

청소년 과학창의연구

JANUARY, 2018 | Vol.3. No.1 | THE JOURNAL OF YOUTHS IN SCIENTIFIC RESEARCH



사사 (Acknowledgment)



과학기술정보통신부



한국과학창의재단
Korea Foundation for the Advancement of Science & Creativity

“이 학술지는 2017년도 과학기술진흥기금(과학기술정보통신부) 및 복권기금(기획재정부)의
재원으로 한국과학창의재단의 지원을 받아 수행된 성과물임”

“This work was supported by the Korean Foundation for the Advancement of Science and
Creativity(KOFAC) FY 2017 Grant funded by the Korean Government(MSIT & MOSF).”

09 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), 지승현(Seunghun Jee)
- 인천과학고등학교(Incheon Science High School)

지도교사 : 김동진(Dongjin Kim) - 인천과학고등학교
지도교수 : 함남우(Namwoo Ham) - 인천대학교 수학과

33 $n=7, 13, 19, 37$ 일 때의 정 n 각형의 종이접기 작도법 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(Daejeon Science High School)

지도교사 : 남정훈(Jeonghun Nam) - 대전과학고등학교
지도교수 : 정상조(Sangzoe Jeong) - 목원대학교 수학교육과

55 전주시 시내버스의 문제점 및 개선 방안 연구
A Research about Problems and Improvement of Bus Network in Jeonju

곽동현(Donghyeon Gwak), 조민서(Minseo Jo), 박동민(Dongmin Park)
- 전북과학고등학교(Jeonbuk Science High School)

지도교사 : 김형주(Hyoungju Kim) - 전북과학고등학교

77 상호지지(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), 강지훈(Jihoon Kang), 김성현(Sunghyun Kim), 이동우(Dongwoo Lee), 정기현(Gihyeon Jeong)
- 인천과학고등학교(Incheon Science High School)

지도교사 : 노수호(Suho Rho) - 인천과학고등학교

103 **장애인과 노약자를 위한 중력보상 보조장치 연구** **Study on a Gravitational Compensation Device for the Disabled and the Elderly**

박경수(Kyungsoo Park), 장건희(Geunhee Jang), 조민석(Minsuk Cho), 신호섭(Hyosup Shin)
 - 세종과학예술영재학교(Sejong Academy of Science and Arts)

지도교사 : 김용순(Yongsoon Kim) - 세종과학예술영재학교

127 **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(Incheon Academy of Science and Arts)

지도교사 : 조대기(Daeki Cho) - 인천과학예술영재학교

지도교수 : 공효주(Hyoju Kong) - 한국조명연구원

151 **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), 배지우(Jiwoo Bae)
 - 인천진산과학고등학교(Incheon Jinsan science High School)

지도교사 : 박인숙(Insuk Park) - 인천진산과학고등학교

177 **메조다공성 실리카 내에 가두어진 금 나노 촉매의 합성과 이를 이용한 일산화탄소 촉매 산화반응** **Synthesis of Gold Nanocatalysts Confined in Mesoporous Silica and their use in Catalytic Oxidation of Carbon Monoxide**

서동희(Donghee Seo), 강유현(Yuhyeon Kang)
 - 세종과학예술영재학교(Sejong Academy of Science and Arts)

지도교사 : 성수미(Sumi Seong) - 세종과학예술영재학교

지도교수 : 강신현(Shinhyun Kang) - 전북대학교 양자시스템공학과

195 Neuropeptide 호르몬의 장내 미생물 활성화에 미치는 영향
Impact of Neuropeptide Hormone on Biological Activity of Microflora

전다니엘(Daniel Jeon), 서은서(Eunseo Seo), 손명국(Myeongguk Son), 김제현(Jehyeon Kim)
- 경산과학고등학교(Gyeongsan Science High School)

지도교사 : 유동욱(Donguk Yoo) - 경산과학고등학교
지도교수 : 조정아(Jungah Cho) - 대구경북과학기술원

223 미세조류와 세균과의 공생 관계 연구 및 이를 이용한 미세조류 생장 촉진
Studies on the Symbiotic Interaction Between Microalgae and Associated Bacteria Application for Algal Growth Enhancement

박재성(Jaesung Park), 이성일(Sungil Lee), 정예원(Yewon Jeong), 강서영(Seoyoung Kang)
- 부산일과학고등학교(Busan Il Science High School)

지도교사 : 노보미(Bomi Noh) - 부산일과학고등학교
지도교수 : 최태진(Taejin Choi) - 부경대학교 미생물학과
지도조교 : 김수현(Suhyun Kim) - 부경대학교

237 감자의 녹말 성분을 이용한 중금속 제거 모델 제작 및 적정기술 제안
Design of Heavy Metal Absorption Model and Appropriate Technology Proposal using Potato Starch

진형주(Hyungju Jin), 이호진(Hojin Lee)
- 세종과학예술영재학교(Sejong Academy of Science of Art)

지도교사 : 성수미(Sumi Seong) - 세종과학예술영재학교
지도교수 : 박찬우(Charwoo Park) - 전자통신연구원(ETRI)

249 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), 하정원(Jeongwon Ha), 김세린(Serin Kim)
- 대구일과학고등학교(Daegu Il Science High School)

지도교사 : 정창렬(Changryul Jung) - 대구일과학고등학교
지도교수 : 심현진(Hyunjin Shim) - 경북대학교 지구과학교육과
지도조교 : 손표원(Pyowon Son) - 경북대학교 지구과학교육과

263 거리측정 센서를 이용한 장애물 회피 군집 드론 알고리즘 개발 Developing Algorithm for Collision Avoidance Swarm Drone using Distance Measuring Sensors

문석환(Seokhwan Moon), 김준혁(Junhyeok Kim), 최지웅(Jiung Choi)
- 과학영재학교 광주과학고등학교(Gwangju Science Academy For the Gifted)

지도교사 : 김영주(Youngju Kim) - 광주과학고등학교
지도교수 : 이흥노(Heungno Lee) - 광주과학기술원 전기전자컴퓨터공학부
지도조교 : 한현준(Hyunjun Han) - 광주과학기술원 전기전자컴퓨터공학부
지도조교 : 이승찬(Seungchan Lee) - 광주과학기술원 전기전자컴퓨터공학부

281 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), 황지윤(Jiyun Hwang)
- 창원과학고등학교(Changwon Science High School)

지도교사 : 김문섭(Moonsub Kim) - 창원과학고등학교

사진을 통한 인원수 추정에 관한 연구

임준혁 · 이경재 · 조동욱 · 지승헌 - 인천과학고등학교

A Study on the Estimation of the Number of People through Photographs

Junhyeok Lim · Kyungjae Lee · Dongwook Cho · Seunghun Jee - Incheon Science High School

국문초록

대규모 인원이 참가하는 행사가 끝나면 참가 인원수가 집계되어 발표된다. 하지만 같은 행사임에도 불구하고 인원수가 많게는 5배까지 차이가 나는 경우가 있다. 따라서 본 연구에서는 좀 더 정확한 인원수를 추정하기 위해 사진 속의 사람들의 수를 통해 추정하는 방법을 수학적으로 고안하였다. 사진을 찍는 시간을 최대 인원이 모이는 시각을 선정하였다. 또한, 사진 속의 면적은 실제와 다르게 원근이 나타나므로 소실점이 발생하고 이를 이용하여 사진 속의 넓이의 비를 실제 넓이의 비로 보정하고자 하였다. 마지막으로 사진 속의 넓이를 일정하게 분할하여 각 구간의 인구수를 정리하여 통계적으로 인원수를 추정하였다.

중심어 : 인원수 추정, 사진, 최대 인원이 모이는 시각, 소실점, 인구 밀도

ABSTRACT

In the completion of a big festival that involves many people, the number of participants will be announced. There could be up to 5 times differences in estimation. Therefore in this study, we designed a mathematical method for estimating the number of people in the event more precisely through photographs. We selected the time when people are mostly gathered. In addition, we noticed that the area in the photograph is different from the actual area(festival) and the unseeable areas of vanishing points can be appeared. To amend this error, we considered the ratio of the area in the photograph to the actual festival area. Finally, we divided the area in the photograph that have same actual area and organized the population of each section to estimate the number of people statistically.

Key words : Estimation of the number of people, Maximum population time, Vanishing point, Population density

I. 서론

1. 연구 동기

2016년 가을 <지난 주말 해운대에 40만 피서 인파? ...또 뺑뺑이 집계 논란>이라는 기사를 봤다[1]. 또한, 평소에도 벚꽃축제나 행사장 참가 인원수가 집계하는 곳마다 다르다는 뉴스를 보았던 기억이 있다. 그리고 얼마 후 촛불집회에서 경찰과 주최 측의 인원수 집계를 두고 큰 논란이 일어났다. 인원수 집계 논란을 빚는 것을 본 우리는 인원 수 집계 정확해야 한다는 것에 필요성과 인원수 집계에 대하여 호기심을 가지게 되었다. 그래서 인원수 집계에 관한 자료를 찾아보던 중 페르미 법에 대해 알게 되었다. 현재 인원수를 집계할 때는 페르미 법을 가장 많이 사용하는데 모든 장소에 페르미 법을 적용하기에는 시간, 범위, 밀도에 따라 큰 오차가 발생할 수 있었다. 이러한 인원수 집계 방법에 더욱 흥미를 가지고 인터넷, 논문 등에서 찾아보았지만 명확한 답을 제시한 것은 없었고, 우리는 이를 연구 주제로 정하고 다양한 방법을 찾아보고자 하였다.

2. 연구 목표

이번 연구에서 우리는 사진을 통한 인원수 추정을 하고자 한다. 우리는 다음과 같은 연구 목표를 세워 기존의 인원수 추정방식을 보완하도록 한다.

가. 최대 인원이 모이는 시간에 대해 알아본다.

먼저 앞선 인원수 추정에서 가장 논란이 되던 것은 바로 행사에 온 총 인원수를 추정하거나 또는 한 시점에 서의 최대 인원수를 추정하는 것이다. 서울시립대의 박인규 교수님은 한 시점의 최대 인원을 추정하였고 원병목 교수님은 유동인구를 고려하여 총 인원수를 추정하였다[3]. 우리는 사진만을 가지고는 유동인구를 고려하기 어렵다고 판단하여 최대인원이 모이는 시간에 대해서 알아보고 또 그 시간의 인원과 총 인원 사이의 관계를 알아보고자 한다.

나. 사영기하를 도입하여 3차원에 2차원으로의 변화를 일반화 시킨다.

사진은 3차원의 공간이 2차원 상으로 투영된 것이다. 구역을 설정하고 표본을 추출하는 과정에서 우리는 구역의 넓이가 같게 표본을 추출하고자 한다. 이를 위해서 소실점, 그리고 근사를 이용할 것이다.

다. 시간, 구역, 밀도 3가지 변수에 초점을 맞춰 인원수 집계 모델을 만든다.

우리의 궁극적인 목표는 시간, 구역, 밀도를 고려한 새로운 인원수 집계 모델을 만드는 것이다. 먼저 시간은 최대인원이 모이는 시간에 대한 실험을 통해서 몇 가지 유형의 집단이 가지는 특징에 대해 알아볼 것이다. 둘째로 구역은 사영기하를 도입해서 사진을 실제 넓이가 같게 자르는 방법을 알아낼 것이다. 마지막으로 밀도는 실제로 사람과 유사한 분포를 가질 것으로 예측되는 쌀을 무질서하게 뿌리는 실험을 통해 표본 추출방법을 완성하고자 한다.

II. 선행연구 분석 및 이론적 배경

1. 선행연구 분석

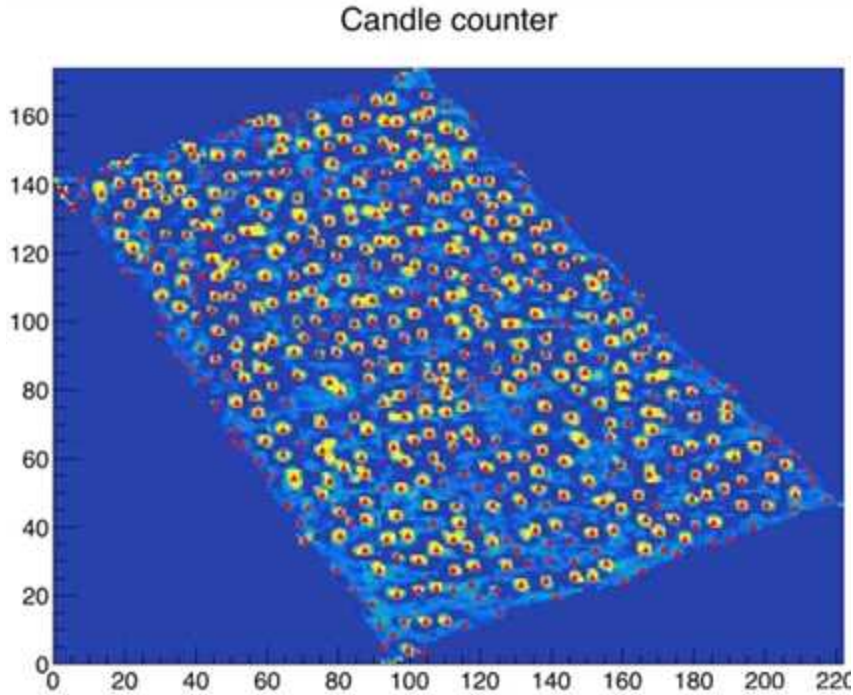
가. 페르미법

현재 대부분의 인원수 추정은 페르미법을 따른다. 페르미법은 일정 조건안의 구하고자 하는 값을 구하고 그것을 전체로 일반화 하여 전체를 예상하는 방법이다. 페르미법을 통해서 구한 근사 값에는 정답이 없다. 어떤 경우에는 특정한 근사법이 더 효과적이고 다른 경우에는 다른 근사법이 더 효과적일 수 있다. 촛불집회의 경우에는 경찰 측은 2가지 순서로 집회 인원을 구했는데 먼저, 공간에 사람이 밀집하여 서 있을 때 1평(3.3m²)당 9~10명의 사람이 들어간다고 하는 것을 정하였다. 그다음, 그 값을 사진을 찍고 구역을 면적을 구한다. 이 둘을 곱하여서 전체 인원수를 추정한다[6]. 하지만 이런 페르미법은 모든 것이 가정에서 부터 시작했기 때문에 가정이 달라지면 결과 크게 달라질 수 있다[2]. 우리는 이 가정을 더욱 근거 있게 만들고 한다.

나. 특수한 프로그램을 통한 추정(박인규 교수님의 CandleCounter.C)[3]

서울시립대 박인규 교수님은 촛불을 든 사람의 수를 세는 CandleCounter C 라는 프로그램을 제작하여 촛불 수를 세었다[3]. 흔들리거나 사람에게 가린 촛불은 세지 못한 것과 거울에 비친 것까지 세진 것을 고려하여 약 총

촛불의 수가 1만 8천 명 정도의 결과를 내렸다. 그 후 촛불을 든 사람과 안든 사람의 비율이 1:1 ~ 1:2 정도는 것을 가정하여 전체인원을 약 3만 6천명에서 5만 4천명이라 추정하였다. 마지막으로 사진의 면적이 10,000 평방미터(m^2) 이고, 집회가 있던 전체 면적 150,000평방미터(m^2) 이므로 총 집회 참가 인원을 50만 ~ 70만 정도로 추정하였다.



[Fig. 1] Picture of program 'candlecounter' by professor Park In Kue

박인규 교수님의 실험에서 우리는 몇 가지 의문이 생겼다. 첫 번째 의문은 촛불을 든 사람과 촛불을 들지 않은 사람의 비율이 1:1 ~ 1:2 라는 것에 대한 논리적인 근거가 무엇일까에 대한 것이었다. 또한, 촛불 수를 1:1 ~ 1:2로 가정한다면 인원수의 범위가 너무 커지게 되는 문제가 생겼다. 두 번째 의문은 사진의 면적이 10,000평방미터라는 것을 어떻게 알 수 있는지 궁금하였다. 사진 속에서 구역은 실제로 직사각형이라 하더라도 찌그러져 그림과 같은 사각형이 된다. 이에 따라 사진의 넓이에도 큰 변화가 생기게 된다. 우리는 어떻게 하면 사진을 보고 실제 넓이를 알아내는지 궁금하였다.

2. 이론적 배경

가. 대수의 법칙

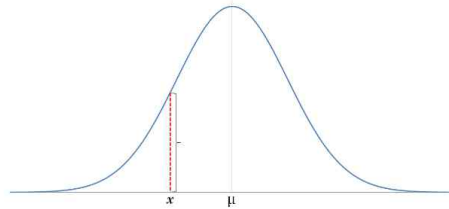
대수의 법칙에는 강법칙과 약법칙이있다[4-5]. 대수의 약법칙은 실험을 많이하면 실험값이 이론값으로 수렴한다는 법칙이며, 대수의 강법칙은 표본평균이 모평균으로 수렴함을 나타낸다. 이는 체비셰프의 부등식인

$P(|X - \mu| \geq \epsilon) \leq \left(\frac{\sigma}{\epsilon}\right)^2$ 로 증명가능하다. (ϵ 는 임의의 양수, μ 는 모평균) 이 식을 표본평균에 대해 적용시키면

$P(|\bar{x} - \mu| < \epsilon) \leq \frac{\sigma^2}{n\epsilon^2}$ 이 성립한다. (표본평균의 표준편차는 모집단의 표준편차를 표본수의 제곱근으로 나눈 값이다.)

이의 여사건을 생각해 보면 $1 - P(|\bar{x} - \mu| < \varepsilon) \geq 1 - \frac{\sigma^2}{ne^2}$ 이 성립하며, 이는 곧 n 이 커지면 표본평균과 모평균의 차의 절댓값이 어떠한 양수보다 작아짐을 알 수 있다.

나. 정규분포



[Fig. 2] Gaussian distribution curve

정규분포는 16세기에 드 무아브르 (1667~1754)가 이항확률분포의 근사값을 계산하기 위하여 발견한 식이다 [4-5]. 좌우대칭인 종 형태의 곡선 모양을 가지며, 표준편차인 σ 가 커질수록 넓게 퍼지는 모양을 갖게된다. 곡선 아래의 면적은 1이고, 평균=중앙값=최빈값이라는 특징을 갖는다. 정규분포 밀도함수는

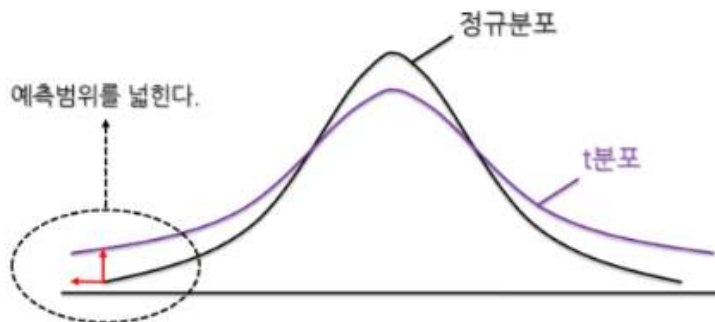
$$f(X) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{X-\mu}{\sigma}\right)^2}, \quad (-\infty < X < \infty, \mu: \text{모집단 평균}, \sigma: \text{모집단 표준편차})$$

로 나타난다. 모집단이 정규분포를 띠는 경우 이를 정규모집단이라고 한다.

다. 중심극한정리

x_1, x_2, \dots, x_n 이 독립동일분포를 갖는 확률표본일 때, n 이 커짐에 따라 표본평균은 모평균이 μ 이고, 표준편차는 $\frac{\sigma}{\sqrt{n}}$ 으로 수렴한다는 정리이다[4-5].

라. t분포



[Fig. 3] t distribution curve

t 분포는 연속확률분포이면서 표본분포로, 정규분포와 매우 비슷한 분포이다[4-5]. 보통 평균에 데이터가 많이 몰리고, 상대적으로 평균에서 멀어질수록 분포가 감소하기 때문에 정규분포가 많이 사용된다. 하지만 정규분포에는

문제점이 있는데 데이터의 수가 많아야 신뢰도가 올라간다는 점이다. 중심극한정리에 따라 표본이 30개 이상이면 정규분포로 근사시켜서 해결할 수 있으나 이를 만족하지 못할 경우 해결책으로 t 분포가 사용된다.

t 분포는 정규분포보다 예측범위가 넓다. 평균이 μ 이고, 분산이 σ^2 인 정규분포에서 추출한 표본 x_1, x_2, \dots, x_n 에 대해 표본분산을 S^2 이라 할 때, $T = \frac{\bar{X} - \mu}{\frac{S}{\sqrt{n}}}$ 은 자유도가 $(n-1)$ 인 t 분포를 따른다. 이 때, 자유도 df(degree of freedom)은 표준오차를 계산하는 데 사용된 정보의 양을 뜻한다. t 분포에서 모평균의 95% 신뢰구간은 $\mu = \bar{X} \pm t_{0.025} \frac{s}{\sqrt{n}}$ 으로 계산할 수 있다. $t_{0.025}$ 는 아래 t 분포표를 통해 찾을 수 있다.

TABLE of CRITICAL VALUES for STUDENT'S t DISTRIBUTIONS											
Column headings denote probabilities (α) above tabulated values.											
d.f.	0.40	0.25	0.10	0.05	0.04	0.025	0.02	0.01	0.005	0.0025	0.001
1	0.325	1.000	3.078	6.314	7.916	12.706	15.894	31.821	63.656	127.321	318.289
2	0.289	0.816	1.886	2.920	3.320	4.303	4.849	6.965	9.925	14.089	22.328
3	0.277	0.765	1.638	2.353	2.605	3.182	3.482	4.541	5.841	7.453	10.214
4	0.271	0.741	1.533	2.132	2.333	2.776	2.999	3.747	4.604	5.598	7.173
5	0.267	0.727	1.476	2.015	2.191	2.571	2.757	3.365	4.032	4.773	5.894
6	0.265	0.718	1.440	1.943	2.104	2.447	2.612	3.143	3.707	4.317	5.208
7	0.263	0.711	1.415	1.895	2.046	2.365	2.517	2.998	3.499	4.029	4.785
8	0.262	0.706	1.397	1.860	2.004	2.306	2.449	2.896	3.355	3.833	4.501
9	0.261	0.703	1.383	1.833	1.973	2.262	2.398	2.821	3.250	3.690	4.297
10	0.260	0.700	1.372	1.812	1.948	2.228	2.359	2.764	3.169	3.581	4.144
11	0.260	0.697	1.363	1.796	1.928	2.201	2.328	2.718	3.106	3.497	4.025
12	0.259	0.695	1.356	1.782	1.912	2.179	2.303	2.681	3.055	3.428	3.930
13	0.259	0.694	1.350	1.771	1.899	2.160	2.282	2.650	3.012	3.372	3.852
14	0.258	0.692	1.345	1.761	1.887	2.145	2.264	2.624	2.977	3.326	3.787
15	0.258	0.691	1.341	1.753	1.878	2.131	2.249	2.602	2.947	3.286	3.733
16	0.258	0.690	1.337	1.746	1.869	2.120	2.235	2.583	2.921	3.252	3.686
17	0.257	0.689	1.333	1.740	1.862	2.110	2.224	2.567	2.898	3.222	3.646
18	0.257	0.688	1.330	1.734	1.855	2.101	2.214	2.552	2.878	3.197	3.610
19	0.257	0.688	1.328	1.729	1.850	2.093	2.205	2.539	2.861	3.174	3.579
20	0.257	0.687	1.325	1.725	1.844	2.086	2.197	2.528	2.845	3.153	3.552
21	0.257	0.686	1.323	1.721	1.840	2.080	2.189	2.518	2.831	3.135	3.527
22	0.256	0.686	1.321	1.717	1.835	2.074	2.183	2.508	2.819	3.119	3.505
23	0.256	0.685	1.319	1.714	1.832	2.069	2.177	2.500	2.807	3.104	3.485
24	0.256	0.685	1.318	1.711	1.828	2.064	2.172	2.492	2.797	3.091	3.467
25	0.256	0.684	1.316	1.708	1.825	2.060	2.167	2.485	2.787	3.078	3.450
26	0.256	0.684	1.315	1.706	1.822	2.056	2.162	2.479	2.779	3.067	3.435
27	0.256	0.684	1.314	1.703	1.819	2.052	2.158	2.473	2.771	3.057	3.421
28	0.256	0.683	1.313	1.701	1.817	2.048	2.154	2.467	2.763	3.047	3.408
29	0.256	0.683	1.311	1.699	1.814	2.045	2.150	2.462	2.756	3.038	3.396
30	0.256	0.683	1.310	1.697	1.812	2.042	2.147	2.457	2.750	3.030	3.385
31	0.256	0.682	1.309	1.696	1.810	2.040	2.144	2.453	2.744	3.022	3.375
32	0.255	0.682	1.309	1.694	1.808	2.037	2.141	2.449	2.738	3.015	3.365
33	0.255	0.682	1.308	1.692	1.806	2.035	2.138	2.445	2.733	3.008	3.356
34	0.255	0.682	1.307	1.691	1.805	2.032	2.136	2.441	2.728	3.002	3.348
35	0.255	0.682	1.306	1.690	1.803	2.030	2.133	2.438	2.724	2.996	3.340
36	0.255	0.681	1.306	1.688	1.802	2.028	2.131	2.434	2.719	2.990	3.333
37	0.255	0.681	1.305	1.687	1.800	2.026	2.129	2.431	2.715	2.985	3.326
38	0.255	0.681	1.304	1.686	1.799	2.024	2.127	2.429	2.712	2.980	3.319
39	0.255	0.681	1.304	1.685	1.798	2.023	2.125	2.426	2.708	2.976	3.313
40	0.255	0.681	1.303	1.684	1.796	2.021	2.123	2.423	2.704	2.971	3.307
60	0.254	0.679	1.296	1.671	1.781	2.000	2.099	2.390	2.660	2.915	3.232
80	0.254	0.678	1.292	1.664	1.773	1.990	2.088	2.374	2.639	2.887	3.195
100	0.254	0.677	1.290	1.660	1.769	1.984	2.081	2.364	2.626	2.871	3.174
120	0.254	0.677	1.289	1.658	1.766	1.980	2.076	2.358	2.617	2.860	3.160
140	0.254	0.676	1.288	1.656	1.763	1.977	2.073	2.353	2.611	2.852	3.149
160	0.254	0.676	1.287	1.654	1.762	1.975	2.071	2.350	2.607	2.847	3.142
180	0.254	0.676	1.286	1.653	1.761	1.973	2.069	2.347	2.603	2.842	3.136
200	0.254	0.676	1.286	1.653	1.760	1.972	2.067	2.345	2.601	2.838	3.131
250	0.254	0.675	1.285	1.651	1.758	1.969	2.065	2.341	2.596	2.832	3.123
inf	0.253	0.674	1.282	1.645	1.751	1.960	2.054	2.326	2.576	2.807	3.090

[Fig. 4] Critical values for student's t distributions

마. 카메라 좌표계 (Camera Coordinate System)

카메라 좌표계는 카메라가 기준이 되는 3차원 좌표계이다. 카메라의 광학축(렌즈가 향해있는 방향)을 Z축으로 하고 X축은 사진을 찍는 사람을 기준으로 우측 방향, Y축은 사진을 찍는 사람 기준으로 아래쪽 방향으로 설정한다. 이때 카메라 좌표계의 단위는 월드 좌표계와 동일한 것을 사용한다.

3. 연구방향

행사가 시작하고 끝날 때까지 인구는 변화하기 때문에 우리는 인원수가 최대가 되는 시각을 찾아 그때의 사진을 찍거나 구한다. 그 이후 사진을 동일한 넓이로 쪼개어 각각의 영역에 존재하는 사람들의 수를 추정한다.

가. 최대인구가 모이는 시각

행사가 시작하고 끝나는 시각이 정해져 있을 때 사람이 최대가 되는 시각은 분명 시작과 끝 사이에 있을 것이다. 우리는 특수한 한 가지 경우에서 연구를 진행할 것이다.

나. 소실점의 활용

행사장에서는 사진의 규모가 크므로 멀어지게 되면 한 점으로 수렴하게 되는 소실점이 발생한다. 우리는 이 소실점을 이용하여 거리와 각도, 크기와의 관계를 탐구할 것이다.

다. 사진 속 넓이

공정한 표본 추출을 위해서는 공간의 넓이를 같게 표본을 추출해야 한다. 하지만 사진에서의 공간은 넓이가 같아도 실제 넓이는 다르게 된다. 가까이 있는 물체는 크게 보이고 멀리 있는 물체는 작게 보인다. 우리는 이를 소실점을 통해 보완하여 실제 넓이가 같게 자르고 또 자른 구역의 넓이를 측정할 식을 만들어 낼 것이다.

라. 인구의 밀도와 분포

1) 쌀 실험

우리는 인구의 분포에 대해 알아보기 전에 하나의 가정을 세웠다. 우리는 인구의 밀도와 분포를 고려하기 위해 쌀을 사용할 것이다. 이에 대한 근거는 다음을 따른다. 첫째로 쌀은 부피가 있어 일정 범위 내에 들어갈 수 있는 개수의 한계가 존재하며 이는 사람과 동일하다. 둘째로 쌀의 불규칙한 모양은 어디로 튈지 예상할 수 없게 한다. 따라서 쌀을 뿌렸을 때에는 한곳에 몰리지 않고 무작위로 퍼지게 된다. 이러한 쌀의 특성과 분포는 인구와 비슷한 형태를 가질 것이라 예상하여 쌀을 뿌려봄으로써 인구의 분포를 간접적으로 관찰하였다.

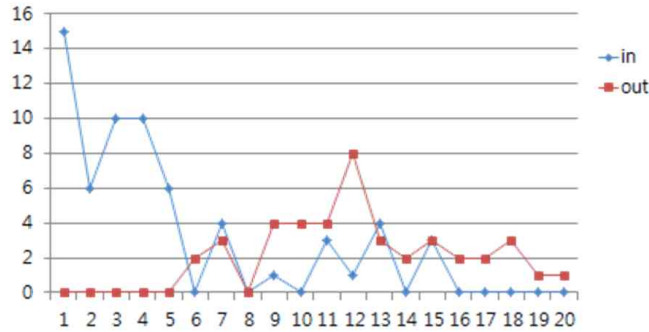
2) 난수 생성 프로그램(python)

쌀은 결국 사람이 던져 그 분포를 파악하는 것이다. 계속 던지다 보면 어느 곳으로 몰릴 가능성이 존재하기 때문에 완벽한 무작위를 만들어낸다고 할 수 없다. 또한 쌀 실험은 너무 많은 양으로 실험하기에는 한계가 존재하므로 난수 생성 프로그램을 제작하였다. 난수를 생성하여 모든 구역에 들어갈 확률을 같게 하고, 부피를 고려하는 대신 일정 영역에 들어갈 수 있는 인원수의 최댓값에 제한을 두었다.

Ⅲ. 연구 내용

1. 최대인원이 모이는 시각

우리학교는 밤 9시부터 9시 20분까지 20분간 간식시간을 갖는다. 학생들은 이 시간 중 자유롭게 급식실을 출입하여 간식을 먹고 나갈 수 있다. 우리는 간식시간 동안의 급식실에 출입하는 학생들을 매 분마다 계수하여 그래프로 나타내었다.



[Fig. 5] Number of students in cafeteria

우리는 5월에서 7월까지 무작위로 6번의 실험을 실시하였고 실시한 결과 평균적으로 5분과 6분 사이에서 최대인원이 된다는 사실을 알 수 있다. 이는 간식시간 20분 중 1/4 지점에 해당하는 부분이다.

2. 소실점의 활용

사진 속에서 영역을 일정하게 분할하기 위해서는 먼저 사진속의 넓이와 실제 넓이 사이의 관계를 알아내야 한다. 이를 위해서 우리는 사영기하학의 이론을 활용하고자 한다. 먼저 소실점에 대해서 알아보자. 우리는 사진 속에서의 영역을 분할하는 방법을 고안하기에 앞서 먼저 사진속의 영역이 가지는 기하학적 특징에 대하여 연구하였다. 선행 연구에 의하면 우리는 실제로 그림에 현실감을 높이기 위해서 원근법이라는 기법을 사용하는데, 원근법에서 가장 유용하게 사용되는 개념 중 하나가 바로 소실점이다. 소실점은 실제 사진 속에서도 존재하는데, 대부분의 촛불 집회 사진을 보면 소실점이 나타나는 것을 알 수 있다. 이런 소실점을 이용하여 영역을 일정하게 나누는 방법에 대하여 연구해 보았다. 먼저 소실점은 왜 생기는 것일까? 사진 속에서 소실점은 평행선을 무한히 먼 곳을 투영시킨 곳이라고 생각해도 된다. 또 소실점은 평행한 두 선분을 연장시켰을 때 생김을 알 수 있다. 또 소실선이라는 것도 존재하는데 소실선은 평면의 무한히 먼 곳을 투영시키면 생긴다. 그리고 이 평면 위에 존재하는 평행선의 극한인 소실선은 소실선 위에 존재하는 것을 알 수 있다. 우리는 소실점에 이러한 특징에 대해서 연구하면서 소실점의 위치가 카메라의 광학축과 관계가 있음을 알게 되었다.

가. 소실점의 위치

1) 실험목적

사진을 찍었을 때 평행하던 선들은 사진 상에서는 원근법에 의해 소실점이라는 하나의 점으로 수렴한다. 이 소실점의 위치와 카메라의 위치와의 연관성에 대하여 알아보려고 한다.

2) 실험방법

- 가) 서로 마주보고 있는 벽에 같은 높이를 표시한다.
- 나) 표시한 두 지점을 선으로 연결한다.
- 다) 조금 떨어진 곳에서 다시 양쪽 벽에 같은 높이를 표시하고 표시한 두 지점을 연결한다.
- 라) 이렇게 만들어진 두 개의 평행선과 카메라가 일직선이 놓인다면 사진 상에서는 두 개의 평행선이 하나의 선으로 보일 것이다. 이 선이 카메라의 위치이다.
- 마) 카메라 각도를 위, 아래로 변화시켜 사진을 찍어본다.
- 바) 앞뒤로 거리를 변화시켜가며 사진을 찍어본다.
- 사) 왼쪽, 오른쪽으로 이동하며 사진을 촬영한다.



[Fig. 6] Change of vanishing point according to upper and lower angle



[Fig. 7] Change of vanishing point by moving both sides

옆으로 이동하며 보는 각도를 다르게 하더라도, 소실점은 카메라와 테이프를 책상선과 평행하게 연결한 곳에 생긴다.



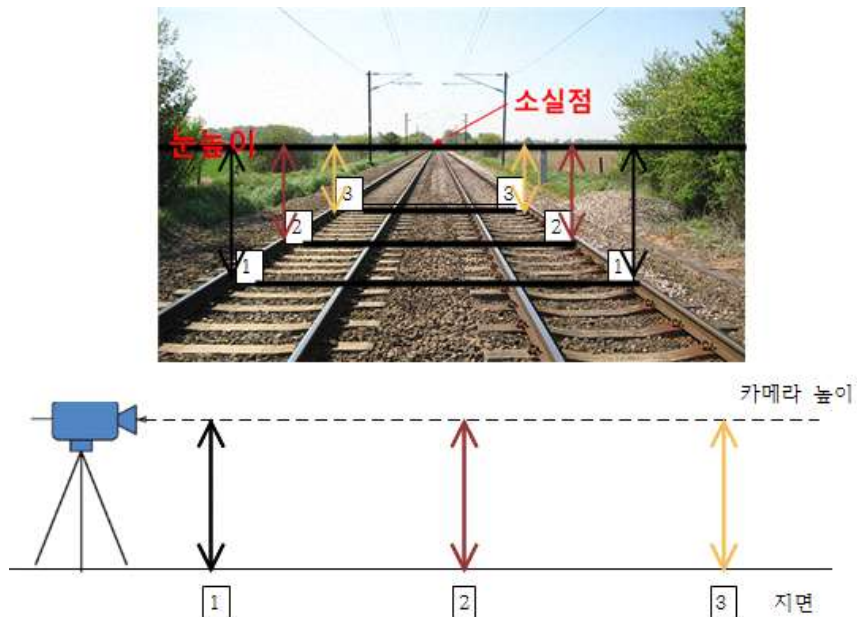
노란테이프로부터 10cm 떨어져 있을 때



노란테이프로부터 60cm 떨어져 있을 때

[Fig. 8] Change of vanishing point by forward and backward movement

앞, 뒤로 이동하더라도 카메라 높이가 같다면 소실점은 이동하지 않음을 알 수 있다.



[Fig. 9] Vanishing point in real photograph

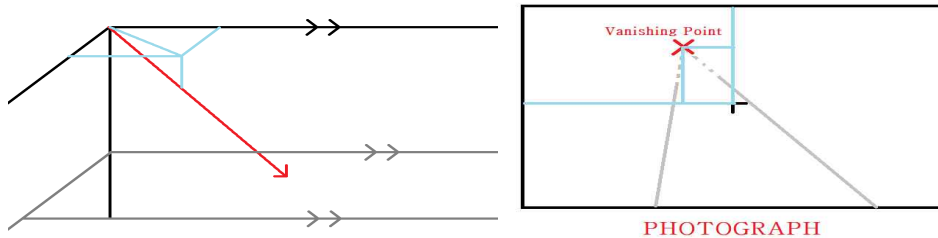
카메라의 시선을 어느 곳에 두어도 소실점은 항상 카메라 높이에 생김을 알 수 있었다.

이는 수학적으로 설명이 가능하다.

그림에서 1번 검정색 화살표와 2번 빨간색 화살표, 그리고 3번 노란색 화살표의 실제 길이는 같지만 카메라와 거리가 멀어질수록 사진 상에서는 짧게 나온다. 이는 카메라와의 거리에 따라 길이가 반비례하기 때문에 1에

서 3으로 갈수록 카메라의 높이를 나타내는 화살표의 길이가 줄어들기 때문이다. 따라서 거리가 무한히 멀어지면 지면과 눈높이선간의 간격은 0으로 수렴하고 소실점이 눈높이에 생기게 된다.

나. 소실점의 이용



[Fig. 10] Position relationship between vanishing point and optical axis

우리는 소실점을 이용해서 카메라가 지표면과 이루는 각도를 알 수 있다. 사진에서 소실점의 위치는 [Fig. 11]의 검은색 평행선 위치가 된다. 그 후 사진의 Vanishing Point를 원점으로 하고 사진의 중앙의 좌표를 (x, y) 로 두면 카메라의 광학축이 지표면과 얼마의 각도를 가지고 있는지 알 수 있다. 카메라와 지표면 사이의 각도 $\theta = \arctan \frac{y}{f}$ 가 된다. (이때 f 는 카메라의 초점거리이다. 그리고 광학축 상 회전은 무시한다.)

3. 사진 속 넓이와 실제 넓이 사이의 관계

가. 거리에 따른 길이변화

실험목적: 거리에 따른 길이변화는 단순히 거리에 반비례하다고 결론지을 수 없다. 또한 시야를 삼각형이 아닌 구면이라 생각하면 접근 방식이 달라질 것이며 각도에 따라 삼각함수 값과 연관이 있을 수도 있다.

1) 실험방법

- 가) 벽면에 청테이프를 수직, 수평으로 붙인다.
- 나) 벽면으로부터 거리를 측정하여 20cm 간격으로 표시한다.
- 다) 거리를 늘려가며 사진을 촬영하고, 사진 상에서 청테이프의 길이를 비교하여본다.

2) 실험결과



40cm에서 찍은 사진
사진상에서 6cm로 측정되었다.



80cm에서 찍은 사진
위와 같은 비율의 사진에서 3cm로 측정되었다.

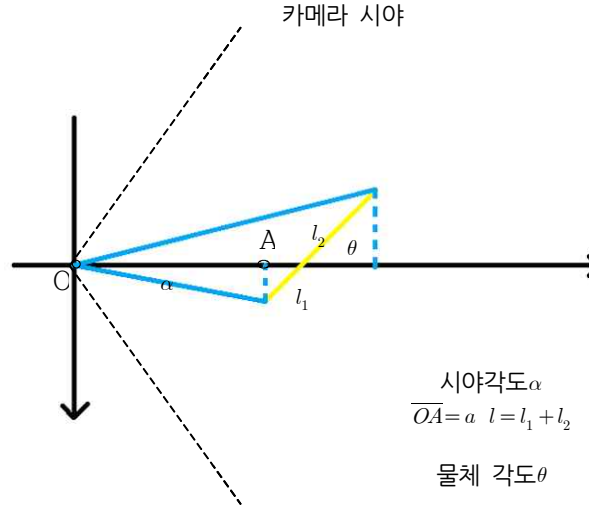


120cm에서 찍은 사진
위와 같은 비율의 사진에서 2cm로 측정되었다.

[Fig. 11] Relation between distance and length

청테이프의 길이는 카메라 거리에 따라 반비례하는 추세를 나타내었다. 이는 수학적으로 증명이 가능하다.

3) 수식적 증명



[Fig. 12] Size according to the distance of the tilted object

[Fig. 12]는 카메라의 광학축을 수평축으로 했을 때 길이의 변환에 관한 그림이다. 앞에서 소실점의 위치를 통해 카메라의 광학축과 지면이 이루는 각을 구할 때 f 를 사용하였는데, f 는 카메라에서 빛이 모이는 지점부터 상이 맺히는 거리이다. 즉 카메라의 광학축에 수직으로 f 만큼 떨어진 위치에 상이 투영되게 된다.

가) 면적이 광학축 위에 있는 경우

[Fig. 12]에서 실제 거리를 l 로 설정하고 l 중에서 카메라와 가까운 쪽부터 l 의 연장선이 카메라의 광학축과 만나는 지점까지의 거리를 l_1 이다. (단, 거리는 카메라에서 멀어지는 방향이 +이다) l_2 는 l 의 연장선이 카메라의 광학축과 만나는 지점에서 l 중에서 카메라와 먼 쪽까지의 거리이다. (역시 카메라에서 멀어지는 방향이 +이다)

l_1 이 투영되는 길이(l_1')을 살펴보면 $f:l_1' = a:l_1 \sin \theta$ 를 만족하게 되고

$$l_1' = \frac{fl_1 \sin \theta}{a}$$

l_2 가 투영되는 길이(l_2')을 관찰하면 $f:l_2' = a+l \cos \theta : l_2 \sin \theta$ 를 만족하게 되고

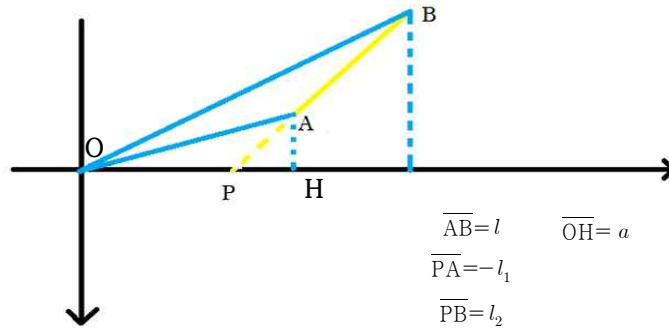
$$l_2' = \frac{fl_2 \sin \theta}{a+l \cos \theta}$$

가 된다.

$$l' = l_1' + l_2' = f \sin \theta \left(\frac{al + l_1 l \cos \theta}{a^2 + al \cos \theta} \right)$$

이를 특수한 경우인 $\theta = \frac{\pi}{2}$ 일 때에 적용시키면 $l' = \frac{l}{a}f$ 가 됩니다. 그리고 이것으로 실험에서 거리가 2배가 될 때 (a 가 2배가 됨) 길이가 절반으로 줄어드는 것을 증명 할 수 있다.

나) 면적이 광학축 위에 없는 경우



[Fig. 13] Picture when out of axis

[Fig. 13]는 길이를 구하고자 하는 면적이 광학축 위에 없는 경우에 길이의 변환에 관한 그림이다. 이 경우에도 광학축 위에 있는 경우와 같은 결과를 만들 수 있는데, 이 경우에는 \overline{PA} 의 길이를 음수로 설정해야 한다. 즉 l 에서 카메라와 가까운 쪽을 기준으로 멀어지는 방향을 +로 잡고 길이를 설정해야 한다. [Fig. 13]에서는 점 P 가 점 A 보다 가까이 있기 때문에 음의 값을 가진다. 비례식을 통해서 위와 같이 계산하면 그 결과는

$$l' = f \sin \theta \left(\frac{al + l_1 l \cos \theta}{a^2 + al \cos \theta} \right)$$

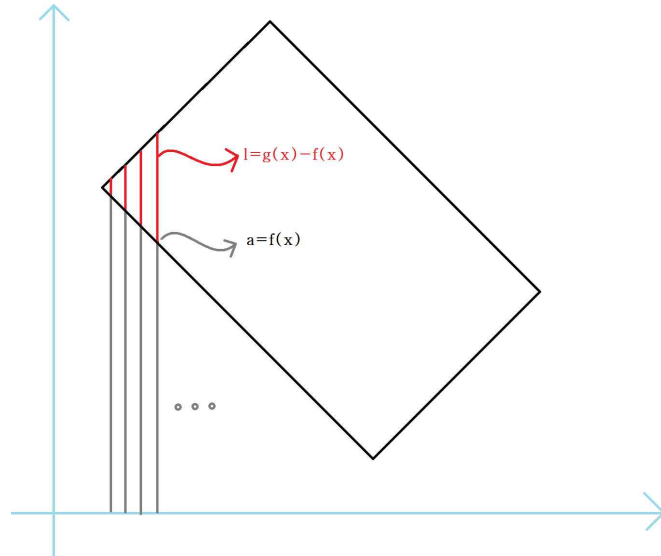
로 면적이 광학축 위에 있을 때와 같은 결과가 나온다.

따라서 물체의 위치에 상관없이 사진 상에서 물체의 크기를 구하는 식은

$$l' = f \sin \theta \left(\frac{al + l_1 l \cos \theta}{a^2 + al \cos \theta} \right)$$

라고 할 수 있다.

나. 넓이로의 변환



[Fig. 14] How to integral area

사진에서 가로방향의 원근을 무시하고 길이 l' 에 dx 를 곱한 값을 적분하면 사진에서의 넓이비가 나온다.

$$S' = \int l' dx = \int f \sin \theta \left(\frac{al + l_1 \cos \theta}{a^2 + al \cos \theta} \right) dx \text{가 된다.}$$

위의 식을 정리해서 사진속의 넓이 S' 을 실제 넓이에 대한 식으로 표현할 수 있다. 또한 투영시켰을 때, 사각형이 되기 때문에 각 변의 길이를 가지고 넓이를 구할 수도 있다.

4. 인구의 밀도와 분포

가. 쌀 실험

1) 쌀을 통한 추정

실험 목적: 쌀, 콩, 좁쌀을 뿌려 쌀의 분포 등을 분석해보고 그래프를 작성해본다. 또한 표본을 추출하여 모평균을 예측해보고 비교해본다.

2) 실험방법

- 가) 전지 위에 50cm×50cm 정사각형으로 나눈 후, 이를 동일한 정사각형 모양으로 100등분 하여 5cm×5cm 정사각형 구간을 만든다.
- 나) 약 2700개 정도의 쌀을 전지위로 뿌린다. 이 때, 최대한 무질서한 상황을 만들기 위해 쌀을 위로 높이 던지거나 멀리서 포물선으로 던지도록 한다.
- 다) 각 구간의 쌀을 센다. 이 때 쌀이 경계에 있는 경우, 경계 양 쪽에 각각 0.5씩 배분하도록 한다.
- 라) 쌀의 개수를 히스토그램으로 나타낸다.
- 마) 가) ~ 라)의 과정을 쌀의 개수를 줄이거나 늘려서 실험을 다시 진행해 본다.
- 바) 얻은 데이터로 모평균을 추정하여 알고 있는 모평균과 비교해본다.

3) 실험결과 분석

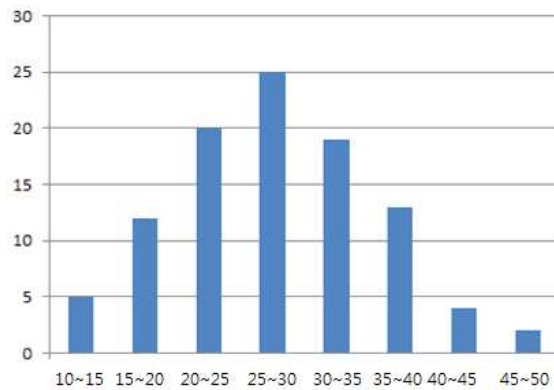
가) 실험 1

첫 실험의 평균은 27.37로 나타났다.

이를 10부터 시작하여 계급의 크기가 5인 계급 9개를 만들고, 막대그래프를 작성하였다.

〈Table 1〉 Amount of rice in 100 zone

26.5	20	13.5	39.5	32	30	26	30	29	19
26	13.5	30	36	34	39	38	23	16	22
38	12	20	21	32.5	35	40	36	29	44
18.5	21.5	36	31.5	29.5	36	38.5	40	23	22
17	30	31	30	26.5	42.5	48	37	29.5	34.5
26.5	20	25.5	27.5	21	33	27	27	30.5	28.5
15.5	45	24.5	29.5	15	37.5	33.5	30.5	24.5	29
27.5	23.5	30.5	18	31	17.5	23.5	23.5	21.5	24
26.5	39.5	30.5	29.5	12	25	29.5	23.5	26	17
21	26	31.5	16.5	27.5	27.5	16	16	11.5	20



[Fig. 15] First rice experiment's graph

평균이 포함된 25~30 계급의 도수가 가장 크게 나타났으며, 대략적인 좌우대칭의 종모양이 나타났다. 이 100개의 데이터에서 30개의 표본을 추출하여 모평균을 추정하는 과정을 세 번 진행하였다.

〈Table 2〉 First experiment's sample

18.5	21.5	36	29.5	39	38
17	30	31	26.5	35	40
26.5	20	25.5	21	23	22
26.5	39.5	30.5	15	29.5	34.5
21	26	31.5	31	30.5	28.5

〈Table 3〉 Second experiment's sample

12	20	21	21	33	44
21.5	36	31.5	23.5	23.5	22
30	31	30	18	31	34.5
20	25.5	27.5	33.5	30.5	28.5
21	26	31.5	23.5	23.5	19

〈Table 4〉 Third experiment's sample

21	26	31.5	30	26	30
28.5	15	37.5	33.5	30.5	39
29	30	26.5	42.5	48	35
24	26.5	20	13.5	29.5	36
17	26	13.5	30	16.5	23.5

〈Table 5〉 Each experiment's result

	1번 시행 표본	2번 시행 표본	3번 시행표본
표본평균	28.133	26.450	27.850
표본표준편차	6.748	6.543	8.187
95% 신뢰구간	[25.616, 30.650]	[24.010, 28.890]	[24.796, 30.904]

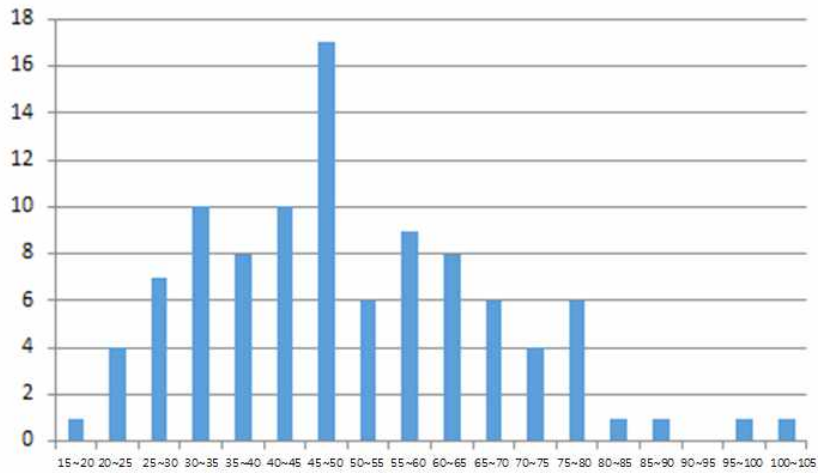
세 번의 시행 모두 95% 신뢰구간에 모평균이 포함되었음을 확인할 수 있다.

나) 실험 2

실험 1보다 약 2배 많은 쌀을 뿌렸을 때에는 다음과 같이 나타났다.

〈Table 6〉 Amount of rice in 100 zone

53.5	42.5	55.5	48.5	50.5	102	20.5	47	33.5	68
52	63.5	67	75.5	44.5	62	72	49	56	47.5
37	45	55	56	45	83	75	73	95	79
65	75.5	49	61.5	41	37.5	43	46.5	33.5	38
23	23.5	55	54	36.5	41.5	25.5	18	26	33
45.5	32	44.5	65	31.5	64.5	66	64.5	85.5	55
72	74	63	49	63	56	48	50	65	51
43	45	49	58.5	60	49	38	34	45.5	33
23	34	40.5	56	38.5	35.5	77	29	47.5	43
34.5	25	29.5	26	76	34.5	38	42	45.5	28



[Fig. 16] Second rice experiment's graph

평균은 49.83이며 마찬가지로 계급의 크기가 5인 히스토그램은 다음과 같다.
 대략적으로 가운데가 볼록하게 나타났으며, 평균이 포함된 계급의 도수가 가장 크게 나타났다.
 마찬가지로 t추정을 세 번 시행하였다.

〈Table 7〉 First experiment's sample

53.5	42.5	55.5	48.5	50.5	102
52	63.5	67	75.5	44.5	62
37	45	55	56	45	83
65	75.5	49	61.5	41	37.5
23	23.5	55	54	36.5	41.5

〈Table 8〉 Second experiment's sample

63.5	67	75.5	72	49	56
45	55	56	75	73	95
75.5	49	61.5	43	46.5	33.5
79	43	47.5	25.5	18	26
38	23	79	38	33	46.5

〈Table 9〉 Third experiment's sample

47	33.5	68	37.5	43	46.5
49	56	47.5	45	49	58.5
73	95	79	56	45	56
32	44.5	65	61.5	41	95
74	63	49	37.5	43	46.5

〈Table 10〉 Each experiment's result

	1번 시행 표본	2번 시행 표본	3번 시행표본
표본평균	53,366	52,92	54,55
표본표준편차	16,814	19,17	15,933
95% 신뢰구간	[47,088, 59,644]	[45,773, 60,067]	[48,61, 60,49]

3번의 시행 모두 95%신뢰구간에 모평균이 포함되어있다. 그러나 95%신뢰구간의 최솟값이 모평균과 거의 비슷하게 나타났는데 이는 100개의 데이터에서 평균보다 큰 값이 더 많기 때문이라고 생각할 수 있다.

나. 특징이 되는 표본

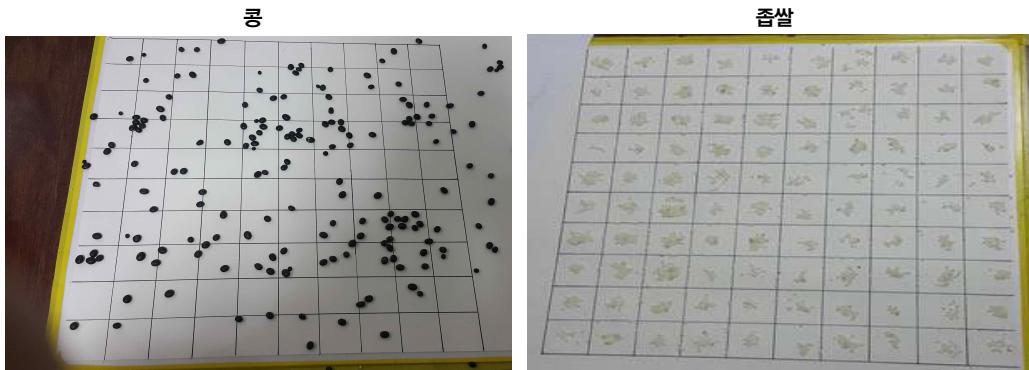
1) 실험목표

박인규 교수님[3]이 사진 속의 사람 수를 추정하실 때 초점을 두신 것은 촛불을 들고 있는 사람의 수였다. 그와 같은 경우를 재현하기 위해 좁쌀, 콩과 같은 다른 곡식을 뿌려 쌀과의 비율을 통해 전체를 직접 예측해보고, 이를 통해 특징이 되는 표본으로 전체를 추정하는 것이 타당한 것인지 알아보고자 한다.

2) 실험방법

- 가) 쌀을 뿌릴 때와 같이 콩과 좁쌀을 뿌린다. 이 때 쌀이 이미 뿌려져있는 전지가 아닌 새로운 전지에 뿌린다. 이는 쌀과 새로 뿌릴 곡식의 충돌을 방지하기 위해서이다.
- 나) 각 구간의 곡식의 개수를 센다.
- 다) 쌀 실험과 같이 곡식의 표본을 추출하여 전체 개수를 추측하는 과정을 반복한다.
- 라) $(\text{추측한곡식의개수} \times \frac{\text{쌀개수}}{\text{곡식개수}})$ 의 값을 진짜 쌀 개수와 비교한다.
- 마) $\frac{\text{쌀개수}}{\text{곡식개수}}$ 를 0.5단위로 근사하여 위의 식을 다시 계산하여 본다.

3) 실험결과



[Fig. 17] A photo of wheat and soybeans

콩은 떨어트렸을 때 멀리 튕겨나가며 콩의 크기가 크기 때문에 멀리 튕겨나간 콩을 다시 떨어트리면 이미 떨어진 콩과 충돌할 가능성이 크다. 또한 콩은 50cm×50cm구역에 많이 들어가지 않기 때문에 표본을 통한 추측의 신뢰도도 떨어지고, 실험에 적합하지 않다고 판단하였다. 그러나 좁쌀은 던졌을 때 분포가 쌀과 큰 차이가 나지 않았기 때문에 좁쌀을 이용하여 실험을 진행하였다.

〈Table 11〉 Amount of wheat in 100 zone

17.5	20	15	16.5	16	19.5	18	23.5	29	23
14	11	22.5	18	15.5	16.5	20	16.5	20.5	18
21.5	25	17	22	11	9	23	17	17	19
13.5	26	35	22	35.5	23.5	34.5	22	16.5	7.5
16.5	18.5	25.5	20	32.5	19	17.5	12.5	19	35.5
33	21.5	30	19	18.5	15	25	25	13.5	28.5
19.5	16.5	28.5	24	13.5	9.5	16.5	13.5	14.5	18
27.5	20	22	18.5	11.5	21	28.5	28	29	22
17.5	31.5	28.5	31.5	24.5	22.5	28	32	19	14
16.5	33	19	38.5	16	38	32	16	19.5	29

좁쌀의 총 개수는 2142이며 평균은 21.42이다. 그러므로 $\frac{\text{쌀 개수}}{\text{곡식 개수}} = \frac{4983}{2142} = 2.326$ 이다. 이는 약 2.5라고 할 수 있다. 이를 추측한 곡식의 개수 $\times \frac{\text{쌀 개수}}{\text{곡식 개수}}$ 의 식을 통해 계산한 값과 실제 쌀의 평균인 49.83과 비교해보자.

〈Table 12〉 First experiment's sample

14	11	22.5	35.5	23.5	23
21.5	25	17	32.5	19	34.5
13.5	26	35	18.5	15	17.5
16.5	18.5	25.5	13.25	9.75	25
20	22	18.5	11.5	21	16.5

〈Table 13〉 Second experiment's sample

17	22	11	9	23	17
35	22	35.5	23.5	34.5	22
25.5	20	32.5	19	17.5	12.5
30	19	18.5	15	25	25
28.5	24	13.5	9.5	16.5	13.5

〈Table 14〉 Third experiment's sample

18,5	25,5	20	16,5	13,5	19
21,5	30	19	28,5	28	15
16,5	28,5	24	28	32	9,5
16	38	32	28,5	24	21
13,5	26	35	22	18,5	32

〈Table 15〉 Each experiment's result

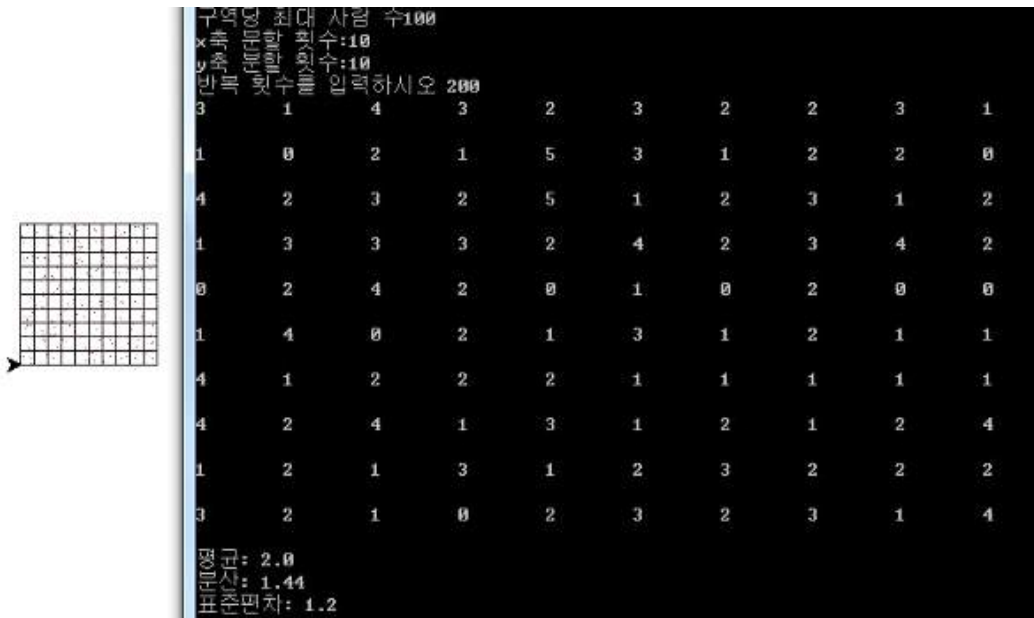
	1번 시행 표본	2번 시행 표본	3번 시행표본
표본평균	20,75	21,2166	23,333
표본표준편차	6,881	7,321	6,987
95% 신뢰구간	[18,185, 23,316]	[18,488, 23,946]	[20,728, 25,938]
정확한 비율로 추정한 쌀	[42,294, 54,233]	[43,003, 55,698]	[48,21, 60,332]
근사한 비율로 추정한 쌀	[45,463, 58,290]	[46,220, 59,865]	[51,820, 64,835]

세 번 모두 좁쌀과 쌀의 비율을 정확하게 하여 계산하였을 때는 추정된 쌀의 95% 신뢰구간에 쌀의 평균이 포함되어있음을 확인할 수 있다. 그러나 실제 인원수 추정할 때는 특징이 되는 인원과 전체 인원간의 비율을 1:3, 1:1.5 와 같이 편의상 0.5단위로 근사하는 경우가 많기 때문에 좁쌀과 쌀의 비율도 2.5로 근사하여 계산 해보았다. 이 때는 세 번째 시행에서 근사한 비율로 추정한 쌀의 95% 신뢰구간 속에 쌀의 평균이 포함되어있지 않음을 알 수 있다. 그 이유는 3번 시행에서 표본평균이 23.333으로 다른 두 시행에 비해 크게 나타났기 때문이다. 이처럼 특징이 되는 표본을 추출하여 모평균을 추정할 때는 여러 번 시행하여 표본평균이 다른 시행과 크게 차이가 나는 경우를 제외하여야 함을 알 수 있다.

다. 프로그래밍을 통한 실험

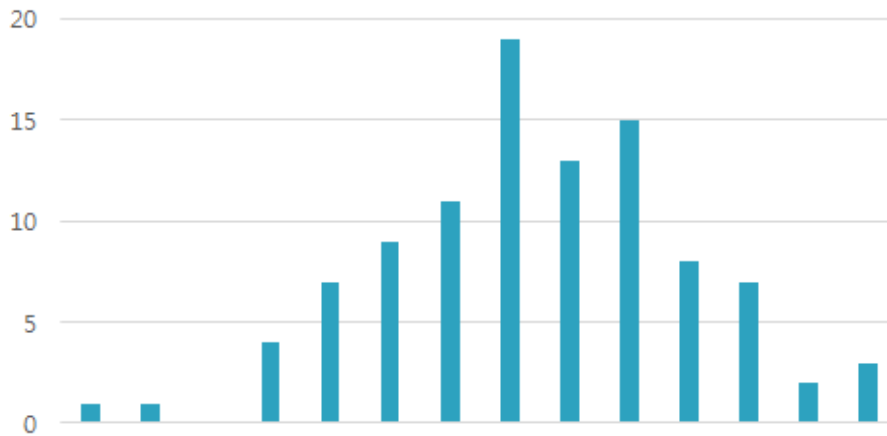
Python을 이용하여 구역 당 최대 인원수, x축 분할횟수, y축 분할횟수, 반복시행횟수를 입력하면 각 구역의 점이 찍히는 과정을 보여주며, 각 구역의 점의 개수와 평균, 분산, 표준편차를 도출해내는 프로그램을 코딩하였다.

쌀로 실험할 때는 쌀의 개수와 구역의 개수가 한정되어 있으나 위와 같은 프로그램을 사용한다면 좀 더 많은 결과를 얻을 수 있을 것이다. 이를 이용하여 계급의 크기를 1로 잡고 연속적인 히스토그램을 그린다면 랜덤하게 구역에 사람이 들어갈 때 구역 당 사람의 수가 어떤 형태의 분포를 띄는지 분석할 수 있을 것이다.



[Fig. 18] Example of program

이 프로그램으로 두 번째 쌀 실험과 같이 약 5000개의 점을 찍었을 때 표준편차는 7.62로 쌀 실험의 표준편차인 17.06보다 작은 값이다. 이는 각 데이터들이 쌀 실험보다 평균에 가깝게 분포함을 나타내며 계급의 크기를 3으로 줄여 막대그래프로 나타냈을 때는 아래와 같은 분포를 띄었다.



[Fig. 19] Graph of python experiment

IV. 고찰

우리 연구는 기존에 존재했던 추산방법을 사진기하학과 통계를 통해 보완하였다. 사진기하의 측면에서 기존에는 고려하지 않았던 원근을 고려하여 추산의 정밀성을 더하였고 이렇게 나누어진 각 가간의 인원수를 통계적

으로 접근하여 표준분포곡선과 유사하다는 사실을 알아내었다.

하지만 우리의 실험에 보안할 점이 몇 가지 존재한다. 먼저 우리가 생각한 사진의 넓이를 구하는 방법은 계산이 복잡해서 실용성이 떨어지는 문제가 있다. 우리는 이것을 향 후 근사를 통해서 식을 단순화 할 방법을 추가로 고안해 보고자 한다. 두 번째로는 사진을 통한 추정에는 유동인구를 고려하기 힘들다는 한계가 여전히 존재하고 최대인원이 모이는 시각을 일반화 하는데 자료의 수가 부족하다는 한계가 있다. 마지막으로 사진 속의 인원수를 정확히 파악할 수는 있지만 사진 속의 인원수가 행사장 전체의 인원수를 대변하지 못한다는 점을 어떻게 해결할 것인가가 앞으로 해결해야 할 과제이다.

V. 결론

실험을 통해 사진에서는 눈높이에서 평행선과 평행하게 그은 직선상으로 평행선들이 모임을 보였고, 길이가 거리에 반비례함도 알아내었다. 우리는 이 결과를 수학적으로 증명하였으며, 광학축의 위치에 따른 길이 및 넓이의 변화에 관한 일반화 된 공식도 이끌어 내었다. 이를 이용하면 원근법에 의해 평행선들이 기울어지더라도 모양과 넓이가 동일한 표본을 만들어 좀 더 정확한 추론이 가능할 수 있음을 제시하였다.

또한 쌀 실험을 통해 히스토그램을 그리는 것과 직접 표본을 추출하여 통계학적 추론을 해보는 실험을 하였는데 히스토그램은 대체적으로 정규분포와 유사한 종 모양을 나타내었다. 만약 표본이 더 많고, 실험 횟수가 많아 히스토그램의 구간을 줄여 연속적으로 그린다면, 그래프는 정규분포 곡선으로 접근할 것이라 예상된다. 이를 위해 파이썬 프로그램을 직접 코딩하였다. 표본 추출을 통한 t추정은 쌀의 개수가 많을 때, 적을 때, 그리고 특징이 되는 표본을 추출하여 전체를 추정하였을 때 모두 95%신뢰구간 안에 모평균이 포함되어 있었다. 그러나 표준편차가 커지면 95%신뢰구간의 폭이 넓어졌고, 많은 인구의 수를 세어야 하는 상황에서는 의미가 없는 값이 나올 수도 있다. 때문에 90%신뢰구간을 사용하거나, 표본의 수를 줄이는 대신 여러 번 추정하는 과정을 거쳐 도출된 여러 개의 신뢰구간 결과 값을 이용해 구간의 폭을 줄이는 방법을 모색하는 것이 좋을 것이라는 결론을 도출하였다. 최대인원이 집결되는 시간에 대해서는 여섯 번의 실험을 진행하였으나 실험 데이터가 부족하다고 판단된다. 후에 실험 데이터가 늘어난다면 최대인원이 집결되는 시간에 대한 일반적인 그래프를 얻을 수 있을 것이다. 이러한 일반적인 그래프가 있으면 한순간의 사람 수를 나타내는 사진이라도 전체적인 사람 수를 좀 더 엄밀하게 예측할 수 있게 된다.

전체적으로 원근법과 소실점을 통해 사진에서 모양과 넓이가 동일한 표본을 얻을 수 있으며, 표본을 추출하고 t추정을 하여 모평균의 95%신뢰구간을 얻어낼 수 있다. 이렇게 얻은 모평균을 주어진 표본 수에 곱하는 방법으로 더욱 정밀한 사람 수를 구할 수 있는 토대를 제공한 것을 연구의 가장 큰 결과로 제시한다.

VI. 부록

인원수 생성 프로그램

```
from random import *
while True:
    n=int(input("변량의 수:"))
    m=int(input("평균:"))
    d=int(input("분산:"))
    while True:
        group=list()
        Sum1=0
        C=0
```

```

        for i in range(n-1):
            a=(d**(1/2))*(random()-random())
            group.append(a)
            Sum1=Sum1+a
            C=C+a**2
        if  $-(d^{1/2}) < \text{Sum1}$  and  $\text{Sum1} < (d^{1/2})$ :
            group.append(-Sum1)
            C=C+Sum1**2
        break

    for i in range(n):
        group[i]=group[i]*((n*d/C)**(1/2))
        group[i]=group[i]+m

    Sum2=0
    Sum3=0
    for i in range(n):
        Sum2=Sum2+group[i]

    Sum2=Sum2/n
    for i in range(n):
        Sum3=Sum3+(group[i]-Sum2)**2

    print(group)
    print("모집단 평균",Sum2)
    print("모집단 분산",Sum3/n)
    x=int(input("추출 횟수"))
    z=x
    t=int(input("추출할 변량의 수:"))
    Sum6=0
    group4=list()
    while (x>0):
        x=x-1
        group2=list()
        group3=list()
        for i in range(n):
            group3.append(i)
        for i in range(t):
            R=randint(0,n-i-1)
            R=group3[R]
            group3.remove(R)
            group2.append(group[R])

        print(group2)
        Sum4=0
        Sum5=0
        for i in range(t):
            Sum4=Sum4+group2[i]

        Sum4=Sum4/t
        Sum6=Sum6+Sum4
        for i in range(t):

```

```

Sum5=Sum5+(group2[i]-Sum4)**2
group4.append(Sum4)
print("표본 평균:",Sum4)
print("표본 분산:",Sum5/(t-1))

Sum7=0
Sum6=Sum6/z
for i in range(t):
    Sum7=Sum7+(group4[i]-Sum6)**2

print("-----")
print("표본 평균의 평균",Sum6)
print("표본 평균의 분산",Sum7/t)

print("-----")

```

VII. 참고문헌

- [1] 지난 주말 해운대에 40만 피서 인파? 뺑뺑기 집계 논란, 연합뉴스, 2016년 7월 29일.
- [2] 풋볼 집회 '방정식' 왜 이렇게 차이가 날까?, 조선pub, 2016년 11월 29일.
- [3] '광화문 풋볼집회 참가자 수' 밝혀낸 '풋볼 함수' . 노컷뉴스, 2016년 11월 23일
- [4] 김현철, 조정우, 통계학의 이해: 기본개원 4만8000명" 주념, 경기도: 교육과학사, 2016년
- [5] 고지마 히로유키, 세상에서 가장 쉬운 통계학 입문, 서울: 지상사, 2009년
- [6] 경찰 "5일 풋볼집회 직접 켜다...최대인장. 뉴스1, 2016년 11월 7일.

I 연구진 I

임준혁 (Junhyeok Lim, 인천과학고등학교, dlawns5505@naver.com) 주저자, 교신저자

이경재 (Kyungjae Lee, 인천과학고등학교, niyanda01@naver.com) 공동저자

조동욱 (Dongwook Cho, 인천과학고등학교, dav0101@naver.com) 공동저자

지승현 (Seunghun Jee, 인천과학고등학교, tsd246@naver.com) 공동저자

지도교사 : 김동진 (Dongjin Kim, 인천과학고등학교, kdj003@ice.go.kr)

지도교수 : 함남우 (Namwoo Ham, 인천대학교 수학과, nhahm@incheon.ac.kr)

n=7, 13, 19, 37일 때의 정n각형의 종이접기 작도법 규명

이동우 · 김민규 · 박상준 · 전성민 - 대전과학고등학교

Identification of the Way to Fold Regular n-gons When n=7, 13, 19 and 37

Dongwoo Lee · Mingyu Kim · Sangjun Park · Sungmin Jun - Daejeon Science High School

국문초록

본 연구의 목적은 종이접기를 통해 유클리드 작도 불가능한 몇몇 정다각형을 종이접기 작도하는 것이다. 종이접기 작도는 유클리드 작도의 확장임이 알려져 있으며, 따라서 일부 유클리드 작도 불가능한 정다각형을 종이접기 작도하는 것이 가능하다. 이에 본 연구에서는 유클리드 작도 불가능한 정n각형 중 $n = 7, 13, 19, 37$ 일 때에 대하여 $\cos\left(\frac{2\pi}{n}\right)$ 를 한 근으로 가지면서 종이접기 작도 가능한 실수를 계수로 가지는 삼차방정식을 구한 뒤, 이 삼차방정식의 실근 $\cos\left(\frac{2\pi}{n}\right)$ 를 좌표평면에 나타내는 방법을 사용하여 정n각형을 종이접기 작도하는 구체적인 방법을 알아내었다. 본 연구는 일부 정n각형의 종이접기 작도법을 구하는 문제를 $\cos\left(\frac{2\pi}{n}\right)$ 를 근으로 갖는 삼차방정식을 구하는 문제로 환원시킬 수 있음을 보였으며, 그 중 $n = 7, 13, 19, 37$ 인 경우에 대하여 정n각형의 종이접기 작도법을 구하였다는 것에 의의가 있다.

중심어 : 종이접기, 삼차방정식, 정다각형, $\cos\left(\frac{2\pi}{n}\right)$, 작도

ABSTRACT

The purpose of this study is to fold some regular polygons which cannot be constructed with Euclid construction tools. It is known that paper folding is the expansion of Euclid Construction, so it is able to fold some regular polygon which cannot be constructed with Euclid construction tools. This study found the method to fold regular n-gon by finding a cubic equation of which the roots include $\cos\left(\frac{2\pi}{n}\right)$ and the coefficients are foldable real numbers, and drawing its root, $\cos\left(\frac{2\pi}{n}\right)$, on two-dimensional plot. Eventually, this study showed that finding the cubic equation of which the roots include $\cos\left(\frac{2\pi}{n}\right)$ means finding the method to fold regular n-gon, and succeeded to find how to fold regular n-gon when $n = 7, 13, 19, 37$.

Key words : Origami, Cubic Equation, Regular Polygon, $\cos\left(\frac{2\pi}{n}\right)$, Construction

I. 서론

1. 연구 배경 및 필요성

임의의 각의 삼등분은 삼대 작도 불능 중 하나이다. 이에 관해 알아보던 중, 단순히 종이를 접는 것만으로도 주어진 각을 삼등분할 수 있다는 것을 알게 되었다. 이에 흥미를 느껴 조사해 본 결과, 종이접기 공리들을 사용하여 도형을 나타내는 종이접기 작도를 이용하면 다른 삼대 작도 불능 중 하나인 배적 문제도 해결할 수 있고, 유클리드 작도가 불가능한 일부 정다각형을 접을 수 있다는 것도 알게 되었다.

각의 삼등분과 배적 문제의 경우 구체적인 종이접기 방법이 제시된 것과 대조적으로, 종이접기로 나타내는 것이 가능하다고 밝혀진 $p_i = 2^a 3^b + 1$ 꼴인 소수 중 유클리드 작도 불가능한 정칠각형, 정십삼각형, 정십구각형, 정삼십칠각형에 대하여 구체적인 종이접기 방법을 찾아보았으나 정칠각형을 제외한 나머지 정다각형에 대한 종이접기 작도법을 찾을 수 없었다[1]. 이에 우리는 이 정다각형들의 구체적인 종이접기 방법을 찾을 필요성이 있다 생각하여 본 연구를 수행하고자 하였다.

2. 연구 목적

본 연구의 목적은 유클리드 작도가 불가능하면서 종이접기 작도가 가능한 정다각형에 대한 구체적인 종이접기 작도법 연구를 통하여 종이 접기 속에 숨어 있는 수학의 대수적 구조를 파악하고자 한다. 또한 흥미로운 주제에 대한 해법을 수학적으로 해결하는 경험을 통하여 팀원들의 수학적 능력을 고양하는데 그 목적이 있다.

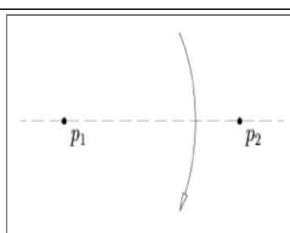
II. 이론적 배경

1. 종이접기 작도

눈금없는 자와 컴퍼스를 사용하여 작도하는 유클리드 작도와는 달리, 다른 도구의 사용 없이 종이를 접는 것으로 원하는 도형을 작도하는 것을 종이접기 작도라 한다.

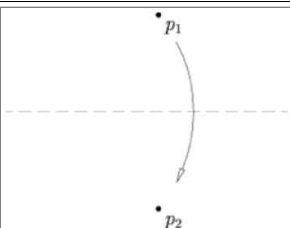
2. 종이접기 공리

종이접기 작도에서 종이를 접을 수 있는 방법을 종이접기 공리라 하여, 현재 총 7가지가 존재한다[2].



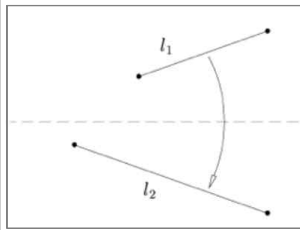
[Fig. 1] Origami Axiom 1

공리 1: 접는 선이 주어진 두 점(p_1, p_2)을 지나도록 접을 수 있다.
 $-p_1, p_2$ 를 지나는 직선의 작도와 동치이며, 1개의 해를 갖는다.



[Fig. 2] Origami Axiom 2

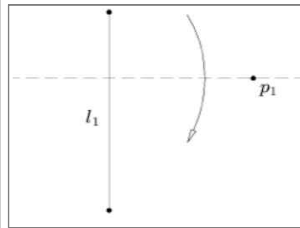
공리 2: 주어진 두 점(p_1, p_2)이 서로 겹치도록 접을 수 있다.
 $-p_1 p_2$ 의 수직이등분선을 작도하는 것과 동치이며, 1개의 해를 갖는다.



[Fig. 3] Origami Axiom 3

공리 3: 주어진 두 직선(l_1, l_2)이 서로 겹치도록 접을 수 있다.

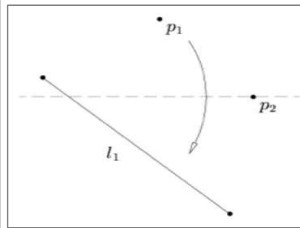
– l_1, l_2 가 평행하지 않을 때, l_1 과 l_2 가 이루는 각의 이등분선의 작도와 동치이며, 2개의 해를 갖는다. l_1, l_2 가 평행하면 1개의 해를 갖는다.



[Fig. 4] Origami Axiom 4

공리 4: 주어진 한 점(p_1)과 한 직선(l_1)에 대하여, 접는 선이 p_1 을 지나고 l_1 과 수직이 되도록 접을 수 있다.

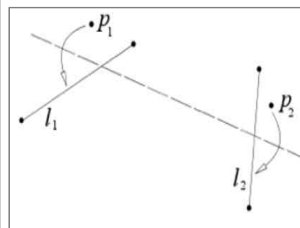
– p_1 을 지나고 l_1 의 수선의 작도와 동치이며, 1개의 해를 갖는다.



[Fig. 5] Origami Axiom 5

공리 5: 주어진 두 점(p_1, p_2)과 한 직선(l_1)에 대하여, 접는 선이 p_2 를 지나면서 p_1 이 l_1 위에 오도록 접을 수 있다.

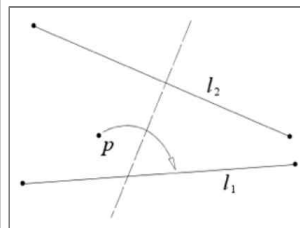
– p_1 을 초점, l_1 을 준선으로 하는 포물선의 접선 중 p_2 를 지나는 직선의 작도와 동치이며, 0~2개의 해를 갖는다.



[Fig. 6] Origami Axiom 6

공리 6: 주어진 두 점(p_1, p_2)과 두 직선(l_1, l_2)에 대하여, p_1 과 p_2 가 각각 l_1, l_2 위에 오도록 접을 수 있다.

– p_1 을 초점, l_1 을 준선으로 하는 포물선과 p_2 를 초점, l_2 를 준선으로 하는 포물선의 공통접선의 작도와 동치이며, 0~3개의 해를 갖는다.



[Fig. 7] Origami Axiom 7

공리 7: 주어진 한 점(p_1)과 두 직선(l_1, l_2)에 대하여, 접는 선이 l_2 에 수직이고 p_1 이 l_1 위에 오도록 접을 수 있다.

– p_1 을 초점, l_1 을 준선으로 하는 포물선의 접선 중 l_2 에 수직인 직선의 작도와 동치이며, 0~1개의 해를 갖는다.

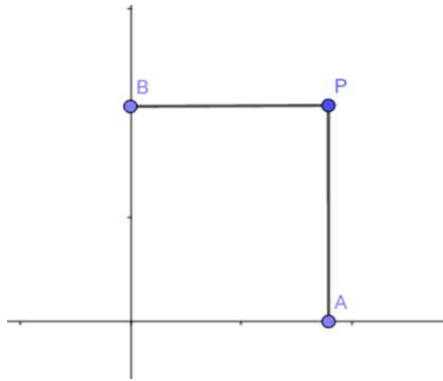
3. 종이접기 작도 가능한 실수

종이를 해석기하의 방법을 도입해 좌표평면화하여, 원점 $O(0,0)$ 과 단위점 $I(1,0)$ 를 잡을 수 있다. 이때 점 O 와 점 I 는 종이접기 작도 가능하다고 본다. 이때 종이접기 공리 1로부터 x 축을, 종이접기 공리 4로부터 y 축을 접을 수 있다. 이제 다음을 정의하자.

[정의] $u \in \mathbb{R}$ 에 대하여 $\overline{AB} = |u|$ 인 두 점 A, B 가 종이접기 작도 가능할 때, u 를 종이접기 가능한 실수라고 한다[3].

위의 정의와 종이접기 공리로부터 다음 정리들이 성립한다.

[정리 1] 점 $P(u,v)$ 에 대하여, 두 실수 u, v 가 종이접기 작도 가능할 때 그리고 이때에만 점 P 는 종이접기 작도 가능하다[3].



[Fig. 8] The Relationship between Foldable Point and Foldable Real Number

증명)

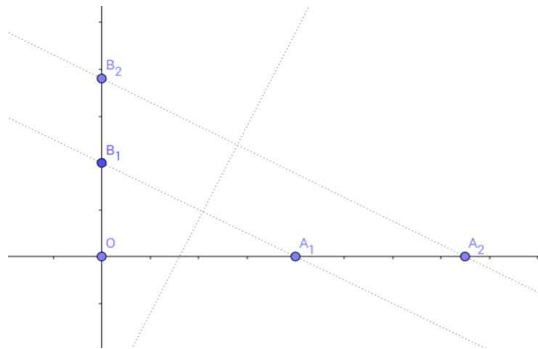
점 $P(u,v)$ 가 종이접기 작도 가능할 때, 종이접기 공리 4를 이용하여 점 P 를 지나며 각각 x 축, y 축과 수직인 직선을 접어, 그 접는 선들과 x 축, y 축과의 교점을 각각 $A(u,0)$, $B(0,v)$ 라 하자. 그러면 $\overline{OA} = |u|$, $\overline{OB} = |v|$ 이므로 가정에 의하여 u, v 는 종이접기 가능한 실수이다.

역으로, u, v 가 종이접기 가능한 실수이면 점 A 와 점 B 를 각각 x 축, y 축 위에 표현 가능하다. 이때 종이접기 공리4에 의하여 x 축, y 축에서 각각 점 A , 점 B 를 지나고 각각의 축에 수직인 직선을 그릴 수 있다. 이 직선들의 교점이 점 P 이므로 P 는 종이접기 작도 가능하다.

[따름정리 1-1] 실수 u 가 종이접기 가능하다. \Leftrightarrow 점 $(u,0)$ 은 종이접기 가능하다. \Leftrightarrow 점 $(0,u)$ 는 종이접기 가능하다[3].

$v > 1$ 인 경우에 대해서 종이접기가 가능하다는 것을 보이면 $v < 1$ 일 때도 같은 방법으로 증명할 수 있다. 점 $A_1(u, 0)$, 점 $B_1(0, 1)$, 점 $B_2(0, v)$ 의 세 점을 잡자. 종이접기 공리 1에 의하여 두 점 A_1, B_1 을 지나는 직선을 접을 수 있다. 이 선을 직선 f 라 하자. 또한 종이접기 공리 2에 의하여 $\overline{A_1B_1}$ 의 수직이등분선을 접을 수 있다. 이 선을 직선 g 라 하자. 종이접기 공리 4에 의하여 점 $B_2(0, v)$ 를 지나며 직선 g 와 수직을 이루는 직선을 접을 수 있고, 이는 직선 f 와 평행하다. 이 직선을 h 라 하자. 직선 h 와 x 축의 교점을 $A_2(a, 0)$ 라 하면, $\triangle OA_1B_1$ 와 $\triangle OA_2B_2$ 는 닮음이므로 $1:u=v:a$ 라는 식이 성립한다. 즉, $a=u \times v$ 로 종이접기 가능하다.

3) $\frac{u}{v} (v \neq 0)$

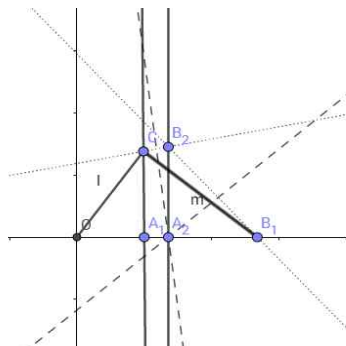


[Fig. 10] Folding $\frac{u}{v} (v \neq 0)$

$v > 1$ 인 경우에 대해서 종이접기가 가능하다는 것을 보인다면 $v < 1$ 일 때도 같은 방법으로 증명할 수 있다. 점 $A_2(u, 0)$, 점 $B_1(0, 1)$, 점 $B_2(0, v)$ 의 세 점을 잡자. 종이접기 공리 1에 의하여 두 점 A_2, B_2 을 지나는 직선을 접을 수 있다. 이 선을 직선 f 라 하자. 종이접기 공리 2에 의하여 $\overline{A_2B_2}$ 의 수직이등분선을 접을 수 있다. 이 선을 직선 g 라 하자. 종이접기 공리 4에 의하여 점 $B_1(0, 1)$ 를 지나고 직선 g 와 수직을 이루는 직선을 접을 수 있고, 이때 이 직선은 직선 f 와 평행하다. 이 직선을 h 라 하자. 직선 h 와 x 축의 교점을 $A_1(a, 0)$ 라 하면, $\triangle OA_1B_1$ 와 $\triangle OA_2B_2$ 는 닮음이므로 $1:a=v:u$ 라는 식이 성립한다. 즉, $a=\frac{u}{v}$ 로 종이접기 가능하다.

[정리 4] $u \geq 0$ 이면 \sqrt{u} 도 종이접기 가능하다[3].

증명)



[Fig. 11] Folding $\sqrt{u} (u \geq 0)$

[정리 5] 임의의 각의 삼등분선은 종이접기 작도 가능하다[3].

원점 O 와 종이접기 작도 가능한 점 S 에 대하여, 그림에서 y 축 양의 방향과 \overrightarrow{OS} 가 이루는 각을 α 라 하자. O 와 S 를 지나는 직선 n 을 종이접기 작도하고, 직선 n 상에 $\overrightarrow{OS} = \overrightarrow{OR}$ 인 S 가 아닌 점 R 을 종이접기 작도한다. 그리고 종이접기 공리 6을 이용하여, 점 R 과 S 가 각각 y 축, x 축 상에 오도록 접고, 그때의 R , S 의 대칭점을 각각 R' , S' , 접는선을 t 라 한다. 종이접기 공리 5를 사용하여 접는 선이 점 O 를 지나고 점 S 가 직선 t 상에 오도록 접고, 이때의 S 의 대칭점을 O' 이라 하면, 직선 t 는 $\overline{OO'}$ 의 중점 B 를 지난다. $\angle R'OO' = \beta$ 라 하면, $\triangle OBC \equiv \triangle O'BC$, $\triangle O'OR$ 이 $\overline{O'O} = \overline{RO}$ 인 이등변삼각형이므로 $\angle OOR = \angle ORO' = \beta$ 이다. 따라서 $\alpha = 3\beta$ 이므로 직선 OO' 은 각 α 를 삼등분한다.

각각의 경우(직선과 직선, 원과 직선, 원과 원의 교점)에서 해가 최대 2개까지 나오는 작도와 달리, 종이접기 작도의 경우 종이접기 공리 6에서 최대 3개의 해 존재하므로, 삼차방정식을 해결할 수 있다. 단, 삼차방정식

$$\begin{aligned}
 &= \frac{\left\{ \sin\left(-\frac{\pi}{n}\right) + \sin\left(\frac{3\pi}{n}\right) \right\} + \left\{ \sin\left(-\frac{3\pi}{n}\right) + \sin\left(\frac{5\pi}{n}\right) \right\} + \cdots + \left\{ \sin\left(-\frac{(n-2)\pi}{n}\right) + \sin\left(\frac{n\pi}{n}\right) \right\}}{2\sin\frac{\pi}{n}} \\
 &= \frac{-\sin\frac{\pi}{n}}{2\sin\frac{\pi}{n}} \\
 &= -\frac{1}{2}
 \end{aligned}$$

III. 연구 방법 및 절차

본 연구의 목표는 유클리드 작도 불가능하나 종이접기 작도 가능한 정다각형의 구체적인 작도 방법을 알아보는 것이다. 따라서 [정리 6]의 조건 중 정다각형이 유클리드 작도 가능할 조건인 $n=2^r q_1 q_2 \cdots q_m$ (q_i 는 $2^{2^i}+1$ 꼴인 서로 다른 소수, $r \in \mathbb{N} \cup \{0\}$)인 경우를 제외하였다. 또한 정 n 각형이 종이접기 작도 가능하면 위의 종이접기 공리 4 및 [정리 5]를 통한 각의 이등분 및 삼등분의 종이접기 작도를 이용하여 정 $2n$ 각형 및 정 $3n$ 각형을 어렵지 않게 종이접기 작도할 수 있으므로, $k=l=0$ 으로 두었다. 그리고 정 a 각형과 정 b 각형이 종이접기 작도 가능하면 이들을 이용하여 정 ab 각형을 어렵지 않게 종이접기 작도할 수 있으므로, $i=1$ 로 두었다. 결론적으로 본 연구에서는 $n=p(p=2^a 3^b+1(b \neq 0)$ 꼴의 소수)일 때의 일부인 $n=7, 13, 19, 37$ 인 경우를 다루기로 하였다.

점 $(\cos\frac{2\pi}{n}, 0)$ 이 종이접기 작도 가능하다면, 이를 이용해 정 n 각형을 작도해 낼 수 있음이 자명하다. 따라서 본 연구에서는 II-4.의 [삼차방정식의 실근의 종이접기 작도법]을 사용하여 점 $(\cos\frac{2\pi}{n}, 0)$ 을 종이접기 작도하였다. 이를 위해 $n=7, 13, 19, 37$ 인 각각의 경우에 대하여 $\cos\frac{2\pi}{n}$ 을 한 근으로 갖고, 계수가 모두 종이접기 가능한 실수인 삼차방정식(이하 종이접기 삼차방정식)을 찾았다.

1. $n=7$ 인 경우

$$\text{let } k_n = \cos\frac{n\pi}{7}$$

k_2 를 근으로 갖는 삼차방정식의 다른 두 근을 k_4, k_6 으로 하자. 그러면 다음과 같이 삼차방정식을 구할 수 있다.

$$k_2 + k_4 + k_6 = -\frac{1}{2}$$

$$k_2 k_4 + k_4 k_6 + k_6 k_2$$

$$= \frac{k_6 + k_2 + k_{10} + k_2 + k_8 + k_4}{2}$$

$$= -\frac{1}{2}$$

$$k_2 k_4 k_6$$

$$= \frac{k_6 + k_2}{2} k_6$$

$$= \frac{k_{12} + k_0 + k_8 + k_4}{4}$$

$$= \frac{1}{8}$$

이상에서 세 실수 k_2, k_4, k_6 을 근으로 갖는 삼차방정식이

$$t^3 + \frac{1}{2}t^2 - \frac{1}{2}t - \frac{1}{8} = 0$$

임을 보였다. 계수가 모두 종이접기 가능한 실수이므로, 이 방정식은 $\cos \frac{2\pi}{7}$ 를 한 근으로 갖는 종이접기 삼차방정식이 된다.

2. $n = 13$ 인 경우

$$\text{let } k_t = \cos \frac{t\pi}{13}$$

k_2 을 근으로 갖는 삼차방정식의 다른 두 근을 k_6, k_8 이라 하자. 우선 이차항의 계수를 구하기 위하여 x, y 를 다음과 같이 놓는다.

$$\text{let } x = k_2 + k_6 + k_8$$

$$\text{let } y = k_4 + k_{10} + k_{12}$$

그러면

$$x + y = -\frac{1}{2}$$

$$xy = (k_2 + k_6 + k_8)(k_4 + k_{10} + k_{12})$$

$$= \frac{(k_6 + k_2) + (k_{12} + k_8) + (k_{12} + k_{10}) + (k_{10} + k_2) + (k_{10} + k_4) + (k_8 + k_6) + (k_{12} + k_4) + (k_8 + k_2) + (k_6 + k_4)}{2}$$

$$= \frac{3}{2} \sum_{n=1}^6 k_{2n} = -\frac{3}{4}$$

이므로, x, y 는 이차방정식

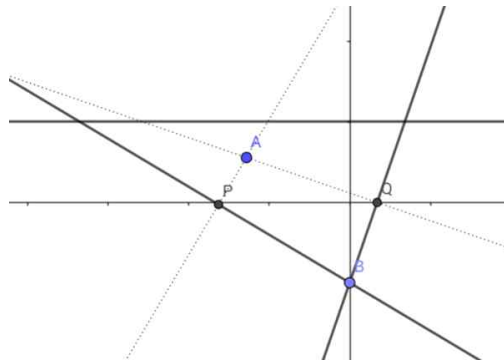
$$t^2 + \frac{1}{2}t - \frac{3}{4} = 0$$

의 두 실근으로서 종이접기 가능한 실수이다.

이때 $x = k_2 + k_6 + k_8 = k_6 + k_2 - k_5 > 0$ 이고, $y = -\frac{1}{2} - x$ 이므로

$$y < 0 < x$$

위의 이차방정식에 근의 공식을 적용해 x, y 의 값을 계산하여 [정리 3] 및 [정리 4]를 통해 점 $(x, 0)$ 과 점 $(y, 0)$ 을 종이접기 작도할 수도 있으나, x, y 의 대소 관계를 알고 있으므로 더 간단한 종이접기 작도를 위하여 다음과 같은 방법을 적용하고자 한다.



[Fig. 14] Folding Roots of Quadratic Equation

이차방정식 $x^2 + ax + b = 0$ (a, b 는 종이접기 가능한 실수)의 실근을 종이접기 작도하기 위하여,

- 1) 종이 위에 점 $A(-a, -b)$, $B(0, -1)$, 직선 $y=1$ 을 종이접기 작도한다.
- 2) 직선 $y=1$ 상에 점 B 가 오게 하면서 접는선이 점 A 를 지나도록 접는다(종이접기 공리 5).
- 3) 두 접는선과 x 축의 교점의 좌표를 각각 $P(p, 0), Q(q, 0)$ 이라 하면, p, q 는 이 이차방정식의 두 실근이 된다.

증명) 점 A 에서 x 축에 내린 수선의 발을 H 라 하자. 이때 $\triangle APH \sim \triangle PBO$ 이므로 $(-b) : (-p) = (-a-p) : 1$, 즉 $p^2 + ap + b = 0$ 이다. 마찬가지로 $q^2 + aq + b = 0$ 가 성립한다. 그러므로, p, q 는 이 이차방정식의 두 실근이 된다.

따라서 위의 방법을 통하여 점 $(x, 0)$ 과 점 $(y, 0)$ 을 종이접기 작도할 수 있다. 또한, 이어서 일차항의 계수와 상수항을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & k_2k_6 + k_6k_8 + k_8k_2 \\ &= \frac{(k_8 + k_4) + (k_{14} + k_2) + (k_{10} + k_6)}{2} \end{aligned}$$

$$= -\frac{1}{4}$$

$$k_2k_6k_8$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{k_8 + k_4}{2} k_8 \\
&= \frac{k_{16} + k_0 + k_{12} + k_4}{4} \\
&= \frac{y+1}{4}
\end{aligned}$$

이상에서 세 실수 k_2, k_6, k_8 을 근으로 갖는 삼차방정식이

$$t^3 - xt^2 - \frac{1}{4}t - \frac{y+1}{4} = 0$$

임을 보였다. 계수가 모두 종이접기 가능한 실수이므로, 이 방정식은 $\cos \frac{2\pi}{13}$ 를 한 근으로 갖는 종이접기 삼차방정식이 된다.

3. $n = 19$ 인 경우

$$\text{let } k_t = \cos\left(\frac{t\pi}{19}\right)$$

k_2 을 근으로 갖는 삼차방정식의 다른 두 근을 k_{14}, k_{16} 이라 하자. 우선 이차항의 계수를 구하기 위하여 x, y, z 를 다음과 같이 놓는다.

$$\text{let } x = k_2 + k_{14} + k_{16}$$

$$\text{let } y = k_4 + k_6 + k_{10}$$

$$\text{let } z = k_8 + k_{12} + k_{18}$$

이때

$$x + y + z = -\frac{1}{2}$$

$$\begin{aligned}
xy &= (k_2 + k_{14} + k_{16})(k_4 + k_6 + k_{10}) \\
&= k_2 k_4 + k_2 k_6 + k_2 k_{10} + k_{14} k_4 + k_{14} k_6 + k_{14} k_{10} + k_{16} k_4 + k_{16} k_6 + k_{16} k_{10} \\
&= \frac{1}{2}(k_6 + k_2 + k_8 + k_4 + k_{12} + k_8 + k_{18} + k_{10} + k_{18} + k_8 + k_{14} + k_4 + k_{18} + k_{12} + k_{16} + k_{10} + k_{12} + k_6) \\
&= \frac{1}{2}(k_2 + 2k_4 + 2k_6 + 3k_8 + 2k_{10} + 3k_{12} + k_{14} + k_{16} + 3k_{18}) \\
&= \frac{1}{2}\left\{-\frac{1}{2} + (k_4 + k_6 + k_{10}) + 2(k_8 + k_{12} + k_{18})\right\}
\end{aligned}$$

$$yz = (k_8 + k_{12} + k_{18})(k_4 + k_6 + k_{10})$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{1}{2}(k_{10} + k_6 + k_{16} + k_6 + k_{14} + k_8 + k_{14} + k_{10} + k_{12} + k_2 + k_{10} + k_4 + k_{18} + k_{16} + k_6 + k_4 + k_4 + k_2) \\
 &= \frac{1}{2} \left\{ -\frac{1}{2} + (k_2 + k_{14} + k_{16}) + 2(k_4 + k_6 + k_{10}) \right\}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 zx &= (k_4 + k_6 + k_{10})(k_8 + k_{12} + k_{18}) \\
 &= \frac{1}{2}(k_{12} + k_4 + k_{16} + k_8 + k_{16} + k_{14} + k_{14} + k_2 + k_{18} + k_6 + k_{14} + k_{12} + k_{18} + k_2 + k_{16} + k_2 + k_{10} + k_8) \\
 &= \frac{1}{2} \left\{ -\frac{1}{2} + (k_8 + k_{12} + k_{18}) + 2(k_2 + k_{14} + k_{16}) \right\}
 \end{aligned}$$

$$\therefore xy + yz + zx = \frac{1}{2} \left\{ -\frac{3}{2} + 3(x + y + z) \right\} = -\frac{3}{2}$$

$$\begin{aligned}
 xyz &= \left(-\frac{1}{4} + \frac{1}{2}y + z\right)z \\
 &= -\frac{1}{4}z + \frac{1}{2}yz + z^2 \\
 &= -\frac{1}{4}z - \frac{1}{2}\left(-\frac{1}{4} + \frac{1}{2}z + x\right) + \left(-\frac{1}{2} - x\right)z \\
 &= \frac{1}{8} - \frac{1}{2}x - \frac{1}{2}z - \frac{1}{2}z - \left(-\frac{1}{4} + \frac{1}{2}x + y\right) \\
 &= \frac{3}{8} - (x + y + z) \\
 &= \frac{7}{8}
 \end{aligned}$$

이므로, x, y, z 는 삼차방정식

$$t^3 + \frac{1}{2}t^2 - \frac{3}{2}t - \frac{7}{8} = 0$$

의 세 실근으로서 종이접기 가능한 실수이다.

또한 x, y, z 의 크기를 비교하면

$$\begin{aligned}
 y &= k_4 + k_6 + k_{10} = k_4 + 2k_8k_2 > 0 \\
 z &= k_8 + k_{12} + k_{18} = k_{18} + 2k_{10}k_2 < 0 \\
 x &= k_2 + k_{14} + k_{16} < k_0 + \frac{k_{38}}{3} + \frac{k_{38}}{3} = 0
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 x - z &= (k_2 + k_{14} + k_{16}) - (k_8 + k_{12} + k_{18}) \\
 &= (k_2 + k_{14} - k_8 - k_{12}) + (k_{16} - k_{18}) \\
 &> \left(k_{\frac{19}{6}} + k_{\frac{95}{6}}\right) - 2k_{10}k_2 + (k_{16} - k_{18}) > 0 \\
 \therefore y &> x > z
 \end{aligned}$$

구한 방정식의 계수가 모두 종이접기 가능한 실수이고 x, y, z 의 대소 관계를 구하였으므로, II-4.를 이용하여 점 $(x, 0), (y, 0), (z, 0)$ 을 종이접기 작도할 수 있다.

또한, 이차항의 계수 및 상수항을 x, y, z 를 이용해 계산하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & k_2k_{14} + k_{14}k_{16} + k_{16}k_2 \\ &= \frac{1}{2}(k_{16} + k_{12} + k_8 + k_2 + k_{18} + k_{14}) \\ &= \frac{1}{2}(x + z) \\ &= -\frac{1}{4}(2y + 1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} k_2k_{14}k_{16} &= \frac{1}{2}(k_{16} + k_{12})k_{16} \\ &= \frac{1}{4}(k_6 + 1 + k_{10} + k_4) \\ &= \frac{1}{4}(1 + y) \end{aligned}$$

이상에서 k_2, k_{14}, k_{16} 을 근으로 갖는 삼차방정식이

$$t^3 - xt^2 - \frac{2y+1}{4}t - \frac{1+y}{4} = 0$$

임을 보였다. 계수가 모두 종이접기 가능한 실수이므로, 이 방정식은 $\cos \frac{2\pi}{19}$ 를 한 근으로 갖는 종이접기 삼차방정식이 된다.

4. $n = 37$ 인 경우

이하의 계산은 II-6.과 삼각함수의 덧셈정리를 이용해 프로그램으로 계산한 것으로서 구체적인 과정은 생략한다.

$$\text{let } p_t = \cos \frac{t\pi}{37}$$

p_2 를 근으로 하는 삼차방정식의 다른 두 근을 p_{20}, p_{22} 로 놓고, 이차항의 계수를 구하기 위하여 다음과 같이 a, b, c, d, e, f 를 놓자.

$$\begin{aligned} \text{let } a &= p_2 + p_{20} + p_{22} \\ \text{let } b &= p_4 + p_{30} + p_{34} \\ \text{let } c &= p_6 + p_8 + p_{14} \\ \text{let } d &= p_{10} + p_{26} + p_{36} \\ \text{let } e &= p_{12} + p_{16} + p_{28} \\ \text{let } f &= p_{18} + p_{24} + p_{32} \end{aligned}$$

다음으로 $a \sim f$ 가 종이접기 가능한 실수임을 보이기 위하여, a, c, f 를 근으로 갖는 삼차방정식과 b, d, e 를 근으로 갖는 삼차방정식을 각각 구하자. 두 방정식의 이차항의 계수를 구하기 위하여 $u = a + c + f, v = b + d + e$ 라 두면,

$$u + v = -\frac{1}{2}$$

$$\begin{aligned} uv &= -\frac{9}{2} - \frac{9}{2}(a + b + c + d + e + f) \\ &= -\frac{9}{4} \end{aligned}$$

이므로, u, v 는 이차방정식

$$t^2 + \frac{1}{2}t - \frac{13}{4} = 0$$

의 두 실근으로서 종이접기 가능한 실수이다. 계수가 모두 종이접기 가능한 실수이고, $u > v$ 이므로(증명 생략), III-2.에서 제시한 방법을 통해 점 $(u, 0)$ 및 점 $(v, 0)$ 를 얻을 수 있다.

또한 u, v 를 이용하여 a, c, f 를 근으로 갖는 삼차방정식 및 b, d, e 를 근으로 갖는 삼차방정식을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} ac + cf + fa &= (a + c + f) + 2(b + d + e) \\ &= -\frac{1}{2} + v \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} acf &= \frac{5}{4}(a + c + f) + \frac{7}{4}(b + d + e) \\ &= -\frac{5}{8} + \frac{v}{2} \end{aligned}$$

이므로, a, c, f 를 근으로 갖는 삼차방정식은

$$t^3 - ut^2 + (v - \frac{1}{2})t - (\frac{1}{2}v - \frac{5}{8}) = 0$$

이 된다. 또한,

$$\begin{aligned} bd + de + eb &= 2(a + c + f) + (b + d + e) \\ &= -\frac{1}{2} + u \end{aligned}$$

$$bde$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{7}{4}(a+c+f) + \frac{5}{4}(b+d+e) \\
 &= -\frac{5}{8} + \frac{u}{2}
 \end{aligned}$$

이므로 b, c, f 를 근으로 갖는 삼차방정식은

$$t^3 - ut^2 + (u - \frac{1}{2})t - (\frac{1}{2}u - \frac{5}{8}) = 0$$

이 된다.

위 방정식들의 계수가 모두 종이접기 가능한 실수이고, $c > a > f$, $e > b > d$ (증명 생략)이므로, 점 $(a, 0)$, $(b, 0)$, $(c, 0)$, $(d, 0)$, $(e, 0)$, $(f, 0)$ 을 종이접기 작도할 수 있다.

마지막으로, 아래와 같이 p_2, p_{20}, p_{22} 를 근으로 갖는 삼차방정식의 일차항의 계수 및 상수항을 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 &p_2 p_{20} + p_{20} p_{22} + p_{22} p_2 \\
 &= \frac{1}{2}(p_{22} + p_{18} + p_{32} + p_2 + p_{24} + p_{20}) \\
 &= \frac{1}{2}(a + f)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &p_2 p_{20} p_{22} \\
 &= \frac{1}{2}(p_{22} + p_{18}) p_{22} \\
 &= \frac{1}{4}(p_{30} + p_0 + p_{24} + p_4) \\
 &= \frac{1}{4}(b + 1)
 \end{aligned}$$

이상에서, p_2, p_{20}, p_{22} 를 근으로 갖는 삼차방정식이

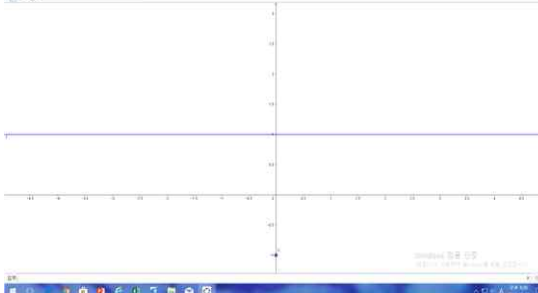
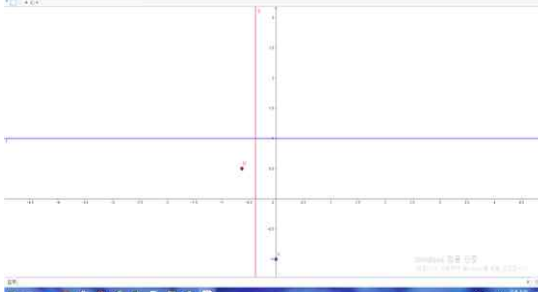
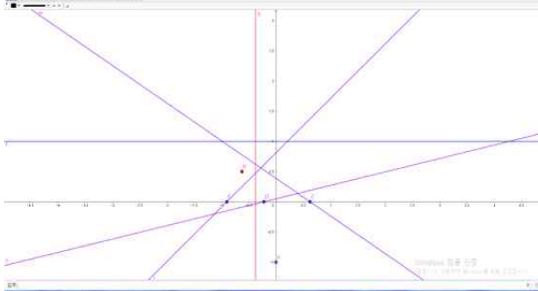
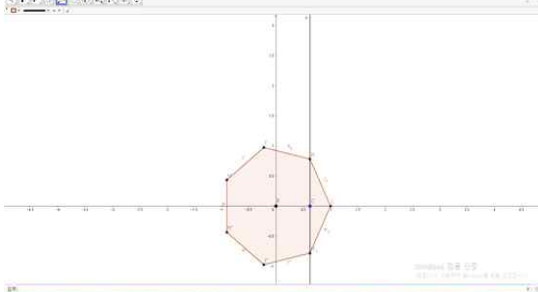
$$t^3 - at^2 + \frac{1}{2}(a+f)t - \frac{1}{4}(b+1) = 0$$

임을 보였다. 계수가 모두 종이접기 가능한 실수이므로, 이 방정식은 $\cos \frac{2\pi}{37}$ 을 근으로 갖는 종이접기 삼차방정식이 된다.

