

## 청소년 과학창의연구 The Journal of Youths in Scientific Research 특별호

조 편성을 통한 가위바위보게임의 효율성 연구(Effectiveness studies of rock, paper, scissors game organized by group)  
안지수(Ahn Jisoo)·김재민(Kim Jaemin)·장충재(Jang Chungjae)·조용중(Cho Youngjung)·한현우(Han Hyeonwoo) - 인천과학고등학교

3차 펄방정식의 해에 관한 연구(On the solutions of cubic Pell equations)  
채지석(Chae Jiseok)·류인영(Ryu Inyoung)·천승환(Cheon Seunghwan)·문현우(Moon Hyeonwoo)·최백규(Choi Baekgyu) - 전북과학고등학교

액체 금속을 이용한 변형률 센서의 개발(Development of strain sensors using liquid metals)  
고은섬(Ko Eunseom)·박채리(Park Chaeree)·차이주(Cha Iju)·최수연(Choi Sooyeon) - 한성과학고등학교

전자기장 내에서 유체의 가속 현상에 관한 메커니즘과 추진체 연구(Research of relations between velocity of electroconductive fluid and two fields in electromagnetic field)  
강제훈(Gang Jehun)·정상하(Jeong Sangha) - 광주과학고등학교

의자 끌림 현상의 단진동 운동과 그에 따른 소리 분석(Noise analysis of oscillating motion in chair dragging)  
김인환(Kim Inhwan)·김진혁(Kim Jinhyeok)·이영우(Lee Youngwoo) - 대전과학고등학교

폴리아닐린-은나노입자 복합물을 이용한 과산화수소의 전기화학적 검출(Electrochemical determination of hydrogen peroxide based on polyaniline-silver nanocomposites modified electrode)  
한준택(Han Joontack)·황윤비(Hwang Yoonbee)·박승민(Park Seungmin)·오서령(Oh Seoryoung) - 세종과학고등학교

HS-SPME GC/MS법을 이용한 개미(*Camponotus japonicus*)의 페로몬 내 포름산, 올레인산 검출 및 정량(Detection and quantitative analysis of formic acid, oleic acid inside the pheromone of *Camponotus japonicus* using HS-SPME GC/MS method)  
김재원(Kim Jaewon)·이택경(Lee Taekkyung)·이민수(Lee Minsoo)·박준우(Park Junwoo) - 경기북과학고등학교

마에서 추출한 뮤신의 유산균에 대한 효과(Effects of mucin extracted from hemp(*Dioscorea*) on lactic acid bacteria)  
허태양(Heo Taeyang)·김소윤(Kim Soyun)·권순형(Kwon Soonhyung)·김인철(Kim Incheol)·정한식(Jeong Hansik) - 인천과학고등학교

통합기상센서망을 이용한 대구지역 도시열섬 효과 연구(Study of urban heat island effect in Deagu using Compact Weather Station convergence network)  
공광조(Gong Gwangjo)·권혁규(Kwon Hyukkyu)·김강찬(Kim Kangchan)·김원종(Kim Wonjong)·서상교(Seo Sanggyo) - 대구일과학고등학교

대기 중 미세먼지 농도와 별의 밝기변화에 대한 정량적 연구(Quantitative study about atmospheric fine dust concentration & brightness of a star variety)  
박준범(Park Junbeom)·박효선(Park Hyoseon)·이지영(Lee Jiyeong)·한효근(Han Hyeokun) - 강원과학고등학교

라즈베리파이를 활용한 시각장애인용 웨어러블 인터페이스 개발(Developing a wearable interface for the visually impaired using Raspberry Pi- Marker recognition-based indoor navigation)  
황준호(Hwang Junho)·윤종효(Youn Jonghyo)·김대진(Kim Daejin)·이원석(Lee Wonseok)·조영인(Cho Youngin)·차형현(Cha Hyeongheon) - 인천과학고등학교

청각장애인의 음악 체감을 위한 앱 개발(Mobile application development for the music experience of the deaf)  
윤영석(Yoon Youngseok)·김민식(Kim Minsik)·이재혁(Lee Jaehyeok)·정용준(Jeong Yongjun)·장병희(Jang Byeonghee) - 인천진산과학고등학교

모션 인식과 근전도 신호를 이용한 힘 증폭 로봇 손 설계 및 제어(Design and control of force amplification robot hand using motion capture and EMG signal)  
조정민(Cho Jungmin)·장민수(Jang Minsu)·이종완(Lee Jongwan)·진태규(Jin Taegyul) - 한국과학기술원(KAIST) 부설 한국과학영재학교

지형과 기후를 고려한 인공구조물 설계(태풍 피해를 감소할 수 있는 비닐하우스 설계 방안 연구)(Research on artificial structure design considering the topography and climate: Minimizing typhoon damage to greenhouse)  
황재희(Hwang Jaehui)·이주윤(Lee Juyoon)·박신영(Park Shinyoung) - 경기과학고등학교



# 청소년 과학창의연구

The Journal of Youths in Scientific Research 특별호

## 발간사



김승환  
(한국과학창의재단 이사장)

자연과 자신에 대한 사람들의 끊임없는 호기심과 상상(想像)은 자연 뿐 아니라 사회적 현상을 보다 체계적으로 설명하고 예측할 수 있는 지식 체계를 생성했습니다. 과학은 우리가 가진 질문에 대한 답을 찾고 삼라만상을 지배하는 이치를 체계적으로 탐구하고 공유하게 해주는 ‘생각의 틀’ 이자 창의적 사고의 원천입니다.

2003년 3월, 부산과학영재학교(현재는 한국과학영재학교, KSA)가 개교되면서 과학영재의 지적·정서적 특성에 맞는 자율적이고 창의적인 탐구 능력배양을 위해 R&E(Research & Education) 프로그램이라는 사사교육(mentorship) 기반의 독창적인 영재교육 모형을 운영해왔습니다. 과학영재들은 R&E 프로그램을 통해서 연구 수행 능력을 길러 가는 한편, 자신의 연구 과정과 산출물을 공개적으로 발표하고 소통할 수 있는 기회를 갖게 되었습니다. 지난 10여 년 동안 이 R&E 프로그램은 전국의 과학영재학교는 물론이고 과학고등학교와 과학중점고등학교의 핵심적인 자율탐구 학습 모형으로 정착되어 왔습니다.

그 동안 한국과학창의재단은 한국형 과학영재교육 모형으로서 R&E 프로그램을 보급, 발전시켜 왔습니다. 매년 R&E 페스티벌에서는 300편 이상의 우수한 자율 탐구 논문들이 공개되었으며, 해가 갈수록 학생들의 참여도와 관심도 크게 높아져 왔습니다. 비록 소수이긴 하지만, SCI 또는 KCI 급 전문 학술지에 게재되는 우수 학생연구 논문들도 생겨났습니다. 과학영재들의 자율적인 연구 관심이 높아지는 만큼, 그들의 창의적 탐구 활동을 더욱 진작시키고 우수한 연구 성과들을 공유할 수 있는 새로운 장(場)을 마련해 줄 필요성을 느끼게 되었습니다.



올해 한국과학창의재단에서는 기존에 발간되고 있는 국내·외 청소년 전문 학술지의 특징과 체제를 분석하여, 고교생을 대상으로 한 과학 전문 학술지 발간의 타당성과 실천 방안들을 마련하였습니다. 그 결과, 향후 청소년 전문 과학 학술지를 정식으로 창간하기에 앞서, R&E 페스티벌의 우수 연구 논문들을 엄선하여 「청소년과학창의연구 특별호」(The Journal of Youths in Scientific Research-Special Edition)를 발간하기로 결정하였습니다.

이번 청소년과학창의연구 특별호 발간을 위하여 대학교수, 과학고등학교·과학영재학교 교사 등 30명으로 구성된 편집·심사위원회를 운영하였습니다. 올해 초 R&E 페스티벌에서 수상한 50편의 학문 영역별 연구논문을 심사 대상으로 선정하여, 수학·물리·화학·생물·지구과학·정보·공학 등 7개 분야에 걸쳐 논문 1편당 3인의 평가위원이 공동으로 1, 2차 심사하였습니다. 그 결과, 연구의 독창성과 적합성 및 연구 성과 등을 종합적으로 고려하여 최종 14편의 게재 논문을 확정하였습니다. 이 특별호에서 게재가 확정된 논문에 대해 간략한 심사평도 수록하였으며, 연구팀의 연구 후기에서 그간의 연구 경험과 소감을 소개할 수 있도록 하였습니다.

무엇보다 이번 학술 논문집 발간을 기획하고 엄정한 심사를 맡아 주신 평가위원 여러분의 노고에 깊이 감사드립니다. 심사위원들은 바쁘신 일정에도 불구하고, 수차례의 심사와 협의에 참여하여 귀한 심사평과 조언을 주셨습니다. 앞으로도 청소년의 과학창의 연구 발전을 위하여 변함없는 협조를 당부 드립니다.

2016년에는 청소년과학창의연구 학술지가 공식 창간호를 발간할 것입니다. 전국의 전문가들로 편집위원회와 평가위원회를 확대하고, 보다 적극적인 홍보를 통해 더 많은 과학영재들이 참여할 수 있도록 노력하겠습니다. 이번 특별호 발간을 계기로 과학영재들의 창의적 과학 탐구 활동을 더욱 활성화하고 열린 경연장이 될 수 있기를 기대해 봅니다. 여러분의 더 많은 관심과 참여를 부탁드립니다.

감사합니다.

2015. 7.

---

## 사사 (Acknowledgment)

---



미래창조과학부



한국과학창의재단  
Korea Foundation for the Advancement of Science & Creativity

- “이 학술지는 2014년도 미래창조과학부의 재원으로 한국과학창의재단의 지원을 받아 수행된 성과물입니다.”
- “This work was supported by the Korea Foundation for the Advancement of Science and Creativity(KOFAC) grant funded by the Ministry of Science, ICT and Future Planning(MSIP).”





# 청소년 과학 창의 연구

The Journal of Youths in Scientific Research

- 특별호 -

# 1

JULY, 31

2015

---

**009      조 편성을 통한 가위바위보게임의 효율성 연구(Effectiveness studies of rock, paper, scissors game organized by group)**

안지수(Ahn Jisoo) · 김재민(Kim Jaemin) · 장충재(Jang Chungjae) · 조용중(Cho Youngjung)

한현우(Han Hyeonwoo) - 인천과학고등학교

지도교사 : 양순규(Yang Soongyu, 인천과학고등학교, 전공: 수학)

지도교수 : 함남우(Hahm Nahmwoo, 인천대학교 수학과)

**039      3차 펠방정식의 해에 관한 연구(On the solutions of cubic Pell equations)**

채지석(Chae Jiseok) · 류인영(Ryu Inyoung) · 천승환(Cheon Seunghwan) · 문현우(Moon Hyeonwoo)

최백규(Choi Baekgyu) - 전북과학고등학교

지도교사 : 유익승(Lyou Lkseung, 전북과학고등학교, 전공: 수학)

**061      액체 금속을 이용한 변형률 센서의 개발(Development of strain sensors using liquid metals)**

고은섬(Ko Eunseom) · 박채리(Park Chaeree) · 차이주(Cha Iju) · 최수연(Choi Sooyeon) - 한성과학고등학교

지도교사 : 안정용(Ahn Jungyong, 한성과학고등학교, 전공: 물리학)

지도교수 : 이정철(Lee Jungchul, 서강대학교 기계공학과)

**077      전자기장 내에서 유체의 가속 현상에 관한 메커니즘과 추진체 연구(Research of relations between velocity of electroconductive fluid and two fields in electromagnetic field)**

강제훈(Gang Jehun) · 정상하(Jeong Sangha) - 광주과학고등학교

지도교사 : 정은희(Jeong Eunhee, 광주과학고등학교, 전공: 물리학)

자문연구원 : 배삼룡(Bae Samryong, 전남대학교 물리학과)

**101      의자 끌림 현상의 단진동 운동과 그에 따른 소리 분석(Noise analysis of oscillating motion in chair dragging)**

김인환(Kim Inhwan) · 김진혁(Kim Jinhyeok) · 이영우(Lee Youngwoo) - 대전과학고등학교

지도교사 : 김중현(Kim Jongheon, 대전과학고등학교, 전공: 물리학)

---



- 
- 121      **폴리아닐린-은나노입자 복합물을 이용한 과산화수소의 전기화학적 검출(Electrochemical determination of hydrogen peroxide based on polyaniline-silver nanocomposites modified electrode)**  
한준택(Han Joontack) · 황윤비(Hwang Yoonbee) · 박승민(Park Seungmin) · 오서령(Oh Seoryoung)  
－ 세종과학고등학교  
지도교사 : 김민성(Kim Minseong, 세종과학고등학교, 전공: 화학)  
지도교수 : 홍훈기(Hong Hung, 서울대학교 화학교육과)
- 137      **HS-SPME GC/MS법을 이용한 개미(*Camponotus japonicus*)의 페로몬 내 포름산, 올레인산 검출 및 정량(Detection and quantitative analysis of formic acid, oleic acid inside the pheromone of *Camponotus japonicus* using HS-SPME GC/MS method)**  
김재원(Kim Jaewon) · 이택경(Lee Taekkyung) · 이민수(Lee Minsoo) · 박준우(Park Junwoo) － 경기북과학고등학교  
지도교사 : 김재균(Kim Jaekyun, 경기북과학고등학교, 전공: 화학)
- 155      **마에서 추출한 뮤신의 유산균에 대한 효과(Effects of mucin extracted from hemp(*Dioscorea*) on lactic acid bacteria)**  
허태양(Heo Taeyang) · 김소윤(Kim Soyun) · 권순형(Kwon Soonhyung) · 김인철(Kim Incheol)  
정한식(Jeong Hansik) － 인천과학고등학교  
지도교사 : 김은성(Kim Eunsung, 인천과학고등학교, 전공: 생물학)  
지도교수 : 박준홍(Park Joonhong, 연세대학교 사회환경시스템공학부)
- 175      **통합기상센서망을 이용한 대구지역 도시열섬 효과 연구(Study of urban heat island effect in Deagu using Compact Weather Station convergence network)**  
공광조(Gong Gwangjo) · 권혁규(Kwon Hyukkyu) · 김강찬(Kim Kangchan) · 김원중(Kim Wonjong)  
서상교(Seo Sanggyo) － 대구일과학고등학교  
지도교사 : 백명희(Baek Myunghee, 대구일과학고등학교, 전공: 대기과학)  
지도교수 : 이규원(Lee Gyuwon, 경북대학교 천문대기과학과)
- 195      **대기 중 미세먼지 농도와 별의 밝기변화에 대한 정량적 연구(Quantitative study about atmospheric fine dust concentration & brightness of a star variety)**  
박준범(Park Junbeom) · 박효선(Park Hyoseon) · 이지영(Lee Jiyeong) · 한효근(Han Hyokeun) － 강원과학고등학교  
지도교사 : 심원재(Sim Wonjae, 강원과학고등학교, 전공: 지구과학)  
지도교수 : 권석민(Kwon Seokmin, 강원대학교 과학교육학부)
-

- 
- 221      **라즈베리파이를 활용한 시각장애인을 위한 웨어러블 인터페이스 개발(Developing a wearable interface for the visually impaired using Raspberry Pi- Marker recognition-based indoor navigation)**  
황준호(Hwang Junho) · 윤종효(Youn Jonghyo) · 김대진(Kim Daejin) · 이원석(Lee Wonseok)  
조영인(Cho Youngin) · 차형현(Cha Hyeongheon) - 인천과학고등학교  
지도교사 : 이진(Lee Jin, 인천과학고등학교, 전공: 정보·컴퓨터)
- 241      **청각장애인의 음악 체감을 위한 앱 개발(Mobile application development for the music experience of the deaf)**  
윤영석(Yoon Youngseok) · 김민식(Kim Minsik) · 이제혁(Lee Jaehyeok) · 정용준(Jeong Yongjun)  
장병희(Jang Byeonghee) - 인천진산과학고등학교  
지도교사 : 윤상현(Yun Sangheon, 인천진산과학고등학교, 전공: 정보·컴퓨터)  
지도교수 : 박길식(Park Gilsik, 삼성첨단기술연구소 정보·컴퓨터과)
- 257      **모션 인식과 근전도 신호를 이용한 힘 증폭 로봇 손 설계 및 제어(Design and control of force amplification robot hand using motion capture and EMG signal)**  
조정민(Cho Jungmin) · 장민수(Jang Minsu) · 이종완(Lee Jongwan) · 진태규(Jin Taegyul)  
- 한국과학기술원(KAIST) 부설 한국과학영재학교  
지도교수 : 김정(Kim Jung, 한국과학기술원 기계공학과)  
지도교조 : 김연주(Kim Yunjoo, 한국과학기술원 기계공학과)
- 275      **지형과 기후를 고려한 인공구조물 설계(태풍 피해를 감소할 수 있는 비닐하우스 설계 방안 연구)(Research on artificial structure design considering the topography and climate: Minimizing typhoon damage to greenhouse)**  
황재희(Hwang Jaehui) · 이주윤(Lee Juyoon) · 박신영(Park Shinyoung) - 경기과학고등학교  
지도교사 : 최혜경(Choi Hyekyoung, 경기과학고등학교, 전공: 지리학)
-





## 조 편성을 통한 가위바위보게임의 효율성 연구 (Effectiveness studies of rock, paper, scissors game organized by group)

안지수 · 김재민 · 장충재 · 조용중 · 한현우(인천과학고등학교)

### 초 록

가위바위보 게임은 1등을 결정할 때 주로 사용되는 도구이다. 하지만 참여하는 인원이 많아질수록 1등을 결정하기까지 가위바위보 횟수가 기하급수적으로 증가하게 되고 시간이 오래 걸린다. 따라서 사람들은 일반적으로 조를 나누어 게임을 하게 되는데 본 연구에서는 c++을 이용하여 게임 상황을 프로그래밍으로 구현하여 실제 확률의 기댓값을 계산하였다. 특히 몇 개의 조로 어떻게 나누어야 1등을 결정하기까지의 시간이 최소가 되는지 알아보고자 하였으며 이 과정을 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

첫째, 조 편성이 가위바위보 게임이 효율성을 높여줄 것 같지만 4명이 진행할 때는 4명이 함께 1등을 결정하는 경우가 2명씩 조를 나눠 1등을 결정한 후 각조의 1등이 모여 최종적인 1등을 결정하는 것보다 빠르다는 사실을 알 수 있었다.

둘째,  $n$ 명이 조 편성 하지 않고 진행하는 경우는  $(n+1)$ 명이 조 편성 하지 않고 진행하는 경우보다 대부분 1.4배에서 1.5배씩 늘어남을 프로그램을 통해서 귀납적으로 확인하였다.

셋째,  $n$ 명이 여러 개의 조로 나누어 진행할 때 1등이 정해지는 시간적 기댓값을 구하는 과정과 공식을 유도하였으며, 실제 4명에서 98명까지 조 편성을 통해 게임에서 1등이 정해지는 시간적 기댓값을 확인해보고 참여자를 최소의 시간적 기댓값이 되는 조의 수로 나눈 값이 3으로 수렴함을 알 수 있었다. 이를 통해 대략 3명씩 조를 나누어서 게임을 하면 최소시간에 1등을 정할 수 있음을 알게 되었다.

키워드 : 가위바위보 게임, 시간적 기댓값, 가위바위보 게임의 기댓값, 가위바위보게임의 조편성

## I. 서론

### 1. 연구동기

이해가 상충되는 경쟁적 상황에서 자기의 이득을 최대화하려고 할 때, 어떤 전략을 선택하여야 하는가를 연구하는 분야가 게임이론(game theory)이다. 이해가 상충되는 경쟁적 상황은 개인과 개인의 대립뿐만



아니라 노사 간의 임금협상, 또는 기업과 기업의 판매전략, 크게는 국가 간의 전쟁에서의 작전수립 등에 이르기 까지 우리 생활의 많은 곳에서 발견할 수가 있다. 게임이론은 이렇게 이해가 엇갈리는 상황에서 각자가 어떤 결정을 내려야 하며 그 결과가 어떻게 나타나는지를 다룬다. 게임이론은 1921년 보렐에 의해 처음 제기되었고 독일의 수학자 폰 노이만에 의해 게임이론이라는 용어가 처음으로 도입되었다[1].

게임이론에서 가장 기본적으로 생각해 볼 수 있는 게임이 가위바위보 게임이다. 가위바위보 게임은 전 세계의 모든 사람들이 알고 있는 게임이다. 이 게임은 나이나 성별 또는 지적 능력의 차이 등에 대한 차별 없이 게임에 참가한 사람들 중 객관적으로 1등을 선정하거나 사람들의 순서를 정해야 할 때 사용하는 다양한 게임 중 하나이다.

가위바위보 게임에 참가한 사람의 수가 적을 경우 가위바위보 게임을 통해서 쉽게 1등을 선정할 수 있으나 게임에 참가한 사람의 수가 많을 경우 여러 번의 가위바위보 게임을 하여도 1등을 선정하기 어려운 경험은 누구나 해 보았을 것이다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 대부분 게임에 참가한 사람들은 몇 개의 작은 조로 나누어 각 조의 1등을 정하고 각 조의 1등들이 모여서 최종적으로 1등을 정하기도 한다. 실제로 우리는 4명이 함께 가위바위보 게임을 통해 1등을 정하려고 할 때 어떤 경우에는 4명이 한꺼번에 게임을 하였을 때 2명씩 조를 나눠서 할 때 보다 더 빨리 끝나는 경우도 있었고 어떤 경우에는 2명씩 두 조로 나눠 게임을 하고 각 조의 1등끼리 다시 가위바위보 게임을 하는 경우가 4명이 함께 가위바위보 게임을 한 경우가 더 빨리 끝나는 경우도 경험하였다. 이러한 경험은 효율적으로 어떻게 게임을 하면 가장 빨리 1등을 결정할 수 있는 방법인지 수학적 검증을 하면 어떨까라는 생각을 갖게 하였다.

가위바위보 게임을 통해서 1등을 선정하고자 할 때 모든 사람들이 원하는 가장 효율적인 방법이라는 것은 가장 빠른 시간 내에 1등을 확정하는 것이다. 따라서 우리는 본 연구에서 어떤 모임에  $n$  명의 사람이 모였을 때 모인 사람들을 몇 개의 조로 나누어 가위바위보 게임을 진행하였을 때 가장 빨리 1등을 선정할 수 있는지를 수학적으로 검증하고자 한다.

## 2. 연구목표

기존의 가위바위보 게임에 대한 선행 연구[3, 4]에서는  $n$  명이 함께 가위바위보 게임을 하였을 때 1등이 정해질 기댓값과  $n = 4$  또는  $n = 6$  일 때 조의 인원을 2명 또는 3명으로 하여 1등이 정해지는 가장 기본적인 기댓값만을 제시하였다.

따라서 우리는 본 연구에서 가위바위보 게임에  $n$  명이 참여하였을 때  $n$  명을 다양한 방법으로 조를 나누고 게임을 하는 것이 가장 빠르게 1등을 정할 수 있는 방법인가를 검증하고자 한다. 특히, 게임에 참여한 사람의 숫자가 소수인 경우 나누어진 조의 인원수가 달라질 수밖에 없으며 이러한 경우

에 기댓값이 어떻게 바뀌는가를 수학적으로 엄밀하게 검증하고자 한다.

본 연구에서 알아보고자 하는 내용을 구체적으로 정리하면 다음과 같다.

### 2.1. 조로 나누어서 가위바위보 게임을 하면 1등을 빨리 결정할 수 있을까?

여러 명이 모여서 가위바위보 게임을 할 때 대부분이 사람들은 모두가 모여 한꺼번에 게임을 하다 보면 시간이 오래 걸릴 것으로 예상하고 게임 시간을 단축하기 위하여 모인 사람들을 몇 개의 조를 나누어서 게임을 하고 다시 그 승자들이 모여 게임을 진행하곤 한다. 예를 들어 20명이 가위바위보 게임을 하여 1등을 정해야 한다면, 한꺼번에 20명이 집단으로 게임을 하기 보다는 10명씩 두 조로 나뉘서 할 때 더 빨리 승자를 결정할 수 있다는 느낌을 바탕으로 조를 나뉘서 게임을 하기도 하고 경우에 따라서는 20명을 4명씩 네 조로 나누어서 게임을 하기도 한다. 실제로 가위바위보 게임에 참가하는 사람 수가 많아질수록 사람들은 다양한 방법으로 조를 나누려는 행위를 더 하게 된다. 따라서 우리는 이번 연구에서 어떻게 조를 나누어서 가위바위보 게임을 하는 것이 승자를 빨리 결정지을 수 있는지 수학적으로 검증해보고자 한다.

### 2.2. 조를 어떻게 편성하면 가위바위보 게임이 모두에게 공평할까?

앞에서 언급한 바와 같이 가위바위보 게임을 가능한 빠르게 끝내는 것이 모두의 관심사이다. 그래서 많은 사람들이 가위바위보 게임을 할 때 팀을 나누어서 게임을 하려 한다. 여기서 의문점이 하나 생긴다. 조를 편성하다보면, 부전승 혹은 다른 요인에 의해서 불공평한 게임이 될 수도 있다. 그렇기에 공평성 또한 중요한 고려 대상이 된다. 따라서 우리들은 이 연구에서 어떻게 조를 나누어서 게임을 하면 모든 사람에게 공평성 보장될 수 있는지에 대해 알아보고자 한다.

### 2.3. 조를 어떻게 편성하면 가위바위보 게임에서 1등을 빨리 결정할 수 있을까?

가위바위보 게임에서 ‘조를 어떻게 편성하느냐’에 따라 결과는 달라진다. 더 빨리 끝날 수도 있고, 더 늦게 끝날 수도 있다. 예를 들어 6명이 가위바위보 게임을 할 때 3명, 3명의 두 조로 나뉘 게임을 하는 것이 나올지 아니면 2명, 2명, 2명의 세 조로 나뉘서 게임을 하는 것이 나올까에 대해 무엇이 더 효과적일지는 잘 알지 못한다. 따라서 우리는 이번 연구에서  $n$  명이 가위바위보 게임을 할 때 가장 짧은 시간 안에 1등을 정하기 위한 조 편성 방법을 알아보고자 한다.

## Ⅱ. 선행연구 분석 및 이론적 배경

### 1. 선행연구 분석

가위바위보 게임과 관련된 학술적 연구는 개인블로그<sup>[4]</sup>와 카이스트 사이버 영재교육 과제에서 일부 다루어졌다. 수학적 연구 외에 가위바위보 게임과 관련된 심리적 영향과 관련된 연구결과<sup>[2]</sup>도 있지만 본 연구에서는 심리적 영향력은 배제한다.

#### 1.1. <http://bindung.egloos.com/4422991><sup>[4]</sup>

위 블로그 게시판에는  $n$ 명이 가위바위보 게임을 할 때, 1명의 승자가 나올 때까지 수행하는 가위바위보 게임의 횟수에 대한 기댓값이 정리되어 있다. 게시판에는 수학적으로 자세히 설명은 되어 있지 않지만 다음과 같은 방법으로 가위바위보 게임의 횟수를 구한 것임을 알 수 있다.

먼저  $n$ 명의 가위바위보 게임에서 승부가 날 확률을 구하고 이를 바탕으로  $n$ 명의 가위바위보 게임에서 승부가 났을 때 기댓값을 구하는 방법을 사용하였다. 또한 가위바위보 게임의 끝나는 횟수의 기댓값에 대한 일반적인 식을 서술하였고, 50명까지의 기댓값을 컴퓨터 프로그램을 통해 구해놓았다. 우리는 이 과정이 수학적으로 맞는지에 대해서 본문에서 검증하였다.

#### 1.2. 카이스트 사이버 영재교육 과제

홍성준과 이준석<sup>[3]</sup>은 카이스트 과제를 통하여 가위바위보 게임에 대한 다음과 같은 기본적인 결과를 얻었다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

$n$ 명이 가위바위보 게임을 하여 1명 이상의 사람이 떨어질 때까지 행해진 횟수의 기댓값을  $D_n$ 라고 하자. 기댓값의 정의를 이용하여  $n = 2$ 일 때와  $n = 3$ 일 때의 결과는 쉽게 얻을 수 있다.

$n$ 명이 가위바위보 게임을 하여 1명 이상의 사람이 떨어질 때까지 행해진 횟수의 기댓값을  $D_n$ 라고 하자. 기댓값의 정의를 이용하여  $n = 2$ 일 때와  $n = 3$ 일 때의 결과는 쉽게 얻을 수 있다.

#### [정리 1]

$$D_2 = \frac{3}{2}, D_3 = \frac{3}{2} \text{이다.}$$

정리 1의 내용을 일반화하여 홍성준과 이준석은 다음 결과도 유도하였다.

## [정리 2]

$n$ 이 2이상의 자연수일 때  $n$ 명이 함께 가위바위보 게임을 하는 경우  $D_n = \frac{3^{n-1}}{2^n - 2}$ 이다.

정리 2에 의하여 4명이 가위바위보 게임을 하면  $D_4 = \frac{27}{14}$ 이고 5명이 가위바위보 게임을 하면  $D_5 = \frac{27}{10}$ 이다. 이 결과는 4명이 함께 가위바위보 게임을 하는 경우 1명 이상이 탈락하려면 대략 1.9번의 게임을 해야 하고 5명이 함께 하는 경우 1명 이상이 탈락을 하려면 2.7번의 게임을 하여야 함을 설명한다.

홍성준과 이준석은 정리 2의 내용을 바탕으로 게임에 참여한 인원이 4명 또는 6명일 때 한꺼번에 가위바위보 게임을 할 때는 1등을 선정할 때까지의 기댓값을 구하였지만 일반화하지 못하였고 특히 조를 나누었을 때에는 명확한 답을 구해내지 못하였다.

위의 선행결과에서는 가위바위보 게임에 참여한 사람의 수가  $n$ 명일 때 어떤 방식으로 조를 구성하여야 가장 빨리 1등을 선정할 수 있는가에 대한 검증을 보여주지 못했다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1. 가위바위보게임의 정의

가위바위보 게임은 지구상에서 가장 널리 통용되는 게임으로, 손을 가위모양, 바위모양, 보자기모양의 세 가지 모양으로 만들어 승부를 내는 게임이다.

가위모양은 보자기모양을 이기고, 보자기모양은 바위모양을 이기고, 바위모양은 가위모양을 이긴다. 따라서 위의 규칙에 해당하지 않는 경우 가위바위보 게임은 비기는 것으로 정의된다.

- (1) 2명이 가위바위보 게임을 하면 두 사람이 같은 모양을 낼 때 비기는 게임이 된다.
- (2) 3명 이상이 가위바위보 게임을 하면 모든 사람이 같은 모양을 내거나 또는 모든 사람의 손 모양에서 적어도 하나의 가위모양, 바위모양, 보자기모양이 있는 경우 비기는 게임이 된다.

### 2.2. 가위바위보게임이 끝나는 횟수의 기댓값

이산확률변수  $X$ 에 대하여 변수  $x_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ )에 대한 확률을  $p_i$ 라는 확률분포를 이룰 때, 확률변수  $X$ 의 기댓값  $E(X)$ 는 다음과 같다.

$$E(X) = x_1p_1 + x_2p_2 + \dots + x_np_n = \sum_{i=1}^n x_ip_i$$



즉, 각 확률변수에 그 변수가 취하는 확률을 곱해 모두 더한 것이다. 따라서 가위바위보 게임이 끝나는 횟수의 기댓값은 게임이 끝나는 횟수에 대하여 그 횟수 만에 승부가 결정지어질 확률을 곱해 모두 더하면 된다.

### 2.3. 가위바위보게임 집단 조건

우리가 연구하는 가위바위보 게임에 참여하는 집단은 다음과 같은 조건을 만족해야 한다.

〈조건 1〉 집단에 속한 사람이 게임을 할 때 이길 확률과 질 확률은 동일하다.

〈조건 2〉 게임을 할 때 사람들끼리 담합하지 않는다.

담합이란 두 명 이상의 사람이 가위바위보게임에서 같은 것을 내기로 약속하는 것을 말한다.

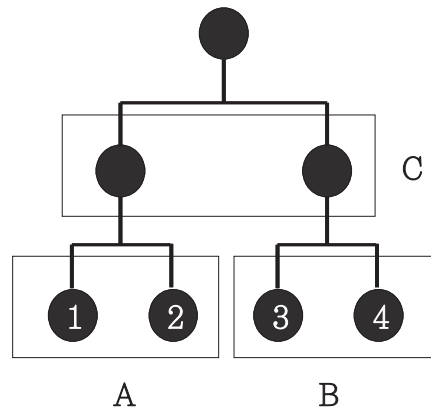
〈조건 3〉 게임을 위하여 조를 나눌 때 각 조의 구성원은 적어도 2명 이상이 되어야 한다.

### 2.4. 가위바위보 게임의 효율성

가위바위보 게임에서 시간적 효율은 ‘가위바위보 게임이 1위를 결정하고 끝나는데 얼마의 시간이 걸렸느냐’를 의미한다. 편의상 가위바위보 게임을 한 번하는데 걸린 시간을 1이라 하자. 가위바위보 게임의 효율성을 수학적으로 설명하기 위하여 다음의 몇 가지 정의를 도입한다.

#### [정의 1]

가위바위보 게임에서 조를 나누어 게임을 할 때 각 조는 같은 레벨(level)에 있다고 정의한다.



[그림 1] 4명을 2명씩 두 조로 나누어 게임하기

[그림 1]에서 4명의 사람이 2명씩 두 조로 나누어져 있는데 정의 1에 의하여 1, 2와 3, 4는 같은 레벨에 있다고 할 수 있다. 하지만 [그림 1]에서 영역 C에 있는 두 사람은 1, 2 또는 3, 4와는 다른 레벨에 있다고 설명된다.

[정의 2]

조를 나누어서 가위바위보 게임을 할 때 게임에서 1등이 선정되는데 까지 걸릴 것으로 예상되는 기댓값을 시간적 기댓값이라 정의한다.

[그림 1]에서처럼 4명이 가위바위보 게임을 한다면 1, 2와 3, 4로 나뉘서 게임을 한 뒤 이긴 사람들이 다시 게임을 하여 최종적으로 1등이 결정될 시간적 기댓값은

$$(1, 2\text{가 속한 조와 } 3, 4\text{가 속한 조의 } 1\text{등이 모두 결정될 시간적 기댓값}) \\ + (\text{각 조의 } 1\text{등이 다시 게임을 하여 } 1\text{등이 모두 결정될 시간적 기댓값})$$

이 된다.

### 3. 선행연구 개선

앞의 선행연구에서 홍성준과 이준석은 1, 2가 속한 조와 3, 4가 속한 조의 1등이 모두 결정될 시간적 기댓값으로  $\frac{3}{2}$  을 제시하였다. 하지만 이 기댓값은 잘못된 기댓값이다. 이유는 무엇일까? 실제로 1, 2가 게임을 하였을 때 1등이 결정될 시간적 기댓값은  $\frac{3}{2}$  이고 3, 4가 게임을 하였을 때도 1등이 결정될 시간적 기댓값은  $\frac{3}{2}$  이지만 1, 2와 3, 4가 동시에 게임을 하게 되면 기댓값은  $\frac{3}{2}$  이 아니다. 그 이유는 예를 들어 1, 2가 3번 만에 1등을 선정하는 경우에도 3, 4는 8번 만에 1등이 선정될 수도 있고 또한 1, 2가 12번 만에 1등을 선정하였지만 3, 4는 단 1번 만에 1등이 선정될 수 있다. 따라서 1, 2가 속한 조와 3, 4가 속한 조의 1등이 모두 결정될 시간적 기댓값은 다음과 같다.

[정리 3]

1, 2가 한 조이고 3, 4가 다른 한 조라 하자. 두 조 모두 조의 1등이 결정될 시간적 기댓값은  $\frac{15}{8}$  이다.

[증명]

두 조 모두 1등이 결정되는 횟수를  $n$ 회라 하고 이러한 결과가 나올 확률을  $p_n$ 이라 하면

$$p_n = 2\left(\frac{2}{3} + \frac{1}{3} \times \frac{2}{3} + \dots + \frac{2}{3^n}\right) \times \frac{2}{3^n} - \frac{2 \times 2}{3^n \times 3^n} = \frac{4 \times 3^n - 8}{3^{2n}} = \frac{4}{3^n} - \frac{8}{9^n}$$

이다.  $S = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4n}{3^n}$ ,  $T = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{8n}{9^n}$  라 할 때  $S$ 와  $T$ 의 값은 다음과 같이 구한다.

$$\begin{aligned}
 3S &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4n}{3^{n-1}} = 4 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4(n+1)}{3^n} \\
 &= 4 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4n}{3^n} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{3^n} \\
 &= 4 + S + 4 \cdot \frac{\frac{1}{3}}{1 - \frac{1}{3}} = 4 + S + 2
 \end{aligned}$$

이므로  $S = 3$ 이다. 같은 방법으로

$$\begin{aligned}
 9T &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{8n}{9^{n-1}} = 8 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{8(n+1)}{9^n} \\
 &= 8 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{8n}{9^n} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{8}{9^n} \\
 &= 8 + T + 8 \cdot \frac{\frac{1}{9}}{1 - \frac{1}{9}} = 8 + T + 1
 \end{aligned}$$

이므로  $T = \frac{9}{8}$ 이다. 따라서 두 조 모두 1등이 결정되는 시간적 기댓값은

$$\sum_{n=1}^{\infty} np_n = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4n}{3^n} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{8n}{9^n} = S - T = 3 - \frac{9}{8} = \frac{15}{8} \text{ 이다.}$$

정리 3을 이용하여 다음 결과를 쉽게 얻을 수 있다.

#### [정리 4]

1, 2가 한 조이고 3, 4가 다른 한 조라 하자. 가위바위보 게임을 하여 4명 중 1등이 결정되는데 걸리는 시간적 기댓값은  $\frac{27}{8}$ 이다.

#### [증명]

정리 3에 의하여 1, 2가 한 조이고 3, 4가 다른 한 조라 하자. 두 조 모두 조의 1등이 결정될 시간적 기댓값은  $\frac{15}{8}$ 이다. 또한 정리 1에 의하여 두 조의 1등이 모여 가위바위보 게임을 하였을 때 1등이 결정될 시간적 기댓값은  $\frac{3}{2}$ 이다. 따라서 가위바위보 게임을 하여 4명 중 1등이 결정되는데 걸리는 시간적 기댓값은

$$\begin{aligned} & (1, 2\text{가 속한 조와 } 3, 4\text{가 속한 조의 } 1\text{등이 모두 결정될 시간적 기댓값}) \\ & + (\text{각 조의 } 1\text{등이 다시 게임을 하여 } 1\text{등이 모두 결정될 시간적 기댓값}) \\ & = \frac{15}{8} + \frac{3}{2} = \frac{27}{8} \end{aligned}$$

이다.

정리 4의 결과는 홍성준과 이준석이 제시하지 못한 기댓값 문제의 올바른 답안을 제시하고 있으며 다음과 같은 결과도 설명해 줄 수 있다.

#### [정리 5]

4명이 모여서 가위바위보 게임으로 1등을 정해야 할 경우 두 개의 조로 나누어 게임을 하는 것 보다 4명이 함께 게임을 하는 것이 시간을 절약할 수 있을 것으로 기대된다.

#### [증명]

정리 2의 의하여 4명이 함께 가위바위보 게임을 하였을 때 1등이 정해지는데 걸리는 시간적 기댓값은  $\frac{27}{14}$  이고 정리 4에 의하여 4명을 2명씩 두 조로 나누어 가위바위보 게임을 하였을 때 1등이 정해지는데 걸리는 시간적 기댓값은  $\frac{27}{8}$  이다.  $\frac{27}{14} < \frac{27}{8}$  이므로 4명이 가위바위보 게임으로 1등을 정해야 하면 두 개의 조로 나누는 것 보다 4명이 함께 게임을 하는 것이 더 빨리 게임이 끝날 것으로 예측된다.

정리 5의 결과는 우리에게 의외의 결과를 제시하고 있다. 즉, 우리는 무조건 모임에 참여한 사람들을 여러 개의 조로 나누어 게임을 하였을 때 가장 빨리 끝나지 않을까하는 기대를 하는 것이 잘못된 기대임을 설명하고 있다.

### Ⅲ. 연구내용

우리는 본 연구에서  $n$ 명이 가위바위보 게임에 참여하였을 때 어떻게 조를 나누는 것이 좋은가를 알아보자. 이를 위하여 다음 기호를 도입하자.

## [정의 3]

$n$ 명의 사람들이 모여서 가위바위보 게임을 한다고 하자.  $n$ 명의 사람들을  $A_1, A_2, \dots, A_{k-1}, A_k$ 의  $k$ 개 조로 나누고 각 조의 조원수를 각각  $a_1, a_2, \dots, a_{k-1}, a_k$ 라 했을 때, 각 조에서 1등이 결정되는데 걸리는 시간적 기댓값을

$$T_{(n,k)}^{(a_1, a_2, \dots, a_k)}$$

로 나타내기로 한다.

정의 3을 이용하여 정리 4의 내용을 나타내면 1, 2가 한 조이고 3, 4가 다른 한 조라 할 때 가위바 조와 3, 4위보 게임을 하여 4명 중 1등이 결정되는데 걸리는 시간적 기댓값은 (1, 2가 속한가 속한 조의 1등이 모두 결정될 시간적 기댓값)

+ (각 조의 1등이 다시 게임을 하여 1등이 모두 결정될 시간적 기댓값)

$$= T_{(4,2)}^{(2,2)} + T_{(2,1)}^{(2)} = \frac{27}{8}$$

이다.

조에 속한 인원이 위의 예에서처럼 2명인 경우 1명이 탈락하는 경우와 1등이 결정되는 경우는 같은 경우가 된다. 하지만조에 속한 인원이 3명이상인 경우 1명이상이 탈락하는 경우와 1등이 결정되는 경우는 다른 경우이므로 1등이 결정될 시간적 기댓값을 구하는 것은 앞에서 다룬 것과 다른 방식으로 접근해야 한다.

## 1. 조편성 없는 1위 결정전

$n$ 명이 조편성 없이 가위바위보 게임을 할 때 1위가 결정될 시간적 기댓값은 정리 1과 2에 의하여 정의 3의 기호를 이용하여 다음과 같이 설명할 수 있다.

2명이 가위바위보 게임을 할 때 1위가 결정될 시간적 기댓값  $T_{(2,1)}^{(2)} = \frac{3}{2}$ 이고 3명이 가위바위보 게임을 할 때 1위가 결정될 시간적 기댓값  $T_{(3,1)}^{(3)} = \frac{9}{4}$ 이다.

$n$ 이 4이상의 자연수일 때 1위가 결정될 시간적 기댓값  $T_{(n,1)}^{(n)}$ 를 수학적으로 구하기 위하여 다음 보조정리를 이용한다[3].

[보조정리 6]

(1)  $n$ 명의 사람이 조편성 없이 가위바위보 게임을 할 때, 한 게임 만에 한 명 이상이 떨어

어질 확률을  $p_n$ 이라 하면  $p_n = \frac{2^n - 2}{3^{n-1}}$  이다.

(2)  $n$ 명의 사람이 조편성 없이 가위바위보게임을 할 때, 한 명 이상을 떨어질 확률을

$p_n$ 이라 하면  $D_n = \frac{1}{p_n}$ 이다.

보조정리 6을 이용하여 정리 7을 증명할 수 있다.

[정리 7]

$n$ 명의 사람이 조편성 없이 가위바위보 게임을 할 때, 한 게임 만에 한명 이상이 떨어

지는 경우 그 떨어진 사람이  $k$ 명일 확률은  $\frac{{}_n C_k}{2^n - 2}$ 이다.

[증명]

조건부확률의 정의를 이용하여 증명한다.  $n$  명의 사람이 가위바위보 게임을 했을 때,  $A$  를 한명 이상이 떨어지는 사건이라 하고,  $B$  를  $k$  명이 떨어지는 사건이라 하자.

그러면, 조건부확률의 정의에 따라  $P(B|A) = \frac{P(B \cap A)}{P(A)}$  이고 보조정리 6에 의하

여  $P(A) = \frac{2^n - 2}{3^{n-1}}$  이다. 또한  $P(A \cap B)$  는 (탈락할 사람  $k$ 명을 고르는 경우의 수)

$\times$ (탈락한 사람들이 낸 가위, 바위, 보 종류의 수) $\times$ (탈락하지 않은 사람들이 내는 가위, 바위, 보 종류의 수)를 전체 경우의 수  $3^n$ 으로 나눈 값이므로

$$P(A \cap B) = \frac{{}_n C_k \cdot 3 \cdot 1}{3^n}$$

이다. 그러므로

$$P(B|A) = \frac{P(B \cap A)}{P(A)} = \frac{\frac{{}_n C_k \cdot 3 \cdot 1}{3^n}}{\frac{2^n - 2}{3^{n-1}}} = \frac{{}_n C_k}{2^n - 2}$$

이다.

$n$ 명이 가위바위보 게임을 할 때 게임이 진행되기 위해서는 한 명이상이 떨어져야 한다. 우리는 앞



에서 이 기댓값을  $D_n$  로 표현하였다. 한 명 이상이 떨어지고 나면 남은 사람 수는  $1, 2, 3, \dots, (n-1)$  명 중 하나이고, 정리 7과 기댓값의 정의에 의하여 정리 8과 같은 시간적 기댓값을 얻을 수 있다.

#### [정리 8]

$n$ 명이 가위바위보 게임에서 1등을 결정하기 위해 해야 하는 시간에 대한 기댓값은

$$T_{(n,1)}^{(n)} = D_n + \sum_{k=1}^{n-1} \frac{n C_k}{2^n - 2} T_{(k,1)}^{(k)}$$

이다.

#### [증명]

우선  $n$ 명이 함께 가위바위보 게임을 할 때, 승부가 나려면 1명 이상의 사람이 떨어져야 하므로  $D_n$ 의 정의와 정리 7을 이용하면  $T_{(n,1)}^{(n)}$ 은  $D_n$ 에 1명 이상이 떨어지는데 1명이 떨어지는 기댓값, 2명이 떨어지는 기댓값,  $\dots$ ,  $n-1$ 명이 떨어지는 기댓값의 합으로 표현되므로 다음을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} T_{(n,1)}^{(n)} &= D_n + \left( \frac{n C_1}{2^n - 2} \cdot T_{(1,1)}^{(1)} + \frac{n C_2}{2^n - 2} \cdot T_{(2,1)}^{(2)} + \dots + \frac{n C_{n-1}}{2^n - 2} \cdot T_{(n-1,1)}^{(n-1)} \right) \\ &= D_n + \sum_{k=1}^{n-1} \frac{n C_k}{2^n - 2} T_{(n,k)}^{(k)} \end{aligned}$$

## 2. 조편성 없는 1위 결정전의 수치적 결과

정리 8에 있는 수식을 이용하여  $n = 2, 3, 4$ 일 때 조편성 없이 가위바위보 게임에서 1등을 결정하기 위해 해야 하는 게임 횟수의 기댓값은 다음과 같다.

---


$$\begin{aligned} T_{(1,1)}^{(1)} &= D_1 = 0 \\ T_{(2,1)}^{(2)} &= D_2 + \frac{2 C_1}{2} T_{(1,1)}^{(1)} = D_2 = 1.5 \\ T_{(3,1)}^{(3)} &= D_3 + \frac{3 C_1}{6} T_{(1,1)}^{(1)} + \frac{3 C_2}{6} T_{(2,1)}^{(2)} = 2.25 \\ T_{(4,1)}^{(4)} &= D_4 + \frac{4 C_1}{14} T_{(1,1)}^{(1)} + \frac{4 C_2}{14} T_{(2,1)}^{(2)} + \frac{4 C_3}{14} T_{(3,1)}^{(3)} = 3.214286 \end{aligned}$$


---

[표 1] 정리 8의 공식에 의해 계산된 기댓값

우리는 C 프로그램을 이용하여  $n = 2, 3, 4, \dots, 20$  일 때 조편성 없이 가위바위보 게임에서 1등을 결정하기 위해 해야 하는 게임 횟수의 기댓값을 구하였다.

#### 〈C 프로그램〉

```
#include<stdio.h>
#include<math.h>
FILE *out = fopen("output.txt","w");
unsigned int l;
long double sum[10001], combi=1, w, h;
int com(int m, int n){
    int i;
    combi=1;
    for(i=n+1;i<=m;i++) combi*=i;
    for(i=1;i<=m-n;i++) combi=combi/i;
    return 0;
}
int main(){
    int n, i, j;
    scanf("%Ld",&n);
    sum[1]=0;
    fprintf(out,"E1=");
    fprintf(out,"%d\n",0);
    l=pow(2,n)-2;
    for(i=2;i<=n-1;i++){
        w=pow(2,i)-2;
        h=pow(3,i-1);
        for(j=1;j<=i-1;j++){
            com(i, j);
            sum[i]+=(combi*sum[j])/w;
        }
        sum[i]+=(float)((float)h/(float)w);
    }
```

```

    fprintf(out,"E%Ld=%Lf\n", i, sum[i]);
}
fprintf(out,"\n \n");
}

```

우리는 위의 프로그램을 이용한 시간적 기댓값에 대한 결과는 다음과 같다. [표 2]에서  $En$ 은  $En = T_{(n,1)}^{(1)}$ 를 의미한다.

E2=1.5	E12=50.625021
E3=2.25	E13=73.740353
E4=3.214286	E14=107.993134
E5=4.485714	E15=158.868441
E6=6.219816	E16=234.573634
E7=8.646736	E17=347.394677
E8=12.104444	E18=515.729403
E9=17.091935	E19=767.135903
E10=24.349598	E20=1142.903239
E11=34.979461	

[표 2]  $n$ 명이 조편성 없이 게임할 때 시간적 기댓값 ( $2 \leq n \leq 20$ )

[표 2]에서 시간적 기댓값은 불규칙하게 늘어나는 것처럼 보이지만 비율을 구해보았을 때 다음과 같은 결과를 얻었다.

E3/E2=1.5	E12/E11=1.45
E4/E3=1.43	E13/E12=1.46
E5/E4=1.40	E14/E13=1.46
E6/E5=1.39	E15/E14=1.47
E7/E6=1.39	E16/E15=1.48
E8/E7=1.39	E17/E16=1.48
E9/E8=1.42	E18/E17=1.48
E10/E9=1.42	E19/E18=1.49
E11/E10=1.44	E20/E19=1.49

[표 3]  $n$ 명이 조편성 없이 게임할 때 시간적 기댓값이 늘어나는 비율 ( $2 \leq n \leq 20$ )

[표 3]에서 알 수 있듯이 조편성 없이 게임을 하여 1등을 정할 때 게임에 참여하는 사람이 늘어날 때 거의 일정한 비율 범위(1.4~1.5) 안에서 게임 시간이 늘어난다.

### 3. 조편성을 통한 1위 결정전

일반적인 조편성을 통한 1위 결정에 대한 시간적 기댓값을 구하는 아이디어를 얻기 위하여  $2n$  명이 가위바위보 게임에 참여하였을 때  $2n$  명을 2명씩 나눠 모두  $n$  개조 편성하여 1위를 결정하는데 걸리는 시간적 기댓값을 구해보기로 한다. 이를 위하여 다음 두 보조정리를 우선 증명한다.

[보조정리 9]

$$\lim_{m \rightarrow \infty} (m+1) \sum_{i=1}^n {}_nC_i \cdot (-1)^i \cdot \left(\frac{1}{3}\right)^{i(m+1)} = 0 \text{ 이다.}$$

[증명]

$$\begin{aligned} \lim_{m \rightarrow \infty} (m+1) \sum_{i=1}^n {}_nC_i \cdot (-1)^i \cdot \left(\frac{1}{3}\right)^{i(m+1)} &\leq \lim_{m \rightarrow \infty} (m+1) \sum_{i=1}^n {}_nC_i \cdot \left(\frac{1}{3}\right)^{i(m+1)} \\ &\leq \lim_{m \rightarrow \infty} (m+1) \sum_{i=1}^n {}_nC_i \cdot \left(\frac{1}{3}\right)^{m+1} \\ &\leq \lim_{m \rightarrow \infty} (m+1) \cdot 2^n \cdot \left(\frac{1}{3}\right)^{m+1} = 0 \end{aligned}$$

이므로

$$\lim_{m \rightarrow \infty} (m+1) \sum_{i=1}^n {}_nC_i \cdot (-1)^i \cdot \left(\frac{1}{3}\right)^{i(m+1)} \leq 0 \quad (1)$$

이 성립한다. 같은 방법으로

$$-\lim_{m \rightarrow \infty} (m+1) \sum_{i=1}^n {}_nC_i \cdot \left(\frac{1}{3}\right)^{i(m+1)} \leq \lim_{m \rightarrow \infty} (m+1) \sum_{i=1}^n {}_nC_i \cdot (-1)^i \cdot \left(\frac{1}{3}\right)^{i(m+1)}$$

이므로

$$0 \leq \lim_{m \rightarrow \infty} (m+1) \sum_{i=1}^n {}_nC_i \cdot (-1)^i \cdot \left(\frac{1}{3}\right)^{i(m+1)} \quad (2)$$

이 성립한다. (1)과 (2)에 의하여

$$\lim_{m \rightarrow \infty} (m+1) \sum_{i=1}^n {}_n C_i \cdot (-1)^i \cdot \left(\frac{1}{3}\right)^{i(m+1)} = 0$$

이 성립한다.

[보조정리 10]

$\lim_{m \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^n {}_n C_j \cdot (-1)^j \cdot \left(\frac{1}{3}\right)^{kj}$  은  $\sum_{j=1}^n {}_n C_j \cdot (-1)^j \cdot \frac{1}{3^j - 1}$  로 수렴한다.

[증명]

$$\begin{aligned} \lim_{m \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^n {}_n C_j \cdot (-1)^j \cdot \left(\frac{1}{3}\right)^{kj} &= \lim_{m \rightarrow \infty} \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m {}_n C_j \cdot (-1)^j \cdot \left(\frac{1}{3}\right)^{kj} \\ &= \sum_{j=1}^n {}_n C_j \cdot (-1)^j \lim_{m \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^m \left(\frac{1}{3}\right)^{kj} \\ &= \sum_{j=1}^n {}_n C_j \cdot (-1)^j \cdot \frac{1}{3^j - 1} \end{aligned}$$

[정리 11]

$2n$  명이 가위바위보 게임에 참여하였을 때  $2n$  명을 2명씩 나눠 모두  $n$  개조로 편성하여 1위를 결정하는데 걸리는 시간적 기댓값은

$$T_{(2n,n)}^{(\overbrace{2,2,\dots,2}^n)} = 1 - \sum_{i=1}^n \frac{(-1)^i}{3^i - 1} \cdot {}_n C_i$$

이다.

[증명]

가위바위보 게임에서 각 조에 대하여  $k$  번째 이내에서 1등이 결정될 확률은  $1 - \left(\frac{1}{3}\right)^k$

이고  $n$  개 조 모두가  $k$  번째 이내에서 1등이 결정될 확률은

$$\left(1 - \left(\frac{1}{3}\right)^k\right)^n$$

이다. 따라서  $n$  개의 조가 딱  $k$  번째 1등이 결정될 확률은  $k$  번째 까지 1등이 결정될 확률과  $(k-1)$  번 째 까지 1등이 결정될 확률의 차이이므로

$$\left\{1 - \left(\frac{1}{3}\right)^k\right\}^n - \left\{1 - \left(\frac{1}{3}\right)^{k-1}\right\}^n$$

이다.

따라서 우리가 구하고자 하는 시간적 기댓값  $T_{(2n,n)}^{(\overbrace{2,2,\dots,2}^n)}$  을 이항정리를 이용하여 계산하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} T_{(2n,n)}^{(\overbrace{2,2,\dots,2}^n)} &= \sum_{k=1}^{\infty} k \left\{ \left(1 - \left(\frac{1}{3}\right)^k\right)^n - \left(1 - \left(\frac{1}{3}\right)^{k-1}\right)^n \right\} \\ &= \lim_{m \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^{m+1} k \left\{ \left(1 - \left(\frac{1}{3}\right)^k\right)^n - \left(1 - \left(\frac{1}{3}\right)^{k-1}\right)^n \right\} \\ &= \lim_{m \rightarrow \infty} \left\{ 1 \times \left(1 - \left(\frac{1}{3}\right)^1\right)^n - \left(1 - \left(\frac{1}{3}\right)^0\right)^n \right. \\ &\quad \left. + (m+1) \cdot \left(1 - \left(\frac{1}{3}\right)^{m+1}\right)^n - \left(1 - \left(\frac{1}{3}\right)^m\right)^n \right\} \\ &= \lim_{m \rightarrow \infty} \left[ (m+1) \cdot \left(1 - \left(\frac{1}{3}\right)^{m+1}\right)^n - \sum_{k=1}^m \left(1 - \left(\frac{1}{3}\right)^k\right)^n \right] \\ &= \lim_{m \rightarrow \infty} \left[ (m+1) \sum_{i=0}^n {}_nC_i \cdot (-1)^i \cdot \left(\frac{1}{3}\right)^{i(m+1)} - \sum_{k=1}^m \sum_{j=0}^n {}_nC_j \cdot (-1)^j \cdot \left(\frac{1}{3}\right)^{kj} \right] \\ &= \lim_{m \rightarrow \infty} \left[ (m+1) - m + (m+1) \cdot \sum_{i=1}^n {}_nC_i \cdot (-1)^i \cdot \left(\frac{1}{3}\right)^{i(m+1)} \right. \\ &\quad \left. - \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^n {}_nC_j \cdot (-1)^j \cdot \left(\frac{1}{3}\right)^{kj} \right] \end{aligned}$$

보조정리 9와 보조정리 10에 의하여  $m \rightarrow \infty$  일 때,

$$(m+1) \sum_{i=1}^n {}_nC_i \cdot (-1)^i \cdot \left(\frac{1}{3}\right)^{i(m+1)}$$

은 0으로 수렴하고,

$$\sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^n {}_nC_j \cdot (-1)^j \cdot \left(\frac{1}{3}\right)^{kj} \text{ 도 } \sum_{j=1}^n {}_nC_j \cdot (-1)^j \cdot \frac{1}{3^j - 1}$$

로 수렴한다. 따라서

$$T_{(2n,n)}^{(\overbrace{2,2,\dots,2}^n)} = \lim_{m \rightarrow \infty} \left[ (m+1) - m - \sum_{k=1}^m \left(\frac{1}{3}\right)^k \cdot {}_nC_1 \cdot (-1) - \sum_{k=1}^m \left(\frac{1}{3}\right)^{2k} \cdot {}_nC_2 \cdot (-1)^2 \right]$$



$$\dots - \sum_{k=1}^m \left( \frac{1}{3} \right)^{nk} \cdot {}_n C_n \cdot (-1)^n \Bigg]$$

$$= 1 - \sum_{i=1}^n \frac{\left( \frac{1}{3} \right)^i}{1 - \left( \frac{1}{3} \right)^i} \cdot {}_n C_i \cdot (-1)^i = 1 - \sum_{i=1}^n \frac{(-1)^i}{3^i - 1} \cdot {}_n C_i$$

이다.

이제  $a$ 명이  $k$ 번 이내에 1등이 결정될 확률을 구해보면 그 결과는 다음과 같다.

#### [정리 12]

$a$ 명이 함께 가위바위보 게임을 하였을 때,  $k$ 번 이내에 1등이 결정할 확률을  $P_k^a$ 라 하면,

$$P_k^a = \left( 1 - \frac{2^a - 2}{3^{a-1}} \right) P_{k-1}^a + \frac{1}{3^{a-1}} \left( \sum_{i=1}^{a-1} P_{k-1}^i \cdot {}_a C_i \right)$$

이다.

#### [증명]

$a$ 명이 첫 번째 게임을 한 이후 결과는 다음과 같다.

(i) 아무도 떨어지지 않을 경우

(ii) 1명 이상이 떨어질 경우

(i)의 경우가 발생할 확률은 1회에는 승부가 나지 않고 동시에, 남은  $k-1$ 회 이내에 1등이 결정되어야 하므로  $\left( 1 - \frac{2^a - 2}{3^{a-1}} \right) P_{k-1}^a$ 로 나타낼 수 있다.

(ii)의 경우에는 1명, 2명,  $\dots$ ,  $(a-1)$ 명이 떨어질 경우로 나눌 수 있는데,  $i$ 명이 떨어질 확률은 정리 7에 의해  $\frac{{}_a C_i}{3^{a-1}}$ 이므로  $i$ 명이 떨어지고, 이긴  $(a-i)$ 명이  $(k-1)$ 회 이내에 1등이 결정되어야 하므로

$$\sum_{i=1}^{a-1} P_{k-1}^{a-i} \cdot \frac{{}_a C_i}{3^{a-1}} = \frac{1}{3^{a-1}} \left( \sum_{i=1}^{a-1} P_{k-1}^{a-i} \cdot {}_a C_i \right) = \frac{1}{3^{a-1}} \left( \sum_{i=1}^{a-1} P_{k-1}^i \cdot {}_a C_i \right)$$

이다.  $P_k^a$ 는 (i)의 확률과 (ii)의 확률을 더한 값이므로

$$P_k^a = \left( 1 - \frac{2^a - 2}{3^{a-1}} \right) P_{k-1}^a + \frac{1}{3^{a-1}} \left( \sum_{i=1}^{a-1} P_{k-1}^i \cdot {}_a C_i \right)$$

이다.

정리 11과 정리 12를 이용하여 다음을 증명한다.

[정리 13]

가위바위보 게임에서  $n$  명의 사람들을  $A_1, A_2, \dots, A_{k-1}, A_k$ 의  $k$ 개 조로 나누고 각 조의 인원수를 각각  $a_1, a_2, \dots, a_{k-1}, a_k$  라 하면

$$T_{(n,k)}^{(a_1, \dots, a_k)} = \sum_{m=1}^{\infty} m \left( \prod_{i=1}^k P_m^{a_i} - \prod_{i=1}^k P_{m-1}^{a_i} \right)$$

이다.

[증명]

$n$ 명이 가위바위보 게임에서  $m$  회째 1등이 결정될 확률은 모든 조가  $m$  회 이내 1등이 결정될 확률에서 모든 조가  $m-1$  회 이내 1등이 결정될 확률을 뺀 것과 같다. 또한,  $1 \leq i \leq m$ 에 대하여  $A_i$ 조에서  $m$  회 이내 1등을 결정할 확률은  $P_m^{a_i}$  이고 각 조 내에서  $m$  회 이내 1등을 결정하는 각각의 사건은 독립사건이므로 모든 조에서  $m$  회 이내 1등을 결정할 확률은  $\prod_{i=1}^k P_m^{a_i}$  이다. 따라서  $n$ 명이 가위바위보 게임에서  $m$  회째 1등을 결정할 확률은

$$\prod_{i=1}^k P_m^{a_i} - \prod_{i=1}^k P_{m-1}^{a_i}$$

이다. 그러므로

$$T_{(n,k)}^{(a_1, \dots, a_k)} = \sum_{m=1}^{\infty} m \left( \prod_{i=1}^k P_m^{a_i} - \prod_{i=1}^k P_{m-1}^{a_i} \right)$$

이다.

정리 13에 의하여 다음을 얻을 수 있다.

[정리 14]

$n$  명의 사람을  $k$ 개의 조  $A_1, A_2, \dots, A_k$ 로 나누고, 각 조에 포함되어 있는 사람의 수를  $a_1, a_2, \dots, a_k$  라고 하자.  $1 \leq s, t \leq k (s \neq t)$  이고,  $a_s < a_t$  인 자연수 쌍  $(s, t)$ 가 존재하고  $(P_n^a)^2 \geq P_n^{a+1} P_n^{a-1}$  이면

$$T_{(n,k)}^{(a_1, a_2, \dots, a_s, \dots, a_t, \dots, a_k)} \geq T_{(n,k)}^{(a_1, a_2, \dots, a_s+1, \dots, a_t-1, \dots, a_k)}$$

이 성립한다.

[증명]

$$T = T_{(n,k)}^{(a_1, a_2, \dots, a_s, \dots, a_t, \dots, a_k)}, \quad T^* = T_{(n,k)}^{(a_1, a_2, \dots, a_s+1, \dots, a_t-1, \dots, a_k)}$$

라 하고 수열  $b_n$  은 수열  $\{a_n\} = \{a_1, a_2, \dots, a_k\}$  에서

$$a_s \rightarrow a_s + 1, \quad a_t \rightarrow a_t - 1$$

으로 바꾸어 얻은 수열이라고 하자. 정리 13에 의하여

$$T = \sum_{m=1}^{\infty} m \left( \prod_{i=1}^k P_m^{a_i} - \prod_{i=1}^k P_{m-1}^{a_i} \right), \quad T^* = \sum_{m=1}^{\infty} m \left( \prod_{i=1}^k P_m^{b_i} - \prod_{i=1}^k P_{m-1}^{b_i} \right)$$

이다. 이제  $P_m^{a_{rest}} = P_m^{a_1} P_m^{a_2} \dots P_m^{a_{s-1}} P_m^{a_{s+1}} \dots P_m^{a_{t-1}} P_m^{a_{t+1}} \dots P_m^{a_k}$  라 하면,

$$\begin{aligned} T &= \sum_{m=1}^{\infty} m \left( \prod_{i=1}^k P_m^{a_i} - \prod_{i=1}^k P_{m-1}^{a_i} \right) \\ &= \sum_{m=1}^{\infty} m (P_m^{a_{rest}} P_m^{a_s} P_m^{a_t} - P_{m-1}^{a_{rest}} P_{m-1}^{a_s} P_{m-1}^{a_t}) \end{aligned}$$

이고

$$\begin{aligned} T^* &= \sum_{m=1}^{\infty} m \left( \prod_{i=1}^k P_m^{b_i} - \prod_{i=1}^k P_{m-1}^{b_i} \right) \\ &= \sum_{m=1}^{\infty} m (P_m^{b_{rest}} P_m^{b_s} P_m^{b_t} - P_{m-1}^{b_{rest}} P_{m-1}^{b_s} P_{m-1}^{b_t}) \end{aligned}$$

이다. 정의에 의해  $P_m^{a_{rest}} = P_m^{b_{rest}}, P_{m-1}^{a_{rest}} = P_{m-1}^{b_{rest}}$  가 성립하므로

$$\begin{aligned} T - T^* &= \sum_{m=1}^{\infty} m (P_m^{a_{rest}} (P_m^{a_s} P_m^{a_t} - P_m^{a_s+1} P_m^{a_t-1}) - P_{m-1}^{a_{rest}} (P_{m-1}^{a_s} P_{m-1}^{a_t} - P_{m-1}^{a_s+1} P_{m-1}^{a_t-1})) \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{m=1}^n m (P_m^{a_{rest}} (P_m^{a_s} P_m^{a_t} - P_m^{a_s+1} P_m^{a_t-1}) - P_{m-1}^{a_{rest}} (P_{m-1}^{a_s} P_{m-1}^{a_t} - P_{m-1}^{a_s+1} P_{m-1}^{a_t-1})) \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} n P_n^{a_{rest}} (P_n^{a_s} P_n^{a_t} - P_n^{a_s+1} P_n^{a_t-1}) - \sum_{i=1}^n P_i^{a_{rest}} (P_i^{a_s} P_i^{a_t} - P_i^{a_s+1} P_i^{a_t-1}) \end{aligned}$$

이다.  $(P_n^a)^2 \geq P_n^{a+1} P_n^{a-1}$  이므로  $\frac{P_n^a}{P_n^{a+1}} \geq \frac{P_n^{a-1}}{P_n^a}$  이 성립한다. 따라서

$$\frac{P_n^1}{P_n^2} \leq \frac{P_n^2}{P_n^3} \leq \dots \leq \frac{P_n^{a_s}}{P_n^{a_s+1}} \leq \dots \leq \frac{P_n^{a_t-1}}{P_n^{a_t}}$$

이므로  $P_n^{a_s} P_n^{a_t} \leq P_n^{a_s+1} P_n^{a_t-1}$  이 성립한다. 그러므로

$$T^* - T = \lim_{n \rightarrow \infty} n P_n^{a_{rest}} (P_n^{a_s+1} P_n^{a_t-1} - P_n^{a_s} P_n^{a_t}) - \sum_{i=1}^{n-1} P_i^{a_{rest}} (P_i^{a_s+1} P_i^{a_t-1} - P_i^{a_s} P_i^{a_t})$$

이다.

$P_n^{a_s} P_n^{a_t} \leq P_n^{a_s+1} P_n^{a_t-1}$  이므로  $P_i^{a_{rest}} (P_i^{a_s+1} P_i^{a_t-1} - P_i^{a_s} P_i^{a_t})$  은 항상 양의 값을 갖는다.

이를 이용하면

$$\begin{aligned} 0 &\leq \lim_{n \rightarrow \infty} n P_n^{a_{rest}} (P_n^{a_s+1} P_n^{a_t-1} - P_n^{a_s} P_n^{a_t}) \\ &\leq \lim_{n \rightarrow \infty} n (P_n^{a_s+1} P_n^{a_t-1} - P_n^{a_s} P_n^{a_t}) \\ &\leq \lim_{n \rightarrow \infty} n (P_n^{a_s+1} P_n^{a_t-1} - P_n^{a_s+1} P_n^{a_t}) \\ &\leq \lim_{n \rightarrow \infty} n (P_n^{a_t-1} - P_n^{a_t}) \leq 0 \end{aligned}$$

이므로  $\lim_{n \rightarrow \infty} n P_n^{a_{rest}} (P_n^{a_s+1} P_n^{a_t-1} - P_n^{a_s} P_n^{a_t}) = 0$  이다.

그러므로  $T^* - T \leq 0$  이 성립한다.

#### 4. 조편성이 있는 1위 결정전의 수치적 결과

##### 〈C 프로그램〉

```
#include<stdio.h>
#include<math.h>
FILE *out = fopen("output.txt","w");
int n, k, N, K, H[1001];
double T[1001][1001], sigma, error, expe, com, res1, res2, res;
int combi(int x, int y){
    unsigned int a=1;
    int i, b=1, c=1;
    for(i=1;i<=x;i++) a*=i;
    com=a;
    for(i=1;i<=y;i++) com=com/i;
    for(i=1;i<=x-y;i++) com=com/i;
```

```

        return com;
    }
    int cal(int x, int y){
        int i;
        double sum=0;
        for(i=1;i<=y-1;i++){
            combi(y,i);
            sum+=com*T[x-1][i];
        }
        sigma=sum;
        return 0;
    }
    int input(){
        int i, j, l;
        for(i=1;i<=250;i++) T[1][i]=(float)(i/pow(3,i-1));
        for(i=1;i<=250;i++) T[i][1]=1;
        for(i=2;i<=250;i++){
            for(j=2;j<=250;j++){
                cal(i, j);

T[i][j]=T[i-1][j]*(1-((pow(2,j)-2)/pow(3,j-1)))+(1/pow(3,j-1))*sigma;
            }
        }
        return 0;
    }
    int phi(int group){
        int i;
        res1=res2=1;
        for(i=1;i<=K;i++) res1*=T[group][H[i]];
        for(i=1;i<=K;i++) res2*=T[group-1][H[i]];
        res=res1-res2;
    }

```

```

    return 0;
}
int main(){
    int i, l;
    input();
    while(K!=1){
        scanf("%d %d",&N,&K);
        if(N!=0) {
            for(i=1;i<=K;i++) scanf("%d",&H[i]);
            l=1;
            while(l<250){
                phi(l);
                expe+=l*res;
                l++;
            }
        }
        else break;
    }
    printf("%f",expe);
}

```

#### [정의 4]

가위바위보 게임에서  $n$ 명이 가위바위보 게임을 할 때 한꺼번에 혹은 조를 나누어서 게임을 하든지 1등을 뽑을 때 가장 최소의 시간이 걸릴 때의 시간적 기댓값을  $M_n$ 으로 나타내기로 한다.

정리 13을 이용하여 가위바위보 게임을 할 때 여러 가지 방법에 대한 시간적 기댓값을 구해보고 1등이 결정되는데 걸리는 시간에 대한 최소의 기댓값을 구해보면 다음과 같다.

참여인원	조 편성	1등이 결정되는데 걸리는 시간의 기댓값
4	4명이 한 조임	$T_{(4,1)}^{(4)} = 3.214$
	2:2로 나눔	$T_{(4,2)}^{(2,2)} + M_2 = 1.875 + 1.5 = 3.375$

[표 4] 4명이 게임을 할 때 걸리는 시간의 기댓값

[표 4]에 의하여 4명이 가위바위보 게임을 할 때 4명이 함께 게임을 하는 것이 더 빨리 1등을 결정할 수 있을 것으로 기대할 수 있다. 따라서  $M_4 = T_{(4,1)}^{(4)} = 3.214$ 임을 알 수 있다.

참여인원	조 편성	1등이 결정되는데 걸리는 시간의 기댓값
5	5명이 한 조임	$T_{(5,1)}^{(5)} = 4.485714$
	2:3으로 나눔	$T_{(5,2)}^{(2,3)} + M_2 = 2.484375 + 1.5 = 3.984375$

[표 5] 5명이 게임을 할 때 걸리는 시간의 기댓값

[표 5]에 의하여 5명이 가위바위보 게임을 할 때 2명과 3명의 두 조로 나누어 게임을 하는 것이 더 빨리 1등을 결정할 수 있을 것으로 기대할 수 있다. 따라서  $M_5 = T_{(5,2)}^{(2,3)} + M_2 = 3.984375$ 임을 알 수 있다.

참여인원	조 편성	1등이 결정되는데 걸리는 시간적 기댓값
6	6명이 한 조임	$T_{(6,1)}^{(6)} = 6.219816$
	2:4로 나눔	$T_{(6,2)}^{(2,4)} + M_2 = 3.349396 + 1.5 = 4.849396$
	3:3으로 나눔	$T_{(6,2)}^{(3,3)} + M_2 = 2.67969 + 1.5 = 4.17969$
	2:2:2로 나눔	$T_{(6,3)}^{(2,2,2)} + M_3 = 2.163462 + 2.25 = 4.413462$

[표 6] 6명이 게임을 할 때 걸리는 시간의 기댓값

[표 6]에 의하여 6명이 가위바위보 게임을 할 때 2명씩 세 조로 나누어 게임을 하는 것보다 3명과 3명의 두 조로 나누어 게임을 하는 것이 더 빨리 1등을 결정할 수 있을 것으로 기대할 수 있다. 따라서  $M_6 = T_{(6,2)}^{(3,3)} + M_2 = 4.17969$ 임을 알 수 있다.

참여인원	조 편성	1등이 결정되는데 걸리는 시간의 기댓값
7	7명이 한 조임	$T_{(7,1)}^{(7)} = 8.646736$
	2:5로 나눔	$T_{(7,2)}^{(2,5)} + M_2 = 4.560034 + 1.5 = 6.060034$
	3:4으로 나눔	$T_{(7,2)}^{(3,4)} + M_2 = 3.633728 + 1.5 = 5.133728$
	2:2:3로 나눔	$T_{(7,3)}^{(2,2,3)} + M_3 = 2.672152 + 2.25 = 4.922152$

[표 7] 7명이 게임을 할 때 걸리는 시간의 기댓값

[표 7]에 의하여 7명이 가위바위보 게임을 할 때 2명, 2명, 3명의 세 조로 나누어 게임을 하는 것이 더 빨리 1등을 결정할 수 있을 것으로 기대할 수 있다. 따라서  $M_7 = T_{(7,3)}^{(2,2,3)} + M_3 = 4.922152$ 임을 알 수 있다.

참여인원	조 편성	1등이 결정되는데 걸리는 시간의 기댓값
8	8명이 한 조임	$T_{(8,1)}^{(8)} = 12.104444$
	2:6으로 나눔	$T_{(8,2)}^{(2,6)} + M_2 = 6.259569 + 1.5 = 7.759569$
	3:5로 나눔	$T_{(8,2)}^{(3,5)} + M_2 = 4.735351 + 1.5 = 6.235351$
	4:4로 나눔	$T_{(8,2)}^{(4,4)} + M_2 = 5.180601 + 1.5 = 6.680601$
	2:2:4으로 나눔	$T_{(8,3)}^{(2,2,4)} + M_3 = 3.461873 + 2.25 = 5.711873$
	2:3:3으로 나눔	$T_{(8,3)}^{(2,3,3)} + M_3 = 3.048075 + 2.25 = 5.298075$
	2:2:2:2로 나눔	$T_{(8,4)}^{(2,2,2,2)} + M_4 = 2.391346 + 3.214286 = 5.605632$

[표 8] 8명이 게임을 할 때 걸리는 시간의 기댓값

[표 8]에 의하여 8명이 가위바위보 게임을 할 때 4명씩 두 조로 나누거나 2명씩 네 조로 나누어 게임을 하는 것보다 2명, 3명, 3명의 세 조로 나누어 게임을 하는 것이 더 빨리 1등을 결정할 수 있을 것으로 기대할 수 있다. 따라서  $M_8 = T_{(8,3)}^{(2,3,3)} + M_3 = 5.298075$ 임을 알 수 있다.

참여인원의 수가 늘어나면 참여인원을 나누는 조 편성의 경우가 점점 늘어나게 된다. 참여인원이 9명에서 18명인 경우에 대한 1등이 결정되는 최소 시간에 대한 기댓값을 정리하면 다음과 같다.

참여인원	최상의 조 편성	1등이 결정되는데 걸리는 최소 시간의 기댓값
9	3:3:3으로 나눔	$M_9 = T_{(9,3)}^{(3,3,3)} + M_3 = 5.590742$
10	3:3:4로 나눔	$M_{10} = T_{(10,3)}^{(3,3,4)} + M_3 = 6.173140$
11	3:4:4로 나눔	$M_{11} = T_{(11,3)}^{(3,4,4)} + M_3 = 6.638012$
12	3:3:3:3으로 나눔	$M_{12} = T_{(12,4)}^{(3,3,3,3)} + M_4 = 6.85907$
13	3:3:3:4로 나눔	$M_{13} = T_{(13,4)}^{(3,3,3,4)} + M_4 = 7.35845$
14	2:2:2:2:3:3으로 나눔	$M_{14} = T_{(14,6)}^{(2,2,2,2,3,3)} + M_6 = 7.521815$
15	2:2:2:3:3:3으로 나눔	$M_{15} = T_{(15,6)}^{(2,2,2,3,3,3)} + M_6 = 7.748519$
16	2:2:3:3:3:3으로 나눔	$M_{16} = T_{(16,6)}^{(2,2,3,3,3,3)} + M_6 = 7.941517$
17	2:3:3:3:3:3으로 나눔	$M_{17} = T_{(17,6)}^{(2,3,3,3,3,3)} + M_6 = 8.108957$
18	3:3:3:3:3:3으로 나눔	$M_{18} = T_{(18,6)}^{(3,3,3,3,3,3)} + M_6 = 8.25642$

[표 9] 9명부터 18명까지 게임을 할 때 걸리는 시간의 기댓값

[표 9]는 15명이 가위바위보 게임을 할 때 3명씩 다섯 조를 만들어 게임을 하는 것보다 2명씩 세 조와 3명씩 세 조로 나누어 게임을 하는 것이 더 효율적임을 설명한다. 반면 18명이 가위바위보 게임을 할 때는 모든 조의 인원을 3명으로 하여 여섯 조를 만들어 게임을 하는 것이 가장 효율적임을 보여주고 있는데 이 결과들로부터 게임의 효율성을 수학적으로 완벽한 공식을 이용하여 설명하기



어려울 것이라고 예측할 수 있다.

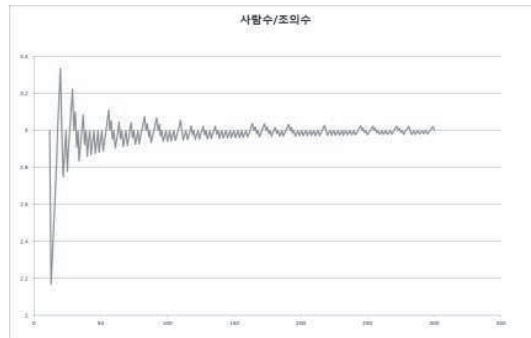
참여인원에 따른 가장 효율성 높은 조 편성방법을 해석적 방법으로 구하기는 어려울 것으로 판단하여 우리는 통계적인 방법으로 결과를 분석해 보았다. 컴퓨터 프로그램을 사용하여  $n$ 명(단,  $24 \leq n \leq 98$ )이 참여한 가위바위보 게임에서 시간을 최소화하여 1등을 선정할 수 있는 조의 개수를 구하였고 그 결과는 다음과 같았다.

$n$	조의 수	$n/\text{조의 수}$	$n$	조의 수	$n/\text{조의 수}$	$n$	조의 수	$n/\text{조의 수}$
24	8	3	49	17	2.88	74	25	2.96
25	9	2.78	50	17	2.94	75	25	3
26	9	2.89	51	17	3	76	26	2.92
27	9	3	52	18	2.89	77	26	2.96
28	9	3.11	53	18	2.94	78	26	3
29	9	3.22	54	18	3	79	27	2.93
30	10	3	55	18	3.06	80	27	2.96
31	10	3.1	56	18	3.11	81	27	3
32	11	2.91	57	19	3	82	27	3.04
33	11	3	58	19	3.05	83	27	3.07
34	12	2.83	59	20	2.95	84	28	3
35	12	2.92	60	20	3	85	28	3.04
36	12	3	61	21	2.90	86	29	2.97
37	12	3.08	62	21	2.95	87	29	3
38	13	2.92	63	21	3	88	30	2.93
39	13	3	64	21	3.05	89	30	2.97
40	14	2.86	65	22	2.95	90	30	3
41	14	2.93	66	22	3	91	30	3.03
42	14	3	67	23	2.91	92	30	3.07
43	15	2.87	68	23	2.96	93	31	3
44	15	2.93	69	23	3	94	31	3.03
45	15	3	70	24	2.92	95	32	2.97
46	16	2.88	71	24	2.96	96	32	3
47	16	2.94	72	24	3	97	33	2.94
48	16	3	73	24	3.04	98	33	2.97

[표 10] 게임에 참여한 인원수와 최적의 조의 수의 비율

[표 10]에서 알 수 있듯이 게임에 참여한 사람의 수를 1등이 결정되는 시간적 기댓값을 최소로 하게 하는 조의 수로 나누면 그 값이 3에 수렴해 가고 있음을 추론할 수 있다.

이 결과를 그래프로 나타내면 다음과 같다.



[그림 2] 가로축은 인원수, 세로축은 인원수를 조의 수로 나눈 값의 그래프

## Ⅳ. 결론 및 토의

우리는 이번 연구에서 전 세계의 모든 사람들이 알고 있는 게임인 가위바위보 게임에 대한 효율성을 알아보았다. 여러 사람이 모여 공평하게 1등을 결정해야할 때 자주 사용하는 게임 중 하나인 가위바위보 게임에 대한 연구는 극히 미미하게 진행되었으며 진행된 연구도 특별한 경우에 대한 사례 정도만 확인을 하는 정도였다.

효율성의 문제는 공학에서 뿐만이 아니라 경영, 경제 등의 인문분야에서도 주된 연구과제 중의 하나이다. 예를 들어 경제학에서 다루는 최소비용의 문제나 최대 효과의 문제도 효율성에 관한 문제라 할 수 있다.

한 학급의 인원이 모두 모여 1등을 정하기 위한 방법으로 가위바위보 게임을 할 때 모두가 모여서 함께 하거나 학급의 인원을 모두 최소단위인 2명씩으로 나눈 후 게임을 하는 경우 1등을 정하는데 적지 않은 시간이 걸리는 경험을 누구나 하였을 것이므로 우리는 본 연구에서 어떻게 인원을 나누어 가위바위보 게임을 하면 게임시간을 최소화할 수 있는지에 대하여 수학적 연구를 하였다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

우리는 우선 4명이 모여 가위바위보 게임을 할 때 4명이 함께 가위바위보 게임을 하여 1등을 결정하는 경우와 2명씩 조를 나눠 1등을 결정한 후 각 조의 1등이 모여 최종적인 1등을 결정하는데 걸리는 시간의 기댓값을 구하였더니 예상과 달리 4명이 함께 가위바위보 게임을 하는 것이 1등을 더 빠르게 결정하는 방법임을 확인하였다.

우리는 기존의 결과를 일반화한 다양한 결과를 얻었다. 우선  $n$  명의 사람이 모여 조편성 없이 1등을 정하는 가위바위보 게임을 할 때 시간적 기댓값이 귀납적인 공식  $T_{(n,1)}^{(n)} = D_n + \sum_{k=1}^{n-1} \frac{n C_k}{2^n - 2} T_{(k,1)}^{(k)}$ 으로 설명됨을 입증하였다. 이 식을 이용하여 컴퓨터 프로그램을 만들어 실행하여 보니 사람수가 늘어나면 시간적 기댓값은 당연히 증가하지만 증가되는 시간이 불규칙하지 않고  $n$  명에서  $(n+1)$  명으로 늘어날 때 대부분 1.4배에서 1.5배씩 늘어남을 확인하였다.

또한  $n$  명의 사람을 여러 개의 조로 나누어 1등이 정해지는 최소의 시간적 기댓값을 구하는 공식도 증명하였다. 즉, 가위바위보 게임에서  $n$  명의 사람들이 모여 있고 이 사람들을  $A_1, A_2, \dots, A_{k-1}, A_k$ 의  $k$ 개 조로 나누고 각 조의 인원수를 각각  $a_1, a_2, \dots, a_k$ 라 하면 시간적 기댓값은

$$T_{(n,k)}^{(a_1, \dots, a_k)} = \sum_{m=1}^{\infty} m \left( \prod_{i=1}^k P_m^{a_i} - \prod_{i=1}^k P_{m-1}^{a_i} \right)$$

이 됨을 보였다. 이 식의 결과를 바탕으로 4명에서 98명의 사람들이 모여 게임을 한 각각의 경우에 대하여 여러 개의 조로 나누어 게임을 하여 1등을 결정하는데 걸리는 시간적 기댓값을 확인하여 보니 모인 사람수를 최소의 시간적 기댓값을 보이는 조의 수로 나눈 값이 3으로 수렴해 가는 것을 확인하였다.

또한 우리는  $n$  명의 사람들을  $k$ 개의 조  $A_1, A_2, \dots, A_k$ 로 나누고, 각 조에 포함되어 있는 사람의 수가 각각  $a_1, a_2, \dots, a_k$ 일 때  $a_s < a_t$ 인 자연수 쌍  $(s, t)$ 가 존재하고  $(P_n^a)^2 \geq P_n^{a+1} P_n^{a-1}$ 이면  $T_{(n,k)}^{(a_1, a_2, \dots, a_s, \dots, a_t, \dots, a_k)} \geq T_{(n,k)}^{(a_1, a_2, \dots, a_s+1, \dots, a_t-1, \dots, a_k)}$ 이 성립함을 보였는데 이 결과는 최적의 시간적 기댓값을 구할 수 있는 방안을 제시함을 제공한다.

이와 같이 우리는 가위바위보 게임에 대한 다양한 이론적 결과를 수학적으로 증명하였고 또한 C 프로그램을 이용하여 수치적인 결과도 분석하였다. 비록 가위바위보 게임에 관한 연구가 많은 수학자들의 연구 분야는 아니지만 우리가 한 연구의 진행과정은 다양한 분야에서 효율성에 대한 연구를 진행할 때 수학적 토대를 제공할 것으로 기대한다.

## ■ 참고문헌

- [1] 사울 스탈, 게임이론(A gentle introduction to game theory), 1999, 경문사
- [2] 조대현, 김병수, Method of Choosing One in the Doubles through the Game of Rock-Paper-Scissors, 2012
- [3] 홍성준과 이준석, 카이스트 사이버 영재 과제, 2006
- [4] <http://bindung.egloos.com/4422991>

## 심사평

n 명의 사람이 가위 바위 보 게임을 하여 가장 빠른 시간에 1위를 결정하기 위해 서는 조편성하여 게임을 진행하는 것이 좋다는 사실을 밝힌 논문이다.

비록 가장 효율적인 방법을 증명하지는 못했지만 많은 계산을 통하여 귀납적인 결론과 계산 알고리즘을 발견하였다.

[1] 4명이 진행할 때는 4명이 함께 1등을 결정하는 경우가 2명씩 조를 나눠 1등을 결정 후 각조의 1등이 모여 최종적인 1등을 결정하는 것보다 빠르다는 사실을 밝혔다.

[2] n 명이 조편성하지 않고 진행하는 경우는 (n+1)명이 조편성하지 않고 진행하는 경우보다 대부분 1.4배에서 1.5배씩 늘어남을 귀납적으로 확인하였다.

[3] n 명이 여러 개의 조로 나누어 진행할 때 1등이 정해지는 시간적 기댓값을 계산하였다.

[4] 4명에서 98명까지의 게임에서 1등이 정해지는 시간적 기댓값을 확인하여 모인 사람 수를 최소의 시간적 기댓값이 되는 조의 수로 나눈 값이 3으로 수렴함을 확인하여 대략 3명씩 조를 나누는 것이 (어떤 의미에서) 최적이라는 발견을 하였다. 앞서 언급한 결과는 흥미있는 결과로서 게재할 가치가 충분하다고 생각한다.

## 연구 후기

‘조편성을 통한 가위바위보게임의 효율성 연구’라는 주제를 생각하는데 조금은 긴 시간이 걸렸습니다. 우리 팀은 초반에 주제선정에 많은 고심을 하다가 평소에 자주 하는 간단한 게임 중 하나가 가위바위보게임인데 빠른 시간 내에 승부가 나지 않아서 많은 불편함이 있다는 것을 생각하게 되었습니다. 사람이 많아지면 몇몇을 나눠서 가위바위보 게임을 진행하게 되는데 그럼에도 불구하고 각 조마다 게임이 끝나는 시간이 다르고 그러면 이런 것들이 최종 게임이 끝나는 시간에 어떻게 영향을 줄 것인가 하는 의문에서부터 출발하게 되었습니다. 따라서 우리 팀은 어떻게 조를 구성해야 가위바위보가 빨리 승부가 날 것인지에 대해 연구를 시작했습니다. 본격적으로 연구를 시작하면서 어떤 결론을 이끌어내야 하는지도 고민해야 했습니다. 게다가 이 주제에 선행된 연구가 많지 않았기에 더 어려움을 겪었습니다. 본 연구에서는 ‘시간적 기댓값’이란 용어를 정의하고 가위바위보게임에서의 효율을 기댓값과 대응시켰습니다. 본 연구 결과는 각 조에 배치된 인원이 3명에 근접할수록 승부가 빨리 결정된다는 것입니다. 저희는 이것을 완전한 수학적 과정으로 증명을 해야 했습니다. 수식을 정리하는 도중에 기호가 중복되거나 혼동했던 수학적 개념들을 다시 공부하면서 저희 연구를 더욱 진전시켰습니다. 특히, 수열의 수렴성을 판단하는 과정에서 길고 복잡했던 수식을 간단히 하는데 도움이 되었습니다. 이 과정에서 연구를 진행하는데 어려움을 겪었다고도 할 수 있는데 저희 팀은 역할분담을 확실히 하여 서로의 힘든 상황을 함께해 주었습니다. 또한 이런 저희의 모습들이 팀워크도 향상시켜주고 동기부여가 되었다고 생각합니다. 그렇게 6달 정도가 지나고 최종적인 연구결과가 나왔을 때는 정말 다행스럽기도 하고 뿌듯했습니다. 또한 창의재단 연구발표대회에서도 저명한 교수님들께 인정을 받고 학술지 게재후보로도 올랐기에 그동안 했던 노력들이 열매를 맺었다는 것이 의미 있었습니다. 후에도 다시 연구를 시작하게 된다면 전에 연구를 진행하면서 아쉬웠던 부분이나 더 일반화하고 싶은 부분들을 연구할 것이고 가위바위보게임 뿐만 아니라 어떤 작업이나 일에 있어서 효율을 일반적으로 증가시키는 것에 대해 연구해 보고자 합니다. 마지막으로 연구에 도움을 주신 지도 선생님과 지도 교수님께 다시 한 번 감사드리고 팀을 위해 끝까지 노력해준 팀원들에게도 감사드립니다.



## 연구진

안지수(Ahn Jisoo, 인천과학고등학교 1학년, dkswltn525@naver.com), 교신저자

김재민(Kim Jaemin, 인천과학고등학교 1학년, jjumin98@naver.com)

장충재(Jang Chungjae, 인천과학고등학교 1학년, catty0116@naver.com)

조용중(Cho Youngjung, 인천과학고등학교 1학년, 98mathgod@naver.com)

한현우(Han Hyeonwoo, 인천과학고등학교 1학년, hhw0526@naver.com)

지도교사 : 양순규(Yang Soongyu, 인천과학고등학교, 전공: 수학, yang8753@hanmail.net)

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

(2015. 1월 현재)

## 3차 펠방정식의 해에 관한 연구 (On the solutions of cubic Pell equations)

채지석 · 류인영 · 천승환 · 문현우 · 최백규(전북과학고등학교)

### 초 록

In this paper, we introduce the methods of finding solutions of cubic Pell equations  $x^3 + dy^3 + d^2z^3 - 3dxyz = 1$ , which is an open problem in number theory. We apply the method of solving Norm Form Diophantine equations, since all cubic Pell equations are a kind of Norm Form Diophantine equations. We first discuss our new method of finding fundamental solutions of cubic Pell equations. Then we will show that some cases of cubic Pell equations are easier than others to find fundamental solutions, and what forms have in those easy cases. We will also discuss how we find solutions of cubic Pell equations using solutions of other cubic Pell equations. In the third section we will discuss the relationship between Delaunay–Nagell Equations and cubic Pell equations, and which and how Delaunay–Nagell Equations can be used on solving cubic Pell equations.

Keywords : Norm Form, Diophantine equation, Group, Cubic Pell equation, Delaunay–Nagell equation

## 1. INTRODUCTION

Pell's equation has been studied since the pre-Christ era. Baudhāyana, an Indian mathematician mentioned the rational approximation of  $\sqrt{2}$  in his writing. The approximation is as follows:

$$\sqrt{2} \approx 1 + \frac{1}{3} + \frac{1}{3 \times 4} - \frac{1}{3 \times 4 \times 34}$$

It is surmised to be induced from quadratic Pell's equation when  $n = 2$ . The rational approximation of  $\sqrt{3}$ , found by Archimedes, is also induced by using Pell equation. The history of Pell's equation in Europe began in the 17th century, when Pierre de Fermat

suggested a problem about Pell's equation. William Brouncker, a British mathematician found a solution of the problem for the first time, then Lagrange proved that number of solutions of Pell's equations are infinite and it can be found by Brouncker's method. At this time Leonhard Euler confused two British mathematicians, Brouncker and John Pell, and named the equation 'Pell's equation', though Pell had nothing to do with it.

We can solve quadratic Pell equations by using continued fractions of a square root of an integer. But finding a continued fraction form of a cubic root of an integer is a difficult task, and solving a cubic Pell equation using continued fractions is complex. In [1], Edward J. Barbeau introduced a method of solving a cubic Pell equation, but that method is quite inefficient. So we studied about the solutions of cubic Pell equations, and we found the method to find them. With this method, we are able to solve cubic Pell equations without using continued fractions.

First we define the norm form. Let  $p(x)$  be a monic irreducible polynomial of degree  $n$  with integer coefficients, and suppose that the equation  $p(x) = 0$  has  $n$  distinct roots,

$$\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n.$$

The function

$$f(\lambda) = \prod_{i=1}^n (x_0 + x_1\theta_i + x_2\theta_i^2 + \dots + x_{n-1}\theta_i^{n-1})$$

with  $\lambda = (x_0, x_1, \dots, x_{n-1})$  is a polynomial with  $n$  variables  $x_0, x_1, \dots, x_{n-1}$  with real coefficients is the norm form of  $p(x)$  [2, p.79].

If a monic polynomial  $p(x)$  has only integer coefficients, then the coefficient of  $x_0^{\epsilon_0} x_1^{\epsilon_1} x_2^{\epsilon_2} \dots x_{n-1}^{\epsilon_{n-1}}$  is a symmetric equation of  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$ . Hence the norm form of  $p(x)$  is a polynomial with integer coefficients. As a result we can define the Norm Form Diophantine equation [8].

