

청소년 과학창의연구

창간호 Vol. 1. No. 1
THE JOURNAL OF YOUTHS IN SCIENTIFIC RESEARCH



2015년 한국 MERS 확산에 대한 수학적 모델링(Mathematical Modeling of the Spread of MERS in Korea in 2015)

김민유(Kim Minyoo)·금화연(Kum Hwayeon)·안준호(Ahn Junho)·최윤석(Choi Yunseok) – 한국과학기술원(KAIST) 부설 한국과학영재학교

수학적 모형에 의한 지하철 운행의 개선 방안에 대한 연구(A Note on Improvement Plan of Subway Operation by Mathematical Modeling)

임수철(Lim Soochaeol)·곽승신(Gwak Seungshin)·장우석(Jang Wooseok)·정효진(Jung Hyojin)·모지훈(Mo Jihun) – 인천진산과학고등학교

일반화된 젓가락게임의 필승전략에 관한 연구(A Study on Winning Strategies of Generalized Chopsticks Game)

조한솔(Cho Hanseul)·박윤원(Park Yunwon)·박종욱(Park Jonguk)·차준경(Cha Junkyeong)·김덕원(Kim Deokwon) – 인천과학고등학교

이산질병모델에 대한 인구 동력학적 성질 연구(A Study on the Dynamics of a Discrete SIR Model)

임재웅(Lim Jaewoong)·설채은(Seol Chaeun)·김성준(Kim Seongjun)·김규리(Kim Gyuri) – 경산과학고등학교

액체 금속을 이용한 열전쌍 온도계(Liquid Metal Thermocouple)

권훈범(Kwon Hoonbeom)·강현구(Kang Hyungu)·김진우(Kim Jinwoo)·박준영(Park Junyoung) – 한성과학고등학교

비대칭축전기에서의 이온풍 가속 효과에 관한 탐구(Study on Wind Velocity Dependence Using Asymmetric Capacitor)

김재윤(Kim Jaeyun)·장연석(Jang Yeonsuk)·조용한(Jo Yonghan) – 광주과학고등학교

Agl-그래핀 나노복합체의 유기물 분해 광촉매 메커니즘 연구(Photocatalytic Organic Dye Degradation Mechanisms of AgI-Graphene Nanocomposite)

김성남(Kim Seongnam)·이아림(Lee Ahrim)·김가현(Kim Gahyun)·채동현(Chae Donghyeon)·김성하(Kim Seongha) – 부산과학고등학교

수용액 상태에서 안정적인 마그네타이트 형성조건에 대한 연구(Study of Stable Magnetite Formation Condition in Aqueous System)

김준서(Kim Joonseo)·신정원(Shin Jungwon)·유원정(Yu Wonjeong)·장건호(Chang Gunho)·조혜지(Jo Hyeji) – 대전동신과학고등학교

외래식물 미국자리공의 도입이 수지상균근군 군집에 미치는 영향(Exotic Plant Invasion of *Phytolacca americana* Affects to Arbuscular Mycorrhizal Fungal Community)

전유진(Jeon Yujin)·임유정(Lim Yoojeong)·박우주(Park Wooju)·전상준(Jeon Sangjun) – 강원과학고등학교

곤충 사이보그 개발을 위한 잠자리 날개 신경망 Mapping 및 근육운동 측정(Mapping Neural Networks and Measuring Muscular Movement of Dragonflies' Wings for Development of Insect-Cyborg Robot)

정석영(Jung Seokyeong)·이주은(Lee Jueun)·박하민(Park Hamin)·이정선(Lee Jeongseon)·홍용권(Hong Yongkwon) – 충남과학고등학교

대기 오염 물질이 구름입자 성장 과정에 미치는 영향 탐구(Study of Effects of Air Pollution on the Growth of Cloud Condensate)

임승현(Lim Seunghyeon)·윤가희(Yun Gahui)·서주형(Seo Juhyeong)·이태동(Yi Taedong) – 대구일과학고등학교

교차로에서 원활한 차량通行과 횡단보도에서 보행자의 대기 시간 단축을 위한 신호등 제어 시스템 연구(A Traffic Signal Control Systems to Ease Traffic Jams on Intersections and Shorten Pedestrians Waiting Time at Crosswalk)

류지석(Ryu Jiseok)·권해진(Kwon Haejin)·정승연(Jung Seungyeon)·채정범(Chae Jeongbeom)·최원석(Choi Wonseok) – 인천과학고등학교

개인화된 부분 이미지를 활용한 새로운 홈쳐보기 방지 기법(A New Anti-Shoulder Surfing Method Using Personalized Sub-Image)

김기홍(Kim Kihong)·김창훈(Kim Changhun)·김상은(Kim Sangeun)·안수영(An Suyeong)·이가은(Rhee Kaeun) – 부산과학고등학교

가변형 캠버 에어포일을 적용한 2-로터 사이클로콥터의 수치해석적 인자 연구(Numerical Parametric Study of Using Variable Camber Airfoil on a Twin-Rotor Cyclocopter)

조재영(Jo Jaeyoung)·이충우(Lee Choongwoo)·오건(Oh Keon)·김승수(Kim Seungsu) – 한국과학기술원(KAIST) 부설 한국과학영재학교

공기 매개 감염을 최소화 할 수 있는 에너지 절약형 교실 공조장치의 개발(Development of the Air Conditioning Equipment that Minimize Air-Borne Infection for the Energy-Saving Classrooms)

오진호(Oh Jinho)·이준호(Lee Junho)·이도호(Lee Doho)·백민혁(Baek Minhyeok)·양현우(Yang Hyunwoo) – 인천과학고등학교

청소년 과학창의연구

창간호 Vol. 1. No. 1

THE JOURNAL OF YOUTHS IN SCIENTIFIC RESEARCH



미래창조과학부



한국과학창의재단



과학영재창의연구(R&E)지원센터

ISSN 2508-2345

MARCH, 2016

청소년 과학창의연구

THE JOURNAL OF YOUTHS
IN SCIENTIFIC RESEARCH

창간호 Vol. 1. No. 1



미래창조과학부



한국과학창의재단



과학영재창의연구(R&E)지원센터

복권위원회



미래창조과학부



한국과학창의재단



과학영재창의연구(R&E)지원센터

ISSN 2508-2345

MARCH, 2016

청소년 과학창의연구

THE JOURNAL OF YOUTHS
IN SCIENTIFIC RESEARCH

창간호 Vol. 1. No. 1



미래창조과학부



한국과학창의재단



과학영재 창의연구(R&E)지원센터

사사 (Acknowledgment)



미래창조과학부



한국과학창의재단

Korea Foundation for the Advancement of Science & Creativity

**“이 학술지는 2015년도 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)."

11	2015년 한국 MERS 확산에 대한 수학적 모델링 Mathematical Modeling of the Spread of MERS in Korea in 2015 김민유(Kim Minyoo) · 금화연(Kum Hwayeon) · 안준호(Ahn Junho) · 최윤석(Choi Yunseok) – 한국과학기술원(KAIST) 부설 한국과학영재학교(Korea Science Academy) 지도교수 : 이창형(Lee Changhyeong, 울산과학기술원(UNIST) 수리학과) 지도조교 : 이효정(Lee Hyojung, 울산과학기술원(UNIST) 수리학과)
35	수학적 모형에 의한 지하철 운행의 개선 방안에 대한 연구 A Note on Improvement Plan of Subway Operation by Mathematical Modeling 임수철(Lim Soochaeol) · 곽승신(Gwak Seungshin) · 장우석(Jang Wooseok) · 정효진(Jung Hyojin) · 모지훈(Mo Jihun) – 인천진산과학고등학교 (Incheon Jinsan Science High School) 지도교사 : 김기용(Kim Kiyong, 인천진산과학고등학교, 수학) 지도교수 : 함남우(Hahm Nahmwoo, 인천대학교 수학과)
53	일반화된 젓가락게임의 필승전략에 관한 연구 A Study on Winning Strategies of Generalized Chopsticks Game 조한솔(Cho Hanseul) · 박윤원(Park Yunwon) · 박종욱(Park Jonguk) · 차준경(Cha Junkyeong) · 김덕원(Kim Deokwon) – 인천과학고등학교(Incheon Science High School) 지도교사 : 강신석(Kang Shinseok, 인천과학고등학교, 수학) 지도교수 : 함남우(Hahm Nahmwoo, 인천대학교 수학과)
81	이산질병모델에 대한 인구 동력학적 성질 연구 A Study on the Dynamics of a Discrete SIR Model 임재웅(Lim Jaewoong) · 설재은(Seol Chaeun) · 김성준(Kim Seongjun) · 김규리(Kim Gyuil) – 경산과학고등학교(Gyeongsan Science High School) 지도교사 : 신현주(Shin Hyunju, 경산과학고등학교, 수학) 지도교수 : 백헌기(Baek Heonki, 대구가톨릭대학교 수학교육과)

97	액체 금속을 이용한 열전쌍 온도계 Liquid Metal Thermocouple 권훈범(Kwon Hoonbeom) · 강현구(Kang Hyungu) · 김진우(Kim Jinwoo) · 박준영(Park Junyoung) – 한성과학고등학교(Hansung Science High School) 지도교사 : 안정용(Ahn Jungyong, 한성과학고등학교, 물리학) 지도교수 : 이정철(Lee Jungchul, 서강대학교 기계공학과) 지도조교 : 김석범(Kim Seokbeom, 서강대학교 기계공학과)
111	비대칭 축전기에서의 이온풍 가속 효과에 관한 탐구 Study on Wind Velocity Dependence Using Asymmetric Capacitor 김재윤(Kim Jaeyun) · 장연석(Jang Yeonsuk) · 조용한(Jo Yonghan) – 광주과학고등학교(Gwangju Science High School) 지도교사 : 이진호(Lee Jinho, 광주과학고등학교, 물리학)
125	Agl-그래핀 나노복합체의 유기물 분해 광촉매 메커니즘 연구 Photocatalytic Organic Dye Degradation Mechanisms of Agl-Graphene Nanocomposite 김성남(Kim Seongnam) · 이아림(Lee Ahrim) · 김가현(Kim Gahyun) · 채동현(Chae Donghyeon) · 김성하(Kim Seongha) – 부산과학고등학교(Busan Science High School) 지도교사 : 남영호(Nam Youngho, 부산과학고등학교, 화학) 지도교수 : 김태규(Kim Taekyu, 부산대학교 화학과) 지도조교 : 최지하(Choi Jiha, 부산대학교 화학과)
137	수용액 상태에서 안정적인 마그네타이트 형성조건에 대한 연구 Study of Stable Magnetite Formation Condition in Aqueous System 김준서(Kim Joonseo) · 신정원(Shin Jungwon) · 유원정(Yu Wonjeong) · 장건호(Chang Gunho) · 조혜지(Jo Hyeji) – 대전동신과학고등학교(Daejeon Dongsin Science High School) 지도교사 : 이수복(Lee Soobok, 대전동신과학고등학교, 화학)

153	외래식물 미국자리공의 도입이 수지상균근균 군집에 미치는 영향 Exotic Plant Invasion of <i>Phytolacca americana</i> Affects to Arbuscular Mycorrhizal Fungal Community 전유진(Jeon Yujin) · 임유정(Lim Yoojeong) · 박우주(Park Wooju) · 전상준(Jeon Sangjun) – 강원과학고등학교(Kangwon Science High School) 지도교사 : 최항석(Choi Hangseok, 강원과학고등학교, 생물학) 지도교수 : 엄안흠(Eom Ahnhum, 한국교원대학교 생물교육과) 지도조교 : 박혁(Park Hyuk, 한국교원대학교 생물교육과)
169	곤충 사이보그 개발을 위한 잠자리 날개 신경망 Mapping 및 근육운동 측정 Mapping Neural Networks and Measuring Muscular Movement of Dragonflies' Wings for Development of Insect-Cyborg Robot 정석영(Jung Seokyeong) · 이주은(Lee Jueun) · 박하민(Park Hamin) · 이정선(Lee Jeongseon) · 홍용권(Hong Yongkwon) – 충남과학고등학교(Chungnam Science High School) 지도교사 : 유선아 (Yu Seona, 충남과학고등학교, 생물학) 지도교수 : 신안나 (Shin Ahnna, 한국과학기술원(KAIST) 생명과학과)
181	대기 오염 물질이 구름입자 성장 과정에 미치는 영향 탐구 Study of Effects of Air Pollution on the Growth of Cloud Condensate 임승현(Lim Seunghyeon) · 윤가희(Yun Gahui) · 서주형(Seo Juhyung) · 이태동(Yi Taedong) – 대구일과학고등학교(Daegu Il Science High School) 지도교사 : 백명희(Baek Myunghee, 대구일과학고등학교, 대기과학) 지도교수 : 이규원(Lee Gyuwon, 경북대학교 지구시스템과학부)
197	교차로에서 원활한 차량 통행과 횡단보도에서 보행자의 대기 시간 단축을 위한 신호등 제어 시스템 연구 A Traffic Signal Control Systems to Ease Traffic Jams on Intersections and Shorten Pedestrians Waiting Time at Crosswalk 류지석(Ryu Jiseok) · 권해진(Kwon Haejin) · 정승연(Jung Seongyeon) · 채정범(Chae Jeongbeom) · 최원석(Choi Wonseok) – 인천과학고등학교(Incheon Science High School) 지도교사 : 조윤정(Cho Yunjeong, 인천과학고등학교, 정보 · 컴퓨터) 지도연구원 : 고광용(Ko Gwangyong, 도로교통공단 교통과학연구원)

223	개인화된 부분 이미지를 활용한 새로운 훔쳐보기 방지 기법 A New Anti-Shoulder Surfing Method Using Personalized Sub-Image 김기홍(Kim Kihong) · 김창훈(Kim Changhun) · 김상은(Kim Sangeun) · 안수영(An Suyeong) · 이가은(Rhee Kaeun) – 부산과학고등학교(Busan Science High School) 지도교사 : 고화정(Ko Hwajung, 부산과학고등학교, 정보 · 컴퓨터) 지도교수 : 조환규(Cho Hwangyu, 부산대학교 컴퓨터공학과)
239	가변형 캠버 에어포일을 적용한 2-로터 사이클로콥터의 수치해석적 인자 연구 Numerical Parametric Study of Using Variable Camber Airfoil on a Twin-Rotor Cyclocopter 조재영(Jo Jaeyoung) · 이충우(Lee Choongwoo) · 오건(Oh Keon) · 김승수(Kim Seungsu) – 한국과학기술원(KAIST) 부설 한국과학영재학교(Korea Science Academy) 지도교사 : 조철희(Cho Chulhee, 한국과학기술원(KAIST) 부설 한국과학영재학교, 물리화학) 지도교수 : 권장혁(Kwon Janghyuk, 한국과학기술원(KAIST) 항공우주공학과) 지도조교 : 박태희(Park Taehee, 한국과학기술원(KAIST) 항공우주공학과) 이학진(Lee Hakjin, 한국과학기술원(KAIST) 항공우주공학과)
259	공기 매개 감염을 최소화 할 수 있는 에너지 절약형 교실 공조장치의 개발 Development of the Air Conditioning Equipment that Minimize Air-borne Infection for the Energy-Saving Classrooms 오진호(Oh Jinho) · 이준호(Lee Junho) · 이도호(Lee Doho) · 백민혁(Baek Minhyeok) · 양현우(Yang Hyunwoo) – 인천과학고등학교(Incheon Science High School) 지도교사 : 조대기(Jo Daeki, 인천과학고등학교, 공학) 지도조교 : 박정현(Park Junghyun, 연세대학교 기계공학과)

2015년 한국 MERS 확산에 대한 수학적 모델링

김민유 · 금화연 · 안준호 · 최윤석 – 한국과학기술원(KAIST) 부설 한국과학영재학교

Mathematical Modeling of the Spread of MERS in Korea in 2015

Kim Minyoo · Kum Hwayeon · Ahn Junho · Choi Yunseok - Korea Science Academy

ABSTRACT

The Middle East respiratory syndrome coronavirus(MERS) is a zoonotic pathogen that has a very high fatality rate of over 40% and the vaccine against MERS is not available. The outbreak of the MERS has caused 186 confirmed cases in the Republic of Korea as of July 2015 within two months. Most of confirmed cases in South Korea involve not only intra-hospital transmission but hospital-to-hospital transmission. The first patient was infected at Pyeongtaek St. Mary’s Hospital where 20& of cases have been affected. 50% of cases were infected at the emergency room of the Samsung Medical Center in Seoul where the 14th confirmed stayed. In this study, we focus on the transmission of MERS outbreak at Pyeongtaek St. Mary’s Hospital and Samsung Medical Center. We construct the mathematical model for two hospitals to match the dynamics of MERS outbreak during May~July 2015 in South Korea. Furthermore, we attempt to simulate the process of infection to understand the dynamics of spreading the virus among individuals at the emergency room at the Samsung Medical Center. Finally, we consider four different scenarios in terms of the periods that the first case stays at the Samsung Medical Center as well as impact of the interventions to prevent close contacts with the infected cases. The results can help evaluate the effective control interventions.

Key words:
MERS, Mathematical Modeling, ODE Model, ABM(Agent Based Model)

국문초록

중동호흡기증후군(MERS)은 치사율 40% 이상으로 매우 높고 백신이 존재하지 않는 전염병이다. 2015년 7월 즈음 한국에서 발생한 MERS는 두 달 만에 186명의 확진자를 발생시켰다. MERS의 전염은 병원 내부뿐만 아니라 병원 간에도 일어났다. 첫 번째 환자는 평택성모병원에서 발생하였으며 평택성모병원의 환자는 전체 환자의 20%를 차지한다. 14번 환자가 머물렀던 삼성서울병원 응급실에서는 전체 환자의 50% 이상이 나타났다. 우리는 평택성모병원과 삼성서울병원의 MERS 확산을 중심으로 연구를 진행하였다. 두 병원의 실제 데이터와 상황에 잘 맞는 모델을 설계하였고, 삼성서울병원 응급실 내에서의 전파 과정을 시뮬레이션을 하였다. 이 모델을 바탕으로 첫 환자의 체류 기간, 접촉률 등을 변화시킨 네 가지의 가상 Scenario를 적용하였다. 이 결과는 전염병 발생 시 효과적인 대처 방안을 제시해 준다.

중심어 :
MERS, 수학적 모델링, ODE 모델, ABM(Agent Based Model)

I. 서론

2015년 6월에서 7월 사이 우리나라를 뜨겁게 달군 전염병인 MERS는 모두의 관심 대상이었다. 첫 번째 환자가 중동에서 걸려온 MERS라는 병을 우리나라에 퍼뜨리게 된 것을 시작으로 대략 200명의 사람이 MERS에 전염되었다. 백신이 없고 전염 방법조차 확실히 되지 않아 모든 사람들에게 위협성을 야기하였다. 또한 어느 특정 병원의 응급실에서만 다수의 환자가 나와서 병원 응급실의 문제점을 지적하기도 했다. 지금은 MERS가 거의 종식되어 안정된 상황이지만 대한민국 병원 응급실의 문제가 나타났기 때문에 우리는 이러한 문제들에 관심을 가지게 되었고 실제와 상황이 달랐다면 MERS 확산을 얼마나 막을 수 있었는지에 대해 알아보기로 하였다. MERS 감염에 있어서 가장 중심에 있는 평택성모병원과 삼성서울병원의 응급실을 배경으로 세운 모델에 적용해서 나온 결과와 2015년에 나타난 MERS 결과를 비교하여 어떠한 차이점이 나타나는지를 연구해 보기로 하였다.

이 연구는 크게 ODE 모델과 ABM의 두 파트로 나누어진다. ODE(Ordinary Differential Equation) 모델은 상미분방정식과 감염률, 회복률 등의 매개 변수로 표현하여 시간에 따른 감염자 수를 예측할 수 있다. ABM(Agent Based Model)은 행위자 기반 모형으로 Agent 하나하나의 행동을 주시하며 전체적인 흐름

을 보는 방식의 모델이다. 이러한 수학적 모델링을 바탕으로 질병의 감염 확산 양상 예측을 하고 전염병 확산 방지를 위한 정책 수립을 하려고 한다. 또한 시뮬레이션을 통해 질병 증가 요인을 분석하여 향후 나타날 전염병에 대한 대안을 알아보기로 한다.

다음은 보건복지부에서 공개한 자료를 바탕으로 정리한 5월 27일부터 7월 6일까지의 삼성서울병원 내의 MERS 환자에 대한 자료이다.

<Table 1> The data of MERS patients-1

연번	성별	나이	확진일	감염예상일	감염~확진	퇴원일	사망일	확진~퇴원	확진~사망
35	남	38	6/4	5/27	8				
41	여	70	6/5	5/27	9	6/14		9	
46	남	56	6/6	5/27	10	6/23		17	
47	여	68	6/6	5/27	10		6/8		2
48	남	39	6/6	5/28	9				
49	남	75	6/6	5/27	10	6/21		15	
50	여	81	6/6	5/27	10		6/29		23
55	남	36	6/6	5/26	11	6/21		15	
56	남	45	6/6	5/26	11	6/15		9	
(하략)									

<Table 2> The data of MERS patients-2

날짜	당일 확진자	누적 확진자	당일 퇴원자	당일 사망자	병원 내 확진자
6/4	1	1	0	0	1
6/5	1	2	0	1	1
6/6	15	17	0	0	16
6/7	17	34	0	0	33
6/8	3	37	0	1	35
6/9	10	47	0	0	45
6/10	10	57	0	2	53
6/11	3	60	0	0	56
6/12	8	68	0	0	64
6/13	4	72	0	0	68
6/14	1	73	1	1	67
(하략)					

II. 이론적 배경

1. 기본적인 전염병 모델[1]

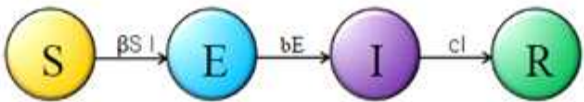
가. SIR모형(S: Susceptible, I: Infectious, R: Recovered)



[Fig. 1] SIR model

SIR 모형은 전염병모델에 있어서 가장 기초가 되는 모델로 한 집단을 전염병에 걸릴 가능성이 있는 집단과 병에 감염된 집단, 병이 다 나은 집단으로 나뉘서 시간에 따라 세 집단에 속하는 사람 수가 바뀌는 모습을 보여준다. [Fig. 1]에서 S는 감염가능집단, I는 감염된 집단, R은 전염병에서 회복된 집단이고 각 집단의 사이사이에 있는 β , c 등의 매개변수들은 전 집단에서 다음 집단으로 넘어가는 비율에 해당된다. 감염된 개체(I)는 β 의 감염률로 이웃한 감염되지 않은 개체(S)를 감염시키거나, c 의 회복률로 회복 상태(R)가 된다. R의 개체는 더 이상 감염되지도 않는다. 따라서 시간이 충분히 흐른 뒤에는 감염된 개체는 사라지고 S 또는 R만 남는다.

나. SEIR 모형(S: Susceptible, E: Exposed, I: Infectious, R: Recovered)



[Fig. 2] SEIR model

SEIR 모델은 잠복기를 고려한 SIR모형보다 복잡한 모형으로 SIR모델보다 현실적이다. [Fig. 2]에서 S는 감염가능집단, I는 감염된 집단, E는 감염된 사람들 중 잠복기에 있는 집단, R은 전염병에서 회복된 집단으로 SIR 모델과 더불어 기초가 되는 모델이다. 각 집단의 사이사이에 있는 β , c 등의 매개변수들은 전 집단에서 다음 집단으로 넘어가는 비율에 해당된다. E(잠복기)단계에서는 전염이 거의 일어나지 않는다.

SIR모형과 SEIR모형은 질병연구에 유용한 모수에 대한 근사치를 제공하지만 대부분의 전염병은 자연사나 환경의 변화 등 다양한 조건들을 고려 해주어야하기 때문에 좀 더 복잡한 모델을 필요로 한다.

2. ODE 모델

ODE(Ordinary Differential Equation)란 미분 방정식의 일종으로, 구하려는 함수가 하나의 독립 변수만을 가지고 있는 경우를 가리킨다. ODE를 사용한 모델은 상미분 방정식과 감염률, 회복률 등의 매개 변수로 표현되어 시간에 따른 감염자 수를 예측 가능하게 한다. 모델에 사용되는 대부분의 매개변수는 실제 데이터를 바탕으로 계산하지만 그렇지 못하는 경우, 수학적 최적화(optimization)라는 방법을 사용하여 구한다.

3. ABM (Agent Based Model)

ABM(Agent Based Model, 행위자 기반 모형)은 이름에서도 알 수 있듯이 Agent 하나하나의 행동을 주시하며 전체적인 흐름을 보는 방식의 모델로 전체적으로 큰 그림이 그려지지 않는, 객체 각각의 상호작용으로 이루어지는 현상에 주로 사용한다. 실제로 복잡한 물리적 현상들이 ABM을 이용함으로써 간단하게 풀리는 경우도 있다.

ABM을 세울 때에는 우선적으로 복잡계를 설정하게 되는데 이 복잡계는 Agent와 외부 환경을 포함한다. 그 후 구성원들 그리고 외부에서의 역할을 지정해 주는데 첫째로 Agent의 행위능력(decision-making rules)을 설정해 준다. 행위 능력이란 말 그대로 Agent가 지정한 환경 내에서 할 수 있는 행동을 말한다. 두 번째로 지정해주어야 할 것은 Agent간의 네트워크를 구성하는 것이다. 각각의 Agent끼리 상호작용을 하며 서로에게 영향을 끼칠 수 있다. 간단한 예시로 질병의 전염을 들 수 있다. 이렇게 설정을 하면 ABM의 설정이 완성되는데 ABM의 컴퓨터 시뮬레이션 할 때 지금까지 설정한 ABM의 행위능력과 상호작용이 동시에 일어나게 되면서 전체적인 움직임을 나타낼 수 있게 된다.

다른 모델이 아닌 ABM을 이용하는 데에는 크게 두 가지 목적이 있다. 첫째로 ABM을 이용하였을 때 어떠한 현상의 근원에 대한 명확한 이유를 알 수 있다. 이는 후에 결과를 조절하는 데에 큰 도움이 될 수 있다. 둘째로 Agent의 행위능력과 외부 환경 그리고 네트워크를 조절함으로써 우리가 원하는 결과를 이끌어 낼 수 있다. 또한 자연, 사회현상의 큰 피해를 막는 역할 역시 가능케 한다.

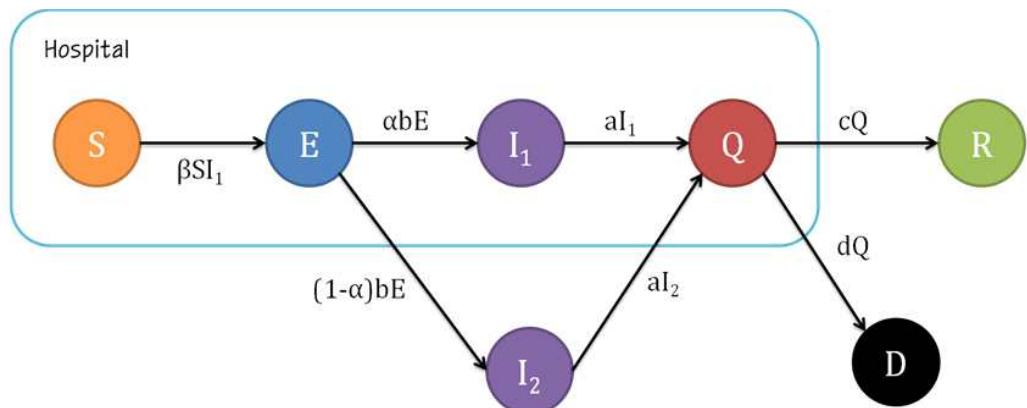
Ⅲ. MERS에 대한 ODE 모델

1. MERS의 ODE 모델

기본 SEIR모델에 몇몇 변수들과 격리가 되는 상황 등을 추가하여 MERS에 맞는 새로운 모델을 세웠다. 또한 평택성모병원과 삼성서울병원의 상황에 나타난 차이를 반영하여 각각의 모델을 만들었다. 두 모델에서 공통적으로 다음과 같이 개체군을 나누었다.

- S : 감염될 수 있는 모든 사람(병원 내의 의료진, 환자, 보호자 등)
- E : 잠복기 환자
- I₁ : 병원 내에서 감염된 채로 머무르는 환자
- I₂ : 병원에서 감염이 되었으나 밖으로 나간 환자
- Q : 확진 환자(격리)
- R : 회복된 사람
- D : 사망자

이 모델은 기존 SEIR 모델에서 I를 I₁ 과 I₂ 로 나누고 확진자 집단인 Q를 추가한 것이다(Fig. 3). MERS 확진 환자들의 사례를 보았을 때, 모두 병원에서 감염되었지만 적지 않은 사람들이 자신이 감염된지 모르고 자택으로 돌아갔다. 병원 내의 의료진, 환자, 보호자 등의 모든 사람들이 S에 해당되고, MERS에 감염되면 잠복기 개체군 E가 된다. 여기서 계속 병원에 머무르는 환자들과 자택으로 돌아가는 환자들로 나누어지게 되는데 증상이 나타나기 시작하면 각각 I₁ 과 I₂ 가 된다. 확진을 받아 격리가 되면 Q가 되고 그 후 회복되면 R, 사망하면 D가 된다. MERS는 병원 내에서만 전염이 일어나고 잠복기인 환자는 전염을 시킬 수 없으므로 이 모델에서 I₁ 만이 다른 사람들에게 전염시킬 수 있다.



[Fig. 3] SHI2QRD ODE Model of MERS

이 모델을 상미분 방정식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{dS}{dt} &= -\beta SI_1 \\ \frac{dE}{dt} &= \beta SI_1 - bE \\ \frac{dI_1}{dt} &= \alpha bE - aI_1 \\ \frac{dI_2}{dt} &= (1-\alpha)bE - aI_2 \\ \frac{dQ}{dt} &= a(I_1 + I_2) - cQ - dQ \\ \frac{dR}{dt} &= cQ \\ \frac{dD}{dt} &= dQ \end{aligned}$$

2. Parameter 선정 및 계산

가. Parameter 선정

위의 모델에서 사용된 Parameter(매개변수)들은 다음과 같이 정의된다.

<Table 3> The parameters' symbols, units, and sources

Parameters	Symbols	Units	Sources
감염률	β	rate	Optimization
병원에 장기간 머무르는 환자들의 비율	α	rate	Data
E에서 I로 진행되는 비율	b	1/일	잠복기 평균 5일 (기존 연구결과)
증상을 느끼고 병원에서 확진을 받는 비율	a	1/일	Data
회복률	c	1/일	Data
사망률	d	1/일	Data

각 Parameter들의 값은 환자들의 데이터를 이용하여 계산하거나 계산이 어려운 것들은 Optimization을 이용하여 찾았다. Optimization이란 각 날짜별 확진 환자들의 수를 이미 알고 있으므로 알고 싶은 Parameter들의 값들을 변화시켜가며 확진자 수 그래프와 가장 비슷해지는 때를 찾는 것이다.

나. 평택성모병원의 MERS 모델의 Parameter 계산

다음은 첫 확진자가 발생한 5월 15일부터의 평택성모병원 MERS 환자에 대한 자료이다.

<Table 4> The data of P-Hospital MERS patients since 5/15

(단위 : 명)		(단위 : 일)	
감염	39	감염~확진	16.63333
퇴원	33	확진~퇴원	15.78751
사망	6	확진~사망	9.5000
의료진	2		

1) b

전염이 된 후 증상이 나타나는 시기로 넘어가는 비율이므로 잠복기의 역수로 계산할 수 있다. MERS의 잠복기는 연구를 통해 평균 5일로 알려져 있다.

$$b = \frac{1}{(\text{잠복기})} = \frac{1}{5} = 0.2$$

2) a

I에서 Q로 넘어가는 비율이므로 증상이 나타난 후부터 확진을 받기까지 걸린 시간의 역수로 계산할 수 있다.

$$a = \frac{1}{(\text{확진일} - \text{감염일} - 5)} = \frac{1}{16.63333 - 5} = 0.08596$$

3) c

확진자는 회복되거나 사망하거나 두 가지의 상태로 넘어가게 되는데 c 는 어떤 날에 어떤 환자가 퇴원할 확률로 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$c = \frac{(\text{퇴원자수})}{(\text{퇴원자수}) + (\text{사망자수})} \times \frac{1}{(\text{퇴원일} - \text{확진일})} = \frac{33}{33 + 5} \times \frac{1}{15.78571} = 0.05360$$

4) d

d 는 c 와 비슷한 방법으로 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$d = \frac{(\text{사망자수})}{(\text{퇴원자수}) + (\text{사망자수})} \times \frac{1}{(\text{사망일} - \text{확진일})} = \frac{5}{33 + 5} \times \frac{1}{9.5} = 0.01619$$

5) β

β (접촉률)는 시간에 따라 달라지는 Parameter이다. 첫 3일 동안에는 1번 환자가 무방비 상태로 돌아다녀 많은 사람이 전염되었다. 후에 3일부터 5일까지는 1번 환자에게 감염된 사람들이 아직 잠복기에 있을 시기이기 때문에 접촉률 β 값이 거의 0에 가깝다. 그 후 5일 부터 11일까지는 감염된 환자들이 잠복기를 지나 감염성을 띄게 되므로 β 값이 증가하게 되지만, 초기의 무방비 상태에 비해서는 상당히 낮다. 일정 시간이 지난 후에는 감염자 수가 크게 감소하였다. 따라서 β 를 시간에 따라 다음과 같이 설정해 주었다. 이는 실제 환자들의 감염 예상일을 바탕으로 하였다.

$$\beta = \begin{cases} \beta_0 & (t \leq 3) \\ 0.01\beta_0 & (3 < t \leq 5) \\ 0.1\beta_0 & (5 < t \leq 11) \\ 0.001\beta_0 & (t > 11) \end{cases}$$

6) α

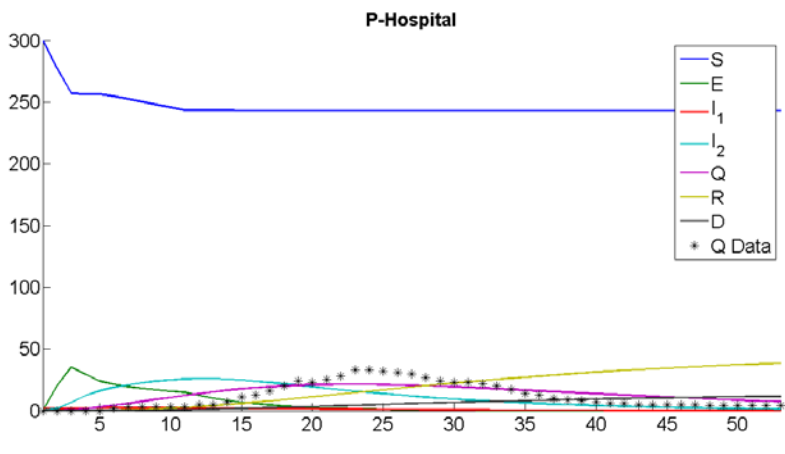
실제 환자 데이터를 통해 병원에 장기간 머무르는 사람들의 비율로 계산해 주었다.

$$\alpha = \frac{2}{39}$$

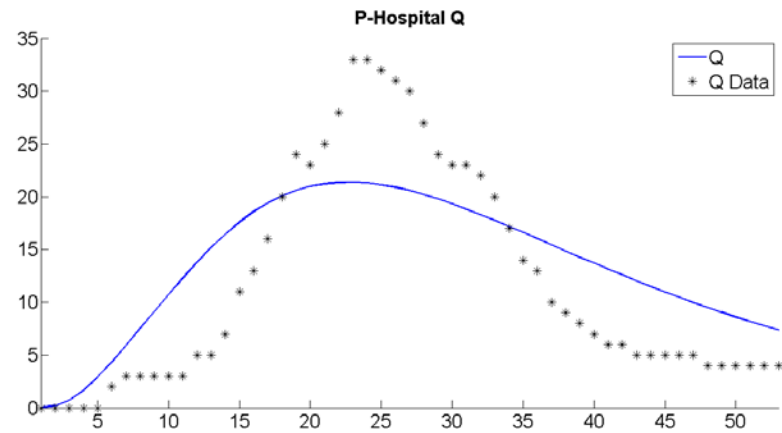
7) β_0

초기 접촉률 β_0 의 경우, 가지고 있는 데이터로 계산하기 힘든 Parameter이기 때문에 Q 데이터와 앞서 계산한 Parameter들의 값을 이용하여 Optimization을 통해 다음과 같은 결과를 얻었다.

$$\beta_0 = 0.03921$$



[Fig. 4] The result of P-Hospital ODE model



[Fig. 5] The change of Q value in P-Hospital ODE model

다. 삼성서울병원의 MERS 모델의 Parameter 계산

다음은 첫 환자가 발생한 5월 27일부터의 삼성서울병원 MERS 환자에 대한 자료이다.

<Table 5> The data of MERS patients in S-Hospital

(단위 : 명)		(단위 : 일)	
감염	93	감염~확진	13.69048
퇴원	77	확진~퇴원	15.22388
사망	16	확진~사망	10.33333
의료진	13		

1) b, c, d

$$b = \frac{1}{(\text{잠복기})} = \frac{1}{5} = 0.2$$

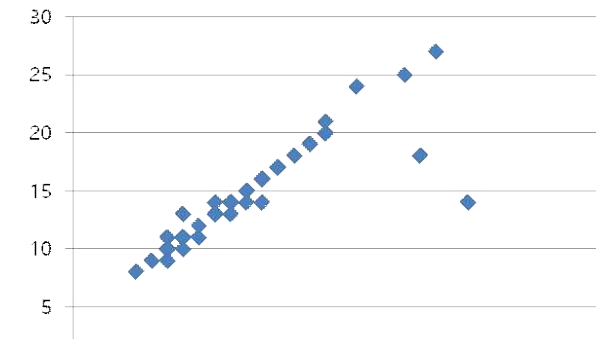
$$c = \frac{(\text{퇴원자수})}{(\text{퇴원자수}) + (\text{사망자수})} \times \frac{1}{(\text{퇴원일} - \text{확진일})} = \frac{77}{77 + 16} \times \frac{1}{15.22388} = 0.05439$$

$$d = \frac{(\text{사망자수})}{(\text{퇴원자수}) + (\text{사망자수})} \times \frac{1}{(\text{사망일} - \text{확진일})} = \frac{16}{77 + 16} \times \frac{1}{10.33333} = 0.01665$$

2) a

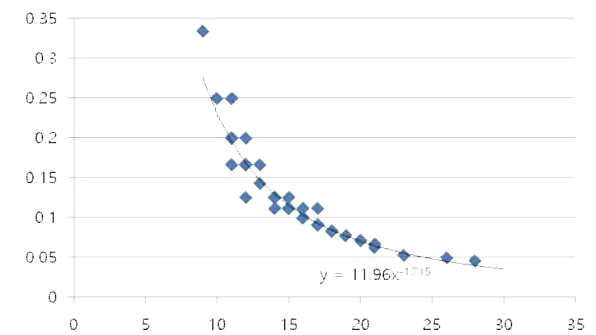
$$a = \frac{1}{(\text{확진일} - \text{감염일} - 5)}$$

평택성모병원의 모델에서 계산하였듯이 위와 같은 방법으로 a 의 값을 찾을 수 있다. 그러나 다음 그래프와 같이 뒤로 갈수록 감염 예상일로부터 확진을 받기까지 걸린 시간이 길어지는 것을 볼 수 있다.



[Fig. 6] Period from infection to quarantine of MERS patients in S-hospital according to time

따라서 a 를 t 에 따른 함수로 표현을 해야 더 정확한 모델이 될 것이다. 위 그래프의 y 좌표들에 역수를 취한 뒤 추세선을 그려 다음과 같은 결과를 얻었다.



[Fig. 7] The graph that shows the change of 'a' by time in S-Hospital and the trend line

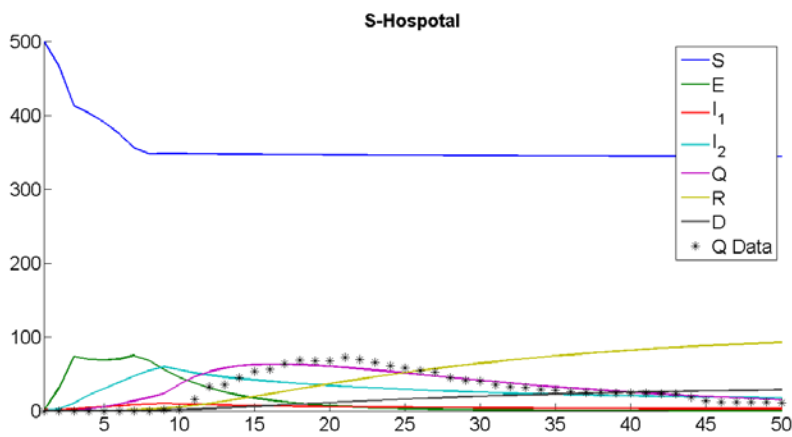
$$a = 11.96t^{-1.715}$$

3) β

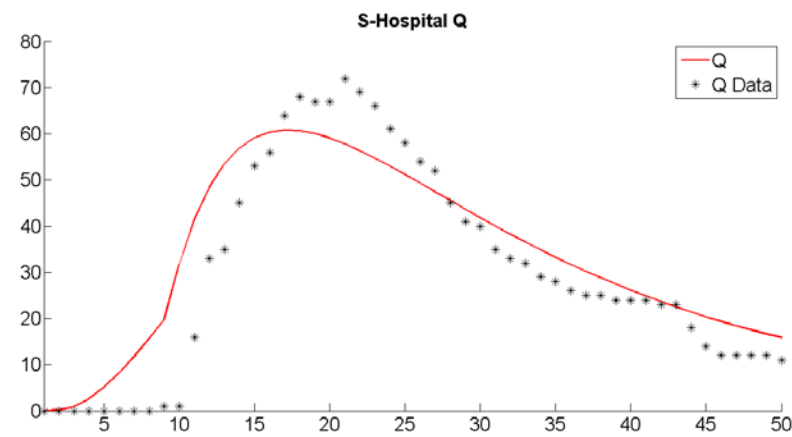
14번 환자가 삼성서울병원에 처음으로 가 3일 동안 그 곳에서 매우 많은 사람들에게 전염을 시켰으므로 초기 3일의 접촉률 β 값이 가장 크다. 3일부터 5일까지의 사람들의 경우 감염된 사람들이 아직 잠복기에 있을 가능성이 매우 크기 때문에 β 값은 $1/100$ 로 낮추어 가정한다. 그 후 t 가 5일부터 9일까지에는 감염자들이 잠복기를 지나서 대부분 감염성을 띄고 있기 때문에 β 값을 증가하나 초기의 무방비 상태에 비해서는 낮다. 그리고 일정시간이 지나게 되면 초기에 비해서 β 값이 낮아지게 된다. 따라서 β 를 시간에 따라 다음과 같이 설정해 주었다. 이는 실제 환자들의 감염 예상일을 바탕으로 하였다.

$$\beta = \begin{cases} \beta_0 & (t \leq 3) \\ 0.01\beta_0 & (3 < t \leq 5) \\ 0.1\beta_0 & (5 < t \leq 9) \\ 0.001\beta_0 & (t > 9) \end{cases}$$

4) β_0
Q 데이터와 앞서 계산한 Parameter값들을 이용하여 Optimization을 통해 찾았다.
 $\beta_0 = 0.06108$



[Fig. 8] The result of ODE model of S-hospital



[Fig. 9] The change of Q value in S-Hospital ODE model

두 병원의 MERS 모델에 위에서 구한 Parameter들의 값들을 넣어 시간에 따른 환자 수를 그래프로 그려본 결과와 실제 데이터를 비교해 보면 두 병원 모두 그래프의 개형과 최고점의 위치 등이 비슷하게 나타남을 볼 수 있다. 특히, 삼성서울병원의 경우 두 그래프가 매우 비슷하게 나타난다. 상대적으로 평택성모병원에서 그래프가 잘 맞지 않는 이유는 환자 수가 많은 질병에 주로 쓰이는 ODE 모델의 특성 때문이라고 예상된다. 이러한 결과를 통해 우리가 세운 ODE 모델이 MERS, 특히 삼성서울병원의 MERS에 잘 맞으며 연구를 더 진행해 나가기에 적합하다고 판단하였다.

두 병원의 Parameter 계산 결과에서 한 가지 주목할 점이 있다. 아래는 두 병원의 Parameter 값들을 비교하기 쉽도록 하나의 표로 정리한 것이다.

<Table 6> The definitions and the values of the parameters of P-hospital and S-hospital

정의		평택성모병원	삼성서울병원
b	$E \rightarrow I_1 + I_2$ 비율	0.2	0.2
a	$I_1 + I_2 \rightarrow Q$ 비율	0.08596	$a = 11.96t^{-1.715}$
c	회복률 ($Q \rightarrow R$ 비율)	0.05360	0.05439
d	사망률 ($Q \rightarrow D$ 비율)	0.01619	0.01665
α	$E \rightarrow I_1$ 비율($E \rightarrow I_2$ 비율 : $1-\alpha$)	0.05128	0.13978
β	접촉률($S \rightarrow E$ 비율)	$\beta = \begin{cases} \beta_0 & (t \leq 3) \\ 0.01\beta_0 & (3 < t \leq 5) \\ 0.1\beta_0 & (5 < t \leq 11) \\ 0.001\beta_0 & (t > 11) \end{cases}$	
		$\beta = \begin{cases} \beta_0 & (t \leq 3) \\ 0.01\beta_0 & (3 < t \leq 5) \\ 0.1\beta_0 & (5 < t \leq 9) \\ 0.001\beta_0 & (t > 9) \end{cases}$	
β_0	초기 β	0.03921	0.06108

위 표를 보면 b, c, d 의 경우는 두 병원에서의 값이 거의 일치하며 a, α, β_0 의 경우는 두 병원에서의 값에 차이가 나타난다. b 는 계산 과정이 동일하기 때문에 당연한 결과이나, c 와 d 는 각각의 데이터로부터 계산을 했음에도 값이 매우 비슷한 것을 볼 수 있다. 회복률과 사망률의 경우 한 질병이 가지고 있는 특징으로서 이 값이 달라지면 백신의 개발이 있어야 하는데 그렇지 않았으므로 두 병원에서 값이 같게 나타나는 것이 타당하다. 따라서 이 결과는 우리의 Parameter 계산 방법에 신빙성을 더해 준다. 반면에 다른 Parameter들은 값이 다르게 나타나는데 이는 MERS라는 질병이 보유하고 있는 성질 외에 시기나 환경에 따라 달라지는 성질도 있다는 것을 의미한다. 즉, 대처 방법에 따라서 질병의 감염 양상이 달라질 수 있다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 질병의 확산 요인 분석과 효과적인 대책 마련에 도움을 줄 수 있다.

3. 재생산지수(R0)

R0는 재생산지수로 한명의 환자가 감염시키는 환자의 수를 의미하는 값이다.

$R0 > 1$ 인 경우는 한명의 환자가 감염시키는 환자의 수가 1을 넘기 때문에 전염이 계속해서 일어나게 된다. 반면, $R0 < 1$ 인 경우는 한명의 환자가 감염시키는 환자의 수가 1보다 작기 때문에 개체군에서 전염이 급방 종식된다.

$$R0 = \frac{\alpha \times \beta \times S}{a}$$

<Table 7> The values of the parameters and R0 of P-hospital and S-hospital

	α	β	S	a	R0
평택	0.05128	0.0020911362	300	0.085960	0.3758306189
삼성	0.13978	0.0042279576	500	0.115009753	2.5692727599

평택성모병원과 삼성서울병원의 응급실에서의 R0값을 구해본 결과이다.

$$\text{평택 } R_0 = \frac{0.05128 \times 0.0020911362 \times 300}{0.085960} = 0.3748306189$$

$$\text{삼성 } R_0 = \frac{0.13978 \times 0.0042279576 \times 500}{0.115009753} = 2.5692727599$$

평택성모병원에서의 R0의 값은 1보다 작을 것을 보아 전염병이 쉽게 종식되었을 것이라고 예상할 수 있었지만, 삼성서울병원의 경우 R0의 값이 1보다 크고 평택성모병원에서의 R0 값보다 약 7배정도 높은 것으로 보아 삼성서울병원에서의 감염이 평택성모병원에서의 감염보다 훨씬 활발히 일어났다는 사실을 알 수 있었다.

4. Scenarios

가. Scenario 설정

삼성서울병원과 평택성모병원 ODE 모델을 바탕으로 다양한 가상의 Scenario들을 적용시키면서 결과를 비교해보았다. 앞에서 설명한 대처에 따라 달라질 수 있는 Parameter들 중 하나인 β에 변화를 줌으로써 Scenario들을 설정하였다.

다음은 Scenario마다 변화된 매개 변수를 정리해 놓은 표이다.

<Table 8> The scenarios of S-hospital

Scenario		β (삼성서울병원) (β0=0.06108)
Original	12 < t ≤ 15	β0
	15 < t ≤ 17	0.01 * β0
	17 < t ≤ 21	0.1 * β0
	t > 21	0.001 * β0
A	12 < t ≤ 13	β0
	13 < t ≤ 17	0.01 * β0
	17 < t ≤ 21	0.1 * β0
	t > 21	0.001 * β0
B	12 < t ≤ 15	β0
	15 < t ≤ 17	0.01 * β0
	17 < t ≤ 21	0.02 * β0
	t > 21	0.001 * β0

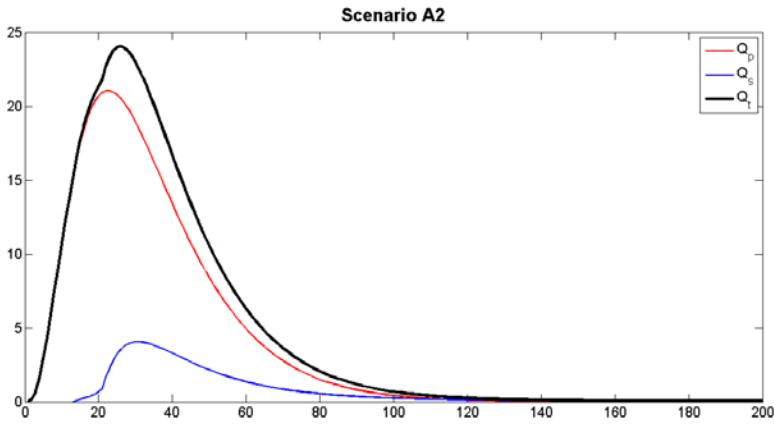
<Table 9> The scenarios of P-hospital

Scenario		β (평택성모병원) (β0=0.03921)
Original	0 < t ≤ 3	β0
	3 < t ≤ 5	0.01 * β0
	5 < t ≤ 11	0.1 * β0
	t > 11	0.001 * β0
C	0 < t ≤ 1	β0
	1 < t ≤ 5	0.01 * β0
	5 < t ≤ 11	0.1 * β0
	t > 11	0.001 * β0
D	0 < t ≤ 3	β0
	3 < t ≤ 5	0.01 * β0
	5 < t ≤ 11	0.02 * β0
	t > 11	0.001 * β0

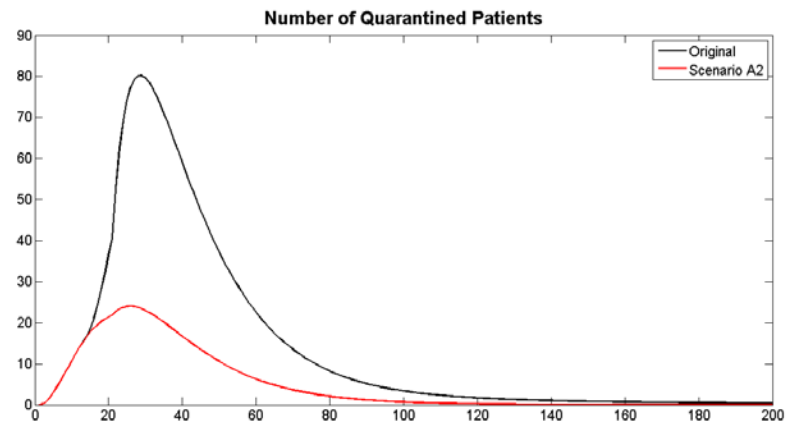
- Scenario A : 14번 환자가 삼성서울병원에서 무방비로 노출되어 있던 기간 감소
- Scenario B : 삼성서울병원의 3시기의 접촉률 감소
- Scenario C : 1번 환자가 평택성모병원에서 무방비로 노출되어 있던 기간 감소
- Scenario D : 평택성모병원의 3시기의 접촉률 감소

나. 삼성서울병원의 가상 Scenario

Scenario A는 14번 환자가 삼성서울병원에 5월 27일 하루만 머문 경우이다.



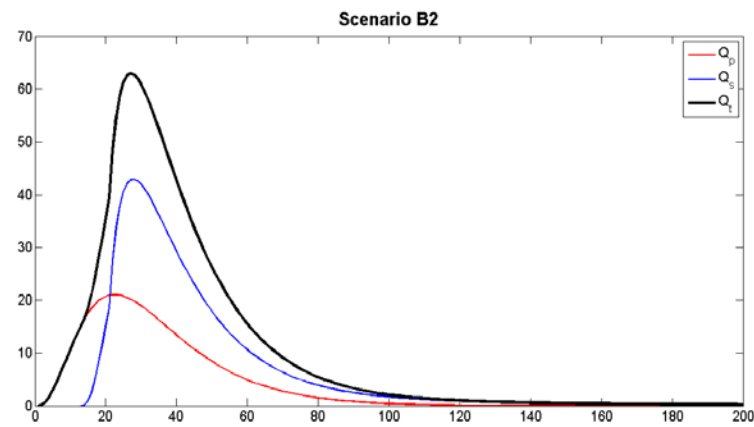
[Fig. 10] The change of Q value in case of Scenario A



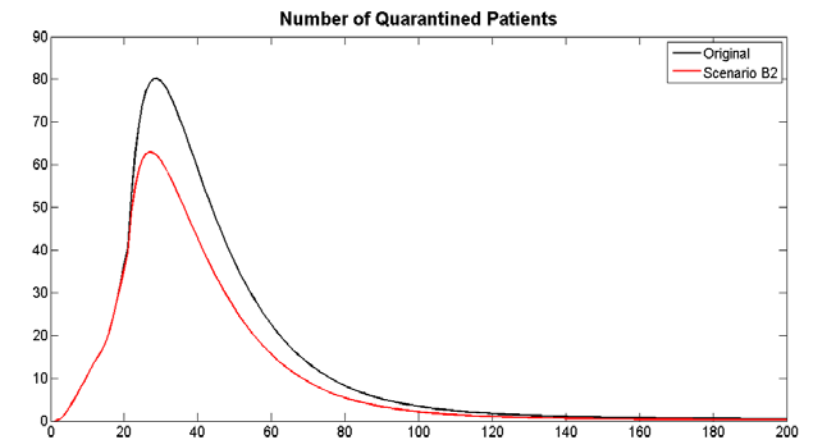
[Fig. 11] Comparison of Q between original and the situation applying Scenario A

확진자 수를 비교해 보니 눈에 띄게 환자 수가 줄어들었다는 것을 알 수 있었다. Original 그래프에서는 확진자수가 최대인 지점이 $X=29$, $Y=80.18$ 명을 나타냈지만 Scenario A를 반영한 그래프에서는 확진자 수 최대지점이 $X=26$, $Y=24.05$ 명을 나타냈다. 확진자 수가 최대인 날이 2일 정도 줄었을 뿐 별다른 차이가 없었지만 환자의 수는 원래 상황의 30%에 해당된다.

Scenario B는 삼성서울병원의 후반 접촉률을 낮춘 경우이다.