IV. 정다각형 종이 접기 작도

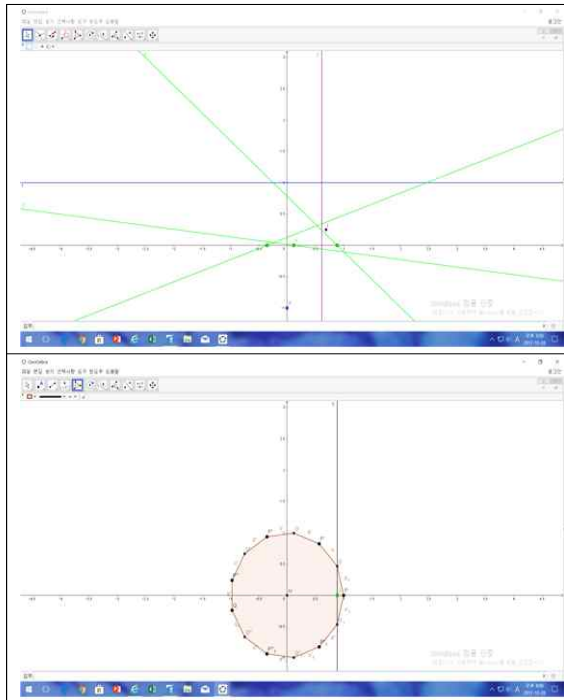
III.에서 얻은 삼차방정식들과 II-4.의 [삼차방정식 실근의 종이접기 작도법] 및 III-2.에서 제시한 이차방정식 실근의 종이접기 작도법을 이용하여, 다음과 같이 정칠각형, 정십삼각형, 정십구각형, 정삼십칠각형을 종이접기 작도하는 방법을 도출하였다.

1. 정칠각형의 종이접기 작도

	<p>종이 위에 직선 $y=1$과 점 $(0,-1)$을 종이접기 작도한다.</p>
	<p>직선 $x=-\frac{3}{8}$과 점 $(-\frac{5}{8}, \frac{1}{2})$를 종이접기 작도한다.</p>
	<p>종이접기 공리 6을 사용하여, 직선 $y=1$상에 점 $(0,-1)$이 오고, 직선 $x=-\frac{3}{8}$상에 점 $(-\frac{5}{8}, \frac{1}{2})$이 오도록 접는다. 세 접는선들과 x축과의 교점 중 가장 $+x$방향에 있는 점이 $(\cos \frac{2\pi}{7}, 0)$이 된다.</p>
	<p>이를 이용하여 정칠각형을 종이접기 작도할 수 있다.</p>

2. 정십삼각형의 종이접기 작도

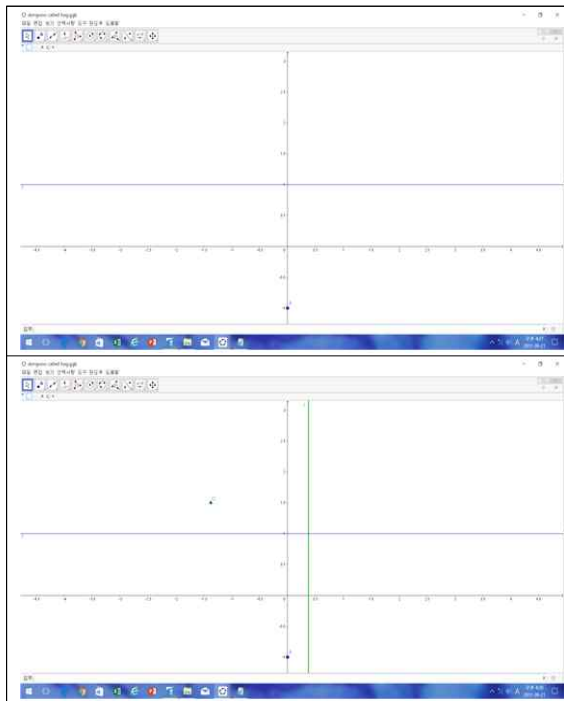
	<p>종이 위에 직선 $y=1$과 점 $(0,-1)$을 종이접기 작도한다.</p>
	<p>점 $(-\frac{1}{2}, \frac{3}{4})$를 종이접기 작도한다.</p>
	<p>종이접기 공리 5를 사용하여 직선 $y=1$상에 점 $(0,-1)$이 오고 접는선이 점 $(-\frac{1}{2}, \frac{3}{4})$를 지나도록 접는다. 이때 두 접는선과 x축과의 교점을 각각 점 $(y_0, 0)$, 점 $(x_0, 0)$라 하자. ($y_0 < x_0$)</p>
	<p>직선 $x = x_0 + \frac{y_0+1}{4}$과 점 $(x_0 - \frac{y_0+1}{4}, \frac{1}{4})$를 종이접기 작도한다.</p>



종이접기 공리 6을 사용하여 직선 $y=1$ 상에 점 $(0, -1)$ 이 오고, 직선 $x = x_0 + \frac{y_0 + 1}{4}$ 상에 점 $(x_0 - \frac{y_0 + 1}{4}, \frac{1}{4})$ 이 오도록 접는다. 세 접는 선들과 x 축과의 교점 중 가장 $+x$ 방향에 있는 점이 $(\cos \frac{2\pi}{13}, 0)$ 이 된다.

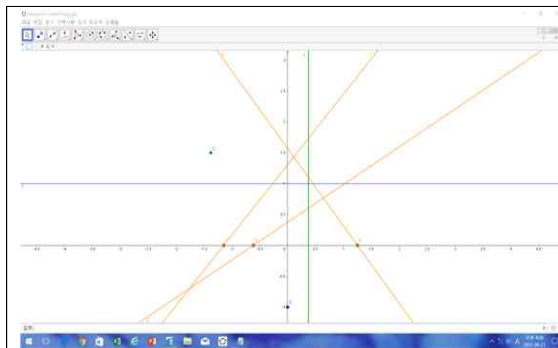
이를 이용하여 정십삼각형을 종이접기 작도할 수 있다.

3. 정십구각형의 종이접기 작도

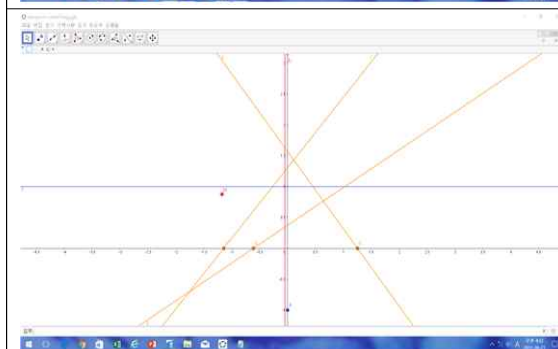


종이 위에 직선 과 점 $(0, -1)$ 을 종이접기 작도한다.

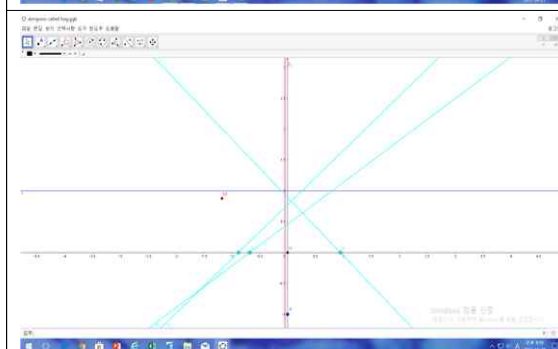
직선 $x = \frac{3}{8}$ 과 점 $(-\frac{11}{8}, \frac{3}{2})$ 을 종이접기 작도한다.



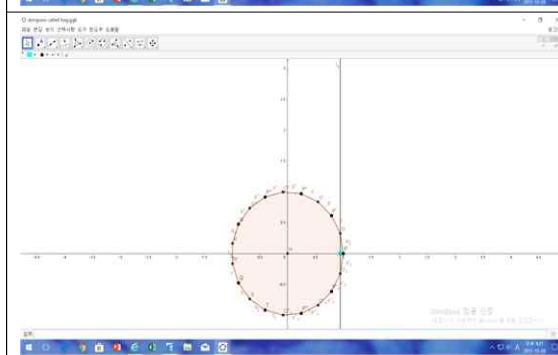
종이접기 공리 6을 사용하여 직선 $y=1$ 상에 점 $(0,-1)$ 가 오고 직선 $x=\frac{3}{8}$ 상에 점 $(-\frac{11}{8}, \frac{3}{2})$ 가 오도록 접는다. 이때 세 접는선과 x 축과의 교점을 각각 점 $(z_0, 0)$, 점 $(x_0, 0)$, 점 $(y_0, 0)$ 라 하자. ($z_0 < x_0 < y_0$)



직선 $x = x_0 + \frac{y_0 + 1}{4}$ 과 점 $(x_0 - \frac{y_0 + 1}{4}, \frac{2y_0 + 1}{4})$ 를 종이접기 작도한다.



종이접기 공리 6을 사용하여 직선 $y=1$ 상에 점 $(0,-1)$ 이 오고, 직선 $x = x_0 + \frac{y_0 + 1}{4}$ 상에 점 $(x_0 - \frac{y_0 + 1}{4}, \frac{2y_0 + 1}{4})$ 이 오도록 접는다. 세 접는선들과 x 축과의 교점 중 가장 $+x$ 방향에 있는 점이 $(\cos \frac{2\pi}{19}, 0)$ 이 된다.



이를 이용하여 정십구각형을 종이접기 작도할 수 있다.

4. 정삼십칠각형의 종이접기 작도

- 1) 종이 위에 직선 $y=1$ 과 점 $(0,-1)$ 을 종이접기 작도한다.
- 2) 점 $(-\frac{1}{2}, \frac{9}{4})$ 를 종이접기 작도한다.
- 3) 종이접기 공리 5를 사용하여 직선 $y=1$ 상에 점 $(0,-1)$ 이 오고 접는선이 점 $(-\frac{1}{2}, \frac{9}{4})$ 를 지나도록 접는다.
이때 두 접는선과 x 축과의 교점을 각각 점 $(u,0)$, 점 $(v,0)$ 라 하자. ($u > v$)
- 4) 점 $(u-\frac{v}{2}+\frac{5}{8}, \frac{1}{2}-v)$ 과 직선 $x=u+\frac{v}{2}-\frac{5}{8}$ 을 종이접기 작도한다.
- 5) 종이접기 공리 6을 사용하여 직선 $y=1$ 상에 점 $(0,-1)$ 가 오고 직선 $x=u+\frac{v}{2}-\frac{5}{8}$ 에 점 $(u-\frac{v}{2}+\frac{5}{8}, \frac{1}{2}-v)$ 가 오도록 접는다. 이때 세 접는선과 x 축과의 교점을 각각 점 $(a,0)$, 점 $(c,0)$, 점 $(f,0)$ 라 하자. ($f < a < c$)
- 6) 점 $(v-\frac{u}{2}+\frac{5}{8}, \frac{1}{2}-u)$ 과 직선 $x=v+\frac{u}{2}-\frac{5}{8}$ 을 종이접기 작도한다.
- 7) 종이접기 공리 6을 사용하여 직선 $y=1$ 상에 점 $(0,-1)$ 가 오고 직선 $x=v+\frac{u}{2}-\frac{5}{8}$ 에 점 $(v-\frac{u}{2}+\frac{5}{8}, \frac{1}{2}-u)$ 가 오도록 접는다. 이때 세 접는선과 x 축과의 교점을 각각 점 $(b,0)$, 점 $(d,0)$, 점 $(e,0)$ 라 하자. ($d < b < e$)
- 8) 점 $(a-\frac{b+1}{4}, -\frac{a+f}{2})$ 와 직선 $x=a+\frac{b+1}{4}$ 를 종이접기 작도한다.
- 9) 종이접기 공리 6을 사용하여 직선 $y=1$ 상에 점 $(0,-1)$ 이 오고, 직선 $x=a+\frac{b+1}{4}$ 상에 점 $(a-\frac{b+1}{4}, -\frac{a+f}{2})$ 이 오도록 접는다. 세 접는선들과 x 축과의 교점 중 가장 $+x$ 방향에 있는 점이 $(\cos \frac{2\pi}{37}, 0)$ 이 된다.
- 10) 이를 이용하여 정삼십칠각형을 종이접기 작도할 수 있다.

V. 결론 및 제언

본 연구에서는 $n=p_i$ 인 유클리드 작도 불가능한 정 n 각형의 종이접기 작도법을 구하는 문제가 결과적으로 $\cos \frac{2\pi}{n}$ 을 한 근으로 가지며 계수가 종이접기 가능한 실수인 삼차방정식을 구하는 문제로 환원됨을 보였다. 또 한, 이를 이용하여 $n=7, 13, 19, 37$ 일 때 해당하는 삼차방정식을 도출하였으며, 정칠각형, 정십삼각형, 정십구각형, 정삼십칠각형의 구체적인 종이접기 작도법을 구하였다.

본 연구의 결과를 모든 $n=p_i$ 에 대하여 일반화하기 위해서는 다음의 문제들을 고려하여야 할 것으로 보인다. 먼저, 초기 삼차방정식을 구성하는 $\cos \frac{2\pi}{n}$ 외의 다른 두 근 $\cos \frac{2k\pi}{n}, \cos \frac{2l\pi}{n} (k, l \in \mathbb{N}, k, l \leq \frac{n}{2})$ 에 대하여 n 과 k, l 간의 관계를 확인할 필요가 있다. 본 연구에서의 결과를 통해서는 일반성을 잃지 않고 $l \geq k$ 라 하였을 때

$2+k=l$ 의 관계가 있고, 본 연구와 같은 방법으로 삼차방정식을 도출할 수 있게 되는 k, l 은 순서를 고려하지 않았을 때 유일하다고 귀납적으로 추론하여 볼 수 있으나, 보다 정확한 관계식과 이에 대한 증명이 필요하다.

또한, 삼차방정식의 이차항의 계수 또는 이차방정식의 일차항의 계수를 구하기 위하여 세 근의 합을 한 근으로 갖는 종이접기 삼차 또는 이차방정식을 구할 때에도 다른 근을 놓을 필요가 있는데, 이에 대하여 추가 연구가 필요하다.

위의 문제들을 해결하고 연구 방법을 발전시킨다면, 일반적인 경우에 대한 정 n 각형의 종이접기 작도법을 도출할 수 있을 것이라 생각된다.

VI. 참고문헌

- [1] 송혜진 (2011). 정다각형과 최적 다각형의 작도와 종이접기에 관한 연구, 교육학석사 학위 논문.
- [2] Roger C. Alperin & Robert J. Lang (2009). One-, Two-, and Multi-Fold Origami Axioms.
- [3] 신현용, 한인기, 서봉건, 최선희 (2002). 종이접기의 대수학적 의미와 교수학적 활용. 수학교육논문집, 13(2), 457-475.

I 연구진 I

이동우 (Dongwoo Lee, 대전과학고등학교, hl1-6@hanmail.net) 주저자, 교신저자

김민규 (Mingyu Kim, 대전과학고등학교, kismmo@naver.com) 공동저자

박상준 (Sangjun Park, 대전과학고등학교, jsekhy@naver.com) 공동저자

전성민 (Sungmin Jun, 대전과학고등학교, jsm5792@naver.com) 공동저자

지도교사 : 남정훈 (Jeonghun Nam, 대전과학고등학교, jhnam12@hanmail.net)

지도교수 : 정상조 (Sangzoe Jeong, 목원대학교 수학교육과, math888@naver.com)

전주시 시내버스의 문제점 및 개선 방안 연구

곽동현 · 조민서 · 박동민 - 전북과학고등학교

A Research about Problems and Improvement of Bus Network in Jeonju

Donghyeon Gwak · Dongmin Park · Minseo Jo - Jeonbuk Science High School

국문초록

최근 많은 지역에서 인한 교통체증, 환경오염 등 도시문제의 해결 방안으로 시내버스의 이용 장려를 추진하고 있다. 전주시 역시 시내버스를 운영하고 있으나 얼마 전 노선 개편에도 불구하고 정류장 배치나 노선 분배의 효율성 면에서 미흡한 모습을 보였다. 전주시 시내버스 체계의 문제점을 해결하기 위해 본 연구에서는 최적노선망 결정 모형에 의한 노선망 개발, 교통취약지 분석과 적정 정류장 수 예측 모델, 적정 정류장 간격을 활용한 정류장 재배치라는 두 가지 측면에서 대안을 제시하였으며 이는 평균굴곡도, 직접통행자수 등의 평가지표에 의해 크게 개선되었음이 증명되었다. 본 연구를 통해 전주시 시내버스의 문제점을 해결할 수 있을 뿐만 아니라 타 지역에서의 노선체계 개선 시 본 연구가 활용될 수 있을 것이다.

중심어 : 전주시 시내버스, 노선망, 정류장, 노선망 개발, 정류장 배치

ABSTRACT

Recently, many cities have encouraged citizens to take the city bus for solving traffic congestion, environmental pollution, etc. Jeonju, which is one of the cities, changed the bus route lately, which remained deficient in terms of efficiency in not only arrangement of the bus stop but also division of the bus route. To solve these problems, we suggested alternatives about developing bus routes by the Model of Optimal Bus Route and rearranging bus stops by analysis of traffic-vulnerable area, Prediction Model of Optimal Numbers of Bus Stops, and ideal distance of bus stops. And those alternatives are proven to be improved by the evaluating indicators such as average degree of sinuosity, numbers of direct passengers, etc. We hope this research to be used to resolve the problems of bus network in Jeonju and to improve bus network in other cities as well.

Key words : city bus, bus network, bus stop, developing bus route, arrangement of bus stop

I. 서론

1. 연구 과제의 선정 동기

본 연구의 주제는 팀원 모두의 경험을 바탕으로 결정되었다고 할 수 있다. 각자 일상생활에서 시내버스를 자주 이용하여 왔는데, 특별히 우리 지역의 중심 도시인 전주시에서 통학을 하거나 친구를 만나는 등 여러 목적으로 시내버스를 이용할 일이 많았다. 또 필요에 따라 다양한 목적지에 향하면서, 동네마다 달리 나타나는 버스 노선과 정류소 배치의 특성 등에 관심을 가지고 유심히 관찰해 왔다.

그러한 가운데 전주시의 특정 지역은 시내버스 이용이 아주 편리한 반면, 그 외의 지역은 매우 불편함을 느꼈다. 도심지가 놀라운 속도로 확장하고 있음에도 노선과 정류소가 여전히 구도심 위주로 설계되어 있으므로 예코시티·혁신도시·서부신시가지 등 신도심은 그 규모에 비하여 버스교통이 발달하지 못한 셈이다. 이러한 불균형을 해소하기 위하여 전주시에서 2017년 2월 20일에 대규모 노선개편을 실시하였으나, 개편 이후 버스 이용객

이 오히려 감소하였음을 보면 개편이 절대 성공적이었다고 할 수 없다.

한편 전주시는 버스 파업이 잦기로 유명하다. 그 영향을 직접적으로 받는 우리는 무엇이 문제인지 궁금하였고, 이를 찾기 위하여 근무 형태 등에 대하여 조사한 바가 있다. 그 결과 무리한 운행 스케줄과 격일제 운행으로 운전원의 피로 문제가 크게 존재함을 찾을 수 있었다.

특별히, 사전에 시내버스와 관련된 충분한 자료를 수집·보유한 팀원이 있었다. 2011년 12월부터 이듬해 5월까지 계속된 전대미문의 초장기 버스 파업 시기에 즈음하여 버스 운전원의 처우 문제를 조사하기 위한 버스 배차시간표와 전 노선을 지속적으로 조사 및 연구하는 과정, 그리고 중학교 재학 중 학교에 불이익이 생기는 노선개편에 대응하기 위한 근거자료를 찾는 과정에서 쌓인 일종의 ‘데이터베이스’ 격이다. 2011년 이후 전주시 시내버스의 변화 양상과 현재의 모습을 가장 잘 알고 있는 팀원이라고 할 수 있겠다.

본 과정은 위와 같은 전주시 시내버스의 문제점 중 시민의 측면에서 직접 느끼는 노선·정류소와 관련된 부분을 수학적(통계적·조합론적) 방법으로 개선하는 것을 목적으로 하여 선정된 주제이다. 지역성이 강하고 모두에게 친근하며, 팀원에게 충분한 자료가 갖추어져 있으므로 ‘전주시 시내버스의 문제점 및 개선 방안’을 연구 주제로 채용하고 8개월 동안의 연구에 착수하였다.

2. 연구의 필요성

최근 교통체증 및 대기오염 등 도시 문제가 대두되고 있어 많은 지역에서는 자가용의 이용을 줄이고 대중교통 중심으로 원활하고 효율적인 교통정책을 수립하기 위한 수단으로 시내버스가 인식되고 있다. 시내버스는 노선 조정이 타 교통수단에 비해 용이하고 수요에 대한 대처가 쉬워 유연하다는 장점이 있다. 서울특별시에서는 관내 지하철과 버스에 대하여 첫차부터 오전 6시 30분까지 정상 운임의 20%를 할인하는 ‘대중교통 조조할인제’가 시행되고 있으며, 정부에서는 매월 넷째 주 수요일을 ‘대중교통의 날’로 지정하는 등 대중교통 이용을 국가적으로 장려하고 있는 추세이다.

또한, 노선 개편에 대해 구체적인 사례를 참고하면 2009년에 앞서 노선개편을 실시한 대전광역시도 개편 후 시내버스 이용객이 8% 증가하여 매년 약 300억 원의 비용 절감 효과를 가져 온 것으로 밝혀진 바 있다. 이는 잘 짜인 노선이 가져오는 이점을 잘 보여주는 예라고 할 수 있다.

본 연구에서 사례지역으로 선정한 전주시를 비롯하여, 지방의 중소 도시에서는 지하철이 개통한 경우가 많지 않으므로 대중교통은 곧 시내버스를 나타낸다. 지방자치단체마다 다양한 방식으로 시내버스를 운영하고 있으며, 전국의 시내버스의 대수는 2016년 5월에 전국버스운송사업조합연합회에서 낸 자료에 의하면 33,671대에 이르는 것으로 조사되었다.

시내버스는 환경오염 및 교통난을 비롯한 다양한 도시 문제와 공공의 편의를 동시에 추구하여야 하나, 사례 지역인 전주시의 시내버스에는 다양한 문제점이 편재하고 있었다. 다음은 사전 조사 결과 발견한 문제점 중 정류소와 노선망의 측면에서의 문제점과 그 예시 지역을 나타낸다.

가. 불합리한 정류소 배치

전주시에서 ‘불합리한 정류소 배치’는 일반적으로 아래의 경우를 수반한다.

- 1) 과다한 노선의 처리를 위하여 정류소를 같은 수요지역 내에서 여러 개로 분류한 경우
- 2) 정류소가 지역의 인구 밀도에 비하여 너무 많거나 적게 설치되어 있는 경우
- 3) 정류소 간의 거리가 과다하게 짧아 버스의 운행속도 저하를 일으키는 경우
- 4) 정류소 간의 거리가 균등하지 못한 경우

다음 그림 자료들은 이에 대한 대표적인 사례에 해당하는 곳을 나타내는 지도이다.



[Fig. 1] Old downtown of Paldal-ro, Wansan-gu



[Fig. 2] Junghwasan-dong, Seowon-ro, Wansan-gu

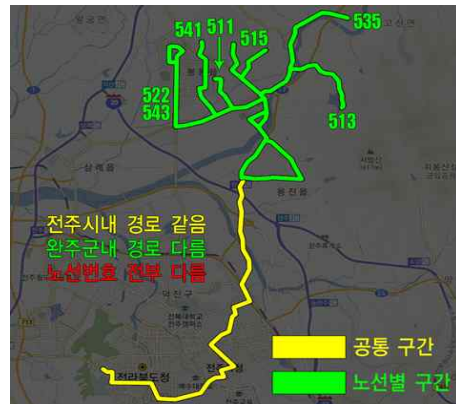
[Fig. 1]은 완산구 팔달로 구도심 지역으로, 위의 1)과 4)의 경우에 해당한다. 특별히 1)의 경우를 대표적으로 보여 주는 지역이며, 4)는 북쪽(중앙시장)과 남쪽(예술회관)으로 이웃한 정류소 간의 거리가 균등하지 못한 지역이다. [Fig. 2]는 완산구 서원로 중화산동 지역으로, 3)의 경우에 해당하는 대표적 예이다. 일반적으로 전주시의 정류소 간 거리는 300~500m 내외인데, 해당 지역의 경우 교통량이 많은 와중에 버스의 연속한 정차로 큰 혼잡을 보인다.

나. 비효율적인 노선

전주시의 시내버스 노선은 경제성 등 여러 면에서 타 도시에 비하여 비효율적 구조를 취하고 있다. 복잡한 도로 형태와 수요지 분포 등에 따른 노선의 거리 및 굴곡도 증가가 대표적 문제점으로 사전 조사되었다. 이와 관련하여 지속적으로 시민들의 요구가 이어진 가운데 2017년 2월 20일에 전주시에서 시내버스 노선의 개편을 실시하였으나, 동서 간의 큰 노선 격차를 해소하지 못한 점 등에서 시민들의 실질적 만족을 가져오지 못하였던 것으로 보였다.



[Fig. 3] Route 105 before restructured



[Fig. 4] Problems of bus network in Jeonju

[Fig. 3]은 2월 20일 개편 이후 사라진 105번 노선을 나타낸다. 105번 노선은 초장거리(편도 32.5km), 초장시간(편도 100~120분)이면서 굴곡도가 5.075로 매우 높은 편에 속하여 운전원의 피로가 가장 크게 발생하는 노선으로 지적되어 왔으며, 이에 따라 시에서는 105번 노선을 폐선 조치 0순위로 설정한 후 개편을 계획한 바 있다. 하지만 정치적·물리적 사유로 기존의 105번이 형성하고 있던 다양한 수요를 충실히 보완하지 못하여 아

중리 지역을 비롯한 연선 주민의 교통 불편이 심화된 것으로 나타났다.

[Fig. 4]는 노선에 있어서 두 가지 문제점을 동시에 보여준다. 전주시 내에서의 운행경로가 완전히 동일하지 만 종점지가 다르다는 이유로 노선번호가 모두 다른 점, 그리고 전주시의 시내버스 자본을 완주군에 과다 투자 하는 점을 알 수 있다. 특별히 후자는 외곽 지역에 환승 거점을 조성하여 시내 운행노선과 외곽 운행노선 간 연 계를 실시하는 지·간선제로 해결할 수 있으나, 2월 20일 개편에서 지·간선제가 시행된 지역이 이서면과 삼례 읍뿐인 만큼 본 연구에서 이를 확대하는 방안 역시 연구하는 것이 필요해 보였다.

한편, 전주시에서 운행하는 80% 정도의 노선이 남쪽 종점(비전대학교, 전주대학교, 평화동종점, 농협공판장, 구이면 등)에서 출발하여 전동성당, 중앙시장, 전북대학교를 경유하여 북쪽 종점(삼례읍, 송천동, 전주역 등)으 로 향하는 구조를 취하고 있다. 이는 동서 방향으로의 교통이 남북 방향에 비하여 힘들어지는 결과를 낳는다.

추가적으로 이러한 정류소 배치와 노선은 다음과 같은 문제점을 보인다. 첫째, 이용자가 많은 경우 불필요하 게 많은 우회와 정차를 함에 따라 통행시간이 길어지고, 둘째, 통행시간이 길어짐에 따라 대기시간 또한 길어져 노선의 정시성을 해친다. 더불어 운전자는 배차간격을 맞추기 위한 무리한 운행을 하여 사고의 위험 또한 증가 한다. 특히 정시성의 하락은 승객들이 대중교통에 대해 불만을 호소하는 가장 큰 요인으로 나타났다.

도시 대중교통의 편리성은 곧 도시의 질을 결정한다고도 할 수 있다. 그런데 전주시의 유일한 대중교통 수단 인 시내버스 체계는 위와 같은 문제점들을 가지고 있었으며 이는 자가용이나 택시 이용의 증가로 이어진다. 이 는 앞서 언급하였듯 도시 문제의 큰 주범이며, 시민의 입장에서 반드시 해결하여야 할 과제라고 생각하였다.

2. 연구 목적

본 연구에서는 시민이 생각하는 전주시 시내버스의 노선과 정류소에 관한 문제점을 정확히 파악하고, 개선이 필요한 노선이 무엇인지 선행 연구에 의하여 개발된 평가기법을 사용하여 도출한다. 이후 개선이 필요한 정류소 에 대해서는 해당 지역의 산업 구조 및 인구 밀도 등을 고려하여 적절한 거리로 정류소를 재배치하고, 노선에 대해서는 전주시를 네트워크 형태로 표현한 뒤 선행 연구에 의하여 개발된 최적노선 결정 모형을 이용한다.

따라서 사례지역 전주시의 시내버스 정류소를 개선하여 한정된 자원의 효율적 이용과 지역 주민의 불만 최소 화를 동시에 만족할 수 있는 물리적 시내버스 환경을 조성하고, 시내버스 노선을 획기적으로 개선하여 시내버스 서비스의 의의인 ‘도시 내 주요 지역의 연결’과 관련된 신속성과 접근성을 확보하는 것이 본 연구의 목적이라고 할 수 있다.

II. 이론적 배경

1. 노선체계 평가 지표

다음은 접근성 및 형평성을 고려한 시내버스 노선체계 평가기법의 적용과 대안적 평가

가. 중복도

한 노선이 어떤 다른 노선과 같은 루트를 따라서 운행하는 것을 의미하며, 중복의 정도를 따져 값을 산출한 다. 중복도를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$R_k = \frac{\sum_{l=1}^n (d_l^k \times n_l^k)}{\sum_{l=1}^n d_l^k} [2]$$

(R_k = k 노선의 중복도, d_l^k = k 노선의 l 구간의 길이, n_l^k = k 노선의 l 구간을 경유하는 노선의 수)
전체 버스노선의 중복도는 다음과 같이 산정한다.

$$TR = \frac{\sum_{k=1}^n R_k}{N} [2]$$

(TR =전체 버스노선의 중복도, R_k = k 노선의 중복도, N =전체 노선의 수)

나. 굴곡도

한 노선의 기점과 종점을 최단거리로 연결할 때의 거리 대비 기점과 종점간의 경로 거리를 의미한다.
굴곡도를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$B = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \frac{m_i}{t_i} [2]$$

(B =전체 노선의 평균 굴곡도, t_i =노선 i 의 최단경로, m_i =노선 i 의 운행경로상 실제거리)

다. 접근성

승차정류소 또는 하차정류소에서 목적지로 접근할 수 있는가를 보여주는 지표

$$A = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \frac{s_i}{(a_i - g_i)} [2]$$

(A =접근성, a_i = i 존의 면적, g_i = i 존의 개발제한구역 면적, s_i = i 존의 버스정류소 수)

2. 버스 정류장의 배치

가. 버스 정류장의 영향권 면적

영향권 면적의 기준은 아래와 같다. 우리나라의 경우 정류장의 영향권을 간선·지선노선체계로 각기 다르게 구분되어 정한다. 기존의 연구결과에 따르면 보통 간선버스의 영향권은 반경 300~400m, 지선버스는 반경 100~200m로 정한다.

〈Table 1〉 Influence area of a bus stop [1] requoted

구분	정류장 영향권 설정 방법	비고
국내	정류장 간격을 간선버스 600~800m, 지선버스 200~400m(간선버스 반경 300~400m, 지선버스 반경 100~200m)	정재은(1995)
	지선버스 정류장 간격을 300m 내외(반경 150m)	윤혁열(2002)
	버스 정류장 반경 150m	손의영, 안재성(2003)
국외	접근성의 서비스 수준으로 분류(LOS=도보시간 2~4분, 거리 101~200m)	Yu, Jason(1982), Transportation Enginnering, New York
	정류장에서부터 400m 거리	Transit Capacity and Quality of Service Manual(2003)

나. 공간분석방법-티센폴리곤

티센폴리곤(Thiessen Polygon)은 가장 근접한 지점 두 개를 연결한 후 연결된 선을 수직으로 이등분하여 연장선을 긋는 방식으로 하나의 점에서 인접한 주위의 점들과 연결한 선을 이등분하여 수직으로 연장선을 긋고 그 선들을 연결하여 폴리곤을 생성하는 것이다. 보통 티센폴리곤은 표본 추출된 표고점들을 연결하여 지형표고모델을 만드는 TIN(Triangulated Irregular Networks)을 생성하는 방법에서 많이 쓰이며 TIN의 생성을 위한 델로니 삼각형망을 구축하기 위해 주로 사용되는 방법 중의 하나이다. 한 점에서 가장 근접한 또 하나의 점의 이등분선들로 이루어지는 티센폴리곤은 상권분석에서 공간을 구획하는 방법에도 적용될 수 있다. 마찬가지로 정류장의 물리적인 거리의 접근성으로 측정하는 분석에 있어 정류장을 이용하는 지역을 구획하는데 티센폴리곤을 적용할 수 있다.

다. 적정 정류장 수 예측 모델 작성 [4, 6]

1) 상관분석

두 변량 x, y 의 공분산은 기호 s_{xy} 로 표현된다. 이 때, 공분산은 아래와 같이 정의된다.

$$s_{xy} = \frac{(x_1 - \bar{x})(y_1 - \bar{y}) + (x_2 - \bar{x})(y_2 - \bar{y}) + \dots + (x_n - \bar{x})(y_n - \bar{y})}{n - 1}$$

두 변량 x, y 의 상관계수는 기호 r_{xy} 로 표현된다. 이 때, 상관계수는 아래와 같이 정의된다.

$$r_{xy} = \frac{s_{xy}}{s_x s_y}$$

(단, s_x, s_y 는 각각 x, y 의 표준편차이고, s_{xy} 는 두 변량 x, y 의 공분산이다.)

이 때, 상관계수 r_{xy} 는 항상 -1이상 1이하의 값을 갖는데, 1에 가까울수록 양의 상관이 강하고, -1에 가까울수록 음의 상관이 강하다. 또한 0에 가까울수록 상관이 없다는 것을 의미한다.

2) 주성분분석

다변량의 데이터로부터 소수의 특징적인 변량을 합성하고, 그것에 의해서 데이터를 분석하는 것이 주성분분석이다. 변량을 합성할 때에는 데이터를 잘 간파하기 위하여 분산을 최대화 하게 한다.

이를 다시 정리하면 변량 x, y, z, \dots 가 있을 때, 합성변량 $u = ax + by + cz + \dots (a, b, c, \dots$ 는 $a^2 + b^2 + c^2 + \dots = 1$ 을 만족하는 상수)을 생각한다. u 의 분산 s_u^2 을 최대화 하는 계수 a, b, c, \dots 를 찾고 이 u 를 이용해서 데이터를 분석한다. 이것이 주성분분석이다.

이 때, 주성분이 데이터의 정보를 어느 정도 설명하고 있는가의 기준을 부여하는 것을 주성분분석의 기여율이라고 하며 기여율이 1과 비교하여 상당히 작은 경우 새로운 주성분을 만들어내는데, 이를 제2주성분이라고 한다.

3) 중회귀분석

중회귀분석이란 복수의 변량으로부터 구성되는 데이터에 있어서 특정의 변량을 나머지 변량의 일차식으로 예측하는 분석법이다. 이 일차식을 회귀방정식이라고 하며, 특정의 변량을 목적변량, 나머지 변량을 설명변량이라고 부른다. 예측치가 목적변량과 좋은 근사치를 보일 수 있도록 예측치와 실측치의 차이인 잔차의 제곱합을 최소로 하도록 식을 세운다.

이 때, $Y = b_0 + b_1x + b_2u + b_3v$ 라는 회귀방정식을 세우기 위하여 아래의 방정식을 이용한다.

$$\begin{pmatrix} s_x^2 & s_{xu} & s_{xv} \\ s_{xu} & s_u^2 & s_{uv} \\ s_{xv} & s_{uv} & s_v^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_{xy} \\ s_{uy} \\ s_{vy} \end{pmatrix}$$

이와 관련해서 b_0 는 변량의 평균은 회귀방정식을 충족한다는 성질을 이용한 다음의 관계식을 이용해서 구한다.

$$\bar{y} = b_0 + b_1\bar{x} + b_2\bar{u} + b_3\bar{v}$$

4) 중회귀분석의 평가

잔차제곱합이 최소가 되기 위해서는 잔차의 분산이 최소여야 한다. 따라서, 회귀방정식을 정할 때에는 예측치의 분산이 최대가 되도록 해야 하는데, 이에 따라 결정계수(기여율)을 아래와 같이 정의한다.

$$R^2 = \frac{\text{목적변량 예측치의 분산}}{\text{목적변량 실측치의 분산}}$$

R^2 이 1에 가까우면 회귀방정식은 데이터의 정보를 충분히 흡수하고 있는 것이며, 0에 가까우면 데이터를 표현할 수 없다는 것을 의미한다. 이 때 R^2 은 예측치와 목적변량의 상관계수인 중상관계수의 제곱과 정확히 일치하며, 이는 R^2 이 1에 가까울수록 데이터의 정보를 충분히 흡수한다는 이전의 논의와 일치한다. [4], [6]

3. 시내버스 최적 노선망 결정 모형

가. 그래프 이론 [5]

1) 그래프

그래프란 유한개의 꼭짓점(vertex)의 집합과 두 꼭짓점을 원소로 갖는 변(edge)의 집합으로 이루어진 것으로 이 꼭짓점을 노드(node)라고 부르기도 한다. 이 때 노드와 이들을 잇는 변을 나열한 것을 길(walk)이라고 하며 같은 변을 두 번 이상 포함하지 않는 길을 경로(path)라고 한다. 특히, 경로의 시작점과 끝점이 같은 경로를 회로(cycle)라고 한다. 또한, 그래프에서 두 노드가 연결되어 있을 때 두 노드는 연결되어 있다고 하며 그래프의 임의의 두 노드가 연결되어 있는 그래프를 연결그래프라고 한다.

2) 네트워크

네트워크는 그래프에 수치 파라미터가 있는 그래프의 특수한 형태이다. 일상에서 직면하게 되는 많은 문제들이 이런 그래프로 표현 가능하며, 수학적으로 정확하게 모형화가 되고 시각적인 표현은 간단명료하기 때문에 복잡한 시스템 및 구조 등을 다루는 전문가에서부터 간단한 문제를 해결하려는 비전문가에게까지 많은 분야에서 적용되고 있다. 특히, 네트워크 이론에 의한 최적화 알고리즘이 다른 어떤 최적화 알고리즘보다 훨씬 더 효율적이기 때문에, 변수와 제약조건이 많은 문제에 자주 사용된다. 이와 같이 네트워크를 사용하면 시각적이고 개념적인 표현이 가능하다는 이점과 네트워크로 표현된 문제는 효율적인 최적화 알고리즘으로 해결할 수 있기 때문에 교통, 통신, 에너지 분배, 물류, 컴퓨터 네트워크 등에 널리 사용되고 있다.

네트워크는 행렬을 이용하여 표현하는데, 인접행렬, 노드-링크 접속행렬, 링크 리스트, 연결 리스트 등의 표현법이 있다.

3) 트리

트리는 회로를 갖지 않는 연결그래프로 정의한다. 이런 트리구조는 네트워크와 함께 실생활에서 많이 사용되는데, 전기의 대진표, 가계의 족보, 조직의 구성표 등에서 사용된다. 트리의 제일 위에 있는 노드를 근노드라고 하고, 그 아래에 연결된 노드를 자노드라고 한다.

본 모형에서는 네트워크 탐색을 위하여 네트워크를 트리로 표현하고 이 트리를 탐색하여 후보노선을 선정하는 기법을 개발하였다. 한 개의 터미널 노드를 트리의 근노드로 하고 이 터미널 노드의 인접노드들을 자노드로 하는 트리로서 하며, 각 자노드들의 인접노드를 그 자노드의 자노드로 구성하였다. 이렇게 트리로서 표현된 네트워크는 일회의 방문만을 허용하는 네트워크 탐색 기법 문제를 해결하면서도 트리 탐색기법을 이용하여 실행 가능한 후보 노선을 생성할 수 있다. [5]

나. 동적계획법

동적계획법은 의사결정의 순서가 필요하고 문제의 변수들이 시간의 경과나 결정의 단계에 따라 변하는 다단계 의사결정문제 해결에 적용된다. 기본원리는 매우 복잡하고 큰 수리적 모형을 풀기 쉬운 여러 개의 작은 부분 문제로 나누어 이들 부분문제에 대한 최적 결정을 차례로 구함으로써 결국 큰 문제에 대한 최적의 해를 구하는 접근방법이다.

- ① 문제가 각 단계에서 정책결정이나 선택을 요구하는 개별 단계들로 나눌 수 있다. 동적계획법문제는 일련의 상호 연관된 결정이나 선택을 하게 되고, 이들 각각은 문제의 한 단계에 해당한다.
- ② 각 단계는 그 단계의 시작과 관계된 다수의 상태를 가진다. 일반적으로 상태란 문제의 각 단계에서 시스템에 발생할 수 있는 가능한 조건이나 상황들이다. 상태의 수는 유한한 것일 수도 있고, 무한한 것일 수도 있다.
- ③ 각 단계에서 정책결정의 효과는 현재의 상태를 다음 상태로 전환시킨다.
- ④ 해법절차는 문제 전체에 대한 최적정책을 찾기 위해서 설계된다. 이 해법절차는 모든 단계에서 가능한 모든 상태들에 대한 최적해를 동시에 구해준다.
- ⑤ 현재의 상태가 주어지면, 차후의 상태에 대한 최적정책은 이전의 단계에서의 선택과는 무관하다. 그러므로 각 단계에서의 최적선택은 현재의 상태에만 의존할 뿐 현재의 상태에 도달한 과정과는 무관하다. 이것이 동적계획법의 최적원리이다.
- ⑥ 해법절차는 첫 번째 단계나 마지막 단계의 최적정책을 찾음으로써 시작된다.
- ⑦ 회귀관계를 이용할 경우에 해법절차는 초기 단계에서 출발하여 최종적인 최적결정을 구할 때까지 계속된다. 최종적인 최적결정은 특정조건으로 통제 가능하다.

수많은 후보노선들 중의 일정수의 노선으로 설정가능한 노선망 중에서 최적의 노선망을 선택할 때, 수천 개의 후보노선을 조합생성법에 의해 해결하기란 불가능하므로 동적계획법을 적용하여 해결한다.

다. 최단경로 알고리즘

1) 다익스트라(Dijkstra) 알고리즘

다익스트라 알고리즘은 출발점이 정해질 때 각 꼭짓점까지의 최단거리를 구하는 알고리즘이다. 꼭짓점이 n 개인 그래프에서 출발점을 각 꼭짓점으로 바꿔가면서 다익스트라 알고리즘을 n 번 적용하면 모든 꼭짓점 사이의 최단경로나 최단거리를 구할 수 있다.

```

 $S := \emptyset, S^* := V, L(s) := 0$ 
 $s$ 가 아닌 모든  $v \in V$ 에 대하여  $L(v) := \infty$ 
while ( $t \notin S$ ) {
 $L(v) = \min\{L(w) | w \in S^*\}$ 이 성립하는 한 꼭짓점  $v \in S^*$ 를 선택하여  $v$ 를  $S$ 에 포함시킨다.
 $S^* := S^* - \{v\}$ 
 $v$ 에 연결된 모든 꼭짓점  $w \in S^*$ 에 대하여 if ( $L(w) > L(v) + W[v, w]$ ) then  $L(w) := L(v) + W[v, w]$ 

```

여기서 s 는 출발점을, S 는 최단경로가 이미 결정된 꼭짓점들의 집합, $L(v)$ 는 출발점 s 에서 v 까지 최단거리를 의미한다.

2) 플로이드(Floyd) 알고리즘

꼭짓점이 n 개인 그래프에서 모든 꼭짓점 사이의 최단경로나 최단거리를 구하는 알고리즘으로 1962년 플로이드(Floyd)가 개발하였다. 알고리즘은 다음과 같다.

- 모든 꼭짓점 사이의 최단거리를 표현하기 위하여 $n \times n$ 행렬 $D^{(n)} = (d_{ij}^n)$ 을 만든다. 행렬의 (i, j) 성분 d_{ij}^n 은 꼭짓점 i 에서 꼭짓점 j 까지의 최단거리를 의미한다.
- 꼭짓점의 번호 k 를 1부터 n 까지 바꿔가면서, 1부터 k 까지의 꼭짓점을 중간점으로 이용할 때, 꼭짓점 i 에서 꼭짓점 j 까지의 최단거리를 성분으로 하는 $n \times n$ 행렬 $D^{(1)} = (d_{ij}^1), D^{(2)} = (d_{ij}^2), \dots, D^{(n)} = (d_{ij}^n)$ 들을 차례대로 만들어 나간다.

$k=1$ 일 때: 1을 중간점으로 이용할 때, $n \times n$ 행렬 $D^{(1)} = (d_{ij}^1)$ 를 조사한다.
 $k=2$ 일 때: 1, 2를 중간점으로 이용할 때, $n \times n$ 행렬 $D^{(2)} = (d_{ij}^2)$ 를 조사한다.
 $k=3$ 일 때: 1, 2, 3을 중간점으로 이용할 때, $n \times n$ 행렬 $D^{(3)} = (d_{ij}^3)$ 를 조사한다.
 이와 같이 계속해서
 $k=n$ 일 때: 1, 2, ..., n 을 중간점으로 이용할 때, $n \times n$ 행렬 $D^{(n)} = (d_{ij}^n)$ 를 조사한다.

- k 가 1부터 시작하여 n 이 되면, 모든 꼭짓점이 중간점으로 사용되었을 때의 각 꼭짓점 사이의 확정된 최단거리를 성분으로 하는 $n \times n$ 행렬 $D^{(n)} = (d_{ij}^n)$ 가 완성된다.

라. 교통존간 OD의 교차로간 OD로의 전환

본 연구에서 이용 가능한 자료는 시내버스 OD자료로, 시내버스를 이용한 교통존에서 교통존으로의 이동만을 알 수 있다. 이런 시내버스 OD자료는 통행자가 실제로 승·하차 하는 버스정류장에 대한 정보를 포함하고 있지 않으므로, 교통존간 시내버스 OD자료를 교차로간 OD자료로 전환해야 한다.

기본적으로 버스의 이용은 교차로의 도보이용권에서 발생한다는 가정에 근거하면서 토지이용 및 지리적 특성을 고려하여 해당 교차로의 인근 교통존에 대한 이용률을 정성적으로 분석하고, 이를 근거로 교차로간 OD자료를 생성한다. 교차로의 유입과 유출에 대한 이용은 동일한 비율로 발생한다고 본다.

$$T_{mn} = T_{ij} \times G_{im} \times A_{jn} [3]$$

(G_{im} =교통존 i 의 교차로 m 의 유출통행 이용률, A_{jn} =교통존 j 의 교차로 n 의 유입통행 이용률,

T_{ij} =교통존 i 의 교통존 j 로의 유출, T_{mn} =교차로 m 의 교차로 n 으로의 유출)

$$\text{단, } \sum_{\forall i} G_{im} = 1, \sum_{\forall j} A_{jn} = 1$$

1) 최적 노선망 결정 모형 [3]

① 후보 노선 생성 알고리즘

터미널노드 파일, 인접노드 파일, 최단경로 파일을 입력하고 아래의 제약조건을 만족시키는 노선을 트리탐색 기법을 이용해 출력한다.

S.T. 1 - 후보노선은 순환노선을 가지지 않는다.

S.T. 2 - 두 노드간의 최대허용초과거리를 초과하는 노선은 제거한다. (노선의 과대굴곡문제)

S.T. 3 - 노선의 시작과 종료는 터미널노드에서만 가능하다.

② 후보노선의 검토 및 정리

생성된 후보노선 중에서 중간경로는 동일하지만 출발·도착 터미널이 교체된 형태를 가지는 2개의 일방노선은 1개의 왕복노선으로 통합하고, 기존노선을 선별하고 후보노선집합에 추가한다.

③ 최적노선망 결정

교통존간 OD를 교차로간 OD로 전환한 OD파일, 최단경로 파일, 후보노선 파일을 입력한다. 대다수의 이용자가 최소의 초과통행시간으로 원하는 목적으로 통행할 수 있도록 허용초과통행거리 내에서 직접통행자수가 최대가 되게 동적계획법으로 설계한다.

Ⅲ. 연구 방법 및 절차

1. 최적 노선망 결정 모형에 의한 버스 노선 개발

가. 노선 개발 범위 설정

〈Table 2〉 Range of developing routes

노드 번호	노드명	노드 번호	노드명	노드 번호	노드명
1	전주농협공판장교차로	32	신흥종합철물건재앞	63	송천도서관앞
2	거마로사거리	33	전라북도교육청입구	64	송천역네거리
3	양지중학교앞	34	우림교서쪽	65	발단리네거리
4	꽃밭정이네거리	35	몰오브효자앞	66	동산광장교차로
5	서학광장	36	완산교남서쪽	67	반월초교앞
6	싸전다리교차로	37	다가교사거리	68	동물원삼거리
7	충경로사거리	38	진북교동쪽	69	송천삼거리북쪽
8	진북광장-팔달로측	39	터미널사거리	70	솔내고등학교앞
9	금암광장교차로	40	사평교북동쪽	71	안골네거리
10	교보빌딩사거리	41	전주대학교신정문앞	72	흑석골
11	종합경기장앞	42	전주대학교구정문동쪽	73	동도미소드림A앞
12	덕진광장사거리	43	척동네거리	74	대왕장미타운A앞
13	가련광장교차로	44	서곡LG앞	75	용산리
14	팔복주유소앞	45	마전교분군	76	호반유치원입구
15	여의광장사거리	46	전북지방경찰청앞	77	전주대경문장
16	호남제일문광장교차로	47	전북도청남서쪽	78	JTV전주교통방송
17	조촌교차로	48	전주우체국, 전북지방우정청앞	79	대한적십자사
18	화개네거리	49	이동교동쪽삼거리	80	전주IC
19	미래페이퍼앞	50	완산구청	81	동산육교
20	서곡사거리	51	전주근영우편취급국앞	82	발단마을
21	서곡교동쪽	52	전북은행서진로지점앞	83	송천정보학교
22	박천수정형외과앞	53	완산소방서앞교차로	84	분내
23	통일광장교차로	54	삼익수영장앞	85	동산과교
24	삼성전자서비스서전주센터앞	55	좁은목앞	86	전주역종점
25	효자광장교차로	56	병무청오거리	87	대학로지하차도
26	선너머네거리	57	전주인후교회앞	88	백자삼거리
27	진북터널사거리	58	아중역광장교차로	89	전주시양묘장
28	백제교사거리	59	우아네거리	90	기린봉
29	사대부교사거리	60	호성네거리	91	좁은목
30	명주골네거리	61	차량등록사업소앞교차로		
31	역전광장교차로	62	대송장레식장앞	터미널 노드	72~91

나. 교차로간 OD파일 구축

교통존은 전주시 법정동을 기준으로 정하였으며 2015년 12월에 산출된 자료를 사용하였다[7]. 교차로가 주거용면적, 상업용면적에 위치한 경우 이용률이 많다고 판단하여 다른 교차로보다 이용률을 2배로 설정하였다. 78개 교통존간 91개 교차로간의 총 통행자 수는 41931명이다.

다. 후보노선 생성

최대비용초과거리는 최단거리의 150%로 설정하였고, 이에 따라 출력된 후보노선의 개수는 495539개이고, 정리·검토된 후보노선의 개수는 415340개이다.

라. 최종 노선 결정

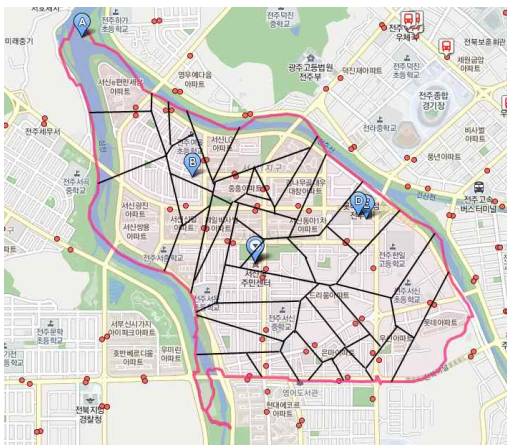
출력된 후보 노선 중 다음을 판단 기준으로 하여 노선을 최종적으로 선정하였다.

- 1) 후보 노선 중 과대하게 짧은 경우 운행의 효율성을 떨어뜨리므로 노선 거리가 12000m 이하인 노선은 제외하였다.
- 2) 기종점지가 같고 중간 경유지가 매우 비슷한 경우 직접통행자의 수가 가장 많은 노선을 선정하였다.
- 3) 도로 구조상 노선의 운행이 불가능한 경우 제외하였다.

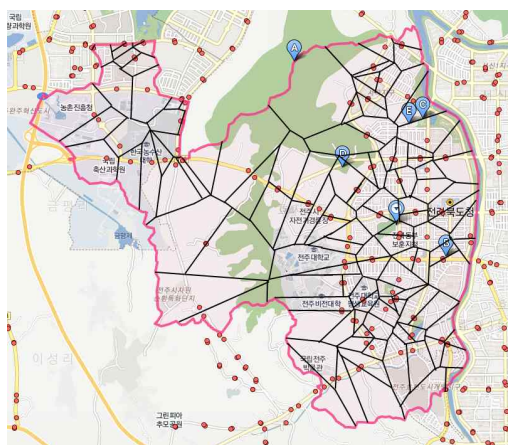
2. 교통취약지 분석과 예측모델에 의한 정류장 배치

가. 티센폴리곤을 이용한 교통취약지 분석

하나의 정류장에서 인접한 주위의 정류장들과 연결한 선을 이등분하여 수직으로 연장선을 긋고 그 선들을 연결하여 폴리곤을 생성하여 33개 행정동의 교통취약지를 분석하였다.



[Fig. 5] Thiessen polygon of Seosin-dong



[Fig. 6] Thiessen polygon of Hyoja 4-dong

나. 적정 정류장 수 예측

1) 모델 지역 선정

설문조사 결과 만족도가 가장 높은 서울특별시를 모델로 하여 예측 모형을 구축하였다. 모형을 위해 2017년 6월에 집계된 승하차 인원 자료와 2015년 6월에 집계된 인구수, 가구수 및 각종 면적 자료를 활용하였다 [9-10].



[Fig. 7] Satisfaction of public transportation by region [8]

2) 도입 변수 목록

정류장 수를 목적변수로 하고 인구수, 가구수, 주거지역 등 총 10개의 설명변수를 선택하여 성분분석을 실시하여 요인들을 분류하고 분류된 요인들에 대해서 각 주성분축별로 1개의 요인들을 선택하여, 중회귀분석을 실시하였다.

〈Table 3〉 List of variables

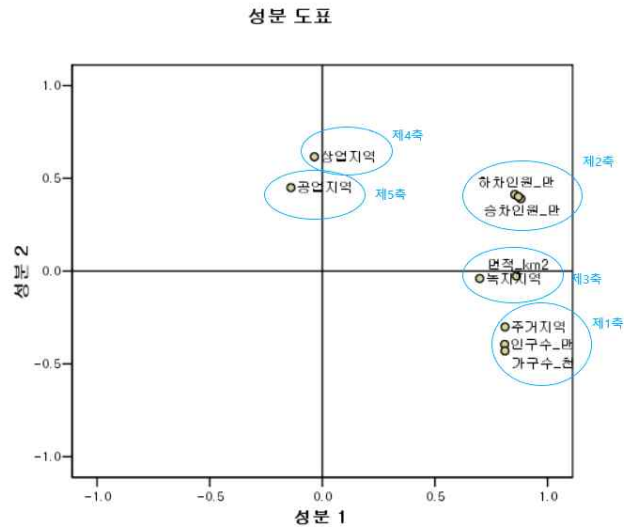
구분	도입변수
변수명	인구수(만), 가구수(만), 주거용면적(km ²), 승차인원(만), 하차인원(만), 승하차인원(만), 면적(km ²), 녹지지역(km ²), 상업용면적(km ²), 공업용면적(km ²)

3) 변수간 상관계수 분포

〈Table 4〉 dispersion of correlation coefficient between variables

	인구수	가구수	주거용 면적	승차 인원	하차 인원	승하차 인원	면적	녹지 지역	상업용 면적	공업용 면적
인구수	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—
가구수	0.982	1	—	—	—	—	—	—	—	—
주거용 면적	0.688	0.710	1	—	—	—	—	—	—	—
승차 인원	0.536	0.536	0.602	1	—	—	—	—	—	—
하차 인원	0.507	0.510	0.566	0.993	1	—	—	—	—	—
승하차 인원	0.523	0.525	0.586	0.998	0.998	1	—	—	—	—
면적	0.647	0.633	0.704	0.637	0.587	0.615	1	—	—	—
녹지 지역	0.491	0.476	0.440	0.477	0.432	0.457	0.925	1	—	—
상업용 면적	-0.225	-0.265	-0.056	0.067	0.067	0.067	0.108	0.031	1	—
공업용 면적	-0.049	-0.103	-0.461	0.004	-0.002	0.001	-0.093	-0.072	0.028	1

4) 주성분 분석에 의한 변수군



[Fig. 8] Groups of variables by principal component analysis

주성분 분석결과 총 5개축이 선정되었으며 각 주성분 축별로 다시 선택된 7개의 변수를 가지고 동별 적정 정류장 수 예측 모델을 구축하였다. 선택된 변수들은 다음과 같다.

〈Table 5〉 Selected groups of variables

구분	변수
제1축 (인구특성)	인구수, 가구수, 주거용면적
제2축 (이용자특성)	승차인원, 하차인원, 승하차인원
제3축 (면적특성)	면적, 녹지지역
제4축 (상업지특성)	상업용면적
제5축 (공업지특성)	공업용면적

5) 후진 회귀분석에 의한 모형구축

분석된 모형의 수정된 R^2 값이 가장 크고 추정 값의 표준오차가 가장 작은 모형 3을 정류장 수 설명모델로 택하였다. 분석된 모형의 R^2 값은 0.798로 매우 설명력이 높으며 계수의 t값도 유의하고 유의확률도 0.05이하이며 다중 공선성 분석 결과 공선성이 나타나지 않는 것으로 보인다.

〈Table 6〉 Constructing models by backward regression analysis

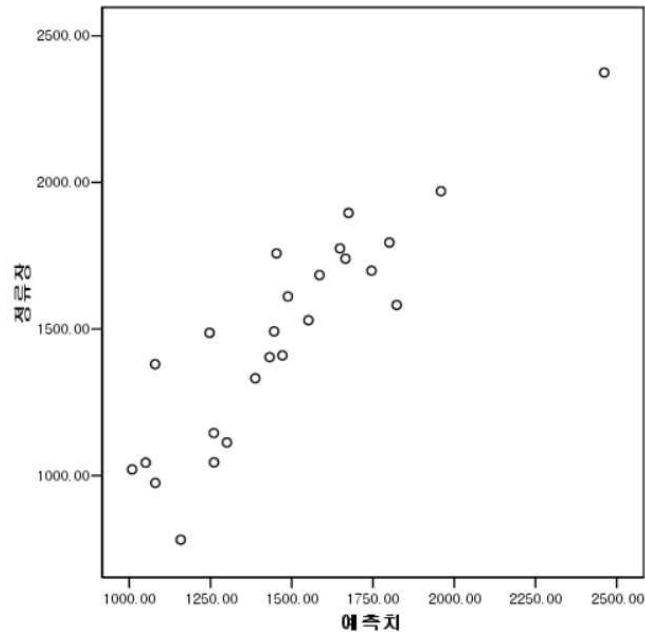
모형	R	R^2	수정된 R^2	추정값의 표준오차
1	0.898	0.806	0.756	183.02344
2	0.897	0.804	0.765	179.35455
3	0.894	0.798	0.770	177.68555
4	0.882	0.777	0.757	182.40565

〈Table 7〉 Analysis of variance table

모형		계급합	자유도	평균계급	F	유의확률
1	선형회귀분석	2651740.6	5	530348.115	15.832	.000
	잔차	636483.986	19	33497.578		
	합계	3288194.6	24			
2	선형회귀분석	2644833.5	4	661208.365	20.555	.000
	잔차	643361.100	20	32168.055		
	합계	3288194.6	24			
3	선형회귀분석	2625179.3	3	875059.760	27.716	.000
	잔차	663015.281	21	31572.156		
	합계	3288194.6	24			
4	선형회귀분석	2556214.5	2	1278107.3	38.414	.000
	잔차	731980.032	22	33271.820		
	합계	3288194.6	24			

〈Table 8〉 Coefficient table

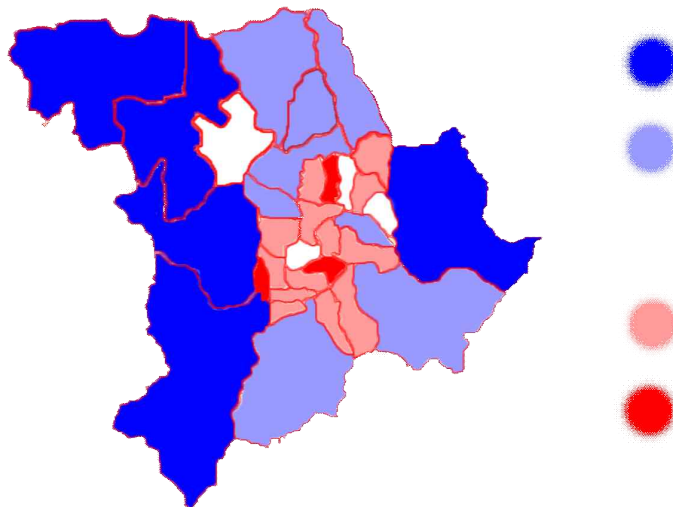
모형 3	비표준화 계수		표준화 계수		t	유의확률	공선성 통계량	
	B	표준오차		베타			공차한계	VIF
(상수)	314.693	134.513			2.339	0.029		
승하차인원	13.751	3.531	0.503		3.895	0.001	0.575	1.738
면적	8.659	5.859	0.218		1.478	0.154	0.442	2.265
주거지역	25.674	12.182	0.303		2.108	0.047	0.466	2.145



[Fig. 9] Dispersion of mesasurement value and predictive value

6) 예측값에 따른 정류장 분포

예측값에 따른 정류장 수를 지도에 시각화시켜 표현하였다. 파란색으로 갈수록 정류장 수가 많은 것을, 빨간색으로 갈수록 정류장 수가 적은 것을 의미한다.



[Fig. 10] Dispersion of bus stops by predictive value

IV. 연구 결과

1. 최종 노선망

본 연구에서는 수요가 충분하고 선형이 양호하다(굴곡도가 낮다)고 판단되는 기존 노선 11개를 선정하였다. 완주군을 비롯한 시계의 지역의 운행상태를 최대한 현재 상태 그대로 보존할 수 있도록 시계의 지역 운행노선을 위주로 선정하였다. 기존 노선 목록은 아래 표와 같다.

〈Table 9〉 List of old bus routes

노선 번호	출발 노드	경유노드	도착 노드	굴곡도
350	73	4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 68 69 65	82	114.87
354	76	32 41 48 49 50 26 37 7 8 9 10 11 12 13 68 69 70 63 64 65	82	170.01
380	73	4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 67 66	81	111.49
383	75	1 2 3 54 24 25 26 37 7 8 9 10 11 12 13 14 15 67 66	81	128.36
385	77	42 41 48 49 35 25 36 37 7 8 9 10 11 12 13 14 15 67 66	81	178.25
420번대*	74	2 53 54 24 25 36 6 7 56 8 9 10 11 12 13 14 15 67 17	80	142.75
470번대*	73	4 5 6 7 56 8 9 10 11 12 13 14 15 67 17	80	120.29
500번대*	77	42 41 48 49 35 25 36 37 7 56 8 71 30 31 60 61	85	157.32
540번대*	73	4 5 6 7 8 9 10 11 29 30 31 60 61	85	115.82
752	83	64 70 69 68 13 12 11 10 9 8 56 7 6 55	91	111.98
800번대*	76	32 33 34 35 25 36 6 7 8 71 59	88	112.77

*420번대) 423, 424, 425, 428

*470번대) 470, 475, 479

*500번대) 511, 513, 514, 515, 520, 521, 522, 535, 541, 543

*540번대) 508, 536, 542, 545, 546

*800번대) 807, 814, 816, 834, 837, 839, 855, 866

이상의 기존 노선 11개와 신규 노선 34개, 총 45개의 노선을 채택하여 최종 노선망을 구성하였다. 목록은 아래 표와 같으며, 기존 노선에는 음영 처리하였다.

〈Table 10〉 List of final bus routes

일련 번호	출발 노드	경유노드	도착 노드
1	84	62 63 64 70 69 68 13 12 40 28 39 10 9 8 56 7 37 26 25 24 54 3 4	73
2	80	17 16 15 14 13 12 40 28 39 10 11 29 30 71 57 56 7 6 5	72
3	85	61 60 31 30 29 9 10 11 12 40 28 39 38 27 52 51 50 49 35 53 2	74
4	85	61 60 31 30 71 8 56 7 37 26 50 49 35 25 24 4 3 54 53 2	74
5	76	32 33 48 47 46 45 21 22 23 28 40 12 11 10 9 8 71 30 31	86
6	73	4 24 25 26 27 38 8 9 29 11 12 13 68 69 70 64 65 66 67 16 17	80
7	89	58 57 56 7 8 9 10 11 12 40 28 23 22 21 45 44 43 42	77
8	82	65 69 68 13 12 40 28 39 10 9 8 56 7 37 36 25 35 53 2	74
9	76	32 33 48 47 46 52 27 38 8 7 56 57 71 30 60 31	86
10	80	17 67 16 15 14 13 68 69 70 64 63 62 61 60 31 30 71 57 58	89
11	75	1 34 35 49 50 51 52 22 40 28 39 9 10 11 12 13 68 69 70 63 64	83
12	91	55 56 8 38 39 28 40 12 13 14 15 16 17 67 66	81
13	85	61 60 30 71 57 56 7 37 26 50 51 47 42 41 32 33 34 1	75
14	73	4 24 25 36 37 7 56 57 71 30 31 60 61 62 63 64	83
15	80	17 16 15 14 13 21 20 44 43 46 47 48 49 50 26 25 35 53 2 3 4	73
16	86	31 30 29 11 10 39 38 27 26 25 35 34 33 32 41 42	77
17	89	58 59 71 30 29 11 28 39 38 27 52 46 43 44 20 19 18	79
18	77	42 41 48 49 35 25 36 37 7 8 9 10 11 12 13 14 15 67 66	81
19	73	4 24 25 26 50 51 52 22 23 28 11 29 30 60 61 62 63 64 65	82
20	90	57 56 7 8 9 39 28 23 22 21 20 19 14 15 16 18	79
21	76	32 41 42 43 46 45 21 13 68 69 70 64 63 62 61 60 31	86
22	83	64 70 69 68 13 12 11 10 9 8 56 7 6 55	91
23	86	31 59 58 57 56 7 37 36 25 35 53 54 3 4	73
24	91	55 56 8 38 39 28 40 22 21 45 44 20 19 18 17 67 66	81
25	81	66 67 16 15 14 19 20 21 45 46 47 42 41 32 33 34 35 25 24 54 53 2	74
26	73	4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 68 69 65	82
27	91	55 56 8 71 30 31 60 61 62 63 64 65 66 67 17	80
28	75	1 2 3 54 24 25 26 37 7 8 9 10 11 12 13 14 15 67 66	81
29	85	61 62 63 70 69 68 13 21 45 44 43 46 47 48 49 35 25 24 54 3 4	73
30	81	66 67 16 15 14 19 20 44 45 46 52 51 50 49 48 33 34 1	75
31	90	57 71 8 38 39 28 40 22 21 20 19 18 17 16 67 66	81
32	83	64 70 69 68 13 21 45 46 52 51 50 49 48 33 34 35 53 2	74
33	76	32 33 34 35 25 36 6 7 8 71 59	88
34	77	42 41 48 49 35 25 36 37 7 56 8 71 30 31 60 61	85
35	79	18 19 20 44 45 46 52 51 50 49 35 25 36 6 7 56 57 58	89
36	79	18 16 15 14 13 68 69 65 64 63 62 61 60 31	86
37	73	4 5 6 7 8 9 10 11 29 30 31 60 61	85
38	79	18 19 20 44 43 42 41 48 49 50 26 37 7 56 57 58 59	88
39	76	32 41 48 49 50 26 37 7 8 9 10 11 12 13 68 69 70 63 64 65	82
40	78	19 20 44 45 46 52 51 50 49 35 25 36 37 7 6 5	72
41	79	18 19 20 44 45 46 52 51 50 49 48 33 34 35 53 54 24 4	73
42	73	4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 67 66	81
43	91	55 56 57 71 59 31 60 61 62 63 70 64	83
44	73	4 5 6 7 56 8 9 10 11 12 13 14 15 67 17	80
45	74	2 53 54 24 25 36 6 7 56 8 9 10 11 12 13 14 15 67 17	80

2. 최종 정류장 배치

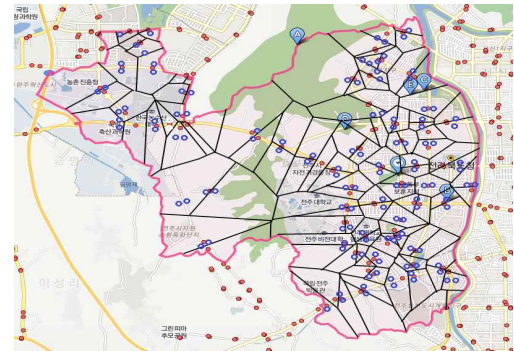
티센폴리곤이 그려진 지도를 기준으로 적정 정류장 거리와 적정 정류장 수 예측모델의 결과를 활용하여 기존 정류장을 최소한 변경하지 않도록 함을 원칙으로 하되 필요한 경우 정성적인 판단 하에 정류장을 새로이 배치하였다. 기존 1110개의 정류장을 재배치하여 총 1117개의 정류장을 배치하였다. 아래는 행정동별 변화된 정류장 수와 4개의 대표적인 행정동의 정류장 배치이다.

〈Table 11〉 Arrangement of bus stops

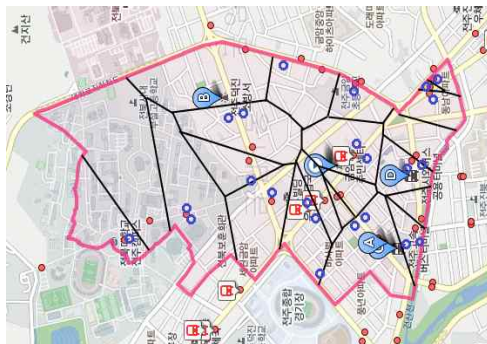
행정동	기존 정류장 수	개편된 정류장 수	변화량
중앙동	22	29	7
풍납동	23	27	4
노송동	22	27	5
완산동	8	14	6
동서학동	35	38	3
서서학동	15	20	5
중화산1동	9	12	3
중화산2동	22	27	5
서신동	39	46	7
평화1동	7	8	1
평화2동	70	60	-10
삼천1동	12	14	2
삼천2동	13	18	5
삼천3동	89	83	-6
효자1동	7	6	-1
효자2동	14	18	4
효자3동	8	12	4
효자4동	127	121	-6
진북동	30	25	-5
인후1동	17	21	4
인후2동	13	13	0
인후3동	29	31	2
덕진동	45	46	1
금암1동	23	23	0
금암2동	7	8	1
팔복동	35	31	-4
우아1동	15	24	9
우아2동	43	38	-5
호성동	46	41	-5
송천1동	24	30	6
송천2동	69	67	-2
조촌동	71	66	-5
동산동	91	73	-18



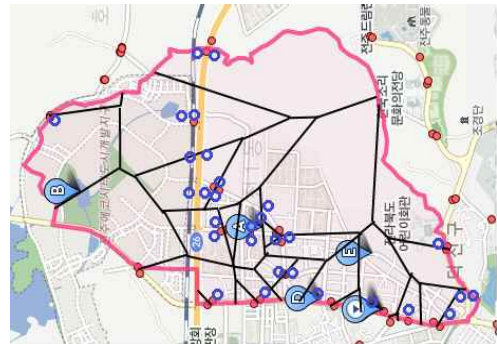
[Fig. 11] Rearrangement of bus stops of Nosong-dong



[Fig. 12] Rearrangement of bus stops of Hyoja 4-dong



[Fig. 13] Rearrangement of bus stops of Geumam 1-dong



[Fig. 14] Rearrangement of bus stops of Songcheon 1-dong

3. 완성된 노선망의 평가

직접통행자수, 환승통행자수, 굴곡도, 중복도 등 다양한 지표를 통해 기존노선과 최적노선망을 비교한 결과는 아래의 표와 같다. 기존노선의 중복도 지표는 2017년 5월 24일 개편된 노선안을 기준으로 산출하였다. 총버스이용객은 Ⅲ-1-(2)에서 산출된 총 통행자 수로 간주했으며 중복도를 제외한 나머지 지표는 최적 노선을 결정하면서 산출된 계산 결과이다.

〈Table 12〉 Comparison between old network and final network

평가항목	기존노선	최적노선망
총버스이용객(A)	41931	41931
직접통행자(B)	32638	38271
1차환승통행자(C)	8117	1319
총통행자(B+C)	40755	39590
직접통행률(B/A × 100)	77	91
1차환승통행률(C/A)	20	3
총통행률((B+C)/A)	97	94
평균굴곡도(%)	184.54	139.66
중복도	12.60	7.86

총통행률은 다소 줄어들었으나 1번만 노선을 이용하여 목적지까지 갈 수 있는 직접통행자수가 매우 증가하였다. 또한 평균굴곡도가 184.54%에서 139.66으로 매우 감소하였으며 중복도의 수치가 12.60에서 7.86으로 매우 작아졌다.

아래는 버스 정류장의 재배치 결과 달라진 행정동별 접근성을 나타낸 것이다.

〈Table 13〉 Examples and evaluation of restructured routes

기존 노선	개편 노선	기존노선	최적노선	
		직접통행자	3301	12361
		1차환승통행자	0	0
		총통행자	3301	12361
		평균굴곡도	229.40	143.40
		중복도	11.75	9.32

〈Table 14〉 Change of accessibility

행정동	중앙동	풍남동	노송동	완산동	동서학동	서서학동	중화산1동	중화산2동	서신동	평화1동	평화2동
기존	18.03	11.62	10.53	8.33	2.23	4.98	6.92	13.50	16.53	6.31	4.48
개선	23.77	13.64	12.92	14.58	2.41	6.64	9.23	16.56	19.49	7.21	3.84
행정동	삼천1동	삼천2동	삼천3동	효자1동	효자2동	효자3동	효자4동	진북동	인후1동	인후2동	인후3동
기존	17.14	17.33	3.25	6.86	16.09	11.43	7.73	18.07	14.41	8.90	17.37
개선	20.00	24.00	3.03	5.88	20.69	17.14	7.37	15.06	17.80	8.90	18.56
행정동	덕진동	금암1동	금암2동	팔복동	우아1동	우아2동	호성동	송천1동	송천2동	조촌동	동산동
기존	9.38	16.08	6.73	5.09	7.08	1.92	6.09	5.24	5.57	2.93	5.35
개선	9.58	16.08	7.69	4.51	11.32	1.70	5.43	6.55	5.41	2.72	4.29

V. 결론 및 고찰

본 연구는 전주시의 시내버스의 문제점을 개선하기 위해 정류장 측면, 노선 측면에서 개선 방안을 만드는 것이었으며, 이를 통해 전주시 시내버스의 문제점을 파악하고 그 대안을 마련할 수 있었다. 이 개선 방안은 먼저 노선 개발에 있어서 교통혼 OD파일을 만드는데에 기존 모형 대비 객관성을 부여하였고 다양한 노선체계 평가 지표를 고려하지 않았던 기존 모형과 달리 다양한 평가 지표를 활용하여 그 결과에 대한 실용성을 더욱 부각할 수 있었다. 따라서 기존 연구와 달리 전주시 실정에 맞고 소비자의 요구에 맞는 적절한 노선을 개발하였다는 것에 의의가 있다. 정류소 배치에 있어서는 이를 위한 연구는 거의 전무하다시피 한데, 이를 위해 교통취약지 분석, 수요 예측 모델 작성을 이용함으로써 정류소 배치를 위한 방법을 제공하였음에 의의가 있다. 더 나아가 정류장 배치 및 노선 개발을 수학적으로 접근하는 방법을 제시함으로써 전주시뿐만 아니라 이러한 방법이 다른 지역의 정류장 재배치 및 노선 개발에 활용할 수 있을 것이라고 기대한다.

다음은 본 연구의 한계점이다.

먼저 정류장을 재배치할 때에는 적정 정류장 수 예측 모델, 적정 간격, 티센 폴리곤을 활용한 교통 취약지

분석을 이용하였는데, 예측모델 작성에서 자료의 부족으로 정류장 수에 영향을 미칠 수 있는 다양한 원인을 종속변수로 고려하지 못하였다.

다음으로 노선망 구축에 있어서는 최적 노선망 결정 모형을 활용하였는데, 노선망을 만들 때 다양한 교차로와 경로를 프로그램의 실행시간의 한계로 고려하지 못하였다. 또한 알고리즘에서 순환노선을 갖는 경우를 제외하였기 때문에 실제 노선에서 흔히 볼 수 있는 순환노선을 제작하지 못하였고, 교차로간 OD파일 전환 시 각 교차로별 수요의 다양한 원인을 분석하지 못해 다소 부정확할 수 있다는 점에서 한계가 있다.

실제 전주시에 적용할 수 있도록 하기 위해서는 향후 배차간격 및 노선별 버스의 배치 수까지 고려해야 할 것이다.

VI. 참고문헌 및 자료

- [1] 박지영. (2008). 버스이용의 접근성 차이에 따른 교통취약지 분석 : - 서울시 강동구 버스 이용자를 대상으로 -, 석사학위논문, 경희대학교
- [2] 양선규, 장현봉. (2012). 접근성 및 형평성을 고려한 시내버스 노선체계 평가기법의 적용과 대안적 평가. 국토계획, 47(2), 133-143.
- [3] 서용구. (1998). 시내버스 최적 노선망 결정 모형, 석사학위논문, 경상대학교 대학원
- [4] 김명열. (2010). 土地利用을 考慮한 市内BUS 利用者 豫測에 關한 研究 : 광주광역시를 중심으로, 석사학위논문, 호남대학교 대학원
- [5] 조성진, 김한두. (2011). 조합론과 그래프이론, 경문사
- [6] 노형진, 유자양. (2016). SPSS 및 EXCEL을 활용한 다변량분석 이론과 실제, 지필미디어
- [7] 2015년 12월 전주시 법정동별 OD파일 BD_LTV_B211_분석보고서_지역관광_교통_V1.6, 전주시청
- [8] http://www.molit.go.kr/USR/NEWS/m_71/dtl.jsp?id=95071887 2012년도 대중교통 현황조사 결과 발표, 도시광역교통과, 국토교통부
- [9] 2017년 6월 서울시 버스노선별 정류장별 승하차 인원 정보, 정보공개, 서울특별시 도시교통본부 교통기획관 교통정책과
- [10] 2015년 6월 구별 인구수, 가구수 및 용도별 면적, 서울 열린 데이터 광장

I 연구진 I

곽동현 (Donghyeon Gwak, 전북과학고등학교, kdhyun0237@naver.com) 주저자

조민서 (Minseo Jo, 전북과학고등학교, chuosobu1688@naver.com) 교신저자

박동민 (Dongmin Park, 전북과학고등학교, dongmin_park@naver.com) 공동저자

지도교사 : 김형주 (Hyoungju Kim, 전북과학고등학교, soyo2510@naver.com)

상호지지(Reciprocal Frame) 구조의 특성 및 다른 건축물 구조와의 비교를 통한 안정성 연구

김민지 · 강지훈 · 김성현 · 이동우 · 정기현 - 인천과학고등학교

Study on the Characteristics and the Stability of Reciprocal Frame Architectures with Different Building Architectures

Minji Kim · Jihoon Kang · Sunghyun Kim · Dongwoo Lee · Gihyeon Jeong - Incheon Science High School

국문초록

본 연구에서는 현재 사용되고 있는 특수 건축 기법을 사용하더라도 건축물의 재료비용, 안정성에 문제가 생기는 것을 보고 이를 효율적으로 보완할 수 있는 구조에 대해 탐구하게 되었다. 이를 위하여 우리는 직접 상호지지 구조물을 제작하고, 구조물의 특성을 파악하였다. 또한 수직 하중에 대한 변형되는 정도, 힘 분산, 진동 상황에서의 변형되는 정도 측정 실험을 진행하고 일반 돔, 지오데식 돔과 비교하며 상호지지 구조의 안정성에 대하여 연구하였다. 제작 결과, nexorade가 순환하는 정다각형 고리를 이루는 것을 알 수 있었다. 변형률과 힘 분산 실험 결과, Nexorade와 다빈치 다리는 힘의 분산이 고르게 될수록 변형 정도는 커졌고, 일반 돔과 지오데식 돔은 변형률이 커지면서도 힘 분산 또한 고르게 되지 않았다. RF 돔에서는 직사각형 구조가 가장 안정하다는 것을 알 수 있었다. 결론적으로 RF 돔이 다른 구조물들보다 안정하다는 것을 알 수 있었다.

중심어 : 상호지지 구조, 돔, 힘의 분산, 안정성, 쪽매맞춤

ABSTRACT

This study was motivated to investigate how we could effectively supplement the structures using existing special construction techniques by looking at construction material cost and the stability problem. For this, we have produced reciprocal frame structures of on our own, identified its characteristics, and tested the angle of deformation, force distribution, and vibration experiment. We found that all of the structures had circulating rings of regular polygons. As a result of force distribution and the angle of deformation, Nexorade and Da Vinci bridge showed even force dispersion and had various changes of angle. However, general domes and Geodesic domes showed unequal forces on various locations and showed different changes of angle. In case of RF dome, rectangular dome showed to be most stable among all of the RF domes. In conclusion, RF dome turned out to be or stable than other structures.

Key words : Reciprocal Frame, Dome, Stability, Force Distribution, Tessellation

I. 서론

1995년에 발생한 삼풍백화점 붕괴 사고는 건축물 구조가 하중을 버티지 못하여 발생한 대표적인 참사였으며, 이후로도 수많은 붕괴 사고로 인해 엄청난 인적 물적 피해가 발생하게 되자 현대 사회에서는 건축물의 안전에 대한 중요도가 증가하고 있다. 이러한 사고들에 대한 뉴스를 접하면서 힘의 분산과 안정성에 효과적인 건축물 구조는 어떤 것이 있는지 기초 조사를 진행하였으며, 그 과정에서 상호지지(Reciprocal Frame, RF) 구조에 대하여 관심을 갖게 되었다. 상호지지 구조는 비교적 구조가 간단하여 쉽게 제작할 수 있고, 구성 요소끼리 서로 맞물려 있으므로 맞물림이 없는 기존 구조물과 비교하여 안정성이 높을 것으로 기대되었다. 본 연구에서는 상호

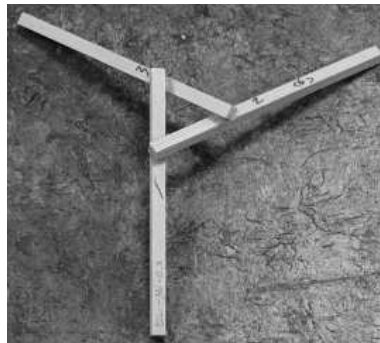
지지 구조물들과 일반 건축물들의 제작과정을 연구하고, 힘 센서와 초고속 카메라를 이용하여 힘의 분산, 변형 되는 정도, 진동상황에서의 특징을 비교함으로써 상호지지 구조의 안정성에 관하여 알아본다.

II. 이론적 배경 및 선행연구 분석

1. 용어 정리

가. 상호지지구조(Reciprocal Frame Structure, 이하 RF 구조)

구조물을 이루는 막대 1이 다른 막대 2를 아래서 지지하고, 막대 2와 연결되어 있는 다른 막대 3이 막대 1를 아래에서 서로 지지하는 것과 같이 구성요소들이 서로 돌아가면서 지지함으로써 힘을 분산시키도록 설계된 구조를 말한다. 가장 간단한 형태의 RF 구조는 [Fig. 1]과 3개의 막대로 구성된다[1]. RF 구조는 막대가 이루고 있는 단위 도형이 쪽매맞춤(tessellation)을 이루는 구조와 그렇지 않은 구조로 나눌 수 있다.



[Fig. 1] Basic RF structure consist of three sticks

나. 쪽매맞춤 (Tessellation)

특정 도형으로 평면 또는 공간을 빈틈없이 메꾸는 것을 말한다. 쪽매맞춤의 종류에는 하나의 정다각형 도형으로만 이루어진 정칙 쪽매맞춤과 한 꼭짓점에서 시작하여 여러 가지 정다각형으로 이루어진 반정칙 쪽매맞춤이 있다. 본 연구에서는 여러 가지 정다각형을 이용하여 반정칙 쪽매맞춤을 완성한 RF 구조를 제작하고, 중앙 부분이 높게 오도록 휘어지게 함으로써 RF 돔을 제작하였다.

다. Nexorade (단위 RF 구조)

RF 구조 중 쪽매맞춤 RF 구조를 만드는 기본적인 단위 구조를 의미한다. 정삼각형, 정사각형, 정오각형 등 정다각형 모양을 이루는 경우가 많다. 단위 RF 구조의 구성 요소는 Engagement length (겹침 길이, 줄여서 E.L.로 표기하는 경우도 있음), Nexor (막대), Engagement window (겹쳐지는 막대들이 이루는 도형)로 설명할 수 있다[2]. 본 연구에서는 RF 구조의 전체적인 힘 분산뿐만 아니라 Nexorade의 Engagement Length와 Engagement window의 넓이 등을 조절하면서 단위 구조에서의 힘 분산을 파악하였다.

라. 다빈치 다리 (Da Vinci Bridge)

르네상스 시대에 레오나르도 다빈치가 구상한 다리로써[2] 위에서 아래로 누르는 힘이 다리 위의 한 점에 작용하면 힘이 가해진 막대가 아래에 연결된 막대를 차례대로 누르면서 힘이 양옆으로 분산되는 원리를 이용하여 다리가 힘을 지탱하는 구조이다. 별도의 연결부가 필요 없으므로 비교적 제작과 해체가 쉽다. 하지만, 위에서 아래로 누르는 힘은 좌우로 분산이 되는 반면 아래에서 위로 가해지는 힘이나 좌우로 가해지는 힘에서는 버티지 못한다는 단점이 있다.

마. 돔 구조 (Dome Structure)

반구 형태의 건축물을 말한다. 돔의 단면은 아치 형태로, 켜기들이 좌우로 힘을 분산시키는 구조를 가지고 있다. 많은 기둥을 세우지 않고 넓은 공간을 덮을 수 있다는 장점이 있어 과거부터 많이 발전해 온 건축물 중 하나이다. 구조를 기준으로 하였을 경우에는 매우 다양한 종류가 나올 수 있는데, 본 연구에서는 RF구조와 일반적인 형태의 돔을 사용하였다. RF 돔 구조에서는 막대가 이루는 도형이 꼭대맞춤을 형성한다는 특징이 있다.

바. 지오데식 돔 (Geodesic Dome)

버킨스터 풀러(Buckminster Fuller, 1895~1983)가 고안한 돔형 구조물[3]로, 비슷한 길이의 직선 부재를 써서 구면 분할을 한 트러스 구조로 만들어진 돔 형식 중 하나이다. 막대와 막대가 서로 지탱하며 힘을 분산하는 RF 구조 형태가 아닌 일반적인 형태의 건축물 중 제작이 가장 간단하여 본 연구에서는 RF 구조물과 안정성을 비교하기 위한 대조군 중 하나의 건축물로 사용하였다.

2. 선행 연구 분석

상호지지 구조는 여러 가지로 분류할 수 있으며 단일 유닛과 여러 유닛, 정다각형 여부, 휘어진 부분의 개수 등의 기준이 있을 수 있다는 것이다[4]. 상호지지의 예시 중 하나인 nexorade는 라틴어로 고리, 연결이라는 어원을 가진 nexor에서 만들어진 단어이며, 여러 가지 변인을 만들 수 있다[2]. 이 점에 있어 본 연구에서는 nexorade를 여러 변인을 조절하면서 만들고자 하였다. 한편 nexorade는 꼭대맞춤에 기초해서 만들 수도 있으며[1] nexorade를 유전자 알고리즘을 통해서 최적화할 수 있다는 것을 알 수 있었다[5]. 기존의 nexorade의 정의는 본 연구에서 말하는 RF 돔까지로 넓은 범위를 말하지만[2] 본 연구에서는 nexorade를 이루는 기본 유닛인 nexor fan만을 일컫는 말로 의미를 축소하였다.

과거부터 존재하던 RF의 예로는 Da Vinci가 노트에 스케치한 Da Vinci 다리가 있다. 또한 lamellae 형태로 nexorade가 있을 수 있는데 이에 버틸 수 있는 특정 각도가 존재한다[4]. 이에 본 연구에서는 구조물에 각도 변화에 관심을 가지고 연구하고자 하였다.

III. 연구 방법 및 절차

1. 실험 장치 구성

가. 카메라

변형되는 정도를 이미지로 측정하기 위해 카메라를 사용하였다. 2대의 카메라를 각각 x축과 y축 방향으로 배치하고, 구조물 위에 추를 올려 수직 하중을 가하기 전과 후의 사진을 촬영하였다. X축에는 Nikon D7500, y축에는 Sony RX100V를 사용하였다.

나. 힘 센서

누르거나 잡아당기는 힘의 크기를 측정할 수 있는 센서로, 주로 힘 센서와 범퍼 혹은 후 어태치먼트로 구성된다. 본 연구에서는 가해지는 하중을 측정하므로 범퍼 어태치먼트를 연결하였다. 힘 센서로 받아들인 정보를 소프트웨어를 통해 나타내면 시간에 따른 힘의 변화 데이터를 얻어낼 수 있다.

다. 진동 발생 장치

진동에 대한 구조물의 반응을 알아보기 위해 진동 발생 장치를 사용하였다. 진동 발생 장치는 진동횟수를 조절할 수 있는 진동운동기구의 일부 구조를 변형하여 사용하였다. 상하로 진동이 일어나므로 지진 등 외부 진동에 대한 건축물의 반응을 조사하는 실험에 사용하였다. 이때 진동 발생 장치는 시소와 같이 진동하며, 초고속 카메라를 이용하여 진동에 대한 구조물의 움직임과 변형 정도를 관찰함으로써 구조물의 진동에 대한 반응을 분석하였다.

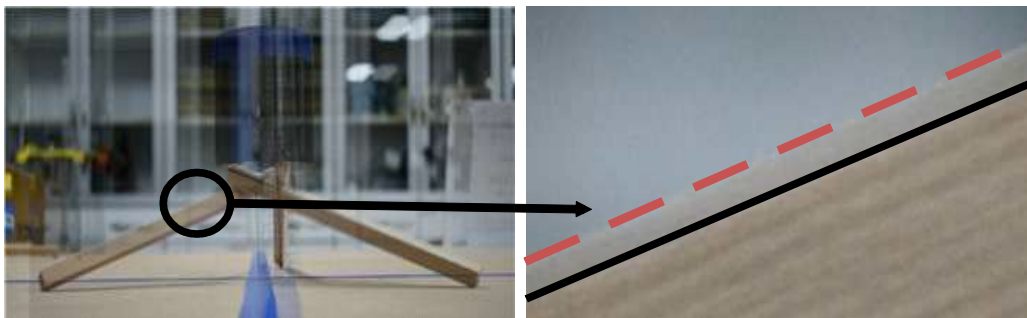
라. 초고속 카메라

초고속 카메라는 구조물의 진동에 대한 반응을 알아볼 때 진동에 따른 구조물의 움직임과 모양 변화 등에 대한 정밀한 데이터를 얻어낼 수 있다. 초고속 영상 촬영은 Photron FASTCAM Viewer 소프트웨어와 연결함으로써 가능한데, 최대 500,000 fps까지 촬영 가능하다. 재생할 때의 초당 프레임 수를 조절함에 따라 느리게 재생이 가능하며, 프레임 하나하나를 세밀하게 관측하면서 원하는 프레임에 대한 사진을 얻어낼 수 있다.

2. 실험값의 측정 및 분석 방법

가. 변형되는 정도 측정

구조물의 변형을 측정하기 위하여 막대가 수평면과 맞닿아 있는 각도를 측정하였다. 각도의 변형을 어느 막대에 힘이 얼마나 가해지는지에 대한 척도로 삼았고, 3kg 추를 올린 후의 막대 각도와 추를 올리기 전의 막대 각도의 차이 값을 계산하였다. 카메라를 이용하여 외부 힘에 의한 변형이 일어나기 전과 후의 장면을 촬영한 후 [Fig. 2]와 같이 두 사진을 투영하고 각 부분에서의 각도를 GIMP 2 프로그램을 이용하여 측정하였다. [Fig. 2]의 오른쪽 확대 사진에서 점선은 추를 올리기 전, 실선은 추를 올린 후를 나타낸다.



[Fig. 2] A composed photo on the left (Enlarged photo on the right) shows the difference of the height of the stick with the weight on it and without on it. The dotted line shows the height of the stick without the weight, and the solid line shows the height of the stick with the weight.

나. 힘 분산 측정

힘 센서를 구조물이 바닥과 맞닿은 한 지점에 놓고 전체적인 높이 균형을 위하여 나머지 부분의 구조물 아래에 힘 센서와 같은 두께의 판을 두어 높이를 맞추었다. 3kg 추를 올릴 때 추가로 가해지는 하중을 기록하여 분석하였다.

다. 진동 상황에서 안정성 측정

진동 장치에 구조물을 고정시킨 후 1초당 좌우가 각각 상하로 6.5번 진동하는 상황에서 구조물의 안정성을 측정하기 위하여 초고속 카메라를 사용하였다. 진동상황에서 변화되는 정도를 측정할 때에는 250 fps로, 무너지는 시간을 측정 할 때에는 50fps로 설정하고 촬영된 사진을 프레임별로 확인하여 진동이 왼쪽, 오른쪽, 중간일 때의 각도나 구조물이 무너질 때까지의 시간을 측정하고 구조물들끼리 비교하였다. 이를 통해 진동 상황에서 RF 구조물의 변형과 안정성을 측정할 수 있었다.

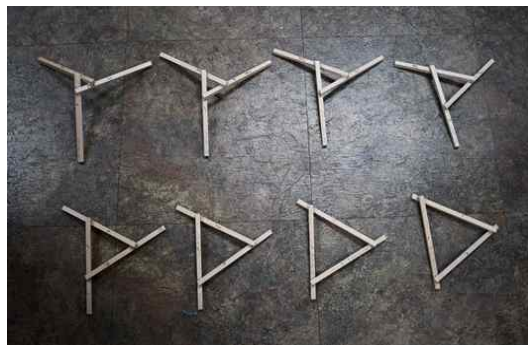
IV. 연구 결과

1. 구조물의 제작

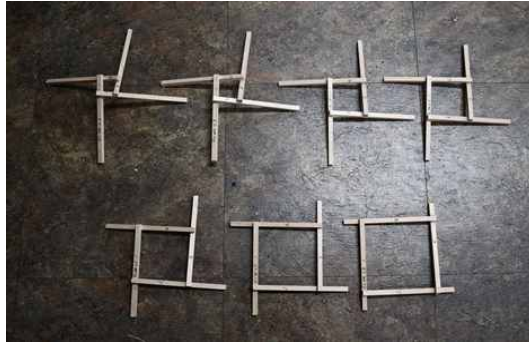
길이가 달라지는 막대를 제외하고는 두께 1cm x 1cm 정사각형, 길이 20cm를 기본 규격으로 한 막대를 사용하였다. 기본 상호지지 구조는 이음새를 사용하지 않지만 본 연구에서는 구조물을 복잡하게 만드는 과정과 실험을 위하여 구조물에 힘을 가하는 과정에서 모양 유지가 어려워 글루건을 일부 사용하였다.

가. n-nexorade

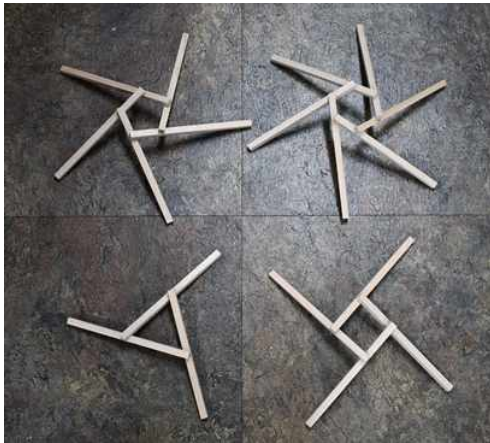
Nexorade 구조는 전체 구조물을 이루는 단위 구조인 만큼 조작변인을 다양하게 하여 구조물을 제작하였다. 총 4가지 갈래로 나누었는데, Engagement window 모형을 각각 삼각형([Fig. 3] 참고)과 사각형([Fig. 4] 참고)으로 일정하게 만든 구조, Engagement window 넓이를 일정하게 만든 구조([Fig. 5] 참고), Engagement length를 일정하게 만든 구조([Fig. 6] 참고)로 나누었다. 모든 구조는 기본 막대로 제작하였다.



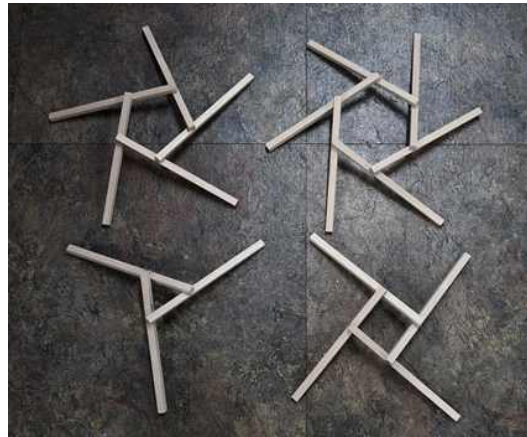
[Fig. 3] 3-nexorades with different Engagement length



[Fig. 4] 4-nexorades with different Engagement length



[Fig. 5] Nexorades with different number of the sticks(3-6) having the same area of the Engagement window



[Fig. 6] Nexorades with different the number of the sticks from 3 to 6 without change of the Engagement length

나. 다빈치 다리

본 연구에서는 단위 구조가 계속 반복되면서 전체 다빈치 구조물을 이루는 특성을 찾았고, 이를 이용하여 기본 막대로 단위 구조를 여러 개 만들어 조립하는 방식을 통해 다빈치 다리를 만든 후 실험하였다. [Fig. 7]과 같이 동일한 단위 구조를 이용하여 단위 구조 길이가 일정한 다빈치 다리와 [Fig. 8]과 같이 전체 길이가 일정(40.5cm)하고 단위 구조의 길이가 다른 다빈치 다리를 제작하여 비교하였다.



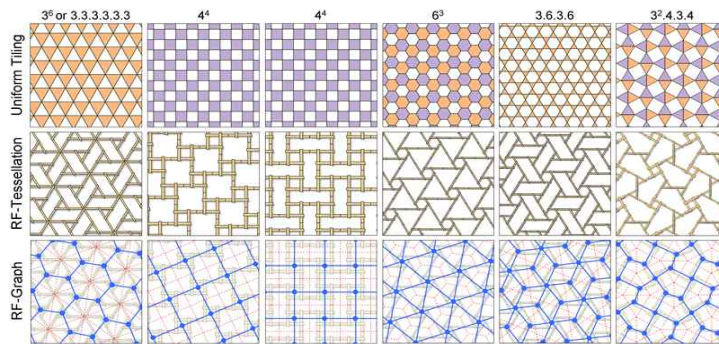
[Fig. 7] Procedures making the Da Vinci bridge. The left picture shows a unit structure.



[Fig. 8] Five types of Da Vinci bridges with constant total length

다. RF 돔

[Fig. 9]의 꼭대맞춤 RF 돔 구조 도안을 바탕으로 단위구조가 육각형, 정사각형, 직사각형인 RF 돔을 제작하였다. ([Fig. 10] 참고) 막대는 기본 막대를 사용하였다.



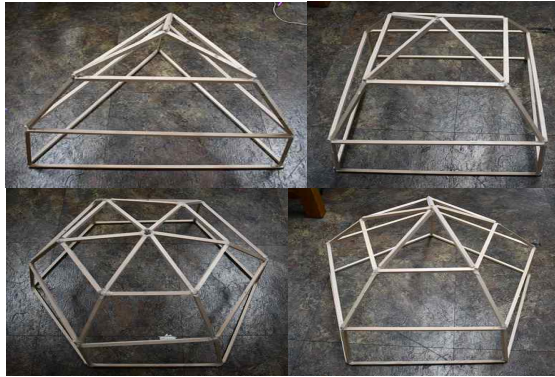
[Fig. 9] Various designs of RF structure with tessellation
(Song, P., et al., 2013)[1]



[Fig. 10] Hexagonal RF dome, square RF dome, and rectangular RF dome from the left

라. 일반 돔

다양한 돔 구조들 중 본 연구에서는 일반적이고 만들기 용이한 형태의 돔을 제작하였다. 밑면이 n 각형인 바닥을 만든 뒤 각 꼭짓점에서 지면과 약 75° 각도로 기둥을 세우고 점점 모이는 형태로 만들어 한 점에서 일치시켰다. 본 연구에서 만든 돔 구조물은 [Fig. 11]과 같이 차례대로 삼각 돔, 사각 돔, 오각 돔, 육각 돔이 있으며 밑면의 변의 개수가 늘어날수록 구에 가까운 형태가 되어 힘의 분산이 더 고르게 될 것이라는 가설을 세우고 실험을 하였다. 일반 돔의 경우 각 층마다 막대의 길이가 달라 직접 계산하여 막대의 길이를 맞추어 제작하였다.



[Fig. 11] Triangular dome, square dome, pentagonal dome, and hexagonal dome (Ordered clockwise from the top left)

마. 지오데식 돔

[Fig. 12]에서 볼 수 있듯이 지오데식 돔은 삼각형으로만 구성되는 특징을 가지고 있다. 본 연구에서는 정이십면체의 각 모서리를 이등분하여 각 면을 사 등분시키고 이를 부풀린 다음 이등분한 끝의 2차 지오데식 돔을 제작하였다. 삼각형 5개가 일정한 각도를 이루면서 만들어진 오각형들이 꼭짓점을 서로 공유하며 구조물이 구성된다. 지오데식 돔은 평면을 이루는 도형 중 가장 적은 변으로 이루어져 있는 삼각형이 단위 구조인 트러스 구조 기반의 돔이기 때문에 힘 분산이 용이하다는 장점을 가지고, 일반 돔 구조에 비하여 일정한 형태로 제작된다.



[Fig. 12] Geodesic Dome

2. Nexorade

가. 3-nexorade Engagement length 변화

1) 변형되는 정도

3개의 기본 막대로 만들어진 삼각형 nexorade에서 Engagement length를 4~18cm 범위에서 변화시킬 때 각 막대의 수평면과 이루는 각도 변화량을 측정하였다.

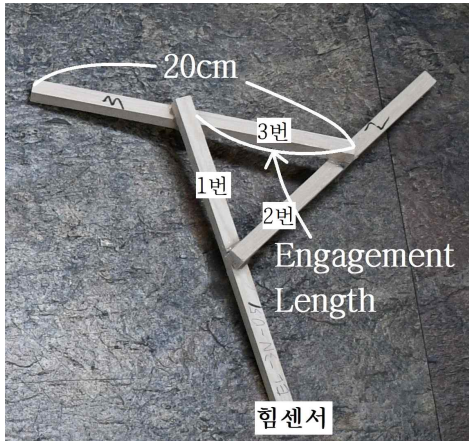
〈Table 1〉 Difference of the angle between the stick and the surface as a function of the Engagement length (Unit : °)

E.L. 길이	1번 막대	2번 막대	3번 막대
4cm	-0.6	-1.29	-1.89
6cm	-0.63	-0.85	-0.87
8cm	-0.7	-0.73	-1.39
10cm	-0.87	-0.55	-0.73

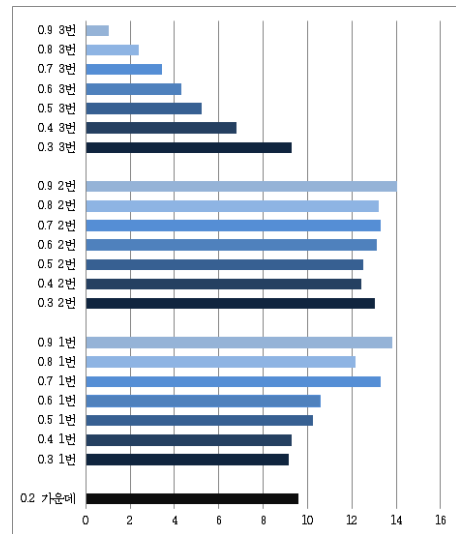
E.L. 길이	1번 막대	2번 막대	3번 막대
12cm	-0.26	0.7	0.35
14cm	-0.15	-0.72	-0.04
16cm	-0.16	-0.15	-1.12
18cm	-0.87	-0.12	0.16

〈Table 1〉에서 Engagement length가 짧을수록 많이 변형되고 길수록 적게 변화함을 관찰하였다. 따라서 Engagement length가 짧을수록 막대 간 상호작용하는 힘의 크기는 커진다는 것을 알 수 있다.

2) 힘 분산



[Fig. 13] Structure used in the experiment differing the Engagement length of the 3-nexorade



[Fig. 14] Load measured in the experiment differing the Engagement length of the 3-nexorade (Unit :N)

[Fig. 14]의 세로축은 전체 길이에 대한 Engagement length의 비율 및 [Fig. 13]의 막대 번호이며, 가로축은 힘 센서에서 측정된 값이다. 1번과 2번 막대에 추를 올렸을 때, Engagement length의 비율이 커질수록 힘의 측정값이 커지는데, 이는 힘의 분산이 덜 이루어졌다는 것을 의미하며 막대에 가해지는 돌림힘을 주된 원인으로 볼 수 있었다. 막대의 Engagement length가 짧을수록 추를 올리는 위치의 차이가 상대적으로 적어서 이런 결과가 나타났다고 해석할 수 있다. 따라서 Engagement Length가 짧을수록 nexorade가 상대적으로 힘을

더 고르게 분산한다는 것이다. 또한, 추가 직접 올려진 막대보다 그 막대를 지탱하는 2번 막대에 가해지는 힘이 더 크게 측정됨을 알 수 있었다.

나. 4-nexorade Engagement length 변화

1) 변형되는 정도

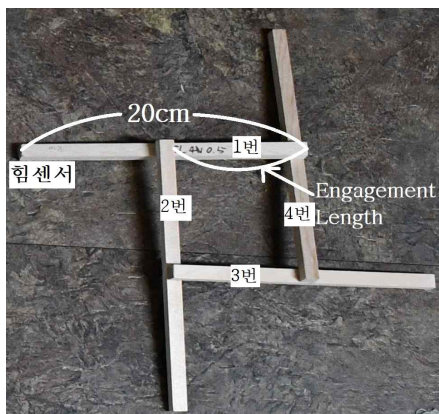
4개의 기본 막대로 만들어진 사각형 nexorade에서 한 변의 길이를 4~18cm 범위에서 변화시킬 때 각 막대의 수평면과 이루는 각도 변화량을 측정하였다.

〈Table 2〉 Difference of the angle between the stick and the surface as a function of the Engagement length of 4-nexorade (Unit : °)

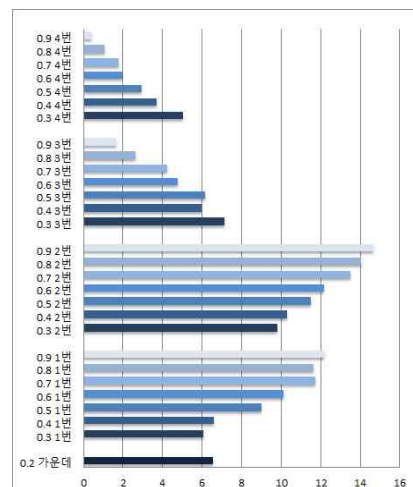
E.L. 길이	1번 막대	2번 막대	3번 막대	4번 막대	E.L. 길이	1번 막대	2번 막대	3번 막대	4번 막대
4cm	-1.32	-2.91	4.26	-0.40	12cm	0.15	-1.33	-0.96	0.02
6cm	-0.70	-0.58	-7.78	-1.09	14cm	-0.06	-1.39	-0.11	-0.39
8cm	-0.49	-4.56	-0.57	-1.27	16cm	-1.01	-2.27	0.50	0.41
10cm	-0.37	0.13	-0.94	-0.96	18cm	-0.93	-1.02	-2.34	-0.09

〈Table 2〉에서 Engagement length 길이가 커질수록 변형되는 정도가 감소하는 경향이 있으나, 16cm nexorade와 18cm nexorade의 경우에는 도리어 변형되는 정도의 평균이 커짐을 알 수 있다. 또한, nexorade는 대칭이므로 모두 균일하게 변형될 것으로 예상했으나, 변하는 정도가 특이한 막대가 있다.

2) 힘 분산



[Fig. 15] A structure of 4-nexorade used in the experiment differing the Engagement length



[Fig. 16] Load measured in the experiment differing the Engagement length of the 4-nexorade (Unit :N)

[Fig. 16]의 세로축은 전체 길이에 대한 Engagement length의 비율 및 [Fig. 15]에서 볼 수 있는 각 구조

물의 막대 번호이고 가로축은 힘 센서에서 측정된 값이다. 3-nexorade의 Engagement length 변화 실험과 마찬가지로 Engagement length가 증가할수록 1번과 2번에 작용하는 힘의 크기는 점점 커지지만 3번과 4번에 작용하는 힘의 크기는 점점 작아진다는 측정값을 통해 힘의 분산이 덜 균등히 이루어져 불균등해졌음을 알 수 있다. Engagement length 길이가 긴(12~18cm) 2번 nexorade에 작용하는 힘의 크기가 다른 막대들보다 월등히 크게 나옴을 알 수 있는데, 이는 3-nexorade 결과의 분석과 같은 방식으로 해석할 수 있다. 또한, 전체적인 구조를 보았을 때 힘 센서를 1번 막대에 달았기 때문에 1번 막대나 2번 막대 쪽 힘의 크기는 Engagement length 비율이 증가할수록 커지지만, 3번 막대나 4번 막대 쪽 힘의 크기는 작아진다.

다. Engagement window 넓이 일정한 상태에서의 변 개수 변화

1) 변형되는 정도

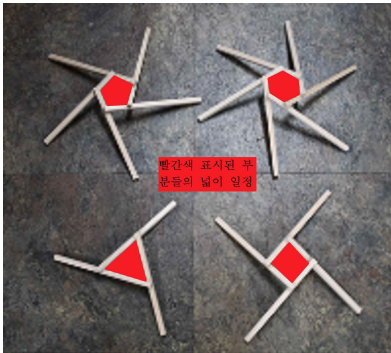
Engagement window 넓이를 일정하게 유지하면서 기본 막대의 개수가 3, 4, 5, 6인 구조들을 만들어 측정하였다.