Definition 1. (Norm Form Diophantine equation) Let  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$  be the distinct roots of a monic irreducible polynomial  $p(x)$  with integer coefficients. Then

$$\begin{aligned} f(\lambda) &= \prod_{i=1}^n (x_0 + x_1\theta_i + x_2\theta_i^2 + \dots + x_{n-1}\theta_i^{n-1}) \\ &= D(x_0, x_1, x_2, \dots, x_{n-1}) \end{aligned}$$

with  $\lambda = (x_0, x_1, x_2, \dots, x_{n-1})$  is a norm form of  $p(x)$ . We call

$$D(x_0, x_1, x_2, \dots, x_{n-1}) = m$$

a Norm Form Diophantine equation of  $p(x)$  with  $n$  variables  $x_0, x_1, \dots, x_{n-1}$  of degree  $n$ .

From now on, the Norm Form Diophantine equation means that of  $p(x)$ . There are many Norm Form Diophantine equations. For example, the Norm Form Diophantine equation of  $p(x) = x^2 - d$  with  $\Lambda = (x, y)$  is

$$D(x, y) = (x - \sqrt{d}y)(x + \sqrt{d}y) = x^2 - dy^2 = 1.$$

So a quadratic Pell equation is also a Norm Form Diophantine equation. Now we can define the cubic Pell equation as the Norm Form Diophantine equation of  $p(x) = x^3 - d$  and  $m = 1$ . By simple calculation we can show that the cubic Pell equations are of the form,

$$x^3 + dy^3 + d^2y^3 - 3dxyz = 1$$

where  $d$  is not cubic integer [2, p.82].

Definition 2. (Group) A group is a set,  $G$ , which, with an operation  $\cdot$ , satisfies the following four properties.

- 1) For all  $g$  and  $h$  in  $G$ , the result of an operation is in  $G$ .
- 2) For any element  $g, h, k$  in group  $G$ ,  $(g \cdot h) \cdot k = g \cdot (h \cdot k)$  holds.
- 3) There exists  $e$ , which is called as an Identity element, In group  $G$ , such that for every element  $g$  in  $G$ , the equation  $e \cdot g = g \cdot e = g$  holds.
- 4) For every  $g$  in  $G$ , there exists  $x$ , which is called as an Inverse element, such that  $g \cdot x = x \cdot g = e$  where  $e$  is the identity element.

The fact that the set of all solutions of Norm Form Diophantine equation when  $m = \pm 1$  forms a group is proven in [8]. This means that the set of solutions satisfies the properties of group.

Definition 3. If  $\lambda = (a_0, a_1, a_2, \dots, a_{n-1})$  is a solution of a Norm Form Diophantine equation,

$$D(x_0, x_1, x_2, \dots, x_{n-1}) = m$$



then there exists a polynomial  $s_\lambda(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \cdots + a_{n-1}x^{n-1}$  with  $\deg(s_\lambda(x)) \leq n-1$  such that

$$\begin{aligned} D(a_0, a_1, a_2, \dots, a_{n-1}) &= \prod_{i=1}^n (a_0 + a_1\theta_i + a_2\theta_i^2 + \cdots + a_{n-1}\theta_i^{n-1}) \\ &= \prod_{i=1}^n s_\lambda(\theta_i) \\ &= m. \end{aligned}$$

We will call the polynomial  $s_\lambda(x)$  the adjoint polynomial of  $\lambda$ .

Definition 4. (Fundamental Solution) Fundamental solution of a Pell's equation is a solution having the smallest value of sum of squares of all numbers consisting a solution, with all numbers consisting a solution being a positive integer.

The focus of this research is to investigate the way to find fundamental solutions of cubic Pell equations without using continued fractions. Now we define multiplication on the adjoint polynomials of cubic Pell equations. In [8], Ikseung Lyoo defined the multiplication on the adjoint polynomials of Norm Form Diophantine equations. We will adapt this operation to use when solving cubic Pell equations.

Definition 5. (Multiplication) Let  $\lambda = (a_0, a_1, a_2), \zeta = (b_0, b_1, b_2)$  be the solutions of a cubic Pell equation. Then there exists two adjoint polynomials of  $\lambda, \zeta$

$$\begin{aligned} s_\lambda(x) &= a_0 + a_1x + a_2x^2 \\ s_\zeta(x) &= b_0 + b_1x + b_2x^2. \end{aligned}$$

By the division algorithm there exists a polynomial  $s_\xi(x)$  such that

$$\begin{aligned} s_\lambda(x)s_\zeta(x) &= q(x)p(x) + s_\xi(x) \\ &\equiv s_\xi(x) \pmod{p(x)} \end{aligned}$$

where  $s_\xi(x) = c_0 + c_1x + c_2x^2$ .

Now we define multiplication  $\lambda \cdot \zeta$  of  $\lambda, \zeta$  such that  $\lambda \cdot \zeta = \xi$ , that is

$$(a_0, a_1, a_2) \cdot (b_0, b_1, b_2) = (c_0, c_1, c_2).$$

By the uniqueness of remainder  $s_\xi(x)$ , the operation is well defined.

Note that

$$\begin{aligned}
 D(c_0, c_1, c_2) &= \prod_{i=1}^3 s_{\xi}(\theta_i) \\
 &= \prod_{i=1}^3 (q(\theta_i)p(\theta_i) + s_{\xi}(\theta_i)) \\
 &= \prod_{i=1}^3 s_{\lambda}(\theta_i)s_{\zeta}(\theta_i) \\
 &= \left(\prod_{i=1}^3 s_{\lambda}(\theta_i)\right)\left(\prod_{i=1}^3 s_{\zeta}(\theta_i)\right) \\
 &= D(a_0, a_1, a_2) \cdot D(b_0, b_1, b_2)
 \end{aligned}$$

## 2. FUNDAMENTAL SOLUTIONS OF CUBIC PELL EQUATIONS

In this section, we discuss how to find fundamental solutions of cubic Pell equations. We first show a solution using the properties of Norm Form Diophantine equations. This method is a method that always can find rational solutions of cubic Pell equations, and sometimes an integer solution can be found by this method. We already mentioned that the cubic Pell equation is

$$x^3 + dy^3 + d^2z^3 - 3dxyz = 1$$

and also it is a Norm Form Diophantine equation of  $p(x) = x^3 - d$ . We first start with the initial equation:

$$x^3 = d$$

Now we set adequate integers  $p$ ,  $q$ , and  $r$  which satisfy

$$d = \frac{q^3 + r}{p^3}$$

so we can change the initial equation into a form of

$$p^3x^3 = q^3 + r$$

and solve as we solve any other Norm Form Diophantine equations.

$$\begin{aligned}
 (px)^3 - q^3 &= r \\
 (px - q)(p^2x^2 + pqx + q^2) &= r
 \end{aligned}$$

If  $r = 1$ , then  $(-q, p, 0)$  and  $(q^2, pq, p^2)$  will be the fundamental solutions. But we cannot guarantee that  $p$ ,  $q$ , and  $r$  so that  $r = 1$  always exist. Or even those  $p$ ,  $q$  exist, it may be tough to find values of them. So we use the following theorem.

Theorem 1. For  $p$  and  $q$  set as above, and  $D(x, y, z) = x^3 + dy^3 + d^2z^3 - 3dxyz$ ,

$$D(-q, p, 0) = r, \quad D(q^2, pq, p^2) = r^2$$

holds. Let  $\lambda = (-q, p, 0)$  and  $\zeta = (q^2, pq, p^2)$ . If

$$s_{\lambda^{-2}}(x)s_{\zeta}(x) \equiv s_{\xi}(x) \pmod{x^3 - d}$$

and  $s_{\xi}(x) = \alpha + \beta x + \gamma x^2$  then  $\xi = (\alpha, \beta, \gamma)$  is a solution of the cubic Pell equation.

Proof. Since  $D(x, y, z) = x^3 + dy^3 + d^2z^3 - 3dxyz = 1$ , we substitute  $(x, y, z)$ , once as  $(-q, p, 0)$ , and once as  $(q^2, pq, p^2)$ . By simple calculation, we get

$$\begin{aligned} D(-q, p, 0) &= (-q)^3 + dp^3 = dp^3 - q^3 = r \\ D(q^2, pq, p^2) &= (q^2)^3 + d(pq)^3 + d^2(p^2)^3 - 3d(q^2)(pq)(p^2) \\ &= q^6 + dp^3q^3 + d^2p^6 - 3dp^3q^3 \\ &= d^2p^6 - 2dp^3q^3 + q^6 \\ &= (dp^3 - q^3)^2 \\ &= r^2 \end{aligned}$$

Therefore we know that for  $\xi = (\alpha, \beta, \gamma)$ , then

$$D(\alpha, \beta, \gamma) = D(-q, p, 0)^{-2} \cdot D(q^2, pq, p^2) = r^{-2} \cdot r^2 = 1$$

Hence we get a solution for the cubic Pell equation. [1] shows a method of solving a cubic Pell equation, but that method is more like a method of trial and error. The following example is in [1, p.108], and the method explained in [1] even fails to find the fundamental solution. But we can find the fundamental solution using our new method.

Example 1. Solve the cubic Pell equation  $x^3 + 16y^3 + 256z^3 - 48xyz = 1$ .

Note that

$$16 = \frac{5^3 + 3}{2^3}.$$

A possible solution by using an idea of Norm Form Diophantine equations might be as follows.

$$\begin{aligned} x^3 &= 16 \\ 8x^3 - 125 &= 3 \\ (2x - 5)(4x^2 + 10x + 25) &= 3 \end{aligned}$$

And finding the inverse element of  $(2x-5)^2$ :

$$\begin{aligned}
 & (2x-5)^2(ax^2+bx+c) \equiv 1 \pmod{x^3-16} \\
 \Leftrightarrow & 4ax^4 + (-20a+4b)x^3 + (25a-20b+4c)x^2 + (25b-20c)x + 25c \equiv 1 \pmod{x^3-16} \\
 \Leftrightarrow & (25a-20b+4c)x^2 + (64a+25b-20c)x + (-320a+64b+25c) = 1 \\
 & \Leftrightarrow \begin{cases} 25a-20b+4c = 0 \\ 64a+25b-20c = 0 \\ -320a+64b+25c = 1 \end{cases} \\
 \Leftrightarrow & a = \frac{100}{3}, b = 84, c = \frac{635}{3}
 \end{aligned}$$

Therefore finding the fundamental solution:

$$\begin{aligned}
 & \left(\frac{635}{3} + 84x + \frac{100}{3}x^2\right)(25 + 10x + 4x^2) \\
 = & \frac{15875}{3} + \frac{12650}{3}x + 2520x^2 + \frac{2008}{3}x^3 + \frac{400}{3}x^4 \\
 \equiv & 16001 + 6350x + 2520x^2 \pmod{x^3-16}
 \end{aligned}$$

And therefore we get the fundamental solution,

$$(16001, 6350, 2520).$$

But note that  $\alpha, \beta, \gamma$  in Theorem 1. should be integers in case to get the fundamental solution. Because we take the inverse element during the process, we do not always get integer solution, but get a rational solution instead as a result.

Interestingly though, when  $d$  has a particular form, we always get integer solution as a result. We will investigate these cases from now.

We first investigate the solutions when  $d = m^3n^3 + n$  for nonzero integers  $m, n$ .

$$\begin{aligned}
 x^3 &= d \\
 x^3 &= (mn)^3 + n \\
 x^3 - (mn)^3 &= n \\
 (x - mn)(x^2 + mnx + (mn)^2) &= n
 \end{aligned}$$

Let  $\lambda = (-mn, 1, 0)$ . To find the inverse element of  $\lambda^2$ , we let  $\zeta = (c, b, a)$  as an inverse element.

$$\begin{aligned}
 & (x^2 - 2mnx + (mn)^2)(ax^2 + bx + c) = 1 \\
 & ax^4 + (-2amn + b)x^3 + (a(mn)^2 - 2bmn + c)x^2 \\
 & \quad + ((mn)^2b - 2cmn)x + c(mn)^2 = 1 \\
 & (a(mn)^2 - 2bmn + c)x^2 + (a(mn)^3 + an + b(mn)^2 - 2cmn)x \\
 & \quad - 2a(mn)^4 - 2amn^2 + b(mn)^3 + bn + c(mn)^2 = 1
 \end{aligned}$$

For left hand side to be 1,

$$\begin{cases} a(mn)^2 - 2bmn + c & = 0 \\ a(mn)^3 + an + b(mn)^2 - 2cmn & = 0 \\ -2a(mn)^4 - 2amn^2 + b(mn)^3 + bn + c(mn)^2 & = 1 \end{cases}$$

should hold. By calculation of these simultaneous equations, we get

$$a = 3m^2, \quad b = 3m^3n + \frac{1}{n}, \quad c = 3m^4n^2 + 2m$$

as a result. Now we calculate  $(c + bx + ax^2)(m^2n^2 + mnx + x^2)$ .

$$\begin{aligned} & (3m^4n^2 + 2m + (3m^3n + \frac{1}{n})x + 3m^2x^2)(m^2n^2 + mnx + x^2) \\ &= (3m^6n^4 + 2m^3n^2) + (6m^5n^3 + 3m^2n)x + (9m^4n^2 + 3m)x^2 \\ &+ (6m^3n + \frac{1}{n})x^3 + 3m^2x^4 \\ &\equiv (9m^6n^4 + 9m^3n^2 + 1) + (9m^5n^3 + 6m^2n)x + (9m^4n^2 + 3m)x^2 \pmod{x^3 - d} \end{aligned}$$

Therefore, we get the fundamental solution,

$$(1) \quad (9m^6n^4 + 9m^3n^2 + 1, 9m^5n^3 + 6m^2n, 9m^4n^2 + 3m)$$

and it is trivial that all the terms are integers. Note that if  $m=0$ , a trivial solution  $(1, 0, 0)$  will appear. Also,  $n$  is self-evidently nonzero, since then  $d=0$ .

Example 2. Find the solution of  $x^3 + 30y^3 + 900z^3 - 90xyz = 1$ .

We know that the given equation is a cubic Pell equation when  $d=30$ . Note that  $30 = 1^3 \times 3^3 + 3$ .

So we set  $m=1$ ,  $n=3$ . A solution by an idea of Norm Form Diophantine equations may be as follows.

$$\begin{aligned} x^3 &= 30 \\ x^3 - 3^3 &= 3 \\ (x-3)(x^2 + 3x + 9) &= 3 \end{aligned}$$

Since  $(x-3)^2 = 9 - 6x + x^2$ , let  $\lambda = (9, -6, 1)$ , and finding the inverse element of  $\lambda$ :

$$\begin{aligned} & (x^2 - 6x + 9)^{-1} = (ax^2 + bx + c) \\ \Leftrightarrow & (x^2 - 6x + 9)(ax^2 + bx + c) \equiv 1 \pmod{x^3 - 30} \\ \Leftrightarrow & ax^4 + (-6a + b)x^3 + (9a - 6b + c)x^2 + (9b - 6c)x + 9c \equiv 1 \pmod{x^3 - 30} \\ \Leftrightarrow & (9a - 6b + c)x^2 + (30a + 3b - 6c)x + (-180a + 30b + 9c) \equiv 1 \pmod{x^3 - 30} \\ \Leftrightarrow & \begin{cases} 9a - 6b + c & = 0 \\ 30a + 9b - 6c & = 0 \\ -180a + 30b + 9c & = 1 \end{cases} \end{aligned}$$

$$\Leftrightarrow a = 3, \quad b = \frac{28}{3}, \quad c = 29$$

Therefore finding the solution:

$$\begin{aligned} (29 + \frac{28}{3}x + 3x^2)(9 + 3x + x^2) &= 261 + 171x + 84x^2 + \frac{55}{3}x^3 + 3x^4 \\ &\equiv 811 + 261x + 84x^2 \pmod{x^3 - 30} \end{aligned}$$

Therefore we get the fundamental solution of  $x^3 + 30y^3 + 900z^3 - 90xyz = 1$ , and it is,

$$(x, y, z) = (811, 261, 84)$$

Also, if we substitute  $m = 1$ ,  $n = 3$  to (1), we get:

$$(9 \times 1^6 \times 3^4 + 9 \times 1^3 \times 3^2 + 1, 9 \times 1^5 \times 3^3 + 6 \times 1^2 \times 3, 9 \times 1^4 \times 3^2 + 3 \times 1) = (811, 261, 84)$$

Which also shows that (1) is valid.

The following example shows that this result can also be used when  $d$  has a form of  $m^3n^3 - n$ . Note that  $m^3n^3 + n$  and  $m^3n^3 - n$  are basically the same form.

Example 3.

Find integer solutions of  $x^3 + 6y^3 + 36z^3 - 18xyz = 1$ .

This is a cubic Pell equation when  $d = 6$ . Note that

$$\begin{aligned} 6 &= 2^3 - 2 \\ &= (1 \times 2)^3 - 2 \\ &= (-1)^3 \times (-2)^3 + (-2) \end{aligned}$$

So we can set as  $m = -1$ ,  $n = -2$ . By solving using the characteristics of Norm Form Diophantine equations or substituting in (1), we get

$$(x, y, z) = (109, 60, 33).$$

We can see that it is a valid solution by substitution on the original given equation.

Now we see solutions when  $d = (mn)^3 + 3n$ , when  $m, n$  are nonzero integers.

$$\begin{aligned} x^3 &= d \\ x^3 &= (mn)^3 + 3n \\ x^3 - (mn)^3 &= 3n \\ (x - mn)(x^2 + mnx + m^2n^2) &= 3n \end{aligned}$$

Let  $\lambda = (-mn, 1, 0)$ , and to find the inverse element of  $\lambda^2$ , we let  $\zeta = (c, b, a)$  as an inverse element, so  $s_\zeta(x) = ax^2 + bx + c$ .

$$\begin{aligned}
& (x - mn)^2(ax^2 + bx + c) = 1 \\
& (x^2 - 2mnx + m^2n^2)(ax^2 + bx + c) = 1 \\
& am^2n^2x^2 - 2amnx^3 + ax^4 + bm^2n^2x - 2bmnx^2 + bx^3 + cm^2n^2 - 2cmnx + cx^2 = 1 \\
& (am^2n^2 - 2bmn + c)x^2 + (a((mn)^3 + 3n) + bm^2n^2 - 2cmn)x \\
& \quad + (b - 2amn)((mn)^3 + 3n) + cm^2n^2 \equiv 1 \pmod{x^3 - d}
\end{aligned}$$

For left hand side to be 1,

$$\begin{cases} am^2n^2 - 2bmn + c = 0 \\ a((mn)^3 + 3n) + bm^2n^2 - 2cmn = 0 \\ (b - 2amn)((mn)^3 + 3n) + cm^2n^2 = 1 \end{cases}$$

should hold. By calculation of these simultaneous equations, we get

$$a = \frac{m^2}{3}, \quad b = \frac{m^3n^2 + 1}{3n}, \quad c = \frac{m^4n^2 + 2m}{3}$$

as a result. Now we calculate  $(c + bx + ax^2)(m^2n^2 + mnx + x^2)$ .

$$\begin{aligned}
& (c + bx + ax^2)(m^2n^2 + mnx + x^2) \\
&= \left( \frac{m^4n^2 + 2m}{3} + \frac{m^3n^2 + 1}{3n}x + \frac{m^2}{3}x^2 \right)(m^2n^2 + mnx + x^2) \\
&= \frac{m^6n^4 + 2m^3n^2}{3} + \left( \frac{2m^5n^3}{3} + m^2n \right)x + (m^4n^2 + m)x^2 \\
&+ \left( \frac{m^3n}{3} + \frac{m^3n^2 + 1}{3n} \right)x^3 + \frac{m^2}{3}x^4 \\
&\equiv (m^6n^4 + 3m^3n^2 + 1) + (m^5n^3 + 2m^2n)x + (m^4n^2 + m)x^2 \pmod{x^3 - d}
\end{aligned}$$

Therefore, we got the fundamental solution,

$$(2) \quad (m^6n^4 + 3m^3n^2 + 1, m^5n^3 + 2m^2n, m^4n^2 + m)$$

and it is trivial that all terms are integers. Again, note that when  $m = 0$ , a trivial solution  $(1, 0, 0)$  appears. We can check that this is true by some examples.

Example 4. Find solution of the cubic Pell equation,  $x^3 + 14y^3 + 196z^3 - 42xyz = 1$ .

We know that the given equation is a cubic Pell equation when  $d = 14$ . Note that

$$14 = 1^3 \times 2^3 + 3 \times 2$$

so we set  $m = 1$ ,  $n = 2$ . A solution by an idea of Norm Form Diophantine equations may be as follows.

$$\begin{aligned}
& x^3 = 14 \\
& x^3 - 8 = 6 \\
& (x - 2)(x^2 + 2x + 4) = 6
\end{aligned}$$

Let  $\lambda = (-2, 1, 0)$ . Finding  $\lambda^{-2}$

$$\begin{aligned}
 \{(x-2)^2\}^{-1} &= (x^2 - 4x + 4)^{-1} \\
 &= (ax^2 + bx + c) \\
 \Leftrightarrow (x^2 - 4x + 4)(ax^2 + bx + c) &= 1 \pmod{x^3 - 14} \\
 \Leftrightarrow 4c + 4bx - 4cx + 4ax^2 - 4bx^2 + cx^2 - 4ax^3 + bx^3 + ax^4 &= 1 \pmod{x^3 - 14} \\
 \Leftrightarrow (-56a + 14b + 4c) + (14a + 4b - 4c)x + (4a - 4b + c)x^2 &= 1 \pmod{x^3 - 14} \\
 \Leftrightarrow \begin{cases} -56a + 14b + 4c = 0 \\ 14a + 4b - 4c = 0 \\ 4a - 4b + c = 1 \end{cases} \\
 \Leftrightarrow a = \frac{1}{3}, \quad b = \frac{5}{6}, \quad c = 2
 \end{aligned}$$

Therefore we get  $\lambda^{-2} = \left(2, \frac{5}{6}, \frac{1}{3}\right)$ . Now finding the solution:

$$\begin{aligned}
 \left(2 + \frac{5}{6}x + \frac{1}{3}x^2\right)(4 + 2x + x^2) &= 8 + \frac{22}{3}x + 5x^2 + \frac{3}{2}x^3 + \frac{1}{3}x^4 \\
 &= 29 + 12x + 5x^2 \pmod{x^3 - 14}
 \end{aligned}$$

Therefore we get the fundamental solution of  $x^3 + 14y^3 + 196z^3 - 42xyz = 1$ , and it is,

$$(x, y, z) = (29, 12, 5)$$

Also, if we substitute  $m = 1, n = 2$  to (2), we get:

$$(1^6 \times 2^4 + 3 \times 1^3 \times 2^2 + 1, 1^5 \times 2^3 + 2 \times 1^2 \times 2, 1^4 \times 2^2 + 1) = (29, 12, 5)$$

which also shows that (2) is valid.

The following example shows that this result can also be used when  $d$  has a form of  $m^3n^3 - 3n$ . Note that  $m^3n^3 + 3n$  and  $m^3n^3 - 3n$  are basically the same form.

Example 5. Find integer solutions of  $x^3 + 210y^3 + 44100z^3 - 630xyz = 1$ .

This is a cubic Pell equation when  $d = 210$ . Note that

$$\begin{aligned}
 210 &= 6^3 - 6 \\
 &= (3 \times 2)^3 - 3 \times 2 \\
 &= (-3)^3 \times (-2)^3 + 3 \times (-2)
 \end{aligned}$$

So we can set as  $m = -3, n = -2$ . Solution by using the characteristics of Norm Form Diophantine equations or substituting in (2), we get

$$(x, y, z) = (11341, 1908, 321)$$

We can see that it is a valid solution by substitution on the original given equation.

Also, when we know the fundamental solution of cubic Pell equation when  $x^3 = d$ ,



we can find the fundamental solution of cubic Pell equation when  $x^3 = dp^3$ , for nonzero integer  $p$ . Similar proposition is introduced in [1, p.106].

Theorem 2. Let the fundamental solution of cubic Pell equation when  $x^3 = d$  as  $\lambda = (a, b, c)$ . For adequate positive integer  $n$ , if  $\{s_\lambda(x)\}^n \equiv s_\zeta(x) \pmod{x^3 - d}$ , when  $\zeta$  has a form of  $\zeta = (\alpha, p\beta, p^2\gamma)$  for integers  $p, \alpha, \beta, \gamma$ , then  $\zeta = (\alpha, \beta, \gamma)$  is a solution of cubic Pell equation when  $x^3 = dp^3$ .

Proof. Let  $D(x, y, z) = x^3 + dy^3 + d^2z^3 - 3dxyz$ . Since  $\lambda = (a, b, c)$  is a solution of a cubic Pell equation when  $x^3 = d$ ,

$$D(a, b, c) = a^3 + db^3 + d^2c^3 - 3dabc = 1,$$

and so

$$D(a, b, c)^n = 1^n = 1.$$

When  $\lambda^n = \zeta$  when  $\zeta$  has a form of  $\zeta = (\alpha, p\beta, p^2\gamma)$ ,

$$\begin{aligned} 1 &= D(a, b, c)^n \\ &= D(\alpha, p\beta, p^2\gamma) \\ &= \alpha^3 + d(p\beta)^3 + d^2(p^2\gamma)^3 - 3d\alpha(p\beta)(p^2\gamma) \\ &= \alpha^3 + (dp^3)\beta^3 + (d^2p^6)\gamma^3 - 3(d\beta^3)\alpha\beta\gamma \end{aligned}$$

Hence,  $(x, y, z) = (\alpha, \beta, \gamma)$  becomes a solution of

$$x^3 + (dp^3)y^3 + (dp^3)^2z^3 - 3(dp^3)xyz = 1,$$

which is a cubic Pell equation when  $x^3 = dp^3$ .

We examine these cases by examples.

Example 6. Find integer solution of  $x^3 + 16y^3 + 256z^3 - 48xyz = 1$ .

This is a cubic Pell equation when  $d = 16$ . This example is an identical example with Example 1., but this time we will find the fundamental solution in a different way. Note that

$$16 = 2 \times 2^3.$$

Finding fundamental solutions of cubic Pell equation when  $d = 2$  is easy, since  $2 = 1^3 + 1$ . So we find the solution:

$$\begin{aligned} x^3 &= 2 \\ x^3 - 1 &= 1 \\ (-1 + x)(1 + x + x^2) &= 1 \end{aligned}$$

And we get the fundamental solutions  $\lambda = (-1, 1, 0)$  and  $\zeta = (1, 1, 1)$ . When we take the 8th power of  $\zeta$  we get the form  $(\alpha, 2\beta, 2^2\gamma)$ . Note that  $p=2$  for this case. That is, by the fact that the adjoint polynomial of  $(1, 1, 1)$  is  $(1+x+x^2)$ ,

$$\begin{aligned}(1+x+x^2)^8 &\equiv (16001+12700x+10080x^2) \pmod{x^3-2} \\ &= (16001, 2 \times 6350x + 2^2 \times 2520x^2).\end{aligned}$$

Therefore we get the solution  $(16001, 6350, 2520)$ . Refer to Example 1. and we can check that the solution is valid.

Example 7. Find the solution of cubic Pell equation when  $d=24$ .

Note that

$$24 = 3 \times 2^3.$$

Fundamental solution of cubic Pell equation when  $d=3$  can be found as below.

$$\begin{aligned}x^3 &= 3 \\ x^6 &= 9 \\ x^6 - 8 &= 1 \\ (x^2 - 2)(x^4 + 2x^2 + 4) &= 1\end{aligned}$$

Since  $x^3 = 3$ ,

$$(x^4 + 2x^2 + 4) \equiv (3x + 2x^2 + 4) \pmod{x^3 - 3}$$

and hence,

$$(-2 + x^2)(4 + 3x + 2x^2) \equiv 1 \pmod{x^3 - 3}.$$

Therefore we get the fundamental solution,  $\lambda = (-2, 0, 1)$  and  $\zeta = (4, 3, 2)$ . When we take the 3rd power of  $\zeta$  we get the form  $(\alpha, 2\beta, 2^2\gamma)$ . Note that  $p=2$  for this case also. That is, by the fact that the adjoint polynomial of  $(4, 3, 2)$  is  $(4+3x+2x^2)$ ,

$$\begin{aligned}(4+3x+2x^2)^3 &\equiv (649+450x+312x^2) \pmod{x^3-3} \\ &= (649+2 \times 225x + 2^2 \times 78x^2).\end{aligned}$$

Therefore we get the fundamental solution,  $(649, 225, 78)$ . By substitution, we can check that this solution is valid.

### 3. CUBIC PELL EQUATIONS AND DELAUNAY-NAGELL EQUATIONS

From  $x^3 = d$  and  $d = \frac{q^3 + r}{p^3}$ , we get the equation  $p^3 x^3 - q^3 = r$ . If  $r = 1$ , finding solutions for cubic Pell equation when  $x^3 = d$  is easy. In the cubic Pell equation, the adjoint polynomial, as we once have said, is  $x^3 = d$ . Here, we can think of integers  $a$  and  $N$  that satisfy

$$a^3 d - N^3 = 1$$

so that

$$a^3 d - N^3 = 1$$

$$(ax - N)(a^2 x^2 + axN + N^2) = 1.$$

Now the fundamental solutions of the cubic Pell equation  $x^3 + dy^3 + d^2 z^3 - 3dxyz = 1$  is

$$\lambda = (-N, a, 0), \quad \zeta = (n^2, aN, a^2).$$

The form  $a^3 d - N^3 = 1$  is the form of Delaunay-Nagell equation. But what we should note is that there are no general solution found for Delaunay-Nagell equation. We explain what we did with finding solutions for some particular Delaunay-Nagell equations.

From the form of Delaunay-Nagell equation, we can change the expression like this:

$$a^3 d - N^3 = 1$$

$$a^3 d = (N+1)(N^2 - N + 1)$$

$$a^3 d = (N+1)((N+1)^2 - 3(N+1) + 3)$$

By the Euclidean algorithm, we get two cases:

$$1) N+1 = 3k \quad 2) N+1 \neq 3k$$

When case 1), then  $\gcd(N+1, N^2 - N + 1) \neq 1$ .

If not, then  $\gcd(N+1, N^2 - N + 1) = 1$ .

First, we consider the case when  $N+1 = 3k$ . Then, we can change the equation as follows:

$$\begin{aligned} a^3 d &= 3k(9k^2 - 9k + 3) \\ \Leftrightarrow a^3 d &= 3^2 k(3k^2 - 3k + 1) \end{aligned}$$

We need  $3^3$  as a factor but the right hand side has only  $3^2$ . So suppose that  $k = 3t$ .

$$\begin{aligned} a^3d &= 3^3t(27t^2 - 9t + 1) \\ a &= 3, \quad d = t(27t^2 - 9t + 1) \end{aligned}$$

Example 8. Find the solution of cubic Pell equation when  $d = 19$ .

Let  $t = 1$ . Then  $(a, N) = (3, 8)$ .

$$\begin{aligned} 3^3 \times 19 - 8^3 &= 1 \\ 3^3 x^3 - 8^3 &= 1 \\ (-8 + 3x)(64 + 24x + 9x^2) &= 1 \end{aligned}$$

Hence we get the fundamental solutions  $\lambda = (-8, 3, 0)$  and  $\zeta = (64, 24, 9)$ . By substitution, we can check that these solutions are valid.

$$\begin{aligned} x^3 + 19y^3 + 19^2z^3 - 3 \times 19xyz &= 1 \\ 64^3 + 19 \times 24^3 + 19^2 \times 9^3 - 3 \times 19 \times 64 \times 24 \times 9 &= 1 \end{aligned}$$

Example 9. Find the solution of cubic Pell equation when  $d = 182$ .

Let  $t = 2$ . Then  $(a, N) = (3, 17)$ .

$$\begin{aligned} 3^3 \times 182 - 17^3 &= 1 \\ 3^3 x^3 - 17^3 &= 1 \\ (-17 + 3x)(289 + 51x + 9x^2) &= 1 \end{aligned}$$

Hence we get the fundamental solutions  $\lambda = (-17, 3, 0)$  and  $\zeta = (289, 51, 9)$ . By substitution, we can check that these solutions are valid.

$$\begin{aligned} x^3 + 182y^3 + 182^2z^3 - 3 \times 182xyz &= 1 \\ 289^3 + 182 \times 51^3 + 182^2 \times 9^3 - 3 \times 182 \times 289 \times 51 \times 9 &= 1 \end{aligned}$$

Now we are going to investigate the case when  $\gcd(N+1, N^2-N+1) = 1$ . From  $\gcd(N+1, N^2-N+1) = 1$ , we know that  $N+1$  and  $N^2-N+1$  should have the form of

$$N+1 = nt^3 \text{ or } N^2-N+1 = mk^3.$$

We will now investigate when  $n = m = 1$ , since it is the easiest. First, we will consider  $N+1 = t^3$ . Then the expression should be as follows:

$$a^3d = t^3(t^6 - 3t^3 + 3).$$

Let's see when  $t = 2$ . Then  $(a, N) = (2, 7)$ , since  $t = 2$  and  $N = t^3 - 1 = 2^3 - 1 = 7$ . Also,  $d = 2^6 - 3 \times 2^3 + 3 = 43$ .

Example 10. Find the solution of cubic Pell equation when  $d = 43$ .

$$\begin{aligned} 2^3 \times 43 - 7^3 &= 1 \\ 2^3 x^3 - 7^3 &= 1 \\ (-7 + 2x)(49 + 14x + 4x^2) &= 1 \end{aligned}$$

Hence, we get fundamental solutions  $\lambda = (-7, 2, 0)$  and  $\zeta = (49, 14, 4)$ . By substitution, we can check that these are valid.

$$\begin{aligned} x^3 + 43y^3 + 43^2z^3 - 3 \times 43xyz &= 1 \\ 49^3 + 43 \times 14^3 + 43^2 \times 4^3 - 3 \times 43 \times 49 \times 14 \times 4 &= 1 \end{aligned}$$

Now we investigate when  $t = 5$ . In this case,  $(a, N) = (5, 124)$ , since  $t = 5$  and

$$N = 5^3 - 1. \text{ Also, } d = 5^6 - 3 \times 5^3 + 3 = 15253.$$

Example 11. Find the solution of cubic Pell equation when  $d = 15253$ .

$$\begin{aligned} 5^3 \times 15253 - 124^3 &= 1 \\ 5^3 x^3 - 124^3 &= 1 \\ (-124 + 5x)(15376 + 620x + 25x^2) &= 1 \end{aligned}$$

Hence, we get fundamental solutions  $\lambda = (-124, 5, 0)$  and  $\zeta = (15376, 620, 25)$ . By substitution, we can check that these are valid.

$$\begin{aligned} x^3 + 15253y^3 + 15253^2z^3 - 3 \times 15253xyz &= 1 \\ 15376^3 + 15253 \times 620^3 + 15253^2 \times 25^3 - 3 \times 15253 \times 15376 \times 620 \times 25 &= 1 \end{aligned}$$

Next, we can think of the case  $N^2 - N + 1 = k^3$ . We found one solution:  $N = 19$ ,  $k = 7$ , and when so,  $d = 20$ . Finding integers that satisfy this condition is not an easy task, but we can eliminate some cases.

Lemma 1. If  $i$  is an integer that satisfies  $i \equiv N \pmod{m}$ ,  $m \nmid 3$ , and  $i^3 \not\equiv -1 \pmod{m}$ , then there are no integers  $N$  and  $k$  such that  $N^2 - N + 1 = mk^3$ .

Proof. We prove this by contraposition. Suppose that there exists an integer  $N$  such that  $N^2 - N + 1 = mk^3$ . Then

$$m \mid N^2 - N + 1.$$

Let  $i$  be the remainder of  $N$  modulo  $m$ . Then

$$i^2 - i + 1 \equiv 0 \pmod{m}.$$

Note that if  $i \equiv -1 \pmod{m}$ ,

$$\begin{aligned} N &= mx - 1 \\ (mx - 1)^2 - (mx - 1) + 1 &= mk^3 \\ m^2x^2 - 3mx + 3 &= mk^3 \\ m(k^3 - mx^2 + 3x) &= 3. \end{aligned}$$

Therefore  $m$  should be a divisor of 3. So if  $m \nmid 3$ , then  $i \not\equiv -1$ . Hence we know that  $i + 1 \not\equiv 0 \pmod{m}$ . Therefore we can say that

$$\begin{aligned} i^2 - i + 1 &\equiv 0 \pmod{m} \\ i^3 + 1 &\equiv 0 \pmod{m} \\ \therefore i^3 &\equiv -1 \pmod{m}. \end{aligned}$$

The contraposition is true, so the original lemma is also true.

By examining all remainders of  $N$  modulo  $m$ , we can see some more characteristics. We first examine when  $m = 5$ .

$$\begin{aligned} m &= 5 \\ 1 \cdots 2 \cdots 3 \cdots 4 \\ 2 \cdots 6 \cdots 12 \\ 2 \cdots 1 \cdots 2 \end{aligned}$$

The first line is all possible remainders of  $N$  modulo  $m$ . Second line is the product of the upper two in the first line, and the third line is the remainder of the second line modulo  $m$ . Same goes to the other cases below.

$$\begin{aligned} m &= 7 \\ 1 \cdots 2 \cdots 3 \cdots 4 \cdots 5 \cdots 6 \\ 2 \cdots 6 \cdots 12 \cdots 20 \cdots 30 \\ 2 \cdots 6 \cdots 5 \cdots 6 \cdots 2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m &= 11 \\ 1 \cdots 2 \cdots 3 \cdots 4 \cdots 5 \cdots 6 \cdots 7 \cdots 8 \cdots 9 \cdots 10 \\ 2 \cdots 6 \cdots 12 \cdots 20 \cdots 30 \cdots 42 \cdots 56 \cdots 72 \cdots 90 \\ 2 \cdots 6 \cdots 1 \cdots 9 \cdots 8 \cdots 9 \cdots 1 \cdots 6 \cdots 9 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m &= 13 \\ 1 \cdots 2 \cdots 3 \cdots 4 \cdots 5 \cdots 6 \cdots 7 \cdots 8 \cdots 9 \cdots 10 \cdots 11 \cdots 12 \\ 2 \cdots 6 \cdots 12 \cdots 20 \cdots 30 \cdots 42 \cdots 56 \cdots 72 \cdots 90 \cdots 110 \cdots 132 \\ 2 \cdots 6 \cdots 12 \cdots 7 \cdots 4 \cdots 3 \cdots 4 \cdots 7 \cdots 12 \cdots 6 \cdots 2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m &= 19 \\ 1 \cdots 2 \cdots 3 \cdots 4 \cdots 5 \cdots 6 \cdots 7 \cdots 8 \cdots 9 \cdots 10 \cdots \\ 2 \cdots 6 \cdots 12 \cdots 20 \cdots 30 \cdots 42 \cdots 56 \cdots 72 \cdots 90 \cdots \\ 2 \cdots 6 \cdots 12 \cdots 1 \cdots 11 \cdots 4 \cdots 18 \cdots 15 \cdots 14 \cdots \end{aligned}$$

By symmetry, we investigated only the first half of possible remainders of  $N$  modulo  $m$  when  $m = 19$ .

Now, we can find some characteristics. We can see when  $m = 5$  or  $11$ ,  $i$  that satisfies  $N(N-1) \equiv -1 \pmod{m}$  does not exist. In contrast, when  $m = 7, 13$ , or  $19$ ,  $i$  that satisfies  $N(N-1) \equiv -1 \pmod{m}$  exists. We can assume that the form of  $m$  being prime and  $N$  not existing is  $m = 3k+2$ . Now we prove this.

Theorem 3. If  $m$  is a prime number and  $m \equiv 2 \pmod{3}$ , then there are no integers  $N$  and  $k$  that satisfy the equation  $N^2 - N + 1 = mk^3$ .

Proof. Since  $m$  is a prime number, by Fermat's little theorem we have  $i^{m-1} \equiv 1 \pmod{m}$ . Because  $m \equiv 2 \pmod{3}$ , let  $m = 3p+2$ , and we have

$$i^{3p+1} \equiv 1 \pmod{m}. \quad \dots\dots\dots(\alpha)$$

By Lemma 1., if there are integers  $N$  and  $k$  that satisfy the equation  $mk^3 = N^2 - N + 1$  then

$$i^3 \equiv -1 \pmod{m}.$$

Therefore  $i^{3p} \equiv \pm 1 \pmod{m}$ , and so

$$i^{3p+1} \equiv \pm i \pmod{m}. \quad \dots\dots\dots(\beta)$$

From  $(\alpha)$  and  $(\beta)$ , we get the following equation

$$i^{3p+1} \equiv \pm i \equiv 1 \pmod{m}.$$

So we have

$$i \equiv \pm 1 \pmod{m}.$$

If  $i \equiv 1 \pmod{m}$ , then let  $N = mt + 1$ .

$$\begin{aligned} N^2 - N + 1 &= mk^3 \\ \Leftrightarrow N(N-1) + 1 &= mk^3 \\ \Leftrightarrow mt(mt+1) + 1 &= mk^3 \end{aligned}$$

The left hand side is not a multiple of  $m$ , while the right hand side is. A contradiction occurs.

If  $i \equiv -1 \pmod{m}$ , then let  $N = mt - 1$ .

$$\begin{aligned}
 & N^2 - N + 1 = mk^3 \\
 \Leftrightarrow & N(N-1) + 1 = mk^3 \\
 \Leftrightarrow & (mt-1)(mt-2) + 1 = mk^3 \\
 \Leftrightarrow & m^2t^2 - 3mt + 3 = mk^3 \\
 \Leftrightarrow & m(mt^2 - 3t) + 3 = mk^3
 \end{aligned}$$

The left hand side is not a multiple of  $m$ , while the right hand side is. A contradiction occurs.

Therefore, in both cases, there are no integers  $N$  and  $k$  satisfying the equation

$$mk^3 = N^2 - N + 1.$$

By Theorem 3., we know that if  $m$  is a prime having a form of  $3k+2$ , there are no solutions we are finding for even though  $i^3 \equiv -1 \pmod{m}$ . Therefore those cases can be eliminated when investigating the solutions.

## 4. DISCUSSION

We have shown a new method of solving a cubic Pell Equation by adapting ideas of Norm Form Diophantine equations. Using this method, we can always find a rational solution for cubic Pell equations. In some special cases, we have shown that the new method we have discussed always gets a integer solution. We also have shown a close relationship between solving cubic Pell Equations and Delaunay–Nagell Equations, and how to adapt Delaunay–Nagell Equations to the new method.

As we always can get a rational solution with the new method, problems with rational numbers related to cubic Pell equations will have a new way of approach. For example, since there is a close relation between continued fraction form of a square root of a natural number and a solution of a quadratic Pell Equation, we might be able to find a continued fraction form of a cubic root of an integer.



## ■ 참고문헌

- [1] Edward J. Barbeau, Pell's equation, Springer, 2003.
- [2] Edward J. Barbeau, DIOPHANTINE EQUATIONS,  
<http://www.math.toronto.edu/barbeau/hxpol10.pdf>
- [3] A. Bérczes and A. Pethő, On norm form equations with solutions forming  
arithmetic progressions, Publ. Math. Debrecen, 65(2004), pp.281–290.
- [4] Serge Lang, ALGEBRA, 3rd edition, Addison–Wesley, 1993.
- [5] Hendrik W. Lenstra, Jr, Solving the Pell equation, Notices Amer. Math Soc. Vol.49, pp.182–192, 2002.
- [6] L. J. Mordell, Diophantine equations, Academic Press, London, 1969.
- [7] R. A. Mordell, NORM FORM EQUATIONS AND CONTINUED FRACTIONS, Acta  
Math. Univ. Comenianae, Vol. LXXIV, 2, pp.273–278, 2005.
- [8] Ikseung Lyoo, ON THE NORM FORM TYPE DIOPHANTINE EQUATIONS, to appear.

### 심사평

3차 펠의 방정식이 적절한 조건을 만족하면 normal form 이라는 사실을 이용하여 해를 구하는 방법을 제시하고, 특별한 경우에는 모든 해를 구할 수 있다고 밝힌 연구이다. 선행연구 논문에 지나치게 의존하였고, 특정 펠방정식의 해의 집합이 군을 이룬다는 정리 하에 대수적 조작을 이용, 특정한 계수를 갖는 3차 방정식의 해를 구하는 논문이다. 많은 내용들이 Edward J. Barbeau의 저서 Pell's equation의 내용들로 이루어져 있으며, 예제로 이 책의 연습문제를 푸는 데 치우쳐 있지만 학생들의 독창성은 엿볼 수 있는 Review Article로서의 가치가 있다고 평가된다.

## 연구 후기

2차 펠 방정식은 연분수 전개를 이용한 풀잇법이 존재하지만, 3차 펠 방정식은 특별한 풀잇법이 발견되지 않았습니 다. 이에 저희는 3차 펠 방정식과 관련이 있는 Norm Form의 개념을 이용하여 풀이에 대한 연구를 시작하게 되었습니다. 연구를 통하여 다양한 다항식에 관련된 이론과 군에 대해 알게 되었으며, 새로운 이론인 Norm Form Diophantine equation과 그것에 사용되는 adjoint polynomial 등의 개념을 3차 펠 방정식에 적용시키는 등의 활 동을 하였습니다. 저희가 3차 펠 방정식을 해결하는 방법을 찾아내어 Edward J. Barbaeu의 책의 결과와 비교하여 같은 해가 나온다는 것을 보고 매우 기뻐했습니다. 그러나 곧 정수해가 항상 나오는 것은 아니라는 것을 알게 되었고, 3 차 펠 방정식의 해를 계산을 할 때마다 정수해가 나오기를 초조하게 바라던 것이 기억에 남습니다. 이후 정수해가 쉽게 나오는 경우들을 관찰하여 항상 정수해를 얻을 수 있는 경우들이 가지는 꼴에 대해 알게 되었으며, 일반화를 통하여 깔끔하게 정수해가 나온다는 것을 보이는 것에 성공하는 만족스러운 결과를 얻게 되었습니다. 연구 도중 저희의 방식이 Delaunay-Nagell equation과 관련이 깊다는 것을 깨닫고 그에 대한 연구도 같이 진행하여 Delaunay-Nagell equation에서의 다양한 결과를 얻어낼 수 있었습니다. 우리의 방식이 모든 3차 펠 방정식에 적용할 수 있고, 또 항상 유리해를 얻어낼 수 있다는 것으로 보아 저희의 결과를 발전시킨다면 더욱 효과적인 3차 펠 방정식의 해결법이 될 것 이라 믿고 있으며, 이에 대한 연구를 진행하고자 합니다. 끝으로 이 연구를 진행하는데 있어 아낌없는 지도와 격려를 해 주신 지도교사 유익승 선생님을 비롯한 수학 교과 선생님들과 이 연구를 깊이 있게 진행할 수 있도록 배려해주신 한 국과학창의재단에 깊이 감사드립니다.

## 연구진

채지석(Chae Jiseok, 전북과학고등학교 1학년, crazy0995@naver.com), 제1저자

류인영(Ryu Inyoung, 전북과학고등학교 1학년, riy520@naver.com)

천승환(Cheon Seunghwan, 전북과학고등학교 1학년, tmdth17@naver.com)

문현우(Moon Hyeonwoo, 전북과학고등학교 1학년, gusdn715@naver.com)

최백규(Choi Baekgyu, 전북과학고등학교 1학년, great922@hanmail.net), 교신저자

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

(2015. 1월 현재)



## 액체 금속을 이용한 변형률 센서의 개발 (Development of strain sensors using liquid metals)

고은섭 · 박채리 · 차이주 · 최수연(한성과학고등학교)

### 초 록

최근 애플워치, 삼성기어 등 웨어러블 기기에 대한 관심이 높아지고 있다. 웨어러블 기기는 유연하여 자유자재로 변화를 줄 수 있기 때문에 인체에 맞게 착용할 수 있다는 장점이 있다. 본 연구에서는 액체 금속을 이용하여 피부에 부착 가능한 웨어러블 변형률 센서를 제작하고, 물리적인 변형을 가했을 때 그에 따른 저항변화를 측정하였다. 변형률 센서의 본체는 유연성과 신축성이 좋은 실리콘 탄성 중합체로 제작하였다. 이는 장력에 대한 신축성이 좋아 변형이 자유롭고 피부에 잘 부착되어 웨어러블 기기에 알맞은 조건의 소재로, 스펀코터로 얇고 고르게 도포하고 경화시키는 과정을 통해 제작하였다. 얇게 도포한 실리콘 탄성 중합체 위에 3D 프린터를 이용하여 갈륨과 인듐으로 제작한 액체 금속을 패터닝하였다. 액체금속은 상온에서 액체 상태로 유동적이기 때문에 기기에 가해진 변형을 그대로 수용할 수 있다. 뿐만 아니라 기존 고체 금속에 비해 단선이 잘 일어나지 않고 전기 전도도가 더 높다는 장점이 있다. 제작 후 변형률 센서의 외부 응력으로 인한 변형에 따른 저항 변화를 디지털 멀티미터로 측정하였다. 변형률이 증가함에 따라 저항이 선형적으로 증가한다는 것을 관찰 할 수 있었고 이 센서의 gauge factor를 구했을 때 0.507로 나타났다. 또한 손가락 관절에 부착하여 굽힘 각도에 따른 저항을 측정하였다. 이를 통해 실제 손가락 관절의 변형률을 예측할 수 있어 관절을 굽힌 정도에 따른 신호입력기로의 개발도 가능하다. 이와 같은 연구결과를 바탕으로 한 초박형 변형률 센서의 제작을 통해 인간의 피부와 같은 신축성을 가지고, 인장, 압축, 비틀림 등의 다양한 외부 응력에 의해 변형 시 신호를 감지할 수 있는 차세대 인공피부와 같은 다양한 분야에 활용될 수 있을 것이라 기대된다. 본 연구에서는 한 가지 액체 금속 패턴의 변형률 센서로만 제한하여 실험하였으나, 액체 금속을 다양한 모양으로 패터닝하여 제작하면 더 정밀하게 측정가능하다.

키워드 : 변형률 센서, 실리콘 탄성중합체, 액체금속, 웨어러블 기기, 패터닝, 인공 피부

## I. 서론

### 1. 연구의 필요성과 목적

최근 유연 반도체 및 유연 디스플레이 등 유연 전자 장비와 신체에 부착해 사용할 수 있는 웨어러블 기기에 대한 관심이 높아지고 있다. 가장 큰 예로 구글 글라스나 갤럭시 기어, 갤럭시 핏 등이 있다. 이러한 유연 전자 장비나 웨어러블 기기를 개발하기 위해서는 변형률 센서가 필수적이다. 변형률 센서는 변형의 정도를 측정하고, 그 정도에 따라 서로 다른 신호를 발생시키는 센서이다. 그 원리는 외부에서 작용하는 응력에 의하여 금속의 치수가 변함에 따른 저항의 변화를 측정하는 것이다.



[그림 1] 미국 Google사에서 개발한 구글 글라스(좌), 삼성전사에서 개발한 갤럭시 기어와 갤럭시 핏(우)

<http://www.theverge.com/2013/2/22/4013406/i-used-google-glass-its-the-future-with-monthly-updates>, [www.androidpolice.com](http://www.androidpolice.com)

한편, 액체 금속은 녹는점이 낮아 상온에서 액체 상태로 존재하는 금속이다. 일반적으로 액체 금속은 높은 표면 장력과 낮은 점도 등 유체의 고유한 성질 이외에도, 높은 열·전기 전도도를 가지고 있기 때문에 여러 가지 산업 분야에 사용되고 있다. 과거에는 수은이 많이 사용되었으며, 주로 핵융합로의 냉각[1], 열 인터페이스 재료[2], 온도감지 및 제어 장치(thermostat)[3]에 사용되었으나 높은 독성과 반응성 때문에 최근에는 거의 사용되지 않고, 최근에는 인듐과 갈륨 기반 공정 합금(eutectic gallium indium[4, 5]과 gallium indium tin[6, 7])을 많이 사용하고 있다.

액체 금속과 탄성 중합체를 이용하여 PDMS 탄성중합체 미소채널을 제작하고 유연한 PDMS 기판 및 열전도성이 높은 실리콘 기판에 부착한 뒤 액체 금속을 채널 내부로 주입하여, 각각 유연한 액체 금속 기반 마이크로 히터와 높은 온도 균일도를 갖는 액체 금속 기반 마이크로 히터를 개발한 연구가 있다[8]. 액체 금속으로 변형률 센서를 제작할 경우 일반 고체 금속과는 달리 유동성과 내구성이 크기 때문에 변형이 크게 일어나도 파손 정도가 작다는 장점이 있다. 또한, 소재를 극도로 늘였을 때에도 전기가 비교적 일정하게 흐른다.

따라서 본 연구에서는 액체 금속과 실리콘 탄성중합체를 이용하여 변형률 센서를 설계 및 제작하고자 한다. 또한 제작한 변형률 센서의 성능을 파악하고자 한다.

## 2. 연구 목표 및 독창성

액체 금속은 기존의 얇은 고체 기반 소재에 비해 더 큰 변형에도 단선 없이 전기 전도성을 유지할 수 있기 때문에 유연 전자 장비나 웨어러블 기기에 응용 가능성이 있다. 하지만 아직까지 높은 분해능으로 적절하게 패터닝하는 기술의 없기 때문에 실용화가 되지는 않고 있다.

따라서 본 연구에서는 액체 금속과 실리콘 탄성중합체 소재를 이용하여 변형률 서를 제작하고, 이를 기반으로 기계적인 변형 인가 시 전기적인 신호를 발생시켜 적절한 신호를 입력시킬 수 있는 인체 피부에 직접 착용 가능한 웨어러블 장치를 개발하고자 한다. 또한, 액체 금속을 이용한 착용 가능한 신호 발생 및 입력 장치 개발을 넘어서 다소 값비싼 액체 금속 전극 형성에 필요한 재료를 최소로 소비하는 패터닝하는 방법을 개발하고, 패터닝 정밀도의 한계를 탐구하고자 한다.

# Ⅱ. 이론적 배경 및 연구방법

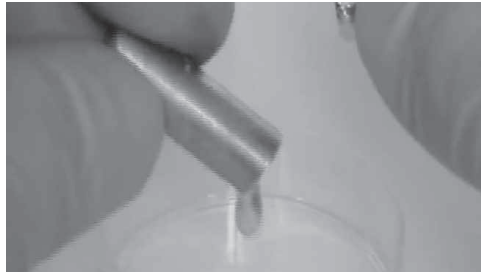
## 1. 이론적 배경

### 1.1. 액체 금속

액체 금속은 상온에서, 또는 사용 온도에서 액체 상태로 존재하는 금속이다. 액체 금속의 성질에는 녹는점이 낮은 것, 표면장력이 큰 것, 점성이 작고 유동성이 큰 것, 고체 금속에 비해 방사선 손상을 덜 받는 것, 열·전기 전도도가 높은 것 등이 있다.

액체 금속의 종류로는 수은, NaK, 갈륨-인듐 합금 등이 있다. 예전에는 수은이 많이 사용되었으나 독성 때문에 그 대체제로 갈륨-인듐 합금이 많이 사용되고 있다. 갈륨-인듐 합금은 액체 금속의 일반적인 성질 외에도 공기 중의 산소와 반응하여 표면에 산화 막을 형성하는 특성을 가지고 있다. 그 중 무게 비로 갈륨이 75%, 인듐이 25%일 때의 합금을 Eutectic Gallium Indium이라고 한다. Eutectic Gallium Indium의 녹는점은 약  $15.5^{\circ}\text{C}$ 이고, 열전도도는  $41.8\text{W/mK}$ , 밀도는  $6.1\text{g/cm}^3$ 이다. 또

한, 염산으로 산화 막을 제거할 수 있다는 특징을 가진다. 제작 방법은 상온에서 고체 상태인 갈륨과 인듐을 서로 비벼주는 것인데, 이렇게 하면 마찰열에 의해 공정 상태의 액체 금속이 만들어진다.



[그림 2] 액체 금속 중 갈륨-인듐 합금

### 1.2. 실리콘 탄성중합체

탄성중합체는 장력을 가하면 몇 배가 늘어나고, 그 장력을 제거하면 원래의 길이로 되돌아가는 성질을 가진 고분자 화합물이다. PDMS나 EcoFlex 등이 그 예이다. 경화 방법에는 백금 촉매를 이용하는 방법과 가교제의 가수분해 반응과 응축반응을 통해 폴리머만 남기는 방법이 있다. 고온에서 경화시키면 비교적 딱딱하고 저온에서 경화시키면 비교적 말랑말랑하다



[그림 3] 실리콘 탄성중합체

[9] <http://www.silon.com/products/scar-management/silon-ses/>

### 1.3. 변형률 센서

변형률 센서는 변형의 정도를 측정하고, 그 정도에 따라 서로 다른 신호를 발생시키는 센서이다. 그 원리는 외부에서 작용하는 응력에 의하여 금속의 치수가 변함에 따른 저항의 변화를 측정하는 것이다.

액체 금속과 실리콘 탄성중합체를 이용하여 만든 변형률 센서의 구조는 다음과 같다.



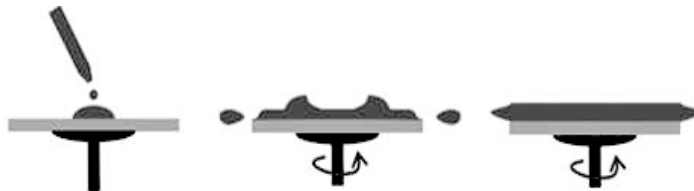
[그림 4] 변형률 센서의 구조

얇은 두 개의 실리콘 탄성중합체 기판 사이에 액체 금속이 있고 이를 외부와 전기적으로 연결하기 위한 전선이 있는 형태이다.

제작 방법에는 소프트리소그래피를 이용하는 방법과 고정 분사 주사바늘과 전동 스테이지를 이용한 직접 Writing 방법이 있다.

소프트리소그래피는 포토리소그래피를 이용하여 제작한 실리콘 웨이퍼 몰드를 기반으로 변형률 센서를 제작하는 방법이다. 제작 순서는 다음과 같다.

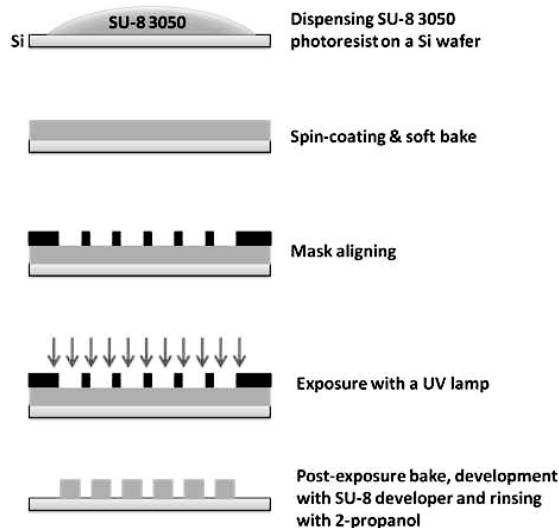
- (1) 변형률 센서에 사용될 액체 금속 부분의 도안을 설계한다.
- (2) 스핀코터를 이용하여 실리콘 웨이퍼 위에 감광액을 도포한다.



[그림 5] 스핀 코터로 감광액을 도포하는 과정

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:SolGel\\_SpinCoating.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:SolGel_SpinCoating.jpg)

- (3) 도포한 실리콘 웨이퍼를 soft-bake 한다.
- (4) 변형률 센서의 액체 금속 부분이 패터닝 되어있는 포토마스크를 적절히 놓는다.
- (5) 실리콘 웨이퍼를 근자외선에 노출하여 post-exposure bake 한다.
- (6) Developer를 이용하여 현상한다.



[그림 6] 포토리소그래피를 이용하여 실리콘 웨이퍼를 만드는 과정 PolymerCoatingsLecture1-2015

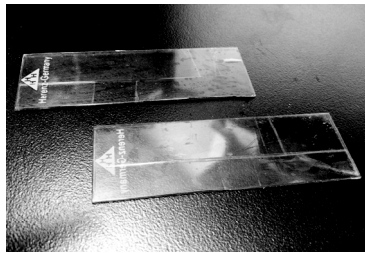


이 과정을 거치면 자외선을 받은 부분이 굳는다. 실리콘 웨이퍼를 세척하면 액체 금속 부분이 패터닝 되어있던 포토마스크를 반전한 부분만이 남는다.

위에서 제작한 실리콘 웨이퍼 몰드에 실리콘 탄성중합체를 경화제와 섞어서 붓고 기포를 제거한 후 경화한다.

직접 Writing 방법의 제작 순서는 다음과 같다.

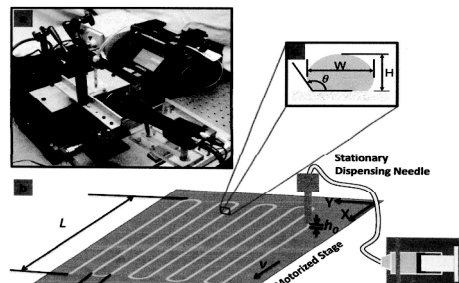
- (1) 슬라이드 글라스를 캡톤 테이프로 코팅한다.



[그림 7] 캡톤 테이프로 코팅한 슬라이드 글라스

이 과정은 슬라이드 글라스를 기판으로 하여 변형률 센서를 제작한 후 마지막으로 변형률 센서를 슬라이드 글라스로부터 쉽게 떼어내기 위한 과정이다.

- (2) EcoFlex의 주제와 경화제를 1:1로 섞는다.
- (3) 진공실에 넣어서 기포를 제거한다.
- (4) 캡톤 테이프로 코팅한 슬라이드 글라스 위에 스핀코터를 이용하여 기포를 제거한 EcoFlex를 고르게 도포한다.
- (5) 약 90℃의 온도에서 EcoFlex를 경화시킨다.
- (6) EcoFlex 위에 가압장치와 전동 2축 스테이지를 이용해서 패턴을 직접 프린팅 한다.
- (7) 위에서 프린팅 한 액체 금속 패턴 위에 EcoFlex를 붓는다.
- (8) 외부로 연결할 수 있는 전선을 삽입하여 변형률 센서를 제작한다.



[그림 8] EcoFlex 기판 위에 액체금속을 프린팅하는 장치

- [10] J. William Boley, Edward L. White, George T.-C. Chiu, and Rebecca K. Kramer, "Direct writing of gallium-indium alloy for stretchable electronics," Adv. Funct. Mater., DOI: 10.1002/adfm.201303220, 2014969

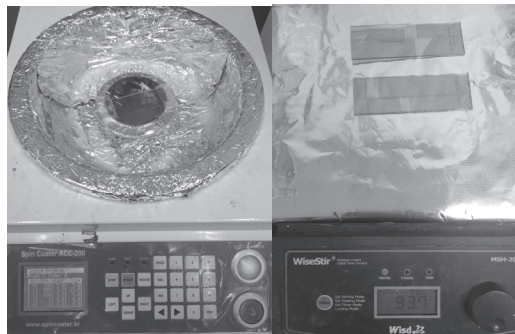
## 2. 연구 방법

### 2.1. 액체금속의 제작

액체금속 Eutectic gallium indium을 만든다. 상온에서 고체 상태인 갈륨과 인듐을 각각 무게 비 75wt%, 25wt%의 공정 조성으로 비빈다. 마찰열이 발생해 상온에서 액체 상태로 존재하는 녹는점이 약 15.5℃인 공정상태의 액체 금속 Eutectic gallium indium이 만들어진다.

### 2.2. 실리콘 탄성중합체 기판 제작

- (1) 실리콘 탄성중합체의 재료인 EcoFlex의 주제와 경화제를 1:1로 섞는다.
- (2) 진공실에 넣어서 섞으면서 EcoFlex에 섞인 기포를 제거한다.
- (3) 슬라이드 글라스를 캡톤 테이프로 코팅한다. (이 과정은 슬라이드 글라스를 기판으로 하여 변형률 센서를 제작한 후 마지막으로 변형률 센서를 슬라이드 글라스로부터 쉽게 떼어내기 위한 과정이다.)



[그림 9] 스핀코터를 이용하여 슬라이드 글라스 위에 EcoFlex를 얇고 고르게 도포하는 과정 (좌), 핫플레이트로 완성된 기판을 경화시키는 과정 (우)

- (4) 캡톤 테이프로 코팅한 슬라이드 글라스 위에 EcoFlex를 붓고 스핀코터를 이용해 EcoFlex를 고르게 도포하여 초박형 실리콘 탄성중합체 기판을 만들고 경화시킨다. (EcoFlex가 고르게 도포되지 않아 높이가 일정하지 않으면, 액체 금속이 고르게 프린팅 되지 않으므로 이에 유의한다.)

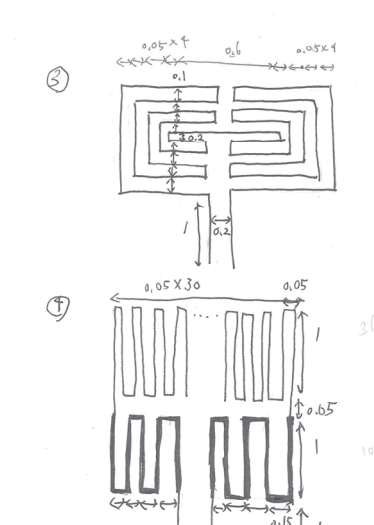
### 2.3. 실리콘 탄성중합체 기판 위에 가압장치와 고정 분사 주사바늘, 전동 x-y축 스테이지를 이용하여 원하는 패턴대로 액체금속을 직접 프린팅 한다.

- (1) 주사바늘 아래 지그 부분에 슬라이드 글라스를 놓고 고니어 스테이지를 움직여가며 슬라이드 글라스 면이 모두 높이가 같게 조정한다.
- (2) 액체금속이 담겨있는 시린지를 가압한 후에 주사바늘이 고정된 Z축 스테이지를 움직여서 EcoFlex가 코팅된 슬라이드 글라스와 주사바늘의 간격을 조정한다.

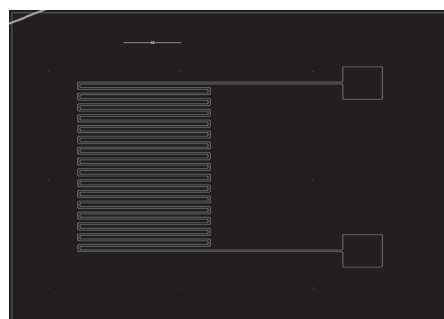


[그림 10] 액체금속을 분사하는 주사바늘. 그 아래 주사바늘이 비치는 부분에 투명한 EcoFlex기판이 있다.  
z축 스테이지로 높이를 조정할 수 있다.

(3) 컴퓨터 프로그램을 이용하여 전동 2축(x-y축) 스테이지를 움직여 원하는 패턴을 EcoFlex 위에 프린팅 한다.



[그림 11] 프린팅 할 액체 금속 패턴의 후보들 중 몇 가지. 모양과 치수를 직접 설계하였다.



[그림 12] 설계한 액체 금속의 패턴 중 실제 사용한 모양.그림

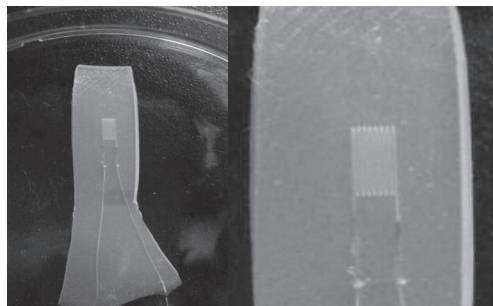


[그림 13] 컴퓨터 프로그램을 이용하여 전동 2축 스테이지를 움직이는 모습.  
주사바늘에서 액체금속이 나오고 있는지를 화면으로 볼 수 있다.

- (4) 시린지에 가하는 압력을 꺼준 후에 Z스테이지를 높이고 슬라이드 글라스를 꺼낸 후 냉장고에서 얼린다.

#### 2.4. 프린팅 한 액체 금속 패턴 위에 EcoFlex(실리콘 탄성중합체)를 붓고 전선을 삽입하여 변형률 센서를 제작한다.

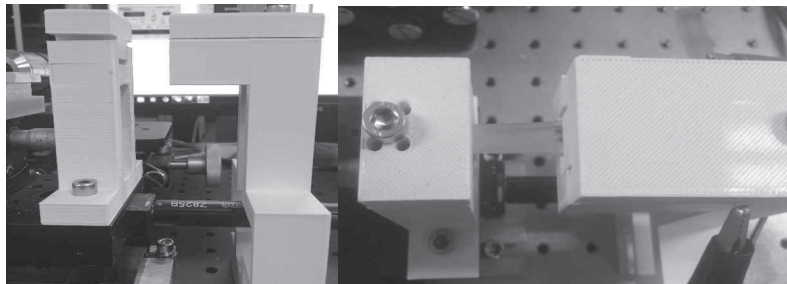
- (1) 잘 섞어서 기포를 제거한 EcoFlex를 '2.3'과정을 통해 액체금속 패턴이 프린팅되어 있는 실리콘 탄성중합체 기판 위에 붓고 경화시킨다. (액체금속이 주위 공간에 노출되면 접촉으로 인해 패턴된 모양이 변형될 수 있고 또한 손상의 위험이 있기 때문에 액체금속을 외부와 차단시키기 위해 액체금속 패턴 주위를 모두 EcoFlex로 채우기 위해 진행한 과정이다.)
- (2) 2.4 (1)에서 부었던 EcoFlex가 완전히 경화되면 실리콘 탄성중합체 기판을 슬라이드 글라스로부터 떼어낸 후 전선을 연결할 부분을 칼로 잘라서 전선을 삽입하고 다시 그 부분에 EcoFlex를 붓고 경화시킨다.



[그림 14] 완성된 변형률 센서의 모습 (좌) / 변형률 센서 안의 액체금속 패턴 (우)

### 2.5. 제작한 변형률 센서의 변형률에 따른 저항변화 특성파악 (인장 실험)

- (1) 오른쪽은 바닥에 고정되어 있고 왼쪽은 전동 1축 스테이지에 연결되어 있는 지그에 제작한 변형률 센서를 놓고 고정한다.
- (2) 저항을 측정하기 위해 전선을 디지털 멀티미터와 연결한다.
- (3) 컴퓨터로 저항을 측정하면서 전동 1축 스테이지로 50% 변형을 반복적으로 가해 준다.
- (4) 변형률을 100%, 150%, 200%, 250%, 300%로 증가시켜가면서 각 변형률에서의 저항을 반복적으로 측정한다.
- (5) 위와 같이 변형률을 증가시키며 변형을 가할 때 저항이 단선되어 더 이상 변형률 센서로 사용할 수 없는 변형률을 기록한다.



[그림 15] 인장 실험을 하는 장치 및 모습

### 2.6. 변형률 센서를 관절에 부착하여 굽힘 실험

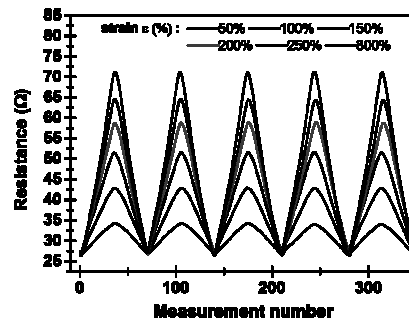
- (1) 변형률 센서를 손가락 관절에 고정하고 저항을 측정하기 위해 전선을 디지털 멀티미터와 연결한다.
- (2) 손가락의 굽힘 정도를  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $50^\circ$ ,  $70^\circ$ ,  $90^\circ$ 로 증가시켜가며 그에 따른 저항 변화를 컴퓨터로 측정한다.
- (3) 변형률 센서 인장실험에서 얻은 변형률과 비교한다.



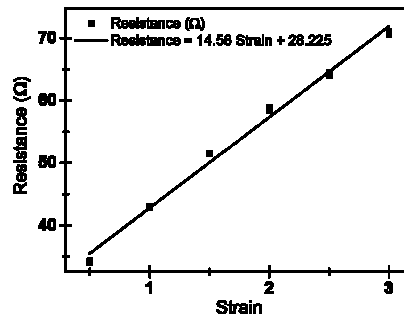
[그림 16] 손가락 관절에 변형률 센서를 붙이고  $0^\circ$ ,  $70^\circ$  굽혔을 때 저항을 측정하는 모습

### Ⅲ. 연구결과

#### 1. 제작한 변형률 센서의 변형률에 따른 저항변화 특성과악 (인장실험)



[그림 17] 50~300%의 변형을 여러 차례 반복하면서 측정한 저항 변화



[그림 18] 변형률에 따른 저항. 변형률이 증가함에 따라 저항이 선형적으로 증가함

전동 스테이지를 이용하여 반복적으로 일정한 변형을 줄 때의 저항 값을 [그림 16]에서 확인할 수 있다. 반복적으로 변형을 가하더라도 일정한 변형률에서는 항상 일정한 저항 값을 보이는 것을 확인할 수 있다. 또한 50% ~ 300%까지 변형률에서도 안정적으로 작동하는 것을 확인하였다. [그림 17]의 최대 저항일 때 즉, 각각 50%에서 300%의 변형률일 때의 저항 값을 변형률에 따라 그리면 [그림 17]의 그래프를 얻는다.

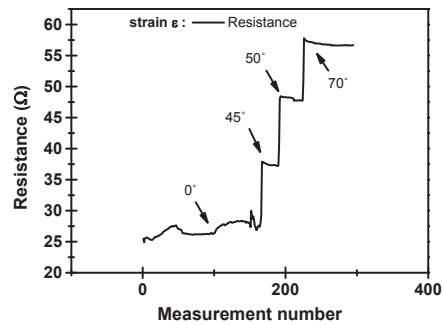
변형률이 증가할수록 저항이 선형적으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 본 변형률 센서의 gauge factor (GF)를 구하면

$$GF = \frac{\Delta R / R_G}{\epsilon} = 0.507 \text{ 이다.}$$

이때  $\Delta R$ 은 변형률에 의한 저항의 변화량,  $R_G$ 는 변형되지 않은 상태의 저항 값,  $\epsilon$ 는 변형률이다.

## 2. 변형률 센서를 관절에 부착하여 굽힘 실험

손가락에 변형률 센서를 붙인 뒤 0도, 45도, 50도, 70도 각도로 구부러가며 저항의 변화를 측정하였다.



[그림 19] 손가락의 각도에 따른 저항의 변화

손가락의 각도 (° )	0	45	50	70
저항 (Ω)	28	37	48	57

[표 1] 손가락의 각도에 따른 저항의 변화

위에서 변형률 센서의 특성 파악한 결과를 바탕으로 변형률 센서를 실제 인체의 변형률을 측정하기 위한 실험을 수행하였다. 그 결과 손가락 관절의 굽힘에 따라서 저항이 변하는 것을 확인하였다. 즉, 손가락의 각도가 커질수록, 저항의 크기가 증가하며, 손가락의 각도에 따른 저항을 측정하고, 이를 특성 파악한 결과와 비교하여 실제 손가락 관절의 변형률을 예측할 수 있다. 예측한 결과는 다음과 같다.

손가락의 각도 (°)	0	45	50	70
실제 손가락 관절의 변형률(%)	0	60	136	198

[표 2] 손가락의 각도에 따른 저항의 변화로 파악한 손가락 관절의 변형률

실제 손가락을 거의 최대로 굽힌 70도에서도 약 200%의 변형률을 나타내는 것을 알 수 있다. 인장 실험에서 변형률 센서가 300%까지 변형되어도 아무 이상이 없었기 때문에 전선의 늘어남이나 실리콘의 변형 등의 문제점 없이 손가락 관절의 굽힘 정도에 따른 신호 입력기로의 개발이 가능하다는 것을 알 수 있다.

## IV. 결론 및 제언

### 1. 결론

액체 금속을 EcoFlex 위에 프린팅하기 위한 설비를 제작하여 이를 통해 다양한 패턴닝을 시도해 볼 수 있었다. 사용 목적, 측정의 정확성 등을 고려하여 여러 패턴들을 고안하였고, 그 중 실험을 하여 데이터를 얻었을 때 다른 패턴에도 이용할 수 있게끔 가장 대칭적이고 기본적인 실험에 적합한 패턴을 이용하여 변형률 센서를 제작하였다.

제작한 변형률 센서는 특정한 변형률에서는 항상 일정한 저항 값을 보이고 변형률과 저항이 선형적으로 증가하는 규칙성을 보였다. 이를 통해 이 변형률 센서가 300%까지 변형되어도 전선의 늘어남이나 실리콘의 변형 등의 문제점이 발생하지 않았다는 것을 알 수 있다. 즉, 실제에서 300%의 변형이 이루어 질 때까지 이용 가능하므로 신체에 부착하였을 때 어느 곳에도든 사용가능하다고 볼 수 있다.

제작한 변형률 센서의 인장실험을 통해 Gauge factor를 구한 결과 대략 0.5가 나왔고 이는 일반적인 금속박막 변형률 센서의 Gauge factor인 2 보다 작으나, 이는 액체금속의 비저항이 일반적인 금속보다 작기 때문인 것으로 보인다.

### 2. 제언

본 연구의 활용 방안은 다음과 같다. 우선 전자, 기계, 재료, 나노 및 다양한 공학 간의 새로운 융합 연구를 도출할 수 있다. 액체 금속과 같은 유연 전도성 재료는 최근 전자, 기계, 재료, 나노 및 다양한 공학 분야에서 응용 가능한 신소재이다. 이를 자유자재로 프린팅하고 응용하여 센서로 만드는 기술을 개발하는 것을 토대로 여러 분야 간의 다양하고 새로운 융합 연구를 도출에 큰 역할을 하리라 기대된다.

또한, 액체 금속 프린팅 장치를 개발 및 사업화할 수 있다. 본 연구를 통하여 개발될 액체 금속 프린팅 장치의 공간 분해능을 향상시키고, 임의의 곡면에 프린팅 가능하게 개선한다면, 유연 전도성 재료 프린팅 장치 관련 사업화가 가능하리라 예상된다.

새로운 마이크로 공정 기술 보유 인력을 양성할 수 있다. 액체 금속과 같은 재료를 패턴 된 실리콘 탄성 중합체에 주입하거나 직접 프린팅하여 기능성 구조를 제작할 수 있는 기술을 보유한 연구 인력 양성에 활용 가능하다.

멤스(MEMS) 관련 국내외 학술 대회나 학술지의 연구 동향을 보면 액체 금속 관련 연구가 계속적으로 증



가하는 추세이므로, 학술대회나 학술지 논문 투고에 시의 적절한 주제이다. 이와 같은 활동을 통해 연구 성과를 확산 시키고 공유할 수 있다.

마지막으로 EcoFlex의 두께를 매우 얇게 제작하면 다른 접착제 없이도 피부에 잘 부착되기 때문에 기존의 금속박막 변형률 센서보다 편리하다. 따라서 인장, 압축, 비틀림 등 다양한 외부 응력에 따른 변형률을 측정하여, 변형률센서가 신체에 부착하여 움직임만으로 전자기기 등을 조작할 수 있는 리모콘, 척추 측만증 환자들을 위한 척추 측만증 예방 및 치료 센서, 인공 피부 등으로서의 사용 가능성이 있다.

한 편, 추후 연구 방향은 다음과 같다. 우선, 본 논문에서 실험한 변형률 센서는 액체 금속을 프린팅한 모양을 한 가지로만 제한하여 휘는 각도, 늘어난 정도에 따른 저항력 크기 변화만을 비교하였다. 앞으로 나아가 다양한 모양으로 액체 금속을 프린팅하여 변형률 센서를 제작한다면 훨씬 더 움직임을 정밀하게 측정할 수 있고, 디자인 측면에서도 우수한 변형률 센서가 될 수 있을 것이다.

실제 액체금속을 이용한 변형률 센서를 실용화 하여 이를 제작할 때 정밀하게 제작할 수 있는 기계개발이 필요하다. EcoFlex의 두께를 아주 얇게 도포하면 다른 접착제 없이 변형률 센서를 피부에 부착하여 사용할 수 있으므로 그와 관련된 기계개발이 중요할 것이다.

또한, 변형률센서의 패턴과 두께를 조절하면 현재 Gauge factor인 0.5보다 더 향상되고 민감한 변형률 센서를 제작할 수 있다. 우리는 직접 설계한 여러 패턴들 가운데에서 가장 대칭적이고, 기본적이고, 실험에 적합할 것 같은 패턴을 선택하여 실험을 진행하였다. 하지만 이는 우리가 이론적으로만 생각한 것이므로 다른 패턴들에 관한 추가 연구가 필요하다.

마지막으로, 인장실험 시 변형률 센서의 온도는 상온과 비슷하나 굽힘 실험에서는 피부에 부착하였으므로 변형률 센서의 온도가 증가한다. 따라서 온도에 따른 저항의 변화를 고려하여 인장 실험을 체온과 비슷한 조건에서 다시 실험하여 그 결과를 굽힘 실험에 이용하는 것이 바람직할 것이다.

## ■ 참고문헌

- [1] M. P. Johnson, "Some aspects of moderate precision temperature control in communication engineering," J. Brit. IRE, Vol. 8, pp. 250-259, 1948.
- [2] A. Hamdan, A. McLanahan, R. Richards, and C. Richards, "Characterization of a liquid-metal microdroplet thermal interface," Exp. Therm Fluid Sci., Vol. 35, pp. 1250-1254, 2011.
- [3] H. U. Borgstedt, and H. Glasbrenner, "Development of a direct insulation layer for a self-cooled liquid metal fusion reactor blanket," Fusion Eng. Des., Vol. 27, pp. 659-662, 1995.
- [4] M. D. Dickey, R. C. Chiechi, R. J. Larsen, E. A. Weiss, D. A. Weitz, and G. M. Whitesides, "Eutectic gallium-indium (EGaIn): A liquid metal alloy for the formation of stable structures in microchannels at room temperature," Adv. Funct. Mater., Vol. 18, pp. 1097-1104, 2008.
- [5] R. C. Chiechi, E. A. Weiss, M. D. Dickey, and G. M. Whitesides, "Eutectic gallium-indium (EGaIn): A moldable liquid metal for electrical characterization of self-assembled monolayers," Angew. Chem. Int. Ed., Vol. 47, pp. 142-144, 2008.
- [6] N. Pekas, Q. Zhang, and D. Juncker, "Electrostatic actuator with liquidmetal elastomer compliant electrodes used for on-chip microvalving," J. Micromech. Microeng., Vol. 22, 097001, 2012.
- [7] B. Zhang, Q. Dong, C. E. Korman, Z. Li, and M. E. Zaghoul, "Flexible packaging of solid-state integrated circuit chips with elastomeric microfluidics," Sci. Rep., Vol. 3, 1098, 2013.
- [8] J. Je and J. Lee, "Design, fabrication, and characterization of liquid metal microheaters," J. Microelectromech. Syst., in press
- [9] <http://www.silon.com/products/scar-management/silon-ses/>
- [10] J. William Boley, Edward L. White, George T.-C. Chiu, and Rebecca K. Kramer, "Direct writing of gallium-indium alloy for stretchable electronics," Adv. Funct. Mater., DOI: 10.1002/adfm.201303220, 2014969

### 심사평

이 논문은 액체금속과 탄성중합체를 이용하여 변형률 센서를 제작하고, 이를 기반으로 전기적 신호를 발생시켜 적절한 신호발생이 가능한 웨어러블 장치를 개발하는 연구 내용을 담고 있다. 특히 최근 웨어러블 기기가 많이 개발되고 있는 시점에 보다 정확한 신호 전달이 가능한 신소재 개발은 다양한 분야에 응용될 수 있는 융합연구라고 판단된다. 다만 이 연구 결과가 기존 연구와 어떤 차별성을 가지며, 어느 수준에 도달했는 지에 대한 자기 평가가 마지막 결론이나 결론 부분에 언급되었으면 하는 아쉬움이 남는다.

## 연구 후기

처음 R&E를 시작했을 때만 해도 아무것도 몰랐다. 그저 액체금속이 궁금하고 변형률 센서를 만들어보고 싶어 했던 학생들이일 뿐이었다. 주제에 대해 교수님의 간단한 소개와 설명을 듣고 나서 생소함과 흥미로움에 설레는 한편, 잘 할 수 있을지 걱정을 했다. 웨어러블 장치와 같은 최근 주목받는 첨단 기기를 우리가 직접 연구한다는 것에 놀라기도 했었다. 잘 휘어지고 피부에 잘 부착되는 실리콘 탄성중합체 속에 액체금속을 주입해서 사람의 동작대로 전기신호를 구별해 받을 수 있다는 점에 착안하여 우리는 척추측만증 치료장치와 원격조절시스템 등 우리가 제작하게 될 변형률 센서의 이용방안에 대한 아이디어를 모았다. 우리는 교수님, 조교 선생님께 많은 도움을 받으며 연구를 진행하였다. 갈륨과 인듐으로 액체금속을 직접 만들어보고, 변형률 센서에 사용될 금속의 패턴을 설계하고 3D 프린터를 사용하여 그려보았으며, 변형률 센서를 제작한 후에는 실험을 통해 그 효율을 확인해보았다. 그 후에는 각자 분량을 나누어 논문을 작성했다. 이런 모든 과정을 거치면서 많은 어려움이 있었지만 우리는 계속된 노력으로 끝내 연구를 성공적으로 마칠 수 있었으며 한층 성장한 것 같다. 일차적으로 액체금속과 변형률 센서에 대해서 많이 알게 되었고, 단순히 호기심과 궁금증으로 가지고 있었던 것들을 어떻게 탐구심으로 바꾸어내어 연구를 진행해나가는지를 배웠다. 그리고 연구를 할 때 팀원들끼리의 협동심도 중요하다는 것을 깨닫게 되었다. 또 앞으로 다른 연구를 하게 될 때 직면할 많은 문제들에 대해 효율적이고 올바르게 대처할 수 있는 방법을 배울 수 있었다. 대학에서 수행하는 심도 있는 연구과정에 함께하며 고등학교에서 할 수 있는 경험에 비해 훨씬 다양하고 많은 양의 지식을 얻게 되어서 기쁘다. 마지막으로 부족한 논문을 이렇게 학술지에 게재될 수 있도록 선정해주신 심사위원님들께 감사드리고, 또한 저희를 지도해주신 제진술 조교님, 이정철 교수님, 그리고 안정용 선생님께 감사의 말씀을 드리고 싶다.

## 연구진

고은섬(Ko Eunseom, 한성과학고등학교 1학년, dmstja5@naver.com), 제1저자 및 교신저자  
 박채리(Park Chaeree, 한성과학고등학교 1학년, cof10530@nate.com)  
 차이주(Cha Iju, 한성과학고등학교 1학년, cha2ju6045@naver.com)  
 최수연(Choi Sooyeon, 한성과학고등학교 1학년, beom1210@naver.com)

지도교사 : 안정용(Ahn Jungyong, 한성과학고등학교, 전공: 물리학, physics\_edu@hanmail.net)  
 지도교사 : 이정철(Lee Jungchul, 서강대학교 기계공학과, jayclee@sogang.ac.kr)

(2015. 1월 현재)

## 전자기장 내에서 유체의 가속 현상에 관한 메커니즘과 추진체 연구 (Research of relations between velocity of electroconductive fluid and two fields in electromagnetic field)

강제훈 · 정상하(광주과학고등학교)

### 초 록

본 논문에서는 전기장과 자기장이 수직으로 걸려있는 공간에서 유체가 가속되는 현상에 대해 연구하였다. 먼저 우리 팀은 선행 논문에서 제시된 모델과 실험 결과에서 오류를 발견했고 그 원인과 이를 수정한 모델을 제시하게 되었다.

수정된 모델을 바탕으로 전자기장 내에서 유체의 가속 현상이 일어나기 위해서는 두 가지 조건 ‘전기 전도성 유체’와 ‘유체와 전기장을 걸어주는 두 극판 사이에서 전자의 이동’이라는 기존의 조건들이 필수적이라는 것을 실험을 통해 재검증하였다.

위의 조건을 따르는 MHD 현상에서 전기장의 세기와 유체의 전기전도도 등의 다양한 조건에 따른 유체의 속도를 이론적으로 해석한 뒤 실험 결과를 예측하였다. 이론적인 해석에서 유도된 공식은 유체의 속력은 시간에 따라  $\sin$  파형을 그리며, 전기장에 세기에 따라 유체의 평균 속도의 증가하고, 자기장의 세기에 따라 유체의  $\sin$  파형의 주기가 감소한다는 흥미로운 결과를 보여주었다. 이에 우리 팀은 동일한 조건에서 유체의 전기전도도와 전기장의 세기를 변화시키면서 유체 속도를 측정했고, 새롭게 제시된 모델을 검증하였다. 또한 유도된 공식에서 나타나는  $\sin$  파형도 함께 얻을 수 있었다.

이번 실험들을 얻은 결론을 통해 최종적으로는 모형 추진 배 장치를 제작에 필요한 이론적 기반을 제시하고자 한다.

키워드 : MHD, 전기전도성 유체, 로렌츠 힘,  $\sin$  파형, 유체의 속력 미분 방정식

## I. 서론

전기장과 자기장을 수직하게 걸어준 상태에서 전기전도성 유체를 넣어주면 특정 방향으로 가속이 된다. 이 현상을 추진 장치에 이용하기 위해 조사해본 결과 ‘전기장내의 유체의 흐름에 대한 고찰. 2005. 김주성 외 2명’이라는 논문에서 증류수도 가속이 된다는 내용을 발견했다. 논문에서는 가속 현상을 설명하기 위해 극성 분자가 전기장 내에서 진동을 하게 되고 이로 인해 가속이 된다는 모델을 제시하였다.

우리 팀은 이 모델에 의문을 가지고 이를 검증하기 위하여  $H_2O$ 를 이용하여 여러 가지 조건에서 몇 차례의 정성 실험을 해보았다. 하지만 논문에서 보았던 가속 현상은 보이지 않았고 유체를 가속 시키기 위해선 반드시 전기장을 형성하는 평행한 두 극판과 유체 사이에서 전자 이동이 있어야 한다는 조건을 충족시켜야 한다는 사실을 발견하였다.

본 논문에서는 앞서 진행했던 실험을 바탕으로 전자 이동이 있는 경우와 없는 경우에서 전자기장 내 유체의 가속 현상을 설명하는 모델을 제시하고 이를 검증하였다. 그리고 실험 장치에 걸어주는 자기장의 세기가 일정할 때 전기장과 유체의 전기전도도의 변화에 따른 유체 가속 세기의 변화를 관찰한다.

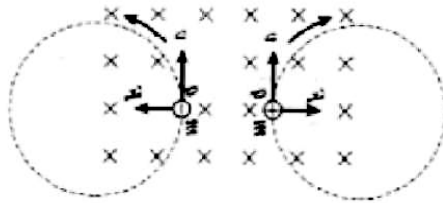
본 연구의 목적은 다음과 같다.

- 가. 전자기장 내 유체의 가속 현상을 설명하는 이론적 모델은 무엇이며, 이를 실험적으로 검증 가능한가?
- 나. 전기장의 세기와 유체의 운동 속도 사이의 관계는 어떠한가?
- 다. 유체의 전기전도도와 운동 속도 사이의 관계는 어떠한가?
- 라. 제시한 모델을 이용한 모형 배 추진 장치는 어떻게 제작하는가?

## II. 이론적 배경

### 1. 로렌츠 힘

하전 입자가 자기장내에서 움직일 때 입자의 운동 방향과 자기장의 방향의 외적 방향으로 힘을 받는데 이 힘을 로렌츠 힘이라고 한다.



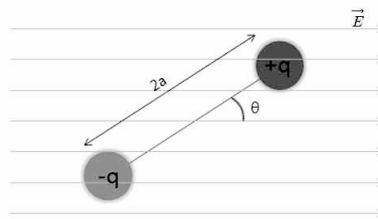
[그림 1] 전자기장 내에서 로렌츠 힘을 받는 전하들의 움직임

자기장 내에서 전하가 받는 힘은 다음과 같다.

$$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B} = m\vec{a}$$

## 2. 전기장 내에서 전기 쌍극자의 운동

전기장 내에서 쌍극자는 다음과 같은 이유로 단진자 운동을 하게 된다. 먼저 오른쪽 그림과 같은  $+q$ 와  $-q$ 전하를 가지며, 질량이 같은 점전하로 된 전기쌍극자를 생각하자. 이 쌍극자에 걸리는 토크의 세기  $\tau$ 는 다음과 같다.



[그림 2] 전기장 내 쌍극자의 진동

$$\tau = -2Fa \sin \theta = -2qEa \sin \theta$$

여기서,  $E$ 는 전기장의 세기,  $\theta$ 는 전기장과 전기쌍극자의  $-q$ 에서  $+q$ 전하로 향하는 벡터와 전기장 사이의 각도,  $a$ 는 질량중심(CM)으로부터 전하까지의 거리이다. 이때 두 전하의 질량이 같다고 하였으므로 질량중심의 위치는 쌍극자의 중앙지점이다.

쌍극자모멘트의 정의(출처 : David J. Griffiths 기초전자기학 제2판, 임채호역, P137)에 의하면  $p \equiv 2aq$ 이므로, 이 쌍극자가 받는 토크의 세기는 다음과 같다.

$$\tau = -Epsin\theta \quad \text{-----} \quad \textcircled{1}$$

또한, 먼저 두 전하의 질량이  $m$ 으로 같다고 가정하였으므로,

$$\tau = I\alpha = I\frac{d^2\theta}{dt^2} \quad \text{-----} \quad \textcircled{2}$$

여기서,  $I$ 는 관성모멘트이며,  $\alpha$ 는 각가속도로서  $\alpha \equiv \frac{d^2\theta}{dt^2}$ 으로 정의된다.

이 쌍극자의 경우 관성모멘트는 관성모멘트의 정의에 따라

$$I = ma^2 + ma^2 = 2ma^2 \quad \text{-----} \quad \textcircled{3}$$

임을 알 수 있다. ①식과 ②식에 의해

$$-Epsin\theta = I\frac{d^2\theta}{dt^2} \text{ 이 되고,}$$

만일,  $\theta$ 가 매우 작다면

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = -\frac{Ep}{I} \sin\theta \approx -\frac{Ep}{I} \theta \text{ 이 된다.}$$

이 식은 다음과 같은 단진동운동의 미분방정식( $\frac{d^2\theta}{dt^2} = -\omega^2\theta$ )의 형태와 같다. 그러므로 전기장 내에서 전기쌍극자는 단진동 운동함을 알 수 있으며, 여기서,  $\omega$ 는 각진동수로서  $\omega \equiv 2\pi f$ 로 정의된다. 따라서

$$\omega^2 = \frac{Ep}{I} \quad \text{-----} \quad \textcircled{4} \quad \text{이며,}$$

$$\omega^2 = \frac{E(2qa)}{2ma^2} = \frac{qE}{ma}$$

전기쌍극자의 진동수는 다음과 같다.

$$\therefore f \equiv \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{qE}{ma}} \quad \text{-----} \quad \textcircled{5}$$

그러나, 우리의 연구에서는 질량이 같은 전하쌍극자가 아니므로 이를 좀 더 일반화시켜야 한다. 두 전하의 질량이 각각  $m_1, m_2$  라고 하자. 이 쌍극자의 경우 질량이 다르기 때문에 질량중심이 달라지게 되어 쌍극자의 진동 중심의 위치가 변하게 되고 관성모멘트가 변하게 된다. 따라서 ④식을 이용하여 전기쌍극자의 진동수를 알기 위해서는 관성모멘트를 구해야 한다.

좌표의 원점을 쌍극자의 중심으로 하고, 질량이 다른 전하쌍극자가 질량중심을 진동중심으로 하여 진동하는 경우, 전하쌍극자의 질량중심의 좌표  $x_{cm}$ 은 다음과 같다.

$$x_{cm} = \frac{m_2 a - m_1 a}{m_1 + m_2} = a \left( \frac{m_2 - m_1}{m_1 + m_2} \right) \quad \text{-----} \quad \textcircled{6}$$

평행축정리에 의하면,  $I = m_1 a^2 + m_2 a^2 = I_{CM} + (m_1 + m_2) x_{cm}^2$  이므로

질량중심을 진동중심으로 하여 진동하는 경우, 전하쌍극자의 관성모멘트를 구할 수 있다.

$$I_{CM} = m_1 a^2 + m_2 a^2 - (m_1 + m_2) x_{cm}^2 \quad \text{-----} \quad \textcircled{7}$$

⑦식에 위의 ⑥식을 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$I_{CM} = \frac{4m_1 m_2 a^2}{(m_1 + m_2)} \quad \text{-----} \quad \textcircled{8}$$

⑧식을 ④식에 대입하면

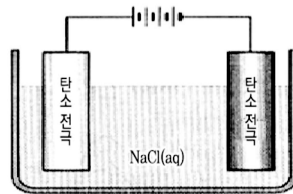
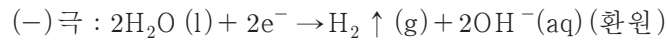
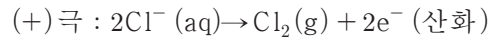
$$\omega^2 = \frac{Ep}{I} = \frac{E(2qa)}{\frac{4m_1 m_2 a^2}{m_1 + m_2}} = \frac{qe(m_1 + m_2)}{2m_1 m_2 a} = 4\pi^2 f^2 \text{ 이 되어}$$

$$\therefore f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{qE(m_1 + m_2)}{2m_1m_2a}} \text{의 진동수로 주기 운동을 하게 된다.}$$

### 3. 전기 분해

#### 3.1. NaCl 전기 분해

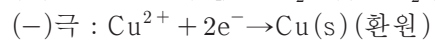
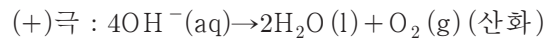
이론적인 NaCl의 전기 분해 반응식은 다음과 같다.