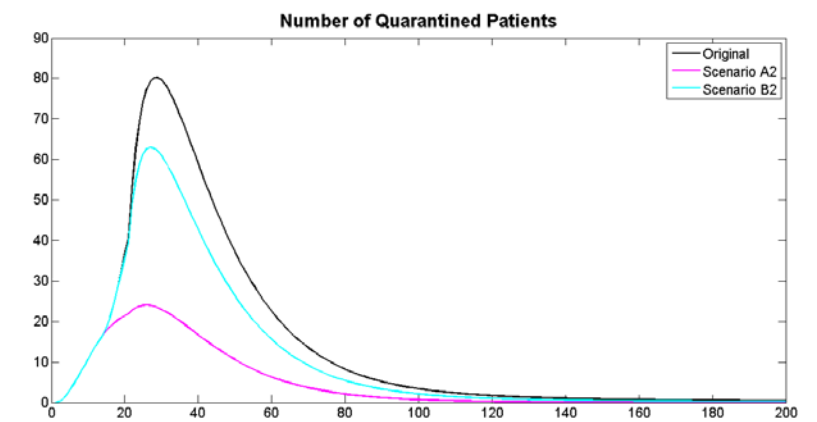
[Fig. 12] The change of Q value in case of Scenario B



[Fig. 13] Comparison of Q between original and the situation applying Scenario B

확진자 수가 원래의 경우보다 줄어들었음을 볼 수 있다. Original 그래프에서 확진자 수가 최대인 지점은 $X=29$, $Y=80.18$ 이지만 Scenario B의 그래프에서는 $X=27$, $Y=62.99$ 이다.

다음은 Original, Scenario A, Scenario B의 그래프를 한 평면에 그려 놓은 것이다.



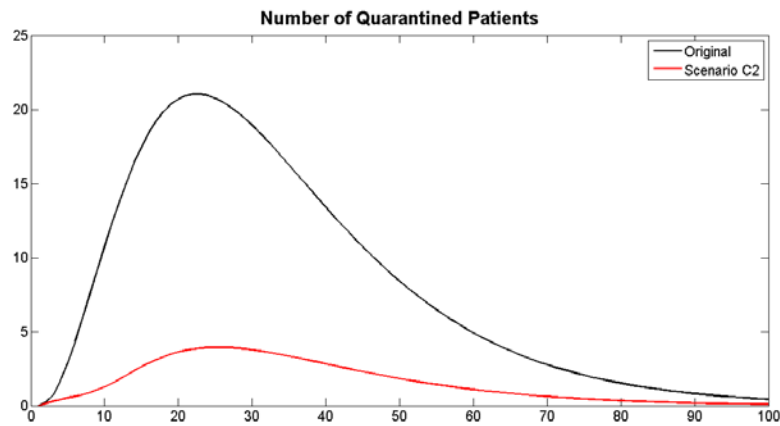
[Fig. 14] Comparison of Q among original, the situation applying Scenario A and B

두 결과를 비교해 보면 Scenario A의 경우가 훨씬 더 확진자 수가 적음을 알 수 있다. 이 결과는 초기 대응이 매우 중요했음을 알려준다.

다. 평택성모병원의 가상 Scenario

Scenario C와 D는 평택성모병원에 변화를 준 것인데, 삼성서울병원에 MERS가 퍼지게 된 것은 14번 환자 한 명으로부터 시작되었기 때문에, 평택성모병원의 확진자 수로는 후반 총 확진자 수의 대부분을 차지하는 삼성서울병원 환자 수를 예상하기 어렵다. 따라서 평택성모병원의 환자 수만을 비교하도록 하겠다.

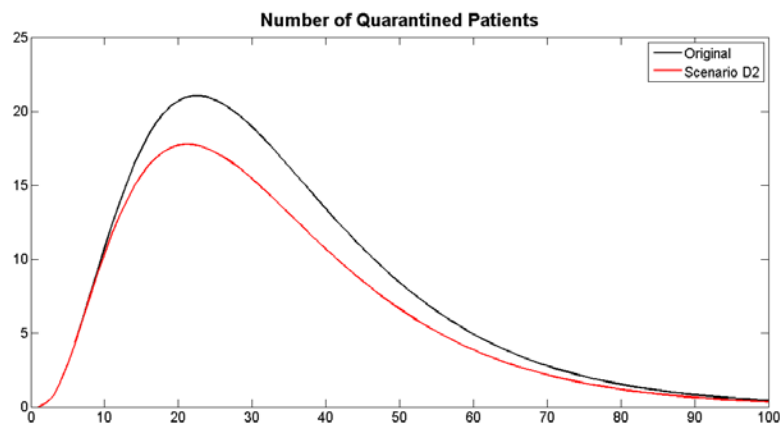
Scenario C는 1번 환자가 평택성모병원에 5월 15일 하루만 머문 경우이다.



[Fig. 15] The change of Q value in case of Scenario C

기존에 비해 확진자 수가 크게 줄어들었음을 볼 수 있다. Original 그래프에서 확진자 수가 최대인 점의 좌표가 $X=22$, $Y=21.04$ 인 것에 비해, Scenario C의 그래프에서는 $X=25$, $Y=3.937$ 이다. 이는 삼성서울병원에 MERS가 전파되었을 가능성이 훨씬 더 적었을 것임을 의미한다.

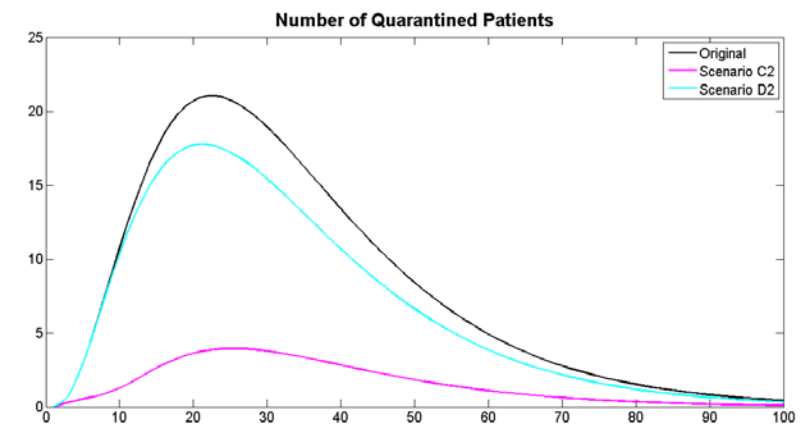
Scenario D는 평택성모병원의 후반 접촉률을 낮춘 경우이다.



[Fig. 16] The change of Q value in case of Scenario D

확진자 수가 원래의 경우보다 줄어들었음을 볼 수 있다. Original 그래프에서 확진자 수가 최대인 지점은 $X=22$, $Y=21.04$ 이지만 Scenario D의 그래프에서는 $X=21$, $Y=17.77$ 이다.

다음은 Original, Scenario C, Scenario D의 그래프를 한 평면에 그려 놓은 것이다.

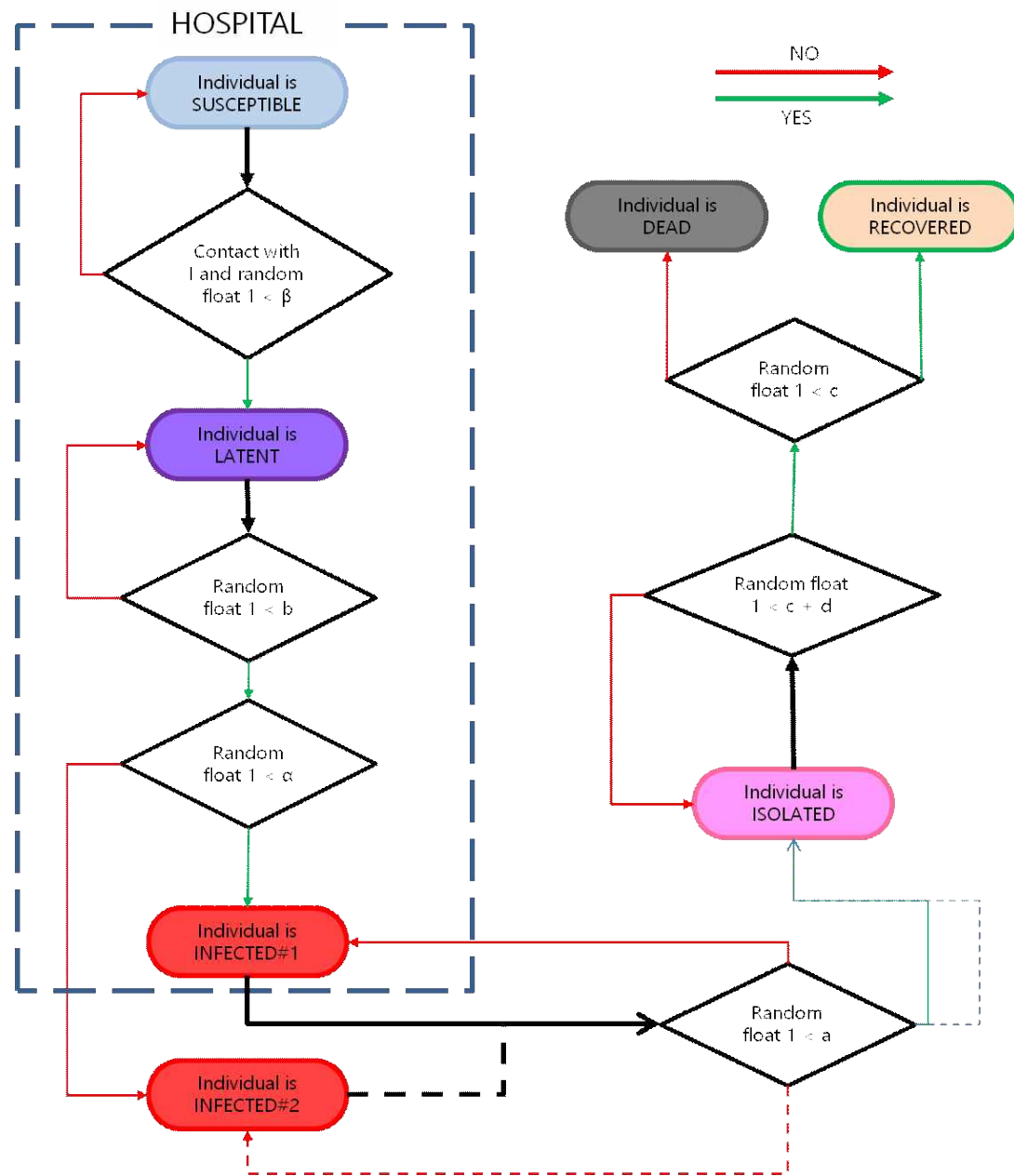


[Fig. 17] Comparison of Q among original, the situation applying Scenario C and D

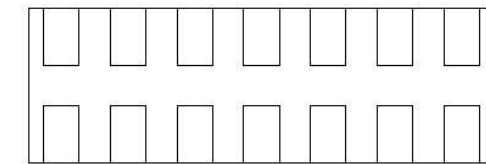
두 결과를 비교해 보면 Scenario C의 경우가 훨씬 더 확진자 수가 적음을 알 수 있다. 이 결과는 초기 대응이 매우 중요했음을 알려준다.

IV. MERS에 대한 Agent Based Model

MERS가 범위가 큰 질병이 아니라 약 200여명 정도 걸린 것이라는 점에 착안하여 ABM으로 이 MERS라는 질병을 관찰하여 보았다. 삼성서울병원의 응급실 모형을 본 따 환경을 구성하였고 Agent는 응급실 내부에 환자들로 볼 수 있다. 우선 환자들을 MERS와 관련해 구분하였는데 Susceptible, Latent, Infected, Isolated, Recover가 있다. 이 Agent들은 각각 또 다른 내부 정보를 담고 있다. 정보들은 나이, 성별, 기저질환 여부 등이 있고 실제 MERS 발병 당시 사람들의 정보들을 기반으로 부여하였다. 또한 MERS의 감염률, 사망률 역시 각각 Agent들의 정보에 따라 다르게 부여하였는데 이 역시 MERS 발생 당시 사망, 감염에 따라 통계적으로 처리해 주었다. 이 Agent간의 감염은 감염자 주위 일정 거리 내부에 있는 사람들에게 β 의 감염률로 감염되게 처리하였다. 물론 이 β 는 각각의 Agent마다 다르게 적용된다. 이러한 초기 조건을 가지고 모델 다이어그램을 작성하여 보았다.



초기에는 환자 1명만이 MERS에 감염되어있는 상태로 사람들에게 전염시키게 된다. MERS에 걸리지 않은 사람들과 감염자가 접촉하게 되면 β 의 확률로 전염을 시키고 전염된 사람은 잠복기에 들어가게 된다. 잠복기에 있는 사람들은 b 의 확률로 증상이 발현되며 a 비율만큼의 사람이 삼성서울병원에 남아 있고 나머지 사람들은 병원에서 나와 자택으로 간다. 이 사람들은 모두 a 의 확률로 격리되고 그 뒤 각각 c 와 d 의 확률로 회복되거나 죽는다.



[Fig. 19] The diagram of S-hospital's emergency room

실제 삼성서울병원의 모양을 만들어 여기에서 위의 다이어그램대로 시뮬레이션을 진행하도록 하였다. 각각의 작은 사각형은 침상을 뜻한다. 환자들은 침상의 가운데에 고정되어 있고 보호자들은 해당하는 환자의 양 옆과 한가운데 길을 지나다니며 병원관계자들은 침상을 제외한 모든 곳을 다니게 하였다.

Field	Value	Min	Max
ipperiod	0	0	0
eperiod	0	0	0
sick	0		
age	50	50	50
info	'patient'		
xposition	525	525	525
yposition	65	65	65
color	'b'		
shape	'o'		
state	'S'		
turn	[]		

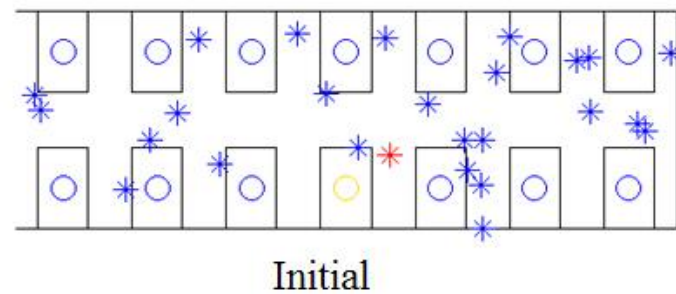
[Fig. 20] Information of individual agent

위의 그림은 시뮬레이션 되는 사람들 중 한 사람의 정보이다. `ipperiod`와 `eperiod`는 각각 증상이 발현되고 격리되는데 걸리는 기간이며 `sick`는 기저질환여부, `age`는 연령대, `info`는 환자, 보호자, 병원관계자 중 하나의 값을 가진다. `xposotion`과 `yposition`의 경우 현재의 위치를 나타내며 `color`와 `shape`은 시뮬레이션에서 우리에게 보여 지는 모양과 색을 의미한다. `state`가 현재 이 사람의 상태를 의미하는데 S, E, I, Q, R, D가 있으며 각각 일반인, 잠복기, 증상발현, 격리, 회복, 죽음을 의미한다.

나이와 기저질환여부에 따른 β 와 d 값은 다음과 같다.

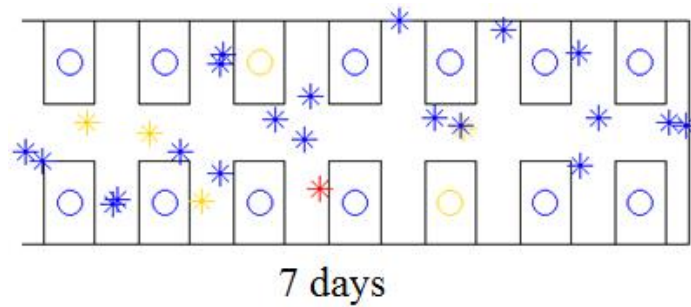
<Table 10> The changes in parameters according to age and underlying disease

나이	β	기저질환여부	d
50대 미만	$0.9 * \beta_0$	O	$1.1 * d_0$
70대 미만	β_0		
80대 이상	$1.1 * \beta_0$	X	d_0



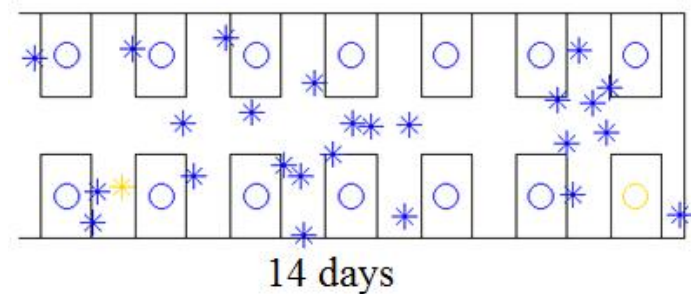
[Fig. 21] Right after the simulation start

시뮬레이션 중인 그림이다. 별표는 병원관계자와 외부인이고 원은 환자이다. 처음에는 병원관계자, 외부인, 환자 관계없이 한명 MERS 잠복기(노란색)인 사람이 들어간 상태로 시작된다. 병원 관계자와 외부인은 침실 외의 공간에서 이동하고, 환자는 침실에만 있게 설정하였다. 사람이 사망했다면 하루 후에 비감염자인 환자 한 명이 다시 채워진다. 감염자 일정범위 내에 있는 사람은 β 의 확률로 감염된다. 위 그림은 시작 후 1일이 지난 상태이고 한 명이 MERS에 걸렸고(빨강색) 한명이 잠복기가 되었다. 다른 사람들은 파란색으로 아직 감염되지 않았다.



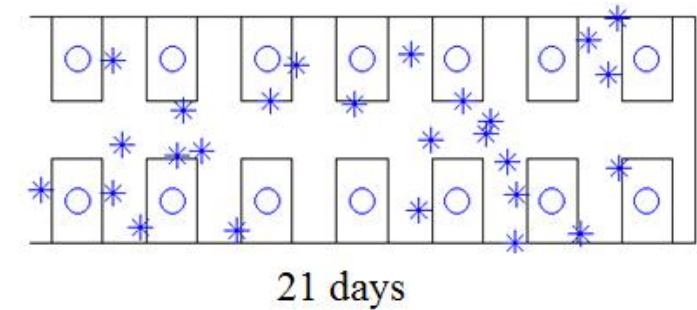
[Fig. 22] The emergency room's situation after a week

시작 후 7일 째 되는 날이다. 처음에 비해 많은 사람이 감염되는 중이다. 5명이나 잠복기이고 한명은 이미 MERS에 감염되었다.



[Fig. 23] The emergency room's situation after two weeks

시작 후 14일 째 되는 날이다. 7일 째에 비해서 감염된 사람이 많이 적어졌다. 이미 사망자는 도메인 밖으로 나갔고 새로운 사람이 채워지게 되므로 점점 줄어들고 있다.



[Fig. 24] The emergency room's situation after three weeks

21일 째 되는 날이다. 모든 사람이 감염되지 않았다. 이로써 21일 만에 한 병실에 잠복기인 환자 한명이 들어감으로써 나타난 MERS가 종결되었다.

V. 결론 및 향후 연구 계획

MERS 감염 확산에 대한 모델링을 구축하기 위해 평택성모병원과 삼성서울병원 응급실 내의 감염에 초점을 두고, 이에 대한 ODE 모델을 수립하였다. 우리가 만든 모델의 경우, 기존 SEIR 모델을 기본으로 하여 실제와 가장 비슷한 모델을 만들기 위해 추가적으로 I 개체군을 I_1 과 I_2 의 개체군으로 나누어주었다. 이는 응급실을 기준으로 I_1 은 응급실 내에 감염이 되어 계속해서 병원에 있는 사람들을 말하고, I_2 는 병원에서 나가 자택으로 간 사람을 말한다. 그리고 나서는 보건복지부에서 나온 데이터를 바탕으로 모델에 필요한 매개변수들을 계산해 주었다. 만들어진 각 병원의 ODE모델의 결과를 그래프로 나타내 보니 삼성서울병원과 평택성모병원 모두 감염 양상이 유사하였다. 평택성모병원의 경우, 감염으로 인해 발생한 환자가 매우 적고 감염이 짧은 기간 동안 진행되었기 때문에 감염양상이 비슷하게 나왔으나 최대 ODE의 모델에서의 최대 감염 환자의 수와 증가감소폭에 있어서 차이를 보였다. 반면 삼성서울병원의 경우, 실제 확진자 수와 ODE 모델에서의 확진자(Q) 수의 변화가 거의 잘 맞았다. 이는 삼성서울병원의 경우, 감염자가 평택성모병원에서의 감염자 수의 대략 2.5배 되는 많은 감염자들의 데이터를 기반으로 하였고 훨씬 감염이 일어난 기간이 길었기 때문이라고 예측하였다. 두 병원의 변수 값들을 비교해 본 결과, 회복률과 사망률의 값이 매우 비슷하게 나와 변수 계산 방법이 타당하다는 것을 알 수 있었고, 두 병원에서의 값이 다르게 나타난 변수들은 시기나 환경에 따라 달라지는, 즉 대처 방법에 따라 달라질 수 있다는 것을 의미하기 때문에 질병의 확산 요인 분석과 효과적인 대책 마련에 도움을 줄 수 있다.

이렇게 만들어진 ODE모델을 바탕으로 미래에 MERS와 비슷한 전염병이 나타났을 때 더 빠르고 효과적인 대처 방법을 찾기 위해 각기 다른 4개의 Scenario를 적용시켜 보았다. 첫 번째, Scenario A와 C의 경우는 각각 응급실에 슈퍼전파자가 무방비로 노출된 기간을 줄여주었을 때의 결과이다. Scenario A의 경우, 삼성서울병원에서 14번 환자가 머무른 기간인 3일을 1일로 줄인 경우에 해당하고 Scenario C의 경우, 평택성모병원에서 1번 환자가 무방비로 머무른 기간인 3일을 1일로 줄인 경우에 해당된다. 이때,

Scenario A의 경우는 최대 감염자의 수가 30%로 줄었고, Scenario D를 적용시켜주었을 경우는 20%로 줄었음을 알 수 있었다. 두 번째, Scenario B와 D의 경우는 각각 삼성서울병원, 평택성모병원 응급실 내의 접촉률을 줄여주었을 때의 결과이다. 이 두 Scenario의 결과를 보면 확진자 수가 줄어든 것을 볼 수 있었지만 Scenario A와 C의 결과 보다는 덜 효과적이게 나타났다. 이는 병원 내의 전염병을 가진 최초의 환자를 빠르게 격리 시키는 것이 중요하다는 것을 알려준다. 이는 전염병의 대규모 확산을 막기 위해서는 초기 대응이 중요하다는 것을 강조한다.

MERS에 대한 ODE 모델을 세우고 시뮬레이션을 해보았을 때 상당히 의미 있는 결과가 나왔다고 생각된다. 우리는 이러한 결과를 더욱 발전시키기 위하여 연구를 계속 진행해 나갈 예정이다. 먼저, 평택성모병원의 ODE 모델의 그래프가 실제 그래프와 더 잘 맞아떨어지도록 계속 수정해 나갈 것이다. 그 방법으로는 접촉률을 계단 함수가 아닌 다른 함수로 정의하는 것 등이 있겠다. 또한, 두 병원에서의 변수들의 값을 비교하고 분석함으로써 질병의 확산 요인을 세밀하게 분석할 것이다. MERS는 우리나라 병원과 응급실의 문제가 지적되었던 바가 있기 때문에 이 연구를 통해 문제점을 밝혀낼 수 있을 것이라고 생각된다. 그리고 더욱 다양한 Scenario들을 설정하여 시뮬레이션을 한다면 더 타당하고 다양한 대처 방법들을 제시할 수 있을 것이다.

행위자 기반 모형(ABM)은 삼성서울병원 응급실을 기반으로 설정하였고, 시뮬레이션을 하였다. 이번 한국에서 유행한 MERS와 같은 경우는 발병된 사람이 매우 적은 편이고 각각에 특징에 따라서 감염성이 많이 바뀌기 때문에 ABM에서 만족스러운 결과를 얻을 수 있을 것이라고 생각하여 ABM으로 모델링 해보았다. Agent들은 S(비감염), E(잠복기), I_1 (감염기1), I_2 (감염기2), R(회복), Q(확진 및 격리), D(치사)의 상태를 가진다. 감염의 방법은 일정 범위 내의 사람들에게 β 의 확률로 감염되게 하였는데, 이 β 값은 각각의 Agent들의 특성에 따라 다르게 주어진다. 예로 나이가 많으면 많을수록 감염확률이 늘어나기 때문에 β 를 높게 설정해 주었고 기저 감염 여부 역시 실제로 기저감염이 된 사람에게 감염이 많이 되었기 때문에 높은 β 값을 설정해 주었다. 이러한 Agent의 특성으로는 나이, 기저질환 여부 등이 있다.

ABM을 이용한 MERS에 대한 연구는 ODE 모델에 비해 많이 진행되지 않은 상황이지만, 환자 수가 적고 개인의 특성에 따라 감염성이 달라진다는 MERS의 특성상 ABM은 매우 적합한 모델링 방법이라고 생각된다. 이러한 ABM 연구를 더욱 발전시키고 ODE 모델과 같이 Scenario들을 적용시켜 결과를 분석하면 더욱 가치 있는 연구가 될 것이다.

이 연구를 통해 다양한 정책 Scenario를 예측해 볼 수 있고, 전염병 감염 확산을 방지하기 위한 효과적인 대안을 제안할 수 있다. 또한 모델에 대한 알고리즘을 개발할 수 있고 보안하여 전염병 확산 방지를 위한 보건 관련 공공기관이 질병이 발생 했을 때 감염 확산을 예측할 수 있게 도움을 줄 수 있다.

VI. 참고문헌

- [1] 질병관리본부 전염병대응센터 역학조사과. 감염병과 수학적모형: SIR 모형과 SEIR 모형(Infectious diseases and mathematical modeling: SIR model and SEIR model). <http://goo.gl/8U0OkW> (검색일: 2015.03.18).
- [2] Gumel, A. B., Ruan, S., Day, T., Watmough, J., Brauer, F., Van den Driessche, P., Gabrielson, D., Bowman, C., Alexander, M. E., Ardal, S., Wu, J., & Sahai, B. M. (2004). Modelling strategies for controlling SARS outbreaks. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 271(1554), 2223-2232.
- [3] Zhang, J., Lou, J., Ma, Z., & Wu, J. (2005). A compartmental model for the analysis of SARS transmission patterns and outbreak control measures in China. *Applied Mathematics and Computation*, 162(2), 909-924.
- [4] Arino, J., Brauer, F., van den Driessche, P., Watmough, J., & Wu, J. (2006). Simple models for containment of a pandemic. *Journal of the Royal Society Interface*, 3(8), 453-457.
- [5] Ariuntssetseg, E., & Yom, J. H. (2013). Foot-and-mouth disease spread simulation using agent-based spatial model. *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, 31(3), 209-219.

| 연구진 |

김민유 (Kim Minyoo, 한국과학기술원(KAIST) 부설 한국과학영재학교, minyoo972@naver.com), 주저자
금화연 (Kum Hwayeon, 한국과학기술원(KAIST) 부설 한국과학영재학교, hykum98@gmail.com)
안준호 (Ahn Junho, 한국과학기술원(KAIST) 부설 한국과학영재학교, dwg226@naver.com)
최윤석 (Choi Yunseok, 한국과학기술원(KAIST) 부설 한국과학영재학교, dbstjr789987@naver.com)

지도교수 : 이창형 (Lee Changhyeong, 울산과학기술원(UNIST) 수리학과, chlee@unist.ac.kr)
지도조교 : 이효정 (Lee Hyojung, 울산과학기술원(UNIST) 수리학과, s1drs@unist.ac.kr)

수학적 모형에 의한 지하철 운행의 개선 방안에 대한 연구

임수철 · 곽승신 · 장우석 · 정호진 · 모지훈 – 인천진산과학고등학교

A Note on Improvement Plan of Subway Operation by Mathematical Modeling

Lim Soocheol · Gwak Seungshin · Jang Wooseok · Jung Hyojin · Mo Jihun - Incheon Jinsan Science High School

ABSTRACT

In mathematics, the theory itself is important, but submitting the solution of a problem in real life by using mathematical theory is also important. subway line number 9 (seoul metro 9) has a different feature from other lines' general and express trains: it runs on one line with bay-lines for the improvement of transport and to reduce the cost of construction. Because of seoul metro 9's operation plan, there is a delay time during rail time, so previous research tried to solve these problems, and many studies tried to make its operation more efficient. However, previous studies didn't use mathematical models to explain the improvement of the efficiency of the operation exactly. In this research, we made a mathematical model for subway operation through an indefinite equation and an equality and submitted a more efficient improvement plan. We expect our research will be used as a basis for determining a better subway operation plan for all-stop and express trains.

Key words:

Indefinite Equality, Mathematical Model, All-Stop and Express Trains, Scheduled Speed

국문초록

수학은 자체적인 이론도 중요하지만 수학기론을 활용하여 실생활 문제의 해법을 제시하는 것도 역시 중요하다. 지하철 9호선은 운송의 효율을 높이기 위해 같은 선로 위에 일반열차와 급행열차를 운행하고 있으며 운행 효율을 높이는 연구가 다양하게 진행되어 왔다. 하지만 기존의 연구는 수학적 모형을 제시하지 못하고 있어서 운행 효율 개선을 엄밀하게 제시하지 못하고 있다. 우리는 본 연구에서 정수론의 부정방정식과 부등식의 개념을 이용하여 9호선 열차운행에 대한 수학적 모델을 만들고 부정방정식의 해를 통한 좀 더 효율적인 운행방안을 제시하였다. 우리의 연구 결과는 향후 건설될 지하철에서 일반열차와 급행열차의 효율적인 운행방식을 결정하는데 중요한 토대를 제시해 줄 것으로 기대한다.

중심어

부정방정식, 수학적 모형, 일반열차와 급행열차, 표정속도

I. 서론

1. 연구동기

수도권에 살고 있는 많은 사람들은 지하철이라는 이동수단을 이용하여 출퇴근을 하거나 목적지로 이동을 한다. 특히, 도로가 복잡한 서울 시내에서 만나기로 약속을 하는 경우 도로의 교통상황이 수시로 변하기 때문에 약속시간에 늦지 않기 위하여 버스나 승용차를 이용하는 것보다 지하철을 이용하는 것이 매우 효율적이다.

지하철을 이용하는 사람들의 숫자가 늘어남에 따라서 이용도가 높은 역까지의 이동을 쉽게 하기 위하여 다양한 방법이 고려되었다. 지하철 1호선은 국철 1호선과 연계되어 있고 지하부분이 없는 국철 1호선은 선로를 4개 확보하여 2개의 선로는 일반열차가 사용하고 2개의 선로는 급행열차가 사용하여 급행열차는 일반열차의 운행 시간을 고려하지 않고 운행할 수 있다. 하지만 지하노선이 대부분인 2호선부터 9호선까지는 지하에 선로를 4개 확보하는 것이 쉽지 않았는데, 그 이유는 일반적으로 지하철 1 km 를 건설하는데 평균적으로 1000억원에서 1200억원의 고비용이 필요하기 때문이다[1]. 이에 따라 비용을 크게 늘리지 않으면서 지하철을 이용하여 원하는 지점으로 빠르게 이동이 가능하도록 4호선과 9호선에서는 몇 개의 역에 대피선을 만들어 1개의 선로 위에 일반열차와 급행열차가 모두 다닐 수 있도록 하였다.

1개의 선로에 일반열차와 급행열차가 모두 다닐 수 있도록 하려면 다양한 문제를 해결해야 한다. 우선 기존의 대피선을 이용하여 일반열차와 급행열차가 다닐 때 현재의 배차 시간을 좀 더 효율적으로 줄이는 것이 가능한지 검증하고, 필요시 급행열차가 정차하는 역의 개수를 줄이는 것이 가능한지를 정수론의 이론을 바탕으로 수학적으로 검증하고자 한다. 이러한 내용의 수학적 검증을 통하여 새롭게 지하철이 건설될 경우 어떤 역에 대피선을 건설하는 것이 효율적인지를 제시할 수 있는 토대를 마련해 보고자 한다.

2. 연구목표

기존의 연구들[2,3,4]은 급행열차와 일반열차에 대한 정차역 사이의 평균속도와 정차시간과 관련된 데이터를 이용한 Visual Basic 프로그램으로 운행의 효율성에 대한 엄밀한 검증을 수학적으로 제시하지 못하고 있다. 본 연구에서는 급행열차와 일반열차의 운항관계를 수학적으로 표현하고 이를 이용하여 현재 9호선에 건설된 대피선을 이용하여 좀 더 효율적인 운행이 가능한가를 논리적으로 검증하고자 한다. 이를 위하여 정차시간을 포함한 급행열차와 일반열차의 운행에 관련된 식을 만들고 방정식과 부등식을 이용하여 다양한 상황에서 급행열차와 일반열차의 교행 상황을 분석하고 9호선에서 연휴 또는 명절과 같이 특별한 수송요구가 있을 때 일반상황보다 얼마나 더 효율적으로 급행열차와 일반열차를 운행할 수 있는가를 검증하고자 한다. 이러한 문제해결 과정에서 교과서에서 배운 최소공배수의 개념과 방정식, 부등식의 개념들이 실제 생활 속의 문제에 적용될 수 있음을 느끼게 하고 수학에 대한 이해를 높이고자 한다.

II. 지하철에 대한 기본 정보

1. 지하철에 대한 기본정보

가. 지하철 용어
우리나라의 지하철은 1974년 서울에 지하철 1호선이 처음 운행되었고 그로부터 최근까지 지하철은 9호선까지 만들어졌다.

정의 1. 표정속도와 평균속도
1) 열차가 운행하는 구간거리를 소요시간으로 나눈 수치의 속도를 표정속도라 한다.
2) 열차가 역에 정차하고 있는 동안의 시간을 포함하지 않은 운전시간으로 나눈 수치의 속도를 평균속도라 한다.

표정속도는 평균속도와 달리 정차역의 정차시분을 포함하기 때문에 같은 구간을 운행하는 열차의 표정속도는 평균속도보다 느리게 계산된다. 대중정차가 적은 특급열차의 경우 표정속도는 최고속도의 70~80%정도이며 역간거리가 짧은 각 역 정차의 경우 표정속도는 최고속도의 30~40%정도이다. 역간거리가 짧은 경우는 최고속도를 올려도 표정속도 향상의 효과는 작다.

정의 2. 급행열차와 일반열차
1) 급행열차는 특정 정거장에만 정차하고 표정속도가 높은 열차로 정의한다.
2) 일반열차는 모든 정거장에 정차하고 표정속도가 낮은 열차로 정의한다.

같은 선로에서 급행열차와 일반열차의 운행이 가능하도록 하기 위하여 지하철을 복복선으로 만들어 급행열차와 일반열차를 별도의 선로에서 운행을 하게 할 수도 있지만 지하철 9호선에서는 “복선+대피선 방식”으로 일부 역에서 급행열차가 일반열차를 추월하는 방식으로 운행으로 하고 있다. 복선+대피선 방식의 경우 정거장에서 급행열차와 일반열차의 운행방식은 다음과 같다.

- ① 일반열차가 정거장에 정차한다.
② 급행열차가 정거장에서 정차한 후 발차한다.
③ 급행열차 발차 후 일반열차가 발차한다.

하지만 프랑스 파리나 미국의 시카고 지하철은 대피선 없이 선택정차방식을 도입하여 평균적으로 우리나라의 지하철보다 2배의 운행속도를 보여주고 있다.

나. 지하철 9호선
지하철 1호선이 도입된 지 35년 후 일반열차만 다니는 이전의 지하철과는 달리 운행의 효율성을 높이 고자 지하철 9호선에 급행열차를 처음 도입하였다. 지하철 9호선은 2009년 7월 개화역과 신논현역 구간이 1차로 개통되었고 2015년 3월 신논현역과 종합운동장역 구간이 2차로 개통되었다. 현재 9호선은 개화역에서 종합운동장역을 포함하여 총 30개의 역이 있으며 9호선은 운항거리가 31.7 km 이다. 9호선 일반열차의 평균 표정속도는 31.7 km/h 이고 급행열차의 평균 표정속도는 46.8 km/h 이다. 일반적으로 일반열차와 급행열차는 2 : 1 의 비율로 운행이 되며 급행열차는 10분에서 13분 간격으로, 일반열차는 5분에서 7분 간격으로 운행하였다. 하지만 2015년 9호선이 연장개통하면서 일반열차와 급행열차를 1 : 1 의 비율로 운행하고 있다.

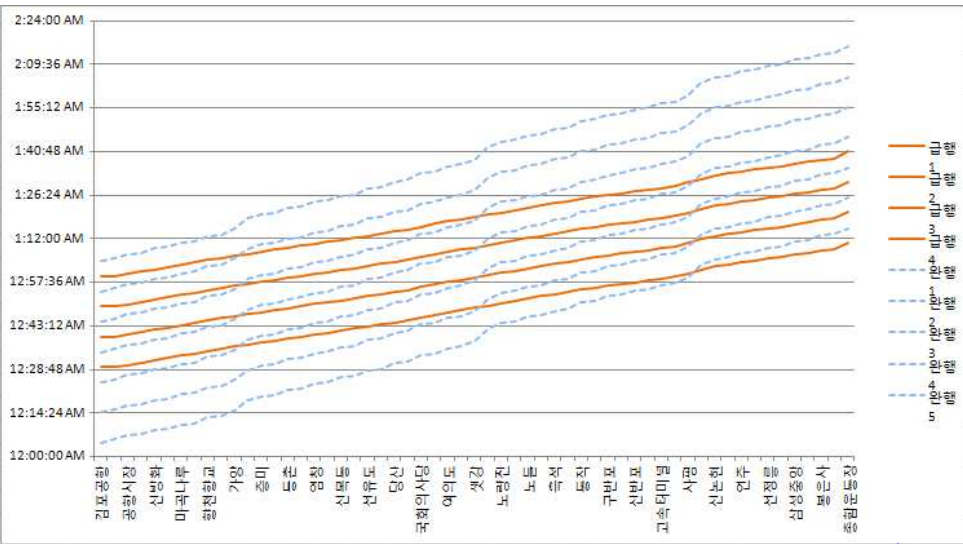
III. 최적의 지하철 운행 시간

1. 사전조사

본 연구에 앞서 우리 팀원들은 2015년 8월 29일에 직접 9 호선 열차에 승차하여 일반열차와 급행열차의 역간 주행시간, 정차시간을 측정하였다. 이때, 역간 주행시간은 열차가 출발해 다음 역에 도착하여 멈추는데 까지 걸린 시간, 정차시간은 열차가 멈추어서 출발하기 전까지의 시간이다.

<Table 1> Measured data of Line 9

	급행열차 걸린 시간(초)	급행열차 누적 시간(초)	일반열차 걸린 시간(초)	일반열차 누적 시간(초)	누적 거리(m)
개화		0	273	273	3600
↓					
김포공항	181	181	64	337	3600
↓		181	81	418	4400
공항시장		181	28	446	4400
↓		181	78	524	5200
신방화		181	29	553	5200
↓		181	81	634	6100
마곡나루	328	181	29	663	6100
↓		181	114	777	7500
양천향교		181	25	802	7500
↓		509	117	919	8800
가양	31	540	195	1114	8800
↓		540	87	1201	9500
중미		540	27	1228	9500
↓		540	95	1323	10500
등촌	205	540	29	1352	10500
↓		745	95	1447	11400
염창	31	776	29	1476	11400
↓		776	93	1569	12300
신목동		776	29	1598	12300
↓		776	115	1713	13500
선유도	207	776	27	1740	13500
↓		983	109	1849	14500
당산	43	1026	39	1888	14500
↓		1026	128	2016	16000
국회의사당	163	1026	33	2049	16000
↓		1189	95	2144	16900
여의도	37	1226	43	2187	16900
↓		1226	98	2285	17600
샛강	138	1226	237	2522	17600
↓		1364	123	2645	18800
노량진	47	1411	34	2679	18800
↓		1411	92	2771	19900
노들		1411	26	2797	19900
↓		1411	94	2891	21000
혹석	227	1411	33	2924	21000
↓		1638	128	3052	22400
동작	43	1681	33	3085	22400
↓		1681	96	3181	23400
구반포		1681	27	3208	23400
↓		1681	79	3287	24100
신반포	172	1681	27	3314	24100
↓		1853	90	3404	24900
고속터미널	42	1895	36	3440	24900
↓		1895	118	3558	26000
사평	208	1895	243	3801	26000
↓		2103	114	3915	26900
신논현	37	2140	33	3948	26900
↓		2140	82	4030	26700
연주	122	2140	28	4058	26700
↓		2262	82	4140	27600
선정릉	26	2288	31	4171	27600
↓		2288	93	4264	28400
삼성중앙	134	2288	29	4293	28400
↓		2422	91	4384	29100
봉은사	25	2447	25	4409	29100
↓		2583	117	4526	30500
종합운동장					



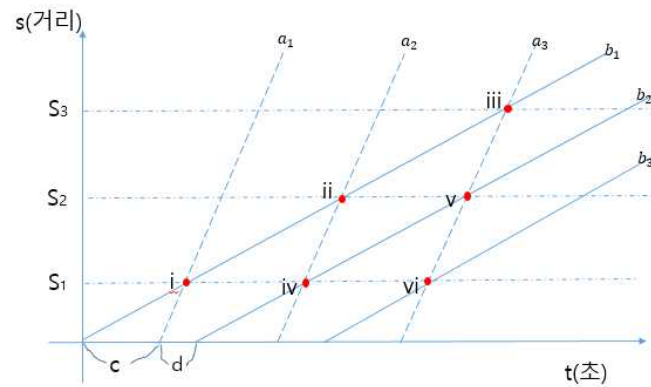
[Fig. 1] Graph of the measurement data

[Fig. 1]에서 그래프의 가로축은 거리, 세로축은 시간, 실선은 급행열차, 점선은 일반열차를 나타낸다. <Table 1>에서 알 수 있듯이, 대피선이 설치되어 있는 역인 가양역, 샛강역, 사평역에서는 급행열차가 일반열차를 앞질러갈 때까지 일반열차가 기다려야 하기 때문에 일반열차의 정차시간이 다른 역에서보다 2~3배 이상 길다는 것을 알 수 있고, 직접 확인하였다. 이는 일반열차의 운행시간이 커지는 부작용을 유발한다. 만약 이 기다리는 시간을 최대한 줄일 수 있다면 같은 시간 동안에 더 많은 승객을 운반 할 수 있을 것이라 판단된다.

2. 열차 운행의 수학적 모형

현재의 상황인 <Table 1>과 [Fig. 1]을 살펴보면, 대피선이 설치된 역에서 급행열차가 일반열차를 추월 하기 위해 일반열차가 추가적으로 기다려야 하는 시간이 필요함을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 일반열차가 추가적으로 기다려야 하는 시간을 줄이는 것을 목표로 하여 열차의 운행과 관련한 수학적 모델을 다음과 같이 만들었다.

일반열차와 그 다음에 오는 급행열차 사이의 배차 시간간격을 c , 급행열차와 그 다음에 오는 일반열 차 사이의 배차 간격시간을 d , 출발 순서에 따른 시간에 의한 급행열차의 운행거리를 a_1, a_2, a_3 , 출발 순서에 따른 시간에 의한 일반열차의 운행거리를 b_1, b_2, b_3 라 하면 각 열차의 주행시간과 이동거리를 그래프로 나타내면 다음과 같다. 이때 그래프를 나타낸 각 요소들을 문자로 나타낸 것은 특정 상황에 대해서 일반화된 식을 도출해 내기 위함이다.



[Fig. 2] Mathematical modeling of all-stop and express trains

[Fig. 2]에서 수학적 모형을 만들기 위해 전 구간에서 급행열차와 일반열차의 표정속도가 일정하다고 가정하였고, 급행열차의 표정속도가 일반열차의 표정속도보다 빠르기 때문에 급행열차에 관련된 기울기가 더 크게 나타낸다.

가. 급행열차의 시간에 따른 운행거리

첫 번째로 출발하는 급행열차의 시간에 따른 운행거리는

$$S = \begin{cases} a(t-c) & (t \geq c) \\ 0 & (0 \leq t < c) \end{cases}$$

이다.

두 번째로 출발하는 급행열차의 시간에 따른 운행거리는

$$S = \begin{cases} a\{t-c-(c+d)\} & (t \geq c+(c+d)) \\ 0 & (0 \leq t < c+(c+d)) \end{cases}$$

이다.

세 번째로 출발하는 급행열차의 시간에 따른 운행거리는

$$S = \begin{cases} a\{t-c-2(c+d)\} & (t \geq c+2(c+d)) \\ 0 & (0 \leq t < c+2(c+d)) \end{cases}$$

이다.

같은 방법으로 n 번째 급행의 시간에 따른 운행거리를 나타내는 식은 $S = a(t-c)$ 를 t 축으로 $(c+d)$ 만큼 일정한 간격으로 $(n-1)$ 번 평행 이동한 식이므로, n 번째 급행열차의 시간에 따른 운행거리는

$$S = \begin{cases} a\{t-c-(n-1)(c+d)\} & (t \geq c+(n-1)(c+d)) \\ 0 & (0 \leq t < c+(n-1)(c+d)) \end{cases}$$

이다.

나. 일반열차의 시간에 따른 운행거리

첫 번째로 출발하는 일반열차의 시간에 따른 운행거리는

$$S = bt$$

이다.

두 번째로 출발하는 일반열차의 시간에 따른 운행거리는

$$S = \begin{cases} b\{t-(c+d)\} & (t \geq c+d) \\ 0 & (0 \leq t < c+d) \end{cases}$$

이다.

세 번째로 출발하는 일반열차의 시간에 따른 운행거리는

$$S = \begin{cases} b\{t-2(c+d)\} & (t \geq 2(c+d)) \\ 0 & (0 \leq t < 2(c+d)) \end{cases}$$

이다.

같은 방법으로 k 번째 일반열차의 시간에 따른 운행거리를 나타내는 식은 $S = bt$ 라는 그래프를 t 축으로 $(c+d)$ 만큼 일정한 간격으로 $(k-1)$ 번 평행 이동한 식이므로, k 번째 일반열차의 시간에 따른 운행거리는

$$S = \begin{cases} b\{t-(k-1)(c+d)\} & (t \geq (k-1)(c+d)) \\ 0 & (0 \leq t < (k-1)(c+d)) \end{cases}$$

이다.

다. 급행열차와 일반열차가 만나는 지점

대피선이 설치된 역에서 급행열차가 일반열차와 만나려면

$$\begin{aligned} (\text{대피선이 설치된 역까지의 거리}) &= (\text{급행열차의 표정속도}) \times (\text{급행열차의 주행시간}) \\ &= (\text{일반열차의 표정속도}) \times (\text{일반열차의 주행시간}) \end{aligned}$$

이어야 한다.

김포공항역에서 대피선이 설치된 역까지의 거리를 S^* , 급행열차의 표정속도를 a , 일반열차의 표정속도를 b , 급행열차의 주행시간 t_a , 일반열차의 주행시간을 t_b 라 하면

$$\begin{cases} S^* = a \cdot t_a \\ S^* = b \cdot t_b \end{cases}$$

이다.

[Fig. 2]에서 첫 번째 급행열차(a_1)와 첫 번째 일반열차(b_1)가 가양역(S_1)에서 만나는 경우는

$$\begin{cases} S_1 = a(t-c) \\ S_1 = bt \end{cases}$$

이고 이 두 방정식의 교점의 좌표를 (t_i, S_1) 이라 하면,

$$t_i = \frac{ac}{a-b}$$

이다.

두 번째 급행열차(a_2)와 첫 번째 일반열차(b_1)가 셋강역(S_2)에서 만나는 경우는

$$\begin{cases} S_2 = a\{t-c-(c+d)\} \\ S_2 = bt \end{cases}$$

이고 이 두 방정식의 교점의 좌표를 (t_{ii}, S_2) 라 하면,

$$t_{ii} = \frac{a\{c+(c+d)\}}{a-b}$$

이다.

세 번째 급행열차(a_3)와 첫 번째 일반열차(b_1)가 사평역(S_3)에서 만나는 경우는

$$\begin{cases} S_3 = a\{t - c - 2(c + d)\} \\ S_3 = b\,t \end{cases}$$

이고 이 두 방정식의 교점의 좌표를 (t_{iii} , S_3) 라 하면,

$$t_{\text{iii}} = \frac{a\{c + 2(c + d)\}}{a - b}$$

이다.

두 번째 급행열차(a_2)와 두 번째 일반열차(b_2)가 가양역(S_1)에서 만나는 경우는

$$\begin{cases} S_1 = a\{t - c - (c + d)\} \\ S_1 = b\{t - (c + d)\} \end{cases}$$

이고 이 두 방정식의 교점의 좌표를 (t_{iv} , S_1) 이라 하면,

$$t_{\text{iv}} = \frac{a\{c + (c + d)\} - b(c + d)}{a - b}$$

이다.

세 번째 급행열차(a_3)와 두 번째 일반열차(b_2)가 셋강역(S_2)에서 만나는 경우는

$$\begin{cases} S_2 = a\{t - c - 2(c + d)\} \\ S_2 = b\{t - (c + d)\} \end{cases}$$

이고 이 두 방정식의 교점의 좌표를 (t_{v} , S_2) 라 하면,

$$t_{\text{v}} = \frac{a\{c + 2(c + d)\} - b(c + d)}{a - b}$$

이다.

세 번째 급행열차(a_3)와 세 번째 일반열차(b_3)가 가양역(S_1)에서 만나는 경우는

$$\begin{cases} S_1 = a\{t - c - 2(c + d)\} \\ S_1 = b\{t - 2(c + d)\} \end{cases}$$

이고 이 두 방정식의 교점의 좌표를 (t_{vi} , S_1) 이라 하면,

$$t_{\text{vi}} = \frac{a\{c + 2(c + d)\} - 2b(c + d)}{a - b}$$

이다.

같은 방법으로 n 번째 급행열차와 k 번째 일반열차가 대피선이 있는 역에서 만나는 경우는 다음과 같 이 나타낼 수 있다. 단, 이때 일반열차가 급행열차보다 먼저 출발해야만 만날 수 있으므로 $n \geq k$ 이어야 한다. 또한 정거장의 개수에 제한이 없다면 $n \geq k$ 일 때 성립하는 지점을 모두 찾을 수 있지만, 현재와 같이 대피선의 개수가 3개로 한정되어 있는 상황에서 교점이 생기기 위해서는 $n - k < 3$ 이어야 한다.

$$\begin{cases} S_{\text{대피로}} = a\{t - c - (n - 1)(c + d)\} & \cdots \cdots \text{①} \\ S_{\text{대피로}} = b\{t - (k - 1)(c + d)\} & \cdots \cdots \text{②} \end{cases}$$

①과 ②로부터 $S_{\text{대피로}}$ 가 9호선의 시작역인 김포공항역으로부터 대피선이 설치된 역까지의 거리일 때, $S_{\text{대피로}}$ 에서 n 번째 급행열차와 k 번째 일반열차가 만나는 시각은

$$t_{\text{대피로}} = \frac{a\{c + (n - 1)(c + d)\} - b(k - 1)(c + d)}{a - b}$$

이다.

라. 수학적 모델의 검증

우리가 제시한 수학적 모델이 실제 상황에서도 적용가능한지에 대한 여부를 판단하기 위하여 실측값 과, 9호선 서울 메트로 사이트에서 제공하는 시간을 위 식에 대입하여 어느 정도의 오차가 존재하는지 비교해 보았다. <Table 2>에서 t_1 은 김포공항역에서 가양역까지 소요시간이고, t_2 는 셋강역까지 소요시 간, t_3 은 사평역까지 소요시간이다. 현재 열차 시간표대로 일반열차와 그 다음에 오는 급행열차 사이의 배차 시간간격은 240초로 하였고, 급행열차와 그 다음에 오는 일반열차 사이의 배차 간격시간은 360초 로 하였다.

<Table 2> Website data of Line 9

	메트로	일반열차 주행거리
t1	600(초)	5280(m)
t2	1740(초)	15312(m)
t3	2700(초)	23760(m)

<Table 2>는 9호선 홈페이지에 나와 있는 역간 소요시간을 대입하여 거리를 구한 것이다. 급행열차의 주행시간은 나와 있지 않았다. 이때 표정속도는 인터넷에서 조사한 31.68 km/h 이다.

<Table 3> The value obtained by substituting the measurement data to equations ① and ②

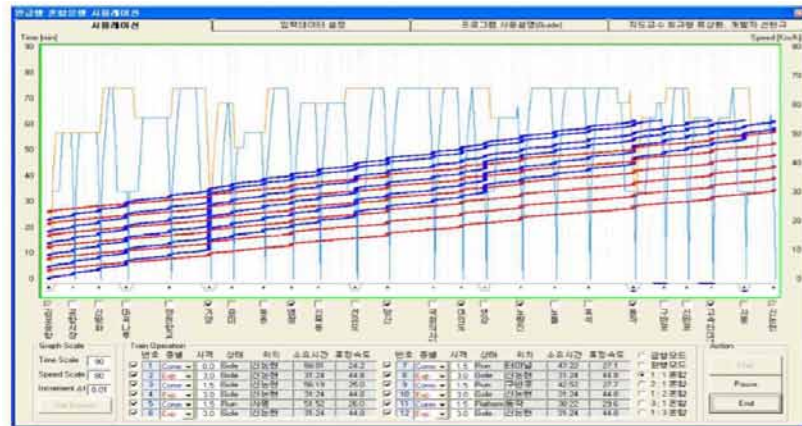
	실측값	급행열차 주행거리	일반열차 주행거리
t1	577(초)	4381(m)	4039(m)
t2	1968(초)	14664(m)	13776(m)
t3	3239(초)	23387(m)	22673(m)

<Table 3>은 실제로 9호선을 탑승하여 측정한 역간 소요시간을 ①, ②식에 대입하여 거리를 구한 것이 다. 이때 표정속도는 김포공항역에서 종합운동장역까지의 거리와 급행열차와 일반열차의 총 주행시간을 이용하여 구하였다. 이때 표정속도는 급행열차가 48.6 km/h, 일반열차가 23.1 km/h 이다.

우리는 수학적으로 접근하기 위해서 열차의 거리-시간을 그래프로 표현할 때 정차시간이 존재하게 되 면 함수로 표현할 수 없기 때문에 식 계산에서는 총 운행거리를 총 운행시간으로 나눈 표정속도를 사용 하였다. 때문에 오차가 발생하게 되었는데, 그 이유는 식으로 표현한 이론상에서와는 달리 실제 상황 에서는 각 구간마다 속력이 다르고, 정차시간의 오류도 존재하기 때문이다. 그렇지만 이러한 오차가 1 km (약 1분)내외이기 때문에 우리가 세운 식을 실제상황에 충분히 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

3. 선행연구 결과와 수학적 모형의 결과 비교

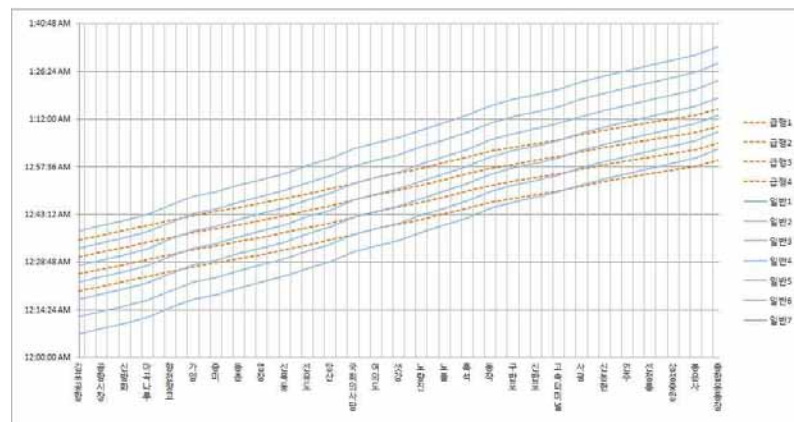
가. 선행연구 결과



[Fig. 3] Graph in the master's thesis

[Fig. 3]은 선행연구의 석사학위[4] 논문에서 Visual Basic을 이용하여 그린 거리와 시간에 관한 그래프이다. 그는 가로축을 운행 구간, 세로축을 시간으로 설정하여 그래프를 만들었다. 일반열차와 급행열차를 1:1, 교대로 운행하도록 시뮬레이션을 하였고, 급행열차와 일반열차 모두 65 km/h의 속도로 운행하도록 설정하였다.¹⁾ 급행열차가 정차하는 역은 역명 위 칸에 V 표시하여 구분하였다. 또한 대피선이 존재하는 역은 그래프의 가로축에 굴곡을 그려 표시하였다. 급행과 일반열차가 6번 경합하는 것을 가정하여 모든 대피선을 사용하게끔 대피 지연시간을 조정하였다. 선행연구에서는 위의 일반열차와 급행열차의 운행 횟수의 비가 1 : 1일 때의 시뮬레이션이 다른 운행 패턴과 비교하여 단위 시간당 수송 인원이 최고로 많았기 때문에 가장 효율적인 운행방식이라 결론을 내렸다.