〈Table 3〉 Difference of the angle between the stick and the surface of 3, 4, 5, 6-nexorades with the same area of Engagement window (Unit : °)

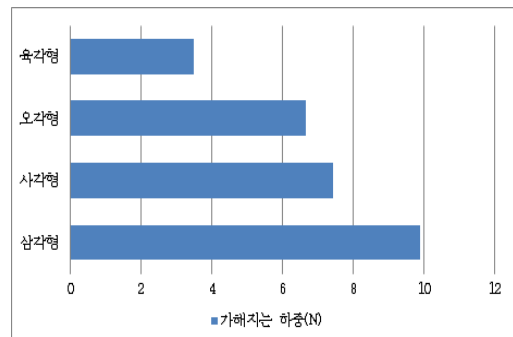
	1번 막대	2번 막대	3번 막대	4번 막대	5번 막대	6번 막대
삼각형	-0.29	-0.63	-0.37			
사각형	-0.76	-0.78	-0.37	0.08		
오각형	-0.78	-0.09	-0.55	-1.33	0.37	
육각형	-0.14	-1.57	-0.35	-0.86	-0.97	-2.43

〈Table 3〉에 따르면 Engagement window의 넓이가 일정할 때 변의 개수가 많아짐에 따라 막대의 변형되는 정도가 다양하게 나타남을 알 수 있다. 이는 힘이 모든 막대에 고르게 분산되는 것이 아니라 어느 쪽에는 힘이 많이 분산되고 다른 쪽에는 힘이 적게 분산될 확률이 높아짐을 뜻한다. 역전되거나 변형되는 정도가 크게 달라지는 측정값은 막대의 길이가 일정하지 않기 때문인데, 변의 개수가 많아질수록 한 변의 길이가 조금만 달라져도 다른 막대로 분산되어 변형되는 정도의 차이가 커질 수 있음을 알 수 있다.

2) 힘 분산



[Fig. 17] Structures sorted by the number of sticks. Structures above all have the same area of Engagement window.



[Fig. 18] Load measured in the experiment measuring the force with the maintenance of the surface of the Engagement window (Unit : N)

[Fig. 18]의 그래프는 [Fig. 17]의 Engagement window의 넓이를 일정하게 하면서 막대의 개수를 다르게 했을 때 구조물에 따라 가해지는 하중을 측정한 그래프이다. 3kg 가량의 추를 올린 것을 감안할 때 중심에 가해진 하중이 가장 고르게 나누어졌다고 볼 수 있는 것은 3-nexorade와 4-nexorade이다. 한 막대에 가해지는 하중은 막대의 개수가 늘어날 때마다 감소함을 알 수 있다. 각각의 측정값은 전체 하중을 막대의 개수로 나뉜 값과 유사하다. Nexorade는 대칭을 이루고 있으므로 힘이 균등하게 분산된다고 생각할 수 있다.

라. Engagement length가 일정한 상태에서의 변 개수 변화

1) 변형되는 정도

Engagement length를 7cm로 일정하게 유지하면서 기본 막대의 개수가 3, 4, 5, 6인 구조들을 만들어 수평면과 이루는 각도 변화를 측정하였다.

〈Table 4〉 Difference of the angle between the surface and part of 3, 4, 5, 6-nexorades with constant Engagement length(7cm) (Unit: °)

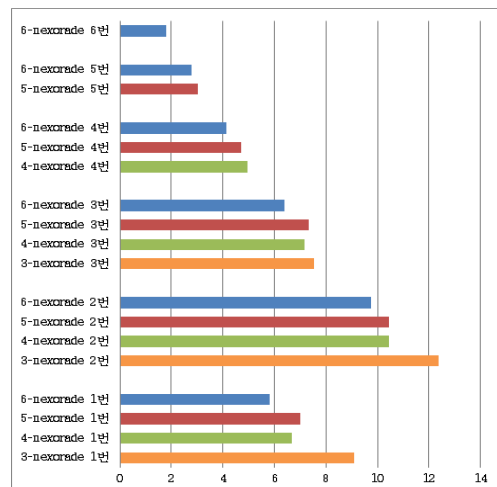
	1번 막대	2번 막대	3번 막대	4번 막대	5번 막대	6번 막대
삼각형	-0.79	-2.96	-8.82			
사각형	1.25	0.93	-1.83	1.03		
오각형	-0.26	-2.73	-2.46	0.24	-1.20	
육각형	-0.11	-0.80	-1.72	-1.64	-0.38	-1.40

〈Table 4〉에 의하면 변의 개수가 늘어날수록 역전되는 값도 줄어들고 값의 편차들이 줄어들을 알 수 있다. 이는 변의 개수가 많아질수록 Engagement window 크기가 커지고 힘의 분산이 고르게 되어 각 막대가 가지는 힘의 크기가 비슷해지기 때문이다.

2) 힘 분산



[Fig. 19] 3, 4, 5, 6-nexorades with constant Engagement lengths(7cm)

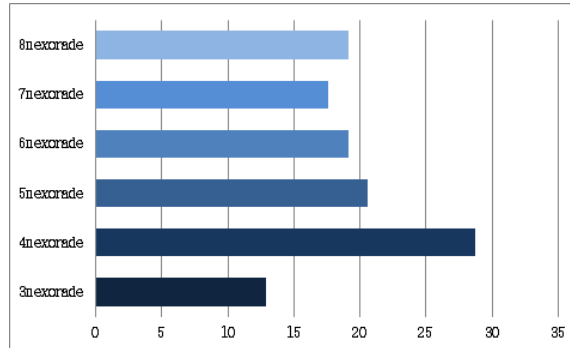


[Fig. 20] The force distribution in 3, 4, 5, 6-nexorades with constant Engagement lengths(7cm) (Unit :N)

[Fig. 20]의 그래프는 [Fig. 19]의 Engagement length를 일정하게 하였을 때 가해지는 하중을 측정한 값의

그래프이다. 힘이 가장 크게 측정되는 막대는 3-nexorade의 2번째 막대이고 힘이 가장 작게 측정되는 막대는 6-nexorade의 6번 막대이다. 이와 같은 값이 측정되는 이유는 앞의 다른 nexorade와 같다. 1, 2, 3번 막대의 경우 다른 막대와 다른 점이 측정되었는데, 3-nexorade에서 6-nexorade로 갈수록 힘의 크기가 작아지는 경향이 있지만, 5-nexorade에서 4-nexorade에서보다 힘의 크기가 커지는 현상이 발생했다.

3) 붕괴되는 시간



[Fig. 21] Time(s) elapsed for n-nexorade to be collapsed (Unit : second)

[Fig. 21]의 그래프에 의하면, 전체적으로 여러 개의 막대로 구성될수록 진동에 대해서 취약한 경향을 나타내는데, 6-nexorade 이상 되면 두드러지는 차이는 줄어들었다. 단, 3-nexorade의 경우는 굉장히 빠르게 붕괴함을 알 수 있었고, 이는 구성하는 단의 개수가 늘어날수록 막대와 막대가 이루는 내각의 크기가 커지기 때문에 막대가 제 위치를 벗어나도 쉽게 떨어지기 때문이며 예외적으로 3-nexorade는 바닥과 이루는 각이 굉장히 컸기 때문이다. 또한 구조물 자체가 진동에 의해 시계방향으로 조금씩 회전하는 경향이 있다.

3. 다빈치 다리

가. 단위 구조 길이가 일정한 다빈치 다리

1) 변형되는 정도

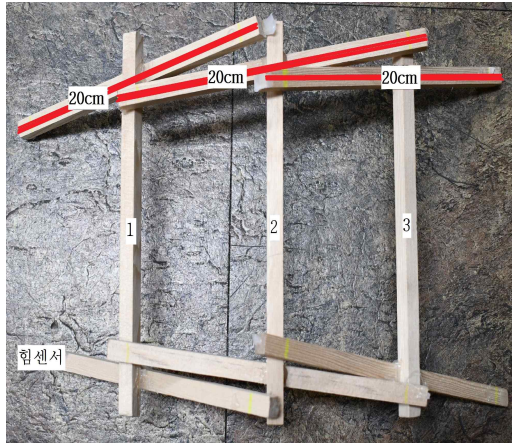
〈Table 5〉 Difference of the angle measured in all position numbered on the Da Vinci bridge with constant unit length. (Unit : °)

	1번 막대	2번 막대	3번 막대	4번 막대	5번 막대	6번 막대
2단	-0.3	-0.53				
3단	-0.48	0.42	-2.15			
4단	1.65	-0.08	-0.17	-0.89		
5단	-0.13	-0.44	0.33	0.04	-1.2	
6단	-0.39	-1.83	-0.13	-0.64	1.66	-1.46

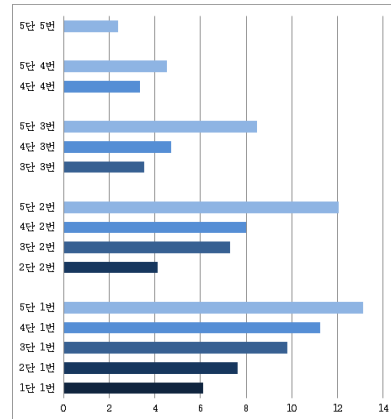
〈Table 5〉는 다빈치 다리의 왼쪽부터 1번으로 설정하였을 때 막대와 바닥 사이 각도의 측정값이다. 위에서 수직으로 하중을 주면 막대들이 놀리면서 각이 작아져야 된다는 가설을 세우고 실험을 한 결과, 대체적으로 각

도가 감소하지만 역전되는 값이 4개 정도 측정되었다. 다빈치 다리가 제작될 때 단위 구조가 한 방향으로 쌓이면서 전체 구조를 이룬다는 점에서 이유를 찾을 수 있었는데, 구조가 한 방향으로 쌓이게 되면 힘을 받을 때 단위 구조가 한 방향으로 쏠리는 현상을 관찰할 수 있었다. 역전되는 값을 보면 대부분 가운데보다 오른쪽으로 치우쳐 분포한다는 사실을 알 수 있는데, 이는 왼쪽에서 오른쪽으로 기본 구조를 쌓아 힘을 받을 때 오른쪽으로 치우쳐져 변형된다는 것을 나타낸다.

2) 힘 분산



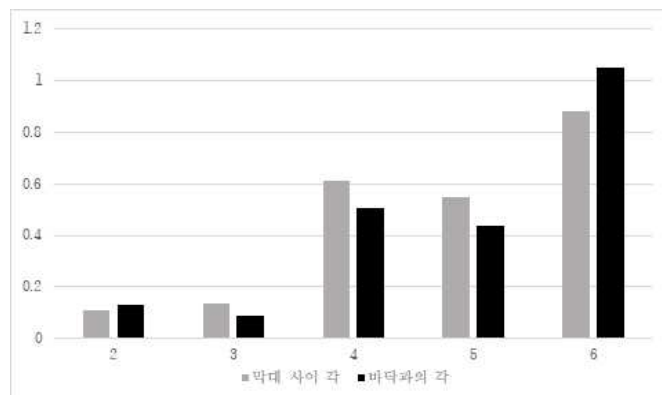
[Fig. 22] Da Vinci bridge with constant unit length



[Fig. 23] The force distribution in Da Vinci bridges with constant unit length (Unit :N)

[Fig. 23]의 그래프는 [Fig. 22]의 단위 구조가 일정한 다빈치 다리에서 가해진 하중의 측정값인데, 전체적으로 다빈치 다리의 다리 단위 구조의 개수가 늘어날 때마다 측정 장치와 가까운 쪽에 추를 올렸을 때 작용하는 힘의 크기가 점점 커지는 경향을 보인다. 그리고 단위 구조의 개수가 늘어날 때마다 가운데 지점으로부터 멀어지는 부분에 추를 올렸을 때 힘의 분산이 한쪽으로 치우치는 경향도 알 수 있다. 실험 결과 6단 이상의 다빈치 다리 경우 힘을 가했을 때 지면에 닿는 단위구조의 각도가 90° 를 넘어 무너지게 된다.

3) 진동에 대한 구조물의 반응



[Fig. 24] The angle change between the surface and the Da Vinci bridges with the same unit length caused by the vibration (Unit : °)

[Fig 24]의 그래프에 따르면 단수가 증가할수록 진동에 따른 각도 변화가 커지는 추세를 보인다. 특히 단수가 많아질수록 각도가 1° 이상 변하는 경우가 많아짐을 알 수 있다. 이는 진동에 따라 반응하는 막대의 수가 더 많아지고, 이에 따라 진동에 대해서 변형이 많이 일어나기 때문인 것으로 해석된다. 나무막대가 바닥과 이루는 각도가 커짐에 따라서 관성력에 의한 토크가 커지는 점 또한 단수가 큰 다빈치 다리의 변형이 더 커지는 원인으로 볼 수 있다.

나. 전체 구조 길이가 일정한 다빈치 다리

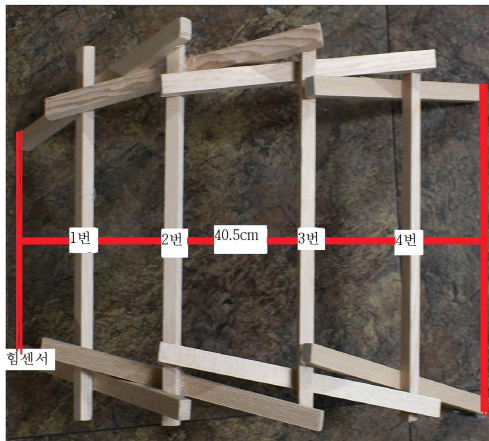
1) 변형되는 정도

〈Table 6〉 Difference of the angle measured in all position numbered on the Da Vinci bridge with constant entire length. (Unit : $^\circ$)

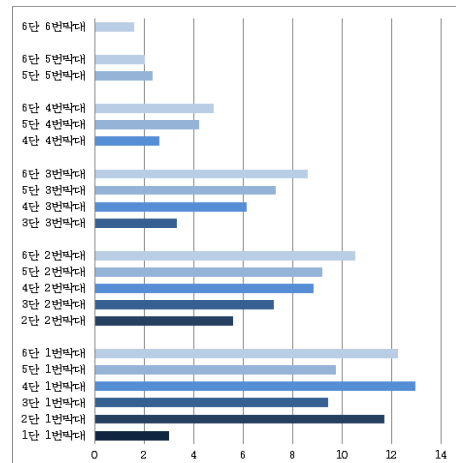
	1번 막대	2번 막대	3번 막대	4번 막대	5번 막대	6번 막대
2단	-0.69	-0.17				
3단	-1.14	0.13	-0.64			
4단	-0.73	-0.44	-0.46	-0.67		
5단	-0.02	-0.16	0.58	-1.66	-2.92	
6단	-2.23	-1.11	-0.59	0.35	-0.96	1.23

〈Table 6〉에 의하면, 전체 길이가 일정한 다빈치 다리의 변형되는 정도는 단위 길이가 일정한 다빈치 다리와 같은 흐름을 나타내었다.

2) 힘 분산



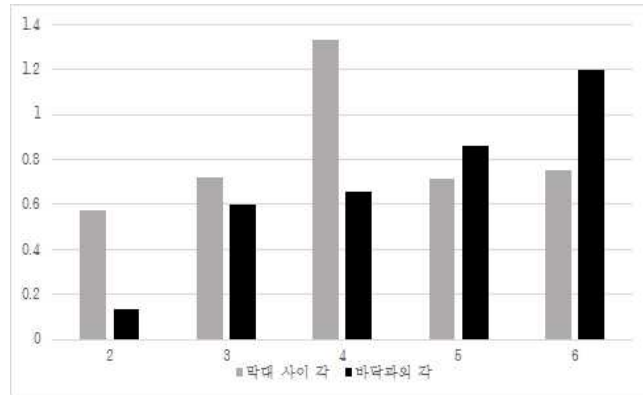
[Fig. 25] Da Vinci bridge with constant entire length



[Fig. 26] The force distribution in Da Vinci bridges with constant total length (Unit :N)

앞서 단위 길이가 일정한 다빈치 다리의 실험에서와 마찬가지로 대체적으로 힘 센서와 가까운 쪽에 있는 막대에 추를 올릴 때는 단이 커질수록 하중이 크게 측정되고 힘 센서와 멀리 있는 막대에 추를 올리면 더 적은 하중이 측정된다.

3) 진동에 대한 구조물의 반응



[Fig. 27] Result of the vibration experiment showing the angle between the surface and the Da Vinci bridge with constant entire length (Unit : °)

[Fig. 27]의 그래프를 보았을 때 전체적으로 각도의 변화가 크지 않음을 알 수 있다. 특히 단의 개수가 적은 다빈치 다리에서는 변화가 측정의 오차 범위 내에서 거의 없음을 알 수 있다. 그리고 단이 증가할수록 각도가 1° 이상 차이 나는 부분이 점차 많아짐을 알 수 있다. 전체적으로 흔들리는 모양이 4단 이상 높은 단수의 다빈치 다리의 경우에는 진동판의 왼쪽이 올라가 있을 때는 전체적인 구조가 왼쪽으로 치우치고, 오른쪽이 올라가면 전체적인 구조가 오른쪽으로 치우쳐진다. 마치 진동판에 고정된 구조의 끝부분 단위 구조만 움직이고 나머지 단위 구조들은 위에 떠 있는 모양과 유사하다. 진동판에 고정하지 않고 실험한 경우에는 다빈치 다리 자체가 움직였으며, 높은 단수의 다빈치 다리 경우에는 낮은 단수의 다리보다 빠르게 무너지는 모습을 보이기도 했다.

4. RF 돔 구조

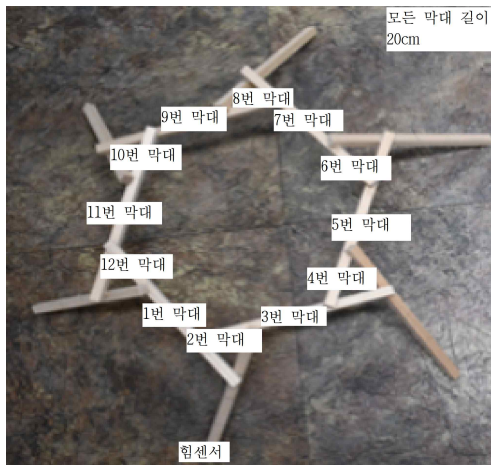
가. 변형되는 정도

〈Table 7〉 Difference of the angle between the surface and the RF dome. (Unit : °) Hexagonal RF dome is ordered from the left looked at the bird's eye view. Square RF dome and the rectangular RF dome is ordered counter-clockwise from the top left.

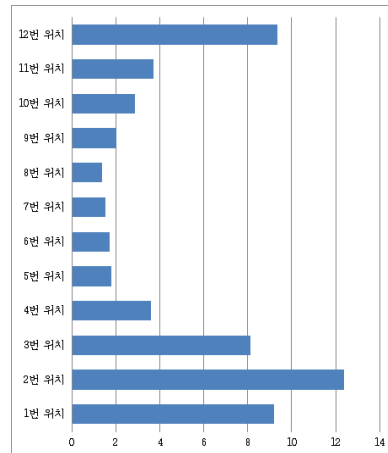
	1번 막대	2번 막대	3번 막대	4번 막대	5번 막대	6번 막대	7번 막대	8번 막대
육각형	-1.18	-1.2	-0.67	-0.71	-0.68	-1.12	-	-
정사각형	-0.62	-0.39	-0.43	-0.23	-2.03	-0.95	-0.95	-0.15
직사각형	-0.39	-0.94	-0.86	-0.34	0.51	-0.97	-0.27	-1.01

〈Table 7〉의 표에 따르면, RF 돔의 변형 정도를 측정하였을 때, 육각형, 직사각형, 정사각형 순서로 변형이 덜 되었다. 여기서 주목해야 할 점은 단위 구조의 변 개수가 같은 정사각형과 직사각형 구조는 직사각형 구조가 정사각형 구조에 비해 편차가 심하지 않았다는 것인데, 이는 정사각형 구조의 경우 힘을 여러 방향으로 퍼뜨리며 지탱하는 반면 직사각형 구조의 경우 힘을 좌우로 퍼뜨려 지탱하는 힘의 지탱 방식의 차이가 원인일 것으로 추정되었다.

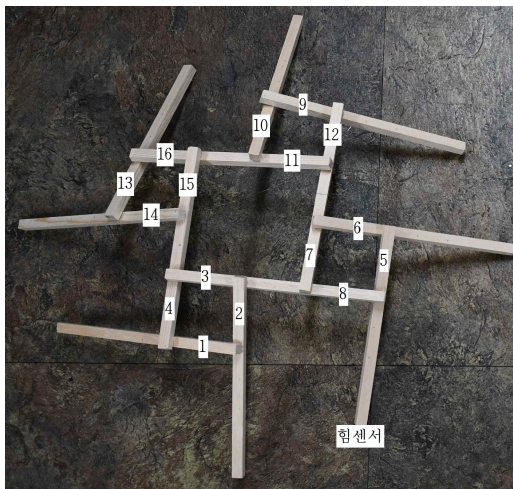
나. 힘 분산



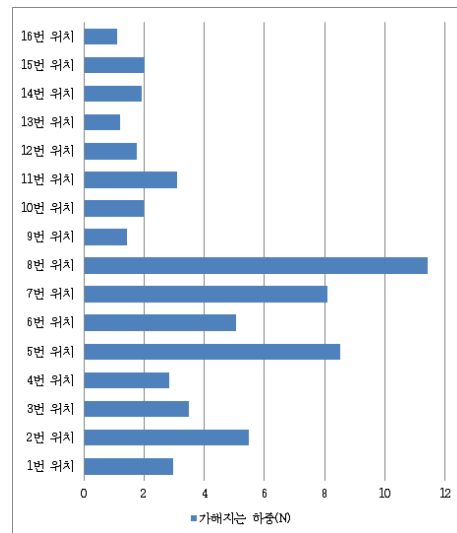
[Fig. 28] Hexagonal RF dome



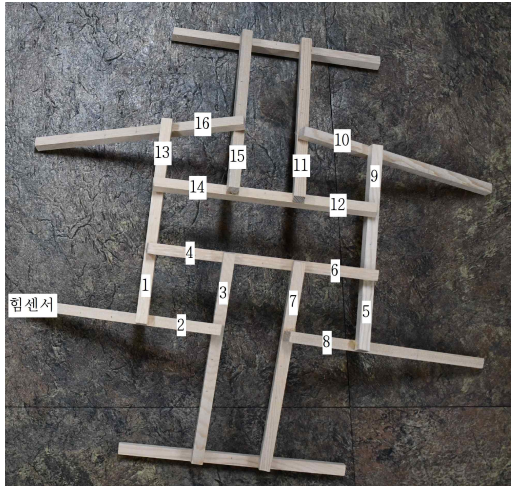
[Fig. 29] The force distribution in the hexagonal RF dome (Unit :N)



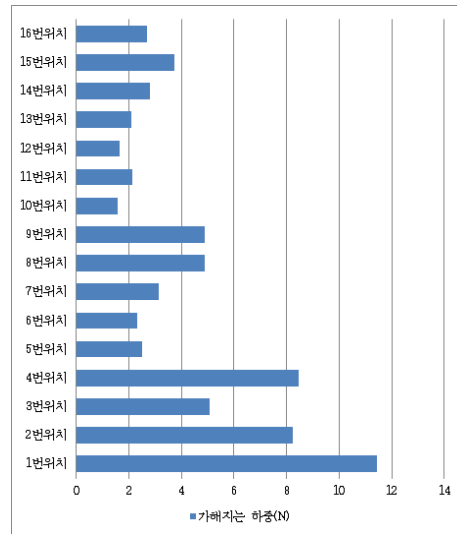
[Fig. 30] Square RF dome



[Fig. 31] The force distribution in the square RF dome (Unit :N)



[Fig. 32] Rectangular RF dome

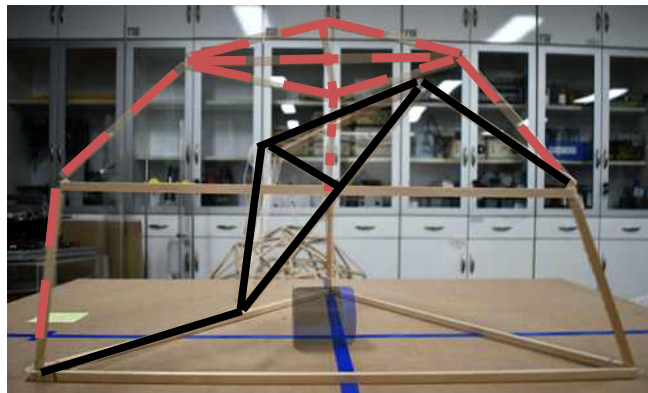


[Fig. 33] The force distribution in the rectangular RF dome (Unit :N)

[Fig. 29], [Fig. 31], [Fig. 33]의 그래프는 각각 [Fig. 28], [Fig. 30], [Fig. 32]의 RF 돔 구조의 힘 분산을 측정하였을 때의 그래프이다. RF 돔 중 직사각형 RF 돔이 힘 분산이 가장 고르게 되었다는 결과를 얻어낼 수 있었다. 대칭인 nexorade의 확장형인 구조가 힘 분산이 가장 고르게 될 것이라는 예상과는 달리 직사각형 RF 돔이 힘을 가장 고르게 분산하였으며, 측정값들의 표준편차를 구해보니 육각 RF 돔은 3.72, 정사각형 RF 돔은 2.92, 직사각형 RF 돔은 2.79로, 힘을 분산시키는 것은 nexorade가 대칭 구조인 것과 관계가 없다는 것을 알 수 있었다.

5. 일반 돔 구조

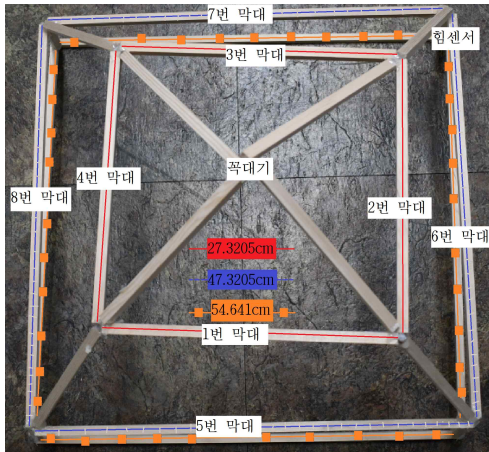
가. 변형되는 정도



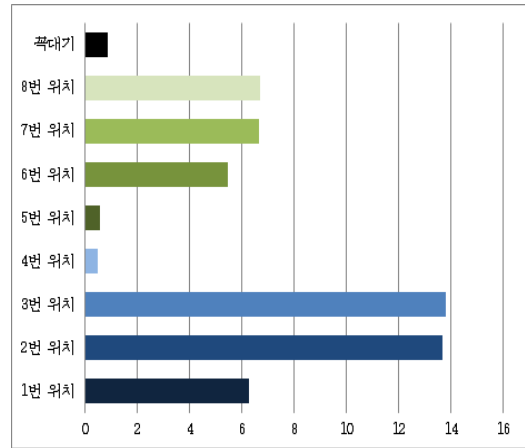
[Fig. 34] A composed photograph of the triangular dome

일반 돔의 경우 전체적으로 힘을 고르게 분산하지 못하면서 한쪽으로 치우치는 변형을 보이는 구조물이 많았다. 특히 다른 돔들은 구조물이 변형되면서 힘을 버티지만 [Fig. 34]에 나오는 삼각 돔의 경우 무너지는 현상이 발생하였다. 사각형 돔부터는 추가 가하는 하중을 버티긴 하였지만, 전체적으로 고르게 변형되지 않고 일그러지게 변형되어 안정한 상태를 오랫동안 유지할 수 없는 구조의 형태로 변형되었다. 밑면의 변의 개수가 많아지고 그에 따라 기둥의 수가 많아질수록 한 막대가 받는 힘의 크기가 줄어들어 변형되는 정도가 작아지고 이에 따라 밑면 변의 개수가 많아질수록 안정하다는 사실을 알 수 있었다.

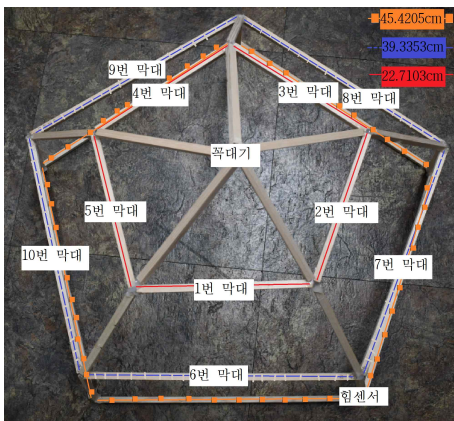
나. 힘 분산



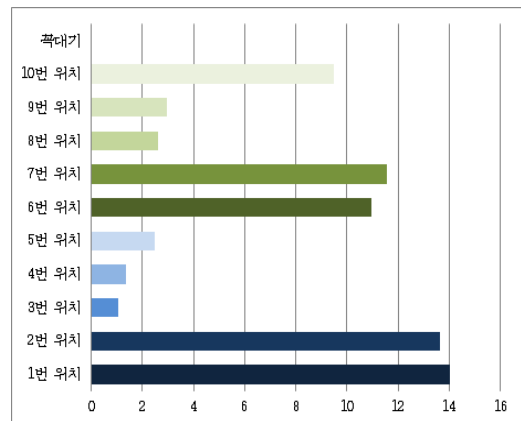
[Fig. 35] Square dome with the position numbered



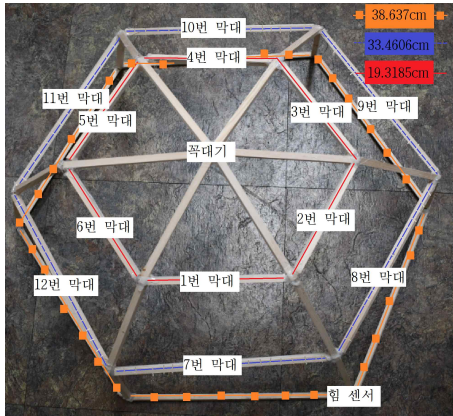
[Fig. 36] The force distribution in the square dome (Unit :N)



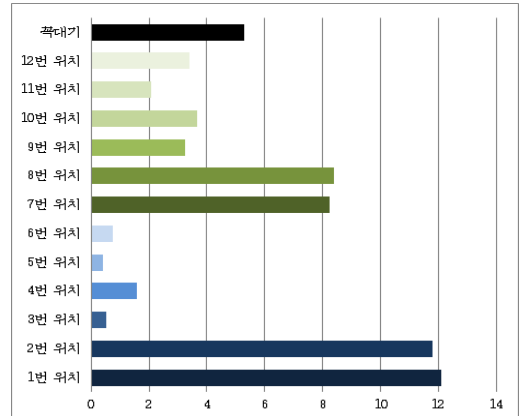
[Fig. 37] Pentagonal dome with the position numbered



[Fig. 38] The force distribution in the pentagonal dome (Unit :N)



[Fig. 39] Hexagonal dome with the position numbered

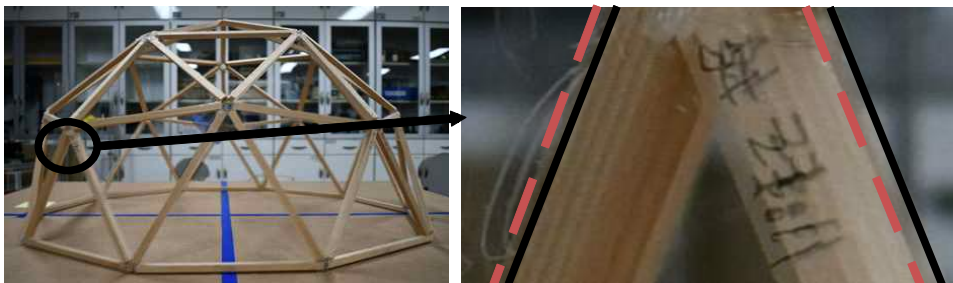


[Fig. 40] The force distribution in the hexagonal dome (Unit :N)

[Fig. 36], [Fig. 38], [Fig. 40]의 그래프는 각각 [Fig. 35], [Fig. 37], [Fig. 39]의 사각 돔, 오각 돔, 육각 돔에 가해진 하중을 측정 한 값이다. 힘이 고르게 분산되지 않고 한쪽으로 몰리는 정도는 밑변의 도형이 정오각형, 정사각형, 정육각형 순으로써 정육각형이 힘의 분산이 가장 고르게 된다.

6. 지오데식 돔

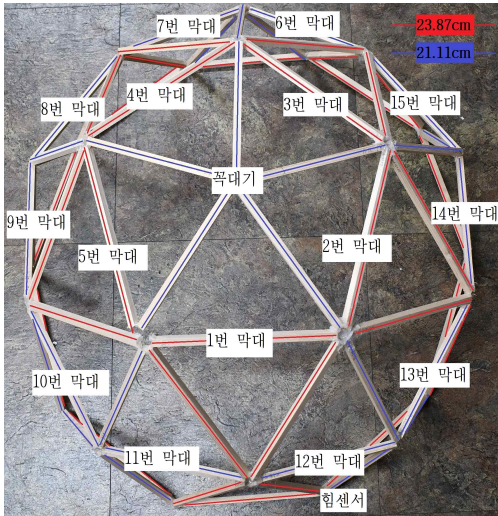
가. 변형되는 정도



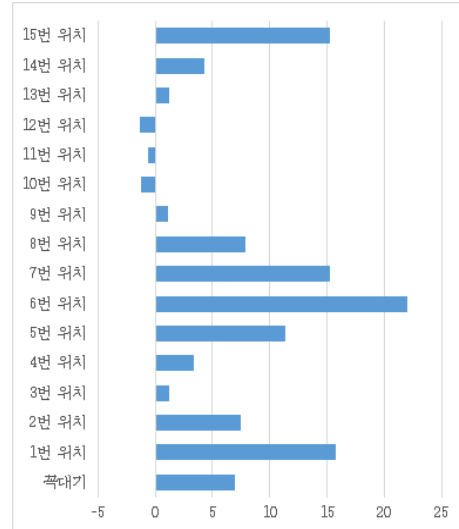
[Fig. 41] A photograph composed with the photo showing the Geodesic dome with/without the weight on it. Solid line shows the position of the Geodesic dome with the weight on it, and dotted line shows the position of the Geodesic dome without the weight on it.

가장 위에 추를 올려 변형되는 정도를 측정하였다. 추를 가장 위에 놓은 결과, 구조물의 위쪽에서는 변형이 일어났지만, 바닥과 가장 가까운 층의 막대들은 변형이 거의 일어나지 않았다. 이는 위에서 주는 힘에 대하여 가까운 쪽부터 힘을 많이 분산 받아 위층에서는 변형되는 정도가 크게 되며, 아래쪽으로 갈수록 막대의 개수가 많아지면서 변형되는 정도가 작게 되기 때문이다. 따라서 구조물의 위쪽은 불안정하고 상대적으로 아래쪽은 힘에 대해 안정함을 알 수 있다.

나. 힘 분산



[Fig. 42] Geodesic dome with the position numbered



[Fig. 43] The force distribution in the geodesic dome (Unit :N)

[Fig. 43]의 그래프는 [Fig. 42]의 지오데식 돔의 하중의 측정값이다. 일반적으로 힘 센서에서 먼 곳의 하중이 적게 측정되었으나 특히 주목해야 할 점은 10, 11, 12번 막대에서 오히려 (-)값이 나온다는 것이다. 이는 구조의 규모가 다른 구조물보다 크기 때문에 구조물이 전체적으로 기울고 또한 힘의 편차 역시 다른 구조보다 크게 나타나는 것이다.

V. 고찰

우리는 연구목적을 달성하기 위하여 다음과 같은 가설을 세웠다.

- 가설 1. RF 구조물의 기본 단위인 Nexorade의 경우 Engagement length가 짧아질수록 힘의 분산이 고르게 되지만, 변형 정도가 커진다.
- 가설 2. 다빈치 다리의 경우 단의 개수가 증가할수록 안정적으로 존재하지 않으며, 하중을 가했을 때 변형되는 정도가 커진다.
- 가설 3. RF 돔의 경우 일반 돔에 비해 변형되는 정도가 작으면서 힘을 고르게 분산시켜 더 안정적일 것이다.

실험을 통해 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1. Nexorade

Engagement length 변화를 조작 변인으로 설정한 3-nexorade와 4-nexorade의 실험 결과를 통하여 Engagement length가 짧아질수록 힘의 분산이 고르게 됨을 알 수 있었다. 하지만 다른 구조물들은 힘이 고르게 분산될 경우 변형되는 정도가 작아짐에도 불구하고 nexorade의 경우 Engagement length가 짧아질수록 변형되는 정도가 커진다는 실험 결과를 얻었다. 이는 다른 구조물과는 다르게 nexorade는 구조물을 이루는 모든 막대들이 지면과 닿아있고 지면과 닿는 막대의 끝부분부터 Engagement window까지의 거리가 증가할수록 막

대에 작용하는 돌림힘이 커져 변형이 크게 일어난 것으로 예측된다. 또한 이는 이론적으로 계산한 결과와 매우 잘 들어맞는데 (부록 참조), 3, 4-nexorade Engagement length 변화 측정 실험에 비해 평균적으로 0.7N, 0.5N으로 크지 않은 오차가 나타났다.

Engagement length를 일정하게 한 실험에서는 Engagement window 도형의 변이 많아질수록 하나의 막대에 배분되는 힘의 크기는 줄어들음을 알 수 있었고, Engagement window 넓이를 일정하게 한 실험에서는 변의 개수가 증가할수록 힘 분산이 고르게 된다는 것을 알 수 있었다. Engagement window 도형의 종류에 따라 힘의 분산을 알아보려 하였으나 삼각형과 사각형의 힘 분산 차이는 2.39N, 사각형과 오각형의 차이는 0.78N, 오각형과 육각형의 차이는 3.28N으로 경향을 파악할 수 없어 도형의 종류 즉, 내부 각도와 힘의 분산의 관련성을 찾을 수 없었다. 이를 통해 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 첫째, nexorade의 막대가 서로를 지지해준다는 특성에 의해 막대의 수가 증가할수록 힘의 분산이 더욱 고르게 일어난다는 특징이 있었다.
- 둘째, Engagement window의 넓이가 일정할 때, 육각형일 경우(막대의 개수가 많은 경우)에 힘의 분산 정도가 월등히 좋았다.
- 셋째, Engagement length가 길면 구조물의 무게가 같을 때, 돌림 힘의 크기가 한쪽에 더 크게 나타나기 때문에 구조물이 들리는 현상이 발생해 불안정했다.

2. 다빈치 다리

다빈치 다리를 제작하면서 단수가 증가할수록 전체 다리의 폭은 감소하고 높이가 높아진다는 일반적인 사실을 다시 한번 알 수 있었다. 다빈치 다리는 단수가 증가할수록 막대 사이의 각도는 감소하고 지면과 막대 사이의 각도는 증가하였는데, 지면과 막대 사이의 각도가 90° 이상이 될 경우 안정적으로 존재하지 않고 붕괴되었다. 또한 단수가 증가할수록 높이가 높아지면서 전체적인 구조물의 변형되는 정도가 커졌다. 단위 길이가 일정한 다빈치 다리의 경우 5단이 안정적으로 존재할 수 있는 구조물의 한계였지만 전체 길이가 일정한 다빈치 다리의 경우 6단이 한계로 측정되면서 단의 개수에 맞는 구조물의 크기가 제한적인 범위를 나타낸다는 것으로 결론지을 수 있었다. 이를 통해 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 첫째, 다빈치 다리의 단수가 증가하면 지면과의 각도가 증가하여 불안정하고, 90도가 넘어가게 되면 구조물이 붕괴된다.
- 둘째, 진동 실험에 대해 단수가 증가하면, 붕괴될 가능성이 증가한다.
- 셋째, 힘 분산, 변형되는 정도, 진동의 측면에서 본 연구에서 사용한 막대 규격으로는 5단의 다빈치 다리가 한계라고 볼 수 있다.

3. RF 돔

단위 구조의 모양이 정사각형인 RF 돔과 직사각형인 RF 돔을 비교하였을 때 대칭인 nexorade의 확장형의 구조를 가지는 정사각형 돔이 안정적일 것이라는 예상과는 다르게 직사각형 RF 돔이 가장 안정적 구조로 나타났다. Engagement window가 정다각형의 경우 Engagement window를 이루는 막대의 개수가 늘어날수록 힘의 분산이 고르게 될 것으로 예상하였지만, 변형되는 정도는 정육각형 RF 돔이 적고 힘 분산은 정사각형 RF 돔이 더 고르게 분산됨을 통해 RF 돔은 nexorade를 단위 구조로 가짐에도 불구하고 nexorade의 경향성과는 상관관계가 적다고 결론지을 수 있었다. 오히려 단위 구조보다는 지면과 접촉된 부분의 면적이 커질수록 안정적으로 하중을 버틸 수 있음을 알 수 있었다. 이를 통해 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 첫째, 변의 개수가 증가해도 힘의 분산과 변형되는 정도가 좋다고 볼 수는 없다.
- 둘째, 꼭대맞춤인 RF 돔이 단위 구조(nexorade)의 경향성을 따라가지 않는다.

4. 일반 돔

일반 돔의 경우 밑변의 개수와 구조물을 이루는 기둥의 개수가 많아질수록 변형되는 정도가 적고 힘이 고르게 분산되어 안정한 구조임을 알 수 있었다. 하지만 RF 돔 구조와 비교하였을 때 기둥의 개수가 많음에도 불구하고 변형되는 정도가 커 RF 돔이 일반 돔보다 효율적임을 알 수 있다. 일반 돔과 RF 돔의 가장 큰 차이는 일반 돔은 구조물을 지지하는 막대의 개수가 많을수록 힘 분산 정도가 고르고, RF 돔은 막대의 개수보다는 구조의 모양이 힘 분산 정도에 영향을 더 미친다는 점이었다. 이를 통해 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 첫째, 돔의 뼈대를 이루는 정다각형의 변의 개수가 늘어날수록 힘의 분산이 잘되었다.
- 둘째, 정다각형의 변의 개수가 작을수록 쉽게 한쪽으로 쏠리며, 약한 충격에도 쉽게 부서졌다.
- 셋째, 꼭대기 지점 외에 다른 지점에 수직하중을 가하면 변형이 더욱 커졌다.
- 넷째, 지지하는 막대의 개수가 많아질수록 힘의 분산이 더 잘되었다.

5. 지오데식 돔

지오데식 돔의 경우 힘의 분산이 고르게 잘 되지만, 구조물의 규모가 매우 크기 때문에 실제로 힘을 측정하였을 때 한쪽이 들려 반대쪽에서는 (-)의 힘의 측정값을 얻어내었다. 힘의 분산이 잘 되는 이유는 막대의 개수가 다른 구조물들보다 많기 때문에 힘이 여러 곳으로 쉽게 나뉘기 때문이라는 결론을 얻었고, 변형되는 정도가 다른 구조물들보다 작은 측정 결과 또한 같은 이유로 해석할 수 있다. 지오데식 돔의 특징으로는, 다른 구조물들의 경우 막대의 비율을 자유자재로 조절할 수 있었다면 지오데식 돔은 일정한 비율을 유지해야 만들 수 있는 것이었다. 이를 통해 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 첫째, 지오데식 돔은 힘을 매우 잘 버티지만 규모가 큰 이유로 한쪽으로의 기울어짐이 컸다.
- 둘째, 지오데식 돔은 강한 충격에도 굉장히 잘 버텼고, 충격이 가해져도 변형 정도는 크지 않았다.
- 셋째, 막대 길이의 비율이 정해져 있어, 막대 간의 비율을 유지하지 못한다면 만들 수 없다.

VI. 결론

본 연구에서는 연구목적을 달성하기 위하여 구조물을 제작하고, 특성을 분석하며 힘의 분산과 진동 상황에서의 변화를 추적하였다. 그 결과 다음과 같은 내용을 알 수 있었다.

첫째, 다양한 RF 구조물들을 nexorade, 다빈치 다리, 쪽매맞춤 RF 돔으로 나누어서 제작하였다. Nexorade는 하나의 막대가 시계 방향에 있는 막대를 지지함으로써 순환하는 정다각형 고리를 이루는 것을 기본 규칙으로 하였다. 막대의 개수를 늘리고 줄임으로써, Engagement window의 모양이 다른 여러 가지 RF 구조물을 만들 수 있었다. 또한, RF 구조물과 비교하기 위해 일반 돔, 지오데식 돔을 만들었는데, 일반 돔은 정다각형을 기본 구조로 하여, 바닥과 막대, 또는 막대와 막대가 이루는 각도를 75° 를 이루며 만들었고, 지오데식 돔은 길이가 다른 막대를 이용하여 기본 구조가 삼각형이 되도록 만들었다.

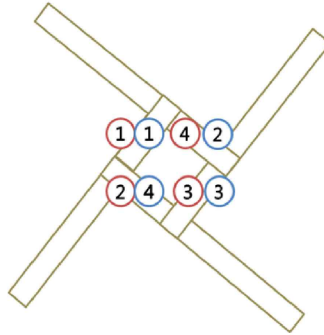
둘째, 각각의 구조물에 하중을 가했을 때 변형되는 정도와 힘의 분산 정도를 알아본 결과, nexorade 구조와 다빈치 다리는 힘의 분산이 고르게 될수록 변형 정도가 커지고 진동상황에서는 잘 버티지 못하고 쉽게 무너지는 경향을 보였다. 일반 돔과 지오데식 돔은 힘의 분산이 고르게 되지 않으면서도 일반 돔의 경우에는 변형 정도 또한 크게 나타났다. RF 돔 구조물의 경우 다른 구조물과는 다르게 힘의 분산은 고르게 되면서 변형 정도는 적

게 나타났다.

마지막으로, 다양한 실험을 통해서 본 연구에서는 힘의 분산이 고르게 되면서도 변형 정도가 적은 구조를 안정한 구조라고 하였다. 이러한 척도를 기준으로 하였을 때 실험을 진행한 구조물 중에서는 RF 구조물, 지오데식 돔, 일반 돔 순서로 안정함을 알 수 있었다. 또한, RF 구조물 중에서도 RF 돔, nexorade, 다빈치 다리에 비해 안정하다는 결론을 얻을 수 있었고, RF 돔 구조물 중에서는 직사각형 RF 돔이 정사각형, 정육각형 RF 돔보다 바닥과 닿는 면적이 더 크기 때문에 변형 정도가 가장 작으면서 힘의 분산이 가장 고르게 되어 가장 안정한 구조라는 결론을 얻어내었다.

VII. 부록

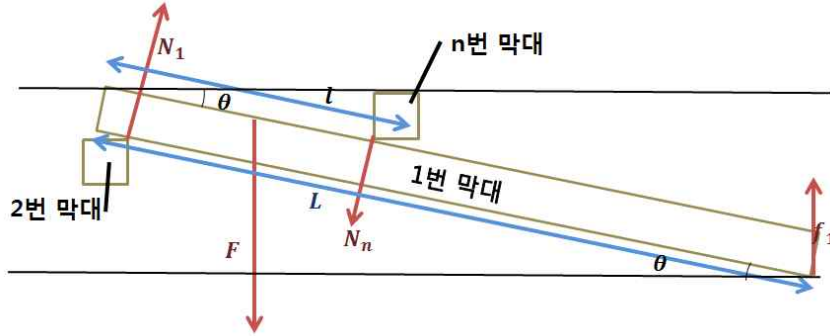
추가 올라가는 위치를 1번 막대의 맞물리는 부분(Engagement)의 중앙이라고 가정하 뒤 계산을 편하게 하고 실험값과 객관적으로 비교하기 위해 [Fig. 43] 과 같이 시계 방향으로 번호를 붙였으며 (실험에서는 반시계 방향으로 번호를 붙였다.) 시계 방향의 막대가 반시계 방향의 막대보다 아래쪽에 위치하는 n-nexorade의 상황을 가정했다.



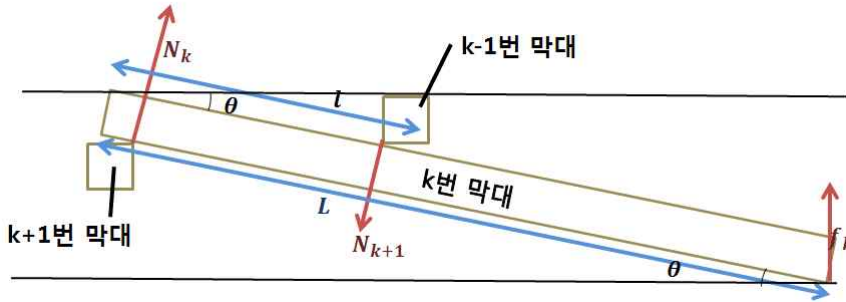
[Fig. 44] The right numbers on each stick symbolize the order of sticks in case of our result of the calculation.

The left numbers on each stick symbolize the order of sticks in case of our result of the experiment.

왼쪽 번호 기준 k번 막대 위에 추를 올린 뒤 1번 막대 아래에 가해지는 하중은 1번 막대 위에 추를 올린 뒤 오른쪽 번호 기준 k번 막대 아래에 가해지는 하중과 같음을 알 수 있다. n번 막대가 떠받쳐지는 수직항력을 N_n 이라고 하였다. Engagement length를 l , 막대의 길이를 L , 막대의 바닥이 이루는 각을 θ 라 했을 때 막대에 의한 구조는 대칭이므로 막대의 높이는 [Fig. 45]과 같이 바닥 면과 수평일 것이다. 막대의 두께 d 에 대해서 $\sin\theta \approx \frac{d}{l}$ 을 만족하는 직각삼각형이 생기며 1번 막대의 토크 평형 식에서 회전의 중심을 바닥과의 접점으로 생각했을 때 추에 의한 하중 F 만을 생각한다면 1번 막대에서 아래 그림과 같이 힘이 작용한다고 생각할 수 있다.



[Fig. 45] Free body diagram of first nexor



[Fig. 46] Free body diagram of k-th nexor

$$LN_1 - \left(L - \frac{l}{2}\right)F \cos \theta - (L-l)N_n = 0$$

$$LN_k - (L-l)N_{k+1} = 0$$

$$N_1 = \frac{\left(1 - \frac{l}{2L}\right)F}{1 - \left(1 - \frac{l}{L}\right)^n} \cos \theta, \quad N_k = N_1 \left(1 - \frac{l}{L}\right)^{k-1}$$

nexorade의 물체 자유물체도에서 첫 번째 식을 알아낼 수 있고 1번 막대가 아닌 k번 막대에서는 두 번째 식이 적용되므로 계산해보면 최종적으로 막대의 개수와 힘의 크기가 연관되어 있는 식을 얻을 수 있다.

바닥면이 첫 번째 막대에 작용하는 힘 f_1 과 k번째 막대에 작용하는 힘 f_k 는 힘의 평형 관계에서

$$f_1 = (N_n - N_1) \cos \theta + F, \quad f_k = (N_{k+1} - N_k) \cos \theta$$

로 나타낼 수 있는데 이 식으로부터 막대 간 상호작용하는 수직항력은 l/L 값이 작을수록 커지고 그에 따라 바닥 면에 작용하는 힘도 비교적 고르게 나타나게 됨을 예상해 볼 수 있다. 그만큼 막대 자체에 가해지는 돌림 힘의 합이 커지기 때문에 변형되는 정도 역시 l/L 값이 작아질수록 커지게 됨을 생각할 수 있었다. 실제로 이렇게 계산한 값과 실험적으로 얻은 3, 4-nexorade에서 Engagement length 변화실험의 값을 비교해 본 결과 $F=30N$ 일 때 평균 오차가 각각 0.7N, 0.5N으로 작게 나타났다.

VIII. 참고문헌

- [1] Song, P., et al. (2013). Reciprocal Frame Structures Made Easy. (pp.1-)ACM Transactions on Graphics (TOG) – SIGFig. 2013 Conference Proceedings, 32(4). 1, 4.
- [2] O.Baverel, et al. (2000). Nexorades : International Journal of Space Structures,15(2). 155-1.
- [3] Carlo, B. D. (2008). The Wooden Roofs of Leonardo and New Structural Research, Nexus Network Journal 10. 27-38.
- [4] Danz, C. (2014). Reciprocal Frames, Nexorades and Lamellae : An investigation into mutually supporting structural forms. University of Washington: Design Machine Group. 5, 8.
- [5] Parigi, D., Kirkegaard, P. H., Sassone, M. (2012). Hybrid Optimization in the Design of Reciprocal Structures. IASS-APCS 2012. 2-8.

I 연구진 I

김민지 (Minji Kim, 인천과학고등학교, minijikim0@naver.com) 교신저자
강지훈 (Jihoon Kang, 인천과학고등학교, jakekang28@naver.com) 주저자
김성현 (Sunghyun Kim, 인천과학고등학교, kshtwelve@naver.com) 주저자
이동우 (Dongwoo Lee, 인천과학고등학교, imdw10830@naver.com) 주저자
정기현 (Gihyeon Jeong, 인천과학고등학교, gus6945@naver.com) 주저자

지도교사 : 노수호 (Suho Rho, 인천과학고등학교, usnova@korea.kr)

장애인과 노약자를 위한 중력보상 보조장치 연구

박경수 · 장건희 · 조민석 · 신효섭 - 세종과학예술영재학교

Study on a Gravitational Compensation Device for the Disabled and the Elderly

Kyungsoo Park · Geunhee Jang · Minsuk Cho · Hyosup Shin - Sejong Academy of Science and Arts

국문초록

본 연구에서는 중력보상 메커니즘을 이용한 외골격 보조 장치를 설계하고 제작하였다. 중력보상 메커니즘이란 중력에 의해 관절에 가해지는 토크를 인위적인 역방향 토크의 공급을 통해 보상하여 관절의 부담을 줄이는 기계 체제이다. 본 연구에서는 기존의 전동기 방식 대신 호형(弧形) 스프링의 복원력을 이용한 중력보상 메커니즘을 설계하여 외골격 보조 장치의 크기와 무게를 줄이고 전원 공급의 필요성을 해결하였다. 이후 Motion Capture System과 EMG Sensor를 통해 외골격 보조 장치를 착용하였을 경우 기립 및 착좌 동작의 소요 시간 증가와 근활성도의 하락이 발생함을 확인하여 중력보상 메커니즘을 이용한 외골격 보조 장치의 성능을 검증하였다.

중심어 : 중력보상, 머니퐁레이터, 외골격 보조 장치, Motion Capture System, EMG Sensor

ABSTRACT

This research suggests a type of exoskeleton assist device using gravitational compensation mechanism. A gravitational compensation mechanism is a mechanism system that relieves stress on joint by applying torque against gravity. In this research, a bow-type spring is used instead of a motor to decrease the weight and size of the device and making it needless of a power supply. Motion Capture System and EMG Sensors were used to prove that using the exoskeleton support device increases the time it takes to sit up and down, and reducing the muscle activity, thus proving the effect of the device.

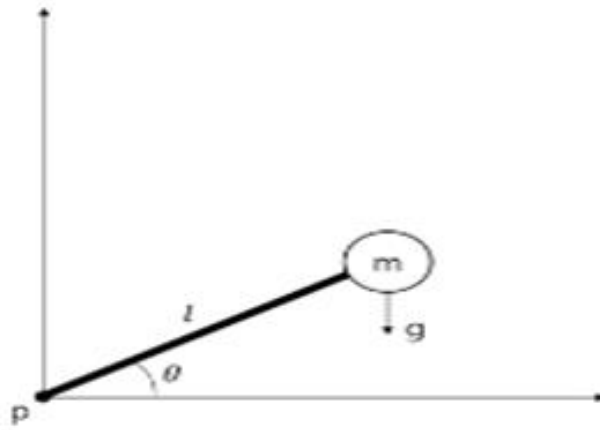
Key words : Gravity compensation, manipulator, exoskeleton type device, Motion Capture System, EMG Sensor

I. 서론 및 이론적 배경

최근 평균 수명의 증가로 고령화가 진행됨에 따라, 만성 퇴행성 질환으로 인한 신체장애 및 근력 감소를 해결하기 위한 재활 및 복지 기술 개발이 각광받고 있다[1]. 또한 의료기술의 발달로 심각한 부상을 입어 활동 능력을 잃어버리더라도 수술 전의 신체 능력을 회복할 수 있게 하는 재활 치료와 그 기술에 대한 관심이 높아지고 있다. 이에 따라 환자 재활과 신체 능력 회복을 돕는 재활 로봇이 개발 및 공개되고 있으나, 공학자와 보건의료인의 접근 방법의 차이로 인해 실질적인 의료 현장에서 필요한 간단하고 저렴하며 일상에서 사용할 수 있는 재활 장치의 개발은 더딘 상태이다.

현재 상용화된 재활 로봇으로는 Hocoma社의 Lokomat, Aretech社의 ZeroG 등이 있으나, 각종 센서와 전동기, 제어기 등을 사용하는 이들 재활로봇의 특성상 크기가 크고 움직일 수 있는 범위가 한정되어 있다는 단점이 있다. 또한 재활 로봇의 가격이 높아 보급이 힘들며, 전원을 공급하기 위한 전선 또는 배터리로 인해 치료 중 환자가 자유롭게 움직일 수 없고 일상생활에서 지속적인 재활을 계속할 수 없다.

이에 본 연구에서는 전원 공급의 필요성을 해결하기 위하여 기계요소를 이용한 중력보상 메커니즘을 채택하였다.



[Fig. 1] Gravity compensation mechanism

회전축을 중심으로 l 의 길이를 갖는 링크가 고정되어 있고 축과 링크 사이의 각도는 θ 이다. 링크의 끝에는 질량 m 을 갖는 물체가 고정되어 있으며 중력가속도는 g 라고 했을 때, 회전축에 가해지는 중력에 의한 링크의 토크의 크기는 $\|\vec{\tau}_g\| = \|\vec{l}\| \|\vec{f}_g\| \cos(\theta) = m \|\vec{l}\| \|\vec{g}\| \cos(\theta)$ 이다. 이때 중력에 의해 발생하는 이 토크를 중력 토크라고 하며, 중력 보상 메커니즘은 중력 토크와 같은 크기의 토크를 역방향으로 공급하여 중력 토크를 상쇄하는 메커니즘이다.

중력보상 메커니즘에 대한 선행 연구로는 중심축에 대해 감겨 있는 스프링을 사용한 ‘중력보상기를 적용한 로봇 팔의 실험적 연구’ [2], 수직 방향 운동을 주로 보상하는 ‘슬라이더 크랭크 기구를 이용한 머니플레이터의 중력 보상 장치 설계’ [3], 간단한 구조가 특징인 ‘가반하중 변동에 대응하는 중력보상장치 개발’ [4], ‘기어유닛 기반 중력보상장치를 갖는 머니플레이터’ [5] 등이 존재하였다.

대부분의 기계요소를 이용한 중력보상 메커니즘에 관한 연구에서는 링크의 회전에 의해 생성되는 회전축에 대한 각변위를 스프링 등의 기계요소를 이용하여 보상하는 방법을 사용하였다. 중력보상기를 적용한 로봇 팔의 실험적 연구[3]에서는 링크의 회전에 의해 형성되는 회전축의 회전을 통해 스프링을 압축하여 회전 방향과 반대되는 방향으로 토크를 공급하는 방안을 연구하였다. 슬라이더 크랭크 기구를 이용한 머니플레이터의 중력 보상 장치 설계[3]에서는 링크의 회전을 슬라이더의 직선운동으로 변환하여 압축스프링의 복원력을 이용한 중력보상 메커니즘을 설계하였다. 가반하중 변동에 대응하는 중력보상장치 개발[4]에서는 링크에 스프링을 직접 연결하여 중력보상 메커니즘을 구현하였으며, 기어유닛 기반 중력보상장치를 갖는 머니플레이터[5]는 회전축과 기어를 연결한 뒤 스프링을 장착하여 스프링의 복원력으로 중력 보상을 시행하였다.

현재까지 연구된 머니플레이터에 적용되는 중력보상 메커니즘 중 실용적인 4가지 구조[2-5]를 선택하여 각각의 구동 원리와 구조의 물리적인 분석을 조사하고, 물리적인 메커니즘과 전자부품을 이용한 메커니즘의 장단점을 파악하였다. 이때 머니플레이터는 인간의 팔과 유사한 동작을 제공하는 기계적인 장치이며, 머니플레이터 끝에서 공구가 원하는 작업을 할 수 있도록 특별한 동작을 제공하는 것을 목적으로 한다[6]. 대표적으로 산업 현장에서 무거운 장비를 운용하거나 용접 등의 정밀한 움직임을 요할 때 사용된다.

머니플레이터에 적용된 중력 보상 메커니즘에 대한 각종 선행연구와 한국전자통신연구원 대경권연구센터의 로IT융합연구실의 자동 식모기에서 영감을 얻어 다용도로 사용할 수 있는 머니플레이터 형태의 보조 장치를 제작하였다. 머니플레이터 형태의 보조 장치 제작에서는 ‘가반하중 변동에 대응하는 중력보상장치 개발’ [4] 연구의 구조를 주로 참고하였다. 그러나 실생활 적용 결과 머니플레이터 보조 장치가 사용자의 동작을 방해하여 일상생활 보조에 적합하지 않다고 판단하여 외골격 형태의 보조 장치를 제작하기로 결정하였다.

환자의 외골격 보조 장치 자중의 부담이 큰 상지 보조 장치 대신 상대적으로 자중의 부담이 작은 하지 보조 장치를 연구하기로 결정하였으며, 중력보상기를 적용한 로봇 팔의 실험적 연구 [2]를 주로 참고하여 중력 보상 메커니즘을 설계하였다. 또한 외골격 보조 장치가 효율적으로 신체의 부하를 줄일 수 있도록 인체 구조를 기반으로 보조 장치를 설

계하였다. 물리적 구조 분석을 통해 스프링의 탄성 계수와 구조의 수치를 결정하여 보조 장치를 제작한 후 Motion Capture System(MCS), Force Plate, EMG Sensor(근전도 센서)를 통해 보상 성능을 측정하였다.

II. 연구 방법 및 절차 1 - 머니플레이터 형태의 보조 장치

1. 중력보상 메커니즘의 머니플레이터에의 적용

머니플레이터 보조 장치 연구에서는 중력보상 메커니즘을 머니플레이터에 적용하여 장애인과 노약자가 물건을 들 때 무게를 보조하여 사용자의 근력 부담을 줄이도록 했다. 이때 머니플레이터 구조의 효과를 쉽게 확인하기 위해 머니플레이터 보조 장치를 대형 관악기, 색소폰 연주의 특수한 상황에 적용하였다. 대형 관악기 연주 상황은 연주자의 피로 부위가 일관적이고 보조 장치를 적용시킬 부위가 한정적이기에 비교적 쉽게 메커니즘의 효과를 검증할 수 있다.

2. 머니플레이터와 적용 대상의 분석

가. 악기 연주 상황 관찰 및 분석

1) 악기 연주자의 움직임 분석

실제 색소폰 연주자의 움직임은 주로 연직 상하 운동으로 이루어지며 약간의 좌우 진동과 불규칙적인 운동 역시 존재하였다. 따라서 머니플레이터 보조 장치 연구에서는 연주자의 연직 상하 운동과 좌우 진동, 불규칙적인 움직임을 처리하고 지속적으로 중력 보상 메커니즘을 작동시키는 머니플레이터를 목표로 하였다.

2) 색소폰 연주시 악기 연주자의 신체에 대한 물리적 분석

중량이 작은 관악기는 스트랩 없이 연주자가 양 팔로 악기를 지탱하나, 색소폰은 중량이 상대적으로 커 어깨에 매는 스트랩을 사용한다. 이때 색소폰의 무게 대부분이 [Fig. 2]와 같이 스트랩을 통해 어깨에 전달되며, 이로 인해 상체에 중력 토크가 발생하여 연주자의 어깨와 허리에 부담이 생긴다. 이때 색소폰의 질량 $2.5kg$, 사람의 팔 길이 $0.75m$, 팔과 몸체 사이의 각도 60° 상황에서 약 $1.732N \cdot m$ 의 토크가 발생한다. 머니플레이터 보조 장치 연구에서는 이 토크의 20% 이상을 보상할 수 있는 보조 장치를 만드는 것을 목표로 한다.



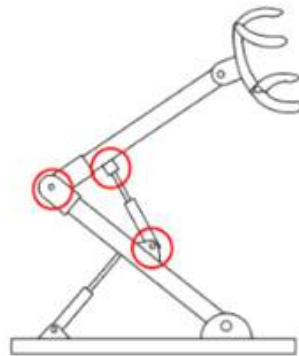
[Fig. 2] Side view of player

나. 머니플레이터 제작

머니플레이터는 [Fig. 3]과 같은 수직 피스톤형 머니플레이터를 제작하였다.



[Fig. 3] Vertical piston manipulator



[Fig. 4] Universal joint area

1) 구조의 설명

지지대 위에 2자유도의 머니플레이터가 존재하여 악기를 지지한다. 아래쪽 링크와 위쪽 링크에 각각 다른 성능의 쇼크 업소버가 장착되어 악기의 무게와 머니플레이터의 자중으로 인한 중력 토크를 보상한다. 머니플레이터의 회전부가 축에 의해 고정되어있지 않고 유니버설 조인트에 의해 연결되어 있기 때문에 악기 연주자의 움직임을 따라 머니플레이터가 같이 움직인다는 장점이 있다. 뿐만 아니라 무게중심이 낮고 지지부가 넓어 악기 연주자의 움직임에도 안정성을 보장할 수 있으며, 연주자의 공간을 침범하지 않아 연주자로 하여금 연주에 집중하도록 한다. 중력 보상 메커니즘으로 쇼크 업소버를 채택하여 머니플레이터를 수납할 수 있어 휴대성이 높으며, 구조가 단순하다.

2) 구조의 특징

본 연구에서 제작한 수직 피스톤형 머니플레이터는 다음과 같은 구조적 특징을 가진다.

- ① 연주자의 앞쪽, 즉 색소폰의 뒤에 위치하므로 구조적으로 연주자를 방해하지 않는다.
- ② 회전부에 유니버설 조인트를 채용하여 수직 운동뿐만 아니라 좌우 운동도 수용이 가능하다.
- ③ 구조가 양 옆으로 퍼지지 않고 수직의 평면 내에서 존재하므로 차지하는 공간이 적어 휴대성 면에서 유리하다.
- ④ 지나치게 구조가 복잡하지 않아 사용자나 제작자 모두에게 편리하다.



[Fig. 5] Universal joint

수직 피스톤형 머니플레이터에서의 자중과 기구의 무게로 인한 중력 토크를 계산하기 위하여 머니플레이터의 물리량을 파악해 보면

m_1 : M 의 질량 : 2,854kg

m_2 : L_2 의 질량 : 0.151kg

m_3 : L_1 의 질량 : 0.230kg

m_4 : S_1 의 질량 : 0.145kg

m_5 : U 의 질량 : 0.429kg

J_1 : S_1 과 L_1 이 연결된 곳

J_2 : S_2 와 L_2 이 연결된 곳

k_1 : O_1 과 J_1 사이의 거리 : 0.44m

k_2 : O_2 와 J_2 사이의 거리 : 0.17m

x_1, x_2, x_5 : O_1 과 수선의 발 사이의 거리 (x_1 : 0.22m, x_2 : 0.24m, x_5 : 0.44m)

x_3, x_4 : O_2 와 수선의 발 사이의 거리(x_3 : 0.52m, x_4 : 0.245m)

중력 토크를 계산하기 위하여 머니플레이터의 구조물들의 질량 중심에서 지면으로 수선을 내린다.

정적인 상황에서 머니플레이터에 작용하는 가속도는 중력가속도 g 만 존재하므로, O_1 에 가해지는 중력 토크의 크기를 계산하면

$$\tau_1 = m_2gx_1 + m_3gx_1 + m_4gx_2 + m_5gx_5$$

이고, 방향은 시계 방향이다.

O_1 에 가해지는 중력 토크를 보상하기 위하여 S_1 이 O_1 에 τ_1 의 토크를 공급하여야 하므로, S_1 이 L_1 에 가해야 하는 힘은

$$f_1 = \frac{\tau_1}{k_1}$$

이다. 같은 방법으로 O_2 에 가해지는 중력 토크를 계산하면

$$\tau_2 = m_1gx_3 + m_2gx_4$$

이며, 방향은 시계 방향이다.

O_2 에 가해지는 중력 토크를 보상하기 위하여 S_2 가 O_2 에 τ_2 의 토크를 공급하여야 하므로, S_2 가 L_2 에 가해야 하는 힘은

$$f_2 = \frac{\tau_2}{k_2}$$

이다. 즉, 중력 보상 메커니즘을 위해 머니플레이터에 설치된 S_1 과 S_2 가 머니플레이터에 공급하여야 하는 힘은 각각 f_1, f_2 이다.

2) 유도된 수식의 계산 및 조건 설정

최종 보조 기구의 질량, 거리 등의 조건 측정한 후 2.3.2.에서 구한 수식에 대입하여 쇼크 업소버가 공급하여야 하는 힘을 계산한다. 머니플레이터를 이루는 구조의 질량 측정 결과는 다음과 같다.

〈Table 2〉 Name and mass of structure

구조물	질량 (kg)
색소폰	2.53kg
색소폰 거치대	0.324kg
L_2 파이프	0.151kg
L_1 파이프	0.230kg
쇼크 업소버 (5kgf 규격, mm)	0.140kg
유니버설 조인트	0.148kg(각 개당)
라켓	0.059kg

최종 보조 기구의 물리적 성질 분석 과정에서 유도한 공식에 머니플레이터의 구조 질량을 대입하면

$$f_1 = \frac{\tau_1}{k_1} = \frac{m_2gx_1 + m_3gx_1 + m_4gx_2 + m_5gx_5}{k_1} = 6.464N$$

$$f_2 = \frac{\tau_2}{k_2} = \frac{m_1gx_3 + m_2gx_4}{k_2} = 87.686N$$

이다.

이를 쇼크 업소버의 규격을 나타내는 kgf 단위로 변환하면

$$f_1 \approx 0.660\text{kgf}$$

$$f_2 \approx 8.948\text{kgf}$$

이다.

이 연구에서는 본래 계산 결과를 토대로 머니플레이터에 정확한 양의 힘을 공급할 수 있는 쇼크 업소버를 장착하고자 하였으나, 시판되는 쇼크 업소버의 길이가 정해져 있고 쇼크 업소버가 공급하는 힘의 크기의 종류가 한정되어 있어 부득이하게 f_1 과 f_2 를 보상하는 데 5kgf 규격의 쇼크 업소버를 장착하기로 결정하였다.

3. 머니플레이터 제작 및 실험 과정

가. 수직 피스톤형 머니플레이터 제작 재료

제작을 위해서 사용한 재료들은 PVC 파이프(25A), MDF 합판(6T), 브라켓, M8 볼트&너트, 유니버설 조인트(1/2인치, 3.8인치), 색소폰 거치대, 5kgf 쇼크 업소버 등이다.

나. 수직 피스톤형 머니플레이터의 제작 과정

머니플레이터의 제작 과정은 다음과 같다.

- ① PVC 파이프의 가공 및 브라켓 장착
- ② MDF를 이용한 바닥판 제작 및 지지 구조 형성
- ③ 색소폰 거치대의 제작 및 가공
- ④ 유니버설 조인트의 분해
- ⑤ 유니버설 조인트와 쇼크 업소버의 결합
- ⑥ 전체적인 머니플레이터의 조립



[Fig. 8] Pipe processing

4. 제작 결과 및 실험 결과

가. 최종 제작 작품

머니플레이터 보조 장치의 대략적인 크기는 가로 70cm, 세로 60cm, 높이 80cm이다.



[Fig. 9] Completed vertical piston type manipulator

나. 보상력 실험 결과

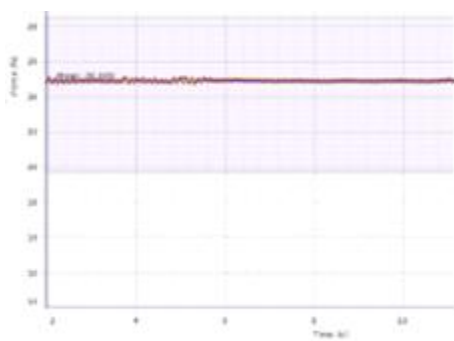
실제 악기를 사용해 보조 장치가 색소폰을 들고 있을 때의 힘을 얼마만큼 보상하는지 알아보기 위해 PASCO Interface와 High-Resolution 힘 센서를 사용해 힘을 측정했다. 보조 장치를 사용하지 않은 상황과 보조 장치를 사용한 상황에서 색소폰을 연결한 줄의 장력을 측정하였다.



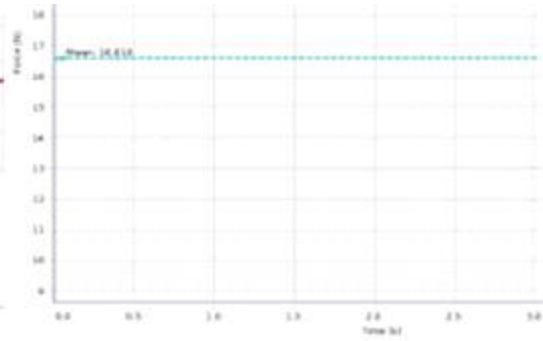
[Fig. 10] Weighing saxophone without auxiliary equipment



[Fig. 11] Weighing saxophone with auxiliary equipment



[Fig. 12] Weighing saxophone without auxiliary equipment



[Fig. 13] Weighing saxophone with auxiliary equipment

〈Table 3〉 Force measurement before and after application of manipulator

실험 번호	보상 장치 적용 전 gla(N)	보상 장치 적용 후(N)
1	24,800	16,570
2	24,900	16,610
3	25,000	16,650
평균값	24,900	16,610

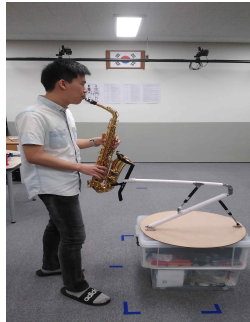
총 보상률은

$$\frac{24.9 - 16.610}{24.9} * 100 = 33.3\%$$

이다.

5. 머니플레이터형 보조 기구 제작과 실험 결론

장애인과 노약자를 위한 무전원, 일상생활에서 사용 가능한 보조 장치에 알맞은 구조의 머니플레이터 보조 기구를 설계하고 제작하였으며, 대형 관악기 연주 상황에 적용하여 보조 기구의 성능을 확인하였다. 그 결과 머니플레이터 보조 장치는 색소폰 무게의 33.3%를 보상할 수 있었으며, 목표 비율이었던 25%를 초과달성하였다. 또한 색소폰 연주 상황에서 연주자의 근력을 효과적으로 보조함을 확인하였으며, 이를 통해 근력이 약한 이들이 머니플레이터 보조 장치를 통해 무거운 물체를 쉽게 운용할 수 있음을 검증하였다.



[Fig. 14] Playing position with auxiliary equipment

6. 머니플레이터 연구에 대한 제언

머니플레이터 보조 장치를 일상생활 보조로 운용한 결과 드릴과 같이 무거운 장비를 사용하는 데에는 효과적이었으나, 일상생활의 대다수를 차지하는 단발성 동작에는 효과적이지 않았다. 또한 보조 장치의 도움을 받기 위하여 무거운 물체를 자력으로 보조 장치에 올려놓아야 하는 모순이 발생하였으며, 무거운 물체가 탑재된 머니플레이터 보조 장치를 이동시키는 데 어려움이 발생하였다. 뿐만 아니라 머니플레이터 보조 장치가 사용자의 움직임을 제한하였으며 그 크기로 인해 실내에서의 운용이 불편했다. 결론적으로 머니플레이터 보조 기구는 지속적인 근력 보조 및 장애인 재활의 기본적인 연구 목표를 달성하는 데 실패하였으며, 예상하지 못한 안전상의 위험이 발견되어 머니플레이터 보조 기구에서 연구 방향을 선회하기로 결정하였다.

III. 연구 내용 및 방법 2 - 외골격 형태의 보조기구

1. 외골격 형태 보조기구의 개관

머니플레이터 보조 기구보다 가동에 필요한 공간이 적고 보조 기구 사용자의 움직임을 방해하지 않으며 사용자의 동작을 지속적으로 보조할 수 있는 보조 기구로 외골격 보조 기구를 구상하였다. 상지 외골격 보조 기구는 사용자가 상지 외골격 보조 기구의 자중을 감당하여야 하며, 사용자가 물체를 들어 올리는 작업을 할 경우 보조 기구가 중력에 반하는 힘을 내야 하므로 외부 전원 없이 구현하기 어렵다. 또한 구동력을 위해 모터와 배터리를 장착할 경우 사용자가 수시로 배터리를 충전하여야 하므로 항상 사용할 수 있는 보조 기구를 연구하는 연구 목표에 반한다. 이에 본 연구에서는 외골격 보조 기구 자중의 부담이 적은 무동력 하지 외골격 보조 기구에 대해 연구하였다.

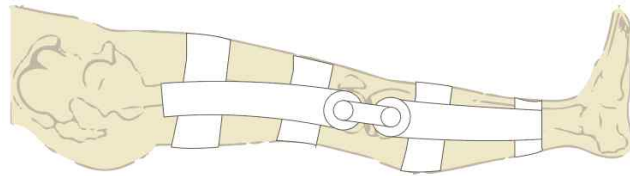
2. 외골격의 설계

가. 외골격 설계 사상의 확립

외골격 보조 기구와 비슷한 구조를 가진 시판중인 Limited Motion Knee Brace를 구입하여 착용하고 의자에 앉는 동작을 수행한 결과 Limited Motion Knee Brace를 착용한 부위가 보조 기구에 의해 무릎 방향으로 이동하여 불편함을 야기했다. 사용자가 편안한 하지 외골격 보조 기구를 설계하기 위하여 슬관절과 무릎 부위의 해부도를 분석한 결과 대퇴골과 경골이 맞닿아 무릎을 형성하는 것을 알 수 있었다. 무릎 관절이 일반적인 회전축과 달리 맞닿아 회전하는 점에서 착안하여 2개의 회전축을 가진 하지 외골격 보조 기구의 대략적인 설계를 구상하였다.

나. 하지 외골격 보조 기구의 목적 및 사용자 행동 특성 분석

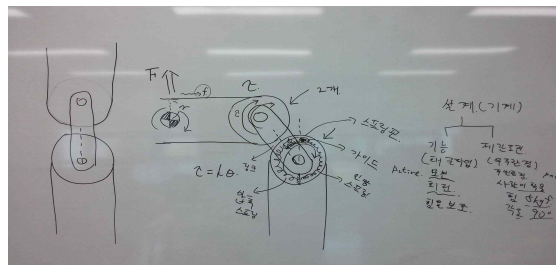
하지 외골격 보조 기구를 설계하기 전, 노약자와 장애인의 동작을 먼저 분석하여 보조하고자 하는 동작을 선정하였다. 먼저 인간이 하지를 사용하는 동작을 크게 앉고 일어서는 동작과 걷는 동작으로 구분하였다. 이 중 걷는 동작은 노약자와 장애인이 보행기나 지팡이를 통해 충분히 스스로 수행할 수 있다고 판단되었으나, 척추를 다친 환자나 무릎과 하지 근력이 부족한 노약자, 허리 견인기를 착용한 재활 치료자는 앉고 일어서는 동작이 힘들다는 것을 알고 대상자의 기립과 착좌를 보조하는 외골격 보조 기구를 목표로 하였다.



[Fig. 15] Initial Design of Exoskeleton Assist Device

다. 하지 외골격 보조 기구의 중력 보상 장치 설계

2개의 회전축을 가진 하지 외골격 보조 기구의 중력 보상 장치는 노약자와 장애인을 위한 설계 개념을 바탕으로 가볍고 작으며 고장이 났을 경우 수리가 쉽도록 간단한 구조를 가져야 한다. 뿐만 아니라 착용자의 움직임을 효율적으로 보조하면서도 보조 기구 자체의 크기로 인한 간섭과 불편함을 최소화하여야 한다. 스프링이 외부로 돌출되지 않고 소형화가 쉬운 구조를 지닌 중력보상 관절구동기에 관한 연구[4]가 있었으나, 구조와 형태가 복잡하여 제작과 수리가 어렵고 대량 생산을 통한 단가 인하가 어렵다고 판단하였다.



[Fig. 16] Initial design of exoskeleton assist device with two rotary axes

이에 본 연구에서는 중력보상 관절구동기에 관한 연구[4]에서 원형으로 설치된 스프링과 링크에 연결된 가이드의 개념을 채택하여 제작과 수리에 용이한 구조를 설계하였다. 각 링크는 경첩에 의해 고정되어 링크를 중심으로 회전하며, 링크 내부를 통과하며 경첩의 축을 중심으로 설치된 카드링은 단순한 원형의 고리가 아니라 열릴 수 있는 구조를 가져 링크가 파손되거나 스프링을 교체해야 할 경우 쉽게 분리될 수 있도록 하였다. 뿐만 아니라 사용자의 다리 옆면에 외골격이 착용되도록 하여 사용자가 의자에 앉을 수 있도록 하였다.

라. 하지 외골격 보조 기구의 최종 설계

최종적으로 한쪽에 3개의 링크와 2개의 카드링, 2개의 스프링을 사용하여 외골격 보조 장치를 제작하기로 결정하였다. 각 링크는 다리 양쪽에 장착되며, 벨크로 밴드로 반대쪽의 링크와 연결되어 사용자의 다리에 고정된다. 카드링은 각 링크마다 1/4씩 각 링크의 내부를 통과하며, 각 링크를 바로 옆의 링크와 연결하는 역할을 한다. 스프링은 카드링을 따라 설치되어 카드링을 가이드로 움직이며, 사용자가 외골격 보조 기구를 착용하고 다리를 구부릴 경우 링크 자체에 반발력을 공급하여 중력 보상 장치 역할을 하도록 한다.

3. 하지 외골격 보조 기구의 제작

가. 수치 계산 및 하지 외골격 보조 기구 성능 설정

연구자 중 허리가 불편한 연구자를 대상으로 하여 하지 외골격 보조 기구를 제작하였다. 먼저 연구자의 키, 체중, 바깥쪽 허벅지 길이, 안쪽 허벅지 길이, 바깥쪽 종아리 길이, 안쪽 종아리 길이, 대퇴골과 경골 사이의 거리를 측정하여 외골격의 크기 수치를 결정하였다. 신체 측정 결과 후 결정한 링크의 길이는 다음과 같다.

〈Table 4〉 Researcher's body size

키 (mm)	1730
체중 (kg)	63
바깥쪽 허벅지 링크 길이 (mm)	200
안쪽 허벅지 링크 길이 (mm)	200
바깥쪽 종아리 링크 길이 (mm)	365
안쪽 종아리 링크 길이 (mm)	295
대퇴골과 경골 사이의 링크 길이 (mm)	85

나. 하지 외골격 보조 기구의 역학적 분석

본 연구에서는 수중 보행 재활 훈련 시스템을 기준으로 하지 외골격 보조 기구의 목표 성능을 설정하였다. 수중 보행 재활 훈련은 허리까지의 하지를 물에 담그고 진행하므로 본 연구에서는 이와 유사하게 하지가 물에 담겨 있을 때의 부력을 계산하여 목표 성능을 설정한 뒤, 하지 외골격 보조 기구를 역학적으로 분석하여 하지 외골격 보조 기구가 공급하여야 하는 토크와 기계요소의 성능을 결정하였다.

1) 부력의 계산

먼저 보조 장치의 제작 대상인 연구자의 하지 부피를 측정하였다. 이때 다리를 골반 1개, 각 다리당 4개, 각각의 발 2개의 부분으로 나누어 분절마다 둘레와 높이를 재고 원뿔대 형태로 근사를 하여 부피를 계산하였다. 계산 결과, 하지의 부피

$$V = 2.388 \times 10^{-2} \text{ m}^3$$

을 얻을 수 있었다. 물의 평균 밀도를 $\rho_w = 1.000 \text{ g/ml}$, 중력가속도를 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 으로 설정하여 물의 부력

$$F = \rho_w Vg \approx 226 \text{ N}$$

을 계산하였다.

2) 보상 토크의 계산

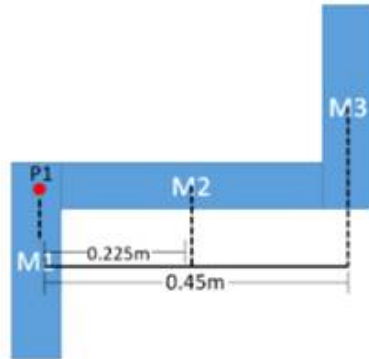
무릎이 주어야 하는 토크 T_n 과 중력이 가하는 토크 T_g , 그리고 보조 장치가 공급하는 토크 또는 부력에 의한 토크 T_m 을 사용하여 장치가 보상해야 하는 최대 토크를 구한다. 이때 이 세 토크는

$$T_n = T_g - T_m$$

을 만족한다. 각 토크를 구하기 위해 토크가 적용하는 무게중심을 계산하며, 부력은 몸 전체의 무게중심에 작용한다. 아래 [Fig. 16]과 같이 90도로 앉은 상태에서의 인체는 3부분으로 나눌 수 있다. M1은 무릎 아래 종아리 부분, M2는 허벅지 부분, M3는 그 외 나머지 상지이며, 연구자의 피부와 몸무게를 이용하여 $M1 = 7.23 \text{ kg}$, $M2 = 7.71 \text{ kg}$, $M3 = 50.1 \text{ kg}$ 을 계산하였다. 이 결과와 허벅지의 길이를 통해 앉은 상황에서 몸 전체의 무게중심은 무릎의 중심인 P1으로부터 약 0.37m 떨어져 있음을 알아냈다. P1은 착좌 상태에서 기립 상태까지의 움직임의 회전 중심이며 F와 무게중심과의 거리를 통해서 보상 토크

$$T_m = 226 \text{ N} \times 0.37 \text{ m} \approx 84.3 \text{ N} \cdot \text{m}$$

를 계산하였다.



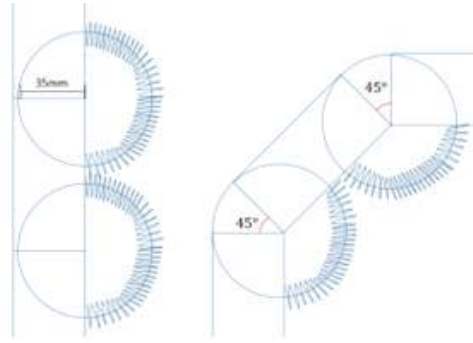
[Fig. 17] Models of the human body in a sitting position

3) 스프링 상수 결정

장치가 주어야 할 총 보상 토크의 계산값을 이용하여 사용할 스프링의 상수를 계산한다. 스프링은 한쪽 다리의 보조 기구에 4개가 장착되므로 총 8개이고, [Fig. 17]과 같이 완전 기립에서 착좌 상황에 이르렀을 때 각각의 스프링이 변형되는 각도는 45° 이다. 그리고 연구자의 무릎 뼈 끝부분 사이의 거리가 대략 70mm로 측정되었으므로 이를 반으로 나눈 35mm를 유효 회전 반경으로 설정하였다.

총 8개의 스프링이 힘을 버티므로 각각의 스프링이 공급해야 할 토크는 $10.54 \text{ N} \cdot \text{m}$ 이다. 그리고 유효 반경 35mm 스프링이 45° 변형되므로 변형 길이는 27.5mm이다. 이때 스프링이 내야 하는 힘은 301N이 되고 훅의 법칙 $F = kx$ 를 사용해 스프링 상수를 구하면 $k = 10.95 \text{ N/mm}$ 의 스프링이 필요함을 알 수 있다.

그러나 지금까지 계산한 상황은 완벽한 중력보상을 위한 상황이며 실제 사람이 착용할 때 부력과 동일하게 힘을 받으면 제대로 착좌 상황에 이르지 못함을 유의하여야 한다. 따라서 실질적인 사용을 고려하여 원래 스프링 상수의 절반인 $k = 4.46\text{N/mm}$ 의 스프링을 사용하기로 했다.



[Fig 18] Spring pattern diagram in full stand / seated situation

다. 하지 외골격 보조 기구의 재료

〈Table 5〉는 하지 외골격 보조 기구를 제작하는 데 사용된 재료의 목록이며 〈Table 6〉는 하지 외골격 보조 기구의 성능을 평가하기 위해 사용된 장비의 목록이다.

〈Table 5〉 Configuration of exoskeleton assist device

명칭	수량	비고
MDF 판	1	6mm
코일스프링 초변형용 SWU	4	SWU26-110
카드링	4	70mm
십자 트리스 볼트	12	M6, 50mm
너트	12	M6
벨크로 밴드	6	150cm
경첩	4	HB2519-13
피스 스크류	16	3.5mm*16mm
에폭시 퍼티	1	57g

〈Table 6〉 Performance test equipment and measurement system

명칭	수량	비고
근전도 측정 모듈	1	PSL-DAQ
소형 EMG 센서 모듈	2	PSL-iEMG2
Motion Capture System	1	Nexus
Force Plate	2	AMTI

라. 하지 외골격 보조 기구의 제작

1) MDF 가공 및 외골격 링크 제작

MDF의 가공과 외골격 링크는 다음과 같이 제작하였다.

- ① 어도비 일러스트레이터를 이용하여 표 6을 기반으로 40mm 폭 링크 조각을 각각 4개씩 제도한다.
- ② 목공용 접착제와 바이스를 이용하여 링크 조각을 2개씩 나란히 붙인다.
- ③ 경첩을 이용하여 링크를 임시로 연결하고, 설계에 따라 컴퍼스를 이용하여 반지름 35mm의 원호를 링크 조각에 제도한다.
- ④ 6.5mm 드릴 비트를 장착한 벤치 드릴을 이용하여 제도된 원호를 기준으로 바깥쪽으로 카드링이 들어갈 수 있는 홈을 판다.
- ⑤ 링크를 조립한 뒤 카드링이 원활하게 움직이는지 확인한 뒤 목공용 접착제와 바이스를 이용하여 링크를 완성한다.
- ⑥ 완성된 링크를 사용자의 다리에 대어 본 후, MDF 조각으로 다리와 링크의 빈 공간을 채워 외골격 보조 기구가 안정적으로 장착되게 한다.



[Fig. 19] The links after insertion of the card ring

2) 외골격 링크 조립

외골격 링크와 경첩, 카드링은 다음과 같이 조립하였다.

- ① 바이스에 3-2-1에서 파 둔 홈이 잘 들어맞도록 링크를 고정한다.
- ② 링크를 경첩으로 임시로 연결한 뒤 전동 드라이버를 이용하여 피스 스크류로 경첩을 고정한다.
- ③ 카드링을 열어 링크에 설치한다. 이때 카드링의 한쪽 부분이 링크에 전부 삽입되어 스프링을 설치할 수 있도록 한다.
- ④ 카드링에 스프링을 끼운 뒤 카드링을 닫는다.
- ⑤ MDF 조각과 에폭시 퍼티를 이용하여 스프링과 링크 사이의 빈 공간을 채워 스프링이 제대로 압축되도록 한다.



[Fig. 20] Links using hinges

3) 벨크로 밴드의 제작과 외골격 보조 기구의 완성

외골격 보조 기구는 다음과 같이 완성하였다.

- ① 외골격 링크를 사용자의 몸에 임시로 설치한 뒤, 벨크로 밴드를 감아 신체에 맞는 길이를 표시한다.
- ② 커터칼을 이용하여 벨크로 밴드를 잘라낸 뒤, 리벳을 이용하여 벨크로 밴드의 접착부를 고정한다.
- ③ 컴퓨터용 사인펜을 이용하여 벨크로 밴드가 설치될 부분을 표시한다. 이때 벨크로 밴드는 최대한 같은 간격을 유지하되 링크를 통과하는 카드리ング과 간섭하지 않도록 주의한다.
- ④ 6mm 드릴 비트를 장착한 벤치 드릴을 이용하여 벨크로 밴드와 외골격 링크에 구멍을 뚫는다.
- ⑤ 볼트와 너트를 이용하여 벨크로 밴드를 외골격 링크에 고정한다. 효율성을 위하여 전동 드라이버를 이용하여 볼트가 거의 다 조여졌을 때는 드라이버를 사용하여 밴드의 위치가 흐트러지지 않도록 한다.
- ⑥ 볼트 커터를 이용하여 외부로 돌출된 볼트를 잘라낸다.



[Fig. 21] Completed exoskeleton assist device

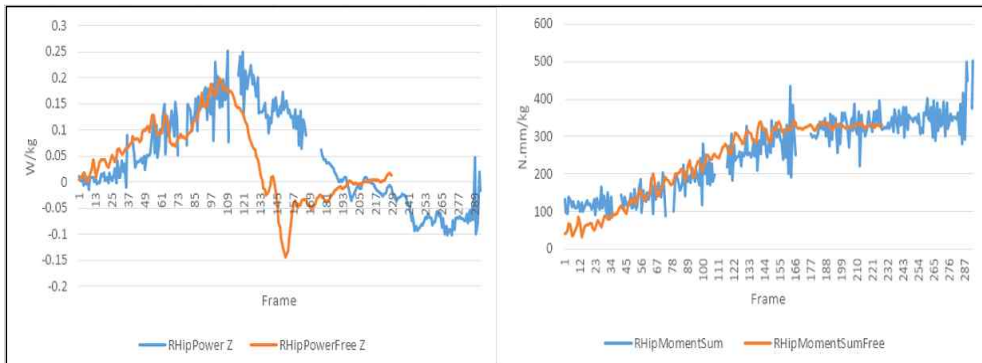
4. 하지 외골격 보조 기구의 성능 시험 - MCS를 사용한 실험

가. 실험환경 구성

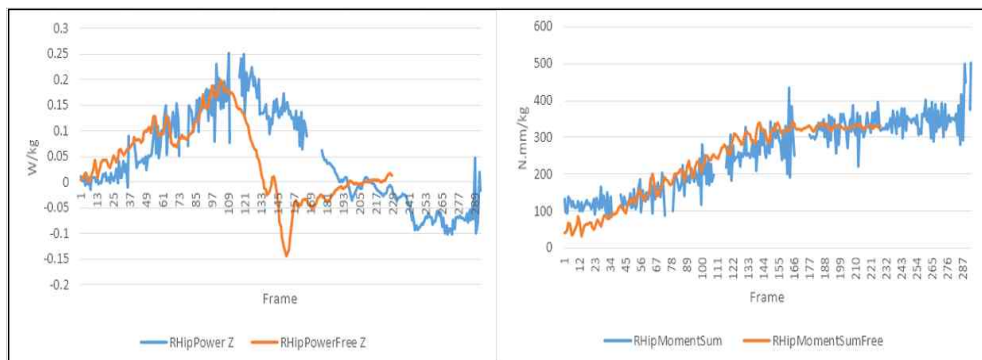
하지 외골격 보조 기구의 성능을 검증하기 위해 사용자가 외골격 보조 기구를 착용하고 의자에 앉고 일어서는 동작을 통해 외골격 보조 기구의 성능을 실험하였다. 외골격 보조 기구의 실험을 위해 Nexus社의 Motion Capture System과 AMTI社의 Force Plate를 이용하였으며 외골격 보조 기구의 외적 성능을 평가하였다. Nexus Vicon의 Human Model을 이용하기 위하여 외골격 보조 기구의 무게는 사용자의 체중에 비해 매우 작다고 판단하여 무시하였으며, Nexus Vicon을 이용하여 시간에 따른 측정을 가능하게 하였다. Nexus Vicon에 측정한 인체 수치를 입력하고 Force Plate를 이용하여 자료 처리 과정을 거쳐 Hip, Knee의 Moment와 Power을 출력함과 동시에 시간을 나타낼 수 있도록 하였다. 이때 Moment는 (+)값을 가지고 있을 때 신전, (-)값을 가지고 있을 때 굴곡을 의미하며, Power는 관절의 일률을 나타내는 것으로 똑같은 일을 얼마나 빠르게 수행하고 있는가를 의미한다. 즉, 하지 외골격 보조 기구를 착용하였을 때 착용하지 않았을 때보다 Moment값이 작다면 하지 외골격 보조 기구가 무릎의 운동에 도움을 준다고 볼 수 있다. 무동력 하지 외골격 보조 기구의 성능을 평가하기 위하여 무동력 하지 외골격 보조 기구를 착용한 경우와 착용하지 않은 경우를 나누어 실험하였다. 각 실험에서는 완전 기립, 완전 착좌, 기립과 착좌의 중간, 값이 최대치가 나온 시점에서의 값을 기록하며, 동작을 전부 수행하는 데 걸린 시간을 측정한다.

나. 실험결과

1) 그래프 개형 분석



[Fig. 22] Power (left) and Moment (right) measurement in hip using Force Plate



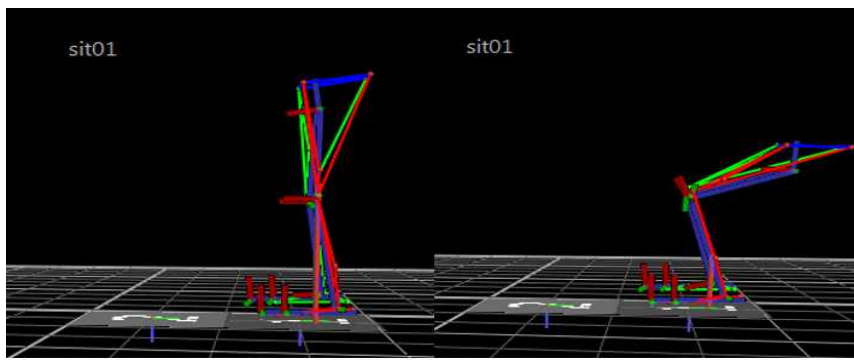
[Fig. 23] Power (left) and Moment (right) measurement in knee using Force Plate

외골격 보조 기구를 착용하고 실험을 수행한 결과와 외골격 보조 기구를 착용하지 않고 실험한 결과를 [Fig. 21], [Fig. 22]에 나타내었다.

[Fig. 21]의 Hip에서의 Moment 실험 결과를 정리하면 외골격 보조 기구를 착용하였을 때 외골격 보조 기구를 착용하지 않았을 때에 비해 더 낮은 Moment값을 나타내고 있으며, 이는 외골격 보조 기구가 효과를 갖고 있음을 알 수 있다. 외골격 보조 기구를 착용하였을 때와 착용하지 않았을 때 전반적인 그래프의 개형이 비슷하다.

그러나 [Fig. 22]의 Knee에서의 Moment 실험 결과를 정리하면 외골격 보조 기구를 착용하였을 때 Knee의 Moment가 거의 일정하게 유지되는 것을 볼 수 있으나, 그래프의 상하 진동폭이 너무 커 유의미한 분석이 어려운 상황이다. 뿐만 아니라 Power와 Moment 모두 그래프의 개형이 상당히 다름을 알 수 있으며, 이는 외골격 보조 기구가 Hip보다는 Knee에 더 많은 영향을 끼치고 있기 때문이라는 결론을 내렸다.

2) 완전 기립, 완전 착좌, 측정 수치 최대 시점에서의 분석



[Fig. 24] Nexus Vicon screen in full standing (left), fully seated (right) using auxiliary equipment

완전 기립, 완전 착좌 상태에서 Hip, Knee에서의 Power 측정값은 차이를 보이지 않았다. 그러나 Hip, Knee에서의 완전 기립 상태에서의 Moment 측정값은 서로 달랐으며, Knee에서의 Moment 측정값은 매우 불규칙하게 운동하여 완전 기립 상태에서는 외골격 보조 기구를 착용하였을 때의 값이 더 크고, 완전 착좌 상태에서는 외골격 보조 기구를 착용하지 않았을 때의 값이 더 큰 불안정한 모습을 보여주었다.

3) 운동 상태 분석 및 성능 평가 결론

외골격 보조 기구를 착용하였을 때 외골격 보조 기구를 착용하지 않았을 때보다 앉는 동작을 수행하는 데 걸리는 시간이 더 긴 것을 알 수 있다. 외골격 보조 기구를 착용하지 않았을 때 자리에 앉는 데 걸린 Frame 수는 211인 반면, 외골격 보조 기구를 착용하였을 때는 자리에 앉는 데 294 Frame이 소요되어 운동에 소요되는 시간이 약 39.3% 증가하였다. 이는 외골격 보조 기구가 사용자를 보조하여 사람이 앉는 동작에서 중력을 일정 부분 상쇄하였으며 결론적으로 사용자가 받는 외력이 감소하였음을 보여준다.

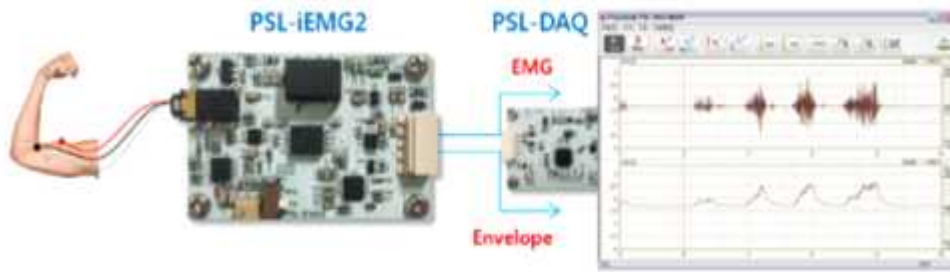
Knee에서의 Moment 측정을 제외한 실험에서는 외골격 보조 기구를 착용했을 때와 착용하지 않았을 때 그래프의 개형이 일치하였다. 이를 통해 외골격 보조 기구를 착용하였을 때 외골격 보조 기구가 사용자를 보조하면서도 사용자의 행동 특성을 바꾸지 않음을 알 수 있다. 이는 환자의 신체 능력을 본래 상태로 회복시키는 데 목적을 두는 재활치료용 외골격 보조 기구의 목표에 부합한다.

전체적으로 외골격 보조 기구를 착용하였을 때 실험 결과의 그래프는 Noise가 많고 값이 불안정하게 이동하는 것을 알 수 있었다. 전체적인 경향성은 알 수 있었으나, 특정한 시점의 측정값을 비교하기는 어려웠다. 이는 바닥에 설치되어 인체가 바닥에 가하는 힘을 통해 Power와 Moment를 계산하는 Force Plate의 특성상 피험자의 하지에 착용된 외골격 보조 기구의 특성을 고려하지 못하였기 때문으로 예상된다. 따라서 우리는 Force Plate를 이용한 외골격 보조 기구 성능 평가 실험을 통해 외골격 보조 기구가 유의미하다는 긍정적인 평가는 할

수 있으나, 정확한 자료를 기반으로 한 정량적인 평가는 불가능하다는 결론을 내렸다. 이에 외부에서 외골격 보조 기구의 성능을 측정하는 Force Plate 대신 사용자의 근육이 얼마나 활성화되었는지 정밀하게 측정하는 근전도 센서를 이용하여 외골격 보조 기구의 성능을 평가하기로 결정하였다.

5. 하지 외골격 보조 기구의 성능 시험 - 근전도 센서를 통한 실험

MCS를 통해 외력을 분석할 때 외력의 측정은 간단하지만 정확성이 떨어진다. 그러하니 더욱 정확한 결과를 얻어내기 위해 표면 근전도 센서를 통한 내력의 측정, 즉 근활성도를 비교해 봐야 한다. 본 실험에서 사용한 근전도 장비는 PhysioLab의 PSL-DAQ 모듈과 PSL-iEMG2 센서이다. 이 센서로는 근전도 신호와 근전도 포락선 신호(EMG, 적분근전도값)을 동시에 측정이 가능하다.



[Fig. 25] Type of EMG sensor module used[7]

근전도 측정을 위해서는 어떤 부위에 전극을 부착하는지도 매우 중요한데, 본 실험에서는 하지에 장착되는 외골격 보조 기구의 근력 보조 효과의 확인을 목표로 한다. 이 장치는 앞에서 거론했듯이 사람의 sit-stand 운동을 보조하기 위해 만들어진 것이다. 사람이 기립하고 착좌하는 운동은 무릎을 중심으로 일어나고 이 운동을 만드는 근육은 바로 허벅지 위쪽의 대퇴직근(Rectus femoris)이다. 근전도 전극의 부착은 EU의 SENIAM project 사이트를 참고하여 부착하였다[8].

가. 근전도 실험 절차

1) 실험 준비 및 방법

실험은 다음과 같은 순서로 진행하였다.

- ① PSL-DAQ와 PSL-iEMG에 전극을 연결하고 이를 PC에 연결한다.
- ② PSL-DAQ Korea 소프트웨어를 실행한다.
- ③ 피험자의 다리에 기준 전극과 측정 전극을 부착한다. 기준 전극은 발목에, 측정 전극은 대퇴근의 중앙에 부착한다. 측정 전극을 부착시 두 전극 사이의 간격은 2cm로 한다. 또한 전극은 근섬유의 방향과 평행하도록 부착해야 한다.
- ④ 피험자는 착좌 상태에서 천천히 기립 자세를 취한다. 이때의 EMG 신호를 기록한다.
- ⑤ 피험자는 기립 상태에서 천천히 착좌 자세를 취한다. 이때의 EMG 신호를 기록한다.
- ⑥ 4~5번 부분을 여러 번 반복해 데이터를 얻는다.



[Fig. 26] Attaching electrodes before and after exoskeleton assist device

2) 실험 데이터 처리

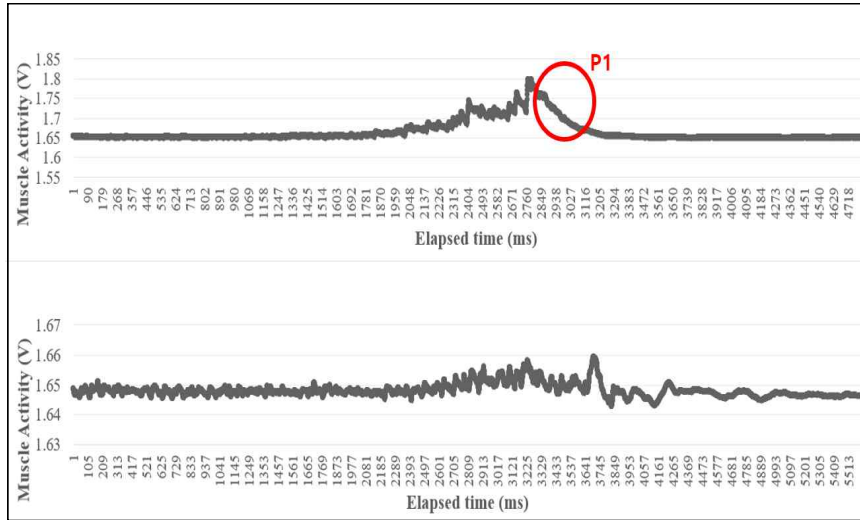
근전도 데이터를 얻어서 나온 V값, 즉 Raw 데이터를 바로 비교에 사용하지는 않는다. 이때 데이터는 표준화(Normalization) 작업을 거치게 되는데, 보통 MVC(Maximal Voluntary Contraction) Normalization을 활용한다[9]. MVC란 최대 자의적 수축에서 얻어지는 최댓값을 100%로 간주하여 상대적으로 비교하는 방법이다. 하지만 MVC는 부작조건이 달라지면 사용하기 힘들고 정확한 기준에 대한 많은 논의가 필요하다. 그 외로 사용하는 분석요인에는 IEMG, 평균값, 중앙값, Integrate Slope, Median Power Frequency 등이 있으나 PSL-DAQ 모듈과 소프트웨어로 기술 한도 내에서 가장 쉽게 얻을 수 있는 신뢰성 있는 지표가 IEMG이므로 본 분석에서는 IEMG 개형을 비교한다.

나. 근전도 실험 결과

1) 착좌 운동의 결과&분석

두 그래프 중 장비 착용 전 상황에서 근활성이 빠르게 낮아지는 것을 볼 수 있다(주목점 P1). 앉는 동작에서 대퇴직근은 원심성 수축을 하며, 근활성도를 보인다. 여기서 원심성 수축(Eccentric contraction)이란 근육의 움직임과 반대되는 방향으로 수축하고 있다는 것이다. 즉 근육의 길이가 길어지며 힘을 쓰고 있다는 의미이다. 이때 빠르게 근활성도가 낮아진다는 것은 힘을 빼고 털썩 주저앉게 되는 것으로 보인다. 이런 동작은 보통 사람에게 별 해가 되지 않을 수 있지만, 하지에 힘이 없는 노약자라면 충격으로 인해 위험해질 수 있다. 그래서 사람들이 노약자들이 의자에서 일어날 때만이 아니라 앉을 때도 부축하는 것이다. 반면 장비의 착용 시에는 뒤쪽 스프링이 받쳐 주는 저항에 대항하기 위해 근육이 지속적으로 활동 상태가 되어 급감하는 점이 없다고 판단된다.

외골격 보조 장치를 착용하지 않았을 때는 IEMG값이 1.65V에서 최대 1.8V까지 0.15V 증가하였으나, 외골격 보조 장치를 착용한 실험에서는 IEMG값이 1.65V에서 최대 1.66V까지 0.01V 증가하였다. 착좌 상황에서 장치를 착용하지 않은 경우에 비하여 장치를 착용했을 때 IEMG값이 6.67% 수준으로 감소하는 것을 확인하였다. 전체적인 IEMG 값이 장치 착용 후가 낮은 것을 보면 대퇴근이 몸이 급작스럽게 떨어지는 것을 막기 위해서 가하는 힘의 일부를 스프링이 부담하는 것으로 생각된다. 이러한 결과를 해석하면 보조기의 착용이 대퇴직근의 근활성도에 영향을 주고 있으며, 앉는 동작에 무리를 주지 않는다고 볼 수 있다.

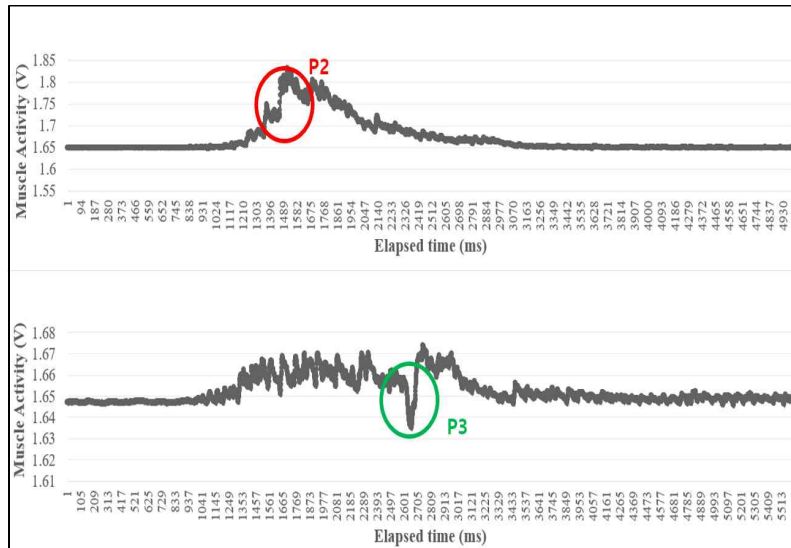


[Fig. 27] IEMG graph in seated situation without the exoskeleton(above) and with the exoskeleton(below). The red circle part is called attention point P1.