[그림 3] NaCl 전기 분해

#### 3.2. NaNO<sub>3</sub> 전기 분해

이론적인 NaNO<sub>3</sub>의 전기 분해 반응식은 다음과 같다.



## Ⅲ. 연구 방법 및 절차

### 1. 준비물

100mL 비커 10개, 250mL 부피 플라스크 3개, 원형 네오디움 자석 2개, 3색 라벨링 테이프, 전자저울, 약순가락, 약포지, 스탠드, 실험용 장갑, 글루건, 정원장치, 전류계, 전압계, 스탠드, 카메라, 구리판, 샬레



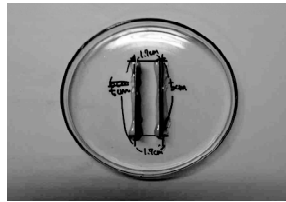


[그림 4] 실험 준비물 (1)

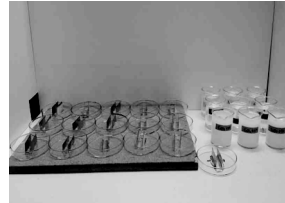


[그림 5] 실험 준비물 (2)

## 2. 실험 장치



[그림 6] 실험 장치 (1)



[그림 7] 실험 장치 (2)

- (1) 사포질한 구리판을 5cm의 길이로 일정하게 자른다.
- (2) 일정한 규격의 샬레에 글루건을 이용하여 두 개의 구리판을 1.7cm간격으로 평행하게 접착시킨다.
- (3) 장치의 규격은 다음과 같이 일정하게 한다.

샬레의 지름	95mm
구리판 사이 간격	17mm
구리판의 길이	50mm

- (4) 같은 방법으로 유체 가속 장치 17개를 제작한다.
- (5) 제작한 유체 가속 장치 중 7개에 전기장에 영향을 주지 않는 비닐로 구리판을 1~2회 감싼다.
- (6) 비닐로 감싼 두 구리판을 글루건을 이용하여 샬레에 사이 간격이 17mm가 되도록 접착 시킨다.  
이때, 비닐이 글루건의 온도에 녹지 않도록 한다.

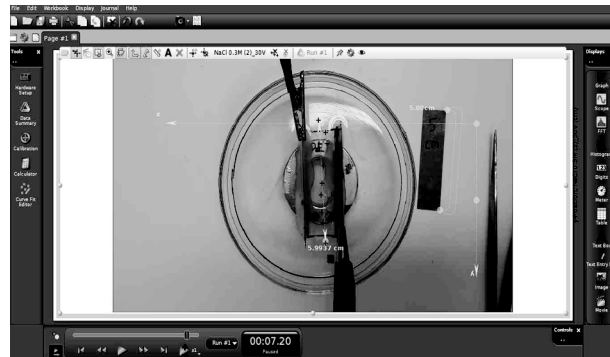
## 3. 실험 절차

- (1) 유체 가속 장치에 유체 40g을 샬레에 넣는다.
- (2) [그림 8]과 같이 네오디움 자석을 샬레 아래의 정중앙에 놓는다.

- (3) 전선을 구리판에 연결시키고 직류 전원 장치를 이용해 균일한 전기장을 생성한다.
- (4) 유체 위에 전자기장의 영향을 받지 않고, 입자를 극판의 중앙, 왼쪽, 오른쪽에 놓는다.
- (5) 전원을 공급하여 유체를 가속시키고 실험을 동영상 촬영한다.
- (6) 극판 사이의 전압, 용액의 농도, 비닐의 유무에 따라 과정 (1)~(4)를 반복한 뒤 촬영된 영상을 분석한다.

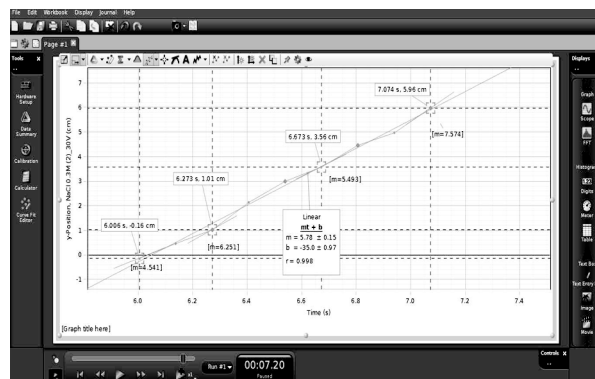
#### 4. 유체의 속도 측정 방법

- (1) [그림 8]과 같이 PASCO capstone 프로그램에 실험 동영상을 첨부한다.



[그림 8] PASCO capstone 분석 사진 (1)

- (2) 분석 간격을 2 프레임으로 설정 한 후, 실제 물체의 크기와 단위를 설정한다.
- (3) [그림 8]과 같이 하나의 축을 구리판과 평행하게 맞춘다.
- (4) 입자의 위치를 선택하여 2프레임 간격으로 경로를 찍는다.
- (5) 시간에 따른 속도 데이터를 엑셀을 통해 그래프로 표현한다.



[그림 9] PASCO capstone 분석 사진 (2)

## 5. 선행연구와 현재 연구의 유체의 속도 분석 방법과 오차 비교

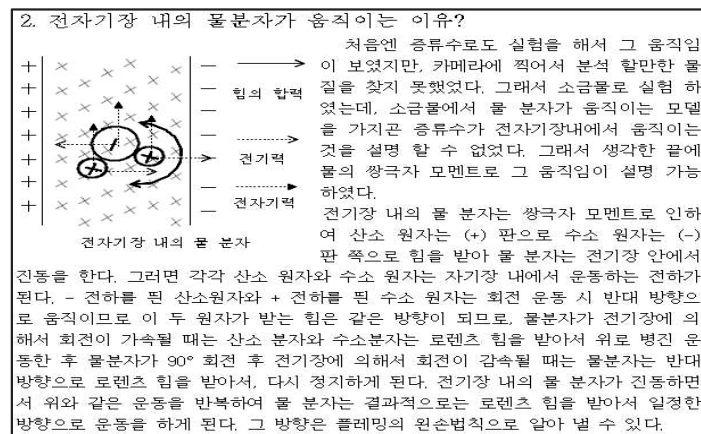
선행연구에서는 유체의 속도를 분석 할 때, 소금물의 전기 분해로 인해 생긴 기포와 부유물이 이동하는 시간을 측정하여서 유체의 시간을 측정하였다고 나와 있다. 하지만 기포와 부유물의 크기는 일정치 않으므로 속도를 분석하기에는 적절치 않은 방법이다. 그래서 위 연구에서는 전자기장에 영향을 받지 않는 라벨링 테이프를 사용하였다. 물론 이 입자가 잠겨 있는 유체의 깊이 또는 전기분해 과정 중 나오는 부산물이 유체 속도 측정에 영향을 줄 수 있다. 본 연구에서는 이 입자의 규격을 정량화하여 모든 실험에서 오차를 같게 하고 최대한 작게 줄일 수 있었다.

## Ⅳ . 연구 결과 및 논의

### 1. 전자기장 내 유체의 가속(MHD) 현상 모델링

#### 1.1. 선행 논문 모델 검증 실험

##### 1.1.1. 선행 모델 분석



[그림 10] 선행 논문(2005. 김주성 외 2명) 본문

우리가 앞서 조사했던 논문에서는 증류수 역시 전자기장 내에서 가속 현상을 보인다고 작성되어 있다. 우리는 이에 의문점을 갖고 논문에서 제시한 실험 내용과 모델을 분석해보았는데 정확한 설명이 되어 있지 않았다. 때문에 본문 중 “처음엔 증류수로도 실험을 해서 그 움직임이 보였지

만, 카메라에 찍어서 분석할 만한 물질을 찾지 못했었다. 그래서 소금물로 실험 하였는데, 소금 물에서 물 분자가 움직이는 모델을 가지곤 증류수가 전자기장내에서 움직이는 것을 설명할 수 없었다. 그래서 생각한 끝에 물의 쌍극자 모멘트로 그 움직임이 설명 가능하였다(2005. 김주성 외 2명). 라는 부분을 재해석 하였고, 이를 통해 가설을 세운 뒤 선행 모델을 검증하는 실험을 진행했다.

#### 1.1.2. 검증 실험 방법 및 가설

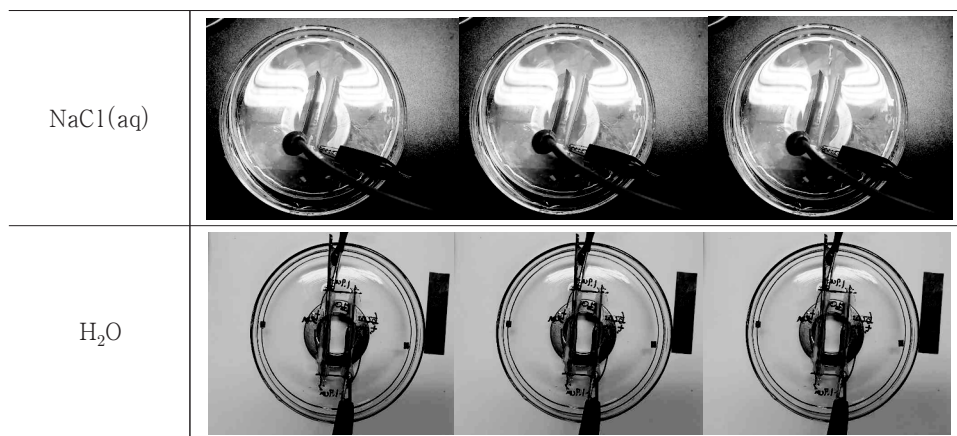
실험은 전기 전도도를 띠는 NaCl 수용액을 대조군으로 하여 극성 분자인  $H_2O$  와 함께 전기장과 자기장이 수직하게 걸려있는 공간에 놓아 진행했다. 전기장 내에서 자기장과 전기장을 수직하게 걸어준 공간 내이 극성 분자는 단진동 운동을 하면서 가속이 된다.

#### 1.1.3. 이론적 재해석

[이론적 배경2. 전기장 내에서 쌍극자의 진동 운동]에 의해 자기장과 전기장을 수직하게 걸어 준 경우  $H_2O$  분자는 진동하게 된다. 앞에서 언급한 선행 연구 논문에서는 이러한 단진자 운동으로 인해 극성 분자가 가속된다고 설명한다. 해당 논문의 일부를 [그림 10]에 나타내었다.

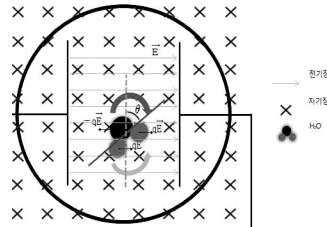
#### 1.1.4. 검증 실험 결과

논문 속 모델의 설명과는 다르게  $H_2O$  의 가속 현상을 관찰할 수 없었다. 몇 차례 동일한 실험을 반복하면서 전기장의 세기도 변화를 주었지만 가속 현상은 나타나지 않았다. 따라서 선행 모델에는 문제점이 있다는 것을 알 수 있으며 그 이유는 다음과 같이 설명할 수 있다.



[표 1] 전해질 용액(NaCl(aq)) 과 극성 분자  $H_2O$ 에 전자기장을 걸었을 때의 변화

## 1.1.5. 선행 모델의 오류 분석

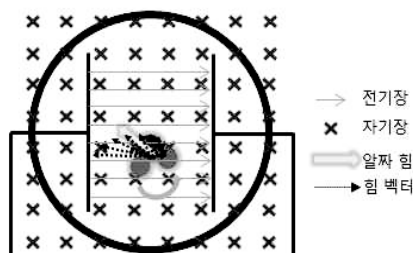


[그림 11] 선행 모델 오류 설명 (1)

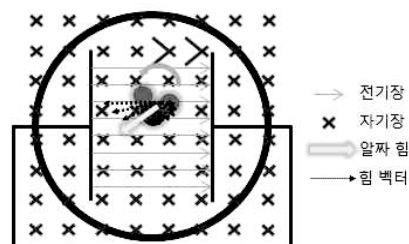
[그림 11]과 같이 전기장과 자기장이 수직한 공간에 극성 분자가 있다고 생각하자. 이 극성 분자는 전기쌍극자 이므로 임의의 진폭을 갖고 단진동을 하게 된다. 이 때 진폭의 크기는 분자의 종류나 전기장의 세기가 결정한다. 두 극판에 평행하고 분자의 무게 중심을 지나는 직선(하늘색 점선)과 분자가 이루는 각을  $\theta$ 라고 하고 시계 방향을 (+)라고 할 때, 두 가지 경우로 나눌 수 있다.

## 1.1.1.1. 반시계 방향으로 회전하는 경우

[그림 12]에서 평형점을 향해 반시계 방향으로 회전하는 경우 무게 중심을 기준으로 분자의 회전 속도는 점점 증가하게 되고 양전하를 띤 입자와 음전하를 띤 입자가 회전하므로 극성 분자는 로렌츠 힘을 받게 된다. 이 분자가 받는 로렌츠 힘은 회전 속도가 증가할수록 커지므로 알짜힘은 왼쪽 위 방향이 된다. [그림 13]에서 평형점을 지나 반시계 방향으로 회전하는 경우 회전 속도는 점점 감소하게 되고 분자가 받는 로렌츠 힘 역시 작아지게 된다. 이 힘의 합력은 왼쪽 아래 방향이 된다.



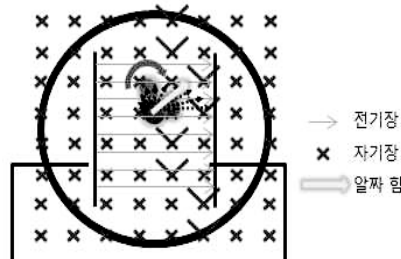
[그림 12] 선행 모델 오류 설명 (2)



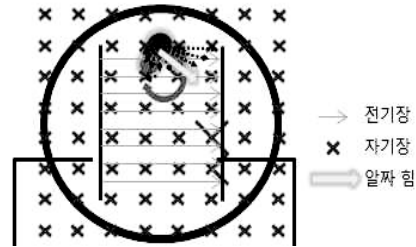
[그림 13] 선행 모델 오류 설명 (3)

## 1.1.1.2. 시계 방향으로 회전하는 경우

반시계 방향으로 회전하는 경우와 동일한 원리로 [그림 14]에서 평형점을 향해 시계 방향으로 회전하는 경우 힘의 합력은 오른쪽 위 방향이며 [그림 15]에서 평형점을 지나 시계 방향으로 회전하는 경우 힘의 합력은 오른쪽 아래 방향이다.



[그림 14] 선행 모델 오류 설명 (4)



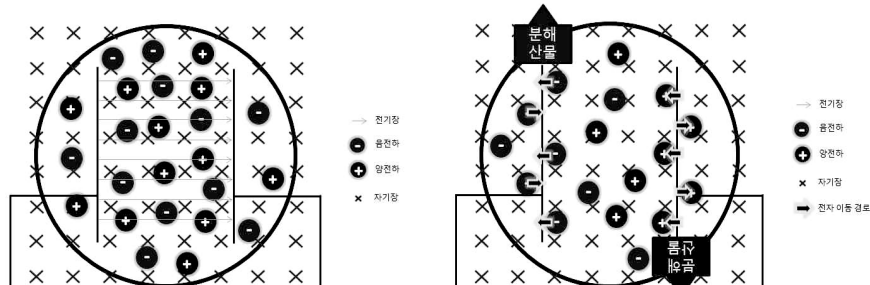
[그림 15] 선행 모델 오류 설명 (5)

따라서 유체 내 극성 분자들이 받는 힘의 합력은 전체적으로 반시계 방향으로 회전하는 경우 (+) 극판 쪽으로, 시계 방향으로 회전하는 경우 (-) 극판 쪽으로 이동하게 된다. 또한 이러한 효과는 매우 짧은 시간 내에 일어나고 유체 내 분자의 수 역시 매우 많기 때문에 극성 분자에 작용하는 힘이 상쇄되어 움직이지 않는 것이다. 즉, 극성 분자로 이루어진 유체는 가속 현상을 보이지 않으며 전기전도성 유체만 가속 현상을 보인다. 즉, 선행 모델은 오류가 있다.

## 1.2. 모델 제안 및 이론적 해석

### 1.2.1 유체의 가속과 전자 이동의 상관관계에 대하여

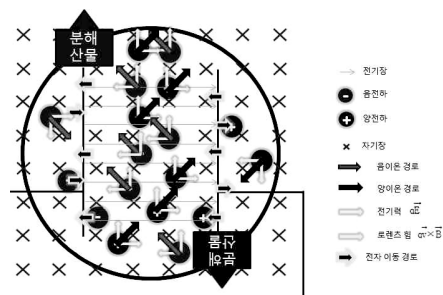
전기장과 자기장이 수직으로 걸려있는 공간에서 전기 전도성 유체와 전기장에 나란한 두 극판 사이에 전자 이동이 있는 경우에 가속 현상이 일어난다. 앞의 선행 모델 실험 결과에 의하면 유체를 이루는 분자의 극성과는 무관하게 가속 현상이 나타난다. 몇 차례의 정성 실험을 거친 후 대부분의 무극성 분자들은 가속 현상을 보이지 않는다는 점과 극성 분자 중 전기 전도도가 낮은 물질의 경우 가속 현상이 보이지 않는다는 점을 발견했다. 이를 통해 가속 현상이 일어나기 위해선 전기장을 걸어주는 두 극판과 유체 내부의 이온들 사이에서 전자 이동이 일어나야 한다는 가설을 세우게 되었다. 예를 들어, 전해질 용액의 경우 가속되기 위해선 넣어 준 용액이 전기 분해가 일어나야 한다. 이 가설을 통해 전자기장 내 유체의 가속 현상이 일어나는 과정을 설명하는 수정된 모델을 제시하였다. 또한 이를 검증하기 위하여 특정 조건을 변화시켰을 때 모델을 이용해 유체의 가속 여부를 예측해보고 실험을 통해 이를 확인했다.



[그림 16] 수정된 유체 가속 모델 (1)

[그림 17] 수정된 유체 가속 모델 (2)

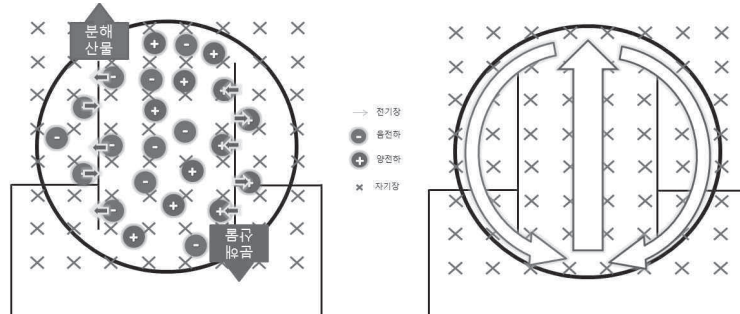
[그림 16]과 같이 전기 전도성을 띠는 유체가 지면에 수직하게 들어가는 방향의 자기장에 있다. 이 때 유체와 접하는 두 극판 사이에 전압을 걸어주면 균일한 전기장이 생성되고 양이온과 음이온은 각각 전기력을 받게 된다. [그림 17]에서 전기력을 받은 이온들의 일부가 각각 (+) 극판과 (-) 극판으로 이동하고 전자의 이동이 일어나게 된다. 이 때 전해질 수용액의 경우 전기 분해가 일어나고 분해 산물이 나오게 된다. 이로 인해 극판의 이온이 제거되면 용액 내의 다른 이온이 이동하게 되며 이 과정에서 유체가 가속이 된다.



[그림 18] 수정된 유체 가속 모델 (3)

[그림 18]에서 극판으로 이동하는 이온은 위 방향으로 로렌츠 힘을 받고 각 극판으로는 전기력을 받는다. 이 두 힘의 합력 방향으로 이온들은 가속된다. 양이온은 왼쪽 위, 음이온은 오른쪽 위 방향으로 가속되어 유체는 전체적으로 위 방향으로 가속된다. 또한 양 극판을 지나는 이온은 각각 서로 다른 방향으로 이동하게 된다. 이렇게 전자의 이동이 일어나는 동안 이온의 이동 역시 계속 일어나게 되고 가속 현상이 유지된다. 전체적인 유체의 이동 경로를 예상하면 [그림 20]과 같다. 모델대로 가속현상을 설명한다면 용액의 종류가 달라 두 이온의 원자량이 차이가 날 때 경로의 모양도 역시 차이가 있을 것이라고 예상한다. 위 모델을 검증하기 위하여 가설을 세우고 검증 실험을 하였다.

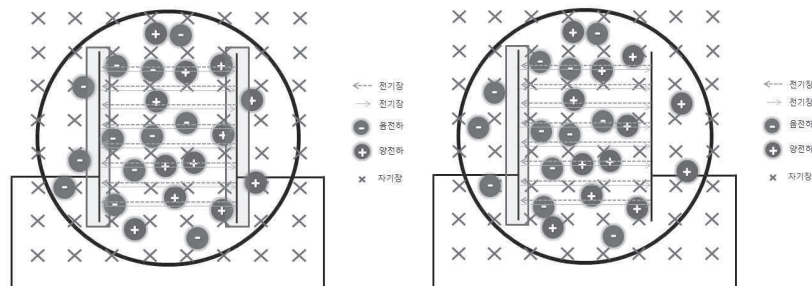




[그림 19] 수정된 유체 가속 모델 (4) [그림 20] 수정된 유체 가속 모델 (5)

### 1.2.2. 검증 실험 방법 및 가설

두 극판에 전기장에 영향을 주지 않는 부도체 물질을 씌운 경우, 한 극판에만 씌운 경우, 씌우지 않은 경우 다음 세 가지 조건에서 유체의 가속 여부를 실험적으로 알아본다. 실험 결과를 모델을 이용하여 예측해보면 [그림 21]에서 부도체에는 유전 분극 현상이 일어나 (+) 극판으로는 음이온이, (-) 극판으로는 양이온이 전기장을 상쇄시킬 때까지 이동하게 된다. 상쇄된 전기장으로 인해 더 이상 이온의 이동이 일어나지 않게 되고 유체의 가속 역시 일어나지 않을 것이다. [그림 22]에서 한 극판에만 부도체를 씌운 경우에도 마찬가지로 부도체로 인해 (+) 극판에서 유체 내 이온과 극판 사이의 전자 이동이 일어나지 않기 때문에 부도체가 없는 (-) 극판 역시 전자 이동이 없다. 따라서 두 극판에 모두 씌운 경우와 동일하게 이온의 이동이 더 이상 일어나지 않아 유체의 가속이 일어나지 않는다.



[그림 21] 수정된 모델 검증 실험 (1)

[그림 22] 수정된 모델 검증 실험 (2)

### 1.2.3. 검증 실험 결과

변인통제	●기온: 16.6℃ ●습도: 26% ●기압: 1020.2hPa ●입자의 크기: 3mm×3mm ●용액: 40g ●샬레의 지름: 95mm ●구리판 사이 간격: 17mm ●구리판의 길이: 50mm
------	---



용액		전압(V)		
		10.0	20.0	30.0
증류수		어느 경우에도 유체의 흐름을 관찰할 수 없었다.		
NaCl	0.3M			
	0.9M			
NaNO <sub>3</sub>	0.3M			
	0.9M			
CaCO <sub>3</sub>				

[표 2] 구리판 양쪽 모두 비닐을 씌웠을 때 유체의 운동 관찰 결과

용액	증류수	NaCl	NaNO <sub>3</sub>	CaCO <sub>3</sub>
실험결과	전압 10V, 20V, 30V까지 전압을 높여가며 실험하였으나 어느 경우에도 유체의 흐름을 관찰할 수 없었다.			

[표 3] 구리판 한쪽만 비닐을 씌웠을 때 유체의 운동관찰 결과

위의 [표 2]와 [표 3]에서 보듯이 우리가 예상한 결과대로 비닐을 금속판에 씌운 경우 어느 경우에도 유체의 가속 현상은 보이지 않았다. 이를 통해 극판과 유체 사이의 전자의 이동과 이로 인한 이온의 이동이 유체 가속의 원인임을 설명하는 수정된 모델을 검증하였다.

※ 전기장과 자기장이 수직으로 걸려있는 공간에서 전기 전도성 유체는 로렌츠 힘을 받아 가속되지만 유체와 두 극판 사이에 전자 이동이 없는 경우에는 유체가 가속되지 않는다.

### 1.3. 본 실험에 관한 시간에 따른 유체의 속도 함수에 관하여

$$\begin{aligned}
 \overrightarrow{F_E} &= qE\hat{i} \\
 \overrightarrow{F_g} &= q\vec{v} \times \vec{B} = q(v_x\hat{i} + v_y\hat{j}) \times (B\hat{k}) = -qv_yB\hat{i} + qv_xB\hat{j} \\
 \overrightarrow{F} &= \overrightarrow{F_E} + \overrightarrow{F_B} = (qE - q\frac{dy}{dt}B)\hat{i} + q\frac{dx}{dt}B\hat{j} = m(\frac{d^2x}{dt^2}\hat{i} + \frac{d^2y}{dt^2}\hat{j}) \\
 \begin{cases} m\frac{d^2x}{dt^2} &= qE - qB\frac{dy}{dt} \\ m\frac{d^2y}{dt^2} &= q\frac{dx}{dt} \end{cases}
 \end{aligned}$$

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = qE - qB \frac{dy}{dt}$$

$$m \frac{d^3 y}{dt^3} = q \frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{q^2}{m} (E - B \frac{dy}{dt})$$

$$\frac{d^3 y}{dt^3} + \frac{q^2 B}{m^2} \frac{dy}{dt} = \frac{q^2}{m^2} E \quad \frac{d^2 v_y}{dt^2} + \frac{q^2 B}{m^2} v_y = \frac{q^2}{m^2} E$$

- 특수해 유도

$$v_y = at^2 + bt + c \text{ 대입 후 계수비교 } \rightarrow 2a + (at^2 + bt + c) \frac{q^2 B}{m} = \frac{q^2}{m^2} E$$

$$\therefore a = 0, b = 0, c = \frac{E}{B}$$

일반해 유도

$$\frac{d^2 v_y}{dt^2} = - \frac{q^2 B}{m^2} v_y \text{ 의 양변에}$$

$$2 \frac{dv_y}{dt} \text{ 를 곱하여}$$

$$2 \frac{dv_y}{dt} \frac{d^2 v_y}{dt^2} = - \frac{2q^2 B}{m^2} v_y \frac{dv_y}{dt} \text{ 를 적분하면}$$

$$(\frac{dv_y}{dt})^2 = - \frac{q^2 B}{m^2} v_y^2 + C = \frac{q^2 B}{m^2} (D^2 - v_y^2) \quad \because C = \frac{q^2 B}{m^2} D^2$$

$$\frac{dv_y}{dt} = \frac{q\sqrt{B}}{m} \sqrt{D^2 - v_y^2}$$

$$\frac{dt}{dv_y} = \frac{m}{q\sqrt{B}} \frac{1}{\sqrt{D^2 - v_y^2}}$$

$$t = \frac{m}{q\sqrt{B}} \sin^{-1} \frac{v_y}{D} + \xi$$

$$v_y = D \sin(\sqrt{\frac{q^2 B}{m^2}} t + \phi)$$

$$\phi = - \sqrt{\frac{q^2 B}{m^2}} \xi + \xi$$

$$\therefore v_y = D \sin(\sqrt{\frac{q^2 B}{m^2}} t + \phi) + \frac{E}{B} \quad f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{q^2 B}{m^2}}$$

[수식 2] 유체의 속도 함수

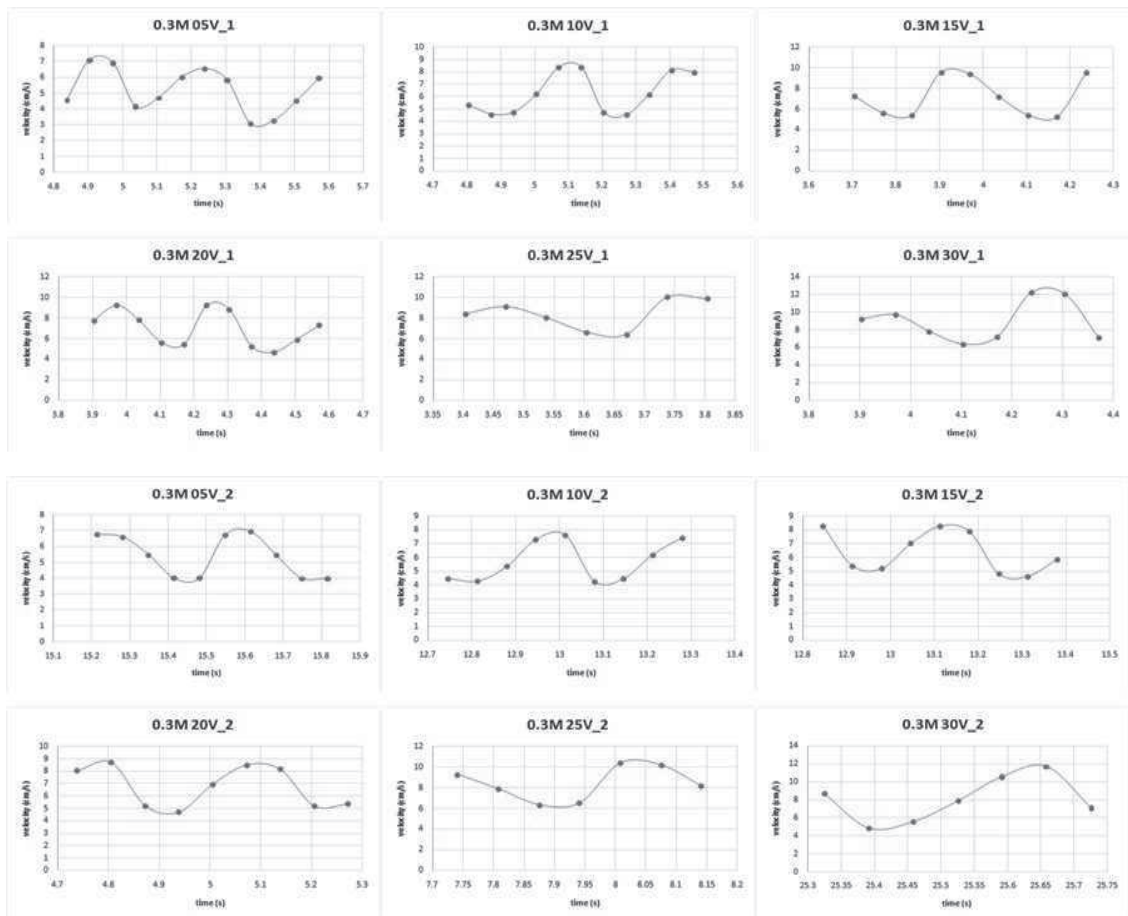
[수식 3] sin파형의 진동수

[수식 2]를 통해 유체의 속도는 전체적으로 sin파형을 그리게 되며, 전기장( $E$ )이 증가 하면 sin파형의 평균값이 증가한다는 것을 알 수 있다. 또한 자기장의 경우, sin파형의 주기에 영향을 주며, 오히려 자기장의 세기가 큰 경우 유체의 속도를 감소시킨다는 것을 말해주고 있다. 마지막으로 물 농도와 유체의 속도는 서로 무관하다는 것을 예측할 수 있다.

## 2. 여러 가지 변인에 따른 MHD 현상 분석

### 2.1. 시간에 따른 유체 속도의 sin파형

#### 2.1.1 0.30M에서의 시간에 따른 유체 속도의 sin파형

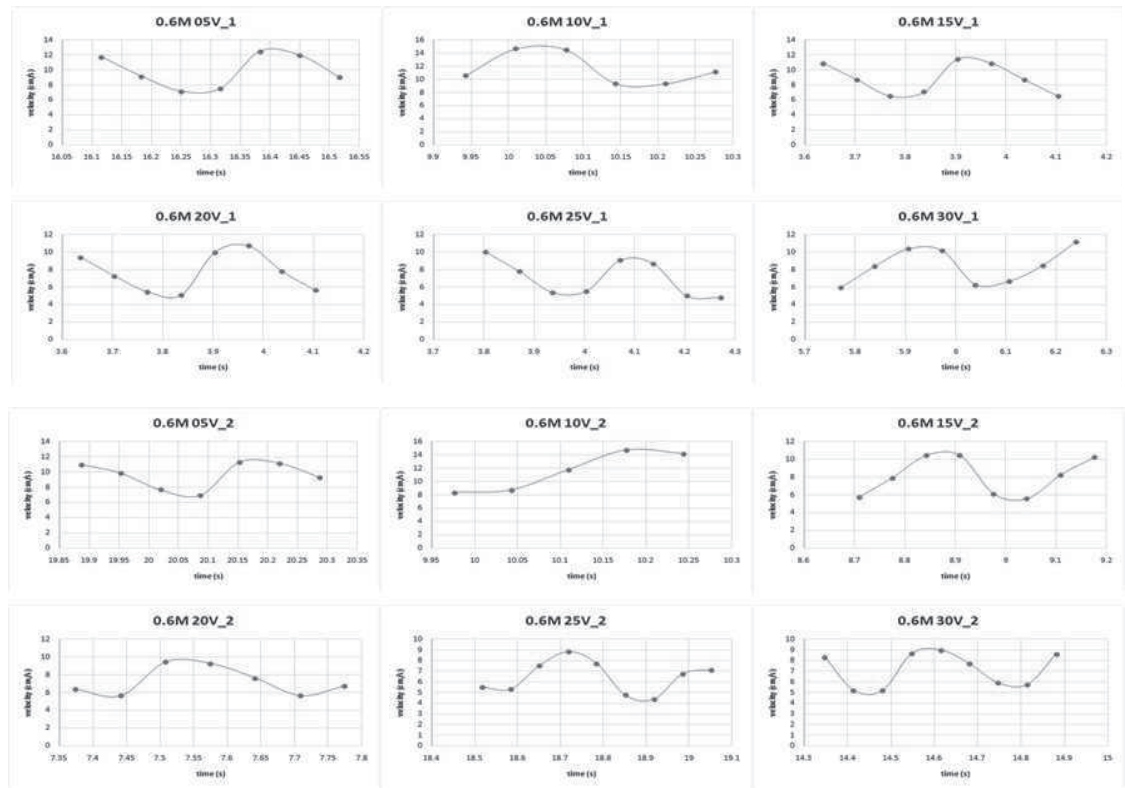


[그림 23] 0.30M, 각 전압에서 유체 속도의 sin파형

전압(V)		5	10	15	20	25	30
물농도(M)		진폭의 범위					
0.30	1회	3.09-7.11	4.28-7.64	4.64-8.29	5.20-8.73	6.40-10.03	7.10-11.71
	2회	4.01-6.94	4.54-8.39	5.23-9.57	4.68-9.25	6.39-10.41	6.38-12.19

[표 4] 0.30M, 각 전압에서 sin 파형의 진폭의 범위

### 2.1.2. 0.60M에서의 시간에 따른 유체 속도의 sin파형

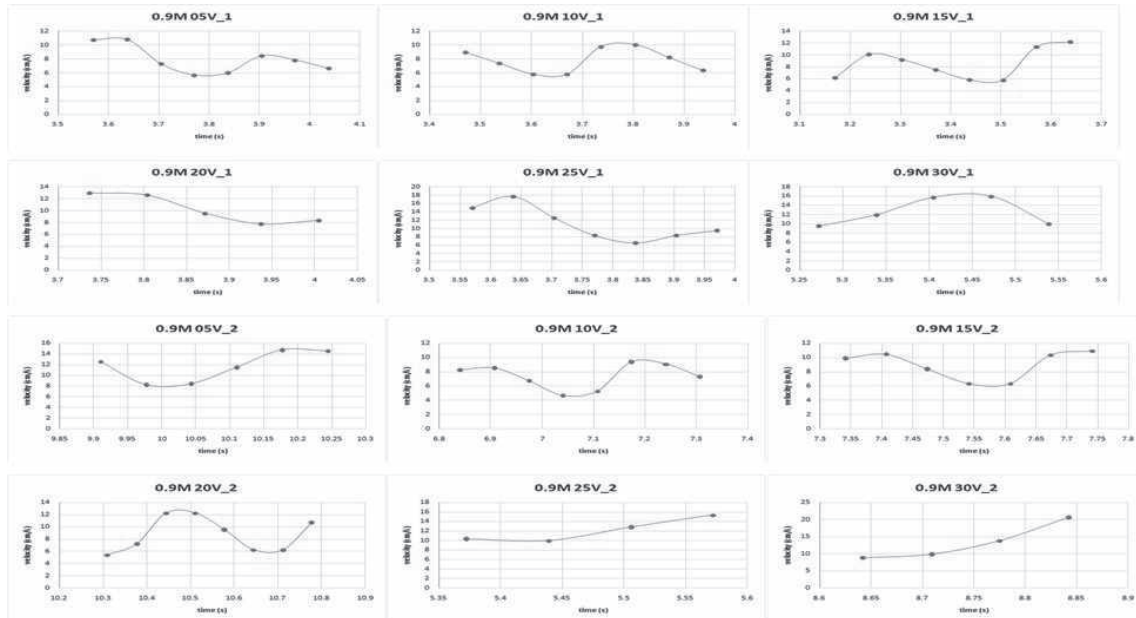


[그림 24] 0.60M, 각 전압에서 유체 속도의 sin파형

전압(V)		5	10	15	20	25	30
물농도(M)		진폭의 범위					
0.60	1회	7.16-12.50	8.36-14.72	6.55-11.46	5.09-10.73	4.82-10.03	5.96-11.22
	2회	6.94-11.32	9.37-14.69	5.58-10.44	5.64-9.45	4.40-8.82	5.22-8.98

[표 5] 0.60M, 각 전압에서 sin 파형의 진폭의 범위

## 2.1.3. 0.90M에서의 시간에 따른 유체 속도의 sin파형



[그림 25] 0.90M, 각 전압에서 유체 속도의 sin파형

전압(V)		5	10	15	20	25	30
물농도(M)		진폭의 범위					
0.90	1회	5.70-10.81	5.83-10.07	5.82-12.22	7.75-12.95	6.59-17.70	9.57-15.95
	2회	8.28-14.77	4.72-9.43	6.37-10.96	5.43-12.30	10.01-15.36	8.86-20.66

[표 6] 0.60M, 각 전압에서 sin 파형의 진폭의 범위

전기 전도성 유체에 일정한 자기장  $\vec{B}$ 를 걸어주고 두 평행한 극판으로 자기장에 수직하게 전기장을 걸어주는 경우 시간에 따른 유체의 속도는 sin파형을 그린다.

## 2.2. 전기장의 세기와 유체 속도의 관계

변인통제	●기온: 16.6℃ ●습도: 26% ●기압:1020.2hPa ●입자의 크기: 3mm×3mm
	●용액: 40g
	●샬레의 지름: 95mm ●구리판 사이 간격: 17mm ●구리판의 길이: 50mm

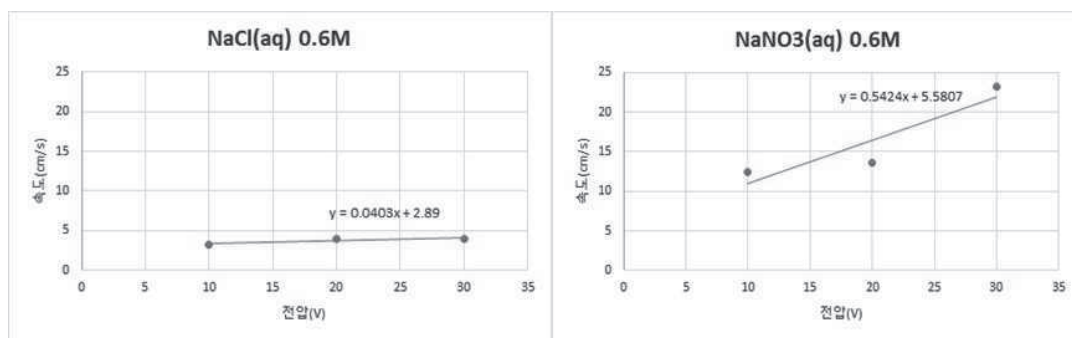
수용액(용질)		전압(V)		
		10.0	20.0	30.0
NaCl(aq)		3.1	4.1	4.7
		3.2	3.7	3.3
		3.2	3.9	4.0
NaNO <sub>3</sub> (aq)		11.6	12.8	23.4
		13.2	14.5	23.1
		12.4	13.6	23.2

[표 7] 전해질 0.6M에서 전기장의 세기에 따른 운동 속도 측정값 (cm/s)

수용액(용질)		전압(V)		
		10.0	20.0	30.0
CaCO <sub>3</sub> (aq)	1회	0	0.267	0.417
	2회	0	0.299	0.457
	평균	0	0.283	0.437

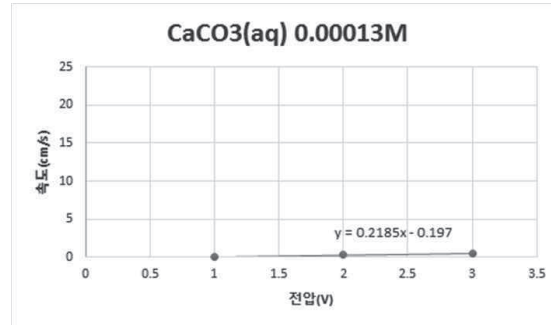
[표 8] CaCO<sub>3</sub>(aq) 0.00013M에서 전기장의 세기에 따른 운동 속도 측정값 (cm/s)

[그림 26]은 NaCl(aq), NaNO<sub>3</sub>(aq)수용액의 몰농도를 0.6M로 일정하게 하고, 전기장의 세기를 변화시켰을 때 측정한 입자의 평균 운동 속력을 나타낸 그래프이다.



[그림 26] NaCl(aq)과 NaNO<sub>3</sub>(aq) 0.6M에서 전기장의 세기와 운동 속도의 관계

[그림 27]은 CaCO<sub>3</sub>(aq) 수용액의 몰농도를 0.00013M로 일정하게 하고 전기장의 세기를 변화시켰을 때 측정한 입자의 평균 운동 속력을 나타낸 그래프이다.

[그림 27]  $\text{CaCO}_3(\text{aq})$  0.00013M에서 전기장의 세기와 운동 속도의 관계

위 실험 결과 일정한 몰농도의 용액에서 전기장의 세기가 증가할수록 속도가 비례하여 증가함을 알 수 있다.

전기 전도성 유체에 일정한 자기장  $\vec{B}$ 를 걸어주고 두 평행한 극판으로 자기장에 수직하게 전기장을 걸어주는 경우 유체의 운동 속도는 전기장 ( $\vec{E}$ )의 세기에 비례한다.

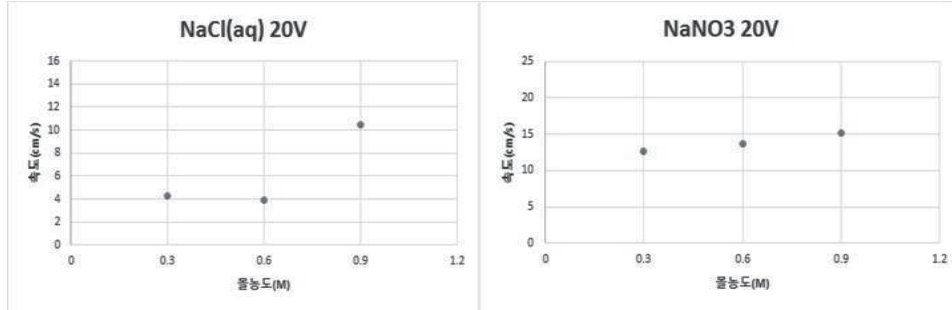
### 2.3. 용액의 농도와 유체 속도의 관계

변인통제	●기온: 16.6℃ ●습도: 26% ●기압: 1020.2hPa ●입자의 크기: 3mm×3mm ●용액: 40g ●샬레의 지름: 95mm ●구리판 사이 간격: 17mm ●구리판의 길이: 50mm
------	--

용액		몰농도(M)		
		0.3	0.6	0.9
NaCl(aq)	1회	4.7	4.1	9.4
	2회	3.8	3.7	11.6
	평균	4.2	3.9	10.5
NaNO <sub>3</sub> (aq)	1회	13.0	12.8	15.1
	2회	12.4	14.5	15.3
	평균	12.7	13.7	15.2

[표 9] 20V에서 몰농도에 따른 운동 속도 측정값 (cm/s)

[그림 28]은 NaCl(aq), NaNO<sub>3</sub>(aq)에서 전압의 세기를 20V로 일정하게 하면서 측정한 입자의 평균 운동 속도를 몰농도에 따라 나타낸 그래프이다.



[그림 28] 20V에서 NaCl(aq), NaNO<sub>3</sub>(aq) 몰농도와 운동 속도의 관계

위 실험 결과를 통해 0.90M의 경우 유체의 운동 속도가 증가하는 경향이 있지만 0.60M에서는 오히려 속력이 감소하는 등 변화가 심하였다. 이러한 속도 변화가 나타나는 이유 다음과 같다. 0.60M로 몰농도가 증가할 때는 전기 분해 산물로 인한 유체의 저항 효과가 이온의 증가에 의한 효과보다 커져서 속도가 감소하지만, 0.90M로 증가하는 경우 이온의 증가에 의한 효과가 더 크기 때문에 운동 속도가 증가한다고 추정할 수 있다.

전기 전도성 유체에 일정한 자기장  $\vec{B}$ 를 걸어주고 두 평행한 극판으로 자기장에 수직하게 전기장을 걸어주는 경우 운동 속도는 유체의 전기 전도도에 영향을 받는다.

## V. 결론 및 제언

### 1. 결론

본 논문에서 전자기장 내에서 유체의 가속 현상이란 전기장과 자기장이 수직한 공간에 유체를 놓는 경우에 나타나는 움직임을 의미한다. 일반적으로 전기장과 자기장이 반드시 수직이 아닌 경우에도 가속 현상이 나타나지만 이번 실험들은 모두 전기장과 자기장이 수직한 특수한 경우에서 진행되었다.

첫째, MHD 현상은 전자기장 내에서 전기 전도성 유체와 극판 사이에서 전자의 이동이 있는 경우에만 발생한다. 대표적인 극성분자 H<sub>2</sub>O 와 전기 전도성 유체인 NaCl 수용액에 전기장과 자기장을



수직하게 걸어준 결과 NaCl 수용액만 가속 현상을 보임을 실험을 통해 알 수 있었다. 이를 통해 선행 논문의 모델에 오류가 있음을 밝히고 기존의 MHD 현상을 정성적으로 설명하는 모델 A를 제시하였다. 또한 전기 전도성 유체에 전기장과 자기장을 수직하게 가해주는 경우에도 유체와 극판 사이에서 전자 이동이 없는 경우 가속 현상은 일어나지 않는다. 특히 전해질 수용액의 경우 전기 분해가 일어나지 않으면 가속 현상이 일어나지 않는다. 이는 극판에 전기장에 영향을 주지 않는 비닐을 씌운 뒤 전자기장 내 유체의 가속 현상 실험을 통해 검증하였다.

- ① 비닐을 씌우지 않은 경우 전기 전도성을 띠는 유체인 염 NaCl,  $\text{NaNO}_3$  의 수용액과 난용성 염  $\text{CaCO}_3$ 의 수용액에서 모두 가속 현상을 보였다. 이 때 전기 전도성이 거의 없는  $\text{H}_2\text{O}$  의 경우 가속 현상을 보이지 않았다.
- ② 비닐을 한 극판에 씌운 경우 NaCl,  $\text{NaNO}_3$ ,  $\text{CaCO}_3$  수용액과  $\text{H}_2\text{O}$  모두 가속 현상을 보이지 않았다.
- ③ 비닐을 두 극판에 씌운 경우 NaCl,  $\text{NaNO}_3$ ,  $\text{CaCO}_3$  수용액과  $\text{H}_2\text{O}$  모두 가속 현상을 보이지 않았다. 따라서, 수정된 모델을 실험적으로 검증하였다.

둘째, 전자기장 내에서 유체 속도는 전기장의 세기에 따라서 증가하는 경향을 보인다. 전자기장 내에서 전기 전도성을 띠는 입자가 받는 로렌츠 힘과 전기력의 합력으로 인해 생기는 가속도를  $t$ 에 대한 함수로 나타낸 후  $y$ 축 방향 벡터의 크기만 나타내어 미분 방정식을 풀어주면

$$\therefore v_y = D \sin\left(\sqrt{\frac{q^2 B}{m^2}} t + \phi\right) + \frac{E}{B} \quad (D, \phi \text{는 상수}) \text{이다.}$$

실험에서 얻은 결과 역시 부유 입자의 시간의 따른 위치를 얻은 뒤, 이것의 기울기를 비교한 결과 유체의 속도가 전기장의 세기에 증가하는 경향을 보이는 것을 알 수 있다.

셋째, 전자기장 내에서 유체 속도는 유체의 전기 전도도에 영향을 받는다. 실험 결과에 의하면 0.3 M의 농도에 비해 0.9M인 경우는 속도가 증가하였지만 0.6M인 경우에는 속도가 오히려 감소하기도 했다. 이는 전기 분해로 인해 발생하는 물질로 인해 용액 전체의 질량이 변화하고, 유체의 운동에 저항이 생기기 때문이다. 위의 식에서는 전기 분해가 일어날 때 나오는 부산물을 고려하지 않아 전기전도도와 무관한 식이지만, 실제로 실험을 해 보았을 때 실험 중 일어나는 여러 요인에 의해 유체의 전기전도도가 유체의 속도에 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

## 2. 제언

본 연구를 수행하면서 우리 팀은 다음과 같은 사항을 제언하고자 한다.

- 가. 논문에서 제시한 수정된 모델에 의하면 플라즈마 상태의 물질 역시 가속 현상 보여야 하며 두 극판과 전자의 이동 역시 일어나야 한다. 이러한 두 조건을 고려한다면 극판과 플라즈마 상태의 물질 사이의 반응을 예측할 수 있을 것이다.
- 나. 유체의 가속 현상이 일어나기 위해서 반드시 전기장과 자기장이 수직할 필요는 없다. 전기장과 자기장의 각도를 변화시키면서 유체의 운동 변화를 분석할 수 있을 것이다.
- 다. 자기장의 세기에 따른 변화를 보기 위해 코일을 이용해 자기장을 생성해보았지만 그 세기가 약해 이를 실험하지 못하였다. 전자석을 이용하여 자기장의 변화에 따른 유체의 속도 변화를 분석할 수 있을 것이다.
- 라. 유체의 가속 현상을 보기 위한 실험 장치가 한번 반응 한 후 소모되어 여러 번 반복 실험을 할 수 없었다. 이는 실험 결과의 그래프에 충분한 자료를 제공하지 못하는 원인이었다. 만약 반복해서 가속 현상을 관찰 할 수 있는 실험 장치를 고안하면 분석이 더욱 용이할 것이다.
- 마. 모형 배 추진 장치에 이용하기 위해선 추력 뿐만 아니라 전기 분해로 인해 발생하는 환경오염 문제를 해결해야 한다. 하지만 극판과 용액이 접하지 않는 경우 전자의 이동이 일어나지 않으므로 극판에 이온은 통과할 수 있고 전기 분해 산물은 통과할 수 없도록 처리를 한다면 추진 장치로서 이용할 수 있을 것이다.

## ■ 참고문헌

- [1] 김주성 외 2명. 전기장 내 유체의 흐름에 대한 고찰. 전남과학고등학교 탐구논총 No.\*\*\*. 2005
- [2] D. Halliday 외 2명. 일반 물리학. 범한 서적. 2011; Chap. 9-22.
- [3] David J. Griffiths. 기초전자기학. 교학사. 2003; Chap. 3.
- [4] 네이버 지식 백과, “전기장”,  
<http://terms.naver.com/entry.nhn?docId=2117667&cid=47338&categoryId=47338>
- [5] 네이버 지식 백과, “플레밍 원손 법칙”,  
[http://terms.naver.com/imageDetail.nhn?docId=941206&imageUrl=http%3A%2F%2Fdbsethumb.phinf.naver.net%2F0903\\_000\\_2%2F20120312165750177\\_0E24PWRUV.jpg%2Fcb1\\_457\\_i1.jpg%3Ftype%3Dm4500\\_4500fst\\_n%26wm%3DY&categoryId=47338&mode=simple|&query=&authorId=](http://terms.naver.com/imageDetail.nhn?docId=941206&imageUrl=http%3A%2F%2Fdbsethumb.phinf.naver.net%2F0903_000_2%2F20120312165750177_0E24PWRUV.jpg%2Fcb1_457_i1.jpg%3Ftype%3Dm4500_4500fst_n%26wm%3DY&categoryId=47338&mode=simple|&query=&authorId=)
- [6] “로렌츠 힘\_원운동”, <http://sungsook.com.ne.kr/images/image208.gif>
- [7] “로렌츠 힘\_전선 내 전하가 받는 힘” <http://lsgn.com.ne.kr/junjagi/images/rolentz.gif>
- [8] “전기 분해” <http://dimg.donga.com/wps/NEWS/IMAGE/2006/09/05/6981896.1.jpg>
- [9] 김종권 외 3명. HIGH TOP 물리 Ⅱ. 두산 동아. 2009

### 심사평

이 논문은 2005년의 논문을 비판적으로 분석한 논문으로, 이전 연구의 연구 결과를 재해석하여 전자기장 내에서 유체의 가속 현상에 대한 새로운 모델을 제시하였다. 학생들이 주제를 선택하여 과학적 탐구 과정에 따라 실험과 분석을 충분하게 하여 연구의 질적 향상을 도모하였다. 연구 수행을 통해 학생들은 다양한 상황에서의 유체의 운동, 속도 변화 등을 분석할 수 있는 방안을 제시하였고, 향후 타 연구에서도 활용가능하리라 본다.

### 연구 후기

안녕하세요. 전자기장 내에서 유체의 가속 현상(MHD 현상)에 대해 연구한 강제훈 정상하 팀입니다. 저희 팀은 작년 한 해 동안 다양한 수용액이 전기장과 자기장이 수직하게 걸린 계 내부에서 어떠한 움직임을 보이는지, 또 각각의 장(場)의 세기와 유체의 속력사이에는 무슨 관련이 있는지 정량적으로 기술하는데 중점을 두어 연구하였습니다. 그리고 현재에는 앞서 진행했던 연구를 기반으로 MHD 현상을 이용한 새로운 추진 장치를 개발하는 것을 목표로 하고 있습니다. 연구를 처음 시작하면서 가장 기본적인 추진 장치 제작에만 3개월이 걸렸는데 이 간단한 실험 장치 하나로 MHD 현상을 설명하고 예측할 수 있는 새로운 미분 방정식을 유도했다는 점이 가장 보람찼습니다. 특히 해당 방정식을 유도하기 전에는 단순히 직관을 통해 자기장과 전기장이 유체의 속력을 증가시킬 것이라고 예상하였으나 유도된 식은 전혀 다른 결과를 보였다는 점에서 연구 활동에서 정량화된 공식의 필요성을 느끼게 되었습니다. 이 밖에도 수차례 반복된 실험에서 용액의 종류에 따른 유체의 운동 궤적, 이온화된 분자들이 sin 파형을 그리면서 초장파를 방출할 가능성 등 다양한 추가 연구 주제들 역시 생각해볼 수 있었습니다. 이론 자체는 고등학생의 물리 수준에서 쉽게 접할 수 있는 로렌츠 힘이지만 한 줄도 안 되는 짧은 공식이 2년에 가까운 연구 활동을 하게 해주었고 여전히 풀리지 않은 의문이 많이 남아있다는 점에서 다른 물리학에 관심 있는 학생들에게 MHD 현상에 관련된 연구 활동을 권하고 싶습니다. 앞으로도 지속적인 연구를 통하여 기존의 공식과 함께 유체의 운동에 대한 정밀한 예측을 할 수 있는 공식을 유도하고, 추진 장치의 추진력의 세기를 증가시킬 방법을 찾아서 새로운 추진 장치의 연구에 속도를 내고 싶습니다.

### 연구진

강제훈(Gang Jehun, 광주과학고등학교 1학년, wpgnssla34@naver.com), 제1저자  
정상하(Jeong Sangha, 광주과학고등학교 1학년, yustina8@naver.com), 교신저자

지도교사 : 정은희(Jeong Eunhee, 광주과학고등학교, 전공: 물리학, jeh0301@hanmail.net)  
자문연구원 : 배삼룡(Bae Samryong, 전남대학교 물리학과, samyong.bae@gmail.com)

(2015. 1월 현재)

## 의자 끌림 현상의 단진동 운동과 그에 따른 소리 분석

(Noise analysis of oscillating motion in chair dragging)

김인환 • 김진혁 • 이영우(대전과학고등학교)

### 초 록

의자가 끌릴 때 발생하는 소음은 의자의 진동에 의해 만들어지므로 본 연구에서는 의자가 끌릴 때의 바닥과의 마찰에 의한 진동을 분석, 이의 크기와 진동수에 영향을 미치는 변인에 대해 연구하여 소음이 최소가 되는 의자 다리의 조건에 대해 연구하였다.

의자 다리의 조건을 바꾸어 가면서 실험하기 위해 다리 부분이 탈부착 가능한 주문 제작된 등받이가 있는 의자를, 음파의 분석에는 'Cool Edit pro 2.1'을 사용하였다. 의자 다리의 길이, 종류, 의자의 무게, 의자 다리의 배치, 연결 막대의 수와 배치, 의자 다리 바닥의 고무 패킹의 수와 배치의 6가지 경우에 대해 소음의 세기와 진동수를 각각 5회씩 측정하였다.

실험으로부터 알아낸 결과를 종합하면, 의자의 다리는 얇게 하며 의자는 약간 무거운 것이 좋으므로 어느 정도 무게감이 있는 소재를 사용하는 것이 소음 감소에 더 효율적일 것이다. 실생활에서 흔히 볼 수 있는 의자 다리 중에서는 옆에서 보았을 때 U자 모양인 것이 가장 소음이 적었다. 또한 이 U자형의 다리에 연결막대를 2개 추가하여 직사각형 형태의 골격이 갖추어졌을 때 기존의 U자형의 다리보다도 소음이 적게 발생하였다. 즉, 본 연구에서 찾아낸 가장 소음이 적은 의자의 구조는 다리의 아랫부분이 직사각형 형태를 이루는 의자이다.

본 연구를 통해 의자에서 발생하는 소음을 정량적으로 분석하여 소음이 최소화될 수 있는 의자의 조건을 알아내었다. 식당 등 사람이 많이 모이고 의자가 많이 필요한 곳, 특히 정숙이 필요한 도서관 등에서 이 소음이 적은 의자를 도입한다면 좋을 것이다. 또한 의자 뿐 아니라 식탁이나 책상 등의 가구에서도 이를 적용한다면 층간소음 감소에도 효과적일 것으로 사료된다.

키워드 : 스틱 슬립(Stick-Slip), 자력 진동(Self-excited Vibration), 진동 저감(Vibration Reduction), 분석(NoiseAnalysis), 저소음 설계(Low noise design)

## I. 서론

어느 학교에나 항상 있는 사물을 생각해보면 의자를 빼놓을 수 없다. 다 같이 모여 공부를 하고 있는 독서실에서 누군가의 의자 끄는 소리가 들리면 공부하는데 방해가 된다. 또한 교실 바닥을 살피

보편 의자가 끌리면서 더러운 자국을 남긴 것을 확인 할 수 있다.

연구 주제를 찾기 위한 토론에서 무심코 의자를 앞으로 당기니 ‘끼이익’ 하며 의자 끄는 소리가 들렸다. 의자의 소음은 의자의 진동에서 만들어 내는 것이고 그 기본 운동과 소음의 특성 및 물리량에 대해 연구하다보면 가구에 의한 층간 소음을 줄이는 데에도 쓰일 수 있을 것이라고 생각하여 이 주제로 탐구를 진행하게 되었다.



[그림 1] 의자를 끌 때 진동하는 모습



[그림 2] 의자 끌림에 의한 바닥 자국

우리의 주된 연구목적은 의자 끌림에 의한 소음의 진동수가 어떤 변인에 의해 변화하는지 산출해 내고 의자 끄는 소리가 최소가 되는 조건을 찾아내는 것이다. 구체적인 연구 목적은 다음과 같다.

의자 끌림 소리(음파)의 진동수에 영향을 주는 변인은 무엇인가?

의자 끌림 소리(음파)의 크기에 영향을 주는 변인은 무엇인가?

의자 끌림 소리(음파)의 소음이 최소가 될 수 있는 조건은 무엇인가?

## Ⅱ. 이론적 배경

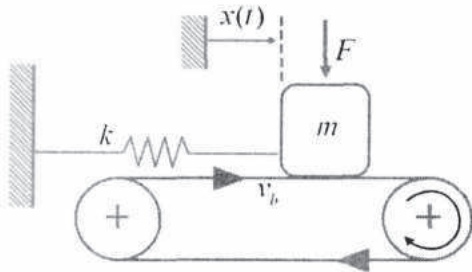
### 1. 자력진동(self-excited vibration)과 스틱 슬립(Stick-slip)현상

#### 1.1. 자력진동(Self-excited vibration)<sup>1)</sup>

외부의 가진이 전혀 없어도 또는 가진 원인이 불분명한 상태에서 발생하여 지속되는 진동을 말한다. 진동은 일반적으로 진동을 유발시킬 수 있는 에너지원이 있어야 가능하다. 외부에서 가하는 힘

이나 충격, 혹은 반복 운동을 가능하게 만드는 기계적인 에너지와 같은 에너지원이 포함되어야 하나 자려진동은 그러한 타율적인 것 없이 일어나게 된다. 바이올린 현의 진동, 문이 삐걱거리는 소리, 자동차 브레이크 소리 등이 이에 해당된다.

임의의 두 강체가 접촉하면 그 접촉점에서 마찰력이 작용하여 시스템의 거동에 영향을 미치게 된다. 이 마찰력을 나타내기 위해 흔히 사용되는 모델이 쿨롱 마찰 모델이다. 그러나 이 쿨롱 마찰 모델 힘의 불연속으로 인해 문제가 발생한다. 이 마찰 모델은 두 강체가 점착 조건으로 접촉하고 있을 때 저속 미끄러짐 현상이 일어나며 자려 진동 현상 역시 구현하지 못하고 있다. 따라서 이를 보완하고자 다음과 같은 마찰모델을 생각할 수 있다. 아래 사진은 ‘자려 진동 구현을 위한 마찰 실험 연구’의 사진이다.



[그림 3] 마찰 진동자 시스템

$$m\ddot{x}(t) + kx(t) = F_R(v_r) \cdots (1)$$

$$F_R(v_r) = \mu(v_r)|F| \cdots (2)$$

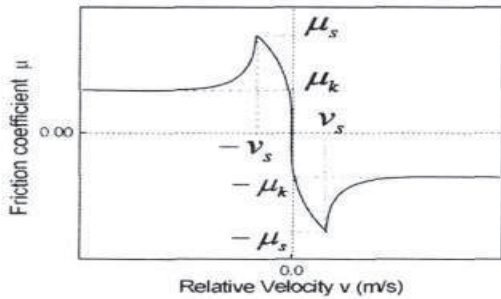
$$v_r = v_b - \dot{x}(t) \cdots (3)$$

[그림 4] 운동 방정식

위 그림은 일정한 속도  $v_b$ 로 이동하고 있는 벨트 위에 상자로 구성된 질량  $m$ 을 싣고 있다. 또한 질량은 벨트와 함께 이동하지 못하도록 스프링 상수  $k$ 인 스프링으로 잡아당기고 있다. 따라서 상자로 구성된 질량은 움직이는 벨트 위에서 진동한다. 위의 마찰 진동 시스템에서의 운동 방정식은 위의 식과 같이 표현되게 된다.

$x(t)$ 는 상자로 구성된 질량의 변위이다. 식 (2)는 마찰력의 함수이며  $F_R(v_r)$ 은 마찰력,  $F$ 는 수직 항력이다. 식 (3)은 벨트와 상자로 구성된 질량의 상대속도로 나타낸 함수이다. 여기서  $v_r$ 은 벨트와 상자 사이의 상대속도,  $v_b$ 는 벨트의 속도,  $\dot{x}(t)$ 는 상자의 속도이다.

마찰계수는 두 강체 사이의 상대속도  $v$ 에 영향을 받는 함수이다. 자려 진동을 구현한 마찰계수 함수로 식 (4)와 같은 형태의 함수를 사용하여 구현되었다. 여기서  $\mu_k$ 와  $\mu_s$ 는 동적 및 정적 마찰계수를 나타내며  $\beta$ 와  $a$ ( $>1.0$ )의 값은 사용자가 결정하는 상수 값이고  $b$ 는 동적 마찰계수, 정적 마찰계수 그리고  $\beta$ 와  $a$ 값이 결정되면 계산되는 상수 값이다. 이 매개변수에 따라서 다양한 형태의 마찰 모델의 구현이 가능하다. 아래 사진은 ‘다물체계의 자려진동 구현을 위한 마찰 모델링’의 사진이다.

[그림 5]  $v_r$ 에 따른 마찰계수 함수

$$\mu = -a^{(v-b)} - \mu_k, \quad v < -v_s$$

$$\mu = \frac{\mu_s}{(v_s)^\beta} v^\beta, \quad -v_s \leq v < v_s \quad (4)$$

$$\mu = a^{-(v+b)} - \mu_k, \quad v > v_s$$

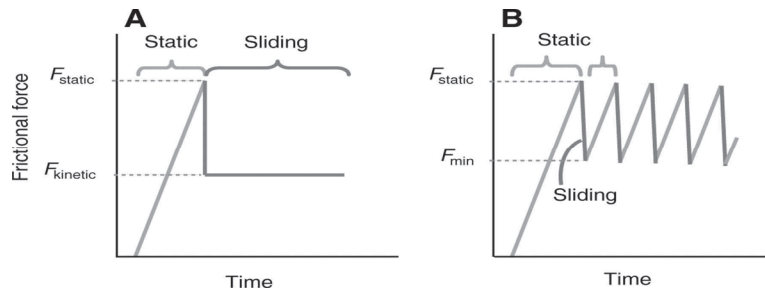
[그림 6] 마찰계수 함수식

### 1.2. 스틱 슬립(Stick slip)<sup>2)</sup>

마찰면 간의 미시적인 부착물이 미끄러져 일어나는 자려 진동 중의 하나로, 일반적으로 날카로운 톱니나 마찰 변동을 표시하는 용어이다. 스틱슬립은 마찰 계수가 증가함에 따라 이에 의해 마찰 특성이 정지마찰(static friction)과 동적마찰(kinetic friction)의 형태로 바뀌기 때문에 이러한 스틱 슬립현상이 일어나게 되면 두 가지 마찰이 서로 번갈아가면서 일어나게 된다. 이로 인하여 우리가 소위 느끼는 낮은 소리의 불쾌감을 유발하는 진동 현상이 발생하는 것이다. 즉, 물체가 움직일 때 정지하고 있는 상태와 미끄러지는 상태가 계속해서 반복되게 된다. 이송 시에 속도를 일정하게 당기게 되면 정지-미끄럼의 반복으로 덜덜덜 소리가 나는 움직임을 반복하게 되는 것이다.

스티크 슬립은 부드럽지 못한 운동을 초래하고, 저속에서 진동을 유발시키기 때문에 기계의 경우 생산되는 부품의 정밀도를 하락시키기도 한다. 따라서 이를 줄여주기 위해 볼 베어링을 사용하여 이를 구름마찰의 형태로 바꾸어주는 방법도 존재한다.

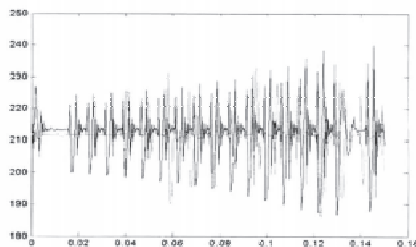
우리가 탐구하고자 하는 의자 역시 스틱 슬립의 한 종류로 말할 수 있는데, 실제로 기본적으로 의자 소음을 줄이고자 하는 방법 중 하나로 이미 바뀌 의자가 고안되어있는 상태이다. 그러나 이는 경제적 측면에서 비효율적이다. 따라서 의자의 기하학적 구조를 정량적으로 분석시키고 변화시켜가면서 공학적인 저소음 유발 방법을 찾아낸다. 아래는 스틱슬립 현상의 메커니즘을 나타낸 그래프이다.

[그림 7] Stick-slip 현상의 메커니즘<sup>3)</sup>

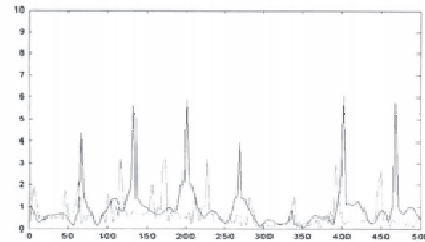
## 2. 발생 소음진동의 해석방법<sup>4)</sup>

소음진동을 해석하는 것은 자동차업체를 중심으로 많은 발전을 거듭해왔다. 소음진동이 제품의 품질에 직결되는 자동차에서 소음진동해석은 매우 중요하다. 대부분의 경우 이를 전산적으로 해석하는 것이 필수적인데 이 첫 번째 장점은 가시성(visualization)이다. 육안으로 확인하기 힘든 현상을 과장해서 보여주거나, 실제로 확인하기 힘든 내부의 단면을 보여주어, 엔지니어 혹은 연구책임자가 판단을 용이하게 한다. 두 번째로는 형상변경이 용이하다는 것이다. 다양한 샘플을 제작하여 빠르게 변화된 형상을 구성할 수 있다는 것이다. 진동해석의 목적은 주로 진동 모드(vibration mode)의 회피를 위한 설계 및 검토를 하는 것이다. 이것은 구성요소의 첫 번째 고유진동모드가 특정한 주파수 대역, 즉 사람이 민감하게 느끼는 주파수 대역에서 벗어나서 존재하도록 설계 제안을 하는 것을 말한다.

소음진동해석은 방법에 따라 시간 영역(time domain)에서의 해석과 주파수 영역(frequency domain)에서의 해석으로 나눌 수 있다. 시간영역에서의 해석은 균일한 시간간격에서의 시스템의 거동을 추적하고, FFT(푸리에 변환, fast fourier transform)과 같은 변환 도구를 통하여 소음 진동의 발생 주파수를 계산하고 검토하는 것이라고 할 수 있다. 주파수 영역에서의 해석은 그 모드 해석에 기초를 두고 있다.



[그림 8] Time Domain Analysis



[그림 9] Frequency Domain Analysis

## Ⅲ. 연구 방법 및 과정

### 1. 연구 방법

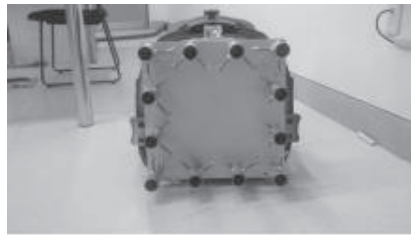
#### 1.1. 실험에 사용된 의자의 제작 및 구조

연구에 사용되는 의자는 우리의 연구 범위에 맞추기 위해, 시중에서 가장 흔히 사용되는 의자를 선정하였으며, 실험에 사용된 의자는 우리가 흔히 사용하는 등받이와 팔걸이가 있는 의자를 사용한다.



실험에서 사용하는 의자는 한 종류로 제한하여 의자의 종류를 변수로 삼지 않도록 해 ‘의자의 강성률’과 ‘의자의 구조에 대한 수직항력’을 일정하게 만들었다.

#### 1.1.1. 의자의 구조



[그림 10] 의자 하단부 정면

의자는 일반적인 의자와 같지만, 다른 점은 의자 하단부에 의자 다리 부분을 바꾸어 탈착이 가능한 구조로 되어있다는 사실이다. 이와 같은 구조를 이용해 의자에 다른 기하학적 요소들을 변형시켜가며 체계적인 소음진동의 분석이 가능하다. 총 12개의 의자 다리 부착 지점이 일정한 간격으로 정사각형 모양으로 한 변에 4개씩 존재한다.

#### 1.1.2. 의자 다리 모형

의자에 부착하고 조금씩 변형하여 변인을 만들어낼 수 있는 구조물들을 의자와 함께 추가로 주문제작 하였으며, 다음은 이 의자 다리 모형들에 대한 설명이다.



[그림 11] 기본형 다리



[그림 12] 가느장다리



[그림 13] 변적형 다리



[그림 14] 가는 변적형 다리



[그림 15] 연결 막대



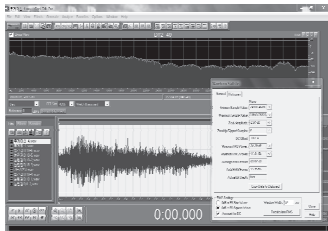
[그림 16] U자 다리

실험에 사용된 의자 다리 모형에는 위 그림들에서 볼 수 있듯이 6가지 종류가 있다. 먼저 기본형 다리는 실험용 의자가 의자로서의 조건을 갖추기 위한 가장 기본적인 형태로 4개가 존재하며

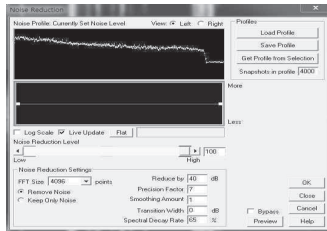
의자 다리 부착 지점의 네 귀퉁이에 각각 한 개씩 장착되어있는 상태가 기본적인 형태이다. 다음으로 면적형 다리는 기본형 다리에서 아래 바닥 부분과 접촉하는 면이 매우 크다는 특징을 가지고 있다. 이 역시 4개가 존재한다. 가는형 다리는 기본형 다리보다 직경, 즉 반지름의 길이가 더 작으며, 마찬가지로 4개 존재한다. U자 다리는 특이하게 U자 모양으로 이어져 있는 형태이며, 2개가 존재하여 서로 반대쪽에 연결하게 된다. 또 하나의 다른 점으로 다른 막대기를 끼울 수 있는 구멍이 5군데 존재하는데, 이는 반대쪽의 U자 다리와 다른 한 U자 다리를 이어주게 만들어줄 수 있는 연결막대를 끼워 고정시키는 데 사용된다. 연결막대는 구멍 수대로 총 5개가 존재한다. U자 다리의 경우 그 조합 방법이 2가지가 있는데, 다리의 방향이 의자의 앞뒤 이동방향과 나란하면 '세로형', 나란하지 않고 수직으로 존재한다면 '가로형'이라 이름 붙였다. 또한 마지막으로 의자 다리의 길이를 조절 가능한 가는 면적형 다리도 있다.

## 1.2. 분석 방법

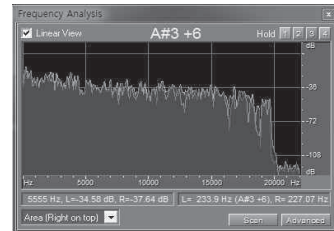
음파의 분석 시에 이용한 프로그램의 이름은 Cool Edit pro 2.1이다. 소리분석 프로그램 Cool Edit pro를 이용하여 time domain 분석과 frequency domain 분석을 진행할 수 있으며, Noise Reduction과 같은 다양한 기능들을 사용하여 녹음된 소리를 분석할 수 있는 전문 프로그램이다. 이를 이용해 실험과정에서 발생한 다양한 진동소음을 녹음한 후 분석할 수 있도록 하였다. 이 소프트웨어를 통해 발생 소음진동의 데시벨(dB)측정과 주요 주파수대를 분석할 수 있다.



[그림 17] Cool Edit의 Waveform Statistics 기능



[그림 18] Cool Edit의 Noise Reduction 기능



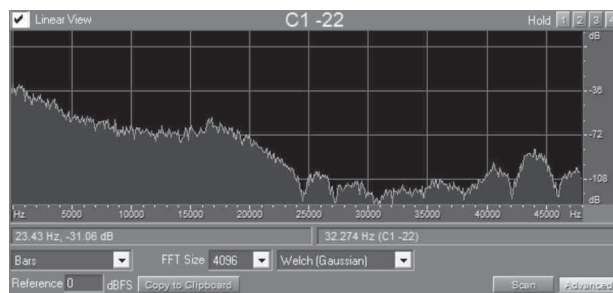
[그림 19] Cool Edit의 Frequency Analysis 기능

### 1.2.1. 음파 분석을 통한 진폭의 측정

음파 분석을 통해 진폭을 계산할 때는 다음과 같은 방식을 따른다.

먼저, Cool Edit Pro의 상단 메뉴에서 [Edit] - [Convert Sample Type] 창을 켜다. 이 때 Resolution 값을 32bit로 맞춘다. 다음으로, 분석하고자 하는 구역을 선택한 후, [Analyze] - [Statistics] 창을 선택한다. 이 때 나오는 Waveform Statistics에서 Average RMS Power 항목의 값을 취하면 이를 통해 dBfs의 형태로 dB를 분석할 수 있고, 이를 standard 기준에 맞추어 변환하여 소리의 진폭을 분석해낼 수 있으며, 이를 변인별로 분

석하여 graph화 시키면 상대적으로 발생하는 에너지의 크기를 비교할 수 있다. 즉, 직접적인 데이터 처리 방법은, 소리의 세기의 경우에는 가청 진동수인 20~20000Hz 범위에서의 Average RMS Power 에 대한 dB 측정값을 기록하였다. 또한 소리의 진동수 측정의 경우, [그림 20]의 하단 부분에 Copy to clipboard 기능을 이용하면 각각의 frequency에 대한 dB 값이 표로 정리 되어 나타난다. 이때 Excel의 함수를 이용하여 그중 최대 dB를 찾을 수 있고, 최대 dB에서의 진동수 값을 기록하였다. 이러한 측정값들을 [그림 21]과 같이 각각 엑셀에 기록하고, 표준 불확도 까지 계산하여 그래프에 도시하였다.



[그림 20] Cool Edit의 Copy to Clipboard 기능

### 1.2.2. 평균과 불확도의 계산

다음으로, 실험을 진행하고 이를 통해 얻어낸 데이터를 처리하는 과정에 있어서 포함된 실험에서 발생하는 불확도를 계산하는 과정을 거쳤다. 각 변인을 실험하는 데 있어서 5회 반복측정을 통해서 불확도를 얻어내어 그래프에 오차막대의 형태로 포함하였다.

	1회	2회	3회	4회	5회	average	표준편차	불확도
가-기본	61.69	62.34	64.36	63.08	64.17	63.13	1.151	1.430
나-얇음	59.33	59.66	59.51	60.01	60.52	59.81	0.4709	0.5854
다-이어짐	56.40	56.94	58.79	56.17	55.82	56.82	1.172	1.457
라-면적	67.51	67.11	67.76	66.60	67.80	67.36	0.5040	0.6266
마-	62.56	64.84	64.57	64.82	65.02	64.36	1.020	1.268
바-	65.25	64.57	65.39	64.68	64.15	64.81	0.5099	0.6340

[그림 21] Excel을 이용한 불확도 계산의 예시

## 2. 연구 과정

### 2.1. 개요

본 연구에서는 의자 끌림 현상에서 나타나는 다양한 소리에 영향을 주는 요인을 파악하여 그들의 상관관계와 물리적 해석을 토대로 결과를 이끌어나가는 데에 있다. 각 변인을 조정된 후에, 아래와

같은 공통적인 실험방법을 거쳐 소음진동 데이터를 얻어내는 것이 이 실험의 주된 목적이라고 할 수 있으며, 각 변인의 실험에서 아래 과정을 거치게 된다.

- 1) 의자는 의자의 다리에 변화를 주어 가며 실험해 보아야 하므로 주문제작하여 사용한다.
- 2) 의자를 일정한 힘으로 밀면서 나는 소리를 녹음한다.
- 3) 이 때 의자의 같은 부분을 끌어야 하므로 등받이 부분의 튀어나온 부분을 잡고 한 사람이 끄는 것을 담당하여 최대한 오차를 줄일 수 있도록 한다.
- 4) 녹음한 소리를 Cool Edit를 이용하여 파형을 도시(圖示)하여 소리의 파형을 분석한다.
- 5) 나온 자료를 Excel을 이용하여 dB와 가장 잦은 진동수를 측정한다. 이 때, dB는 RMS 값을 구한다.
- 6) 실험 중 위의 과정을 각 변인마다 5회 반복하여 측정한다.

## 2.2. 의자 끌림과 다리 길이의 관계

의자의 다리를 늘일 수 있도록 제작된 다리를 이용하여 다리의 늘어난 길이를 0cm 에서 15cm 까지 5cm 씩, 그리고 마지막에는 3cm 를 증가시켜가면서 소리의 크기와 진동수를 측정한다. (전체 의자 다리의 길이는 각각 21cm, 26cm, 31cm, 36cm, 39cm)

## 2.3. 의자 끌림과 의자 다리의 종류의 관계

- 1) 앞서 본 4개 종류의 다리인 기본형 다리, 굽기가 기본형 보다 얇은 가는형 다리, U자 다리, 땅과 닿는 면적이 넓은 면적형 다리)를 준비한다.
- 2) 각각의 다리들을 의자에 장착하고 끌었을 때의 소리의 크기와 진동수를 구한다.

## 2.4. 의자 끌림과 의자의 무게의 관계

- 1) 의자의 무게를 달리하면서 의자의 무게와 의자 끌림의 소리의 크기와 진동수와의 관계를 파악한다.
- 2) 의자의 무게를 측정한다.
- 3) 의자 위에 5kg 단위로 추의 역할을 할 수 있는 물체를 올려놓아 의자의 무게를 0kgf ~ 20kgf 까지 증가시켜 소리의 크기와 진동수를 측정한다. 5kgf 의 추가 없으므로 추의 역할을 대신하여 약 1kgf 인 고무판과 약 500gf 인 9V 건전지를 이용하여 실험한다. 이 경우 무게의 오차가 많이 발생하므로 모든 고무판과 건전지의 무게를 측정하여 가장 목표한 결과에 가까운 쌍을 만들어 사용한다.

## 2.5. 의자 끌림과 의자 다리 배치의 관계

의자 다리의 배치는 아래 [그림 22, 23]과 같이 두 가지로 나누어 볼 수 있다. 첫 번째 배치 형태는

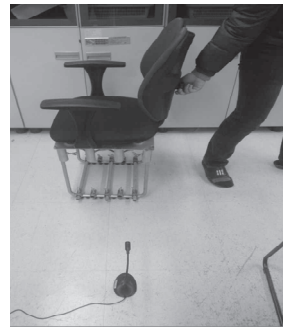
의자 앞쪽에 의자 다리 2개가 서로 가까이 붙어있고, 두 번째 배치 형태는 의자 뒤쪽에 의자 다리 2개가 가까이 붙어있는 형태이다. 이들을 다르게 하면 의자가 바닥면에 가하는 하중의 분포형태가 달라지게 되고, 이것이 과연 고유 진동수 변화에 영향을 주는지, 혹은 발생 소음의 크기에 영향을 주는지, 즉 우리가 흔히 보는 의자 다리의 배치에 따라 소리의 크기와 진동수가 어떻게 달라지는지 알아보려고 한다.



[그림 22] 배치형태 1



[그림 23] 치형태 2



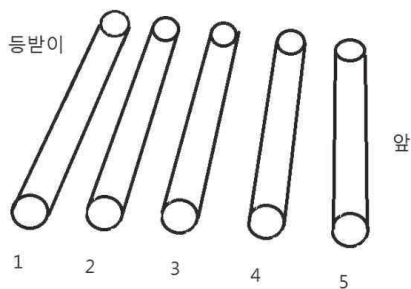
[그림 24] 실험모습

## 2.6. 의자 끌림과 연결막대 사이의 관계

1) U자 모양의 의자 다리 사이에 막대를 0개부터 5개까지 끼워 넣고 각각의 소리의 크기와 진동수를 측정한다.

2) 가장 진동수가 작게 나온 막대의 개수에서 막대의 배치를 변경해가면서 소리의 크기와 진동수를 측정한다. (연결막대의 개수와의 관계)

3) 의자다리를 90도 회전시켜 가로형과 세로형으로 장착방법을 변경한 후, 같은 방법으로 소리와 진동수를 측정한다. (연결막대의 배치와의 관계)



[그림 25] 결 막대 배치도



[그림 26] 연결 배치 - 가(2,3,4)



[그림 27] 연결 배치 - 나(1,3,5)

## 2.7. 의자 끌림과 U형 다리 바닥의 고무 패킹 배치

의자의 마찰 현상은 의자가 마찰하는 바닥과의 상호작용이라는 점에서 바닥면의 특성에 의한 바닥면의 마찰계수와 의자 구조의 물리적 특성이 서로 어떤 식으로 연관되는 지도 좋은 변인이 될 수

있다. 그러나 실제로 의자와 바닥면이 맞닿는 부분이 고무 패킹으로 되어있는가, 혹은 다리와 같은 재질인 나무 혹은 철 재질로 되어있는가에 따라서도 달라질 수 있으며, 바닥의 재질뿐 아니라 바닥면이 균일하지 않거나 이물질이 많을 때, 온도, 습도에 따라서도 상당히 실생활에서도 유기적으로 변하기도 하는 변수 중의 하나이기 때문에 정량적인 실험에 문제가 생길 수 있다. 또한 바닥면과 의자의 마찰계수를 정확하게 측정하기도 상당히 어렵기 때문에 본 논문에서는 이러한 탐구 방법 대신 바닥면과 의자가 맞닿는 부분인 고무패킹의 수와 배치에 따라서 의자 끌림의 발생 소음이 어떻게 달라지는지 탐구함으로써 이러한 변인을 대체하기로 하였다.

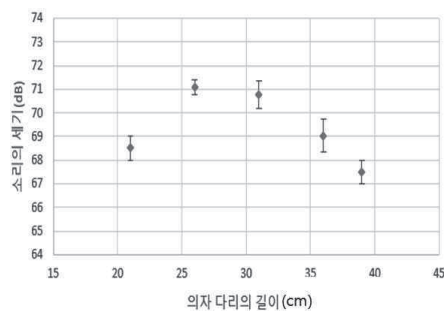
1) U자 모양의 의자 다리 밑면에 고무 패킹(즉, 바닥에 직접 닿아있는 부분)의 개수에 따라 소리의 세기를 측정한다.

2) U자 모양의 의자 다리 밑면에 고무 패킹(즉, 바닥에 직접 닿아있는 부분)의 개수의 배치가 대칭으로 배치되어 있을 때, 그리고 비대칭 적으로 배치되어 있을 때의 경우를 고려하여 소리의 세기를 측정한다.

## IV. 연구결과 및 해석

### 1. 소리의 크기에 대한 결과 및 해석

#### 1.1. 의자다리 길이에 따른 소음분석결과



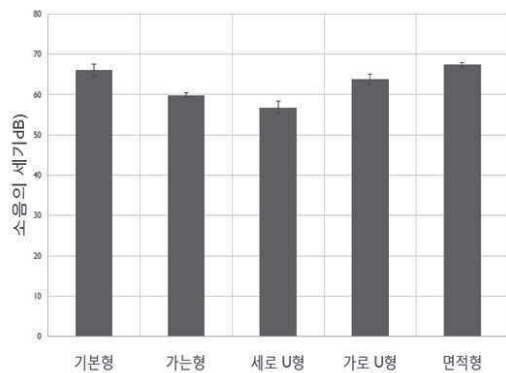
[그림 28] 의자 다리 길이에 따른 진폭

의자의 길이가 가장 짧을 때는 적은 소음을 내다가 어느 정도 길이가 증가하면 소음이 커진다. 그 뒤 다리의 길이가 길어질수록 소음의 크기가 감소하는 경향성을 보인다. 이는 의자의 길이가 길어짐에 따라 소음 발생점(바닥면)으로부터 힘이 더 멀리 떨어진 곳에서 작용함에 기인한다. 의자 다리가 길어질

수록 의자를 사용할 때 잡는 부분, 즉 힘의 작용점의 위치가 높아지기 때문에 같은 힘에도 작용하는 토크의 크기가 증가하게 된다. 이는 더 쉽게 구조적인 불안정을 가져오게 된다는 뜻이다. 이 때, 구조적 불안정은 쉽게 정지-미끄럼 단계의 반복이 쉽게 일어난다는 뜻이다. 따라서 계에 가해지는 적은 힘에도 스틱-슬립 현상이 쉽게 일어나게 되기 때문에 의자가 최소로 진동이 일어나기 위하여 가해주어야 하는 양의 일이 양이 줄어들게 되고, 이 때 마찰력에 의해 물체가 가하는 음의 일의 양은 같으므로 방출되는 에너지의 양이 더 줄어들게 된다. 따라서 발생 진폭이 작아지게 된다. 한편, 그래프 상에서 보편적인 의자 길이인 30cm 후반 부에서는 소리의 세기가 점차 작아지는 것을 확인 할 수 있다.

이 때 피크를 가지는 이유는 스틱 슬립에 의한 진동과 의자 구조에 의한 진동 조건이 서로 공명하면서 이 부근에서 가장 큰 소음이 발생하게 된 것으로 보인다. 그러나 실제 시중의 의자 다리의 평균은 약 40cm 전후이기 때문에, 실제 사용되는 의자에서는 공명으로 인해 고려되는 소음의 크기가 그다지 않다는 것을 알 수 있다.

## 1.2. 의자다리의 종류에 따른 소음의 세기 분석결과



[그림 29] 의자다리의 종류에 따른 소음의 세기



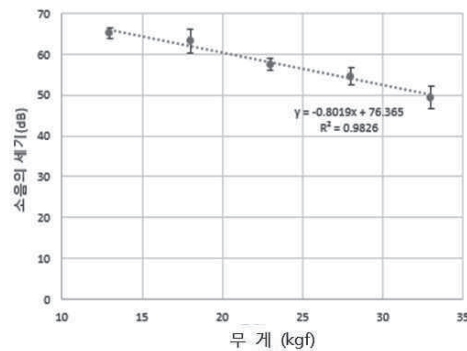
[그림 30] '세로 U형'과 '가로 U형' 의자의 모습

'가느형', '세로 U형', '가로 U형', '면적형'의 실험결과를 '기본형' 비교하였을 때 다음과 같은 사실을 알아낼 수 있다.

- 1) '가느형'로부터 의자의 다리가 얇은 것이 다리 굵기가 두꺼운 것보다 소음이 적다.
- 2) '연결형'로부터 의자의 다리가 서로 연결되어 있으면 소음이 적다. 이는 연결막대를 통해 양쪽 다리에서 발생한 진동이 서로 중첩을 일으키면서 상쇄되기 때문이다.
- 3) '면적형'로부터 의자의 다리가 바닥과 접촉면이 많을수록 소음이 크다. 실접촉면적이 커질수록 표면과 의자 밑부분의 스틱 슬립(stick-slip) 현상이 더욱 두드러지기 때문에 더 큰 소음이 발생하게 된다. 여기에서 주목 할 만 한 부분은 세로 U형과 가로 U형의 비교이다. U형의 같은 다리 모양을 가지

고 있지만 세로 U형의 경우가 소음이 더 작은 것을 확인할 수 있다. 이는 의자 끌림의 진행 방향의 다리 떨림을 U형의 구조가 억제하기 때문이다.

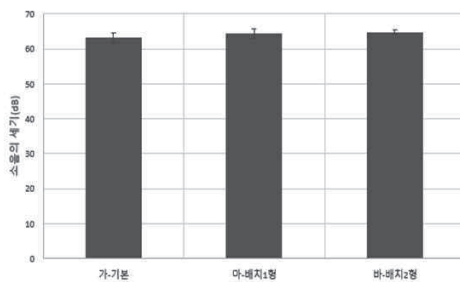
### 1.3. 의자의 무게의 따른 소음의 세기 분석결과



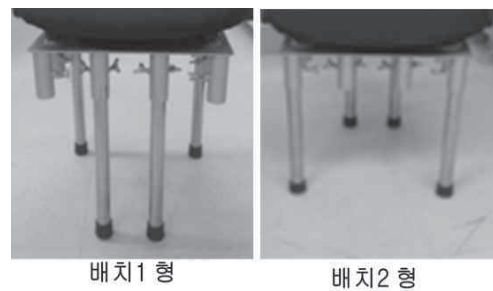
[그림 31] 수직항력에 따른 진폭

의자의 무게 변화에 따라 소음의 세기가 1차 선형 그래프의 양상을 보이며 의자의 무게가 증가할수록 소음의 세기가 줄어든다는 것을 확인할 수 있다. 이 이유는 무게가 증가하여 마찰이 증가할수록 진동이 무게의 의해 억제되는 것으로 보인다.

### 1.4. 의자 다리 배치에 따른 소음의 세기 분석결과



[그림 32] 의자 다리 배치에 따른 소음의 세기

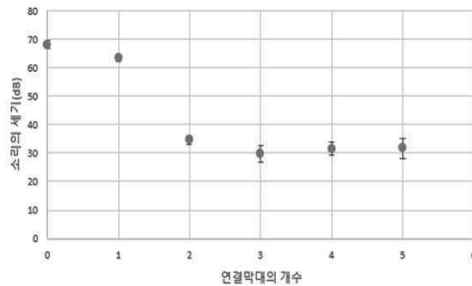


[그림 33] 의자 다리 배치

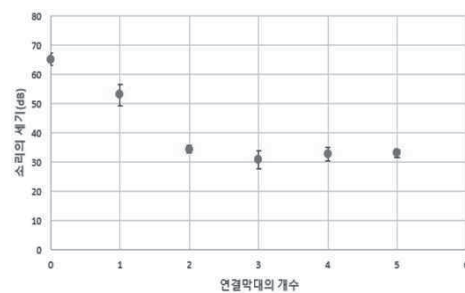
기본형인 '가'와 의자의 다리 배치를 바꾸었을 때의 결과 '마', '바'가 불확도 범위 내에서 서로 포함한다. 의자 다리 배치에 따른 소음의 차이는 거의 없음을 확인할 수 있다. 즉, 의자의 위치를 바꾸는 것은 실질적으로 지면과 의자의 접촉형태를 바꿀 뿐, 이로 인해 발생하는 음파를 주파수 분석을 통해 보면 결국은 같은 성분의 음파를 내뿜는다는 사실을 알 수 있다. 즉, 의자의 다리를 바꾸는 것으로는 방출되는 양의 에너지를 바꿀 수는 없다.



## 1.5. 연결막대의 개수에 따른 소음의 세기 분석결과 (가로, 세로형)



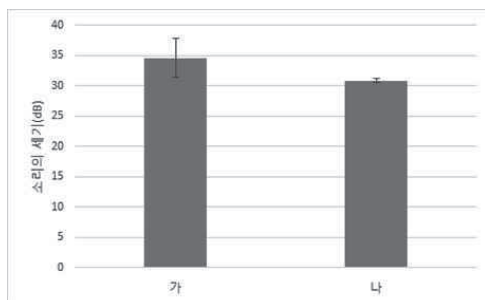
[그림 34] 세로형의 연결막대 개수에 따른 진폭 분석



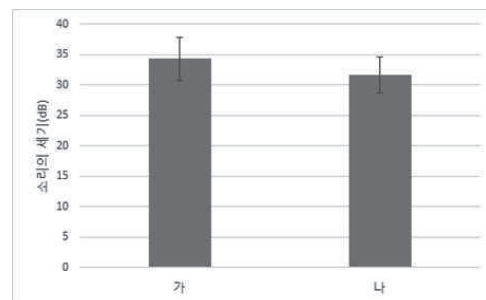
[그림 35] 가로형의 연결막대 개수에 따른 진폭 분석

가로형 다리와 세로형 다리에서 모두 연결막대의 수가 증가할수록 소음이 감소하다가 일정 개수 이상(2개)부터는 소음이 거의 일정해지는 양상을 보인다. 이는 공학적 한계로, 연결막대의 수가 어느 한계 이상이 되면 양쪽 다리의 서로 다른 진동양상을 상쇄시키기는 작용이 상대적으로 줄어들고 의자 구조로서 작용하게 되는 것으로 해석할 수 있다.