나. 수학적 모형의 예시



[Fig. 4] An example of graph obtained by R&E

우리가 만든 수학적 모형으로부터 다양한 결과를 얻을 수 있었고 [Fig. 4]는 급행열차의 표정속도가 42.12 km/h, 일반열차의 표정속도가 29.88 km/h, 일반열차와 그 다음 급행열차의 배차간격이 150초, 급행열차와 그 다음 일반열차의 배차간격이 160초일 때의 조건에서 얻어진 그래프의 예를 보여준다. 본 연구의 목표는 대피 지연시간을 최소화하고, 열차의 표정속도를 최대화하는 것으로, 단위 시간당 수송인원수를 최대화하는 선행연구와 목표가 다르다. 선행연구에서는 운행 패턴을 조작 변인으로 설정하고, 급행열차의 표정속도와 운행속도를 고정하여 그에 맞는 일반열차의 표정속도와 대피 지연시간을 구한 데 비해, R&E에서는 급행열차와 일반열차의 표정속도와 배차간격을 조작변인으로 설정하여 그래프를 그렸다. 선행연구에서는 일반열차와 급행열차가 6번 경합하는 것을 가정하여 시뮬레이션 했지만, R&E에서는 3번의 경합을 가정하여 시뮬레이션 하였다. 선행 연구에서는 대피 지연시간으로 인한 열차의 정체가 표현되어 있는데 비해, 열차의 운행 속도가 아닌 표정속도에 관한 직선 그래프를 그렸으므로 대피 지연시간이 생략되었다. 또한 선행연구에서는 열차의 모든 운행방향(상선, 하선)을 고려하여 시뮬레이션 하였지만 R&E에서는 상선만을 시뮬레이션 하였다.

우리가 추가로 얻은 분석 결과는 다음과 같다.

- 1) 선행 연구에서는 한 열차 운행 패턴에서 열차의 배차 간격이 일정하지 않다.
- 2) 선행연구의 그래프에서는 급행열차와 일반열차의 표정속도와 평균속도를 모두 나타내었다.
- 3) 선행연구의 논문에서는 구간마다 표정속도가 다르다.
- 4) 선행 연구에서 급행열차가 대피선을 사용한 횟수에 관한 언급이 있다.

1) 그래프에서 역 사이 구간 별 기울기가 급행열차와 일반열차 모두 같다. 선행연구에서는 통제 변인인 운행 패턴에 따라 일반열차의 표정속도가 정해진다. 대체로 일반열차를 많이 운행할수록 일반열차의 표정속도가 높아진다. 급행열차의 추월로 인한 대피 지연시간의 감소가 원인이다.

IV. 연구 결과 및 고찰

우리는 코드블럭스 프로그램을 이용하여 부정방정식의 모든 양의 정수해를 구하였으며, 그 결과의 일부는 웹²⁾에 게재하였고 결과에도 수록하였다.

```
#include <iostream>
#include <fstream>
using namespace std;

int main()
{
    double a, b, c, d, t1, t2, t3, s1, s2, s3;
    //a=급행열차의 속도, b=일반열차의 속도, c=급행열차와 일반열차의 시간 간격, d=일반열차와
    급행열차의 시간간격
    ofstream fout("R&E 데이터.txt");
    s1=5200;
    s2=14100;
    s3=22500;
    z=20;
    fout<<"a"<<" "<<"b"<<" "<<"c"<<" "<<"d"<<" "<<"t1"<<" "<<"t2"<<" "<<"t3"<<endl;
    for(a=117;a<143;a++)
        for(b=79;b<96;b++)
            for(c=90;c<300;c=c+10)
                for(d=90;d<300;d=d+10)
                    for(t1=0;t1<1000;t1=t1+10)
                        for(t2=t1;t2<2000;t2=t2+10)
                            for(t3=t2;t3<3000;t3=t3+10)
                                {
                                    if(a/10*(t1-c-z)<s1 && b/10*(t1-z)<s1 && a/10*(t1-c+z)>s1 && b/10*(t1+z)>s1 && a/10*(t1-c+z)>b/10*(t1+z)
                                        && a/10*(t2-c-z-(q+c))<s2 && b/10*(t2-z)<s2 && a/10*(t2-c+z-(q+c))>s2 && b/10*(t2+z)>s2 &&
                                        a/10*(t2-c+z-(q+c))>b/10*(t2+z) && a/10*(t3-c-z-2*(q+c))<s3 && b/10*(t3-z)<s3 && a/10*(t3-c+z-2*(q+c))>s3
                                        && b/10*(t3+z)>s3 && a/10*(t3-c+z-2*(q+c))>b/10*(t3+z))
                                        fout<<a<<" "<<b<<" "<<c<<" "<<d<<" "<<t1<<" "<<t2<<" "<<t3<<endl;
                                }
    return 0;
}
```

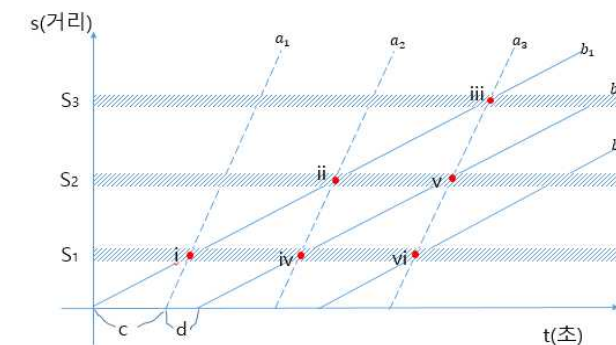
[Fig. 5] The codeblocks algorithm used in the research

그래프 상에서는 교점이 한 점으로 나타나지만, 실제 상황에서는 열차의 길이와 역의 길이에 의해 만나는 지점은 구간이 된다. 따라서 코드블럭스 프로그램을 사용할 때는 등식이 아니라 부등식을 사용하였다. ①과 ②를 이용하여 세운 부등식은 다음과 같다. 이때 시간 t (초)를 $t \pm 20$ 으로 한 이유는 열차의 길이와 역의 길이의 합을 일반열차가 20초안에 주행할 수 있기 때문이다.

$$\begin{cases} S_{\text{대피로}} = a\{t - c - (n-1)(c+d)\} & \dots\dots ① \\ S_{\text{대피로}} = b\{t - (k-1)(c+d)\} & \dots\dots ② \end{cases}$$

$$\begin{cases} a(t_1 - c - 20) < s_1 \\ b(t_1 - 20) < s_1 \\ a(t_1 - c + 20) > s_1 \\ b(t_1 + 20) > s_1 \\ a(t_2 - c - 20 - (c+d)) < s_2 \\ b(t_2 - 20) < s_2 \\ a(t_2 - c + 20 - (c+d)) > s_2 \\ b(t_2 + 20) > s_2 \\ a(t_3 - c - 20 - 2(c+d)) < s_3 \\ b(t_3 - 20) < s_3 \\ a(t_3 - c + 20 - 2(c+d)) > s_3 \\ b(t_3 + 20) > s_3 \end{cases} \dots\dots ③$$

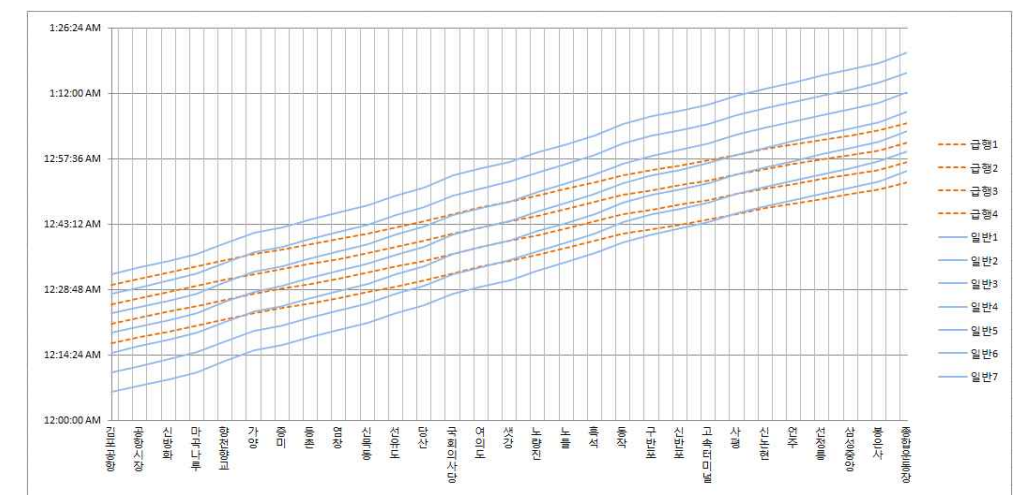
부등식 ③의 범위를 그래프로 표현하면 [Fig. 6]과 같다. 즉 일반열차의 시간에 따른 거리 그래프와 급행열차의 시간에 따른 거리 그래프의 교점이 빗금 친 영역 내에서 성립하면 출력하도록 한 것이다.



[Fig. 6] Areas of inequality used in codeblocks program

우리가 얻은 다양한 부정방정식의 해 중 몇 가지 사례를 나열하면 다음과 같다.

1. 급행열차의 속도를 고정했을 때의 개선 방안

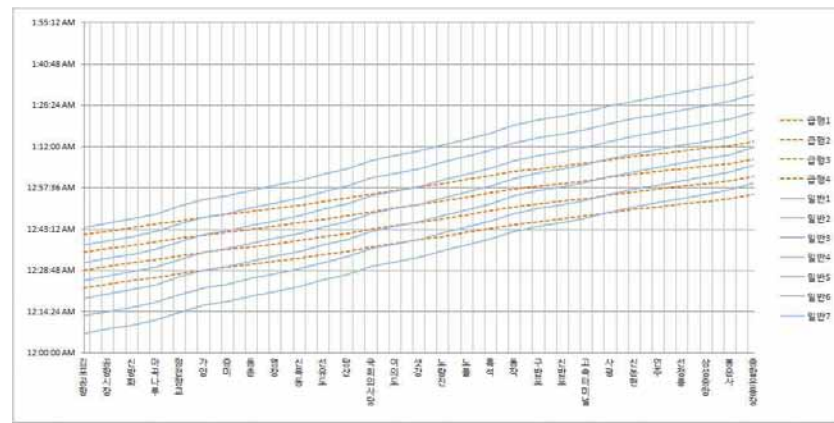


[Fig. 7] Speed of trains when scheduled speed of express trains is fixed

2) <https://goo.gl/92XrXF> <https://goo.gl/zJ9Hg4>

급행열차의 표정속도는 46.8 km/h로 고정된 상태에서 식 ③을 만족하는 가장 빠른 일반열차의 표정속도인 34.2 km/h일 때의 그래프이다. 즉, 일반열차와 그 다음 급행열차의 배차간격은 120초, 급행열차와 그 다음 일반열차의 배차간격은 140초이다. 실측자료 <Table 1>에서 보면 알 수 있듯이 일반열차의 총 누적 시간 즉, 총 운행시간은 현재 3916초 인데 비해 개선 방안의 상황에서는 2937초로 줄일 수 있었다.

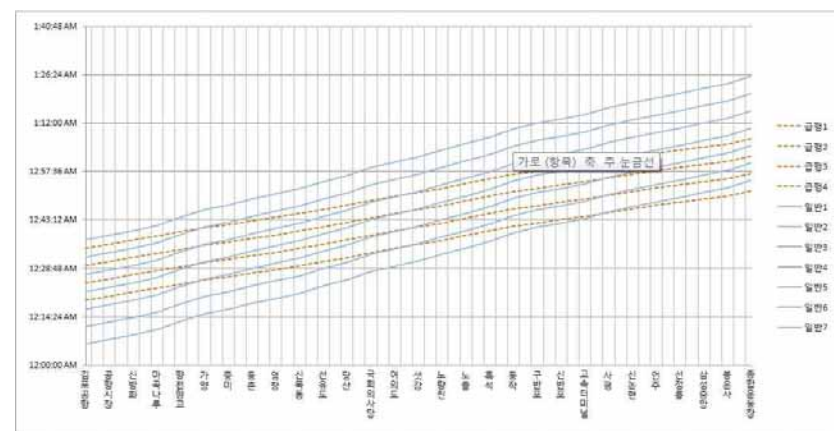
2. 일반열차의 표정속도를 고정했을 때의 개선 방안



[Fig. 8] Speed of trains when scheduled speed of all-stop trains is fixed

일반열차의 표정속도는 31.68 km/h로 고정된 상태에서 위의 수식을 만족하는 가장 빠른 급행열차의 표정속도인 51.12 km/h일 때의 그래프이다. 즉, 일반열차와 그 다음 급행열차의 배차간격은 220초, 급행열차와 그 다음 일반열차의 배차간격은 150초 이다. 실측자료인 <Table 1>에서 일반열차의 총 운행시간은 현재 3916초인데 비해, 개선 방안의 상황에서는 3170초로 줄일 수 있었다.

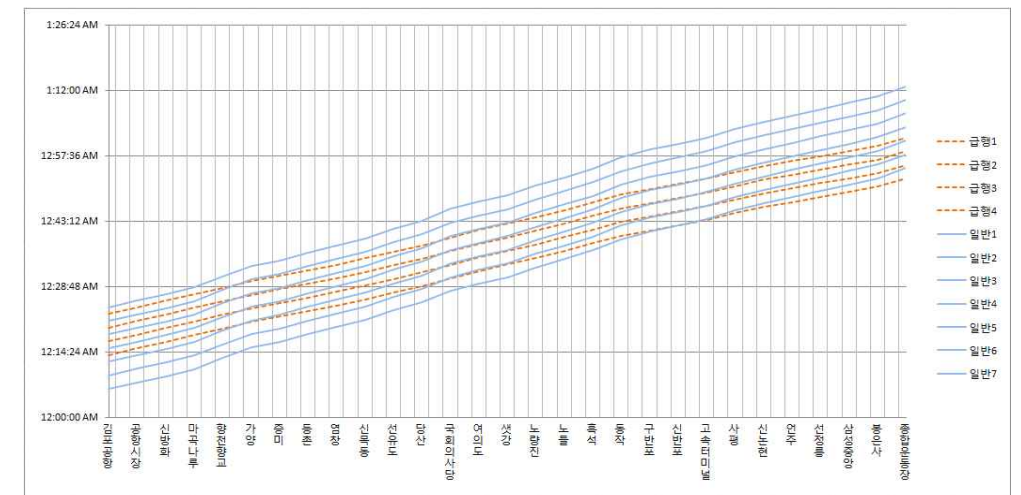
3. 급행열차와 일반열차의 최대 표정속도 내에서의 개선 방안



[Fig. 9] Revised graph showing a 10% increase in the speed of trains

위의 수식을 만족하는 가장 빠른 일반열차의 표정속도인 34.2 km/h와 가장 빠른 급행열차의 표정속도인 51.12 km/h를 이용하여 그린 그래프이다(일반열차와 그 다음 급행열차의 배차간격은 150초, 급행열차와 그 다음 일반열차의 배차간격은 160초이다). 실측자료 <Table 1>에서 일반열차의 총 운행시간은 현재 3916초인데 비해, 개선 방안의 상황에서는 2937초로 줄일 수 있었다.

4. 급행열차와 일반열차의 배차간격을 조정한 개선 방안



[Fig. 10] Revised graph to reduce intervals

Ⅳ. 3절에서 우리는 급행열차와 일반열차의 표정속도를 변화하였을 때 운행의 좀 더 효율적으로 할 수 있는 방안을 제시하였다. 우리는 여기에 급행열차와 일반열차의 배차 시간을 조절하여 좀 더 개선된 방안을 다음과 같이 제시하고자 한다. 식 ③을 만족하는 가장 짧은 배차간격은 일반열차와 그 다음 급행열차의 배차간격 90초, 급행열차와 그 다음 일반열차의 배차간격 90초이다. 이때 수식을 만족하도록 하는 급행열차와 일반열차의 표정속도는 각각 42.84 km/h, 34.2 km/h이다. 실측자료 <Table 1>에서 일반열차의 총 운행시간은 현재 3916초인데 비해, 개선 방안의 상황에서는 2939초로 줄일 수 있었다.

위의 결과들을 살펴보면, 단순히 일반열차의 표정속도와 급행열차의 표정속도가 빠르기만 해서 같은 시간동안 많은 사람들을 운반할 수 있는 효율을 보이는 것이 아니라는 것을 알 수 있다. 지금보다 더 효율적인 운영을 진행하기 위해서는 단순히 배차간격을 줄이거나 표정속도만 높여서는 안 되고, 체계적으로 짜인 시간표가 필요하다는 것을 알 수 있다.

5. 코드블럭스 프로그램에서 얻은 결과 값

<Table 4> Results when the interval between trains is the amallest

급행열차	표정속도[km/h]	일반열차	표정속도[km/h]	일반-급행 간 배차간격[s]	급행-일반 간 배차간격[s]
42.12		33.84		90	90
42.12		34.2		90	90
42.48		34.2		90	90
42.84		34.2		90	90

<Table 5> Results at intervals of 150 seconds and 160 seconds

급행열차	표정속도[km/h]	일반열차	표정속도[km/h]	일반-급행 간 배차간격[s]	급행-일반 간 배차간격[s]
42.12		29.88		150	160
42.48		30.24		150	160
42.84		30.24		150	160
43.2		30.6		150	160
43.92		30.96		150	160
44.28		30.96		150	160
44.64		31.32		150	160
45.36		31.68		150	160
46.08		32.04		150	160
46.44		32.04		150	160
46.8		32.4		150	160
47.16		32.4		150	160
47.52		32.76		150	160
47.88		32.76		150	160
48.24		33.12		150	160
48.6		33.12		150	160
48.96		33.48		150	160
49.32		33.48		150	160
49.68		33.48		150	160
50.04		33.84		150	160
50.4		34.2		150	160
50.76		34.2		150	160
51.12		34.2		150	160

V. 결론 및 제언

수학은 엄밀한 증명을 통해서 논리를 전개하기도 하지만, 수학이 갖고 있는 다양한 논리를 이용하여 생활 속 문제를 해결할 수도 있다. 본 과제에서 우리는 자주 이용하는 지하철 문제에 대한 수학적 해결 방안을 제시하였다. 효율적인 지하철 운행은 이용객들의 만족도를 높일 수 있을 뿐만이 아니라, 비용을 절감할 수 있는 효과도 얻을 수 있다. 우리는 현재 같은 레일을 이용하여 일반열차와 급행열차가 운행 되고 있는 지하철 9호선을 분석하였다. 현재 지하철 9호선은 3개의 대피선을 이용하여 일반열차와 급행 열차가 충돌하지 않고 운행이 되고 있으며 선행 연구들도 이 대피선을 이용한 효율적인 운행방안을 알아보기 위해 노력하였다. 하지만 기존의 연구는 역과 역 사이의 운행속도뿐만이 아니라 정차시간을 별도의 요소로 하여 운행 효율성을 검증하려 하였기 때문에 수학적 모델을 제시하지 못하였다. 우리는 이번 연구에서 정차시간을 포함한 표정속도를 사용하여 수학적 모델을 제시하였다. 이 모델은 연립 선형

방정식의 형태로 나타났다. 구체적으로 설명하면 일반열차와 급행열차 사이의 배차 간격, 일반열차의 표정속도, 급행열차의 표정속도 그리고 운행 시간에 따른 복잡한 연립 부정방정식으로 만들어진 수학적 모델이라서 이를 수작업으로 푸는 것은 불가능하였다. 그런 이유로 우리는 정보시간에 학습한 코드블럭스 프로그램을 이용하여 부정방정식의 정수해를 모두 구하였다. 우리가 연구 결과에서 제시한 어떤 해를 사용하더라도 수학적으로는 현재의 운행 체계 보다는 효율적임을 알 수 있다. 만일 우리가 배차간격을 줄였을 때 이용객의 만족도, 운행 횟수가 늘어나는데 따르는 지하철 공사의 운영비용 증가 등을 계산할 수 있다면 제시된 다양한 부정방정식의 해 중 최적의 해도 구할 수 있을 것이라 생각된다.

이번 R&E를 통해서 우리는 수학의 기본적인 지식들이 어떻게 연결되어 실생활의 문제를 해결하는데 적용되는가를 구체적으로 확인하고 검증해 보았다. 이러한 연구의 경험은 향후 복잡한 문제를 해결할 때 어떻게 수학을 사용할 것인가를 생각하게 하는데 좋은 토대가 될 것으로 생각한다.

VI. 참고문헌

[1] 소년한국일보. <http://goo.gl/DxuXjn> (검색일: 2015.9.3).

[2] 김응태, 박승안 (2012). **정수론** (8판). 서울: 경문사.

[3] 박정수 (2008). 급행열차 개념의 정의. **교통기술과 정책**, 5(1), 240-245.

[4] 박정수, 안우진 (2008). 영업 및 운전 중심의 서울 지하철 9호선 개선 방안 연구. **한국철도학회 논문집**, 11(5), 482-488.

[5] 김경철 (2001). 기존선 개량을 통한 도시철도 속도향상방안 기초연구. **서울시정개발연구원, 연구보고서**, 10.

[6] 나무위키. <https://goo.gl/HQxCQY> (검색일: 2015.9.3).

[7] 선현규 (2012). **대피역이 한정된 복선구간에서 완·급행열차를 혼합운행하기 위한 운전계획 최적화에 관한 연구**. 석사학위논문. 서울과학기술대학교, 서울.

[8] 일간위스트. <https://goo.gl/OX8Csr> (검색일: 2015.9.3).

| 연구진 |

임수철 (Lim Soochool, 인천진산과학고등학교, dlatncjf7@naver.com), 주저자
곽승신 (Gwak Seungshin, 인천진산과학고등학교, supersentai48@gmail.com)
장우석 (Jang Wooseok, 인천진산과학고등학교, wkddntjr50@naver.com)
정효진 (Jung Hyojin, 인천진산과학고등학교, gywls2690@naver.com)
모지훈 (Mo Jihun, 인천진산과학고등학교, gjm679@naver.com)

지도교사 : 김기용 (Kim Giyong, 인천진산과학고등학교, 수학, doldevil@naver.com)
지도교수 : 함남우 (Hahm Nahmwoo, 인천대학교 수학과, nhahm@inu.ac.kr)

일반화된 젓가락게임의 필승전략에 관한 연구

조한솔 · 박윤원 · 박종욱 · 차준경 · 김덕원 — 인천과학고등학교

A Study on Winning Strategies of Generalized Chopsticks Game

Cho Hanseul · Park Yunwon · Park Jonguk · Cha Junkyeong · Kim Deokwon - Incheon Jinsan science High school

ABSTRACT

Chopsticks game is a game for two players, and each player uses their hands. In the original version, both players have 5 digits on each hand and extend one digit from each hand at the start. They take turns to be referred to as attacker and defender respectively. The attacker can tap their own hand to the other. Then, one player changes the number of extended digits by rule. The goal of the game is to force the opponent fold all digits. There are not any clear proofs of winning strategy of chopsticks game. Hence we tried to prove them verifying some basic theorems. Moreover, we generalized chopsticks game by modifying basic rules and studied the new game. We invented some symbols to devise ‘Process Table’ and ‘Strategy Table’, indicates the process of an independent game and proper action in all situations made in a game. We also devised an algorithm for manufacturing strategy table We could find strategy tables in computer coding where the players have more digits. Furthermore, we found several strategic actions regardless of the situations and digits. We finally concluded several results as follows. First, the player begins as defender always win in the original game. Second, Devising process and strategy table, strategies for any different initial condition and number of digits are surely exist. Lastly, the outcome of all situations is already determined if the players have no intention to lose, and there are ‘tied situations’ where both players never lose but also never win.

Key words:
Chopsticks Game, Strategy, Initial Condition, The Number of Digits, Process/Strategy Table

국문초록

젓가락게임은 두 사람이 양 손의 손가락을 사용하여 쉽게 할 수 있는 게임이다. 기존의 젓가락게임은 양 손에 손가락을 하나씩 펴고 시작하며, 손가락을 5개 이상 펼 수 없다. 또한 두 경기자는 공격과 수비를 번갈아 하는데 이때, 공격자는 자신의 손으로 자신 또는 상대의 손을 칠 수 있으며 공격자의 공격을 하면 한 경기자가 손에 펴 손가락의 개수를 규칙에 따라 바꾸어야 한다. 인터넷에는 젓가락게임은 승패를 반드시 알 수 있는 게임으로 설명되어 있으며 어떻게 이길 수 있는지 말과 표로 설명되어 있다. 하지만 제시된 자료가 왜 필승전략인지에 대한 수학적 증명은 전혀 제시되어있지 않다. 이에 우리는 젓가락게임의 필승전략을 검증하고 수학적 증명을 하고자 했다. 나아가 기존의 젓가락게임의 규칙에서 초기 조건과 손가락 수를 일반화하고 그때의 일반화된 전략을 찾고자 했다. 이를 위해 몇 가지 기호를 고안하였고, 이를 이용해 두 경기자가 참여중인 게임의 진행과정을 나타낸 표인 ‘과정표’와 각각의 상황에서 승패여부와 함께 경기자가 전략적으로 어떻게 해야 할지 알려주는 ‘전략표’를 고안하였다. 전략표로부터 기존의 게임과 다른 초기조건에서의 승패여부와 전략, 손가락 수에 따른 전략을 한꺼번에 확인할 수 있는데, 이러한 표를 제작하기 위해 10단계의 전략표 제작 알고리즘을 고안했고, 이 알고리즘이 수학적으로 타당함을 여러 보조정리를 이용해 증명하였다. 손가락이 2, 3, 4, 5개일 때의 전략표를 제작했으며, 고안한 알고리즘을 기반으로 두 가지 코드를 작성하고 응용프로그램을 만든 후 손가락이 더 많을 때의 전략을 알 수 있음을 확인하였다. 나아가, 전략에서 손가락 수에 따라 일반적인 규칙성을 보이는 몇 특수한 상황에 대해 타당함을 수학적인 증명을 통해 보였다. 본 연구를 통해 다음과 같은 결과를 얻어내었다. 첫째, 기존의 젓가락게임은 후공을 한 사람에게 필승전략이 존재함을 보였다. 둘째, 과정표와 전략표를 통해 초기조건을 다르게 했을 때 전략을 확인했다. 과정표와 전략표를 통해 손가락 개수를 다르게 했을 때의 전략을 확인했다. 과정표를 고안한 이후로 연구에 필요한 몇 가지 기초적인 사실들을 보일 수 있었다. 또한, 과정표는 전략의 타당성을 보일 때 중요한 역할을 하였다. 전략표 제작 알고리즘을 통하여, 경기자가 지지 않으려고 노력한다고 하면 각각의 상황마다 승패여부가 정해져있음을 보였고, 전략적으로 지지 않지만 이길 수도 없는 ‘비기는’ 상황이 존재함을 확인했다.

중심어 :
젓가락게임, 전략, 초기 조건, 손가락 수, 과정표 및 전략표

I. 서론

1. 연구 동기

젓가락게임은 두 사람이 양 손의 손가락을 사용하여 누구나 쉽게 할 수 있는 게임으로, 인터넷을 검색하여 보면 젓가락게임은 승패를 반드시 알 수 있는 게임으로 설명되어 있으며 어떻게 반드시 이길 수 있는지에 대한 전개 과정이 말과 표로 설명되어 있다. 하지만, 다양한 선택이 가능한 젓가락게임에서 제시된 표가 왜 필승전략인지에 대한 수학적 증명은 전혀 제시되어있지 않다. 이에 본 연구에서는 젓가락 게임에서 승패를 알 수 있는 수학적 논리를 제시하고, 젓가락게임의 손가락 개수를 바꾸거나 게임의 초기 조건을 바꾸었을 때도 수학적으로 필승 전략이 존재하는가, 또한 그 전략이 왜 타당한가를 수학적으로 검증해보고자 한다.

2. 연구 목표

본 연구에서 우리는 다음과 같은 연구 목표를 세우고, 그 결과를 얻고자 한다.

가. 젓가락게임에서 필승전략은 존재할까?

젓가락 게임을 진행하면 매 단계에서 다양한 선택을 할 수 있기 때문에 게임에 참여한 사람들은 최선의 선택을 하고자 고민을 한다. 공격을 하는 사람과 수비를 하는 사람들의 다양한 고민이 가능한데, 인터넷에서 필승전략을 제시하고 있지만 수학적이고 논리적인 검증은 없다. 따라서 우리는 인터넷에 제시된 필승전략이 수학적으로 합리적인지를 검증하고자 한다.

나. 초기조건을 바꿔도 필승전략이 존재할까?

두 명의 경기자는 모두 두 손에서 각각 한 개의 손가락을 펴 상태에서 게임을 시작해야 하며 게임을 하다보면 경기자가 펴는 손가락의 수는 계속 변하게 된다. 이는 두 명의 경기자가 계속해서 초기조건을 바꾸며 게임에 참여하는 것으로 간주되며, 이에 우리는 초기조건을 바꾸어 필승전략을 알아내면 전통적인 게임의 필승전략을 더욱 효과적으로 구할 수 있을 것으로 생각한다. 또, 전통적인 게임에서 발생되지 않는 초기조건으로 게임을 할 수 있다면 기존의 게임과 다른 결과가 나올 수 있으므로, 초기 조건을 바꾸었을 때 필승전략을 찾고 검증해보고자 한다.

다. 손가락의 개수가 5개가 아닐 때에도 필승전략이 존재할까?

젓가락게임은 한 손에 있는 손가락의 개수 5개를 사용하였을 때 필승전략이 존재하는 것으로 알려진 게임이다. 우리는 연구에서 손가락의 개수가 5개보다 작은 경우에서부터 전략에 대해 규칙성을 찾아보기로 했고, 손가락의 개수가 5개가 아닌 일반적인 경우의 필승전략에 대해 수학적으로 검증해보고자 한다.

II. 선행연구 분석 및 이론적 배경

1. 선행연구 분석

젓가락 게임을 하는 방법과 전략에 대해서는 사람들에게 널리 알려져 있지만, 두 경기자 중 어떤 사람이 반드시 이기는지, 그리고 그 전략에 대해 수학적으로 어떻게 설명할 수 있는지에 대한 연구는 거의 없다.

가. 정문자 (2005). 젓가락게임에 활용한 창의성 신장 방안 연구[2]

이 논문은 연구의 초점을 젓가락 게임을 통한 창의성 신장에 두고 있으며, 기존의 젓가락게임에서 후공을 하는 사람들의 필승전략을 표를 이용해 소개하고 있다. 다만 몇 가지 특수한 상황에 대한 전략만을 다루었고, 젓가락게임에 대한 세부적인 규칙이 언급되지 않았기에 논문을 읽는 동안 의문점이 생겼다. 예를 들어, 후공을 하는 사람의 양손에 펼쳐진 손가락의 개수가 각각 4개와 0개, 또는 4개와 1개가 아닌 경우에도 후공이 반드시 이길 수 있는지, 공격자의 손가락을 0개 펴 손으로 수비자의 손을 치는 동작을 허용하는 것이 옳은지 의문이 들었다. 이에 우리는 [2]에 대해 심화된 연구를 진행하기로 결정하였고, 본 논문에 그 과정을 실었다.

나. Wikihow 사이트 (<http://www.wikihow.com/Always-Win-Chopsticks>)[6]

위 사이트에서는 기존의 젓가락게임에서 후공인 사람이 어떻게 하면 이길 수 있는지 글로 설명해 놓았다. 그러나 이 전략에 대한 수학적인 증명이 제시되어있지 않다. 우리는 이를 수학적으로 검증하고자 한다.

다. 네이버 블로그 (<http://blog.naver.com/fsfd1100/220059348810>)[1]

이 네이버 블로그는 젓가락게임에서 후공이 이기는 과정과 초기조건을 변형했을 때의 전략의 존재 가능성과 전략에 대해 언급하고 있지만 (나.)처럼 명확한 이유와 수학적 증명을 제시하지 못하고 있다.

2. 이론적 배경

가. 전통적인 젓가락게임의 진행방법

연구에 앞서 전통적인 젓가락게임의 규칙에 대해 설명하기로 한다.

[규칙 1] 두 경기자는 양 손에 모두 각각 손가락을 하나씩 펴고 선공과 후공을 정한다.

[규칙 2] 공격자는 다음 두 가지 동작 중 하나를 시행한다. 공격자가 하나의 동작을 했으면 공격권은 수비자에게 넘어간다.

(1) 공격자가 수비자의 손을 치는 동작(치기, Hit)

공격자는 자신의 한 손을 사용해서 상대방인 수비자의 손을 칠 수 있다. 이때 수비자의 공격받은 손은 공격받기 전 손에 펴 있던 손가락의 개수에서 공격자가 칠 때 사용한 손에 펴 있던 손가락의 개수만큼을 더 펴야 한다. 이때 수비자가 펴야 할 손가락이 5개 이상이면 수비자의 그 손은 손가락을 모두 펴지 않는다.

[금지 규칙] 공격자는 편 손가락이 없는 손으로 수비자의 손을 치거나, 공격자의 한 손으로 수비자의 편 손가락이 없는 손을 칠 수 없다.

(2) 공격자가 자신의 손을 치는 동작(분할하기, Split)

X 또는 Y 가 공격자일 때 자신의 두 손을 맞대어 칠 수 있는데 이를 분할한다고 한다. 이때 양 손의 편 손가락 개수의 합은 변하지 않으며, 다만 공격자의 양손에 편 손가락의 개수를 공격자가 자유롭게 변화시킬 수 있다.

[금지 규칙]

- (1) 분할을 할 때 양 손의 위치만 바꾸는 것은 결국 같은 결과이므로 이와 같이 해서는 안 된다.
- (2) 양 손에 편 손가락 개수의 합이 5개 이상일 때 한 손에 5개 이상이 오도록 분할해서는 안 된다.

[규칙 3] 두 경기자 중에서 한 경기자의 양손의 손가락을 모두 접게 되면 이 순간 그 경기자가 패배하며 경기가 종료된다.

나. 젓가락게임 연구를 위한 정의 및 기호 약속

젓가락게임의 규칙을 연구에 적용하기 위해 연구에 필요한 개념들을 정의하고 이를 문자와 기호로 약속하기로 한다.

정의 1. 게임에 참여하는 두 경기자를 X 와 Y 로 나타내기로 한다. X 가 Y 의 손을 칠 수 있는 상황을 X 가 Y 를 공격한다고 하고 이 때, Y 는 수비한다고 한다.

X 가 Y 를 공격할 수도 있지만 그 다음 차례에서는 Y 가 X 를 공격하므로 X 와 Y 는 모두 공격자(Attacker)도, 수비자(Defender)도 될 수 있다. 이에 따라 특별히 공격자와 수비자를 의미하는 기호로 각각 A 와 D 를 사용하기로 한다.

정의 2. 한 손에 있는 손가락의 수는 p, q, r, s 등의 알파벳으로 표기하기로 하며, 한 경기자 X 가 양 손에 손가락을 각각 p_1 개, p_2 개 펴고 있을 때 이를 순서쌍을 이용하여 $X(p_1, p_2)$ 로 나타내기로 한다. 이때, 전통적인 젓가락게임에서 p_1 과 p_2 는 $0 \leq p_1, p_2 < 5$ 인 정수이다. 다만 왼손과 오른손을 구별할 필요가 없어서 $X(p_1, p_2) = X(p_2, p_1)$ 이므로 중복을 막기 위하여 $p_1 \geq p_2$ 일 때는 $X(p_1, p_2)$ 로 표기하기로 한다. 정의 2에 의하여 경기 중인 X 와 Y 의 손가락 개수는 각각 $X(p_1, p_2), Y(q_1, q_2)$ 가 된다. 이를 이용하면 두 경기자 X, Y 가 참여하는 전통적인 게임의 초기상태는 $X(1,1), Y(1,1)$ 이며, 한 사람이 $(0,0)$ 이 되면 그 사람이 패배하며 게임이 종료됨을 알 수 있다.

정의 3. 공격자 A 가 손가락을 r_1 개 편 손으로 수비자의 손가락이 s_1 개 펴진 손을 치는(Hit) 동작을 $H_A[r_1, s_1]$ 으로 나타내기로 한다.

예를 들어 $H_X[2,3]$ 는 X 가 2개의 손가락을 편 손으로 손가락 3개 편 수비자의 손을 치는 것을 의미한다.

- [예제] (1) $X(3,2), Y(4,1)$ 일 때 $H_X[3,1] \Rightarrow X(3,2), Y(4,4)$ 로 된다. (By [규칙 2] (1))
- (2) $X(3,2), Y(4,1)$ 일 때 $H_Y[4,2] \Rightarrow X(3,0), Y(4,1)$ 로 된다. (By [규칙 2] (1))
- (3) $X(3,0), Y(1,0)$ 일 때 $H_X[3,0], H_Y[0,3]$ 은 불가능한 동작이다. (By [규칙 2] (1) [금지규칙])

정의 4. 공격자 A 가 자신의 양손을 분할해서(Split) 각각 r_1 개와 s_1 개의 손가락을 펴도록 하는 동작을 $S_A[r_1, s_1]$ 으로 나타내기로 한다. 예를 들어, $S_X[2,3]$ 는 X 의 원래 양 손에 펴 있던 손가락은 각 2개, 3개가 아니고 다만 손가락 수의 합은 $2+3=5$ 개일 때 양 손의 손가락을 각각 2개, 3개로 분할하는 것을 의미

한다.

- [예제] (1) $X(3,2)$ 일 때 $S_X[4,1] \Rightarrow X(4,1)$ 로 된다. (By [규칙 2] (2))
- (2) $Y(2,1)$ 일 때 $S_Y[0,3] \Rightarrow Y(3,0)$ 으로 된다. (By [규칙 2] (2))
- (3) $X(4,3)$ 일 때 $S_X[3,4], S_X[6,1]$ 은 불가능한 동작이다. (By [규칙 2] (2) [금지규칙])
- (4) $X(3,0)$ 일 때 $S_X[2,1] \Rightarrow X(2,1)$ 은 가능하다. (By [규칙 2] (2))

III. 연구 내용

1. 과정표(Process Table)의 작성

앞서 정의한 기호를 이용하여 젓가락게임의 진행과정을 표로 표현해보았다.

시행 횟수에 따라서 경기자 X 와 Y 가 참여하는 게임의 진행과정을 나타낸 표를 과정표(Process Table)라고 하자. <Table 1>은 X 가 선공을 하였을 때 젓가락게임에서 이기는 과정을 보여주는 과정표의 한 예시다.

<Table 1> An Example of ‘Process Table’.

시행 횟수	0 (초기)	1	2	3	4	5	6	7	종료
동작	X 의 차례	$H_X[1,1]$	$H_Y[1,1]$	$H_X[2,2]$	$S_Y[3,2]$	$H_X[2,3]$	$H_Y[2,2]$	$H_X[4,2]$	X win
X	(1,1)	(1,1)	(2,1)	(2,1)	(2,1)	(2,1)	(4,1)	(4,1)	
Y	(1,1)	(2,1)	(2,1)	(4,1)	(3,2)	(0,2)	(0,2)	(0,0)	

과정표의 각각의 행은 두 경기자가 젓가락게임을 하는 동안의 시행 횟수, 경기자가 취하는 동작, 게임에서 나타나는 X, Y 의 손가락 상태를 보여준다. 또한, 각각의 열은 그 열에 나타난 행동에 따라 바로 왼쪽 열에 나타난 상황에서 만들어진 상황을 보여준다. 예를 들어, <Table 1>에서 5열은 4열의 상황 $X(2,1), Y(2,1)$ 에서 $H_X[2,2]$ 라는 동작에 의해 $X(2,1), Y(4,1)$ 가 된 것을 보여준다.

이런 과정표는 경기자가 젓가락게임을 할 때 경기자끼리 만들 수 있는 시행 횟수에 따른 상황 변화를 얼마든지 기록할 수 있다. 과정표를 쉽게 읽는 방법은 다음과 같다.



[Fig. 1] How to read Process Table.

1) 원래 2016년 2월 전까지는 ‘전략표’라는 말을 쓰고 있었으나 의미상에 문제가 있는 것으로 판단해 이후로 ‘과정표’라고 대체했다.

2. 필승전략을 위한 기초적인 정의 및 정리

과정표를 이용하여 젓가락게임의 최선의 전략을 찾기 전에 다룰 정의와 정리들에 대해 언급하겠다.

정의 5. 앞으로 자주 사용할 용어들을 다음과 같이 정의하자.

- (1) n : 경기자가 펼 수 없는 최소 손가락의 개수를 5개로 한정하지 않고, 일반적인 경우에 대해 논하기 위해서 앞으로 **그 이상 펴야 하면 모두 접게 되는 손가락의 개수를 나타내는 문자를 n 으로 정한다.** (단, n 은 $n \geq 2$ 인 자연수) 따라서 [규칙 2]의 (1)을 확장하면, 수비자가 펴야 할 손가락이 n 개 이상이 되면 수비자의 그 손은 손가락을 모두 접게 된다. 이에 따라 $n=5$ 일 때의 젓가락게임을 ‘전통적인’ 혹은 ‘기존의’ 젓가락게임이라고 부른다. 이 n 값은 한 게임이 시작하고 끝날 때까지 바꿀 수 없는 값이다.
- (2) 손 상태 : 한 회에 한 경기자가 양 손에 편 손가락 개수의 집합을 ‘손 상태’라 하자. 정의 2의 순서쌍을 이용해 표기할 수 있다.
- (3) 상황 : 한 회에 두 경기자가 각각 양손에 편 손가락 개수의 집합을 ‘상황’이라 하자. 정의 2처럼 하나의 상황은 일반적으로 $X(p_1, p_2), Y(q_1, q_2)$ 로 표현할 수 있다. 또, 한 상황에서 다른 상황이 되는 것을 게임이 진행되는 것으로 볼 수 있는데, 게임 도중에 이런 상황 변화가 몇 번 있었는지를 ‘시행횟수’로 표현하기로 한다. 게임이 시작하는 상황은 제 0회로 둔다.
- (4) 전략 : 경기자 X, Y 에 대해 공격자인 X 가 수비자 Y 에게 지지 않을 수 있는 실행 가능한 동작을 X 의 전략이라고 한다. 이때 ‘지지 않음’이 반드시 이김을 보장하진 않는다.
- (5) 필승, 필패 : 경기자 X, Y 에 대해 Y 가 어떤 동작을 해도 X 에게는 반드시 이기는 전략이 있는 상황을 X 가 필승한다고 한다. 또, X 가 어떤 동작을 해도 Y 가 필승이어서 이기는 전략을 취하면 반드시 X 가 지는 상황을 X 가 필패한다고 한다.
- (6) 비김, 루프 : 양쪽 경기자 모두에게 각각 지지 않는 전략이 있어서 이를 행했을 때 어느 때부터는 일련의 상황들을 반복하며 게임이 끝나지 않을 때 이를 비긴다고 하며, 이때 반복되는 일련의 상황들을 루프(Loop)라고 한다.

정의 5의 (1)에서 우리는 손가락 수를 일반화할 수 있게 되었다. 또한 정의 1, 2, 3, 4를 적용하여 특정 상황 $X(p_1, p_2) Y(q_1, q_2)$ 의 바로 다음 상황으로 가능한 것을 알아보았다.

성질 1. [규칙 2]에 의해, 공격자 X 는 자신의 한 손으로 Y 의 한 손을 치는 동작을 할 수 있다. 이 때 X 의 손은 변하지 않으며, Y 는 자신의 공격받은 손에서 X 가 공격하는 데 쓴 손가락의 개수만큼을 더 퍼져, n 개 이상을 펴야 하면 그 손의 손가락을 모두 접어야 하므로 이에 따라 Y 의 한 손은 변한다. 따라서 X 가 치는 동작을 할 경우 가능한 다음 상황은 아래와 같다.

$X(p_1, p_2), Y(p_1 \rightarrow q_1, q_2)$

(단, $p_1 q_1 \neq 0$)

$X(p_1, p_2), Y(q_1, p_1 \rightarrow q_2)$

(단, $p_1 q_2 \neq 0$)

$X(p_1, p_2), Y(p_2 \rightarrow q_1, q_2)$

(단, $p_2 q_1 \neq 0$)

$X(p_1, p_2), Y(q_1, p_2 \rightarrow q_2)$

(단, $p_2 q_2 \neq 0$)

(단, r, s 가 정수일 때, $r \rightarrow s = \begin{cases} r+s & (0 < r+s < n) \\ 0 & (r+s \geq n) \end{cases}$)

성질 2. [규칙 2]에 의해, 공격자 X 는 자신의 손을 쳐서 분할하는 동작을 할 수 있다. 이 때 Y 의 손은 변하지 않으며, 다만 X 의 양 손이 모두 바뀐다. 만약 X 의 양 손가락 수의 합이 n 보다 작으면 한 손의 손가락을 다른 쪽으로 얼마든지 옮길 수 있다. 하지만 양 손의 합이 n 이상이면 어느 한 손이 n 이상이 되도록 분할해서는 안 된다. 좌우 손이 바뀌어도 결국 같은 손 상태임을 감안하면 X 가 분할하는 동작을 할 때 가능한 다음 상황은 아래와 같다.

$X(p_1 + p_2, 0), Y(q_1, q_2)$

$X(p_1 + p_2 - 1, 1), Y(q_1, q_2)$

\vdots

$X\left(\left\lfloor \frac{p_1 + p_2}{2} \right\rfloor, \left\lfloor \frac{p_1 + p_2}{2} \right\rfloor\right), Y(q_1, q_2)$

① $p_1 + p_2 < n$ 일 때 :

$\left\lfloor x \right\rfloor = n, n \leq x < n + 1$ 일 때 $\left\lfloor x \right\rfloor = n$

$X(n - 1, n - 1 - (p_1 + p_2)), Y(q_1, q_2)$

$X(n - 2, n - 2 - (p_1 + p_2)), Y(q_1, q_2)$

\vdots

$X\left(\left\lfloor \frac{p_1 + p_2}{2} \right\rfloor, \left\lfloor \frac{p_1 + p_2}{2} \right\rfloor\right), Y(q_1, q_2)$

② $p_1 + p_2 \geq n$ 일 때 :

$\left\lfloor x \right\rfloor = n, n \leq x < n + 1$ 일 때 $\left\lfloor x \right\rfloor = n$

위의 성질로부터 반대로 그 이전 상황도 추측할 수 있으며, 위 성질과 정의들로부터 아래의 정리들을 증명하였다.

정리 1. 한 회 만에 게임이 끝날 수 있는 상황은 $A(p_1, p_2), D(q_1, 0)$ 로 유일하며, 이때 공격자의 전략은 $H_A[p_1, q_1]$ 이다. (단, p_1, p_2, q_1 은 $0 \leq p_1, p_2, q_1 \leq n - 1, p_1 + q_1 \geq n$ 인 정수).

[증명] 분명한 내용이므로 증명은 생략한다.

정리 2. 어떤 상황에서 만들 수 있는 다음 상황에서 공격자가 필승하면 그 전 상황의 공격자는 질 수도 있다. 즉, 두 경기자 X, Y 에 대해 X 가 필승하는 상황을 만들 수 있는 바로 직전 상황은 Y 가 패배하는 동작이 존재한다.

[증명]

<Table 2> An ended game by X 's winning.

시행 횟수	0	1	...	t	종료
동작		X 의 차례		X 의 차례	
X	(p_1, p_2)	(p_1', p_2')	...	(p_1^t, p_2^t)	X win
Y	(q_1, q_2)	(q_1', q_2')		$(0, 0)$	

<Table 2>에서 p_1^t 와 p_2^t 는 제 t 회에서 X 의 양 손에 있는 손가락 수를 나타낸다.

제 1회, $X(p_1', p_2'), Y(q_1', q_2')$ 에서 X 가 공격자이고 X 가 필승임을 가정하자. <Table 2>에 의하면 홀수 짝 회에서 X 의 공격차례이므로 짝수 짝 회에서 Y 의 공격차례이다. X 의 시행으로 $Y(0, 0)$ 가 되어야 하므로 $Y(0, 0)$ 가 됐을 때 Y 의 차례로 종료해야 하며, 즉 짝수 짝 회에서 종료해야 한다. 따라서 <Table 2>에서 t 는 짝수다.

제 0회에서 Y 가 공격자인데, Y 가 제 0회 상황 $X(p_1, p_2)$, $Y(q_1, q_2)$ 에서 제 1회 상황 $X(p_1', p_2')$, $Y(q_1', q_2')$ 을 만들 수 있다면 성질 1, 2에 의해 그러한 동작이 존재하여 Y 를 패배하게 만들 수 있다.

정리 3. 어떤 상황에서 만들 수 있는 다음 상황에서 공격자가 반드시 지면 그 전 상황의 공격자는 반드시 이긴다. 즉, 두 경기자 X , Y 에 대해 X 가 필패하는 상황을 만들 수 있는 바로 직전 상황은 Y 가 필승하는 상황이다.

[증명]

<Table 3> An ended game by X 's losing.

시행 횟수	0	1	...	t	종료
동작	X 의 차례			Y 의 차례	
X	(p_1, p_2)	(p_1', p_2')	...	$(0, 0)$	Y win
Y	(q_1, q_2)	(q_1', q_2')		(q_1^t, q_2^t)	

제 1회, $X(p_1', p_2')$, $Y(q_1', q_2')$ 에서 X 가 공격자이고 X 가 반드시 패배함을 가정하자. <Table 3>에 의하여 홀수 짝 회에서 X 의 차례이므로 짝수 짝 회에서 Y 의 차례이다. Y 의 시행으로 $X(0, 0)$ 가 되어야 하므로 $X(0, 0)$ 가 됐을 때 X 의 차례로 종료해야 하며, 즉 홀수 짝 회에서 종료해야 한다. 따라서 위 <Table 3>에서 t 는 홀수이다.

제 0회에서 Y 가 공격자인데, Y 가 제 0회 상황 $X(p_1, p_2)$, $Y(q_1, q_2)$ 에서 제 1회 상황 $X(p_1', p_2')$, $Y(q_1', q_2')$ 을 만들 수 있다면 성질 1, 2에 의해 그러한 동작이 전략으로 존재해서 Y 는 X 가 반드시 패배하고 Y 가 승리하게 만들 수 있다.

정리 4. 경기자의 손가락 개수가 (p_1, p_2) 일 때 두 손 모두 0이 아닌 손으로 분할할 수 없는 조건은 $p_1 + p_2 \geq 2n - 3$ 또는 $(p_1, p_2) = (1, 0), (1, 1), (2, 1)$ 일 때이다.

[증명]

- i) 양 손이 0이 아닌 손으로 분할할 수 없으므로 $p_1 + p_2 < 2$ 이면 자명하다. 따라서 $(p_1, p_2) = (1, 0)$ 일 때 성립한다.
- ii) 두 손 모두 0이 아닌 손으로 분할할 수 없는 것은 양 손 합이 현재와 같고 양 손이 0이 아니면서 현재 상태와 손 상태가 동일하지 않은 경우가 존재하지 않는다는 것이다.

우선 어느 손도 0이 반드시 될 수 없는 경우는 성질 1, 2에 의해 $p_1 + p_2 \geq n$ 일 때다. 또한 성질 2에서 볼 수 있는 X 가 가질 수 있는 손상태가 오로지 하나이려면 한 손이 최대일 경우와 한손이 최소인 경우가 동일해야 한다. 한 손이 최소인 경우가 동일해야 한다. 즉,

$$(n-1, n-1-(p_1+p_2)) = \left(\left\lceil \frac{p_1+p_2}{2} \right\rceil, \left\lfloor \frac{p_1+p_2}{2} \right\rfloor \right)$$

이어야 한다. 좌변에 의해 한 손(일반성을 잃지 않고, p_1)이 $n-1$ 이다. 이를 이용하면

$$(n-1, p_2) = \left(\left\lceil \frac{n-1+p_2}{2} \right\rceil, \left\lfloor \frac{n-1+p_2}{2} \right\rfloor \right)$$

이다. 따라서 $n-1 = \left\lceil \frac{n-1+p_2}{2} \right\rceil$ 이고, 식을 정리하면

$$\begin{aligned} n-1 &< \frac{n-1+p_2}{2} \leq n \\ n-3 &< p_2 \leq n-1 \end{aligned}$$

이다. 따라서 $(p_1, p_2) = (n-1, n-1), (n-1, n-2)$ 일 때 성립한다.

- iii) $2 \leq p_1 + p_2 < n$ 일 때도 마찬가지로 하자. 이 범위에서 한 손이 0이면 $X(p_1, 0)$ 이라서 $S_X(p_1-1, 1)$ 의 분할이 가능하므로 분할이 불가능하려면 한 손은 최소 1이다. 이때 성질 1에서 보인 X 가 가질 수 있는 손 상태가 오로지 하나라면

$$(p_1+p_2-1, 1) = \left(\left\lceil \frac{p_1+p_2}{2} \right\rceil, \left\lfloor \frac{p_1+p_2}{2} \right\rfloor \right)$$

이어야 한다. 좌변에 의해 한 손(일반성을 잃지 않고, p_2)이 1이다. 이를 이용하면

$$(p_1, 1) = \left(\left\lceil \frac{p_1+1}{2} \right\rceil, \left\lfloor \frac{p_1+1}{2} \right\rfloor \right)$$

이다. 따라서 $1 = \left\lfloor \frac{p_1+1}{2} \right\rfloor$ 이고, 식을 정리하면

$$\begin{aligned} 1 &\leq \frac{p_1+1}{2} < 2 \\ 1 &\leq p_1 < 3 \end{aligned}$$

이다. 따라서 $(p_1, p_2) = (1, 1), (2, 1)$ 일 때 성립한다.

3. 전략표(Strategy Table)²⁾의 작성

가. 전략표의 필요성과 읽는 방법

위에서 설명한 과정표를 이용하면 젓가락게임을 하는 두 경기자가 만들 수 있는 상황들을 시간 순으로 배열해서 이해하기 쉽고, 그러한 상황들을 원하면 얼마든지 기록할 수 있다.

<Table 4> An example of Process Table shows repeating situations.

시행 횟수	0(초기)	1	2	3	4	
동작	X 의 차례	$S_X[2, 0]$	$S_Y[2, 0]$	$S_X[1, 1]$	$S_Y[1, 1]$	
X	(1, 1)	(2, 0)	(2, 0)	(1, 1)	(1, 1)	4회는 0회와 같음, 계속 반복
Y	(1, 1)	(1, 1)	(2, 0)	(2, 0)	(1, 1)	

그러나 매 차례 경기자의 모든 행동을 표에 담는 것은 비효율적이며, <Table 4>에서 나온 것처럼 경기자들끼리 승패와는 상관없이 특정 상황들을 얼마든지 반복되도록 만들 수 있기 때문에 과정표만으로 전략적으로 가능한 상황 전개를 모두 표현하는 것은 무리다. 따라서 본 연구는 두 경기자가 각각 지지 않으려고 최대한 노력한다고 가정하고, 각각의 상황에서 승패여부와 함께 경기자가 전략적으로 어떻게 행동해야 할지 알려주는 ‘전략표(Strategy Table)’를 제작하였다. 전략표는 두 경기자가 할 수 있는 행동 중 최선의 경우를 나타내는 표이다. 가로축에는 현재 공격자의 손가락 상태를, 세로축에는 수비자의 손가락 상태를 표기하여 경기에서 벌어질 수 있는 모든 상황을 표현하였다.