2) 기립 운동의 결과 및 분석

먼저 장치 미착용 상태에서의 그래프를 보면 처음에 근육을 갑자기 많이 쓰다가 나중에 빠르게 줄어드는 개형이 관측된다(주목점 P2). 이는 처음에 근육을 강하게 사용하여 관성을 통해 기립 상태에 이르는 것으로 볼 수 있다. 그에 반면에 장치를 착용한 상태에서의 그래프를 보면 전체적으로 근활성도가 낮고 원만하게 증가했다가 대체적으로 일정하게 유지되다가 다시 원만하게 줄어들게 된다. 이는 장치 미착용 상태처럼 강하게 힘을 쓸 필요가 없이 기립이 가능함을 의미한다. 근육에 걸리는 부하는 근육을 빠르게 사용하거나 강하게 사용할수록 커지는데, 장치를 착용하게 되면 기립시 이런 상황을 마주치지 않게 되니 근육에 걸리는 부하가 적어짐으로 해석할 수 있다. 여기서 갑자기 근활성도가 떨어지는 부분(주목점 P3)이 존재하는데, 이는 기립 상태에 거의 도달했을 때 관성에 의해 움직이기 위해 힘을 뺐다가 다시 균형을 맞추기 위해서 힘을 가하는 것으로 예상된다.

외골격 보조 장치를 착용하지 않았을 때는 IEMG값이 1.65V에서 최대 1.85V까지 0.2V 증가하였으나, 외골격 보조 장치를 착용하였을 경우 IEMG값이 1.65V에서 최대 1.675V까지 0.025V 증가하였다. 이를 통해 기립 상황에서 장치를 착용하지 않은 경우에 비하여 장치를 착용했을 때 IEMG값이 12.5% 수준으로 감소하는 것을 확인하였다. 따라서 장치를 사용하면 근육에 걸리는 부하를 줄이고 더 낮은 근활성도 에서도 동일한 동작을 할 수 있으므로 동작의 효율을 높인다고 할 수 있다.



[Fig. 28] IEMG opening in standing movement without the exoskeleton(above) and with the exoskeleton(below). The red circle part is called attention point P2, and the green circle part is called attention point P3.

IV. 결론 및 제언

1. 결론

이 연구에서는 기립 및 착좌시 신체의 무게로 인해 무릎에 걸리는 토크를 보상하여 사용자의 근력을 보조하는 중력 보상 장치가 적용된 하지 외골격 보조 기구를 제작하고 그 실용성을 확인하였다. 외부 전원 공급이 필요하지 않아 일상생활 속에서 계속 착용할 수 있으며 구조가 간단하여 가격이 낮도록 장치를 설계하였고, 기존 수중 재활 치료를 기준으로 물리적인 분석을 통해 장치의 보상력을 결정하였다. 장치의 효과와 실용성 검증에 대해서는 MCS를 사용한 외력 측정과 근전도 센서를 통해 내려 측정을 시도했고, 외골격 보조 장치에서 발생하는 보상력을 정량적으로 측정하는 데에는 실패하였으나, 외골격 보조 장치를 통해 근활성도를 최대 6.67%까지 감소시킬 수 있는 것을 확인하였다. 그 결과 본 장치가 근육과 관절에 걸리는 부하와 동작 효율을 높임을 알 수 있었다. 본 연구는 다른 연구와 달리 사용자가 직접 착용하면서도 외부 동력을 필요로 하지 않는 외골격 보조 기구를 설계하여 재활 치료에서 중요한 조건 중 하나인 치료의 연속성을 만족시킬 수 있었다.

2. 제언

본 연구에서 목표로 한 무동력 하지 외골격 보조 기구와 같이 인간이 신체에 착용하는 의료기구는 기구의 성능, 효율성뿐만 아니라 착용감과 같은 사용자가 느끼는 감정도 중요하다. 특히 본 연구에서는 사용자가 항상 보조 기구를 착용하며 일상생활 속의 동작을 행하는 것을 목표로 하므로, 착용감이 매우 중요하다. 실제 노약자와 환자들이 제작한 하지 외골격 보조 기구를 착용하였을 때 편안하게 일상생활을 할 수 있는지 조사하여 하지 외골격 보조 기구의 설계를 변경하거나 완충재를 덧대는 등의 개선이 필요하다.

이 연구에서 제작한 하지 외골격 보조 기구는 기립과 착좌에만 초점이 맞춰져 있다. 스프링의 길이와 에폭시 퍼티의 크기를 조절하여 중력 보상 장치가 보행 동작에 영향을 미치지 않도록 할 수 있으나, 하지 외골격 보조 기구의 자중으로 인해 환자의 보행이 힘들 것으로 예상된다. 따라서 이 연구에서 사용한 중력 보상 장치를 응용하여 보행 동작에도 도움이 되는 보조 기구에 대한 연구를 진행할 필요성이 있다.

인간의 신체 수치는 개인마다 차이가 있음에도 불구하고 이 연구에서 진행한 하지 외골격 보조 기구의 링크의 길이는 고정되어 있다. 특히 가운데 링크는 대퇴골과 경골 사이의 길이에 의해 결정되며 이 부분의 길이는 개인마다 다르면서도 하지 외골격 보조 기구의 성능과 착용감에 지대한 영향을 끼친다. 이 문제를 해결하기 위하여 가운데 링크를 탈부착이 쉽게 만들어 개인에 맞는 링크를 사용할 수 있게 하거나 길이 조절이 가능한 링크의 설계가 필요하다.

V. 참고문헌

- [1] 허영 외 2인 (2016). 재활의료기기 기술 동향 및 전망, 한국산업기술평가관리원. 92-94
- [2] 최형식, 서해용, 엄태웅, 윤종수 (2011). 중력보상기를 적용한 로봇 팔의 실험적 연구. 한국마린엔지니어링학회지. 제 35권 제1호. 60-67.
- [3] 권효찬, 고훈건, 김권희 (2011). 슬라이더 크랭크 기구를 이용한 머니플레이터의 중력 보상 장치 설계. 대한기계학회 2011년도 생산 및 설계공학 부문 춘계학술대회. 175-176.
- [4] 황적규, 조창현, 이영호, 최문택, 송재복, 김문상 (2011). 가반하중 변동에 대응하는 중력보상장치 개발. 2011 제26회 ICROS 학술대회. 120-123.
- [5] 강인호, 김휘수, 송재복, 이현수, 장인성 (2014). 기어유닛 기반 중력보상장치를 갖는 머니플레이터. 대한기계학회논문집, A, 제 38권 3호. 289-294.
- [6] 로봇 머니플레이터 설명. <http://www.aistudy.com/robot/manipulator.html> (검색일 2017/11/20)
- [7] Physiolab 홈페이지. www.physiolab.co.kr PSL-DAQ DataSheet(검색일 : 2017.11.20.)
- [8] EU의 SENIAM 프로젝트 홈페이지. www.seniam.org (검색일 : 2017.11.20.)
- [9] 문영진 (2009). 스포츠과학 09 SUMMER. KISS. 42-43

I 연구진 I

박경수 (Kyungsoo Park, 세종과학예술영재학교, pentagram@sasa.hs.kr) 주저자
조민석 (Minsuk Cho, 세종과학예술영재학교, stancho0811@naver.com) 공동저자
장건희 (Geunhee Jang, 세종과학예술영재학교, janghwa8@naver.com) 공동저자
신호섭 (Hyosup Shin, 세종과학예술영재학교, godmugi@sasa.hs.kr) 교신저자

지도교사 : 김용순 (Yongsoon Kim, 세종과학예술영재학교, sn0707@nate.com)

광 베네시안 블라인드를 이용한 교실 내 조명환경 개선 연구 : 실측과 시뮬레이션을 통하여

김우재 · 이석준 · 박기은 · 김예준 - 인천과학예술영재학교

A Study on Improvement of Lighting Environment in Classroom using Daylight Venetian Blind

Woojae Kim · Sukjun Lee · Kieun Park · Yejun Kim - Incheon Academy of Science and Arts

국문초록

학교 교실은 학생들이 많은 시간을 상주하며 학습을 진행하는 장소로, 학생들의 원활한 학습 진행을 위해서는 쾌적한 조명환경이 필수적이다. 하지만 실제로는 교실의 심도로 인해 자연채광이 불균일하게 유입되는 것이 현실이다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 이미 광선반 등의 해결책이 제시되었지만, 공간 활용이 비효율적이고 설치의 문제점이 있는 등 여러 문제를 포함하고 있다. 따라서 본 연구는 공간 활용이 효과적이고, 적용이 용이한 광 베네시안 블라인드를 이용하여 교실의 조명환경을 개선할 수 있도록 광 블라인드의 슬랫 각도 조절 알고리즘을 제시하였고, 이를 Radiance 시뮬레이션과 Mock-up을 통해 검증하였다. 제작한 알고리즘을 시뮬레이션과 Mock-up을 통해 검증한 결론은 다음과 같다. 첫째, 알고리즘을 이용하여 자연채광을 교실 천정조명처럼 사용할 때 모든 절기에서 창문 쪽 재실자의 글레어와 복도 쪽 재실자의 조도가 긍정적인 방향으로 유의미하게 개선됨을 확인했다. 둘째, 알고리즘을 이용한 광 블라인드를 Mock up한 교실과 일반교실을 비교한 결과 광 블라인드를 Mock up한 경우 창문 쪽 휘도가 2.6배 감소한 것으로 나타나 글레어를 줄이는 블라인드의 목적을 충분히 할 수 있다는 결과를 얻었다. 셋째, 알고리즘을 이용한 Mock up 블라인드를 이용한 경우 일반교실보다 복도 쪽 책상면의 휘도를 3배 이상 높여주는 것으로 나타나 1개 교실 당 연간 $3.2 \times 10^9 \text{J}$ (87%)의 에너지 절감 효과를 낼 수 있다는 결론을 얻을 수 있었다.

중심어 : 광블라인드, Radiance, 자연채광, 교실 조명, 조명환경 개선

ABSTRACT

School classroom is a place where students stay most of the time during the day for education, which essentially needs pleasant lighting environment. However in reality, there is inevitable unbalance of Daylight caused by the depth of the classroom. There already were some solution that has been suggested to solve this problem like light shelf, but these solutions also has problem of unefficient space use, difficult in emplacement, etc. So in this study we have suggested a better way to improve the light environment in classroom using a lighting tool called 'Venetian blind', which doesn't have any problems we mentioned before. We have suggested an algorithm that can give us the best angle for each slat in Venetian blind depend on time and few conditons in classroom, and we have proven the alghrithm using Radiance simulation, and Mock-up in test-bed. Algorithm was made to give the angle of each slat in blind, where blind can concentrate the Daylight to the table which is furthest from the window. We have made the alghrithm by backtracking the Daylight when blind is set to the best angle we want, and made an equation of the angle we want. The result of simulation and the test in real classroom is as follows. First, we have observed that light environment has improved in all seasonal days using the Venetian blind with this study's algorithm. Second, as we have tested the Venetian blind with algorithm in real test-bed, we have observed that luminance has decreased in 2.6 times in table which is closest to the window. This means our algorithm has achieved the goal of reducing the glare which students that are placed closest to window feels. Third, when using the blind with this study's algorithm, we have observed that luminance in furthest table from window has increased in more than three times, and by using the blind with this sruty's algorithm, school can save energy use up to $3.2 \times 10^9 \text{J}$ (87%) per one classroom.

Key words : Venetian blind, Radiance, Daylight, classroom light, improvement in light environment

I. 서론

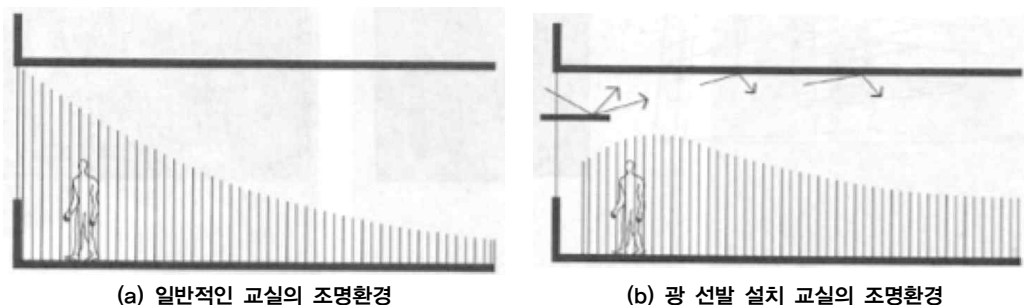
‘밝은 낮 시간 교실에 블라인드를 쳐서 어둡게 만들고 조명을 켜는 일은 너무 모순적인 일이다.’

밝은 낮 시간에 교실의 풍경을 에너지 관점에서 보면 모순된 부분을 쉽게 관찰할 수 있다. 대부분의 교실은 자연광이 유입되는 것을 블라인드로 차단한 후 추가로 실내조명을 하고 있다. 이런 상황은 에너지를 효율적으로 사용하지 못하는 대표적인 사례라고 볼 수 있다.

학교교실에서 빛 환경은 매우 중요한 요소로 충분한 조도가 확보되어야 한다. 그러나 학교교실의 경우 학생들의 재실시간이 대부분 주간 임에도 불구하고 조도 불균형과 눈부심 문제로 자연채광을 충분히 이용하지 못하고 있다. 또한 대부분 학교교실은 한쪽 벽에만 측창을 설치하여 교실의 깊은 부분까지 채광이 불충분하며 충분한 조도를 확보하기 위해 대부분 전기 조명을 사용하고 있는 실정이다. 전기 조명은 에너지를 필요로 하며 건물 부문 에너지 사용량 중 조명부하가 차지하는 비율이 약 33 % 정도로 다른 소비전력에 비해 가장 높아 에너지 절감이 요구된다[1].

교실 환경은 구조상 창문으로부터 심도가 깊은 내부공간의 존재는 필연적이며 그에 반해 측창을 이용한 자연광의 유입량은 [Fig. 1] (a)와 같이 창면으로부터 거리가 멀수록 급격히 감소된다. 따라서 수직 외벽에 위치한 측창만으로 자연채광을 유입하는 것은 한계가 있으며, 자연채광의 유효 거리 내인 창면으로부터 2~3m 이내의 밝은 부분은 심한 조도의 불균형 및 눈부심의 발생요인을 포함하고 있다. 이와 같은 불균형을 해소하기 위한 대안으로 국내외에서 다양한 친환경적 조명시스템이 제안되고 있다. [Fig. 1]은 태양 조명시스템 중 광선반을 이용한 것으로 측창면의 자연광 유입량을 줄이고, 내부공간에 자연광 유입량을 균형있게 만들어주는 것을 모식적으로 나타낸 것이다.

※ 세로선은 조도를 모식적으로 표현한 것



[Fig. 1] General classroom and light shelf lighting Classroom environment

조명에너지를 대체할 수 있는 신·재생에너지 종류로는 태양광 발전과 태양광 조명 시스템이 있다. 태양광 활용의 다양성 측면에서는 태양광으로 전기를 생산·축전할 수 있는 태양광 발전 시스템이 유리하지만 발전효율이 약 15% 정도로 낮으며, 셀 모듈을 설치하기 위한 공간과 지속적인 유지보수가 필요하다는 단점이 있다. 반면 태양광 조명시스템의 경우 광을 이송할 수 있는 공간만 있으면 설치가 가능하고, 별도의 유지관리비용이 없으며 태양광을 그대로 조명으로 활용하므로 효율이 우수한 장점이 있다. 또한 자연광을 조명으로 직접 활용하므로 연색성이 우수하고 재실자의 시 환경 개선, 대상 공간의 제습·살균효과 등 다양한 보건적인 부수효과를 생성할 수 있다. 이처럼 다양한 효용성이 있는 태양광 조명시스템 종류로는 [Fig. 2]와 같은 반사 채광 형, 광 덕트 형, 광케이블 형이 있다.

이중 광 덕트 형 및 광케이블 형의 경우 광을 이송할 수 있는 별도의 공간이 필요하기 때문에 기존의 교실에 설치하는 것은 부적합하다. 반사채광 형의 경우 다른 조명시스템과 비교하여 설치와 유지보수가 간단하여 교실

에 적용하는 데 이점이 있다. 반사 채광형 조명시스템은 크게 광 선반과 광 블라인드(베네시안 형태의 블라인드)로 나뉘는데 광선반의 경우 광 블라인드에 비해 차지하는 공간이 크고, 교실 수업환경에서 빛을 완전히 차단할 (빔 프로젝터 사용 등) 필요가 있을 때 추가로 블라인드를 구성해야 하는 번거로움을 가지고 있다.



[Fig. 2] Types of solar lighting system

낮 시간 때 학교 교실의 조도 불균형을 해소하고 자연채광을 이용하여 에너지를 효율적으로 활용하기 위한 선행연구를 분석해보았다[2-4]. 선행연구들은 사무실이나 건물에 적용되는 광덕트형, 반사채광 형 등의 태양광 조명시스템을 실제 적용하거나 시뮬레이션 하는 방식으로 교실에서 사용하는 조명 에너지를 절감하고 조도 불균형을 줄이고자 노력하였다. 이와 같은 노력은 에너지를 절감하고 실내 조도를 고르게 하는 측면에서 상당한 효과를 냈으나 실제 현장에 적용하는 것과는 거리감을 가지고 있다. 그 이유는 현재 이미 지어진 많은 건물에 광덕트와 광선반을 추가로 설치하는 것에 대한 심리적인 거부감이다. 또 다른 선행연구에서는 블라인드 사용자들은 블라인드의 각도를 능동적으로 제어하는 것조차 하지 않는 것으로 나타나 자연채광을 이용한 에너지 절감의 필요성이 사회 전반에 전파되지 못하였다는 것을 제시하였다[5]. 또한 기존 블라인드와 비교하여 광덕트 형, 반사채광형 제품들이 아직 소비자의 선택을 받기에 어려움이 있다는 것도 설문 결과를 통해 제시하였다. 따라서 자연채광을 이용하여 조명에너지를 절감하는 기술을 실제에 적용하기 위해서는 기존에 사용하고 있는 제품을 보다 편리하게 활용할 수 있도록 하는 것이 중요하다고 하겠다[6-8].

이와 같은 조건을 충족할 수 있는 방안은 기존 사용자들이 많이 는 베네시안 블라인드와 매우 유사한 광 베네시안 블라인드를 자동 제어하는 시스템이다[9]. 또한 베네시안 블라인드 형태의 자연채광조명시스템은 차지하는 공간적인 부피가 적고, 설치비용과 같은 조건에 있어서 교실 내 설치가 다른 시스템보다 더 실현 가능하다고 판단하였다. 그러나 이와 같은 광 베네시안 블라인드의 슬랫 조절 알고리즘을 제시하고 이를 검증한 선행연구는 아직 없었다.

이와 같은 자연채광 제품과 선행연구 분석을 통해 도출한 연구 문제는 다음과 같다.

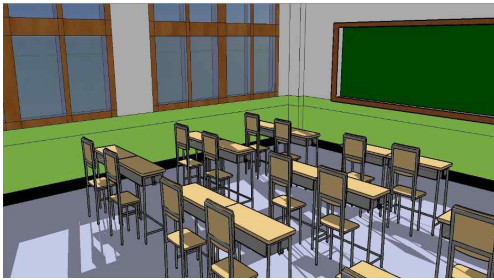
1. 자연채광을 교실에 효과적으로 활용할 수 있는 광 베네시안 블라인드(이하 광 블라인드) 슬랫 조절 알고리즘을 개발한다.
2. 테스트 베드를 Radiance 시뮬레이션 프로그램 상에 설계하고 시뮬레이션의 신뢰도를 확보한 후 알고리즘을 검증한다.
3. 테스트 베드에 자동제어 광 블라인드를 제작하여 설치하고 글레어와 휘도, 조도, 에너지 측면에서 이를 검증한다.

II. 연구내용

1. 시뮬레이션 장소 선정 및 기초 시뮬레이션 작업

광블라인드를 이용한 자연채광 시뮬레이션을 진행하기 전 ○○학교 수학 교과실을 테스트 베드로 선정하였

다. 수학교과실의 크기는 가로 8.2m, 세로 9.4m, 높이 2.7m의 교실로 칠판과, 창문, 책상, 의자 등의 구성품이 내부에 있다. 수학교과실의 모습을 Radiance 프로그램에서 구현한 모습은 다음 [Fig. 3] 과 같다[9].



[Fig. 3] Radiance simulation

수학교과실 시물레이션을 실제와 일치시키기 위해 반사율 측정기기를 이용하여 교실 내 물건들의 반사율을 측정하였다.



[Fig. 4] Reflectance meter



[Fig. 5] Illuminometer



[Fig. 6] COLORANALYZER

교실 내 물건들의 반사율을 측정한 값은 <Table 1>과 같다. 측정값은 5회를 실시하여 평균으로 산출하였다. 유리창의 경우 각각의 유리에 번호를 붙이고 반사율을 측정하였다. 전체적으로 유리창의 평균값은 5.5%가 나왔으나 측정한 각각의 반사율 정보를 시물레이션에 입력하였다.

<Table 1> Reflectance measurement results of objects in the classroom

책상	의자	바닥	벽 (복도측)	벽 (창측)	칠판	천정	문
36.6%	9.6%	22.0%	51.8%	73.4%	71.0%	83.1%	28.2%

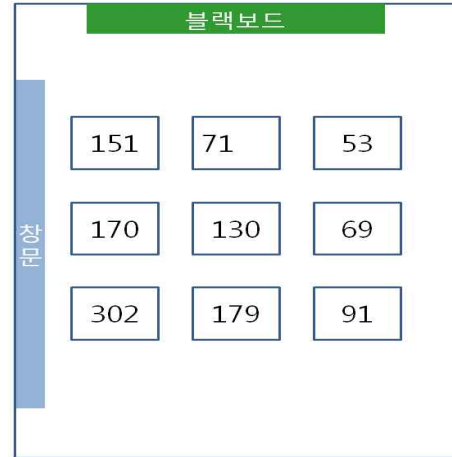
2. Radiance 시물레이션 신뢰도 확보

시물레이션을 이용하여 알고리즘을 검증하기 전에 시물레이션이 얼마나 실제공간을 잘 설명하는지 알아보기 위해 테스트 베드와 시물레이션 상의 책상면 조도 값을 비교하였다.

Radiance 시물레이션에 의해 측정된 책상면 조도 값은 [Fig. 7]에 실측결과와는 [Fig. 8]에 제시하였다. 두 경우 모두 2017년 11월 16일 15시 담천공 상태를 측정한 결과이다.



[Fig. 7] Desk surface illumination by Simulation



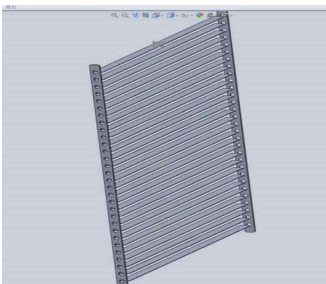
[Fig. 8] Desk surface illumination by measurement

실제 교실의 조도와 시뮬레이션 상의 조도를 비교해 본 결과 조도의 오차수준은 5.58%였다. 시뮬레이션으로 측정한 값이 실측에 의한 값보다 조금 높게 나왔으나 Radiance 시뮬레이션 전문가의 자문을 통해 신뢰할 수 있는 수준으로 판단하였고, 후속연구를 진행하였다.

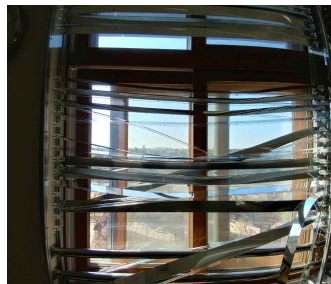
3. 교실 내 조명환경 개선을 위한 광블라인드 슬랫 각도 알고리즘 개발

가. 광블라인드의 설계 및 제작

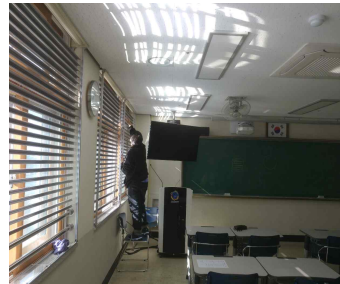
교실 조명환경 개선을 위한 광블라인드는 사용자의 거부감을 줄이기 위해 기존 블라인드와 동일한 슬랫 크기로 제작하였다. 광 블라인드의 규격은 슬랫의 너비 5cm, 길이 149cm이며 블라인드 별로 사용한 슬랫의 개수는 30개 이다. 설계된 광블라인드는 [Fig. 9]와 같다. 각 슬랫은 반사 필름이 붙어있는 아크릴 판을 이용하여 제작하였고, 광블라인드는 교실 창 4면에 모두 설치하였다. 최초 Mock-up시 아크릴판만을 이용하여 슬랫을 제작한 결과 슬랫이 처지는 문제점이 나타나 시간이 지나면서 [Fig. 10]과 같이 떨어지는 현상이 생겼다. 이를 개선하기 위해 2차 Mock-up시 뒷면에 얇은 알루미늄 프로파일을 추가 부착하였다. 또한 슬랫 별로 각도를 조절하기 위해 슬랫별로 스테핑 모터를 이용하여 제어하였으며, 각 스테핑 모터는 한 개의 보드에서 제어하는 방식으로 제작하였다.



[Fig. 9] Daylight blind design



[Fig. 10] 1st Mock up

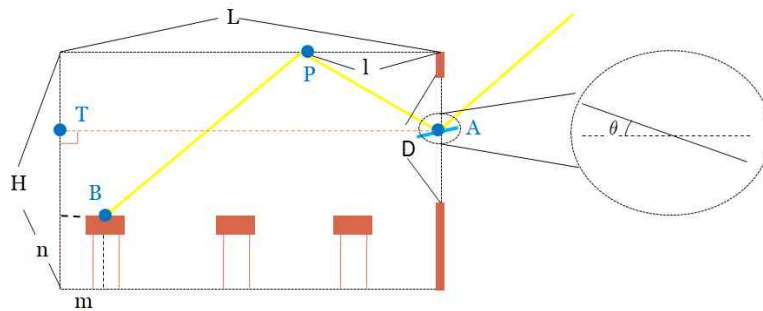


[Fig. 11] 2nd Mock up

나. 광블라인드 슬랫 각도 조절을 위한 조건 확인

자연채광만을 이용하였을 때 교실 조도환경이 어떤지를 알아보기 위해 2017년 5월 16일 13시 30분 청천공 상태에서 교실내 책상면 조도 분포를 확인하였다. 그 결과 창문에 가까운 쪽의 책상 면 조도는 1380 lux로 기준치보다 높아 글레어가 발생하는 것으로 나타났고, 복도 쪽 책상면의 조도는 360 lux로 기준치 이하였다. 이와 같은 불균형 현상을 줄이기 위해서는 광블라인드 슬랫에서 반사된 빛이 창에서 가장 먼 복도 쪽 책상면에 갈 수 있도록 해야 한다는 아이디어를 얻을 수 있었다. 또한 학생 및 교사가 슬랫에서 1차 반사된 빛이 바로 눈으로 들어가는 경우 글레어가 생길 수 있어 이런 현상이 발생하지 않도록 해야 한다는 점도 알고리즘 개발에 고려하여야 했다. 알고리즘 개발 시 사용한 아이디어 도면과 변수를 [Fig. 12]에 표현하였다. [Fig. 12]의 우측면에서 태양광이 교실로 입사하고 슬랫 A에서 반사된다. 이 빛은 교실 천정의 창 측에서 l 떨어진 지점 P에서 반사되어 교실의 복도 쪽 책상면인 B지점에 도착하도록 하였다. 이 경우 창가 쪽 책상면의 조도는 낮아지고 복도 쪽의 조도는 높아지게 된다. 또한 교실 앞에 서 있는 교사의 눈에 1차 반사된 빛은 직접 전달되지 않는다.

슬랫 면은 거울 아크릴을 이용하였기 때문에 정반사하고, 천정에서 2차 반사를 할 때는 산란하게 된다. 빛이 산란하게 되는 경우 교실 내에 보다 자연스러운 조명 효과를 줄 수 있다. 또한 난반사 되는 경우도 Mainstream이 정반사하는 것과 같은 경로를 진행한다는 선행연구를 참고하여 알고리즘을 개발 하였다.



[Fig. 12] Slat angle adjustment algorithm drawing

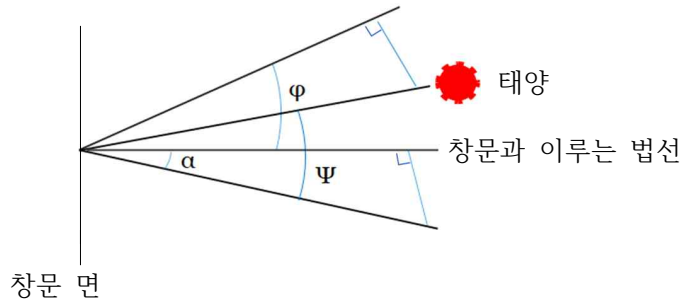
[Fig. 12]와 알고리즘 제작에 사용한 상수와 변수는 <Table 2>에 제시하였다.

<Table 2> Variables and constants used in the algorithm

변수		상수	
φ	태양의 수직 방향 고도	d	바닥에서 창문까지 거리
θ	슬랫의 각도	D	창의 수직방향 길이
t	시간(계절)	x	슬랫의 개수
ψ	실제 태양의 고도	a	슬랫의 너비의 절반
β	태양의 방위각	H	교실 높이
α	태양과 창의 방위각 차	L	교실 길이
h(k)	k번째 슬랫의 높이	γ	창의 수직방향 방위각
		m	복도 쪽 책상과 벽 사이의 거리
		n	책상의 높이

다. 자연 채광효과를 높이기 위한 슬랫 각도(θ) 알고리즘 개발

연구에서 고려한 광 블라인드의 슬랫은 베네시안 블라인드와 같이 창문 수평 방향을 축으로 하여 각도를 조절한다. 따라서 창의 수직방향 자연채광만을 알고리즘 제작에 고려하였다. 창문과 이루는 법선에 대한 태양의 수직방향 각도는 시간의 흐름에 따라 태양 방위각의 변화를 고려하여 θ (슬랫 각도)를 구하는데 반영하였다. 식 (1)의 ϕ 는 태양의 방위각과 고도에 따른 창문면의 법선에 대한 태양의 각도를 나타낸 식으로 [Fig. 12]에 표시한 각들을 통해 계산할 수 있다. θ, ϕ, α 는 [Fig. 13]과 <Table 2>에 설명하였다.



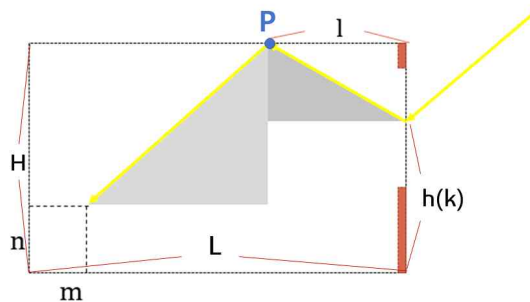
[Fig. 13] θ, ϕ, α

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{\tan \psi}{\cos \alpha} \right) \quad \text{식(1)}$$

슬랫에서 반사된 빛이 목적인 복도쪽 책상 면 위에 도착하기 위한 슬랫 각도 θ 를 구하기 위해서는 각 슬랫의 높이가 변수가 된다. 각각의 슬랫의 높이를 알고리즘에 반영하기 위해 식(2)를 개발 하였다. 식(2)는 가장 밑에 있는 슬랫에서부터 k번째 슬랫의 높이를 나타낸 식이다.

$$h(k) = d + \frac{(D-2a)}{(x-1)}(k-1) + a \quad \text{식 (2)}$$

슬랫에서 반사된 빛이 바로 재실자의 눈에 들어가지 않고 천정에 2차 반사되어 최종 목적인 복도 쪽 책상 면 (m,n)에 도착하기 위한 l 은 식 (3)을 이용하여 계산할 수 있다. 이때 학생과 교사에게 글레어가 나타나지 않도록 하기 위해서 [Fig. 14]과 같은 기하학적 분석을 통해 거리 l 을 정하였다.



[Fig. 14] Idea drawing for equation(4)

$$l = g(k) = \frac{(H-h(k))(L-m)}{(2H-n-h(k))} \quad \text{식 (3)}$$

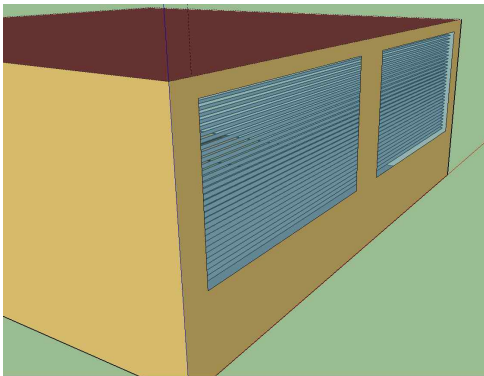
식(1)~(3)을 통해 자연채광이 슬랫과 천정에 각각 1차, 2차 반사되어 (m,n)점에 도달하기 위한 블라인드의 각 스렛 각도 조절 알고리즘을 식(4)와 같이 개발하였다.

$$\theta = \frac{1}{2}(\tan^{-1}(\frac{H-h(k)}{l}) - \phi) \quad \text{식 (4)}$$

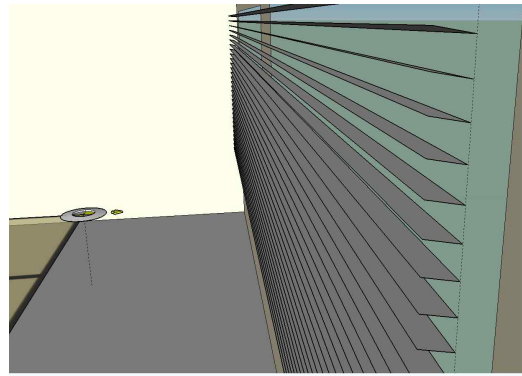
개발된 알고리즘인 식(4)를 보면 창문을 통과하는 빛이 (m,n)점에 도착하도록 하기 위해서는 각 슬랫별 (h(k))로 다른 각도(θ)를 가져야 함을 알 수 있다. 이는 자동제어 광블라인드를 이용하여 교실의 조명환경을 개선할 때 기존의 블라인드와는 다르게 각각의 슬랫마다 다른 각도로 제어해 주어야 한다는 결과임을 의미한다.

라. 알고리즘을 이용한 시뮬레이션의 제작

자연채광을 슬랫에서 복도 쪽 책상 면으로 반사시켜 교실 조명환경을 개선할 수 있도록 제작한 시뮬레이션은 다음 [Fig. 15], [Fig. 16]과 같다.



[Fig. 15] Outside view of simulation



[Fig. 16] Inside view of simulation

시뮬레이션 상에서 조도를 측정한 높이는 교실 책상면의 높이와 같은 72cm, 그레어를 측정할 수 있는 센서의 위치는 교실 창면에서 1.6m 안쪽이고, 칠판에서 4.72m, 높이 72cm 에 위치시켰다.

마. 자연채광을 통한 교실 조명환경 개선 시뮬레이션

춘분, 하지, 추분, 동지 각각 10시, 12시, 14시에 자연채광을 이용한 시뮬레이션으로 책상면의 조도를 측정하였다. 알고리즘을 적용한 광블라인드에서 각 슬랫의 각도를 다르게 하였을 때, 교실 내의 조도 분포를 균일하게 맞출 수 있다. 따라서 이렇게 슬랫의 각도를 다르게 조절하는 작업의 필요성과 그 효과를 확인하기 위해 모든 슬랫의 각도를 일정하게 한 상황에 대한 시뮬레이션도 실시하였다. 결과적으로는 본 연구의 알고리즘을 적용한 광블라인드와, 모든 슬랫의 각도를 일정하게 한 광 블라인드, 블라인드 미사용한 경우에 대한 시뮬레이션을 실시하였고 측정된 결과는 다음과 같다. 모든 슬랫의 각도를 일정하게 한 블라인드의 경우, 가장 위의 슬랫, 중간 슬랫, 가장 아래의 슬랫에 맞추어 측정하였으나, 보고서 지면 상 중간 각도로 맞춘 슬랫을 결과로 제시하였다.

1) 알고리즘을 적용한 광블라인드 설치 시뮬레이션 결과

가) 춘분

연구의 알고리즘을 적용한 광블라인드를 이용하여 춘분날 시뮬레이션 한 결과는 <Table 3>과 같다.

<Table 3> Algorithm application simulation result(춘분)

		10시			12시			14시		
조도 (lux)		345.9	287.2	168.7	301.3	260.9	186.8	293.4	246.8	175.9
		375.7	296.3	182.7	374.2	355.1	205.7	351.3	314	161.5
		342.9	310.3	184.1	501.8	353.6	252.4	287.4	309.3	170.6
글레이		0.23			0.23			0.23		
균제도		44.90			37.23			45.97		

나) 하지

연구의 알고리즘을 적용한 광블라인드를 이용하여 하짓날 시뮬레이션 한 결과는 <Table 4>과 같다.

<Table 4> Algorithm application simulation result(하지)

		10시			12시			14시		
조도 (lux)		241.4	186.4	95.3	3157	1557.6	973.5	179.7	167.4	118.5
		175.2	185.8	135.5	3759.8	1738.6	1219.1	152.9	183	124.1
		228.1	179.5	146.2	3592.9	1537.4	1008.4	232.2	173.2	133.6
글레이		0.22			0.24			0.22		
균제도		39.48			25.89			51.03		

다) 추분

연구의 알고리즘을 적용한 광블라인드를 이용하여 추분날 시물레이션 한 결과는 <Table 5>와 같다.

<Table 5> Algorithm application simulation result(추분)

10시			12시			14시			
조도 (lux)	103.5	82.6	53.4	79.9	80.8	57.6	80.4	71.7	57.9
	87	84.8	58.9	97	84.8	65.1	94.6	96.8	48.2
	93.1	99.5	62.9	147.4	105	81.8	79.7	92	49.4
글레이	0.22			0.23			0.23		
균제도	51.59			39.08			49.79		

라) 동지

연구의 알고리즘을 적용한 광블라인드를 이용하여 동짓날 시물레이션 한 결과는 <Table 6>와 같다.

<Table 6> Algorithm application simulation result(동지)

	10시			12시			14시		
조도 (lux)	1036	485.5	342.6	78.6	68.9	60.5	962.5	481.1	381.8
	1171.5	542.9	368.3	76.5	76	52.9	1061	562	366.7
	1064.7	563.4	292.8	94.9	76.3	50.8	1040.4	467	322.9
글레이	0.2			0.2			0.21		
균제도	24.99			55.74			30.43		

2) 각도가 일정한 광블라인드 설치 시뮬레이션 결과

가) 춘분

광블라인드 슬랫 전체를 일정하게 맞추어 춘분날 시뮬레이션 한 결과는 <Table 7>과 같다.

<Table 7> simulation result($\theta = 0$)(춘분)

		10시			12시			14시		
조도 (lux)		270.2	178.9	83.3	959.6	618.5	419.5	1224.9	573.3	225.8
		208.5	86.5	99.4	685.5	312.3	336.1	994.1	295.8	338.1
		166.7	149.2	115	648.5	513.9	373.5	580.2	551.7	415.7
글래어		0.26			0.33			0.27		
균제도		30.83			32.54			18.43		

나) 하지

광블라인드 슬랫 전체를 일정하게 맞추어 하짓날 시뮬레이션 한 결과는 <Table 8>과 같다.

<Table 8> simulation result($\theta = 0$)(하지)

		10시			12시			14시		
조도 (lux)		497.4	346.6	172.7	583.5	373	177.1	522.3	327.2	147.5
		384.9	173.1	195.3	449	186.3	209	417.5	162.4	183.2
		338.2	290.8	224	362.4	318	241.3	318	288.8	214.2
글래어		0.24			0.24			0.23		
균제도		34.72			30.35			28.24		

다) 추분

광브라이트 슬랫 전체를 일정하게 맞추어 추분날 시뮬레이션 한 결과는 <Table 9>과 같다.

<Table 9> simulation result($\theta = 0$)(추분)

	10시			12시			14시		
	530.6	422.7	235.5	323.6	211.5	97.1	267.4	174.7	79
조도 (lux)	463.8	230.5	244	252	102.7	118	213.6	85.3	98.9
	505.2	360.5	263.9	198.5	178.9	137.4	165.2	151	116.7
글레이	0.21			0.22			0.21		
균제도	43.44			30.01			29.54		

라) 동지

광브라이트 슬랫 전체를 일정하게 맞추어 동짓날 시뮬레이션 한 결과는 <Table 10>과 같다.

<Table 10> simulation result($\theta = 0$)(동지)

	10시			12시			14시		
	172.7	117.1	54.9	255.4	170.2	77	149.3	117.6	56.9
조도 (lux)	131.7	56	64.8	192.9	80.8	94.3	168.7	69.7	73.7
	107	95.7	74.6	154	139.9	109.7	189.6	130.9	81.5
글레이	0.2			0.21			0.22		
균제도	32.43			30.15			30.01		

3) 블라인드 미설치 시뮬레이션 결과

가) 춘분

블라인드를 설치하지 않은 경우를 시뮬레이션 한 춘분날 결과는 <Table 11>과 같다.

<Table 11> Simulation result(No blinds, 춘분)

		10시			12시			14시		
조도 (lux)		1250.1	593.4	338.4	1488.5	656.2	374.2	1247.6	541.6	306.8
		1217.5	581.7	327.9	1373.6	668	381	1165.2	568.7	325.1
		1261.4	540.4	311.5	1500.5	651	379	1261.9	563.3	336
글레어		0.31			0.32			0.24		
균제도		33.74			33.16			33.25		

나) 하지

블라인드를 설치하지 않은 경우를 시뮬레이션 한 하짓날 결과는 <Table 12> 같다.

<Table 12> Simulation result(No blinds, 하지)

		10시			12시			14시		
조도 (lux)		641.4	372.6	224.5	682.1	385	227.3	568.6	323.9	189
		611.9	376.1	224.2	637	395.2	232.6	533.4	335.8	196.2
		665.4	355.4	219.3	711.9	379.3	233.3	596.3	323.9	200.1
글레어		0.26			0.27			0.25		
균제도		32.96			31.93			31.70		

다) 추분

블라인드를 설치하지 않은 경우를 시뮬레이션 한 추분날 결과는 <Table 13>과 같다.

<Table 13> Simulation result(No blinds, 추분)

	10시			12시			14시		
조도 (lux)	289.7	170.9	102.3	345.5	201.7	120	282.7	165.2	98.6
	272.2	174.5	103.9	323.4	207.1	123	265.1	170.5	101.7
	303.2	166.9	103.8	361.9	199.1	123.9	296.5	164.7	103.1
클레어	0.22			0.23			0.22		
균제도	33.74			33.16			33.25		

라) 동지

블라인드를 설치하지 않은 경우를 시뮬레이션 한 동짓날 결과는 <Table 14>와 같다.

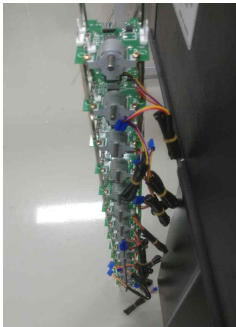
<Table 14> Simulation result(No blinds, 동지)

	10시			12시			14시		
조도 (lux)	181.2	109	66	259.9	154.7	93	564.2	185.5	94
	170.3	110.9	66.6	241.1	158.5	95.1	508.7	191.8	98.5
	190	105.8	66	272.9	152.9	95.8	572.3	180	101.5
클레어	0.21			0.22			0.25		
균제도	36.42			34.08			16.42		

바. 광블라인드 Mock-up 및 휘도, 글레어 측정

1) 1차 Mock-up

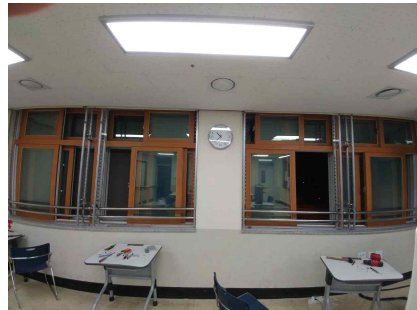
알고리즘 개발과 시뮬레이션을 통해 얻은 결과를 구현하기 위해 실제 테스트 베드에 광블라인드를 Mock-up하였다. 테스트 베드로 선택한 ○○학교 수학 교과실에 mock-up을 실시하였으며 블라인드의 총 개수는 4개로 하였다. 계절과 시간을 미리 입력하여 각도 알고리즘을 구현하였으며, 각 슬래트를 돌려주는 것은 스테핑 모터를 활용하였다. 슬래트를 돌려주는 시간 간격은 한 시간으로 설정하였다. 구현된 1차 Mock-up의 모습은 [Fig. 17]과 같다.



슬랫제어용 모터



1차 Mock up



1차 Mock up 블라인드 기동

[Fig. 17] 1st Mock up

2) 1차 Mock-up 휘도 측정

1차 Mock-up된 블라인드를 활용한 테스트베드와 롤 블라인드를 한 교실을 휘도 카메라로 촬영한 [Fig. 18], [Fig. 19]을 보면 롤 블라인드를 한 경우 복도 쪽 책상의 휘도가 현저하게 낮아지는 것을 볼 수 있다. 이는 조도계를 통해 측정한 결과와도 유사하게 나타났다. 각 조도의 분포 및 분석은 결과에서 다루겠다.



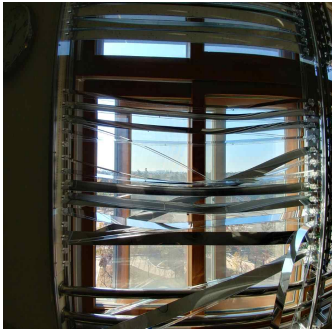
[Fig. 18] Measuring luminance(1st Mock up)



[Fig. 19] Measuring luminance(Control group)

3) 2차 Mock-up

1차 Mock-up의 슬래트가 처지는 문제가 발생하여, 1차 Mock-up된 블라인드를 철거하고, 2차 mock-up을 실시하였다. 2차 Mock-up시 1차 Mock-up 슬래트에서 발생하는 문제점을 보완하기 위해 슬래트 뒤쪽에 얇은 알루미늄 프로파일을 붙여 작업을 실시하였다.



1차 Mock up의 슬랫 휘어짐 현상



2차 Mock up제작 모습

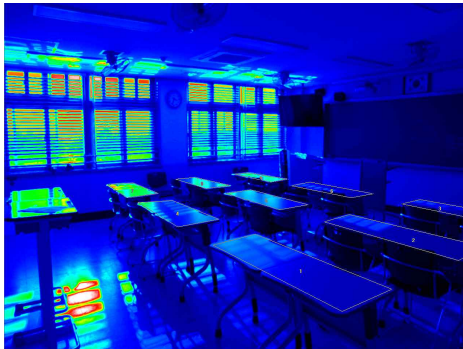


2차 Mock up의 전체 모습

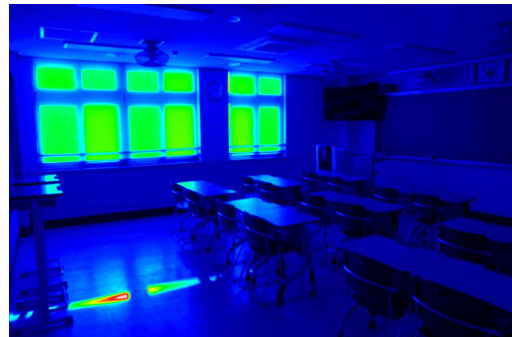
[Fig. 20] 2nd Mock up

4) 2차 Mock-up의 휘도 및 글레어 측정

2차 Mock-up된 블라인드를 활용한 테스트베드와 롤 블라인드를 한 교실을 휘도 카메라로 촬영한 [Fig. 21]와 [Fig. 22]를 보면 롤 블라인드를 한 경우 복도 쪽 책상의 휘도가 현저하게 낮아지는 것을 볼 수 있다. 이는 조도계를 통해 측정한 결과와도 유사하게 나타났다. 각 조도의 분포 및 분석은 결과에서 다루겠다.



[Fig. 21] Measuring luminance(2nd Mock up)



[Fig. 22] Measuring luminance(Control group)

사. 자연채광에 의한 에너지 절감 효과 정량화 방안 연구

제작된 광블라인드를 사용하여 자연채광을 교실에 활용할 경우 인공조명의 에너지를 절감할 수 있다. 에너지 절감에 관한 정성적 논의는 선행연구에서 많이 나오고 있으나, 정량적으로 에너지 절감효과를 제시한 경우는 찾아볼 수 없었다. 광블라인드를 활용할 때 긍정적 효과를 정량적으로 제시하기 위해 LED 조명의 디밍(Dimming)절감 정도를 이용하여 나타내는 계산법을 마련하였다.

제작된 광블라인드를 이용하여 에너지 절감효과를 확인하기 위해 교실에 설치된 인공조명을 모두 켜고 있는 경우와 자연채광을 통해 얻은 빛에너지 만큼을 뺀 인공조명의 사용량을 비교하였다.

교실 내의 기준조도는 300lx ~ 600lx로 지정하고 있으며, 표준조도는 400lx로 권장하고 있다. 위에서 언급한 인공조명만 사용한 경우와 자연채광을 함께 사용한 경우에 대해 교실 내 조도가 표준조도가 되는 것을 목표로 설정하였다. 이후 설정한 목표를 달성하기 위해 교실 내 각 인공 조명에서 요구되는 소비전력을 계산하였다.

시뮬레이션을 통해 도출된 각 계절에서의 조도 분포를 기준으로 교실의 각 위치의 조도와 표준조도의 차이를 계산하였다. 표준조도를 맞추기 위해 필요한 조명의 소비전력 계산은 두 단계의 과정을 거쳐서 진행하였다.

필요한 소비전력을 계산하기 위해 조명이 만드는 조도와 광속, 소비전력 간의 관계를 이용하였다. 식(5)는 조명에서의 광속과 소비전력의 관계이고, 식(6)은 조명에서 떨어진 거리에 따른 조명이 만드는 조도와 광속의 관계이다.

$$F(lm) \propto P(W) \text{ ----- 식(5)}$$

$$E(lx) \propto \frac{F(lm)}{r^2(m^2)} \text{ ----- 식(6)}$$

또한 테스트베드에서 사용된 조명의 광효율(A, 광속/소비전력)과 식(5)와 식(6)을 통해 필요 소비 전력을 구할 수 있는 식(7)을 유도하였다. 식(7)에서 x_i 는 i번째 조명에 필요한 광속이고, P_i 는 i번째 조명에 필요한 소비 전력이다.

$$\frac{x_i(lm)}{A(lm/W)} = P_i(W) \text{ ----- 식(7)}$$

시뮬레이션의 결과로 얻은 각 책상 면 조도와 표준조도(400lx)의 차이를 계산하여 테스트베드 내 9개 조명들이 필요로 하는 광속(x_i , $i=1,2,...,9$)에 대해 식(8)과 같은 구원 연립 일차 방정식을 유도하였고, 이를 이용하여 각 조명이 가져야 하는 광속과 소비전력을 계산하고, 필요한 인공조명의 양을 계산하였다.

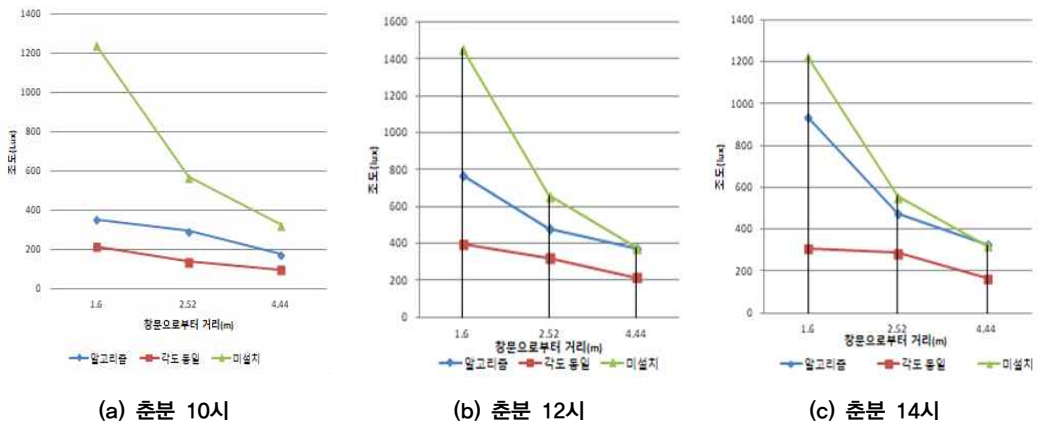
$$E_n = a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4 + a_5x_5 + a_6x_6 + a_7x_7 + a_8x_8 + a_9x_9 \text{ ----- 식(8)}$$

(n : 책상 번호, a_i ($i=1,2,...,9$) : 거리조건을 반영한 계수, x_i ($i=1,2,...,9$) : 광속)

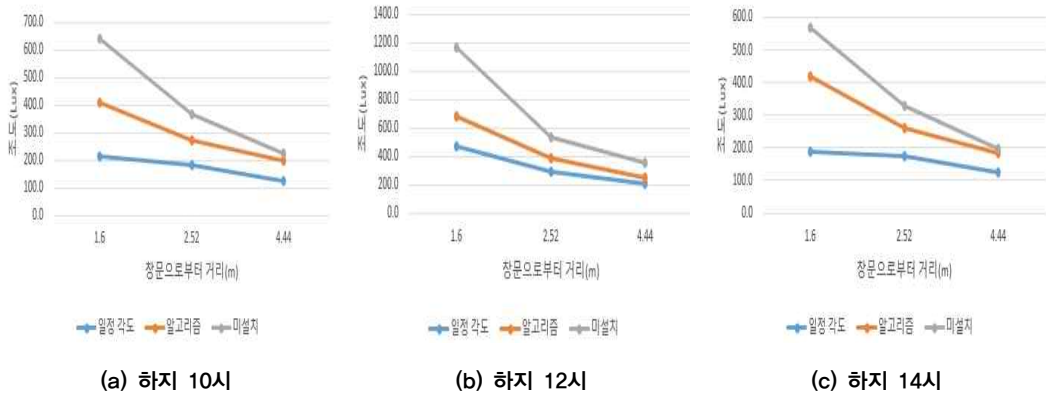
III. 연구결과

1. 시뮬레이션을 통한 책상면의 조도 분석

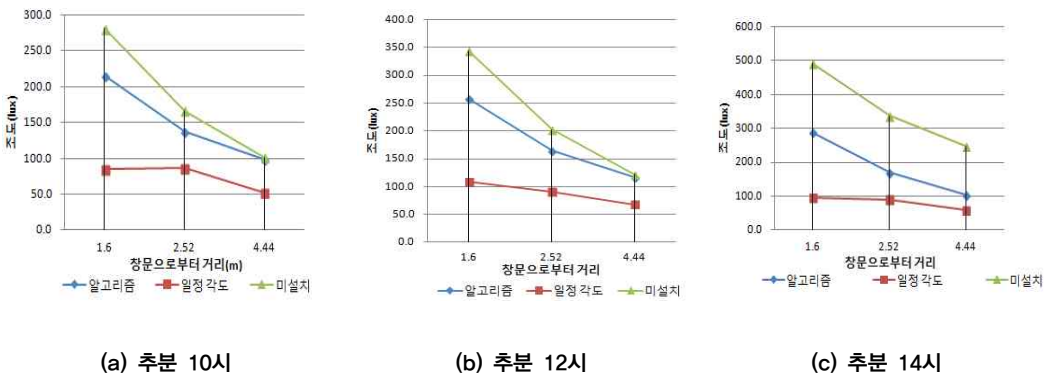
알고리즘을 적용한 광블라인드와 각도를 일정하게 한 광블라인드, 블라인드를 미설치한 경우의 시뮬레이션을 그래프로 나타낸 결과는 [Fig. 23], [Fig. 24], [Fig. 25], [Fig. 26]과 같다.



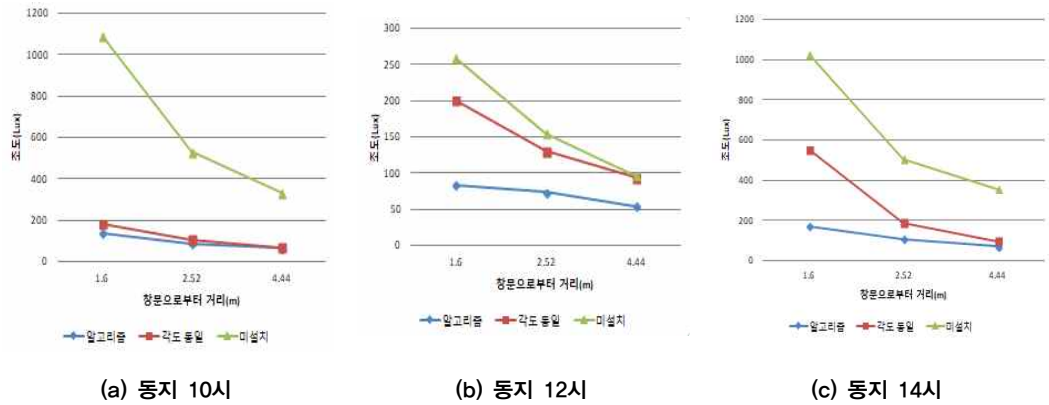
[Fig. 23] Analysis of illuminance through simulation(춘분)



[Fig. 24] Analysis of illuminance through simulation(하지)



[Fig. 25] Analysis of illuminance through simulation(추분)



[Fig. 26] Analysis of illuminance through simulation(동지)

알고리즘을 적용한 광 블라인드의 경우 각도를 일정하게 해준 블라인드의 결과보다 모든 절기 매 시간에 높은 조도가 나타나는 것으로 나타났다. 조도 측면에서 보면 광블라인드의 각도를 슬랫 별로 통제해준 경우가 그렇지 않은 경우에 비해 시뮬레이션 상에서 50%에서 100%까지 큰 조도를 나타내는 것으로 나타났다. 또한 블라인드를 미적용한 경우와 비교해 보면 창문으로부터 거리가 1.6m 떨어진 책상 면에서는 조도의 차이가 크게 나타나지만 창문에서 4.44m 떨어진 책상 면에서의 조도는 춘분 10시, 춘분 14시, 하지 10시, 하지 14시, 추분 10시, 추분 12시, 동지 12시에 거의 비슷하게 나타나는 결과를 얻었다. 이 결과는 창문에 가까이 있는 책상면 재실자의 눈부심을 줄이면서 창문과 멀리 있는 재실자의 조도를 올려주는 것으로 에너지 절감 측면에서 큰 효과를 준다고 할 수 있다. 선행연구의 경우 광블라인드에 대한 각도 알고리즘이 없었기 때문에 슬랫의 각도를 모두 동일하게 하는 것을 볼 수 있는데 에너지 절감과 균제도 측면에서 슬랫의 각도를 개별적으로 통제하는 것은 유의미한 일이라고 판단된다[10-11].

2. 시뮬레이션을 통한 균제도 분석

알고리즘을 적용한 광블라인드와 각도가 일정한 광블라인드, 블라인드 미설치 경우 균제도를 시뮬레이션 상에서 계산하여 나타낸 결과는 <Table 15>와 같다.

<Table 15> Analysis of uniformity ratio of illuminance through simulation

알고리즘에 따른 블라인드		각도가 일정한 블라인드	블라인드 미설치
춘분	10시	60.88%	55.22%
	12시	60.22%	57.75%
	14시	62.92%	40.49%
하지	10시	54.51%	59.56%
	12시	47.25%	54.97%
	14시	72.82%	51.43%
추분	10시	66.23%	63.70%
	12시	64.85%	54.04%
	14시	64.68%	52.60%
동지	10시	44.91%	56.50%
	12시	71.95%	54.39%
	14시	51.78%	49.34%

알고리즘을 적용한 광블라인드를 활용할 때 각도를 일정하게 한 광블라인드를 적용한 경우와, 광블라인드를 적용하지 않은 경우에 비해 모든 경우 좋은 균제도를 보이는 것으로 나타났다. 이는 조도분석 결과와 같은 맥락으로 해석된다. 이와 같은 결과는 알고리즘을 적용한 광블라인드의 우수한 특성을 나타내는 것으로 LED 조명의 디밍 기능과 함께 적용할 경우 건물의 조명 에너지를 절감하는데 큰 효과를 줄 수 있을 것으로 기대된다[12].

3. 시뮬레이션을 통한 글레어 분석

알고리즘을 적용한 광블라인드와 각도가 일정한 경우, 롤 블라인드를 사용한 경우의 글레어를 시뮬레이션 상에서 계산하여 나타낸 결과는 <Table 16>와 같다.

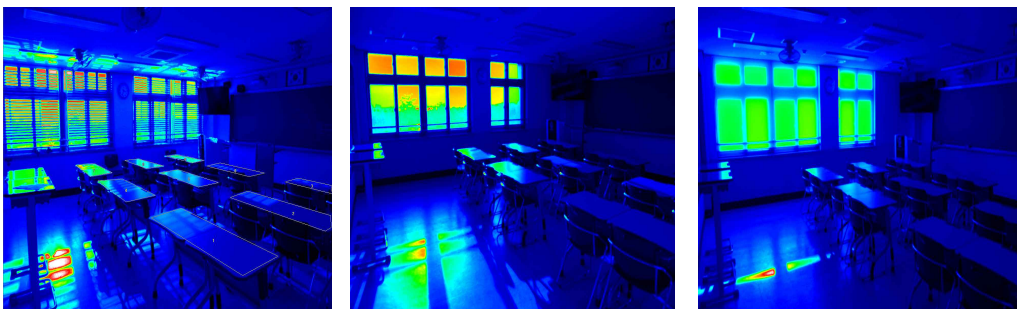
〈Table 16〉 Glare analysis through simulation

날짜	시간	알고리즘을 이용한 광블라인드	일정 각도의 광블라인드	미설치
춘분	10시	0.23	0.26	0.31
	12시	0.23	0.33	0.32
	14시	0.23	0.27	0.24
하지	10시	0.22	0.24	0.26
	12시	0.24	0.24	0.27
	14시	0.22	0.23	0.25
추분	10시	0.22	0.21	0.22
	12시	0.23	0.22	0.23
	14시	0.23	0.21	0.22
동지	10시	0.2	0.2	0.21
	12시	0.2	0.21	0.22
	14시	0.21	0.22	0.25

교실의 한가운데 있는 학생을 기준으로 한 글레어 결과를 보면 알고리즘을 이용한 광블라인드의 경우와 일정 각도를 유지한 광블라인드의 경우에 큰 차이가 발생하지 않았다. 다만 블라인드를 미설치한 경우 춘분 10시, 12시 등에서 글레어가 기준치보다 높게 나타나는 결과가 나타났다.

4. Mock-up을 통한 알고리즘 적용 블라인드 고찰

2017년 11월 16일, 15시 40분 청천공 상태에서 Mock-Up한 알고리즘 적용 광블라인드와 블라인드를 설치하지 않은 경우, 롤블라인드를 설치한 경우의 휘도를 분석하였다. 분석결과는 [Fig. 27], 〈Table 17〉과 같다.



알고리즘 적용 광블라인드

블라인드 미설치시

롤블라인드 닫은 경우

[Fig. 27] Luminance analysis by Luminance meter

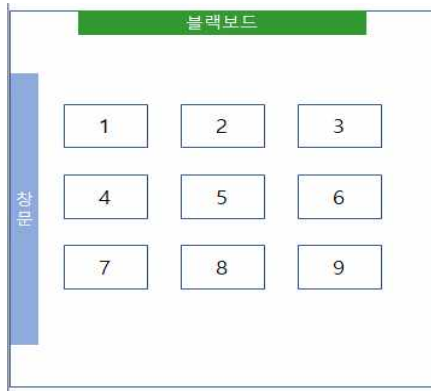
〈Table 17〉 Luminance analysis by mock up

책상 번호 \ 블라인드상태	블라인드 미설치	알고리즘 적용 광 블라인드	롤블라인드 닫은 경우
창가 쪽	114.06	148.94	28.88
책상면 휘도	1098.31	359.70	219.67
(cd/m ²)	1697.74	589.33	270.28
교실 중간	183.97	87.63	23.85
책상면 휘도	400.01	399.74	34.62
(cd/m ²)	950.25	634.01	217.54
복도쪽	93.48	92.58	31.72
책상면 휘도	110.56	113.29	27.62
(cd/m ²)	150.32	141.36	54.66

휘도 카메라를 통해 측정한 결과는 시뮬레이션을 통해 얻은 조도 결과와 유사하게 나타났다. 창가 쪽 책상면의 휘도를 보면 블라인드 미설치한 경우에 비해 알고리즘을 적용한 광블라인드의 경우 휘도가 평균 2.6배 낮아지는 것을 볼 수 있으며, 복도 쪽 책상면의 휘도를 보면 블라인드를 미설치한 경우에 비해 휘도가 평균 0.97배를 유지되는 것으로 나타났다. 이는 교실에서 사용하는 일반 블라인드에 비해 복도 쪽 책상의 휘도가 3.06배 되는 결과이다. 이는 시뮬레이션에서 얻은 결과와 유사한 값으로 알고리즘을 적용한 광블라인드가 교실 내 조명 환경에 긍정적인 영향을 시뮬레이션의 결과를 실제로 확인한 것이라 할 수 있다.

5. 광블라인드에 의한 에너지 절감 효과 정량화

알고리즘을 이용한 광블라인드를 적용한 경우, 에너지가 절감되는 정도를 정량적으로 표현하기 위해 식(8)을 이용하여 계산하였다. 계산 결과 [Fig. 28]과 같은 결과를 얻을 수 있었다.



(a) 교실 내 조명 번호

조명 번호	필요 소비전력			
	준분	하지	추분	동지
조명 1	0	4.6049	5.909	0.714
조명 2	1.816	0	2.021	0
조명 3	15.640	12.738	11.207	9.868
조명 4	17.206	0	5.763	0
조명 5	0	1.063	0	1.294
조명 6	1.621	2.387	3.687	0
조명 7	0	8.635	8.500	2.101
조명 8	7.932	0	0	0
조명 9	7.134	13.357	11.807	20.335

(b) 절기별 필요전력

[Fig. 28] Energy saving effect

교실에 설치된 LED 조명의 한 개당 소비전력은 40 W로 [Fig. 28]의 결과를 보았을 때 춘분에는 308 W, 하지에는 317 W, 추분에는 311 W, 동지에는 325 W를 절감할 수 있다. 이를 1년으로 환산할 경우 1개 교실에서 광블라인드를 활용하여 3.2×10^9 J로 낮 시간 조명을 지속적으로 켜놓은 것에 비해 87%의 에너지를 절감 효과를

보이는 것으로 나타났다. 건물에서 조명이 차지하는 에너지 소모 비중이 33%로 가장 높다는 것을 감안하면 자연채광을 적극적으로 이용하는 것이 상당히 중요하다는 결론을 제시하는 값이라 할 수 있다[13-14].

IV. 결론 및 고찰

자연채광을 이용한 친환경 조명의 연구는 많이 진행되는 추세이나, 아직 광 배제시안 블라인드 적용에 대한 심도깊은 연구는 이루어지지 못하였다. 본 연구는 여타 태양광 조명시스템에 비해 설치가 용이하여 학교 현장에 적용하기 쉬운 친환경 자연 채광 기구로 광 배제시안 블라인드를 선정하였고, 블라인드의 슬랫 각도 조절을 통하여 학교 조명환경을 개선할 수 있는 방안을 마련하였다.

기존 선행연구에서 제시한 광 블라인드들이 특정시간에 동일한 슬랫 각도를 이용하는데 비해 본 연구는 알고리즘을 개발하여 특정시간에 각 슬랫에 적용되는 각도를 제안하였고, 보다 효과적인 자연채광을 할 수 있는 방안을 제시하였다. 또한 시뮬레이션과 Mock-up을 통하여 이를 검증하였다.

알고리즘을 제작 시 목표지점의 입사광 유입경로를 역 추적하여 주광의 목적지를 지정하였고, 제작한 알고리즘을 검증하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 광블라인드 슬랫 각도 조절 알고리즘을 이용할 때 창문 쪽 재실자의 glare와 복도 쪽 재실자의 조도 측면의 유의미한 개선이 일어남을 확인했다. 조도 측면에서 보면 광블라인드의 각도를 슬랫 별로 통제해준 경우가 그렇지 않은 경우에 비해 시뮬레이션 상에서 50%에서 100%까지 큰 조도를 나타내는 것으로 나타났다. 또한 블라인드를 미적용한 경우와 비교해 보면 창문으로부터 거리가 1.6m 떨어진 책상 면에서는 조도의 차이가 크게 나타나지만 창문에서 4.44m 떨어진 복도쪽 책상 면에서의 조도는 춘분 10시, 춘분 14시, 하지 10시, 하지 14시, 추분 10시, 추분 12시, 동지 12시에 거의 비슷하게 나타나는 결과를 얻었다. 또한 알고리즘을 적용한 광블라인드를 활용할 때 각도를 일정하게 한 광블라인드를 적용한 경우와, 광블라인드를 적용하지 않은 경우에 비해 시뮬레이션한 모든 경우 좋은 균제도를 보이는 것으로 나타났다.

둘째, 알고리즘을 활용하여 제작한 Mock up은 시뮬레이션 결과와 유사한 휘도 결과를 나타냈다. 창가 쪽 책상면의 휘도는 블라인드 미설치한 경우에 비해 알고리즘을 적용한 광블라인드의 경우 평균 2.6배 낮아지는 것을 볼 수 있으며, 복도 쪽 책상면의 휘도는 블라인드를 미설치한 경우에 비해 휘도가 평균 0.97배를 유지되는 것으로 나타났다. 이는 교실에서 사용하는 롤블라인드에 비해 복도 쪽 책상의 휘도가 3.06배나 되는 결과이다. 이는 시뮬레이션에서 얻은 결과와 유사한 값으로 알고리즘을 적용한 광블라인드가 교실 내 조명 환경에 긍정적인 영향을 시뮬레이션의 결과를 실제로 확인한 것이라 할 수 있다.

셋째, 자연채광을 통해 얻는 에너지 절감률을 계산한 결과 춘분에는 308 W, 하지에는 317 W, 추분에는 311 W, 동지에는 325 W를 절감하는 것으로 나타났다. 이를 1년으로 환산할 경우 1개 교실에서 광블라인드를 활용하여 3.2×10^9 J로 낮 시간 조명을 지속적으로 켜놓은 것에 비해 87%의 에너지를 절감 효과를 보이는 것으로 나타났다.

향후 자연 채광과 LED의 디밍 기능을 함께 접목한 시뮬레이션을 통해서 자연채광을 이용할 때 LED 조명을 교실내에 어떻게 설치하는 것이 바람직한지에 관한 추가 연구가 필요할 것으로 생각된다. 현재 교실 LED 조명의 경우는 자연채광을 고려하지 않은 상태에서 설계되어 있다. 자연채광을 적극적으로 고려한 LED 조명설계가 필요할 것으로 생각된다. 또한 광블라인드의 각각의 슬랫 제어를 보다 편하게 진행할 수 있는 연구가 필요하다. 슬랫을 개별적으로 통제하기 위해 각각의 슬랫에 모터를 연결하는 경우 제작에 노동력이 많이 투입되는 단점이 나타났다. 이를 해소하는 과정이 있어야 각각의 슬랫을 통제하는 광블라인드가 실제로 활용될 것이라 생각된다.

V. 참고문헌

- [1] 박웅규(2013), “실내 주광조도 분포 예측식의 제안 및 검증”, 석사학위논문
- [2] 이이석(2015), “학교교실의 방위에 따른 애니돌릭 천장 자연채광 시스템의 실내 산광부 최적제원”, 석사학위논문
- [3] 김태형(2006), “학교건물 자연채광용 광선반 시스템의 성능평가 연구”, 석사학위논문
- [4] 박윤영(2010) “학교시설 일반교실의 현황 감소를 위한 적절한 차양설계에 관한 연구”, 석사학위논문
- [5] 김지현, 여명석, 김광우(2012) “블라인드 자동 제어의 필요성” Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems, 제 6권 1호, pp.12-13.
- [6] 김옥, 이언구 (2006). 학교 교실의 빛환경 평가 및 개선방안에 관한 연구. 한국태양에너지학회 학술발표대회논문집, pp. 231-236.
- [7] 임재한, 정진주, 이지영 (2008). 학교 건물에서 외부 차양 장치 유형에 따른 일반 교실 내 빛환경 특성에 관한 연구. 한국교육시설학회지 제15권 제2호, pp.4-15.
- [8] 이종영, 송규동 (2011). 학교교실에서 애니돌릭 광덕트 시스템의 실내 빛환경 및 조명에너지 사용량 예측. 대한설비공학회 하계학술발표대회 논문집, pp. 377-380.
- [9] 공효주, 김곤, 김정태(2010). RADIANCE를 이용한 이중 블라인드의 자연채광 성능 평가. 한국생태환경건축학회 학술발표대회 논문집, 제 18호, pp191-195.
- [10] 신화영, 김정태 (2007). 혼합형 채광조절장치가 실내공간의 주광조도분포에 미치는 영향에 관한 Mockup 실험평가. 한국생태환경건축학회 논문집 제7권 제1호, pp. 23-31.

I 연구진 I

김우재 (Woojae Kim, 인천과학예술영재학교, alchemistry987@naver.com) 주저자

이석준 (Sukjun Lee, 인천과학예술영재학교, kevin7598@hanmail.net) 공동저자

박기은 (Kieun Park, 인천과학예술영재학교, shastar01@naver.com) 교신저자

김예준 (Yejun Kim, 인천과학예술영재학교, 0214david@naver.com) 공동저자

지도교사 : 조대기 (Daeki Cho, 인천과학예술영재학교, hotkirara@ice.go.kr)

지도교수 : 공효주 (Hyoju Kong, 한국조명연구원, hjkong@kilt.re.kr)

알지네이트 비드를 이용한 음용수 제조 적정기술 키트의 개발

이승민 · 김나현 · 정유정 · 신지원 · 배지우 - 인천진산과학고등학교

Development of Appropriate Technology Kit for Drinking Water using Alginate Bead

Seungmin Lee · Nahyun Kim · Yoojeong Jeong · Jiwon Shin · Jiwoo Bae - Incheon Jinsan Science High School

국문초록

본 연구는 알지네이트 비드를 이용하여 적정 기술로 음용수 제조 키트를 개발하는 것을 목적으로 한다. 음용수의 오염 조건을 염분, 세균, 중금속으로 가정하고 오염물을 제거할 수 있는 비드의 개발을 위한 실험을 구상하였다. 염분 제거를 위해 알지네이트 비드의 염분 흡착 최적 조건을 알아보기 위한 변인을 구상하고 실험을 진행하였으며 항곰팡이 능력이 있는 알지네이트와 항균 능력이 있는 키토산을 혼합한 비드를 제작하여 항균효과 실험을 진행하였다. 알지네이트 비드의 중금속 흡착 능력을 알아보기 위해 Cd 수용액을 이용한 중금속 흡착 정도 실험을 진행하였다. 효율적인 염분 제거를 위해 키트에 도입하기 위한 미세막을 제작하는 실험도 진행하였다. 위의 실험들을 통해 얻어낸 결과로 개발도상국에 보급할 수 있는 음용수 제조 적정기술 키트를 구상해보았다. 이에 이어 향후 3D프린터를 이용하여 시제품을 제작해보려고 한다.

중심어 : 음용수, 적정기술, 알지네이트 비드, 미세막

ABSTRACT

This study aims to develop a making potable water kit which contains alginate beads. An experiment was designed for the development of beads which can eliminate some contaminants such as bacteria and heavy metals. An experiment was conducted to find out an optimal condition of the alginate beads for salinity removal. To search an antimicrobial properties of alginate beads, an experiment, using an chitosan-alginate bead, was conducted. Verification experiment for adaptability of heavy metal was carried out with cadmium solution. Also, there was nanofilter producing experiment, which would be instituted on the water kit, to increase the efficiency of salinity removal. Based on the above experiments, we have formulated a technical kit for the manufacture of potable water that can be supplied to developing countries. The potable water kit was consist of alginate beads, chitosan-alginate beads and nano filter. Also, additional tools were developed together. We plan to build prototypes using 3D printers. This study hopes to provide potable water all around the world including many developing countries.

Key words : portable water, Appropriate Technology, alginate bead, nanofilter

I. 서론

지난 3월 세계 물의 날을 맞아 유니세프에서 발표한 보고서 ‘미래를 위한 갈증, 변화하는 기후에서의 물과 어린이’ (유니세프, 2017)라는 보고서에는 현재 36개국에 극단적인 수자원 고갈의 위기에 직면해 있고 2040년 이 되면 세계 6억 명의 아동들이 물 부족 국가에 살게 될 것이라는 충격적인 내용이 담겨있다. 현재 전 지구의 40%에 해당되는 인구가 마실 수 있는 물이 부족하여 고통 받고 있다. 물 부족은 건조 기후인 나라들뿐만 아니라 이미 우리나라를 포함한 전 세계적인 문제로 확대되었다. 물 부족 현상을 극복할 방안으로 제기되고 있는 방안은 지하수의 이용, 인공 강우, 해수 담수화 등이 있다. 이 중에서 지하수 이용은 수자원 고갈과 수질 오염 등의 부작용이 따를 수 있다는 단점이 있고, 인공 강우는 실험 단계에 그쳐 있기 때문에 현재까지는 해수담수화

기술이 물 부족 현상을 극복할 수 있는 실질적인 대안으로 여겨지고 있다. 따라서 많은 선진국들은 많은 재원을 투자하여 거대한 해수담수화 플랜트를 건설하고 있다. 그러나 실질적으로 물 부족 문제가 심각한 국가들은 개발도상국인 경우가 많아 해수담수화 플랜트처럼 최첨단의 대규모 건설물이 필요한 기술이 널리 적용되기에는 한계가 있다. 따라서 적은 양의 비용과 투자로 지구상의 물 중에서 97.5%를 차지하는 해수를 담수화할 수 있는 적정 기술의 개발이 절실하다.

또한 개발도상국에서는 우물물을 많이 길어다 먹곤 하는데 이를 통해서 질병이 옮겨지는 등 우물물이 음용수로써의 역할을 잘 하지 못하는 경우가 많다. 따라서 우리는 우물물 혹은 강물을 음용수화 할 수 있는 방법에 대해 연구해보고자 하였다. 알지네이트 비드를 주로 하여 강물, 우물물의 염분을 흡착하고 대장균과 같은 세균들을 제거하여 질병 발생의 위험성을 낮추고자 한다. 또한 여러 오염물질들을 여과할 수 있는 미세막을 직접 구상, 제작하여 가격이 비싼 시중의 미세막을 대체할 수 있는 막의 제조에 대해 연구해보기로 하였다. 이러한 효과를 검증하고 음용수 제작 키트를 설계하여 3D프린터를 이용해 시제품을 제작해보고자 한다. 이렇게 개발된 음용수 개발 키트를 개발도상국 혹은 오지에 보급하여 건강한 음용수를 제공하는 것을 목표로 한다.

II. 이론적 배경

1. 해수담수화

가. 해수담수화

생활용수나 공업용수로 직접 사용하기 힘든 바닷물로부터 염분을 포함한 용해 물질을 제거하여 순도 높은 음용수 및 생활용수, 공업용수 등을 얻어내는 일련의 수처리 과정을 말하며, 해수를 담수로 생산하는데 사용되는 설비를 해수담수화 설비 또는 해수담수화 플랜트라고 한다[2].

나. 해수담수화 방법

해수담수화의 방식은 크게 기본원리에 따라 분류된다. 열원을 이용하여 해수를 가열하고 발생한 증기를 응축시켜 담수를 얻는 증발법과 삼투현상(Osmosis)을 역으로 이용하여 해수를 반투막(Semi-permeable Membrane)을 통과시켜 담수를 생산하는 역삼투법(Reverse Osmosis)이 해수담수화의 대표적인 방식이다. 이외에도 결정화법, 이온교환막법, 용제추출법, 가압흡착법 등이 해수담수화에 적용되고 있으나, 현재 널리 상용화된 해수담수화 방식은 MSF, MED와 RO의 3가지 기술이며, MSF 또는 MED와 RO를 혼용하여 담수를 생산하는 Hybrid 방식이 적용되는 경우도 있다[2].

다. 역삼투법

농도가 다른 두 용액 사이에 반투막이 있을 때 일반적으로 농도가 묽은 용액 속의 용매가 농도가 진한 용액 속으로 이동한다. 이것은 삼투압의 차이 때문에 생긴다. 그러나 농도가 진한 용액의 위쪽에 높은 압력을 가해주면 위와 같은 현상이 역으로 일어난다. 즉, 농도가 진한 용액 속의 용매가 반투막을 통하여 묽은 용액 속으로 이동한다. 이것을 역삼투라고 한다. 이러한 원리는 바닷물의 정수 장치에 이용할 수 있다. 바닷물에 높은 압력을 가하면 반투막을 통하여 순수한 물만 빠져나가므로 역삼투를 이용하여 담수를 얻을 수 있는 것이다[12].

2. 알지네이트

가. 칼슘 알지네이트($(C_{12}H_{14}CaO_{12})_n$)

소듐 알지네이트 수용액을 염화칼슘 수용액과 반응시키면 소듐 알지네이트의 카르복시기와 하이드록시기 사이에서 나트륨 이온과 칼슘 이온의 치환 반응이 일어난다. 수용성인 소듐 알지네이트와 염화칼슘의 칼슘 이온이 완전히 반응하면 불용성의 칼슘 알지네이트가 형성되는데 이 과정을 통해 형성된 칼슘 알지네이트는 삼차원의 그물 구조를 가지게 된다. SEM을 통해 칼슘 알지네이트 비드를 관찰하여 보면 비드의 내부가 복잡한 그물 구조이며 다공성 구조라는 것을 알 수 있다. 소듐 알지네이트를 염화칼슘 수용액과 반응시켜 형태를 변화시키는 이유는 칼슘 알지네이트가 제작하기 용이하고 생체 적합성이 우수하며 다루기 쉽다는 장점을 가지고 있고 더불어 비드를 제작하였을 때 잘 깨지지 않고 크기도 적당하다는 장점을 가지고 있어 가장 많은 방법으로 사용되기 때문이다[15].

나. 흡착

흡착은 물체의 계면에서 농도가 주위보다 증가하는 현상이다. 반대로 흡착하고 있던 물질이 계면에서 떠나지는 현상을 탈착이라고 부른다. 칼슘 알지네이트의 흡착 원리는 제작 원리와 같다. 소듐 알지네이트의 카르복시기와 하이드록시기에서 나트륨 이온과 칼슘이온이 치환되는 반응이 일어나며 칼슘 알지네이트가 만들어지게 된다. 이렇게 만들어진 칼슘 알지네이트를 중금속 흡착을 위해 사용하게 되면 또 다시 칼슘 이온과 금속 이온이 치환되며 흡착되는 것이다[14].

3. 여과막

가. 막 재료의 특성에 따른 분류

막의 종류는 그 재료의 형상과 특성 그리고 제조 방법 등에 따라 구분할 수 있다. 우선 막세공의 특성에 따라 다공질막과 비다공질막으로 구분할 수 있으며, 막 단면의 구조에 따라 대칭막과 비대칭막으로 구분할 수 있다. 또한 막의 제조에 이용된 원료의 성질에 따라 유기성막과 무기성막으로 구분하며, 물과의 친화성 여부에 따라 친수성 막과 소수성 막으로 구분할 수 있다[8].

1) 유기성막과 무기성막

분리막은 재질에 따라 유기성막과 무기성막으로 분류할 수 있으며, 사용되는 재질에 따라 생산방법이 달라진다. 유기성 막은 폴리에틸렌, 폴리프로필렌, 셀룰로오스, 폴리아미드 등 주로 polymer 계통의 소재를 이용하여 제조되며, 다양한 제조 방식이 있으나 기본적으로는 소재를 액상으로 용해한 후 이를 성형틀(cast)에서 응결시키는 원리를 이용하여 제조되며 상전환법, 연신법, 추출법 등의 방법이 이용된다. 무기성막의 소재는 주로 알루미늄, 산화규소, 산화티탄 등의 금속 산화물이 이용되며, 미세한 분말형태의 원료를 주입하여 압축, 규화시켜 제작하는데, 이 과정에 많은 비용이 소요되기 때문에 유기성막에 비하여 상대적으로 생산비가 높아지게 된다. 또한 무기막은 금속소재를 이용하여 제작되기 때문에 유기성막에 비하여 내열, 내약품성이 강하며 물리적인 강도도 높지만 가격이 비싼 단점이 있다[8].

2) 다공질막과 비다공질막

막은 세공의 특성에 따라 다공질막과 비다공질막으로 구분되는데 이러한 세공의 특성은 제조 과정의 여러 조

건에 의해 결정된다. 다공질 막은 수 nm이상의 많은 세공을 가진 막으로 주로 콜로이드성 물질 제거에 사용된다. 비다공질막은 상으로 작은 수 nm이하의 세공을 가진 막으로 다공질막에서 제거하지 못하는 무기 이온이나 분자 물질을 분리하는데 이용된다[8].

3) 친수성막과 소수성막

막의 친수성 여부는 막의 제조에 사용된 재질에 의해 결정된다. 셀룰로스 계열이나 유리 등을 주성분으로 제조된 막은 친수성을 가지게 되며, 테론(PTFE), 폴리 로필(PP) 등으로 만들어진 막은 소수성을 가지게 된다. 일반적으로 친수성막이 소수성막에 비해 막의 막힘이 적은 것을 비롯하여 다른 방면에서도 실제 이용에 유리하다. 그렇기 때문에 소수성 막을 이용하게 될 경우 화학 처리를 통하여 표면을 친수화 시켜 이용하는 경우가 많다[8].

나. 막의 세공 크기에 따른 분류

실제 수처리 공정에 막분리 공법을 용할 경우에는 제거상 물질의 입자 크기에 합한 세공을 가진 막을 선정하는 것이 중요하다. 분리막은 막 세공의 크기에 따라 정여과막(MF), 한외여과막(UF), 역삼투막(RO), 나노여과막(NF), 기투석막(ED) 등으로 분류 할 수 있으며 각각의 특징은 다음과 같다. 실제 수처리 공정에 막분리 공법을 이용할 경우에는 제거상 물질의 입자 크기에 적합한 세공을 가진 막을 선정하는 것이 중요하다. 분리막은 막 세공의 크기에 따라 정여과막(MF), 한외여과막(UF), 역삼투막(RO), 나노여과막(NF), 기투석막 (ED) 등으로 분류 할 수 있으며 각각의 특징은 다음과 같다[8].

1) 정밀여과막 (Microfiltration)

정밀여과막은 0.05~10 μ m의 공경을 가지며, 가장 흔히 사용되는 공경은 0.2 μ m이다. 콜로이드와 비교하여 큰 입자인 박테리아, clay, silt, cysts, algae 등이 주로 제거된다. 다른 막에 비하여 공경이 크기 때문에 비교적 높은 투과유속을 얻을 수 있으나 타막에 비하여 투과수의 순도가 떨어지며, 콜로이드성 물질 등에 의한 막의 폐색 현상이 잦은 단점이 있다[8].

2) 한외여과막 (Ultrafiltration)

한외여과막은 정밀여과막 보다 작은 0.001~0.1 μ m의 공경을 가지며 다른 막에 비해 공경의 범위가 넓은 편이다. 주로 비대칭 막으로 선택적 투과를 할 수 있는 표면층과 이를 지지하는 지지층으로 나누어져 있어 정밀여과막 보다 막 폐색 현상이 적게 나타난다. 보다 미세한 입자까지 제거할 수 있으나 정밀여과막에 비하여 투과유속이 작고 운전 압력이 높게 유지 되어야 한다[8].

3) 나노여과막 (Nanofiltration)

대략 1nm정도의 입자까지도 제거가 가능하며 분자량은 200~400Da이다. 막에 따라 다소 차이가 있지만 DOC의 90%, Na⁺등의 1가 이온의 60%, Ca²⁺등의 2가 이온의 90%가량의 제거가 가능하므로 연수화 공정에 적용이 가능하다[8].

4) 역삼투막 (ReverseOsmosis)

역삼투법은 과거 해수의 담수화를 목적으로 사용되었으며, TDS, 중금속 이온, NOM 등의 제거에 사용될 망이나 막의 공극이 매우 작기 때문에 막의 폐색이 잦으며 투과 유속이 매우 작고 높은 운전 압력이 필요한 단점이 있으며, 원수의 전처리가 요구된다. 따라서 사용 분야가 제한적이며 초순수 제조 등 전문 분야에 주로 이용되고 있다[8].

4. 기자재

가. 염도 센서

염도 센서는 용액의 전도도를 측정하여 염도를 계산해 내는 원리로 염도는 일정한 질량의 용액에 용해된 용질의 질량으로 정의한다. 본 연구에서는 MBL기기와 연결하여 알지네이트 비드의 염분 흡착 정도를 알아보는 실험에서 염도 값 변화를 알아볼 때 이용하였다[13].

나. MP-AES(Microwave Plasma Atomic Emission Spectroscopy)

MP-AES는 원자 발광 분광 광도계(AES)로 유도된 마이크로파 유도 플라즈마로 구성된다. 그것은 주요 요소와 사소한 요소들의 동시 다층적 결정을 위해 사용된다. TDS는 전자파 에너지를 사용하여 플라즈마 방출을 촉진하거나 외부 공기로부터 추출된 질소를 사용하여 플라즈마 방전을 유발하며, 외부 지역이나 외국에서 가스를 소싱할 필요가 없다. 샘플은 일반적으로 β -NLS 측정의 혈장과의 상호 작용에 앞서 무효화된다. 분무된 샘플은 혈장을 통과하고 전자는 흥분된 상태로 흐른다. 방출된 전자파는 빛으로 반사되며 검출기에서 측정된 각 방사 라인의 강도로 분리된다. 대부분의 일반적으로 결정된 원소는 중량 백분율(ppm)로 측정할 수 있다. MPS는 전통적인 AA와 AES와 비교할 수 있는 기술이지만, 낮은 운영 비용과 가연성 가스의 제거 요건을 포함한 몇 가지 잠재적 장점을 가지고 있다[11].

1) MP-AES의 작동

MP-AES는 전자파 에너지를 사용하여 플라즈마 방출을 촉진하거나 외부 공기로부터 추출된 질소를 사용하여 플라즈마 방전을 유발한다. 금속 수용액 샘플은 플라즈마와 상호작용하기 전에 분무된다. 분무된 샘플은 MP-AES를 통과하며 전자는 흥분된 상태로 흐른다. 방출된 전자파는 빛으로 반사되며 검출기에서 측정된 각 방사 라인의 강도로 분리된다. 대부분의 일반적으로 결정된 원소는 중량 백분율(ppm)로 측정하여 측정할 수 있다[11].

다. 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope, 이하 SEM)

1) SEM의 구성

주사전자현미경은 크게 본체부와 전기계부로 구성되어 있다. 본체부는 전자총에서 나온 전자선을 가늘게 집속하여 시료 위를 2차원적으로 주사시키면서 조사하는 전자 광학계와 관찰 시료를 취급하는 시료 스테이지, 시료의 표면에서 나오는 신호를 검출하는 검출기, 시료스테이지와 검출기를 포함하는 시료실 및 전자선 통로를 진공으로 배기시키는 배기계로 구성되어 있다. 전기계는 본체부를 제어하는 각종 전원(가속전압 전원, 렌즈 전원, 주사 전원, 직류 전원 등)과 검출기의 제어 및 신호를 증폭하는 신호 처리계, 신호를 음극선관(Cathode Ray Tube: CRT) 위에 상으로 표시하는 상 표시부 및 상을 기록하는 카메라 장치와 전기계 전체를 조작하기 위한 조작부(조작 판넬)로 구성되어 있다[9].

2) SEM의 작동

주사전자현미경은 전자총에 의해 형성된 일련의 전자들이 인가된 가속전압에 의해 에너지를 가지고 시료 표면을 향해 가속된다. 가속된 전자빔은 금속으로 형성된 수십, 수백 마이크로미터의 직경을 갖는 조리개에 의해 산란된 것을 걸러주고, 자기장을 이용한 집속 렌즈에 의해서 전자빔의 스팟 크기를 조절해 주게 된다. 조절된 전자빔은 비점보정 코일을 이용하여 전자빔의 저형화를 도모해 준다. 정제된 전자빔이 편향기에 의해 시료 표면에 초점을 형성한다. 시료 표면에 입사되는 전자들은 시료 표면 내에 포함된 원자 및 전자들과 상호작용에 의해 방출되는 여러 가지 신호들, 2차 전자, 반사 전자, 투과 전자, 오제 전자 등이 발생하게 된다. 이러한 전자

들 중에서 진공 준위보다 에너지가 큰 2차 전자를 검출하여 영상신호로 변환하고 영상화되는데 이러한 과정을 거쳐 시료의 표면을 관찰 할 수 있게 된다[9].

3) SEM-EDS

EDS(Energy Dispersive X-ray Spectrometer, XS-160, Japan)는 SEM에 장착되어 고체, 박막 또는 particle 들의 화학적 성분을 분석하는 기술이다. EDS의 측정 원소 범위는 Beryllium(4) 부터 Americium(95) 까지이다. 가장 정도가 높은 분석 방법 중의 하나인 X-ray microanalysis는 미소 부위, 즉 수 μm 영역의 원소 성분에 대한 정보를 알 수 있으며, 검출 한계는 0.1%이다. 이것으로 분석 가능한 원소 성분은 Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Ti, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Sn, Pb 등이며 본 연구에서도 이들 원소 중 알지네이트 비드에 함유되어있는 원소들에 대해 분석하였다[10].

Ⅲ. 연구 방법 및 절차

1. 시약 및 기기

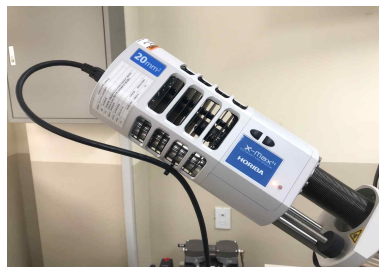
칼슘 알지네이트 비드 제조에는 소듐 알지네이트와 CaCl_2 를 사용하였다. 키토산 비드 제조에는 aldrich사에서 구입한 키토산을 사용하였고 pH에 따른 비드를 제조할 때에는 buffer solution을 사용하였다. 피흡착물로는 NaCl 과 카드뮴 수용액을 사용하였다. 적하 장치 제조에는 클램프, 뷰렛을 사용하였다. 염분 흡착 분석은 염도 측정 센서와 salt meter를 사용하였고 중금속 흡착 분석은 MP-AES(Agilent Technologies - 4100)를 사용하였다. 비드의 표면 관찰 및 비드 성분 분석에는 SEM(Hitachi - SU3500)과 SEM-EDS 성분 분석기(Horiba)를 사용하였다. 항균능력 검증 실험에서는 대장균 배양 배지를 사용하였다. 미세막 제작을 위해 TMC와 PIP를 사용하였으며, 적정기술 모델 개발에는 123D 프로그램을 사용하였다.



[Fig. 1] MP-AES



[Fig. 2] SEM



[Fig. 3] SEM-EDS

2. 연구 방법

가. 농도에 따른 칼슘 알지네이트 비드의 염분 흡착 능력 확인

1) 칼슘 알지네이트의 제조

- 가) 전동 피펫 에이드로 49mℓ, 48.75mℓ, 48.5mℓ, 48.25mℓ, 48mℓ의 증류수를 측정한다.
- 나) 전자저울로 소듐 알지네이트 1.0g, 1.25g, 1.5g, 1.75g, 2.0g을 측정한다.
- 다) 100mℓ 비커에 49mℓ의 증류수와 소듐 알지네이트 1.0g을 넣은 후 magnetic stirrer에서 stirring하며 소듐 알지네이트를 녹인다.
- 라) 500mℓ 비커에 CaCl_2 3% 수용액을 제조한다.
- 마) 뷰렛에 소듐알지네이트 수용액을 담은 후 클램프로 고정시킨다.
- 바) 충분히 교반되고 있는 CaCl_2 수용액에 뷰렛의 콕을 열어 일정한 속도로 소듐 알지네이트 수용액을 떨어 뜨려 칼슘 알지네이트 비드를 제조한다.
- 아) 위와 같은 방법으로 2.0%, 2.5%, 3.0%, 3.5%, 4.0%의 소듐 알지네이트 용액을 만든다.

2) 칼슘 알지네이트 비드의 염분 흡착 능력 확인

- 가) 칼슘 알지네이트 비드 10g을 측정한다.
- 나) 100mℓ 비커에 NaCl 3.5% 수용액 100mℓ를 제조한다.
- 다) 염도 측정 센서를 클램프에 고정한다.
- 라) 칼슘 알지네이트 하이드로 겔을 NaCl 수용액에 넣고 파라필름으로 입구를 막는다.
- 마) 1일 동안 염도측정센서로 염분을 측정한다.

3) 칼슘 알지네이트 비드의 해수 담수화 기술 적용 가능성 확인

- 가) 칼슘 알지네이트 비드 10g씩 6번을 측정한다.
- 나) 10g의 칼슘 알지네이트 비드를 거즈와 고무줄로 칼슘 알지네이트 하이드로 겔 사이의 공간이 충분히 포장해준다.
- 다) 100mℓ 비커에 NaCl 3.5% 수용액 100mℓ를 제조한다.
- 라) 염도 측정 센서를 클램프에 고정한다.
- 마) 칼슘 알지네이트 비드를 NaCl 수용액에 넣고 파라필름으로 입구를 막는다.
- 바) 한 묶음을 20분씩 총 1시간 30분을 NaCl 수용액에 담궈다가 빼준다.

나. pH에 따른 칼슘 알지네이트 비드의 염분 흡착 능력 확인

1) pH에 따른 칼슘 알지네이트 비드제작

- 가) 전동 피펫 에이드로 pH 3, 7, 10 98.5mℓ의 buffer solution을 측정한다.
- 나) 전자저울로 소듐 알지네이트를 1.5g 측정한다.
- 다) 100mℓ 비커에 98.5mℓ의 buffer solution에 소듐 알지네이트 1.5g을 넣은 후 magnetic stirrer에서 stirring하며 소듐 알지네이트를 녹인다.
- 라) 500mℓ 비커에 CaCl_2 3% 수용액을 제조한다.
- 마) 뷰렛에 소듐 알지네이트 수용액을 담은 후 클램프로 고정시킨다.
- 바) 충분히 교반되고 있는 CaCl_2 수용액에 뷰렛의 콕을 열어 일정한 속도로 소듐 알지네이트 수용액을 떨어 뜨려 칼슘 알지네이트 비드를 제조한다.

아) 1, 2의 실험을 진행한다.

2) 농도와 pH에 따른 칼슘 알지네이트 비드의 표면 관찰

가) SEM 기기로 염분을 흡착하기 전의 칼슘 알지네이트 비드의 표면과 단면을 60배와 500배의 배율로 관찰한다.

나) EDS를 사용하여 흡착 전의 원소의 비율을 분석한다.

다) SEM 기기로 염분을 흡착한 후의 칼슘 알지네이트 비드의 표면과 단면을 60배와 500배의 배율로 관찰한다.

라) EDS를 사용하여 흡착 전의 원소의 비율을 분석한다.

마) 염분 흡착 전과 흡착 후의 표면의 구조 및 원소의 비율을 비교한다.

다. 알지네이트 비드의 항균 효과 확인

1) 키토산 알지네이트 비드의 제조

가) 전동 피펫 에이드로 48.5ml의 증류수를 측정한다.

나) 전자저울로 소듐 알지네이트를 1.5g 측정한다.

다) 100ml 비커에 48.5ml의 증류수와 소듐 알지네이트 1.5g을 넣은 후 magnetic stirrer에서 stirring하며 소듐알지네이트를 용해시킨다.

라) 500ml 비커에 CaCl_2 3% 수용액을 제조한다.

마) 아세트산 5% 수용액 100ml와 키토산 5% 수용액 100ml를 제조한다[1].

바) 60℃에서 아세트산 5% 수용액에 키토산 5% 수용액을 녹인다.

사) 100ml 비커에 10g의 키토산 콜로이드 용액과 50ml 알지네이트 수용액을 섞는다.

아) 뷰렛에 키토산-소듐 알지네이트 수용액을 담은 후 클램프로 고정시킨다.

자) 충분히 교반되고 있는 CaCl_2 수용액에 뷰렛의 콕을 열어 일정한 속도로 소듐 알지네이트 수용액을 떨어 뜨려 칼슘 알지네이트 하이드로 겔을 제조한다.

차) 키토산 콜로이드 용액을 소듐 알지네이트 수용액에 구형으로 떨어뜨린 후 건져내어 충분히 교반되고 있는 CaCl_2 수용액에 적하시킨다.

2) 키토산 알지네이트 비드의 항균 능력 확인

가) 클린벤치 앞에 앉기 전 70% 에탄올로 손을 소독하고 실험하는 동안 무균 조건을 유지한다.

나) plate에 실험날짜, 실험자 성명, 도말한 미생물 종류, 희석배율(10), 채취한 미생물의 양에 대해 라벨링한다.

다) 대장균 배양액을 증류수와 섞어 10배 희석시킨다.

라) 마이크로피펫을 이용해 30 μl 의 대장균 배양액을 10개의 배지 위에 떨어뜨린다.

마) 도말봉을 이용해 도말한다.

아) 8개의 배지 위에는 중앙에 2.5%의 알지네이트 비드를 올려놓는다.

자) 2개의 배지는 대조군으로 정하고 비드를 올려놓지 않는다.

차) 도말이 끝난 배지를 뚜껑을 덮고 뒤집어서 24시간 동안 37℃에서 배양한다.

카) 비드 주위의 대장균 생성 여부를 확인한다.

라. 알지네이트 비드의 중금속 흡착 능력 확인

1) 중금속 흡착능력 확인

- 가) 전동 피펫 에이드로 48.5mL의 증류수를 측정한다.
- 나) 전자저울로 소듐 알지네이트를 1.5g 측정한다.
- 다) 100mL 비커에 48.5mL의 증류수와 소듐 알지네이트 1.5g을 넣은 후 magnetic stirrer에서 stirring하며 소듐알지네이트를 녹인다.
- 라) 500mL 비커에 CaCl_2 3% 수용액을 제조한다.
- 마) 뷰렛에 소듐 알지네이트 수용액을 담은 후 클램프로 고정시킨다.
- 아) 충분히 교반되고 있는 CaCl_2 수용액에 뷰렛의 콕을 열어 일정한 속도로 소듐 알지네이트 수용액을 떨어 뜨려 칼슘 알지네이트 하이드로 겔을 제조한다.
- 자) 50ppm의 카드뮴 수용액을 제조한다.
- 차) 카드뮴 수용액에 알지네이트 비드 10g을 넣는다. MP-AES로 카드뮴 흡착 전과 흡착 후의 카드뮴 수용액의 농도를 측정한다.

마. 2.6 미세막 제작 실험

한외여과막(UF)에 계면중합을 하면 역삼투막이 형성되나 이는 이온까지 모두 거를 수 있을 만큼 구멍의 크기 충분히 작아 나트륨 이온을 제거하는데 알지네이트의 역할이 무의미해지므로 중금속 이온만 거를 수 있을 정도의 NF 막을 slow speed filter paper 거름종이에 계면중합 시켜 만들기로 한다.

1) 한외여과막을 이용한 여과막 제작

- 가) 폴리설폰 한외여과막(UF)의 표면을 묽은 황산으로 세척한다.
- 나) 준비된 PIP 수용액(0.05 wt.-%-PIP 0.05g, 물 99.95g)에 세척한 막을 1분간 담가 둔다.
- 다) 담가둔 막을 꺼내어 표면에 과량으로 남아있는 PIP 수용액을 롤러를 이용하여 제거한다.
- 라) PIP용액을 제거한 막을 준비된 TMC를 녹인 헥산용액(1.0 wt.-%-헥산 99g, TMC 1g)에 10초간 담가 PIP와 TMC 사이에 계면중합이 일어나게 한다.
- 마) 이렇게 제조된 역삼투막을 2시간 동안 공기에 건조한 후 증류수에 넣어서 보관한다.

2) 거름종이를 이용한 여과막 제작

- 가) slow speed filter paper의 표면을 묽은 황산으로 세척한다.
- 나) 준비된 PIP 수용액(0.05 wt.-%-PIP 0.05g, 물 99.95g)에 세척한 막을 1분간 담가 둔다.
- 다) 담가둔 막을 꺼내어 표면에 과량으로 남아있는 PIP 수용액을 롤러를 이용하여 제거한다.
- 라) PIP용액을 제거한 막을 준비된 TMC를 녹인 헥산용액(1.0 wt.-%-헥산 99g, TMC 1g)에 10초간 담가 PIP와 TMC 사이에 계면중합이 일어나게 한다.
- 마) 이렇게 제조된 NF막을 2시간 동안 공기에 건조한 후 증류수에 넣어서 보관한다.

아. 적정 기술 모델 제작

위의 결과들을 바탕으로 실제 적용 모델을 설계하고 123D 프로그램으로 실체화 하여 음용수 제조를 위한 적정기술 키트의 성능을 검증한다.

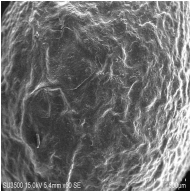
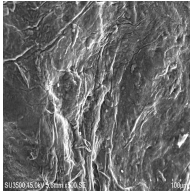
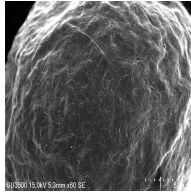
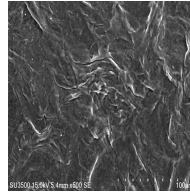
IV. 연구 결과

1. 농도에 따른 칼슘 알지네이트 비드의 형성 확인

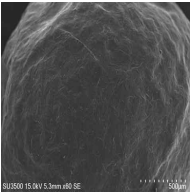
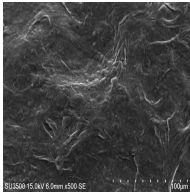
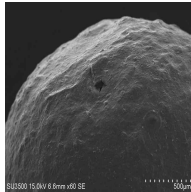
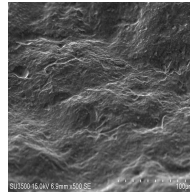
가. 알지네이트 농도에 따른 비드의 형성 비교

알지네이트의 농도를 2.5% 3.0% 3.5% 4.0%로 하여 비드를 제작하여 그 표면을 SEM으로 관찰한 결과는 <Table 1>과 같다. <Table 1>에서 볼 수 있는 것과 같이 농도가 전해질수록 비드 표면의 굴곡이 적어짐을 알 수 있었다. 즉, 알지네이트 비드에는 구멍과 같이 움푹 파인 곳이 존재하는데 움푹 파인 정도가 농도가 전해질수록 알아짐을 알 수 있었다. 또한 결정의 구조도 고농도로 갈수록 안정적으로 나타났다. 물질의 흡착에는 알지네이트 비드가 지닌 다공성이라는 성질이 관여하므로 이 결과를 보아 표면에 굴곡이 심한 농도가 옅은 비드가 본 연구에 적합할 것이라는 결론을 얻었다. 따라서 추후 실험부터는 2.5%의 비드를 기본 비드로 사용하기로 하여 연구를 진행하였다.

<Table 1> Surface of 2.5%, 3.0% alginate bead

2.5%		3.0%	
			
2.5%-1(60배)	2.5%-2(500배)	3.0%-1(60배)	3.0%-2(500배)

<Table 2> Surface of 3.5%, 4.0% alginate bead

3.5%		4.0%	
			
3.5%-1(60배)	3.5%-2(500배)	4.0%-1(60배)	4.0%-2(500배)

2. 변인에 따른 칼슘 알지네이트 비드의 염분 흡착 능력 확인

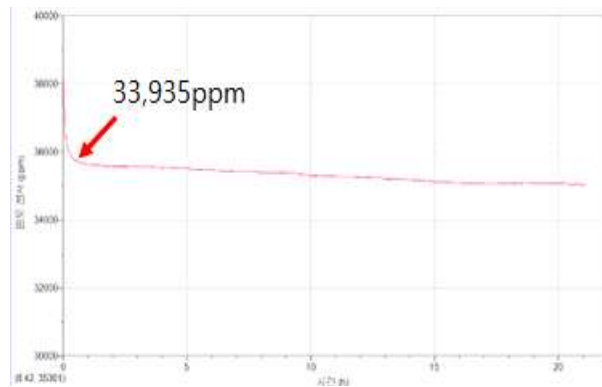
가. pH에 따른 칼슘 알지네이트 비드의 염분 흡착 능력 확인

alginate는 중성화된 카르복시기를 갖는데, 주변의 pH가 낮은 경우 그룹 간 수소결합이 유지된다. 그런데 pH가 높아지면 카르복시기가 이온화되어 COO^- 형태가 되고 이온 간의 정전기적 반발력에 의해서 고분자 사슬 간 거리가 멀어진다는 성질을 가지고 있다. 이와 같은 성질로 인해 알지네이트 비드는 pH에 따라 형성이 달라지고 흡착능력이 달라지게 되는 것이다.

따라서 우리는 산성조건, 중성조건, 염기성조건에서 제작된 비드를 이용하여 염분 흡착에 효과적인 pH를 찾아보는 실험을 설계하였다. 산성조건은 pH는 4로, 중성조건은 pH7, 염기성 조건은 pH10으로 설정하였다. 가장 효과적으로 염분을 흡착한 조건을 알아보고 그 조건에서의 pH를 세부적으로 나누어 염분 흡착에 최적화 된 pH를 알아보도록 하였다. pH는 덕산사의 버퍼솔루션을 이용하여 맞추어주었다.

1) pH 4 비드 염분 흡착 정도

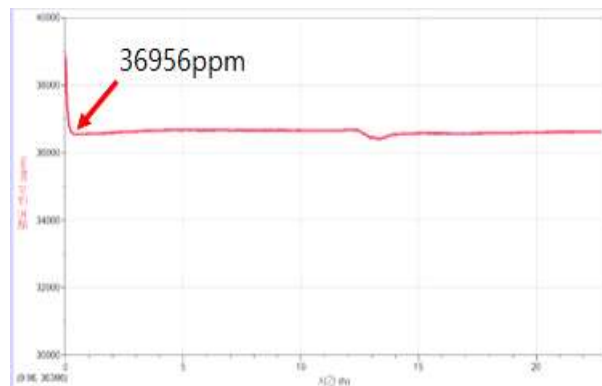
pH 4의 환경에서 제작된 알지네이트 비드의 염분 흡착 능력을 측정한 실험 결과 [Fig. 4]에서 볼 수 있는 것과 같이 처음 9분 동안 35,122ppm에서 33,935ppm까지 농도가 감소하였고 이후 처음부터 21시간이 지났을 때 농도가 33,728ppm까지 감소한 것을 관찰 할 수 있었다. 이를 통해 pH4로 제작 된 알지네이트 비드는 염분 흡착의 대부분이 처음 9분 사이에 진행되었다는 것을 알 수 있었다.



[Fig. 4] Salt adsorption capacity of pH 4 bead

2) pH 7 비드 염분 흡착 정도

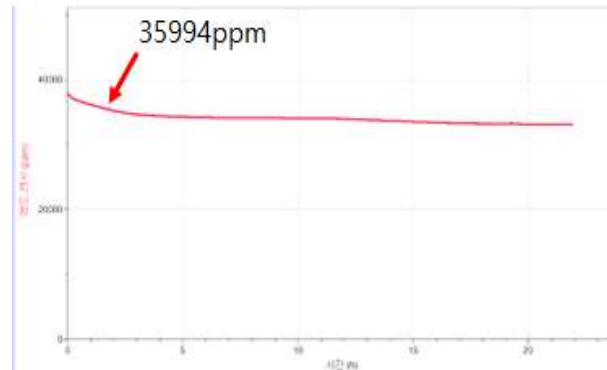
pH 7의 환경에서 제작된 알지네이트 비드의 염분 흡착 능력을 측정한 실험 결과 [Fig. 5]에서 볼 수 있는 것과 같이 처음 38,908ppm에서 약 8분 동안 36,956ppm로 감소하였고 이후 처음부터 약 23시간이 지났을 때 36,616ppm까지 감소한 것을 관찰 할 수 있었다. 이를 통하여 pH 4로 제작된 알지네이트 비드와 비교하였을 때 전체 흡착량이 더 많았음을 알 수 있고 흡착량이 최대가 되는 시간이 더욱 빠르게 나타났으므로 pH 4보다는 pH 7에서 알지네이트 비드를 제조하는 것이 염분 흡착에 유리하다는 것을 알 수 있었다.



