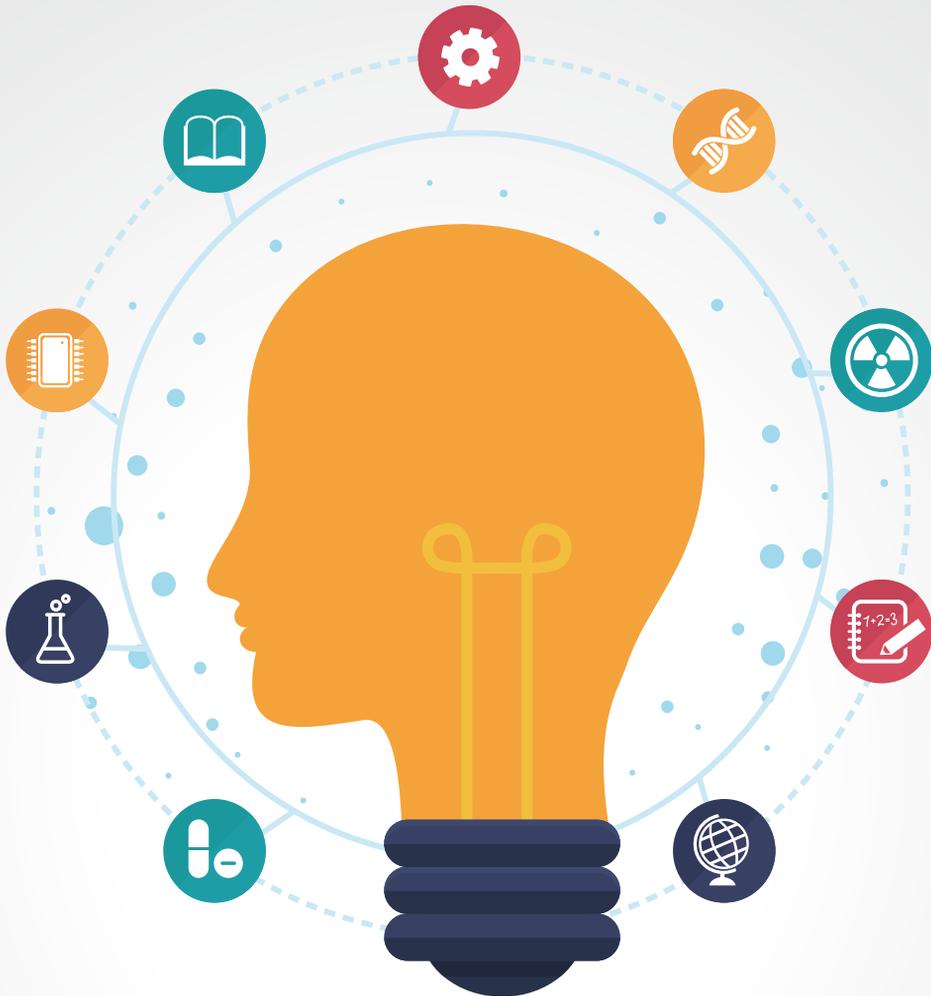


청소년 과학창의연구

JANUARY, 2019 | Vol. 4. No. 1 | THE JOURNAL OF YOUTHS IN SCIENTIFIC RESEARCH



사사 (Acknowledgment)



과학기술정보통신부



한국과학창의재단
Korea Foundation for the Advancement of Science & Creativity

“이 학술지는 2018년도 과학기술진흥기금(과학기술정보통신부) 및 복권기금(기획재정부)의
재원으로 한국과학창의재단의 지원을 받아 수행된 결과물임”

“This work was supported by the Korea Foundation for the Advancement of Science and
Creativity(KOFAC) FY 2018 Grant funded by the Korean Government(MSIT & MOEF)”

11 산 접기와 골짜기 접기에 따른 우표 접기 문제 탐구

Stamp Folding Problem with Mountain-Valley Folding

박지환(Jihwan Park) · 유정훈(Junghun Yoo) · 전윤조(Yoonjo Jeon)
– 인천과학예술영재학교(Incheon Academy of Science and Arts)

지도교사 : 이동화(Donghwa Lee, 인천과학예술영재학교)
지도교수 : 함남우(Nahmwoo Hahm, 인천대학교)

35 $x^2 + axy + by^2 = \pm 1$ 형태의 이차 디오판틴 방정식의 해에 관한 연구

A Study of Solutions of Quadratic Form Diophantine Equation $x^2 + axy + by^2 = \pm 1$

장지환(Jihwan Jang) · 김서용(Seoyoong Kim) · 송유찬(Yuchan Song) · 김승윤(Seungyun Kim) · 김민서(Minseo Kim)
– 전북과학고등학교(Jeonbuk Science High School)

지도교사 : 유익승(Ikseung Lyou, 전북과학고등학교)

47 동서양 악기 울림통 구조 적용을 통한 스마트폰 스피커 음질 최적화 울림통 구조 개발에 관한 연구
Developing Sound Box's Structure of Smartphone's Speaker Optimized to Sound Quality
Through Application of Eastern and Western Instruments' Sound Box's Structure

이해민(Haemin Lee) · 이기욱(Kiwook Rhee) · 송재민(Jaemin Song) · 송준하(Joonha Song) · 김태현(Taehyun Kim)
– 인천진산과학고등학교(Incheon Jinsan Science High School)

지도교사 : 이창재(Changjae Lee, 인천진산과학고등학교)
지도교수 : 박정우(Jeongwoo Park, 서울대학교 물리 교육)

65 휴대용 소수력발전의 효율 증진에 관한 연구

Research on Efficiency Increasing of Portable Minor Hydroelectric Power Generation

장예진(Yejin Jang) · 하승현(Seunghyun Ha) · 정윤찬(Yoonchan Jeong) · 김혜윤(Hyeyun Kim) · 한의석(Euiseok Han)
– 인천진산과학고등학교(Incheon Jinsan Science High School)

지도교사 : 장상경(Sangkyung Chang, 인천진산과학고등학교)

- 87 풀러렌과 닮은 정다면체 및 준정다면체의 분자모델링에 관한 연구**
A Study on the Molecular Modeling of Regular- or Semi-Regular Polyhedron Resembling Fullerene
박세준(Sejun Park) · 강동원(Dongwon Kang) · 김세원(Sewon Kim)
- 창원과학고등학교(Changwon Science High School)
지도교사 : 강인숙(Insook Kang, 창원과학고등학교)
지도교수 : 양기열(Kiyull Yang, 경상대학교 화학교육)
- 107 소수성 작용기 도입을 통한 금속-유기 하이브리드 소재 기반 이산화탄소 저감제의 물 저항성 증진**
Development of Water-Resistant Metal-Organic Framework based Hybrid Material for the Selective Capture of Carbon Dioxide
박성현(Seong-Hyeon Park) · 장현성(Hyunsung Jang) · 강우형(Wooheong Kang)
- KAIST 부설 한국과학영재학교(Korea Science Academy of KAIST)
지도교사 : 최은영(Eun-Young Choi, KAIST 부설 한국과학영재학교)
- 121 미토콘드리아 유전자 서열분석을 통한 넓적사슴벌레(*Dorcus titanus*) 계통 분석**
Phylogenetic Analysis of *Dorcus titanus* using CO I and CO II gene of mtDNA
김예빈(Yebin Kim) · 박효빈(Hyobin Park) · 박세훈(Sehun Park) · 박지상(Jisang Park)
- 부산일과학고등학교(Busan Il Science High School)
지도교사 : 신차정(Chajeong Shin, 부산일과학고등학교)
- 135 중금속 농도에 따른 속성배추 성장차이 연구와 커피부산물 및 해조류를 통한 토양정화 방안 연구**
A Study on the Difference of Rapid cycling *Brassica rapa* Growth by Heavy Metal Concentration and the Study of Soil Remediation through Coffee by-products and Seaweeds
강지희(Jihee Kang) · 송수환(Soohwan Song) · 이가은(Gaeun Lee) · 이영재(Youngjae Yi)
- 인천과학고등학교(Incheon Science High School)
지도교사 : 김재권(Jaekwon Kim, 인천과학고등학교)
지도교수 : 김성하(Sungha Kim, 한국교원대학교 생물교육과)
-

- 159** **투과형 사방댐의 형태에 따른 토석류 유출 저감 효과 분석**
An Analysis on the Debris Flow Reduction Effect of Debris Barrier Type
윤혜림(Hyelim Yoon) · 신동현(Donghyun Shin) · 유찬영(Chanyoung Yoo) · 지서연(Seoyeon Ji) · 김민서(Minseo Kim)
– 인천진산과학고등학교(Incheon Jinsan Science High School)
지도교사 : 신지은(Jieun Shin, 인천진산과학고등학교)
- 173** **큐브위성의 기능시험 모델 제작 및 카메라 짐벌을 활용한 1축 자세제어 시스템 구축**
Functional Test Model Implementation of Cube Satellite and Construction of 1-axis Attitude Control System for Cube Satellite using Camera Gimbal
임정민(Jeongmin Lim) · 조영민(Youngmin Cho) · 이유빈(Yubin Lee)
– KAIST 부설 한국과학영재학교(Korea Science Academy of KAIST)
지도교사 : 박선미(Sun Mie Park, KAIST 부설 한국과학영재학교)
지도교수 : 김용민(Yongmin Kim, KAIST SATREC)
- 187** **저지연 모바일 엣지 컴퓨팅 모델링 연구**
Study on Low-Latency Mobile Edge Computing Modeling
백범한(Beomhan Baek) · 이현준(Hyeonjun Lee) · 홍성우(Seongwoo Hong)
– KAIST 부설 한국과학영재학교(Korea Science Academy of KAIST)
지도교수 : 이주형(Juhyeong Lee, 가천대학교 소프트웨어학과)
지도교 : 박상돈(Sangdon Park, KAIST 전기 및 전자공학부)
- 215** **폴리페놀 추출물의 나노코팅을 이용한 석조문화재 보존 연구**
Preservation of Stone Cultural Properties by Nano-Coating of Polyphenol Extract
유영주(Youngju Yoo) · 박은서(Eunseo Park) · 서준배(Junbae Seo) · 오선무(Seonmu Oh)
– 대전동신과학고등학교(Daejeon Dongshin Science High School)
지도교사 : 전철홍(Cheolhong Jeon, 대전동신과학고등학교)
자문교수 : 이태종(Taejong Lee, 국립문화재연구소)
-

231 음향파를 이용한 세포 분리법 개발

Cell Separation using Acoustics in Combination with a Microchannel

김지원(Jiwon Kim) · 노승준(Seungjoon Rho) · 서성재(Seongjae Seo) · 이재원(Jaewon Lee)

- 세종과학고등학교(Sejong Science High School)

지도교사 : 김태은(Taeun Kim, 세종과학고등학교)

지도교수 : 이형석(Hyungsuk Lee, 연세대학교)

지도조교 : 류찬열(Chanryeol Rhyou, 연세대학교)

강병준(Byungjun Kang, 연세대학교)

243 자이로스코프의 원리를 이용한 내진설계 연구

A Study of Seismic Design Using the Principle of Gyroscope

신정욱(Jungwook Shin) · 김미정(Mijung Kim) · 정현수(Hyeonsoo Jeong)

- 대전동신과학고등학교(Daejeon Dongshin Science High School)

지도교사 : 고관홍 (Kwanhong Ko, 대전동신과학고등학교)

261 부록

「청소년 과학창의연구」 학술지 투고 규정

「청소년 과학창의연구」 특별호 ~ 3권 표지 및 논문 목차

산 접기와 골짜기 접기에 따른 우표 접기 문제 탐구

박지환 · 유정훈 · 전윤조 - 인천과학예술영재학교

Stamp Folding Problem with Mountain-Valley Folding

Jihwan Park · Junghun Yoo · Yoonjo Jeon - Incheon Academy of Science and Arts

국문초록

우표 접기 문제는 n 개 우표의 열이 있을 때, 이를 접는 경우의 수에 대한 문제이다. 우표 접기의 경우의 수와 관련해 기존 연구는 순열의 성질을 이용하거나 프로그래밍을 통해 전체 경우의 수를 구하는 방법을 모색 했지만 우리는 이와 다른 관점인 산 접기와 골짜기 접기라는 관점에서 탐구했다. 우리는 수학적 탐구를 통해 임의의 산-골짜기 수열에 의해 우표 접기가 이루어질 때 생기는 기본적인 성질과 특수한 형태의 산-골짜기 수열에 대해 가능한 우표 접기의 경우의 수를 증명하였다. 또한 프로그래밍을 통한 탐구를 통해 임의의 산-골짜기 접기에 대한 우표 접기의 경우의 수를 계산하는 프로그램을 제작하였고 이 프로그램을 활용해 우표 접기 문제의 통계적인 성질을 탐구했다.

중심어 : 우표 접기 문제, 산-골짜기 접기, 산-골짜기 수열, 접힌 상태 수열

ABSTRACT

A Stamp folding problem is determining how many ways a strip of n stamps, separated by creases, can be folded along those crease so that stamps are piled one on the top of the other. Previous researches used permutation and found number of different ways to fold a strip of n stamps by programming. But our research used Mountain-Valley folding. We mathematically examined the basic properties shown if a strip of n stamps is folded by Mountain-Valley sequence and proved the number of cases to fold a strip of n stamps possible with a given Mountain-Valley sequence. We made a program which calculates these numbers and researched statistical properties of stamp folding problem using this program.

Key words: Stamp folding problem, Mountain-Valley folding, Mountain-Valley sequence, Folded state sequence

I. 서론

1. 연구 동기

종이 접기는 단순 취미부터 최첨단 우주 연구까지 다양한 곳에서 활용된다. 실제 나사(NASA)에서는 종이접기 전문가인 로버트 랭 박사의 도움을 받아 거대 우주 망원경 제작을 연구 중이고 MIT에서는 오리가미 로봇(origami robot) 연구가 한창이다[1]. 이런 종이접기에 대한 연구는 여전히 많은 학자들에 의해 이루어지는 분야이다. 종이접기를 연구하는 학자들은 과학과 수학, 교육의 종이접기에 관한 국제회의(OSME)를 통해 주기적인 모임을 갖고 서로의 연구를 교류하며 연구 결과를 책으로 출판한다[2]. 300명 이상의 연구진이 참여하는 이 회의는 2018년 8월에도 영국 옥스포드에서 열렸다. 우표 접기 문제는 아직까지 해결되지 않은 대표적인 종이접기와 관련된 미해결 문제이다. 아직까지 해결되지 않은 것이 의아할 정도로 이 문제는 단순한 경우의 수 문제로 보인다. 그렇기에 우리는 이 문제에 많은 흥미를 느꼈고 기존의 연구와는 약간 다른 방향에서 접근해 보기로 하였다. 산 접기와 골짜기 접기가 바로 그것이다. 기존의 연구는 주로 순열을 통한 우표 접기의 전체 경우의 수에 대해 탐구해 보거나 프로그래밍을 활용하여 우표 접기의 전체 경우의 수를 구해보려는 연구를 진행했었다. 종이 접기의 가장 기본적인 형태가 산 접기와 골짜기 접기라는 점을 생각하면 이진 의미의 접기이다. 우표 접기 문제와 산-골짜기 접기와의 관계를 탐구하는 논문이 없지는 않지만 그 논문의 핵심 주제는 경우의 수를 구하는 것이 아니다. 우리가 진행하려는 연구인 산 접기와 골짜기 접기를 통한 우표 접기의 경우의 수에 대한 탐구는 그 결과가 아주 미비한 편이다. 그런 점에서 우리의 연구는 새로운 접근법으로 문제를 탐구한다는 의미가 있다. 우리의 이런 연구가 종이 접기 이론에 기여하

기를 기대한다. 그리고 이런 탐구 결과가 나중에 다양한 분야에서도 응용되기를 바란다.

2. 연구 목표

우리의 연구 목표는 다음과 같다.

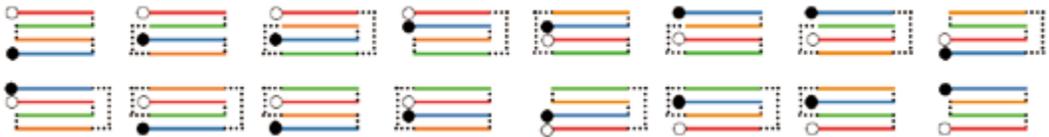
- 1) 산-골짜기 수열에 대응하는 우표 접기의 경우의 수는 어떻게 되고 어떤 수학적 성질을 갖는가?
- 2) 임의의 산-골짜기 수열에 대응하는 우표 접기의 경우의 수를 구하는 알고리즘은 어떻게 되는가?
- 3) 산-골짜기 수열과 이에 대응하는 우표 접기의 경우의 수는 어떤 통계적인 성질을 갖는가?

II. 이론적 배경 및 연구 방법

1. 우표 접기 문제 소개 및 선행 연구 결과

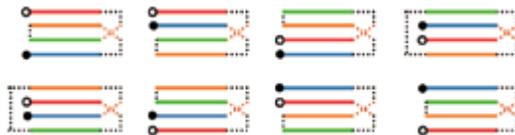
가. 우표 접기 문제 소개

우표 접기 문제는 우표를 접는 경우에 수에 대한 문제로 1891년 Lucas의 정수론 책에서 처음으로 소개되었다[3]. 같은 크기의 서로 다른 n 개의 우표가 일렬로 붙어 있고 우표의 사이의 주름(crease)만 접어 우표들이 순서대로 쌓이게 할 때, 가능한 경우의 수를 구하는 문제로 물리적으로 가능하지 여부는 고려하지 않는다. 쉽게 우표가 2개 일 때는 그 경우의 수가 $2! = 2$ 가지이고 우표가 3개일 때는 그 경우의 수가 $3! = 6$ 가지임을 알 수 있다.



[Fig.1] 16 ways to fold a strip of four different stamps

하지만 우표가 4개가 되면 그 경우의 수가 $4!$ 이 아니다. 그 이유는 우표의 연결부분끼리 겹쳐 현실적으로 불가능한 경우가 존재하기 때문이다.

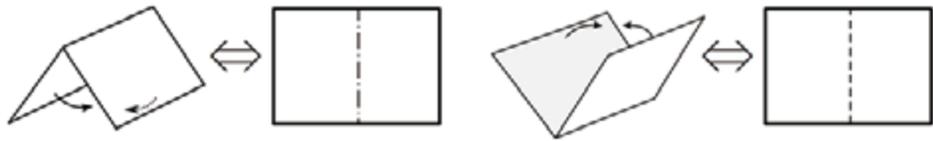


[Fig.2] Impossible way to fold a strip of four different stamps

이런 우표 접기 문제는 지도 접기 문제(Map folding problem)의 특수한 경우다. 지도 접기 문제는 가로, 세로 방향으로 된 주름에 의해 $n \times m$ 개의 사각형으로 나뉜 지도가 있을 때, 종이의 주름만 접어서 접을 수 있는 경우의 수를 구하는 문제이다. 이 문제 역시 미해결 문제로 $n \times n$ 인 지도에 대해서 $n = 6$ 인 경우까지만 그 경우의 수가 알려져 있다. 그 경우의 수는 29950723279272이다[4].

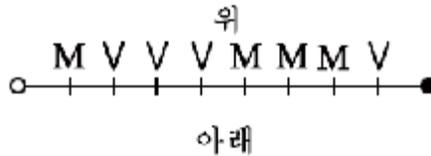
나. 용어의 정의

종이 접기에는 기본적으로 산 접기와 골짜기 접기가 있다. 산 접기는 종이의 오른쪽 부분을 아래로 가게 접는 방법으로 보통 M 으로 표현하고 골짜기 접기는 종이의 오른쪽 부분을 위로 가게 접는 방법이 보통 V 로 표현한다.



[Fig.3] Mountain folding(left) and Valley folding(right)

$n + 1$ 개의 서로 다른 우표의 열이 있고 우표 사이만의 주름만 접어 우표들이 위에서부터 아래까지 하나씩 쌓여 있도록 접는다고 하자. 이때 우표에 순서대로 0부터 n 까지 번호를 붙이자. 그러면 그 사이에 n 개의 주름이 있고 각 주름에는 산 접기 또는 골짜기 접기가 시행된다. 예를 들어 우표가 9개라면 8개의 주름이 있고 각 주름에 산 접기 또는 골짜기 접기가 시행되므로 총 2^8 가지의 접기 방법이 있다.



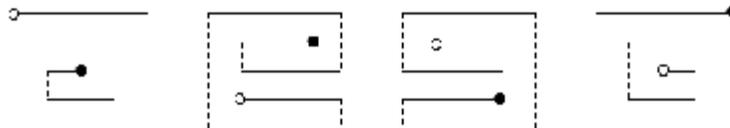
[Fig.4] For strips of 9 stamps, MV sequence $MVVVMMM V$

앞의 그림처럼 산 접기와 골짜기 접기를 시행한다고 할 때, 이는 수열로 나타낼 수 있고 이 수열은 $MVVVMMM V$ 이다. 이를 산-골짜기 수열(mountain-valley sequence or MV sequence)이라 하고 일반적으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

정의1. 길이 $n + 1$ 인 우표 열이 있을 때, 산-골짜기 수열 s 는 다음과 같다.

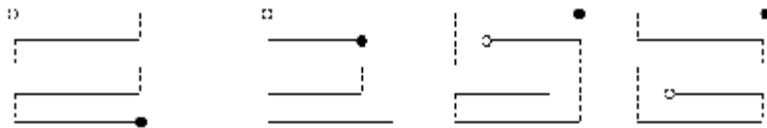
$$s = X_1 X_2 \cdots X_n (X_i \in \{M, V\}, 1 \leq i \leq n)$$

산-골짜기 수열에 대하여 가능한 우표 접기의 경우는 여러 가지가 존재한다. 예를 들어 산-골짜기 수열 $MMMM$ 에 대하여 이에 대응되는 우표 접기의 경우는 모두 4가지이다.



[Fig.5] Stamp folding corresponding to a mountain-valley sequence $MMMM$

만약 산-골짜기 수열이 $MVMV$ 이면 1가지가 있고 $MMVM$ 이면 3가지가 있다.



[Fig.6] Stamp folding corresponding to a sequence $MVMV$ (left) and sequence $MMVM$ (right)

우리는 경우의 수를 주로 다루기 때문에 경우의 수와 관련해 다음과 같이 정의할 것이다.

정의2. 임의의 산-골짜기 수열 s 에 대해 이에 대응하는 우표 접기의 경우의 수를 $F(s)$ 라 하고 길이가 n 인 우표열이 주어졌을 때 전체 우표 접기의 경우의 수를 $P(n)$ 이라 한다.

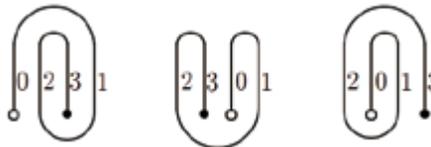
우리는 여기서 한 가지 수열을 더 생각할 수 있다. 접기가 시행되면 우표가 순서대로 나열되므로 이를 수열로 표현할 수

있다. 이 수열을 접힌 상태 수열(*folded state sequence*)이라 하고 다음과 같이 정의한다.

정의3. $n + 1$ 개의 우표를 접을 때, 우표의 배열 순서를 나타내는 수열을 접힌 상태 수열 f 라 하고 이 수열 f 는 0부터 n 까지의 숫자가 재배열된 수열로 다음과 같다.

$$f = [f_0, f_1, \dots, f_n] \quad (f_i \in \{0, 1, 2, \dots, n\}, 0 \leq i \leq n)$$

일반적으로 산-골짜기 수열에 대응되는 접힌 상태 수열은 1가지 이상이다. 예를 들어 산-골짜기 수열 MMM 에 대응하는 접힌 상태 수열은 $[0, 2, 3, 1], [2, 3, 0, 1], [2, 0, 1, 3]$ 이다. 우표를 접은 상태에서 반시계 방향으로 90도 회전한 모양을 떠올리면 이 수열이 쉽게 이해할 수 있다.



[Fig.7] Three folded state sequences corresponding to a mountain-valley sequence MMM

산-골짜기 수열에 대응하는 접힌 상태 수열은 여러 가지이므로 산-골짜기 수열을 통해 접힌 상태 수열을 알기란 쉽지 않다. 하지만 접힌 상태 수열에 대응하는 산-골짜기 수열은 한 가지이므로 이에 대응하는 산-골짜기 수열을 알기는 상대적으로 쉽다. 뒤에서 우리는 이런 성질을 증명할 것이다.

<Table 1> For strips of 4 stamps, MV sequence and stamp folding and $F(s)$

산-골짜기 수열	가능한 우표 접기	$F(s)$
MMM		3
MMV		2
MVM		1
MVV		2
VMM		2
VMV		1
VVM		2
VVV		3

다. 선행 연구 결과

우표 접기 문제와 지도 접기 문제는 많은 학자들에 의해서 연구가 진행되었고 최근에도 그 연구는 계속되고 있다. 1968년 Koehler는 순열을 이용한 수학적 탐구를 통해 16개까지 우표의 열에서 접는 경우의 수를 계산하였다[5]. 그에 따르면 16개의 우표를 접는 경우의 수는 16861984이다. 1968년 Lunnon은 컴퓨터 프로그래밍을 통해 24개까지 우표의 열에서 접는 경우의 수까지 계산하였다[6]. 유명한 퍼즐리스트인 Martin Gardner는 이 우표 접기 문제를 소재로 퍼즐을 만들었고 많은 사람들이 이 문제에 대해 알게 되는 계기가 되었다[7]. 2000년이 넘어서며 우표 접기 문제(또는 지도 접기 문제)는 그

복잡성으로 인해 컴퓨터를 활용한 연구가 주를 이뤘다. Iwan은 우표 접기 문제의 경우의 수를 계산하는 프로그램을 제작하였고 이 프로그램은 지수시간의 복잡도를 갖는다[8]. 산-골짜기 접기와 관련하여 우표 접기 문제를 처음 탐구한 사람은 Demaine이다. Demaine은 임의의 지도에서 접기패턴(우표에서는 산-골짜기 수열)이 주어졌을 때, 평면 접기 가능성에 대해 알아보는 지수시간 복잡도를 갖는 프로그램을 제작하였다[9]. 또한 그는 임의의 산-골짜기 수열에 대해 우표 접기가 가능한 경우의 수는 1가지 이상이라는 것을 증명했다. Ryuhei는 임의의 산-골짜기 수열이 주어졌을 때, 효율적인 접기가 무엇인지 정의하고 가장 효율적인 우표 접기 문제에 대해 탐구하였다[10, 11]. 가장 효율적인 우표 접기란 우표들이 이루는 층 사이에 존재하는 우표의 개수를 최소화 하는 접기를 의미한다. 그는 특정 형태의 산-골짜기 수열에 대한 경우의 수 구하는 것과 관련해 약간의 결과를 내놓았는데 이는 우리의 연구 주제이기도 하다. 그가 이와 관련하여 증명하거나 추측한 사실은 2가지로 다음과 같다.

정리4[10]. 임의의 산-골짜기 수열에 대하여 평면 접기가 유일하게 가능하기 위한 필요충분조건은 산-골짜기 수열이 $s = MVVMV\dots$ 인 경우이다.

그는 이 수열을 특별히 pleats라고 명명하였다. 이 수열은 산 접기와 골짜기 접기가 교대로 나타나는 수열이다. 따라서 $VMVM\dots$ 도 이 수열에 해당하고 이 역시 평면 접기가 가능한 경우가 유일하다. 다시 말하면 우표 접기가 가능한 경우가 1가지이다.

추측5[11]. 산-골짜기 수열 M^n 에 대하여 이에 대응하는 우표 접기의 경우의 수는 n 가지이다.

그는 특별한 증명 없이 관찰의 결과로 이를 제시하였다. 우리는 이를 수학적으로 증명할 것이다.

2. 연구 방법

연구 방법은 수학적 증명을 통한 탐구와 컴퓨터 프로그래밍을 활용한 탐구로 이루어 졌다. 수학적 탐구는 귀납적 관찰과 연역적 추론에 의해 진행되었고 필요에 따라 우리가 제작한 계산 프로그램을 활용하여 증명의 오류 여부를 검증하였다. 프로그래밍을 통한 탐구에 이용한 도구는 C/C++과 파이썬이다. C/C++을 이용하여 임의의 산-골짜기 수열이 주어졌을 때, 이에 대응하는 우표 접기의 경우의 수를 계산하는 프로그램을 제작하였다. 이후 이 프로그램을 활용하여 우표가 2개인 경우부터 우표가 18개인 경우까지 모든 산-골짜기 수열과 이에 대응하는 우표 접기의 경우의 수 데이터 파일을 제작하였다. 파이썬을 활용해 이 데이터 파일을 분석하였고 산-골짜기 수열과 이에 대응하는 우표 접기의 경우의 수의 통계적 성질에 대해 탐구하였다.

III. 연구 결과

1. 수학적 탐구 결과

수학적 탐구 결과는 산-골짜기 수열의 기본 성질과 특정 형태의 산-골짜기 수열의 가능한 우표접기의 경우의 수를 알아 보는 방향으로 진행되었다. 우표가 0번째부터 시작함을 주의하자.

가. 산-골짜기 수열의 기본성질

산-골짜기 수열 s 의 항의 개수를 $|s|$, 산 접기 개수를 $|s|_M$, 골짜기 접기의 개수를 $|s|_V$ 라 하자. 이 때 다음 정리가 정립함은 자명하다.

정리6. 산-골짜기 수열 s 에 대해 다음이 성립한다.

$$1) |s| = |s|_M + |s|_V \qquad 2) P(n+1) = \sum_{|s|=n} F(s)$$

다음 정리는 산 접기와 골짜기 접기의 본질적인 특징으로 인해 생기는 성질이다. 산-골짜기 수열과 접힌 상태 수열의 관계를 알 수 있는 정리로 기본성질 중 가장 중요하다고 판단되는 성질이다.

정리7. 접힌 상태 수열 $f = [f_0, f_1, \dots, f_n]$ 에 대해 $s = X_1 X_2 \dots X_n$ 가 f 에 대응하는 산-골짜기 수열이라 하자. (단, i 는 $0 \leq i \leq n-1$ 인 정수)

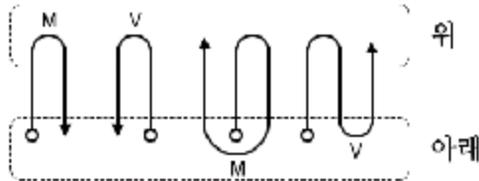
1) i 가 짝수일 때, $f_m = i, f_l = i+1$ 이라 하자.

$$X_{i+1} = \begin{cases} M, & (l > m) \\ V, & (l < m) \end{cases}$$

2) i 가 홀수일 때, $f_m = i, f_l = i+1$ 이라 하자.

$$X_{i+1} = \begin{cases} V, & (l > m) \\ M, & (l < m) \end{cases}$$

증명)



[Fig. 8] The relationship between folding order of stamps and MV sequence

시작점에서 어떤 접기를 시행하면, $f_k = 0, f_h = 1$ 인 k, h 이 존재한다. 이때 접힌 상태 수열은 우표를 접은 후 반시계로 90도 회전시켰을 때 왼쪽부터의 순서이므로 회전된 상태에서 보면 우표열의 위와 아래에서 접히는 것으로 생각할 수 있다. 이 때, 임의의 $f_i (0 \leq i \leq n-1)$ 에 대해 다음이 성립한다.

① f_i 가 짝수이면, f_i 를 시작점으로 하는 접기는 위에서 접힌다.

② f_i 가 홀수라면, f_i 를 시작점으로 하는 접기는 아래로 접힌다.

그리고 다음이 성립한다.

③ 위에서 접힐 때, 우표가 오른쪽으로 접힌다면 M접기이고, 왼쪽으로 접힌다면 V접기이다.

④ 아래로 접힐 때, 우표가 오른쪽으로 접힌다면 V접기이고, 왼쪽으로 접힌다면 M접기이다.

따라서 짝수인 i 에 대해 $f_m = i, f_l = i+1$ 이고 $l > m$ 이라면 ①과 ③에 의해 $X_{i+1} = M$ 이다. 마찬가지로 $l < m$ 이라면 ①과 ③에 의해 $X_{i+1} = V$ 이다. 홀수인 i 에 대해 $f_m = i, f_l = i+1$ 이고 $l > m$ 이라면 ②와 ④에 의해 $X_{i+1} = V$ 이고 $l < m$ 이면 ②와 ④에 의해 $X_{i+1} = M$ 이다. 그러므로 위 명제가 성립한다. ■

$s = X_1 \dots X_n$ 에 대해 $\bar{M} = V, \bar{V} = M, \bar{s} = \bar{X}_1 \dots \bar{X}_n$ 라 하고 $R(s) = X_n X_{n-1} \dots X_1$ 이라 하면 다음이 성립한다. 이 정리는 산-골짜기 수열과 그에 대응하는 우표 접기의 경우의 수의 대칭성을 잘 보여준다.

정리8. 산-골짜기 수열 s 에 대해 다음이 성립한다.

$$F(s) = F(\bar{s}) = F(R(s)) = F(R(\bar{s}))$$

증명)

i) 먼저 $F(s) = F(\bar{s})$ 임을 증명하자.

$s = X_1 \dots X_n$ 에 대응되는 임의의 접힌 상태 수열 $f = [f_0, f_1, \dots, f_n]$ 에 대해 $f' = [f_n, f_{n-1}, \dots, f_0]$ 이 존재해

$\bar{s} = \bar{X}_1 \cdots \bar{X}_n$ 에 대응되는 접힌 상태 수열임을 보이자. 임의의 $i \in \{0, 1, \dots, n-1\}$ 에 대하여 $f_m = i, f_l = i+1$ 이면, $f' = [f_x, f_{n-1}, \dots, f_0]$ 에서는 $n-m$ 번째 항이 $i, n-l$ 번째 항이 $i+1$ 이다. 따라서 f' 에 대응되는 접힌 상태 수열을 $s' = X'_1 \cdots X'_n$ 이라 한다면 $m > l$ 일 때 $n-m < n-l$ 이고 $m < l$ 일 때, $n-m > n-l$ 이므로 정리7에 의하여 $X'_{i+1} = \bar{X}_{i+1}$ 이다. 즉, $s' = \bar{s}$ 이다. 이 역도 성립하므로 s 의 접힌 상태 수열의 집합과 \bar{s} 의 접힌 상태 수열의 집합은 일대일대응이고 $F(s) = F(\bar{s})$ 임을 알 수 있다.

ii) 다음으로 $F(\bar{s}) = F(R(s))$ 또는 $F(\bar{s}) = F(R(\bar{s}))$ 임을 보이자.

$s = X_1 \cdots X_n$ 의 접힌 상태 수열 $f = [f_0, f_1, \dots, f_n]$ 에 일대일 대응되는 $\bar{s} = \bar{X}_1 \cdots \bar{X}_n$ 의 접힌 상태 수열 $f' = [f_x, f_{n-1}, \dots, f_0]$ 를 생각하자. 이제 접힌 상태 수열 $f'' = [n-f_n, n-f_{n-1}, \dots, n-f_0]$ 이 존재해 $R(s)$ 또는 $R(\bar{s})$ 의 접힌 상태 수열임을 보이자. 임의의 $i \in \{0, 1, \dots, n-1\}$ 에 대하여 $f_m = i, f_l = i+1$ 이면, $f'' = [n-f_n, n-f_{n-1}, \dots, n-f_0]$ 에서는 $n-m$ 번째 항이 $n-i, n-l$ 번째 항이 $n-(i+1)$ 이다. 이때 n 의 기우성에 따라 f'' 에 대응되는 접기의 형태는 달라진다.

① $n = 2k-1 (k \in \mathbb{N})$ 일 때, f'' 에 대응되는 접힌 상태 수열을 $s'' = X_1'' X_2'' \cdots X_n''$ 이라 한다면 $m > l$ 일 때 $n-m < n-l$ 이고 $m < l$ 일 때, $n-m > n-l$ 이므로 정리7에 의하여 $X_{i+1}'' = X_{n-i}$ 임을 알 수 있다.

② $n = 2k (k \in \mathbb{N})$ 일 때, f'' 에 대응되는 접힌 상태 수열을 $s'' = X_1'' X_2'' \cdots X_n''$ 이라 한다면 $m > l$ 일 때 $n-m < n-l$ 이고 $m < l$ 일 때, $n-m > n-l$ 이므로 정리7에 의하여 $X_{i+1}'' = \bar{X}_{n-i}$ 임을 알 수 있다.

즉, n 이 짝수라면 $s'' = R(\bar{s})$ 이고, n 이 홀수라면 $s'' = R(s)$ 이다. 이 역도 성립하므로 \bar{s} 의 접힌 상태 수열의 집합과 $R(s)$ 또는 $R(\bar{s})$ 의 접힌 상태 수열의 집합은 일대일대응이고 따라서 $F(\bar{s}) = F(R(s))$ 또는 $F(\bar{s}) = F(R(\bar{s}))$ 임을 알 수 있다.

그러므로 i), ii)에 의하여 주어진 식이 성립한다. ■

예시9. $s = MMVVMVV$ 이라 하면 $R(s) = VVMVVM, \bar{s} = VVMMVMM, R(\bar{s}) = MMVVMVV$ 이다. 이때 $F(s) = F(\bar{s}) = F(R(s)) = F(R(\bar{s})) = 16$ 이다.

정리10. 산-골짜기 수열 s 에 대해 다음이 성립한다.

$$1) |s| = n \text{ 일 때, } P(n+1) = \sum_{i=0}^n \left(\sum_{|s_M|=i} F(s) \right) = \sum_{i=0}^n \left(\sum_{|s_V|=i} F(s) \right)$$

$$2) |s| = n \text{ 일 때, } \sum_{|s_M|=i} F(s) = \sum_{|s_V|=n-i} F(s)$$

$$3) \sum_{|s_M|=i} F(s) = \sum_{|s_V|=i} F(s) \quad (0 \leq i \leq n)$$

증명)

$$1) P(n+1) = \sum_{i=0}^n \left(\sum_{|s_M|=i} F(s) \right) \text{ 이고 } P(n+1) = \sum_{i=0}^n \left(\sum_{|s_V|=i} F(s) \right) \text{ 이므로 준식이 성립한다.}$$

2) 정리6의 1)에 의해 $|s| = |s_M| + |s_V|$ 이다. 따라서 $|s_M| = i$ 이면 $|s_V| = n - i$ 이다. 따라서 준식이 성립한다.

$$3) \text{ 정리8에 의해 } F(s) = F(\bar{s}) \text{ 이므로 } \sum_{|s_M|=i} F(s) = \sum_{|s_V|=n-i} F(s) = \sum_{|s_V|=n-i} F(\bar{s}) = \sum_{|s_V|=i} F(\bar{s}) = \sum_{|s_V|=i} F(s) \text{ 이다. } \blacksquare$$

나. 특정 형태의 산-골짜기 수열 s 에 대한 $F(s)$ 공식

산-골짜기 수열의 가장 기본적인 형태 중 하나는 산 접기와 골짜기 접기가 반복적으로 나타나는 $(MV)^n$, $(VM)^n$ 이다. 이 형태는 직관적으로도 쉽게 파악이 된다. Ryuhei는 특별히 이러한 형태를 pleats라 하였고 $F((MV)^n) = F((VM)^n) = 1$ 임을 증명하였다. 또 다른 형태는 산 접기가 반복되거나 골짜기 접기만 반복되는 M^n, V^n 이다. Ryuhei는 $F(M^n) = F(V^n) = n$ 임을 관찰하였지만 증명하지는 않았다. 우리는 첫 번째로 이러한 형태에 대해 증명하고자 한다. 이를 위한 필요한 정리가 있는데 바로 Koehler의 논문에서 증명된 정리로 우표 접기의 가능성과 관련된 중요한 정리이다[5]. 그 정리를 우리가 정한 기호에 맞게 표현하면 다음과 같다.

정리11[5]. 접힌 상태 수열 $f = [f_0, f_1, \dots, f_n]$ 에 대하여 $f_i = a, f_j = a+1, f_k = b, f_l = b+1$ 이고 $a \equiv b \pmod{2}$ 라 하자. 이 때, i 와 j 사이에 k 와 l 중 한 값만 올 수 없다. 다시 말하면 k 와 l 은 둘 다 i, j 사이에 있거나 둘 다 i, j 사이에 있지 않다.

위의 정리를 만족하지 않으면 우표들의 서로 다른 주름들이 만나 접을 수 없는 상태가 된다. 역으로 접힌 상태 수열이 위의 조건을 만족한다는 것은 그에 대응하는 우표 접기가 존재함을 뜻한다. 따라서 위 정리는 접힌 상태 수열이 만족해야 하는 필요충분조건이다.

보조정리12. 산-골짜기 수열 M^n 에 대해 다음이 성립한다.

- 1) n 이 홀수일 때, M^n 에 대응하는 임의의 접힌 상태 수열 $f = [f_0, f_1, \dots, f_n]$ 중 $f_n = n$ 을 만족한 수열은 유일하다.
- 2) n 이 짝수일 때, M^n 에 대응하는 임의의 접힌 상태 수열 $f = [f_0, f_1, \dots, f_n]$ 중 $f_0 = n$ 을 만족한 수열은 유일하다.

증명)

1) $f_i = n-1$ 이라 하자. $0 < i$ 이면 $f_j = n-2$ 이고 $f_k = n-3$ 라 할 때, j, k 는 정리11에 의해 i 와 n 사이에 있어야 한다. 그리고 이 과정을 반복하면 f_j 에 대응하는 우표가 존재하지 않는다. 이는 모순이다. 따라서 $f_0 = n-1$ 이다. 비슷한 과정으로 $f_m = n-2$ 이고 $m < n-1$ 이면 f_{n-1} 에 대응하는 우표가 존재하지 않는다. 따라서 $f_{n-1} = n-2$ 이다. 이를 반복하면 $f = [n-1, n-3, n-5, \dots, n-4, n-2, n]$ 이다. 이 접힌 상태 수열이 M^n 에 대응하는 $f_n = n$ 을 만족하는 유일한 수열이다.

2) 1)과 비슷한 방법으로 증명가능하다. ■

이제 보조정리12을 이용하여 정리13을 증명하자.

정리13. 산-골짜기 수열 M^n 과 V^n 에 대하여 $F(M^n) = F(V^n) = n$ 이 성립한다.

증명)

수학적 귀납법으로 증명하자.

i) $n = 1$ 일 때, $f = [0, 1]$ 로 1가지가 존재한다.

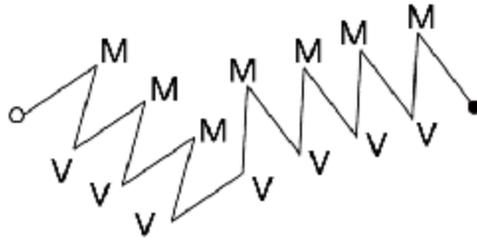
ii) $n = k$ 일 때, $F(M^k) = k$ 라고 가정하자. 이 때, M^{k+1} 접기는 M^k 접기에서 M 접기를 한 번 더 한 것이다.

① k 가 홀수이면 보조정리12에 의하여 M^k 에 대응하는 접힌 상태 수열 $f = [k-1, k-3, \dots, k-2, k]$ 이 존재하고 이 수열은 M^k 에 대응하는 접힌 상태수열 중 k 번째 항이 k 인 유일한 수열이다. 여기에 $k+1$ 을 추가한다고 하면 정리7과 정리11에 의하여 가장 앞에 오거나 $k-2$ 와 k 사이에 올 수 있다. 즉, $k+1$ 을 넣는 방법이 2가지 존재한다. k 번째 항이 k 가 아닌 M^k 의 접힌 상태 수열은 $f_i = k-2, f_j = k-1, f_m = k$ 라 할 때, $j-1=i+1=m$ 이거나 $j+1=i-1=m$ 이다. 따라서 정리7과 정리11에 의하여 $k+1$ 번째 우표는 k 번째 우표와 $k-1$ 번째 우표 사이에 올 수밖에 없다. 즉 $k+1$ 번째 우표를 추가하는 방법은 1가지 밖에 없다. 그러므로 $k+1$ 번째 우표를 추가하는 방법은 $1 \times 2 + 1 \times (k-1) = k+1$ 이다. 따라서 $F(M^{k+1}) = k+1$ 이다.

② k 가 짝수인 경우 ①과 비슷한 방법으로 $F(M^{k+1}) = k+1$ 임을 보일 수 있다.

그러므로 i), ii)에 의해 $F(M^n) = n$ 이고 정리 8에 의하여 $F(V^n) = n$ 이다. ■

산-골짜기 수열에서 우리가 다음으로 생각할 수 있는 형태는 방금 소개한 $(MV)^n, (VM)^n, M^n, V^n$ 이 서로 조합되어 있는 형태이다. 즉 $(MV)^n$ 와 $(VM)^n$ 이 조합되거나 $(MV)^n$ 와 M^n 이 조합되거나 M^n 와 V^n 이 조합되어 있는 형태가 바로 그것이다. 이에 대해 알아보도록 하자. 먼저 $(MV)^m$ 와 $(VM)^n$ 의 조합으로 생기는 $(MV)^m(VM)^n$ 이다.



[Fig. 9] Stamp folding corresponding to a sequence $(MV)^2(VM)^1$

정리14. 산-골짜기 수열 $(MV)^m(VM)^n$ 에 대하여 $F((MV)^m(VM)^n) = \frac{(m+n)!}{m!n!}$ 이 성립한다.

증명) $(MV)^m$ 접기로 만들어 지는 부분은 우표를 계속 오른쪽으로 접는 것만 반복하여 생긴 1가지 형태만 존재한다. 이와 마찬가지로 $(VM)^n$ 접기로 만들어 지는 부분도 우표를 계속 왼쪽으로 접는 것을 반복하여 생긴 1가지 경우만 존재한다. $(MV)^m$ 접기로 인해 생긴 부분과 $(VM)^n$ 접기로 생긴 부분을 합칠 때, 접기로 생긴 부분의 위쪽 공간에 $(VM)^n$ 접기로 생긴 부분이 존재하기 때문에 $(MV)^m$ 접기로 생긴 m 개의 홈과 맨 왼쪽 공간으로 $(VM)^n$ 접기로 생긴 부분이 들어갈 수 있다. $(VM)^n$ 접기로 생긴 부분 중 $(MV)^m$ 접기로 생긴 부분의 방향으로 튀어나온 n 개의 부분이 $(m+1)$ 개의 홈으로 나누어 들어가야 되기 때문에 전체 경우의 수는 $\frac{(m+n)!}{m!n!}$ 가지이다. ■

다음으로 $(MV)^m$ 과 M^n 또는 $(VM)^n$ 와 조합된 형태에 대해 알아보자.

정리15. 산-골짜기 수열에 대해 다음이 성립한다.

$$1) F((MV)^m M^n) = \begin{cases} 1 & (n=1) \\ m+2 & (n=2) \\ 2m+n & (n \geq 3) \end{cases} \quad 2) F((MV)^m V^n) = \begin{cases} m+1 & (n=1) \\ 2m+n & (n \geq 2) \end{cases}$$

증명)

1) 세 가지 경우로 나눠 생각하자.

i) $n=1$ 일 때, $MVMV \dots MVM$ 의 형태는로 1가지

ii) $n=2$ 일 때, $(MV)^m M$ 으로 1가지가 만들어지며 이 때, 접힌 상태 수열은 $f = [0, 1, 2, \dots, 2m, 2m+1]$ 이다. 여기서 M 접기가 추가되면 $2m+2$ 번째 우표가 정리7과 정리11에 의하여 $2m+1$ 번째 우표 앞, $2m-1$ 번째 우표 앞, ..., 1번째 우표 앞에 오는 경우가 있고 0번째 앞에 올 수도 있다. 즉, 총 $m+2$ 가지이다.

iii) $n \geq 3$ 일 때, 세 가지의 경우로 나누어서 생각해보자.

① $(MV)^m MM$ 접기에서의 $2m+2$ 번째 우표가 $2m+1$ 번째 우표 앞, $2m-1$ 번째 우표 앞, ..., 1번째 우표 앞에 오는 경우 이후 M 접기를 추가 시행해도 정리7과 정리11에 의해 우표들이 추가되는 경우는 유일하다. 따라서 우표 접기의 경우는 $m+1$ 가지가 있다.

② $(MV)^m MM$ 접기에서의 마지막 우표가 0번째로 오고 여기에 M 접기가 추가된다고 하자. 정리7과 정리11에 의하여 $2m+3$ 번째 우표가 추가될 수 있는 위치는 정리7과 정리11에 의하여 0번째 앞, 2번째 앞, ..., $2m+2$ 번째 앞이다. 이 중 0번째 앞부터 $2m$ 번째 앞까지 오는 경우엔 정리7과 정리11에 의하여 이후 M 접기를 추가 시행해도 우표들이 추가되는 경우는 유일하다. 따라서 우표 접기의 경우는 $m+1$ 가지가 있다.

③ ②에서 $2m+3$ 번째 우표가 $2m+2$ 번째 앞에 오는 경우를 생각하자. 여기서 다시 한 번 M 접기를 추가 시행할 때 마다 정리7과 정리11에 의해 경우의 수는 1가지씩 늘어난다. 따라서 M^{n-2} 를 추가 시행한다고 하면 $(MV)^m M^n$ 까지 진행 된 것이고 경우의 수는 $n-2$ 가지이다.

①, ②, ③에 의하여 총 경우의 수는 $2(m+1)+n-2=2m+n$ 가지이다.

2) 두 가지로 나눠 생각하자.

i) $n = 1$ 일 때, $(MV)^m$ 접기로 인하여 1가지의 형태가 생기며 이 때 접힌 상태 수열 $f = [0, 1, 2, \dots, 2m]$ 이다. V 접기를 시행하면 정리7과 정리11에 의하여 $2m+1$ 번째 우표가 올 수 있는 위치는 $2m$ 번째 우표 앞, $2m-2$ 번째 우표 앞, ..., 0 번째 우표 앞이다. 따라서 총 $m+1$ 가지가 있다.

ii) $n \geq 2$ 일 때, 세 가지의 경우로 나누어서 생각해보자.

① $(MV)^m V$ 접기에서 $2m+1$ 번째 우표가 $2m$ 번째 우표 앞, $2m-2$ 번째 우표 앞, ..., 2 번째 우표 앞에 오는 경우 이후 V 접기를 추가 시행해도 정리7과 정리11에 의해 우표들이 추가되는 경우는 유일하다. 따라서 우표 접기의 경우는 m 가지가 있다.

② $(MV)^m V$ 접기에서 $2m+1$ 번째 우표가 0 번째로 오고 여기에 V 접기가 추가된다고 하자. $2m+2$ 번째 우표가 추가될 수 있는 위치는 정리7과 정리11에 의하여 0 번째 앞이 있고 그 후 규칙적으로 1 번째 앞, 3 번째 앞, ..., $2m+1$ 번째 앞이 있다. 이 중 0 번째 앞, 1 번째 앞, 3 번째 앞, ..., $2m-1$ 번째 앞에 오는 경우엔 정리7과 정리11에 의하여 이후 V 접기를 추가 시행해도 우표들이 추가되는 경우는 유일하다. 따라서 우표 접기의 경우는 $m+1$ 가지가 있다.

③ ②에서 $2m+2$ 번째 우표가 $2m+1$ 번째 앞에 오는 경우를 생각하자. 여기서 다시 한 번 V 접기를 추가 시행할 때 마다 정리7과 정리11에 의해 경우의 수는 1가지씩 늘어난다. 따라서 V^{n-1} 을 추가 시행한다고 하면 $(MV)^m V^n$ 까지 진행된 것이고 경우의 수는 $n-1$ 가지이다.

①, ②, ③에 의하여 총 경우의 수는 $m+(m+1)+n-1=2m+n$ 가지이다. ■

마지막 결합 형태인 M^m 와 V^n 이 결합된 형태에 대해 알아보자. 이 경우는 위에서 소개할 프로그램을 사용하여 공식을 귀납적으로 관찰하였다. 다음 표는 프로그램을 이용하여 $F(M^m V^n)$ 를 m 과 n 의 값에 따라서 정리해놓은 표이다. 지금 부터는 이 표에서 찾은 규칙성을 기반으로 $F(M^m V^n)$ 의 값에 대한 추론을 하고자 한다.

<Table 2> Table of $F(M^m V^n)$

	V	V^2	V^3	V^4	V^5	V^6	V^7	V^8	V^9	V^{10}	V^{11}	V^{12}	V^{13}	V^{14}
M	1	2	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
M^2	2	4	7	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29	31
M^3	4	7	11	16	22	25	28	31	34	37	40	43	46	49
M^4	5	11	16	22	29	37	41	45	49	53	57	61	65	69
M^5	6	13	22	29	37	46	56	61	66	71	76	81	86	91
M^6	7	15	25	37	46	56	67	79	85	91	97	103	109	115
M^7	8	17	28	41	56	67	79	92	106	113	120	127	134	141
M^8	9	19	31	45	61	79	92	106	121	137	145	153	161	169
M^9	10	21	34	49	66	85	106	121	137	154	172	181	190	199
M^{10}	11	23	37	53	71	91	113	137	154	172	191	211	221	231
M^{11}	12	25	40	57	76	97	120	145	172	191	211	232	254	265
M^{12}	13	27	43	61	81	103	127	153	181	211	232	254	277	301
M^{13}	14	29	46	65	86	109	124	161	190	221	254	277	301	326
M^{14}	15	31	49	69	91	115	141	169	199	231	265	301	326	352

추측16. 산-골짜기 수열 $M^m V^n$ 에 대하여 $k = \min\{m, n\}$ 이면 다음이 성립한다.

$$F(M^m V^n) = \begin{cases} 2n^2 - 3n + 2 & (m = n) \\ 2k^2 - k + 1 & (|m - n| = 1) \\ mn + k^2 - k + 1 & (|m - n| \geq 2) \end{cases}$$

설명)

i) 위 표에서 $m=n$ 인 부분을 살펴보자.

$F(M^n V^n) = a_n$ 이라고 하자. 그러면 Table 2에 의해 $a_1 = 1, a_2 = 4, a_3 = 11, a_4 = 22, a_5 = 37$ 의 값을 가진다. 이때, $b_n = a_{n+1} - a_n$ 이라고 하자. 그러면 $n \leq 13$ 일 때까지 수열 $\{b_n\}$ 은 $b_1 = 3$ 이고 공차가 4인 등차수열의 형태를 가진다. 따라서 수열 $\{a_n\}$ 의 일반항을 구해주면 다음과 같다.

$$a_n = a_1 + \sum_{k=1}^{n-1} b_k = 1 + \sum_{k=1}^{n-1} (4k-1) = 1 + 4 \times \frac{n(n-1)}{2} - (n-1) = 2n^2 - 3n + 2$$

그러므로 $F(M^n V^n) = 2n^2 - 3n + 2$ 이다.

ii) 위 표에서 $|m-n| = 1$ 인 경우를 살펴보자.

$F(M^{n+1} V^n) = F(M^n V^{n+1})$ 이므로 $F(M^{n+1} V^n)$ 의 값만 살펴보자. $F(M^{n+1} V^n) = p_n$ 이라고 하자. 그러면 Table 2에 의해 $p_1 = 2, p_2 = 7, p_3 = 16, p_4 = 29, p_5 = 46$ 의 값을 가진다. 이때, $q_n = p_{n+1} - p_n$ 이라고 하자. 그러면 $n \leq 12$ 일 때까지 수열 $\{q_n\}$ 은 $q_1 = 5$ 이고 공차가 4인 등차수열의 형태를 가진다. 따라서 수열 $\{a_n\}$ 의 일반항을 구해주면 다음과 같다.

$$p_n = p_1 + \sum_{k=1}^{n-1} q_k = 2 + \sum_{k=1}^{n-1} (4k+1) = 2 + 4 \times \frac{n(n-1)}{2} + (n-1) = 2n^2 - n + 1$$

따라서 $F(M^{n+1} V^n) = 2n^2 - n + 1$ 이고 $F(M^m V^n) = 2k^2 - k + 1 (k = \min\{m, n\})$ 이다.

iii) 이제 $|m-n| \geq 2$ 일 때를 확인해보자. 이때 $m > n$ 이라고 가정하자.

$F(M^m V^n) = A_n$ 이라고 하자. 이때 표의 값을 관찰해보면 $A_1 = m + 1$ 로 관찰이 된다. 또, $B_n = A_{n+1} - A_n$ 이라고 하면 수열 $\{B_n\}$ 은 첫 항이 $B_1 = m + 2$ 이고 공차가 2인 등차수열의 형태를 가진다. 따라서 $B_n = m + 2n$ 이다. $\{A_n\}$ 의 일반항을 구해주면 다음과 같다.

$$A_n = A_1 + \sum_{k=1}^{n-1} (m+2k) = m+1 + m(n-1) + n(n-1) = mn + n^2 - n + 1$$

그러므로 $F(M^m V^n) = mn + k^2 - k + 1 (k = \min\{m, n\})$ 이다.

i), ii), iii)을 통해 위의 추측과 같은 식이 나온다. ■

이 외에도 몇 가지 형태에 대한 증명 및 관찰을 하였다.

정리17. 산-골짜기 수열 $M^n V$ 에 대하여 $F(M^n V) = \begin{cases} n & (1 \leq n \leq 2) \\ n+1 & (n \geq 3) \end{cases}$ 이다.

증명)

$n=1,2$ 일 때는 자명하다. $n \geq 3$ 인 경우를 생각하자. $M^n V$ 접기는 M^n 접기에서 V 접기를 한 번 더 한 것이다. 이때 M^n 접기의 가짓수는 정리 13에 의해 n 가지이므로 이제 $f = [f_0, f_1, \dots, f_{n-1}, f_n]$ 에서 $n+1$ 번째 우표가 들어가는 경우를 생각하면 된다.

i) n 이 짝수인 경우 (단, $n \geq 3$)

M^n 에 대응하는 접힌 상태 수열 $f = [f_0, f_1, \dots, f_{n-1}, f_n]$ 에서 $f_n = n-1, f_{n-1} = n$ 인 경우와 그 외의 경우가 있다. $f_n = n-1, f_{n-1} = n$ 인 경우 $n+1$ 번째 우표를 추가하는 방법은 n 번째 우표 바로 앞의 항에 오는 경우가 있고 2번째 항에 오는 경우가 있다. 즉, 2가지가 있다. 접힌 상태 수열 $f = [f_0, f_1, \dots, f_{k-1}, f_k]$ 가 $f_n = n-1, f_{n-1} = n$ 을 만족하지 않는 경우에는 $n+1$ 번째 우표를 추가하는 방법은 1가지 있다. 따라서 $k+1$ 번째 우표를 추가하는 총 경우는 $1 \times 2 + 1 \times (n-1) = n+1$ 이다.

ii) n 이 홀수인 경우(단, $n \geq 3$)

M^n 에 대응하는 접힌 상태 수열 $f = [f_0, f_1, \dots, f_{n-1}, f_n]$ 에서 $f_0 = n-1, f_1 = n$ 인 경우와 그 외의 경우가 있다. $f_0 = n-1, f_1 = n$ 인 경우 $n+1$ 번째 우표를 추가하는 방법은 n 번째 우표 다음 위치한 2번째 항에 넣거나 n 번째

항에 넣는 경우가 있다. 즉, 2가지가 있다. 접힌 상태 수열 $f = [f_0, f_1, \dots, f_{k-1}, f_k]$ 가 $f_0 = n-1, f_1 = n$ 을 만족하지 않는 경우에는 $n+1$ 번째 우표를 추가하는 방법은 1가지 있다. 따라서 $k+1$ 번째 우표를 추가하는 총 경우는 $1 \times 2 + 1 \times (n-1) = n+1$ 이다.

i), ii)에 의하여 주어진 공식이 성립한다. ■

정리18. 산-골짜기 수열 MVM^n 에 대하여 $F(MVM^n) = \begin{cases} n & (n=1) \\ n+1 & (n=2) \\ n+2 & (n \geq 3) \end{cases}$ 이다.

증명)

$n=1,2$ 일 때는 자명하다. $n \geq 3$ 인 경우를 생각하자. 정리8에 의해 $F(MVM^n) = F(M^n VM)$ 임을 알 수 있다. 따라서 $F(M^n VM) = n+2$ 임을 증명하면 된다. 이때 $M^n VM$ 접기는 M^n 접기에서 VM 접기를 이어서 한 것이라고 생각할 수 있다. 이때 M^n 접기의 가짓수는 정리 13에 의해 n 가지이므로 $f = [f_0, f_1, \dots, f_{n-1}, f_n]$ 에서 $n+1$ 번째 우표와 $n+2$ 번째 우표가 들어가는 경우에 대해 생각해보면 된다.

i) n 이 짝수인 경우(단, $n \geq 3$)

M^n 에 대응하는 접힌 상태 수열 $f = [f_0, f_1, \dots, f_{n-1}, f_n]$ 에서 $f_n = n-1, f_{n-1} = n$ 인 경우와 그 외의 경우가 있다. $f_n = n-1, f_{n-1} = n$ 인 경우 $n+1$ 번째 우표와 $n+2$ 번째 우표를 추가하는 방법은 모두 3가지가 가능하다. 하나는 $n+2$ 번째 우표가 1번째 항, $n+1$ 번째 우표가 2번째 항에 오는 경우이다. 또 다른 경우는 $n+2$ 번째 우표가 $n-1$ 번째 항, $n+1$ 번째 우표가 n 번째 항에 오는 경우이다. 마지막 경우는 $n+2$ 번째 우표가 0번째 항, $n+1$ 번째 우표가 n 번째 항에 오는 경우이다. 그 외의 경우에는 1가지가 가능하다. 따라서 $n+1$ 번째 우표와 $n+2$ 번째 우표를 추가하는 방법은 총 $3 \times 1 + 1 \times (n-1) = n+2$ 가지이다.

ii) n 이 홀수인 경우(단, $n \geq 3$)

M^n 에 대응하는 접힌 상태 수열 $f = [f_0, f_1, \dots, f_{n-1}, f_n]$ 에서 $f_0 = n-1, f_1 = n$ 인 경우와 그 외의 경우가 있다. $f_0 = n-1, f_1 = n$ 인 경우 $n+1$ 번째 우표와 $n+2$ 번째 우표를 추가하는 방법은 모두 3가지가 가능하다. 하나는 $n+1$ 번째 우표가 n 번째 항, $n+2$ 번째 우표가 $n+1$ 번째 항에 오는 경우이다. 또 다른 경우는 $n+1$ 번째 우표가 2번째 항, $n+2$ 번째 우표가 3번째 항에 오는 경우이다. 마지막 경우는 $n+1$ 번째 우표가 2번째 항, $n+2$ 번째 우표가 $n+2$ 번째 항에 오는 경우이다. 그 외의 경우에는 1가지가 가능하다. 따라서 $n+1$ 번째 우표와 $n+2$ 번째 우표를 추가하는 방법은 총 $3 \times 1 + 1 \times (n-1) = n+2$ 가지이다.

i), ii)에 의하여 주어진 공식이 성립한다. ■

아래의 표는 n 에 따른 $F(V^2MV^{n-3})$ 과 $F(V^kMV^{n-k-1})(k=3,4, n-k-1 \geq 3)$ 의 값을 표로 나타낸 것이다. 이번에도 이 표에서 찾은 규칙성을 기반으로 $F(V^2MV^{n-3})$ 과 $F(V^kMV^{n-k-1})$ 의 값을 추론하도록 하겠다.

〈Table 3〉 Table of MV sequence and $F(s)$

n	$F(V^2MV^{n-3})$	$F(V^kMV^{n-k-1})$ (단, $k=3$ 인 경우)	$F(V^kMV^{n-k-1})$ (단, $k=4$ 인 경우)
1	•	•	•
2	•	•	•
3	2	•	•
4	3	•	•
5	7	•	•
6	11	•	•
7	13	15	•
8	15	17	17
9	17	19	19
10	19	21	21
11	21	23	23
12	23	25	25
13	25	27	27
14	27	29	29
15	29	31	31

추측19. 다음이 예상된다.

- 1) $F(V^2MV^{n-3}) = 2n - 1 (n \geq 6)$
- 2) $F(V^kMV^{n-k-1}) = 2n + 1 (k \geq 3, n - k - 1 \geq 3)$

설명)

- 1) $F(V^2MV^{n-3})$ 의 값은 표에서 볼 수 있듯 $n \geq 6$ 에서부터는 $F(V^2MV^{n-3}) = 2n - 1$ 임을 알 수 있다.
- 2) $F(V^3MV^{n-4})$ 와 $F(V^4MV^{n-5})$ 의 값도 위 표에서 볼 수 있듯이 $F(V^kMV^{n-k-1}) = 2n + 1 (k \geq 3)$ 임을 알 수 있다. 이때 $n - k - 1 < 3$ 이면 경우의 수는 정리8에 의해 $F(V^2MV^{n-3})$ 또는 $F(VMV^n)$ 또는 $F(MV^n)$ 과 같으므로 $2n + 1$ 가지의 가짓수를 가지지 못한다.
따라서 1), 2)에 의해 위와 같은 추측이 가능하게 된다. ■

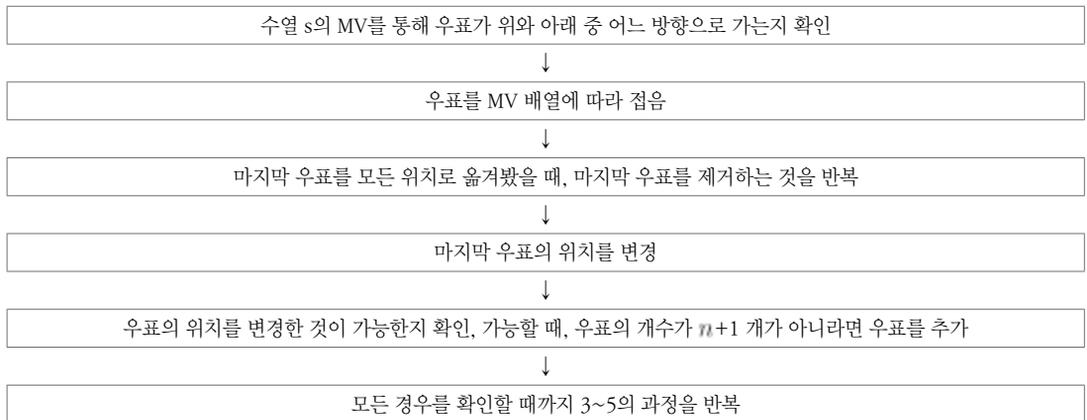
2. 프로그래밍을 통한 탐구 결과

임의의 산-골짜기 수열 s 에 대해 $F(s)$ 의 값을 알려주는 프로그램을 C언어로 제작하였다.

가. $F(s)$ 를 구하는 프로그램의 진행과정

$F(s)$ 를 구하는 프로그램의 진행과정을 간략하게 소개하면 다음과 같다.

<Table 4> The process of the algorithm for calculating $F(s)$



[Fig. 10] Table of MV sequence and $F(s)$

위의 [Fig. 10] 처럼 프로그램이 진행된다. 이 프로그램의 특징은 우표의 추가와 제거를 반복하는 것이 깊이우선탐색(DFS)의 방법을 닮았다는 것이다. 또한 프로그램에서 우표를 제거한 상태에서 확인하는 것을 통하여 모든 경우를 확인하지 않아도 되므로 $F(s)$ 를 구하는 과정이 효율적이다.

```

1  #include<stdio.h>
2  void add(int *floor,int num,int what)
3  {
4      int a;
5      *(floor+num)=what;
6      for(a=0;a<num;a++)
7          if(*(floor+a)>=what)
8              (*(floor+a))+=1;

```

```

9         return ;
10    }
11    void dis(int *floor,int num)
12    {
13        int a;
14        for(a=0;a<num;a++)
15            if(*(floor+a)>*(floor+num))
16                (*(floor+a))-=1;
17        return ;
18    }
19    int check(int *floor,int num)//num은 추가되는 우표의 편제
20    {
21        int a=0,sma=*(floor+num),big=*(floor+num-1);
22        int bi,sm;
23        if(num%2==0)
24            a=1;
25        if(*(floor+num)>*(floor+num-1))
26        {
27            sma=*(floor+num-1);
28            big=*(floor+num);
29        }
30        for(;a<num-1;a+=2)
31        {
32            if(*(floor+a)>*(floor+a+1))
33            {
34                sm=*(floor+a+1);
35                bi=*(floor+a);
36            }
37            else
38            {
39                sm=*(floor+a);
40                bi=*(floor+a+1);
41            }
42            if(((big>bi)&&(sma<bi)&&(sma>sm))||((big<bi)&&(big>sm)&&(sma<sm)))
43                return 0;
44        }
45        return 1;
46    }
47    int main ()
48    {
49        int leaf;
50        scanf("%d",&leaf);
51        int floor[leaf],arr[leaf];
52        char mvmv[leaf];
53        scanf("%s",mvmv);
54        int a,b,c=leaf-1,count=0,e=0,d=0;//c는 현재 우표의 수 -1의 값을 나타냄
55        int mv[leaf-1];//mv[a]는 arr[a+1]에 관한
56        arr[0]=1;//우표의 위치는 1부터 leaf까지
57        floor[0]=1;
58        for(a=0;a<leaf-1;a++)//0이 올리는 것,1은 내리는 것
59        {
60            if(mvmv[a]=='m')
61            {
62                if(a%2==0)
63                    mv[a]=1;
64                else
65                    mv[a]=0;
66            }
67            else
68            {
69                if(a%2==1)
70                    mv[a]=1;
71                else

```

```

72         mv[a]=0;
73     }
74 }
75 for(a=0;a<leaf-1;a++)
76 {
77     if(mv[a]==0)
78     {
79         arr[a+1]=arr[a];
80         add(floor,a+1,arr[a]);
81     }
82     else
83     {
84         arr[a+1]=arr[a]+1;
85         add(floor,a+1,arr[a]+1);
86     }
87 }
88 count++;
89 while(1)
90 {
91     while(d==0)//우표를 떼는 과정
92     {
93         if(mv[c-1]==1)
94         {
95             if((arr[c]!=c+1)&&(c!=1))
96                 break;
97             dis(floor,c);
98             c--;
99         }
100        else
101        {
102            if((arr[c]!=1)&&(c!=1))
103                break;
104            dis(floor,c);
105            c--;
106        }
107        if(c==0)
108        {
109            e=1;
110            break;
111        }
112    }
113    if(e==1)
114        break;
115    if(d==0)//우표를 변형하는 과정
116    {
117        if(mv[c-1]==0)
118        {
119            arr[c]--;
120            dis(floor,c);
121            add(floor,c,arr[c]);
122        }
123        else
124        {
125            arr[c]++;
126            dis(floor,c);
127            add(floor,c,arr[c]);
128        }
129    }
130    d=0;
131    if(check(floor,c)==1)
132    {
133        if(c==leaf-1)
134            count++;

```

```

135         else
136         {
137             d=1;
138             if(mv[c]==1)
139             {
140                 arr[c+1]=arr[c]+1;
141                 add(floor,c+1,arr[c+1]);
142             }
143             else
144             {
145                 arr[c+1]=arr[c];
146                 add(floor,c+1,arr[c+1]);
147             }
148             c++;
149         }
150     }
151 }
152 printf("%d",count);
153 return 0;
154 }
    
```

[Fig. 11] Code of the algorithm for calculating $F(s)$

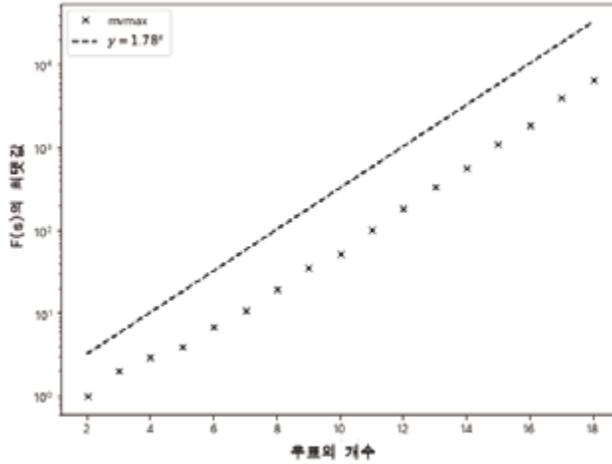
위의 코드는 우표의 개수와 산-골짜기 수열 s 를 입력하면 우표 접기의 경우의 수를 알려주는 프로그램이다. 위의 코드 중 floor 배열은 우표의 최종 위치를 나타내고, arr 배열은 우표를 추가할 당시의 그 우표의 위치를 나타내어 준다. add 함수는 우표를 더해주는 역할을 하며, dis 함수는 우표를 제거하는 역할을 한다. 또한 check 함수는 각 우표의 위치대로 접는 것이 가능한지 확인하는 역할을 한다.

나. $F(s)$ 의 최댓값에 대한 탐구

$F(s)$ 가 최대인 수열 s 를 관찰하였다. 우표가 짝수 개에서 홀수 개로 바뀔 때 최대 경우의 수가 대략 2배, 홀수 개에서 짝수 개로 바뀔 때 대략 1.6배 증가하였다. 따라서 평균적으로 1.78배 증가하였다고 할 수 있다.

<Table 4> Maximum value of $F(s)$ and MV sequence for each strip of stamps

수열 s	$F(s)$	수열 s	$F(s)$
MM	2	$(M)^4(V)^2, (M)^3V(M)^2, (M)^2V(M)^3, (M)^2(V)^4$	11
MMM	3	$(M)^2(V)^2(M)^3, (M)^3(V)^2(M)^2$	20
$(M)^4, (M)^3V, (M)^2, M(V)^3$	4	$(M)^3(V)^2(M)^3$	36
$(M)^3(V)^2, (M)^2(V)^3, (M)^2V(M)^2$	7	$(M)^2(V)^2(M)^2(V)^3, (M)^3(V)^2(M)^2(V)^2$	53
$(M)^3(V)^2(M)^2V(M)^2, (M)^2V(M)^2(V)^2(M)^3$			102
$(M)^2(V)^2(M)^3(V)^2(M)^2$			188
$(M)^3(V)^2(M)^3(V)^2(M)^2, (M)^2(V)^2(M)^3(V)^2(M)^3$			334
$(M)^3(V)^2(M)^3(V)^2(M)^3$			562
$(M)^2V(M)^2(V)^2(M)^3(V)^2(M)^2, (M)^2(V)^2(M)^3(V)^2(M)^2V(M)^2$			1109
$(M)^2(V)^2(M)^3(V)^2(M)^2(V)^2(M)^2, (M)^2(V)^2(M)^2(V)^2(M)^2(V)^2(M)^2$			1854
$(M)^2(V)^2(M)^3(V)^2(M)^3(V)^2(M)^2$			4040
$(M)^2V(M)^2(V)^2(M)^3(V)^2(M)^2V(M)^2$			6530

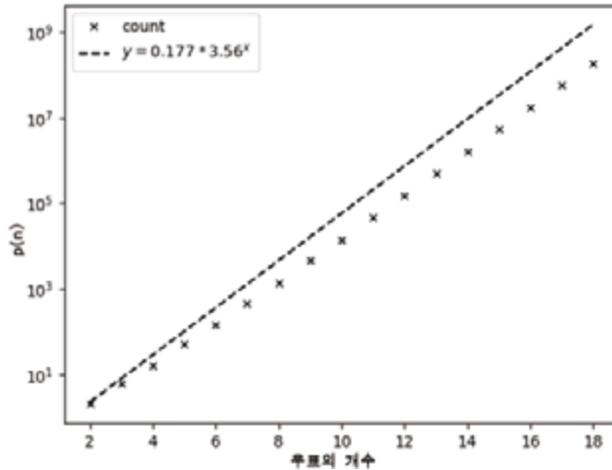


[Fig. 12] Experimental results of the maximum values of $F(s)$ for a strip of 2~18 stamps

우표 접기의 전체 경우의 수가 지수적으로 증가하기 때문에 산-골짜기 수열 s 에 대하여 $F(s)$ 의 지수적인 증가도 어느 정도 예상되는 바이다. 하지만 실제 수치적 계산을 통해서도 이것이 처음으로 확인됐다는 점에서 의미가 있다. 아래 추측20과 관련하여 이미 선행연구에서 우표 접기의 경우의 수가 3.3^n 이하임이 추측된 바 있고 수학적 증명으로는 4^n 이하임이 증명되었다[10]. 아래 결과가 그보다 약하기는 하지만 전혀 다른 접근을 통해서 비슷한 결론을 도출했다는 점에서 의미가 있다.

추측20. 위와 같은 증가폭이 유지될 때, 다음이 예상된다.

$$P(n) \leq 4 \times 2 \times 2^{n-3} (2^{n-3} \times 1.6^{n-3})^{\frac{1}{2}} \approx 8 \times 3.56^{n-3} \approx 0.177 \times 3.56^n$$



[Fig. 13] Comparison of $P(n)$ and function 0.177×3.56^n for a strip of 2~18 stamps

추측21. 다음이 예상된다.

$n \geq 8$ 일 때 $F(s)$ 가 최대가 되도록 하는 수열 s 에서 M 또는 N 이 연속적인 횟수는 3회 이하이다.

산-골짜기 수열에서 산 접기의 횟수가 몇 번인지를 기준으로 $F(s)$ 의 최댓값과 최솟값에 대한 탐구를 하였다. 그 결과 $|s|_M$ 이 1, 2, 3인 경우의 최댓값과 최솟값의 성질을 파악하였고 좀 더 일반적인 경우를 추측하였다. 먼저 $|s|_M = 1$ 인 때는 다음과 같이 관찰 되었다.

<Table 5> Maximum value and minimum value of $F(s)$ with $|s|_M = 1$

우표 개수	최솟값	최댓값	우표 개수	최솟값	최댓값
3	1	1	11	10	21
4	1	2	12	11	23
5	3	4	13	12	25
6	5	7	14	13	27
7	6	11	15	14	29
8	7	15	16	15	31
9	8	17	17	16	33
10	9	19	18	17	35

추측22. n 개의 우표 열에 대해 $|s|_M = 1$ 인 산-골짜기 수열 s 에 대해 다음이 성립한다.

- 1) $n \geq 6$ 에 대해 산-골짜기 수열 s 가 MV^{n-2} 또는 VMV^{n-3} 또는 $V^{n-2}M$ 또는 $V^{n-3}MV$ 일 때, $F(s)$ 는 최솟값 $n-1$ 을 갖는다.
- 2) $n \geq 8$ 에 대해 산-골짜기 수열 s 가 V^kMV^{n-k-2} ($k \geq 3, n-k-2 \geq 3$)일 때, $F(x)$ 는 최댓값 $2n-1$ 을 갖는다.
- 3) 산-골짜기 수열 s 에 대하여 $F(s)$ 는 $n-1, 2n-3, 2n-1$ 중 한 가지 값을 갖는다.

추측22로부터 우리는 다음과 같은 성질이 성립하리라 예상할 수 있다.

추측23. n ($n \geq 8$)개의 우표 열에 대해 $\sum_{|s|_M=1} F(s) = 2n^2 - 7n - 3$ 이다.

설명) $|s|_M = 1$ 일 때, $n \geq 8$ 인 경우 $F(s)$ 가 $n-1$ 이 나오는 경우는 4가지, $2n-3$ 이 나오는 경우는 2가지이고 나머지 경우엔 $2n-1$ 이 나온다. 따라서

$$\sum_{|s|_M=1} F(s) = 4(n-1) + 2(2n-3) + (n-7)(2n-1) = 2n^2 - 7n - 3 \blacksquare$$

$|s|_M = 2$ 일 때, 다음이 관찰되었다.

<Table 6> Maximum value and minimum value of $F(s)$ with $|s|_M = 2$

우표 개수	최솟값	최댓값	우표 개수	최솟값	최댓값
3	2	2	11	10	60
4	1	2	12	11	68
5	1	4	13	12	74
6	1	7	14	13	80
7	4	11	15	14	86
8	7	20	16	15	92
9	8	36	17	16	98
10	9	48	18	17	104

추측24. n 개의 우표 열에 대해 $|s|_M = 2$ 인 산-골짜기 수열 s 에 대해 다음이 성립한다.

- 1) $n \geq 8$ 에 대해 $V^{n-5} = X$ 라 하면 산-골짜기 수열 s 가 $MVXMV$ 또는 $MVXVM$ 또는 $VMXMV$ 또는 $VMXVM$ 또는 $MVMVX$ 또는 $VMVMX$ 또는 $XMVMV$ 또는 $XVMVM$ 일 때, 최솟값 $n-1$ 을 갖는다.
- 2) $n \geq 12$ 에 대해 산-골짜기 수열 s 가 $V^kMV^3MV^{n-k-6}$ ($k \geq 3, n-k-6 \geq 3$)일 때, 최댓값 $6n-4$ 을 갖는다.

$|s|_M = 2$ 일 때, 우표가 3개일 때 최솟값이 우표가 4개 일 때 최솟값 보다 큰 것은 재미있는 현상이다. 우표의 개수가 적을 때는 특수한 경우가 자주 발생해 최솟값과 최댓값의 추이가 일정한 규칙을 보이려면 우표가 충분히 많아져야 한다는 점을 파악할 수 있다.

$|s|_M = 3$ 일 때, 다음이 관찰되었다.

〈Table 7〉 Maximum value and minimum value of $F(s)$ with $|s|_M = 3$

우표 개수	최솟값	최댓값	우표 개수	최솟값	최댓값
4	3	3	16	15	268
5	3	4	17	16	286
6	1	7	18	17	304
7	1	11	19	18	322
8	1	16	20	19	340
9	5	31	21	20	358
10	9	51	22	21	376
11	10	102	23	22	394
12	11	162	24	23	412
13	12	196	25	24	430
14	13	230	26	25	448
15	14	247	27	26	466

추측25. n 개의 우표 열에 대해 $|s|_M = 3$ 인 산-골짜기 수열 s 에 대해 다음이 성립한다.

1) $n \geq 10$ 에 대해 $V^{n-7} = X(n-7 \geq 4)$ 라 하면 산-골짜기 수열 s 가 $MVMVXMV$ 또는 $MVMVXVM$ 또는 $VMVMXMV$ 또는 $VMVMXVM$ 또는 $MVXVMVM$ 또는 $MVXVMVM$ 또는 $VMXVMVM$ 또는 $VMXVMVM$ 또는 $MVMVMVX$ 또는 $VMVMVMX$ 또는 $XMVMVMV$ 또는 $XVMVMVM$ 일 때, 최솟값 $n-1$ 을 갖는다.

2) $n \geq 16$ 에 대해 산-골짜기 수열 s 가 $V^kMV^3MV^3MV^{n-k-10}$ ($k \geq 3, n-k-10 \geq 3$)일 때, 최댓값 $18n-20$ 을 갖는다.

$|s|_M = 3$ 인 경우까지 확인하였을 때, 최댓값과 최솟값이 나타나는 규칙에 일정한 패턴이 발견되었다. 이를 표로 나타내면 다음과 같다.

〈Table 8〉 Observed maximum value of $F(s)$ for value of $|s|_M$

$ s _M$	최솟값이 규칙을 보이는 범위	최솟값	최댓값이 규칙을 보이는 범위	최댓값	최댓값인 산-골짜기 수열의 형태($k, l \geq 3$)
1	$n \geq 6$	$n-1$	$n \geq 8$	$2n-1$	V^kMV^l
2	$n \geq 8$	$n-1$	$n \geq 12$	$6n-4$	$V^kMV^3MV^l$
3	$n \geq 10$	$n-1$	$n \geq 16$	$18n-20$	$V^kMV^3MV^3MV^l$

최솟값의 경우에는 이 규칙이 유지된다면 다음과 같이 성립하리라 추측할 수 있다.

추측26. $n(n \geq 2k+4)$ 개의 우표 열에 대해 $|s|_M = k$ 인 산-골짜기 수열 s 에 대해 $F(s)$ 의 최솟값은 $n-1$ 이다.

최댓값의 경우 규칙을 보이는 범위는 4씩 커진다는 특징을 보였고 n 앞의 계수가 3씩 곱해진다는 규칙이 보였지만 최댓값의 상수항에는 특별한 규칙이 있다고 보기 어려웠다. 하지만 최댓값인 산-골짜기 수열의 형태에는 일정한 규칙을 보였으므로 최댓값의 일반항에 모종의 규칙이 있을 가능성이 높다고 판단하였다. 그래서 최댓값의 범위, n 앞의 계수, 산-골짜기 수열의 형태가 계속해서 이를 유지한다는 가정하여 아래 표와 같은 관찰표를 작성하였다. 그리고 아래 표의 가장 오른쪽 예상되는 일반항이 나왔다.

<Table 9> Expected maximum value of $F(s)$ for value of $|s|_M$

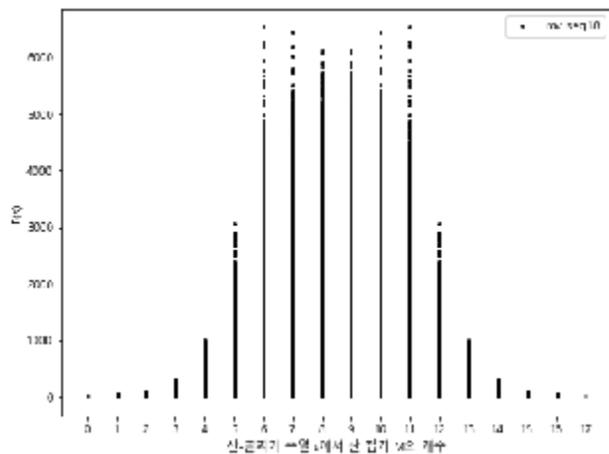
$ s _M$	우표의 개수	산-골짜기 수열 s	$F(s)$	예상되는 일반항
1	8	V^3MV^3	15	$2n-1$
2	12	$V^3MV^3MV^3$	68	$6n-4$
3	16	$V^3MV^3MV^3MV^3$	268	$18n-20$
4	20	$V^3MV^3MV^3MV^3MV^3$	996	$54n-84$
5	24	$V^3MV^3MV^3MV^3MV^3MV^3$	3564	$162n-324$
6	28	$V^3MV^3MV^3MV^3MV^3MV^3MV^3$	12420	$486n-1188$
7	32	$V^3MV^3MV^3MV^3MV^3MV^3MV^3MV^3$	42444	$1458n-4212$
8	36	$V^3MV^3MV^3MV^3MV^3MV^3MV^3MV^3MV^3$	142884	$4374n-14580$
9	40	$V^3MV^3MV^3MV^3MV^3MV^3MV^3MV^3MV^3MV^3$	475308	$13122n-49572$
10	44	$V^3MV^3MV^3MV^3MV^3MV^3MV^3MV^3MV^3MV^3MV^3$	1565892	$39366n-166212$

예상되는 일반항의 상수항에는 여전히 어떤 특별한 규칙이 보이지는 않았다. 하지만 상수항이 이미 알려진 수열의 원소 일 가능성을 확인하고자, 온라인 정수열 사전 사이트에서 검색하였다[12]. 그러자 한 수열과 우리가 구한 일반항의 상수항과 모두 정확히 일치하였다[13]. 이 수열은 함수 $\frac{1-2x+5x^2}{(1-3x)^2}$ 을 맥클로린 전개 했을 때 나오는 다항식의 n 차 항의 계수로 된 수열로 그 일반항은 $3^{n-2}(8n+4)(n \geq 1)$ (온라인 정수열 백과사전에 등록된 수열은 0항부터 시작한다)이다. 따라서 최댓값이 이 규칙을 따른다고 할 때 다음과 같은 추측이 가능하다.

추측 27. $n(n \geq 4k+4)$ 개의 우표 열에 대해 $|s|_M = k$ 인 산-골짜기 수열 s 에 대해 $F(s)$ 의 최댓값은 $2 \cdot 3^{k-1}n - 3^{k-3}(8k-4)$ ($k \geq 2$)을 갖는다.

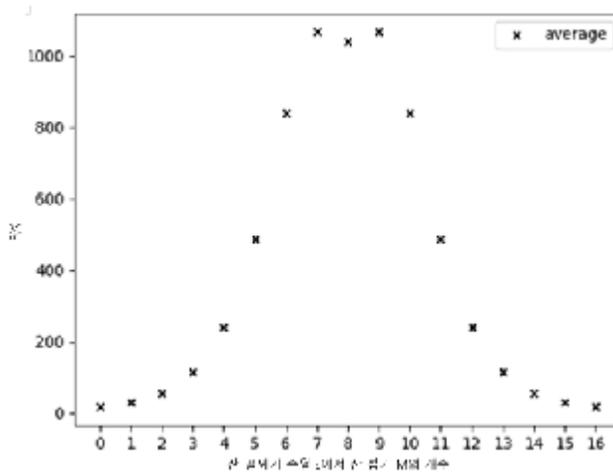
다. 산-골짜기 수열에 대한 경우의 수의 분포 탐구

산 접기 횟수를 기준으로 각 산-골짜기 수열과 그에 대응되는 $F(s)$ 에 대한 산점도를 탐구했고 우표의 개수가 증가할수록 전체적으로 쌍봉의 분포를 보였다. 이를 통하여 산 접기의 개수와 골짜기 접기의 개수의 차의 절댓값이 우표가 홀수 개 일 때는 대략 4에 가까울 때, 우표가 짝수 개 일 때는 3이나 5에 가까울 때, 우표 접기의 경우의 수가 최댓값을 가질 수 있다고 추측할 수 있다.



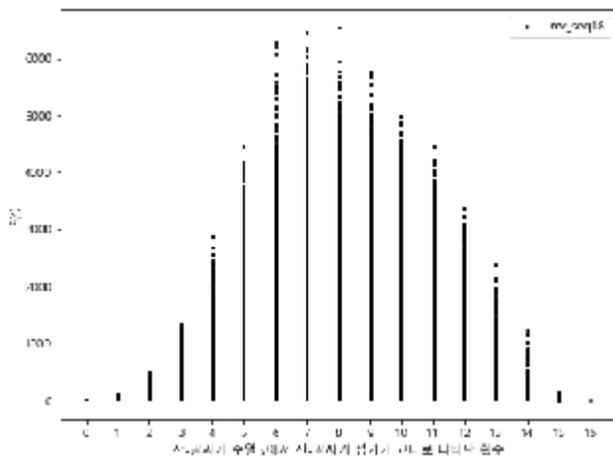
[Fig. 14] Scatter plot of $|s|_M$ vs $F(s)$ and for a strip of 18 stamps

또한 각 $F(s)$ 에 대하여 산 접기의 개수에 따른 우표 접기의 평균을 나타낸 그래프를 만들었는데, 그래프의 개형이 모든 $F(s)$ 를 나타낸 그래프의 최댓값이 찍히는 모양과 유사하다는 것을 볼 수 있다. 이를 통하여 산 접기 횟수를 기준으로 했을 때 $F(s)$ 의 최댓값이 큰 경우에 평균도 높게 나오는 특징이 있음을 알 수 있었다.



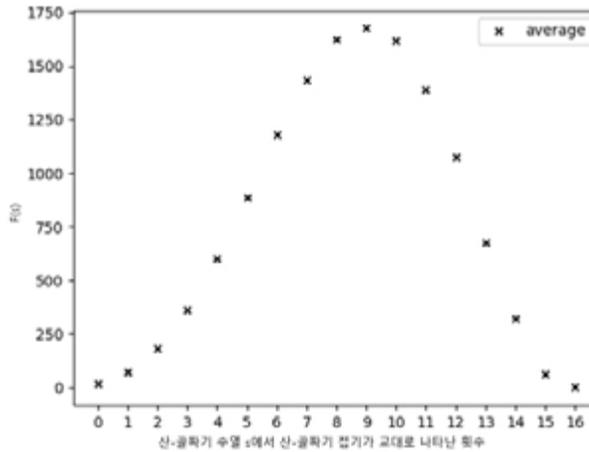
[Fig. 15] Scatter plot of $|s|_M$ vs average of $F(s)$ for a strip of 18 stamps

산-골짜기 접기가 바뀌는 것이 나타난 횟수를 기준으로 산점도를 나타냈을 때, 우표의 개수가 증가할수록 최댓값은 약간 왼쪽에 치우쳤지만, 전체적인 분포는 약간 오른쪽에 치우친 것을 볼 수 있다.



[Fig. 16] Scatter plot of number of times the mountain folding and valley folding alternated vs $F(s)$ for a strip of 18 stamps

또한 바뀌는 것이 나타난 횟수를 기준으로 우표 접기의 경우의 수의 평균을 나타내는 그래프에서는 그래프의 개형이 우표가 작을 때는 왼쪽에 치우친 모습을 보여줬지만, 우표의 개수가 증가할수록 그래프의 개형이 점점 오른쪽으로 치우쳐지게 되는 경향이 있었다. 실제로 대략 우표가 14일 때, 좌우 대칭과 비슷한 모습을 보여주었고 우표의 개수가 더 늘어날수록 전체적으로 더 오른쪽에 치우친 모습을 볼 수 있다. 이를 통하여 산 접기와 골짜기 접기가 교대로 나타나는 횟수와 산 접기 또는 골짜기 접기가 연속적으로 나타나는 횟수의 차가 1이나 2에 가까울 때, 우표 접기의 경우의 수가 최댓값을 가질 수 있다고 추측할 수 있다.



[Fig. 17] Scatter plot of number of times the mountain folding and valley folding alternated vs average of for a strip of 18 stamps

IV. 결론 및 제언

우리의 연구 주제는 우표 접기 문제이다. 우표 접기 문제와 관련된 기존의 연구는 주로 수열의 성질을 이용한 것이었지만 우리의 연구는 이와는 다르게 산 접기와 골짜기 접기를 통해 우표 접기 문제를 탐구하였다. 주된 탐구 내용은 산-골짜기 수열 s 가 주워졌을 때 이에 대응하는 우표 접기의 경우의 수를 찾는 것이고 이를 $F(s)$ 라 하였다. 연구는 크게 두 가지 방향으로 이루어 졌다. 한 가지는 수학적 성질에 대한 탐구이고 다른 한 가지는 프로그래밍을 활용한 탐구로 이루어 졌다.

수학적 탐구를 통해 우리는 산-골짜기 수열과 접힌 상태 수열의 관계와 $F(s)$ 의 기본적인 성질에 대해 알아봤다. 또한 산-골짜기 수열의 기본적인 형태인 M^n 과 V^n 에 대해 $F(M^n) = F(V^n) = n$ 임을 증명하였다. 그리고 M^n , V^n 과 $(MV)^n$ 을 조합한 형태에 대해 수학적 귀납법 등을 활용해 $F(s)$ 를 알아보았다.

프로그래밍을 통한 탐구에서 우리가 먼저 한 것은 C언어를 활용하여 임의의 산-골짜기 수열에 대해 이에 대응하는 우표 접기의 경우의 수 $F(s)$ 를 계산하는 프로그램을 만든 것이다. 이를 통해 우표의 개수에 따른 $F(s)$ 의 최댓값을 계산해보았으며, 우표의 개수가 늘어날수록 우표 접기의 전체 경우의 수가 어떠한 식으로 될지 추측하였다. 또한 산 접기 횟수를 기준으로 했을 때 $F(s)$ 의 최댓값과 최솟값도 추측했다. 이외에도 산 접기의 개수 또는 산-골짜기 접기 방법이 바뀌는 횟수에 대한 $F(s)$ 의 산점도를 통해 $F(s)$ 의 통계적인 성질을 추측했다.

수학적 증명으로는 특수한 몇몇 형태의 산-골짜기 수열 s 에 대해서만 $F(s)$ 를 증명 했다는 점에서 우리의 연구는 한계가 있었다. 하지만 이를 보완하는 것이 프로그래밍을 활용한 탐구이다. 그리고 그 결과 많은 추측을 얻을 수 있었다. 후속 연구에서는 우리가 얻은 다양한 추측에 대한 수학적 증명을 탐구해야 할 것이다. 만약 이런 추측에 대한 수학적 증명이 이루어지고 좀 더 일반적인 형태의 산-골짜기 수열에 대해 $F(s)$ 의 값을 구하는 공식을 찾을 수 있다면 좀 더 긍정적인 결과를 도출할 수 있으리라 믿는다. 우리의 연구가 그 길에 작은 발판이 되길 바란다.

V. 참고문헌

- [1] 수학동아 2014년 11월호. 46-53 기사: 종이학부터 변신로봇까지 오리가미의 진화.
- [2] 7th International Meeting on OSME site, <http://osme.info/7osme/> (검색일: 2018.11.29.)
- [3] Lucas, É. (1891). *Théorie des nombres* 120. Paris: Gauthier-Villars.

- [4] Sloane, N. J. A. Sequences A001418 in The On-Line Encyclopedia of Integer Sequences. <https://oeis.org/A001418> (검색일: 2018.11.29.)
- [5] Koehler, J. E. (1968). Folding a strip of stamps, *Journal of combinatorial Theory* 5 (2), 135–152.
- [6] Lunnon, W. F. (1968). A map folding problem, *Mathematics of Computation* 22 (101), 193–199.
- [7] Gardner, M. (1983). Wheels, Life and Other mathematical Amusements 60–73. New York: W. H. Freeman.
- [8] Jensen, I. (2000). A transfer matrix approach to the enumeration of plane meanders, *Journal of Physics A: Mathematical and General* 33 (34), 5953–5963
- [9] Demaine, E. D., Arkin, E. M., Bender, M. A., Demaine, M. L., Mitchell, J. S. B., Sethia, S., Skiena S. S. (2004). When can you fold a map? *Computational Geometry* 29, 23–46.
- [10] Ryuhei, U. (2011). *Origami5 : Fifth International Meeting of Origami Science, Mathematics, and Education* 585–597. Florida : CRC Press.
- [11] Umesato T., Saitoh, T., Uehara, R., Ito, H., Okamoto, Y. (2013). The complexity of the stamp folding problem, *Theoretical Computer Science* 497, 13–19.
- [12] The On-Line Encyclopedia of Integer Sequences site. <http://oeis.org/> (검색일: 2018.11.29.)
- [13] Sloane, N. J. A. Sequences A167682 in The On-Line Encyclopedia of Integer Sequences. <http://oeis.org/A167682> (검색일: 2018.11.29.)

| 연구진 |

박지환 (Jihwan Park, 인천과학예술영재학교, math-artist@naver.com), 주저자 및 교신저자

유정훈 (Junghun Yoo, 인천과학예술영재학교, sngdjwbd@naver.com), 공동저자

전윤조 (Yoonjo Jeon, 인천과학예술영재학교, yoonjo02yoonjo02@naver.com), 공동저자

지도교사 : 이동화 (Donghwa Lee, 인천과학예술영재학교, uibsee@hanmail.net)

지도교수 : 함남우 (Nahmwoo Hahm, 인천대학교, nhahm@inu.ac.kr)

$x^2 + axy + by^2 = \pm 1$ 형태의 이차 디오판틴 방정식의 해에 관한 연구

장지환 · 김서용 · 송유찬 · 김승윤 · 김민서 - 전북과학고등학교

A Study of Solutions of Quadratic Form Diophantine Equation $x^2 + axy + by^2 = \pm 1$

Jihwan Jang · Seoyoong Kim · Yuchan Song · Seungyun Kim · Minseo Kim - Jeonbuk Science High School

국문초록

본 연구는 노름 형식 디오판틴 방정식(Norm Form Diophantine equation) 중에서 이차곡선의 형태를 갖는 방정식의 정수해와 이들 성질을 탐구하는 것이다. 노름 형식(Norm Form)의 디오판틴 방정식의 해들의 집합에 특정한 modular 연산을 정의하고 이를 이용하여 해들의 순환구조나 해들 사이에 존재하는 점화식의 발견, 방정식의 해들이 군을 이루므로 이들 군의 생성원(generator) 구하기 등 여러 흥미로운 수학적 사실들을 발견할 수 있었다. 먼저 각 판별식에 따라 타원, 쌍곡선으로 나누어 연구를 진행하였다. 노름 형식의 디오판틴 방정식의 그래프가 타원 형태일 때는 판별식의 값에 따라 정수해의 개수가 2개, 4개, 6개 중 하나로 결정됨과 생성원의 거듭제곱의 결과가 일정한 방향으로 순환하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 해들이 이루는 사각형 혹은 육각형이 항상 일정한 넓이를 유지하는 것과 타원의 넓이가 판별식을 포함한 형태로 나타난다는 사실도 확인하였다. 노름 형식의 디오판틴 방정식의 그래프가 쌍곡선인 경우에는 판별식이 같은 방정식들의 해들이 서로 특이한 관계가 있음을 방정식들의 해들의 생성원과 이들을 거듭제곱한 것들을 비교함으로써 밝힐 수 있었다. 각각의 방정식의 해를 구하는 문제는 잘 알려져 있지만 판별식이 같은 방정식들의 해들 사이에 특별한 관계가 있음을 밝힌 것은 본 연구의 가장 주요한 성과 중의 하나이다.

중심어 : 노름 형식, 디오판틴 방정식, 수반다항식, 군, 순환군

ABSTRACT

This study examines the integer solutions of Norm Form Diophantine equation which have quadratic curve formula and their properties. With a particular modular arithmetic on the set of solutions of NFD, many impressive mathematical facts were discovered, such as the cyclic formation or recurrence formula among the solutions, and the generator of a group made with the solutions. First, we did a study with separating the circumstances by the shape of the graph, which depends on the value of discriminant. When the graph is an ellipse, the number of integer solutions of NFD is one of 2, 4, and 6, depending on the discriminant. Also the exponentiation of the generator cycles in a fixed direction. Additionally, the tetragon or hexagon made from the solutions has a constant area, and the area of the ellipse is described in the term of the discriminant. When the graph of NFD is a conjugate hyperbola, we clarified that solutions of equations with the equal value of discriminant have a particular relationship, by comparing the generators and their exponentiation. It is well known how to find the solution of each equation, but revealing that there is a special connection among the solutions of equations with the same discriminant is one of the major accomplishment of this study.

Key words: Norm Form, Diophantine equation, Adjoint polynomial, Group, Cyclic group

I. 서론

디오판틴 방정식의 연구는 정수론에서 매우 중요한 위치를 차지한다. 본 연구는 디오판틴 방정식 중에서 특수한 형태의 이차형식 즉

$$x^2 + axy + by^2 = \pm 1 \text{ ----- (*)}$$

형태의 디오판틴 방정식의 해와 해들 사이의 관계를 구할 것이다.

기존 선행연구에서는 이차식의 모든 계수를 일반화하거나[1], 판별식이 특정한 값을 가져 피보나치 수열과 연관되는 경우만을 다루었다[2]. 그러나 우리는 노름 형식을 이용하여 해들 사이의 관계를 규명하기 위해 (*)와 같은 상황에서 판별식의 값이 같게 주어졌을 때, 수많은 방정식이 가지는 해들 사이의 정수론적/대수적 관계를 파악하여 의의를 가진다.

주어진 형식은 $D = a^2 - 4b$ 의 부호에 따라 $D < 0$ 이면 타원이고, $D = 0$ 이면 평행한 두 직선이고, $D > 0$ 이면 쐐곡선이 된다. 특히 $D < 0$ 인 경우, 먼저 a 가 짝수인 경우는 자명한 해 즉, $(1, 0), (-1, 0)$ 만을 해로 갖거나 추가로 두 개의 해를 더 가져서 해가 4개인 경우만 존재한다는 사실과 a 가 홀수인 경우에는 자명한 해만을 갖거나 해가 6개인 경우 두 가지만 존재한다는 것을 증명하였다. 또한 해가 6개인 경우에는 이들 해가 위수가 6인 순환군을 이룸을 알 수 있었다. 또한 $D > 0$ 인 경우에는 (*)의 식이 쐐곡선을 나타내는데 이 경우에는 해가 무수히 존재하거나 해가 존재하지 않을 수도 있다. 해가 무수히 많은 경우는 이들 해가 군을 이루고 그 구조는 $C_2 \times C_\infty$ 이다. 이 경우에는 위수가 무한인 생성원을 구하는 것이 주요한 문제가 된다.

쐐곡선의 경우에도 여러 가지 흥미로운 사실들을 발견하였는데 특히 판별식이 같은 (*) 형태의 디오판틴 방정식들의 각각의 생성원을 거듭제곱했을 때 각 디오판틴 방정식의 생성원의 거듭제곱의 지수가 같은 해들의 x 값들 사이에는 등차수열의 관계가 성립하고 y 값은 항상 같으며 특히 x 값들의 공차가 $-y$ 가 됨을 관찰하고 이를 증명하였다.

한편 (*) 형태의 디오판틴 방정식의 해가 갖는 대수적 성질뿐만 아니라 해석적 성질 또한 연구할 필요가 있다. 사전 연구를 통해 우리는 (*)이 유한한 영역을 갖는 경우 즉, $D < 0$ 인 경우에 (*)가 해가 자명하지 않는 해를 갖는 경우에 (*)의 넓이가 D 와 관련이 있음을 관찰하고 증명하였다. 우리는 일반적으로 타원의 경우에 넓이와 판별식 D 가 어떤 관계가 있는가와 자명하지 않은 해를 갖는 경우 이 해들을 꼭짓점으로 하는 다각형의 넓이와 타원의 넓이 사이의 관계도 규명하였다.

마지막으로 쐐곡선의 경우에 $D \equiv 0, 1 \pmod{4}$ 임을 이용하여 $D \equiv 0 \pmod{4}, D \equiv 1, 5 \pmod{8}$ 의 세 가지 경우로 나누어 각 NFD 방정식의 생성원의 존재성에 대하여 연구하였다.

II. 이론적 배경

Definition 1. 노름 형식(Norm Form)

k 에 관한 r_k 차 정수 계수 기약다항식 $p(t)$ 가 r_k 개의 서로 다른 근 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{r_k}$ 을 가질 때, $A = (x_0, x_1, \dots, x_{r_k})$ 에 대하여 $p(t)$ 의 Norm Form $f(A)$ 을 다음과 같이 정의한다.

$$f(A) = \prod_{i=1}^{r_k} (x_0 + x_1\theta_i + \dots + x_{r_k-1}\theta_i^{r_k-1})$$

이를 간편하게 $D(x_0, x_1, \dots, x_{r_k-1})$ 로 나타내기도 한다.

Definition 2. 노름 형식 디오판틴 방정식(Norm Form Diophantine Equation, NFD)

$p(t)$ 의 노름 형식을 $f(A) = \prod_{i=1}^{r_k} (x_0 + x_1\theta_i + \dots + x_{r_k-1}\theta_i^{r_k-1})$ 라 할 때,

$$f(A) = \prod_{i=1}^{r_k} (x_0 + x_1\theta_i + \dots + x_{r_k-1}\theta_i^{r_k-1}) = 1$$

형태의 디오판틴 부정방정식을 노름 형식 디오판틴 방정식(Norm Form Diophantine Equation)이라고 하고 줄여서 NFD로 부른다.

$$p(x) = x^2 - ax + b \text{의 NFD는 } x^2 + axy + by^2 = \pm 1 \text{이다.}$$

아래 Definition 3과 4는 유익승의 연구에서 정의된 내용을 본 연구의 특성에 적합한 특수한 경우에 대하여 수정한 것이다[3].

Definition 3. 수반다항식(adjoint polynomial)

순서쌍 $\lambda = (a, b)$ 의 수반다항식은

$$s_\lambda(t) = a + bt \text{로 정의한다.}$$

Definition 4. 곱(Multiplication)

두 순서쌍 $\lambda = (a_0, a_1)$ 와 $\zeta = (b_0, b_1)$ 에 대하여 각각 수반다항식이 다음과 같이 존재한다.

$$\begin{aligned} s_\lambda(t) &= a_0 + a_1 t \\ s_\zeta(t) &= b_0 + b_1 t \end{aligned}$$

이 때 나눗셈 알고리즘에 의해 다음 식을 만족하는 $\deg(s_\zeta(t)) \leq 1$ 인 다항식 $s_\zeta(t) = c_0 + c_1 t$ 가 존재한다.

$$\begin{aligned} s_\lambda(t)s_\zeta(t) - a(t)p(t) - s_\zeta(t) \\ = s_\zeta(t) \pmod{p(t)} \end{aligned}$$

여기서 λ 와 ζ 의 곱셈(Multiplication) 연산 $\lambda \cdot \zeta = \xi$ 가 되도록 정의한다. 즉 $(a_0, a_1) \cdot (b_0, b_1) = (c_0, c_1)$ 이다. 유익승은 [3]에서 NFD의 해들이 위의 곱셈 연산에 대하여 군을 이룸을 증명하였다.

III. 연구 결과

들어가기에 앞서 본 연구에서 자주 사용되는 정리를 밝힌다.

Theorem 1. 임의의 NFD $x^2 + axy + by^2 = \pm 1$ 의 판별식 $D = a^2 - 4b$ 에 대하여 다음 합동식이 성립한다.

$$D \equiv 0, 1 \pmod{4}$$

Proof. 임의의 정수 a 에 대하여 $a^2 \equiv 0, 1 \pmod{4}$ 이고, $4b$ 는 4의 배수이므로 위 정리가 성립함을 간단하게 알 수 있다.

이 정리를 이용하여 생성원(generator)의 일반화를 $D = 4k$ 꼴과 $D = 4k + 1$ 꼴로 나누어 진행할 수 있다.

1. 그래프가 타원의 형태를 가지는 경우($D = a^2 - 4b < 0$)

판별식 D 가 0보다 작을 때

$$\begin{aligned} x^2 + axy + by^2 &= -1 \\ \Leftrightarrow x^2 + axy + \frac{a^2}{4}y^2 &= \left(\frac{a^2}{4} - b\right)y^2 - 1 \\ \Leftrightarrow \left(x + \frac{a}{2}y\right)^2 &= \frac{D}{4}y^2 - 1 < 0 \end{aligned}$$

이므로 그 실근이 존재하지 않는다. 따라서 $x^2 + axy + by^2 = -1$ 인 경우만 생각하여도 무방하다.

가. D의 값에 따른 정수해의 개수

판별식의 값이 음의 부호를 가질 때 a 가 짝수일 때와 홀수일 때로 경우를 나누어 자명한 해 이외의 해를 갖기 위한 조건을 파악하고 그 해를 a 에 관한 식으로 나타낼 수 있으며, 이와 함께 다음 정리가 성립함이 증명된다.

Theorem 2. $a^2 - 4b < 0$ 이면 NFD $x^2 + axy + by^2 = \pm 1$ 의 해의 개수는 2개, 4개, 6개 중 하나로 결정된다.

1) $a = 2m (m \in \mathbb{Z})$

$$\begin{aligned} \left(x + \frac{a}{2}y\right)^2 - x^2 + axy + \frac{a^2}{4}y^2 &< x^2 + axy + by^2 \\ &= 1 \\ \left(x + \frac{a}{2}y\right) &\in \mathbb{Z} \end{aligned}$$

에서 $x - \frac{a}{2}y = 0$ 이고, $x = -\frac{a}{2}y$ 을 $x^2 + axy + by^2 = 1$ 에 대입하면

$$\begin{aligned} \left(-\frac{a}{2}y\right)^2 + a\left(-\frac{a}{2}y\right)y + by^2 - \left(b - \frac{a^2}{4}\right)y^2 &= -\frac{D}{4}y^2 \\ &= 1 \\ y^2 &= \frac{4}{D} \\ \therefore D = 4, y^2 &= 1 \end{aligned}$$

즉 $x^2 + axy + by^2 = \pm 1$ 이 비자명근을 가질 필요충분조건은 $D = -4$ 이고, 이때의 해는

$$(\pm 1, 0), \left(-\frac{a}{2}, 1\right), \left(\frac{a}{2}, -1\right)$$

로 총 4개이다. 또한 이 4개의 점이 만드는 사각형의 넓이는 a 와 관계없이 $2 \times \frac{1}{2} \times 2 \times 1 = 2$ 이다.

반면 $D \neq -4$ 인 경우 $x^2 + axy + by^2 = 1$ 는 2개의 자명한 해 $(\pm 1, 0)$ 만을 해로 갖는다.

2) $a = 2m + 1 (m \in \mathbb{Z})$

$$\begin{aligned} \left(x + \frac{a}{2}y\right)^2 - x^2 + axy + \frac{a^2}{4}y^2 &< x^2 + axy + by^2 \\ &= 1 \end{aligned}$$

에서 $x + \frac{a}{2}y = 0, \pm \frac{1}{2} (\because 2x + ay \in \mathbb{Z})$ 이다. 그런데 $x + \frac{a}{2}y = 0$ 이면 $\frac{a}{2}y = -x \in \mathbb{Z}, a = 2m + 1$ 이므로 $y = 2l (l \in \mathbb{Z})$ 이고, 이때

$$\begin{aligned} \left(-\frac{a}{2}y\right)^2 + a\left(-\frac{a}{2}y\right)y + by^2 &= -\frac{D}{4}y^2 \\ &= -Dl^2 \\ &= 1 \\ \therefore -D = 4b - a^2 &= 1 \end{aligned}$$

이는 Theorem 1.에 의해 모순이다.

따라서 $x = \frac{a}{2}y \pm \frac{1}{2}$ 이고, $x = \frac{-ay \pm 1}{2}$ 을 $x^2 + axy + by^2 = 1$ 에 대입하여 정리하면

$$\left(\frac{-ay \pm 1}{2}\right)^2 + a\left(\frac{-ay \pm 1}{2}\right)y + by^2 - \left(b - \frac{a^2}{4}\right)y^2 + \frac{1}{4} = 1$$

$$\left(b - \frac{a^2}{4}\right)y^2 = \frac{D}{4}y^2 - \frac{3}{4}$$

$$y^2 = \frac{3}{-D}$$

$$\therefore D = -3, y^2 = 1$$

따라서 $x^2 + axy + by^2 = \pm 1$ 이 비자명근을 가질 필요충분조건은 $D = -3$ 이고, 이때 주어진 NFD가 가지는 근은 $(\pm 1, 0), \left(-\frac{a \pm 1}{2}, 1\right), \left(\frac{a \pm 1}{2}, -1\right)$ 으로 총 6개이다. 또한 이 6개의 점이 만드는 육각형의 넓이는 a 값과 관계없이 $2 \times \frac{1}{2} \times (1 + 2) \times 1 = 3$ 이다.

$D \neq -3$ 인 경우 $x^2 + axy + by^2 = 1$ 는 2개의 자명한 해 $(\pm 1, 0)$ 만을 해로 갖는다.

나. D 와 타원의 넓이의 관계

$D < 0$ 일 때 $x^2 + axy + by^2 = 1$ 에서

$$\frac{dy}{dx} = -\frac{2x + ay}{ax + 2by} = 0 \Leftrightarrow x = -\frac{a}{2}y$$

이를 NFD에 다시 대입하면

$$\left(-\frac{a}{2}y\right)^2 + a\left(-\frac{a}{2}y\right)y + by^2 - \left(b - \frac{a^2}{4}\right)y^2 - \frac{D}{4}y^2 = 1$$

$$\therefore y = \pm \frac{2}{\sqrt{-D}}, -\frac{2}{\sqrt{-D}} < y < \frac{2}{\sqrt{-D}}$$

반면 $-\frac{2}{\sqrt{-D}} < a < \frac{2}{\sqrt{-D}}$ 를 만족하는 실수 a 에 대하여 직선 $y = a$ 와 NFD가 만나는 두 교점 사이의 거리는 $\sqrt{Dx^2 + 4}$ 이다. 따라서 타원의 넓이 S 는 다음과 같은 적분과정을 거쳐 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} S &= \int_{-\frac{2}{\sqrt{-D}}}^{\frac{2}{\sqrt{-D}}} \sqrt{Dy^2 + 4} dy \\ &= 4 \int_c^{\frac{2}{\sqrt{-D}}} \sqrt{1 - \frac{-D}{4}y^2} dy \\ &= 4 \int_c^{\frac{\pi}{2}} \left(\sqrt{\sin^2 t} \cdot \frac{2}{\sqrt{-D}} \cdot \sin t \right) dt \\ &= \frac{8}{\sqrt{-D}} \int_c^{\frac{\pi}{2}} \sin^2 t dt \\ &= \frac{8}{\sqrt{-D}} \cdot \frac{\pi}{4} \\ &= \frac{2\pi}{\sqrt{-D}} \end{aligned}$$

이차형식 $x^2 + axy + by^2 = 1$ 형태의 타원의 넓이가 이 타원의 판별식에 의해 결정되는 점이 매우 흥미롭다.

다. 정수해의 순환구조

그래프가 타원의 형태를 가지는 경우 정수해의 개수에 따라 서로 다른 순환구조를 갖는다.

1) $(D-3)(D+4) \neq 0$

이 경우 $(-1, 0)^\alpha$ ($\alpha \in \mathbb{Z}$)로 모든 해를 표현할 수 있다. 해집합은 C_2 구조의 순환군을 이루게 된다.

2) $D = -4$

이 경우 NFD의 해들은 $(-\frac{a}{2}, 1)$ 또는 $(\frac{a}{2}, -1)$ 을 거듭제곱 한 점, 즉 $(-\frac{a}{2}, 1)^{\alpha}$ or $(\frac{a}{2}, -1)^{\alpha}$ ($\alpha \in \mathbb{Z}$)로 표현이 가능하며, 그 결과 다음 <Table 1>과 같이 해집합이 C_4 구조의 순환군임을 알 수 있다.

<Table 1> Exponentiation of generators when $D = -4$

	$a = 2$	$a = 3$	$a = 4$	$a = 5$...
$(\frac{a}{2}, -1)^\alpha$	$(-1, 0)$	$(-\frac{a}{2}, 1)$	$(1, 0)$	$(\frac{a}{2}, -1)$...
$(-\frac{a}{2}, 1)^\alpha$	$(-1, 0)$	$(\frac{a}{2}, -1)$	$(1, 0)$	$(-\frac{a}{2}, 1)$...

좌표평면 상에 나타내었을 때 $(-\frac{a}{2}, 1)$ 는 거듭제곱을 시행함에 따라 반시계 방향으로 순환하였고, 반대로 $(\frac{a}{2}, -1)$ 을 거듭제곱하였을 때는 시계방향으로 순환하는 형태를 확인하였다. 이는 두 해가 서로 역원 관계이며 모두 생성원이 될 수 있기 때문에 생기는 현상이다.

3) $D = -3$

이 경우 NFD의 해들은 $(-\frac{a-1}{2}, 1)$ 또는 $(\frac{a-1}{2}, -1)$ 을 거듭제곱 한 점, 즉 $(\frac{a-1}{2}, -1)^{\alpha}$ 또는 $(-\frac{a-1}{2}, 1)^{\alpha}$ ($\alpha \in \mathbb{Z}$)로 표현이 가능하며, 그 결과 다음 <Table 2>와 같이 해집합의 원소가 C_6 구조의 순환군을 구성함을 알 수 있다.

<Table 2> Exponentiation of generators when $D = -3$

	$a = 2$	$a = 3$	$a = 4$	$a = 5$	$a = 6$	$a = 7$...
$(\frac{a+1}{2}, -1)^\alpha$	$(\frac{a-1}{2}, -1)$	$(-1, 0)$	$(-\frac{a+1}{2}, 1)$	$(-\frac{a-1}{2}, 1)$	$(1, 0)$	$(\frac{a+1}{2}, -1)$...
$(-\frac{a-1}{2}, 1)^\alpha$	$(-\frac{a+1}{2}, 1)$	$(-1, 0)$	$(\frac{a-1}{2}, -1)$	$(\frac{a+1}{2}, -1)$	$(1, 0)$	$(-\frac{a-1}{2}, 1)$...

좌표평면 상에서 $(-\frac{a-1}{2}, 1)$ 의 거듭제곱은 반시계방향의, $(\frac{a-1}{2}, -1)$ 의 거듭제곱은 시계방향의 순환을 이끌어냄을 확인하였다. 이 경우에도 앞에서와 같이 이는 두 해가 서로 역원 관계이며 모두 생성원이 될 수 있기 때문에 생기는 현상이다.

2. 그래프가 켈레쌍곡선의 형태를 가지는 경우 ($D = a^2 - 4b > 0$)

D 가 양수일 때 그래프는 켈레쌍곡선의 형태를 가지는데, a 와 D 를 변수로 하고 $b = \frac{a^2 - D}{4}$ 경우를 나누어 일반적

인 생성원을 구할 수 있다. 이때 모든 정수해를 $(-1, 0)^{\pm} \cdot (\text{generator})^{\pm}$ ($\alpha = 0$ or $1, \beta \in \mathbb{Z}$) 꼴로 표현할 수 있어 해집합의 원소는 $\mathbb{C}_2 \times \mathbb{C}_2$ 구조의 무한순환군을 구성한다. 생성원을 구하기 위해 쌍곡선의 성질을 연구하던 중 몇 가지 주목할 만한 특징을 발견했다.

Theorem 3. NFD $x^2 + axy + by^2 = \pm 1$ 에서 판별식이 $D = a^2 - 4b - n^2$ ($n \in \mathbb{N}$) 꼴로 표현 가능할 때, NFD의 비자명근은 없거나 2개만 존재한다.

Proof. $D = a^2 - 4b - n^2$ 에서 $b = \left(\frac{a+n}{2}\right)\left(\frac{a-n}{2}\right)$, $a = n$ ($n \equiv 2$) 이므로 $\frac{a-n}{2}, \frac{a+n}{2} \in \mathbb{Z}$. 이때

$$\begin{aligned} x^2 + axy + by^2 = x^2 + axy + \left(\frac{a+n}{2}\right)\left(\frac{a-n}{2}\right)y^2 \\ = \left(x + \frac{a+n}{2}y\right)\left(x - \frac{a-n}{2}y\right) \\ = \pm 1 \end{aligned}$$

$$\therefore \begin{cases} x + \frac{a+n}{2}y = \pm 1 & \dots (1) \\ x - \frac{a-n}{2}y = \pm 1 & \dots (2) \end{cases}$$

(1) - (2)을 하면 $y = 0, \pm \frac{2}{n}$

이때 $y = 0$ 이면 $x = \pm 1$ 이므로 $(n-1)(n-2) = 0$ 이면 NFD $x^2 + axy + by^2 = \pm 1$ 의 비자명근이 2개 존재하고, $(n-1)(n-2) \neq 0$ 이면 비자명근이 존재하지 않는다.

Theorem 4. $p(t) = t^2 - at + b$ 에서 정수 m, n 이 존재하여 $m^2 p(t) + n$ 이 정수 범위 내에서 $(mt + \alpha)(mt + \beta)$ 로 인수분해될 때 다음 식이 성립한다.

$$D(\alpha, m) - \alpha^2 = am\alpha + bm^2 = D(\beta, m) - \beta^2 = a\beta m + bm^2 = -n$$

Proof. 주어진 조건에 의해

$$\begin{aligned} m^2 p(t) + n &= m^2 t^2 - am^2 t + bm^2 + n \\ &= (mt + \alpha)(mt + \beta) \\ &= m^2 t^2 + m(\alpha + \beta)t + \alpha\beta \end{aligned}$$

$$\therefore \begin{cases} \alpha + \beta = -am \\ \alpha\beta - bm^2 = n \end{cases}$$

$$\begin{aligned} \therefore D(\alpha, m) - \alpha^2 &= am\alpha + bm^2 \\ &= \alpha^2 - \alpha(\alpha + \beta) + \alpha\beta - n \\ &= -n \end{aligned}$$

마찬가지로

$$D(\beta, m) = \beta^2 + a\beta m + bm^2 = -n$$

이 정리에 의해 $D(x, y) = \pm 1$ 의 생성원을 찾기 위해서는 $m^2 p(t) \pm 1$ 이 인수분해가 되도록 하는 최소 자연수 m 의 값을 찾아야 함을 알 수 있다.

가. 특수한 경우의 생성원

Theorem 1.에 의해 판별식을 각각 $4k, 3k-1, 3k-5$ 꼴의 정수로 나누어 연구를 진행하였다.