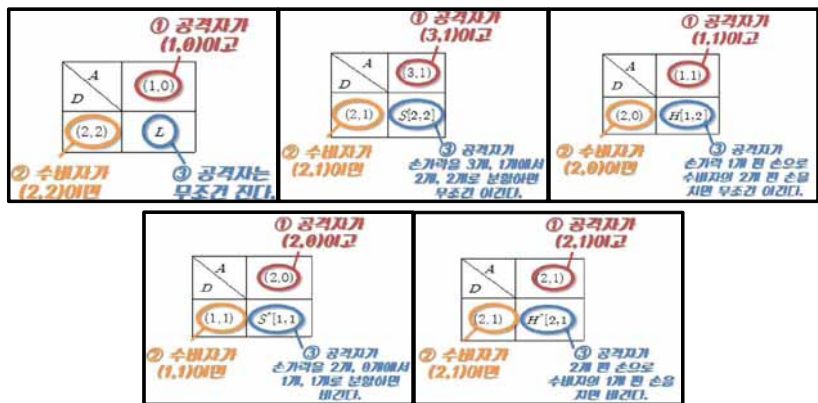
2) 원래 2016년 1월까지의 ‘필승표’라는 말을 대신 쓰고 있었으나 의미와 실제 기능의 부합 여부에 문제가 있는 것으로 판단해 2016년 2월 이후로 ‘전략표’라고 대체했다.

<Table 5> An Example of Strategy Table.

		A		
		(p_1, p_2)	(q_1, q_2)	(r_1, r_2)
D	(s_1, s_2)	$H[p_1, s_1]$	$H^*[q_1, s_2]$	L

<Table 5>는 전략표를 추상적으로 간략하게 해놓은 것이다.³⁾ 맨 왼쪽 위 칸의 A는 공격자(Attacker), D는 수비자(Defender)의 영어 머리글자를 딴 것이고, 1행은 공격자의 상태, 1열은 수비자의 상태를 뜻한다. 나머지 칸들은 1행과 1열을 축으로 하여 공격자의 상태와 수비자의 상태를 동시에 읽을 수 있으므로 하나의 상황을 의미한다. 2행의 2,3,4열은 그 상황에서 각각 공격자가 반드시 이기거나, 반드시 지거나, 비기는 것을 의미한다. 첫째로, $H[p, s]$, $S[p, s]$ 와 같은 기호는 공격자가 그러한 동작을 했을 때 반드시 이기는 것을 의미한다. 둘째, $H^*[q, s]$, $S^*[q, s]$ 와 같은 기호는 기존의 동작을 의미하는 기호에 별표(*) 위첨자를 쓴 것으로, 공격자가 그러한 동작을 했을 때 무승부로 만들 수 있으나 반드시 이기지는 않음을 의미한다. 마지막으로 L은 그 상황에서 공격자가 어떠한 동작을 취해도 반드시 패배함을 의미한다.

전략표를 쉽게 읽는 방법을 소개한 예시는 아래와 같다.



[Fig. 2] How to read Strategy Table.

나. 손가락 개수에 따른 전반적인 과정표와 전략표의 제작 알고리즘

손가락의 개수에 따라 생길 수 있는 각각의 상황들에 대해 전략을 기록한 전략표를 만들려면 우선 전략을 구해야 할 것이다. 따라서 우리는 각각의 상황들을 표의 칸으로 나타내는 것에서 시작해서, 손가락 개수 n 에 대해 각각의 상황에서 승패를 결정하고 전략을 알아내는 10단계의 알고리즘을 고안해냈다.

[단계 1] 공격자 A와 수비자 D의 양 손의 손가락 상태를 축으로 하는 표를 만든다. 각 축에는 $(1,0)$ 부터 $(n-1, n-1)$ 까지, 경기자가 가질 수 있는 손가락 상태를 모두 표현한다. 이 때 표에 있는 각각의 칸은 두 경기자의 손가락 상태를 한꺼번에 나타낼 수 있다. 즉, 게임 중간의 어떤 한 상황을 나타낸다 ([Fig. 3]).

[단계 2] 정리 1에 의해 한 회 만에 끝낼 수 있는 경우를 찾아 속이 빈 동그라미를 그리고 그 칸 왼쪽 위에 win을 뜻하는 W를 써둔다. 그렇지 않은 칸은 채워진 동그라미를 그려 대조시킨다. [Fig. 4]에서는 이해를 위해 임의로 가정된 속 빈 동그라미를 그렸다.

[단계 3] [Fig. 4]에 있는 임의의 칸에 대해, 성질 1,2 에 의해 가능한 다음 상황에는 어떤 것이 있는지 예측할 수 있다. 한 상황에서 다음 상황으로 갈 때 공격자와 수비자가 뒤바뀐다. 따라서 표에 있는 임의의 칸에서 나올 수 있는 상황에서 두 경기자가 뒤바뀐 것을 표시하는 또 다른 칸을 찾을 수 있다. 예를 들어, $X(1,0)$, $Y(1,0)$ 이고 X가 공격자이면 이를 $A(1,0)$, $D(1,0)$ 인 칸으로 볼 수 있다. 이 상황에서 X는 Y의 손가락이 펴진 손을 칠 수밖에 없으므로 가능한 다음 상황에는 $X(1,0)$, $Y(2,0)$ 가 있다. 이제 Y가 공격자이므로 우리는 이 상황을 $A(2,0)$, $D(1,0)$ 으로써 표에서 찾을 수 있다. 이러한 두 칸에 있는 동그라미를 전 상황에서 후 상황으로 화살표로 이어준다. 이와 같은 과정을 각각의 칸에서 실행한다. 단, [단계 2]에서 속이 빈 동그라미를 그린 칸은 필승 전략에 의한 다음 상황이 표에 존재하지 않으므로 그 칸에서 나가는 화살표를 그릴 필요가 없다. 즉, [Fig. 5]의 검은색 화살표는 그릴 필요 없다.

[단계 4] W표시가 적힌 칸으로 향하는 화살표는 x표를 해둔다. cf.) 정리 2, [Fig. 6]

[단계 5] 각 칸에서 나가는 화살표가 없거나, 나가는 모든 화살표가 x표가 된 칸은 그 칸의 왼쪽 위에 lose를 뜻하는 L을 쓴다. cf.) 정리 2, [Fig. 6]

[단계 6] L표시가 적힌 칸으로 향하는 화살표는 o표를 해둔다. cf.) 정리 3, [Fig. 6]

[단계 7] 각 칸에서 나가는 화살표 중 단 하나라도 o표가 있는 경우 그 칸의 왼쪽 위에 win을 뜻하는 W를 쓴다. cf.) 정리 3, [Fig. 6]

[단계 8] 4, 5, 6, 7의 과정을 더 이상 반복할 수 없을 때까지 반복한다. cf.) [Fig. 7]

[단계 9] L표시가 적힌 칸에서 나가는 화살표는 모두 남기고, W표시가 적힌 칸에서 나가는 화살표는 o표가 된 것만 남기고 다른 화살표는 모두 지운다. 단, L표도 W표도 없는 칸은 *표를 해두고(loop를 의미함), 화살표는 모두 남긴다. cf.) [Fig. 8]에서는 지워야 할 화살표가 없었다. [Fig. 8]에서 여전히 아무런 표시도 되어 있지 않은 칸은 그 칸에서 화살표를 그을 수 있는 칸이 그림에 표현되지 않았기 때문이다. 하지만 실제로 해보면, 아무런 화살표가 없는 칸은 존재할 수도 있다. [Fig. 9]는 [단계 1]부터 [단계 9]까지를 $n=3$ 에 대해 직접 그려 놓은 것이고, [Fig. 9]의 빨간색 화살표는 전략적으로 행동할 때 가능한 칸의 이동을, 초록색 화살표는 전략을 고려하지 않았을 때도 가능한 칸의 이동을 표현한 것이다.

[단계 10] 화살표를 따라 진행되는 게임을 과정표로 작성한다. [Fig. 10]과 같은 양식의 표를 준비한다. [단계 9]에서 L표시가 된 칸은 똑같이 L표시를 하고, W표시가 된 칸은 o표가 된 화살표로 가는 동작을 기록한다. 또 L표도 W표도 없는 칸은 x표가 되지 않은 화살표를 따라 가는 동작을 기록한다. 단, H 또는 S에 위첨자로 *를 쓴다. 속이 빈 동그라미가 있는 칸은 정리 1에 의해 한 회 만에 끝낼 수 있는 동작을 적어야 한다. cf.) [Fig. 10]에서 ‘-’는 모든 칸이 그려지지 않은 탓에 제외된 칸이다. 실제로 이런 칸은 없다.

3) <Table 5>는 전략표의 틀이 한 번 수정된 모습이다. [Fig. 2] 등에서 수정되기 전의 모습을 볼 수 있는데, 표를 읽는 방법은 수정 전과 후가 비슷하다.

$\begin{matrix} A \\ D \end{matrix}$	(1,0)	(1,1)	(2,0)	
(1,0)				...
(1,1)				
(2,0)				
	⋮			

[Fig. 3] A table with finger state of Attacker/Defender.

$\begin{matrix} A \\ D \end{matrix}$	(1,0)	(1,1)	(2,0)	
(1,0)	●	●	●	...
(1,1)	●	●	●	
(2,0)	●	●	○	
	⋮			

[Fig. 4] Marking situations with hollow or solid circles.

$\begin{matrix} A \\ D \end{matrix}$	(1,0)	(1,1)	(2,0)	
(1,0)	●	●	●	...
(1,1)	●	●	●	
(2,0)	●	●	○	
	⋮			

[Fig. 5] Making developments of game situations with arrows.

$\begin{matrix} A \\ D \end{matrix}$	(1,0)	(1,1)	(2,0)	
(1,0)	●	●	●	...
(1,1)	●	●	●	
(2,0)	●	●	○	
	⋮			

[Fig. 6] Back-tracking arrows to judge win or lose.

$\begin{matrix} A \\ D \end{matrix}$	(1,0)	(1,1)	(2,0)	
(1,0)	●	●	●	...
(1,1)	●	●	●	
(2,0)	●	●	○	
	⋮			

[Fig. 7] End of Back-tracking.

$\begin{matrix} A \\ D \end{matrix}$	(1,0)	(1,1)	(2,0)	
(1,0)	●	●	●	...
(1,1)	●	●	●	
(2,0)	●	●	○	
	⋮			

[Fig. 8] Marking drawn situation with asterisk.

$\begin{matrix} A \\ D \end{matrix}$	(1,0)	(1,1)	(2,0)	(2,1)	(2,2)
(1,0)	●	●	●	●	●
(1,1)	●	●	●	●	●
(2,0)	●	●	●	●	●
(2,1)	●	●	●	●	●
(2,2)	●	●	●	●	●

[Fig. 9] Finished table as $n = 3$.

$\begin{matrix} A \\ D \end{matrix}$	(1,0)	(1,1)	(2,0)	
(1,0)	$H^*[1,1]$	$S[2,0]$	$S^*[1,1]$	
(1,1)	-	$S[2,0]$	L	...
(2,0)	-	L	$H[2,2]$	
	⋮			

[Fig. 10] A completed example of Strategy Table.

다. 손가락의 개수를 다르게 했을 때의 과정표와 전략표

우리는 $n = 5$ 일 때의 전략이 상황별로 어떻게 나타나는지 그 규칙을 관찰하기 위해, 손가락 개수를 5개보다 적게 했을 때는 어떻게 과정표를 일일이 그려가며 모든 경우의 수를 따져서 알아보았다. 또한 위에서 소개한 알고리즘으로 검증하였다.

전략표를 작성할 때 몇 가지 규칙을 지켰다. 첫째, 정리 1에 의해 공격자가 한 회 만에 이길 수 있는 상황에서는 분할(Split)을 해서 이길 수 있어도 굳이 분할이 필요치 않으므로, $n - 1$ 개 손가락을 편 손으로 수비자의 손을 치는 경우만 칸에 적는다. 둘째, 한 상황에서 공격자가 할 수 있는 어떤 다른 두 가지 동작이(서로 다른 손으로 같은 손을 치는 동작처럼) 똑같은 그 다음 상황을 야기하면 같은 것으로 보고, 한 칸에 모두 적지는 않고 하나만 적는다. 예를 들어 $n = 4$ 일 때 $A(3,2), D(2,2)$ 이면 공격자는 $H[3,2]$ 또는 $H[2,2]$ 의 동작을 취하면 필승인데, 이 둘은 모두 D 가 $(2,0)$ 이 되는 동작이므로 $H[3,2]$ 만을 적어야 한다.

자세한 과정표는 생략하며, 우리가 찾아낸 $n = 2, 3, 4, 5$ 일 때의 전략표는 다음과 같다.

1) $n = 2$ 일 때 전략표

<Table 6> Strategy Table on $n = 2$.

$\begin{matrix} A \\ D \end{matrix}$	A	
	(1,0)	(1,1)
(1,0)	$H[1,1]$	$H[1,1]$
(1,1)	L	$H[1,1]$

2) $n = 3$ 일 때 전략표

<Table 7> Strategy Table on $n = 3$.

$\begin{matrix} A \\ D \end{matrix}$	A				
	(1,0)	(1,1)	(2,0)	(2,1)	(2,2)
(1,0)	L	$H^*[1,1]$	$H[2,1]$	$H[2,1]$	$H[2,1]$
(1,1)	L	$H^*[1,1]$	$S^*[1,1]$	$H^*[1,1]$	$H[2,1]$
(2,0)	$H[1,2]$	$H[1,2]$	$H[2,2]$	$H[2,2]$	$H[2,2]$
(2,1)	$H[1,2]$	$H[1,2]$	$S^*[1,1]$	$H^*[2,1]$	$H[2,1], H[2,2]$
(2,2)	L	$H^*[1,2]$	L	$H^*[2,2]$	$H[2,2]$

3) $n = 4$ 일 때 전략표

<Table 8> Strategy Table on $n = 4$.

$\begin{matrix} A \\ D \end{matrix}$	A							
	(1,0)	(1,1)	(2,0)	(2,1)	(2,2)	(3,0)	(3,1)	(3,2)
(1,0)	L	$S[2,0], H[1,1]$	$S[1,1]$	$H[2,1]$	$H[2,1]$	$H[3,1]$	$H[3,1]$	$H[3,1]$
(1,1)	L	$H[1,1]$	L	L	$H^*[2,1]$	$S^*[2,1]$	$S[2,2]$	$H[3,1]$
(2,0)	L	$H^*[1,2]$	$H[2,2]$	$H[2,2]$	$H[2,2]$	$H[3,2]$	$H[3,2]$	$H[3,2]$
(2,1)	L	$H^*[1,1]$	$H[2,2], S[1,1]$	$H[2,2]$	$H[2,2]$	L	$S[2,2]$	$H[3,2], H[3,1]$
(2,2)	L	L	$S^*[1,1]$	L	$H^*[2,2]$	L	$S^*[2,2]$	$H[3,2]$
(3,0)	$H[1,3]$	$H[1,3]$	$H[2,3]$	$H[2,3]$	$H[2,3]$	$H[3,3]$	$H[3,3]$	$H[3,3]$
(3,1)	$H[1,3]$	$H[1,3]$	$H[2,3]$	$H[2,3]$	$H[2,3]$	L	$H[3,1]$	$H[3,3], H[3,1]$
(3,2)	L	$H[1,3]$	L	$H[2,2]$	$H[2,2]$	L	$H[3,2]$	$H[3,3], H[3,2]$
(3,3)	L	$H^*[1,3]$	L	$H[2,3]$	$H[2,3]$	L	$H[3,3]$	$H[3,3]$

위에서 소개한, [단계 10]에서 만들어낸 [Fig. 10]의 표는 공격자가 자신과 수비자의 손 상태에 따라서 어떤 전략을 취해야 하는지 알려준다.

4) $n = 5$ 일 때 전략표

<Table 9> Strategy Table on $n = 5$.

		\mathcal{A}													
		(1,0)	(1,1)	(2,0)	(2,1)	(2,2)	(3,0)	(3,1)	(3,2)	(3,3)	(4,0)	(4,1)	(4,2)	(4,3)	(4,4)
D	(1,0)	L	$S[2,0]$	$S[1,1]$	$\begin{smallmatrix} S[3,0] \\ H[1,1] \end{smallmatrix}$	$\begin{smallmatrix} S[3,1] \\ H[2,1] \end{smallmatrix}$	$S[1,2]$	$S[2,2]$	$H[2,1]$	$\begin{smallmatrix} S[4,2] \\ H[3,1] \end{smallmatrix}$	$H[4,1]$	$H[4,1]$	$H[4,1]$	$H[4,1]$	$H[4,1]$
	(1,0)	L	L	$S[1,1]$	$S[3,0]$	$S[1,3]$	L	$H[3,1]$	$H[3,1]$	$\begin{smallmatrix} H[3,1] \\ S[4,2] \end{smallmatrix}$	$S[3,1]$	$S[3,2]$	$\begin{smallmatrix} H[4,1] \\ S[3,3] \end{smallmatrix}$	$\begin{smallmatrix} H[4,1] \\ H[3,1] \end{smallmatrix}$	$H[4,1]$
	(1,0)	L	$\begin{smallmatrix} H[1,2] \\ S[2,0] \end{smallmatrix}$	L	L	$H^*[2,2]$	$H[3,2]$	$H[3,2]$	$H[3,2]$	$H[3,2]$	$H[4,2]$	$H[4,2]$	$H[4,2]$	$H[4,2]$	$H[4,2]$
	(2,1)	L	$S[2,0]$	L	$\begin{smallmatrix} H[2,2] \\ H[2,1] \end{smallmatrix}$	$H[2,2]$	$H[3,2]$	$\begin{smallmatrix} H[3,2] \\ S[2,2] \end{smallmatrix}$	$\begin{smallmatrix} H[3,2] \\ H[2,2] \end{smallmatrix}$	$H[3,2]$	$S[2,2]$	L	$\begin{smallmatrix} S[3,3] \\ H[4,2] \\ H[2,2] \\ H[4,2] \\ H[2,1] \end{smallmatrix}$	$\begin{smallmatrix} H[4,1] \\ H[4,2] \end{smallmatrix}$	$\begin{smallmatrix} H[4,1] \\ H[4,2] \end{smallmatrix}$
	(2,2)	L	$S^*[2,0]$	L	L	$H^*[2,2]$	L	$S^*[2,2]$	L	$H[3,2]$	$S^*[2,2]$	L	$H^*[2,2]$	$H[4,2]$	$H[4,2]$
	(3,0)	L	L	$H[2,3]$	$H[2,3]$	$H[2,3]$	$H[3,3]$	$H[3,3]$	$H[2,3]$	$H[3,3]$	$H[4,3]$	$H[4,3]$	$H[4,3]$	$H[4,3]$	$H[4,3]$
	(3,1)	L	L	$H[2,3]$	$\begin{smallmatrix} H[2,3] \\ H[1,3] \end{smallmatrix}$	$H[2,3]$	$H[3,3]$	$\begin{smallmatrix} H[3,3] \\ H[1,3] \end{smallmatrix}$	$H[3,3]$	$H[3,3]$	$S^*[2,2]$	L	$\begin{smallmatrix} S[3,3] \\ H[4,3] \\ H[4,1] \end{smallmatrix}$	$\begin{smallmatrix} H[4,3] \\ H[4,1] \end{smallmatrix}$	$\begin{smallmatrix} H[4,3] \\ H[4,1] \end{smallmatrix}$
	(3,2)	L	L	$H[2,3]$	$H[2,3]$	$H[2,3]$	L	$S[2,2]$	$H[3,2]$	$\begin{smallmatrix} H[3,3] \\ H[3,2] \\ S[4,2] \end{smallmatrix}$	$S[2,2]$	L	$H[4,2]$	$\begin{smallmatrix} H[4,3] \\ H[4,2] \end{smallmatrix}$	$\begin{smallmatrix} H[4,3] \\ H[4,2] \end{smallmatrix}$
	(3,3)	L	L	L	L	$H[2,3]$	L	L	$H[3,3]$	$H[3,3]$	L	L	$H[4,3]$	$H[4,3]$	$H[4,3]$
	(4,0)	$H[1,4]$	$H[1,4]$	$H[2,4]$	$H[2,4]$	$H[2,4]$	$H[3,4]$	$H[3,4]$	$H[3,4]$	$H[3,4]$	$H[4,4]$	$H[4,4]$	$H[4,4]$	$H[4,4]$	$H[4,4]$
	(4,1)	$H[1,4]$	$H[1,4]$	$H[2,4]$	$H[2,4]$	$\begin{smallmatrix} H[2,4] \\ S[3,1] \end{smallmatrix}$	$\begin{smallmatrix} H[3,4] \\ S[2,1] \end{smallmatrix}$	$\begin{smallmatrix} H[1,4] \\ S[2,2] \end{smallmatrix}$	$H[2,4]$	$\begin{smallmatrix} H[3,4] \\ S[4,2] \end{smallmatrix}$	$\begin{smallmatrix} S[2,2] \\ S[3,1] \end{smallmatrix}$	$S[3,2]$	$\begin{smallmatrix} H[4,4] \\ S[3,3] \end{smallmatrix}$	$\begin{smallmatrix} H[4,4] \\ H[4,1] \end{smallmatrix}$	$\begin{smallmatrix} H[4,4] \\ H[4,1] \end{smallmatrix}$
	(4,2)	L	L	$H[2,4]$	$H[2,4]$	$H[2,4]$	L	$\begin{smallmatrix} S^*[2,2] \\ H^*[3,2] \end{smallmatrix}$	L	$\begin{smallmatrix} H[3,4] \\ H[3,2] \end{smallmatrix}$	$S^*[2,2]$	L	$H^*[4,2]$	$\begin{smallmatrix} H[4,4] \\ H[4,2] \end{smallmatrix}$	$\begin{smallmatrix} H[4,4] \\ H[4,2] \end{smallmatrix}$
	(4,3)	L	$H[1,4]$	L	L	$H[2,4]$	L	$H^*[3,3]$	$H[2,4]$	$\begin{smallmatrix} H[3,4] \\ H[3,3] \end{smallmatrix}$	L	L	$H[4,4]$	$\begin{smallmatrix} H[4,4] \\ H[4,3] \end{smallmatrix}$	$\begin{smallmatrix} H[4,4] \\ H[4,3] \end{smallmatrix}$
	(4,4)	L	L	L	L	$H^*[2,4]$	L	$H^*[3,4]$	L	$H[3,4]$	L	L	$H^*[4,4]$	$H[4,4]$	$H[4,4]$

4. 전략표의 일반화와 해석

가. 프로그래밍을 통한 일반화된 전략표의 도출

우리는 3-[나. 손가락 개수에 따른 전반적인 과정표와 전략표의 제작 알고리즘]에 기반하여 프로그래밍을 통해 경기자가 가질 수 있는 최대 손가락의 개수를 달리했을 때의 일반화된 전략표를 얻고자 했다. 우리는 몇 가지 작은 목적을 세워 두 개의 코드를 작성했다.

컴퓨터 프로그래밍 언어 c++를 이용할 때, 가지고 있는 데이터를 효율적으로 저장하는 것이 필요하다. 그래서 우선 젓가락게임을 하면서 나올 수 있는 모든 상황을 음이 아닌 정수에 일대일 대응시킬 방법이

필요했다. 따라서 우리는 전략표의 형식을 이용해서 공격자와 수비자의 손 상태를 한꺼번에 음이 아닌 정수와 일대일 대응시켰다.

D \ A	(1,0)	(1,1)	(2,0)	(2,1)	(2,2)
(1,0)	0	1	2	3	4
(1,1)	5	6	7	8	9
(2,0)	10	11	12	13	14
⋮					

[Fig. 11] One to one correspondence between situations and whole number.

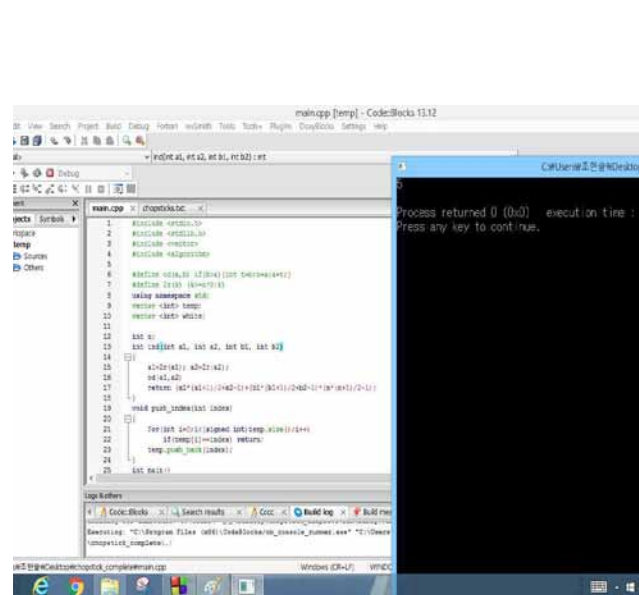
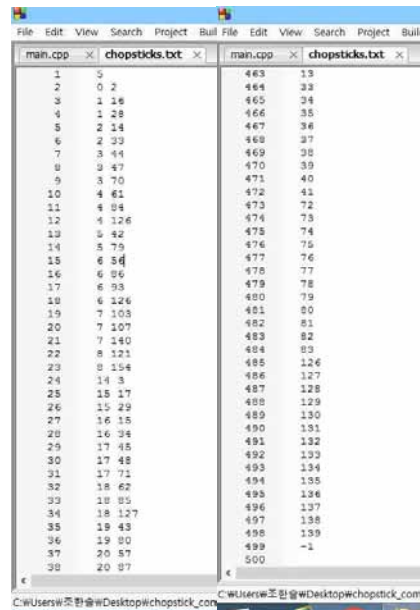
즉, 전략표의 전략이 들어가는 자리에 왼쪽 위부터, 음이 아닌 정수를 0부터 크기순으로 하나씩 배치하여 대응시켰다. 이처럼 대응시키려면, $p_1 \geq p_2$, $q_1 \geq q_2$ 일 때 공격자와 수비자의 손 상태의 모임 $A(p_1, p_2), D(q_1, q_2)$ 는 $\left(\frac{p_1(p_1+1)}{2} + p_2 - 1\right) + \left(\frac{q_1(q_1+1)}{2} + q_2 - 1\right) \left(\frac{n(n+1)}{2} - 1\right)$ 에 대응시켜야 함을 알았다. 이처럼 각각의 상황을 음이 아닌 정수에 대응시키면 1차원 자료구조에 저장하기가 쉬워진다.

다음으로 해야 할 일은 3-[나. 손가락 개수에 따른 전반적인 과정표와 전략표의 제작 알고리즘]에서 소개한 ‘화살표’와 ‘속이 빈 동그라미’의 개념을 만드는 것이다. 즉, 정의 5에서 정의된 손가락 수 n 과 젓가락게임에서 발생할 수 있는 모든 상황들에 대해, 공격자의 공격에 의해 만들어질 수 있는 다음 상황을 공수가 바뀔을 고려하여 모두 알아내야 했다. 또한 n 에 대해 정리 1에 의해서 승패 여부가 확실한 상황을 모두 알아내야 했다. 이와 같은 목적을 달성하기 위해 첫째 코드를 구상했다.

첫째 코드는 이 링크 주소⁴⁾에 있는 ‘c++chop.cpp’ 파일로 만들어두었다. 이 코드는 공격자와 수비자의 손 상태를 각각 (1,0)부터 $(n-1, n-1)$ 까지 반복하며 가능한 다음 상황을 검사하고 있다. 이때 1차원 자료구조로 값이나 요소를 연속된 메모리에 보관하며 값의 추가와 삭제가 자유롭고 요소의 개수를 선언할 필요가 없는 자료구조인 ‘vector’를 사용하였다. ‘temp’라는 vector는 어떤 상황에 대해 갈 수 있는 다음 상황에 대응되는 정수를 크기순으로 저장하여 [단계 3]의 화살표 역할을 하고, ‘white’라는 vector는 어떤 상황이 정리 1에 의해 바로 끝날 수 있는 상황인지 판단되면 그에 대응되는 정수를 저장해두어서 [단계 2]의 속이 빈 동그라미 역할을 한다. 코드 내의 본체 함수 ‘main’에는 각각의 상황에 대해 바로 끝날 수 있는 상황인지, 아니라면 가능한 그 다음 상황에 있는지 무엇인지 판단하는 기능을 넣었고, 이 외에도 공격자의 공격 등으로 인해 변환 손 상태를 더 큰 손이 왼쪽으로 오도록 자리를 바꾸어주는 함수 ‘od’와, n 보다 큰 손이 나타나면 그 손의 값을 0으로 만들어주는 함수 ‘Zr’, 상황이 주어지면 그와 대응되는 정수를 반환해주는 함수 ‘ind’, 어떤 값이 vector 저장소 temp에 이미 있는지 탐색해서 없으면 그 값을 temp에 추가해주는 함수 ‘push_index’를 같이 정의해두었다.

위의 코드를 컴퓨터 프로그래밍 언어의 작성과 구동을 위한 ‘Code::blocks’라는 프로그램을 이용해 실행해 본 결과는 아래 사진과 같다.

4) <https://drive.google.com/folderview?id=0B2zdSBRXnNy0WUVPX0VwVE11dlk&usp=sharing> : 프로그래밍한 코드와 이를 컴파일링한 응용프로그램을 같이 공유해놓았다. 링크가 있으면 들어갈 수 있다.

[Fig. 12] First code with Codeblocks and inputting $n = 5$.

[Fig. 13] Output of first code.

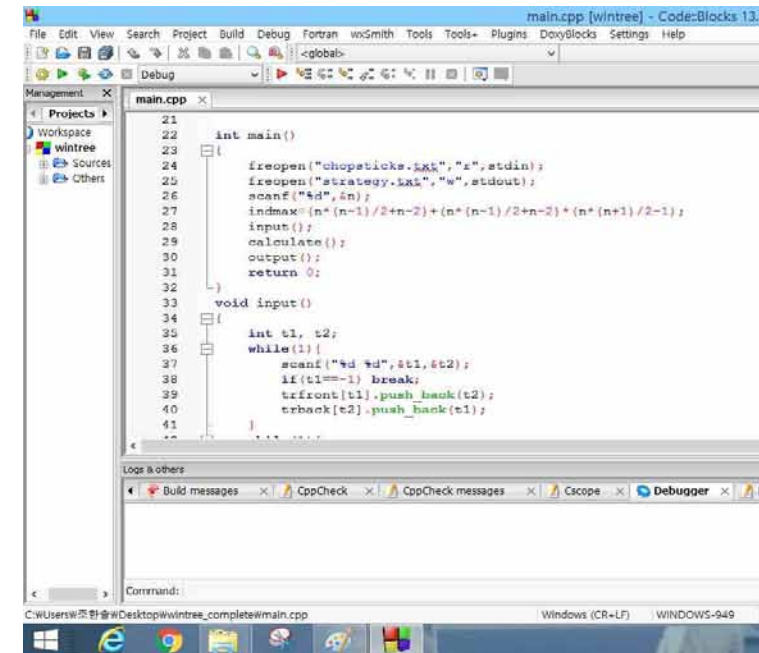
[Fig. 13]에서 왼쪽은 현재 상황(왼쪽 세로줄)에서 갈수 있는 다음 상황(오른쪽 세로줄)을 (일부)출력한 것이고, 오른쪽은 한 회 만에 끝날 수 있는 상황들을 (일부)출력한 것이다.

위의 프로그램 코드로 우리는 임의의 정수 n 에 대해 벌어질 수 있는 모든 상황 전개를 표현했다. 즉, 3-[나. 손가락 개수에 따른 전반적인 과정표와 전략표의 제작 알고리즘]의 [단계 3]까지 완료했다. 이어서, 나머지 단계를 위한 둘째 코드를 구상했다.

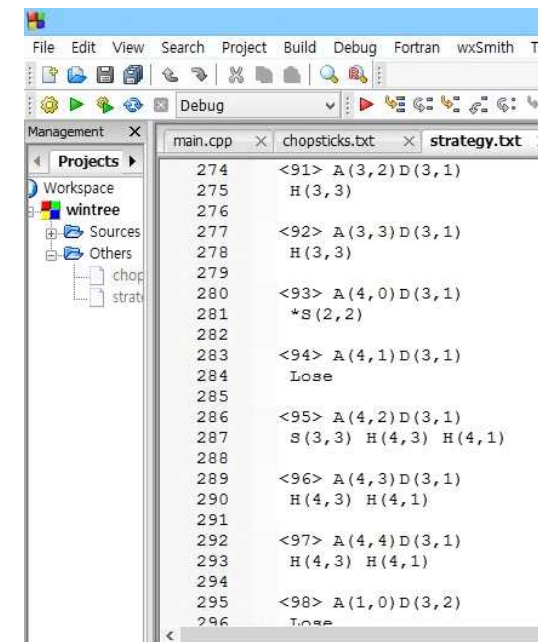
둘째 코드는 이 링크 주소⁵⁾에 있는 'c++chop2.cpp' 파일로 만들었다. 이 코드는 이 앞에서 알아낸 가능한 다음 상황들 중에서 어떤 상황으로 가야 지지 않는지 찾아내서 모든 각각의 상황에 대해 출력한다. 필패하는 상황이면 Lose, 필승 또는 비기는 상황이면 취해야 할 동작들을 전체 출력해준다. 단, 다른 동작인 것처럼 보이지만 같은 결과를 보이면 중복을 피해 한 가지 동작만 출력하도록 했다.

이 코드에서는 1차원 자료구조로 스택(stack)과 큐(queue)의 특징을 모두 가지고 있어서 자료구조 양 말단에서 데이터의 첨가와 삭제가 편리한 덱(deque), 이외에도 2차원 vector, int형 배열, bool배열을 사용하였다. Deque에 저장하는 데이터는 모두 pair의 형태인데, 이는 한 자리에 연관된 데이터 두 개를 동시에 저장하는 형태다. 주요 저장소를 몇 가지 소개하자면 2차원 vector인 'trback'과 'trfront'는 각각 어느 상황으로 올 수 있는 직전 상황과 어느 상황에서 갈 수 있는 다음 상황을 대응되는 정수로 저장하는 곳이다. 또 deque 저장소 bfsq는 각각의 상황과 승패여부의 가능성을 한꺼번에 저장했다가 승패여부가 확실해지면 빠져나가는 곳인데, 우리는 이것을 이용하여 너비우선탐색(BFS: Breadth-First Search) 기반의 코드를 작성할 수 있었다.

위의 코드를 'Code::blocks' 프로그램을 이용해 실행해 본 결과는 다음과 같다.



[Fig. 14] Second Code with Codeblocks.



[Fig. 15] A part of Output of second code.

5) <https://drive.google.com/folderview?id=0B2zdSBRXnNy0WUVPX0VwVE11dlk&usp=sharing> : 앞에서 제시한 링크와 동일하다.

The figure displays 18 notepad windows, each showing a list of game states and their outcomes for a specific strategy. The strategies are numbered from 1 to 18, and the game states are listed in a structured format. The outcomes are categorized as 'Win', 'Lose', or 'Draw'.

[Fig. 16] Whole Output of second as $n = 5$ on notepad.

나. 일반화된 전략표를 위한 정리

우리는 ‘가’에서 프로그래밍을 통해 경기자가 가질 수 있는 최대 손가락의 개수를 달리했을 때 전략표를 얻고자 했다. 그러나 모든 경우를 일일이 프로그래밍으로 출력하기에는 손가락 수 n 이 늘어날 때마다 시행시간이 기하급수적으로 늘어났다. 따라서 시행시간을 줄이기 위해 특정 경우에서 무조건 성립하는 다양한 전략을 증명할 필요를 느꼈고, 찾아낸 칸들을 이용하여 귀납적으로 전략표에 남아있는 칸들의 최선의 전략들을 도출하고자 하였다. 따라서 우리는 귀납적으로 칸을 정의하기 위해 규칙성이 보이는 특정 상황들의 결과를 예측한 후 증명을 통해 이것이 타당함을 보였고 이것을 다음과 같이 증명한다.

정리 5. $n \geq 4$ 일 때, 공격자와 수비자의 손가락 상태가 각각 $A(p_1, p_2)$, $D(1, 0)$ 이고 p_1, p_2 가 $n-1 \geq p_1 \geq p_2 \geq 0$, $(p_1, p_2) \neq (1, 0)$ 인 정수이면 공격자 A 는 반드시 필승이다.

[증명]

$A(p_1, p_2)$, $D(1, 0)$ 일 때, 경기자 X, Y 에 대해 공격자를 X , 수비자를 Y 라고 하자. 즉, 처음에는 $X=A$, $Y=B$ 이다. 이때를 0회(초기)로 두자. $n \geq 4$ 이면 X 의 손 상태는 다음 중 어딘가에 반드시 포함된다.

- X 의 한 손이 $p_1 = (n-1)$ 일 때, 정리 1에 의해 X 는 $H_X[n-1, 1]$ 의 동작을 해서 한 단계 만에 이길 수 있다. $p_1 + p_2 = 2n-3$, $p_1 + p_2 = 2n-2$ 인 경우가 반드시 한 손이 $n-1$ 이므로 포함된다.
- X 가 $S_X[p_3, p_4]$ ($p_3 p_4 \neq 0$)의 동작을 할 수 없을 경우를 보면 정리 4에 의해 $p_1 + p_2 \geq 2$ 에서는 $(1, 1)$, $(2, 1)$ 일 때밖에 없다.

① $n \geq 4$ 일 때 $(p_1, p_2) = (1, 1)$ 라고 하자. 이때 X 는 $S_X[2, 0]$ 의 동작을 하면 된다. 이때 Y 가 할 수 있는 동작은 $H_Y[1, 2]$ 뿐이다. 다음의 과정을 따라 X 는 필승한다. 1회 상황에서 Y 가 $H_Y[1, 2]$ 의 동작을 할 때 2회에서 X 는 $(3, 0)$ 이 되고, $n=4$ 일 때는 i)에 포함되므로 X 필승. 또 $S_X[2, 1]$ 의 분할이 가능해서 $n \geq 5$ 일 때는 iv)에 포함되므로 X 는 필승한다(<Table 10>).

<Table 10> Winning strategy in ii) of $X(1, 1)$ while $n \geq 4$

시행 횟수	0(초기)	1	2	...	종료
동작	X 의 차례	$S_X[2, 0]$	$H_Y[1, 2]$	2회 이후는 iv)에 포함됨	X win
X	(1, 1)	(2, 0)	(3, 0)		
Y	(1, 0)	(1, 0)	(1, 0)		

② $n \geq 5$ 일 때 $(p_1, p_2) = (2, 1)$ 라고 하자. 그럼 이때는 $S_X[3, 0]$ 의 동작을 하면 된다. 이때 Y 가 할 수 있는 동작은 $H_Y[1, 3]$ 뿐이다. 다음의 과정과 같이 X 는 필승이다. 1회 상황에서 Y 가 $H_Y[1, 3]$ 의 동작을 할 때 2회에서 X 는 $(4, 0)$ 이 되고, $n=5$ 일 때는 i)에 포함되므로 X 필승. 또 $S_X[3, 1]$ 등의 분할이 가능해서 $n \geq 6$ 일 때는 iv)에 포함되므로 X 는 필승한다(<Table 11>).

<Table 11> Winning strategy in ii) of $X(2,1)$ while $n \geq 5$

시행 횟수	0(초기)	1	2	...	종료
동작	X 의 차례	$S_X[3,0]$	$H_Y[1,3]$	2회 이후는 iv)에 포함됨	X win
X	(2,1)	(3,0)	(4,0)		
Y	(1,0)	(1,0)	(1,0)		

iii) X 가 할 수 있는 분할이 $S[n-1,1]$ 또는 $S[n-1,0]$ 밖에 없는 경우를 정리 4에서 사용한 방법을 이용해 찾아보면 $n=4$ 일 때 (2,1), (2,2), $n=5$ 일 때 (3,2)인 경우뿐이다.

① $n=4$, $X(2,1)$ 라고 하자. 그러면 공격자 X 는 $H_X[2,1]$ 의 동작을 하면 된다. 이때 Y 가 할 수 있는 동작은 $H_Y[3,2]$, $H_Y[3,1]$, $S_Y[2,1]$ 뿐이므로 다음의 과정과 같이 X 는 필승이다.

a) 1회에서 Y 가 $H_Y[3,2]$ 의 동작을 하면 $X(1,0)$ 이 되므로 정리 1에 의해 X 는 필승한다.

<Table 12> Winning strategy in iii) ① of X after Y attempts $H_Y[3,2]$ in (attempting number) 1st.

시행 횟수	0(초기)	1	2	3	종료
동작	X 의 차례	$H_X[2,1]$	$H_Y[3,2]$	$H_X[1,3]$	X win
X	(2,1)	(2,1)	(1,0)	(1,0)	
Y	(1,0)	(3,0)	(3,0)	(0,0)	

b) 1회에서 Y 가 $H_Y[3,1]$ 의 동작을 하면 $X(2,0)$ 이 되므로 정리 1에 의해 X 는 필승한다.

<Table 13> Winning strategy in iii) ① of X after Y attempts $H_Y[3,1]$ in (attempting number) 1st.

시행 횟수	0(초기)	1	2	3	종료
동작	X 의 차례	$H_X[2,1]$	$H_Y[3,1]$	$H_X[2,3]$	X win
X	(2,1)	(2,1)	(2,0)	(1,0)	
Y	(1,0)	(3,0)	(3,0)	(0,0)	

c) 1회에서 Y 가 $S_Y[2,1]$ 의 동작을 하면 X 는 $H_X[2,2]$ 의 동작을 하면 된다. 이때 $Y(1,0)$ 가 되는데, 3회에서 Y 가 할 수 있는 동작은 $H_Y[1,2]$, $H_Y[1,1]$ 뿐이며, 4회에서 X 는 (3,1) 또는 (2,2)가 된다.

c) - 1) 3회에서 Y 가 $H_Y[1,2]$ 의 동작을 하면 $X(3,1)$ 이 되므로 정리 1에 의해 X 는 필승한다.

<Table 14> Winning strategy in iii) ① of X after Y attempts $H_Y[1,2]$ in (attempting number) 3rd.

시행 횟수	0(초기)	1	2	3	4	5	종료
동작	X 의 차례	$H_X[2,1]$	$S_Y[2,1]$	$H_X[2,2]$	$H_Y[1,2]$	$H_X[3,1]$	X win
X	(2,1)	(2,1)	(2,1)	(2,1)	(3,1)	(3,1)	
Y	(1,0)	(3,0)	(2,1)	(1,0)	(1,0)	(0,0)	

c) - 2) 3회에서 Y 가 $H_Y[1,1]$ 의 동작을 하면 iv)과 동일하므로 X 는 필승한다.

<Table 15> Winning strategy in iii) ① of X after Y attempts $H_Y[1,1]$ in (attempting number) 3rd.

시행 횟수	3	4	...	종료
동작	위 표의 3회와 동일	$H_Y[1,1]$	4회는 iv)의 상황과 동일함	X win
X		(2,2)		
Y		(1,0)		

② $n=4$, $X(2,2)$ 라고 하자. 공격자 X 는 $H_X[2,1]$ 의 동작을 취하면 된다. 이때 Y 가 할 수 있는 동작은 $H_Y[3,2]$, $S_Y[2,1]$ 뿐이므로 다음의 과정과 같이 X 는 필승이다.

a) 1회에서 Y 가 $H_Y[3,2]$ 의 동작을 하면 $X(2,0)$ 이 되므로 X 는 정리 1에 의해 필승한다.

<Table 16> Winning strategy in iii) ② of X after Y attempts $H_Y[3,2]$ in (attempting number) 1st.

시행 횟수	0(초기)	1	2	3	종료
동작	X 의 차례	$H_X[2,1]$	$H_Y[3,2]$	$H_X[2,3]$	X win
X	(2,2)	(2,2)	(2,0)	(2,0)	
Y	(1,0)	(3,0)	(3,0)	(0,0)	

b) 1회에서 Y 가 $S_Y[2,1]$ 의 동작을 했을 때 X 는 $H_X[2,2]$ 의 동작을 하면 된다. 이때 Y 는 (1,0)가 되는데 3회에서 Y 가 할 수 있는 동작은 $H_Y[1,2]$ 뿐이다. 그럼 X 는 (3,2)가 되므로 X 는 필승이다 (<Table 17>).

<Table 17> Winning strategy in iii) ② of X after Y attempts $S_Y[2,1]$ in (attempting number) 1st.

시행 횟수	0(초기)	1	2	3	4	5	종료
동작	X 의 차례	$H_X[2,1]$	$S_Y[2,1]$	$H_X[2,2]$	$H_Y[2,2]$	$H_X[3,1]$	X win
X	(2,2)	(2,2)	(2,2)	(2,2)	(3,2)	(3,2)	
Y	(1,0)	(3,0)	(2,1)	(1,0)	(1,0)	(0,0)	

③ $n=5$, $X(3,2)$ 라고 하자. 공격자 X 는 $H_X[2,1]$ 의 동작을 취하면 된다. 이때 Y 가 할 수 있는 동작은 $H_Y[3,3]$, $H_Y[3,2]$, $S_Y[2,1]$ 뿐이므로 다음의 과정대로 X 는 필승이다.

a) 1회에서 Y 가 $H_Y[3,3]$ 의 동작을 하면 X 는 (2,0)이 되므로 정리 1에 의해 X 가 필승이다.

<Table 18> Winning strategy in iii) ③ of X after Y attempts $H_Y[3,3]$ in (attempting number) 1st.

시행 횟수	0(초기)	1	2	3	종료
동작	X 의 차례	$H_X[2,1]$	$H_Y[3,3]$	$H_X[2,3]$	X win
X	(3,2)	(3,2)	(2,0)	(2,0)	
Y	(1,0)	(3,0)	(3,0)	(0,0)	

b) 1회에서 Y 가 $H_Y[3,2]$ 의 동작을 하면 X 는 (3,0)이 되므로 정리 1에 의해 X 가 필승이다.

<Table 19> Winning strategy in iii) ③ of X after Y attempts $H_Y[3,2]$ in (attempting number) 1st.

시행 횟수	0(초기)	1	2	3	종료
동작	X 의 차례	$H_X[2,1]$	$H_Y[3,2]$	$H_X[3,3]$	X win
X	(3,2)	(3,2)	(3,0)	(3,0)	
Y	(1,0)	(3,0)	(3,0)	(0,0)	

c) 1회 상황에서 Y 가 $S_Y[2,1]$ 의 동작을 하면, X 는 $H_X[3,2]$ 의 동작을 하면 된다. 이때 Y 는 (1,0)가 되는데, Y 가 할 수 있는 동작은 $H_Y[1,3]$ 또는 $H_Y[1,2]$ 뿐이다.

c) - 1) 3회에서 Y 가 $H_Y[1,3]$ 를 할 때 X 는 (4,2)이 되므로 정리 1에 의해 X 는 필승한다.

<Table 20> Winning strategy in iii) ③ of X after Y attempts $S_Y[2,1]$ in (attempting number) 1st.

시행 횟수	0(초기)	1	2	3	4	5	종료
동작	X 의 차례	$H_X[2,1]$	$S_Y[2,1]$	$H_X[3,2]$	$H_Y[1,3]$	$H_X[4,1]$	X win
X	(3,2)	(3,2)	(3,2)	(3,2)	(4,2)	(4,2)	
Y	(1,0)	(3,0)	(2,1)	(1,0)	(1,0)	(0,0)	

c) - 2) 3회에서 Y 가 $H_Y[1,2]$ 를 하면 X 는 (3,3)가 된다. 이는 vi)에 포함되므로 X 는 필승한다.

<Table 21> Winning strategy in iii) ③ of X after Y attempts $S_Y[2,1]$ in (attempting number) 1st.

시행 횟수	3	4	...	종료
동작	위 표의 3회와 동일	$H_Y[1,2]$	4회는 viii)에 포함함	X win
X		(3,3)		
Y		(1,0)		

iv) 이제 $n \geq 4$ 일 때 i) ~ iii)에 해당되지 않는 경우를 보자. 즉, $S[n-1,1]$ 또는 $S[n-1,0]$ 말고도 두 손 모두 0이 아닌 손이 되는 분할이 존재하는 경우이다.

- ① $n \geq 5$ 일 때 $2 \leq p_1 + p_2 \leq n-3$ 이면 공격자 X 는 두 손 모두 0이 되지 않게 분할하면 된다. 즉, X 는 $S_X[p_3, p_4]$ ($p_3 p_4 \neq 0$)의 동작을 하면 된다. 1회에서 $Y(1,0)$ 이므로 X 의 두 손 중 한 손을 칠 수밖에 없으므로 할 수 있는 동작은 일반성을 잃지 않고 $H_Y[1, p_3]$ 뿐이다. 그럼 X 의 양 손의 합만 1 늘어난다. 다른 경우의 상황이 나타나지 않으면 이 과정을 X 의 양 손의 합이 $n-2$ 가 될 때(→②)까지 반복하면 된다.
- ② $n \geq 5$ 일 때 $p_1 + p_2 = n-2$ ($p_1 p_2 \neq 0$)이면(<Table 22>의 2*t*회), X 는 $S_X[n-2, 0]$ 의 동작을 하면 된다. 그러면 $Y(1,0)$ 이므로 Y 가 할 수 있는 동작은 $H_Y[1, n-2]$ 뿐이다. 따라서 $X(n-1, 0)$ $Y(1,0)$ 의 상황이 되고, 이때 정리 1에 의해 X 는 필승이다.

<Table 22> Winning strategy in iv) ①~② of X .

시행 횟수	0(초기)	1	2	...	2 <i>t</i>	2 <i>t</i> +1	2 <i>t</i> +2	2 <i>t</i> +3	종료
동작	X 의 차례	$S_X(p_3, p_4)$	$H_Y[1, p_3]$		X 의 차례	$S_X[n-2, 0]$	$H_Y[1, n-2]$	$H_X[n-1, 1]$	X win
X	(p_1, p_2)	(p_3, p_4)	$(p_3 + 1, p_4)$	...	(p_i, p_{i+1})	$(n-2, 0)$	$(n-1, 0)$	$(n-1, 0)$
Y	(1,0)	(1,0)	(1,0)		(1,0)	(1,0)	(1,0)	(0,0)	

(단, t 는 정수, $(p_1, p_2) \neq (p_3, p_4)$, $p_1 + p_2 = p_3 + p_4$, $p_i + p_{i+1} = n-2$)

- ③ $n \geq 4$ 일 때 $(p_1, p_2) = (n-2, 0)$ 이면 X 는 두 손 모두 0이 되지 않게 분할하면 된다. 즉, X 는 $S_X[p_3, p_4]$ ($p_3 p_4 \neq 0$)의 동작을 하면 된다. 여기서 Y 가 할 수 있는 동작은 일반성을 잃지 않고 $H_Y[1, p_3]$ 뿐이다. 그럼 X 의 양 손의 합이 $n-1$ 이 된다.(→④)
- ④ $n \geq 5$ 일 때 $n-1 \leq p_1 + p_2 \leq 2n-6$ (단, i)가 아닐 때)이면, 공격자 X 는 어느 손도 0과 $n-1$ 이 되지 않게 분할하면 된다. 즉 X 는 $S_X[p_3, p_4]$ ($p_3 p_4 \neq 0$)의 동작을 하면 된다. 1회에서 $Y(1,0)$ 이므로 X 의 둘 중 한 손을 칠 수밖에 없으므로 할 수 있는 동작은 일반성을 잃지 않고 $H_Y[1, p_3]$ 뿐이다. 그럼 X 의 양 손의 합만 1 늘어난다. 다른 경우의 상황이 나타나지 않으면 이 과정을 X 의 양 손의 합이 $2n-5$ (→⑤)가 될 때까지 반복하면 된다.
- ⑤ $n \geq 5$ 일 때 $p_1 + p_2 = 2n-5$ (단, i)가 아닐 때)이면(<Table 23-24>의 2*t*회) X 의 손은 $(n-2, n-3)$ 이다. 이때 X 는 $S_X[n-1, n-4]$ 을 하면 된다. Y 는 (1,0)이므로 할 수 있는 동작은 $H_Y[1, n-4]$ 또는 $H_Y[1, n-1]$ 뿐이다. 만약 Y 가 $H_Y[1, n-4]$ 의 동작을 하면 $X(n-1, n-3)$, $Y(1,0)$ 이므로 정리 1에 의해 X 가 한 단계 만에 이길 수 있다. 또 만약 Y 가 $H_Y[1, n-1]$ 의 동작을 하면 $X(n-4, 0)$ 이므로 iv) ①에 따르면 된다.

<Table 23> Winning Strategy in iv) ⑤ of X while Y attempts ‘ $H_Y[1, n-4]$ ’

시행 횟수	0(초기)	1	2	...	2 <i>t</i>	2 <i>t</i> +1	2 <i>t</i> +2	2 <i>t</i> +3	종료
동작	X 의 차례	$S_X(p_3, p_4)$	$H_Y[1, p_3]$		X 의 차례	$S_X[n-1, n-4]$	$H_Y[1, n-4]$	$H_X[n-1, 1]$	X win
X	(p_1, p_2)	(p_3, p_4)	$(p_3 + 1, p_4)$	...	$(n-2, n-3)$	$(n-1, n-4)$	$(n-1, n-3)$	$(n-1, n-3)$
Y	(1,0)	(1,0)	(1,0)		(1,0)	(1,0)	(1,0)	(0,0)	

<Table 24> Winning Strategy in iv) ⑤ of X while Y attempts ‘ $H_Y[1, n-1]$ ’

시행 횟수	0(초기)	1	2	...	2t	2t+1	2t+2	종료	
동작	X 의 차례	$S_X(p_3, p_4)$	$H_Y[1, p_3]$		X 의 차례	$S_X[n-1, n-1]$	$H_Y[1, n-3]$		2t+2회 이후는 iv) ①에 포함됨
X	(p_1, p_2)	(p_3, p_4)	(p_3+1, p_4)	...	$(n-2, n-3)$	$(n-1, n-4)$	$(n-4, 0)$		
Y	(1,0)	(1,0)	(1,0)		(1,0)	(1,0)	(1,0)		

(단, t 는 정수, $(p_1, p_2) \neq (p_3, p_4)$, $p_1 + p_2 = p_3 + p_4$)

⑤ $n \geq 5$ 일 때 $p_1 + p_2 = 2n - 4$ (단, i)가 아닐 때)이면 X 의 손은 $(n - 2, n - 2)$ 이다. 이때 X 는 $S_X[n - 1, n - 3]$ 을 하면 된다. Y 는 $(1, 0)$ 이므로 할 수 있는 동작은 $H_Y[1, n - 3]$ 또는 $H_Y[1, n - 1]$ 뿐이다. 만약 Y 가 $H_Y[1, n - 3]$ 의 동작을 하면 $X(n - 1, n - 2)$, $Y(1, 0)$ 이므로 정리 1에 의해 X 가 한 단계 만에 이길 수 있다. 또 만약 Y 가 $H_Y[1, n - 1]$ 의 동작을 하면 $X(n - 3, 0)$ 이므로 iv) ①에 따르면 된다. (과정표는 <Table 23-24>와 비슷하여 생략)

위의 i) ~ iv)에 의해, $n \geq 4$ 일 때 $X(p_1, p_2)$, $Y(1, 0)$ 이고 p_1, q_2 가 $n - 1 \geq p_1 \geq p_2 \geq 0$, $(p_1, p_2) \neq (1, 0)$ 인 정수이면 공격자 X 는 반드시 필승이다.