[Fig. 5] Salt adsorption capacity of pH 7 bead

나. 키토산 비드의 염분 흡착 능력 확인

키토산 비드의 염분 흡착 능력을 측정하는 실험을 진행한 결과 [Fig. 6]에서 볼 수 있는 것과 같이 처음 37,929ppm에서 약 1시간 10분 동안 35,994ppm까지 감소하였고 이후 약 22시간 동안 33,094ppm까지 감소한 것을 관찰 할 수 있었다. 키토산 비드는 일반 알지네이트 비드와 결과를 비교해 보았을 때 초반에 염분이 급격하게 흡착되는 구간이 없다는 것을 알 수 있었으며 꾸준하게 감소하는 모습을 관찰 할 수 있었다. 오랜 시간 동안 염분을 흡착하게 해준다고 하였을 때 키토산 비드의 사용이 가능할 것이라는 결론을 얻었다.



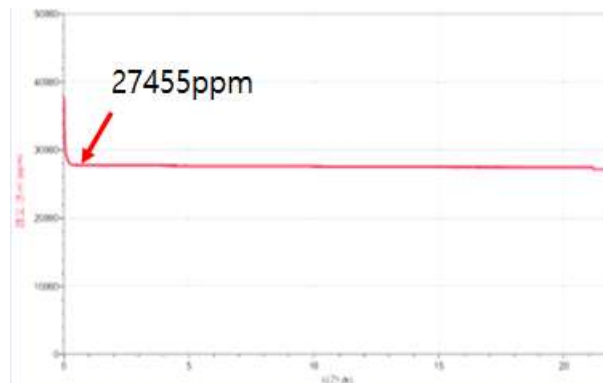
[Fig. 6] Salt adsorption capacity of chitosan bead

다. 비드를 넣어주는 시간에 따른 염분 흡착 능력 확인

알지네이트 비드 70g을 한 번에 투하하는 방식과 릴레이식으로 20분마다 10g씩 나눠서 넣어주어 염분을 흡착을 시키는 방식에 따라 염분 흡착정도가 달라질 것이라는 가설을 세우고 이를 검증하기 위해 염분의 감소량을 확인하였다.

1) 2.5% 알지네이트 비드 70g 염분 흡착 정도

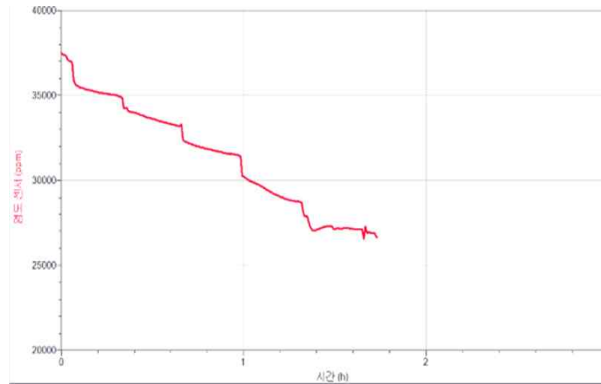
알지네이트 비드 70g의 염분 흡착 능력을 측정한 실험 결과 [Fig. 7]에서 볼 수 있는 것과 같이 처음 37,626ppm에서 27분 동안 27,455ppm까지 감소하였고 이후 약 22시간 동안 27,116ppm까지 감소한 것을 관찰할 수 있었다. 70g의 비드를 염분 흡착에 이용하였을 경우가 10g을 이용하였을 경우보다 염분 흡착 효과가 우세하였다.



[Fig. 7] Salt adsorption capacity of alginate 2.5% bead(70g)

2) 알지네이트 비드 70g 릴레이 염분 흡착 정도

알지네이트 비드 70g 릴레이 염분 흡착 실험 결과 그래프 [Fig. 8]에서 볼 수 있는 것과 같이 처음 37,524ppm에서 약 2시간 20분 동안 26,655ppm까지 감소한 것을 관찰할 수 있었다. 총 20분 간격으로 10g씩 넣어주었는데, 한 번 넣어줄 때마다 염분이 급격하게 감소하는 구간이 나타나는 것을 관찰할 수 있었다.



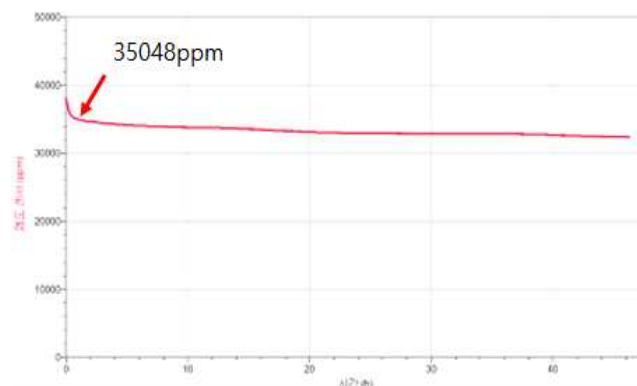
[Fig. 8] Salt adsorption capacity of 2.5% alginate bead - relay

라. 알지네이트 비드 크기에 따른 염분 흡착 능력 확인

알지네이트 비드의 크기에 따라 염분 흡착 능력이 달라질 것이라는 가설을 세우고 이를 검증하기 위해 비드의 지름을 변인으로 설정하고 각 비드에 따른 염분 흡착 정도를 측정하였다.

1) 2.5% 큰 크기 (지름 : 6mm) 알지네이트 비드 염분 흡착 정도

큰 크기의 알지네이트 비드 염분 흡착 능력을 측정한 실험 결과 [Fig. 9]에서 처음 38,043ppm에서 67분 동안 35,048ppm까지 감소한 것을 관찰할 수 있었다. 평소에 만들던 작은 크기(지름이 약 3mm)의 알지네이트 비드와 큰 크기(지름이 약 6mm) 비드를 비교해보았을 때 비슷한 양의 염분을 흡착하는 데 필요한 시간이 더 많이 걸리는 것으로 관찰되었다. 이는 각각 같은 양의 큰 크기 비드와 작은 크기 비드를 비교했을 때, 작은 크기 비드의 표면적이 더 넓기 때문이라고 생각하였다. 따라서 같은 양의 큰 크기 비드보다 표면적이 더 넓은 작은 크기 비드의 효율이 더 좋다는 것을 알 수 있었다.



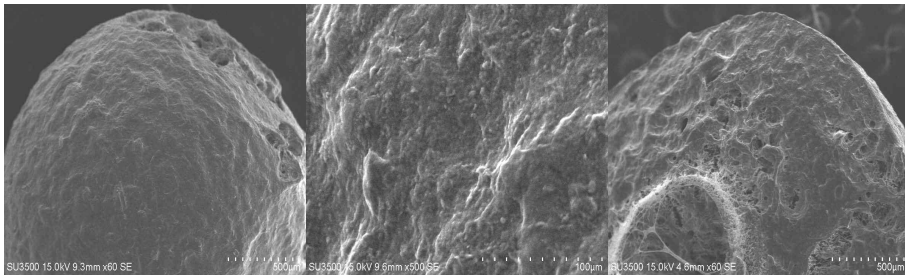
[Fig. 9] Salt adsorption capacity of 2.5% alginate bead - large size

3. pH에 따른 칼슘 알지네이트 비드의 원소함량 관찰

알지네이트 비드를 이용하여 염분 흡착 실험을 진행하였으며 염분 흡착 전, 후의 알지네이트 비드의 표면 및 단면의 변화를 알아보기 위해 염분 흡착 실험에 사용 된 비드의 표면과 단면을 SEM을 이용하여 관찰하였다. 또한 염분 흡착 전, 후의 비드의 원소 함량이 다를 것이라고 생각하고 SEM-EDS를 이용하여 비드의 원소 함량을 분석하였다.

가. 염분 흡착 후 pH 별 비드의 표면 및 단면관찰

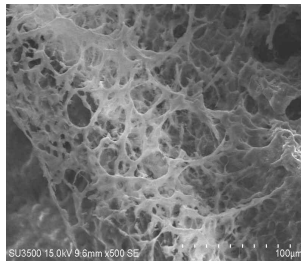
[Fig. 10], [Fig. 11], [Fig. 12], [Fig. 13], [Fig. 14], [Fig. 15], [Fig. 16], [Fig. 17], [Fig. 18], [Fig. 19], [Fig. 20], [Fig. 21]은 염분 흡착 후 pH 별 비드의 표면과 단면을 SEM을 이용하여 관찰한 사진이다. 사진에서 볼 수 있듯이 pH가 낮을수록 비드 내부의 구멍이 많았으므로 pH가 낮은 비드가 염분 흡착 능력이 더 좋았을 것으로 예상하고 비드의 원소 함량을 분석하였다.



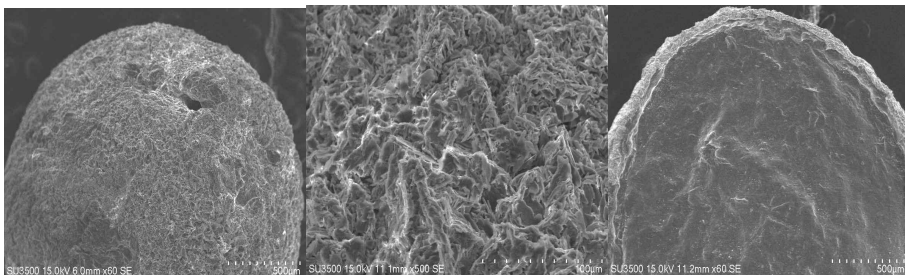
[Fig. 10] pH 4alginate bead
after salt adsorption
experiment(x60)

[Fig. 11] pH 4alginate bead
after salt adsorption
experiment(x500)

[Fig. 12] pH 4alginate bead
after salt adsorption
experiment-section(x60)



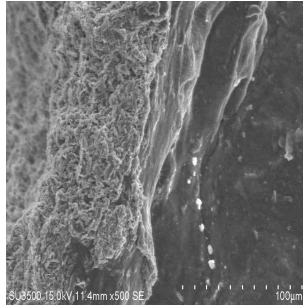
[Fig. 13] pH 4alginate bead
after salt adsorption
experiment-section(x500)



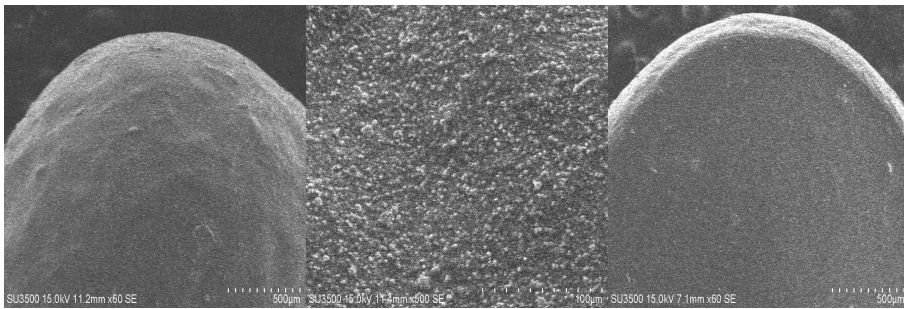
[Fig. 14] pH 7 alginate bead
after salt adsorption
experiment(x60)

[Fig. 15] pH 7 alginate bead
after salt adsorption
experiment(x500)

[Fig. 16] pH 7 alginate bead
after salt adsorption
experiment-section(x60)



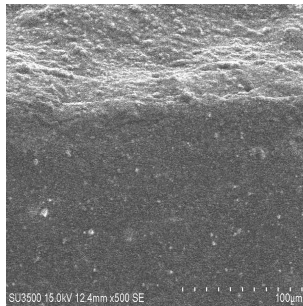
[Fig. 17] pH 7 alginate bead after salt adsorption experiment-section(x500)



[Fig. 18] pH 10 alginate bead after salt adsorption experiment(x60)

[Fig. 19] pH 10 alginate bead after salt adsorption experiment(x500)

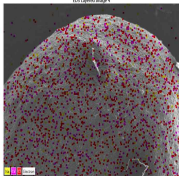
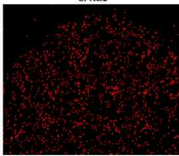
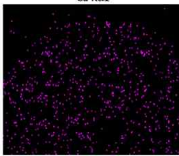
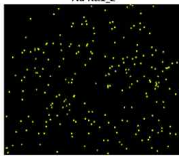
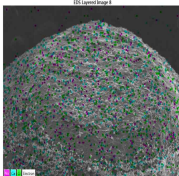
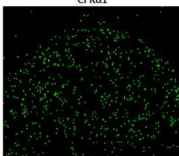
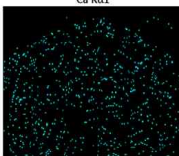
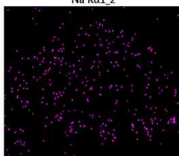
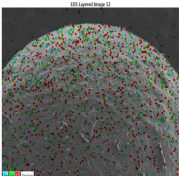
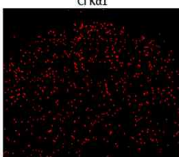
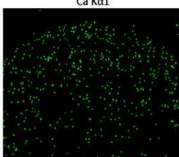
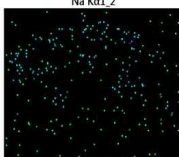
[Fig. 20] pH 10 alginate bead after salt adsorption experiment-section(x60)



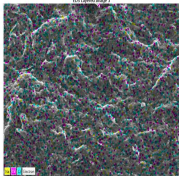
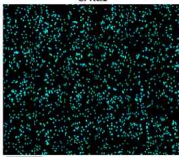
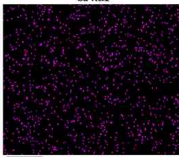
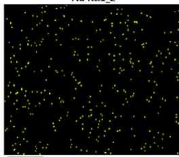
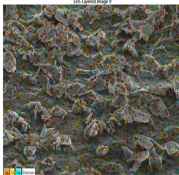
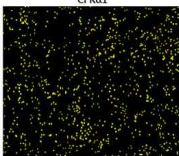
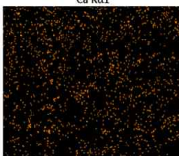
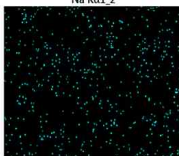
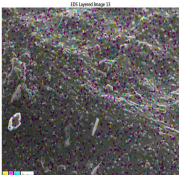
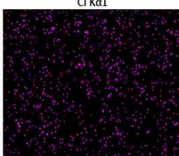
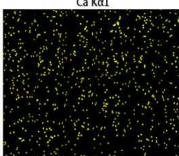
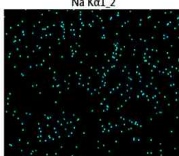
[Fig. 21] pH 10 alginate bead after salt adsorption experiment-section(x500)

나. pH에 따른 염분 흡착 전, 후 칼슘 알지네이트 비드의 원소함량 관찰

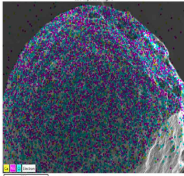
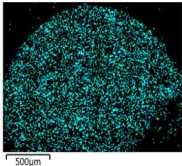
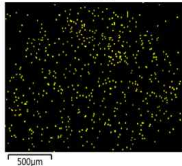
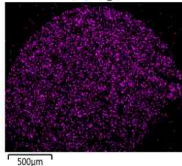
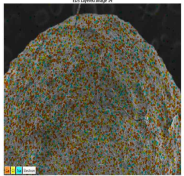
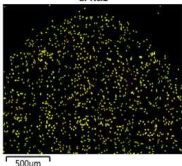
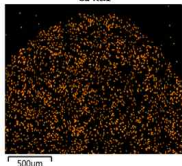
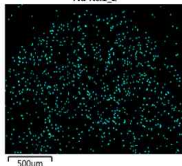
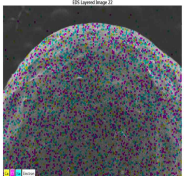
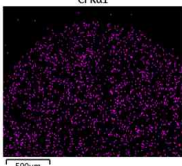
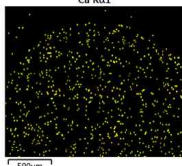
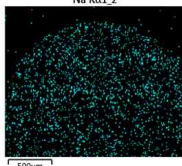
〈Table 3〉 Ultimate analysis of pH 4, 7, 10 alginate beads' surface before salt adsorption experiment(x60)

	SEM	Cl	Ca	Na
pH4				
pH7				
pH10				

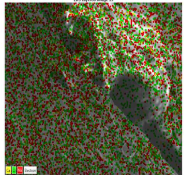
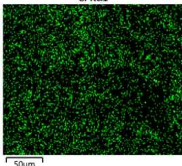
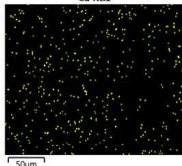
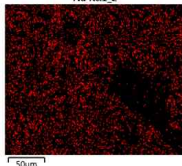
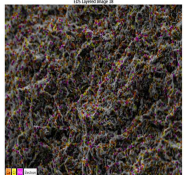
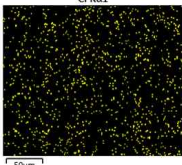
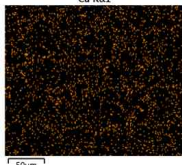
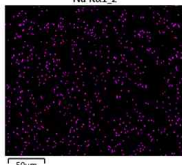
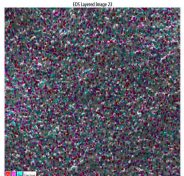
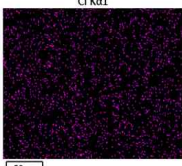
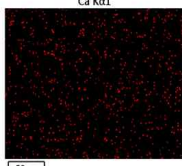
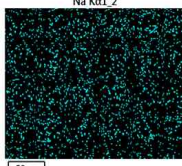
〈Table 4〉 Ultimate analysis of pH 4, 7, 10 alginate beads' surface before salt adsorption experiment(x500)

	SEM	Cl	Ca	Na
pH4				
pH7				
pH10				

〈Table 5〉 Ultimate analysis of pH 4, 7, 10 alginate beads' surface after salt adsorption experiment(x60)

	SEM	Cl	Ca	Na
pH4				
pH7				
pH10				

〈Table 6〉 Ultimate analysis of pH 4, 7, 10 alginate beads' surface after salt adsorption experiment(x500)

	SEM	Cl	Ca	Na
pH4				
pH7				
pH10				

〈Table 3〉, 〈Table 4〉, 〈Table5〉, 〈Table 6〉은 pH4, pH7, pH10 비드의 염분 흡착 전과 후의 원소 분석 결과이다. SEM-EDS를 이용하여 EMAX 프로그램을 통해 결과를 분석하였으며 찍은 사진 중 각각의 원소에

해당하는 색이 SEM 사진에 찍혀 있는 것을 알 수 있고, 육안 관찰을 통해 성분의 비율을 확인할 수 있다. 염분 흡착 전, 후를 비교하였을 때 pH4, pH7, pH10 공통적으로 칼슘 이온의 비율이 현저하게 줄어들었음을 확인할 수 있었고 나트륨 이온의 비율이 늘어났음을 확인할 수 있었다. 이는 카르복시기의 수소와 치환된 칼슘 이온이 염분을 흡착하는 과정에서 나트륨 이온으로 치환되었다는 것을 보여준다.

염도 센서를 통해 얻은 그래프와 SEM-EDS 프로그램을 이용한 원소분석 결과를 통해 pH4(산성), pH10(염기성)에서의 염분 흡착량보다 pH7(중성)에서의 흡착량이 많았음을 알 수 있었으며 원소 분석 결과 pH7에서 나트륨 이온의 치환율이 가장 높았다는 것을 알 수 있었다. 위의 결과를 통해 알지네이트 비드가 pH7(중성)에서 제작되었을 때 염분 흡착의 효율을 높여준다는 것을 알 수 있었다. 위와 같은 결과로 증류수를 이용하여 제작한 비드를 추후 실험에 사용하기로 하였다

2. 3.을 통해 다공성에 의한 물리적 흡착과 이온치환에 의한 화학적 흡착이 알지네이트 비드의 주된 흡착 원리를 알아내었다. 물리적 흡착 능력을 알아보기 위해 SEM을 이용하여 비드의 표면과 단면을 관찰해본 결과, 낮은 농도, 낮은 pH에서 비드 표면의 굴곡이 심하며 비드 내부의 구멍이 많음을 관찰 할 수 있었다. 흡착정도를 알아보기 위해 염도 센서를 이용해 측정한 그래프를 분석해본 결과, pH4보다 pH7에서 더 많은 염분을 흡착하였음을 확인하였다. 위와 같은 결과를 통해 다공성에 의한 물리적 흡착보다 이온치환에 의한 화학적 흡착이 우세할 것이라고 생각하고 SEM-EDS프로그램을 통해 관찰한 비드의 원소 분포를 분석해보았다. 그 결과 pH7에서, 가장 높은 나트륨 이온의 치환율이 관찰되었다. 이 결과를 통해 물리적 흡착 보다는 화학적 흡착이 염분 흡착에 주된 원리로 작용한다는 것을 알 수 있었다.

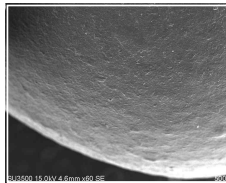
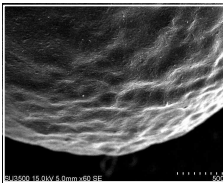
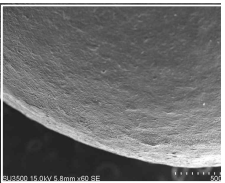
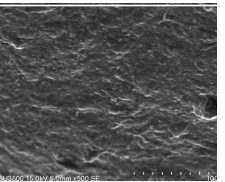
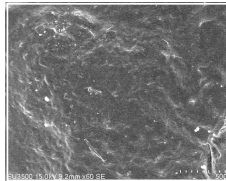
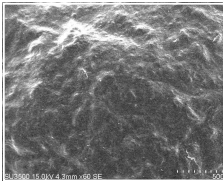
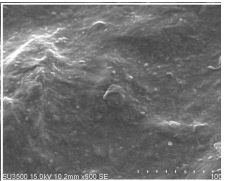
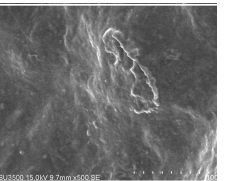
4. 키토산 비드의 표면 관찰 및 염분 흡착 능력 확인

키토산 비드의 표면을 SEM을 이용하여 관찰하였으며 키토산 비드를 이용하여 염분 흡착 실험을 진행하였다. 염분 흡착 후의 표면과 단면을 SEM을 이용하여 관찰하였다.

가. 키토산 비드 표면 관찰

키토산 알지네이트 비드의 염분 흡착 전후 표면을 SEM 촬영을 통해 관찰하였다. 관찰한 결과는 <Table 7>과 같다. 60배, 500배로 촬영을 한 결과 두 배율 모두 염분 흡착 전에 비하여 염분 흡착 후에 표면이 거칠어진 것을 확인할 수 있었다.

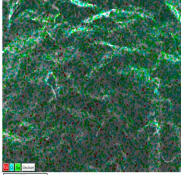
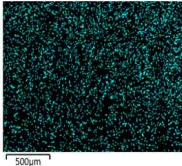
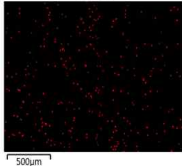
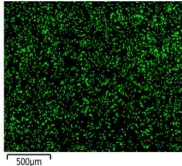
<Table 7> Surface of chitosan bead after salt adsorption experiment and before salt adsorption experiment

키토산비드 염분 흡착 전				
	키토산-1(60배)	키토산-2(60배)	키토산-3(60배)	키토산-4(500배)
키토산비드 염분 흡착 후				
	키토산-5(60배)	키토산-6(60배)	키토산-7(500배)	키토산-8(500배)

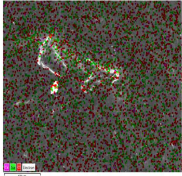
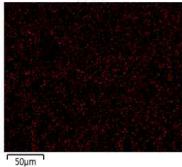
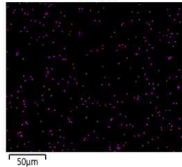
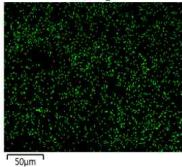
나. 염분 흡착 후 키토산 비드의 원소 함량 분석

SEM-EDS의 EMAX 프로그램을 이용하여 알지네이트로 코팅한 키토산 비드의 염분 흡착 후 원소함량을 분석하였다.

〈Table 8〉 Ultimate analysis of chitosan beads' surface after salt adsorption experiment(x60)

흡착 후	Cl	Ca	Na
			

〈Table 9〉 Ultimate analysis of chitosan beads' surface after salt adsorption experiment(x500)


흡착 후	Cl	Ca	Na
			

SEM-EDS의 EMAX 프로그램을 이용하여 알지네이트로 코팅한 키토산 비드의 염분 흡착 후 원소 함량을 분석한 결과는 〈Table 8〉, 〈Table 9〉와 같다. pH 별 비드와 마찬가지로 염분 흡착 후 나트륨 이온의 비율이 증가하였음을 관찰할 수 있었다.

5. 키토산 알지네이트 비드의 항균 능력 확인

키토산 알지네이트 비드의 항균 능력 확인 실험의 결과는 〈Table 10〉과 같다.

〈Table 10〉 Antibacterial effects of chitosan beads

대조군		실험군	
			

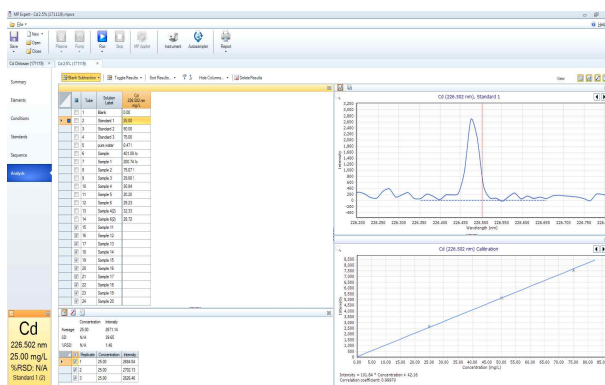
키토산 비드를 올려놓지 않은 대장균 배지를 관찰 한 결과, 균이 배지 전체적으로 잘 배양되어 있었다. 키토산 비드를 올려놓은 대장균 배지를 관찰한 결과, 키토산 비드 주위에만 대장균이 자라지 않은 모습을 확인할 수 있었다. 이 실험 결과를 통해 키토산 비드의 항균효과를 확인하였다.

6. 알지네이트 비드와 키토산 비드의 중금속 흡착 능력 확인

기본 alginate 비드와 키토산 비드의 중금속 흡착능력 확인 및 비교를 위해 Cd 50ppm 수용액에 각각의 비드를 담가 놓고 중금속 흡착 정도를 관찰하는 실험을 진행하였다. 수용액을 채취하는 시간의 간격을 4시간으로 하여 총 6번, 24시간을 측정하였으며 6개의 Sample을 MP-AES로 측정하였으며, 분석 프로그램으로는 MP Expert를 사용하였다. [Fig. 23], [Fig. 25]은 MP-AES로 측정한 중금속 농도의 실제 값을 보여주는 사진이다. 이때 pure water는 증류수를, Sample은 초기 농도(50ppm) 수용액을 뜻한다.

가. 2.5% 알지네이트 비드의 중금속 흡착 능력 확인

MP-AES를 이용한 2.5% 알지네이트 비드의 중금속 흡착 능력 확인 실험의 결과는 [Fig. 22] 와 [Fig. 23]과 같다.



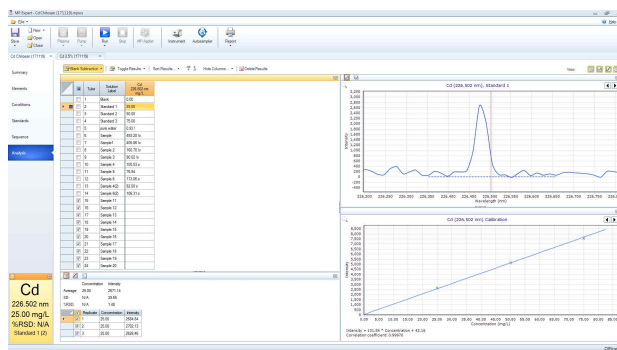
[Fig. 22] MP Expert program

Tube	Solution Label	Cd 226.502 nm mg/L
1	Blank	0.00
2	Standard 1	25.00
3	Standard 2	50.00
4	Standard 3	75.00
5	pure water	0.47 !
6	Sample	401.09 lo
7	Sample 1	200.74 lo
8	Sample 2	75.07 !
9	Sample 3	29.68 !
10	Sample 4	30.84
11	Sample 5	20.20
12	Sample 6	29.23
13	Sample 4(2)	32.33
14	Sample 6(2)	28.72

[Fig. 23] Concentration of Cd aqueous solution

나. 키토산 비드의 중금속 흡착 능력 확인

MP-AES를 이용한 키토산 비드의 중금속 흡착 능력 확인 실험의 결과는 [Fig. 24] 와 [Fig. 25]과 같다.



[Fig. 24] MP Expert program

Tube	Solution Label	Cd 226.502 nm mg/L
1	Blank	0.00
2	Standard 1	25.00
3	Standard 2	50.00
4	Standard 3	75.00
5	pure water	0.93 !
6	Sample	493.20 lo
7	Sample 1	405.86 lo
8	Sample 2	160.70 lo
9	Sample 3	90.02 lo
10	Sample 4	105.53 o
11	Sample 5	76.94
12	Sample 6	113.06 o
13	Sample 4(2)	92.00 o
14	Sample 6(2)	106.31 o

[Fig. 25] Concentration of Cd aqueous solution

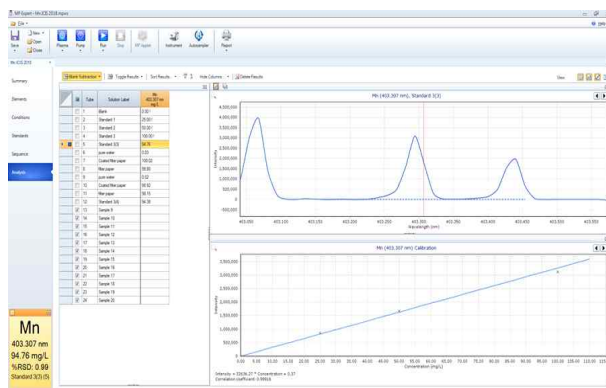
[Fig. 22], [Fig. 24]에서 2.5% 알지네이트 비드를 담갔을 경우 농도가 401.1ppm에서 20.2ppm까지 감소한 것을 볼 수 있었고 키토산 비드를 담갔을 경우 농도가 493.2ppm에서 76.9ppm까지 감소하였음을 볼 수 있었다. 중금속의 감소량을 보았을 때 키토산 비드가 2.5% 알지네이트 비드보다 중금속 흡착능력이 좋았다는 것을 알 수 있었다.

측정값을 통해 시간에 따라 수용액의 농도가 감소하는 것을 알 수 있었다. MP-AES는 특정한 이온의 농도를 측정하는 것이므로 수용액의 농도의 감소는 이온량의 감소를 뜻한다. 이 결과로 우리는 중금속 흡착 또한 염분 흡착과 같이 이온 치환의 방식으로 이루어짐을 알 수 있었다.

또한 두 비드 모두 측정값이 갑자기 증가하는 것을 볼 수 있는데 이것은 비드가 물질을 흡착하기도 하지만 다시 뱉어내기도 한다는 특성 때문이라고 생각하였다. 하지만 일반적인 경향성에 벗어나므로 실험을 다시 진행해보기로 하였다. 키트에 두 비드를 함께 사용할 경우 중금속 흡착 효율이 좋아질 것으로 예상된다.

7. 거름종이 코팅 막의 흡착 능력 확인

거름종이에 한외 여과막의 코팅 방식을 도입하여 미세막을 제작해 보았다. 제작된 막의 흡착 능력을 확인하기 위해 Mn 100ppm 수용액을 이용하여 막을 통과 시켜 보는 실험을 진행하였다. 코팅된 막과 코팅하지 않은 막 총 2개의 막의 흡착능력을 MP-AES를 이용하여 측정하였으며, 분석 프로그램으로는 MP Expert를 사용하였다. [Fig. 26]는 MP-AES로 측정한 중금속 농도의 실제 값을 보여주는 사진이다. 이때 pure water는 증류수, Coated filter paper는 코팅된 막, filter paper는 코팅되지 않은 막을 의미하며 standard3(3), standard3(4)는 검정 곡선에 사용된 standard3 수용액을 의미한다.



[Fig. 26] MP Expert program

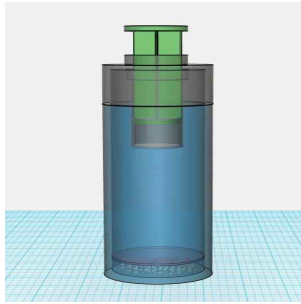
Tube	Solution Label	Mn 403.307 nm mg/L
1	Blank	0.00 !
2	Standard 1	25.00 !
3	Standard 2	50.00 !
4	Standard 3	100.00 !
5	Standard 3(3)	94.76
6	pure water	0.03
7	Coated filter paper	100.02
8	filter paper	99.80
9	pure water	0.02
10	Coated filter paper	98.92
11	filter paper	98.15

[Fig. 27] Concentration of Mn aqueous solution

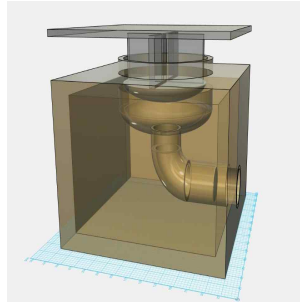
[Fig. 27]에서 볼 수 있듯이 Coated filter paper와 filter paper를 이용한 경우 각각의 Mn 농도는 차이가 거의 없는 것으로 관찰 되었다. 따라서 1차 코팅만 실시하였을 시에는 코팅의 효과가 나타나지 않는다는 결론을 얻어내었다.

8. 음용수 제조 키트의 제작

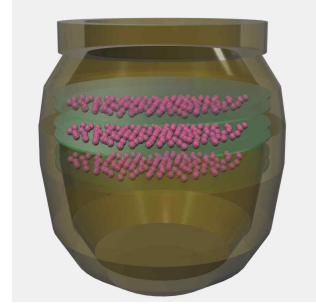
음용수 제조 키트를 제작하기 위한 도안을 구상해보았다. 구상해본 도안은 다음과 같다.



[Fig. 28] Plan of kit 1



[Fig. 29] Plan of kit 2



[Fig. 30] Plan of kit 3

가. 키트 1

[Fig. 28]은 휴대용으로 간편하게 들고 다닐 수 있게 제작하였다. 병의 크기는 반지름 3.5cm, 높이는 22cm이다. 물을 넣는 곳에 필터를 설치하였다. 물을 마실 때에는 필터가 있는 빈 원통에 넣은 후 피스톤으로 물을 밀어내어 필터로 물이 지나가게 하였다. 필터를 지나간 물은 병에 저장되게 된다. 알지네이트 비드는 물을 저장할 때 병 아래에 두어 저장된 물과 계속 접촉될 수 있도록 하였다.

나. 키트 2

[Fig. 29]는 가로 30cm 세로 30cm 높이 20cm인 박스에 펌프가 있어 사람이 올라가서 뺄 수 있게 제작하였다. 물을 처음 집어넣는 곳의 크기를 크게 하여 한 번에 많은 양을 넣을 수 있게 구상하였다. 물이 필터를 지나가는 공간의 크기를 작게 하여 압력이 크게 작용하도록 하였다. 알지네이트 비드는 물이 저장되는 곳에 넣도록 구상하였다.

다. 키트 3

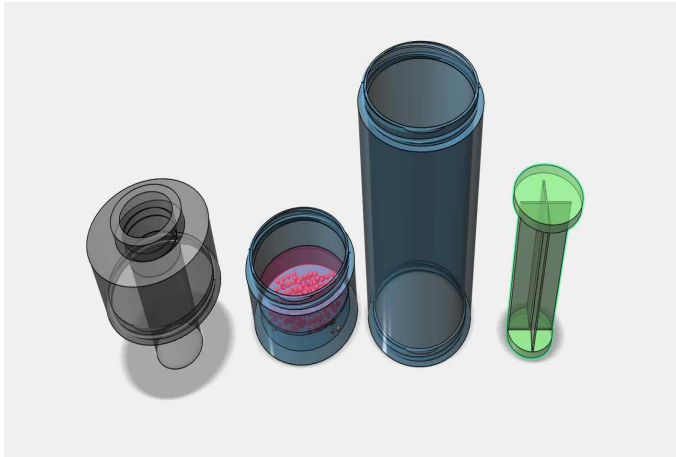
[Fig. 30]은 항아리 속에 3개의 층을 나누어 층 사이사이에 알지네이트 비드가 위치하도록 구상하였다. 이를 통해 음용수를 저장할 때 발생할 수 있는 곰팡이, 세균 등을 알지네이트 비드를 통해 제거하도록 하였으며, 용기를 항아리로 구성하여 온도가 높은 곳에서도 물의 온도를 일정하게 유지시킬 수 있도록 구상하였다.

〈Table 10〉 Comparison of strengths and weaknesses in the kits

	키트1	키트2	키트3
장점	- 휴대용으로 들고 다니기 편하다.	- 물을 큰 힘으로 밀어낼 수 있다.	- 알지네이트 비드가 층으로 이루어져 여러 번 걸러낼 수 있다.
단점	- 알지네이트 비드를 주기적으로 교체할 방안이 없다.	- 저장 용기에서 알지네이트 비드를 건져낼 방법이 없다.	- 틀과 항아리가 한 세트라서 가격이 비싸다. - 알지네이트 비드를 주기적으로 교체할 방법이 없다.

9. 보완된 음용수 제조 키트의 제작

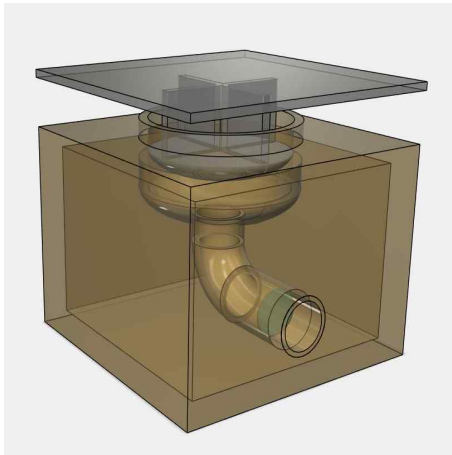
〈Table 10〉에서 키트1, 키트2, 키트3의 장단점을 분석한 후 키트들의 단점을 보완하고 장점을 융합하여 휴대용 키트와 거치용 키트를 제작하였다. 막 실험이 종료된 후 구상한 키트를 3D 프린터를 이용하여 실체화 시켜보려고 한다.



[Fig. 31] Plan of portable kit



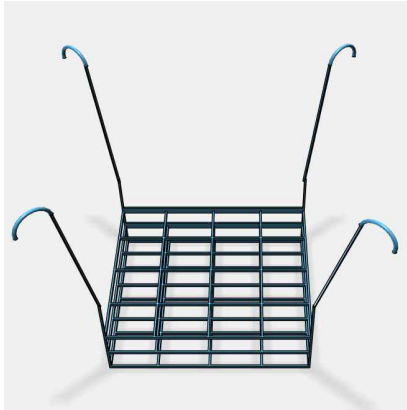
[Fig. 32] Plan of portable kit



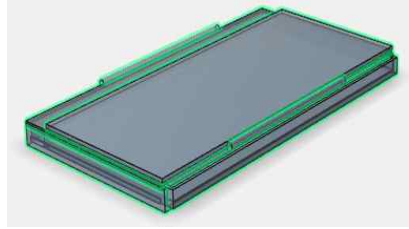
[Fig. 33] Plan of part of pushing water



[Fig. 34] Plan of storage



[Fig. 35] Plan of frame



[Fig. 36] Plan of Folded storage container



[Fig. 37] Storage container

가. 휴대용 키트

휴대용 키트는 키트 1의 단점 중 알지네이트를 교체할 수 없다는 점을 해결하기 위해 [Fig. 31]와 같이 분리하여 쓸 수 있게 제작하였다. 알지네이트가 담겨있는 공간은 개폐가 가능하며 물이 자유롭게 드나들 수 있는 막을 사용하기로 하였다. 또한 알지네이트 비드를 편하게 교체할 수 있도록 물통의 아래 부분을 돌려서 열고 닫을 수 있게 만들었다.

나. 저장용 키트

저장용 키트는 키트 2의 막을 사용하는 시스템과 키트 3의 저장 시스템을 융합하였다. 키트 2와 키트 3의 단점을 보완하기 위해 알지네이트 비드를 넣을 수 있는 막으로 이루어진 알지네이트 비드 저장용기를 만들었다. 또한 비드 저장용기를 쓰지 않을 때 저장용기가 차지하는 부피를 줄이기 위해 저장용기를 밀고 접어서 쓸 수 있게 만들었다. 또한 비드 저장용기를 놓을 수 있는 틀을 만들어 틀을 기존 집에서 쓰는 항아리에 자유롭게 사용할 수 있게 만들었다.

V. 결론

본 연구에서 다양한 조건을 변화시킨 알지네이트 비드의 효율을 확인하고 개발도상국 및 고립된 해안가 가정에서 해수를 쉽게 담수화할 수 있는 키트 혹은 장비를 제작하려고 하였다. 본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 알지네이트 비드의 염분 흡착 원리를 알아보기 위하여 SEM-EDS를 이용하여 원소 분석을 진행한 결과 알지네이트

비드의 염분 흡착 원리를 알게 되었다. 알지네이트 비드의 Ca^{2+} 이 해수(소금물)의 NaCl 용액의 Na^+ 와 치환되는 원리로 염분을 흡착한다.

- 알지네이트 비드의 단면을 SEM을 이용해 촬영해본 결과 여러 개의 구멍이 뚫려있는 모습을 관찰하였고, 알지네이트 비드가 다공성을 가지고 여러 물질을 흡착할 수 있다는 사실을 확인하였다.
- 알지네이트 비드의 염분흡착 능력 확인 실험 결과 NaCl 용액의 농도가 24,000ppm까지 떨어지는 것을 확인하였다. 하지만 사람이 마실 수 있는 음용수의 경우 NaCl 의 함량이 매우 적어야하기 때문에 알지네이트 비드만으로는 음용수를 만들 수 없다고 생각하였고, 이에 따라 다른 정수막을 이용하는 것에 대해 논의한 결과 알지네이트 비드와 더불어 한외 여과막에 코팅을 하여 보조적인 필터로 RO필터를 이용하기로 하였다. 보조 필터를 이용할 때 매우 큰 압력이 필요한데 최소한의 힘을 이용하여 막의 효과를 나타낼 수 있는 방법에 대해 생각해 보기로 한다.
- 알지네이트 비드의 염분흡착 능력 확인 실험에서 알지네이트 비드를 20분 간격으로 교체해 주었던 실험에서 가장 높은 흡착율을 보였다. 원인으로 표면적, 시간, 알지네이트 비드의 양을 생각해보았고 탐구해보기로 하였다. 또한 알지네이트 비드를 해수에 담가놓는 시간과 1L의 해수를 담수화 할 때 얼마나 많은 양의 알지네이트 비드가 필요한가에 대한 실험을 진행해보기로 하였다.
- 알지네이트 비드는 곰팡이 성장 억제 효과 있으며 대장균에 대한 항균 효과가 있는 것을 실험을 통해 확인하였다. 이에 따라 식수의 기준이 되는 대장균을 제거하는데 이용하기로 하였다. 결과적으로 키토산 비드는 해수담수화 키트 혹은 장치를 이용하여 생산한 담수를 보관할 때 서식할 수 있는 곰팡이를 방지하고 잔여 세균을 제거하는데 이용하기로 하였다.
- 키토산의 항균기능은 양이온화 된 아미노기($-\text{NH}_3^{3+}$)에 의해 발생하는 것으로 알려져 있다. 양이온화 된 아미노기와 미생물의 세포벽을 구성하는 인지질 등의 마이너스 전하 간 이온결합이 일어난다. 그 결과 세포막 조직이 파괴되고 그로 인해 세포내의 원형질이 누출되어 미생물이 죽게 된다. 키토산의 양이온이 미생물에 접촉될 수 있는 한 항 미생물 효과는 지속된다. 키토산의 이러한 성질 때문에 키토산 비드 주변에만 대장균이 생장하지 않은 것으로 보인다.
- 염분 흡착 이후의 비드를 관찰하여 보았을 때, 염분 흡착 전 비드보다 탄성이 떨어진 것을 알 수 있었고, 손으로 작은 압력을 가해도 쉽게 터지는 모습을 볼 수 있었다. 특히 pH를 달리 한 pH4, pH10 비드의 경우에서 이러한 현상을 관찰할 수 없었고, pH 비드는 재사용이 어려울 것이라는 결론을 내렸다.
- 중금속 흡착 실험 결과 키토산 비드와 2.5% 알지네이트 비드 모두 중금속 흡착 능력이 충분한 것으로 나타났다. 키토산 비드는 항균효과 뿐만 아니라 중금속도 있음을 확인하였다.
- 거름종이를 한외여과막의 코팅 방식을 이용하여 코팅해본 결과 측정 된 Mn의 농도는 코팅 전, 후에 거의 동일한 것을 [Fig. 27]를 통해 알 수 있었다. 따라서 1차 코팅만 실시하였을 시에는 코팅의 효과가 매우 미미하다는 결론을 내렸다. 실제 흡착에 사용될 경우에는 여러 번의 코팅과정을 거쳐야 할 것이라고 예상하였다.

VI. 참고문헌

- [1] 강하린 (2016). 환경친화적 키토산-알지네이트비드를 이용한 항균활성. 석사학위논문. 전남대학교.
- [2] 두산백과 (2015). 해수담수화.
<http://terms.naver.com/entry.nhn?docId=1162075&cid=40942&categoryId=32335>
- [3] 문유진 (2001). 친수성 공중합체를 이용한 역삼투막 제조에 관한 연구. 석사학위논문. 중앙대학교.
- [4] 안기래 (1998). 키토산/알지네이트 이온 복합체를 이용한 생체 흡수성 봉합사의 제조. 석사학위논문. 전남대학교.
- [5] 우윤환, 주창업. (2011). 기능화된 실리카 비드를 이용한 수용액상의 중금속 이온의 제거공정에 대한 모사 연구. 청정기술, 17(2), 150-155.
- [6] 이용환 (2009). 기능성 분리막 제조 및 분리투과특성 연구. 박사학위논문. 한양대학교 대학원.
- [7] 이진영 (2006). 황성탄과 알지네이트로 제조한 비드에 의한 폐놀과 구리의 흡착. 박사학위논문. 전남대학교.
- [8] 이호정 (2014). RO(역삼투)를 이용하는 산업용수 시설의 수처리 최적화. 석사학위논문. 고려대학교 대학원.

- [9] 정광오 (2010). 주사전자 현미경에서의 왜곡된 이미지 향상에 관한 연구. 석사학위논문. 서울과학기술대학교.
- [10] 정문현 (2010). SEM-EDS를 이용한 산업폐기물과 고형연료의 무기성분 규명. 석사학위논문. 한서대학교.
- [11] Agilent (2015). 4100 MP-AES.
<https://www.agilent.com/en/products/mp-aes/mp-aes-systems/4100-mp-aes>
- [12] 두산백과 (2017). 역삼투법.
<http://terms.naver.com/entry.nhn?docId=1221753&cid=40942&categoryId=32335>
- [13] KOREA SCIENTIFICS(주)한국과학. 염도센서
http://www.koreasci.com/product/detail.html?product_no=4184&cate_no=31&display_group=1
- [14] 위키백과(2018). 흡착. <https://ko.wikipedia.org/wiki/%ED%9D%A1%EC%B0%A9>
- [15] 김정은(2014). 수처리용 분리막 생물반응기에서 막 오염 저감을 위한 정족수감지 억제 미생물이 고정화된 코팅 비드의 제조. 석사학위논문. 서울대학교 대학원.

Ⅰ 연구진 Ⅰ

이승민 (Seungmin Lee, 인천진산과학고등학교, seung6706@naver.com) 주저자, 교신저자

김나현 (Nahyun Kim, 인천진산과학고등학교, rgb753aa@naver.com) 공동저자

정유정 (Yoojeong Jeong, 인천진산과학고등학교, wjddbwd2855@naver.com) 공동저자

신지원 (Jiwon Shin, 인천진산과학고등학교, tllswdnjs122@naver.com) 공동저자

배지우 (Jiwoo Bae, 인천진산과학고등학교, jimill02@daum.net) 공동저자

지도교사 : 박인숙 (Insuk Park, 인천진산과학고등학교, dltmf0730@ice.go.kr)

메조다공성 실리카 내에 가두어진 금 나노 촉매의 합성과 이를 이용한 일산화탄소 촉매 산화 반응

서동희 · 강유현 - 세종과학예술영재학교

Synthesis of Gold Nanocatalysts Confined in Mesoporous Silica and their use in Catalytic Oxidation of Carbon Monoxide

Donghee Seo · Yuhyeon Kang - Sejong Academy of Science and Arts

국문초록

본 연구에서는 나노케이지 구조를 갖는 메조다공성 실리카의 기공 내부에 금 나노입자를 가두어서, 나노입자 상호 간의 접촉을 원천적으로 차단함과 동시에, 서로 연결되어 있는 기공을 통해 반응물질이 효과적으로 나노입자 표면에 접근할 수 있도록 하여 효율적이고 안정적인 금 나노촉매를 개발하였다. 또한 합성된 촉매의 활성과 열적, 화학적 안정성을 자동차 배기가스의 대표적 독성물질인 일산화탄소의 산화 실험을 통해 평가하여, 금 나노촉매의 백금족 촉매 대체 가능성을 확인하였다.

중심어 : 금, 나노촉매, 메조다공성, 실리카, 일산화탄소

ABSTRACT

In this study, we have confined gold nanoparticles in the nanocage-structured pores of mesoporous silica to prohibit the contact of neighboring gold nanoparticles, and simultaneously to allow reactant molecules easy access to the surface of gold nanoparticles through the interconnected pores. We have also examined their catalytic activity and the thermal/chemical stability under catalytic oxidation of carbon monoxide which is a representative toxic compound of automotive emissions, and confirmed the possibility of gold nanocatalyst as an alternative to platinum group metals.

Key words : Gold, nanocatalysts, mesoporous, silica, CO

I. 서론

1. 연구 배경 및 동기

불균일 촉매는 전세계 90% 이상의 화학공정을 제어하는 필수적인 요소로서[1], 주로 금속으로 이루어진 촉매 물질은 반응에 직접 참여하지 않지만, 표면에서 반응물질과의 상호작용을 통해 활성화 에너지를 낮추어줌으로써 에너지비용을 저감하여 공정의 경제성을 높여준다. 지난 수십년간 나노과학기술이 비약적으로 발전하며 촉매 기술 또한 더욱 정교하게 심화되어 왔는데, 촉매 물질을 나노미터 크기의 입자로 만들면 반응을 일으키는 표면적이 극적으로 증대되어 적은 양의 촉매 물질로도 매우 높은 효율을 갖는 촉매를 구현할 수 있다[2]. 그러나 나노입자는 안정성이 매우 낮아서 표면의 원자들이 유기물 등에 의해 적절히 보호되지 않고 노출되어 있을 경우 인근의 나노입자와 쉽게 소결하여 더 큰 입자가 되는데, 나노촉매 입자가 반응 중에 소결될 경우 촉매의 표면적이 감소하며 촉매 활성도가 떨어지게 되고, 결국에는 촉매로서의 수명이 단축되어 촉매 비용을 증가시키게 된다[1].

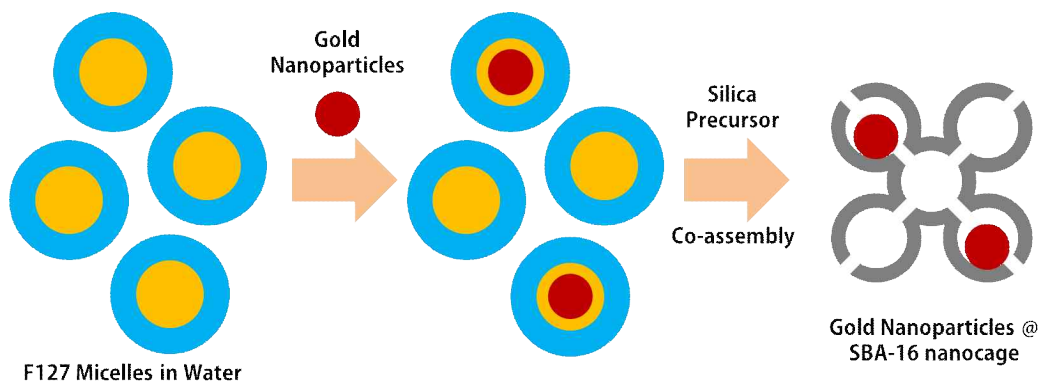
한편, 현재 자동차 배기가스 정화장치를 비롯하여 세계적으로 여러 화학 공정에 가장 널리 사용되고 있는 촉매 물질은 백금족 금속인데, 백금은 연간 채굴되는 약 210 톤 가량의 절반 이상이 이미 촉매로 사용되고 있고,

로듐의 경우 연간 채굴량 자체가 7~8 톤 정도 밖에 되지 않는다[3]. 이에 따라 가격의 급등과 자원의 고갈마저 우려되고 있어서, 백금족을 대체할 촉매의 개발이 절실히 요구되고 있는 상황이다. 이러한 가운데, 최근 백금족 촉매의 잠재적 대체재로서 금 나노촉매가 각광을 받고 있다[3]. 금은 백금족에 비해 매장량과 채굴량이 훨씬 풍부하여 안정적인 공급이 가능한데, 벌크 상태의 금은 촉매로서의 활성이 전혀 없다고 알려져 있었으나, 1987년에 Haruta 등에 의해 나노입자 상태의 금은 매우 높은 촉매 활성을 갖는다는 것이 밝혀졌고[4], 그 이래로 금 나노입자 촉매에 대한 많은 연구가 이루어져 왔다.

그러나 금의 녹는점($1,064^{\circ}\text{C}$)은 백금($1,768^{\circ}\text{C}$)에 비해 상대적으로 낮아서, 비교적 낮은 온도에서부터 입자 표면의 유동성이 증가하여 인근의 입자들과 쉽게 소결하기 때문에 고온 반응 환경에서 촉매로서의 안정성을 확보하기가 불리하다. 예를 들어, 금속 표면의 유동성이 급격히 증가하는 온도인 Tamman 온도가 금의 경우 약 396°C 정도인데, 일반적인 자동차 배기가스의 온도는 약 $400 \sim 600^{\circ}\text{C}$ 정도로, 금 나노입자의 안정성을 충분히 확보하지 않으면 자동차 배기가스 정화용 촉매로 사용하는 것이 불가능하다. 현재 개발되어 있는 금 나노촉매는 대부분 산화물로 이루어진 지지체 표면에 금 나노입자가 얹혀져 붙어있는 형태로서, 고온 상황에서 촉매의 안정성을 보장할 수 없는 구조이다. 이를 근본적으로 해결하기 위해서는 산화물 지지체의 구조가 나노입자를 그 내부에 완전히 감금할 수 있어서 나노입자 상호간의 접촉을 원천적으로 차단함과 동시에, 외부에서 유입되는 반응물질 분자들의 원활한 출입은 충분히 보장할 수 있도록, 기공이 뚫려있는 나노케이징(nanocage)의 형태를 갖고 있어야 할 것으로 예견되어 왔다[1].

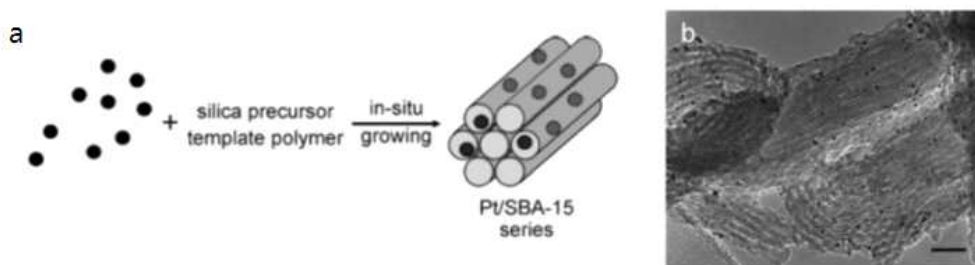
2. 연구 목적

이에 본 연구에서는 열적/화학적 안정성을 보장할 수 있는 산화물인 실리카를 매트릭스 구조체로 이용하여 금 나노 입자를 보호하고, 동시에 산화물에 기공을 확보하는 형태로 금 입자의 화학적 활용성을 유지하는 금 나노입자의 초구조체를 합성하고, 그 성능을 직접 촉매 반응을 통해 확인해보았다.



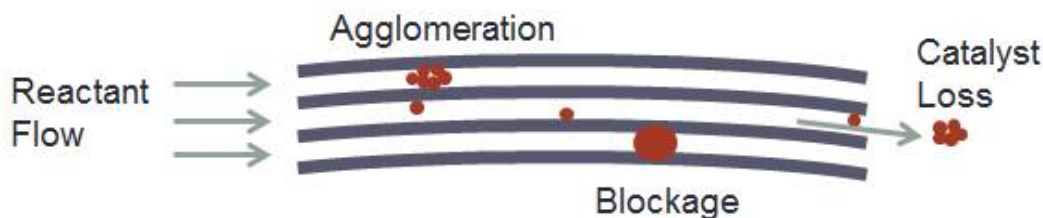
[Fig. 1] Mimetic diagram of how to cage individual gold nanoparticles in SBA-16 nanocages

나노케이징 형태를 갖는 SBA-16 메조다공성 실리카 구조체[5]의 내부에 크기 제어가 가능한 금 나노입자를 감금하기 위하여, SBA-16의 Structure Directing Agent(SDA)인 Pluronic F127 블록공중합체 마이셀(micelle)의 소수성 코어(core) 부분에 이미 합성된 금 나노입자를 삽입하여, 금 나노입자를 감싸고 있는 F127 마이셀이 SDA로 작용하도록 하는 방법으로 다공성 실리카 구조체를 합성하였고, 그 후에 고온(600°C)의 calcination 과정을 거치면서 고분자가 열분해되고 나면, 금 나노입자가 다공성 실리카 나노케이징 내에 개별적으로 감금되도록 하였다[Fig. 1].



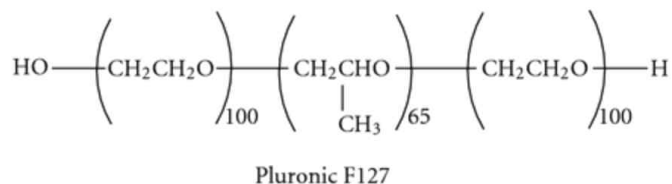
[Fig. 2] Mimetic diagram of platinum nano-catalyst using SBA-15 mesoporous silica with hexagonal channel structure(a) and Transmission electron microscope(TEM) picture(b) [6]

촉매입자 지지체로서의 메조다공성 실리카는 주로 SBA-15 등과 같은 육각 채널 구조[Fig. 2]가 많이 사용되는데[6], 이 경우, [Fig. 3]과 같이 반응 중에 반응물 유체의 흐름과 반응 온도 등의 조건에 따라 나노입자들이 뭉쳐지고, 기공을 막아서 유체의 흐름을 저하시키거나 촉매입자가 이탈하여 촉매의 성능이 저하되는 등 촉매로서의 수명과 안정성에 문제가 생길 수 있다. 바로 이런 문제를 해결하기 위하여 나노케이지 형태의 다공성 산화물 구조체를 나노촉매의 매트릭스로 사용하여야 한다.



[Fig. 3] Problem of hexagonal channel structures

정리하면, 본 연구의 목적은 촉매로서의 성질을 가지고 있는 금 나노입자를 열적, 화학적으로 안정적인 실리카 구조체 내부에 가두어둌으로써 촉매로서의 안정성을 높이는 것이다. 금 나노 입자를 Pluronic F127 마이셀에 주입한 뒤, 마이셀을 SDA로 사용하여 다공성 실리카 구조로 만듦으로써 온도가 올라가거나 촉매반응이 일어나더라도 나노 입자끼리의 소결 현상이 일어나거나 촉매의 이탈이 일어나지 못하도록 하여, 열적, 화학적으로 안정성이 뛰어난 촉매를 만들고자 한다.

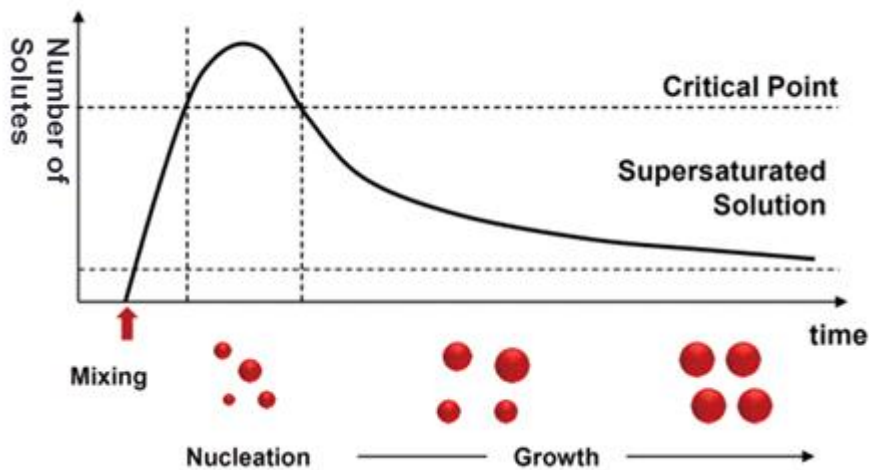


[Fig. 4] Structure of Pluronic F127

II. 이론적 배경

1. 금 나노입자의 합성 - Burst Nucleation Method

크기가 균일한 금 나노입자를 합성하는 기본적인 기작은 Burst Nucleation Method에 기반을 두고 있다. 균일한 콜로이드 입자를 만드는 것에 대한 연구는 1940년대 초반에 LaMer 등에 의해 시작되었는데, 이들은 다양한 오일의 에어로졸과 황의 하이드로졸 등에 대한 연구를 수행하다가 Burst Nucleation이라는 개념을 내놓게 되었다. Burst Nucleation Method는 콜로이드의 핵이 되는 입자가 동시에 많은 수가 생성되어 이후로는 추가적인 핵의 생성 없이 함께 균일하게 자라게 되는 개념이다[Fig. 5][7]. 대부분의 입자가 거의 동시에 생성되기 시작하기 때문에, 거의 같은 이력으로 성장하게 되므로 거의 균일하게 생성된다는 것이다. 만약 어떤 입자들이 성장하고 있는 동안 다른 입자들의 핵이 생성되기 시작한다면, 이 두 종류의 입자들은 형성의 이력이 다를 수밖에 없어 전체 콜로이드의 크기를 원하는 만큼 제어하기가 매우 어려울 것이다[8]. 즉, 핵이 되는 입자의 형성과 성장의 과정을 시간적으로 분리하여 균일한 나노입자를 합성하는 방법이라고 이해할 수 있다. 현재 알려져 있는, 금 나노입자를 포함한, 많은 콜로이드 나노입자의 합성법이 Burst Nucleation Method에 기반하고 있다. 일반적으로 이 합성법에는 이온의 형태로 입자의 원자를 제공해주는 금속의 염과, 이온이 원하는 시기에 환원되어 핵으로 생성되도록 도와주는 reducing agent, 그리고 형성된 입자의 표면을 감싸서 보호해주는 capping agent 등이 필요하다. 본 연구에서는 borane tert-butylamine complex를 reducing agent로, oleylamine을 capping agent로 사용하여 금 나노입자를 합성하였다.



[Fig. 5] Concept map of Burst Nucleation Method

2. 메조다공성 실리카의 형성 기작

1992년도에 Beck 등에 의해 고도로 정렬된 메조다공성 실리카가 처음으로 보고된 이후로[9] 다양한 종류와 구조를 가진 메조다공성 물질들이 연구되어 왔다. 메조다공성 실리카의 합성에는, 양친성 분자의 마이셀 등과 같은 집합체가 SDA로 사용되는데, 실리카와의 복합체를 만들기 위해서 SDA는 수용액 내에서 실리케이트 이온에 정전기적 인력을 작용하여 끌어당길 수 있어야 한다. SDA의 구조에 따라 메조다공성 실리카는 전혀 다른 상의 기공을 가지게 된다. 예를 들어, 같은 Pluronic 고분자 시리즈 중에서도 그 마이셀이 구형을 이루는 F127이

나 F108 같은 고분자도 있고, 원통형 마이셀을 이루는 P123이나 P105 같은 고분자도 있는데, 구형을 이루는 고분자들은 실리케이트 이온과 결합하여 체심입방(bcc) 구조의 기공을 가진 메조다공성 실리카(SBA-16)를 형성하고, 원통형 마이셀을 이루는 고분자들은 실리케이트 이온과 결합하여 2차원 육각구조의 기공 채널을 가진 메조다공성 실리카(SBA-15)를 형성하게 된다. Pluronic 고분자를 이용한 SBA 시리즈의 메조다공성 실리카는 Stucky 등에 의해 개발되었는데[5], 비이온계 양친성 고분자인 Pluronic 고분자가 정전기적 인력으로 실리케이트 이온을 끌어당기는 원리는 다음과 같다. 먼저 산성의 수용액 내에서는 Pluronic 고분자의 PEO 체인 내에 산소 원자(S^0)들이 수소 이온(H^+)과 수소결합을 하여 양전하(S^0H^+)를 가지게 된다. 한편, 산성용액에서 실리케이트 이온은 protonate 되어 양이온(I^+)의 형태로 존재하다가, 용액 내에서 염소 이온 등의 음이온(X^-)과 결합하여 overcharge 효과에 의해 음전하(XI^+)를 가지게 된다. 이에 따라 (S^0H^+)(XI^+)의 형태로 다중 결합이 일어나게 되고, 그 상태에서 실리케이트 이온들이 서로 중합하여 메조다공성 실리카 구조를 형성하게 된다. 이후 SDA는 주로 세척과 calcination 과정을 통해서 제거하여 준다.

III. 연구 방법 및 절차

본 연구는 크게 3가지 단계로 진행되었다. 촉매의 가장 기본이 될 금 나노입자를 합성하고 분석하는 과정, 금 나노입자를 이용한 다공성 실리카 구조 합성, 합성된 다공성 구조를 이용한 촉매 효율 및 온도 안정성 확인 이렇게 크게 3단계로 나뉜다. 먼저 첫 번째 실험의 경우에는 참고문헌[10]에서 사용된 방법을 이용하여 금 나노입자의 합성을 진행하고 만들어진 금 나노입자를 투과전자현미경(TEM)으로 관찰함으로써 나노입자의 크기 및 균일도를 측정하였으며, 두 번째 실험은 합성한 나노 입자를 Pluronic F127 마이셀에 주입한 뒤, 실리카 전구체와의 반응을 이용하여 다공성 실리카 구조로 합성하였다. 이 때, 구조체 내의 금 나노입자 함량에 따른 변화를 보기 위해 투입되는 금 나노입자의 양을 제어하여 보았다. 이 후에는 일산화탄소 산화 촉매로서의 활성 및 안정성을 알아보는 실험을 진행하였다.

1. 재료 및 시약

Gold (III) chloride trihydrate ($HAuCl_4 \cdot 3H_2O$, $\geq 99.9\%$ trace metals basis), borane tert-butylamine complex (TBAB, powder, 97%), oleylamine (technical grade, 70%), 1,2,3,4-tetrahydronaphthalene (tetralin, anhydrous, 99%), ethanol (reagent grade), hexane (anhydrous, 95%), Pluronic F127, tetraethyl orthosilicate (TEOS), hydrochloric acid (HCl, 37%) 등의 시약은 Sigma-Aldrich에서 구매하였으며, 별도의 처리 없이 그대로 사용되었다.

2. 금 나노입자 합성

10mL vial에 2.5mL tetralin과 2.5mL oleylamine을 섞은 후, TBAB 2.5 mmol(= 0.217g)을 넣는다. Teflon tape을 이용하여 입구를 막은 뒤 10분간 소니케이션한다. 100mL 삼각 플라스크에 0.25 g $HAuCl_4 \cdot 3H_2O$ 을 넣는다. 25mL oleylamine과 25mL tetralin를 플라스크에 넣는다. 자력 교반기를 이용해 500 rpm으로 교반한다. 모든 실험은 실온에서 진행한다. 약 10 분 후 $HAuCl_4 \cdot 3H_2O$ 가 충분히 녹으면, TBAB 용액을 재빨리 투입한다. 용액의 색깔이 급격히 변하면 1시간 동안 교반하며 기다린다. 합성한 금 나노입자 용액을 4개의 50 mL conical centrifuge tube에 나눠담고 에탄올로 가득 채워 4000 rpm으로, 10분간 원심 분리한다. 상층부의 투명한 용액을 제거해주고 하부의 금 나노입자를 다시 100mL hexane에 분산하여 시약병에 보관한다.

3. TEM 시편 준비 및 최대 흡광 파장 측정

TEM grid(Formvar/Carbon Film, 300 mesh, Copper) 위에 금 나노입자 용액 0.01 mL을 떨어뜨린 후에 상온에서 천천히 건조하여 TEM 시편을 얻는다. [Fig. 6] 금 나노 입자를 합성한 용액을 희석하여 UV-vis를 찍는다.



[Fig. 6] Preparation process of TEM specimen

4. 금 나노입자가 주입된 마이셀의 준비

30mL의 물에 F127 1.4g을 넣고 교반하여 충분히 녹인다. 이 후, 합성해둔 금 나노입자 헥세인 용액 0.5mL을 F127 수용액에 넣고 소니케이션하여 균일하게 분산된 금 나노입자 수용액 [Fig. 7]을 얻는다.



[Fig. 7] Colloidal solution of Gold Nanoparticles

5. 동결 건조로 금 나노입자/F127 파우더 제작

금 나노입자의 분산 수용액은 마이셀 내부에 나노입자와 함께 헥세인을 포함하고 있는데, 이대로 메조다공성 실리카를 합성하게 되면 메조다공성 실리카의 기공의 크기가 커지고, 이에 따라 금 나노입자의 안정성을 저하시킬 수 있으므로, 이를 막기 위해 수용액 전체를 완전히 건조시킴으로써 헥세인을 제거한다. 이 때 금 나노입자를 포함한 마이셀의 구조가 최대한 손상되지 않게 하기 위해 동결건조법을 이용하여 안정적으로 건조한다.

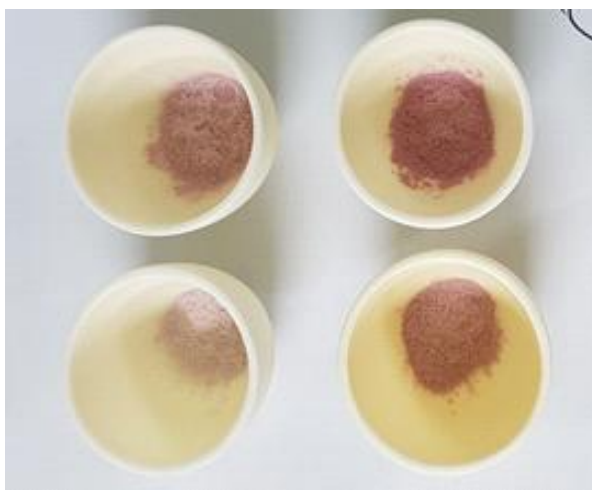
6. 금 나노입자/메조다공성 실리카 구조체 합성

동결건조법을 이용하여 제작한 파우더와 F127 파우더를 각각 0.125g/0.375g, 0.25g/0.25g, 0.375g/0.125g, 0.5g/0g의 비율로 혼합하여 준비한다. 1.6M HCl이 되도록 37% HCl 1.38mL을 증류수 8.618g에 희석한다. 같은 용액을 4 vial에 각각 준비한다. 만든 용액에 혼합된 파우더를 각각 넣어주고 충분히 녹여준다. 파우더가 모두 녹았다고 판단되면, TEOS 각 1.13mL을 첨가하여 약 15분간 stirring 해준다. 이후 25℃ 상온 상태에서 48시간 이상 보관하면, [Fig. 8]과 같은 자주색 침전이 생겨있는 것을 확인할 수 있는데 이것이 금 나노입자와 메조다공성 실리카의 구조체이다. 48시간 경과 후 용액에서 침전물을 걸러준다. 깔때기에 거름종이를 놓고 거른 뒤 증류수 100 mL와 에탄올 100 mL를 이용하여 반복적으로 세척을 해준다. 이후 이 침전물을 상온에서 다른 이물질이 들어가지 않도록 실온에서 건조시킨 후, [Fig. 9]와 같이 건조된 파우더를 600℃에서 4시간 이상 calcination하여 내부에 남아있는 고분자를 열분해시켜 제거해주면 최종적으로 다공성 실리카와 금 나노입자만 남아있는 나노촉매가 완성된다.

[Fig. 8]에서 보이는 것과 같이 투입된 금 나노입자의 양에 따라 결과물 색깔의 짙은 정도가 다르게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 각각 샘플을 금 나노입자의 양이 적은 것부터 많은 것의 순서로 각각 Gold-Cat-1, Gold-Cat-2, Gold-Cat-3, Gold-Cat-4로 부르기로 한다.



[Fig. 8] Synthesized and precipitated Gold Nanoparticles and Mesoporous silica structures



[Fig. 9] Powder of Gold Nanoparticles and Mesoporous silica structures in Aluminum crucible for calcination

7. 일산화탄소의 촉매 산화 실험

새롭게 합성된 금 나노촉매의 촉매 활성과 안정성의 확인을 위하여 촉매에 일산화탄소와 산소, 헬륨의 혼합 기체를 통과시키며 온도를 바꾸어가며 일산화탄소의 변환률을 측정하였다. 이때, 헬륨, 산소, 일산화탄소의 부피 조성은 각각 79%, 20%, 1%이고, 혼합 기체의 유속은 100 cc/min으로 유지되었으며, 각각의 기체 유량을 Mass Flow Controller(MFC)를 이용해 제어하였다. 촉매는 수직으로 세워진 석영관 내에 석영섬유를 이용하여 흘러내리지 않도록 고정되었고, 촉매의 온도는 전기로와 온도조절기를 통해 실온에서 500℃까지 제어되었으며, 온도 상승 시에는 안정적으로 온도를 제어하기 위해 분당 1℃의 속도로 상승하도록 하였다. 촉매를 통과한 기체는 기체 크로마토그래피 장치를 이용해 조성을 분석하여 일산화탄소와 이산화탄소의 비율을 이용해 일산화탄소

의 변환율을 측정하였다. 실험을 위한 전체 시스템의 구성은 아래 [Fig. 10]과 같다.



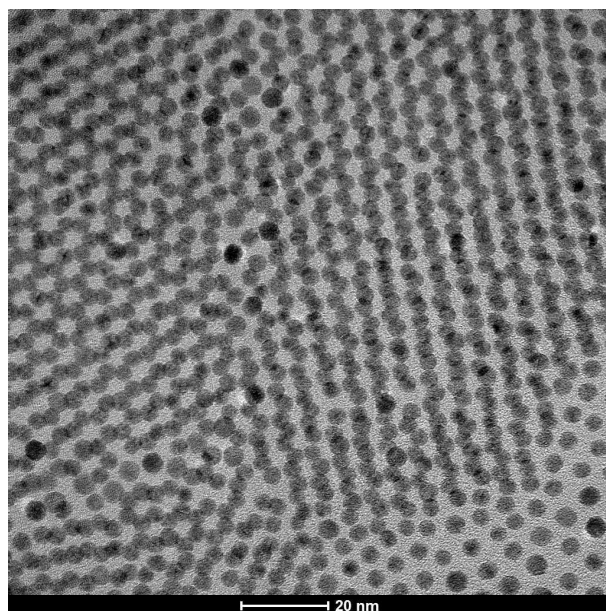
[Fig. 10] Reactor and Gas Chromatography(GC) for analysis of carbon monoxide oxidation method

IV. 연구 결과

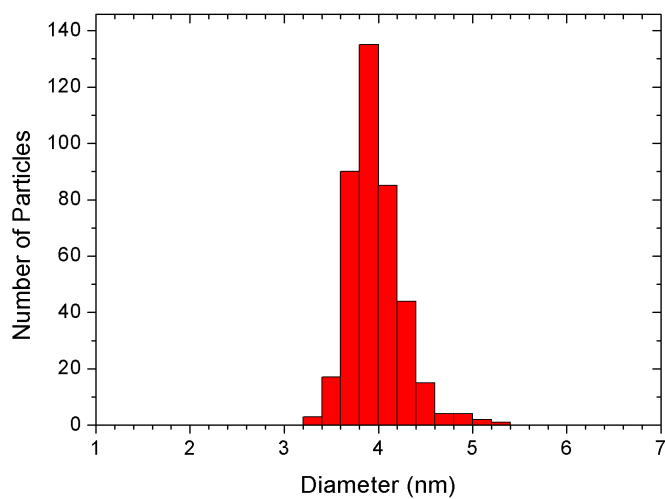
1. 합성된 금 나노입자의 분석

가. 투과전자현미경 분석

합성된 금 나노입자를 투과전자현미경(TEM)으로 관찰하여 대표적으로 아래 [Fig. 11]와 같은 이미지를 얻을 수 있었다. TEM 이미지 상에서 금 나노입자의 크기가 매우 균일한 것으로 보이는데, 이를 확인하기 위해 개별 입자 400개의 지름을 측정하여 통계 분석을 해본 결과 [Fig. 12], 평균 3.97 nm, 표준편차 0.276 nm로, 95% 신뢰한계는 0.0272 nm, 95% 신뢰구간은 3.94 ~ 4.00 nm로 나타났다.



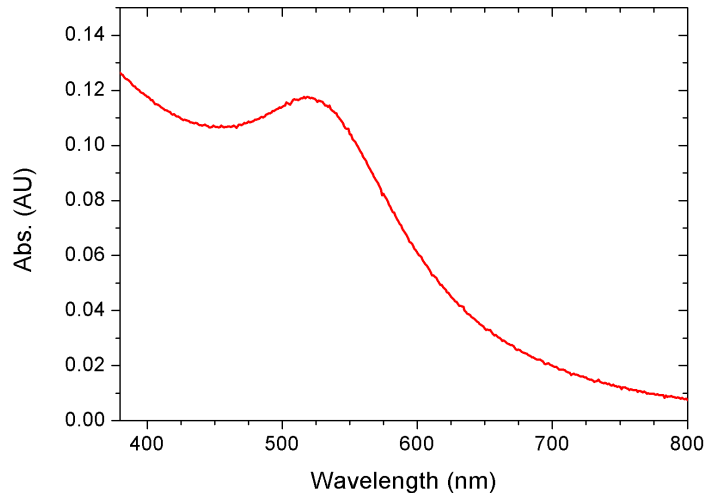
[Fig. 11] TEM Image of synthesized Gold Nanoparticles



[Fig. 12] Diameter distribution of Gold Nanoparticles analyzed by TEM

나. 흡광도 스펙트럼 분석

합성된 금 나노입자의 가시광 영역 흡광도를 측정한 결과 아래 [Fig. 13]과 같은 스펙트럼을 확인할 수 있었다.



[Fig. 13] Absorbance spectrum of synthesized Gold Nanoparticles

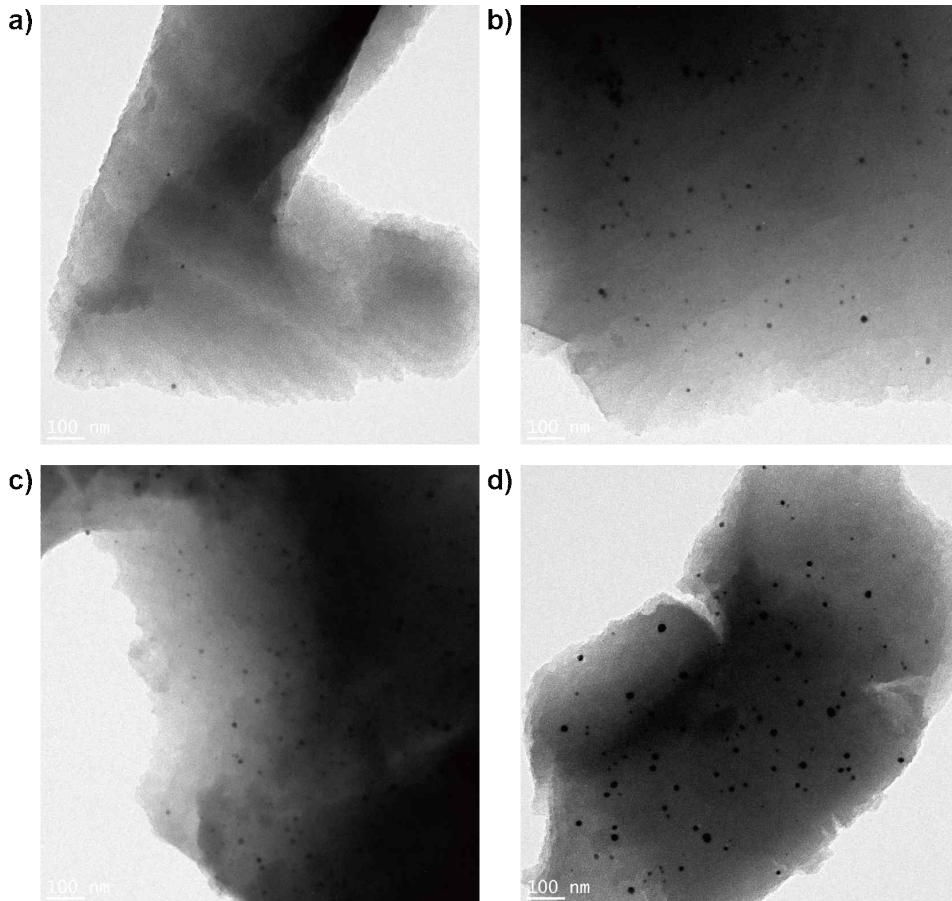
위 흡광 파장 그래프를 보면 약 520 nm 부근에서 최대 흡광 파장이 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 초록색의 가시광선 영역대의 빛을 가장 잘 흡수한다는 것이고 이에 대한 보색을 보게 되면 대략 Violet Red 또는 Burgundy Red 정도의 색깔을 띠게 된다는 것을 알 수 있는데 이는 육안으로 관찰한 결과와 일치한다. 금 나노입자는 입자 내 전자들이 집단적으로 거동하는 플라즈몬 효과에 의해 최대 흡광 파장이 결정되며, 이 때, 입자의 크기와 모양에 따라 각각 다른 흡광 스펙트럼을 갖게 된다고 알려져 있다. TEM 분석 결과와 함께 고려하면 약 4 nm의 지름을 갖는 구형 금 나노입자는 약 520 nm 파장의 빛에 플라즈몬 공진 현상을 일으켜 최대 흡광 파장을 나타내게 되고, 이에 따라 Burgundy Red 색깔을 띠게 된다는 것을 알 수 있다.

2. 합성된 금 나노입자/메조다공성 실리카 구조체의 분석

가. 투과전자현미경 분석

합성된 금 나노입자/메조다공성 실리카 구조체를 투과전자현미경으로 관찰하여 금 나노입자가 다공성 실리카 나노케이지 내에서 묻혀지지 않고 개별적으로 잘 분산되어 있는 것을 확인할 수 있었다. [Fig. 14] 투과전자현미경 관찰 시에 합성된 금 나노입자/메조다공성 실리카 구조체의 두께가 두꺼워서 투과 이미지를 얻기가 어려워 주로 구조체의 가장 자리에서 다공성 실리카의 기공과 거기에 포함된 금 나노입자를 확인할 수 있었다. 측정된 시료는 이미 600℃에서 4시간 이상 calcination 과정을 거친 것으로 투과전자현미경 관찰만으로도 새롭게 합성된 금 나노입자의 열적 안정성을 어느 정도 확인할 수 있었다. 또한 합성 시에 각각의 샘플에 투입한 금 나노입자의 양에 따라 다공성 실리카 내부에서 관찰되는 금 나노입자의 숫자도 달라지는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 전체 샘플에 비해 매우 작은 일부에 대해서만 TEM 측정을 할 수 있었기 때문에 전체 샘플에 대한 상태를 통계적으로 기술할 수는 없지만, 다른 샘플들에 비해 금 나노입자가 가장 많이 함유된 Gold-Cat-4 샘플에서는 금 나노입자의 크기가 상대적으로 큰 입자들이 자주 관찰되었는데, 이는 합성 과정에서 금 나노입자들 간의 묻혀짐에 의해 일어난 것으로 추정된다. 그러나 이 경우에도 장시간의 calcination 과정을 통과하는 동안 더 이상

의 이동이나 뭉쳐짐은 일어나지 않고 대부분 10nm 남짓의 크기에 머무르는 것으로 보아, 수용액 상에서 분산 될 때 하나의 마이셀에 몇 개의 금 나노입자가 함께 포함되면서 나타난 현상일 것으로 추측된다. 따라서 촉매 반응 측정 시, 해당 샘플의 반응성에는 다소 부정적인 영향이 있을 것으로 예상되고, 안정성에는 큰 영향이 없을 것으로 예상된다.

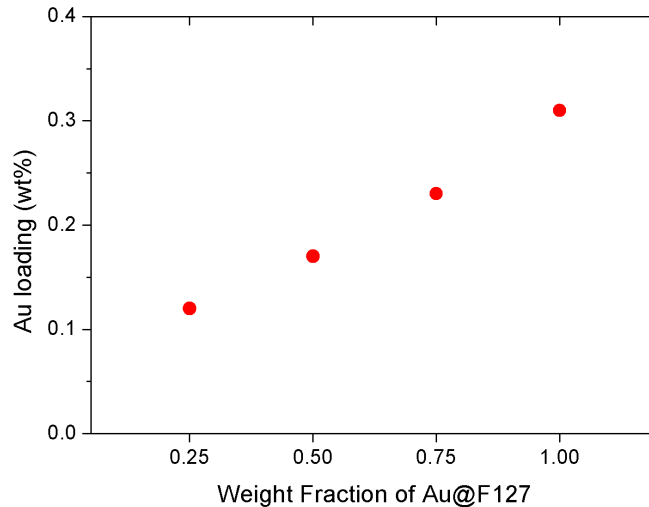


[Fig. 14] Typical TEM image of each synthesized Gold Nanoparticle and Mesoporous silica structure : a) Gold-Cat-1, b) Gold-Cat-2, c) Gold-Cat-3, d) Gold-Cat-4

나. 촉매 내 금 나노입자의 함량 분석

Inductively Coupled Plasma - Optical Emission Spectroscopy(ICP-OES)법을 이용해 합성된 금 나노입자/메조다공성 실리카 구조체 내에 금 원소의 함량이 얼마나 되는지 확인해보았다. [Fig. 15] ICP-OES는 시료 내의 원소 조성을 알기 위해, 시료를 용액에 완전히 녹인 다음, 그 이온이 플라즈마 내에서 발산하는 빛의 파장을 스펙트럼 분석하여 해당 이온의 양을 정량적으로 분석하는 방법이다. 본 실험에서는 시료에 실리카와 금이 포함되어 있으므로, 이들을 용액 내에 완전히 녹여 이온화하기 위해 측정에 앞서 불산과 왕수를 이용하여 시료를 전처리 하였다. 메조다공성 실리카를 합성하기 위해 사용되었던 SDA 중에 동결건조하여 제조된, 금 나노입자를 포함한 F127 마이셀(Au@F127)의 질량의 비율에 따라 해당 샘플 내의 금 원소의 함량을 조사해보니 각각 0.12 ~ 0.31 wt%의 금을 포함하는 것으로 나타났고, 구간 내에서 비교적 선형적인 변화를 확인할 수 있었다.

이는 금 나노입자의 수용액 내 농도를 조절함으로써 효과적으로 촉매 내의 금 함량을 제어할 수 있음을 의미한다. 또한, 0.5 wt%에도 미치지 않는 적은 양임에도 불구하고 TEM 분석 결과 금 나노입자가 메조다공성 실리카 내부에서 높은 개수 밀도로 관찰되는 것을 고려할 때, 금 나노입자가 메조다공성 실리카 내에서 특정 영역에 밀집되지 않고 고도로 분산되어 있다는 것을 알 수 있다. 이는 적은 양의 금을 사용하더라도 높은 효율을 낼 수 있는 촉매를 구현할 수 있음을 의미한다.



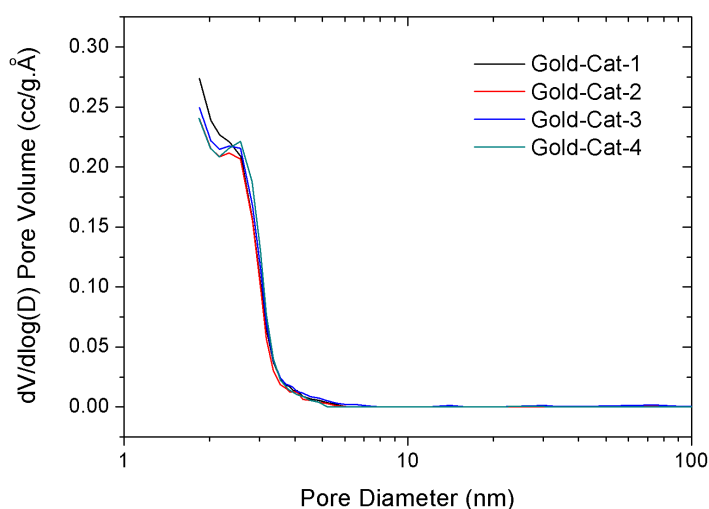
[Fig. 15] Gold content of each sample measured through ICP-OES

다. 질소 흡착법을 통한 비표면적 및 기공 부피 분석

질소 흡착법은 단위 질량의 다공성 물질의 기공 내에 흡착되는 질소 분자의 양이 질소 기체의 압력에 따라 달라지는 것을 측정한 후, 이를 여러 가지 이론적인 모델과 비교 및 근사하여 물질의 비표면적과 물질 내 기공의 부피, 그리고 기공의 크기 분포 등을 추산하는 실험법이다. 일반적으로 비표면적을 추산하는 데에는 개발자들의 이름을 딴 Brunauer-Emmett-Teller (BET) 이론을 가장 많이 사용하고, 기공의 부피나 크기분포를 알아내기 위해서는 Barrett-Joyner-Halenda (BJH) 분석법을 많이 사용하는데, 최근에는 Density Functional Theory (DFT) 분석법도 많이 이용하는 추세라고 한다. 본 실험에서는 BET와 BJH 분석법에 따른 비표면적과 기공의 부피, 기공의 크기 분포를 알아보았는데 이는 질소 흡착 실험 장치가 기본적으로 제공해주는 결과 값이기도 하다. <Table 1> 분석 결과, 샘플 내 금의 함량과 큰 상관관계가 없이 비표면적은 411 ~ 442 m²/g 정도로 평균값 기준 편차 약 5%내에서 대동소이하며, 기공의 부피도 0.053 ~ 0.058 cm³/g 정도로 마찬가지로의 결과를 보인다. [Fig. 16]에서 나타나는 것처럼, 구조체 내 기공의 크기 분포도 매우 유사한 분포를 보이는데 대부분의 기공이 3 nm 이하의 크기로 나타나고 크기가 작은 기공들의 분포가 더 크게 나타난다. 이는 기공의 크기를 고려할 때 구조체 내에 포함된 4 nm 크기의 금 나노입자가 기공을 통해서 빠져나오기가 매우 어렵다는 것을 보여주는 증거라고 할 수 있다.

〈Table 1〉 Gold content, specific surgace area, volume of pores per unit mass according to the samples

	Au Loading (wt%)	BET Surface Area (m ² /g)	BJH Pore Volume (cm ³ /g)
Gold-Cat-1	0.12	441.5	0.05769
Gold-Cat-2	0.17	424.4	0.05339
Gold-Cat-3	0.23	425.2	0.05748
Gold-Cat-4	0.31	411.5	0.05682



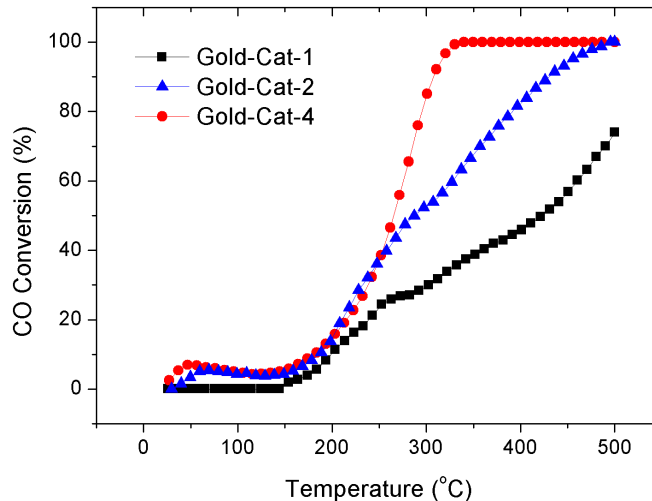
[Fig. 16] Distribution of pore volume according to the size of pores

3. 금 나노입자/메조다공성 실리카 촉매의 반응성 및 안정성 분석

가. 온도에 따른 반응성 분석

일산화탄소 산화 실험을 통해 합성된 촉매의 온도에 따른 반응성[Fig. 17]을 실험적으로 확인하여 보았다. 상온에서 500℃까지 1분에 1도씩 증가시켜가며 확인하였는데, 일산화탄소의 자발적 산화 온도가 609℃이고 금의 Tamman 온도가 396℃이기 때문에, 이를 고려하여 500℃까지 실험을 진행하였다. 90 mg의 촉매를 이용하여 1% CO와 20% O₂가 포함된 기체를 100 cc/min 으로 촉매에 통과시켜서 CO의 변환율을 측정하였는데 온도변화 실험 결과, 약 150℃이상부터 변환율이 급격히 증가하며 높은 촉매활성이 나타나는 것으로 확인되었다. 이는 백금 촉매와 유사한 수준이고, [11] Gold-Cat-4의 경우, 약 320℃ 이상에서는 주입된 CO가 모두 산화되는 것으로 나왔다. 자동차 배기가스의 경우, 일반적으로 디젤 엔진은 약 400℃, 가솔린 엔진은 약 600도 정도의 온도를 갖기 때문에 백금 촉매의 대체제로서 충분히 역할을 할 수 있을 것으로 기대된다. 온도 변화 실험의 결과, 샘플 내 금 나노입자의 함량이 높을수록 활성이 대체로 높게 나타났는데, 약 250℃ 이하의 영역에서는

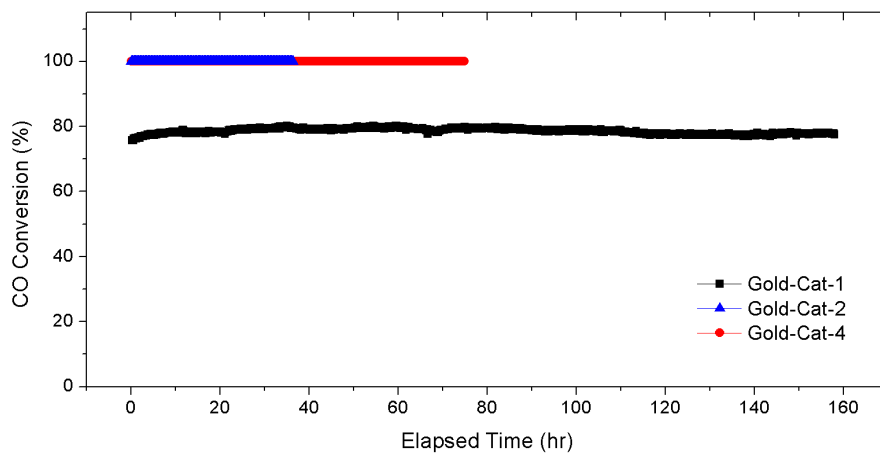
Gold-Cat-2와 Gold-Cat-4의 변환율이 거의 차이가 없거나 Gold-Cat-2가 오히려 소폭 높게 나타나는 등 전체적인 경향성에서 약간 벗어나는 듯한 결과를 보였다. 그러나 또 그 이상의 온도에서는 Gold-Cat-4가 확실히 높은 활성을 보여주어, 아직 정확한 원인은 이해하지 못하였지만, 다만 TEM 분석으로 확인한 바와 같이 Gold-Cat-4 내의 금 나노입자 크기가 상대적으로 크게 나타난 것에 원인이 있을 것으로 의심된다.



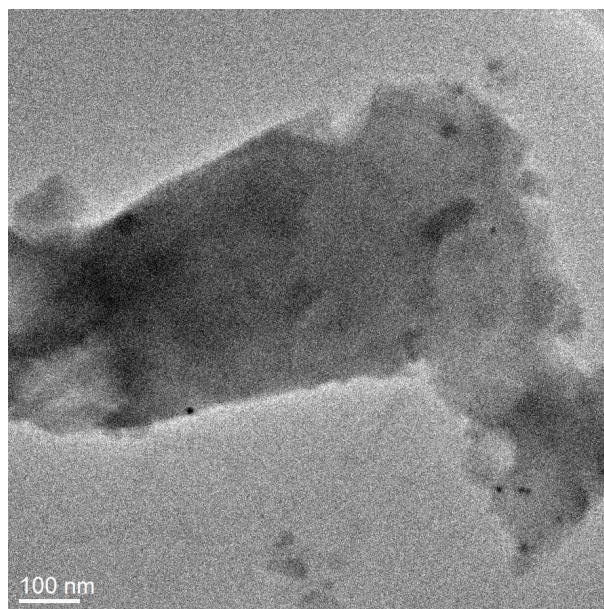
[Fig. 17] Carbon monoxide(CO) conversion rate of each sample according to the temperature (Flux of injected gases ; He: 79cc/min, CO: 1 cc/min, O₂: 20 cc/min)

나. 고온에서 반응 시간에 따른 안정성 분석

또한 일반적인 금 나노촉매의 가장 취약점이라 할 수 있는 고온 안정성을 시험하기 위해 각 샘플을 이용하여 500℃의 온도에서 촉매 반응을 유지시켜 보았다. Gold-Cat-2와 Gold-Cat-4의 경우, 위의 온도 변화 실험 결과 500℃에서 이미 100%의 변환율에 도달하여 있었고, 각각 36시간, 74시간 이상 반응을 유지시켜도 100% 변환율에 변화가 없어 [Fig. 18] 실질적인 안정성을 측정하기 어렵겠다는 판단이 들어서 500℃에서 100% 변환율을 보이지 못하는 Gold-Cat-1을 이용해 장시간 반응을 유지해보았다. 그 결과, 157 시간 이상 큰 변화 없이 변환율을 유지하였고, 처음 약 76%의 변환율로 시작해서 간헐적으로 약 80%의 변환율도 보이는 등 소폭의 변화는 있었으나, 157시간 이상 마지막 측정까지 77% 이상의 변환율을 보이며 처음의 성능에서 전혀 열화 없이 안정적으로 활성을 나타내었다. 이는 본 연구의 의도대로 금 나노입자가 나노케이지의 형태를 갖는 메조다공성 실리카 구조 내에 잘 가두어져서 서로 뭉쳐지지 않고 구조를 안정적으로 유지하고 있음을 나타낸다. 이를 확인하기 위해, 157 시간 이상의 안정성 시험을 진행한 Gold-Cat-1 샘플을 회수하여 다시 TEM으로 분석하여 보았더니, [Fig. 19]과 같이 반응 전의 이미지와 큰 차이 없이 구조가 안정적으로 유지되어 있는 것을 확인할 수 있었다.



[Fig. 18] Carbon monoxide(CO) conversion rate of each sample according to the reaction time at 500° C (Flux of injected gases ; He: 79cc/min, CO: 1 cc/min, O2: 20 cc/min)



[Fig. 19] TEM Image of the catalyst after a long reaction at high temperature

V. 결론

균일한 크기로 합성된 금 나노입자를 Pluronic F127 고분자 마이셀의 내부에 포함시킨 후, 금 나노입자가 포함된 마이셀을 SDA로 사용하여 메조다공성 실리카 구조체를 합성하였다. 그 결과 메조다공성 실리카 내에 가두어진 금 나노입자 촉매를 얻을 수 있었고, 금 나노입자의 농도를 조절하여 촉매 내 금 함량을 효과적으로 제어할 수 있었다. 뿐만 아니라 금 나노입자들이 크게 뭉쳐지거나 밀집되지 않고 메조다공성 실리카 내부에서 매우 잘 분산되어 있는 것을 TEM을 통해 확인할 수 있었다. 그리고 일산화탄소 산화 실험을 통해 금 나노촉매가 백금족 촉매에 비해서 뒤지지 않는 활성을 갖는다는 것과 고온 환경에서 촉매가 열적/화학적 안정성과 높은 활성을 장시간 유지하는 것을 확인하였다. 이러한 촉매 제조기술을 활용하면 금 나노촉매를 이용해 백금족 촉매의 수요를 대체해 나갈 수 있을 것으로 기대된다. 앞으로 사용되는 고분자의 종류나 금 나노입자 또는 메조다공성 실리카 합성법 등에 다양한 변화를 주어 더욱 효율적이고 안정적인 금 나노촉매를 제조하는 연구를 수행할 수 있을 것으로 기대한다.

VI. 참고문헌

- [1] De Rogatis et al.(2010) Embedded Phases: A Way to Active and Stable Catalysts, ChemSusChem, 3, 24-42.
- [2] Moshfegh, A. Z.(2009) Nanoparticle catalysis, J. Phys. D: Appl. Phys. 42, 233001.
- [3] Zhang, Y. et al.(2011) Gold, an alternative to platinum group metals in automobile catalytic converters, Gold Bull. 44, 145-153.
- [4] Haruta, M. et al.(1987) Novel Gold Catalysts for the Oxidation of Carbon Monoxide at a Temperature far Below 0 °C. Chemistry Letters 16, 405-408.
- [5] Zhao, D. et al.(1998) Nonionic Triblock and Star Diblock Copolymer and Oligomeric Surfactant Syntheses of Highly Ordered, Hydrothermally Stable, Mesoporous Silica Structures, J. Am. Chem. Soc. 120, 6024-6036.
- [6] Song, H. et al.(2006) Hydrothermal Growth of Mesoporous SBA-15 Silica in the Presence of PVP-Stabilized Pt Nanoparticles: Synthesis, Characterization, and Catalytic Properties, J. Am. Chem. Soc. 128, 3027-3037.
- [7] LaMer, V. K., and Dinegar, R. H.(1950) Theory, Production and Mechanism of Formation of Monodispersed Hydrosols, J. Am. Chem. Soc. 72, 4847-4854.
- [8] Park, J. et al.(2007) Synthesis of Monodisperse Spherical Nanocrystals, Angew. Chem. Int. Ed., 46, 4630-4660.
- [9] Beck, J. S. et al.(1992) A new family of mesoporous molecular sieves prepared with liquid crystal templates, J. Am. Chem. Soc., 114, 10834-10843.
- [10] Peng, S. et al.(2008) Facile Synthesis of Monodisperse Au Nanoparticles and Their Catalysis of CO Oxidation, Nano Res. 1, 229-234.
- [11] Kim, S. H. et al.(2013) Catalytic activity of Au/TiO₂ and Pt/TiO₂ nanocatalysts prepared with arc plasma deposition under CO oxidation, Applied Catalysis A: General, 454, 53-58.

Ⅰ 연구진 Ⅰ

서동희 (Donghee Seo, 세종과학예술영재학교, tommy00a@sasa.hs.kr) 주저자

강유현 (Yuhyeon Kang, 세종과학예술영재학교, yhk03819@sasa.hs.kr) 공동저자

지도교사 : 성수미 (Sumi Seong, 세종과학예술영재학교, sumiseong@gmail.com)

지도교수 : 강신현 (Shinhyun Kang, 전북대학교 양자시스템공학과, hunny@kaist.ac.kr)

Neuropeptide 호르몬의 장내 미생물 활성화에 미치는 영향

전다니엘 · 서은서 · 손명국 · 김제현 - 경산과학고등학교

Impact of Neuropeptide Hormone on Biological Activity of Microflora

Daniel Jeon · Eunseo Seo · Myeongguk Son · Jehyeon Kim - Gyeongsan Science High School

국문초록

생명체의 건강은 신경계, 내분비계, 면역계의 균형에 의해 유지된다. 최근 들어 많은 연구들에서 장내 미생물의 구성이 생명체의 면역력에 상당한 영향을 미친다는 것이 밝혀지고 있다. 따라서 본 연구의 목적은 신경전달물질이면서 호르몬인 Neuropeptide가 면역계 활성화에 영향을 미치는 또 다른 기전으로서, neuropeptide에 의한 장내 미생물군의 변화 여부에 대한 가능성을 알아보는 것이다. 이를 위하여 본 연구는 3가지 종류의 서로 다른 neuropeptide (Neuropeptide Y, Neuromedin B, Oxytocin)을 각각 3마리 쥐에게 투여하고 이를 아무것도 투여하지 않은 대조군 3마리와 비교하였다. 주사한 쥐로부터 배설물을 추출하여 nutrient broth, MacConkey와 MRS배지에 각각 접종하여, 장내 미생물들의 전체 군, 그람 음성균, 유산균 CFU를 각각 측정하였다. 또 배양한 미생물들은 16s rRNA에 대한 염기서열 분석을 시행하였다. CFU 측정 결과 총 균수와 그람 음성균 수가 Oxytocin 투여 그룹에서 가장 높았고, 유산균 수는 neuropeptide 투여 그룹이 가장 높았고, 그 다음이 Oxytocin 투여 그룹에서 유산균이 동정되었고, 특히 Oxytocin 투여 그룹에서는 staphylococcus계열 미생물이 현저히 증가하였다. 따라서 본 연구를 통해 Oxytocin 호르몬이 장내 미생물 활성화에 미치는 긍정적인 영향에 대해 확인할 수 있었다.

중심어 : neuropeptide, 장내미생물, 면역 활성화, Oxytocin, sequencing

ABSTRACT

Proper interaction among nervous, endocrine and immune system maintains life of living organism. Recent research results has found that composition of rumen microorganism has a significant impact on the immune system. Hence, in this study, our research investigated possibility that neuropeptide, a neurotransmitter and hormone, has an impact on the rumen microbial population as another mechanism affecting the activation of immune system. To do this, we put three different neuropeptides (Neuropeptide Y, Neuromedin B, and Oxytocin) respectively into each group of three rats, and compared the groups with a drug-naïve group. For comparisons, we extracted excretes and cultured them to nutrient broth, MacConkey agar, and MRS agar respectively. They were used to measure the microorganism total count, gram-negative bacteria and lactic acid bacteria. Also, 16s rRNA sequencing for the cultured microbes was done. The result of CFU measurement shows that the microorganism total count and the number of the gram-negative was highest in the Oxytocin-inoculated group, lactic acid bacteria was highest in the Neuropeptide-Y-inoculated group and second highest in Oxytocin group. Particularly, staphylococcal microorganisms increased remarkably in the Oxytocin-injected group. Therefore, the study identified the positive effect of Oxytocin hormone on the activity of the rumen microorganisms.

Key words : neuropeptide, microflora, immune system, Oxytocin, sequencing

I. 서론

인체는 여러 개의 기관계로 구성되어 있고, 이들 기관계간의 상호작용의 균형을 통해 항상성이 유지된다. 이러한 인체 항상성을 조절함에 있어 면역계와 신경내분비계는 중요한 두 개의 구성 요소로서, 이들은 서로

끊임없는 소통을 통해 복잡한 네트워크를 이루어 상호작용하고 있다. 본 연구에서는 신경계와 내분비계에서 생산 되어 작용하는 neuropeptide가 최근 이슈가 되고 있는 장내 미생물군의 생물학적 활성에 미치는 영향에 대해 분석해 보고자 한다[1].

사람뿐만 아니라, 대부분의 동물의 장내에 많은 미생물이 살고 있다. 장내에 존재하는 미생물들은 체내 소화효소로 분해되지 않은 섬유소, 전분 등의 많은 성분들을 분해시켜 영양분의 소화와 흡수를 돕는 역할을 한다. 따라서 유전적 요소 혹은 식습관 같은 환경적 요소에 의해 미생물 군의 불균형이 유발되고, 이것이 자가 면역질환 및 알레르기와 같은 다양한 면역계에 영향을 주게 된다[2]. 이때, 면역계가 신경계에 영향을 주게 되고, 결국 미생물이 신경계에 간접적으로 영향을 준 것이 된다. 그 예는, 류마티스 관절염(Rheumatoid arthritis, RA)으로, 뉴욕 대학의 다니엘 리트먼(Daniel R. Littman)이 류마티스 관절염과 장내미생물 사이의 관계에 관한 연구 결과를 발표(2013.11.5.)한 바가 있다[3]. 선행연구를 조사하며 우리는 장내미생물과 신경계의 관련성을 찾기 위해 neuropeptide를 사용하여 neuropeptide가 장내 미생물에 미치는 영향을 분석하고, neuropeptide에 의한 면역 활성 조절의 메커니즘을 탐구해보고자 한다.

우리가 사용한 neuropeptide는 Neuropeptide Y, Neuromedin B, Oxytocin로 Neuropeptide Y, Neuromedin B는 가장 일반적인 Neuropeptide이고, Oxytocin은 아직 면역활성에 대한 정보가 없어 본 연구를 통해 알아보고자 한다. 본 연구를 통해 Neuropeptide가 장내 미생물의 생물학적 활성에 영향을 줌으로써 인체 내 면역 반응 조절에 기여할 수 있다는 가설을 검증할 수 있을 것이다.

II. 이론적 배경

1. Neuropeptide Y(NY)

Neuropeptide Y는 뇌 및 인간의 자율신경계에서 신경 전달 물질로 작용하는 36-아미노산 신경펩타이드이다. 이는 시상하부에서 분비되는 여러 신경전달 물질 중 가장 강력한 식욕자극제이다. 주된 역할은 음식 섭취를 증가시키기 위한 호르몬 변화를 유발하고 신체활동을 감소시키며, 지방을 축적하려는 작용을 통해 에너지 항상성을 유지하는 것이다[4].

2. Neuromedin B(NmB)

Neuromedin B는 포유류에 존재하며, 효력이 적은 가스트린 방출 펩타이드-선호 수용체와 결합하여 G세포(가스트린 분비 세포)로부터 가스트린 방출을 자극한다.

NmB mRNA는 중추신경계와 위장관에서 발현된다. 쥐의 뇌에서는 후각 구근에서 두드러지게 발현되고 혈당, 체온, 음식 섭취, 통각 및 세포성장을 조절한다[5].