그렇다면 의자 무게의 편리성과 경제적 관점에서 보았을 때 같은 효과를 발휘하면서 연결막대의 개수를 적게 사용하는 의자가 바람직할 것이다. 그렇다면 이 개수를 어떠한 형태로 연결하는 것이 좋을까? 2개의 위치를 모아서 총 5개의 연결막대 연결 부위를 각각 1, 2, 3, 4, 5번이라 이름붙이면, (1, 3, 5)위치 쌍과 (2, 3, 4)위치 쌍에서의 실험을 통해 비교해보았다.



[그림 36] 3개의 세로형 연결 배치에 따른 진폭 분석



[그림 37] 3개의 가로형 연결 배치에 따른 진폭 분석

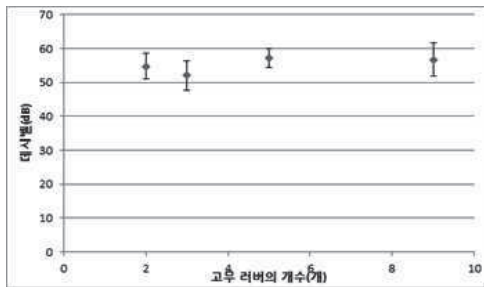
‘가’는 (2,3,4)위치 쌍, ‘나’는 (1,3,5)위치 쌍이다. 가로형과 세로형 실험결과 모두에서 (1,3,5)처럼 연결막대를 최대한 대칭적으로 분산시켜놓은 모양이 연결막대를 모아서 배치시켜 놓는 것보다 소음이 더 적은 것을 확인 할 수 있다. 연결 막대가 양 끝을 지탱해주고 있으면 지탱하지 않았을 때에 비하여 의자 다리 진동의 폭이 작아지게 되어 위와 같은 결과가 나왔을 것으로 생각된다.

위에서 설명하였듯이 무게 요인에 따른 소음 분석 결과 추세선 기울기는 약  $-0.8 \text{ dB/kg}$ 으로 대략 5 kg 변화에 따라 4 dB 정도 직선형 그래프를 이루며 일정하게 변하는 것을 알 수 있다. 연결막대 추

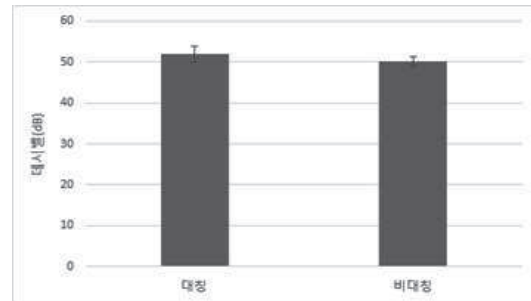
가실험의 경우 연결 막대가 개당 약 300 g이고, 최대 5개까지 추가하였으므로 최대 1.5 kg의 편차가, 다른 실험들의 경우 다리의 교체 등이 이루어진 부분에서 최대 1 kg 정도의 중량 차이가 난다. 이때, 위 실험 결과에 따르면 최대 데시벨 편차는 1 dB 정도로, 그다지 큰 편차를 나타내지 않는다는 사실을 알 수 있으며, 이러한 오차는 다른 실험 데이터에 큰 영향을 주지 않는다는 사실을 알 수 있다.

#### 1.6. 의자 끌림과 U형 다리 바닥의 고무 패킹 배치에 따른 소음의 세기 분석 결과

U자형 다리 바닥의 고무 패킹의 개수를 달리하며 소음의 세기를 측정한 결과 불확도 범위가 모두 겹쳤다. 바닥면의 고무 패킹의 개수는 소음의 크기와 관련이 없음을 확인 할 수 있다. 두 번째 실험의 경우 고무 패킹 3개의 배치를 5cm 간격으로 대칭적으로 배치하는 것과 3cm, 7cm 간격으로 비대칭적으로 배치하는 경우를 소음을 분석한 결과이다. 이 경우에도 첫 번째 실험과 마찬가지로 소음의 세기와 관련이 없는 것을 확인 가능하다.



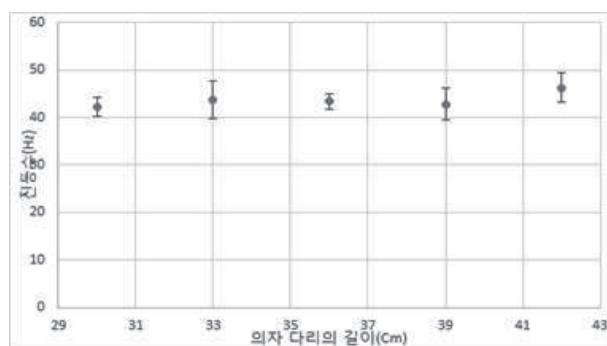
[그림 38] 고무 패킹의 개수에 따른 소음 세기



[그림 39] 고무 패킹의 배치 유형에 따른 소음 세기

## 2. 소리의 진동수에 대한 결과 및 해석

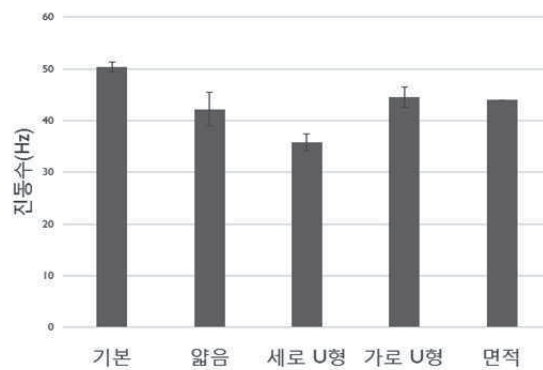
### 2.1. 의자 다리 길이에 따른 진동수 분석결과



[그림 40] 의자 다리의 길이에 따른 진동수

다리 길이에 따른 진동수 불확도 범위가 서로 겹치는 모습을 볼 수 있다. 의자의 다리 길이에 따라 진동수 값은 거의 변화가 없다는 사실을 그래프로부터 해석할 수 있다.

## 2.2. 의자의 다리 종류에 따른 진동수 분석 결과

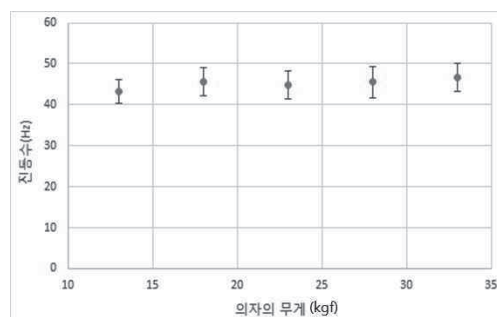


[그림 41] 의자의 다리 형태에 따른 진동수 분석 결과

의자 다리의 형태에 따라 진동수가 각기 달라진다는 사실을 이를 통해 알 수 있다. 먼저, 가의 경우 기본형, 나의 경우 가는형, 다의 경우 U자, 라의 경우 면적형, 마의 경우 U자 다리를 세로로 연결한 상태, 바의 경우 U자 다리를 가로로 연결한 상태를 말한다. 기본형의 경우가 가장 진동수가 크고 U자의 경우가 가장 진동수가 작다.

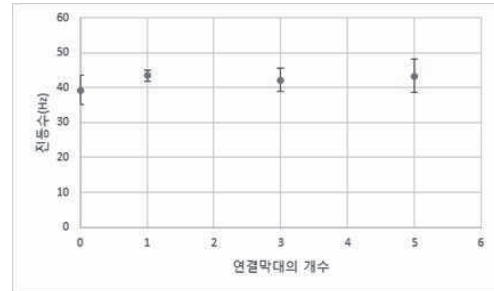
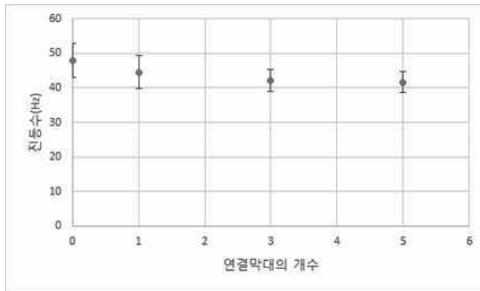
## 2.3. 의자의 무게에 따른 진동수 분석 결과

의자의 무게를 13, 18, 23, 28, 33kgf로 설정한 후, 각 무게에 따라 진동수의 변화를 살펴보았다. 의자의 무게에 따른 진동수의 불확도의 범위가 서로 겹치는 모습을 볼 수 있는데, 이는 모두 변화가 없다는 것을 나타낸다. 즉, 의자의 가해지는 수직항력에 따라 발생하는 소음진동의 진동수 값은 거의 변화가 없다.



[그림 42] 의자 무게에 따른 진동수

## 2.4. 연결 막대의 개수에 따른 진동수 분석결과



[그림 43] 연결막대의 개수에 따른 소음분석결과(가로형) [그림 44] 연결막대의 개수에 따른 소음분석결과(세로형)

가로형 다리와 세로형 다리 모두 연결막대의 수가 변하여도 비슷한 값에서 불확도 범위 내에 서로 포함되는 모습을 볼 수 있다. 또한 연결막대가 연결되어 있는 개수에 의해서는 진동수 값이 거의 변화하지 않는다.

## V. 결론 및 제언

### 1. 결론

의자의 소음의 세기는 다리 배치(다리의 개수와 종류가 모두 같을 경우)에는 거의 영향을 받지 않았다. 또한 의자가 무거울수록, 다리가 얇을수록 소음이 적었다.

의자 다리 사이에 연결다리를 연결했을 경우 가장 소리의 크기가 작게 측정되었는데, 의자에 연결다리를 추가할수록 소음이 적어지지만 연결다리의 수가 2개 이상일 때부터는 연결다리의 수가 증가하더라도 소음의 크기가 거의 일정했고, 연결다리를 넓게 분포시켰을 때 소음이 가장 적게 발생했다. 즉, 연결막대의 연결 부위를 [그림 25]와 같이 연결막대의 연결 부위를 각각 1, 2, 3, 4, 5번이라 하면 (2, 3, 4)보다 (1, 3, 5)로 연결할 때가 더 소음이 적었다.

의자의 진동수는 의자의 길이, 무게, 연결막대의 개수 등의 의자 외적인 요소에 의해서는 변하지 않았다.

의자의 진동수에 영향을 주는 요인에는 의자 다리의 굵기, 의자와 접촉하는 부분의 넓이, 의자 다리의 배치된 모양 등이 있으며, 이는 의자 구조의 매커니즘에 직접적으로 영향을 미치는 요인이다.

의자의 다리가 연결되어 있으면 양쪽 다리에서 일어나는 서로 다른 진동을 이들이 서로 상쇄시켜 주는 작용이 일어나 진동모드에 변화가 생기며 진동수가 낮아진다.

결론적으로, 의자를 끌 때 나타나는 소음은 ‘스틱 슬립’ 현상에 의해 발생하며 세로 U자형의 다리가 소음이 가장 적은데, 이것은 의자가 움직이는 방향과 진동이 억제되기 때문이다.

세로 U자형의 다리에 연결막대 2개를 추가하여 바닥과 접촉하는 밑면의 골격이 직사각형 형태가 완성될 때 연결 막대가 움직이는 방향 이외의 다른 방향으로의 진동 역시 억제하므로 소음이 가장 적게 방출된다.

## 2. 제언

우선 실험으로부터 알아낸 결과들을 종합하여 볼 때, 의자를 이루는 다리의 두께는 얇게 하며 실험에서 사용한 연결막대의 개수가 2개 정도인 U자의 골격을 가져야 한다. 사람의 체중을 견뎌내야 하므로 얇으면서도 튼튼한 재질을 사용하는 것이 좋을 것이다. 또한 의자의 무게가 무거울수록 소음이 적으므로 사람이 들 수 있는 무게 중에 어느 정도 무게감 있는 소재를 사용하면 소음을 더욱 줄일 수 있을 것이다. 하지만 결론적으로 가장 중요한 것은 소음이 적은 U자형의 다리 모형에 연결막대 2개를 추가하여, 아랫부분이 직사각형 형태의 골격을 가진 의자가 가장 소음이 적다는 것이다.

이 연구를 다물체 동역학 해석(multi body dynamics)과 같은 방향으로 확장시킨다면 보다 확실한 소음 진동의 해석을 통해 소음 억제 효과를 누릴 수 있을 것으로 예상된다.

현재 의자 다리의 반지름에 대한 정량적인 연구가 이루어지지 못해 정성적으로 그 관계만을 파악하였다. 다리의 반지름이나 두께 등에 관해 보다 정량적인 연구 진행이 필요하다.



[그림 45] 장 소음이 적은  
의자의 구조 모형



[그림 46] 소음이 심각한  
고전적 의자 모형



[그림 47] 새로 고안한 소음이  
적은 의자

- 1) 자려 진동 구현을 위한 마찰 실험 연구(2014), 강원석 · 박준홍 · 유홍희, 대한기계학회 동역학 및 제어부문 춘계학술대회 논문집 pp.45~46  
다물체계의 자려진동 구현을 위한 마찰 모델링(2007), 노현영 · 유홍희, 한국소음진동공학회논문집 제 17권 제 6호, pp.524~530
- 2) "Wikipedia", Retrived December 10 from Daejeon Science High School, Web site:  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Stick-slip\\_phenomenon](http://en.wikipedia.org/wiki/Stick-slip_phenomenon)
- 3) The acoustic mechanics of stick-slip friction in the California spiny lobster(Panulirus interruptus)(2007), Patek SN · Baio JE, J Exp Biol, 3538-46
- 4) 소음진동분야의 전산해석기술(2007.12), 소현준, 소음 · 진동제 17권 제 6호 pp. 36~40

## ■ 참고문헌

- [1] 다물체계의 자려진동 구현을 위한 마찰 모델링(2007), 노현영 · 유홍희, 한국소음진동공학회논문집 제 17권 제 6호, pp.524~530
- [2] 소음진동분야의 전산해석기술(2007.12), 소현준, 소음 · 진동제 17권 제 6호 pp. 36~40
- [3] 왕복운동에서의 마찰소음 실험적 연구(2013), 최호일 · 강재영, 한국소음진동공학회논문집 제 23권 제 7호, pp. 640~644
- [4] 자려 진동 구현을 위한 마찰 실험 연구(2014), 강원석 · 박준홍 · 유홍희, 대한기계학회 동역학 및 제어부문 춘계학술대회 논문집 pp.45~46
- [5] "Wikipedia", Retrived December 10 from Daejeon Science High School, Web site:  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Stick-slip\\_phenomenon](http://en.wikipedia.org/wiki/Stick-slip_phenomenon)
- [6] "The Journal of Experimental Biology", Retrived December 10 from Daejeon Science High School, Web site: <http://jeb.biologists.org/content/210/20/3538/F2.expansion.html>

### 심사평

이 논문은 생활 주변에서 독창적인 문제 상황을 찾고, 다양한 변인을 조작하여 실험을 수행한 학생 중심 연구라 판단된다. 특히 연구 결과 해석의 정량적 기술이 돋보이며, 향후 가구에 의한 소음 관련 연구에 방법적인 도움을 줄 수 있으리라 기대한다. 또한 과학고등학교 및 영재학교 학생들에게 생활 속 문제를 어떻게 연구로 승화시킬 수 있는지를 보여준 좋은 사례가 되리라 본다.

## 연구 후기

이 연구를 처음으로 생각하게 된 것은 학교 물리 수업시간에 ‘단진동(Oscillation)’과 관련된 내용을 배우고 있을 때였다. 변위에 비례하는 복원력을 받아 발생하는 진동이라는 현상을 앉아있던 의자에서 발생하던 ‘드르륵’소리와 연관 지었던 호기심에서 출발한 이 연구가 가치 있는 논문이 되어 학술지에 실리게 된 것은 우리에게 너무나 큰 영광이라고 생각한다.

처음 이 연구를 시작하려고 하였을 때는 꽤 막연했다. 관련된 선행연구도 찾기 힘들고, 체계적으로 문제를 파악하기가 힘들었기 때문이다. 그런 이유에서 연구를 시작하기 전 상당히 많은 예비실험을 거쳤다. 가능한 변수가 상당히 많기도 하고 의미 있는 데이터를 명확한 변인을 통해 추출해내어야 하기 때문에 이를 파악하기 위해 팀 내에서 자체적인 예비실험을 상당히 많이 거쳤다. 상당히 번거로운 작업이었지만 이 과정이 이후 연구 전체에 가장 큰 뼈대가 되었다. 정확한 문제의 인식과 영역확대, 제약조건을 확인하는 과정의 중요성을 이번 기회를 통해 확실히 깨닫게 되었다.

이 연구를 본격적으로 시작하고자 하였을 때 당시 학교 시험기간과 여러 행사, 대회 같은 것들이 동시에 겹쳐서 상당히 바쁜 상황이었음에도 불구하고 수십 차례의 실험과 데이터 추출, 분석 등을 해낼 수 있었던 데에는 팀원들이 이 연구에 대한 열정을 가지고 있었기 때문에 가능했다고 생각한다. 연구가 방학에도 계속되는 탓에 방학 기간에도 서울·경기 지역에서 학교가 위치한 대전까지 수차례 오가며 고생했던 두 팀원에게도 수고했다는 말을 남기고 싶고, 무엇보다 항상 부족한 연구를 지도해주시기 위해 조언과 도움의 말을 아끼지 않아 주신 지도교사 선생님에게 다시 한 번 감사 드리는 바이다.

예전에 읽은 공학 책에서 이러한 글을 읽은 적이 있다. 가구 디자이너 Charles Eames는 원하는 형태의 가구를 만들기 위해 프로그램을 보고 그것을 약 30여 개의 특이한 필수 성분으로 나누었고, 각각의 필수 성분마다 체계적으로 100번의 연구를 진행해 나갔으며, 이들에 가장 적합한 해결책을 찾기 위해 노력하였다. 이를 다시 세분화하여 연구하고, 그 조합의 다른 조합, 또 다른 논리적 조합들을 반복하여 찾아나가는 과정을 끊임없이 실행에 옮겼다. 그리고 마침내 그 시간이 끝났을 때, 그들은 그들이 거친 수많은 과정들이 무색해 보일 만큼 너무나 단순한 형태의 최종 완성품을 보게 되었고, 그들은 결국 대회에서 우승을 차지했다고 한다. 읽을 당시엔 어떤 의미인지 정확히 파악하지 못하였는데, 이 연구가 끝나고 우리 팀의 결과를 확인하고 난 후에는 조금 알게 된 것 같다. 이 연구를 첫 걸음으로 하여 우리가 앞으로 미래에 해나가게 될 연구에 있어서 올바른 과학자로서의 자세와 열정을 가지고 꿈을 키워나갈 수 있었으면 싶다.

## 연구진

김인환(Kim Inhwan, 대전과학고등학교 1학년, toktoktori@naver.com), 제1저자  
김진혁(Kim Jinhyeok, 대전과학고등학교 1학년, rlajh01@gmail.com), 교신저자  
이영우(Lee Youngwoo, 대전과학고등학교 1학년, ingyangu121@naver.com)

지도교사 : 김종헌(Kim Jongheon, 대전과학고등학교, 전공: 물리학, cysics@daum.net)

(2015. 1월 현재)

## 폴리아닐린-은나노입자 복합물을 이용한 과산화수소의 전기화학적 검출

(Electrochemical determination of hydrogen peroxide based on  
polyaniline-silver nanocomposites modified electrode)

한준택 · 황윤비 · 박승민 · 오서령(세종과학고등학교)

### 초 록

본 연구에서는 전도성 고분자 폴리아닐린에 과산화수소 분해 촉매인 은을 나노입자 형태로 도핑시켜 전극을 제작한 후 전기화학적 분석 방법을 이용하여 전극의 특성과 나노 복합물 및 과산화수소의 전기화학적 특성을 분석하였다. 그 결과, 전압을 걸어줌에 의해 진행되어 검출에 이용되는 과산화수소 산화환원 반응에서 확산 과정이 속도결정단계이며, 은나노입자를 도핑함으로써 과산화수소 검출 능력이 급격히 향상되었고 current를 통해 농도를 알아낼 수 있는 센서로서의 역할이 가능함을 확인하였다. 전극의 특성을 구한 결과 선형범위 0.05~9 mM, 검출한계 8.2  $\mu\text{M}$ , 민감도 146.5  $\mu\text{A mM}^{-1} \text{cm}^{-2}$  으로 센서로서 이용 가능함을 판단하였다. 또한, 본 연구에서는 인체 체액의 pH와 비슷한 pH 7.4 PBS 조건에서 실험을 함으로써 추후 바이오센서로 발전시킬 수 있는 가능성 또한 확인하였다.

키워드 : 폴리아닐린, 은, 과산화수소, 전기화학, 센서

## I. 서론

과산화수소( $\text{H}_2\text{O}_2$ )는 의약품, 로켓 추진 연료, 표백 등의 여러 가지 공학 기술 분야에서 널리 이용되고 있다. 뿐만 아니라, 생물체 안에서 대사과정에 직접 관여하거나 대사과정의 부산물로 생성되기도 한다. 특히 각종 효소반응의 결과로 생성되는 과산화수소는 특정한 질병의 진단에 매우 유용하게 쓰인다. 이 때 과산화수소가 참여하는 대표적인 효소로는 glucose 산화효소인 glucose oxidase( $\text{GOx}$ ), alcohol oxidase( $\text{AOx}$ ) 등이 있다.

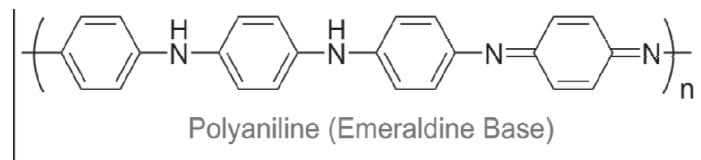
전기화학적 방법으로 과산화수소를 정량 분석할 경우에는 전극에 전압을 걸어줌으로써 전극 표면



에서의 과산화수소 산화/환원 반응을 통해 생성된 전류를 측정한다. 이때 전극의 활성을 증가시키기 위해서 전극 표면에 과산화수소 분해효소를 도입하기도 한다. 하지만 효소의 경우 pH와 온도와 같은 환경적 변수에 큰 제약이 있고, 안정성 또한 떨어지는 단점이 있다.

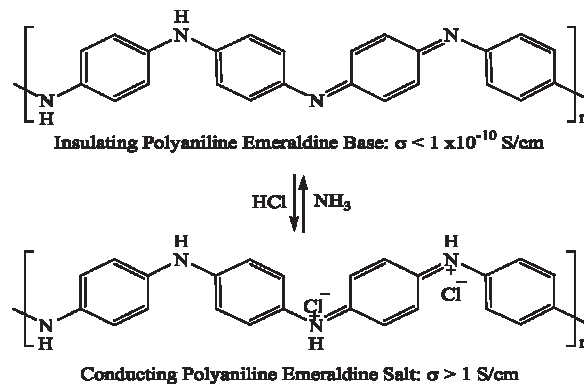
과산화수소를 분해하는 촉매에는 효소뿐만 아니라 은(Silver)과 같은 금속 촉매도 존재한다. 은은 다른 금속에 비해 전기 전도도와 열전도도가 뛰어난 특징이 있으며, 널리 알려진 과산화수소 분해 촉매이다. 최근 나노 기술의 발달로 높은 분해 활성을 가진, 표면적이 비약적으로 증가한 안정된 은 나노 입자의 합성이 가능해졌다. 이에 따라 은나노입자를 안정적으로 전극에 도입할 수 있다면 안정적이면서도 효율적인 전기화학적 센서를 제조할 수 있을 것이라 기대된다.

폴리아닐린(Polyaniline; PANI)은, 널리 알려진 전도성 고분자 중 하나이다. 개발된 것은 150년 전이지만, 1980년대 초부터 폴리아닐린이 전기 전도성을 띄는 특성을 발견하게 되면서, 학계에서 큰 주목을 받고 있다. 폴리아닐린은 전기전도성을 가진 폴리머 중 유일하게 합성이 쉽고 안정성이 있으며 쉽게 도핑되는 성질이 있기 때문에 많은 연구에 사용되고 있다. 특히 전기전도성을 가진 특성 때문에 PANI는 전기화학적 센서의 좋은 후보 중 하나로 알려져 있다.



[그림 1] Polyaniline Emeraldine Base

폴리아닐린의 전기전도성은 pH에 따라 달라지는데, pH 4 이상에서는 전기전도도가 낮아져 전기화학적 검출 정도가 현저히 떨어지게 된다. 이는 중합 과정에서 산을 사용하는 폴리아닐린의 산화 및 환원 때문이라고 할 수 있다. 이러한 이유로 전기화학적 검출을 할 때는 금속 또는 금속산화물을 폴리아닐린에 도핑시킨 후 많이 사용하며, 이는 중성에서 좋은 전도성을 갖는다.



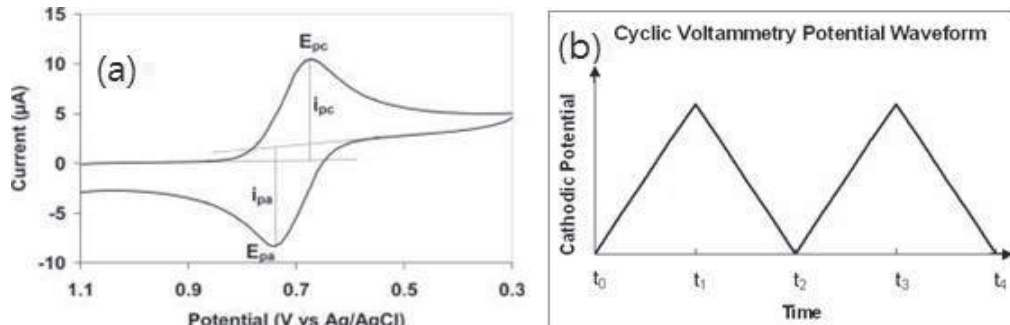
[그림 2] Electrical conductivity changes of Polyaniline by proton doping<sup>[1]</sup>

본 연구에서는 폴리아닐린과 은나노입자를 이용하여 폴리아닐린-은나노 복합체를 합성할 것이다. 또한 TEM(Transmission Electron Microscopy)를 이용하여 복합체의 시각적인 구조를 규명할 것이다. 또한 폴리아닐린-은나노 복합체를 유리탄소전극 표면에 도입하여 과산화수소 검출 센서를 제작하고, Cyclic Voltammetry, Amperometry와 같은 여러 가지 전기화학적 분석 방법을 이용하여 센서의 민감도, 검출 한계와 같은 전극의 특성과 나노 복합물 및 과산화수소의 전기화학적 특성을 분석할 것이다.

## Ⅱ. 이론적 배경 및 연구방법

### 1. 이론적 배경

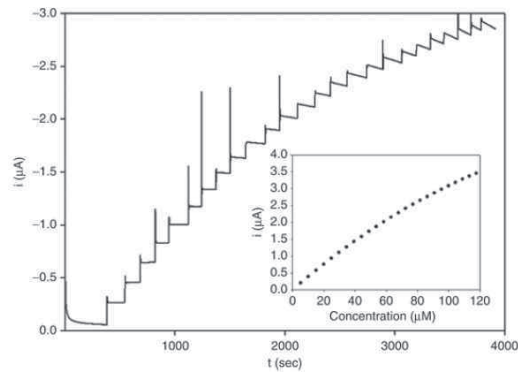
#### 1.1. Cyclic voltammetry



[그림 3] Example of (a)Cyclic Voltammogram and (b)Cyclic Voltammetry Potential waveform

Cyclic Voltammetry(CV)는 순환 전압 전류법이라고 불리며, 전압을 삼각파 형태의 순환전위로 가하면서 얻어진 전류를 통해 전극표면 또는 근처에서 일어나는 물질의 전기화학적 반응을 정성, 정량할 수 있는 분석방법이다. 이 때 얻어지는 전압-전류 그래프를 Cyclic Voltammogram이라고 한다. 순환전압전류법으로 물질을 정성 및 정량 분석할 수 있는데, peak의 전위 값으로 분석 물질의 정성을, 그 때의 전류 값으로 농도를 정량할 수 있다. 또한 Cyclic Voltammogram은 무기화학, 유기화학, 고분자화학, 생화학 등의 분야에서 산화환원쌍의 형식(form), 산화환원전위, 평형상수, 농도, 전극반응에 관여하는 전자수, 화학반응의 속도상수, 흡착현상, 전자이동반응의 속도론적 파라미터 등을 구하는데 사용된다.

## 1.2. Amperometry

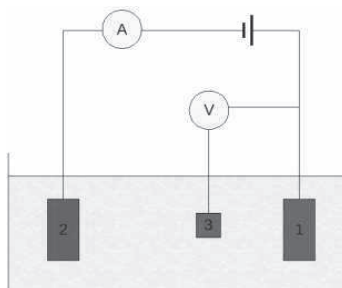


[그림 4] Example of Amperometry result

Amperometry는 시간-전류법이라고 불리며 기준전극과 작업전극을 이용하여 일정한 전위를 유지하면서 시간에 따른 전류의 값을 측정하는 방법이다. 일정한 시간이 지날 때마다, 일정한 농도의 물질을 넣어주면서  $I-t$  그래프를 얻는다. 시간-전류법의 일정 포텐셜은 무시할 수 있을 정도의 충전 전류를 생성하며, 시간-전류법은 충전 전류를 줄이는 장점이 있다는 것을 보여준다. 이 때 충전 전류란 모든 전압이 물질을 산화/환원 시키는데 가지 않고 새어나가는 전압이 생길 때 발생하는 전류이다.

## 1.3. 전극계(three electrode system)

Cyclic voltammetry method와 Chronoamperometry method는 흔히 3전극계 구성을 통해 이루어진다. 일반적인 전기화학 실험에서의 전위 측정은 기준전극(Reference electrode), 작업전극(Working electrode)의 두 전극을 사용하여 전극의 전위차를 측정한다. 하지만 Cyclic Voltammetry의 경우에는 외부 Potential에 의해 전극 사이의 용액에 의한 저항이 생기게 되고, 이로 인해 전압강하가 일어나기 때문에 기준전극 전위가 평형으로부터 벗어나게 된다. 따라서 2개의 기존 전극에 상대전극(Counter electrode)를 추가하여 작업전극과 기준전극 사이의 전류의 흐름을 줄임으로써 오차를 줄일 수 있다. 3전극계에서의 전류의 측정은 일정전위기(Potentiometer)에서 기준 전극에 포텐셜을 걸어 주면, 작업 전극 아래에서 전극활성물질의 산화-환원 반응이 일어나게 된다, 이 때 발생하는 전류 값을 상대 전극을 통해 측정한다. 3전극 계에 사용되는 대표적인 작업전극으로는 유리탄소 전극과 백금 전극 등이 있고, 상대전극은 대부분 Pt전극을 사용한다. 기준전극은 SCE(포화 칼로멜 전극), SHE(표준 수소 전극), Ag/AgCl전극을 많이 사용한다.



[그림 5] A schematic diagram of the three-electrode system  
(1) Working Electrode, (2) Counter Electrode, (3)Reference Electrode

#### 1.4. 계면중합법(interfacial polymerization)

계면중합법은 고분자 중합체를 얻는 여러 가지 방법 중 하나이다. 서로 섞이지 않는 두 액상의 계면 근처에서 일어나는 두 시약의 반응을 통해 중합체를 얻어낼 수 있다. 이 방법은 두 시약의 비율을 정확하게 맞추지 않아도 쉽고 짧은 시간에 고분자 중합체를 얻어낼 수 있다는 특징이 있다. 본 실험에서 PANI의 합성에 사용된 두 액상은 Methylene Chloride(MC)와 HCl 수용액이다.

## 2. 연구 방법

### 2.1. PANI(Polyaniline nanofiber) 중합

Polyaniline nanofiber의 합성방법은 여러 가지로 알려져 있다. 본 실험에서는 그 중 쉽고 편리한 계면중합법을 이용하여 PANI를 제조하였다<sup>[1]</sup>. Aniline(Sigma Aldrich, 미국) 3.2 mmol을 Methylene Chloride(J. T. Baker, 미국) 10 mL에 녹인 용액과 1M HCl(삼진, 한국) 수용액 10 mL에 Ammonium persulfate(APS: Sigma Aldrich, 미국) 0.8 mmol을 녹인 용액을 제조한다. 유리 바이알 병에 MC용액을 먼저 넣고, APS를 녹인 1M HCl 수용액을 두 용액이 섞이지 않도록 한 방울씩 MC용액의 표면에 떨어트린다. 충분히 반응이 진행되어 PANI가 생성될 수 있도록 실온에서 1시간 동안 바이알 병을 방치시킨다. PANI는 두 액상 중 위쪽에 해당하는 1M HCl 수용액 쪽에 위치하게 되므로 상층 HCl 수용액 6 mL를 피펫으로 취해 conical tube로 옮겨 담는다. 원심분리기에서 conical tube를 3000 rpm, 15분간 원심분리 후 기존에 있던 보라색을 띄는 수용액을 제거하고 3차 증류수를 6mL 넣어 vortexing한다. 위 과정을 3회 반복하여 최종적으로 원심분리 되었을 때 다시 vortexing 후 conical tube의 분산액을 Membrane filter로 걸러내어 고체상태의 PANI를 얻는다. 잔여수분을 없애기 위해 40도의 오븐에서 12시간 건조시킨 후 막자사발에서 가루 형태로 만들고 유리바이알에 넣어 은박지로 빛을 차단한 상태로 보관시켰다. 본 실험에서 중합된 PANI는 emeraldine base형태로 HCl의 영향을 받아 양전하를 가지며 진녹색을 띤다.

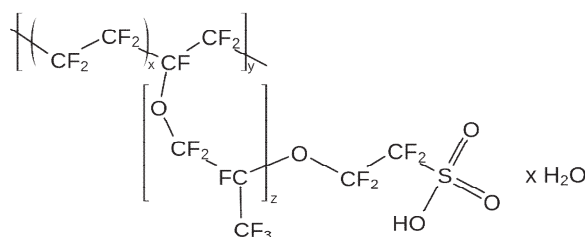
## 2.2. PANI-Ag 나노복합물 제조와 그 구조 관찰

PANI 5mg과 3차 증류수 2.5mL를 혼합해 유리 바이알 병에 넣는다. dispersion 형태가 될 때까지 초음파 세척기에서 sonication 한 후 stirring한다. 그 상태에서 50 mM  $\text{AgNO}_3$ (삼전, 한국) 수용액을 제조하여 stirrer의 PANI 분산액에 0.5mL를 넣고, 초순수 2mL를 넣어 2시간동안 stirring하여 은 나노 입자가 충분히 PANI에 도핑되도록 한다. 이 과정을 거친 후 분산액을 4000 rpm에서 6분간 원심분리 후 상층액을 제거하고 증류수를 넣고 다시 원심분리시키는 과정을 2회 반복하였다. 최종적으로 원심분리가 끝나면 빛이 차단된 유리 바이알 병에 dispersion 형태로 보관한다. (2.1)과 (2.2)에서 만든 PANI와 PANI-Ag 복합물의 구조를 관찰하기 위하여 TEM(LIBRA 120, 독일)을 사용해 PANI와 PANI-Ag의 구조를 비교하였다.

## 2.3. PANI, PANI-Ag 전극 제조

아무것도 코팅되어 있지 않은 유리탄소 전극을 polishing 해준다.  $0.3\mu\text{m}$ 와  $0.05\mu\text{m}$  alumina powder를 polishing pad위에 놓고 pad를 약간 적실 정도로 증류수를 가한다. 유리탄소 전극을 pad에 대하여 수직으로 세운 뒤 pad위에서 8자를 약 80회 그려준다. 이때 순서는  $0.3\mu\text{m}$ 에서 먼저 진행한다. 각 pad에서 polishing이 끝난 전극은 초순수로 세척하였고, 이후 초순수에 담아 2분간 sonication을 통해 전극과 전극 표면의 남아있는 powder가루 및 불순물을 제거하였다.

polishing된 유리탄소전극에 PANI와 PANI-Ag 분산액을 피펫으로 각각  $6\mu\text{L}$  떨어뜨려 40도 오븐에서 60분간 건조시킨다. PANI와 PANI/Ag를 전극 표면에 고정시키기 위해서 Nafion(Sigma Aldrich, 미국)을 사용한다. Nafion은 술폰산 음이온을 가지고 있어 양이온을 띄는 PANI와 PANI-Ag 복합물을 고정시킬 수 있다. Nafion (0.5% wt in ethanol) 용액을 전극 표면 위에  $6\mu\text{L}$  떨어뜨려 다시 40도 오븐에서 20분간 건조시켜, 최종적으로 PANI와 PANI-Ag복합물이 코팅된 작업전극을 제조하였다.



[그림 6] Structure of Nafion, composing proton ion transport membrane

## 2.4. 은 이온의 과산화수소 산화환원 촉매반응 확인

전극 표면에 아무것도 코팅되지 않은 bare-GCE와 PANI와 PANI-Ag복합물이 코팅된 전극의 background를 확인하기 위하여 과산화수소를 넣지 않은 0,1 M PBS pH 7.4 10 mL를 cell에 넣

은 후 3전극계를 구성하여 일정전위기(CHI440, CH Instrument, 미국)를 이용해 각 전극에서 CV를 시행하였다. 이후 과산화수소 농도가 1mM인 pH 7.4 Phosphate buffer solution (PBS) 수용액에서 CV를 시행하여 background와의 차이를 통해 과산화수소 산화/환원 촉매반응 활성을 확인하였다.

## 2.5. 과산화수소의 농도와 scan rate에 따른 peak current 측정

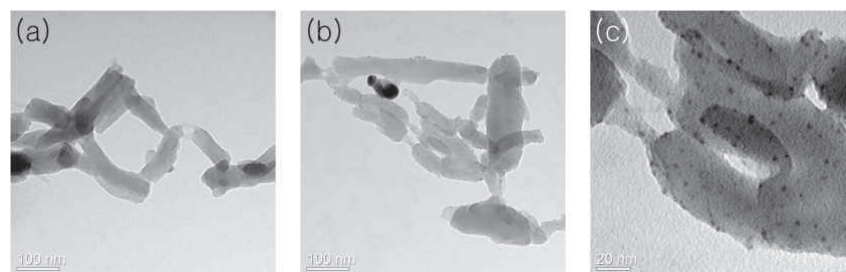
Cell에  $H_2O_2$  1 mM인 PBS 용액 10 mL를 넣어 3전극계를 구성한 후, PANI-Ag 복합물이 코팅된 전극으로 scan rate(V/s)가 0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 0.2 V/s인 조건에서 CV를 시행하였고,  $H_2O_2$  농도가 각각 1, 2, 3, 4, 5 mM 인 PBS 수용액에서 CV를 시행하여 각 Cyclic Voltammogram의 피크 전류값의 선형성 분석을 통해 Randles-Sevcik Equation과 비교하였다.

## 2.6. Amperometry 시행

PBS 수용액 10mL를 cell에 넣은 후 PANI-Ag/GCE를 사용한 3전극계를 구성하고 -0.35V로 일정한 포텐셜을 걸어준다. 그리고 300초 지점부터 50초 간격으로 100mM 과산화수소 수용액을 5  $\mu$ L씩 주입하여 농도를 50  $\mu$ M씩 증가시켰다. 이 과정을 10회 진행하면서 전류가 크게 증가하지 않아 11회부터는 1M 과산화수소 수용액을 5  $\mu$ L씩 주입하여 농도를 0.5mM씩 증가시켰다. 이 과정을 계속 진행하다가 2000초에서 PBS 용액 속의 과산화수소 농도가 13mM이 되었을 때 큰 노이즈가 생겨 더 이상 의미 있는 실험 결과를 얻을 수 없다고 판단하여 실험을 중단하였다.

# Ⅲ. 연구 결과 및 고찰

## 1. 폴리아닐린-은 나노복합물의 구조

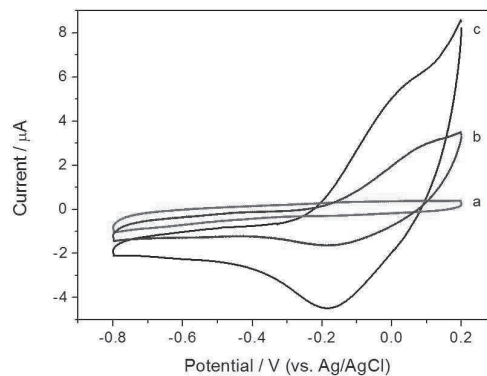


[그림 7] TEM Picture of (a)PANI (b),(c) PANI-Ag

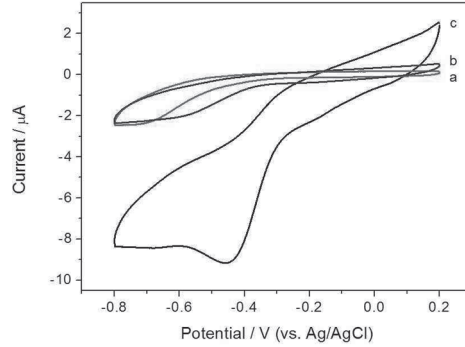
[그림 7](a)에서 직경이 약 50nm인 PANI nanofiber의 모습을 관찰할 수 있다. [그림 7](b)는 PANI-Ag의 모습이다. 왼쪽 윗부분에 직경 약 40nm인 벌크 형태의 은 입자를 관찰할 수 있다. [그림 7](c)는 [그림 7](b)의 일부분을 확대한 것이다. PANI의 표면에 직경 약 3 nm인 은 입자를 볼 수 있다. PANI를 이용해 폴리아닐린-은나노 복합물을 제조하였을 때, 매끄러웠던 PANI의 표면에 은 입자가 달라붙어있음을 알 수 있다. 또한 은 입자는 작은 입자나 덩어리 형태로 존재하였으며 작은 입자들은 PANI의 표면에 균일하게 분포되어있음을 관찰할 수 있었다. 이와 같은 형태는 PANI의 표면 전체에서 반응에서의 은 입자의 효과를 균일하게 얻을 수 있으며 전체적으로 반응 표면적을 증가시키는 효과도 불러온다. PANI는 다양한 산화상태를 가지고 있다. PANI-Ag제조 과정에서 은 이온을 넣어주었는데 TEM촬영 결과 중성을 띄는 나노입자형태로 나타났다. 이는 PANI가 산화되며 은 이온을 환원시켰을 것으로 추정된다.<sup>[2]</sup> 이를 바탕으로 계면중합법으로 합성한 PANI-Ag 나노복합물을 전극 표면에 붙여 센서로의 응용 가능성을 확인할 수 있다.

## 2. 전극 종류에 따른 Cyclic Voltametry

PANI에 Ag를 합성하였을 때와 그렇지 않았을 때의 과산화수소 검출 능력을 비교하기 위해과산화수소를 주입한 용액과 그렇지 않은 용액에서 bare-GCE, PANI/GCE, PANI-Ag/GCE로 CV를 진행하여 성능을 비교하였다.



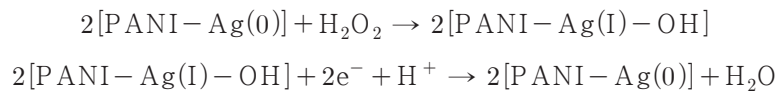
[그림 8] CV of (a) Bare GCE, (b) PANI/GCE, (c) PANI-Ag/GCE in pH 7.4 PBS saturated with nitrogen



[그림 9] CV of (a) Bare GCE, (b) PANI/GCE, (c) PANI-Ag/GCE in pH 7.4 PBS 1mM H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> solution saturated with nitrogen

[그림 8, 9]에서 (a)는 Bare-GCE, (b)는 PANI/GCE, (c)는 PANI-Ag/GCE이다. H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>를 주입하지 않은 PBS 용액[그림 8]에서의 CV를 살펴보면, (a)는 피크가 나타나지 않았고, (b)와 (c)에서는 피크가 나타났다. 선행연구를 살펴보면, 이 피크에서 나타나는 전류는 전극 표면에 흡착된 PANI의 산화/환원에 의해 생성되었다고 추정할 수 있다[3].

[그림 9]는 농도가 1mM이 되도록 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>를 주입한 PBS 용액에서의 CV이다. (a)에서는 -0.7V, (b)에서는 -0.6V에서 약한 피크가 나타났고, (c)는 -0.4V에서 큰 값의 피크가 나타났다. 이 때 나타나는 전류값은 용액 속의 과산화수소가 환원되면서 생성되었음을 알 수 있다. 선행연구를 참고하면, 전극표면에서 일어나는 화학반응의 경로는 아래와 같을 것이라고 추측된다[4].



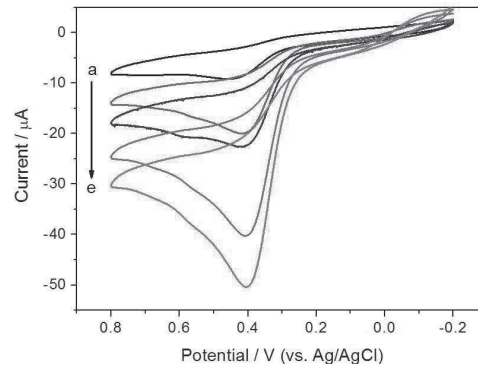
[그림 8, 9]의 결과를 바탕으로, 피크에서의 전류값을 통해 PANI-Ag의 전기화학적 과산화수소 환원능력이 우수하며 과산화수소를 전기화학적으로 검출하기 위한 센서의 전극물질로 사용하기에 적합하다고 판단되었다.

### 3. 과산화수소의 농도에 따른 Cyclic Voltammogram

제작한 PANI-Ag/GCE가 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>의 농도변화를 감지하여 그에 따라 전류값을 다르게 나타내어 센서로서의 역할을 할 수 있는지 알아보기 위해 PANI-Ag/GCE와 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>의 농도가 각각 1, 2, 3,



4, 5mM인 PBS용액으로 3전극계를 구성하여 CV를 시행하였다.

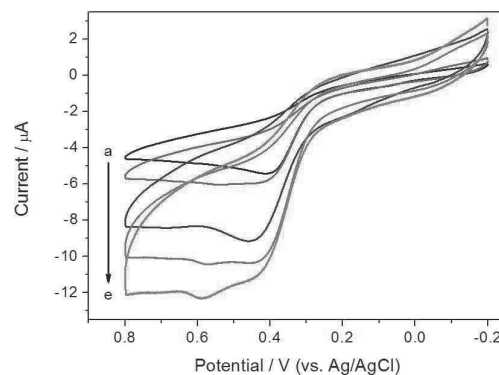


[그림 10] CV of PANI-Ag/GCE (a) 1mM, (b) 2mM, (c) 3mM, (d) 4mM, (e) 5mM  $H_2O_2$  are added in pH 7.4 PBS solution saturated with nitrogen

$H_2O_2$ 의 농도가 1 mM에서 5 mM까지 증가할수록 피크전류값이 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 농도가 증가하면 단위 면적당 전극 표면으로 확산되는 과산화수소의 양이 증가하므로 전류의 값이 커지는 것으로 추정할 수 있다. 이는 센서로 측정한 전류값을 통해  $H_2O_2$ 의 농도를 유추하는 것이 가능함을 알 수 있으며 PANI-Ag/GCE의  $H_2O_2$  검출 센서로서의 이용 가능성을 보여준 것이라고 판단할 수 있다.

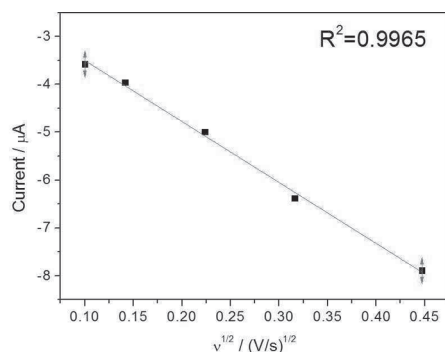
#### 4. Scan Rate에 따른 Cyclic Voltammogram

PANI-Ag/GCE 전극 표면에서 일어나는  $H_2O_2$  산화-환원 반응의 특성을 좀 더 자세하게 알아보기 위해 PANI-Ag/GCE와 1 mM의  $H_2O_2$ 가 포함된 PBS용액으로 3전극계를 구성하여 scan rate를 0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 0.2  $V s^{-1}$ 로 변화시켜가며 CV를 시행하였다.



[그림 11] CV of PANI-Ag/GCE by scan rate

[그림 11]에서 scan rate가 증가할수록 최대전류가 증가함을 알 수 있다. 전류는 단위 시간당 흐른 전하량으로 결정되는데 scan rate가 빨라진다면 같은 전압이 인가되는데 걸리는 시간이 짧아지므로 전류량은 증가하게 된다.



[그림 12] Linear relationship graph of  $v^{1/2}$  and electric current

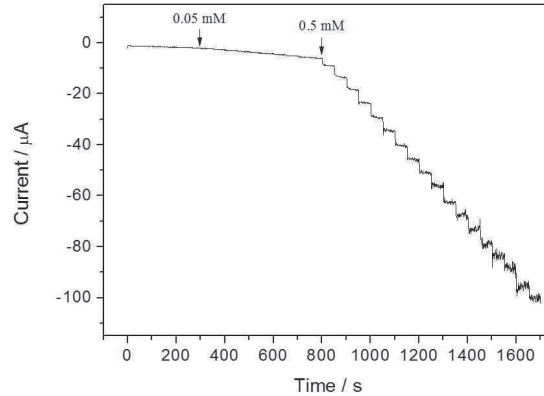
[그림 12]는 scan rate와 전류의 상관관계를 나타낸 그래프이다. scan rate의 제곱근과 전류가 비례한다는 것을 알 수 있는데, 이 결과를 Randles-Sevcik 식과 비교하면 분석물질의 산화-환원 반응 속도가 분석물질이 확산되어 들어오는 속도에 의해 결정된다는 것을 알 수 있다. Randles-Sevcik 식은 산화-환원 반응속도가 확산에 의해 결정되는 조건에서 Cyclic Voltammetry의 피크 전류값과 몰농도, 주사 속도와 비례관계를 설명해준다. 비가역 또는 유사가역 산화-환원 과정에서의 Randles-Sevcik 식은 다음과 같다[5].

$$i_p = 0.4961nFAC\left(\frac{\alpha n F v D}{RT}\right)^{1/2}$$

이 때  $i_p$ 는 Cyclic Voltammogram에서의 피크 전류(A)값이며 F는 패러데이 상수(C/mol), A는 전극의 표면적( $cm^2$ ), C는 물질의 몰농도( $mol\ cm^{-3}$ ), D는 확산 계수( $cm^2\ s^{-1}$ ) v는 주사 속도(Scan Rate)로  $V\ s^{-1}$ 의 단위를 가진다.

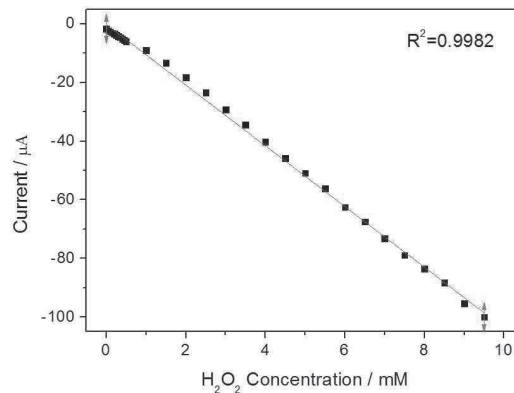
## 5. Amperometry

앞의 실험들로부터 PANI-Ag를 이용한 전극이 용액에 녹아있는  $H_2O_2$  검출이 가능하며  $H_2O_2$  검출 센서로서 활용이 가능함을 알 수 있었다. 이에 이 전극의 센서로서의 특성을 조사하기 위해서 일정 전압에서 농도를 변화시켜 전류값의 변화를 측정하는 Amperometry를 시행하였다.



[그림 13] Amperometry result in  $-0.35\text{V}$  in pH 7.4 PBS solution saturated with nitrogen

[그림 13]에서  $\text{H}_2\text{O}_2$ 를 계속 주입하면서 시간이 지날수록 농도가 커지자 일정한 구간부터 노이즈가 심해지는 것을 관찰할 수 있다. 용액 상에  $\text{H}_2\text{O}_2$ 를 넣어주는 즉시 전류가 증가하며, 이를 통해 전극 표면에서  $\text{H}_2\text{O}_2$ 의 환원 반응이 매우 빠르게 일어남을 알 수 있다.



[그림 14] Correlation between  $\text{H}_2\text{O}_2$  density and electric current Amperometry experiment

[그림 13]의 시간-전류 관계를  $\text{H}_2\text{O}_2$  농도-전류 관계로 변환하면 [그림 14]와 같다. [그림 14]에서  $\text{H}_2\text{O}_2$  농도가 9mM일 때 까지 농도-전류 관계가 우수한 선형 관계를 보임을 알 수 있다. 예서의  $\text{H}_2\text{O}_2$  농도와 current간의 선형성 그래프이다. 따라서 이 전극의 선형범위(linear range)는 0.05 – 9mM임을 알 수 있다. 또한, 측정값을 바탕으로 센서의 민감도와 검출 한계를 조사한 결과 각각 민감도(sensitivity)는  $146.5 \mu\text{A mM}^{-1}\text{cm}^{-2}$ , 검출 한계(Limit of Detection, LOD)는 8.2  $\mu\text{M}$ 로 확인되었다.

전극	선형범위 (mM)	검출한계 ( $\mu\text{M}$ )	민감도 ( $\mu\text{A mM}^{-1} \text{cm}^{-2}$ )	인용문헌
MWCNT-NiO/GCE	0.2 - 2.53	19	338	[6]
Pt/PPy/GCE	0.1 - 0.8	1.2	80	[7]
HRP/nano-MgO/chit/AuE	0.0001 - 1.3	0.05	243.1	[8]
GO/MnO <sub>2</sub> /GCE	0.005 - 0.6	0.8	38.2	[9]
AgNPs/ZnONRs/FTO	0.008 - 0.983	0.9	152.1	[10]
SWCNTs-PDA-AgNPs/GCE	0.05 - 1.75	0.6	355.6	[11]
PANI-Ag/GCE	0.05 - 9	8.2	146.5	본 연구

[표 1] Previously reported performance comparison with electrochemical H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> Detecting Sensor

[표 1]에서 보았을 때, 본 연구에서 제작한 PANI-Ag/GCE의 검출한계는 비교적 높지만, 민감도는 기존 연구 결과들과 비교하여 뒤지지 않는 성능을 보였다. 특히 선형범위가 매우 넓은 것을 알 수 있다.

## IV. 결론 및 논의

본 연구에서는 전도성 고분자물질인 PANI를 계면중합법을 이용해 중합하였고, PANI dispersion에 은 이온을 혼합하여 PANI-Ag 나노 복합물을 제조하였다. TEM 사진 촬영을 통해 PANI-Ag 나노 복합물 형성 시 PANI 표면에 직경 3 nm가량의 Ag 나노입자가 형성되었음을 확인했다. H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>를 포함한 용액과 그렇지 않은 용액에서 bare-GCE, PANI/GCE, PANI-Ag/GCE로 CV를 시행한 결과 PANI-Ag/GCE에서 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>의 검출 능력이 고도로 향상되었음을 알 수 있다. 즉 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>의 환원 반응을 PANI-Ag/GCE가 크게 증가시켰다는 것인데, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>의 환원 반응이 촉진된 이유는 선행연구를 바탕으로 생각해보면 Ag가 전기화학적 촉매역할을 했기 때문으로 추정된다 [4]. 전압을 걸어줌에 따라 진행되는 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>의 산화 환원 반응을 이용한 검출에서 확산 과정이 속도 결정단계임을 scan rate와 current의 선형성 조사를 통해 알아내었다. 또한 이 current는 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>의 농도에 비례하여 증가하는 것을 확인함으로써 PANI-Ag/GCE 전극을 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>의 농도를 알아내는 센서로서 응용할 수 있음을 확인하였다. 이 전극을 이용하여 amperometry를 시행하여 전극의

특성인 민감도, 선형 범위, 검출 한계를 구하였다. 그 결과 민감도  $146.5 \mu A mM^{-1} cm^{-2}$ , 선형 범위 0.05 – 9 mM, 검출 한계  $8.2 \mu M$ 로 센서로서 이용 가능함을 판단하였다. 특히 본 연구에서 제작한 센서는 기존 연구 결과들과 비교하였을 때 선형범위가 넓은 것을 알 수 있으며, 이는 PANI가 Ag 나노입자의 안정화에 기여함으로 추측할 수 있다. 본 연구에서는 pH 7.4 PBS 조건에서 실험을 하였는데, 이 pH는 인체 체액의 pH와 비슷하다. 이로써 본 연구에서 제작한 전극을 추후 바이오센서로 발전시킬 수 있는 가능성 또한 확인하였다. 이 실험이 그 시작단계라고 볼 수 있기에 후속 연구가 진행될 때에는 다양한 pH에서의 전극 활용 가능성을 생각해볼 수 있다. PANI가 단독으로 응용될 경우에는 염기성 조건에서 전기전도성이 매우 떨어진다는 사실이 널리 알려져있다. 만약 염기성 조건에서도 본 전극이 충분히 효과를 발휘할 수 있다면 전기화학적 센서에서 PANI의 활용성이 더욱 넓어질 것이다. 또, 본 연구를 통해 제작한 전극을 이용하여  $H_2O_2$ 를 함유한 시판되는 제품에서의  $H_2O_2$  농도를 측정해볼 수 있다. 이를 통해 PANI-Ag/GCE 전극의 검출 선택성을 평가할 수 있을 것이다. 마지막으로 본 연구의 결론으로서 PANI가 Ag의 안정화에 기여를 했다고 판단했는데, PANI 대신에 사용할 수 있는 다른 전도성 고분자 물질에 관한 연구도 진행할 수 있을 것이다.

## ■ 참고문헌

- [1] S. Virji, B. H. Weiller, Construction of a Polyaniline Nanofiber Gas Sensor, J. Chem. Edu. 85 (2008) 1100-1104.
- [2] Jia, Qingming, *et al.* "One-step synthesis of polyaniline nanofibers decorated with silver." Journal of applied polymer science 115.1 (2010): 26-31.
- [3] J. Luo, Y. Chen, Q. Ma, R. Liu and X. Liu, Layer-by-layer self-assembled hybrid multilayer films based on poly(sodium 4-styrenesulfonate) stabilized graphene with polyaniline and their electrochemical sensing properties, RSC Adv., 2013, 3, 17866.
- [4] M. R. Guascito, E. Filippo, C. Malitesta, D. Manno, A. Serra, A. Turco, A new amperometric nanostructured sensor for the analytical determination of hydrogen peroxide, Biosensors and Bioelectronics 24 (2008) 1057-1063.
- [5] A.J. Bard, L.R. Faulkner, Electrochemical Methods Fundamentals and Applications, Wiley, New York, 1980.
- [6] J. Wang, M. Musameh, Y. Lin, Solubilization of carbon nanotubes by nafion toward the preparation of amperometric biosensors, J. Am. Chem. Soc. 125 (2003) 2408-2409.
- [7] Bian, Xiujie, *et al.* "Fabrication of Pt/polypyrrole hybrid hollow microspheres and their application in electrochemical biosensing towards hydrogen peroxide." Talanta 81.3 (2010): 813-818.
- [8] L.M. Lu, L. Zhang, X.B. Zhang, Z.S. Wu, S.Y. Huan, G.L. Shen, R.Q. Yu, A MgO nanoparticles composite matrix-based electrochemical biosensor for hydrogen peroxide with high sensitivity, Electroanalysis 22 (2010) 471-477.

- [9] L.M. Li, Z.F. Du, S. Liu, Q.Y. Hao, Y.U. Wang, A novel nonenzymatic hydrogen peroxide sensor based on  $\text{MnO}_2$ /graphene oxide nanocomposite, *Talanta* 82 (2010) 1637-1641.
- [10] C.-Y. Lin, Y.-H. Lai, A. Balamurugan, R. Vittal, C.-W. Lin, K.-C. Ho, Electrode modified with a composite film of ZnO nanorods and Ag nanoparticles as a sensor for hydrogen peroxide, *Talanta* 82 (2010) 340-347.
- [11] Y. Lin, L. Li, L. Hu, K. Liu, Y. Xu, Multifunctional poly(dopamine)-assisted synthesis of silver nano particles/carbon nanotubes nanocomposite: Toward electrochemical sensing of hydrogen peroxide with enhanced sensitivity, *Sens. Actuators, B: Chem.*, 202 (2014), 527-535.

#### 심사평

폴리아닐린-은나노입자 복합물을 전극에 코팅하여 과산화수소를 전기화학적 방법으로 검출하고자 하는 연구과제로서, 연구목표 및 내용이 아주 명확하다. 어떤 물질을 전기화학적으로 분석하는 실험은 전극의 특성에 영향을 많이 받기 때문에 전극의 특성을 개선하는 연구는 광범위하게 진행되고 있는 주제중의 하나이다.

연구 주제 선정에서의 독창성이 부족하지만 연구 내용 및 실험 방법, 결과 도출은 우수하였다. 기존에 알려지지 않은 새로운 방법을 시도해 보았다는 측면에서 의미가 있다고 생각한다.

학생들이 연구에 대한 이해를 충분히 하여 연구 수행 중에 새로운 실험방법을 생각하거나 스스로 궁금한 점을 해소하기 위해 여러 가지 노력을 하는 과정을 거치는 것은 좋은 학습경험이라 생각한다. 결론 및 논의와 같은 부분에서 학생들의 경험한 바를 좀 더 구체적으로 알 수 있는 내용을 서술했으면 좀 더 좋은 논문이 되었을 것이라 생각한다.

## 연구 후기

처음에 R&E 팀을 결성하고, 하고 싶은 주제에 대해 생각하다가 전기화학 쪽으로 해보고 싶다는 결론을 내렸다. 직접 지도교수 선생님께 연락을 해서 우리 팀을 지도해 주실 수 있다는 허락을 받고, 교수님의 연구팀이 하는 주제인 전기화학 김출 센서를 해보기로 했다. 우리 팀원 모두가 이 연구에 대해서 흥미로울 것이라고 생각했고 창의재단 R&E에 지원하게 된 것이다. 우리 팀은 R&E를 상당히 많이 갔다. 대학원 수준의 연구를 우리가 직접 하기 위해서 이론 수업을 교수님께 두 번 들었으며, 매번 실험을 갈 때마다 우리가 무엇을 하는지 조교선생님께서 자세히 알려주셨다. 조교선생님께서는 우리가 실험을 통해서 배우는 것이기에, 기본적인 화합물의 제조도 우리가 직접 해보기를 원하셨다. 우리가 완벽하게 실험을 실행하기 위해, 다른 화합물로 예비실험도 구상해주셨다. 부득이하게 2명만 간 뒤에는, 다른 2명도 그 다음날 와서 같은 실험을 하도록 해서 팀원 모두가 우리가 무슨 실험을 하는지 이해를 하게 해주신 것이 좋은 연구를 만들어낸 것 같다. 우리는 밤 11시까지도 실험을 하는 등 연구의 결과를 얻기 위해 노력했다. R&E를 정말 많이 가서 다른 R&E를 하는 친구들마저 우리가 너무 많이 가는 것이 아니냐고 말할 정도였다. 하지만, 매번 갈 때마다 새로운 것을 배우고, 실험의 기술을 터득하고, 실험 시 유의할 점을 배웠기에 우리의 노력은 결코 헛되지 않았다고 생각한다. 너무 많이 가는 동안에는 힘들기도 했으나, 카이스트에 가서 발표도 하고, 학술지에 낼 수 있게 될 때마다, 그 노력에서 기쁨을 얻을 수 있었다. 실험 이론, 실험 과정 등등 이 모든 R&E에 대한 활동이 흥미로웠다. 앞으로 같은 팀 구성으로 실험을 할 수 있는 날이 다시 온다면, 더 많은 흥미로운 것을 배워 볼 수도 있지 않을까 싶다. 마지막으로, 지도교수님과 지도교사 선생님, 조교선생님께 오랜 기간 도움 주신 것에 감사드리고 싶다.

## 연구진

한준택(Han Joontack, 세종과학고등학교 1학년, wm05055@naver.com), 제1저자 및 교신저자  
 황윤비(Hwang Yoonbee, 세종과학고등학교 1학년, thinksink325@naver.com)  
 박승민(Park Seungmin, 세종과학고등학교 1학년, qkrtmdals119@gmail.com)  
 오서령(Oh Seoryoung, 세종과학고등학교 1학년, hpsur1783@naver.com)

지도교사 : 김민성(Kim Minseong, 세종과학고등학교, 전공: 화학, wontor@sen.go.kr)  
 지도교수 : 홍훈기(Hong Hungi, 서울대학교 화학교육과, hghong@snu.ac.kr)

(2015. 1월 현재)

## HS-SPME GC/MS법을 이용한 개미(*Camponotus japonicus*)의 페로몬 내 포름산, 올레인산 검출 및 정량

(Detection and quantitative analysis of formic acid, oleic acid inside the  
pheromone of *Camponotus japonicus* using HS-SPME GC/MS method)

김재원 · 이택경 · 이민수 · 박준우(경기북과학고등학교)

### 초 록

HS-SPME(HeadSpace-Solid Phase MicroExtraction) GC/MS(Gas Chromatography / Mass Spectrometer)법은 미량의 시료를 흡착하여 분석하는 분석법이다. 본 연구에서는 HS-SPME GC/MS법을 이용하여 살아있는 일본왕개미(*Camponotus japonicus*)의 페로몬을 검출하고 정량하였다. 메탄올을 용매로 하여 개미의 페로몬의 GC/MS법을 통한 분석 가능 여부를 확인한 후 일본왕개미에게 먹이 자극과 위기 자극을 가하여 이를 HS-SPME GC/MS법으로 분석한 결과 각 상황별 페로몬분비의 재현성을 확인하였으며, 페로몬 성분 중 포름산과 올레인산이 다량 포함되어 있음을 확인하였다. 반복된 실험을 통해 포름산과 올레인산 검출의 재현성을 확인할 수 있었다. 이후 포름산과 올레인산에 대한 fiber 최적화 작업 후 여러 상황에서 개미가 분비하는 페로몬과 올레인산을 정량하였다. 본 연구 방법은 개미를 죽이지 않고 페로몬을 분석하므로 각 자극에 대응하는 페로몬을 검출 할 수 있다는 장점이 있으며, 이를 이용하면 페로몬의 분류의 타당성과 정확성을 확보 할 수 있을 것이다.

키워드 : 일본왕개미, 개미 페로몬, HS-SPME, GC/MS, 포름산, 올레인산

## I. 서 론

외분비를 통한 행동 유발 물질인 페로몬은 지난 몇 십 년에 걸쳐 연구되어 왔다. 그러나 분비샘 적출을 통한 연구는 상황에 따라 분비된 페로몬을 검출하기 어렵기 때문에 연구 별로 페로몬 체계의 정리가 부족하고, 연구 간 개연성과 일관성이 부족하다.<sup>[1]</sup> 이는 외분비샘을 직접 적출하는 조건에서, 개미의 페로몬은 개미가 죽기 직전의 단계에서 분비하는 것이 대부분을 차지하며, 외분비샘에 포함되어 있는 다른 불순물이 같이 분석되어 결과 처리 단계에서 오차가 발생한다. 따라서 본 연구



에서는 현재까지의 단점을 극복하기 위하여 살아있는 개미로부터 상황을 설정한 후 상황 별 페로몬을 분석하고자 하였다.

한국에 서식하는 일본왕개미(*Camponotus japonicus*)의 일개미에게 먹이 1M sucrose 10  $\mu$ L를 주었을 때 나타나는 decane, tridecane, undecane의 HS-SPME(HeadSpace - Solid Phase Micro Extraction) GC/MS(Gas chromatography / Mass spectrometer)법을 이용한 분석이 수행된 바 있다.[2] HS-SPME법은 1990년대에 개발된 새로운 추출 방법으로서 vial의 headspace에 노출된 fiber의 coating과 headspace와의 화학평형을 통해 fiber에 시료를 흡착한 후 이를 GC/MS로 추출하는 방법이다. HS-SPME법은 민감도와 추출 능력이 뛰어나기 때문에 효과적인 시료 분석 방법으로 사용되고 있다. 이에 본 연구에서는 일본왕개미의 페로몬의 GC/MS를 통한 분석 가능성을 확인하고, 자극 및 상황을 재현하여 HS-SPME GC/MS법을 통해 페로몬 검출을 시도하고 재현성을 확인함으로써 분석 가능성을 연구하고, 정량을 통해 상황별로 페로몬이 다르게 분비됨을 확인하고자 한다.

## II. 연구방법 및 이론

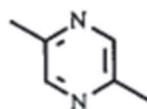
### 1. 개미 관련 이론

#### 1.1. 페로몬<sup>[1]</sup>

페로몬은 신호전달 체계의 일종으로 현재까지 밝혀진 다양한 신호전달 체계가 가지는 내분비의 특징에 비해서 특이하게 외분비의 성격을 가진다. 페로몬을 가지고 소통하는 생물로는 말벌, 꿀벌, 개미, 흰개미 등이 있다. 탄화수소 계열의 화합물들이 주를 이루며, 질소나 황이 포함되는 페로몬도 존재한다. 페로몬의 분자량은 30정도부터 300이 넘어가는 등 넓은 범위를 가지며 각각의 화합물들마다 다양한 상황에서 분비 및 작용한다.



[그림 1] tridecane, 성 페로몬의 예



[그림 2] trimethyl pyrazine, 질소 포함 페로몬의 예

페로몬은 Dufour's gland, venom gland, pygidial gland 등의 여러 가지 분비샘에서 분비될 수 있다. 페로몬은 그 역할에 따라서 세분화되는데, 개미의 경우에는 성 페로몬, 알람 페로몬, 아기 돌봄(brood) 페로몬, 집합(recruitment)/경로(trail) 페로몬의 종류가 있다. 성 페로몬은 이성을 유혹하고 짝짓기를 유도하여 자손의 번식에 이용되는 페로몬이다. 알람 페로몬은 군체에 가해진 스트레스 또는 혼란에 대처하는 데에 사용되는 페로몬으로, 군체에 가해진 스트레스를 전달하는 역할을 한다. 아기 돌봄 페로몬은 어린 개체에서 분비되는 것으로 동종의 어른 개체에게 자신의 상태를 알리거나 그들의 행동에 대한 대응 행동을 유발시킨다. 집합/경로 페로몬은 개미가 먹이를 발견한 후 본거지로 돌아올 때 침을 통해 분비된다. 집합/경로 페로몬이 분비된 경로의 인지를 통해 동료 개미들이 먹이가 있는 곳으로 도달할 수 있다.

페로몬의 경우 일반적인 화학적 물질들과는 다르게 하나의 물질이 다방면으로 작용할 수 있다. 페로몬 화합물은 분비되는 장소나 농도에 따라서 소통하는 상황에서의 의미가 다르게 나타난다.

### 1.2. Necrophoric behavior

Necrophoric behavior는 시체를 처분하는 반응으로, 이 반응에서 개미는 남은 먹이나 쓰레기들과 개미의 시체를 함께 쓰레기 더미로 이송하여 보관하는 행동을 보인다. 올레인산(Oleic acid)은 개미가 죽을 때 분비되는 지방산으로서 necrophoric behavior를 유도한다.[3]

건강한 일개미에 희석된 올레인산을 묻힌 후 개미가 서식처로 되돌아갔을 때 다른 일개미들은 올레인산 처리된 개미를 신속히 체포하여 쓰레기 더미로 이송하였다. 대조적으로, 단순히 얼려진 개미는 다른 일개미들에 의해 이송되지 않았는데, 이는 이 개미가 사망 후 부패하지 않아 지방산의 방출이 발생하지 않았기 때문이다.[4]

개미에게 있어서 올레인산은 두 가지 반응을 유도할 수 있다. 반응은 사건 발생 시 대다수의 개미들이 어떤 활동에 관여하는지에 따라 다르게 나타난다. 첫 번째로, 개미가 서식처 보수 또는 쓰레기 더미 작업을 할 때 올레인산이 묻은 종이를 투입하였을 때는 올레인산이 묻은 종이를 쓰레기 더미로 옮기는 작업이 관찰되었다. 두 번째로, 개미가 먹이 채집 활동 중이거나 서식처에서 먹이 공급이 진행될 때 개미가 올레인산 처리된 종이를 발견할 경우 이 종이를 먹이로 인지하여 둥지 내부로 가지고 들어가는 행동이 관찰되었다.[5] 이러한 일련의 결과를 통해 oleic acid도 개미의 행동 유발 물질인 페로몬임을 알 수 있다.

### 1.3. 방어 기작

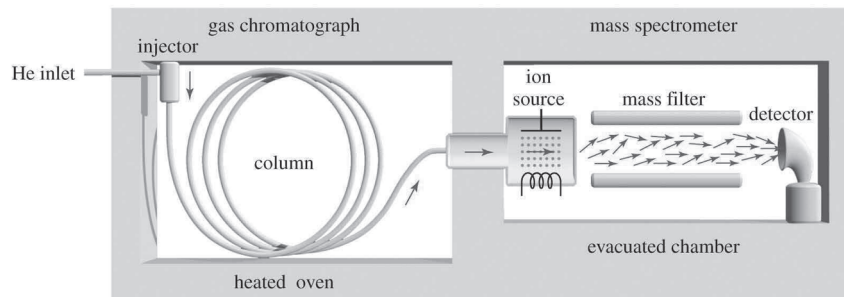
불개미아과(*Formicinae*) 개미들은 포름산(Formic acid)을 방어 기작에 이용한다. 불개미아과의 개미들은 튀어나온 침의 형태가 발달하는 대신 몸의 내부에 venom gland가 발달하여 독액을 생성/분비

한다.[6] 이 때 독액에는 포름산이 포함되어 있고, 이 포름산이 위험을 알리거나 방어 기작을 형성하는 역할을 하므로 포름산은 알람 페로몬의 일종이다.

왕개미(*Camponotus*)족의 개미들은 몸 밖으로 튀어나온 mandibular gland를 가지고 있는데, 지속적인 자극을 받을 경우 개미는 몸을 터뜨려 자살하며 이 때 끈적거리는 물질을 분비하게 된다.[7]

## 2. 분석기기 및 분석법

### 2.1. Gas Chromatography / Mass Spectrometer



[그림 3] GC/MS의 전체 개요도

출처: <http://www.intechopen.com/source/html/39013/media/image11.jpeg>

기체 크로마토그래피(Gas Chromatography)에서 휘발성 성분들은 이동상 기체상과 컬럼에 들어 있는 액체나 고체 고정상 간의 분배에 의해 분리된다. 기체 크로마토그래피로 분리 할 때 시료는 기화되고 크로마토그래피의 컬럼의 입구로 주입된다. 불활성 기체 이동상의 흐름에 의해 용리가 일어난다. 다른 형태의 크로마토그래피와 달리, 이동상은 분석 성분 분자와 상호작용을 하지 않는다. 이동상은 단지 컬럼을 통해 분석성분을 이동시킨다.[8]

질량 분석기(Mass Spectrometer)는 또한 검출 한계가 낮아서 높은 감도를 가지므로 미량 분석에 용이하다. 또한, 이동상을 기체로 사용하기 때문에 분석시간이 짧아 편리하다.

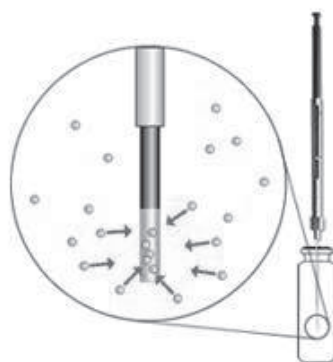
### 2.2. Solid Phase MicroExtraction<sup>[9][10]</sup>

SPME(Solid Phase MicroExtraction)법은 1990년에 개발된 용매의 영향을 받지 않는 추출법이다. SPME법은 fiber라는 바늘을 이용하는데, fiber 끝부분의 coating에 시료 물질이 흡착된다. Vial 내부에 존재하는 용매에 용해되어 있는 물질을 흡착하는 경우에 SPME법은 시료에 fiber를 직접 접촉시키는 Direct-SPME법과, 시료 위의 공간(headspace)에 fiber를 노출시키는 Headspace-SPME (HS-SPME)

법 두 가지 형태가 존재한다. HS-SPME법에서 coating, headspace, matrix가 평형을 이룰 때 coating에 시료 물질이 최대로 흡착될 수 있다. 이 때 시료 물질이 많을수록, vial의 전체 부피가 작을수록 coating에 시료가 흡착되는 속도가 증가한다. 또한 온도가 증가하게 되면 평형 도달 속도가 증가하므로 가능한 한 높은 추출 온도를 설정하는 것이 좋다.

Analyte Class	Fiber Type	Linear Range
Acids (C2-C8)	Carboxen/PDMS	10ppb - 1ppm
Alcohols (C1-C8)	Carboxen/PDMS	10ppb - 1ppm
Alcohols (C1-C18)	Polyacrylate	100ppb - 100ppm
Aldehydes (C2-C8)	Carboxen/PDMS	1ppb - 500ppb
Aldehydes (C3-C14)	100 μ m PDMS	50ppb - 50ppm
Amines	PDMS/DVB	50ppb - 50ppm
Amphetamines	100 μ m PDMS	100ppb - 100ppm
Amphetamines	PDMS/DVB	50ppb - 50ppm
Aromatic amines	PDMS/DVB	5ppb - 1ppm
Barbiturates	PDMS/DVB	500ppb - 100ppm
Benzodiazepines	PDMS/DVB	100ppb - 50ppm
Esters (C3-C15)	100 μ m PDMS	5ppb - 10ppm
Ethers (C4-C12)	Carboxen/PDMS	1ppb - 500ppb
Explosives (Nitroaromatics)	PDMS/DVB	1ppb - 1ppm
Hydrocarbons (C2-C10)	Carboxen/PDMS	10ppb - 10ppm
Hydrocarbons (C5-C20)	100 μ m PDMS	500ppt - 1ppm
Ketons (C3-C9)	Carboxen/PDMS	5ppb - 1ppm
Ketons (C5-C12)	100 μ m PDMS	5ppb - 10ppm
Nitrosamines	PDMS/DVB	1ppb - 200ppb
PAHs	100 μ m PDMS	500ppt - 1ppm
Pesticides, chlorinates	100 μ m PDMS	50ppt - 500ppb
Pesticides, nitrogen	Polyacrylate	50ppt - 500ppb
Pesticides, phosphorus	100 μ m PDMS	100ppt - 1ppm
Pesticides, phosphorus	Polyacrylate	100ppt - 500ppb
Phenols	Polyacrylate	5ppb - 500ppb
Sulfur gases	Carboxen/PDMS	10ppb - 10ppm
Terpenes	100 μ m PDMS	1ppb - 10ppm
VOCs	Carboxen/PDMS	100ppt - 500ppb
VOCs	100 μ m PDMS	20ppb - 50ppm

[표 1] SPME Fiber Selection Guide<sup>[10]</sup>



[그림 4] 시료 물질이 fiber의 coating에 흡착되는 모습

출처 <http://www.schambeck-sfd.com/en/hplc-gpc-products/gc-autosampler.php>

Coating의 종류에는 PDMS, PA, PDMS/DVB, Carbowax/DVB, Carbowax/TR 등이 있다. PDMS는 GC의 injector 온도 300℃를 견딜 수 있으며 PDMS는 무극성 coating으로서 무극성 시료를 잘 흡착하면서도, 극성 시료도 흡착할 수 있는 능력이 있어서 가장 널리 이용된다. PA는 극성 물질을 흡착하는데 용이하지만 평형 도달 시간이 길다는 단점이 있다. Coating에 따라 흡착이 잘 일어나는 물질과 그렇지 않은 물질이 나타나게 된다.

### 3. 시료 및 기구

포름산(Formic acid)은 Samchun pure chemical에서 구매하였고, 올레인산(Oleic acid)은 Sigma Aldrich에서 구매하였다. SPME법을 이용한 검출 시 개미에게 주어진 먹이는 선행논문에 따라 sucrose 수용액을 사용하였고[2], Supelco(trademarks of Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, USA)의 Screw-Top 20mL, Hole Cap with PTFE/Silicone Septa 바이알과 Varian의 Clear Glass Wide Open Screw Vial 2.0mL, 9mm red cap with PTFE /Silicone Septa 바이알이 사용되었다.

GC/MS 기기는 CP-3800 GC와 1200 Quadrupole MS(Bruker, Bremen, Germany)를 사용하였다. GC/MS의 조건은 표에 나타내었다. 각 실험마다 사용된 GC/MS method가 일부 다르기 때문에 이는 각 실험별로 따로 표기하도록 한다. Fiber는 Supelco의 65  $\mu$ m PDMS/DVB fused silica, 75  $\mu$ m CAR/PDMS fused silica, 100  $\mu$ m PDMS fused silica가 사용되었다. 각 실험별로 선택된 fiber는 따로 표기하였다.

Gas chromatography	
Column	Capillary Column 30m * 0.25mm (VARIAN)
Carrier gas	Helium gas at constant rate flow 1.0mL/min
Inlet temperature	250℃
MS Detector	
Ionization energy	70eV
Ion source temperature	230.4℃
Transfer line temperature	251.1℃
Scan rate	2.25 scan/sec

[표 2] Analytical condition by GC/MS

## 4. 실험 방법

이 실험의 목표에 따라서 개미에게서 페로몬을 분석 및 정량하기 위해 3개의 단계를 걸쳐 실험을 진행하였다. Fiber의 종류와 자극은 각 실험의 목적에 맞게 적절한 것을 선택하였다.

이 때 사용한 시료는 일본왕개미(*Camponotus japonicus*)로서 일개미 단독 군체와 여왕개미 포함 일개미 군체를 비바생물원(Biobiba Ant Kingdom, 대구, 한국)에서 구매하였다. 실험에 사용하지 않는 개미는 비바생물원에서 구매한 개미집에 보관하였으며 먹이는 일정하게 공급하였다. 또한 개미는 어두운 땅 속에서 가장 안정하기 때문에 개미집과 실험에 사용된 바이알을 알루미늄 호일로 감싸서 암실로 만들어 주었다.

### 4.1. GC/MS를 통한 페로몬의 검출 가능성 여부 분석

개미의 페로몬이 실제로 GC/MS로 검출 가능한지 여부를 판단하기 위해 개미를 바이알에 넣고 바이알을 메탄올로 채워서 개미가 분비하는 물질을 전부 용해시킨다. 이후 메탄올에 녹아있는 페로몬은 GC/MS를 통해 분석한다.

### 4.2. HS-SPME를 통한 페로몬 검출 가능성 확인 및 재현성 분석

HS-SPME GC/MS법을 통해 페로몬을 검출한다. 개미는 특정 상황에서 특정한 페로몬을 분비할 것이므로 동일한 상황에서 동일한 chromatogram이 나타나는지 확인한다.

### 4.3. 특정 페로몬의 자극별 분비량 분석

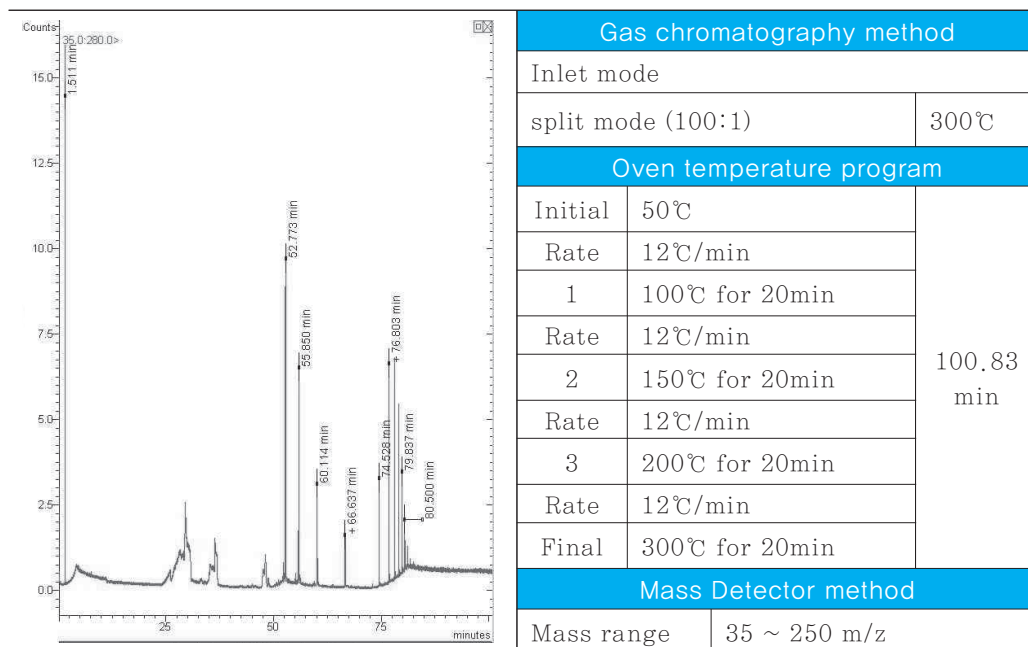
정량 결과를 도출하기 위해 앞서 가장 흡착 효율이 좋은 fiber를 찾기 위해 fiber 최적화를 한다. 그런 다음 앞에서 나온 결과를 바탕으로 핵심적인 페로몬들을 선정하여 페로몬의 chromatogram peak의 넓이 적분 값으로 검정 곡선을 작성하여 개미로부터 분비된 페로몬을 정량한 다음, 다른 상황에서 나오는 페로몬의 양이 어떻게 다른지 알아본다.

## III. 연구결과 및 고찰

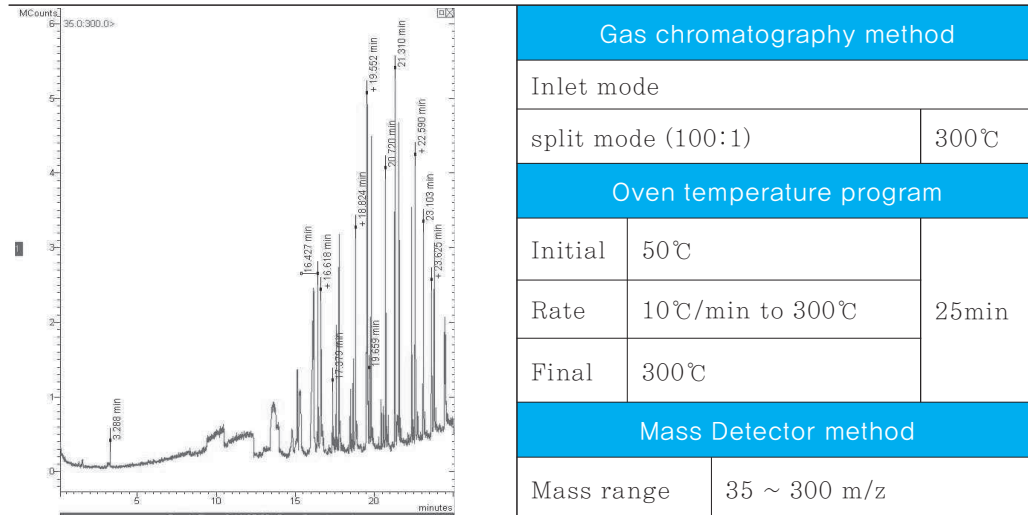
### 1. 페로몬의 검출 가능성 여부 분석

#### 1.1. 실험 조건 및 결과

페로몬의 검출 여부를 위해 개미를 바이알에 넣은 뒤 메탄올로 가득 채웠다. 이 때 사용한 바이알은 Hole Cap with PTFE/Silicone Septa vial이고, fiber는 75  $\mu$ m Carboxen/PDMS를 사용하였다.



[표 3] 메탄올로 개미의 페로몬을 용해시킨 후 얻어진 Chromatogram 및 GC/MS method



[표 4] 메탄올로 개미의 페로몬을 용해시킨 후 얻어진 Chromatogram 및 GC/MS method

## 1.2. 결과 분석

두 번의 실험을 통해 GC/MS로 페로몬이 검출이 가능한지 본 결과 첫 번째 실험과 두 번째 실험 모두 많은 peak가 확인되었고 이로써 GC/MS로의 페로몬 분석이 가능함을 알 수 있다. 그렇지만 앞에서 언급했던 바와 같이 개미를 메탄올에 넣어 페로몬을 추출하는 방법은 개미의 다양한 상황에서 분비되는 특정 페로몬을 검출할 수 없다는 점과 개미를 계속 죽여야 한다는 점이 본 연구의 목적에는 적합하지 않았다. 따라서 살아 있는 개미로부터 상황별로 분비되는 페로몬을 HS-SPME GC/MS법으로 분석하고자 한다.

## 2. HS-SPME를 통한 페로몬 검출 가능성 확인 및 상황별 재현성 분석

동일한 상황에서 개미는 동일한 페로몬을 분비하므로 chromatogram의 각 peak의 retention time이 일정하게 나타날 것이다. 만약 검출되는 물질들이 불순물이거나 상황과 관계없는 물질이라면 chromatogram의 각 peak의 retention time이 다르게 나타날 것이다. 따라서 retention time의 확인을 통해 페로몬 검출 가능성 확인 및 재현성 확인이 가능하다.

이 실험에서는 두 가지의 상황을 설정하였는데, 첫 번째는 먹이로 1M Sucrose 1 μL를 주었을 때의 상황이고 두 번째는 위기의 상황이다. 위기의 상황을 실험할 때에는 바이알을 가열하였다. 두 번의 실험에서 사용했던 바이알은 Hole Cap with PTFE/Silicone Septa vial이고 fiber는 75 μm Carboxen/PDMS를 사용하였다.



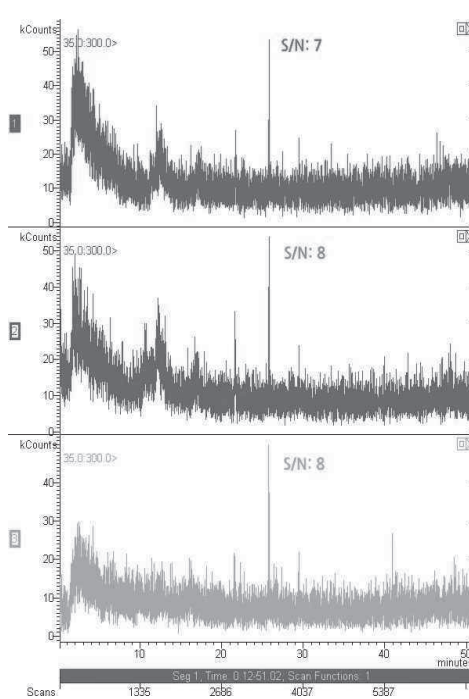
## 2.1. 실험 조건 및 결과

당을 넣었을 시 fiber는 3분 흡착, 3분 탈착하였으며 1M sucrose는 1  $\mu$ L 투입하였다. 바이알 가열 시 fiber는 5분 흡착, 5분 탈착하였다.

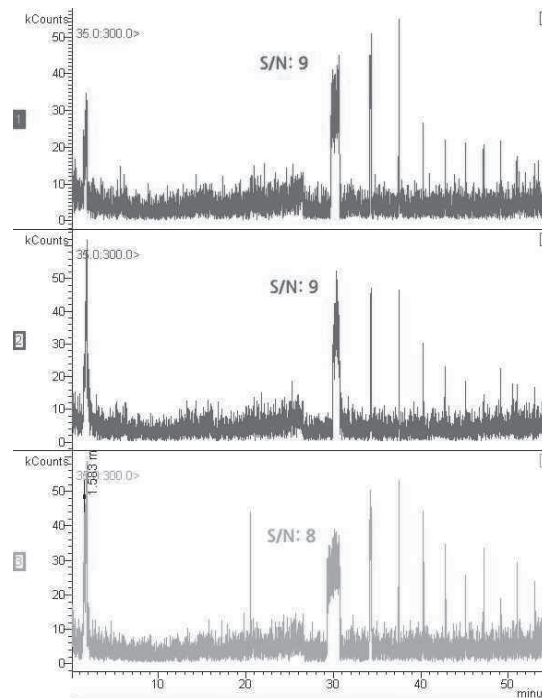
Gas chromatography method			Gas chromatography method		
Inlet mode			Inlet mode		
Splitless		250℃	Splitless, split mode(50:1) at 0.5min after injection		250℃
Oven temperature program			Oven temperature program		
Initial	35℃ for 5min	51min	Initial	35℃ for 10min	56min
Rate	5℃/min to 240℃		Rate	5℃/min to 240℃	
Final	240℃ for 5min		Final	240℃ for 5min	
Mass Detector method			Mass Detector method		
Mass range	35 ~ 300 m/z		Mass range	35 ~ 300 m/z	

[표 5] 당을 넣었을 때 검출 시 Method

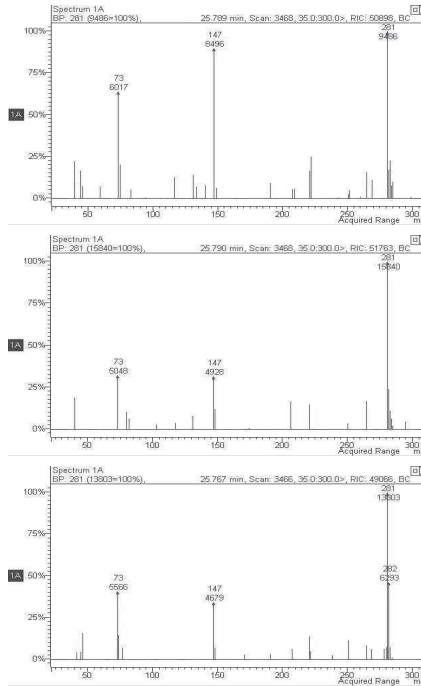
[표 6] 바이알 가열 후 검출 시 Method



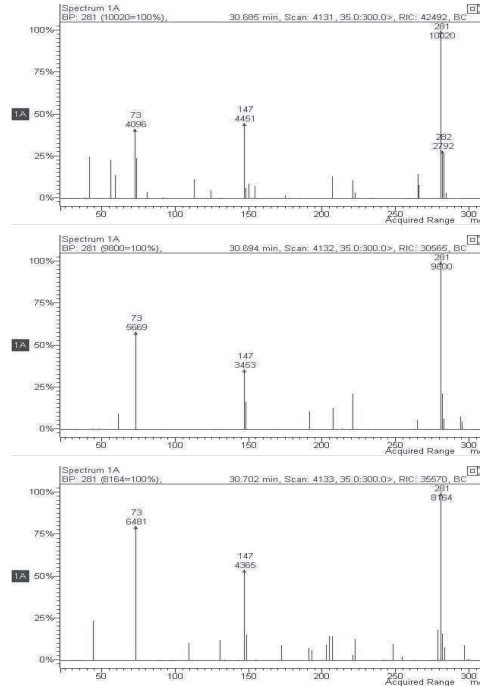
[그림 5] 당을 넣었을 때 Chromatogram 비교



[그림 6] 바이알을 가열했을 때의 Chromatogram 비교



[그림 7] 당을 넣었을 때 mass spectrum



[그림 8] 바이알을 가열했을 때 mass spectrum

## 2.2. 결과 분석

실험 결과 먹이를 주었을 때는 retention time 26분에서 S/N값이 의미 있는 동일한 peak가 나타났으며 위기의 상황에 처해지게 했을 때 30분에서부터 S/N값이 의미 있는 동일한 여러 peak가 얻어졌다. 보다 정확한 분석을 위하여 반복적으로 retention time이 나타난 피크의 mass spectrum을 확인한 결과 앞 쪽의 peak에서는 m/z가 29, 60인 peak가 나타났고 뒤 쪽의 peak에서는 m/z가 73, 281, 282인 peak가 나타났다. 두 peak의 mass spectrum은 각각 포름산과 올레인산과 일치하였다. 이를 통해 HS-SPME를 통한 페로몬 검출이 가능함을 확인하고, 페로몬 검출의 재현성을 볼 수 있었다.

## 3. 특정 페로몬의 자극별 분비량 분석

본 연구에서는 사전 실험에서 특정 페로몬이 주어지는 자극에 따라 어떻게 분비되는지 알아보았다. 물질의 흡착효율은 fiber의 종류에 따라 달라지므로 정량에 앞서 fiber 최적화 실험을 진행하였다. 이때 감도를 높이기 위해 MS method를 Scanning이 아닌 SIM(Selected Ion Monitoring)으로 설정하였다.