정리 6. $X(1, 0)$, $Y(p_1, p_2)$ 일 때, X 가 공격자이고 $(p_1, p_2) \neq (n - 1, 0), (n - 1, 1)$ 이면 항상 X 가 패배한다. 반면, $(p_1, p_2) = (n - 1, 0), (n - 1, 1)$ 이면 항상 공격자 X 가 승리한다. (단, $0 \leq p_1, p_2 \leq n - 1$, $(p_1, p_2) \neq (0, 0)$, $n \geq 3$)

[증명]

- i) 정리 5에 의해 $(p_1, p_2) \neq (0, 0), (1, 0), (n - 1, 0), (n - 1, 1)$ 인 경우에 대해서는 항상 X 가 패배한다.
- ii) 정리 1에 의해 $(p_1, p_2) = (n - 1, 0)$ 은 게임이 한 번에 끝나는 경우이다.
- iii) $(p_1, p_2) = (1, 0)$ 일 때, $X(1, 0)$ 가 $H_X[1, 1]$ 을 하면 $Y(2, 0)$ 이 된다. X 는 $D(1, 0)$, Y 는 $A(2, 0)$ 이므로 정리 5에 의해 항상 X 가 패배한다.
- iv) $(p_1, p_2) = (n - 1, 1)$ 이면 $X(1, 0)$ 가 $H_X[1, n - 1]$ 을 하고, $Y(1, 0)$ 는 $H_Y[1, 1]$ 밖에 할 수 없다. 즉, X 는 $A(2, 0)$, Y 는 $D(1, 0)$ 이므로 정리 5에 의해 X 가 승리한다.

보조정리 7. 자연수 순서쌍 $S_0 = (p_0, q_0)$ 에 대해, 한 성분을 선택해 없애고, 남은 성분을 합으로 하는 두 음 아닌 정수를 성분으로 갖는 집합 $S_1 = (p_1, q_1)$ 을 만드는 시행을 반복한다고 하자. 그러면 유한한 시행 횟수 안에 성분들의 합이 2 이하인 집합이 반드시 나타난다. (단, $(p, q) = (q, p)$)

[증명]

처음 순서쌍 S_0 의 두 성분의 합을 $p_0 + q_0 = n$ 이라 하자.

- i) $n = 2$ 일 때, 가능한 S_0 은 $(1, 1)$ 이다. 이때는 성립함이 자명하다.
- ii) $n = 2, 3, \dots, k$ 일 때 성립함을 가정하자.

$n = k + 1$ 일 때, 가능한 S_0 에는 $(k, 1), (k - 1, 2), \dots, (m, k - m), \dots$ $\left(\text{단, } m = 1, 2, \dots, \left\lceil \frac{k + 1}{2} \right\rceil \right)$ 가 있다. 이때 한 성분을 없애도 나머지 한 원소는 1 이상 k 이하의 자연수이며, 이를 합으로 하는 두 자연수를 원소로 갖는 집합을 새로 만들어도 원소의 합은 k 이하의 자연수다. 즉, 새로 만든 집합은 위의 보조정리를 성립시킨다. 따라서 가정에 의하여 $n = k + 1$ 일 때도 성립한다. 수학적 귀납법에 의하여, i) 과 ii)에 따라 위 보조정리는 성립한다.

정리 8. $n \geq 2$ 이고 p, q 는 $0 \leq p, q \leq n - 1$ 인 정수일 때, 공격자가 $A(n - 1, n - 1)$ 이고 수비자가 $D(p, q)$ 이면, 공격자는 $n - 1$ 인 손으로 수비자의 손을 칠 때 반드시 승리한다.

<Table 25> Strategy table of $A(n - 1, n - 1), D(p, q)$

A		
$(n - 1, n - 1)$		
D	(p, q)	$H[n - 1, p]$ or $H[n - 1, q]$

[증명]

일반성을 잃지 않고 경기자 X 가 치는 동작을 할 때 Y 의 q_i 인 손을 친다고 하자. (i 는 음 아닌 정수) 이때, X 가 공격자로 시작한다. 즉, $X = A, Y = D$ 이다. 정리 4에 의해, 0회에서 X 는 치는 동작밖에 할 수 없다. Y 의 차례인 1회에서 Y 의 한 손이 0은 된다. Y 는 치는 동작이나 분할 동작을 할 수 있다. 우선 1회에서 Y 가 치는 동작을 한다고 하자. 정리 1에 의해 아래 과정표처럼 X 는 필승이다.

<Table 26> Winning Strategy of X while Y attempts $H_Y[p_0, n - 1]$.

시행 횟수	0(초기)	1	2	3	종료
동작	X 의 차례	$H_X[n - 1, q_0]$	$H_Y[p_0, n - 1]$	$H_X[n - 1, p_0]$	X win
X	$(n - 1, n - 1)$	$(n - 1, n - 1)$	$(n - 1, 0)$	$(n - 1, 0)$	
Y	(p_0, q_0)	$(p_0, 0)$	$(p_0, 0)$	$(0, 0)$	

이번에는 1회에서 Y 가 분할이 가능할 때 분할 동작을 한다고 하자. 이후 Y 는 (p_1, q_1) (단, $p_1 + q_1 = p_0$)가 된다. 2회는 0회와 마찬가지로 정리 8에서 설명하고자 하는 상황에 포함되며, 따라서 X 는 치는 동작을 할 수밖에 없다. 그러면 앞서 설명한 내용에 따라 Y 는 분할하는 동작을 해야 할 것이다. 이와 같이 <Table 27>처럼 계속 하면, 짝수 짝 회 X 의 치는 동작과 홀수 짝 회 Y 의 분할동작이 반복된다. X 의 손가락은 변함이 없고, 다만 Y 는 한 손이 손가락을 모두 접고 남은 손가락을 양 손에 분할하기를 반복한다. 그 과정은 아래와 같다.

<Table 27> Winning Strategy of X while Y attempts splitting.

시행 횟수	0(초기)	1	2	3	...	$2t$	$2t + 1$	$2t + 2$	$2t + 3$	종료
동작	X 의 차례	$H_X[n - 1, q_0]$	$S_Y[p_1, q_1]$	$H_X[n - 1, q_1]$		$S_Y[1, 1]$	$H_X[n - 1, 1]$	$H_Y[1, 0]$	$H_X[n - 1, 1]$	X win
X	$(n - 1, n - 1)$	$(n - 1, n - 1)$	$(n - 1, n - 1)$	$(n - 1, n - 1)$	...	$(n - 1, n - 1)$	$(n - 1, n - 1)$	$(n - 1, 0)$	$(n - 1, 0)$	
Y	(p_0, q_0)	$(p_0, 0)$	(p_1, q_1)	$(p_1, 0)$		$(1, 1)$	$(1, 0)$	$(1, 0)$	$(0, 0)$	

경기자의 손가락 수는 양 손을 서로 바꾸어도 동치이며, 경기자의 손가락 수를 순서쌍으로 나타낼 수 있다. 그렇다면 위의 상황 전개에 보조정리 7을 적용할 수 있고, 유한한 짝수 짝 시행횟수 안에 Y 의 양 손은 $(1, 1)$ 이 된다. 이때 X 가 치면 Y 는 $(1, 0)$ 이 되고, 정리 6에 의해 Y 는 더 이상 분할을 못한다. 따라서 Y 는 치는 동작을 할 수밖에 없고, 따라서 X 는 <Table 26>에 의해 홀수 짝 시행횟수에서 필승이다.

정리 9. $n \geq 4$ 이고 p, q 는 $0 \leq p, q \leq n - 1$ 인 정수일 때, 공격자가 $A(n - 1, n - 2)$ 이고 수비자가 $D(p, q)$ 이면, 공격자는 $n - 1$ 인 손으로 수비자의 손을 칠 때 반드시 승리한다.

<Table 28> Strategy table of $A(n-1, n-2), D(p, q)$

		A
		$(n-1, n-2)$
D	(p, q)	$H[n-1, p]$

[증명]

일반성을 잃지 않고 경기자 X 가 치는 동작을 할 때 Y 의 q_i 인 손을 친다고 하자. (i 는 음 아닌 정수)
 X 가 공격자로 시작한다. 즉, $X = A, Y = D$ 이다. 정리 4에 의해, 0회에서 X 는 치는 동작밖에 할 수 없다. 따라서 $H_X[n-1, q_i]$ 의 동작을 할 수 있다. Y 의 차례인 1회에서 Y 의 한 손이 0은 된다. Y 는 치는 동작이나 분할 동작을 할 수 있다. 다만 $q_0 = 0$ 이면 이때 정리 1에 의해 X 는 바로 필승이다.
 $(p_0, q_0) = (1, 1)$ 일 때, X 가 $n-1$ 개인 손으로 Y 의 한 손을 치면 Y 는 $(1, 0)$ 이 된다. 만약 Y 가 X 의 $n-2$ 개인 손을 치면 앞에서 정리 8의 경우와 같다. 만약 Y 가 $n-1$ 개인 손을 치면 X 는 $(n-2, 0)$ 가 되고, 이는 정리 6의 경우와 같으므로 Y 는 진다. 즉, Y 는 1회에서 치는 동작을 하면 필패한다.

<Table 29> Winning Strategy of X while $(p_0, q_0) = (1, 1)$.

시행 횟수	0(초기)	1	2	2회 이후는 정리 6에 포함됨	종료
동작	X 의 차례	$H_X[n-1, 1]$	$H_Y[1, n-1]$		
X	$(n-1, n-2)$	$(n-1, n-2)$	$(n-2, 0)$		
Y	$(1, 1)$	$(1, 0)$	$(1, 0)$		

$q_0 \neq 0$ 이고 $p_0 > 1$ 또는 $q_0 > 1$ 일 때, 1회에서 Y 가 1개가 아닌 손으로 치는 동작을 한다고 가정하자. 그럼 정리 1에 의해 아래의 과정표처럼 X 는 필승이다. 즉, Y 는 치는 동작을 할 때 필패한다.

<Table 30> Winning Strategy of X while Y attempts hitting.

시행 횟수	0(초기)	1	2	3	종료
동작	X 의 차례	$H_X[n-1, q_0]$	$H_Y[p_0, (n-1) \text{ or } (n-2)]$	$H_X[(n-1) \text{ or } (n-2), p_0]$	X win
X	$(n-1, n-2)$	$(n-1, n-2)$	$(n-2, 0) \text{ or } (n-1, 0)$	$(n-2, 0) \text{ or } (n-1, 0)$	
Y	(p_0, q_0)	$(p_0, 0)$	$(p_0, 0)$	$(0, 0)$	

이번에는 1회에서 Y 가 분할하는 동작을 한다고 하자. 이후 Y 는 (p_1, q_1) 가 되며, 단 $p_1 + q_1 = p_0$ 이다. 2회는 0회와 마찬가지로 정리 9의 경우이므로 X 는 치는 동작을 할 수밖에 없다. 그러면 앞서 설명한 내용에 따라 Y 는 치는 동작을 할 수 없다. 같은 방법으로 짝수 짝 회 X 의 치는 동작과 홀수 짝 회 Y 의 분할동작이 반복된다. X 의 손가락은 변함이 없고, 다만 Y 는 한 손이 손가락을 모두 접고 남은 손가락을 양 손에 분할하기를 반복한다. 그 과정을 아래와 같다.

<Table 31> Winning Strategy of X while Y attempts splitting.

시행 횟수	0(초기)	1	2	3	...	$2t$	$2t+1$	...	t'	종료
동작	X 의 차례	$H_X[n-1, q_0]$	$S_Y[p_1, q_1]$	$H_X[n-1, q_1]$		$S_Y[1, 1]$	$H_X[n-1, 1]$		$H_X[n-1, 1]$	X win
X	$(n-1, n-2)$	$(n-1, n-2)$	$(n-1, n-2)$	$(n-1, n-2)$	...	$(n-1, n-2)$	$(n-1, n-2)$	...	$(n-1, n-2)$	
Y	(p_0, q_0)	$(p_0, 0)$	(p_1, q_1)	$(p_1, 0)$		$(1, 1)$	$(1, 0)$		$(0, 0)$	

경기자의 손가락 수는 양 손을 서로 바꾸어도 동치이며, 경기자의 손가락 수를 순서쌍으로 나타낼 수 있다. 따라서 위와 같은 상황 전개에 보조정리 7을 적용할 수 있고, 유한한 짝수 짝 시행횟수 안에 Y 의 양 손은 $(1, 1)$ 이 된다. 이후 상황은 앞에서 $(p_0, q_0) = (1, 1)$ 일 때로 설명한 것과 같다(<Table 26>). 따라서 X 는 위의 과정표에 의해 유한한 시행횟수 안에 이기게 된다.

IV. 결론 및 제언

우리는 본 연구에서 두 사람이 손쉽게 할 수 있는 게임인 젓가락게임의 필승전략에 대해 탐구하였다. 전통적인 젓가락게임의 필승전략의 존재 여부를 수학적으로 검증하는 것은 물론, 나아가 젓가락게임의 초기 상태와 필 수 있는 손가락 수를 달리한 일반화된 젓가락게임에서도 검증하는 것을 궁극적인 연구 목표로 두었으며, 이에 따른 연구 결과를 정리하면 다음과 같다.

첫째, 전통적인 젓가락게임은 후공이 필승하고 그 전략이 존재함을 검증하였다. 연구 과정 중 젓가락 게임을 하면서 발생할 수 있는 모든 상황에서 공격자가 취해야 할 동작을 정리해 놓은 ‘전략표’를 그리게 되었다. 규칙에 따르면 전통적인 젓가락게임은 $n = 5$ 이고 초기 상황을 $A(1, 1), D(1, 1)$ 로 둔 경우인데, 이에 대한 전략표를 찾아보면 L , 즉 공격자(선공)가 지고 수비자(후공)가 이김을 알 수 있다.

둘째, 초기 조건이 $(1, 1), (1, 1)$ 이 아닌 경우에도 전략이 존재함을 확인하였다. 우리는 전략표를 통해 다른 초기 조건에 대한 전략을 분석하고 정리하였으며, 과정표를 통해 그 자세한 과정을 하나하나 서술하였다. 전략표에 있는 모든 칸은 게임 중간에 벌어질 수 있는 상황들이며 동시에 가능한 모든 초기조건들이다. 즉 $(1, 1), (1, 1)$ 이 아닌 다른 상황에서 시작을 하든, 게임 중간에 그 상황이 벌어졌든 상관없이 그 때 공격자가 전략적으로 이길지 질지, 혹은 비길지 알 수 있다. 만약 지지 않는다면 어떤 동작을 해야 이기거나 비길 수 있는지 전략표를 보고 알 수 있는데, 이것은 젓가락게임의 어떤 상황이 이전의 과정과 별개임을 의미한다. 반대로 그 직전의 상황에서 벌어질 수 있는 다양한 상황들 중 어느 쪽을 선택하느냐에 따라 두 경기자의 승패가 달라지므로, 어떤 상황의 승패는 간접적으로 그 다음 상황에 영향을 끼친다. 이 원리는 젓가락게임의 필승 전략을 찾는 기본적인 토대가 되었고, 이를 기반으로 과정표와 전략표를 작성할 수 있는 알고리즘을 개발할 수 있었다. 이는 젓가락 또한 기존의 연구에서 연구된 바가 없는 ‘비깅’도 하나의 승패 여부로 해석하였으며 비기는 상황에서는 이길 순 없어도 지지 않는 방법이 존재함을 확인했다. 즉, 비기는 상황에서는 전략적으로 행동할 때 승리하거나 패배하는 상황으로 갈 수 없음을 확인했다.

셋째, 손가락 개수를 다르게 해도 전략이 존재함을 확인하였다. 우선 필 수 있는 손가락을 전통적인 방식보다 적게 두고 일일이 필승전략을 구해보았다. 공격자 또는 수비자의 손 상태에 따라 취해야 하는 동작이나 승패 여부에서 규칙을 찾을 수 있었고 이를 일반화하여 몇 가지는 수학적으로 보이기도 했다. 기존의 연구와는 다르게 임의의 자연수 n 에 대해 보일 수 있었으며, 실제 전략이 어떤 과정에 의해 작동하는지 과정표를 통해 쓸 수도 있었다. 과정표의 양이 너무 많아 본 연구에 실을 수 없었으나 전략표

를 통해 이를 확인할 수 있다.

본 연구의 결과를 통해서 제안하고자 하는 바는 다음과 같다.

첫째, 전략표는 오로지 알고리즘에 의존하고 있어서, 전략표에 있는 승리 또는 패배가 확실한 각각의 모든 칸에 대해 수학적인 검증을 완료하지 못했다. 특수한 경우에 한해 증명이 되었으나, 이를 보다 일 반화하는 작업이 이루어지면 좋을 것이라고 생각된다.

둘째, 아직 비기는 상황에 대한 분석은 물론, 수학적인 검증은 제대로 이루어지지 않았다. 비기는 상 황이란, 전략적으로 행동해도 결국 몇 가지 상황을 돌고 도는 결과를 초래하는 상황이므로 그 과정에 대해 추가적으로 다루어져야 할 것이다.

마지막으로, 승패 여부가 수학적으로 증명이 된 특수한 경우를 컴퓨터 프로그래밍에 적용시킬 방법을 구체적으로 마련해야 할 것이다.

V. 참고문헌

- [1] 네이버 블로그. <http://blog.naver.com/fsfd1100/220059348810> (검색일: 2015.5.10).
- [2] 정문자. (2005). 시리즈 E: 젓가락게임에 활용한 창의성 신장 방안 연구. **E-수학교육 논문집**, 19(3), 503-516.
- [3] wikipedia 홈페이지. [https://en.wikipedia.org/wiki/Chopsticks_\(hand_game\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Chopsticks_(hand_game)) (검색일: 2015.3.28).
- [4] wikihow 홈페이지. <http://www.wikihow.com/Play-Chopsticks> (검색일: 2015.3.28.)
- [5] activityvillage 홈페이지. <http://www.activityvillage.co.uk/chopsticks-game> (검색일: 2015.3.28.)
- [6] Wikihow 홈페이지. <http://www.wikihow.com/Always-Win-Chopsticks> (검색일: 2015.3.28).

| 연구진 |

조한솔 (Cho Hanseul, 인천과학고등학교, jodooly99@gmail.com), 주저자 및 교신저자

박윤원 (Park Yunwon, 인천과학고등학교, bookvug0505@naver.com)

박종욱 (Park Jonguk, 인천과학고등학교, icchris@naver.com)

차준경 (Cha Junkyeong, 인천과학고등학교, yoiris100@naver.com)

김덕원 (Kim Deokwon, 인천과학고등학교, tops1301@naver.com)

지도교사 : 강신석 (Kang Shinseok, 인천과학고등학교, 수학, kangssx@hanmail.net)

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

이산질병모델에 대한 인구 동력학적 성질 연구

임재웅 · 설채은 · 김성준 · 김규리 – 경산과학고등학교

A Study on the Dynamics of a Discrete SIR Model

Lim Jaewoong · Seol Chaeun · Kim Seongjun · Kim Gyuri - Gyeongsan Science High School

ABSTRACT

In this research, we studied a study on the dynamics of a discrete SIR model by applying discretization method on continuous disease model. This is the theme that high school students in Korea who suffered from MERS(MERS:Middle East Respiratory Syndrome) infection situation may interested in. There's a purpose in research to find out one method how to use mathematics in real life. This research is based on simple differential calculus and integral calculus. Also, it was applied mathematics theory of college level which extended by high school math. Therefore, by extension of mathematical knowledge, we selected and used simple disease model, mathematical biology, the dynamics and mathematical modeling among many kinds of solutions. In the paragraph, there are traits of continuous disease model detailed by discrete SIR model. In particular, to analysis the dynamics around the two fixed points that concluded by matrix eigenvalue, we studied conditions of fixed points at attracting, repelling, saddle, and non-hyperbolic. Lastly, by using MATLAB which is used in math usefully, we visualized numerical examples about theoretical results we had. This results will be able to predict the population dynamics tendency about interaction among the Susceptible, Infection and Recovered when numerous infected disease spread. Therefore, this will be standard to establish the solution about infection situation.

Key words:

Disease Model, Dynamics, Fixed Point, Discrete Equation

국문초록

본 연구에서는 연속질병모델에 이산화 방법을 적용하여 얻어진 이산질병모델에 대한 인구 동력학적 성질을 연구하였다. 이것은 최근 우리나라 메르스 사태를 접한 고등학생들이 관심을 가질 만한 주제로, 수학을 실생활에 어떻게 활용할 수 있는 지에 대한 하나의 해법을 찾기 위한 연구이다. 고등학교 수준의 미분과 적분 내용을 기반으로 대학원 수준의 수학 이론을 활용, 질병모델, 수리생물학, 인구동력학, 그것들 중에서도 중요한 연구 방법인 수학적 모델링을 사용하였다. 본문에서는 이산 질병모델의 인구 동력학적 성질을 구체화 하였고, 특히 행렬의 고유 값으로부터 도출되는 두 개의 고정점에 대하여 고정점 주위의 동력학적 성질의 경향 파악을 위하여 고정점이 attracting, repelling, saddle, nonhyperbolic이 되는 조건들을 분석하였다. 또한 수학 학문에 유용히 쓰이는 MATLAB 프로그램을 이용하여 우리가 도출한 이론적 결과에 대한 수치적 예시를 시각화하였다. 이러한 연구 결과는 여러 전염성 질병이 확산될 경우 감염된 집단, 감염 가능 집단, 회복된 집단 간의 상호 작용에 대한 인구 동력학적 경향 예측을 가능하게 하여 전염병 사태에 대한 대책을 세우는 데 기초가 되어 줄 것이라고 예상된다.

중심어 :

질병모델, 동력학, 고정점, 이산화

I. 서론

“21세기는 세계화의 시대이다.” 라는 말이 있다. 이러한 말이 나올 정도로 세계화에 따른 사람 또는 사물의 교류가 더욱 활발해졌다. 그러나 그에 따른 문제들도 더욱 심화되었는데, 그러한 문제들 중 하나 가 새로운 질병의 발생과 여러 가지 질병의 확산이다. 실제로 2015년 대한민국의 메르스(MERS: Middle East Respiratory Syndrome) 감염 사태에서도 볼 수 있듯이 비교적 통제가 쉬운 질병이라도 질병의 예측 방향이나 경로 등을 제대로 예측하지 못했을 때에는 큰 피해를 입을 수 있다는 사실을 이미 경험한 바 이다. 따라서 우리는 이러한 시대의 흐름에 맞춰 질병모델을 이용한 기초적인 수리적 모델링을 설계하 고, 설계한 모델을 바탕으로 후속적인 탐구 및 모델의 개선을 통해 이산질병모델에 대한 인구 동력학적 성질을 예측하고자 한다.

1. 수리생물학

생물학에 수학이 쓰이기 시작한 것은 20세기 초로 거슬러 올라간다. 생물의 가장 기본인 생태계의 먹이 사슬을 수학의 미분방정식을 통해 나타내는 것으로 생물학과 수학의 만남이 시작되었다.

18세기 후반 인구 성장에 대한 맬스(T.R.Malthus)의 이론을 기점으로 탄생한 수리생물학은 1940년대 피셔(I.Fisher)가 확산방정식을 집단 유전학에 시도한 이래 생물 분야에 널리 사용되고 있는 학문이다. 1980년부터는 컴퓨터 기술의 발전과 생물 및 환경의 중요성의 대두에 따른 경제적인 중요성에 기인하여 수리생물학이 급속히 큰 관심사로 대두되었다. 현재 21세기는 생명과학의 시대라고도 불리며 생명과학의 관심사는 인간의 건강한 삶의 질적 향상, 그리고 지구 생태계의 안정성 이 두 가지이다. 이것을 위해서 활발히 연구되고 있는 분자생물학, 유전 공학과 같은 학문뿐만 아니라 생태계의 분포나 미래의 분포 양상에 관한 학문 또한 필요하다. 따라서 수리생물학이라는 학문은 생물의 진화, 기원 등 이론적인 분야 뿐 아니라 생태학, 생리학, 환경보전, 의학, 농학, 수산학 및 그에 따른 관련 분야에 널리 적용되고 있다.

현재 사용되고 있는 대다수의 실제 생물학 모델들은 복잡하고, 비선형적인 구조와 특성을 가지고 있는데, 이러한 모델들의 연구와 분석을 위해서 다양한 수학적 모델링을 수행하고 그에 걸맞는 수학적 계산 방법론이 사용되고 있다. 구체적인 연구 분야로는, 군집 동력학, 세포 동력학, 유전자 네트워크, 분자 생물학 등이 있다. 주로 결정론적 과정론과 확률론적 과정론 등의 방법론이 생물학적 시스템을 모델링 및 분석하는 데 이용된다[7].

2. 인구 동력학과 접근 방법

본 팀은 이러한 역사적 배경과 학문에 근거하여 과거부터 계속적으로 진행된 수리생물학의 일종인 질병모델에 대하여 연구할 것이다.

현재 학계에서 전도유망한 학문 중 하나로 꼽히는 것이 동력학이며 이중에서도 인구 동력학이다. 우리는 이러한 인구 동력학을 기본으로 수리 모델을 계획하려고 한다. 인구 동력학을 연구하기 위한 접근 방법은 두 가지가 존재하는데 미분방정식(differential equation)을 통해 접근하는 방법과 이산방정식(discrete equation)을 통한 방법이 있다. 이 두 가지 방법 중 미분방정식을 이용해 접근하는 방식은 이해하기 어려울 뿐만 아니라 방정식의 풀이 과정이 너무 복잡하여 이 방법이 존재한다는 것을 아는데 의의를 두고 이 방식을 적용하지는 않을 것이다. 따라서 우리는 나머지 한 가지 방법인 이산방정식을 통해 문제에 접근하고자 한다. 이산방정식의 장점은 보다 쉬운 방향으로 문제를 접근할 수 있다는 점으로써 현재 학계에서 각광받는 방식이기도 하다.

3. 질병과 수학적 모델

수리생물학이 결합된 감염병에 대한 수학적 접근은 1760년 베르누이(D.Bernoulli)의 천연두 모델로부터 처음 이루어졌다. 그는 1766년 천연두를 연구하여 이 전염병으로 인해 사망한 사람들의 수를 분석하여 결과를 발표했다. 또한, 로스(R.Ross)는 말라리아를 옮기는 기생충을 발견하고 그것의 확산 정도를 수리 모델로 표현하여 1902년 노벨상을 받았다. 이와 같이 인류는 과거부터 현재까지 지속적으로 전염병에 대비한 예상과 결과를 예측하여 연구하였다. 또한 현대에서는 이를 통해 과거의 전염병을 다시 연구하여 수학적 모델을 연구하는데, 이것은 그 질병에 대한 효과적인 대응 전략을 세우는 데 중요한 단서를 제공한다[3,10].

4. 수학적 모델링

본격적인 설명에 들어가기 전에 수학적 모델링(mathematical modeling)이란 무엇이고, 어떠한 방식으로 모델링 하는 것인지 설명하겠다.

프랭크(F.Swetz)의 말을 인용하자면 이론적인 모델은 관찰자의 마음속에 있는 어떤 현상을 정확하게 묘사하는 원리나 규칙들의 모임이고, 이 원리나 규칙들이 수학적인 것으로 관심 현상의 특징을 잘 나타낼 수 있는 수학적인 구조를 수학적 모델이라고 하며 이 수학적 모델을 고안하는 과정을 수학적 모델링이라고 정의하였다.

이것을 간단히 말하자면 수학적 모델링이란, 우리 주변의 현실적인 상황을 수학적으로 적용하여 풀어나가기 위해 사용한다고 생각 할 수 있다는 것이다. 이러한 수학적 모델링을 통해 관심 분야의 대상, 그리고 다른 대상들 사이의 관계를 수학적인 형태로 변경하는데 이렇게 변형된 수학적인 형태를 ‘수학적 모델’이라고 칭한다. 수학적 모델을 사용하게 되면 수학적으로 표현한 문제를 해결하는 과정에서 수식을 실제 문제에 대응 시키게 되고 이 과정에서 수식이 조건에 적합한지 판단하는 과정을 거치게 된다. 이 단계를 만족하지 못했을 경우, 이전 단계로 돌아가 실제 문제와의 오차 범위에 대해 수정하는 작업을 거쳐야 하고 반대의 경우, 다음 단계로 넘어가 이 모델이 어떻게 변하게 될 것인지 예측해 나갈 수 있다.

이러한 수학적 모델링은 손으로 간단히 문제를 풀 수 없을 경우에 주로 사용하며 특히 계산량이 많고 복잡한 현대사회의 문제의 카오스적인 요소를 감소하는 방식과 더불어 컴퓨터 프로그래밍을 결합하여 수학적 모델의 결과를 예측한다.

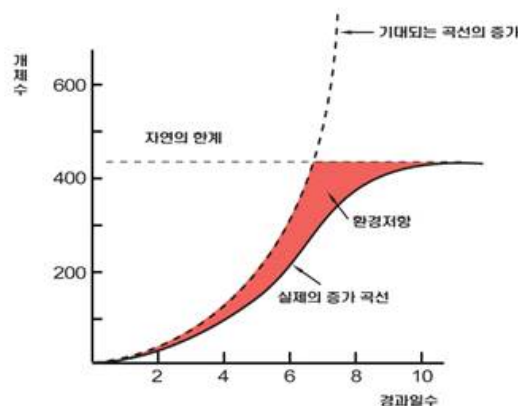
본 팀은 ‘질병역학’에 대해 다루고자 한다. 질병역학은 Epidemiology라고 하며, 전염병이 사람들 사이에서 퍼져나가는 것에 대한 학문이다. 질병역학에는 전염병이 퍼지는 현상에 대한 여러 가지 모델이 있는데, 그 중 가장 기초적인 SIR 모델에 대해 알아볼 것이다.

위에서 언급한 바와 같이 수학과 생물의 결합 학문인 수리생물학으로 질병에 대하여 연구할 것이다. 우리의 연구는 어떠한 질병에 대해 불변적인 가정을 세운 후 그 질병에 대한 기본모델을 세워 질병의 전파 양상과 과정을 예측하는 과정을 수행 할 것이다. 먼저 SIR은 S(Susceptible, 감염 가능 집단), I(Infected, 감염된 집단), R(Recovered, 회복된 집단)이다. 따라서 세 가지의 집단으로 어떠한 질병에 대하여 인구를 분류하여 과거의 베르누이의 결과처럼 이에 대한 대략적인 수를 계산하기 위하여 쓰인다[4].

II. 본론

1. 로지스틱 성장

현실적인 생물체 집단은 무한정 지수적으로 증식할 수 있는 것이 아니다.



[Fig. 1] The growth curve of the number of an individual

아래의 그래프와 같이 생물 집단은 환경 저항에 의해 실제 증가 곡선의 기울기가 점점 완만해지는 것을 볼 수 있다. 대표적으로 대장균에서 위와 같은 그래프를 그리고 있는데 이것은 비교적 큰 생물체에서도 관찰된다. 이러한 환경 저항에는 먹이, 서식 장소, 영양 상태 등이 있는데 이것의 영향에 따라 질병의 확산도가 달라지게 된다[6].

이 같은 그래프에서 경과 일수가 지날수록 고밀도에서 증식률이 감소된다는 것을 표현하는데 유효한 방정식이 로지스틱 방정식(Logistic equation)이다.

$$\frac{dx}{dt} = rx \left(1 - \frac{x}{K}\right) \text{ (단, } r : \text{인구 증가율, } K : \text{최대 인구수)}$$

이 식을 해석 할 때 집단의 증가율이 고려되는데 한 생물 집단의 개체 수를 x 라고 둔다면 그 집단의 개체 수의 증가율은 $\frac{dx}{dt} = rx$ 이다. 여기서 비례 상수인 r 은 1개체 당의 증가율이다. 로지스틱 방정식은 한 개체 당 증가율인 r 을 x 를 사용하여 감소하는 함수로 치환한 것이다. 이러한 이유로 개체수 x 는 식의 관계를 토대로 알 수 있듯이 K 보다 작으면 증가율이 0보다 크므로 증가하게 되고, 반대로 K 보다 크면 증가율이 감소한다.

로지스틱 성장의 대표적인 예는 위의 [Fig. 1]과 같이 나타나는데 초기의 개체 수 $x(0)$ 에서 출발할 경우 초기에는 지수적으로 급격히 증가하나 차츰 증가 속도가 낮아져 S자 형의 곡선을 그리고 자연의 한계, 즉 K 에 수렴하게 된다. 이 K 는 환경 수용력(carrying capacity)라고 정의 되며 계수인 r 은 환경 수용력 아래의 영역 즉, 개체 밀도가 작아 자연에 개체군이 살아갈 충분한 자원이 있을 때의 증가율을 나타내는 것으로 내적자연증가율(intrinsic rate of natural increase)이라고 정의된다[6, 10].

2. 인구 모델

인구 동력학은 ‘Population dynamics’ 라고 한다. 인구의 동태, 변화 양상에 대하여 알아보는 것으로 기본적으로 수열의 정의를 사용한다. ‘ P_n : n 일째 인구수’ 라고 가정하면 같은 원리로 P_{n+1} 을 구할 수 있고 $\lim_{n \rightarrow \infty} P_n$ 의 값 또한 구할 수 있다.

(예제) $P_{n+1} = r P_n$ ($r > 0$) (r : 인구 증가율)일 때

$$a) r > 1 \quad \lim_{n \rightarrow \infty} P_n = \infty$$

$$b) 0 < r < 1 \quad \lim_{n \rightarrow \infty} P_n = 0$$

$$c) r = 1 \quad P_{n+1} = P_n, \quad \forall n \in \mathbb{N}$$

(예제)는 위와 같은 결과를 가지게 된다. 이와 같이 인구가 무한정 증가하는 것과 같은 상황은 현실적인 상황에서 예외적이라고 생각해두어야 하며 위 예제의 인구 변화 양상은 비현실적이므로 불가능하다.

따라서 우리는 비현실적인 결과가 도출되는 식보다는 변수를 추가하여 더 복잡해지고 현실적인 요소를 표현하는 인구방정식을 세운다. $x(t)$ 를 시간 t 일 때 인구수라고 둘 때의 연속 인구 모델부터 알아보도록 한다. 위의 예제와 같이 인구가 일정한 비율로 지속적으로 증가한다는 맬서스의 간단화한 초기 인구 모델은 다음과 같다.

위에서 언급한 바와 같이 개체군의 증가율은 $\frac{dx}{dt} = rx$ 이다. 이 식에서 적분을 사용하여 맬서스의 인구 모델을 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= rx \Leftrightarrow \frac{1}{x} dx = r dt \\ \Leftrightarrow \int_0^t \frac{1}{x} dx &= \int_0^t r dt \\ \Leftrightarrow [\ln |x(t)|]_0^t &= [rt]_0^t \\ \Leftrightarrow \ln(x(t)) - \ln(x(0)) &= rt \\ \Leftrightarrow \ln \frac{x(t)}{x(0)} &= rt \\ \Leftrightarrow \frac{x(t)}{x(0)} &= e^{rt} \\ \Leftrightarrow x(t) &= x(0)e^{rt} \end{aligned}$$

위와 같은 $x(t)$ 의 그래프는 다음과 같은 양상을 보이게 된다.

$$1) r > 0 \text{ 일 때 } \lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = \infty$$

$$2) 0 < r < 1 \text{ 일 때 } \lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = 0$$

$$3) r = 0 \text{ 일 때 } x(t) = x(0)$$

이와 같게 된다면 간단히 세 가지 분류에 의한 개체 수(인구수) 분포가 나타나게 된다. 1)에서는 r 이 0보다 크므로 t 가 무한히 커짐과 동시에 인구수 $x(t)$ 는 무한대로 발산하게 된다. 2)에서는 r 이 0과 1사이의 값을 가지므로 개체군 $x(t)$ 는 0으로 수렴하게 된다. 3)에서는 $r=0$ 이므로 $x(t)$ 는 초기 인구 값과 같게 일정하게 유지된다.

여기서 2), 3)과 같은 인구 양상은 멸종되거나 일정하게 유지될 수 있으므로 현실적으로 가능한 양상이다. 이 세 가지 조건 중 1)번 조건에서 계수 r 이 0보다 크게 되면 인구수 $x(t)$ 가 무한히 증가한다. 따라서 이러한 비현실적인 인구 양상을 보완하기 위해 새로운 연속 인구 모델이 요구되었다. 이로써 나온 아래의 인구수 $x(t)$ 연속 모델이 로지스틱 성장과 많은 상관관계를 가진다. 고밀도에서 [Fig. 1]과 같

이 증식이 정지하는 것을 표현하는데 대단히 유효한 방정식이 로지스틱 방정식이다. 로지스틱 방정식은 생태학에서 개체군 성장의 단순한 모델로 고안된 미분 방정식으로 불리며 식의 형태는 아래와 같다.

$$\frac{dx}{dt} = rx \left(1 - \frac{x}{K}\right)$$

이 식은 $\frac{dx}{dt} = rx$ 와 비슷하지만, 한 개체 당 증가율 r 을 x 와 더불어 감소하는 함수인 $r(1 - \frac{x}{K})$ 로 치환한 것이다. 여기서 K 는 앞서 언급한 바와 같이 임의의 환경 속에서 유지되는 개체수인 환경수용력이다. 이 때문에 식 자체를 보았을 때 식을 이해하기 위해서는 x 와 K 의 상관관계 해석이 요구된다. x 가 K 보다 작을 때는 증가율이 증가하게 되고, x 가 K 보다 크면 증가율이 감소하게 된다. 증가율을 사용하여 인구수 $x(t)$ 를 적분을 사용하여 시간의 함수로 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} \int \frac{dx}{dt} &= \int rx \left(1 - \frac{x}{K}\right) dt \\ \Leftrightarrow \int_0^t \frac{1}{(K-x)x} dx &= \int_0^t \frac{r}{K} dt \\ \Leftrightarrow \int_0^t \frac{1}{x(K-x)} dx &= \frac{r}{K} t \\ \Leftrightarrow \frac{1}{K} \int_0^t \frac{1}{x} + \frac{1}{K-x} dx &= \frac{r}{K} t \\ \Leftrightarrow \frac{1}{K} \left[\ln \frac{x(t)}{x(0)} - \ln \frac{x(t)-K}{x(0)-K} \right] &= \frac{r}{K} t \\ \Leftrightarrow \ln \frac{x(t)(x(0)-K)}{(x(t)-K)x(0)} &= rt \\ \Leftrightarrow e^{rt} = \frac{x(t)(x(0)-K)}{(x(t)-K)x(0)} \\ \therefore x(t) &= \frac{K}{1 + Ce^{-rt}} \end{aligned}$$

이와 같이 인구수 $x(t)$ 가 표현되고, 여기서 C 의 값은 적분 상수로써, 개체수의 초깃값인 $x=0$ 을 대입시켜 보면 $C = K/x(0) - 1$ 이다.

우리의 목표는 이산질병모델에 대한 동력학적 성질 연구이다. 따라서 1.2에서 알아본 인구 연속 모델을 인구 모델의 기반으로 잡고, 이 모델의 연속적인 정보를 해석하기 위해 각각의 종속 변수를 임의로 지정하여 다음 II.3과 II.4절에서 질병모델에 따른 인구의 동력학적 성질 연구를 해석하고 예측해 볼 것이다.

3. 이종모델에서의 이산화와 해석

우리는 II.2절에서 알아보았던 인구 모델을 기본으로, 참고문헌 [9]의 연속 모델에 대하여 언급하겠다. 우리가 사용할 이산화 방법에 대해 소개하기 위해 단일모델에서의 한 예시인 로지스틱 인구모델에 대한 이산화에 대해 알아보겠다.

$$\text{로지스틱 인구모델: } \frac{dx}{dt} = rx \left(1 - \frac{x}{K}\right)$$

$$(\text{방법 1}) \quad \frac{dx}{dt} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{x(t+h) - x(t)}{h} \approx x(t+1) - x(t), (h=1 \text{로 근사})$$

$$t=n \text{ 일 때, } x(n+1) - x(n) = rx(n) \left(1 - \frac{x(n)}{K}\right) \text{을 유도할 수 있다.}$$

(방법 2) $h=1$ 로 근사하지 않고, $h=\delta$ 로 놓고 전개한다.

$$x(n+1) - x(n) = \delta \left(rx(n) \left(1 - \frac{x(n)}{K}\right) \right)$$

그러나 (방법 2)는 고등학교 교과과정에서 벗어나기 때문에 이산화방법을 사용할 때는 고등학교 교과 내에서 할 수 있는 $h=1$ 로 근사시킨 (방법 1)을 사용하겠다.

<이종모델에서의 이산화와 해석>

우리가 최종적으로 해석할 SIR모델은 이종모델로 표현되는 형태이기 때문에 이종모델에서의 이산화방법에 대하여 언급하겠다. 이종모델이란 예를 들자면 단일모델과 달리 포식자와 피식자 같은 두 개의 종을 동시에 고려하는 모델이다. 따라서 두 종을 x, y 로 지정한 후 아래와 같이 이산화 한다.

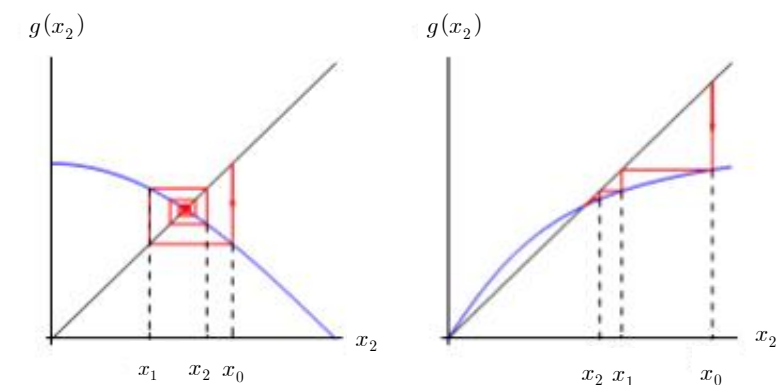
i) 이 두 종에 대한 함수가 있을 때, 각각을 (방법 1)로 이산화 한다.

$$\text{예) } \begin{cases} x_{n+1} = ax_n(1-x_n) - bx_ny_n \dots\dots ① \\ y_{n+1} = -dy_n + ex_ny_n \dots\dots ② \end{cases}$$

ii) 고정점을 찾자

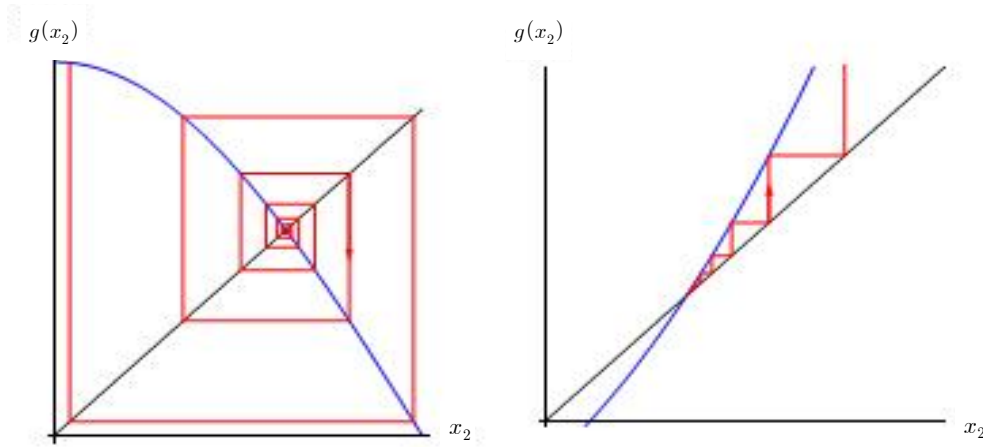
고정점을 찾기 전에 먼저 고정점에 대하여 알아보겠다. 간단히 말하자면 고정점은 함수나 변환에서 옮겨지지 않는 점이다. 즉, $f(x)=x$ 를 만족하는 x 를 함수 $f(x)$ 의 고정점이라고 한다(곡선 $y=f(x)$ 와 직선 $y=x$ 의 교점과 동일).

이 때, 이 고정점의 상태는 attracting(끌개), repelling(밀개), saddle, non-hyperbolic 등이 존재하는데 그 중 attracting과 repelling에 대해서 설명하겠다. attracting은 본래의 뜻과 같게 점들을 그 고정점으로 끌어당긴다고 하고 repelling은 점들을 그 고정점 밖으로 밀어낸다고 하여 이와 같은 명칭을 사용한다.



[Fig. 2] The fixed point attracting graph

▲ 고정점 근처에서 고정점으로 끌려 들어가는 것을 볼 수 있다.(화살표 방향 확인)



[Fig. 3] The fixed point repelling graph

▲ 고정점 근처에서 고정점 밖으로 밀려 나가는 것을 볼 수 있다.(화살표 방향 확인)

이 고정점의 정의를 알았으므로, 이제 x_n 과 x_{n+1} 의 크기가 같다고 보고 그 때 각각 방정식①과 ②의 해를 구하자.

$$\text{예) } \begin{cases} x = ax(1-x) - bxy \dots\dots ① \\ y = -dy + exy \dots\dots ② \end{cases}$$

그러면 고정점은 다음과 같이 세 점이 존재한다.

$$(0,0), (1 - \frac{1}{a}, 0), (\frac{d+1}{e}, \frac{1}{b}(\frac{d+1}{g(x_2)} - 1))$$

iii) 이 고정점의 상태(attracting, repelling 등)를 알기 위해 자코비안(Jacobian) 행렬과 근을 구하자.

앞서 말했듯 고정점의 상태는 attracting(끌개), repelling(밀개), saddle, non-hyperbolic 등이 존재한다. 그리고 우리가 탐구한 전염병모델에 대해 고정점이 가지는 의미는 다음과 같다. 고정점을 찾아 그 고정점이 attracting인 경우에는 시간이 흐른 뒤 그 고정점으로 인구가 갈 가능성이 높다는 것을 의미하고, repelling인 고정점은 그 고정점으로 인구가 갈 가능성이 낮다는 것을 의미한다. 이뿐만 아니라 repelling인 고정점 2개 사이에는 attracting인 고정점이 있을 것으로 유추 가능해 지므로 고정점을 찾고 그 고정점의 상태를 알아내는 것이 중요하다는 것을 알 수 있다.

이제 고정점의 상태를 알기 위해 고정점을 (x^*, y^*) 로 두고 $\begin{cases} f(x,y) = ax(1-x) - bxy \dots\dots ① \\ g(x,y) = -dy + exy \dots\dots ② \end{cases}$ 로 두자.

방정식 ①과 ②를 x, y 에 대한 함수로 간주하고 자코비안 행렬 $\begin{pmatrix} \frac{df(x,y)}{dx} & \frac{df(x,y)}{dy} \\ \frac{dg(x,y)}{dx} & \frac{dg(x,y)}{dy} \end{pmatrix}$ 을 구한 뒤, 그 행렬

의 x, y 값에 고정점 (x^*, y^*) 의 값을 행렬을 V 라고 하자.

$$\begin{pmatrix} \frac{df(x,y)}{dx} & \frac{df(x,y)}{dy} \\ \frac{dg(x,y)}{dx} & \frac{dg(x,y)}{dy} \end{pmatrix} \bigg|_{(x^*, y^*)} = \begin{pmatrix} a(1-x^*) + 1 - ax^* - by^* & -bx^* \\ ey^* & -d + ex^* \end{pmatrix} \dots\dots \text{행렬 } V$$

iv) 행렬 V 와 그것의 고유벡터(eigenvector)로 방정식을 만들어 행렬 V 의 고유치(eigenvalue)를 찾자.

$V \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = m \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$ 인 행렬을 사용하여 m 값을 구할 수 있으며, 이 행렬식을 아래와 같이 이차방정식으로 변환하였을 시 고정점 1개 당 고유치는 2개가 도출된다.

$$\begin{pmatrix} a(1-x^*) + 1 - ax^* - by^* & -bx^* \\ ey^* & -d + ex^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = m \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} a(1-x^*) + 1 - ax^* - by^* & -bx^* \\ ey^* & -d + ex^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m & 0 \\ 0 & m \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} a(1-x^*) + 1 - ax^* - by^* & -bx^* \\ ey^* & -d + ex^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} m & 0 \\ 0 & m \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = 0$$

$$\begin{pmatrix} a(1-x^*) + 1 - ax^* - by^* - m & -bx^* \\ ey^* & -d + ex^* - m \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = 0$$

$$\begin{cases} (a(1-x^*) + 1 - ax^* - by^* - m)x - bx^*y = 0 \\ ey^*x + (-d + ex^* - m)y = 0 \end{cases}$$

$$(1-x^*) + 1 - ax^* - by^* - m)(-d + ex^* - m) + bx^* - ey^* = 0$$

v) m 에 대한 이차방정식을 풀고, 고유치 m 을 해석해 이 고정점 (x^*, y^*) 를 해석하자.

<고유치 m 의 해석>

우리는 고유치 m_1 과 m_2 를 해석할 수 있다. 방정식은 총 4가지로 분류하여 이것을 분석하며, 먼저 고유치 m_1 과 m_2 의 절댓값이 1보다 작으면 위에서 언급했던 것처럼 고정점 근처의 어느 집단에서 시작해서 고정점으로 모이는 현상이 일어나는데, 이것을 attracting 이라고 한다. 두 번째로 m_1 과 m_2 의 절댓값이 모두 1보다 크면 고정점 주위의 어느 점에서 고정점으로부터 멀리 퍼져나가는 현상이 일어나는데, 이것은 repelling이다. 세 번째로 m_1 과 m_2 의 절댓값이 각각 1보다 크거나 작으면 saddle이라고 하며, 네 번째로 m_1 과 m_2 의 절댓값이 1이 되면 non-hyperbolic상태로, 이는 정의할 수 없다. 4가지의 변화 양상은 아래와 같이 정의 된다.

$$(1) (x^*, y^*) : \text{attracting if } |m_1| < 1, |m_2| < 1$$

$$(2) (x^*, y^*) : \text{repelling if } |m_1| > 1, |m_2| > 1$$

$$(3) (x^*, y^*) : \text{saddle if either } |m_1| > 1, |m_2| < 1 \text{ or } |m_1| < 1, |m_2| > 1$$

$$(4) (x^*, y^*) : \text{nonhyperbolic if either } |m_1| = 1 \text{ or } |m_2| = 1$$

4. SIR 질병모델의 동력학적 분석

SIR 모델은 어떠한 질병에 대하여 그 질병에 노출된 인구의 감염 가능 집단(Susceptible people), 감염 집단(Infected people), 회복된 집단(Recovered people)의 대략적인 수를 계산하기 위하여 쓰인다.

이 모델을 사용하기 위해서는 한 집단의 인구 단체를 필요로 하기 때문에 이러한 가상적인 단체를 사용하기 위해서는 기본적인 가정이 필요하다. 인구 집단은 아래와 같은 가정을 만족하며 쓰이게 된다.

<질병모델에 대한 가정(assume)>

- 1) 총 인구 수는 고정되어 있다.
- 2) 감염 가능 집단에서 벗어나기 위해서는 감염되어야 한다.
- 3) 감염 집단에서 벗어나기 위해서는 질병에서 회복되어야 한다.
- 4) 질병의 잠복기와 치료기간을 고려하지 않는다.
- 5) 한 번 치료한 사람은 면역성을 가진다.
- 6) 나이, 성별, 사회적 지위, 인종은 감염에 영향이 없다.
- 7) 면역은 유전되지 않는다.
- 8) 인구는 균일하게 분포되어 있다.
- 9) 다른 외부종과의 접촉은 없다.
- 10) 출생 비율과 사망 비율은 포함되어 있다.
- 11) 태어난 모든 사람은 S(감염 가능) 집단에 포함된다.
- 12) 세 집단에서 사망 비율은 각각 동일하며, 출생 비율과 사망 비율을 동일하게 함으로써 인구 집단의 총 수가 고정되도록 한다.

SIR 집단에 대한 정의

$S(t)$ 는 시간 t 에서의 감염 가능 집단의 인구 수

$I(t)$ 는 시간 t 에서의 감염된 집단의 인구 수

$R(t)$ 는 시간 t 에서의 회복된 집단의 인구 수

N 은 세 집단의 전체 인구 수

위의 이산화 방법을 이용하여 이제 우리가 제안했던 모델을 통하여 직접 이산화를 해보고 고정점을 알아본 후 동력학적 분석을 행하도록 하겠다.

$$(모델1) \begin{cases} N = R(t) + I(t) + S(t) : \text{고정된 총인구수} \\ \frac{dS}{dt} = \mu N - \mu S(t) - \beta \frac{S(t)}{N} I(t) \\ \frac{dI}{dt} = \beta \frac{S(t)}{N} I(t) - \gamma I(t) - \mu I(t) \\ \frac{dR}{dt} = \gamma I(t) - \mu R(t) \end{cases}$$

$R(t) = N - S(t) - I(t)$ 이므로 $S(t), I(t), R(t)$ 를 구할 수 있다. 여기서 μ : 출생율과 사망률, β :전염율, γ : 회복률이다. II.3절에서 언급한 수학적 모델의 이산화 방법을 토대로 $S(t), I(t)$ 에 대한 이산화식을 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{dS}{dt} &= \lim_{\substack{h \rightarrow 0 \\ \approx h=1 \\ t=n}} \frac{S(t+h) - S(t)}{h} = S(t+1) - S(t) \\ &= S(n+1) - S(n) \\ S(n+1) - S(n) &= \mu N - \mu S(n) - \frac{\beta}{N} S(n) I(n) \\ \frac{dI}{dt} &= \lim_{\substack{h \rightarrow 0 \\ \approx h=1 \\ t=n}} \frac{I(t+h) - I(t)}{h} \\ &= I(t+1) - I(t) \\ &= I(n+1) - I(n) \end{aligned}$$

이 식을 이용하여 (모델1)로 다음과 같은 이산화 방정식을 도출할 수 있다.

$$(모델2) \begin{cases} S(n+1) - S(n) = \mu N - \mu S(n) - \frac{\beta}{N} S(n) I(n) \\ I(n+1) - I(n) = \frac{\beta}{N} S(n) I(n) - \mu I(n) - \gamma I(n) \\ R(n+1) - R(n) = N - S(n) - I(n) \end{cases}$$

(단, μ : 출생, 사망 비율, β : 전염율, γ : 회복률)

본 연구는 위의 (모델2)에 대한 고정점 근처에서의 동력학적 성질을 분류하는 것이다. 이를 위하여 먼저 위 모델의 고정점을 구하도록 한다. 고정점을 구하기 위하여

$$S(n) = S, \quad I(n) = I \quad \forall n$$

로 두자. 그러면 (모델2)로부터 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{cases} \mu N - \mu S - \frac{\beta}{N} SI = 0 \\ \frac{\beta}{N} SI - \mu I - \gamma I = 0 \\ N - S - I = 0 \end{cases}$$

이중 두 번째 식으로부터 $I(\frac{\beta}{N} S - \mu - \gamma) = 0$ 을 얻을 수 있다. 이로부터 아래와 같은 두 경우를 고려한다.

$$1) I = 0 \quad 2) S = \frac{N}{\beta}(\mu + \gamma)$$

이제 이 두식을 이용하여 1)과 2), 이 두 가지의 상황을 사용하여 각각의 고정점을 찾아보고 SIR 집단 각각의 인구 함수를 정립할 수 있다.

경우 1) $I = 0$

$$\begin{aligned} 0 &= 0 - \mu S + \mu N - 0 \\ \therefore S &= N \\ \therefore (S_0, I_0, R_0) &= (N, 0, 0) \end{aligned}$$

SIR 집단의 인구 분포 형태 중 하나의 고정점은 위와 같이 나타나게 된다. 다음으로 2)의 상황을 식에 대입하여 정리하도록 하겠다.

$$\text{경우 2) } S = \frac{N}{\beta}(\mu + \gamma)$$

$$\begin{aligned} 0 &= -\mu S - \frac{\beta}{N} SI + \mu N \\ &= S(-\mu - \frac{\beta}{N} I) + \mu N \\ -\mu + \frac{\beta}{N} S(n) - \gamma &= 0 \\ \mu S &= \mu N - (\mu + \gamma)I \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\therefore I &= \frac{\mu N - \frac{N}{\beta} \mu (\mu + \gamma)}{\mu + \gamma} \\ &= \frac{\mu N (\beta - \mu - \gamma)}{\beta (\mu + \gamma)} \\ \therefore (S^*, I^*, R^*) &= \left(\frac{N}{\beta} (\mu + \gamma), \frac{\mu N (\beta - \mu - \gamma)}{\beta (\mu + \gamma)}, N - S^* - I^* \right)\end{aligned}$$

이로부터 구해지는 두 번째 고정점은 위와 같이 나타난다.