3. Oxytocin(OX)

Oxytocin은 자궁 수축 호르몬으로서 여성의 분만과정을 순조롭게 하고 모유의 생산을 돕는 매개 호르몬 역할을 한다. 임신 중에는 황체 호르몬인 프로게스테론의 영향을 받아 분비되지 않다가 분만이 다가와 출산 직전 프로게스테론의 양이 자연스럽게 줄어들면서 분비를 시작, 프로락틴(젖 분비자극 호르몬)과 함께 출산과정과 이후 여성의 육아 전반에 영향을 미친다. 또 남자에게도 분비되는데, 이를 통해 옥시토신은 자궁수축호르몬이지만 모성애를 형성하고 인간의 사회성에도 영향을 미치는 것으로 나타난다. 하지만 면역 활성에 대한 연구는 아직 이뤄지지 않아서 이번 실험을 통해 밝혀낼 것이다[6].

4. Nutrient 배지

Nutrient 배지는 증식 배지로 수육 또는 어육의 추출액을 일반적으로 사용하는 세균배지의 일종이다. 주로 부생유기영양의 세균 배양에 사용된다. 보통 시판되는 스프용 또는 특히 세균학용 추출액 0.3%에 펩톤 0.5%,

경우에 따라서는 0.5% 효모 침출물, 0.8% 식염 등을 첨가하여 pH 7 정도로 조정한 것을 기본배지로 사용한다. 여기에 한천 1.5%를 첨가하여 고형배지로 만드는 경우가 많은데, 이를 한천배지라고 한다. L. Pasteur를 비롯하여 많은 연구자들이 널리 사용하였으며 이 배지에서 발육하는 세균의 종류는 매우 많다.

5. MacConKey 배지

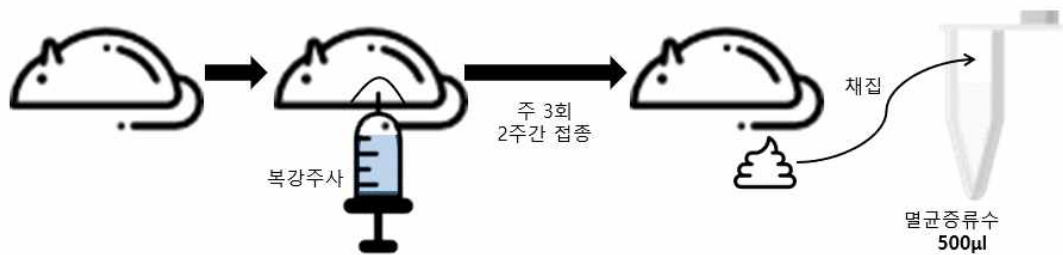
MacConKey agar 배지는 Alfred Theodore MacConkey가 개발한 선택 감별 배지로 그람 음성균과 장내 간균을 선택적으로 자라게 하며 젖당 발효균을 감별한다. 담즙산염과 크리스탈 바이올렛이 그람 양성균(젖당 발효균)의 증식을 저해한다. 특히 대장균과 같은 장내세균을 선택 분리하는 데 사용된다. 그람 양성균의 성장을 억제하여 그람 음성 세균을 선별 및 분리 할 수 있다. 배지의 pH는 7이다.

6. Lactobacillus MRS 배지

Lactobacillus 의 무성한 성장을 돕기 위해 고안된 선택적 배양 배지로 많은 경쟁 박테리아의 성장을 억제하는 나트륨 아세테이트를 함유하고 있다.

Ⅲ. 연구 방법 및 절차

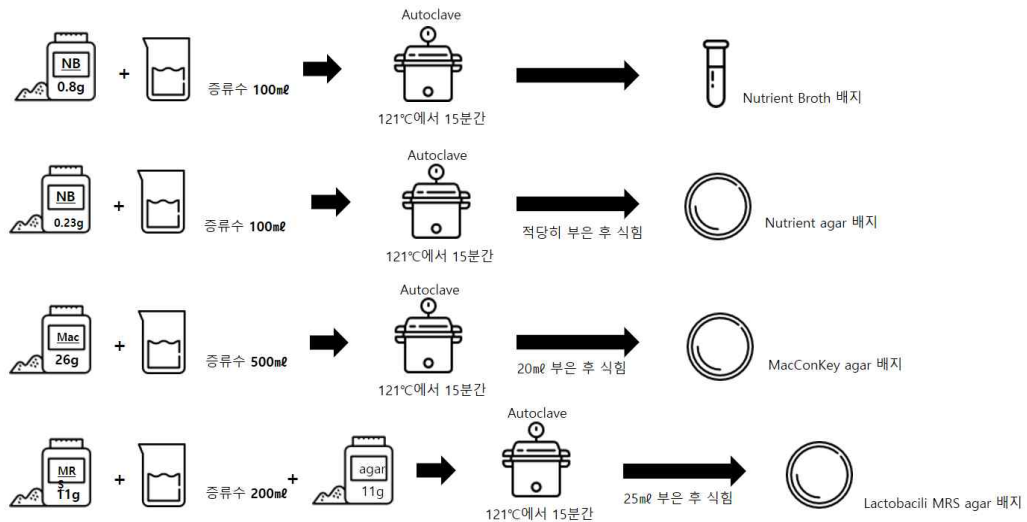
1. 실험동물 및 약물 접종



[Fig. 1] Animal and drug inoculation pattern diagram

실험동물은 6개월 된 SD rat, 수컷이고 각 실험군 당 3마리씩 실험한다. 접종 시의 약물은 Neuropeptide Y(20 μ g/ml), Neuromedin B(20 μ g/ml), Oxytocin(200 μ g/ml)이다. Neuropeptide Y, Neuromedin B, Oxytocin을 복강을 통해 각각 rat 3마리씩 2주간 1ml씩 접종하고 남은 rat 3마리는 대조군으로 접종하지 않는다. Neuropeptide를 접종한 rat의 배설물을 채취하여 멸균증류수 500 μ l와 혼합한다. 혼합한 용액은 e-tube에 보관한다.

2. 실험에 필요한 배지 제작



[Fig. 2] Medium making diagram

가. Nutrient Broth / agar 제작

- 1) 증류수 100mℓ에 Nutrient broth powder 0.8g(Nutrient agar일 경우엔 23g/L)을 넣고 교반기를 이용해 잘 섞어준다.
- 2) Autoclave에 넣어 121°C에서 15분간 멸균한 수 배지를 45°C(만질 수 있는 온도)가 될 때까지 식힌다.
- 3) 멸균된 펠트리 접시에 20mℓ씩 분주한 다음 냉장고의 4°C 칸에 보관한다.

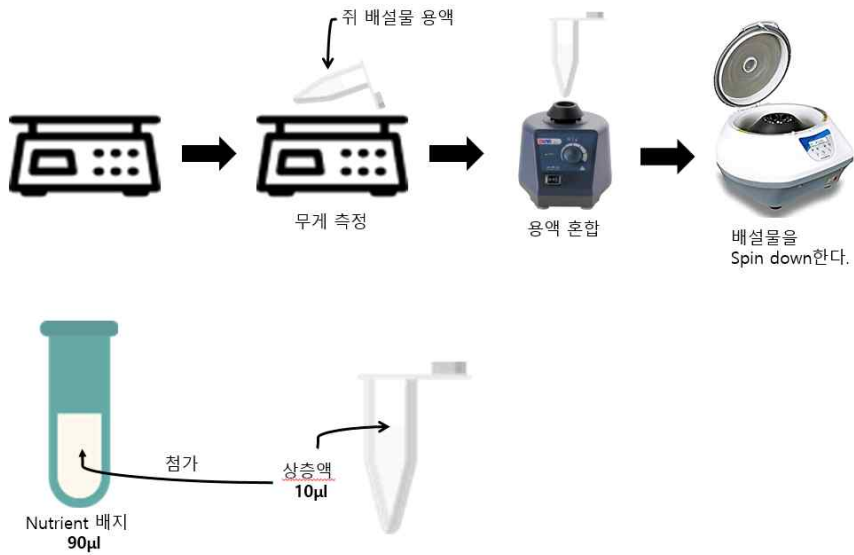
나. MacConkey agar 제작

- 1) 정제수 4L + MacConkey agar 200g or 정제수 500mℓ + MacConkey agar 26g을 교반기를 이용해 잘 섞어준다.
- 2) Autoclave에 넣어 121°C에서 15분간 멸균한 수 배지를 45°C(만질 수 있는 온도)가 될 때까지 식힌다.
- 3) 멸균된 펠트리 접시에 20mℓ씩 분주한 다음 냉장고의 4°C 칸에 보관한다.

다. Lactobacillus MRS agar 제작

- 1) 정제수 200mℓ에 해당되는 MRS 11g과 고체배지인 경우 agar powder(1.5%) 3g을 교반기를 이용해 잘 섞어준다.
- 2) Autoclave에 넣어 121°C에서 15분간 멸균한 수 배지를 45°C(만질 수 있는 온도)가 될 때까지 식힌다.
- 3) 멸균된 펠트리 접시에 20mℓ씩 분주한 다음 냉장고의 4°C 칸에 보관한다.

3. 배설물 무게 측정 및 장내미생물 배양

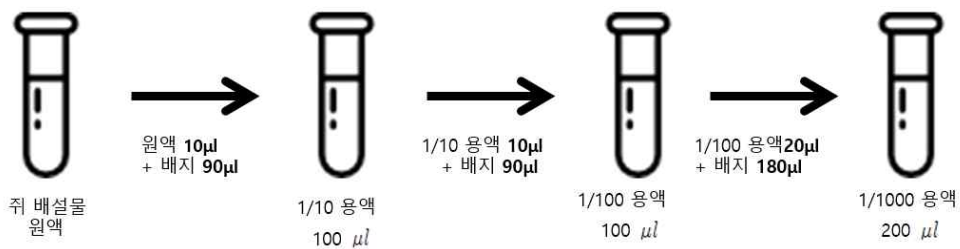


[Fig. 3] Excreta weight measuring and culturing diagram

다음과 같이 추출한 배설물의 무게를 잰다.

(배설물 무게) = (전체 무게) - (튜브 무게) - (물 무게)

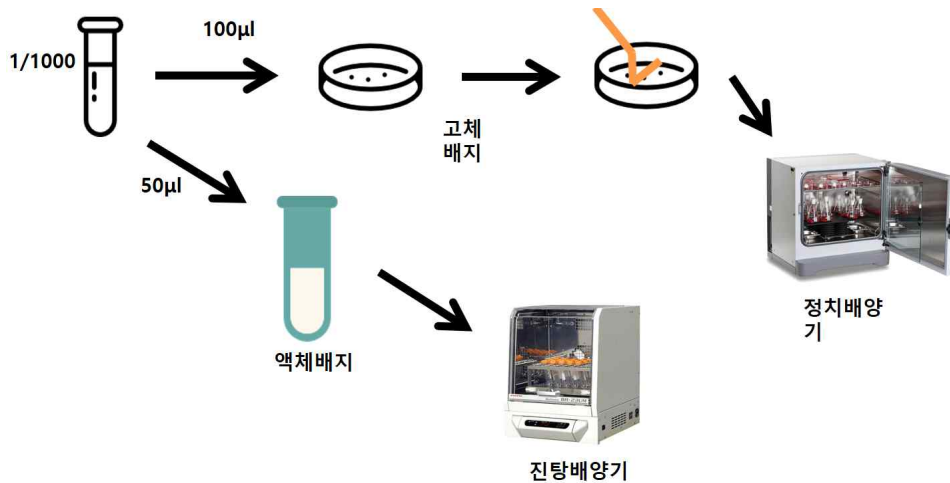
배설물 추출액을 원심분리기에 돌리고 상층액 10μl를 Nutrient broth 배지 90μl에 첨가한다.



[Fig. 4] Serial dilution diagram

혼합액의 1/10을 추출하여 다시 Nutrient broth 배지에 첨가하는 과정을 2번 더 반복하여 1/1000 희석액 200μl와 300μl만큼 만든다.(Serial dilution)

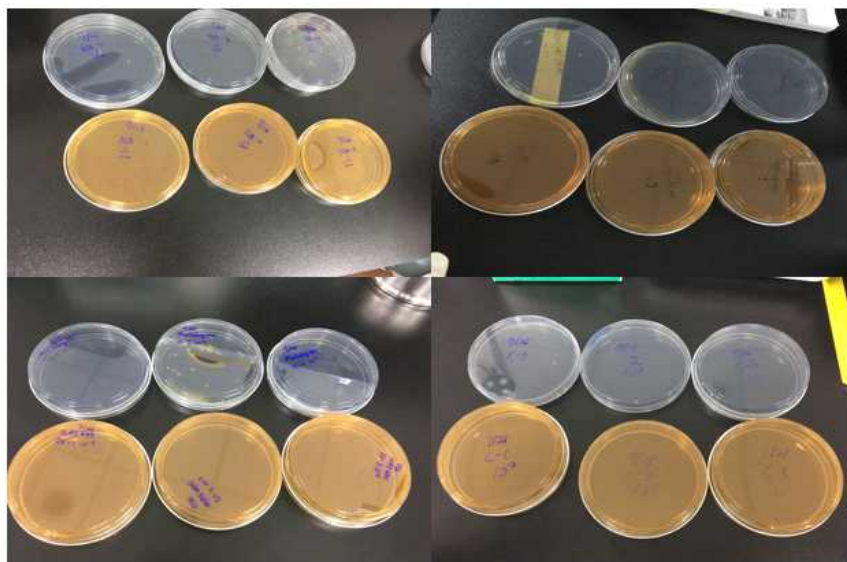
4. Nutrient, MacConkey, MRS 배지에 도말, 접종 및 배양



[Fig. 5] Inoculating to medium and culturing diagram

각각의 희석액의 50 μ l는 Nutrient broth 배지 3ml에 접종하고, 100 μ l는 고체배지에 도말 붓을 이용해 평판 도말을 한다. 이때, 대조군으로 사용할 Nutrient broth 배지만 따로 만들어둔다. Nutrient agar 배지는 24시간 동안 정식배양기(인큐베이터)에서 배양시키고 Nutrient broth 배지는 진탕 배양기에 넣어 배양한다.

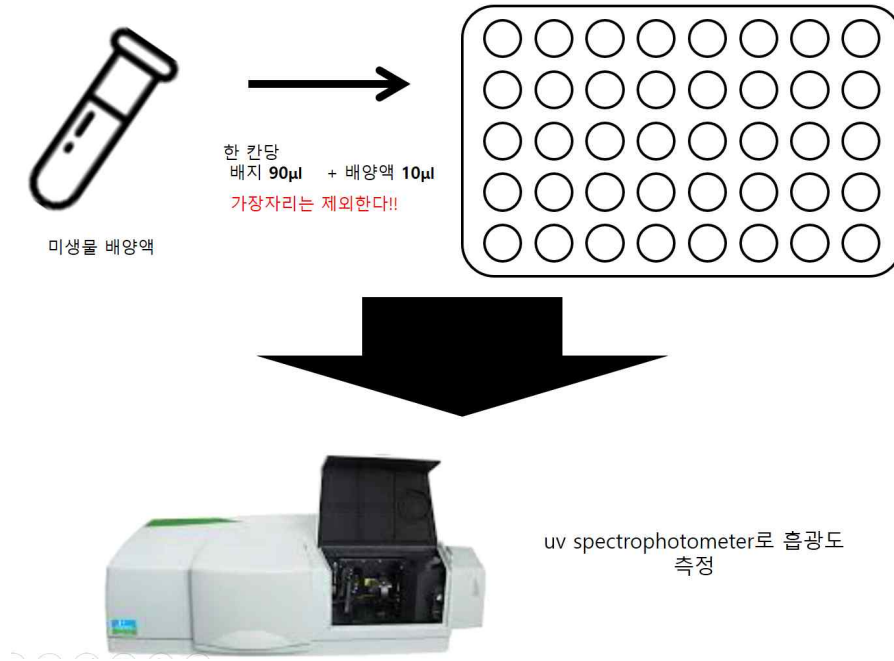
5. 고체배지 별 콜로니 수 측정 (CFU)



[Fig. 6] The picture of each group's CFU

24시간 배양한 고체배지의 콜로니 수를 측정한다. 응결된 물방울이 떨어지지 않게 배지를 뒤집어 욕안으로 배지 위에 배양된 균수를 욕안으로 센다. 배설물과 콜로니 수를 비교하여 mg당 균 수를 구한다.

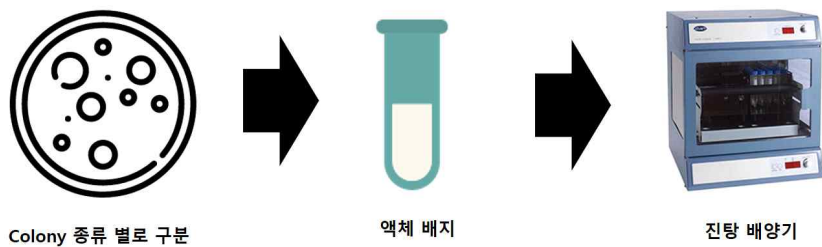
6. 미생물 생장도 측정



[Fig. 7] Growth degree measuring diagram

24시간 동안 배양한 액체배지를 multi well plate의 한 칸 당 Nutrient broth 배지 90μl, 배양액 10μl씩 넣는다. multi well plate를 spectrophotometer에 넣고 spectrophotometry(분광 광도법)[7]을 통하여 균의 생장 여부를 확인한다.

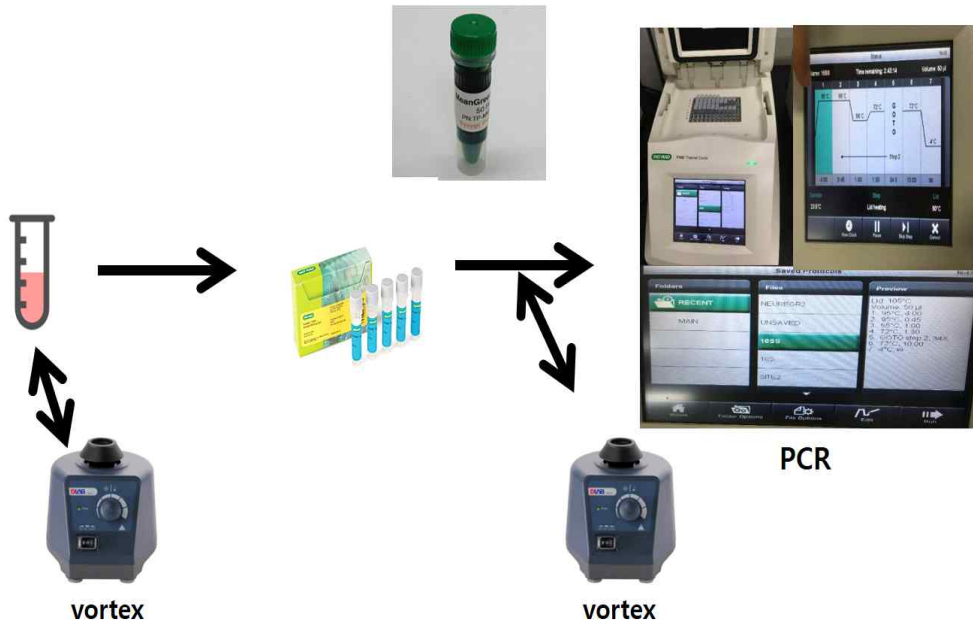
7. 고체배지의 균 종류별 배양



[Fig. 8] Colony classificatorily culturing diagram

고체배지에 배양된 균들을 크기와 색, 모양을 기준으로 구분한다. 균 1종류 당 대표되는 콜로니 하나씩만 떼어내어 Nutrient broth 배지에 각각 진탕 배양기에서 배양한다.

8. Colony 종류별 PCR

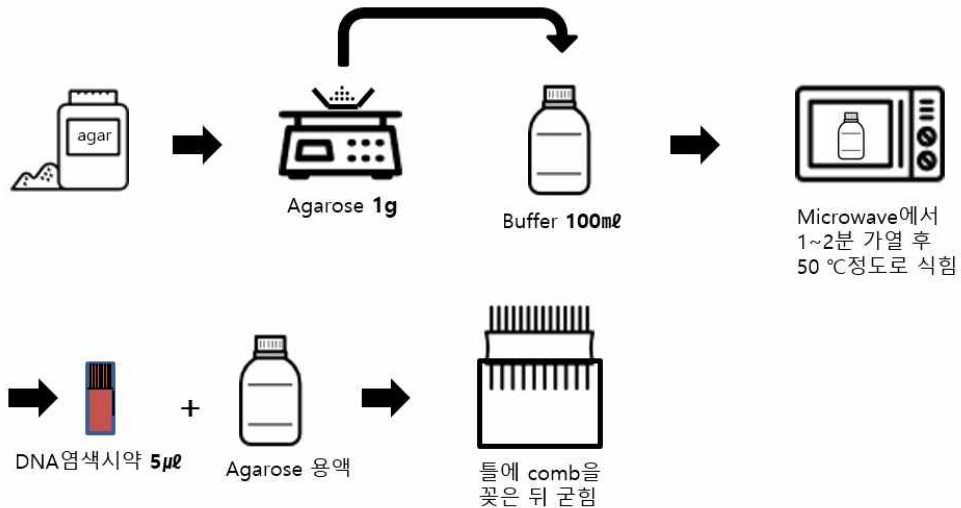


[Fig. 9] DNA replication diagram

‘7.’에서 배양한 미생물 배양액을 이용해 PCR을 진행한다[8]. Mastermix를 만들기 위해 Control은 primer F $7\mu\text{l}$, primer R $7\mu\text{l}$, DW $322\mu\text{l}$ 를 E-tube에 넣고 vortex로 섞는다. Neuropeptide Y는 primer F $11\mu\text{l}$, primer R $11\mu\text{l}$, DW $506\mu\text{l}$ 를 E-tube에 넣고 vortex로 섞는다. Neuromedin B는 primer F $15\mu\text{l}$, primer R $15\mu\text{l}$, DW $690\mu\text{l}$ 를 E-tube에 넣고 vortex로 섞는다. Oxytocin은 primer F $10\mu\text{l}$, primer R $10\mu\text{l}$, DW $460\mu\text{l}$ 를 E-tube에 넣고 vortex로 섞는다. template $2\mu\text{l}$ 와 각각의 Mastermix $48\mu\text{l}$ 를 pre-mix tube에 넣고 vortex로 섞어준 후 spin down한다. PCR기계에서 온도를 설정해준 후(먼저 95°C 에서 4분, 그리고 나서 95°C 에서 45초, 55°C 에서 1분, 72°C 에서 1분 30초를 34번 반복한다. 반복 후 72°C 에서 10분, 4°C 를 유지한다.) PCR기계에 Dye tube를 넣어준다. 그리고 PCR기계를 작동시켜 Colony 종류별의 DNA를 증폭시킨다.

9. 전기영동

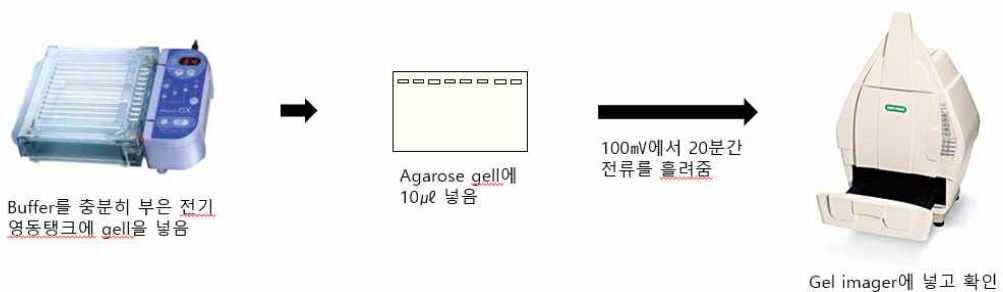
가. agarose gel만들기



[Fig. 10] Agarose gel making diagram

agar powder 1g을 buffer 100μl에 넣고 골고루 섞는다. agar 용액을 microwave에 넣고 1~2분 동안 가열한 후 50℃ 정도로 식힌다. 투명해진 agar 용해액에 DNA염색시약 5μl을 넣어준 후 comb을 꽂은 틀의 높이의 반 정도로 용액을 붓고 굳힌다.

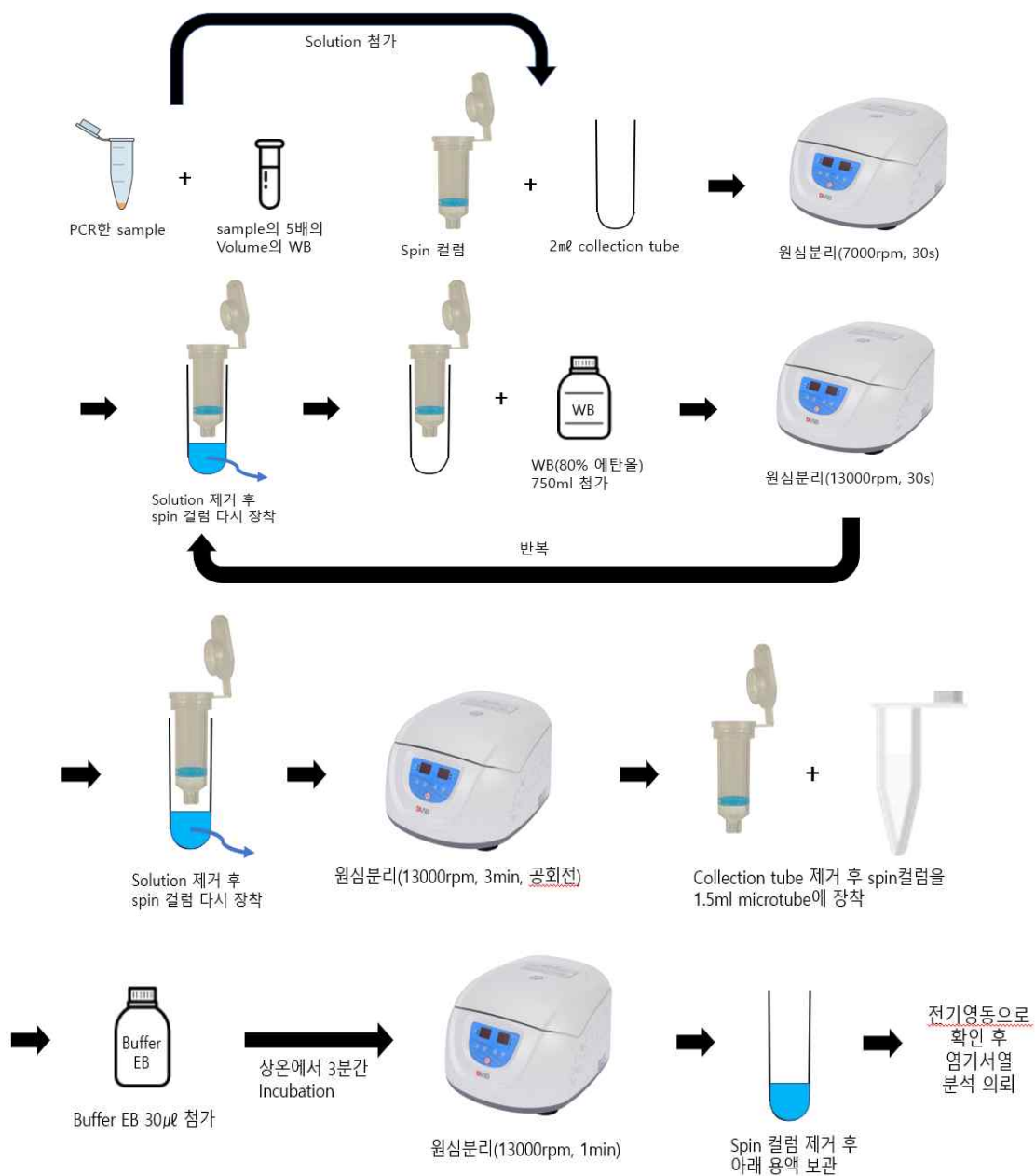
나. 전기영동 및 확인하기



[Fig. 11] Gel electrophoresis and reading diagram

전기영동탱크에 agarose gel[9]을 넣고 buffer를 충분히 채운다. agarose gel의 홈에 PCR한 용액을 각각 10μl씩 넣는다. 전기영동탱크에서 100mV로 설정 후 20분간 전류를 흘려준다. 20분 후, gel을 꺼내 Gel imager에 넣고 확인한다.

10. PCR한 샘플 정제



[Fig. 12] PCR sample refinement sequence diagram

PCR을 마친 샘플에서 복제시킨 DNA만 추출하기 위해 Spin컬럼을 사용한다. PCR 샘플의 5배에 해당하는 Volume의 binding buffer를 넣는다. Spin컬럼을 Collection tube에 장착한다. Spin컬럼에 PCR 샘플과 binding buffer의 혼합액을 올려준다. 원심분리를 통해 Collection tube에 모인 용액을 버린다. 그 후

Collection tube를 새 것으로 교체하고 Spin컬럼에 Washing Buffer를 투입한다. 원심분리기를 통해 Collection tube에 모인 용액은 버리고 위의 Washing과정을 한 번 더 반복한다. Collection tube를 교체하고 원심분리기에서 공회전한 다음, Spin컬럼을 새로운 microtube에 장착한다. Elution Buffer를 30 μ l 첨가하고 상온에서 3분간 Incubation한 후 원심분리한다. Spin컬럼을 제거한 후 아래 용액을 보관한다. 이 용액을 agarose gel에 넣고 전기영동으로 확인한 후 염기서열 분석을 의뢰한다.

11. 염기서열 결과 분석

The image shows the NCBI BLAST web interface. At the top, there's a navigation bar with 'BLAST' and 'blastn' links. Below that, the 'Standard Nucleotide BLAST' form is displayed. The form has several sections: 'Enter Query Sequence' with a text area and 'Query subrange' fields; 'Job Title' with a text area; 'Choose Search Set' with options for Database (Human genomic + transcript, Mouse genomic + transcript, Nucleotide collection [nr]), Organism (Enter organism name or id-completions will be suggested), Exclude (Modes (VARI), Unpublished/environmental sample sequences), Limit to (Sequences from type material), and Program Selection (Optimize for: Highly similar sequences (megablast), More dissimilar sequences (discontiguous megablast), Somewhat similar sequences (blastn), Choose a BLAST algorithm). At the bottom, there's a 'BLAST' button and a 'Show results in a new window' checkbox. The footer contains the NCBI logo, 'National Center for Biotechnology Information, U.S. National Library of Medicine', and contact information.

[Fig. 13] Base sequence analysis process picture

염기서열 분석 결과 파일을 Finch TV로 확인한다. 그리고 난 후 정상적인 염기서열을 NCBI의 Nucleotide BLAST에서 검색하여 그 염기서열들을 가진 미생물을 조사한다.

IV. 연구 결과

1. CFU 측정 결과

가. 실험 군 별 배설물 무게

각 실험 군 별 배설물의 무게를 측정한 결과 다음 <Table 2>처럼 나타났다.

〈Table 2〉 Each group's excreta weight

실험 군	1(mg)	2(mg)	3(mg)
Control	0.33	0.36	0.28
Neuropeptide Y	0.27	0.65	0.25
Neuromedin B	0.52	0.59	0.35
Oxytocin	0.26	0.75	0.25

나. CFU 결과 colony 개수

Nutrient agar배지에서의 CFU 결과 〈Table 3〉처럼 나타났다.

〈Table 3〉 The number of each group's colony in Nutrient Broth medium

실험 군	1(개)	2(개)	3(개)
Control	123	127	88
Neuropeptide Y	251	53	48
Neuromedin B	154	503	67
Oxytocin	232	18	241

MacConKey agar배지에서의 CFU 결과 〈table 4〉처럼 나타났다.

〈Table 4〉 The number of each group's colony in MacConKey medium

실험 군	1(개)	2(개)	3(개)
Control	21	46	27
Neuropeptide Y	45	7	23
Neuromedin B	11	2	23
Oxytocin	126	158	5

Lactobacillus MRS 배지에서의 CFU 결과 〈Table 5〉처럼 나타났다.

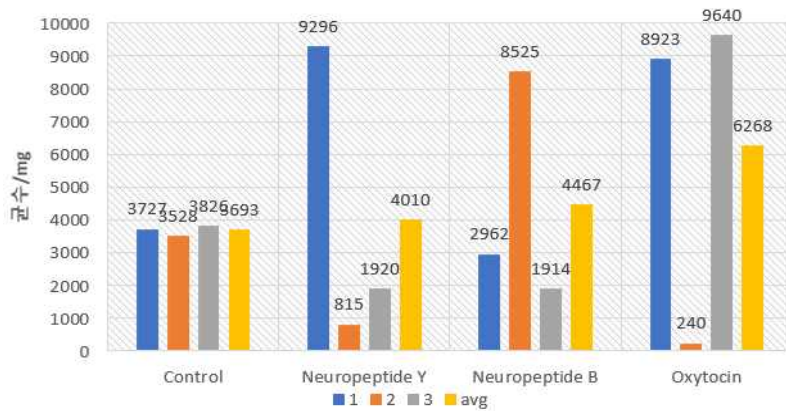
〈Table 5〉 The number of each group's colony in Lactobacillus MRS medium

실험 군	1(개)	2(개)	3(개)
Control	14	7	10
Neuropeptide Y	22	656	31
Neuromedin B	817	1538	508
Oxytocin	162	689	72

〈Table 3〉의 CFU결과를 각 실험 군의 배설물 무게를 고려하여 mg/ml당 군 수를 측정한 결과 〈Table 6〉처럼 나타났다.

〈Table 6〉 The number of each group's colony per mg/ml in Nutrient Broth medium

실험 군	1(mg/ml)	2(mg/ml)	3(mg/ml)	Avg(mg/ml)
Control	3727	3528	3826	3693
Neuropeptide Y	9296	815	1920	4010
Neuromedin B	2962	8525	1914	4467
Oxytocin	8923	240	9640	6268

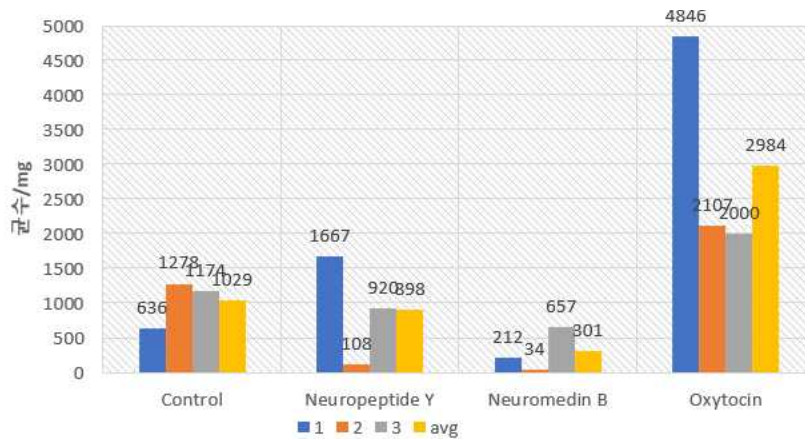


[Fig. 14] The number of each group's colony per mg/ml in Nutrient Broth medium Graph

〈Table 4〉의 CFU한 결과를 각 실험 군의 배설물 무게를 고려하여 mg/ml당 군 수를 측정한 결과 〈Table 7〉처럼 나타났다.

〈Table 7〉 The number of each group's colony per mg/mL in MacConKey medium

실험 군	1(mg/mL)	2(mg/mL)	3(mg/mL)	avg(mg/mL)
Control	636	1278	1174	1029
Neuropeptide Y	1667	108	920	898
Neuromedin B	212	34	657	301
Oxytocin	4846	2107	2000	2984

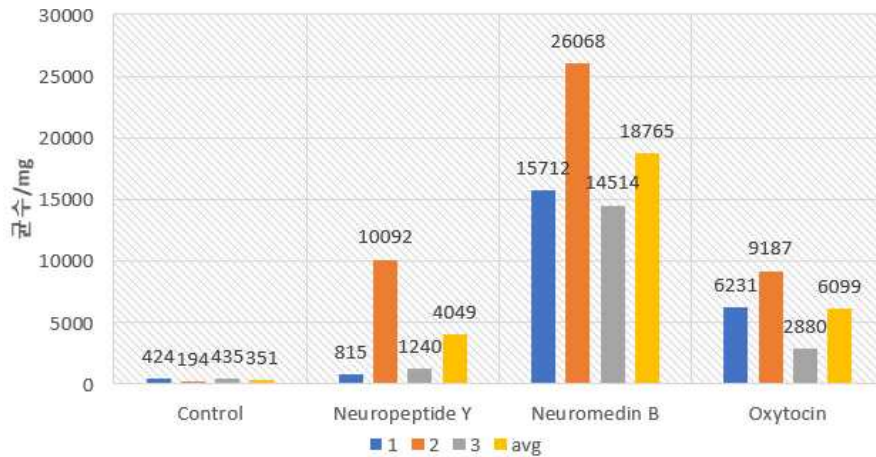


[Fig. 15] The number of each group's colony per mg/mL in MacConKey medium Graph

〈Table 5〉의 CFU한 결과를 각 실험 군의 배설물 무게를 고려하여 mg/mL당 균 수를 측정한 결과 〈Table 8〉처럼 나타났다.

〈Table 8〉 The number of each group's colony per mg/mL in Lactobacillus MRS medium

실험 군	1(mg/mL)	2(mg/mL)	3(mg/mL)	avg(mg/mL)
Control	424	194	435	351
Neuropeptide Y	815	10092	1240	4049
Neuromedin B	15712	26068	14514	18765
Oxytocin	6231	9187	2880	6099



[Fig. 16] The number of each group's colony per mg/mL in Lactobacillus MRS medium Graph

전체적인 실험 결과를 보면 Oxytocin이 Nutrient agar배지에서는 다른 실험 군들보다 실험값이 높다는 것을 알 수 있다. MacConKey agar배지에서도 Oxytocin이 실험값이 가장 높았고 Neuromedin B의 실험값이 가장 낮은 결과를 보였다. 그리고 Lactobacillus MRS agar배지에서는 Neuromedin B의 실험값이 확연하게 높았고 그 다음으로 Oxytocin의 실험값이 높았다.

2. 성장도 측정 결과

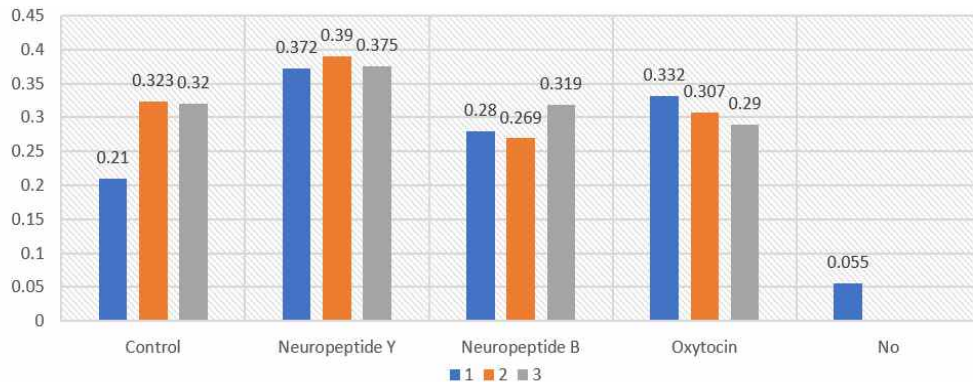
각 실험 군의 spectrophotometry한 결과 다음의 [Fig. 17], <Table 9>, [Fig. 18]처럼 대개 비슷한 분포도를 보였다.

Plate1												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A	0.045	0.046	0.045	0.045	0.045	0.046	0.047	0.045	0.046	0.046	0.047	0.046
B	0.045	0.391	0.382	0.373	0.046	0.046	0.046	0.046	0.214	0.206	0.211	0.046
C	0.047	0.361	0.347	0.363	0.045	0.047	0.046	0.046	0.361	0.431	0.329	0.046
D	0.047	0.332	0.345	0.343	0.046	0.047	0.045	0.046	0.359	0.347	0.346	0.047
E	0.047	0.378	0.386	0.374	0.047	0.054	0.055	0.046	0.336	0.324	0.331	0.046
F	0.046	0.403	0.400	0.381	0.045	0.055	0.055	0.048	0.314	0.318	0.327	0.048
G	0.047	0.366	0.387	0.386	0.046	0.046	0.046	0.046	0.324	0.352	0.433	0.046
H	0.046	0.046	0.046	0.047	0.046	0.047	0.046	0.046	0.049	0.046	0.046	0.046

[Fig. 17] The result of spectrophotometry picture

〈Table 9〉 The result of spectrophotometry

		[spectrophotometry 결과]				빨강:OX-1,2,3 파랑:NY-1,2,3 노랑:C-1,2,3 초록:NB-1,2,3 주황 : NB배지							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
A	0.045	0.046	0.045	0.045	0.045	0.046	0.047	0.045	0.046	0.046	0.047	0.046	
B	0.045	0.391	0.382	0.373	0.045	0.045	0.045	0.045	0.214	0.206	0.211	0.046	
C	0.047	0.361	0.347	0.363	0.045	0.045	0.045	0.045	0.361	0.431	0.329	0.046	
D	0.047	0.332	0.345	0.343	0.045	0.045	0.045	0.045	0.359	0.347	0.346	0.047	
E	0.047	0.378	0.386	0.374	0.045	0.054	0.055	0.045	0.336	0.324	0.331	0.046	
F	0.046	0.403	0.4	0.381	0.045	0.055	0.055	0.045	0.324	0.318	0.327	0.048	
G	0.047	0.366	0.387	0.386	0.045	0.045	0.045	0.045	0.324	0.352	0.433	0.046	
H	0.046	0.046	0.045	0.047	0.046	0.047	0.048	0.046	0.049	0.046	0.046	0.046	



[Fig. 18] The result of spectrophotometry Graph

3. 전기영동 결과

가. Control 전기영동 결과

Control을 전기영동을 한 결과 [Fig. 19]처럼 나타났다.



[Fig. 19] The result of Control's gel electrophoresis picture

나. Neuropeptide Y 전기영동 결과

Neuropeptide Y를 전기영동한 결과가 [Fig. 20]처럼 나타났다. Neuropeptide Y 1-1, 3-10는 결과가 나오지 않았다.



[Fig. 20] The result of Neuropeptide Y's gel electrophoresis picture

다. Neuromedin B 전기영동 결과

Neuromedin B를 전기영동 한 결과 [Fig. 21]와 [Fig. 22]처럼 나타났다. Neuromedin B 1-1, 2-10, 2-11, 3-15의 결과가 나오지 않았다.



[Fig. 21] The result of Neuromedin B's gel electrophoresis picture



[Fig. 22] The result of Neuromedin B's gel electrophoresis picture

라. Oxytocin 전기영동 결과

Oxytocin을 전기영동을 한 결과 [Fig. 23]처럼 나타났다. Oxytocin 3-9는 결과가 나오지 않았다.



[Fig. 23] The result of Oxytocin's gel electrophoresis picture

4. 정제 후 전기영동

가. Control 정제 후 전기영동 결과

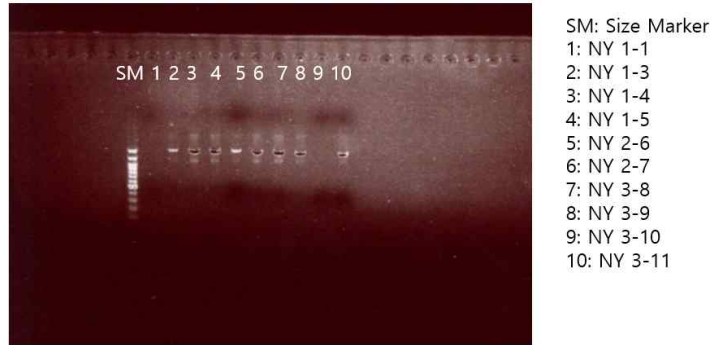
Control을 정제 후 전기영동 한 결과 [Fig. 24]처럼 나타났다.



[Fig. 24] The result of refined Control's gel electrophoresis picture

나. Neuropeptide Y 정제 후 전기영동 결과

Neuropeptide Y를 정제 후 전기영동 한 결과 [Fig. 25]처럼 나타났다. 위의 전기영동 결과처럼 Neuropeptide Y 1-1, 3-10의 결과는 나오지 않았다.



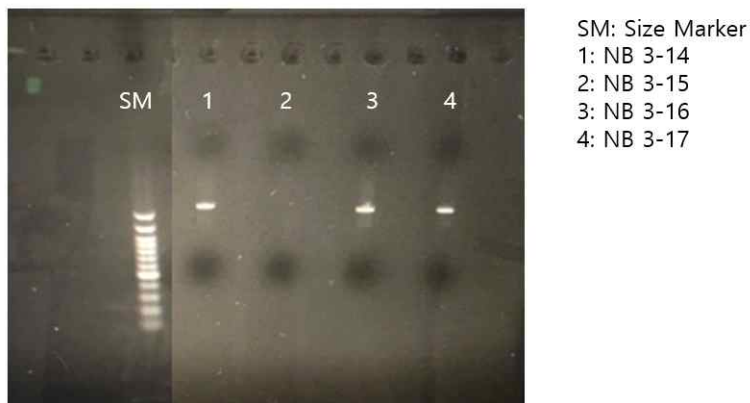
[Fig. 25] The result of refined Neuropeptide Y's gel electrophoresis picture

다. Neuromedin B 정제 후 전기영동 결과

Neuromedin B를 정제 후 전기영동 결과 [Fig. 26], [Fig. 27]처럼 나타났다. 위의 전기영동 결과처럼 Neuromedin B 1-1, 2-10, 2-11, 3-15는 결과는 나오지 않았다.



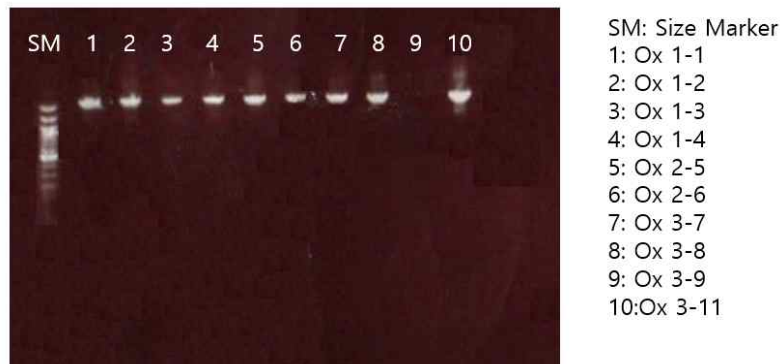
[Fig. 26] The result of refined Neuromedin B's gel electrophoresis picture



[Fig. 27] The result of refined Neuromedin B's gel electrophoresis picture

라. Oxytocin 정제 후 전기영동 결과

Oxytocin을 정제 후 전기영동 한 결과 [Fig. 28]처럼 나타났다. 위의 전기영동 결과처럼 Oxytocin 3-9의 결과는 나오지 않았다.

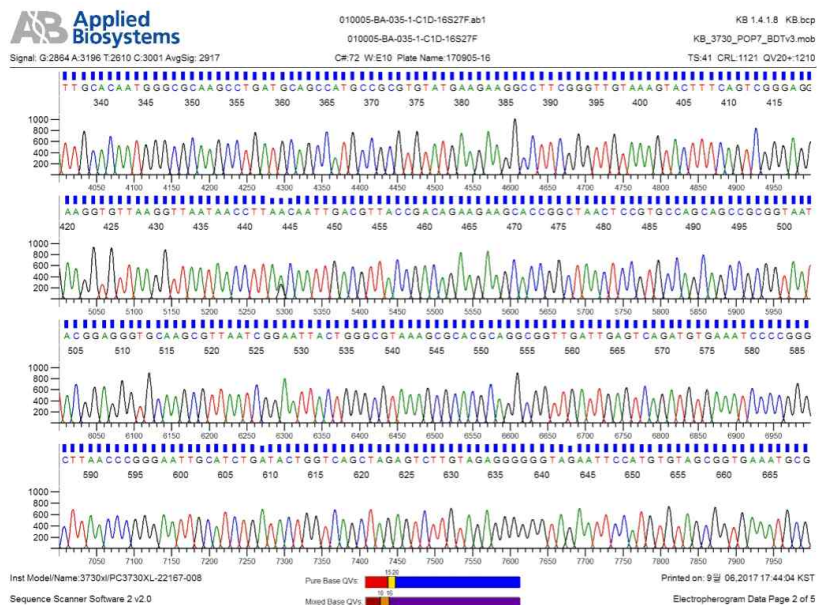


[Fig. 28] The result of refined Oxytocin's gel electrophoresis picture

5. 염기 서열 분석

가. Control 염기서열 chromatogram

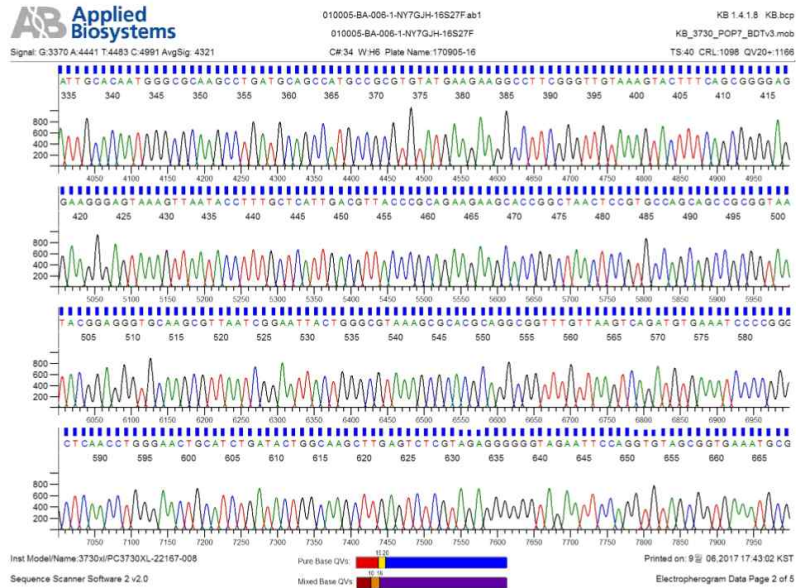
Control의 염기서열 chromatogram 결과 [Fig. 29]처럼 나타났다.



[Fig. 29] The example picture of Control's base sequence chromatogram

나. Neuropeptide Y 염기서열 chromatogram

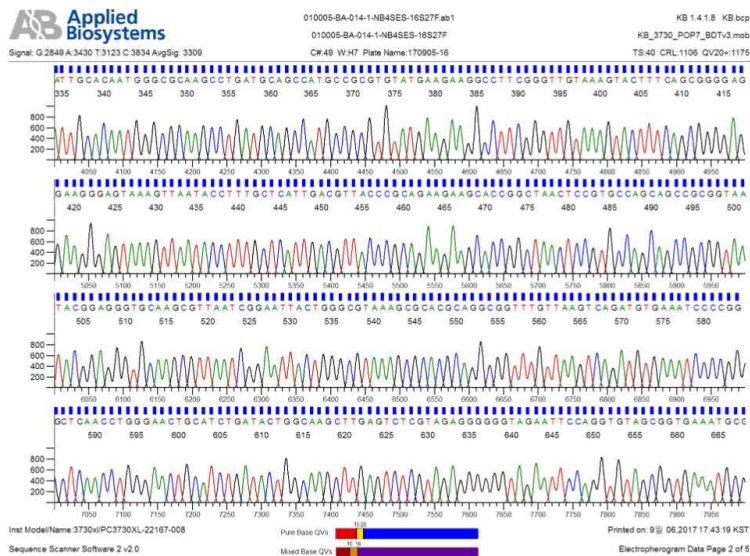
Neuropeptide Y의 염기서열 chromatogram 결과 [Fig. 30]처럼 나타났다.



[Fig. 30] The example picture of Neuropeptide Y's base sequence chromatogram

다. Neuromedin B 염기서열 chromatogram

Neuromedin B의 염기서열 chromatogram 결과 [Fig. 31]처럼 나타났다.



[Fig. 31] The example picture of Neuromedin B's base sequence chromatogram

라. Oxytocin 염기서열 chromatogram

〈Table 11〉 The result of naming Neuropeptide Y's microbe

	Neuropeptide Y1	Neuropeptide Y3	Neuropeptide Y4	Neuropeptide Y5
중,속	분석불가	Escherichia fergusonii	Escherichia fergusonii	Escherichia fergusonii
		Escherichia sp	Escherichia coli	Escherichia sp
		Shigella sonnei	Shigella flexneri	Shigella sonnei
		Shigella flexneri	Escherichia sp	Shigella flexneri
		Shigella sp	Corynebacterium pseudotuberculosis	Escherichia coli
		Photorhadus luminescens	Enterobacteriales bacterium	Photorhadus luminescens
		Escherichia coli	Shigella sonnei	Shigella sp
		cronobacter sp		
	Neuropeptide Y6	Neuropeptide Y7	Neuropeptide Y8	
중,속	Escherichia fergusonii	Escherichia coli	Escherichia coli	
	Escherichia sp	Escherichia fergusonii	Escherichia sp	
	Escherichia coli	Shigella flexneri	Escherichia fergusonii	
	Shigella sonnei	Streptomyces sp	Shigella sonnei	
	Shigella flexneri	Shigella sp	Shigella flexneri	
	Streptomyces sp	Corynebacterium pseudotuberculosis	Corynebacterium pseudotuberculosis	
	Enterobacteriaceae bacterium	Enterobacteriales bacterium	Enterobacteriales bacterium	
	Shiqella sp	Enterebacteriaceae bacterium	Enterebacteriaceae bacterium	
	Escherichia sp	Streptomyces sp		
Shigella sp				
	Neuropeptide Y9	Neuropeptide Y10	Neuropeptide Y11	
중,속	Escherichia coli	분석불가	Escherichia coli	
	Shigella flexneri		Shigella flexneri	
	Escherichia fergusonii		Escherichia fergusonii	
	Streptomyces sp		Escherichia sp	
	Corynebacterium pseudotuberculosis		Corynebacterium pseudotuberculosis	
	Enterobacteriales bacterium		Enterobacteriales bacterium	
	Enterebacteriaceae bacterium		Enterebacteriaceae bacterium	
	Escherichia sp		Shigella dysenteriae	

〈Table 12〉 The result of naming Neuromedin B's microbe

	Neuromedin B1	Neuromedin B2	Neuromedin B3
중,속	측정불가	Escherichia coli	Escherichia coli
		Shigella flexneri	Shigella flexneri
		Streptomyces sp	Escherichia fergusonii
		Shigella sp	Streptomyces sp
		Corynebacterium pseudotuberculosis	Corynebacterium pseudotuberculosis
		Enterobacterales bacterium	Enterobacterales bacterium
		Escherichia sp	Escherichia sp
		Escherichia fergusonii	
		Enterobacteriaceae bacterium	
	Neuromedin B4	Neuromedin B5	Neuromedin B6
중,속	Escherichia coli	Escherichia coli	Escherichia fergusonii
	Shigella flexneri	Shigella flexneri	Escherichia sp
	Escherichia fergusonii	Escherichia fergusonii	Escherichia coli
	Streptomyces sp	Streptomyces sp	Citrobacter koseri
	Shigella sp	Shigella sp	Shigella flexneri
	Corynebacterium pseudotuberculosis	Corynebacterium pseudotuberculosis	Shigella sp
	Enterobacterales bacterium	Enterobacterales bacterium	Enterobacterales bacterium
	Escherichia sp	Enterobacteriaceae bacterium	Enterobacteriaceae bacterium
	Shigella dysenteriae	Escherichia sp	Shigella sonnei
		Shigella dysenteriae	Photobacterium luminescens
			Leuconostoc lactis
	Neuromedin B7	Neuromedin B8	Neuromedin B9 Neuromedin B10
중,속	Shigella flexneri		Moraxella sp
	Escherichia fergusonii		Moraxella moraxii
	Escherichia coli		Enterobacter sp
	Shigella sp		Lactobacillus sp
	Enterobacterales bacterium	측정불가	측정불가
	Photobacterium luminescens		
	Leuconostoc lactis		
	Cronobacter sp		
	Enterobacteriaceae bacterium		

	Neuromedin B11	Neuromedin B12	Neuromedin B13	Neuromedin B14
중,속	Escherichia coli	측정불가	Escherichia coli	측정불가
	Shigella flexneri		Shigella flexneri	
	Escherichia fergusonii		Escherichia fergusonii	
	Streptomyces sp		Streptomyces sp	
	Shigella sp		Shigella sp	
	Corynebacterium pseudotuberculosis		Corynebacterium pseudotuberculosis	
	Enterobacterales bacterium		Enterobacterales bacterium	
	Enterobacteriaceae bacterium		Enterobacteriaceae bacterium	
	Escherichia sp		Escherichia sp	

〈Table 13〉 The result of naming Oxytocin's microbe

	Oxytocin 1	Oxytocin 2	Oxytocin 3	Oxytocin 4
중,속	staphylococcus lecutus	분석불가	Enterobacteriaceae bacterium	staphylococcus nepalensis
	staphylococcus sp		Enterobacterales bacterium	staphylococcus cohnii
			Shigella flexneri	staphylococcus sp
			Escherichia fergusonii	staphylococcus bacterium
			Streptomyces sp	
			Escherichia coli	
	Oxytocin 5	Oxytocin 6	Oxytocin 7	Oxytocin 8
중,속	Shigella flexneri	Staphylococcus sciuri	Shigella flexneri	Morqanella morqanii
	Escherichia fergusonii	Staphylococcus sp	Escherichia fergusonii	Morqanella sp
	Streptomyces sp	Bacterium peng-1	Streptomyces sp	Swine manure
	Escherichia coli	Bacterium TT4	Escherichia coli	Enterobacter sp
	Enterobacteriaceae bacterium	Staphylococcus luqduensis	Shigella bacterium	Endophytic bacterium
	Enterobacterales bacterium	Staphylococcus lentus	Escherichia/Shigella sp	Lactobacillus sp
	Escherichia/Shigella sp	Bacterium TT3	Shigella a	
		Bacterium F7-12	Shigella sp	
			Escherichia sp	
	Oxytocin 9		Oxytocin 10	
중,속	분석불가		분석불가	

V. 결론 및 제언

우리는 Neuropeptide가 장내 미생물에 미치는 영향과 Neuropeptide에 의한 면역 활성 조절의 새로운 매커니즘을 탐구하기 위해 본 연구를 진행하였다. 사용한 Neuropeptide는 Neuropeptide Y, Neuromedin B, Oxytocin으로 이들을 쥐에게 주입한 후 그 쥐의 배설물의 장내미생물을 고체배지에 배양하였다.

CFU 과정에서 mg당 균수를 측정한 결과 Nutrient배지에서는 Control \approx Neuropeptide Y \approx Neuromedin B < Oxytocin 으로, MacConKey배지에서는 Neuromedin B < Neuropeptide Y < Control \ll Oxytocin 으로, Lactobacillus MRS배지에서는 Control < Neuropeptide Y < Oxytocin \ll Neuromedin B 으로 나타났다. 이를 통해 장내미생물의 증식과 면역 활성화에 좋은 영향을 끼친다고 알려져 있는 Neuromedin B는 유산균을 키우는 배지인 MRS배지에서 균수가 가장 많았고, 그람 음성균을 키우는 배지인 MacConKey배지에서 가장 적은 균수가 나왔다는 것을 알 수 있었다. 그리고 이것으로 위의 실험결과가 선행연구와 거의 일치한다는 것 또한 알 수 있다. 그리고 Oxytocin은 MRS배지와 MacConKey배지에서 모두 높은 균수를 보였는데 이는 Oxytocin이 장내 미생물의 개체수를 늘려주고 면역 활성 조절에 좋은 영향을 미칠 수 있다고 예측할 수 있다. 구체적인 영향은 추후 염기서열 분석을 통한 미생물 동정 실험으로 알아낼 수 있을 것이다.

미생물의 생장 정도를 알아보기 위해 spectrophotometry에서 흡광도를 측정한 결과, 각 실험 군들의 결과 값에 차이가 나지 않았다. 그 원인은 초기 점종 시 너무 많은 양의 미생물을 점종했기 때문일 것이라 예상한다. 미생물이 증식하면서 포화된 배지에서는 미생물이 더 이상 증식하지 못하므로 위의 고체배지에서의 결과와는 다르게 차이가 나지 않는 결과가 나타났다고 추측한다.

PCR 및 전기영동 실험 결과를 보면 몇몇 실험 군에서는 전기영동 결과가 나오지 않았다. 그 실험 군들은 각각 Neuropeptide 1-1, 3-10, Neuromedin B 1-1, 2-10, 2-11, 3-15, Oxytocin 3-9이었다. 이는 PCR 시 원핵생물의 프라이머인 16s rRNA를 사용했기 때문에 결과가 나오지 않은 실험 군들은 진핵세포 미생물일 가능성이 높다.

정제 후 전기영동 시 결과가 나오지 않은 Neuropeptide 1-1, 3-10, Neuromedin B 1-1, 2-10, 2-11, 3-15, Oxytocin 3-9는 위와 같은 이유일 가능성이 높을 것으로 추측된다.

염기서열 분석 시 분석 여부를 확인 할 때 분석이 잘 되지 않은 실험 군들이 있었다. 이는 Control 3-6, Neuropeptide Y 1-1, 3-10, Neuromedin B 1-1, 2-10, 2-11, 3-15, Oxytocin 1-2, 3-9, 3-11이었다. 이들 중 Neuropeptide Y 1-1, 3-10, Neuromedin B 1-1, 2-10, 2-11, 3-15, Oxytocin 3-9는 위와 같이 진핵세포 미생물일 가능성이 높다. 그 외의 Control 3-6, Oxytocin 1-2, 3-11은 PCR 및 전기영동 실험 시 결과 값은 나왔지만 정제 후 전기영동 실험 후 염기서열 분석 과정에서 분석이 되지 않았다. 이는 샘플들을 정제할 당시 정제가 잘 이루어지지 않았거나 PCR이 되지 않았던 진핵세포 미생물일 것이라고 추측된다.

위의 염기서열들을 이용해 미생물 동정을 한 결과, 위의 표와 같은 미생물들이 동정 되었지만 대조군과 비교분석했을 때 뚜렷한 특징이 관찰되지 않았다. 하지만 미생물 동정이 완료되지 않았기 때문에 그람 동정, 생리활성도 측정 등의 추가적인 실험을 통해 미생물의 종을 명확히 규명하여 결론을 내려야할 것이다.

우리는 본 연구의 주목적인 Oxytocin의 장내 미생물의 개체수를 높이는 효과를 입증하였으며, 추후 실험을 통해 미생물의 종을 정확히 규명하고 그 미생물들의 특징들을 조사해 통계를 내본다면 Oxytocin이 우리 몸의 면역 활성화에 어떠한 영향을 끼치는지에 대한 결론이 내려질 것으로 예상한다. 그리고 Oxytocin이 면역 활성화에 효과가 있다면 차후 연구가 더 진행될 것이고 그로 인해 Oxytocin은 인간뿐만 아니라 많은 동물들의 면역력 향상에도 큰 기여를 할 것으로 기대된다.

VI. 참고문헌

- [1] 멀고도 가까운 장-뇌 사이, 연결축이 있다. <http://scienceon.hani.co.kr/531036>
- [2] 한겨레. 2016. 9. 20일자 기사: 장내 미생물의 ‘두 얼굴’... 병 되기도, 약 되기도.
http://www.hani.co.kr/arti/science/science_general/761978.html
- [3] eLIFE 장내 Prevotella copri의 확장은 관절염에 대한 감수성 증가와 관련이 있다.
<https://elifesciences.org/articles/01202>
- [4] NCBI Effects of neuropeptide Y on appetite. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/10681656>
- [5] NCBI Neuromedin B(2000). <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21922398>
- [6] Hormone Health What is Oxytocin.
<https://www.hormone.org/hormones-and-health/hormones/oxytocin>
- [7] Daniel C. Harris, 2007. 『분석화학』, 자유아카데미, 468,469,523~528,534p
- [8] NCBI PCR. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/probe/docs/techpcr/>
- [9] NCBI agarose gel. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4846332/>

I 연구진 I

전다니엘 (Daniel Jeon, 경상과학고등학교, jeondaniel0305@gmail.com) 주저자

서은서 (Eunseo Seo, 경상과학고등학교, seoeunseo61@gmail.com) 교신저자

손명국 (Myeongguk Son, 경상과학고등학교, mk09876727@gmail.com) 공동저자

김제현 (Jehyeon Kim, 경상과학고등학교, pqty1@gmail.com) 공동저자

지도교사 : 유동욱 (Donguk Yoo, 경상과학고등학교, unu00@hanmail.net)

지도교수 : 조정아 (Jungah Cho, 대구경북과학기술원, jungahcho@dgist.ac.kr)

미세조류와 세균과의 공생 관계 연구 및 이를 이용한 미세조류 생장 촉진

박재성 · 이성일 · 정예원 · 강서영 - 부산일과학고등학교

Studies on the Symbiotic Interaction between Microalgae and Associated Bacteria Application for Algal Growth Enhancement

Jaesung Park · Sungil Lee · Yewon Jeong · Seoyoung Kang - Busan Il Science High School

국문초록

미세조류는 동화 색소를 가지고 주로 수중 생활을 하며 독립 영양 생활을 통해 살아가는 원생생물 중 하나이며 미래 바이오 에너지 등에 크게 이용 가능한 것으로 각광받고 있다. 이처럼 이용성이 주목받는 미세조류를 대상으로 생물들의 상호 작용 중 특히 미세조류와 세균과의 공생 관계를 알아보고, 이러한 관계를 이용하여 미세조류의 생장을 증식시킬 수 있을지 알아보하고자 하였다. 우리는 미세조류 *Chlorella* sp.(AG60058)과 공생하는 4종류의 세균(Y_1 , Y_2 , W, B)을 형태학적 특징을 기준으로 미세조류로부터 분리하고 항생제 혼합액 처리에 의하여 세균이 제거된 미세조류와 혼합 배양한 결과 Y_1 , Y_2 균이 미세조류의 효과적인 생장 증식에 가장 적합한 세균임을 찾아내었다. 이들 세균의 16S rRNA 유전자 분석결과 Y_1 , Y_2 가 각각 *Paenibacillus*, *Micrococcus* 속에 속한다는 것을 확인하였다.

중심어 : 미세조류, 세균, 공생, 상호작용

ABSTRACT

Microalgae with assimilatory pigment are living under water. They are one of the protist living through independent nutrient and get their attention that they will be greatly available in bioenergy in the future. For this reason, we will investigate the interaction between microalgae and the symbiosis between microalgae and bacteria. We will also look into the possibility of promoting the growth and development of microalgae by using this interaction. We extracted 4 kinds of bacteria(Y_1 , Y_2 , W, B) from microalgae *Chlorella* sp.(AG60058) based on behavioral characteristics and finally found Y_1 , and Y_2 are the fittest bacteria to the effective growth and development of microalgae by culturing germ-free microalgae with antibiotics. We discovered Y_1 , Y_2 , belong to *Paenibacillus*, *Micrococcus* Genuses each by analyzing 16S rRNA genes of these bacteria.

Key words : Microalgae, Bacteria, Symbiosis, interaction

I. 서론

본 연구의 주목적은 미세조류와 세균과의 공생관계 연구 및 이를 이용한 미세조류의 생장 촉진을 알아보는 것이다. 자연 생태계의 생물들은 긴밀한 상호 작용을 하며 살아간다. 수중의 미세조류 또한 표면에 세균들이 많이 존재하는데, 이들은 미세조류의 생장에 직접적인 도움을 주기도 하고 해를 주기도 한다[1]. 세균을 미세조류로부터 분리하여 세균이 제거된 미세조류와 함께 배양함으로써 세균들이 미세조류의 생장에 어떠한 영향을 미치는지 알아본다. 생장 촉진 세균을 통해 미세조류의 생장을 촉진하여 그 생산성을 높이하고자 한다. 담수 미세조류 1종에 있는 세균을 따로 분리하고 미세조류에서 세균을 제거하여 미세조류를 세균이 없는 무균상태로 만든 후 분리된 세균과 세균이 제거된 미세조류와 함께 배양하여 생장 촉진 효과가 있는 세균을 찾아내고, 이를 통해 미세조류의 생산성을 높이하고자 한다.

II. 이론적 배경

1. 조류란?

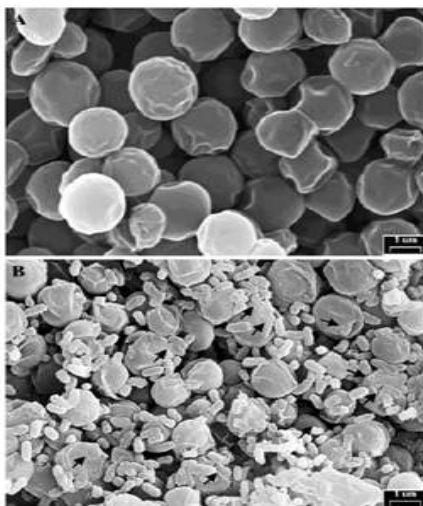
조류(藻類)는 주로 수중에서 생활하며 동화 색소를 가지고 독립 영양 생활을 하는 원생생물의 총칭이다. 일반적으로 조류는 해수나 담수에서 생육하는 것을 가리키나 기수·습지·빙설·온천 속 등에서 생육하는 것도 포함된다. 거의가 광합성 색소를 가지고 독립 영양 생활을 하여, 과거에는 식물로 분류되기도 하였다. 그러나 광합성 색소가 결여된 것일지라도 시스템이 유사하면 조류에 포함시키기도 한다[1].

2. 조류의 활용 방안

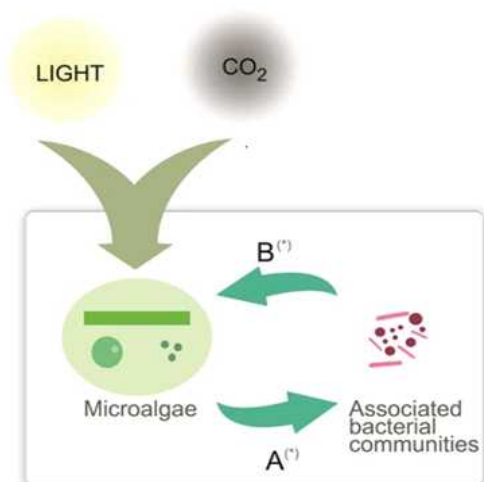
최근 원유가격의 급등과 세계적인 지구온난화에 대한 의식이 높아지고 원자력발전소 사고에 의한 탈 원전의 움직임에 의해 주목을 받고 있는 새로운 재생가능 에너지원이 바로 미세조류이다. 미세조류는 일반적으로는 수중에 존재하는 아주 작은 크기의 조류이지만, 이것을 원료로 하여 오일을 생산하는 데 최초로 성공한 미국에서는 이 오일을 “녹색 원유”라고 하였다. 미국에서는 2009년에 에너지부(DOE)가 “국가 조류계 바이오연료 기술 로드맵”을 발표하는 등 이 분야에서 선진적으로 대응하고 있으며, 오일 생산의 실용화를 목표로 벤처기업이 지속적으로 설립되었다. 이 오일은 공군 및 육군 등 제트연료용뿐만 아니라 건강산업 및 재료분야 등 폭넓은 용도로 사용될 것이다. 미세조류의 활용은 미국과 일본을 중심으로 활발한 기술개발이 이루어지고 있지만, 에너지 분야에서의 이용은 아직 비용이 높고, 국가로부터 지원이 있는 군사용 제트연료 등의 용도로 한정되어 있다. 우선 고부가가치의 화장품 및 의약품 분야로의 전개를 시작으로 최종 제품의 생산까지 각 공정의 프로세스를 최적화하여 생산비용의 저감을 실현할 수 있다면 에너지 분야에서의 이용도 기대할 수 있다[2].

3. 상호작용의 유형

생물들은 주변의 생물들과 경쟁, 포식, 공생과 같은 다양한 상호작용을 한다. 미세조류 역시 주변의 생물들과 상호작용을 한다. 미세조류와 세균의 상호작용 [Fig. 1]과 [Fig. 2]에서 확인하여 미세조류와 함께 발견되는 특정 세균 군집이 조류의 생장을 촉진함을 밝힌 연구가 다수 보고되고 있다[3].



[Fig. 1] Bacteria in microalgae

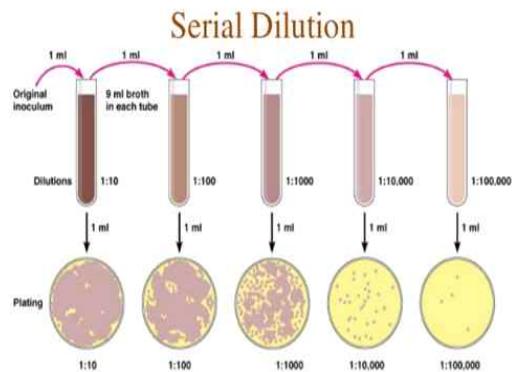


[Fig. 2] Interaction between microalgae and bacteria

Ⅲ. 연구 방법 및 절차

1. 미세조류로부터 세균 분리

한국생명공학연구원에서 분양받은 *Chlorella* sp.(AG60058)를 무균상태로 만들기 위해 미세조류로부터 세균을 분리하는 과정을 거쳤다. 이 때 연속희석법을 사용하여 BG-11배지에 조류 배양액을 희석 배수 $10^{-2} \sim 10^{-5}$ 까지 연속적으로 [Fig. 3]과 같이 희석하였다. 희석한 시료를 LB 고체 배지에 각 희석 배수 당 $50\mu\text{l}$, $100\mu\text{l}$ 씩 [Fig. 4]와 같이 도말하여 37°C 에서 18시간 배양하였다. 생성된 콜로니에서 형태학적으로 구분되는 서로 다른 콜로니를 LB 고체 배지에 분리하여 순수 배양한 후 LB 액체 배지에 접종하여 동일조건에서 배양하였다. 순수 분리된 세균은 색에 따라 Y₁(yellow), Y₂, B(beige), W(white) 로 명명하였으며 후속실험을 위하여 4°C 에서 보관하였다.



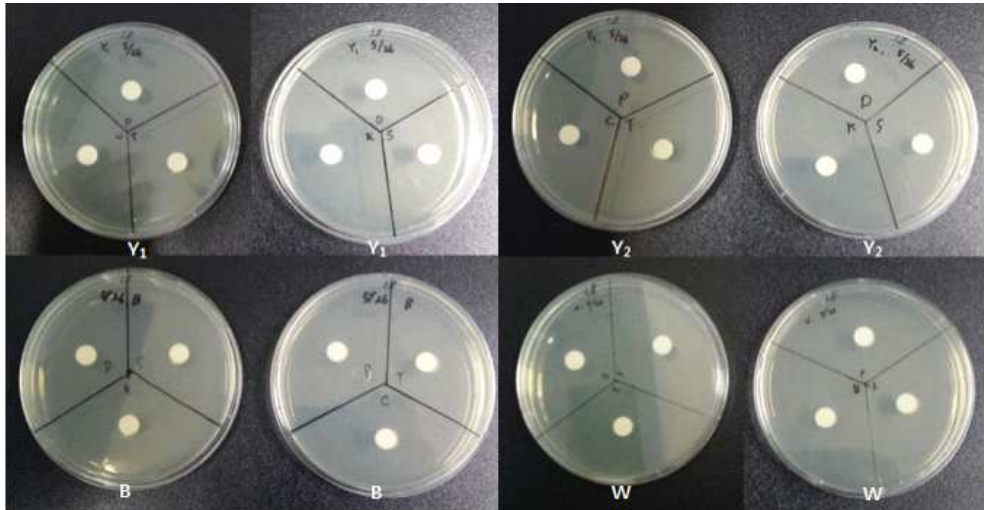
[Fig. 3] Serial dilution method



[Fig. 4] Smear process

2. 항생제에 대한 세균의 감수성 확인

디스크 확산법을 이용하여 세균의 Tetracycline, Doxycycline, Chloramphenicol, Penicillin, Streptomycin, Kanamycin에 대한 각각의 감수성을 확인하였다. LB 고체 배지에 세균시료를 100 μ l 도말한 후 각 항생제를 10 μ l 흡수시킨 디스크를 [Fig. 5]와 같은 방식으로 올렸다. 37 $^{\circ}$ C에서 16~18시간 정도 배양한 후 투명대를 확인하였다. 이후 항생제에 대한 세균의 민감도를 비교하기 위해 투명대의 지름을 측정하였다.



Tetracycline(T), Doxycycline(D), Chloramphenicol(C), Penicillin(P), Streptomycin(S), Kanamycin(K)

[Fig. 5] Identification of bacterial susceptibility to antibiotics

3. 항생제에 대한 미세조류의 감수성 확인

세균처리가 되지 않은 미세조류에 각 항생제들을 처리한 후 미세조류의 생장여부를 조사하여 항생제가 세균 뿐만이 아니라 미세조류에게도 영향을 주는지 확인하였다. BG-11 4ml, 조류배양액 100 μ l와 항생제 4 μ l를 [Fig. 6]과 같이 혼합하여 1주일간 배양한 후 조류의 생장을 비교하였다. 이때 단일 항생제뿐 아니라 각 항생제들을 두 가지씩 조합하여 실험하였다.



[Fig. 6] Antibiotic injection process

4. 조류로부터 세균 제거 및 검증

위의 과정을 통해 가장 효과적으로 세균을 제거하면서도 조류의 성장에는 영향을 주지 않는 것으로 판단된 미세조류에 항생제를 [Fig. 7]과 같이 처리하여 세균을 제거하였다. 확실하게 세균이 제거되었는지 확인하기 위해 항생제 처리 후의 미세조류 배양액 100 μ l를 LB 고체 배지에 도말한 뒤 배양하여 콜로니가 나타나는지 관찰하였다.



[Fig. 7] Bacteria removal confirmation process

5. 미세조류와 각 세균의 혼합배양 및 성장 비교

BG-11배지 25 ml, Chlorella sp.(AG60058) 200 ml와 Bacteria(O.D=0.5) 50 ml를 혼합하여 20℃에서 7일간 배양하였다. 각 세균별 혼합배양 결과를 비교하기 위해 배양액을 10 ml 분주한 후 혈구 계산기를 사용하여 현미경으로 관찰하여 Chlorella sp.(AG60058)의 수를 확인하고 비교하였다.

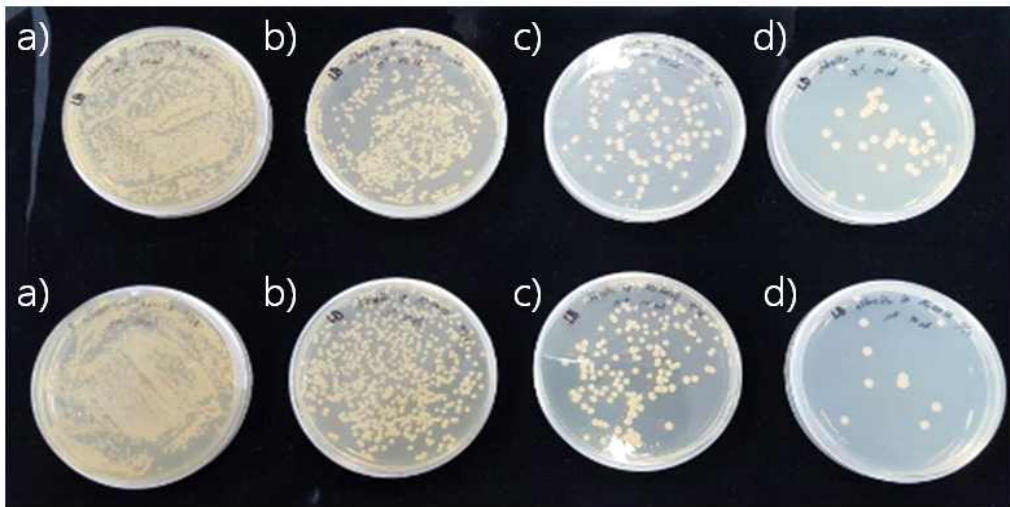
6. 미세조류의 성장을 촉진시키는 세균의 동정

미세조류의 성장을 크게 촉진시키는 것으로 판단된 세균을 배양하여 DNA를 추출한 뒤 Universal primer 27F(5'-AGAGTTTGATCMTGGCTCAG-3'), 1492R(5'-TACGGYTACCTTGTTACGACTT-3') (출처 : Bionics 사)을 사용하여 PCR을 통해 증폭시켰다. Bionics사에 DNA샘플을 의뢰하여 염기서열을 확인하였다. 이를 미국 국립생물정보센터(NCBI)에 Blast 하여 세균의 종을 알아보았다.

IV. 연구 결과

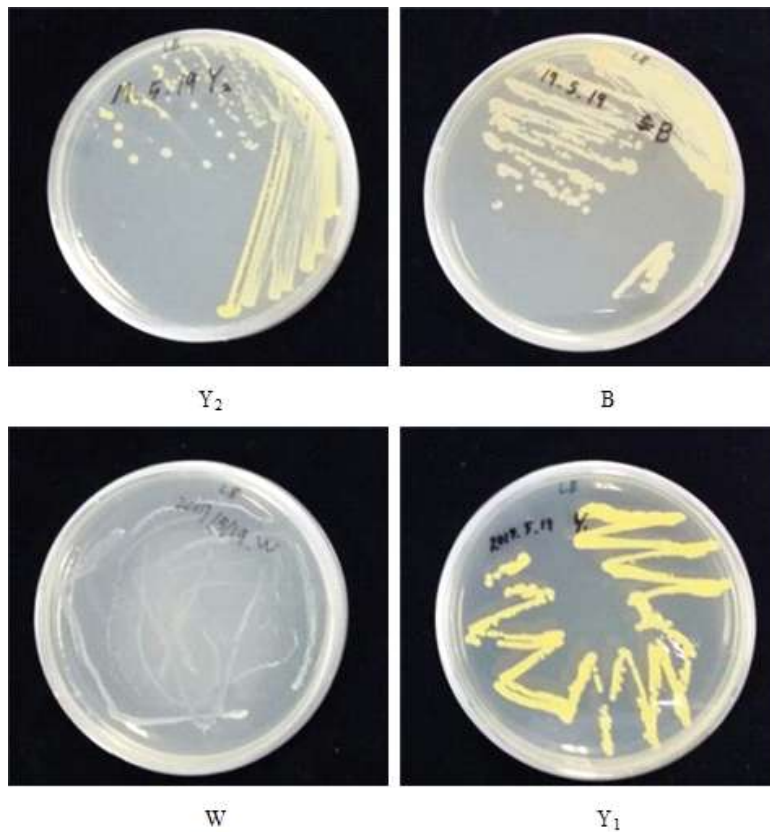
1. 미세조류로부터 세균 분리

미세조류로부터 세균을 분리하였을 때 희석배수 10⁻²에서는 콜로니가 서로 겹쳐서 알아보기 힘든 반면, 희석배수 10⁻⁵에서는 형태적으로 구분되는 서로 다른 4 종류의 콜로니를 [Fig. 8]과 같이 확인했으며 배지에서 분리하기가 쉽다는 것을 확인할 수 있었다. 이 세균들을 색상에 따라서 각각 Y₁, Y₂, B, W라고 명명하고, 이 콜로니들을 LB 고체 배지에 희선도말법을 사용하여 순수배양 한 결과 [Fig. 9]와 같은 결과를 얻었다.



[Fig. 8] Result of separation of bacteria from microalgae

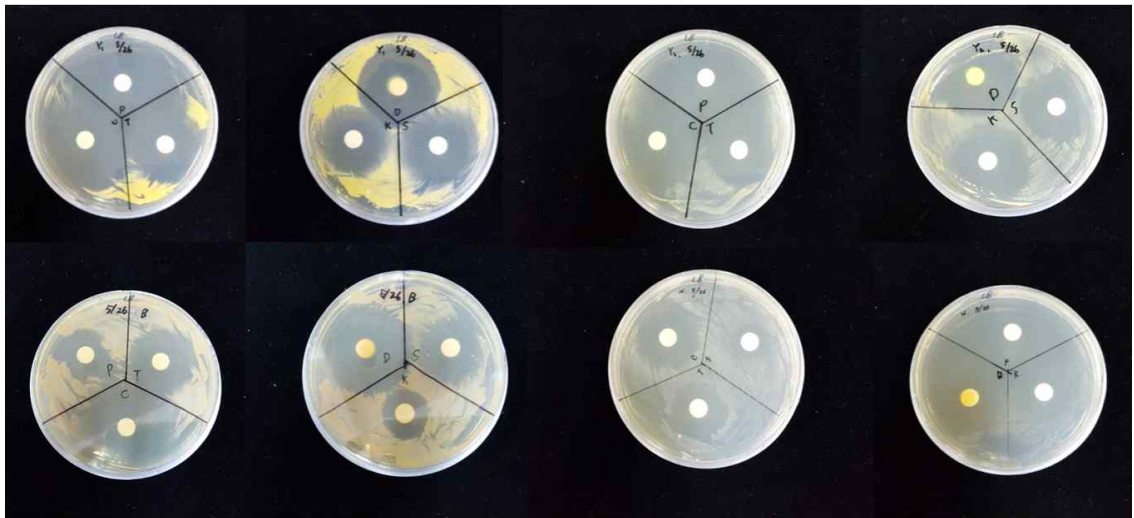
- a) Dilution factor : 10^{-2} b) Dilution factor : 10^{-3}
 c) Dilution factor : 10^{-4} d) Dilution factor : 10^{-5}



[Fig. 9] Result of single culture of isolated bacteria

2. 항생제에 대한 세균의 감수성 확인

항생제에 대한 세균의 감수성을 분석한 결과로 세균이 자라지 못한 투명대의 지름을 측정하였다. 세균의 항생제에 대한 감수성이 너무 커서 투명대의 지름이 너무 크게 나와 투명대의 지름의 길이를 측정하기 불가능한 것은 *으로 표시하였다. 투명대의 지름이 크면 항생제에 대한 미생물의 감수성이 큰 것이므로 항생제 효과가 좋은 것이라고 말할 수 있다. 따라서 [Fig. 10]을 보면 왼쪽 상단부터 2개씩 묶었을 시 Y₁, Y₂, B, W 인 것을 알 수 있고, 각각 P, C, T / D, K, S 의 항생제를 투여한 것을 확인할 수 있다(반시계 방향). 이 정보와 <Table 1>의 내용을 연계하여 결과를 도출해 보면 대상 세균에 대한 억제효과가 좋은 항생제들은 Tetracycline, Penicillin, Doxycycline, Chloramphenicol이라고 할 수 있다.



[Fig. 10] Antibiotic susceptibility test results of bacteria

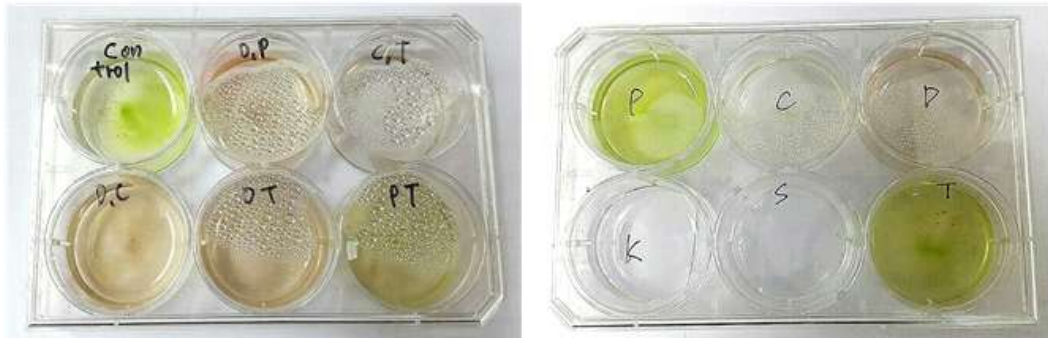
<Table 1> Antibiotic susceptibility test results of bacteria

(단위 : mm)

항생제 종류 \ 세균	B	W	Y ₁	Y ₂
Tetracycline	30	27	35	36
Penicillin	27	*	50	*
Doxycycline	40	26	37.5	45
Streptomycin	30	16	43	38
Chloramphenicol	42	32	40	34
Kanamycin	20	27	35.5	36

3. 항생제에 대한 미세조류의 감수성 확인

세균에 감수성이 큰 항생제로 미세조류의 감수성을 확인한 결과 Tetracycline이나 Penicillin을 처리한 배지에서 미세조류가 가장 잘 자랐고, Doxycycline이나 Chloramphenicol을 처리한 배지의 미세조류는 조금 자랐으며 Streptomycin이나 Kanamycin을 처리한 배지에서는 미세조류가 자라지 않은 것을 확인할 수 있었다. 그리고 항생제 중에서 제일 효과가 좋았던 항생제들을 조합하여 앞의 과정을 반복해 보았다. 이는 항생제 사이의 상호작용을 확인해 보는 것으로 Tetracycline과 Penicillin, Doxycycline, Chloramphenicol을 조합하여 사용했다. 결과는 아무 항생제도 처리하지 않은 대조군이 제일 잘 자랐고 Tetracycline과 Penicillin을 처리한 배지에 미세조류가 조금 자랐고 나머지는 자라지 않은 것을 확인할 수 있었다[Fig. 11], <Table 2>.



[Fig. 11] Growth of microalgae treated with antibiotics

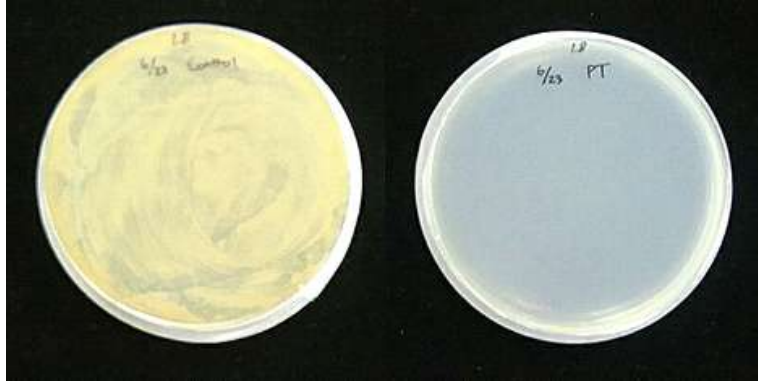
<Table 2> Growth of microalgae treated with antibiotics

항생제 처리		미세조류 생장 정도
단독처리	대조군(무처리)	++
	Penicillin	++
	Chloramphenicol	+
	Doxycycline	+
	Kanamycin	-
	Streptomycin	-
	Tetracycline	++
혼합처리	Penicillin + Doxycycline	-
	Chloramphenicol + Tetracycline	-
	Doxycycline + Chloramphenicol	-
	Doxycycline + Tetracycline	-
	Penicillin + Tetracycline	+

(++ : 잘 자람, + : 조금 자람, - : 안 자람)

4. 조류로부터 세균 제거 및 검증

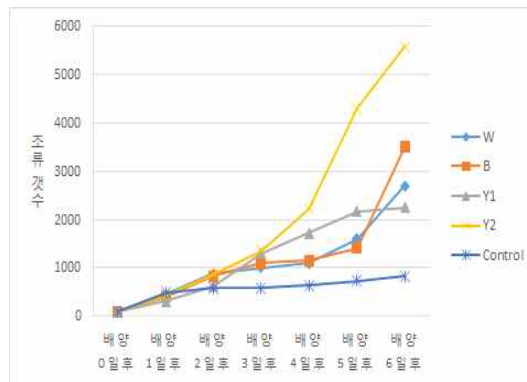
미세조류로부터의 세균 제거 결과는 [Fig. 12]를 통해 뚜렷하게 확인할 수 있다. 항생제 처리전의 미세조류 배양액을 LB 고체 배지에 분주하였을 때는 많은 세균 콜로니가 관찰되었지만, 항생제 처리 후의 미세조류에는 세균 콜로니가 발견되지 않는 것을 볼 수 있어, 세균이 제거된 것을 알 수 있었다.



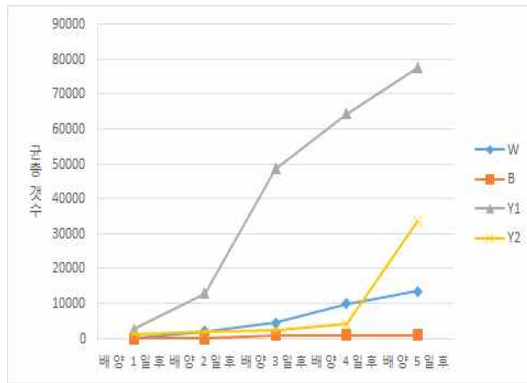
[Fig. 12] Before(left) and After(right) Antibiotic Treatment

5. 미세조류와 각 세균의 혼합배양 및 성장 비교

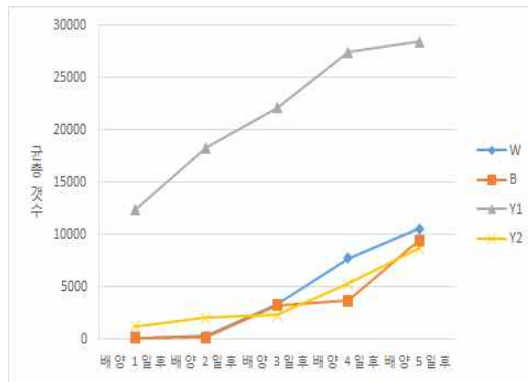
미세조류와 세균을 혼합배양 했을 때 세균 Y₂가 미세조류의 성장을 가장 촉진하고 아무 세균을 넣지 않은 순수 미세조류가 가장 생장이 늦다는 것을 [Fig. 13]을 통해 알 수 있다. 또한 미세조류와 세균을 혼합배양 하였을 때 세균을 순수배양 하였을 때 보다 최종값이 훨씬 증가하는 것을 [Fig. 14]를 통해 알 수 있다. 최종값이 가장 많이 증가한 세균은 Y₁이고, 최종값이 가장 적게 증가한 세균은 W로 거의 변화가 없는 것을 [Fig. 15]을 통해 확인할 수 있다.



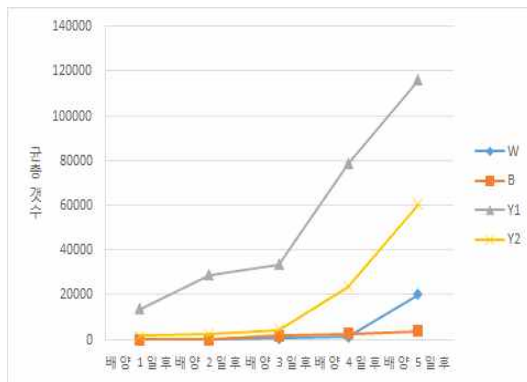
[Fig. 13] Microalgae growth during mixed culture



[Fig. 14] Bacterial growth during mixed culture



[Fig. 15] Results of single cultivation of bacteria

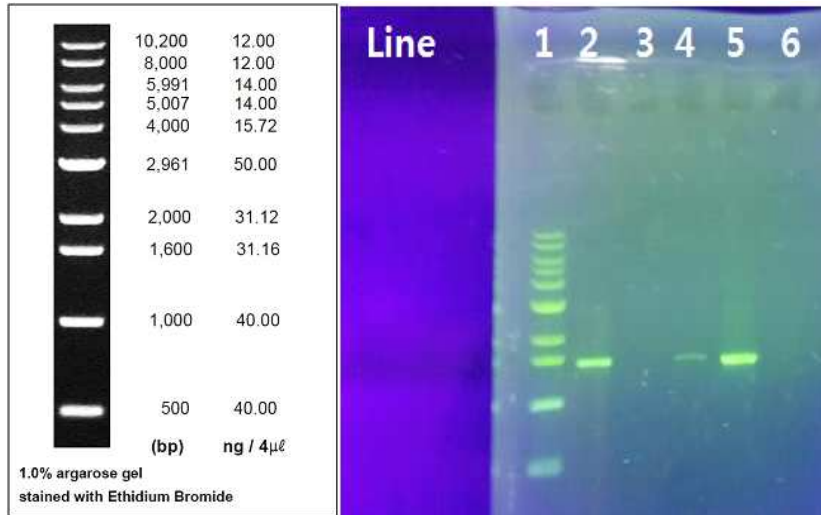


[Fig. 16] Results of bacterial cultures in LB plate

6. 미세조류의 생장을 촉진하는 세균의 동정

미세조류의 생장을 촉진하는 세균의 동정을 위해서 16S rRNA 유전자를 PCR로 증폭하고, 아가로스 겔에서 전기영동한 결과인 [Fig. 17]을 통해 예상되는 크기의 DNA 절편이 증폭된 것을 확인 할 수 있었다. 아가로스 겔에서 전기영동한 DNA를 겔로부터 추출한 후 Bionics사에 의뢰하여 염기서열을 분석하였다. 염기서열 분석

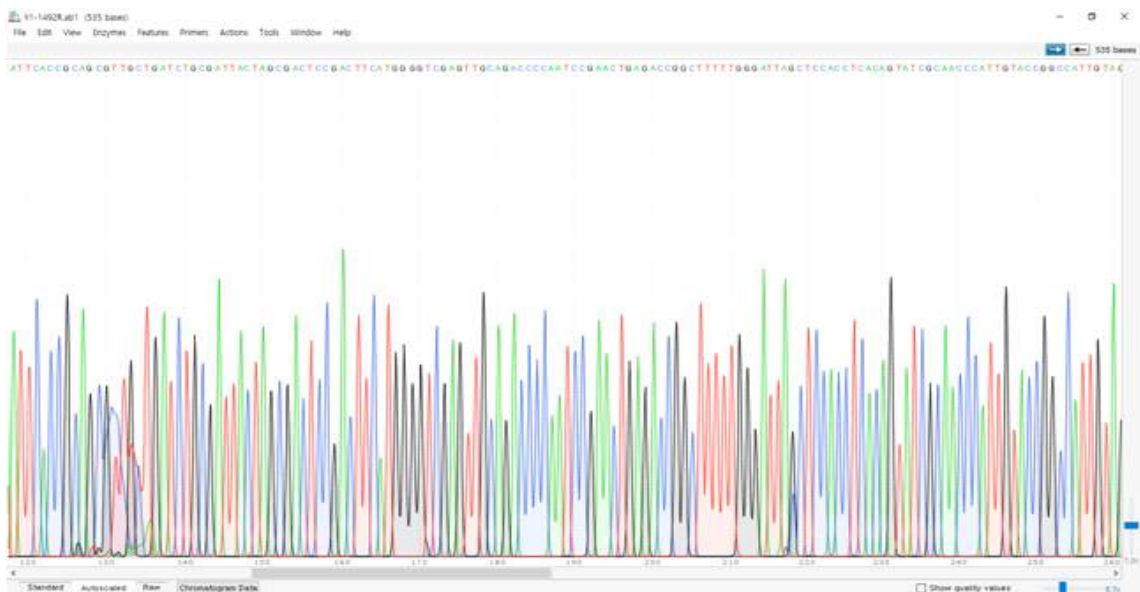
결과를 [Fig. 18]에 나타내었다. 염기서열을 미국국립생물정보센터(NCBI)에서 BLAST한 결과 Y₁으로 명명한 세균은 기존 데이터베이스에 등록되어 있는 *Paenibacillus rhizosphaerae* strain CEAP06 과 서열이 99% 일치하였고 [Fig. 19], Y₂는 *Micrococcus luteus* strain NCTC2665 과 서열이 99% 일치하였다[Fig. 20]. 이를 통해 우리가 최종적으로 찾은 균은 각각 *Paenibacillus*, *Micrococcus* 속에 속한다는 것을 알 수 있었다.



[Fig. 17] Electrophoresis result

Line 1: 1kb ladder, Line 2: Microalgae before antibiotic treatment

Line 3: Microalgae after antibiotic treatment, Line 4: Y₁, Line 5: Y₂, Line 6: Negative control



[Fig. 18] Y₁ Sequence analysis result of 1492R primer of Y₁ bacteria

Paenibacillus rhizosphaerae strain CECAP06 16S ribosomal RNA gene, complete sequence
Sequence ID: [NR_043166.1](#) Length: 1547 Number of Matches: 1

Range 1: 687 to 1434 [GenBank](#) [Graphics](#) [Next Match](#) [Previous Match](#)

Score	Expect	Identities	Gaps	Strand
1360 bits(736)	0.0	744/748(99%)	0/748(0%)	Plus/Minus
Query 1	GTGTTGTAACCTCTCGTGGTGTGACGGGCGGTGTGTACAAGACCCGGGAACGTATTCACC	60		
Sbjct 1434	GTGTTGTAACCTCTCGTGGTGTGACGGGCGGTGTGTACAAGACCCGGGAACGTATTCACC	1375		
Query 61	GCGGCATGCTGATCCGCGATTACTAGCAATTCGACTTCATGCAGGCGAGTTGCAGCCTG	120		
Sbjct 1374	GCGGCATGCTGATCCGCGATTACTAGCAATTCGACTTCATGCAGGCGAGTTGCAGCCTG	1315		
Query 121	CAATCCGAAGTGAAGACAGCTTTGATAGGATTGGCTCCACCTCGCGGCTTCGCTTCCCCT	180		
Sbjct 1314	CAATCCGAAGTGAAGACAGCTTTGATAGGATTGGCTCCACCTCGCGGCTTCGCTTCCCCT	1255		
Query 181	TGTAAGTGGCAATGTAGTACGTGTGTAGCCAGGTCATAAGGGGCATGATGATTTGACGT	240		
Sbjct 1254	TGTAAGTGGCAATGTAGTACGTGTGTAGCCAGGTCATAAGGGGCATGATGATTTGACGT	1195		
Query 241	CATCCCAGCTTCCTCCGTTTGTACCGGCGAGTCATTCTAGAGTGCCCAACCGAAGTGC	300		
Sbjct 1194	CATCCCAGCTTCCTCCGTTTGTACCGGCGAGTCATTCTAGAGTGCCCAACCGAAGTGC	1135		
Query 301	TGGCAACTAAAAATCAAGGGTTGCGCTCGTTGCGGGACTTAACCAACATCTCAGACACG	360		
Sbjct 1134	TGGCAACTAAAAATCAAGGGTTGCGCTCGTTGCGGGACTTAACCAACATCTCAGACACG	1075		
Query 361	AGCTGACGACAACCATGCACCACTGTCTCCTCTGTCCGAAAGGAAAGGTACATCTCTGT	420		
Sbjct 1074	AGCTGACGACAACCATGCACCACTGTCTCCTCTGTCCGAAAGGAAAGGTACATCTCTAG	1015		
Query 421	ACCGGTCAGAGGGATGTCAAGACCTGGTAAGGTTCTTCGCTTGCTTCGAATTAACAC	480		
Sbjct 1014	ACCGGTCAGAGGGATGTCAAGACCTGGTAAGGTTCTTCGCTTGCTTCGAATTAACAC	955		
Query 481	ATACTCCACTGCTTGTGCGGGTCCCGTCAATTCCTTTGAGTTTCAGTCTTGCGACCGTA	540		
Sbjct 954	ATACTCCACTGCTTGTGCGGGTCCCGTCAATTCCTTTGAGTTTCAGTCTTGCGACCGTA	895		
Query 541	CTCCCCAGGGGGAATGCTTAATGTGTTAACTTCGGCACCAAGGGATCGAAACCCCTAAC	600		
Sbjct 894	CTCCCCAGGGGGAATGCTTAATGTGTTAACTTCGGCACCAAGGGATCGAAACCCCTAAC	835		
Query 601	ACCTAGCATTATCGTTTACGGCGTGGACTACGAGGATCTAATCCTGTTTGTCCCCA	660		
Sbjct 834	ACCTAGCATTATCGTTTACGGCGTGGACTACGAGGATCTAATCCTGTTTGTCCCCA	775		
Query 661	CGCTTTTCGCGCTCAGCGTCAGTTACAGCCAGAGAGTGCCCTTCGCCACTGGTGTTCCT	720		
Sbjct 774	CGCTTTTCGCGCTCAGCGTCAGTTACAGCCAGAGAGTGCCCTTCGCCACTGGTGTTCCT	715		
Query 721	CCACATATCTACGCATTTACCGCTACA	748		
Sbjct 714	CCACATATCTACGCATTTACCGCTACA	687		

[Fig. 19] Result of 16S rRNA gene analysis of Y₁ bacteria

Micrococcus luteus strain NCTC 2665 16S ribosomal RNA gene, partial sequence

Sequence ID: [NR_075062.2](#) Length: 1525 Number of Matches: 1

Range 1: 980 to 1363 [GenBank](#) [Graphics](#) [Next Match](#) [Previous Match](#)

Score	Expect	Identities	Gaps	Strand
671 bits(363)	0.0	377/384(98%)	0/384(0%)	Plus/Minus
Query 1	GGGAACGTATTACCGCAGCGTTGCTGATCTGCGATTACTAGCGACTCCGACTTCATGGG	60		
Sbjct 1363	GGGAACGTATTACCGCAGCGTTGCTGATCTGCGATTACTAGCGACTCCGACTTCATGGG	1304		
Query 61	GTCGAGTTGCAGACCCCAATCCGAAGTGAAGACCGGCTTTTGGGATTAGCTCCACCTCAC	120		
Sbjct 1303	GTCGAGTTGCAGACCCCAATCCGAAGTGAAGACCGGCTTTTGGGATTAGCTCCACCTCAC	1244		
Query 121	AGTATCGCAACCAATTGTACCGGCCATTGTAGCATGCGTGAAGCCCAAGACATAAGGGGC	180		
Sbjct 1243	AGTATCGCAACCAATTGTACCGGCCATTGTAGCATGCGTGAAGCCCAAGACATAAGGGGC	1184		
Query 181	ATGATGATTGAGTCGTCCTCACTTCCTCCGAGTTGACCCCGGAGTCTCCATGAGT	240		
Sbjct 1183	ATGATGATTGAGTCGTCCTCACTTCCTCCGAGTTGACCCCGGAGTCTCCATGAGT	1124		
Query 241	CCCCACCAATTACGTGCTGGCAACATGGAACGAGGGTTGCGCTCGTTGCGGGACTTAACCC	300		
Sbjct 1123	CCCCACCAATTACGTGCTGGCAACATGGAACGAGGGTTGCGCTCGTTGCGGGACTTAACCC	1064		
Query 301	AACATCTCAGACACGAGCTGACGACTACCATGCACTTCTGTGAACCCGCCCAAGGT	360		
Sbjct 1063	AACATCTCAGACACGAGCTGACGACAAACCATGCACTTCTGTGAACCCGCCCAAGGT	1004		
Query 361	TAAACCGTATTTCTACGGCGATCG	384		
Sbjct 1003	GAAATCGTATCTCTACGGCGATCG	980		

[Fig. 20] Result of 16S rRNA gene analysis of Y_2 bacteria

V. 고찰

미세조류와 여기에 부착하여 살아가는 세균과의 상호작용을 알아보기 위하여 미세조류로부터 4종의 세균을 분리한 후 항생제 혼합액으로 세균을 제거한 후 각각의 세균과 혼합하여 배양한 결과 일부 세균은 미세조류의 생장을 촉진하였고, 다른 세균은 미세조류의 생장에 큰 영향을 미치지 않았다. 뿐만 아니라 조류 배양액에 세균을 배양한 결과 세균의 생장이 촉진되었다. 따라서 미세조류와 여기에 부착하여 살아가는 세균 간에는 상리공생의 상관관계가 존재하는 것으로 여겨진다.

분리된 4종의 세균 중 미세조류의 생장촉진효과가 좋은 2종의 세균에서 16S rRNA 유전자를 증폭하고 이의 염기서열을 분석한 결과 Y_1 , Y_2 로 명명한 세균은 각각 *Paenibacillus*속과 *Micrococcus*속의 세균으로 확인되었다.

이 세균들의 특징을 조사해 본 결과 대부분의 *Micrococcus*속들은 당을 발효하여 산을 생산하고, 카탈레이즈를 양성 가능하다는 특징이 있었다. 또한 *Micrococcus*속 중에서 *Micrococcus luteus*라는 종은 Biogenic amin이라는 유독성 질소 화합물을 만들어 낸다는 사실이 알려져 있었다[4]. 이는 사람에게는 유해하나 식물에게는 어떤 영향을 끼치는 지 알려진 바가 없기에 *Micrococcus luteus*가 미세조류의 생장을 촉진한다는 점에서 이 *Micrococcus luteus*라는 종이 미세조류의 생장에 긍정적인 영향을 끼칠 수 있을 것이라 예상하였다. 또한 동정한 두 균 중에 다른 종인 *paenibacillus rhizosphaerae*는 아직까지 식물과의 상호작용이 밝혀지지 않았지만, 이번 실험에서 조류의 생장을 촉진한 결과가 도출되었고, *Paenibacillus*속 중에서 *Paenibacillus polymyxa*라는 종은 이미 다양한 항생물질과 가수분해 효소를 생산하는 유용미생물임이 밝혀져 있다[5]. 또한 이 미생물은 질소고정을 하는 그람양성 세균으로 최근에 그 중요성이 크게 부각되고 있다고 한다[6]. 또한, *Paenibacillus lentimorbus*라는 종은 살선충력 및 식물 생장 촉진 효과를 가짐이 밝혀져 있다. 이와 같이 *Paenibacillus*속의 균들은 이미 식물과의 긍정적인 상호작용을 하고 있음이 실험적으로 증명되어[7] 있다. 따라서 이번 연구에서 미세조류의 생장을 촉진하는 것으로 나타난 *paenibacillus rhizosphaerae* 역시 이런 역할을 수행할 수 있을 것이라 추측해볼 수 있다.

VI. 결론

순수 배양한 조류와 세균과 혼합 배양한 조류의 생장을 비교한 결과 *Micrococcus*속과 *Paenibacillus*속의 일부 종들이 미세조류의 생장을 촉진시킨다는 사실을 확인하였으며, 이는 두 속의 세균들이 미세조류를 다른 세균들에게서 보호하거나[8] 질소화합물 등을 제공하기 때문으로 사료된다[6].