1) $D=4k$ 꼴일 때

$$\begin{aligned}
 b &= \frac{1}{4}(a^2 - 4k) \\
 p(t) &= t^2 - at + b \\
 &= t^2 - at + \frac{1}{4}(a^2 - 4k) \\
 p(t) + 1 &= t^2 - at + \frac{1}{4}(a^2 - 4k + 4) \\
 &= \left\{ t - \left(\frac{a}{2} + \sqrt{k-1} \right) \right\} \left\{ t - \left(\frac{a}{2} - \sqrt{k-1} \right) \right\}
 \end{aligned}$$

∴ generator : $\left(-\frac{a}{2} \pm \sqrt{k-1}, 1 \right)$

(단, $\sqrt{k-1} \in \mathbb{N}$)

2) $D=8k+1$ 꼴일 때

$$\begin{aligned}
 b &= \frac{1}{4}(a^2 - 8k - 1) \\
 p(t) &= t^2 - at - b \\
 &= t^2 - at - \frac{1}{4}(a^2 - 8k - 1) \\
 4n^2 p(t) - 1 &= 4n^2 t^2 - 4n^2 at + n^2 \left(a^2 - 8k - 1 + \frac{1}{n^2} \right) \\
 &= \left\{ 2nt - na + \sqrt{(8k+1)n^2 - 1} \right\} \left\{ 2nt - na - \sqrt{(8k+1)n^2 - 1} \right\}
 \end{aligned}$$

∴ generator : $\left(\pm \sqrt{(8k+1)n^2 - 1} - na, 2n \right)$

(단, $n, \sqrt{(8k+1)n^2 - 1} \in \mathbb{N}$, n 이 최소인 경우 생성원이 됨.)

3) $D=8k+5$ 꼴일 때

$$\begin{aligned}
 b &= \frac{1}{4}(a^2 - 8k - 5) \\
 p(t) &= t^2 - at + b \\
 &= t^2 - at + \frac{1}{4}(a^2 - 8k - 5) \\
 p(t) + 1 &= t^2 - at + \frac{1}{4}(a^2 - 8k - 1) \\
 &= \left\{ t - \frac{a + \sqrt{a^2 - (a^2 - 8k - 1)}}{2} \right\} \left\{ t - \frac{a - \sqrt{a^2 - (a^2 - 8k - 1)}}{2} \right\}
 \end{aligned}$$

∴ generator : $\left(-\frac{a \pm \sqrt{8k+1}}{2}, 1 \right)$

(단, $\sqrt{8k+1} \in \mathbb{N}$)

나. 정수해 사이의 점화식

제곱수가 아닌 자연수 판별식 D 의 값이 정해지면 그 값을 만족하는 $p(t)$ 가 무수히 많이 존재하고, 각각의 $p(t)$ 에 대해

서도 근 (α, β) 가 무수히 많이 존재한다. 흥미로운 점은 이때의 $y(t)$ 중 NFD의 해들 사이에서 판별식의 값에 따라 결정되는 점화식의 특성방정식과 일치하는 경우가 존재한다는 것이다. 대수적인 증명에 앞서 몇 가지 예시를 들어 보자. 아래의 표는 D 가 5, 8인 다항식과 이들 다항식의 노름 형식 디오판틴 방정식 그리고 이들 각각의 생성원들을 6제곱까지 계산한 것이다.

<Table 3> Generators and their exponentiations when $D = 5$ [4]

$y(t)$	NFD	#1	#2	#3	#4	#5	#6	...
$t^2 - t - 1$	$x^2 + xy - y^2 = \pm 1$	(0, 1)	(1, 1)	(1, 2)	(2, 3)	(3, 5)	(5, 8)	...
$t^2 - 3t + 1$	$x^2 + 3xy + y^2 = \pm 1$	(-1, 1)	(0, 1)	(-1, 2)	(-1, 3)	(-2, 5)	(-3, 8)	...
$t^2 - 5t + 5$	$x^2 + 5xy + 5y^2 = \pm 1$	(-2, 1)	(-1, 1)	(-3, 2)	(-4, 3)	(-7, 5)	(-11, 8)	...
$t^2 - 6t + 7$	$x^2 + 7xy + 11y^2 = \pm 1$	(-3, 1)	(-2, 1)	(-5, 2)	(-7, 3)	(-12, 5)	(-19, 8)	...
$t^2 - 9t + 19$	$x^2 + 9xy + 19y^2 = \pm 1$	(-4, 1)	(-3, 1)	(-7, 2)	(-10, 3)	(-17, 5)	(-27, 8)	...

<Table 4> Generators and their exponentiations when $D = 8$

$y(t)$	NFD	#1	#2	#3	#4	#5	#6	...
$t^2 - 2$	$x^2 - 2y^2 = \pm 1$	(1, 1)	(3, 2)	(7, 5)	(17, 12)	(41, 29)	(99, 70)	...
$t^2 - 2t - 1$	$x^2 + 2xy - y^2 = \pm 1$	(0, 1)	(1, 2)	(2, 5)	(5, 12)	(12, 29)	(29, 70)	...
$t^2 - 4t + 2$	$x^2 + 4xy + 2y^2 = \pm 1$	(-1, 1)	(-1, 2)	(-3, 5)	(-7, 12)	(-17, 29)	(-41, 70)	...
$t^2 - 6t + 7$	$x^2 + 6xy + 7y^2 = \pm 1$	(-2, 1)	(-3, 2)	(-8, 5)	(-19, 12)	(-46, 29)	(-111, 70)	...
$t^2 - 8t + 14$	$x^2 + 8xy + 14y^2 = \pm 1$	(-3, 1)	(-5, 2)	(-13, 5)	(-31, 12)	(-75, 29)	(-181, 70)	...

표에서 흥미로운 사실은 같은 열에서는 근의 y 좌표가 모두 일치하고, x 좌표는 공차를 ($-y$ 좌표)로 하는 등차수열을 이룬다는 점과 같은 행에서 이웃한 세 쌍의 좌표 사이의 관계를 찾을 수 있다는 것이다. 즉 판별식이 같은 경우는 한 NFD 방정식만 해결하면 나머지 방정식들의 정수해를 모두 구할 수 있다는 것을 의미한다.

위의 표들을 바탕으로 아래와 같은 네트 $\gamma_{(a,b)}$ 을 정의할 수 있다.

Definition 5. γ -네트 (γ -Net)

NFD $x^2 + axy + by^2 = \pm 1$ 에서 $D = a^2 - 4b$ 이고 $a = \begin{cases} 2m & (D \equiv 0 \pmod{4}) \\ 2m+1 & (D \equiv 1 \pmod{4}) \end{cases}$ 라 할 때, NFD의 생성원을 Γ_m^n 이라 할 때

$$G_m^n = \gamma_{(a,b)}$$

으로 정의한다. Γ_m^n 에서 m 이 임의의 정수이거나 알 수 없는 경우 간단히 G 로 표현한다.

위 정의에 따라 $x^2 - 5xy + 5y^2 - \pm 1$ 의 해 $(-7, 5)$ 는 $\gamma_{(2,5)}$ 로, $x^2 - 2xy - y^2 - \pm 1$ 의 해 $(29, 70)$ 는 $\gamma_{(1,6)}$ 으로 표현할 수 있다. 이제 위에서 얻은 γ -네트의 성질에 대한 증명을 보이자.

Theorem 5. (α, β) 가 $x^2 + axy - \frac{a^2 - D}{4}y^2 = \pm 1$ 의 근이면 $(\alpha - \beta, \beta)$ 는

$$x^2 - (a+2)xy + \frac{(a+2)^2 - D}{4}y^2 = \pm 1$$

의 근이다.

Proof. 조건에 의해 $\alpha^2 + a\alpha\beta + \frac{a^2 - D}{4}\beta^2 = \pm 1$

이때

$$\begin{aligned}
 (\alpha - \beta)^2 + (\alpha + 2\beta)(\alpha - \beta)\beta &= \frac{(\alpha + 2\beta)^2 - D}{4} \beta^2 = \alpha^2 - 2\alpha\beta + \beta^2 + \alpha\alpha\beta + 2\alpha\beta - \alpha\beta^2 - 2\beta^2 + \frac{\alpha^2 - D}{4} \beta^2 + \alpha\beta^2 + \beta^2 \\
 &= \alpha^2 + \alpha\alpha\beta + \frac{\alpha^2 - D}{4} \beta^2 \\
 &\pm 1
 \end{aligned}$$

Theorem 6. 정수 λ_1, λ_2 가 존재하여 판별식의 값이 고정된 임의의 NFD에서 $G^2 = \lambda_1 G + \lambda_2$ 가 성립하면 다음 식이 성립한다.

$$\forall n \in \mathbb{Z} \quad G^{n+2} = \lambda_1 G^{n+1} - \lambda_2 G^n$$

Proof. $G^2 = \lambda_1 G - \lambda_2$ 에서 양변에 G^n 을 곱함으로 간단하게 증명할 수 있다.

Theorem 5, 6.은 γ -네트에서 임의의 정수 m, n 에 대하여 다음 식이 성립함을 보여준다.

$$\begin{aligned}
 \exists \lambda_1, \lambda_2 \in \mathbb{Z} \text{ s.t. } \gamma_{(m, n-2)} &= \lambda_1 \gamma_{(m, n-1)} + \lambda_2 \gamma_{(m, n)} \\
 \gamma_{(m, n)} - (\alpha, \beta) &\leftrightarrow \gamma_{(m+1, n)} - (\alpha - \beta, \beta)
 \end{aligned}$$

실제로 <Table 3>에서는 $\gamma_{(m, n-1)} = \gamma_{(m, n)} - \gamma_{(m, n-2)}$ 이, <Table 4>에서는 $\gamma_{(m, n+1)} = 2\gamma_{(m, n)} - \gamma_{(m, n-1)}$ 이 성립함을 알 수 있다. 이제 판별식의 형태에 따라 어떤 점화식을 갖는가를 경우를 나누어 살펴보겠다.

1) $D = 4k$ 꼴일 때 (단, $a = 2m$)

가) NFD $x^2 + axy + by^2 = 1$ 을 만족하는 정수해가 존재하는 경우

$$\begin{aligned}
 b &= \frac{a^2 - D}{4} = \frac{4m^2 - 4k}{4} = m^2 - k \\
 p(t) + 1 - t^2 - 2mt - m^2 - k + 1 \\
 &= t^2 - 2mt + (m - p)(m + p) \\
 &= (t - (m - p))(t + (m + p))
 \end{aligned}$$

(단, $k = p^2 + 1$)

Theorem 4.에 의해 $(p - m, 1)$ 을 생성원으로 하면

$$\begin{aligned}
 (p - m + t)^2 &\equiv p^2 - 2pm + k + 2pt \pmod{p(t)} \\
 &= p^2 - 2pm - p^2 - 1 + 2pt \\
 &= 2p^2 - 2pm - 1 + 2pt
 \end{aligned}$$

$G_m^c = (1, 0)$ 과 $G_m = (p - m, 1)$, $G_m^2 = (2p(p - m) + 1, 2p)$ 에서 **Theorem 6.**에 의해 $G^{n+1} = 2pG^n - G^{n-1}$

또한, 이 수열의 특성다항식은 $t^2 - 2p - 1$ 로, NFD의 $p(t)$ 와 같기 위해서는 $a = 2p, b = -1$ 이어야 한다.

이때 $p = \pm \sqrt{m^2 + 1}$ 이기 때문에 $a = \pm 2\sqrt{m^2 + 1}$ 이다.

나) NFD $x^2 + axy + by^2 = -1$ 을 만족하는 정수해가 존재하지 않는 경우

$$\begin{aligned}
 p(t) - 1 - t^2 - 2mt + m^2 - k - 1 \\
 &= t^2 - 2mt + (m - p)(m + p) \\
 &= (t - (m - p))(t + (m + p))
 \end{aligned}$$

(단, $k = p^2 - 1$)

$$\begin{aligned}
 (p - m + t)^2 &\equiv p^2 - 2pm + k + 2pt \pmod{p(t)} \\
 &= p^2 - 2pm + p^2 - 1 + 2pt \\
 &= 2p^2 - 2pm - 1 + 2pt
 \end{aligned}$$

$G_m = (p-m, 1)$, $G_m^2 = (2p(p-m)-1, 2p)$ 에서

$$G^{n+1} = 2pG^n - G^{n-1}$$

이 수열의 특성다항식은 $t^2 - 2p + 1$ 로, NFD의 $p(t)$ 와 같기 위해서는 $a = 2p$, $b = 1$ 이어야 한다.

이때 $p \pm \sqrt{m^2 - 1}$ 이기 때문에 $a \pm 2\sqrt{m^2 - 1}$ 이다.

2) $D = 8k + 1$ 꼴일 때, $G = (\alpha, \beta)$ (단, $\alpha = \sqrt{(8k+1)m^2 - 1}$, $\alpha, \beta = 2m$)

가) $D\alpha^2 - 1 = m^2$ ($m \in \mathbb{Z}$)의 정수해 (α, m) 이 존재하는 경우
 (α, β) 의 수반다항식 $\alpha + \beta t$ 에 대하여

$$\begin{aligned} (\alpha + \beta t)^2 &= \alpha^2 + 2\alpha\beta t + \beta^2 t^2 \\ &= \alpha^2 - b\beta^2 + (2\alpha\beta + a\beta^2)t \pmod{p(t)} \end{aligned}$$

$G = (\alpha, \beta)$, $G^2 = (\alpha^2 - b\beta^2, 2\alpha\beta + a\beta^2)$ 에서

$$\begin{aligned} \alpha^2 - b\beta^2 &= -(\alpha^2 + a\alpha\beta + b\beta^2) - \alpha(2\alpha + a\beta) \\ &= -\alpha(2\alpha + a\beta) + 1 \quad (\because \alpha^2 + a\alpha\beta + b\beta^2 = 1) \end{aligned}$$

마찬가지로 $2\alpha\beta + a\beta^2 = \beta(2\alpha + a\beta) + 0$ 이므로

$$G^{n+1} = (2\alpha + a\beta)G^n - G^{n-1}$$

또한, 이 수열의 특성다항식은 $t^2 - (2\alpha + a\beta)t - 1$ 로, NFD의 $p(t)$ 와 같을 조건은 $a = 2\alpha + a\beta$, $b = -1$ 이다.

나) $D\alpha^2 - 1 = m^2$ ($m \in \mathbb{Z}$)의 정수해 (α, m) 이 존재하지 않는 경우

$G = (\alpha, \beta)$, $G^2 = (\alpha^2 - b\beta^2, 2\alpha\beta + a\beta^2)$ 에 대하여

$$\begin{aligned} \alpha^2 - b\beta^2 &= -(\alpha^2 - a\alpha\beta + b\beta^2) - \alpha(2\alpha + a\beta) \\ &= -\alpha(2\alpha + a\beta) - 1 \quad (\because \alpha^2 - a\alpha\beta + b\beta^2 = 1) \end{aligned}$$

$2\alpha\beta + a\beta^2 = \beta(2\alpha + a\beta) - 0$ 이므로

$$G^{n+1} = (2\alpha - a\beta)G^n - G^{n-1}$$

이 수열의 특성다항식은 $t^2 - (2\alpha - a\beta)t - 1$ 로, NFD의 $p(t)$ 와 같을 조건은 $a = 2\alpha + a\beta$, $b = -1$ 이다.

3) $D = 8k + 5$ 꼴일 때 (단, $a = 2m + 1$)

가) NFD $x^2 + axy - by^2 = -1$ 을 만족하는 정수해가 존재하는 경우

$$b = m^2 + m - 2k - 1$$

$$p(t) + 1 = t^2 - (2m + 1)t + (m + p + 1) \left\{ \frac{m(m+1)}{2} - p \right\}$$

$G_m = (p-m, 1)$, $G_m^2 = ((2p+1)(p-m)+1, 2p+1)$ 에서

$$G^{n+1} = (2p+1)G^n + G^{n-1}$$

이 수열의 특성다항식은 $t^2 - (2p+1)t - 1$ 로, NFD의 $p(t)$ 와 같을 조건은 $a = 2p+1$, $b = -1$ 이다.

나) NFD $x^2 + axy + by^2 = 1$ 을 만족하는 정수해가 존재하지 않는 경우

$$b = m^2 + m - 2k + 1$$

$$p(t) - 1 = t^2 - (2m + 1)t + (m + p - 1) \left\{ \frac{m(m-1)}{2} - p \right\}$$

$G_m = (p-m, 1)$, $G_m^2 = ((2p+1)(p-m)+1, 2p+1)$ 에서

$$G^{n+1} = (2p+1)G^n + G^{n-1}$$

또한, 이 수열의 특성다항식은 $t^2 - (2p+1)t - 1$ 로, NFD의 $p(t)$ 와 같을 조건은 $a = 2p+1$, $b = -1$ 이다.

연구 결과 나. 에서 얻은 생성원은 가. 에서 인수분해를 통해 구한 것과 일치함을 쉽게 알 수 있다.

Remark. 판별식의 값이 0인 경우 그래프는 평행한 두 직선의 형태를 가지나, ‘기약다항식’이라는 노름 형식의 정의에서의 전제 조건에 어긋난다. 그러나 형식 불역의 원리에 의해 본 연구에서 진행한 바와 같이 곱셈 연산을 시행할 수 있고, 이때 모든 정수해는 $(-1, 0)^n \cdot \left(1, \frac{\alpha}{2}, 1\right)^i$ ($\alpha = 0$ or $1, \beta \in \mathbb{Z}$)으로 표현할 수 있으며, 해집합은 $\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}$ 구조의 순환군 형태를 가진다.

IV. 결론 및 제언

우리는 특수한 형식의 이차 디오판틴 방정식을 조건에 따라 구분하여 연구를 진행하였다. 방정식의 그래프가 타원의 형태일 때 방정식의 계수에 따른 정수해의 형태를 제시하고 그 개수가 2개, 4개, 6개 중 하나로 나타남을 보였다. 또한 해들이 이루는 다각형이나 타원의 넓이가 이차곡선의 판별식의 값에 따라 결정됨을 찾아내었다.

반면 그래프가 켈레쌍곡선일 때는 무수히 많은 해의 생성원을 구하는 방법을 판별식을 제시하고, 고정된 판별식의 값에서 나타나는 정수해 사이의 특별한 관계를 발견하고 η -네트를 새로이 정의하였다. 더불어 주어진 방정식에서 생성원의 이웃한 세 정수에 대한 거듭제곱이 갖는 관계를 밝혔다.

본 연구에서는 $D = 4k, 8k + 5$ 일 때 $n! \pm 1$ 이 인수분해가 되는 경우만 살펴보았으나, $D = 24$ 인 경우에서 알 수 있듯이 $n!$ 에서 정수배를 한 후 1을 더하거나 뺀 때 인수분해가 가능한 경우가 존재한다. 이에 우리는 판별식의 값이 주어진 경우 어떤 정수를 곱한 후 1을 더하거나 뺀 때 인수분해가 되는 가를 보이고, 그 때 이웃한 세 항의 점화식에 대한 연구를 진행할 계획이다.

또한 타원에 경우는 해석적 연구를 수행하였는바 우리는 쌍곡선의 경우에도 NFD 방정식의 정수해에 어떠한 해석적 성질이 있는 가를 연구해 볼 것이다.

V. 참고문헌

- [1] Jin Hong, Kyeonghoon Jeong, Jae-hoon Kwon(1997), Integral Points on Hyperbolas, J. Korean Math. Soc, 34
- [2] Thomas Koshy(2001), Fibonacci and Lucas Numbers with Applications, Wiley, New York
- [3] 유익승, 김정수, 김연호, 김형균(2007), 디오판틴 방정식의 해들에 대한 연산 및 성질 연구, East asia math journal, 1
- [4] Clark Kimberling(1990), Fibonacci Hyperbolas, The Fibonacci Quarterly, 28 , 22-27

I 연구진 I

장지환 (Jihwan Jang, 전북과학고등학교, jbs28pi2bangool@gmail.com), 주저자

김서용 (Seoyong Kim, 전북과학고등학교, neymaryoong@naver.com), 교신저자

송유찬 (Yuchan Song, 전북과학고등학교, goodboy0203@naver.com), 공동저자

김승윤 (Seungyun Kim, 전북과학고등학교, aperseung@naver.com), 공동저자

김민서 (Minseo Kim, 전북과학고등학교, gyals0807@naver.com), 공동저자

지도교사 : 유익승 (Ikseung Lyou, 전북과학고등학교, infgrp@hanmail.net)

동서양 악기 울림통 구조 적용을 통한 스마트폰 스피커 음질 최적화 울림통 구조 개발에 관한 연구

이해민 · 이기욱 · 송재민 · 송준하 · 김태현 - 인천진산과학고등학교

Developing Sound Box's Structure of Smartphone's Speaker Optimized to Sound Quality Through Application of Eastern and Western Instruments' Sound Box's Structure

Haemin Lee · Giwook Rhee · Jaemin Song · Joonha Song · Taehyun Kim - Incheon Jinsan Science High School

국문초록

본 연구에서는 스마트폰에서 나오는 소리의 음질을 개선하기 위해 동서양 악기의 울림통 구조, 울림통의 구조적 변인에 따른 음질 변화를 연구하고 이를 기반으로 울림통 기능을 수행하는 음질 향상 스마트폰 케이스를 구축·제작하는 것에 대해 연구하였다. 실험을 통해 선정된 동서양 악기 울림통의 구조적 특징을 분석하고, 울림통 구조들에 따른 음질의 변화를 분석하여 스마트폰에서 나오는 소리의 범위에 해당하는 음역에서 가장 효과적이라고 판단되는 특정 악기 울림통의 구조를 본며 스마트폰 케이스를 제작하였다. 본 연구팀이 선정한 음질 판단 기준 중에서 전체 dBA 값의 평균, 각도별 dBA 값의 표준편차, THD 값과 IMD 값 등에서 음질을 증대시킬 수 있는 울림통의 구조적인 특징을 모색하였고, 이를 울림통 스마트폰 케이스에 접목시켜 제작했다. 결과적으로 본 연구팀이 제작한 케이스를 통해 기존보다 스마트폰 스피커의 음질이 향상되는 효과를 확인하였다.

중심어 : 울림통, 스마트폰 케이스, 음질 향상, 동서양 악기, RMAA

ABSTRACT

Our research team, EVA (Everting Vibration Ability), wanted to study the structure of the acoustic instruments of Western and Eastern instruments and build sound quality-enhancing smartphone cases based on the sound quality function. We analyzes the structural characteristics of the Eastern and Western musical instruments, selected through the experiment and produced a smartphone case based on the structure of the particular instrument, which is deemed most effective in the vocal range corresponding to the range of sounds that human can hear. Among the sound quality judgment criteria selected by us, we sought the structural characteristics of the vibration box that can increase sound quality in terms of average dBA value by frequency, standard deviation of dBA value by angle, THD and IMD value, etc. and it was manufactured by applying this technology to a Smartphone case. As a result, we found that the sound quality of the smartphone speakers is better than before don't use our case.

Key words: Vibration Box, Smartphone Case, Enhance Sound Quality, Eastern and Western Instruments, RMAA

I. 서론

1. 연구 동기

컴퓨터가 처음 개발되었을 때, 하나의 혁신이 시작되었다. 1946년 최초의 컴퓨터인 애니악은 당시 최고의 계산실력을 자랑했다. 이것이 1900년대에 발명된 혁신적 기계라면, 2000년대에 발명된 혁신적인 기계로 단연컨대 스마트폰을 꼽을 것이다. 사실 스마트폰이 지닌 기능들은 새로이 만들어진 것은 아니다. 스마트폰은 기존에 존재하던 기능들을 한 손에 들어오는 작은 기기로 함축해둔 것이다. 이를테면, 시계로부터 시작해서, 알람, 게임, 날씨 정보나 인터넷 기능, 음악 듣기 기능까지 스마트폰이 등장하기 전부터 이 기능들은 사람이 모두 이용할 수 있었지만, 스마트폰은 이런 편리한 기능들을 통합시켜 이용하기 쉽게 만들었다는 점에서 차별화가 된다. 최초의 스마트폰은 1992년 IBM이 개발한 '사이먼(Simon)'으로 1993년 일반 대중에게 공개되었으며, 현재까지도 스마트폰은 성장을 거듭하며 기기의 성능이 향상되고 있다. 2018년 기준으로 우리나라의 스마트폰 보급률이 91%가량이다. 보급률이 약 90%일 때 0~5세, 80세 이상을 제외하고 대부분이 스마트폰을 가

지고 있다는 점을 의미할 때, 91%는 대단한 수치인 것을 알 수 있다[1]. 이렇듯 발전을 거듭하고, 엄청난 대중화가 진행되는 와중에도 스마트폰은 그 자체가 가진 기기적 특성으로 인해 갖는 성능의 한계가 존재해왔다. 스마트폰은 기존에 존재하던 각종 기기의 융합체로, 다양한 기기의 결합을 통한 편의성 제공에 기반을 둔 채로 발전해 왔다. 편의성 제공에 초점을 둔 나머지, 기존 기기의 기능을 완전히 구현해내지 못하는 경우가 있다. 가장 큰 한계가 생기는 요인은 역시 편의성을 위해 ‘한 손에 들어오는 크기’로 제작하기 때문이다. 본 연구팀은 스마트폰의 크기로 인한 한계 중에서도 음향학적 부분의 한계점에 주목하였다.

스마트폰은 그 자체의 성능뿐 아니라 스마트폰과 연계해 사용할 수 있는 기기들이 존재한다. 대표적인 기기들에는 이어폰이나 헤드셋, 블루투스 스피커, 무선 공유기 등이 있다. 이러한 기기들을 보면 음향에 관련된 장치들이 많다는 것을 알 수 있다. 스마트폰은 크기의 한계로 인해 스마트폰에 아무런 장비사용 없이 음악을 들면 음질이나 음량 등이 다른 음향기보다 성능이 떨어진다는 특징이 있다. 이는 한정된 스마트폰의 크기 속에 충분한 음향기기를 내장시킬 수 없기 때문이다. 따라서 스마트폰으로 양질의 음악을 들을 때면 이어폰이나 헤드셋, 블루투스 스피커 등의 기기를 더 이용해야 한다는 단점이 존재해왔다는 것이다. 이러한 장비의 경우 비용이 많이 들거나, 휴대하기 불편하다는 특징으로 인해 스마트폰으로 음악을 좋은 음질과 적절 음량으로 듣는데 제약이 많았다. 본 연구팀은 이를 극복하고자 실제 악기에 적용되는 악기 구조를 연구해 보면서 스마트폰에 악기 구조를 접목하자는 생각을 했다. 스마트폰은 한정된 크기로 제작이 되므로, 추가로 울림통을 내장하기 위해 고안하였고, 스마트폰 케이스를 이용해보자고 생각하였다. 실험을 통해 스마트폰의 음질에 최적화되어 있다고 판단이 되는 악기 울림통의 구조를 연구하고, 연구 과정에서 악기의 소리, 음질에 관련이 되어있다고 생각되는 악기 울림통의 효율성을 판단하고, 스마트폰에서 출력되는 음악의 음질에 효과가 있다고 생각되는 악기 울림통을 본따 스마트폰 케이스를 제작하는 것을 연구하고자 하였다.

2. 연구 목적

스마트폰의 음향학적 성능 향상을 위해 현대에 사용되는 기기는 사실 성능도 효과도 굉장히 뛰어나다. 전문적인 음향기기의 경우에는 인간이 감지하기 어려울 정도의 주파수 영역까지 정밀히 다룰 수 있다. 본 연구팀이 개발하여 증대하고자 하는 능력은 기기의 효율성이 아니고 ‘실용성’과 ‘경제성’이다. 저렴한 제품이야 구할 수 있지만, 기기의 고장까지 고려해 교체하는 시기까지 따져볼 필요가 있다. 사실 블루투스 스피커 등은 휴대가 불편한 경우가 많고, 고가의 장비 같은 경우에는 기기의 이동이 부담될 수밖에 없다. 이러한 기기들을 이동할 때마다 일일이 장비하고 다니기에는 무리가 있다. 가뜰이나 이용률도 높고 이동할 때마다 휴대하고 다니는 스마트폰의 특성상 스마트폰이 이동할 때마다 음향기기를 별도로 휴대하기에는 문제가 있다고 판단하였다. 따라서 스마트폰에 장착하여 사용하는 양상을 띠고자 하였고, 스마트폰에 장착된 간단한 장비 중 스마트폰 케이스의 형태로 제작하며, 이것의 구조를 동서양의 악기가 지닌 울림통 구조와 융합하여 만들고자 한다. 본 연구팀은 실제 악기에 적용되는 울림통의 구조를 연구해보면서 인간의 가청주파수 영역에서 가장 효율이 높다고 판단되는 울림통을 선별해 내어 적용하였다. 이렇게 선정할 악기는 동양과 서양 각각에서 악기를 선별했는데, 이는 동양과 서양의 음악과 악기, 그리고 악기의 울림통 등의 발전과정과 변천사가 달라 각각의 구조가 지닌 특성이 다르기 때문이다. 음악의 용도와 목적이 동양과 서양에서 차이가 나기 때문에 음악의 변천사 역시 차이가 있었고, 이로 인해 악기의 구조적 특성 역시 차이가 있다고 생각했다. 이렇게 선정한 악기 중 가장 효율이 높다고 판단되는 악기의 울림통을 결정한 후, 그 악기를 토대로 스마트폰 케이스의 형태로 제작하여 음질을 개선할 수 있게 된다면 다른 전문기기와 비교했을 때, 가격을 훨씬 절감시킬 수 있다. 더욱이, 고장의 위험이 없는 것 또한 비용 절감의 일정 부분을 담당한다고 볼 수 있을뿐더러, 기존 기기의 고장위험으로 사용의 불편함 등을 해결할 수 있다.

II. 이론적 배경

본 연구팀이 이끌어낸 여러 가지 실험 결과를 뒷받침하는 대전제가 있다. 각 악기의 울림통은 그 악기의 일반적인 주법을 통해 나오는 악기의 소리에 최적화되어 있다는 것이다.

1. 음질의 측정 기준

동서양의 다양한 악기 중에는 악기에서 생긴 소리가 우리 귀에 전달되기까지 특정 경로를 지나도록 설계되어있는 것이 있다. 특히 관악기나 현악기, 타악기의 경우에는 악기가 만든 소리가 내부에서 일종의 울림을 형성하도록 돕는 울림통이라는 구조를 거쳐 나오게 된다. 악기마다 울림통에 소리가 유입되는 경로나 방향, 울림통에 뚫려있는 구멍의 개수 등은 다양하지만, 악기에서 발생한 소리가 울림통을 지나면서 그것의 램시, 진폭, 주파수 특성 등이 바뀐다는 점은 모두 같다. 다시 말해, 소리가 울림통을 지나면서 변형이 일어난다는 것이다. 소리는 파동의 한 종류이다. 파동은 접촉하지 않더라도 매질을 통해 힘의 전달이 가능하며, 이로 인해 진동된 공기를 우리의 귀가 인지하여 소리를 감지하고 구분할 수 있는 것이다. 소리의 세기, 소리의 높낮이, 소리의 램시를 소리의 3요소라 하며, 우리가 소리를 들을 때는 이 요소에 따라 다르게 인식한다. 이를 분석하기 위해 본 연구팀은 측정된 음원을 RMAA 프로그램을 이용하였고, RMAA 프로그램에서는 다음 10가지를 기반으로 측정 한 소리를 구분하고 판단했다[2].

Frequency Response(dBA), Noise Level(dBA), Dynamic Range(dBA), Total Harmonic Distortion(THD)(%), Intermodulation Distortion + noise(%), Stereo Crosstalk(dBA), Intermodulation Distortion(swept freqs)(%), Frequency Response(dBA), Total Harmonic Distortion(swept freqs)(dB), THD(swept freq)(%)

(본 연구에서는 필요에 따라 Noise Level을 NL로, Dynamic Range를 DR로, Total harmonic Distortion을 THD로, Intermodulation Distortion을 IMD로, Stereo Crosstalk를 SC로 줄여서 썼음을 밝힌다.)

본 연구팀은 다음 기준 중에서도 THD 값과 dBA값, SC, NL, DR, IMD에 집중했다. 음 왜곡률에 해당하는 THD값은 쉽게 말해 원래 내기로 되어있는 소리의 원음과 실제로 발생한 음 사이에 왜곡률의 정도를 수치로 표현한 값이다. THD값이 작을수록 발생하는 소리는 원음에 가까우며, 필요 없는 잡음 등의 포함 정도가 적다는 것이다. 따라서 THD 값이 작을수록 우리가 듣기에 소리에 잡음의 포함 정도가 적은, 높은 음질의 소리를 들을 수 있다. THD는 음질에 가장 밀접한 관련이 있는 특성이므로, 이후에 자세히 다루도록 하겠다. 이외에도 dBA (데시벨) 값에 의해서도 음질이 결정된다. 데시벨 값은 다시 크게 사방으로 음이 퍼지는 정도 (각도별 dBA 값의 표준편차값), 음압 (dBA 값의 평균) 두 가지 기준에 의해 각 악기의 울림통 효율을 판단했다. 여기서 음이 퍼지는 정도 (각도별 dBA 값의 표준편차값)를 비교기준으로 설정한 이유는 소리를 듣는 청취자 입장에서 고려하였기 때문이다. 음원에서 떨어진 각도에 따라 음의 주파수나 음압 등의 요소에 변화가 클수록 소리를 듣는데 더 많은 혼란을 줄 것이고, 따라서 각도별로 측정되는 요소 각각의 차이가 작을수록 즉, 각도별 dBA 값의 표준편차 값이 작을수록 모든 방면에서 소리가 고르게 들리므로 청취에 있어 양질의 소리를 제공할 수 있기 때문이다. 또한, dBA는 사람이 소리를 들을 때의 경향성으로 구분되는 특성으로 일반적으로 작은 소리보다 큰 풍부한 소리일수록 음원의 잡음 포함 정도 등이 작다고 느끼기 때문이다. 실제로 음질에 영향을 미치는 요인으로 음압이 해당해 있는데, 음압 레벨이 클수록 상대적으로 잡음의 영향, 왜곡되는 음을 인지하는 정도 등이 감소함에 따라 원음에 더욱 집중하여 들을 수 있기 때문이다.

Device:	green/logtech/1	green/logtech/2	green/logtech/3	green/logtech/4	green/logtech/5	green/logtech/6	green/logtech/7	green/logtech/8
Sampling mode:	16-bit, 48 kHz							
Frequency response (multitone), dB	+39.85, -7.04	+36.85, -7.54	+42.67, -8.87	+26.78, -8.07	+42.33, -8.89	+21.82, -8.76	+31.91, -19.84	+37.11, -13.03
Noise level, dBA	-49.7	-44.1	-49.1	-45.9	-48.5	-49.5	-49.2	-50.0
Dynamic range, dBA	48.5	44.9	49.3	45.1	48.1	50.2	46.6	47.9
Total harmonic distortion (THD), %	1.284	1.214	1.258	1.277	0.834	0.842	0.991	0.840
Intermodulation distortion + noise, %	12.080	20.726	16.943	6.053	14.015	11.625	11.836	13.330
Stereo crosstalk, dB	-7.1	-8.3	-9.1	-6.2	-10.7	-9.6	-9.6	-9.7
Intermodulation distortion + noise (sweep freq), %	6.639	5.212	3.842	7.062	3.382	3.518	3.606	3.474
Frequency response (sweep sine), dB	+5.9, -26.5	+5.8, -25.0	+5.3, -22.7	+5.6, -27.3	+5.4, -23.2	+5.4, -22.7	+5.5, -24.3	+5.3, -22.0
Total harmonic distortion (sweep freq), aF	-0.34, -39.42	+5.92, -36.38	+5.42, -34.22	-5.76, -42.46	-2.01, -32.36	-0.53, -30.76	+1.92, -33.30	+2.88, -33.17
THD (sweep freq), %	+5.5, -41.7	+4.9, -43.4	+5.6, -40.6	+6.0, -42.4	+4.7, -39.9	+4.9, -42.3	+4.9, -38.2	+4.8, -40.5

[Fig. 1] Part of the Data Measured by the RMAA Program

우선, THD란 오디오 신호에서 불필요한 하모닉 성분들이 발생하여 왜곡이 생기는 증상으로, 왜울 또는 전체 고조파 왜곡이라고도 한다. THD를 계산하기에 앞서서, THD는 기본파가 아닌, 고조파의 값에 의존하므로 기본파의 RMS값과 고조파의 RMS값을 기준에 구해야 한다. 여기서 RMS란 제곱평균제곱근을 의미하며, $\sqrt{\frac{x^2 + x^2 + \dots + x^2}{N}}$ 로 구한다. 기본파와 고조파의 RMS 값을 구한 뒤, $THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{N} V_{n,rms}^2}}{V_{1,rms}}$ 으로 구한다. 이 때, $V_{1,rms}$ 는 기본파의 RMS 값, $V_{n,rms}$ 는 고조파의 RMS 값을 의미한다.

고조파는 본 연구팀이 입력받은 기본파의 정수배에서만 나타나며, 이러한 고조파 데이터를 흔히 하모닉스라고도 한다. 이러한 하모닉스가 발생하지 않는 음원의 주파수 그래프를 그리면 사인파가 형성되며, 마찬가지로 주파수가 사인파를 이루는 경우 하모닉스가 발생하지 않아 THD 값도 0이 된다. 기본파의 정수배에서 나타나는 하모닉스를 알아내기 위해서는 본 연구팀이 측정한 소리를 스펙트럼으로 나타내야 하는데, 이때 각 주파수에 따라 dBA값으로 나타낸 스펙트럼이 필요하다. 본 연구팀이 측정한 소리를 이러한 스펙트럼으로 나타내기 위해서는 FFT변환이 필요하다. FFT 변환을 거쳐 본 연구팀이 얻은 음원을 각 주파수 별로 dBA값을 알아내면, 기본파와 고조파, 하모닉스 성분으로 구분해낼 수 있다.

이외에 RMAA 프로그램을 이용하면서 고려할 수 있는 판단 기준이 있는데, 그것이 SC, DR, NL, IMD 이다. 먼저 SC란, Stereo Crosstalk의 약자로, SC 값이 커지면 좌/우 채널 간섭이 커져 스테레오가 점점 모노로 변한다는 이야기이다. 이를 테면 헤드셋이나 이어폰 등 양쪽 귀로 소리를 들을 때, 원래 음원에 의하면 좌우 음향이 다르지만, SC 값이 커지면서 모노의 형식으로 음이 방출되는 것이 예이다. 하지만 Stereo Crosstalk는 음향기기에서 소리가 방사될 때, 전기적 신호에 의해 관계되는 특성으로, 울림통으로 SC값을 바꾸기에는 무리가 있다고 판단했다. 따라서, 본 연구팀이 실험에 이용한 울림통을 관찰할 때, SC값은 기준으로 삼지 않았음을 밝힌다. DR은 Dynamic Range의 약자로 특정 음량에서 가장 큰 소리와 가장 작은 소리의 dBA값의 차를 일컫는 말이다. 예를 들어 본 연구팀이 측정한 소리에서 가장 큰 dBA값이 100dBA이고, 가장 작았던 dBA값이 60dBA이라면 DR은 40인 것이다. NR은 Noise Level의 약자이며, 소음의 크기를 나타내는 값 중 하나이다. 소음이 원음 중에서 차지하는 비율을 계산하는 THD 값과 다르게 NR은 소음을 dBA값으로 나타내어 판단하는 것이다. 흔히 dBA (데시벨) 이나 폰 (phon) 으로 나타낸다. IMD는 Intermodulation Distortion의 약자로, 상호 변조 왜곡을 의미한다. ID는 앰프 회로에 의해서 발생하는 입력 신호의 기본파와 그 고조파 성분들의 선형조합에 의해 생성된 주파수들이 기기의 출력에 형성하는 비선형 왜곡을 말한다.

본 연구팀은 이렇게 dBA 값의 평균, 각도별 dBA 값의 표준편차값, THD, DR, NL, IMD 총 6가지의 기준을 바탕으로 각 악기 울림통의 효율성을 판단하였다.

2. 헬름홀츠 공명기 (Helmholtz Resonator)

이 장치는 강체 벽으로 둘러싸인 체적이 V 인 빈 공간과 면적이 S 이고, 길이가 L 인 목으로 구성된다. 목의 개구부에서 소리가 방사되므로 방사 저항 및 방사 질량이 발생한다. 하나의 단위로 움직이는 유체는 또 다른 질량 요소를 가지게 되는데, 목의 벽에서의 열점성 손실은 추가적인 저항을 발생시킨다. 또한, 체적 내에 공기가 압축되므로 강성이 생기게 된다. 반경 a 인 원형 개구부에는 면적이 S 이고 길이는 $0.85a$ 인 유체기둥의 방사 질량에 의해 방사 부하가 걸리게 된다. 만약 개구부가 플랜지 된 것과 동일하다면 총 유효질량은 $m = \rho SL$ 이고, 여기서 유효 목 길이는 플랜지 되었다면 $L + (0.85 + 0.85)a$ 이고, 플랜지 되지 않았다면 $L + (1.4)a$ 가 된다. 계의 강성을 결정하기 위하여 목에 빈틈없이 꼭 끼게 설치된 가상의 피스톤을 생각해보자 이 피스톤이 x 만큼 밀려 들어가면 공기의 체적은 $-xS$ 만큼 변하게 되어서 $\Delta \rho / \rho = -xS/V$ 만큼의 압축이 발생한다. 그러므로 압력 증가는 $P = \rho c^2 Sx/V$ 일 것이고, 변위를 유지하기 위한 힘은 $SP = sx$ 이며 유효강성 s 는 따라서 $s = \rho c^2 S^2 / V$ 임을 알 수 있다. 결과적으로 목에 있는 유체의 안쪽방향 변위 x 에 대한 미분방정식을 구하고, 그 식을 통해서 이 공명기의 입력기계 임피던스를 구할 수 있다. 공명기의 리액턴스가 영일 때 공진이 발생하므로 이때 발생하는 공명주파수가 $w = c \sqrt{S/LV}$ (여기서 L 은 유효길이이다.)임을 알 수 있다. 여기서 공명기의 모형에 관해서 형상에 관한 가정이 없는데 이때 공명기의 모형은 모든 치수가 과장보다 상당히 작고, 개구부가 너무 크지 않으며 적당한 단면을 가지지만 하면 공명주파수는 S/LV (여기서 L 은 유효길이이다.) 값에 의존한다. 형상은 다르지만 같은 공명주파수를 갖는 공명기들은 본질적으로 같은 공명기라고 정의할 수 있다.

III. 연구 방법 및 절차

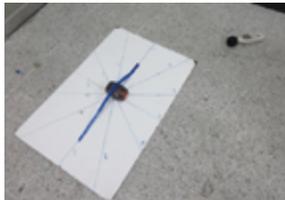
1. 스마트폰 음향기기에 대한 설문조사

스마트폰 음향기기에 대해 얼마나 불편을 느끼는지 물어보는 설문지를 작성해 80명 학생들을 상대로 설문지를 나눠주며 설문을 진행했다.

2. dBA 측정기를 이용한 동서양 악기의 음향 방사 특징 분석



[Fig. 2] Bluetooth Speaker ELECOM Company LBT-SPCB01 Used in the Experiment



[Fig. 3] Bluetooth Speaker Inside the Instrument's Resonator Box



[Fig. 4] The Instrument is Placed in a Diaphragm and the Angle is Displayed



[Fig. 5] dBA Meter SMART SENSOR Company Intelligent Instruments, Plus Digital Sound Level AR824

우드락 판 가운데에 악기 울림통이 대칭점(악기를 한 점으로 점대칭이 되는 점)이 되는 중심이 오게 놓았고 고정된 뒤, [Fig. 4]와 같이 스피커의 소리 방사 방향을 0° 기준점으로 정했고 반시계 방향으로 30° 씩 각도를 표시한 후, 표시한 각도 방향으로 악기의 울림통에서 100cm가 되는 지점들에 절연 테이프로 바닥에 위치를 표시했다[3]. 블루투스 스피커를 켜고,

컴퓨터와 연결하여 tone generator을 이용해 특정 Hz의 음원을 재생한 뒤, [Fig. 5]와 같이 블루투스 스피커를 배치했다. 조건을 동일하게 하기 위해 블루투스 스피커에 보조배터리를 연결하고, 100cm 떨어진 지점에 dBA 측정기를 놓고 각도별로 dBA를 측정했고, 위의 과정을 tone generator을 이용해 재생되는 음원의 Hz를 달리하여 측정하였다.

3. 'Right Mark Audio Analyzer(RMAA)'를 이용한 동서양 악기의 음질 분석

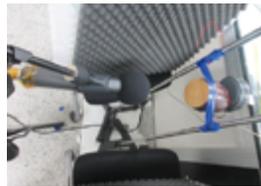
악기의 구조를 거치지 않은 상태에서 RMAA 측정을 하여 대조군을 데이터를 수집한 뒤, [Fig. 8]과 같이 스피커-올림통-마이크 순으로 배열한 후, 일정 수준 이하의 Distortion, 일정 수준의 dBA를 만족하는 오디오 인터페이스의 Mic Gain, Output, 윈도우의 재생 볼륨 레벨, 마이크와 올림통 사이의 거리 등을 찾았다. (여기서 각 동서양 악기 올림통의 음질 분석에 이용된 음원은 RMAA 프로그램에서 기본적으로 THD, NL, IMD, dBA, DR 등의 음향 특성을 측정할 때 제공되는 다양한 Hz와 dBA를 가지는 기본 음원을 바탕으로 측정했다. 또한, 다른 악기도 [Fig. 8]의 해금과 마찬가지로 대칭점을 기준으로 올림통을 위치시키고 실험을 진행했다.)



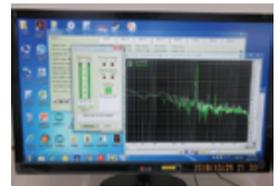
[Fig. 6] Microphone (RODE M3)



[Fig. 7] Audio Interface (M-AUDIO Fast Track)



[Fig. 8] Images of the Installation of the Haegeum's Vibration Box



[Fig. 9] Finds a Suitable Distance Between Microphone and the Speaker in the RMAA Program

4. 선정된 악기의 헬름홀츠 공명기를 이용한 고유진동수 탐색

선정된 악기의 부피를 모래를 통해 측정하고, 입구 부분의 길이를 측정한 뒤, 헬름홀츠 공명기의 식을 이용해 고유진동수를 알아낸 후, FFT 그래프를 통해 알아낸 고유진동수와 헬름홀츠 공명기의 식을 통해 알아낸 고유진동수를 비교하여 고유진동수를 가청주파수 밖으로 보내는 방법을 모색했다.

5. 선정된 악기의 최적의 구조 탐색

아크릴을 이용해 구멍의 위치, 구멍의 크기, 구멍의 개수, 종이의 두께, 종이의 재질 등을 변인으로 하여 각각 올림통 모형을 제작한 후, RMAA와 dBA 측정기를 이용해 음질을 측정하여 최적의 구조를 갖는 올림통 모형을 알아냈다. (이때, 모든 음질 측정 기준이 실제 음질에 영향을 끼치는 정도는 동일하게 하여 앞의 실험을 비교, 분석했다.)

6. 스마트폰의 음질 최적화를 위한 스마트폰 케이스 제작

올림통 모형 실험을 통해 알아낸 최적의 올림통 모형 구조와 동서양 악기의 음질을 분석한 결과를 통해 스마트폰 케이스의 구조를 설계하여 스마트폰 음질을 최적화시키는 스마트폰 케이스를 제작한 뒤, 스마트폰에 장착하여 그때의 음질을 측정했다.

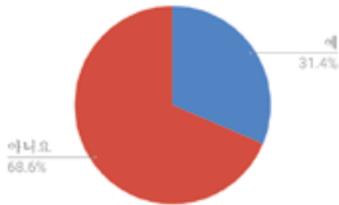
IV. 연구 결과

1. 스마트폰 음향기기에 대한 설문조사

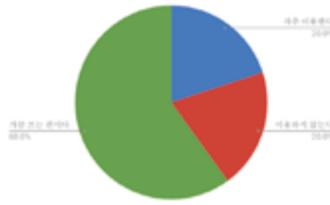
2018년 6월, 본 연구팀은 실제로 스마트폰 음향기기에 대해 사람들이 얼마나 불편함을 느끼고 있는지 알아보기 위해 설문지를 만들어 설문을 진행했다. 총 설문자는 55명이며, 각 질문은 다음과 같다.

- 가. 귀하께서는 스마트폰을 가지고 계십니까?
- 나. 스마트폰을 이용해 얼마나 자주 음악을 들습니까?
- 다. 스마트폰을 이용하여 음악을 듣는 중에 음질이나 음량으로 인해 불편함 등을 겪으신 적이 있습니까?
- 라. 쾌적한 음악을 듣기위해 이어폰이나 블루투스 스피커 등의 음향기기를 이용하십니까?
- 마. 휴대하기 편하며 고장의 위험이 없고 가격도 저렴한데 이러한 스마트폰의 음질 개선해 줄 수 있는 도구가 있다고 하면 사용하실 의향이 있습니까?

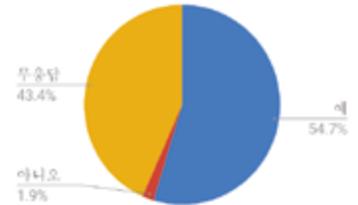
설문을 통해 얻은 결과는 다음과 같다.



[Fig. 10] Have you ever experienced difficulty with sound quality or volume while listening to music using your smartphone (the device's own speakers)?



[Fig. 11] Do you use sound devices such as earphones or Bluetooth speakers to listen to pleasant music?



[Fig. 12] Would you be willing to use the tools to improve the quality of these smartphones which are easy to carry, risk-free and affordable?

설문자의 68.6%는 스마트폰만을 이용해 음악을 들을 때 음질이 낮아 제대로 음악을 잘 듣지 못하는 불편함을 겪지 못했다고 응답했다. 그러나 이렇게 대답한 설문자는 모두 '쾌적한 음악을 듣기 위해 이어폰이나 블루투스 스피커 등의 음향기기를 이용하십니까?' 라는 질문에 가끔 쓰는 편이다 또는 사용하지 않는다고 답했다. 그리고 불편함을 겪었다고 응답한 설문자는 모두 음향기기를 자주 사용한다고 답했다. 또한, 스마트폰 음질에 관해 불편함을 느낀 사람들이 쾌적한 음악을 듣기 위해 여러 음향기기를 이용하는 것으로 나타났다. 하지만 시중에 나온 음향기기에 대해 공통적으로 밖에서 들고 다니기 불편하고, 분실 위험이 크다는 단점을 가지고 있다는 의견이 있었고 만약 스마트폰 음질 최적화 스마트폰 케이스가 있다면 그 제품을 실제로 사용할 것이라는 많은 의견도 있었다. 따라서 본 연구가 성공적으로 진행된다면, 본 연구에서 나온 스마트폰 음질 최적화 스마트폰 케이스는 실생활에서 매우 유용하게 쓰일 것으로 예상된다.

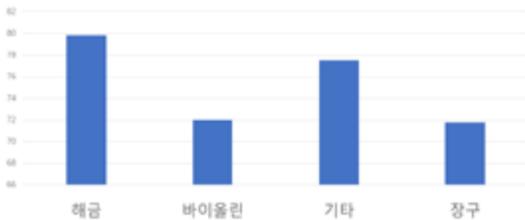
2. 동서양 악기 올림통의 음향 방식 특징 분석

선정한 악기인 해금과 장구, 바이올린과 기타의 올림통에 스피커를 위치시키고 측정을 했으며, 올림통마다 각도별로 측정되는 dBA 값의 표준편차를, 즉 스마트폰을 기준으로 전 방향에서 얼마나 고르게 소리가 방사될 수 있는지 분석했다. 또한, 선별한 주파수 범위 내에서 측정되는 값의 평균, 즉 어떠한 주파수에서도 큰 dBA 값을 유지할 수 있는 올림통을 선별했다. 측정된 결과에 따르면 해금 올림통의 전체 dBA 값 평균은 79.8, 표준편차의 평균은 4.084이었다. 장구 올림통의 전체

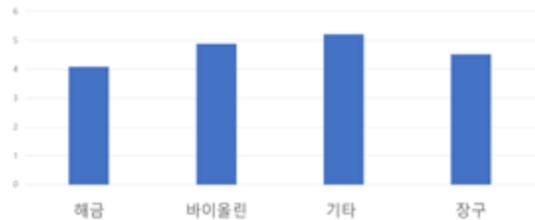
dBA 값 평균은 72.0, 표준편차의 평균은 4.514이었고, 바이올린 울림통의 dBA 값 평균은 77.5, 표준편차의 평균은 4.898이었으며, 기타 울림통의 전체 dBA 값 평균은 71.8, 표준편차의 평균은 5.221이었다. 선정된 악기의 울림통 중 음질 향상에 가장 효율이 좋다고 판단되는 것은 해금의 울림통이었다.

각 악기의 각도별 음압 레벨 값의 표준편차값과 전체 음압 레벨의 평균값을 토대로 동서양 악기가 본 연구팀이 원하는 좋은 음질을 낼 수 있는 스마트폰 케이스의 조건을 얼마나 가지고 있는지 알아보았다. 각 악기별 전체 dBA 평균은 해금, 바이올린, 장구, 기타 순으로 컸다. 상대적으로 동양 악기의 음압 레벨이 서양 악기의 음압 레벨보다 큰 것을 알 수 있었다. 그 이유로 동양 악기는 악기의 구조가 큰 소리를 만드는 쪽으로 발전되어 왔지만 서양 악기의 구조는 각각의 고유의 음색을 개성 있게 만드는 쪽으로 발전되어 왔다. 동양 악기는 사물놀이와 같이 주로 합주곡이 발달하였다. 합주곡을 할 때 악기의 종류가 다양하지 않기 때문에 악기에서 나오는 소리의 세기가 커질 필요가 있었고, 동양 악기의 울림통 구조가 소리의 세기 즉, 음압 레벨을 증가시키는 방향으로 발전되어 왔던 것이다[4].

이에 비해, 서양 악기는 합주곡을 할 때 많은 다양한 악기의 종류가 쓰이고 있다[5]. 그래서 상대적으로 악기의 소리의 세기를 증가시키기보다는 각 악기의 고유한 음색을 살려 음색이 풍부한 합주곡을 만들기 위한 쪽으로 서양 악기의 울림통 구조가 발전되어 왔다. 하지만 바이올린이 장구보다 전체 dBA 평균이 높은 것을 알 수 있었다. 이는 바이올린과 해금이 합주곡 속 악기들 중 음색의 중심이 되기 때문에 상대적으로 세기가 높은 소리를 내기 위한 쪽으로 발달되었다고 생각되었다 [6]. 음압 레벨의 고른 정도 즉, 각 악기의 표준편차값들은 기타, 바이올린, 장구, 해금 순으로 나타났다. 표준 편차는 동양 악기가 서양 악기보다 작다는 결과를 통해 동양 악기가 서양 악기보다 소리를 더 고르게 발생시킨다는 것을 알 수 있었다. 옛날에 동양 악기는 합주 또는 독주를 할 때 청중들이 악기를 둘러싼 형태로 악기 연주를 들곤 했다. 반면에 옛날에 서양 악기는 콘서트 홀 또는 그와 비슷한 무대 장치에서 악기를 연주하여 공연을 하였고 때문에 서양 악기의 울림통 구조는 상대적으로 동양 악기들보다 사방으로 소리를 고르게 발생시키는 쪽으로 발전되지 못한 것으로 볼 수 있다. 따라서 동양 악기는 서양 악기보다 소리를 고르게 발전시키는 쪽으로 발전되었기에 표준 편차 값이 적은 것으로 나타난다.



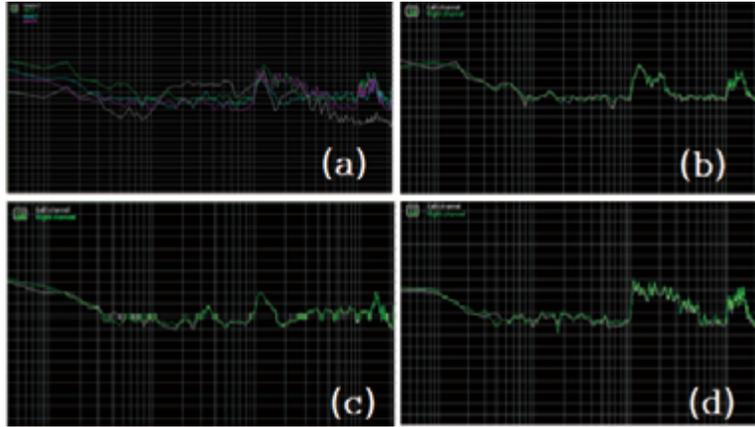
[Fig. 13] Average of Total dBA for Each Instrument



[Fig. 14] Standard Deviation for Each Instrument

3. 동서양 악기 울림통의 음질 측정 결과 분석

가. RMAA 프로그램을 이용한 동서양 악기의 FFT 그래프



[Fig. 15] FFT Graph of Eastern and Western Musical Instruments
 (a) Haeguem's Vibration Box (b) Violin's Vibration Box (c) Jang-Gu Vibration Box (d) Guitar Vibration Box

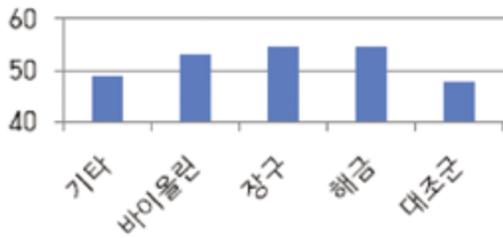
나. RMAA를 이용한 음질 측정의 결과 분석

<Table 1> Sound Quality Measurement of Eastern and Western Instruments Using RMAA

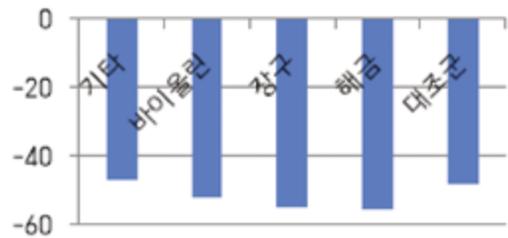
	Frequency Response(dBA)	Noise Level(dBA)	Dynamic Range(dBA)	Total Harmonic Distortion (THD)(%)	Intermodulation Distortion + Noise(%)
대조군	34.92, -9.88	-48.3	47.6	1.068	13.326
기타	28.61, 15.62	-46.8	48.7	0.639	28.196
장구	35.44, -15.75	-54.6	54.5	1.010	4.190
바이올린	27.77, -12.12	-52.3	53.0	0.613	34.681
해금	29.19, -17.61	-55.6	54.8	0.856	11.873

각 악기별 Noise Level을 측정하여 비교 분석한 결과 효율성이 해금, 장구, 바이올린, 대조군, 기타 순으로 나왔다. Dynamic Range는 효율성이 해금, 장구, 바이올린, 기타, 대조군 순으로 나왔고, Total Harmonic Distortion(THD)는 효율성이 바이올린, 기타, 해금, 장구, 대조군 순으로 나왔으며, Intermodulation Distortion은 효율성이 장구, 해금, 대조군, 기타, 바이올린 순으로 나왔다.

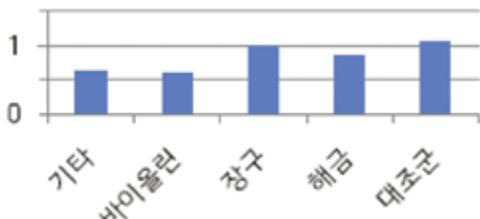
실험 결과 값을 토대로 해금, 장구, 바이올린, 기타, 대조군 순으로 음질이 좋은 것으로 나타났다.



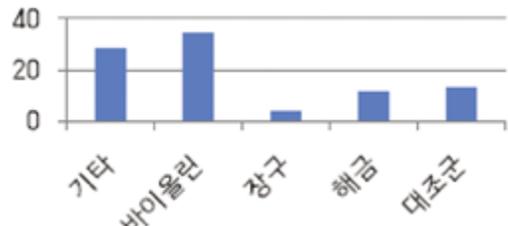
[Fig. 16] Comparison of Dynamic Ranges for Each Instrument



[Fig. 17] Comparison of the Noise Levels of Each Instrument



[Fig. 18] Total Harmonic Region (THD) Comparison of Each Instrument

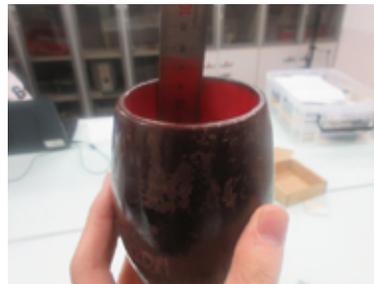


[Fig. 19] Comparison of the Intermodulation Distortion of Each Instrument

4. 해금의 헬름홀츠 공명기를 이용한 고유진동수 탐색



[Fig. 20] The Volume of the Tidal Wave is Measured through Soil



[Fig. 21] Measuring the Length of the Neck of Harangue

가. 해금의 부피 및 길이 측정

전체 해금의 부피는 300ml였고, 해금의 목 부분의 길이는 7cm, 해금의 목 부분의 단면적은 $9.0 \times 10^{-4} \pi \text{ cm}^2$ 였다. 또한, 해금 울림통에서 몸통 부분을 제외한 부분의 부피는 200ml로 측정되었다. 따라서 해금 몸통 부분의 넓이는 100ml였다. 또한, 실험 당시 기온을 15°C로 일정하게 유지하였다.

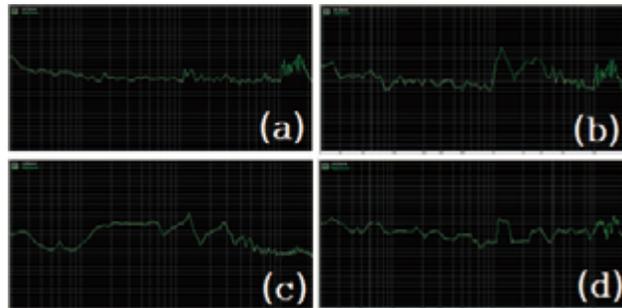
나. 해금의 고유진동수 탐색

헬름홀츠 공명기에서 고유진동수는 $f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{Vl}}$ 이고, 기온에 따른 음속의 크기는 $V_{\text{air}} = 20.05 \sqrt{273.15 + T}$ 이다. 이때, c 와 V_{air} 은 음속이고, S 는 해금 울림통의 목 부분의 단면적이며, V 는 해금 울림통 내부의 부피, l 은 해금 울림통의 목 부분의 길이이다. T 는 기온이다. 이를 이용하여 해금의 고유 진동수를 구해보았더니 1089.34Hz의 진동수가 나왔다. 이와 해금 울림통의 FFT 그래프와 비교하면, FFT 그래프는 1000Hz~1200Hz 부근에서 값이 높게 측정되는데, 이

진동수 범위는 헬름홀츠 공명기에서 나온 고유 진동수와 비슷하다는 것을 알 수 있었다.

5. 'RightMark Audio Analyzer (RMAA)'를 이용한 울림통 박스 모형의 음질 측정

본 연구팀은 울림통이 가질 수 있는 변인을 단면적, 목의 길이, 울림통의 부피와 타원 형태의 유무로 설정했다. 변인에 따라 주파수 영역별 데시벨의 평균값과 표준편차값, 각도별 표준편차값의 평균을 구하였다. RMAA 프로그램에서 측정되는 THD, NL, DR, IMD의 데이터가 실제 음질에 어느 정도 영향을 끼치는지에 대하여 모두 음질을 알아 보는데 같은 가중치를 부여함으로써 음질에 동등하게 영향을 끼친다고 가정했음을 앞서 밝힌다.



[Fig. 22] Sound Quality Measurement of the Vibration Box Model Using RMAA
 (a) Results of the Haeguem FFT Analysis 1 (b) Results of the Haeguem FFT Analysis 2
 (c) Results of the Haeguem FFT Analysis 3 (d) Results of the Haeguem FFT Analysis 4

항목은 크게 단면적, 목 길이 0cm, 4cm, 8cm, 12cm, 16cm, 타원의 곡률에 따라 곡률이 제일 작은 타원 1, 그 다음으로 곡률이 큰 타원 2, 제일 곡률이 큰 타원 3까지 실험했다. 또한, 울림통의 부피가 1L, 2L, 3L, 4L, 5L인 것을 제작해 실험에 임했다. 결과값은 다음과 같다.

<Table 2> Measurement value of the Vibration Box Model Using RMAA

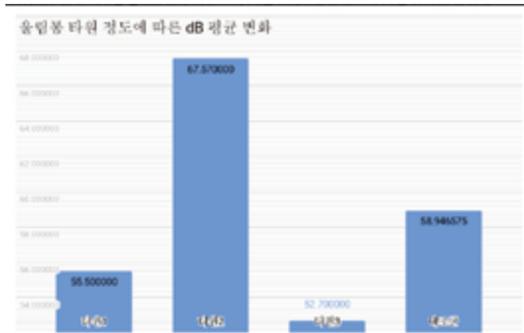
	Noise Level (dBA)	Dynamic Range(dBA) :	Total Harmonic Distortion(THD)(%)	Intermodulation Distortion + Noise(%)	
단면적	10*10cm ²	43.4	45.95	1.28	63.9
	12*12cm ²	46.36	48.01	1.194	32.946
	14*14cm ²	45.95	44.91	0.448	63.109
	16*16cm ²	46.84	50.96	1.059	26.469
목 길이	0cm	-45.06	47.02	0.262	56.4
	4cm	-51.43	53.03	0.217	8.554
	8cm	-55.75	57.34	0.4595	44.82
	12cm	-47.77	50.55	1.0127	18.067
	16cm	-46.7	49.07	0.2398	26.98
타원의 곡률	1	-49.74	56.12	1.0246	18.956
	2	-49	50.36	0.8507	12.534
	3	-49	51.33	0.4322	26.625

부피	1L	-54.155	55.175	0.2536	29.235
	2L	-55.3	55.055	0.2389	12.585
	3L	-57.135	57.28	0.20345	15.238
	4L	-57.625	57.35	0.4149	13.354
	5L	-56.05	55.87	0.1783	12.901

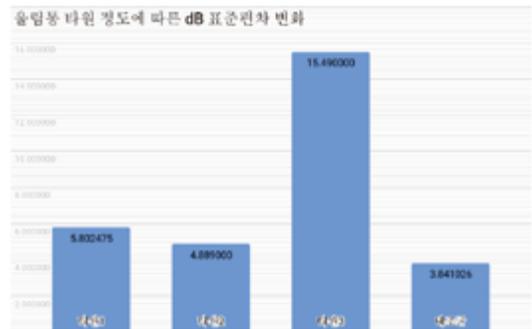
하지만, 결과를 보면 알 수 있듯이 곡률이나 타원형의 변화 등에 따라 dBA 값이 일정하게 증가하지 않는다는 것을 확인하였다. 따라서 본 연구팀이 설정했던 가설 중 해금의 올림통 구조가 갖는 특징인 타원형 구조가 dBA 값에 무조건적으로 효율적인 구조가 아니라는 것을 알게 되었다.

6. dBA 측정기를 이용한 올림통 박스 모형의 음향 방사 특징 분석

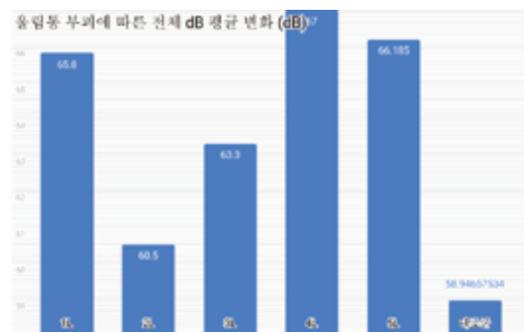
본 연구팀은 동서양 악기의 올림통을 RMAA 프로그램을 통해 비교했을 때와 동일한 기준을 적용했다. 따라서 본 연구팀은 올림통 박스 모형의 dBA 값, THD, IMD, DR, NL을 측정하여 비교하였다. RMAA 프로그램에서 측정되는 THD, NL, DR, IMD의 데이터가 실제 음질에 어느 정도 영향을 끼치는지에 대하여 모두 음질을 알아보는데 같은 가중치를 부여함으로써 음질에 동등하게 영향을 끼친다고 가정했음을 앞서 밝힌다. 결과는 다음과 같다.



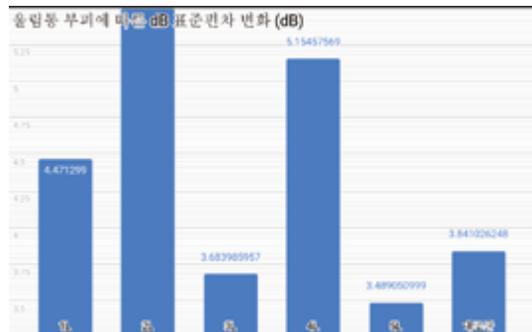
[Fig. 23] Average Value of dBA According to the Degree of Eccentricity of the Vibration Box



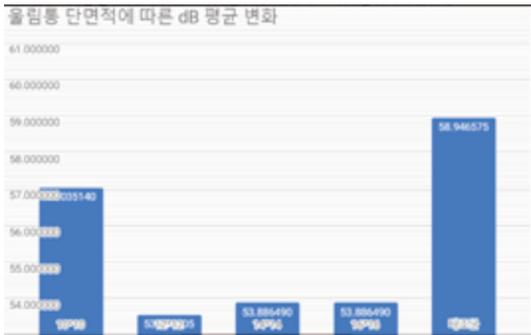
[Fig. 24] Standard Deviation of dBA According to the Degree of Eccentricity of the Vibration Box



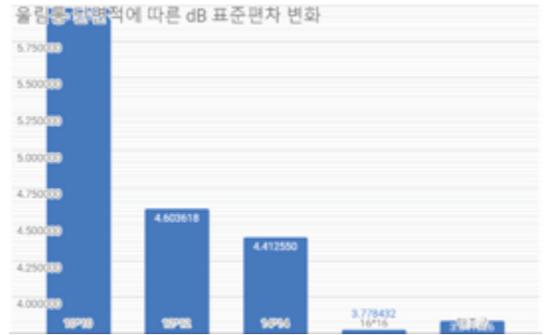
[Fig. 25] Average Value of dBA According to the Volume of the Vibration Box



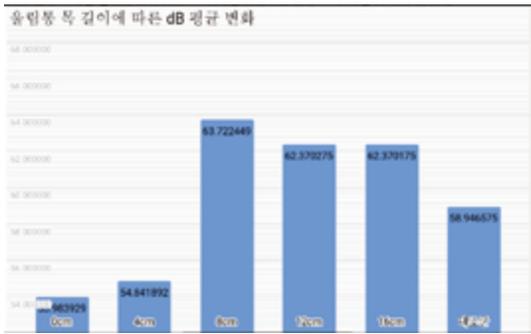
[Fig. 26] Standard Deviation of dBA According to the Volume of the Vibration Box



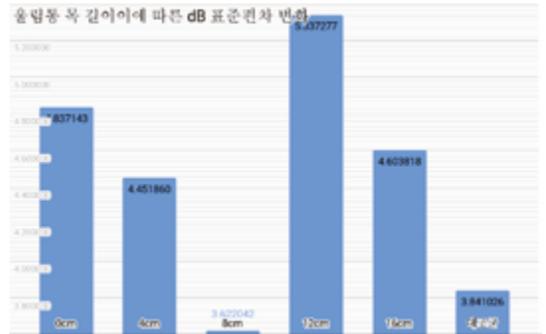
[Fig. 27] Average Value of dBA According to the Cross Section Area of the Vibration Box



[Fig. 28] Standard Deviation of dBA According to the Cross Section Area of the Vibration Box



[Fig. 29] Average Value of dBA According to the Length of the Neck of the Vibration Box



[Fig. 30] Standard deviation of dBA According to the Length of the Neck of the Vibration Box

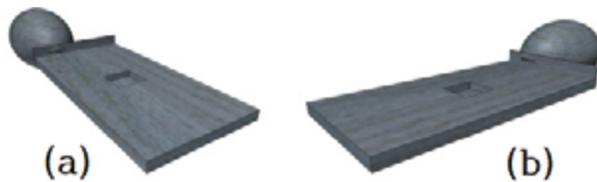
하지만, 여기서 진행한 실험으로 본 연구팀은 예상치 못했던 몇 가지 경향성을 확인할 수 있었다. 울림통의 목 길이가 길수록 주파수별 dBA 값의 평균이 크며, 단면적이 클수록 각도별 표준편차가 작았다. 곡률이 클수록 THD 값이 작게 나왔으며, 부피가 증가할수록 dBA 값의 평균과 IMD값이 높았다. 이를 통해 주파수별 dBA 값을 크게 만들어주기 위해 울림통의 목 길이를 길게 만들거나 부피를 크게 해야 한다는 사실, THD 값을 줄이기 위해 곡률을 크게 해주어야 한다는 것이나 각도별 표준편차를 작게 만들기 위해 단면적을 크게 해야 하고, IMD값을 높게 만들기 위해 부피를 크게 해주어야 한다는 사실을 알 수 있었다. 이를 표로 정리하면 다음과 같다.

<Table 3> Results of an Experiment on the Vibration Box Model

개선되는 음향특성	바뀌어야 하는 요인
주파수별 dBA값의 평균	울림통의 목 길이를 길게, 부피를 크게 만들
각도별 dBA값의 표준편차	울림통의 단면적을 크게 만들
THD 값	울림통의 곡률을 크게 만들
IMD 값	울림통의 부피를 작게 만들

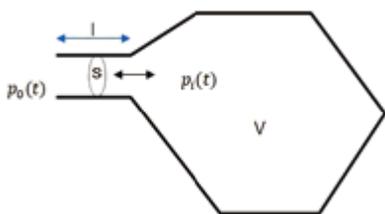
7. 제작된 올림통 스마트폰 케이스의 효율 분석

본 연구팀이 실험을 거쳐서 선정한 악기 중 가장 효율적인 올림통 구조를 가지고 있는 악기는 해금이었다. 본 연구팀은 전반적인 케이스 디자인을 해금의 올림통 구조와 유사하게 제작하기 위해서 해금 올림통의 몇 가지 특징을 따왔는데, 먼저 해금은 다른 악기의 올림통에 비해 곡면이 차지하는 비율이 훨씬 많다는 것이었다. 모든 악기의 올림통 내부에서 소리가 올림통 벽면에 부딪힐 때는 반사가 일어난다. 악기의 올림통 벽면이 가지는 구조에 따라 음이 반사되는 성향이 바뀌어지는데, 이때 해금의 올림통 구조로 인해 해금만이 가지는 고유한 특징이 있을 것임을 짐작했다. 해금의 올림통 구조가 곡선을 많이 가지고 있는데, 이것으로 인해 전체적인 올림통의 구조가 타원형과 유사하게 생겼다는 생각을 했다. 타원의 주요 특징 중 하나는 타원의 안쪽에서 타원을 이루는 곡선 쪽으로 아무 방향이나 선을 그었을 때, 반사되는 방향이 타원의 초점을 향한다는 특징이 있다. 이 때문에 해금의 올림통 내부로 방사된 소리가 특정 부위에 소리를 중첩되어서 결과적으로 소리를 증폭시킬 수 있다고 판단하였고, 이에 따라 해금의 올림통 구조와 스마트폰 케이스의 형태가 융합된 구조를 제작해 실험에 임하였다. 본 연구팀이 제작한 해금 올림통은 곡률에 따라 크게 2가지를 제작해서 실험했다. 하나는 해금 올림통의 가운데 부분을 잘라 방사형으로 나타나는 절반 올림통 구조를 적용했으며, 두 번째는 해금 올림통의 구조 형식을 그대로 이용했다. 절반만 적용한 올림통의 장축은 69.6cm, 단축은 0.305cm이다. 모두 적용한 해금 올림통의 장축은 17.4cm, 단축은 0.305cm이다. 먼저 스마트폰에 쉽게 부착하고 떼기 쉬운 형태로 만들기 위해 노력했고, 자석을 이용하기로 결정했다. 스마트폰에 얇은 자석을 뒷면에 부착시켜두고, 케이스에는 구멍을 뚫어 자석의 반대 극끼리 마주보도록 설정했다. 스마트폰의 스피커와 케이스가 맞닿는 부분에 올림통 구조를 적용하여서 스마트폰에서 방사된 소리가 본 연구팀이 고안한 올림통 구조를 지나도록 설계하였다. 해금의 일부를 따서 방사형으로 만든 스마트폰 케이스 구조의 경우에는 고유 진동수를 가청주파수 밖에 위치시키기 위해 상대적으로 큰 올림통이 필요했다. 이 모든 기준을 바탕으로 스마트폰 케이스를 구현해내기 위해 다음과 같이 고안했다.



[Fig. 31] Vibration Box Smartphone Case Model (a) Side 1 (b) Side 2

해금 올림통 구조를 바탕으로 구현한 스마트폰 케이스 모델은 다음과 같다([Fig. 31]).



[Fig. 32] Modelling of Helmholtz Resonator

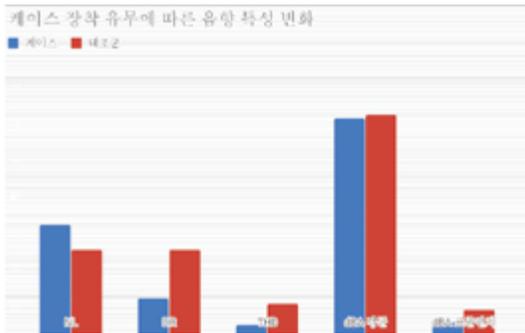
[Fig. 32]는 단면적이 S이며, 길이가 l인 목을 갖는 부피 V의 헬름홀츠 공명기이다. 단위 시간당 Q의 질량이 유입되면 체적 V의 밀도가 증가할 것이므로 $Q = V \frac{\partial \rho}{\partial t}$ 이다. 공기의 유출입이 공진 시에는 조화진동으로 일어나므로 대기압의 밀도를 ρ_0 라 하면 $\rho = \rho_0 + \rho' e^{i\omega t}$ 이다.

따라서 $\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{Q e^{i\omega t}}{V} = \rho' i\omega e^{i\omega t}$ 에서 $\rho' = \frac{Q}{V i\omega}$ - 식(a)이 성립한

다. 또한, 음속의 정의에 의해 $p_i = c^2 \rho' = \frac{c^2 Q}{V i \omega}$ 으로 정리된다 - 식(1). 공명기에 들은 공기 질량을 이용해 $F=ma$ 를 적용하되, 공기입자의 유속 u 가 $\frac{Q}{\rho_w S}$ 임에 유의하면 $F_e - F_i = S(p_e - p_i) = \rho_w S \frac{\partial u}{\partial t} = i \omega l Q$ 을 이끌어 낼 수 있다 - 식(b). 이제, 식 (a)와 식(b)에 식(1)의 값을 넣어 정리하면 $p_e - \frac{c^2}{V i \omega} Q - \frac{i \omega l}{S} Q = p_i - \frac{c^2 S i \omega Q}{V w S}$ 를 얻는다. 이 식에서 목 바깥쪽의 음압이 최소가 되는 주파수, 즉 헬름홀츠 공명기의 공명주파수를 구할 수 있으며, 이를 주파수로 정리하면 $f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{V l}}$ 임을 알 수 있다. 본 연구팀이 실험한 해금의 울림통 구조를 이상적인 헬름홀츠 공명기를 가정하여 공명 주파수를 구했고, $170.3 \sqrt{\frac{(0.03)^2}{0.0001 \times 0.07 \times \pi}} = 1089.34 \text{ Hz}$ 로, 대략 1,100Hz 부근에서 고유주파수를 갖는다고 예상할 수 있다. 또한, 해금 울림통을 이용해 얻은 소리를 FFT 분석했을 때, 약 4개의 그래프에서 1,100Hz 부근에서 그래프의 dBA 값이 급격히 커지는 것을 확인했다[7].

먼저, $f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{V l}}$ 이라는 식에서 단면적 S 는 스마트폰 스피커(참고할 스마트폰 모델은 아이폰 Xs를 기준으로 삼았다.)에 의해 결정되는 값이므로 스마트폰 스피커의 단면적 $0.169 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ 에 해당하는 고정된 값이다. 진동수 f 는 가청 주파수 영역에 포함되지 않도록 20보다 작은 값을 가지도록 설정하려고 했다. (20,000Hz 이상에 위치시키기 위해서는 울림통의 부피와 목의 길이를 곱한 값이 지나치게 작아져야 했다. 따라서 이론상 불가하다고 생각했고, 20Hz 이하에 고유진동수를 위치시키기로 했다.) 또한, 울림통의 전체적인 부피는 스마트폰의 크기와 비슷한 범위에서 제작해야만 했고, 목의 길이 역시 너무 길게 설정되면 목이 울림통의 무게를 감당하기 힘들었으며 3D 프린터로 스마트폰 케이스를 구현하기 위해 3D 프린터가 출력 가능한 범위인 $1.2\text{mm} \leq l$ 를 만족해야 했다. 또한, 실험 결과를 보았을 때 울림통의 전체적인 부피가 클수록 평균 dBA 값이 컸으므로 최대한 부피 값을 크게 하되, 휴대에는 불편함을 미치지 않는 범위에서 설계해 제작하고자 노력했다. 울림통의 전반적인 모양은 이미 소리에 최적화되어있는 해금 울림통의 모양과 비율과 동일하게 제작하였다. 또한, 스마트폰 모델(기종: 아이폰 Xs)의 부피 범위에 비슷하게 울림통을 맞추면서 부피를 115.42cm^3 로 정했다. 따라서, 헬름홀츠 공명기식은 $f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{0.169 \times 10^{-4} \text{ m}^2}{115.42 \times 10^{-6} \text{ m}^3 / l}}$ 이 된다. 이때, 주어진 변수는 f, l 두 개로, 이때 각각 변수의 범위를 만족하면서 스마트폰 케이스를 구현하기 위해 ‘지오지브라’라는 프로그램을 이용하였다. 따라서, 사용 가능한 크기의 범위를 만족하면서 고유진동수 역시 가청주파수 영역 밖에 위치하는 f, l 을 수식을 통해 구한 결과 f 는 0.02Hz, l 은 0.14cm로 결정되었다. 울림통 케이스의 장축은 4.2cm, 단축은 2.57cm이다. 장축과 단축은 해금과 비율이 같으면서 범위를 만족하는 두 값을 지정했다. 또한, 해금의 구조는 타원의 앞부분을 자른 듯한 구조였는데, 이때 잘려진 부분이 해금의 타원형의 초점에 해당하는 부분과 굉장히 근접해있었던 것을 알 수 있었다. (잘려진 부분이 초점이라고 가정했을 때, 잘린 양단의 초점에서 해금의 단축에 해당하는 부분의 끝까지 거리를 측정했더니 측정한 두 길이가 70cm이었다. 또한, 해금 울림통 벽면에 임의의 점을 잡고 초점에서 점까지 거리의 합을 측정했더니 140cm와 거의 유사한 값이 나온 것을 보고 양단에 초점이 위치했을 것이라고 예측할 수 있었다.) 따라서 초점 부근에서 구멍이 뚫려 있던 해금의 울림통 구조와 동일한 비율로 스마트폰 케이스의 울림통 역시 초점 부분을 잘라냈다.

설정한 대조군이 가지는 울림통의 부피는 본 연구팀이 제작한 스마트폰 케이스에 존재하는 울림통의 부피와 같으며, 대조군의 형태는 해당 부피를 갖는 정육면체 모양으로 제작하였다. 대조군 역시 동서양 악기나 울림통 박스 모형을 측정했던 기준과 같은 기준에 맞춰서 RMAA 프로그램을 통해 음향 특성을 측정하고, 음향 방사 특성을 측정하였다. 대조군에 대한 실험값과 본 연구팀이 만든 스마트폰 케이스로 측정된 실험값은 다음과 같다. dB 표준편차는 각도별로 측정된 dBA 값의 표준편차를 의미하며, dBA 값의 평균은 주파수별 dBA의 평균값이다.



[Fig. 33] The Efficiency Comparison of Smartphone Case



[Fig. 34] A Vibration Box Made for the Control Group

정값인 IMD값은 해당 실험의 범위의 음질 판단 기준에서 제외하기로 하였다.

대조군의 실험값과 제작한 케이스에 대한 실험값을 비교했을 때, 제작한 스마트폰 케이스를 장착한 후 NL, THD, dBA, 표준편차값이 향상되는 경향을 띠는 것으로 확인되었다.

본 연구팀이 악기의 울림통과 박스모형을 각 기준에 따라 측정했을 때는 측정하는 기기와 음원을 하나의 컴퓨터로 통합했기에 RMAA에서 요구하는 적정 측정 거리 등을 정밀히 조작하고 실험할 수 있었지만, 스마트폰의 음질 향상 정도를 판별하는 것에서는 이와 같은 실험 설계가 불가능했다. 스마트폰으로 RMAA 프로그램을 이용할 수 없으므로 컴퓨터와 스마트폰을 연결해 RMAA에서 측정할 때 이용되는 소리를 스마트폰으로 방사시켜야 울림통 케이스의 능력을 알아낼 수 있었다. 하지만 컴퓨터에서 보낸 소리를 스마트폰에서 출력하기까지 대략 2~3초 정도의 지연이 존재했다. 입력된 주파수 값을 기반으로 소리를 방사한 후, 측정되는 소리의 주파수 값과 입력된 주파수 값이 얼마나 일치하며 그 사이에 고조파가 얼마나 포함되어있는지를 따져서 값을 측정하는 것이 RMAA 프로그램이다. 하지만 이때 측정되는 소리가 시간 지연이 일어나면서 방사된 소리와 주파수 특성을 비교하는 알고리즘에 있어서 많은 오차를 부른 것으로 보인다. 따라서 이 때문에 오차가 가장 크게 일어났다고 판단되는 측

V. 실험 결과 분석

본 연구팀은 동서양의 악기 중 소리가 날 때, 울림통의 기능을 수행하는 장치가 내장되어있는 악기를 4가지 선정하였다. 이 과정에서, 본 연구팀은 동양의 악기 울림통의 특징과 서양의 악기 울림통의 특징을 비교하여 보았고, 동양과 서양에서 사용되는 악기의 쓰임새가 달라서 악기 울림통의 구조, 특화된 분야에 차이가 난다는 사실을 알았다. 동양은 대중들의 앞에서 흥을 돋우고, 자신의 감정, 여운 등을 음악과 승화시켜서 악기를 연주했다는 점에서 동양 악기들은 대중에게 음악을 제공하려는 성격이 강했다. 따라서, 다수의 사람들에게 효과적으로 음을 전달하기 위해 연주자가 연주하는 음악의 음압레벨, 즉 dBA값을 증폭시키는 방향으로 울림통의 구조가 발달했다. 이로 인해 동양 악기의 울림통은 대체로 방사형으로 이루어져 있고, 서양악기의 울림통에 비해 울림통이 대체로 항아리 형태를 띠고 있는 것을 확인했다. 또한, 본 연구팀이 측정하던 중 해금의 울림통이 타원과 유사하다는 점을 알게 되었다. 파동의 성질은 진행하는 도중 밀한 매질을 만나면 반사된다는 점이 있는데, 나무 정도의 밀도를 가진 물체에 소리가 부딪힐 때 소리는 반사가 되므로 동서양의 악기에서 역시 소리가 울림통 벽면을 치면 반사가 될 것이다. 그런데, 타원의 경우 타원의 내부에서 타원 도형을 이루는 곡선 면에 부딪혀 반사될 경우, 모두 초점에 모인다는 특징이 있다. 따라서, 타원의 구조와 유사한 울림통을 지닌 해금의 경우 울림통에서 반사된 소리가 특정 지점으로 모여서 방출되기 때문에 다른 동서양 악기의 울림통보다 음압 레벨의 측면에서 높은 효과를 기대할 만한 수치를 보였다고 생각했다. 또한, 2차원적으로 타원의 형태인 것이 아니고, 3차원에서 늘린 구의 형태이기 때문에 모든 방향으로 퍼지는 소리가 초점과 같은 특정 부분에 밀집해서 반사되었다고 생각할 수 있었다. 해금의 추가적인 특징으로는 각도별 dBA의 표준편차값이 가장 작다는 것이다. 본 연구팀이 음질 판단 기준으로 삼은 '음이 사방으로 고르게 퍼지는 정도'

에서는 해금이 가장 우수한 것으로 측정되었다. 각도별로 들리는 소리가 일정하지 않을 때 생기는 청취 상의 혼란을 고려하였을 때, 해금은 상대적으로 다른 악기보다 여러 방면으로 소리가 고르게 퍼짐을 알 수 있었다. 장구의 경우 측정 과정에서 스피커의 위치선정에 따라 RMAA 측정값이 크게 좌우된다는 사실을 발견하였다. 본 연구팀은 장구의 한쪽 끝에 스피커를 위치하고, 한쪽 끝에 마이크를 설치하여서 각도별, 주파수별 dBA값을 측정하였는데, 실제 장구가 연주될 때는 장구의 한쪽이 막혀있다는 점에서 원래 악기의 주법과 다르게 실험을 진행하였기 때문에 오차가 발생했다고 생각한다.

서양 음악의 경우 공통적인 특징으로는 정교한 음색과 주법, 강약과 음악의 표현성을 살려서 대중에게 들려주는 것에 초점을 두는 경향성이 있다. 서양 악기의 울림통은 이에 맞추어서 음질의 개선, 정교하고 풍부한 음색과 잡음이 없는 말끔한 소리를 제공하는 것에 특화되어 다양한 형태의 울림통 구조를 갖는다. 따라서 연구 초기에 본 연구팀이 생각했던 음질 개선에 초점을 두어 발전해온 서양 악기의 울림통 구조가 스마트폰 음악의 '음질 개선' 측면에서 효과적일 것이라는 가설을 설정하고 실험을 진행했다. 잡음이 없는 말끔한 소리의 제공에 특화되어 있다는 점에서 서양 악기들을 이용해 THD 값을 분석해보면 동양 악기들보다 작게 측정될 것이라 예상하였고, 실제로 본 연구팀이 설정한 실험 기준에서 서양 악기의 울림통을 이용하였을 때, 보편적으로 THD 값이 작게 나오는 경향성을 확인하였다. 바이올린의 경우 본 연구팀이 설정한 악기 중에서 THD 값이 가장 작게 나왔다. 이는 독주의 비율이 높고, 오케스트라 등의 합주곡에서 차지하는 비중이 높은 만큼 음질 부분에 있어서 잡음이 덜 포함되는 방향으로 울림통이 발전했을 것이다. 기타의 경우 다른 악기들과 차별되는 한 가지 큰 특징이 있다. 바로 기타의 연주 음역대가 인간의 가청주파수 영역과 거의 유사하다는 점이다. 따라서 기타의 울림통은 인간의 가청주파수 영역의 소리를 변형하는데 유리하다 판단하였고, 이는 우리가 청취하는 음악의 영역에서 역시 유리하게 작용할 것이다. 결과적으로 본 연구팀은 설정한 판단 기준에서 가장 높은 점수를 받은 해금의 울림통을 분석했다. 헬름홀츠 공명기의 고유 진동수 계산법을 이용해 해금의 울림통의 고유 진동수를 계산하였으며, 해금의 울림통은 가운데에 구멍이 뚫린 관으로 인해 두 개의 부분으로 나뉜다고 생각했다. 이때, 헬름홀츠 공명기의 목 부분 역할을 해금 울림통의 앞부분이 담당한다고 판단했다.

본 연구팀이 울림통을 고안할 때 고려한 점이 한 가지가 있다. 특정 주파수에서만 큰 dBA값을 방사하지 않도록 하기 위해서 울림통의 공진주파수를 가청주파수 밖에 위치시키기 위해 노력한 것이다. 만약 공진주파수가 가청주파수 내에 있다면 그 주파수를 재생할 때마다 가청주파수에서 공진 효과를 일으키면서 소리가 부분적으로 크게 나올 것이다. 가청주파수에 따라 공진주파수가 있어야 할 범위는 20Hz보다 작고 20,000Hz보다 큰 범위여야 한다. 만약 20,000Hz이상으로 공진주파수를 맞추려면 헬름홀츠 공명기 식에 의해 부피가 매우 작아야 하고 20Hz보다 작게 하려면 부피가 커져야 한다. 울림통의 크기를 조절할 수 있는 이론적인 범위는 현재보다 부피를 넓혀서 20Hz보다 작게 하는 것이었다. 게다가, 울림통의 부피가 클수록 평균 dBA값이 높게 나왔다는 결과도 존재했다. 따라서 본 연구팀이 공진 주파수를 가청 주파수 밖으로 만들기 위한 방법으로 울림통의 부피를 최대한 증가시키기로 했다.

연구팀이 제작한 스마트폰 케이스를 실험을 통해 판단 기준에 따라 능력을 비교했을 때 대조군에서 나오는 소리와 케이스를 사용한 스마트폰에서 나오는 소리를 비교했는데, 상대적으로 우리가 제작한 스마트폰 케이스가 Noise Level, Total Harmonic Distortion, dBA 값의 평균에서 대조군보다 더 높은 값을 기록한 것을 확인할 수 있었다. 결과적으로 본 연구팀이 개발한 울림통 스마트폰 케이스는 NL과 DR, THD 값의 중대에 아주 중대한 역할을 수행할 수 있고, 이에 따라 음질 향상에 있어서 큰 역할을 할 수 있을 것이라고 기대한다.

VI. 결론

결론적으로, 본 연구팀은 가장 효율적인 악기인 해금을 찾아냈다. 이후 각 변인을 대입해보면서 주파수별 dBA 값과 THD 값, 각도별 표준편차, IMD값 등의 특성을 개선해주는 울림통의 구조적인 조건을 파악했다. 이를 바탕으로 케이스 제

작에 해금의 울림통 구조를 인용하되, 부족한 음향 특성을 개선해주는 울림통의 구조적인 조건을 지오지브라 등의 프로그램을 이용해 제작 가능한 범위 내에서 수치를 지정했고, 스마트폰 스피커에 가장 효율적인 울림통 구조를 지닌 스마트폰 케이스를 제작했다.

본 연구팀이 해금의 구조와 음질 측정 기준에 영향을 주는 구조적인 특징을 통해 제작한 스마트폰 음질 향상 케이스는 같은 부피를 가지며 다른 구조를 갖는 울림통에 비해서 NL, THD, dBA 값의 표준편차 등의 음향 특성을 개선하는 것을 확인했다. 이것으로 본 연구팀이 개발한 스마트폰 케이스가 스마트폰 스피커 음질 향상에 도움을 주는 것으로 판단되며, 기존에 스마트폰이 완전히 구현해내지 못했던 음향학적 특성을 개선한 것으로 보인다. 기존에 존재했던 블루투스 스피커 등의 전문 음향기기를 극복할 수 있을 것으로 기대되며, 양산에도 어려움이 없는 것으로 보인다. 하지만 여전히 dBA 값의 평균이나 측정할 수 없었던 IMD 값 등에서 개발한 스마트폰 케이스의 효율성이 완벽히 검증된 것이 아니므로 이것에 대한 추후 연구가 이루어져야 할 것으로 보인다.

VII. 참고문헌

- [1] 한국, 인터넷 사용자 · 스마트폰 보급률 '세계 1위', 데일리뉴스, 2018.06.24
- [2] 김진연, 권휴상, 음향학의 기초, Fundamentals Of Acoustics, 홍릉과학출판사
- [3] 한계석(2013), 국악기 근접 마이크로폰 테크닉스를 위한 연구 한국산학기술학회 논문지 14(10), 4753-4761
- [4] 정희석(1999), 전통악기 음향관용재의 살리게닌 처리가 음향성 및 흡습성에 미치는 영향, 목재공학 27(3) :7~16
- [5] 서울대학교 부설 뉴미디어통신공동연구소(2000), 현악기 현의 진동 및 음향 특성에 대한 연구, 국악원논문집 (Journal of the National Center for Korean Traditional Performing Arts) (Vol.12, p. 215-275)
- [6] 이나래(2005), 바이올린의 주법에 따른 음색 스펙트럼 분석 연구, 이화여자대학교 실용음악대학원
- [7] 헬몰츠 공명 원리를 이용한 한국 범종 울림통 구조의 스피커 개발 제작을 통한 과학적 원리 지도, 제63회 전국과학전람회 출판번호 1158

I 연구진 I

이해민 (Haemin Lee, 인천진산과학고등학교, s09136@naver.com), 주저자

이기욱 (Kiwook Rhee, 인천진산과학고등학교, a26070434@gmail.com), 공동저자

송재민 (Jaemin Song, 인천진산과학고등학교, jaemin0003@naver.com), 공동저자

송준하 (Joonha Song, 인천진산과학고등학교, hjulbo26@naver.com), 공동저자

김태현 (Taehyun Kim, 인천진산과학고등학교, puppy020124@naver.com), 공동저자

지도교사 : 이창재 (Changjae Lee, 인천진산과학고등학교, dipole72@hanmail.net)

지도교수 : 박정우 (Jeongwoo Park, 서울대학교 물리 교육, pjw1006@snu.ac.kr)

휴대용 소수력발전의 효율 증진에 관한 연구

장예진 · 이승현 · 정윤찬 · 김혜윤 · 한익석 - 인천진산과학고등학교

Research on Efficiency Increasing of Portable Minor Hydroelectric Power Generation

Yejin Jang · Seunghyun Ha · Yoonchan Jeong · Hyeyun Kim · Euseok Han - Incheon Jinsan Science High School

국문초록

본 연구의 목적은 신 재생에너지의 필요성이 대두된 가운데 그 중 친환경적인 물 에너지인 소수력 발전에 주목하여 관련된 변인을 조작하여 효율을 증진시키는 것이다. 첫째, 수차의 모양, 날개 각도에 따른 에너지 발전 효율은 블레이드의 면적을 넓힌 개선된 프란시스형 수차 모델의 발전량이 가장 많았으며, 프로펠러형 수차의 경우의 발전량이 가장 낮았다. 둘째, 가속장치에서는 최대 전류량을 확인한 결과 가속장치 있는 경우가 없는 경우보다 효율이 높았다. 셋째, 외관형에서는 모델의 곡률에 따른 생긴 와류의 변화를 슈리렌 기법을 이용해 조사한 결과 새 모양의 모델의 경우가 와류를 가장 적게 발생한다는 결과가 나왔다.

이상의 연구를 통해 소수력 발전 효율 증진에 영향을 가장 많이 미치는 것으로 프로펠러와 휴대용 소수력 발전기의 외관 모형이며 블레이드의 면적을 넓힌 개선된 프란시스형 수차와 유속을 높일 수 있는 입수구 가속장치, 와류를 적게 발생시키는 새 모양의 외관형 구조가 발전효율을 높일 수 있음을 알 수 있었다. 본 연구는 향후 개인이 소장할 수 있는 효율적인 휴대용 소수력 발전 장치를 개발하는데 중요한 시사점을 제공할 것이다.

중심어 : 소수력 발전, 수차, 가속장치, 외관 모형, 휴대용

ABSTRACT

The purpose of this study is to improve the efficiency of minor hydroelectric power generation which is using environment-friendly water energy by modulating related variables. First, the energy generation efficiency according to the shape of aberration and pitch angle was the most in Francis aberration that expanded the blind and the lowest in Propeller aberration. Second, in the accelerating device, the maximum current amount was higher than in the case where there is no accelerating device. Third, in the external model, the variation of the vortex caused by the curvature of the model was investigated by using the Schlieren method. As a result, it was found that the bird model produced the lowest amount of vortex.

Through the study, the most influential factor for the improvement of minor hydroelectric power generation efficiency is the propeller and the external model. The improved Francis type aberration which enlarges the area of the blind, the inlet accelerator which can increase the flow rate, and the external model shaped like a bird has shown an improvement of the power generation efficiency. Also, this study will provide important implications for developing an efficient portable minor hydroelectric power generation device that can be owned by individuals in the future.

Key words: minor hydroelectric power generation, propeller, acceleration device, appearance model, portable

I. 서론

1. 연구 동기

최근 미세먼지로 인해 우리나라는 물론이고 전 세계적으로 수많은 생명이 고통받고 있으며 언제 터질지 모르는 원자력 발전 사고로 인해 친환경적이고 재생 가능한 에너지원이 필요하게 되었다. 19세기는 화석연료의 시대였다. 기차에 석탄이, 자동차에 석유가 이용되었으며, 전력도 화력발전을 통하여 생산하였다. 그러나 지구온난화의 주요 원인으로서 이산화탄소가 지목되면서 탄소를 배출하지 않는 발전으로서 핵분열 에너지를 이용하는 원자력 발전이 대두되었다. 그러나 이전에 체르노빌, 후쿠시마에서 있었던 원전 사고들과 같이 원전으로 인한 국가적 피해도 무시할 수 없었다. 이러한 화석연료와 원자력 발전에서 벗어나 친환경적이고, 재생 가능한 에너지원의 개발 관심이 높은 가운데 누구나 쉽게 접할 수 있는 물을 이용한 소수력발전이 주목하게 되었다[1].

소수력발전은 수력발전을 소형화한 발전 방식이며 큰 낙차를 이용하지 않기 때문에 댐 건설이 필수이지 않으며 환경을 파괴하지 않고 발전할 수 있다. 또한 수력 발전보다 지형 제한성이 적어 좁은 물 흐름에도 사용가능 하고 개인이 쉽게 접할 수 있는 장점을 가지고 있다. 이러한 높은 접근 가능성에도 불구하고 소수력발전 방식은 아직 수력 발전을 단순 소형화한 단계에 머물러 있으며 개인화의 가능성에 대해서도 사람들의 관심을 많이 받고 있지 않다.

본 연구에서는 소수력발전을 일반적인 대형 수력 발전소에 쓰이는 수차들과 비교하여 알아보고 유속이 빠른 강이나 좁은 하천에서 소수력 발전의 효율을 증진시키자 하였다. 먼저 소수력발전 효율과 관련될 변인을 수차와 내부 가속 장치, 외관으로 나누어 생각하여 소수력발전의 효율에 관한 연구를 진행하였다. 즉, 유속을 이용한 수차와 유속을 증가시킬 수 있는 내부 가속장치를 고안하고 물흐름 마찰과 관련 있을 것이라 생각되는 외관형에 따라 소수력 발전의 효율을 달라질 수 있을 것이라 생각하였다. 이를 통해 소수력 발전기의 효율을 높이고자 한다.

2. 용어의 정의

가. 소수력발전

산간벽지의 작은 하천이나 폭포수의 낙차를 이용하여 높이로 인한 수력을 전기에너지로 전환하는 발전 방식. 수력발전과 규모의 차이가 있다.

나. 수차

물의 에너지를 이용하여 원동력을 얻는 수력 터빈의 회전자

다. 외관형

수차와 가속장치를 감싸는 소수력 발전기의 바깥부분으로 물의 흐름을 직접 받는 부분

라. 가속장치

경사진 구조로서 수차에 연결되어 수차에 도달하는 유속을 높여주는 도구

마. 피치각(Pitch Angle)

회전면에 대한 프로펠러 깃 단면의 기울기

바. 캄버각(Camber Angle)

날개 깃 단면에서 평균 두께 선의 곡률

사. 블레이드

프로펠러 날개의 수

II. 이론적 배경

1. 수력 발전 및 소수력 발전의 정의

수력발전은 높은 곳에 위치한 물의 위치에너지를 발전기 터빈의 운동에너지로 변화시키고 발전기 내부의 전자기유도 현상을 이용하여 전기를 얻어내는 방법이다. 예전에 사용되던 물레방아는 물이 높은 곳에서 떨어지면서 물레를 돌려 역학

적 보존법칙에 의하여 물레가 돌아가는 운동에너지로 변화하게 되는 방식이다. 수력발전의 기본원리도 이와 같지만 터빈의 운동에너지를 다시 전기에너지의 형태로 변환하는 과정이 추가된다. 일반적으로 수력발전은 댐을 지어 상류에 물을 가득 채웠다가 수문을 열고 이를 댐의 하류로 떨어뜨려서 터빈을 돌리는 형식이다. 따라서 물의 자연낙차, 자연유량에 따라 발전 용량도 달라지고 발전량이 지형, 계절과 강우량의 영향을 많이 받는다. 이를 해결하고자 수력 발전을 소형화 한 소수력 발전을 사용하여 에너지를 생산하는 방법이 있다. 소수력 발전은 댐으로 발전하는 형식뿐만 아니라 빌딩 내에서 터널 등을 사용하여 낙차 에너지를 발생시키거나, 터널 내의 압력을 이용해 터빈을 돌리는 것 또한 포함된다. 즉 수력 발전 중 비교적 적은 물로 적은 발전용량을 생산하는 발전이 소수력 발전인 것이다.

2. 수차 형태에 따른 소수력 발전의 종류

〈Table 1〉 The table of minor hydroelectric power generation by aberration [2]

구분	종류	특징	n_h (수력효율)
충동 수차	펠톤 수차	수압관으로 도입된 물을 노즐에서 빠른 속도로 분출시키고 이를 버킷에 부딪치게 하여 그 충동력으로 날개차를 회전시켜 동력을 얻는다.	$\frac{v_1^2/2g}{H} \frac{L_h}{\gamma Q v_1^2/2g}$
	타고 수차	펠톤형과 달리 물 반사 각도가 작다. 펠톤 수차에 비해 더 큰 용량과 높은 속도에서 사용 가능하다.	$\frac{v_1^2/2g}{H} \frac{L_h}{\gamma Q v_1^2/2g}$
반동 수차	프로펠러 수차	회전체 주위 4~8개의 날개깃을 고정시킨 수차로 낙차가 클수록 날개깃이 많아지며 물의 흐름 속에서 프로펠러를 회전시켜 동력을 얻는다. 구조가 간단하여 가격이 저렴하나 날개깃이 고정되어 있어 유량이 변하면 효율이 떨어진다.	$\frac{u(v_{u1} - v_{u2})}{gH}$
	카플란 수차	기본적인 프로펠러 수차에서 유량의 변화에 따라 날개깃의 각도를 변화시킬 수 있도록 개량한 수차이다. 낙차변화가 큰 경우에도 안정적으로 사용 가능하며 표준화를 통해 가격을 낮출 수 있어 대규모 수력 발전에 적합하다.	$\frac{u(v_{u1} - v_{u2})}{gH}$
	프란시스 수차	수차의 회전축을 기준으로 날개차인 런너가 있고, 그 바깥은 안내날개가 있다. 물은 날개 차의 바깥에서부터 중심축 방향으로 직각으로 들어오며 그 때 만들어진 수압이 날개에 반동을 주어 날개차를 회전시키고 회전축 방향으로 유출하여 흡출관을 통해 방수로에 도달한다. 상황에 따라 수차 전체 소형화가 가능하며 넓은 범위의 낙차에 적용 가능하다. 다른 수차에 비해 비교적 효율이 높아 발전 용으로 많이 쓰이고 있다.	$\frac{1}{gH}(v_1 v_1 \cos \alpha_1 - v_2 v_2 \cos \alpha_2)$

3. 수력 발전기 출력량

수력 발전기의 출력량은 다음의 공식으로 구할 수 있다.

$$P = 9.8QHn_k [kW]$$

여기서 P : 수차의 출력량[kW], Q : 물의 유량[m³/s], H : 유효 낙차[m], n_k : 수차 효율 이다. 위 식에 의해 수력 발전기의 출력은 물의 유량 Q와 유효 낙차 H에 비례한다. 또한 에너지 보존 법칙으로부터 $mgH = \frac{1}{2}mv^2$ 이 성립하는데 이 식을 유속에 관한 식으로 정리하면 $2gH = v^2$ 으로 $v = \sqrt{2gH}$ 이다. 여기서 물의 점성 마찰을 고려하여 속도계수를 사용하면 실제 속도 v에 대하여 $v = Cx\sqrt{2gH}$ [m/s] 식이 성립한다. 이에 따라 유속과 수차의 출력량은 비례관계가 성립한다.

4. 연속방정식

어떤 물리량이 보존되는 상태로 이송되는 것을 서술한 방정식이다. 유체역학에서의 연속방정식을 나타내면 질량 보존의 법칙을 미분 방정식의 형태로 나타낸 식이며, $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$ 과 같이 나타낼 수 있다. 간단하게 나타내면 관 속에 물이 흐를 때, $A_1 V_1 = A_2 V_2$ 라고 할 수 있다.

5. 베르누이 방정식

유체의 층류에서, 두 점 A와 B의 높이 그리고 두 점에서의 압력과 흐르는 속도 사이의 관계를 두 점에서 역학적 에너지가 보존됨을 바탕으로 수식으로 나타낸 것을 가리킨다. 기준점에 대한 높이 h 로 위치에너지를, 유체가 흐르는 속도 v 로 운동에너지를, 압력 P로 내자. 단, $A_1 V_1 = A_2 V_2$ 로 가정한다. 이때, $P_A + \rho gh_A + \frac{1}{2}\rho v_A^2 = P_B + \rho gh_B + \frac{1}{2}\rho v_B^2$ 가 성립하게 된다.

6. 레이놀즈 수

유체역학에서 레이놀즈 수는 “관성에 의한 힘”과 “점성에 의한 힘”의 비로써, 주어진 유동 조건에서 이 두 종류의 힘의 상대적인 중요도를 정량적으로 나타낸다. $NR = \nu d / \nu$ 또는 $\rho \nu d / \mu$ 로써 차원이 없는 수로 나타낸다. 여기서 ρ 는 밀도, μ 는 점성계수, d는 유로직경, ν 는 속도, ν 는 μ / ρ 로 동점성계수이다. 레이놀즈 수는 또한 유동이 층류인지 난류인지를 예측하는 데에도 사용이 가능한데, 층류는 점성력이 지배적인 유동으로서 레이놀즈 수가 낮고 평탄하면서도 일정한 유동이 특징이다. 반면 난류는 관성력이 지배적인 유동으로서 레이놀즈 수가 높아 임의적이며 와류와 같은 기타 유동의 변동이 특징이다. 층류의 한계는 $NR \approx 2000$, 전부 난류가 되는 것은 $NR = 3000 \sim 4000$ 일 때이다.

7. 와류

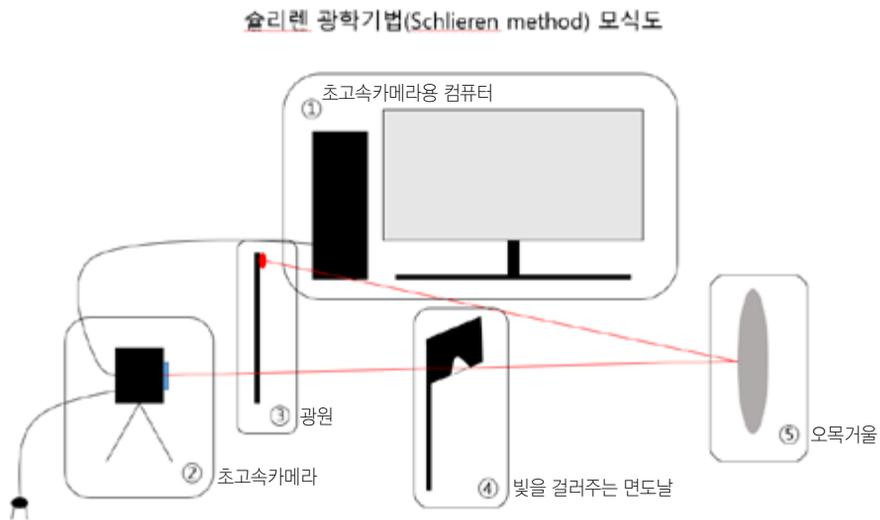
와류는 유체의 회전운동에 의하여 주류와 반대방향으로 강하게 소용돌이치는 유체의 흐름을 정의한다. 이러한 불규칙적인 유체의 흐름을 난류라고 하며, 유체의 가장자리가 굴곡이 있고, 유속이 빠르고, 유체점성이 작을 때 발생한다. 유체의 규칙적인 흐름을 층류라고 하며, 난류는 층류보다 수송계수가 더 크며, 레이놀즈 수의 값이 일정 수준 위로 올라갈 경우 층

류가 난류로 바뀌게 된다. 난류는 나비에 - 스토크스 방정식의 비정상해의 집합이나, 레이놀즈 수가 일정 수준 이상이 된다면 나비에 - 스토크스 방정식을 통해 구하기 어렵다. 그래서 난류는 이론적인 값을 정확히 구하지 못하며, 시뮬레이션을 통하여 구한다.

8. 슐리렌 광학 기법(Schlieren method)

슐리렌 기법이란 굴절률의 법이라고도 명명한다. 슐리렌 기법은 공기와 같은 투명한 매질의 움직임을 가시적으로 보기 위해서 사용하는 광학적 방법이다. 투명물질의 굴절률에 의한 빛의 진행방향의 변화를 이용하여 투명한 매질의 움직임을 볼 수 있게 해주는 광학적 방법이다.

본 연구에서 슐리렌 기법을 실현하기 위해 [Fig. 1]과 같이 장치를 설계하고 구상하여 진행했다. 광원에서 나간 빛이 오목거울에 반사되어 면도날에 의해 걸러진 후 초고속카메라에 도달한 후 컴퓨터를 통해 투명한 매질의 움직임을 가시적으로 볼 수 있게 된다.



[Fig. 1] Schlieren method pattern diagram

Ⅲ. 연구 방법 및 절차

1. 연구 개요

〈Table 2〉 The table of a study on the improvement of efficiency of minor hydroelectric power generation

〈휴대용 소수력 발전장치 구조에 따른 연구 개요〉		
수차 형태	입수구 가속 장치	외관형
사전 연구1 : 프로펠러 형 변인조작(각도, 날개 수)에 따른 전류량 측정	입수구 가속 장치의 유무에 따른 유속 과 전류량 측정	솔리덴 광학 기법을 이용하여 네 가지 외관형에 따른 유체의 흐름의 양성을 분석하고 레이놀즈 수를 측정함.
사전 연구2 : 프란시스 형 변인조작(각도, 날개 수)에 따른 전류량 측정		
본 연구 : 개선된 수차의 제작 및 실험		

2. 연구 시 사용 기기

가. 3D 프린터기

3D프린터는 필라멘트를 사용하여 입체적 물건을 뽑아내는 장치이다. 3D 모델링 파일을 평면 레이어의 집합으로 변환시켜 그에 맞게 레이어를 올리며 입체적 물질을 만든다. 수차와 유속 가속 장치, 외관형 모델 제작에 이용되었다.

나. 풍동장치

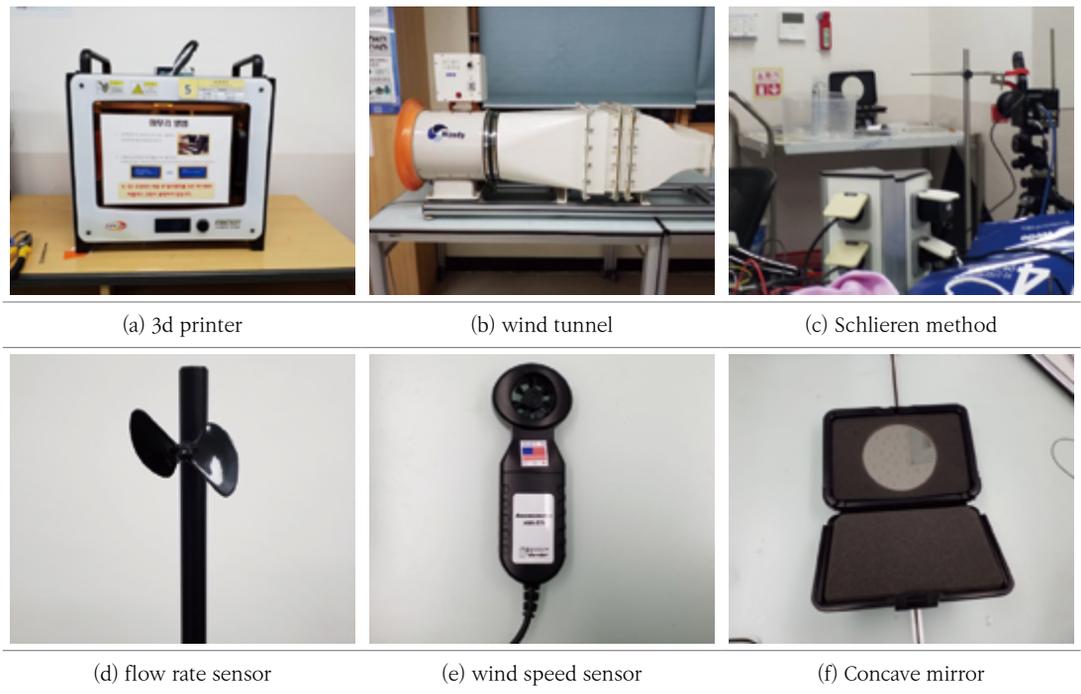
풍동장치는 고속의 기류를 발생하는 장치이다. 흡입부 부분에는 유동 정류기가 난류를 없애주고 평행하게 바람이 들어오게 해준다. 터빈에 의해 흡입된 기류는 3.3배 더 빠른 풍속으로 바뀌어 방출이 된다. 수차의 출력량 비교에 이용되었다.

다. MBL 실험장치-전류센서, 유속센서, 풍속센서

MBL이란 컴퓨터를 이용하여 과학실험을 하는 장치를 일컬으며 데이터수집과 분석하는데 활용된다. 센서로 물리량을 측정하여 인터페이스에 전기적 신호를 제공하면 인터페이스에서 신호를 받아 컴퓨터에 측정된 전류량, 유속, 풍속 값을 그래프로 나타낸다.

라. 초고속 카메라를 이용한 솔리덴 장치

솔리덴 기법에 의한 굴절을 통해 2개의 볼록렌즈를 통하여 빛을 굴절시켜 사용한다. 또한 렌즈 대신 오목거울 하나로 반사된 빛이 모이게 하는 방식으로 솔리덴 장치를 사용하기도 하는데, 후자의 방법을 더 자주 사용한다. 기본적으로 이러한 방식을 통해 생긴 장치를 초고속 카메라(HSC)로 촬영하여 가시적으로 보게 된다. 본 실험에서는 외관형의 형태에 따른 와류의 변화를 관찰하는데 사용되었다.



[Fig. 2] Research equipments

3. 사전 연구

가. 수차 선정 과정

본 연구의 취지가 강 및 하천과 같은 지형에서 물을 저장할 필요 없이 발전하는 것이므로 물의 위치에너지를 이용하는 충동수차는 적합하지 않다고 생각하였다. 따라서 물의 필요량이 충동수차보다 많이 수 있지만 물의 낙차가 없어도 발전할 수 있는 반동수차를 선정하였다. 또한 반동수차 중에서도 물의 위치에너지 없이 발전할 수 있고 반동 수차 종류에 속하는 프로펠러형과 프란시스형을 선정하여 실험을 진행하였다[3-6].

나. 프로펠러 수차의 발전효율 확인

수력발전에 대하여 찾아 본 결과 실제 발전소에서 사용하는 수차는 다양한 종류가 있다는 것을 알게 되었고, 우리는 그중 일부를 선택하여 발전 효율을 실험 해보았다. 수력발전 시 같은 속도, 같은 상황이라도 사용하는 수차의 모양에 따라 힘을 받는 방향과 이의 총합이 달라져 발전량에 큰 차이가 나게 된다. 유속이나 낙차의 정도에 따라 다른 기존 수력 발전에서 사용되는 수차를 3D 프린터로 출력하여 확인하여 발전 효율을 확인하고 소수력 발전에 적합한 수차의 형태를 고안해 보았다.



[Fig. 3] Waterwheel

본 실험에 사용한 수차는 [Fig. 3]의, 우리가 일상생활에서 잘 볼 수 있는 형태의 수차이다. 가운데 축 부분은 지름 1.6cm, 중심으로부터 날개의 말단까지의 거리는 4cm이다. 피치각 25°, 캠버각 10° 블레이드 수는 5개로 변인을 조절하여 그에 따른 발전량의 변화량을 살펴보았다. 프로펠러의 날개의 가로 세로 비율은 1:1로 제작하였다[7].

1) 실험 과정

발전기에 수차와 MBL 전류 센서를 장착하고, 풍동장치의 풍속을 8~9단계로 설정한 후 MBL의 Logger Pro 프로그램을 이용하여 발전량의 시간에 따른 변화를 보며, 최댓값을 기록하였다.

2) 실험 결과

<Table 3> The table of Power generation per hour

시간(s)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
전류(mA)	-0.1	0.0	22.8	47.2	37.8	46.6	42.3	35.1	38.9	32.7



[Fig. 4] Propeller aberration power generation

[Fig. 4]에서 보는 바와 같이 프로펠러의 블레이드가 5개인 수차의 발전량을 풍동장치로 10초 동안 풍동장치 8~9단계의 풍속에서 측정하였다. 실험도구 MBL은 매우 작은 값의 전류까지 측정이 가능하기 때문에 구성된 회로에 전류가 흐르기 전까지는 환경에 의해 측정값이 변할 수 있다. 이때, 환경의 변화로 기준에 비해 전류량이 미세하게 작아졌을 경우 전류량이 음의 값을 나타낼 수 있다. 그 값을 제외한 9초 동안 전류량의 평균값이 약 30.34mA이고 평균 전력은 0.04J이었다. 프란시스형 수차의 발전량과 전력보다 아주 적었다. 따라서 프로펠러 형태의 수차는 본 연구에서 진행하고자 하는 소수력 발전 환경에 적합하지 않다고 생각하였다.



[Fig. 5] Francis aberration

다. 프란시스 수차의 발전효율 확인

본 실험에 사용한 수차는 [Fig. 5]의, 일반적인 수력발전소에서 가장 많이 사용되고 있는 형태의 프란시스 수차이다. 가운데 축 부분은 지름 1.6cm, 중심으로부터 날개의 말단까지의 거리는 4cm로 설계하였다.

1) 실험 과정

발전기에 수차와 MBL 전류 센서를 장착하고, 물을 흐르게 한 후 MBL의 Logger Pro 프로그램을 이용하여 발전량의 시간에 따른 변화를 보며, 최댓값을 기록하였다.



(a) Francis aberration measurement and rotation experiment



(b) Francis aberration current measurement and rotation experiment

[Fig. 6] Francis aberration current

2) 실험 결과

[Fig. 6]에서 보는 바와 같이 MBL 전류센서를 사용하여 프란시스 수차의 전류량을 확인해 보려 하였으나 프란시스 수차가 회전하지 않았다. 위와 같은 형태의 수차는 대형 수력 발전에 많이 이용하고 있지만 소수력 발전에는 적합하지 않다는 것을 확인 할 수 있었다.

라. 개선된 프란시스 수차의 제작

기존 프란시스 수차의 모양을 소수력 발전에 맞게 고안하여 제작하였다.



(a) Improved Francis aberration



(b) Viewed from above

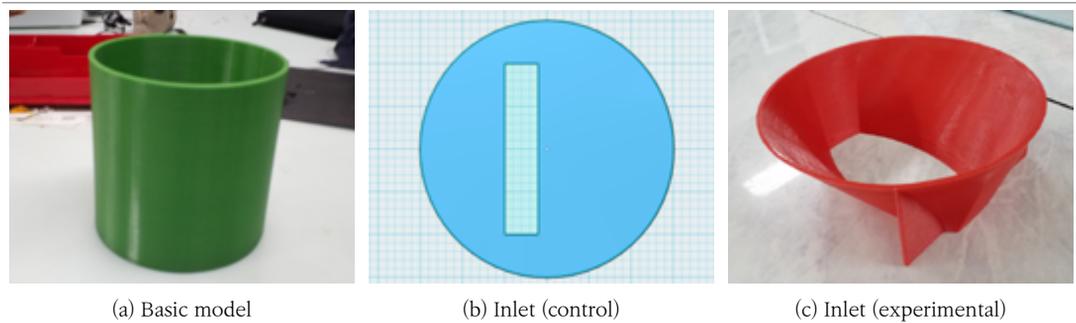
[Fig. 7] Improved Francis aberration

유량이 적은 소수력발전의 특성상, 일반 수력발전 수차를 사용하기에는 날개가 받는 힘이 매우 부족했다. 이를 보완하기 위해 [Fig. 7]의 형태로 수차의 높이를 높여서 수차에 물이 닿는 면적을 늘리고자 하였다.