이제 두 상황에서의 S, I 집단의 관계를 구하였다. 이것은 SIR 모델 각각의 고정점이며, 이를 사용하여 II.3절을 참고하여 위에서 행하였던 것처럼 이 고정점의 상태(attracting, repelling 등)를 알기 위해 행렬과 고유치를 구하도록 하겠다. 이를 위하여

$$f(S, I) = \mu N - \mu S - \frac{\beta}{N} SI, \quad g(S, I) = \frac{\beta}{N} S - \mu - \gamma$$

로 두자.

1) 고정점 $(S_0, I_0, R_0) = (N, 0, 0)$ 인 경우

$$\begin{aligned}V &= \begin{pmatrix} \frac{df}{dS} & \frac{df}{dI} \\ \frac{dg}{dS} & \frac{dg}{dI} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\mu - \frac{\beta}{N} I & -\frac{\beta}{N} S \\ \frac{\beta}{N} I & -\mu + \frac{\beta}{N} S - \gamma \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} -\mu & -\beta \\ 0 & -\mu + \beta - \gamma \end{pmatrix}\end{aligned}$$

$$(-\mu - m)(-\mu + \beta - \gamma - m) = 0$$

$$\therefore m = -\mu \text{ or } -\mu + \beta - \gamma$$

2) 고정점 (S^*, I^*, R^*) 인 경우

이 고정점의 경우 간단한 양상인 1)과 다르게 복잡한 식을 가진다. 따라서 수식을 간단하고 빠르게 계산하기 위하여 MATLAB을 사용하여 수식을 정리하였다. 하지만 고유치 m 을 구하였을 때 매우 복잡한 식을 가져 단순하게 아래와 같이 이차방정식으로 해석하는 것이 간단하다고 판단하였다. 이 2)의 경우 이차방정식과 그 해는 아래와 같다.

$$(\mu + \gamma)m^2 - (\mu\beta)m + \mu(\mu + \gamma)(\beta - \mu - \gamma) = 0$$

$$m = \frac{\mu\beta \pm \sqrt{\mu^2\beta^2 - 4\mu(\mu + \gamma)^2(\beta - \mu - \gamma)}}{2(\mu + \gamma)}$$

위의 고정점들에 대하여 우리는 아래와 같이 이산질병모델2의 고정점 근처의 동력학적 성질을 얻을 수 있다.

정리1) 고정점 $(S_0, I_0, R_0) = (N, 0, 0)$ 에서 이 고정점이 attracting일 조건

$$|\mu| < 1 \text{ \& } |\beta - \mu - \gamma| < 1$$

정리2) 고정점 $(S_0, I_0, R_0) = (N, 0, 0)$ 에서 이 고정점이 repelling일 조건

$$|\mu| > 1 \text{ \& } |\beta - \mu - \gamma| > 1$$

정리3) 고정점 $(S_0, I_0, R_0) = (N, 0, 0)$ 에서 이 고정점이 saddle일 조건

$$|\mu| < 1 \text{ \& } |\beta - \mu - \gamma| > 1 \text{ 또는 } |\mu| > 1 \text{ \& } |\beta - \mu - \gamma| < 1$$

정리4) 고정점 $(S_0, I_0, R_0) = (N, 0, 0)$ 에서 이 고정점이 nonhyperbolic일 조건

$$|\mu| = 1 \text{ 또는 } |\beta - \mu - \gamma| = 1$$

정리5) 고정점 (S^*, I^*, R^*) 에서 이 고정점이 attracting일 조건

$$\left| \frac{\mu\beta \pm \sqrt{\mu^2\beta^2 - 4\mu(\mu + \gamma)^2(\beta - \mu - \gamma)}}{2(\mu + \gamma)} \right| < 1$$

정리6) 고정점 (S^*, I^*, R^*) 에서 이 고정점이 repelling일 조건

$$\left| \frac{\mu\beta \pm \sqrt{\mu^2\beta^2 - 4\mu(\mu + \gamma)^2(\beta - \mu - \gamma)}}{2(\mu + \gamma)} \right| > 1$$

정리7) 고정점 (S^*, I^*, R^*) 에서 이 고정점이 saddle일 조건

$$\begin{aligned}&\left| \frac{\mu\beta - \sqrt{\mu^2\beta^2 - 4\mu(\mu + \gamma)^2(\beta - \mu - \gamma)}}{2(\mu + \gamma)} \right| > 1 \text{ 그리고 } \left| \frac{\mu\beta + \sqrt{\mu^2\beta^2 - 4\mu(\mu + \gamma)^2(\beta - \mu - \gamma)}}{2(\mu + \gamma)} \right| < 1 \\ \text{또는 } &\left| \frac{\mu\beta - \sqrt{\mu^2\beta^2 - 4\mu(\mu + \gamma)^2(\beta - \mu - \gamma)}}{2(\mu + \gamma)} \right| < 1 \text{ 그리고 } \left| \frac{\mu\beta + \sqrt{\mu^2\beta^2 - 4\mu(\mu + \gamma)^2(\beta - \mu - \gamma)}}{2(\mu + \gamma)} \right| > 1\end{aligned}$$

정리8) 고정점 (S^*, I^*, R^*) 에서 이 고정점이 nonhyperbolic일 조건

$$\left| \frac{\mu\beta - \sqrt{\mu^2\beta^2 - 4\mu(\mu + \gamma)^2(\beta - \mu - \gamma)}}{2(\mu + \gamma)} \right| = 1 \text{ 또는 } \left| \frac{\mu\beta + \sqrt{\mu^2\beta^2 - 4\mu(\mu + \gamma)^2(\beta - \mu - \gamma)}}{2(\mu + \gamma)} \right| = 1$$

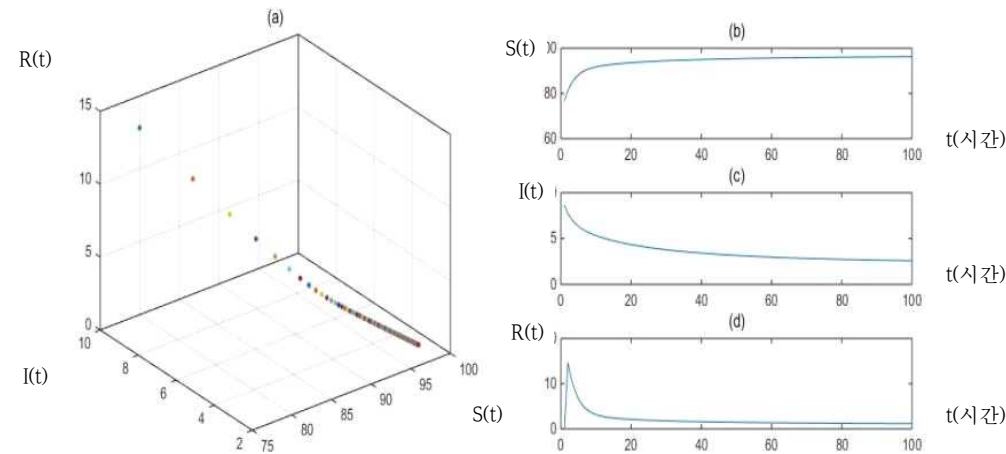
5. SIR 질병모델에 대한 수치 예

본 팀은 MATLAB이라는 프로그램을 사용하여 고정점을 시각적으로 나타내었다[2].

MATLAB 이란 MATrix LABoratory를 줄인 말로, 행렬을 만들고 조작하는 프로그래밍 언어이다. 따라서 행렬을 이용하여 데이터와 함수 처리가 쉽고, 그래프에 표현할 수 있으며, 다른 프로그래밍 언어와 연결하여 사용할 수 있다. 그러므로 본 팀은 행렬을 이용해서 이종모델에서의 해석을 MATLAB을 이용해 보다 더 쉽게 하고자 한다.

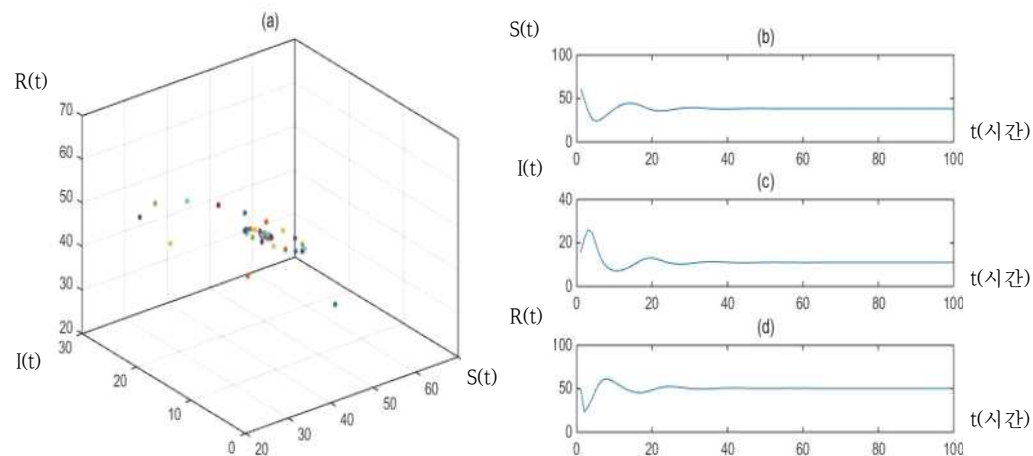
MATLAB을 사용하여 이산모델화를 한 식에서 고정점을 찾고, II.4절에서 이러한 고정점에 대한 행렬로 구한 방정식의 해의 절댓값이 1을 기준으로 attracting, repelling, saddle, non-hyperbolic인 것을 구별할 수 있다고 언급하였다. 또한 MATLAB을 사용하여 감염 가능성이 있는 집단, 감염된 집단, 회복된 집단의 인구수의 자취를 알아보고, 시간에 따른 각 집단의 변화 양상을 시각적으로 살펴보고자 한다. 이러한 방법을 통하여 알아낸 수치적, 시각적 예시들은 다음과 같다.

(예제 1) $\mu = 0.3434, \gamma = 0.1544, \beta = 0.51447, N = 100$ 이면 고정점 $(S, I, R) = (100, 0, 0)$ 이다. 정리 1에 의해 고정점(100,0,0)은 attracting이다. 이를 MATLAB을 이용한 그래프는 [Fig. 4]와 같다.



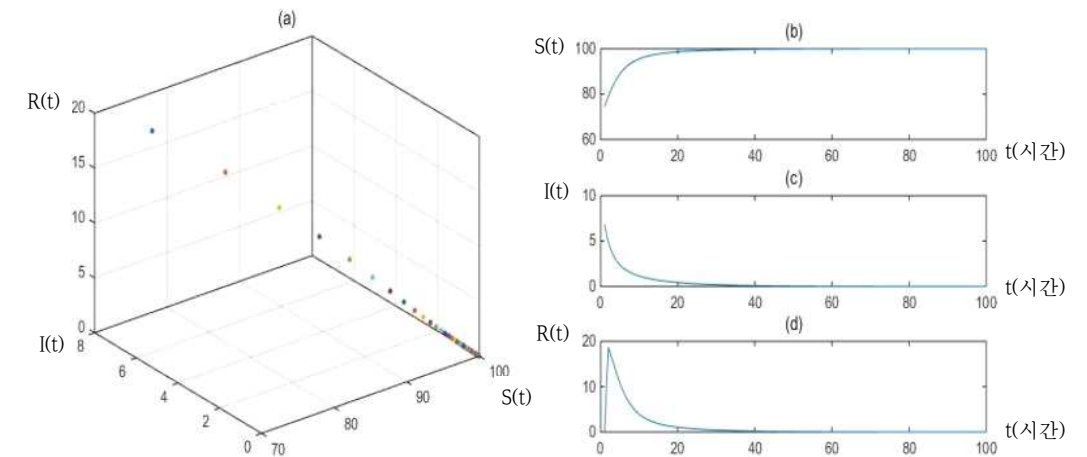
[Fig. 4] (a) The trace of example 1, which is starting point, $(S(0), I(0), R(0)) = (70, 10, 20)$, (b) The trace of $S(t)$ according to time t , (c) The trace of $I(t)$ according to time t , (d) The trace of $R(t)$ according to time t

(예제 2) $\mu = 0.1244$, $\gamma = 0.5678$, $\beta = 1.7987$, $N = 100$ 이면 고정점(S^*, I^*, R^*) = (38.4833, 11.0556, 50.4611)이다. 정리 5에 의해 고정점(38.4833, 11.0556, 50.4611)은 attracting이다. 이를 MATLAB을 이용한 그래프는 [Fig. 5]와 같다.



[Fig. 5] (a) The trace of example 3, which is starting point, $(S(0), I(0), R(0)) = (70, 10, 20)$, (b) The trace of $S(t)$ according to time t , (c) The trace of $I(t)$ according to time t , (d) The trace of $R(t)$ according to time t

(예제 3) $\mu = 0.3434$, $\gamma = 0.55848$, $\beta = 0.830777$, $N = 100$ 이면 고정점(S^*, I^*, R^*) = (109.6805, -3.6482, -6.0322)이다. 정리 6에 의해 고정점(109.6805, -3.6482, -6.0322)은 repelling이다. 이를 MATLAB을 이용한 그래프는 [Fig. 6]과 같다.



[Fig. 6] (a) The trace of model 4, which is starting point, $(S(0), I(0), R(0)) = (70, 10, 20)$, (b) The trace of $S(t)$ according to time t , (c) The trace of $I(t)$ according to time t , (d) The trace of $R(t)$ according to time t

III. 결론

1. 요약 및 정리

본 연구에서는 수학적 모델링이란 방법을 통해 이산질병모델에 대한 동력학적 성질 연구를 수행하였다. 우리는 고등학교 과정에서 충분히 수행할 수 있는 이산화방정식과 행렬, 미분 방정식 등을 사용하여 수학적 모델링을 통해 질병모델을 가정하였다. 우리의 연구에서는 인구 모델의 특성, 이를 이용한 SIR 질병모델을 만들 수 있었고 이 모델을 이산화 하여 출생, 사망비율, 전염율, 회복률에 따라서 전염 가능성 집단, 전염된 집단, 회복된 집단의 인구수를 파악하여 각 변수를 한 함수로 보아 인구의 양상이 결국 함수의 어떠한 점으로 표현되는지 알아볼 수 있었다.

또한 최종적으로 이 인구 모델을 한눈에 간편히 알아볼 수 있도록 MATLAB이라는 컴퓨터 프로그래밍을 통해 수식을 해석하고 여러 경우로 분류하여 시간에 따른 전체 인구, S, I, R 집단의 인구를 각각의 그래프로 나타내었다.

2. 의의 및 추가 논의

우리의 연구는 수학적 모델링을 통한 질병 분석이라는 기법을 채택하고 있었기에 그 특성상 실제 질병의 확산 정도와는 어느 정도의 차이가 존재할 수밖에 없다. 그럼에도 불구하고 우리의 연구는 실제 사례의 모델을 제공하고, 이를 바탕으로 미래를 예측할 수 있는 기본적인 틀을 잡을 수 있다는 점과 그다지 전문적이지 않은 고등학생 수준의 수학적 지식으로서도 수학적 모델링에 접근할 수 있다는 점에 본 연구의 의미를 둘 수 있다. 또한 이 모델을 간단히 표현하기 위해 현실적인 요소들을 많이 배제하고 생략하였지만, 사회적으로 실용화하여 사용할 수 있도록 높은 수준의 인구 모델을 요구할 시에는 이 점

을 보완하여 더 많은 시간과 노력을 투자한다면 나아가 높은 수준의 복잡하고 더욱 더 현실적인 질병모델의 동태와 인구 양상을 충분히 파악할 수 있을 것이라 예상한다.

IV. 참고문헌

- [1] 고정점. http://goo.gl/imperial.ac.uk/metric/metric_public/numerical_methods/iteration/fixed_point_iteration.html (검색일: 2015.09.16).
- [2] 방성완 (2014). **제대로 배우는 MATLAB**. 서울: 한빛 아카데미.
- [3] 서민아, 이지현, 지혜진, 김영근, 강대용, 허남욱, 하경화, 이동한, 김창수 (2010). 수학적 모델을 이용한 신종인플루엔자 환자예측 및 대응 전략 평가. *Journal of Preventive Medicine and Public Health*, 43(2), 109-116.
- [4] 수학적 모델링. <http://goo.gl/report.dreamwiz.com/view/3476930> (검색일: 2015.06.20).
- [5] 이상구, 고래영, 이재화 (2010). 신종 인플루엔자의 수학적 모델링 한국수학교육학회, <E-수학교육 논문집> 24권4호.
- [6] 이와사 요 (2011). **수리 생물학 입문**. 부산: 부산대학교출판부.
- [7] 정덕한 (2003.06.04). 수리생물학, 수학과 생물학의 새로운 만남. 카이스트 신문. p. 12.
- [8] Robert, L. D. (1992). *A First Course in Chaotic Dynamical Systems*. MA: Addison Wesley Publishing company
- [9] Chauhan, S., Misra, O. P., & Dhar, J. (2014). Stability analysis of SIR model with vaccination. *American Journal of Computational and Applied Mathematics*, 4(1), 17-23.
- [10] Smith T. M., & Smith, R. L. (2008). *Elements of Ecology (7th Ed.)*. 강혜순, 오인혜, 정 근, 이우신 역 (2011). **생태학 7판**, 서울: 라이프사이언스.
- [11] Teng, Z., Nie, L., & Xu, J. (2013). Dynamical behaviors of a discrete SIS epidemic model with standard incidence and stage structure. *Advances in Difference Equations*, 2013(1), 1-23.

| 연구진 |

임재웅 (Lim Jaewoong, 경산과학고등학교, dr472@naver.com)

설채은 (Seol Chaeun, 경산과학고등학교, eun476@naver.com)

김성준 (Kim Seongjun, 경산과학고등학교, tjdwns0618@naver.com)

김규리 (Kim Gyuri, 경산과학고등학교, suri126@naver.com)

지도교사 : 신현주 (Shin Hyunju, 경산과학고등학교, 수학, shj65w@naver.com)

지도교수 : 백헌기 (Baek Heonki, 대구가톨릭대학교 수학교육과, hkbaek@cu.ac.kr)

액체 금속을 이용한 열전쌍 온도계

권훈범 · 강현구 · 김진우 · 박준영 – 한성과학고등학교

Liquid Metal Thermocouple

Kwon Hoonbeom · Kang Hyungu · Kim Jinwoo · Park Junyoung - Hansung Science High School

ABSTRACT

This paper reports flexible thermocouple-type temperature sensors fabricated by using liquid metals and silicone elastomer ultimately entended for wearable devices and medical applications. Eutectic gallium-indium and gallium were prepared and used for two metal electrodes required to make a thermocouple junction by spray printing via shadow masks. To improve accuracy and reliability during temperature measurements, the thermocouple circuit was designed to have a common ground electrode. After the device fabrication, the thermal electromotive force (or voltage) and temperature characteristics of fabricated flexible liquid metal based thermocouples were thoroughly investigated while the temperature was varied from 30 to 100℃ using a hot plate. A linear relationship between the thermal electromotive force and temperature was observed and well matched with the expected Seebeck effect. The accuracy and reliability of the fabricated flexible thermocouples are well-suited for wearable and medical applications.

Key words:

Liquid Metal, Silicone Lastomer, Thermocouple, Thermal Electromotive Force

국문초록

본 연구에서는 인체에 착용 가능하며 휘어지는 특성을 갖는 플렉시블 열전쌍 온도 센서를 제작하고 동작 특성을 평가하였다. 센서 제작을 위해 열전쌍 재료로서 상온 이하의 녹는점과 표면 산화막 형성으로 인한 형상 유지 및 단성 변형이 가능한 액체 금속인 갈륨과 EGaln 합금을 선택하였으며 유연 기판 위에 프린팅하는 방법을 이용하여 액체 금속의 패턴 형성 및 소자 제작을 수행하였다. 특히 프린팅 방법으로 제작된 액체 금속 균일도 향상을 위해 분사 방식을 사용한 패턴 형성 공정을 도입하였으며, 소자 설계 시 1개의 그라운드(기준접점)로 여러 개의 각기 다른 열전쌍의 신호를 측정할 수 있도록 소자의 디자인을 개선하였다. 제작된 열전쌍 온도 센서를 핫플레이트 위에 올려놓은 후 핫플레이트의 온도를 특정 온도로 맞추어서 열기전력과 온도 사이의 변화를 측정하였으며, 온도와 열기전력이 일정한 기울기를 갖는 일차 함수의 관계가 있는 것이 관찰되었다.

중심어 :

액체 금속, 열전쌍 온도계, 열기전력

I. 서론

최근 유연한 전자소자(flexible electronic device), 유연 반도체(flexible semiconductor)를 기반으로 제작된 유연 디스플레이(flexible display)와 같은 웨어러블(wearable) 전자제품에 대한 관심이 크게 증가하고 있다. 이렇게 전 세계적으로 웨어러블 전자제품에 대한 관심이 증대함에 따라 국내외의 여러 기업에서 웨어러블 글라스([Fig. 1] (a)), 스마트 워치([Fig. 1] (b)), 플렉시블 OLED, 플렉시블 스마트폰을 앞 다투어 선보이고 있다. 이러한 유연 전자 장비는 현재 다양한 분야에서 사용되고 있으며, 장비 속에 들어가는 유연성 소자 및 센서에 대한 연구도 활발하게 이루어지고 있다. 특히 그 중에서도 스트레인게이지[1], 압력 센서[2], 텍타일 센서[3] 등에 대한 연구 개발이 활발하게 이루어지고 있다.

유연성 소자에 대한 기술은 최근 정보통신 기술과 접목되어 사람이 몸에 직접 착용할 수 있는 웨어러블 어플리케이션 기술에 초점이 맞춰져 있다. 이런 어플리케이션 기술을 의료기기 분야에 응용하기 위해서는 신체의 다양한 정보를 측정해야 할 센서가 웨어러블 전자장비에 결합되어야 한다. 따라서 인체의 부분적인 온도를 측정할 새로운 유연소자를 필요로 한다.

이러한 유연소자를 제작함에 있어, 기존 센서들은 실리콘(Silicon) 및 금속 등으로 제작되었기 때문에 스트레칭 및 트위스팅과 같은 모션에 대해서 한계점이 존재한다. 따라서 최근 전 세계적으로 다양한 소재들을 이용한 유연성 디바이스 제작이 시도되고 있다. 대표적으로 기존 탄성이 없는 기판을 대체하기 위해 PET(Polyethylene terephthalate), PDMS(Polydimethylsiloxane), Ecoflex 등을 이용하여 유연한 기판을 구성하고 금속 전극의 단선을 막기 위해 연성이 좋은 금을 패터닝[4]을 통해서 신축성을 증가시켰다. 그리고 액체금속(Mercury, Gallium, EGaIn)[5,6]을 사용하여 다양한 센서들을 제작하는 연구들이 많이 진행되었다. 그 중 유연성 열전대를 구현하기 위해 EGaIn를 종이와 붓을 이용한 프린팅 방식으로 제작한 소자는 이미 존재[7] 하지만, 붓을 이용하여 액체금속을 패터닝 함으로 인해 균일도가 떨어질 뿐만 아니라 종이가 탄성이 없기 때문에 곡면에 적용하기 어렵다는 단점이 존재한다. 본 논문연구에서는 앞선 문제들을 해결하기 위해서 휘어지면서 늘어나는 온도센서를 제작하고 그 성능을 평가하였다.



[Fig. 1] Comercial Flexible Electronic Devices
(a) Google Glass(American google) (b) Galaxy Gear(Samsung Electronics Co.)

II. 이론적 배경

1. 액체 금속

액체 금속은 녹는점이 상온과 유사한 온도이므로 유동성을 갖는 액체 상태로 존재하며 일반적으로 높은 열전도도, 전기전도도, 열팽창계수를 갖는다. 대표적인 액체 금속으로 수은(mercury; Hg)과 eutectic sodium potassium(NaK) 등이 있으나 높은 독성과 반응성 때문에 최근에는 소자 제작 시 거의 사용하지 않고 있다.

본 연구에서 사용한 갈륨은 녹는점이 약 29.8 °C로 상온 근처에서 액체로 존재하는 금속 중의 하나이다. 특히 다른 금속과 합금으로 제조 시 다음과 같은 장점들이 있어 수은 대신에 많이 쓰인다.

먼저, 녹는점이 낮아 금속을 만들기가 용이하고 인체에 흡수가 잘 되지 않으며 독성이 거의 없는 것으로 알려져 있다. 그리고 갈륨은 대부분의 금속이나 합금에 쉽게 확산이 되어 쉽게 부서지게 만들며, 합금을 잘 만든다. 갈륨의 다른 특성으로는 금속으로서 전기 전도성을 가지고 있다는 것과 산소와 접촉하게 되면 산화 반응을 한다는 것이 있다. 특히 갈륨이 산화를 하게 되면 산화 갈륨을 만들게 되는데,

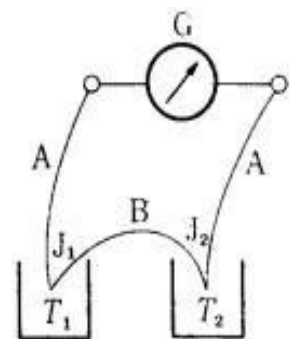
이때 실온에서는 산화물 보호 피막이 만들어져 공기나 물에서 산화가 더 이상 일어나지 않게 된다. 피막 안에서는 갈륨은 액체와 같은 유동성을 유지한다. 순수한 인듐은 독성이 거의 없는 것으로 알려져 있으며 체내에 축적되지 않는다. 인듐은 다른 금속에 미량만 첨가해도 금속의 성질을 크게 바꿔 합금 제조에 매우 중요하게 쓰이며, 전기전도성도 다른 금속에 비해 좋은 것으로 알려져 있다.

본 연구에서 사용한 액체금속은 EGaIn으로 갈륨과 인듐을 3:1 비율로 혼합한 합금이다. 이는 새로운 액체 금속으로 주목 받고 있으며, 갈륨의 성질 중 하나인 산화막을 형성하는 특징이 있다. 산화막을 형성하면 상온에서 공기나 물에 반응을 잘 하지 않고 표면에는 산화막을 형성하지만 그 내부에서는 여전히 액체와 같은 유동성을 가지게 된다. 그리고 녹는점은 15.5 °C로 상온에서 액체 상태로 존재해 액체 금속으로 쓰일 수 있다. 이러한 EGaIn을 만드는 방법은 갈륨:인듐을 질량비 3:1로 용기에 넣고 섞어 주면 된다. 만약 만드는 과정에서 산화막이 만들어져서 잘 섞이지 않으면 중간에 에탄올을 넣어 주면 된다.

EGaIn은 높은 전기전도성을 가지고 있으며 갈륨, 인듐과 마찬가지로 현재 밝혀진 독성은 없다. 앞서 설명한 갈륨, EGaIn 외에도 다양한 액체 금속이 존재 하는데, 독성을 가지고 있는 수은이나 폭발성을 가지고 있는 나트륨 외에도 갈린스탄이라는 액체 금속도 있다. 갈린스탄은 68.5%의 갈륨, 21.5%의 인듐, 10%의 주석으로 이루어져 있으며, 녹는점이 -19 °C로 크게 낮아서 의료용 온도계로 많이 쓰인다. 현재까지 설명한 액체 금속은 녹는점이 상온 이하인 금속을 말하였지만, 이 외에도 액체처럼 불규칙한(비정질) 원자구조를 지닌 합금인 비정질합금을 액체금속이라고 부르기도 한다.

2. 제백 효과

제백 효과란 [Fig. 2]의 회로 모양처럼 두 종류의 금속선을 접하게 하여 폐회로를 만들고 그 두 접합부를 서로 다른 온도로 유지했을 때 기전력이 발생하는 현상으로 제백이 실험적으로 발견하여 이름이 붙여졌다. 제백 효과의 크기는 서로 다른 두 금속 A, B의 종류에 따라 다르다. 즉 접점의 온도 차이가 같다고 해도 발생하는 기전력의 크기가 금속의 종류에 따라서 달라지며 이때, 온도에 따라 달라지는 기전력의 기울기를 제백 상수라고 한다. 제백 효과에 의해 만들어지는 열기전력을 V , 양 금속의 온도를 T_1 , T_2 두 금속 A, B사이의 제백 상수를 J 라고 하면 $V = J(T_1 - T_2)$ 이다. 여기서 두 금속이 접촉한 부분 J_1 , J_2 를 열전대라고 하고 발생한 기전력을 열기전력이라고 한다. 한쪽의 온도를 일정하게 해주고 다른 쪽의 온도를 일정하게 올리면 열기전력이 선형적으로 증가하게 되는데, 이 성질을 이용해서 열전쌍 온도계를 만들 수 있다(기울기가 물체의 제백 상수다.).



[Fig. 2] Seebeck effect

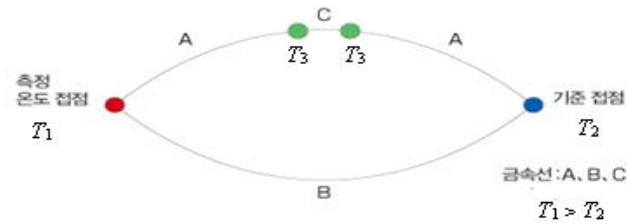
3. 제백 효과의 기본 성질

가. 균질 회로의 법칙

단일하며 균질한 재료에서 나온 금속선에서는 형상, 온도 분포에도 불구하고 열기전력은 발생하지 않는다. 열전대의 열기전력은 양 접점의 온도로만 결정되며, 진행 도중의 온도 분포에는 영향을 받지 않는다.

나. 중간금속의 법칙

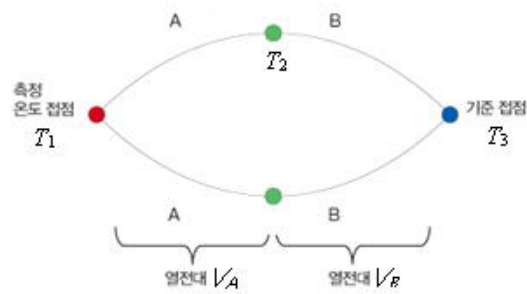
열전대가 만드는 회로의 임의의 위치에 이중 금속선 C를 [Fig. 3]과 같이 삽입했을 때 삽입 금속선 C의 양 끝 온도 (T_3)가 같을 경우, 열전대의 기전력은 변화되지 않는다.



[Fig. 3] Law of intermediate metals

다. 중간온도의 법칙

두 열전대를 [Fig. 4]와 같이 직렬로 접속했을 때 회로 전체에서 얻을 수 있는 열기전력은 T_1 , T_2 의 온도차로 생기는 열기전력 A와 T_2 , T_3 의 온도차로 생기는 열기전력 B의 합이다.



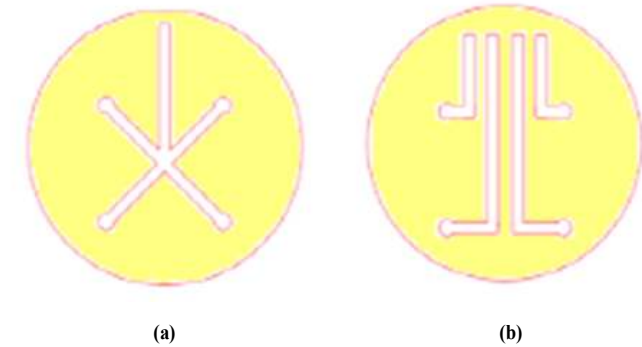
[Fig. 4] Law of intermediate temperature

III. 연구방법

1. 열전쌍 온도계 제작 방법

본 연구에서는 열전쌍 제작을 위한 액체 금속으로 갈륨과 갈륨-인듐을 선택하였다. 일반적인 액체 금속은 흘러내려서 온도센서를 만들기에 적당하지 않다. 하지만 갈륨과 갈륨-인듐은 갈륨이 산화막을 형성하여서 액체 금속이 흘러내리지 않으므로 온도센서를 만들기에 적합하다. 프린팅을 하는 기판은 유연하고 늘어날 수 있는 에코플렉스를 이용해 온도센서가 늘어나고 휘어질 수 있도록 하였으며, 프린팅 시 액체 금속이 유연기판 위에 균일하게 패터닝 될 수 있도록 스프레이 방식을 이용하였다.

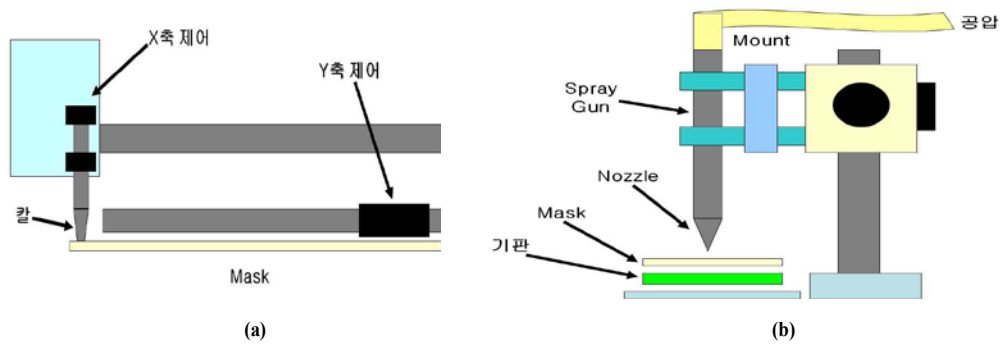
열전쌍 디자인 시 1개의 그라운드로 여러 개의 열전쌍에서 오는 신호를 받아들일 수 있도록 디자인을 하였다. 본 연구에서는 [Fig. 5]와 같이 2행 2열의 열전쌍을 제작한 후 온도에 따른 각 열전쌍에서 발생하는 열기전력을 측정하여 온도-열기전력 사이의 관계를 측정하였으며, 제백효과에 따른 일차함수의 형성 여부를 확인하여 제작된 온도 센서의 정확도를 평가하였다.



[Fig. 5] Circuit layout of Ga-EGaIn thermocouple
(a) Gallium electrode and ground (b) EGaIn electrode

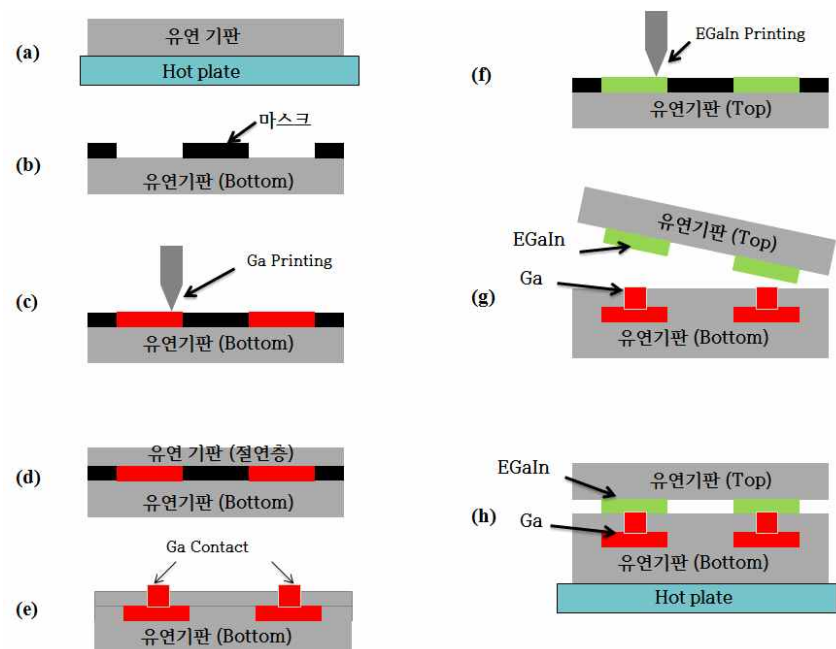
2. 열전쌍 온도계 제작 공정

- (1) 마스크를 제작하기 위해서 먼저 마스크 필름에 패턴을 형성하는 기계를 이용하였다. 마스크 패턴 형성 기계는 컴퓨터로 도면을 설계한 후 [Fig. 6]의 (a)와 같이 마스크를 X축 Y축으로 잘라주는 기계를 이용하였다. 본 연구에서는 PET 필름을 [Fig. 5]와 같이 설계 도면대로 잘랐다.
- (2) 열전쌍 온도계에서 쓰일 유연기판은 늘어나면서 휘어질 수 있는 소재여야 한다. 따라서 [Fig. 7]의 (a)와 같이 실리콘과 경화제를 1:1로 섞은 다음 핫플레이트로 99 °C의 온도를 가해주어서 Ecoflex라는 초탄성 유연기판을 제작하였다. 유연 기판 위에 제작한 PET 마스크를 올려 두었다. 열전쌍 온도계의 하부 기판의 회로는 열전대와 그라운드를 연결할 회로이고 갈륨으로 프린팅 했다([Fig. 7] (b)-(c)).
- (3) 유연기판 위의 액체금속패턴 형성은 스프레이 프린팅 방법을 이용하였다. 스프레이 방식은 모든 회로에 균일한 두께로 액체금속 프린팅이 가능하다. 프린팅 시 두께의 불균일성은 저항의 변화를 초래하여 정확한 온도 측정이 어렵게 될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 [Fig. 6]의 (b)와 같이 스프레이 방식으로 프린팅 할 수 있는 기계를 제작 하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 스프레이건을 공압에 연결한 후(공압은 균일한 압력을 스프레이건에 전해 주어서 균일하게 액체금속이 나올 수 있도록 해준다.) 스프레이건을 스탠드에 고정시켰다. 먼저 프린팅한 액체금속은 갈륨이다. 이는 나중에 EGaIn과 섞이는 것을 방지하기 위한 조치이다.



[Fig. 6] Schematic drawings of (a) Mask patterning Tools and (b) Spray printing machine

- (4) 갈륨 프린팅 후 그 위에 다시 Ecoflaex로 절연코팅([Fig. 7] (d))을 하였다. 이는 회로에서 열전대 접촉 전극 부분을 제외하고 EGaIn과의 통전 차단 목적이다. 또한 열전대의 Ga-EGaIn 접촉 전극 형성을 위해서 절연코팅 위에 펀치를 이용하여 홀(Contact Hole)을 형성하였으며 주사기를 이용하여 갈륨을 주입하였다. [Fig. 7]의 (e)는 Ga 접촉 전극이 형성된 하부 유연기판이다.
- (5) 상부 EGaIn 열전대 전극 및 채널 제작을 위해 Ecoflex 유연기판을 동일한 공정을 통하여 제작하였다. [Fig. 7]의 (f)와 같이 스프레이 방식으로 EGaIn을 유연기판 위에 프린팅 함으로써 상부 기판이 완성되었다.
- (6) 완성된 상부와 하부 기판의 결합을 위하여 Ecoflex를 두개의 유연기판 사이에 바른 후 핫플레이트를 이용하여 경화시킨 후 최종적인 열전쌍 온도계를 [Fig. 7]의 (h)와 같이 제작하였다. 제작된 열전쌍 온도계에 1개의 전선은 그라운드 연결하고 나머지 전선은 다른 채널 쪽에 연결을 하여서 멀티미터와 같은 장비로 전압을 측정한다([Fig. 8]).



[Fig. 7] Fabrication procedure of liquid metal thermocouple

3. 열전쌍 온도계를 이용한 온도 측정

가. 열기전력과 온도 사이의 관계 측정

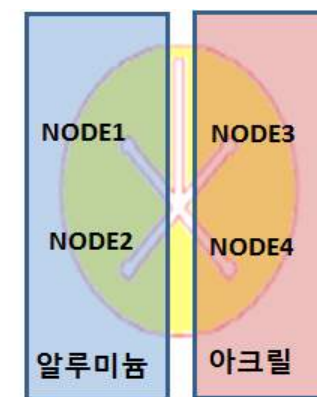
열전쌍 온도계로 온도를 측정하기 위해서는 열전대에서 나오는 전압과 온도 사이의 관계를 알아야 한다. 온도-열기전력 사이의 관계를 알기 위해서 온도를 조절할 수 있는 핫플레이트 위에 본 연구에서 만든 열전쌍 온도계를 올려놓았다. 그 다음 1개의 전선은 그라운드에 연결하고 4개의 채널 전선 중 1개를 택하여서 온도에 따른 전압을 측정하였다. 만약 온도-전압 사이의 관계가 일차함수가 나오면 제백효과와 특성과 일치한다고 볼 수 있다. 그리고 온도-전압 사이의 관계식에서 기울기를 제백 상수라고 볼 수 있다.



[Fig. 8] Thermocouple thermometers

나. 온도 분포 측정

핫플레이트 위에 열전도율이 다른 물질을 놓는다. 그리고 전도판 위에 열전쌍 온도계를 [Fig. 9]와 같이 놓아서 열기전력을 측정한다. 측정한 열기전력을 제백 상수를 이용해서 표면 온도를 알아낸 다음 전도 물질에 따른 표면 온도의 차이를 알아내서 두 전도판의 열전도율을 비교해 본다. 비교해 본 결과가 이론과 비슷하다고 한다면 본 연구에서 만든 열전쌍 온도계는 정확하다고 볼 수 있다.



[Fig. 9] Thermal conductivity comparison test

IV. 연구결과

1. 열전쌍 온도계 제작

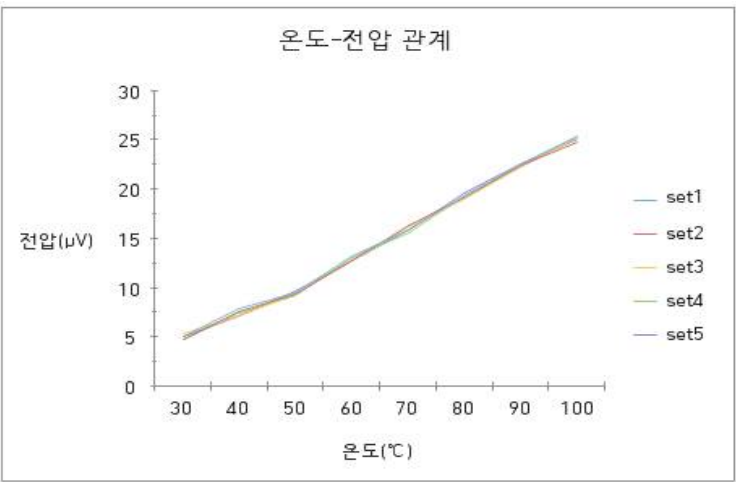
본 연구에서는 액체금속 스프레이 기법과 웨도우 마스크잉 기법을 이용하여 한 디바이스 안에 4개의 열전쌍을 제작하였다. 다수의 열전쌍이 들어있는 온도계를 디자인함에 앞서 각 열전쌍의 온도를 측정하기 위해서는 각 열전쌍에 +전극과 -전극이 필요하다. 결국 4개의 열전쌍을 측정하기 위해서는 4개의 +전극과 4개의 -전극, 총 8개의 전극이 필요하다. 하지만, 각각 다른 -전극을 연결하게 되면, 각 열전쌍의 기준이 되는 전압이 달라질 수 있기 때문에 -전극을 하나의 전극으로 통일한 디자인을 고안하게 되었다. 따라서 갈륨 패터층에서 모든 -전극들을 하나에 모이게 하여 그라운드를 통일시키고, 하나의 외부 전극으로 연결할 수 있게 제작하였다. EGaln층은 각 열전쌍마다 +전극을 한 개씩 연결하여 개별적인 측정이 가능하도록 하는 방법으로 기존 8개였던 전극을 +전극 4개와 -전극 1개, 총 5개의 전극으로 줄일 수 있었고, 그라운드 통일을 통해 좀 더 신뢰성 있는 데이터를 얻을 수 있게 되었다. 이러한 디자인을 기반으로 하여 갈륨과 EGaln으로 프린팅한 회로는 2행 2열의 열전대가 만들어지도록 하였다. 결론적으로 북동, 북서, 남동, 남서 방향으로 4개의 노드에서의 온도 분포 측정을 가능하게 하였다. 또한 패터닝된 갈륨 위에 Ecoflex를 코팅하여 절연층을 구현하였고 다시 위에 EGaln 패터층을 올려, 액체금속 이중채널을 손쉽게 제작할 수 있었다. 최종적으로, 4개의 노드를 이용하여 온도분포를 효율적으로 측정을 하기 전에 갈륨과 EGaln으로 제작된 열전쌍의 특성을 파악하기 위해 먼저 단일 소자에 대한 측정을 진행하였다.

2. 열전쌍 온도계를 이용한 온도 측정

가. 열기전력-온도 사이 관계 측정

<Table 1> Temperature - Thermal electromotive force Relation

온도(℃)	전압(μV)					평균	표준편차
	set1	set2	set3	set4	set5		
30	5.1	4.8	5.3	4.7	5.1	5.0	0.25
40	7.8	7.6	7.2	7.4	7.1	7.4	0.29
50	9.5	9.3	9.3	9.2	9.6	9.4	0.16
60	13.2	12.8	12.7	13.0	12.8	12.9	0.20
70	15.8	16.3	16.2	15.6	15.9	16.0	0.29
80	19.3	19.1	19.0	19.3	19.6	19.3	0.23
90	22.5	22.4	22.2	22.3	22.6	22.4	0.16
100	25.3	24.8	25.2	25.3	25.0	25.1	0.22



[Fig. 10] Temperature - Thermal electromotive force Relation

온도분포 측정에 앞서 단일 소자에 대한 실험 결과, 온도-열기전력 관계는 일차함수가 나왔다. 이는 제백 법칙에 대한 이론적 배경과 일치하기에 신뢰성이 있다고 판명된다. 따라서 제작한 소자를 이용하여 표면의 온도를 선형적으로 측정할 수 있다.

30 ℃에서 100 ℃ 사이의 기울기를 평균 기울기로 구해서 온도 열기전력 공식을 만들었다. 함수에서 기울기는

$$\frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{V}{T} = 0.29$$

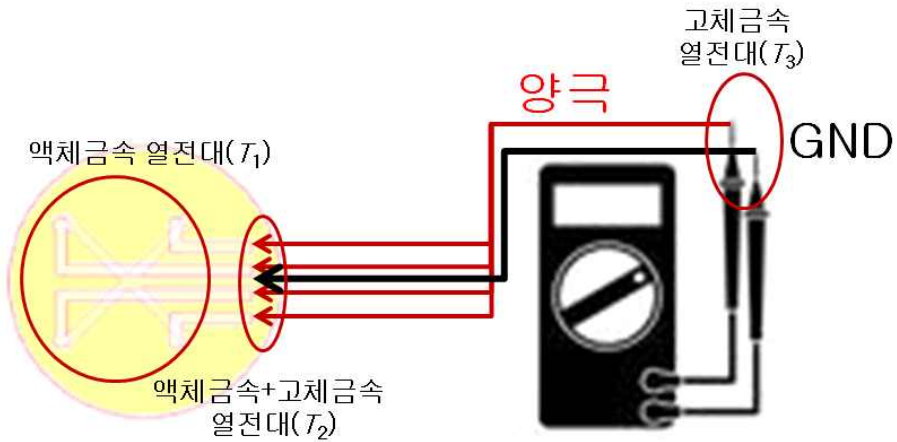
이고 표준편차 값이 제일 적은 (90, 22.4) 좌표를 대입해서 y절편의 값을 알았다. 이런 방법으로 구한 식은

$$V = 0.30 T - 5.6$$

온도-열기전력 관계식은

$$T [^{\circ}\text{C}] = 3.3V [\mu\text{V}] + 18.7$$

이다. 현재 알려진 갈륨과 EGaln 사이에 제백 상수는 0.2153 uV/℃[7]이고 우리가 실험에서 얻은 값은 0.30 uV/℃ 이다. 이 실험을 자세히 분석해 보면 [Fig. 11]과 같다.



[Fig. 11] Analysis of experiment

중간온도 법칙에 따라서 전압계가 측정한 열전쌍은 T_1 (온도변화측정) + T_2 (온도변화측정) + T_3 (일정)이다.

멀티미터에서 0 uV라고 측정이 되면 T_1 , T_2 , T_3 온도가 같다는 것을 의미한다. 그러므로 온도 전압 관계식 $T[^\circ\text{C}] = 3.3V[\mu\text{V}] + 18.7$ 에서 y절편 값이라고 할 수 있는 18.7은 고체금속 열전대의 온도라고 할 수 있고 고체금속 열전대의 온도는 실험실 내부의 온도라고 볼 수 있다.

온도-열기전력 관계 실험을 하면서 실험의 오차는 소수 첫 번째 자리이다. 즉 본 연구에서 만든 온도계의 유효숫자는 자연수부터다.

우리가 측정한 갈륨과 EGaIn 사이의 제백상수는 문헌상의 값보다 높은 것을 확인할 수 있다. 그 이유는 저항과 히터의 열기로 인해서 T_1 , T_2 의 온도가 주어진 온도 보다 높았고 외부 온도인 T_3 역시 일정하지 않고 시간이 갈수록 증가한 것으로 보인다. T_1 , T_2 , T_3 의 온도는 시간이 갈수록 올라갔지만 시간에 대해서 연속적으로 전압을 측정했기 때문에 본 연구에서 측정한 갈륨과 EGaIn 사이의 제백 상수가 문헌상의 수치보다 높았을 것으로 생각된다.

나. 온도분포 측정

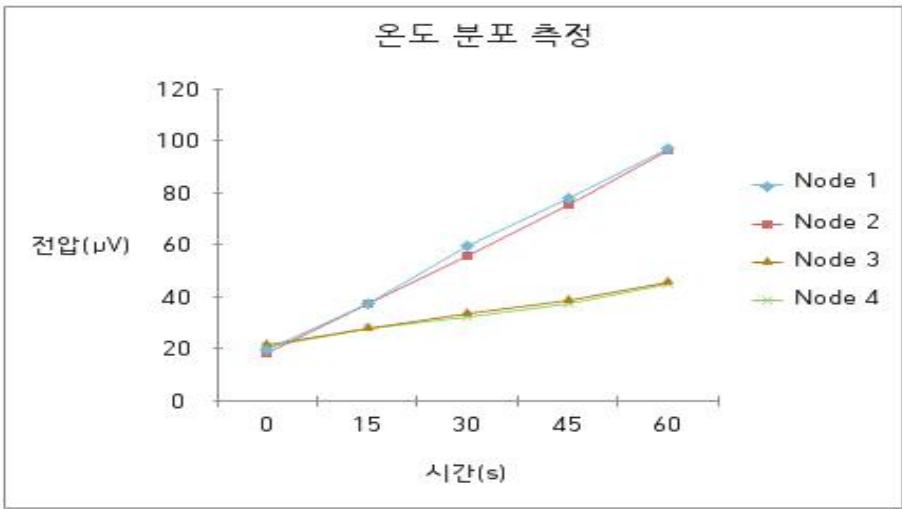
4개의 열전대를 이용해서 물체의 열분포를 측정해 보았다. 먼저 2개의 열전대는 알루미늄 위에 올렸고 나머지 2개의 열전대는 아크릴 위에 올렸다. 그리고 핫플레이트를 켜서 온도를 시간대별로 올렸다.

<Table 2> Thermal conductivity comparison test Case 1

Case 1		μV			
Heater	Time	Node 1	Node 2	Node 3	Node 4
30->100 Deg	0	4.2	3.8	4.5	4.2
	15	8.4	8.0	5.9	5.8
	30	12.2	12.0	7.2	6.9
	45	16.1	15.9	8.0	8.0
	60	20.1	20.0	9.3	9.5

<Table 3> Thermal conductivity comparison test Case 2

Case 2		μV			
Heater	Time	Node 1	Node 2	Node 3	Node 4
30->100 Deg	0	4.1	4.0	4.8	4.7
	15	7.7	8.1	6.2	6.3
	30	13.5	12.1	7.1	6.9
	45	17.3	16.5	8.7	8.1
	60	21.6	21.4	10.4	10.0



[Fig. 12] Thermal conductivity comparison test Average of Case 1 and 2

전압을 알면 제백 효과로 물체의 표면 온도를 알 수 있다. 전압에다가 본 연구로 구한 갈륨-EGaIn의 제백 상수 0.30 uV/°C의 역수를 곱해 주면 된다.

<Table 4> Conducting plate surface temperature

Average		°C			
Heater	Time	Node 1	Node 2	Node 3	Node 4
30->100 Deg	0	13.9	13.1	15.5	14.9
	15	26.9	26.8	20.1	20.2
	30	42.9	40.2	23.9	23.1
	45	55.7	53.9	27.9	26.8
	60	69.5	68.9	32.8	32.4

열전도율 공식은 $\frac{Q}{t} = k \frac{A \cdot (T_H - T_C)}{L}$ 이다. 이 실험에서 두께는 알루미늄 아크릴 모두 5 mm로 같았다. 그리고 열량(Q)도 핫플레이트에서 동일한 양의 에너지를 공급했다. 실험을 할 때 두 개의 전도판 모두 같은 시간 동안 열량을 가해 주었다. 또 동일한 핫플레이트에서 열을 가해 주었기 때문에 T_H 의 값도 같다. 그러나 이 실험에서 두 전도판의 표면 온도가 달랐던 것은 열전도계수 차이 때문이다. 열전도계수는 $k = \frac{QL}{A(T_H - T_C)}$ 이므로 알루미늄의 열전도율이 아크릴의 열전도율 보다 높다고 할 수 있다(원래 알루미늄의 열전도율은 167 W/m*K이고 아크릴의 열전도율은 0.2 W/m*K이지만 위의 실험에서는 두 전도판의 면적이 달라서 단순 비교가 어렵다.).

V. 결론

본 연구에서 만든 열전쌍 온도계는 갈륨과 EGaIn을 유연기관 위에 프린팅하는 방식을 사용하였다. 그래서 휘어지고 늘어나는 온도계를 만들 수 있었으며, 총 4개의 열전쌍을 제작하여 온도-열기전력 사이의 관계를 분석한 결과 온도-열기전력 관계는 일차함수가 나왔다.

본 연구에서 만든 열전쌍 온도계로 전도판의 열전도율을 비교한 결과, 현재 밝혀진 알루미늄의 열전도율 값과 아크릴의 열전도율에서 예측되듯이 알루미늄의 열전도율이 아크릴의 열전도율보다 훨씬 높은 추이를 보였다. 위 2개의 실험 결과는 각각 제백 효과와 열전도 공식을 만족하므로 본 연구로 만든 열전쌍 온도계가 온도를 정확하게 측정하였다고 예측된다.

VI. 제언

1. 활용분야

본 연구를 통해 개발된 열전쌍 온도계는 기존 열전쌍 온도계에 대비해서 월등하게 휘어지면서 늘어날 수 있다는 특징이 있다. 그리고 본 연구에서 사용한 Ecoflex는 특수분장에 이용될 만큼 인체에 무해하다. 또한 갈륨과 EGaIn 또한 인체에 유해하다는 연구결과는 없다. 따라서 초탄성실리콘과 액체금속을 이용한 온도계는 곡면이 있는 신체피부온도 미세 측정 등의 다양한 온도 측정을 할 수 있는 의료 어플리케이션에 사용될 것으로 예상된다. 또한, 애플사의 애플워치, 삼성사의 갤럭시핏과 같은 항상 인체에 접촉해있는 웨어러블 디바이스와 통합이 가능하며, 온도계 자체를 실리콘 팔찌와 같은 형태로 만들어 다양한 의료기기분야에 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

이러한 의료기기 어플리케이션뿐만 아니라 기존 열전대의 경우 다양한 양각의 높낮이를 갖는 표면의 온도를 스트레칭을 통해 표면에 부착하여 측정할 수 있다는 장점을 이용해 다양한 PCB 기관 위 소자들의 온도를 측정하는 응용분야를 생각할 수도 있다. 즉, Ecoflex를 이용하여 PCB 기관을 코팅하여 생활방수를 가능하게 할 수 있을 뿐만이 아니라 코팅제 내부에 개발한 열전대가 통합되어있어 PCB 표면의 온도 분포를 측정할 수 있을 것이다.