### 3.1. Fiber 최적화

가장 효율이 좋은 fiber를 찾기 위하여 현재 보유하고 있는 3가지 fiber인 75  $\mu$ m Carboxen/PDMS, 65  $\mu$ m PDMS/DVB, 100  $\mu$ m PDMS에 대한 실험을 진행하였다.

#### 3.1.1. 실험 조건 및 결과

실험을 위해 표준 용액인 포름산과 올레인산을 2.0mL vial에 1mL 담고 포름산은 5분 흡착, 올레인산은 30분 흡착하였다. 그리고 포름산은 3분 탈착, 올레인산은 10분 탈착하였다.

	Integrate result (106)	Max count (MCounts)
75 $\mu$ m Carboxen/PDMS	9.70	8.94
65 $\mu$ m PDMS/DVB	14.72	12.59
100 $\mu$ m PDMS	12.24	10.79

[표 7] 포름산 피크의 적분 값과 최대 피크

	Integrate result	Max count (Counts)
75 $\mu$ m Carboxen/PDMS	1356	955
65 $\mu$ m PDMS/DVB	1368	1042
100 $\mu$ m PDMS	1370	933

[표 8] 올레인산 피크의 적분 값과 최대 피크

#### 3.1.2. 결과 분석

포름산의 정성 분석을 통한 fiber 최적화 결과 65  $\mu$ m PDMS/DVB fiber가 가장 흡착 능력이 우수한 것으로 나타났다. 그 다음으로는 100  $\mu$ m PDMS fiber, 75  $\mu$ m Carboxen/PDMS fiber 순이었다. 그러나 이와는 다르게 올레인산의 정성 분석을 통한 fiber 최적화 결과 100  $\mu$ m PDMS fiber가 가장 우수한 fiber라고 결론지어졌다. 뒤이어 65  $\mu$ m PDMS/DVB fiber, 75  $\mu$ m Carboxen/PDMS fiber가 나타났다. 위에서 실험한 fiber 최적화 값을 바탕으로 본 실험에서는 정량 분석이 원활히 이루어질 수 있었다.

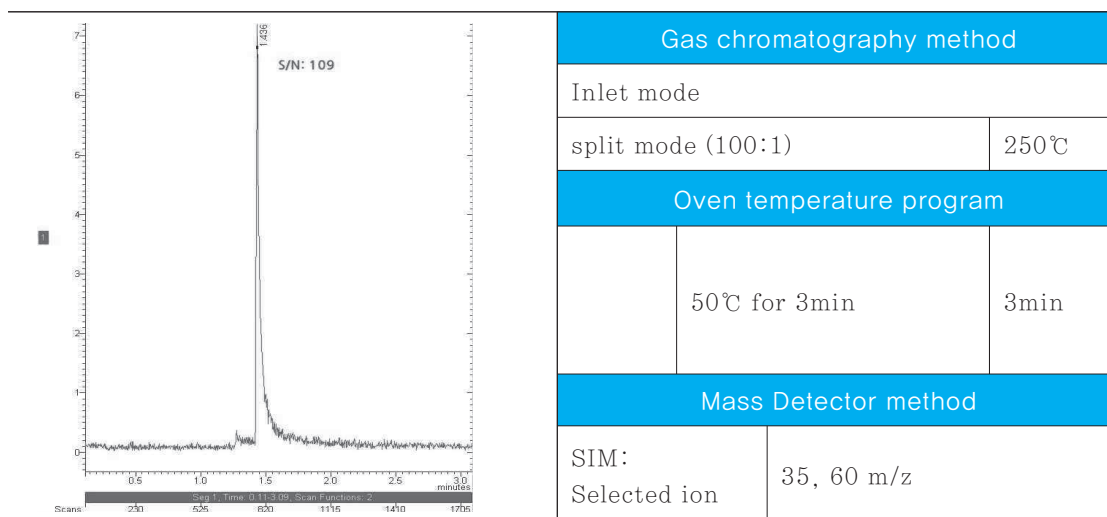
### 3.2. 포름산(Formic acid)의 검출과 정량

정량을 진행할 때는 fiber 최적화 실험을 바탕으로 효율이 좋은 fiber 순으로 선택하여 정량을 진행하였다. 그러나 가장 효율이 좋은 65  $\mu$ m PDMS/DVB fiber와 두 번째로 효율이 좋은 100  $\mu$ m PDMS fiber의 경우 개미 페로몬에 상응하는 농도 범위에서 선형적 결과가 얻어지지 않았으며 75  $\mu$ m Carboxen/PDMS fiber로 실험을 진행했을 시 선형적 결과가 나타났다.

### 3.2.1. 실험 조건 및 결과

Vial은 VARIAN의 2.0mL vial을, fiber는 75  $\mu$ m Carboxen/PDMS를 사용하였다.

상황별로 개미가 분비하는 포름산의 농도를 구하고자 표준시료를 이용하여 정량하였다. 포름산 정량을 위한 표준시료는 농도가 6g/L, 12g/L, 18g/L, 24g/L, 30g/L인 5개의 용액을 이용하였다. 실험 과정은 fiber에 5분 흡착 후 2분간 탈착시켜서 진행하였다.



[표 9] 포름산(24g/L) 정량 시 Chromatogram, GC/MS method

### 3.2.2. 결과 분석

표준 용액 5개 peak의 적분값을 바탕으로 검정 곡선을 그린 후( $R^2 = 0.997301$ ) 여러 상황을 설정하여 4개의 analytes를 만들었다. 그리고 개미가 내뿜은 포름산의 농도를 알기 위하여 미리 그린 검정 곡선에 값을 대입하여 구하였다.

Concentration Deviation:  $\pm 2.94$

	Concentration (g/L)	S/N
개미 한 마리를 넣은 지 10분 후	121.499	179
죽은 개미 두 마리를 넣은 지 10분 후	115.536	204
두 마리의 개미가 싸운 지 10분 후	57.687	88
두 마리의 개미가 싸운 지 20분 후	3.647	8

[표 10] Concentration of analytes, S/N

포름산의 정량을 통해 개미는 다른 자극에서 같은 페로몬이라도 다른 양을 내뿜는다는 사실을 알 수 있다. 첫 번째 analytes는 개미 한 마리를 산채로 잡아서 바이알에 넣은 지 10분이 지난 다음에 측정한 값이다. 10분이 지난 다음에 측정한 이유는 바로 측정하였을 경우 값이 정량 가능 범위를 넘어서는 값이 나왔기 때문이다. 서로 다른 군체인 두 마리의 개미를 같은 바이알에 넣어 두고 10분이 경과한 뒤 포름산을 검출한 결과 역시 포름산이 검출되었다. 더 긴 시간이 흐른 뒤에는 훨씬 적은 양의 포름산이 검출되었다.

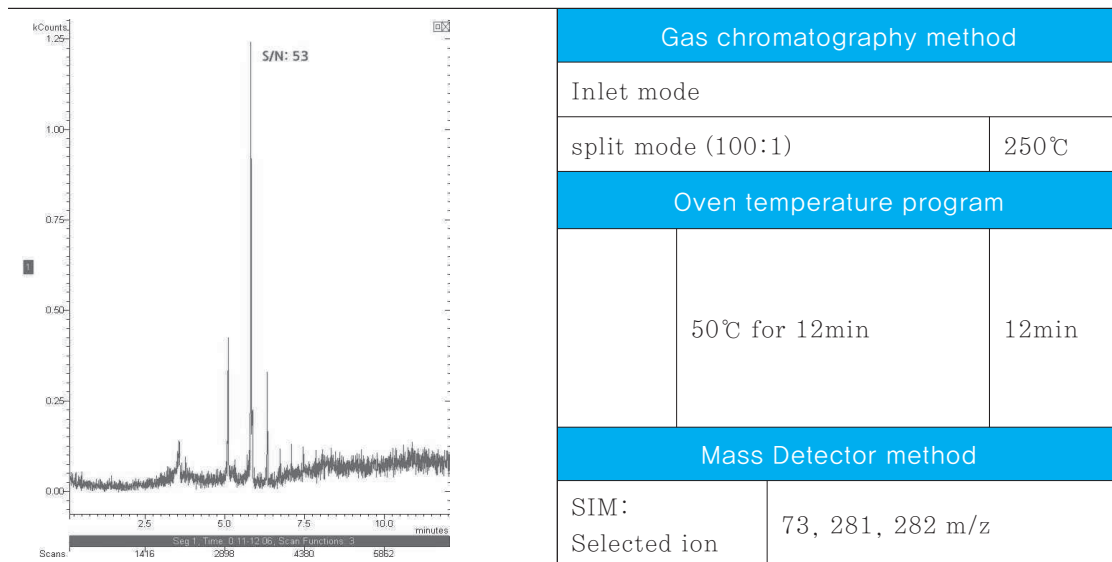
### 3.3. 올레인산(Oleic Acid)의 검출과 정량

올레인산의 정량 또한 fiber 최적화 실험을 바탕으로 진행하였다. Fiber는 100  $\mu$ m PDMS를 사용한 결과 농도에 따른 peak 넓이의 선형적 결과가 얻어졌으므로 그대로 사용하였다.

#### 3.3.1. 실험 조건 및 결과

이 실험에서 vial은 VARIAN의 2.0mL vial을, fiber는 100  $\mu$ m PDMS를 사용하였다.

포름산과 마찬가지로 상황별로 분비되는 올레인산의 농도를 구하고자 표준시료를 제조하였다. 올레인산 표준용액은 농도가 4.45g/L, 6.675g/L, 8.9g/L, 11.125g/L, 13.35g/L인 5개의 용액을 사용하였다. 올레인산은 분자량이 크고 지방산 계열에 속하기 때문에 fiber에 30분 흡착시키고 10분 탈착시키는 방식으로 진행하였다.



[표 11] Chromatogram, GC/MS method

### 3.3.2. 결과 분석

위에서 실험했던 3개의 농도를 바탕으로 검정 곡선을 그린 후( $R^2 = 0.9231$ ), 포름산과 같이 analytes를 3개 설정하였다. 그 후 개미가 내뿜은 올레인산의 농도를 알기 위해 검정 곡선에 값을 대입하여 결과를 도출하였다.

Concentration Deviation:  $\pm 7.00\%$

	Concentration (g/L)	S/N
죽기 직전의 개미 두 마리를 넣은 직후	1.483g/L	5
죽은 개미 두 마리를 넣은 직후	2.874g/L	6
개미 한 마리를 넣고 1M sucrose 10 $\mu$ L를 넣어준 직후	10.569g/L	7

[표 12] Concentration of analytes, S/N

올레인산의 정량 결과 포름산보다 확연히 농도 값과 S/N값이 떨어지는 것을 알 수 있다.

Analytes를 보면 올레인산은 살아있는 개미와 죽어있는 개미 모두에서 검출이 되는 것을 알 수 있다. 여기서 개미를 두 마리씩 vial에 넣은 이유는 올레인산의 흡착도를 본 결과 매우 적은 peak 값이 검출되었기 때문에 S/N 값을 올리기 위해서 두 마리를 사용하였다.

또한 농도가 1M인 sucrose 10  $\mu$ L를 가하였을 때 다량의 올레인산이 검출되었다. 올레인산은 죽을 때뿐만 아니라 먹이를 주는 자극을 가했을 때도 검출됨을 알 수 있다. 즉 올레인산 역시 개미의 페로몬으로 다른 자극에서는 다른 양이 분비된다는 것을 결과를 통해 알 수 있다.

## IV. 결론 및 논의

본 연구에서는 HS-SPME GC/MS법을 이용하여 살아있는 일본왕개미(*Camponotus japonicus*)로부터 분비되는 페로몬을 검출 및 정량하였다. HS-SPME법 이용시 개미에게 물리적 간섭 없이 비교적 쉽게 다음과 같은 실험 결과를 얻을 수 있다. 같은 상황에서는 동일 페로몬이 재현성 있게 검출되었으며 다른 상황에서는 동일 페로몬의 농도가 다르게 검출되었다. 즉, HS-SPME법을 이용할 경우 개미의 상황별 페로몬을 분석 할 수 있을 뿐 아니라, 이전의 실험 결과들을 이용하여 페로몬만으로 개미의 상태를 예측 할 수 있을 것으로 추정된다. 먹이 자극과 가열 자극에 대한 반복 실험에서 얻어진 chromatogram에서는 같은 retention time을 갖는 peak가 반복해서 나타났고, 이를 통해 자극에 의해 분비되는 페로몬이 재현성 있게 분석될 수 있음을 알 수 있다. Fiber 최적화를 진행함으로써 페로몬의 흡착 효율을 높이고 미량 페로몬의 농도 범위에서 정성분석 및 정량분석이 가능하였다. 포름산(Formic acid)은 개미가 스트레스 상황에 놓이거나 죽었을 때 검출되었다. 포름산이 스트레스 상황에서 개미의 방어 기작으로 활용됨을 알 수 있다. 올레인산(Oleic acid)은 두 가지 상황에서 분비됨이 확인되었는데, 첫 번째로 먹이 자극에서 다량의 올레인산이 검출되었으며, 두 번째로 죽었거나 죽기 직전인 개미들로부터 소량의 올레인산이 검출되었다. 또한 개미집에 올레인산 처리된 종이를 넣은 결과 개미들이 종이를 쓰레기 더미로 옮기는 necrophoric behavior를 보였다. 이를 통해 한 가지의 페로몬이 한 개의 행동을 유발하는 것이 아니라, 페로몬 화합물의 작용은 페로몬 작용 시 상황, 페로몬 화합물의 농도 등과 관련지어 나타남을 알 수 있고, 중요한 것은 개미는 페로몬의 종류뿐만이 아닌 양으로도 각기 다른 신호를 나타낸다는 것을 정량을 통하여 알 수 있었다. 추후 연구에서 다양한 페로몬에 대해 동일한 연구를 진행한다면 페로몬의 명확하고 체계적인 분류 체계가 구성되어 개미의 특성을 이해하는 데 도움이 될 것이다.

## ■ 참고문헌

- [1] Robert K. Vander; Leeanne E. Alonso, Pheromone Communication in Social Insects: Ants, Wasps, Bees, and Termites, Westview Press, 1998, pp.3-33:159-182
- [2] 박경은 외 3인, "Analysis of the composition of trail pheromone secreted from live *Camponotus japonicus* by HS-SPME GC/MS", Analytical Science and Technology, Vol. 25 No. 5, pp.292-299, 2012
- [3] Maurice Maeterlink, The Life of the Ant, London Toronto Melbourne and Sydney Cassell and Company Ltd., 1930
- [4] Wilson E.O.; Durlach N.I.; Roth L.M., "Chemical Releasers of Necrophoric Behavior in Ants", Psyche, pp.65:108-114, 1958
- [5] Gordon Deborah M., "Dependence of necrophoric response to formic acid on social context in the ant", *Pogonomyrmex badius*, Journal of Chemical Ecology, pp.105-111, 1983
- [6] Eisner T.; M. Eisner; and M. Siegler, Secret Weapons, Cambridge MA: Belknap Press, 2005
- [7] Blum M.S., Chemical Defenses of Arthropods, New York: Academic Press, Inc., 1981
- [8] Douglas A. Skoog, 분석화학 교재연구회, Fundamentals of Analytical Chemistry Eight Edition, 자유아카데미, 2004, pp.1013
- [9] Sue Ann Scheppers Wercinski, Solid phase microextraction: A practical guide, Marcel Dekker, 1999, pp.99
- [10] Janusz Pawliszyn, Solid phase microextraction theory and practice, Wiley-VCH, 1997, pp.97-101

## 심사평

HS-SPME GC/MS법을 이용하여, 개미가 여러 다른 환경에서 분비하는 포름산과 올레인산을 정량 분석하는 연구 과제로서, 보고서 자체는 논리적으로 작성되어 있으나, 연구내용은 첨단 분석 장비라고 할 수 있는 GC/MS를 사용해 보는 수준으로 판단된다. 생물의 생태 특성을 화학적 분석 방법을 통해 알아보고자 하는 창의적인 융복합 연구 주제로 독창성이 돋보인다. 크로마토그래피 분석이 페로몬 분석에 일반적인 방법론인 점을 고려하면 새로운 연구 방향을 제시한 것은 아니므로 새로운 화학적 발견이나 방법론을 제시하기 보다는 생물의 생태 특성을 이해하는데 GC/MS를 사용했다는 것 이외의 연구방법론이 조금 부족한 것은 아쉬운 점이다.

그러나, 각 단계별 논의가 부족하긴 하지만 학생들이 연구를 진행하는 과정에 대한 이해도는 높은 것으로 보인다. 연구를 수행함에 있어서 실험과정에 대한 이해 또한 매우 중요한 학습요소중의 하나이므로 추후에 본 연구를 좀 더 발전시키거나 아니면 새로운 연구를 진행 할 때 이러한 경험은 많은 도움이 될 것으로 기대한다.



## 연구후기

우리는 어릴 때 한번쯤 곤충에게 말을 걸어 본 적이 있을 것이다. 우리는 어릴 적부터 말을 알아듣는지도 모르는 곤충부터 어머니까지 다양한 대상과 소통을 하여왔고 이런 경험들이 모여 소통으로 이루어진 사회로 발걸음을 내딛고 있다. 사회로 넘어가는 문턱에 서있는 고등학생의 입장에서 우리는 우리가 좋아하는 과학을 통해 다시 동심으로 돌아가 보았다. 재미의 페로몬을 분석하고, 더 나아가 재미와의 대화를 꿈꾸는 일 말이다. 과장 좀 더하자면 어릴 적 꿈꾸던 미지의 존재와의 대화를 재미로부터 시작하는 것이다.

아마 우리의 본질을 살피는 과학이라는 학문은 동심으로 돌아가야 하는 학문일지도 모른다. 상대성 이론을 발표한 아인슈타인도 중학교 시절 별빛을 보며 그 상상을 하였다는 이야기를 책에서 읽은 적이 있다. 우리 역시 어릴 적 상상력으로 미래의 과학자가 되겠다는 꿈을 키워왔고, 그 시절 별빛을 바라보고 곤충을 탐구하던 추억들이 지금의 어렵고 생소한 과학들을 배우는 원동력이 되었다. 앞으로 우리가 과학도가 되면 지금의 추억들이 우리의 힘이 되지 않을까?

## 연구진

김재원(Kim Jaewon, 경기북과학고등학교 1학년, brendonhp@gmail.com), 제1저자  
이택경(Lee Taekkyung, 경기북과학고등학교 1학년, terry00123@gmail.com)  
이민수(Lee Minsoo, 경기북과학고등학교 1학년, cloudystarlights@outlook.com), 교신저자  
박준우(Park Junwoo, 경기북과학고등학교 1학년, joonoo156@gmail.com)

지도교사: 김재균(Kim Jaekyun, 경기북과학고등학교, 전공: 화학, gopp20@gmail.com)

(2015. 1월 현재)

## 마에서 추출한 뮤신의 유산균에 대한 효과 (Effects of mucin extracted from hemp(*Dioscorea*) on lactic acid bacteria)

허태양 · 김소윤 · 권순형 · 김인철 · 정한식(인천과학고등학교)

### 초 록

유산균의 다양한 효능에 대해서는 이미 입증되었으나 위의 낮은 pH로 인해 많은 수의 유산균이 장에 도달하기 전에 사멸한다. 산성 환경에서 침전되는 마의 식물성 뮤신을 이용한다면 위에서 유산균을 둘러싸 내산성을 증가시켜 줄 것이라고 예측하였다. 또한 마의 뮤신이 강산 환경에서 유산균의 성장률에 영향을 줄 경우 어떠한 메커니즘을 통해 영향을 미치는지 연구한다면 보다 광범위하게 이용될 수 있을 것이라고 생각했다. 본 연구 중 뮤신의 유무에 따른 강산성에서 유산균의 성장률을 비교한 결과 뮤신이 있는 경우 성장률이 약 6.23배 높은 것으로 나타났다. 이후 메커니즘을 밝히기 위해 뮤신의 변성 여부, 혼합 순서, 혼합 시간에 따른 유산균의 내산성 변화와 뮤신이 pH 변화에 미치는 영향에 대해 연구를 진행하였다. 그 결과 뮤신의 변성 여부, 혼합시간은 산성 환경에서 유산균의 성장률 변화에 크게 영향을 미치지 못했고, 뮤신 혼합 전후 배지의 pH 변화도 거의 없었다. 따라서 뮤신이 주변 환경의 pH를 증가시켜주는 것이 아니라 물리적인 장벽의 역할을 함으로써 유산균을 주변 환경으로부터 격리시켜 성장률을 높여주는 것으로 생각된다. 물리적 장벽이 되는 뮤신 점성의 원인은 단백질이 아니라 아미노당이고 당은 단백질처럼 쉽게 변성되지 않는다는 사전 연구를 통해서도 본 연구의 추론을 미루어 짐작할 수 있었다. 또한 pH가 중성인 경우에는 오히려 유산균의 성장률이 감소하는 것으로 나타났다. 이는 뮤신의 점성이 공간적인 제약으로 작용하여 세포분열을 억제하는 것이라 생각된다. 추가적으로 펩신과 같은 소화효소를 첨가한 뒤 본 연구의 실험을 진행하여 뮤신의 분해와 그 분해산물이 유산균의 성장률에 어떤 영향을 미치는지 연구할 필요성이 있다고 생각한다.

키워드 : 뮤신, 유산균, pH, 가열, 성장률, 내산성

## I. 서론

### 1. 연구 배경

유산균을 섭취할 시 건강에 유익한 효과를 낸다는 것은 알려져 있다. 하지만 위의 낮은 pH로 인해 대부분의 유산균들이 주로 활동하는 장에 도달하지 못하고 사멸하게 된다. 이러한 문제를 보다

쉽고 간편하게 해결할 수 있는 방법에 대해 생각하던 중 위액으로부터 위벽을 보호하는 뮤신을 떠올리게 되었다. 뮤신은 산성 환경에서 침전되므로 이를 이용하면 산성 환경에서 유산균을 보호해 줄 것이라고 생각하였다. 따라서 본 연구에서는 마에서 추출한 뮤신과 유산균을 혼합할 경우 유산균의 내산성이 증가되는지 확인하고자 하였다. 또한 뮤신에 의해 유산균의 내산성이 증가한다면, 물리적인 방법(유산균을 산성 환경으로부터 격리시킴)으로 유산균을 보호하는지, 혹은 화학적인 방법(중탄산 이온 혹은 아미노산에 의한 pH의 증가)으로 유산균을 보호하는지, 그 작용 기작을 알아보하고자 하였다.

## 2. 연구 목적 및 범위

### 2.1. 연구 목적

본 연구의 목적은 마로부터 추출한 식물성 뮤신으로 유산균의 생장률을 강산성의 환경에서 기존보다 증가시키는 것이다. 또한 식물성 뮤신이 유산균의 생장률에 변화를 준다면 어떠한 메커니즘을 통해서 유산균의 생장률에 변화를 주는지 연구한다.

### 2.2. 연구 범위

본 연구에서는 위의 낮은 pH로부터 식물성 뮤신이 유산균을 보호하고 유산균의 생장에 도움을 줄 수 있는지와 뮤신이 유산균을 보호해주는 메커니즘을 확인하기 위하여 다음과 같은 사항을 탐구하고자 한다.

- 사전실험 1 - 3종의 유산균을 MRS Broth에서 배양하여 콜로니수 counting으로 생장 정도를 측정한다.  
 사전실험 2 - 장마에서 뮤신을 추출한다.  
 실험 1 - 식물성 뮤신의 유무에 따른 pH 2, 7에서의 생장률 변화  
 실험 2 - 뮤신의 가열여부에 따른 pH 2에서의 생장률 변화  
 실험 3 - 뮤신, 유산균, pH 2에서의 혼합순서에 따른 생장률 변화  
 실험 4 - 뮤신과 균의 혼합시간에 따른 pH 2에서의 생장률 변화  
 실험 5 - 식물성 뮤신이 액체 배지의 pH변화에 미치는 영향

## 3. 이론적 배경

### 3.1. 뮤신

뮤신(mucin)이란 점막에서 분비되는 점액물질로 점액소 또는 점소라고도 한다. 물과 중성염 용액에는 녹기 어렵고, 산성에서는 녹지 않고 침전되나, 알칼리성에는 점성질의 액이 된다. 그 화학적 본

체는 당단백질의 일종이나, 점액의 기원에 따라 여러 당단백질을 함유하고 있으며, 또한 점액의 종류에 따라 두 종류 이상의 당단백질이 함유되는 경우가 많다. 소화 기관의 뮤신은 기관의 보호 및 소화운동의 원활제 역할을 하고, 위점막 뮤신은 위산과다와 위궤양 치료에 사용된다.

※ 윤정훈 외 1명(2013), 식물성 뮤신 추출물을 함유하는 피부 외용제 조성물

### 3.2. 유산균

사람과 동물의 위장관(gastrointestinal tract, GIT)에는 다양한 미생물이 복합적으로 군총을 이루고 있는데, 이들 군총은 동물의 종이나, 서식하고 있는 위장관의 위치에 따라 우점종의 차이를 나타내는 것으로 알려져 있다. 특히 돼지, 닭 및 설치류의 상부 위장관에는 비교적 많은 수의 미생물이 서식하고 있으며, 이들의 상부 위장관의 비분비형 상피내벽 표면에는 *Lactobacilli* group이 주로 부착되어 있는 것으로 알려져 있다. *Lactobacilli* group은 유산, 초산 등의 유기산과 nisin과 같은 단백질성 항균물질인 bacteriocin을 생성함으로써 유해세균의 증식을 억제할 뿐만 아니라 세균총의 안정화, 과민성대장증후군, 유당 불내증 및 비특이적 면역증강의 완화, 나아가 항암 및 항종양 등의 유익한 기능을 숙주에 대해 나타내는 것으로 알려져 있다. 이러한 이유로 *Lactobacillus* 속 균주를 이용한 프로바이오틱스에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다.

※ Ji Hun Bang 외 5명(2012), *Lactobacillus* 분리 균주의 프로바이오틱스로서의 가능성 검토

### 3.3. 프로바이오틱스(Probiotics)

프로바이오틱스의 정의는 “Live microorganisms, which when administered in adequate amounts, confer a health benefit on the host”로 최근 International Scientific Association에 의하여 공식적으로 채택되었다.

많은 연구를 통하여 프로바이오틱스가 건강에 이로운 효과를 나타내는 여러 가지 기전들이 제안되었는데, 병원균과 영양소 경쟁, 장내세포 부착부위 경쟁, 독소 분해 항미생물질 생성, 국소적 그리고 전신적 면역제어 등이다.

가장 많이 이용되는 프로바이오틱스 균주는 *Lactobacillus*와 *Bifidobacterium* 속인데, 그 중 *Lactobacillus* 종은 *L. casei*, *L. rhamnosus* 등이 있다.

※ 조남옥(2012), 구강건강을 위한 프로바이오틱스의 사용에 관한 문헌고찰

### 3.4. 속 뮤신의 성분

등근마로부터 분리한 뮤신의 단백질 함량은 71.03중량%이고, 당 함량은 28.14중량%이다. 또한, 뮤신의 구성성분의 당을 확인한 결과, 주로 만노오스(Mannose), 글루코오스(Glucose)이며, 갈락토오스(Galactose), 아라비노오스(Arabinose), 푸코오스(Fucose), 람노오스(Rhamnose)도 소량 포함되어 있다.

뮤신의 아미노산은 주로 Asp, Glu, Arg로 이루어져 있으며, 총 17종으로 구성되어 있다. 뮤신의 분자량은 100,000~550,000Da으로, 분자량 분포에 의한 수평균 분자량은 약 320,000Da이다.  
※ 주철규 외 1명<sup>(2011)</sup>, 둥근마 유래의 뮤신 제조방법 및 이를 함유하는 화장품 조성물, 모아캠

## II. 연구 방법 및 이론

### 사전 실험 1

3종의 유산균을 MRS Broth에서 배양하여 콜로니수 counting으로 성장 정도를 측정한다.

- (1) 30mL의 MRS Broth에서 *L. casei*, *L. salivarius*, *L. bulgaricus*, *L. rhamnosus* 균주를 하루 동안 활성화시킨다.
- (2) 이를 vortexing한 뒤 십진 희석법을 이용하여 희석한다.
- (3) 희석한 균주( $10^{-4} \sim 10^{-7}$ )를 각각 0.1mL씩 취하여 MRS Agar에 도말한 뒤 인큐베이터에서 2일간 배양한다.
- (4) 유산균이 자란 배지 사진을 찍은 뒤 실제 Petri dish 크기와 동일하게 칼라 인쇄한다.
- (5) OHP필름에 Petri dish와 같은 크기의 원을 그리고, 원 안에 가로와 세로가 1cm 간격인 격자선을 그린 후 이 중 임의의 다섯 개의 칸을 선별한다.
- (6) (4)에서 인쇄한 사진에 (5)의 OHP 필름을 대고 선별된 다섯 개의 칸마다 콜로니 수를 센 뒤 면적에 비례하게 곱한다.



[그림 1] 십진 희석법과 콜로니 카운팅하는 모습

### 사전 실험 2

장마에서 뮤신을 추출한다.

#### 가. 뮤신의 추출 후 필터링을 하지 않고 사용한 경우

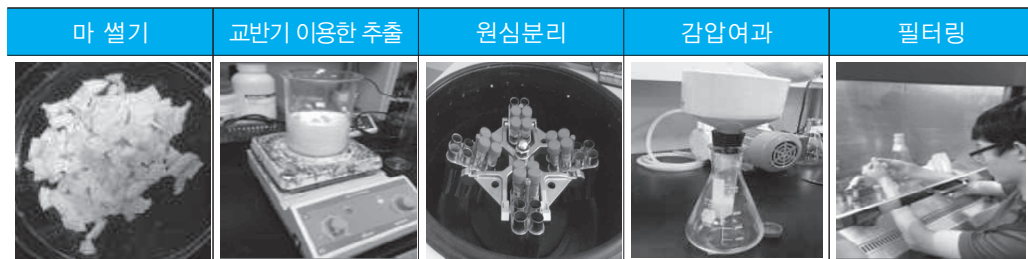
- (1) 장마를 흐르는 물에 세척하고 표면을 70% 에탄올로 소독한 후 Clean Bench 내부에서 살균한 칼로 껍질을 벗긴다.
- (2) 장마를 70% 에탄올로 다시 소독한 뒤, 살균한 칼로 장마의 표면을 한 번 더 깎아낸 후 멸균수로 세척한다.
- (3) 장마를 썰고 살균한 믹서기로 갈아낸 뒤, 50mL 팔콘 튜브 3개에 각각 갈아낸 장마 10g과 saline 10mL씩을 넣고 vortexing한다.
- (4) 원심 분리기에 넣고 15분간 7830rpm으로 원심 분리한 뒤 상등액을 추출한다.

#### 나. 뮤신의 추출 후 필터링을 하여 사용한 경우

- (1) 장마를 흐르는 물에 세척하고 껍질을 벗긴 뒤 잘게 썬다.
- (2) 1000mL 비커에 장마 100g과 증류수 100mL를 넣고 교반기에서 1시간 동안 300rpm으로 교반시킨다.
- (3) (2)의 용액을 팔콘 튜브에 40mL씩 담은 뒤 15분간 7830rpm에서 원심분리(Eppendorf Centrifuge 5430 R)한다. 이후 상등액을 추출하고 감압여과기를 이용하여 여과(ADVANTEC No.2)시킨다.
- (4) (3)의 용액을 20mL 주사기에 넣고 0.45  $\mu$ m 필터(Chromafil CA-45/255)를 이용하여 필터링한다.

#### 다. 뮤신의 추출 후 오염여부 확인

가.와 나.에서 얻어낸 뮤신추출액 1mL를 R2A배지에 도말한 뒤 인큐베이터에서 2일간 배양하여 균의 존재 여부를 확인한다.



[그림 2] 마의 식물성 뮤신 추출 과정

#### 실험 방법 1

식물성 뮤신의 유무에 따른 pH 2, 7에서의 생장률 변화

#### 가. 식물성 뮤신의 유무에 따른 pH 2, 7에서의 생장률 변화

- (1) 액체 배지에 *L. casei*, *L. salivarius*, *L. bulgaricus* 균주를 하루 동안 배양해 활성화시킨다.
- (2) 균액을 각각 1mL씩 덜어 각각 2개의 멸균수, 뮤신액 5mL에 넣은 뒤 vortexing하고 5분간 기

다린다.

- (3) 각각의 혼합액에 pH 2, pH 7 MRS Broth를 10mL 넣은 뒤 웨이킹 인큐베이터에서 2시간 배양한다.
- (4) (3)의 혼합액을  $10^{-4}$ 로 희석한 뒤 MRS medium 배지에 0.1mL를 5개씩 고르게 도말한다. 그 후 인큐베이터에서 2일간 배양한다.
- (5) 콜로니 카운팅을 통해 균의 성장 정도를 비교한다.

	<i>L. casei</i> 균액 1mL		<i>L. salivarius</i> 균액 1mL	
	유산액 5mL	멸균수 5mL	유산액 5mL	멸균수 5mL
pH 2 MRS Broth 10mL	실험군 1	실험군 2	실험군 3	실험군 4
pH 7 MRS Broth 10mL	대조군 1	대조군 2	대조군 3	대조군 4

※ *L. rhamnosus*의 경우 pH에 따른 유산균의 성장정도에 큰 차이가 없었고, *L. salivarius*의 경우에는 실험 1의 결과 pH 2에서 대조군의 개체수가 0이어서 실험군과 비교가 어렵다고 판단되어 이후 실험과정에서는 실험대상에서 제외하였다. *L. bulgaricus*의 경우에는 콜로니의 형태로 인해 콜로니 카운팅을 할 경우 정확하게 세기 어려운 점이 있었다. 따라서 이후 실험에서는 콜로니의 개수와 형태가 카운팅을 하기에 가장 적절하다고 판단되는 *L. casei*을 이용하였다.

## 실험 방법 2

유산의 가열여부에 따른 pH 2에서의 성장률 변화

- (1) 액체 배지에 *Lactobacillus casei* 균주를 하루 동안 배양해 활성화시킨다.
- (2) 가열하지 않은 유산 5mL, 가열한 유산 5mL, 멸균 증류수 5mL에 균액을 각각 1mL씩 넣는다.
- (3) 5분이 지난 후 각각의 혼합액에 pH 2 MRS Broth를 10mL 넣은 뒤 웨이킹 인큐베이터에서 2시간 배양한다.
- (4) 혼합액에 pH 2 MRS Broth를 10mL 넣은 뒤 웨이킹 인큐베이터에서 2시간 배양한다.
- (5) (4)의 혼합액을  $10^{-4}$ 로 희석한 뒤 MRS medium 배지에 0.1mL를 5개씩 고르게 도말한다. 그 후 인큐베이터에서 2일간 배양한다.
- (6) 콜로니 카운팅을 통해 균의 성장 정도를 비교한다.

	<i>Lactobacillus casei</i> 균액 1mL		
	가열하지 않은 유산액 5mL	가열한 유산 5mL	멸균수 5mL
pH2 MRS Broth 10mL	실험군 1	실험군 2	대조군

## 실험 방법 3

유산, 유산균, pH 2에서의 혼합순서에 따른 성장률 변화

- (1) 액체 배지에 *Lactobacillus casei* 균주를 하루 동안 배양해 활성화시킨다.
- (2) 뮤신액이나 멸균수 5mL를 균액 1mL와 혼합한 뒤 5분 후 pH 2 MRS Broth 10mL와 혼합한다.
- (3) 뮤신액이나 멸균수 5mL를 pH 2 MRS Broth와 혼합한 뒤 5분 후 균액 1mL와 혼합한다.
- (4) (2), (3)의 혼합액들을 셰이킹 인큐베이터에 넣고 2시간 배양한다.
- (5) (2), (3)의 혼합액을  $10^{-4}$ 로 희석한 뒤 MRS medium 배지에 0.1mL를 5개씩 고르게 도말한다. 그 후 인큐베이터에서 2일간 배양한다.
- (6) 콜로니 카운팅을 통해 균의 성장 정도를 비교한다.

혼합 순서	( <i>L. casei</i> 균액 1mL + 뮤신액 또는 멸균수 ) + pH 2 MRS Broth		(뮤신액 또는 멸균수 + pH 2 MRS Broth) + <i>L. casei</i> 균액 1mL	
	뮤신액 5mL	멸균수 5mL	뮤신액 5mL	멸균수 5mL
pH 2 MRS Broth 10mL	실험군 1	대조군 1	실험군 2	대조군 2

#### 실험 방법 4

뮤신과 균의 혼합시간에 따른 pH 2에서의 성장률 변화

- (1) 액체 배지에 *Lactobacillus casei* 균주를 하루 동안 배양해 활성화시킨다.
- (2) 균액을 1mL 4개 덜어 각각 뮤신액 5mL에 넣은 뒤 vortexing한다.
- (3) 각각을 즉시, 5분, 30분, 1시간이 지난 후에 pH 2 MRS Broth 배지와 혼합한 뒤 셰이킹 인큐베이터에서 2시간 배양한다.
- (4) (3)의 혼합액을  $10^{-4}$ 으로 희석한 뒤 MRS medium 배지에 0.1mL를 5개씩 고르게 도말한다. 그 후 인큐베이터에서 2일간 배양한다.
- (5) 콜로니 카운팅을 통해 균의 성장 정도를 비교한다.

<i>Lactobacillus casei</i> 균액 1mL				
뮤신액 5mL(시간)	즉시	5분	30분	1시간
pH 2 MRS Broth 10mL	실험군 1	대조군	실험군 2	실험군 3

#### 실험 방법 5

식물성 뮤신이 액체 배지의 pH변화에 미치는 영향

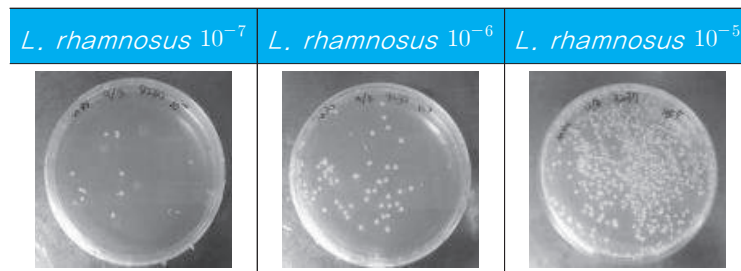
- (1) pH 2 MRS 액체 배지 2개의 pH를 pH미터로 측정한다.
- (2) 각각 뮤신액 5mL와 증류수 5mL를 넣고 다시 pH를 측정한다.
- (3) 10분 간격으로 pH를 측정하여 60분 동안 pH변화를 기록한다.



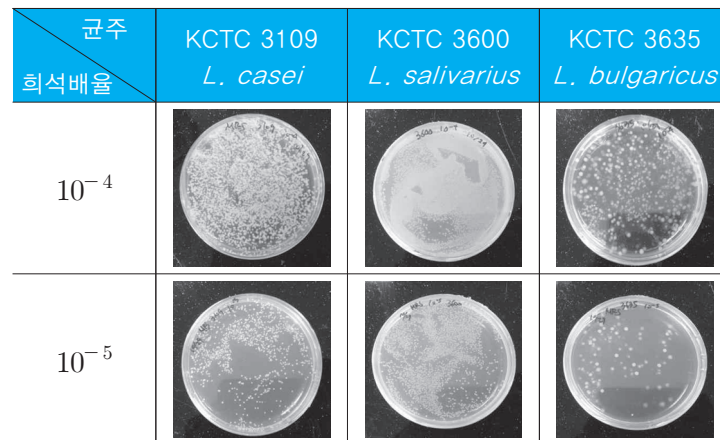
### Ⅲ. 연구 결과 및 고찰

#### 사전 실험 1

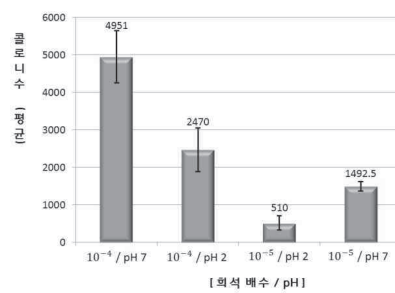
식물성 뮤신의 유무에 따른 pH 2, 7에서의 성장률 변화



[그림 3] *L. rhamnosus* 균주의 희석배수 결정



[그림 4] *L. casei*, *L. salivarius*, *L. bulgaricus* 균주의 희석배수 결정



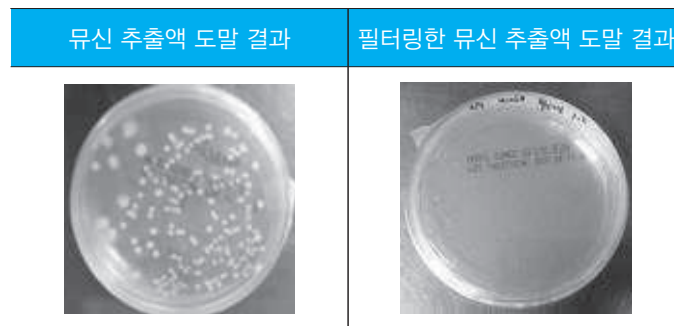
[그림 5] 희석배율에 따른 pH 2와 pH 7에서의 성장률 비교

※ pH 7 조건에서는  $10^{-5}$ 로 희석한 균의 콜로니 수를 더 세기에 적합했지만, pH 2 조건에서  $10^{-5}$ 로 희석한 균의 콜로니 수가 너무 적게 나타나  $10^{-4}$ 로 희석하는 것이 가장 적합할 것이라고 판단했다. 이후 실험은 모두  $10^{-4}$ 로 희석한 균주를 사용하였다.

## 사전 실험 2

장마에서 뮤신을 추출한다.

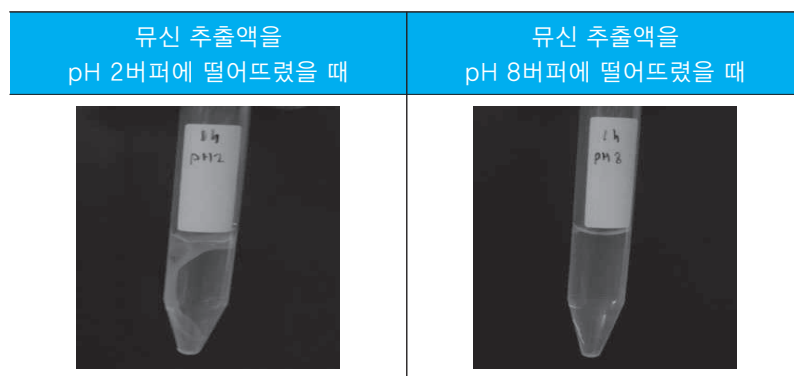
### 가. 필터링을 하지 않은 식물성 뮤신의 오염여부 확인



[그림 6] 필터링 여부에 따른 뮤신의 오염여부

※ 필터링을 하지 않은 뮤신의 경우 R2A배지에 도말했을 때 오염된 것을 확인하였고, 필터링을 거친 후에는 오염되지 않았다. 따라서 이후 실험에서는 필터링을 하여 사용하였다.

### 나. 필터링한 경우 식물성 뮤신의 존재여부 확인

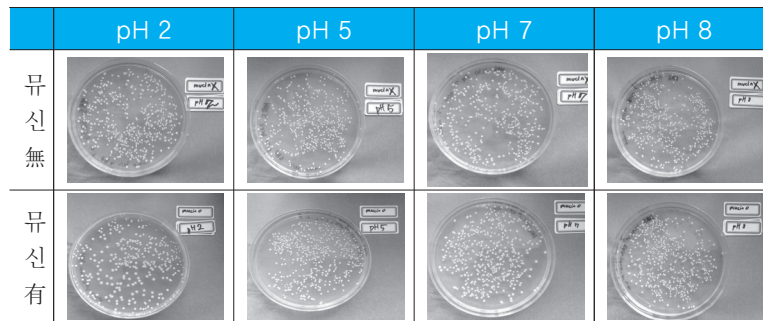
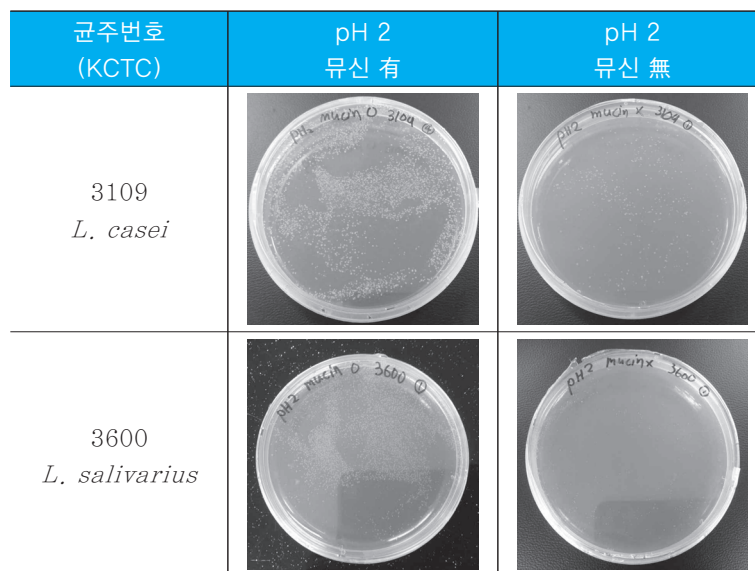


[그림 7] 필터링한 뮤신 추출액의 뮤신 여부 확인

※ 필터링한 뮤신 추출액에 강산의 버퍼를 떨어뜨렸더니 침전이 생기는 것으로 보아 단백질 성분의 뮤신이 존재함을 확인할 수 있었다.

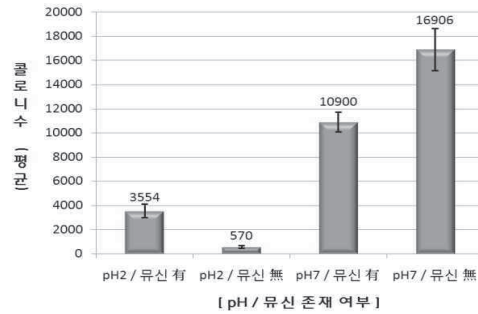
## 실험 1

식물성 뮤신의 유무에 따른 pH 2, 7에서의 생장률 변화

[그림 8] pH에 따른 *L. rhamnosus* 균주의 생장률 변화[그림 9] pH 2에서 *L. casei*, *L. salivarius* 균주의 뮤신 여부에 따른 생장률 변화

배지 조성						클로니 수(개)	
	1	2	3	4	5	평균	표준오차
pH 2 / 뮤신 有	4610	3650	1620	3280	4610	3554	550.22
pH 2 / 뮤신 無	570	290	340	840	810	570	114.41
pH 7 / 뮤신 有	10250	8250	12200	10900	12900	10900	810.40
pH 7 / 뮤신 無	20300	20450	17200	15570	11010	16906	1742.31

[표 1] 식물성 뮤신의 유무에 따른 pH 2에서의 생장률 변화



[그림 10] 식물성 뮤신의 유무에 따른 pH 2에서 *L. casei*의 생장률 변화

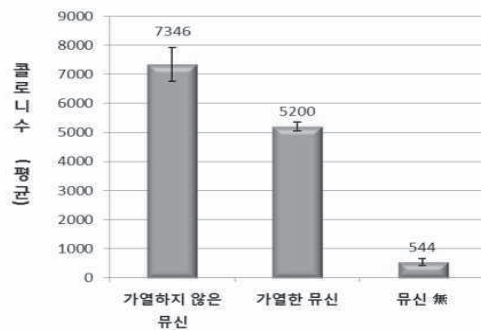
1. pH 7의 환경에서는 뮤신이 없는 경우가 뮤신이 있는 경우에 비해서 유산균의 개체수가 약 1.55배 정도 높은 것으로 나타났다.
2. 반면에 pH 2의 환경에서는 뮤신이 있는 경우가 뮤신이 없는 경우에 비해서 유산균의 개체수가 약 6.23배 높은 것으로 나타났다.
3. 이를 통해서 pH 7의 환경에서는 뮤신이 없는 경우에 유산균의 개체수가 많으나 pH 2의 환경에서는 뮤신이 있을 경우에 유산균의 개체수가 더 많다는 것을 알 수 있었다.

## 실험 2

뮤신의 가열여부에 따른 pH 2에서의 생장률 변화

구분						콜로니 수(개)	
	1	2	3	4	5	평균	표준오차
가열하지 않은 뮤신	5410	8800	8150	6930	7440	7346	578.38
가열한 뮤신	4700	5430	5240	5600	5030	5200	157.07
뮤신 無	560	240	340	770	810	544	113.16

[표 2] 식물성 뮤신의 가열여부에 따른 pH 2에서의 생장률 변화



[그림 11] 식물성 뮤신의 가열여부에 따른 pH 2에서의 생장률 변화

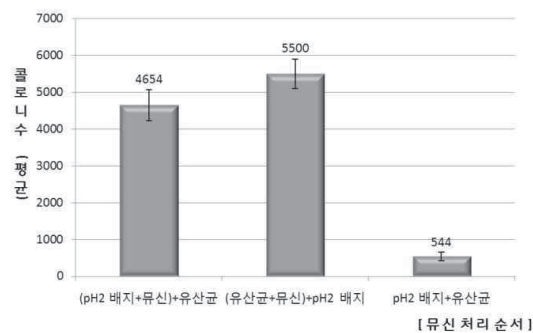
1. 유산균과 가열하지 않은 묶신을 섞었을 경우가 가열한 묶신을 섞었을 경우에 비해서 유산균의 개체수가 약 1.41배 높은 것으로 나타났다.
2. 하지만 묶신을 처리하지 않은 것에 비해서 가열한 묶신을 처리한 경우가 유산균의 개체수가 약 9.55배 높은 것으로 나타났다.
3. 이 실험을 통해서 유산균과 묶신을 혼합할 시 가열한 경우에 가열하지 않은 경우에 비해서 개체수가 낮으나 묶신을 처리하지 않은 것에 비해서는 매우 높다는 것을 알 수 있었다.

### 실험 3

묶신, 유산균, pH 2에서의 혼합순서에 따른 생장률 변화

구분	클로니 수(개)					평균	표준오차
	1	2	3	4	5		
(pH 2 배지+묶신)+유산균	5970	3710	3990	4330	5270	4654	421.21
(유산균+묶신)+pH 2 배지	4210	5000	6350	6240	5700	5500	401.51
pH 2 배지+유산균	560	240	340	770	810	544	113.16

[표 3] 식물성 묶신과 균의 혼합 순서에 따른 pH 2에서의 생장률 변화



[그림 12] 묶신과 *L. casei*의 혼합 순서에 따른 pH 2에서의 생장률 변화

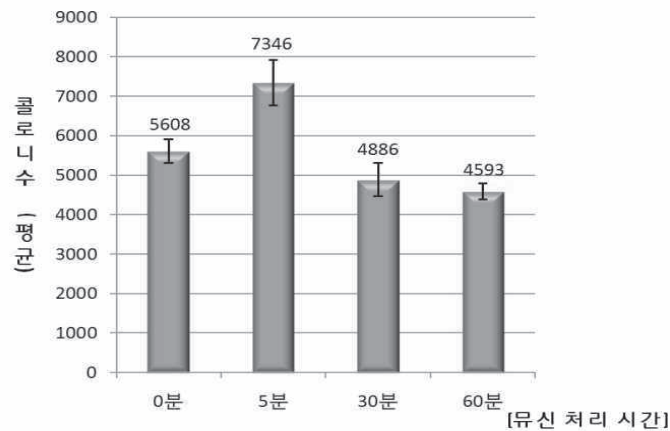
1. 유산균과 묶신을 먼저 혼합한 뒤 pH 2 배지에 넣는 것이 pH 2 배지와 묶신을 혼합한 뒤 유산균을 넣는 것 보다 유산균의 개체수가 약 1.18배 높은 것으로 나타났다.
2. 하지만 pH 2 배지와 묶신을 혼합한 뒤 유산균을 섞는 것이 묶신이 없는 것에 비해서 유산균의 개체수가 약 8.55배 높은 것으로 나타났다.
3. 이를 통해서 유산균과 묶신을 먼저 혼합한 뒤 pH 2 배지에 넣는 것이 묶신과 pH 2 배지를 먼저 혼합한 뒤 유산균을 섞는 것보다 효과적이나 이 역시 묶신이 없는 것보다 매우 효과적이라는 것을 알 수 있었다.

#### 실험 4

뮤신과 균의 혼합시간에 따른 pH 2에서의 생장률 변화

							콜로니 수(개)
구분	1	2	3	4	5	평균	표준오차
0분	5730	5590	4580	5740	6400	5608	292.97
5분	5410	8800	8150	6930	7440	7346	578.38
30분	4030	4650	4890	4390	6470	4886	420.92
60분	5005	4990	4720	3960	4290	4593	204.45

[표 4] 식물성 뮤신과 균의 혼합 시간에 따른 pH 2에서의 생장률 변화



[그림 13] 식물성 뮤신과 *L. casei*의 혼합 시간에 따른 pH 2에서의 생장률 변화

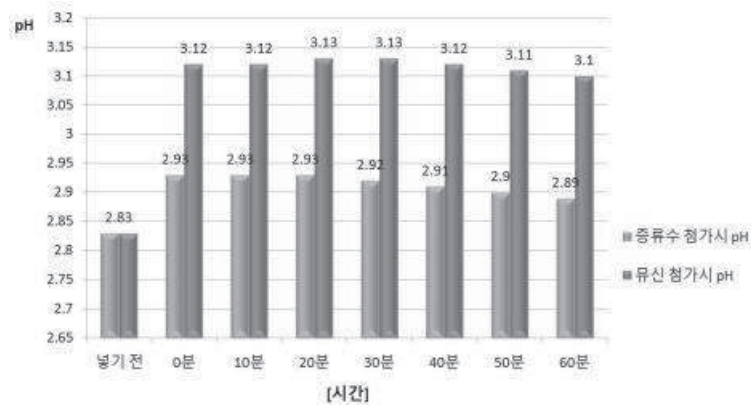
1. 유산균과 뮤신의 혼합시간이 5분일 경우에 가장 효과적인 것으로 나타났다.
2. 유산균과 뮤신의 혼합시간이 5분이 지날 경우에는 유산균의 개체수가 오히려 감소하는 것으로 나타났다.

#### 실험 5

식물성 뮤신이 액체 배지의 pH변화에 미치는 영향

									콜로니 수(개)
구분	넣기 전	0분	10분	20분	30분	40분	50분	60분	
증류수 첨가시 pH	2.83	2.93	2.93	2.93	2.92	2.91	2.9	2.89	
뮤신 첨가시 pH	2.83	3.12	3.12	3.13	3.13	3.12	3.11	3.10	

[표 5] 식물성 뮤신과 균의 혼합 순서에 따른 pH 2에서의 생장률 변화]



[그림 14] 식물성 뮤신과 *L. casei*의 혼합 시간에 따른 pH 2에서의 생장률 변화

1. 뮤신을 첨가한 경우가 멸균 증류수를 첨가한 경우에 비해서 pH가 약 0.2 정도 높은 것으로 나타났다.

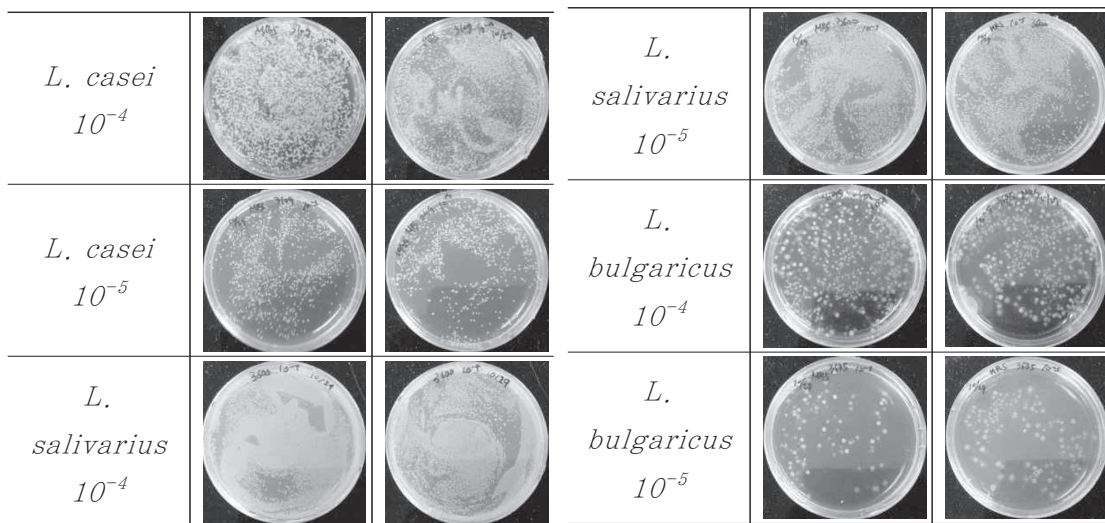
## IV. 연구 결론

1. 실험 1의 결과를 보면, pH 2 조건에서 뮤신이 유산균의 생장률을 높여 준다는 것을 확인할 수 있었다. 이때 실험 5의 결과를 보면 뮤신을 혼합한 경우와 증류수를 혼합한 경우의 pH차이는 약 0.2정도로 크지 않았다. 결론적으로 우리는 뮤신이 화학적인 기작을 통해 배지의 pH를 증가시키는 것은 아니라고 판단하였다.

2. 뮤신이 유산균의 내산성을 높여주는 기작에 대해 두 번째 추론은 뮤신의 점성이 물리적인 장벽으로 작용해서 유산균을 주변 환경으로부터 격리시킴으로써 생장률을 높여준다는 것이다. 뮤신의 점성은 당단백질로 구성 성분인 아미노당(시알산)으로 인해 존재하는 이온결합이 점성의 가장 큰 원인이라는 사전 연구가 있다. 따라서 단백질이 변성되더라도 점성의 원인인 아미노당에는 큰 영향을 미치지 못할 것이다. 이러한 이유로 인해 실험 2와 실험 3에서 실험군과 대조군 간의 큰 차이가 없었던 것으로 보인다. 단, 단백질의 변성으로 구조가 바뀌면서 아미노당 사이의 이온결합이 일부 변화하여 약간의 생장률 차이가 존재하는 것으로 보인다.

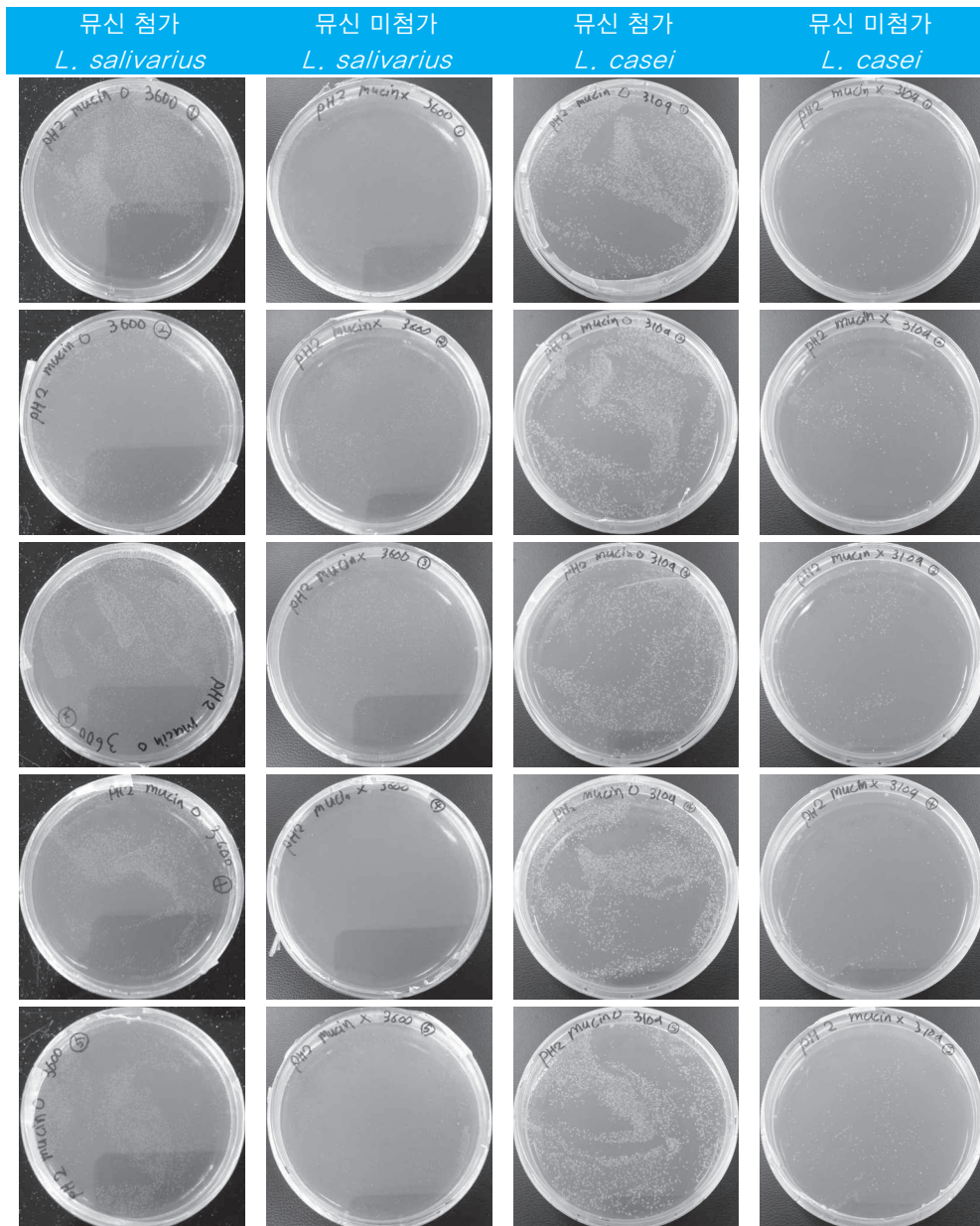
3. 실험 1과 실험 4의 경우에는 뮤신의 점성도 유산균 생장의 제한요소로 작용하는 것으로 추론된다. 실험 1에서 pH가 중성인 경우에는 pH로 인한 영향보다는 뮤신의 점성으로 인한 공간적 제약 때문에 유산균의 생장률이 오히려 떨어지는 것으로 보인다. 실험 4에서는 뮤신과 균액의 혼합시간이 5분일 때 가장 효과적이었는데, 이는 pH 2의 환경에서 뮤신이 유산균에 대해 물리적 장벽의 역할을 하기 위해서는 어느 정도의 시간이 필요한 것으로 보인다. 하지만 시간이 경과할수록 뮤신이 유산균을 과하게 둘러싸게 되어 공간적인 제약이 심해지는 것으로 보인다.

※ 콜로니 카운팅에 사용된 실험 결과 사진

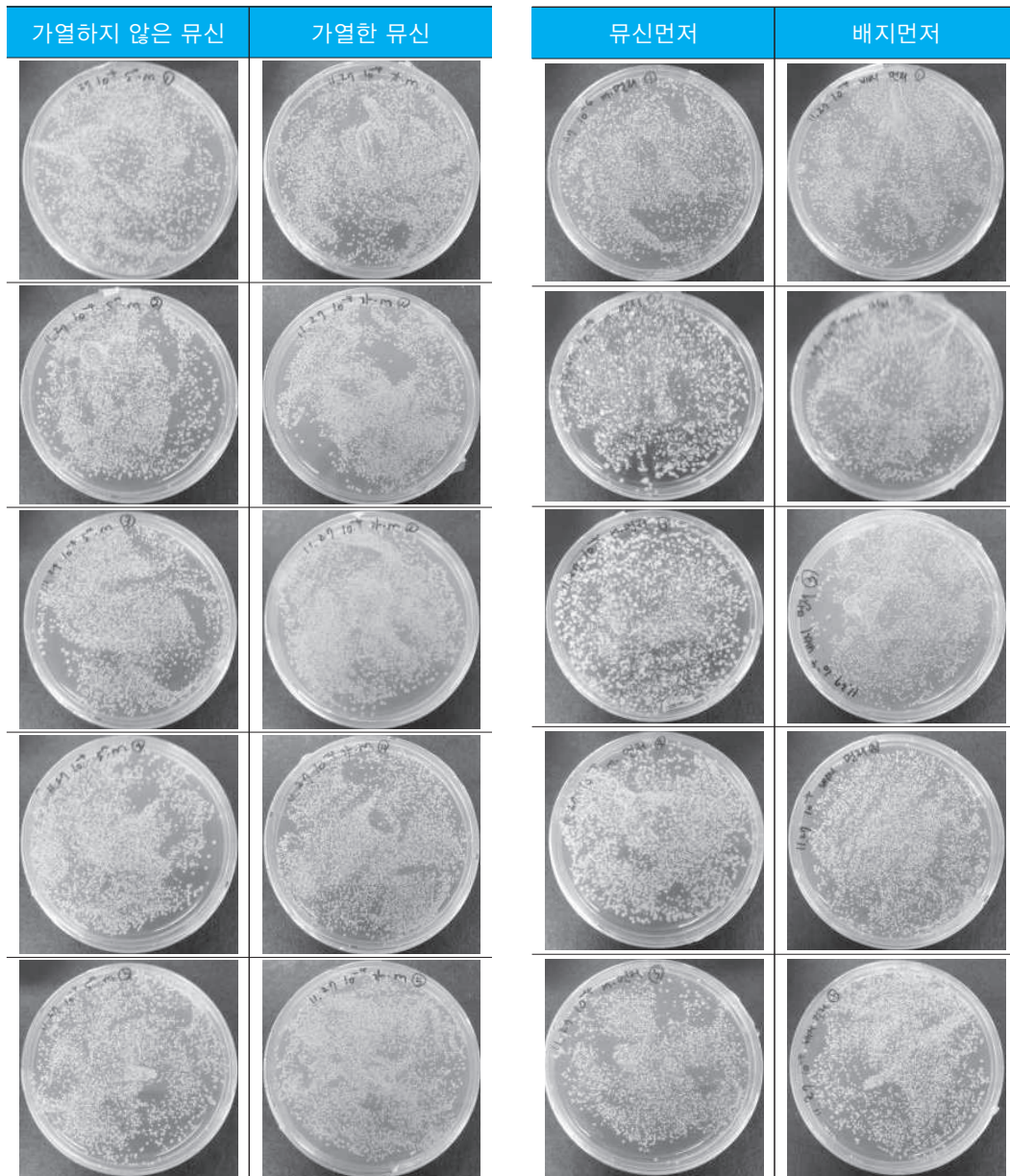


[그림 15] 사진실험 1 : 유산균 생장 정도의 측정





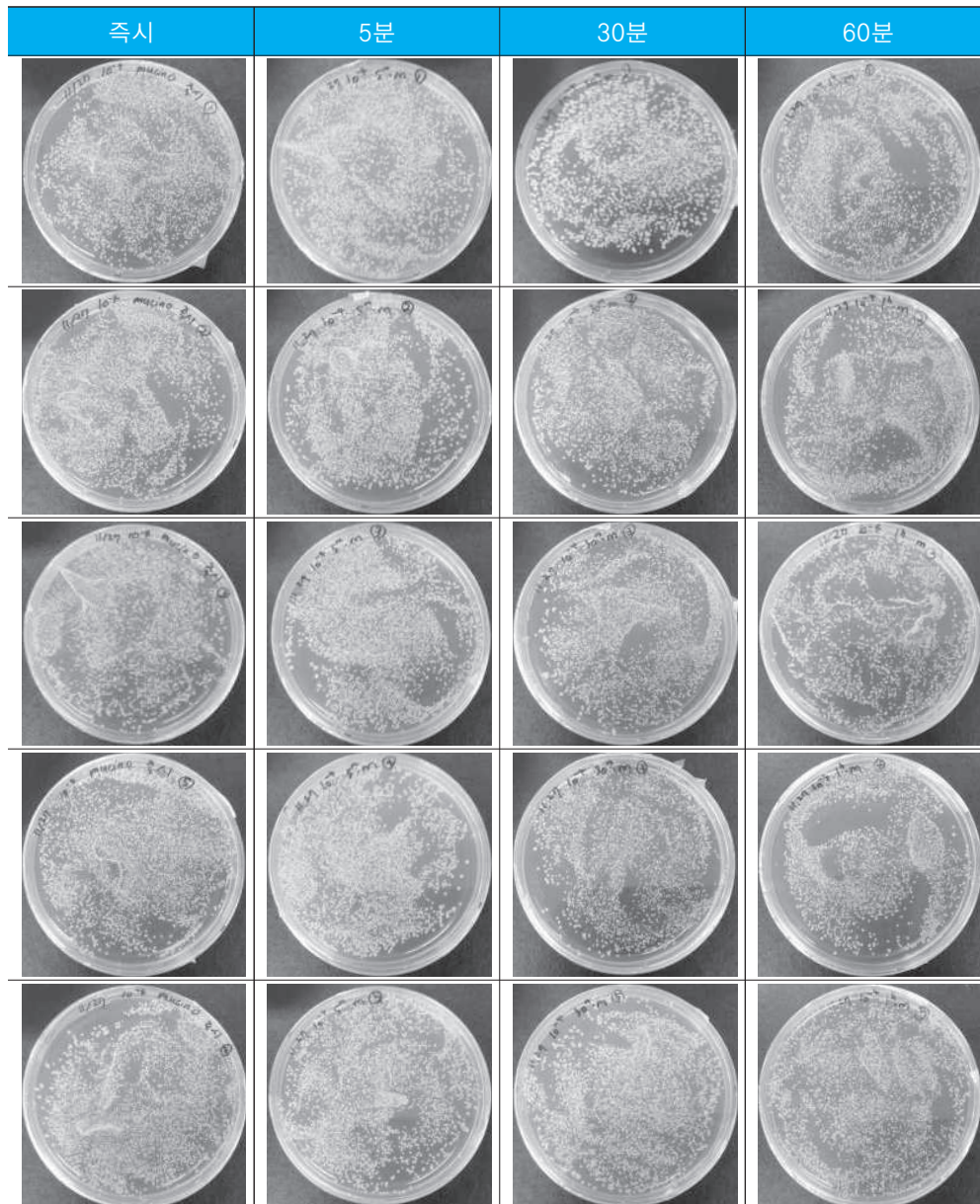
[그림 16] 식물성 뮤신의 유무에 따른 pH 2에서의 생장률 변화



[그림 17] 식물성 뮤신의 가열여부에 따른 pH 2 에서의 생장률 변화 (*L. casei*)

[그림 18] 뮤신과 균의 혼합 순서에 따른 pH 2 에서의 생장률 변화 (*L. casei*)





[그림 19] 식물성 뮤신과 균의 혼합 시간에 따른 pH 2에서의 생장률 변화 (*L. casei*)

## ■ 참고문헌

- [1] 김종현 외 5명. (1999). 콜레스테롤 저하 유산균의 분리 및 이들 균주의 이화학적 특성. 한국농화학회지. (p.84~89)
- [2] 심재현 외 3명. (1995). 젖산 발효 제품에서 분리한 유산균의 내산성 비교. Korean J Food Sci Technol. (p.1)
- [3] 오윤정. (2002). 당귀 숙지황 쑥 황기가 유산균의 생육에 미치는 영향. 동국대학교. (p. 4~6)
- [4] 김송희. (2010). 유산균 발효 동근마의 이화학적 특성과 위보호 효과 및 요구르트에 응용 연구. 세종대학교. (p.1~13, 20, 26)
- [5] 방지훈 외 6명. (2012). Probiotic Potential of *Lactobacillus* Isolates, Journal of Life Science (p.119~126)
- [6] 한국바이오펜치협회. (2006). 유산균의 검출 및 계수 방법. (p. 1~5)
- [7] 송창영. (2013). *Lactobacillus rhamnosus* CY-1의 동정과 배양학적 특성에 따른 항균물질 생산. 제주대학교. (p.3~6)
- [8] 윤정훈 외 1명. (2013). 식물성 미신 추출물을 함유하는 피부 외용제 조성물. (p.3~4)
- [9] 조남욱. (2012). 구강건강을 위한 프로바이오틱스의 사용에 관한 문헌고찰. (p.3)
- [10] 주철규 외 1명. (2011). 동근마 유래의 미신 제조방법 및 이를 함유하는 화장료 조성물. 모아캠 (p.9~10)
- [11] JACQUES EMILE PROUST 외 3명. (1984). BOVINE SUBMAXILLARY MUCIN (BSM) ADSORPTION AT SOLID/ LIQUID INTERFACES AND SURFACE FORCES. (p.43~52)
- [12] 차상도 외 2명. (2010). 김치로부터 담즙산 분해능이 우수한 *Lactobacillus plantarum* CIB 001의 분리 및 동정. (p.2~4)

### 심사평

마로부터 추출한 식물성 미신으로 유산균의 생장률을 강산성 환경에서 증가시키고 생장률 변화를 일으키는 기작을 연구한 결과 pH 2 조건에서 미신이 유산균의 내산성을 높여 생장률을 높여 주는 것을 확인하였으며, 미신이 화학적 또는 다른 기작을 통해 주변의 pH를 상승시킴으로써 유산균의 생장률을 증가시키는 것이 아니고 물리적인 장벽의 역할을 함으로써 강산성의 환경으로부터 유산균을 보호해 주는 것이라는 결과로부터 건강에 유익한 유산균을 위장의 강력한 산성물질인 위산으로부터 보호하여 장에 도달하게 하는 방법으로 미신이 많은 마를 섭취하면 유익하다는 것을 알 수 있게 하였다는데 의의가 있다.

유산균의 종류를 다르게 하거나 또는 다른 유익한 균도 마찬가지로 미신에 의해 보호받을 수 있는지 또는 장에서 실제로 몇 %의 균이 살아있는지를 비교하는 연구가 필요할 것으로 보인다. 미신의 성분 또한 정확하게 밝혀내어 유산균에 대해 어떤 기작으로 장벽의 역할을 하는지에 대한 연구가 진행되었으면 더욱 좋은 논문이 될 수 있으리라고 판단된다.

## 연구 후기

연구를 시작하는데 결정적인 동기가 된 것은 공부를 하다가 뮤신이라는 물질이 위를 보호해준다는 사실을 알게 된 것입니다. 마침 미생물이 인체에 미치는 영향에 관한 연구들을 접하면서 장 건강과 아토피에 유산균이 많은 도움을 준다는 것을 알 수 있었습니다. 하지만 위의 낮은 pH로 인해서 장에 도달하기 전에 대부분 사멸한다는 사실을 알게 되었고 뮤신을 이용하면 유산균의 내산성을 높여줄 수 있을 것이라고 생각했습니다. 연구를 수행하면서 뮤신의 조성과 이화학적 특성에 대한 논문들을 공부했고 내산성과 관련된 논문들의 연구 방법을 보고 실험을 계획하기도 했습니다. 연구 초반에는 실험 설계와 진행에 있어 다소 미숙했기에 여러 시행착오를 겪기도 했지만 점차 익숙해지고 많은 경험이 쌓이면서 원활히 실험을 진행할 수 있었습니다. 팀원들과 호흡을 맞춰가며 노력한 결과 성공적으로 연구를 마칠 수 있었고 그 덕에 좋은 결과를 얻을 수 있었던 것 같습니다. 가장 좋았던 것은 단순히 책 속에 갇혀있는 지식이 아니라 궁금한 것을 직접 찾아보고 연구를 수행할 수 있는 기회를 가졌다는 것이 저희에게 있어 가장 큰 즐거움이었습니다. 보다 많은 학생들이 책에 갇힌 지식이 아니라 직접 체험하고, 궁금한 것들을 스스로 찾아나간다면 참교육이 실현될 수 있을 것입니다. 앞으로도 깊은 공부와 연구를 해 나가면서 생명과학자가 되어 공부를 이어나가고 싶습니다. 마지막으로 본인들이 하고 싶은 연구를 하는 것이 가장 중요하다는 말씀과 더불어 아낌없는 조언을 해주신 연세대학교 박준홍 교수님과 저희가 연구에 집중할 수 있게 도와주시고 이따금씩 문제를 해결하는데 결정적인 도움을 주신 인천과학고등학교 김은성 선생님께 감사의 말씀을 드리고자 합니다. 항상 저희를 믿고 응원해 주시는 부모님과 좋은 연구를 할 수 있도록 기회를 주고 지원을 해주신 한국과학창의재단 측에도 감사의 말씀을 드리고 싶습니다.



## 연구진

허태양(Heo Taeyang, 인천과학고등학교 1학년, heo1998@naver.com), 제1저자 및 교신저자  
 김소윤(Kim Soyun, 인천과학고등학교 1학년, ginkim518@naver.com)  
 권순형(Kwon Soonhyung, 인천과학고등학교 1학년, tns9597@naver.com)  
 김인철(Kim Incheol, 인천과학고등학교 1학년, zirmi0904@naver.com)  
 정한식(Jeong Hansik, 인천과학고등학교 1학년, danieljhs@naver.com)

지도교사 : 김은성(Kim Eunsung, 인천과학고등학교, 전공: 생물학, agnes-304@hanmail.net)  
 지도교수 : 박준홍(Park Joonhong, 연세대학교 사회환경시스템공학부, parkj@yonsei.ac.kr)

(2015. 1월 현재)

## 통합기상센서망을 이용한 대구지역 도시열섬 효과 연구

(Study of urban heat island effect in Deagu using  
Compact Weather Station convergence network)

공광조 · 권혁규 · 김강찬 · 김원중 · 서상교(대구일과학고등학교)

### 초 록

본 연구는 대구지역의 도시 열섬 효과를 연구하기 위해 통합기상센서망 자료를 이용하여 대구지역의 기상요소들을 관측하고 열섬강도 및 평균 기온, 기압, 습도 분포 등을 분석하였다. 연구에 사용한 자동기상관측시스템(AWS)은 자동으로 여러 기상 요소들을 측정하여 일정한 간격으로 저장하는 장치이며 기온, 풍속 등 총 6가지의 기상 요소를 측정할 수 있다. 대구를 도심과 외곽으로 나누고 AWS를 8곳에 설치하여 통합기상센서망을 구축하였으며, 설치 장소는 도심 3학교, 외곽 5학교이다.

관측 기간 중 운량이 적어 열섬효과를 관찰하기 좋을 것으로 예상되는 기간을 사례기간으로 설정하고 분석하였으며, 관측된 기상 자료의 검증에 위해 기상청홈페이지에서 대구 전지역, 총 6곳의 기상청 자료를 수집하여 검증하였다. 자료의 이상을 확인하기 위해 시계열을 분석하였고, 가장 낮은 기온을 가진 지점을 기준으로 열섬강도를 계산하고 공간분포를 확인하였다. 시청을 대구 중심으로 두고 시청으로부터 거리에 따른 평균 기온 분포를 분석한 결과 중심으로부터 멀어질수록 온도가 낮아졌다. 따라서 대구에 열섬 현상이 있음을 확인할 수 있었다. 열섬효과가 주간보다는 야간에 뚜렷하게 나타났으며 도시외곽지보다 도심에서 주·야간 열섬강도 차가 크게 나타났다. 또한 하계와 동계의 열섬 강도를 비교해본 결과 겨울이 여름보다 열섬 강도가 크게 나타났다.

키워드 : 열섬 효과, 열섬 강도, 통합기상센서망, 자동기상관측시스템(AWS)

## I . 서론

### 1. 연구 배경

우리 학교에 입학하여 1월에 적응 교육을 할 때부터 3, 4월까지 통학하면서 유달리 학교가 대구

의 다른 지역에 비해 춥다고 느껴졌다. 선배들도 우리 학교는 겨울에는 너무 춥고 여름에는 상대적으로 덜 덥다고 하였다. 우리 학교는 대구광역시 동쪽 끝의 팔공산 자락에 위치하며, 혁신도시가 들어서고 있는 곳으로 아직 도심과 같은 높은 건물이 없고 자동차도 적으며 인구 밀도도 아주 낮은 상태이다. 또한 주변이 산으로 둘러 싸여 있어 한적한 시골과 같은 곳이다. 그래서 이런 차이로 인해 대구의 도심과 기온 차이가 나는 것이 아닐까하는 생각을 하게 되었다. 즉, 대구에 도시열섬(Urban Heat Island) 효과가 실제로 존재하고 도심에 비해 외곽에 위치한 우리 학교는 그 효과가 거의 없기 때문에 이러한 차이가 생겼을 것이라 생각했다. 그래서 우리 학교에서 보유하고 있는 8대의 이동식 자동기상관측시스템(Automatic Weather System, 이하 AWS)으로 통합기상센서망을 구축하여 기상요소를 관측함으로써 대구 지역의 열섬 현상에 대해 연구를 하게 되었다.

## 2. 연구 목적

과거 여러 관측 자료로부터 도심지역이 교외지역보다 온도가 높다는 사실은 널리 알려져 왔다. 이러한 현상을 도시열섬(Urban Heat Island)이라고 하고, ‘런던의 기후 관측에 대한 보고서(The Climate of London, Luke Howard, 1883)’에서 처음으로 기록되어 알려졌다. 그 후 전 세계적으로 도시열섬 강도와 원인을 제시하는 연구가 폭발적으로 증가하였고, 인구가 밀집된 세계의 대도시에서 많이 관찰되었다.

최근 도시열섬은 도시효과의 일부분으로 인식되고 있다. 도시열섬의 원인으로는 각종 냉난방기구 등이 만들어내는 인공열, 대기 오염물질에 의한 온실효과, 빌딩과 같은 도시 구조물, 물을 전혀 흡수할 수 없는 아스팔트와 같은 지상의 피복 상태 등이 있다. 일반적으로 도심과 교외지역의 기온차로서 표현되는 도시열섬 강도는 주로 구름과 바람이 없는 야간에 강하게 나타나며, 여름철에 약하고 겨울철에 가장 크게 나타나는 특징이 있다.

온대 지역에 위치한 대도시의 경우에, 겨울철 도시열섬에는 도심에서 배출되는 인공 폐열의 효과가 가장 크고, 여름철은 도시의 포장화로 인한 지표의 열저장 기능의 증대와 도시의 확대에 지표 증발원의 감소 효과가 가장 큰 것으로 알려져 있다. 연간으로는 인공 폐열의 배출보다 도시표면의 포장화가 도시열섬에 미치는 영향이 훨씬 크다. 이러한 도시효과는 인구밀도가 높은 지역에서는 예외 없이 관측되며, 다양한 기상현상을 유발하고 외곽지역과는 확연한 차이를 보여준다.

종관기상관측망과 달리 자동기상관측망(automatic weather station, AWS)은 주변의 건물 특성 및 밀도에 직접 영향을 받기 때문에 이런 특성을 반영한 도시 열섬 효과의 특성에 관한 연구가 매우 유용할 것이라고 생각된다. 따라서 본 연구에서는 대구지역 도시효과가 기상요소에 어떠한 영향을 주는지 파악하기 위해 기상청에서 운영 중인 자동기상관측시스템(Automatic Weather System, 이하 AWS)과 대구일과학고등학교의 통

합기상센서망을 이용하여 다양한 기상요소를 관측하고 이를 통해 대구의 도시 열섬에 대해 연구하고자 한다.

## Ⅱ. 이론적 배경

### 1. 이론적 배경

#### 1.1. 열섬효과(heat island effect)

열섬효과(heat island effect)는 도시에서 발생하는 열로 인하여 도시의 기온이 주변의 농촌 지역보다 높게 나타나는 현상으로, 조용하고 맑은 날씨를 보이는 중위도 도시에서 가장 잘 나타난다. (Barry and Chorley, 2002). 열섬 현상은 주로 날씨가 맑고 바람이 잔잔한 날 나타나는 것으로 알려져 있으며, 도시의 규모가 클수록 잘 나타난다. 또한 도심과 교외의 기온 차이를 의미하는 열섬 강도는 맑고 바람이 잔잔한 날, 여름보다는 겨울철에, 그리고 낮보다는 새벽에 크게 나타난다고 한다.

도시는 일반적으로 주변의 교외지역에 비하여 고온의 공기층을 형성하게 된다. 이러한 요인으로서는 도시지역의 인구집중에 따른 인공열의 증가와 건물과 같은 구조물에 의한 거칠기 길이의 변화, 지표면에서의 증발잠열의 차이가 있다. 또한 아스팔트나 콘크리트처럼 도시에서 주로 사용되는 건축자재는 열 특성(열용량, 열전도성 등)이나 표면 반사도(알베도, 열방사력)에 있어서 주변의 농촌지역과 크게 다르기 때문에 도시지역의 에너지 균형에 변화를 일으켜, 주변의 교외지역에 비해 도시지역의 온도를 높게 만든다. (Mackey *et al.*, 2011; Stewart and Oke, 2009; Ackerman, 1985; Oke, 1979).

※ 열섬강도란?

$$H = T' - T \quad (H: \text{열섬강도}, T: \text{기준점의 온도}, T': \text{측정 지역의 온도})$$

그 지역의 온도에서 기준점의 온도를 뺀 값이다. 이 값이 클수록 외곽 지역에 비해 기온이 높다는 말이 된다. 이번 연구에서는 각 지점별 열섬강도를 비교하여 분석해 볼 것이다.

#### 1.2. 문헌 연구

19세기 초 영국의 Howard가 런던의 기온을 관측하여 열섬 현상의 존재를 최초로 확인하였고, 그 후 뉴욕, 세인트루이스, 신시내티, 동경, 오사카 등의 대도시를 대상으로 한 열섬현상 연구가 계속되고 있다. 우리나라에서도 지역별로 많은 연구가 이루어졌다. 대구를 중심으로 한 연구를 살펴



보면 (윤일희 외, (1994))는 대구의 열섬 연구를 위해 계절별로 특정일을 하루 선정하여 49개 지점에서 이동 관측한 결과 도심 및 공단지역을 중심으로 고온역이 형성되고 외곽으로 갈수록 열섬현상이 약해지며 열섬 핵이 주간에는 공단지역에서, 야간에는 도심에서 나타났다고 하였다. Lee *et al.* (2009)은 대구지역의 최신 토지피복자료를 이용하여 도시지역 세분화와 물리특성을 고려한 도시 열환경 변화를 고찰 하였다.

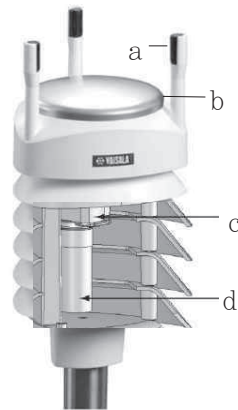
구해정 외, (2007)는 서울의 열섬 강도는 일 변화 경향을 보이면서 주간보다는 야간에 높게 나타나고, 그 중에서도 새벽 시간대에 가장 크게 발달한다고 하였다. 한영호 외, (1993)는 부산지역 도심지의 도시 현상이 모든 계절에 걸쳐 나타나며 주간보다는 야간에 열섬강도가 강하고 계절적으로는 겨울, 봄, 가을, 여름 순이며 열섬핵이 시간대에 따라 차이가 나타난다는 것을 밝혔다. 박석봉 (2004)은 광주 지역의 여름철 도시 열섬 현상 연구를 통하여 천변이 교통량이 과다함에도 불구하고 도심의 다른 지역보다 온도가 낮았으며 녹음으로 우거진 도심공원 지역, 저수지변은 열섬완화에 기여한다고 하였다. 시골지역과 도시지역의 기상조건 비교, 도시열섬과 도시 미기후 관계(Jo and Ahn, 1999) 등의 연구가 이루어져 왔다. 최근 Hwang and Kim (2003)이 전주시의 열섬현상은 주택단지의 입지와 특성에 따라 차이가 있음을 확인하였고 김유진 (2012)이 서울시의 열섬현상은 풍속의 증가가 도시 내 대기 혼합을 강화시켜 열섬의 발생을 억제한다는 것과 운량이 적은 맑은 날(운량 0~2.4)에 잘 발달한다는 것이 밝혀졌다. 또한 열섬현상 완화와 관련되어 허정훈 (2013)은 차열 코팅 포장에 도시 도로에 시공 시 온도 저감이 10℃ 정도 발생하여 여름철 도시 열섬현상에 대한 예방 방안을 내놓았다.

### III. 연구 방법

#### 1. 관측 장비 및 관측 지역

##### 1.1. 관측 장비

자동기상관측시스템(AWS)는 자동으로 여러 기상 요소들을 측정하여 일정한 간격으로 저장하는 장치이다. 우리가 이번에 사용한 기상 멀티 센서는 WXT-520이다. 이 기상 장비로 측정할 수 있는 기상 요소들은 기온, 풍속, 일사량, 풍향, 강수량, 습도 등이 있다[그림 1]. 이 장비의 장점은 설치가 굉장히 쉽고, 작고 가벼워서 이동성이 우수하다. 하나의 센서로 6가지 기상요소 관측이 가능하여 가격대비 효능이 뛰어나다. 저전력 제품으로 태양전지로도 작동이 가능하기 때문에 설치가 용이하였다.



- a: 바람변환기  
b: 강우량센서  
c: 압력센서  
d: 습도와 온도센서

#### Wind

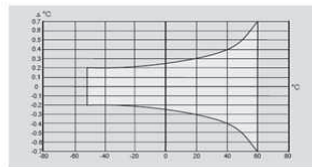
<b>SPEED</b>	
range	0 ... 60 m/s
response time	250 ms
accuracy	
0 ... 35 m/s	$\pm 0.3$ m/s or $\pm 3\%$ , whichever is greater
35 m/s ... 60 m/s	$\pm 5\%$
output resolutions and units	0.1 m/s, 0.1 km/h, 0.1 mph, 0.1 knots
<b>DIRECTION</b>	
azimuth	0 ... 360°
response time	250 ms
accuracy	$\pm 3^\circ$
output resolution and unit	1°

#### Liquid Precipitation

<b>RAINFALL</b>	cumulative accumulation after the latest automatic or manual reset
output resolutions and units	0.01 mm, 0.001 inches
accuracy	5%*
<b>RAINFALL DURATION</b>	counting each ten-second increment whenever water droplet is detected
output resolution and unit	10 s
<b>RAIN INTENSITY</b>	one-minute running average in ten-second steps
range	0 ... 200 mm/h (broader range with reduced accuracy)
output resolutions and units	0.1 mm/h, 0.01 inches/h
<b>HAIL</b>	cumulative amount of hits against the collecting surface
output resolutions and units	0.1 hits/cm <sup>2</sup> , 0.01 hits/in <sup>2</sup> , 1 hits
<b>HAIL DURATION</b>	counting each ten-second increment whenever hailstone is detected
output resolution and unit	10 s
<b>HAIL INTENSITY</b>	one-minute running average in ten-second steps
output resolutions and units	0.1 hits/cm <sup>2</sup> h, 1 hits/in <sup>2</sup> h, 1 hits/h

#### Air Temperature

Range	-52 ... +60 °C (-60 ... +140 °F)
Accuracy for sensor at +20 °C	$\pm 0.3$ °C ( $\pm 0.5$ °F)
Accuracy over temperature range (see graph below)	



Output resolutions and units	0.1 °C, 0.1 °F
------------------------------	----------------

#### Barometric Pressure

Range	600 ... 1100 hPa
Accuracy	$\pm 0.5$ hPa at 0 ... +30 °C ( $\pm 32$ ... $\pm 86$ °F) $\pm 1$ hPa at -52 ... +60 °C (-60 ... +140 °F)
Output resolutions and units	0.1 hPa, 10 Pa, 0.0001 bar, 0.1 mmHg, 0.01 inHg

#### Relative Humidity

Range	0 ... 100 %RH
Accuracy	$\pm 3$ %RH within 0 ... 90 %RH $\pm 5$ %RH within 90 ... 100 %RH
Output resolution and unit	0.1 %RH

#### General

Operating temperature	-52 ... +60 °C (-60 ... +140 °F)
Storage temperature	-60 ... +70 °C (-76 ... +158 °F)
Operating voltage	5 ... 32 VDC
Typical power consumption	3 mA at 12 VDC (with defaults)
Heating voltage	5 ... 32 VDC / 5 ... 30 VAC <sub>max</sub>
Serial data interface	SDI-12, RS-232, RS-485, RS-422, USB connection,
Weight	650 g (1.43 lb)
Housing	IP65
Housing with mounting kit	IP66

[그림 1] WXT520 센서 기능 세부 사항

## 1.2. 관측 지역

본 연구에서 대구지역에 나타나는 열섬 현상을 확인하기 위해 자동기상관측시스템(AWS)을 대구의 도심과 외곽을 나누어 8곳에 설치하여 통합기상센서망을 구성하였다. 설치 장소는 대구일과고(우리

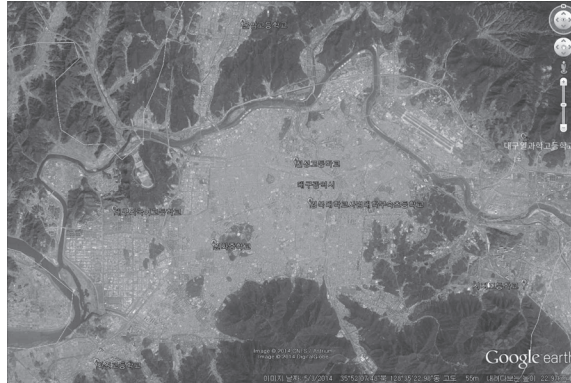
학교), 대구외국어고등학교, 시지고등학교, 원화중학교, 칠성고등학교, 운암고등학교, 경대사대부설등학교, 화원고등학교이다. [표 1]과 [그림 2]를 참조하면 통합기상센서망을 구성하고 있는 장소의 주변 지역 특징을 파악할 수 있다. 경대사대부설등학교, 원화중학교, 칠성고등학교는 주변이 모두 인공피복으로 덮여 있으며 대구의 도심에 위치한다. 나머지 장소는 대구의 외곽지에 위치하며 주변에 자연 피복이 많고, 특히 대부분의 설치 장소가 산자락에 위치하고 있다. [그림 3]을 통해 통합기상센서망의 설치 장소를 전체적으로 파악할 수 있다. [그림 4]에서 [그림 6]은 자동기상관측시스템(AWS)을 설치하고 있거나 설치한 모습을 나타낸다.

연번	장소	소재지	지역 특징
1	대구일과학교등학교	대구 동구	팔공산 밑자락, 자연피복
2	시지고등학교	대구 수성구	성암산 녹지 경계부
3	운암고등학교	대구 북구	명봉산 밑자락
4	화원고등학교	대구 달성군	비슬산 밑자락, 금호강
5	대구외국어고등학교	대구 달서구	와룡산 밑자락
6	경대사대부설초등학교	대구 중구	교통지, 상업지, 인공피복
7	칠성고등학교	대구 북구	주거지, 상업지, 인공피복
8	원화중학교	대구 달서구	주거 밀집 지역, 인공피복

[표 1] 통합기상센서망이 설치된 장소 및 특징



[그림 2] 통합기상센서망이 설치된 학교의 주변의 Google Earth 이미지



[그림 3] 통합기상센서망 설치 장소



[그림 4] 대구일과고 설치



[그림 5] 시지고 설치



[그림 6] 운암고 설치

## 2. 분석 자료

### 2.1. AWS 관측 자료

#### - 관측 기간

본 연구에서 2014년 7월 14일부터 2014년 9월 18일까지와 2014년 12월 14일부터 2015년 1월 2일까지 통합기상센서망 8개 지점의 자료를 수집하여 분석하였다.

#### - 사례 기간 설정

자료 수집 기간 중 비가 오지 않고 맑아(운량이 적어) 열섬효과를 관찰하기 좋을 것으로 예상되는 9월



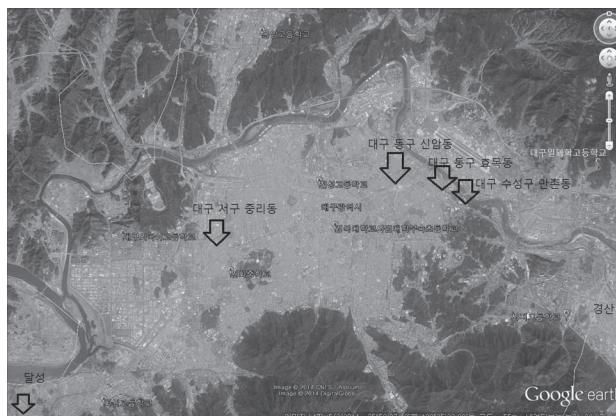
5일-11일과 12월 14일-16일을 사례기간으로 정하였다. 사례기간을 정할 때 기상청 홈페이지에 있는 운량 자료[그림 7]를 참고하였다.