4. 연구 설계

가. 입수구의 가속 장치 연구

수력발전에서 발전량을 증대시키기 위해, 우리는 수차의 회전각속도를 증가시켜야 했다. 따라서 입수구의 면적을 점차적으로 좁히고 경사를 만들어 유체의 속도를 증가시키고자 하였다. 물과 바람이 유체라는 유사성을 적용시켜 풍동장치를 사용하여 실험을 진행하였다[8].



[Fig. 8] Accelerating outer model

실험에 사용한 모형들은 [Fig 8]과 같다. [Fig. 8(a)]의 기본 모형은 지름 15cm, 높이 15cm의 원기둥이다. 3D 프린터를 이용하여 제작되었으며 실험군 입수구와 대조군 입수구가 원기둥의 한 쪽 끝에 연결되어 풍동 실험을 하게 되었다. [Fig. 8(b)]의 대조군 입수구는 지름 15cm, 깊이 3mm의 원기둥이다. 수차가 시계 방향으로 회전하기 위해 사각형의 오른쪽 선분이 그와 평행한 원의 지름으로부터 5mm 떨어져 있도록 설계되었다. 사각형 부분의 면적은 20cm²이다. [Fig. 8(c)]의 실험군 입수구는 지름 15cm, 깊이 15cm의 형태이다. 3D 프린터를 이용하여 제작되었다. 바깥쪽 원 부분의 단면적은 176.7cm²이고, 안쪽 사각형 부분의 단면적은 20cm²이다. 원에 대한 사각형의 상대적 위치는 대조군과 같다.

나. 가속 장치의 선정 과정

1) [Fig. 8(a)]에서 보는 바와 같이 기존 모델 (대조군)은 프로펠러의 부분만 물을 들어가게 하고 입수구의 다른 부분을 막아 물이 들어갈 수 없게 하였다.

2) [Fig. 8(c)]에서 보는 바와 같이 가속 모델 (실험군)은 모델 내부의 유속을 증가시키기 위해 만들었다. 연속 방정식 ($A_1 \cdot V_1 = A_2 \cdot V_2$)과 운동방정식에 따르면 입의 한 공간에서 비압축성 유체일 경우 단위 시간당 유입되는 양과 유출되는 양이 같아야 하므로 단면적이 좁힐수록 유체의 속도가 빠르다는 것을 이론적으로 알 수 있었다. 따라서 우리는 가속 모델의 모양을 유체가 통과 할수록 단면적이 줄어드는 모양으로 만들었다. 가속 장치의 길이는 프로펠러와 모터가 차지하는 내부 공간을 빼고 최대한 많이 늘렸으며 이때의 가속장치의 외부 단면적은 176.7cm²이고, 안쪽 사각형 부분의 단면적은 20cm²이다.

3) 실험 과정

외관형, 수차 및 가속장치를 합친 모델로 풍속 5m/s와 14m/s 에서 대조군 입수구와 실험군 입수구의 시간에 따른 발전량의 변화를 측정하였다.

4) 예상 결과

대조군 입수구는 초당 26L의 바람이 통과하지만, 면적이 8.835배 줄어들도록 설계된 실험군 입수구는 연속방정식에 의해 속도가 8.835배 늘 것이고 회전 운동 에너지($\propto \omega^2$)가 전부 전기 에너지($\propto I^2$)로 변환 다고 가정하면, 발전 전류량은 8.835배 늘어날 것이라 생각하였다.

다. 외관 모형의 형태에 따른 유속의 흐름 비교

본 연구에서 추구하는 소수력 발전의 특징은 유속이 빠르고 지형이 불규칙한 계곡이나 하천에서도 사용 가능하다는 것이다. 따라서 이러한 지형에서 수차를 보호할 수 있는 적절한 외관 모형이 필요하다. 이때, 가장 이상적인 외관 모형은 내부로 지나가는 유량을 거의 변화시키지 않으며 수차를 보호할 수 있는 것이다. 따라서 실험을 통하여 내부로 지나가는 유량이 가장 큰 외관 모형 형태를 찾고자 하였다.

1) 실험 설계

이 실험에서는 외관 모형의 부피, 헤어 드라이기와 외관 사이의 거리, 헤어 드라이기의 바람 세기를 일정하게 통제하였으며, 외관 모형의 종류를 각각 조작 변인으로 설계하였다.

2) 실험 과정

사전에 선정한 외관형의 4가지 형태의 입구 출구를 솔리덴 기법을 통해 유체의 흐름을 분석하고 레이놀즈 수를 계산하였다.

라. 외관 모형 선정 과정

1) 1차 외관 모형

직육면체 모양은 같은 양의 재료대비 공간 효율이 떨어지며, 수차가 회전을 하면 원형으로 최전을 하여 직육면체의 모양과 어울리지 않고, 비효율적이기에 실험 대상에서 제외하였다. 또한 재료대비 가장 부피 효율이 좋다고 알려진 올로이드 모양의 경우 곡면을 가지고 있으나 정확한 원 모양과는 차이가 있어 수차의 회전과 잘 맞지 않아 최종 실험의 대상에서 제외하였다.

2) 2차 외관 모형

외관형의 내부, 외부 곡률을 변인으로 삼고 원통 모형, 제트 모형, 물고기 모형, 새 모형의 외부 부피를 약 350㎤로 통일시켜 설계하였다. (오차범위 ±3.5)

가) 원통 모형(대조군)

$$V = \pi(3.34)^2 \times 10 \approx 350.46 \text{ (cm}^3\text{)}$$

나) 제트 모형

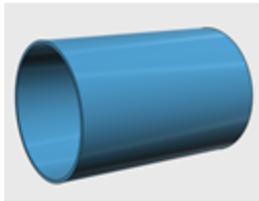
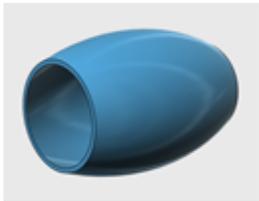
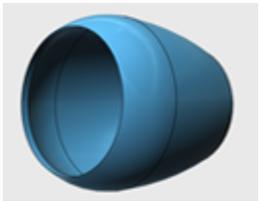
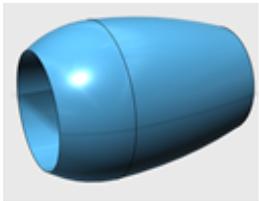
$$V = \int_{-5}^5 \pi(\sqrt{625 - x^2} - 21.5)^2 dx \approx 349.6 \text{ (cm}^3\text{)}$$

다) 물고기 모형

$$V = \int_{-3}^0 \pi(\sqrt{25 - x^2} - 13)^2 dx + \int_0^7 \pi(\sqrt{(23.8)^2 - x^2} - 20.1)^2 dx \approx 357.8 \text{ (cm}^3\text{)}$$

라) 새 모형

$$V = \int_{-3}^0 \pi(\sqrt{25 - x^2} - 13)^2 dx + \int_0^7 \pi(\sqrt{(23.8)^2 - x^2} - 20.1)^2 dx \approx 357.8 \text{ (cm}^3\text{)}$$

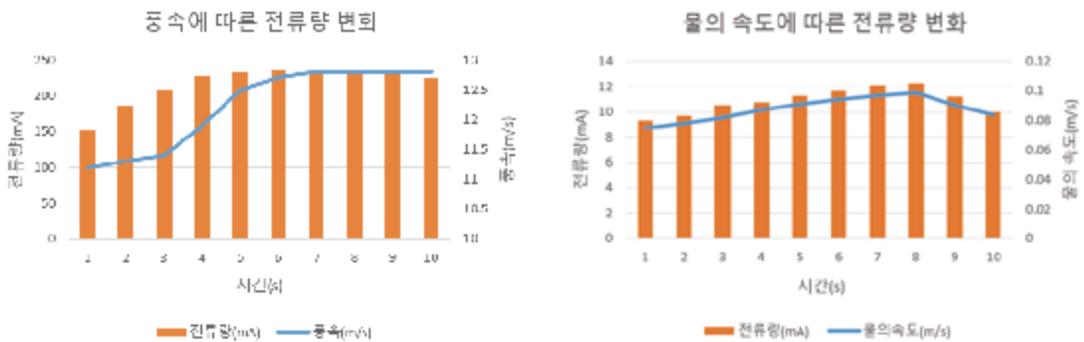
대조군	비행기의 가운데가 오목한 엔진 모양에서 고안	물고기의 유선형적 형태에서 고안	새의 유선형적 형태에서 고안 (3번과 단면이 다르다.)
Cylinder	Jet Engine Model	Fish Stream line model	Bird Stream line model
$A = \pi(3.34)^2 \approx 35.05 (cm^2)$	$A = \pi(3)^2 \approx 28.27 (cm^2)$	$A = \pi(3.5)^2 \approx 38.48 (cm^2)$	$A = \pi(3.5)^2 \approx 38.48 (cm^2)$
			
(a) Cylinder	(b) Jet Engine Model	(c) Fish Stream line model	(d) Bird Stream line model
			
(e) Cylinder	(f) Jet Engine Model	(g) Fish Stream line model	(h) Bird Stream line model

[Fig. 9] Appearance type

IV. 연구 결과

1. 개선된 프란시스형 수차 제작 및 실험

가. 유체 속도에 따른 발전기 전류량 변화 양상



[Fig. 10] Change of current flow

<Table 4> The table of The Change of Current Rate by the Speed of Water

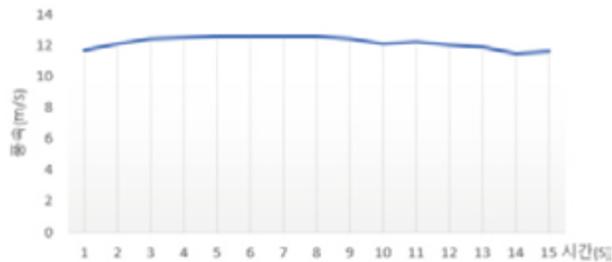
시간(s) 구분	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
유속(m/s)	0,075	0,078	0,082	0,087	0,091	0,094	0,097	0,099	0,090	0,084
전류량(mA)	9.3	9.7	10.5	10.8	11.3	11.7	12.1	12.3	11.2	10.0

<Table 5> The table of The Change of Current Rate by the Speed of Wind

시간(s) 구분	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
유속(m/s)	11,2	11,3	11,4	11,9	12,5	12,7	12,8	12,8	12,8	12,8
전류량(mA)	153,5	185,0	208,9	227,2	231,6	234,8	233,2	230,9	230,6	223,9

[Fig. 10]에서 보는 바와 같이 개선된 프란시스 수차 모델을 제작하고 풍동장치로 실험을 진행하여 전류량을 측정해보았다. 풍속에 따른 전류량 변화 측정 실험에서 10초 동안의 평균 발전량 215.96mA 이고 물의 속도에 따른 전류량 변화 측정 실험에서 10초 동안의 평균 발전량은 10.89mA이다. 물의 속도에 따른 실험의 전류량이 풍속 실험보다 적게 나왔지만 보통 강의 유량이 0.1~2.0 m/s이기 때문에 12.4~24.85mA의 출력을 얻을 수 있다고 생각한다. 또한 두 실험 모두 유체의 속력과 전류량이 비례하는 결과가 도출되었으므로 본 연구에서는 풍속을 이용하여 1차 실험을 진행하였고, 물을 이용하여 2차 실험을 진행하였다[10].

2. 가속장치의 유무에 따른 풍속측정



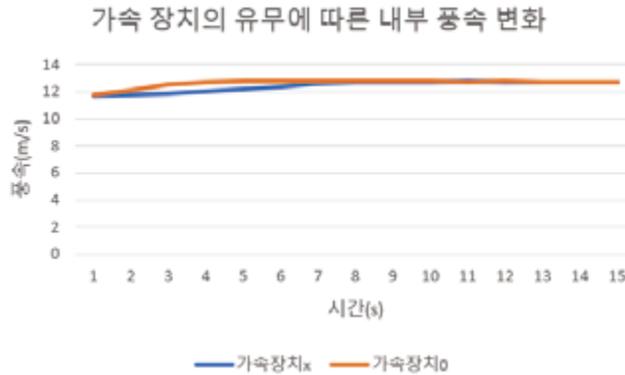
[Fig. 11] Nine-stage wind speed

<Table 6> The table of Step 9 Wind Speed Measurement

시간(s)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
풍속 (m/s)	11,7	12,1	12,4	12,5	12,6	12,6	12,6	12,4	12,2	12,0	11,9	11,9	11,9	11,5	11,1

사전실험으로 풍동장치의 8단계에서 9단계의 속도를 풍속센서로 미리 측정해본 결과 [Fig. 11]에서 보는 바와 같이 15초 동안의 평균값이 약 12.3 m/s이었다.

가. 풍동장치 8~9단계의 풍속에서 가속 장치의 유무에 따른 발전 효율 확인 실험



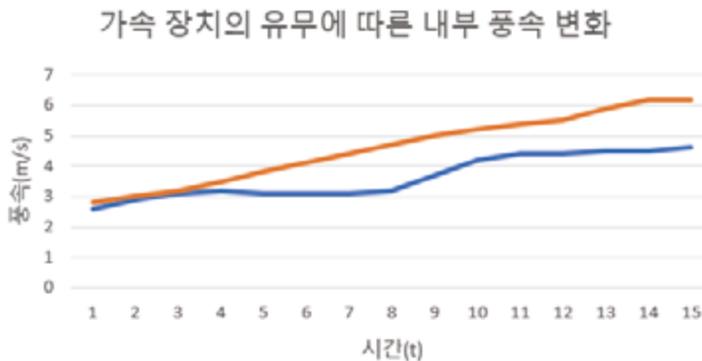
[Fig. 12] Graph of 8 to 9 changes in wind speed with or without accelerators

〈Table 7〉 The table of Changes in the wind speed of 8 to 9 phases depending on the presence or absence of the acceleration device

종류 \ 시간(s)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
가속장치 0(m/s)	11.8	12.1	12.5	12.7	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.7	12.7	12.7	12.7	12.7
가속장치 x(m/s)	11.7	11.8	11.9	11.9	12.0	12.2	12.4	12.6	12.7	12.7	12.7	12.8	12.7	12.7	12.7

풍동장치의 8~9단계의 평균속도에 해당하는 14.4m/s의 풍속에서 가속장치의 유무에 따라 모델의 내부 풍속을 측정해 보았다. 가속장치가 없는 모델로 측정 할 때 10초 동안 내부 풍속의 평균값은 약 12.17 m/s이고 가속장치가 있는 모델의 내부의 풍속이 10초 동안의 평균값은 약 12.23 m/s이다. [Fig. 12]에서 보는 바와 같이 14.4 m/s의 풍속에서 가속장치가 있을 때의 내부 풍속과 가속장치 없을 때의 내부풍속이 크게 다르지 않았다. 따라서 우리는 풍속이 매우 빠른 반면 가속장치의 길이는 너무 짧아 가속하는 효과가 적게 나타나게 된 것으로 생각하였다.

나. 풍동 장치 2~4단계의 풍속에서 가속장치의 유무에 따른 발전 효율 확인 실험



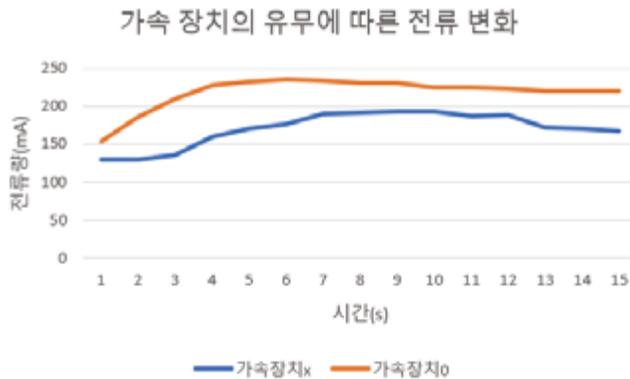
[Fig. 13] Graph of 2 to 4 changes in wind speed with or without accelerators

<Table 8> The table of Changes in the wind speed of 2 to 4 phases depending on the presence or absence of the acceleration device

종류 \ 시간(s)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
가속장치 0(m/s)	2.8	3.0	3.2	3.5	3.8	4.1	4.4	4.7	5.0	5.2	5.4	5.5	5.9	6.2	6.2
가속장치 x(m/s)	2.6	2.9	3.1	3.2	3.1	3.1	3.1	3.2	3.7	4.2	4.4	4.4	4.5	4.5	4.6

가속장치의 길이가 풍속이 1초에 가는 거리에 비해 매우 짧아 가속 장치의 속도 증진효과가 잘 보이지 않은 관계로 재 실험을 진행하였다. 풍동장치의 속도를 2~4 단계로 풍속을 낮추어 가속장치가 풍속을 증가시킬 수 있는 효율을 측정해 보았다. [Fig. 13]에서 보는 바와 같이 가속 장치가 있는 모델의 내부 풍속을 측정하였을 때, 20초 동안의 평균 속도가 약 5.21 m/s이고 가속 장치 없는 모델의 내부 풍속을 측정하였을 때, 20초 동안의 평균 속도는 약 3.79 m/s이다. [Fig. 8]에서 보는 바와 같이 가속 장치가 있을 때 내부 풍속이 없을 때보다 입수구의 면적이 약 2.9(176/60) 배가 줄어들었고 속도가 1.3 배가 늘어난다는 것을 알 수 있었다. 풍속이 느린 상태에서 가속장치의 속도 증가효과를 확인하는 것이 용이하였으며 가속 장치가 유체의 속도를 증가시킬 수 있다는 것을 확인할 수 있었다.

3. 가속장치의 유무에 따른 전류량 측정



[Fig. 14] Current graph with or without accelerators

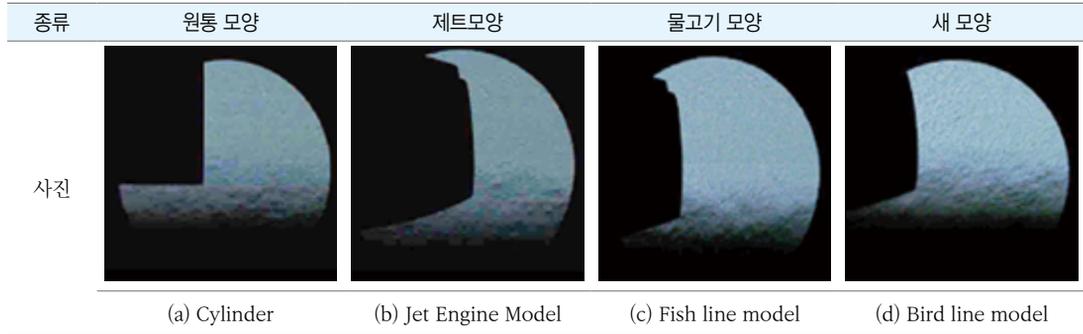
<Table 9> The table of The change in current flow with or without the acceleration device

종류 \ 시간(s)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
가속장치 0(m/s)	153	185	208	227	231	234	233	230	230	223	224	223	219	219	229
가속장치 x(m/s)	129	130	136	160	170	177	189	191	192	193	186	187	172	170	167

[Fig. 14]에서 보는 바와 같이 가속장치가 없는 모델의 10초 동안 평균 전류량은 약 130.1mA/s 평균 전력은 1.69J/s이다. 가속장치 있는 모델의 10초 동안 평균 전류량은 약 277.4mA이고 평균 전력은 7.29J/s이다. 가속 장치가 있을 때가 없을 때보다 약 2.1배의 전류를 더 흐르게 된다는 것을 확인하였다. 가속장치가 전류의 양을 높이는데 도움이 된다는 것을 확인할 수 있었다.

4. 외관에 따른 유체의 흐름 분석

가. 외관의 출구별 유체의 흐름

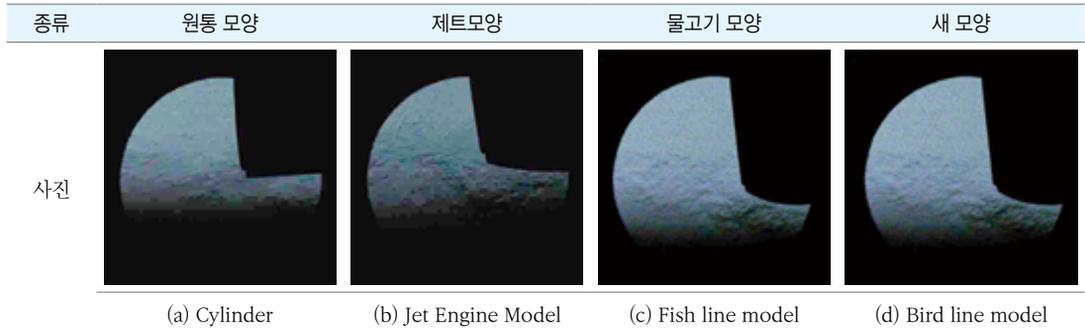


[Fig. 15] Flow of fluid by external outlet

<Table 10> The table of Flow of fluid by external outlet

종류	원통 모양	제트 모양	물고기 모양	새 모양
난류의 생성정도	출구부분에서 난류가 적게 생기는 편이다.	출구부분에서 난류가 상대적으로 많이 생기는 모양이다.	출구부분에서 난류가 많이 생기는 모양이다.	출구부분에서 난류가 상대적으로 적게 생기는 모양이다.
난류의 생성 과정	외관에 곡률이 없는 모양에서는 출구부에서는 외관이 직선형이므로 두 공기의 흐름의 속도, 방향이 비슷하여 이 두 공기가 퍼지며 만나는 부분에서 약간의 난류가 생성된다.	외관에 곡률이 있는 모양의 경우 출구부에서는 외부를 통해 흐르는 비교적 흐름이 느린 공기와 내부를 통해 나오는 비교적 빠른 공기의 흐름과 그 경계면에서 만나게 된다. 그 경계면에서 속도차에 의하여 만난 두 공기의 흐름은 속도 차에 의해 한쪽으로 휘게 되며 그 과정에서 타 흐름과 부딪히며, 그것이 결국 소용돌이치는 난류를 만든다.		
난류의 생성 원인	외부, 내부 모두 직선으로 이루어져 있어 유체의 흐름이 겹치는 정도가 타 모양에 비하여 적은 편이라 유체끼리의 겹치는 부분이 적어 난류가 많이 생기지 않는다.	외부의 곡면과 내부에서 나오는 유체의 흐름이 겹치는 부분에서 주로 난류가 생기고, 내부의 모양이 곡면이라 내부에서 나오는 유체끼리도 겹쳐져 난류가 많이 생긴다. 외부곡면의 곡률이 변화하면 외관형의 특성길이가 바뀌어 난류의 생성정도가 변화할 것이다.	외부의 곡면과 내부에서 나오는 유체의 흐름이 겹치는 부분에서 주로 난류가 생기고, 내부의 모양이 곡면이라 내부에서 나오는 유체끼리도 겹쳐져 난류가 많이 생긴다. 외부곡면과 내부곡면의 곡률이 변화하면 외관형의 특성길이가 바뀌어 난류의 생성정도가 변화할 것이다.	외부의 곡면과 내부에서 유체의 흐름이 겹치는 부분에서 주로 난류가 생기며, 내부의 모양이 원기둥형이라 직선의 형태를 따라 나와 겹침의 정도가 작다. 외부곡면의 곡률이 변화하면 외관형의 특성길이가 바뀌어 난류의 생성정도가 변화할 것이다.
비율(표면 반지름 : 난류범위 반지름)	약 10:3 2cm : 0.6cm 표면적 반지름 대비 비교적 적은 난류가 생긴다.	약 20:7 2cm : 0.7cm 표면적 반지름 대비 중간 수준의 난류가 생긴다.	약 5:2 2cm : 0.8cm 표면적 반지름 대비 비교적 많은 난류가 생긴다.	2:0 난류가 거의 생기지 않는다.
공기의 방출	직선에 가까운 형태로 공기가 방출된다. 출구의 크기가 새 모양에 비하여 큰 편이다.	비교적 넓게 퍼지며 공기가 흘러나간다. 출구의 크기가 새 모양에 비하여 약간 작다.	넓게 퍼지며 공기가 흘러나간다. 출구의 크기는 중간이며, 새 모양과 같다.	출구의 크기보다 비교적 넓게 퍼지며 공기가 흘러나간다. 출구의 크기는 중간이다.
	공기의 방출 속도는 4가지 모형 모두 유사하여 큰 차이를 알 수 없었다.			
난류의 생성 범위	난류가 생기는 범위가 작은 편이다.	난류가 생기는 범위가 큰 편이다.	난류가 생기는 범위의 정도가 큰 편이다.	난류가 생기는 범위는 넓지 않다.

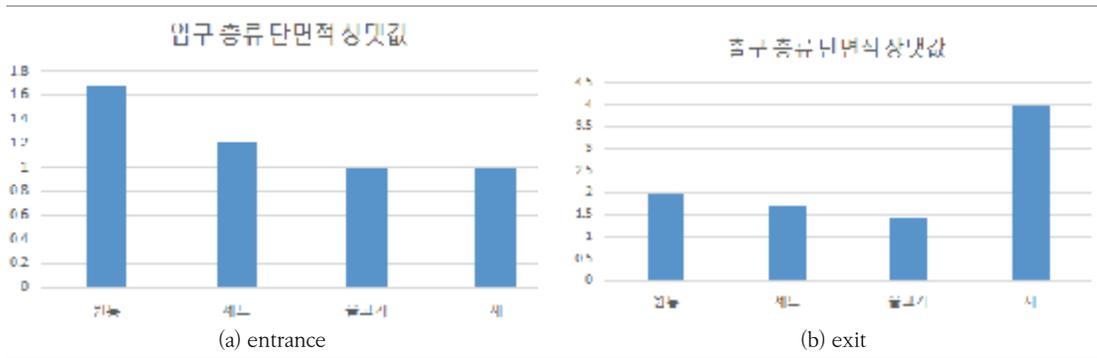
나. 외관의 입구별 유체의 흐름



[Fig. 16] Flow of fluid by external outlet

<Table 11> The table of Flow of fluid by external outlet

종류	원통 모양	제트모양	물고기 모양	새 모양
난류의 생성정도	입구 부분에서 난류가 적게 생기는 편이다.	입구 부분에서 난류가 비교적 많이 생기는 모양이다.	입구 부분에서 난류가 굉장히 많이 생기는 모양이다.	입구 부분에서 비교적 난류가 덜 생기는 편이다.
난류의 생성 과정	외관의 속으로 들어가는 공기와 바깥쪽으로 흐르는 공기 사이의 외관에 부딪혀 그 부분 주위에서 내부로 들어가는 공기와 외부로 나오는 공기가 부딪힌 공기에 의하여 외관형의 면이 시작하는 부분 주위에서 소용돌이치는 난류가 생긴	외관의 가운데로 들어가는 공기가 있고, 외관의 바깥쪽으로 가는 공기의 흐름으로 나뉘는데, 이 때 바깥쪽으로 가는 공기가 외관과 충돌하고, 곡면을 따라 이동하게 되어 속도가 느려지는 부분이 생긴다. 이 때 뒤에서 오는 공기의 흐름과 부딪히며 소용돌이를 형성하며 난류를 만들게 된다.		
난류의 생성 원인	외부, 내부 모두 직선으로 이루어져 있어 유체의 흐름이 겹치는 정도가 타 모양에 비하여 적은 편이며, 겹쳐도 같은 방향으로 향하고 있는 유체끼리에 난류의 생성이 적다. 하지만 주기적인 간격을 통해 큰 소용돌이가 생성되어 난류가 생성되며 이것의 원인은 유체 흐름의 변화로 추정된다.	외부의 곡면과 내부로 들어가는 유체의 흐름이 겹치는 부분에서 주로 난류가 생기고, 내부의 모양이 곡면이라 내부로 들어가 유체의 부피가 증가할 때 유체끼리도 충돌하여 그 사이에서도 난류가 조금 생긴다. 곡면의 곡률의 변화율의 차이에 의해서 유선형 모양과 난류의 생성의 정도가 조금 차이 날 것이다.	외부의 곡면과 내부로 들어가는 유체의 흐름이 겹치는 부분에서 주로 난류가 생기고, 내부의 모양이 곡면이라 내부로 들어가 유체의 부피가 증가할 때 유체끼리도 충돌하여 그 사이에서도 난류가 조금 생긴다. 곡면의 곡률의 변화율의 차이에 의해서 유선형 모양과 난류의 생성의 정도가 조금 차이 날 것이다.	외부의 곡면과 내부로 들어가는 유체의 흐름이 겹치는 부분에서 주로 난류가 생기고, 내부의 모양이 원기둥형이라 직선의 형태를 따라 나와 충돌을 하여도 난류가 덜 생성된다. 곡면의 곡률의 변화율의 차이에 의해서 유선형 모양과 난류의 생성의 정도가 조금 차이 날 것이다.
비율(단면적의 반지름: 난류생성 범위의 반지름)	20:7 2:0.7 표면적 반지름에 비해 비교적 적은 양의 난류가 생성되었다.	20:9 2:0.9 표면적 반지름에 비해 다른 모형보다 난류가 비교적 조금 덜 생성되었다	2:1 2cm:1cm 표면적 반지름 대비 비교적 많은 수준의 범위에 걸쳐 난류가 생성되었다	2:1(약 2cm : 1cm) 표면적 반지름 대비 비교적 많은 수준의 범위에 걸쳐 난류가 생성되었다
공기의 흡입	입구의 크기보다 난류의 영향에 의해 적은 양의 공기가 흡입되지만 줄어드는 공기의 양이 크지는 않다. 하지만 흡입되는 공기의 흐름이 불안정하여 공기의 흡입량이 줄어들 것이라고 추정된다.	입구의 크기보다 난류의 영향에 의해 적은 양의 공기가 흡입되며 줄어드는 공기의 양이 상당하다. 또한 입구의 단면적이 좁기 때문에 흡입되는 공기의 양은 더 줄어든다.	입구의 크기보다 난류의 영향에 의해 적은 양의 공기가 흡입되며 줄어드는 공기의 양이 상당하다.	입구의 크기보다 난류의 영향에 의해 적은 양의 공기가 흡입되지만 줄어드는 공기의 양이 크지는 않다.
난류의 생성 범위	난류가 생기는 범위가 작다.	난류가 생기는 범위가 큰 편이다.	난류가 생기는 범위가 큰 편이다.	난류가 생기는 범위는 작다.



[Fig. 17] Upper section value

다. 외관별 출구의 풍속

<Table 12> The table of The wind speed of the exit by appearance

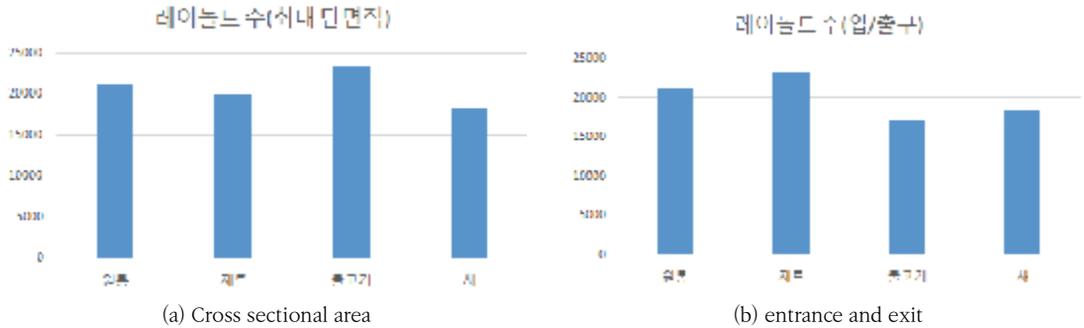
시간(s)	원통(m/s)	제트(m/s)	물고기(m/s)	새(m/s)
0	6.188202	6.482697	6.088257	6.509399
1	6.16684	6.591797	6.041718	6.46286
2	6.247711	6.666565	6.065369	6.491089
3	6.285095	6.491089	6.087494	6.57196
4	6.246185	6.492615	6.184387	6.705475
5	6.338501	6.610107	6.271362	6.744385
6	6.252289	6.567383	6.325531	6.735992
7	6.142426	6.551361	6.377411	6.699371
8	6.16684	6.597137	6.340027	6.710052
9	6.110382	6.440735	6.299591	6.756592
10	6.089783	6.288147	6.250763	6.797791
평균	6.203114	6.525421	6.211992	6.653179

라. 각 외관별 레이놀즈 수 계산

<Table 13> The table of Calculating reynolds number by appearance

	풍속(m/s)	입구 지름(cm)	레이놀즈 수	최대 단면적일 때의 지름	레이놀즈 수
원통	6.203	6.68	21140.83673	6.68	21140.83673
제트	6.525	7	23303.57143	5.99	19941.19898
물고기	6.211	5.4	17111.93878	7.4	23449.69388
새	6.653	5.4	18329.69388	5.4	18329.69388

*레이놀즈 수 계산시 [11]의 기체의 물성표를 사용하였음



[Fig. 18] Upper section value

1) 연구 결과

외관형의 내부의 경우 곡률이 생기면 내부의 특성길이가 달라져 유체의 흐름이 감소하는 결과가 나타났다. 이것은 내부의 모양이 곡면이라 내부에서 나오는 유체끼리도 겹쳐져 난류가 생기는 것으로 해석된다. 이것은 [12]의 연구결과와 비슷한 경향을 보이고 있다.

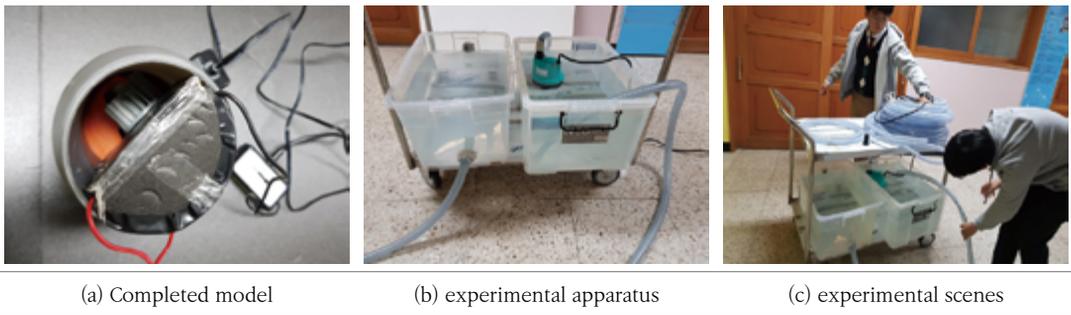
외관형의 외부의 경우 곡률이 생기면 외부에서 흐르는 유체의 흐름이 빨라지는 결과가 나타났다. 하지만 입구와 출구에서는 유체의 흐름이 감소하였는데 이것은 외부의 유체와 내부의 유체가 겹쳐져 난류가 생기는 것으로 해석된다. 이것은 [13]의 연구결과와 비슷한 경향을 보이고 있다.

이번 실험을 진행할 때 물의 정상흐름을 생성하는데 어려움이 존재하여 물을 사용하지 않고 공기를 사용하였기 때문에 실제 환경과는 차이가 있을 수 있다고 생각할 수 있다. 하지만 물과 공기는 모두 유체이기 때문에 비슷한 특성을 나타낸다. 또한 레이놀즈 수를 구함에 있어 물과 공기의 차이점은 동점성 계수 밖에 존재하지 않으며 이는 상수이기 때문에 큰 영향을 미치지 않을 것이라 생각한다. 따라서 공기를 통한 실험으로 물에서의 동향을 예측할 수 있다.

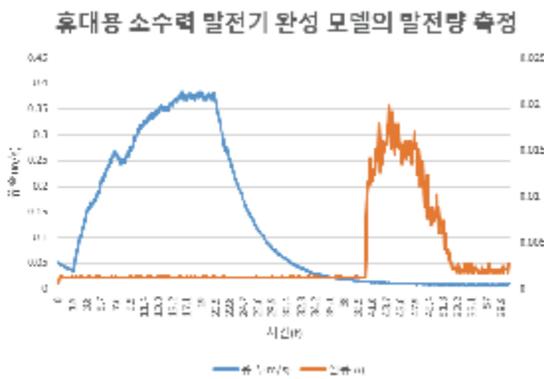
본 실험에서 새 외관이 외부의 공기의 흐름을 덜 받으며 와류와 난류가 적게 발생함을 알 수 있었다. 또한 레이놀즈 수도 다른 외관에 비해 작게 나타났다. 여기서 새 모양의 단면적이 작아 유체의 유량이 작다는 문제가 제기될 수 있는데 이는 새 모양의 곡률을 줄임으로서 해결 할 수 있을 것이다. 따라서 소수력 발전의 가장 효율적인 외관을 새 외관으로 결정하였으며 곡률을 조정하여 다음 실험을 진행하도록 결정하였다.

5. 휴대용 소수력 발전기 완성 모델의 발전량 측정

실제 하천에서 물의 흐름을 모방하기 위해 펌프와 호스를 이용하여 다음과 같은 구조를 만들어서 연구를 진행하였다. 지금까지 연구과정에서 효율적이라고 판단되는 각 구조를 연결하였다. 즉, 개선된 프란시스수차와 입수구 가속장치와 새 외관 모형으로 연결된 완성된 모델을 흐름이 있는 물 속에 넣어 전류량을 측정하였다.



[Fig. 19] Experiment on measuring actual minor hydroelectric power generation



[Fig. 20] The Change of Current Rate by the Speed of Water

본 실험에서는 유속과 전류량을 동시에 측정하는 것이 어려웠기 때문에 먼저 유속센서를 물에 넣어 유속을 측정했다. 유속센서를 물에서 빼고 전류를 측정하였다. 실험 결과 유속 약 0.4m/s(1.44km/h)일 때, 최대 0.02A(20mA)까지의 전류가 흐르게 할 수 있었다.(유속은 한번 1.44km/h에 도달한 후 계속 일정하다.) 우리나라 한강의 평균 유속이 0.85m/s이며 낙동강의 평균 유속이 1.42m/s인 것을 고려하였을 때, 실제 발전량은 더 클 것으로 예상된다. 따라서 이번 실험에서 사용한 발전기를 실생활에 적용시키는 것이 가능할 것이라고 본다.

V. 결론

본 연구는 재생에너지 개발 문제 해결을 위해 수력발전의 현황을 알아 본 후 발전에 영향을 미치는 요인에 대해 탐구하여 각 요인 별로 변인을 바꾸어 실험을 진행하였다. 수차부분에서는 대형 수력발전기에 많이 쓰이는 수차 모델이 소수력 발전에는 적합하지 않다는 것을 알 수 있었다[14]. 따라서 우리는 적은 양의 유속에도 효과적으로 힘을 받아 발전량을 늘릴 수 있는 수차 구조를 고안하였다. 본 연구에서는 물의 위치에너지를 사용하지 않기 때문에 물의 운동에너지를 최대한 효과적으로 이용할 수 있는 방법을 고민하여 가속장치를 설계하고 실험을 진행하였다. 또한 수차의 크기와 유속의 변화에 따라 가속장치의 형태를 조절할 수 있게 하였다.

가. 소수력 발전 환경에서 효율을 증진시킬 수 있는 발전기 모델을 만들기 위해 수력 발전 시 발전량에 영향을 미치는 변

인을 레이놀즈 수와 난류로 생각하여 실험하였다. 가속 장치 없는 모델 내부에서 솔리덴 장치를 이용해 유체의 풍속을 측정하여 레이놀즈 수를 계산하는 실험을 진행하였다. 이 실험에서 난류의 생성을 발전에 가장 중요한 변수로 생각하여 결론을 도출하였다. 그 결과 솔리덴 실험에서는 원통 모형, 새 모형이 난류가 가장 적게 생기는 것을 관찰할 수 있었다. 이는 가속장치 없는 모델 외부에서의 난류 생성에 관해 알아본 결과이며 물고기 모형과 새 모형이 레이놀즈 수가 작게 나와 내부의 와류가 적어 효율적임을 알 수 있었다. 따라서 실험을 종합적으로 생각해봄으로써 새 모형이 다른 원통, 제트, 물고기 모형에 비하여 더 좋은 효율을 낼 것이라고 결론을 지었다. 이 때 이 실험에서 물과 공기의 차이를 고려하지 않아 실험의 결과가 이론값과 다를 수 있지만, 유체라는 공통점을 가지고 있으므로 그 경향성은 이 실험값과 유사하게 나올 것이라고 생각한다. 따라서 위 실험 결과 실제 물에서도 새 모형이 타 모양에 비하여 더 효율이 좋다는 경향성을 가질 수 있다고 생각된다.

나. 본 연구에서는 수차가 기존에 있는 수력 발전방식과 달리 내부에 위치해 있기 때문에 내부에서도 잘 돌아갈 수 있도록 디자인하였다. 입수구의 부분에서 유체의 속도를 최대한 증대시키기 위해 연속방정식에 따라 유체가 들어갈수록 면적이 좁아지는 형태로 설계하였다. 실험을 통하여 우리가 만든 가속장치가 유체의 속도를 약 1.3배 정도 증가시키며 발전기로 발전 하였을 때는 전류량이 약 2.1배로 증가한다는 것을 알 수 있었다.

다. 위와 같이 제작된 휴대 가능한 소수력 발전기의 구조를 적용하여 활용한다면 실제 소수력 발전 환경에서 발전 효율을 증진시키는데 기여할 수 있을 것이다.

VI. 참고문헌

- [1] 이철형. (2004). [특집] 국내·외소수력발전 개발 동향. 태양에너지, 3(4), 3-10.
- [2] 전국소수력이용추진협의회(2014) 소수력개발이해하기, 씨아이알
- [3] 한국에너지공단 신재생에너지센터, 한국 에너지 공단 동진강 발전소 프로펠러형 수차 사용 사례, 2004.
- [4] 월간전기, 양양 양수 발전소 프란시스형 수차 사용 사례, 2006, http://www.energy.co.kr/at1/view.asp?a_id=1312
- [5] 청평 수력 발전소 고정익 프로펠러형 수차 이용 사례, 2015.
- [6] 임승희, 일본 나가노자연전력 프란시스형 수차 사용 계획 <http://www.todayenergy.kr/news/articleView.html?idxno=129157>
- [7] 한대현, 강래형, 광승렬, (2015). 임펠러 블레이드 각도에 따른 횡류형 수직 풍력발전시스템의 성능 향상 예측에 관한 연구. 한국항공우주학회 학술발표회 초록집 1219-1222.
- [8] 윤순현 외(2011), 유체역학, 우일미디어
- [9] 김강민(2016), Paul Schatz의 Cube와 Oloid, 한양대학교 대학원
- [10] 나카무라 마사히로(2016), 풍력 발전기 교과서, 보누스
- [11] A.8.7 기체의 물성표(spirax-sarco engineering)
- [12] Effect of Reynolds Number and Curvature Ratio on Single Phase Turbulent Flow in Pipe Bends Mechanics and Mechanical Engineering Vol. 19, No. 1 (2015) 5-16 Lodz University of Technology
- [13] Swan, C. (DOI: 10.1615/AtoZ.s streamline_flow) Streamline Flow, from <http://www.thermopedia.com/content/1161/>
- [14] 정해상 외(2013), 소수력발전기술, 일진사, 과학나눔연구회/ 정해상 편저

| 연구진 |

장예진 (Yejin Jang, 인천진산과학고등학교, haha9986@daum.net), 공동저자

하승현 (Seunghyun Ha, 인천진산과학고등학교, hsh020505@naver.com), 공동저자

정윤찬 (Yoonchan Jeong, 인천진산과학고등학교, wotti2@naver.com), 공동저자

김혜윤 (Hyeyun Kim, 인천진산과학고등학교, jungheeh123@naver.com), 공동저자

한의석 (Euseok Han, 인천진산과학고등학교, han.eui.seok45@gmail.com), 공동저자

지도교사 : 장상경 (Sangkyung Chang, 인천진산과학고등학교, jsk079@ice.go.kr)

풀러렌과 닮은 정다면체 및 준정다면체의 분자모델링에 관한 연구

박세준 · 강동원 · 김세원 - 창원과학고등학교

A Study on the Molecular Modeling of Regular- or Semi-Regular Polyhedron Resembling Fullerene

Sejun Park · Dongwon Kang · Sewon Kim - Changwon Science High School

국문초록

본 연구는 풀러렌과 닮은 정다면체 혹은 준정다면체(아르키메데스 다면체) 구조를 가진 분자의 존재 가능성에 대한 것이다. 존재 가능성을 알아보기 위해 Gaussian program을 이용해 탄소 원자들이 정·준정다면체 구조의 분자가 되었을 때 에너지 변화량(ΔE)을 계산하였다. 풀러렌을 기준으로 가장 에너지 변화량(ΔE)이 큰 분자를 순서대로 분자의 존재 가능성을 제시하였다. 이 과정에서 탄소의 수가 많을수록 에너지 변화량(ΔE)이 커짐을 확인하였고, 삼각형 비율이 많은 구조는 Gaussian program에 의한 계산 과정에서 삼각형을 줄이는 구조로 변화하는 것을 확인했다. 한 원자에 형성되는 결합이 5개 이상인 경우 계산 과정에서 원자당 결합을 4개 이하로 줄이는 구조로 변화하는 것을 확인하였다. 최종적으로 정다면체와 13가지 준정다면체의 에너지 변화량을 계산해냈다. 또한 정다면체 혹은 준정다면체 분자들의 Host 분자로의 가능성을 확인하기 위해 모델링이 끝난 분자의 안쪽 최소반경을 계산하여 가둘 수 있는 guest 화합물의 크기에 대해 고려해보았고, 작은 십이이십면체에 SO_2 분자를 넣어 안정화되는 에너지를 계산해 보았다.

중심어 : 풀러렌, 준정다면체, 분자모델링, 퍼텐셜에너지, Gaussian program

ABSTRACT

This study is about the possibility of existence of molecules with regular or semi-regular(Archimedes polyhedron) structure except fullerene. To investigate the possibility of existence, we used the Gaussian program to calculate the energy change (ΔE) when the carbon atoms become the molecules of the regular or semi-regular structure. We present the possibility of molecules in order of molecules with the largest energy change (ΔE) based on fullerene. In this process, it was confirmed that the energy change (ΔE) increases as the number of carbon increases, and that the structure with a large triangular ratio changes to a structure that reduces the triangle in the calculation by the Gaussian program. When the number of bonds formed on one atom is 5 or more, the number of bonds per atom is reduced to 4 or less in the calculation. We also consider the size of the gueast compound that can be calculated by calculating the minimum inner radius of the modeled molecule. In order to check the possibility of a regular or semi-regular polyhedron molecule as a host molecule, we tried to calculate the energy stabilized by adding SO_2 molecule to the twelve-sided dodecahedron.

Key words: fullerene, semi-regular polyhedron, molecular modeling, potential energy, Gaussian program

I. 서론

풀러렌, 그래핀, 탄소나노튜브 등의 탄소 동소체는 guest 물질을 가둘 수 있고, 매우 강도가 높다는 등의 특징 때문에 활용 가능성이 매우 높다고 평가되는 신소재이다. 최근 이러한 탄소 동소체를 활용한 연구도 활발하게 이루어지고 있는 추세이다. 그중 풀러렌이 준정다면체 중 하나인 작은 정이십면체라는 것을 우연히 알게 되었다. 정다면체 5개와 준정다면체 15개를 보면서 “풀러렌 이외의 다른 정다면체와 준정다면체 모양의 분자가 존재할 수 있을까?”라는 궁금증이 생기게 되었고 이에 대한 연구를 하게 되었다. 선행연구가 있는지 알아보기 위해 KISS, DBPIA, NDSL, RISS 등의 논문 검색 기관에서 다면체 모델링, 벤젠, 톨루엔 모델링, 풀러렌등을 검색어로 하여 검색해 보았지만 본 연구와 관련된 선행연구는 없었다.

본 연구의 목적은 첫째, 풀러렌과 같은 정다면체 또는 준정다면체 구조를 가진 새로운 분자의 존재 가능성을 안정도 분석을 통해 확인하여 추후 합성과 같은 연구가 진행되기 위한 동기를 제공하는 것이다. 본 연구를 계기로 다면체 또는 준정다면체 구조를 가진 분자의 합성법이 개발된다면 기대 효과가 매우 클 것이다. 둘째, 정다면체와 준정다면체 분자의 host로서 활용 가능성을 연구하여 추후 알맞은 guest를 발견하는 것이다. host는 분자 구조 내부에 빈 공간이 있어 물질을 그

공간에 가둘 수 있는 분자를 뜻하고, guest는 host의 빈 공간에 가두어지는 분자를 뜻한다. 현재 풀러렌은 host와 guest로써 많은 연구가 진행되고 있다. 풀러렌 이외에도 host-guest작용은 활용 범위가 넓다[1].

준정다면체는 정다면체, 각기둥, 각엃등을 제외한 볼록인 다면체 중에서 모든 면이 정다각형으로 이루어져 있으며 모든 꼭짓점이 합동인 입체도형으로, 아르키메데스 다면체라고도 한다. 준정다면체는 정다면체와 같이 한 꼭짓점에 모인 면의 개수와 종류가 같고, 모서리의 길이가 모두 같다. 정다면체는 모든 면이 같은 도형으로 이루어져 있지만, 준정다면체는 여러 평면도형으로 이루어져 있다는 차이점이 있다. 정다면체, 준정다면체 모양의 분자가 존재할 수 있는지에 대해 연구하기 위해서는 이러한 분자의 안정도를 조사하여야 한다. 분자는 안정할수록 존재할 수 있을 가능성이 높다. 우리는 분자의 에너지를 안정성의 척도로 설정하였는데, 분자를 구성하는 원자가 서로 무한히 떨어져 있을 때의 에너지에 비해 분자가 형성되었을 때 에너지가 얼마나 낮아졌는지(ΔE)를 기준으로 안정성을 판단하였다.

ΔE 를 이론적으로 구할 수 있는 방법은 여러 가지이며, 주로 삼차원 구조를 추정된 뒤 적절한 계산모델을 도입하여 생성물과 반응물의 에너지 차이를 구한다. 분자의 에너지를 구하는 방법은 고전역학적인 방법과 양자역학적인 방법을 들 수 있는데, 본 연구에서는 양자역학적인 방법을 이용하고자 한다. 즉, 살펴보고자 하는 분자가 실험적으로는 존재하지 않기 때문에 고전역학적인 모델에서 이용할 각종 파라미터(변수)를 구하기 쉽지 않다. 따라서 이러한 경험적 파라미터를 사용하지 않는 순이론적인 방법 중의 하나인 밀도범함수론(density functional theory)을 이용하였다. 초기 분자의 3차원 구조를 설정한 다음 에너지를 계산하고 차츰 더 낮은 에너지를 가진 분자의 구조를 찾는 일련의 과정을 소위 “분자 모델링”이라고 하며 이를 통하여 정다면체, 준정다면체 분자를 표현하고, 존재 가능성을 확인할 것이다. 분자 모델링은 추상적인 분자의 형상을 구체적으로 표현하고 분자계의 특성을 이해하여 그로부터 어떠한 과학적 결론을 유도하는 이론적 활동을 말한다. 우리는 분자 모델링을 위해 크게 Chemcraft와 Gaussian program을 사용하였다. 특히 Gaussian program은 경상대학교에 설치된 서버에서 실행되므로 원격접속 등을 위하여 xshell, openvpn, xftp등의 프로그램도 사용하였다. Chemcraft는 분자의 형상을 시각적으로 표현 할 수 있는 프로그램이고, Gaussian program은 표현된 분자의 가장 안정적인 형태를 찾는 프로그램이다. 우리는 3차원상의 정다면체와 준정다면체의 좌표를 이용하여 chemcraft에 분자를 나타내고, 이때의 좌표를 Gaussian program에 입력하여 ΔE 를 구하였다. 그리고 ΔE 를 이용하여 안정도를 비교하는 연구를 하였다.

원래 안정성을 비교할 때는 엔탈피 항과 엔트로피 항을 모두 고려한 깁스의 자유에너지를 이용해야 하는데, 정다면체와 준정다면체 분자의 경우 원자 수가 많은 것도 있어(최대 120개)엔트로피를 정확하게 구하는 것이 매우 힘들다. 그래서 ΔE 를 원자 개수로 나눈 값을 기준으로 에너지 변화량(ΔE)을 비교하고, 결합수가 많을수록 ΔE 가 클 것이라 생각하여, 결합당 에너지 변화량(ΔE)도 비교해보았다.

그리고 준정다면체 혹은 정다면체 구조를 가진 분자가 host로의 역할이 가능할 지에 대해 연구하였다. 반경이 가장 큰 짝은 십이이십면체에 SO_2 분자를 넣어 Gaussian program으로 계산해 보았다.

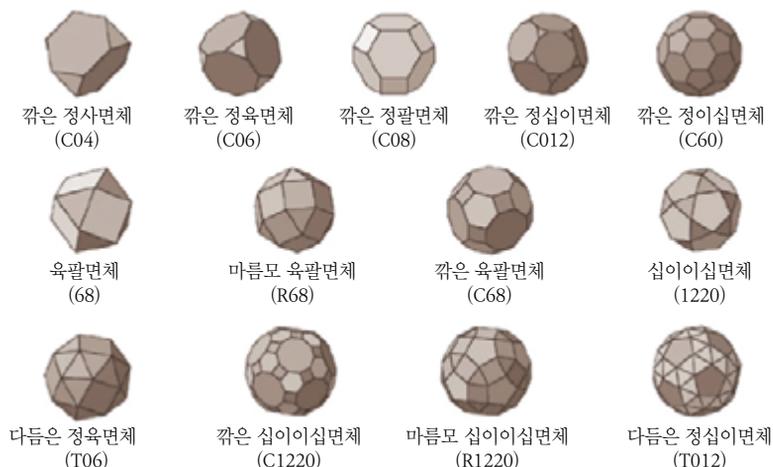
II. 이론적 배경

1. 준정다면체

가. 준정다면체[2]

준정다면체는 정다면체, 각기둥, 각엃등을 제외한 볼록인 다면체 중에서 모든 면이 정다각형으로 이루어져 있으며 모든 꼭짓점이 합동인 입체도형으로 두 개의 동일한 준정다면체가 있다고 할 때 한 준정다면체와 다른 준정다면체의 다른 한 꼭짓점을 일치시키면 도형의 다른 부분들이 완전히 일치하는 도형을 말한다[2].

풀러렌은 이들 중 짝은 정이십면체로 축구공과 닮은 오각형 12개와 육각형 20개로 이루어진 다면체이고, 이외에 12가지가 준정다면체에 포함된다. 준정다면체는 모든 꼭짓점마다 동일한 다각형들이 동일한 순서로 모이는데, 예를 들어 육각형-육각형-삼각형으로 되어있다. 보통 준정다면체는 한 꼭짓점에 모인 도형을 순서대로 숫자로 나타내는 경우가 많은데, 우리 연구에서는 보다 쉽게 기호를 달리하여 나타내었다[3].



[Fig. 1] 13 types of semi-regular polyhedron

입체 도형 중 폴러렌의 구조인 깎은 정이십면체는 하나의 꼭짓점에 모이는 정오각형의 내각(180°)과 정육각형 두 개의 내각(120°+120°)을 합하면 348°로 360°에 가까운 각을 가지고 있어, 다면체 중 둥근 구에 가장 가까우면서 동시에 표면적을 최대한 줄인 구조이다.

나. 정다면체와 준정다면체 명명법

각 다면체의 이름이 너무 복잡하므로 간단한 기호를 통한 새로운 명명법을 제시하였다. 숫자가 들어갈 경우 숫자를 그대로 표기하며 “깎은”은 cut의 약자인 C, “마름모”는 rhombus의 약자인 R, “다듬은”은 trim의 약자인 T를 이용해 표기하였다. “정”이 들어갈 경우 숫자 0으로 표기하였다. 예를 들어 깎은 정십이면체일 경우 ‘C012’라고 표기한다. 폴러렌의 경우 특별하게 C60이라고 표기한다. 앞으로는 이러한 명명법으로 준정다면체를 표시할 것이다.

2. 계산화학(Computational Chemistry)

분자모델링은 주로 컴퓨터의 빠른 계산능력을 이용하는 연구방법이므로 계산화학이라고도 하며 실험적으로 관측하기 어려운 미시적 입자들의 현상을 예측하는 것이 주된 역할이다. 최근 컴퓨터의 발달과 함께 분자, 특히 고분자들의 구조와 성질을 밝히고 이를 응용하는 등 많은 분야에서 사용되고 있다[4]. 이 방식은 보통 세 단계에 거쳐 이루어지는데, 첫 단계는 분자의 에너지를 계산하는 것, 두 번째 단계는 구조 최적화를 통해 가장 낮은 에너지를 갖는 구조를 예측하는 것으로 에너지의 위치에 대한 Ep의 기울기가 0이 되는 지점을 찾는 것이다. 세 번째 단계는 분자간의 상호작용으로 관심 있는 특정 분자의 운동에 기인한 진동수를 계산하고 이를 토대로 분자 간 상호작용에 대해 예측을 하는 단계이다[5].

3. 전자구조 계산 방법; ab initio MO 방법

전자구조 계산을 위한 기초방법으로 양자역학적인 법칙들을 사용한다. 양자역학은 Schrödinger방정식의 해에 의해서 얻어지는 분자 에너지 및 그와 관련된 물리화학적 성질들을 기술하는 것이다. 그러나 완전히 대칭적인 계일지라도 Schrödinger방정식의 해를 정확하게 구할 수 없으므로 수학적 근사를 사용해야 한다. 이번 연구에서 사용된 방법은 전자 구조계산 방법 중에 ab initio법이다. ab initio법은 이론적 계산을 하는 과정에서 나오는 적분 값들의 일부 또는 전체를 실험적인 자료를 전혀 사용하지 않고, 완전히 수화적인 계산을 통해 Schrödinger방정식을 푸는 방법이다. LCAO-MO SCF 법은 핵과 전자들의 상호작용을 구하기 위한 모든 적분을 하나도 무시하지 않고 그대로 수행해 주는 분자궤도함수법

이다. 따라서 ab initio 계산 과정은 매우 복잡하고 많은 계산 시간이 소요된다. 특히 분자의 크기가 커질수록 소요되는 계산시간은 기하급수적으로 늘어나므로 주로 작은 분자의 연구에 사용된다. ab initio 계산에서도 계산의 단순화를 위한 가정 및 근사를 포함한다. 핵이 전자운동의 시간 척도 상에 고정되어 있다는 Born-Oppenheimer 근사를 사용하고 있다. 다시 말해 전자의 파동함수가 핵의 운동에 의해 영향을 받지 않는다는 것이다. 일반적으로 양자역학에서 분자 문제를 단순화하기 위해 핵과 전자의 운동을 분리하여 취급한다. 이것은 전자보다 수천 배 이상 무거운 핵은 거의 운동하지 않는 것으로 생각하는 것이다. 결과적으로 분자 내의 전자들은 핵의 위치에 의존할 뿐 핵의 이동 속도에는 의존하지 않는다는 가정에 따른 근사적 취급을 하게한다. ab initio MO 계산의 정확도는 MO를 구성하는 기초함수(basisfunction, basissets)를 어떻게 선택하는가에 달렸다. 또한, 계산하려는 물리적 성질에 따라 이에 적합한 기초함수를 선택하여야 한다.

4. Hartree-Fock SCF 법

원자나 분자의 에너지와 파동함수는 다음 Schrödinger 방정식의 해로서 주어진다.

$$\hat{H}\Psi = E\Psi \quad (1)$$

다전자 원자의 파동함수 Ψ 는 Slater의 행렬식으로 주어진다.

$$\Psi = \frac{1}{\sqrt{N!}} |\Psi_1(1)\Psi_2(2) \dots \Psi_N(N)| \quad (2)$$

여기서 Ψ_i 는 스핀 궤도함수(spin-orbital)이다. 식 (1)과 (2)를 이용하여 에너지 평균값을 구하면 다전자 원자의 에너지는 식 (3)으로 주어진다.

$$E = \sum_m E_m + \sum_{m < n} \sum J_{mn} - \sum_{m < n} \sum K_{mn} \quad (3)$$

여기서 E_m 은 궤도함수 m에 있는 전자의 운동 에너지와 핵-전자 간 인력에 의한 퍼텐셜 에너지의 합으로 주어지는 1-전자 에너지고, J_{mn} 과 K_{mn} 은 전자간 평균 반발 에너지에 관련된 항으로서 각각 쿨롱 에너지(coulomb energy)와 교환 에너지(exchange energy)라고 하며 적분형태로 주어진다.

궤도함수 에너지는 다음과 같다.

$$\epsilon_m = E_m + \sum_n (2J_{mn} - K_{mn}) \quad (4)$$

궤도함수 에너지를 구하기 위해서는 먼저 반발 에너지를 구해야 하는데, Hartree와 Fock는 전자 간 반발 에너지를 전자 i와 나머지 전자들로 이루어지는 정전 분포 사이의 평균 반발 퍼텐셜로 고려하여 근사적인 에너지와 파동함수를 구하는 자기모순이 없는 장(self-consistent field, SCF) 근사법을 개발하였다. 다전자 원자에 대한 Hartree-Fock SCF 법을 분자에 적용하여 분자 궤도함수(molecular orbital, MO)를 구하는 방법은 Roothaan과 Hall에 의해서 개발되었는데, 이들은 식 (2)의 파동함수 Ψ_i 를 원자 궤도함수(atomic orbital, AO)의 선형결합(LCAO-MO 법)으로 전개하여 Hartree-Fock SCF법의 여러 적분항을 원자 궤도함수로 표현하였다.

$$\Psi_i = \sum c_{\mu i} \phi_{\mu} \quad (5)$$

이를 원자궤함수의 선형결합(linear combination of atomic orbital, LCAO)이라 하며, 이 파동함수를 분자궤도함수(molecular orbital, MO)라 한다.

5. 기초함수(Basis Function)

분자의 Hartree-Fock 궤도함수 Ψ_i , 즉 LCAO-MO를 정확히 구하기 위해서는 이를 선형결합하여 나타내는 기초함수가 완전조를 이루어야 한다. 이는 한 원자의 모든 AO들이 결합되어 있지 않은 원자 상태에서 채워져 있진, 채워져 있지 않진 간에 MO에 기여하는 것을 의미한다. 이론적으로는 충분한 숫자의 기초함수를 쓰면 정확한 Hartree-Fock MO (Hartree-

Fock limit)를 구할 수 있지만, 실제로 완전한 Hartree-Fock해는 비교적 작은 분자에서만 가능하다. 분자에 대한 SCF 계산에서 주로 사용되는 기초함수는 원칙적으로 원자궤도함수여야 하지만, 원자 궤도함수의 복잡한 마디 성질 때문에 원자 궤도함수에 대한 근사로서 Slater형 함수(Slater type function, STF 또는 Slater type orbital, STO)를 사용한다. 최소 기본함수조(minimal basis set)는 속껍질 AO와 원자가껍질 AO만으로 제한된 기본함수조를 최소 기본함수조라고 한다. 즉 H와 He 원자에 대해서는 1s 함수에 해당하는 한 개의 STF 함수가, 2주기 원소(Li~Ne)에 대해서는 1s, 2s, 2px, 2py, 2pz에 해당하는 다섯 개의 STF 함수가 사용되고, 3주기 원소에 대해서는 다섯 개의 d궤도함수에 해당하는 STF를 포함하여 열 개의 STF가 사용된다. 이때 각 STF 기본함수 ϕ_{μ} 들은 K개의 단축 GTF(contracted Gaussian type function)를 선형결합하여 나타낸다.

최소 기본함수조는 원자 궤도함수를 표현하는 가장 단순한 방법으로서 계산 결과의 정확도는 떨어지는 편이다. 따라서 Double-zeta(DZ) 기본함수조, Split-valence 기본함수조등의 함수를 이용하여 나타내기도 한다.

6. 밀도 범함수 이론 (Density functional theory)

밀도 범함수 이론 (Density functional theory, DFT)의 기본은 '바닥 전자상태의 에너지는 전자밀도(ρ)에 의하여 완전히 결정된다'라는 Hohenberg 와 Kohn의 정리이다. 이 정리는 어떤 계에서 전자의 밀도와 계의 에너지 사이에 일대일 대응관계가 성립함을 의미한다.

예를 들어, N개의 전자로 이루어진 계에서의 상태함수는 스핀상태를 고려하지 않으면 3N개의 좌표에 의존한다. 한편 전자의 밀도는 상태함수의 제곱을 N-1개의 좌표에 대하여 적분하여 구한다. 이때 얻어진 전자밀도의 값 자체는 오로지 3개의 공간좌표 값에만 의존한다. 즉 상태함수의 복잡함은 전자의 수에 따라 증가하지만 전자의 밀도는 여전히 3개의 좌표에만 의존하므로 전자밀도에 대한 함수가 상태함수보다 훨씬 더 간단하게 다루어 질 수 있는 가능성을 시사한다. 그러나 바닥 전자상태의 전자밀도와 에너지 사이에 일대일 대응관계가 있음이 증명되어도, 이들 관계를 표현할 수 있는 함수 자체는 알 수 없다는 것이 문제이다. 따라서 DFT 방법에서 문제의 핵심은 이러한 함수를 알아내는, 혹은 만들어 내는 것이라고 할 수 있다. 여기서 함수(Function)는 변수(좌표값)들의 집합으로부터 어떤 값을 도출하는 것인 반면, 범함수(Functional)는 변수들에 의존하는 함수들로부터 어떤 값을 도출하는 것을 의미한다. 즉 범함수는 '함수의 함수'라고 볼 수 있다. 따라서 상태함수와 전자밀도는 함수인 반면에 상태함수 또는 전자밀도에 의존하는 에너지 자체는 범함수인 셈이다. 변수 x 에 의존하는 함수는 $f(x)$ 하고 표시하고, 함수 f 에 의존하는 범함수는 $F[f]$ 로 표시한다.

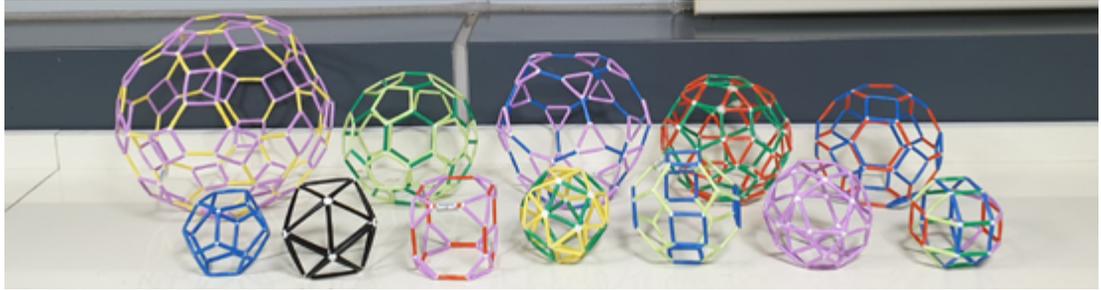
궤도함수만 있으면 전자밀도가 정의되므로 HF방법과 비슷한 정도의 계산량으로 더 정확한 에너지를 제공할 수 있다. 다만 E_{XC} 가 알려져 있지 않아 DFT 방법의 가장 큰 문제는 이것을 유도해 내는 것이다. 따라서 서로 다른 DFT 방법들의 차이는 주로 어떤 형태의 범함수를 사용하느냐에 해당하며 이러한 범함수를 어떻게 유도해 내는가에 대한 통일된 지침이 없기 때문에 서로 다른 많은 범함수들이 제안되고 있다. 어떤 범함수가 더 우수한지는 범함수를 사용한 결과를 정확한 실험 결과 또는 더 높은 수준의 양자역학 방법의 결과와 비교하여 평가될 수 있다[6].

III. 연구 방법 및 절차

1. 정다면체, 준정다면체 분석 및 4D프레임 분자구조 재현

본 연구에서는 분자의 안정성을 비교하기 위해 정다면체와 준정다면체의 수학적 특성을 분석하는 과정이 필요하다. 수학 프로그램으로 분석하는 것도 하나의 방법이지만 손으로 직접 돌려보며 더욱 깊이 있고 효율적으로 분석하기 위해 "4D 프레임"을 이용하여 정다면체, 준정다면체 모양의 분자모형을 만들었다. 4D프레임은 여러 가지 평면, 입체도형을 만들어 볼 수 있는 수학 교구이다. 4D프레임은 크게 연결봉과 연결대로 구성되어 있다. 연결봉은 도형에서 변 역할을 하고, 연결대

는 꼭짓점 역할을 하는 부분이다. 연결대에는 연결봉을 연결할 수 있는 발이 있다. 발에 연결봉을 연결하여 조립한다. 여러 가지 길이의 연결봉이 있고, 연결대도 발의 개수가 다양하다. 우리는 연결봉을 결합, 연결대를 하나의 원자로 생각하여 분자 구조를 재현해 보았다. 정다면체와 준정다면체는 모든 변의 길이가 같기 때문에 같은 길이의 연결봉을 사용했다. 한 꼭짓점에 모인 면의 개수가 3개일 때에는 3발 연결대를, 4개일 때에는 4발 연결대를, 5개일 때에는 5발 연결대를 사용하였다.



[Fig. 2] Regular · Semi-regular polyhedron structure

재현이 완료된 분자들의 특징을 꼭짓점 개수, 모서리 개수, 면 개수, 한 점에 모이는 모서리 수, 면을 구성하는 다각형 수로 나누어 분석해보았고, 결과는 다음과 같았다.

<Table 1> Characteristics of semi regular polyhedrons

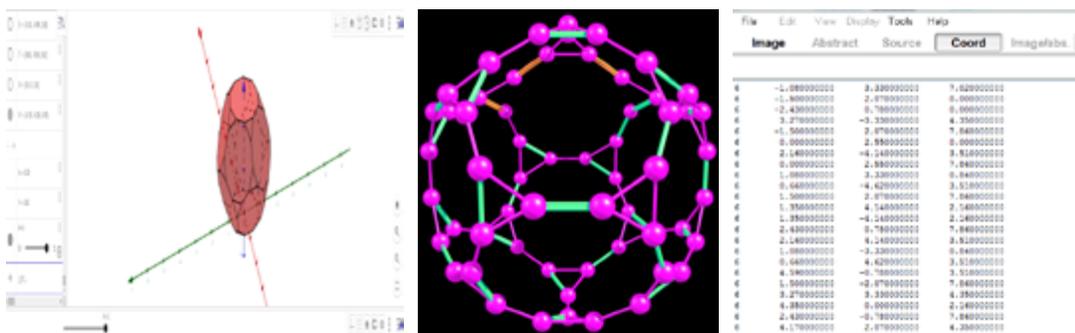
분자	꼭짓점 개수	모서리 개수	면 개수	한 점에 모이는 모서리 수	면을 구성하는 다각형 수
깍은 정사면체 (C04)	12개	18개	8개	3개	정삼각형 4개 정육각형 4개
깍은 정육면체 (C06)	24개	36개	14개	3개	정삼각형 8개 정팔각형 6개
깍은 육팔면체 (C68)	48개	72개	26개	3개	정사각형 12개 정육각형 8개 정팔각형 6개
깍은 정팔면체 (C08)	24개	36개	14개	3개	정사각형 6개 정육각형 8개
깍은 정이십면체 (C60)	60개	90개	32개	3개	정오각형 12개 정육각형 20개
깍은 정십이면체 (C012)	60개	90개	32개	3개	정삼각형 20개 정십각형 12개
마름모십이이십면체 (R1220)	60개	120개	62개	4개	정삼각형 20개 정사각형 30개 정오각형 12개
마름모육팔면체 (R68)	24개	48개	26개	4개	정삼각형 8개 정사각형 18개
십이이십면체 (1220)	30개	60개	32개	4개	정삼각형 20개 정오각형 12개
깍은 십이이십면체 (C1220)	60개	180개	62개	3개	정사각형 30개 정육각형 20개 정십각형 12개
다듬은 정육면체 (T06)	24개	60개	38개	5개	정삼각형 32개 정사각형 6개
다듬은 정십이이십면체 (T012)	60개	150개	92개	5개	정삼각형 80개 정오각형 12개
육팔면체 (68)	12개	24개	14개	4개	정삼각형 4개 정사각형 6개

2. 모델링을 위한 선행 작업

가. 정다면체, 준정다면체의 좌표 찾아 입력하기

3차원 구조의 정다면체, 준정다면체를 chemcraft 화면에서 직접 만들려고 해봤지만 정확한 길이와 각을 지정하기가 힘들었다. 그래서 정다면체와 준정다면체 각 꼭짓점의 3차원 좌표를 입력하기로 했다.

정육면체, 깎은 정육면체, 정팔면체 등과 같은 간단한 도형은 수학적 방법으로 좌표를 구할 수 있었지만, 깎은 정십이면체, 깎은 십이이십면체와 같은 복잡한 도형은 수학적 방법으로 구하기 힘들었다. 이미 구해놓은 좌표를 인터넷에서 찾아보기로 하였고, '지오지브라'라는 프로그램에서 정다면체와 준정다면체를 그려 놓은 것을 찾을 수 있었다[7]. 지오지브라에서 각 다면체의 꼭짓점 좌표를 가져와 chemcraft의 coord에 입력하여 분자를 나타내었다. coord는 공백을 기준으로 왼쪽부터 원자 번호, x좌표, y좌표, z좌표 순으로 입력한다. 원자 번호는 모두 탄소(C)의 원자 번호 6으로 입력한다.



```

%nproc=6
#p B3LYP/3-21G OPT
(공백 1줄)
test molecule
(공백 1줄)
0 1
-----분자의 좌표와 원자번호-----
6  0.000000000  1.500000000  1.500000000
6  1.000000000  2.000000000  0.000000000
-----
(공백 1줄 이상)
분자의 좌표는 chemcraft의 coord에 입력하는 것과 같은 형식으로 입력하면 된다.(원자번호, x좌표, y좌표, z좌표 순)

```

[Fig. 4] How to use the Gaussian Program

나. 초기 구조 설정 및 좌표 수정 방법 요약

1) 초기 구조 설정

앞에서 언급했듯이 정다면체와 준정다면체 구조의 좌표는 지오지브라에서 가져왔다. 지오지브라 좌표의 결합 길이는 대부분 1Å로 길이를 변화시켜 주는 프로그램을 이용해 비교적 큰 분자는 1.3~1.5Å, 비교적 작은 분자는 1.6~1.8Å로 설정하였다.

2) 좌표 수정 방법

계산을 진행하였을 때 'done'이라는 문구가 뜨면 계산이 정상적으로 이뤄진 것이고, 'exit'이라는 문구가 뜨면 계산 과정에 문제가 있다는 의미이다. 계산 과정에 문제가 생기는 이유는 크게 초기 구조의 너무 길거나 짧은 결합 길이, 낮은 대칭성의 2가지이다. 계산 과정에서 결합 길이가 길어지면 초기 구조의 결합 길이가 너무 짧다는 의미이므로 초기 구조의 결합 길이를 길게 하여 다시 계산을 진행하였고, 결합 길이가 짧아지면 반대로 결합 길이를 짧게 하였다. chemcraft의 대칭성 보완 모드를 통해 해당 구조의 대칭성을 높여 계산을 진행하였다.

다. 정상적으로 계산이 이루어지지 않은 분자에 대한 수정

위의 과정을 통해 준정다면체 분자 13개(총 15개 중 거울상 2개 제외)와 정다면체 분자 5개의 계산을 하였다. 정상적으로 계산이 이루어진 것도 있었지만 그렇지 않은 분자들도 있었다. 정상적으로 계산이 이루어지지 않은 분자들의 경우 분석이 불가능했다. 최대한 많은 종류의 정다면체, 준정다면체 분자를 분석해 보기 위해 정상적인 계산이 진행되도록 보정하기로 하였다. 결합 길이를 조절하고 대칭성을 보완하는 등의 과정을 거쳐 수정한 결과 몇 개의 분자의 계산을 정상적으로 완료할 수 있었다. 아래는 계산이 정상적으로 완료되지 않은 분자들의 보정 과정이다.

1) 육팔면체(68)

처음 계산에서 최소 에너지가 제대로 나오지 않았다. 초기 좌표 변경, 결합 길이 조정 등의 방법으로 수정을 시도하였으나 계산을 완료할 수 없었다.

2) 마름모 육팔면체(R68)

아래 그림과 같이 결합이 끊어지고 사각형 6개로 분리된 상태로 계산이 끝났다. 이러한 결과가 나타난 이유를 알아보기 위해 계산하기 전의 분자를 분석해 보았다. 준정다면체는 모든 변의 길이가 같아야 하는데, 계산 전 분자에서는 조금씩 다르게 나타났다. 결합 길이가 1Å인 결합과 0.9051Å인 결합이 있었다. 이러한 이유로 대칭성이 무너져 계산이 정상적으로 이루어지지 않았다고 판단하였다. 그래서 결합 길이를 모두 1.8Å로 같도록 좌표를 수정하여 Gaussian program으로 계산하였더니 정상적으로 계산이 진행되어 out파일이 나왔다. 이때 결합 길이는 약 1.72Å였다.

3) 마름모 십이이십면체(R1220)

계산이 1번만 진행된 후 종료되었다. 원인 분석을 위해 계산 소스를 열어 보았다. 메모리 초과로 인한 오류가 발생하였다. 마름모 십이이십면체는 꼭짓점이 60개로, 계산하기 전 메모장 파일에 적절한 크기의 메모리를 할당해 잡아주어야 이러한 오류가 발생하지 않는다는 것을 자문 교수님을 통해 알 수 있었다.

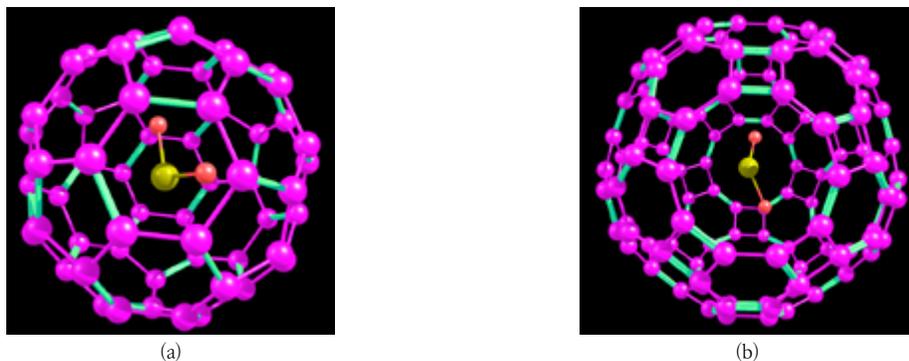
메모리를 할당하고 계산하였더니 마름모 육팔면체의 경우와 같이 분리되었다. 계산 전 파일을 분석해 보니 마찬가지로 결합 길이가 조금씩 달랐다. 그래서 chemcraft를 이용해 대칭성을 보정하는 작업을 진행하였다. 결합 길이도 0.9배로 줄였다. 이 작업을 한 후의 좌표를 계산하여도 분리되었다. 우연히 다듬은 정십이면체에 대칭성 보완 작업을 거치니 결합 길이가 그나마 비슷한 마름모 십이이십면체가 얻어진다는 것을 알 수 있었다. 그러나 계산을 완료할 수 없었다.

4) 다듬은 정십이면체(T012)

마찬가지로 메모리 초과 오류로 인하여 계산이 되지 않았다. 메모리를 잡아주고 다시 계산하였지만 역시 계산이 정상적으로 되지 않았다. 대칭성 보완 작업을 진행해 보았지만 마름모 십이이십면체의 모양으로 변해 계산을 진행할 수 없었다.

라. host분자로서의 역할 수행 가능성 분석

풀러렌은 guest를 잡을 수 있는 host로서의 기능을 가지고 있어 풀러렌에 약품을 집어넣어 인체에 흡수를 도와주는 등의 역할을 수행할 수 있다. 우리는 정다면체, 준정다면체 분자의 host로서의 기능을 가질 수 있는지 분석해 보았다. 풀러렌과 짝은 십이이십면체 내부 공간의 중심 부근에 SO_2 분자를 넣어 계산해 보았다. 반경 분석에서 짝은 십이이십면체의 가장 반경이 컸기 때문에 짝은 십이이십면체에 SO_2 를 넣어 보기로 하였다. 이때 SO_2 분자의 결합 길이, 결합각을 조사하여 chemcraft에 나타낸 후 이때의 좌표를 풀러렌(C020, C60)과 짝은 십이이십면체(C1220)의 out파일의 좌표에 각각 추가하여 SO_2 가 내부에 들어간 구조를 만들었다. 아래 그림은 host에 guest를 넣고 계산하기 전의 상태이다.



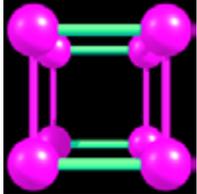
[Fig. 5] SO_2 (guest molecule) in the host molecules (a) Fullerene- SO_2 , (b) Truncated icosidodecahedron- SO_2

IV. 연구 결과 및 분석

1. 준정다면체 분자 모델링 결과

가. 정다면체 분자 모델링 결과

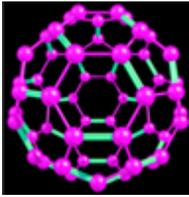
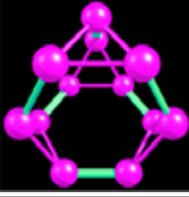
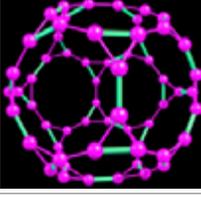
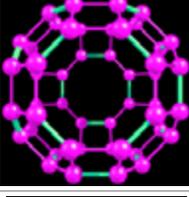
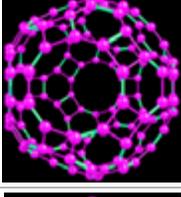
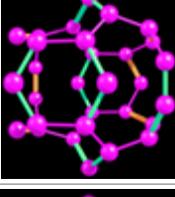
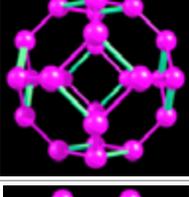
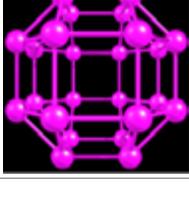
<Table2> Optimized structures of regular polyhedrons

분자	모형	결합길이(Å)		결합각도(°)	
		계산 전	계산 후	계산 전	계산 후
06(정육면체)		1.8	1.514	$\alpha = 90$	$\alpha = 90$
012(정십이면체)		1.76	1.410 1.456 1.527	$\alpha = 108$	$\alpha = 108$
020(정이십면체)		1.83	1.468 1.475	$\alpha = 60$	$\alpha = 60$

나. 준정다면체 분자 모델링 결과

<Table3> Optimized structures of semi-regular polyhedrons

분자	모형	결합길이(Å)		결합각도(°)	
		계산 전	계산 후	계산 전	계산 후
C06(짧은 정육면체)		1.30	1.37 1.39 1.43 1.46	$\alpha = 60$ $\beta = 135$	$\alpha = 60$ $\beta = 135$
C08(짧은 정팔면체)		1.42	1.37 1.51	$\alpha = 90$ $\beta = 120$	$\alpha = 90$ $\beta = 120$

C60(풀러렌)		1.56	1.39 1.46	$\alpha=108$ $\beta=120$	$\alpha=108$ $\beta=120$
C04(짧은 정사면체)		1.3	1.37 1.49	$\alpha=60$ $\beta=120$	$\alpha=60$ $\beta=120$
C012(짧은 정십이면체)		1.57	1.57 1.58	$\alpha=60$ $\beta=144$	$\alpha=60$ $\beta=144$
C68(짧은 육팔면체)		1.64	1.38 1.46	$\alpha=90$ $\beta=120$ $\gamma=135$	$\alpha=90$ $\beta=120$ $\gamma=135$
C1220 (짧은 십이이십면체)		1.32	1.35 1.49 1.50	$\alpha=90$ $\beta=120$ $\gamma=144$	$\alpha=90$ $\beta=120$ $\gamma=144$
1220(십이이십면체)		1.62	1.40 1.43 1.45 1.46	$\alpha=60$ $\beta=108$	-
T06(다듬은 정육면체)		1.3	1.37 1.51	$\alpha=60$ $\beta=90$	$\alpha=90$ $\beta=120$
R68(마름모 육팔면체)		1.8	1.64 1.72	$\alpha=60$ $\beta=90$	$\alpha=60$ $\beta=90$

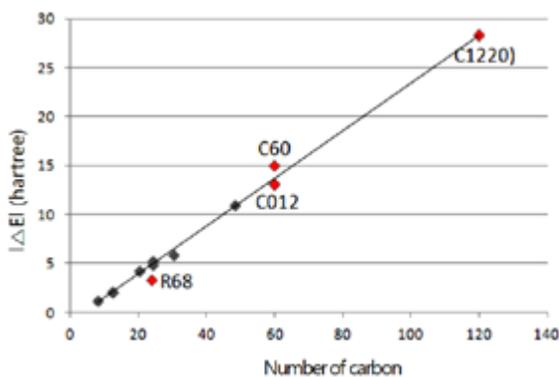
다. 분자별 에너지 변화량

〈Table4〉 Energy Information of each molecule

순서	분자	ΔE	$\Delta E/\text{원자수}$	$\Delta E/\text{결합수}$
1	C1220	-28,2390	-0.2353	-0.1568
2	C60	-14,9600	-0.2493	-0.1662
3	C012	-13,0080	-0.2168	-0.1445
4	C68	-11,0170	-0.2295	-0.1530
5	1220	-6,0430	-0.2014	-0.1590
6	C08(=T06)	-5,3330	-0.2222	-0.1481
7	C06	-4,9690	-0.2070	-0.1656
8	012	-4,4059	-0.2203	-0.1468
9	R68	-3,3400	-0.1391	-0.0695
10	C04	-2,2060	-0.1838	-0.1225
11	020	-2,1780	-0.1815	-0.1555
12	06	-1,3070	-0.1633	-0.1089

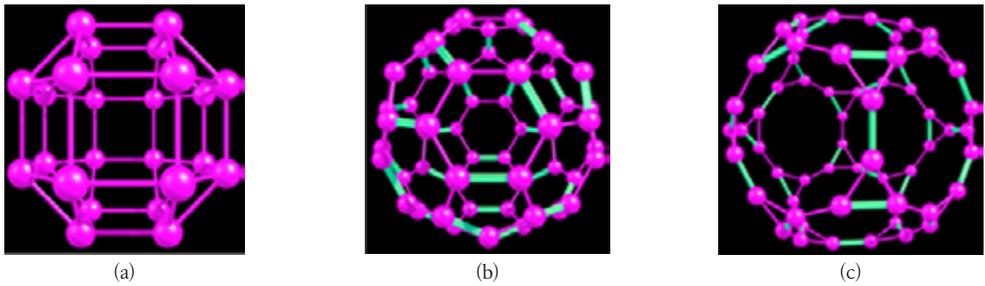
1) 가장 안정한 상태의 에너지와 초기 에너지 차이(ΔE)

구성 원자가 무한히 떨어져 있어 서로 상호작용을 하지 않을 때의 퍼텐셜에너지(탄소 한 개의 에너지 × 원자 개수)와 out파일에서 가장 안정한 상태의 퍼텐셜에너지와의 차이($\Delta E = (\text{가장 안정한 구조의 에너지}) - (\text{원자 상태의 에너지})$)를 구한다. 표의 순서는 절댓값이 큰 순서대로 나열되어 있다. 탄소 하나의 에너지는 -37.5729458 hartree로 이 또한 Gaussian program에 탄소 원자 하나를 넣어 계산하여 얻은 최종 값이다.



〔Fig. 6〕 Plot of ΔE versus number of carbon atoms

원자의 개수와 ΔE 와 관계를 그래프를 나타내었을 때 아래와 같은 선형 그래프가 나타난다. 탄소의 개수에 ΔE 값이 비례한다는 사실을 알 수 있다. 그래프에서 크게 벗어나는 ΔE 값을 가지는 다면체는 아래와 같다.



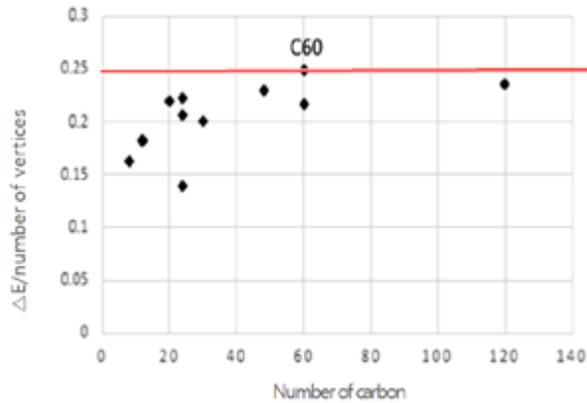
[Fig. 7] Molecules that deviate from the ΔE graph by the carbon number (a) R68, (b) C60, (c) C012

2) 깃스 자유에너지 계산의 어려움

분자의 안정성을 비교하여 존재 가능성을 확인하는 가장 정확한 방법은 깃스의 자유에너지를 구하여 부호를 조사하고 상대적인 값을 비교하는 것이다. 깃스의 자유에너지를 구하기 위해서는 엔탈피 항(ΔH)과 엔트로피 항(ΔS)이 필요한데, 엔탈피 항은 Gaussian program을 이용한 계산으로 구하였다. 분자들의 엔트로피를 구하는 프로그램이나 방법 등이 있는지 알아보기 위해 양기열 교수님께 자문하였다. 자문 결과 엔트로피를 구하는 프로그램과 방법이 존재하나 엔트로피를 구하는 과정은 엔탈피를 구하는 것보다 훨씬 복잡하여 풀러렌, 짝은 십이십면체와 같이 원자 수가 60개 이상인 것들은 엔트로피 계산이 거의 불가능하다는 결론을 얻었다. 엔트로피항을 간접적으로 대변할 수 있는 지표에 대해 생각해 보았고, 엔탈피 항을 원자 개수와 결합 개수로 각각 나눈 두 가지의 수치를 고안하였다.

3) 원자 하나당 감소한 에너지(ΔE /원자 개수)

준정다면체마다 모두 원자(꼭짓점)의 개수가 다르다. 엔트로피는 분자를 이루는 원자의 개수가 많아질수록 커지므로 엔트로피 항을 어느 정도라도 고려하기 위해 ΔE 를 분자를 이루는 원자의 개수로 나눈 값을 비교 하였고, [Fig. 8]과 같다.

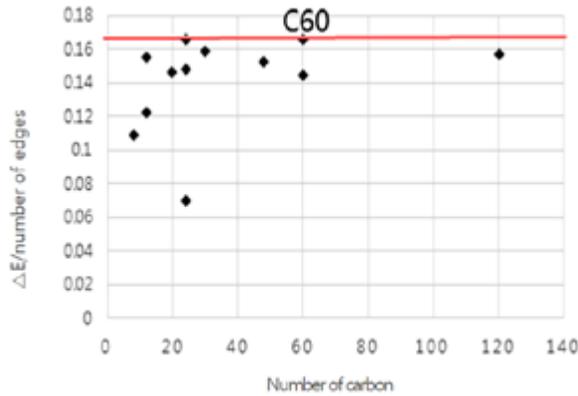


[Fig. 8] Plot of ΔE /(number of vertices) versus number of carbon atoms

탄소 원자 하나당 감소한 에너지(ΔE /원자 개수)와 탄소 개수와의 관계를 나타낸 그래프이다. C60(풀러렌)이 가장 큰 값을 나타냈으며 그 뒤로 C1220, C68, C08(T06) 순서로 높게 나타났다.

4) 결합 하나당 감소한 에너지(ΔE /결합수)

앞서 언급했듯이 탄소의 개수가 많아질수록 ΔE 값은 커지게 되는데 이는 탄소 개수가 늘어날수록 결합수가 많아져서 에너지가 많이 낮아지게 되는 것이라고도 해석할 수 있다. 탄소 사이에 생긴 결합에 의해 감소한 에너지를 비교하기 위해서 총 ΔE 값을 모서리개수로 나눈 값을 비교한 결과는 [Fig. 9]와 같다.



[Fig. 9] Plot of $\Delta E/(\text{number of edges})$ versus number of carbon atoms

결합 하나당 감소한 에너지($\Delta E/\text{결합수}$)와 탄소 개수와의 관계를 나타낸 그래프이다. $\Delta E/\text{결합수}$ 값 역시 C60(풀러렌)이 가장 큰 값을 가졌으며, 그 뒤로 C06, 1220, C1220 순서의 높은 값을 가졌다. $\Delta E/\text{결합수}$ 는 탄소의 개수와는 무관하게 나타났다.

마. 분자별 최소반경 계산

모델링한 분자 내부에 들어갈 guest 물질의 대략적인 크기를 예상하기 위해선 분자의 최소반경을 알아야 한다. 준정다면체의 전체 무게중심으로부터 준정다면체를 이루는 각 종류의 면의 무게중심까지의 거리를 측정하여 그중 가장 가까운 거리를 분자의 최소반경으로 정의하였다. 표의 순서는 최소 반경이 큰 순서대로 나열되어 있다. 020은 구조상 최소반경을 정의할 수 없었다.

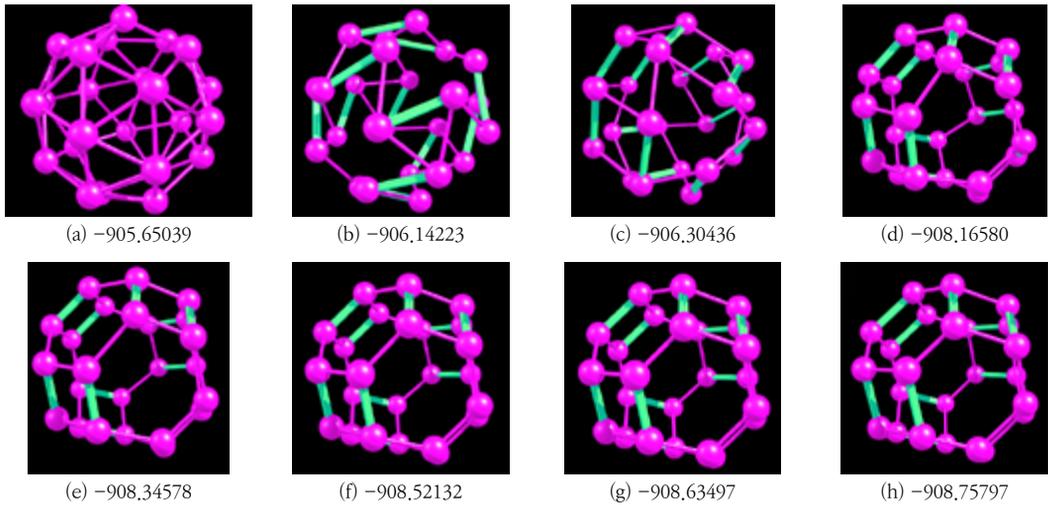
<Table 5> Minimum radius of molecules

순서	분자	거리(Å)	순서	분자	거리(Å)
1	C1220	4,9451	7	C08(=T06)	1,7900
2	C012	3,4758	8	C06	1,7050
3	C60	3,2557	9	012	1,6580
4	C68	2,7660	10	C04	0,8889
5	R68	2,0200	11	06	0,7572
6	1220	1,9859			

바. 구조 변화가 일어난 분자 분석

1) T06이 C08로 모양변화가 일어난 이유

T06은 에너지 계산 과정 중 아래와 같은 과정을 통해 C08 구조로 변화한다.



[Fig. 10] Structural change by cycle during the calculation of T06
 (a) 11th, (b) 15th, (c) 18th, (d) 39th, (e) 42th, (f) 44th, (g) 45th, (h) 49th(min)

삼각형을 이루는 결합에 변화가 생기면서 남은 사각형 구조가 점점 회전하여 놓인 각도가 달라진다. 다시 육각형 모양의 결합이 생기면서 C08 모양으로 변화한다. 다면체의 한 꼭짓점에 삼각형이 많이 모여 있을수록 결합각이 작아지게 되고 전자쌍 간의 반발이 심해지면서 불안정한 결합을 가진다. T06의 경우 한 꼭짓점에 모인 삼각형의 개수가 4개로 비교적 불안정한 구조를 가진다. 또 최외각 전자수가 4개인 탄소의 경우 결합수가 5개이면 결합이 불안정해지게 되므로 한 꼭짓점에 모이는 모서리의 개수가 5개인 T06은 더더욱 불안정한 구조를 가진다. 따라서 한 점에 모이는 모서리의 개수가 4개 또는 3개가 되는 구조로 바뀔 가능성이 높다. 준정다면체와 정다면체 중 T06 말고도 한 꼭짓점에 모이는 모서리의 개수가 5개인 것은 O20와 T012가 있다. T012는 계산이 완료되지 않아 최종구조를 확인하지 못하였고 O20의 경우 준정다면체 모양이 아닌 정의 할 수 없는 모양으로 변화하였다. 분자 모양이 그대로 유지되지 못하고 변화가 일어나는 이유는 위와 같을 것으로 예상된다.

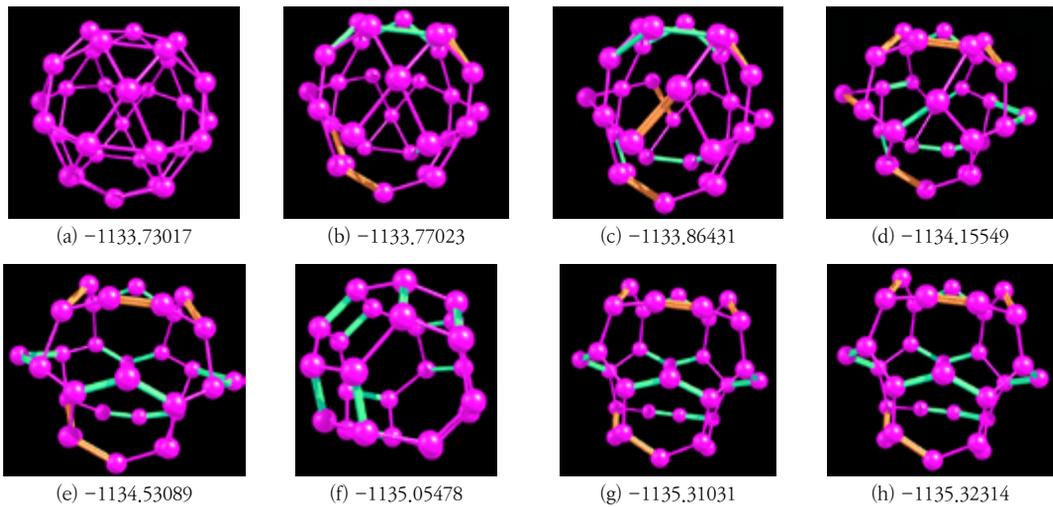
그렇다면 T06은 왜 같은 꼭짓점 개수를 가진 C06이나 R68로 변하지 않고 C08 모양으로 변했을까? 같은 꼭짓점 개수를 가진 준정다면체들끼리는 그중 가장 낮은 에너지를 가지는 분자구조로 변하는 것이 분자의 안정성 입장에서 더 유리할 것이다. 하지만 가우시안(gaussian) 프로그램 알고리즘은 위의 과정을 그대로 실행하지 않는다. 계산을 시작할 때 원자의 위치를 완전히 바꾸는 것이 아니라 처음 상태에서 조금씩 원자 사이의 거리와 각도를 바꾸며 가장 안정한 상태를 계산하는 것이기 때문에 분자가 아예 다른 모양으로 변화하지 않는다. 출발할 때와 완전히 다른 구조를 가지기 위해선 큰 에너지장벽을 넘어야 하는데, 가우시안(gaussian) 프로그램의 경우 에너지장벽이 높을수록 기존 형태를 유지하며 계산을 진행한다. 이 때문에 같은 24개의 꼭짓점을 가지는 C06과 R68, C012 같은 경우 자신의 모양을 유지하며 계산이 이루어진 것이다. 워낙 불안정한 결합을 하는 T06은 다른 모형으로 결합을 다시 하던 중 그나마 모양이 비슷해 변형이 쉬운 C08로 변화했을 것이다.

2) T012의 모양 변화 예측

계산 오류에 의해 계산을 완료하지 못한 T012의 경우 오각형과 삼각형으로 이루어져 있으며 한 꼭짓점에 모이는 모서리 개수가 5개인 다면체이다. 이는 사각형과 삼각형으로 이루어져 있으며 한 꼭짓점에 모인 모서리 개수가 5개인 T06과 유사한 구조이다. 만약 에너지 계산에 성공할 경우 T06과 마찬가지로 삼각형 간의 결합이 깨지고 육각형 모양의 결합이 생성되면서 오각형과 육각형으로 이루어진 풀러렌 모양으로 변화할 것이다.

3) 1220의 모양이 변화한 이유

1220은 아래와 같은 과정을 통해 모양이 변화한다.



[Fig. 11] Structural change by cycle during the 1220 calculation
 (a) 1th, (b) 6th, (c) 9th, (d) 14th, (e) 19th, (f) 24th, (g) 30th, (h) 38th

1220의 경우 한 점에 모이는 모서리의 개수가 4개이므로 T06과 완벽히 동일한 이유로 구조가 바뀌는 것은 아니다. 하지만 1220의 한 꼭짓점에 모인 삼각형의 개수는 2개로 이는 T06 다음으로 많은 개수이다. 삼각형구조에 의한 전자쌍 반발로 1220 역시 결합이 불안정해지고 이에 따라 위의 그림과 같이 삼각형을 줄이는 방향으로 변화가 생기며 육각형과 같은 새로운 결합이 만들어지면서 새로운 모양으로 변화한다.

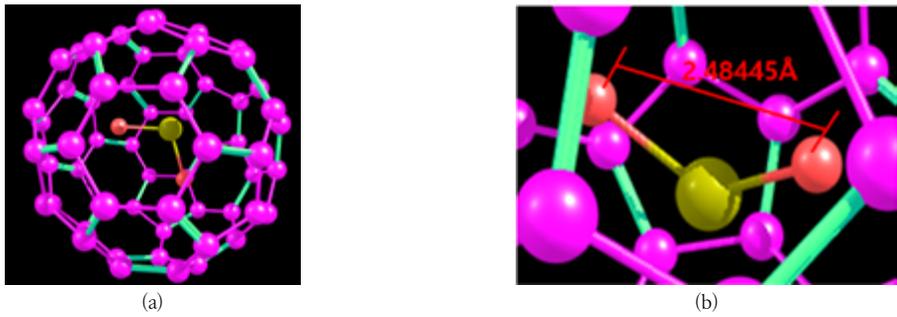
1220이 T06처럼 다른 준정다면체 모양으로 변화하지 않은 이유는 삼각형의 결합에 변화가 생겼을 때 새로운 결합이 생성되어 변화할 비슷한 모양의 준정다면체가 존재하지 않기 때문이라고 추측된다.

2. host로써의 역할 수행 가능성 분석 결과

가. 풀러렌

풀러렌 분자 내부의 빈 공간에 SO_2 분자를 넣어 계산해 보았더니 (풀러렌의 좌표는 out파일의 좌표를 이용하였다.) 풀러렌의 구조는 거의 변하지 않고 SO_2 의 위치만 내부 공간의 중심 쪽으로 조금 이동하였다. 구성 원자는 탄소 60개와 산소 2개, 황 1개로, 탄소 원자 1개의 에너지는 -37.57294 hartree, 산소 원자 1개의 에너지는 -74.55491 hartree, 황 원자 1개의 에너지는 -396.10031 hartree 이다. 따라서 구성 원자들이 모두 무한히 떨어져 있을 때의 에너지는 $-37.57294 \times 60 - 74.55491 \times 2 - 396.10031 = -2799.58689$ hartree이다. out파일에서 가장 안정할 상태일 때의 에너지는 -2819.19866 hartree로 $\Delta E = -19.61172$ hartree이다.

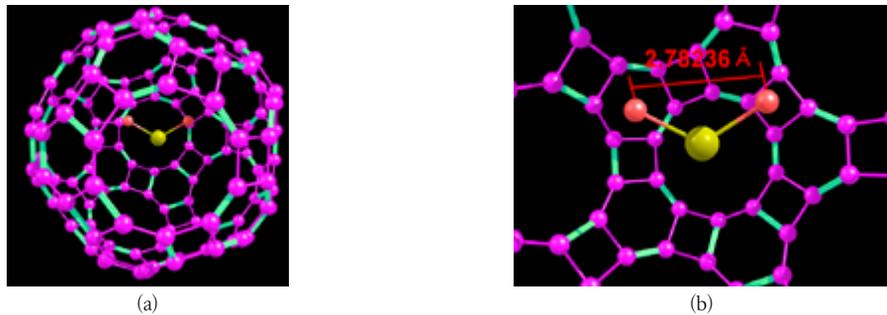
독립된 분자에 대한 host-guest 분자가 형성되었을 때의 에너지를 비교하면 풀러렌의 에너지는 -2273.52219 hartree, SO_2 의 에너지는 -545.714375 hartree이다. SO_2 와 풀러렌이 따로 있을 때의 에너지 합은 -2819.23656 hartree이다. SO_2 를 풀러렌에 넣었을 때의 에너지는 -2819.19862 hartree로 따로 있을 때의 에너지보다 약 100kJ/mol 만큼 에너지가 높다. 실제로 host와 guest로 활용되고 있는 물질의 경우 host-guest 작용이 일어나면 서로의 인력으로 더욱 에너지가 낮아지는 경우가 대부분이다. 풀러렌의 반경은 3.26 Å 이고, SO_2 에서 두 산소 원자간의 거리를 SO_2 의 직경으로 정의 할 때, 산소 원자 간의 거리는 2.48 Å였다. 풀러렌의 직경은 $3.2557 \times 2 = 6.51$ Å이다. 직경에 비해 SO_2 의 크기가 커서 안정화되지 않을 수도 있다.



[Fig. 12] Calculation result (a) Fullerenes- SO_2 after calculation, (b) Size of SO_2

나. 짧은 십이십면체

짧은 십이십면체에 SO_2 를 넣어 계산한 결과 짧은 십이십면체의 크기가 좀 더 커졌다. 구성 원자는 탄소 120개, 황 1개, 산소 2개이다. 구성 원자들이 무한히 떨어져 있을 때의 에너지 합은 -5053.96533hartree이고 SO_2 를 넣은 분자의 계산에서 최소 에너지는 -5091.074122hartree로 $\Delta E = -37.108792$ hartree이다. 짧은 십이십면체의 에너지는 -4545.3631391hartree, SO_2 의 에너지는 -545.714375hartree이다. 마찬가지로 이 둘을 합하면 -5091.077514hartree로 SO_2 를 넣은 분자의 에너지와 거의 같다. 추후 더욱 여러 가지 host분자(우리가 계산한 준정다면체 분자)와 guest분자를 넣어 host와 guest의 크기(반경)을 조절해 가면서 계산을 진행한다면 안정한 host-guest 작용을 찾을 수 있을 것이다.



[Fig. 13] Calculation result (a) Truncated icosidodecahedron- SO_2 after calculation, (b) Size of SO_2

V. 결론 및 제언

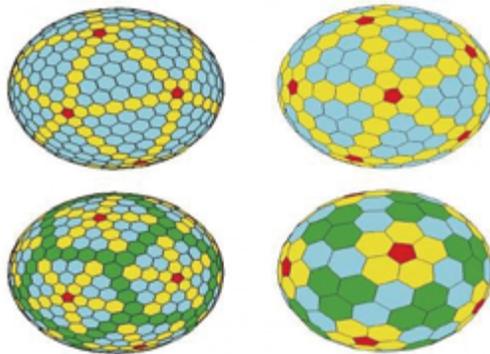
ΔE (퍼텐셜 에너지 변화량)값을 이용하여 분자의 에너지적 안정성을 고려했을 때 분자를 이루는 탄소의 개수에 비례하여 에너지적 안정성이 커진다는 것을 알 수 있다. 계산 결과가 나온 다면체 중 탄소수가 120개로 가장 많은 C1220이 가장 많은 에너지 감소를 보였으며 이는 풀러렌의 2배를 넘는 수치이다.

준정다면체 분자는 한 점에 모이는 결합수와 삼각형 면의 개수가 많을수록 전자쌍 간 반발에 의해 구조가 매우 불안정해지며 에너지 계산중에 삼각형의 개수와 결합수를 줄이는 방향으로 구조가 변화하게 된다. 이에 따라 서로 다른 종류의 준정다면체로 변화하거나 준정다면체 구조를 잃는 등의 구조변화가 일어난다. R1220과 T012 분자는 오류를 정정했음에도 불구하고 좌표의 문제로 인해 결국 계산을 완료하지 못하였다. R1220의 경우 많은 삼각형을 가지고 있고 한 꼭짓점에 오각형 1개와 삼각형 2개, 사각형 1개가 모여 있다. 탄소개수가 60개이므로 ΔE 값에선 비교적 높은 안정성을 가질 것이지만 구조적인 불안정에 의해 구조적 변화가 있을 것으로 예상된다. 위의 두 분자의 데이터를 얻어내어 분자 구조 변화의 이유와 경향성에 대한 심화적인 연구를 진행 할 것이다.

모델링된 준정다면체 분자들은 다양한 반경을 가진다. 0.7Å에서 4Å 까지의 다양한 반경을 지니는데, 각 준정다면체 분자의 반경에 맞는 guest 물질을 찾아 준정다면체 host 물질로서의 역할을 기대해볼 수 있다. 풀러렌과 C1220 분자내부에 SO_2 분자를 넣어봤을 때 구조적으로 분리되지 않은 것으로 보아 다른 준정다면체 분자들도 분리되지 않고 안정적인 host 분자의 역할을 수행할 수 있을 것으로 보이며, 이 분자들에 대해선 추후 연구 할 것이다.

본 연구에선 분자들의 엔트로피 계산의 어려움 때문에 깃스의 자유에너지 대신 ΔE /원자수, ΔE /결합수로 안정성을 비교하였다. 추후 이 수치의 타당성을 입증하기 위해 안정성이 알려진, 즉 깃스의 자유에너지를 구할 수 있는 몇몇 분자의 ΔE /원자 개수, ΔE /결합수로 판단한 안정성과 깃스의 자유에너지로 판단한 안정성이 유사한지 비교해 볼 것이다. 추후 연구에선 위에서 언급한 방법들을 통해 지금까지 모델링한 분자들의 엔트로피와 깃스의 자유에너지를 고려하여 준정다면체 분자들의 엄밀한 존재 가능성을 알아볼 것이다.

또한 준정다면체 구조에 탄소 원자 이외의 다른 원자를 넣어 계산해 볼 것이다. 특히 Si-C결합의 경우 C-C결합보다 결합에너지가 더 크므로(Si-C의 결합에너지는 360KJ/mol 이고 C-C의 결합에너지는 345KJ/mol 이다.) 규소 원자를 일부 넣는다면 더욱 안정성이 큰 분자를 얻을 수 있을 것이다.



[Fig. 14] Goldberg polyhedron

여러 다면체에 대해 조사하는 과정에서 준정다면체 이외에 추가적으로 [Fig. 14]와 같은 골드버그 다면체에 대해 접하게 되었다. 골드버그 다면체는 스태ن 사인이라는 사람에게 의해 고안되었다[8]. 골드버그 다면체는 구성하는 면이 완전한 평면이 아니지만 이러한 점이 분자의 형성에 영향을 주는 요소로 작용하진 않을 것이다. 골드버그 다면체는 풀러렌과 마찬가지로 오각형과 육각형 구조로 이루어져 있어 구조상 안정할 것으로 예상된다. 다른 종류의 다면체를 이용하여 계산함으로써 준정다면체와 정다면체 구조보다 더욱 안정한 입체 구조를 발견할 수 있을 것이다.

VII. 참고문헌

- [1] F.Vogtle, E. Weber(1985). Host Guest Complex Chemistry Macrocycles, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York Tokyo.
- [2] 김경식, 임익수, 김경식, 지유나, 이문재, 임슬지, 이운식(2016). 다면체(Polyhedron)플라톤 다면체에서 케플러 푸앵소 다면체까지. 엠솔영어교육.
- [3] 13 types of semi-regular polyhedron, (2018. 3. 19) (<https://m.blog.naver.com/telle100/221055587176>)
- [4] 김현명. (2003). 분자모델링을 이용한 환형올리고당의 포집복합체에 관한 연구(석사학위논문). 건국대학교.
- [5] 강인숙. (2012). 펜타졸 및 옥소펜타졸 음이온과 금속 착물의 안정성에 대한 이론적 연구(석사학위논문). 경상대학교.
- [6] M. J. Frisch et al(2004). Gaussian 03, Revision C.02, Gaussian, Inc. Wallingford CT.
- [7] 지오지브라 고급예제 모델링 2권. (2018. 4. 1). (<https://www.geogebra.org/m/bHVasMp9>)

[8] Goldberg polyhedron, (2018. 4. 1). (<http://dongascience.donga.com/news.php?idx=3832>)

| 연구진 |

박세준 (Sejun Park, 창원과학고등학교, psjigicube@gmail.com), 주저자

강동원 (Dongwon Kang, 창원과학고등학교, dongwon1129@naver.com), 공동저자

김세원 (Sewon Kim, 창원과학고등학교, pukekko@daum.net), 공동저자

지도교수 : 양기열 (Kiyull Yang, 경상대학교 화학교육, kyang@gnu.kr)

지도교사 : 강인숙 (Insook Kang, 창원과학고등학교, ssuksuki@hanmail.net)

소수성 작용기 도입을 통한 금속-유기 하이브리드 소재 기반 이산화탄소 저감재의 물 저항성 증진

박성현 · 장현성 · 강우형 - KAIST 부설 한국과학영재학교

Development of Water-Resistant Metal-Organic Framework based Hybrid Material for the Selective Capture of Carbon Dioxide

Seong-Hyeon Park · Hyunsung Jang · Woohyeong Kang - Korea Science Academy of KAIST

국문초록

본 연구에서는 금속-유기 골조(Metal-Organic Framework, MOF)의 고질적인 문제인 물에 대한 취약함을 소수성 결가지를 도입함으로써 해결하려 한다. 소수성 결가지를 도입한 벤젠다이카복실산에서 유도된 단량체 리간드를 사용해 기존에 보고된 벌집 골조와 동일한 골격을 가지는 MOF를 합성하였다. 이를 통해 물에 대한 저항성을 극적으로 향상시킬 수 있었다. 기존의 골조의 경우 대기 중 습기에 노출시켰을 경우 수 시간 내로 붕괴하였으나 새로이 합성한 골조의 경우 7일 이상 안정하였으며 더 나아가 물과 혼합하여도 24시간 이상 골조를 유지하였다. 이때 기체흡착의 선택성도 유지되었으나, 알킬 사슬이 골조 내부의 공간을 차지하여 흡착량이 감소하는 문제가 있었다. 이를 개선하기 위하여, 마이크로파 합성법을 사용하여 골조 내부 결합 증가에 의한 공간 증대를 유도하였으며 bipyridyl linker의 길이를 증가시키고 리간드를 혼합해서 사용하는 등 다양한 시도를 진행하였다. 이때 마이크로파 합성법을 통해 시간효율적인 합성을 할 수 있었으며 혼합 리간드를 사용한 경우 흡착능 감소의 문제를 개선할 수 있었다. 궁극적으로는 bdc기반 MOF들에 적용할 수 있는 물 저항성 개선 전략을 찾아내고자 하며, 이를 위해 대표적인 bdc 기반 MOF인 MOF-5에도 성공적으로 적용시켜 보았다.

중심어 : 미금속-유기 골조, 물 저항성, 선택적 흡착, 구조 변화, 알콕시 결가지

ABSTRACT

In this research, we aim to solve the problem of water instability of traditional MOFs via introducing hydrophobic alkoxy functionalities onto the monomeric ligands. By using 1,4-benzenedicarboxylic acid derivatives with alkoxy chains, we were able to synthesize an analogous structure that was isorecticular to a previously reported honeycomb-like MOF. It was found to have exceptional water stability towards both atmospheric moisture as well as liquid water. The new structural analogue was stable for more than 7 days in a moisture-saturated atmosphere, and remained stable for more than 24 hours when mixed with liquid water. On the contrary, the original structure had been degraded completely and had transformed to another unknown structure within hours when subjected to water-rich atmospheres. While the selectivity of gas adsorption was retained in the structural analogue, the amount was decreased noticeably due to the bulky alkyl chains blocking the pores. In order to improve this, various methods such as using microwave-assisted synthesis to facilitate the formation of defects in which gas can be adsorbed, and increasing the length of the bipyridyl linkers, and mixing bdc with the Cn-acids were tried. In particular, mixing bdc helped improve the problem of adsorption capacity, while microwave-assisted synthesis dramatically shortened reaction time. The same strategy of water stability improvement was tested on another structure, MOF-5. Ultimately, this strategy of increasing water stability will be tested for its applicability, efficacy, and universality on other various bdc-based MOFs.

Key words: metal-organic frameworks, water stability, selective adsorption, structural transformation, alkoxy side chains

I. 서론

금속-유기 골조(Metal-Organic Framework, MOF)는 그 구조와 조성이 다양하여 넓은 범위의 물성 스펙트럼을 가지고 있어 기체 저장[1], 촉매[2], 센서[3] 등으로의 활용 가능성이 주목받는 신소재이다. 이러한 금속-유기 골조는 일반적으로 금속 양이온과 리간드의 배위결합으로 만들어진다. 이때 유기 리간드는 흔히 두 자리 (bidentate), 혹은 세 자리 (tridentate) 등 여러 자리 배위 (multidentate) 리간드를 사용하여 금속 양이온들을 연결하게 된다. 따라서 금속-유기 골조의 구조적, 화학적 특성은 일차적으로 그 구성에 의해 결정된다. 또한 합성 조건과 방법 등에 의해서도 물성의 세밀한 조정이 가능한 것이 금속-유기 골조의 중요한 특성이다. 즉, 금속-유기 골조는 유기 리간드에 작용기를 도입하거나, 금속의

종류를 바꾸거나, 결정의 합성 조건을 조절하는 등의 다양한 접근방법으로 물성의 최적화가 가능하다는 장점을 가진다.

금속-유기 골조는 이렇듯 다양한 활용가능성과 우수한 물성을 가지나, 물(공기 중 수분 등)에 의해 안정성이 저해된다는 점 때문에 그 실질적인 활용이 제한되어 왔다. 습기가 있는 환경에서는 물 분자들이 리간드와 치환되어 금속에 배위하게 되고, 어떤 경우에는 골조의 총체적인 붕괴를 일으키기도 한다[4]. 이를 극복하기 위해 고분자 형태의 리간드를 사용하거나 [5], 태생적으로 안정한 구조를 합성하려는 노력이 지속되어 왔다[6].

Henke et al. 이 2011년에 보고한 벌집 구조(honeycomb-like structure)의 금속-유기 골조는 치환기가 첨가된 파라-이카복실산벤젠 (1,4-benzene dicarboxylate, bdc), 4,4'-bpy (bipyridine, bpy)과 2가 아연 양이온으로부터 합성되는 금속-유기 골조이다[7]. 이후 bdc의 2,5-자리에 적절한 크기의 치환기가 존재하는 경우에만 이 구조가 합성되며, 그렇지 않은 경우에는 paddle-wheel 골조의 합성이 보고되었다[8]. 이것은 그러한 치환기에 의한 입체 장애(steric hindrance)에 의해 유기 리간드들의 파이-파이 상호작용이 더 이상 선호되지 않아 이 상호작용이 강한 입방 구조보다 육각 채널 구조가 더 안정해지기 때문이다[8]. 이 벌집 구조는 동공들이 한 방향으로 이어져 있고(unidirectional channel), 동공 속으로 결사슬이 배치되어 있으며 일종의 선택적인 통로(gated channel)로 작용하므로 기체의 흡착에 있어서 높은 선택성을 가진다. 그 이유 중 하나로 Henke et al.은 질소 기체와 이산화탄소 기체의 극성 및 크기 차이라고 제안하였다[7]. 이 구조는 그러한 선택성을 기반으로 하여 산업 현장에서의 배기 가스 분리, 이산화탄소 포집 등의 높은 활용 가능성을 가진다.

그러나 많은 금속 유기 골조와 마찬가지로, 이 구조 또한 물에 취약한 단점을 갖고 있다. 실제로 이 벌집 구조를 공기 중에서 습기에 노출시킨 결과 1시간 이내로 전혀 다른 구조로 변화함이 관찰되었다. 이를 보완하기 위해 Zhang et al.은 고분자 리간드인 poly(1,4-benzenedicarboxylate), pbdc-xa를 사용하여 물 저항성이 우수한 고분자-금속-유기 골조를 합성한 바 있다[5]. 그러나 이러한 방식의 물 저항성 향상 전략은 몇 가지 중요한 문제점을 가진다. 우선 이렇게 단량체 유기 리간드를 고분자 리간드로 대체하는 것은 대다수의 금속-유기 골조에 공통적으로 적용하기에는 무리가 있다. 다른 골조에 적용하기 위해서는 각 골조의 단량체 리간드들에 대응되는 고분자를 각각 합성해야 하며, 그렇다고 해도 그것이 동일한 골조에 incorporate될 것이라는 보장이 없다. 또한 금속-유기 골조의 중요한 장점인 화합물의 구조를 약간 변화시킴으로써 물성 변화를 도모하는 fine-tuning 또한 고분자 리간드를 사용할 경우 다소 힘들어진다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 본 연구에서는 물 저항성을 증가시키는 새롭고, 보다 범용 가능한 전략을 제시하려고 한다. 고분자 리간드를 사용하는 대신, 각각의 단량체 리간드에 소수성 결가지를 도입함으로써 물 분자의 접근을 막아 물 저항성을 증가시킨다는 것이 본 연구의 목적이다.

정리하자면, 기존의 연구에서 이산화탄소에 대해 선택적인 벌집 구조를 발견하였다[7]. 하지만 이 구조는 물에 대해 약하기에 실용적인 가치가 낮았는데 이를 개선하기 위해 소수성인 고분자 리간드를 활용하여 극적인 물 저항성 증가를 유도한 바가 있다[5]. 하지만 고분자 리간드를 사용하는 방법은 대다수의 금속-유기 골조에 적용하기에는 무리가 있다는 점과 fine-tuning이 힘들다는 점 등의 단점이 있다. 그리하여 우리는 단량체 자체에 소수성을 부여함으로써 물 저항성을 증진시키고 이 방법이 보편적으로 적용될 수 있음을 보여주고자 한다. 이 과정에서 발생하는 흡착량의 감소를 개선하기 위한 여러 가지 방법을 이 논문에서 보여주고 있다.

II. 연구방법 및 이론

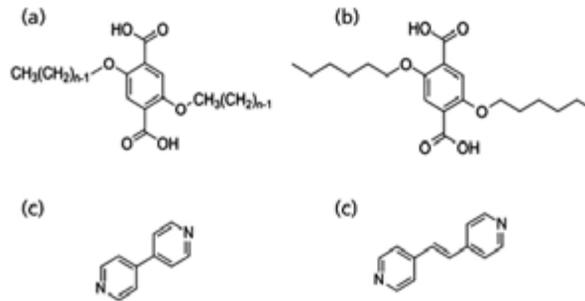
1. 금속-유기 골조의 합성

가. 사용된 시약

DMF(dimethylformamide), DEF(diethylformamide), 파라-이카복실산 벤젠(terephthalic acid, 1,4-benzene dicarboxylic acid, or bdc), 질산 아연 육수화물(zinc nitrate hexahydrate), 에탄올, bpy(4,4'-bipyridine), bipyen(1,2-Di(4-pyridyl)ethene)은 모두 시그마-알드리치 사(현 Merck)에서 Reagent grade로 구입, 별도의 정제 없

이 사용하였다.