또한 이전에 동일한 패턴을 이용하여 스트레인지지를 제작한 연구가 있는데[1], 이러한 연구를 이용하면 제작된 열전대의 신장률 측정과 온도측정을 동시에 할 수 있다. 따라서 신장에 따른 다양한 오차를 보정할 수 있으며, 곡면 표면의 온도 분포를 측정할 때 스트레인을 같이 측정하게 되면, 곡면의 형상도 같이 측정하여 온도 분포를 표현할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 추가로 연구할 점

본 연구에서는 단일 소자 수준의 열전대를 제작해 보고 이에 대한 특성과악을 진행하였다. 이후 단일 소자 수준의 열전대를 배열화 시켜, 총 4개의 열전대를 포함하는 열전대열을 만들어서 특성 파악 실험을 진행하였지만, 총 4개의 노드를 통해서 측정을 하였기 때문에, 표면상의 온도분포를 세밀하게는 측정할 수 없었다. 하지만, 현재 매크로단위의 열전소자를 미세 액체금속 프린팅기법과 연결하여 좀 더 세밀한 열전대 패턴을 배열화 할 경우, 물체 표면의 온도 분포를 좀 더 세밀하게 알 수 있을 것이다. 뿐만

아니라, 여러 개의 열전대의 배열을 동시에 측정하기 위해서는 MUX 소자를 이용한 회로를 구성하면 LED배열과 같이 면적단위의 온도 분포 측정이 가능할 것이다. 또한 유연기관의 두께를 얇게 하면 열전대와 물체의 온도가 좀 더 빠르게 열평형을 이루어서 반응 속도가 빠른 액체금속 열전대를 개발 할 수 있을 것으로 기대된다. 그리고 유연기관으로써 Ecoflex뿐만이 아니라 인장률이 더 높다고 알려진 Dragon skin과 같은 다양한 실리코 고무 기반의 재료를 이용하여 액체금속 열전대를 제작하게 되면, 1000% 이상의 신장률을 갖는 열전대 역시 개발이 가능성이 있다. 따라서 추후 후속연구로 개발된 열전대의 효율을 향상시키고 다양한 회로를 이용하여 응용분야를 개척할 것으로 기대된다.

VII. 참고문헌

- [1] Kim, S., Lee, J., & Choi, B. (2015). Stretching and twisting sensing with liquid-metal strain gauges printed on silicone elastomers. *Sensors Journal IEEE*, 15(11), 6077-6078
- [2] Choi, J., Kim, S., Lee, J., & Choi, B. (2015). Improved capacitive pressure sensors based on liquid alloy and silicone elastomer. *Sensors Journal IEEE*, 15(8), 4180-4181
- [3] Cheng, M.Y., Tsao, C. M., Lai, Y. Z., & Yang, Y. J. (2011). The development of a highly twistable tactile sensing array with stretchable helical electrodes, *Sensors and Actuators A: Physical*, 166(2), 226-233
- [4] Xu, L., Gutbrod, S. R., Ma, Y., Petrossians, A., Liu, Y. R., Webb, C., Fan, J. A., Yang, Z., Xu, R., Whalen III, J. J., Weiland, J. D., Huang, Y., Efimov, I. R., & Rogers, J. A. (2015). Materials and fractal designs for 3D multifunctional integumentary membranes with capabilities in cardiac electrotherapy. *Advanced Materials*, 27(10), 1731-1737
- [5] Dickey, M. D., Chiechi, R. C., Larsen, R. J., Weiss, E. A., Weith, D. A., & Whitesides, G., M. (2008). Eutectic Gallium-Indium (EGaIn): A liquid metal alloy for the formation of stable structures in microchannels at room temperature. *Advanced Functional Materials*, 18(7), 1097-1104
- [6] Cheng, S., Rydberg, A., Hjort, K., & Zhigang Wu. (2009). Liquid metal stretchable unbalanced loop antenna. *Applied Physics Letters* 94(14), 144103
- [7] Li, H., Yang, Y., & Liu, J. (2012). Printable tiny thermocouple by liquid metal gallium and its matching metal. *Applied Physics Letters*, 101(7), 073511-1-3

| 연구진 |

권훈범 (Kwon Hoonbeom, 한성과학고등학교, hhbb123@naver.com), 주저자 및 교신저자

강현구 (Kang Hyungu, 한성과학고등학교, hgkang990@naver.com)

김진우 (Kim Jinwoo, 한성과학고등학교, konan4869@naver.com)

박준영 (Park Junyoung, 한성과학고등학교, ben9908@naver.com)

지도교사 : 안정용 (Ahn Jungyong, 한성과학고등학교, 물리학, ahnjungyong@sen.go.kr)

지도교수 : 이정철 (Lee Jungchul, 서강대학교 기계공학과, jaydee@sogang.ac.kr)

지도조교 : 김석범 (Kim Seokbeom, 서강대학교 기계공학과, hanshink@naver.com)

비대칭 축전기에서의 이온풍 가속 효과에 관한 탐구

김재윤 · 장연석 · 조용한 – 광주과학고등학교

Study on Wind Velocity Dependence Using Asymmetric Capacitor

Kim Jaeyun · Jang Yeonsuk · Jo Yonghan - Gwangju Science High School

ABSTRACT

For an asymmetric charge structure in a capacitor, there can be wind generation in either direction. This effect is known as the Biefeld-Brown effect. But the apparent cause of the phenomena is still unknown, so various teams from all over the world have researched it. In this study, we made a structure with aluminum foil and a wire to determine the factors that affect the thrust of a capacitor with an asymmetric structure. The speed of ionic wind was measured with a speed measuring equipment. We considered the shape, production method, and voltage value of the structure of an asymmetric capacitor as the independent variables. As a result, the shorter the distance between the electrodes and the thinner the wire, the more the internal cells of the asymmetric capacitor could be confirmed to generate more thrust.

Key words:

Biefeld-Brown Effect, Ionic Wind, Asymmetric Capacitor

국문초록

축전기에 대전되는 전하량이 비대칭적 구조를 가질 경우 어느 한 방향으로 바람이 발생하게 되는데, 이것은 비펠드-브라운 효과(Biefeld-Brown Effect)로 알려져 있다. 그렇지만 아직까지 이와 같은 현상을 일으키는 뚜렷한 원인이 무엇인지 밝혀지지 않은 상태이며 세계각지에서 꾸준한 연구가 지속되고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 비대칭 구조를 가지는 축전기에서 추력에 영향을 주는 변인들을 알아보기 위해 직접 설계/제작한 구조물에 알루미늄 호일과 와이어를 둘러 축전기를 제작하였으며 이때 발생하는 바람의 속도를 풍속측정 장비를 사용하여 측정하였다. 특히 비대칭 축전기 구조체의 구조물의 크기, 모양, 제작방법, 그리고 전압 값의 변화 등 다양한 변인을 통제/조작한 결과를 비교/분석 하였다. 그 결과 양쪽 전극 간의 거리가 짧을수록, 전선의 두께가 가늘수록, 비대칭 축전기의 내부 셀이 많을수록 추력이 더 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

중심어 :

비펠드 브라운 효과, 이온풍, 비대칭 축전기

I. 서론

1. 연구의 필요성 및 연구 목적

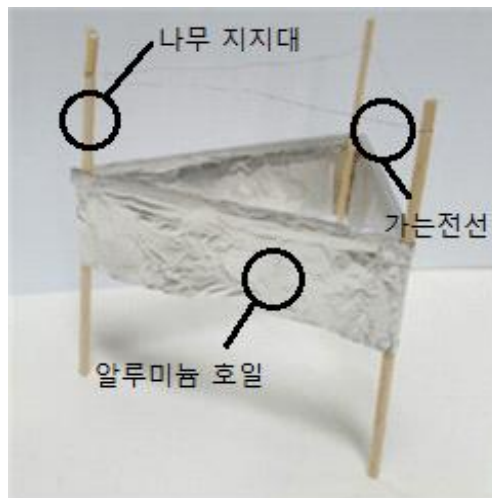
비펠드-브라운 효과를 이용한 새로운 비행체의 개발은 그리 최근의 이야기가 아니다. 여기서 비펠드-브라운 효과란 축전기에 비대칭적 전하를 대전시켰을 때 추력이 발생하는 현상으로 와이어, 알루미늄 호일, 나무 지지대를 이용하여 간단하게 제작이 가능하며 이때 발생하는 추력만으로 물체를 공중에 띄우는 것이 가능하다. 예를 들어 축전기의 위쪽 전선에는 +극을 연결하고 알루미늄 호일에는 -극을 연결하여 수십 kV급의 고전압을 걸어주면 수 m/s의 바람이 발생한다. 비대칭 축전기에서 추력이 발생하는 원인에 대해서는 이온풍에 의한 기류발생이라는 이론이 제기된 적이 있지만, 이에 대해서는 아직까지 많은 이견들이 존재하고 있으며 세계각지에서 활발한 연구가 진행되고 있다. 자동차, 배, 비행기 등 지구상에 현존하는 운송매체는 주로 화석연료를 에너지원으로 움직이고 있으나 화석연료는 영구적인 연료가 아닐 뿐 아니라 각종 환경오염도 발생시키고 있다. 따라서 화석연료를 기반으로 하지 않고 환경오염이 적으며 영구적으로 사용할 수 있는 새로운 에너지원의 발굴과 운송매체의 개발은 시급하며 인류문명사에 큰 의미도 가질 것이다. 본 연구에서는 비펠드-브라운 효과를 실제 실험을 통해 확인하고 변인통

제를 통해 그 현상을 분석하는 것이 목적이다. 본 논문에서는 크기와 모양, 그리고 인가전압을 변화시키며 최적화된 비행체를 제작하는 과정 및 방법에 대한 결과를 정리하였다.

2. 이론적 배경

가. 비대칭 축전기

비대칭 축전기는 양 전극에 쌓이는 전하량을 다르게 만들어 줌으로써 그 사이의 공간에 형성된 이온들의 흐름을 극대화 하는 장치이다[1,2]. 앞에서 설명한 바와 같이, 이론적인 배경에 대한 서로 다른 의견이 많은 관계로 본 연구에서는 일단 이온풍이 그 원인이라고 가정한 채로 실험을 진행하고, 그 결과에 대한 해석은 뒤로 미루겠다. 아래의 [Fig. 1]은 비대칭 축전기의 원형을 보여준다. 그림에서와 같이 세 모서리에 세워진 나무 지지대와 상단에 걸쳐진 가는 전선, 그리고 몸통 부분의 알루미늄 호일로 이루어진 매우 간단한 구조를 띠고 있다. 양단의 전극에는 수 kV의 고전압이 걸리게 되는데 추력이 중력을 이기고 공중에 물체를 띄울 정도로 세지 않기 때문에 비행체의 무게를 최대한 줄일 필요가 있다는 판단에 따라 [Fig. 1]과 같은 간단한 구조로 제작하게 되었다. 따라서 나무지지대는 발사목(balsawood)을 사용하여 그 무게를 경량화 하였으며 몸체는 알루미늄호일의 사용과 제작법을 단순화시키는 연구를 통해 무게를 최적화 할 수 있었다.



[Fig. 1] Asymmetric Capacitor

나. 이론적인 계산 방법

전압과 전류의 변화에 따른 이온풍의 세기를 알아보기 위해 물체가 공중에 부양했을 때 전기력에 의한 일과 운동에너지가 같다는 식을 이용하여 전개하였다. 우선, 비대칭 축전기의 공간에 분포한 이온에 미치는 전기력을 이온풍의 운동에너지로 놓으면,

$$\frac{1}{2}mv^2 = qV \quad \dots \dots \dots (1)$$

식 (1)에서 m 은 이온의 질량, v 는 이온풍의 속력, q 는 이온의 전하량, 그리고 V 는 유효 전압을 나타낸다. 또한, 물체가 부양할 때 받는 힘은 운동량의 변화량으로 표현할 수 있기 때문에,

$$F = mv \frac{I}{q} \quad \dots \dots \dots (2)$$

식 (2)의 I 는 유효전류로서 전류의 정의에 의해 $\frac{I}{q}$ 는 $\frac{q/\Delta t}{q}$ 로 바꿀 수 있기 때문에 $\frac{1}{\Delta t}$ 을 도출할 수 있다. 식 (1)을 적당히 변형하여 $\frac{mv}{q}$ 대신에 대입하면,

$$F = \left(\frac{2mV}{q} \right)^{\frac{1}{2}} I \quad \dots \dots \dots (3)$$

식 (3)으로 표현된 힘이 얼마만큼의 무게를 들어 올릴 수 있는지는 중력과 비례관계를 사용하여 그 크기를 예측할 수 있다. 따라서 식 (3)으로 표현된 힘이 질량 M 이 중력가속도 g 로 가속되는 힘과 같다고 놓으면,

$$M = \left(\frac{2mV}{q} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{I}{g} \quad \dots \dots \dots (4)$$

임을 확인할 수 있다. 위로 밀어 올리는 식 (3)의 힘 F 와 중력 Mg 를 같다고 놓고 풀었기 때문에 질량 M 의 상태는 안정적이라고 생각할 수 있다. 이에 따라 입자의 무게 M 이 결정될 경우 어느 정도의 인가전압이 필요한지 실험적으로 구할 수 있다. 만약 위와 같은 상황에서 이온화된 한 개의 전자가 식 (3)의 힘 F 에 의해 가속된다고 가정한다면,

$$M = \left(\frac{(2)(9.1 \times 10^{-31} kg)(40 \times 10^3 Volt)}{1.6 \times 10^{-19}} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{1.0 \times 10^{-3} A}{10 m/s^2} = 6.8 \times 10^{-2} kg \quad \dots \dots \dots (5)$$

식 (5)는 식 (3)으로 표현되는 위로 밀어 올리는 힘과 중력이 같다고 가정하여 얻은 결과이다. 따라서 질량이 m인 전자 하나가 가속되어 들어 올릴 수 있는 물체의 질량 M 은 $6.8 \times 10^{-2} \text{ kg}$ 을 넘어설 수 없다는 것을 의미한다고 볼 수 있다. 위의 식 (5)의 결과는 매우 제한적인 조건에서 얻은 것이기 때문에 실험에서 얻은 데이터와 1대1 비교는 힘들더라도 올바른 실험을 위한 지침으로 사용될 수 있다. 식 (1)에서 식 (5)까지 구한 관계식을 이용하여 비대칭 축전기에서 발생하는 이온풍의 속력과 추력을 구하는 공식을 도출할 수 있다[3]. 관계식을 풍속측정 장비로부터 습득한 이온풍의 풍속 데이터에 적용하여 물체의 추력을 계산할 수 있다. 우리에게 익숙한 뉴턴의 운동방정식이 의미하는 것은 힘은 운동량의 변화량이라는 것을 적용하여 보면,

$$dF = \frac{dP}{dt} \quad \dots \dots \dots (6)$$

식 6)에서 P 는 선운동량이라고 불리며 mv 와 같은 양을 갖기 때문에 식 (6)은 아래의 식 (7)과 같이

$$dF = \frac{d(mv)}{dt} \quad \dots \dots \dots (7)$$

바뀌 쓸 수 있다. 다음으로 임의의 부피밀도 ρ 를 갖는 기체가 v 로 가속될 경우 질량분포를 구해 보면,

$$m = vA\rho dt \quad \dots \dots \dots (8)$$

위의 식 (7)과 식 (8)을 연립하면 $dF = vA\rho dv$ 의 관계식을 얻을 수 있다. 계속적으로, 적분을 취하면 비대칭 축전기에서 발생하는 추력은 다음 식 (9)와 같음을 알 수 있다.

$$F = \int vA\rho dv = \frac{1}{2}v^2 A\rho \quad \dots \dots \dots (9)$$

식 (9)로부터 추력은 비대칭 축전기 내부의 이온속도의 제곱에 비례하고 축전기 구조물의 단면적과 부피밀도에 선형적인 관계를 보이는 것을 알 수 있다. 즉, 축전기가 클수록, 축전기로 둘러싸인 공기 속에 불순물이 낮을수록 그리고 양단에 인가된 전압이 높을수록 추력이 커지는 것을 알 수 있다[4].

II. 연구방법 및 결과

1. 연구 방법

가. 축전기 모형의 제작

현재까지 연구된 비대칭 축전기를 살펴본 결과 그 모양이 삼각형의 연결체 모양을 갖는다는 것을 찾을 수 있었지만 문헌상의 자료만을 바탕으로 실제로 부양하는 장치를 만들기란 그리 쉽지 않았다. 이렇듯 크기와 모양과 같은 하드웨어적인 구성에 대해서는 의견이 많은 것으로 보인다. 그렇기 때문에 본 연구에서는 다양한 모양의 비대칭 축전기를 제작하여 보았다. 단위 셀의 모양을 삼각형과 사각형으로 바꿔 가며, 그리고 단위 셀의 수를 늘려가며 다양한 모양의 축전기를 제작하였다. 아래 [Fig. 2]의 첫 번째 사진은 몸체의 무게를 최소화하기 위하여 수수깡으로 만들어 본 모형인데, 처음 제작 시 구조물에 대한 다각적인 연구가 부족하여 모양만을 고려하여 이온풍의 생성 여부에 대해 연구할 때 사용되었다. 이때 최고 속도는 대략 1.8 m/s를 상향하는 결과를 얻었다. 다음으로 [Fig. 2]의 두 번째 사진은 구조물에 대한 자료를 수집하고 연구하여 제작기법을 단순화 할 수 있는 방법을 모색하고 발사목의 사용으로 몸체를 경량화 하는데 성공한 모형이다. 이 모형으로부터 알게 된 사실은 알루미늄 호일의 면이 매끈할수록 그리고 양극 전선과의 공극이 일정할수록 고른 바람을 발생시킬 수 있다는 것이었으며, 이때 얻은 최고 속도는 2.2 m/s - 2.8 m/s를 상향하였다. [Fig. 2]의 마지막 사진은 단위 셀의 모양과 개수를 늘려본 모형이다. 이 모형을 이용한 실험으로부터 축전기의 단위 셀의 개수가 증가해도 단위 셀의 면적이 바뀌지 않는다면 그 효과는 경감된다는 것을 확인 할 수 있었다.



[Fig. 2] Some Models of Asymmetric Capacitor

[Fig. 2]에 소개한 모형 이외에도 별 모형, 다중층 모형 등 근 40여 종에 이르는 모형들을 제작하여 실험에 사용하였다. 이렇게 많은 모형을 제작한 이유는 제작방법, 재료의 종류, 그리고 실험기구의 사용과 같은 다양한 변인통제를 통하여 다각적이고 면밀한 실험을 수행하기 위함이었다.



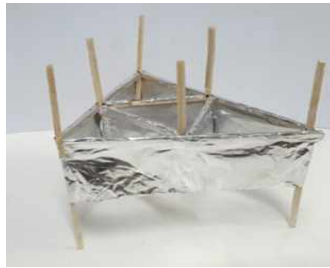
[Fig. 3] Asymmetric Capacitor of Stable Thrust

위의 [Fig. 3]은 [Fig. 2]의 가운데 모형과 매우 흡사하지만 한 가지 다른 점이라면 알루미늄 바디를 제작하는 기법에 차이가 있다. 다시 말하면, [Fig. 2]와 [Fig. 3]에서 가장 중요한 부분은 양극의 전선과 알루미늄 호일 사이의 간격을 일정하게 유지하는 것이다. 초기의 모형은 대부분 단층식 구조로써 단층식 구조를 겹치면 이온의 밀도가 높아지고 처음 가속된 전자를 다시 가속시켜 추력이 커지지 않을까 하여 [Fig. 3]의 표준모형 두 개를 이어 붙여 이중층 모형을 제작하여 시험해 보았다. 이 결과가 [Fig. 4]의 모형인데, 이 모형의 특징은 위층과 아래층의 공극 거리를 엑셀 시뮬레이션으로부터 얻은 최적화된 거리 1 cm를 유지하여 제작하였다는 것에 있다.



[Fig. 4] Double Layer Model of Asymmetric Capacitor

다음으로 축전기 몸체 내부에 [Fig. 5]와 같은 추가적인 셀을 제작한 뒤 추력의 변화를 확인해 보았다. 이 모형은 표준모형 가운데에 본래의 모형을 축소시켜 붙여놓은 것 같은 구조를 갖고 있다.



[Fig. 5] Cell Model of Asymmetric Capacitor

비대칭 축전기는 양단에 축적되는 전하의 양이 비대칭적이라는 점을 제외하면 다른 축전기와 다를 바가 없기 때문에 축전기 용량 및 에너지 분포가 추력과 밀접한 관계를 가질 것이라고 생각하여 공극간격을 바꾸어 실험을 해 보았다. 또한 축전기에 걸리는 전압이 변화함에 따라 축전기에 쌓이는 전하가 어떻게 변화하고 풍속이 어떻게 달라지는지를 실험하여 보았다. 이렇듯 여러 다양한 변인을 조절해 가며 풍속이 가장 세게 측정되는 모델을 찾고 그 이유를 분석하여 보았다.

나. 장치 제작 기법

안정적인 출력을 낼 수 있는 표준모형이란 구조물의 변화에 따른 출력의 변화가 민감하지 않다는 것을 의미한다. 그것을 가능하게 하는 것은 제작 기법의 향상에 있는데, 여기에서 제작 기법의 핵심은 불필요하거나 중복된 프로세스를 제거하여 보다 간단하면서도 견고한 모형을 만드는 것이다. 따라서 제작 기법에 대한 연구는 선행연구 중 매우 중요한 부분이라고 생각할 수 있다. 또한 앞에서 간략히 설명하였듯이 알루미늄 호일의 표면 상태와 공극 거리를 일정하게 유지시키도록 하는 제작 기법의 개발이 필요하다. 설명하였듯이 알루미늄 호일의 표면 상태와 공극 거리를 일정하게 유지시키는 기술은 제작기법에 변화가 생기지 않는다면 장치의 향상은 힘들다.

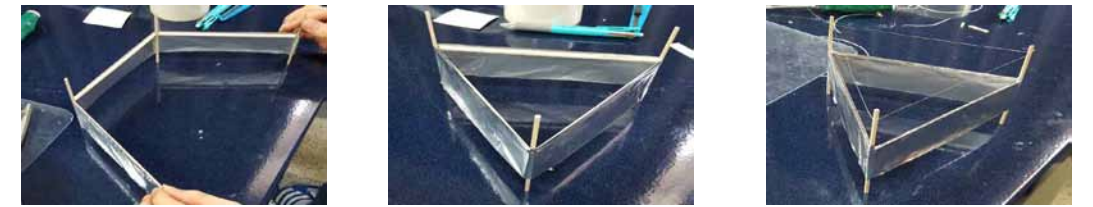


[Fig. 6] Production Process according to the Template Technique

본 연구의 초기에는 각 모서리에 있는 발사목 지지대에 알루미늄 호일을 한 장 씩, 접착제를 사용하여 이어붙이는 방법을 사용하였기 때문에 장치에 접착제가 덕지덕지 붙는 등 제작 후의 상태가 온전하지 못했다. 따라서 이에 대한 작업 방식의 전환이 필요하였으며 템플릿을 이용한 제작 기법을 고려하게 되었다. 여기서 템플릿이란 축전기의 형태를 접착 전에 잡아 놓는 것을 의미하는데 일반 알루미늄 호일로는 이와 같은 템플릿을 제작하기는 힘들다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해 알루미늄 호일을 같은 재질의 알루미늄 테이프로 대체하였다. 알루미늄 테이프는 [Fig. 6]에 보인 것 같이 한 면에만 접착력이 있어 사진과 같이 발사목을 미리 계산해 둔 간격대로 배치하고 모서리를 기점으로 돌려주기만 하면 된다. 이 방법을 통해 제작된 장치들은 실험자가 미리 계산해 둔 크기대로 손쉽게 제작이 가능하다는 것과 견고한 알루미늄 테이프 때문에 몸체가 쉽게 호트러지지 않아 공극간격을 조정하는데 매우 용이하다는

장점을 갖는다고 할 수 있다.

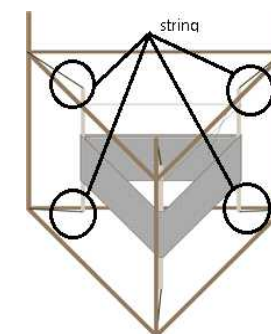
[Fig. 6]은 알루미늄 테이프의 접착 면에 각각 위치에 맞는 발사목을 붙여 축전기의 템플릿을 미리 마련하는 과정이다. 이렇게 준비된 템플릿은 아래의 [Fig. 7]과 같이 돌려가며 조립해야 하기 때문에 세로축 기둥과 가로축 뼈대 사이에는 약간씩 간격을 만들어 조립 시 빈틈이 없도록 만들어 주어야 하며 가로축 뼈대 윗부분에도 테이프를 조금 남겨 마무리가 가능하게 설계하였다. 알루미늄 테이프는 템플릿 제작 시 매우 중요한 재료이다. [Fig. 7]에서 확인할 수 있듯이 테이프 형식이라 구조물을 보강하는 작업과 균일한 공극 거리를 유지하는 작업이 보다 쉬워진다.



[Fig. 7] Production Process according to the Template Technique

다. 실험 방법

지금까지 설명한 바와 같이 비대칭 축전기에 고전압을 걸어주면 장치에서 추력이 발생하게 된다. 그렇지만 [Fig. 7]과 같이 단일 셀로 구성될 경우 비등방적인 추력으로 인해 한쪽으로 뒤집히게 되는데 셀의 개수를 많게 하면 이러한 문제를 해결할 수 있다. 즉, 셀의 개수는 등방적인 추력을 제공하기 위한 것일 뿐 추력의 크기를 높이기 위한 것은 아님을 알 수 있다. 본 연구에서는 최종적으로 만들어진 [Fig. 7]의 장치를 가지고 다양한 변인을 통제하며 풍속의 크기를 측정하는 실험을 수행하였다. 앞에서 설명한 것과 같이 단일 셀의 비등방성 추력으로 비행체가 뒤집히는 현상을 막기 위해 [Fig. 8]과 같이 질량이 작은 끈으로 연결하고 아랫부분에 [Fig. 9]에 나타난 풍속장치를 설치하여 이온풍의 속도를 측정하였다.



[Fig. 8] Experimental Method



[Fig. 9] Wind Meter

[Fig. 1]과 같이 비대칭 축전기 장치의 상단 전선에 고전압 발생 장치의 +극을 걸고, 알루미늄 몸체에는 전선을 알루미늄 테이프로 고정하고 -극을 걸어 주었다. 이때 생각해볼 문제는 양극을 바꾸어도 같은 방향으로 바람이 발생한다는 것인데, 흥미롭기는 하나 본 연구에서는 이것에 대해 따로 다루지는 않았다. 그림과 같이 극을 모두 연결한 뒤 kV급의 고전압 장치에 연결하였으며 바람의 세기를 측정하기 위해 [Fig. 9]의 풍속측정 장치를 바로 아래에 설치하여 그 값을 기록하였다.

2. 연구 결과

가. 풍속 측정 결과

각 모형의 풍속 측정은 각각 10번씩 수행하였으며 이를 평균한 결과를 사용하였다. 측정 시험에는 [Fig. 2]에서 설명한 세 모델을 사용하였는데, 각 모형의 풍속 측정 결과가 <Table 1>에 제시되어 있다. 이 때 사용한 고전압 장치는 30 kV - 100 kV가 가능한 고전압 발생 장치를 제작하여 사용하였다.

<Table 1> Wind Speed Measurement Result of [Fig. 2]

인가전압	왼쪽	가운데	오른쪽
30 kV	1.8 m/s	2.3 m/s	2.2 m/s
30 kV	1.9 m/s	2.4 m/s	2.3 m/s
30 kV	1.5 m/s	2.3 m/s	2.2 m/s

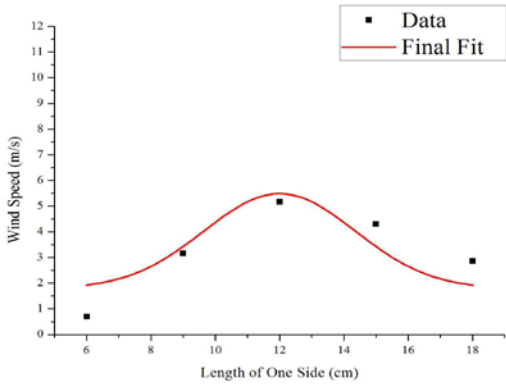
다음 <Table 2>의 결과는 축전기 한 변의 길이가 6 cm, 9 cm, 12 cm, 15 cm, 그리고 18 cm 되도록 제작하여 풍속의 변화를 관찰한 결과이다.

<Table 2> Wind Velocity Measurement Results in accordance with the Lengths of the Sides

한 변의 길이	6 cm	9 cm	12 cm	15 cm	18 cm
측정된 풍속	0.7 m/s	3.1 m/s	5.2 m/s	4.4 m/s	2.8 m/s
측정된 풍속	0.7 m/s	3.2 m/s	5.2 m/s	4.2 m/s	2.9 m/s
측정된 풍속	0.7 m/s	3.2 m/s	5.1 m/s	4.3 m/s	2.9 m/s

아래의 [Fig. 10]의 결과는 <Table 2>에서 축전기 한 변의 길이를 변화시켜가며 측정한 풍속의 측정 결과에 대한 함수 모델링 결과이다. 단일 셀의 한 변의 길이는 [Fig. 10]과 같이 12 cm - 13 cm가 적당하

다는 것을 확인할 수 있다. 이 결과는 단면적이 어느 이상 넓어지면 축전기 공간에 쌓이는 공기의 밀도가 낮아져 그 효과가 줄어든다는 것을 의미한다.

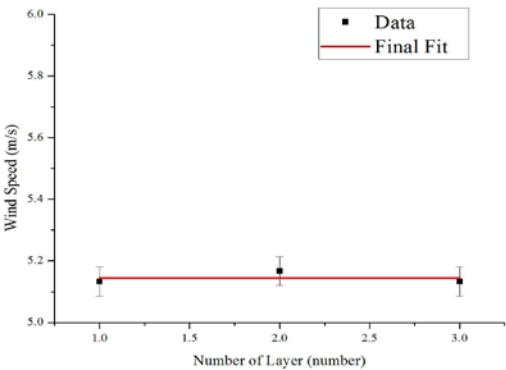


[Fig. 10] Graph of <Table 2>

<Table 3>의 측정 결과는 [Fig. 4]에서 설명하였던 축전기 층을 늘리면서 측정한 것이다. 이 때 인가전압은 30 kV로 동일하게 하였다.

<Table 3> Wind Velocity Measurement Results in accordance with the Number of Layers

셀의 층수	1층	2층	3층
측정된 풍속	5.1 m/s	5.2 m/s	5.2 m/s
측정된 풍속	5.2 m/s	5.2 m/s	5.1 m/s
측정된 풍속	5.1 m/s	5.2 m/s	5.1 m/s

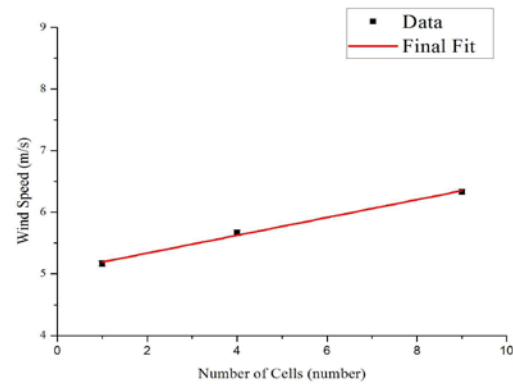


[Fig. 11] Graph of <Table 3>

층수를 늘릴 경우 - 5 m/s 이상의 풍속이 측정되어 <Table 1>의 결과와 비교하여 2~3배 정도로 향상되어 층수와 풍속의 관계가 있어 보이지만 층수의 변화에 따른 변화를 관찰하기 힘들다는 것을 [Fig. 11]의 결과로부터 확인할 수 있다. 이 현상은 처음에 예측하였던 것과 반대되는 결과이지만 겨우 3층의 데이터만으로는 분석이 힘들어 보이며 공극간의 거리도 함께 분석하는 과정이 필요하다고 생각한다. 아래의 <Table 4>는 단위 셀의 개수를 변화시켜가면서 측정한 풍속의 결과이다.

<Table 4> Wind Velocity Measurement Results in accordance with the Number of Cells

셀의 수	1개	4개	9개
측정된 풍속	5.1 m/s	5.6 m/s	6.3 m/s
측정된 풍속	5.2 m/s	5.7 m/s	6.3 m/s
측정된 풍속	5.2 m/s	5.6 m/s	6.4 m/s

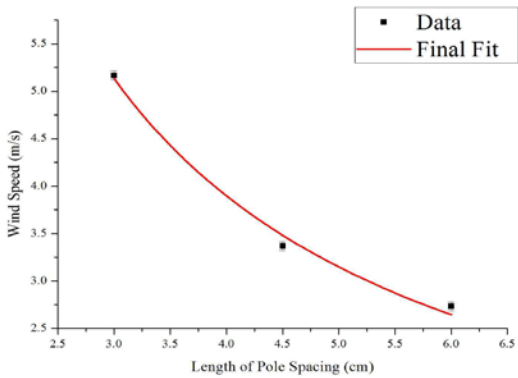


[Fig. 12] Graph of <Table 4>

[Fig. 12]의 그래프로부터 셀의 수가 증가함에 따라 변화의 폭이 크지는 않더라도 풍속이 조금씩 증가함을 알 수 있었다. 아래의 <Table 5>는 양극의 전선과 음극의 알루미늄 몸체 사이의 거리에 따른 풍속의 변화를 측정한 결과인데, 이로부터 3 cm의 공극간격이 적당한 것을 알 수 있다.

<Table 5> Wind Velocity Measurement Results in accordance with the Length of Pole Spacing

공극간격	1.5 cm	3 cm	4.5 cm	6 cm
측정된 풍속	0 m/s	5.2 m/s	3.3 m/s	2.8 m/s
측정된 풍속	0 m/s	5.1 m/s	3.4 m/s	2.7 m/s
측정된 풍속	0 m/s	5.1 m/s	3.4 m/s	2.7 m/s

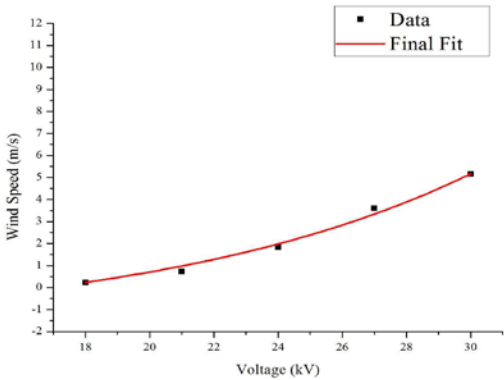


[Fig. 13] Graph of <Table 5>

[Fig. 13]의 결과에서 특이한 점은 3 cm 이하와 같이 공극간격이 특정 길이 이하가 될 경우 스파크(방전)가 발생하여 바람이 발생하지 않는다는 점이다. 이때 공극간격은 축전기가 포함할 수 있는 공기의 밀도와 밀접한 관련이 있기 때문인 것으로 생각된다. 마지막으로 양단에 인가된 전압 변화에 따른 풍속을 측정하였다. 이때 공극 거리는 3 cm를 유지하였다.

<Table 6> Wind Velocity Measurement Results in accordance with Voltage

인가전압	18 kV	21 kV	24 kV	27 kV	30 kV
측정된 풍속	0.2 m/s	0.7 m/s	1.8 m/s	3.6 m/s	5.1 m/s
측정된 풍속	0.2 m/s	0.8 m/s	1.9 m/s	3.6 m/s	5.2 m/s
측정된 풍속	0.3 m/s	0.7 m/s	1.8 m/s	3.6 m/s	5.1 m/s



[Fig. 14] Graph of <Table 6>

[Fig. 14]는 [Fig. 13]에서 최적화시킨 3 cm의 공극간격을 유지한 채로 인가전압을 18 kV ~ 30 kV까지 변화시키면서 풍속을 측정한 결과를 보여준다. 이 결과로부터 최대의 추력을 내기 위해서는 27 kV ~ 30 kV가 적당한 것을 확인할 수 있다.

Ⅲ. 연구 결론 및 제언

1. 결론

본 연구는 비대칭 축전기에서 발생하는 힘의 크기를 정량적인 분석을 통해 이해하려고 노력하였다. 실험을 통하여 축전기의 크기와 모양이 가장 큰 이슈임을 확인할 수 있었다. 본 문제를 해결하기 위하여 제작기법을 향상시키기 위한 연구를 병행하였으며 최적의 기법으로 제작된 비대칭 축전기를 시험해 본 결과 풍속의 변화를 관측할 수 있었다. 지금까지의 결과를 정리하면 다음과 같다.

가. 인가전압과 풍속 사이의 관계

[Fig. 14]의 결과에서와 같이 전압을 증가함에 따라 풍속이 증가한다는 것을 확인할 수 있었다. 이 결과는 $F = (\frac{2mV}{q})^{\frac{1}{2}} I$ 으로 표현되는 식 (3)의 결과와 일치함을 알 수 있다. 즉, 회로에 흐르는 전류가 증가하면 입자에 작용하는 힘이 증가하고 풍속은 빨라지게 된다.

나. 공극간격과 풍속 사이의 관계

공극 간격은 동일 전압에서 전극 사이에 발생하는 전기장의 세기를 결정하는데 이렇게 발생한 전기장의 크기에 따라 전하들의 움직임이 결정된다. 따라서 공극 거리가 증가하면 전기장의 세기가 약해져서 전하들은 느려진다. 이때 공극 간격이 짧아지면 풍속이 점점 빨라질 것으로 예측할 수 있으나 양쪽 극이 너무 가까울 경우 순간 방전이 일어나 더 이상 실험이 불가능하므로 공극간격이 짧아져도 방전이 일어나지 않는 안전한 모델이 필요하다.

다. 한 변의 길이와 풍속 사이의 관계

축전기 한 변의 길이는 비대칭 축전기가 가속시키는 공기의 면적과 관계가 있어 변이 길어지면 입자에 힘을 미치는 거리가 길어져 충분한 가속을 시키기에 보다 많은 에너지를 필요하게 된다는 것을 [Fig. 10]의 결과로부터 확인할 수 있었다. 공극간격의 결과에서와 같이 적당한 거리가 존재함을 확인하였는데 이 거리에서 입자를 가장 효율적으로 가속시킬 수 있다는 것을 의미한다. 반대로 한 변의 길이가 너무 짧을 경우 바람이 발생하지 않게 되는데 이것은 전하를 가속시키기에는 공기의 밀도가 충분하지 않기 때문으로 추측된다.

라. 셀의 개수와 풍속 사이의 관계

축전기 내부 셀의 증가는 중첩효과를 발생시키는 효과는 크지 않지만 등방적인 추력을 만들어 보다 안정적인 비행이 가능하도록 돕는 효과가 있었다.

2. 제언

본 연구는 비펠드-브라운 효과를 정량적으로 분석한 결과를 바탕으로 새로운 형태의 운송장치를 개발하기에는 매우 초보적인 수준이다. 그렇지만 본 연구를 통하여 직접 도출한 식과 측정 결과가 잘 일치하는 것만으로도 반중력 장치의 제작에 희망을 가지게 된 것도 사실이다. 본 연구를 마무리하기 위해서는 보다 향상된 제작기법의 연구와 융복합적인 시도가 밀바탕 되어야 할 것으로 사료되는 바 주요 목적인 추력을 최대화하기 위해서는 보다 다양한 변수에 대해 깊은 이해가 필요할 것으로 생각된다.

Ⅳ. 참고 문헌

[1] Bahder, T. B., & Fazi, C. (2002). Force on an Asymmetric Capacitor. *ArXiv preprint physics/0211001*.
[2] Canning, F. X., Melcher, C., & Winet, E. (2002). Asymmetrical Capacitors for Propulsion. NASA/CR-2004-213312.
[3] Chattock, A.P. (1899). XLIV. On the velocity and mass of the ions in the electric wind in air. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 48(294), 401-420.
[4] Bortnikov, Y. S., Nesterov, V. A., Rubashov, I. B., & Chaplii, V. I., (1970). Corona Discharge in an air stream. *Soviet Physics-Technical Physics*, 14, 1579.

| 연구진 |

김재윤 (Kim Jaeyun, 광주과학고등학교, wodbs1027@naver.com)
장연석 (Jang Yeonsuk, 광주과학고등학교, wkd_dustjr@naver.com)
조용한 (Jo Yonghan, 광주과학고등학교, dkssud7112@naver.com)

지도교사 : 이진호 (Lee Jinho, 광주과학고등학교, 물리학, sanmak28@empal.com)

Agl-그래핀 나노복합체의 유기물 분해 광촉매 메커니즘 연구

김성남 · 이아림 · 김가현 · 채동현 · 김성하 – 부산과학고등학교

Photocatalytic Organic Dye Degradation Mechanisms of AgI-Graphene Nanocomposite

Kim Seongnam · Lee Ahrim · Kim Gahyun · Chae Donghyeon · Kim Seongha - Busan Science High School

ABSTRACT

Advancements in science have allowed us to decompose water wastes using advanced photocatalysts. Among various photocatalysts, AgI-reduced graphene oxide (RGO) nanocomposites with an excellent visible light photocatalytic efficient have been suggested as promising candidate for the removal of organic dyes. In this work, we have successfully fabricated and characterized the RGO enwrapped AgI nanocomposite. The photocatalytic activity of the synthesized nanocomposite was evaluated by the degradation of Rhodamine B (RhB) under visible-light irradiation. The results indicate that AgI-RGO exhibited much higher photocatalytic activity than the pure AgI nanostructure. In addition, to unravel the specific reactive species in the RhB degradation, we have performed the scavengers experiments.

Key words:
Photocatalyst, AgI/AgI-graphene, Scavengers Experiment, Photocatalytic Mechanism

국문초록

광촉매를 이용해 수생 환경을 오염시키는 유기 화합물을 분해하는 연구가 주목받고 있다. 여러 가지 광촉매 중 아이오딘화 은(AgI) 나노 입자와 아이오딘화 은-그래핀(AgI-graphene) 나노 복합체는 태양광에서 많은 양을 차지하는 가시광선 영역대의 밴드 갭과 높은 전도도를 가지므로 광촉매로서 적합하다. 본 연구에서는 아이오딘화 은 나노 입자와 아이오딘화 은-그래핀 나노 복합체를 합성하고, 주사전자현미경으로 그 구조를 확인하였다. 염료로 사용되는 유기 화학물질 중 하나인 로다민 B(RhB)와 광촉매의 혼합 용액에서 시간에 따른 RhB의 분해 정도를 흡광도 측정을 통해 두 광촉매의 효율을 비교하였다. 이를 통해 아이오딘화 은-그래핀이 아이오딘화 은보다 광촉매 효율이 높다는 것을 확인하였다. 또한 선행 연구에서는 거의 밝혀지지 않았던 아이오딘화 은-그래핀의 메커니즘 중 스캐빈저(scavenger) 실험을 통해 광촉매의 반응에서 핵심적인 역할을 하는 화학종을 규명하는 메커니즘 연구를 수행하였다.

중심어 :
광촉매, AgI/AgI-그래핀, 스캐빈저 실험, 광촉매 메커니즘

I. 서론

산업이 발달함에 따라 많은 유기 화학물질들의 생산, 운반이 증가하고 있고, 이에 따라 강, 하천, 바다 등에 누출, 방류되는 양도 증가하고 있다. 이렇게 방류된 유기 화학물질들은 수생환경을 오염시키며, 이러한 오염된 물에 노출된 사람들에게도 암과 같은 심각한 질병들을 일으킨다. 유기 화학물질의 친환경적인 분해 및 재처리를 위해 과학자들은 여러 방법들을 개발하였다. 가장 대표적인 방법 중 하나인 고급산화법(AOP: Advenced Oxidation Process)은 강한 산화제로 작용할 수 있는 자외선, 과산화수소, 오존, 광촉매 등을 이용하여 라디칼을 생성시켜 물속에 존재하는 유기물을 분해하는 방법이다[1]. 이 중 태양 빛을 이용하는 산화금속 광촉매는 뛰어난 유기 화학물질 분해 효율과 재활용성으로 널리 사용되고 있지만[2,3] 대표적인 산화금속 광촉매인 TiO₂와 ZnO 광촉매들은 태양 빛 중에 자외선 영역 해당하는 빛만을 흡수하므로, 일반적인 상황에서 태양에너지 중 5%에 불과한 자외선 영역에 해당하는 에너지만 활용할 수 있다는 단점이 있다[4]. 이러한 단점을 극복하고자 현재 가시광선 영역에서 활성을 가지고 광촉매 개발이 많이 이루어지고 있다[5,6].

최근 들어서 가시광선 영역에서 활성을 가지는 AgCl, AgBr, AgI, Ag₃PO₄, Ag₂O, Ag₂CO₃와 같은 은-기반 나노 광촉매에 대한 개발 연구가 많이 이루어졌다[7-9]. 이중 AgI 나노 광촉매는 가시광선 영역에 해

AgI-그래핀 나노복합체의 유기물 분해 광촉매 메커니즘 연구

김성남 · 이아림 · 김가현 · 채동현 · 김성하 – 부산과학고등학교

Photocatalytic Organic Dye Degradation Mechanisms of AgI-Graphene Nanocomposite

Kim Seongnam · Lee Ahrim · Kim Gahyun · Chae Donghyeon · Kim Seongha - Busan Science High School

ABSTRACT

Advancements in science have allowed us to decompose water wastes using advanced photocatalysts. Among various photocatalysts, AgI-reduced graphene oxide (RGO) nanocomposites with an excellent visible light photocatalytic efficient have been suggested as promising candidate for the removal of organic dyes. In this work, we have successfully fabricated and characterized the RGO enwrapped AgI nanocomposite. The photocatalytic activity of the synthesized nanocomposite was evaluated by the degradation of Rhodamine B (RhB) under visible-light irradiation. The results indicate that AgI-RGO exhibited much higher photocatalytic activity than the pure AgI nanostructure. In addition, to unravel the specific reactive species in the RhB degradation, we have performed the scavengers experiments.

Key words:

Photocatalyst, AgI/AgI-graphene, Scavengers Experiment, Photocatalytic Mechanism

국문초록

광촉매를 이용해 수생 환경을 오염시키는 유기 화합물을 분해하는 연구가 주목받고 있다. 여러 가지 광촉매 중 아이오딘화 은(AgI) 나노 입자와 아이오딘화 은-그래핀(AgI-graphene) 나노 복합체는 태양광에서 많은 양을 차지하는 가시광선 영역대의 밴드 갭과 높은 전도도를 가지므로 광촉매로서 적합하다. 본 연구에서는 아이오딘화 은 나노 입자와 아이오딘화 은-그래핀 나노 복합체를 합성하고, 주사전자현미경으로 그 구조를 확인하였다. 염료로 사용되는 유기 화합물질 중 하나인 로다민 B(RhB)와 광촉매의 혼합 용액에서 시간에 따른 RhB의 분해 정도를 흡광도 측정을 통해 두 광촉매의 효율을 비교하였다. 이를 통해 아이오딘화 은-그래핀이 아이오딘화 은보다 광촉매 효율이 높다는 것을 확인하였다. 또한 선행 연구에서는 거의 밝혀지지 않았던 아이오딘화 은-그래핀의 메커니즘 중 스캐빈저(scavenger) 실험을 통해 광촉매의 반응에서 핵심적인 역할을 하는 화학종을 규명하는 메커니즘 연구를 수행하였다.

중심어 :

광촉매, AgI/AgI-그래핀, 스캐빈저 실험, 광촉매 메커니즘

I. 서론

산업이 발달함에 따라 많은 유기 화합물질들의 생산, 운반이 증가하고 있고, 이에 따라 강, 하천, 바다 등에 누출, 방류되는 양도 증가하고 있다. 이렇게 방류된 유기 화합물질들은 수생환경을 오염시키며, 이러한 오염된 물에 노출된 사람들에게도 암과 같은 심각한 질병들을 일으킨다. 유기 화합물질의 친환경적인 분해 및 재처리를 위해 과학자들은 여러 방법들을 개발하였다. 가장 대표적인 방법 중 하나인 고급산화법(AOP: Advanced Oxidation Process)은 강한 산화제로 작용할 수 있는 자외선, 과산화수소, 오존, 광촉매 등을 이용하여 라디칼을 생성시켜 물속에 존재하는 유기물을 분해하는 방법이다[1]. 이 중 태양 빛을 이용하는 산화금속 광촉매는 뛰어난 유기 화합물질 분해 효율과 재활용성으로 널리 사용되고 있지만[2,3] 대표적인 산화금속 광촉매인 TiO_2 와 ZnO 광촉매들은 태양 빛 중에 자외선 영역 해당하는 빛만을 흡수하므로, 일반적인 상황에서 태양에너지 중 5%에 불과한 자외선 영역에 해당하는 에너지만 활용할 수 있다는 단점이 있다[4]. 이러한 단점을 극복하고자 현재 가시광선 영역에서 활성을 가지고 광촉매 개발이 많이 이루어지고 있다[5,6].

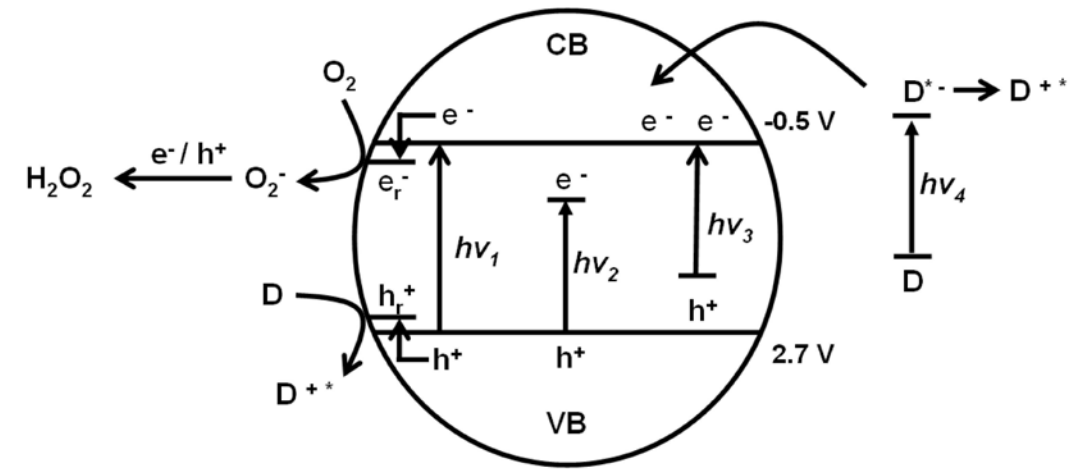
최근 들어서 가시광선 영역에서 활성을 가지는 AgCl , AgBr , AgI , Ag_3PO_4 , Ag_2O , Ag_2CO_3 와 같은 은-기반 나노 광촉매에 대한 개발 연구가 많이 이루어졌다[7-9]. 이중 AgI 나노 광촉매는 가시광선 영역에 해

당하는 밴드갭(band-gap) 구조를 가지고 있고 AgI 나노구조체의 전기전도성이 좋아서 광촉매 반응 중 전자-정공 재결합(electron-hole recombination)을 최소화 시킬 수 있어서 가시광선 감응형 광촉매로 많은 연구가 되어 왔다[7,8]. AgI는 수용액 상태에서 응집이 일어나 나노 상태에서 그보다 큰 입자인 벌크 상태로 돌아가려는 성질 때문에 가시광선 감응형 광촉매로 재활용성이 떨어진다는 단점이 존재한다[9]. 최신 연구결과[9]에 따르면 이러한 재활용성에 대한 단점은 AgI 나노구조에 산화 그래핀(graphene oxide)을 접합시킨 AgI-그래핀 나노복합체를 합성하여 최소화 시킬 수 있다는 것이 밝혀졌고, 사용된 산화 그래핀의 전기전도성 및 표면적 때문에 유기 화학물질 분해 효율이 순수한 AgI 나노구조보다 증가했다는 것이 보고되었다. 하지만 사전 연구에서는 광촉매의 효율 개선을 위해서 필수적으로 밝혀져야 할 유기 화학물질 분해와 관련 광촉매 작용 메커니즘이 규명되지 않았다. 이러한 연구 필요성에 따라서 본 연구에서는 AgI-그래핀 나노복합체를 수열합성법에 따라서 합성하고 분석한 다음 광촉매 관련 메커니즘을 알아볼 수 있는 대표적 실험인 스캐빈저(scavenger) 실험을 통해 AgI-그래핀 나노복합체의 광촉매 메커니즘을 확인하여 어떤 중간체가 광촉매로 작용하는 데 큰 영향을 미치는지를 알아보았다. 본 연구 결과는 앞으로 진행될 광촉매의 효율증대에 관한 연구에 방향성을 제시해 줄 것으로 기대된다.

II. 이론적 배경

1. 광촉매의 일반 원리

친환경적으로 사용될 수 있는 나노광촉매의 원리는 비교적 간단하다[2,3]. 전자가 차 있는 최상위 오비탈(HOMO: Highest Occupied Molecular Orbital)과 HOMO 바로 위의 오비탈인 전자가 차 있지 않은 최하위 오비탈(LUMO: Lowest Unoccupied Molecular Orbital)과의 에너지 준위 차이에 해당하는 밴드갭 이상의 빛 에너지를 나노 구조체에 조사시키면 광자가 나노 구조체의 가전자대(valence band)로부터 전도대(conduction band)로 전자를 여기 시키고 가전자대에 정공(positive hole)이라고 하는 전자부족 상태를 만들게 된다. 이 때 생성된 가전자대의 정공(h^+)과 전도대의 전자(e^-)가 나노 구조체에 흡착된 물질들과 접촉하여 산화, 환원되거나 또는 정공이나 물의 산화반응에 의해 생성된 $\cdot\text{OH}$ 라디칼이 오염물질을 분해하게 되는 것이다. 대표적인 광촉매인 TiO_2 의 광촉매 산화반응 메커니즘이 [Fig. 1]에 나타나있다. [Fig. 1]에 나타나 있는 것과 같이 광촉매가 빛을 받게 되면 광전 효과에 의해 전자가 방출되고, 이때 형성된 정공은 매우 강한 산화력을 가지게 되고 물속의 OH^- 에서 전자를 뺏어 $\cdot\text{OH}$ 라디칼을 만든다. 밖으로 나간 전자는 산소 원자와 만나 슈퍼 옥사이드(O_2^-)를 형성한다. 슈퍼 옥사이드와 $\cdot\text{OH}$ 라디칼은 매우 강력한 산화제로 유기물을 물과 이산화탄소로 분해하게 된다.



[Fig. 1] The principle of nano photocatalyst

2. 나노구조-그래핀 광촉매의 장점

다양한 나노구조체에 그래핀을 접합한 나노구조-그래핀 복합체는 광촉매 개발에 있어 다음과 같은 여러 가지 장점을 가진다.

- (1) 그래핀 나노시트는 2차원의 얇은 탄소 구조로 되어 있는데 화학적인 안정성으로 나노구조체에서 흔하게 일어나는 응집 현상을 막을 수 있다.
- (2) 그래핀 나노 시트는 화학적 안정성뿐만 아니라 전기전도성이 우수하므로 빛에 의해서 형성된 광전자를 빠른 시간 안에 받아들여 광촉매 응용에 가장 문제가 되는 전자-정공 재결합을 막아서 광촉매 효율을 개선시킬 수 있다. 또한, 그래핀 나노 시트 내에서 전자 이동이 빨라서 빠른 시간 안에 유기물로 전자 이동이 가능하다는 장점도 있다.
- (3) 그래핀 나노 시트를 나노구조체에 접합시키면 원래 나노구조체가 가지고 있는 빛의 흡수 영역이나 세기를 변화시킬 수 있고, 이를 통하여 가시광선 감응형 광촉매 제작에 사용될 수 있다.
- (4) 나노구조체가 가지고 있는 표면적보다 나노-그래핀 복합체는 더 큰 표면적을 가져서 유기 화학물질을 효과적으로 흡착 시킬 수 있는 장점을 가지고 있다.