[그림 7] 2014년 7월 14일부터 2014년 9월 18일까지 운량 자료

## 2.2. 자료 검증

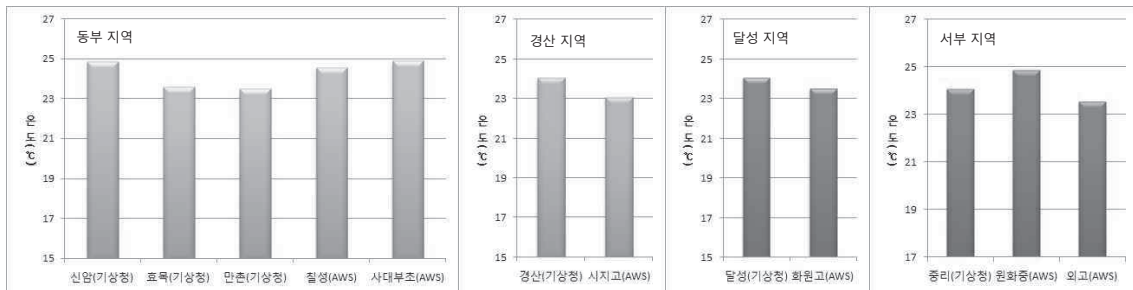
각 지점에서 관측된 기상 요소의 자료를 검증하기 위해 기상청이 설치한 기상장비의 기온을 이용하였다. 기상청홈페이지(www.kma.go.kr)에서 [그림 8]과 같이 달성, 경산, 동구 신암동, 서구 중리동, 수성구 만촌동, 동구 효목동 총 6곳의 기상청 자료를 수집하였다. 효목동과 만촌동이 거의 동일한 기온 변화양상을 보여주었으며, 신암동과 사대부초, 칠성고가 비슷한 기온 변화양상을 보여주었으나 주간에는 신암동이, 야간에는 사대부초의 기온이 조금 더 높은 기온을 유지했다. [표 2]와 같이 대구일과고 통합기상센서망과 가까운 지점의 기상청 관측 지점과 비교함으로써 대구일과고 통합기상센서망의 자료를 검증하였다. 그 결과 [그림 9]와 [그림 10]에서 볼 수 있듯이 가까운 거리에 있는 통합기상센서망의 자료와 기상청 자료가 크게 차이가 없어 연구의 목적을 달성하는데 이상이 없는 자료임을 판단할 수 있으며 아울러 기상청 AWS의 자료도 분석에 이용한다.



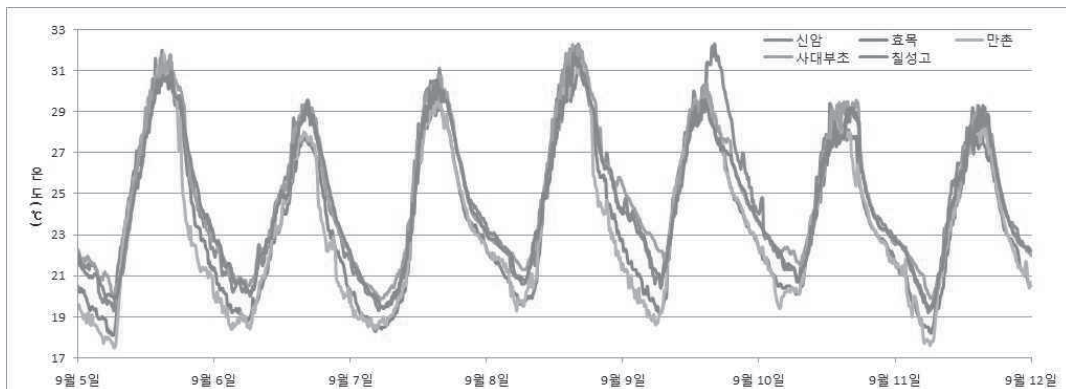
[그림 8] 기상청 자료 확보 지점 및 AWS설치 지역(화살표가 기상청임)

비교한 기상청 관측자료	통합기상센서망 지점
신암동 효목동 만촌동	칠성고 사대부초
달성군	화원고
중리동	원화중 외고
경산시	시지고
주변에 관측 장비가 없어 비교 불가능	운암고등학교

[표 2] 기상청 관측 지점과 통합기상센서망 지점의 비교



[그림 9] 기상청 AWS와 대구일과고 통합기상센서망의 사례기간 동안 평균 온도 비교



[그림 10] 사례기간 동안 동부지역 관측망의 기온 일변화 그래프

### 3. 분석 방법

#### 3.1. 열섬강도 측정 방법

- 1) 자료가 수집 된 후 각 지점별 평균기온을 구한다.

2) AWS 장비를 설치한 곳 중 우리학교인 대구일과학교등학교가 기온이 낮게 측정되었기 때문에 열섬강도를 구할 때의 기준점으로 잡는다.

3) 각 지점별 (평균기온-대구일과고의 평균 기온)을 하여 열섬강도를 구한다.

4) 각 지점의 열섬강도를 구한 후, 그래프를 그려 한눈에 쉽게 알아볼 수 있게 만든다(막대그래프 이용).

5) 이 자료들을 이용하여 어떤 지점에 열섬효과가 심하게 나타나는지 알아본다.

6) 주간(06시~18시), 야간(18시~06시)의 열섬효과를 각각 구해 낮과 밤에 열섬효과가 어떻게 나타나는지 알아보고, 이유를 분석해본다.

6) 네이버 지도[그림 11]를 이용하여 도심(대구시청)과의 거리를 구해 열섬강도가 도심과의 거리와도 관련이 있는지 알아본다.



[그림 11] 네이버 지도 이용한 거리 구하기

### 3.2. 열섬강도와 기상요소와의 관계 분석

열섬강도와 기상요소(기온과 기압, 습도)와의 상관관계를 분석하기 위해 산포도를 이용하였으며 다음은 그 과정이다.

1) 엑셀에서 기온자료와 습도자료를 골라 그래프로 나타낸다.

2) 가로축을 기온축으로 잡고 세로축을 습도축으로 잡는다.

3) 그래프의 추세선을 나타내고 추세선의 방정식과  $R^2$  값을 나타내도록 설정한다.

4) 추세선을 보고 기온에 따른 습도의 전체적인 추이를 알 수 있다.

## Ⅳ. 연구 결과 및 논의

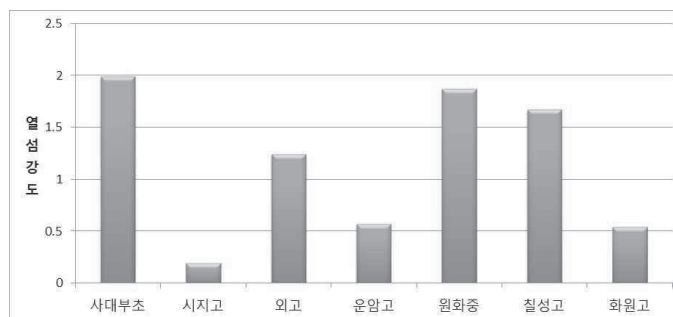
### 1. 대구의 도시효과

본 연구에서는 대구 지역의 열섬현상의 존재유무 및 그 정도를 파악하기 위하여  $\Delta T$ (도심부와 도시외곽 지역 간의 기온차이)인 열섬강도( $H$ )를 비교하였다. 9월 5일-11일, 12월 14일-16일의 사례기간 동안 위에서 언급한 과정을 바탕으로 통합기상센서망의 8개 지점의 일평균 기온을 살펴본 결과 [표 3]과 같이 도심에 위치한 사대부초, 칠성고, 원화중의 평균 기온은 24도 이상인데 반해 외곽지역에 있는 시지고, 운암고, 화원고, 일과고의 평균 기온은 23.5도 이하로 눈에 띄는 차이가 나타난다.

인공배열이나 도시열섬의 영향이 미치지 않는 기준점을 우리학교로 설정하여 7개 지점에서 우리학교와의 기온차를 통해 열섬강도를 측정하였다. [표 4]와 같이 열섬의 강도가 도심에 위치한 사대부초에서 가장 크게 나타났으며, 상대적으로 도시외곽지역에 해당하는 시지고가 가장 작은 것으로 나타났다[그림 12].

	온도(℃)	습도(%)	기압(hPa)	열섬강도( $H$ )
사대부초	24.88	60.54	1003.1	1.99
원화중	24.76	62.08	1003.7	1.87
칠성고	24.56	61.85	1004.0	1.67
외고	24.13	66.77	1003.1	1.24
운암고	23.46	65.81	1002.9	0.57
화원고	23.43	68.52	1003.8	0.54
시지고	23.08	68.28	998.8	0.19
대구일과학교등학교	22.89	69.47	999.9	0

[표 3] 지점별 온도, 습도, 기압, 열섬강도



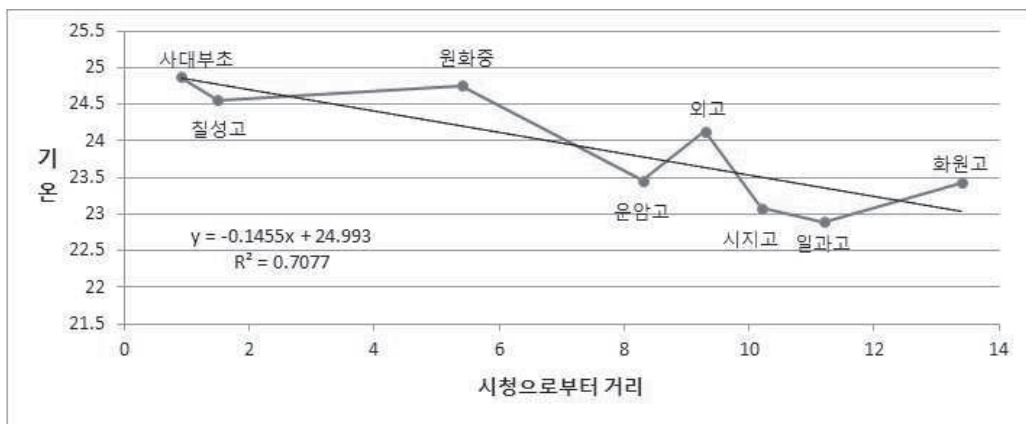
[그림 12] 우리학교(대구일과학교등학교)에 대한 열섬강도



또한 대구 시청을 대구 중심으로 두고 시청으로부터 거리에 따른 평균 기온 분포를 살펴본 결과 [그림 13]과 같이 대구의 중심으로부터 거리가 멀어질수록 온도가 낮아지며 추세선을 그려  $R^2$ 값을 산정한 결과 0.70으로 중심으로부터 거리와 기온이 매우 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다. 따라서 대구지역에서도 도시 효과에 의한 열섬 현상이 발생하고 있는 것으로 파악할 수 있다.

	사대부초	칠성고	원화중	운암고	외고	시지고	일과고	화원고
거리(km)	0.9	1.5	5.4	8.3	9.3	10.2	11.2	13.4

[표 4] 대구시청으로부터의 거리



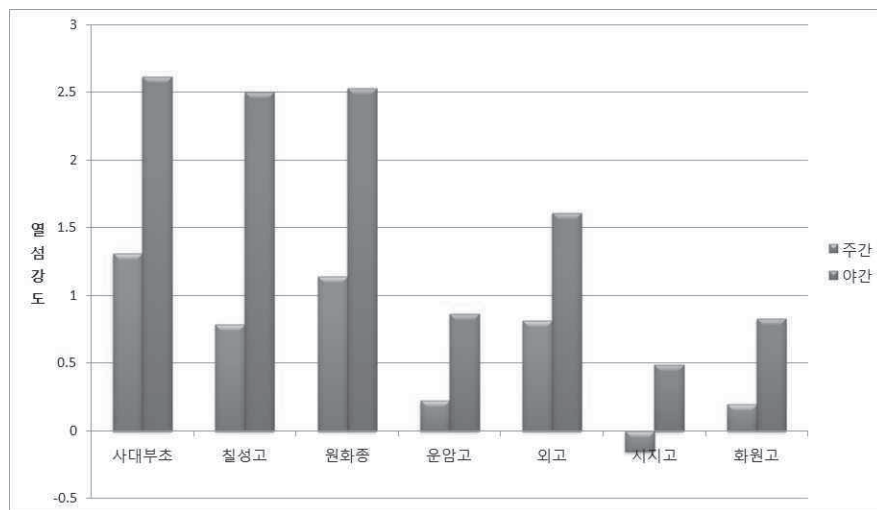
[그림 13] 대구 시청으로부터 거리에 따른 평균 기온

## 2. 주간과 야간 열섬 강도 비교

주간과 야간의 열섬 강도를 비교하기 위해 주간은 06시부터 18시까지, 야간은 18시부터 06시까지의 기온 자료를 평균하였다. [표 5]와 [그림 14]를 보면 열섬효과가 낮보다는 야간에 뚜렷하게 나타났으며 도시외곽지보다 도심에서 주·야간 열섬강도 차( $\Delta H$ )가 큰 것으로 나타났다. 이러한 차이는 도심은 인공피복으로 되어 있고 인공피복은 열을 흡수하고 배출하는 속도가 느려 야간에 기온이 천천히 떨어지게 된다. 그러나 자연피복은 지면에서 열을 흡수하고 배출하는 속도가 빨라 야간에 기온이 빠르게 떨어져, 냉각효과가 크게 일어난다. 따라서 주간보다는 야간에 열섬강도차가 크고, 또한 인공피복의 비율이 높은 도심이 그 차이가 더 큰 것으로 분석된다.

	기온(°C)		열섬강도(H)		주야간 열섬강도 차( $\Delta H$ )
	주간	야간	주간	야간	
사대부초	26.28242	23.47392	1.30827	2.61348	1.30521
칠성고	25.76272	23.3607	0.78857	2.50026	1.71169
원화중	26.11647	23.39473	1.14232	2.53429	1.39197
운암고	25.19550	21.72078	0.22135	0.86034	0.63899
외고	25.79109	22.46979	0.81694	1.60935	0.79241
시지고	24.82207	21.34420	-0.15208	0.48376	0.63584
화원고	25.17037	21.68791	0.19622	0.82747	0.63125
대구일과고	24.97415	20.86044	-	-	-

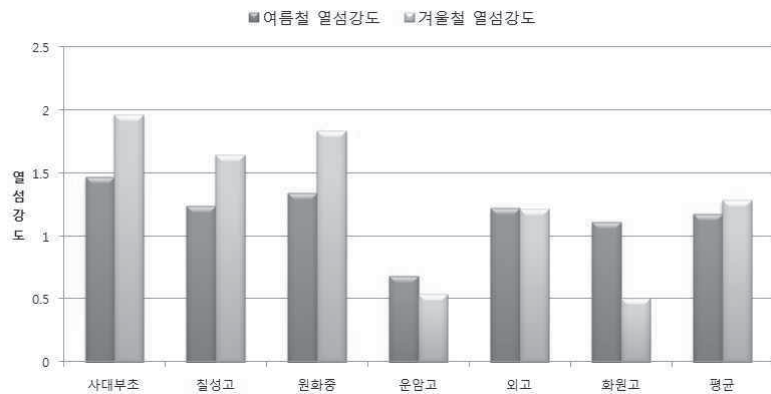
[표 5] 주야간 기온, 열섬강도 및 열섬강도 차( $\Delta H$ )



[그림 14] 주·야간 열섬강도

### 3. 하계와 동계의 열섬 강도 비교

겨울철과 여름철의 열섬강도[그림 15]를 비교해 본 결과 겨울철의 열섬강도가 여름철의 열섬강도보다 큰 값을 나타냈으며, 그 이유는 태양 복사 에너지와 인공열이 영향을 미치는 정도가 달라졌기 때문인 것으로 생각된다. 여름철에는 태양 복사 에너지의 양이 많아 인공열의 영향을 비교적 적게 받지만, 겨울철은 태양 복사 에너지의 양이 적어 인공열이 영향을 미치는 비율이 커지기 때문이다.



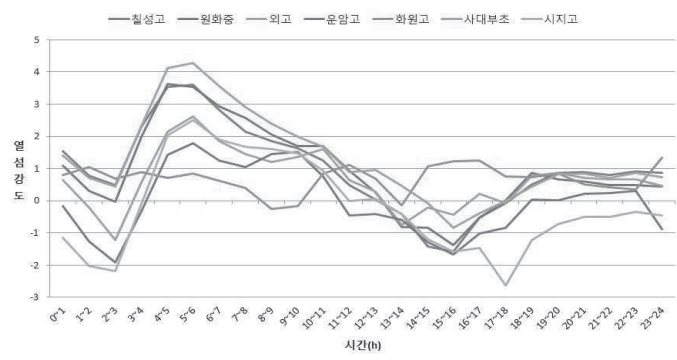
[그림 15] 하계와 동계의 열섬강도 비교

#### 4. 하계와 동계의 시간별 열섬 강도 비교

[그림 16]은 9월 10일 시간에 따른 도시열섬강도를 나타낸 것이다. 열섬강도의 최댓값은 06:00 경에 가장 크게 나타나며, 이후 점차 감소하여 16:00경부터 점차 증가하는 것으로 나타났다. 도시 열섬 강도는 주간 보다는 야간에 높게 나타났으며 새벽 시간대에 가장 크게 발달함을 알 수 있다.

[그림 17]은 12월 14일 시간에 따른 도시열섬강도를 나타낸 것이며, 열섬강도의 최댓값은 19:00경에 가장 크게 나타났다. 이때는 열섬이 저녁 시간대에 가장 크게 발달한다.

여름철의 열섬 강도 변화는 안개의 영향 때문인 것으로 분석했는데, 새벽에 습도가 더 높은 외곽 지역에 안개가 먼저 발생하면서 열섬강도가 낮아지다가 도심지에 안개가 발생하는 시점부터 다시 증가했다. 반면 겨울철에는 해가 지는 시점부터 열수용력이 작은 외곽지역의 온도가 빠르게 감소해 열섬강도가 증가했다. 마찬가지로 해가 뜨는 오전 8시 경부터 외곽지역의 온도가 빠르게 증가해 열섬강도가 작아지게 된다.



[그림 16] 시간에 따른 도시열섬강도(2014.09.10.)



[그림 17] 시간에 따른 도시열섬강도(2014.12.14.)

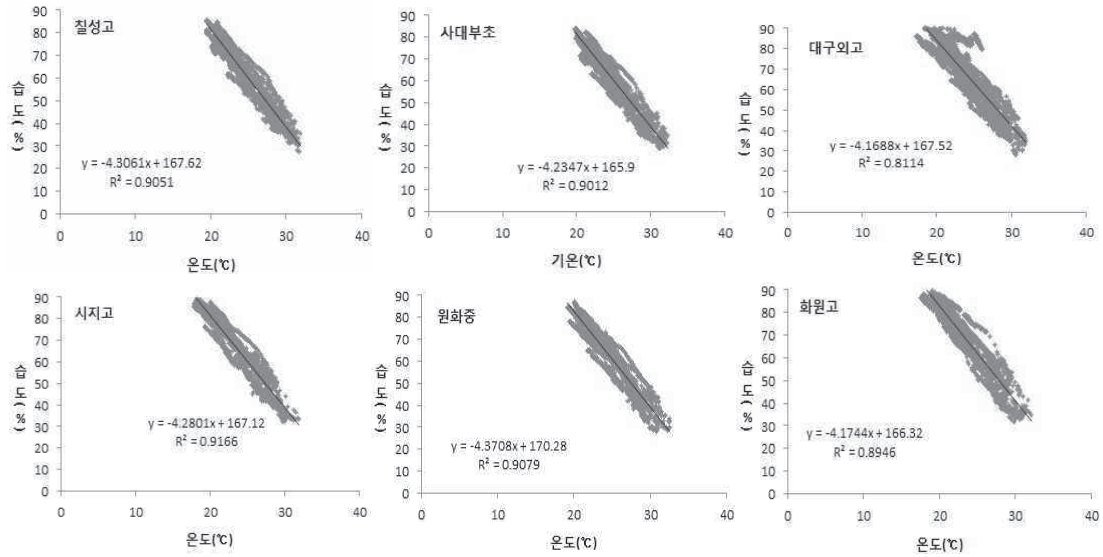
## 5. 도시열섬과 기상요소의 관계

### 5.1. 도시열섬과 습도

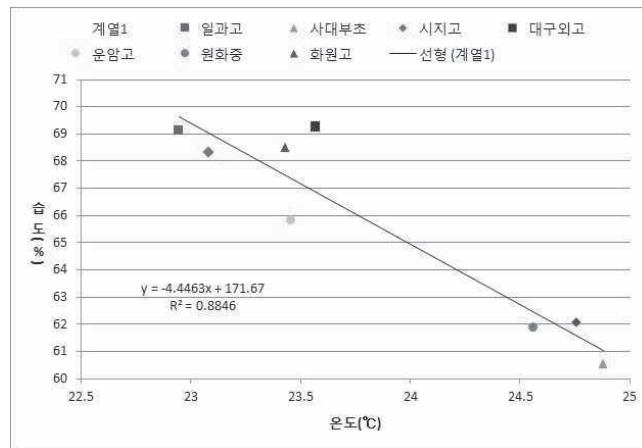
[표 6]에서 습도를 보면 평균 기온이 낮은 외곽 지역 학교가 도심 지역 학교에 비해 습도가 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 도심 지역의 습도가 외곽보다 더 낮다는 것은 두 가지를 의미한다. 상대습도는 현재수증기량과 포화수증기량에 의해 결정되는데 상대 습도가 낮다는 것은 현재수증기량이 적거나 기온이 높아 포화수증기량이 높기 때문이다. 도심과 대비되는 외곽 지역의 특징은 저수지나 숲이 있다는 것인데 저수지와 식물의 증산 작용으로 인해 수증기량이 증가했을 것으로 생각된다. 또한 위에서 도시의 기온이 외곽보다 더 높다는 것을 알았는데, 이것으로 도시의 포화수증기량이 높다는 것이라는 점을 알 수 있다. 즉, 도시는 외곽보다 숲이 적고 기온이 높아 습도가 낮은 것이다. 또한 [그림 18]과 [그림 19]에서 기온이 1도 높아지면 상대습도는 4.2%정도 떨어진다는 점도 볼 수 있다.

	기온		습도	
	주간	야간	주간	야간
사대부초	26.28242	23.47392	53.84391	67.24144
칠성고	25.76272	23.3607	55.90809	67.79397
원화중	26.11647	23.39473	54.97887	69.17518
운암고	25.19550	21.72078	57.92944	73.6993
외고	25.79109	22.46979	58.54364	74.99507
시지고	24.82207	21.34420	60.25196	76.38316
화원고	25.17037	21.68791	60.40874	76.63317
대구일과고	24.97415	20.86044	60.09048	78.85595

[표 6] 통합기상센서망 8개 지점의 주·야간 기온과 습도



[그림 18] 기온과 습도와의 관계



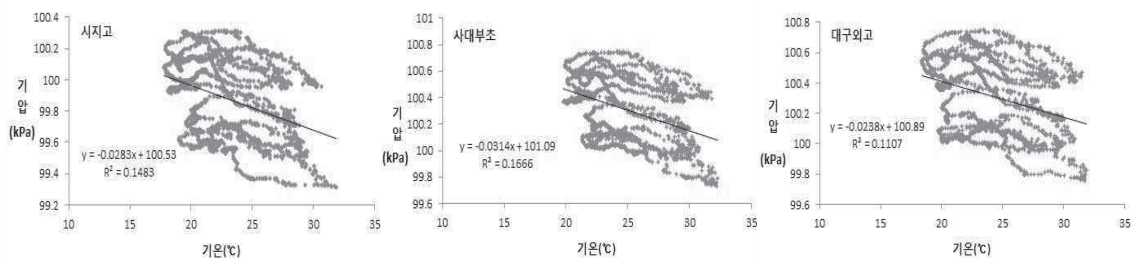
[그림 19] 기온과 습도와의 추세 관계

## 5.2. 도시열섬과 기압

기온이 높을수록 기압이 낮아지는 이유는 기온이 높아지면 공기가 팽창하게 되고 공기의 밀도가 낮아지게 되기 때문이다. [표 7]과 [그림 20]을 보면 한 지역의 한 기온 상에 여러 기압수치가 존재한다. 이 원인은 사례기간 7일 동안 기온에 의한 기압변화가 아닌 광범위한 기압 변화로 인해 기압이 크게 달라졌기 때문으로 사료된다. 사례기간 동안 이 광범위한 기압의 변화가 없었다면 기압은 기온에 따라 일정하게 감소했을 것이다. 그러나 대부분의 자료들은 뚜렷한 경향성이 없고  $R^2$ 값이 0.1 부근 이므로 기온과 기압사이의 관계는 크게 없는 것으로 밝혀졌다.

	기온(℃)		기압(hPa)	
	주간	야간	주간	야간
사대부초	26.28242	23.47392	1003.096	1003.108
칠성고	25.76272	23.3607	1004.005	1003.973
원화중	26.11647	23.39473	1003.716	1003.622
운암고	25.19550	21.72078	1002.923	1002.901
외고	25.79109	22.46979	1003.173	1003.06
시지고	24.82207	21.34420	998.7391	998.7812
화원고	25.17037	21.68791	1003.851	1003.754
대구일과고	24.97415	20.86044	999.9167	1000.000

[표 7] 기온과 기압과의 관계



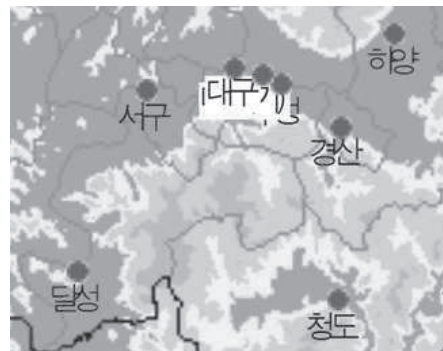
[그림 20] 기온과 기압과의 관계

## 6. 기상청 AWS자료를 통해 대구의 도시효과 검증

통합기상센서망을 통해 분석된 대구 도시효과의 결과와 마찬가지로 대구중심에서 멀어질수록 열섬강도가 커짐을 확인할 수 있었다. 그런데 [표 8]에서 대구 중심에서 먼 경산시와 달성군[그림 21]의 열섬 강도가 상당히 높게 나타났는데, 이를 통해 경산시와 달성군의 자체적인 도시효과가 나타남을 알 수 있었다.

	온도(℃)	열섬강도(H)
신암(기상청)	24.84	1.95
중리(기상청)	24.08	1.19
효목(기상청)	23.59	0.7
만촌(기상청)	23.49	0.6
경산(기상청)	24.05	1.19
달성(기상청)	24.07	1.18
대구일과학교등학교	22.89	0

[표 8] 지점별 온도, 습도, 기압, 열섬강도



[그림 21] 기상청 AWS 망

## V. 결론 및 제언

### 1. 결론

본 연구는 대구지역에서 8개 지점에 통합기상센서망을 구축하여 2014년 9월 5일부터 9월 11일까지, 12월 14일부터 16일까지를 사례기간으로 선정하여 기상요소들을 관측하여 열섬강도 및 평균 기온, 기압, 습도 분포 등을 분석하였다.

먼저 도심지역에 관한 선행연구를 조사하고 분석하였으며, 통합기상센서에서 관측하는 기상요소의 관측 원리를 이해하였다. 이를 기반으로 대구 전역에 통합기상센서를 설치하여 자료를 수집하였다.

연구에 사용된 자료는 강수가 없는 사례를 선정하였으며, 해당 기간 동안 자료의 이상을 확인하기 위해 시계열을 분석하였다. 또한 지도에 평균값을 표시하여 기상요소들의 공간분포를 확인하였으며, 대구지역에 열섬효과가 나타나는 것을 확인하였다. 가장 낮은 기온을 가진 지점을 통해 열섬강도를 계산하였고, 같은 방식으로 열섬강도의 공간분포를 확인하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 가. 강수가 없는 사례를 기상요소들의 공간분포를 확인을 통해 대구의 도시 효과에 의한 UHI가 나타나는 것을 확인하였다.
- 나. 주간과 야간을 나누어 분석하여 주간과 야간의 열섬 강도 차이를 분석한 결과 야간의 열섬 강도가 강함을 확인하였다.
- 다. 도시의 인공열 배출이 많은 하계에 비해 동계의 열섬 강도가 크다.
- 라. 도시의 열섬 효과와 기상요소의 상관성을 분석한 결과 분석 결과 기온과 습도가 가장 높은 상관관계를 보였고, 이를 통해 습도와 온도가 밀접한 연관이 있음을 확인하였다.

### 2. 제언

대구의 도시효과에 의한 열섬현상을 확인하였으나 왜 그런지 구체적인 요인은 제지하여 못하였다. 추후 도시의 어떤 특징에 의해 열섬이 발생하는지 구체적으로 분석할 것이다.

그리고 관측 기간이 짧아, 겨울철과 여름철의 자료만 분석하여 도시 열섬의 계절별 변동성에 대해 자세하게 분석하지 못하였다. 추후 지속적인 관측을 통해 봄과 가을철의 관측 자료도 수집하여 계절별 도시열섬 강도의 차이에 대해 연구할 것이다. 겨울과 여름의 열섬강도를 비교해 보았을 때 차이

가 있었는데, 봄과 가을의 열섬강도도 구해 보아서 풍속과 운량등 각 계절의 특징과 열섬강도의 상관관계를 분석해 볼 것이며, 열섬강도의 연변화를 관측해보고 그에 대한 특징을 파악해 볼 것이다.

## ■ 참고문헌

- [1] 구해정, 김연희, 최병철, 2007, 서울시 도시 열섬 구조의 변화에 관한 연구, 건국대학교 기후연구 2(2), 67-78.
- [2] 김경익, 민경덕, 윤일희, 1994, 대구 지역의 기상 특성 연구 및 대기 확산 모델의 개발Ⅱ. 도시 열섬 특성에 관한 사례 연구. 한국기상학회지, 30, 303-313.
- [3] 김보현, 이동인, 한영호, 1993, 부산지역 도심지의 열섬현상과 기온변화에 관한 연구. 한국기상학회지, 29(6), 94-101
- [4] 김유진, 2012, 서울 도시 열섬의 공간분포 및 열섬 강도 특성에 관한 연구
- [5] 박석봉, 2004, 광주지역의 여름철 열섬현상 측정 및 분석. 한국태양에너지학회지, 24, 65-75.
- [6] 허정훈, 2013, 친환경 열섬 완화 도로포장재를 사용한 도시 온도상승 억제효과에 관한 연구
- [7] Ackerman, B. (1985) Temporal March of the Chicago heat island, J. Appl. Meteorol., 24, 547-554.
- [8] Barry. R. G. & Chorle. R. J., 2002, 현대기후학, 이민부, 박병익, 강철성 역, 한올아카데미
- [9] Hwang, J.-W. and S.-C. Kim (2003) A Comparative Analysis on the Urban Heat Island by Residential Types, J. of Korea Planner A, 38(7), 235-244. (in Korean with English abstract)
- [10] Iain Stewart and Time Oke (2009) Classifying Urban climate field sites by "Local climate zones": The case of Nagano, Japan.
- [11] Jo, H.-K. and T.-W. Ahn (1999) Function of Microclimate Amelioration by Urban Greenspace, J. of Korean Inst. Lands. Arc., 27(4), 203-216. (in Korean with English abstract)
- [12] Lee, H.-J., K.-Y. Lee, G.M. Won, and H.W. Lee (2009) Application of the Latest Land Use Data for Numerical Simulation of Urban Thermal Environment in the Daegu, Korean J. of Atmos. Environ., 25(3), 196-210. (in Korean with English abstract)
- [13] Mackey, C.W., X. Lee, and R.B. Smith (2011) Remotely sensing the cooling effects of city scale efforts to reduce urban heat island, Building and Environment, doi:10.1016/j.buildenv.2011.08.004.
- [14] Oke, T.R. (1979) Review of urban climatology, 1973-1976, WMO Tech. note NO.169, World Meteorol. Organiz., p.100



### 심사평

본 연구는 학생들이 생활 속에서 느끼는 기상현상에 대해 기상장비인 자동기상관측시스템(AWS)을 이용한 자료 획득 및 분석을 통해 대기과학의 중요한 요소인 기온, 기압, 습도 등의 대한 상관관계를 조명하였다.

문제의 특성이 충분히 학생 수준에서 가질 수 있는 호기심에 기반을 두었고 학생들이 학습한 지식수준에서 과학적 가설을 설정하고 자료수집, 실험, 분석을 통해 검증하는 과정이 예비 과학자로서 소중한 탐구 경험을 했을 것이라 사려된다. 연구결과는 학문적 가치보다는 실제 생활문제를 과학적으로 탐구하였다는 것에서 의미를 찾을 수 있을 것이다. 다만 다른 연구들과의 비교라든지 본 연구결과와 학문적 중요성 등은 아직 충분한 문헌연구나 비교 연구 등을 파악하지 못한 학생들이라면 충분히 이해할 수 있을 듯 하다. R&E 프로그램의 취지에 가장 부합하는 연구논문이라 할 수 있다.

### 연구 후기

창의적인 주제라는 말을 듣고 생각보다 어리둥절했다. 처음에 이 주제를 접했을 때 과연 이게 창의적인 주제인가 하는 의문이 들었다. 하지만 조금씩 연구를 진행해 나가다보니, 우리의 연구주제가 가지는 의미를 점차 알아낼 수 있었다. '열섬효과 연구'라는 단순한 이름과 다르게 결코 단순한 주제가 아니라는 것을 느꼈다. 기본적인 배경지식들만을 가지고 우리가 직접 실험을 설계하고 직접 정보를 수집하고 직접 분석하는 과정에서 이 연구가 정말 우리들만의 연구라는 자신감을 가지게 되었다. 그런 자신감이 있었기에 좋은 결과를 얻게 되었고, 이 연구가 하나의 시발점이 되어 또 다른 우리들만의 연구에 도움이 되기를 바란다.

### 연구진

공광조(Gong Gwangjo, 대구일과학고등학교 1학년, flerika\_kg@naver.com), 교신저자  
권혁규(Kwon Hyukkyu, 대구일과학고등학교 1학년, hkok0922@naver.com)  
김강찬(Kim Kangchan, 대구일과학고등학교 1학년, kgc7890@naver.com)  
김원중(Kim Wonjong, 대구일과학고등학교 1학년, wwjj2231@naver.com)  
서상교(Seo Sanggyo, 대구일과학고등학교 1학년, ssk7808@naver.com)

지도교사 : 백명희(Baek Myunghee, 대구일과학고등학교, 전공: 대기과학, 97donggle@hanmail.net)  
지도교수 : 이규원(Lee Gyuwon, 경북대학교 천문대기과학과, gyuwon@knu.ac.kr)

(2015. 1월 현재)

## 대기 중 미세먼지 농도와 별의 밝기변화에 대한 정량적 연구 (Quantitative study about atmospheric fine dust concentration & brightness of a star variety)

박준범 · 박효선 · 이지영 · 한효근(강원과학고등학교)

### 초 록

중국 발 미세먼지는 봄이나 겨울과 같이 서풍이 부는 계절에 우리나라에 영향을 준다. 대기 질 악화는 물론이고, 호흡기 계통에 질병을 유발하기도 하며, 맑은 날씨에도 청명한 하늘을 볼 수 없어 삶의 질을 떨어트리며, 외부 활동에 많은 제약을 준다. 특히 미세먼지에 의한 대기 질 악화는 시정을 나쁘게 하며, 이는 야간에 천체관측 활동에도 악영향을 미치는 것이 사실이다.

미세먼지로 인해 시정이 나빠져 별의 밝기가 감소한다면 얼마나 감소하는지를 정확한 수치를 통해 정량화하고자 하였고, 이를 알아보기 위해 소광계수를 활용하기로 하였다. 소광계수는 별이 동쪽에서 떠올라 천정에 도달할 때까지, 또는 천정에서 서쪽으로 향할 때까지 별의 기기등급(또는 겉보기 등급)을 일정시간간격으로 측광한 뒤, 투과 대기량과 기기등급(또는 겉보기 등급)간의 관계를 통해 구할 수 있다. 소광계수는 대기의 상태에 따라 다른 값을 보이기 때문에, 가급적 최대한 많은 날 소광계수를 구하고, 온도, 습도, 풍속 등은 비슷하면서 미세먼지 농도만 다른 날의 소광계수만을 서로 비교하여, 미세먼지 농도와 소광계수간에 어떠한 정량적 관계가 있는지를 찾아내고자 하였다.

9월부터 12월까지 관측을 실시하면서, 미세먼지농도가 증가할 때 소광계수가 1차함수적으로 증가한다는 유의미한 결론을 얻었다. 이와 관련된 연구를 더욱 체계적으로 실시하여, 미세먼지가 많은 날 별의 등급을 보정할 수 있는 보편적인 보정 방정식을 만드는 것이 최종 목표이다.

키워드 : 미세먼지, 소광계수, 기기등급, 겉보기등급, 투과 대기량

## I. 서론

중국의 경제 발달과 산업화로 인해 중국 현지의 미세먼지에 의한 대기 오염이 날로 심각해 지고 있다. 현지에서 발생하는 각종 스모그와, 이로 인한 호흡기 질환 등 각종 기관지 계통의 질병 역시 큰 문제로 제기되고 있다. 중국 당국은 이를 인지하고, 이에 대한 해결책을 마련하고는 있으나, 쉽

게 해결되기는 어려운 것이 사실이다. 이와 같은 문제는 한반도에도 큰 영향을 미치고 있다. 겨울이나 봄철 등 주로 서풍이 부는 계절에 중국발 미세먼지가 한반도를 위협하고 있으며, 우리나라도 작년과 재작년에 이에 의한 피해가 매우 컸다. 특히 미세먼지에 포함된 각종 중금속과 독성물질들은 인체에 매우 치명적이라는 것은 잘 알려진 사실이다. (Park, E. J. (2007). Health risk assessment of fine particles and their hazardous chemicals, Dong-duk girl's university, Seoul) 이에 우리나라에서는 기상예보를 하면서 동시에 미세먼지 농도에 대한 예보 역시 병행하기 시작하였다. 또한 전국의 주요시도 단위로만 실시하던 예보시스템을 개편하여 전국의 수십여개 시, 군단위로 예보지역을 세분화 하였다. 이렇듯 중국발 미세먼지는 단순히 중국만의 문제가 아니고, 우리나라에서도 크나큰 문제로 제기되고 있는 만큼 이에 대한 대비를 철저히 해야 할 필요가 있다.

뿐만 아니라 미세먼지로 인해 시정이 악화되는 경우도 발생하는데, 이는 천체 관측활동에도 영향을 줄 것이 자명한 사실이다. 천체관측을 취미로 하는 일반인뿐만 아니라, 전문 연구기관에도 좋지 않은 영향을 줄 수 있다. 때문에 우리는 미세먼지가 별의 밝기에 어떠한 영향을 주는지를 소광계수의 변화를 이용해 정량적으로 알아보고자 하였다. 소광계수는 대기의 상태에 따라 달라지는 값이다. 이같은 소광계수의 특성을 이용하여 가급적 많은 날 측광을 통해 소광계수를 결정하고, 대기의 다른 물리조건이 동일하고 미세먼지 농도만 다른 날을 찾아 소광계수에 어떠한 변화가 발생하는지를 분석하면 미세먼지와 별의 밝기간의 상관관계를 체계적으로 분석할 수 있을 것이다.

## II. 이론적 배경

### 1. 미세먼지

미세먼지(PM)란 아황산가스, 질소 산화물, 납, 오존, 일산화탄소 등 수많은 대기오염물질을 포함하는 대기오염 물질로 자동차, 공장 등에서 발생하여 대기 중에 장기간 떠다니는  $10\mu\text{m}$  이하의 미세한 먼지이며, PM10이라 한다. 입자가  $2.5\mu\text{m}$  이하인 경우는 PM 2.5라고 쓰며 '초미세먼지' 또는 '극미세먼지' 라고 부른다. 학술적으로는 에어로졸이라고도 부른다.

미세먼지는 인체에 큰 영향을 미치는 물질이다. 1948년 미국 펜실베이니아주 도노라에서 20명이 사망한 대기오염사고, 1952년 약 4000명의 사망자를 발생시킨 런던스모그는 미세먼지가 인체에 어떤 영향을 미치는지 보여주는 대표적인 사례이다. 그 이후로 미세먼지가 인체에 미치는 영향에 대한 다양한 역학 조사가 실시되었고, 특히  $10\mu\text{m}$  이하의 미세먼지 입자가 취약 집단의 질병 발생률

과 사망률을 높이는 등 인체에 해로운 영향을 미칠 가능성이 높다는 것이 밝혀졌다. 이러한 연구결과가 나온 이후 각국 정부에서는 대기오염 대책을 마련하기 시작했으며 미세먼지가 인체와 환경에 미치는 해로운 영향을 줄이기 위해 대기오염 기준도 마련하였다.

미세먼지의 배출원은 인위적인 발생과 자연적인 발생으로 구분된다. 자연발생원은 모래바람의 먼지, 화산재, 산불에 의해 발생하는 먼지 등이다. 해염입자 또한 바다 가까이에 위치한 지역에는 많은 영향을 미친다.

사람의 폐포까지 깊숙하게 침투해 기관지와 폐에 쌓인 미세먼지는 각종 호흡기 질환의 직접 원인이 되며 몸의 면역 기능을 떨어뜨린다. 천식과 호흡곤란을 일으키며 장거리 이동으로 비 또는 눈 속의 중금속 농도를 증가시키기도 한다. 또한 대기 중에 부유하면서 빛을 흡수, 산란시키기 때문에 시야를 악화시키기도 하고, 식물의 잎 표면에 쌓여 광합성 동화작용, 호흡작용과 증산작용 등을 저해하여 식물 성장에도 나쁜 영향을 미친다. (반기성, 케이웨더기후산업 연구소장, 미세먼지, 2014.2.14. from

[http://navercast.naver.com/contents.nhn?rid=116&contents\\_id=49005](http://navercast.naver.com/contents.nhn?rid=116&contents_id=49005); 위키백과, from

<http://ko.wikipedia.org/wiki/%EB%AF%B8%EC%84%B8%EB%A8%BC%EC%A7%80>)

## 2. 소광

소광이란 전자기파를 방출하는 천체와 관측자 사이의 어떠한 물질들에 의해 빛의 세기가 약해지는 현상이다. 별빛은 관측자에게 도달할 때까지 성간물질과 대기에 의해 빛이 약해진다. 대기 바깥, 즉 우주 공간에서의  $F$  (플럭스)를  $F_{\lambda_0}$ 라 하고, 대기를 뚫고 관측자에게 도달한  $F$ 를  $F_{\lambda}$ 라 할 때, 대기에 의해 감소한 플럭스는  $dF_{\lambda} = F_{\lambda_0} \times (-\alpha \cdot dr)$ 로 나타낸다. 여기서  $\alpha$ 는 대기의 불투명도이고,  $-\alpha \cdot dr$ 은 광학적 두께  $d\tau$ 로 정의한다.  $dr$  동안  $dF$  만큼 빛이 약해지면,  $r$  만큼의 거리에서는  $F$  만큼의 빛이 최종적으로 도달하게 된다. 이는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\int_{F_{\lambda_0}}^{F_{\lambda}} \frac{dF_{\lambda}}{F_{\lambda}} = \int_0^r (-\alpha \cdot dr)$$

$$\frac{F_{\lambda}}{F_{\lambda_0}} = \exp[-\alpha \cdot dr] = \exp[-\tau]$$

$$F_{\lambda} = F_{\lambda_0} \times \exp[-\tau]$$

(Michael, Zeilik & Stephen, A. Gregory(2010), 천문학 및 천체물리학(강혜성, 윤홍식, 이상각, 최승언, 한정준, 홍승수) 시그마프레스(2010.03.05.))

### 3. 대기소광계수(atmospheric extinction coefficient)

지구 표면을 평면이라 가정하고, 천정거리를  $z$ 라고 하자. 수직 대기층의 단위 길이를 1로 놓으면, 빛이 대기를 투과한 거리  $X$ 는  $X = \frac{1}{\cos z} = \sec z$  이다.  $X$ 를 투과 대기량이라 하는데, 천체의 밝기 등급  $m$ 은  $X$ 에 대해 선형적으로 증가한다. Bemporad 공식을 사용하면 천정거리에 따른, 대기의 곡률을 고려한 투과 대기량을 구해낼 수 있다. 수식을 쓰면 다음과 같다.

$$X_{(z)} = \sec(z) - 0.0018167(\sec z - 1) - 0.002875(\sec z - 1)^2 - 0.0008083(\sec z - 1)^3$$

$\sec z$ 를 구하기 위해서 다음과 같은 식을 이용한다.

$$\sec z = \frac{1}{\sin(\phi)\sin(\delta) + \cos(\phi)\cos(\delta)\cos(H)} \quad (\phi : \text{관측지 위도}, \delta : \text{관측별 적위}, H : \text{시간각})$$

$k$ 로 나타내는 대기소광계수는 관측하는 당일의 대기 특성을 나타내며, 이를 알아야 대기소광보정을 거쳐 지구 대기 바깥에서의 천체 밝기를 알 수 있게 된다. 대기소광계수를 구하기 위해서는, 천체를 시간에 따라 측광한 데이터를 투과 대기량에 대한 기기 등급 또는 겉보기 등급 그래프로 나타낸다. 이 그래프는 일차함수 형태로, 이 때 직선의 기울기가 곧 대기소광계수  $k$ 이다. 예를 들어, 날씨가 매우 좋은 날에는  $k$ 가 0.1~0.3 정도, 구름이 약하게 깔려 있으면  $k$ 가 0.4~0.5 정도, 구름이 어느 정도 깔려 있는 상태에서 별이 보일 정도이면  $k$ 가 0.6~0.8까지 나오기도 한다. (김희수(2004.03.10.), 관측천문학, 북스힐)

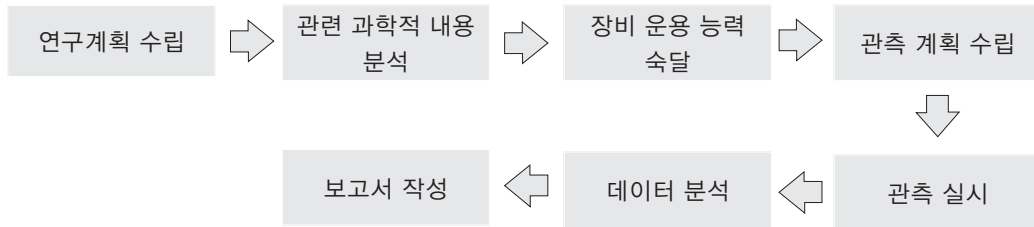
### 4. 구경 측광

측광을 위해 사용한 MaxIm DL 프로그램은 구경 측광법으로 별빛의 양을 측정한다. 구경 측광이란 이미지 상에서 관측된 별 이미지 보다 큰 구경을 설정하고 그 안에 들어오는 빛의 광량을 더하여 별의 등급을 구하는 과정으로 충분히 분해되어 독립적으로 존재하는 별일 때 측광이 가능하다. MaxIm DL 프로그램에서 사용되는 구경은 Aperture, Gap, Annulus가 있다. Aperture는 관측하고자 하는 천체의 영역을 정하는 것으로 2~20단계의 크기로 설정할 수 있고, Gap은 이미지의 베드픽셀이나 기타 이미지에서 배제해야 할 것이 있을 시에 사용하며 0~10단계로 크기를 설정할 수 있다. Annulus는 Gap을 사용한 후에 바깥쪽의 배경 이미지의 광량을 계산할 때 사용하는 것으로 1~12단계의 크기로 설정할 수 있다. 이 3가지 원으로 측광 대상에 적당한 구경을 지정하여야 보다 정확한 측광을 할 수 있다. 일반적으로 관측 대상의 반지름(FWHM, Full Width at Half Maximum)의 2~3배 정도의 범위를 측광 하는데 본 연구의 경우 Aperture의 값을 최대로 한 20의 경우도 대부분의 측광 대상의 2배가 넘지 않으므로 Aperture의 값을 20으로 설정하고 Gap, Annulus 값을 20, 9로 하여 측광을 하였다. (권석민(personal communication, July 22, 2014))

## Ⅲ. 연구 과정

### 1. 연구절차 및 방법

미세먼지와 별빛의 밝기 변화에 대한 정량적인 데이터를 얻기 위해 구체적이고 체계적인 실험 실시 계획을 수립하였고, 이는 아래와 같다.



#### 1.1. 연구 계획 수립

미세먼지가 별 빛의 밝기에 어떠한 영향을 주는지 정량적인 분석을 실시하기 위해, 앞으로 어떤 과정으로 연구를 실시할지에 대하여 계획을 수립하였다.

#### 1.2. 관련 과학적 내용 분석

미세먼지와 별빛의 밝기 변화와 관련된 과학적 내용을 파악하였다. 천문학 분야에서 복사전달과정, 대기소광, 별의 등급 및 색지수, 좌표계의 기본 원리 등이 필요하였고, 이에 대하여 우선적인 학습을 실시함은 물론, 강원대학교 과학교육학부 천문학 담당 교수인 권석민 교수에게 지도를 받기로 하였다. 관측 및 측광 분야에서 구경 합성의 원리, 히스토그램의 원리 등을 학습하고, 마찬가지로 권석민 교수로부터 자문을 얻기로 하였다.

#### 1.3. 장비 운용능력 숙달

연구의 실시에 앞서 별을 측광하고 이 데이터를 분석하는데 필요한 천체 장비의 운용방법을 숙지해야 할 필요성이 있어 이에 대하여 학습하기로 하였다. 필요한 장비의 목록은 아래와 같다.

유형	장비의 종류	비고
관측장비	적도의	takahashi temma 2 NJP
	경통	11in 반사 망원경
	가이드 경통	kenko 80mm 굴절 망원경
프로그램	CCD 제어 및 측광 프로그램	Maxim DL
	적도의 제어 프로그램	The sky
	가이드 CCD 제어 프로그램	Orion star shoot auto guide
촬영장비	DSLR	Canon 600D
	CCD	SBIC ST-11000
기타장비	풍속, 온도, 습도 측정계	VT-50
	미세먼지 측정장치	HAT 200

#### 1.4. 관측 계획 수립

미세먼지 농도에 따른 별의 밝기변화에 대한 정량적인 데이터 확보를 위해 여러 날 동안 하나의 별 또는 성단에 대한 측광을 실시하기로 계획하였다. 이를 위해 관측 대상 결정, 관측 가능 시각 또는 날짜 등을 결정해야 하며 이는 아래와 같다.

##### (1) 관측 대상 선정 조건

- (가) 겉보기 등급이 6등급보다 어두운 별이어야 한다.
- (나) 가급적 천정을 통과하는 별 이어야 한다.
- (다) 성단을 이용할 경우, 측광에 용이하도록 산개성단을 이용하여 측광을 실시한다.
- (라) 관측을 실시하는 시각에 동쪽 하늘에 뜨기 시작하는 별이어야 한다.

##### (2) 관측 가능 시각 또는 날짜

- (가) 관측 대상이 동쪽하늘에서 천정 부근을 향하는 동안 달이 떠 있는 날짜는 피한다.
- (나) 상대습도가 높은 날은 가급적 관측을 실시하지 않는다.
- (다) 그 밖에 흐린 날을 제외하고, 가급적 맑은 날 동안 관측을 실시한다

#### 1.5. 관측 실시

관측 대상을 결정한 후 아래와 같은 방법으로 관측을 실시하고자 하였다.

- (1) 관측 대상이 동쪽 하늘에서 뜬 이후부터 천정에 도달할 때 까지 15분 간격으로 촬영한다.
- (2) 촬영 하는 시간의 풍속, 상대습도, 미세먼지 농도를 측정하고 이를 엑셀에 기록한다.
- (3) 촬영이 끝난 뒤 Maxim DL 프로그램을 이용해 측광을 실시한다.

### 1.6. 데이터 분석

여러 날 동안 측광한 데이터는 아래와 같은 방법으로 분석한다.

- (1) Maxim DL을 이용해 측광을 실시하며, 구경측광의 원리를 이용한다.
- (2) 측광 데이터는 엑셀을 이용해 정리한다.
- (3) 천정거리에 따른 기기등급의 변화에 대한 그래프를 산출하고, 소광계수를 결정한다.
- (4) 관측을 실시한 모든 날짜에 대하여 위와 같은 과정을 통해 소광계수를 결정하고, 풍속, 상대 습도를 통제변인으로 하여, 미세먼지가 서로 다른 날에 대하여 소광계수를 비교한다.

### 1.7. 보고서 작성

실험 결과를 정리하여 보고서를 작성한다.

## 2. 연구에 사용된 장비 및 프로그램

본 연구를 실시하기 위해 다음과 같은 장비를 이용 하였다.

### 2.1. Canon EOS 600D

항성에 대한 이미지 자료 획득 및 측광을 위해 Canon EOS 600D를 이용했다.



▲ Canon EOS 600D

Canon EOS 600D	
이미징 센서	APS-C CMOS 센서
센서 크기	22.2mm × 14.8mm
유효 화소 수	1010만 화소
해상도(L)	3888 × 2592
용량	RAW12.4M, JPEG3.5M
ISO	100~3200

[그림 1] Canon EOS 600D의 재원

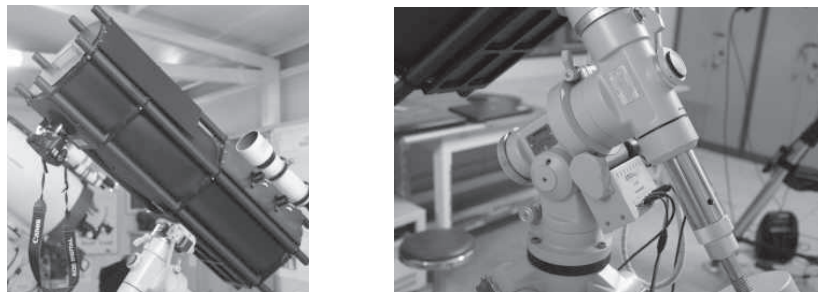
### 2.2. 천체망원경과 적도의

항성 관측 및 측광에 사용할 망원경과 적도의로 10in 반사망원경과 Takahashi Temma2 NJP 적도의를 이용하였다.



10in 반사망원경.		Takahashi Temma2 NJP	
대물렌즈	10in	탑재 중량	30kg
초점거리	300mm(f/4)	웜기어	적경 240:1, 적위 144:1
분해능	0.58초	구동 모터	스테핑 모터
한계등급	13.3등급	구동 속도	12V 175배, 24V 350배
집광력	816배	제어방식	컴퓨터 제어 프로그램
집광방식	뉴턴식	극축망원경	내장(명시야 조명)
경통무게	25kg	전원	DC12V, 24V

[그림 2] 천체 망원경과 가대의 제원



[그림 3] 본 연구에 사용된 반사망원경과 가대

### 2.3. 미세먼지 측정 장치

관측 당시의 미세먼지 농도를 측정하기 위하여 미세먼지 농도 측정 장치를 사용하였다. 또한 측정된 미세먼지 농도 값의 신뢰도를 높이기 위해, 국립 대기환경과학원에서 제공하는 실시간 관측 자료를 함께 이용하였다.



미세먼지 측정 장치(HAT200)	
원리	light scattering method
광원	Laser diode
측정범위	0~500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
디스플레이 단위	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
샘플링 시간	60sec
전원	충전식 리튬 이온배터리, AC 아답터
배터리 동작시간	3시간 이상

[그림 4] 미세먼지 측정 장치와 제원

#### 2.4. 온·습도 및 풍속 측정 장치

관측 및 측광에서 미세먼지 이외의 대기요소는 모두 통제변인으로 두어야 하기 때문에 온도, 습도, 풍속 등에 대한 정보를 알아 두어야 할 필요가 있을 것으로 판단, 온·습도 및 풍속 측정 장치를 사용하여 온도, 습도, 풍속 등을 측정하였다.

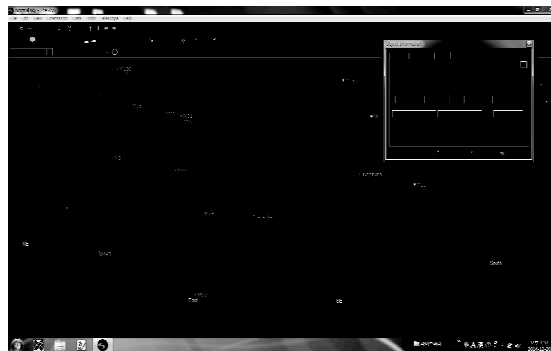


온·습도 및 풍속 측정 장치(VT-50)	
풍속 측정범위	0~30m/s
온도 측정범위	-20~80℃
해상도	0.01m/s, 0.1℃
전원	9V 배터리

[그림 5] 온·습도 및 풍속 측정 장치와 제원

#### 2.5. The sky

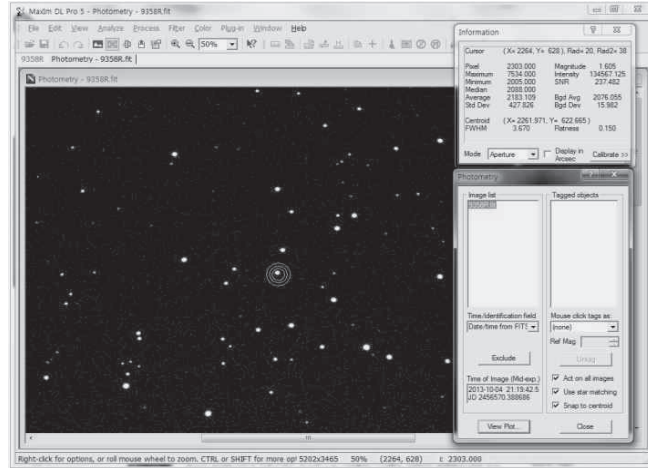
사용할 가대에는 천체를 찾을 수 있는 go to기능이 없다. 때문에 관측 대상을 정확하게 찾고 추적하기 위해, 성도 프로그램인 The Sky와 가대를 연동하여 관측을 하였다. (김희수(2010). 천체관측(2판). 시그마프레스)



[그림 6] The Sky 6

#### 2.6. Maxim DL

MaxIm DL은 Diffraction Limited 사의 CCD제어 및 이미지처리 소프트웨어이다. MaxIm DL을 활용하여 DSLR카메라로 촬영한 RAW형식의 이미지 파일을 mono의 형태로 처리하였고, 처리한 파일을 photometry기능을 사용하여 측광 하였다. RAW형식의 이미지 파일을 읽기 위해 Maxim DL 5.0 버전을 사용하였다. (김희수(2010). 천체관측(2판). 시그마프레스)



[그림 7] Maxim DL 프로그램

## 2.7. Stellarium

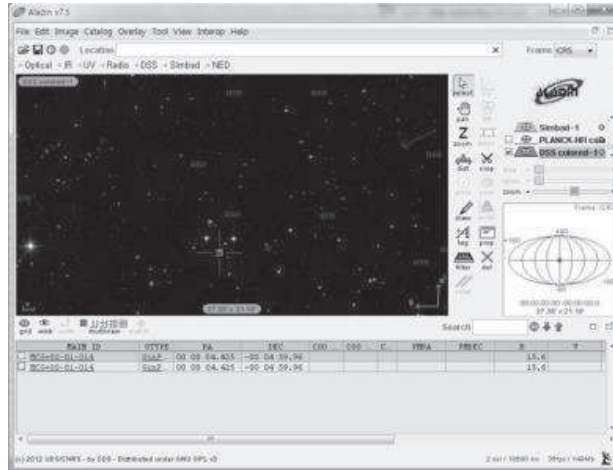
The sky와 같은 성도프로그램이다. 시간대 별로 언제 뜨고 지는지 알 수 있어 어떤 대상을 측광할지 선정할 때에 많이 사용하였으며 적경, 적위와 절대 등급, 겉보기 등급을 알 수 있었다. 이 프로그램을 통해 NGC 956과 NGC 1778을 선정하게 되었다.



[그림 8] Stellarium

## 2.8. Aladin

Aladin은 별에 대한 정보가 담겨 있는 프로그램이다. 주로 비교성을 찾을 때 별에 대한 정보를 얻기 위하여 사용을 하였고, Sync 과정에서 망원경으로 찍은 사진과 실제 그 대상이 일치하는지 여부를 파악하기 위해 사용하였다.



[그림 9] Aladin 프로그램

### 3. 천체 관측 과정

#### 3.1. 파인더 정렬

파인더와 경통이 보고 있는 시야를 맞추는 과정을 파인더 정렬이라고 한다. 관측을 하기 전, 밝은 천체나 사물을 경통으로 맞춘 후 파인더로 보아 십자선의 중앙에 대상이 위치하도록 한다. 대상이 올바르게 위치한다면 파인더를 통하여 대상을 찾으면 경통과 가리키는 방향이 일치하게 되어 원활한 관측이 가능해진다.

#### 3.2. 카메라의 초점 맞추기

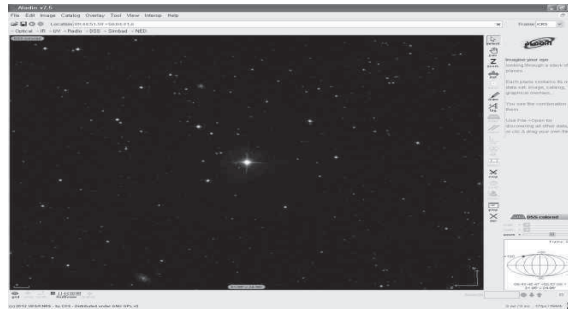
초점이 맞은 것은 상이 가장 작고 또렷해 질 때를 말한다. 파인더를 통하여 대상을 맞춘 후 카메라의 라이브 뷰 기능을 이용하여 초점을 맞춘다.

#### 3.3. 관측 대상 찾기

관측 대상을 찾기 위해서는 우선 망원경과 성도 프로그램을 Align 해야 한다. Align을 위해 우선 망원경을 사용하여 주변에서 볼 수 있는 밝은 별을 찾아 카메라의 센터에 그 별이 들어오도록 한다. 밝은 별이 사진의 거의 가운데에 관측이 되게 되면 성도프로그램에서 현재 촬영하고 있는 밝은 별을 찾아 'Sync'를 시키게 되면 망원경이 현재 보고 있는 대상과 천문 프로그램이 가리키고 있는 대상이 일치하게 되고 이제 천문프로그램을 사용하여 원하는 대상으로 망원경을 이동 시킬 수 있게 된다.

### 3.4. FOV(Field of view) 확인

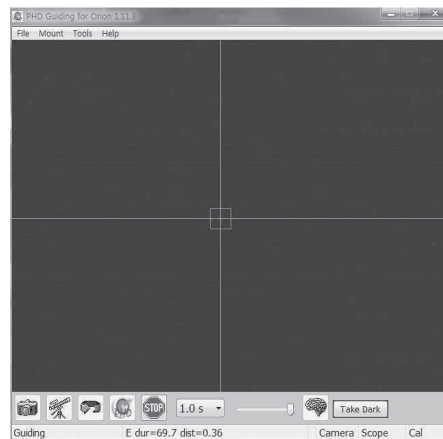
싱크 후 The sky를 통해 망원경을 이동시키면서 정확한 위치를 가리키는지 확인을 하는 과정을 FOV 확인 이라고 한다. 먼저 원하는 대상으로 망원경을 이동시키고 Aladin을 이용해 그 화각이 원하는 대상을 가리키는지 확인해 본다. 이 과정에서 화각과 대상이 일치하지 않는다면 sync를 다시 해야한다.



[그림 10] Aladin을 통한 화각 확인과정

### 3.5. auto guiding

촬영 대상이 FOV에 들어온 것을 확인하였으면, 적도의의 추적오차를 줄이기 위해 auto guiding을 실시한다. auto guiding을 통해 카메라의 화각에서 관측 대상이 벗어나지 않고, 관측 오차를 최소화 할 수 있다.



[그림 11] PHD autoguiding

### 3.6. 적정 노출 시간 설정

촬영 대상의 겉보기 등급이 상대적으로 어두운 별이기 때문에 적정시간 노출을 주어야 별이 사진상에 표시가 되어 Maxim DL5를 통하여 측광이 가능하다. 이 때, 사진은 너무 밝지도, 너무 어둡

지도 알아야 한다. 적정 노출시간을 알기 위해서 카메라의 노출 시간과 ISO를 바꿔가며 촬영을 하였다. ISO 1600에 노출시간은 15초 정도가 적당 하였다. 적정 노출 시간을 파악한 후 ‘인터벌 릴리즈’를 이용하여 노출 시간, 촬영 간격, 촬영 매수 등을 인터벌 릴리즈에 입력한다.

### 3.7. 촬영 간격 결정 및 촬영 실시

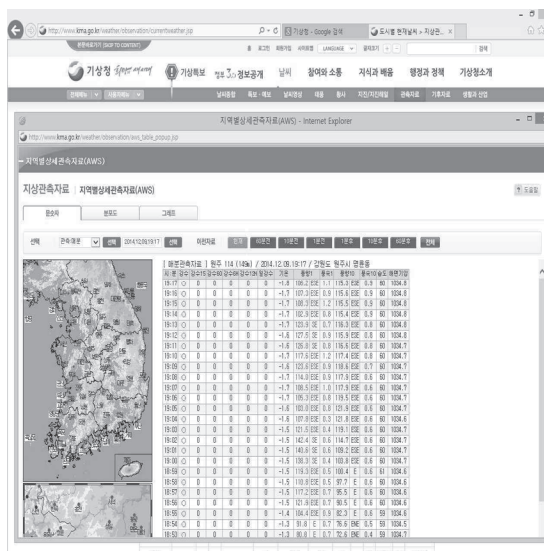
측광 대상이 동쪽 하늘에서 떠올라 천정 까지 이동하는 과정을 측광하거나, 반대로 천정에서 서쪽으로 이동하는 모든 과정을 측광해야 한다. 본교의 특성상 서쪽하늘은 상대적으로 시야가 잘 확보되어 있으나 원주 시내에 의한 광공해가 심하며, 동쪽하늘은 광공해에 의한 영향은 적으나 산의 영향으로 고도 약 20° 내에서 시야 확보가 어렵다는 단점이 있다. 측광 데이터의 신뢰도를 확보하기 위하여, 동쪽하늘에서 천정으로 이동하는 동안 15분 간격으로 촬영을 실시하였다.

### 3.8. 대기 상태 분석

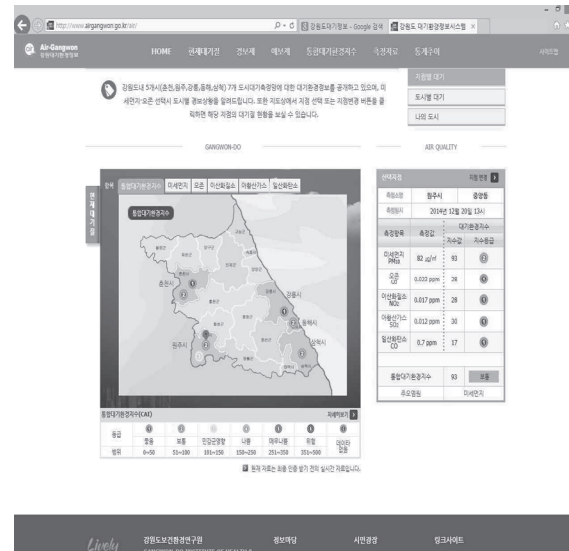
촬영을 실시한 시간의 미세먼지 농도를 알아야 하기 때문에, 촬영이 실시되는 시간에 맞추어 미세먼지 농도를 측정하였다. 이 때, 미세먼지 측정 장치의 오작동에 의한 데이터 오류를 최소화하기 위해 국립 대기 환경 과학원에서 지역별로 실시간으로 제공하는 미세먼지 측정 데이터를 함께 이용하였고, 우리가 측정한 미세먼지 농도와 함께 비교하였다.

또한 미세먼지 이외에 온도, 습도, 풍속 등은 통제변인으로 두어야 하기 때문에, 이를 함께 측정하여 측광데이터와 함께 기록하였다. (강원도보존환경연구원(2014년 상시자료, from

<http://blog.naver.com/eju5782/220312024999>, 에어코리아(2014년 상시자료, from <http://www.airkorea.or.kr/>)



[그림 12] 기상청 원주지역 지상관측자료



[그림 13] 강원도 대기환경정보시스템 미세먼지 농도 자료

촬영이 모두 끝난 뒤에는, 관측 대상의 모든 별의 기기등급을 측광하여야 한다. 이때에는 Maxim DL 5를 사용한다. Maxim DL 5의 photometry기능을 이용하여 별의 기기등급을 측광한다.



Maxim DL 5로 각 각 사진들의 기기등급을 측광하였으면 데이터를 분석하여 별의 고도별 기기 등급의 변화곡선을 구해 내야 한다. 이 때 사용하는 프로그램이 Excel이다. Excel에는 대상을 찍은 시간, 촬영시 각의 미세먼지 농도, 온도, 습도, 풍속 등을 기록하여야 한다.

[그림 15] excel을 이용한 데이터 정리 과정

## IV. 연구 결과

### 1. 연구 결과

2014년 10월부터 12월 까지 총 10회의 관측을 실시하였다. 10월 관측 기간 동안은 NGC956에 대한 측광을 통해 연구를 실시하였고, 12월 관측 기간 동안은 NGC1778에 대한 측광을 통해 연구를 실시하였다. 그 밖의 날짜에 대해서는 달의 밝기, 기상 조건 등에 의해 관측을 실시할 수 없었고, 그 외에도 학사 일정, 학교 교육프로그램 진행 등의 이유로 관측을 실시할 수 없었다. 또한, 관측 및 측광을 실시한 날 중에서도 상대습도가 높거나 안개가 끼는 날에는 신뢰도가 높은 데이터를 얻기 어려웠다.

관측 실시일자	측광 대상	측광대상 정보
2014.10.16.	NGC 956	· 유형 : 산개성단 · 겉보기 등급 : 9.0 · 적경/적위 : 2h33m22s/44° 42'22"
2014.10.22.		
2014.10.23.		
2014.10.24.		
2014.10.27.		
2014.10.28.		
2014.10.29.		
2014.12.09.	NGC 1778	· 유형 : 산개성단 · 겉보기 등급 : 7.7 · 적경/적위 : 5h9m7s/37° 5'7"
2014.12.18.		
2014.12.29.		

[표 1] 관측 실시 일자와 측광 대상



[그림 16] NGC956 중 측광을 실시한 별



[그림 17] NGC1778 중 측광을 실시한 별



## 1.1. 10월 23일 NGC 956의 기기등급 측광 결과

## (1) NGC 956의 측광 결과

관측시각	1번별	2번별	3번별	4번별	5번별	6번별	7번별	시간각(H, rad)	천정거리(secZ)	투과대기량(X)
19:17	-3.044	-3.179	-2.5	-2.478	-2.147	-2.581	-3.02	1.474803	2.078026	2.071714
19:32	-2.949	-3.059	-2.377	-2.357	-2.04	-2.405	-2.9	1.409353	1.930973	1.926138
19:47	-3.07	-3.175	-2.505	-2.48	-2.116	-2.494	-2.976	1.33954	1.796841	1.793159
20:02	-3.096	-3.208	-2.541	-2.467	-2.158	-2.486	-3.018	1.27409	1.688603	1.685725
20:17	-3.124	-3.217	-2.544	-2.468	-2.15	-2.427	-3.009	1.217367	1.606282	1.603943
20:32	-3.106	-3.209	-2.524	-2.465	-2.141	-2.447	-3.014	1.151917	1.522561	1.520711
20:47	-3.125	-3.2	-2.52	-2.473	-2.128	-2.428	-2.933	1.086467	1.449198	1.447728
21:02	-3.156	-3.236	-2.548	-2.503	-2.155	-2.456	-3.005	1.021017	1.384735	1.383565
21:17	-3.147	-3.241	-2.566	-2.483	-2.163	-2.469	-3.05	0.955568	1.327988	1.327054
21:32	-3.06	-3.192	-2.531	-2.469	-2.154	-2.437	-3.03	0.890118	1.277983	1.277239
21:48	-2.889	-3.056	-2.391	-2.323	-2.035	-2.326	-2.971	0.824668	1.233921	1.233328
22:03	-2.563	-2.815	-2.091	-2.106	-1.773	-2.333	-2.879	0.759218	1.195136	1.194666
22:18	-2.464	-2.707	-2	-2	-1.643	-2.069	-2.735	0.693768	1.161074	1.160703
22:33	-2.38	-2.637	-1.897	-1.925	-1.57	-2.06	-2.686	0.623955	1.12943	1.129145
22:48	-2.186	-2.441	-1.69	-1.756	-1.367	-2.052	-2.537	0.549779	1.100603	1.10039
23:03	-2.069	-2.313	-1.567	-1.649	-1.244	-1.94	-2.415	0.484329	1.078912	1.07875
23:18	-1.934	-2.193	-1.428	-1.489	-1.102	-1.809	-2.271	0.418879	1.06046	1.06034
23:33	-1.763	-2.008	-1.264	-1.342	-0.935	-1.656	-2.101	0.353429	1.045036	1.044949

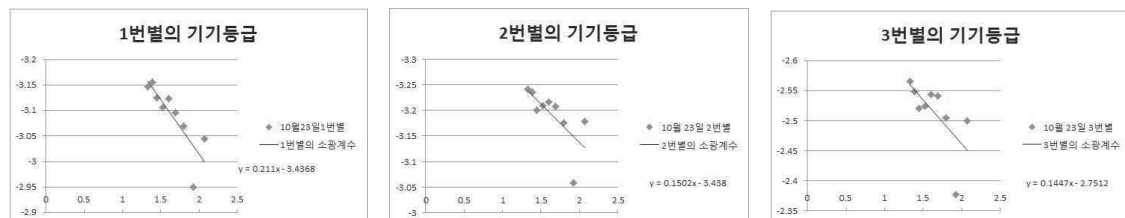
[표 2] 10월 23일 NGC 956의 측광 결과

## (2) 관측 당시 기상 상태

평균 미세먼지 농도( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	평균 온도( $^{\circ}\text{C}$ )	평균 상대습도(%)	평균 풍속(m/s)
35	10.5	87.05	0.36

[표 3] 10월 23일 관측 당시 기상 상태

## (3) 측광 결과와 소광계수



[그림 18] NGC 956의 대기 투과량 과 기기등급(x축 : 대기 투과량, y축 : 기기등급)

	1번별	2번별	3번별
소광계수	0.211	0.150	0.145
평균 소광계수	0.169		

[표 4] 10월 23일 평균 소광계수

※ 10월 23일 4,5,6,7번 별의 측광 정보는 소광계수가 음수로 계산되어 관측 자료로 쓰기 부적합 하였음.

## 1.2. 10월 28일 NGC 956의 기기등급 측광 결과

### (1) NGC 956의 측광 결과

관측시각	1번별	2번별	3번별	4번별	5번별	6번별	7번별	시간각(H, rad)	천정거리(secZ)	투과대기량(X)
19:36PM	-3.269	-3.446	-2.828	-2.848	-2.536	-3.036	-3.434	1.304633	1.737207	1.733981
20:11PM	-3.306	-3.499	-2.883	-2.955	-2.59	-3.18	-3.532	1.151917	1.522561	1.520711
20:27PM	측광 불가	-3.544	-2.899	-2.931	-2.583	-3.186	-3.56	1.082104	1.444638	1.443191
20:42PM		-3.543	-2.905	-2.951	-2.6	-3.197	-3.579	1.016654	1.380724	1.379571
20:57PM	이 후 시간 기상악화로 측광 불가									

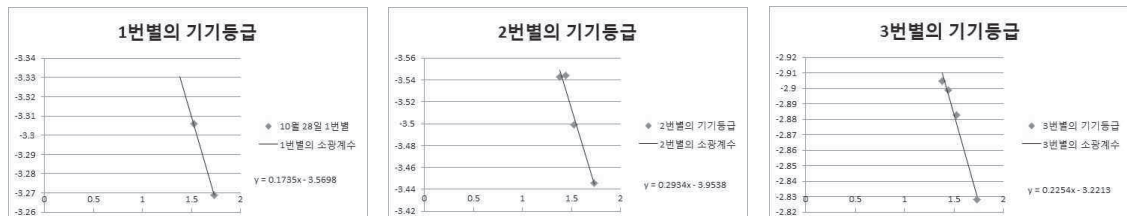
[표 5] 10월 28일 NGC 956의 측광 결과

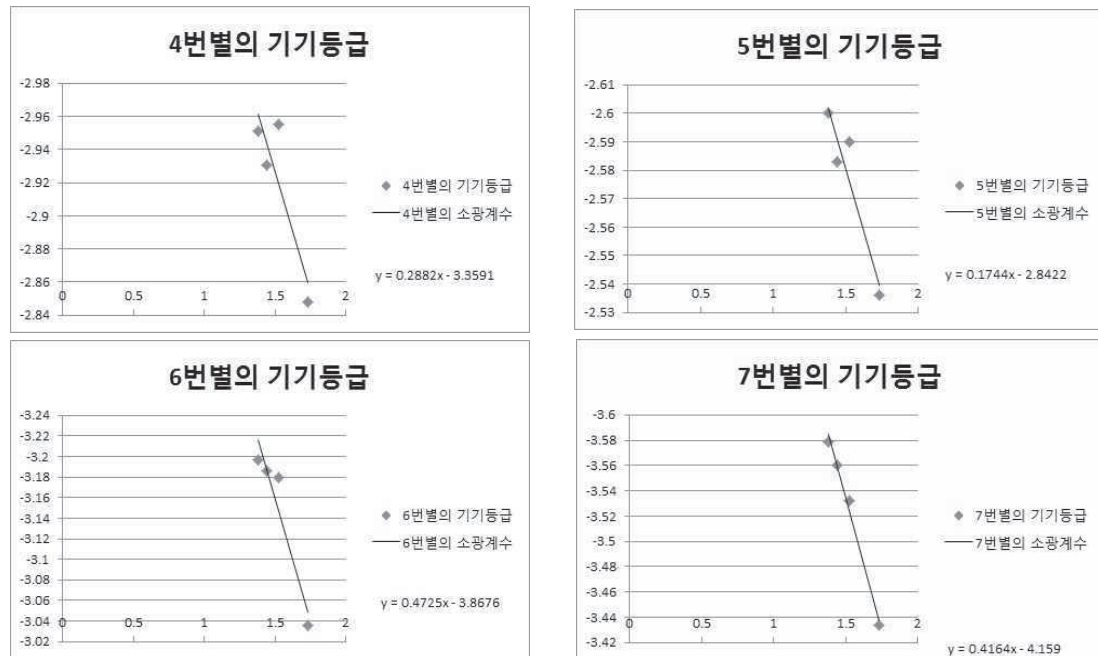
### (2) 관측 당시 기상 상태

평균 미세먼지 농도( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	평균 온도( $^{\circ}\text{C}$ )	평균 상대습도(%)	평균 풍속(m/s)
58	9.225	70.5	0.2

[표 6] 10월 23일 관측 당시 기상 상태

### (3) 측광 결과와 소광계수





[그림 19] NGC 956의 대기 투과량과 기기등급(x축 : 대기 투과량, y축 : 기기등급)

	1번별	2번별	3번별	4번별	5번별	6번별	7번별
소광계수	0.174	0.293	0.225	0.288	0.174	0.473	0.416
평균 소광계수	0.292						

[표 7] 10월 28일 평균 소광계수

### 1.3. 12월 18일 NGC 1778의 기기등급 측광 결과

#### (1) NGC 1778의 측광 결과

관측시각	1번별	2번별	3번별	4번별	5번별	시간각(H)	천정거리(secz)	투과대기량(x)
6:19 PM	-1.875	-0.968	-0.138	-0.426	-1.144	1.701	3.530147	3.328411
6:34 PM	-1.88	-1.014	-0.173	-0.49	-1.194	1.627	3.030287	2.901324
6:49 PM	-1.875	-1.045	-0.21	-0.502	-1.207	1.308333	1.885995	1.861255
7:04 PM	-1.916	-1.071	-0.274	-0.552	-1.252	1.242917	1.754634	1.736543
7:19 PM	-2.002	-1.111	-0.263	-0.559	-1.285	1.1775	1.642735	1.629476
7:34 PM	-1.898	-1.118	-0.309	-0.585	-1.285	1.112083	1.546737	1.537018
7:49 PM	-1.945	-1.142	-0.327	-0.606	-1.284	1.046667	1.46391	1.456799

관측시각	1번별	2번별	3번별	4번별	5번별	시간각(H)	천정거리(secz)	투과대기량(x)
8:04 PM	-2.04	-1.148	-0.304	-0.618	-1.31	0.98125	1.392129	1.386948
8:19 PM	-2.019	-1.148	-0.319	-0.613	-1.323	0.915833	1.329722	1.325968
8:34 PM	-2	-1.16	-0.336	-0.631	-1.357	0.850417	1.275352	1.272655
8:49 PM	-1.987	-1.168	-0.353	-0.655	-1.347	0.785	1.227947	1.22603
9:04 PM	-1.996	-1.187	-0.363	-0.651	-1.354	0.719583	1.186637	1.185291
9:19 PM	-2.011	-1.209	-0.371	-0.637	-1.37	0.654167	1.150712	1.149782
9:34 PM	-2.026	-1.23	-0.401	-0.674	-1.398	0.58875	1.119591	1.118961
9:49 PM	-2.051	-1.218	-0.39	-0.668	-1.386	0.523333	1.092797	1.09238

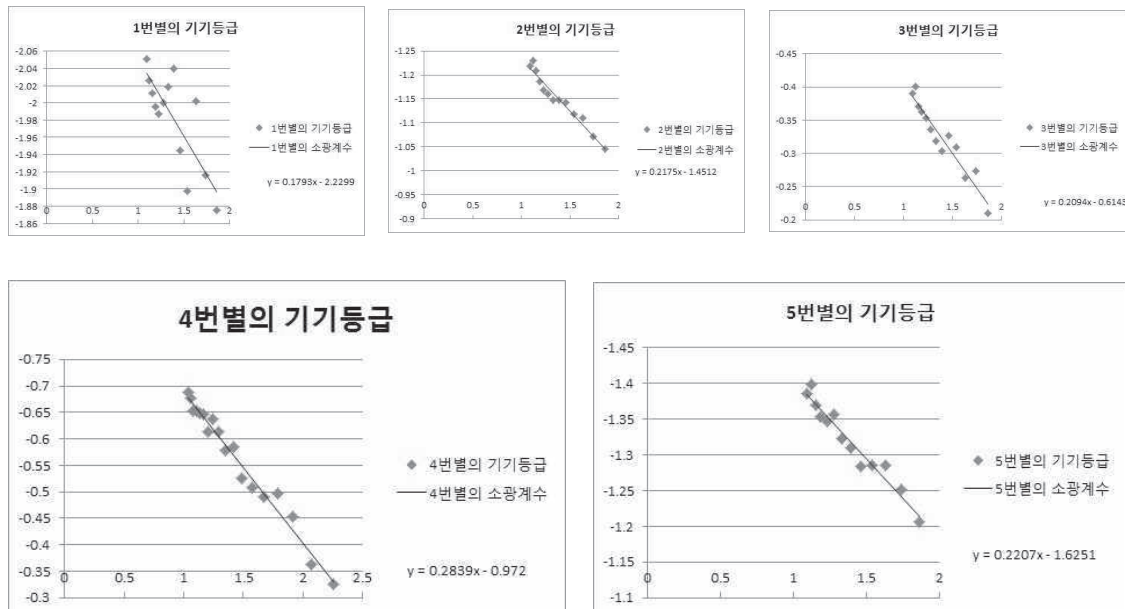
[표 8] 12월 18일 NGC 1778의 측광 결과

## (2) 관측 당시 기상 상태

평균 미세먼지 농도( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	평균 온도( $^{\circ}\text{C}$ )	평균 상대습도(%)	평균 풍속(m/s)
21	-8.1	55.73	0.77

[표 9] 12월 18일 관측 당시 기상 상태

## (3) 측광 결과와 소광계수



[그림 20] NGC 1778의 대기 투과량과 기기등급(x축 : 대기 투과량, y축 : 기기등급)

	1번별	2번별	3번별	4번별	5번별
소광계수	0.179	0.218	0.209	0.284	0.221
평균 소광계수	0.222				

[표 10] 12월 18일 평균 소광계수

## 1.4. 12월 20일 NGC 1778의 기기등급 측광 결과

## (1) NGC 1778의 측광 결과

관측시각	1번 별	2번 별	3번 별	4번 별	5번 별	시간각(rad)	천정거리(secz)	투과대기량(X)
6:05 PM	-1.835	-0.896	-0.067	-0.325	-1.004	1.465333	2.312608	2.258861
6:20 PM	-1.922	-0.939	-0.119	-0.363	-1.144	1.399917	2.111904	2.073228
6:35 PM	-1.928	-0.999	-0.094	-0.454	-1.149	1.3345	1.944998	1.916925
6:50 PM	-1.955	-1.022	-0.18	-0.497	-1.18	1.269083	1.804609	1.784113
7:05 PM	-1.996	-1.053	-0.201	-0.491	-1.208	1.203667	1.685409	1.670397
7:20 PM	-1.965	-1.063	-0.209	-0.509	-1.255	1.13825	1.583418	1.572412
7:35 PM	-2.031	-1.056	-0.254	-0.526	-1.261	1.072833	1.495608	1.487547
7:50 PM	-2.061	-1.114	-0.298	-0.585	-1.295	1.007417	1.419632	1.413747
8:05 PM	-2.043	-1.134	-0.324	-0.578	-1.314	0.942	1.353652	1.349378
8:20 PM	-2.095	-1.157	-0.324	-0.614	-1.341	0.876583	1.296209	1.293127
8:35 PM	-2.078	-1.172	-0.325	-0.638	-1.352	0.811167	1.246133	1.243932
8:50 PM	-2.062	-1.175	-0.363	-0.614	-1.35	0.74575	1.202478	1.200925
9:05 PM	-2.083	-1.182	-0.345	-0.646	-1.356	0.680333	1.164475	1.163395
9:20 PM	-2.115	-1.196	-0.359	-0.648	-1.367	0.614917	1.131495	1.130758
9:35 PM	-2.118	-1.189	-0.342	-0.654	-1.356	0.5495	1.103022	1.102529
9:50 PM	-2.127	-1.217	-0.379	-0.654	-1.389	0.484083	1.078632	1.078311
10:05 PM	-2.135	-1.211	-0.384	-0.677	-1.377	0.418667	1.05798	1.057778
10:20 PM	-2.137	-1.217	-0.394	-0.687	-1.402	0.35325	1.040782	1.04066

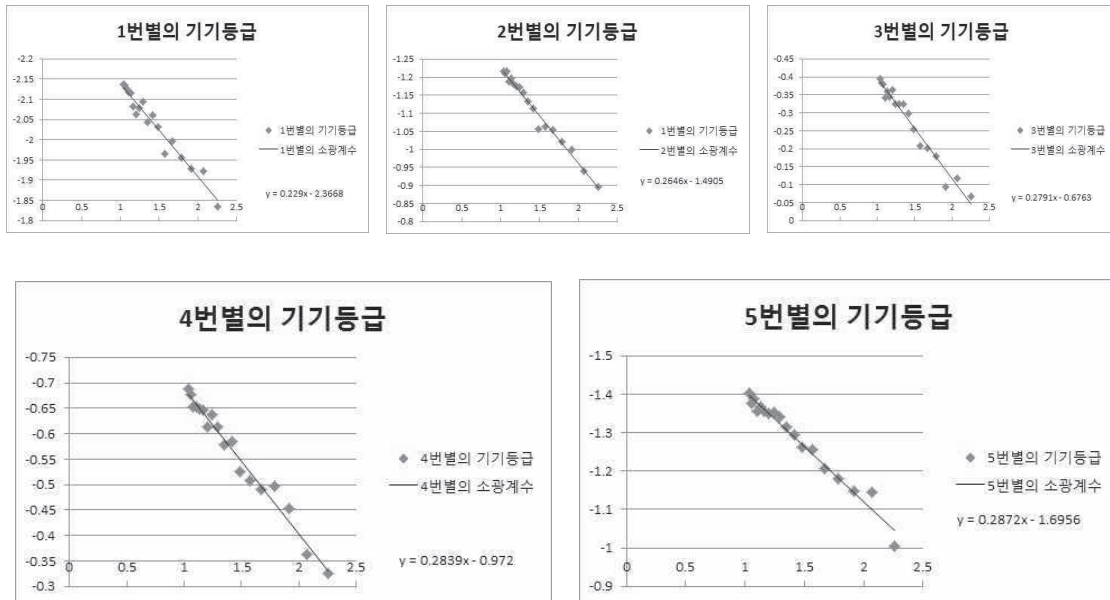
[표 11] 12월 20일 NGC 1778의 측광 결과

## (2) 관측 당시 기상 상태

평균 미세먼지 농도( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	평균 온도( $^{\circ}\text{C}$ )	평균 상대습도(%)	평균 풍속(m/s)
60	-6.1	42.83	1.54

[표 12] 12월 20일 관측 당시 기상 상태

### (3) 측광 결과와 소광계수



[그림 21] NGC 1778의 대기 투과량과 기기등급(x축 : 대기 투과량, y축 : 기기등급)

	1번별	2번별	3번별	4번별	5번별
소광계수	0.229	0.265	0.279	0.284	0.287
평균 소광계수	0.269				

[표 13] 12월 20일 평균 소광계수

### 1.5. 기타 관측 정보

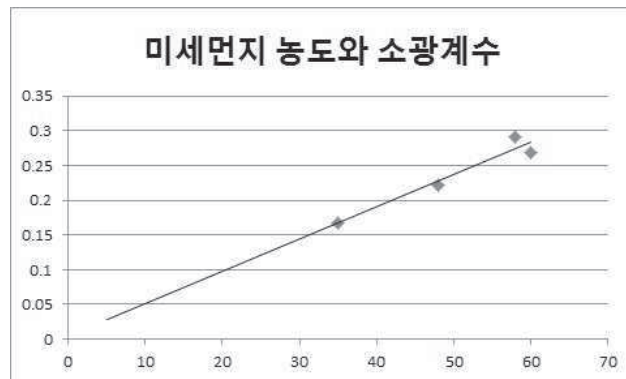
그 밖의 날짜에 대하여 10월 16일, 10월 22일, 10월 23일, 10월 24일, 10월 27일, 10월 28일, 10월 29일, 12월 9일에도 관측을 실시하였으나, 높은 상대습도에 의한 수증기 응결, 관측 중 이슬 및 안개 등의 요인으로 신뢰할 수 있는 데이터를 확보할 수 없었다. 특히 상대습도가 높은 날의 경우 소광계수가 음수가 나오거나, 대기 투과량과 관계없이 무작위 적으로 등급이 변하기도 하여, 이를 통해 미세먼지와 소광계수간의 유의미한 상관관계를 찾아내기 어려웠다.

### 1.6. 소광계수와 미세먼지 농도간의 상관관계

관측 및 측광을 실시한 10일의 기간 중 유의미한 데이터는 10월 23일, 10월 28일, 12월 18일, 12월 20일에 관측 및 측광을 실시한 때이며, 이는 아래 표와 같다.

날짜	평균 소광계수	미세먼지 농도( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	상대습도(%)	평균온도( $^{\circ}\text{C}$ )	평균풍속(m/s)
	0.169	35	87.05	10.5	0.36
	0.292	58	70.50	9.2	0.20
	0.222	48	55.73	-8.1	0.77
	0.269	60	42.83	-6.1	1.54

[표 14] 관측 실시 날짜별 소광계수와 미세먼지

[그림 22] 미세먼지 농도와 소광계수의 관계(x축 : 미세먼지 농도( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), y축 : 소광계수)

소광계수 그래프가 이미 잘 알려진 것과 유사하게 나타나 데이터 분석에 사용할 수 있는 4일의 유의미한 소광계수를 이용해 자료를 정리한 결과, 미세먼지 농도가 증가할수록 소광계수가 함께 증가하는 경향을 보였다. 유의미한 데이터를 확보한 날의 기상상태가 육안으로 구름이 보이지 않은 쾌청한 날이었음을 고려할 때 미세먼지 농도가  $35\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서  $60\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 증가하면서 소광계수가 0.168에서 0.26876로 1차함수적으로 뚜렷하게 증가한 것은 미세먼지로 인한 별의 산란효과가 증가한 것으로 해석할 수 있다. 이를 통해 미세먼지가 대기 중 별빛의 산란에 유의미한 영향을 주고 있음을 정량적으로 알 수 있었다.

단, 관측 일수가 부족하여 상대습도를 비롯한 온도, 풍속 등에 대한 대기 요소를 효과적으로 통제하지 못하였다. 하지만 윤량이 0.0일 때 보다 2.5일 때 소광계수가 증가함을 정량적으로 해석한 연구결과를 바탕으로 보았을 때, 10/23일의 상대습도가 다른 날에 비해서 높았음에도 소광계수가 작게 계산된 점은 미세먼지가 수증기보다 대기 산란에 더 큰 영향을 주고 있음을 짐작할 수 있다(Kwak, D. Y.(2009). CCD photometric observation of eclipsing variable star and determination of the atmospheric extinction coefficient, Jun nam University, Kwangju). 이는 수증기의 응결이 발생하지 않는 이상, 미세먼지가 공기 중 별 빛 산란에 큰 영향을 줄을 의미한다. 뿐만 아니라 평균온도 및 평균 풍속을 기준으로 데이터를 분

석하였을 때 이들 대기 물리량이 소광계수와 유의미한 상관관계를 보이지 않음을 확인할 수 있었다. 즉, 대기 온도 및 풍속 등은 별빛의 산란에 유의미한 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다. 하지만 더 정확한 데이터를 확보하기 위해서는 연중 최대한 많은 날 측광을 실시하고, 소광계수를 결정하여 상대습도를 비롯한 다른 대기요소에 대한 변인을 통제한 채로 데이터를 재분석할 필요가 있다.

## V. 결론 및 제언

3개월간의 관측 자료를 토대로 미세먼지의 농도가 증가할 때, 대기 소광계수가 증가하면서 별의 밝기가 어두워진다는 사실을 정량적으로 확인할 수 있었다. 특히 상대습도가 높은 날일지라도 미세먼지의 농도가 낮은 날은 상대습도가 낮고 미세먼지농도가 높은 날 보다 소광계수가 작은 점에서 수증기보다는 미세먼지가 별빛의 산란에 더 유의미한 영향을 주는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 상대습도와 미세먼지가 모두 높은 날에는 미세먼지를 응결핵으로 한 수증기 응결이 발생하기 때문에, 이같은 대기 상태에서는 수증기의 영향을 무시해서는 안 될 것으로 생각된다.

좀 더 정밀한 관측결과를 얻기 위해서는 상대습도가 낮으면서 풍속, 온도, 상대습도 등이 거의 일정하고 미세먼지 농도만 다른 날을 선정하여 자료를 정리할 필요가 있다. 또한 모든 기상 조건이 같은 날에 대한 소광계수의 자료도 더 많이 필요할 것으로 보인다. 즉, 본 연구 결과의 신뢰도를 높이기 위해 가급적 많은 날 관측을 실시하고 데이터를 정리할 필요가 있다.

본 연구 과제를 발전시켜 활용한다면, 불가피하게 미세먼지의 농도가 높은 날 측광을 실시할 때, 측광된 자료에 본 연구를 통해 계산된 소광계수를 이용해 기기등급을 보정하여 정확한 겉보기등급을 얻어낼 수 있을 것으로 본다. 또한 일선 학교에서 천체관측 실습을 하는 경우에 습도, 날씨 등의 기상상태 뿐 아니라 미세먼지 역시 고려하여 관측일자를 선정해야 하는 당위성에 대하여 홍보할 수 있다. 뿐만 아니라 아마추어 천문가들이 천체관측 날짜를 결정할 때 이번 연구 자료가 도움이 될 수 있을 것으로 본다.