알콕시 치환기가 도입된 테레프탈산 유도 리간드, 즉 2,5-bis(alkyloxy)terephthalic acid는 치환기에 포함된 탄소의 개수에 따라 Cn-acid로 명명하였다. 예를 들어, 2,5-bis(hexyloxy)terephthalic acid의 경우 C6-acid라고 지칭하는 식이다.



[Fig.1] Molecular structure of ligand molecules used in this study. (a) Cn-acids (b) C6-acid (c) 4,4'-bipyridine(bpy) (d) 1,2-Di(4-pyridyl)ethene (bipen)

나. 용매열합성법(Solvothermal synthesis)

다양한 조건을 시험하고, 결정을 합성하기 위해 금속-유기골조의 합성에서 흔히 사용되는 용매열합성법을 사용하였다. 우선 각 시약을 적절한 양을 유효숫자 4자리의 정밀도로 정량하고, 이를 배합한 후 용매를 첨가하였다. 이후 Branson사의 초음파 항온수조 내에서 투명해질 때까지, 혹은 균일한 혼합물이 될 때까지 혼합하였다. 이후 합성을 위해 결정 합성용 정밀온도조절오븐(DKN 302, Yamato Scientific 사)에서 3개의 단계에 걸쳐 가열, 유지, 냉각하였다.

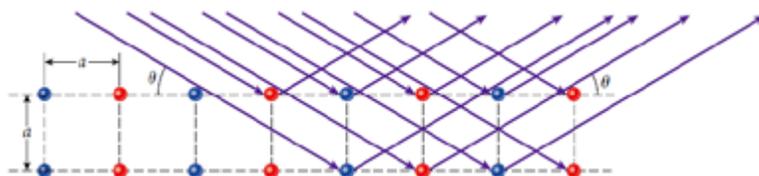
다. 마이크로파 이용 합성법(Microwave-assisted synthesis)

금속-유기 골조의 용매열합성법에서 빠른 결정핵 생성과 그에 따른 합성시간의 단축을 가능케 하는 마이크로파 이용 합성법도 시도하였다. 용매열합성법과 동일하게 시료를 배합한 다음 Discovery사의 마이크로파합성기를 사용하여 합성을 진행하였다. 이때 합성에 소요되는 시간은 일련의 예비 실험의 결과에 따라 1시간으로 결정하였으며, DEF를 용매로 사용하였으므로 알려진 값에 따라 150W의 출력으로 설정하였다.

2. 합성한 구조의 분석

가. 분말 엑스선 회절분석법 및 구조분석(Powder X-Ray Diffractometry, PXRD)

합성된 물질의 구조를 파악하기 위하여 분말 엑스선 회절분석법을 사용하였다. PXRD는 결정 분석 시 가장 많이 사용되는 방법 중 하나이다. 파우더 형태의 샘플에 엑스선을 주사하게 되면 결정의 특정 면에 대해 [Fig. 2]와 같이 보강 간섭이 일어나게 된다. 이 신호를 기기 내부의 탐지기가 검출하게 되어 PXRD 패턴이 관찰된다. 각각의 신호의 각도 값은 Bragg's law ($n\lambda = 2dsin\theta$)에 따라 면 사이의 간격에 의해 결정된다. 이 분석을 통해 얻은 PXRD 패턴은 결정의 '지문'과 같은 역할을 한다.



[Fig. 2] Diagram of X-ray diffraction in crystal lattice [9]

이 방법은 단결정 엑스선 회절 분석법(single x-ray diffraction, SXRD)과 유사하나 SXRD는 단결정, 즉 하나의 결정에 대해 분석할 때 사용되며 PXRD는 파우더 형태의 벌크 물질을 분석할 때 주로 사용된다[9].

본 연구에서는 시료의 측정을 위해 Rigaku 사의 Miniflex 600 Powder X-Ray Diffractometer를 사용하였다. 얻은 PXRD 패턴과 단결정 분석 결과를 바탕으로 계산된 PXRD 패턴을 비교하였으며 이를 위해 Cambridge Crystallographic Data Centre(CCDC)의 Mercury, ConQuest 소프트웨어를 이용하였다. 기타 구조 모델 편집 및 조각을 위해 Biovia사의 Materials Studio 소프트웨어를 사용하였다.

나. 현미경 관찰

합성된 시료의 거시적인 형태를 관찰하기 위하여 Dino-Lite 사의 휴대용 USB 현미경을 사용하였다. 현미경을 통해 50~450 배 정도의 배율로 확대하여 관찰할 수 있었으며 구체적인 수치는 본문에 기술하였다.

다. 열중량분석법

합성한 금속-유기 골조의 열적 안정성을 관찰하고, 금속의 비율을 측정하기 위해 열중량분석법(Thermogravimetric Analysis)를 사용하였다. 열중량분석법이란 온도 증가에 따른 시료의 중량 변화를 측정하는 방법이다. 일반적으로 시작 온도, 최종 온도, 시간 당 온도 변화 등을 설정해 주며 실험 목적에 따라 질소, 공기 등의 환경에서 실험을 진행한다. 이 분석을 통해 물질의 열에 대한 안정성을 확인할 수 있으며 조성을 확인하기 위한 정량적인 분석에도 사용될 수 있다. 더 정확한 실험을 하기 위해 가열될 때 발생하는 기체를 질량분석기 등을 통해 정량적으로 분석하기도 하며 금속-유기골조 외에도 고분자 수지, 탄소 물질 등을 분석할 때 사용되기도 한다[10]. 본 연구에서는 Scinco사의 TGA-1000기기를 통해 분석을 진행하였으며 고순도 압축 공기 하에서 질량 변화를 측정하였다.

라. 적외선분광법

합성에 사용된 물질들과, 합성된 시료들을 적외선분광법(Infrared spectroscopy, IR spectroscopy)를 통해 확인하였다. 다원자분자는 결합 길이, 결합된 원자의 종류와 질량 등에 따라 다양한 진동수를 가진 진동 모드로 진동하고 있다. 이때 전자기파의 적외선 영역은 분자에 흡수되어 이러한 진동 모드를 들뜨게 한다. 이에 따라 분자가 흡수한 에너지를 빛의 파수에 따라 그래프로 나타낸 것을 적외선 스펙트럼이라고 한다. 분자 내부에서 어떤 원자들이 어떤 결합을 이루고 있는지에 따라 여러 신호들이 관찰된다.

일반적으로 적외선 스펙트럼을 분석할 때는 크게 지문 영역(fingerprint region)과 특징적인 결합들의 신호를 관찰하여 구조에 대한 정보를 찾는다. 하지만 금속-유기 골조를 분석할 때는 주로 단량체와 합성된 골조의 적외선 스펙트럼을 대조하여 배위가 잘 되었는지 확인을 한다. 본 연구에서는 Perkin-Elmer사의 Frontier FT-IR Spectrometer를 사용하였다.

마. 기체 흡착

합성된 골조의 기체 흡착능을 확인해 보았다. 기체의 흡착이란 어떤 물질의 표면에 다른 분자가 결합되어 있는 것으로 금속-유기 골조에서는 동공 내부의 표면에 기체가 흡착될 수 있다. 이는 일반적으로 표면의 분자들이 결합이 부족하기 때문에 다른 손님 분자(guest molecule)와 상호작용하는 것이 에너지적으로 안정하기 때문에 일어난다. 기체 흡착에는 크게 물리적 흡착(physisorption)과 화학적 흡착(chemisorption)이 있다. 금속-유기 골조에서는 불포화된 금속 등이 있을 때 화학적 흡착이 일어나나 본 연구에서 다루고자 하는 물질은 이와 같은 성질을 가지고 있지 않아 전반적인 흡착은 물리적인 과정에 의해 이루어질 것이다[11].

본 연구에서는 Micromeritics사의 기체 흡착 및 표면적 분석장치 ASAP-2020를 사용하였다. 사용한 기체인 질소, 헬륨, 수소, 아르곤, 이산화탄소, 일산화탄소, 메테인, 산소 등은 초고순도 99.9999퍼센트로 시판되는 것을 사용하였다. 분석을 진행하기 전 각 시료는 섭씨 150도에서 1440분동안 진공 하에서 전처리하였다.

바. 접촉각 측정

합성된 결정의 소수성 정도를 알아보기 위해 접촉각 측정 실험을 하였다. 접촉각 측정을 위해 측면에서 수평으로 사진을 촬영하여 직접 접촉각을 측정하였으며, 가루 형태로 뿜은 결정을 샘플 홀더에 고르게 뿌린 뒤 물 한 방울을 떨어뜨리고 사

진을 촬영했다.

III. 연구결과 및 고찰

1. 조건 최적화

일반적으로 금속-유기 골조를 합성하는 것은 조건에 민감할 뿐더러 우리가 사용하려고 하는 Cn-acid(bdc 유도체)는 큰 치환기로 인해 좋은 결정성을 가진 결정을 얻기 어렵다. 더불어, 합성을 진행하기 위해 모든 화합물들이 용해되어야 하나 Cn-acid는 친수성기인 카복실기와 소수성기인 알킬기가 한 분자에 위치해 대부분의 용매에 대한 용해도가 낮은 등 기존 연구에 사용되던 화합물에 대해 물성이 달라 추가적인 조건 최적화가 필요할 것으로 예상했다. 이에 따라 온도, 시간, 용매, 당량, 농도 등에 대해 아래의 조건들을 활용하였다.

〈Table 1〉 Amounts of reagents in various reaction conditions.

번호	화합물의 양(금속 염, 리간드, bipyridyl linker)		
1	0,1 mmol	0,1 mmol	0,1 mmol
2	0,2 mmol	0,1 mmol	0,2 mmol
3	0,2 mmol	0,2 mmol	0,1 mmol
4	0,02 mmol	0,02 mmol	0,01 mmol

이 외에도 온도를 80℃에서 110℃까지 시도해 보았고 반응 시간 또한 72시간부터 120시간까지 시도해 보았다. 조건 최적화 결과는 〈Table 2〉와 같다.

〈Table 2〉 The optimized reaction condition.

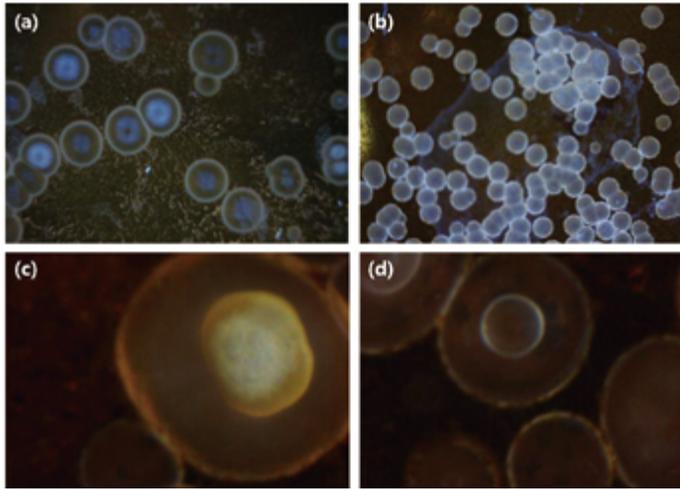
질산 아연 양	bdc유도체 양	bipyridyl linker의 양	용매	온도	시간
0,2 mmol	0,2 mmol	0,1 mmol	DEF 3 ml	100 ℃	120 시간

2. 결정 분석

가. 결정 사진

먼저 합성된 결정의 거시적 형태를 USB 현미경으로 관찰해 보았고 그 결과 독특한 구형 결정이 관찰되었다. 일반적으로 단결정은 단위 셀에 평행한 면을 따라 자라기 때문에 구형 결정이 형성되기 매우 힘들고 이전에 보고된 바에 따르면 벌집 구조는 각진 기둥 형태의 형태를 가진다고 했기 때문에 이들을 다결정이라는 판단을 내렸다. 여러 도메인들이 삐곡히 위치하여 전체적으로 구형처럼 보인다고 판단했다([Fig. 3]).

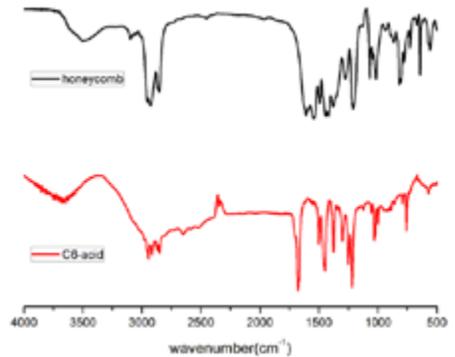
우리가 최적화한 조건에서 벌집 구조를 합성하면 작은 도메인들이 모인 구형 결정이 된다는 점이 흥미로웠고 이를 활용하여 선행 연구[12]와 유사한 방법으로 후속 연구의 일환으로 결정 형성의 메커니즘에 대해 탐구할 수 있을 것이라 기대한다.



[Fig. 3] Crystal morphology of samples as observed via USB microscope. (a), (b): low resolution (52X) (c), (d): high resolution (435X)

나. 적외선분광법

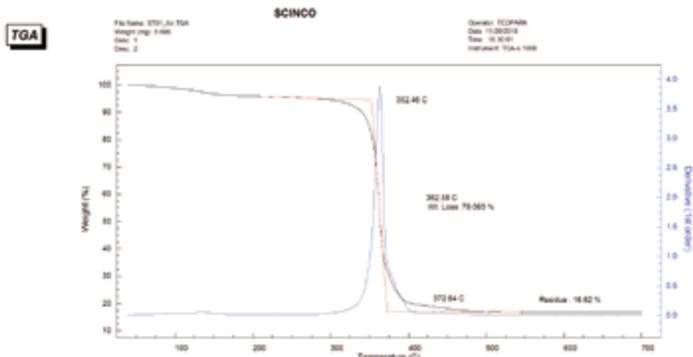
거시적인 물성을 파악한 후 적외선분광법을 통해 자세한 관찰을 해 보았다([Fig. 4 참조]). 위의 스펙트럼에서 $1,750\text{cm}^{-1}$ 부근의 C=O stretching(신축진동) 모드의 주파수가 증가한 점, $3,000\text{--}3,500\text{cm}^{-1}$ 의 O-H 신축진동모드가 사라진 점 등을 보아 아연 이온과 bdc와의 결합이 형성되었다는 것을 알 수 있다. 이는 간접적으로 금속-유기골조가 형성되었음을 보여준다. 더불어 $1,000\text{cm}^{-1}$ 에서 $1,800\text{cm}^{-1}$ 부근의 영역이 이전에 보고된 벌집 구조의 IR 스펙트럼과 거의 일치하고 PXRD와 더불어 합성된 구조가 벌집 구조라는 결론을 내렸다.



[Fig. 4] IR spectrum of synthesized honeycomb-like structure (top) and IR spectrum of C6-acid (bottom)

다. 열중량분석법

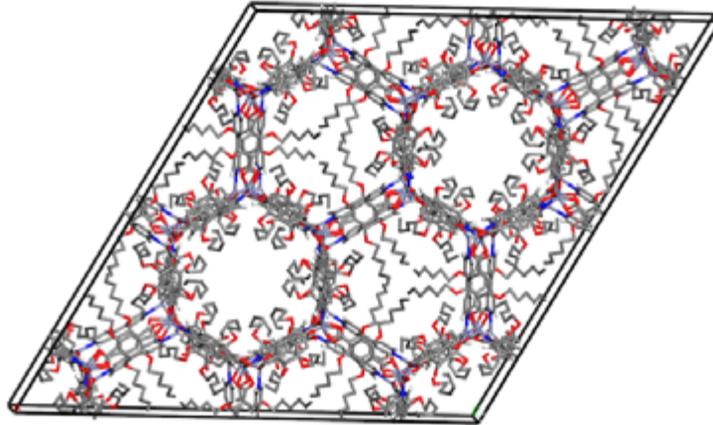
열중량분석은 압축 공기 환경 하에서 진행되었으며 유기물이 높은 온도에서 태워짐에 따라 아연 산화물이 마지막에 남게 된다. 이 결과는 우리가 합성한 벌집 구조는 300°C 이상의 온도까지도 안정하다는 것을 보여주어 여러 응용 가능성을 제시했다([Fig. 5 참조]).



[Fig. 5] Result of thermogravimetric analysis. The black curve shows mass changes as temperature changes, and the blue curve is the derivative of the former.

3. 합성된 벌집 구조의 성질

위의 실험들을 바탕으로 합성된 물질이 벌집 구조라는 결론을 내렸으며 벌집 구조의 형태는 아래[Fig. 6]와 같다. [Fig. 6]은 EVOTIT(Cambirdage Structural Database에서 찾은 벌집구조)[7]를 Material Studio visualizer 프로그램에서 무작위로 C6알킬기를 붙여 수정하여 제안하는 벌집 골조이다.



[Fig. 6] The structure of a honeycomb analogue synthesized from C6-acid as bdc derivative ligand. The conformation of the side groups were selected at random. Practically, the alkyl chains are predicted to be interacting with other alkyl chains nearby.

이 구조는 일차원 통로 형태를 이루고 있으며 동공 내부를 향해 치환기가 매달려 있다. 단위 세포에 대한 정보는 <Table 3>에 서술되어 있다. 벌집 구조는 통상적으로 이산화탄소에 대해 선택적인 것으로 알려져 있다[7].

<Table 3> Cell parameter of the unit cell

Space Group	$R\bar{3}C3$
Cell Lengths	$a\ 53.188\ \text{\AA}, b\ 53.188\ \text{\AA}, c\ 17.813\ \text{\AA}$
Cell Angles	$\alpha\ 90^\circ, \beta\ 90^\circ, \gamma\ 120^\circ$
Cell Volume	$43641\ \text{\AA}^3$

4. 합성된 벌집 구조의 소수성과 물 저항성 관찰

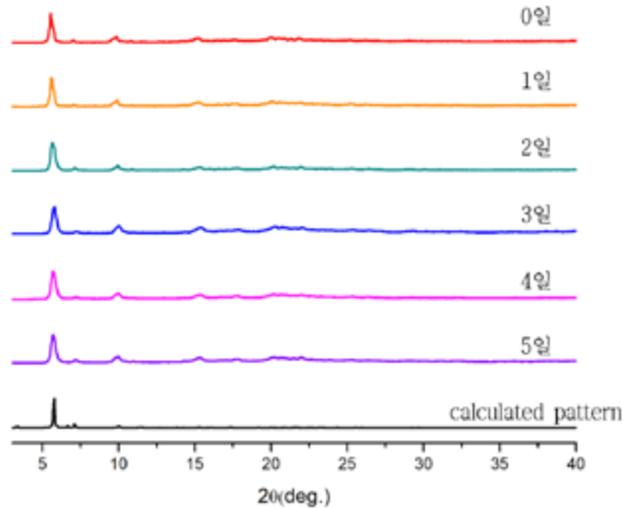
앞의 실험을 바탕으로 Zn/C6-acid/bpy를 사용하여 합성한 결정의 소수성을 확인해 보았다. 기존에 C6-acid 대신 2,5-bis(allyloxy)-1,4-benzenedicarboxylic acid를 사용하여 합성한 벌집 구조는 크게 친수성을 띤다고 보고 된 바 있다[5]. 이에 우리의 결정은 소수성을 띄는지 접촉각을 측정해 보았고, 결과는 [Fig. 7]과 같다.



[Fig. 7] Contact angle analysis of synthesized sample as well as a schematic diagram of the method.

접촉각은 약 $130^{\circ} \pm 1^{\circ}$ 가량으로 측정이 되었으며, 이는 90° 를 훨씬 넘는 값으로 매우 강하게 소수성을 띤다고 할 수 있다. 다만 결정을 가루로 뺐기 때문에 작은 공기구멍의 효과로 보다 큰 접촉각이 측정되었을 가능성도 있으나, 기존의 벌집 구조보다 확연히 소수성을 띤다는 점은 변함없어 보인다.

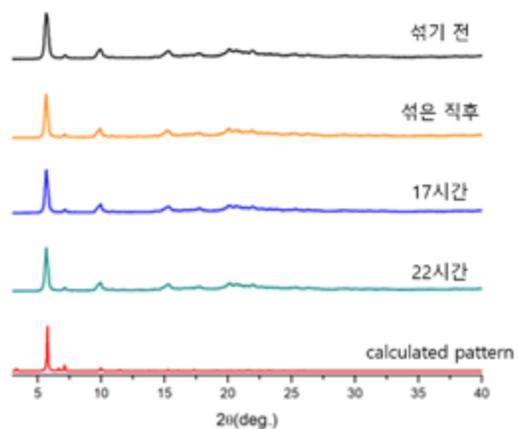
하지만 소수성이 있다고 해서 구조 자체가 물에 대해 강한 저항성을 가진다는 뜻은 아니다. 실제 대기 중의 수분과 같은 환경에서 구조의 안정성은 소수성과는 또 다른 변수가 작용하기에 따로 물 저항성을 확인해 보았다. 최적화된 조건을 사용하였으며 결정에서 용매를 제거한 후 크게 두 가지 방법으로 물에 대한 안정성을 확인해 보았다.



[Fig. 8] PXRD patterns showing structural changes of the honeycomb-like structure under exposure to atmosphere of relative humidity of 100 %. From top to bottom, 0 day(red), 1 day(yellow), 2 days(green), 3 days(blue), 4 days(pink), 5 days(purple), and calculated pattern of original structure(black).

먼저 합성된 결정을 상대습도 100퍼센트의 환경에 노출 시킴으로써 구조가 어떻게 변하는지 확인해 보았다. 구조의 변화는 PXRD 패턴을 활용하여 알아보았으며 실험 결과는 [Fig. 8]과 같다. PXRD 패턴이 5일이 넘도록 변하지 않는 것을 보아 우리가 합성한 C6-acid/bpy 벌집 구조는 물에 대해 상당히 안정하다는 것을 알 수 있었다. 이는 기존에 친수성기(메톡시에톡시 작용기)를 통해 합성된 벌집 구조가 1시간 이내에 붕괴된 것에 비해 큰 변화이다.

이 실험에 이어 합성한 결정을 물과 슬러리로 만들어 시간에 따른 구조 변화를 관측해 보았고 결과는 [Fig. 9]과 같다. 실험한 결과 하루 가까이 PXRD 패턴이 변하지 않았고 이를 바탕으로 물에 직접적으로 접촉해도 오랜 시간 동안 구조를 유지할 수 있다는 것을 알아냈다. 앞의 두 실험을 바탕으로 충분한 길이의 소수성 치환기를 가진 bdc 유도체를 통해 합성한 벌집 구조는 물에 대해 매우 안정하다는 것을 알 수 있었다. 이는 동공 내부의 성질을 소수성으로 만듦과 동시에 치환기가 메탈 클러스터를 감싸는 듯한 배치를 이루기 때문으로 보인다. 기존의 연구에 따르면 MOF-5를 비롯한 금속 유기 골조에서 물에 의한 결정 파괴는 물 분자가 메탈 클러스터에 결합하며 리간드-금속 결합을 제거하여 이루어지는데[14] 이 경우에는 소수성 치환기가 물이 접근하는 것을 막아 오랜 시간 동안 안정한 것으로 보인다. 대기 중에서 수 일동안 안정하며 물에 대해 직접적인 접촉에도 상당히 오래 구조를 유지할 수 있다는 것은 독특한 성질이며 이를 통해 합성된 물질이 여러 응용 분야에 사용될 수 있다는 것을 의미한다.



[Fig. 9] Result of direct mixing of sample with water to form a slurry. From top to bottom, before mixing(black), after mixing(yellow), after 17 hours(blue), after 22 hours(green), and the calculated pattern(red).

5. Zn/C6-acid/bpy 샘플의 기체 흡착

물에 대한 높은 저항성을 확인한 후 여러 응용 분야 중 하나인 기체 흡착능에 대해 알아보았다. 기존의 연구에 따르면 벌집 구조는 이산화탄소에 대해 높은 선택성을 지닌다[7]. 하지만 우리는 큰 소수성 치환기를 사용함으로써 동공 내부의 성질을 많이 변화시켰기 때문에 이 경우에도 여러 성질이 유지되거나 다른 성질이 나타나는지 알아보기 위해 이산화탄소를 비롯한 기체에 대해 흡착능을 조사해보았다. 그 결과 이산화탄소에 대해서는 어느 정도 기체가 흡착된 반면 질소에 대해서는 전혀 흡착이 되지 않았다.

주로 질소의 흡착량은 표면적을 측정하는데 사용되는데 우리가 합성한 결정은 질소를 흡착하지 못하는 것을 보아 표면적이 0에 매우 가깝다는 것을 알 수 있다. 이것은 대부분의 기체에 대해 흡착량이 없을 것을 의미한다. 하지만 놀랍게도, 이산화탄소에 대해서는 어느 정도의 흡착을 보였다. 이를 보아 소수성 치환기를 가진 bdc 유도체를 통해 합성된 결정 또한 이산화탄소에 대해 높은 선택성을 가진다는 것을 알 수 있었다. 하지만 전체적인 흡착량이 매우 낮았기에 이를 증진하기 위해 아래의 방법들을 시도해 보았다.

6. 증진 방법

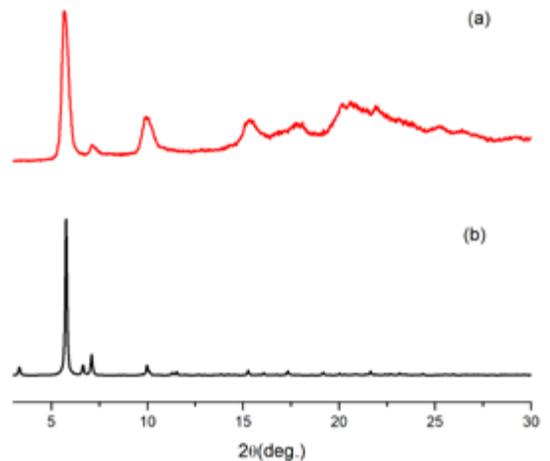
앞서 살펴보았듯이 C6bpy 벌집 구조의 흡착결과 CO₂에 대한 선택적인 특성은 유지되었으나 절대적인 흡착량이 다소 적게 관찰된 바, 우리는 전체적인 흡착량 증진의 필요성을 느꼈다. 이에 이론적으로 구조의 흡착량을 증진시킬 수 있을 것으로 판단되는 3가지 방법을 구상하여 실험을 진행해보았다.

가. 마이크로파 합성법

지금까지의 구조들은 최적화된 조건에서 용매열합성법을 통해 합성되었다. 이 대신 마이크로파를 이용하는 합성법을 사용하면, 기존 용매열합성법에서 120시간이 걸리던 합성을 약 수 시간 가량의 시간 안에 매우 빠르게 합성할 수 있게 된다. 하지만 이러한 합성법은 속도가 지나치게 빨라 결정이 제대로 성장할 시간이 주어지지 않고, 결정에 구조가 형성되지 못한 부분인 결함이 많이 생기게 된다. 결함이 많다는 것은 일반적으로는 결정의 질이나 그 특성에 안 좋은 영향을 미쳐 좋지 않은 것으로 생각되어지지만, 이 경우에는 반대로 그러한 결함, 또는 구조 사이의 빈 공간이 기체가 흡착될 수 있는 새로운 공간으로서 작용하여 흡착량의 상승을 가져올 것이라 예상하였다. 합성 조건 중 온도와 반응물의 비율, 용매는 용매열합성법의 조건과 동일하였으며 마이크로파 합성은 150와트에서 진행되었다([Fig. 10 참조]).

만일 결정이 결함 없이 균질하게 합성되었다면 PXRD가 측정하는 층간 거리가 일정하여 좁은 각도범위에서 뾰족한 피크가 나타나야 한다. 하지만 결정에 결함이 생기면서 층간 거리에 크고 작은 변화가 생기면 더 넓은 범위의 각도에서 회절간섭이 측정될 것이고, 이는 결국 PXRD 피크가 넓어지는 효과를 가져오게 된다. 실험결과 벌집 구조가 성공적으로 합성된 것으로 보이긴 하나 전체적으로 각 피크가 좁고 날카롭게 올라오지 않고 몽게져 넓어진 모양을 띠는 것을 볼 수 있다. 이로부터 실험 전에 세운 가설과 일치하도록 결정에 결함이 많이 생성되었다는 사실을 알 수 있다.

그리하여 마이크로파 합성법을 통해 얻은 벌집 구조의 흡착능을 조사해 보았다. 그 결과 예상과는 다르게 흡착능이 전



[Fig. 10] PXRD pattern of samples synthesized from C6-acid and bpy via microwave-assisted synthesis. Synthesized sample(a), calculated pattern(b)

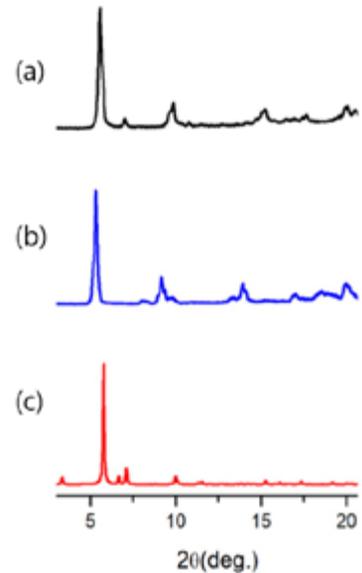
혀 증진되지 않았다. 이것은 벌집 구조의 성질 때문이라고 추정한다. 일반적인 금속-유기 골조와는 다르게 벌집 구조는 일차원의 통로 형태로 이루어져 있으며, 또한 골조를 이루는 층간의 간격이 좁다. 더불어 사용되는 리간드인 C6-acid와 bpy 모두 파이 전자가 풍부한 화합물들이다. 이 성질들을 보아 구조적 결합을 포함하고 있는 벌집 구조의 합성에는 성공하였으나, 전자 밀도가 통로벽면에 풍부한 구조적 특성에 의해 결합이 흡착능에 유의미한 영향을 줄 수 없었던 것으로 보인다.

나. 다른 bipyridyl linker의 사용

이는 앞서 구조의 변화를 볼 때도 사용되었던 가설이다. 기존의 bpy 대신에 결합 부위가의 거리가 더 긴 bipyen을 사용하게 되면 셀이 더욱 확장되어 C12-acid의 알킬기의 부피 스트레스까지도 견디게 된다는 실험 결과를 앞서 소개했었다. 이 결론을 그대로 가져와 C6-acid 알킬기를 유지한 채 bipyen을 사용하여 셀을 확장시킨다면 그만큼 확장된 공간은 기체가 접근하여 흡착량을 증진시키는데 충분히 기여할 것으로 예상하였다. 자세한 결과는 [Fig. 11]에 나타나 있다.

이전 실험에서 확인 된 것과 같이 C6-acid와 bipyen을 사용한 결과 벌집 구조가 합성되었으나, 피크의 위치가 약간씩 왼쪽으로 이동한 모습을 확인 할 수 있다. 이는 층간 거리가 증가하여 2θ 값이 줄었기 때문으로 보인다. 더불어, bpy를 사용하였을 때는 C8, 9, 10-acid부터 층상 고분자가 관찰된 반면 bipyen을 사용한 경우에는 이들에 대해서도 벌집 구조가 합성이 되었다. 이는 bipyen을 사용한 벌집 구조의 경우에는 더 많은 부피를 동공에 포함할 수 있다는 것을 의미한다. 이를 바탕으로 셀이 성공적으로 확장되었다는 것을 알 수 있다.

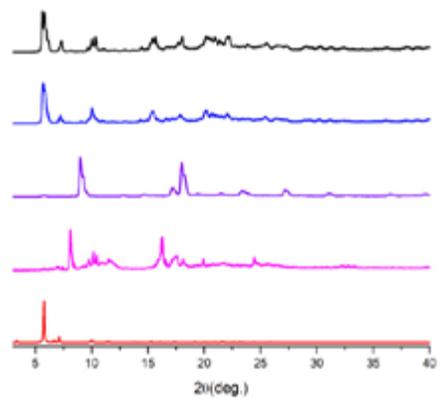
그 후 bipyen이 포함된 벌집 구조의 흡착능을 조사하기 위해 노력해 보았지만 실험을 진행하지 못했다. 전처리를 하는 과정에서 용매와 함께 바이펜이 승화되는 모습이 관찰되었는데 이로 인해 흡착실험을 진행하지 못했다. 이를 예방하기 위해 반응 혼합물로부터 직접 핀셋으로 결정을 분리하는 등의 작업도 해 보았으나 뚜렷한 개선에는 실패했다. 그러나 앞으로 향후 전처리 과정에 대해 추가적인 실험을 진행하여 bipyen을 사용한 벌집 구조의 흡착능도 확인해 볼 것이다.



[Fig. 11] Result of using different bipyridyl linkers. C6-acid and bpy (a), C6-acid and bipyen(b), and calculated PXRD pattern(c)

다. 리간드의 혼합 사용

지금까지 우리의 벌집 구조는 기존 bdc에 긴 소수성 곁가지를 붙인 유도체를 리간드로 사용해왔다. 하지만 이렇게 긴 곁가지는 결정의 공동에서 굉장히 큰 부피를 차지하게 되고, 결국 흡착량의 감소를 불러올 수 밖에 없다. 실제로 앞에서 주로 언급된 알킬기의 부피 스트레스도 곁가지 자체의 부피에 의해 유도된 것이므로 C8, 9 acid 정도만 되어도 구조 자체가 합성되지 못할 정도의 부피를 동공내부에서 차지하게 된다는 것을 알 수 있다. 따라서 흡착량의 감소를 불러온 가장 큰 요인으로 알킬기의 부피 차지를 들 수 있다. 이에 이 C6-acid와 알킬기가 달려 있지 않은 bdc를 혼합하여 벌집 구조를 합성 할 수 있다면 본래 있어야 할 알킬기가 사라진 부분은 온전히 기체가 흡착할 수 있는 공간으로 작용하게 될 것이며, 이로부터 흡착량의 증진을 가져올 것이라 예상할 수 있다. 우선 C6-acid와 bdc가 어떤 비율로 혼합되어야 성공적으로 벌집 구조를 합성 할 수 있을지를 알아보기 위해 C6-acid : bdc 비율을 9:1, 8:2, 5:5 로 변화시켜 가며 용매열합성법으로 합성을 진행해 보았다.

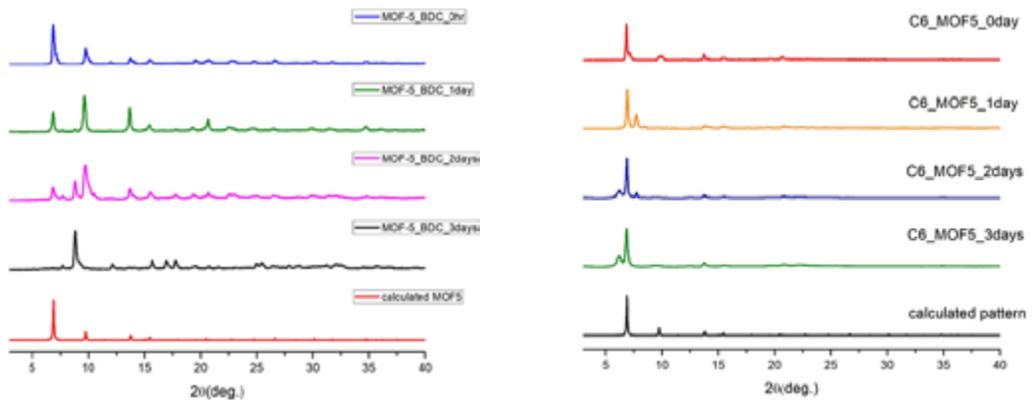


[Fig. 12] Result of using different mixing ratios of C6-acid and bdc. From top to bottom, C6 : bdc =9:1(black), spherical product(blue) and powder(purple) from 8:2 ratio, 5:5 (pink) and the calculated PXRD pattern(빨간색)

그 결과(Fig. 12 참조) C6 : bdc 비율이 9:1인 경우 벌집 구조로 보이는 결정이 성공적으로 합성되었으나, 8:2인 경우 검은색 구형의 결정과 흰색 파우더의 혼합물이 합성되었다. 이 서로 다른 두 물성의 물질을 분리하여 각각 분석해본 결과 구형 결정은 벌집 구조로 보이지만 흰색 파우더는 리간드 반응물의 단량체인 것으로 보인다. 이는 9:1 비율의 합성 결과보다 선호되지 않는 생성물이다. 마지막으로 5:5 비율의 생성물은 전혀 다른 형태의 PXRD패턴을 보여 벌집 구조와는 거리가 먼 다른 구조가 합성되었음을 알 수 있다. 결국 9:1의 비율에서는 두 리간드가 혼합된 벌집 구조가 합성됨을 확인하였다.

이 방법을 통해 합성된 벌집 구조의 기체 흡착능을 확인해 보았다. 이전 실험의 결과에 따라 C6 : bdc = 9:1의 혼합물을 사용하였다. 실험 결과 흡착량이 두 배 정도 증가하였으며 산소와 질소와 대비하여 이산화탄소에 대한 선택성 또한 유지되었다. 그러므로 이 방법을 통한 흡착능 증진은 성공적이었다.

7. 소수성 치환기를 활용한 다른 금속 유기 골조의 물 저항성 증진



[Fig. 13] Left: PXRD pattern changes of conventional MOF-5 as exposed to moisture
 Right: PXRD patterns of an isorecticular MOF-5 like structure made from C6-acid as exposed to moisture.
 Notice the relative stability of the pattern over time.

다양한 금속-유기 골조에 적용 가능한 물 저항성 증진 전략의 개발이라는 개념을 증명하기 위하여 이러한 전략을 다른 금속-유기 골조의 경우에도 시도해 보았다(Fig. 13 참조). 대표적인 bdc 기반 금속-유기 골조인 MOF-5는 대기 중 습기에 노출되었을 경우, 하루가 지나기 전에 파괴되었다. 그러나 이와 대조적으로 C6-acid를 사용하여 동형의 골조를 합성하였을 경우에는 습기에 노출된 상태에서도 3일 이상 구조가 유지되는 것을 관찰할 수 있었으며, 이는 소수성 작용기를 도입함으로써 금속-유기 골조의 물에 대한 안정성을 증진시키는 전략이 다른 골조에 대해서도 유효함을 시사한다.

IV. 결론 및 논의

본 연구에서는 기존에 알려진 사실로부터 예측할 수 있듯이, bdc 리간드에 일정 크기 이상의 알콕시 치환기를 붙여 벌집 구조를 합성하는데 성공하였다. 기존의 연구에서 사용한 치환기는 친수성인 메톡시에톡시기이며 이를 통해 합성된 벌집 구조는 대기 중에서 습기에 의해 1시간 이내에 파괴된다고 한다[7]. 하지만 우리가 사용한 알콕시 치환기는 소수성을 띄며 그렇기에 물 분자의 접근을 방지, 물에 대한 안정성을 증가시킬 수 있을 것이라는 가설을 세웠고 이를 실제로 확인했다. 그리하여 물에 안정한 이 벌집 구조는 여러 응용 분야에 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

하지만 주요 응용 분야 중 하나인 기체 흡착능을 측정한 결과 이산화탄소에 대해 매우 높은 선택성을 지니지만 전체적인

흡착량이 매우 낮았으며 이는 치환기가 동공을 가득 채우고 있기 때문으로 보인다. 따라서 흡착량을 증진시키기 위해 여러 실험을 해 보았다.

먼저 마이크로과합성기를 사용해 보았다. 마이크로과합성기는 분자 운동을 활발히 하여 반응을 빨리 진행시킬 수 있다. 그런데, 금속 유기 골조와 같은 배위 고분자를 마이크로과합성기를 통해 합성하는 경우에는 잘 정렬된 결정을 만들기 힘들어 일부분이 덜 배워진 결함으로 남을 수 있다는 단점이 있다. 하지만 우리는 이 결함들에 기체가 들어갈 수 있을 것이라고 기대했고 이에 따라 마이크로과를 사용한 반응을 최적화한 후 흡착 실험을 진행했다. 다음으로는 bpy보다 더 긴 bipyridyl linker인 bipyen을 사용하였다. 조금 더 긴 리간드를 사용한다면 동공이 더 커질 것이라고 예상했고 이에 따라 기체 흡착량도 증진될 것이라 예측하여 이에 대해 실험을 진행해 보았다. 마지막으로는 혼합-리간드 계를 사용했다. C6-acid 대신 이것과 bdc를 섞은 혼합물을 사용한다면 골조의 일부에서 C6-acid가 bdc로 치환된 것을 얻을 수 있을 것이라 기대했고 이에 따라 빈 공간이 만들어져 흡착량이 증가할 것이라 예측하였다. 이 가설을 기반으로 혼합 비율에 대한 상한선인 9:1을 실험을 통해 찾고 그 비율을 활용하여 흡착 실험을 진행했다. 실험 결과 마이크로과를 사용한 반응에서는 개선을 이루어내지 못했으며 bipyen을 사용한 경우에는 흡착능을 확인하지 못했다. 하지만 혼합-리간드 계를 사용한 경우에 대해 유의미한 흡착량 증가를 얻을 수 있었다.

결론적으로 소수성 치환기를 도입함으로써 벌집 구조의 물 저항성을 비약적으로 증가시켰으며 이 구조는 이산화탄소에 대한 선택성을 유지시켰다. 하지만 전반적인 흡착 용량이 감소하였으며 이를 증진시키기 위해 다양한 시도를 했다. 그 결과 혼합-리간드계를 통해 흡착량을 성공적으로 증가시킬 수 있었다.

향후 활성탄과 같은 다른 물질과의 혼합을 통해 우리가 합성한 벌집 구조가 이산화탄소 저감재로서의 사용 가능성이 있다는 것을 보여줄 것이다. 또한 계산화학 시뮬레이션으로 소수성 치환기가 물 저항성에 어떻게 기여하는지 그리고 벌집 구조가 어떤 원리로 이산화탄소에 대해 선택적인지에 대해 알아볼 것이다. 마지막으로 벌집 구조와 MOF-5가 아닌 다른 금속 유기 골조들에도 소수성 치환기를 도입하여 그들의 물 저항성을 증진시키고 응용 가능성을 제시할 것이다.

V. 참고문헌

- [1] R. Kitaura, K. Seki, G. Akiyama and S. Kitagawa (2003) Porous Coordination-Polymer Crystals with Gated Channels Specific for Supercritical Gases. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 42, 428-431.
- [2] J. Lee, O. K. Farha, J. Roberts, K. A. Scheidt, S. T. Nguyen and J. T. Hupp (2009) Metal-organic framework materials as catalysts. *Chem. Soc. Rev.*, 38, 1450-1459.
- [3] S. Achmann, G. Hagen, J. Kita, I. M. Malkowsky, C. Kiener and R. Moos (2009) Metal-Organic Frameworks for Sensing Applications in the Gas Phase. *Sensors*, 9, 1574-1589.
- [4] J. B. Decoste, G. W. Peterson, B. J. Schindler, K. L. Killops, M. A. Browe and J. J. Mahle (2013) The effect of water adsorption on the structure of the carboxylate containing metal-organic frameworks Cu-BTC, Mg-MOF-74, and UiO-66. *J. Mater. Chem. A*, 1, 11922-11932.
- [5] Z. Zhang, H. T. H. Nguyen, S. A. Miller, A. M. Ploskonka, J. B. Decoste and S. M. Cohen (2016) Polymer-Metal-Organic Frameworks (polyMOFs) as Water Tolerant Materials for Selective Carbon Dioxide Separations. *J. Am. Chem. Soc.*, 138, 920-925.
- [6] S. S. Y. Chui, S. M. F. Lo, J. P. H. Charmant, a G. Orpen and I. D. Williams (1999) A Chemically Functionalizable Nanoporous Material $[Cu_3(TMA)_2(H_2O)_3]_n$. *Science*, 283, 1148-1150.
- [7] S. Henke and R. A. Fischer (2011) Gated Channels in a Honeycomb-like Zinc-Dicarboxylate-Bipyridine Framework with Flexible Alkyl Ether Side Chains. *J. Am. Chem. Soc.*, 133, 2064-2067.
- [8] S. Henke, A. Schneemann, S. Kapoor, R. Winter and R. A. Fischer (2012) Zinc-1,4-benzenedicarboxylate-bipyridine frameworks - linker functionalization impacts network topology during solvothermal synthesis. *J. Mater. Chem.*, 22, 909-918.

- [9] W. Bauer and G. D. Westfall, University physics with Modern Physics 2th ed., (McGrawHill, 2011) p.1120-1122
- [10] A. W. Coats and J. P. Redfern (1963) Thermogravimetric analysis. A review. *Analyst*, 88, 906-924
- [11] Azo Materials. 2014. 9. 2. : Using Specific Surface Area Measurement for Pharmaceutical Materials. <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=11303>
- [12] C. Zheng, H. F. Greer, C. -Y. Chiang and W. Zhou (2014) Microstructural study of the formation mechanism of metal-organic framework MOF-5. *CrystEngComm*, 16, 1064-1070
- [13] Y. Ming, J. Purewal, J. Yang, C. Xu, R. Soltis, J. Warner, M. Veenstra, M. Gaab, U. Müller and D. J. Siegel (2015) Kinetic Stability of MOF-5 in Humid Environments: Impact of Powder Densification, Humidity Level, and Exposure Time. *Langmuir*, 31, 4988-4995

| 연구진 |

박성현 (Seong-Hyeon Park, KAIST 부설 한국과학영재학교, push0524@naver.com), 주저자 및 교신저자

장현성 (Hyunsung Jang, KAIST 부설 한국과학영재학교, wkdgustjdrnt@naver.com), 공동저자

강우형 (Woohyeong Kang, KAIST 부설 한국과학영재학교, allankang@naver.com), 공동저자

지도교사 : **최은영** (Eun-Young Choi, KAIST 부설 한국과학영재학교, faujasite1@kaist.ac.kr)

미토콘드리아 유전자 서열분석을 통한 넓적사슴벌레(*Dorcus titanus*) 계통 분석

김예빈 · 박효빈 · 박세훈 · 박지상 - 부산일과학고등학교

Phylogenetic Analysis of *Dorcus titanus* using CO I and CO II gene of mtDNA

Yebin Kim · Hyobin Park · Sehun Park · Jisang Park - Busan Il Science High School

국문초록

국내 판매되고 있는 사슴벌레종[넓적사슴벌레(*Dorcus titanus*), 참넓적사슴벌레(*Serrognathus consentaneus*), 남방넓적사슴벌레(*D. titanus jejuensis*, 가칭), 애사슴벌레(*D. rectus*) 및 왕사슴벌레(*D. hopei*)]과 부산 지역에서 채집한 넓적사슴벌레 12개체와 경남 의령군에서 채집한 1개체의 미토콘드리아 DNA 중 cytochrome oxidase I(COI) 를 이용하여 계통을 비교분석하였다. 아울러 NCBI에 기록된 북한, 일본, 대만, 필리핀, 인도네시아 및 태국의 넓적사슴벌레의 COI 서열을 이용하여 추가 분석하였다. 먼저 판매되고 있는 사슴벌레종은 넓적사슴벌레, 남방넓적사슴벌레 및 참넓적사슴벌레의 group I과 애사슴벌레 및 왕사슴벌레의 group II로 구분되었다. 부산지역 및 의령에서 채집한 넓적사슴벌레의 경우 COI 및 COII로 분석 결과 북한에서 보고된 3개체를 포함해 유전적 변이에 있어 큰 차이가 나타나지 않았다. 또한 한반도와 일본 일부지역에서 높은 상동성을 확인하였는데 그 외 아시아 지역에 서식하는 넓적사슴벌레와는 다른 그룹을 형성함을 확인하였다. 이러한 결과들은 국내 서식 사슴벌레 종의 유전적 분석과 함께 외래 유입종을 관별하는 근거자료로 활용될 수 있을 것이다.

중심어 : 넓적사슴벌레, 유연관계 분석, COI, COII, 사슴벌레종

ABSTRACT

We analyzed phylogenetic relationship of 9 stag beetles for sail in Korea (*Dorcus titanus*, *Serrognathus consentaneus*, *D. titanus jejuensis*, *D. rectus*, and *D. hopei*) and 13 *D. titanus* samples collected from Busan and Uiryeong using cytochrome oxidase I and II (COI, CO II) gene of mitochondria DNA. Furthermore, we also analyzed COI gene sequences of *D. titanus* samples from North Korea, Japan, Taiwan, Philippines, Indonesia and Thailand registered in NCBI. As a first result, stag beetles for sail were divided into group I (*D. titanus*, *S. consentaneus*, *D. titanus jejuensis*) and group II (*D. rectus*, *D. hopei*). And second, collected *D. titanus* samples and registered one in Korea did not have considerable genetic variation. *D. titanus* from the Korean peninsula and some areas in Japan were classified as one group with high genetic homology, the others from asia formed another two groups. Our research can provide a basis for genetic analysis of domestic stag beetles, and CO I and CO II gene could be used as a marker for the identification of exotic species among various *D. titanus* conclusionally.

Key words: *Dorcus titanus*, Phylogenetic analysis, COI, COII, stag beetle

I. 서론

1. 탐구동기 및 목적

최근 1인가구가 점차 증가하는 추세와 더불어 반려동물의 시장 규모가 점차 커지고 있다. 반려동물은 포유류, 양서류, 파충류, 어류, 조류, 곤충, 절지동물 등으로 다양한데 그 중 가장 인기 있는 것은 포유류나 어류이지만 곤충 또한 적지 않은 비율을 나타내고 있다.

2017년 5월 19일자 조세신문 기사로 한 마리에 50만원에 해당하는 외래곤충이 101마리가 밀반입이 시도되다가 적발되었다고 한다[1]. 밀반입된 곤충들 사이에는 사슴벌레가 포함되어있었으며 이외에도 다양한 곤충들이 여행용 가방에 숨겨 국내로 밀반입하려다 관세법 위반으로 입건되었다고 한다. 동아일보 2007년 6월 18일자 기사로 외국산 애완 곤충들이 생태계를 위협한다는 내용도 검색된다[2]. 실제로 외래 곤충은 국내식물에 대한 피해와 국내 생태계 교란 우려로 인해 식물 방역법에서 병해충으로 지정돼 있다.

우리 또한 초등학교 시절 사슴벌레를 비롯한 곤충을 키워본 경험이 있는데 반려동물 시장의 곤충 비중이 커지고 외래종 유입으로 인한 부작용들도 불거지는 가운데 우리는 최종적으로 외래종과 국내 사슴벌레를 구별할 수 있는 마커를 확인해 보기 위해 먼저는 애완샵에서 구매할 수 있는 다양한 종의 사슴벌레들을 이용하여 종별 형태적 차이뿐만 아니라 유전적 차이를 분석하고, 부산 지역에서 직접 채집한 사슴벌레의 지역별 유전적 다양성을 파악해보기로 하였다. 나아가 NCBI 를 통해 한반도 및 일본, 아시아 전역의 넓적사슴벌레 유전 정보를 얻고, 함께 분석하여 최종 목표에 도달하고자 하였다.

II. 이론적 배경

1. 연구에 사용된 사슴벌레

가. 사슴벌레의 종류와 특징

1) 넓적사슴벌레(*Dorcus titanus*)

넓적사슴벌레는 우리나라에서 가장 큰 종으로 수컷은 31~82 mm까지 자라고, 암컷은 암컷 : 22~44 mm 까지 자란다. 수명은 대략 1~2년 까지 자라고 성충은 참나무 수액을 먹고 유충은 썩은 참나무를 먹으며 자란다. 또한 전국에 분포하며 23종의 아종이 있는 것으로 보고되어 있다. 그리고 서울시 보호 야생 생물 대상종이다.

2) 참넓적사슴벌레(*Serrognathus consentaneus*)

수컷은 19~38 mm이고 암컷은 18~29mm 까지 자란다. 그리고 넓적사슴벌레와 비슷하게 생겼지만 딱지 날개의 광택이 더 강하며 큰 턱이 바깥쪽에서 안쪽으로 더 둥글게 굽어있다. 그리고 상수리나무수액 및 썩은 나무를 먹고 성충으로 성장하고 한국, 중국, 일본에 서식한다.

3) 남방넓적사슴벌레(*Dorcus titanus jejuensis*)

넓적사슴벌레에 비해 큰 턱이 20~30% 짧고, 한라산 국립공원에서만 서식하는 것으로 알려져 있다. 충우곤충박물관 장영철 대표에 의해 발견 및 채집되었으며 누대사육을 통해 짧고 큰 턱이 고정되어 있음이 밝혀졌고, 새로운 아종인지 논란의 여지가 있다. 이에 유전적으로 유의미한 차이가 있는지 살펴보고자 본 연구에 포함시켰다.

4) 예사슴벌레(*Dorcus rectus*)

수컷은 17~45 mm, 암컷은 20~28 mm 까지 자라고, 수명은 1~2년이다. 성충은 참나무 수액을, 유충은 썩은 참나무를 먹으며 몸은 흑색 또는 적갈색, 수컷의 턱은 내치가 1개이다. 대체로 전국분포하며 일본 및 중국에 분포하기도 한다.

5) 왕사슴벌레(*Dorcus hopei*)

수컷은 40~75 mm, 암컷은 25~40 mm 까지 자라고 수명은 1~4년이다. 한국에서 넓적사슴벌레 다음으로 큰 사슴벌레로 알려져 있다. 수컷의 큰 턱은 모양이 둥글고 안쪽으로 휘어지며, 안에 내치 1개가 나있고, 상수리나무 수액 및 썩은 참나무를 먹으며 자란다. 한국, 중국, 일본에 주로 서식하며 종 보호차원에서 국외로 반출이 법으로 금지되고 있다.

나. mtDNA

세포소기관인 미토콘드리아에 존재하는 DNA이다. 미토콘드리아 DNA는 진핵세포에 있는 DNA 중 극히 일부를 차지한다. 대부분의 DNA는 핵 내에 존재하며, 식물의 경우에는 핵과 엽록체에 존재한다. 사람 미토콘드리아 DNA는 가장 작은 염색체로 간주하며, 37개 유전자와 약 16,600개 염기쌍이 있다. 사람 미토콘드리아 DNA는 사람 유전체 가운데 처음으로 서열을 밝혔다. 사람을 포함한 대부분 중에서 미토콘드리아 DNA는 오직 모계로만 유전된다. 몇몇 멸종된 생물을 포함하여 다수의 생물과 개인의 미토콘드리아 DNA의 서열이 밝혀져 있다. 멸종된 생물의 DNA 서열은 종 사이의 진화적 관계를 밝

히는 데 사용되며 계통학의 근간이 된다. 미토콘드리아 DNA는 또한 인류학과 생태학에서는 인종 간의 관계를 밝히는데 쓰인다.

다. CO I, CO II 유전자

미토콘드리아 유전자 중에서도 문헌 연구를 통해 파악되는바 곤충의 유연관계 파악에 주로 활용되는 두 유전자를 활용하였는데 CO 은 cytochrome c oxidase 복합체로 호기성 호흡에 중요한 역할을 하고 그 중 CO I 이 핵심적 역할을 한다. 염기서열 길이는 CO I 이 총 1,560bp (아미노산 약 520개)이며 CO II 는 690bp(아미노산 약 230개) 이다. 우리는 판매되는 애완용 사슴벌레에서는 CO I 유전자의 일부본인 826개 염기서열을 이용하였고 채집한 야생 넓적사슴벌레 분석에는 CO I 과 CO II를 합쳐 1,910bp개 염기서열을 활용하였다. 이 두 유전자는 특히 종내, 종간 변이가 많아 딱정벌레목에서 비교 마커로 많이 활용되는 것으로 알려져 있다[3].

III. 연구 방법 및 절차

1. 연구 대상

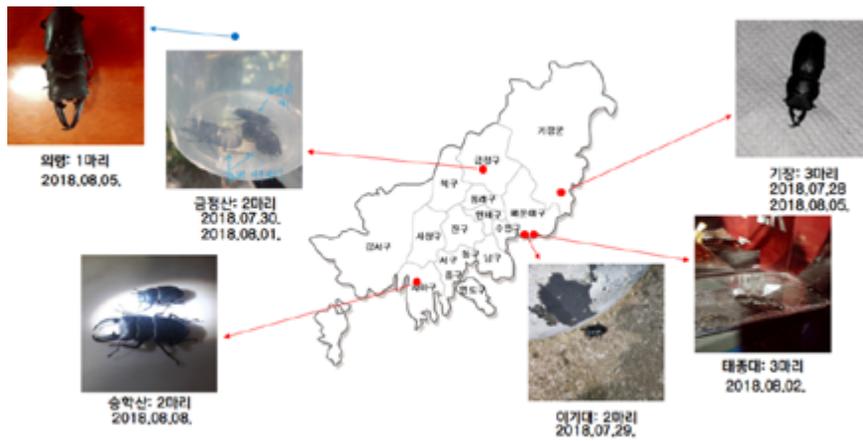
사슴벌레의 종간 유전적인 차이를 파악하기 위한 첫 번째 실험에서는 넓적사슴벌레(*D. titanus*), 참넓적사슴벌레(*S. consentaneus*), 애사슴벌레(*D. rectus*), 왕사슴벌레(*D. hopei*) 각각 암수 한 마리와 남방넓적사슴벌레(*D. titanus jejuensis*(가칭)) 수컷을 실험에 사용하였고, 이들은 온라인 애완곤충샵에서 구입하였다.

지역별 사슴벌레의 유전적인 차이점을 비교하기 위한 두 번째 실험에서는 사슴벌레를 부산 일대에서 채집한 후, 넓적사슴벌레만을 선별해 사용하였다. 기장군 3마리, 금정산 2마리, 이기대 2마리, 태종대 3마리, 승학산 2마리, 의령 1마리 총 13마리를 이용해 진행되었다.

2. 채집 방법

연구에 필요한 사슴벌레 채집을 위해 여름 방학 기간을 활용하여 같이 또는 각자 집 주변의 산에서 채집을 하였다 (2018.07.24. ~ 2018.08.12.). 사슴벌레의 활동시간이 주로 저녁 시간이기 때문에 18시부터 22시 사이에 채집을 하였다. 사슴벌레는 빨이 있기 때문에 목장갑을 준비하고 벌레들에 대비해 긴 바지를 입었고 주로 수액이 있는 참나무에 서식하여 참나무와 흙 속에서 발견하였다. 발견을 하게 되면 그 지역을 구글 지도를 통해 위치 표시를 하였고, 깊숙히 숨어 있는 경우 나무젓가락이나 꼬챙이 등을 이용해 조심히 꺼내었다. 채집한 사슴벌레는 실험에 지장이 없도록 내부에 손상을 시키지 않기 위해 냉동실에 보관하였다.

승학산에서 2마리(2018.08.08.), 이기대에서 2마리(2018.07.29.), 태종대에서 3마리(2018.08.02.), 기장에서 3마리(2018.07.28., 2018.08.05.) 금정산에서 2마리(2018.07.30., 2018.08.01.), 의령에서 1마리(2018.08.05.)를 채집하여 총 13마리의 넓적 사슴벌레를 실험에 이용하였다. 연구 목적에 따라 채집한 사슴벌레 중 넓적 사슴벌레만을 외형으로 구별하였다([Fig. 1], <Table 1>).



[Fig. 1] *D. titanus* collection area

<Table 1> Number of *D. titanus* collected

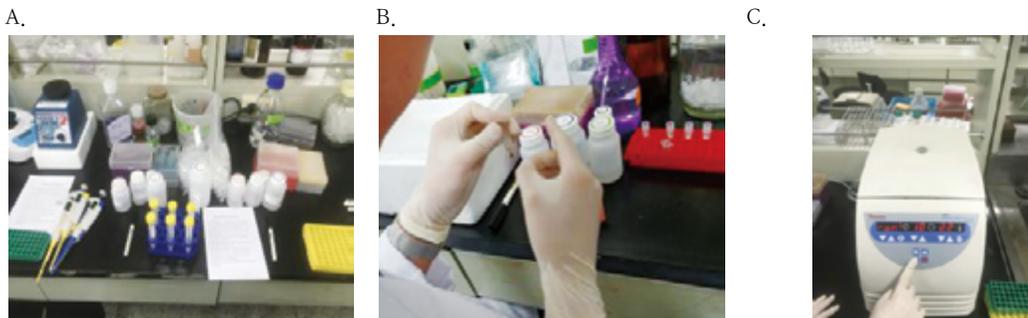
	승학산	이기대	태종대	기장	금정산	익령
수(마리)	2	2	3	3	2	1

3. DNA 분리 및 염기 서열 분석

염기서열 분석을 통한 계통도 파악 및 분자생물학적 마커로서의 가능성을 확인하고자 먼저 대상이 되는 유전자가 있는 미토콘드리아 DNA 를 추출한 후 CO I, CO II 유전자를 PCR 을 통해 분리하였다. 아가로스 젤 전기영동 상에 분리된 유전자 밴드를 잘라 DNA 만을 다시 정제하여 염기 서열 분석을 의뢰하였다. 이 때 보다 정확하고 확실한 시퀀싱을 위해 p-GEM T 벡터에 삽입하여 대장균에 형질전환한 후 다시 수확하는 절차를 추가 진행하였고 시퀀싱 결과는 정렬을 거쳐 최종적으로 메가 프로그램을 이용하여 계통도 분석을 하였다.

가. mtDNA 추출

1.5 ml E-tube에 cell resuspension solution 125 μ l 분쇄된 조직과 혼합한 후 cell lysis solution 125 μ l 을 넣고 실온에서 5분간 인큐베이션한다. Alkaline protease solution 5 μ l와 neutralization solution 175 μ l를 순차적으로 넣어 반응시키고 10분 실온에서 13,000rpm으로 원심 분리하여 상층을 칼럼 튜브에 옮기고 1분 실온에서 원심 분리한다. Wash solution 으로 2회 Washing 하고 원심 분리한다. 상층 칼럼을 새로운 elution tube에 옮긴 후 50 μ l elution solution을 넣어 원심분리하여 mtDNA 를 수확한다(Fig. 2).



[Fig. 2] mtDNA extraction (A: Kit of Plasmid extraction, B: solutions, C: Centrifuge)

나. PCR-CO I, CO II

Primer는 유전자은행의 염기서열 정보를 바탕으로 직접 제작해 사용하였고 프라이머 서열은 <Table 2> 과 같고 <Table 3> 와 같이 PCR 을 수행하였다. 결과는 1% 아가로스 젤 전기영동으로 확인하였다.

<Table 2> Primer sequences

Primer	Sequence
CO I Forward	5' - CAACATTTATTTTGATTTTTTGG - 3'
CO I Reverse	5' - TCAATTGCACTAATCTGCCATATTA - 3'
CO I + CO II Dt-F	5' - CCTAATACTGGGTGCCCC - 3'
CO I + CO II Dt-R	5' - TTTCTGAACATTGACCAAAG - 3'

<Table 3> PCR mixture prep and condition (CO I + CO II)

용액	양(μl)	온도 (°C)	시간(min)
DNA	3	93	5
F,P	2	93	1
R,P	2	55	1
		72	2
멸균수	14	72	5

다. TA Cloning

<Table 4>과 같이 DNA ligation 반응을 16°C에서 24시간 실시한다.

<Table 4> TA cloning mixture

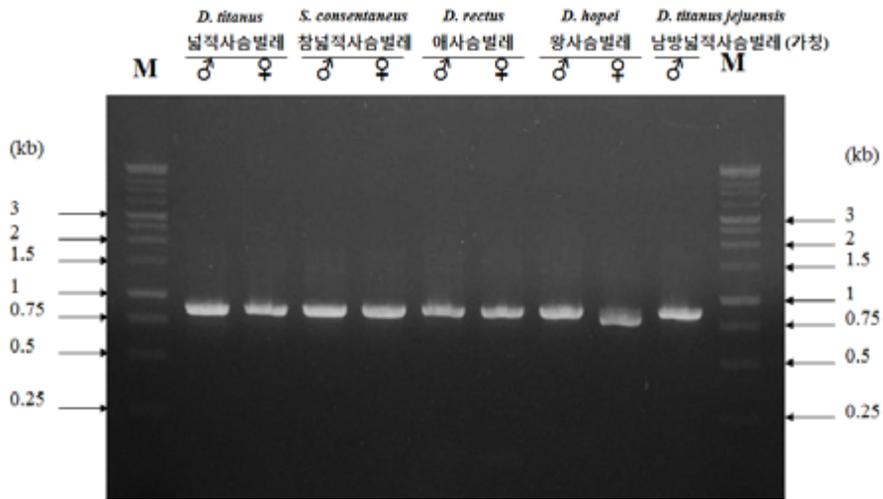
pGEM-T Vector (50ng/μl)	1μl
PCR product	3μl
DW	4μl
10X ligation buffer	1μl
T4 DNA ligase	1μl
Total	10μl

사. 최종 확인 PCR 및 시퀀싱 의뢰

배양한 *E. coli*에서 plasmid DNA를 추출한 후, 우리는 COI 및 COII 유전자가 정확히 vector에 삽입되었는지 다시 한 번 확인하기 위해 COI, COII 유전자의 PCR과정을 한 번 더 거쳤다. 이때, COI, COII 유전자는 vector에 삽입되어있는 상태이므로 pGEM-T 벡터상의 T7 (5' -CAACATTTATTTTGATTTTTTGG-3')과 SP6 (5' -TCAATTGCACTAATCTGCCATATTA-3') primer를 사용하였고 PCR 조건은 <Table 5>와 같고 PCR 이후 1% 아가로스 젤에 전기영동하여 결과를 확인하였다[Fig. 3].

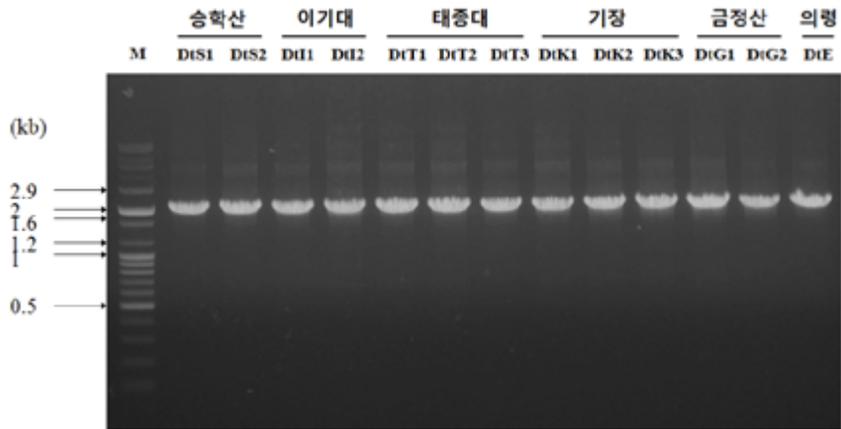
<Table 5> PCR mixture prep and PCR program

용액	양(μl)	온도 (°C)	시간(min)
배양액	1	94	1
T7 primer (1.6 pmole)	2	35회 반복	53
Sp6 (1.6 pmole)	2		
멸균수	15	72	2



[Fig. 3] PCR result - Cytochrome Oxidase I (COI) (826bp)

우리가 사용한 COI 유전자는 전기영동 밴드에서 0.75kb와 1kb 사이인 826bp의 자리에서 확인할 수 있다. 결과에서 *D. hopei* 암컷의 경우 전기영동 밴드가 826bp보다 조금 밑에 뜨는데, 재실험 결과도 826bp에 위치하는 밴드가 뜨지 않아 실험대상에서 제외하였다.



[Fig. 4] PCR result - Cytochrome Oxidase I + Cytochrome Oxidase II (1,910bp)

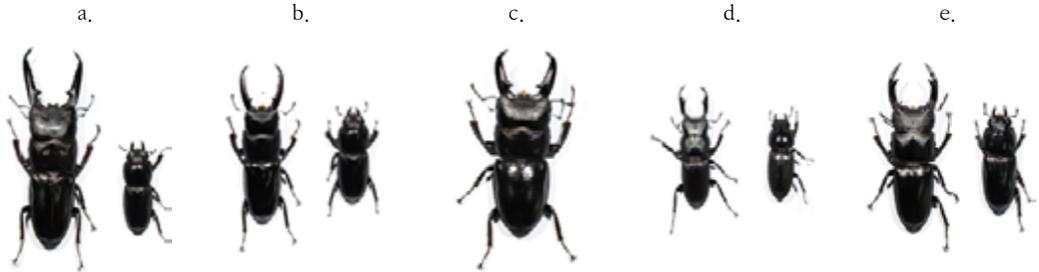
한편 CO I + COII 유전자는 일부분인 1,910bp에 해당하는 밴드를 [Fig. 4]에서 확인할 수 있다. 이를 통해 우리는 COI, COII 유전자가 정확하게 vector에 삽입되었음을 확인하고, Cosmo genetech에 sequencing을 의뢰하였다.

4. 계통도 분석

Sequencing 결과를 Bio edit와 Microsoft Word 2010을 사용해 프라이머를 제외한 COI, COII 유전자만의 염기서열을 워드 파일 형식으로 정렬했다. 또한, NCBI에서 북한, 일본, 대만, 인도네시아 등 아시아 전역에서 서식하고 있는 넓적사슴벌레의 COI, COII 유전자 염기서열을 검색했다. Sequencing한 염기서열과 NCBI에서 검색한 염기서열을 MEGA 7.0 프로그램을 사용하여 Neighbor-Joining 방식으로 bootstrapping 1,000회 반복하여 계통도를 그렸다.

5. 표본제작

사용한 사슴벌레는 냉동실에 보관했다가 표본으로 제작해 형태학적인 특징을 비교했다. 냉동실에 보관된 사슴벌레들은 근육을 풀어주기 위해 뜨거운 물에 10분간 담갔다 건져, 다리와 뺨, 몸통을 펼쳐 고정시킨 후 사진을 촬영하고, 건조시켜 표본으로 만들었다. [Fig. 5]은 판매중인 사슴벌레 중 우리가 실험에 사용한 개체들을 표본으로 만든 것이다.



[Fig. 5] Samples of stag beetles on sale (a: *D. titanus*, b: *S. consentaneus*, c: *D. titanus jejuensis*, d: *D. rectus*, e: *D. hopei*)

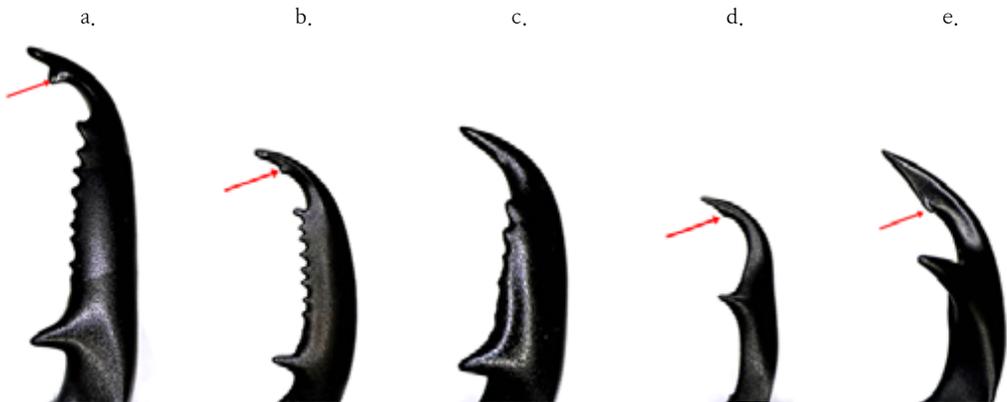
IV. 연구 결과

1. 판매중인 사슴벌레 분석 결과

가. 형태적 차이

1) 수컷 사슴벌레들의 턱 비교

왼쪽 두 개체(넓적사슴벌레, 참넓적사슴벌레)와 오른쪽 세 개체(남방사슴벌레, 애사슴벌레, 왕사슴벌레)를 비교해보면 넓적사슴벌레와 참넓적사슴벌레의 단치가 더 발달한 것을 볼 수 있다. 각각 비교해 보았을 때 외형적으로 차이가 있다는 것을 한 눈에 볼 수 있었다([Fig. 6]).



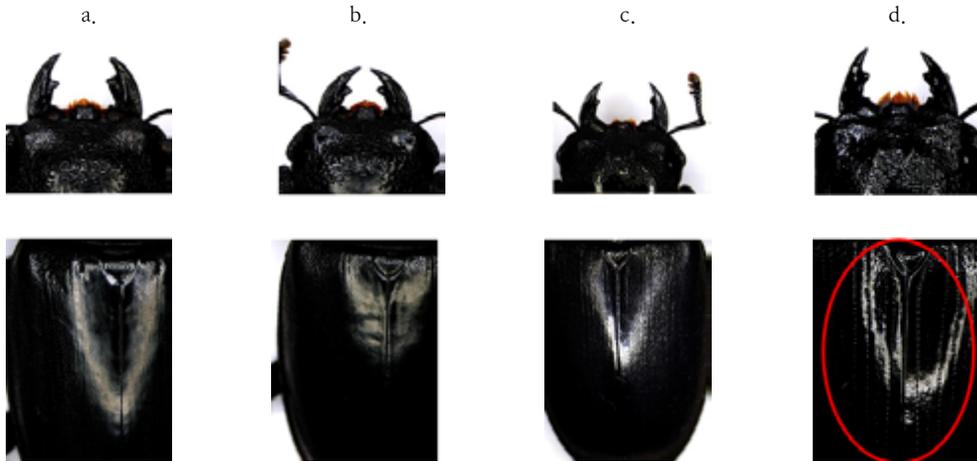
[Fig. 6] Morphological characteristics of Stag beetles (Male)

(a: *D. titanus*, b: *S. consentaneus*, c: *D. titanus jejuensis*, d: *D. rectus*, e: *D. hopei*)

2) 암컷 사슴벌레들의 등딱지 비교

[Fig. 7]의 왼쪽 두 개체 (넓적사슴벌레, 참넓적사슴벌레)와 오른쪽 두 개체 (애사슴벌레, 왕사슴벌레) 사이에서 차이점

을 발견할 수 있었다. 좌측의 두 개체는 등껍질이 매우 매끈한 것을 관찰할 수 있었지만, 우측의 두 개체의 등껍질의 경우에는 줄무늬와 같이 울퉁불퉁한 선이 존재한다[4].



[Fig. 7] Morphological characteristics of Stag beetles (Female) (a: *D. titanus*, b: *S. consentaneus*, c: *D. rectus*, d: *D. hopei*)

나. 유전자 비교 분석

1) COI 유전자 서열 비교

각 개체 별 염기서열을 분석한 <Table 6>을 보면 넓적사슴벌레 암, 수가 염기 2개 차이를 가지고, 넓적사슴벌레 암, 수와 남방사슴벌레가 염기 1개 차이를 가진다. 애사슴벌레 암컷과 수컷, 애사슴벌레 암컷과 왕사슴벌레가 염기 2개 차이를 보이며 애사슴벌레 수컷과 왕사슴벌레가 염기 4개의 차이를 가진다. 따라서 우리는 넓적사슴벌레 암, 수, 남방사슴벌레를 한 그룹으로 나눌 수 있고, 애사슴벌레 암, 수와 왕사슴벌레 수컷을 한 그룹으로 묶을 수 있다.

아미노산 서열을 분석한 <Table 7>에서 보면 넓적사슴벌레 암, 수가 2개의 서열의 차이를 보이며 넓적사슴벌레 암, 수와 남방사슴벌레가 각각 1개의 서열 차이를 보인다. 애사슴벌레 수컷과 애사슴벌레 암컷, 왕사슴벌레 수컷이 1개의 아미노산 서열 차이를 보이고, 애사슴벌레 암컷과 왕사슴벌레 수컷은 아미노산 서열이 일치한다.

<Table 6> Pairwise difference of nucleotide sequence of the COI gene between species (826 bp)

	1	2	3	4	5	6	7
1, <i>D. titanus</i> M1	-	0,242	0,121	7,869	17,312	17,312	17,312
2, <i>D. titanus</i> F1	2	-	0,121	7,869	17,312	17,312	17,312
3, <i>D. titanus jejuensis</i> (가칭)	1	1	-	7,748	17,191	17,191	17,191
4, <i>S. consentaneus</i> F1	65	65	64	-	17,402	18,402	18,160
5, <i>D. rectus</i> M1	143	143	142	152	-	0,242	0,484
6, <i>D. rectus</i> F1	143	143	142	152	2	-	0,242
7, <i>D. hopei</i> M1	143	143	142	150	4	2	-

* 위 표에서 대각선 아래 부분은 차이나는 염기의 개수를 나타내고, 대각선의 위쪽 부분은 차이나는 COI 유전자의 뉴클레오타이드 비율을 나타낸 것이다.

<Table 7> Pairwise difference of amino acid sequence of the COI gene between species (275 aa)

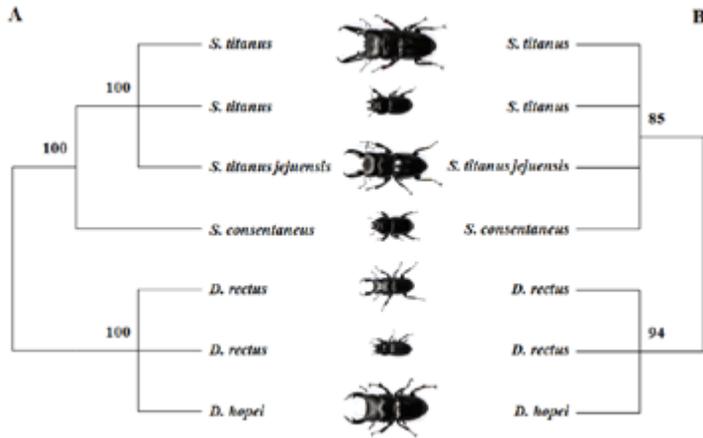
	1	2	3	4	5	6	7
1, <i>D. titanus</i> M1	-	0,727	0,364	0,727	3,636	3,273	3,273
2, <i>D. titanus</i> F1	2	-	0,364	0,727	3,723	2,909	2,909

3. <i>D. titanus jejuensis</i> (가칭)	1	1	-	0,364	3,273	2,909	2,909
4. <i>S. consentaneus F1</i>	2	2	1	-	3,636	3,273	3,273
5. <i>D. rectus M1</i>	10	9	9	10	-	0,364	0,364
6. <i>D. rectus F1</i>	9	8	8	9	1	-	0,000
7. <i>D. hopei M1</i>	9	8	8	9	1	0	-

* 위 표에서 대각선 아래 부분은 차이나는 염기의 개수를 나타내고, 대각선의 위쪽 부분은 차이나는 CO1 유전자의 아미노산 비율을 나타낸 것이다.

2) 계통도 분석

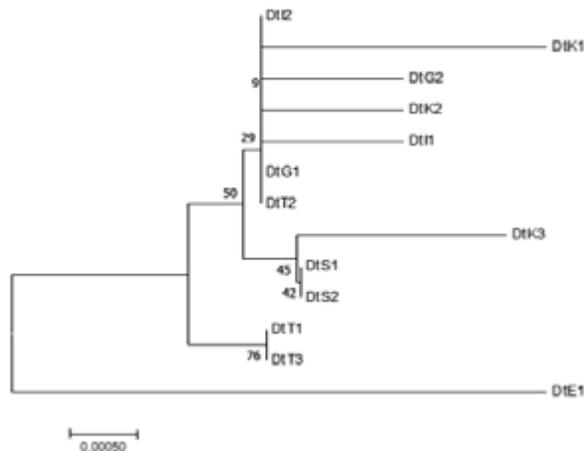
계통도를 그려보았을 때 넓적사슴벌레, 참넓적사슴벌레, 남방사슴벌레로 구성된 그룹과 왕사슴벌레, 애사슴벌레로 구성된 그룹으로 나뉜다[Fig. 8]. 계통도를 그려보았을 때 넓적사슴벌레, 참넓적사슴벌레, 남방사슴벌레가 하나의 clade를 이루며, 왕사슴벌레, 애사슴벌레가 하나의 clade를 이루어 크게 두 그룹으로 나뉜다.



[Fig. 8] phylogenetic analysis of COI gene on the sequence of base(A), amino acid sequence of amino acid(B)

2. 야생 넓적사슴벌레 분석 결과

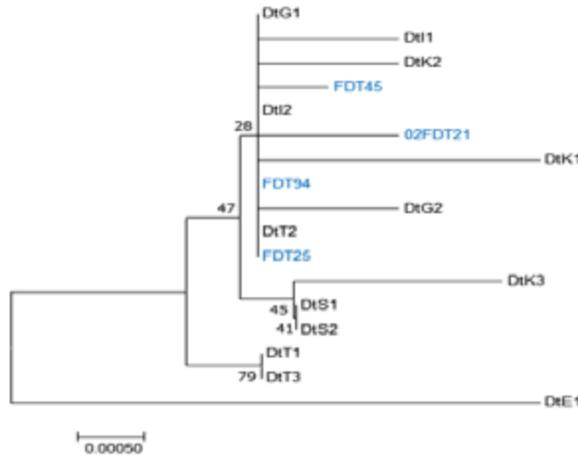
가. 채집한 개체들만을 이용한 분석



[Fig. 9] Phylogenetic tree of collected *Dorcus titanus* in Busan

DtS, DtL, DtT, DtK, DtG, DtE 순서대로 각각 승학산, 이기대, 태종대, 기장, 금정산, 의령에서 채집한 넓적사슴벌레 개체이다. [Fig. 9]을 분석해볼 때 의령에서 채집된 개체를 제외한 나머지 개체들이 큰 하나의 clade를 형성한다.

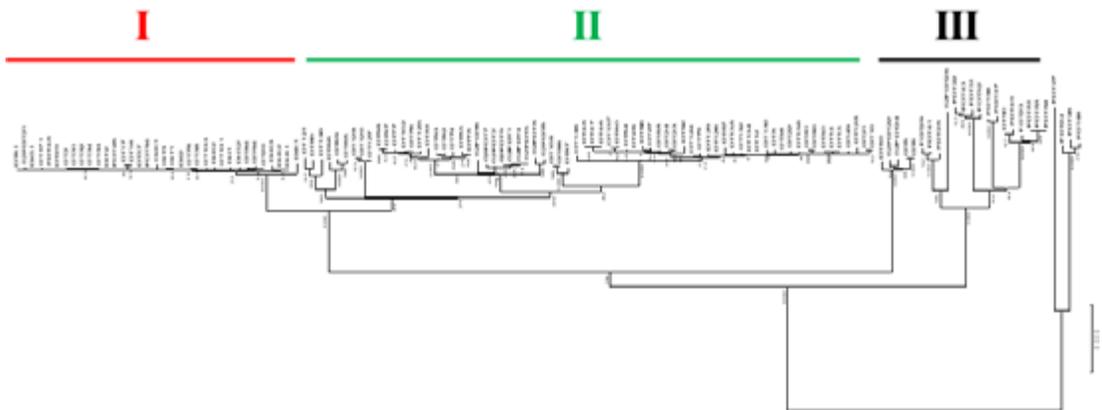
나. 북한 기보고 개체 추가 분석



[Fig. 10] Phylogenetic tree of *Dorcus titanus* in Busan and North Korea

‘NCBI(미국 국립생물정보센터)’에서 북한지역에 서식한 개체 3개와 부산지역에 서식한 개체 1개를 찾아 추가하여 1.1의 계통도에 포함시켜 분석하여 그린 계통도이다[Fig. 10]. 새롭게 추가된 개체들은 푸른색으로 표시하였다. 이 계통도를 분석해보면 여전히 의령에서 채집한 개체(DtE)는 독립적으로 분리되고 나머지 개체들은 큰 하나의 clade를 형성하는 것을 볼 수 있다. 이를 통해 한반도 내의 서식하는 넓적사슴벌레 개체들의 경우 특정 지역 별 유전적 차이는 적고 한반도 지역 전체를 넓적사슴벌레의 유전적 거리가 가까운 하나의 그룹으로 생각할 수 있다. 의령의 경우 추가적인 샘플 확보 및 분석이 필요할 것으로 생각된다.

다. 아시아 전역의 넓적사슴벌레 기보고 정보 종합 분석

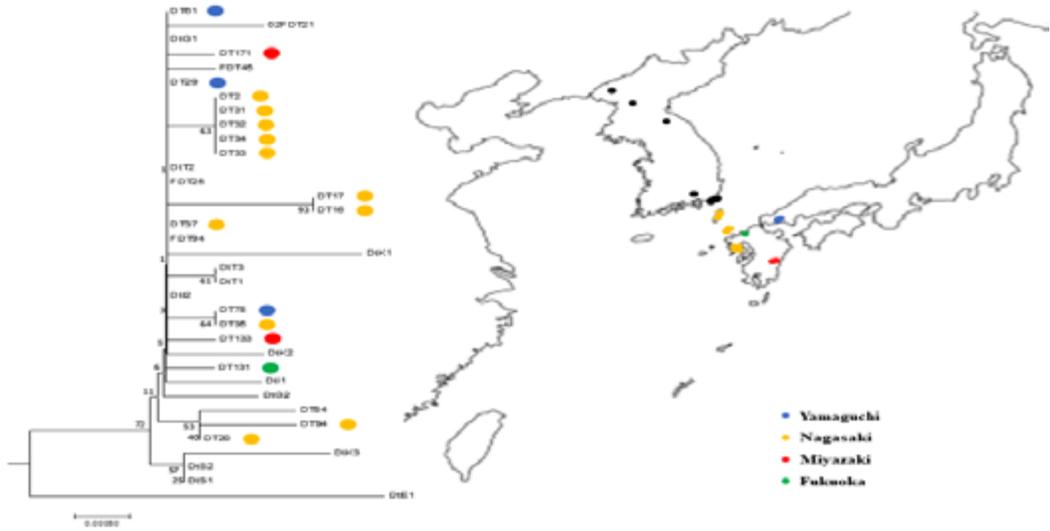


[Fig. 11] Phylogenetic tree of *Dorcus titanus* in Asia

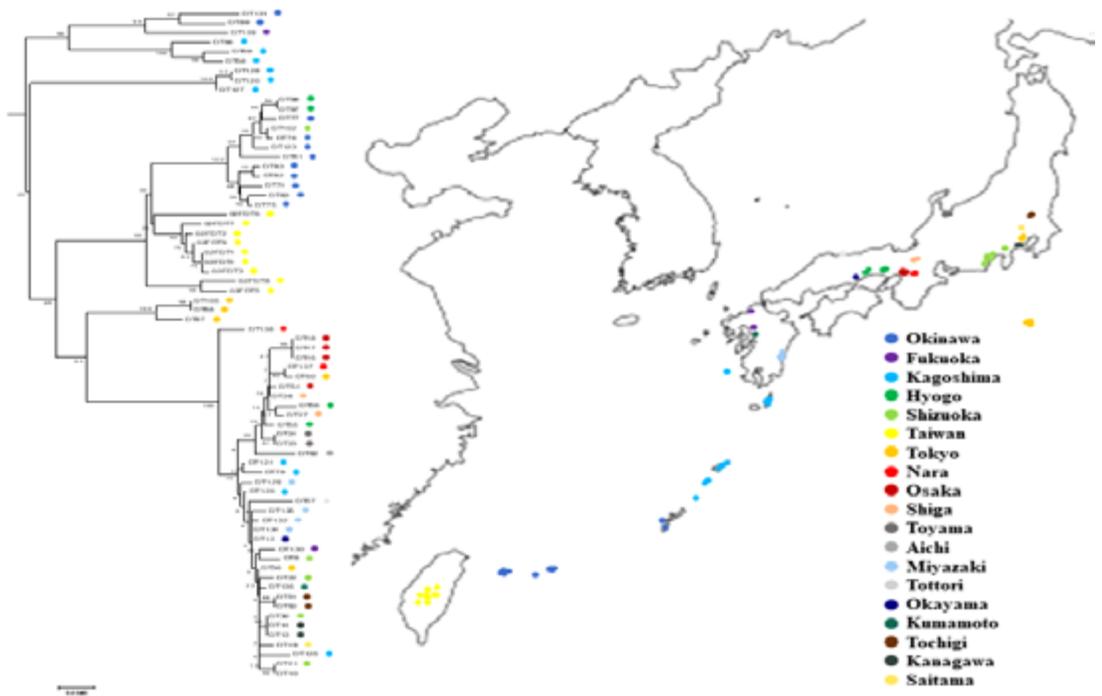
[Fig. 11]의 경우 [Fig. 10]에서 한발 더 나아가서 일본, 말레이시아, 필리핀, 대만, 인도네시아 등 아시아 전역에서 기보고된 넓적사슴벌레 유전자 염기 서열을 NCBI에서 검색 후 추가하여 분석한 것이다. 우리는 상단과 중단, 그리고 중단 및 중단을 제외한 나머지 부분으로 총 3가지로 그룹을 분리(Group I, Group II, Group III)하여 각각의 그룹에 해당하는 부분

을 지리적 분포와 함께 분석해 보았다[5-7].

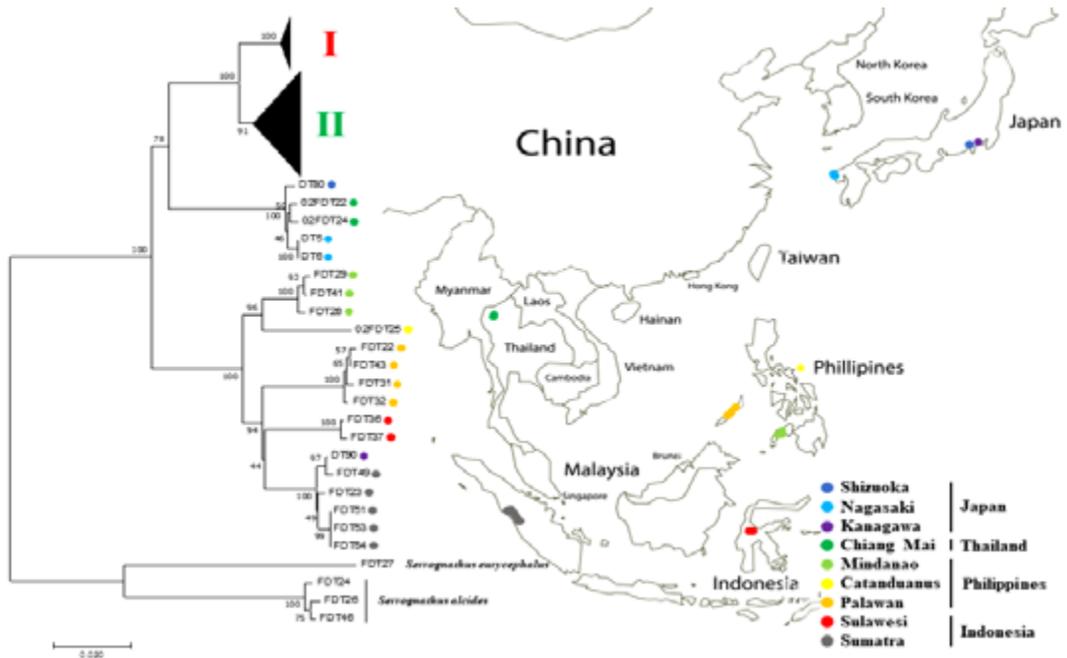
라. 그룹별 지리적 분포 분석



[Fig. 12] Group I



[Fig. 13] Group II



[Fig. 14] Group III

각각의 그룹에 존재하는 넓적사슴벌레 개체들을 지도상에 서식했던 장소 및 채집한 위치에 맞게 표시하여 보았을 때 Group I [Fig. 12]의 개체들은 한반도 전역 및 일본의 남부 지역에 서식했던 개체들임을 알 수 있다. Group II [Fig. 13]의 개체들의 경우 일본의 도쿄지역 이남부터 대만까지 서식했던 개체들임을 알 수 있다. Group III [Fig. 14]의 개체들의 경우 필리핀, 인도네시아, 말레이시아 등의 동남아시아 지역 일대에 서식했던 개체들임을 알 수 있다.

지도상에 표시된 각각의 그룹의 위치 점들을 바탕으로 그룹별로 묶어보면 [Fig. 15]와 같다.



[Fig. 15] Geographical distribution of Group I, II, III

V. 고찰 및 결론

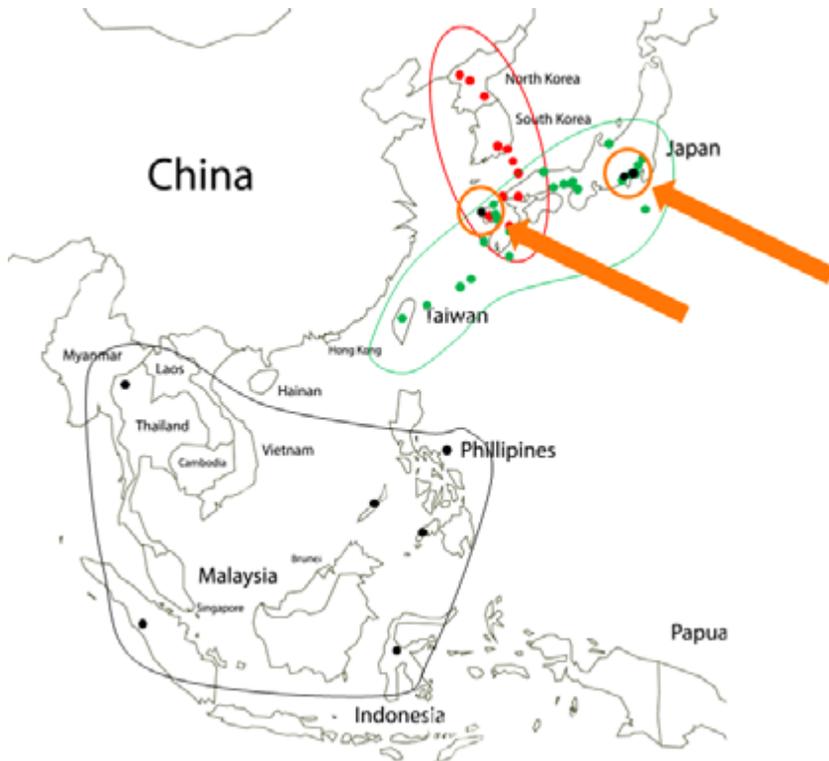
1. 판매중인 사슴벌레들간의 유연관계

판매중인 사슴벌레를 이용하여 사전 연구를 진행 하였을 때, 연구에 이용한 사슴벌레의 종들은 크게 두 가지 그룹을 나눌 수 있었다. Group I 에는 넓적사슴벌레, 참넓적사슴벌레, 남방넓적사슴벌레(가칭)가 포함되었다. 특히 남방넓적사슴벌레(가칭)는 제주도에서만 발견되는 종으로 가칭이며 정식 등록되지 않은 종이다. 형태적으로 봤을 때 단치의 모양이 Group I 과 많이 닮아있고 조금의 차이가 있다는 것을 알 수 있었다. 또한 유전자 분석도 그와 유사한 패턴을 관찰할 수 있었다. 즉, 아마추어 곤충애호가들 사이에 암암리에 고가 거래가 이뤄지고 있는 남방넓적사슴벌레(가칭)는 우리의 유전자 분석 결과에 기초하여 분석해볼 때 일반 넓적사슴벌레와 유의적 차이를 보이지 않았다. Group II 에는 애사슴벌레와 왕사슴벌레가 포함되었다.

2. 야생 넓적사슴벌레들간의 유연관계

먼저 부산 5개 지역의 넓적사슴벌레들은 특별히 지역별로 특성을 드러내지 않았다. 또한 북한의 개체들과도 유전적으로 분리되지 않았다. 그러나 의령 개체의 경우 한반도내에서 도드라졌는데 개체가 1개여서 추가적인 채집 및 분석이 있어야 결론을 내릴 수 있을 것이다.

나아가 NCBI에서 검색한 아시아 전역에 서식하고 있는 넓적사슴벌레들은 크게 세 가지 그룹으로 나눌 수 있었다. 각 그룹은 지리적 분포 면에서 비교적 잘 파악이 된다. 그 중 일본의 3개 샘플은 Group II 지역에 분포하는 Group III 개체라고 분석된다[Fig. 16]. 정확한 경위는 파악할 수 없으나 Group III 에서 수입되거나 채집된 개체로서 외래종임을 판별할 수 있다. 이는 본 연구의 결과가 외래종 판별에 활용될 수 있음을 시사한다.



[Fig. 16] A case of distinction of exotic species

본 연구는 부산에서 직접 채집한 넓적사슴벌레의 유전자 CO I과 CO II 의 정보를 등록할 수 있는 기초 자료를 제공하고, 한반도내에 넓적사슴벌레가 유전적으로 나누어지지 않으므로 국내종과 외래종을 판별할 때 이 유전자를 마커로 활용할 수 있다는 결론을 내릴 수 있다. 또한 부산 지역에 국한되지 않고 한반도와 일본을 넘어 아시아 전역을 분석 대상으로 하여 넓적사슴벌레의 다양성이 어떠한지 파악할 수 있는 계기가 된다.

VI. 참고문헌

- [1] 조세신문. <http://joseongsin.com/news/view.html?section=136&category=139&no=20734>(검색일 : 2018.04.05.).
- [2] 동아일보. <http://news.donga.com/3/all/20070518/8443290/1>(검색일 : 2018.04.05.).
- [3] Elena M. Martinez-Navarro et al. (2005). Phylogeny and molecular evolution of the tribe Harpalini(Coleoptera, Carabidae) inferred from mitochondrial cytochrome-oxidase I. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 35, 127-146.
- [4] Tae Man Han et al. (2010). Phylogenetic Relationships of *Dorcus koreanus* Jang and Kawai, 2008 (Coleoptera, Lucanidae): Species or Subspecies?, *Zoological science*, 27, 362-368.
- [5] Tae Hwa Kang et al. (2015). Development of Seven Microsatellite Markers Using Next Generation Sequencing for the Conservation on the Korean Population of *Dorcus hopei* (E. Saunders, 1854) (Coleoptera, Lucanidae). *International journal of Molecular sciences*, 16, 21330-21341.
- [6] Tae Hwa Kang et al. (2016). Development of 12 Microsatellite Markers in *Dorcus titanus castanicolor* (Motschulsky, 1861) (Lucanidae, Coleoptera) from Korea Using Next-Generation Sequencing. *International journal of Molecular sciences*, 17, 1621-1627.
- [7] Kouichi Goka et al. (2004). Biological Invasion caused by Commercialization of Stag Beetles in Japan. *Global Environmental Research*, 8(1), 67-74.

I 연구진 I

김예빈 (Yebin Kim, 부산일과학고등학교, mickymi@naver.com), 주저자

박효빈 (Hyobin Park, 부산일과학고등학교, qkrgyqls41@naver.com), 공동저자

박세훈 (Sehun Park, 부산일과학고등학교, bsh0204081@naver.com), 공동저자

박지상 (Jisang Park, 부산일과학고등학교, wltkddl113@naver.com), 공동저자

지도교사 : 신차정 (Chajeong Shin, 부산일과학고등학교, 960283@hanmail.net)

중금속 농도에 따른 속성배추 성장차이 연구와 커피부산물 및 해조류를 통한 토양정화 방안 연구

감지희 · 송수환 · 이가은 · 이영재 - 인천과학고등학교

A Study on the Difference of Rapid cycling *Brassica rapa* Growth by Heavy Metal Concentration and the Study of Soil Remediation through Coffee by-products and Seaweeds

Jiheeh Kang · Soohwan Song · Gaeun Lee · Youngjae Yi - Incheon Science High School

국문초록

본 연구는 중금속이 식물 생장에 어떤 영향을 미치며, 중금속에 오염된 토양정화 방안을 강구하고자 커피 부산물과 해조류(파래, 톳, 다시마, 미역)를 이용한 토양정화 방법 연구와 토양정화 효과를 식물 성장 비교를 통해 알아보고자 하였다. 본 연구는 생활사가 짧은 RcBr을 이용하여 중금속이 식물 생장에 미친 영향과 커피 부산물 및 해조류의 토양 정화 효과를 비교 및 분석하였다. 연구 결과 고농도의 카드뮴은 식물 발아 및 식물생장을 저해시키고, 잎의 갈변현상 등 독성효과를 나타냄을 확인할 수 있었다. 또한, 안토시아닌을 생성하는 Purple stem RcBr과 생성하지 않는 Non-purple RcBr의 성장 차이로 카드뮴의 독성 효과를 비교해본 결과 Purple stem RcBr이 독성에 관한 저항성을 지닌 것이 확인됨으로써 안토시아닌이 식물 생장에 있어 카드뮴 독성효과를 억제할 수 있다는 것을 검증할 수 있었다. EDS(Energy Dispersive Spectrometry) 분석 결과 커피부산물과 해조류 중 해조류가 더 카드뮴 흡착 효율이 크며, 카드뮴 흡착 및 식물생장의 효과가 동시에 나타나는 것은 파래임을 확인할 수 있었다. 이를 통해 카드뮴에 오염된 토양을 정화시키는 방안으로 파래를 흙에 섞어 주어 토양 속 카드뮴을 흡착하여 지하수의 2차 오염을 막고, 흡착된 카드뮴은 카드뮴에 대한 저항성을 지닌 안토시아닌을 생성하는 식물을 파종하여 식물 속으로 카드뮴을 축적시킴으로써 카드뮴으로 오염된 토양을 정화시킬 수 있는 한 가지 방안으로 제안하는 바이다.

중심어 : RcBr, 카드뮴, 커피, 해조류, 토양정화

ABSTRACT

This study was conducted to investigate the effects of heavy metals on the plants' growth and to investigate the remediation strategies of cadmium - contaminated soils using coffee and seaweeds(green laver, seaweed fusiforme, kelp, sea mustard). In this study, we used RcBr (Rapid cycling *Brassica rapa*), which has a short lifespan, and investigated the effect of cadmium concentration on the germination and growth of RcBr. The results showed that high concentrations of cadmium inhibited plant germination and plant's growth, and showed toxic effects such as browning of leaves. In addition, the toxic effect of cadmium was compared by the difference of individual growth of Purple stem RcBr that produces anthocyanin and Non-purple RcBr that doesn't produce anthocyanin. As a result, Purple stem RcBr had a resistant to the toxicity of cadmium, and it was verified that anthocyanin can inhibit the cadmium toxicity effect in plant's growth. The EDS(Energy Dispersive Spectrometry) analysis showed that the seaweed had higher adsorption efficiency of cadmium than coffee. For the growth of RcBr, green laver in seaweed showed a good effect on adsorption of cadmium and plant's growth. As a way to purify the contaminated soil with cadmium, the green laver mixed in the soil can prevent secondary contamination of the groundwater by adsorption of cadmium in the soil. Sown plants that produce anthocyanins in soil will absorb cadmium on seaweed and will be able to purify the contaminated soil with cadmium.

Key words: RcBr, cadmium, coffee, seaweed, soil remediation

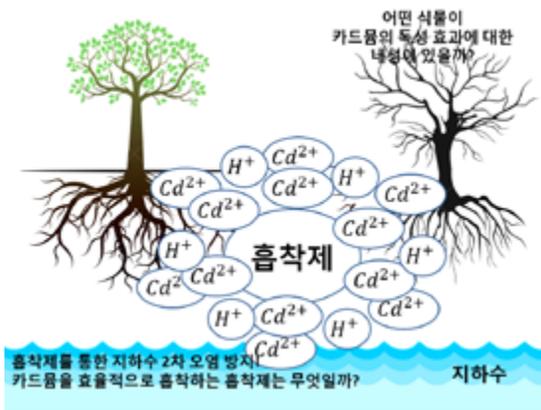
I. 서론

1. 연구 배경 및 필요성

한국환경공단은 토양오염을 '산업 활동을 포함한 인간이 활동에 의해 만들어지는 여러 가지 물질이 토양에 침투하여 토양이 환경구성 요소로서의 기능을 상실하게 만드는 것'이라고 정의하고 있다. 수질오염 또한 마찬가지이다. 여기서 '상실'이라는 단어는 곧 인간, 나아가서는 지구의 종말을 의미한다. 우리는 이미 수질오염과 토양오염으로 인해 많은 식물들이 피해를 보고 있다는 사실을 알고 있다. 그에 대한 한 예로 울산 온산공단 주변의 환삼덩굴, 토끼풀, 미국자리공, 달맞이꽃, 무궁

화 등은 생식물이 일반 흙보다 10% 이상 떨어진다는 것이다. 특히, 토끼풀과 미국자리공의 화분 생식력이 34.5%, 50.0%로 매우 낮게 측정됨으로써 환경오염이 심각하다는 것을 분명히 알 수 있다. 앞으로 살아갈 날이 더 많은 우리는 이에 대한 책임을 통감하고, ‘어떻게 하면 중금속으로 오염된 토양을 되돌릴 수 있을까?’에 집중하게 되었다.

중금속에 관해 조사한 결과 중금속은 비중이 4 이상 되는 금속으로 주로 산업폐수에 포함되어 바다로 배출되는데, 미생물에 의해 분해가 되지 않고 환경과 생물체 내에 계속적으로 축적된다. 중금속으로 오염된 토양에서 토마토의 생장이 카드뮴 농도가 증가할수록 억제된다는 연구결과를 접하였다. 또한 오복희(2007)의 ‘토마토 유묘에 있어서 카드뮴 노출에 의한 안토시아닌 색소 형성과 오염지표로서의 교육적 효과’에 관한 논문에서 안토시아닌이 카드뮴 흡착에 도움을 준다는 것을 알게 되었다[3]. 즉, 카드뮴에 노출된 유묘와 그렇지 않은 유묘로부터 추출한 안토시아닌의 차이를 스펙트럼미터를 사용하여 비교 분석한 결과 카드뮴에 노출된 유묘에서 안토시아닌 생성량이 높게 나왔으며, 이는 안토시아닌이 카드뮴과 결합하여 복합체를 이루어 주요 흡수 스펙트럼의 파장 변화가 달라진 것이라고 결론을 낸 것이다. 이에 카드뮴이 실제 식물에 어떠한 영향을 미치는지 알아올과 성장차이를 알아보고자 하였으며, 카드뮴의 농도에 따라 안토시아닌의 생성량이 다르다면 안토시아닌을 생성하는 식물과 생성하지 않는 식물을 구분하여 성장차이를 연구하고자 계획하였다. 또한, 식물연구에 있어 오랜 시간이 걸린다는 단점을 극복할 수 있는 새로운 소재의 식물을 찾고자 하였다. 이에 김재권(2018)의 논문을 확인해본 결과 RcBr(Rapid cycling *Brassica rapa*)은 생활사가 짧고, 종에 따라 다양한 특성이 나타나며, 특히 Purple stem, hairy RcBr(P.S, RcBr)과 Non-purple stem, hairless RcBr(N.P.S, RcBr)이 DFR 유전자 차이로 인해 안토시아닌 생성 유무의 차이가 난다는 사실을 알게 되었다[1]. 또한, 흙 속의 카드뮴이 흡착제에 붙으면 양이온은 치환으로 인해 땅 속의 수소이온과 카드뮴 이온이 치환되며 수소 이온이 흡착제에 붙고 카드뮴 이온은 식물에게 흡수될 것이라 판단하였고, 카드뮴을 흡수한 이 식물을 제거하면 흙 속 카드뮴을 제거할 뿐만 아니라 지하수로 유출될 수 있는 카드뮴 이온을 흡착함으로써 지하수의 오염도 막을 수 있을 것이라는 새로운 토양방법을 생각하게 되었다.



[Fig. 1] Soil remediation system which we design

따라서 [Fig. 1]처럼 카드뮴을 효율적으로 흡착할 수 있는 흡착제를 찾고, 어떤 식물이 카드뮴의 독성 효과에 대한 내성이 있는지 연구를 통해 찾아보고자하였다. 이에 우리는 RcBr을 이용하여 카드뮴 농도에 따라 종자의 발아율과 유묘의 생장률이 얼마나 차이가 나는지 연구하기로 하였으며, 실제 안토시아닌을 생성하지 않는 N.P.S. RcBr 개체보다 안토시아닌을 생성하는 P.S. RcBr 개체의 생장이 더욱 높을 것이라는 연구가설을 세워 연구를 시작하기로 하였다. 이러한 결과를 바탕으로 오염된 토양 속 카드뮴이 특정 물질에 흡착된다면 P.S. RcBr의 안토시아닌 발현량과 생성량이 작아질 것이라는 가정으로 카드뮴을 흡착하는 물질들이 무엇이며, 얼마나 효과적인지 알아봄으로써 카드뮴에 오염된 토양정화 방안을 연구하고자 하였다.

2. 연구 목적

우리는 중금속 중에서 카드뮴의 농도가 RcBr(Rapid cycling *Brassica rapa*)의 생장에 미치는 영향을 알아보고, 커피 부산물과 해조류를 이용해 발아 및 성장 차이를 관찰하고자 하였다. 또한, 흡착 연구는 커피 부산물과 해조류 중에서 과래, 톳, 다시마, 미역을 사용하여 이들의 중금속 흡착여부를 SEM(주사전자현미경)의 EDS 촬영을 통해 확인하고자 하였고, 이를 토양에 적용하였을 때 실제로 RcBr의 생장과 안토시아닌의 생성량에 영향을 주는지 파악하여 토양정화의 효과를 추론하고자 하였다. 이에 연구 목적은 다음과 같다.

가. 카드뮴 농도에 따른 RcBr의 발아 및 성장 차이를 비교한다.

- 나. 특정 농도의 카드뮴으로 오염된 토양별 RcBr의 생장 차이를 비교한다.
- 다. 커피 부산물과 해조류의 카드뮴 흡착 여부를 확인한다.
- 라. 커피 부산물과 해조류의 카드뮴으로 오염된 토양정화 효과를 식물 생장을 통해 검증한다.

II. 이론적 배경 및 선행연구 분석

1. 이론적 배경

가. RcBr의 특징 및 생활사

1) 식물 생장 차이 비교를 위한 RcBr 선택 이유

Wisconsin Fast Plant로 알려진 RcBr은 미국 Wisconsin 대학교의 Williams 박사가 십자화과 식물의 질병에 대한 저항성을 연구하던 중 발견한 야생형의 *Brassica rapa*를 개량한 식물이다. RcBr은 씨를 심어서 종자를 획득하기까지 다른 식물 보다는 빠른 35~40일의 생활사를 가지며, 24~29 °C의 생육조건을 갖는다. 또한 종자는 휴면기간이 없고, 흙에 심어 하루 정도가 지나면 발아를 한다. 4일 정도가 지나면 첫 번째 잎이 나며 일주일 정도가 지나면 5 cm 정도이며 그 후부터는 생장 속도가 빠르다. 11일 정도 후 꽃봉오리가 생기며 15일 정도면 꽃이 피어 수분을 할 수 있다. 수분 후 종자가 맺히고 꼬투리 형성하기까지 15~20일 정도 걸린다. 꼬투리의 수는 수분하는 것에 따라 유동적이며 한 꼬투리에는 10~15개 정도의 씨가 들어있다. 영양 정도, 빛의 세기, 종자 등의 여러 가지 변인에 따라 최대 생장 크기가 달라질 수 있지만 대체적으로 15~20 cm 정도 성장한다[1]. 이에 RcBr은 생활사가 35~40일로 빠르기 때문에 식물의 전 생활사를 빠른 시일 내로 관찰할 수 있어 일정 시간 안에 다양한 실험을 해야 하는 본 연구에 적합하였으며, 크기가 15~20 cm로 작아 상대적으로 작은 배양기에서 실험하기 용이하기 때문에 RcBr이라는 식물을 선택하여 생장 비교 연구를 하였다.

2) Purple Stem RcBr과 Non-Purple Stem RcBr의 차이

Purple stem, hairy RcBr(ANL/ANL) 개체는 줄기뿐만 아니라 자엽, 잎 등에서 보라색을 나타내며, 모용(털, trichome)을 가지고 있다. 전체적으로 보라색을 띠는 이유는 안토시아닌 색소가 과잉으로 생성되기 때문이다. 안토시아닌의 존재 여부는 단일 열성 유전자(anl)에 의해 조절되며 열성 동형접합(anl/anl)의 경우 안토시아닌이 만들어지지 않지만, 유전자형이 ANL/ANL 또는 ANL/anl인 경우에는 다양한 수준으로 안토시아닌이 만들어진다. 이 개체는 4~7일 정도 지난 후 줄기 아랫부분을 보면 뚜렷하게 보라색으로 보인다. 안토시아닌의 합성은 환경 상태에 의해서도 영향을 받게 되며 특히 영양분이 적거나 빛의 세기가 커지면 더욱 진한 보라색이 관찰된다. 또한, 화분에서 자란 것보다는 페트리접시에서 발아한 개체가 더 진한 보라색으로 관찰된다. Non-purple Stem, hairless(anl/anl)의 표현형을 가지는 이 개체는 줄기나 잎 등이 전체적으로 밝은 녹색을 보이며, 줄기나 잎에 모용(털, trichome)이 없거나 매우 적게 가지고 있다. 전체적으로 녹색으로 보이는 이유는 DFR 유전자의 이상으로 안토시아닌 색소가 만들어지지 않기 때문이다. 이러한 식물의 안토시아닌 색소의 결핍은 식물 전체에 영향을 미치게 되어 전체적으로 녹색을 띠게 된다. 이는 단일 열성 유전자(anl)에 의해서 조절되는데, 이 개체의 유전자형은 열성 동형접합(anl/anl)이므로 식물의 줄기나 잎, 자엽 등에서 안토시아닌이 생성되지 않아 녹색으로 띠게 되는 것이다[1].

나. 연구에 사용되는 시료들의 특징

1) 카드뮴의 특징 및 식물에 미치는 영향

카드뮴은 원자번호 48번의 원소로, 원소기호는 Cd이다. 주기율표에서는 아연(Zn)과 함께 12족에 속하는 금속원소이다. 카드뮴은 푸른색을 띠는 은백색 금속으로, 칼로 자를 수 있을 정도로 무르며 연성과 전성이 좋다. 녹는점은 321 °C로 비교적 낮다. 고온에서는 붉은색 불꽃을 내면서 타서 산화카드뮴(CdO)이 된다. 가열하면 할로겐 원소들과 반응하나, 수소나 질소와는 반응하지 않는다. 산에 녹아 +2 산화 상태의 염들을 만드나, 알칼리에는 녹지 않는다. 카드뮴은 1급 발암물질로 매

우 독성이 강한 금속으로 사람에게에는 이타이이타이병을 일으키며, 식물에게는 과량 축적 시 생체량 감소, 줄기 및 뿌리의 신장억제, 치사 등의 독성 효과를 나타낸다. 이것은 대사와 관련된 효소들의 활성을 억제하고 필수 무기물의 흡수를 막아 결핍시키며 엽록소 합성을 억제하고 호흡을 억제하는 등 다양한 독성 효과를 유도한다. 또한, 이것은 엽록소의 구조적 변화와 엽록소 함량 감소에 의한 광합성률의 감소로 인해 물가 무기영양분 흡수의 감소 등으로 성장억제, 갈변현상을 나타나게 된다. 이에 카드뮴은 독성이 강한 금속이다. 따라서 식물에 축적되었을 시 성장억제, 갈변현상, 고사 등의 실험을 통해 관찰하기에 용이한 변화를 식물에 야기하기 때문에 중금속 중 카드뮴을 선택하여 본 연구를 진행하였다[2, 3].

2) 해조류의 특징 및 중금속 흡착 가능성

알칼리 식품인 해조류에는 단백질, 당질, 비타민, 무기질 등이 많이 함유되어 있다. 즉 해조류는 피를 맑게 해주고 활성 산소 생성을 억제하며, 식이섬유가 풍부하여 변비 예방에 좋다. 해조류에 함유되어 있는 철은 빈혈을 예방한다. 해조류 맛의 근원은 글루탐산, 아스파라긴산, 알라닌, 글리신 등의 아미노산이다. 해조류 지질은 불포화지방산이며, 탄수화물의 대부분은 식이섬유로 장장 작용과 콜레스테롤 등의 배설 작용을 한다. 뿐만아니라 무기질 성분은 요오드가 많이 함유되어 있다. 이러한 해조류 속 철과 질소, 요오드 등 많은 무기염류들은 식물이 생장하는데 필요한 필수 영양소이며, 식물 성장에도움을 줄 것으로 판단된다. 또한, 해조류에 의한 중금속 흡착에 관한 연구는 모든 식물 분야 중에서 가장 활발히 진행되었다. 해조류의 성분 중에서는 아민기(-NH₂)가 가장 큰 영향을 끼치는 것으로 알려져 있다. 이장호의 논문에 의하면 파래와 미역 등이 중금속 흡착능력이 큰 효능을 보였으며 이에 이를 확인하고 파래와 미역뿐 아니라 톳, 다시마 등의 해조류들의 중금속 흡착능력을 확인 및 사용하고자 파래, 톳, 다시마, 미역의 해조류를 선택하여 중금속 흡착 실험 및 생장실험에 사용하였다[4, 5].

3) 커피 부산물의 특징 및 중금속 흡착 가능성

커피 부산물을 흙에 섞어 주면 며칠이 지난 후에 토양 속에 흡수되면서 미생물을 생성하게 되고 토양을 비옥하게 만들며, 통기성과 흙의 흡입력을 증가시키고, 양이온치환용량(CEC)과 공극률도 높여주는 효과가 있다. 커피원두는 향을 추출할 때 커피 알맹이의 무게 0.2%만 향기와 함께 용출되어지며 98.8%는 찌꺼기로 남아 있다. 관세청에서 발표한 '2011년 원두 수입 현황'에 의하면 2011년 수입한 커피 수입량은 130천만 톤이다. 그렇다면 0.2%만 마시고 나머지 98.8%는 생활폐수로 흘러버리거나 생활폐기물로 버려진다. 커피 찌꺼기는 다공성 물질이며, 고태상, 임성훈의 논문 등에서 커피 부산물이 토양의 중금속 흡착에 효과가 있음을 검증하였다[7, 8]. 이에 실제 커피 부산물이 중금속을 흡착하는지 EDs를 통해 확인하고, 식물 생장에 어떠한 영향을 미치는지 확인하고자 하였다[6, 7, 8].

다. 식물 생장에 미치는 요인

1) 빛의 파장대별 식물의 흡수 능력

광합성을 규제하는 요인은 빛의 강약, 이산화탄소의 농도, 온도가 있다. 일정한 농도의 이산화탄소와 어느 온도에서, 빛이 약한 범위에서는 빛의 세기가 증가하면 광합성률은 증가하지만, 어느 정도 이상의 강한 빛이 되면 포화 상태가 되어 더 이상 광합성률이 증가하지 않는다. 빛의 3원색은 빨강, 녹색, 파랑이다. 식물이 녹색인 이유는 가시광선 중 녹색을 흡수하지 않고 반사하기 때문인데, 식물이 녹색이면 몸 색이 빨강인 경우와 파랑인 경우보다 생존에 더욱 유리하다. 빨강 파장은 파장이 길어서 공기를 통과할 때 다른 물질과의 충돌이 적어 에너지 손실이 적으며 이 때문에 멀리까지 갈 수 있다. 따라서 식물은 빨강 파장으로 인해 기상이 악화되어도 광합성을 할 수 있고, 산란이 되기 쉬운 파란 파장을 이용해 식물의 몸체에 빛이 잘 흡수되도록 한다. 또한, 햇빛의 스펙트럼에는 붉은색 영역과 푸른색 영역이 가장 넓다고 한다. 이 연구를 통해 식물이 어떤 색깔의 빛에서 광합성을 잘 하고, 또 어떤 색깔의 빛에서 광합성을 잘 하지 않는지를 알았으니 앞으로는 각 분야에서 알맞게 활용해야 할 것이다. 야간에도 아름다운 나무들을 보기 위해서는 나무가 밤에는 일을 조금만 하고 쉴 수 있도록 녹색 조명을 하고, 식물을 잘 키우기 위해서는 빨강 파장과 파란파장을 강화하여 조명을 주면 될 것으로 예상된다. 또한, 백열등은 전기의 5%의 효율을 가지고, LED는 전기의 35%의 효율을 가진다. LED는 전기장에 의한 전자의 흐름에 의해서 고체 원자의 전자궤도에너지를 높여줌으로써 발광하는 것이다. 형광등은 전자에 눈에 보이지 않는 광자를 주어 눈에 보이는 광자로 바꾸는 것이다. 따라서 백열등보다는 LED가 좋고, 그중에서도 빨간색과 파란색 빛이 식물 생장에 좋다. 그래서 우리는 이를 이용하여 식물 생장 장치에서 빨간색과 파란색 LED 광원을 사용하기로 하였다[9].

2) 토양의 산성도에 따른 양이온 교환 능력

토양이 교환성 양이온을 흡착할 수 있는 능력, 즉 토양의 무기 및 유기 콜로이드에 흡착할 수 있는 교환성 양이온의 총량을 양이온 치환용량 또는 양이온 교환능(Cation Exchange Capacity, CEC)이라고 한다. 양이온 교환능은 토양 1 kg이 흡착할 수 있는 교환성 양이온의 총량을 mol/kg의 단위를 사용하여 나타낸다. 양이온 교환능은 토양이 보유하고 있는 음전하의 양에 따라 결정된다. 토양교질의 입자 주위 이온층을 확산이중층이라고 하는데, 확산이중층의 외곽 부위는 전기적 인력이 매우 작아 여기에 있는 양이온은 쉽게 용액층의 양이온인 유리양이온들과 자리를 바꿀 수 있다. 확산이중층 내부의 양이온들은 유리 양이온의 농도라든지 또는 그 밖의 이온 환경변화에 따라서 치환될 수 있는 것이므로 치환성 양이온(exchangeable cation)이라고 한다. 양이온별로 치환될 수 있는 능력이 다른데, 수소이온(H+)은 양이온 치환 능력이 있어 약산성조건에서는 식물이 잘 자라지만 토양의 산도가 높아지면, 식물이 잘 자라지 못한다[10].

라. 중금속 흡착 연구 방법

이현용의 ‘밤 부산물의 수용액 중 중금속 흡착 특성’에서 울피의 불순물을 제거한 후 분쇄기를 이용하여 파쇄하고 건조하여 중금속 흡착에 사용하였다. 황인복과 박희원의 ‘감잎을 이용한 중금속 이온 흡착에 관한 연구’에서는 감나무잎을 몰탈로 갈고 체로 쳐서 입자 크기별로 분리한 후 중금속 흡착에 사용하였다. 또한, 중금속은 각 금속의 최적 pH로 조절하여 만든 500 ppm 중금속 수용액 50 ml를 각 흡착제 0.5 g과 혼합하여 밀봉한 후 진탕기에 넣어 건조시키고, 그 중 0.3 g을 취하여 고정흡착장치에서 용출액을 받아 AAS(원자흡광광도법)으로 정량하였다[11, 12, 13]. 창철순과 김민의 ‘식물 재료를 이용한 중금속 흡착에 관한 탐구’에서는 식물 재료를 건조하고 분쇄한 후 중금속 흡착에 사용하였다. 시료 용액의 pH를 조정하고 교반한 후 원심분리를 하고 AAS를 이용해 중금속 흡착 정도를 분석했다. 또한 정문헌의 논문과 같이 EDS의 무기물 구성 물질 분석을 통해 중금속 흡착 정도를 분석할 수 있다는 것을 알 수 있었다[14]. EDS는 SEM(주사전자현미경)에 부착되어 있는 부가 장치 중 하나인데, 성분 분석이 가능한 장비이다. 시료에 전자빔을 주사하면 원자가 에너지를 받아 들뜬 상태로 변하게 되는데, 이 때 들뜬 원자가 다시 안정화되면서 특정한 빛을 방출한다. 방출되는 빛의 고유 에너지가 원자마다 다른데, EDS는 이를 이용하여 물질을 이루는 성분을 분석한다. 전자빔의 에너지 증가에 따라 반응 부피가 증가하고, 원자의 양이온 밀도 증가에 따라 반응 부피가 감소한다. 조작이 간단하고 분석 시간이 빠르다. 또한 동시에 여러 가지의 원소를 검출해낼 수 있고, 부위별로 측정하면서 현미경을 동시에 사용할 수 있다는 장점이 있지만 시료 샘플 크기가 제한적이고, 고체만 가능하고, 전처리 과정이 필요하다는 단점이 있다. 원소마다 색깔을 지정하여 SEM으로 찍은 사진을 보기 편하게 만들어주기도 한다[12]. 따라서 우리는 카드뮴 흡착 정도를 알아보기 위해 앞선 선행연구를 바탕으로 실험 방법을 고안하고 최종적으로 EDS 분석을 통해 흡착여부를 알고자 하였다.