VII. 참고문헌

- [1] <https://en.wikipedia.org/wiki/Algae>
- [2] KISTI 미리안 녹색기술정보포털 2013-12-12, http://mirian.kisti.re.kr/futureknow/tech_define.jsp
- [3] Juan Luis Fuentes, Ines Garbayo, Maria Cuaresma, Zaida Montero, Manuel Gonzalez-del-valle and Carlos Vilchez (2016). Impact of Microalgae-Bacteria Interactions on the Production of Algal Biomass and Associated Compounds.
- [4] 김용상, 오현화, 엄태봉, 정도연(2014). 바이오제닉 아민 분해 활성 및 유해 미생물에 대한 항균 활성이 있는 페디오코커스 펜토사세우스 균주 및 이의 용도.
- [5] https://en.wikipedia.org/wiki/Paenibacillus_polymyxa
- [6] Kiran Preet Padda, Akshit Puri, Chris P. Chanway(2017). *Paenibacillus polymyxa* : A Prominent Biofertilizer and Biocontrol Agent for Sustainable Agriculture
- [7] Kumar S, Chauhan PS, Agrawal L, Raj R, Srivastava A, Gupta S, Mishra SK, Yadav S, Singh PC, Raj SK, Nautiyal CS(2016). *Paenibacillus lentimorbus* Inoculation Enhances Tobacco Growth and Extenuates the Virulence of Cucumber mosaic virus.
- [8] <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1287669/>

I 연구진 I

박재성 (Jaesung Park, 부산일과학고등학교, skarudf13@naver.com) 주저자 및 교신저자

이성일 (Sungil Lee, 부산일과학고등학교, reginapae@naver.com) 공동저자

정예원 (Yewon Jeong, 부산일과학고등학교, dpdnjs0116@naver.com) 공동저자

강서영 (Seoyoung Kang, 부산일과학고등학교, ksydragon01@naver.com) 공동저자

지도교사 : 노보미 (Bomi Noh, 부산일과학고등학교, nbm0327z@naver.com)

지도교수 : 최태진 (Taejin Choi, 부경대학교 미생물학과, choitj@pknu.ac.kr)

지도조교 : 김수현 (Suhyun Kim, 부경대학교, olem1140@gmail.com)

감자의 녹말 성분을 이용한 중금속 제거 모델 제작 및 적정기술 제안

진형주 · 이호진 - 세종과학예술영재학교

Design of Heavy Metal Adsorption Model and Appropriate Technology Proposal using Potato Starch

Hyungju Jin · Hojin Lee - Sejong Academy of Science of Art

국문초록

본 연구에서는 우리 주변에서 쉽게 구할 수 있는 소재로 경제적이고 실용적인 중금속 흡착 모델을 제작하기 위해 감자를 선택하였다. 감자를 이용하여 중금속을 제거하여 제거효율을 정성적으로 양금생성반응을 이용하여 측정하였으며, ICP-AES를 이용하여 제거효율을 정량화하여 등온흡착모델인 Freundlich와 Langmuir 모델을 통해 제거정도를 확인하였다. 양금 생성반응 결과 Pb와 Fe에서는 높은 제거 효율을 보였지만, Co에서는 높은 제거 효율을 보이지 못하였다. ICP-AES를 통해 정량화하여 흡착 효율을 계산 한 결과 Fe, Pb, Cu 에서는 90% 이상의 효율을 보였고, Cd와 Co에 대해서도 80% 정도의 효율을 가졌다. 등온흡착모델에 적용시킨 결과 Pb의 제거 모델은 Freundlich 모델보다는 Langmuir 모델을 따르고, Cu, Cd 및 Zn의 제거모델은 Langmuir와 Freundlich 두 흡착모델과 잘 일치하였다. Fe는 흡착강도와 흡착 친화도 값이 음수로 측정되어 두 흡착모델 모두를 따르지 않는다는 것을 알았다. 감자를 이용한 흡착모델은 비극성 흡착물질과 균일한 흡착 에너지를 갖는 흡착제에 대해 적용되는 Langmuir 모델을 따른다는 결과를 얻게 되었다. 따라서 감자전분을 활용한 제거 모델은 여러 중금속을 효과적으로 제거할 수 있는 친환경 중금속 제거모델이라 결론내릴 수 있다.

중심어 : 중금속, 녹말, 아밀로오스, 아밀로펙틴, 제거

ABSTRACT

In this study, potato was chosen as a practical and economical heavy metal adsorption model. Purification efficiency of heavy metals was measured qualitatively by sedimentation reactions. The removal efficiency was quantified by using ICP-AES and the degree of removal was confirmed by Freundlich and Langmuir isothermal adsorption models. The results of the sedimentation reaction showed that Pb and Fe had high removal efficiency, but Co had low removal efficiency. By using ICP-AES to quantify the removal efficiency, Fe, Pb, Cu showed more than 90% removal efficiency and Cd, Co showed about 80% removal efficiency and the removal model of Pb was based on the Langmuir model rather than the Freundlich model and Cu, Cd, Zn fitted well in both the Langmuir and Freundlich adsorption models. The adsorption strength and the adsorption affinity value of Fe were measured as negative values, which indicates that Fe follows neither adsorption models. In conclusion, The adsorption model using the potato follows the Langmuir model, which is normally applied to adsorbents having a uniform adsorption energy and a nonpolar absorbate. Therefore, the removal model using potato starch is an eco-friendly heavy metal removal model that can effectively remove various heavy metals.

Key words : heavy metal, starch, amylose, amylopectin, removal

I. 서론

학생들은 대부분의 시간을 학교에서 보내는 만큼 학교환경의 청결함과 쾌적함을 유지하는 것은 매우 중요하다. 하지만 학교와 그 주변에서 배출되는 먼지들은 체내로 흡입되기 쉬울 뿐 아니라, 중금속 등의 유해물질이

다량 함유되어 있어 학생들에게 특히 악영향을 끼치는 것으로 알려졌다[1]. 이처럼 납, 비소, 카드뮴 등의 중금속에 의한 오염은 심각한 사회 문제로 떠오르고 있으며, 더는 우리들과도 먼 세상 이야기가 아니다. 중금속이 배출되는 경로에는 여러 가지가 있지만, 본 연구에서는 폐수에 의한 중금속 오염에 집중해보기로 하였다. 중금속이 배출되면 먹이사슬을 따라 사람들에게까지 영향을 끼치게 된다. 또한 중금속은 소량이라도 체내에 축적되어 쌓이게 되면 배설도 되지 않고, 몸속의 단백질에 쌓이게 되어 부작용이 나타나 우리 몸에 심각한 질병을 일으키게 된다. 위와 같은 문제를 해결할 수 있는 중금속 제거 기술의 도입과 개발은 중요한 과학 이슈가 되었다.

지금까지 중금속 폐수에서 중금속을 제거하는 방법은 크게 화학적 제거와 물리적 제거 2가지로 나눌 수 있다. 화학적 제거는 폐수 중금속의 이온성 및 착물의 이온성에 의해 제거하는 방법이고, 물리적 제거는 활성탄, 막을 이용한 여과 등의 물리학적 수작 작용을 이용하여 폐수 내 중금속을 제거하는 방법이다. 하지만 두 방법 모두 비용 상의 문제나 오랜 시간이 걸리는 등 고비용, 저효율의 기술들이며, 낮은 농도의 금속이온을 제거할 때 낮은 처리효율을 보이는 것으로 알려져 있다[2]. 따라서, 우리 주변에서 흔하게 구할 수 있는 값싼 재료를 이용해 고효율 저비용의 중금속 흡착제를 구현할 수 있는 새로운 기술에 대한 요구가 높아지고 있다.

감자는 탄수화물이 풍부하고 단위 면적당 생산량이 많아 옥수수, 벼, 밀과 함께 세계 4대 작물 중 하나이다. 또한 감자의 풍부한 탄수화물은 대부분이 전분, 즉 녹말로 이루어져 있다. 이처럼 재배량이 많은 감자는 주로 가공과정을 거쳐 기호식품의 형태로 바뀌는데, 가공과정에서 많은 전분 성분들이 버려지게 된다[3]. 또한, 대표적인 폐수 내 중금속 제거 기술로는 착화합물 형성 반응을 이용하는 방법이 있는데, 감자 녹말성분의 아밀로오스나 아밀로펙틴의 하이드록실 작용기의 산소에 존재하는 고립전자쌍이 중금속 양이온에 리간드처럼 작용하면서 착이온을 형성하는 것으로 알려져 있다[4-5]. 따라서, 감자의 높은 재배량과, 중금속 양이온에 대해 리간드로 작용하는 성질을 이용한다면, 효과적인 중금속 제거 기술을 개발할 수 있을 것이다. 특히, 가공과정에서 버려지는 감자의 전분을 활용한다면 중금속 제거 비용을 획기적으로 낮출 수 있을 것이라 기대된다.

본 연구에서는 일상생활 환경에서도 손쉽게 제작, 사용할 수 있는 중금속 제거제를 개발하기 위해, 버려지는 감자 전분을 재활용하는 저비용의 환경 친화적 기술을 제안하는 것을 목표로 두었다. 만일 감자의 녹말 성분이 중금속을 제거할 수 있다면, 유사한 녹말 성분을 가지는 열대 지방의 카사바나 얀 등의 중금속 제거율을 확인하고 저비용 고효율의 중금속 제거 기술을 개발할 수도 있을 것이다.

따라서 본 연구는 중금속 폐수의 효과적인 중금속 제거를 위해 일상생활에서 흔히 사용할 수 있는 감자 전분을 이용해 중금속 이온(Cd^{2+} , Fe^{3+} , Pb^{2+} , Cu^{2+} , Co^{2+}) 흡착 효율과 흡착 특성을 조사하여 감자전분의 중금속 흡착제로서의 적합성에 대해 연구하였다.

II. 이론적 배경

1. 착화합물

가. 착화합물

착화합물, 배위화합물이라고도 하는데, 비어있는 오비탈을 많이 갖는 중심금속 이온에 리간드 고립전자쌍이 배위결합으로 형성되는 것을 말한다. 리간드는 착화합물 중심의 금속이온에 배위하는 원자나 분자나 이온을 의미한다. 전이금속은 대부분 양이온으로, 리간드의 경우 주로 음이온이나 극성분자가 되는 것이 일반적이다. 중심금속은 루이스 산, 리간드는 경우 루이스 염기로 작용한다.

2. 중금속 흡착 효율과 등온흡착식

가. 제거효율의 계산

중금속의 제거 효율은 다음과 같이 계산한다. $((\text{초기농도}) - (\text{나중농도})) / \text{초기농도} * 100(\%)$ 감자전분이 중금속 용액을 제거한 뒤 초기 농도와 나중 농도의 차이를 계산하여 얼마나 감자전분이 중금속을 흡착하는지 확인할 수 있었다. 각 중금속 별로 흡착효율을 비교하고, 감자 전분의 농도에 따른 흡착효율을 비교할 것이다.

나. 중금속 등온흡착식

중금속 등온흡착식은 흡착평형상태에서의 중금속의 잔존농도를 분석한 중금속 제거량을 산출하는 흡착식이다. 이는 Freundlich와 Langmuir의 등온흡착식을 통해 계산할 수 있다. Freundlich 등온흡착식은 다음과 같이 표현이 가능하다[6].

$$q = KC_{eq}^{1/n}$$

위의 식에서 q는 흡착제의 무게 당 중금속 이온이 흡착된 질량(mg/g)을 의미하고, C는 흡착 후 평형 농도 K는 흡착하는 능력, $1/n$ 은 흡착의 강도를 나타낸다. 이를 log를 이용하여 선형화하면 다음과 같다.

$$\log q = \log K + 1/n \log C_{eq}$$

K의 값이 클수록 흡착제의 능력이 증가한다. 또한, 흡착강도가 그 값이 0.1~0.5 안에 속할 때 흡착을 당하는 물질인 피흡착제가 흡착 효과가 좋고, 2 이상이면 흡착이 어렵다. 만약 위의 식에서 $1/n$ 이 1보다 작으면 Langmuir식을 사용할 수 있다. 위 식은 유기물질들의 흡착에 대한 실험의 경험식을 토대로 알게 된 식이다. 위 식에서 기울기가 1보다 작은 경우가 많은데, 기울기가 1보다 크게 되는 경우는 드물게 나타난다.

Langmuir식의 경우 균질하게 분포한 입자 표면에 오염물질이 하나의 층으로 흡착하고, 포화흡착량이 있다고 가정한 모델이다. 이 모델 식의 경우에는 실제의 오염물질 흡착에는 적용시키기 어렵지만 이온교환, 리간드교환에 적용이 가능하다. Langmuir 흡착식은 다음과 같이 표현이 가능하다[7].

$$\frac{q}{q_m} = \frac{bC_{eq}}{1 + bC_{eq}}$$

주어진 식에서 q는 중금속 흡착량(mg/g), q_m 은 단분자층을 구성하는 포화흡착량(mg/g), b는 결합의 세기, C_{eq} 는 남은 중금속의 평형농도(mg/L)를 의미한다. 이를 선형화해서 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{C_{eq}}{q} = \frac{1}{bq_m} + \frac{C_{eq}}{q_m}$$

주어진 식에서 q_m 이 클수록 흡착할 수 있는 최대량이 많다는 것이고, b가 큰 것은 흡착친화도가 높다는 것을 의미한다.

III. 연구 방법 및 절차

1. 앙금생성반응을 이용한 중금속 종류별 제거 효과 확인

감자를 이용하여 중금속을 제거하는 것이 실제로 효과가 있는지 살펴보았다. 카드뮴(Cd^{2+}), 구리(Cu^{2+}), 납(Pb^{2+}), 코발트(Co^{2+}), 철(Fe^{3+}) 5개의 중금속 이온의 제거 효율을 감자 전분을 이용하여 측정하는 실험을 통해 확인하였다. 각각의 중금속은 $Cd(NO_3)_2$, $CuCl_2$, $Pb(NO_3)_2$, $CoCl_2$, $FeCl_3$ 를 이용하여 용액을 제조하였다. 이후 중금속 성분의 양을 앙금생성반응을 통해서 중금속이 제거되었는지 여부를 앙금생성반응을 통해 정성적으로 확인하였다.

가. 용액제조

아래 표와 같은 방법으로 용액을 제조하였다.

〈Table 1〉 Method of making solutions

용액	제조한 용액의 양	용액 제조 방법
$Cd(NO_3)_2$	2.00mM 1L	$Cd(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ 0.617g + 증류수 → 1.00L 용액
$CuCl_2$	2.00mM 1L	$CuCl_2 \cdot 2H_2O$ 0.341g + 증류수 → 1.00L 용액
$Pb(NO_3)_2$	2.00mM 1L	$Pb(NO_3)_2$ 0.662g + 증류수 → 1.00L 용액
$CoCl_2$	2.00mM 1L	$CoCl_2 \cdot 6H_2O$ 0.476g + 증류수 → 1.00L 용액
$FeCl_3$	2.00mM 1L	$FeCl_3 \cdot 6H_2O$ 0.541g + 증류수 → 1.00L 용액
KI	0.100M 100mL	KI 0.166g+증류수 → 100mL 용액
Na_2S	0.100M 100mL	$Na_2S \cdot 5H_2O$ 1.681g + 증류수 → 100mL 용액

나. 감자 전분을 이용한 중금속 제거 실험

위에서 제작한 중금속 용액을 이용하여 앙금생성 반응을 통해 감자의 중금속 제거 실험을 진행하였다. 중금속별로 용액을 비커에 30mL씩 담았다. 각각의 비커에 감자 전분을 10g씩 담고, 이를 100rpm에서 24시간동안

동안 교반시켰다. 이후, 감자 전분을 침전시키기 위해 conical tube로 옮긴 다음 4000rpm에서 5분 동안 Centrifuge 시켰다. Centrifuge 이후 상층액을 다른 Conical Tube에 15mL 덜어두고, 다른 Conical Tube에 원래의 중금속 용액을 똑같이 15mL 덜어내었다. 여기까지의 과정을 녹말 처리*라 명명한다. 두 개의 tube에 KI, Na₂S 용액을 2mL 첨가하여 양금생성 반응을 관찰하였다. 각각의 중금속에 대해 동일한 방법으로 실험을 진행하고, 중금속의 제거 여부를 정성적으로 확인하였다. 각 중금속의 종류 별로 어느 정도의 제거 효율을 갖고, 감자가 어떤 중금속을 가장 잘 제거하는지 확인하였다.

2. 감자 전분의 중금속 제거 능력 정량화 및 흡착 모델 탐구

감자 전분의 중금속 제거 능력을 정량적으로 측정하기 위해 중금속 용액을 감자전분으로 녹말 처리* 한 다음, ICP-AES로 중금속의 농도 변화를 측정하였다. <Table 1>에서 사용한 중금속 용액을 감자 전분의 질량을 1.0g, 2.0g, 5.0g, 10.0g으로 달리하여 녹말 처리 한 후 등온흡착모델에 적용하여 질량에 따른 감자전분의 중금속 제거효율을 계산하였다. 이를 위해 3회 반복실험하여, 평균값을 이용해 Freundlich 모델과 Langmuir 모델에 적용시켜 보았다.

가. 중금속 용액 제조 및 중금속 제거 실험

중금속에 대해 <Table 1>의 5가지 중금속 용액을 비커 5개에 각각 5mL씩 담은 후, 감자 전분을 1.0g, 2.0g, 5.0g, 10.0g을 저울로 재서 각 비커에 담았다. 이후 100rpm에서 24시간동안 교반시킨 후, conical tube에 옮겨 담아 Conical tube를 4000rpm에서 5분 동안 centrifuge하고, 상층액을 15mL 덜어 시료를 준비하였다. 이후 ICP를 이용하여 녹말처리* 전후의 중금속 이온의 농도 변화를 측정한다.

나. ICP-AES 전처리 및 촬영

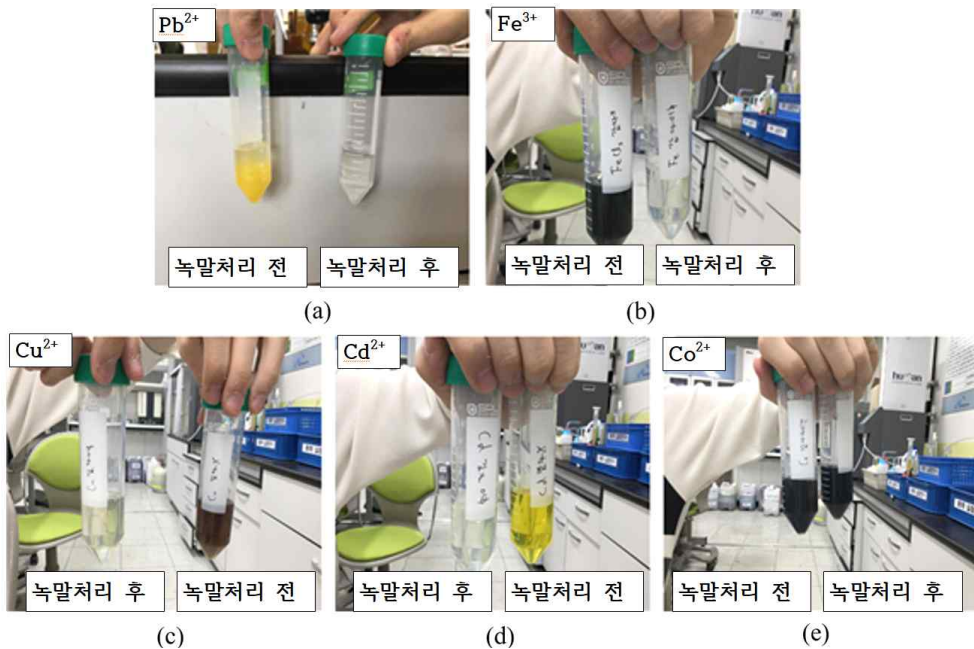
Centrifuge한 이후 덜어낸 상층액 1mL 피펫을 이용하여 전처리 plate에 담고 질산을 10mL 함께 담은 후, 용액들을 담고, 슬리브에 밀봉하여 전처리 준비를 마무리하였다. 5개의 용액 중 하나의 슬리브는 Control vessel로 이용하여 온도센서를 달 수 있는 슬리브에 담았다. 밀봉을 마치고, 온도센서를 전처리 장치에 연결한 뒤 이유식 모드를 선택하여 15분 간 전처리를 진행한 후, ICP-AES 장비를 통해 농도를 측정한다. ICP-AES는 공주대학교 공동실험실습관의 OPTIMA 5300 DV(PerkinElmer)를 이용해 측정하였다.

IV. 연구 결과

1. 양금생성반응을 이용한 중금속 종류별 제거 결과

감자전분에 의해 중금속이 제거되었다면 감자전분을 처리한 용액과 처리하지 않은 원래의 중금속 용액에 각 양금생성 반응을 시켰을 때 감자전분을 처리한 용액에서는 양금이 생기지 않을 것이라고 예측하였다.

가. 중금속 제거 결과



[Fig. 1] Result of Sedimentation Reaction Before and After Removal
(a) Pb^{2+} (b) Fe^{3+} (c) Cu^{2+} (d) Cd^{2+} (e) Co^{2+}

[Fig.1] 을 통해서 알 수 있듯이 원래 용액은 양금생성반응을 통해서 PbI_2 , CuS 의 노란색 양금, Fe_2S_3 , CuS 의 검정색 양금을 형성하였지만, 감자 전분을 이용해서 중금속을 제거한 용액은 양금이 생기지 않고 투명한 것을 알 수 있었다. 한편, Co^{2+} 이온은 다른 중금속 용액들과는 다르게 녹말 처리 전후의 양금생성 정도가 크게 변하지 않음을 확인하였다. 따라서 감자 전분의 Co^{2+} 이온 제거 효과가 다소 떨어짐을 확인할 수 있었다. 정리 하면, 감자전분을 이용했을 때 Pb^{2+} , Fe^{3+} , Cu^{2+} , Cd^{2+} 의 중금속 이온이 거의 완벽하게 제거된다는 것을 알 수 있었고, Co^{2+} 의 경우 제거 효과는 다소 약하다는 것을 알 수 있었다.

2. 감자 전분의 중금속 제거 모델 탐구

가. 중금속 종류에 따른 제거 효율

감자전분 10g을 중금속 용액 2mM에 처리하여 중금속을 제거하기 전과 후의 농도를 비교하여 중금속 흡착 효율을 계산하여 <Table 2>에 제시하였다. 또한 중금속 흡착특성을 조사하기 위해 2mM의 중금속 용액 25mL에 넣은 감자전분의 양을 달리하여 Freundlich식과 Langmuir식을 통해 plotting한 다음에 등온흡착식을 이용하여 분석하였다. 실험은 3회 반복하여 ICP-AES로 측정하였으며, <Table 3>는 세 결과의 평균값이다.

〈Table 2〉 Average Concentration of heavy metals before and after treatment of 10g potato powder(mg/L) and its removal efficiency(%)

	녹말처리 전	녹말처리 후	효율(%)
Cd ²⁺	124.9±0.142	23.17±0.127	81.45
Fe ³⁺	103.5±0.162	0.4062±0.0422	99.61
Pb ²⁺	385.3±1.42	1.824±0.0342	99.53
Cu ²⁺	80.89±0.523	4.297±0.0229	94.69
Co ²⁺	107.3±0.323	22.75±0.0543	78.80

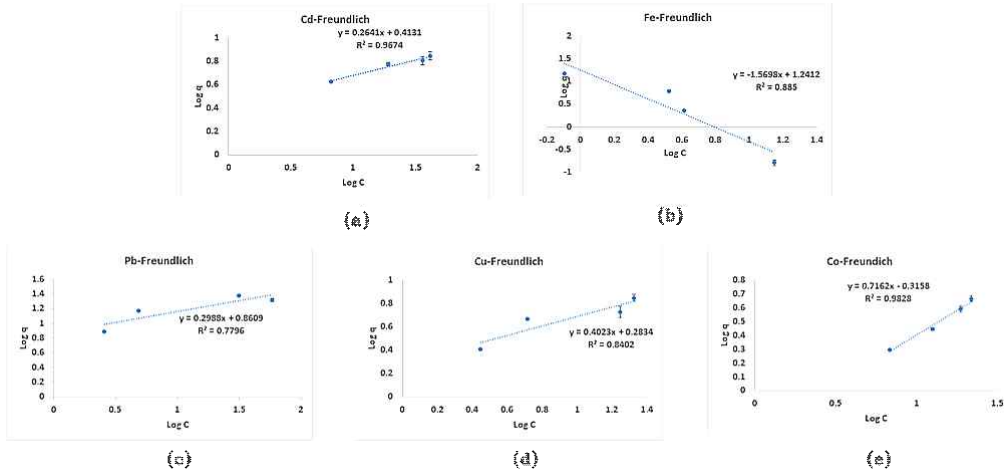
〈Table 3〉 Average of residual heavy metal concentration according to mass of potato powder(mg/L)

	Cd ²⁺	Fe ³⁺	Pb ²⁺	Cu ²⁺	Co ²⁺
0	48.76±0.0387	15.65±0.123	79.378±0.263	28.21±0.211	26.52±0.163
1g	41.73±0.656	0.7982±0.132	58.83±1.19	21.22±0.516	21.90±0.432
2g	36.00±1.26	3.346±0.255	31.63±1.48	17.64±1.28	18.76±0.652
5g	19.12±1.30	4.118±0.242	4.886±0.857	5.188±0.425	12.58±0.477
10g	6.704±0.511	14.05±0.236	2.574±0.347	2.806±0.255	6.812±0.242

*위 데이터는 각각 3회 측정하여 평균한 값임.

감자 전분의 중금속 종류별 제거효율은 〈Table 2〉와 같다. 각 중금속의 용액에 감자전분을 10g넣었을 때의 제거효율은 Fe³⁺>Pb²⁺>Cu²⁺>Cd²⁺>Co²⁺의 순으로 나타났다. 특히 Fe³⁺와 Pb²⁺의 제거효율은 각각 99.6%, 99.5%로 다른 중금속의 제거효율보다 월등히 높았다. Cu²⁺의 제거효율은 94.7%, Cd²⁺의 제거효율은 81%, Co²⁺의 제거효율은 78.8%로 나타났다. 이러한 경향성은 다른 생체재료인 참깨 biochar[8]를 이용한 경우와 해조류를 이용해서[2,9] 중금속을 흡착할 때도 나타났다. 참깨 부산물 biochar를 이용한 중금속 제거효율의 측정에서는 Pb²⁺의 제거효율이 99%, Cu²⁺의 제거효율이 67.2%이었으며, Cd²⁺의 제거효율은 53.2%로 나타났다[8]. 이와 비슷하게 reed biochar를 이용한 중금속 제거효율의 측정에서는 Pb²⁺의 제거효율이 50.1%, Cu²⁺의 제거효율이 12.8%, Cd²⁺의 제거효율이 10.8%로 나타났다[10]. 감자 전분의 중금속 제거효율은 Pb²⁺ 99.5%, Cu²⁺ 94.7%, Cd²⁺ 81%로 기존의 다른 생체재료인 참깨 부산물 biochar, reed biochar 등과 비교했을 때 본 연구성과인 감자전분의 중금속 흡착능력이 가장 뛰어나다는 것을 확인할 수 있다[8, 10]. 즉, 감자 전분 속 녹말이 다른 생체재료를 이용한 흡착제들에 비해 효과적으로 중금속을 제거한다는 것을 알 수 있다. 중금속의 종류마다 제거 효율이 다른 이유와, 감자전분의 중금속 제거 특성을 더 알아보기 위해서 등온흡착모델에 적용해 보았다. 등온흡착모델에 적용 시, 〈Table 3〉의 평균값을 사용하였다.

나. Freundlich식을 적용한 감자전분의 중금속 제거 모델 탐구

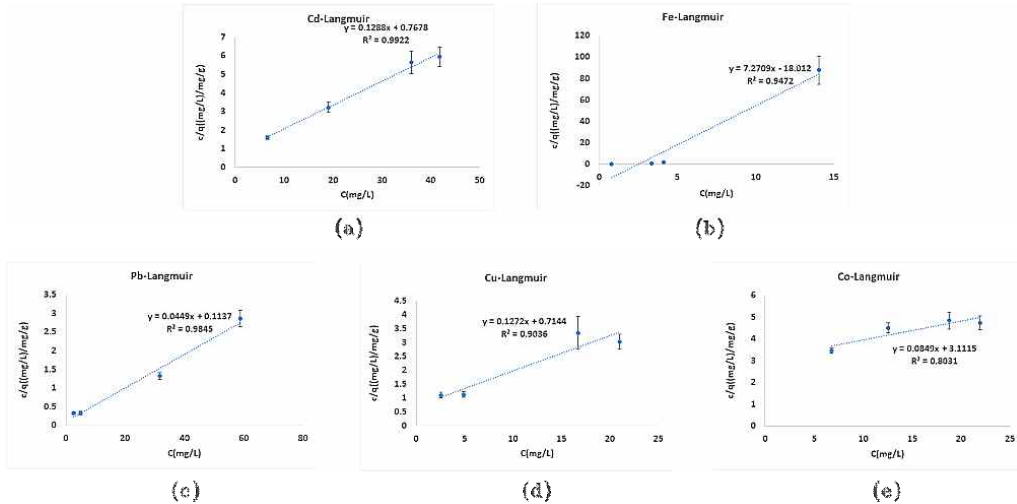
[Fig. 2] Linearization of Freundlich isotherm equation (a) Cd^{2+} (b) Fe^{3+} (c) Pb^{2+} (d) Cu^{2+} (e) Co^{2+}

〈Table 4〉 Determination of the parameters for the Freundlich assorption isotherms

	Freundlich isotherm		
	K	1/n	R^2
Cd^{2+}	2.59	0.264	0.9674
Fe^{3+}	17.4	-1.57	0.8850
Pb^{2+}	7.26	0.299	0.7796
Cu^{2+}	1.92	0.402	0.8402
Co^{2+}	0.483	0.716	0.9828

각각의 중금속에 대한 실험결과의 평균값을 Freundlich식에 대입하여 선형화 시킨 결과는 [Fig. 2]에 제시되어 있다. 이후 각각의 데이터에 표준편차를 이용하여 그래프에 오차범위를 나타내었다. 표준편차 값이 y축 scale에 비해 작은 경우 그래프에 나타나지 않았다. 이를 이용하여 중금속의 흡착능력(K)과 흡착강도(1/n)를 계산한 결과는 〈Table 4〉에 제시되어 있다. Cd^{2+} , Fe^{3+} , Pb^{2+} , Cu^{2+} , Co^{2+} 의 흡착능력(K)은 각각 2.59, 17.4, 7.26, 1.92, 0.483 으로 다른 중금속에 비해서 Pb^{2+} 와 Fe^{2+} 가 흡착능력이 큰 것으로 나타났다. Cd^{2+} , Fe^{3+} , Pb^{2+} , Cu^{2+} , Co^{2+} 의 흡착강도 (1/n)는 각각 0.264, -1.57, 0.299, 0.402, 0.716로 나타났다. 모든 중금속의 경우 흡착강도가 1보다 작기 때문에 langmuir모델을 따른다는 것을 알 수 있다. 하지만 철의 경우 흡착강도가 음수이므로 모델의 적합성을 판단할 수 없었다.

다. Langmuir식을 적용한 감자전분의 중금속 제거 모델 탐구

[Fig. 3] Linearization of Langmuir isotherm equation (a) Cd^{2+} (b) Fe^{3+} (c) Pb^{2+} (d) Cu^{2+} (e) Co^{2+}

〈Table 5〉 Determination of the parameters for the Langmuir absorption isotherms

	langmuir isotherm		
	q_m	b	R^2
Cd^{2+}	7.76	0.168	0.9922
Fe^{3+}	0.138	-4.04	0.9472
Pb^{2+}	22.3	0.439	0.9845
Cu^{2+}	7.86	0.178	0.9036
Co^{2+}	11.8	0.0273	0.8031

감자전분을 이용해 중금속 흡착실험 결과의 평균을 이용하여 Langmuir식에서 도출한 선형화식은 [Fig. 3]에 나타내었다. 이후 각각의 데이터에 표준편차를 이용하여 그래프에 오차범위를 나타내었다. 표준편차 값이 y축 scale에 비해 작은 경우 그래프에 나타나지 않았다. 각각의 중금속의 선형화식을 이용하여 각각의 중금속의 최대흡착량 (q_m)값과 흡착친화도(b) 값을 구하여 〈Table 5〉에 나타내었다. Langmuir 등온흡착식에서 최대흡착량 (q_m)은 Cd^{2+} , Fe^{3+} , Pb^{2+} , Cu^{2+} , Co^{2+} 가 각각 7.76mg/g, 0.138mg/g, 22.3mg/g, 7.86mg/g, 11.8mg/g로 Pb와 Cu가 다른 금속들에 비해서 상당히 높은 것을 알 수 있었다. 하지만, 철의 경우 흡착친화도 값이 음수이므로 모델의 적합성을 판단할 수 없었다.

등온흡착모델을 감자전분에 적용시킨 결과, Pb^{2+} 의 경우, Freundlich 등온흡착식보다 Langmuir 등온흡착식이 더 일치하였다. Cu^{2+} , Cd^{2+} 및 Zn^{2+} 의 흡착량은 전반적으로 Langmuir와 Freundlich 등온흡착식 모두 적합하였지만, 두 모델을 선형화 했을 때 R^2 값을 비교한 결과 Langmuir 모델이 조금 더 적합하였다. 특히 Langmuir 모델의 경우 R^2 값이 0.9 이상으로 모델과의 일치도가 매우 높았다. 따라서 본 연구에서는 감자 전분은 전반적으로 Langmuir 등온흡착모델과 잘 일치한 것을 알 수 있었다. 이를 통해, 본 연구로 진행된 감자 전분 중금속 제거모델에 대해 추정할 수 있었다. Langmuir 모델을 따르는 물질들은 기질의 표면이 흡착 과정

에 있어서 같은 활동도를 가져 에너지의 관점으로 볼 때 균일하며, 흡착된 분자들은 서로 상호작용하지 않는다. 또한, 흡착된 작물의 구조는 동일하며, 흡착의 결합력이 단분자층으로만 일어나고, 그 이상 분리된 경우 흡착이 일어나지 않는다. 즉, 감자 전분 중금속 제거 모델은 단층 중금속 흡착 모델로, 기질 상에서 균일하게 중금속을 흡착 및 제거할 수 있다는 결론을 얻을 수 있었다[11-12]. 감자 전분 표면의 녹말성분만이 리간드 배위결합을 통해 중금속을 흡착하므로, 감자 전분을 이용하여 중금속 흡착할 시 전분의 크기를 최대한 작게 해야 흡착효율을 증가시킬 수 있을 것이다.

하지만 Fe^{3+} 는 Freundlich 흡착 모델로 분석을 했을 때 흡착강도($1/n$)값이 음수로 측정되었고, Langmuir 흡착모델을 이용했을 때도 흡착친화도(b)값이 음수로 측정되었다. 그러므로 흡착능력 K 값이나 최대흡착량 q_m 값이 정확한지 알 수 없으며, Freundlich 모델과 Langmuir 모델중 어느 모델을 사용해야 하는지 또한 판단할 수 없었다. 뿐만 아니라 Fe^{3+} 는 흡착제의 질량이 증가할수록 흡착량이 감소하는 특성을 보였다. 하지만 모든 등온흡착모델들은 흡착제의 질량이 증가하면 단위무게당 흡착량 또한 증가하는 것을 보여주므로[11], 이에 대해서는 더욱 추가적인 실험이 필요하다.

또한 Co^{2+} 는 정성분석과 정량분석에서 모두 흡착 효율이 다른 중금속에 비해 낮은 것으로 측정되었다. 이 이유는 Langmuir 모델의 특징과 관련되어 있다고 생각된다. Co의 경우 ^{58}Co 과 ^{60}Co 의 두 가지 동위원소가 거의 같은 비율로 존재하며, 다른 금속 양이온들에 비해 물속의 다른 리간드들과도 쉽게 결합한다[13]. 본 연구에서 사용된 중금속 용액에는 중금속 양이온뿐만 아니라 Cl^- 음이온까지 포함되어 있다. Co^{2+} 는 물속의 다른 리간드들과 쉽게 착이온을 형성하므로, Co^{2+} 는 Cl^- 음이온과도 배위결합을 통해 착이온을 형성할 수 있다, 반면, 다른 중금속 양이온들은 수용액상에서 대부분 오직 물과 배위결합을 한 형태로 존재할 것이다. Co^{2+} 는 다른 중금속 양이온들과는 달리 Cl^- 를 포함한 착이온이 존재할 수 있기 때문에 녹말과 잘 흡착되지 않았을 것이라고 생각된다. 이를 검증하기 위해서는 추가적인 실험이 더 이루어져야 할 것이다.

V. 결론 및 제언

본 연구에서는 감자의 녹말성분을 이용해서 중금속을 90%가 넘는 효율로 완벽하게 제거할 수 있음을 알 수 있었다. 다만, 이후에 다음과 같은 내용들이 추가적으로 이루어져야 한다.

먼저 Fe^{3+} 와 Co^{2+} 이온의 흡착 특성에 대한 분석이 이루어져야 한다. Fe^{3+} 이온은 흡착제의 질량이 증가할수록 흡착량이 감소하였는데, 등온흡착모델에 따르면, 흡착제의 질량이 증가하면, 단위무게당 흡착량 또한 증가해야 한다. 이에 대해서 Fe^{3+} 이온에 대해서는 추가적인 분석을 통해 흡착 특성을 파악해야한다고 생각한다. 또한, Co^{2+} 이온의 경우, 중금속 제거 효율이 78% 정도로 다른 중금속 양이온들에 비해 제거 효율이 비교적 낮은 것으로 측정되었다. 본 연구에서는 이에 대해 물 이외의 다른 리간드와 잘 결합하는 성질 때문일 것이라는 가설을 세웠는데, 이를 검증할 수 있는 실험들이 추가로 진행되어야 할 것이다.

다음으로, 이 실험은 오직 감자전분을 이용한 흡착에 대한 내용만을 포함하고 있다. 녹말 성분의 중금속 흡착에 대해 일반적인 특성을 알기 위해서는 녹말성분을 포함하는 다른 작물을 이용한 중금속 흡착실험이나, 녹말 조성에 따른 중금속 흡착 효율을 비교하는 실험 등이 추가적으로 이루어져야 할 것이다. 만약 이런 추가적인 실험에서도 녹말의 중금속 흡착 특성이 밝혀진다면, 굳이 감자의 녹말 성분이 아니더라도, 우리 주변에서 쉽게 구할 수 있는 녹말 함유 작물을 이용해 중금속 오염 문제를 해결할 수 있을 것이다. 특히, 아프리카 등 중금속 오염 문제가 심각한 지역에서 녹말 작물인 카사바나 얀 등을 활용한 중금속 흡착 모델을 이용할 수 있다. 감자전분의 녹말성분이 리간드 배위결합으로 중금속을 흡착하는 결과를 이용하여, 카사바와 얀 등의 녹말 작물을 전분화하고, 필터를 제작한다면 저비용, 고효율의 중금속 흡착 모델을 제작할 수 있을 것이다. 필터를 제작하고, 아프리카 등의 지역에 보급하여 중금속 오염 문제로 고통 받는 사람들에게 적정기술로써 활용이 가능할 것이다. 새로운 중금속 흡착 모델의 적용을 통해 제 3세계에서 새로운 문제로 대두되고 있는 중금속 오염 문제 해결에 직접적으로 기여할 수 있는 적정기술로 사용할 수 있을 것으로 기대된다.

VI. 참고문헌

- [1] Fergusson, J. E. and Kim, N. D., (1991) "Trace elements in street and house dusts : sources and speciation," Sci. of the Total Environ., 100, 125~150.
- [2] Choi, I.W. (2004). Biosorption of heavy metals and development of biosorbent by using seaweeds. Master Science Thesis, Sunchon National University, Korea
- [3] 최정민 외(2017), "식품용 Hemicellulase 계열 효소를 이용한 국내산 감자 가공 부산물의 전분 추출 및 이화학적 특성," 산업식품공학 21.3 : 280-285.
- [4] Ciesielski, W., Lii, C. Y., Yen, M. T., & Tomasik, P. (2003). Interactions of starch with salts of metals from the transition groups. Carbohydrate polymers, 51(1), 47-56.
- [5] Lai, V. M. F., Tomasik, P., Yen, M. T., Hung, W. L., & Lii, C. Y. (2001). Rerexamination of the interactions between starch and salts of metals from the non-transition groups. International journal of food science & technology, 36(3), 321-330.
- [6] Freundlich, H.M.F. (1906). Over the adsorption in solution. J. Phys. Chem, 57:385-470
- [7] Langmuir, I. (1918). The adsorption of gases on plane surface of glass, mica and platinum. J. Ame. Chem. Soc. 40:1361-1403
- [8] 최익원, 서동철, 강세원, 이상규, 서영진, 임병진, 허종수, 조주식. (2013). 참깨 부산물 Biochar의 중금속 흡착특성. 한국토양비료학회지, 46(1), 8-15.
- [9] Choi, I.W., S.U. Kim, D.C. Seo, B.H. Kang, B.K. Sohn, Y.S. Rim, J.S. Heo, and J.S. Cho, (2005). Biosorption of heavy metals by biomass of seaweeds, Laminaria species, Ecklonia stolonifera, Gelidium amansii and Undaria pinnatifida, Korean J. Environ. Agric. 24:370-378.
- [10] Choi, I.W., Kim, J.H., Lee, S.H., Lee, J.K. Seo, D.C., and Cho, J.S. (2016). Adsorption Characteristics of Cd, Cu, Pb and Zn from Aqueous Solutions onto Reed Biochar, 49(5), 489-494.
- [11] 나춘기, 한무영, 박현주. (2011). 흡착제의 흡착특성 규명을 위한 흡착모델의 적용성 평가(1). 대한환경공학회지, 33(8), 606-616.
- [12] Ruthven, D.W. (1984). Principles of Adsorption and Adsorption Process. John Wiley & Sons, U.S.A.
- [13] Say, R., A. Denizli, and M.Y. Arica. 2001. Biosorption of cadmium(II), lead(II), and copper(II) with the filamentous fungus Phanerochaete chrysosporium. Bioresour. Technol, 76:67-70.
- [13] Kim, J. H., Jung, K. J., Lee, K. W., & Park, H. H. (1992). The Development of Radioactive Waste Treatment Technology (V). KAERI, KAERI-NEMAC/RR-62/92, 2-1.

I 연구진 I

진형주 (Hyungju Jin, 세종과학예술영재학교, wildhunter@sasa.hs.kr) 주저자

이호진 (Hojin Lee, 세종과학예술영재학교, meezzi@sasa.hs.kr) 공동저자

지도교사 : 성수미 (Sumi Seoung, 세종과학예술영재학교, sumiseong@gmail.com)

지도교수 : 박찬우 (Chanwoo Park, 전자통신연구원(ETRI), chanwoo@etri.re.kr)

밝은 구상성단의 질량 측정을 통한 항성계 진화과정 연구

김현수, 김준홍, 문성준, 하정원, 김세린 - 대구일과학고등학교

Study on the Evolution of the Stellar System through the Estimation on the Mass of the Bright Globular Clusters

Hyeonsu Kim, Junhong Kim, Seongjun Moon, Jeongwon Ha, Serin Kim - Daegu Il Science High School

국문초록

성단은 같은 성간운에서 같은 시기에 생성된 초기 질량이 다른 별들의 색, 등급 등 물리량을 한꺼번에 탐구할 수 있어 항성계의 진화과정을 연구하는 데에 있어 중요한 관측대상이다. 우리 은하의 구상성단은 특히 많은(수백 개 이상) 별들이 밀집된 구형 항성계로, 여러 구상성단이 생성된 시기에 따라 어떤 차이가 있는지 살펴봄으로써 우리 은하의 진화 과정에 대한 힌트를 얻을 수 있을 것이다. 이에 착안하여 본 연구에서는 구상성단의 대표적인 물리량인 질량과, 구상성단의 대략적인 나이를 보여줄 수 있는 성단의 평균 색지수 사이의 관계를 탐구하였다. 연구대상이 된 구상성단은 밝은 구상성단인 M2, M13, M15, M56, M71, M92 이다. 천문학에서 질량 측정을 위해 주로 사용하는 비리얼 정리를 이용하기 위해서는 구상성단의 반지름과 속도 분산을 알 필요가 있다. 따라서, 각반지름 측정을 위해 광학 영역에서 이미지를 촬영하였고, 속도 분산 측정을 위해 분광 관측을 하여 구상성단의 적분 스펙트럼을 얻었다. 한편, B, V 필터를 사용하여 얻은 이미지에서 각각 측광을 수행해 성단의 평균 색지수를 구했다. 이를 바탕으로 색지수에 따른 성단의 질량을 비교하였다. 그리고 종합적으로 구상 성단의 평균 색지수에 따른 구상성단의 질량 관계를 도출하여 항성계 진화와 연관 지어 분석하였다. 이를 통해 생성된 지 오래된 성단이 질량이 작은 경향이 있다는 것을 알 수 있었다. 또한 초기 우리은하 성운에서 생성된 성단이 수축했을 때 생성된 성단보다 질량이 작다는 사실을 추론할 수 있었다. 보다 신뢰도 있는 결과를 얻기 위해서는 추가적인 관측이 필요할 것으로 요구된다.

중심어 : 구상성단, 색지수, 진화 과정, 질량, 나이

ABSTRACT

Star clusters are important objects in study of the stellar system's evolution process because they show the evolution of stars which have different initial mass created at the same time in the same interstellar cloud. The globular clusters in our Galaxy consist of over hundreds of stars. By examining the differences of the various globular clusters' physical properties, we can get a hint about the evolution of stellar system. In this study, we investigated the relationship between the mass, which is a representative physical quantity of globular clusters, and the mean color indexes of clusters that can show the approximate age of globular clusters. Targets used in this study are bright globular clusters, M2, M13, M15, M56, M71 and M92. In order to use the virial theorem, which is mainly used to measure the mass in astronomy, it is necessary to know the radius and the velocity dispersion of the globular clusters. Therefore, we took images in optical domain to determine the angular radius. Through the spectroscopic observations we could measure the velocity dispersion by obtaining the integral spectrum of spherical clusters. The average color index of clusters were obtained by performing photometry on each of the images taken using the B, V filters. With this, we compared the masses of the clusters according to the average color indexes and derived the mass relationship of globular clusters with mean color index. The result shows that older clusters tend to be smaller in mass and the clusters produced in the early our galaxy's nebula have a smaller mass than the clusters generated when it collapsed. Additional observations are required to obtain more reliable results.

Key words : globular clusters, color indexes, evolution process, mass, age

1. 서론

별의 수명은 인간의 생애 비교하자면 영원에 가까울 정도로 길다. 그렇기 때문에 우리는 이를 직접 관찰하고 변화과정을 연구할 수 없다. 그래서 천체물리학자들은 우주공간 속의 항성의 분포를 이용하여 간접적으로 별의 일생을 예측한다. 그리고 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 별이 일생동안 변화해 가는 과정을 확인한다. 그러나 우리는 항성 하나를 가지고 별의 진화에 대하여 연구하는 것이 아닌 구상성단을 통해 별의 진화에 대하여 연구하게 되었다. 구상성단은 우주상에서 가장 오래된 항성계들 중 하나이며[1] 중력으로 묶여 밀집한 구형 성단이다[2]. 뿐만 아니라 은하의 초기 역사를 담고 있기 때문에 구상성단을 이용해 은하의 형성과 초기 진화에 관한 연구를 할 수 있다[3, 5]. 또한 구상성단이 생성된 시기에 의해 구상성단 안에 있는 별들의 진화가 이루어진 시간의 차이가 발생하기 때문에 전체적인 색지수가 달라질 수 있다. 이를 통해 성단을 연구함으로써 질량에 따른 별의 진화 모델을 검증할 수 있다는 사실을 알게 되었다. 별의 진화를 연구하는 것을 직접적으로 관찰하기에는 불가능하다. 그렇기에 구상성단 분석을 통하여 간접적으로 알아보고자 한다. 본 연구는 여러 구상성단을 촬영하여 반지름, 속도분산을 비교하여 최종적으로 서로 다른 구상성단의 질량을 비교해 보는 것이다. 그러기 위해서 여러 개의 구상성단 이미지를 촬영하고 적분 스펙트럼을 얻어 이미지로부터 구상성단의 반지름을 비교한다. 또한 가우스 함수와 그 매개변수를 이용하여 함수선의 선윤곽을 보정하는 작업을 통해 구상성단의 속도분산을 분석하여 질량을 구한다[6, 8]. 비리얼 정리[4]를 가정하여 반지름과 속도분산을 이용하여 여러 구상성단의 질량의 비를 비교해 본다. 더불어 구상성단의 질량과 구상성단까지의 거리의 상관관계[7]와 구상성단의 질량과 구상성단의 절대 등급 사이의 관계에 대하여도 탐구해본다. 따라서 본 연구에서는 구상성단을 촬영 및 스펙트럼 분석을 하여 성단을 질량을 구하여 서로 비교하여 별의 진화 모델을 검증하고 항성과 항성계의 진화에 대한 이해를 하고자 하며 탐구과제는 다음과 같다.

1. 구상성단의 광학 영역 영상 촬영 및 크기 측정
2. 구상성단의 광학 영역 스펙트럼 촬영 및 함수선 선윤곽 맞추기를 통한 속도분산 분석
3. 비리얼 정리를 가정하여 항성계의 질량을 추정

II. 이론적 배경

1. 구상 성단의 색지수와 질량

가. 속도분산

속도분산이란 산개성단, 구상성단, 은하, 은하단, 초은하단과 같은 무리 지어진 천체의 평균속도에 대한 통계적 분산이다. 시선속도, 즉 물체가 시선방향으로 운동할 때의 속도를 천체에서 구한 스펙트럼선의 도플러 확장을 측정함으로써 그 무리의 속도 분산을 추정할 수 있고, 비리얼 정리로부터 그 무리의 질량을 알아낼 수 있다. 중심 속도 분산은 은하나 성단 같은 전체의 내부 지역의 속도 분산을 나타낸다[12].

나. 스펙트럼 분석과 천체 분광학

스펙트럼은 어떤 복합적인 신호를 가진 것을 1~2가지 신호에 따라 분해해서 표시하는 기술을 일컫는다. 흔히 빛을 프리즘 등의 도구로 색깔에 따라 분해해서 살펴보는 것을 말한다. 이 스펙트럼에 관한 연구를 분광학이라고 하며, 현대 천문학의 방법론에서 매우 중요한 위치를 차지하고 있다. 천체의 스펙트럼은 연속 스펙트럼, 휘선 및 흡수선 스펙트럼으로 되어 있는데, 이런 것들을 양자역학을 활용해서 해석 후, 천체의 물리적 상태를 탐구하는 것이 천체 분광학의 목적이다. 가시광선 관측으로 예를 들자면, 관측을 위해 망원경에 프리즘 또는 회

절격자를 사용한 분광기를 부착시킨다. 스펙트럼을 통해서 화학조성, 대기의 구조(밀도, 온도, 이온화 상태 등), 자기장의 세기, 난류, 별의 회전, 절대광도, 시선속도 등의 정보를 얻을 수 있다. 현재는 가시광선에 그치지 않고, 자외선, 적외선, 전파영역까지 넓혀져 있다.

2. 비리얼 정리를 이용한 구성 성단의 역학적 질량 도출

가. 가우스 함수(Gaussian Function)

수학에서 가우스 함수는 다음과 같은 형태의 함수를 말한다.

$$f(x) = ae^{-\frac{(x-b)^2}{2c^2}}$$

가우스 함수는 대칭적인 Bell Curve 형태를 띄고 있으며 매개변수 a 는 그래프에서 벨 커브의 피크 높이, b 는 피크 중앙의 위치, c 는 벨 커브의 너비를 정의한다. 따라서 c 는 FWHM와 관계가 있다. 이 함수에서 FWHM은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$FWHM = 2\sqrt{2\ln 2}c \approx 2.35482c$$

본 연구에서 가우스 함수의 FWHM은 속도 분산의 2배를 의미하며 FWHM의 1/2에 제곱을 함으로써 속도분산을 구할 수 있다[17].

3. 연구 대상의 선정

북반구에 위치하고 중위도에서 18시부터 00시 사이에 관측이 가능하며 이 시간대에 자오선을 넘어가지 않는 구상성단 중 M2, M13, M15, M56, M71, M92를 연구 대상으로 선정하였다.

4. 관측 장비

가. 망원경



[Fig. 1] Takahashi CCA-250 with SBIG STF-8300M



[Fig. 2] Takahashi TOA 150mm with QHY9

관측은 대구일과학고등학교 천문대(경도:35.8865154, 위도:128.720662)[Fig. 1]은 관측에 사용된 망원경으로 Takahashi사의 CCA-250(Corrected Cassegrain)을 사용하였으며 초점거리는 $f = 1250\text{mm}$, 구경은

1250mm 이고 구동방식은 적도의식(equatorial type)이다. [Fig. 2]는 가이드 망원경으로 구경 150mm의 Takahashi사의 TOA(Apochromatic)을 사용하였다. 광검출기(detector)로 사용된 CCD는 SBIG사의 STF-8300M과 QHY9을 사용하였으며 STF-8300M은 3326*2504개의 픽셀을 가지고 있으며 QHY9은 3358*2536개의 픽셀을 가지고 있다. 촬영에 사용된 필터는 Orion사의 1.25" LRGB Astrophotography Filter 이다.

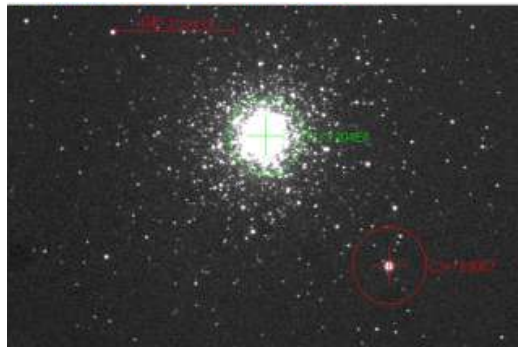
관측기기 제어 프로그램으로 사용된 The Sky X는 망원경의 시야를 지정한 위치로 이동시키며 Fire Capture는 가이드 프로그램으로 망원경의 시야와 대상 천체의 위치를 원격으로 확인 가능하게 한다. 촬영을 위해 Maxim DL을 사용하였으며 세부사항은 “소형망원경을 이용한 산개성단 NGC 129 영역의 변광성 탐사연구 [8]”에 기술되어 있다.

분석 프로그램으로 사용된 Stellarium은 특정 시일의 하늘을 시뮬레이션할 수 있어 관측 대상 설정 시 사용하였으며 광학 영역 이미지를 편집하고 관측 대상의 광포화도를 측정하기 위해 이미지의 광도를 그래프로 바꾸어주는 ImageJ와 AstroImageJ를 사용하였다. Logger Pro 프로그램은 파장 동정 시 사용되었다. SIMBAD Astronomical Database에서는 천체의 겉보기 등급 자료를 얻을 수 있으며, 구상성단의 색지수를 구할 때 필터 별 겉보기 등급 자료를 얻는데 이용하였다.

III. 구상 성단의 측광 연구 과정

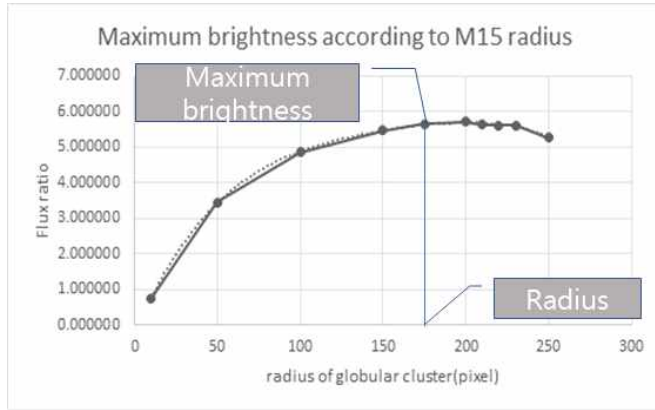
1. 구상성단의 광학 영역 영상 촬영 및 크기 측정

M2, M3, M13, M15, M56, M71, M92의 측광 관측은 본교 천문대의 250mm망원경과 SBIG STF-8300M, QHY9 두 종류의 CCD를 이용하여 진행하였다. CCD영상 관측은 120s 장기 노출로 촬영되었으며 V, B필터(Orion 필터)별로 12회 촬영하였다. 전처리를 위해 Flat은 필터 종류별로 5회, Dark는 노출 시간 별로 5회, Bias도 5회 촬영하였다. 광학 영상의 오차를 줄이기 위해 Maxim DL을 이용하여 Flat, Dark, Bias를 Stack하고 Average File을 만들어 분석에 사용하였다. 분석 프로그램으로는 Astro Image J를 이용하였다.



[Fig. 3] Optical image of M15

Astro Image J에서 반지름을 측정하고자 하는 구상성단의 중심을 T1이라 설정하고 기준 별을 하나 잡아 C2라고 설정하여 C2에 대한 T1의 Flux 비를 측정한다. [Fig. 3]은 Maxim DL을 이용해 전처리 과정을 거치고 T1, C2가 설정된 상태의 M15의 광학영상이다.



[Fig. 4] Maximum brightness according to M15 radius

T1과 C2의 좌표를 일정하게 잡고, T1의 영역과 C2의 영역의 반지름을 10pixel부터 50pixel 단위씩 늘려가며 최대 밝기가 되는 지점을 구상성단의 반지름이라 정의하였다. [Fig. 4]는 M15의 반지름에 따른 최대 밝기를 나타내는데, 특정 pixel에서 더 이상 Rel Flux가 늘어나지 않음을 볼 수 있다. 이 부근에서는 반지름을 50pixel 보다 작은 단위로 조절해가며 포화 지점을 찾는다.

픽셀 단위의 반지름을 광년으로 바꿔주는 식은 다음과 같다.

$$\text{Radius} = \frac{x \times 0.764''}{3600''/^{\circ}} \times \frac{\pi}{180} \text{rad} / ^{\circ} \times y \text{ kpc} \times 1000 \times 3.26 \text{Ly/pc}$$

여기서 x 는 pixel 단위의 반지름이며 y 는 현재 알려진 대상과 지구간의 거리이다. 위 식에 사용된 구상성단까지의 거리는 다음과 같다[9].

<Table 1> Distance to globular cluster (program stellarium)

	M2	M15	M56	M71	M92	M13
Distance (kpc)	11.5	10.3	9.7	4.0	7.98	7.0

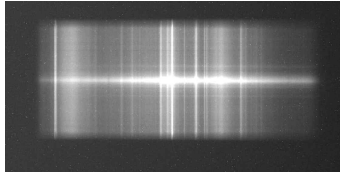
CCD, SBIG STF-8300은 1pixel 당 0.764"의 광학 영역을 촬영하기에 식은 위와 같다. 또한, QHY9이라는 CCD는 1pixel 당 0.928"의 광학 영역을 촬영하였으므로 위의 환산 식을 다르게 하여 반지름을 구했다.

2. 색지수 측정

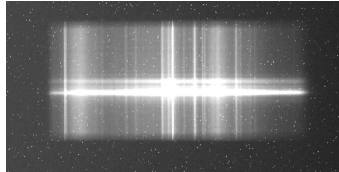
구상성단 반지름 측정 시 사용했던 기준별(C2)을 Stellarium에서 찾아, C2를 제외한 또 다른 하나의 별에 C3라는 이름을 지정한 후 C2에 대한 플럭스 비를 구한다. 이 때, 좌표는 고정적이어야 한다. C2에 대한 구상성단의 플럭스 비를 구하고 Pogson formula에 필터별로 얻은 C3에 대한 구상성단의 플럭스 비와 C3의 겉보기 등급 자료를 대입하면 각각의 필터별 구상성단 겉보기 등급을 도출해 낼 수 있다.

IV. 구상 성단의 분광 연구 과정

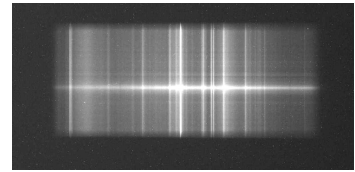
1. 구상성단의 광학 영역 스펙트럼 촬영



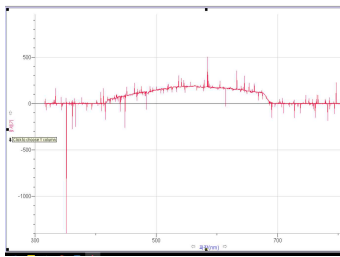
[Fig. 5] M2 spectrum



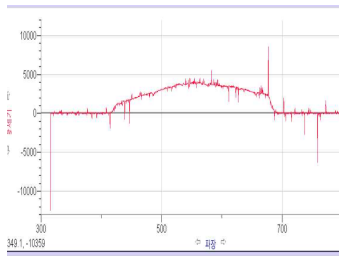
[Fig. 6] M15 spectrum



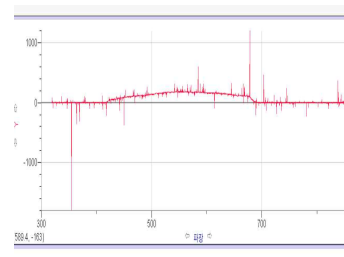
[Fig. 7] M92 spectrum



[Fig. 8] M2 spectrum graph



[Fig. 9] M15 spectrum graph



[Fig. 10] M92 spectrum graph

stack한 스펙트럼의 그래프에서 관측대상의 스펙트럼에서 배경 스펙트럼을 빼주었다. 관측된 스펙트럼에서 H β 선이 뚜렷하게 나타났다. 각 사진이 촬영된 날짜와 노출 시간에 대한 정보는 <Table 2>에 표기하였다.

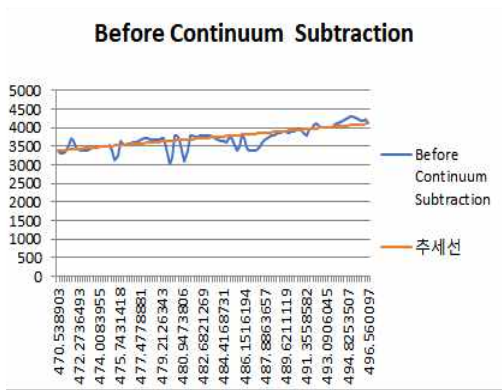
<Table 2> Photograph Information

Globular cluster	date	exposure time
M2	10.30	(10min)x (12pics)= 120min
M15	10.29	(10min)x(15pics)= 150min
M92	11.08	(10min)x(7pics)= 70min

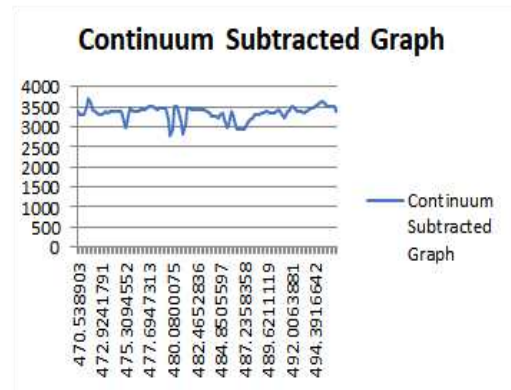
2. 가우스 함수를 이용한 스펙트럼 흡수선 윤곽 분석

보편적인 구상성단 질량함수는 가우스 함수의 형태를 띠며 이를 통해 속도분산을 구할 수 있고, 최근 이러한 방법으로 성단의 질량을 구하는 방법이 선호되고 있는 추세이다[2]. 따라서 가우스 함수를 흡수선에 fitting하여

각 매개변수 값을 도출하였다. 가우스 함수는 $y = D - A \cdot e^{-\frac{(x-B)^2}{2C^2}}$ 의 꼴을 가지는데 매개변수 A는 그래프 상에서 피크의 높이 조절, B는 피크 중앙의 위치를 조절, C는 종 모양 커브의 너비를 조절, D는 함수를 y축 방향으로 평행 이동시킨다. 연구에 사용된 CCD의 장파장 측광 효율이 낮아 H- α 선의 확인이 어렵고, 실제 촬영 결과 H- γ 선 또한 확인이 어려워 발머 계열의 수소 스펙트럼 중 가장 가시성이 좋은 H- β 선을 연구에 사용하였다.

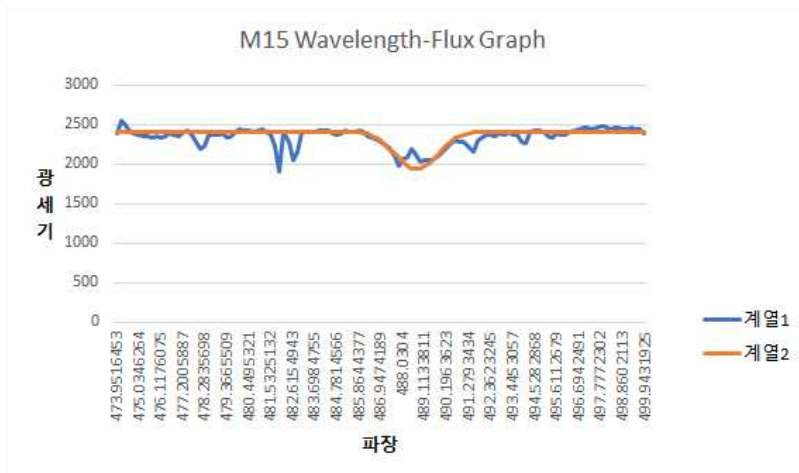


[Fig. 11] Before Continuum Subtraction



[Fig. 12] Continuum Subtracted

데이터를 그래프화한 경우 피크를 제외한 부분이 y축에 평행하지 않고 $y = ax + b$ 의 일차함수에 평행하기 때문에([Fig. 11]) Continuum 보정 과정을 거쳐 y축에 평행하게 보정([Fig. 12])하고 매개변수 값을 조절하여 데이터와 모델 값 간의 편차가 가장 작을 때를 찾아 데이터 그래프에 해당하는 가우스 함수 꼴을 찾았다([Fig. 13]).



[Fig. 13] M15 Gaussian Function Model

이러한 가우스 함수를 데이터를 대표하는 모델 값으로 하여 속도분산을 찾을 수 있었다. 이때, 가우스 함수

는 정규분포를 따르므로 FWHM과 표준편차 간에 $\sigma(\text{편차}) = \frac{\text{FWHM}}{2} = \sqrt{2\ln 2} C \approx 1.17741C$ 의 관계가 성립하는데, 가우스 함수 모델 값에서 구한 매개변수 C를 대입함으로써 편차를 구하고 이를 제곱함으로써 속도 분산 값을 구하였다.

3. 비리얼 정리를 가정한 항성계의 질량 추정

비리얼 정리는 천체가 정역학적 평형상태에 있다고 가정했을 때 운동에너지(KE)와 위치에너지(PE)의 관계를 정리한 것으로, $2\langle KE \rangle = -\langle PE \rangle$ 으로 나타나며 은하의 경우 $\langle v^2 \rangle = 0.4GM/r_h$ 의 더 구체화된 식으로 나타난다. 식에서 $\langle v^2 \rangle$ 은 각 항성들의 고유 운동 속도 제곱의 평균값을 나타내며, r_h 는 천체 질량의 절반을 포함하고 있는 곳까지의 반지름을, M은 은하 전체의 질량을 나타낸다. 따라서 은하의 전체 에너지는 $TE = -KE = \frac{1}{2}PE$ 로 나타낼 수 있다[10].

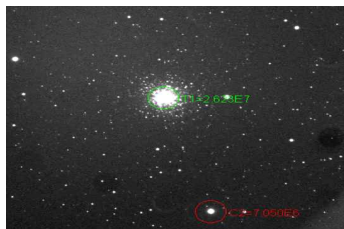
비리얼 정리를 통해 특정 대상이 은하에 속해있는지에 대한 여부나 은하의 속도 분산으로부터의 은하의 질량을 추정할 수 있는데[11] 본 연구에서 도출하고자 하는 것은 색지수에 따라 성단의 질량을 ‘비교’ 하는 것으로 비리얼 정리를 질량에 관해 정리한 식인 $M = \alpha \frac{R\sigma^2}{G}$ (α, G = 상수)에 반지름 R과 속도분산 σ^2 을 대입한 후 $R\sigma^2$ 값을 계산하여 상대값을 계산하였다[16].

V. 연구 결과

1. 구상 성단의 크기



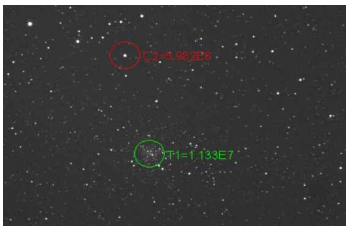
[Fig. 14] Optical image of M2



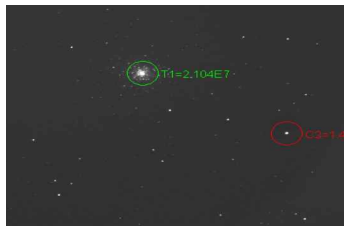
[Fig. 15] Optical image of M15



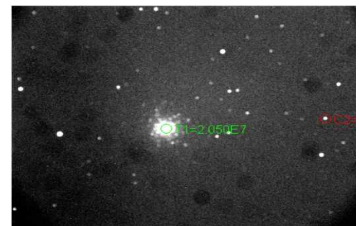
[Fig. 16] Optical image of M56



[Fig. 17] Optical image of M71



[Fig. 18] Optical image of M92

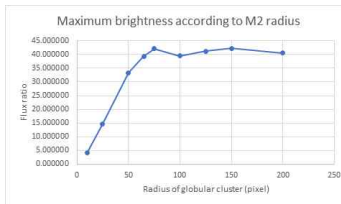


[Fig. 19] Optical image of M13

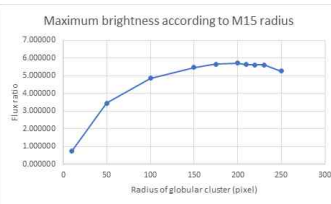
〈Table 3〉 Photograph Information for GC's Optical Images

	Fig. 14	Fig. 15	Fig. 16	Fig. 17	Fig. 18	Fig. 19
Date	2017.10.31	2017.10.31	2017.10.31	2017.10.31	2017.10.31	2017.11.08
Filter	None	None	None	None	None	None
Ex pose time	120s*5=600s	120s*5=600s	120s*5=600s	120s*5=600s	120s*5=600s	120s*5=600s

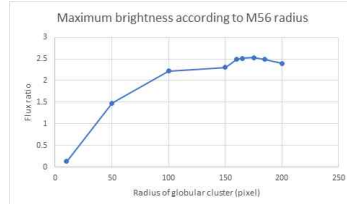
[Fig. 14]~[Fig. 19]는 Filter 없이 촬영한 구상성단의 광학 영상이며 노출 시간은 600s로 동일하게 설정하였다.



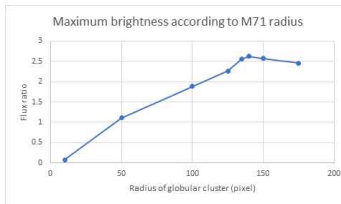
[Fig. 20] Maximum brightness graph (M2)



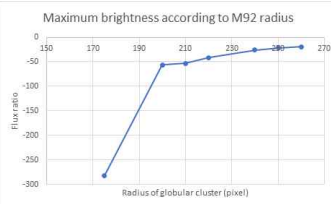
[Fig. 21] Maximum brightness graph (M15)



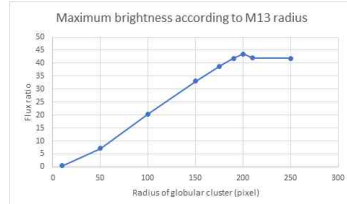
[Fig. 22] Maximum brightness graph (M56)



[Fig. 23] Maximum brightness graph (M71)



[Fig. 24] Maximum brightness graph (M92)



[Fig. 25] Maximum brightness graph (M13)

구상성단의 중심부로부터 밝기를 측정하는 구경의 크기를 키워가기 때문에 구경 안에 들어오는 밝기가 반지름에 따라 어떻게 변화하는가 하는 것을 보여주는 밝기 증가 그래프는 구상성단 중심부의 별의 밀도가 변하는 정도가 급한지 완만한지와 관련이 있을 것이다. [Fig. 20~22]로부터 M15와 M56의 반지름에 따른 총 밝기 변화율이 M2의 경우와 다를 수 있음을 확인할 수 있다. 즉, M15와 M56의 중심부 별 밀집도는 M2와 다를 것이라 생각된다[14~15].

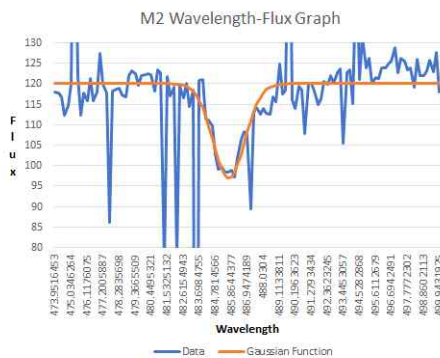
2. 구상 성단의 색지수

〈Table 4〉 Radius and mean color index of globular clusters

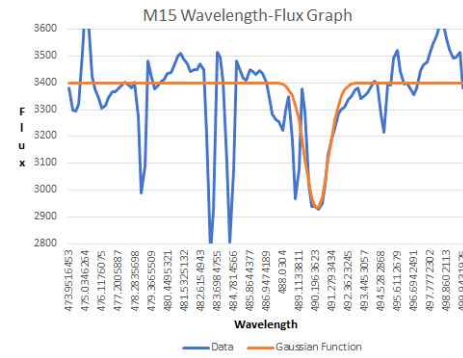
	M2	M15	M56	M71	M92	M13
Radius	100 pixel (33.7474Ly)	350 pixel (52.8953Ly)	320 pixel (37.4807Ly)	270 pixel (13.0410Ly)	240 pixel (56.2026Ly)	200 pixel (45.0160Ly)
Mean color index (B-V)	0.27147	1.27612	1.06301		1.10240	

본 연구에서는 B, V필터로 측광하였을 때, 구상성단 전체를 하나의 점광원으로 생각해서 구한 겉보기 등급차를 이용해 색지수를 구하였다. 이는 구상성단을 구성하는 별들의 평균 색지수라 부를 수 있다. 구상성단에서 주계열을 구성하는 별들이 시간이 지남에 따라 평균적인 색지수가 증가할 것이라는 가정 하에서 전체적으로 측정되는 색지수는 생성된 지 오래됐을수록 커질 것이라고 예상하였다. 위의 결과표를 참고하면, 우리가 구한 4개의 구상성단에서 M15가 가장 오래된 구상성단이라고 판단된다. 이 결과는 색지수에 영향을 주는 것이 오직 나이 뿐이라는 가정 하에서만 성립한다. M13, M71의 경우에는 데이터 질의 문제로 이미지가 제대로 표시되지 않아 색지수를 구할 수 없었다.

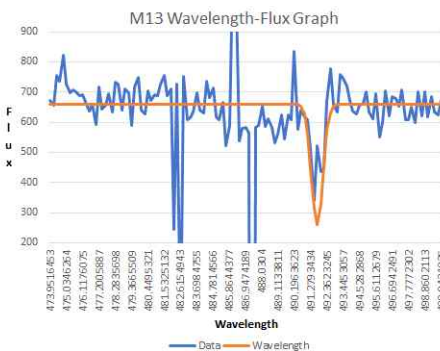
3. Gaussian Function Fitting



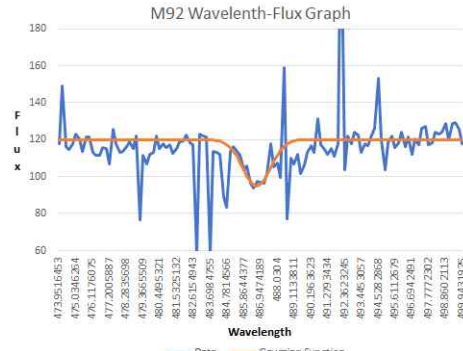
[Fig. 26] M2 Wavelength-Flux Graph



[Fig. 27] M15 Wavelength-Flux Graph



[Fig. 28] M13 Wavelength-Flux Graph



[Fig. 29] M92 Wavelength-Flux Graph

각 함수에 해당하는 가우스 함수 모델의 매개변수 값과 속도 분산 값은 <Table 5>에 정리하였다.

<Table 5> Gaussian Function Model's Parameter

	M2	M13	M15	M92
A	23	400	470	25
B	485.7	491.7	490.3	486.7
C	1.08	0.38	0.76	0.9
D	120	660	3400	120
σ	1.271603	0.251685	0.89483	1.059669
V	1.616974	0.063345	0.80072	1.122898

4. 구상 성단의 질량

비리얼 정리를 가정하여 M2, M15, M92의 질량을 추정해보았다. 앞선 연구 결과를 통해 얻은 반지름 및 속도 분산 값을 이용하였다. M15의 질량을 1로 두고, 각 성단의 상대적인 질량비를 <Table 6>에 정리하였다.

<Table 6> Mass Ratio of Globular Clusters

Globular Cluster	Radius	Velocity Dispersion	Mass Ratio
M2	33,7474Ly	1.616974	22.6018
M15	52,8953Ly	0.800720	1
M92	56,2026Ly	1.122898	2.0896
M13	32,8439Ly	0.063345	0.0039

VI. 결론 및 제언

구상성단 M2, M13, M15, M92의 B, V 광학영상을 촬영하고 스펙트럼을 얻어 색지수, 유효 반지름, 속도 분산, 질량을 추정하였다. 구상성단의 색지수와 질량 분석 결과 색지수가 가장 큰 M15의 질량이 다른 구상성단에 비해 작았다. 색지수가 나이를 반영하고 나이에 의해서만 결정된다면 이 결과는 우리 은하에서 보다 먼저 생성된 구상성단이 이후 생성된 구상성단보다 질량이 더 작다는 사실을 보여준다.

선행 연구에 따르면 성단별로 금속함량에 약간의 차이가 있으며 M2가 상대적으로 금속함량이 높은 성단인 것으로 알려졌다. 기존 문헌에서 M2, M92만 비교하면 금속함량이 높은 M2가 반지름이 작은데도 불구하고 금속함량이 낮은 M92에 비해 질량이 큰 것으로 보이므로 M2는 작고 뭉쳐진 성단 M92는 약간 더 느슨하게 퍼진 성단으로 추정해 볼 수 있다[13].

본 연구에서 구한 M2 구상성단의 질량 값은 나머지 두 성단에 비해 지나치게 크게 도출되었는데 흡수선 윤곽은 모든 경우에 뚜렷하게 측정이 되었으므로 오차에 가장 큰 영향을 준 것은 반지름 측정으로 분석된다.

따라서 표면밝기 개념을 사용하여 중심에 더 밀도가 높은 성단과 그렇지 않은 성단처럼 구상성단의 종류별로 질량을 구하고 연구함으로써 더 정확한 결과를 얻을 수 있을 것으로 기대되며 또한 교내 천문대의 장비를 활용한 관측에서 발생하는 한계에 의해 측정할 수 없었던 몇몇 구상성단들을 더 좋은 기상여건이 되는 날에 더 오랜 노출을 주어 재촬영하여 데이터의 정확도와 컨디션을 높인다면 다양한 데이터 분석을 통해 의미 있는 결과를 도출할 수 있을 것이다.

VII. 참고문헌

- [1] 조영훈(2004), 구상성단 NGC 4147의 CCD 측광 연구
- [2] Parmentier, G., & Gilmore, G. (2007). The origin of the Gaussian initial mass function of old globular cluster systems, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 377(1), 352–372.
- [3] Kim, Y. K., & Oh, K. S. (1999). Dynamical evolution of the multi-mass component globular clusters under the tidal interaction with the Galaxy, *Journal of Korean Astronomical Society*, 32, 17–39.
- [4] Lee, S. W., & Rood, H. L. (1969). The Shape and Virial Theorem of a Star Cluster in the Galactic Tidal Force Field, *Journal of Korean Astronomical Society*, 2, 1–9.
- [5] 이종환, & 손영종. (2005). 우리은하 구상성단들의 역학적 세부구조 III. NGC 7006, *Journal of Astronomy and Space Sciences*, 22(4), 363–376.
- [7] Vesperini, E. (1998). Evolution of the mass function of the Galactic globular cluster system, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 299(4), 1019–1039.
- [8] 이은정(2006), 소형망원경을 이용한 산개성단 NGC 129 영역의 변광성 탐사 연구
- [9] B. Chaboyer(2008), *International Astronomical Union*, 442, "Distances and ages of globular clusters"
- [10] Michael Zeilik, Stephen A. Gregory(2010) 천문학 및 천체물리학 서론, CENGAGE Learning 14–15
- [11] Bradly W. Carroll · Dale A. Ostlie(2007) 현대천체물리학, 항성 천문학 PEARSON 203–207
- [12] Van den Bergh(2008) *MNRAS*, 385(1), L20, "Globular Clusters and Dwarf Spheroidal Galaxies"
- [13] McLaughlin & van der Marel(2005), *ApJS*, 161, 304, "Resolved Massive Star Clusters in the Milky Way and Its Satellites : Brightness Profiles and a Catalog of Fundamental Parameters"
- [14] Pasquali et al(2004), *A&A*, 428, 469, "The global mass function of M15"
- [15] Rodney Howe et. al.,(2010), Imaging dense globular clusters like M3 and M15
- [16] 박대성(2013), "Black Hole Masses, Scaling Relations, and The Co-Evolution of Black Holes and Galaxies"
- [17] 문성곤(2011), "A study on DOA using Gaussian Beam Function"

Ⅰ 연구진 Ⅰ

김현수 (Hyeonsu Kim, 대구일과학고등학교, hyunsu243@gmail.com) 주저자

김준홍 (Junhong Kim, 대구일과학고등학교, kin4191@naver.com) 교신저자

문성준 (Seongjun Moon, 대구일과학고등학교, sjmoon001@naver.com) 공동저자수집

하정원 (Jeongwon Ha, 대구일과학고등학교, hjw8868@naver.com) 공동저자

김세린 (Serin Kim, 대구일과학고등학교, serin2580@naver.com) 공동저자

지도교사 : 정창렬 (Changryul Jung, 대구일과학고등학교, ryuly19@hanmail.net)

지도교수 : 심현진 (Hyunjin Shim, 경북대학교 지구과학교육과, shim,hyunjin@gmail.com)

지도조교 : 손표원 (Pyowon Son, 경북대학교 지구과학교육과, vydnjs11@naver.com)

거리측정 센서를 이용한 장애물 회피 군집 드론 알고리즘 개발

문석환 · 김준혁 · 최지웅 - 과학영재학교 광주과학고등학교

Developing Algorithm for Collision Avoidance Swarm Drone using Distance Measuring Sensors

Seokhwan Moon · Junhyeok Kim · Jiung Choi - Gwangju Science Academy For the Gifted

국문초록

본 연구는 단순한 거리 측정 센서를 이용하여 장애물을 감지하고, 드론의 속도 벡터의 분해와 합성을 이용하는 충돌 회피 알고리즘을 설계한다. 또한 이를 통신량이 적은 트리 네트워크로 연결되어 있는 군집 드론에 적용시킴으로써 자율 비행을 하는 군집 드론이 대형을 제어하면서, 장애물을 회피하며 목적지까지 안전하게 이동할 수 있도록 하는 알고리즘을 설계한다. 이를 위해, 본 연구는 곤충의 장애물 회피 알고리즘과 선행 연구의 알고리즘을 바탕으로 독자적인 장애물 회피 알고리즘을 설계하고, 이를 군집 드론으로 확장시킨다. 또한 트리 네트워크로 연결되어 있는 군집 드론의 대형 제어를 위한 수학적 조건들을 알아본다. 최종적으로, 이들을 3차원 시뮬레이션을 통해 확인함으로써 본 연구에서 설계한 알고리즘들이 성공적으로 군집 드론에게 적용될 수 있음을 확인한다. 본 연구는 재난 현장과 같은 군집 드론이 필요한 곳에서 사용될 수 있을 것으로 예상된다.

중심어 : 군집 드론, 대형 제어, 장애물 감지, 충돌 회피, 자율 비행

ABSTRACT

In this research, we will develop collision avoidance algorithm for drone by using disassemble and synthesis of drone's velocity vector, which only uses distance measuring sensors for obstacle detection. Also, we will apply this algorithm to tree-connected swarm drones with low communication amount, in order to make autonomous flight swarm drones fly safely to their destination while controlling the formation and avoiding obstacles. For them, we will make obstacle avoidance algorithm based on insect's obstacle avoidance algorithm and previous algorithms. Also, we will expand those algorithm to swarm drones. Moreover, we will find about conditions for formation control of swarm drones. Consequently, we will check that our algorithm can successfully apply to swarm drones, by using 3D simulation. This research is expected to be able to use in situations which needs swarm drone, such as disasters.

Key words : Swarm drone, Formation Control, Obstacle Detection, Collision avoidance, Autonomous Flight

I. 서론

최근, 드론에 대한 관심이 높아짐에 따라 드론들이 함께 비행을 하며 작업을 수행하고 한계를 극복하는 군집 드론에 대한 관심이 높아지고 있다. Jo et al., Bürkle et al.의 선행 연구들에서 이를 연구하였다[1, 4]. 이들은 대부분 천장에 카메라를 부착해서 맵의 전체적인 형태를 알 수 있고, 블루투스나 와이 파이와 같은 무선 연결을 통하여 모든 드론들이 상시로 정보를 교환할 수 있는 환경에서 진행되었다.

또한 군집 드론의 시변 대형 제어는 지난 몇 년간 중요한 문제로 여겨져 왔다. 많은 연구들이 이들의 대형 제어에 성공했는데, 처음에 이들은 주로 leader-follower기반, behavior 기반, 그리고 virtual structure기반의 세 가지의 방법으로 연구되어 왔다[5, 10, 13]. 그리고 Ren et al.은 이 세 가지의 제어 방식이 consensus

problem을 기반으로 하는 대형 제어의 특별한 경우임을 규명하였다[12]. 또한, Dong et al.은 consensus 기반의 방식 또한 formation theory를 기반으로 하는 대형 제어의 특별한 경우임을 규명하였다[10].

기존의 연구들은 군집 드론들이 일반적인 네트워크로 연결되어 있다고 가정하였다. 일반적으로 군집 드론의 네트워크에는 트리 네트워크와 그물형 네트워크가 있으나, 그물형 네트워크의 안정성이 높음이 알려져 있다. 그러나 그물형 네트워크는 연결의 개수가 많기 때문에 네트워크의 복잡도가 높다는 단점이 있다.

하나의 드론에 대해 장애물을 회피하며 비행을 할 수 있도록 하는 연구 또한 진행되었다. 이러한 선행 연구에서는 주로 카메라, optical flow, lidar, 3D 광센서 등의 장비들을 이용하였다[2, 9, 11, 14]. 그러나 이러한 센서들은 비싸며 계산 량이 많아 드론 자체 계산에 사용하기에는 무리가 있다.

따라서 본 연구에서는 초음파 센서나 적외선 센서와 같은 단순한 거리 측정 센서를 이용하여 장애물을 회피하며 목표 지점까지 이동할 수 있는 군집 드론을 위한 알고리즘을 개발하는 것을 목적으로 한다. 본 연구는 다음과 같은 조건에서 진행되었다. 첫째, 군집 드론은 본인들의 목적지만 알고 있고, 그 사이에 어떤 장애물들이 있는지는 모른다. 둘째, 드론이 지니고 있는 센서는 단순한 거리 측정 센서 뿐이다. 이러한 조건에서 군집 드론이 서로 충돌하지 않고, 장애물을 회피하며 목적지까지 안전하게 비행하도록 작동하는 알고리즘을 개발하는 것이 본 연구의 목표이다. 또한, 개발한 알고리즘의 작동을 시뮬레이션을 통하여 확인한다.

이를 위해 본 연구에서는 곤충의 장애물 회피 알고리즘과 선행 연구의 알고리즘을 분석하여 알고리즘을 개발한다. 트리 네트워크로 연결되어 있는 군집 드론의 대형 제어를 위하여 일반적인 군집 드론의 대형 제어를 위한 조건과 트리의 라플라시안 행렬의 고윳값에 대한 성질을 이용한다.

본 연구는 크게 네 방향으로 진행되었다.

첫째, 트리형 네트워크로 연결된 군집 드론의 시변 대형 제어를 위한 조건 탐구

둘째, 트리 네트워크로 연결되어 있는 여러 대의 드론의 동시 비행

셋째, 드론에 단순한 거리 측정 센서 적용을 통한 장애물 회피 알고리즘 개발

넷째, 시뮬레이션을 이용한 트리 네트워크로 연결되어 있는 군집 드론의 장애물 회피 능력 검증

II. 이론적 배경

1. 트리형 네트워크로 연결된 군집 드론의 대형 제어

가. 그래프 이론에서의 기반

어떤 그래프 $G = \{V, E\}$ 는 꼭짓점들의 집합 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 와 두 꼭짓점을 연결하는 변들의 집합은 $E \subseteq \{(v_i, v_j) : v_i, v_j \in V\}$ 로써 정의된다. 그리고 이 그래프 G 의 인접 행렬 W 를 그것의 원소 w_{ij} 를 이용하여 정의 1과 같이 표현할 수 있다.

정의 1. 두 꼭짓점 i 와 j 가 연결되어 있을 때 $w_{ij} = 1$, 그렇지 않을 때는 $w_{ij} = 0$ 으로 정의한다.

이를 응용하여, w_{ij} 가 두 꼭짓점을 연결하는데 드는 비용을 나타내도록 하는 가중치가 있는 인접 행렬도 만들 수 있다. 이때, 가중치가 있는 인접 행렬의 모든 원소들은 음이 아닌 실수로 나타내어진다.

그래프 G 의 degree 행렬 $D = \text{diag}(\deg(v_i), i = 1, 2, \dots, n)$ 와 같이 만들어진다. 재술하면, $d_{ii} = \deg(v_i)$ 를 나타내고 $i \neq j$ 일 때는 $d_{ij} = 0$ 이 된다. 이때, 그래프 G 의 라플라시안 행렬을 정의 2와 같이 나타낼 수 있다.

정의 2. 라플라시안 행렬은 $L = D - W$ 로 정의하며, 이 행렬의 크기는 $n \times n$ 이다.

어떤 꼭짓점이 존재하여 자신을 제외한 모든 꼭짓점으로 연결되는 단일 경로가 존재할 때, 그래프 G 가 spanning tree를 지닌다고 표현한다. 만약 그래프 G 가 spanning tree를 지니면, 이 그래프의 라플라시안 행렬의 고윳값은 n 개이며 고윳값 중에서 가장 작은 값은 0이 된다는 사실을 알려져 있다. 우리는 이를 $0 = \text{Re}(\lambda_1(G)) < \text{Re}(\lambda_2(G)) \leq \dots \leq \text{Re}(\lambda_n(G))$ 와 같이 표현하였다.

트리란, 회로가 없는 무향 그래프를 의미한다. 트리는 n 개의 꼭짓점과 $n-1$ 개의 변으로 이루어진다. 트리는 모든 꼭짓점으로 가는 경로가 오직 하나씩만 존재한다. 트리 역시 그래프의 한 종류이기 때문에 그래프의 모든 특징들을 따른다. 트리가 가지는 많은 특징들은 본 연구에서 영향을 미치지 않기 때문에 생략한다.

나. Formation Theory의 접근

어떤 군집 드론 시스템을 생각하자. 이 시스템은 n 개의 드론들로 구성되어 있다. 그리고 이들이 연결된 네트워크의 형태는 그래프 G 로서 표현된다. 그리고 G 가 spanning tree를 지닌다고 생각하자.

드론들 중에 어느 한 개체가 움직일 때, (1)은 자명하다.

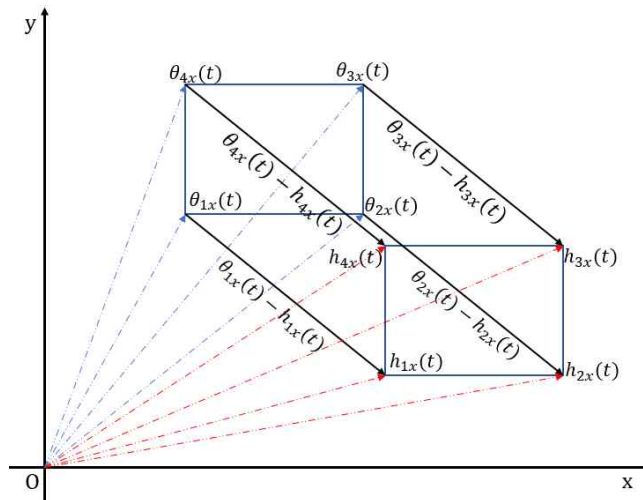
$$\dot{x}_i(t) = v_i(t), \quad \dot{v}_i(t) = a_i(t) \quad (1)$$

$\theta_i(t) = [x_i(t) \ v_i(t)]^T$, $A_1 = [1 \ 0]^T$, 그리고 $A_2 = [0 \ 1]^T$ 로 놓으면, (2)은 (1)과 같은 의미를 가진다.

$$\dot{\theta}_i(t) = A_1 A_2^T \theta_i(t) + A_2 a_i(t) \quad (2)$$

$h_i(t)$ 를 드론 i 의 목표 상태라고 정의하고, $h_i(t) = [h_{ix}(t) \ h_{iy}(t)]^T$ ($i=1,2,\dots,n$)로 놓자. 또한 $h(t) = [h_1^T(t) \ h_2^T(t) \ \dots \ h_n^T(t)]^T$ 로 정의하자. 그러면, 시변 대형 제어를 정의할 수 있다.

정의 3. $i \in \{1, 2, \dots, n\}$ 에 대하여, $\lim_{t \rightarrow \infty} (\theta_i(t) - h_i(t) - c(t)) = 0$ 를 만족하는 2차원의 함수 $c(t)$ 가 존재할 때, 군집 드론 시스템 (2)은 시변 대형을 만족한다고 정의한다. 그리고 이때 $c(t)$ 는 대형 중심 함수라고 한다.



[Fig. 1] Time-varying formation of swarm drone

군집 드론 시스템을 위한 프로토콜을 (3)과 같이 정의한다.

$$\dot{a}_i(t) = K_1(\theta_i(t) - h_i(t)) + K_2 \sum_{j \in N_i} w_{ij}((\theta_j(t) - h_j(t)) - (\theta_i(t) - h_i(t))) + \dot{h}_{iv}(t) \quad (3)$$

식 3에서는 N_i 는 꼭짓점 i 와 연결된 꼭짓점들의 집합을 의미하고, $K_1 = [k_{11} \ k_{12}]$, $K_2 = [k_{21} \ k_{22}]$ 로 나타낸다.

프로토콜 (3)에서, K_1 은 시변 대형의 중심의 모션 모드를 의미한다. 그리고 K_2 는 모든 드론들이 목표 상태로 움직일 수 있도록 한다.

$\theta(t) = [\theta_1^T(t) \ \theta_2^T(t) \ \cdots \ \theta_n^T(t)]^T$, $h_x(t) = [h_{1x}(t) \ h_{2x}(t) \ \cdots \ h_{nx}(t)]^T$, $h_v(t) = [h_{1v}(t) \ h_{2v}(t) \ \cdots \ h_{nv}(t)]^T$ 로 놓으면 프로토콜 (3) 아래에서, 군집 드론 시스템 (2)은 아래의 수식 (4)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \dot{\theta}(t) &= (I_n \otimes (A_2 K_1 + A_1 A_2^T) - L \otimes (A_2 K_2)) \theta(t) \\ &\quad - (I_n \otimes (A_2 K_1) - L \otimes (A_2 K_2)) h(t) + (I_n \otimes A_2) \dot{h}_v(t) \end{aligned} \quad (4)$$

이때, 다음의 보조 정리들이 성립한다.

보조 정리 1. 군집 드론 시스템 (4)은 아래의 조건들이 만족될 때 시변 대형 $h(t)$ 를 만족한다. [6]

보조 정리 (1-1) 모든 $i \in \{1, 2 \cdots n\}$ 와 $j \in N_i$ 에 대하여,

$$\lim_{t \rightarrow \infty} ((h_{iv}(t) - h_{jv}(t)) - (\dot{h}_{ix}(t) - \dot{h}_{jx}(t))) = 0$$

보조 정리 (1-2) 모든 $i \in \{2, 3 \cdots n\}$ 에 대해,

$$\begin{aligned} \text{(I)} \quad & -k_{12} + \operatorname{Re}(\lambda_i) k_{22} > 0 \\ \text{(II)} \quad & (-k_{12} + \operatorname{Re}(\lambda_i) k_{22})(k_{12} k_{11} - \operatorname{Re}(\lambda_i)(k_{12} k_{21} + k_{11} k_{22}) + (\operatorname{Re}(\lambda_i)^2 + \operatorname{Im}(\lambda_i)^2) k_{21} k_{22}) \\ & - \operatorname{Im}(\lambda_i)^2 k_{21}^2 > 0 \end{aligned}$$

보조 정리 2. 보조 정리 1의 조건 (1-1)을 만족할 때, 군집 드론 시스템 (2)은 프로토콜 (3)에 의해 시변 대형을 $K_2 = [\operatorname{Re}(\lambda_2)]^{-1} A_2^T X$ 에 의해 만족한다. 여기서 X 는 (5)에 나타난 대수적 리카티 방정식의 양의 실수해가 된다[6].

$$X(A_2 K_1 + A_1 A_2^T) + (A_2 K_1 + A_1 A_2^T)X - X A_2 A_2^T X + I = 0 \quad (5)$$

다. 트리의 라플라시안 행렬의 고윳값

임의의 행렬 M , 그리고 M 와 같은 차원을 가지는 또 다른 행렬 v 에 대하여, 행렬 M 의 고윳값 λ 는 방정식 $Mv = \lambda v$ 를 만족시키는 값들을 의미한다. 그리고 이때의 v 는 행렬 M 의 고유 벡터라고 명명된다. 우리는 행렬 M 의 고윳값을 다음의 방정식을 통해 보다 쉽게 구할 수 있다 : $\det(M - \lambda I) = 0$.

Yi-Zheng et al., Hong et al., Guo et al.처럼 트리의 라플라시안 행렬의 고윳값에 대한 많은 연구가 진행되어 왔다[7, 8, 15]. 대부분의 연구들이 어느 특정한 조건의 트리에 대하여 연구를 진행하여 왔지만, 아래의 수식은 특정한 조건이 없는 트리에 대해서도 항상 성립한다.

보조 정리 3. n 개의 꼭짓점을 가지는 임의의 트리 T 에 대해서, (6)가 성립한다[16].

$$2(1 + \cos(\frac{\pi}{n})) \leq Re(\lambda_n(T)) \leq n \quad (6)$$

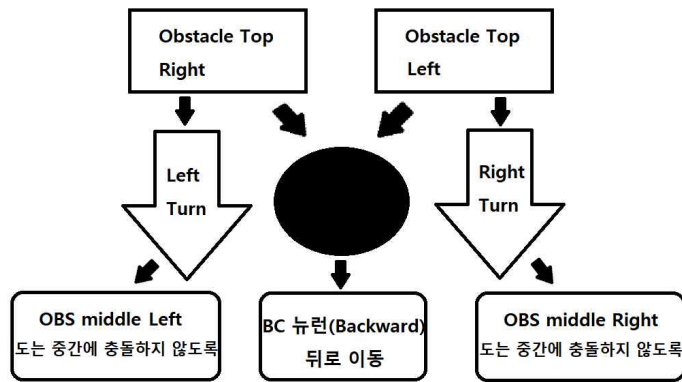
$$2(1 - \cos(\frac{\pi}{n})) \leq Re(\lambda_2(T)) \leq 1$$

(6)의 왼쪽의 등식은 T 가 path형태일 때 성립한다. 그리고 오른쪽의 등식은 T 가 star형태일 때 성립한다.

2. 드론을 위한 장애물 회피 알고리즘의 개발

가. 곤충의 장애물 회피 알고리즘

곤충이 장애물을 피하는 알고리즘은 [Fig. 2]와 같다.

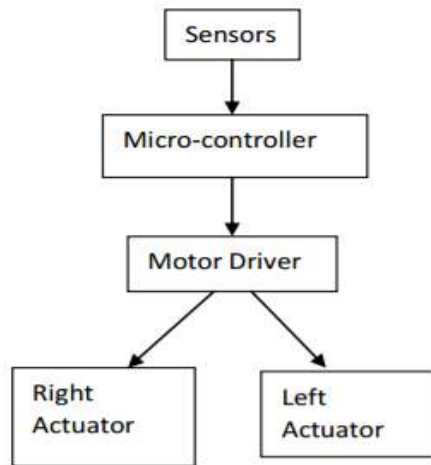


[Fig. 2] Obstacle avoidance algorithm for insects

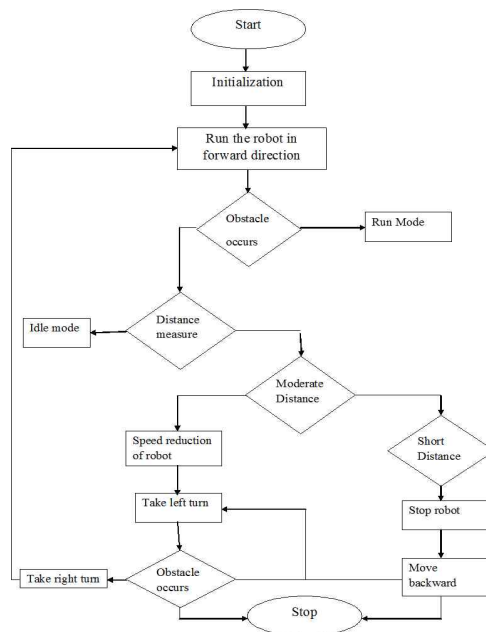
곤충은 자신의 양쪽 눈을 통해 자신의 왼쪽과 오른쪽에 장애물의 유무를 확인한다. (Fig. 2의 Obstacle Top Right와 Left) 이때, OTR에서 장애물이 인식되면 뇌에서 왼쪽으로 회전하라는 명령을 내린다. 명령을 받은 몸체는 왼쪽으로 회전을 하며 OBS middle Left를 실행하여, 회전하는 중에 다리나 다른 부위에서 장애물과의 충돌이 감지되면, 충돌한 장애물로부터 떨어지게 한다. OTL에서 신호가 올 때도 마찬가지로 OBS middle Right를 작동시킨다. 그러나 만약 양 쪽에서 장애물이 감지되면, 뇌에서 BC 뉴런이 뒤로 이동을 하도록 명령을 내린다.

나. 선형 연구들의 장애물 회피 알고리즘

드론이 장애물을 회피할 수 있도록 해주는 알고리즘은 연구된 바 있다. 많은 알고리즘들이 존재하지만, 우리는 3.1과 유사한 방법으로 장애물을 회피하는 알고리즘에 주목하였다. 아래는 Bhagat et al.의 알고리즘의 그림의 일부인데, [Fig. 2]와 유사한 형태를 띠고 있다[3].



[Fig. 3] Obstacle avoidance algorithm for insects used in drones



[Fig. 4] Obstacle avoidance flight algorithm

[Fig. 4]는 Bhagat et al.에서 사용한 장애물 회피 주행 알고리즘이다[3]. 알고리즘을 보면 장애물과의 거리를 측정하여, 거리가 멀 경우에는 드론을 우선 왼쪽으로 회전시킨 후 장애물이 있으면 오른쪽으로 회전시키고, 거리가 짧을 경우에는 드론을 멈추고 뒤로 움직이도록 하는 방식을 취하고 있다.

III. 연구 방법 및 결과

1. 드론을 위한 장애물 회피 알고리즘 개발

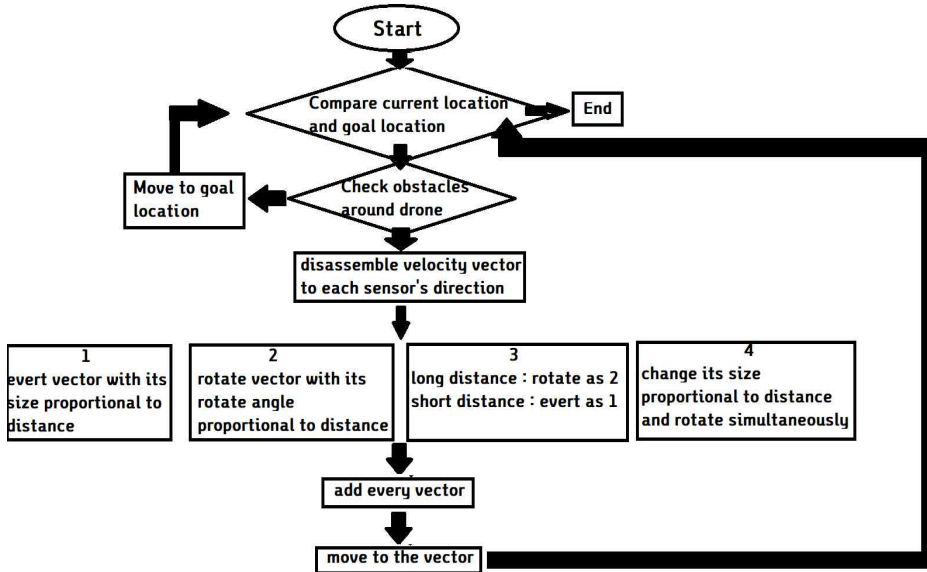
가. 알고리즘의 설계

Bhagat et al.에서 소개된 알고리즘은 무조건 왼쪽으로 돈다는 점과, 거리가 짧을 경우 무조건 멈추고 뒤로 이동시킨다는 점에서 문제가 있다[3]. 우리는 이 문제를 해결하고자 네 가지의 알고리즘을 설계하였다.

〈Table 1〉 Algorithms for this research

알고리즘 1	드론의 속도 벡터를 각 센서 방향으로 분해를 하고, 각 방향에서 측정된 거리에 따라 속도 벡터를 $(x, y) \rightarrow (-nx, -ny)$ 로 뒤집는다. n 은 장애물까지의 거리가 가까울 때 크고, 가까울 때 작은 거리에 비례하는 값이다.
알고리즘 2	드론의 속도 벡터를 센서 방향으로 분해를 하고, 각 방향에서 측정된 거리에 따라 속도 벡터를 회전시킨다. 회전방향은 장애물이 더 멀리 있는 방향으로 회전하고, 회전속도는 가장 가까이 있는 장애물과의 거리에 비례하여 회전한다.
알고리즘 3	장애물과의 거리가 가까울 때는 알고리즘 1의 방식을, 멀 때는 알고리즘 2의 방식을 따른다. 예를 들어, 장애물과의 거리가 4m일 때는 0.1도를 회전하고, 2m일 때에는 180도를 회전하고 $n=1$, 0m 일 때에는 180도 회전한 상태에서 $n=2$ 로 거리에 따라 벡터를 변화시킨다.
알고리즘 4	벡터의 크기 변화와 회전이 동시에 이루어지도록 한다. 예를 들어, 거리가 4m 일 때에는 $n=0.1$ 에 0.1도를 회전하고, 0m 일 때에는 $n=2$ 에 180도 회전을 하도록 거리에 따라 방향 벡터를 변환시킨다.

Table 1을 바탕으로 바뀐 벡터를 다시 합성하여 드론의 속도벡터를 찾는 과정으로 알고리즘이 진행된다. 본 알고리즘의 전체적인 개요도가 [Fig. 5]에 나타나 있다.



[Fig. 5] Outline of the obstacle avoidance algorithm

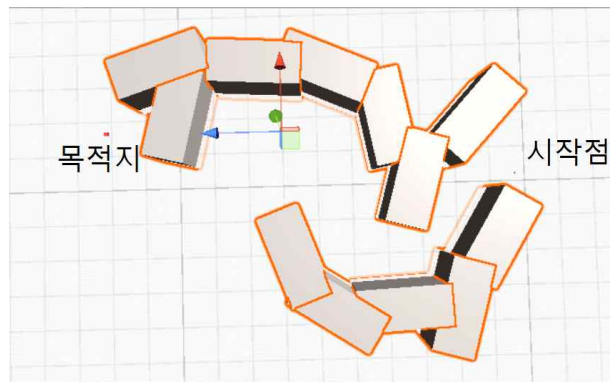
나. 시뮬레이션과 그 결과

본 연구의 시뮬레이터 제작은 Unity 5 프로그램을 통해 이루어졌다. 코딩과 시뮬레이팅의 편의를 위하여 드론의 모터 제어에 따른 드론의 이동 및 회전을 구현하는 대신 이동하는 벡터만을 이용하여 드론의 회전과 이동을 구현하였다. 드론은 기본적으로 목표 지점인 작은 상자를 향해서 이동하며, 그 과정에서 초음파 센서의 인식과 회피 알고리즘에 따라 이동하게 된다.

거리 측정 센서는 sensor.cs가 포함되어 있다. scene 화면에서는 거리 측정 센서의 인식 부분이 초록색 선(Ray) 형태로 나타나며, 이를 Raycast를 이용하여 Ray와 충돌한 물체가 있는지, 그리고 충돌하였을 경우 이 선의 발사 지점과 다른 물체와 Ray의 충돌 위치 사이의 거리를 측정하였다. 드론의 기동은 MoveWithBox.cs를 따르게 된다. sensor 클래스를 이용하여 4개의 객체를 이용, 즉 거리 측정 센서 4개를 이용하게 된다.

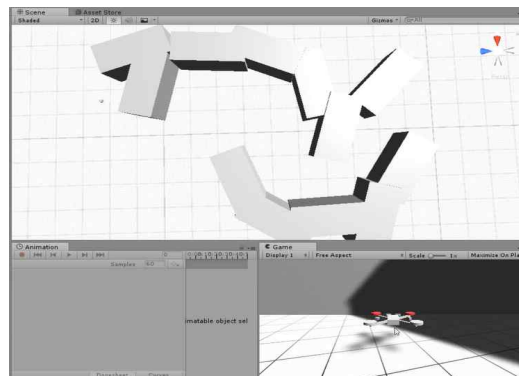
어떤 센서에서도 장애물이 감지되지 않았을 경우에는 목적지를 향해서 곡선의 형태로 이동한다. 초음파 센서가 Ray와의 충돌을 인식했을 때, 즉 물체가 있다는 것을 인식했을 때 우리가 고안한 회피 알고리즘에 따라서 기동하게 된다.

Box object 여러 개를 이용하여 [Fig. 6]과 같은 모습으로 장애물을 배열하여 드론의 비행 환경을 만들고, 시작점에는 드론을, 목적지에는 박스를 놓고 드론의 기동 모습을 동영상 촬영 프로그램을 이용하여 촬영하였다. 실행 시에 시뮬레이터 내에서 출력되는 초당 프레임과 실행시간은 시뮬레이션의 그래픽 요소까지 출력하며 프로그램 내에 프레임 제한이 존재하므로 오차가 존재한다.



[Fig. 6] Simulation map of the research

1) 알고리즘 1 실행 결과

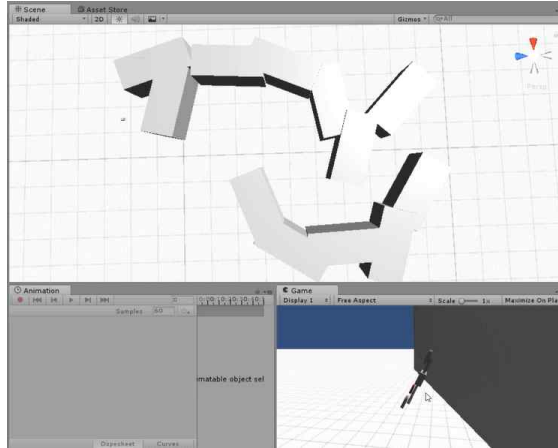


[Fig. 7] Simulation for algorithm 1

알고리즘 1은 정면으로 장애물을 만나는 경우 그 지점에서 앞뒤로 왕복을 반복하는 문제가 발생하여, 목적지

도달에 실패하였다. 본 알고리즘의 시간 복잡도는 센서의 개수 N 에 대해 프레임 당 $O(N)$ 의 시간 복잡도를 가진다. 실행 시 초당 90~110 프레임(90~110 fps), 11 ms 이하의 실행시간을 가진다.