## ■ 참고문헌

- [1] 김희수(2004.03.10.), 관측천문학, 북스힐
- [2] 김희수(2010). 천체관측(2판). 시그마프레스
- [3] Michael, Zeilik & Stephen, A. Gregory(2010), 천문학 및 천체물리학(강혜성, 윤홍식, 이상각, 최승연, 한정준, 홍승수) 시그마프레스(2010.03.05.)
- [4] 위키백과 from <http://ko.wikipedia.org/wiki/%EB%AF%B8%EC%84%B8%EB%A8%BC%EC%A7%80>
- [5] 강원도보건환경연구원(2014년 상시자료), from <http://www.airgangwon.go.kr/air/>
- [6] 에어코리아(2014년 상시자료), from <http://www.airkorea.or.kr/>
- [7] 반기성, 케이웨더기후산업 연구소장, 미세먼지, 2014.2.14. from [http://navercast.naver.com/contents.nhn?rid=116&contents\\_id=49005](http://navercast.naver.com/contents.nhn?rid=116&contents_id=49005)
- [8] 권석민(personal communication, July 22, 2014)
- [9] Park, E. J.(2007). Health risk assessment of fine particles and their hazardous chemicals, Dong-duk girl' s university, Seoul)
- [10] Kwak, D. Y.(2009). CCD photometric observation of eclipsing variable star and determination of the atmospheric extinction coefficient, Jun nam University, Kwangju

### 심사평

본 연구는 실제 천체 관측의 가장 기초가 되는 대기 소광에 대한 연구로 요즘은 문제가 되고 있는 미세먼지와 별의 밝기의 관계를 정량적으로 분석한 것으로 학생 수준에 적합하며 천문학적으로 의미있는 연구라고 할 수 있다.

천체망원경을 이용한 관측을 실시하기 위해서는 지구 대기에 의한 효과를 분리하는 것이 가장 기본이 되지만 학생들은 대부분 책으로만 소광방법에 대해 배우고 끝나는 경우가 대부분인데 이를 직접 분석해보았다는 것은 중요한 경험이라고 할 수 있을 것이다. 다만 너무 보편적인 주제라 새로운 생각을 검증하거나 결과로 도출하기에는 무리가 있어 보인다. 연구방법 또한 새로운 시도가 없었다는 점은 아쉬움으로 남는다. 하지만 R&E의 취지가 학생이 전문가의 도움을 받아 주도적으로 연구를 수행하는 것임을 감안한다면 우수한 연구논문이라고 할 수 있을 것이다. 향후 이와 같은 분석 결과를 바탕으로 천체관측을 할 경우 대기 보정 등에 활용한다면 더욱 의미있는 경험이 될 수 있을 것이다.

## 연구 후기

박준범 : 주제를 잡고 교수님과 연구를 시작할 때는 기대에 부풀어 있었습니다. 하지만 긴 시간 연구가 진행되면서 너무 추워 노트북이 오작동하기도 하였고, 망원경 조작이 미숙하여 촬영이 제대로 되지 않고, 엑셀이 서툴러 데이터 정리를 잘못하는 등의 문제를 겪으면서 힘든 점이 많았습니다. 그러나 최종 데이터가 잘 나왔을 때의 성취감은 이루 말할 수가 없었습니다. 이번 기회를 통해 과학연구라는 것이 무엇인지 알 수 있었습니다.

박효선 : 처음 연구를 시작할 때 한번도 해보지 못한 것을 시작하는 것에 있어서 너무 막막했습니다. 망원경 조작미숙, 예기치 못한 돌발상황 등을 겪으면서 너무 힘들고 내가 과학자라는 길을 가야하는가에 대한 의문도 들었습니다. 하지만 친구들과의 협동에서 관측결과가 나오고, 최종데이터가 나왔을 때 처음 예상했던 결과대로 나와주어 기분이 너무 좋았습니다. 이번기회를 통해 과학자가 무엇을 하는지 알게되었고, 동료의 중요성에 대해 알게 되었습니다. 늦은시간까지 저희를 지도해주신 심원재 선생님과 권석민 교수님께 깊은 감사를 표하는 바입니다.

이지영 : 처음엔 단순히 별이 보고싶다는 생각으로 시작한 R&E였는데 생각보다 힘든점이 많았습니다. 날씨 때문에 기껏 관측했던 데이터를 사용조차도 못해보고 버린적도 있었고, 망원경에 맺힌 이슬로 고생한 적도 있었습니다. 하지만 이런 과정을 통해 과학도로서 어떤일을 해야하는지 알 수 있었고, 실수와 실패를 극복하는 방법도 알게 되었습니다.

한효근 : 연구 과정에서 장비 사용방법부터 관련 이론까지 많은 것을 배웠습니다. 관측 중, 그리고 데이터 분석 과정에서 예기치 못한 여러 가지 변수를 해결하고, 결론을 도출하는 과정에서 과학연구가 어떻게 진행되는지를 배울 수 있어서 의미있는 시간이었습니다. 또한 연구를 친구들과 함께 진행하면서 책임감, 성실함, 협동심 등을 기를 수 있었던 것 같습니다. 매일 함께 관측과 분석을 하면서 고생해주신 심원재 선생님과, 이론교육과 관측팁을 제시해 주신 권석민 교수님께 깊은 감사를 드립니다.

## 연구진

박준범(Park Junbeom, 강원과학고등학교 1학년, peace33227@naver.com), 제1저자 및 교신저자

박효선(Park Hyoseon, 강원과학고등학교 1학년, gytjs342@naver.com)

이지영(Lee Jiyeong, 강원과학고등학교 1학년, leeje230698@hanmail.net)

한효근(Han Hyokeun, 강원과학고등학교 1학년, hhhh0325@naver.com)

지도교사 : 심원재(Sim Wonjae, 강원과학고등학교, 전공: 지구과학, kalchi09@naver.com)

지도교수 : 권석민(Kwon Seokmin, 강원대학교 과학교육학부, smkwon@kangwon.ac.kr)

(2015. 1월 현재)



## 라즈베리파이를 활용한 시각장애인용 웨어러블 인터페이스 개발

### - 마커 인식 기반의 실내 내비게이션

(Developing a wearable interface for the visually impaired using Raspberry Pi

- Marker recognition-based indoor navigation)

황준호 · 윤종효 · 김대진 · 이원석 · 조영인 · 차형현(인천과학고등학교)

#### 초 록

시각장애인의 보행극복을 위한 많은 수단이 개발되어 있지만, 아직까지 많은 불편함이 따르며 특정 장소에 가기 위한 경로를 알려주는 시스템은 찾아보기 힘들다. 본 연구에서는 라즈베리파이(Raspberry Pi)라는 소형 MCU를 이용한 마커인식 기반의 실내 내비게이션 시스템을 구축하여 시각장애인에게 음성으로 길을 안내하는 웨어러블 인터페이스를 제안한다.

본 연구는 시각장애인을 위한 웨어러블 인터페이스 설계 및 구성, 마커 형태 및 위치정보 설계, 실내 마커 정보 입력, 마커 인식 알고리즘 구현, 길찾기 알고리즘 구현, TTS(Text To Speech) 구현의 과정으로 구성된다.

첫째, 시각장애인을 위한 웨어러블 인터페이스로 착용과 조작이 쉽도록 설계하여 웹캠을 옷에 부착하고 아두이노 나노를 손목시계와 같은 형태로 제작, 사용자가 아두이노 나노에 부착된 버튼을 통해 목적지를 선택하는 형태로 구성하였다. 둘째, 위치정보를 표현하기 위해 자체적으로 사용할 마커를 설계하였다. 셋째, 실내 마커 정보를 입력하기 위해 'Mark42' 프로그램을 제작하여 실내 맵의 정보와 더불어 마커를 입력하여 라즈베리파이 에 쉽게 입력할 수 있도록 하였다. 넷째, 마커 인식 알고리즘 구현을 위해 라즈베리파이 에 부착된 카메라가 특정 장소를 표시하는 마커를 촬영하고, 라즈베리파이 자체에서는 해당 영상에서 마커만을 인식하여 저장된 맵의 정보에 접속할 수 있도록 구현하였다. 다섯째, 목적지가 입력되면 저장된 맵의 정보에 접속한 뒤 목적지를 향한 최단 경로를 찾을 수 있도록 길찾기 알고리즘을 구현하였다. 여섯째, 사용자에게 길안내 정보를 음성으로 안내하는 TTS를 구현하였다.

연구과정 및 결과를 통해 실내에서 동작 가능한 시각장애인을 위한 네비게이션을 개발할 수 있었으며, 처리 속도와 마커 인식의 정확도를 더욱 향상시키는 방법에 대해 고민할 수 있었다.

본 연구는 라즈베리파이라는 소형 컴퓨터와 웹캠이라는 최소한의, 저가의 하드웨어만을 이용하여 마커 인식 프로그램을 개발한다는 것에 의의가 있다.

키워드 : 시각장애인, 웨어러블, 라즈베리파이, 마커인식, 실내 내비게이션

## I. 서론

### 1. 연구의 필요성

우리는 사회 속에서 다양한 장애인들과 함께 살아가고 있다. 우리나라에는 약 250만 명의 장애인이 있으며 그중 시각장애인은 약 25만 명으로 전체 장애인의 10%, 장애 유형 중에선 세 번째로 많은 정도로 우리 주변에서 쉽게 만날 수 있다<sup>[1]</sup>. 시각장애인들에게 가장 불편한 점은 처음 접해 본 건물 내에서의 이동이었다<sup>[2]</sup>. 익숙하지 않은 환경에서 지팡이에만 의존하여 길을 찾기란 매우 어려운 일이다. 그들을 돕는 여러 장치들이 개발되었지만 대부분 무겁고, 부피가 크며, 고가인 경우가 많아 일반인들이 장치를 접하기 어렵다는 단점이 있다. 이러한 단점을 해결해보고자 아두이노와 라즈베리파이라는 소형 MCU를 기반으로 웹캠과 블루투스, 음성TTS 등을 이용한 시각장애인을 위한 웨어러블 인터페이스를 구성하여 시각장애인의 이동성을 증진할 수 있는 실내 내비게이션 시스템에 대한 연구를 진행하게 되었다.

### 2. 연구 목표

라즈베리파이와 아두이노를 기반으로 한 웨어러블 인터페이스를 통해 카메라로 주변을 인식하고 처음 가는 장소에 상관없이 원하는 목적지로의 이동 경로를 단계적으로 안내받는 길 안내가 가능한 ‘실내 내비게이션’을 구현한다. 라즈베리파이와 아두이노는 소형, 저전력, 저가의 MCU로 누구나 쉽게 접할 수 있고, 구성이 단순하여 제작이 편리하다는 장점이 있다. 본 연구는 이러한 기술적인 장점을 바탕으로 웨어러블 기기의 보편성을 높여 많은 시각장애인들이 사용할 수 있는 인터페이스를 제작하는 것이 주된 목표이다.

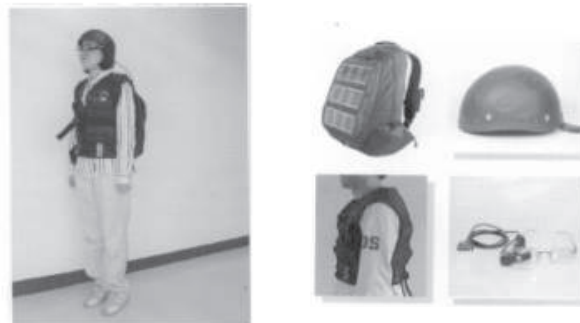
실내용 내비게이션을 눈이 보이지 않는 시각장애인들에게 적용하려면 음성을 통해 안내해야 TTS 기반의 음성 안내 환경을 구축한다. 또한 인터페이스가 너무 크거나 무거우면 본 연구의 목적에 액세서리 형태의 웨어러블 인터페이스를 고안한다.

### 3. 연구 범위

이번 연구의 개발 및 구현을 위해 실내 범위를 “인천과학고등학교 본관동 1, 2, 3층”으로 설정하였으며 아두이노 나노, 라즈베리파이 플랫폼을 기반으로 구현하였다. 모든 건물에서 실내 내비게이션 프로그램 적용이 가능하도록 실내 위치 정보를 데이터베이스화 할 수 있는 마커 정보 입력 프로그램인 Mark42 프로그램을 개발하였다. 실내 정보를 제공하고 싶은 곳에서는 Mark42 프로그램에 실내 평면도를 그림파일(.jpg 등)로 지정할 수 있으며, 실내의 각 지점을 마커로 표시하는 과정을 거쳐 실내 위치를 저장할 수 있다.

### 4. 선행연구 분석

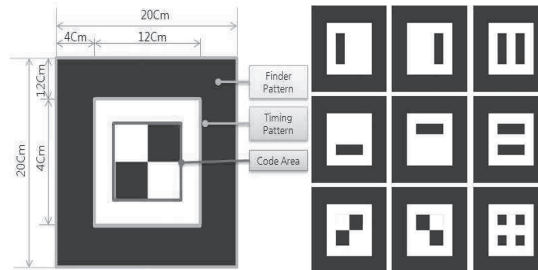
#### 4.1. 청각장애인을 위한 웨어러블 단말 인터페이스 기술(한국HCI학회)[3]



[그림 1] 청각장애인을 위한 웨어러블 기기

[그림 1]에 있는 장치는 청각장애인을 위한 웨어러블 단말 인터페이스 시스템으로 8개의 소형 마이크로폰을 통해 입력된 주변의 소리로부터 미리 정해진 주요한 소리(예를 들면 아기 울음 소리, 전화벨 소리, 초인종 소리, 자동차 경적 소리 등)를 실시간 감지하고 시각과 촉각 정보로 변환하여 소리의 종류 및 방향을 청각장애인에게 알려주는 장치이다. 본 인터페이스는 노트북과 룩색, 모자, 햅틱 슈트, 안경식 소형 디스플레이로 구성되어 있다. 이때 노트북은 룩색에 넣어 휴대하며, 향후 룩색의 솔라셀을 이용하여 전원을 공급받을 수 있을 것이란 가능성을 남겨 놓았다.

#### 4.2. 실내 환경에 효율적인 모바일 내비게이션을 위한 마커 인식(동신대학교)[4]



[그림 2] 다양한 형태로 표현된 마커

실내 환경에 효율적인 모바일 내비게이션을 위해 실내 조명상태 변화와 다양한 실내 구조에 효율적인 마커 인식을 고안했다. 획득한 영상 이미지 데이터의 명도값, 표준편차, 최대 편차를 이용한 전역적 이진화 방법을 이용함으로써 빠르고 안정적인 처리 속도를 유지할 수 있도록 하였다. 또한, 조명의 위치와 그림자에 의해 발생하는 그라데이션 현상을 해결하기 위해 전체 이미지 명도 값을 이용한 가중치를 적용함으로써 다양한 조명 환경에서 정확한 마커 인식이 가능하도록 하였다. 선행연구에 사용된 마커는 빠른 처리속도를 위해 마커의 후보영역에서 내부에 흰색의 홀(Hole) 형태가 존재하면 마커로 판단하도록 하였다. 이에 따라 인식 오류가 발생할 수 있으나 타이밍 패턴 내부에 코드 영역이 존재하므로 코드 영역의 인식에 따라 마커의 인식 오류를 줄일 수 있도록 하였다.

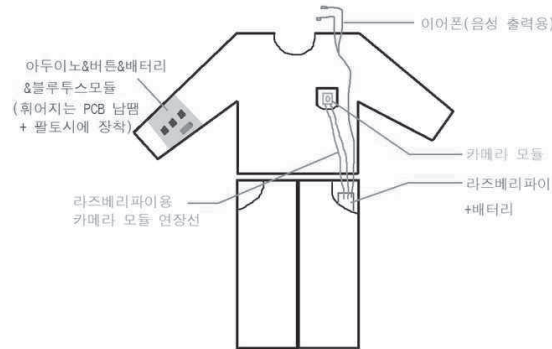
## II. 연구 내용

### 1. 웨어러블 인터페이스 설계 및 구성

시각장애인을 위한 웨어러블 기기 설계 시 고려할 사항을 정리하여 [그림 3]과 같은 웨어러블 인터페이스를 구성하였다.

#### 【시각장애인을 위한 웨어러블 기기 설계 시 고려 사항】

- 웨어러블 기기를 착용했을 때 불편함을 느끼지 않아야 한다.
- 다른 사람이 보았을 때 시각장애인이라는 사실을 잘 알아보지 못할 정도로 자연스러워야 한다.
- 앞이 보이지 않는 상태에서도 인터페이스를 조작하기 쉬워야 한다.
- 시각장애인이 언제든지 쉽게 착용할 수 있어야 한다.
- 카메라는 전방을 잘 포착할 수 있는 곳에 있어야 한다.



[그림 3] 웨어러블 인터페이스의 기본적인 구성

## 2. 소프트웨어 연구 및 개발

### 2.1. 건물 내 마커 정보 입력

#### 2.1.1. 마커 형태 및 정보 설계

[그림 4]와 같이 마커의 정확한 인식을 위해 흑백 색상만 사용하며, 검은 사각 테두리 안 모퉁이 부분에 네 개의 사각형이 있다. 마커의 방향을 읽기 위해서 내부가 흰 사각형의 위치가 왼쪽 위라고 가정하였다. 방향성이 결정된 마커에 대해 가운데 아홉 칸 무늬에 의해 결정되는 정보는 [그림 5]와 같다.



[그림 4] 마커의 모양

1	2	4
8	16	32
64	128	256

[그림 5] 위치별 가중치

이때 색칠된 칸에 해당하는 수를 더하면 해당 노드의 번호가 된다. 예를 들어 마커 1에 해당하는 번호는 0, 마커 2에 해당하는 번호는  $1+8+256 = 265$ 가 된다. 따라서 본 연구로 쓰이는 마커는 총  $2^9 = 512$ 개의 노드 번호를 지정할 수 있다. 이는 마커의 기능을 실험해 보기 위한 본 연구에서만 디자인이며 실생활에 적용할 때는 다른 방식으로 더 효율적인 디자인을 선택할 수 있을 것이다.



1	2	4
8	16	32
64	128	256

마커 1

1	2	4
8	16	32
64	128	256

마커 2

[그림 6] 마커 설정의 예시

### 2.1.2. 마커 정보 입력 프로그램(Mark42) 개발

본 연구에서는 마커 지도 작성을 위해 각 층의 도면 정보를 바탕으로 쉽게 마커의 정보를 관리할 수 있는 프로그램을 제작하였다. 이때 도면에는 실제 거리를 알아내기 위해서 축척이 표기되어있어야 하며 도면의 확장자명은 jpg이어야 한다.

이 프로그램은 다음과 같은 순서로 동작한다.

#### ① 도면 불러오기

Mark42로 도면의 jpg파일을 불러온 뒤 도면의 축척을 이용하여 좌표 형식으로 바꾼다. 축척을 맞췄기 때문에 좌표의 계산을 통해 마커끼리의 거리를 파악할 수 있다. 또한, 사용자는 마커의 위치를 파악하면서 마커에 대한 정보를 정확하게 입력할 수 있다.

#### ② 마커 입력

사용자가 좌표계 형식의 도면에 원하는 구역에 마커를 찍는 것으로 마커의 위치 정보는 좌표 형식으로 저장된다. 마커가 입력되었을 시, 마커에 해당되는 이름을 입력받게 된다. 또한, 인접한 마커와의 연결 상태를 설정할 수 있다.

#### ③ 마커 설정

사용자가 설정할 사항들은 종류가 다양하며, 다음과 같은 항목들이 있다.

- 이름: 해당 마커가 가리키는 장소의 이름을 나타내며, 시각장애인을 대상으로 음성 안내를 진행할 때 이름을 참조하게 된다.
- 번호: 마커의 번호를 통해 모든 마커의 정보를 가져오며, 실제로 마커 정보를 처리할 때도 마커의 번호 중심으로 처리한다.
- 좌표: 마커의 좌표 정보를 통해 최단 경로를 구하며 마커 사이의 거리를 파악할 수 있다.

#### ④ 상대적 위치

인접한 마커 정보를 말한다. 인접한 마커의 입력을 사용자에게 맡긴 것은 프로그램을 통해 같

수 있는지의 여부를 분명하게 파악할 수 없기 때문이다. 인접한 마커라는 것은 단순히 거리가 가까운 마커를 뜻하는 것이 아니라 그 부분에서 다른 마커를 거치지 않고 바로 갈 수 있는 마커를 뜻한다. 거리가 가까워도 중간에 벽이 있으면 인접한 마커로 설정될 수 없다. 이 때 프로그램이 벽의 여부 등을 분명하게 알 수 없으므로 사용자의 입력이 필요하다.

#### ⑤ 층 연결

층 연결 설정에는 계단 여부를 설정할 수 있는데, 설정하게 될 경우 위층으로 연결되는지, 혹은 아래층으로 연결되는지, 혹은 두 층 모두 연결되는지를 설정할 수 있다. 또한 각각의 층에서 어떤 마커와 연결되는지를 설정할 수 있다. 이에 대한 정보는 인접한 장소의 정보에 속한다.

#### ⑥ 마커 설정

마커의 기본적인 틀은 [그림 7]과 같으며 중간 9개의 칸에 검은색과 흰 색을 조화시킴으로써 512개의 서로 다른 마커를 만들 수 있다.

1	2	4
8	16	32
64	128	256

$$2 + 8 + 32 = 42$$

1	2	4
8	16	32
64	128	256

$$1 + 4 + 128 = 133$$

[그림 7] 마커 설정의 예시

#### ⑦ 저장

이 과정을 통해 사용자가 입력한 정보가 일련의 과정을 통해 텍스트 파일(txt)로 출력된다. 이파일을 라즈베리파이에 전송함으로써 경로 탐색을 위한 그래프 생성 등의 작업을 할 수 있다.

이 때, 출력되는 방식은 다음과 같다.

```
*.txt
[층]
[마커의 개수]
[마커 번호] [이름] [X좌표] [Y좌표] [인접한 장소의 수] [인접한 장소] ... [마커 모양]
[마커 번호] [이름] [X좌표] [Y좌표] [인접한 장소의 수] [인접한 장소] ... [마커 모양]
...
```

계단에 대한 정보는 다른 층의 어떤 장소와 인접되는지에 대한 정보이므로 인접한 장소의 정보에 추가되며 인접한 장소의 수만큼 인접한 장소가 나열된다.

## 2.2. 마커 인식 알고리즘 구현

### 2.2.1. 이진화(Binarize)

영상처리에서 이진화란 영상을 흑과 백, 두 가지 색상으로만 나타내는 과정을 의미한다. 주의할 것은 그레이 영상을 만드는 것이 아니라 오로지 흑과 백, 이진 색상 영상을 만드는 것이다. 이진화 과정을 거치는 이유는 영상 내에서 특정 모양이나 형태를 쉽게 구분해 내기 위함이다. RGB 컬러 영상을 그레이 영상으로 전환하면 각 픽셀의 RGB값이 0~255 사이의 값으로 통일되는데 이 값이 0에 가까울수록 어둡고, 255에 가까울수록 밝다. 이진화는 이러한 픽셀들에 대하여 임계값(Threshold)을 정하여 임계값보다 작은 픽셀값은 모두 0(흑)으로, 큰 값은 모두 255(백)로 전환함으로써 수행된다.

Global Fixed Thresholding은 고정된 임계값에 대하여 이진화를 수행하는 것을 말한다. 임계값을 정하는 방법에도 여러 가지 존재하는데, 그 중 대표적인 것으로 Otsu's Method가 있다[5].

오츠 기법(Otsu's Method)은 그레이 영상의 각 픽셀들에 대하여 밝기 분포 히스토그램을 생성하고 임계값  $T$ 를 기준으로 영상 픽셀들을 두 클래스로 분류했을 때 두 클래스 간의 intra-class variance를 최소화하거나 inter-class variance를 최대화하는  $T$ 를 찾는 기법으로, intra-class variance와 inter-class variance는 아래와 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \text{intra-class variance} &= \alpha \sigma_1^2 + \beta \sigma_2^2 \\ \text{inter-class variance} &= \alpha \beta (\mu_1 - \mu_2)^2 \\ (\alpha : \text{어두운 픽셀들의 비율}, \beta : \text{밝은 픽셀들의 비율}, \alpha + \beta &= 1, \mu_1, \\ \mu_2 : \text{밝기 평균}, \sigma_1^2, \sigma_2^2 : \text{분산}) \end{aligned}$$



(a) 칼라 영상



(b) 그레이 영상



(c) 이진화 영상 (Otsu's method)

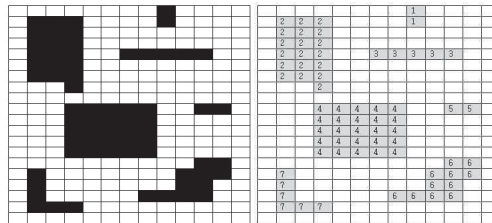
[그림 8] 이진화 영상으로 변환하는 과정

[그림 8]은 웹캠으로부터 영상을 입력받아 오츠 기법으로 이진화한 모습이다.

### 2.2.2. 레이블링(Labeling)

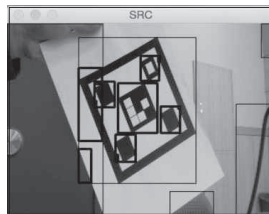
레이블링(Labeling)이란 입력 영상의 각각의 픽셀에 고유한 숫자 번호(label)를 부여함으로써 주

변 픽셀에 대한 연결성을 구현하는 기법이다[6]. 예를 들어 [그림 9]와 같은 화소에 대해 레이블링을 수행하면 총 7개의 레이블이 형성된다.



[그림 9] 레이블링 과정

인접한 화소를 찾는 방법으로 Flood Fill 알고리즘을 이용할 수 있다. 본 연구에서는 재귀적인 방식의 Flood Fill을 구현하여 레이블링을 진행하였다. [그림 10]은 Flood Fill 알고리즘으로 레이블링한 후 컬러 영상에 각각의 레이블을 나타낸 것이다.



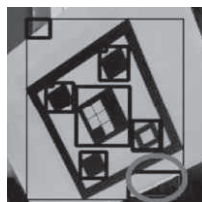
[그림 10] 마커의 레이블 추출

### 2.2.3. 외곽선(Contours) 추출

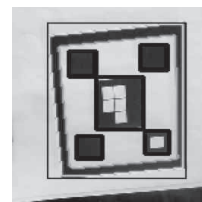
본 연구에 쓰인 마커의 모양은 앞에서 언급하였듯이 정사각형 모양이다. 기울어진 마커를 인식하기 위해 사각형의 꼭짓점을 인식한 후 변환 과정을 거치는데, 이 과정을 위해 우선 외곽선을 추출한다[7].

OpenCV에선 외곽선 추출 함수로 cvFindContours를 제공한다[8]. 외곽선 추출 과정은 각 레이블 내에서 일어나므로, cvSetImageROI 함수를 통해 ROI 영역을 설정하고 해당 영역에 대해 cvFindContours를 적용한다.

보통 cvFindContours를 적용하면 [그림 12]와 같이 외곽선이 추출되어야 정상이지만, [그림 11]과 같이 가끔 사각형 외의 영역이 분리되면서 원치 않는 곳의 외곽선이 검출된다.



[그림 11] 외곽선 검출의 오작동



[그림 12] 외곽선 검출에 성공한 모습

따라서 외곽선을 여러 번 검출하여 그 중 길이가 최대가 되는 외곽선을 사각형 마커의 외곽선으로 설정하여 위 문제를 해결한다. 외곽선을 여러 번 검출하기 위해 CvContourScanner 객체를 생성하여 cvFindNextContour 함수를 반복적으로 실행하고 최대 길이의 외곽선을 계산한다.

#### 2.2.4. 사각형 꼭짓점 인식

마커의 외곽선을 추출하면 그로부터 사각형의 꼭짓점 좌표를 얻어내야 한다. 사각형의 꼭짓점을 찾는 과정은 4단계로, 각 단계에서 꼭짓점을 1개씩 찾게 된다.

- ① 외곽선을 이루는 점들 중 임의의 점을 하나 선택하고(보통은 CvSeq의 첫 번째 점), 외곽선 상의 모든 점을 탐색하며 그 점으로부터의 거리가 최대가 되는 점을 첫 번째 사각형 꼭짓점( $x_1, y_1$ )으로 지정한다.
- ② 두 번째 사각형 꼭짓점( $x_2, y_2$ )도 위와 같은 방식으로 첫 번째 사각형 꼭짓점으로부터의 거리가 최대가 되는 점으로 지정한다.
- ③ 세 번째 사각형 꼭짓점( $x_3, y_3$ )은 (첫 번째 사각형 꼭짓점으로부터의 거리 + 두 번째 사각형 꼭짓점으로부터의 거리)가 최대가 되는 점으로 지정한다.
- ④ 네 번째 사각형 꼭짓점( $x_4, y_4$ )은 아래의 식이 최대가 되는 점으로 지정한다.

$$\begin{aligned}
 & \text{abs}( (x_1 + y_2 + x_2 + y_3 + x_3 + y_1) - (x_2 + y_1 + x_3 + y_2 + x_1 + y_3) ) \\
 & + \text{abs}( (x_1 + y_3 + x_3 + y_1) - (x_3 + y_1 + x_3 + y_2 + x_1 + y_3) ) \\
 & + \text{abs}( (x_3 + y_2 + x_2 + y_3 + x_3 + y_1) - (x_2 + y_1 + x_3 + y_2 + x_1 + y_3) )
 \end{aligned}$$

이로부터 네 개의 사각형 꼭짓점 좌표를 구할 수 있다.

#### 2.2.5. 와핑(Warping)

주어진 4개의 꼭짓점 좌표로 기울어진 사각형 이미지를 원래의 정사각형으로 복원하는 와핑(Warping, 혹은 Perspective Transform) 과정을 거쳐야 한다.

기본적으로 perspective transform을 위한 식은 다음과 같다.

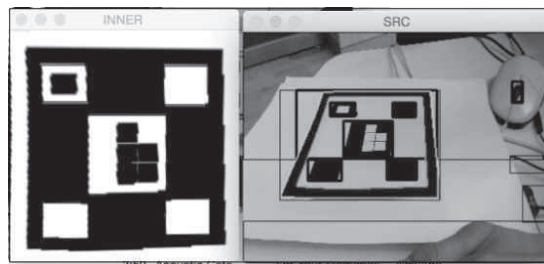
$$\begin{bmatrix} wx' \\ wy' \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}$$

여기서 ( $x', y'$ )에 대한 식을 다음과 같이 바꾸어 쓸 수 있다.

$$x' = \frac{ax + by + c}{gx + hy + 1}, \quad y' = \frac{dx + ey + f}{gx + hy + 1}$$

$$\begin{aligned}x' &= ax + by + c - gxx' - hx'y \\ y' &= dx + ey + f - gxy' - hyy'\end{aligned}$$

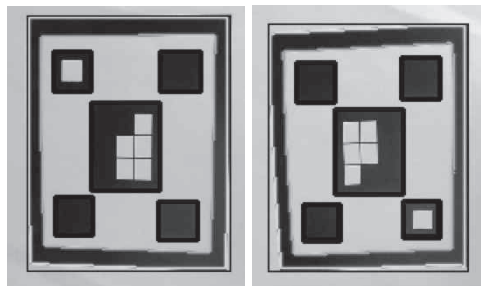
$(x, y)$ 와 그에 대응되는  $(x', y')$  쌍을 4개만 알고 있으면 Projection Matrix를 구할 수 있다. OpenCV에서는 기본적으로 `cvWarpPerspective` 함수를 제공하여 `cvGetPerspective`로부터 얻은 변환행렬을 입력하면 위 과정을 거쳐 [그림 13]과 같이 와핑된 이미지를 얻을 수 있다.



[그림 13] 와핑된 마커 이미지

#### 2.2.6. 마커 방향 인식

마커는 사방에서 찍을 수 있는데, 찍는 방향에 따라 읽히는 데이터가 다르다. 예를 들어 [그림 14]의 두 마커의 경우 회전시키면 서로 같은 마커이나, 마커를 보는 방향에 따라 이진 데이터를 읽는 방향이 달라 서로 다른 마커로 인식하게 된다.



[그림 14] 방향이 서로 다른 두 마커 이미지

이러한 문제를 해결하기 위해 마커의 꼭짓점 부분에 위치한 4개의 검은 사각형 영역 중 한 영역의 중앙에 흰 공간을 채움으로써 마커의 방향을 명시한다.

네 개의 검은 사각형 영역을 인식하기 위해 우선 와핑된 이미지에 대하여 레이블링 과정을 거치고, 레이블의 개수가 5개(4개 사각형 영역 + 중앙 이진 데이터 레이블)인지 확인한 후 넓이가 최대인 레이블(중앙 격자 레이블)을 제외한 나머지 4개의 레이블에 대하여 마커와 레이블의 크기 비율 및 각 레이블 간의 가로, 세로 길이 오차를 계산하여 마커 결정 여부를 판단한다. 마커가 판단되면 4개의 레이블

블을 탐색하며 중앙의 색상을 통해 방향이 명시된 레이블을 찾고, 해당 레이블의 좌표를 통해 마커에 대한 상대적인 위치를 파악한 뒤 방향값을 구한다.

```

set centerX to markerImage.width/2
set centerY to markerImage.height/2
If GetPixel(markerImage, markerImage.width/2, markerImage.height/2) == COLOR_BLACK
  If innerRect.x<centerX And innerRect.y<centerY
    set dir to 0
  If innerRect.x>centerX And innerRect.y<centerY
    set dir to 1
  If innerRect.x>centerX And innerRect.y>centerY
    set dir to 2
  f innerRect.x<centerX And innerRect.y>centerY
    set dir to 3

```

[그림 15] 마커의 방향값을 구하는 의사 코드

위 과정을 통해 마커의 방향값을 구한 뒤 마커 이미지를 회전시켜 일정한 방향값을 유지해야 한다. OpenCV의 이미지 회전 관련 함수인 `cv2DRotationMatrix`와 `cvWarpAffine`를 이용하면 이미지를 임의의 각도만큼 회전할 수 있다.

#### 2.2.7. 이진 데이터 인식

와핑과 회전을 거친 마커 이미지로부터 이진 데이터를 추출한다. 중앙의 사각형 레이블 위에 4x4 격자를 표시하면 격자점에 이진 데이터가 기록된 영역이 위치하게 된다. 따라서 중앙 레이블을 가로, 세로 각각 4등분한 뒤 이중 반복을 통해 왼쪽 상단부터 오른쪽 하단까지 순차적으로 4등분선의 교차점의 색상을 확인하여 이진 데이터를 추출한다. 위에서 언급하였듯이 검은색은 값이 존재하고, 흰색은 값이 존재하지 않음(0)을 의미하며  $(x, y)$  ( $x, y$ 는 0~2의 정수)에 위치한 영역이 검은색일 경우, 해당 영역에 위치한 값은  $2^x + 3^y$ 이다.

```

set exp to 1
set sum to 0
For a = 1 to GRID_SIZE
  For b = 1 to GRID_SIZE
    markData[a][b] = GetBinaryPixel(gridLabel, GRID_SIZE, a, b)
    If markData[a][b]
      set sum to (sum + exp)
    set exp to (exp * 2)

```

[그림 16] 이진 데이터 인식 의사 코드

## 2.3. 길찾기 알고리즘 구현

### 2.3.1. 다익스트라(Dijkstra) 알고리즘

다익스트라 알고리즘(Dijkstra algorithm)은 어떤 간선도 음수 값을 갖지 않는 방향 그래프에서 주어진 출발점과 도착점 사이의 최단 경로 문제를 푸는 알고리즘이다. 다익스트라 알고리즘은 어떤 그래프에서, 점들은 각각 도시를 나타내고 연결선들이 도시 사이를 연결하는 도로의 길이를 나타냈을 때 다익스트라 알고리즘을 통하여 두 도시 사이의 최단 경로를 찾을 수 있다.

### 2.3.2. 다익스트라 알고리즘과 현재 연구의 관계

다익스트라 알고리즘은 특정 그래프에서 모든 정점과 정점사이의 거리가 양의 값을 가질 때 최단경로로 가는 방법을 찾아낼 수 있다. Marker가 설치된 구역들은 모두 탐색할 수 있는 정점이 된다. 또한 특정 구역과 인접해있는 구역까지의 경로는 그래프 내의 간선으로 취급한다. 이러한 간선들과 정점 데이터들은 미리 Mark42 프로그램을 이용하여 구할 수 있다. 이때 모든 간선의 거리는 양수이기 때문에 다익스트라 알고리즘을 사용하여 목표지점까지의 최단거리를 구할 수 있다.

### 2.3.3. 길찾기 알고리즘의 적용

본 연구에서는 다음과 같은 세 단계 과정을 통해 길찾기 알고리즘을 적용한다.

- 첫 번째, 연구를 위해 제작한 Mark42 프로그램을 통해 마커를 설치할 지도로부터 노드 및 간선 데이터를 얻어온다.
- 두 번째, 웨어러블 기기로부터 시작정점과 도착정점에 관한 데이터를 읽어오고 다익스트라 알고리즘을 이용해 최단거리를 계산한다.
- 세 번째, 길찾기 알고리즘을 이용해 얻은 경로 해를 웨어러블 기기를 통해 사용자에게 알린다.

## 2.4. TTS(Text To Speech)

본 연구는 Mac OS X에 내장된 TTS Engine을 이용하여 음성 출력 환경을 구성한다. 음성을 파일로 출력하여 라즈베리파이에 저장하고, C++에서 커맨드 명령을 제어하여 음성을 조합함으로써 한 문장을 완성한다. 예를 들어 [그림 17]에 나타난 소스 코드의 경우 “앞으로 (distance)걸음 이동하세요.”라는 음성이 출력된다. 본 연구에서는 아래 예시처럼 다음 이동해야 할 마커의 방향을 시각장애인이 바라보고 있는 마커의 방향을 기준으로 판단하고, 마커까지의 거리를 계산하여 음성 조합으로 안내하게 된다.



```
system("aplay /root/rne/tts/forward.wav");
system(ttsNum[distance]);
system("aplay /root/rne/tts/step.wav");
system("aplay /root/rne/tts/move.wav");
```

[그림 17] TTS 소스 코드 일부

“앞으로 (distance)걸음 이동하세요”

### Ⅲ. 연구 결과

#### 1. 시각장애인을 위한 웨어러블 인터페이스 제작

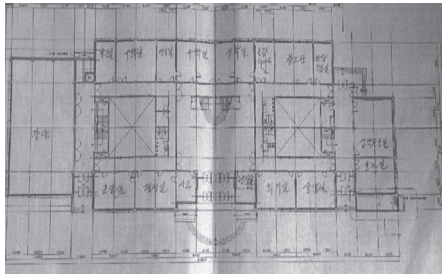
[그림 18]과 같이 아두이노 나노와 라즈베리파이를 사용하여 의복과 액세서리 형태의 웨어러블 내비게이션 인터페이스를 제작한다. 구성 요소로는 마커를 인식할 수 있는 웹캠, 손목에 착용하여 목적지를 입력할 수 있는 팔찌, 길 안내 시스템이 내장된 라즈베리파이, 팔찌와 데이터 송/수신이 가능한 블루투스 모듈이 있다.

웨어러블 인터페이스의  
구성품

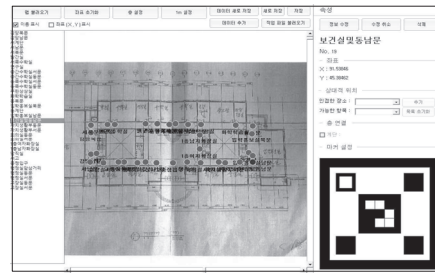
[그림 18] 웨어러블 인터페이스 착용

#### 2. 마커 위치를 저장하기 위한 map 제작

자체 제작한 Mark42 프로그램을 사용하여 인천과학고등학교 본관 건물 내부 [그림 19]의 각 위치를 map에 [그림 20]과 같이 점을 찍듯이 표시할 수 있다.

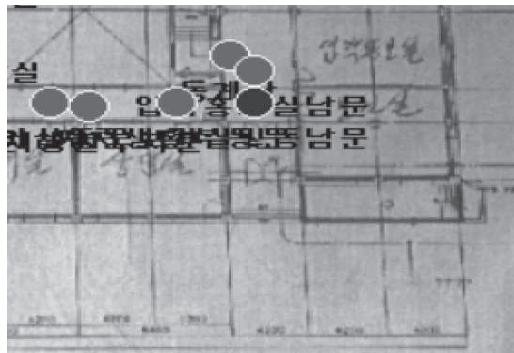


[그림 19] 인천과학고등학교 본관 건물 내부 도면



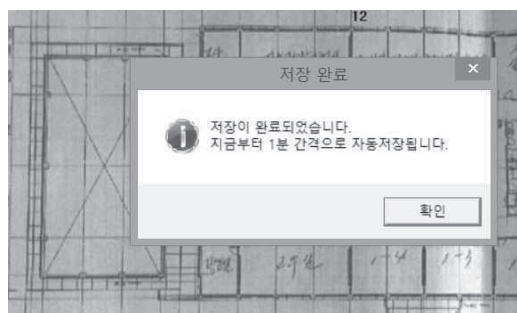
[그림 20] Mark42를 이용한 마커 위치 설정

[그림 20]을 일부분 확대한 그림의 일부분은 [그림 21]과 같다.



[그림 21] 마커 위치 설정 확대 그림

또한 프로그램의 안정성을 위하여 탑재한 자동저장기능이 [그림 22]와 같이 정상적으로 작동하는 것을 확인할 수 있다.








[그림 22] 자동 저장 기능

건물 내부의 각 위치를 점으로 찍듯이 표시한 맵을 txt파일로 저장한 뒤, 라즈베리파이에 저장함으로써 마커 지도 설정이 완료된다.

### 3. 목적지 입력

손목에 장착한 인터페이스는 3개의 버튼과 아두이노로 구성되어 시각장애인이 목적지를 선택할 수 있도록 돕는다. 버튼은 각각 이전, 확인, 다음 버튼으로 구성되며, 아두이노에서는 각 버튼에 할당된 이진수의 조합으로 버튼의 상태를 파악한다. 목적지를 선택하는 과정에서 현재 선택된 목적지 정보를 TTS를 통해 음성으로 안내함으로써 듣는 것만으로 갈 수 있는 곳이 어디인지 알 수 있다. 확인 버튼을 누르면 라즈베리파이는 현재 위치로부터 목적지까지의 최단 경로를 마커 지도를 바탕으로 계산한다. 이 경로에 따라 순차적으로 가야할 방향과 거리를 TTS를 통해 음성으로 안내하게 된다.

### 4. 실내 내비게이션 실행하기

	<p style="text-align: center;"><b>【웨어러블 기기 착용】</b></p> <p>시각장애인이 착용할 조끼와 부품들이다. 각 부품들은 조끼에 장착되어 있기 때문에 사용자는 조끼를 입고 제어용 팔찌를 착용하면 된다.</p>
	<p>사용자는 출발지 주변의 마커를 인식하여 출발지를 설정한다.</p>
	<p>사용자는 손목에 착용한 팔찌의 버튼 입력을 통해 목적지를 입력한다. 이 때 버튼을 누를 때마다 음성으로 안내를 받는다. 버튼은 총 3개로 구성되어 있으며 두 개의 버튼은 목적지 입력용, 하나의 버튼은 확인 기능을 수행한다.</p>
	<p>사용자는 이어폰의 음성 안내를 통해 경유지에 따른 길을 차례대로 안내 받는다.</p>
	<p>이동 중 건물 내의 계단, 코너 등을 이동할 수 있도록 친절한 안내시스템을 갖추고 있다.</p>

## IV. 결론 및 제언

### 1. 결론

라즈베리파이에서 위 프로그램을 업로드 하여 실행하는 데 성공하였고, 인천과학고등학교 본관 내에서 오류 없이 작동하는 것을 확인하였다. 라즈베리파이의 처리 속도 한계로 인하여 평균적으로 영상 처리 속도가 2fps밖에 미치지 못하였는데, 이는 라즈베리파이 CPU 성능 한계로 예상된다. 또한 Global Fixed Thresholding 이진화로 인해 조도에 따라 다른 결과값을 출력하는 문제가 발생하는 데, 이는 고정된 임계값이 아닌 환경에 따라 가변적인 임계값을 채택하는 Adaptive Thresholding 방식의 이진화로 개선할 수 있을 것으로 예상된다<sup>[9]</sup>. 비록 속도는 느리지만 마커 데이터 인식에 높은 정확도를 보였고, 방향 탐색과 마커 간 거리 계산에서도 높은 정확도를 보였다. 따라서 본 연구의 결과물은 MCU의 처리 속도에 따라 큰 퍼포먼스 차이를 보인다는 것을 알 수 있다.

### 2. 제언

본 연구는 라즈베리파이라는 소형 컴퓨터와 웹캠이라는 최소한의, 저가의 하드웨어만을 이용하여 마커 인식 프로그램을 개발한다는 것에 의의가 있다. 현재 라즈베리파이를 비롯한 많은 MCU들이 개발되고 있고, 그 성능 또한 향상되고 있다. 더욱 개선된 성능의 MCU와 보다 효율적이고 최적화된 이진화 및 레이블링 알고리즘을 적용하면 더 나은 결과를 바탕으로 실제 시각장애인을 대상으로 상용화할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 카메라 뿐 아니라 자이로스코프 등 다른 센서를 장착하면 시각장애인의 움직임을 보다 정밀하게 측정할 수 있고 길 안내의 정확성이 높아질 것으로 기대된다.

## ■ 참고문헌

- [1] 통계청, 장애인 현황, 2013.
- [2] 이진현, 시각장애인을 위한 보조기기의 사용과 현황에 대한 연구, 한국시각장애교육재활학회, 2006.
- [3] 박진영, 안정근, 김래현, 하성도, 박세형, 청각장애인을 위한 웨어러블 단말 인터페이스 기술, 한국HCI학회, 2006.
- [4] 최태웅, 실내 환경에 효율적인 모바일 내비게이션을 위한 마커인식, 동신대학교, 2012.
- [5] N. Otsu, "A Thresholding Selection Method from Gray-level Histogram," IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol.9, No.1, pp.62-66, 1979.
- [6] 김도현, 강동구, 차의영, 화상 및 음성처리 : 비재귀 Flood - Fill 알고리즘을 이용한 적응적 이미지 Labeling 알고리즘, 한국정보처리학회, 2002.
- [7] 이희석, 열혈강의 영상처리 프로그래밍, 프리렉, 2013.
- [8] Intel OpenCV library, <http://www.intel.com/research/mrl/research/opencv/>
- [9] D. Bradley, "Adaptive Thresholding using the Integral Image," ACM Journal of Graphics Tools, Vol.12, No.2, pp.13-21, 2007.

### 심사평

본 연구에서는 라즈베리파이와 아두이노를 기반으로 카메라를 이용해 주변을 인식하고 시각 장애인을 위해 목적지까지 길 안내를 해주는 웨어러블 인터페이스를 구현하였다. 저가의 경량 웨어러블 인터페이스를 구현했다는데 연구의 의의가 있으며 고등학생 수준에서 의미 있는 연구결과라 할 수 있다. 지도와 마커 인식을 위한 이미지 처리, 경로 처리, 음성처리 등 다양한 모듈을 결합하여 목적을 수행하는 모듈을 완성한 측면에서 고등학생 수준에서 완성도 있는 연구로 판단된다. 더 발전적인 연구가 되기 위해서는 특정 학교의 특수한 환경에서만 작동되는 결과물이 아니라 일반적인 환경에서 작동될 수 있도록 지도 입력과 마커의 위치에 대한 기준 설정과 마커 인식 후 정확한 위치 안내, 실시간 처리 등의 문제를 극복해야 될 것으로 보인다. 특히 마커를 사용하기 보다는 다양한 무선 신호를 활용한 측위 시스템을 이용하는 것도 하나의 대안이 될 것이라 판단된다. 이런 분야에 대한 서베이도 필요할 것이다.

## 연구 후기

황준호 : 연구 주제를 정할 즈음, IT계에서 화두가 되었던 저전력, 저가형의 프로세서인 아두이노와 라즈베리파이의 장점을 잘 살려 우리 생활에 도움이 될 수 있는 것을 만들 수 있을지 고민하였고, 아두이노 키트를 구매하여 다양한 센서들을 다뤄보았다. 초음파 센서로 키를 측정하고, 사람이 지나가면 블루투스를 통해 휴대폰으로 알림이 전송되는 프로그램을 만들면서 아두이노를 최대한 이해하고 활용하려 노력했다. 이 과정을 통해 센서가 사람의 새로운 감각기관 역할을 할 수 있다는 것을 알게 되었다. 우리는 장애인분들에게 새로운 감각이 되어주고 싶었고 마커인식기만 실내 내비게이션이 가능한 웨어러블 인터페이스를 제작하였으며, 제작한 웨어러블 인터페이스가 실제 시각 장애인분들에게 상용화가 되었으면 하는 바람이다.

윤종효 : 시각장애인들이 내비게이션을 이용하는 방법에 대해서 고민하였다. 손목시계의 버튼을 통해 목적지를 선택할 수 있도록 음성으로 실내위치정보를 알려주었으며, 실내에 마커를 부착한 후 마커인식을 통한 위치파악 및 내비게이션 시스템을 실행시켰다. 연구 진행을 위해 팀원들과 많은 토론을 하였고 창의적인 방법을 생각해내게 되었다.

김대진 : 웨어러블에 적합한 기술을 개발하기 위해 하드웨어의 낮은 사양으로 다양한 기능을 구현하는 과정을 거쳤다. 그 과정을 극복해가면서 웨어러블에 대한 이해도가 월등히 높아졌다는 점을 강조하고 싶다. 이러한 연구 기회를 갖는다면 망설이지 않고 도전하고 싶다.

이원석 : 가장 기억에 남는 것은 손목시계 형태의 인터페이스를 만들던 과정이다. 처음에는 아크릴 판을 직접 잘라 붙이면서 모형을 만들었으나 내구성이 약했고 원하는 형태도 만들 수 없었다. 시행착오 끝에 설계도를 작성하여 3D 프린터로 원하는 형태를 완성했으며 그 과정이 새로운 경험이 되었다.

조영인 : 연구를 진행하면서 시각장애인들이 내비게이션을 사용할 때의 장단점을 고려하며 시각장애인들에 대한 이해도가 높아지게 되었다.

차형현 : 오랫동안 함께 연구를 진행해오면서 팀원 모두가 연구 파트너로서만이 아닌 진짜 ‘친구’가 되어 서로를 진심으로 응원하고 아껴주게 되었다. 서로의 의견을 공유하고 토론, 토의하는 과정을 통해 팀원 개개인을 알아가게 되었고 이는 좋은 팀워크로 발전해 나갔다.



## 연구진

황준호(Hwang Junho, 인천과학고등학교 1학년, wnsgh224@naver.com), 제1저자 및 교신저자

윤종효(Youn Jonghyo, 인천과학고등학교 1학년, whdgy310@naver.com)

김대진(Kim Daejin, 인천과학고등학교 1학년, kdj2614@naver.com)

이원석(Lee Wonseok, 인천과학고등학교 1학년, dnjstjr1017@naver.com)

조영인(Cho Youngin, 인천과학고등학교 1학년, choyi0521@naver.com)

차형현(Cha Hyeongheon, 인천과학고등학교 1학년, chahh98@naver.com)

지도교사 : 이진(Lee Jin, 인천과학고등학교, 전공: 정보·컴퓨터, gobeach@hanmail.net)

(2015. 1월 현재)

## 청각장애인의 음악체감을 위한 앱 개발

(Mobile application development for the music experience of the deaf)

운영석 · 김민식 · 이재혁 · 정용준 · 장병희(인천진산과학고등학교)

### 초 록

최근 사람들의 스마트폰 사용량이 늘어남에 따라 애플리케이션의 중요성이 더욱 커지면서 스마트폰을 통해 언제 어디서나 음악을 감상하기 위한 다양한 MP3 플레이어 애플리케이션이 개발되고 있다. 하지만 현재 개발된 대부분의 MP3 플레이어 애플리케이션들은 청각 장애인들이 음악을 감상할 수 있는 기능을 제공하지 못하고 있다. 이에 본 연구는 푸리에 변환을 통해 음악의 주파수와 진폭데이터를 추출하고 이것을 그룹화하여 스마트폰의 진동 센서를 통해 그에 맞는 진동으로 나타냄으로써 청각 장애인들이 음악을 체감할 수 있는 애플리케이션을 개발하고자 한다.

키워드 : 청각장애인, 음악체감, 햅틱(진동), 푸리에변환, 안드로이드애플리케이션

## I. 서론

지하철을 타보면 좌석에 앉아서 스마트폰을 이용하여 SNS, 인터넷 등을 하는 사람을 많이 볼 수 있다. 또한 스마트폰을 이용하여 노래를 듣는 사람도 쉽게 볼 수 있다.

국내 스마트폰 사용자가 500만 명이었던 2010년 이후 최근 4천 만 명으로 늘어났다. 5명당 4명 꼴로 스마트폰을 소지하고 있는 셈이다. 이제는 스마트폰 없이 살아가는 다큐멘터리가 나올 정도로 스마트폰은 이미 우리의 삶에 없어서는 안 될 물건으로 자리 잡았다. 여기에는 스마트폰 애플리케이션이 한 몫 했다. 다양한 애플리케이션이 개발되면서 그에 따라 사용자도 기하급수적으로 증가한 것이다. 그러나 이와 달리 장애인들은 열 명 중 단 두 명만이 스마트폰을 소지하고 있는 실정이다. 이는 수많은 애플리케이션 중 비장애인과 다른 장애인들을 위한 애플리케이션이 부족하기 때문에 일어난 현상이다. 스마트폰은 이미 대중화 되었지만 장애인을 고려한 애플리케이션이 없다는 것은 장애인들에게는 상당한 불편이 아닐 수 없다.

우리나라 등록 청각장애인 수는 2013년을 기준으로 25만 8589명이다. 지체장애인을 제외하고



는 청각장애인이 가장 많은 숫자를 차지한다. 청각장애인들은 실제에 가까운 음악을 들을 수 있는 경우가 거의 없다. 특히 달팽이관에 있는 청각세포들이 파괴되거나 청각신경에 손상이 간 청각장애인들은 조그마한 소리도 느끼지 못하여 음악을 전혀 들을 수 없다. 현재 청각장애인들을 위한 보조기구로서 보청기, 골전도 스피커 등이 존재하지만 이마저도 청각세포와 청각신경이 온전한 사람들만이 이용할 수 있다는 제한점이 있다.

우리는 청각장애인들이 음악을 체감하게 해주는 'SONATA 터치블 뮤직 시트'에서 모티브를 얻어 청각장애인들의 음악체감을 위하여 음악을 진동으로 변환시킴으로써 진동을 통한 촉감으로 음악을 전달할 수 있는 애플리케이션을 개발하고자 한다. 이를 위한 연구의 목적은 다음과 같다.

첫째, 일반적인 MP3 플레이어 애플리케이션을 개발한다.

둘째, MP3 파일을 이용하여 진동을 구현하는 방법을 연구한다.

셋째, 음악을 진동으로 구현할 때, 그룹화를 위해 적정 진동 범위를 추출한다.

넷째, Android 애플리케이션 인터페이스를 설계하고 청각장애인의 음악체감을 위해 "Miracle of Music"을 개발한다.

## II. 이론적 배경

### 1. SONATA 터치블 뮤직시트

[그림 1]은 서강대학교 송은성 박사가 제작한 SONATA 터치블 뮤직시트이다. 청각장애인이 음악을 듣지 못한다는 점을 극복하기 위하여 제작하였으며, 현재는 현대자동차 카시트로 만들어졌다.

스피커에 손끝을 가져다대면 저음에서는 강하고 굵은 떨림, 고음에서는 가늘고 미세한 떨림이 느껴지는데, 듣지 못하는 사람들은 일반인보다 촉각이 극히 예민해서 몸이 느끼기 쉬운 주파수로 음악을 변환해보면 어떨까 하여 터치블 뮤직시트를 만들었다고 한다. 뮤직시트는 시트 가죽 커버 안에 4개의 진동스피커가 들어 있다. 사람의 허벅지와 등 쪽에 있는 진동 스피커를 이용하여 음악을 체감할 수 있다. 이 터치블 뮤직시트는 사람이 들을 수 있는 주파수(20~20kHz)를 촉각으로 구별할 수 있는 주파수(15~1000Hz)로 바꾸는 작업을 거쳐 진동을 통해 음악을 느낄 수 있도록 만들어졌다. 그 결과 원음의 70% 정도에 가깝게 느낄 수 있으며 리듬뿐만 아니라 멜로디의 변화, 장르 구분도 가능하게 되었다.



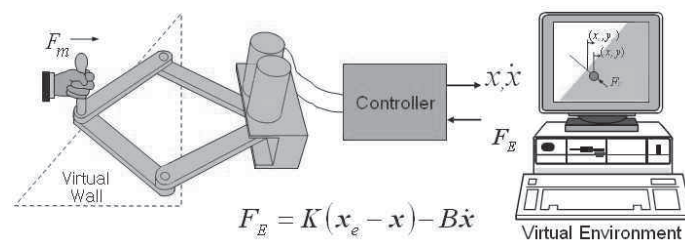
[그림 1] SONATA 터치블 뮤직시트

## 2. 햅틱 인터페이스

햅틱 인터페이스는 넓은 의미로는 사용자에게 촉감을 전달하는 시스템 전체를 가리키며, 사용자가 직접 접촉하게 함으로써 사용자에게 물리적 전달을 통해 촉감을 발생시키는 하드웨어 장치인 햅틱 디바이스, 원격 접촉 환경 혹은 컴퓨터 그래픽과 물리적 특성치 등으로 이루어진 가상환경, 햅틱 디바이스의 움직임을 가상환경에 전달하고 가상환경과의 접촉력을 햅틱 디바이스로 전달하는 역할을 하는 제어기로 이루어진다.

햅틱 인터페이스의 궁극적인 목적은 모델링 되어 있는 가상 환경 혹은 실제 환경의 물리적 특성을 사용자가 햅틱 디바이스를 통하여 똑같이 느끼게 하는 것이다. [그림 2]와 같이 햅틱 인터페이스는 햅틱 디바이스와 가상환경이 하나의 환경 내에 존재할 수 있도록, 햅틱 디바이스의 위치 변화를 표현하는 가상의 대리자가 가상환경 속에 존재한다. 가상의 대리자가 가상의 물체에 부딪쳐서 발생한 힘이  $F_E$ 고, 사람이 햅틱 디바이스를 통해서 느끼는 힘이  $F_m$ 이라면 두 값이 똑같이 되도록 제어하는 것이 이상적인 햅틱 인터페이스 시스템이다.

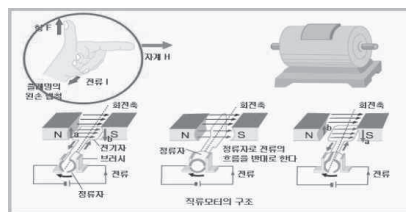
이상적인 햅틱 인터페이스의 구현을 위해서는 정확한 모델링 방법과 모델을 구현할 수 있는 하드웨어 및 제어 방법에 관한 연구가 뒷받침 되어야 한다. 햅틱 인터페이스는 좁은 의미로는 하드웨어적인 부분만으로 제한되어 햅틱 디바이스와 동일한 의미로 사용되는 경우가 많다.



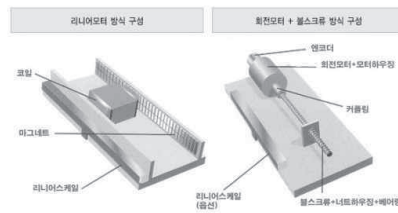
[그림 2] 햅틱 인터페이스

### 3. 안드로이드 진동 모터

진동 모터는 전자기적 힘의 발생 원리를 이용하여 전기적 에너지를 기계적 진동으로 변환하는 장치이다. 일반적으로 모터에는 자기장을 줄 수 있는 자석과 코일로 구성되어 있고, 자기장 내에서 전류가 흐르는 코일은 일정한 방향으로 힘을 받기 때문에 코일은 계속 돌아갈 수 있다. 휴대전화에 사용되는 진동모터의 경우에는 분동이 달린 회전체가 회전하면서 편심에 의해 평형성을 잃게 되면 특정 방향으로 진동이 발생하는 모터이다. 이는 내구성이 떨어지고 소비 전력도 너무 높아 마찰이 없는 구조인 리니어 진동 모터로 대체되고 있는 추세이다. 리니어 모터는 진동 모터와는 달리 마찰을 할 수 있는 부위가 없어 내구성도 크고 소비 전력도 낮은 편이다. 또한, 기존의 코인 모터나 실린더 모터는 반응 속도가 느린데 300ms, 60ms인 반면 리니어 모터는 50ms의 반응 속도를 가진다. 게다가, Haptic 기술을 다른 모터들은 지원하지 않는다.



[그림 3] 휴대전화의 진동 모터



[그림 4] 리니어모터와 기존 모터의 차이점

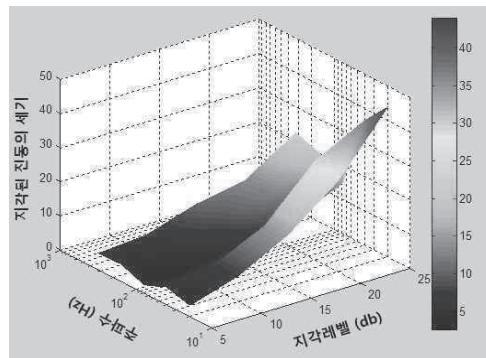
### 4. UHL

UHL이란 Universal Haptic Layer의 줄임말로써 immersion사에서 개발한 촉각 피드백 제공 기술이다. UHL는 햅틱 API를 포함하며 고급 햅틱 제어 기술 및 실행기 인터페이스를 제공한다. 실행기 인터페이스는 응용 프로그램을 확인할 수 있는 좋은 방법이 되는데, 모든 안드로이드 장치에 큰 촉각을 제공한다. 실행기는 그 특성에 따라 효과 소자의 특성을 파악하고 렌더링한다.

### 5. 손끝 진동에 대한 사람의 지각

“손끝 진동에 대한 인간의 지각과 감성”(황지홍(2010))에서는 5개의 진동수(20, 40, 80, 160, 320Hz)와 5개의 지각레벨(5, 10, 15, 20, 25db)을 통해 총25개에 서로 다른 진동의 세기를 측정한 것을 결과로 나타낸

3차원 그래프인데 지각 레벨이 동일 할 때 20~80Hz의 진동 주파수 구간에서는 지각된 진동세기 값이 급격히 감소됨이 보이고 80~320Hz에서 그래프가 완만하게 증가하는 것을 통해 알 수 있다. 보통 스마트폰 진동 소자는 235Hz의 진동을 만들어 낸다. 따라서 위의 연구를 통해 스마트폰 진동이 사람이 지각하기에 적절함을 알 수 있다.



[그림 5] 지각된 진동의 세기

### Ⅲ. 연구의 실제

#### 1. 'Miracle Of Music'앱의 개요

본 연구를 통해 개발된 애플리케이션의 이름은 'Miracle Of Music'이다. 이를 해석하자면 음악의 기적이란 뜻이다. 음악을 듣지 못하는 사람이 음악을 체감할 수 있다는 것은 기적과도 같은 일일 것이다. 따라서 청각장애인이 음악을 체감하는 기적을 일으키고자 하는 강렬한 열망을 애플리케이션의 이름을 통해 표현하고자 하였다.

본 연구의 주제인 '청각장애인의 음악 체감을 위한 앱'의 디자인은 일반 MP3플레이어와 비슷하다. 하지만 이들과는 몇 가지 차이점이 있다. 우선 가장 큰 차이점은 켜다 끌 수 있는 진동버튼이 있다는 것이다.

청각장애인은 소리를 듣지 못하기 때문에 진동을 이용하여 음악을 체감할 수 있도록 하는 것이 본 연구의 목표이지만 비장애인 사용자들도 사용할 수 있도록 해야 한다고 생각했다.

진동버튼을 눌러 진동모드를 활성화시키면 음악이 사운드와 진동으로 재생되어 청각장애인은 음악을 느낄 수 있다. 반대로 진동버튼을 비활성화 시키면 사운드만 재생되어 일반 MP3 플레이어 애플리케이션처럼 사용할 수 있다.

'Miracle Of Music'은 전체적으로 하얀색과 파란색 톤으로 디자인하였다. 하얀색과 파란색이 시원함,

청결한 느낌을 주는데, ‘Miracle Of Music’을 사용하면서 지금까지 음악을 듣지 못했던 답답함을 시원하게 날려 보내자는 의미를 담아 밝은 색으로 표현하였다.

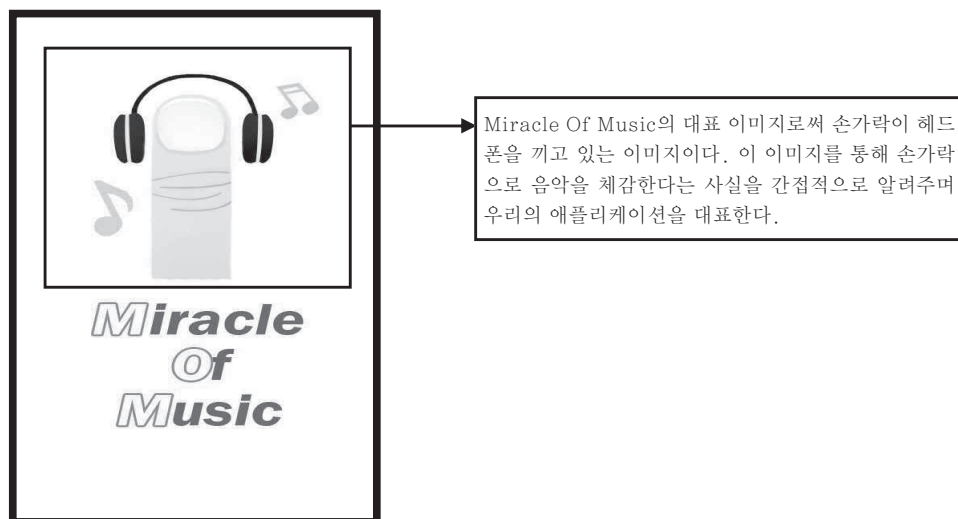
화면하단에는 재생버튼, 일시정지버튼, 빨리 감기, 되감기 버튼 등 일반적인 MP3플레이어의 기본 구성 요소로 구성되어 있다.

메인 이미지는 ‘손가락으로 음악을 듣는다.’라는 의미를 담아 손가락위에 헤드폰을 장착한 그림으로 표현하였다.

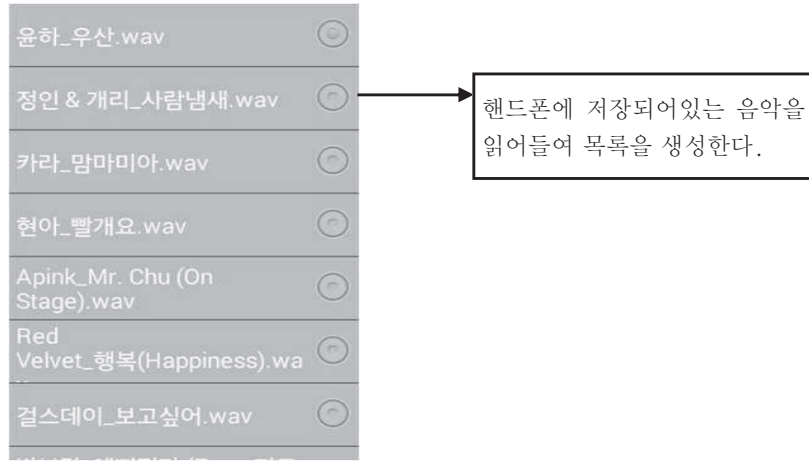
## 2. 개발환경

구분		사양
하드웨어 (H/W)	CPU	Intel(R) Core(TM) i5-3470 CPU @ 3.20GHz
	RAM	4.00 GB
	HDD	250 GB
소프트웨어 (S/W)	운영 체제	Window 7
	개발 도구	Eclipse IDE for Java Android SDK Adobe Photoshop CS3
	사용 언어	JAVA language

## 3. 인터페이스 설계



[그림 6] “Miracle Of Music”의 첫 화면



[그림 7] “Miracle Of Music”의 재생 목록화면



[그림 8] “Miracle Of Music” 재생 화면

#### 4. 푸리에 변환

본 연구에서는 음악의 정보 즉, 음악의 주파수와 진폭을 구하기 위해서 푸리에 변환을 사용해야 한다. 푸리에 변환식을 그대로 계산한 DFT(Discrete Fourier Transform, 이산 푸리에 변환) 알고리즘을 사용하기에는  $n$ 개의 데이터를 연산 할 때  $O(n^2)$ 의 시간복잡도를 가져 느리다는 단점이 있다. 따라서 단점을 보완하여  $O(n \log n)$ 의 시간복잡도를 갖는 FFT(Fast Fourier Transform, 고속 푸리에 변환)를 이용했다.

FFT는 PCM 데이터를 이용하기 때문에 MP3 파일을 PCM데이터로 변환시켜야한다. MP3를 PCM 데이터로 변환하기 위해서는 Java의 NDK를 사용하여야 하며 많은 단계를 거치기 때문에 시간이 오래 걸린다. 하지만 본 연구에서는 음악과 진동 재생에 초점을 맞추고 있기 때문에 빠르게 PCM 데이터를 이용하기 위해 WAV 파일을 사용하였다.

WAV 파일형식이란 Windows에서 표준적으로 사용되는 PCM 데이터 파일을 의미한다.

```
while (cnt < Music_Size / BUFFER_SIZE_IN_BYTES) {
    ret = Music.read();
    audio_data = bytesToShorts();
    for (int i = 0; i < CHUNK_SIZE_IN_SAMPLES; i++) {
        x_RealNumber[i] = audio_data[i];
        x_ImaginaryNumber[i] = 0;
    }

    fft.doFFT(x_RealNumber, x_ImaginaryNumber, false);
    double best_frequency = min_frequency_fft;
    double best_amplitude = 0;
    draw_frequency_step = 1.0 * RATE / CHUNK_SIZE_IN_SAMPLES;

    for (int i = min_frequency_fft ; i <= max_frequency_fft ; i++) {
        current_frequency = i * draw_frequency_step;
        current_amplitude = Math.pow(x_r[i], 2) + Math.pow(x_i[i], 2);
        best_frequency = Max(current_frequency, best_frequency);
        best_amplitude = Max(current_amplitude, best_amplitude);
    }
    arrayAmplitude[cnt]=sortAmplitude[cnt]=best_amplitude;
    arrayFrequency[cnt]=sortFrequency[cnt]=best_Frequency;
    cnt++;
}
sort(sortAmplitude);
sort(sortFrequency);
```

[그림 9] FFT변환을 통한 음악의 주파수와 진폭데이터 추출 의사코드

음악을 BUFFER\_SIZE\_IN\_BYTES만큼씩 불러들여 FFT변환을 한 다음 그 구간 안에서의 최대 주파수 값과 진폭 값을 구하고 다른 배열에 정렬하여 저장한다.

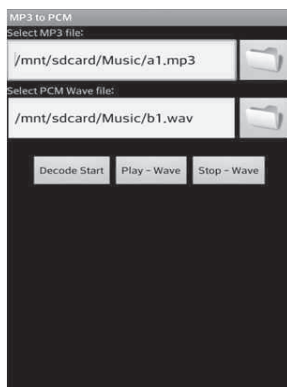
## 5. 범용 MP3 플레이어 구현

본 연구에서 개발하고자 하는 Miracle Of music은 범용 MP3 플레이어에다가 음악을 분석하여 진동으로 표현하는 부분을 추가하는 것이다. 따라서 범용 MP3 플레이어를 먼저 구현하기로 한다.

### 5.1. PCM 변환

FFT를 이용하기 위해서는 PCM데이터가 필요한데, MP3파일을 PCM데이터로 사용하기에는 시간이 걸리기 때문에 WAV파일을 사용하기로 하였으나, 일반적으로 사람들은 MP3파일형식의 음악을 사용한다. 따라서 MP3파일을 쉽게 WAV파일형식으로 쉽게 바꾸어야 한다고 생각했다.

따라서 본 연구에서는 오픈 소스를 이용해서 MP3파일을 PCM으로 변환하는 “MP3 to PCM”이라는 애플리케이션을 만들었다. 이는 MP3파일 형식을 WAV파일 형식으로 바꾸어 스마트폰에 저장한다. 다음은 이를 구현한 소스 코드의 의사코드이다.



[그림 10] “MP3 to PCM”

```
File mp3File = new File(mp3FileName);
AudioInputStream in = null;
in = AudioSystem.getAudioInputStream(mp3File);

AudioInputStream din = null;
AudioFormat baseFormat = Music.getFormat();
AudioFormat decodedFormat = new AudioFormat();
din = AudioSystem.getAudioInputStream();
```

[그림 11] MP3 to PCM 구현 의사 소스

### 5.2. 음악 재생 목록

음악을 재생시키기 위해서는 음악파일이 필요하기 때문에 스마트폰 내에 있는 음악파일을 찾아서 음악 목록을 만들어야 한다.

다음은 스마트폰 내에 있는 파일중 MP3파일을 찾아서 목록에 추가한 후 화면에 표시하는 의사 코드이다.





[그림 12] 재생 목록 화면

```
String mp3Path = "/storage/emulated/legacy/Music/";
mp3List = new ArrayList<String>();

File[] listFiles = new File(mp3Path).listFiles();
String fileName, extName;
for (File file : listFiles) {
    fileName = file.getName();
    extName = fileName.substring(fileName.length() - 3);
    if(extName.equals((String)"mp3"))
        mp3List.add(fileName);
}

ArrayAdapter<String> adapter =
    new ArrayAdapter<String>(mp3List);
```

[그림 13] 음악 재생 목록 구현 의사 코드

### 5.3. 음악 재생

범용 MP3 플레이어에서 음악을 재생시키면 재생화면이 나타난다. 재생화면에는 앨범아트, 재생/일시정지 버튼, 넘기기 버튼 등 다양한 기능을 지원한다.



[그림 14] 음악 재생 화면

```
public void onClick(View v) {
    if (v.getId() == R.id.VibBtn) {
        vibState=!vibState;
    } else if (v.getId() == R.id.play) {
        playState=!playState;
    } else if (v.getId() == R.id.stop) {
        changeMusic=true;
        WAV_Player_Start();
    } else if (v.getId() == R.id.next) {
        Now_play_music++;
        WAV_Player_Start();
    } else if (v.getId() == R.id.back) {
        Now_play_music--;
        WAV_Player_Start();
    }
}
```

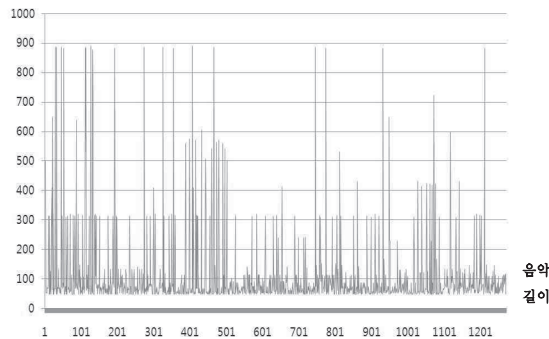
[그림 15] 음악 재생 관련 버튼 기능 의사코드

## 6. 햅틱 반응 구현

본 연구에서는 Immersion사의 UHL에 내장된 햅틱 API를 이용하여 햅틱 반응을 구현하였다. 진동 세기 세 가지(33%세기, 66%세기, 100%세기)와 진동횟수 세 가지(1번, 2번, 3번)의 진동을 이용하여 총 9가지의 진동을 사용하기로 했다.

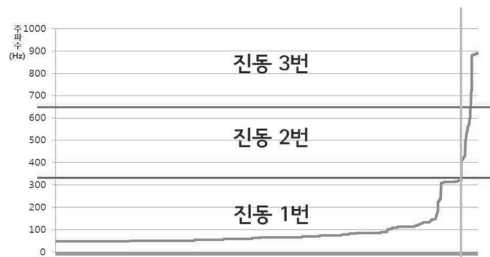
음악을 진동으로 표현하기 위해서는 어떤 부분에서 어떤 진동을 사용할지를 알아야 한다. 적정 진동 범위를 알아내기 위해서 음악파일 하나를 가지고 푸리에 변환을 시켰을 때의 주파수와 진폭을 분석하였다.

음악을 푸리에 변환 시킨 후 재생하는 소스에 데이터를 추출하는 소스를 추가하여 주파수 데이터를 txt파일로 추출 한 후 그 값을 Microsoft Excel을 이용하여 그래프로 나타내었다.



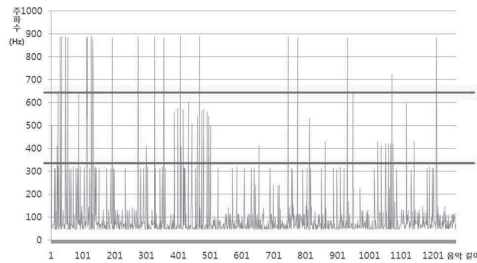
[그림 16] 음악 길이에 따른 주파수 데이터 그래프

이 데이터를 주파수 값을 기준으로 오름차순으로 정렬하여 다음과 같은 그래프로 나타내었다.

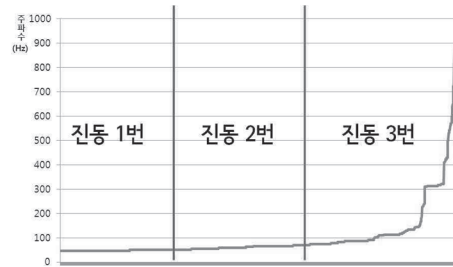


[그림 17] 음악의 주파수 데이터를 오름차순 정렬 후 x축과 평행하게 3등분한 그래프

진동횟수 세 가지(1번, 2번, 3번)을 사용하기 위하여 오름차순 된 음악을 3등분해야 한다. 초기에는 최저 주파수(47Hz)와 최고 주파수(891Hz) 사이 범위를 3등분 하여 (47Hz ~ 328Hz), (329Hz ~ 609Hz), (610Hz ~ 891Hz)의 범위로 나누어 각각 진동 1번, 2번, 3번을 주도록 하였다. 그러나 [그림 17]과 같이 (47Hz ~ 328Hz)의 빈도수가 음악 전체의 약 95%를 차지 한다는 결과가 나왔고, 음악의 약 95%가 진동 1번으로 구현된다면 체감도가 떨어질 것이라는 생각을 하여 다른 방법으로 범위를 나누어야 한다고 생각하였다.



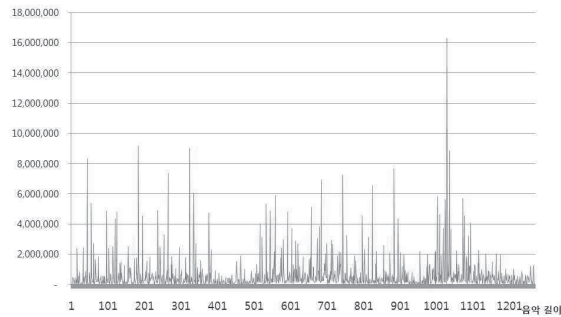
[그림 18] 오름차순 했을 때 나는 범위를 음악 주파수 그래프에 대입해 본 그래프



[그림 19] 주파수 데이터를 오름차순 후 음악의 전체 길이를 3등분 한 그래프

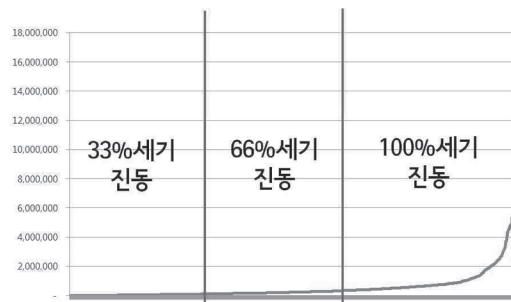
위의 문제점을 해결하기 위하여 음악의 전체 길이를 3등분한 후 주파수 값을 이용하여 구간을 나누었다. 그 덕분에 1번, 2번, 3번 진동하는 구간의 빈도수가 같게 나오는 결과가 나와 햅틱 반응을 구현하는 데에 뿐만 아니라 청각장애인들이 진동을 통해 음악을 체감하는데 적당하고 판단하였다.

위의 방법과 동일하게 음악 진폭의 데이터를 추출하여 그래프를 나타내었다.



[그림 20] 음악의 진폭 데이터

다음 데이터를 오름차순 한 뒤 음악 길이로 3등분 하여 33%세기의 진동, 66%세기의 진동, 100%세기의 진동을 주어 햅틱 반응을 구현하였다.



[그림 21] 진폭 데이터를 오름차순 후 음악의 전체 길이를 3등분 한 그래프

진동을 통한 햅틱 반응을 구현하기 위해 음악파일을 BUFFER\_SIZE\_IN\_BYTES만큼씩 읽어 들인 PCM바이트 배열(3000byte)에 대해 2048byte만 푸리에 변환을 하였다.

다음은 삼등분 할 때의 기준이 되는 값을 정렬된 배열에서 찾고 이 값을 기준으로 주파수레벨과 진폭레벨을 나누어 그에 맞게 immersion사에서 제공하는 Haptic API를 이용하여 진동을 구현하는 의사 코드이다.

```
total=ExtractFFT.cnt;
SortFrequency1=sortFrequency[total*33/100];
SortFrequency2=sortFrequency[total*66/100];

SortAmplitude1=sortAmplitude[total*33/100];
SortAmplitude2=sortAmplitude[total*66/100];

while(cnt < size/BUFFER_SIZE_IN_BYTES){

    if(arrayFrequency[cnt] < SortFrequency1) FrequencyLevel=1;
    else if(arrayFrequency[cnt] < SortFrequency2) FrequencyLevel=2;
    else          equencyLevel=3;

    if(arrayAmplitude[cnt] < SortAmplitude1) AmplitudeLevel=1;
    else if(arrayAmplitude[cnt] < SortAmplitude2) AmplitudeLevel=2;
    else          amplitudeLevel=3;

    if(FrequencyLevel==1){
        if(FrequencyLevel==1) Vibrate(STRONG_CLICK_33);
        if(FrequencyLevel==2) Vibrate(STRONG_CLICK_66);
        if(FrequencyLevel==3) Vibrate(STRONG_CLICK_100);
    }
    else if(FrequencyLevel==2){
        if(FrequencyLevel==1) Vibrate(DOUBLE_STRONG_CLICK_33);
        if(FrequencyLevel==2) Vibrate(DOUBLE_STRONG_CLICK_66);
        if(FrequencyLevel==3) Vibrate(DOUBLE_STRONG_CLICK_100);
    }
    else if(FrequencyLevel==3){
        if(FrequencyLevel==1) Vibrate(TRIPLE_STRONG_CLICK_33);
        if(FrequencyLevel==2) Vibrate(TRIPLE_STRONG_CLICK_66);
        f(FrequencyLevel==3) Vibrate(TRIPLE_STRONG_CLICK_100);
    }
    cnt++;
}
```

[그림 22] 진동 구현 의사코드

## IV. 결론

본 연구에서는 청각장애인이 음악을 소리가 아닌 진동을 통해 느낄 수 있도록 하기 위해 음악 체험 안드로이드 애플리케이션 ‘Miracle Of Music’을 개발하는 연구를 수행하였다. 그 결과 다음과 같은 성과를 얻을 수 있었다.

첫째, 청각장애인용 애플리케이션 개발 과정에서 사전 조사를 통해 청각 장애인의 고충을 해결할 방안을 모색하였다.

둘째, MP3 파일을 햅틱 인터페이스를 통해 소리를 진동으로 변환하였다.

셋째, 소리와 진동을 동기화함으로써 비장애인도 음악을 입체적으로 즐기게 하였다.

넷째, 청각장애인들을 위한 다양한 애플리케이션을 개발할 수 있는 계기를 마련하였다.

그러나 음악을 진동으로 표현하는 과정에서 스마트폰의 진동모터를 사용하고 immersion사에서 제공하는 Haptic API를 사용하기 때문에 음악의 미세한 차이를 나타낼 수 없었다. 따라서 하드웨어적으로 여러 개 또는 강력한 진동모터를 사용하여 진동 표현의 폭을 넓히는 연구와 소프트웨어적으로 immersion사의 Haptic API를 이용하지 않고 스마트폰의 kernel에 접근하여 직접 진동을 제어하는 방법에 대한 연구가 추가적으로 필요하다.

## ■ 참고문헌

- [1] 송은성, “Tactile Music”, 석사학위 논문, 2009
- [2] 황지홍, “손끝 진동에 대한 인간의 지각과 감성”, 디자인학연구 통권 제91호, 127-137, 2010
- [3] 황인옥 외 5명, “모바일 기기용 실시간 이중 채널 진동 촉감 음악 재생기”, 한국HCI학회 학술대회, 251-253, 2010

### 심사평

본 연구에서는 PCM 데이터를 푸리에 변환하여 진동수와 진폭 정보를 얻은 후에 진동수와 진폭을 각각 3단계로 구분하여 그에 맞는 진동을 표현함으로써 소리를 진동으로 바꾸어주는 app을 개발하였다. 본 연구는 청각장애인을 위하여 소리 정보를 진동 정보로 바꾸어 청각장애인도 음악을 느낄 수 있는 app을 구현하였는데 연구의 참신함과 의의가 있다. 더 발전적인 연구가 되기 위해서는 기존 연구 결과에 대한 서베이도 필요하고, 직접 청각 장애인들이 사용한 후에 음악을 체감할 수 있는지에 대한 검증이 필요하고, 음악을 더 실제적으로 체감할 수 있는 척도를 탐색하는 과정이 필요할 것이다.

### 연구 후기

음악은 사회 깊숙이 자리를 잡으며 다양한 기능을 수행하지만 청각장애인들은 음악을 들을 수가 없습니다. 이러한 청각장애인이 음악을 듣지는 못하더라도 느낄 수는 없나 하는 의문을 갖게 되었고 그들을 도와주자라는 마음으로 이 연구를 시작하게 되었습니다.

현대자동차에서 개발한 청각장애인들이 음악을 경험할 수 있도록 만든 뮤직시트를 직접 경험했었습니다. 이때 촉감으로 음악을 듣는 경험을 할 수 있었고 촉감으로 청각장애인이 음악을 경험한다는 것에 관심을 가졌습니다. 음악은 언제나 편하게 들을 수 있어야 하므로 가장 잘 접할 수 있는 스마트폰을 이용하기로 했습니다. 이렇게 촉감과 스마트폰이라는 주제가 만나 ‘청각장애인들의 음악 체감을 위한 앱 개발’이라는 연구주제가 정해졌습니다.

처음에는 다들 프로그래밍에 대해서 하나도 몰랐습니다. 음악을 분석하여 진동으로 표현하기는커녕 일반적인 MP3 애플리케이션도 만들지 못했습니다. 모두가 열정을 가지고 JAVA언어를 공부하고 서로에게 모르는 것을 알려주며 1년간 많은 발전을 해왔습니다. 그동안 옆에서 함께 연구하신 윤상현 선생님과 기술적인 자문을 구해주신 박길식 박사님의 도움이 있었기에 아무것도 모르던 저희가 “Miracle Of Music”을 개발할 수 있었습니다. 그리고 청각 장애인에게 음악을 전달하는 분야의 연구자 분의 격려와 조언이 연구를 진행하는데 큰 힘이 되었습니다. 모두 감사드립니다. 그리고 우리 팀원들, 맨땅에 헤딩하듯이 아무것도 모른 채로 시작하고 선행연구조차 얼마 없어 많이 힘들기도 했지만 지금 생각해보면 모두 머리를 맞대고 연구에 대해 깊은 고민을 하면서 팀원들 사이의 유대가 더욱 돈독해진 것 같다. 그동안 열심히 해주어서 고맙다.

우리 앱을 통해 청각장애인들이 완벽하게 음악을 체감할 수 있는 것은 아닙니다. 다만 흔히 가지고 다니는 스마트폰으로도 청각장애인들이 음악을 체감할 수 있다는 것을 보여주고 싶었습니다. 우리의 연구가 첫 걸음이 되어 청각장애인들에게 도움이 되는 많은 연구가 진행되기를 바랍니다.

## 연구진

윤영석(Yoon Youngseok, 인천진산과학고등학교 1학년, yys980@gmail.com), 제1저자 및 교신저자

김민식(Kim Minsik, 인천진산과학고등학교 1학년, tv6755@gmail.com)

이재혁(Lee Jaehyeok, 인천진산과학고등학교 1학년, peter9893@gmail.com)

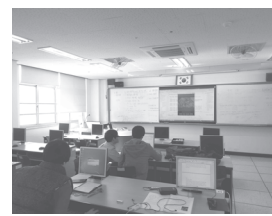
정용준(Jeong Yongjun, 인천진산과학고등학교 1학년, lucasjeong99@gmail.com)

장병희(Jang Byeonghee, 인천진산과학고등학교 1학년, jmkabc4@gmail.com)

지도교사: 윤상현(Yun Sangheon, 인천진산과학고등학교, 전공: 정보·컴퓨터, histime7@chol.com)

지도교수: 박길식(Park Gilsik, 삼성첨단기술연구소 정보·컴퓨터과, himdrura@dongguk.ac.kr)

(2015. 1월 현재)



# 모션 인식과 근전도 신호를 이용한 힘 증폭 로봇 손 설계 및 제어

## (Design and control of force amplification robot hand using motion capture and EMG signal)

조정민 · 장민수 · 이종완 · 진태규(한국과학기술원(KAIST) 부설 한국과학영재학교)

### 초 록

본 연구의 목표는 사람의 손동작을 인식하고 손의 힘을 측정하여 동작을 원격으로 제어하고 힘을 증폭시킬 수 있는 로봇 손을 제작하는 것이다. 립 모션(Leap Motion)을 사용하여 엄지와 검지 사이가 벌어진 정도를 측정하고, 그만큼 로봇 손을 오므려 제어한다. 로봇 손이 물건과 접촉하는 부분에는 힘 센서를 장착하여 물건을 잡았는지 인식한다. 기기가 물건을 잡았다고 인식했을 때부터는 사람의 팔에 부착한 근전도 센서를 이용해 손에 준 힘의 크기를 측정하고, 이에 비례하여 로봇 손의 힘을 제어한다. 이 과정을 통해 손의 힘을 증폭하는 효과를 발휘한다. 이 때 손에는 진동 모터로 피드백을 주어 로봇 손이 물건을 어느 정도 세기로 잡고 있는지 알 수 있게 한다. 립 모션과 근전도의 입력은 따로 분리된 PC와 아두이노를 이용하여 받고, 네트워크로 정보를 보내 원격으로 로봇 손을 제어한다. 또한 로봇 손에 장착된 힘 센서에서 측정된 값은 다시 보내 진동 모터에 반영한다. 본 연구의 성과는 사람이 들어가지 못하는 극한 환경에서의 작업, 사람보다 큰 힘을 필요로 하면서도 정교한 제어가 필요한 작업 등에 활용될 수 있다고 기대한다.

키워드 : 로봇 손, 모션 인식, 근전도

## I. 서론

### 1. 연구 목적

본 연구에서는 모션 인식 적외선 센서와 근전도 센서로 사람의 손동작을 인식하고, 진동모터를 이용한 햅틱 피드백을 통하여 사람과의 상호작용 능력을 향상시켜, 사람이 들어가지 못하는 극한 환경에서의 작업과 사람보다 큰 힘을 필요로 하면서도 정교한 제어가 필요한 작업 등의 넓은 영역에서 활용할 수 있는 원격조작 가능한 힘 증폭 로봇 손을 제작하였다.



연구를 진행하면서 하드웨어 설계 프로그램을 익히고 로봇이 구동되기 위한 기본적인 시스템 구조와 제어방법을 이해하고 적용할 수 있도록 하여 공학적 설계의 기반을 다질 수 있도록 하였다.

## 2. 연구 배경 및 필요성

근력강화를 위한 외골격 연구는 고령 및 장애인구의 근력 저하로 인한 삶의 질 저하 문제를 해결하는 방안으로 고령화 사회로 갈수록 개인별 맞춤형 활동 보조를 통해 원활한 일상생활을 유지하는 기술의 필요성이 점점 더 증가하고 있다. 대상이 되는 고령자/장애인에 필요한 사양은 장애 정도와 운동/감각 능력이 따라 다양하므로 이러한 다양성에 대한 확장이 가능한 잠재력이 있으며, 동시에 보급제작이 가능한 기술 개발이 핵심적이다.

인간의 운동 신호를 실시간으로 해석(Encode) 한 후 인체의 일부분을 대체하거나 보조, 증폭하는 기기에 대한 기기는 단순히 컴퓨터 인터페이스를 넘어 의수, 의족을 제어하거나 인체의 힘을 증폭하는 군사, 원격 작업을 이용한 극한 작업 로봇의 원거리 제어에 대한 응용까지 속속 선을 보이고 있다. 로봇과 인간이 분리되어 영상/음성 교환에 근거한 감정적, 인지적인 HRI 상호 작용에서 양자가 물리적으로 결합되어 공동의 일을 수행하거나 인간의 절단되거나 약화 된 신체의 일부분을 대신할 수 있는 로봇기술이 시연될 것이다.

이미 생체신호를 이용한 각종 인터페이스 기술을 이미 상당 수준의 상업성과 시장이 형성되고 있다. 절단 또는 마비 환자들은 손실되었던 팔, 다리의 기능을 회복할수 있으며 뇌졸중, 파킨슨씨병 등의 신경 퇴화성 질병으로 고통 받는 노인들의 재활 및 삶의 질 향상에 큰 기여를 할 것이다. 이러한 인간의 근력 증폭 바이오 로봇기술은 재활, 동작보조, 군사 및 원격제어 등에 다양하게 적용되고 있으며 시장적으로도 수술용 로봇의 성공적인 상업화의 길을 갈 관련 차세대 로봇 시장에 가장 중요한 부분이 될 것이라고 예측된다.

## II. 기본 이론

## 1. 모션 인식 센서의 반응 특성

립 모션(Leap Motion) 센서는 적외선 센서와 카메라를 이용해 사용자의 손을 인식하는 모션 캡처 기기이다. 특이하게도 일반적인 정면 센서가 아닌 작업 영역의 아래 쪽에 두고 사용하는 센서로, 센서 위쪽으로 길이, 너비, 그리고 폭이 각각 50센티미터 정도인 범위를 내에서 손 동작을 인식할 수 있다. 립 모션은 인식 범위가 좁은 대신 높은 정밀도(0.01mm)를 지녔다. 심지어 손가락이 겹쳐 있거나 굽혀져서 다른 손가락에 가려져 인식되지 않을 경우에도 내부 알고리즘을 사용해 가려진 손가락의 위치를 유추할 수 있도록 구현되어 있다.

## 2. 근전도 신호(Electromyography: EMG) 분석법

근전도란, 골격근에서 발생하는 전기적인 신호를 측정하고 기록하는 기술이다. 근육 세포가 전기적으로 혹은 신경적으로 활성화될 때 근섬유막에서는 약  $50\mu V \sim 30mV$ 의 활동 전위가 발생한다. 이 근전도 신호와 실제 근육의 힘은 통계적으로 큰 선형 관계를 가지고 있다. 그 밖에도 사람의 운동량과 관절힘 값을 알고자 하는 임상의학, 물리치료/재활, 스포츠 과학, 생체역학적 연구 등의 분야에서 다양한 근전도 신호 분석법이 사용된다.

근전도 신호는 분석 시 사용되는 전극에 따라 표면 전극을 사용하는 표면 근전도(surface EMG: sEMG)와 삽입 전극을 사용하는 바늘삽입 근전도(needle EMG: nEMG)로 나뉜다. 표면 근전도는 피부 표면에 전극을 부착하기 때문에 통증이 없으며 손쉽게 활용할 수 있지만, 개별 운동단위의 측정이 불가능하고 전극이 피부에 잘 부착되도록 각별한 주의가 필요하다. 반면 바늘삽입 근전도는 근육에 직접적으로 바늘을 삽입하는 방법으로 개별 운동단위로 측정이 가능하다. 그러나 바늘을 피하에 삽입하기 때문에 통증을 수반할 수밖에 없고 반드시 자격을 갖춘 전문가가 시행해야 하며, 지나치게 동적인 활동은 분석이 어렵다는 단점이 있다.

본 연구에서는 정확한 동작패턴을 구분하는 것이 아니라 특정 근육의 활성화도에 대한 선형적인 힘을 이용할 예정이기 때문에, 비침습적으로 쉽게 사용할 수 있는 표면 근전도 신호를 이용하였다.