2. 선행연구 분석

이론적 배경을 바탕으로 연구를 위한 실험방법 고안 및 결과해석을 위해 논문들과 연구보고서들을 분석하였다. 선행연구 분석 결과는 <Table 1>과 같다.

<Table 1> Analysis of precedent research

저자	제목	참고 내용
우복희 (2007)	토마토 유묘에 있어서 카드뮴 노출에 의한 안토시아닌 색소 형성 관찰과 오염지표로서의 교육적 효과	토마토에 안토시아닌이 있고, 흡수 스펙트럼을 관찰하는 실험을 통해 안토시아닌이 카드뮴과 복합체로 존재하며, 이로 인해 안토시아닌이 카드뮴을 흡착하는데 효과가 있음을 알려 주어 도움이 되었다[3].
김영남 (2002)	Arabidopsis에 있어서 카드뮴 저항성 식물의 유도 및 특징	100 μM, 200 μM, 300 μM, 400 μM, 500 μM CdCl ₂ 수용액을 이용하여 Arabidopsis(애기장대)의 발아율을 측정할 것을 알 수 있고, 카드뮴의 식물의 독성효과가 산화적 스트레스를 통해 일어남을 알 수 있었다[15].

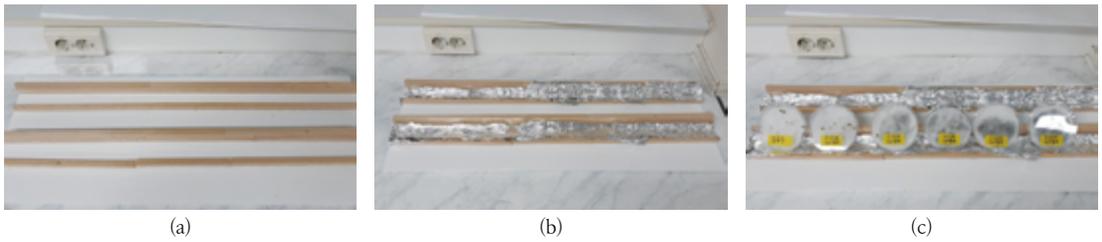
이현용 등 (2009)	밤 부산물의 수용액 중 중금속 흡착특성	탄닌 성분이 다량 함유된 울피의 폐수 속 중금속 흡착 여부를 SEM을 이용하여 분석했다. 중금속 흡착 전과 후 전자밀도 차이를 관찰함으로써 중금속이 흡착되었을 것으로 판단하였고, EDS 분석을 통해 특정 중금속 흡착 정도를 확인하였다. 이를 통해 중금속 흡착 여부 확인을 위해 SEM의 EDS 분석을 실시하기로 하였다[11].
황인복과 박희원 (1993)	제39회 전국과학전람회 감잎을 이용한 중금속이온 흡착에 관한 연구	흡착실험을 할 때 각 시료들의 염분을 없애기 위해 여러 번 세척하고 건조시키는 방법을 참고하였다. 교반 실험 시 용액 50 mL에 시료 0.5 g을 교반시켰다는 실험 방법을 응용하였다. 교반 시킨 후 원심분리기를 이용하였다는 것을 응용하였다. 이 논문의 실험에서 감잎이 카드뮴을 가장 많이 흡착하였다는 결과를 보고 확인한 차이를 보여줄 수 있다고 생각하여 본 연구에 중금속으로 카드뮴을 선택한 것에 도움을 주었다[12].
장철순과 김민 (1999)	제45회 전국과학전람회 식물 재료를 이용한 중금속 흡착에 관한 탐구	흡착실험을 할 때 변인통제에 표면적을 일정하게 하기 위해서 각 시료들을 체에 거르는 실험 방법을 참고하였다. 교반 시 15 °C에 48시간에 150 rpm으로 교반시켰다는 실험 방법을 응용하였다. 실험 결과 해조류 중 김, 파래, 미역, 다시마 순으로 중금속 흡착이 높음을 알 수 있었고 이에 본 연구의 연구 시료로 해조류를 선택한 것에 도움을 주었다[13].

III. 연구 방법 및 절차

1. 카드뮴 농도에 따른 RcBr 발아 및 성장 차이 연구

김영남은 카드뮴 농도에 따른 애기장대의 발아율을 측정하기 위해 100 μM, 200 μM, 300 μM, 400 μM, 500 μM CdCl₂ 수용액을 이용하였다[15]. 이와 마찬가지로 카드뮴의 농도에 따라 RcBr의 발아율을 측정하기 위해 동일한 방법을 사용하였다. 이때, 10 mM CdCl₂ 수용액을 먼저 제작한 후 증류수로 희석하여 최종적으로 100 μM, 200 μM, 300 μM, 400 μM, 500 μM CdCl₂ 수용액과 고농도에서 발아율과 성장차이를 알아보기 위해 1,000 μM 수용액을 추가적으로 만들어 사용하였다.

RcBr의 발아율과 성장차이를 비교하기 위해 [Fig. 2]의 (a), (b)와 같이 나무와 하드보드지를 이용하여 경사대 제작하였으며, RcBr 종자가 들어 있는 페트리접시를 올려놓았을 때 약 45° 각도가 되도록 하여 줄기와 뿌리의 생장이 아래 위를 향하게 성장할 수 있도록 하였다. 알루미늄박을 붙인 이유는 제작한 경사대가 카드뮴에 오염되는 것을 방지하기 위함이다. [Fig. 2]의 (c)는 경사대를 이용하여 RcBr 종자의 발아율과 성장차이를 알아보기 위해 실제 실험한 사진이다. 28개의 페트리접시를 준비하여 솜을 페트리접시의 크기에 맞게 동그랗게 자른 후 깔고, 증류수와 제작한 100 μM, 200 μM, 300 μM, 400 μM, 500 μM, 1,000 μM CdCl₂ 수용액을 각각 30 mL씩 측정하여 각각의 페트리 접시에 넣었다. 28개의 페트리접시 중 14개는 Purple stem RcBr과 Non-purple stem RcBr 종자를 증류수와 카드뮴 농도별로 넣어 있는 페트리접시에 각각 9개씩 넣은 후 수평하게 실험대에 올려놓고 1일 경과 후 발아율을 측정하였고, 나머지 14개는 각 RcBr 종자를 4개씩 페트리접시에 넣고 경사대에 올려놓은 후 성장 차이를 비교하였다. 성장차이를 정확하게 비교하기 위해서 증류수와 농도별 RcBr 종자를 검정색 하드보드지 위에 올려놓은 후 비니어 캘리퍼스를 이용하여 전체 길이, 줄기 및 뿌리의 길이를 측정하고, 표로 작성하여 결과 값을 도출하였다.

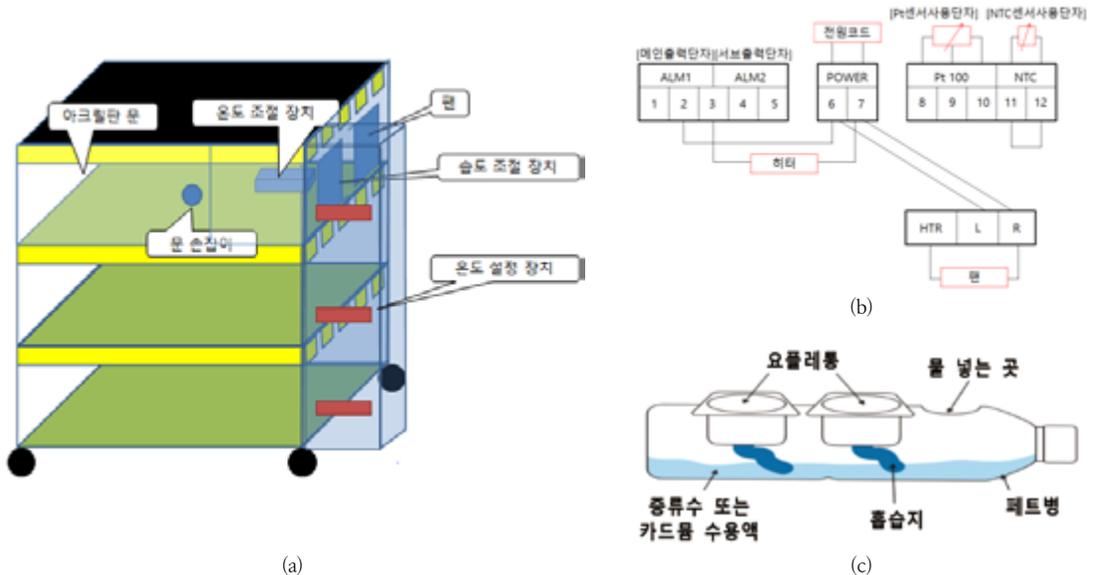


[Fig. 2] Ramp production process and application.
 (a) Step 1 of Creating Ramp, (b) Step 2 of Creating Ramp, (c) Application of Ramp.

2. 특정 농도의 카드뮴으로 오염된 토양별 RcBr의 생장 차이 비교 연구

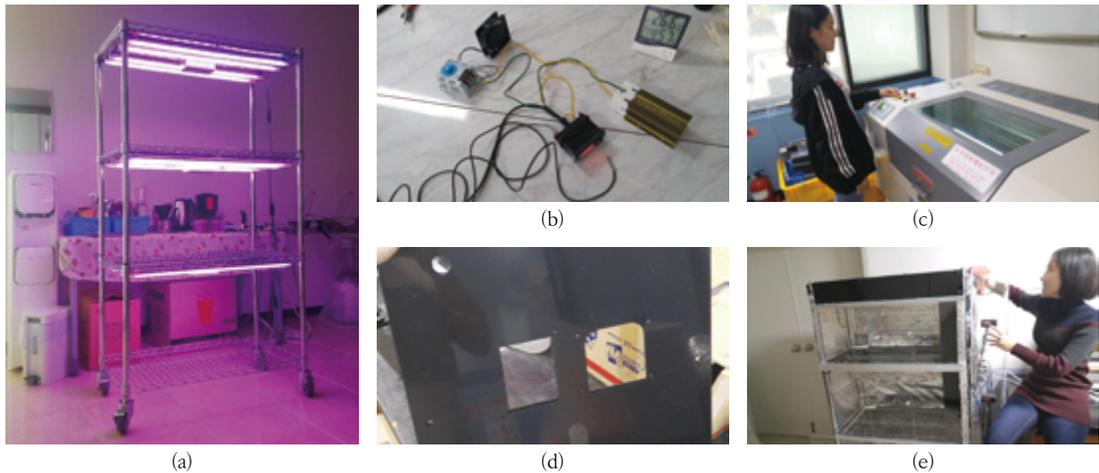
가. RcBr 생장 차이 비교 연구를 위한 식물생장장치 제작

우선 특정 농도의 카드뮴으로 오염된 토양별 RcBr 개체 생장 차이 비교를 위해 [Fig. 3]의 (a)와 같이 식물생장장치를 고안하였다. RcBr의 생장을 위해서는 연속 광 조건과 24~29 ℃의 온도, 30~70 %의 습도가 유지되어야 한다[1]. 또한, 적색과 청색광이 식물 생장에 유리하다는 선행연구 분석 결과를 바탕으로 적색, 청색의 LED 광원을 사용하였으며, [Fig. 3]의 (b)와 같이 RcBr 생장에 필요한 적절한 온도와 습도를 유지할 수 있도록 습도조절장치, 온도조절장치, 히터, 환풍기를 이용하여 전기도면도를 작성하였다[9]. 우선 식물생장장치는 RcBr 생장 결과의 신뢰성을 확보하기 위해 많은 데이터 값을 얻을 수 있도록 1층, 2층, 3층으로 식물을 생장시킬 수 있도록 뼈대를 만들었으며, 청색과 적색 LED를 윗면에 설치하였다. 온도와 습도를 적절히 유지하기 위해서는 닫힌 공간을 만들어야 했으며, 이에 레이저커팅기를 사용하여 아크릴판을 절단하여 사용하였다. 식물생장장치 내부는 알루미늄 호일을 붙여 반사판을 만들어 LED 빛이 산란되게 하여 광합성 효율을 높이고자 하였다. 또한, 실험을 위해 RcBr의 생장에 필요한 화분을 제작하기로 하였으며, 이때 [Fig. 3]의 (c)와 같이 1.5 L 페트병, 요플레통, 흡습지(1 cm × 6 cm)를 활용하여 재활용 페트병 심지화분의 모형을 작성하고 제작하여 사용하였다.



[Fig. 3] Plant Growth Equipment Model and Plastic Bottle Pot Model. (a) Plant growth system design for plant growth, (b) Electrical schematics of equipment needed for plant growth, (c) Plastic Bottle Pot design for plant germination and growth.

[Fig. 4]는 [Fig. 3]의 (a), (b)의 식물성장장치 설계도면에 따라 제작하는 과정이다.



[Fig. 4] Plant Growth Equipment Manufacturing Process.

(a) Plant growth equipment frame with LED lighting, (b) Configuration of electrical devices required for Plant Growth Equipment, (c) Acrylic cutting with laser cutting machine, (d) Cutting acrylic plate (part), (e) Equipment attachment process.

나. 카드뮴 농도에 따른 Purple Stem RcBr과 Non-purple Stem RcBr 개체의 성장 차이 비교

줄기신장저해, 갈변현상과 같이 카드뮴의 식물성장저해를 안토시아닌이 억제할 수 있는지 확인하기 위해서 안토시아닌이 발현되는 Purple Stem RcBr과 발현되지 않는 Non-purple Stem RcBr을 이용하여 <Table 3>과 같이 카드뮴 농도에 따라 정량적으로 성장차이를, 정성적으로는 RcBr 개체들의 갈변현상이 나타나는지 관찰을 통해 확인하고자 하였다. 우선 RcBr 종자를 하루정도 발아 시킨 후 앞서 제작한 재활용 페트병 심지화분에 동일한 양의 배양토를 넣어 토양의 효과를 최소화 하였으며, 또한 N.P.K가 함유된 비료 알갱이를 세알씩 동일하게 넣어 통제하였다. 모두 같은 조건에서 대조군인 증류수가 담긴 페트병과 실험군인 100 μM, 200 μM, 300 μM, 400 μM의 카드뮴 수용액에서 RcBr 종자를 파종하되, 파종 시 편셋을 이용하여 뿌리가 아래로 가도록 심고 흙을 살짝 덮어주었다. 또한, 변인통제를 통한 객관적인 수치를 얻고 많은 양의 데이터를 얻기 위해 제작한 식물성장장치의 1층, 2층, 3층 모두를 사용하여 실험데이터 값을 얻었다. 데이터 결과 값 처리는 RcBr의 성장 주기를 고려하여 5일과 7일 뒤, 생장한 RcBr 줄기의 길이를 버니어 캘리퍼스를 이용하여 측정하였고, 이후 Excel 2013을 이용하여 세 개의 층에서의 데이터의 평균값을 내었다.

<Table 3> Experimental design of RcBr length measurement for contaminated soil with specific concentration of cadmium

식물성장장치	종자별	카드뮴 농도	대조군		실험군			
			증류수	100 μM	200 μM	300 μM	400 μM	
3층	실험군(1)	⊖	P.S.	P.S.	P.S.	P.S.	P.S.	
		⊕	N.P.S.	N.P.S.	N.P.S.	N.P.S.	N.P.S.	
2층	실험군(2)	⊖	P.S.	P.S.	P.S.	P.S.	P.S.	
		⊕	N.P.S.	N.P.S.	N.P.S.	N.P.S.	N.P.S.	
1층	실험군(3)	⊖	P.S.	P.S.	P.S.	P.S.	P.S.	
		⊕	N.P.S.	N.P.S.	N.P.S.	N.P.S.	N.P.S.	

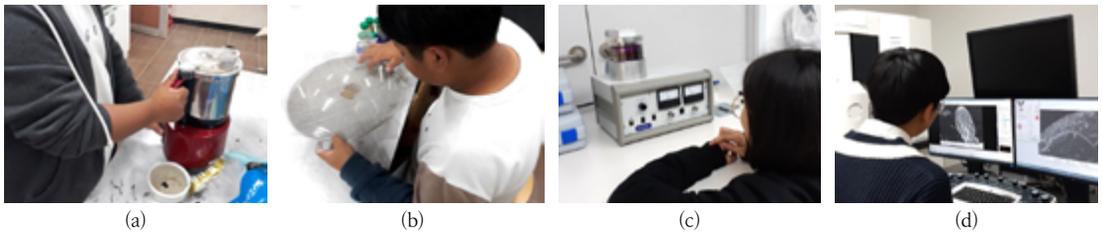
(⊖) : 안쪽 요플레통 ⊕ : 바깥쪽 요플레통

또한, 카드뮴의 농도가 저농도에서 고농도로 커질수록 RcBr의 생장이 어떻게 저해되는지, 그리고 Purple Stem RcBr과 Non-purple Stem RcBr의 생장차이 및 Purple Stem RcBr의 줄기 색깔이 어떻게 변하는지 알아보기 위해 과중 후 14일이 경과한 개체를 선별하여 흙을 털어낸 후 검은색 하드보드지에 조심스럽게 올려놓고 관찰하였다. 세부사항 (날짜, 온도, 습도, 중금속의 농도 및 RcBr 종자 이름)을 라벨지를 이용하여 기록하였으며, 식물이 마르기 전에 카메라로 촬영한 후 정성적으로 비교하였다.

3. 커피부산물과 해조류의 카드뮴 흡착 여부 확인 연구

가. 커피부산물 및 해조류(파래, 툇, 다시마, 미역)의 표면 구조 차이 비교

[Fig. 5]와 같이 커피부산물 및 해조류(파래, 툇, 다시마, 미역)의 표면 구조 차이를 비교하기 위해 분쇄기를 이용하여 분쇄하였다. 분쇄한 시료들의 표면적이 실험 결과에 영향을 주지 않도록 체를 이용하여 커피부산물, 해조류(툇, 미역, 다시마, 파래)의 물질들을 같은 크기로 분류하였다. 분류된 커피부산물과 해조류(파래, 툇, 다시마, 미역)를 카본테이프가 붙어있는 스티브에 올린 후 이온조사 코팅기를 이용하여 시료 표면을 코팅하였다. 코팅된 시료들은 주사 전자 현미경(SEM)으로 배율, 명암, 밝기, 초점 등을 조절한 후 각 시료들의 표면 구조를 촬영하여 저장하였다. SEM으로 촬영한 사진 결과를 통하여 각 시료의 구조를 다공성 구조와 거친구조로 기준을 정해 분류하였다.

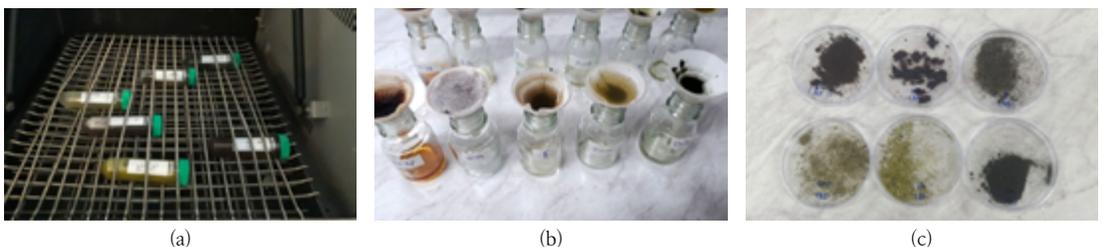


[Fig. 5] Observation process of surface structure of sample. (a) Grinding process using grinder, (b) Sieving to control sample size, (c) Sample ion coating using ion irradiation coater, (d) Imaging SEM for surface structure.

나. 커피부산물 및 해조류(파래, 툇, 다시마, 미역)의 카드뮴 흡착 여부 EDS 분석

1) 교반 및 카드뮴 흡착 실험

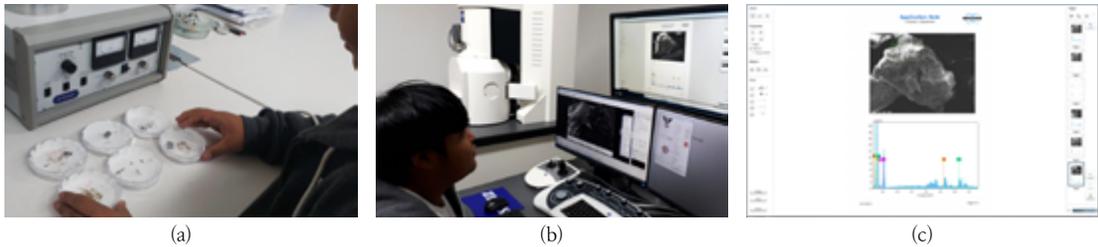
0.1 M 카드뮴 수용액을 제작하여 50 mL를 코니컬 튜브에 넣었다. 실험 가에서 분쇄한 각각의 시료(커피부산물, 파래, 툇, 다시마, 미역)를 2 g씩 카드뮴 수용액이 든 코니컬 튜브에 넣었다. 같은 조건에서의 시료별 카드뮴 흡착 여부를 확인하기 위해 [Fig. 6]과 같이 100 rpm, 24시간으로 세팅된 셰이킹 인큐베이터를 이용하여 교반 흡착 실험을 진행하였으며, 24 시간이 지난 뒤 깔때기에 0.4 μm 여과지를 깔 후 미디어 병에 고정시키고 교반이 끝난 튜브 속 시료를 깔때기에 부어 여과시켰다. 여과된 시료를 증류수 50 ml와 함께 코니컬 튜브에 넣고 교반하여 시료에 흡착되지 못한 카드뮴을 세척하였다. 이후 앞선 방법으로 여과지에 시료를 거르고 건조시켜 EDS 분석 시료로 사용하였다.



[Fig. 6] Experiment of stirring and cadmium adsorption, (a) Process of heavy metal adsorption using shaking incubator(100 rpm, 24 hours), (b) Washing Stirred sample and filtration, (c) Dried sample.

2) 카드뮴 흡착 여부 EDS 분석

EDS 분석 시료(커피부산물, 파래, 톳, 다시마, 미역)를 카본테이프가 붙어있는 스티브에 묻힌 후 이온조사 코팅기를 이용하여 시료를 코팅하였다. 코팅된 시료를 SEM을 이용하여 표면 구조를 관찰한 후 사진으로 저장하였다. SEM 프로그램과 EDS 분석 프로그램을 연동한 후 탄소, 산소, 질소, 카드뮴, 염소들의 존재를 피크 값으로 확인한 후 정량 분석을 실시하였다. 하나의 에어리어를 설정하기 위해 SEM으로 스캔한 사진의 전자밀도가 높은 지역과 낮은 지역의 EDS를 분석하여 어느 부분이 카드뮴 흡착이 잘 되었는지를 분석하였다. 이후 카드뮴 흡착이 잘 된 지역에서 건조된 시료의 카드뮴 흡착 여부를 EDS 분석을 통해 확인하였다. 그리고 위 과정의 EDS 결과를 보고서 형태로 저장하였다.



[Fig. 7] Process of EDS analysis for identification of cadmium adsorption.
 (a) Process of Ion irradiation coating, (b) Process of EDS Analysis, (c) EDS Analysis Report.

4. 커피부산물과 해조류의 카드뮴으로 오염된 토양 정화 효과를 식물 성장을 통해 검증

가. 카드뮴으로 오염된 토양에서 커피부산물 및 해조류가 Purple Stem 및 Non-purple Stem RcBr 생장에 미치는 영향 비교

실험에 앞서 변인통제를 위해 제작한 재활용 페트병 심지화분에 얼마만큼의 흙이 담겨지는지 확인하기 위해 전자저울을 이용하여 측정된 결과 25 g이었다. 이에 흙과 굵게 간 시료(커피부산물, 파래, 톳, 다시마, 미역)의 비율이 49 : 1이 되도록 전자저울을 이용하여 측정 [2%의 배양토 제작 : 흙의 양(24.5 g)+굵게 간 시료의 양(0.5 g)]한 후 사용하였다. 카드뮴으로 오염된 각각의 배양토에서 Non-purple Stem RcBr의 생장에 어떤차이를 보이는지 확인하기 위해 <Table 4>와 같이 실험을 설계하였으며, 이때 400 μM 카드뮴 수용액을 하루에 2회 3 mL씩 흙에 넣어주었고 파종 후 14일 경과된 시점에서 버니어캘리퍼스를 이용하여 개체 성장 길이를 측정하여 평균값을 도출하였다. 또한 평균값과 근사하게 성장한 각 개체를 선별하여 흙을 털어낸 후 검은색 하드보드지에 조심히 올려놓고 관찰하였다. 세부사항 (날짜, 온도, 습도, 증급속의 농도 및 RcBr 종자 이름)을 라벨지를 이용하여 기록하였으며, 식물이 마르기 전에 카메라로 촬영한 후 정성적으로 비교하였다.

<Table 4> Experimental design of the effect of coffee and seaweed on Non-purple RcBr's growth in cadmium exposure

식물생장장치	구분	대조군	실험군			
1층	배양토의 종류	흙	커피*	파래*	톳*	다시마*

(* : 2% 배양토=시료 0.5 g+흙 24.5 g)

Purple Stem RcBr에서 각각의 시료가 카드뮴의 유무에 따라서 어떠한 성장 차이를 보이는지 알아보기 위해서 <Table 5>와 같은 조건으로 대조군과 실험군으로 설정하여 RcBr 종자를 파종하였으며, 증류수 및 400 μM 카드뮴 수용액을 하루에 2회 3 ml씩 흙에 넣어 주고 파종 후 14일 경과된 시점에서 버니어캘리퍼스를 이용하여 개체 성장 길이를 측정하여 평균값을 도출하였다. 또한, 앞선 방법과 마찬가지로 검은색 하드보드지에 올려 놓은 후 카메라로 촬영한 후 정성적으로 비교하였다.

〈Table 5〉 Experimental design of purple stem RcBr's growth by cadmium exposure and adsorption of cadmium

식물생장장치	배양토의 종류	400 μM 카드뮴 주입 여부	대조군			실험군		
			주입하지 않음 (증류수 3 ml 주입)			주입함 (카드뮴 수용액 3 ml 주입)		
3층	세트1	㉠	흙	커피*	툇*	흙	커피*	툇*
		㉡	흙	파래*	다시마*	흙	파래*	다시마*
2층	세트2	㉠	흙	커피*	툇*	흙	커피*	툇*
		㉡	흙	파래*	다시마*	흙	파래*	다시마*

(㉠ : 안쪽 요플레통 ㉡ : 바깥쪽 요플레통 / * : 2 % 배양토=시료 0.5 g+흙 24.5 g)

나. 카드뮴으로 오염된 토양의 정화 방안 추론

배양토의 종류 및 카드뮴 노출 여부에 따른 성장차이를 비교하였다. Purple stem RcBr의 경우 배양토의 종류 및 카드뮴 노출 여부에 따른 Non-purple stem RcBr과 Purple stem RcBr의 성장차이 및 갈변현상 등의 정량적, 정성적 실험결과를 토대로 카드뮴으로 오염된 어떤 배양토에서 RcBr의 생장이 효과적인지 알아보고, 커피부산물과 해조류(파래, 툇, 다시마)의 표면 구조 차이 및 EDS 촬영결과를 바탕으로 결과를 바탕으로 카드뮴으로 오염된 토양의 정화 방안을 추론하였다.

IV. 연구 결과

1. 카드뮴 농도에 따른 RcBr 발아 및 성장 차이 연구 결과

가. 카드뮴 수용액에 직접 노출된 경우 농도별 RcBr 발아율 측정 결과

〈Table 6〉과 같이 정량적으로는 카드뮴 수용액 농도의 500 μM까지 발아율에 큰 차이가 없었으나 1,000 μM에서는 단 하나의 씨앗도 발아가 없었다. 또한, Purple stem RcBr(P.S.)과 Non-purple stem RcBr(N.P.S.)의 발아율 차이를 비교해 본 결과 Purple stem RcBr이 더 발아율이 높을 것으로 예상하였지만 예상과 다르게 발아율에 차이를 보이지 않았다.

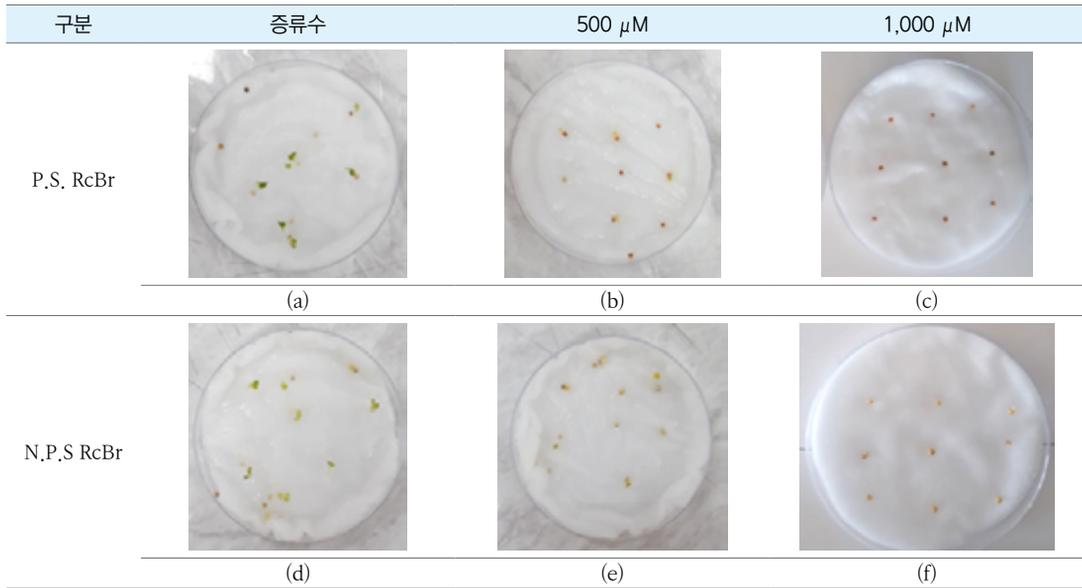
〈Table 6〉 Results of RcBr germination according to cadmium aqueous solution concentration

(평균값, 단위:개)

구분	증류수	100 μM	200 μM	300 μM	400 μM	500 μM	1,000 μM
P.S. RcBr	8	9	9	7	9	7	0
N.P.S. RcBr	8	9	9	9	7	9	0

(평균온도 27.0 °C, 평균습도 40 %)

하지만 [Fig. 8]에서 보듯이 증류수와 다르게 500 μM에서는 발아속도에 영향을 주는 것으로 확인할 수 있었다. 이는 김영남의 Arabidopsis에 관한 카드뮴 농도에 따른 발아실험 연구 결과와 일치함을 보였고, 결과적으로 카드뮴 농도가 일정 이상 높아지면 발아가 되지 않는다는 결론을 내릴 수 있으며, 카드뮴의 농도에 따라 발아 속도가 달라진다는 것을 추론할 수 있었다[15].



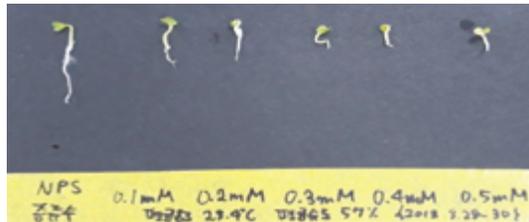
[Fig. 8] Actual photographic results of RcBr germination according to cadmium aqueous solution concentration. (a), (b), (c) shows germination after one day of purple stem RcBr seeds sowing and (d), (e), (f) shows germination after one day of Non-purple stem RcBr seeds sowing (average temperature 27.0°C, average humidity 40%), (a) Distilled water, (b) 500 μ M CdCl₂, (c) 1,000 μ M CdCl₂, (d) Distilled water, (e) 500 μ M CdCl₂, (f) 1,000 μ M CdCl₂.

나. 카드뮴 수용액에 직접 노출된 경우 농도별 RcBr 생장 차이 비교 결과

[Fig. 9], [Fig. 10]과 같이 45° 각도의 경사대에서 성장한 Purple stem RcBr과 Non-purple stem RcBr 모두 카드뮴 수용액의 농도가 높아질수록 생장량이 줄어드는 것을 알 수 있으며, 특히 줄기보다는 뿌리의 생장이 저해됨을 알 수 있었다. 또한, 500 μ M의 카드뮴 수용액 농도에서는 잎의 갈변현상을 관찰 할 수 있었으며, 증류수와 다르게 쾌쾌한 냄새가 났다. 이는 카드뮴이 식물의 성장을 저해할 뿐만 아니라 엽록소 생성에 영향을 미친다는 것을 추론할 수 있었다. 이는 김김영남의 Arabidopsis의 카드뮴 농도에 따른 뿌리 생장 억제에 관한 연구결과와 일치함을 보였고, 이러한 원인은 우복희의 논문에서 보듯이 카드뮴이 식물 내에 과다하게 축적되면 엽록소의 구조적 변화와 엽록소 함량 감소에 의한 광합성률의 감소, 물과 무기 영양분 흡수의 감소 및 갈변현상 등과 같은 증상을 보이다 결국 고사한다는 내용과 일치한다[3, 15].



[Fig. 9] Purple stem RcBr growth difference by cadmium aqueous solution concentration



[Fig. 10] Non-purple stem RcBr growth difference by cadmium aqueous solution concentration

<Table 8>은 제작한 경사대에 파종한 후 2일이 경과한 RcBr 각 4개체를 버니어캘리퍼스를 이용하여 평균 생장 길이 (mm)를 나타낸 것이다. 실험 결과에서 뿌리 대 줄기의 비율 값에서 볼 수 있듯이 P.S. RcBr과 N.P.S. RcBr 모두 카드뮴 수용액의 농도가 높아질수록 뿌리 생장률이 크게 저하됨을 알 수 있었다. 이는 김영남과 우복희 논문에서 카드뮴이 생체량 감소, 줄기 및 뿌리의 신장억제, 치사 등의 독성효과를 나타낸다는 연구 결과와 일치한다. 이러한 독성효과는 카드뮴에 의한 산화적 스트레스 및 대사에 관련된 효소 억제, 필수 영양소 결핍, 엽록소 합성 억제, 호흡 억제, 세포막 변화 등 다양한 독성효과를 통하여 유도된다고 한다[3, 15]. 하지만 안토시아닌을 생성하는 Purple Stem RcBr이 Non-purple Stem

RcBr보다 카드뮴의 영향을 덜 받을 것으로 예상하였지만 예상과 다르게 성장차이가 크게 나지 않았으며, 오히려 Non-purple Stem RcBr이 고농도에서 약간 더 잘 성장한다는 결과가 나왔다. 이는 우복희의 결과에서 안토시아닌이 카드뮴 복합체를 형성하여 식물 성장 저해를 극복한다는 연구 결과와는 다른 결과 인데, 이 연구는 안토시아닌을 생성하지 않는 식물체와의 비교를 하지 않았기 때문에 잘못된 결과라고는 말할 수 없다. 우복희의 논문 결과는 카드뮴의 농도가 높을수록 안토시아닌이 많이 형성되고, 이로 인해 카드뮴에 의한 광합성률의 감소를 극복하는 기작에서의 도움을 준 것이기 때문에 빛 조건이 없을 때의 RcBr의 발아 및 성장에 대한 우리의 실험 결과는 발아에 관해 카드뮴에 대한 안토시아닌이 영향을 미치지 않는다는 결론을 내리는 것이 타당하다고 판단된다[3].

〈Table 8〉 RcBr individual growth length results by concentration of cadmium aqueous solution

(평균값, 단위:mm)

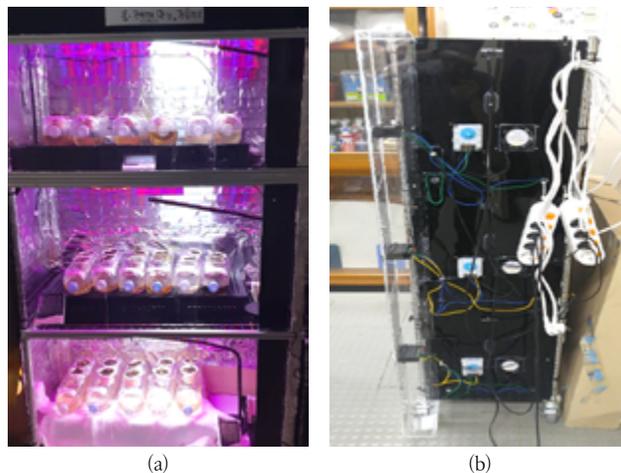
구분	대조군		실험군				
	증류수	100 μ M	200 μ M	300 μ M	400 μ M	500 μ M	
P.S. RcBr	전체 길이	42.00	29.48	17.39	7.48	5.21	5.02
	줄기 길이	10.19	6.42	4.91	4.25	2.83	3.21
	뿌리 길이	31.81	23.06	12.48	3.23	2.38	1.81
	뿌리/줄기 비율	3.12	3.59	2.54	0.76	0.84	0.56
N.P.S. RcBr	전체 길이	31.33	16.63	15.60	9.84	9.25	6.91
	줄기 길이	8.71	9.72	9.15	5.62	5.85	3.92
	뿌리 길이	22.62	6.91	6.45	4.22	3.40	2.99
	뿌리/줄기 비율	2.60	0.71	0.70	0.75	0.58	0.76

(과종 후 2일 경과, 평균온도 27.4 $^{\circ}$ C, 평균습도 52 %)

2. 특정 농도의 카드뮴으로 오염된 토양별 RcBr의 성장 차이 비교 연구

가. RcBr 개체 성장 차이 비교를 위한 식물성장장치 제작 결과

제작한 식물성장장치는 [Fig. 11]과 같다. RcBr과 광원과의 거리를 가깝게하기 위해 트레이를 구매하여 식물성장장치의 각 층에 두었으며, 보온을 위해 바닥에 솜을 깔아 최종적으로 식물성장장치를 완성하였다.



[Fig. 11] Result of Plant Growth Equipment (a) Front of Plant Growth Equipment, (b) Side of Plant Growth Equipment

나. Purple Stem RcBr과 Non-purple Stem RcBr 개체의 성장 차이 비교 결과

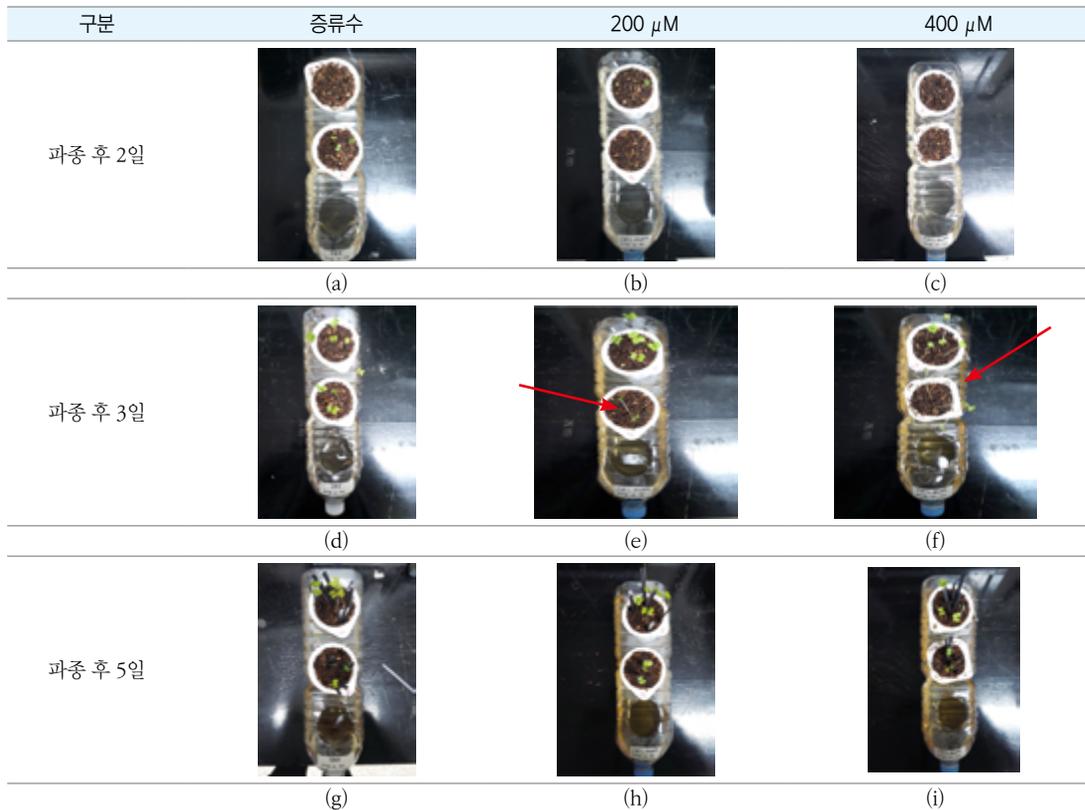
〈Table 9〉는 식물생장장치 1층, 2층, 3층의 파종 후 5일과 7일에 RcBr의 성장 길이를 버니어캘리퍼스를 이용하여 측정하고 평균값을 기록해 놓은 것이다. 〈Table 9〉 결과를 보면 식물생장장치와 제작한 페트병 심지화분에서 키운 P.S. RcBr 과 N.P.S. RcBr 모두 고농도의 카드뮴에 노출되었을 경우 성장률이 감소하는 경향을 보였고, 이는 연구 1과 같은 결과임을 알 수 있다. 즉, 카드뮴에 직접 노출이 되었든 오염된 토양 속 카드뮴이든 고농도로 갈수록 성장을 저해함을 알 수 있다.

〈Table 9〉 Comparison of ‘purple stem RcBr’ and ‘Non-purple stem RcBr’ growth by the concentration of cadmium aqueous solution

(평균값, 단위:mm)

구분	파종	증류수	100 μ M	200 μ M	300 μ M	400 μ M
P.S. RcBr	5일 경과	44.60	41.70	30.40	33.10	37.40
	7일 경과	55.60	57.75	52.94	42.18	44.37
	성장률	1.25	1.38	1.74	1.27	1.19
N.P.S RcBr	5일 경과	40.10	33.00	33.90	32.00	33.00
	7일 경과	76.04	45.94	46.83	43.76	43.43
	성장률	1.90	1.39	1.38	1.37	1.32

(평균온도 24.5 $^{\circ}$ C, 평균습도 42 %)



[Fig. 12] Actual result of purple stem RcBr(P.S. RcBr) and Non-purple stem RcBr(N.P.S. RcBr) growth difference by the concentration of cadmium aqueous solution. Upper: P.S RcBr, lower: N.P.S. RcBr, average temperature 24.5 $^{\circ}$ C, average humidity 42%, (a), (b),(c) show the growth of 2 days after sowing, (d), (e), (f) show the growth of 3 days after sowing and (g), (h), (i) show the growth of 5 days after sowing, (a), (d), (g) show germination in distilled water, (b), (e), (h) show germination in 200 μ M CdCl₂ and (c), (g), (i) show germination in 200 μ M CdCl₂.

하지만, <Table 9> 결과만 보면 안토시아닌을 생성하는 P.S, RcBr이 안토시아닌을 생성하지 않는 N.P.S, RcBr보다 고농도의 카드뮴 농도에서 카드뮴에 의한 성장저해 크다는 결론을 내릴 수도 있지만 [Fig. 12]의 P.S, RcBr과 N.P.S, RcBr의 카드뮴 농도에 따른 생장 차이 실제 사진을 살펴보면 카드뮴의 농도가 높아질수록 N.P.S, RcBr의 경우는 줄기가 더욱 가늘게 길어져 쓰러지는 경향이 있었으며, 이후 고사하는 개체들도 관찰되었다. 반대로 P.S, RcBr의 경우는 고농도의 경우에 단지 줄기의 신장이 더디지만 상대적으로 줄기의 굵기가 굵고, 위로 곧바로 성장함을 알 수 있었다. 이는 안토시아닌이 카드뮴의 식물 생장에 미치는 독성 효과를 감소시킨다는 우복희 연구 결과와 일치한다. 이러한 결과는 중금속 저항성 식물로 토마토와 같은 안토시아닌이 풍부한 식물이 식물을 이용한 환경 정화 기술의 산업으로 이용될 수 있는 하나의 대안이 될 수 있다[3].

이후 파종 후 14일차가 된 P.S, RcBr과 N.P.S, RcBr의 생장 차이를 비교해본 결과 원래 RcBr의 경우 14일이 지나면 최대 개체 생장을 보이며, 개화하는 것이 타당하나 광조건과 온도, 습도가 적절치 않게 되면 생활사가 길어질 수 있다는 사실을 자문을 통해 알게 되었고, [Fig. 13], [Fig. 14]와 같이 떡잎 이외에 본잎이 나와 실험 결과 값을 비교하였다. 실험 결과에서 보듯이 장시간 고농도에서 카드뮴에 노출되면 생장이 저해된다는 것을 알 수 있었으며, 잎이 외형적으로 기형을 일으켜 말려 올라가는 경향을 보였다. 특히, N.P.S, RcBr의 경우 P.S, RcBr과 비교하면 고농도의 카드뮴 농도에서 고사한 개체들이 많이 발견되었을 뿐만 아니라 일부 개체에서는 잎의 갈변현상이 관찰되었다. 이와 대조적으로 P.S, RcBr의 경우 카드뮴에 대해 저항성을 지니고 있는 것을 확인하였으며, 400 μ M에서는 안토시아닌의 영향으로 뚜렷한 보라색 줄기가 관찰된 것으로 보았을 때, 안토시아닌이 카드뮴의 생장 저해효과에 대해 저항성을 지니게 한다는 사실을 확신할 수 있었다.



[Fig. 13] Difference of Purple stem RcBr growth by the concentration of contaminated soil with cadmium



[Fig. 14] Difference of Non-purple stem RcBr growth by the concentration of contaminated soil with cadmium

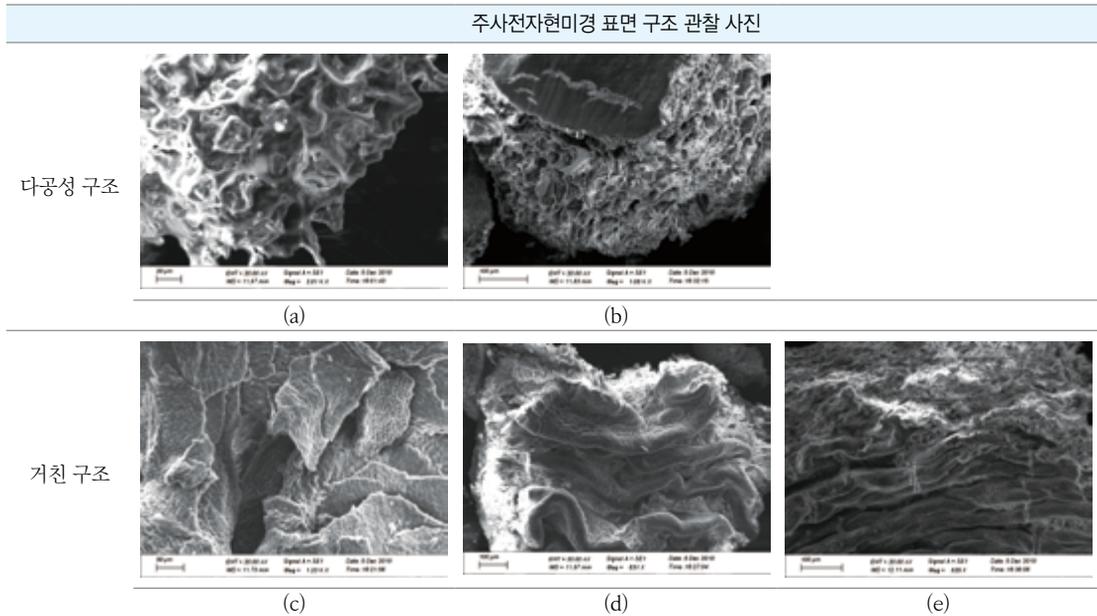
3. 커피부산물과 해조류의 카드뮴 흡착 여부 확인 연구

가. 커피부산물 및 해조류(파래, 툇, 다시마, 미역)의 표면 구조 차이 비교 결과

장철순과 김민의 연구에서 식물재료 중 해조류의 카드뮴 흡착능력을 원자흡광광도계(AAS)를 이용하여 실험한 결과 김, 파래, 미역, 다시마 순으로 카드뮴의 흡착능력이 뛰어난 것을 알 수 있었다[13]. 하지만 이러한 해조류가 어떤 구조에 기인하여 카드뮴을 흡착하는지는 설명하지 못하였으며, 이에 우리는 해조류 중 김을 제외하고 툇을 포함하여 파래, 툇, 다시마, 미역을 주사전자현미경(SEM)을 통해 관찰해보고 구조 차이를 비교해 보고자 하였다. 또한, 고태상과 임성훈의 논문에서 커피 부산물이 토양의 중금속 흡착에 효과가 있음을 검증하였고, 이는 커피부산물의 다공성 표면구조가 기인한다는 것을 설명하고 있었으며, 우리는 실제 그러한지 SEM을 통해 확인하고자 하였다[7, 8].

[Fig. 15]는 커피부산물 및 해조류(파래, 툇, 다시마, 미역)의 표면 구조를 주사전자현미경(SEM)을 통해 관찰한 후 다공성 구조와 거친 구조로 분류기준을 정하여 분류해 놓은 것이다. SEM을 통해 확인해 본 커피부산물은 선행연구와 마찬가지로 다공성 구조를 보이고 있었으며, 다시마 또한 절단면에서 다공성 구조가 관찰되었다. 이러한 다공성 구조는 표면적을 넓혀 특정물질의 흡착에 도움을 주었을 것으로 생각되어진다. 거친 구조로는 파래, 툇, 미역을 분류하였는데, 파래의 경우는 툇과 미역과 다르게 판의 구조로 이루어져 있으며, 표면이 미세한 주름이 쳐 있었으며, 툇과 미역은 외형적으로 주름이 쳐있던 표면 또한 미세한 주름과 절단면의 구멍들이 관찰되었다. 이러한 구조들 또한 표면적을 넓혀 중금속 흡착에 도움을 주

있을 것이라 판단된다.

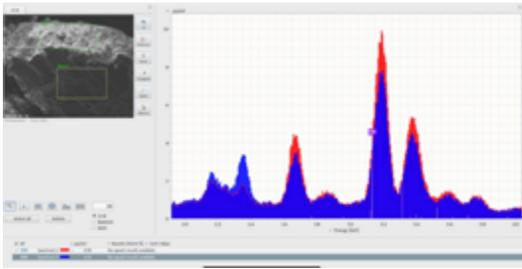


[Fig. 15] Classification according to surface structure of coffee by-products and seaweeds using SEM. (a) coffee by-products, (b) kelp, (c) green laver, (d) seaweed fusiforme, (e) sea mustard, (a), (b) were classified as the porous structure and (c), (d), (e) were classified as the rough structure.

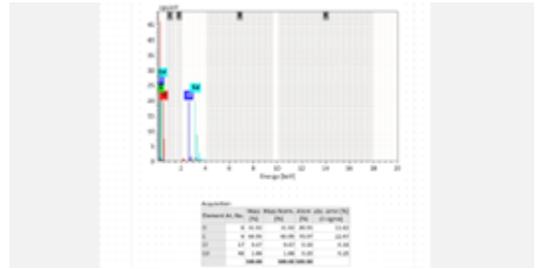
나. 커피부산물 및 해조류(파래, 툇, 다시마, 미역)의 카드뮴 흡착 여부 EDS 분석 결과

커피부산물 및 해조류가 실제 카드뮴을 흡착하는지 알아보기 위해 곱게 간 해조류 및 커피찌꺼기 가루를 각기 카드뮴 400 μM과 섞고, 100 rpm으로 24시간 교반한 후 거름종이로 걸러 건조시켜 EDS 분석 결과 커피부산물과 해조류에서 모두 카드뮴이 관찰되지 않았다. 이러한 실험 결과에 당황하여 EDS 전문 업체에 자문해본 결과 표면에 흡착된 카드뮴의 양이 매우 적은 경우 EDS로서는 분석하기 어렵다는 사실을 알게 되었다. 이에 카드뮴의 농도를 0.1 M로 높여 카드뮴 교반 흡착실험을 동일하게 진행한 후 EDS로 분석하였다.

흡착된 카드뮴을 검출하기 위해 EDS 분석 시 커피부산물과 해조류 표면의 어떤 지역을 분석할지 결정하기 위해 파래를 이용하여 전자밀도가 높은 지역과 낮은 지역을 구분한 후 지정한 구역의 면적을 동일하게 하여 피크 값의 차이를 알아보았다. [Fig. 16]과 같이 전자밀도가 높은 지역(빨간색 면적)이 낮은 지역(파란색 면적)보다 카드뮴의 높은 피크 값을 나타냈으며, 이에 모든 시료에서 전자밀도가 높은 지역을 분석하기로 하였다. 이는 이현용 등의 연구에서 전자밀도차이에 따른 중금속 흡착정도를 파악할 수 있다는 결과와 동일한 방법을 사용한 것이다[11]. 다음으로 [Fig. 17]과 같이 각 피크 값이 의미하는 바를 알아보기 위해 정량 분석을 실시하였고, 실시된 정량 분석 결과는 각 원소의 상대적인 질량 값을 의미하며, [Fig. 16]의 결과와 같이 어떤 구역을 설정하여 분석하느냐에 따라 피크 값이 달라지기 때문에 정확한 비교는 할 수 없지만 카드뮴의 피크 값이 나온다면 흡착이 되었다는 것을 알 수 있으며, 전자밀도를 높은 지역을 설정하였기 때문에 정확하지는 않지만 대략적으로 흡착정도를 비교는 할 수 있을 것이라 판단하였다.



[Fig. 16] Comparison of adsorption of cadmium in regions where the electron density differs from the surface of kelp (red: high electron density region, blue: low electron density region)

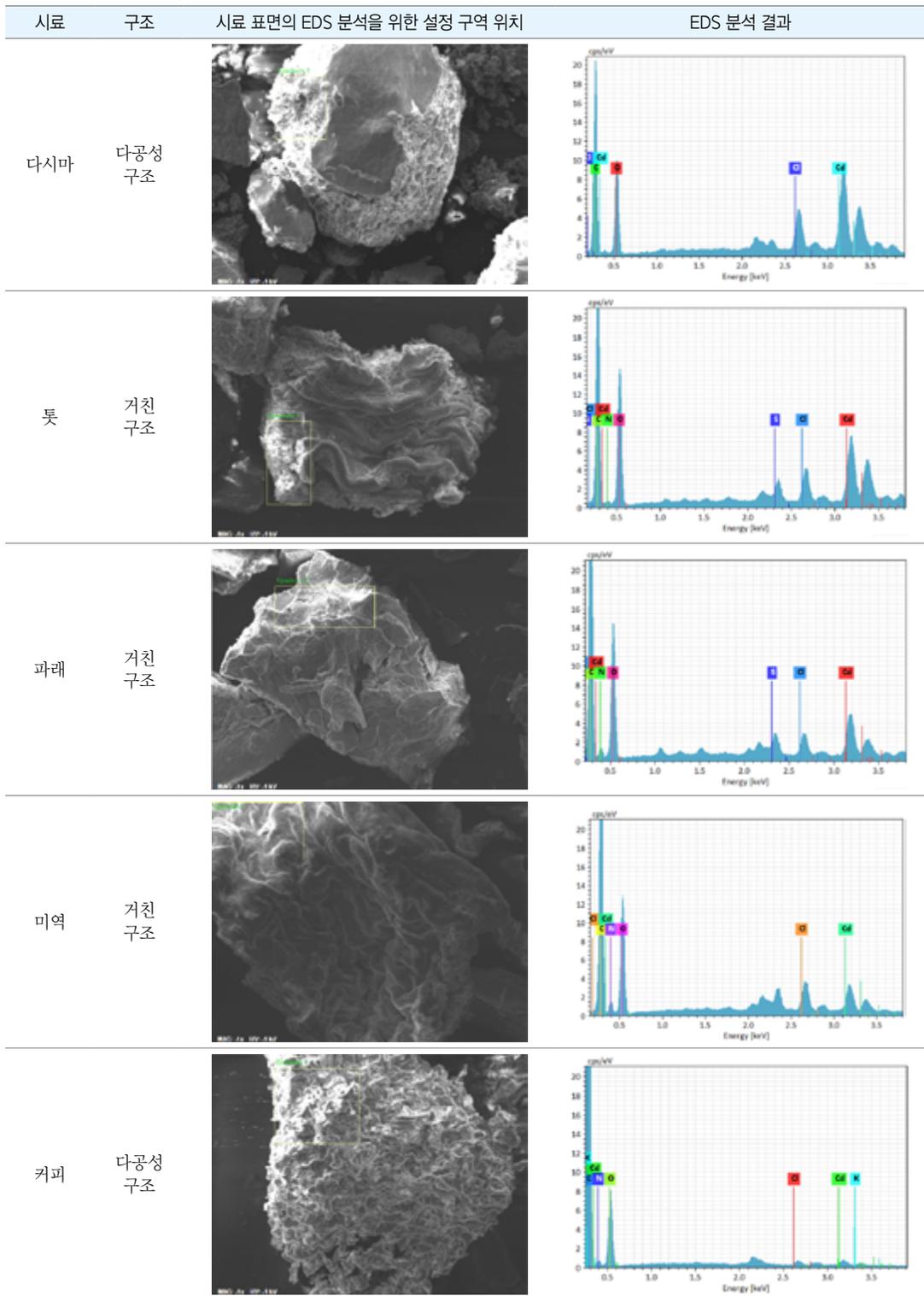


[Fig. 17] Peak value quantitative analysis results by element in EDS analysis

EDS는 X선 검출기를 이용하여 특정 원소를 정성적으로 검출하는데, 이는 원자의 전자가 에너지 준위가 낮아지면서 방출하는 X선 피크의 값을 데이터베이스 값과 대조함으로써 특정원소의 유무를 알아내는 것이다. 이때, 정성 분석에 나타나지 않는 원소는 없는 원소이거나 측정 한계에서 벗어난 것으로 판단하였다. 이때, 정확한 분석을 위해서는 X선 검출기를 점검해야 하는데, 그러기 위해서는 Mn 시료를 이용하였다[14]. 그러나 우리 학교에 있는 EDS는 Mn 시료를 이용한 피크의 점검을 한 적이 없어 [Fig. 18]에서 보는 것처럼 특정원소의 위치가 특정 피크 값과 일치해야하나 산소 피크부터 확실히 밀리는 것이 관찰되었다. 따라서 산소의 피크가 밀린 것을 이용한 계산을 통해 카드뮴 수용액(CdCl₂)의 주성분인 카드뮴(Cd)과 염소(Cl)의 피크 위치를 알아내었다.

[Fig. 18]과 같이 해조류는 다시마, 툇, 파래, 미역 순으로 카드뮴 흡착 능력이 높음을 알 수 있었으며, 장철순과 김민희의 연구 결과와 다르게 다시마가 파래와 미역보다도 카드뮴 흡착 능력이 높다는 결과가 나왔다. 이는 SEM으로 관찰하였을 때, 다시마는 다공성 구조를 이루고 있으며, 다른 해조류 보다 거친 정도가 커서 표면에 존재하는 작용기와 카드뮴의 반응이 쉽게 일어날 수 있는 표면구조를 갖고 있기 때문이라 판단되었다. 하지만 고태상과 임성훈의 논문에서 다공성 물질인 커피부산물의 경우 카드뮴 흡착에 관해 효과적이었다는 결과와 다르게 해조류 보다는 흡착 능력이 낮음을 알 수 있었다. 고태상과 임성훈의 논문은 단지 비교 대상 없이 커피가 카드뮴을 흡착하느냐의 여부만을 검증한 것이기 때문에 이러한 결과가 나왔다고 판단되었다[7, 8]. 또한, EDS 분석 결과에서 각 시료의 표면에 존재하는 질소의 피크를 확인해보면 파래와 미역에서 질소의 양이 상대적으로 많음을 알 수 있었다. 결론적으로는 다시마, 툇, 파래, 미역, 커피 순으로 카드뮴을 효과적으로 흡착하며, 식물생장에 필요한 필수 영양소인 질소를 상대적으로 많이 함유하고 있는 파래와 미역을 배양토에 적절한 비율로 섞는다면 중금속으로 오염된 토양에서도 식물생장에 도움을 줄 것이라 판단하였다.

따라서 질소함량이 적지만 카드뮴 흡착력이 높은 다시마, 질소함량이 높으며 카드뮴 흡착능력이 높은 파래를 사용하여 중금속으로 오염된 토양에서의 RcBr의 성장 차이를 비교한다면 토양 정화 방안의 하나의 대안으로 제시할 수 있을 것이라 판단하였다. 즉, 해조류를 통해 토양 속 중금속을 흡착한 후 P.S, RcBr과 같이 안토시아닌을 생성하는 식물의 카드뮴 흡수하고, 안토시아닌이 카드뮴의 독성효과를 저해시킴으로써 식물이 성장할 수 있다면 토양 속 카드뮴이 자연스럽게 식물로 이동할 수 있게 되기 때문에 새로운 토양정화 방안이 될 수 있을 것이라 판단하였다.



[Fig. 18] Analysis of adsorption of cadmium on coffee by-products and seaweeds using EDS. The yellow squares (a) to (e) indicate the location of the set zone for the cadmium adsorption-EDS analysis of the sample surface, (a) is the sea mustard, (c) is the green laver, (d) is the sea mustard, (e) is the coffee by-products and (f) to (j) indicate the results of adsorption EDS analysis.

4. 커피부산물과 해조류의 카드뮴으로 오염된 토양 정화 효과를 식물 성장을 통해 검증

가. 카드뮴으로 오염된 토양에서 커피부산물 및 해조류가 Purple Stem 및 Non-purple Stem RcBr 생장에 미치는 영향 비교 결과

〈Table 13〉는 배양토를 달리하여 카드뮴으로 오염된 토양에서 커피와 해조류가 안토시아닌을 생성하지 않는 N.P.S. RcBr의 생장에 미치는 영향을 알아본 실험 결과이다. 흡과 시료의 비율을 2 % 하였으며, 지속적으로 400 μM의 카드뮴에 노출되었을 경우 N.P.S. RcBr의 생장이 많이 저해되기 때문에 대조군과 실험군 모두 앞선 실험과 다르게 일회용 스포이트를 이용하여 하루에 2번씩 간헐적으로 400 μM을 배양토에 처리하였다.

〈Table 13〉과 [Fig. 19]에서 볼 수 있듯이 커피는 N.P.S. RcBr 생장에 크게 영향을 미치지 못했지만 파래의 경우는 대조군보다 평균적으로 3.7 mm 차이의 생장효과를 보였고, 오히려 톳과 다시마의 경우는 생장이 저해되었음을 알 수 있었다. 특히, [Fig. 19]에서 보는 것처럼 톳의 경우는 잎의 변형을, 다시마의 경우 생장뿐만 아니라 잎의 변형도 심각했으며, 결과만 보면 톳과 다시마가 RcBr의 카드뮴 흡수의 촉진을 가속화 하는 것처럼 보였다. 이는 EDS 분석 결과와 같이 다시마와 톳이 카드뮴 흡착력이 매우 높아 간헐적으로 카드뮴을 넣어주었을 때, 흡습지를 따라 카드뮴이 물속으로 배출 되어야 하지만 많은 양의 카드뮴 흡착 통해 토양의 카드뮴 농도를 높게 유지하여 이러한 결과가 나왔을 것으로 예상된다. 또한, 다시마에 결합된 카드뮴의 경우 흡착력이 약해 식물에 의한 양이온 교환능력에 의해 다시마에 붙어있는 카드뮴이 식물 뿌리로 흡수 되어 식물의 성장을 저해 시켰을 것이라 판단된다[10]. 만약 다시마의 경우 카드뮴에 대해 이러한 경향성이 있고, 안토시아닌을 형성하는 P.S RcBr의 경우 카드뮴에 대한 생장 저해가 감소되는 것이 확인이 된다면 안토시아닌의 카드뮴 식물 생장 저해 억제 효과를 검증할 수 있을 것이라 판단하였다.

반대로 커피, 파래의 경우는 카드뮴을 흡착하지만 양이온교환이 되는 물질이 카드뮴이 아니라 각 시료의 다른 물질들이 교환되어 카드뮴에 영향을 덜 받는 것으로 판단된다. 특히, 파래의 경우는 EDS 결과와 마찬가지로 표면의 질소함량이 높게 나타났으며, 이러한 질소 성분의 지속적인 공급으로 식물생장에 좋은 영향을 미쳤을 것이라 판단된다.

〈Table 13〉 Experiment results of the difference of Non-purple stem RcBr growth between coffee and seaweeds in contaminated soil with cadmium

(평균값, 단위:mm)

구분	대조군		실험군		
	흡	커피*	파래*	다시마*	톳*
배양토의 종류	38.5	37.5	41.2	12.7	34.3

(*: 2 % 배양토=시료 0.5 g+흡 24.5 g/파종 후 14일 경과, 평균온도 20 ℃, 평균습도 32 %)



[Fig. 19] The effect of 'coffee and seaweeds' on soil contaminated with cadmium, N,P,S, RcBr Growth Difference Actual Results Photos

앞선 연구는 카드뮴을 넣지 않았을 경우 커피부산물과 해조류가 RcBr 생장에 미치는 영향을 판단할 수 없기 때문에 다른 실험 설계가 필요하였다. 이에 카드뮴 주입여부, 배양토 조건에 따라 새로운 실험을 진행하였고, 앞선 실험과 마찬가지로 일회용 스포이트를 이용하여 하루에 2번씩 간헐적으로 400 μ M을 배양토에 처리하였다.

실험 결과, <Table 14>와 [Fig. 20], [Fig. 21]과 같이 카드뮴의 노출되지 않는 조건에서 커피부산물과 해조류 중에서 파래, 다시마가 흙만 넣고 키웠을 때보다 개체 성장과 본 잎이 나오는 시기가 앞섰으며, 특히, 파래, 커피, 다시마의 경우는 꽃봉오리가 맺혀있음을 확인할 수 있었다. 커피부산물의 경우 커피부산물의 영양염류가 식물생장에 좋은 영향을 미친다는 김현숙의 연구와 일치하는 결과를 보였으며, 해조류 중 특히 파래의 경우는 다시마와 대조적으로 EDS 분석 결과 표면에 질소함량이 많은 것으로 추정해볼 때, 파래의 무기염류가 식물 생장에 도움을 주었을 것이라 판단된다[4, 6]. 톳의 경우는 대조군보다 낮은 성장률을 보였으며, 다른 개체와 다르게 잎의 색깔이 연두색으로 엽록체 생성에 문제가 있음을 확인할 수 있었다. 이는 톳의 표면의 거친 구조가 토양의 공극률을 낮추며, 식물생장에 필요한 필수 영양소의 흡수를 저해할 수 있었다고 판단된다.

<Table 14> Experiment results on the difference of purple stem RcBr growth by cadmium exposure, coffee and seaweed

(평균값, 단위:mm)

구분	대조군		실험군		
	흙	커피*	파래*	다시마*	톳*
증류수 3 ml 주입(2회/일)	40.31	41.43	50.31	42.55	38.27
카드뮴 수용액 3 ml 주입(2회/일)	37.55	42.32	46.38	38.67	37.34

(*: 2 % 배양토=시료 0.5 g+흙 24.5 g/과종 후 14일 경과, 평균온도 23 $^{\circ}$ C, 평균습도 10 %)



[Fig. 20] Results of unexposed to cadmium by culture soil P.S. RcBr growth



[Fig. 21] Results of exposed to cadmium by culture soil P.S. RcBr growth

카드뮴의 노출 여부에 따른 P.S. RcBr 성장차이를 비교해 보면 [Fig. 20], [Fig. 21]과 같이 카드뮴에 노출되지 않은 RcBr 보다는 생장이 저해되었음을 알 수 있었다. 또한 본 잎의 크기와 길이 개화에도 영향을 받는 것으로 확인되었으며, 이는 2.2 연구결과와 일치하는 경향을 보였다. 다만, 카드뮴에 노출된 N.P.S. RcBr과 다르게 P.S. RcBr의 경우 모든 개체의 줄기가 보라색을 띠고 있었으며, 잎의 변형이 적을 뿐만 아니라 파래를 섞은 배양토에서는 꽃봉오리까지 맺혀있는 것을 확인할 수 있었다. 뿐만 아니라 다시마를 섞은 배양토에서 성장한 N.P.S RcBr과 P.S. RcBr을 비교해보면 카드뮴의 노출에 따라 성장 차이가 크게 나타나는데, 다시마의 경우 N.P.S RcBr과 비교했을 때, P.S. RcBr이 카드뮴에 대한 성장 저해 효과를 덜 받는 것으로 확인되었다. 이는 다시마가 보유하고 있는 카드뮴을 P.S. RcBr이 흡수하더라도 안토시아닌의 형성으로 인해 성장저해가 억제되었을 것이라 판단되며, 이는 우복희의 연구결과와 일치하는 결과를 보였다[3].

나. 카드뮴으로 오염된 토양의 정화 방안 제안

카드뮴에 오염된 토양에 커피부산물과 해조류를 넣었을 경우 카드뮴을 흡착하고, 흡착된 카드뮴을 식물의 양이온치환능력에 따라 뿌리로부터 카드뮴을 흡수하여 토양 속 카드뮴을 식물 내에 축적시키는 방안을 생각하였다. 이에 카드뮴으로 오염된 토양에서도 식물이 잘 성장할 수 있는, 즉 카드뮴에 의한 식물 생장의 독성 효과를 억제하여 축적시킬 수 있는 식물이 무엇이 있고, 이러한 기작은 어떻게 이루어 질 수 있는지 연구하여 카드뮴으로 오염된 토양의 정화 방안을 제안하고자 하였다.

이에 고농도의 카드뮴은 식물의 발아에 악영향을 미치기 때문에 고농도로 오염된 토양의 정화에는 식물을 이용하는 것은 타당하지 못할 것이라 판단된다. 하지만 400 μM 이하의 카드뮴으로 오염된 토양에서는 카드뮴의 농도가 높아짐에 따라 식물 생장이 저해되기는 하지만 안토시아닌을 형성하는 식물은 카드뮴의 독성효과에 대한 내성을 지니기 때문에 이 식물을 활용할 수 있을 것이다. 또한, 선행연구 및 EDS 분석 결과와 마찬가지로 커피부산물과 해조류가 카드뮴 흡착에 효과를 보이며, 카드뮴으로 오염된 토양에 특히, 카드뮴 흡착 능력이 뛰어나고, 식물생장에 도움을 줄 수 있는 많은 무기영양분을 갖고 있는 과래를 섞어 준 후 안토시아닌을 형성하는 식물을 심어 준다면 지하수를 2차적으로 오염시키는 토양 속 카드뮴이 과래 표면에 흡착되고, 식물이 이를 양이온치환에 따라 식물내부로 흡수 될 것이다. 이렇게 흡수된 카드뮴은 식물 생장을 저해시킬 수 있지만 안토시아닌의 생성함으로써 이를 극복 할 수 있으며, 안토시아닌은 카드뮴과 복합체를 형성함으로써 식물 내부에 카드뮴을 축적시킬 수 있을 것이라 판단된다. 카드뮴으로 오염된 토양을 정화하는 한 가지 방안으로써 해조류 중 과래와 안토시아닌 생성 식물을 이용할 수 있다는 것을 제안하는 바이다.

V. 결론 및 제언

RcBr(Rapid cycling *Brassica rapa*)은 22~28 $^{\circ}\text{C}$, 24시간 연속 광 상태, 충분한 수분, N, P, K가 함유된 비료에서 잘 자랄 수 있다고 알려져 있다. 이때, 식물 생장에 필요한 광조건과 영양분을 통제하였고, 우리가 확인하고자 하는 변인들 이외에는 최대한 통제한 상태에서 실험을 진행하였다. 다만, 식물 생장 실험에 있어 카드뮴 수용액을 제작할 때, 메스실린더와 비커를 이용해 부피를 측정하고 전자저울을 통해 카드뮴의 양을 측정하여 계산하였고, 이때 메스실린더는 기구 특성상 $\pm 15\text{ mL}$ 까지의 오차가 발생할 수 있다는 단점, 카드뮴이 전부 균일하게 용해되었는지에 대해서는 알 수는 없지만 카드뮴의 농도가 높을수록 식물생장을 저해한다는 결과는 여러 선행연구들이 뒷받침 해줄 수 있다고 판단된다. 또한, Purple Stem RcBr의 경우 400 μM 에서 안토시아닌의 영향으로 줄기의 색깔이 보라색을 띤다는 것을 육안으로 관찰해서 실험 결과를 도출하였는데 있어 관찰자의 주관이 들어갈 수 있었을 것이라 판단될 수 있지만 앞선 실험 결과에서 보는 바와 같이 뚜렷한 차이를 보였기 때문에 이의 단점을 극복할 수 있었다. 하지만 해조류를 섞은 배양토에서의 안토시아닌 생성량을 육안으로 관찰하기보다는 RT-PCR을 통한 *DFR* 유전자의 발현양의 차이 또는 생성된 안토시아닌을 Turker와 Erdogdu 방법을 사용하여 줄기로부터 추출한 후 정량적으로 분석한다면 보다 과학적인 방법으로 비교해 볼 수 있는 또 다른 방법이지 않았을까 하는 판단된다[16]. 이번의 실험 결과를 통해서 카드뮴으로 오염된 토양의 정화를 위한 최적의 방법은 될 수는 없었지만 하나의 방안으로써 제시할 수는 있을 것이다. 이에 우리의 연구 결론과 제언은 다음과 같다.

1. 결론

본 연구는 카드뮴 농도에 따른 RcBr의 발아율과 생장 차이를 확인하며, 안토시아닌을 생성하는 Purple stem RcBr과 생성하지 않는 Non-purple stem RcBr의 생장차이를 확인함으로써 안토시아닌의 카드뮴 독성 저해 효과를 확인하고자 하였다. 또한, SEM을 통해 커피부산물과 해조류의 표면구조 차이를 확인한 후 EDS 분석을 통해 각 시료의 카드뮴 흡착 여부를 확인하고, 이를 실제 카드뮴으로 오염된 토양과 섞은 후 RcBr 생장을 비교함으로써 토양 정화방안을 제시하고자 하였다. 이러한 연구결과를 바탕으로 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

첫째, 카드뮴 농도에 따른 RcBr 생장차이 결론 고농도의 카드뮴 농도에서는 식물이 발아하지 않지만 일정 수준의 카드

뮴 농도에 있어서는 RcBr이 모두 발아하는 것으로 보았을 때, 식물은 발아에 있어 카드뮴에 대한 내성을 지녔다고 판단할 수 있었다.

둘째, 카드뮴의 농도가 높아질수록 개체 성장 억제 및 잎의 갈변현상 등 카드뮴의 독성효과가 강해지지만 식물은 안토시아닌을 형성함으로써 카드뮴 독성효과에 대한 저항성을 지닌다고 결론지을 수 있었다.

셋째, 커피부산물과 해조류 중 해조류가 더 카드뮴 흡착 효율이 크며, 카드뮴 흡착 및 식물 생장의 효과가 동시에 나타나는 것은 파래임을 확인할 수 있었다. 이에 SEM으로 파래의 표면구조를 관찰하였을 때는 거친 구조를 가지고 있으며, EDS 분석 결과 질소함량이 높음을 알 수 있었고, 이러한 구조와 성분으로 인해 카드뮴 흡착과 식물 생장에 도움을 주는 것으로 판단할 수 있었다.

2. 제언

선행연구를 분석해 본 결과 커피부산물과 해조류의 카드뮴 흡착 여부를 AAS나 EDS 분석을 통해 많은 연구가 진행되어 있지만 이러한 연구결과를 바탕으로 토양정화방안에 대한 연구는 부족하다는 것을 알 수 있었다. 이에 우리는 우리의 연구 결과를 토대로 카드뮴에 오염된 토양에 파래를 넣었을 경우 카드뮴을 흡착하고, 흡착된 카드뮴을 식물의 양이온치환능력에 따라 뿌리로부터 카드뮴을 흡수하여 토양 속 카드뮴을 식물 내에 축적 시키는 방법을 통해 카드뮴으로 오염된 토양정화 방안을 제시하고자 한다. 구체적인 방법으로는 식물 생장에 도움을 줄 수 있는 많은 무기영양분을 갖고있는 파래를 섞어 준 후 안토시아닌을 형성하는 식물을 심어 준다면 지하수를 2차적으로 오염시키는 토양 속 카드뮴이 파래 표면에 흡착되고, 식물이 이를 양이온치환에 따라 식물 내부로 흡수될 것이다. 이렇게 흡수된 카드뮴은 식물 생장을 저해시킬 수 있지만 안토시아닌을 생성함으로써 이를 극복할 수 있다. 안토시아닌은 카드뮴과 복합체를 형성함으로써 식물 내부에 카드뮴을 축적시킬 수 있을 것이라 판단된다. 이에 카드뮴으로 오염된 토양을 정화하는 한 가지 방안으로써 해조류 중 파래와 안토시아닌 생성 식물의 이용을 제안한다. 또한, 식물은 생활사가 길다는 단점과 생장에 있어 여러 변수가 작용한다는 단점으로 중학교나 일반고에서 많이 다루지지 않는 실험 소재임을 확인할 수 있었다. 이는 생활사가 짧은 RcBr(Rapid cycling *Brassica rapa*)을 이용한다면 극복될 수 있으며, 고가의 배양기가 구비되어 있지 않은 학교의 경우는 우리가 제작한 식물생장장치를 소형화하여 보급한다면 더 원활한 식물연구가 진행될 것이라 기대된다. 뿐만 아니라, 페트병 심지 화분의 경우 버려지는 페트병과 요플레통을 재활용하기 때문에 환경보전을 할 수 있다는 장점도 있다. RcBr의 경우는 해외 구매가 이루어져야 하는 단점이 있기 때문에 우리가 제작한 식물생장장치에서 RcBr을 키우고, 개화된 꽃에 수분시켜 종자를 많이 얻어 놓아 연구에 필요한 학교가 있다면 보급할 예정이다. 또한 실제 해조류가 어떻게 카드뮴을 흡착할 수 있는지, 그리고 양이온 치환에 의한 흡착된 카드뮴이 식물에게 공급되며, 실제 식물 안에 축적된 카드뮴의 양이 얼마나 되는지등의 후속연구들이 필요할 것이다. 또한 DFR 유전자의 유무에 따른 카드뮴 농도별 안토시아닌의 분비량을 RT-PCR을 이용하여 측정함으로써 DFR 유전자에 따른 안토시아닌 분비량과 카드뮴 농도에 따른 안토시아닌 분비량을 알고 이와 식물연구를 진행한다면 안토시아닌의 독성저해 효과를 조금 더 명확하게 알 수 있을 것이다. 또한 커피부산물과 해조류의 흡착제에서 카드뮴의 양이온 치환이 원활하게 되는 조건에 대해 추가 실험을 한다면 (pH변화, 온도, 습도 등) 어떤 흡착제가 좋은지 명확하게 알 수 있을 것이다. 또한 카드뮴 흡착량 측정에 EDS 분석뿐만 아니라 기존 선행연구에서 사용된 AAS(원자흡광광도계)를 이용하여 정량적으로 어떤 흡착제가 좋은지 추가 실험을 한다면 결론의 신뢰성을 뒷받침할 수 있을 것이다.

VI. 참고문헌

- [1] 김재권(2018). 인지적 도제학습 기반의 예비교사용 RcBr 식물분자생물학 실험 프로그램의 개발 및 적용. 한국교원대학교 석사학위논문.
- [2] 네이버지식백과(카드뮴). <https://terms.naver.com> (검색일 : 2018.06.12.).

- [3] 우복희(2007). 토마토유묘에 있어서 카드뮴 노출에 의한 안토시아닌 색소 형성 관찰과 오염지표로서의 교육적 효과. 창원대학교 석사학위논문.
- [4] 네이버지식백과(해조류). <https://terms.naver.com> (검색일 : 2018.06.12.).
- [5] 이장호(2010). 해조류에 의한 중금속 흡착능력 평가. 관동대학교 석사학위논문.
- [6] 김현숙(2012). 커피부산물을 이용한 친환경적 퇴비화. 광운대학교 석사학위논문.
- [7] 고태상(2013). 원두커피 찌꺼기를 이용한 폐수 중의 Sb 흡착에 관한 연구. 함양대학교 석사학위논문.
- [8] 임성훈(1995). 커피찌꺼기를 이용한 폐수중의 Pb, Cr, Cd의 제거에 관한 연구. 서울대학교 석사학위논문.
- [9] 신은영, 배주원(2009). 새싹의 생장은 빛의 파장과 세기에 따라 어떻게 달라질까?. 제 55회 전국과학전람회.
- [10] 강대원(2011). 염분농도에 따른 상록활엽수의 생장특성. 순천대학교 석사학위논문.
- [11] 이현용, 홍기찬, 임정은, 주진호, 양재의, 옥용식(2009). 밤 부산물의 수용액 중 중금속 흡착특성. 한국환경농학회지, 28(1), 69-74.
- [12] 황인복, 박희원(1993). 감잎을 이용한 중금속이온 흡착에 관한 연구. 제39회 전국과학전람회.
- [13] 장철순, 김민(1999). 식물 재료를 이용한 중금속 흡착에 관한 탐구. 제45회 전국과학전람회.
- [14] 정문현(2009). SEM-EDS를 이용한 산업단지폐기물과 고형연료의 무기 성분 규명. 한국산학기술학회논문지, 10(10), 2786-2793.
- [15] 김영남(2002). Arabidopsis에 있어서 카드뮴 저항성 식물의 유도 및 특징. 창원대학교 석사학위논문.
- [16] 박정섭(2010). 고구마 품종별 생리활성 및 안토시아닌 색소의 특성. 전북대학교 박사학위논문.

| 연구진 |

강지희 (Jihe Kang, 인천과학고등학교, jihui8653@daum.net), 공동저자

송수환 (Soohwan Song, 인천과학고등학교, song690119@naver.com), 공동저자, 교신저자

이가은 (Gaeun Lee, 인천과학고등학교, gaeun8467@naver.com), 공동저자

이영재 (Youngjae Yi, 인천과학고등학교, lowjae2@naver.com), 공동저자

지도교사 : 김재권 (Jaekwon Kim, 인천과학고등학교, hagoja777@ice.go.kr)

지도교수 : 김성하 (Sungha Kim, 한국교원대학교 생물교육과, plantedue@gmail.com)

투과형 사방댐의 형태에 따른 토석류 유출 저감 효과 분석

윤혜림 · 신동현 · 유찬영 · 지서연 · 김민서 - 인천진산과학고등학교

An Analysis on the Debris Flow Reduction Effect of Debris Barrier Type

Hyelim Yoon · Donghyun Shin · Chanyoung Yoo · Seoyeon Ji · Minseo Kim - Incheon Jinsan Science High School

국문초록

기존의 중력식 불투과형 사방댐은 강수량이 적으면 물이 고여 수질 오염 등 환경 문제가 발생하거나 산사태가 발생하였을 때 완전히 막힌 곳 위로 물이 범람하여 더 큰 피해를 초래하곤 하였다. 본 연구에서는 이러한 기존 사방댐의 문제점을 보완하면서도 토석류 유출 저감 효율을 높인 새로운 형태의 투과형 사방댐을 제안하고자 하였다. 사방댐의 형태는 기존의 직선형과 달리 토석류를 효과적으로 포획하면서도 물은 빠져 나갈 수 있도록 곡선을 도입하여 곡선형과 국자형으로 제작하였고, 이를 모의 실험 세트장에 설치한 후 세트장의 경사를 15°, 20°로 변화시키면서 토석류의 유속과 하부 퇴적 두께를 비교하여 토석류 유출 저감 효과를 비교하였다. 또한 사방댐 모형의 설치 각도를 30°, 60°, 90°로 변화시켜 모형의 설치각에 따른 토석류 유출 저감 효과도 함께 비교하였다. 그 결과 직선형, 곡선형, 국자형 사방댐 모두 토석류 유출 저감 효과가 크며, 특히 곡선형 사방댐이 가장 유속을 감소시킬 뿐만 아니라 하부 퇴적을 매우 효율적으로 차단할 수 있음을 확인하였다.

중심어 : 투과형 사방댐, 토석류 유출, 사방댐 모형, 유출 저감 효과, 유속 감소

ABSTRACT

The current gravitational non-transferable dams used to cause more damage by flooding over completely blocked areas when landslide was caused or causing environmental problems such as water pollution when the precipitation was low. In this research, we proposed a new type of debris barriers that overcome for problems of the existing debris barrier but also improved the efficiency of decreasing debris flow. However, pre-researching on the protection effects of debris barrier due to the shape and placement of the transferable dams is inadequate. Unlike linear typed debris barrier, we produce curved typed debris barrier and ladle typed debris barrier which can capture debris flow effectively though get out water as introduced a curve. Then we set the simulator and compared debris flow and thickness of deposition to change to 15° and 20° the slope of the simulator. In addition, the installation angle of the debris barriers model was changed to 30°, 60° and 90°, and we also compared effect of reducing the leakage of debris flow each new type of debris barriers. As a result, linear shaped debris barrier, curved typed debris barrier, and ladle typed debris barrier all contributed to the decreasing debris flow. In particular, the flow rate and prevent very efficient bottom deposition.

Key words: Debris Barrier, Debris Flow Leakage, Debris Barrier Model, Leakage Reduction Effect, Reduction flow rate

I. 서론

최근 국지성 집중 호우 및 강수량이 증가함에 따라 인천의 일부 지역은 산사태를 대비하여 별도의 상황실을 가동했다. 인천뿐만 아니라 전국의 여러 지역이 산사태 위험 지역으로 산사태를 대비하기 위하여 사방댐을 설치하거나 이와 관련된 다양한 연구를 진행하고 있다.

산사태로 인한 피해를 줄이기 위하여 설치된 기존의 불투과형 사방댐의 경우 산사태가 발생하지 않을 때도 산에 흐르는 물의 흐름을 막아버려 물이 고이게 되고, 고인 물에 녹조가 발생하며 자연적인 토사유출을 막게 되어 강 하류 환경을 변화시키고, 이로 인해 생태계에도 좋지 않은 영향을 끼치는 등의 문제가 생기고 있다. 또한, 불투과형 사방댐의 경우 물의 흐름을 완전히 차단하여 댐 위로 물이 범람하게 됨으로써 더 큰 피해를 발생시키기도 한다. 우리나라의 경우 계절별 편차가 커서 여름철에는 강수가 집중되지만 나머지 계절에는 강수량이 많지 않은 데다 산의 경사도 크지 않은 경우가 대부분이라 불투과형 사방댐보다 투과형 사방댐이 물의 흐름을 유지하면서도 사방 시설로서의 역할을 할 수 있을 것으로 보인다. 따라서

기존의 불투과형 사방댐의 문제점들을 보완하면서도 토석류의 흐름을 효과적으로 줄일 수 있는 개방형 사방댐에 대한 연구가 필요하고, 특히 개방형 사방댐의 형태나 배치에 따른 사방 효과에 대한 연구는 반드시 필요하다. 이에 본 연구는 토석류의 흐름을 효과적으로 막아주어 인근 지역의 인명 피해 및 재산 피해를 최소화하면서도 사방댐에 물이 고이지 않도록 하여 녹조 현상, 유충의 번식 등을 방지하고 수질 환경 오염 문제를 야기하지 않는 투과형 사방댐의 새로운 형태를 고안하고, 토석류 유출 저감의 효과성을 알아보고자 한다.

II. 이론적 배경

1. 사방댐

사방댐은 토석류가 발생했을 때 상류에서 내려오는 토석과 나무를 차단하기 위해 설치하는 소규모 댐을 말한다. 박병수의 연구에 따르면 사방댐은 그 형태에 따라 투과형 사방댐과 불투과형 사방댐으로 나눈다[1].

투과형 사방댐은 개방형 사방댐이라고도 하며 평상시 자연적으로 유출되는 토사를 천천히 하류로 흘려보내는 댐이다. 투과형 사방댐은 [Fig. 1]의 (a), (b)에서 보듯이 슬릿 사방댐과 스크린 사방댐의 두 가지로 나뉜다. 슬릿 사방댐은 콘크리트 기둥으로 토석과 유목의 유출을 방지하고 스크린 사방댐은 토석류를 막아 계류수의 지중 침투를 촉진한다.



(a) Slit debris barrier



(b) Screen debris barrier

불투과형 사방댐은 폐쇄형 사방댐이라고도 하며 강의 상류에서 흘러 내려오는 토석류를 막아 하류로 흘러가지 않는 댐이다. 불투과형 사방댐은 [Fig. 1]의 (c), (d)에서 보듯이 중력식 사방댐과 저수댐이 있다. 중력식 사방댐은 일반적인 형태의 사방댐으로 댐의 고정이 가능하며 계류가 직선인 곳에 설치한다. 저수댐은 토석류 방어 기능과 함께 저수 기능을 갖춰 물을 저장한다.



(c) Screen debris barrier



(d) Storage Dam

[Fig. 1] The type of debris barrier

2. 토석류

김낙영의 연구에 따르면 토석류는 산사태의 다른 유형으로, 산사태는 자연적 또는 인위적인 원인으로 산지가 일시에 붕괴되는 것을 말하고 토석류는 산지 또는 계곡에서 토석, 나무 등이 물과 섞여 빠른 속도로 유출되는 것을 말한다[2]. 산림청이 제공하는 산림정보에 따르면 대부분의 토석류들은 산사태로부터 발생한다[3]. 이창우의 연구에 따르면 우리나라의 산사태는 주로 빗물에 의해 발생하는데 이 빗물이 더 이상 흡수 들어갈 수 없는 불투수층에 도달하여 일시적으로 지하수를 형성하고 이 지하수의 수압에 의해 토양층이 위로 올려지면서 토양의 경계면의 응집력이 급격하게 약해진다[4]. 이때 토양층의 윗부분이 빗물을 머금어 무게 증가하게 되고, 평소 유지되던 토양의 물리적인 균형이 깨지면서 붕괴되기 시작하는데 이때 산사태가 발생하고, 이 붕괴로 인해 산지 유역 안에서 흙과 크고 작은 암석, 모래, 자갈 등 빗물과 함께 혼합되어 빠르게 이동하는 현상을 토석류라고 말한다.

토석류는 경사진 계곡, 충분한 토사, 충분한 물의 공급의 조건이 모두 갖춰진 곳에서 발생하는데 주요 발생 원인으로는 호우, 눈 녹음, 지진, 화산 폭발 등이 있다. 토석류는 물과 토사의 중간 성질을 갖는데, 토석류는 큰 자갈의 흐름을 갖기도

하고 진흙의 흐름을 갖는 경우도 있어 상당히 다양한 성질을 가진다. 토석류는 산사태(붕괴)와 다르게 퇴적물이 흘러내리는 거리가 더 길다. 사방사태기술협회의 저서에 따르면 토석류는 흘러내리는 거리가 100m~1,000m이고, 이동속도가 수 m/s에서 수십 m/s 정도이며 토석류의 입도분포를 보면 토석류 사례마다 선단부 퇴적물의 입도 차이가 크다[5]. 최하길의 저서에 따르면 자갈이 거의 없이 2mm 미만의 입자들로 이루어진 선단부를 가진 토석류가 있는 반면, 자갈이 대다수를 차지하는 선단부를 가진 토석류도 있는데, 주로 선단부에는 큰 자갈들이 집중되어 있고 그 뒤에 후속류로 진흙 같은 작은 입자들이 많이 분포한다. 선단부의 자갈이 집중되어 있는 경우 토석류의 직진성이 강해져 재해 발생 시 파괴력이 매우 크다 [6]. 사방사태기술협회의 저서에 따르면, 토석류는 토석류가 발생한 구역의 지형과 토석류 퇴적부의 형태에 따라 그 특징이 조금씩 달라질 수 있다[5]. 먼저, 토석류가 발생한 구역의 지형을 파악하기 위해서는 윗하부의 경사각과 윗하부의 폭을 조사해야 한다. 김진홍의 연구에 따르면 윗하부에서 토사의 흐름은 3가지로 나눌 수 있는데, 물과 토사가 잘 섞여 함께 이동하는 집합 유동 상태, 토사가 물 높이의 절반 이하로 낮아져 이동하는 소류형 집합 유동 상태, 토사가 대부분 가라앉은 소류 사류상태가 있다[7]. 토석류를 발생시키기 위한 집합 유동 상태의 기울기는 최저 12°~15° 전후이다. 경사각 0°~10°에서는 토사가 퇴적되고, 10°~15°에서는 토사의 퇴적과 유하가 함께 발생한다. 20°가 넘으면 토석류로 발생한다.

다음으로, 토석류 퇴적부의 형태를 파악하기 위해서는 퇴적부의 경사각, 최대 퇴적폭과 분산각, 퇴적길이, 퇴적 두께 및 퇴적 면적, 퇴적 토사량을 조사해야 한다. 퇴적 토사량은 퇴적면적에 평균퇴적 깊이를 곱하여 구한다. 토석류 퇴적부의 경사는 평균적으로 2°~12°의 경사를 갖고 있고, 가장 많은 빈도를 보인 경사는 6°이다. 퇴적폭은 유량에 의해 수식으로 예상할 수 있으며, 큰 입자들이 많으면 직진성이 커져 퇴적폭이 감소하는 경향을 보인다. 사방사태기술협회의 저서에 따르면 퇴적길이는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다[5].

$$\log L = 0.42\log(\tan x \times V) + 0.935 \quad (L: \text{퇴적길이}, x: \text{평균 경사 } V: \text{토석류량})$$

이 식에서 볼 수 있듯 퇴적길이는 퇴적지의 지형조건과 토석류량에 따라 달라진다.

III. 연구 방법 및 절차

1. 현장 답사

실제 사방댐의 규모 및 실태를 확인해보기 위해 인천광역시에는 여러 가지 사방댐들을 직접 답사하였다. 총 4개의 조로 나누어 현장 답사를 다녀왔으며 현장 답사 장소는 인천광역시 서구 공촌동, 부평구 청천동, 남동구 장수동, 강화군 삼산면 석모도이다.



[Fig. 2] Bupyeong-gu Cheongcheon-dong



[Fig. 3] Ganghwa-gun Samsan-myeon Seockmo-do

인천광역시 서구 공촌동의 사방댐과 인천광역시 남동구 장수동의 사방댐은 지리적 문제로 접근이 불가능하였다. 따라서 부평구청 공원녹지와 산림자원팀 전현철 전문가와의 전화 연결을 통해 사방댐의 규모에 대해 전해 듣는 것으로 대신하였다. 이에 따르면 두 사방댐 모두 청천동의 사방댐과 비슷한 설치 방식인 중력식 사방댐이 설치되어있고, 사면 경사가 10° 주변으로 비슷한 규모라고 한다.

부평구 청천동의 사방댐은 [Fig. 2]에서와 같이 외부에서 물을 공급하여 소형 풀장으로 이용하고 있었다. 물이 고여 있을 수 있는 구조였으나 꾸준한 관리로 인해 사방댐 내부가 오염되어있지는 않았다. 반면 강화군 삼산면 석모도 자연휴양림의 사방댐은 중력식 전석 사방댐으로 [Fig. 3]에서와 같이 물이 고여 수질이 오염되고 악취가 나는 것을 확인할 수 있었다.

사전 답사를 통해 인천과 같이 산의 경사가 가파르지 않은 지역은 사방댐에 물이 고이지 않도록 하는 것이 중요하다는 것을 알게 되었고, 따라서 불투과형 사방댐이 아닌 투과형 사방댐의 필요성을 확인할 수 있었으며, 이에 따라 사방 효과를 높일 수 있는 투과형 사방댐의 형태를 고안하고자 하였다.

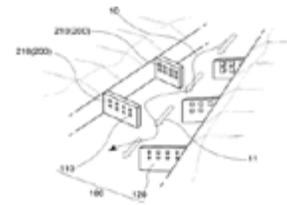
2. 새로운 사방댐 형태 고안

기존의 불투과형 사방댐은 토석류가 발생하지 않을 때에도 상당한 양의 토사가 퇴적되는데 이는 후에 토석류가 발생했을 때 사방 성능을 저하시킨다. 그리고 자연적인 토사 유출까지 억제해 댐 하류의 생태계에 악영향을 끼친다. 뿐만 아니라 물이 고이는 문제가 발생해 녹조, 부패 등의 수질 오염이 생기기도 한다.

본 연구를 통해 고안하고자 한 사방댐은 토석류의 흐름을 효과적으로 막아주어 인근 지역의 인명피해 및 재산 피해를 최소화하면서도 기존의 불투과형 사방댐이 가지고 있는 문제를 해결하는 새로운 형태의 사방댐이다. 이 연구에서 제안하는 모형은 자연적인 토사 유출을 억제하지 않으면서 평소 상황에서는 물이 고이지 않고 지속적으로 유수의 흐름을 유지할 수 있는 모형이다. 특히 인천 지역의 경우 높은 산이 없고 산의 경사가 15°를 잘 넘지 않으므로 물의 흐름을 최대한 방해하지 않으면서도 방제 효과를 가져올 수 있는 투과형 사방댐이 적절하다고 생각하였고, 기존의 투과형 사방댐들 중 특히 산사면을 따라 댐을 교차로 배열하는 형태가 효과적인 것이라고 판단하였다. 이처럼 사방구조물을 교차로 배열하는 형태는 [Fig. 4]와 [Fig. 5]에 제시되어 있다.



[Fig. 4] Debris flow control dam



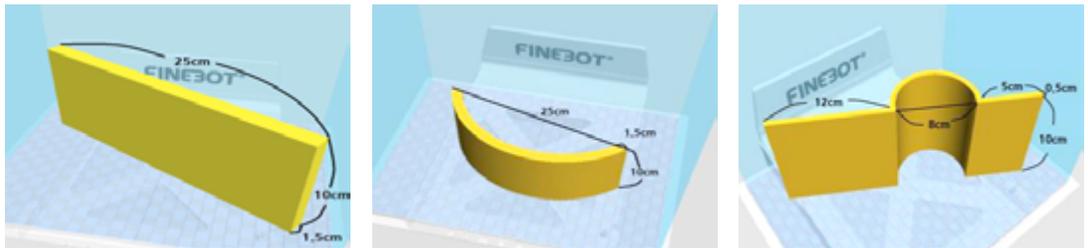
[Fig. 5] Debris structure

BS 일요특선 다큐멘터리에서 소개된 강원도 양양군 서면에 있는 투과형 사방댐의 경우 물이 고이는 것을 최소화하여 하류의 생태계를 파괴나 수질 오염을 방지할 수 있으며 산을 과도하게 개발하거나 환경을 해치지 않는다는 평가를 받고 있다 [8]. 윤찬영의 연구결과에 따라 효과적으로 토석류의 흐름을 막고 유속을 줄이기 위한 사방댐 모형을 제시 했다[9]. 이에 본 연구에서는 효과적으로 토석류의 흐름을 막고 유속을 줄이기 위한 사방댐의 모형을 모색했다. 곡선형 사방댐은 직선형 사방댐과는 다르게 곡면을 추가하여 토석류가 사방댐에 닿는 시간과 길이를 늘려 물의 흐름을 방해하여 유속을 효과적으로 줄일 수 있다. 광동희의 물용어집에 따르면 접촉마찰손실수두(friction loss of head)를 통해 유체의 마찰을 표현할 수 있다[10]. 접촉마찰손실수두는 관에 물이 흐를 때 관내 마찰저항으로 발생하는 에너지 손실을 나타낸 것이다.

$$h = f \times \frac{l}{d} \times \frac{v^2}{2g}$$

위 식은 달시의 공식으로, h 는 마찰손실수두, f 는 마찰손실계수, l 은 관의 길이, d 는 관의 지름, v 는 평균 유속, g 는 중력 가속도이다. 위 식에서 마찰손실수두는 관의 길이에 비례하는 것을 알 수 있었다. 이를 댐에 적용한다면 l 은 댐에 물길이 닿는 길이, d 는 댐과 바닥면이 만드는 물길의 지름이라 할 수 있다. 이를 통해 곡선댐이 직선댐보다 토석류간의 접촉 길이가 길어 토석류를 더 효과적으로 저항했다고 할 수 있다. 따라서 토석류와 사방댐의 접촉면을 늘린다면 사방댐이 토석류를 포획하여 토석류의 유출을 감소시킬 수 있을 것이다. 이를 바탕으로 기존의 직선형인 투과형 사방댐의 형태에 곡면을 추가한 국자형 사방댐과 곡선형 사방댐을 고안하였다. 또한 최진규의 연구에서는 투과형 사방댐이 토석류를 막아 토석류가 통과할 수 있는 폭이 좁아지면 벽체와 충돌횟수가 증가해 토석류 속도가 감소한다고 하였다[11]. 그리고 댐이 토석류의 흐름을 유도해 토석류가 빠져 나갈 공간이 작아짐에 따라 토석류가 사방댐이나 물길의 벽 부분에 부딪히는 양이 많아 사방댐과 벽에 보다 큰 힘을 가한다. 따라서 토석류의 힘이 약해져 토석류 방어 효과를 가질 것이라 예상된다.

본 실험에서 사용할 사방댐의 다양한 모형을 제작하기 위해 123D design과 Auto CAD를 이용하여 3D 모형을 진행하였다. 직선형뿐만 아니라 곡선형, 국자형 등 총 3가지 유형의 사방댐 모형을 3D 프린터를 이용해 출력했다. 각각의 모형의 규모는 [Fig. 6]과 같다.



(a) Linear typed debris barrier model

(b) Curved typed debris barrier model

(c) Ladle typed debris barrier model

[Fig. 6] A new types of debris barrier

3. 실험 세트장 제작

정태성의 연구에 따르면 급경사지 붕괴재현을 위한 산사태 모의 실험장은 세로 12m, 가로 4m의 규모로 급경사지에서의 산사태 모의 실험을 통해 산사태로 인한 피해 저감 효과를 확인하였다[12]. 이 실험장은 세계 최대 규모의 산사태 모의 실험장으로, 본 연구에서는 이를 기반으로 크기를 1/6로 축소하여 아크릴로 모의 실험장을 제작하고자 하였다. 그러나 축소를 하였음에도 아크릴 세트장은 실험 중 운반이 거의 불가능하였고 붕괴될 위험이 있었기 때문에 제작이 불가능하다고 판단되었다. 따라서 크기는 유사하게 유지하되 단단하면서도 좀 더 가벼워 이동이 쉬운 아이스핑크를 활용하여 세로 180cm, 가로 45cm, 높이 25cm의 실험 세트장을 제작하였다. 또한, 아래 쪽에는 토석류의 퇴적 두께 및 퇴적 길이와 퇴적 폭 측정을 위해 격자판을 설치하였다. 격자판은 토석류의 넓은 확장 범위를 측정하기 위해, 가로 2m, 세로 2m로 제작하였다. 또 눈금간격 5cm로 표시하여 간편하게 확산 범위를 측정할 수 있도록 하였다.



[Fig. 7] An experimental set

4. 토석류 발생 방법

가. 실험 개요

일정하게 토석류를 발생시키는 방법을 결정하기 위한 사전 실험을 진행하였다. 실험을 여러 번 반복할 때 실험마다 일정한 토석류를 발생시킬 수 있으며 흘러내려 가지 않고 남는 토사가 가장 적은 방법이 본 실험에 가장 적합한 방법이라고 생각하였고 이 방법을 찾기 위해 유수대와 직선형 사방댐 모형 6개, 흙, 물, 호스, 수조, 직선형 사방댐 모형 등을 이용하여 실험을 진행하였다. 본 연구에서는 [Fig. 8]과 같이 실험 세트장의 윗부분에 일정량의 흙을 쌓아둔 다음 물을 수조에 담아 한 번에 쏟는 방법과 [Fig. 9]와 같이 호스를 이용하여 쏟는 방법을 비교하였고, 이후 녹화한 영상 분석을 통해 유수대에 남은 토양의 양이 적으면서도 초기에 일정한 속도로 토석류를 발생시킬 수 있는 방법을 찾고자 하였다.



[Fig. 8] A way to use hose

나. 실험 절차

유수대에 6개의 직선형 사방댐 모형을 일정한 간격으로 설치한 후 유수대 윗부분에 일정한 양의 흙을 쌓아두고 호스로 물을 뿌려 흘러보낸 뒤 토석류가 멈추면 영상을 멈추고, 실험 세트장의 윗부분 남은 토사의 양을 기록한다. 그다음 수조에 실험 과정 2와 같은 양의 흙을 쌓아두고 수조에 담긴 물을 실험 세트장의



[Fig. 9] A way to use sink

윗부분에 흘러보내고 실험 과정 3을 반복한 후 남은 토사의 양을 기록하고 영상을 분석한다.

다. 실험결과

흙을 쌓아놓은 뒤 호스를 이용하여 물을 흘러보내면 물의 수압이 낮아 유수대 윗부분에 쌓인 흙이 하부로 흘러 내려가는데 많은 시간이 걸렸고, 사용한 물의 양을 측정하기 어려웠다. 수조를 이용하여 물을 흘러보내면 한 번에 흘러보낼 수 있는 물의 양이 많지 않았기 때문에 유수대 윗부분에 쌓인 흙 대부분이 유수대 윗부분에 남아있었다. 따라서 두 방법 모두에서 문제점을 확인하였고, 이러한 문제를 해결하기 위해 토석류와 물을 가두어 두었다가 문을 순간적으로 개방하여 토석류를 발생시키는 방법을 이용하기로 했다. 이 방법은 토석류의 정확한 함수비도 구할 수 있기에 본 연구에 적절한 방법이라고 판단했다.

5. 토석류의 함수비 설정

함수비는 흙의 중량에 대한 물의 중량의 백분율을 의미하는데 김기환(2008)은 토석류 흐름 상태를 파악하기 위해 주문진 표준사 2kg을 기준으로 30%, 35%, 40%, 45%, 50%, 55%, 60%의 함수비에 대해 물의 중량을 600g, 700g, 800g, 900g, 1kg, 1.1kg, 1.2kg으로 변화시켜 실험하였다[13]. 그 결과는 30°각도의 경사로 설정된 실험 세트장에서 함수비 35%부터 토사가 격자판 위로 쌓이기 시작하여 실험결과 측정이 가능하였다.

본 연구에서는 인천 지역 산의 평균 경사가 15°를 잘 넘지 않으므로 15°와 20°, 즉 30°보다 완만한 경사에서 실험을 진행하기로 하였기 때문에 함수비가 좀 더 높아야 할 것으로 예상했고 먼저 함수비 40%의 토석류를 발생시켜 보았다. 그 결과 격자판 위로 쌓인 토사의 양이 적어 실험값 측정이 불가능하였다. 따라서 본 연구에서는 흙 2kg에 물 1kg을 혼합한 함수비 50%의 토석류를 발생시키기로 하였다. 또한 현장 조사에서 사방댐에 설치된 지역의 흙을 표집해와 5mm, 2mm, 1mm, 0.5mm, 체로 걸러 입도 분포를 확인했다. 그 결과 모든 입자가 5mm체를 통과했고, 그 중 80%가량의 입자가 2mm체를 통과했다. 전체의 70%는 1mm체를 통과했고, 전체의 35%는 0.5mm체를 통과했다. 따라서 본 실험에서는 현장 조사를 실시했던 사방댐 설치 유역과 유사한 입도 분포를 가질 수 있도록 체를 이용하여 2mm흙 1.6kg, 1mm이하 흙 0.4kg 섞어 만든 흙을 실험에 사용하였다.

6. 사방댐의 설치각에 따른 투과형 사방댐의 형태별 성능 비교

가. 실험 개요

직선형의 투과형 사방댐보다 유속은 늦추면서도 댐에 닿는 시간과 면적을 증가시킬 수 있을 것으로 생각하여 고안했던 곡선형 사방댐, 국자형 사방댐의 설치각에 따른 토석류 유출 저감 효과를 설치각에 따라 비교해 보고자 하였다.

본 연구에서는 유속이 가장 느리며 토사가 효과적으로 사방댐에 쌓여 하류로 유출되는 양이 적으며, 하류의 토사 분포가 좁은 것일수록 효과적인 설치 방법이라고 생각하였다. 기존에 설치된 대부분의 사방댐의 경우 사방댐이 설치된 벽에 대하여 90°각도로 설치되어 있었다. 그러나 최신규의 연구에 따르면 설치각에 따라서도 사방댐의 성능이 달라질 수 있어 본 실험에서도 설치각에 따른 사방댐의 토석류 유출 저감 효과에 대한 경향성을 확인하기 위하여 사방댐 설치각 가능한 각도인 0°~90°를 3등분 하여 설치 각도를 30°, 60°, 90°로 바꾸어가며 실험을 진행하기로 하였다.

나. 실험 절차

직선형 사방댐 모형 6개를 30° 각도로 설치한 후 수조를 이용하여 실험 세트장에 토석류를 발생 시킨 뒤 영상분석을 통해 유속을 계산하고 토사의 분포와 쌓인 양을 기록한다. 그다음 각도를 60°, 90°로 바꾸어가며 실험 1~3 과정을 반복한다. 곡선형 사방댐 모형, 국자형 사방댐 모형을 이용하여 실험 1~4 과정을 반복한 뒤 각각의 실험을 3번 진행하여 실험값들의 평균을 최종 실험값으로 정한다.

7. 산의 경사에 따른 사방댐의 형태별 성능 비교

가. 실험 개요

지역별 산의 경사에 따라 산사태의 규모나 발생 방식에도 차이가 생긴다. 따라서 산의 경사에 따른 사방댐의 형태별 토석류 유출 저감 효과를 비교하였다. 산림청에서 제공하는 정보에 따르면 사방댐이 설치된 인천광역시의 산의 평균 경사는 약 15°이며 김성덕의 연구에 따르면 토석류의 발생 가능성과 위험도가 15°에서 시작된다[14]. 한편 사방, 사태기술협회에 따르면 토석류의 최초 발생 각도가 약 20°이므로 본 연구에서는 토석류의 발생을 일으킬 수 있는 실험 세트장의 경사를 15°, 20°로 바꾸어가며 실험하기로 하였다[5].

15°에서는 토석류의 퇴적과 함께 유화되며 20°에서는 본격적으로 유화되는 것으로 알려져 있다. 본 실험에서는 토석류의 유속이 가장 느리고 토사의 분포가 가장 좁고 사방댐 모형에 쌓인 토사의 양이 가장 적은 사방댐의 형태가 해당 각도에 서 가장 토석류 유출 저감 효과가 뛰어난 것으로 판단하였다.

나. 실험 절차

유수대를 15° 각도로 설치하고, 직선형 사방댐 모형 6개를 유수대에 설치한 후 수조를 이용하여 실험 세트장에 토석류를 발생시킨 뒤 영상분석을 통해 유속을 계산하고 토석류 분포 및 쌓인 양을 기록하는 과정을 곡선형 사방댐, 국자형 사방댐에 대해 실험 1~3의 과정을 반복한 후 유수대를 20°로 바꾸어 실험 1~4의 과정을 반복한 뒤 각각의 실험을 3번씩 진행하여 실험값들의 평균을 최종 실험값으로 정한다.

IV. 연구 결과

1. 사방댐의 설치각에 따른 투과형 사방댐의 형태별 성능 비교

가. 직선형 사방댐 모형

먼저 직선형 사방댐에서 토석류가 하류에 최초로 도착하는 시간과 사면에서 토석류가 완전히 방출되는 시간 비교를 통해 사방댐의 설치각에 따른 유속 저감 효과를 알아보았다.

〈Table 1〉에서 보듯 실험 세트장의 경사가 15°일 때 댐의 설치 각도가 30°, 60°, 90°로 증가함에 따라 토석류의 최초 도착 시간과 완전 방출 시간이 더 길어진 것을 볼 수 있었다. 이는 실험 세트장의 경사가 20°일 때도 같은 경향성을 확인할 수 있었다. 최초 도착시간이 15°일 때 보다 최초도착 시간이 감소하였고, 토석류의 속도는 증가하였지만, 물의 흐름을 수직으로 막는 설치각 90°일 때가 가장 토석류의 유속을 저감시켰던 것을 알 수 있었다.

〈Table 1〉 Initial arrival time and total release time of linear typed debris barrier

댐 설치 각도 세트장 경사	30°		60°		90°	
	최초 도착 시간 (s)	완전 방출 시간 (s)	최초 도착 시간 (s)	완전 방출 시간 (s)	최초 도착 시간 (s)	완전 방출 시간 (s)
15°	2.2	23.9	4.3	25.8	12.1	39.9
20°	2.1	23.5	3.5	24.5	9.1	30.2

다음으로 하부 토석류의 분포와 양을 통한 토석류 저감 효과를 알아보기 위해 댐 하부 토석류의 퇴적 길이, 퇴적두께, 퍼진 폭을 측정하였고, 그 결과는 〈Table 2〉과 같다.

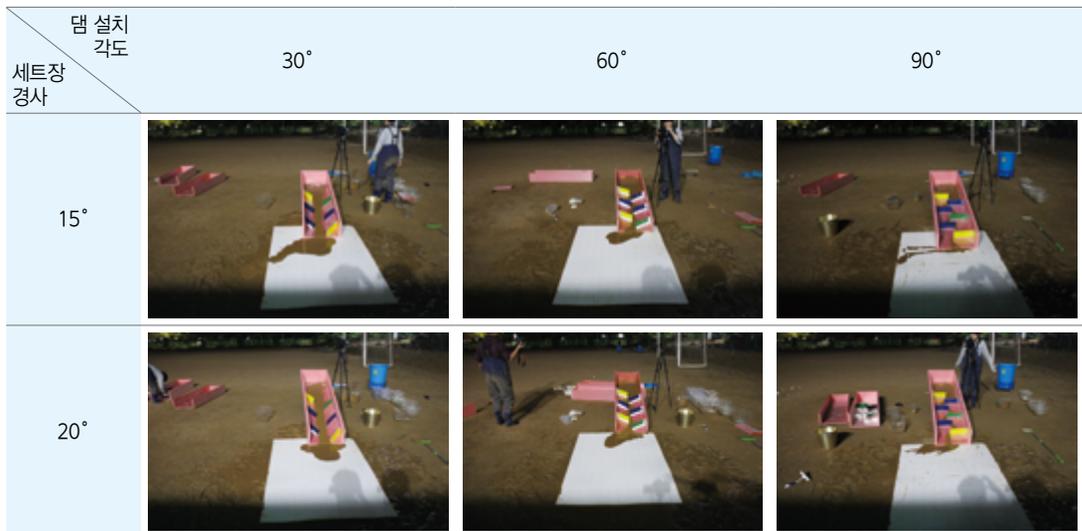
<Table 2> Length, thickness and width of sedimentary of linear typed debris barrier

세트장 경사 \ 댐 설치 각도	30°			60°			90°		
	퇴적길이 (cm)	퇴적두께 (cm)	퍼진 폭 (cm)	퇴적길이 (cm)	퇴적두께 (cm)	퍼진 폭 (cm)	퇴적길이 (cm)	퇴적두께 (cm)	퍼진 폭 (cm)
15°	94.3	2.1	69.2	35.5	1.2	48.6	25.8	0.8	91.7
20°	47.5	4.3	53.5	53.0	1.0	54.7	75.3	0.8	27.2

<Table 2>에서 퇴적 길이와 토석류의 퍼진 폭은 직선형 사방댐의 설치각에 따른 뚜렷한 경향성을 보이지 않았다. 실험 세트장의 경사가 15°일 때는 댐의 설치 각도가 30°, 60°, 90°로 증가함에 따라 토석류의 퇴적길이가 줄어들었다. 실험 세트장의 경사가 20°일 때는 댐의 설치 각도가 증가함에 따라 토석류 퇴적길이가 늘어났다. 또한, 퇴적부의 퍼진 폭도 설치 각도에 따른 경향성을 찾을 수 없었다. 이러한 문제는 실험에서 격자판의 수평을 완벽하게 맞추지 못했기 때문에 물이 살짝 기울어진 면을 타고 흘러가 버려 생기는 오차를 들 수 있다.

그러나 퇴적두께의 경우 세트장 경사가 20°일 때 댐의 설치 각도가 증가함에 따라 퇴적두께가 감소함을 알 수 있었다.

또한, 실험 세트장의 각과 상관없이 댐의 설치각이 90°일 때 퇴적두께가 가장 작음을 확인할 수 있었고, 이는 [Fig. 10]에서도 볼 수 있듯이 댐의 설치 각도 90°에서 상부에 토석류가 쌓이는 양이 가장 많았고, 하부로 이동되는 양이 가장 적기 때문임을 알 수 있었다.



[Fig. 10] The distribution of sedimentary of linear typed debris barrier model

나. 곡선형 사방댐 모형

<Table 3>는 곡선형 사방댐 모형에서 토석류가 하류에 최초로 도착하는 시간과 사면에서 토석류가 완전히 방출되는 시간을 나타낸 것이다.

<Table 3> Initial arrival time and total release time of curved typed debris barrier

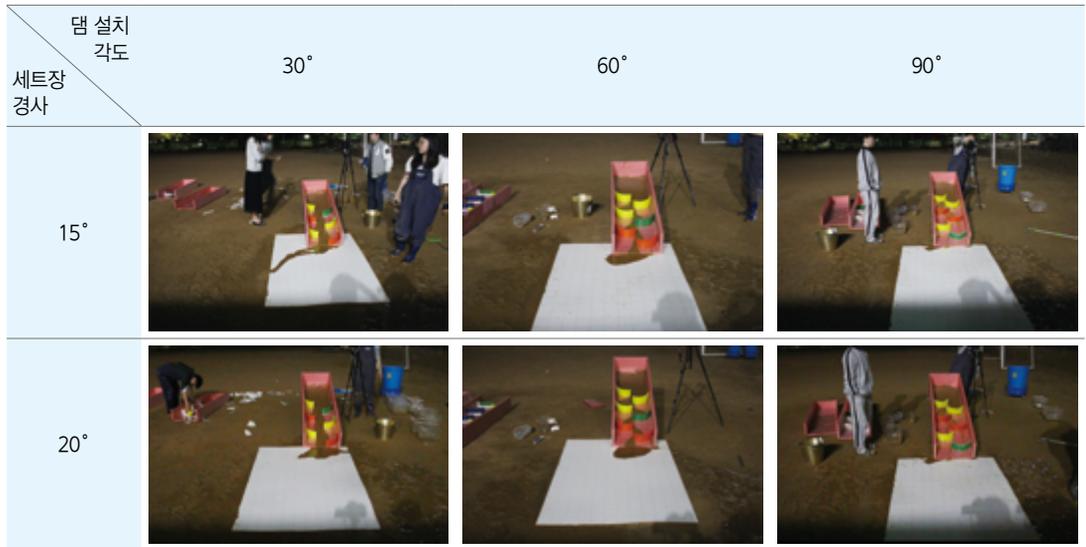
세트장 경사 \ 댐 설치 각도	30°		60°		90°	
	최초 도착 시간 (s)	완전 방출 시간 (s)	최초 도착 시간 (s)	완전 방출 시간 (s)	최초 도착 시간 (s)	완전 방출 시간 (s)
15°	3.4	36.6	7.2	54.5	133.6	X
20°	2.6	30.7	5.9	37.5	103.0	137.5

곡선형 사방댐의 경우 세트장의 경사와 상관없이 사방댐의 설치각이 증가함에 따라 토석류의 최초 도착 시간이 증가하였다. 이는 유속이 감소한 것이며, 특히 90°에서 그 시간이 급속히 늘어난 것으로 보아 유속 감소 효과가 탁월한 것을 알 수 있었다. 또한, 설치각이 90°인 경우 사면의 토사가 모두 댐에 포획되어 댐 밖으로 방출되는 양이 없었다.

〈Table 4〉 Length, thickness and width of sedimentary of curved typed debris barrier

댐 설치 각도 세트장 경사	30°			60°			90°		
	퇴적길이 (cm)	퇴적두께 (cm)	퍼진 폭 (cm)	퇴적길이 (cm)	퇴적두께 (cm)	퍼진 폭 (cm)	퇴적길이 (cm)	퇴적두께 (cm)	퍼진 폭 (cm)
15°	70.3	1.6	90.1	22.6	0.7	41.8	0	0	0
20°	31.5	1.1	65.3	32.5	0.8	38.5	34.2	0.2	10.5

〈Table 4〉는 곡선형 사방댐 모형에서 하류의 토석류 퇴적 길이와 두께, 폭을 나타낸 것이다. 곡선형 사방댐도 직선형 사방댐과 같이 설치각에 따라 토석류의 퇴적두께가 감소하는 경향성을 확인할 수 있었으며, 퇴적 길이와 퇴적 폭은 그 경향성을 확인하기가 힘들었다. 이 역시 격자관의 수평 문제로 기인한 것임을 추정할 수 있었다. 그러나 설치각 90°인 경우 토석류가 사면에 완전히 포획되었기 때문에 하류에 쌓이는 토석류가 없었다. 사면의 토석류 분포는 [Fig. 11]을 통해 확인할 수 있었다.



[Fig. 11] The distribution of sedimentary of curved typed debris barrier model

다. 국자형 사방댐 모형

〈Table 5〉은 국자형 사방댐 모형에서 토석류가 하류에 최초로 도착하는 시간과 사면에서 토석류가 완전히 방출되는 시간을 나타낸 것이다. 실험 세트장의 경사를 15°로 했을 때, 댐의 설치각도가 30°, 60°, 90°로 증가함에 따라 토석류의 최초 도착 시간과 완전 방출 시간이 더욱 증가한 것을 볼 수 있었다. 이는 실험 세트장의 경사가 20°일 때도 같은 경향성을 보였다. 국자형 사방댐 역시 설치각이 90°일 때가 토석류의 유속을 가장 크게 감소시켰음을 알 수 있었다.