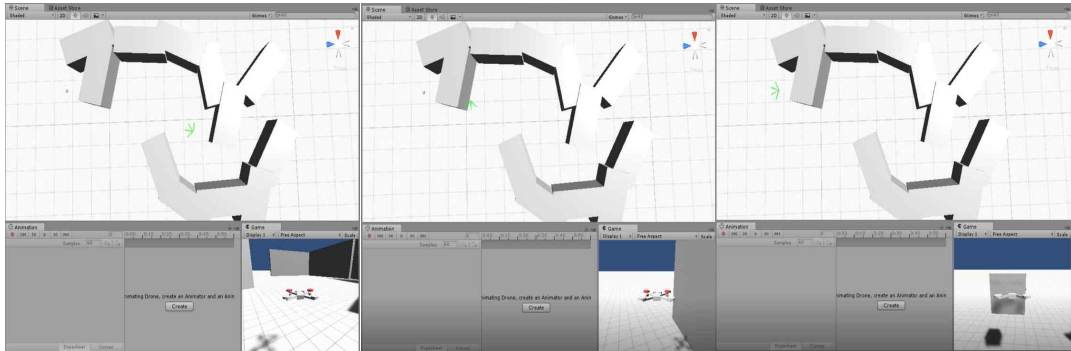
2) 알고리즘 2 실행 결과



[Fig. 8] Simulation for algorithm 2

드론이 가까운 경로를 선택하지 못하고, 계속 오른쪽으로만 회전하다가 벽과 드론의 후방 부분이 충돌하게 되어 목적지 도달에 실패하였다. 본 알고리즘은 프레임 당 $O(N)$ 의 복잡도를 가지지만, 알고리즘 1과 달리 벡터 계산이 아닌 단순 계산이므로 알고리즘 1에 비해 계수가 작다.

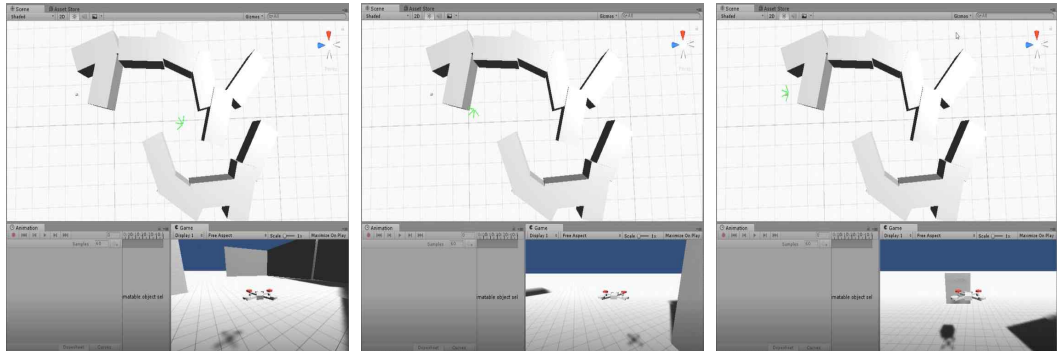
3) 알고리즘 3 실행 결과



[Fig. 9] Simulation for algorithm 3

장애물을 만났을 때 매우 즉각적으로 반응하는 모습을 보이면서 우리의 목적대로 장애물과 충돌하지 않고 안정적으로 목적지에 도달하는데 성공하였다. 시간 복잡도는 $O(N)$ 이지만 거리에 따른 경우를 나누기 때문에 알고리즘 1, 2에 비해 센서 개수만큼의 계산량을 추가로 가진다. 실행 시간은 88~110fps, 11ms 이하로, 알고리즘 1, 2와 큰 차이는 없었다.

4) 알고리즘 4 실행 결과



[Fig. 10] Simulation for algorithm 4

[Fig. 10]과 같이 알고리즘 3과 거의 차이가 없는 경로를 보이며 목적지에 안정적으로 도착하였다. 시간 복잡도는 $O(N)$ 이지만 벡터 이동과 회전 이동이 동시에 진행되므로, 알고리즘 1, 2에 비해 2~3배의 계산량을 가지며, 시뮬레이션의 상황, 즉 $N=4$ 의 경우에서 알고리즘 3보다 계산량이 더 많았다. 실행시간은 85~107fps, 12ms 이하로, 다른 알고리즘에 비해 미세한 시간차가 존재하였다.

우리는 위의 시뮬레이션들을 통해 알고리즘 3과 4가 가장 효과적임을 확인하였다. 또한 알고리즘 4가 약간 더 긴 시간이 소요되었지만, 이는 무시할 수 있는 정도이다. 다만 알고리즘 4에서 드론에 떨림이 더 심하게 관찰되었다. 반면에 알고리즘 3은 실행 시간에서 다른 알고리즘들과 큰 차이가 없었으며, 주행 면에서 다른 알고리즘보다 더 나은 결과를 보였다. 시뮬레이션을 바탕으로 알고리즘 3을 드론의 장애물 회피 알고리즘으로 사용하기로 하였다.

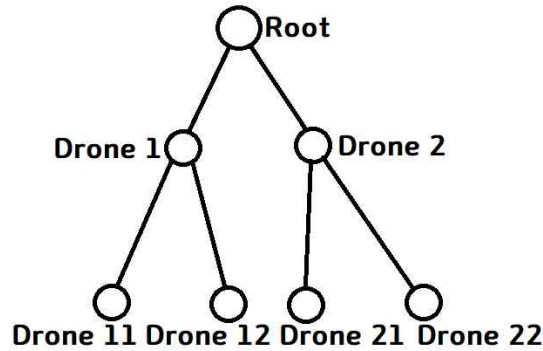
이후 드론의 후방에 센서를 달지 않아 후방충돌의 가능성이 있음을 확인하여 후방에 센서를 4개 더 달아 총 8개의 센서로 기동할 수 있도록 알고리즘 3을 조정하였다. 또한 드론의 이동 경로를 파악할 수 있도록 수정했다. 최종적인 장애물 회피 알고리즘의 실행 시간은 프레임 당 85~105ms로 12ms 이하로 측정되었다.



[Fig. 11] Final result for the simulation of obstacle avoidance algorithm

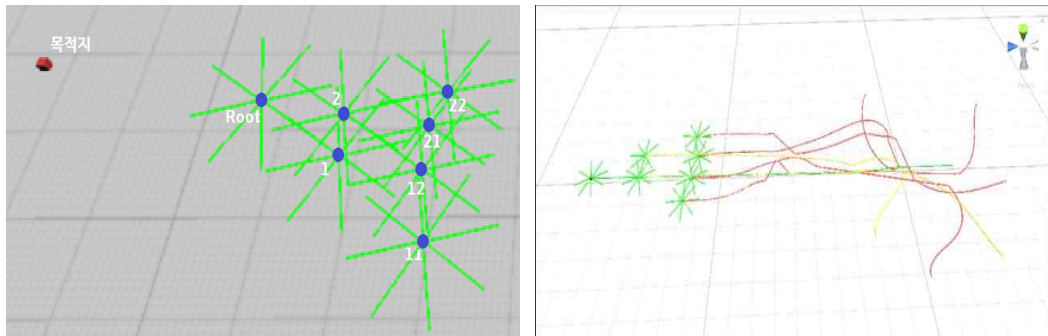
2. 트리 네트워크로 연결된 군집 드론의 동시 비행

트리 네트워크로 연결되어 있는 군집드론을 동시에 비행을 시키는 작업은 간단히 이루어졌다. 각각의 드론들은 자신의 부모(parent)와 자식(child)드론을 가지게 하여, 부모 드론이 연결 구조상 더 높은 위치에 있는 개체, 자식 드론은 더 낮은 위치에 있는 개체로 설정하였다. 우리가 시뮬레이션한 군집 드론은 [Fig. 12]와 같은 이진 트리 형태의 연결을 하고 있다.



[Fig. 12] Connection of the drones in simulation

[Fig. 12]의 군집 드론을 대형을 유지하며 목표 지점까지 이동하도록 하였다. 그 시뮬레이션의 결과는 [Fig. 13]과 같다.



[Fig. 13] Simulation of formation maintenance flight of a swarm drone

[Fig. 13]에서 초록색 선은 root 드론의 자취, 노란색 선은 드론 1, 2의 자취이고, 빨간 색은 드론 11, 12, 21, 22의 자취이다. [Fig. 13]에서 볼 수 있다시피 서로 연결되어 있는 드론들이 안전하게 목적지까지 비행을 하는 것을 확인할 수 있었다. 한 드론의 자식 드론의 개수를 M 이라 하면, 본 알고리즘의 시간 복잡도는 각 드론이 컴퓨터의 계산에 의해 움직이지 않고 독립적으로 기동하므로 $O(M)$ 의 시간 복잡도를 가진다. 다만 이들의 시뮬레이션은 한 컴퓨터 내에서 진행되었기 때문에 각 드론이 각각의 스레드에서 계산되었다 하더라도 70~90fps, 14ms 이하의, 드론 하나의 움직임의 실행 시간보다 더 긴 시간이 측정되었다.

3. 트리형 네트워크로 연결된 군집 드론의 대형 제어

가. 이론적인 결과

보조 정리 3으로부터, 우리는 다음과 같은 사실을 알 수 있다.

$$\text{모든 } i \in \{2, 3, \dots, n\} \text{에 대해서, } 2(1 - \cos(\frac{\pi}{n})) \leq \operatorname{Re}(\lambda_i) \leq n$$

그러면, 이 수식을 보조 정리 1과 2와 결합을 시키면, 다음의 정리들을 알아낼 수 있다.

정리 1. 군집 드론 시스템이 n 개의 꼭짓점으로 이루어진 트리 네트워크로 연결되어 있을 때, 이 시스템은 다음 조건이 성립할 때 시변 대형 제어를 만족할 수 있다.

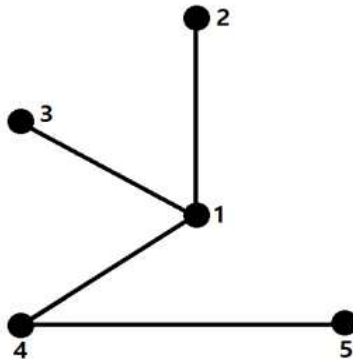
- 1) 모든 $i \in \{1, 2, \dots, n\}$ 와 $j \in N_i$ 에 대하여, $\lim_{t \rightarrow \infty} ((h_{iv}(t) - h_{jv}(t)) - (\dot{h}_{ix}(t) - \dot{h}_{jx}(t))) = 0$
- 2) 모든 $i \in \{2, 3, \dots, n\}$ 에 대하여,
 - (I) $k_{12} < k_{22} \times n$
 - (II) $(-k_{12} + \operatorname{Re}(\lambda_i)k_{22})(k_{12}k_{11} - \operatorname{Re}(\lambda_i)(k_{12}k_{21} + k_{11}k_{22}) + (\operatorname{Re}(\lambda_i)^2 + \operatorname{Im}(\lambda_i)^2)k_{21}k_{22}) - \operatorname{Im}(\lambda_i)^2k_{21}^2 > 0$

정리 2. 정리 1의 조건 1이 만족할 때, 군집 드론 시스템 (2)를 프로토콜 (3)을 통해 시변 대형을 만족시키도록 해 주는 K_2 는 (5)의 양의 실수 해 X 에 대해 다음과 같은 범위 내에서 존재한다.

$$A_2^T X \leq K_2 \leq \frac{1}{2(1 - \cos(\pi/n))} A_2^T X$$

나. 시뮬레이션과 그 결과

시뮬레이션은 Processing을 기반으로 만들어졌다. 시뮬레이션은 5대의 드론으로 이루어졌으며, 이들 간의 연결은 [Fig. 14]와 같이 이루어졌다.



[Fig. 14] Connection between drones

일반적으로 드론 간의 통신은 단방향 통신으로 이루어지므로 드론간의 그래프는 유향 그래프로 나타난다. 그러나 우리의 시뮬레이션에서는 이들이 양방향 통신을 한다고 가정을 하였다. 그래서 시뮬레이션에서 사용되는 트리는 방향성이 없는 연결을 하고 있다.

그러면, 우리는 정리 2에 의해 K_2 의 범위를 다음과 같이 찾을 수 있다.

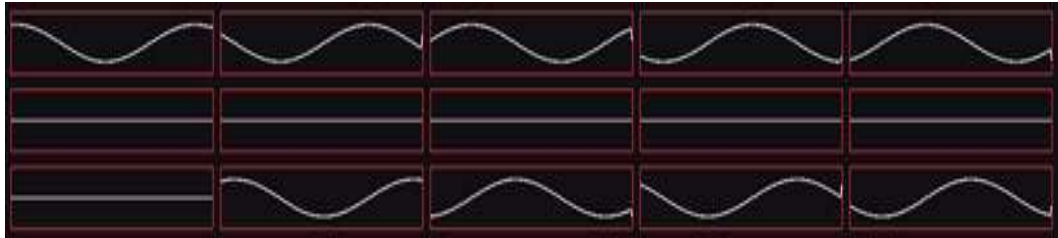
$$A_2^T X \leq K_2 \leq \frac{1}{2(1 - \cos \frac{\pi}{5})} A_2^T X \approx 2.618 A_2^T X$$

이 트리의 라플라시안 행렬 L 의 고윳값은 $Re(\lambda_1)=0$, $Re(\lambda_2) \approx 0.519$, $Re(\lambda_3)=0$, $Re(\lambda_4) \approx 2.311$, $Re(\lambda_5) \approx 4.170$ 이고, 허수 부분은 모두 0이다. 그리고 우리는 이 드론들의 움직임의 함수를 다음과 같이 설정했다.

$$h_{ixX}(t) = r \frac{\cos \theta - \theta}{p} t - r \cos \theta, \quad h_{ixY}(t) = \frac{r}{p} (\sin \theta - 1)(t - p) - r \quad (0 \leq t \leq p)$$

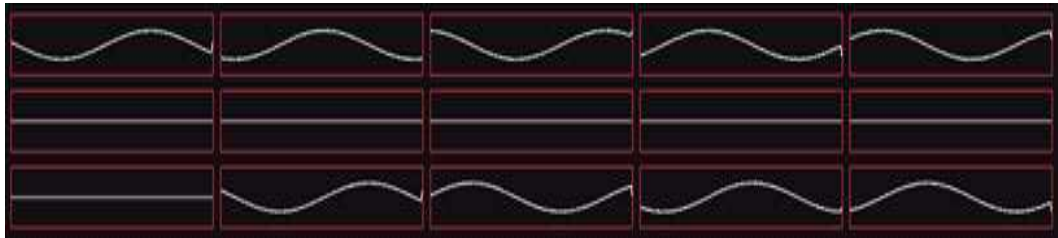
이때 $r = \frac{6}{\pi}$, $p=12$, 그리고 $i=1$ 일 때 $\theta=0$, $i=2$ 일 때 $\theta = \frac{2\pi}{5}$, $i=3$ 일 때 $\theta = -\frac{2\pi}{5}$, $i=4$ 일 때 $\theta = \frac{4\pi}{5}$, $i=5$ 일 때 $\theta = -\frac{4\pi}{5}$ 로 설정했다. 여기서 드론들이 복소평면 위에 있다고 가정하고, 대형 중심의 motion mode를 $3+5i$ 와 $3-5i$ 에 놓았다. 그러면, Dong et al.로부터, 대형 중심의 모션 모드가 $A_2 K_1 + A_1 A_2^T$ 의 고윳값이 되도록 놓아야 하므로, 우리는 $K_1 = I_2 \otimes [-34 \ 6]$ 가됨을 알 수 있다[10]. 또한, 대수적 리카티 방정식의 양의 실수해는 $X = \begin{bmatrix} 410.99 & 0.01 \\ 0.01 & 12.09 \end{bmatrix}$ 와 같이 구해진다. 그러므로 $K_2 = I_2 \otimes \frac{1}{0.51881} [0 \ 1] X = I_2 \otimes [0.019 \ 23.303]$ 이다. 이 결과는 정리 1과 2를 만족시킴을 알 수 있다.

시뮬레이션을 통한 드론들의 그래프가 [Fig. 15, 16, 17]에 나타나있다.



[Fig. 15] x, y, z coordinates of each drone in time

[Fig. 15]는 드론들의 좌표 값들이 시간의 흐름에 따라 변하는 모습을 나타냈다. 각 그래프의 x축은 시간, y축은 좌표 값이며, 각각의 가로줄은 x, y, z 좌표 값을 의미한다. 여기서 y축이 드론의 높이를 의미한다. 그리고 각각의 세로줄은 다섯 개의 드론들을 의미한다.



[Fig. 16] x, y, z velocities of each drone in time

[Fig. 16]은 다섯 대의 드론들의 x, y, z축 방향의 속도 변화를 나타낸다. 이 그래프는 우리의 예상대로 그래프가 단순하게 나타난다.



[Fig. 17] x, y, z accelerations of each drone in time

[Fig. 17]은 x, y, z축 방향의 가속도 변화이다. 우리가 가속도를 측정하는데 있어서 dt를 임의로 발생시켰기 때문에 그래프가 복잡하게 나타났지만, 그래프의 대략적인 개형은 확인할 수 있다.

그러므로, 우리의 시뮬레이션을 통하여, 우리는 다섯 대의 드론이 우리의 이론대로 잘 나는 것을 확인하여, 본 연구의 이론이 올바름을 확인하였다.

4. 트리형 네트워크로 연결된 군집 드론의 장애물 회피

가. 군집 드론을 위한 장애물 회피 알고리즘

군집 드론이 장애물을 회피하면서 목적지까지 이동하는 비행을 하기 위해서는 <Table 1>의 알고리즘만으로는 부족하다. 이를 위해 우리는 군집드론에게 적용시킬 알고리즘을 설계하였다. 이 알고리즘은 각 드론이 여러 조건에 대해 합을 구하며 결과에 따라 작동하는 모습이 다르다. 알고리즘의 조건이 <Table 2>에 소개되어 있다.

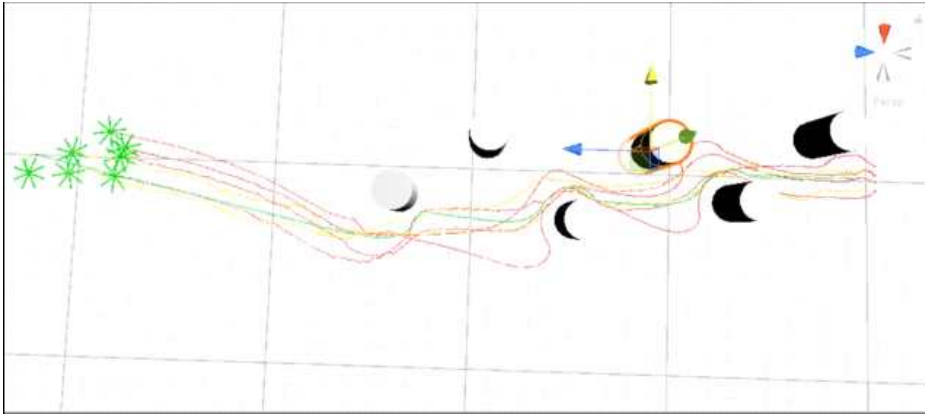
<Table 2> Conditions and its results of swarm drone algorithm

조건 1	root 드론이 아니면서 부모 드론과의 거리가 10 미만인가?	+1
조건 2	root 드론이 아니면서 같은 level에 있는 다른 드론과의 거리가 10 미만이면서 부모 드론과의 거리가 30 이하인가?	+2
조건 3	장애물과의 거리가 0에서 2 사이인가?	+4
조건 4	자식 드론 중에 하나라도 거리가 30을 초과하는가?	+8

조건들의 합이 2, 10 일 때는 드론의 최대 속력을 넘지 않으면서 속도를 초기에 설정한 가속도의 절반씩 증가시키면서, DroneIdx(드론의 인덱스, 부모 드론의 왼쪽 뒤에 위치하면 1, 오른쪽 뒤에 위치하면 2)가 1이면 왼쪽 앞 대각선 방향으로, 2이면 오른쪽 앞 대각선 방향으로 이동한다. 합이 1, 3, 5, 7, 11, 13, 15일 때는 드론의 속도를 가속도만큼 감소시키면서 장애물 회피 알고리즘을 수행한다. 합이 0, 4, 6, 14 일 때는 속도를 가속도만큼 증가시키면서 장애물 회피 알고리즘을 수행한다. 합이 8, 9, 12 일 때는 속도를 가속도만큼 감소시키는 대신, 최대 속도의 70%는 유지하며 장애물 회피 알고리즘의 기능대로 수행한다. 이 작업을 목표 지점에 도달할 때 까지 반복한다. 본 알고리즘의 Pseudo Code가 [Fig. 18]에 나타나있다.

Algorithm ForSwarmDrone**While** drone's pos = destination pos **int** k=0 **if** drone != root & distance between parent drone < 10 k+1 **if** drone != root & distance of same level drone < 10 & distance between parent drone <= 30 k+2 **if** 0 < distance between obstacle < 2 k+4 **if** distance between child drone > 30 k+8 **if** k = 2 || 10 $v = v_0 + \frac{1}{2}at$, move by DroneIdx **if** k = 1 || 3 || 5 || 7 || 11 || 13 || 15 $v = v_0 - at$. activate collision avoidance algorithm **if** k = 0 || 4 || 6 || 14 $v = v_0 + at$. activate collision avoidance algorithm **if** k = 8 || 9 || 12 $v_{max} \times 0.7 < v$ & $v = v_0 - at$. activate collision avoidance algorithm**[Fig. 18] Pseudo Code of the swarm drone algorithm****나. 알고리즘의 시뮬레이션과 그 결과**

알고리즘의 시뮬레이션은 [Fig. 19]와 같은 형태의 맵에서 진행되었다. 그 결과는 다음과 같다.

**[Fig. 19] Simulation of obstacle avoidance flight of tree-connected swarm drone**

[Fig. 19]은 군집 드론이 장애물을 회피하면서 비행하는 모습이다. 초록색 선은 root 드론이 남긴 자취, 노란색 선은 드론 1과 2가 남긴 자취이고, 빨간색은 드론 11, 12, 21, 22가 남긴 자취이다. 시뮬레이션을 통해서 우리는 알고리즘이 성공적으로 장애물을 회피한다는 것을 확인할 수 있었다. 본 알고리즘은 자식 드론과의 거리와 센서의 인식 거리에 따라 경우를 나눠서 이동하여 시간 복잡도는 $O(2N+M)$ 이다. 실행 시간은 70~85fps, 14ms 이하로 측정되었다.

IV. 고찰 및 결론

위의 시뮬레이션과 그 결과 및 분석을 통해, 우리는 성공적으로 군집 드론을 목적지까지 장애물을 회피하면

서 비행시키는 알고리즘을 개발하였다. 이 알고리즘은 비행할 때 만드는 대형이 한정되어 있지만, 그 대형을 최대한 유지하면서 장애물을 회피하며 비행을 할 수 있음을 확인하였다. 또한, 드론 간에 연결되어 있는 네트워크가 통신량이 적은 트리형 네트워크로 연결되어 있다는 점이 본 연구만의 특별한 점이다.

그러나 본 연구는 대부분의 확인이 시뮬레이션을 통해 이루어졌다는 점이 한계점으로 남는다. 시뮬레이션 상에서는 모든 반응이 즉각적으로 일어나고, 센서도 아무런 문제가 없이 작동을 하는 이상적인 환경이지만, 실제 군집 드론의 비행에는 센서 간에 간섭, 통신, 반응 속도 등의 문제가 발생할 수 있다. 그렇기 때문에 실제 드론을 가지고 비행을 하여 확인을 하는 후속 연구가 필요하다.

또한, 드론 군집에서 어느 한 개체가 떨어지면 네트워크가 무너질 수 있다는 한계점이 있다. 이는 드론의 네트워크가 트리 네트워크이기 때문에 더 큰 문제점이 된다. 그러나 어느 드론이 없어지더라도 네트워크는 계속해서 유지할 수 있도록 하는 선행 연구가 수학적으로 많이 진행되어 있으므로, 관련된 연구를 참고하면 보다 더 안정적인 드론 네트워크를 설계할 수 있을 것으로 예상된다.

본 연구는 단순히 군집 드론이 트리 네트워크로 연결되어 있을 때 이들이 목적지까지 이동하도록 하는 알고리즘을 설계하는 연구이지만, 관련된 후속 연구가 계속하여 진행된다면 본 연구를 군집 드론이 필요한 재난 현장과 같은 곳에서 응용할 수 있을 것으로 기대된다.

V. 참고문헌

- [1] 조동현, 문성태, 장종태, & 류동영. (2014). AR, Drone 을 이용한 실내 군집비행용 충돌회피 기동 설계. 한국항공 공우주학회지, 42(9), 752-761.
- [2] Bachrach, A., He, R., & Roy, N. (2009). Autonomous flight in unknown indoor environments. *International Journal of Micro Air Vehicles*, 1(4), 217-228.
- [3] Bhagat, K., Deshmukh, S., Dhonde, S., & Ghag, S. (2016). Obstacle Avoidance Robot. *International Journal of Science, Engineering and Technology Research (IJSETR)*, 5(2), 439-442.
- [4] Bürkle, A., Segor, F., & Kollmann, M. (2011). Towards autonomous micro uav swarms. *Journal of intelligent & robotic systems*, 61(1-4), 339-353.
- [5] Consolini, L., Morbidi, F., Prattichizzo, D., & Tosques, M. (2008). Leader-follower formation control of nonholonomic mobile robots with input constraints. *Automatica*, 44(5), 1343-1349.
- [6] Dong, X., Yu, B., Shi, Z., & Zhong, Y. (2015). Time-varying formation control for unmanned aerial vehicles: Theories and applications. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 23(1), 340-348.
- [7] Gageik, N., Müller, T., & Montenegro, S. (2012). Obstacle detection and collision avoidance using ultrasonic distance sensors for an autonomous quadcopter. University of Würzburg, Aerospace Information Technology (Germany) Würzburg September.
- [8] Guo, J. M. (2003). On the laplacian spectral radius of a tree. *Linear algebra and its applications*, 368, 379-385.
- [9] Hong, Y., & Zhang, X. D. (2005). Sharp upper and lower bounds for largest eigenvalue of the laplacian matrices of trees. *Discrete Mathematics*, 296(2), 187-197.
- [10] Kuhnert, K. D., & Kuhnert, L. (2013). Light-weight sensor package for precision 3D measurement with micro UAVs EG power-line monitoring. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40, 235-240.
- [11] Kushleyev, A., Mellinger, D., Powers, C., & Kumar, V. (2013). Towards a swarm of agile micro quadrotors. *Autonomous Robots*, 35(4), 287-300.
- [12] Ren, W. (2007). Consensus strategies for cooperative control of vehicle formations. *IET Control*

- Theory & Applications, 1(2), 505–512.
- [13] Richards, A., Bellingham, J., Tillerson, M., & How, J. (2002, August). Coordination and control of multiple UAVs. In AIAA guidance, navigation, and control conference, Monterey, CA.
- [14] Salaskar, P., Paranjpe, S., Reddy, J., & Shah, A. (2014). Quadcopter-Obstacle Detection and Collision Avoidance. Int. J. Eng. Trends Technol, 17(2), 84–87.
- [15] Sharma, R. K., & Ghose, D. (2009). Collision avoidance between UAV clusters using swarm intelligence techniques. International Journal of Systems Science, 40(5), 521–538.
- [16] Yi-Zheng, F., Xu, J., Wang, Y., & Liang, D. (2008). The laplacian spread of a tree. Discrete Mathematics and Theoretical Computer Science, 10(1).

Ⅰ 연구진 Ⅰ

문석환 (Seokhwan Moon, 광주과학고등학교, tjrhks0826@naver.com) 주저자/교신저자

김준혁 (Junhyeok Kim, 광주과학고등학교, rlawnsgur39@naver.com) 공동저자

최지웅 (Jiung Choi, 광주과학고등학교, 0806jy@gmail.com) 공동저자

지도교사 : 김영주 (Youngju Kim, 광주과학고등학교, kyj@gsa.hs.kr)

지도교수 : 이흥노 (Heungno Lee, 광주과학기술원 전기전자컴퓨터공학부, heungno@gist.ac.kr)

지도조교 : 한현준 (Hyunjun Han, 광주과학기술원 전기전자컴퓨터공학부, hyunjun0701@gist.ac.kr)

지도조교 : 이승찬 (Seungchan Lee, 광주과학기술원 전기전자컴퓨터공학부, seungchan@gist.ac.kr)

탑과 가람의 비례분석을 통한 고대 사찰 복원에 대한 연구

김희선, 윤예슬, 황지윤 - 창원과학고등학교

A Study on Restoration of Ancient Buddhist Temples through Proportion Analyses of Stupa and Temple Arrangement

Heesun Kim · Yeseul Yoon · Jiyun Hwang - Changwon Science High School

국문초록

사찰은 한국의 불교문화 자체를 보여주는 건축물이나 현재 고대 사찰은 소실되거나 무분별한 복원으로 훼손된 경우가 많아 역사적인 의미를 완전히 갖고 있지 못하다. 이에 본 연구를 통해 해당 사찰들의 복원 안을 제시하고자 하며, 동시대에 지어진 사찰은 유사한 외형과 규칙을 갖는다는 전제하에 진행한다. 사찰들을 분류한 뒤 탑이 현존하며 뚜렷한 가람배치가 남은 고대 사찰의 탑과 가람의 비례 분석을 통해 공통 특징을 추출하고, 추출한 특징들을 복원이 필요한 사찰에 적용시켜 탑이나 가람배치의 복원 안을 제시한다. 또한 복원이 필요한 사찰 중 개선정된 사찰은 탑의 높이를 이용해 가람의 복원 안을 설계하고 3D 프린터로 그 복원 안을 제작한다. 이로써 고대 사찰 본래의 모습을 되찾을 수 있도록 하여, 찬란한 고대 사찰을 재현하고자 한다.

주제어 : 가람배치, 비례분석, 사찰, 복원, 탑

ABSTRACT

Temples are the buildings that best display Buddhist culture. However, there are many ancient temples that have disappeared or have been damaged by reckless restoration, so they are not able to have the same historical significance. This research proposes the proper restoration plans, supposing that the temples built in same period have similar shapes and rules. After sorting the temples, common characteristics were extracted through proportional analysis of Stupa and Temple arrangement that are still intact. Also, the extracted characteristics were applied to temples needing restoration, allowing Stupa or Temple arrangement' restoration plans to be proposed. After selecting temples from among those needing restoration, selected temples' restoration plans would be designed and be printed out using a 3D printer. By this, we are trying to help glorious ancient temples regain their own original features and revive their cultural and historical importance.

Key words : Temple arrangement, Proportion analyses, Temple, Restoration, Stupa

I. 서론

1. 연구 배경

불교는 인도에서 발생하여 만주대륙과 한반도 등의 동아시아 문화권에 정착한 뒤 우리나라의 지역 및 풍토와 민족성 안에서 독특한 전개를 이루었다. 대표적인 사찰에는 경주 불국사, 경주 분황사, 익산 미륵사지 등이 있다. 사찰은 한국의 불교문화 그 자체를 보여주는 건축물이나 현대에는 사찰의 일부 또는 전체가 소실된 경우가 많아 역사적인 의미를 완전히 갖고 있지 못하다고 볼 수 있다. 또한, 불국사의 석굴암이나 익산 미륵사지 석탑의 경우 일제 강점기 일본의 무분별한 복원으로 본래의 모습을 잃고 훼손되었다. 석굴암의 경우 구한말까지 이어지던 통풍과 습도 조절이 원활하던 구조가 일제의 3차례 보수공사에 의해 급속한 풍화 및 백화 현상을 보였

다[1]. 익산 미륵사지 석탑의 경우 1915년 일본 동경대학 공과대학 교수인 세키노 타다시(關野貞)가 미륵사지 석탑의 붕괴 위험을 지적하면서 미륵사지 석탑의 동쪽 면을 제외한 나머지 부분을 시멘트로 무자비하게 복원하여 한쪽 면이 콘크리트로 덮인 모습으로 남게 되었다. 미륵사지 석탑의 경우 아름다움을 잃었을 뿐만 아니라 본래의 모습을 잃었기 때문에 석탑의 층수에 대한 여러 설이 존재하기도 한다[2]. 이와 비슷한 사례로 분황사의 모전석탑이 있다. 분황사 모전석탑의 경우 일본인에 의해 1900년대 초반 복원되었으나 완전히 복원된 것이 아니기에 건립 당시 분황사 모전석탑이 지녔던 층수에 대한 여러 견해가 존재한다. 3층까지만 현존하고 있어 그간 3층설, 5층설, 7층설, 9층설 등 다양한 견해가 제시되어 왔다. 1992년에 시행된 분황사모전석탑 실측조사에서는 잔존 부재의 양으로 볼 때 높이 17.016m에 달하는 9층 석탑이었을 가능성이 제기되었다[3]. 이외에도 황룡사 구층목탑과 같이 역사적인 사건¹⁾에 의해 소실된 경우가 있다. 이러한 우리 문화재의 의의를 되찾기 위해서는 본래의 모습을 복원하는 것이 매우 중요하고 복원방법으로 탑과 가람의 비례체계를 분석하면 더 정확한 복원안을 제시할 수 있을 것이다. 또한 훼손되거나 소실된 사찰에 대하여 현재까지 제시되어 있는 연구는 사찰의 외형에 관하여 많이 연구되어 왔다면, 본 연구에서는 사찰의 외형보다는 탑의 높이와 가람 평면과의 수치적인 비례 관계를 중점적으로 연구하고자 한다. 그를 위해 탑의 높이를 지름 또는 반지름으로 하는 원을 가람 평면상에 작도하는 과정에서 삼국시대 기본 수리작도법과 술바수트라스 작도법을 이용하였다. 이와 같은 방법으로 산출된 고대 사찰에 대한 연구 결과를 복원이 필요한 사찰에 적용시켜 복원안을 제시하고자 한다.

2. 연구 목적

한국의 고대 사찰은 주로 금당, 대웅전, 강당 등의 건물과 탑으로 이루어져 있으며 이러한 구조물들의 배치를 가람배치라고 한다. 모든 고대 사찰은 고유의 가람배치를 가지고 있으며, 동시대의 사찰의 경우 유사한 구조의 가람배치를 지니는 경우가 많다. 따라서 탑과 가람의 비례 분석을 위해 사찰을 선정하고 선정된 고대 사찰을 시대별로 분류하여 발굴조사에 의해 비교적 정확한 탑과 가람의 배치를 갖는 사찰을 따로 분류해 분석한 후 그 공통점을 추출할 것이다. 분석하여 얻은 시대별 사찰의 공통점을 복원이 필요한 고대 사찰에 적용시켜 그 복원안을 재현하기 위해 다음과 같은 연구 목적을 설정하였다.

- 가. 고대 사찰의 가람에 포함된 탑의 개수, 사찰의 입지조건을 기준으로 사찰을 분류하고 탑의 조형 원리와 탑의 높이-가람배치도 사이 관계를 찾을 수 있는 사찰을 선정한다.
- 나. 삼국시대 중 백제의 사찰 정림사지와 능산리사지에서의 탑의 조형 원리와 탑의 높이-가람배치도 사이의 비례 분석을 통해 익산 미륵사지 탑의 높이를 추정한다.
- 다. 통일신라시대의 사찰 감은사와 불국사에서 탑의 조형 원리와 탑의 높이-가람배치도 사이의 비례 분석을 통해 황룡사 구층목탑과 분황사 모전석탑의 높이를 추정한다.
- 라. 백제의 사찰과 통일신라시대의 사찰에서 찾은 탑의 조형 원리와 탑의 높이-가람배치도 사이의 비례 분석을 통해 사천왕사와 망덕사 사찰을 복원한다.

1) 고려와 몽고의 전쟁 - 여몽전쟁 중 몽골의 3차 침입에 의해 고려 전체를 유린당하면서 황룡사 또한 불타.

II. 이론적 배경

1. 삼국시대 기본 수리작도법[4]

정방형과 대각선전개에 의한 정팔각형 구성법, 정방형의 대각선 구성법, 정삼각형과 수선, 오각형과 직각삼각형, 정방형과 대각선전개, 구체구성법, 정사각형과 내접원, 원에 의한 분할 등의 고대 작도법을 원리에 따라 GeoGebra를 이용해 직접 작도하고 익혀 가람배치도와 탐의 관계를 파악하는데 사용하였다.

2. 술바수트라스 작도법[5]

주어진 직선에 수직선과 수직 이등분선 그리기, 주어진 조건들을 가진 다양한 삼각형들의 작도법, 사각형과 마름모꼴 그리기, 주어진 변을 가진 정사각형 작도법, 주어진 높이와 밑변 그리고 면을 가진 사다리꼴 작도법, 주어진 직선위의 점에서 수직선 그리기, 주어진 변과 기울기를 가지는 평행사변형 작도법, 원 그리기, 원에서 지름으로 여러 부분으로 나누기, 직선을 같은 부분으로 나누기, 주어진 넓이의 정사각형이나 등변 사다리꼴 작도하기, 주어진 등변 사다리꼴 넓이의 정사각형이나 등변 사다리꼴 작도하기, 넓이가 주어진 등변 사다리꼴의 넓이의 $\frac{1}{3}$ 배나 2배가 되는 닮은 등변 사다리꼴 작도법 등이 있다. 이것들은 고대 인도의 제단에 사용된 작도법으로 삼국시대 기본 수리 작도법이 인도의 영향을 받았으므로 탐구하였다.

3. 고대 사찰의 탐과 가람

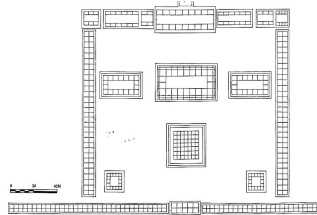
372년 고구려에 처음으로 불교가 전파되었으며, 이것이 한반도에 처음으로 불교가 들어온 것이다. 이후 한반도에는 탐파가 세워지고, 여러 사찰들이 건조되었다. 이때 세워진 탐파들 중 현재까지 남아있는 탐파는 거의 대부분이 석탐이며 유일하게 남아있는 목탐은 법주사 팔상전으로 1층 자체가 하나의 불교 건축물이다. 이와 같이 하나의 사찰에는 하나 또는 둘 이상의 탐이 존재한다. 이때 불교 사찰의 탐의 경우 지면과 맞닿으며 탐을 세우기 위해 잡은 터에 쌓은 돌인 지대석부터 탐신부를 받치고 있는 크고 넓적한 돌인 상대갑석까지를 기단부라고 한다. 기단부의 경우 지면에서부터 탐의 1층이 시작되기 전까지의 부분으로 인식할 수 있다. 탐의 1층이 시작되는 탐신부는 몸체부분인 옥신과 그 지붕인 옥개석으로 이루어진 탐층이 연속적으로 지어진 형태를 띠고 있다. 탐신부 위로는 탐의 가장 윗부분으로 가장 화려한 모습을 갖추고 있는 상륜부가 있다. 고구려의 경우 대부분의 탐이 목탐으로, 현존하는 탐이 없다. 백제의 경우에는 목탐과 5층 석탐을 주로 건조하였으며, 목탐의 경우 고구려와 마찬가지로 모두 소실되었다. 5층 석탐의 예로는 국보 9호 정림사지 5층 석탐과 국보 289호인 왕궁리 5층 석탐이 있다. 신라의 경우 고구려의 목탐 양식을 계승하여 황룡사 9층목탐과 같은 목탐을 축조하였으며, 다른 석탐들에는 다보탐, 석가탐, 감은사지 석탐 등이 있고, 중국의 전탑 양식을 모방한 분황사 모전석탐이 있다[6]. [Fig. 1]은 석탐의 구조와 명칭을 정리한 그림이다²⁾.

가람이란, 승가람마와 같은 뜻으로 승려가 살면서 불도를 닦는 곳 즉 모든 사찰 건축물들을 통틀어 일컫는 말이다. 이때 사찰의 건축물이 사찰 지역에 배치되어 있는 전체적인 구조를 가람(배치)이라고 한다. 가람의 경우 공간에 따라서 구분하거나 탐과 금당 사이의 관계에 따라서 구분하는데, 공간에 따라 구분하는 경우 평지형, 산지형, 석굴형으로 구분할 수 있다. 일반적으로 평지이던 건설 공간을 산지로 옮기게 된 것은 당시의 산악숭배사상과 호국사상에 더불어 불교를 배척하는 정책을 피하려던 것이 그 원인이 되었다고 알려져 있다. 또한 석굴형으로는 인공석굴인 불국사 석굴암이 있다.

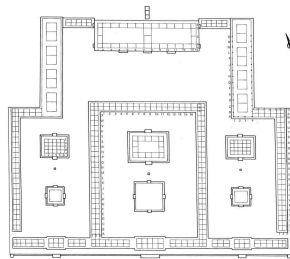
또 다른 구분의 기준이 되는 탐과 금당 사이의 관계에는 일탑삼금당과 일탑일금당(삼탑삼금당), 이탑일금당이 있다. 처음으로 불교를 들여온 고구려에서 중앙에 위치한 탐을 중심으로 3개소에 금당을 건립하는 배치방식으로

시작되었던 일탑삼금당은 이후 신라의 황룡사에서도 볼 수 있는 형식이다. 아래는 그러한 황룡사의 모습을 보여주는 황룡사지 가람배치도이다[7]. 이는 고구려에서 가장 유행했으며 현재 남한에서는 찾아볼 수 없다. 일탑일금당의 경우 백제에서 완성한 가람의 형식으로 탑이 한 기만 건립되어 단탑가람으로 불리기도 한다. [Fig. 3]은 일탑일금당과 같은 비율이 적용된 삼탑삼금당으로 지어진 백제의 익산 미륵사지의 가람배치도이다[8].

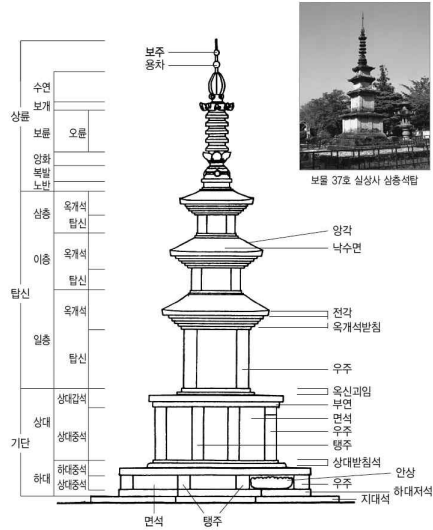
이탑일금당의 경우 대웅전 앞 2기의 석탑이 건립된 가람배치로 쌍탑가람이라고 한다. 신라가 삼국을 통일하자마자 자리 잡아 통일신라시대의 특징적인 가람배치로 인식된다. [Fig. 4]는 쌍탑가람의 예시가 되는 불국사의 가람배치도이다[9].



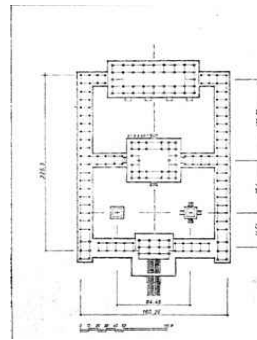
[Fig. 2] One stupa for three main buildings - Hwangnyongsa temple arrangement



[Fig. 3] Three stupas for three main buildings - Mireuksa temple arrangement



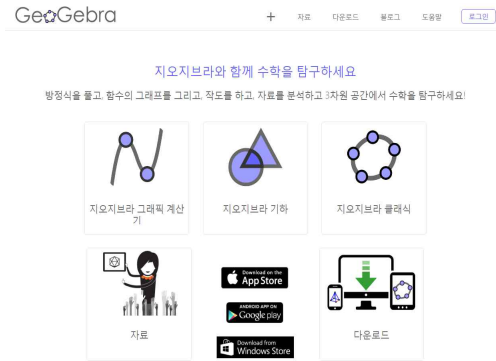
[Fig. 1] The structures and designations of Stupa



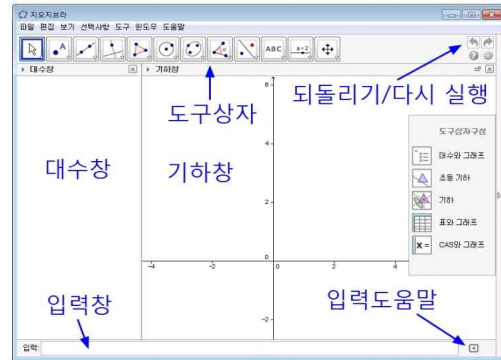
[Fig. 4] Two stupas for one main building - Bulguksa Temple arrangement

4. Geogebra

지오지브라는 기하, 대수, 그래프, 통계 등을 쉽게 다룰 수 있는 수학소프트웨어다. 지오지브라의 이름은 지오 (Geometry;기하)와 지브라 (Algebra;대수)의 합성어로 동적 기하 소프트웨어와 컴퓨터 대수 시스템을 결합한 소프트웨어라는 의미를 담고 있다. 따라서 지오지브라는 다양한 수학 영역의 대상을 다룰 수 있는 동적 수학 소프트웨어 (DMS; Dynamic Mathematics Software)라고 볼 수 있다. 지오지브라는 STEM(Science, Technology, Engineering, Mathematics) 교육을 지원하는 움직이는 수학 소프트웨어를 제공하며 전 세계적으로 교수-학습의 영역에서 혁신을 이끌고 있다.³⁾



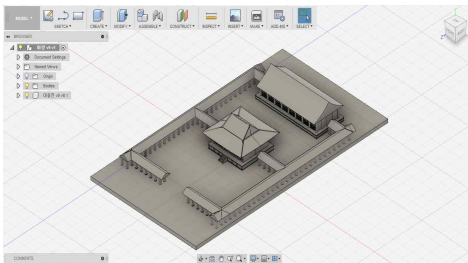
[Fig. 5] Program Geogebra



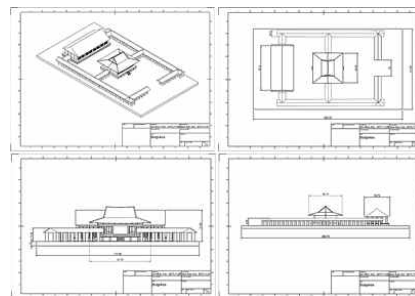
[Fig. 6] Beginning screen of Geogebra

5. Fusion 360

3D프린팅 할 모형의 모델링을 위해 사용한 프로그램이다. 기본 화면에서 시작하여 평면을 그리고 스케치를 바탕으로 입체를 만든다. 스케치 할 평면은 기본 평면을 이용하거나 CONSTRUCT를 이용하여 자유롭게 설정할 수 있으며 선분, 곡선, 다각형 등을 통해 평면에 스케치하고 Fillet, Mirror, Offset, Circular Pattern, Rectangular Pattern 등의 기능을 이용할 수 있다. 평면 위에 스케치가 완료되면 상단의 CREATE에서 Extrude, Sweep, Loft 등을 이용하여 입체로 만들 수 있다. [Fig. 7]는 불국사 가람배치의 구현을 위한 디자인 과정이며 이를 통해 [Fig. 8]의 도면과 같이 출력할 수 있다.



[Fig. 7] Bulguksa Temple arrangement design process for 3D printing



[Fig. 8] Bulguksa Temple arrangement floor plan for 3D printing

III. 연구 방법

1. 연구 대상 사찰의 선정

탐이나 고대 사찰 건축물들이 많이 남아있는 사찰의 비례분석을 통해 다른 고대 사찰들의 탐 높이나 가람을 추정하기 위해 기준이 될 사찰 즉, 탐이나 사찰 건축물들이 많이 남아있는 사찰을 선정한다. 또한, 기준이 된

사찰을 비례 분석하여 적용시켜 훼손, 소실 전 사찰의 모습을 추정할 사찰을 선정한다. 이때 사찰을 선정할 기준은 시대, 입지 조건, 형식 등이며 기준에 따라 사찰을 분류한 뒤 연구에 적합한 사찰을 선정한다.

2. 백제 사찰의 분석과 익산 미륵사 탑 높이의 추정

백제 사찰 분석 연구 대상 사찰은 정림사지와 능산리사지이다. 두 사찰의 탑의 높이와 기단부 사이의 관계, 탑의 높이와 가람배치 사이의 관계를 각각 분석하여 공통점을 찾아 백제 전성기의 사찰의 전형적인 특징을 추출한다. 추출한 백제시대 전성기의 사찰건축의 특징을 이용해 익산 미륵사 탑의 높이를 추정한다.

3. 통일신라시대 사찰의 분석과 황룡사 구층목탑 높이, 분황사 모전석탑 높이의 추정

통일신라시대 사찰 분석 연구 대상 사찰은 감은사지와 불국사이다. 두 사찰의 탑의 높이와 기단부 사이의 관계, 탑의 높이 또는 기단부의 폭과 가람배치 사이의 관계를 각각 분석하여 공통점을 찾아 통일신라시대 전성기의 사찰의 전형적인 특징을 추출한다. 신라시대의 경우 전성기의 사찰 건축 형식이 통일신라시대 전성기의 사찰 건축과 유사하므로 정의한 통일신라시대 전성기 사찰건축의 특징을 이용해 황룡사 구층목탑의 높이와 분황사 모전석탑의 높이를 추정한다.

4. 사천왕사, 망덕사 사찰의 복원

사천왕사와 망덕사는 신라시대 건축된 사찰로, 본 연구 대상으로 선정된 다른 사찰들과는 다르게 사찰의 탑 또는 가람배치에 속하는 사찰 건축물의 존재나 존재하였다는 증거가 분명하지 않다. 또한 황룡사 구층목탑, 분황사 모전석탑과는 달리 현재 높이 추정에 대한 연구의 진행과 발굴조사 자료가 현저히 부족하다. 사천왕사와 망덕사 모두 통일신라시대에 건축된 사찰이므로 감은사나 불국사와 같이 통일신라시대의 사찰을 분석한 결과를 적용하는 것이 사찰 모습을 추정해 보는 하나의 방법이 될 수 있을 것이다. 따라서 연구 방법 3에서 황룡사 구층목탑의 높이와 분황사 모전석탑의 높이를 추정한 방법과 같은 방법, 즉 통일신라시대의 사찰인 감은사지와 불국사를 기준이 되는 사찰로 두고 두 사찰의 유사점을 통일신라시대 전성기의 사찰의 전형적인 특징으로 추출하여 적용시키는 방법으로 사천왕사와 망덕사 탑의 높이를 추정한다. 추가적으로, 탑의 높이를 근거로 하여 가람배치를 추정하여 3D 프린터로 복원 안을 제작한다.

IV. 연구 결과

1. 연구 대상 사찰의 선정

가. 탑의 개수에 따른 분류[10]

연구를 본격적으로 시작하기 전, 사찰을 분류하고자 하였다. 이때 가장 기본적인 사찰의 분류 기준이 탑의 개수이므로, 먼저 탑의 개수를 기준으로 사찰을 분류하였다.

나. 사찰의 입지 조건(산지와 평지)에 따른 분류[11]

본 연구에서는 가람배치도 상에 기준 단위를 갖는 원이나 정삼각형 등을 작도하여 그 규칙을 찾아내고자 하므로 가람배치도가 직사각형으로 이루어져 있어야 한다. 해당 조건을 만족하기 위해서는 평지에 위치하여야 하므로 평지가람형의 사찰이 필요하다. 이때, 주변의 환경이 산지이어도 사찰이 위치한 부분이 모두 평지인 경우 평지 사찰로 구분한다.

다. 연구 대상 사찰의 선정

몇 차례의 사찰 분류 이후 선정된 연구 대상 사찰의 조건은 평지에 건축된 사찰, 건설 당시 국가적 차원에서 계획하고 건설했으며 현대에는 역사적으로 의의가 있는 사찰, 남한에 위치한 사찰이다. 사찰의 가람배치도 분석을 위해서는 직사각형으로 구성된 가람배치도가 필요하며, 이는 평지에 세워진 사찰에서만 가능한 모습이다. 북한에 속해있는 사찰의 경우 그 가람배치도나 실측 자료 등의 연구 자료를 사용하기 힘들 것을 고려해 제외하였다. 또한 삼국시대 중 고구려의 사찰은 현재 대부분 북한에 속해 있어 고구려의 사찰은 제외하여 <Table 1>과 같이 연구 대상 사찰을 분류하였다.

<Table 1> Categorizing of subjects of study by age

시대	사찰
삼국시대(백제)	정림사지(부여), 능산리사지(부여), 미륵사(익산)
삼국시대(신라)	황룡사, 분황사, 사천왕사, 망덕사(경주)
통일신라시대	감은사, 불국사(경주)

선정한 사찰에 대해 자세히 살펴보면 다음과 같다.

1) 부여 정림사지 (국보 제 9호 정림사지 오층석탑)

부여 정림사지 오층석탑(국보 제9호)은 우리나라의 대표적인 석조문화재로서 충남 부여군 부여읍 동남리의 정림사지 내에 위치한다. 이 석탑은 익산 미륵사지 석탑(국보 제11호)과 함께 백제시대에 세워진 귀중한 탑으로 평가되고 있을 뿐만 아니라, 상륜부를 제외하고는 원형을 그대로 유지했다는 점에서 매우 중요한 역사적 및 예술적 가치를 지니고 있다[12]. 정림사지의 대지는 북동에서 남서로 경사진 자연지형을 이용하여 높은 북동쪽은 깎고, 낮은 서남쪽은 성토하여 조성하였던 것으로 확인되었다. 또한 정림사지 사역의 남편과 서편은 원래의 지형을 그대로 이용하였는데, 사역보다 상대적으로 매우 낮아 사찰의 위용이 한껏 과시되었을 것이다.

정림사지의 고고학적 조사 결과 백제시대의 중문, 금당지, 강당지 및 그 북·동·서편의 승방지, 회랑지 등이 확인되었다. 그 배치 평면과 같은데, 이러한 회랑에 접속된 북·동·서 승방지의 배치는 고대 동아시아에서는 독특한 모습으로 백제지역에서만 나타난다. 사찰에서 가장 중심이 되는 공간은 예불대상이 되는 불상이 안치되는 금당과 부처의 사리가 봉안되는 탑이다⁴⁾.

4) 정림사지 박물관 홈페이지; 정림사지의 의의 <http://www.jeongnimsaji.or.kr/Pages16>

2) 부여 능산리사지

부여 능산리사지(陵山里寺址, 사적 제434호)는 “昌王十三年…”이라고 쓰인 석조사리감 명문에 의해 567년경 건립된 것으로 밝혀진 백제 위덕왕대 사찰유적으로, 국립부여박물관에 의해 8차례(1992~2002), 한국전통문화 대학교에 의해 1차례(2005~2006) 발굴조사가 실시되었다. 이러한 조사를 통해 탑·중문·금당·강당과 이를 둘러싼 회랑·부속건물지 등 중심 사역의 가람배치가 밝혀지게 되었으며, 강당 북쪽 일대에 대단위 건물지군이 노출되어 사역범위가 강당북편까지 확장되는 것으로 확인되었다. 또한, 1993년 공방지 I에서 부여 능산리 출토 백제금동대향로(국보 제287호), 1995년 목탑지 심조석 상면에서 백제 창왕명석조 사리감(국보 제288호)이 출토 되어 백제 고고학에서 커다란 성과도 거두었다[13]. 이와 더불어 백제의 사찰을 실물크기로 온전하게 복원한 것은 능산리사지가 최초이다. 상상 속에만 존재하던 백제 사찰의 위용과 아름다움을 그대로 느껴볼 수 있다는 점에서 그 의미가 매우 크다. 복원본이기에 잘못된 부분이나 부자연스러운 부분이 있을 수 있으므로 이에 주의하며 백제시대의 사찰 건축의 특징을 파악해보아야 할 것이다.

3) 익산 미륵사지 (국보 제 11호 익산 미륵사지 석탑)

미륵사지는 우리나라에서는 유일하게 삼탑삼금당이 배치된 사찰이라는 점에서 의의가 있다. 아울러 백제무왕이 세운 곳으로서 최근 발굴된 사리기를 통해 창건연대가 정확히 밝혀져, 백제사와 불교미술 연구에 있어 중요한 자료이다. 또한, 일제는 석조 문화재를 복원한다는 명목 아래 시멘트를 복원의 주된 소재로 이용하였다. 1915년 세키노는 미륵사탑의 붕괴 위험을 지적하면서 미륵사탑의 동쪽 면을 제외한 나머지 부분을 시멘트로 무자비하게 복원하여 현재의 모습으로 남게 되었다[14]. 이에 탑이 완전한 모습으로 보존되지 못하였기 때문에 위의 두 사찰을 분석하여 공통된 부분을 미륵사지에 적용시켜 미륵사지 석탑의 높이를 추정하는 것을 목표로 연구를 진행할 것이다.

4) 경주 황룡사지

황룡사(皇龍寺)는 9층 목탑과 3개 금당, 강당 등으로 이루어진 신라시대 최대 사찰이었다. 황룡사는 신라시대 고건축을 대표할 정도로 그 역사적 가치를 담고 있으며, 그 가치가 오늘날까지 널리 알려져 있다. 황룡사는 고려시대 몽고 침입전쟁 화재로 소실되어 매장된 상태로써 1976년 체계적인 발굴이 진행되어 초석과 불상좌대 등 석조유구를 비롯해 수많은 유물이 발견되어 세간의 이목이 집중되었으며, 관심이 고조되었다. 현재 황룡사지는 주요 석재 유구를 배치하고, 잔디를 식재하여 광활한 유적을 정비 유지관리하고 있다. 국립문화재연구소에서는 2005년 9월부터 황룡사 복원 기본계획 수립과 함께 복원정비 종합 계획 수립을 위한 기초연구를 수행해 오고 있다[15].

5) 경주 분황사 (국보 제 30호 경주 분황사 모전석탑)

현존하는 석탑들 중 가장 오래된 것으로 지금은 3층까지만 남아 있으나 이 탑의 건축 당시 층수는 현재 남아 있는 자료로 복원하는 방법 밖에는 없다. 1989년 문화재관리국이 조사한 결과에 의하면 현재 남아 있는 2층과 3층의 모습이 원래 형태를 반영하는 것으로 단정할 경우 비례 면에서는 7층 설, 경내에 남아 있는 모전석의 양으로 보아서는 9층 설을 제기하고 있다. 그러므로 어떠한 경우에도 지금의 형상과는 다르다고 할 수 있다. 문화재관리국에서 제시한 도면에 의하면 7층일 경우 높이 41.6m, 9층일 경우에는 48.5m에 이르는 매우 큰 탑이었다. 따라서 본 연구에서 찾은 규칙성으로 분황사 모전석탑의 제작 당시 높이를 추정하고자 한다.

6) 경주 사천왕사

통일 전의 신라 사찰들은 모두 금당 앞에 1기의 탑을 세우는 일탑식가람배치를 따랐으나, 통일 이후에는 금당을 중심으로 동쪽과 서쪽에 각각 탑을 세우는 쌍탑가람배치로 변모되었다. 사천왕사는 통일신라 초기에 창건

된 사찰로 쌍탑가람배치가 처음 등장하였으며, 특히 2기의 목탑이 배치되어 682년에 창건된 감은사와 함께 당시 건축·미술·불교문화사 등을 연구하는 데 있어서 기준이 된다[16]. 현재 그 터만 남아있으며, 터를 바탕으로 위의 사찰들에서 찾은 규칙들을 적용시켜 탑의 높이를 추정하고 탑의 높이로 가람배치를 복원한다.

7) 경주 망덕사

경덕왕 당시 이 절은 황룡사(皇龍寺)·사천왕사·황복사(皇福寺) 등과 함께 경주의 중요한 사찰 가운데 하나였다. 망덕사의 전체 가람구조는 가장 남쪽 단애면에 사찰 출입시설로 추정되는 계단이 있고, 그 북쪽에 중문이 연결되었던 것으로 추정할 수 있다. 다시 그 북쪽으로 동서 목탑(3×3칸)이 각각 위치하고, 금당(5×3칸)과 강당(7×3칸 추정)이 동서 중심축선상에 남북으로 각각 차례대로 배치되었던 것으로 볼 수 있다. 동서 목탑 기반 규모는 한 변 최대길이가 약 830cm이고, 높이는 지대석에서 초석까지 100~120cm 정도이다. 현존하는 사찰들에서 찾은 규칙들을 적용시켜 탑의 높이를 추정하고 탑의 높이로 가람배치를 복원하고자 한다[17].

8) 경주 감은사지 (국보 제 112호 경주 감은사지 동·서 삼층석탑)

동해의 용이 되어 나라를 지키겠다고 한 문무왕은 생전에 직접 대왕암의 위치를 잡고, 대왕암이 바라다 보이는 용당산을 뒤로 하고 용담이 내려다보이는 명당에 절을 세워 불력으로 나라를 지키고자 했다. 삼국을 통일하고 당나라 세력까지 몰아낸 문무왕이었지만 당시 시시때때로 쳐들어와 성가시게 구는 왜구는 눈엣가시 같은 존재가 아닐 수 없었다. 이에 문무왕은 부처의 힘을 빌어 왜구를 막겠다는 생각으로 동해 바닷가에 절을 짓게 된 것이다. 그러나 절의 완성을 보지 못하고 왕위에 오른 지 21년 만에 세상을 떠나니, 신문왕이 그 뜻을 이어 이듬해(682년)에 절을 완공하여 감은사라 이름하였다. 이는 불심을 통한 호국이라는 부왕의 뜻을 이어받는 한편 부왕의 명복을 비는 효심의 발로였던 것이다. 이런 이야기를 더욱 신빙성 있게 해주는 것은 동해의 용이 된 문무왕이 드나들 수 있도록 만들어놓았다는 금당 밑의 공간이다⁵⁾. 제일 윗부분인 찰주의 높이까지를 합하면 우리나라에 현존하는 석탑 중에서 가장 큰 것이다. 감은사 탑과 감은사의 가람배치도 사이의 관계가 본 연구의 가장 기본적인 부분일 것이다. 따라서 감은사를 신라 사찰의 기준으로 삼아 그 규칙성을 찾고자 한다.

9) 경주 불국사 (국보 제 20호 다보탑, 국보 제 21호 석가탑)

대한불교 조계종 제11교구 본사 불국사는 한국불교를 대표하는 사찰이다. 또한 유네스코가 지정한 세계문화유산이다. 불국사 내 주요 문화재로는 다보탑(국보 제20호), 석가탑(국보 제21호), 청운교와 백운교(국보 제23호), 연화교와 칠보교(국보 제22호), 금동아미타여래좌상(국보 제27호), 비로자나불(국보 제26호) 등이 있다⁶⁾. 주 영역인 대웅전 일곽은 앞마당에 석가탑과 다보탑을 가진 쌍탑가람제이다. 7세기 중반 사천왕사를 창건하면서 시작된 쌍탑가람배치는 불국사에서 완성된다. 불국사 이전의 쌍탑가람제를 갖춘 사찰들은 똑같은 형태의 쌍동이 탑을 마당 좌우에 세웠지만, 불국사는 완벽하게 다른 두 개의 탑을 세워 쌍탑가람제의 새로운 실험에 성공하였다. 석가탑은 전형적이고 추상적인 탑, 목조건축을 묘사한 다보탑은 매우 개성적이고 사실적인 탑이다[18]. 따라서 불국사를 신라 사찰의 기준으로 삼아 그 규칙성을 찾고자 한다.

이상으로 살펴본 연구대상 사찰을 정리하면 <Table 2>, <Table 3>, <Table 4>와 같다.

5) 한국문화유산답사회(1997) 경주 답사여행의 길잡이 2

6) 문화재청(2002) 한국의 세계유산

〈Table 2〉 Result of researching sites, stupas, arrangements of subjects of study (1)

사찰	정림사	능산리사지	미륵사
터	○	○	○
탑	○	△	△
사찰 건축물	△	△	×
가람배치	일탑일금당	일탑일금당	삼탑삼금당
비고	백제 문화단지에 실제 크기와 같은 규모로 사찰 전체가 복원되어있음.		

〈Table 3〉 Result of researching sites, stupas, arrangements of subjects of study (2)

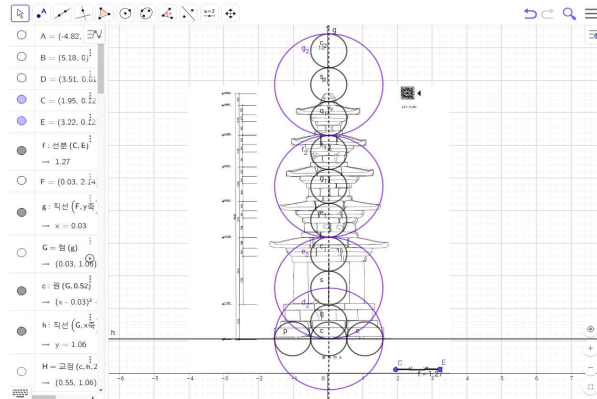
사찰	황룡사	분황사	사천왕사
터	○	○	○
탑	×	△	×
사찰 건축물	×	○	×
가람배치	일탑일금당	일탑일금당	이탑일금당
비고	높이 추정에 관한 연구가 다수 있음.	탑이 3층까지만 복원되어 있어 완전하지 않음.	건물지는 남아있으나 건축물이 없음.

〈Table 4〉 Result of researching sites, stupas, arrangements of subjects of study (3)

사찰	망덕사	감은사	불국사
터	○	○	○
탑	×	○	○
사찰 건축물	×	○	○
가람배치	이탑일금당	이탑일금당	이탑일금당
비고	주춧돌이 남아있음. 십삼층목탑의 형태추정에 대한 연구가 있음.		

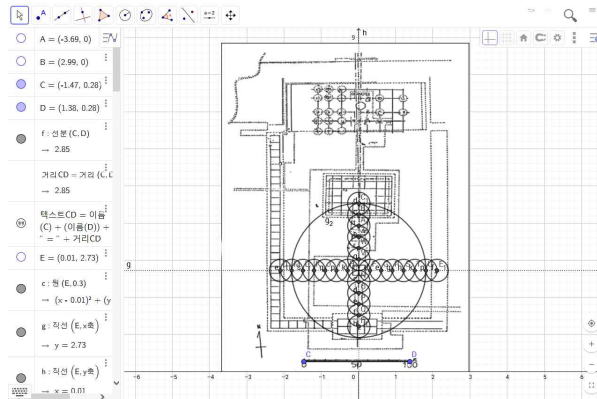
2. 백제 사찰의 분석과 익산 미륵사 탑 높이의 추정

백제 사찰 분석 연구 대상 사찰은 정림사지와 능산리사지이다. 두 사찰의 탑의 높이와 기단부 사이의 관계, 탑의 높이와 가람배치 사이의 관계를 각각 분석하여 유사점을 찾아 백제 전성기의 사찰의 전형적인 특징을 추출하여 익산 미륵사지의 소실된 탑의 높이를 추정한다. 이와 같이 백제 사찰을 분석하여 추출해낸 백제시대 전성기의 사찰건축의 특징을 이용해 익산 미륵사 탑의 높이를 추정한다.



[Fig. 9] Relation between height and stylobate width of Five storied stone pagoda of Jeongnimsa Temple site

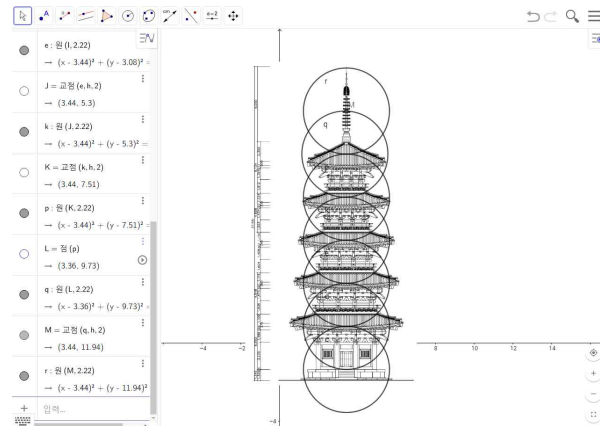
먼저, 정림사지 오층석탑과 가람배치의 비례분석을 위해 탑과 가람배치를 분석하였다. 위의 [Fig. 9]는 부여 정림사지 정비 복원 고증 기본 조사 자료의 탑의 단면도에 Geogebra를 이용해 비례 분석을 위한 원들을 작도한 것이다. 큰 원은 기단부 폭의 길이이고, 작은 원은 기단의 높이로 기단의 높이의 3배가 기단부 폭의 길이임을 나타낸다. [Fig. 9]와 같이 정림사지 오층석탑의 경우 기단부 폭의 3배가 탑의 높이가 됨을 알 수 있다[19]. 이는 기단부의 폭은 약 3.7m, 탑이 높이는 약 11.2 m인 실측자료와 매우 유사하다. 또한, 기단부의 폭이 지반부터 1층 옥개석까지의 높이임을 알 수 있다.



[Fig. 10] Relation between arrangements and stylobate width of Jeongnimsa Temple site

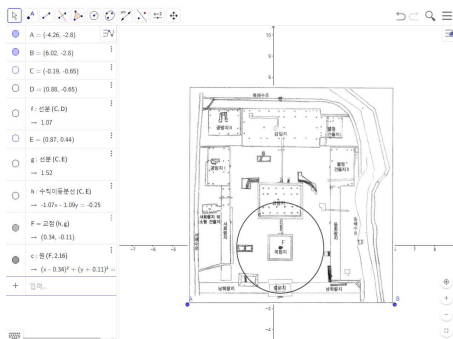
[Fig. 10]는 정림사지의 가람배치도 위에 탑의 기단부의 폭과 탑의 높이를 지름으로 하는 원을 비례분석을 위해 Geogebra로 작도한 것이다[20]. 큰 원은 지름이 작은 원의 3배가 되는 길이의 원이다. 탑의 중심을 기준

으로 가로와 세로로 기단부의 폭을 기준 원으로 하여 작도하고, 또한 탑의 중심을 기준으로 탑의 높이가 지름인 큰 원을 작도 한다. 또한, 작은 원은 각 원이 서로의 중심을 지나도록 작도한다. [Fig. 10]에서 보면, 동서 회랑의 바깥쪽 테두리까지의 거리가 탑의 중심에서부터 기준 원인 탑의 기단부 폭의 약 4배임을 알 수 있다. 또한, 탑의 중심에서부터 금당까지의 거리와 중문까지의 거리가 같음을 알 수 있고 이는 기단부의 폭의 약 2.5배이다. 그리고 탑의 중심에서 탑의 높이를 지름으로 하는 원, 즉 탑을 탑의 중심을 기준으로 좌우로 눕혔을 때, 좌, 우 회랑에 닿지 않는 것을 확인할 수 있다.

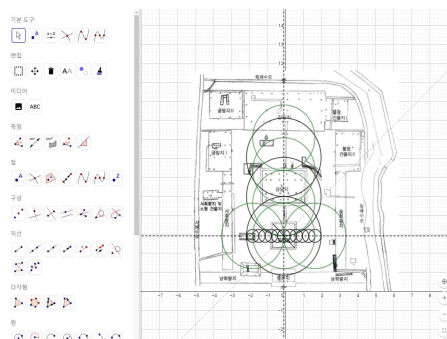


[Fig. 11] Result of drawing circles on Neungsanri temple's restored stupa

다음으로 능산리사지 오층석탑과 가람배치의 비례분석을 위해 탑과 가람배치를 분석하였다. [Fig. 11]는 복원된 능산리사지의 탑 단면도에 기단부의 폭을 지름으로 하는 원을 작도한 결과이다. 작도에 의해 능산리사지 5층 목탑의 높이는 기단부 폭의 3.5배임을 알 수 있다. 실측자료에 따르면 기단부 폭의 너비는 10.3m이고 탑의 높이는 약 37.5m이므로, 이는 작도에 의해 기단부 폭의 3.5배인 36.05m와 아주 비슷하고 실제로 기단부 폭의 3.5배는 기단의 중심에서부터 원을 작도하면 최종 원은 보주와 맞닿는 것을 확인할 수 있다. 탑의 중심에서 복원된 능산리사지 탑의 높이를 반지름으로 하는 원을 능산리사지 가람배치도에 작도하면 [Fig. 12]와 같다. 목탑지의 중심부에서 작도한 원은 동서회랑과 접하지 않으며 금당의 중심을 지나게 된다.



[Fig. 12] Result of drawing circles on Neungsanri temple arrangement plan



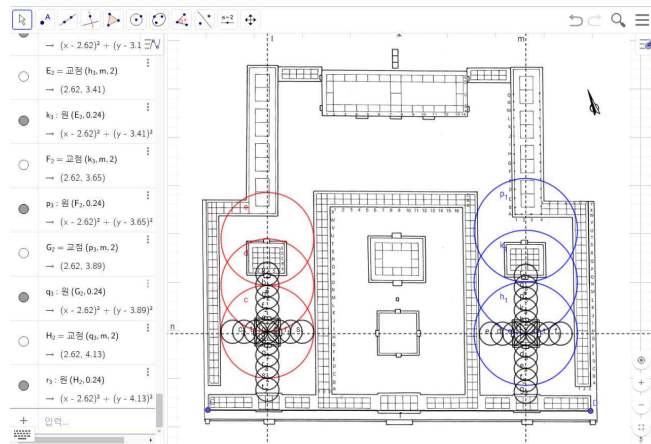
[Fig. 13] Result of drawing circles on Neungsanri temple arrangement plan

[Fig. 13]은 능산리사지 가람배치도 위에 목탑 기단부의 폭과 탑의 높이를 지름으로 하는 원을 작도한 모습이다[20]. 작은 원의 지름은 기단부의 폭이고 큰 원의 반지름은 탑의 높이로 기단부 폭의 3.5배가 되는 원이다.

실측 자료에 따르면 탑의 기단부 폭은 10.3m가 된다. 가운데 원은 탑을 중심으로 하며 그 원의 상하좌우로 작도된 원은 모두 이웃한 원과 외접하고 원의 중심을 이은 선분은 가람배치도의 가로와 세로에 평행하다.

작도 결과를 보았을 때 탑의 중심에서 중문지까지의 거리는 기단부 폭의 3배이다. 그리고 탑의 중심에서부터 동서 회랑까지의 거리는 기단부 폭의 약 4배이며 탑의 중심에서부터 금당지까지의 거리는 기단부 폭의 약 2.5배이다.

이상에서 백제 사찰 분석 연구 대상 사찰인 정림사지와 능산리사지 각각의 작도 결과에 따른 비례분석의 공통점을 찾아보면 다음과 같다. 첫째, 탑의 높이는 기단부 폭의 3~3.5배이고 둘째, 탑의 높이를 반지름으로 하는 원을 탑의 중심에서 작도하면 회랑에 닿지 않고 셋째, 탑의 중심으로부터 기단부 폭의 4배 되는 거리에 동서 회랑이 존재하며 넷째, 탑의 중심으로부터 중문지까지의 거리가 기단부 폭의 2.5~3배이고 다섯째, 탑의 중심에서부터 금당지까지의 거리가 기단부 폭의 약 2.5배이다. 여기서 탑의 높이나 중문지까지의 거리에서 0.5배 정도 차이가 나는 것은 능산리사지의 탑은 원래 탑이 아니라 현재 복원된 탑을 사용되었기에 그 규칙이 정확하게는 성립하지 않을 것이라 생각된다. 따라서 추출한 백제의 사찰의 공통점들을 바탕으로 미륵사지 석탑의 높이를 추정해 보면 다음과 같다. [Fig. 14]는 미륵사지석탑의 높이를 반지름으로 하는 원을 작도한 결과이다.

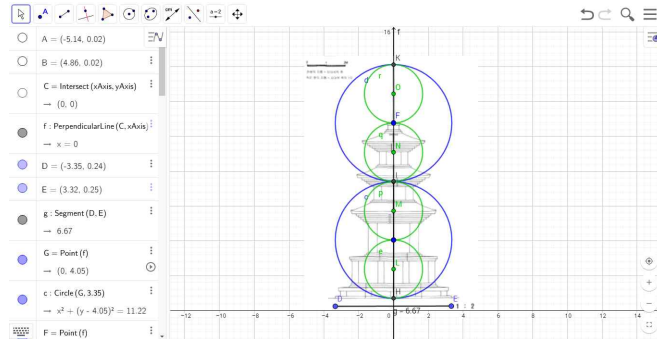


[Fig. 14] Result of drawing circles on Mireuksa Temple Site arrangement plan

왼쪽의 큰 원은 7층인 탑의 높이를 반지름으로 하는 원이고 작은 원은 기단부의 폭을 반지름으로 작도한 것이다. 그리고 오른쪽의 큰 원은 9층인 탑의 높이를 반지름으로 하는 원이고 작은 원은 기단부의 폭을 반지름으로 작도한 것이다. 작도한 결과 탑의 높이가 7층인 경우와 9층인 경우 모두 탑의 중심으로부터 중문지까지의 거리와 금당지까지의 거리가 기단부 폭의 2.5배로 일치하므로 이 사실로부터 탑의 높이가 7층인지, 9층인지 예측하기가 어렵다. 석탑의 높이가 기단부 폭의 3~3.5배라는 또 다른 공통점으로 미륵사지 석탑의 높이를 추정해 보면, 기단부 폭의 실측 길이는 10.7m이므로 탑의 높이는 32.1~37.45m로 추정된다. 미륵사의 배치에 대한 논문에 따르면 미륵사지 석탑이 7층이 될 경우 그 높이는 57.61척, 즉 21.02m이고, 9층이 될 경우 그 높이는 66.01척, 즉 23.49m이므로 추정한 탑의 높이인 32.1~37.45m는 층수에 비해 매우 높기 때문에 미륵사지석탑은 7층보다는 9층이라고 추정할 수 있고 높이의 차이가 많이 나는 이유는 5층 석탑의 공통점을 9층 석탑에 적용함으로 인한 차이라고 할 수 있다[21].

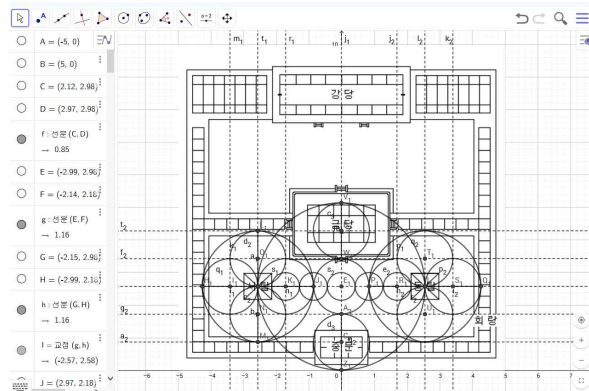
3. 통일신라시대 사찰의 분석과 황룡사 구층목탑 높이, 분황사 모전석탑 높이의 추정

통일신라시대 사찰 분석 연구 대상 사찰은 감은사지와 불국사이다. 두 사찰의 탑의 높이와 기단부 사이의 관계, 탑의 높이 또는 기단부의 폭과 가람배치 사이의 관계를 각각 분석하여 공통점을 찾아 통일신라시대 전성기의 사찰의 전형적인 특징을 추출한다. 신라시대의 경우 전성기의 사찰 건축 형식이 통일신라시대 전성기의 사찰 건축과 유사하므로 정의한 통일신라시대 전성기 사찰건축의 특징을 이용해 황룡사 구층목탑의 높이와 분황사 모전석탑의 높이를 추정한다.



[Fig. 15] Drawing showing that Gameunsa Temple stupa's height is twice of stylobate width

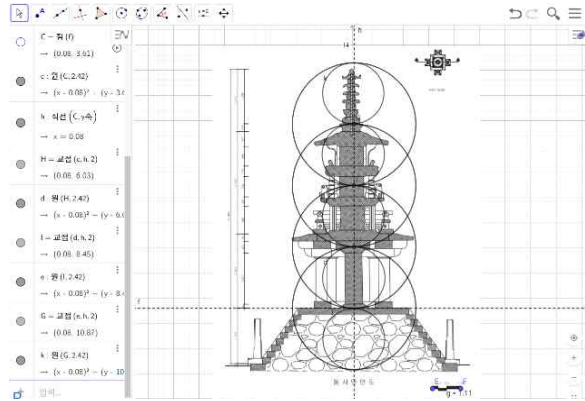
먼저, 감은사지 삼층석탑과 가람배치의 비례분석을 위해 탑과 가람배치를 분석하였다. [Fig. 15]은 큰 원의 경우 기단부의 폭을 지름으로 하며 작은 원의 경우 노반 위로 노출되는 찰주 길이를 지름으로 원을 작도하였다. 작도 결과 감은사 삼층석탑의 높이는 기단부 폭의 2배이다[22]. 실측 자료에 따르면 탑의 높이는 13m, 탑의 기단부 폭은 6.5m이므로 기준 원의 지름은 탑의 기단부 폭인 6.5m로 한다. 그리고 [Fig. 16]은 감은사지 가람배치도 위에 석탑 기단부의 폭을 지름으로 하는 기준 원(가장 작은 원)을 작도한 것이다[23]. 두 번째로 큰 원의 경우 그 지름이 탑의 높이가 되고, 탑의 높이를 지름으로 석탑의 중심에서 원을 작도하면 회랑과 익랑에 접하게 되고 이를 통해 탑을 넓혀도 회랑을 침범하지 않게 됨을 알 수 있다. 기준 원의 중심을 석탑의 중심으로 하고 그 원의 상하좌우로 작도된 원은 모두 이웃한 원과 외접하고 서로 수직이며 각각 가람배치도의 가로와 세로에 평행하다.



[Fig. 16] Result of drawing circles on Gameunsa Temple Site arrangement plan

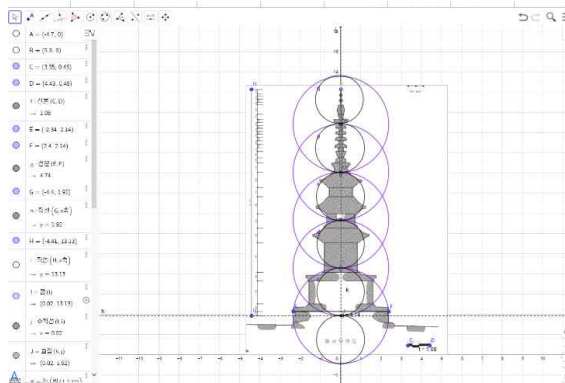
또한, 두 석탑의 동서 간격은 석탑 높이의 3배와 일치하고, 전정(앞뜰)의 남북길이는 석탑 기단부 폭의 4배와

일치한다. 그리고 가장 큰 원의 경우 사찰의 전정이 좌우대칭을 이룸을 보이고 있다. 이는 두 석탑의 중심을 연결하며, 중문의 어간 외곽선에 외접하는 것을 확인할 수 있다.



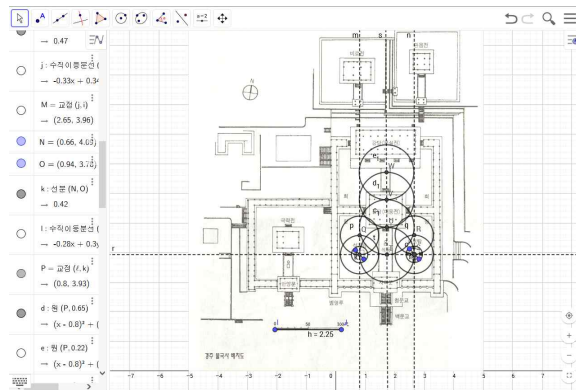
[Fig. 17] Result of drawing circles which uses stylobate width as radius on Dabotap

다음으로 먼저, 불국사 석탑과 가람배치의 비례분석을 위해 탑과 가람배치를 분석하였다. 불국사의 탑에는 다보탑과 석가탑이 있으며 이 두 석탑 모두 기단부 폭과의 비례를 이루고 있다. [Fig. 17]과 같이 다보탑의 경우 큰 원의 지름을 기단부 폭, 작은 원의 지름을 기단부의 높이로 하여 작도하면 기단부 폭은 기단부 높이의 2배가 되고, 탑의 높이는 기단부 폭의 2.5배가 된다는 것을 알 수 있다[24].



[Fig. 18] Result of drawing circles which uses stylobate width as radius on Seokgatap

또한, [Fig. 18]과 같이 석가탑의 경우 큰 원의 지름이 기단부의 폭이고, 작은 원의 지름이 기단부의 높이로 작도한 것이다[24]. 기단부 폭은 기단부 높이의 2배가 되고, 탑의 높이는 기단부 폭의 2.5배가 된다는 것을 알 수 있다. 그래서 석가탑과 다보탑의 기단부 폭이 같으므로 두 석탑의 높이는 같다고 할 수 있다.



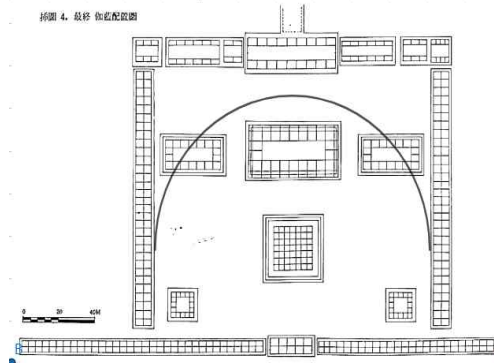
[Fig. 19] Result of drawing circles on Bulguksa Temple arrangement plan

[Fig. 19]의 불국사 가람배치도 위에 두 석탑의 높이를 지름으로 하는 기준 원을 작도한 모습이다[25]. 가장 작은 원의 경우 기단부의 너비를 나타낸 것이며, 중간 크기의 원은 탑의 높이를 반지름으로 하는 원이다. 가장 큰 원의 경우 두 탑의 중심에서 떨어진 거리를 지름으로 하는 원으로 가람배치가 좌우 대칭성을 이루고 있음을 보여준다. 탑의 높이를 지름으로 하는 원인 중간 크기의 원을 탑의 중심에서 상하좌우로, 또는 탑의 높이를 반지름으로 하는 원을 탑의 중심에서 작도하게 되면 회랑이나 다른 사찰 건축물에 닿지 않는다.

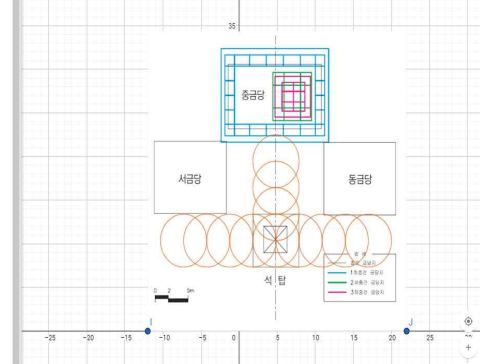
이상에서 통일신라 사찰 분석 연구 대상 사찰인 감은사와 불국사 각각의 작도 결과에 따른 비례분석의 공통 점을 찾아보면 다음과 같다. 첫째, 탑의 높이는 기단부 폭의 2~2.5배이고 둘째, 석탑의 높이를 반지름으로 하는 원을 작도하면 여간(익랑)의 외곽선에 외접하고 셋째, 사찰의 가람배치가 좌우대칭을 이루고 있음을 알 수 있다. 따라서, 추출된 공통점을 바탕으로 황룡사 구층 목탑의 높이를 추정하고자 한다.

[Fig. 20]은 황룡사지 가람배치도로, 기준 원은 황룡사 구층목탑의 높이를 반지름으로 하는 원이다[26]. 가람 배치도 상에서는 통일신라시대 사찰의 특징인 사찰 전체 구조의 좌우대칭을 볼 수 있다. 석탑의 중심 또한 위의 두 통일신라시대 사찰에서 찾은 특징⁷⁾ 상에서 동서 회랑에 접하는 원을 작도한 모습이다. 석탑의 중심에서 익랑이나 회랑으로 탑을 직각으로 눕힐 경우, 탑의 높이는 회랑과 정확하게 맞닿게 되는 것을 확인할 수 있다. 따라서 감은사지 석탑에서 밝혀진 쌍탑식 가람의 평면과 탑과의 관련성이 단탑식 가람의 조형원리와의 유사하다고 할 수 있다. 여러 문헌자료에서 황룡사 구층목탑의 높이를 225척으로 제시하고 있다[27]. 따라서 황룡사 구층목탑의 높이 225척을 고려척으로 계산하게 되면 80.1m, 당척으로 계산하게 되면 66.8m이다. 황룡사 구층목탑의 기단이 34척이고, 기단부 폭의 2배~2.5배가 탑의 높이라면 탑의 높이는 약 80m로 현재 논문에서 추측되는 황룡사 구층목탑의 높이와 매우 유사하다는 결론을 얻을 수 있다. 따라서 위의 작도 결과를 통해 찾은 황룡사 구층목탑의 높이는 약 80m로 제시할 수 있다. 또한 이와 같은 방법으로 분황사 모전석탑의 실제 건축 당시의 높이를 추정한다. [Fig. 21]의 분황사 가람배치도상에 원을 작도한 것으로, 위의 두 통일신라시대 사찰의 결과를 참고하여 기단부의 폭을 지름으로 하는 원을 가람배치도 상에 작도하였다[28]. 이때, 분황사 가람배치도의 경우 동서회랑이 분명하게 나타나있는 가람배치가 없었으므로 회랑에 닿는 것이 아닌 금당을 침범하지 않는 것을 기준으로 하였다. 먼저 사찰의 전체 배치가 좌우대칭임을 확인하였으며, 위의 분석에서 탑의 높이를 반지름으로 하는 원을 작도하였을 때, 상하좌우 부분에서는 침범하는 사찰 건축물이 없었음을 보아 탑의 높이는 작은 원의 지름, 즉 기단부의 폭의 약 2.5배 정도가 될 것이라 추정한다. 이때 실측에 따른 기단부의 폭이 6.94m이므로 높이는 약 17.35m일 것이다. 이때 분황사 모전석탑의 높이를 추정한 논문에서는 잔존 부재의 양으로 볼 때 분황사 모전석탑은 높이 17.016m라고 밝힌 바 있다[29].

7) 석탑의 높이를 반지름으로 하는 원을 작도하면 여간(익랑)의 외곽선에 외접하고 있음



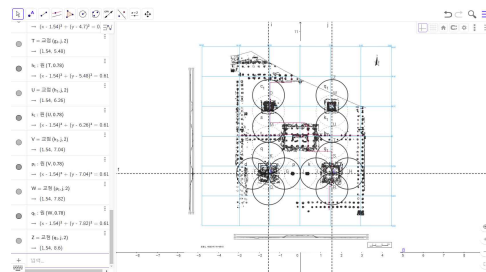
[Fig. 20] Result of drawing circles on Hwangnyongsa Temple Site arrangement plan



[Fig. 21] Result of drawing circles on Bunhwangsa Temple arrangement plan

4. 사천왕사, 망덕사 사찰의 복원

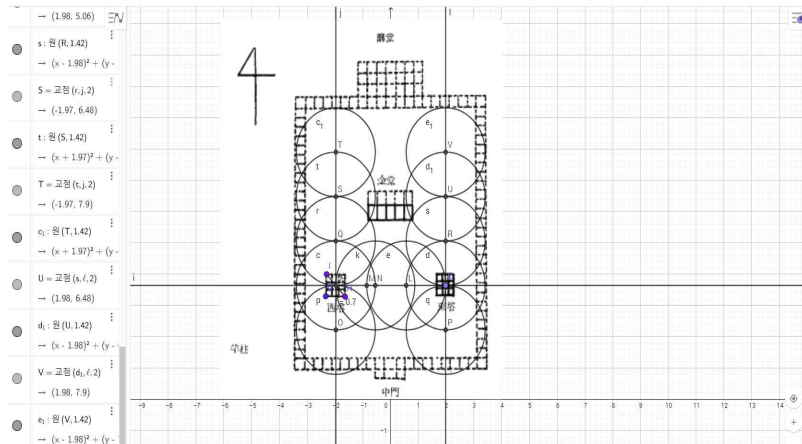
불국사와 분황사의 경우 탑의 높이를 지름으로 하는 원을 탑의 중심에서 상하좌우로, 또는 탑의 높이를 반지름으로 하는 원을 탑의 중심에서 작도하게 되면 회랑이나 다른 사찰 건축물에 외접한다. 이를 바탕으로 [Fig. 22]은 사천왕사의 가람배치도 위에 작도한 결과이다[30].



[Fig. 22] Result of drawing circles on Sachunwangsa Temple arrangement plan

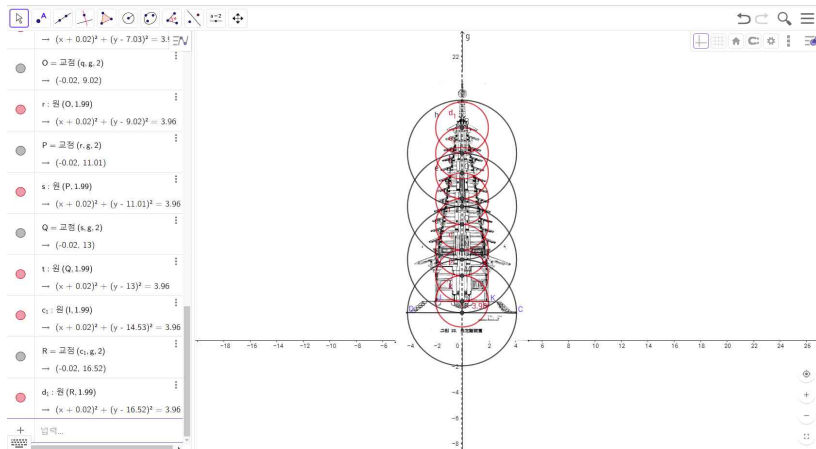
[Fig. 22]은 사천왕사 가람배치도 상에 두 탑의 중심 사이의 거리를 4등분한 값을 반지름으로 하는 원을 작도한다. 이때 작도한 원의 반지름은 기단부 폭의 약 1.15배가 된다. 따라서 두 탑지의 중앙 사이의 거리는 탑의 기단부 폭의 4.6배, 각 탑지의 중앙에서 회랑 바깥쪽까지는 탑의 기단부 폭의 2.3배인 것을 알 수 있다. 이는 탑지의 중앙에서부터 남쪽 회랑까지의 거리와 같다. 석탑의 높이를 반지름으로 하는 원을 작도하면 여간(익랑)의 외곽선에 외접하므로 작도를 통해 탑의 높이와 기단부 폭 사이의 비율은 약 1:2.3임을 알 수 있다. 이때 실측을 통한 기단부 폭은 12.9m이므로, 탑의 높이는 약 29.67m일 것이다.

다음은 망덕사의 가람배치도 위에 작도한 결과이다[31]. [Fig. 23]의 가람배치도 상에 탑의 중심에서부터 회랑까지의 거리를 반지름으로 하는 원을 작도한 모습이다. 이때 사찰 전체 구조의 세로 길이가 기준 원의 정수배(3배)임을 확인함으로써 망덕사의 탑의 높이가 될 수 있을 것이라고 추정하였다.



[Fig. 23] Result of drawing circles on Mangdeoksa Temple arrangement plan

또한, 망덕사 탑의 형태에 대한 논문 자료를 참고하였을 때, 지대석의 너비는 기단부 폭의 2배가 되므로 탑의 높이는 지대석 너비의 2배이기도 하다[31]. 따라서 실측 자료에 따른 망덕사의 기단부의 폭은 약 5.4m이므로 탑의 높이는 약 21.6m일 것으로 추정된다.

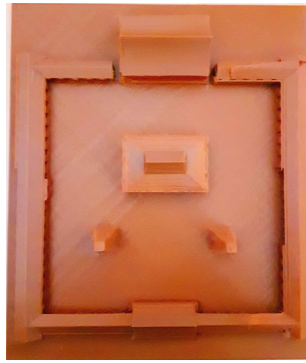


[Fig. 24] Result of drawing circles on stupa of Mangdeoksa Temple

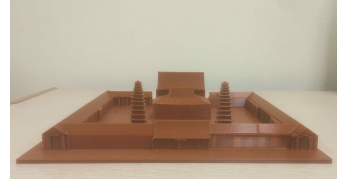
위와 같은 추정된 탑의 높이를 실제 탑의 높이와 가람 배치 사이의 관계에 적용시켜 가람배치의 복원 본을 설계하였고, 다음은 망덕사와 사천왕사의 가람 배치를 3D로 구현한 것이다.



[Fig. 25] Real appearance of Mangdeoksa site



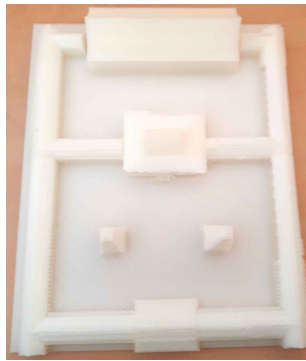
[Fig. 26] 3D Realization of Mangdeoksa arrangement-1



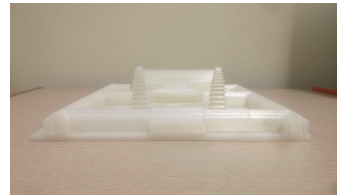
[Fig. 27] 3D Realization of Mangdeoksa arrangement-2



[Fig. 28] Real appearance of Sachunwangsa Temple site



[Fig. 29] 3D Realization of Sachunwangsa arrangement-1



[Fig. 30] 3D Realization of Sachunwangsa arrangement-2

[Fig. 25]이 망덕사, [Fig. 27]이 사천왕사의 가람 배치를 나타낸 것이다. 망덕사의 경우 가람 배치의 실측자료에 의해 동서 길이와 가람의 남북 길이의 비가 1:1.27임을 고려하여 건축물들을 구현하였고 추정된 탑을 탑의 높이에 맞게 3D로 구현하여 비율에 맞는 위치에 배치한 후 완성하였다. 사천왕사의 경우 가람 배치의 실측자료에 의해 동서 길이와 가람의 남북 길이의 비가 1:1.15임을 고려하여 건축물들을 구현하였고 이후 추정된 탑을 탑의 높이에 맞게 3D로 구현하여 익랑과 회랑에서부터 탑의 중심까지의 거리는 각각 가람의 동서 길이의 0.275, 0.19배임을 이용하여 탑을 배치한 후 완성하였다.

V. 결론 및 제언

1. 결론

탑과 가람의 비례 분석을 위해 사찰을 선정하고 선정한 사찰을 시대별로 분류하여 확실한 탑과 가람의 배치를 갖는 사찰을 따로 분류해 분석한 후 시대별 사찰에서 추출한 공통된 특징을 복원이 필요한 사찰인 미륵사, 황룡사, 분황사, 망덕사, 사천왕사에 적용시켜 다음과 같은 결과를 얻었다.

첫째, 연구 대상 사찰을 다음과 같이 선정하였다.

〈Table 5〉 Result of researching sites, stupas, arrangements of subjects of study (1)

사찰	정림사지	능산리사지	미륵사
터	○	○	○
탑	○	△	△
사찰 건축물	△	△	×
가람배치	일탑일금당	일탑일금당	삼탑삼금당
비고	백제 문화단지에 실제 크기와 같은 규모로 사찰 전체가 복원되어있음.		

〈Table 6〉 Result of researching sites, stupas, arrangements of subjects of study (2)

사찰	황룡사	분황사	사천왕사
터	○	○	○
탑	×	△	×
사찰 건축물	×	○	×
가람배치	일탑일금당	일탑일금당	이탑일금당
비고	높이 추정에 관한 연구가 다수 있음.	탑이 3층까지만 복원되어 있어 완전하지 않음.	건물지는 남아있으나 건축물이 없음.

〈Table 7〉 Result of researching sites, stupas, arrangements of subjects of study (3)

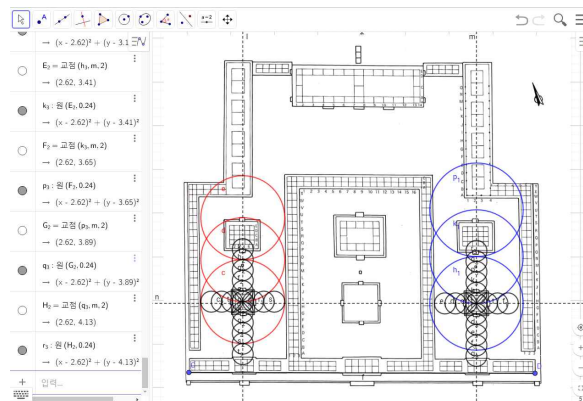
사찰	망덕사	감은사	불국사
터	○	○	○
탑	×	○	○
사찰 건축물	×	○	○
가람배치	이탑일금당	이탑일금당	이탑일금당
비고	주춧돌이 남아있음. 십삼층목탑의 형태추정에 대한 연구가 있음.		

둘째, 삼국시대 중 백제의 사찰 정림사지와 능산리사지에서의 탑의 조형 원리와 탑의 높이-가람배치도 사이의 관계를 분석해 익산 미륵사의 탑의 높이를 아래와 같이 추정하였다.

〈Table 8〉 Deduction of common points of Baekjae Period temple

	정림사지	능산리사지
백제시대	기단부의 폭 = a 탑의 중심~동서 회랑의 바깥쪽 테두리 = $4a$ 탑의 중심~금당 = $2.5a$ 탑의 중심~중문지 = $3a$ 탑을 탑의 중심을 기준으로 좌우로 넓혔을 때 회랑에 닿지 않음.	기단부의 폭 = b 목탑지의 폭 = $2b$ 탑의 중심~동서 회랑 = $4b$ 탑의 중심~금당지 = $2.5b$ 탑의 중심~중문지 = $3b$ 목탑지~중문지 = 목탑지의 폭= $2b$
	공통점	
	기단부의 폭 = c 일 때, 탑의 중심~동서 회랑 = $3c \sim 4c$ 탑의 중심~중문지 = $3c$ 탑의 중심~금당지 = $2.5c$ 탑을 탑의 중심을 기준으로 좌우로 넓혔을 때 회랑에 닿지 않음.	

탑의 높이는 탑 기단부 폭의 2~2.5배 정도로 추정할 수 있으며, 탑의 층수가 7층보다는 9층이라고 할 수 있음.



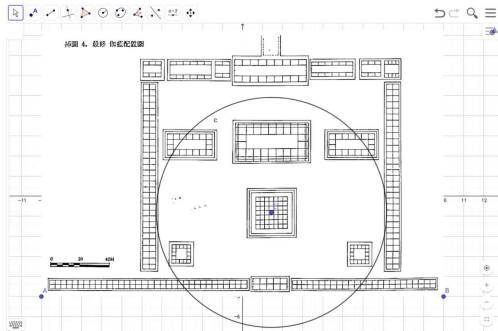
〔Fig. 31〕 Result of drawing circles on Mireuksa Temple Site arrangement plan

셋째, 통일신라시대 사찰 중 감은사와 불국사에서 탑의 조형 원리와 탑의 높이-가람배치도 사이의 관계를 분석해 황룡사 구층목탑과 분황사 모전석탑의 높이를 추정하였다.

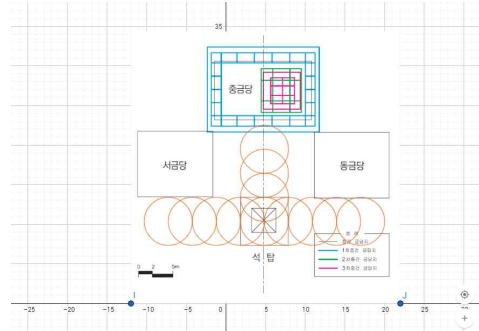
〈Table 9〉 Deduction of common points of Unified Silla Period temple

	감은사	불국사
통일신라시대	기단부의 폭 = a 두 석탑의 동서 간격 = $6a$ 전정 남북길이 = $4a$ 사찰의 전정이 좌우대칭을 이루 두 석탑의 중심을 연결하는 원이 중문의 여간 외곽선에 외접	기단부의 너비 = b 불국사 가람배치도 상의 대칭성 탑의 높이=반지름인 원을 탑의 중심에서 작도 시 회랑/다른 사찰 건축물에 닿지 않음.
	공통점 사찰은 좌우대칭을 이루고 있으며, 석탑의 높이를 반지름으로 하는 원을 작도하면 여간(의랑)의 외곽선에 외접하고 있음	

황룡사지 구층 목탑의 높이는 약 78m, 분황사 모전석탑의 높이는 약 14~17m로 추정함.



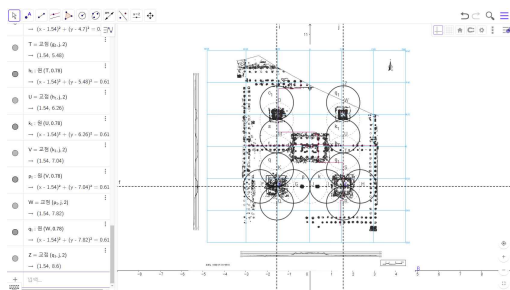
[Fig. 32] Result of drawing circles on Hwangnyongsa Temple Site arrangement plan



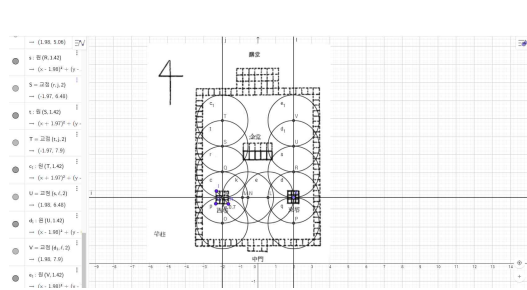
[Fig. 33] Result of drawing circles on Bunhwangsa Temple arrangement plan

넷째, 백제의 사찰과 통일신라시대의 사찰에서 찾은 탑의 조형 원리와 탑의 높이-가람배치도 사이의 관계를 바탕으로 사천왕사와 망덕사의 가람배치와 탑의 높이를 추정하였다.

사천왕사의 탑의 높이는 약 29.67m, 망덕사 심삼층 목탑의 높이는 약 21.6m로 추정함.



[Fig. 34] Result of drawing circles on Sachunwangsa Temple arrangement plan



[Fig. 35] Result of drawing circles on Mangdeoksa Temple arrangement plan

2. 제언

- 가. 한국 전통 사찰에 내재되어 있는 수학·과학적 사실들에서 추출한 원리들을 고대 모든 건축에 적용하여 일반화할 수 있을 것이다.
- 나. 한국 고대 건축뿐만 아니라 세계 여러 나라의 건축물에 보이는 수학·과학적 사실들과 비교함으로써 공통점을 찾을 수 있을 것이다.
- 다. 수학과 건축을 기반으로 하는 STEAM 교육 수업 자료를 학교 현장에 적용함으로써 수학에 대한 흥미와 관심을 불러일으킬 수 있을 것이다.

VI. 참고문헌

- [1] 이진기(1999). 원형 석굴암 상부구조의 장마철 결로(結露) 및 열전달 현상의 실험적 연구, 석사학위논문, 한국과학기술원
- [2] 강우방(2003). 한국 미의 재발견 - 탐, 솔출판사
- [3] 박경식(2013). 분황사 모전석탑의 양식 기원에 대한 고찰, 新羅文化 第41輯(163-194)
- [4] 米田代治(2007). 増補版 朝鮮 上代 建築의 研究.
- [5] 김종명, 허혜자(2011). 고대 인도와 술바수트라스 기하학, 한국수학사학회지, 제24권 제1호, 15-29.
- [6] 박경식(2016). 한국석탑의 양식 기원, 학연문화사.
- [7] 국립경주문화재연구소(1982). 황룡사 유적 발굴조사 보고서
- [8] 국립문화재연구소(1989). 미륵사 고고, 고고학 연구
- [9] 박만식(1975). 한국 고대 가람의 배치 및 평면계획에 관한 연구, 박사학위논문, 충남대학교.
- [10] 권순모(1998). 寺刹 建築 配置形式의 分類에 關한 研究, 석사학위논문, 성균관대학교
- [11] 이성도(2002). 한국 전통 사찰 건축 감상 방법 연구, 학술저널, 한국미술교육학회Vol 13 Num 1, 297-354
- [12] 이찬희(2007). 부여 정림사지 오층석탑 구성암석의 원산지 추정
- [13] 국립부여문화재연구소(2008). 부여 능산리사지 10차 발굴조사보고서
- [14] 강우방(2003). 한국 미의 재발견 - 탐, 솔출판사
- [15] 국립문화재연구소 (2016). 2016 황룡사 최근 연구성과와 과제 건축
- [16] 국립경주문화재연구소(2011). 경주 사천왕사지 瓦
- [17] 국립경주문화재연구소(2015). 경주 망덕사지 발굴조사보고서(69·70년 발굴조사)
- [18] 김봉렬 (2004). 한국 미의 재발견 - 불교건축, 솔출판사
- [19] 국립문화재연구소(2009). 부여 정림사지 정비 복원 고증기본조사(자료편)
- [20] 이병호(2008). 扶餘 陵山里寺址 伽藍中心部の 變遷 過程, 한국사연구(143)
- [21] 장경호(1987). 미륵사 배치와 탑의 조형적 고찰, 대한건축학회
- [22] 한정호(2007). 감은사지 삼층석탑 창건 과정과 의장계획에 대한 연구, 한국미술사학회, 2007.3.5.-30.
- [23] 국립경주문화재연구소(1977). 감은사 발굴조사보고서
- [24] 국립문화재연구소(2007) 경상북도의 석탑 I
- [25] 박만식(1975). 한국 고대 가람의 배치 및 평면계획에 관한 연구, 박사학위논문, 충남대학교.
- [26] 국립경주문화재연구소(1982). 황룡사 유적 발굴조사 보고서
- [27] 김정수(1982) 황룡사 구층목탑 내부형태추정에 관한 연구 - 단면도를 중심으로, 대한건축학회, 건축 26(1), 1982.2, 28-35쪽
- [28] 국립문화재연구소(2007) 경상북도의 석탑 II
- [29] 박경식(2013) 분황사 모전석탑의 양식 기원에 대한 고찰, 新羅文化 第41輯(163-194)
- [30] 국립경주문화재연구소(2011) 경주 사천왕사지 瓦
- [31] 김정수(1984) 망덕사 삼층목탑의 형태추정에 관한 연구 - 문화재와 현지답사 중 (建築, Vol.28 No.4)

I 연구진 I

김희선 (Heesun Kim, 창원과학고등학교, kheesun1015@naver.com), 주저자

윤예슬 (Yeseul Yoon, 창원과학고등학교, yoonyesle@naver.com)

황지윤 (Jiyun Hwang, 창원과학고등학교, wldbs2073@naver.com), 교신저자

지도교사 : 김문섭 (Moonsub Kim, 창원과학고등학교, subi3333@naver.com)

「청소년 과학창의연구」

(The Journal of Youths in Scientific Research) 학술지 투고 규정

1. 논문 작성

- ① 논문 작성은 한글 2014 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, 이 후부터 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, 왼쪽오른쪽 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, 김정희, 조석희, 역]. 서울: 이화여자대학교 출판부. (원본출간년도: 1983).
 - [16] Tannenbaum, A. J. (1983). *Gifted children: Psychological and educational perspectives*. New York: Macmillan.

편집위원회

편집위원장	최호성 (경남대학교 교육학과) (한국과학창의재단 지정 과학영재 창의연구(R&E) 지원센터장)
수학분과	방승진 (아주대학교 수학과)
물리분과	이정철 (서강대학교 기계공학부)
화학분과	고광윤 (아주대학교 화학과)
생물분과	김선정 (동국대학교 생명과학과)
지구과학분과	정현철 (한국과학기술원 과학영재교육연구원)
정보분과	이재호 (경인교육대학교 컴퓨터교육과)
융합 · 공학 분과	최경호 (대구경북과학기술원 기초학부)

청소년 과학창의연구

Vol. 3. No. 1

THE JOURNAL OF YOUTHS IN SCIENTIFIC RESEARCH

발행일	2018년 1월 31일
발행인	박태현(한국과학창의재단 이사장)
편집인	최호성(과학영재 창의연구(R&E) 지원센터장)
발행처	한국과학창의재단 서울특별시 강남구 선릉로 602 02-555-0701
디자인/인쇄	디자인바오 경상남도 창원시 마산합포구 동서북 12길 39 유한B/D 302호 055-221-0801

이 학술지의 내용 전부 또는 일부를 무단으로 복제할 수 없습니다.