### 3. 제어 이론

#### 3.1. PID 제어

PID 제어는 제어 기법 중 산업 현장에서 가장 일반적으로 사용되는 방식이다. 기본적으로 피드백 제어로 제어 대상의 출력 값을 측정하고 이를 도달하고자 하는 설정 값과 비교하여 오차를 계산하고 이 오차값을 이용하여 제어값을 계산하는 구조이다. 제어값은 다음 식에 의해서 계산된다.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

이 때 각 항들은 오차에 비례하는 값(proportional), 그리고 각각 오차의 적분값(integral)과 미분값(derivative)에 비례하는 값이기 때문에 PID제어라고 불린다. 이 때 각 항의 비례상수  $K_p, K_i, K_d$ 를 이득 혹은 게인이라고 한다.

각 항들은 제어의 특성을 결정한다. 비례항은 상승시간(설정값에 도달하는 시간)을 줄이지만 오버슈트를 늘리는 작용을 한다. 적분항은 정상상태오차를 줄여주지만 오버슈트가 증가하고 시스템이 불안정해지는 영향이 있다. 미분항은 오버슈트를 줄이고 시스템의 안정성을 향상시킨다.

따라서 세 가지 게인을 적절히 조절하여 원하는 특성의 PID 제어를 얻을 수 있다.

#### 3.2. 평균값 필터

입력 신호의 잡음을 제거하기 위해 일정 구간만큼의 신호를 적분한 뒤, 다시 시간으로 나눠 구한 평균값으로 출력을 제어한다. 시간에 따른 입력 신호가  $f(x)$ 일 때,  $g(x) = \frac{\int_{t-T}^t f(x)}{T}$  의 꼴로 평균값 필터를 적용한다.  $T$ 값이 클수록 노이즈가 줄어들지만 센서의 감도가 감소하고 신호를 받는데 걸리는 시간이 길어진다.

#### 3.3. PWM(Pulse Width Modulation) 제어

PWM제어는 펄스 폭 제어를 이용한 스위칭 제어의 기본이 되는 기술이다. PWM은 주기가 일정하고 DC전압의 크기에 따라서 펄스 폭의 듀티 사이클이 변화하는 것을 의미한다. 이 제어 방식은 포화 On/Off의 스위칭을 반복할 뿐이므로, 스위칭 손실을 제외한 전력 낭비가 거의 없는 효율적인 동작을 구현할 수 있는 장점이 있다.

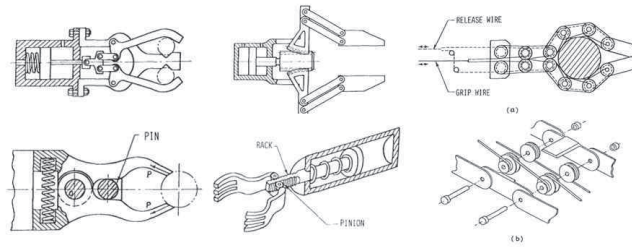
## Ⅲ. 연구 방법

### 1. 하드웨어 설계

#### 1.1. 로봇 손 하드웨어 설계

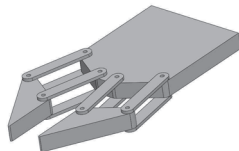
가장 먼저 시스템의 중심이 되는 로봇 손을 설계하였다. 총 3차에 걸친 수정과 설계가 이루어졌으며, 3차원 설계프로그램인 SolidWorks 2013을 사용하여 설계 및 도면 작성을 진행하고, 알루미늄 가공을 통하여 결과물을 제작하였다.

초기 구상은 [그림 1]과 같이 기존에 자주 응용되던 1자유도 로봇 손인 그리퍼(Gripper)의 구조1 중 모터와 기어를 사용한 1축 제어 기반의 형태를 차용하였다.

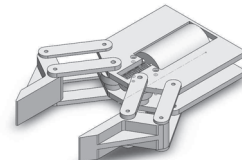


[그림 1] 기존 연구들에서 응용되는 1자유도 로봇 손(그리퍼)의 구조

1차 프로토타입은 전반적인 크기를 가늠하고 기본적인 동작구조를 확인할 수 있도록 설계되었으며, 평행 링크 구조를 이용하여 견고하고 쉬운 동작이 가능한 형태이다. 이러한 형태에 동작 제어가 가능하도록 DC모터와 웜 기어, 웜 휠을 장착한 2차 프로토타입을 설계하였다. 웜 기어는 1:20의 기어비를 가지고 있어 수십 뉴턴 수준의 충분히 큰 힘을 낼 수 있다. 2차 프로토타입에서는 1차 프로토타입에서 설계된 기본구조에 회전부위의 베어링, 링크 연결부위에 셋스크류, 가장자리 링크에 볼트와 너트 결합부위 등 상세설계를 진행하였다.

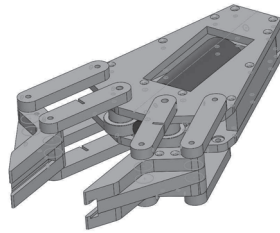


[그림 2-1] 부품의 개략적인 형태를 정하기 위한 1차 프로토타입



[그림 2-2] 모터와 기어를 장착한 2차 프로토타입

마지막 3차 최종설계에서는 가공의 편의성을 고려하여 로봇 손의 접촉면을 10T 단위로 나누어 제작하고, 로봇 손의 고정과 향후 상지로봇에까지의 확장성을 위하여 손목부분으로 갈수록 좁아지는 형태로 설계하고 나사고정 탭을 추가하였다. 힘센서는 모듈로 제작하여 필요에 따라 다른 형태의 구조로 교체할 수 있도록 슬라이드 결합구조로 제작하였다.



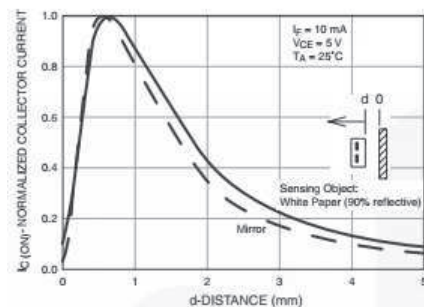
[그림 2-3] 밀링 가공의 특성과 전체적인 형태 변경을 반영한 최종 설계 결과

### 1.2. 힘 센서 설계 및 제작

힘 센서는 로봇 손의 동작 힘 제어와 햅틱 피드백에 모두 관여하는 매우 중요한 부품이다. 로봇 손 설계 시 고려했던 것처럼, 용도에 맞는 형태로 쉽게 구현할 수 있는 얇은 센서를 제작하기 위해서 Rapid 3D prototyping을 이용하여 ABS(Acrylonitrile Butadiene Styrene) 수지 재질로 제작하였다.

힘 센서의 작동원리는 광센서(QRE-1113, Analog Devices)를 이용하여, 외부에서 가해진 힘에 의한 반사판과의 거리변화를 인식하고 이를 실제 힘과의 선형적인 관계를 통하여 출력하는 방식을 사용하였다. 광 센서의 출력은 거리 변형에 대하여 선형적으로 대응되는 아날로그 값으로 출력되었다. 힘 센서는 최고 용량이 약 60N 정도로 일반적인 성인 남성의 악력의 100% 이내에서 설계되었다.

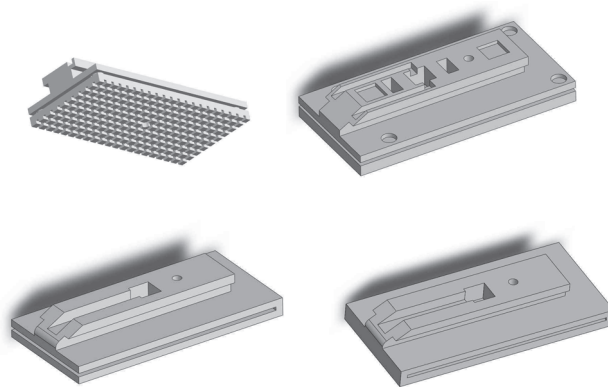
힘 센서는 QRE-1113이 선형적으로 동작하는 범위인 1~2mm 간격을 유지할 수 있도록 2mm의 간격으로 제작되었다.



[그림 3] QRE-1113의 반사판 거리와 신호 사이의 관계

로봇 손의 힘 센서는 1축 센서이기 때문에 어떤 위치에서 눌러도 일정한 변형이 일어나는 반복성이 필요하다. 따라서 축과 다른 방향으로의 변형을 최소화하기 위하여 1차 힘 센서 설계에서는 밑면

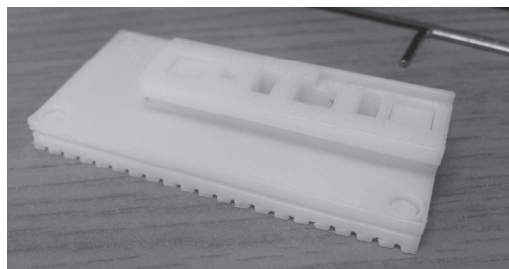
의 어느 곳이 눌러도 똑같이 좁아지도록 사각기둥과 원기둥이 사각 구멍과 원형 구멍에 삽입되는 구조로 설계하였고, 물체와의 결속을 극대화하기 위해 밑면에 격자형 홈을 삽입하였다. 밑면과 지지판 사이에 길이 2mm, 두께 2mm의 판형 구조가 스프링 역할을 해 눌리는 힘에 비례하여 두 판 사이 거리가 변하도록 설계하였다.



[그림 4] 힘 센서의 설계 변화 과정 (첫째 줄 왼쪽부터 1, 2, 둘째 줄 왼쪽부터 3, 4)

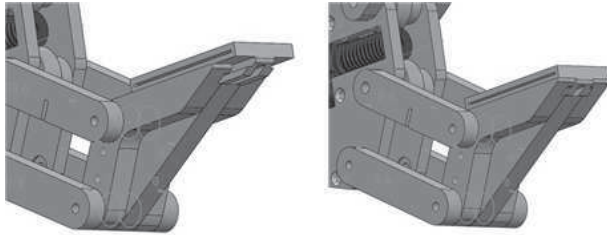
첫 번째 프로토타입을 테스트한 결과([그림 4-1, 2] 및 [그림 5]) 균등한 힘 배분이 되지 않아 밑판이 제대로 평행이동하지 않고, 판 스프링의 강도가 강하여 이를 수정하였다. 외형적인 면에서는 전면의 경사를 추가하여 그리퍼와 결합 시 돌출부가 없도록 설계하였다. 격자형 홈은 효과가 적고 3D 프린팅 시간이 오래 걸려 생략하고, 이후 고무 도핑으로 대체하였다. 또한, 전선부분의 돌출이 없도록 전선부가 숨겨질 홈을 추가하였다.

여러 차례의 치수변화에도 불구하고 밑판이 제대로 평행이동하지 않아, 단순한 왜곡 형태의 구조로 수정하였다. 가장자리의 한쪽만 연결된 외팔보 형태로 설계해 밑판 자체의 탄성으로 힘에 따라 변형되도록 제작하였다가([그림 4-3]), 구조가 힘에 의해 변형되는 정도가 심해 우리가 원하는 세기 영역의 힘을 제대로 감지하지 못하여서 전후면에서 밑판을 지지하고, 밑판의 구부러짐만을 이용해 힘을 측정하도록 변경하였다([그림 4-4]).

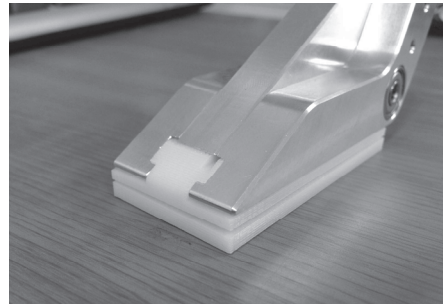


[그림 5] 1차 힘센서 프로토타입의 실제작 형태

제작된 힘 센서는 [그림 6], [그림 7]과 같은 슬라이드 형태로 그리퍼에 장착되었으며, 양단에 장착된 센서는 데이터 수집(Data Acquisition: DAQ) 장비를 통하여 아날로그 값으로 측정되었다. 센서의 Calibration은 분동과 상용 힘 센서(Kioto)를 이용하여 진행되었다.



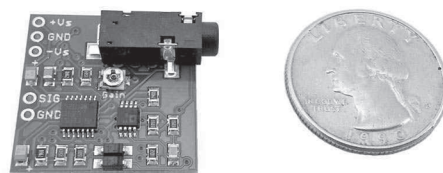
[그림 6] 그리퍼에 장착한 모습 설계



[그림 7] 그리퍼에 실제 장착된 힘 센서

### 1.3. 근전도 센서 모듈

근전도 센서는 Advancer Technologies의 Three lead Differential Muscle/Electromyography Sensor for Microcontroller를 사용했다. 본 모듈은 Raw Signal을 증폭, 정류 및 평활해 출력한다.



[그림 8] Advancer Technologies의 Three lead Differential Muscle/Electromyography Sensor for Microcontroller (마이크로컨트롤러용 3선 근전도 센서)

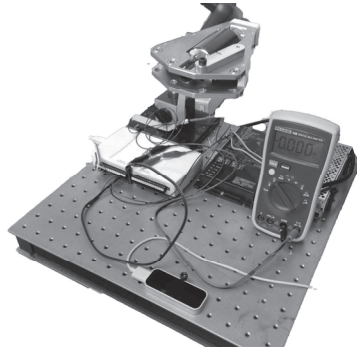
본 모듈은 GND와  $+V_s$ ,  $-V_s$ 의 양전원을 필요로 한다. 이를 위해 초기에는 OP-amp buffer를 이용한 양전원 공급 장치를 제작했으나, 이를 위해 별도의 직류전원공급장치를 사용하는 것이 비효율적이라고 판단하여 두 개의 9V 건전지로 대체하였다.

### 1.4. 전체 로봇 손 구동 시스템 구성

로봇 손 구동을 위한 전체 실험 시스템에는 직접 제작한 로봇 손 구조, DC 모터, 힘 센서, 근전도 센서, 그리고 진동모터가 포함되었다. 이를 구동하기 위한 보조시스템으로 고정부의 광학테이블, 12V 전원장치, 모터 드라이버, 그리고 데이터 수집장치(DAQ) 등을 연결하였다. 로봇 손은 마그네틱 스탠드를 이



용하여 자유로운 자세변형이 가능하도록 설치하였다가, 좀 더 큰 힘을 구동하게 되면서 보다 견고한 알루미늄 프로파일을 이용하여 고정하였다. 전원장치와 모터드라이브에 절연작업을 하였고, 안전을 위해 긴급 정지 스위치를 추가하였다. 또한, 필요에 따라 멀티미터를 회로와 연결하여 점검할 수 있도록 하였다.

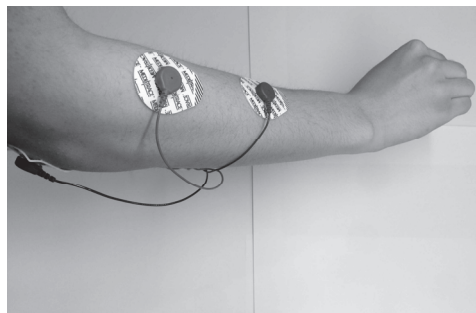


[그림 9] 전체 로봇 손 구동 시스템

## 2. 로봇 손의 동작 제어

제어 출력 장치는 DC모터와 진동 모터이고, 제어 입력 장치는 립 모션, 엔코더, 힘 센서, 근전도 센서 등이다. 립 모션을 제외한 장치들은 모두 전압, 전류 등의 형태로 입/출력 처리를 하기 때문에, 컴퓨터 자체로는 처리할 수 없는 아날로그 신호를 입/출력할 수 있는 데이터 수집(DAQ) 장치를 이용하였다. 전류 손실을 방지하기 위하여, 근전도 센서와 진동 모터는 DC모터나 힘센서와 분리된 아두이노를 이용하였다.

근전도 신호는 얇은손가락굽힘근<sup>1)</sup>에서 측정하였다. 근전도 모듈의 사용 가이드를 따라 근육의 가장 굽은 부분과 가는 부분에 각각 빨강색과 파랑색 전극을 부착했고, 근육이 없어 다른 근육의 근전도 신호를 최소화할 수 있는 팔꿈치에 그라운드 선을 부착했다.

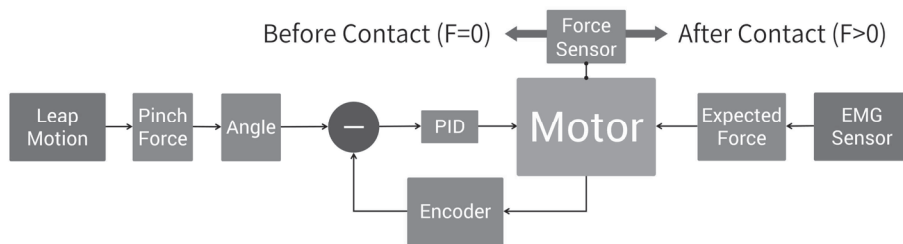


[그림 10] 근전도 패치 부착

1) 대한해부학회 e-Anatomy



제어방식은 그리퍼가 물건에 접촉하였는지 여부를 중심으로 달라진다. 립 모션은 손동작에 따른 위치만을 알 수 있고 쥐는 힘을 직접 추출할 수 없기 때문에 물건에 접촉하기 전에는 적외선 모션 인식 센서인 립 모션을 기준으로 제어되며, 접촉한 후에는 근전도 신호의 강도에 따라 쥐는 힘의 크기를 제어한다. 이 때, 로봇 손이 물체에 가하는 힘은 그리퍼의 말단에 위치한 힘 센서를 통하여 측정되며, 사용자의 손에 장착된 진동모터를 통하여 힘의 강도를 피드백 해준다.



[그림 11] 로봇 손 제어 시스템

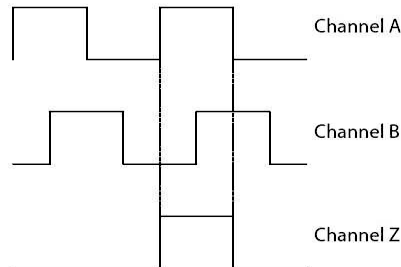
## 2.1. 접촉 전 제어

### 2.1.1. 모션 인식 센서

접촉 전 제어에는 모션인식 센서인 립 모션과 엔코더가 쓰인다. 립 모션은 대기 상태에서 사용자의 입력을 받아들이게 되는데, 이 때 립 모션 자체에 내장된 함수인 핀치 스트렝스 (Pinch Strength) 메소드를 이용하였다. 핀치 스트렝스 메소드는 엄지와 검지 사이를 완전히 펼쳤을 때를 0, 맞닿도록 오므렸을 때를 1로 계산해 사용자가 어느 정도로 손가락을 벌리고 있는 지에 대한 입력을 받는다. 이때 장치의 핀치 최대 이동각은 60도이고, 윌기어와 윌힐의 작동비는 30:1 이기 때문에, 모터의 최대 제어각은 1800도이다. 따라서 모터를 제어할 때에는 핀치 스트렝스의 값에 1800을 곱한 값을 목표 각도로 입력하여 모터를 제어한다.

### 2.1.2. 증분형 엔코더와 DC모터

모터 자체는 오직 전압과 전류에 의해서만 구동되기 때문에, 모터를 제어할 때에는 모터에 부착되어 있는 엔코더가 필요하다. 엔코더는 모터가 얼마만큼 회전을 했는지 측정할 때 쓰인다. 엔코더 내에는 A, B, Z 세 개의 센서가 존재한다. 이때 우리가 사용한 엔코더의 경우 A, B로는 각각 360도 당 5000번 감지할 수 있고, Z로는 360도 당 한 번 감지할 수 있다. A, B는 서로 약간 엇갈려서 맞물려 있기 때문에 ([그림 21] 참고) 실제로는 총 4가지의 상태를 띄게 되어 360도 당 20000번(x4)의 감지가 가능하게 된다. 보통 이러한 신호를 처리하려면 새롭게 함수를 짜야하지만, 우리는 DAQmx 내장 함수 (DAQmxReadDigitalU32)를 이용해 쉽게 회전각을 감지할 수 있었다.



[그림 12] 증분형 엔코더의 출력 패턴

### 2.1.3. PID 제어

위의 립 모션과 엔코더의 데이터를 통해 모터를 제어했는데, 이때 널리 쓰이는 방식인 PID 제어를 사용했다. 현재 각도는 엔코더로 감지하고, 목표 각도는 립 모션에 의해 계속해서 갱신 되기 때문에 보통 1회 PID 제어를 할 때와는 다르게 즉각적인 반응과 오차에 대한 반응을 빠르게 할 수 있도록 I와 D에 높은 값을 주었다( $P=1.0$ ,  $I=0.5$ ,  $D=3.0$ ). 이때 P를 기준으로 비율을 맞춰서 조정을 했는데 P가 과도하게 높아지면 전압이 상승해 모터가 계속해서 도는 상태에 빠질 우려가 있어서 P를 1.0으로 조정했다.

## 2.2. 접촉 후 제어

### 2.2.1. 힘 센서

로봇 손과 물건의 접촉 여부는 힘센 서로 판단한다. 로봇 손이 물건을 잡기 전에 힘 센서에 나타나는 값을 기준으로 하여, 일정 크기 이상의 힘이 감지되면 접촉 후 단계로서 근전도 신호를 이용해 제어한다.

### 2.2.2. 근전도

근전도 신호는 로봇 손이 집은 물건에 더 큰 힘을 가할 수 있도록, 손에 가한 힘을 측정하는 역할이다. 근전도 전극은 엄지와 검지를 맞붙인 상태에서 힘을 주면 주로 활성화되는 근육인 얇은손가락굽힘근(Flexor Digitorum Superficialis: FDS)에 부착하였다. 근전도 센서의 전압은 근육의 자극 강도에 따라 증가하기 때문에, 손에 어느 정도 힘을 주었는지 측정할 수 있다. 사용자가 내는 힘에 비례하는 증폭된 크기의 힘을 로봇 손이 낼 수 있도록, 목표각을 크게 설정하여 모터 입력을 넣어주었다.

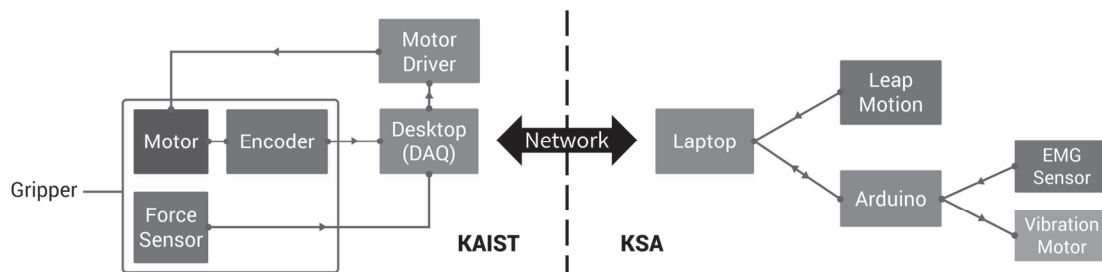
### 2.2.3. 진동 모터

손을 움직이는 사람과 로봇 손은 원격조종되기 때문에, 로봇 손이 물건을 제대로 잡았는지 알 수 있도록 진동모터로 손에 피드백을 주었다. 로봇 손에 장착된 힘 센서에서 측정된 힘의 크기에 비례하는 전압을 PWM 제어를 통해 진동 모터에 입력하여 동작하게 하였다.

### 2.3. 네트워크 통신을 통한 원격 제어

위의 제어 과정 중, 로봇 손의 작동에 관련된 부분과 손동작의 입력을 받아오는 부분을 분리시켜 네트워크 통신을 통해 원격 제어를 할 수 있게 하였다. 첫 번째 부분은 로봇 손을 구동하는 모터와 힘센서, 엔코더뿐만 아니라 이를 제어하기 위해 필요한 모터 드라이버, 전원장치, DAQmx, PC까지 포함한다. 두 번째 부분은 립 모션, EMG 센서, 진동모터와 아두이노, 노트북 컴퓨터가 있다.

[그림13]과 같이, KAIST에 위치한 데스크탑 컴퓨터에서는 DAQ를 통해 모터를 제어하고, 힘 센서의 입력을 받는다. 한국과학영재학교에 위치한 랩탑에서는 립 모션을 통해 사용자 손의 움직임을 측정하고 아두이노를 통해 사용자의 근전도 신호를 측정하며 진동 모터를 구동한다. 이들 원격리 시스템간의 정보 교환이 인터넷 네트워크를 통해 이루어져 원격 제어가 가능해진다.



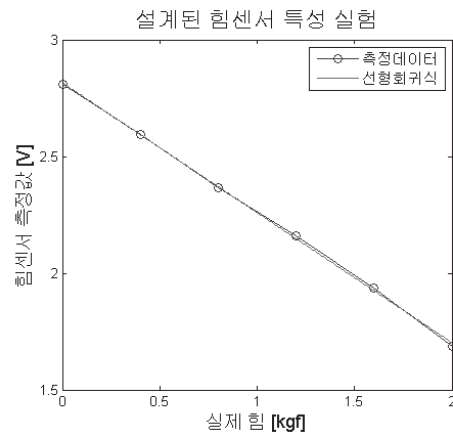
[그림 13] 원격 제어 구조

## IV. 연구 결과

본 연구에서는 위와 같이 모션인식을 통한 사람의 동작인식과 근전도를 이용한 힘 증폭을 이용하여 사람 손의 쥐는 힘을 증폭하는 로봇 손 설계하고 제어하였다. 설계된 힘 센서의 특성을 확인하고, 힘센서와 근전도 이용하여 힘을 증폭한 결과를 측정하였다. 또한 로봇 손의 쥐는 힘을 진동 모터를 통하여 사용자에게 촉각피드백 줄 수 있는 시스템을 구현하였다.

## 1. 설계된 힘 센서 특성 실험 결과

힘 센서에서 측정된 신호의 세기에서 힘 센서에 작용한 힘의 크기를 측정하려면 힘 센서에 작용한 힘의 크기와 힘 센서의 신호의 상관관계를 측정해야 한다. 본 연구에서 제작한 힘 센서의 작용한 힘과 신호의 세기 사이의 관계는 다음과 같다.



[그림 14] 힘 센서에 작용한 힘과 신호의 상관관계

## 2. 근전도를 이용한 힘 증폭 결과

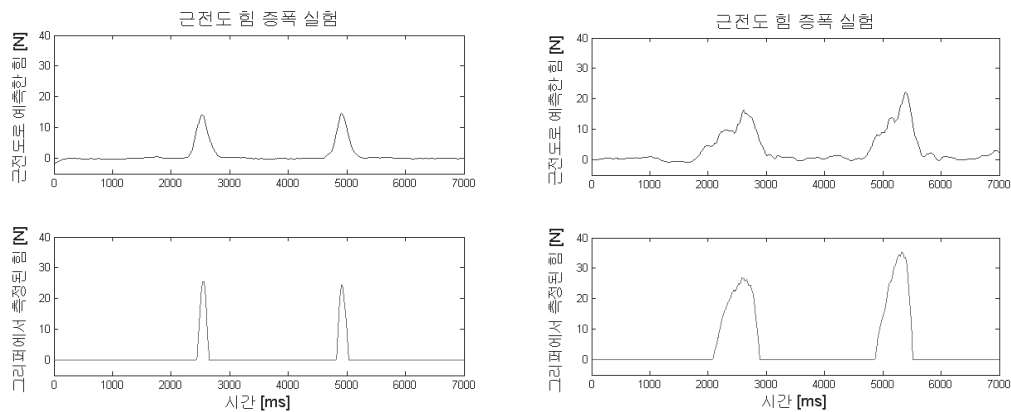
근전도와 힘 센서의 관계는 일정구간 내에서 거의 선형적으로 예측할 수 있다. 보통 근전도 신호와 힘 값의 상관관계를 추정할 때는 먼저 근육의 최대 힘을 측정하여 근전도 신호의 최대값과의 선형함수를 구한 뒤 정량적으로 사용하는 경우가 많으나, 이 실험에서는 정확한 힘 값보다는 상대적인 힘 증폭 값의 변화를 입력하여도 충분하기 때문에 다음과 같은 방법으로 근전도 신호와 힘 사이의 관계를 측정했다.

가. 근전도 전극을 부착하고 최대 pinch 힘을 낼 때의 근전도 값을 100%MVC로 설정한다.

나. 10% 20% 30%MVC 만큼의 힘을 낼 때 절대적인 힘 값(힘센서로 측정)과 근전도 값을 이용하여 선형 fitting을 하였고, 이를 이용하여 근전도로 부터 실제 내는 pinch 힘을 예측하였다.

다. 그리퍼는 한쪽을 이용하여 근전도 신호에 비례하는 값의 전압을 모터에 입력하였다.

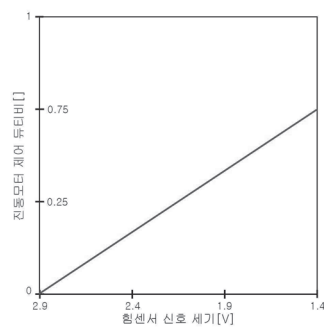
라. 근전도에서 예측한 근육의 힘과 그리퍼가 작용하는 힘의 측정값을 그래프화 하였다.



[그림 15] 시간에 따른 근전도에서 예측한 근육의 힘(위)과 그리퍼가 작용하는 힘의 측정값(아래)

### 3. PWM 진동모터 제어를 이용한 촉각 피드백 구현

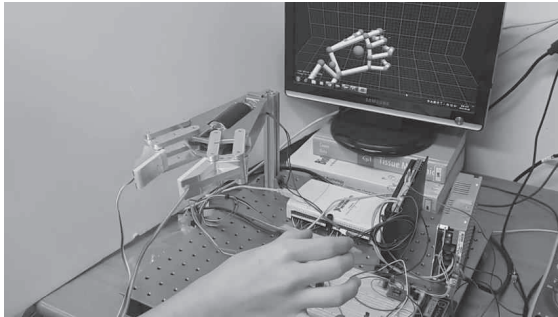
촉각 피드백을 위한 진동 모터는 PWM을 이용하여 제어하였다. 힘 센서에 작용한 힘의 크기와 진동 모터의 PWM 듀티 비(Duty-cycle Ratio)의 관계는 다음과 같다.



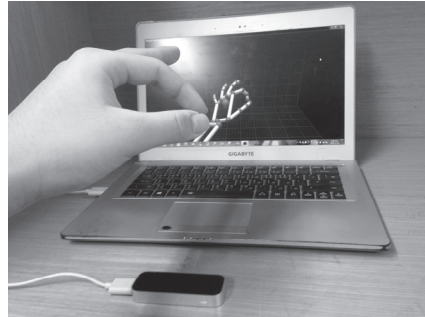
[그림 16] 힘 값에 따른 촉각 피드백 강도 변화

### 4. 모션인식을 이용한 원격 로봇 손 제어 구현

아래는 네트워크를 통한 제어와 근전도 제어, 촉각 피드백을 장착하지 않은 상태에서의 접촉 전 제어를 구현한 상태이다. 립 모션으로부터 측정된 펀치 스트랭스 메소드 값에 비례하여 모터를 0도~1800도 범위에서 PID제어로 회전하고, 이에 따라 그리퍼는 0도~120도를 움직인다.



[그림 17] 립 모션을 이용한 접촉 전 제어



[그림 18] 립 모션을 이용한 손가락 인식

본 연구에서 개발한 로봇 손 시스템을 개선하기 위해서 원격조종자가 보다 편하게 장착 및 탈착할 수 있는 장갑형태의 의도인식 장비를 제작할 수 있을 것이다. 시간이 촉박하여 완성하지 못했으나, 근전도 측정을 위한 일회용 전극을 전도성 섬유로 대체하고 전동모터를 적절한 위치에 고정한 장갑 타입의 장비를 제작하면 사용자가 보다 간편하게 시스템을 사용할 수 있으며, 개인의 제어성능에 대한 재현성이 향상될 것으로 생각된다.

## V. 결론

결과적으로 본 연구는 목표했던 로봇 손의 제작을 성공적으로 이루었다. 모션인식 센서, 근전도 센서, 힘 센서 등 다양한 센서들로부터 신호를 받아 실시간으로 손동작을 인식하고, 사용자의 의도대로 로봇 손을 제어하며 포봇 손이 가하는 힘을 진동 모터를 통해 피드백 받는 작동을 구현해냈다. 그 결과 이 같은 작동을 통해 로봇 손으로 음료수 캔을 잡고 힘을 가해 찌그러뜨리는 동작을 성공적으로 수행했다.

개선할 점이 몇 가지 있었다. 첫째로, 모션인식 센서를 통한 손동작 인식에서 손을 너무 빠르게 움직일 때 PID 제어가 제대로 작동하지 않는 문제가 있었다. 이는 좀 더 정교한 PID 제어기 설계를 통해 해결해야 할 것이다. 또한, 힘센서의 출력을 진동 모터로 피드백 받는 과정에서 힘 센서의 측정 범위와 선형성이 좋지 않아서 로봇 손이 힘을 얼마나 주고 있는지 느낄 수 있을 만큼 진동 모터의 피드백이 정교하지 못했다. 이는 좀 더 정확한 힘 센서의 설계를 통해 해결해야 할 것이다. 그리고 근전도 신호 분석을 통한 로봇 손의 힘 증폭률이 실제로 활용할 수 있을 만큼 충분히 크지 못했다. 로봇 손이 인간의 힘으로 불가능한 작업에 활용될 수 있으려면 좀 더 토크가 큰 모터를 이용해야 할 것이다.

본 연구의 로봇 손은 1자유도의 단순한 구조라는 한계가 있다. 로봇 손이 더 많은 자유도를 가지고 정교한 움직임을 할 수 있도록 설계한다면 본 연구의 결과가 더 다양한 분야에서 실제로 활용되는 것을 기대할 수 있을 것이다.

## ■ 참고문헌

- [1] Fan Yu Chen. Gripping mechanisms for industrial robots: An overview. Mechanism and Machine Theory Vol. 17, Issue 5, 299-311 (1982)
- [2] H. S. Milner-Brown, and R. B. Stein. The relation between the surface electromyogram and muscular force. The Journal of Physiology, Vol. 246, Issue 3, 549-569 (1975)
- [3] 대한해부학회 e-Anatomy

### 심사평

모션인식과 근전도 신호를 이용한 힘 증폭 로봇 손을 설계하고 제어함으로써 극한 환경에서의 작업과 사람보다 큰 힘을 필요로 하는 작업에 매우 유용하여 청소년과학학술지에 매우 적합한 논문으로 판단된다.



## 3연구 후기

R&E 프로그램으로서 수행한 이번 연구는 우리에게 있어 처음으로 연구를 어떻게 진행하는지 직접 해보며 배울 수 있었던 경험이자 처음부터 끝까지 우리 스스로 연구를 주도하여 만족스러운 결과를 낸 뜻깊은 경험이었다.

R&E 연구를 위한 팀을 정해야 했을 때, 서로 친한 친구이자 공학을 좋아했던 우리는 자연스럽게 팀이 되었다. 그리고 지도교수를 정하기 위해 카이스트의 여러 연구실을 찾아보았고, 그 중의 하나가 기계공학과 김정 교수님의 생체기계연구실이었다. 그 곳은 외골격 로봇 등 인간과 상호작용하는 기계를 연구하는 곳이었다. 공학을 좋아하던 우리에게 아이언맨을 떠올리게 하는 그 연구실은 정말 멋있어 보였고 우리는 단박에 마음이 이끌려 교수님께 연락을 드렸다. 교수님께서 우리의 지도를 승낙해주셨고, 그렇게 우리의 연구가 시작되었다.

몇 번의 수정 과정을 거쳐 우리의 연구 주제는 생체기계연구실에서 연구하던 EMG와 우리가 알고 있던 립모션이라는 손동작 인식 장치를 이용해 사람의 손을 따라서 움직이는 로봇 손이 되었다. 그 이후의 연구 과정은 지금 와서 생각해보면 고등학생들의 첫 연구라는 점 치고 꽤나 순조롭게 진행되었다. 그럴 수 있었던 것에는 조교님의 도움과 더불어 아주 남다른 공학적 지식과 경험을 가지고 있던 팀장 정민이의 덕택이 컸다. 정민이가 무엇을 해야 할지를 계획하였고, 조교님에게서는 기계 설계와 제어 이론에 대해서 자세히 배울 수 있었다. 우리는 협동하여 해야 할 일을 수행했고, 그 과정에서 시행착오도 많이 겪었다. 그렇기에 우리가 만든 로봇 손이 처음 우리 손을 따라서 움직이던 순간은 정말 잊을 수 없다. 최종발표만을 남겨두고 연구를 끝마쳤을 때에는 바로 “해냈구나!”라는 말이 터져 나왔다. 처음 주제를 정할 때 ‘할 수 있을까’라고 의문이 들던 우리의 목표를 우리는 달성해냈고, 그 때의 뿌듯함과 보람은 형용할 수 없다.

이 연구를 통해 우리는 먼저 연구를 하는 방법과 연구 논문을 쓰는 방법 등 연구의 기본을 배울 수 있었다. 특히 기계의 설계와 제어 등 공학 연구를 위한 지식을 많이 배울 수 있었다. 이 연구를 우리 중 누군가 혼자 했더라면 해내지 못했을 것이다. 이번 기회에 우리는 협력하여 일을 진행하는 법에 대해서도 많은 배움을 얻었다. 그리고 이 연구를 우리끼리 해냈다는 점은 보람을 두 배로 만들어주었다. 대학에 진학하고 대학원에 진학해서 우리 중에는 분명 공학도가 되어 있을 친구가 있을 것이고, 어쩌면 다른 길로 나아갈 친구도 있을 것이다. 어느 쪽이든 우리의 연구 경험이 우리의 미래에 도움이 될 것이라고 확신하다.

## 연구진

조정민(Cho Jungmin, 한국과학기술원(KAIST) 부설 한국과학영재학교 2학년, wakalics@gmail.com), 제1저자 및 교신저자

장민수(Jang Minsu, 한국과학기술원(KAIST) 부설 한국과학영재학교 2학년, nobleminsu@gmail.com)

이종완(Lee Jongwan, 한국과학기술원(KAIST) 부설 한국과학영재학교 2학년, jongwan56@gmail.com)

진태규(Jin Taegyul, 한국과학기술원(KAIST) 부설 한국과학영재학교 2학년, jtgmnh36@gmail.com)

지도교수 : 김정(Kim Jung, 한국과학기술원 기계공학과, jungkim@kaist.ac.kr)

지도조교 : 김연주(Kim Yunjoo, 한국과학기술원 기계공학과, yunjooya@kaist.ac.kr)

(2015. 1월 현재)

## 지형과 기후를 고려한 인공구조물 설계

(태풍 피해를 감소할 수 있는 비닐하우스 설계 방안 연구)

(Research on artificial structure design considering the topography and climate: Minimizing typhoon damage to greenhouse)

황재희 · 이주윤 · 박신영(경기과학고등학교)

### 초 록

현대인의 식생활에 많은 영향을 주는 근교농업은, 비닐하우스와 같은 시설을 이용한 농업만큼 폭우, 태풍, 폭설 등 자연재해에 의한 영향을 많이 받는다. 그 자연재해 중에서도 우리나라는 특히 매년마다 7~9월에 많이 발생하는 태풍에 의해 폭풍우 피해를 크게 입는다. 이러한 피해를 줄이기 위해 태풍에 대해 더 강한 비닐하우스를 만들어야 하지만 재료비, 시설비 때문에 그렇지 못하는 것이 실정이다. 하지만 비닐하우스의 구조를 어떻게 하느냐에 따라 같은 재료라도 다른 효과를 낼 수 있을 것이라 생각했다. 또한 비닐하우스가 설치되는 지역의 지형에 따라 같은 자연재해라도 비닐하우스에 미치는 영향이 다를 것이라 추측하였다. 따라서 본 연구에서는 비닐하우스의 구조적 요인과, 지역 환경의 구조를 고려하여 ‘태풍(바람)’에 대해 효율적인 비닐하우스를 설계할 수 있도록 하는 것을 목적으로 하였다. 구조적 요인에 대해 값을 다르게 하여 실험을 진행한 결과 폭, 높이, 서까래 간격 및 개수, 가로대 개수에 대해 바람에 대한 비닐하우스의 영향은 달라졌다. 또한 지역 환경의 구조를 다르게 하여 실험을 진행한 결과 지형의 유무에 따라서도 바람에 대한 비닐하우스의 영향은 달라졌음을 알 수 있었다. 더 나아가 태풍뿐만 아니라 다른 자연재해에 대해서도 더욱 다양하고 세부적인 요인과, 이보다 더 다양한 지형을 실생활에 적용시킨 연구를 진행시켜 나간다면 비닐하우스를 각 지역마다 실생활에서 효율적으로 설계하여 이용할 수 있을 것이다.

키워드 : 태풍, 비닐하우스, 구조, 지형, 실생활

## I. 서론

### 1. 연구 동기

우리의 밥상을 보면 밥을 중심으로 채소와 육류로 채워졌으며 식사 후 과일로 식사를 마무리하게 된다. 우리나라 밥상에 등장하는 과일과 채소는 사계절의 변화에 따라 제철 채소와 제철 과일로 구

성되어 있으며 제철에 맞는 식재료로 밥상이 구성되어진다. 그러나 1980년 후반에 들어와 제철이라는 용어가 무색할 정도로 한 겨울에도 봄에 수확 가능한 딸기, 과일 등을 먹을 수 있게 되었다. 이는 지형, 기후 등의 자연적인 조건을 극복할 수 있는 인위적인 시설로 작물을 재배할 수 있게 되었다. 이렇듯 자연적인 제약 조건을 극복할 수 있는 시설 재배 중에는 비닐하우스재배와 온실재배를 손꼽을 수 있다. 특히 1986년 우루과이라운드협정을 통해 농수산물시장이 개방되면서 우리나라에서 생산되는 전통 농산물에 대한 경쟁력이 약화에 따른 대책으로 해외의 작물 재배에 주력하게 되면서 노지재배보다는 시설 작물 재배의 비중이 증가하게 되었다.

연도	지역구분	식량작물	과수작물	채소작물	특용작물	시설작물
1990년	전국	1,668,736	131,517	276,610	130,071	44,613
	서울특별시	1,234	79	505	17	1,054
	경기도	192,462	8,315	30,198	15,929	8,483
	인천광역시 (95년 자료)	20,578	354	2,596	775	1,028
2010년	전국	1,092,843 (65%감소)	156,247	206,148	74,077	91,487 (105%증가)
	서울특별시	314 (75%감소)	28 (64%감소)	64 (87%감소)	12 (29%감소)	385 (63%감소)
	경기도	109,421 (45%감소)	8,385 (1%증가)	15,066 (50%감소)	8,487 (47%감소)	14,889 (76%증가)
	인천광역시 (95년 자료)	14,014 (32%감소)	700 (98%증가)	1,719 (34%감소)	471 (39%감소)	663 (36%감소)

[표 1] 연도에 따른 지역별, 작물별 재배 면적의 변화

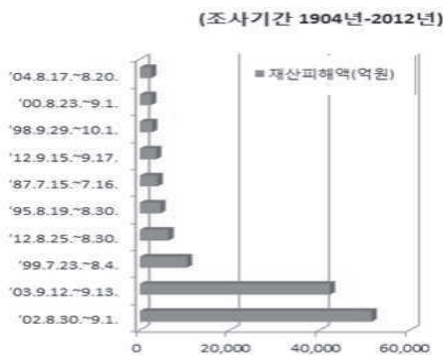
비닐하우스 등의 시설을 이용한 근교 농업은, 도시 가까운 곳에서 집약적으로 작물을 재배하는 것이다. 과거부터 인구가 밀집되어 있는 곳에서 항상 근교농업이 진행되었었으며 국민의 소득 수준이 향상되면서 채소, 원예작물의 소비량이 증가했다. 1975년 1인당 채소 소비량은 62.5kg이었으나, 1985년에는 119.9kg으로 두 배 가까이 증가했고, 1995년에는 236kg으로 마찬가지로 두 배 가까이 증가했다<sup>1)</sup>. 이러한 근교 농업은 온실 재배나 경영비가 많이 들지만, 시장이 가까워 수송비가 적게 들고, 시장의 수요 경향을 파악하여 경제에 대응하여 농업 경영에 변화를 줄 수 있으며, 신선도가 높다는 점에서 그 가치를 높게 평가 받는다. 이에 수도권을 중심으로 작물에 따른 경작지 면적을 1990년과 2010년을 기점으로 비교 분석해 보면 [표 1]에 보듯이 전국 면적으로는 105%가 증가하고 경기도는 76%가 증가하고 있음을 알 수 있다. 이는 우리나라의 채소 및 과수작물이 사계절과 무관하게 출하되기 위하여 노지재배보다는 온실시설에서 재배되고 있음을 알 수 있다<sup>2)</sup>.

1) 농림통계연보(1990~2007), 경지면적통계(2008~2010)를 재구성함.

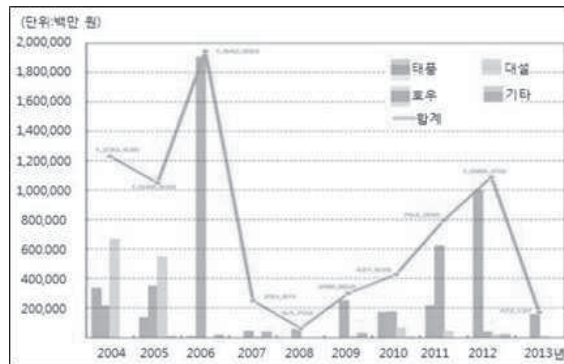
2) 농림수산물부. 2010. 시설채소 온실현황 및 채소류 생산실적

현대인의 식생활에 많은 영향을 주는 근교농업은, 비닐하우스와 같은 시설을 이용한 농업인만큼 폭우, 태풍, 폭설 등 자연재해에 의한 영향을 많이 받으며 [그림 2]에서 볼 수 있듯이 큰 피해를 가지고 온다. [그림 1]에 보듯이 우리나라는 매년 7~9월에 지나가는 태풍으로 인해 폭풍우 피해를 크게 입고 있다.

시설작물재배의 자연재해에 대한 문제점에는 구체적으로 일반 비닐하우스의 구조에 있다. 비닐하우스의 경사도나 파이프의 두께, 취약한 접합부 및 연결곡부 등은 재해에 있어 안전하지 않다. 이 문제점들을 기술적으로 해결하더라도 농촌 사회는 또 다른 현실적인 문제에 직면하게 된다. 농가의 노령화로 인한 일손 및 경제력 부족으로 내재해형 비닐하우스보다 일반형 비닐하우스를 선호하고 있는 것이 재해에 취약한 1차적인 문제로 손꼽을 수 있다<sup>3)</sup>.



[그림 1] 태풍으로 인한 재산 피해액 순위



[그림 2] 비닐하우스 농가 피해 현황 (2004~2013)

이에 본 연구는 큰 도시, 특히 우리나라의 서울 중심에서 주로 이루어지는 근교농업에서, 비닐하우스가 지역 환경에 맞게 자연 재해에 피해를 많이 입지 않고 재료를 절약할 수 있게 할 수 있어야 한다는 생각에서 본 연구를 시작하게 되었다.

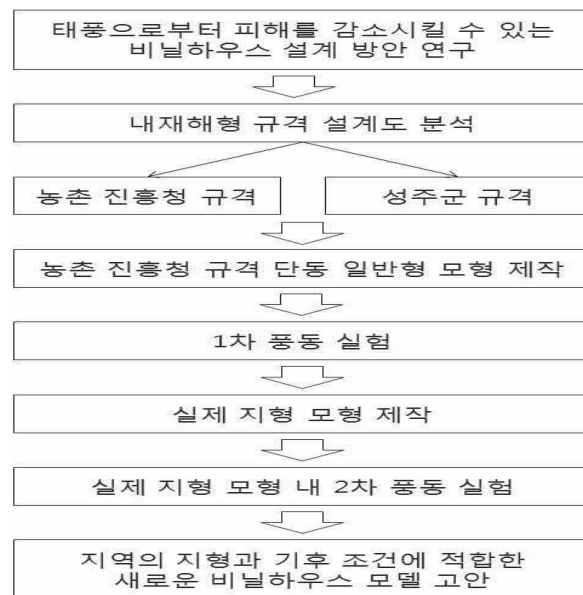
## 2. 연구 목적

채소나 과일들은 주로 시설에서 재배되는 시설 작물들이다. 그러나 농가에서 사용하는 비닐하우스 시설물은 태풍에 매우 취약한 구조물이다. 비닐하우스는 태풍에 의해 옆면의 철근이 휘어지거나 지면의 버팀목이 뽑히는 등 비닐이 찢어져 피해를 입는 경우가 대부분이다<sup>4)</sup>. 우리나라를 통과하는 태풍은 매년 동일하지는 않지만 충분히 예상될 수 있는 기후현상이다. 이에 농촌 지역에 증가하고

3) 정상환, 2009 비닐하우스 구조보강을 위한 내재해형 트러스 클립 개발에 관한 연구, 충청북도농업기술원.

4) 남상운, 2002, 비닐하우스 폭설피해 방지용 가지주 장치의 개발, 생물환경조절학회지, p 65-70.

있는 비닐하우스에 대한 피해액을 줄일 방안이 모색되어야 한다. 또한 이런 비닐하우스에 대한 연구는 지역별 자연재해에 대한 영향이 다른 만큼 지역에 따라 나누어져 이루어져야 한다. 강원도와 같은 산간지방은 폭설에 의한 영향이 크지만, 서울 및 경기 지역의 경우 하중보다는 강풍에 더 중점을 두어야 하고 보다 경제적인 비닐하우스가 필요하다. 이에 본 연구목적은 지형 및 기후를 고려한 자연 재해를 견딜 수 있는 최적의 비닐하우스 시설물을 설계하고자 한다. 본 연구는 [표 2]에서 볼 수 있듯이 태풍으로부터 피해를 감소시킬 수 있는 비닐하우스 설계를 위해 내재해형 규격 설계도 분석 후 농촌 진흥청 규격의 단동 일반형 모형을 제작하여 1차, 2차 풍동 실험을 거쳤다. 2차 풍동 실험은 실제 지형 모형 제작 후 이루어졌다.



[표 2] 본 연구 과정 흐름도

## Ⅱ. 연구 방법

본 연구는 자연재해 중에서 태풍의 피해를 감소시킬 수 있는 구조적인 설계에 초점을 두고 연구를 진행하기로 하였다. 이에 대한 구조상의 설계를 제시하기 전에 정부기관에서 고시한 구조상의 설계도를 먼저 분석하여 설계의 기본 방향을 정하였다. 이에 농촌진흥청에서 고시한 원예특작시설 내재해형 설계규격<sup>5)</sup>을 대상으로 풍속을 기준으로 폭, 높이, 폭-높이, 가로대, 서까래 등과의 상관관계

5) 농림수산식품부, 농촌진흥청. 2010. 원예특작시설 내재해형 규격 설계도, 지방서.

를 살펴보기 위해 다중회귀분석을 실시하였다. 이를 통해 10-단동-3을 기준으로 폭, 높이, 가로대 개수 및 간격, 서까래 간격 등을 고려하여 모형11개를 제작하여 측정지점 29개에 대한 풍속을 측정하여 비교 분석하였다. 마지막으로 지형을 고려하여 개방된 공간과 분지형의 폐쇄된 지형에서 모형12에서 측정지점 29개의 풍속을 측정하여 비교 분석하였다.

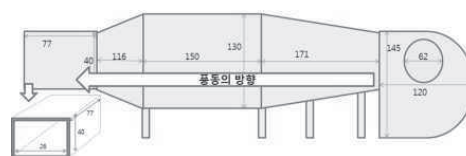
## 1. 다중회귀분석

비닐하우스 시설의 구조를 보면 가로대와 서까래를 중심으로 단순하게 조립되는 인공시설물이기에 풍속과 적설에 매우 취약한 구조물이다. 본 연구는 풍속과 관련된 연구이기에 풍속과 비닐하우스 시설구조물간의 상관관계를 먼저 알아보기 위해 다중회귀분석을 실시하였다. [표 3]의 농촌진흥청에서 고시한 원예특작시설 내재해형 설계 규격 17개를 풍속을 기준으로 폭, 높이, 폭-높이, 서까래, 가로대 등을 각각 개별적으로 상관관계를 분석하여 보았다.

규격명	폭 (m)	높이 (m)	서까래 $\Phi(\text{mm}) \times t(\text{mm}) @ \text{cm}$	가로대 $\Phi(\text{mm}) \times t(\text{mm})$	설계강도		시설비 (천 원/㎡)	비 고
					적설심 (cm)	풍속 (m/s)		
07-단동-1	5.0	2.6	$\Phi 25.4 \times 1.5t @ 60$	7개 $\Phi 25.4 \times 1.2t$	50	35	18.5	농촌진흥청
07-단동-2	6.0	3.3	$\Phi 31.8 \times 1.5t @ 60$	9개 $\Phi 25.4 \times 1.5t$	50	35	20.5	"
07-단동-3	7.0	3.3	$\Phi 31.8 \times 1.7t @ 60$	9개 $\Phi 25.4 \times 1.5t$	50	36	19.5	"
07-단동-4	8.0	3.6	$\Phi 31.8 \times 1.7t @ 50$	9개 $\Phi 25.4 \times 1.5t$	48	37	19.9	"
10-단동-1	6.0	3.3	$\Phi 31.8 \times 1.5t @ 60$	5개 $\Phi 25.4 \times 1.5t$	41	32	19.3	"
10-단동-2	7.0	3.3	$\Phi 31.8 \times 1.7t @ 60$	5개 $\Phi 25.4 \times 1.5t$	42	35	18.5	"
10-단동-3	7.0	3.5	$\Phi 31.8 \times 1.7t @ 60$	5개 $\Phi 25.4 \times 1.5t$	37	33	18.7	"
10-단동-4	8.2	3.9	$\Phi 31.8 \times 1.7t @ 50$	5개 $\Phi 25.4 \times 1.5t$	41	35	19.0	"
10-단동-5	8.2	3.5	$\Phi 31.8 \times 1.7t @ 50$	5개 $\Phi 25.4 \times 1.5t$	30	32	18.8	"
10-단동-6	7.6	3.7	$\Phi 31.8 \times 1.5t @ 50$	7개 $\Phi 25.4 \times 1.5t$	28	39	40.1	"
10-단동-7	8.9	3.9	$\Phi 42.2 \times 2.1t @ 90$	7개 $\Phi 25.4 \times 1.5t$	27	41	39.0	"
10-단동-8	7.6	3.7	$\Phi 42.2 \times 2.1t @ 80$	7개 $\Phi 25.4 \times 1.5t$	25	33	43.8	"
10-단동-9	8.9	3.9	$\Phi 48.1 \times 2.1t @ 70$	7개 $\Phi 25.4 \times 1.5t$	26	36	45.0	"
10-단동-10	5.4	2.6	$\Phi 25.4 \times 1.5t @ 80$	5개 $\Phi 25.4 \times 1.5t$	30	28	13.8	성주군 농업기술센터
10-단동-11	5.6	2.4	$\Phi 31.8 \times 1.5t @ 100$	5개 $\Phi 31.8, \Phi 25.4$	29	27	14.4	"
10-단동-12	5.6	2.4	$\Phi 25.4 \times 1.5t @ 65$	5개 $\Phi 25.4 \times 1.5t$	27	27	14.4	"
10-단동-13	5.8	2.6	$\Phi 31.8 \times 1.5t @ 90$	5개 $\Phi 31.8, \Phi 25.4$	30	28	14.4	"

[표 3] 원예특작시설 내재해형 규격 설계도(농촌진흥청, 2010)

## 2. 조작 변인에 따른 수리모형실험



[그림 3] 풍동장치의 설계도면.



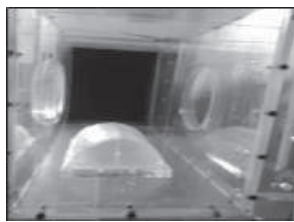
연구에서 사용한 풍동장치의 설계도면은 다음과 같다. 실제로 실험을 진행하게 되는 장소는 폭 26cm, 높이 40cm, 길이 77cm이다. 이 실험 공간을 고려하여 원예특작시설 내재해형 설계규격 중에 10-단동-3(7m×3.5m)을 1/50으로 축소한 모형을 기본으로 하였다. 또한 이 기본 모형을 바탕으로 앞서 다중회귀분석의 결과를 참고하여 폭, 높이, 서까래 간격 및 개수, 가로대 개수 등을 조작변인으로 하여 모형 11개를 제작하였다. 또한 대한민국 기상청에서 제시한 태풍 풍속은 17.2m/s이며, 강한 태풍으로 분류하는 풍속은 44m/s이다. 실제 모형의 스케일이 실제 스케일의 1/50인 점을 고려하였을 때 최저 태풍 풍속의 약 1/2이며, 강한 태풍 풍속의 약 1/4인 10m/s로 실험하였다. 모형에 충분히 풍속이 강한 영향을 끼칠 수 있을 것이라고 생각하였다. 또한, 모형들에서 앞면과 뒷면, 그리고 옆면에서 서까래가 있는 지점과 없는 지점, 윗부분 아랫부분을 대표할 수 있다고 생각되는 29개 지점을 측정지점으로 선정하여 풍동실험을 실시하였다<sup>6)</sup>.

조작변인	번호	폭(m)	높이(m)	서까래 간격(cm)	서까래 개수	가로대 개수
기본	1	7	3.5	80	16	7
폭 및 너비	2	5	2.5	80	16	7
	3	9	4.5	80	16	7
서까래동간격	4	7	3.5	60	21	7
	5	7	3.5	100	13	7
서까래앞조밀	6	7	3.5	40/80/80	6, 12	7
서까래중간조밀	7	7	3.5	80/40/80	6, 6, 6	7
가로대 개수	8	7	3.5	80	16	5
	9	7	3.5	80	16	9
가로대위조밀	10	7	3.5	80	16	7
가로대아래조밀	11	7	3.5	80	16	7

[표 4] 실험 원형 규격

구분(단위:cm)	모형 번호	폭	높이	서까래간격	서까래 개수	가로대 개수	
조작변인	기본	1	14	7	1.6	16	7
	폭 및 높이	2	10	5	1.6	16	7
		3	18	9	1.6	16	7
서까래 간격	4	14	7	1.2	21	7	
	5	14	7	2.0	13	7	
서까래 앞 조밀	6	14	7	0.8/1.6	6/12	7	
서까래 뒤 조밀	6-1	14	7	1.6/0.8	6/6/6	7	
서까래 중간 조밀	7	14	7	1.6/0.8/1.6	16	7	
가로대 개수	8	14	7	1.6	16	5	
	9	14	7	1.6	16	9	
가로대 위 조밀	10	14	7	1.6	16	7	
가로대 아래 조밀	11	14	7	1.6	16	7	

[표 5] 실험 모형 규격



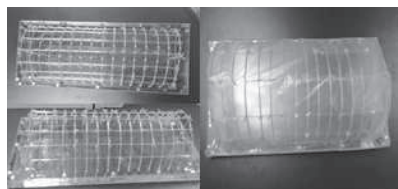
[그림 4-1] 풍동실험 면사진



[그림 4-2] 풍동실험 측면사진



[그림 4-3] 풍동장치 측면사진



[그림 5] 모형 제작 과정

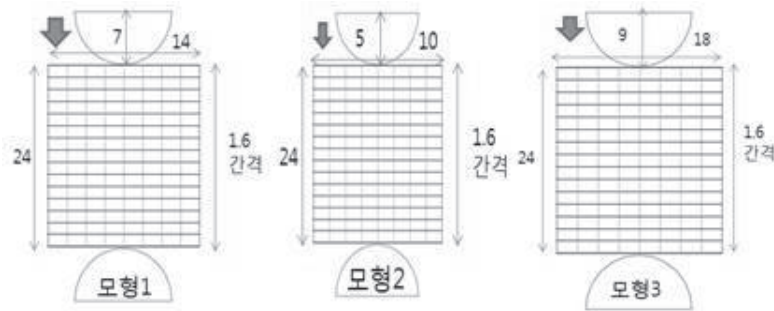


[그림 6] 모형 완성 사진

6) 백선영. 2010. 전북대학교 대학원 석사논문. '비닐하우스의 형태와 배치에 따른 풍압'에서 수리모형실험의 연구설계환경을 참고로 함.

### 2.1. 폭과 높이에 따른 풍속 변화 실험

농촌진흥청에서 원예특작시설 내재해형 설계규격을 보면 폭과 높이를 풍속과 적설심에 견딜 수 있는 최적의 규격을 제시하고 있다. 단 비닐하우스의 길이는 논, 밭의 길이 또는 농부의 결정에 따라 달라지기에 정확하게 제시되어있지는 않다. 본 연구는 기본 서까래의 개수를 임의로 16개로 잡고, 연구를 진행하였다.

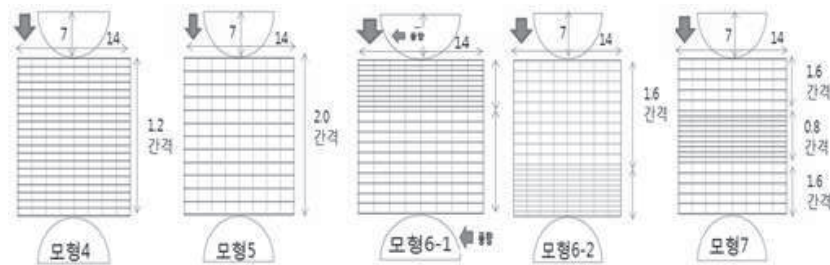


[그림 7] 규모에 따른 모형의 설계도면 (단위 : cm)

비닐하우스의 규모에 관한 내용으로 원예특작시설 내재해형 설계규격에서는 폭과 높이의 비가 약 2:1이다. 2:1의 비율을 유지하면서 규모만 다르게 하여 모형을 3개를 제작하여 풍동실험을 하였다. 모형1은 10-단동-3의 규모를 1/50으로 축소하여 14×7로 하였고 모형1을 기준으로 작은 규모의 모형2는 10×5, 큰 규모의 모형3은 18×9로 제작하였으며 모형1, 2, 3은 가로대 7개와 서까래 16개 모두 동일하게 하였다. 그리고 각각 29개의 측정 지점을 정하고 이 지점에 대한 풍속을 측정하여 비교 분석하였다.

### 2.2. 서까래 간격에 따른 풍속 변화 실험

서까래의 간격에 따른 풍속의 변화를 알아보기 위해 기본 모형1의 서까래 간격 1.6cm를 기준으로 서까래 1.2cm으로 등간격으로 하여 21개의 서까래를 설치한 모형4와 서까래 2.0cm으로 등간격으로 하여 13개의 서까래를 설치한 모형5에 측정지점 29개에 대한 풍속을 측정하였다. 또한 서까래의 간격을 위치에 따라 조밀정도를 다르게 하여 모형6-1, 6-2, 모형7에 대한 풍속을 측정하여 실험하였다.

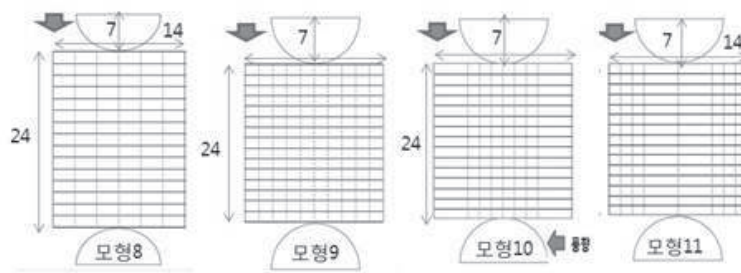


[그림 8] 서까래 간격에 따른 설계도면



### 2.3. 가로대 개수에 따른 풍속 변화 실험

원예특작시설 내재해형 설계규격을 보면 가로대는 5, 7, 9개 정도로 규정하고 있다. 강판 파이프 관에 대한 경제적 원인을 고려한다면 가로대의 개수가 많다고 좋은 것은 아니다. 그렇다고 가로대의 수가 적다면 태풍에 견딜 수 없기에 붕괴위험도 커질 수밖에 없다. 그래서 본 연구는 가로대의 개수와 가로대의 간격에 따른 연구를 다음과 같이 실험하였다. 모형8은 가로대 5개, 모형9는 가로대 9개, 모형10과 모형11은 가로대의 위치에 따른 조밀정도를 다르게 하여 측정지점 29개에 풍속 실험을 하였다.



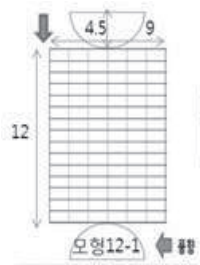
[그림 9] 가로대 개수에 따른 설계도면

## 3. 공간 변화를 통한 수리모형 실험

대도시의 시설작물재배는 ‘평지’라는 공간에서 주로 행하여지지만 채소 및 과일 등의 시설작물재배는 농촌지역의 대부분이 작은 규모의 야산, 구릉 정도의 저산성 산지로 둘러싸인 분지에서 행하여지고 있다. 이에 본 연구도 공간의 변화에 대한 비닐하우스에 대한 풍속의 변화를 실험하기로 하였다. 모형12는 기본 모형1의 1/2을 축소하여 제작하였고, 산지는 폭이 26cm, 높이는 20cm로 병풍 모양으로 지표면을 표현하고자 찰흙으로 제작하였다.

### 3.1. 지형에 따른 풍향 변화 실험

개방된 공간과 폐쇄된 공간(분지형 공간)으로 구분하고 이에 모형12를 측면, 정면으로 배치를 바꾸어 풍향 및 풍속 실험을 하였다. 이는 풍동에서 바람이 불어 비닐하우스를 지나 지형을 만나 부딪칠 때, 지형이 있을 때와 없을 때가 차이가 있을 것이라 판단하였다. 따라서 바람이 불어 나오는 곳에서 향을 피우고 지형이 없을 때와 있을 때, 그리고 비닐하우스를 가로 방향으로 두었을 때와 세로 방향으로 두었을 때 각각 향 연기의 흐름을 촬영하여 풍향의 변화를 관찰하였다.



[그림 10] 모형 12의 설계도면



[그림 11] 분지모형의 측면 정면사진



모형12-1 (측면)      모형12-2(정면)  
[그림 12] 개방된 공간에서의 모형12 실험 장면



모형12-3(측면)      모형12-4(정면)  
[그림 13] 폐쇄된 공간에서의 모형12 실험 장면

### 3.2. 지형에 따른 풍속의 변화

풍속은 10m/s로 하고, 지형이 있을 때와 없을 때, 그리고 비닐하우스를 가로 방향으로 놓았을 때와 세로 방향으로 두었을 때 각각 풍속계를 이용하여 이미 지정한 지점의 풍속을 측정한다. 3번 측정한 값을 평균값을 내어 데이터를 얻는다. 후에 각각의 경우에 대하여 데이터를 분석하여 정리한다.

## Ⅲ. 연구 결과

### 1. 다중회귀분석 결과

태풍의 피해를 감소할 수 있는 비닐하우스 구조 설계를 하기 전에 기존의 비닐하우스의 설계 규격을 분석하기로 하였다. 분석 대상은 농촌진흥청과 성주군청에서 제시한 원예특작시설 내재해형 설계 규격 17개이다. 첫 번째 분석은 비닐하우스의 폭과 높이간의 관계를 분석하였다. [표 6]은 농촌진흥청에서 제시한 규격에 의하면 폭과 높이의 비율은 1:8.1에서 1:2.34 정도이고 성주군청에서 제시한 폭과 높이의 비율은 1:2.07에서 1:2.33이다. 평균 폭과 높이는 2:1의 비율로 설치하고 있음을 알 수 있다.

구분명	폭 (m) (X1)	높이 (m) (X2)	폭-높이 비율 (X3)	서까래 (cm) (X4)	가로대 개수 (X5)	적설심 (cm)	풍속 (m/s) (Y)	비고
07-단동-1	5.0	2.6	1.923077	60	7	50	35	농진청 출원 경
07-단동-2	6.0	3.3	1.818182	60	9	50	35	
07-단동-3	7.0	3.3	2.121212	60	9	50	36	
07-단동-4	8.0	3.6	2.222222	50	9	48	37	
10-단동-1	6.0	3.3	1.818182	60	5	41	32	
10-단동-2	7.0	3.3	2.121212	60	5	42	35	
10-단동-3	7.0	3.5	2.000000	60	5	37	33	
10-단동-4	8.2	3.9	2.102564	50	5	41	35	
10-단동-5	8.2	3.5	2.342857	50	5	30	32	
10-단동-6	7.6	3.7	2.054054	50	7	28	39	
10-단동-7	8.9	3.9	2.282051	90	7	27	41	
10-단동-8	7.6	3.7	2.054054	80	7	25	33	
10-단동-9	8.9	3.9	2.282051	70	7	26	36	
10-단동-10	5.4	2.6	2.076923	80	5	30	28	성주 군 (농업 기술 센터)
10-단동-11	5.6	2.4	2.333333	100	5	29	27	
10-단동-12	5.6	2.4	2.333333	65	5	27	27	
10-단동-13	5.8	2.6	2.230769	90	5	30	28	

[표 6] 비닐하우스의 폭과 높이 비에 대한 분석

구분	계수	표준오차	t 통계량	P-값	하위 95%	상위 95%
풍속	13.84758	4.015606	3.448441	0.003583	5.288517	22.40664
높이	6.010652	1.214556	4.948846	0.000175	3.421887	8.599417
구분	계수	표준오차	t 통계량	P-값	하위 95%	상위 95%
풍속	40.47541	4.238357	9.549748	9.13E-08	31.44153	49.50929
서까래	-0.10492	0.061891	-1.69521	0.110688	-0.23684	0.026999
구분	계수	표준오차	t 통계량	P-값	하위 95%	상위 95%
풍속	43.06592	13.07498	3.293766	0.004921	15.19726	70.93458
폭, 높이	-4.51657	6.136013	-0.73608	0.47304	-17.5952	8.562035
구분	계수	표준오차	t 통계량	P-값	하위 95%	상위 95%
풍속	23.33631	3.444716	6.774523	6.26E-06	15.99407	30.67855
가로대	1.610119	0.531904	3.027086	0.008491	0.476393	2.743845
구분	계수	표준오차	t 통계량	P-값	하위 95%	상위 95%
풍속	18.32769	4.30103	4.2035	0.000767	9.34354	27.62103
폭	2.185307	0.619556	3.527215	0.003048	0.864755	3.50586

[표 7] 풍속을 기준으로 비닐하우스 부대시설 간의 다중회귀분석자료

본 연구가 풍속을 중심으로 각 비닐하우스의 각 부속 시설에 대한 유의미에 대한 관계를 살펴보기 위해 다중회귀분석을 해 보았다. [표 7]은 자료 17개를 관측 수로 하여 풍속(Y)을 기준으로 폭(X1), 높이(X2), 폭-높이의 비(X3), 서까래(X4), 가로대(X5)로 구분하여 분석한 결과가 다음과 같다. [표 7]에 대한 다중회귀분석에 의하면  $0 < P\text{-값} < 0.05$ 일 경우 유의미하다고 볼 수 있다. 이에 의하면 풍속과 관련하여 폭, 높이, 가로대는 의미 있는 분석 결과를 보인 반면에 폭-높이, 서까래에 대한 분석 결과에 있어서는 의미가 매우 미비함을 알 수 있다. 이 분석을 토대로 비닐하우스 구조 설계에 있어 폭, 높이, 가로대에 대한 상관관계를 고려하여 설계해야 함을 알 수 있다. 이를 바탕으로 다음과 같은 실험 결과를 얻었다.

## 2. 조작 변인에 따른 수리모형실험 결과

### 2.1. 폭과 높이에 따른 풍속 변화 결과

규모에 따른 실험으로 [표 8]의 실험 결과를 보면, 폭과 높이에 대한 비율을 2:1로 하고 모형 1, 2, 3처럼 규모만 다르게 하여 풍동실험 결과 모형3이 모형1, 2에 비해 풍속에 대한 수치가 전반적으로 낮게 측정되었다. 부분적으로 살펴보면 모형3이 모형1보다 앞과 뒷부분 그리고 양 측면에서 풍속 수치가 매우 낮게 측정되었으나 비닐하우스 정수리 부분에서는 약간 미비한 수치로 약간 높게 측정되었다. 이는 규모가 큰 비닐하우스일수록 한 지점으로 불어오는 바람을 분산시켜 풍속의 영향을 덜 받고 있음을 알 수 있다.

1.64	0.8	2.35	2.51	1.06	1.82
3.51	1.64	1.79	0.73	0.79	0.71
7.9	9.06	10.53	10.93	10.93	11.03
4.23	3.9	3.06	10.9	3.03	4.77
6.13	2.95	1.44	10.4	2.08	3.59
8.07	4.55	4.4	9.03	4.28	3.96
10.03	5.03	6.57	9.3	5.2	6.1
10.31	7.53	7.47	10.2	5.9	7.5
9.75	9.79	7.37	10.47	6.8	9
1.83	1.86	0.77	0.61	0.65	0.57
1.06	1.14	0.61	1.35	0.42	0.95

1.64	0.8	2.35	2.51	1.06	1.82
3.51	1.64	1.79	0.73	0.79	0.71
7.9	9.06	10.53	10.93	10.93	11.03
4.23	3.9	3.06	10.9	3.03	4.77
6.13	2.95	1.44	10.4	2.08	3.59
8.07	4.55	4.4	9.03	4.28	3.96
10.03	5.03	6.57	9.3	5.2	6.1
10.31	7.53	7.47	10.2	5.9	7.5
9.75	9.79	7.37	10.47	6.8	9
1.83	1.86	0.77	0.61	0.65	0.57
1.06	1.14	0.61	1.35	0.42	0.95

1.64	0.8	2.35	2.51	1.06	1.82
3.51	1.64	1.79	0.73	0.79	0.71
7.9	9.06	10.53	10.93	10.93	11.03
4.23	3.9	3.06	10.9	3.03	4.77
6.13	2.95	1.44	10.4	2.08	3.59
8.07	4.55	4.4	9.03	4.28	3.96
10.03	5.03	6.57	9.3	5.2	6.1
10.31	7.53	7.47	10.2	5.9	7.5
9.75	9.79	7.37	10.47	6.8	9
1.83	1.86	0.77	0.61	0.65	0.57
1.06	1.14	0.61	1.35	0.42	0.95

0~2	2~4	4~6	6~8	8~10	10 이상
-----	-----	-----	-----	------	-------

모형1(5cm×10cm)	모형2(7cm×14cm)	모형3(9cm×18cm)
---------------	---------------	---------------

[표 8] 규모에 따른 실험 결과 (단위 : m/s)

### 2.2. 서까래 간격에 따른 풍속 변화 결과

#### 2.2.1. 서까래 간격

서까래 등간격에 따른 실험으로 기준 모형으로 설정한 모형1은 서까래 간격이 1.6cm인 모형이고, 모형4와 모형5는 각각 서까래 간격이 1.2cm, 2cm인 모형이다. [표 9]의 실험 결과 측정치를 보면, 까래 간격이 좁은 모형 4가 서까래 간격이 넓은 모형5보다 전반적으로 풍속이 약하게 측정된 것을 확인할 수 있었다. 또한, 모형4는 중심 부분의 풍속이, 그리고 모형5는 좌우와 앞뒷면의 풍속이 강하게 측정되었다.

1.44	2.78	1.44	2.78	6.05	5.93	6.05	5.93
0.83	0.91	0.83	0.91	1.56	2.69	1.56	2.69
11.43	11.43	11.43	11.43	12.2	9.4	12.2	9.4
5.1	11.27	5.1	11.27	9.93	9.23	9.93	9.23
2.89	10	2.89	10	7.57	7.87	7.57	7.87
4.33	9.17	4.33	9.17	7.7	7.1	7.7	7.1
7.17	9.33	7.17	9.33	8.97	7.6	8.97	7.6
8.47	9.7	8.47	9.7	9.2	10.43	9.2	10.43
8.9	9.87	8.9	9.87	9.53	10.1	9.53	10.1
0.73	0.77	0.73	0.77	3.99	3.43	3.99	3.43
0.87	0.82	0.87	0.82	0.92	0.66	0.92	0.66

모형4(7cm×14cm), 서까래 간격 1.2cm

모형5(7cm×14cm), 서까래 간격 2.0cm

[표 9] 서까래의 개수에 따른 실험 결과 (단위 : m/s)

## 2.2.2. 서까래 부분간격

바람의지면의 서까래가 조밀한 모형, 그리고 모형7은 중앙 부분의 서까래가 조밀한 모형이다. [표 10]의 실험결과 측정치를 보면, 전체적인 풍속은 모형 6-1과 6-2에 비해 모형7의 풍속이 약하게 측정되었다. 또한, 모형6-1은 중심부분의 풍속이 확연히 강하게 측정되었고, 모형6-2은 좌우부분의 풍속이 강하게 측정되었다.

2.37	2.02	1.51	2.6	2.13	2.36
2.44	1.7	0.92	1.77	1.33	2.90
9.13	13.97	11.37	9.6	3.38	9.3
5.22	13.3	8.47	11	3.45	9.2
2.45	12.87	6.6	9.9	2.3	11.00
4.84	12.8	8.17	9.37	4.51	10.47
10.47	12.83	7.8	9.27	6.27	3.42
10.5	13.03	8.93	9.77	7.43	10.47
10.5	12.83	8.125	10.23	6.97	10.57
1.56	1.22	0.73	0.59	0.7	0.78
0.89	0.85	0.6	0.79	1.1	1.00

2.37	2.02	1.51	2.6	2.13	2.36
2.44	1.7	0.92	1.77	1.33	2.90
9.13	13.97	11.37	9.6	3.38	9.3
5.22	13.3	8.47	11	3.45	9.2
2.45	12.87	6.6	9.9	2.3	11.00
4.84	12.8	8.17	9.37	4.51	10.47
10.47	12.83	7.8	9.27	6.27	3.42
10.5	13.03	8.93	9.77	7.43	10.47
10.5	12.83	8.125	10.23	6.97	10.57
1.56	1.22	0.73	0.59	0.7	0.78
0.89	0.85	0.6	0.79	1.1	1.00

2.13	2.36	0.70	0.78
1.33	2.90	1.10	1.00
3.38	9.3		
3.45	9.2		
2.30	11.00		
4.51	10.47		
6.27	3.42		
7.43	10.47		
6.97	10.57		

모형6(7cm×14cm) 앞 조밀

모형6-1(7cm×14cm)뒤 조밀

모형7(7cm×14cm) 중간 조밀

[표 10] 서까래 간격에 따른 실험 결과 (단위 : m/s)

## 2.3. 가로대 개수에 따른 풍속 변화 결과

가로대의 개수에 다른 실험으로 기준 모형으로 설정한 모형1은 가로대의 개수가 7개이고, 모형8과 모형9는 각각 가로대의 개수를 5개와 9개로 설정하였다. 이 때 [표 11]의 실험결과 측정치를 보면, 가로대 개수가 적은 모형8이 가로대 개수가 많은 모형9보다 풍속이 약하게 측정되었으며, 모형8과 모형9 모두 모형1에 비해서는 풍속이 강하게 측정되었다. 이를 통해 가로대의 개수는 너무 많아 서도 적어서도 안 된다는 것을 유추해낼 수 있었다.

2.75	1.84	2.75	1.84	2.99	1.11	2.99	1.11
1.83	6.50	1.83	6.5	1.76	1.97	1.76	1.97
12.10	8.83	13.00	12.10	8.83	13.00	13.57	13.23
7.20	10.77	7.70	7.20	10.77	7.70	11.03	13.5
10.73	9.47	2.95	10.73	9.47	2.95	11.23	13.07
11.37	8.77	6.93	11.37	8.77	6.93	11.7	12.53
11.20	8.77	10.50	11.20	8.77	10.50	11.57	12.17
10.90	9.00	10.90	10.90	9.00	10.90	11.1	12.33
10.80	9.30	10.70	10.80	9.30	10.70	11.27	12.43
1.32	2.50	1.32	25	3.26	1.31	3.26	1.31
1.32	0.72	1.32	0.72	1.07	0.91	1.07	0.91

모형8(7cm×14cm), 가로대 5개

모형9(7cm×14cm), 가로대 9개

[표 11] 가로대 개수에 따른 실험 결과 (단위 : m/s)

### 2.3.1. 가로대 간격에 따른 풍속 변화 결과

가로대 간격에 따른 실험결과 측정치를 [표 12]에서 보면, 가로대의 간격이 동일한 모형1은 비닐하우스의 정수리부분이 모형10과 모형11에 비해 풍속 수치가 낮게 측정된 반면에 양측면의 풍속은 모형10, 모형11보다 풍속의 수치가 높게 측정되었다. 특히 모형11은 가로대의 아래 부분을 조밀한 간격으로 배치했을 때 비닐하우스의 정수리부분의 풍속의 수치는 다른 세 개의 모형보다 높은 수치로 측정되었다. 모형10은 가로대를 비닐하우스의 정수리 부분을 조밀한 간격으로 하였을 때는 정수리 부분의 풍속이 낮은 수치로 측정되었으며 이는 모형1보다 더 적은 수치로 측정되었다.

2.98	1.72	2.98	1.72	2.66	1.55	2.66	1.55
1.38	0.72	1.38	0.72	1.39	0.77	1.39	0.77
11.07	10.4	11.9	11.07	10.4	11.9	10.87	11.07
3.07	7.67	4.59	3.07	7.67	4.59	2.87	10.57
1.94	3.68	2.17	1.94	3.68	2.17	1.92	10.03
3.56	6.73	5.1	3.56	6.73	5.1	4.51	9.1
6.67	8.13	7.17	6.67	8.13	7.17	7.27	10.2
8.4	9.37	8.7	8.4	9.37	8.7	8.6	10.5
8.17	10.47	8.37	8.17	10.47	8.37	8.3	10.5
0.69	0.71	0.69	0.71	0.45	0.56	0.45	0.56
0.7	1.01	0.7	1.01	0.88	0.54	0.88	0.54

모형10(7cm×14cm), 가로대 위(정수리) 조밀

모형11(7cm×14cm), 가로대 아래 조밀

[표 12] 가로대 간격에 따른 실험 결과 (단위 : m/s)

## 3. 공간 변화를 통한 수리모형 실험 결과

### 3.1. 지형에 따른 풍향의 변화 결과

[그림 14]를 보면 개방된 공간에서는 바람이 비닐하우스를 흘러 지나가는 것을 볼 수 있다. 또한 높은 방향에 따라 바람의 흐름이 달랐는데, 비닐하우스의 옆면이 바람에 맞닿을 경우, 앞면이 맞닿을 경



우에 비해 바람이 큰 충돌 없이 부드럽게 넘어감을 알 수 있다. 앞면이 맞닿을 경우에는, 앞면에 많은 충돌이 있음을 알 수 있다. [그림 15]를 보면 지형이 있을 경우 바람이 흐를 수 있는 지형의 윗부분으로 바람이 흐르게 되어, 지형이 없을 경우에 비해 바람이 시설에 많은 영향을 주지 못하고 흘러가게 된다.



모형12-1 (측면)

모형12-2(정면)

[그림 14] 개방된 공간에서 풍향 실험 결과



모형12-3(측면)

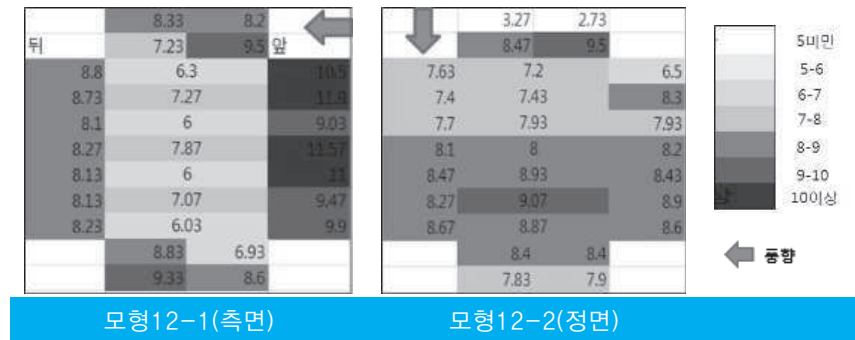
모형12-4(정면)

[그림 15] 폐쇄된(분지형) 공간에서 풍향 실험 결과

### 3.2 지형에 따른 풍속의 변화 결과

#### 3.2.1. 개방된 지형

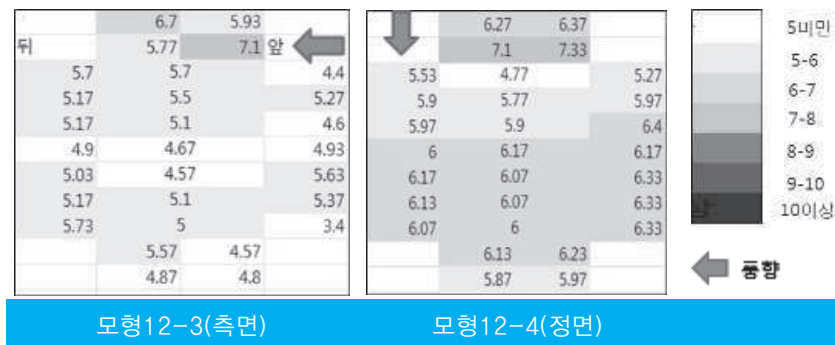
개방된 지형에서의 실험 결과를 [표 13]에서 보면 모형12-1(측면)에서 확연하게 풍속이 강하게 측정된 것을 확인할 수 있었다. 또 이 경우에는 중간 부분이 모형12-2(정면)보다 풍속이 약하게 측정된 것을 볼 수 있었다. 모형12-2(정면)의 경우에는 가장 강하게 측정된 부분의 풍속을 보았을 때, 모형12-1(측면)의 경우보다 훨씬 약한 것을 확인할 수 있었다. 또한, 앞면과 뒷면의 아랫부분은 풍속이 상당히 약하게 측정되었다.



[표 13] 개방된 지형에서의 실험 결과 (단위 : m/s).

### 3.2.2. 폐쇄된 지형(분지 구조)

[표 14]는 폐쇄된(분지형) 지형을 추가하여 모형12를 바람의 방향을 비닐하우스의 측면과 정면방향으로 구분하여 측정한 실험결과 측정치이다. 이 때 색으로만 보아도 한눈에 알 수 있듯이 폐쇄된 분지 지형실험에서는 풍속이 현저히 약하게 측정되었다. 특히 모형 12-3(측면)의 경우에는 거의 모든 지점에서의 풍속이 6m/s를 넘지 못한 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 우리는 주변에 지형이 있을 경우에 비닐하우스는 바람의 영향을 확실히 적게 받는다는 것을 확인할 수 있었다.



[표 14] 폐쇄된(분지형) 지형에서의 실험 결과(단위 : m/s).



## IV. 결론 및 제언

내재형 비닐하우스 규격을 풍속과 관련하여 다중회귀분석을 한 결과 폭, 높이, 가로대는 의미 있는 수치를 보였으며 반면에 폭-높이, 서까래에 대한 수치에 의미는 미비하였다. 이는 비닐하우스 구조 설계에 있어 폭, 높이, 가로대에 대한 상관관계를 고려하여 설계해야 함을 알 수 있다.

여러 요인들(폭, 높이, 서까래 간격 및 개수, 가로대 개수)에 대한 수리모형 실험 결과 모형2-11까지의 실험 결과를 보면 전체적으로 풍속이 약하게 측정된 것은 모형 2이다. 이는 작은 규모보다는 큰 규모의 비닐하우스가 바람에 접하는 면적이 넓어 풍속을 분산하는 역할을 한다는 것을 알 수 있다. 또한 서까래 및 가로대가 집약적으로 분포된 곳은 조방적으로 분포된 곳보다 풍속이 강하게 나타났다. 이로 인해 가로대, 서까래 구조물이 지나치게 집약되면 힘의 분산에 좋지 않은 영향을 준다는 것을 알 수 있다.

지형의 유무에 따른 수리모형 실험 결과 바람의 흐름에서도 볼 수 있듯이, 지형이 있을 경우 바람이 비닐하우스에 많은 영향을 주지 않고 지나가게 된다. 따라서 풍속 데이터를 얻었을 때 지형이 있을 경우 바람에 대한 영향을 더 적게 받음을 알 수 있다.

상사 법칙이란 모형실험을 통하여 원형에서 발생하는 각종 특성을 예측하는 수학적 기법이다. 풍동실험과 같이 실제 큰 구조물을 축소하여 유체 해석을 하는 경우에 상사 법칙이 만족되어야 하는데, 두 실험적 상태에 대해 Reynolds 수가 같으면 각종 유체 상수가 동일하기 때문에 상사가 만족된다. Reynolds 수의 식은 밀도, 특성속도, 특성 길이에 비례하며, 점성계수에 반비례한다. 모델과 원형에 대한 식을 세워보았을 때 밀도와 점성계수는 유체 고유의 상수이므로 일정하다. 따라서 태풍의 풍속과 모델의 축척을 고려하여 모델 실험에서의 풍속을 구한다면 상사 법칙이 만족하여 더 정확한 실험을 진행할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 폭, 높이, 서까래 간격 및 개수, 가로대 개수의 요인별 영향과, 지형의 유무에 대한 영향에 대하여 연구를 진행하였다. 하지만 비닐하우스에 영향을 주는 요인에는 더 세부적인 것들이 있을 것이며, 또한 지형도 단순한 산 지형이더라도 낮은 산, 높은 산 등 더 다양한 지형이 있을 것이다. 이를 실생활에 적용해 실제 비닐하우스가 있는 지역의 지형 모형을 제작하여 실험을 진행하면 실생활에 실제로 연구 결과를 이용할 수 있을 것이다.

## ■ 참고문헌

- [1] 김정원. 2008. 단동 결합형 비닐하우스 구조개선 연구. 국립농업과학원 에너지환경공학과.
- [2] 김정원. 2008. 연동형 비닐하우스 구조개선 연구. 국립농업과학원 에너지환경공학과.
- [3] 남상운. 2002. 비닐하우스 폭설피해 방지용 가지주 장치의 개발. 생물환경조절학회지. pp 65-70.
- [4] 농림수산식품부. 2010. 시설채소 온실현황 및 채소류 생산실적.
- [5] 농림수산식품부, 농촌진흥청. 2010. 원예특작시설 내재해형 규격 설계도, 시방서.
- [6] 농림통계연보(1990~2007), 경지면적통계(2008~2010)
- [7] 백선영. 2010. 전북대학교 대학원 석사논문. 비닐하우스의 형태와 배치에 따른 풍압.
- [8] 염성현. 2011-2012. 기후 변화 대응 내재해 비닐하우스 구조 개선 연구. 국립농업과학원.
- [9] 염성현. 2011. 농기계 적용성 향상 내재해 단동하우스 모델 개발. 국립농업과학원.
- [10] 윤남규. 2008. 지붕연결형 감귤하우스 구조개선 연구. 국립농업과학원 에너지환경공학과.
- [11] 정상환, 2009 비닐하우스 구조보강을 위한 내재해형 트러스 클립 개발에 관한 연구. 충청북도농업기술원.

### 심사평

본 논문은 지형과 기후를 고려한 인공구조물 설계에 대한 연구이다. 노지재배 보다는 시설 작물재배의 비중이 급속하게 증가하는 추세이므로 자연재해를 견딜수 있는 최적의 비닐하우스 시설물을 설계하여 피해를 최소화하는 방안을 찾아보는 연구는 청소년과학학술지에 적합한 논문으로 판단된다.

## 연구 후기

황재희 : 연구를 시작하고 진행하면서 따로 연구를 할 시간이 많지 않았기 때문에 시간적 여유 면에서 많은 어려움을 겪었던 것 같다. 하지만 누구보다도 더 열정적이었던 지도 선생님과, 마찬가지로 열심히 임했던 친구들을 만나 우여곡절 끝에 연구를 마칠 수 있었다. 과거에는 항상 어려운 수식, 복잡한 과학이론이 들어가야만 제대로 된 연구라고 생각하던 시절이 있었다. 고등학교에 입학하면서 점점 그 관념은 깨졌고, 특히 연구의 필요성, 동기를 설정하며 실생활, 공학 면에 많은 초점을 맞추면서, ‘내 손으로 실생활의 무언가를 바로 바꿀 수 있는’, 또 ‘인간 중심적인’ 공학의 매력에 더욱 더 끌리게 되었으며 앞으로도 이러한 연구들을 더 해보고 싶다는 생각이 들었다.

이주윤 : 처음 연구를 시작했을 때는 조금 생소한 내용이나 실험 때문에 막막한 점도 있었다. 잘 모르는 내용에 대해서 공부해야 했고, 가장 추웠던 겨울에 풍동 실험을 해야 하는 등 힘든 점이 많았다. 하지만 열정적으로 연구를 지도해 주신 선생님, 그리고 친구들 덕분에 순조롭게 진행할 수 있었고, 고생한 만큼 잘 마무리한 것 같아서 뿌듯하다. 이 연구는 어렵고 복잡한 연구라기 보단 실용적이고 실생활에 근접한 연구라고 생각한다. 본 연구를 통해서 딱딱하고 이론적인 연구만 필요한 것이 아니라 보다 우리 생활에 가까운 연구 역시 꼭 필요한 연구라는 것을 느꼈고, 이러한 연구를 할 수 있었던 것 역시 정말 값진 경험이었다고 생각한다.

박신영 : 생명과학을 주로 공부하다가 익숙하지 않은 분야인 공학적 연구를 하자니 공부해야 할 내용이나 실험을 설계하는 데 있어 쉽지 않은 연구였다. 연구를 위해서 농촌경제의 변화, 통계 처리 그리고 유체역학에 대해 공부해야 했다. 지식을 습득하는데 있어서 분야 간의 벽을 자주 느끼곤 했는데, 문제를 해결하고자 하는 목표 아래에서는 그렇지 않았던 것 같다. 연구를 하면서 이제는 그 분야 간의 벽을 어느 정도 허물어야 한다는 생각이 들었고, 요즘 사회에서는 융합적인 사고가 더 요구되고 있다는 말을 실감할 수 있었다. 나에게는 무엇보다 다른 분야를 경험할 수 있었다는 점이 가장 가치 있었다.

최혜경 : 추운 겨울 밤, 방과 후 풍동실에서 얼은 손을 녹여가며 실험을 진행한 황재희, 이주윤, 박신영 학생에게 감사함을 표하고 싶다.

## 연구진

황재희(Hwang Jaehui, 경기과학고등학교 2학년, wogml1657@naver.com), 제1저자 및 교신저자

이주윤(Lee Juyoon, 경기과학고등학교 2학년, muzik3252@naver.com)

박신영(Park Shinyoung, 경기과학고등학교 2학년, junia9784@naver.com)

지도교사 : 최혜경(Choi Hyekyoung, 경기과학고등학교, 전공: 지리학, midafrica@naver.com)

(2015. 1월 현재)

## 편집·심사활동 소개

이번 「청소년과학창의연구」 특별호에는 총 14편의 논문이 게재되었습니다. 학술지 발간 기획과 엄정한 심사를 위하여 대학교수, 과학고등학교·과학영재학교 교사 등 30명으로 구성된 편집·심사위원회를 운영하였습니다.

올해 초 R&E 페스티벌에서 수상한 50편의 학문 영역별 연구논문을 심사 대상으로 선정하여, 수학·물리·화학·생물·지구과학·정보·공학 등 7개 분야에 걸쳐 논문 1편당 3인의 평가위원이 공동으로 심사하였습니다. 1차 논문 심사를 통해 각종 수정·보완 사항이 지적되었으며, 심사위원의 심사평가 의견에 따라 충실히 수정한 논문에 대해 2차 엄정 심사를 실시하였습니다. 그 결과, 연구의 독창성과 적합성 및 연구 성과 등을 종합적으로 고려하여 최종 14편의 게재 논문을 확정하였습니다. 게재가 확정된 논문에 대해 간략한 심사평을 수록하였으며, 연구팀의 연구 후기에서 그간의 연구 경험과 소감을 소개할 수 있도록 하였습니다.

지면에서나마, 본 학술지에 논문을 게재하게 된 연구팀원과 지도교수진에게 축하의 마음을 전하며, 앞으로 후속 연구에 매진하여 더욱 값진 논문으로 이어지길 기대해 봅니다.

「청소년과학창의연구」 편집·심사위원회 교수 최호성(경남대학교)

## 청소년 과학 창의 연구

The Journal of Youths in Scientific Research

- 특별호 -

**발행일** 2015년 7월 31일

**발행인** 김승환

**편집인** 최호성

**발행처** 한국과학창의재단

| 주소 서울특별시 강남구 선릉로 602 | **전화번호** 02) 559-0701

**디자인·인쇄** 오션커뮤니케이션즈

| 주소 경상남도 창원시 마산회원구 합포로 285 3층 (양덕동) | **전화번호** 055) 296-4995

이 학술지의 내용 전부 또는 일부를

무단으로 복제할 수 없습니다.