<Table 5> Initial arrival time and total release time of ladel typed debris barrier

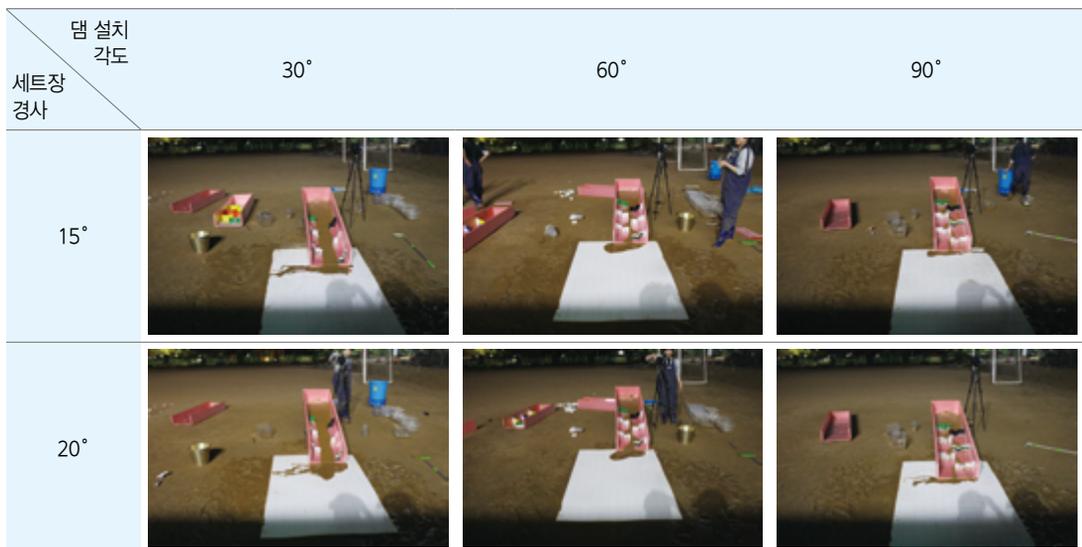
댐 설치 각도 세트장 경사	30°		60°		90°	
	최초 도착 시간 (s)	완전 방출 시간 (s)	최초 도착 시간 (s)	완전 방출 시간 (s)	최초 도착 시간 (s)	완전 방출 시간 (s)
15°	2.5	42.8	4.5	32.2	24.9	75.9
20°	1.6	32.9	4.0	29.6	11.1	60.4

<Table 6>에서 국자형 사방댐 역시 토석류의 퇴적길이와 퍼진 폭은 경향성을 찾기 어려웠으나, 퇴적두께는 사방댐의 설치각이 증가함에 따라 그 양이 감소하며, 특히 90°일 때 그 양이 급감하는 것을 알 수 있었다. 따라서 국자형 사방댐의 경우 설치각도가 90°일 때 토석류의 속도를 가장 늦출 수 있다는 것을 알 수 있었다.

<Table 6> Length, thickness and width of sedimentary of ladel typed debris barrier

댐 설치 각도 세트장 경사	30°			60°			90°		
	퇴적길이 (cm)	퇴적두께 (cm)	퍼진 폭 (cm)	퇴적길이 (cm)	퇴적두께 (cm)	퍼진 폭 (cm)	퇴적길이 (cm)	퇴적두께 (cm)	퍼진 폭 (cm)
15°	95.4	1.2	17.4	31.3	1.1	60.4	88.2	0.3	11.5
20°	0.4	1.4	96.6	37.4	1.1	51.7	11.5	0.5	56.5

이와 함께 [Fig. 12]에서는 경사면에서 국자형 사방댐 모형의 퇴적 분포를 확인할 수 있었다. 설치각이 90°인 경우를 살펴보면 댐이 설치된 부분에 토석류가 같은 양으로 분포하는 것이 아니라 상류 쪽에서 많은 토석류가 포획되고 하부로 갈수록 그 양이 급격히 줄어드는 양상을 파악할 수 있었다.



[Fig. 12] The distribution of sedimentary of ladel typed debris barrier model

2. 투과형 사방댐의 형태에 따른 토석류 유속 저감 효과

<Table 7>은 설치각이 90°일 때 투과형 사방댐의 형태에 따른 토석류의 최초 도착 시간과 토석류 완전 방출 시간을 비교한 것이다.

〈Table 7〉 Initial arrival time and total release time according to the shape of debris barrier

세트장 경사 / 댐 설치 각도	직선형 댐		국자형 댐		곡선형 댐	
	최초 도착 시간 (s)	완전 방출 시간 (s)	최초 도착 시간 (s)	완전 방출 시간 (s)	최초 도착 시간 (s)	완전 방출 시간 (s)
15°	12.1	39.9	24.9	75.9	33.6	×
20°	9.1	30.2	11.1	60.4	103.0	137.5

〈Table 7〉은 댐의 형태에 따른 최초도착시간과 완전방출시간을 비교하여 나타낸 것이다. 세트장의 경사와 상관없이 형태에 따른 유속 저감 효과에 차이가 있었다. 특히, 곡선형 사방댐이 토석류의 최초 도착 시간도 길었고, 토석류의 완전 방출 시간도 월등히 길었기에 유속 저감 효과가 가장 뛰어난 것으로 볼 수 있었다.

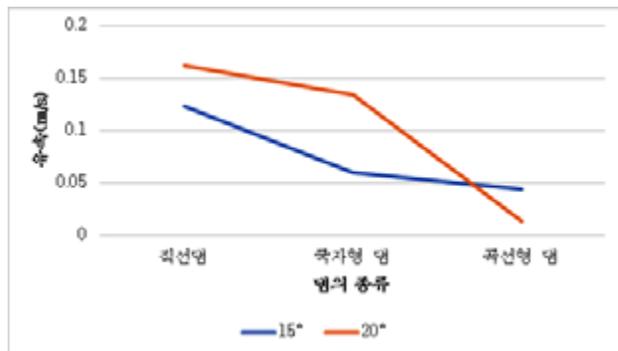
〈Table 8〉 The thickness of sedimentary according to the shape of debris barrier

세트장 경사 / 댐 설치 각도	직선형 댐			국자형 댐			곡선형 댐		
	퇴적길이 (cm)	퇴적두께 (cm)	퍼진 폭 (cm)	퇴적길이 (cm)	퇴적두께 (cm)	퍼진 폭 (cm)	퇴적길이 (cm)	퇴적두께 (cm)	퍼진 폭 (cm)
15°	25.3	0.2	91.8	88.2	0.3	11.5	×	0	0
20°	75.5	0.4	27.3	11.5	0.5	56.5	34.2	0.2	10.5

〈Table 8〉는 댐의 형태에 따른 하부 토석류의 퇴적두께를 비교하여 나타낸 것이다. 댐의 형태와 상관없이 댐이 설치된 실험장이 모두 하부 토석류 퇴적두께가 얇았으며, 그중에서 특히 곡선형 사방댐이 하부에 토석류가 쌓이지 않거나 토석류의 퇴적두께가 가장 작아 토석류 유출 저감 효과가 가장 뛰어난 것으로 볼 수 있었다.

3. 유속 저감 효과

본 연구에서는 산의 경사와 댐의 형태에 따라서 토석류가 하부에 최초로 도착하는 시간 및 토석류가 경사면을 완전히 빠져나가는 시간을 측정하였다. 토석류가 하부에 최초로 도착하는 시간은 직선형, 국자형, 곡선형의 순서로 증가하였고, 이를 사면 경사 길이로 나눈 유속을 비교한 그래프가 [Fig. 13]에 제시되었다. [Fig. 13]를 보면 곡선형이 유속 저감 효과가 가장 크고, 세트장의 경사가 15°일 때보다 경사가 20°일 때 유속 감소 효과가 더 크다는 것을 알 수 있었다.



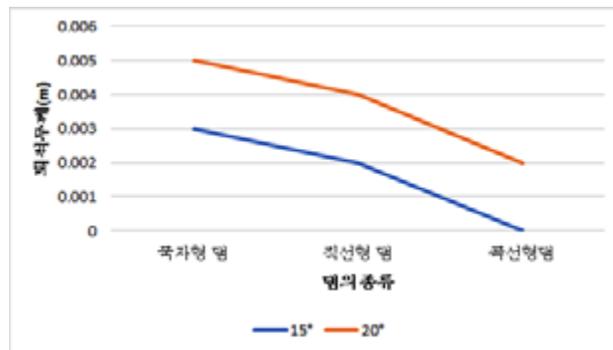
[Fig. 13] Flow rate according to the shape of debris barrier when the angle of the debris barrier is 90°

토석류의 완전방출시간은 토석류가 더 이상 흐르지 않을 때까지의 시간이다. 즉, 완전방출시간이 증가할수록 토석류의 유하속력을 감소시켰다고 볼 수 있었다. 본 연구에서는 직선형, 국자형, 곡선형의 순으로 토석류의 완전 방출 시간이 증가하였다. 이를 통해 볼 때 투과형 사방댐 중 유속 저감 효과가 가장 큰 것은 곡선형 사방댐임을 알 수 있었다.

4. 토석류 방지 효과

본 연구에서는 산의 경사와 댐의 형태에 따른 하류의 토석류 퇴적두께를 측정하였다. 토석류의 퇴적 길이의 경우 $\log L = 0.42 \log(\tan(x) * V) + 0.935$ (L : 퇴적길이, x : 평균 경사, V : 토석류량) 으로 나타낼 수 있다. 위 실험 과정에서 세트장의 경사, 즉 평균 경사가 증가함에 따라 토석류의 퇴적 길이가 증가하는 경향을 일부 볼 수 있었으나, 그렇지 않은 결과도 측정되었다. 이는 실험 장소가 완벽한 수평이지 않은 운동장 바닥 위에서 실험을 진행하였기 때문에 물이 격자판 위에서 경사를 따라 쉽게 움직여서 측정에 오차가 발생했을 것이라고 예상된다.

최두영의 연구에 따르면 퇴적두께의 경우 토석류의 퇴적이 임계 두께($T_c = c / [\gamma \cos \theta (\tan \theta - \tan \phi)]$) (T_c 는 임계 두께, c 는 토석의 점착강도, γ 는 토석의 단위질량, θ 는 수로의 경사, ϕ 는 토석의 내부 마찰각)에 도달할 때 발생한다. 위 실험에서 토석의 점착강도, 단위 질량, 내부 마찰각은 같다고 가정했을 때, 수로의 경사, 즉 세트장의 경사가 증가할수록 임계 두께가 감소함을 확인할 수 있었다[15]. 임계 두께가 감소하면, 임계 두께에 도달하기 쉬워지고, 이는 토석류의 퇴적이 더 잘 일어난다는 것을 말한다. 따라서 세트장의 경사가 증가할수록, 토석류의 퇴적 두께가 증가함을 알 수 있었다. 위 실험에서는, 댐의 설치각은 증가할수록, 실험장의 기울기가 작을수록 줄어들었다. 그 결과 국자형, 직선형, 곡선형의 순서로 퇴적 두께가 감소하였다. 이러한 경향성은 [Fig. 14]을 통해 확인할 수 있었다. 퇴적토사량은 퇴적면적에 퇴적두께를 곱하여 구한다. 즉, 퇴적두께가 작다는 것은 상부에서 토석류를 포획하여 하부로 내려가는 토석류의 양을 줄였다는 것을 의미하며, 하부로 내려가는 토석류의 양이 줄었다는 것은 결국 토석류 유속 저감 효과가 있었다는 것을 말해주었다. 따라서 실험장의 경사각과 상관없이 곡선형 사방댐이 가장 토석류 방지 효과가 좋음을 알 수 있었다.



[Fig. 14] The thickness of sedimentary according to the shape of debris barrier when the angle of the debris barrier is 90°

V. 결론 및 제언

본 연구에서는 산사태를 가장 잘 방지할 수 있는 여러 가지 사방댐 모형에 따른 최적의 설치각도와 산의 경사에 따른 최적의 사방댐 모형을 알아보기 위한 연구를 진행하였다. 기존의 직선형인 투과형 사방댐의 형태에 변화를 주어 곡선형 사방댐, 국자형 사방댐의 모형을 고안하여 토석류 방지와 유속 감소 효과를 연구하였다. 아이소 펑크와 3D 프린터를 활용하여 실험 세트장 및 댐의 모형을 제작한 후 실험을 진행하였다. 실험은 사방댐의 설치각을 30°, 60°, 90°로 바꾸어 각 형태별 유속 저감 효과와 토석류 방지 효과를 비교해 보았으며, 산의 경사도 15°, 20°로 바꾸어 같은 실험을 진행하였다. 이 때 유속 저감 효과는 토석류가 최초로 하부에 도착하는 시간을 측정하여 사면 경사로 나는 유속을 비교하였고, 토석류 방지 효과는 하부에 토석류의 퇴적된 두께를 비교하였다.

먼저, 유속 저감 효과는 기존의 직선형 사방댐보다 본 연구에서 제시한 곡면을 추가한 국자형 댐과 곡선형 댐이 그 효과가 탁월한 것을 확인할 수 있었다. 또한 토석류 방지 효과의 경우 곡선형 댐이 직선형이나 국자형보다 그 효과가 탁월하며 댐 설치 각도가 90°이고, 세트장의 경사가 15°일 때에는 댐 하부로 토석류를 전혀 내려보내지 않은 것을 확인할 수 있었다. 이는 곡선형댐이 토석류의 접촉면을 늘릴 뿐만 아니라 토석류를 다른 형태보다 더욱 효과적으로 포획해 유속을 감소시

키면서도 토석류 방지 효과까지 높아진 것으로 생각해 볼 수 있었다. 이러한 결과는 기존의 불투과형 사방댐에 새로운 대안을 제시해 주는 것으로 산의 경사를 전혀 훼손시키지 않고도 토석류가 하부까지 전달되는 것을 효과적으로 막을 수 있을 것으로 기대된다. 또한 기존의 불투과형 사방댐이 갖는 물의 고임 현상으로 인한 녹조, 악취 발생과 같은 수질 오염 문제 역시 곡선형의 투과형 사방댐을 설치할 경우 지속적인 물의 흐름은 유지시켜 줄 수 있기에 효과적인 해결책을 제시해 주고 있다. 본 연구는 산의 경사가 낮은 지역에서 투과형 사방댐을 설치할 경우 그 형태에 대한 새로운 안을 제시하고 있으며, 나아가 산의 경사에 따른 적절한 댐의 곡률과 최적의 설치각 등은 후속 연구를 통해 알아볼 필요가 있을 것으로 생각된다.

VI. 참고문헌

- [1] 박병수, 전상현, 엄재경, 조광준, 유남재. (2013). 강원 인제지역 토석류 사방시설의 준설 및 퇴적 특성. 한국지반환경공학회논문집, 14(1), 15~22.
- [2] 김낙영. (2012). 토석류의 정의와 피해사례를 설명해주세요. 대한토목학회지, 60(7), 97~100.
- [3] 산림청. www.forest.go.kr > 분야별 산림정보 > 산사태자료방 > 산사태의 정의.
- [4] 이창우, 우충식, 김동엽, 정선환, 구교상. (2014). 국민안전과 국토보전을 위한 산사태 바로알기. 국립산림과학원 연구자료 제 584호.
- [5] 사방사태기술협회. (2010). 재해를 발생시킨 토사의 움직임에 관한 조사. 씨아이알(CIR), 토석류 재해대책을 위한 조사법 제 2장.
- [6] 최하길. (2007). 지반재해공학. 원기술.
- [7] 김진홍. (1995). 토석류의 해석과 적용분야. 대한토목학회지, 43(9), 100~103.
- [8] SBS. (2017). 우리나라 이색 친환경 사방댐 종류와 원리. 일요 특선 다큐멘터리 115.
- [9] 윤찬영, 이상돈, 김성태. (2015). 사방댐 구조물 연구. KIPRIS 특허실용신안 출원번호:1020150030354.
- [10] 곽동희, 박태욱, 권지영. (2011). 마찰손실수두. 물용어집.
- [11] 최신규, 이정민, 정한범, 김지현, 권태혁. (2015). 슬릿트형 사방댐의 배치에 따른 토석류 흐름에 대한 영향: 축소모형실험 연구. 한국방재학회 학술발표대회논문집, 15(3), 223~228.
- [12] 정태성. (2017). 실규모 급경사지 붕괴재현을 위한 실증실험기술 개발. 국립 재난 안전 연구원 연구보고서.
- [13] 김기환, 이동혁, 김대희, 이승호. (2008). 토석류 흐름 상태 특성 파악을 위한 모형실험 연구. 한국지반환경공학회 논문집, 9(5), 83~89.
- [14] 김성덕, 윤일로, 오세욱, 이호진, 배우석. (2012). 비탈면 경사 변화에 따른 토석류 거동의 수치모의. 한국지반환경공학회논문집, 13(6), 59~66.
- [15] 최두영, 백중철. (2012). 한국 토석류의 이동거리 특성. 대한토목학회논문집 B, 32(3), 193~201.

I 연구진 I

윤혜림 (Hyelim Yoon, 인천진산과학고등학교, gt1039@naver.com), 공동저자

신동현 (Donghyun Shin, 인천진산과학고등학교, sdhyun02@gmail.com), 공동저자

유찬영 (Chanyoung Yoo, 인천진산과학고등학교, ycy77ok@naver.com), 공동저자

지서연 (Seoyeon Ji, 인천진산과학고등학교, jsy5037402@naver.com), 공동저자

김민서 (Minseo Kim, 인천진산과학고등학교, ysc9356@naver.com), 공동저자

지도교사 : 신지은 (Jieun Shin, 인천진산과학고등학교, jieun.shin@ice.go.kr)

큐브위성의 기능시험 모델 제작 및 카메라 짐벌을 활용한 1축 자세제어 시스템 구축

임정민 · 조영민 · 이유빈 - KAIST 부설 한국과학영재학교

Functional Test Model Implementation of Cube Satellite and Construction of 1-axis Attitude Control System for Cube Satellite using Camera Gimbal

Jeongmin Lim · Youngmin Cho · Yubin Lee - Korea Science Academy of KAIST

국문초록

본 연구에서는 큐브위성의 자세제어 시스템 구축을 목표로, 1축 자세제어 큐브위성 모형을 제작하고, 카메라 짐벌을 이용한 자세제어 실험의 가능성을 확인하고자 하였다. 먼저, 큐브위성의 자세제어를 위해 반작용 휠을 이용한 큐브위성 모형을 제작하고, 카메라 짐벌을 이용한 값싸고 다루기 편한 자세제어 실험환경을 구축하였다. 그리고 소프트웨어적인 부분에 속하는 지상국과 작동 코드를 개발하였다. 이후 자세제어가 원활하게 이루어지는지 확인하기 위해 두 가지 모드의 실험을 진행하였다: 자세유지, 목표물 추적 모드. 이때 카메라 짐벌 관절(베어링)의 마찰을 고려한 PID 제어를 통해 초기 불안정성을 보완하고, 오차범위 ± 5 도 이내에서 자세가 안정화됨을 확인하였다. 또한 Pixy를 이용한 목표물 추적 모드도 정확하게 동작함을 확인하였다. 이를 통해 제작된 1축 자세제어 큐브위성 모형의 성능을 검증하였으며, 카메라 짐벌을 이용하여 1축 자세제어 실험의 실현가능성 또한 증명할 수 있었다.

중심어 : 큐브위성, 반작용 휠, 카메라 짐벌, PID 제어, 자세제어 실험

ABSTRACT

In this study, with the aim of establishing a cube satellite's attitude control system, we made a 1-axis attitude control cube satellite model and checked the possibility of a attitude control experiment using a camera gimbal. First, the model of the Cube Satellite with the reaction wheel was manufactured to control the attitude of the Cube Satellite, and then attitude control environment using the camera gimbal which is cheap and easy to handle was constructed. Since then, we built our own operating codes and ground station that belong to the software sector. After making model and attitude control experiment environment, the two modes of attitude control experiment were conducted to check the ability of our model: attitude regulation and target tracking modes. The PID control, which takes into account the friction of the camera gimbal joint, compensated for initial instability and confirmed that the attitude is stabilized within ± 5 degrees of error. We also confirmed that the target tracking mode using Pixy worked correctly. The performance of the one-axis attitude control cube satellite model, which was manufactured through this process, was verified, and the feasibility of the one-axis attitude control experiment was also demonstrated using the camera gimbal.

Key words: Cube Satellite, Reaction Wheel, Camera Gimbal, PID Control, Attitude Control Experiment

I. 서론

우리나라는 나로호를 통해 인공위성을 발사한 이후 인공위성 기술에 많은 투자를 하고 있다. 특히 최근에 소형위성인 큐브위성에 많은 관심을 보이고 있다. 큐브위성은 일반 위성과 다르게 개발 기간이 짧으며 개발 비용도 적어 단기간에 우주 환경에서 여러 실험들을 진행할 수 있다. 이러한 장점 때문에 많은 대학교와 연구소에서 큐브위성 개발에 힘을 쏟고 있다.

큐브위성은 여러 구성요소로 이루어져 있다. 크게는 두 가지로, 큐브위성의 미션을 수행하는 탑재체와 큐브위성의 본체에 해당하는 버스(bus)로 나뉜다. 버스는 위성의 구조 설계, 미션 수행을 위한 위성의 자세제어 등으로 구성된다[1]. 그 외에도 열진공 시험 및 진동 시험을 통해 우주환경에서 위성이 원활하게 작동하는지 확인이 필요하다[2].

우리는 그 중 가장 중요하게 여겨지는 위성의 자세제어에 관심을 가지게 되었다. 위성의 모든 미션은 특정 자세를 유지해야 실현가능하다. 예를 들어 별을 관측하기 위해서는 지속적으로 별을 지향하도록 위성의 자세를 유지해야 가능하다. 일반적으로 위성 개발 시 자세제어 시험을 담당하고 있는 기기는 에어베어링이다. 에어베어링은 금속, 플라스틱, 카본, 세라믹을 원료로 제조된 다공질 소결체에 압축공기를 공급하여 흡착 또는 부상력을 부여하는 장치로 마찰로 인한 제품의 손상

이 발생하지 않는다. 에어베어링은 정확하고 정밀하게 자세제어 실험이 가능하다는 장점이 있지만, 가격도 비싸고 외부 가스압출 시스템을 필요로 하여 복잡하고 에너지 측면에서 비용이 발생한다. 또한 외부 가압 가스의 미립자 및 먼지의 존재에 민감하기 때문에 깨끗한 환경을 필요로 하며, 설치와 운용이 어렵하다는 단점이 있다[3]. 이에 큐브위성 개발 시에 자세제어 실험을 진행할 수 있는 더 간편한 기기를 고민하던 중 카메라 짐벌을 생각하게 되었다. 3축의 회전이 가능한 카메라 짐벌은 좋은 도구일 것이라는 생각이 들었다. 이에 큐브위성의 자세제어를 위한 모형 제작과 카메라 짐벌을 이용한 1축 자세제어 실험환경 구현을 통해 큐브위성의 자세제어 시스템 구축을 목표로 연구를 진행하였다. 다만 카메라 짐벌은 관절 부위에 마찰력이 존재하여 무중력 환경을 이상적으로 모사할 수 없다. 이를 보완하기 위한 방법이 필요하나, 장소 및 운용의 한계를 가진 고가의 에어베어링 대신 카메라 짐벌을 활용하여 자세제어 실험환경을 구축하는 데 연구의 목적이 있다. 이러한 시스템 구축을 통해 전리층 등 지구주변 우주환경 관측용 큐브위성의 개발과 자세제어 시험이 가능하게 된다.

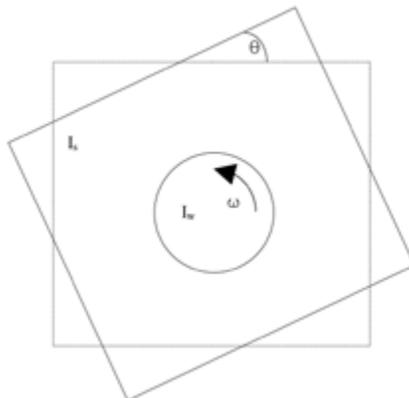
II. 이론적 배경

인공위성의 자세제어는 어떠한 목적에 맞춰서 인공위성의 좌표계를 관성좌표계에 대해서 상대적으로 바꾸어 놓는 작업을 뜻한다. 관성좌표계는 인공위성에서 수정할 수 있는 부분이 아니기 때문에 인공위성이 관성좌표계에 대해서 상대적으로 움직여야만 한다. 이러한 작업을 수행하기 위해서는 구동기(actuator)가 필요하다. 인공위성에서 흔히 사용되는 구동기는 반작용 휠, CMG(Control Moment Gyro)[4], 자세제어용 추력기 등이 있다. 우리는 구동기 중 반작용 휠을 기반으로 한 실험장치를 제작하였다.

1. 반작용 휠을 이용한 자세제어의 원리

본 연구에서 제작한 1축 자세제어 실험장치는 반작용 휠을 이용한 자세제어를 바탕으로 제작되었다. 반작용 휠은 위성의 회전속도가 변함에 따라 속도가 변하는 방향의 역방향으로 일(work)을 하며 자세를 유지하는 장치이다[5]. 일반적으로 위성의 3축 자세제어에서 외부에 추력기가 필요하지 않기 때문에 가장 대중적으로 사용되는 구동기이다. 반작용 휠이 작용하는 방식은 동역학적 해석이 가능하므로 제작한 1축 자세제어 모형을 기준으로 1축에 대한 자세제어 방식을 동역학적으로 해석하도록 하겠다[6].

2. 1축 회전 인공위성의 운동방정식



[Fig. 1] Model of 1-axis attitude control experiment

기본적으로 모든 반작용 휠을 이용한 자세제어 장치는 각운동량 보존 법칙을 만족하는 범위 안에서 자세제어를 진행한다. 외부로부터 토크가 가해지지 않는 상황에서는 인공위성 본체와 반작용 휠의 각운동량의 총합은 일정해야 한다. 이렇게 전체 각운동량의 총합이 일정한 상황에서 반작용 휠의 회전 속도를 변화시키면 속도 변화로 인해 발생한 반작용 휠의 각운동량을 상쇄하기 위해 본체의 각운동량이 발생한다. 따라서 이를 상쇄하기 위해 속도 변화가 일어나는 역방향으로 본체의 각운동량이 생기게 된다. 즉, 반작용 휠 제어방식에서는 반작용 휠의 속도변화를 통해 본체의 각운동량을 조절할 수 있으므로 이 방식을 바탕으로 회전 각도를 제어한다[7].

이제 자세제어 방식의 동역학적 분석을 살펴보자. [Fig. 1]은 1축 자세제어 모델의 기본적인 외형이다. [Fig. 1]에서 큰 사각형은 인공위성, 중앙의 원은 반작용 휠을 단순하게 나타낸 것이고, θ 는 기준 축으로부터 위성이 회전한 각도, 즉, 인공위성의 자세를 의미하며, ω 는 반작용 휠의 반시계방향 회전 각속도이다. I_s 는 인공위성의 회전축 방향 관성모멘트, I_w 는 반작용 휠의 회전축 방향 관성모멘트이다. 1축 자세제어 장치와 [Fig. 1]과 같이 회전하게 되면 이 인공위성의 각운동량 총합 L 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_s \dot{\theta} + I_w (\omega + \dot{\theta}) = L \tag{1}$$

이 시스템에 외부로부터 가해지는 토크가 없다면 각운동량 보존 법칙에 의해 각운동량이 일정해서 어떤 상수로 표현할 수 있게 되어 식(2)과 같이 나타낼 수 있다.

$$(I_s + I_w) \ddot{\theta} + I_w \dot{\omega} = 0 \tag{2}$$

여기서 $x_1 = \theta$, $x_2 = \dot{\theta}$, $u = -\frac{I_w}{I_s + I_w} \dot{\omega}$ 라 하면 식(2)은 다음과 같은 선형 연립 1차 미분방정식으로 표현이 가능하다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= u \end{aligned} \tag{3}$$

여기서 u 는 반작용 휠의 회전에 의해 위성에 전달되는 반동 토크이다. 위와 같은 식을 상태 방정식(state equation)이라고도 부른다. 하지만 위의 경우는 이상적인 경우이며, 이번에 자체 제작한 1축 자세제어 장치의 경우 짐벌 관절부의 마찰을 무시할 수 없기 때문에 마찰을 고려하여 아래와 같이 수정할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= u_f \end{aligned} \tag{4}$$

식(4)에서 u_f 는

$$u_f = \begin{cases} 0 & \text{if } \dot{\theta} = 0 \text{ and } |u| < \tau_s \\ u - \tau_c \text{sign}(\dot{\theta}) - \mu_v \dot{\theta} & \text{otherwise} \end{cases} \tag{5}$$

여기서

$$\text{sign}(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } x > 0 \\ 0 & \text{if } x = 0 \\ -1 & \text{if } x < 0 \end{cases}$$

이고, τ_s , τ_c , μ_v 는 양의 값을 갖는 상수로 각각 최대 정지마찰 토크, 쿨롱마찰 토크, 이동마찰 계수이다.

식(5)의 의미를 살펴보면 다음과 같다. 우리의 모형위성이 정지해 있고 ($\dot{\theta} = 0$) 반동 토크가 위성을 회전시키는 데 필요한 최대 정지마찰토크 τ_s 보다 작으면 결과적으로 위성에 전달되는 토크가 0이라는 의미이다. 반동 토크가 τ_s 보다 커져야

모형위성이 회전하기 시작한다. 식(5)의 아랫줄은 모형위성이 회전할 때는 반동 토크 u 에서 마찰 토크를 뺀 만큼의 토크가 결과적으로 위성에 전달된다는 의미이다. 이때, 마찰 토크는 위성이 회전하는 방향의 반대로 작용하기 때문에 부호 함수 $sign()$ 이 사용되었다.

식(4)에서 $\dot{\theta} = 0$ 인 조건을 시뮬레이션에서 처리할 때는 시스템이 거의 정지하는 상황이 되었을 때 조건을 너무 자주 체크하게 되어 계산시간이 오래 걸릴 수 있기에, 이를 방지하기 위해 $\dot{\theta} = 0$ 을 체크하는 대신 조건의 범위를 작은 양의 상수 ϵ 에 대해 $|\dot{\theta}| < \epsilon$ 으로 넓히고, 이 속도 범위 내에서는 시스템이 서서히 멈추도록 저항 토크가 작용하게 모델링할 수 있다. 이렇게 수정된 결과는 아래와 같다.

$$u_f = \begin{cases} -\mu_s \dot{\theta} & \text{if } |\dot{\theta}| < \epsilon \text{ and } |u| < \tau_s \\ u - \tau_c \text{sign}(\dot{\theta}) - \mu_v \dot{\theta} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

자세제어 실험장치 동역학 모델:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= u_f \\ \dot{\omega} &= -\frac{I_s + I_w}{I_w} u \\ u_f &= \begin{cases} -\mu_s \dot{\theta} & \text{if } |\dot{\theta}| < \epsilon \text{ and } |u| < \tau_s \\ u - \tau_c \text{sign}(\dot{\theta}) - \mu_v \dot{\theta} & \text{otherwise} \end{cases} \end{aligned} \quad (7)$$

이제 x_1, x_2, ω 의 초기 값과 상수 $\epsilon, \mu_s, \mu_v, \tau_s, \tau_c$ 의 값을 알고 $u(t)$ 를 안다면 식(7)을 시간에 대해 적분하여 시간이 지남에 따라 x_1, x_2, ω 의 값이 어떻게 변하는지 계산할 수 있다.

3. PID 제어기

반작용 휠 제어방식을 바탕으로 1축 자세제어 장치(큐브위성 모형)를 설계하였고, 제어를 정밀하게 해주는 방식으로는 PID 제어를 택하였다. PID 제어기는 기본적으로 피드백제어기의 형태를 가지고 있으며, 제어하고자 하는 대상의 출력값을 측정하여 이를 원하는 참조값 혹은 설정값과 비교하여 오차를 계산하고, 이 오차값을 이용하여 제어에 필요한 제어값을 계산하는 구조로 되어 있다.

이제 식(7) 자세제어 실험장치 동역학 모델에 PID 제어기를 적용해보자. 목표자세 θ_d 가 주어질 때 현재 자세와 목표자세의 오차 e 는 다음과 같이 주어짐을 알 수 있다.

$$e = \theta - \theta_d$$

PID 제어기는 오차항과 오차항의 미분, 오차항의 적분성분에 상수를 곱하고 더하여 제어입력을 구성하는 형태의 제어기이므로 다음과 같이 기술할 수 있다.

$$u = -k_p e - k_d \dot{e} - k_i \int_0^t e dt \quad (8)$$

여기서 k_p, k_d, k_i 는 모두 양의 값을 갖는 상수이며, 각각 P-gain, D-gain, I-gain이라 불리는 설계 파라미터이다. 각 항에 대한 역할을 분석해보면, 비례항은 현재 상태에서의 오차값의 크기에 비례한 제어작용을 한다. 적분항은 정상상태의 오차를 없애는 작용을 하며, 출력값의 급격한 변화에 제동을 걸어 오버슈트를 줄이고 안정성을 향상시키는 작용을 한다. 편 의 상 목표 자세 θ_d 가 상수라고 하자. 그러면, 식(8)은 다음과 같이 정리할 수 있다. 추가로 도입한 변수 x_3 가 오차 e 의 적분 항에 해당된다[8].

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_1 &= x_2 \\
 \dot{x}_2 &= u_f \\
 \dot{x}_3 &= x_1 - \theta_d \\
 \dot{\omega} &= -\frac{I_s + I_w}{I_w} u \\
 u_f &= \begin{cases} -\mu_s \dot{\theta} & \text{if } |\dot{\theta}| < \epsilon \text{ and } |u| < \tau_s \\ u - \tau_c \text{sgn}(\dot{\theta}) - \mu_v \dot{\theta} & \text{otherwise} \end{cases} \\
 u &= -k_p(x_1 - \theta_d) - k_d x_2 - k_i x_3
 \end{aligned} \tag{9}$$

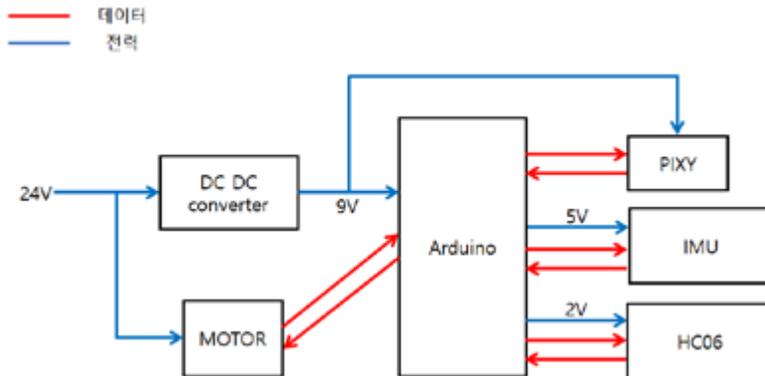
III. 연구 방법 및 절차

1. 1축 자세제어 큐브위성 모형 제작

본 연구에서는 인공위성의 자세제어 원리를 실험해보기 위해 반작용 휠을 이용한 1축 자세제어 기능을 갖춘 큐브위성 모형을 제작하였다. 큐브위성 모형, 즉, 1축 자세제어 실험장치인 큐브위성 모형과 구성요소 모식도는 [Fig. 2] 및 [Fig. 3]과 같다. 큐브위성 모형은 프로세서 아두이노 메가[9], 블루투스 통신 HC06[10], 회전속도와 자세를 측정하는 EBIMU, 반작용 휠 구동 모터, 물체인식 카메라 PIXY 등으로 구성되어 있다.



[Fig. 2] 1-axis control experiment model



[Fig. 3] 1-axis control experiment model diagram

<Table 1> INPUT, OUTPUT of components in the model

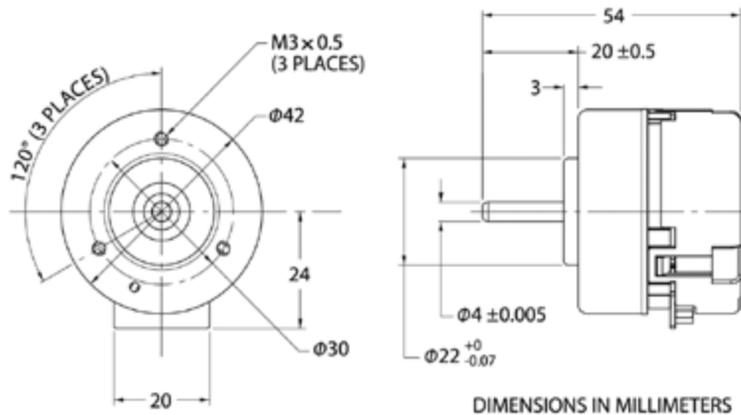
Component	Model	INPUT	OUTPUT
Processor	Arduino Mega 2560		
Bluetooth	HC06	Command from COSMOS	Data toward COSMOS
IMU	EBIMU-9DOFV4	Common attitude	Driving command
Reaction wheel motor	Nidec 24H	Motor RPM	Rotation of motor
Camera	Pixy	Location of target	Driving command
Camera Gimbal	Zhiyun Crane2		

가. EBIMU-9DOFV4

EBIMU는 기본적으로 3축 자이로스코프, 3축 가속도센서, 3축 지자기센서가 내장되어있는 초소형 자세 방위 장치(AHRS)이다. EBIMU에서 자세 데이터의 출력은 Euler Angles와 Quaternion으로 가능하다. 여러 자세측정 센서 장치 중 선택한 EBIMU-9DOFV4는 요구되는 전력이 낮을 뿐만 아니라 전압은 3.3V에서 7V정도이며, 넓은 통신범위를 지니고 있어 HC06 블루투스와의 통신이 원활하게 이루어질 가능성이 높아 선택하였다[11].

나. BLDC Motor

Brushless DC(BLDC) 모터([Fig. 4])는 사이즈가 작고, 진동과 노이즈가 적으며, 작동수명이 길다는 장점이 있어 선택하게 되었다[12, 13].



[Fig. 4] BLDC 24H Motor

다. Pixy

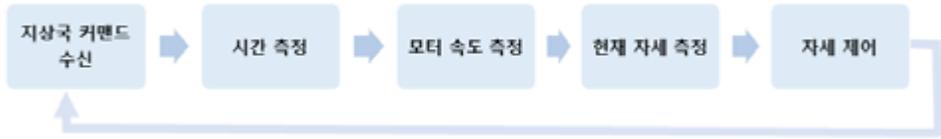
물체인식 카메라인 PIXY는 위성의 자세제어 실험장치의 목표물 추적(tracking) 모드에서 PIXY에 등록된 대상을 따라 움직이며 그 방향으로 위성을 움직이는 데 필요한 장치이다[14, 15].

2. 큐브위성 모형의 자세제어 실험

인공위성의 3축 자세제어 실험에 보통 사용되는 에어베어링은 고가이면서 다루기 어렵다는 단점이 있다. 이에 본 연구에서는 시중에 판매되는 카메라 짐벌을 사용하여 값싸고 간편하게 3축 자세제어 실험을 할 수 있는 환경을 구축하고, 그 성능을 확인해 보고자 하였다.

큐브위성이 로켓에서 발사되어 가장 먼저 진행되는 작업은 태양을 향하는 것이다. 이는 큐브위성에 전원을 최대한 빨리

공급받아야하기 때문이다. 이에 큐브위성의 자세를 제어하는 것은 큐브위성의 미션 수행에 있어 굉장히 큰 비중을 차지하게 된다. 우리는 직접 제작한 자세제어 실험장치를 통해 큐브위성이 로켓에서 분리된 후, 태양을 기준으로 위성의 자세를 제어하는 과정을 자세유지 모드와 목표물 추적 모드로 구현하였다. [Fig. 5]는 지상국의 커맨드 수신부터 큐브위성의 자세 측정 및 자세제어 과정을 나타낸 모식도이다.



[Fig. 5] The algorithm diagram for 1-axis attitude control experiment

가. 자세제어-자세유지 모드

위성의 yaw축에 휠을 달아 휠의 회전 변화량에 의해 생성되는 토크를 이용하여 위성의 자세를 제어하기로 하였다. 처음 구상한 제어 방법은 오차 각에 비례한 토크를 가하는 P-항 제어 방식이었다. 그러나 진동과 평형 오차가 심하여 PID 제어를 사용하기로 하였다. 이때 제어해야 하는 대상은 자세 각도이다. 우리가 실질적으로 BLDC 모터에서 조절할 수 있는 값은 pwm(pulse width modulation; 교류전압 펄스변조) 값이다. 정밀한 자세제어를 위해서는 모터의 속도를 정밀하게 제어할 수 있도록 제어기를 구현해야 하나, 본 연구에서는 시간과 기재의 한계로 회전관성과 마찰력을 비롯한 모델 파라미터의 정확한 추정이 어려웠고, 연구의 목적이 대략적인 자세제어 원리 구현인 점을 감안하여 반작용 휠의 속도 제어를 근사적으로 구현하였다. 우리가 사용한 BLDC 모터의 속도는 pwm 입력에 대체로 비례하는 것을 관찰할 수 있었기 때문에, 입력 pwm과 모터 속도의 관계가 선형적이라고 가정하고 모터 제어 코드를 작성하였다. 이후에 기술할 실험 결과의 오차에는 이와 같이 모터 제어를 근사적으로 구현함에 따른 오차도 작용했을 것으로 생각된다.

그 후 자세제어 커맨드에서 error angle을 현재 yaw 값에서 목표 yaw 값으로 설정하고 이 값이 허용 오차 밖에 있으면 PID 제어를 통해 error angle을 0으로 맞추었다. 이때 Δtime은 아두이노 코드의 loop를 실행하는 데 걸리는 시간으로 하였다.

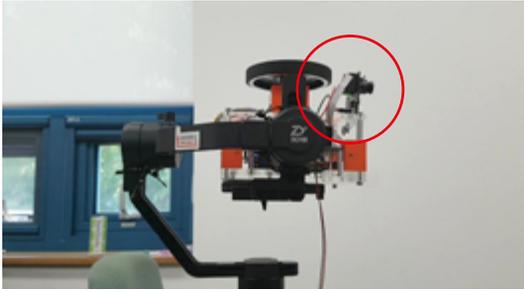
PID 제어에서 안정화란 진동이 없고 오차 값이 매우 작은 상태를 말한다. 이는 각각의 제어 게인(gain) 값을 조절하면서 안정화를 진행한다. 우리는 천 번 이상의 실험을 통해 가장 안정적인 상태의 PID 게인 값을 알아내었다. 그러나 error angle을 0으로 조절하도록 구현된 PID 제어를 단순 적용하면 휠의 회전 속도가 너무 높아지는 경향이 있었다. 이렇게 되면 이후 휠의 회전 속도를 높이는 데 한계가 생겨서 원하는 제어 토크를 발생시킬 수 없게 된다. 이 문제를 해결하기 위해 우리는 error angle 값의 범위에 따라 제어 방식이 달라지도록 모터 제어를 구현하였다. 즉, error angle이 설정해준 허용 범위 밖에 있을 때에는 error angle을 0으로 줄이는 PID 제어를 적용하고, error angle이 설정된 허용 범위 내에 들어오면 휠 속도를 0으로 줄이는 PID 제어가 적용되도록 제어 알고리즘을 구현하였다. error angle이 0에 도달하는 시간은 길어지겠지만 이후 단계의 새로운 자세제어에 있어 충분한 토크를 가할 수 있다[16].

추가적인 오류로는 EBIMU의 Euler 각도의 특성상 각도의 범위가 180°에서 -180°까지인데, 이는 180°의 경계에서 오차 범위가 360°로 커진다는 문제점이 있다. 이 문제는 error angle의 범위에 따라 error angle 값을 재설정 해줌으로써 해결할 수 있었다.

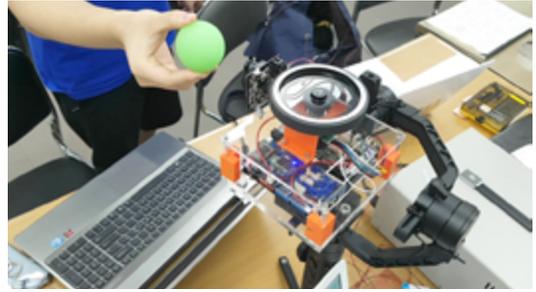
$$\begin{aligned}
 & \text{error angle} > 180^\circ : \text{error angle} - 360^\circ \\
 & \text{error angle} < -180^\circ : 360^\circ - \text{error angle} \\
 & \text{else} : \text{error angle}
 \end{aligned}$$

나. 자세제어-목표물 추적 모드

큐브위성의 목표물 추적 모드는 큐브위성이 주어진 물체를 인식하여 이를 추적하는 과정이다. 물체를 인식하고 이를 추적하기 위해서 물체인식 카메라인 Pixy를 추가하였다([Fig. 6]). Pixy에서는 특정 색을 가진 물체를 등록하여 그 위치를 x 축과 y 축 값으로 나타내게 된다. 큐브위성의 목표물 추적 모드에서는 물체의 중심이 원점에서 떨어진 정도를 error angle로 설정하여 위의 자세유지 모드를 실행하였다([Fig. 7]).



[Fig. 6] Pixy



[Fig. 7] Tracking mode experiment

3. 지상국 구축

가. 지상국 하드웨어

큐브위성 모형에 명령을 보내고 데이터를 수신하기 위한 지상국을 PC에 구축하였다. 지상국은 랩탑과 블루투스 dongle로 구성하였으며, 지상국과 큐브위성은 블루투스로 연결되어 있다. 이는 큐브위성의 회전에 영향을 받지 않으면서 연결 상태가 유지되고, COSMOS로 개발된 지상국은 커맨드 추가가 용이하며 위성의 상태가 지속적으로 수신될 수 있다.

나. 지상국 소프트웨어

지상국 소프트웨어 구축을 위해 처음에는 파이썬의 pyserial 라이브러리를 이용하여 시리얼 통신기반의 지상국을 개발하였다[17]. 그러나 이는 다양한 커맨드를 보낼 수 없다는 단점이 있기 때문에, 기본적인 인공위성 제어와 커맨드 통신에 가장 간편하게 사용되는 지상국인 COSMOS를 사용하기로 결정하였다[18].

COSMOS는 주어진 커맨드를 입력하면 커맨드에 맞는 버퍼 값을 정해진 포트에 송신하게 되는 커맨드 서버와 지속적으로 원하는 특정 정보 값을 받아들이는 텔레메트리 서버를 이용하여 주어진 장치와 통신을 하게 된다. 또한 텔레메트리 서버를 통해 받아들이는 정보를 지속적으로 로그에 기록해두어 장치제어에 관한 정보를 얻을 수 있다. COSMOS를 이용하기 위해서는 config editor 창이나 생성된 디렉토리에서 각 파일에 저장되어 있는 텍스트 파일을 입력하여 커맨드를 생성하거나 받아들이는 정보를 설정할 수 있다.

본 연구의 큐브위성 자세제어 시스템은 아두이노 기반이기 때문에 통신 프로토콜 역시 드론 소프트웨어에서 흔히 쓰이는 멀티위 시리얼 프로토콜(Multiwii Serial Protocol; MSP)을 사용한다. MSP의 메시지는 3가지 형식으로 나뉘게 된다. Command, Request, Response로 각각 지상국에서 아두이노로 전달되는 커맨드, 지상국에서 아두이노로 전달되는 정보 요청, 아두이노에서 지상국으로 전달되는 응답 메시지이다.

우리의 목적은 크게 두 가지로 큐브위성이 주어진 자세위치로 이동하는 것과 주어진 물체를 인식하여 이를 추적하는 것이다. 이 두 가지 주 커맨드와 더불어 다양한 커맨드들을 추가하였다(〈Table 2〉).

〈Table 2〉 COSMOS command

커맨드 종류	커맨드 설명
SET_MODE	모드 설정(angle regulation, pixy tracking)
GET_CURRENT_MODE	현재 모드
SET_MOTOR_CONTROL	모터 pwm 값 설정
GET_MOTOR_SPEED	현재 모터의 pwm 값
GET_IMU_DATA	현재 자세의 euler 값
SET_REGULATION_GAIN	자세 제어 PID 게인 값 설정
GET_REGULATION_GAIN	현재 자세 제어 PID 게인 값
SET_TRACKING_GAIN	tracking PID 게인 값 설정
GET_TRACKING_GAIN	현재 tracking PID 게인 값
ABORT	초기화
SET_ORIGIN	현재 위치를 원점으로 설정
SET_DESIRED_YAW_ANGLE	목표 위치 설정
GET_DESIRED_YAW_ANGLE	목표 위치
SET_REGULATION_TOLERANCE	자세 제어 허용 오차 범위 설정
GET_REGULATION_TOLERANCE	현재 자세 제어 허용 오차 범위
SET_PIXY_TRACKING_TOLERANCE	tracking 허용 오차 범위 설정
GET_PIXY_TRACKING_TOLERANCE	현재 tracking 허용 오차 범위
SET_MOTOR_GAIN	pwm 값 PID 게인 값 설정
GET_MOTOR_GAIN	현재 pwm 값 PID 게인 값

4. 큐브위성 모형의 자세제어 실험의 한계점

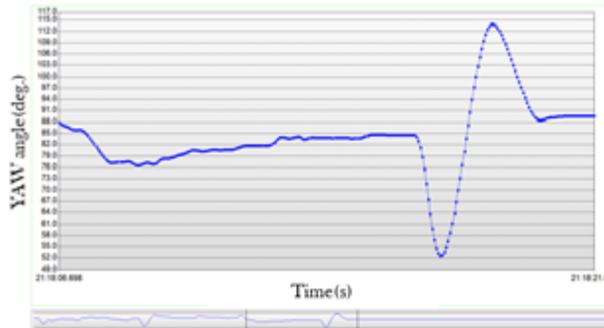
큐브위성 모형을 이용한 자세제어 실험의 한계점은 카메라 짐벌의 관절(베어링)에 존재하는 마찰력이다. 마찰력이 없는 경우에는 초기 각운동량과 나중의 각운동량이 동일하지만, 우리 실험장치의 경우에는 마찰력으로 인해 각운동량이 동일하지 않을 수 있다. 따라서 이를 보완하기 위한 방법이 필요하며, 카메라 짐벌에서 사용한 큐브위성 모형의 아두이노 코드를 우주에서 바로 사용하지 못할 수 있다. 그럼에도 에어베어링과 같이 장소 및 운용의 한계를 가진 고가의 실험장치 대신 카메라 짐벌을 자세제어 실험장치의 성능시험에 활용할 수 있음을 확인하는 데 본 연구의 의미가 있다.

IV. 연구 결과

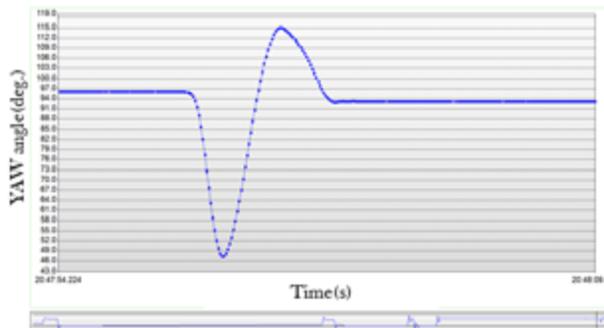
본 연구에서는 [Fig. 2]와 같이 1축 자세제어 큐브위성 모형을 제작하고, 카메라 짐벌을 이용한 자세제어 실험환경을 구현하였다. 큐브위성 모형의 자세제어 성능을 검증하기 위하여 크게 두 가지 모드의 실험을 진행하였다: 자세유지 모드, 목표물 추적 모드.

1. 자세유지 모드 실험

자세유지 모드 실험에서는 두 가지 실험을 진행하였다. 첫 번째 실험은 set_mode 커맨드를 바탕으로 가장 안정한 자세를 찾아가게 하는 것으로, 오차 각에 비례한 토크를 가하는 PID 제어 방식이다. [Fig. 8]은 error angle을 0으로 조절하도록 구현된 통상적인 PID 제어를 적용하여 얻은 초기 실험 결과이며, [Fig. 9]는 앞서 2절에서 설명한 바와 같이 error angle이 허용 범위(± 5 도) 밖에 있을 때는 error angle을 0으로 줄이는 PID가 적용되고, error angle이 허용 범위 내에 들어왔을 때는 휠 속도를 0으로 줄이는 PID 제어가 적용되도록 제어 알고리즘을 수정한 이후에 얻어진 실험 결과이다. 알고리즘 수정 결과, 통상적인 PID 제어를 단순 적용하였을 때 보다 자세 안정화에 걸린 시간이 줄어들고 매끄럽게 제어가 되는 것을 확인할 수 있었다.



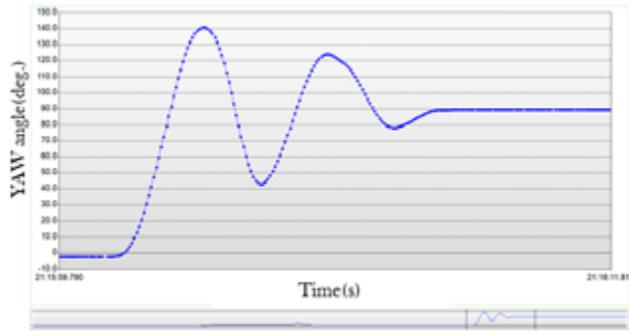
[Fig. 8] Early experiment of attitude maintain mode



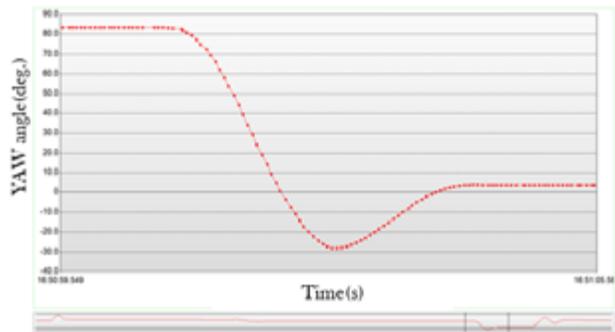
[Fig. 9] Final experiment of attitude maintain model

두 번째 실험은 set_yaw angle 커맨드를 바탕으로 우리가 원하는 각도만큼 자세제어 큐브위성 모형을 회전하게 하는 실험이다. 여기서 각도는 90도로 설정하여 실험을 진행하였다. 각도를 90도로 설정한 것은 자세 변화를 쉽게 관찰할 수 있기 때문이며, 명령창에 특정 각도를 입력하여 원하는 각도만큼 회전하는 것을 확인할 수 있다.

90도 회전 실험결과는 시간에 따른 yaw angle의 변화를 나타낸 [Fig. 10]과 같다. 실험장치의 진동이 여러 차례 있음을 각도의 지속적인 변화로 확인할 수 있다. 하지만 진동 및 오차범위를 줄이는 방향으로 PID 게인 값을 조정함(P-게인: 30, D-게인: 20, I-게인: 10) 후, 결과는 [Fig. 11]과 같았다. 초기각과 최종각을 비교해 보면 커맨드에 따라 각 90도 근처에 도달했음을 알 수 있고, 허용 오차범위(± 5 도) 이내에서 안정화됨을 확인할 수 있다. 또한, PID 제어 전보다 진동이 줄었음을 확인할 수 있다.

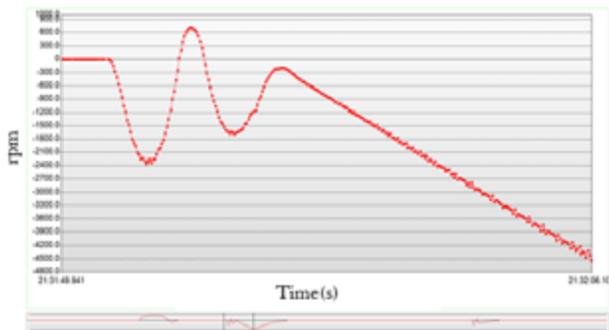


[Fig. 10] Early attitude control mode (90 degree)

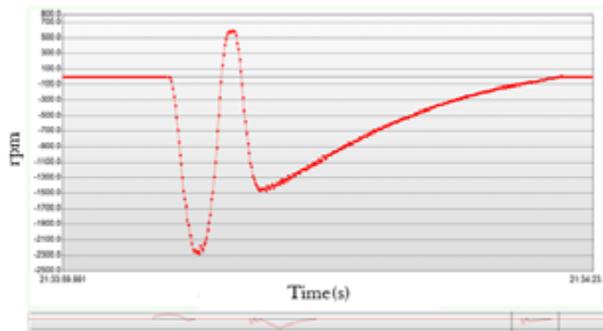


[Fig. 11] Final attitude control mode (90 degree)

위와 같이 자세제어 실험을 진행했을 때 모터 속도인 rpm 값은 [Fig. 12] 및 [Fig. 13]과 같다. error angle을 0으로 제어하는 PID 제어를 단순 적용했던 초기 실험의 경우([Fig. 12])에는 실험장치가 설정한 각도 90도에 도달하더라도 모터 속도가 계속 증가하는 반면에, 앞서 설명했던 수정된 알고리즘을 적용한 이후에는 [Fig. 13]과 같이 설정한 목표 각도에 접근함에 따라 모터 속도가 0으로 수렴하는 것을 확인할 수 있었다. 즉, 우리가 원하는 동작 수행이 가능하고, 모터회전도 완전히 정지하여 안정성을 갖춘 자세제어 실험장치를 구현할 수 있었다.



[Fig. 12] RPM value of early attitude control mode



[Fig. 13] RPM value of final attitude control mode

2. 목표물 추적 모드 실험

목표물 추적 모드 실험에서 사용된 추적 대상은 초록색 공이었다. 먼저 물체인식 카메라 Pixy에서 초록색 공을 인식하도록 한다. 초록색 공을 허용 오차범위 내의 각도에서 정지하도록 한다. 큐브위성이 더 이상 움직이지 않고 정지하게 되면, 공의 현재 위치를 기준으로 조금 떨어진 곳에 공을 위치시켜 위성이 자세를 변경하도록 한다. 다시 위성이 정지할 때까지 기다린다. 위와 같이 실험을 진행해본 결과, 예상했던 대로 Pixy가 초록색 공이 있는 방향으로 따라가며 자세제어 실험장치가 그에 따라 회전하였다. 물체를 추적하는 과정에 있어서는 안정적인 모습을 보였다. 공의 위치에서 오차범위 이내의 각도로 실험장치가 회전하였고 지속적으로 공을 움직였음에도 모터의 과한 동작으로 과열 및 추가 회전 등의 현상이 일어나지 않은 것을 보아 정확하게 동작되는 것을 알 수 있었다.

V. 결론

본 연구를 통해 1축 자세제어 큐브위성 모형을 제작하였으며, 카메라 짐벌을 이용하여 제작된 큐브위성 모형의 자세제어 성능을 검증하였다. 또한 이를 위해 COSMOS를 이용한 지상국을 구축하였다. 자세제어 실험은 자세유지 모드와 목표물 추적 모드에 대해 진행하였다. 그러나 카메라 짐벌에 존재하는 마찰력 때문에 자세제어를 한 이후 초기 각속도가 남아있는 상태에서 휠의 회전이 멈추게 되어 오차가 발생할 수밖에 없었다. 이에 자세제어 모드 실험에서는 단순한 P-항 제어방식이 아닌 PID 제어를 실시하고, euler 각도의 범위 조정을 통해 실험 도중 발생하는 문제점들을 해결 할 수 있었다. 그 결과, set_mode 커맨드를 바탕으로 가장 안정한 자세를 찾아가게 하는 실험과 set_yaw angle 커맨드를 바탕으로 우리가 원하는 각도만큼 자세제어 실험장치를 회전하게 하는 두 실험 모두 허용 오차범위($\pm 5^\circ$)에서 자세제어가 구현됨을 확인할 수 있었다. 또한 목표물 추적 모드 실험에서도 Pixy를 통해 목표물을 안정적으로 추적함을 확인하였다.

이를 통해 카메라 짐벌을 이용하여 1축 자세제어 성능실험을 성공적으로 실시하였으며, 이를 이용한 3축 자세제어 실험의 가능성을 확인할 수 있었다. 다만, 인공위성의 정밀 자세제어를 위해서는 회전관성과 마찰력 등 정확한 모델 파라미터를 통해 모터의 속도를 정밀하게 제어할 필요가 있으나, 본 연구에서는 반작용 휠의 속도 제어를 근사적으로 구현하였으며, 이로 인한 오차가 작음이었으므로 추정된다. 또한 보다 정밀한 자세제어 실험이 필요한 경우에는 에어베어링을 사용할 필요가 있을 것으로 판단된다. 실제 인공위성을 이용해 자세제어를 구현한 것은 아니지만 주변에서 흔히 볼 수 있는 카메라 짐벌을 이용해 자세제어 실험환경을 구현하고, PID 제어나 error angle을 조정하여 문제를 해결했다는 데 본 연구의 의미가 있다. 향후 연구로는 3축 자세제어를 위해 3개의 모터를 부착시킬 수 있는 방안을 모색하고, 이를 실제 큐브위성의 3축 자세제어 시스템에 구현해 볼 계획이다.

VI. 참고문헌

- [1] 장영근. (2003). 소형위성 기술 연구개발 동향과 전망. 한국항공우주학회지, 31(6), 118-132.
- [2] 황기룡, 민명일, 문병영, 장영근. (2004). 초소형위성 HAUSAT-1의 기계시스템 설계 및 개발. 한국항공우주학회지, 32(9), 103-113.
- [3] 이선호, 이승우, 오시환, 용기력, 김경원, 서현호. (2005). 위성 자세제어용 소형 CMG 개발 (I): 설계 및 제작. 한국항공우주학회 학술발표회 초록집, 878-881.
- [4] Jovanovic, N., Kruegel, C., and Kirda, E. (2006). Pixy: A static analysis tool for detecting web application vulnerabilities, IEEE short paper, 258-263.
- [5] Tsiotras, P., Shen, H., and Hall, C. (2001). Satellite attitude control and power tracking with energy/momentum wheels, Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 24(1), 23-34.
- [6] 명현삼, 이현재, 박종우, 방효충, 오시환, 용기력. (2007). 인공위성 자세제어를 위한 제어 모멘트 자이로의 정밀 모델링. 한국항공우주학회지, 35(7), 640-646.
- [7] 황재혁, 오화석, 이성춘, 나병철. (1998). 인공위성의 이상모드시 선형 운동방정식을 이용한 자세제어. 한국항공우주학회지, 26(6), 107-114.
- [8] Johnson, M. A., Moradi, M. H. (2005). PID control, Springer-Verlag London Limited.
- [9] Arduino 홈페이지. <https://www.arduino.cc/> (검색일: 2018.07.21.)
- [10] kocoafab 홈페이지. <https://kocoafab.cc/> (검색일: 2018.07.29.)
- [11] E2BOX 홈페이지. <http://www.e2box.co.kr/> (검색일: 2018.08.09.)
- [12] Kang, H. B. (2009). U.S. Patent No. 7,555,589. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [13] Yedamale, P. (2003). Brushless DC (BLDC) motor fundamentals, Microchip Technology Inc, 20, 3-15.
- [14] PIXY 홈페이지. <https://pixycam.com/pixy-cmucam5/> (검색일: 2018.08.18.)
- [15] Boynton, R. (1996). Using a spherical air bearing to simulate weightlessness. Methods, 1, 3.
- [16] 박완근, 이자성. (1995). 리액션 휠을 이용한 3-축 안정 인공위성 자세제어에 관한 연구. 한국항공우주학회 학술발표회 논문집, 515-520.
- [17] PyPI 홈페이지. <https://pypi.org/> (검색일: 2018.09.21.)
- [18] COSMOS 홈페이지. <https://cosmosrb.com/> (검색일: 2018.09.28.)

I 연구진 I

임정민 (Jeongmin Lim, KAIST 부설 한국과학영재학교, ilfvvpk0425@gmail.com), 주저자

조영민 (Youngmin Cho, KAIST 부설 한국과학영재학교, raygreat@naver.com), 교신저자

이유빈 (Yubin Lee, KAIST 부설 한국과학영재학교, 0529qls@naver.com), 공동저자

지도교수 : **김용민** (Yongmin Kim, KAIST SATREC, bluewing@kaist.ac.kr)

지도교사 : **박선미** (Sun Mie Park, KAIST 부설 한국과학영재학교, smpark@kaist.ac.kr)

저지연 모바일 엣지 컴퓨팅 모델링 연구

백범한 · 이현준 · 홍성우 - KAIST 부설 한국과학영재학교

Study on Low-Latency Mobile Edge Computing Modeling

Beomhan Baek · Hyeonjun Lee · Seongwoo Hong - Korea Science Academy of KAIST

국문초록

모바일 기기의 확산에 따라 사물인터넷(IoT)이 주목받고 있으며, 모바일 기기의 부족한 저장소와 처리 능력 때문에 클라우드 컴퓨팅이 많은 관심을 받고 있다. 그러나 기존 클라우드 컴퓨팅은 많은 트래픽이라는 한계가 있었으며, 이를 극복하기 위해 모바일 엣지 컴퓨팅(MEC)이 새로운 패러다임으로 제시되었다. 이 기술에서는 클라우드 제공자와 사용자의 관계에 따라 그 양상에는 많은 차이가 발생한다. 이 연구에서는 이전의 연구에서 제안되지 않은 세 종류의 시나리오에 대해 모두 새로운 엣지 컴퓨팅 모델을 제안하고 분석하였다. 내장된 프로세서가 없는 충분히 많은 모바일 사용자가 존재하여 그들이 MEC을 사용할 경우 CPU 사이클을 어떻게 분배할지에 대하여 3가지 모델(BID-PRAM, UNI-PRIM, FAID-PRIM)을 제시하였다. 또한, 중간 단계의 클라우드와 메인 클라우드가 모두 존재하는 시장의 경우 각 클라우드의 처리 속도, 대기 시간, 무선 네트워크 상황 등 다양한 요인에 따라 전송 정보량과 전송 순서를 결정하였다. 클라우드가 하나 존재하는 시장의 경우 단일 사용자가 존재하여 소요 시간, 클라우드 사용 비용, 모바일 기기 및 클라우드의 에너지 사용량을 모두 고려하여 모델을 제시하였다. 이들 요인에 의해 결정되는 유틸리티를 고려하여 최적의 전송 정보량을 수학적으로 엄밀하게 결정하였으며, 이를 통해 향후 MEC가 산업 전반에 사용될 때 시장의 동향을 예측할 수 있는 이론적인 기반을 제공한다.

중심어 : 모바일 엣지 컴퓨팅(MEC), 이중 클라우드 시스템, 유틸리티 함수, 내쉬 균형

ABSTRACT

Because of the spread of mobile devices, development of Internet of Things (IoT) has been accelerated. Explosive growth of mobile data and lack of computation power and storage of mobile devices forced mobile users to use cloud computing for the quality of experience (QoE). Traditional cloud services, however, are shown not to be appropriate for communication and computation of IoT devices, considering huge traffic between the cloud and devices. To overcome this problem, mobile edge computing (MEC) has been emerging as the new paradigm for cloud computing. However, the exact characteristics of MEC depend on the relationships between cloud service provider and mobile users. In this study, we propose and analyze new models for three different situations in MEC that have not been proposed in previous studies. First, we analyzed how a mobile user, using a single cloud, can determine the amount of data to send to the cloud, depending on the delay time, charge for using cloud, and the consumed energy, maximizing his happiness. Also, we optimized MEC with two clouds, considering lots of factors such as wireless network system, waiting time and the ability of two clouds, and determined the sending order of two clouds. Lastly, 3 pricing schemes of MEC between multiple users and edge cloud are suggested, based on game theoretic approach. We suggest mathematical analysis to these situations in MEC, and these analysis can provide theoretical backgrounds for popularization of MEC. Finally, we conclude that the constant manipulation by the service provider is necessary for the market to make profits.

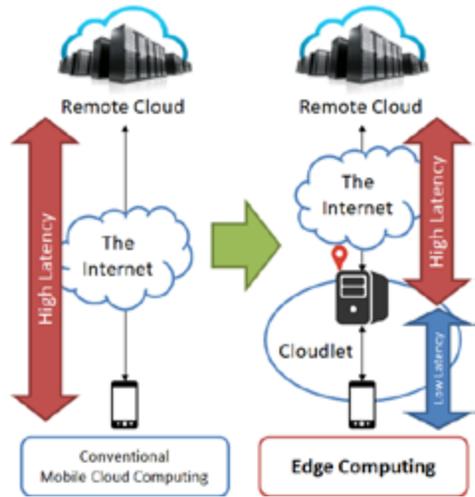
Key words: Mobile Edge Computing, two-cloud system, utility function, Nash equilibrium

I. 서론

지난 몇 년간 모바일 기기 사용자의 수는 급격하게 증가해왔다. 스마트폰의 확산으로 인해 태블릿PC, 웨어러블 기기, 그리고 노트북과 같은 모바일 기기들의 수는 폭증하고 있으며, 이는 사물 인터넷(IoT)의 개발을 가속화시켰다. 모바일 데이터의 기하급수적인 성장과 모바일 기기의 계산 능력 및 저장소의 부족은 사용자 경험(QoE)을 위한 클라우드 컴퓨팅의 성장을 추구하고 있다. 그러나 기존의 클라우드 컴퓨팅은 IoT 기기의 통신과 처리를 위해서는 적절하지 못했는데, 이는 중앙 서버와 기기 사이의 큰 트래픽이 극심한 속도 저하를 초래하기 때문이다. 이 문제를 해결하기 위해, 모바일 엣지 컴퓨팅(MEC)은 클라우드 컴퓨팅의 새로운 패러다임으로 등장하고 있다. [Fig. 1]과 같이, 기존의 중앙 서버와 기기 사이의 트래

픽을 줄이기 위해 그 사이 엣지 클라우드를 설치함으로써 저지연 클라우드 컴퓨팅을 구현하는 MEC는 미래의 IoT 사회를 위한 기반이 될 것이라 촉망받고 있다.

이처럼 MEC는 하나의 클라우드에 다수의 모바일 기기들이 실시간으로 접속하고 빠져나가기를 반복한다. 따라서 시시각각 달라지는 접속한 모바일 기기들의 환경에 따라 엣지 클라우드의 자원을 어떻게 분배하는지는 MEC의 효율에 큰 영향을 준다. 따라서 MEC가 처음 소개된 이후, MEC 자원을 효율적으로 분배하는 방법에 대한 연구가 지속적으로 이어져왔다. 하지만 이전의 연구들에는 여러 가지 한계점이나 문제점들이 존재했다. 그렇기에 이 연구를 통해 과거의 연구들이 지닌 문제점들에 대해 개선책을 제시해보고자 한다. 이 연구가 제시하는 개선책은 크게 3가지 독립된 상황들로 구성되어 있다. II절에서는 처리 시간, 지출 비용, 그리고 클라우드와 모바일 기기의 사용 에너지를 동시에 고려하지 못한 기존 연구를 확장시켜 이를 모두 고려하는 모델을 제시하였고, 이에 대한 수학적인 분석을 진행하였다. III절에서는 이중 클라우드 상황을 엄밀하게 고려하지 못한 기존 연구에 더 나아가 이중 클라우드 상황에서 존재하는 두 가지 매커니즘에 대하여 각각 최적해를 찾아내었다. IV절에서는 단일 클라우드에 다수의 사용자가 존재할 경우 중앙집권적으로 자원이 분배되어 발생할 수 있는 상황과 맞지 않는다는 기존 연구의 문제점을 해결하기 위해 가격이라는 요소를 도입하였다. 이에 MEC에 적합한 세 가지 가격 책정 방식을 제시하여 이를 수학적으로 최적화하였다. 이처럼 이 연구는 기존 연구 결과의 한계에 집중하여 MEC 시스템 모델에 대한 새로운 접근을 진행하였다.



[Fig. 1] Conventional mobile edge computing and Edge computing

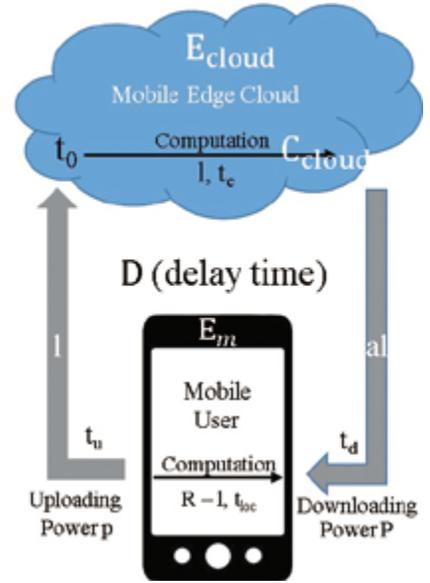
II. 단일 사용자 단일 엣지 클라우드 모델

1. 연구 목적

모바일 기기의 확산과 더불어 처리해야 할 데이터의 양이 급격하게 늘어나면서 기존 서버나 모바일에서 발생한 데이터를 모두 처리하는 것은 여러 한계점을 내보이고 있다. 이 때문에 중앙 클라우드 보다 사용자에게 가까운 곳에 엣지 클라우드를 설치함으로써 데이터 처리 지연 시간을 줄인다는 저지연 클라우드 컴퓨팅 기술에 대한 활발한 연구가 진행되고 있다. 그 중에서도 단일 엣지 클라우드에 대한 단일 사용자 시스템에 관한 연구가 가장 활발하다. 클라우드 컴퓨팅에서 나타날 수 있는 시스템 모델 중 가장 간단한 경우이기에 보다 복잡한 경우에 적용하기 위해서는 가장 간단한 경우에서 먼저 해결되어야 하기 때문일 것이다. 단일 클라우드, 단일 사용자 시스템을 고려할 때의 가장 큰 장점은 사용자의 행동을 예측하기 위한 요인을 최대한으로 선정할 수 있다는 점이다. 이 때문에 단일 사용자 환경에서는 사용자 만족도를 고려할 때 보다 다양한 요인들이 고려되었음을 선행 연구로부터 확인할 수 있었다. Wang, Y, M, Sheung, X, Wang, et al.의 연구에서는 예서는 역시 같은 시스템에서 사용자 만족도를 지출 비용과 사용 에너지의 선형결합으로 정의하여 최적화 문제를 해결했다[1]. 그렇지만 위에서 열거한 세 가지 요인을 모두 고려하여 최적화 문제를 해결한 사례는 존재하지 않았으며, 따라서 지출 비용, 지연 시간, 모바일 사용 에너지, 클라우드 사용 에너지를 모두 고려하여 사용자의 만족도 함수를 정의함으로써 최적화 문제를 해결하는 것을 연구의 목적으로 설정했다.

2. 모델 제시 (System Model)

[Fig. 2]가 표현하는 상황, 즉 R 만큼의 데이터를 계산해야하는 모바일 사용자의 상황을 생각하자. 그에게는 계산 속도를 높이기 위해서 1만큼의 데이터를 엣지 클라우드로 전송하여 대신 계산하도록 하는 선택지가 존재한다. 모바일과 클라우드의 CPU 성능 차이가 존재하기 때문에 이러한 행동은 보다 효율적일 수 있다. c (Cy/byte)를 1 바이트의 데이터를 모바일에서 처리하기 위한 CPU 사이클 수라고 하자. 또한, (Cy/s)를 모바일의 계산 용량으로, q (J/Cy)를 한 사이클당 모바일에서 필요한 에너지 양으로 하자. 데이터 전송은 p (J/s)의 출력으로 전달되며 p_0 라는 상계가 존재한다. 비슷하게 C (Cy/byte)를 엣지 클라우드에서 1 바이트의 데이터를 처리하기 위한 CPU 사이클 수로, F (Cy/s)를 엣지 클라우드의 계산 용량, 그리고 Q (J/Cy)를 클라우드의 한 사이클당 필요한 에너지의 양으로 두자. 한 바이트의 계산마다 부과되는 비용을 M (\$/byte)으로, 클라우드에서 모바일로의 데이터 전송의 출력을 P (J/s)로 두자. 마찬가지로, 데이터 전송의 출력은 P_0 의 상계를 갖는다. 데이터 전송 시 대역폭을 B_u 로, 데이터 수신 시 대역폭을 B_d 로 놓고, 다른 채널 상태는 송신과 수신 때 같다고 가정하여 가우시안 채널 노이즈를 N_0 로, 채널 상태를 h 로 두자. 데이터를 클라우드에서 처리한 후 그 양이 감소하므로 송신 데이터에 대한 수신 데이터의 비를 1 보다 작은 양수인 α 로 두자.



[Fig. 2] Edge computing process between a single mobile user and a edge cloud

2. 유틸리티 함수

엣지 클라우드를 활용하고 싶은 사용자는 전송 시간을 단축시킬 필요성을 가진다. 그러나 이 때 사용자가 바꿀 수 있는 변수는 매우 한정적이다. 대역폭 B_u 나 B_d 는 통신사에서 배정해주는 값으로 임의로 조절할 수 없고, 채널 상태 h 나 가우시안 채널 노이즈 N_0 등도 바꿀 수 없다. 따라서 전송하는 정보의 양 l 을 바꾸거나 전송에 사용되는 출력 p , P 만을 바꿀 수 있을 뿐이다. 따라서 최적화 문제를 풀 때 고려해야할 변수는 세 개, 즉 l, p, P 뿐이다.

위에서 정의한 상수들과 변수들을 바탕으로 유틸리티 함수를 정의하겠다. 유틸리티 함수는 시간 지연, 지출, 모바일에서 사용한 에너지, 클라우드에서 사용한 에너지의 4개 요인에 의해서만 결정되고 이들의 선형 결합으로 구성된다고 가정하였으므로, 다음과 같은 형태로 제한된다.

$$u = utility(l, p, P) = -\alpha D - \beta E_m - \gamma E_{cloud} - \delta C_{cloud}. \quad (1)$$

식 (1)에서 D 는 지연시간, E_m 은 모바일에서 사용된 에너지, E_{cloud} 는 클라우드에서 사용된 에너지, C_{cloud} 는 클라우드에서 모바일 사용자에게 부과한 비용이고, 그 앞에 각각 곱해진 계수 $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ 는 각각의 요인의 가중치를 나타내는 음이 아닌 실수이다.

T_{loc} 를 모바일의 계산시간으로, t_u 를 엣지 서버로 데이터를 업로드하는데 걸리는 시간, 그리고 t_d 를 다운로드하는데 걸리는 시간으로 두자. 정보 전송에 관한 이론에 의해, 정보 전송량과 대역폭에 대해 다음과 같이 나타난다.

$$t_{loc} = \frac{(R-l)c}{f},$$

$$t_u = \frac{l}{B_u \log_2(1 + k_u p)}, \text{ where } k_u = \frac{h}{B_u N_0},$$

$$t_d = \frac{al}{B_d \log_2(1+k_d P)}, \text{ where } k_d = \frac{h}{B_d N_0}.$$

엣지 클라우드에서 계산되는데 소요되는 시간은 $t_c = \frac{Cl}{F}$ 이다. 다른 모바일의 데이터를 처리하기 위한 지연 시간을 t_0 로 놓으면, 엣지 클라우드에서 소요되는 전체 시간은 $t_{off} = t_u + t_c + t_d + t_0$ 와 같이 나타난다. 결과적으로, 지연 시간은 엣지 클라우드에서 소요되는 시간과 모바일에서 소요되는 시간의 최댓값, 즉 $D = \max\{t_{off}, t_{loc}\}$ 이다.

모바일에서 사용된 에너지의 총합은 계산에 사용된 에너지와 업로드에 사용된 에너지의 합과 같으므로,

$$E_m = qft_{loc} + t_u p = qc(R-l) + \frac{l}{B_u} \frac{p}{\log_2(1+k_u p)}. \tag{2}$$

엣지 클라우드에서 사용된 에너지는 계산에 사용된 에너지와 전송에 사용된 에너지의 합이므로,

$$E_{cloud} = Qft_c + t_u p = QCl + \frac{al}{B_d} \frac{P}{\log_2(1+k_d P)}. \tag{3}$$

엣지 클라우드를 사용할 때 부과되는 비용은

$$C_{cloud} = Ml. \tag{4}$$

식 (2), (3), (4)로부터, 유틸리티 함수는

$$u = -\beta qcR - \alpha \max\{t_{off}, t_{loc}\} + (\beta qc - \gamma QC - \delta M)l - \frac{\beta l}{B_u} \frac{p}{\log_2(1+k_u p)} - \frac{\alpha \gamma l}{B_d} \frac{P}{\log_2(1+k_d P)}. \tag{5}$$

으로 표현가능하다.

$g(l, p, P)$ 라는 함수를 새로 정의해서 유틸리티 함수의 덧셈에 대한 역원을 취하도록 하자. 풀어야 할 최적화 문제는 함수 g 를 $l, p, P (0 \leq l \leq l_0, 0 \leq p \leq p_0, 0 \leq P \leq P_0)$ 의 조건 하에서 최적화 하는 것이다. 함수 g 는 다음과 같다.

$$u = \beta qcR + \alpha \max\{t_{off}, t_{loc}\} + (\gamma QC + \delta M - \beta qc)l + \frac{\beta l}{B_u} \frac{p}{\log_2(1+k_u p)} + \frac{\alpha \gamma l}{B_d} \frac{P}{\log_2(1+k_d P)}. \tag{6}$$

새롭게 두 함수 $g_1(l, p, P), g_2(l, p, P)$ 를 다음과 같이 정의하자.

$$g_1(l, p, P) = \alpha \max\{t_{off}, t_{loc}\}, \tag{7}$$

$$g_2(l, p, P) = \beta qcR + (\gamma QC + \delta M - \beta qc)l + \frac{\beta l}{B_u} \frac{p}{\log_2(1+k_u p)} + \frac{\alpha \gamma l}{B_d} \frac{P}{\log_2(1+k_d P)} \tag{8}$$

자명하게 $g(l, p, P) = g_1(l, p, P) + g_2(l, p, P)$ 가 성립한다.

3. 모델 분석 및 연구 결과

$t_0 \geq \frac{Rc}{f}$ 가 성립한다고 가정하자. t_{off} 가 항상 t_{loc} 보다 작지는 않게 되므로, $l = 0$ 일 때 $g_{1, \min} = t_0$ 의 최솟값을 갖는다. 이제 $t_0 \geq \frac{Rc}{f}$ 이 성립한다고 가정하자. p 와 P 가 고정되어 있을 때의 $g_1 - l$ 그래프는 x좌표가 l_0 인 점에서 만나는 두 선형 그래프의 큰 값을 취한 것과 같다. l_0 의 값은 다음과 같이 주어진다.

$$l_0 = \frac{\frac{Rc}{f} - t_0}{\frac{C}{F} + \frac{c}{f} + \frac{1}{B_u \log_2(1+k_u p)} + \frac{a}{B_d \log_2(1+k_d P)}} \quad (9)$$

비슷하게, p와 P에 대해 고정된 값을 가질 때 $g_1 - l$ 그래프는 일정한 기울기를 가지는 선형 그래프이다. 그 기울기는 다음과 같다.

$$slope = (\gamma QC + \delta M - \beta qc) + \frac{\beta}{B_u} \frac{p}{\log_2(1+k_u p)} + \frac{a\gamma}{B_d} \frac{P}{\log_2(1+k_d P)} \quad (10)$$

결론적으로, $g - l$ 그래프의 가능한 형태는 다음과 같은 세 개 뿐일 것이라고 합리적으로 추측할 수 있다. 먼저, 두 부분의 그래프가 모두 양의 기울기를 가질 수 있고, 두 번째로 앞 부분의 기울기는 음수이지만 뒷 부분의 기울기는 양수일 수 있고, 마지막으로 두 부분의 기울기가 모두 음수일 수 있다. 이러한 기울기에 관련한 특성은 p와 P의 값에 의해서 결정된다. 각각의 경우에 있어서, 함수 g 는 $l = 0$, $l = l_0$, $l = l_0$ or R 일 때 최솟값을 가진다.

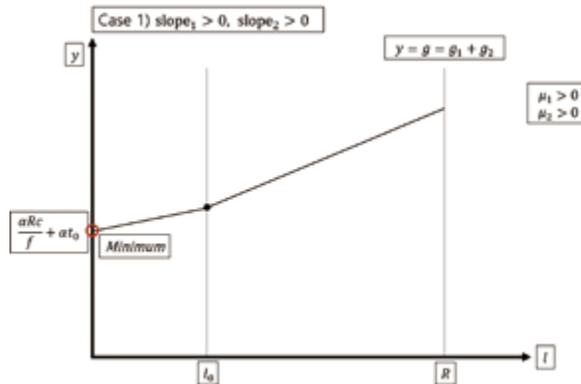
각각의 경우가 언제 가능할지에 대해 이야기를 나눠볼 수 있다. g_1 의 그래프는 y절편의 값이 $\beta qcR + \frac{\alpha Rc}{f}$ 이고, 기울기 $slope_1$ 은 다음과 같이 주어진다.

$$slope_1 = (\gamma QC + \delta M - \beta qc - \frac{\alpha c}{f}) + \frac{\beta}{B_u} \frac{p}{\log_2(1+k_u p)} + \frac{a\gamma}{B_d} \frac{P}{\log_2(1+k_d P)} \quad (11)$$

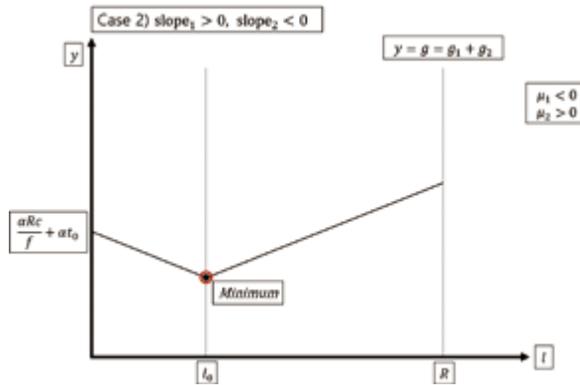
이 값은 항상 g_2 그래프의 기울기인 $slope_2$ 보다 작다.

$$slope_2 = (\gamma QC + \delta M - \beta qc + \frac{\alpha C}{F}) + \frac{1}{B_u} \frac{\alpha + \beta p}{\log_2(1+k_u p)} + \frac{a}{B_d} \frac{a + \gamma P}{\log_2(1+k_d P)} \quad (12)$$

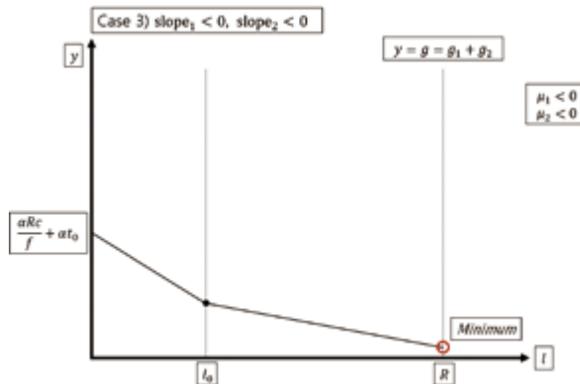
식 (11), (12)에서 확인할 수 있듯이, 기울기는 p, P에 의존해서 달라진다. 기울기의 값에 따라 다음과 같은 세 가지 종류로 나누어 생각할 수 있다. 첫 번째 종류는 두 기울기가 모두 양수인 경우이고 ([Fig. 3]), 두 번째 종류는 두 기울기 중 하나만 양수, 다른 하나는 음수인 경우 ([Fig. 4]), 세 번째 종류는 두 기울기가 모두 음수인 경우 ([Fig. 5])이다.



[Fig. 3] $slope_1 > 0, slope_2 > 0$



[Fig. 4] $slope_1 > 0, slope_2 < 0$



[Fig. 5] $slope_1 < 0, slope_2 < 0$

위의 그래프에서 확인할 수 있듯이, 최솟값은 각각 $l = 0, l = l_0, l = l_0 \text{ or } R$ 에서 나타난다. y 절편이 항상 $\beta qcR + \frac{\alpha Rc}{f}$ 이므로, 첫 번째 경우의 최솟값은 언제나 두 번째의 최솟값 보다 크고, 같은 논리로 두 번째 경우의 최솟값이 언제나 세 번째의 최솟값 보다 크다.

결과적으로, $slope_1$ 과 $slope_2$ 의 최솟값의 부호에 의해 어떠한 경우의 그래프에 대해 최솟값이 나타나는지가 결정되고, 따라서 최솟값이 나타나는 값인 l_{min} 이 결정된다. 따라서 최솟값을 결정하기 위해서는 함수 g_1 과 g_2 의 기울기 각각의 최솟값을 구할 필요가 있다.

Lemma 1. $f(x) = \frac{x}{\log_2(1+kx)}$ ($k > 0$). 함수 f 는 증가함수이고 $\lim_{x \rightarrow 0^+} f(x) = \frac{\ln 2}{k}$ 이 성립한다.

Proof.

$$f'(x) = \frac{(\ln 2)(1+kx) \ln(1+kx) - kx}{(1+kx) \log_2(1+kx)^2} \tag{13}$$

이 성립하고, 이 값은 항상 음수가 아니고 오직 $x = 0$ 에서만 0이라는 값을 갖는다. 따라서 f 는 증가함수이다. 또한, 로피탈의 정리에 의해,

$$\lim_{x \rightarrow 0^+} f(x) = \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{\ln 2}{\frac{k}{1+kx}} = \frac{\ln 2}{k} \tag{14}$$

□

Theorem 1.

$$\mu_1 = \gamma QC + \delta M - \beta qc - \frac{\alpha c}{f} + \frac{\beta \ln 2}{B_u k_u} + \frac{a \gamma \ln 2}{B_d k_d}. \quad (15)$$

으로 정의하자. $slope_1$ 의 최솟값은 μ_1 이고, 최솟값은 p와 P가 0에 충분히 가까울 때 발생한다.

Proof. 식 (11)에 Lemma 1을 고려하면,

$$\lim_{x \rightarrow 0^+} slope_1(l) = (\gamma QC + \delta M - \beta qc - \frac{\alpha c}{f}) + \frac{\beta \ln 2}{B_u k_u} + \frac{a \gamma \ln 2}{B_d k_d} = \mu_1. \quad \square$$

Lemma 2. 음이 아닌 수 a, 양수 b에 대해 $f(x) = \frac{a+bx}{\log_2(1+x)}$ 으로 두자. f 는 최솟값을 $x = e^{\frac{W(\frac{a-b}{be})+1}{1}} - 1$ 에 대해 갖는다. $W(x)$ 는 product log function으로, $y = xe^x$ 의 역함수이다.

Proof.

$$f'(x) = (\ln 2) \frac{b(1+x)\ln(1+x) - (a+bx)}{(1+x)\ln(1+x)^2} \quad (16)$$

따라서 미분계수가 0인 것과 $a+bx = b(1+x)\ln(1+x)$ 인 것은 동치이고, 이는 $x = e^{\frac{W(\frac{a-b}{be})+1}{1}} - 1$ 인 것 과 동치이다. 미분계수의 부호가 그 전에 음수이고 그 이후에 양수인 것을 고려하면, f 는 앞의 x 좌표에서 최솟값을 갖는다. \square

추후의 이론 전개를 위해 다음과 같이 새로운 함수 $f_1(x)$, $f_2(x)$ 를 정의하자.

$$f_1(x) = \frac{\alpha + \beta x}{B_u \log_2(1+k_u x)}, \quad (17)$$

$$f_2(x) = \frac{a(\alpha + \gamma x)}{B_d \log_2(1+k_d x)}. \quad (18)$$

Lemma 3. $\beta > 0, \gamma > 0$ 이라고 가정하자. $f_1(x)$, $f_2(x)$ 는 다음 식과 같이 최솟값을 가진다.

$$f_1\left(\frac{e^{W(K_u)+1}-1}{k_u}\right) = \frac{\ln 2}{B_u} \frac{\alpha + \frac{\beta}{k_u}[e^{W(K_u)+1}-1]}{W(K_u)+1}, \text{ where } K_u = \frac{k_u \alpha - \beta}{\beta e}. \quad (19)$$

$$f_2\left(\frac{e^{W(K_d)+1}-1}{k_d}\right) = \frac{a \ln 2}{B_d} \frac{\alpha + \frac{\gamma}{k_d}[e^{W(K_d)+1}-1]}{W(K_d)+1}, \text{ where } K_d = \frac{k_d \alpha - \gamma}{\gamma e}. \quad (20)$$

Proof. $y = k_u x$ 으로 두자.

$$f_1 = \frac{\alpha + \frac{\beta}{k_u} y}{B_u \log_2(1+y)}. \quad (21)$$

Lemma 3에 의해, f_1 은 $y = \frac{e^{W(K_u)+1}-1}{k_u}$ 에 대해 최솟값을 갖고, 따라서 $x = \frac{e^{W(K_u)+1}-1}{k_u}$ 에서 최솟값을 갖는다. 비슷하게 함수 f_2 에 대해서 증명할 수 있고, 상수 a 만이 유일한 차이이다. \square

각각의 함수 f_1, f_2 가 최솟값을 가지는 p 와 P 를 다음과 같이 정의하자.

$$m_1 = \frac{e^{W(\kappa)+1} - 1}{k_u}, \tag{22}$$

$$m_2 = \frac{e^{W(\kappa)+1} - 1}{k_d}. \tag{23}$$

Theorem 2.

$$\mu_2 = (\gamma QC + \delta M - \beta qc + \frac{\alpha C}{F}) + f_1(m_1) + f_2(m_2). \tag{24}$$

으로 놓자. $slope_2$ 의 최솟값은 μ_2 이고, 이러한 최솟값은 $p = m_1, P = m_2$ 에서 발생한다.

Proof. 식 (12)에 Lemma 3을 적용하면, $slope_2$ 는 $p = m_1, P = m_2$ 에서 최솟값을 가지고 그 값은 $(\gamma QC + \delta M - \beta qc + \frac{\alpha C}{F}) + f_1(m_1) + f_2(m_2) = \mu_2$ 이다. □

Theorem 3. 함수 $g(l, p, P)$ 는 다음과 같은 l 의 값에 대해서 최솟값을 갖는다.

$$g_{\min} = g(l_{\min}, p_{\min}, P_{\min}), \text{ where } \begin{cases} l_{\min} = 0, & \text{if } \mu_1 > 0, \mu_2 > 0 \\ l_{\min} = l_0, & \text{if } \mu_1 < 0, \mu_2 > 0. \\ l_{\min} = l_0 \text{ or } R, & \text{if } \mu_1 < 0, \mu_2 < 0 \end{cases} \tag{25}$$

Proof. 기울기가 0인 경우를 제외하면 앞서 말했다시피 μ_1, μ_2 의 부호에 따라 세 가지의 경우로 나눌 수 있다.

가. $\mu_1 > 0, \mu_2 > 0$

$slope_1$ 과 $slope_2$ 는 항상 양수이다. 따라서 함수 g 는 l 에 대한 증가함수이고, 함수 g 는 최솟값을 오직 l 이 최솟값일 때, 즉 0일 때 갖는다. 결과적으로, p 와 P 의 값은 함수 g 의 값에 영향을 미치지 않으므로 임의로 설정할 수 있다.

나. $\mu_1 < 0, \mu_2 > 0$

$slope_1$ 은 음의 최솟값을 갖고, 따라서 $slope_1$ 은 충분히 작은 p 와 P 에 대해 0보다 작고, 충분히 큰 p 와 P 에 대해 0보다 크다. g 의 y 절편이 고정되어 있으므로, $slope_1$ 이 음수일 때 오직 g 가 최솟값을 가진다. 따라서, g 의 최솟값은 두 선형 함수의 교점에서 발생한다. 그 때의 l 의 값은 l_0 으로 정해진다. p_{\min} 과 P_{\min} 은 gradient-descent method로 구할 수 있다.

다. $\mu_1 < 0, \mu_2 < 0$

가와 같은 방식으로, $slope_1$ 가 음수일 때 오직 g 가 최솟값을 가질 수 있다. 그러나 $slope_2$ 가 음수인지 양수인지 특정할 수 없지만, 양 끝값에서 최솟값이 존재한다는 사실은 확실하므로 l_0, R 에서의 g 값을 비교하는 것으로 충분하다. p_{\min} 과 P_{\min} 은 gradient-descent method로 구할 수 있다. □

4. 결론

이 단원에서는 한 명의 모바일 유저가 무선으로 연결되는 한 개의 엣지 클라우드를 이용할 수 있는 시스템에서 사용자의 만족도를 의미하는 유틸리티 함수를 최적화하는 방법에 대해 알아보았다. 유틸리티는 지연 시간, 모바일에서 소비되는 에너지, 클라우드에서 소비되는 에너지, 지불 비용의 선형 결합으로 구성된다고 가정하였고, 사용자는 전송하는 정보량

과 수신과 송신 시 전송 출력의 3개 변수를 바꿀 수 있다고 상정하고 문제를 풀었다. 전송 출력과 선형 결합 시 계수에 의해 결정되는 기준값의 부호에 따라 전송하는 정보량이 0, 사이값, 또는 전부로 결정되며, 전송 출력은 Gradient-Descent Method로 구할 수 있다는 결론을 얻었다. 이는 알고리즘 없이 최적값을 찾았을 때보다 훨씬 빠른 것으로 기존 연구보다 복잡한 유틸리티 함수를 최적화하는 방법을 찾았다는 점에서 의미가 있다. 또한 이 연구는 MEC에서 여러 클라우드가 사용 가능하거나 다수의 사용자가 존재할 때 사용 분포를 분석하기 위한 계산을 용이하게 만들 것이다.

III. 단일 사용자 이중 엣지 클라우드 모델

1. 연구 목적

모바일 기기는 휴대성과 편리성으로 인류 문명에 엄청난 변화를 가져왔다. 하지만 한정된 CPU 용량과 배터리 양 때문에 모바일 기기들은 복잡한 연산을 처리할 때에 고질적인 한계가 있었다. 이 문제를 개선하기 위해 모바일 엣지 컴퓨팅에서는 모바일 기기 사용자들이 일부의 데이터를 무선 네트워크를 통해 엣지 클라우드로 보내서 연산하게 하고, 이 데이터를 무선 네트워크로 다시 송신하게 해서 모바일 기기에 가해지는 부하를 줄였다. 이를 위해 지금까지 여러 논문들은 소요 시간과 에너지 소모량을 최소화할 수 있는 모델 제작, 에너지 소모량과 지출 비용을 최소화하는 모델 제작 등에 대해 연구했다. 하지만, 지금까지 대부분의 연구들은 오직 하나의 클라우드만을 가진 시스템에 치중해 왔다.

이 연구에서는 이전 연구들과 달리 두 개의 클라우드를 가지고 있는 모델들에 대해 탐구해보고자 한다. 엣지 클라우드는 모바일 기기와 무선 네트워크를 통해 연결되어 있고 메인 클라우드는 엣지 클라우드로와만 유선 네트워크로 연결되어 있다. 여기서, 유선 네트워크는 극도로 넓은 대역폭을 가지기 때문에 이 과정에서 발생하는 지연은 전송하는 데이터의 양에 독립적인 전파 지연(propagation delay) 뿐이다. 그러나 무선 네트워크에서는 전송하는 데이터의 양에 비례해서 소요 시간이 증가할 것이다. 이러한 변수들을 고려한 이중 클라우드 모델은 모바일 기기 사용자에게 메인 클라우드로는 추가적인 선택지를 제공하고, 복잡한 연산을 수행할 때의 총 지연 시간을 획기적으로 줄여 줄 것이다.

이처럼 두 개의 클라우드를 사용하는 기술은 현재 다양한 분야에서 사용되고 있다. 대표적으로, 삼성의 스마트폰에 내장되어 있는 AI 비서 빅스비(Bixby)나 Kakao, Amazon 등에서 출시한 AI 스피커들은 모두 이러한 기술을 사용한다. 이 기기들에서 필요한 음성 인식 데이터 등은 모두 기지국에 설치된 엣지 클라우드에서 진행되고, 연산 공간이 부족하다면 일부가 본사에 있는 메인 클라우드로 보내진다. 미래에는 이와 같이 두 개의 클라우드를 사용해 연산을 하는 기술은 점점 발전하고, 많은 분야에서 사용될 것으로 예측된다. 그 이유는 연산해야 할 절대적 데이터의 양이 시간이 지남에 따라 증가할 것이기 때문이다.

두 개의 클라우드를 연산에 사용함으로써 얻는 소요 시간 감소 면에서의 이점을 최대화하기 위해 이 논문에서 2가지의 서로 다른 연산 메커니즘을 제시할 것이다. 이 분야에 대해 탐구한 소수의 논문들은 모두 단 하나의 식을 이용하고, 적은 수의 요소들을 고려해서 식을 세웠다. 하지만 이 논문서는 2가지의 서로 다른 연산 방법을 제시할 것이고, 수많은 요소들을 식에 포함해 최대한 현실에 가까운 모델을 설계했다. 또한, 두 가지 방법들을 여러 상황에서 비교해 어떤 상황에서 어떤 모델이 더욱 효과적으로 지연 시간을 줄여주는지에 대한 수학적 분석을 실시하였다. 이 논문이 담고 있는 중요한 성취에 대해 요약하자면 다음과 같다.

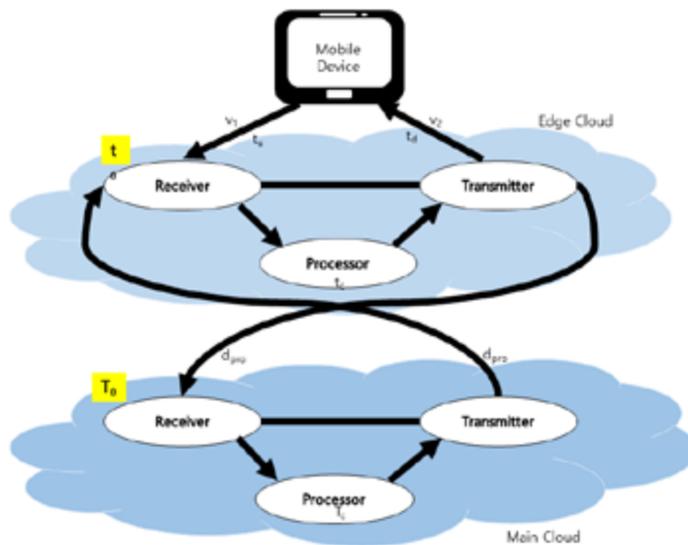
- 모바일 기기, 엣지 클라우드, 메인 클라우드에 할당해야 할 최적의 데이터의 양에 대한 두 가지 다른 방법 제시
- 두 가지 방법에 대한 수학적 비교, 분석을 통한 효율적인 지연 시간 최소화 방법 제시

2. 연구 과정

가. 두 개의 정액제 클라우드를 가진 시스템

이 논문서 제시하는 새 모델은 엣지 클라우드와 메인 클라우드라는 두 개의 클라우드를 가지고 있다. 모바일 기기와 엣지 클라우드는 무선 네트워크로 연결되어 있으며, 엣지 클라우드와 메인 클라우드는 유선 네트워크로 연결되어 있다. 또한, 엣지 클라우드의 연산 속도는 메인 클라우드의 연산 속도보다 느리지만 모바일 기기의 연산 속도보다는 빠르다. 메인 클라우드는 엣지 클라우드와만 정보를 주고받을 수 있다. 그렇기에 만약 모바일 기기 사용자가 메인 클라우드와 정보를 주고 받고 싶다면 무조건 엣지 클라우드를 거쳐야만 한다.

두 개의 클라우드는 기능으로 나누자면 송신기, 수신기, 연산기로 나눌 수 있다. 현재 사용되는 대다수 클라우드는 하나의 모듈서 송신 기능과 수신 기능을 모두 수행하고, 또다른 하나의 모듈인 연산기는 연산을 수행한다. 하나의 클라우드에서 송신, 수신, 연산 기능은 모두 독립적으로 작용한다. 송신기가 데이터를 보내고 있을 때 수신기가 데이터를 받을 수 있고, 그 동안 연산기가 연산을 수행하고 있을 수도 있다. 여기서, 연산기는 연산에 필요한 모든 데이터가 수신기를 통해 도착했을 때부터 연산을 시작할 수 있고, 클라우드로 보낸 모든 데이터에 대해 연산이 끝났을 때만 송신기를 통해 데이터를 보낼 수 있다. 위와 같은 정보들로 만들어진 모델에 대한 간단한 그림은 [Fig. 6]과 같다.

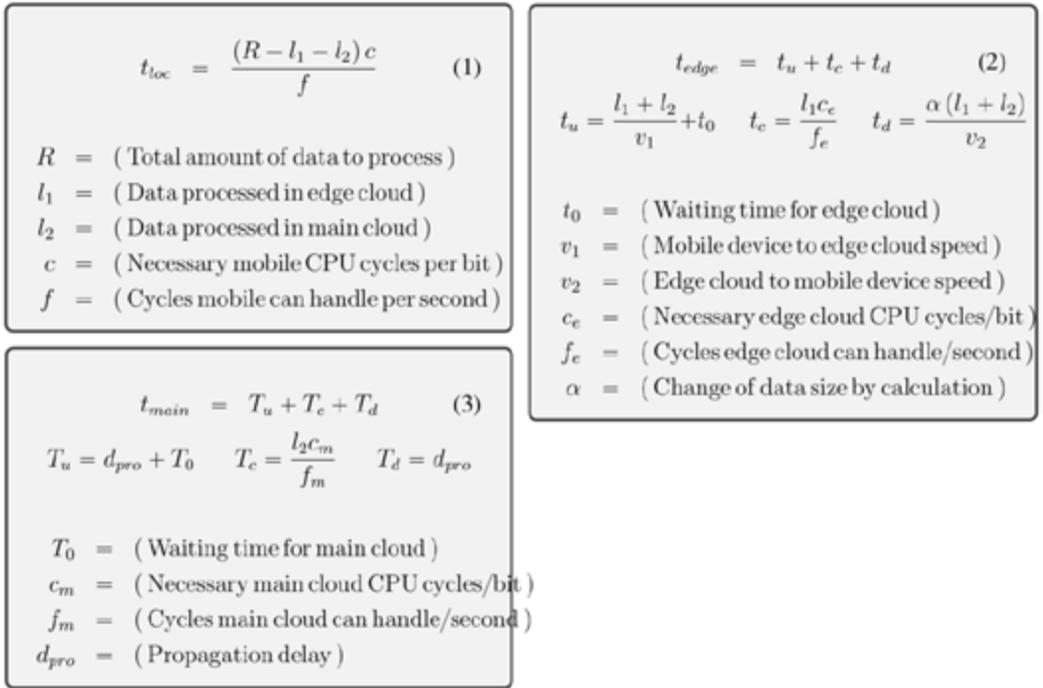


[Fig. 6] The scheme of two-fixed-payment-cloud-system

우리는 이러한 모델에서 소요시간을 최소화할 것인데 그러려면 각 기기, 즉 모바일 기기와 두 개의 클라우드에서 걸리는 시간에 대해 식으로 나타내어 보는 것이 중요하다.

나. 모바일 기기, 엣지 클라우드, 메인 클라우드에서 소요되는 시간

모바일 기기, 엣지 클라우드, 메인 클라우드에서 소요되는 시간은 다양한 요소를 고려해서 식으로 쓰여질 수 있다. 대표적으로 고려되는 변수는 각 기기나 클라우드에 분배되는 데이터 양에 관련된 변수인 l_1, l_2 가 있다. 이 두 변수를 정하면, 총 데이터 양인 R 이 상수이므로 세 기기에 분배되는 데이터 양이 결정된다. 즉, 모바일 기기에 $R - l_1 - l_2$, 엣지 클라우드에 l_1 , 메인 클라우드에 l_2 가 분배되게 된다. 이외에 고려되는 요소들은 네트워크 상황에 따른 속도 등이 있다. 이를 이용해 모바일 기기에서 소요되는 시간인 t_{loc} , 엣지 클라우드에서 소요되는 시간인 t_{edge} , 메인 클라우드에서 소요되는 시간인 t_{main} 을 아래 [Fig. 7]와 같이 구할 수 있다.

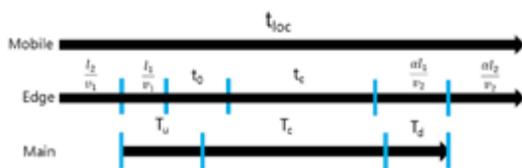


[Fig. 7] Time needed in mobile device, edge cloud, main cloud

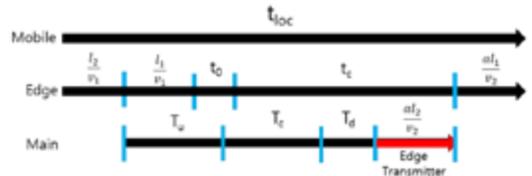
위의 [Fig. 7]을 보면 메인 클라우드에서 연산된 데이터를 엣지 클라우드서 모바일 기기로 보낼 때 소요된 시간은 메인 클라우드 소요시간이 아닌 엣지 클라우드 소요시간에 들어가 있는 것을 알 수 있다. 또한, t_0 와 T_0 는 각각 엣지 클라우드와 메인 클라우드에서 소요되는 대기 시간이다. 이 대기 시간이 생기는 이유는 수많은 사람이 한 기지국에 있는 엣지 클라우드에 접속하기 때문이다. 현재 주어진 식은 단 한 명의 모바일 유저가 모든 엣지 클라우드의 연산량을 독점할 수 있다는 가정 하에 세워져 있는데 현실에서는 엣지 클라우드의 연산 능력의 일부분만을 할당받을 수 있다. 그렇기에 시간이 더 걸리게 되는데 이를 보정해주는 것이 t_0 와 T_0 이다. 이 대기 시간은 각 클라우드에 할당되어 있는 연산량과 해당 시점서 접속한 접속자 수에 따라 자동적으로 계산되는 값이다. 이때 필요한 정보를 얻는 방법은 클라우드에 데이터를 보내는 도중에 모바일이 지속적으로 각 클라우드에 가해지는 부하를 관찰하는 것이다.

3. 연구 결과

가. 데이터를 분배하는 2가지 시간 최소화 메커니즘



[Fig. 8] Optimized method 1system



[Fig. 9] Optimized method 2

우리는 지금까지 두 개의 클라우드를 이용한 모델과 거기서 사용되는 다양한 시간 함수들을 알아보았다. 우리는 이제 소요 시간을 최소화하기 위한 2가지 서로 다른 방법에 대해 알아보겠다. 이 2가지 서로 다른 방법들의 차이는 두 클라우드에

서 연산된 데이터를 엣지 클라우드에서 모바일 기기로 보내는 순서이다. 방법 1은 엣지 클라우드에서 연산된 데이터를 먼저 보내고, 방법 2는 메인 클라우드에서 연산된 데이터를 먼저 보낸다.

두 가지 모델에 대한 최적화된 데이터 분배를 찾는 방법은 다음과 같다. 첫 번째로, 방법 1에 대한 최적의 데이터 분배는 다음과 같다. 위 데이터 분배가 최적인 이유에 대한 수학적 증명은 Appendix 1에 있다.

Optimized data amount distribution in two fixed payment cloud system is given by,

$$l_1^* = \frac{a_m (aR - t_0) + (a + \gamma) (T_0 - t_0 + 2d_{pro})}{(a + \gamma) (a_e + \gamma) + a_m (a + a_e + \gamma)}$$

$$l_2^* = \frac{(\gamma + a_e) (aR - t_0) - (a + a_e + \gamma) (T_0 - t_0 + 2d_{pro})}{(a + \gamma) (a_e + \gamma) + a_m (a + a_e + \gamma)}$$

where $\gamma = \frac{1}{v_1} + \frac{\alpha}{v_2}$ $a_m = \frac{c_m}{f_m}$ $a = \frac{c}{f}$ $a_e = \frac{c_e}{f_e}$
 under the following two conditions:

$$t_{loc} = \frac{l_2}{v_1} + t_{em} + \frac{\alpha l_2}{v_2}$$

$$t_{main} = \frac{l_1}{v_1} + t_0 + t_c + \frac{\alpha l_1}{v_2}$$

두 번째로, 방법 2에 대한 최적의 데이터 분배는 다음과 같다. 위 데이터 분배가 최적인 이유에 대한 수학적 증명은 Appendix 2에 있다.

Optimized data amount distribution in two fixed payment cloud system is given by,

$$l_1^* = \frac{(\gamma + a_m + a) (T_0 - t_0 + 2d_{pro}) + (\gamma_2 + a_m) (aR - T_0 - 2d_{pro})}{(\gamma + a_m + a) (\gamma_1 + a_e) + (\gamma_2 + a) (\gamma_2 + a_m)}$$

$$l_2^* = \frac{-(\gamma_2 + a) (T_0 - t_0 + 2d_{pro}) + (\gamma_1 + a_e) (aR - T_0 - 2d_{pro})}{(\gamma + a_m + a) (\gamma_1 + a_e) + (\gamma_2 + a) (\gamma_2 + a_m)}$$

where $\gamma_1 = \frac{1}{v_1}$ $\gamma_2 = \frac{\alpha}{v_2}$ $\gamma = \gamma_1 + \gamma_2$
 under the following two conditions:

$$t_{loc} = \frac{l_2}{v_1} + t_{em2} + \frac{\alpha l_1}{v_2}$$

$$t_{main} + \frac{\alpha l_2}{v_2} = \frac{l_1}{v_1} + t_0 + t_c$$

나. 두 가지 시간 최소화 메커니즘의 비교

우리는 위에서 2가지 시간 최소화 메커니즘에 대해 최적의 데이터 분배 방법을 알아보았다. 이 두 방법들은 각 상황에 따라 소요시간이 약간씩 다르다. 그래서 우리는 두 클라우드의 대기 시간인 t_0 와 T_0 에 따른 각 방법의 소요 시간을 비교해보고자 한다. 이를 통해 더욱 효율적인 해결책을 다양한 상황에서 찾을 수 있을 것이다. 각 방법 중 더 소요시간이 짧은 방법은 다음과 같다.

위 조건을 이용한다면 각 상황에서 어떤 모델을 사용하는 것이 더 시간이 짧게 걸리는지 간단하게 알 수 있고, 직접 적용해서 시간을 절약할 수 있을 것이다. 증명은 Appendix 3에 있다.

Model 1 is superior when $t_0 \leq \psi T_0 + \chi$
Model 2 is superior when $t_0 > \psi T_0 + \chi$
 where

$$\psi = \frac{\gamma\delta + \epsilon}{\epsilon + \gamma_2\delta + \gamma_1(a + a_e)}$$

$$\chi = \frac{2d(\gamma\delta + \epsilon + a_e\gamma_1) - aR\gamma_1(\delta - a)}{\epsilon + \gamma_2\delta + \gamma_1(a + a_e)}$$

$$\delta = a + a_e + a_m + \gamma$$

$$\epsilon = aa_e + aa_m + a_ea_m$$

4. 결론

이 단원에서는 두 개의 정액제 클라우드로 구성된 시스템에서 소요 시간을 최소화하는 두 가지 방법에 대해 알아보았다. 우리는 각 방법에서 시간을 최소화할 수 있는 최적화된 데이터 분배 방법에 대해 알아보았고, 클라우드의 상황에 따라 각 방법의 효율성을 비교하여 수학적 식으로 표현하였다. 그 결과 환경에 따라 두 방법 중 더 효율적인 방법을 선택할 수 있도록 조건도 제시할 수 있었다. 이 연구는 기존 연구에서는 고려하지 않았던 두 가지 처리 방법을 모두 수학적으로 엄밀하게 고려하였으며, 그에 따라 한정된 연산 능력을 가진 모바일 기기에서 많은 연산량을 처리하는 MEC의 효율 향상에 도움이 될 것이다. 또한, 이 연구는 여러 가지 방향으로 확장 및 응용이 가능하다. 향후 정액제 클라우드가 아닌 연산량 비례 요금제를 가진 클라우드에 대해 연구해 볼 것이다. 그리고 이중 클라우드 모델이 아닌 삼중, 사중, 나아가 n중 클라우드 모델에서의 일반화된 데이터 분배 방법에 대해 탐구해 볼 것이다.

IV. 다수 사용자 단일 엣지 클라우드 모델 - 가격 책정 방식 중심으로

1. 연구 목적

모바일 엣지 컴퓨팅(MEC)에서는 하나의 엣지 클라우드에 다수의 모바일 기기가 실시간으로 추가되거나 사라진다. 따라서 시시각각 달라지는 모바일 기기들의 환경에 따라 엣지 클라우드의 자원을 어떻게 분배하는지가 시스템의 효율에 큰 영향을 준다. 따라서 2016년 MEC가 처음 소개된 이후, 하나의 엣지 클라우드에 다수의 사용자가 연결되어 있는 MEC 시스템을 효율적으로 분배하는 방법에 대한 연구가 지속적으로 이어져 왔다. [2]에서는 소요 시간과 처리의 우선권에 제한을 두었을 때 시스템의 전체 에너지 소비를 최소화하는 문제에 대한 모델을 제시하였다. 더 나아가 [3]에서는 시스템의 에너지와 소요시간을 모두 고려하는 행복도 함수에 대한 최적화 문제를 풀어내었다. 또한 [4]에서는 하이브리드 와이파이가(hybrid WiFi)를 사용하여 엣지 컴퓨팅을 구현하였을 때 소요 시간을 제한하여 에너지 소비를 최소화하는 모델을 제시하였다.

그러나 대부분의 이전 연구들은 크게 두 가지의 특징이 있었다. MEC 시스템을 이루는 사용자들 전체의 행복도를 최대화시키는 최적화 문제를 제시하였다는 점과, 문제들의 해가 엣지 클라우드의 중앙집권적인 시스템으로 나타났다는 점이다. 이는 실제 실용화되기는 어려운 문제점이 있었는데, MEC를 상업적으로 사용할 때에는 각각의 사용자들이 독립적으로 자기 자신의 행복도만을 최대로 하기 위한 선택을 한다는 점에서 실제 상황에 적용되기는 어려웠다. 또한 엣지 클라우드에서 결정한 자원 분배를 사용자들이 무조건적으로 따라야 하는 중앙집권적인 시스템은 마찬가지로 적용되기에 어려움이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 자원의 '가격'이라는 개념이 도입되기 시작했다. 엣지 클라우드의 자원의 가격을 도입함으로써 사용자들의 이기적인 선택을 잘 기술할 수 있게 되며, 중앙집권적인 기존의 문제점에서 탈피할 수 있다. 실제로, [5]에서는 엣지 클라우드 판매자와 사용자 사이를 연결하는 클라우드 브로커(cloud broker)의 개념을 이용하여 브로커의 수입 최대를 추구하는 모델을 제시하였다. 또한 [6]에서는 사용자들이 소비 에너지와 비용을 최소화하는 선택을 한다고 가정하여 최적 가격 책정 방식을 제시하였다. [7]에서는 Stackelberg 균형을 이용하여 사용자들이 계산 시간과 비용을 최소화하는 선택을 하며, 클라우드 판매자가 최대계산용량을 제한하는 MEC 시스템에서 2가지의 가격 책정 방식 모델

을 제시하였다.

이번 단원에서는, 앞선 연구에 더 나아가 사용자들이 계산 시간과 비용을 최소화하는 선택을 하고, 클라우드의 계산 속도의 제한을 둔 MEC 시스템에 대하여 3가지 동적 가격 책정 방식을 제시한다. 이 접근은 기존 연구에 비해 훗날 실제 생활 속에서 사용될 MEC 시스템의 동향을 파악하는 데 큰 의미가 될 수 있는데, 이는 대부분의 MEC 사용자들은 자신의 계산 처리 시간을 줄이기 위해 클라우드 서비스를 사용하기 때문이다. 따라서 우리는 사용자들의 행복도를 처리 시간과 지불하는 비용의 선형 결합으로 정의하였고, 판매자는 사용자들에게 클라우드의 초당 CPU 사이클 수를 분배하는 것으로 가정하였다.

2. 시스템 모델

이번 논문에서 제시하는 3가지 동적 가격 책정 방식은 다음과 같이 명명하겠다.

- 입찰 비례 분배 체제 (BID-PRoportional Allocation Mechanism, BID-PRAM)
- 균등 가격 책정 체제 (UNIform Pricing MEchanism, UNI-PRIM)
- 공정성 추구 차등 가격 책정 체제 (FAIrnness-seeking Differentiated PRICing Mechanism, FAID-PRIM)

먼저 특정 시간 옛지 클라우드에 총 N 개의 모바일 사용자가 접속했다고 가정하자. 사용자들의 집합을 I 로 정의하며, 모든 사용자 $k \in I$ 는 R_k (bits)만큼의 데이터를 처리하기 위해 옛지 클라우드를 사용한다. 이때 데이터 크기들의 집합을 $R = \{R_1, R_2, \dots, R_N\}$ 라 하자. 옛지 클라우드는 총 F 만큼의 초당 CPU 사이클을 제공할 수 있으며, 지금부터 제시될 3가지 가격 책정 방식은 이 초당 CPU 사이클 F 을 사용자들에게 분배할 것이다.

이제 k 번째 모바일 사용자에게 분배되는 CPU 사이클을 F_k 라 하고, 이 값들의 집합을 $\Phi = \{F_1, F_2, \dots, F_k\}$ 라 하자. 또한, k 번째 사용자가 지불하는 비용을 w_k 라고 명명하며, 사용자들의 비용 벡터 w 는 $w = [w_1, w_2, \dots, w_N]$ ($w_i > 0, \forall i \in I$)로 정의한다. 그렇다면 각 사용자 i 의 처리 시간은 $\frac{R_i C}{F_i}$ 이며, 이때 C 는 1 비트의 데이터를 처리하는 데 필요한 CPU 사이클의 수로서 데이터마다 상수로 주어진다.

각각의 모바일 사용자는 자신이 지불하는 비용을 최소화하면서 처리 시간을 줄이는 것을 목표로 한다. 이러한 사용자들의 선택을 수치적으로 분석하기 위해 행복도를 나타내는 함수인 유틸리티 함수 $v_i(w_i, w_{-i})$ 을 다음과 같이 정의하였다. 이는 데이터를 처리하는 시간과 지불하는 비용의 선형 결합에 해당한다.

$$v_i(w_i, w_{-i}) = -\frac{R_i C}{F_i} - \mu_i w_i \tag{26}$$

가. BID-PRAM

입찰 비례 분배 체제 (BID-PRAM)에서는 각각의 사용자가 더 많은 CPU 사이클을 얻기 위해 옛지 클라우드에게 돈을 입찰한다. 이때 판매자는 자신의 클라우드의 초당 CPU 사이클을 사용자들이 지불하는 비용에 비례하여 분배한다. 따라서, i 번째 사용자에게 분배되는 CPU 사이클의 수는 다음과 같다.

$$F_i = F \frac{w_i}{\sum_{k \in I} w_k} \tag{27}$$

I 의 모든 사용자는 그들 스스로의 유틸리티 함수를 최대화시키도록 전략을 선택한다. 따라서 BID-PRAM에서의 각 사용자들은 서로를 견제하는 비협조적인 게임을 진행하게 되는데, 이때의 내쉬 균형점에 대해 분석하였다.

나. UNI-PRIM

균등 가격 책정 체제 (UNI-PRIM)에서는 옛지 클라우드 판매자가 균등한 단위 가격 ν 을 모든 사용자들에게 공지한다. 그 이후 각각의 사용자는 자신의 비용을 결정하여 판매자에게 지불하면, 판매자는 그에 맞는 CPU 사이클 $F_i = \frac{w_i}{\nu}$ 을 제공한다. 이때 사용자들은 자신의 유틸리티 함수를 최대화하는 전략을 선택하며, 판매자는 이러한 사용자들의 선택을 예측

하여 엣지 클라우드의 CPU 사이클을 모두 분배할 수 있도록 단위 가격을 결정한다.

다. FAID-PRIM

공평성 추구 차등 가격 책정 체제(FAID-PRIM)에서는 엣지 클라우드 판매자가 더 높은 수입을 위해 사용자들마다 서로 다른 단위 가격을 공지한다. 사용자들은 앞선 체제들과 마찬가지로 자신의 행복도를 최대화하는 이기적인 전략을 선택하며, 판매자는 이러한 사용자들의 선택을 모두 예측하여 자신의 CPU 사이클을 모두 분배하는 단위 가격 벡터 $\nu = [\nu_1, \nu_2, \dots, \nu_N]$ 를 결정한다.

이때 사용자들마다 단위 가격에 큰 차이가 있다면, 공평성에 대한 논란을 초래할 수 있다. 따라서 공평성 상수 f 를 도입하여 최대 단위 가격과 최소 단위 가격의 비율을 제한하였다.

$$1 \leq \frac{\max_{k \in I} \nu_k}{\min_{k \in I} \nu_k} \leq f \quad (28)$$

3. 모델 분석 및 연구 결과

이번 단원에서는 앞서 언급한 세 가지 가격 책정 체제 - BID-PRIM, UNI-PRIM, FAID-PRIM - 에 대하여 구매자 및 판매자의 최적의 전략이 수학적 접근에 근거하여 제시될 것이다.

가. BID-PRIM

BID-PRIM 모델에서는 CPU 사이클에 대한 시장 가격이 모바일 사용자들의 지불 비용에 의해 완전히 결정되며, 클라우드 판매자의 간섭이 이루어지지 않는다. 우리는 이 모델에서 모든 사용자들이 독립적이며, 자신의 행복도를 최대화하는 전략을 택하는 것으로 가정할 수 있다.

이러한 비협조적 게임의 경우, 안정적인 시장 가격은 사용자 사이의 내쉬 균형점에 존재할 수 있다. 이 균형점은 다음과 같이 정의된다.

Definition 1. BID-PRIM에서 사용자들 내의 내쉬 균형점, $\mathbf{w}^* = [w_1^*, w_2^*, \dots, w_N^*]$ 은 다음과 같이 정의한다.

$$v_i(w_i^*, \mathbf{w}_{-i}^*) \geq v_i(w_i, \mathbf{w}_{-i}^*), \forall w_i > 0, i \in I \quad (29)$$

이 모델의 유일한 내쉬 균형점이 존재하는지는 이 시스템에서 사용자들의 행동을 결정하는데 매우 중요하다. 우리는 BID-PRAM의 유일한 내쉬 균형점을 다음과 같은 수학적 접근을 통해 엄밀하게 보일 수 있었다.

Lemma 4. 유틸리티 함수 $v_i(w_i, \mathbf{w}_{-i})$ 은 $w_i > 0$ 에서 위로 볼록하며, w_i 에 대한 편미분이 연속이다.

Proof. $v_i(w_i, \mathbf{w}_{-i}^*)$ 의 w_i 에 대한 일차, 이차 편미분은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial w_i} v_i(w_i, \mathbf{w}_{-i}^*) = \frac{R_i C}{F} \frac{\sum_{k \in I \setminus \{i\}} w_k^*}{w_i^2} - \mu_i \quad (30)$$

$$\frac{\partial^2}{\partial w_i^2} v_i(w_i, \mathbf{w}_{-i}^*) = -\frac{2R_i C}{F} \frac{\sum_{k \in I \setminus \{i\}} w_k^*}{w_i^3} \quad (31)$$

이때 이차 편미분은 $w_i > 0$ 에서 항상 음수이므로 유틸리티 함수의 볼록성이 증명된다.

또한 일차 편미분은 w_i 에 대한 유리 함수의 형태로, 분모의 값이 0이 아닐 때 연속임을 알 수 있다.

□

Lemma 5. 다음의 조건을 만족하는 $\mathbf{w}^* = [w_1^*, w_2^*, \dots, w_N^*]$ 은 BID-PRIM에서의 내쉬 균형점이며, 그 역도 성립한다.

$$\frac{\sum_{k \in I \setminus \{i\}} w_k^*}{w_i^*} = \frac{F\mu_i}{R_i C} \tag{32}$$

Proof. w^* 가 사용자들 사이의 내쉬 균형점이라고 가정하자. Lemma 4에 의해 $v_i(w_i, w_{-i}^*)$ 은 위로 볼록하며 w_i 에 대한 편미분이 연속이다. 또한 Definition 1에 따라 w^* 은 수식 (4)를 만족하게 되므로 $v_i(w_i, w_{-i}^*)$ 에 대하여 $w_i > 0$ 의 구간에서 w_i^* 은 유일한 극대이자 최대점이 된다. 따라서 페르마의 정리에 따라 다음의 식이 성립하며,

$$\frac{\partial}{\partial w_i} v_i(w_i, w_{-i}^*) = 0 \tag{33}$$

이는 (32)의 수식과 일치한다.

역으로, w^* 가 수식 (32)을 성립한다고 가정하자. Lemma 1에 따라 $v_i(w_i, w_{-i}^*)$ 은 위로 볼록하며 w_i 에 대한 편미분이 연속이다. 또한, 수식 (32)이 성립하므로 w_i 에서의 유틸리티 함수의 편미분계수는 0이다. 따라서

$v_i(w_i, w_{-i}^*)$ 은 w_i 을 유일한 극대이자 최대점으로 가진다. Definition 1에 따라, w_i 은 BID-PRAM의 내쉬 균형점이다. □

Lemma 6. 다음의 조건을 만족하는 $e^* = [e_1^*, e_2^*, \dots, e_N^*]$ 과 스칼라 ν 을 찾는 문제를 생각하자.

$$\begin{cases} R_i C \frac{F - e_i^*}{\mu_i F e_i^{*2}} - \nu = 0 \\ \sum_{k \in I} e_k^* - F = 0 \\ e_i^*, \nu > 0 \end{cases} \tag{34}$$

이 문제는 다음의 유일한 해를 가진다. (ν 는 $\sum_{k \in I} e_k^* = F$ 을 만족하는 실수이다.)

$$e_i^* = \frac{-R_i C + \sqrt{R_i^2 C^2 + 4\mu_i F^2 R_i C \nu}}{2\mu_i F \nu} \tag{35}$$

Proof. (34)의 첫 번째 조건에서, 다음의 식이 도출된다.

$$\mu_i F \nu e_i^{*2} + R_i C e_i^* - F R_i C = 0$$

이 이차방정식의 판별식 $R_i^2 C^2 + 4\mu_i F^2 R_i C \nu$ 는 항상 양수이므로, e_i^* 의 존재성을 입증한다. 근의 공식과 (34)의 세 번째 조건에 따라 해는 다음과 같이 주어지며,

$$e_i^* = \frac{-R_i C + \sqrt{R_i^2 C^2 + 4\mu_i F^2 R_i C \nu}}{2\mu_i F \nu}$$

이는 e_i^* 의 유일성을 보인다.

또한, (34)의 두 번째 조건에 따라,

$$\sum_{k \in I} \frac{-R_i C + \sqrt{R_i^2 C^2 + 4\mu_i F^2 R_i C \nu}}{2\mu_i} - F^2 \nu = 0$$

이 식의 좌변을 $f(\nu)$ 라고 하자. ν 에 대한 일차, 이차 편미분은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial f(\nu)}{\partial \nu} &= \sum_{k \in I} \frac{F^2 R_i C}{\sqrt{R_i^2 C^2 + 4\mu_i F^2 R_i C \nu}} - F^2 \\ \frac{\partial^2 f(\nu)}{\partial \nu^2} &= - \sum_{k \in I} \frac{2\mu_i F^4 R_i^2 C^2}{(R_i^2 C^2 + 4\mu_i F^2 R_i C \nu)^{3/2}} \end{aligned}$$

$\frac{\partial f(\nu)}{\partial \nu} \Big|_{\nu=0} > 0$ 이고 모든 $\nu > 0$ 에 대하여 $\frac{\partial^2 f(\nu)}{\partial \nu^2} < 0$ 이므로, (34)를 만족하는 $\nu > 0$ 은 유일하다. □

Lemma 7. w^* 이 BID-PRAM 사용자들의 비협조적 게임의 내쉬 균형점이면, $e^* = (\frac{w_k^*}{\nu})_{k \in I}$ 과 스칼라 $\nu = \frac{\sum_{k \in I} w_k^*}{F}$ 는 (34)의 유일한 해이다.

Proof. w^* 가 내쉬 균형점이라면, Lemma 5에 따라 w^* 는 (32)을 만족한다. (32)에 각각 $w_i^* = \nu e_i^*$, $\nu = \frac{\sum_{k \in I} w_k^*}{F}$ 을 대입하면, 다음의 식이 도출된다.

$$\frac{F - e_i^*}{\nu e_i^{*2}} = \frac{\mu_i F}{R_i C} \tag{36}$$

비슷한 방법으로, $\sum_{k \in I} e_k^* - F = 0$ 임을 보일 수 있고, 이는 새롭게 정의된 e^* 와 스칼라 ν 가 조건 (34)를 만족함을 입증한다. 또한 Lemma 6는 앞서 정의된 해가 유일하다는 점을 보여준다. □

Lemma 8. (e^*, ν) 가 조건 (34)를 만족하면, 벡터 $w^* = (\nu e_k^*)_{k \in I}$ 는 BID-PRAM의 내쉬 균형점이다.

Proof. 이는 Lemma 7의 증명 과정을 반대로 취함으로써 쉽게 증명할 수 있다. 또한 Lemma 6에 의해, 이러한 (e^*, ν) 은 유일하다.

Theorem 4. BID-PRAM의 모바일 사용자들의 비협조적 게임의 내쉬 균형점 w^* 은 다음과 같이 유일하게 존재한다. ($\nu = \frac{\sum_{k \in I} w_k^*}{F}$ 를 만족하는 실수이다.)

$$w_i^* = \frac{-R_i C + \sqrt{R_i^2 C^2 + 4\mu_i F^2 R_i C \nu}}{2\mu_i F} \tag{37}$$

Proof. Lemma 6과 Lemma 8는 내쉬 균형점의 존재를 증명하며, Lemma 7는 균형점의 유일성을 증명한다. (35)에 $w^* = (\nu e_k^*)_{k \in I}$ 을 대입하면 유일한 내쉬 균형점은 (37)와 같이 주어진다. □

Theorem 4은 BID-PRAM의 유일한 내쉬 균형점이 존재함을 시사하며, 그 점은 (37)과 같이 계산할 수 있다. 이 결과를 통해 이 모델에서 사용자들의 지불 비용은 초기값에 상관없이 충분한 경쟁을 거친다면 특정한 지점으로 고정되는 경향을 보임을 알 수 있다. 따라서 클라우드 판매자는 Theorem 4를 통해 사용자들의 전략을 예측할 수 있으며, 각자 할당되는 CPU 사이클을 결정할 수 있다.

나. UNI-PRIM

Theorem 5. UNI-PRIM에서 사용자들의 최적점 w_i^{**} 과 단위 가격 ν 는 다음과 같이 유일하게 주어진다.

$$w_i^{**} = \sqrt{\frac{R_i C \nu}{\mu_i}} \tag{38}$$

$$\nu = \frac{(\sum_{k \in I} \sqrt{\frac{R_k C}{\mu_k}})^2}{F^2} \tag{39}$$

Proof. 클라우드 판매자가 ν 라는 단위 가격을 사용자들에게 공지했다고 가정하자. 사용자들의 유틸리티 함수는 다음과 같이 주어진다.

$$v_i(w_i) = -\frac{R_i C \nu}{w_i} - \mu_i w_i \tag{40}$$

이 함수의 일계도함수와 이계도함수는 다음과 같다.

$$\frac{d}{dw_i} v_i(w_i) = \frac{R_i C \nu}{w_i^2} - \mu_i \tag{41}$$

$$\frac{d^2}{dw_i^2} v_i(w_i) = -\frac{2R_i C\nu}{w_i^3} \tag{42}$$

이계도함수는 $w_i > 0$ 에 대하여 모두 음수이므로, 유틸리티 함수는 위로 볼록하다. 그렇다면 이 함수의 미분계수가 0이 되는 지점이 존재한다면, 그 지점은 함수의 유일한 최대점이 된다. 따라서 사용자들의 비용의 최적점 w_i^{**} 은 (38)과 같이 ν 에 따라 주어진다.

한편, 판매자는 이러한 사용자들의 전략을 모두 예측하여, 자신이 가지고 있는 모든 CPU 사이클을 분배할 수 있는 단위 가격을 결정하게 된다. 즉, 단위 가격은 $\sum_{k \in I} w_k^{**} = \nu F$ 을 만족하도록 결정되며, 이는 (39)와 같이 유일하게 주어짐을 알 수 있다.

□

Theorem 5는 UNI-PRIM에서 사용자들이 모두 이기적으로 전략을 택할 때 사용자의 지불 비용과 단위 가격은 모두 유일하게 결정된다는 점을 보이며, 이는 (38)과 (39)를 통해 계산될 수 있음을 밝힌다.

다. FAID-PRIM

FAID-PRIM에서 판매자의 매출을 최대화하는 최적의 단위 가격들은 다음과 같이 정의된다. 이 정의를 바탕으로 이 모델에서 최적 단위 가격들은 다음의 수학적 접근을 통해 구할 수 있다.

Definition 2. FAID-PRIM의 최적의 차등 단위 가격 벡터, $\nu = [\nu_1, \nu_2, \dots, \nu_N]$ ($\nu_i \in [0, \nu_{\max}]$, $\forall i \in I$)는 다음과 같이 정의된다.

$$\nu = \operatorname{argmax}_{\nu} \sum_{k \in I} w_i \tag{43}$$

, where $w_i = \operatorname{argmax}_{w_i} v_i(w_i, \nu_i) = \operatorname{argmax}_{w_i} (-\frac{R_i C\nu}{w_i} - \mu_i w_i)$, $\sum_{k \in I} F_k = F$, , and condition (28) holds

Lemma 9. $\nu = [\nu_1, \nu_2, \dots, \nu_N]$ ($\nu_i > 0$, $\forall i \in I$)가 최적의 차등 단위 가격 벡터라면, 이 벡터는 다음의 최적화 문제의 해이다. 또한 이의 역도 성립한다.

$$\begin{aligned} & \max_{\nu} \sum_{k \in I} \sqrt{\frac{R_k C\nu_k}{\mu_k}} \\ & \text{subject to } \begin{cases} \sum_{k \in I} \sqrt{\frac{R_k C}{\mu_k \nu_k}} = F \\ 1 \leq \frac{\max_{k \in I} \nu_k}{\min_{k \in I} \nu_k} \leq f \end{cases} \end{aligned} \tag{44}$$

Proof. 유틸리티 함수 $v_i(w_i) = -\frac{R_i C\nu_i}{w_i} - \mu_i w_i$ 은 위로 볼록하며 도함수가 연속하다. 따라서 이 함수는 미분계수를 0으로 만드는 유일한 최대점 $w_i = \sqrt{\frac{R_i C\nu_i}{\mu_i}}$ 을 가지며, 이를 (43)에 대입하여 (44)를 보일 수 있다.

□

이 문제를 해결하기 위하여, 더 단순화된 문제를 제시한다.

Problem 1.

$$\begin{aligned} & \max_x \sum_{i=1}^N \frac{a_i}{x_i} \\ & \text{subject to } \begin{cases} \sum_{i=1}^N a_i x_i = s \\ 1 \leq \frac{\max_{i \in I} x_i}{\min_{i \in I} x_i} \leq K \\ a_i, x_i > 0, \forall i \in I \end{cases} \end{aligned} \tag{44}$$

Lemma 10. $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_N]$ 이 Problem 1의 해라면, 모든 $i \in I$ 에 대하여 $x_i \in \{\max_{k \in I} x_k, \min_{k \in I} x_k\}$ 이다.

Proof. Problem 1의 해 \mathbf{x} 중의 몇 개의 원소가 $\{\max_{k \in I} x_k, \min_{k \in I} x_k\}$ 에 속하지 않는다고 가정하자.

우리는 이 벡터의 원소 x_i 에 대하여 계수 a_i 가 낮아지는 순서대로 재배열할 수 있다. 새롭게 배열된 벡터를 $\mathbf{y} = [y_1, y_2, \dots, y_N]$, 새롭게 배열된 계수들을 $\mathbf{b} = [b_1, b_2, \dots, b_N]$ 라고 하자. 그렇다면 이 중 n 개의 원소 y_1, y_2, \dots, y_n 는 $\max_{k \in I} x_k$ 에 속하며, m 개의 원소 $y_{N-m+1}, y_{N-m+2}, \dots, y_N$ 는 $\min_{k \in I} x_k$ 에 속한다. 따라서 \mathbf{y} 는 다음의 부등식을 만족한다.

$$\begin{aligned} y_1 = y_2 = \dots = y_n &> y_{n+1} \geq \\ \dots \geq y_{N-m} &> y_{N-m+1} = y_{N-m+2} = \dots = y_N \end{aligned} \quad (46)$$

이때, $\frac{\max_{i \in I} x_i}{\min_{i \in I} x_i} = k$ 라 하자.

만약 $\frac{k}{y_1^2(k+1)} - \frac{b_{n+1}}{y_{n+1}^2} + \frac{1}{y_N^2 k} > 0$ 라면, 다음의 부등식을 만족하는 $\epsilon > 0$ 을 가져오자.

$$y_1 - \frac{f}{(f+1) \sum_{i=1}^n b_i} \epsilon > y_{n+1} + \epsilon \quad (47)$$

y' 과 y'' 을 다음과 같이 정의하며,

$$y' = y_1 - \frac{f}{(f+1) \sum_{i=1}^n b_i} \epsilon, \quad y'' = y_N - \frac{f}{(f+1) \sum_{i=N-m+1}^N b_i} \epsilon$$

새로운 벡터 $\mathbf{y}' = [y'_1, y'_2, \dots, y'_N]$ 을 다음과 같이 정의하자.

$$y'_i = \begin{cases} y', & \text{if } i = 1, 2, \dots, n \\ y_{n+1} + \epsilon, & \text{if } i = n+1 \\ y_i, & \text{if } i = n+2, n+3, \dots, N-m \\ y'', & \text{if } i = N-m+1, N-m+2, \dots, N \end{cases}$$

그렇다면 y' 은 최댓값과 최솟값의 비 k 을 유지하면서 조건 (45)을 충족시킨다. 이때 $f(\epsilon) = \sum_{i=1}^N \frac{b_i}{y'_i}$ 라 하자. 이를 한 번 미분하게 되면, 다음의 식을 얻는다.

$$\frac{df(\epsilon)}{d\epsilon} = \frac{k}{y_1'^2(k+1)} - \frac{b_{n+1}}{y_{n+1}'^2} + \frac{1}{y_N'^2 k} \quad (48)$$

또한,

$$\begin{aligned} \frac{df(\epsilon)}{d\epsilon} \Big|_{\epsilon=0} &= \frac{k}{y_1^2(k+1)} - \frac{b_{n+1}}{y_{n+1}^2} + \frac{1}{y_N^2 k} > 0 \\ \frac{d^2 f(\epsilon)}{d\epsilon^2} &> 0, \forall \epsilon > 0 \end{aligned}$$

로서, $f(\epsilon)$ 은 $\epsilon > 0$ 에서 증가함수임을 알 수 있다. 이는 \mathbf{x} 가 Problem 1의 최적해라는 가정에 모순이다.

만약 $\frac{k}{y_1^2(k+1)} - \frac{b_{n+1}}{y_{n+1}^2} + \frac{1}{y_N^2 k} < 0$ 이면, $y_{n+1} - \epsilon > y_n$ 를 만족하는 ϵ 을 가져오자. 이때 y_n 는 원소 중 y_{n+1} 보다 작은 가장 큰 원소이다.

y' 과 y'' 을 다음과 같이 정의하며,

$$y' = y_1 + \frac{f}{(f+1) \sum_{i=1}^n b_i} \epsilon, \quad y'' = y_N + \frac{1}{(f+1) \sum_{i=N-m+1}^N b_i} \epsilon$$

새로운 벡터 $y' = [y'_1, y'_2, \dots, y'_N]$ 을 다음과 같이 정의하자.

$$y'_i = \begin{cases} y'_i, & \text{if } i = 1, 2, \dots, n \\ y_n - \epsilon, & \text{if } i = n \\ y_i, & \text{if } i = n + 1, n + 2, \dots, N - m \\ y''_i, & \text{if } i = N - m + 1, N - m + 2, \dots, N \end{cases}$$

마찬가지로 $f(\epsilon) = \sum_{i=1}^N \frac{b_i}{y_i}$ 를 정의하고 한 번 미분함으로써, $f(\epsilon)$ 는 $\epsilon > 0$ 에서 증가함수임을 알 수 있다. 이는 χ 가 Problem 1의 최적해라는 가정에 모순이다. □

Theorem 6. $A \cap B = \emptyset$ 이고 $A \cup B = \{a_1, a_2, \dots, a_N\}$ 이며 $\{a_1, a_2, \dots, a_N\}$ 을 분할하는 두 집합 중에서 원소들의 합의 차이가 가장 작은 두 집합을 $A = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n\}$ 과 $B = \{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_{N-n}\}$ 라 하자. 이때, $\sum_{x \in A} x = \alpha$, $\sum_{x \in B} x = \beta$ 라 하자.

그렇다면 Problem 1의 최적해는 다음과 같이 유일하게 결정된다.

$$x_i = \begin{cases} \frac{s}{\alpha + K\beta}, & \text{if } a_i \in A \\ \frac{Ks}{\alpha + K\beta}, & \text{if } a_i \in B \end{cases} \tag{49}$$

Proof. Lemma 10에 의해, Problem 1의 최적해는 두 개의 실수로 구성되어 있고, 이를 x_{\max} , x_{\min} 이라고 명명하자. χ 가 최적해라고 가정하고 두 집합 $A = \{a_i | x_i = x_{\min}\}$ 과 $B = \{a_i | x_i = x_{\max}\}$ 를 정의하자. 또한 $\frac{x_{\max}}{x_{\min}} = k$ 라 하자. (45)의 첫 번째 조건에 따라,

$$x_{\min} = \frac{s}{\sum_{x \in A} 1 + k \sum_{x \in B} 1}$$

$$x_{\max} = \frac{ks}{\sum_{x \in A} 1 + k \sum_{x \in B} 1}$$

$\sum_{x \in A} x = \alpha$, $\sum_{x \in B} x = \beta$, 그리고 $\alpha + \beta = \gamma$ 라 하자. 그렇다면, 다음의 식이 성립한다.

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N \frac{a_i}{x_i} &= \sum_{x \in A} \frac{x(\alpha + k\beta)}{s} + \sum_{x \in B} \frac{x(\alpha + k\beta)}{ks} \\ &= \frac{\alpha(\alpha + k\beta)}{s} + \frac{\beta(\alpha + k\beta)}{ks} \\ &= \frac{(\alpha + \beta)^2 + (k + \frac{1}{k} - 2)\alpha\beta}{s} \\ &= \frac{\gamma^2 + (k + \frac{1}{k} - 2)\alpha(\gamma - \alpha)}{s} \end{aligned}$$

이 식은 α 에 대한 이차함수이며, 최고차항의 계수가 음수이고 대칭축이 $\chi = \gamma/2$ 로 주어진다. χ 가 Problem 1의 최적해이므로, α 의 값은 $\gamma/2$ 와 가장 가까워야 한다. 따라서 조건 (49)를 만족한다.

반대로, 조건 (49)를 만족하는 χ 는 마찬가지로 Problem 1의 최적해가 된다. □

Theorem 7. $A \cap B = \emptyset$ 이고 $A \cup B = \left\{ \sqrt{\frac{R_i C}{\mu_i}} \mid i = 1, 2, \dots, N \right\}$ 이며 $\left\{ \sqrt{\frac{R_i C}{\mu_i}} \mid i = 1, 2, \dots, N \right\}$ 을 분할하는 두 집합 중에서 원소들의 합의 차이가 가장 작은 두 집합을 $A = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n\}$ 과 $B = \{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_{N-n}\}$ 라 하자. 이때, $\sum_{x \in A} x = \alpha$, $\sum_{x \in B} x = \beta$ 라 하자.

그렇다면 FAID-PRIM의 최적 차등 단위 가격 벡터 \mathbf{v} 는 다음과 같이 유일하게 결정된다.

$$v_i = \begin{cases} \left(\frac{\alpha + \beta f^{1/2}}{F}\right)^2, & \text{if } \sqrt{\frac{R_i C}{\mu_i}} \in A \\ \left(\frac{\alpha + \beta f^{1/2}}{f^{1/2} F}\right)^2, & \text{if } \sqrt{\frac{R_i C}{\mu_i}} \in B \end{cases} \quad (50)$$

Proof. (49)의 식에 $v_i = \frac{1}{x_i^2}$, $a_i = \sqrt{\frac{R_i C}{\mu_i}}$, 그리고 $K = \sqrt{f}$ 를 대입하면, 최적 차등 단위 가격 벡터는 (50)의 형태로 결정됨을 구할 수 있다. □

라. Comparison of Three Models

Theorem 8. FAID-PRIM의 판매자의 매출은 $f \geq 1$ 에 따라 단조증가한다. 특히, $f = 1$ 일 때에는 UNI-PRIM과 동일하다.

Proof. FAID-PRIM과 UNI-PRIM의 총매출의 차이는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{\alpha^2 + \beta^2 + (f^{1/2} + f^{-1/2})\alpha\beta}{F} - \frac{(\alpha + \beta)^2}{F} \\ &= \frac{(f^{1/2} + f^{-1/2} - 2)\alpha\beta}{F} \end{aligned}$$

이는 $f \geq 1$ 일 때 단조증가하며, $f = 1$ 일 때 두 매출의 차이는 0으로 같아짐을 알 수 있다.

Corollary 1. UNI-PRIM의 총 매출에 대하여 FAID-PRIM과 UNI-PRIM의 판매자의 총 매출의 차이의 비율은 α 와 β 가 충분히 가까울 때 다음의 식으로 근사할 수 있다.

$$\frac{f^{1/2} + f^{-1/2} - 2}{4}$$

Proof. Theorem 8에서 총 매출의 차이의 비율은 다음과 같다.

$$\frac{(f^{1/2} + f^{-1/2} - 2)\alpha\beta}{(\alpha + \beta)^2}$$

α 와 β 가 충분히 가까울 때 $\alpha \approx \beta$ 로 가정할 수 있으며,

$$\frac{(f^{1/2} + f^{-1/2} - 2)\alpha\beta}{(\alpha + \beta)^2} \approx \frac{(f^{1/2} + f^{-1/2} - 2)\alpha^2}{(2\alpha)^2} = \frac{f^{1/2} + f^{-1/2} - 2}{4}$$

□

Corollary 1을 통해 판매자가 FAID-PRIM을 사용할 경우 UNI-PRIM에 비해 공평성 상수를 어느 정도로 택해야 원하는 만큼의 매출 증가를 기대할 수 있는지 판단할 수 있다. 예컨대 FAID-PRIM을 택할 경우, UNI-PRIM과 비교하여 10%의 매출 증가를 원한다면, 약 3.47로 공평성 상수를 결정하면 된다는 것을 알 수 있다.

Theorem 9. UNI-PRIM의 총 매출은 항상 BID-PRAM의 총 매출보다 높다.

Proof. 같은 사용자 $I = \{1, 2, \dots, N\}$ 에 대하여 BID-PRAM과 UNI-PRIM의 최적점에서 사용자들의 비용을 각각 $[w_1^*, w_2^*, \dots, w_N^*]$, $[w_1^{**}, w_2^{**}, \dots, w_N^{**}]$ 라 하자. 또한 각각의 단위 가격을 ν_1, ν_2 라고 하자. 이때, 다음의 식이 성립한다.

$$\begin{aligned} \sum_{k \in I} w_k^* &= \nu_1 F \\ \sum_{k \in I} w_k^{**} &= \nu_2 F \end{aligned}$$

따라서 다음의 식이 성립함을 알 수 있다.

$$\sum_{k \in I} \left(\frac{w_k^*}{\nu_1} - \frac{w_k^{**}}{\nu_2} \right) = \sum_{k \in I} \left(\frac{-R_k C + \sqrt{R_k^2 C^2 + 4\mu_k F^2 R_k C \nu_1}}{2\mu_k F \nu_1} - \sqrt{\frac{R_k C}{\mu_k \nu_2}} \right) = 0 \tag{51}$$

이때 $f_k(x) = \frac{-R_k C + \sqrt{R_k^2 C^2 + 4\mu_k F^2 R_k C x}}{2\mu_k F x}$, $g_k(x) = \sqrt{\frac{R_k C}{\mu_k x}}$ 라고 하면, 두 함수는 $x > 0$ 에 대하여 항상 양수이다. 또한,

$$\begin{aligned} g_k^2(x) - f_k^2(x) &= \frac{R_k C}{2\mu_k^2 F^2 x^2} (\sqrt{R_k^2 C^2 + 4\mu_k F^2 R_k C x} - R_k C) \\ &> 0 \end{aligned} \tag{52}$$

이므로 $f_k(x) < g_k(x)$ 임을 알 수 있다.

한편 두 함수는 $x > 0$ 에 대하여 감소한다. 이에 $\nu_1 \geq \nu_2$ 라고 가정하자. 그렇다면

$$\begin{aligned} \sum_{k \in I} \left(\frac{w_k^*}{\nu_1} - \frac{w_k^{**}}{\nu_2} \right) &= \sum_{k \in I} (f_k(\nu_1) - g_k(\nu_2)) \\ &\leq \sum_{k \in I} (f_k(\nu_2) - g_k(\nu_2)) \\ &< 0 \end{aligned} \tag{53}$$

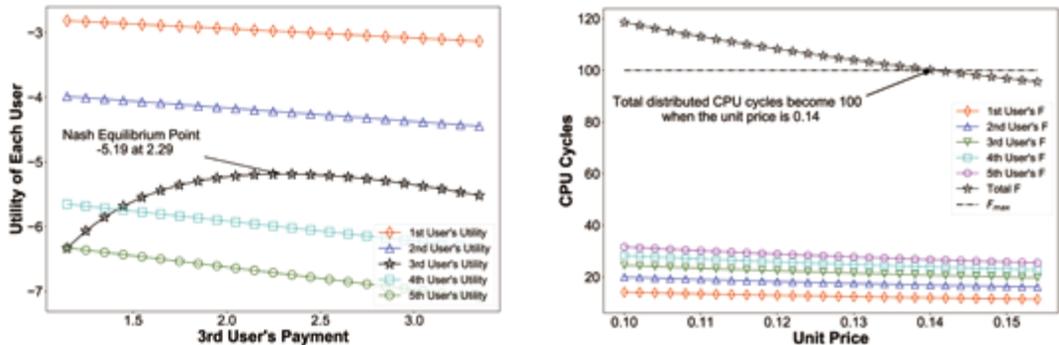
으로, (51)에 모순된다.

따라서 ν_2 는 ν_1 보다 크며, 이는 UNI-PRIM의 총매출 $\nu_2 F$ 는 BID-PRAM의 총매출 $\nu_1 F$ 보다 항상 크다는 점을 입증한다. □

Theorem 8과 9는 판매자의 매출이 BID-PRAM, UNI-PRIM, FAID-PRIM 순서로 증가함을 말해준다. 그러나 앞서 언급하였듯이 FAID-PRIM 모델에서 판매자는 사용자 사이의 차등적인 가격 때문에 발생하는 불만을 해결해야 하고, BID-PRAM 모델에서는 판매자가 가격 책정에 간섭을 하지 않아도 된다는 점에서 강점을 지닌다. 따라서 판매자는 각 모델의 장단점을 고려하여 상황에 맞는 가격 책정 방식을 택할 수 있을 것이다.

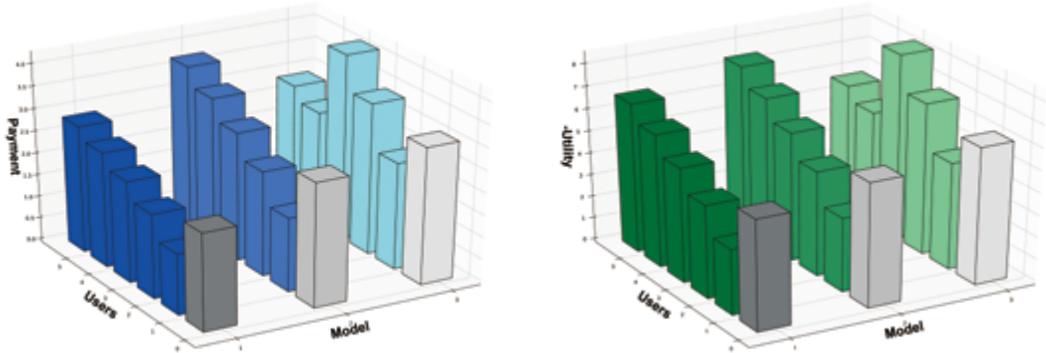
마. Numerical Results

제시된 Theorem들을 실제 데이터 값을 이용하여 검증해보았다. 이때 사용자들의 집합은 {2,3,4,5,6,8,10RIGHT}, 그리고 데이터의 크기는 {2,3,4,5,6,8,10RIGHT} 로 주어졌다. 또한 μ 는 모든 사용자들에게 동일하게 1로 주어졌으며 총 초당 CPU 사이클을 100, 1 비트당 필요한 CPU 사이클은 10으로 가정하였다.



[Fig. 10] Verification of Theorem 1 and 2

그 결과 BID-PRAM의 내쉬 균형의 지점이 예측한대로 2.29와 같게 나타났다. 또한 UNI-PRIM에서 자신의 CPU 사이클을 모두 판매하게 되는 단위 가격 0.14는 Theorem 2로 예측한 것과 같게 나타났다는 점에서 앞의 Theorem들이 실제 데이터와 잘 들어맞음을 알 수 있다.



[Fig. 11] Verification of Theorem 5 and 6

이와 더불어 같은 사용자들의 각 모델별 비용과 유틸리티 함수에 -1을 곱한 값에 대한 그래프를 그렸다. 두 그래프는 거의 동일한 그래프 개형을 가지고 있으며, 특히 회색으로 나타내진 평균의 값은 FAID-PRIM, UNI-PRIM, 그리고 BID-PRAM의 순서로 사람들의 비용은 줄어들고 행복도는 높아졌음을 알 수 있다. 이는 Comparison of Three Models의 결과들과 일치하는 값이다.

4. 결론

이 단원에서는 사용자가 소요 시간과 지불하는 비용에 의존하는 유틸리티 함수로 행복도를 느낀다고 가정하고, 판매자는 초당 CPU 사이클이라는 자원을 분배하는 경우 사용할 수 있는 3가지 가격 책정 체제를 제시하였다. 판매자의 간섭 없이 구매자들의 경쟁을 통해 적정 가격이 유지되는 BID-PRAM, 동일한 단위 가격을 제시하여 구매자들이 CPU 사이클을 구매하는 UNI-PRIM, 그리고 판매자의 매출 증대를 위해 사용자들마다 다른 단위 가격을 제시하는 FAID-PRIM이 있었다. 각 가격 책정 방식에 대하여 수학적 분석을 진행하였고, 그 결과 FAID-PRIM, UNI-PRIM, BID-PRAM 순서로 판매자의 매출이 높았다. 그러나 FAID-PRIM의 경우 공평성 상수를 어떻게 설정하는지에 따라 사용자들의 불만에 대한 문제가 생길 수 있으며, BID-PRAM의 경우 판매자가 시장에 대한 간섭 없이도 적절한 가격을 유지할 수 있다는 점에서 장점이 있다. 따라서 세 가지 모델에 대한 비교를 수학적으로 진행하였고, 이러한 연구 결과들을 통해 판매자들은 3가지 가격 책정 체제에서 매출과 사용자들의 전략을 예측할 수 있다. 판매자의 상황에 따라 3가지 가격 책정 방식 중 한 모델을 선택할 수 있다는 점에서 이 단원은 MEC의 실용화에 큰 의미가 있는 결과이다.

V. 요약 및 결론

이 연구는 MEC의 최적화와 관련된 기존 연구에 대하여 개선점을 중심으로 새로운 모델을 제시하였다. II절에서는 단일 사용자와 단일 클라우드가 존재하는 상황에 대하여 기존 연구에서 더 나아가 지불 비용, 지연 시간, 모바일 사용 에너지, 클라우드 사용 에너지를 모두 고려하는 최적화 문제를 제시하였고, 그에 대한 해를 제시하였다. 또한 III절에서는 단일 사용자와 이중 엣지 클라우드에 대하여 두 클라우드가 모두 정액제를 사용할 때의 상황에 대하여 연구하였다. 이때 기존 연구에서

더 나아가 이중 클라우드에서 데이터를 분배하는 2가지 방법을 모두 고려하였고, 각각을 최적화함은 물론 두 방법 중 어떠한 상황에서 하나를 선택하는 것이 더 효율적인지에 대한 모델을 제시하였다. 마지막으로 IV절에서는 단일 클라우드에 다수의 사용자가 연결되어 있는 경우 가격을 도입함으로써 기존 연구가 가졌던 중앙 집권적인 리소스 분배를 해결하였다. 이에 MEC의 상황에서 판매자가 사용할 수 있는 가격 책정 방식에 집중하였고, 3가지 가격 책정 방식 모델을 제시하여 각각의 모델에서 예측되는 사용자의 행동을 수학적으로 분석하였다. 더 나아가 3가지 가격 책정 방식을 수식적으로 서로 비교하여 판매자가 어떤 가격 책정 방식을 선택할 것인지에 대한 수학적인 기초를 세운 연구라고 볼 수 있다.

이처럼 이 연구는 MEC가 실생활에서 사용될 때 효율적인 리소스 분배 방식에 대한 수학적인 모델을 제시하였다고 볼 수 있다. 향후 연구 목표로는 II절에서는 실제 사람들의 행동을 결정짓는 다양한 요소에 대하여 모델을 확장시키는 것, III절에서는 n-중 엣지 클라우드에 대하여 연구 결과를 확장시키는 것, 그리고 IV절에서는 사용자가 Computation Offloading을 사용하는 경우로 확장시키는 것 등을 제시할 수 있다.

VI. 참고문헌

- [1] Y. Wang, M. Sheung, X. Wang, L. Wang & J. Li. (2016). Mobile-edge computing: Partial computation offloading using dynamic voltage scaling, *IEEE Transactions on Communications*, vol. 64, no. 10, pp. 4268–282.
- [2] K. Zhang, Y. Mao, S. Leng, Q. Zhao, L. Li, X. Peng & Y. Zhang. (2016). Energy-efficient offloading for mobile edge computing in 5g heterogeneous networks, *IEEE Access*, vol. 4, pp. 5896–907.
- [3] M. H. Chen, B. Liang & M. Dong. (2017). Joint offloading and resource allocation for computation and communication in mobile cloud with computing access point, *IEEE INFOCOM 2017 – IEEE Conference on Computer Communications*, pp. 1–9.
- [4] Guo, H. & Liu, J. (2018). Collaborative computation offloading for multi-access edge computing over fiberwireless networks, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*.
- [5] J. Mei, K. Li, Z. Tong, Q. Li, & K. Li. (2018). Profit maximization for cloud brokers in cloud computing, *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, pp. 1-1.
- [6] S. Kim, S. Park, M. Chen, & C. Youn. (2018). An optimal pricing scheme for the energy-efficient mobile edge computation offloading with OFDMA, *IEEE Communications Letters*, vol. 22, no. 9, pp. 1922-1925.
- [7] M. Liu & Y. Liu. (2018). Price-based distributed offloading for mobile-edge computing with computation capacity constraints, *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 7, no. 3, pp. 420-423.

VI. APPENDIX: 단일 사용자 이중 엣지 클라우드 모델

1. 방법 1에 대한 최적의 데이터 분배 증명

앞의 theorem에서 언급된 2가지 조건을 만족할 때 총 소요 시간은 최소화된다. 즉, 엣지 클라우드 송신 모듈은 엣지 클라우드에서 연산된 데이터의 전송을 끝내자마자 지연 없이 메인 클라우드에서 연산된 데이터의 전송을 시작해야 하고, 메인 클라우드에서 연산된 데이터의 전송은 모바일에서 연산이 끝나고 동시에 끝나야 한다. 이 상황을 간단히 식으로 표현하면 다음과 같은 등식들을 만족하게 된다.

$$\begin{aligned}
t_{em}^* &= (\gamma + a_e) l_1^* + t_0 \\
&= T_0 + 2d_{pro} + a_m l_2^* \\
t_{tot}^* &= a(R - l_1^* - l_2^*) \\
&= t_{em}^* + \gamma l_2^*
\end{aligned}$$

이 상황에서 l_1 과 l_2 를 증가, 혹은 감소시켰을 때 총 소요 시간이 증가하는지 감소하는지를 알아보도록 하자. 아래 증명에서 x 는 양수이다.

$$\begin{aligned}
(i) \quad & l_2 = l_2^* + x \\
& t_{em} = 2d_{pro} + T_0 + a_m(l_2^* + x) > t_{em}^* \\
& t_{tot} = \gamma(l_2^* + x) + t_{em} > t_{tot}^* \\
(ii) \quad & l_2 = l_2^* \text{ and } l_1 = l_1^* + x \\
& t_{em} = (a_e + \gamma)(l_1^* + x) + t_0 > t_{em}^* \\
& t_{tot} = \gamma l_2^* + t_{em} > t_{tot}^* \\
(iii) \quad & l_2 = l_2^* \text{ and } l_1 = l_1^* - x \\
& t_{tot} = a(R - l_1^* - l_2^* + x) > t_{tot}^* \\
(iv) \quad & l_2 = l_2^* - x \text{ and } l_1 \geq l_1^* \\
& t_{tot} = a(R - l_1^* - l_2^* + x) > t_{tot}^* \\
(v) \quad & l_2 = l_2^* - x \text{ and } l_1 > l_1^* + x \\
& t_{em} \geq t_{em}^* + (a_e + \gamma)x \\
& t_{tot} = t_{em} + \gamma l_2^* - \gamma x \geq t_{tot}^* + a_e x > \\
(vi) \quad & l_2 = l_2^* - x \text{ and } l_1^* < l_1 \leq l_1^* + x \\
& t_{tot} > a(R - l_1^* - l_2^*) = t_{tot}^*
\end{aligned}$$

(i)에서 (vi)까지 모든 경우에서 총 소요 시간이 앞에서 구한 가설을 만족할 때의 소요시간이 t_{tot}^* 보다 증가했음을 알 수 있다. 그렇기에, 앞에서 구한 두 조건을 만족하는 l_1 과 l_2 가 최적임을 알 수 있다.

2. 방법 2에 대한 최적의 데이터 분배 증명

앞의 theorem에서 언급된 2가지 조건을 만족할 때 총 소요 시간은 최소화된다. 즉, 엣지 클라우드 송신 모듈은 메인 클라우드에서 연산된 데이터의 전송을 끝내자마자 지연 없이 엣지 클라우드에서 연산된 데이터의 전송을 시작해야 하고, 엣지 클라우드에서 연산된 데이터의 전송은 모바일에서 연산이 끝남과 동시 끝나야 한다. 이 상황을 간단히 식으로 표현하면 다음과 같은 등식들을 만족하게 된다.

$$\begin{aligned}
t_{em}^* &= (\gamma_1 + a_e) l_1^* + t_0 \\
&= T_0 + 2d_{pro} + (a_m + \gamma_2) l_2^* \\
t_{tot}^* &= a(R - l_1^* - l_2^*) \\
&= t_{em}^* + \gamma_1 l_2^* + \gamma_2 l_1^*
\end{aligned}$$

이 상황에서 l_1 과 l_2 를 증가, 혹은 감소시켰을 때 총 소요 시간이 증가하는지 감소하는지를 알아보도록 하자. 아래 증명에서 x 는 양수이다.

(i)에서 (vii)까지 모든 경우에서 총 소요 시간이 앞에서 구한 가설을 만족할 때의 소요시간이 t_{tot}^* 보다 증가했음을 알 수 있다. 그렇기에, 앞에서 구한 두 조건을 만족하는 l_1 과 l_2 가 최적임을 알 수 있다.

- (i) $l_1 = l_1^* + x$ and $l_2 \geq l_2^*$
 $t_{em} > t_{em}^*$
 $t_{tot} = \gamma_1 l_2 + \gamma_2 l_1 + t_{em} > t_{tot}^*$
- (ii) $l_1 = l_1^* + x$ and $l_2^* - x \leq l_2 \leq l_2^*$
 $t_{em} \geq t_{em}^* + (a_e + \gamma_1)x$
 $t_{tot} \geq t_{em} + \gamma_1(l_2^* - x) + \gamma_2 l_1^* > t_{tot}^*$
- (iii) $l_1 = l_1^* + x$ and $l_2 < l_2^* - x$
 $t_{tot} > a(R - l_1^* - l_2^*) = t_{tot}^*$
- (iv) $l_1 = l_1^*$ and $l_2 = l_2^* + x$
 $t_{em} = T_0 + 2d_{pro} + (a_m + \gamma_2)(l_2^* + x) > t_{em}^*$
 $t_{tot} = t_{em} + \gamma_1(l_2^* + x) + \gamma_2 l_1^* > t_{tot}^*$
- (v) $l_1 = l_1^*$ and $l_2 = l_2^* - x$
 $t_{tot} = a(R - l_1^* - l_2^* + x) > t_{tot}^*$
- (vi) $l_1 = l_1^* - x$ and $l_2^* < l_2 < l_2^* + x$
 $t_{tot} > a(R - l_1^* - l_2^*) = t_{tot}^*$
- (vii) $l_1 = l_1^* - x$ and $l_2 \geq l_2^* + x$
 $t_{em} \geq t_{em}^* + (a_m + \gamma_2)x$
 $t_{tot} \geq t_{em} + \gamma_1(l_2^* + x) + \gamma_2 l_1^* - \gamma_2 x > t_{tot}^*$

3. 2가지 시간 최소화 메커니즘에 대한 비교 증명

앞의 2가지 시간 최소화 메커니즘에서 우리는 최적의 데이터 분배를 구했다. 그렇기에, 이 최적 데이터 분배 식을 이용하면 각 상황에서의 total delay 역시 구할 수 있다. 여기서, 두 상황에서 total delay가 같은 경우를 생각해보면 다음과 같은 등식으로 표현된다.

$$t_{0,opt} = \psi T_{0,opt} - \chi$$

이 상황에서 다른 변수와 상수의 값은 고정된 채로 t_0 의 값만 약간씩 바꿔보자. 이때 변화된 t_0 를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$t_0 = t_{0,opt} + \Delta t_0$$

이 상황에서 방법 1과 2를 이용한 total delay를 이용해 새로운 함수 D를 정의해보자.

$$D(t_0, T_0) = (\text{method 1 delay}) - (\text{method 2 delay})$$

이 상황에서 D가 음수이면 1번 방법이 더 시간을 절약할 수 있고, D가 양수라면 2번 방법이 더 시간을 절약할 수 있다. D가 0이면 두 방법은 동등하게 된다. 즉, $D(t_{0,opt}, T_{0,opt}) = 0$ 이 되게 된다. 이 상황에서 위에서 구한 변화된 t_0 를 대입하자.

$$D(t_0, T_{0,opt}) = \frac{a(a_m + \gamma)\Delta t_0}{(a + \gamma)(a_e + \gamma) + a_m(a + a_e + \gamma)} - \frac{a(a_m + \gamma_1)\Delta t_0}{(a_e + \gamma_1)(a + a_m + \gamma) + (a + \gamma_2)(a_m + \gamma_2)}$$

위 식에서 두 분모가 모두 양수이므로 양변에 두 분모를 곱해도 식의 부호는 변하지 않는다.

즉, 위 식에서 $\Delta t_0 > 0$ 이면 D는 양수이고, 이때 방법 2가 더 좋다. 반대로, $\Delta t_0 < 0$ 이면 D는 음수가 되고 방법 1이 더 시간을 단축할 수 있다는 결론을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} & a\Delta t_0[(a_m + \gamma)[(a + \gamma)(a_e + \gamma) + a_m(a + a_e + \gamma)] \\ & - (a_m + \gamma_1)[(a_e + \gamma_1)(a + a_m + \gamma) + (a + \gamma_2)(a_m + \gamma_2)] \\ & = a\gamma\Delta t_0[(a + a_e + \gamma_2)(a_m + \gamma) + aa_e] \end{aligned}$$

연구진

백범한 (Beomhan Baek, KAIST 부설 한국과학영재학교, qjagks2001@naver.com), 공동저자

이현준 (Hyeonjun Lee, KAIST 부설 한국과학영재학교, hjharold@naver.com), 공동저자

홍성우 (Seongwoo Hong, KAIST 부설 한국과학영재학교, hahswoopy@naver.com), 공동저자

지도교수 : **이주형** (Juhyeong Lee, 가천대학교 소프트웨어학과, j17.lee@gachon.ac.kr)

지도교교 : **박상돈** (Sangdon Park, KAIST 전기 및 전자공학부, johnsdpark@kaist.ac.kr)

폴리페놀 추출물의 나노코팅을 이용한 석조문화재 보존 연구

유영주 · 박은서 · 서준배 · 오선무 - 대전동신과학고등학교

Preservation of Stone Cultural Properties by Nano-Coating of Polyphenol Extract

Youngju Yoo · Eunseo Park · Junbae Seo · Seonmu Oh - Daejeon Dongshin Science High School

국문초록

현재 석조 문화재의 표면 공극을 충전하기 위한 보존 관리로 TiO_2 광촉매의 나노 코팅법을 사용하고 있지만 TiO_2 광촉매는 암석 표면에 백화현상을 발생시키며, 그 가격이 굉장히 비싸다는 단점이 있다. 본 연구에서는 이를 보완할 수 있는 폴리페놀을 녹차, 뽕나무, 아로니아, 케이퍼에서 추출하여 대체하고자 한다. 고성능 액체 크로마토그래피 분석과 총 폴리페놀 함량 분석을 통해 추출물 속 폴리페놀의 함량을 측정하고, 추출물을 화강암석 표면에 나노코팅하여 그 표면을 SEM으로 관찰하였다. 또한, DPPH 라디칼 소거능과 메틸렌블루 광분해 특성 분석을 통해 항산화능을, 대장균 계수를 통해 항균력을 측정하였다. 그 결과 녹차 추출물이 석조 문화재의 나노코팅제로 가장 적합하였다. 이를 잘 개발하면 기존 암석 코팅제의 문제점을 해결하여 보완할 수 있고 석조 문화재 뿐만 아니라 다른 나노코팅이 요구되는 부분에도 적용할 수 있을 것이다.

중심어 : 석조 문화재, 나노 코팅, 폴리페놀, 항균력, 항산화능

ABSTRACT

Although TiO_2 photocatalyst nano coating method is used as a preservation management to fill the pores of rocks, TiO_2 photocatalyst causes whitening on the surface of rock, and its price is very expensive. Polyphenols, which can complement them, are extracted from four plants and replaced. As a result of HPLC analysis, polyphenol contents of the extracts were high in order of green tea and mulberry. The antioxidant activity of DPPH radical scavenging ability and methylene blue photodegradation were higher in order of green tea, aronia, mulberry, and capae. Antimicrobial activity was higher in the order of caper, mulberry and aronia.

Key words: Stone cultural property, Nano coating, Polyphenol, Antimicrobial activity, Antioxidant ability

I. 서론

훼손된 문화재에 필요한 기술이 바로 보존과학기술이다. 우리의 역사와 민족의식이 담긴 유물들을 잘 보존하고, 복원하기 위해서는 보존과학기술은 필수적이며 발전해야한다. 현재 우리나라의 대부분 석조문화재는 실외에 노출되어있어 암석 표면의 공극에 조류, 지의류 및 고등식물이 착생하여 암석의 풍화와 침식이 촉진된다. 이로 인해 균열과 공극이 발생하여 적절한 보존관리를 요하고 있다. 따라서 석조문화재를 보존, 복원하는 다양한 방법이 연구되고, 고안되고 있다. 현재 가장 많이 사용되는 방법으로는 석조 문화재 표면에 TiO_2 paste를 광촉매 나노코팅 하여 암석 표면에 지의류가 자라지 않게 하는 보존 처리를 진행하고 있다. TiO_2 는 자외선을 받으면 $-OH$ 라디칼을 생성하고 생성된 $-OH$ 라디칼은 유기물질들을 산화분해 할 수 있는 능력이 매우 뛰어나 악취물질, 바이러스, 박테리아 같은 세균등을 산화분해한다. 이러한 높은 항산화능과 항균력에 의해 나노코팅을 통해 암석 표면에 존재하는 공극을 채워 지의류나 조류 및 고등생물이 자라지 못하도록 한다 [1, 2]. 하지만 TiO_2 를 사용하여 암석에 나노코팅 처리할 경우, 백화현상이 발생하여 암석 고유의 색이 변하게 될 수 있다. 또한 후속연구에 따르면 인체에 암을 유발할 가능성이 있다고 하며 발암 가능성물질 군에 속한다는 연구 논문을 찾을 수 있었다. 뿐만 아니라 비용적인 측면에서도 TiO_2 나노 Sol의 가격이 굉장히 비싸다는 단점이 존재한다[3, 4]. 따라서 본 연구에서는 이러한 점을 보완하고, 친환경적인 천연 폴리페놀 추출물의 항산화능과 항균력에 대해 분석하여 TiO_2 의 대체제로서의 가능성을 연구해보고자 한다. 이때 항산화능은 DPPH 라디칼 소거능, 메틸렌블루 광분해에 대해 분석할 것이며 항균력은 추출물의 대장균 사멸 효과에 대해 분석할 것이다.

II. 이론적 배경

1. 선행연구조사

현재 암석 표면의 공극을 채우기 위해 가장 연구된 방안은 TiO_2 를 광촉매로 사용하는 것이다. TiO_2 는 산화력이 커서 빛을 흡수하여 다른 물질을 산화시키는 능력이 뛰어나기 때문에 광촉매로서 적합하다고 앞선 연구에서 밝혀진 바가 있다. 빛을 받으면 산소분자를 산화시켜 라디칼을 생성한다. 이 때 생성된 라디칼은 암석 표면에 존재하는 지의류, 조류 및 고등생물을 살균하는 항균력을 가지고 있다[5, 6]. 이러한 이유로 TiO_2 는 현재 광촉매로 암석 표면에 활발히 사용되고 있는데, TiO_2 는 암석표면에서 백화현상을 일으키고, 발암 가능 물질 군에 속하기 때문에 본 연구에서는 '폴리페놀'이 TiO_2 를 대체할 수 있는지에 대해 확인해보고자 하였다[7, 8]. TiO_2 의 가장 큰 특징 중 하나인 '항균력'과 '나노코팅' 두 가지를 폴리페놀 또한 갖고 있었기 때문에 선행 연구에 따라 폴리페놀을 대체물질로 선정하게 되었다.

2. 이론적 배경

가. 석조문화재 보존

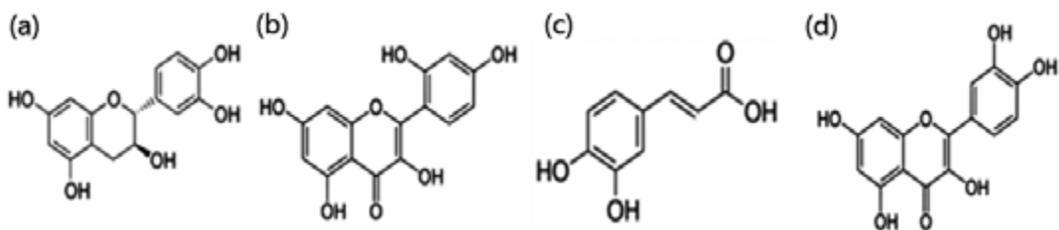
과거에는 석조문화재의 보존 및 복원을 위해 균열부위 양면에는 나비장, 접착 부위에는 철심을 박아 넣고 유황을 붓는 방법을 사용했으나 풍화를 촉진시키는 부작용으로 인해 에폭시 계통의 합성수지를 이용하여 접착제 및 충전 재료 사용된다[9, 10]. 풍화되어 석질이 약화되거나 균열이 일어난 석재는 합성수지를 이용해 접착한 뒤에 경화 및 발수처리를 실시해 약화된 석재조직의 응집력을 회복시켜 준다[11]. 석질을 경화하고 물의 침투로 발생될 수 있는 석재의 풍화나 손상을 방지하기 위해 발수경화제 합성수지를 사용하기도 한다[12, 13].

나. 석재의 코팅

석재는 수분, 온도, 기후 등의 자연환경과 외부의 인위적인 자극에 의해 백화현상, 황변, 얼룩 및 물반점, 컵자국 등으로 인해 석재의 내부 혹은 외부가 손상되는 문제점이 존재한다[14]. 이러한 문제점을 해결하기 위해 석재 표면에 TiO_2 와 같은 광촉매 혹은 본 실험에서 사용한 폴리페놀 등을 코팅함으로써 석재 표면이 수분과 접촉하는 시간 및 면적을 최소화 시키고 [15], 수분에 의한 석재의 손상을 줄이고, 외부의 자극으로부터 석재 표면을 보호할 수 있다[16,17].

다. 폴리페놀(Polyphenol)

폴리페놀은 식물에서 발견되는 화학물질의 일종이다. 분자 하나에 페놀 그룹이 두 개 이상 있는 것이 폴리페놀의 특징이며 활성 산소를 해가 없는 물질로 바꾸어 주는 항산화 효과가 있다. 대표적인 폴리페놀의 종류에는 카테킨, 모린, 카페산, 퀘세틴 등이 있다[18].



[Fig. 1] Structural formulas of (a) Catechin, (b) Morin, (c) Caffeic acid, (d) Quercetin

III. 연구 방법 및 절차

1. 폴리페놀의 추출

폴리페놀의 종류는 수천가지가 넘지만 본 연구에서는 대표적인 식물성 폴리페놀인 카테킨, 모린, 카페산, 퀘세틴에 대해서 실험을 진행하기로 결정하였다. 각각 카테킨은 녹차잎, 모린은 뽕나무, 카페산은 아로니아, 퀘세틴은 케이퍼에서 용매추출법을 이용하여 추출을 진행하였다. 이때 사용되는 용매는 에탄올을 사용하기로 하였다.

가. 모린(Morin) 및 카테킨(Catechin)의 추출

모린(Morin)과 카테킨(Catechin)을 추출하기 위해 우선 각각 뽕나무와 녹차잎을 구매하였다. 구매한 뽕나무와 녹차잎을 각각 핸드 블렌더를 이용하여 곱게 갈아주었다. 곱게 갈아줌으로써 용매와 접촉하는 표면적이 증가하기 때문에 추출의 효율을 높일 수 있다. 곱게 갈린 분말을 큰 용기에 담아준 후 에탄올로 분말이 완전히 잠길 때까지 부어준 뒤 입구를 알루미늄 호일로 감싸준 후 일주일을 기다렸다. 일주일 이 지난 뒤 감압여과를 약 2~3회를 진행하여 이물질들을 제거해주었다. 이후 감압농축기를 이용하여 90rpm, 70℃에서 감압농축을 진행하여 실험에 사용하였다.

나. 카페산(Caffeic acid) 및 퀘세틴(Quercetin)의 추출

카페산(Caffeic acid)과 퀘세틴(Quercetin)의 추출에 사용된 아로니아와 케이퍼는 각각 생과일, 통조림 상태였기 때문에 자체의 수분이 굉장히 많이 포함되어 있었다. 따라서 핸드 블렌더를 이용하여 분말 형태로 만들어서 사용하는 것이 불가능하였기 때문에 동결건조를 시킨 후 분말로 제조하여 용매추출을 진행하였다. 동결건조 이외의 방법은 Morin과 Catechin의 추출방법과 동일하게 진행되었다.

2. 총 폴리페놀 함량 분석

5ml 용량 바이알에 폴리페놀 표준용액이 30ppm, 40ppm, 50ppm이 되도록 100 μ l를 넣어준 뒤, 증류수 880 μ l, Folin-Ciocalteu 20 μ l을 넣어 준다. 3분 후에 20% 탄산나트륨 100 μ l와 증류수 900 μ l를 넣어 1시간 동안 상온에서 방치한 다음 분광광도계를 이용하여 최대흡광도 715nm에서 흡광도를 측정하였다. 각각의 대조 표준용액과 바탕시료도 추출액과 동일한 과정으로 흡광도를 측정하였다.

3. 나노 코팅

추출물과 TiO₂ paste를 화장암 표면에 나노 코팅하여 화장암표면에 존재하는 공극을 채우고자 하였다. 나노 코팅을 하기 위해 압력을 이용해 추출물을 화장암 표면에 분사하는 방법을 선택하여 돌 표면을 코팅하였다. 코팅한 후 40℃ 건조기에 하루간 건조하였고, 나노 코팅이 되었는지 확인하기 위해 주사전자현미경(SEM, Scanning Electron Microscope)을 이용하여 돌 표면을 확인해 보았다.

4. 고성능 액체 크로마토그래피를 이용한 폴리페놀 함량 분석

폴리페놀 추출액 내에 폴리페놀의 농도를 알아보기 위해 고성능 액체 크로마토그래피 분석을 진행하였다. 카테킨은 Acetonitrile와 0.2% acetic acid를 30%:70% 비율로 혼합한 용매 하에서 278nm 파장에서 1.0 ml/min의 유속으로 분석하였다. morin은 0.2mM potassium dihydrogen phosphate 와 acetronitrile을 60%:40% 비율로 혼합한 용매 하에

서 260nm 파장에서 1.0 ml/min의 유속으로 분석하였다. 모린은 0.2% acetic acid 와 acetronitrile을 60%:40% 비율로 혼합한 용매 하에서 370nm 파장에서 1.3 ml/min의 유속으로 분석하였다. caffeic acid는 ethanol과 purified water를 40%:60% 비율로 혼합한 용매 하에서 325nm 파장에서 0.7 ml/min의 유속으로 분석하였다.

5. DPPH 라디칼 소거능

DPPH는 radical 상태에서 보라색을 띄고, 환원이 되면 노란 색의 2, 2-diphenyl-1-picrylhydrazine (DPPH-H)으로 변환된다. 안정한 라디칼인 DPPH는 항산화 물질로부터 전자 혹은 수소를 제공받으면 non-radical 로 전환된다. 517nm에서 DPPH-H는 0의 흡광도를 가져 천연물의 수용성 혹은 유기용매 추출물의 항산화 활성 측정법으로 널리 사용하는 방법이다. 먼저 95% ethanol 에 용해시킨 0.2 mM DPPH (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl) 와 각 추출물을 E.P. tube에 1:10, 1:50, 1:100의 비율로 넣고 암실에서 30분간 반응 시켰다. 남아있는 radical의 농도를 UV-Visible spectrophotometer를 사용하여 517 nm에서 측정하였다. 농도 0.5 mg/ml, 1mg/ml, 5mg/ml의 표준 폴리페놀(morin, catechin, caffeic acid, quercetin)과 농도 1%, 2%, 10%의 뽕나무, 녹차, 아로니아, 케이퍼 추출물의 항산화능을 측정하였다. 또한, 추출물로 표면을 코팅한 암석의 항산화능 또한 측정하였다. 항산화능(Antioxidant activity)은 시료첨가구와 무첨가구의 흡광도를 구하여 아래와 같이 백분율로 표시하였다. 엑셀 프로그램을 사용하여 물질의 농도와 소거능 사이의 관계식을 구하였으며 이를 통해 DPPH를 50% 감소시키는데 필요한 농도(IC₅₀)을 나타내었다.

$$\text{Antioxidant activity} = \frac{\text{absorbance of control} - \text{absorbance of sample}}{\text{absorbance of control}} \times 100 (\%)$$

6. 메틸렌블루 광분해 실험

MB 0.1870 g을 500 ml 부피플라스크에 넣고 증류수를 채워 1.0×10^{-3} M MB 수용액을 만든 후, 이 농도의 MB 수용액을 묽혀 2.50×10^{-5} M MB 수용액을 만들었다. 제조된 수용액은 알루미늄 호일로 감싸 빛이 들어오지 않게 보관하였다. 10ml 2.50×10^{-5} M MB 수용액을 UV cell에 넣고 UV spectrum (500~800 nm)을 얻은 후, TiO₂ paste 와 폴리페놀 추출물로 나노 코팅한 2×2×1 암석과 30 ml의 2.50×10^{-5} M MB수용액을 알루미늄호일을 쓴 바이알에 넣고 15 min 간 암실에서 반응 시켰다. 용액을 마이크로피펫으로 1 mL를 취하여 UV cell에 넣은 후 UV spectrum (500~800 nm)을 얻었다. 용액이 담긴 바이알을 알루미늄 호일을 벗긴 후, 이 용액을 암실에서 UV lamp를 켜고 60 min 동안 광반응 시켰다. 광반응 시간 15, 30, 60 min에 용액을 마이크로피펫으로 1 mL를 취하여 UV cell에 넣은 후 UV spectrum (500~800 nm)을 얻었다. 2.50×10^{-5} M MB 수용액 1ml와 폴리페놀 추출물 0.2ml를 같은 방식으로 반응시켜 UV spectrum을 얻는다.

7. 추출물의 항균력 측정

본문암석 표면에 존재하는 공극에 지의류, 조류 등이 자라면서 암석의 풍화와 침식을 심화시킨다. 따라서, 암석 표면에 나노코팅 처리한 폴리페놀 추출물이 암석 표면에 존재하는 세균 등을 항균하는 항균력을 지니고 있는지를 측정하고자 하였다. 추출물의 항균력은 두 가지 방법으로 측정해 보았다.

가. Trypan blue 염색약을 통한 대장균의 항균 정도 측정

Trypan blue 염색약은 죽은 조직이나 세포를 선택적으로 염색하는 염색약이다. 고체 LB배지에 대장균(*E.coli*(JM109))을 16~18시간 정도 배양한 후, 폴리페놀 추출물에 의해 죽은 대장균을 Trypan blue 염색약을 통해 파란색으로 염색하면서 항균정도를 측정하고자 하였다. 대장균을 배양하기 위해 먼저 LB배지를 제작하였다. LB배지의 조성은 Yeast Extract 1g, Trypton 2g, Agar 3g, NaCl 2g 과 증류수를 합쳐 총 부피가 200mL가 되도록 하였다. 삼각 플라스크에 앞서 언급했던

고체 LB배지 제작에 필요한 시약을 넣고, 입구를 알루미늄 호일로 감싼 후 고압멸균기를 이용하여 멸균한다. 멸균하는 동안 클린벤치에 미리 사용할 페트리 디시와 스프레더를 넣고 UV램프를 30분간 켜둔다. 고압멸균기에서 멸균한 고체배지를 꺼내어 식히고, 클린벤치에서 고체 배지를 제작하였다. 페트리 디시의 약 3분의 1정도 되는 부분까지 용액을 부어주고 고체배지가 잘 굳도록 식혀준다. 고체배지가 잘 굳으면 미리 채취한 대장균(*E. Coli*(JM109))를 25 μ L 채취하여 배지에 스프레딩 해준다. 스프레딩한 고체배지는 파라필름을 이용하여 실링한 후, 미생물 배양기에 37 $^{\circ}$ C로 16~18시간가량 배양한다.

대장균이 잘 자라면, 배지 위에 항균력을 측정할 추출물을 페트리 디시의 절반위치 까지 붓고, 3분간 기다린다. 3분 후에 추출물을 버리고 증류수로 한번 배지의 표면을 씻어준 후, Trypan blue 염색약을 이용하여 염색되는 대장균을 관찰한다.

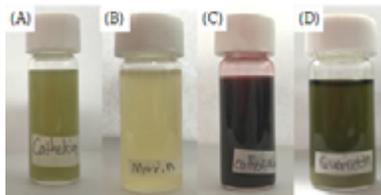
나. C-Chip을 이용한 항균력 측정

C-Chip이란 세포 혈구 측정기로, 광학현미경을 이용하여 관찰하면 3 \times 3mm의 셀이 존재한다. 셀 안에 존재하는 죽은 세포를 개수하여 항균력을 측정하고자 하였다. 먼저 마이크로 피펫을 이용하여 추출액 200 μ L와 10배 희석한 대장균 20 μ L, 증류수 1780 μ L를 ep튜브에 담아 희석하였다. 그리고 희석한 추출액을 다시 180 μ L만큼 빼내어 Trypan blue 염색약 20 μ L와 희석하였다. 희석한 용액을 C-Chip의 시료 주입구에 주입하고, 광학현미경으로 관찰하였다. Trypan blue 염색약은 죽은 세포를 파란색으로 염색하므로 C-Chip의 셀안에 파란색 점으로 표시된 죽은 세포들을 개수하였다. 또한 대조군으로는 10배 희석한 대장균용액을 사용하여 C-Chip의 시료 주입구에 주입하고 광학현미경으로 관찰하고 개수하였다. C-Chip의 1 \times 1mm 셀은 다시 25개의 셀로 나누어져 있는데, 여기서 서로 다른 4개의 셀을 선택하여 그 안에 존재하는 대장균을 개수하였다.

IV. 연구 결과

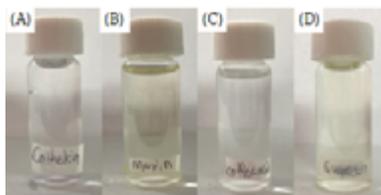
1. 폴리페놀 추출

추출과 농축 과정을 통해 뽕나무 추출물(morin), 녹차 추출물(catechin), 아로니아 추출물(caffeic acid), 케이퍼 추출물(querctetin)을 얻었다.



[Fig. 2] (A) mulberry extract, (B) green tea extract, (C) aronia extract and (D) caper extract

총 폴리페놀 함량 분석 분석, 고성능 액체 크로마토그래피 분석, DPPH 라디칼 소거능 분석 시 사용하기 위해 50ppm의 폴리페놀 표준용액을 제조하였다.



[Fig. 3] Standard solution of (A) morin, (B) catechin, (C) caffeic acid and (D) querctetin

2. 총 폴리페놀 함량 분석

총 폴리페놀 함량 분석 결과 각 추출물 속 폴리페놀의 농도는 <Table 1>와 같다. 뽕나무가 폴리페놀 함량이 가장 높았으며, 녹차, 아로니아, 케이퍼 순으로 폴리페놀의 농도가 높았다. 본 분석은 추출물 속에 함유된 모든 폴리페놀의 함량을 측정하므로 한가지 폴리페놀에 대한 정확한 농도를 알 수 없다. 하지만 총 폴리페놀 함량 분석 자료는 뒤에 나올 DPPH 라디칼 소거능 분석과 메틸렌블루 광분해 특성 분석, 항균력 분석에 적용된다.

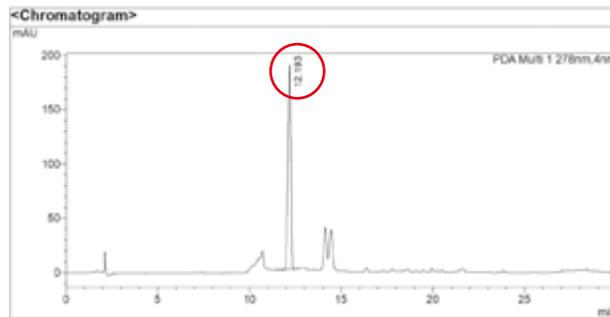
<Table 1> DPPH Antioxidant activity by standard polyphenol concentration

	green tea	mulberry tree	aronia	capper
Concentration[ppm]	379.884	884.648	320.739	258.793

3. 고성능 액체 크로마토그래피를 이용한 페놀성 화합물의 분석

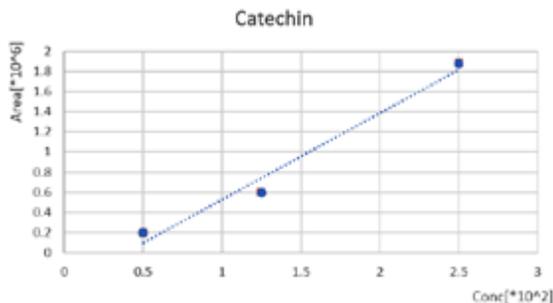
본 분석은 SHIMADZU 고성능 액체 크로마토그래피를 이용하여 네 가지 추출물 속의 폴리페놀을 분석하였고, 분석 시 column은 Shim-pack GIST C18 5 μ m 를 사용했다.

가. 녹차 추출물 분석



[Fig. 4] HPLC analysis of green tea extract

고성능 액체 크로마토그래피를 이용하여 Acetonitrile와 0.2% acetic acid를 30%:70% 비율로 혼합한 용매 하에서 278nm 파장에서 1.0 ml/min의 유속으로 catechin과 녹차 추출물을 분석하였다. 100ppm, 125ppm, 250ppm catechin 표준 용액을 고성능 액체 크로마토그래피로 분석한 결과 약 11.892분에서 센 피크가 나타난다. 녹차 추출물을 고성능 액체 크로마토그래피로 분석한 결과 여러 잡 피크와 함께 약 12.193분에 센 피크가 나타난다. 여러 잡 피크는 추출물의 폴리페놀 외의 성분 때문에 나타난 것이며 12분의 센 신호는 catechin에 의한 신호라고 볼 수 있다.



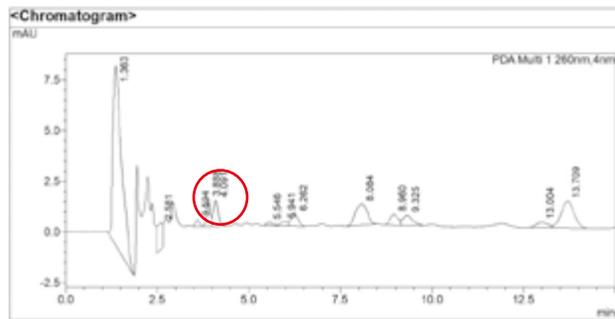
[Fig. 5] Standard curve of green tea extract

<Table 2> The result of Catechin standard solution

Conc.(ppm)	Mean Area	Area
50	197414	197414
125	598572	598572
250	1878303	1878303

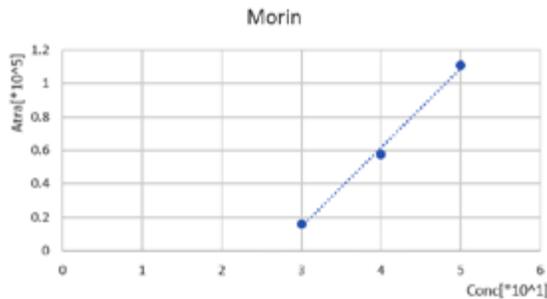
3개의 표준용액 결과 값을 토대로 그린 추세선 식은 $f(x) = 8591.53x - 325704 (R^2=0.988)$ 으로 나타났으며, 추세선 식을 토대로 녹차 추출물속 catechin 농도를 측정된 결과 278.617ppm으로 나타났다. 녹차 추출물속에는 catechin이 많이 함유되어 있다는 것을 확인할 수 있었다.

나. 뽕나무 추출물 분석



[Fig. 6] HPLC analysis of mulberry tree extract

고성능 액체 크로마토그래피를 이용하여 10mM potassium dihydrogen phosphate 와 acetonitrile을 60%:40% 비율로 혼합한 용매 하에서 260nm 파장에서 1.0 ml/min의 유속으로 catechin과 뽕나무 추출물을 분석하였다. 30ppm, 40ppm, 50ppm morin 표준 용액을 고성능 액체 크로마토그래피로 분석한 결과 약 3.873분에 센 피크가 나타났다. 뽕나무 추출물을 고성능 액체 크로마토그래피로 분석한 결과 여러 잡 피크와 함께 morin 표준 용액의 피크와 같은 위치인 3.888분에 약한 피크가 나타난다. 여러 잡 피크는 추출물의 폴리페놀 외의 성분 때문에 나타난 것이며 3.5분의 약한 피크는 morin에 의한 신호라고 볼 수 있다.



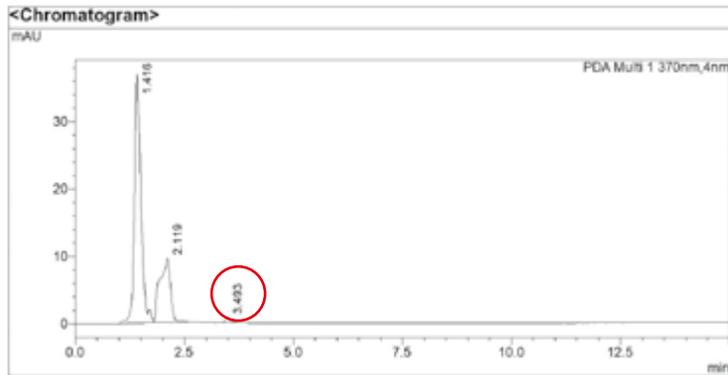
[Fig. 7] Standard curve of mulberry tree extract

<Table 3> The result of Morin standard solution

Conc.(ppm)	Mean Area	Area
30	110645	110645
40	57760	57760
50	16029	16029

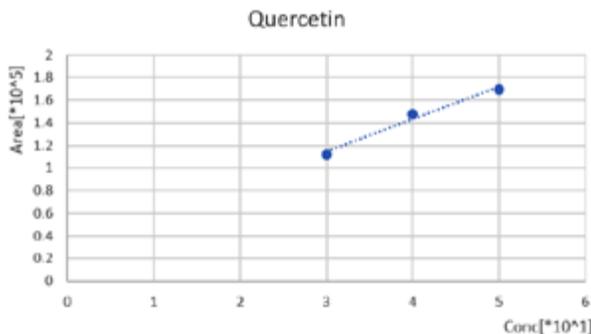
3개의 표준용액 결과 값을 토대로 그린 추세선 식은 $f(x) = 4730.76x - 127753(R^2=0.998)$ 으로 나타났으며, 추세선 식을 토대로 녹차 추출물 속 morin 농도를 측정한 결과 28.996ppm으로 나타났다. 뽕나무 추출물에서도 적은 양이긴 하나 morin이 추출된 것을 확인할 수 있었다.

다. 케이퍼 추출물 분석



[Fig. 8] HPLC analysis of capper

고성능 액체 크로마토그래피를 이용하여 0.2% acetic acid 와 acetronitrile을 60%:40% 비율로 혼합한 용매 하에서 370nm 파장에서 1.3 ml/min의 유속으로 quercetin과 케이퍼 추출물을 분석하였다. 30ppm, 40ppm, 50ppm morin 표준 용액을 고성능 액체 크로마토그래피로 분석한 결과 약 3.474분에 센 피크가 나타난다. 케이퍼 추출물을 고성능 액체 크로마토그래피로 분석한 결과 여러 잡 피크와 함께 quercetin 표준 용액의 피크와 같은 위치인 3.493분에 약한 피크가 나타난다. 여러 잡 피크는 추출물의 폴리페놀 외의 성분 때문에 나타난 것이며 3.5분의 약한 피크는 quercetin에 의한 신호라고 볼 수 있다.



[Fig. 9] Standard curve of capper

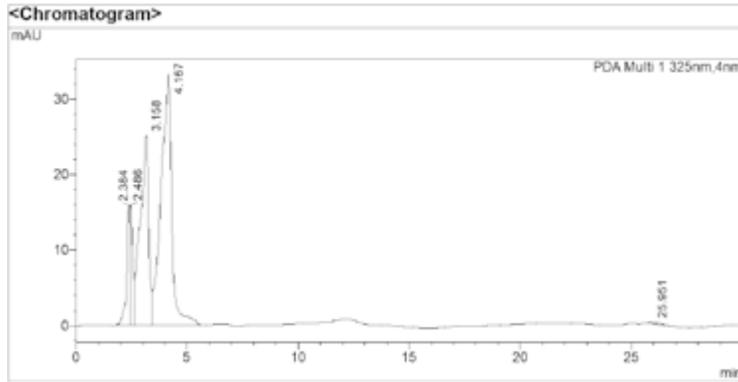
<Table 4> The result of quercetin standard solution

Conc.(ppm)	Mean Area	Area
30	112210	112210
40	148072	148072
50	169772	169772

3개의 표준용액 결과 값을 토대로 그린 추세선 식은 $f(x) = 2878.09x - 28227.7(R^2=0.990)$ 으로 나타났으며, 추세선 식

을 토대로 녹차 추출물속 quercetin 농도를 측정된 결과 -7.592ppm으로 나타났다. 따라서 케이퍼 추출물에는 quercetin 이 거의 함유되어 있지 않다는 것을 확인할 수 있었다.

라. 아로니아 추출물 분석

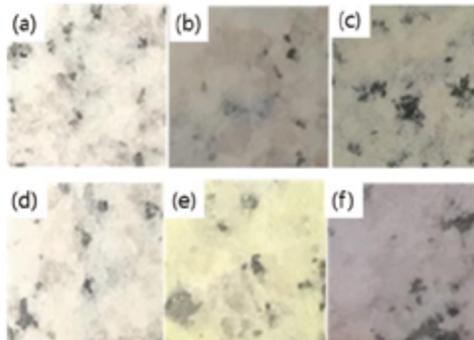


[Fig. 10] HPLC analysis of aronia

고성능 액체 크로마토그래피를 이용하여 ethanol과 purified water를 40%:60% 비율로 혼합한 용매 하에서 325nm 파장에서 0.7 ml/min의 유속으로 caffeic acid와 아로니아 추출물을 분석하였다. 30ppm, 40ppm, 50ppm caffeic acid 표준 용액을 고성능 액체 크로마토그래피로 분석한 결과 약 6.451분에 센 피크가 나타난다. 아로니아 추출물을 고성능 액체 크로마토그래피로 분석한 결과 표준용액과 유사한 피크가 나타나지 않았다. 이를 통해 아로니아 추출물에는 caffeic acid 가 함유되어 있지 않다고 판단하였다.

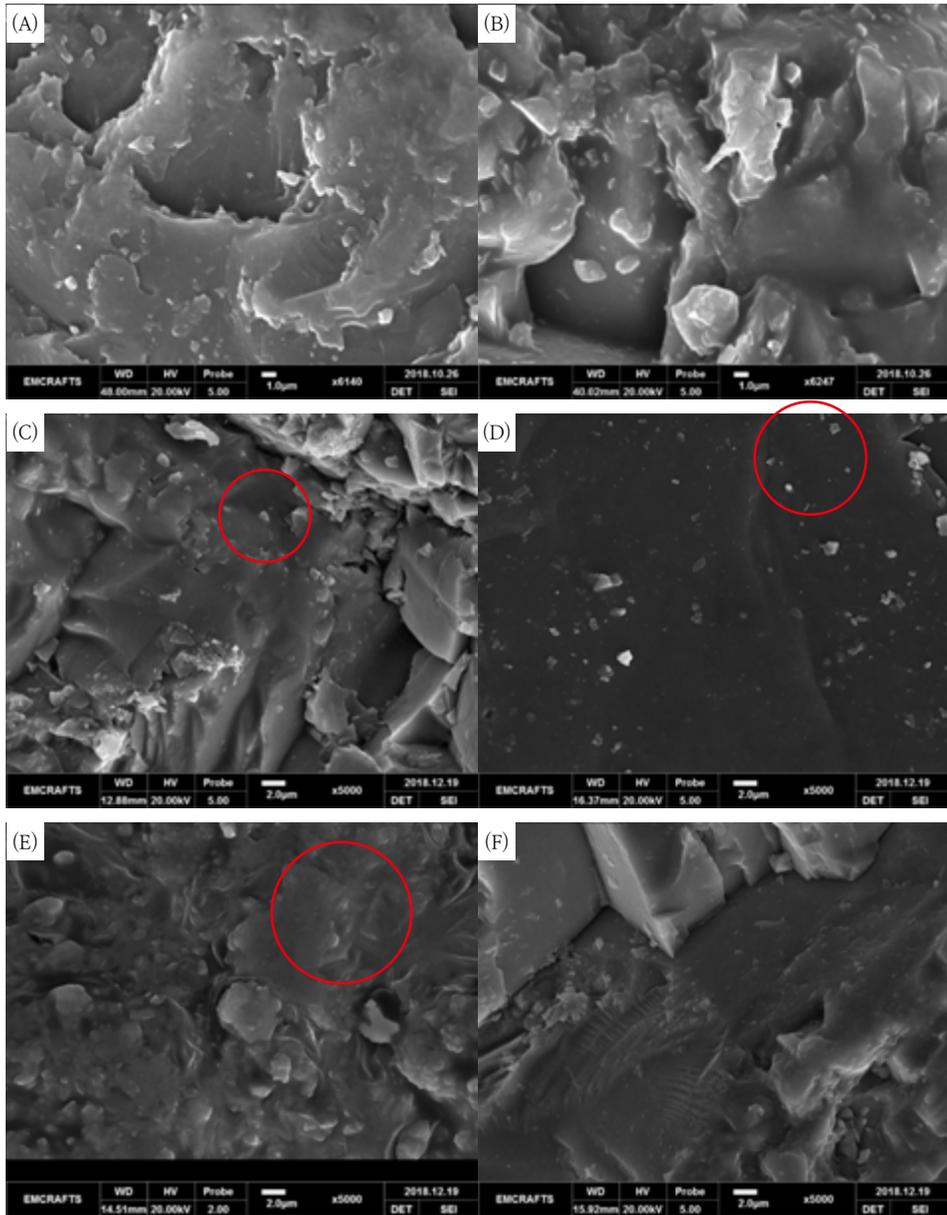
4. 나노코팅

압력 분사를 이용하여 네 가지 추출액을 압력 분사하였다. TiO₂역시 압력 분사를 진행하여 나노코팅을 진행하였다. 이전에는 추출액의 농도가 너무 진해 돌 표면에 추출액이 균일하게 분사되지 않고 굴곡지게 분사되어 건조되면서 입자화되는 현상이 발생하였다. 따라서 추출액의 농도를 분석하여 에탄올에 희석한 후 [Fig. 11]를 보면 TiO₂와 morin(뽕나무 추출물), catechin(녹차 추출물)은 대조군과 비교했을 때 표면의 색이 별 차이가 없지만 caffeic acid(아로니아 추출물)과 quercetin(케이퍼 추출물)의 경우는 착색이 심하게 된 것을 확인할 수 있다.



[Fig. 11] (a) control group without nano coating., coated with (b) TiO₂, (c) green tea, (d) mulberry tree, (e) caper, (f) aronia

주사전자현미경을 이용하여 나노코팅을 진행한 화강암 표면과 코팅을 진행하지 않은 화강암의 표면을 촬영하였다([Fig. 12]).



[Fig. 12] This is a photograph of granite surface taken by SEM.
 (A) uncoated granite, (B) TiO₂, (C) green tea, (D) mulberry tea, (E) aronia, and (F) copper.

아무것도 코팅하지 않은 돌의 표면인 (A)에서는 돌 표면의 공극이 채워지지 않고, 요철과 같은 날카로운 부분이 남아있는 것을 관찰할 수 있다. TiO₂로 코팅한 (B)사진을 보면 공극이 채워져 있고, 표면이 매끄럽게 코팅되어있음을 확인할 수 있다. 또한 돌 표면의 요철과 입자들이 부드럽게 코팅되어져 있는 것을 볼 수 있다. 녹차 추출액으로 코팅한 (C)사진을 보면 돌의 공극이 채워져 있고, 돌 표면의 요철이 매끄럽게 코팅된 것을 확인할 수 있었다. 하지만 녹차 추출액의 농도가 가장 진했기 때문에 약간 뭉쳐진 곳이 보이고 공극이 채워지지 않은 부분이 보인다. 뽕나무 추출액으로 코팅한 (D)사진을 보면 돌 표면의 층 부분이 추출액에 의해 매끄럽게 채워진 것을 볼 수 있다. 표면에 보이는 약간의 요철은 추출액이 건조되면서

입자화 된 것으로 생각된다. 아로니아 추출액으로 코팅한 (E)사진을 보면 돌 표면의 요철은 추출액으로 매끄럽게 코팅되었으나, 공극이 다 채워지지 못한 부분이 보이는 것을 알 수 있다. 케이퍼 추출액으로 코팅한 (F)사진을 보면 공극이 부분 부분 채워져 있는데 요철이 전반적으로 매끄럽게 코팅되지 않은 것을 보아 균일하게 코팅되지는 않은 것으로 보인다. 에탄올에 희석한 결과 전에 비해 균일하게 코팅된 것을 확인할 수 있었다.

5. DPPH 라디칼 소거능

가. 폴리페놀 표준용액의 DPPH 라디칼 소거활성

폴리페놀 표준용액의 DPPH 라디칼 소거능 측정 결과 높게 측정된 폴리페놀은 catechin으로 0.027mg/mL 이었으며, 그 다음으로 caffeic acid 0.051mg/L, morin 0.030mg/mL, quercetin 0.031mg/mL 순이었다. <Table 5> TiO₂의 IC₅₀은 99385mg/mL로 매우 높았으며, 이를 통해 DPPH 라디칼에 대한 항산화 활성이 없음을 알 수 있다.

<Table 5> DPPH Antioxidant activity by standard polyphenol concentration

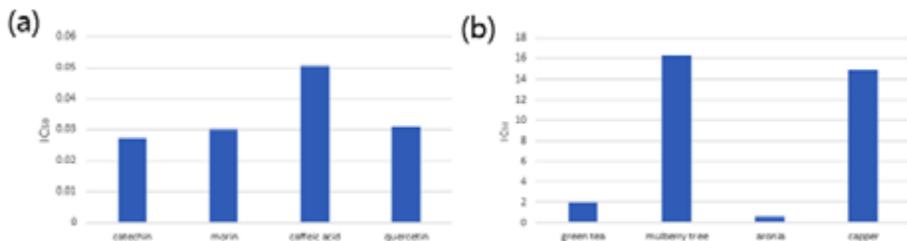
	TiO ₂	catechin	morin	caffeic acid	quercetin
Absorbance	2,314	0,912	0,392	1,178	0,453
Antioxidant activity	0,22	91,72	83,09	49,20	80,47
IC ₅₀	99385	0,027	0,030	0,051	0,031

나. 폴리페놀 추출물의 DPPH 라디칼 소거활성

폴리페놀 추출물은 아로니아 0.573mg/mL, 녹차 1.915mg/mL로 뽕나무와 케이퍼에 비해 매우 높은 항산화능을 보였다. <Table 6> 추출물에는 각각에 해당하는 폴리페놀 외의 다른 항산화능을 가진 물질이 포함되어 있기 때문에 폴리페놀 표준용액의 DPPH 라디칼 소거능과 차이가 있다.

<Table 6> DPPH Antioxidant activity by standard polyphenol concentration

	green tea	mulberry tree	aronia	capper
Absorbance	2,089	2,259	1,795	2,294
Antioxidant activity	9,92	2,58	22,59	1,07
IC ₅₀	1,915	16,322	0,573	14,875



[Fig. 13] (a) is the DPPH antioxidant capacity of the polyphenol standard solution, and (b) is the DPPH antioxidant capacity of the polyphenol extract.

6. 폴리페놀 추출물의 메틸렌블루 광분해 특성

가. 폴리페놀 추출물의 메틸렌블루 광분해 특성 분석

폴리페놀 추출물의 메틸렌블루 광분해 특성 분석 결과, 암실 반응 후 용액의 흡광도는 TiO₂가 0.225로 가장 가장 낮았으며 다음으로 녹차 0.254, 뽕나무 0.419, 아로니아 0.544, 케이퍼 0.648 순이었다. 또한, 암실 반응 후의 용액에 UV를 비췄을 때, 폴리페놀 추출물은 시간에 따른 메틸렌블루의 농도 변화가 거의 없었다. 이는 폴리페놀은 이미 -OH 라디칼을 가지고 있기 때문에 가시광선 영역에서도 활성이 가능하기 때문이다.

<Table 7> DPPH Antioxidant activity by standard polyphenol concentration

	대조군	TiO ₂	catechin	morin	caffeic acid	quercetin
Absorbance	0.727	0.225	0.254	0.419	0.544	0.648

나. 폴리페놀 추출물로 코팅한 화강암석의 메틸렌블루 광분해 특성 분석

폴리페놀 추출물로 나노코팅한 화강암석의 광분해 특성 분석 결과, 마찬가지로 TiO₂, 녹차, 뽕나무, 아로니아, 케이퍼 순으로 흡광도가 낮았다. 암석에 코팅된 용액의 양이 매우 소량이기 때문에 흡광도 감소량은 매우 적다.

<Table 8> DPPH Antioxidant activity by standard polyphenol concentration

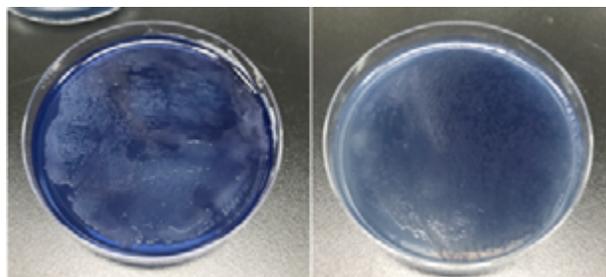
	대조군	TiO ₂	catechin	morin	caffeic acid	quercetin
Absorbance	0.727	0.612	0.620	0.615	0.619	0.624

7. 추출물의 항균력 측정

가. trypan blue 염색약을 통한 대장균의 항균 정도 측정

녹차 추출물을 뿌린 배지에는 죽은 세포들이 과량색으로 염색되어 나타나는 것을 볼 수 있고, 대조군인 배지에는 대장균이 염색되지 않은 채 하얀색으로 나타나는 것을 볼 수 있었다. 결과분석은 'ImageJ'라는 이미지 편집 프로그램을 이용하여 진행하였다. 전체 대장균이 차지하고 있는 면적의 픽셀수를 측정한 뒤, 염색된 대장균이 차지하고 있는 픽셀수를 측정하여 항균력을 측정할 수 있었다. 항균력을 계산하는 식은 다음과 같다.

$$\text{항균력} = \frac{\text{염색된 대장균이 차지하는 면적}}{\text{전체 대장균이 차지하는 면적}} \times 100 (\%)$$



[Fig. 14] (a) DPPH antioxidant capacity of the polyphenol standard solution, (b) DPPH antioxidant capacity of the polyphenol extract.

면적을 측정할 때에는 손으로 측정하는 것이기 때문에 오차를 최대한 줄이고자 10회 반복 측정한 뒤, 평균을 내어 사용하였다. 측정 결과, 전체 대장균이 차지하고 있는 면적의 픽셀 수는 10회 평균 결과 2863198이고, 염색된 대장균이 차지하고 있는 면적의 픽셀 수는 2356889로 나타났다. 항균력 계산결과 약 82.308%라는 결과를 얻을 수 있었다. 녹차 추출물 외에 나머지 세 가지의 추출물도 이 과정을 통해 항균력을 측정하였고, 결과는 아래 표와 같다.

<Table 9> The result of Antimicrobial Activity of Extracts

	뽕나무 희석 용액	녹차 희석 용액	아로니아 희석 용액	케이퍼 희석 용액
전체 대장균 픽셀수	2,863,198	2,827,467	2,798,574	2,815,365
염색된 대장균 픽셀수	2,356,889	2,449,857	2,248,987	2,338,751
항균력(%)	81.095	86.645	80.362	83.071

나. C-Chip을 이용한 항균력 측정

C-Chip에의 4개의 작은 셀에서 개수한 대조군의 대장균과 죽은 대장균의 수를 평균내어 한 셀에 존재하는 균의 수를 계산하였다. 그리고 아래 식을 이용하여 항균력을 계산하였다.

$$\frac{\text{추출물에 희석한 용액에서 개수한 죽은 대장균 수}}{\text{대조군 용액에서 개수한 대장균 수}} \times 100$$

광학현미경으로 C-Chip을 관찰한 결과, cell안에 균이 관찰되었다.

C-Chip을 개수한 결과 아래 표와 같은 결과가 나타났다.

<Table 10> The result of observing *E.coli*(JM109)

	대조군 용액	뽕나무 희석 용액	녹차 희석 용액	아로니아 희석 용액	케이퍼 희석 용액
Cell 1	1607	1512	1320	1213	1345
Cell 2	1350	1285	1071	1131	1475
Cell 3	1548	1176	1654	1072	986
Cell 4	1632	1005	1432	1424	1372
평균	1534	1244	1369	1210	1294
항균력(%)	-	81.095	89.230	78.878	84.354

항균력을 계산한 결과 녹차 추출물을 희석한 용액에서 약 89.230%로 가장 항균력이 높게 나타났다. 또한, 모든 추출물에서 항균력이 75% 이상으로 항균력이 높은 것으로 나타났다.

V. 결론 및 제언

본 연구에서는 폴리페놀 추출물의 나노코팅을 이용하여 석조 문화재를 보호하고자 뽕나무, 녹차, 아로니아, 케이퍼에서 네 종류의 폴리페놀(morin, catechin, caffeic acid, quercetin)을 추출하여 석조 문화재 보호 가능성을 확인하고자 하였다. 이를 위해 각 추출물의 폴리페놀 함량을 측정하고, 항산화능과 항균력을 측정하였으며, 압력분사를 통한 암석 표면의 나노코팅을 실시하여 주사전자현미경 촬영을 통해 코팅여부를 확인하였다.

먼저, 고성능 액체 크로마토그래피 분석 결과 녹차 추출물에 카테킨 함량이 가장 높았으며, 뽕나무 추출물에도 적은 양이지만 모린 이 포함되어 있는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 케이퍼 추출물과 아로니아 추출물에는 각각 퀘세틴과 카페산 이 포함되지 않을 것으로 나타났다. 이는 추출방법에 문제가 있다 생각되며 추후 용매 추출법 말고 다른 추출법을 이용하여 재실험을 해야할 필요가 있다.

각 추출물의 나노코팅 결과 TiO_2 paste와 추출물간의 코팅정도의 차이가 미미하였고, 따라서 본 연구에서 사용한 폴리페놀 추출물은 나노코팅이 된 것을 확인할 수 있었다.

DPPH 라디칼 소거능과 메틸렌블루 광분해 특성을 분석하여 항산화능을 비교한 결과 실험 결과 녹차(catechin), 아로니아(caffeic acid), 뽕나무(morin), 케이퍼(querctin) 순으로 항산화능이 높은 것으로 나타났다. 또한, 이를 바탕으로 항균력을 측정한 결과 폴리페놀 녹차, 케이퍼, 뽕나무, 아로니아 순으로 항균력이 좋은 것으로 나타났다. 본 연구에서 나타난 항산화능과 항균력은 추출물 속 순 폴리페놀에만 의한 것이 아니라 다른 항산화능을 가진 물질에 의해서도 효과가 나타나기 때문에 폴리페놀 표준용액의 항산화능과 항균력과 결과가 다르게 나타난다.

폴리페놀 추출물로 코팅한 암석의 표면을 보면 아로니아와 케이퍼 추출물로 코팅한 암석에서 특히 착색이 심하게 나타난다. 하지만 표준 폴리페놀 용액을 보면 catechin과 caffeic acid의 경우는 무색으로 나타나는 점을 보아 추출물 내의 색소를 따로 분리해내는 방법에 대한 추가적인 연구를 진행하여 암석 코팅의 착색에 대한 문제점을 해결할 것이다.

본 연구는 기존의 암석의 표면 코팅제로 사용되는 TiO_2 가 발암 물질 군에 속하고 나노 코팅을 위한 gel은 매우 비싸다는 문제점이 있어 이를 보완하기 위해 진행하였다. 암석의 표면 코팅제는 나노 코팅이 가능하며 항산화능과 항균력이 있어야 된다. 본 연구의 결과에 따라 천연 폴리페놀 추출물은 TiO_2 에 비교하면 낮지만 항산화능과 항균력이 있음이 검증되어 암석 코팅제로 폴리페놀 추출물로 대체하여 문제점을 해결할 수 있다고 생각되는 바이다.

VI. 참고문헌

- [1] 김동형, 이태규, 김광복, 이승원(1996). Sol-Gel법으로 제조한 의 광촉매 활성도. 한국재료학회지. Vol.6. No.3. 282-290
- [2] Enrico Quagliarini, Lorenzo Graziani, Daniela Diso, Antonio Licciulli(2017). Is nano- alone an effective straregy for the maintenance of srones in Cultural Heritage?. *Journal of Cultural Heritage* 30. 81-91
- [3] Mariatersa Lettieri, Angela Calia, Antonio Licciulli, Any E. Marquardt, Raymond J, Phaneut(2017). Nanostructured for stone coating: assesing compatibility with basic stone's properties and photocatalytic effectiveness. *Bull Eng Geol Environ* 76. 101-114
- [4] Mauro F. La Russa, Natalia Rovella, Monica Alvarez de Buergo, Cristina M. Belfiore, Antonino Pezzino, Gino M. Crisi, Silverstri A, Ruffolo(2015). Nano- coatings for cultural heritage protection: The role of the binder on hydrophobic and self-cleaning efficacy. *Progress in Ofganic Coatings* 91. 1-8
- [5] K.K. Singh, K.K. Senapati, K.C. Sarma(2017). Synthesis of superparamagnetic nanoparticles coated with green tea polyphenols and their use for removal of dye pollutant from aqueous solution. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 5. 2214-2221
- [6] 박영규, 한만소(2005). 광촉매 코팅농도가 포르말데히드 제거능에 미치는 효과 - 코팅 두께 표준화 연구를 중심으로. *대한환경위생공학회*. 50-58
- [7] 박노형, 유은성(2011). 은이온을 함유한 glass-ceramic의 항균 특성. *Journal of the Korean Crystal Growth and Crystal Technology* Vol.21, No5. 210-213
- [8] 박혜림, 이상화, 유인상(2012). Aging 효과에 따른 나노메탈(Au, Ag)-이산화티탄 보감체의 항균 활성도. *Appl.*

Chem. Eng. Vol23, No3, 293-296

- [9] Mauro F, La Russa, Silvestro A, Ruffolo, Natalia Rovella, Cristina M, Belfiore, Anna M, Palermo, Maria T, Guzzi, Gino M, Crisci(2011). Multifunctional coatings for Cultural Heritage. *Progress in Organic Coatings* 74, 186-191
- [10] 황문진, 웅웬탄빈, 류광선(2011). 아나타제/루틸 결정 구조에 의한 메틸렌 블루 광분해 특성 연구. *Appl. Chem. Eng. Vol23, No 2*, 148-152
- [11] 최영진 김동규, 김인수(2010). 나노 입자를 이용한 상온건조용 항균 코팅. *대한금속재료학회지 Vol 45, No5*, 401-409
- [12] 임삼룡, 웬 판 사이 유영, 신은우(2011). 메틸렌블루 광촉매 분해반응에서 이산화티타늄 열처리 온도 영향. *Appl. Chem. Eng. Vol22 No1*, 61-66
- [13] 남상명, 강일준, 신미혜(2015). 산사 추출물의 항산화 및 항당뇨 활성. *J East Asian Soc Diretary Life*, 270-277
- [14] 서정혁, 백옥진, 강영운, 안지은, 윤지숙, 오금순, 안영순, 박선희, 이상재(2013). 채소류의 항산화 효과 비교 연구. *pISSN 1229-1153, Fd Hyg, Vol.28 No.4*, 337-341
- [15] 이미희, 이승언(2013). HPLC를 이용한 하동 녹차의 catechin류, Alkaloid류 분석 및 항산화능 측정. *J. of Korean Oil Chemist'Soc*, 761-769
- [16] Chia-Lin Chang. Queantificant of (+)-catechin and (-)-epicatechin in coconut water by LC-MS.. *Food Chemistry* 710-717
- [17] Nitra Nuengchampong(2010). On-line HPLC-MS-DPPH asaay for the analysis of phenolic antionxidant compounds in fruit wine : *Antidesma thwaitesianum Muell*, *Food Chemistry* 118, 147-152
- [18] 좌용주, 김건기, 최진범, 신동우, 박삼식(2008). TiO 광촉매 표면코팅을 통한 화강암 석재의 효능에 관한 연구. *한국암석학회 학술발표회 논문집*, 17-19

| 연구진 |

유영주 (YoungJu Yoo, 대전동신대학교등학교, iwhite98@naver.com), 주저자, 교신저자

박은서 (Eunseo Park, 대전동신대학교등학교, dmstk403@naver.com), 공동저자

서준배 (Junbae Seo, 대전동신대학교등학교, totoro011010@naver.com), 공동저자

오선무 (Seonmu Oh, 대전동신대학교등학교, tjsan0122@naver.com), 공동저자

지도교사 : 전철홍 (Cheolhong Jeon, 대전동신대학교등학교, ferrate87@daum.net)

지도교수 : 이태종 (Taejong Lee, 국립문화재연구소, tj0819@korea.kr)

음향파를 이용한 세포 분리법 개발

김지원 · 노승준 · 서성재 · 이재원 - 세종과학고등학교

Cell Separation using Acoustics in Combination with a Microchannel

Jiwon Kim · Seungjoon Rho · Seongjae Seo · Jaewon Lee - Sejong Science High School

국문초록

최근 들어, 맞춤형 개인 의료 및 현장 진단을 위해 원하는 세포를 분리할 수 있는 다양한 기술들이 개발되었다. 특히, 세포에 악영향을 미치지 않으며 단시간에 세포를 분리할 수 있는 음향파를 이용한 기술이 각광받고 있다. 그러나, 기존의 기술에서는 정상파의 노드(node)가 고정되어 있어서 다양한 종류의 입자들이 노드에 모이기만 하고, 입자들을 종류에 따라 개별적으로 이동시켜주는 것은 불가능했다. 본 연구에서는 각 종류의 입자에 최적으로 노드의 위치를 조절해줌으로써 다양한 종류의 입자들의 위치를 한번에 분류하는 기술을 개발하고자 한다. 정상음향파의 위상 변화에 따라 노드의 위치가 변한다. 음향파의 위상 변화 속도에 따라 다양한 크기의 폴리스티렌 입자와 세포의 이동 궤적을 분석했다. 위상 조작 속도 300 mHz에서 6 μM 및 15 μM 크기의 폴리스티렌 입자들 중 15 μM 입자만 분리할 수 있었다. 위상 조작 속도 50 mHz에서 신경줄기세포와 지방유래줄기세포 중 지방유래줄기세포만 분리하는 것이 가능했다. 향후 본 연구를 발전시킨다면 다양한 종류의 세포 중 특정 세포만 분류할 수 있을 것으로 기대한다. 이를 통해 고속/고효율로 세포를 분류할 수 있는 휴대용 장치를 개발하여 현장 진단 등에서 활용하는 것이 가능할 것으로 기대한다.

중심어 : 표면탄성파, 입자 분리, 미세 입자, 음향방사력, 항력

ABSTRACT

For the development of customized private medication and on site medical diagnosis, various techniques for cell separation have been developed. In particular, a technique using an acoustic wave capable of separating a cell in a short time without adversely affecting the cell is attracting attention. However, in the conventional technique, nodes of stationary waves are fixed, so that various kinds of particles are gathered at the nodes, and it is impossible to individually move the particles according to kinds. In this study, we tried to develop a technique to separate polystyrene particles and cells with different sizes at once by controlling the nodes. The position of the node changes according to the phase change of the standing acoustic wave. When the phase modulation rate was 300 mHz, it was possible to separate a mixture of 6- μM , and 15 μM polystyrene beads completely. When the phase modulation rate was 50 mHz, it was possible to separate adipose-derived stem cells from the mixture of neural stem cells and adipose-derived stem cells. We expect that from this research and with further development, we will be able to categorize, and separate specific cells of different types. Using this technique, we expect the development of mobile devices that can sort cells with high speed and accuracy, and can be used for immediate medical diagnosis.

Key words: standing surface acoustic waves, particle separation, micro/nano particles, acoustic radiation force, drag force

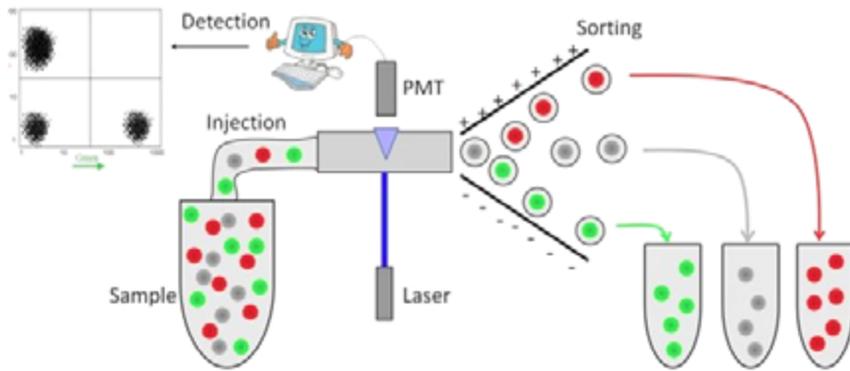
I. 서론

1. 연구의 배경

특정한 세포를 분리하는 과정은 과거의 세포의 종류를 단순 분석하던 과정에 그치던 수준을 벗어나, 후속 검사 및 연구를 위해 생물학, 화학, 진단 의학 및 임상연구에 있어 반드시 필요한 전처리 과정으로 인식되고 있다. 이러한 특정한 세포만을 분리해 내는 방법으로는 해당 특정 세포에 부착할 수 있는 라벨을 이용하여 라벨이 부착된 세포를 라벨이 없는 세포로부터 분리하는 방법이 대부분이다. 이 중 가장 대표적인 방법은 FACS(Fluorescence-activated cell sorting)으로 세포에 형광 물질을 부착하여 형광 물질이 내는 빛을 감지하여 분리해 내는 것이다(Fig. 1).

그러나, 기존의 FACS를 포함한 세포 분리 장비들은 효율적이고 빠른 분석 및 분리가 가능한 반면, 휴대하기 어려운 크

기의 장비, 전문적인 장비 사용 교육훈련을 받은 전문가의 필요성, 고가의 장비 구매 및 소요 비용 요구, 고압으로 발생하는 마이크로버블(microbubble)에 의한 해로움 등이 알려져 있다[1].



[Fig. 1] Principles of FACS (Fluorescence-Activated Cell Sorting) [2]

이러한 기존 세포 분석의 단점을 극복하고자 미세유체채널 내부에 음향파를 발생시켜 라벨링을 하지 않고 비침습적으로 그리고 대용량으로 특정한 세포를 분리해낼 수 있는 장비를 개발하고자 한다. 기존 연구에서는 압전소자를 이용하여 미세 유체채널 내부에 MHz 영역의 단순한 정상 표면탄성파(Standing Surface Acoustic Waves, SSAW)를 인가하였다[3]. 최근에는 정상 표면탄성파에 연속적으로 일정한 위상 변조를 인가하면 마이크로입자(microparticle)을 특정 속도로 이동시켜주는 기술이 개발되었다[4]. 이 때, 음향파에 의해 가해지는 힘이 입자에 크기에 따라 달라짐[4]을 이용하면 동일한 위상 변조율임에도 불구하고 입자크기에 따라 다른 거동양상을 보인다는 것이 알려져 있다. 따라서, 정상표면탄성파에서 위상 변화를 사용하는 경우, 원하는 크기를 갖는 입자나 세포를 분리해 낼 수 있다고 기대된다.

2. 연구 목적

본 연구에서는 아래와 같이 연구 목적을 설정 하였다.

첫째, 세포에 이염표를 붙이는 전처리 과정이 필요 없는 일명 비표지 (Label-free) 분리법 개발을 위하여 음향파(표면탄성파)가 세포에 가해질 경우 미세입자의 크기와 밀도에 따라 발생하는 힘에 대한 이론적 분석한다.

둘째, 음향파를 이용한 세포 분리 장치 제작을 위하여 미세입자가 투입될 수 있는 미세유체채널을 제작한다.

셋째, 미세유체채널에 미세입자를 투입한 후, 정상음향파를 가해서 입자들을 정렬한다.

넷째, 입자가 정렬된 이후에 위상 변화(phase shift)를 유발하여 정상음향파의 노드 및 입자들의 위치를 조작한다.

다섯째, 다양한 조건에서의 입자 조작 실험을 통해, 입자를 움직이기에 최적의 조건을 탐색한다.

여섯째, 개발된 기술을 세포 분류에 적용해본다.

II. 이론적 배경

1. Microchannel 제작에 대한 이론

가. PDMS

PDMS는 실리콘 기반의 중합체로, PDMS A와 경화제 역할을 하는 PDMS kit B를 혼합하여 사용한다. 표면 자유에너지 (interfacial free energy)가 낮아 PDMS로 다른 polymer를 molding하면 접착이 잘 일어나지 않는다. 같은 이유로, 상

대적으로 넓은 기관 영역에도 안정적으로 점착하는데, 이는 평탄하지 않은 표면에 대해서도 동일하게 작용하기 때문에 포토리소그래피를 이용하여 microchannel 모양을 제작한 웨이퍼(wafer)에도 안정적으로 점착할 수 있다. microchannel 제작 시 분리되어 있는 PDMS A와 PDMS kit B를 10:1의 비율로 혼합한 용액을 사용하여 다양한 모양을 구현할 수 있고, um단위의 미세한 구조도 정확하게 표현할 수 있다. 또한 내구성이 강한 탄성체의 성질을 가지고 있어 PDMS stamp를 수백번, 몇 달 동안 사용해도 눈에 띄는 구조의 붕괴(degradation)가 일어나지 않는다. 하지만 PDMS A와 PDMS kit B를 혼합할 때 잘 섞지 않으면 경화가 잘 일어나지 않으며, 경화를 위해 오랜시간 동안 oven에 넣어주어야 한다. Wafer에 PDMS 용액을 molding하기 전, 점착 방식을 위하여 추가적인 코팅과정이 필요하고 다른 물체와의 점착을 위해 다양한 표면세척과정이 필요하다. 위와 같은 단점이 있음에도 불구하고 PDMS가 가진 재료적 장점을 대체할만한 다른 물질이 없으므로 microchannel 제작에 필수적으로 사용되고 있다.

나. Oxygen Plasma

Oxygen Plasma는 비금속 물질을 세척하거나, 표면에 점착시키기 위해 자유라디칼을 형성 시켜 인력을 강하게 만들어 주는데 사용한다. Oxygen Plasma Chamber 안에 PDMS를 넣으면 $Si-CH_3$ 결합이 $Si-OH$ 로 변환된다. 이때 라디칼 간에 공유결합을 형성하여 강력한 $Si-O-Si$ 결합이 형성되어 점착이 가능하다. Oxygen Plasma를 거치지 않더라도 PDMS와 IDT(압전기관)은 반데르발스힘(정전기적 인력)에 의해 붙지만 매우 약해서 사용할 수 없다. 따라서 실험 과정에서 필수적으로 Oxygen Plasma를 사용하여 PDMS와 IDT의 표면을 변화시켜야 한다.

2. Microchannel에서 입자가 받는 힘에 대한 이론

입자에 SSAW를 가하여 입자의 움직임을 유발할 때, 중력, 부력, 음향방사력, 항력 4 가지의 힘이 움직임에 관여한다[5]. 먼저 중력과 부력은 비슷한 크기이지만 방향이 반대이므로 두 힘의 합력은 0에 가깝다. 결국 입자의 운동에 관여하는 힘은 항력과 음향방사력(F_r) 뿐이다. ϕ 는 contrast factor이고, $\rho_p, \rho_m, \beta_p, \beta_m$ 는 각각 입자의 밀도, 유체의 밀도, 입자의 압축성, 유체의 압축성을 의미한다. 항력은 유체와 입자사이에서 발생하는 마찰력이다. stokes 법칙에 의해서 항력은 $F_d = -6\pi\eta a(v-u)$ 로 정의된다. v, u, a, η 는 각각 입자와 유체의 속도, 입자의 반경, 유체의 점성도이다. 그러나 본 연구에서는 입자의 운동을 2차원 평면에서만 관찰하기 때문에 (유체의 흐름이 입자에 작용하는 힘은 2차원 평면에서의 입자 운동에 관여하지 않으므로) 유체의 속도 u 를 0으로 설정한다. 세포와 세포 미디어가 흐르는 미세유체채널에 SSAW를 생성하면 입자들이 압력마디에 정렬된다. 정렬된 입자에 SSAW의 위상을 ϕ 만큼 변화시켜면 마디가 $\phi/2k$ 만큼 이동한다. 따라서 식 (1)에 x 대신 $x - \frac{\phi}{2k}$ 를 대입하면 식 (2)가 된다. 시간에 따른 위상변화율이 SSAW의 주파수에 비해 충분히 작으면 입자의 운동은 식 (3) 과 같이 나타난다. 최대 음향방사력이 입자에 연속적으로 가해지도록 위상변화가 지속적으로 일어난다고 가정하면 식 (3)이 식 (4)와 같이 분리된다. 따라서 입자의 위치와 변화되어야 할 위상은 식 (5)와 같이 계산된다. x_0, V 는 각각 입자의 초기 위치와 $\frac{F_0}{b}$ 를 의미한다.

$$F_r = F_0 \sin(2kx) \quad \text{식 (1)}$$

$$F_r = F_0 \sin(2kx - \phi) \quad \text{식 (2)}$$

$$b \frac{dx}{dt} = F_0 \sin(2kx - \phi) \quad \text{식 (3)}$$

$$b \frac{dx}{dt} = F_0 \quad \text{식 (4)}$$

$$\sin(2kx - \phi) = 1$$

$$x = Vt + x_0 \quad \text{식 (5)}$$

$$\phi = \frac{2kF_0}{b}t + 2kx_0 - \frac{\pi}{2}$$

이후 두 가지 힘을 고려하여 입자의 위치를 구할 수 있다. 항력과 음향방사력이 같아지는 지점으로 입자가 모이게 되고, 그 지점 근방에서의 입자의 속도를 v_h 라 하자. 식 (6)에 $v_h = -\frac{dx}{dt}$ 를 대입하고 변수 분리를 하면 (7)식을 얻을 수 있고, (7)식의 양변을 각각 x 와 t 에 대해서 적분하면 (6)식을 얻게 된다. (8)식에서 x_1, x_2 는 각각 시작점과 끝지점의 x 축 좌표, t 는 입자가 가장 가까운 압력마디로 이동하는데 걸리는 시간을 의미한다.

$$v_h = - [p_0^2 V_c \beta_w I(12\lambda\eta r_c)] \phi(\rho, \beta) \sin(4\pi x/\lambda) \quad \text{식 (6)}$$

$$\operatorname{cosec}(4\pi x/\lambda) dx = [p_0^2 V_c \beta_w I(12\lambda\eta r_c)] \phi(\rho, \beta) dt \quad \text{식 (7)}$$

$$t = (3\lambda^2 \eta r_c I \pi) [\ln(\tan(2\pi x/\lambda))]_{x_1}^{x_2} / [p_0^2 V_c \beta_w \phi(\rho, \beta)] \quad \text{식 (8)}$$

III. 연구방법 및 절차

1. 선행연구

음향파를 이용한 세포 분리 시스템 제작을 위해 지속적인 위상변조라는 아이디어 이전에 입자의 분리보다는 입자들의 정렬에 SSAW가 사용되었다[3]. The Pennsylvania State University에서 SSAW를 이용한 세포 분리 연구에 필요한 표준적인 system setup으로 PDMS와 lithium niobate에 프린팅된 wafer를 이용한 PDMS microchannel 제작과 압전기관(IDT)를 이용한 surface acoustic wave 발생을 제시하였다. 정상파를 이용하므로 microchannel의 폭은 파장의 절반 크기로 제한되어 입자가 분리되기엔 한계가 있지만 앞서 이론적 배경에 소개된 formula에 의해 예상한 위치에 80~90% 정도의 정확성을 나타내었고 세포 미디어의 밀도, 점성도 등의 물리량을 조절하여 분리 속도나 효율성을 조절할 수 있다는 점에서 SSAW를 이용한 세포 분리의 가능성을 제시하였다.

2. 연구방법 및 절차

음향파를 이용한 세포 분리 실험을 진행하기 위해서, ‘PDMS를 이용한 미세유체채널 제작 → 음향파 발생 압전 기관과 미세유체채널 접합 → 채널 내에 세포 주입 → 음향파를 인가 → 현미경을 이용하여 세포의 이동을 관찰’의 순서로 실험을 진행하고자 했다. 세포가 혼합된 용액의 형상을 조절하기 위해 PDMS를 이용한 미세유체 채널을 제작하고, 이를 음향파 발생 장치와 결합시켰다. 이후, 채널에 세포를 주입하여 음향파를 인가하고, 현미경을 통해 이를 관찰했다. 세포를 이용한 실험을 진행하기에 앞서, 우선 폴리스티렌(polystyrene) 재질의 미세입자(크기: 6, 15 μm)를 분리하는 실험을 진행하였다.

가. 음향파 장치 제작

음향파를 이용한 세포 분리 장치 제작을 위해서는 음향파를 발생시킬 수 있는 압전소자 기관과 세포가 포함된 용액을 가둘 수 있는 미세유체채널이 필수적이다. 선행연구에서 제시된 IDT와 PDMS를 사용하여 미세유체채널(PDMS microchannel)을 제작했다.

PDMS A와 PDMS kit B를 질량비 10:1로 섞어 약 90g을 만들었다. 섞는 과정에서 PDMS 용액에 포함된 공기는 2시간 30분 동안 진공 펌프에 넣어 제거했다. 페트리접시에 SU-8 마이크로패턴이 형성된 wafer를 담고 진공펌프로 표면에 실레인을 처리한 뒤, PDMS 혼합 용액을 부었다. 이 과정에서 포함된 공기 제거를 위해 30분 간 진공 펌프에 넣어주고, 섭씨 60도 오븐에 15시간 동안 넣어 경화작용을 촉진했다. Microchannel이 프린팅된 PDMS를 칼로 채널 1개씩 포함되도록 자르고, 바이오폴리펀치를 이용하여 microchannel에 액체 입구/출구를 제작했다. 이후, 입구/출구 주변의 잔여 물질들을 세척

하였고 IDT와 microchannel에 oxygen plasma 처리를 한 다음, 두 기관을 접합했다. IDT 표면에 금속판을 고정시키고 RF 케이블을 연결했다. RF 케이블의 반대쪽은 신호발생기 및 신호증폭기와 연결시켰고, 준비된 음향파 기관을 현미경에 장착했다.

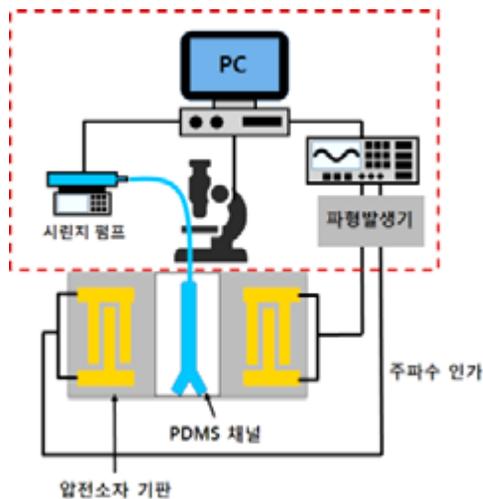
나. System Setup

본 연구에서는 기존의 SSAW의 단점을 극복하고자 연속적인 위상변조를 이용하여 향후 다중 마디(multiple pressure nodes)를 갖는 폭이 넓은 채널에서의 세포 조작이 가능한 장점을 가질 것이다. 분리하고자 하는 단일 세포를 효율적으로 추적하기 위해 연속적인 위상변조 시 입자가 선형적으로 움직이는 진동수 변화값을 f_{opt} 로 정의하였고 f_{opt} 만큼 위상을 연속적으로 변화시켰을 때의 입자의 운동을 트래킹했다. 정상파의 파장, 입자의 크기와 같은 물리량을 제외하고는 선행연구와 동일한 시스템을 사용하였다 [5].

원하는 입자 농도로 시판하는 미세입자 용액을 희석하고, 주사기에 희석액을 주입했다. 추후에 세포를 이용하여 실험을 진행할 때에는, 미세입자 희석액 대신 세포 희석액을 주입했다. 용액을 주사기에 주입한 후, 주사기를 시린지 펌프에 장착했다. 이후, 주사기에 튜브를 장착하고, 튜브의 반대쪽 면을 microchannel에 장착했다. 전체적인 system setup은 [Fig. 2]와 같다. 이 때, 원하는 유량으로 시린지 펌프가 작동하도록 세팅했다. 구체적으로는 microchannel에 입자가 주입되기 전에는 $10 \mu\text{L}/\text{min}$ 으로 유량을 세팅하고, 입자가 주입된 이후에는 $1 \mu\text{L}/\text{min}$ 으로 유량을 세팅했다. 이를 통해, microchannel의 입구로부터 출구로의 유동을 최소화시켰다.

주사기 세팅이 완료된 이후, 현미경의 초점 노브(knob)를 조절하여 현미경의 초점을 입자에 맞췄다. 형광 입자 혼합물의 이미지를 촬영하기 위해 현미경에 디지털 일안 반사식 카메라(Digital Single-Lens Reflex Camera, DSLR)를 장착하고 입자의 형광 신호 세기에 맞춰서 감도(ISO) 및 노출 속도를 조절했다.

신호발생기와 컴퓨터를 USB 케이블로 연결 후, 신호발생기 제어 프로그램을 실행했다. 정상표면탄성과 발생 및 표면 탄성과 위상 조절은 모두 제어 프로그램으로 진행했다. 준비가 완료되면, 카메라의 영상 촬영을 시작 후 음향파 신호를 인가하고, 현미경을 통해 세포의 이동을 관찰했다.



[Fig. 2] PDMS-based microchannel incorporated with a piezoelectric substrate

다. 이미지 분석

미세입자들의 위치를 정량적으로 평가하기 위해, 본 연구에서는 imageJ라는 프로그램[6]을 사용하고자 한다. ImageJ는 생물학 연구에 필요한 이미지 분석 도구를 모아놓은 open source 프로그램이다. 프로그램은 공식 홈페이지 (<https://imagej.nih.gov/ij/download.html>)에서 다운로드 받을 수 있다.

실험을 통해 획득한 영상은 imageJ에서 직접 불러올 수 없다. 이 때문에, 영상 속 이미지들을 각 frame으로 나누어 이미지 파일로 만들었다. 이후, 추출된 연속된 이미지 파일들(image sequence)을 imageJ에서 불러들인다.

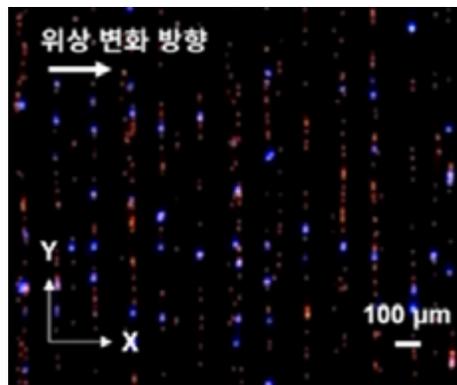
ImageJ에서 file-import-image sequence 기능을 선택하면 이미지를 선택할 수 있다. 이후, 불러오고자 하는 이미지들의 개수와 선택된 이미지의 개수(Numer of Images)가 맞는지 여부를 확인 후, OK 버튼을 누른다. 이후, 아래 그림과 같이 point tool을 선택 후 이미지 속 분석 대상 입자를 선택한다.

선택이 완료된 이후, analyzer-measure 기능을 통해 입자의 좌표를 획득하는 것이 가능하다. 이전/이후 프레임의 이미지들을 비교하며, 연속된 이미지들에서 특정 입자의 위치를 연속적으로 측정했다.

원하는 입자들의 위치들을 추출하여 엑셀에 정리했다. 추출된 데이터에서 위치는 픽셀 단위이며, 시간은 프레임 단위이다. 이미지 속 한 픽셀은 1.2 μm 이며, 프레임 사이 시간은 0.2초이기 때문에, 추출한 데이터에 이 값들을 곱해서 시간(초)에 따른 입자의 위치(μm)를 얻는다. 이 때, 본 연구에서는 초기 위치보다는 입자의 변위가 중요하기 때문에, 모든 데이터에서 초기값을 빼주어 초기 위치를 0으로 맞추고 x 좌표를 재설정했다.

이후, 시간에 따른 입자의 위치를 위와 같이 점/선 그래프 형태로 표현했다. 입자 1개에 대한 그래프의 경우, 점/선 그래프만 표현을 한다. 여러 입자의 움직임을 추세를 보기 위해서는 각 시간에서의 입자들의 변위 데이터의 평균 및 표준편차를 구하고, 평균/표준편차를 보여주는 점/선 및 에러바 그래프를 제작했다.

Ⅲ. 연구방법 및 절차

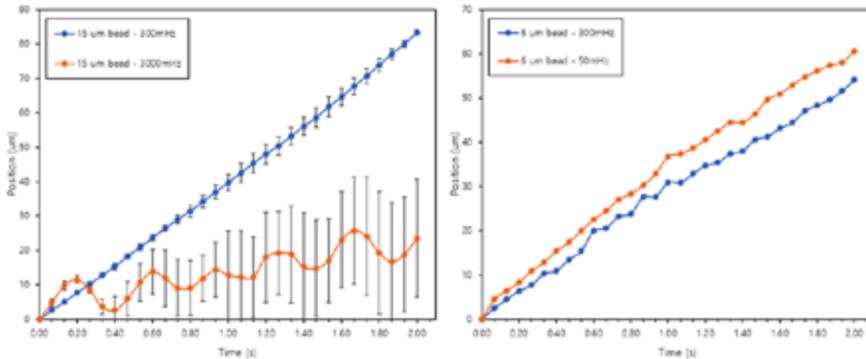


[Fig. 3] A fluorescent image of aligned blue microparticles with diameter of $6 \mu\text{m}$ and red microparticles with a diameter of $15 \mu\text{m}$ and the direction of phase modulation

세포 분리를 진행하기에 앞서, 예비실험으로서 크기가 다른 폴리스티렌 미세입자의 분리가 가능한지 여부를 확인하는 실험을 진행하였다. 미세 입자의 분리를 위한 실험 조건 탐색을 위해 개별 입자 위치 조작 실험을 우선 진행하였고, 이후 입자 혼합물 속 대상 입자의 분리 실험을 진행하였다.

위상 변화를 통한 개별 입자 위치 조작 실험 및 입자 혼합물 속 대상 입자 분리 실험을 진행하기 위해, 우선 위 그림과 같이 입자 용액을 microchannel에 주입 후 정상음향파를 인가하여 x 방향으로 정렬을 진행하였다. 입자들이 모두 정렬된 이후, x 방향으로 정상음향파의 위상 변화를 인가하였다. 이 때문에 정상압력파의 노드(node) 및 입자의 위치 모두 x 방향으로 변화된다. 연구 방법 및 절차에서 언급한 이미지 분석 방법을 이용하여 각 조건에서의 입자 위치를 분석하였다. [Fig. 3]은 두 입자 혼합액이 주입된 경우에 대한 이미지이다.

1. 다양한 크기의 폴리스티렌 미세입자 위치 조작



[Fig. 4] A plot of x-displacement of polystyrene microparticle with diameter of 15 μm over two frequency shifts ($n=3$) (left) and plot of x-displacement of polystyrene microparticle with diameter of 6 μm over two frequency shifts ($n=3$) (right)

이론에 따르면, 정상압력과의 위상 변화가 빠를수록 노드 위치의 변화도 빨라진다. 그러나, 입자들은 입자 주변 유체에 의해 항력을 받기 때문에, 노드 위치 이동 속도와 동일한 속도로 이동하는 것이 불가능하다. 노드 위치 이동 속도가 과도하게 빠른 경우, 입자들은 원래의 노드의 위치 이동을 충분히 따라가지 못하고, 뒤쪽의 노드가 입자 근처로 이동하게 되어 뒤쪽 노드로 이동하게 된다. 이 때문에, 한쪽 방향으로 이동을 하면서 진동하는 형태의 움직임을 보이게 된다. 만약, 노드 위치 이동 속도가 적절한 경우, 입자들은 노드 위치 이동 속도와 동일한 속도로 이동을 하며 선형적인 움직임을 보이게 된다.

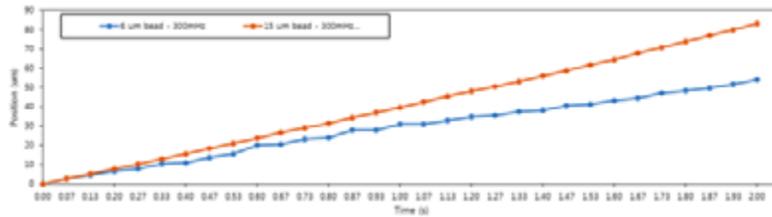
[Fig. 4]의 좌측 그래프는 본 실험을 통해 획득한 다양한 위상 변화 속도에 따른 15 μm 크기의 폴리스티렌 입자의 위치 변화 그래프이다. 앞서 언급한 것과 같이, 위상 변화 속도가 과도한 경우(위상 변화 속도: 3000 mHz), 입자들은 진동하는 형태의 움직임을 보였다. 반면, 위상 변화 속도가 적절한 경우(위상 변화 속도: 300 mHz), 입자들은 선형으로 이동했으며 이동 속도는 초당 약 40 μm 로 위상 변화가 과도한 경우보다 약 4배 빨랐다.

이러한 입자의 최적 위상 변화 속도는 이론에 따르면 입자의 부피에 따라 감소한다. 따라서, 6 μm 입자는 15 μm 입자에서 최적이었던 300 mHz에서는 진동하는 움직임을 보이며 300 mHz보다 작은 위상 변화 속도에서 선형적인 움직임을 보일 것으로 예상하였다. 실제 실험 결과는 [Fig. 4]의 우측 그래프와 같았다. 300 mHz로 위상을 변화시켰을 때 6 μm 입자는 진동하는 움직임을 보였으며 특히 0.5초~1.05초 구간에서 진동의 폭이 컸다. 이 때, 6 μm 입자의 이동 속도는 초당 약 24 μm 로 동일한 조건에서 15 μm 입자의 이동 속도의 약 60%였다. 50 mHz로 위상을 변화시켰을 때 6 μm 입자는 선형적인 움직임을 보였다.

동일한 조건(위상 변화 속도 300 mHz)에서 6 μm 입자의 속도가 15 μm 입자보다 느리기 때문에, 6 μm 입자와 15 μm 입자를 한 용액에 혼합하고 300 mHz의 속도로 위상 변화를 인가하면, 15 μm 입자만 분리하는 것이 가능할 것으로 기대되었다. 따라서, 이를 확인하는 실험을 추가적으로 진행하였다.

2. 6 μm / 15 μm 크기의 폴리스티렌 미세입자 혼합물에서 대상 입자(15 μm 크기의 입자) 분리

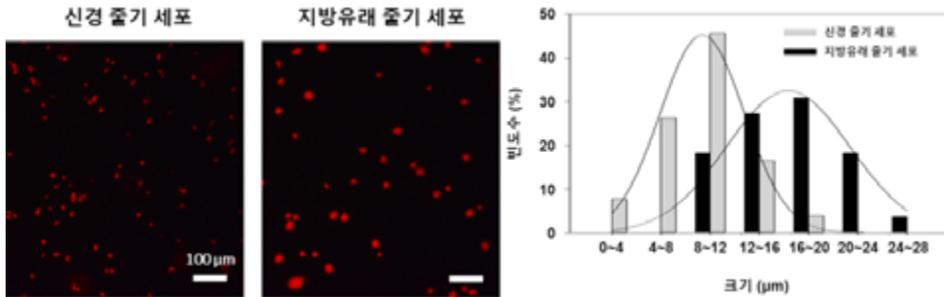
2 종류 입자 중 대상 입자만을 분리하는 실험을 진행하기 위해, 입자가 혼합된 용액을 microchannel에 주입 후 정상음향파를 인가하여 x 방향으로 정렬하였다. 이후, 대상 입자(15 μm 입자)가 빠른 속도로 이동할 수 있었던 조건(상변화 속도: 300 mHz)으로 위상 변화를 인가하였다. 이 때, 위상 변화의 방향은 x 방향이기 때문에, 정상압력과의 노드(node) 및 입자의 이동 방향도 x 방향이다.



[Fig. 5] A plot of average x-displacements of both 6 μm and 15 μm particles under continuous phase modulation of standing surface acoustic waves

실험 결과는 [Fig. 5]와 같다. 앞선 실험에서와 같이, 입자들의 초기 위치를 0으로 변경한 다음, 그래프를 위 그림과 같이 제작하였다. 초기에는 두 입자들의 변위가 비슷하지만, 시간이 지남에 따라 대상 입자(15 uM 입자)와 다른 입자(6 uM 입자)의 변위 차이가 점차 커졌다. 2초에서 두 입자의 변위 차이는 약 30 uM 정도가 되었다. 이를 통해, 개발된 기술이 입자 혼합물에도 적용이 가능함을 확인하였다.

3. 신경 줄기 세포 및 지방유래 줄기 세포 크기 분석



[Fig. 6] Fluorescent images of membrane-stained neural stem cells (NSCs) and adipose-derived stem cells (ADSCs) (left) and size distribution of neural stem cells (NSCs) and adipose-derived stem cells (ADSCs) (right)

개발된 기술이 입자 혼합물에서 특정 입자를 분리 가능하다는 것을 관찰하였기 때문에, 추가적으로 2종류 이상의 세포 혼합물에서 특정 세포를 분리하는 것이 가능한지 여부를 확인하고자 했다. 우리의 몸 안에서 다양한 종류의 세포가 존재한다. 세포의 종류에 따라서 그 크기가 달라지는 것은 널리 알려진 사실이다. 따라서 본 연구에서 우리는 크기가 다른 신경 줄기세포와 지방유래 줄기세포를 이용하여 우리의 가설을 검증하려 했다. 분리 실험을 진행하기에 앞서서, 우리는 이미지 분석을 통해서 두 종류 세포의 크기를 정확하게 분석하려 했다. 특히, 세포 크기의 평균 뿐만 아니라 세포 크기의 분산도 중요할 것으로 예상했다. 이미지를 통한 세포 크기 분석을 위해서 세포막에 형광 물질을 부착된 세포들의 이미지를 촬영하였다. 이 때의 이미지는 [Fig. 6]의 좌측 이미지와 같았다. 이미지 속의 서로 떨어져 있는 붉은색 영역들이 세포들을 의미한다.

ImageJ 프로그램을 이용하여 서로 떨어져 있는 붉은색 영역들의 면적을 측정해본 결과는 [Fig. 6]의 우측 그래프와 같다. 전체적으로 지방유래 줄기 세포의 크기가 신경 줄기 세포의 크기보다 컸다. 이 때, 55개의 지방유래 줄기 세포의 면적을 측정했을 때, 지방유래 줄기 세포의 크기 평균과 표준편차는 각각 17.0 uM와 5.0 uM였다. 103개의 신경 줄기 세포의 면적을 측정했을 때, 신경 줄기 세포의 크기 평균과 표준편차는 각각 9.3 uM와 3.6 uM였다.

이번 분석을 통해서 세포들의 형태는 폴리스티렌 입자에 비해 불분명하다는 것을 확인할 수 있었다. 세포의 크기 표준편차가 폴리스티렌 입자에 비해서 매우 크다는 것도 확인할 수 있었다. 정상음향파의 상변화에 따른 이동 속도가 입자의 크기에 따라 정해지기 때문에, 폴리스티렌 입자와 비교해서 세포의 이동 속도는 균일하지 않을 것이라 예상된다. 또한 신경 줄기 세포와 지방유래 줄기 세포 중에는 크기가 비슷한 세포들이 일부 존재하고 있기 때문에, 두 종류의 세포들을 분리하는 것이 쉽지 않을 것이라 예상을 했다.

폴리스티렌 입자는 단단하기 때문에 음향파에 의한 음향방사력에 의해 형태가 변하지 않을 것이라 예상된다. 그러나, 세

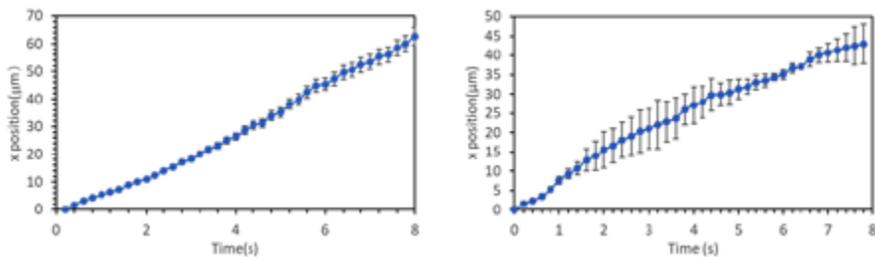
포는 폴리스티렌보다 훨씬 물렁하기 때문에 음향방사력에 의해서 형태가 바뀔 수도 있다고 예상하였다. 이를 확인하기 위해 기존 연구를 조사해보았다. 실제로는 음향파의 세기/세포의 종류에 따라서 정상음향파의 수직 방향으로 압축되며 형태가 바뀔 수도 있다고 한다[6]. 이러한 점들 때문에, 세포를 분리하는 것은 폴리스티렌 입자를 분리하는 것보다 어려울 것이라 예상했다.

4. 지방유래 줄기세포와 신경 줄기세포의 위치 조작

이론에 따르면, 입자가 정상음향파에 의해 받는 음향방사력의 크기는 입자의 크기뿐만 아니라 음향학적 특성에 의해서도 달라진다. 음향학적 특성은 밀도와 압축계수를 포함한다. 이 때, 음향방사력은 입자와 주변 매질의 밀도/압축계수 차이에 의해 결정되는 어쿠스틱 컨트라스트 팩터에 비례한다[7]. 세포는 폴리스티렌 입자보다 밀도가 낮고 압축이 더 쉽게 될 수 있기 때문에, 물과 비슷한 밀도/압축계수를 갖게 된다. 따라서, 세포의 어쿠스틱 컨트라스트 팩터는 폴리스티렌의 값보다 낮으며 세포는 음향방사력을 폴리스티렌보다 적게 받게 된다. 따라서, 정상음향파 노드 이동에 따라가는 속도가 낮다. 결국, 세포를 선형적으로 이동시켜주기 위해서는 폴리스티렌 입자보다 낮은 속도로 상변화를 인가해줘야 한다.

앞선 크기 분석을 통해서 우리는 지방유래 줄기 세포의 크기가 15 마이크로 폴리스티렌 입자와 비슷하다는 것을 확인하였다. 따라서, 15 마이크로 폴리스티렌 입자가 선형적으로 움직일 때의 상변화 속도 300 mHz보다 더 낮은 속도로 상변화를 인가하고자 했다. 기존 논문[7-10]에서 알려진 폴리스티렌, 세포, 물의 물리적 특성 값을 이용하여 어쿠스틱 컨트라스트 팩터를 계산해본 결과, 세포의 어쿠스틱 컨트라스트 팩터는 폴리스티렌의 어쿠스틱 컨트라스트 팩터의 약 0.16배였다. 따라서, 폴리스티렌을 선형적으로 움직일 때보다 약 0.16배의 속도로 상을 변화시켜줘야 세포를 선형적으로 움직일 수 있을 것이라는 결론에 도달하였다.

이를 입증하기 위해, 준비한 음향파 장치에 지방유래 줄기 세포를 포함하는 용액을 주입 후, 정상음향파를 인가하고 약 50 mHz로 상을 변화시켜주었다. 정상 음향파가 가해지는 여러 입자들 사이에는 서로 간섭하는 2차 음향 방사력이 발생한다[11]. 2차 음향 방사력의 영향을 최소화 하기 위해서 서로 떨어져 있으며 서로 다른 노드에 위치한 세포를 3개 선정하여 위치를 트래킹하였다.



[Fig. 7] A plot of average x-displacement of adipose-derived stem cells (ADSCs) over time with error bar when the frequency shift is 50 mHz (n = 3) (left) and a plot of average x-displacement of neural stem cells (NSCs) over time with error bar when the frequency shift is 50 mHz (n = 3) (right)

이를 통해 분석한 결과는 [Fig. 7]의 좌측 그래프와 같다. 지방유래 줄기 세포는 비슷한 크기인 15 마이크로 폴리스티렌 입자보다는 oscillation 하는 모습을 보였다. 이러한 결과에 대한 예상 결과는 2가지가 있다. 첫 번째는 세포의 크기가 균일하지 않다는 것이다. 앞서 언급한 것과 같이, 세포는 폴리스티렌 입자보다 크기의 편차가 크다. 이 때문에 여러 세포들이 다른 크기의 음향 방사력을 받게 되어 다른 움직임을 보이는 것이다. 따라서, 평균적인 움직임을 분석해보면 선형적이 않은 모습을 보인다. 두 번째로 [Fig. 6]에서와 같이 세포는 완전한 구 형태를 이루지 못하고 있다. 따라서, 비슷한 크기의 세포의 경우에도 형태에 따라서 다른 음향 방사력을 받아서 다른 움직임을 보일 수 있다. 이러한 움직임의 편차로 인해서 평균적인 세포의 궤적이 선형적이지 않다고 본다.

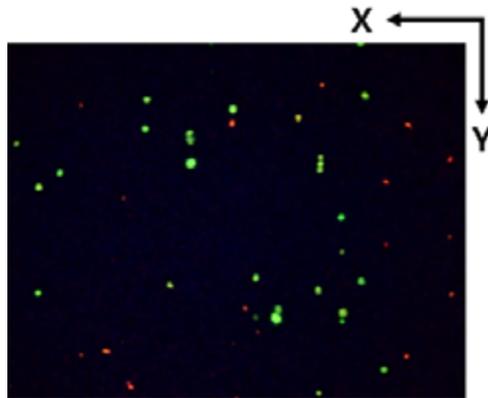
지방유래 줄기 세포와 동일한 조건(상변화 속도: 50 mHz)에서 신경 줄기 세포 위치를 조작한 실험 결과는 [Fig. 7]의 우측 그래프와 같다. 지방유래 줄기 세포가 약 8초에서 64 μm 에 도달한것과 비교해서, 신경 줄기 세포는 약 42 μm 에 도달했

다. 즉, 신경 줄기 세포의 속도는 지방유래 줄기 세포의 약 66% 수준이었다. 또한, 신경 줄기 세포 위치 평균 그래프에서 표준편차의 크기는 폴리스티렌 입자의 표준편차보다 컸다. 이는 지방유래 줄기 세포와 마찬가지로 세포의 형태 및 크기의 편차로 인한 것이라 예상된다.

지방유래 줄기 세포와 신경 줄기 세포 각각을 조작한 데이터를 바탕으로 보면, 동일한 조건에서 지방유래 줄기 세포의 속도가 더 빠르기 때문에, 두 종류의 세포를 혼합한 경우에도 지방유래 줄기 세포를 분리하는 것이 가능할 것으로 예상된다.

5. 신경 줄기 세포/지방유래 줄기 세포 혼합물에서 대상 입자(지방 유래 줄기 세포) 분리

앞선 실험을 통해, 우리는 지방유래 줄기 세포와 신경 줄기 세포를 분리하는 것이 가능할 것이라 예상했다. 지방유래 줄기 세포 분리 실험을 진행하기 위해, 폴리스티렌 입자 실험에서와 마찬가지로 두 세포를 [Fig. 9]와 같이 다른 색으로 염색했다.

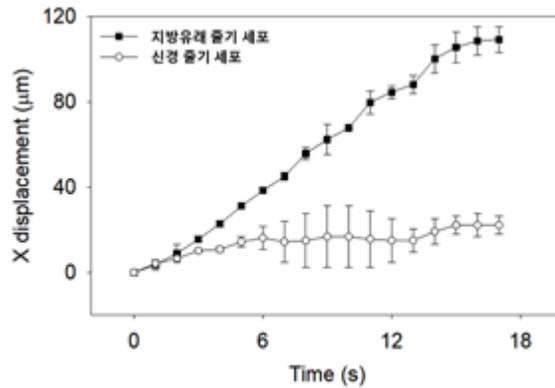


[Fig. 8] A fluorescent image of neural stem cells (NSCs) and adipose-derived stem cells (ADSCs)
(Green - ADSCs, Red - NSCs)

기존 실험에서와 마찬가지로, 우리는 각자 떨어져 있으며 다른 노드에 있는 지방유래 줄기 세포 3개와 신경 줄기 세포 3개의 위치를 imageJ 프로그램으로 분석하였다. 이 때의 결과는 [Fig. 8]과 같다. 지방유래 줄기 세포의 이동 속도가 신경 줄기 세포의 이동 속도보다 약 7배 빨랐으며 따라서 지방유래 줄기 세포를 분리하는 것이 가능했다.

지방유래 줄기 세포의 경우, 기존의 실험에서와 비슷하게 8초에 약 60 uM 이동을 했다. 그러나, 신경 줄기 세포의 경우 8초에 약 15 uM 이동했다. 기존 실험에서 8초에 약 42 uM 이동한 것과 비교하여 큰 차이가 있다.

이는 결국 세포의 크기 편차 때문에 발생한 것으로 예상된다. [Fig. 6]의 결과를 보면 신경 줄기 세포 중 일부는 지방유래 줄기 세포와 크기가 비슷하다. 따라서, 지방유래 줄기 세포와 동일한 속도로 상변화를 인가했을 때, [Fig.7]에서와 같이 선형에 가까운 움직임을 보일 수 있다. 신경 줄기 세포 중 일부는 크기가 9 uM 이하이기 때문에, [Fig. 4]의 그래프 중 3000 mHz 조건에서의 궤적과 같이 전체적으로 oscillation하는 움직임을 보이게 된다. 이러한 궤적은 세포 혼합물에서의 실험 결과 [Fig. 9]에서도 관찰되었다. 즉, 실험에 따라서 화면에 보이는 신경 줄기 세포의 크기가 다르고 이에 따라서 세포 이동 그래프도 다르게 나타날 수 있다. 이러한 영향을 최소화하기 위해서는 반복 실험을 통해서 보다 많은 세포들에 대해 실험 및 분석을 진행해야 할 것으로 생각된다.



[Fig. 9] A plot of average x-displacement of neural stem cells (NSCs) and adipose-derived stem cells (ADSCs) over time with error bar when the frequency shift is 50 mHz (n = 3)

V. 결론 및 제언

본 연구에서는 정상표면탄성파의 상 조절을 통해서 크기가 다른 미세입자 및 크기가 다른 세포들의 위치를 독립적으로 조절하여 분리하는 것이 가능하다는 것을 확인할 수 있었다. 위상 조절 속도가 300 mHz일 때에는 6 μM 크기의 폴리스티렌 입자는 초당 약 25 μM 이동하였으며, 15 μM 입자는 초당 약 40 μM 이동하였다. 이 때문에, 6 μM 폴리스티렌 입자와 15 μM 입자의 혼합물에 정상음향파를 인가하고 300 mHz 속도로 위상을 조절함으로써 15 μM 입자만 별도로 분리하는 것이 가능하였다. 개발된 기술을 크기가 다른 신경 줄기세포와 지방유래 줄기세포에 적용하여 세포 분리가 가능한지 확인하였다. 정상음향파의 위상을 50 mHz 속도로 조절해주면 지방유래 줄기세포와 신경 줄기세포는 8초간 약 64 μM와 40 μM 이동하였다. 이 때문에 두 세포의 혼합물에 정상음향파를 인가하고 50 mHz 속도로 위상을 조절함으로써 지방유래 줄기세포만 분리하는 것이 가능했다. 폴리스티렌 입자는 단단하며 형태와 크기가 균일하기 때문에 입자 움직임의 편차가 적었지만, 세포의 경우에는 형태와 크기가 균일하지 않아서 움직임의 편차가 크게 존재했다. 그럼에도, 세포 종류에 따른 속도 차이가 크기 때문에, 세포들을 분리하는 것이 가능했다. 향후 연구에서 세포 형태 및 크기를 균일하게 해줄 수 있는 전처리 기술을 개발한다면, 보다 효과적으로 세포를 분리하는 것이 가능할 것이라 기대한다.

본 연구를 통해 개발될 미세유체채널과 음향파를 결합한 시스템은 FACS를 대체할 새로운 형태의 세포 분리 방법을 개발하는데 있어서 핵심 기술 중 하나로서 활용될 것이다. 현재의 실험을 발전시키면 다종의 세포 혼합물에서 특정 세포만 분리하는 것이 가능할 것으로 기대한다. 특히, 세포의 물리적 성질에 따라 변하는 음향방사력과 항력에 대한 해석 및 세포의 이동에 대한 해석을 통해 보다 고효율/고속의 세포 분리가 가능할 것으로 기대한다.

더 나아가, 위상변조 음향파를 이용한 세포 분리 기술을 세포 패터닝 기술로 발전시켜 생체 모사 시스템 개발에 까지 응용할 수 있다는 점에서 큰 의미를 가진다. 이 시스템의 개발을 통해서 단순 분리 작업, 패터닝 기술을 넘어서 생체 모사형 액추에이터, 센서, 약물 전달 시스템을 구축 가능하고 이 기술을 기본으로 하는 수많은 새로운 기술들이 파생될 수 있을 것이다.

VI. 참고문헌

- [1] Nawaz, A. A., Chen, Y., Nama, N., Nissly, R. H., Ren, L., Ozcelik, A., Wang, L., McCoy, J. P., Levine, S. J., Huang, T. J. (2015). Acoustofluidic fluorescence activated cell sorter. *Analytical chemistry*, 87, 12051–12058.
- [2] Lund 대학교 Applied Microbiology학과 홈페이지. <http://www.tmb.lth.se/?id=105877> (검색일: 2018.09.01.)
- [3] 이용진, 남정훈, 임현정, 설수빈, 신유진, 정석, 신세현 (2009). SSAW 기반 미세입자 분류소자 개발을 위한 연구. *대한기계학회 춘추학술대회*, 2974–2976.
- [4] Destgeer, G., & Sung, H. J. (2015). Recent advances in microfluidic actuation and micro-object manipulation via surface acoustic waves. *Lab on a Chip*, 15(13), 2722–2738.
- [5] Lee, J., Rhyou, C., Kang, B., & Lee, H. (2017). Continuously phase-modulated standing surface acoustic waves for separation of particles and cells in microfluidic channels containing multiple pressure nodes. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 50(16), 165401.
- [6] 미국 NIH의 ImageJ 공식 홈페이지. <https://imagej.nih.gov/ij/download.html> (검색일: 2018.09.02.)
- [7] Wijaya, F. B., Mohapatra, A. R., Sepehrirahnama, S., & Lim, K. M. (2016). Coupled acoustic-shell model for experimental study of cell stiffness under acoustophoresis. *Microfluidics and Nanofluidics*, 20(5), 69.
- [8] Bruus, H. (2012). Acoustofluidics 7: The acoustic radiation force on small particles. *Lab on a Chip*, 12(6), 1014–1021.
- [9] Laurell, T., Petersson, F., & Nilsson, A. (2007). Chip integrated strategies for acoustic separation and manipulation of cells and particles. *Chemical Society Reviews*, 36(3), 492–506.
- [10] Hartono, D., Liu, Y., Tan, P. L., Then, X. Y. S., Yung, L. Y. L., & Lim, K. M. (2011). On-chip measurements of cell compressibility via acoustic radiation. *Lab on a Chip*, 11(23), 4072–4080.
- [11] Ahmed, D., Baasch, T., Blondel, N., Laubli, N., Dual, J., & Nelson, B. J. (2017). Neutrophil-inspired propulsion in a combined acoustic and magnetic field. *Nature communications*, 8(1), 770.

I 연구진 I

김지원 (Jiwon Kim, 세종과학고등학교, sehayon@paran.com), 주저자

노승준 (Seungjoon Rho, 세종과학고등학교, ryzere@naver.com), 공동저자

서성재 (Seongjae Seo, 세종과학고등학교, alexijtjdwo@naver.com), 공동저자

이재원 (Jaewon Lee, 세종과학고등학교, meet021205@gmail.com), 공동저자

지도교사 : **김태은** (Taeun Kim, 세종과학고등학교, tiny1220@sen.go.kr)

지도교수 : **이형석** (Hyungsuk Lee, 연세대학교, hyungsuk@yonsei.ac.kr)

지도교조 : **류찬열** (Chanryeol Rhyou, 연세대학교, chan.rhyou@yonsei.ac.kr)

강병준 (Byungjun Kang, 연세대학교, crbox@yonsei.ac.kr)

자이로스코프의 원리를 이용한 내진설계 연구

신정욱 · 김미정 · 정현수 - 대전동신과학고등학교

A Study of Seismic Design Using the Principle of Gyroscope

Jungwook Shin · Mijung Kim · Hyeonsoo Jeong - Daejeon Dongshin Science High School

국문초록

현재 우리나라의 지진 발생 빈도가 증가하며 지진에 피해가 가시화되면서 내진설계에 대한 관심이 높아졌다. 이에 따라 본 연구팀은 기존 건물 구조의 변화를 최소화하는 내진설계로 자이로스코프 효과를 이용하여 건물의 진동을 감쇠하는 방법을 고안하였다. 따라서 건물에 부착된 원판이 회전함에 따라 나타나는 자이로스코프 효과로 건물 흔들림의 감소 정도를 연구하였다. 실제 지진이 발생하였을 때와 유사한 조건을 만들기 위해 제작한 모형건물을 진동 장치 위에 고정시키고 건물에 원판을 부착하여 건물에 진동을 주는 방식으로 실험을 진행하였다. 그 결과, 건물에 부착된 회전원판을 회전시킬 경우 회전원판의 각운동량 크기에 비례하여 건물에 자이로스코프 효과가 나타나 건물에 발생한 진동을 감쇠시키는 데에 효과적임을 확인할 수 있었다. 또한, 중·저층 건물의 경우에는 기존의 제진구조를 이용한 내진설계보다 본 연구에서의 자이로스코프 효과를 이용한 내진설계가 더 효과적임을 알 수 있었다. 따라서 자이로스코프를 이용한 내진설계 방식은 효과적인 내진설계라 할 수 있다. 무엇보다 본 연구는 기존에 건설된 내진설계가 없는 건물에도 회전원판을 부착하는 것만으로 비교적 간편하게 내진설계를 할 수 있다는 점에서 큰 의의를 갖는다.

중심어 : 자이로스코프, 내진설계, 부착가능

ABSTRACT

At present, as the frequency of earthquakes in Korea is increasing and the damage from earthquakes has become visible, people have become more and more interested in seismic design. Therefore, we have devised a method of damping the vibration of a building using a gyroscope (rotating disk) as a structure for seismic design. This minimizes the changes needed in existing building structures. We have studied the degree by which building shake can be reduced by the rotation of a gyroscope attached to a building through experiments conducted with model buildings. In order to make conditions similar to that of an actual earthquake, the model building was fixed to a vibration system, and the rotating disk was attached to the building. In an experiment, it was confirmed that the gyroscope has an effect on attenuating vibration in the building when the disk attached to the building is rotated in proportion to the amount of angular momentum. Also, it has been confirmed that the effect of the seismic design system in this study works better in lower buildings than that of the existing damping structures. Therefore, seismic design using a gyroscope is an effective seismic design. In addition, this study has great significance in that the seismic protection can be improved relatively simply by attaching the rotary disk to a building without existing seismic design.

Key words: Gyroscope, Seismic design, attachable

I. 서론

1. 연구동기

오늘날 우리나라는 현재 규모 5 이상의 대규모 지진이 여러 차례 발생할 뿐만 아니라 지진 발생 횟수 또한, 큰 폭으로 증가하고 있다. 이에 따라 국민의 지진에 대한 경각심이 일깨워지고 지진 대비에 대한 관심이 크게 증가하고 있다. 따라서 지진이 발생하였을 때 지진의 피해를 최소화할 수 있는 시설들에 대한 관심이 커지고 있는데 그 중 가장 이슈가 되는 것이 건물의 내진설계이다. 이미 지진을 많이 경험한 일본 등의 국가에서는 일정한 규모에 버틸 수 있는 내진설계가 의무화되어 있으나, 최근에서야 법을 제정되어 내진설계가 적용된 건물 비율이 낮은 우리나라의 경우에는 또다시 대규모의 강진이 발생할 경우 건물이 밀집되어 있는 도심에서 큰 피해가 예상된다. 이처럼 현재 많은 노후화 건물들의 지진 피해 문제가 발생하

고 있다. 실제로 포항 지진에서 피해가 컸던 한동대학교는 노후화된 건물과 내진설계의 부재가 문제로 거론되었으며 경주 지진 이후에는 다양한 노후 건물들의 지진 피해 예방 대책안이 화두가 되기도 하였다. 하지만 모든 노후 건물에 기둥, 혹은 건설 기반을 바꾸어 건축물의 내구성을 강화하는 것이나 내부구조를 「L」자형이나 「T」자형으로 설계하고 벽면에 각종 보강 설비를 갖추어 지진에 대한 저항력을 높이는 방법 등의 건물의 구조를 변형하는 것은 이미 건축된 건물에 적용하기에는 현실적으로 적절하지 않다 [1].

그렇다면 우리는 다른 형태의 내진설계를 고려하여 볼 수 있다. 초고층건물에서 사용되는 큰 하중의 물체를 건물에 설치하는 것이다. 이는 관성이 큰 물체를 이용하여 건물 내에 설치된 큰 하중의 물체가 건물이 흔들리는 반대방향으로 움직여 건물의 진동을 최소화하는 작용을 하는 것이다. 이는 초고층건물에서는 흔히 사용되나 건물 내부에 큰 하중의 물체를 별도로 설치할 공간을 마련하기 어려운 중·저층 건물에 적용하는 것이 경제적인 측면에서 어렵다.

따라서 본 연구에서는 기존 건물의 구조를 바꾸거나 내진 장치를 위한 별도의 큰 공간을 마련하지 않아도 되는 회전원판을 건물의 외벽이나 최상부에 부착하는 형태의 내진설계 장치를 고안하고자 한다. 이는 주변에서 쉽게 볼 수 있는 자이로스코프를 응용하여 건물에 부착된 회전원판의 관성모멘트에 의한 자이로스코프 효과를 이용한 것이다. 이를 위하여 실험에서 실제로 회전원판이 부착된 모형건물에서 자이로스코프 효과가 나타나는지 확인하고, 내진의 정도를 크게 할 수 있는 방법에 대하여 탐구해보고자 한다. 그리고 최종적으로 이를 실제 건물에 적용할 수 있는 방안에 대해서도 제언해 보고자 한다.

II. 이론적 배경

1. 연구와 관련된 물리학적 이론

가. 각운동량

각운동량이란 회전하는 물체가 가지는 물리량으로서 회전하는 물체의 운동 상태를 기술하기 위해 도입된 개념으로 회전축과 물체사이의 거리와 운동량의 외적으로 나타난다. $\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p}$ 또는 각운동량은 관성모멘트와 각속도의 곱으로도 나타낼 수 있는데 이를 표현하면 다음과 같다.

$$\vec{L} = I \cdot \vec{\omega}$$

나. 관성모멘트

관성모멘트는 물체가 회전 운동에 대한 관성질량으로 미소 질량의 회전축으로부터의 거리의 제곱에 곱을 적분한 형태로 나타난다. 이는 회전운동에너지나 각운동량 등 회전에 관련된 물리량을 기술할 때 필요한 중요한 값들이다. 본 실험에서 사용하는 원판은 균일한 부피밀도를 지니고 있는 원판(원기둥)을 사용하고자 한다. 따라서 이 원판의 관성모멘트를 구하고자 하면 다음과 같은 식을 이용하여 계산할 수 있다.

$$\int_0^h \int_0^{2\pi} \left(\int_0^R \rho r dr d\theta dh \right)$$

이를 정리하여 실험에 사용하고자 하는 원판의 회전관성을 측정할 때에는 다음과 같이 나타낸다.

$$E_r = \frac{1}{2} I \omega^2$$

다. 토크

토크는 물체에 작용하여 물체를 회전시키거나 회전 운동 상태에 변화를 줄 수 있는 요인을 토크라고 한다. 토크의 크기는 물체에 작용하는 힘과 회전 중심과 작용점 사이의 거리 위치벡터 사이의 거리 ϕ 에 의해 나타나고 그 값을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} |\tau| &= r F \sin(\theta) \\ \vec{\tau} &= \vec{r} \times \vec{F} \end{aligned}$$

라. 회전운동에너지

회전운동에너지는 물체가 회전을 하기 위해 필요한 일의 크기를 의미한다. 그 크기는 다음과 같이 구할 수 있다 [2].

$$E_r = \frac{1}{2} I\omega^2$$

2. 자이로스코프

가. 자이로스코프

자이로스코프는 각운동량 보존의 원리를 이용한 기계이다. 어느 방향으로든 자유롭게 회전할 수 있는 동시에 방향을 알아내고 유지하는 데에 사용되는 장치이다.

나. 자이로스코프의 운동양상

자이로스코프가 운동하는 방식은 다음과 같다. 먼저 자이로스코프의 회전축은 자전하지 않는다. 초기 각운동량이 0이고 원판의 질량이 만들어진 토크는 원판-회전축 계의 축 사이의 교점(pivot)에 대한 각운동량을 갖게 한다.

자이로스코프의 초기 원판이 충분히 큰 각운동량을 지녔을 때 자이로스코프는 자전한다. 자이로스코프의 중력으로 인한 힘은 자이로스코프가 수직하다는 가정 하에 자이로스코프의 회전방향에 대해 수직이다. 즉, 중력이 만들어 내는 토크는 회전하는 원판에 대해 수직이다. 이는 다시 말해 자이로스코프의 각운동량은 일정하되 중력이 만들어내는 토크의 방향으로 회전축이 회전하는 운동을 한다는 것을 의미한다.

다. 자이로스코프의 옆돌기 운동

자이로스코프에서 옆돌기 운동은 지면에 대해 수직인 축에 대해 회전축이 회전하는 운동을 의미한다. 이때 옆돌기 운동의 속도는 자이로스코프의 초기 회전여부, 회전속도 등의 다양한 조건에 따라 달라질 수 있다. 그 속도의 크기는 $dL = Ld\phi$ 의 관계를 통해 유도할 수 있다. 이때 $d\vec{L} = |\vec{\tau}|dt = |Mgr|dt$ 를 대입하면 다음과 같음을 알 수 있다.

$$\frac{Mgr}{I\omega} = \frac{d\phi}{dt} = \Omega$$

즉, 이 결과는 다음과 같이 해석할 수 있다. 먼저 원판 각속도가 증가할수록 세차각속도는 감소한다. 그리고 자이로스코프의 축이 수평면(지면)에 대해 기울어 있어도 지면에 대해 수직일 때와 같이 성립함을 알 수 있다. 하지만 느린 속도로 회전하는 물체는 토크에 비해 기존 각속도가 너무 작으면 각속도의 방향뿐만 아니라 크기 또한 변화하기 때문에 일정한 각속도의 회전이 불가능하다[3].

3. 내진설계

가. 지진

지구 내부의 에너지가 지표로 나와, 땅이 갈라지며 흔들리는 현상이다. 지진이 나타나는 원리는 탄성 반발로 한 지층에 지속적인 힘이 가해지고 지층이 그 힘을 이기지 못할 때 에너지가 방출되어 파동의 형태로 나타나는 것이다[4].

나. 내진설계

시설의 내진 안정성을 확보하기 위한 목적으로 하는 설계로 일반적으로 시설 구조물에 가해지는 지진력을 산정하고 그 지진력을 버틸 수 있는 용력이 건물이 버틸 수 있는 허용용력 범위 내로 들어 올 수 있는 설계를 의미한다. 예를 들면 구조물 내에 강성이 우수한 내진 벽을 설치하여 지진에 견딜 수 있게 하는 구조가 있다.

다. 면진구조

면진구조는 지진에 대항하지 않고 피하고자 하는 수동적인 개념을 말한다. 지반과 구조물 사이에 고무나 유동체를 설치하여 지반의 진동에너지가 구조물에 전달되지 않도록 하는 구조를 말한다. 면진장치를 설치하기 위해서는 온도에 의한 변위를 조절할 수 있어야 하며, 사용 하중 내에서의 저항성이 존재하는지 고려되어야 한다. 또한, 지진의 하중에 의해서 과도한 변위가 발생하지 않아야 하므로 최대 저항 진도를 확인해야 한다.

라. 제진구조

제진구조는 지진에 효율적으로 대항하기 위한 구조 중 하나로 진동을 자동적으로 감지하여 구조물 내외부에 장치를 부착하여 다가오는 진동에 반대파를 인위적으로 작동하여 지진파를 감소, 상쇄 및 변형시켜 소멸시키는 구조를 말한다. 이는 탑상구조물의 최상부에 흔들림의 고유주기가 구조물의 고유주기와 일치하는 진자 등을 설치하여 건물에 바람 등에 의해 흔들리기 시작함과 동시에 진자의 추가 진동하여 수평 반력이 설치된 바닥판의 움직임과 역방향으로 작용하여 건물의 진동을 저감하는 효과가 있다[5].

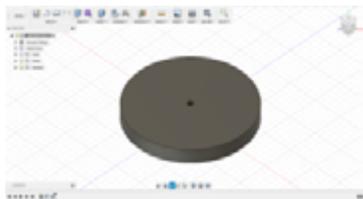
Ⅲ. 연구 방법 및 절차

1. 연구 설계

이 실험의 목적은 각운동량의 증가에 따른 건물의 진동의 변화를 측정하는 것이다. 이를 위하여 크게 실험에 사용할 모형 건물, 모형 건물에 진동을 가할 진동장치, 각운동량을 만들 원판 등 세 가지를 제작하였다.

가. 원판

실험에서 원판은 모형 건물의 흔들림을 보정할 수 있는 힘인 각운동량을 발생시키는 역할을 한다. 그래서 이번 실험에서는 모형 건물에 가하는 각운동량 모멘트에 따른 모형 건물의 진동 변화를 파악하는 것이다. 따라서 원판은 반지름을 달리하여 각각 지름 100mm, 150mm, 200mm 규격의 원판을 제작하였다. 그러나 기존 [6, 7]의 자이로스코프 효과 증폭을 위한 원판과 달리 건물에 부착하고 경제성을 고려하여 구조가 간단하며 제작에 용이하도록 단순한 구조로 제작하고자 하였다.



[Fig. 1] Design of disk using Fusion 360 (a) graphic design



[Fig. 2] Design of disk using Fusion 360 (b) real

회전원판을 균일한 밀도로 내부 구조를 비교적 정밀하게 제작하기 위하여 3D 모델링 프로그램인 'Fusion 360'을 이용하여 원판을 모델링 한 후 3D 프린터로 출력하여 실험에 이용하였다. 위의 [Fig. 2]에서 각각 왼쪽부터 지름 200mm, 150mm, 100mm 순으로 제작한 회전원판의 모습이다.

각 원판의 각운동량 모멘트에 따른 건물의 흔들림 변화의 관계를 파악하기 위하여 각 원판의 정확한 각운동량 모멘트를 측정하였다. 회전속도는 일정한 값인 6500rpm으로 실험을 진행하였다. 각 원판에 의하여 발생하는 각운동량 모멘트는 아래 <Table 1>과 같다.

<Table 1> moment of inertia

지름(mm)	질량(g)	각운동량모멘트(kg · cm ²)
100	90.190	1.1274
150	200.71	5.7910
200	220.91	11.016

나. 모형 건물

본 연구에서 사용한 모형 건물은 기존의 지진에 의한 건물의 흔들림을 탐구하기 위한 모형건물의 설계를 참고하였다[8]. 본 연구에서는 모형 건물을 아래 [Fig. 3]과 같이 두께 5mm의 투명 아크릴판과 15mm 직경의 높이 40cm 아크릴 기둥을 이용하여 3층으로 제작하였다. 건물의 구조를 최대한 단순화하여 무게를 줄여 원판과 모형 건물의 무게 비를 낮춤으로써 회전원판에 의하여 생성되는 자이로스코프 효과를 실험값에서 뚜렷하게 확인하게 하기 위함이었다. 실험을 용이하게 진행하기 위하여 [Fig. 10]과 같이 회전원판을 건물의 상부에 부착하여 실험을 진행할 때는 레이저 커팅기를 이용하여 모형 건물의 최상층부 아크릴판에 직류모터 크기에 맞게 구멍을 내어 원판 부착 위치에 따른 모형건물의 흔들림 변화를 측정하고자 하였다. 또한, MBL 역학실험장치 motion detector가 초음파를 이용하여 변위를 측정하므로 측정의 정확도를 위하여 건물 상부 측면 외벽에 별도의 반사판을 부착하였다.



[Fig. 3] model building

다. 직류 모터

본 연구에서 직류 모터는 회전원판을 결합하여 원판을 회전시킬 수 있도록 하는 역할을 수행하였다. 본 연구에서 사용한 직류모터는 아래 [Fig. 4]의 정격전압 24V의 15W 소형 DC(직류)모터로 회전속도를 조절하기 위해 직류전원장치와 전압계(멀티테스터)를 이용하여 직류 모터에 걸리는 전압의 크기를 달리하며 초고속카메라를 이용하여 직류모터의 회전수를 측정하였다. 직류모터에 걸어준 전압에 따른 회전수는 아래 <Table 2>와 같다. 이를 통하여 회전원판에 의하여 발생하는 자이로스코프 효과를 수치화하였다.



[Fig. 4] DC motor

<Table 2> Rotation of the motor by voltage

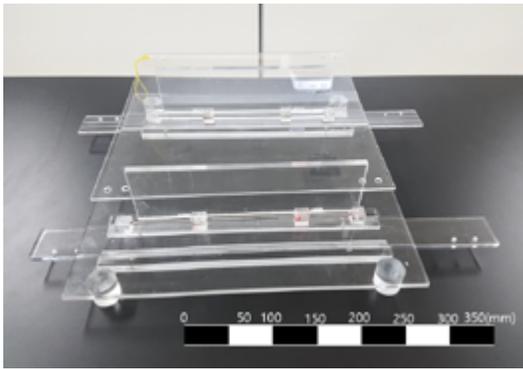
전압(V)	회전수(rpm)
3	5250
5	6500
8	16500
10	19000

라. 진동 장치

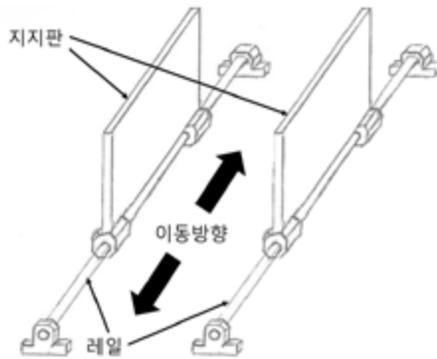
실제 지진과 같은 진동을 발생하기 위하여 기존의 지진과 구현장치의 형태를 참고하여 실험에 사용할 모형 건물에 일정한 크기의 진동을 가하기 위해서 일정한 길이의 레일을 움직이는 형태로 제작하였다[9, 10]. 지진동의 구현은 실제 지진의 경우 진원의 위치에 따라 모형 건물에 대하여 지면에 수평한 움직임(x축, y축 진동)과 지면에 수직인 움직임(z축 진동)이 존재하나 본 연구의 실험에서는 비용과 기술상의 문제로 진동 장치 제작의 단순화와 본 연구에서 자이로스코프 효과가 나타남을 검증이라는 연구 목표로 인하여 하나의 축(x축)에 대한 진동만을 발생시키는 진동 장치를 고안하였다. 아래 [Fig. 5]와 같이 본 연구의 진동 장치는 모형건물을 올려놓는 상층부, 상층부와 레일의 연결부, 받침판 등으로 구성되어 있다.

상층부는 투명 아크릴판으로 제작하여 모형 건물을 올리기 위하여 350mm*350mm 크기로 제작하였다. 상층부와 레일은 아래 [Fig. 6]와 같이 슬라이딩 통이 2개씩 부착된 투명 아크릴판으로 연결하였다. 슬라이딩 통은 내부에 볼 베어링을 부착하여 레일을 이동할 때 마찰이 적도록 설계되었고, 레일에는 별도의 윤활유를 발라 실험에서 진동 발생이 용이하도록 하였다. 하부의 받침판 또한 투명 아크릴 판으로 실험 진행시에는 받침판과 실험을 진행한 테이블을 C형 클램프로 고정하여

진동 발생에 의한 진동 장치의 흔들림을 보정하였다. 실험 진행시에는 아크릴판과 스탠드를 고무줄과 연결하여 아크릴판을 레일의 끝까지 당겼다가 놓는 방식으로 아크릴 판 위에 놓인 모형건물에 진동을 가하였다.



[Fig. 5] Seismic generator



[Fig. 6] x axis seismic generator

2. 기본적인 실험장치 배치

아래 [Fig. 7]과 같이 모형 건물을 올려놓는 진동 장치 상층부에 고무줄 연결하여 스탠드와 함께 고정하고 건물을 올린다. 이때, 진동에 의하여 모형건물이 흔들리지 않도록 모형건물과 진동 장치를 C형 클램프를 이용하여 고정하고 진동 장치 또한 실험을 진행할 테이블과 C형 클램프를 이용하여 고정하였다. 그리고 모형건물에 실험에 따라 원관이 끼워진 직류모터를 모형건물 옆면이나 천장에 부착한다. 이후 직류모터를 직류전원장치와 집게 전선을 이용하여 연결하고 전압계를 이용하여 전압을 확인하며 실험을 진행한다. 그리고 진동 장치의 레일을 이용하여 모형건물에 움직임을 가하는데 이때 진동을 일정하게 가하기 위하여 진동판을 레일 끝까지 당긴 후 고무줄의 탄성력을 이용하여 진동판과 그 위의 모형건물이 운동하도록 하게 한다. 이에 따라 발생하는 모형건물의 움직임(진동)은 아래 [Fig. 8]과 같이 MBL 역학실험장치 중 motion detector를 이용하여 모형건물 상층부의 움직임을 mm 단위로 측정하였다. 전체적인 실험장치 배치는 아래 [Fig. 9]와 같다.



[Fig. 7] Setting up experimental devices



[Fig. 8] Vibration measurement with motion detector



[Fig. 9] Setting up experimental devices(full)

3. 세부실험방법

본 연구에서 진행하는 실험은 크게 자이로스코프 효과 발생 여부 입증 실험과 기존 진동감쇠구조(제진구조)와 회전원관 내진설계 장치의 진동감쇠 효과 비교 실험으로 나뉜다. 그 이전에 본 연구에서 설계한 실험 장치 중 모형 건물에 진동을 가하는 진동 장치에 의한 영향을 확인하고자 하였다. 즉, 외부의 진동으로 인한 그 충격의 세기가 건물에 작용하는 영향을 먼저 파악해야 한다.

가. 진동 장치에 의한 진동 발생효과 검증 실험

본 실험은 진동 장치에 의하여 발생하는 진동의 크기와 모형 건물의 흔들림이 비례함을 확인하고자 고안한 실험이다. 본 실험에서 변인은 진동 장치가 발생시키는 진동의 크기로서 위의 [Fig. 9]에서 진동 장치 상층부와 스탠드를 연결하는 고무줄의 길이를 다르게 하며 탄성력을 조절하는 방식으로 실험을 진행하였다. 조작변인은 외부의 진동, 즉, 진동 장치의 상층부에 결합된 모형건물의 초기속도로 하였고 이에 영향을 주는 요인은 고무줄의 탄성력이며 $F = -kx$ 에서 고무줄의 인장길이(x)를 각각 30cm, 50cm, 70cm로 하여 측정된 초기속도이다. 측정값은 MBL 역학실험장치의 motion detector를 이용하여 측정하였으며 실험장치 세팅 모습은 [Fig. 9]와 같다.

나. 자이로스코프 효과 발생 여부 입증 실험

1) 회전원관의 회전여부에 따른 진동감쇠효과 측정

본 실험의 목적은 구체적으로 회전원관의 관성모멘트에 따른 진동감쇠효과를 비교하기 전, 실제 모형 건물에서 회전원관의 회전에 의하여 진동감쇠효과가 발생하는지 확인하는 실험이다. 따라서 건물의 진동감쇠에 영향을 줄 수 있는 회전원관의 회전여부와 크기(관성모멘트), 부착 위치 등의 종합적인 변인을 분석하고자 하였다.

회전원관의 크기는 [Fig. 2]에서 제작한 것과 같은 지름 100mm, 150mm, 200mm를 사용하였으며, 회전원관의 모형건물 부착위치는 건물 최상부와 ([Fig. 10]), 건물 측면 ([Fig. 11])으로 설정하였다. 회전속도는 직류모터에 가해주는 전압을 5V로 일정하게 하여 <Table 2>에서의 회전수를 사용하였다. 실험장치 모습은 본문 위의 [Fig. 9]와 같다.

2) 회전원관의 관성모멘트에 따른 진동감쇠 측정

자이로스코프 효과에 영향을 주는 각운동량(\vec{L})은 II. 1. 가.와 같이 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$\vec{L} = I \times \vec{\omega}$$

본 실험에서는 각운동량(\vec{L})에 영향을 주는 요인인 관성모멘트(I)에 따른 진동감쇠 정도를 측정하여 회전원관이 부착된 모형건물에 자이로스코프 효과가 나타남을 입증하고자 한다. 본 실험에서는 [Fig. 2]와 같은 지름 100mm, 150mm, 200mm의 회전원관을 사용하였으며 각각의 무게를 측정하여 각 회전원관의 관성모멘트를 조작변인으로 실험을 진행하였다. 또한, 추가적으로 회전원관의 부착위치를 다르게 하여 부착위치에 따른 진동감쇠 정도의 차이를 측정하였다. 본 실험에서 회전원관의 회전속도는 직류모터에 가해주는 전압을 5V로 일정하게 하여 <Table 2>에서의 회전속도를 사용하였으며 전체적인 실험장치 세팅 모습은 본문 위의 [Fig. 9]와 같다.

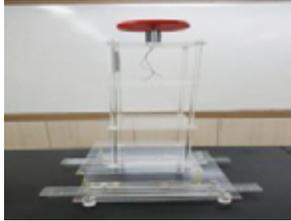
3) 회전원관의 회전 각속도에 따른 진동감쇠 측정

본 실험에서는 각운동량(\vec{L})에 영향을 주는 요인인 회전각속도($\vec{\omega}$)에 따른 진동감쇠 정도를 측정하여 회전원관이 부착된 모형건물에 자이로스코프 효과가 나타남을 입증하고자 한다. 본 실험에서는 지름 200mm의 회전원관을 사용하였으며 회전원관이 부착된 직류모터의 전압을 (0V), 3V, 5V, 8V, 10V로 하여 <Table 2>에서의 전압에 따른 회전수를 조작변인으로 하였다. 전체적인 실험장치 세팅 모습은 본문 위의 [Fig. 9]와 같다.

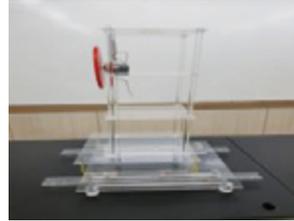
4) 회전원관을 부착한 모형 건물의 움직임 분석

본 실험은 원관이 회전하는 모형건물이 외부 충격에 대해 실제 자이로스코프 역할을 하는지 알기 위해 진행한 실험이다. 자이로스코프 효과가 나타나기 위해서는 먼저 한 축을 기준으로 회전체가 회전해야 한다. 이때 회전체의 각운동량의 방향

은 중력의 방향에 수직이어야 한다. 또한, 방향이 변하지 않는 축에 대해서 회전체의 각운동량과 평행한 방향의 축이 축 회전을 해야 한다. 이 경우에 한해 자이로스코프는 세차 운동한다. 따라서 원판이 회전하는 모형건물에 자이로스코프 효과가 나타난다면 모형건물의 상층부는 세차 운동(원운동)을 할 것이다. 이를 수치로 나타내기 위하여 본 실험에서는 초고속 카메라로 원판이 회전하는 모형건물의 상층부를 모형 건물 위에서 측정하여 진동방향을 x축, 진동방향의 수직인 방향을 y축으로 하여 x축과 y축의 진동크기를 측정하였다. 실험 장치의 세팅 모습은 실험 3)과 같다.



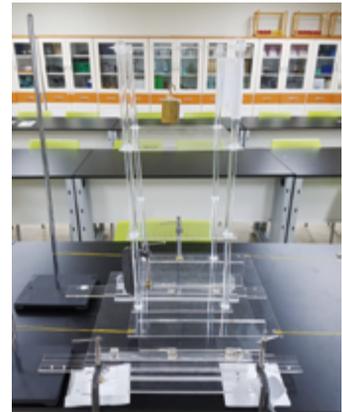
[Fig. 10] Attach the disk to the top of the building



[Fig. 11] Attach the disk to the side of the building

다. 기존 진동감쇠구조와 회전원판 내진설계 장치의 진동감쇠효과 비교 실험

우선 기존의 내진설계와 본 연구에서 진행하는 내진 설계의 효율을 비교하기 위하여 현재 초고층빌딩에 적용된 제진구조를 이용하고자 하였다. 본 실험에서는 제진구조를 모방하여 아래 [Fig. 12]와 같이 모형건물에 500g의 금속 추를 건물 상부층에 부착하여 제진구조를 제작하였고, 이를 같은 크기의 흔들림을 모형건물에 가했을 때 모형건물에 부착된 원판을 회전시킨 경우와 진동감쇠 정도를 비교하였다.



[Fig. 12] Weight attached to the model building

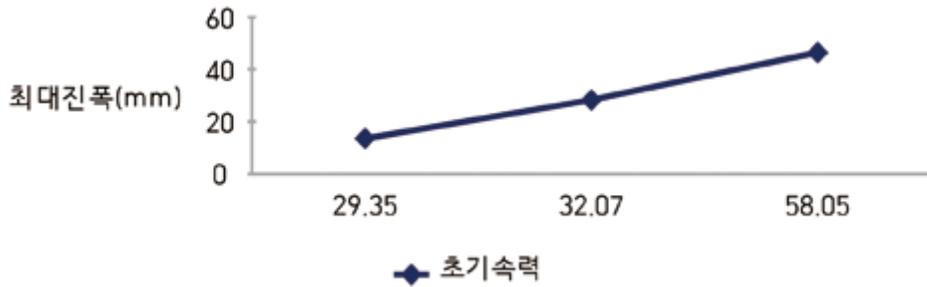
IV. 연구 결과

실험 결과 해석에 앞서 건물 진동 장치로 건물에 흔들림을 주었을 때 건물의 진동은 여러 번 나타났으므로, 건물에 나타난 첫 번째 진동을 1차 진동, 두 번째 진동을 2차 진동이라고 표기하였음을 알린다. 또한, 진동의 진폭이란 첫 번째 진동에서 건물이 흔들린 정도를 말하며 본 실험 결과 해석에서는 진동의 진폭이 작을수록 진동감쇠효과가 뛰어난 것으로 해석하였음을 알린다.

1. 진동 장치에 의한 진동 발생 효과 검증 실험

자이로스코프의 원리를 이용하여 만든 내진설계 장치가 건물의 진동감쇠효과에 미치는 영향을 알기 위해서는 건물의 진동 장치, 즉 외부의 진동으로 인한 그 충격의 세기가 건물에 작용하는 영향을 먼저 파악해야 한다. 본 실험은 외부의 충격의 세기와 진동 장치에 부착된 모형건물이 진동크기가 비례함을 검증하고자한 실험이다. 본 실험에서는 진동 장치에 연결된 고무줄의 인장길이를 30cm, 50cm, 70cm로 하였을 때의 모형건물의 초기속력 (29.35cm/s, 32.07cm/s, 58.05cm/s)을

조작변인으로 하였으며 그 외 모형건물이나 진동 장치의 조건은 동일하게 진행하였다.



[Fig. 13] Maximum amplitude of a building depend on the external speed

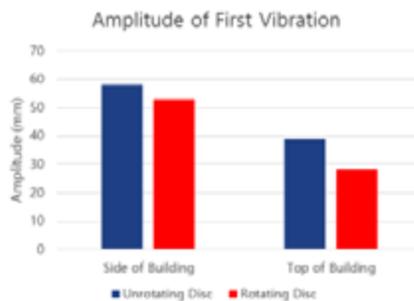
본 실험을 통하여 모형 건물의 최대진폭(1차 진폭)으로 나타나는 충격량의 크기는 모형건물에 가해지는 외부의 충격 즉, 외부에 의하여 가해지는 진동의 초기 속력이 커질수록 건물에 가해지는 진동의 최대 진폭 또한 이에 비례하여 증가함을 알 수 있다. 본 실험의 정량적인 해석을 위해서는 건물에 미치는 초기 충격량의 크기를 정량적으로 해석할 수 있는 방법이 필요하다라고 판단하였다.

2. 자이로스코프 효과 발생 여부 입증 실험

가. 회전원판의 회전여부에 따른 진동감쇠효과 측정

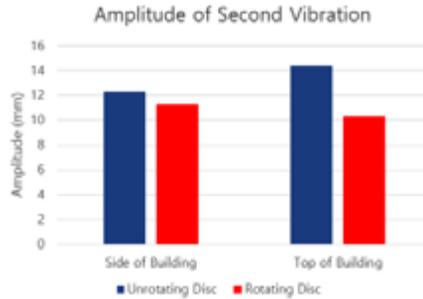
앞선 실험 1.을 통해서 진동 장치를 이용하여 모형 건물에 흔들림을 주었을 때, 충격으로 인한 진동이 여러 번 나타나는 것을 알 수 있었다. 이 때문에 본 실험에서는 처음 가장 큰 진폭을 지니고 있는 진동을 1차 진동, 이후 진동을 2차 진동, 3차 진동 등으로 표현하였다. 회전원판의 지름은 200mm로 제작하여 실험하였고, [Fig. 14-16]에서 'Unrotating Disc'은 모형 건물에 부착된 원판을 회전시키지 않았을 경우, 'Rotating Disc'는 원판을 회전시킨 경우를 나타낸 것이다. [Fig. 14-16]에서 측정값은 각각 모형 건물(추가) 진폭의 크기로 단위는 mm이다.

1) 1차 진동의 진폭



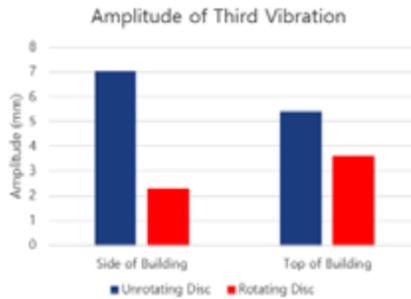
[Fig. 14] The amplitude of first vibration depend on rotation of disc

2) 2차 진동의 진폭



[Fig. 15] The amplitude of second vibration depend on rotation of disc

3) 3차 진동의 진폭



[Fig. 16] The amplitude of third vibration depend on rotation of disc

본 실험 결과를 통하여 건물에 부착된 원판이 회전할 때가 회전하지 않을 때에 비해 1, 2, 3차 진동의 진폭이 작음을 알 수 있다. 또한, 회전원판의 부착 위치에 따라 모형건물 진동의 진폭을 비교하였을 때 건물 상부에 위치할 때가 측면 벽에 위치했을 때보다 대체로 모형건물의 진폭이 작다는 것을 알 수 있다.

원판이 회전할 때가 회전하지 않을 때에 비해 1, 2, 3차 진동의 진폭이 작게 나타난 것은 앞서 이론적 배경에서 설명한 회전원판에 의한 자이로스코프 효과가 원판이 회전하는 건물에서도 나타남을 확인할 수 있는 실험 결과라고 해석할 수 있다. 실제 자이로스코프처럼 회전축을 유지하려는 운동이 모형건물에서도 나타나 진동을 감쇠하였음을 알 수 있다. 그러나 회전시키지 않은 원판을 건물의 측면에 부착하였을 경우가 회전시키지 않은 원판을 건물 상부에 부착하였을 때보다 초기 진동(1차 진동)이 강함을 알 수 있는데 이는 원판과 모터를 건물 측면에 부착함에 따른 건물 질량의 불균형 때문으로 보여진다. 그리고 3차 진동 이후부터는 진동 진폭의 크기가 작아지며 이에 따라 회전원판의 자이로스코프 효과와 모터 회전에 따른 미세 진동의 차이가 크게 구분되지 않으며 측정기기의 오차 또한 고려되어야 하기 때문에 본 실험의 해석에는 이용하지 않았다.

따라서 본 실험을 통해 자이로스코프 원리를 이용한 내진설계 장치에서 원판의 회전은 진동감쇠효과가 있음을 확인할 수 있었다.

나. 회전원판의 관성모멘트에 따른 진동감쇠 측정

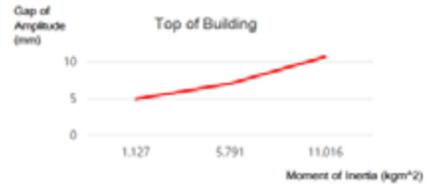
본 실험에서는 원판의 관성모멘트를 변수로 하여 각각 회전원판의 관성모멘트와 모형건물에 부착된 원판을 회전시켰을 때와 회전시키지 않았을 때의 진폭의 크기 차이를 측정하였다. 이때 원판에 연결된 모터의 전압은 5V, 회전수는 6,500rpm으로 고정하여 실험을 진행하였다. 회전원판의 지름은 100mm, 150mm, 200mm로 제작하여 실험하였고, ‘moment of inertia’는 이 회전원판의 각각의 관성모멘트를 $kg \cdot cm^2$ 의 단위로 계산한 값이다. ‘Side of Building’은 본문 앞의 연구 설계에서 [Fig. 11]과 같은 형태로 원판을 모형건물에 배치하여 실험하였음을 의미하고, ‘Top of Building’은 본문 앞의 연구

설계에서 [Fig. 10]과 같은 형태로 원판을 모형건물에 배치하여 실험하였음을 의미한다. 측정값은 모형건물에 부착된 원판을 회전시키기 전과 후의 실험에서 나타나는 각 진폭의 차이로 단위는 mm이다.

1) 1차 진동의 진폭

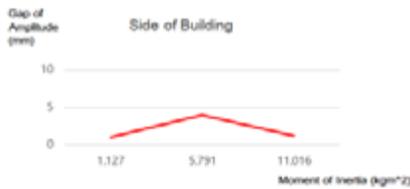


[Fig. 17] The amplitude of first vibration depend on moment of inertia, when the disk is attached to the side of the building.

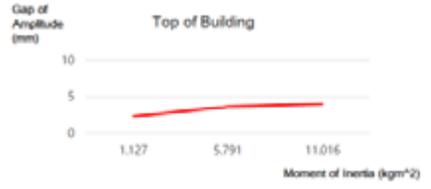


[Fig. 18] The amplitude of first vibration depend on moment of inertia, when the disk is attached to the top of the building.

2) 2차 진동의 진폭



[Fig. 19] The amplitude of second vibration depend on moment of inertia, when the disk is attached to the side of the building.

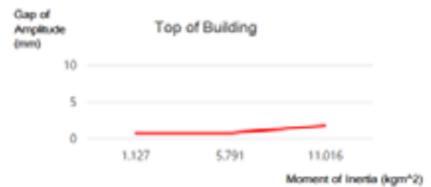


[Fig. 20] The amplitude of second vibration depend on moment of inertia, when the disk is attached to the top of the building.

3) 3차 진동의 진폭



[Fig. 21] The amplitude of third vibration depend on moment of inertia, when the disk is attached to the side of the building.



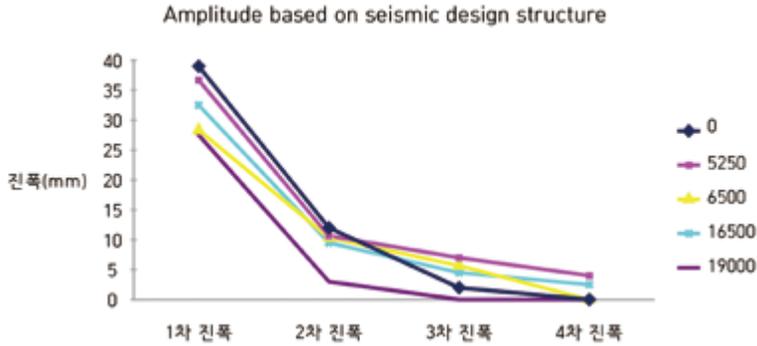
[Fig. 22] The amplitude of third vibration depend on moment of inertia, when the disk is attached to the top of the building.

실험결과를 나타낸 위의 [Fig. 18], [Fig. 20]을 통해 1, 2차 진동의 진폭 차이는 모형건물에 부착된 원판의 관성모멘트에 비례함을 알 수 있으며, [Fig. 17-20]을 비교하였을 때 회전원판이 건물 상부에 위치했을 때가 측면 벽에 위치했을 때보다 그 진폭의 차이가 크고 관성모멘트가 클수록 진폭차이가 커지는 경향성 또한 뚜렷하게 나타남을 알 수 있다. 그러나 3차 진동의 진폭의 차이는 원판의 지름이 클수록 크며 회전원판이 측면 벽에 위치했을 때가 건물 상부에 위치했을 때보다 크게 측정되었다. 이를 통하여 원판의 회전에 의하여 발생하는 자이로스코프 효과가 일정한 진폭 이상의 진동을 감쇠시키는 데에 효과가 있으나 모터의 회전과 원판의 불균일로 발생하는 진동에 의하여 진폭이 작은 진동(본 실험에서 3차 진동)을 감쇠시키는 데에 가시적인 효과가 나타나지 않는 것임을 알 수 있다.

따라서 관성모멘트의 크기에 따른 자이로스코프 효과 변화를 확인해보고자 하는 본 실험에서 관성모멘트가 클수록 자이로스코프 효과가 커지게 된다. 이에 따라 모형건물에 부착된 회전원판의 불균일한 밀도로 인한 회전시의 진동, 모터의 회전에 의한 진동 등 다양한 변인 때문에 다소 오차가 존재하지만 회전관성이 커질수록 진동감쇠정도가 커짐을 확인할 수 있었다.

다. 회전원판의 회전 각속도에 따른 진동감쇠 측정

실험 2. 나. 에서 각운동량의 변수 중 관성모멘트로 했다면 본 실험에서는 회전원판의 회전각속도를 조작변인으로 하여 각 회전수 별 진폭의 크기를 mm단위로 측정하였다. 본 실험에서 회전수는 회전원판이 부착된 직류모터에 가해진 전압이 각각 (0V), 3V, 5V, 8V, 10V일 때의 회전수 (0rpm), 5,250rpm, 6,500rpm, 16,500rpm, 19,000rpm으로 하였으며 본 실험에서는 지름 200mm의 원판을 사용하였다.



[Fig. 23] Amplitude based on seismic design structure

실험결과를 나타낸 위의 [Fig. 23] 그래프에서 볼 수 있듯이 대체로 자이로스코프의 회전수가 높을수록 모형건물에 나타나는 진동의 진폭 크기가 작아지며 진동횟수도 감소하는 것을 알 수 있다. 따라서 본 실험을 통해 나. 실험과 동일하게 각운동량이 증가할수록 진동감쇠 정도가 크게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 나. 실험은 회전원판 자체의 진동이 커지는 문제점이 발생하였다면 본 실험의 경우에는 회전수가 증가하면서 모터 내부 진동이 커지기에 오차의 주원인이 변화된 것이 라고 생각된다.

따라서 나. 실험과 본 실험을 통해 자이로스코프의 원리를 이용한 내진설계 장치에서 회전원판의 각운동량이 클수록 진동감쇠효과는 크다는 것을 확인할 수 있었다.

라. 회전원판을 부착한 모형 건물의 움직임 분석

본 실험은 원판이 회전하는 모형건물이 외부 충격에 대해 실제 자이로스코프 역할을 하는지 알기 위해 진행한 실험이다. 원판이 회전하는 모형건물에 자이로스코프 효과가 나타난다면 모형건물의 상층부는 세차 운동(원운동)을 할 것이다. 이를 수치로 나타내기 위하여 본 실험에서는 초고속 카메라로 원판이 회전하는 모형건물의 상층부를 모형 건물 위에서 측정하여 진동방향을 x축, 진동방향의 수직인 방향을 y축으로 하여 'x축 진폭', 'y축 진폭'을 mm단위로 측정하였다. <Table 3>에서 '원판 정지'는 모형건물에 부착된 원판이 정지하였을 때의 x, y축 진폭을, '원판 회전'은 지름 200mm 원판이 6500rpm(직류모터 5V)으로 회전할 때 x, y축 진폭을 측정하였음을 의미한다.

<Table 3> Vibration analysis of a model building based on the presence or absence of a rotating disk

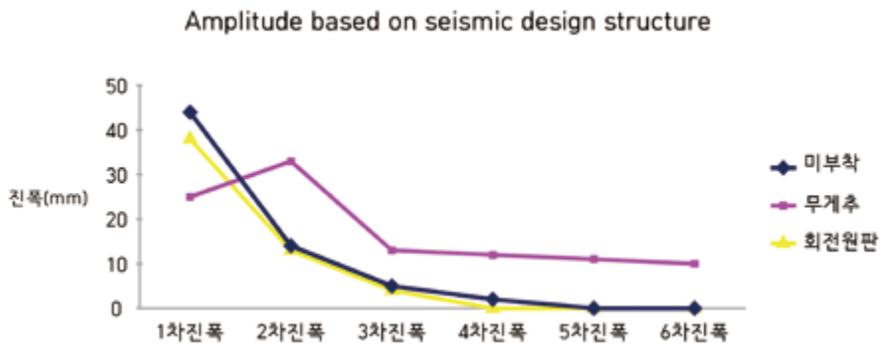
x축 진폭 / y축 진폭	1차진폭(mm)	2차진폭(mm)	3차진폭(mm)
원판 회전	15 / 12	7 / 4	3 / 1
원판 정지	16 / 11	8 / 3	4 / 1

본 실험 결과 모형건물에 부착된 원판이 회전할 때의 모형건물 상부의 진동 양상이 원판을 회전하지 않았을 때와 비교하였을 때 진행방향 진동(x축 진동)과 진행 방향에 수직인 진동(y축 진동)이 비교적 균일한 진폭을 나타낸다. 이는 원판이 회전하고 있을 때 원판이 부착된 모형건물이 자이로스코프와 유사한 형태의 운동을 진행하고 있다고 분석할 수 있다. [Fig. 10]과 같이 건물의 최상부에 원판을 회전시키는 경우, 이 건물의 움직임이 자이로스코프의 축돌기 운동과 유사함을 알 수

있다. 이론적 배경에 언급했듯이 자이로스코프의 회전운동은 고정축이 중력에 대해 수직인 방향으로만 존재한다면 원관의 회전축이 고정축에 대해 수직이지 않아도, 즉 지면에 대해 수평하지 않아도 성립한다는 것을 말하는데 실제 실험에서 원관을 회전시킨 모형건물의 움직임이 자이로스코프와 같은 움직임을 나타냄이 본 실험을 통해 확인되었다.

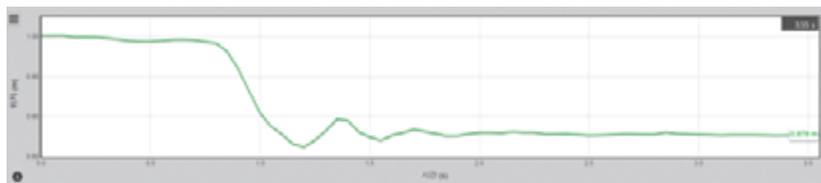
3. 기존 진동감쇠구조와 회전원판 내진설계 장치의 진동감쇠효과 비교 실험

본 실험에서는 건물에 아무런 내진설계를 하지 않은 '미부착', 제진구조를 모방한 '무게추', 본 연구 주제인 자이로스코프를 이용하여 내진설계를 하는 '회전원판' 각각의 내진설계에 대해 진동감쇠효과를 분석하고자 하였다. 따라서 이 세 가지 경우에서 모형건물에 흔들림을 가하였을 경우의 1차 진폭에서 6차 진폭까지를 mm단위로 나타내었다. 다른 실험과 달리 본 실험에서 6차 진폭까지 건물의 흔들림을 측정하는 것은 제진구조를 모방한 '무게추'의 실험결과 경향을 잘 나타내기 위함이었다.

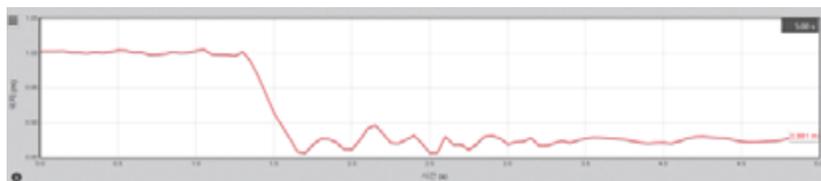


[Fig. 24] Amplitude based on seismic design structure

실험결과 건물에 회전원판을 부착한 형태의 모형 건물의 진폭이 무게 추를 건물 상부에 부착하였을 때의 경우보다 1차 진폭이 커져 무게추가 흔들림 방지 구조로서 회전원판보다 우수한 것으로 보이지만 아래 [Fig. 25]와 [Fig. 26]을 비교하였을 때 motion detector를 이용한 결과는 그와 다른 양상을 나타내었다.

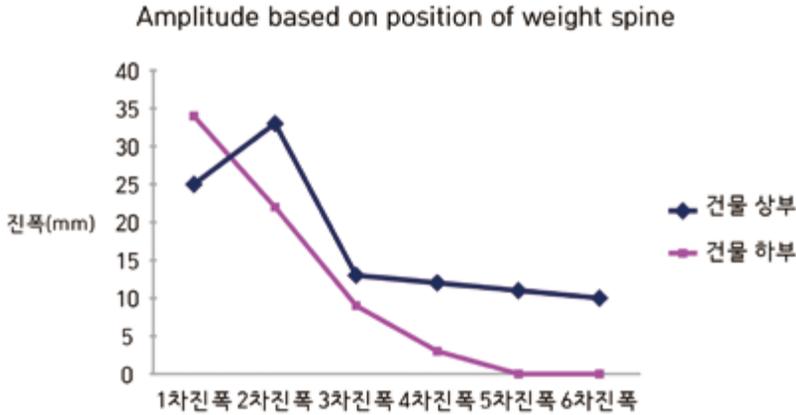


[Fig. 25] Amplitude when using a rotating disk



[Fig. 26] Amplitude with weight spine attached

motion detector를 이용하여 건물 상부의 위치변화(흔들림)을 측정한 그래프이다. [Fig. 25]는 원판을 이용한 내진설계를 모형건물에 적용하였을 때의 그래프이다. 흔들림이 가해지고 2차 진폭까지 뚜렷하게 관측되나, 아래 [Fig. 26]의 경우 무게 추를 부착한 형태의 흔들림 방지 구조를 적용한 모형 건물은 초기 진폭의 크기가 회전원판을 부착한 모형건물보다 작은 것으로 보이거나 추의 흔들림으로 인하여 모형 건물에 주기적인 흔들림이 가해짐을 알 수 있다. 이는 건물 상부에 부착한 무게 추와 연결한 줄의 길이가 짧고 무게 중심이 건물 상부에 위치하여 비교적 불안정하기 때문으로 보인다. 그래서 무게 추를 건물 상부에 부착하였을 때와 건물 하부에 부착하였을 때를 비교하여 건물에 흔들림을 주었을 때 건물에 발생하는 진동의 진폭을 비교하였다.



[Fig. 27] Amplitude based on position of weight spine

추를 건물 하부(아래층)에 부착하였을 때가 건물 상부(위층)에 부착하였을 때보다 흔들림을 주었을 때 모형 건물의 진폭이 대체적으로 작기는 하였으나 건물 하부에 부착하였을 때에도 추에 의한 흔들림이 주기적으로 발생하여 건물에 내진설계(흔들림 방지 구조)를 적용하지 않았을 때보다 오히려 후반 진동으로 갈수록 진폭이 증가함을 알 수 있었다. 따라서 무게 추를 건물에 부착한 형태의 흔들림 방지 구조는 모형 건물과 같은 저층 건물에는 부적절한 것으로 보인다. 실제로 건물에 큰 무게를 주어 주로 바람에 의한 흔들림을 방지하는 구조는 초고층 건물에 적용하는 형태의 구조로써 오히려 도심에 주로 분포하는 20층 이하의 중·저층 건물에는 적절하지 않으며 추가적으로 무게 추를 부착하기 위한 공간을 마련하는 것이 경제적으로도 불가하기 때문에 건물 외부에 부착하는 형태의 회전원판을 이용한 내진설계 구조가 적용할 수 있는 건물 종류의 범위가 더 넓어 경제적임을 알 수 있다.

V. 결론

본 연구의 실험과 가설은 한 가지 가정에 따른다. 바로 건물의 최상부에 원판을 돌리는 경우, 이 건물의 양상을 마치 자이로스콧프의 운동과 동일시 여길 수 있다는 것이다. 먼저 이론적 배경에 언급했듯이 자이로스콧프의 회전운동은 고정축이 중력에 대해 수직인 방향으로만 존재한다면 원판의 회전축이 고정 축에 대해 수직이지 않아도, 즉 지면에 대해 수평하지 않아도 성립한다는 것을 증명하였다. 그리고 이와 같이 실제로 원판의 회전축이 고정 축에 대해 수직이지 않아도 모형건물이 자이로스콧프 운동을 한다는 것이 추가실험인 실험 6.에서 확인하였다. 즉, 건물의 경우 건물과 지면 사이의 인력, 혹은 건물의 고정을 위한 기반을 고정 축으로, 흔들리는 건물을 움직이는 회전축, 그리고 건물에 부착된 회전원판을 자이로스콧프의 원판이라고 여길 수 있다. 이론적 배경에서 밝힌 것과 같이 세차각속도(Ω)는 다음과 같은 식이 성립한다.

$$\Omega = \frac{MgR}{I\omega}$$

이 경우는 자이로스코프가 3차원 공간에서 움직일 때의 세차각속도를 의미하지만 본 연구의 실험환경처럼 건물이 앞뒤로만 운동할 경우 진동운동과 유사하다고 생각할 수 있다. 단진동의 경우 속도와 진폭 모두 진폭에 1차적으로 비례하므로 세차각속도가 크면 클수록 진폭이 커질 것이고, 이것은 건물이 외부 진동에 의하여 발생하는 진동을 감쇠하기 어려움을 의미한다. 반대로 세차각속도가 작으면 작을수록 외부진동을 상쇄하여 효과적인 내진설계라는 것을 의미한다.

하지만 모형건물의 측면에 회전원판을 부착한 경우에는 자이로스코프라고 가정하기 힘들다. 이는 회전판이 만들어내는 각속도의 방향과 회전축의 방향이 수직이므로 회전판이 회전축의 운동에 영향을 미치지 못하리라고 생각한다. 이는 실험 1.과 실험 2.의 값을 통하여 확인할 수 있었다.

실험 3.에서 본 연구에서 제작한 내진설계 구조와 또 다른 내진구조인 제진구조와 비교하는 실험을 진행한 결과 본 실험에서 제진구조를 구현하기 위해 건물 상부에 부착한 무게추의 진동으로 인하여 제진구조를 적용한 모형건물의 진동이 오히려 증가하는 결과가 도출되었다. 이는 제진구조가 대부분의 건물 형태인 중·저층 건물에 적용하기 기술적 및 경제적인 측면에서 어려움을 간접적으로 확인할 수 있는 결과였다. 또한, 이를 통하여 원판을 단순히 건물에 부착하여 구현 가능한 본 연구의 내진구조의 실제 적용 가능성을 확인할 수 있었다. 본 연구에서 원판의 질량이 모형 건물의 질량에 비교하였을 때 최대 약 10%에 이르렀지만, 회전체의 질량을 줄이면서 원판이 아닌 고리 형태나 밀도가 낮은 재질 사용, 회전체의 회전각속도를 증가시키는 등의 방법으로 내진 효과를 증대시킬 수 있다.

본 연구에서는 모형건물을 제작하고 인위적인 진동을 가해주어 건물의 진동 감쇠를 확인하였다. 이를 통하여 내진설계를 시행하지 못한 건축물이나 고층 건물에서 강풍에 의한 흔들림을 제어할 수 있는 보조물로서의 역할이 기대된다. 그러나 실제 지진이나 강풍에 의한 건물의 진동을 감쇠시키는데 상용화한다면 본 연구에서 고려하지 못하거나 실험환경의 한계로 제어하지 못하였던 변수를 해결할 필요가 있다.

첫 번째로 회전원판의 밀도를 최대한 균등하게 분포시켜 회전원판이 균일한 회전을 할 수 있도록 해야 한다. 본 연구에서는 원판을 3D프린터로 제작하여 그 밀도를 최대한 균일하게 하고자 하였으나 모터에 장착하여 회전시키는 과정에서 원판이 균질하지 않아 원판을 회전시킬 때 작고 일정한 진동이 지속적으로 발생함을 알 수 있었다. 이를 실제 건물에 적용한다면 회전에 의하여 발생하는 진동이나 소음이 오히려 건물에 더 큰 피해를 줄 수 있으며 건물 내에 존재하는 사람들에게도 불편함 등의 악영향을 줄 수 있다.

두 번째로 건물에 회전원판을 가동할 경우 큰 회전수와 질량으로 인하여 전력 소모가 매우 클 것이다. 따라서 건물의 흔들림을 감지하는 별도의 센서를 설치하여 강진이나 강풍으로 인하여 건물의 흔들림이 기준치를 초과하는 크기가 된다면 회전원판을 가동하여 진동을 감쇠시키는 시스템으로 작동시켜야 할 것이다. 이를 통하여 원판을 가동시키는 데에 필요한 전력과 소음 등의 문제를 최소화할 수 있을 것으로 기대된다. 이때에는 순간적으로 고출력의 회전력을 발생시킬 수 있는 장치나 동력원이 필요하다. 또한, 원판 회전에 필요한 전력을 건물 자체에서 생산할 수 있는 풍력에너지나 태양광 에너지 같은 친환경 에너지로 사용할 필요가 있을 것으로 보인다.

이외에도 매우 큰 질량의 원판을 지탱할 수 있는 회전축과 건물을 연결하는 데에도 상당한 수준의 건축 공학적 정밀성이 필요하다. 질량이 원판을 부착할 경우 건물에 가해지는 힘이 지속적으로 누적되어 건물의 수명을 단축시킬 수 있어 이를 해결할 수 있는 건축물의 구조와 건축자재 등의 발전이 필요할 것으로 예상된다.

하지만 실험적인 측면에서 봤을 때 이 구조의 효과는 분명히 존재한다. 모터의 진동이 강하고 이것이 건물을 진동하고 힘을 줬음에도 불구하고 회전원판의 회전효과가 건물의 전체적인 진동을 감쇠시켰음은 확실한 사실이다. 따라서 이러한 한계점들을 해결할 수 있는 현실적인 과학기술이 적용 가능하다면, 이 자이로스코프의 원리를 이용한 진동감쇠 장치를 통하여 지진이나 강풍에 효과적으로 견딜 수 있는 건축물을 건설할 수 있을 것으로 기대된다.

VI. 참고문헌

- [1] 원자력용어사전, 내진설계, <https://terms.naver.com/entry.nhn?docId=664366&cid=42434&categoryId=42434> (검색일 : 2018.10.24)
- [2] Walker Halliday Resnick (2015), 일반물리학 개정10판 제1권, 335-365.
- [3] F. Ünker, O.Çuvalci (2015), Seismic Motion Control of a Column Using a Gyroscope.
- [4] 네이버 두산백과, 지진, <https://terms.naver.com/entry.nhn?docId=1144442&cid=40942&categoryId=32298> (검색일 : 2018.10.24)
- [5] 건축하는 늑대블로그, 지진이 건물에 미치는 영향과 내진, 제진 및 먼진구조의 설명, <https://blog.naver.com/asimsim/221333431937> (검색일 : 2018.12.11)
- [6] 김해분성고등학교 (2016). 자이로스코프와 아두이노를 이용한 이륜구동장치. STEAM R&E 연구결과보고서. 건국대학교.
- [7] 김필교, 김연섭, 정슬 (2007), 한 바퀴로 구동하는 로봇 GYROBO의 구현, 전자공학회 논문지 제 44 권 SC 편 제 4호
- [8] 배형진 (2009) 지진학습모형장치, 제30회 전국학생과학발명품경진대회_학습용품 부문(작품번호 470)
- [9] 서보현, 심현보, 지진에 의한 건물의 흔들림 탐구. 제50회 전국과학전람회, 다사고등학교.
- [10] 김대웅, 손광진, 지진파 구현 장치제작 및 그 활용에 관한 연구, 제46회 전국과학전람회, 부산과학고등학교

Ⅰ 연구진 Ⅰ

신정욱 (Jungwook Shin, 대전동신과학고등학교, wjddnr0576@naver.com), 주저자

김미정 (Mijung Kim, 대전동신과학고등학교, pinktree10@naver.com), 공동저자

정현수 (Hyeonsoo Jeong, 대전동신과학고등학교, ted1204@naver.com), 공동저자

지도교사 : 고관홍 (Kwanhong Ko, 대전동신과학고등학교, kokh3@naver.com)

부 록

- 「청소년 과학창의연구」 학술지 투고 규정
- 「청소년 과학창의연구」 특별호 ~ 3권 표지 및 논문 목차

「청소년 과학창의연구」 학술지 투고 규정

1. 논문 작성

- ① 논문 작성은 한글 2010 이상을 이용하여 작성한다.
- ② 논문 투고 면수는 아래 편집 기준에 따라 전체 25쪽을 초과하지 않는다.

2. 논문의 체제

- ① 첫 번째 페이지를 1페이지로 하여 참고문헌까지 반드시 페이지를 기입하여야 한다.
- ② 맨 앞쪽 표지에는 연구제목, 연구자 이름과 소속 학교명, 초록, 중심어 5개 이내를 국문과 영문으로 각각 기재하고, 이후부터 연구내용과 참고문헌을 순서대로 기술한다.
- ③ 연구 제목은 연구 내용을 압축하여 간단명료하게 제시한다.
- ④ 연구내용은 서론, 본론(이론적 배경, 연구(실험)방법, 연구결과 및 논의), 결론 순으로 나누어 기술하여야 한다.

다만, R&E 연구 분야별 논문 작성 방식이 다양하므로 아래의 논문 편집 기준에 따라 작성하되 연구 분야에 따라 연구자가 적절하게 정하여 작성할 수 있다.

3. 논문 편집 기준

- ① 논문의 편집용지를 비롯한 작성 서식은 다음의 편집기준에 따른다.
 - 편집용지 : A4
 - 여백 : 위쪽 15mm, 아래쪽 10mm, 왼쪽·오른쪽 20mm, 머리말 10mm, 꼬리말 10mm
 - 글자체 : 한글 휴먼명조체, 영문 Times New Roman, 장평 97, 자간 -3
 - 줄간격 : 160%(도표 안은 130%)
 - 제목의 번호 체계
 - 1수준 : I, II, III ...
 - 2수준 : 1, 2, 3 ...
 - 3수준 : 가, 나, 다 ...
 - 4수준 : 1), 2), 3) ...
 - 5수준 : 가), 나), 다) ...

○ 글자모양

- 연구제목 : (국문) 휴먼명조, 글자크기16, 장평97, 자간 -3 (진하게), 가운데 정렬
(영문) Times New Roman, 글자크기12, 장평 97, 자간 -3(진하게), 가운데 정렬
- 저 자 명 : (국문) 휴먼명조, 글자크기10, 장평 97, 자간 -3, 가운데 정렬
(영문) Times New Roman, 글자크기9, 장평 97, 자간 -3, 가운데 정렬(이름, 성 순으로 기입)
- 소 속 명 : (국문) 휴먼명조, 글자크기10, 장평 97, 자간 -3, 가운데 정렬
(영문) Times New Roman, 글자크기10, 장평 97, 자간 -3, 가운데 정렬
- 초 록 : (국문) 휴먼명조, 글자크기9, 장평 97, 자간 -3
(영문) Times New Roman, 글자크기9, 장평 97, 자간 -3
- 대 제 목 : 휴먼명조, 글자크기12, 장평97, 자간 -3 (진하게)
- 소 제 목 : 휴먼명조, 글자크기11, 장평97, 자간 -3 (진하게), 들여쓰기 10
- 본문글자 : 휴먼명조, 글자크기10, 장평97, 자간 -3, 들여쓰기 10
- 그림 · 표 : 휴먼명조, 글자크기9, 장평97, 자간-3, 가운데 정렬 (줄간격 130%)
- 각주글자 : 휴먼명조, 글자크기8.5, 장평97, 자간 -3 (줄간격 130%)
- 참고문헌 : 휴먼명조, 글자크기8.5, 장평97, 자간 -3

4. 초록의 작성

- ① 초록은 논문의 내용을 요약한 국문초록(400단어 이내)과 영문초록(ABSTRACT, 250단어 이내)을 연구제목, 연구자명, 소속학교명 다음에 중심어와 함께 기술한다.
- ② 중심어 명시 : 논문의 효율적 검색을 위하여 5개 이내의 중심어를 각 초록의 아랫부분에 명시한다.

5. 작성언어·전문용어

- ① 논문 작성에 사용하는 언어는 한글을 원칙으로 하되, 의미의 혼동 가능성이 있는 경우에 한해 ()속에 원어를 기록하며 가로쓰기를 원칙으로 한다.
- ② 논문의 전문용어는 원칙적으로 관련 학문분야의 학회가 인정한 것을 사용하여야 한다.

6. 숫자·기호·단위

- ① 숫자는 아라비아 숫자를 사용한다.
- ② 모든 기호와 단위는 원어로 기입하되 국제표준화기구(ISO, International Standardization Organization)가 인정하는 SI(이 인정하는 국제단위계(SI, International system of Unit)의 사용을 권장한다.

7. 표·그림·통계

- ① 모든 표와 그림은 본문의 적절한 위치에 원본대로 인쇄될 수 있도록 삽입한다.

- ② 표는 한 줄로 된 가로선만 사용하여 작성한다.
- ③ 표 안의 긴 단어는 적당한 약어로 표현하고, 표의 하단에 사용한 약어의 정의 또는 원어를 제시한다.
- ④ 모든 표는 표 위에 아라비아 숫자로 일련번호와 함께 표 제목을 영문으로 붙인다(예: <Table 1> The title of the table).
- ⑤ 모든 그림은 그림 아래에 아라비아 숫자로 일련번호와 함께 그림 제목을 영문으로 붙이고, 연구내용과 결과를 이해할 수 있도록 설명을 적는다(예: [Fig. 1] The title of the picture).
- ⑥ 모든 통계량은 기울임체로 표기한다. 예) t 검증, $r=.85$, M , SD , $F(2, 20)=57.59$

8. 인용 및 참고문헌 표시

- ① 참고문헌 인용은 해당되는 어귀의 우측에 '[']안에 참고문헌의 번호를 아라비아 숫자로 표시한다. 다음의 예와 같이 표기한다.
 - 이 실험결과는 기존의 연구결과[1]과 반대되는 것이다.
 - 이 실험결과는 기존의 연구결과[1-3]과 반대되는 것이다.
 - 기존에는 생물을 다섯 계(kingdom)로 나누었다[1,3].
- ② 본문에서 인용할 수 있도록 인용된 참고문헌들을 제9조의 규정에 따라 일련번호를 붙여 작성한다.

9. 참고문헌 작성

- ① 참고문헌은 논문의 말미에 작성하며, 참고문헌마다 '[']안에 일련번호를 함께 기재한다.
- ② 참고문헌의 일련번호는 한국, 일본, 서양의 문헌 종류와 상관없이 인용한 순으로 작성한다. 여기에 예시한 이외의 영문 참고문헌의 작성법은 APA(American Psychological Association) 양식에 따른다.
- ③ 참고문헌 작성 방법 및 예시
 - 학위논문([1] 참조)
 - 정기간행물 속의 논문(해당 권, 호, 페이지를 밝힐 것, 권수는 진한 글씨체 사용, [2] 참조)
 - 신문의 기사를 인용한 경우([4] 참조)
 - 단행본([6] 참조)
 - 인터넷에 탑재된 자료를 인용(인용한 연월일을 기입해야한다. [3,5,9,10]참조)
 - 영문 참고 문헌 작성 시 참조 사항
 - 정기간행물의 단독저자 논문(Journal article, one author)([12] 참조)
 - 정기간행물의 복수저자 논문(Journal article, three to six authors)([14] 참조)

저자수가 11인 이상인 경우에는 10명까지 제시하고, 추가 저자에 대해서는 국문의 경우, “등”, 영어의 경우, “et al.”로 표시한다.

- 단행본(book)([13] 참조)
- 단행본(book, third edition, Jr. in name)([16] 참조)
- 편저(edited book)([8] 참조)
- 편저의 장 또는 논문 인용(article or chapter in an edited book, two editors)([7] 참조)
- ERIC(Educational Resources Information Center)의 자료 인용([11] 참조)
- 번역서([15] 참조)

○ 예시

- [1] 송경애 (2005). *중학생 영재의 비지적특성과 가정의 과정변인이 수학적 창의성에 미치는 영향*. 박사학위논문. 건국대학교.
- [2] 윤형주, 윤여홍 (2003). 부모의 지각에 따른 유아영재의 비동시적 발달특성. *영재교육연구*, 13(1), 65-80.
- [3] 조석희(2004). 언어 영재교육의 필요성과 방향 탐색. <http://www.ksg.or.kr> (검색일: 2015.10.20).
- [4] 한국신문 2015. 10. 6. 20일자 4면(종합) 기사:유학비자 받기 까다로워진다.
- [5] 한국영재학회 홈페이지. <http://www.ksg.or.kr> (검색일: 2015.10.20.)
- [6] 황정규 (1984). *학교 학습과 교육평가*. 서울: 교육과학사.
- [7] Bjork, R. A. (1989). Retrieval inhibition as an adaptive mechanism in human memory. In H. L. Roediger & F. I. Craik (Eds.), *Varieties of memory and consciousness* (pp. 309-330). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- [8] Colangelo, N., & Davis, G. A. (Eds.) (2003). *Handbook of gifted education* (3rd Ed.). Boston, MA: Allyn & Bacon.
- [9] Eid, M., & Langeheine, R. (1999). The measurement of consistency and occasion specificity with latent class models: A new model and its application to the measurement of affect. *Psychological Methods*, 4, 100-116. Retrieved November 19, 2000, from the PsycARTICLES database.
- [10] *Electronic reference formats recommended by the American Psychological Association*. (2000, October 12). Retrieved October 23, 2000, from <http://www.apa.org/journals/webref.html>
- [11] Mead, J. V. (1992). *Looking at old photographs: Investigating the teachers tales* (Report No.

- NCRTL-RR-92-4). East Lansing, MI: National Center for Research on Teacher Learning. (ERIC Document Reproduction Service No. ED346082)
- [12] Pyryt, M. C. (2000). Finding “g”: Easy viewing through higher order factor analysis. *Gifted Child Quarterly*, 44(3), 190-195.
- [13] Runco, M. A. (2007). *Creativity*. San Diego, CA: Elsevier Academic Press.
- [14] Saywitz, K. J., Mannarino, A. P., Berliner, L., & Cohen, J. A. (2000). Treatment of abused children and adolescents. *American Psychologist*, 55, 1040-1049.
- [15] Tannenbaum, A. J. (2004). 영재교육: 심리학과 교육학에서의 조망 [김태련, 김정휘, 조석희, 역]. 서울: 이화여자대학교 출판부. (원본출간년도: 1983).
- [16] Tannenbaum, A. J. (1983). *Gifted children: Psychological and educational perspectives*. New York: Macmillan.

31 JULY, 2015

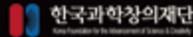


청소년 과학창의연구

The Journal of Youths in Scientific Research **특별호**



미래창조과학부
Ministry of Science, ICT and
Future Planning



한국과학창의재단
Korea Foundation for the Measurement of Science & Creativity



청소년 과학창의연구 The Journal of Youths in Scientific Research 특별호

조 편성을 통한 가위바위보게임의 효율성 연구(Effectiveness studies of rock, paper, scissors game organized by group)

안지수(Ahn Jisoo)·김재민(Kim Jaemin)·장충재(Jang Chungjae)·조용중(Cho Youngjung)·한현우(Han Hyeonwoo) - 인천과학고등학교

3차 윌방정식의 해에 관한 연구(On the solutions of cubic Pell equations)

채자석(Chae Jiseok)·류인영(Ryu Inyoung)·천승환(Cheon Seunghwan)·문현우(Moon Hyeonwoo)·최백규(Choi Baekgyu) - 전북과학고등학교

액체 금속을 이용한 변형률 센서의 개발(Development of strain sensors using liquid metals)

고은성(Ko Eunseom)·박채리(Park Chaeree)·차이주(Cha Iju)·최수연(Choi Sooyeon) - 한성과학고등학교

전자기장 내에서 유체의 가속 현상에 관한 메커니즘과 추진체 연구(Research of relations between velocity of electroconductive fluid and two fields in electromagnetic field)

강재훈(Gang Jehun)·정상하(Jeong Sangha) - 광주과학고등학교

의자 끌림 현상의 단진동 운동과 그에 따른 소리 분석(Noise analysis of oscillating motion in chair dragging)

김인환(Kim Inhwan)·김진혁(Kim Jinhyeok)·이영우(Lee Youngwoo) - 대전과학고등학교

폴리아닐린-은나노입자 복합물을 이용한 과산화수소의 전기화학적 검출(Electrochemical determination of hydrogen peroxide based on polyaniline-silver nanocomposites modified electrode)

한준택(Han Joontack)·황윤비(Hwang Yoonbee)·박승민(Park Seungmin)·오서정(Oh Seoryoung) - 세종과학고등학교

HS-SPME GC/MS법을 이용한 개미(Camponotus japonicus)의 페로몬 내 포름산, 올레안산 검출 및 정량(Detection and quantitative analysis of formic acid, oleic acid inside the pheromone of Camponotus japonicus using HS-SPME GC/MS method)

김재원(Kim Jaewon)·이택경(Lee Taekkyung)·이민수(Lee Minsoo)·박준우(Park Junwoo) - 경기북과학고등학교

마에서 추출한 유신의 유산균에 대한 효과(Effects of mucin extracted from hemp(Dioscorea) on lactic acid bacteria)

하태양(Heo Taeyang)·김소운(Kim Soyun)·권순형(Kwon Soonhyung)·김인철(Kim Incheol)·정한식(Jeong Hansik) - 인천과학고등학교

통합기상센서망을 이용한 대구지역 도시열섬 효과 연구(Study of urban heat island effect in Daegu using Compact Weather Station convergence network)

공광조(Gong Gwangjo)·권혁규(Kwon Hyukgyu)·김강찬(Kim Kangchan)·김한종(Kim Hanjong)·서상고(Seo Sanggo) - 대구일과학고등학교

대구 중 미세먼지 농도와 별의 밝기변화에 대한 정량적 연구(Quantitative study about atmospheric fine dust concentration & brightness of a star variety)

박준범(Park Junbeom)·박효선(Park Hyoseon)·이지영(Lee Jiyeong)·한효근(Han Hyokeun) - 강원과학고등학교

라즈베리파이를 활용한 시각장애인을 위한 웨어러블 인터페이스 개발(Developing a wearable interface for the visually impaired using Raspberry Pi- Marker recognition-based indoor navigation)

황준호(Hwang Junho)·윤종효(Yoon Jonghyo)·김대진(Kim Daejin)·이원석(Lee Wonseok)·조영민(Cho Youngmin)·차형현(Cha Hyeongheon) - 인천과학고등학교

청각장애인의 음악 체험을 위한 앱 개발(Mobile application development for the music experience of the deaf)

윤영석(Yoon Youngseok)·김민식(Kim Minsik)·이재혁(Lee Jaehyeok)·정용준(Jeong Yongjun)·장병희(Jang Byeonghee) - 인천진신과학고등학교

오션 인식과 근전도 신호를 이용한 힘 증폭 로봇 손 설계 및 제어(Design and control of force amplification robot hand using motion capture and EMG signal)

조정민(Cho Jungmin)·장민수(Jang Minsu)·이종완(Lee Jongwan)·진태규(Jin Taegyoo) - 한국과학기술원(KAIST) 부설 한국과학영재학교

지형과 기후를 고려한 인공구조물 설계(태풍 피해를 감소할 수 있는 비닐하우스 설계 방안 연구)(Research on artificial structure design considering the topography and climate: Minimizing typhoon damage to greenhouse)

황재희(Hwang Jaehui)·이주윤(Lee Juyoon)·박산영(Park Shinyoung) - 경기과학고등학교

ISSN 2508-2345

MARCH, 2016

청소년 과학창의연구

THE JOURNAL OF YOUTHS
IN SCIENTIFIC RESEARCH

창간호 Vol. 1. No. 1



미래창조과학부



한국과학창의재단



과학영재창의연구(R&E)지원센터

청소년 과학창의연구

창간호 Vol. 1. No. 1

THE JOURNAL OF YOUTHS IN SCIENTIFIC RESEARCH



2015년 한국 MERS 확산에 대한 수학적 모델링(Mathematical Modeling of the Spread of MERS in Korea in 2015)

김민우(Kim Minwoo)·김화연(Kim Hwayeon)·안준호(Ahn Junho)·최윤석(Choi Yunseok) – 한국과학기술원(KAIST) 부설 한국과학영재학교

수학적 모형에 의한 지하철 운행의 개선 방안에 대한 연구(A Note on Improvement Plan of Subway Operation by Mathematical Modeling)

임수철(Lim Soocheol)·곽승신(Gwak Seungshin)·장우석(Jang Woooseok)·정효진(Jung Hyojin)·오지훈(Mo Jihun) – 인천천신과학고등학교

일반화된 칩가래게임의 필승전략에 관한 연구(A Study on Winning Strategies of Generalized Chopsticks Game)

조한술(Cho Hanseul)·박윤원(Park Yunwon)·박종욱(Park Jonguk)·차준경(Cha Junkyeong)·김덕원(Kim Deokwon) – 인천과학고등학교

이산질병모델에 대한 인구 동력학적 성질 연구(A Study on the Dynamics of a Discrete SIR Model)

임재웅(Lim Jaewoong)·설채운(Seol Chaeun)·김성준(Kim Seongjun)·김규래(Kim Gyurae) – 경신과학고등학교

액체 금속을 이용한 열전쌍 온도계(Liquid Metal Thermocouple)

권호범(Kwon Hoonbeom)·강현구(Kang Hyungu)·김진우(Kim Jinwoo)·박준영(Park Junyoung) – 한성과학고등학교

비대칭축전기에서의 이온풍 가속 효과에 관한 탐구(Study on Wind Velocity Dependence Using Asymmetric Capacitor)

김재윤(Kim Jaeyun)·장연석(Jang Yeonsuk)·조용현(Jo Yonghan) – 광주과학고등학교

AgI-그래핀 나노복합체의 유기물 분해 광촉매 메커니즘 연구(Photocatalytic Organic Dye Degradation Mechanisms of AgI-Graphene Nanocomposite)

김성남(Kim Seongnam)·이아람(Lee Ahram)·김가현(Kim Gahyun)·채동현(Chae Donghyeon)·김성하(Kim Seongha) – 부산과학고등학교

수용액 상태에서 안정적인 마그네타이트 형성조건에 대한 연구(Study of Stable Magnetite Formation Condition in Aqueous System)

김준서(Kim Joonseo)·신정원(Shin Jungwon)·유원정(Yu Wonjeong)·장건희(Chang Gunho)·조혜자(Jo Hyeje) – 대전통신과학고등학교

외래식물 미국자리공의 도입이 수자상균군군 군집에 미치는 영향(Exotic Plant Invasion of *Phytolacca americana* Affects to Arbuscular Mycorrhizal Fungal Community)

전유진(Jeon Yujin)·임유정(Lim Yoojeong)·박우주(Park Wooju)·전상준(Jeon Sangjun) – 강원과학고등학교

곤충 사이브그 개발을 위한 절자리 날개 신경망 Mapping 및 근육운동 측정(Mapping Neural Networks and Measuring Muscular Movement of Dragonflies' Wings for Development of Insect-Cyborg Robot)

정석영(Jung Seokyeong)·이주은(Lee Jueun)·박하민(Park Hamin)·이정선(Lee Jeongseon)·홍용권(Hong Yongkwon) – 충남과학고등학교

대기 오염 물질이 구름입자 성장 과정에 미치는 영향 탐구(Study of Effects of Air Pollution on the Growth of Cloud Condensate)

임승현(Lim Seunghyeon)·윤가혜(Yun Gahui)·서주형(Seo Juhyeong)·이태동(Yi Taedong) – 대구일과학고등학교

교차로에서 원활한 차량 통행과 횡단보도에서 보행자의 대기 시간 단축을 위한 신호등 제어 시스템 연구(A Traffic Signal Control Systems to Ease Traffic Jams on Intersections and Shorten Pedestrians Waiting Time at Crosswalk)

류자석(Ryu Jiseok)·권혜진(Kwon Haejin)·정승연(Jung Seungyeon)·채정범(Chae Jeongbeom)·최원석(Choi Wonseok) – 인천과학고등학교

개인화된 부분 이미지를 활용한 새로운 홈처보기 방지 기법(A New Anti-Shoulder Surfing Method Using Personalized Sub-Image)

김기홍(Kim Kihong)·김창훈(Kim Changhun)·김상운(Kim Sangun)·안수영(An Suyeong)·이가은(Rhee Kaeun) – 부산과학고등학교

가변형 캠버 에어포일을 적용한 2-로터 사이클로콥터의 수치해석적 인자 연구(Numerical Parametric Study of Using Variable Camber Airfoil on a Twin-Rotor Cyclocopter)

조재경(Jo Jaeyoung)·이충우(Lee Chongwoo)·오건(Oh Keon)·김승수(Kim Seungsu) – 한국과학기술원(KAIST) 부설 한국과학영재학교

공기 매개 감염을 최소화 할 수 있는 에너지 절약형 교실 공조장치의 개발(Development of the Air Conditioning Equipment that Minimize Air-Borne Infection for the Energy-Saving Classrooms)

오진호(Oh Jinho)·이준호(Lee Junho)·이도호(Lee Doho)·백민혁(Baek Minhyeok)·양현우(Yang Hyunwoo) – 인천과학고등학교



미래창조과학부



한국과학창의재단



과학영재창의연구(R&E)지원센터

복권위원회



ISSN 2508-2345

청소년 과학창의연구

MARCH, 2017 | Vol. 2. No. 1 | THE JOURNAL OF YOUTHS IN SCIENTIFIC RESEARCH



청소년 과학창의연구

Vol. 2, No. 1
THE JOURNAL OF YOUTHS IN SCIENTIFIC RESEARCH



4차 뿔 방정식의 해에 관한 연구

On the Solutions of Quartic Pell's Equation

김민서(Minseo Kim) · 김락영(Rakyong Kim) · 김길현(Gilhyun Kim) · 이유진(Yoojin Lee) – 전북대학교등학교

최소 분모 문제의 해답에 관한 연구

A Study on the Answer to the Least Denominator Problem

김요한(Yohan Kim) · 김남태(Namtae Kim) · 정의성(Euisung Jung) · 홍창민(Changmin Hong) · 김현준(Hyunjun Gil) – 연천대학교등학교

유클리드 기하에서의 반전(inversion) 탐구 및 확장

Research and Development on Inversion in Euclidean Geometry

송주호(Juho Song) · 한형구(Hyunggu Han) · 김우진(Woojin Kim) · 강선미(Sunmee Kang) – 경기북대학교등학교

텅스텐 와이어의 전기화학적 식각을 이용한 원자현미경용 하이드로겔 캔틸레버 제작

Fabrication of Hydrogel Atomic Force Microscopy Cantilever using Tungsten Wire Electrochemical Etching Method

이경준(Kyeongjun Lee) · 원태우(Taewoo Won) · 유승민(Seungmin Yoo) · 최지웅(Jiwoong Choi) – 한성대학교등학교

야구배트의 sweet spot 위치를 결정하기 위한 효율적인 방안

Effective Method to Decide Position of Baseball Bat Sweet Spot

김동현(Donghyun Kim) · 심정운(Jungeun Shim) – 대전대학교등학교

광산란 기법을 이용한 구형과 비구형 입자계 현탁액의 건조 거동 비교 연구

Comparison of Drying Dynamics for Spherical and Non-spherical Particulate Suspensions via Light Scattering Method

한상혁(Sanghyeok Han) · 이승윤(Seungyun Lee) · 이승현(Seunghyeon Lee) · 차준우(Junwu Cha) – 한성대학교등학교

천연물에 대한 다공성 실리카 나노입자의 선택적 포집에 대한 연구

Study of Selective Adsorption of Natural Products Using Mesoporous Silica Nanoparticles

이지우(Jiwoo Lee) · 박조현(Johyun Park) · 임채현(Chaehyeon Lim) – 대전대학교등학교

천연물 자원으로부터 항암제 내성을 억제하는 물질의 탐색

Screening of an Inhibitor for Anticancer Resistance from Natural Products

김영서(Youngseo Kim) · 고대영(Daeyoung Gho) · 임혜영(Hyeoung Lim) – 창원대학교등학교

태양 추적 이동의 정량적 분석 방법 개발 및 자전 주기 추정을 통한 검증

Development of Sunspot Analysis Method and Verification using Solar Rotation

김치영(Chiyoung Kim) · 박규태(Gyulaa Park) · 안승민(Seungmin An) · 홍지영(Jiyoung Hong) – 부산대학교등학교

원격 천문대 망원경을 이용한 토성 위성의 관측과 토성의 질량 측정

The Observation of Saturn's Satellites and Measuring of Saturn's Mass by using Remote Observatory

박혜빈(Hyebin Park) · 김규리(Gyuri Kim) · 안종윤(Jongyoon An) · 장윤애(Yuna Jang) – 경북대학교등학교

Receding Horizon Next-Best-View 계획법 기반의 보로노이 편향 3차원 군집 로봇 탐사 알고리즘

Receding Horizon Next-Best-View Planner Based Voronoi-Biased 3D Multi-Robot Exploration Algorithm

이재호(Jaeho Lee) · 이재주(Chaeju Lee) · 정우창(Woochang Jeong) – KAIST 부설 한국과학영재학교

인공신경망을 활용한 위험 상황 전달 방식에 관한 연구

Research of Dangerous Situation Delivery Way by Artificial Neural Network

김성환(Sunghwan Kim) · 김한주(Hanjo Kim) · 방선웅(Sunwoong Bang) · 성학민(Rakbin Sung) · 신재현(Jaehyun Shin) – 인천대학교등학교

우렁이 폐기물을 이용한 친환경 농축산 자재 제조 및 효능에 대한 연구

A Study on the Effectiveness and Use of Freshwater Snail Waste in the Production of Agricultural Materials

장수연(Suyeon Jang) · 안동준(Dongjun Ahn) · 최연수(Yeonsoo Choi) – 창원대학교등학교

음성 재배 커피 생두의 품질분석을 통한 국내재배 가능성 연구

A Study on the Possibility of Domestic Cultivation by Analyzing the Quality of Coffee Bean Cultivated in Eumseong

박지현(Jihyun Park) · 강찬희(Charhee Kang) · 권도원(Dowon Kwak) – 충북대학교등학교



미래창조과학부



한국과학창의재단



과학영재창의연구(R&E)지원센터

북권위원회



ISSN 2508-2345

청소년 과학창의연구

JANUARY, 2018 | Vol. 3. No. 1 | THE JOURNAL OF YOUTHS IN SCIENTIFIC RESEARCH



청소년 과학창의연구

Vol. 3. No. 1

THE JOURNAL OF YOUTHS IN SCIENTIFIC RESEARCH



사진을 통한 인원수 추정에 관한 연구

A Study on the Estimation of the Number of People through Photographs

임준혁(Junhyeok Lim) · 이경재(Kyungjae Lee) · 조동욱(Dongwook Cho) · 자승현(Seunghun Jee) 인천과학고등학교

n=7, 13, 19, 37일 때의 정n각형의 종이접기 지도법 규명

Identification of the Way to Fold Regular n-gons When n=7, 13, 19, and 37

이동우(Dongwoo Lee) · 김민규(Mingyu Kim) · 박상준(Sangjun Park) · 전성민(Sungmin Jun) 대전과학고등학교

전주시 시내버스의 문제점 및 개선 방안 연구

A Research about Problems and Improvement of Bus Network in Jeonju

곽동현(Donghyeon Gwak) · 조민세(Minseo Jo) · 박동민(Dongmin Park) 전북과학고등학교

상호지대(Reciprocal Frame) 구조의 특성 및 다른 건축물 구조와의 비교를 통한 안정성 연구

Study on the Characteristics and the Stability of Reciprocal Frame Architectures with Different Building Architectures

김민지(Minji Kim) · 김지훈(Jihoon Kang) · 김성현(Sunghyun Kim) · 이동우(Dongwoo Lee) · 정기현(Gihyeon Jeong) 인천과학고등학교

장애인과 노약자를 위한 중력보상 보조장치 연구

Study on a Gravitational Compensation Device for the Disabled and the Elderly

박경수(Kyungsoo Park) · 정건희(Geunhee Jang) · 조민석(Minsuk Cho) · 신효섭(Hyosup Shin) 세종과학예술영재학교

광 베네시안 블라인드를 이용한 교실 내 조명환경 개선 연구 : 실측과 시뮬레이션을 통하여

A Study on Improvement of Lighting Environment in Classroom using Daylight Venetian Blind

김우재(Woojae Kim) · 이석준(Sukjun Lee) · 박기은(Kieun Park) · 김예준(Yejun Kim) 인천과학예술영재학교

알지네이트 비드를 이용한 음용수 제조 적정기술 키트의 개발

Development of Appropriate Technology Kit for Drinking Water using Alginate Bead

이승민(Seungmin Lee) · 김나현(Nahyun Kim) · 정유정(Yoojeong Jeong) · 신지원(Jiwon Shin) · 백지우(Jiwoo Bae) 인천진산과학고등학교

메조다공성 실리카 내에 가두어진 금 나노 촉매의 합성과 이를 이용한 일산화탄소 촉매 산화 반응

Synthesis of Gold Nanocatalysts Confined in Mesoporous Silica and Their Use in Catalytic Oxidation of Carbon Monoxide

서동희(Donghee Seo) · 강유현(Yuhyeon Kang) 세종과학예술영재학교

Neuropeptide 호르몬의 장내 미생물 활성에 미치는 영향

Impact of Neuropeptide Hormone on Biological Activity of Microflora

전다니엘(Daniel Jeon) · 서운세(Eunseo Seo) · 손영국(Myeonguk Son) · 김재현(Jehyeon Kim) 경산과학고등학교

미세조류와 세균과의 공생 관계 연구 및 이를 이용한 미세조류 성장 촉진

Studies on the Symbiotic Interaction Between Microalgae and Associated Bacteria Application for Algal Growth Enhancement

박재성(Jaesung Park) · 이상일(Sungil Lee) · 정예원(Yewon Jeong) · 강서영(Seoyoung Kang) 부산일과학고등학교

감자의 녹말 성분을 이용한 중금속 제거 모델 제작 및 적정기술 제안

Design of Heavy Metal Absorption Model and Appropriate Technology Proposal using Potato Starch

진영주(Hyungju Jin) · 이호진(Hojin Lee) 세종과학예술영재학교

밝은 구상성단의 질량 측정을 통한 항성계 진화과정 연구

Study on the Evolution of the Stellar System through the Estimation on the Mass of the Bright Globular Clusters

김현수(Hyeonsu Kim) · 김준홍(Junhong Kim) · 문성준(Seongjun Moon) · 허정원(Jeongwon Ha) · 김세민(Serin Kim) 대구일과학고등학교

거리측정 센서를 이용한 장애물 회피 군집 드론 알고리즘 개발

Developing Algorithm for Collision Avoidance Swarm Drone using Distance Measuring Sensors

김준혁(Junhyeok Kim) · 문석환(Seokhwan Moon) · 최자웅(Jiung Choi) 과학영재학교 광주과학고등학교

탑과 가람의 비례분석을 통한 고대 사찰 복원에 대한 연구

A Study on Restoration of Ancient Buddhist Temples Through Proportion Analyses of Stupa and Temple Arrangement

김희선(Heesun Kim) · 윤예슬(Yeseul Yoon) · 황지은(Jiyeon Hwang) 창원과학고등학교

편집위원회

편집위원장	최호성 (경남대학교 교육학과) (한국과학창의재단 지정 과학영재 창의연구(R&E) 지원센터장)
수학분과	방승진 (아주대학교 수학과)
물리분과	안창림 (이화여자대학교 물리학과)
화학분과	방윤수 (광주과학기술원 화학과)
생물분과	김선정 (동국대학교 생명과학과)
지구과학분과	윤마병 (전주대학교 과학교육과)
정보분과	김명수 (서울대학교 컴퓨터공학부)
융합·공학분과	박형동 (서울대학교 에너지자원공학과)

청소년 과학창의연구

Vol. 4, No. 1

THE JOURNAL OF YOUTHS IN SCIENTIFIC RESEARCH

발행일	2019년 1월 31일
발행인	안성진(한국과학창의재단 이사장)
편집인	최호성(과학영재 창의연구(R&E) 지원센터장)
발행처	한국과학창의재단 서울특별시 강남구 선릉로 602 02-555-0701
디자인/인쇄	일성프린팅 경남 창원시 마산합포구 천하장사로 9 055-243-6788

이 학술지의 내용 전부 또는 일부를 무단으로 복제할 수 없습니다.