3. 나노 광촉매의 효율 측정

사전 연구 결과에 따르면 AgI 나노구조 및 AgI-그래핀 나노복합체의 대표적인 유기 물질인 로다민 B(Rhodamine B: RhB) 광유도 분해 반응은 1차 반응임이 알려져 있다[9]. 단일 단계 반응에서 반응물의 농도를 c라고 두면 농도는 시간의 함수이므로 다음과 같이 둘 수 있다.

$$v = -\frac{dc}{dt} = kc \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{1}{c}dc = -kdt \quad \dots\dots\dots (2)$$

초기 농도 c_0 에서 시간 t 의 농도 c 까지 적분하면 다음과 같은 속도-시간에 대한 관계식을 얻을 수 있다.

$$\int_{c_0}^c \frac{1}{c}dc = -k \int_0^t dt \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\ln(c/c_0) = -kt \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$c = c_0 e^{-kt} \quad \dots\dots\dots (5)$$

따라서 나노 광촉매의 RhB 광분해 실험에서에서 $\ln(c/c_0) = -kt$ 식을 이용하여 $\ln[\text{농도}]$ 와 시간에 따른 1차식으로부터 AgI와 AgI-그래핀 나노복합체의 RhB 분해에 대한 반응 속도와 효율을 효과적으로 비교 할 수 있다.

4. 나노 광촉매 메커니즘 실험

나노 광촉매의 메커니즘은 나노 광촉매가 유기물을 분해 할 때 가능할 것으로 생각되는 메커니즘을 1 개씩 저해할 때 나타나는 광분해 효율의 변화를 통해 유추할 수 있다[10]. 일반적으로 광촉매는 빛을 받아 여러 산화 환원 반응을 진행하면서 반응성이 높은 정공, $\cdot\text{O}_2^-$ 라디칼, $\cdot\text{OH}$ 라디칼 등을 형성한다고 알려져 있고 이러한 과도 화학종들이 유기물과의 반응을 통해 유기물을 분해한다. 광촉매의 메커니즘 규명을 위해서 각각의 화학종의 역할을 저해한다고 알려진 disodium ethylenediaminetetraacetate(EDTA: 정공 저해제), benzoquinone(BQ: $\cdot\text{OH}$ 라디칼 저해제), tert-butyl alcohol(TA: EDTA, $\cdot\text{O}_2^-$ 라디칼 저해제) 등을 사용하면 광분해 반응에서 주로 작용하는 화학종에 대한 정보를 밝힐 수 있다.

III. 실험방법

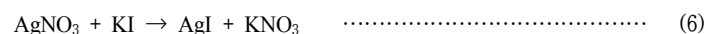
1. AgI 나노구조체 및 AgI-그래핀 나노복합체의 합성

가. 산화 그래핀(graphene oxide: GO)의 제조

산화 그래핀의 제조는 잘 알려진 변형 Hummers 방법을 사용하였다[11]. 3 g의 흑연 파우더 (시그마 알드리치)와 1.5 g의 NaNO_3 (대성화학) 혼합물에 69 mL 황산 수용액 (대성화학)을 천천히 혼합시킨다. 만들어진 혼합물을 0 ℃ 아이스베쓰에 넣어 온도를 유지시키면서 1시간 혼합 자력교반기로 섞는다. 이후 온도를 20 ℃ 아래로 유지시키면서 KMnO_4 (시그마 알드리치) 9 g을 혼합시킨다. 혼합 용액의 온도를 35 ℃로 유지시키면서 교반시키고 천천히 증류수를 가하면서 교반시킨다. 만들어진 혼합물을 HCl (30%, 대성화학)와 증류수를 섞어주면서 필터시킨 서스펜전을 초음파 세척기로 60분 동안 반응시킨다.

나. AgI 나노입자의 제조

아래와 같은 화학 반응식을 이용해서 AgI 나노입자를 제조한다.



0.05 M AgNO_3 수용액 50 mL을 만들기 위해 50 mL 부피 플라스크에 AgNO_3 (시그마 알드리치)

0.42468 g을 넣고, 증류수로 묽힌다. 그리고 15분간 0.05 M AgNO_3 수용액을 자력교반기로 섞는다. 0.05 M KI (시그마 알드리치) 수용액 50 mL을 만들기 위해 50 mL 부피 플라스크에 KI 0.41501 g을 넣고 증류수로 묽힌 후 앞에서 만든 AgNO_3 수용액을 한 방울씩 떨어뜨린다. 마찬가지로 자력교반기로 15분간 섞어준다. 이렇게 만든 용액을 침전시켜 윗부분의 물을 따라내고 증류수로 세척하는 과정을 5회 반복한다. 80 ℃의 오븐에서 24시간 동안 건조시킨 후 비커를 굽어 AgI 나노 파우더를 모은 뒤 곱게 갈아 병에 담는다.

다. AgI-그래핀 나노복합체 제조

앞서 합성한 GO 0.02 g을 증류수 25 mL에 넣고 초음파 세척기로 30분간 반응시킨다. AgNO_3 0.21234 g을 GO가 섞여 있는 증류수에 넣어 0.05 M 수용액 25 mL를 만든다. 이 용액을 30분간 자력교반기로 섞는다. KI 0.20750 g을 증류수에 넣어 0.05 M 수용액을 25 mL 만든다. GO와 AgNO_3 수용액에 KI 수용액을 한 방울씩 넣고 15분간 섞는다. 이렇게 만든 용액을 침전시켜 윗부분의 물을 따라내고 증류수로 5회 세척한다. 80 ℃의 오븐에서 24시간 동안 건조시킨 후 비커를 굽어 AgI-산화그래핀 나노복합체를 모은 뒤 곱게 갈아 병에 담으면 [Fig. 2]의 입자를 얻을 수 있다.



[Fig. 2] (A) The way to compose AgI-RGO nanocomposites (B) AgI, AgI-RGO nanocomposites

2. AgI 나노구조체 분석 및 광촉매 효율, 메커니즘 측정 실험

가. AgI 및 AgI-그래핀 나노복합체 모폴로지, 성분 및 광학적 특성 분석

합성된 AgI 및 AgI-그래핀 나노복합체 모양 및 입자 크기 측정을 위해서 주사전자현미경(SEM: Scanning Electron Microscopy, Hitachi S-4800)으로 분석하였다. 또한 합성된 나노복합체의 원소 성분비를 측정하기 위해서 SEM에 설치되어있는 X-선 분광분석기(EDS: Energy Dispersive Spectrometer, Oxford Instruments)를 사용하였다. 합성된 나노복합체의 광학적 특성 분석을 위해 자외선 및 가시광선의 흡광도를 분광 광도계(UV-Visible Spectrometer, Shimadzu UV-1800 Double Beam Spectrometer)를 이용하여 측정하였다.

나. AgI 및 AgI-그래핀 나노복합체의 RhB 분해 반응 속도 및 광촉매 효율 측정

RhB 10 mg/L 용액 250 mL를 만든다. RhB 용액 80 mL에 AgI 및 AgI-그래핀 나노복합체를 각각 8 mg 섞어 용액을 만든다. 처음에는 빛이 없는 암흑 속에서 30분 동안 자력 교반기로 섞어준다. 각 용액을 자력 교반기로 섞어주며 솔라-시뮬레이터(150 W Xe lamp with AM 1.5 G filter, Abet Technologies)를 이용하여 가시광선 영역의 빛을 조사시킨다. 초기용액을 포함해 빛을 조사시킨 후, 매 10분마다 총 60분 동안의 시료를 채취하여 UV-visible 분광광도계로 흡광도 곡선을 측정한다. RhB의 자외선-가시광선 영역

의 흡광도 곡선 중에 554 nm의 흡광도를 이용하여 다음과 같은 식 (7)을 이용하여 특정 시간에서의 나노광촉매에 의한 RhB의 분해 효율을 계산하였다.

$$\text{RhB의 분해도} = \left[\frac{A(RhB)_0 - A(RhB)_t}{A(RhB)_0} \right] \times 100\% \quad \dots\dots\dots (7)$$

단 위 식에서 $A(RhB)_0$ 와 $A(RhB)_t$ 는 각각 $t = 0$ 과 t 에서의 554 nm에서의 흡광도를 나타낸다.

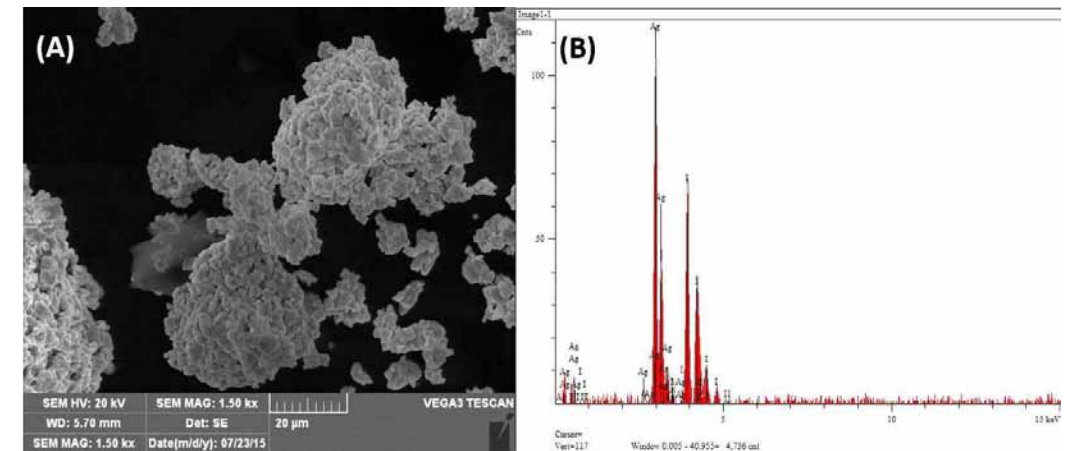
다. AgI-그래핀 나노광촉매 메커니즘 실험(스케빈저 실험)

합성한 광촉매의 메커니즘을 확인하기 위해 스케빈저 실험을 수행한다. 먼저 첫 번째 실험과정에서 h^+ 의 활성을 제거하기 위해 EDTA를 첨가한다. RhB 10 mg/L 용액 100 mL를 만들고 EDTA 10 mmol(0.3722 g)을 넣는다. 처음에는 빛이 없는 암흑 속에서 30분 동안 자력교반기로 섞어준다. 용액을 자력 교반기로 섞어주며 솔라-시뮬레이터를 이용하여 가시광선 영역의 빛을 조사시킨다. 10분마다 총 70분 동안 시료를 채취하여 UV-visible 분광광도계로 흡광도 곡선을 측정한다. 다음에는 $\cdot O_2$ 의 활성을 제거하기 위해 BQ를 넣고 위의 EDTA와 같은 실험을 반복한다. 마지막으로 $\cdot OH$ 의 활성을 제거하기 위해 TBA를 첨가하고 같은 실험을 반복한다.

IV. 실험 결과 및 토의

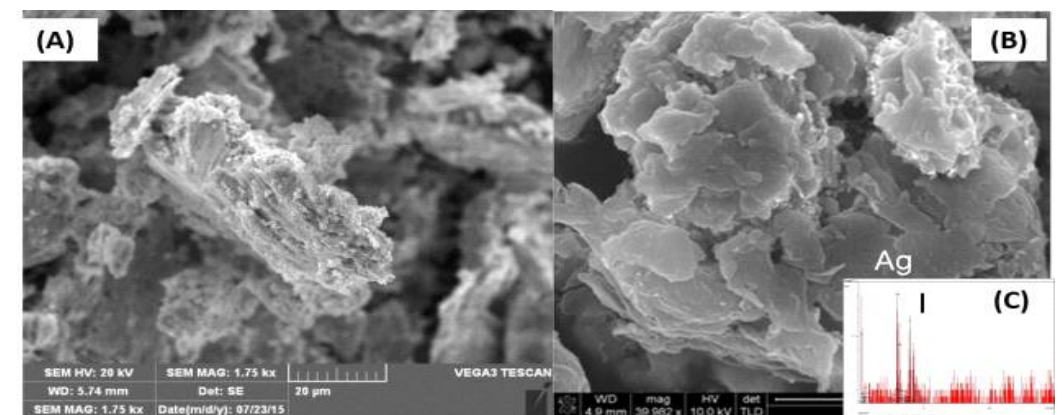
1. AgI 및 AgI-그래핀 나노복합체 모놀로지, 성분 및 광학적 특성 분석

[Fig. 3]은 양금생성반응으로 생성한 AgI 나노구조체를 SEM으로 관찰한 결과와 SEM-EDS로 성분원소의 함량을 나타낸 그래프이다. [Fig. 3(A)]에서 나타난 것처럼 합성된 AgI 나노구조체는 다층의 입방 형태를 구조를 가지고 있다. 형성된 나노 입자의 크기는 0.1 ~ 3 μm 인 것을 볼 수 있으며 표면은 대체적으로 매끄러우며 큰 덩어리로 뭉쳐져 있음을 알 수 있다. EDS를 사용하여 AgI 나노구조체의 성분원소 함량을 확인하였더니 [Fig. 3(B)]와 같이 Ag와 I의 파장대에서 매우 높은 피크가 나타났고, Ag와 I의 성분원소 함량비는 각각 47.4%와 52.6%로 나타났다. 이러한 결과들로 순수한 AgI 나노구조체가 잘 합성되었다는 것을 알 수 있다.



[Fig. 3] (A) SEM (B) EDS result of AgI nano structure

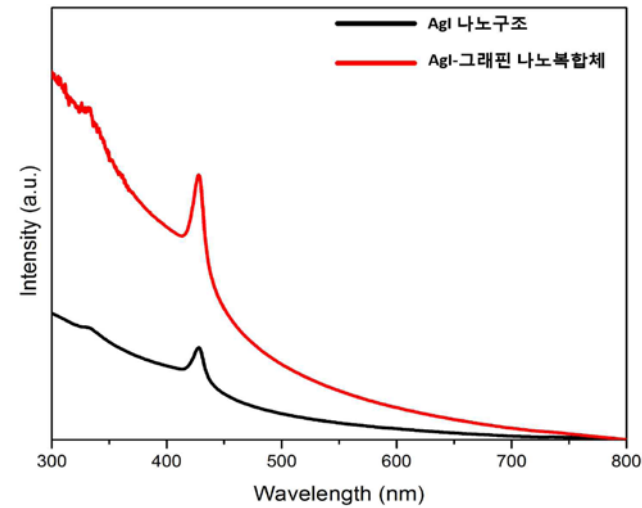
[Fig. 4]는 AgI-그래핀 나노복합체를 SEM으로 관찰한 결과와 SEM-EDS로 성분원소의 함량을 나타낸 그래프이다. [Fig. 4(A)]에 나타난 것처럼 AgI-그래핀 나노복합체는 순수한 AgI 나노구조와는 다르게 표면이 거칠며 약 0.1 ~ 2 μm 정도의 크기로 나노 복합체가 형성되었다. 고배율 SEM으로 관찰한 [Fig. 4(B)]의 결과를 보면 이러한 표면 특성은 AgI 나노구조 주변을 산화-그래핀 나노시트가 두껍게 감싸고 있기 때문에 나타나는 것으로 생각 할 수 있다. 그러한 화학적인 복합체 형성으로 [Fig. 4(C)]의 EDS 결과 순수한 AgI 나노구조체와는 다르게 Ag와 I 이외에 C와 O에 해당하는 피크들을 확인할 수 있다. Ag, I, C와 O의 성분 원소 함량비는 각각 43.0%, 30.0%, 19.3% 및 7.7%로 나타났다. 이러한 모폴로지 및 성분 분석 결과로 AgI-그래핀 나노복합체의 합성을 확인할 수 있다.



[Fig. 4] (A) SEM (B) High resolution-SEM (C) EDS result of AgI-RGO nano structure

[Fig. 5]는 합성된 AgI 및 AgI-그래핀 나노복합체의 광학적 특성을 보여주는 UV-visible 흡광도 측정 결과이다. 합성된 AgI 및 AgI-그래핀 나노복합체는 AgI에서 나타나는 전형적인 430 ~ 433 nm의 피크를 나타내고 있으며, 측정된 흡광도 피크에서 $E = hc/\lambda$ (E 는 밴드갭 에너지, h 는 플랑크 상수, λ 는 흡수 곡선의 피크 파장, c 는 빛의 속도) 관계식을 사용하여 밴드갭을 계산하면 2.90 ~ 2.89 eV가 측정되었다. 이는 순수한 AgI의 밴드갭(2.82 eV)보다[12] 약간 증가한 값인데, 이는 나노 구조에서 일어나는 양자-구속 효과 및 AgI-그래핀 복합체에서 나타나는 그래핀의 영향으로 생각된다. [Fig. 5]에서 나타내는 것처럼 순수한 AgI 나노구조체의 흡광도보다 AgI-그래핀 나노복합체의 흡광도가 가시광선 영역에서 매우 커지

는데 이는 그래핀에 의한 빛 흡수의 증가 때문으로 생각할 수 있다. 이러한 흡광도 증가는 그래핀 효과에 의해서 나노 광촉매의 유기물질 분해 효율이 증가를 나타낸다.



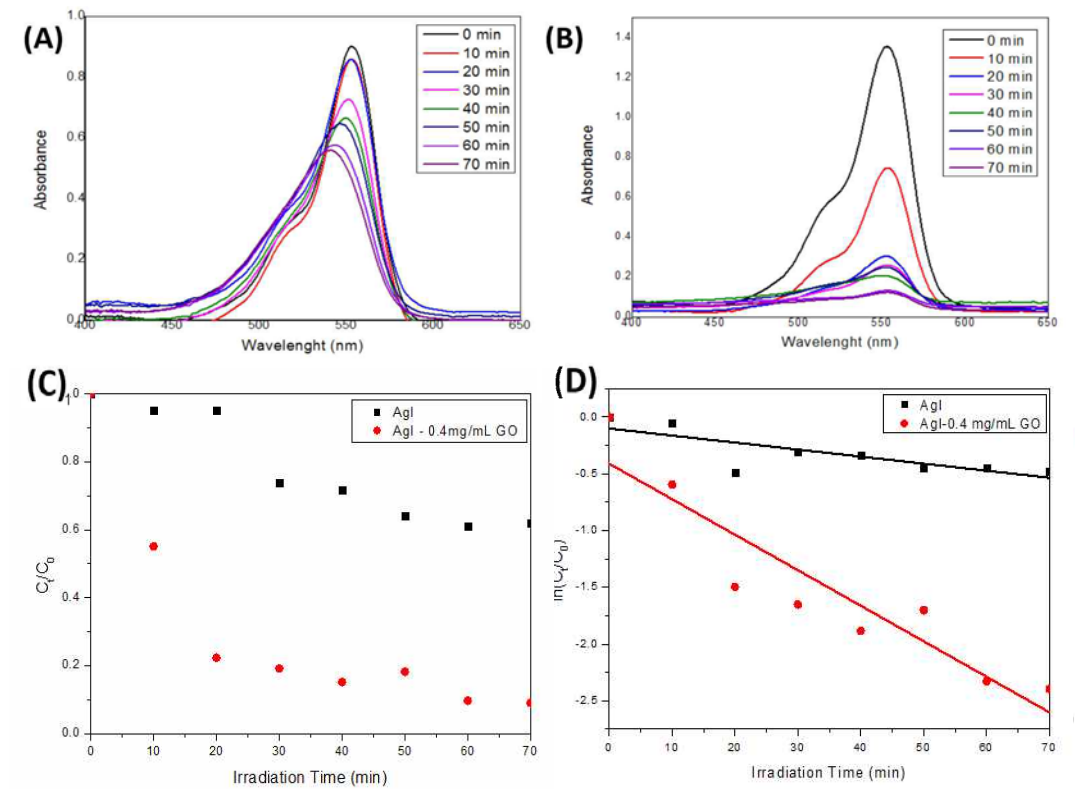
[Fig. 5] UV-visible absorbance of AgI and AgI-RGO nano structure

2. AgI 및 AgI-그래핀 나노복합체의 광촉매 효율

합성된 AgI 및 AgI-그래핀 나노복합체의 광촉매 효율을 측정하기 위해서 솔라-시뮬레이터로 빛을 조사시키고 RhB의 농도를 나타내는 554 nm 흡광도 변화를 측정하였다. 빛을 조사한 뒤 시간에 따른 흡광도의 변화가 [Fig. 6(A)]와 [Fig. 6(B)]에 나타나 있다. 흡광도의 시간에 따른 변화는 시간에 따른 용액 중에 남아 있는 RhB의 농도를 나타낸다. 그림에 나타나 있는 것과 같이 시간에 따른 명백한 흡광도의 변화는 AgI 및 AgI-그래핀 나노복합체가 효과적으로 용액 중의 RhB를 분해시킨다는 것을 나타낸다. 시간에 따라서 최대 흡광도를 나타내는 파장이 단파장쪽으로 옮겨가는데 이는 RhB의 에틸렌 결합이 깨어지는 것으로 생각할 수 있다[13]. 따라서 용액 중의 RhB는 나노광촉매에 의해서 결합이 깨져서 미네랄 생성물로 분해되는 것으로 알 수 있다. AgI 나노구조체보다 AgI-그래핀 나노복합체의 RhB 광분해 효율이 월등히 좋다는 것을 나타내며, AgI-그래핀 나노복합체의 경우에는 가시광선을 조사한 후 70분이 지나면 완벽히 RhB를 분해한다는 것을 나타낸다.

정량적인 광분해 효율을 나타내기 위해서 [Fig. 6(C)]와 [Fig. 6(D)]에 시간에 따른 용액 중에 남아 있는 RhB의 농도를 나타내었다. [Fig. 6(C)]에서 순수한 AgI 나노구조체보다 AgI-그래핀 나노복합체의 광분해 효율이 높다는 것을 알 수 있으면 이러한 관계를 [Fig. 6(D)]에 시간에 따른 $\ln(C_t/C_0)$ 변화량으로 나타내었다. 이러한 관계식에서 AgI 나노구조 및 AgI-그래핀 나노복합체에 의한 RhB의 광분해 현상은 유사 1차 속도식으로 나타난다는 것을 알 수 있으면 광분해 현상에 대한 속도 상수(k)는 $k = \ln(C_0/C_t)/t$ 에서 구할 수 있다. 실험 데이터를 분석한 결과 AgI 나노구조 및 AgI-그래핀 나노복합체에 의한 RhB의 광분해 현상의 k 값은 각각 0.00746와 0.03133(min^{-1})으로 계산되었으며 이로부터 AgI-그래핀 나노복합체의 RhB 광분해에 대한 광촉매 효율이 순수한 AgI 나노구조체보다 약 4.2배 높다는 것을 알 수 있었다. 측정된 광촉매의 효율도 광촉매의 성능을 검증하는데 매우 중요하지만 광촉매 작용 후 재사용할 수 있는 재처리 능력도 매우 중요하다. 4번째 연속된 RhB의 광분해 처리 과정에도 처음 광

분해 효율의 약 80% 이상을 유지하여 합성된 AgI-그래핀 나노복합체의 재사용 능력도 매우 우수하다고 생각된다.

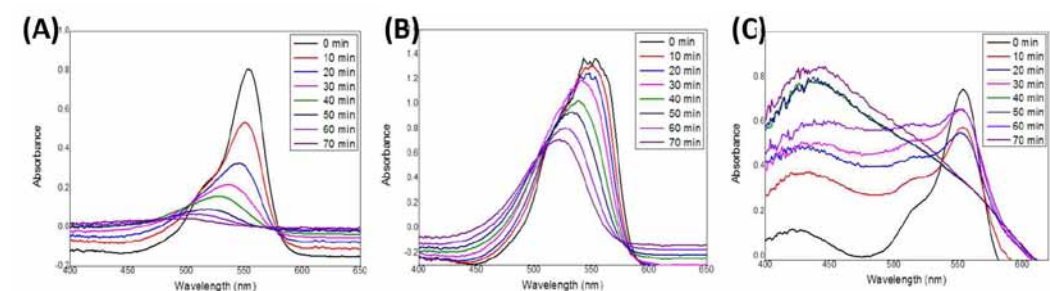


[Fig. 6] Photo decomposition efficiency of AgI and AgI-RGO RhB nano structure (A) AgI nano structure (B) AgI-RGO nanocomposites' absorbance graph at 554 nm by time (C) Absorbance (C_t/C_0) (D) $\ln(C_t/C_0)$ transition

3. AgI-그래핀 나노복합체의 광촉매 메커니즘

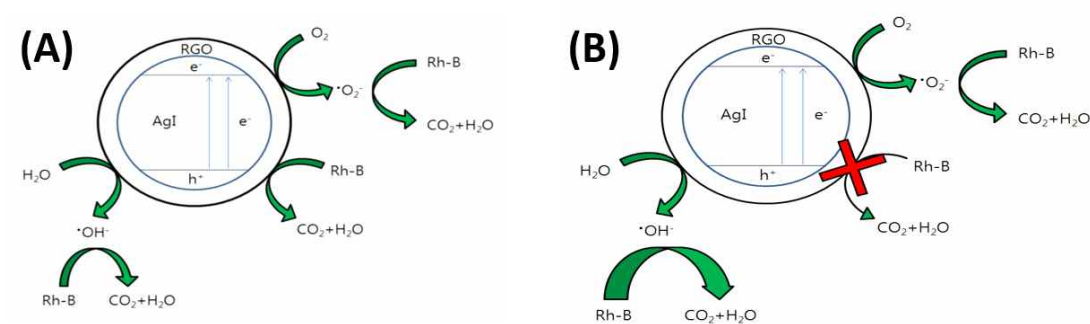
AgI-그래핀 나노복합체의 광촉매 효율을 측정하기 위해서 일반적인 나노광촉매 작용에 중요한 역할을 할 것으로 생각되는 정공, $\cdot\text{O}_2^-$ 라디칼 및 $\cdot\text{OH}$ 라디칼을 효과적으로 저해할 수 있는 스케빈저로 각각 EDTA, BQ, TBA를 사용하여 시간에 따른 RhB의 흡광도 변화를 측정하였다. 스케빈저에 의한 흡광도 변화가 [Fig. 7]에 나타나 있다. [Fig. 7(A)]에 나타난 것처럼 EDTA 첨가는 AgI-그래핀 나노복합체의 광촉매 효율을 나타내는 시간에 따른 RhB의 흡광도 변화에 영향이 거의 없다는 것으로 알 수 있는데 이로부터 정공은 AgI-그래핀 나노복합체의 광촉매 메커니즘에 미약한 효과를 보인다는 것을 알 수 있다. 반면에 $\cdot\text{O}_2^-$ 라디칼 및 $\cdot\text{OH}$ 라디칼에 대한 스케빈저로 BQ 및 TBA를 첨가하였을 때는 매우 다른 양상을 보인다는 것을 알 수 있다. TBA는 $\cdot\text{OH}$ 라디칼의 활성화를 막는 역할을 한다. [Fig. 7(B)]와 같이 TBA를 첨가한 AgI-그래핀 나노복합체의 RhB 분해 반응 실험에서는 [Fig. 6(B)]의 아무런 첨가물질이 없는 AgI-그래핀(0.4 mg/ml)의 RhB 분해 반응 그래프에 비해 현저히 분해도가 줄어든 것을 확인할 수 있다. 그러므로 $\cdot\text{OH}$ 라디칼이 AgI-그래핀 광촉매의 RhB 분해에 관여하는 주요 화학종이라고 예상 할 수 있다.

BQ는 $\cdot\text{O}_2^-$ 의 활성화를 막는 역할을 한다.



[Fig. 7] AgI-RGO nanocomposite photocatalytic mechanism. (A) RhB solution's absorbance change by AgI nanocomposite including EDTA, (B) TBA, (C) BQ by time

[Fig. 7(C)]와 같이 BQ를 첨가한 AgI-그래핀 나노복합체의 RhB 분해 반응 실험에서는, 반응 후 시간이 지남에 따라 다른 파장대에서 흡광도 피크가 점차 증가하는 것이 관찰되었고 육안으로 보았을 때 RhB의 분홍색 빛이 점점 붉은색으로 바뀌는 것을 관찰 할 수 있었다. 하지만 암흑에서 30분간 교반하였을 때는 이러한 반응이 일어나지 않았으므로, 이 실험에서 감소한 RhB의 흡광도가 $\cdot\text{O}_2^-$ 이외의 다른 AgI-그래핀 나노복합체의 광촉매 메커니즘을 통해서만 분해되었다고 할 수 있다. 그러므로 $\cdot\text{OH}$ 라디칼과 마찬가지로 $\cdot\text{O}_2^-$ 가 AgI-그래핀 광촉매의 RhB 분해에 관여하는 주요 화학종이라고 예상 할 수 있다. 스케빈저 실험 결과를 바탕으로 결과 값을 정리한 <Table 1>을 보면 정공이 비활성화된 상태에서 AgI-그래핀 나노복합체와 RhB 수용액의 광분해 반응은 554.2 nm의 파장대에서 초기 흡광도 0.744에서 70분 후 나중 흡광도 0.336으로 변해 약 99.3%의 효율이 있었다. 또한 $\cdot\text{OH}$ 라디칼, $\cdot\text{O}_2^-$ 라디칼은 각각 69.4%, 54.9%의 효율이 있었다. 결론적으로 정공은 중요한 역할을 하지 못하나 $\cdot\text{OH}$ 라디칼과 $\cdot\text{O}_2^-$ 라디칼은 주요 반응 메커니즘에 관계함을 알 수 있다. [Fig. 8]에 본 연구로 규명된 AgI-그래핀 나노복합체의 RhB 분해 반응 메커니즘을 도식하였다.



[Fig. 8] (A) Expected mechanism before scavenger [9] (B) Modified mechanism of AgI-RGO nano structure in this research

<Table 1> Photo decomposition efficiency of AgI-RGO nano structure

첨가 물질	비활성 메커니즘	광촉매 반응 참여	최대 흡광 파장(nm)	초기 흡광도	70분후 흡광도	분해율 (%)
EDTA	h^+	x	554.2	0.807	0.006	99.3
TBA	$\cdot\text{OH}$ 라디칼	o	542.8	1.370	0.420	69.4
BQ	$\cdot\text{O}_2^-$ 라디칼	o	554.2	0.744	0.336	54.9

V. 결론

그래핀의 농도가 0.4 mg/mL일 때 가장 효율이 높다는 선행연구에 따라 AgI 나노구조체 및 AgI-그래핀 나노복합체의 RhB 광분해 촉매 효율을 측정하여 보았다. AgI-그래핀 나노복합체는 약 90%의 분해도로 40%의 분해도를 가진 순수한 AgI 나노구조에 비해 월등히 뛰어난 유기물 분해 효율을 보였고 4.20배 정도 더 빠르게 RhB를 분해함을 알 수 있다. 하지만 AgI-그래핀 나노복합체의 RhB 광분해 반응 속도 상수가 $0.0342 (\text{min}^{-1})$ 로 실제 산업에 활용되어 고농도의 유기물질을 분해하는 것은 어려울 것으로 판단되었다. 따라서 AgI-그래핀 나노복합체의 RhB를 분해하는 메커니즘에서 단점을 보완하고 효율을 높일 수 있는 방법을 찾기 위해 AgI-그래핀 나노복합체의 주요 광촉매 반응 메커니즘을 알아내는 스케빈저 실험을 수행하였다. [Fig. 8(A)]에 나타난 사전 연구에서 예상된 광촉매 반응 메커니즘과 달리 본 연구에서 규명된 결과는 [Fig. 8(B)]에서 보는 것처럼 $\cdot\text{OH}$ 라디칼과 $\cdot\text{O}_2^-$ 라디칼이 주요 반응 메커니즘에 관여하므로, AgI-그래핀 나노복합체의 효율을 더 증가시키기 위해서는 $\cdot\text{OH}$ 라디칼과 $\cdot\text{O}_2^-$ 라디칼이 더욱 활발하게 생성되고 반응을 할 수 있는 환경을 제공해 주면 될 것이다. 이 외에도 어느 정도 유기물을 분해하고 난 후 나노복합체의 구조 변경, 응집, 이온화 등으로 효율이 떨어지거나, 결합 에너지가 큰 결합은 분해하지 못하는 것 등을 보완한다면 오염 물질 분해에 더 효율을 높일 수 있을 것이다. 또한, 상용화 시 도포하였다가 다시 수거할 방법, $\cdot\text{O}_2^-$ 라디칼의 생성으로 인한 용존 산소량 감소, 특정 파장 이하의 빛이 없을 때에는 반응이 거의 일어나지 않는 광촉매 자체의 단점 등을 보완하고 찾는다면 실제로 상용화해서 큰 효과를 볼 수 있을 것이다.

VI. 참고문헌

[1] 신항식, 임재림 (1995). 고급산화법을 이용한 Trichloroethylene 함유 폐수의 처리 (III)(O_3/UV , $\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$ 처리 중심으 로). **대한환경공학회지**, 17(12), 1189-1198.

[2] Kuvarega, A. T., Krause, R. W., & Mamba, B. B. (2015). Evaluation of the simulated solar light photocatalytic activity of N, Ir co-doped TiO_2 for organic dye removal from water. *Applied Surface Science*, 329, 127-136.

[3] Yu, J., Liu, W., & Yu, H. (2008). A one-pot approach to hierarchically nanoporous titania hollow microspheres with high photocatalytic activity. *Crystal Growth and Design*, 8(3), 930-934

[4] Ravelli, D., Dondi, D., Fagnoni, M., & Albini, A. (2009). Photocatalysis. A multi-faceted concept for green chemistry. *Chemical Society Reviews*, 38(7), 1999-2011.

[5] Kumar, S. G., & Rao, K. K. (2015). Zinc oxide based photocatalysis: Tailoring surface-bulk structure and related interfacial charge carrier dynamics for better environmental applications. *RSC Advances*, 5(5), 3306-3351.

- [6] Liu, T. J., Wang, Q., & Jiang, P. (2013). Morphology-dependent photo-catalysis of bare zinc oxide nanocrystals. *RSC Advances*, 3(31), 12662-12670.
- [7] An, C., Liu, J., Wang, S., Zhang, J., Wang, Z., Long, R., & Sun, Y. (2014). Concaving AgI sub-microparticles for enhanced photocatalysis. *Nano Energy*, 9, 204-211.
- [8] Lei, B., Zhu, M., Chen, P., Chen, C., Ma, W., Li, T., & Liu, M. (2014). Silver iodide microstructures of a uniform towerlike shape: morphology purification via a chemical dissolution, simultaneously boosted catalytic durability, and enhanced catalytic performances. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 6(6) 4160-4169.
- [9] Reddy, D. A., Lee, S., Choi, J., Park, S., Ma, R., Yang, H., & Kim, T. K. (2015). Green synthesis of AgI-reduced graphene oxide nanocomposites: Toward enhanced visible-light photocatalytic activity for organic dye removal. *Applied Surface Science*, 341, 175-184.
- [10] Choi, J., Reddy, D. A., Islam, M. J., Seo, B., Joo, S. H., & Kim, T. K. (2015). Green synthesis of the reduced graphene oxide-CuI quasi-shell-core nanocomposite: A highly efficient and stable solar-light-induced catalyst for organic dye degradation in water. *Applied Surface Science*, 358, 159-167.
- [11] Liu, M., Xu, J., Cheng, B., Ho, W., Yu, J. (2015). Synthesis and adsorption performance of Mg(OH)₂ hexagonal nanosheet-graphene oxide composites. *Applied Surface Science*. 332, 121-129.
- [12] Ves, S., Glötzl, D., Cardons, M., & Overhof, H. (1981). Pressure dependence of the optical properties and the band structure of the copper and silver halides. *Physical Review B*. 24(6), 3073-3085.
- [13] Wu, T., Liu, G., Zhao, J., Hidaka, H., & Serpone, N. (1998). Photoassisted degradation of dye pollutants. V. Self-photosensitized oxidative transformation of rhodamine B under visible light irradiation in aqueous TiO₂ dispersions. *Journal of Physical Chemistry B*, 102(30) 5845-5851.

| 연구진 |

김성남 (Kim Seongnam, 부산과학고등학교, kimsn3928@naver.com), 주저자 및 교신저자

이아림 (Lee Ahrim, 부산과학고등학교, lar990925@gmail.com)

김가현 (Kim Gahyun, 부산과학고등학교, gahyun8431@naver.com)

채동현 (Chae Donghyeon, 부산과학고등학교, chae3488@naver.com)

김성하 (Kim Seongha, 부산과학고등학교, seongha0113@gmail.com)

지도교사 : 남영호 (Nam Youngho, 부산과학고등학교, 화학, fistman50@hanmail.net)

지도교수 : 김태규 (Kim Taekyu, 부산대학교 화학과, tkkim@pusan.ac.kr)

지도조교 : 최지하 (Choi Jiha, 부산대학교 화학과, ghyh105@gmail.com)

수용액 상태에서 안정적인 마그네타이트 형성조건에 대한 연구

김준서 · 신정원 · 유원정 · 장건호 · 조혜지 – 대전동신과학고등학교

Study of Stable Magnetite Formation Condition in Aqueous System

Kim Joonseo · Shin Jungwon · Yu Wonjeong · Chang Gunho · Jo Hyeji - Daejeon Dongsin Science High School

ABSTRACT

Ferrofluid is the material which has magnetic properties on fluid state. Recently, the ferrofluid formed dispersed in hydrophobic solvent is generally used in various industry. However, still most of experiments are carried out in aqueous system. Therefore, it is important to form stable ferrofluid in aqueous system. Changing reactant's ratio, pH of solutions and using various kinds of surfactant and base, the best condition for strong ferrofluid, and clear peaks could be found. The condition is when mol ratio 1:1 (FeCl₂ : FeCl₃), using ammonia for base, disperse with TMAH and washing with pH 7 solution. Stabilization of ferrofluid depend on time should be added and then the application of ferrofluid on aqueous system will enlarge to various field.

Key words:

Ferrofluid, Aqueous System, Stability, Spike

국문초록

자성유체는 유체 상태로 자성을 나타내는 물질이며 현재는 소수성의 용매를 이용하여 분산시키는 방식으로 형성한 것을 일반적으로 사용하나, 많은 연구에서는 수용액 상태가 사용되므로 수용액 상태에서 안정적인 자성유체를 형성하는 것이 중요하다. 반응물의 비율, 세척해주는 용액의 pH, 사용하는 염기와 계면활성제의 종류를 각각 변화시키는 실험을 통해 가장 자기력이 강한 자성유체를 형성하는 조건을 찾고, 자기력선에 의한 피크가 선명하게 나오는 조건을 찾았다. 그 결과, 최적의 조건은 2가와 3가 염화철 수용액을 1:1 몰수 비로 혼합 후 암모니아를 사용하여 적정하고 TMAH로 분산 시킨 후 pH 7의 용액으로 세척해주었을 때이다. 추후 시간에 따른 자성유체의 안정성에 관한 연구가 추가된다면 수용액 상태에서 형성된 자성유체가 다방면으로 이용될 것으로 기대된다.

중심어 :

자성유체, 수용액 상태, 안정도, 스파이크

I. 서론

교육과학연구원에서 과학체험부스 자원봉사를 하던 중, 체험관 내의 자성유체를 보았다. 자기장 내에서 뿔뿔한 피크가 생기는 자성유체를 자세히 관찰해보니 용기의 표면에 기름방울이 맺힌 것을 확인할 수 있었다. 이에 자성유체에 대하여 조사한 결과, 현재 대부분 자성유체는 유기 용매 상태에서 만들어지며, 수용액 상태에서 만든 자성유체는 자성, 지속력 등이 상대적으로 떨어진다는 것을 알게 되었다. 이에 호기심이 생겨 수용액 상태에서 큰 피크가 생성되는 자성유체를 직접 만드는 실험을 진행하였다.

수용액 상에서 자성유체를 성공적으로 형성하는 기술이 응용된다면 기존의 공학 분야뿐만 아니라 수계(水系)를 이용하는 생체공학, 환경공학 등의 다양한 분야에 적용할 수 있을 것이다.

이를 위해 본 연구에서는 자성유체에 대한 관찰에서 그치지 않고 수용액 상태에서 자성과 지속력이 강한 자성유체를 만들기 위해 자성유체의 성질에 영향을 미치는 여러 가지 요인들에 대해 연구하였다. 여러 변인 하에서 자성유체를 실제로 합성하고, 물리적 특성인 자화율을 측정하여 초상자성체의 특성으로 알려진 자성유체의 자기이력현상과 그 성질을 비교하였다.

II. 이론적 배경

1. 자성유체

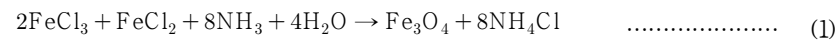
가. 자성유체

자성유체란 수 nm에서 수십 nm의 균일한 크기의 강자성체 초미립자를 지방산과 같은 계면활성제로 조밀하게 피복한 후, 석유와 같은 액체 용매 중에 안정하게 분산시켜[4] 액체 자신이 외관상 자성을 띄게 만든 자성 콜로이드[14]를 말한다. 이러한 특성은 마그네타이트(Fe_3O_4)가 용매에 분산된 콜로이드의 특성 때문에 나타난다. 이 자성유체를 자기장 안에 두면 강자성 초미립자는 자기장이 센 방향으로 자기적 힘을 받는다. 게다가 이 초미립자는 용매 분자와 무질서한 충돌을 하고 있다. 따라서 강자성 초미립자에 작용하는 자기적 힘은 용매 분자에게도 전달돼 거시적으로 보면 마치 자기장이 자성유체에 힘을 주는 것처럼 보인다. 이런 힘 때문에 자성유체가 자석에 끌리게 되는 것이다.

이러한 자성유체는 1960년대 미항공우주국(NASA)에서 로켓연료를 자성유체로 만들어[6] 무중력의 상태에서도 연료탱크 속에 고정하기 위한 연구에서 개발되기 시작하였다.

나. 마그네타이트 생성

자철광을 포함하는 액체자석은 염기성 용액에서 Fe(II) 염과 Fe(III) 염의 적당한 양을 조합하여 혼합된 원자가 산화물(Fe_3O_4)을 용액으로부터 침전시키게 함으로써 만들 수 있다. 다음 식은 염기 용액 조건에서 마그네타이트의 화학 반응식이다[2].



강자성체가 100 Å 정도 크기의 초미립자가 되면 각 입자는 더 이상 자화될 수 없는 포화자화상태가 된다. 동시에 단일자구(입자 전체가 일정한 방향으로 저절로 자화된 상태)로 변한다. 따라서 강자성 미립자를 액체 속에 넣으면 이들은 자기적 인력에 의해 응집, 결국 침전하고 만다. 그러나 자철광의 입자는 액체상에서 서스펜션으로 남아 있게 하기 위해 작은 입자, 즉 응집되지 않은 상태로 남아 있어야 한다. 지름이 10 nm 보다 더 작은 자기입자의 열적 운동은 각 입자 간 자기적 상호작용 때문에 멎쳐지는 것을 방해하는데 충분하기 때문이다. 따라서 그들을 작게 하고 멎치지 않게 하기 위해서 자기력과 반데르발스 상호작용에 의해 입자들이 멎쳐지는 것을 방해해야만 하는데, 이는 계면활성제를 사용함으로써 해결한다.

다. 자성유체의 응용

1) 실링장치

자기장이 강자성유체에 작용하는 힘과 그에 따른 형상변화라는 특성을 이용하여 두 물체를 봉합해주는 실링장치와 윤활장치 등에 활용되는데 현재 회전축 실링장치에 가장 많이 쓰이고 있다[1]. 자성유체를 실링장치로 이용하면 새는 곳이 없어지고 마모가 적어진다. 또 치수공작에 여유가 생기고 발열이 적다는 장점을 갖는다.

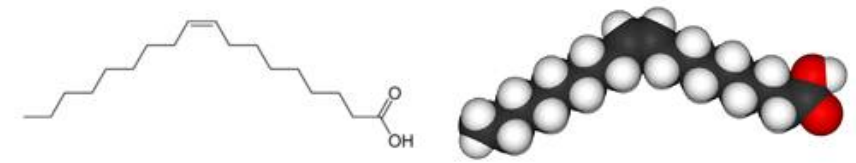
2) 유용금속 회수 · 광물 선광

자화의 결과로 발생하는 뜨는 힘을 활용할 수 있다. 불균일한 자기장 내에 강자성유체를 두면 겉보기에도 매우 비중이 큰 액체가 된다. 이 속에 비자성유체가 존재하면 부양력을 얻을 수 있다. 바로 이 힘이 자기장을 조절하기 때문에 비중이 다른 물질들의 비중차를 활용한 선별이 가능해진다. 흔히 이 부력을 이용하여 폐기물 중에서 유용금속을 회수하거나 광물을 선광한다[15].

2. 계면활성제

두 입자 사이의 반데르발스 상호작용은 입자가 서로 가까이 있을 때 가장 강하다. 따라서 반데르발스 상호작용과 자기력 때문에 자화된 입자들이 멎쳐는 것을 막을 수 있는 한 방법은 액체상에 계면활성제를 넣어 입자들을 서로 떨어지게 하는 것이다. 적당한 계면활성제를 강자성 초미립자의 표면에 입히면 이들 초미립자는 어떤 거리 이상 서로 접근할 수 없게 되어 입자들의 응집을 피할 수 있게 된다. 또 용매분자의 무질서한 충돌에 의한 브라운운동은 초미립자의 침전을 막아준다. 이때, 강자성 초미립자의 크기는 용매분자 크기의 약 100배이다. 이 같은 계면활성제의 역할과 브라운운동 덕분에 용매 내의 강자성 콜로이드는 매우 안정하게 분산돼 마침내 자성유체가 되는 것이다.

이런 점에서 자성유체 제조 시에 계면활성제의 사용이 불가피한데, 기존의 유기 용매 상태를 분산매로 하는 자성유체는 cis-올레인산을 사용하였다. cis-올레인산은 자기 입자의 표면에 붙을 수 있는 극성기를 지고 있는 긴 사슬의 탄화수소이다. 그리하여 계면활성제가 자기입자의 표면에 코팅된다. 꼬리의 긴 사슬은 반발하는 쿠션의 역할을 하고 자기입자들이 가까이 다가오는 것을 방해한다.



[Fig. 1] Molecular structure(left) and space filling model(right) of Oleic Acid($\text{C}_{18}\text{H}_{34}\text{O}_2$). [10]

본 연구와 같은 수용액 상태를 분산매로 쓰는 자성유체 같은 경우는 $\text{N}(\text{CH}_3)_4\text{OH}$ 같은 이온성 계면활성제를 사용한다. 수용액상에서 정전기적 반발력을 유발할 수 있는 계면활성제이기 때문이다. OH^- 이온이 자기입자의 표면에 달라붙어 자기입자의 표면을 음전하층으로 만들며, $\text{N}(\text{CH}_3)_4^+$ 양이온은 양전하층을 만들면서 음전하층에 붙어 있다. 자기입자가 서로 가까이 접근할 때 그들의 양전하 층 사이의 반발력이 그들이 너무 가까이 오는 것을 방해한다.

III. 연구내용 및 방법

1. 탐구대상

이번 연구에서는 유기 용매 상태가 아닌 수용액 상태에서 자성유체를 합성하여 진행하였다. 일반적인 자성유체는 유기 용매 상태, 즉 수용액 상태에서 마그네타이트를 합성한 후 분산매로 유기 용매나 기름을 넣어주어 만든다[3,16]. 하지만 우리가 가장 많이 사용하는 계는 수용액 상태이므로, 기름이나 유기 용매를 사용하지 않고 물과 친화력이 큰 물질들을 사용하여 자성유체를 형성시켰다.

자성유체가 잘 생성되었다는 것은 자기력에 반응을 잘하고, 자기력선에 따라 피크가 잘 생성된다는 것으로 판단하여 이것을 확인하고 시료 별로 비교해봄으로써 연구의 결과를 판단하였다.

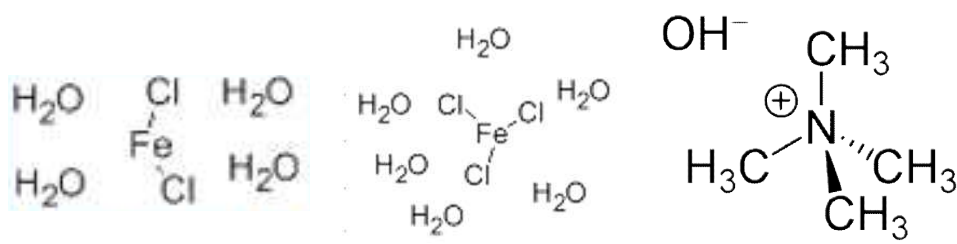
2. 탐구내용

먼저 자성유체 생성을 다음과 같이 한다. 염화철 2가, 3가 용액을 이용하여 마그네타이트를 합성한 후, 이를 물로 씻어준다. 이후 계면 활성제를 이용해 분산을 시켜준 후, 증류수로 한 번 더 씻어주어 골고루 퍼지게 한다. 이 과정을 기본으로 하여 2가 용액과 3가 용액의 반응 비율을 조절해 가장 효과적인 비율을 선택하여 자성유체를 형성한 후 이후 모든 탐구과정을 진행한다.

효율적인 자성유체의 형성조건을 찾기 위해 자성유체 형성의 마지막 단계에 증류수가 아닌 pH 3, 7, 10의 용액을 사용해 씻어준다. 또한, 염기의 종류를 암모니아[5], 수산화나트륨, 수산화칼륨, 탄산나트륨의 수용액으로 적정을 해보고, 분산시켜 주는 계면 활성제를 TMAH, 시트르산, 에탄올, 글리세롤, 세제로 변화시켜 본다.

네 가지 변인조건을 이용해 생성된 자성유체의 형성정도를 확인하기 위해 자성유체에 자기장을 걸어주며 질량 변화를 살펴보고, 자기장에 의해 생기는 피크의 길이를 제어 자성유체가 잘 생성되었는지 확인하는 과정을 진행한다.

3. 실험에 사용된 시약



[Fig. 2] Structure of FeCl₂ (left),[13] Structure of FeCl₃ (middle),[12] Molecular Structure of C₄H₁₃NO (right)[11]

FeCl₂(염화철(II))은 상자성체로서, 보통 흰색을 띠는 고체로서 얻어진다. 수용액 상태에서 FeCl₂은 노란색이며, 강산성을 띤다[7]. 본 연구에서는 FeCl₂ • 4H₂O 의 화학식으로 나타나는 염화철 4수화물을 사용하였다.

염화철(III)의 무수물은 수분이 있는 공기 중에서 염화수소를 형성하며 조해성을 띤다. 수용액 상태에서 FeCl₃는 갈색이며, 강산성과 부식성을 가진다[8]. 본 연구에서는 FeCl₃ • 6H₂O 의 화학식으로 나타나는 염화철 6수화물을 사용하였다.

수산화테트라메틸암모늄은 전자산업 등에서 응집을 방지하기 위한 계면활성제로 사용된다. 무색의 액체 또는 수화한 형태의 고체로 존재하며 순수한 것은 무취이지만, 불순물로서 포함되는 트리메틸아민에 의해 비린내가 발생한다[10]. 강염기성 물질로 취급 시 주의가 필요하다. 실험에서는 25% TMAH in methanol을 사용하였다.

4. 탐구과정 및 수행

가. 마그네타이트의 제조

정해진 비율에 따라 250 mL 비커 5개에 각각 FeCl₂ in 2 M HCl, FeCl₃ in 2 M HCl를 넣어준다 (이하 염화철 용액은 단순히 FeCl₂, FeCl₃ 로 표기한다.). 이후, 비커를 교반기 위에 올려놓고 마그네틱 바를 넣어준 뒤, 천천히 돌려주며 뷰렛에 50 mL의 염기 수용액을 넣고 1초에 한 방울 씩 떨어뜨려준다 (이때, 거품이 생길 정도로 세게 마그네틱 바를 돌리지 않는다.).

50 mL의 염기 수용액을 모두 가한 후, 교반기를 끄고 핀셋으로 마그네틱 바를 제거한다(마그네틱 바에 액체 자석이 너무 많이 붙어 있을 경우, 마그네틱 바를 상층액 내에서 흔들어 자성유체를 털어낸다.). 다음으로, 자석을 이용해 생성된 자성유체를 가라앉히고 상층액을 제거한다(이때, 침전이 따라 가지 않게 조심한다.). 비커에 남아있는 자성유체를 씻기병을 이용해 증류수로 씻어주고, 다시 자석을 이용하여 침전 시킨 뒤 증류수를 따라 버리는 과정을 3회 반복해준다. 마지막 과정에서는 증류수를 완전하게 제거해준다.

계면활성제를 약 3 mL 넣고, 덩어리가 보이지 않을 정도로 10분 동안 유리막대로 부드럽게 저어준다. 이후, 자석을 이용해 자성유체를 침전시킨 뒤 상층액을 따라 제거한다. 다음으로 씻기병을 이용해 증류수로 씻어준 후, 페트리 접시로 옮겨서 다시 자석을 이용해 자성유체를 침전시키고 증류수를 제거한다.

나. 비율, pH, 염기, 계면활성제의 변화

pH, 염기, 계면활성제에 의한 자성유체의 형성 비교는 기준이 되는 실험방법에서 자성유체가 온전히 형성되어야 한다. 그러나 기존의 매뉴얼방법에 따라 실험한 결과 자성유체가 형성되지 않았다. 따라서 자성유체 형성에 가장 큰 영향을 미친다고 추측되는 비율을 달리하여 자성유체가 가장 잘 형성되는 최적조건을 우선적으로 찾고, 이후 해당 비율을 매뉴얼에 적용한 방법으로 pH, 염기, 계면활성제에 따른 실험을 진행하도록 하였다.

각 변인에 대한 실험을 진행할 때, 변인을 제외한 나머지 요인들은 모두 매뉴얼을 기준으로 실험한다. 매뉴얼에서 사용한 염기는 1 M NH₄OH 수용액, 계면활성제는 25% TMAH를 사용하였으며, pH는 인위적인 조작을 가하지 않는다.

1) 비율

250 mL 비커 5개에 각각 FeCl₂ in 2 M HCl, FeCl₃ in 2 M HCl 부피가 <Table 1>과 같도록 한다.

<Table 1> Ratio of FeCl₂, FeCl₃ in 5 beakers

	물수 비 (FeCl ₂ :FeCl ₃)	부피 비 (FeCl ₂ :FeCl ₃)
비율 1	5 : 1	2.5 : 1
비율 2	2 : 1	2 : 2
비율 3	1.5 : 1	1.8 : 2.4
비율 4	1 : 1	1.5 : 3
비율 5	0.5 : 1	1 : 4

2) pH

계면활성제를 약 3 mL 넣고, 덩어리가 보이지 않을 정도로 10분 동안 유리막대로 부드럽게 저어준다. 이후, 자석을 이용해 자성유체를 침전 시킨 뒤, 상층액을 따라 제거한다. 다음으로 pH 3, 7, 10의 용액으로 각각 씻어준 뒤, 유리막대로 덩어리가 보이지 않을 정도로 부드럽게 저어준 뒤, 페트리 접시로 옮겨준다. 마지막으로 자석을 이용해 자성유체를 침전 시킨 후, 용액을 제거한다.

3) 염기

비커를 교반기 위에 올려놓고 마그네틱 바를 넣어 천천히 돌려준다. 뷰렛에 50 mL의 염기 수용액을 넣고 1초에 한 방울 씩 떨어뜨리는 과정에서 염기의 종류를 NH₄OH, NaOH, KOH, Na₂CO₃로 바꾸어가며 실험한다.

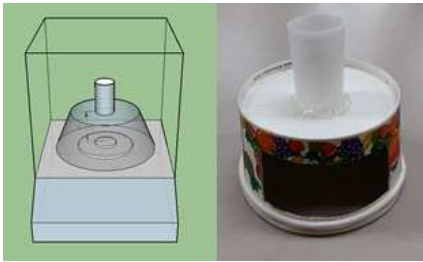
4) 계면활성제

비커에 남아있는 자성유체를 증류수로 3회 반복 워싱(washing)한 후, 계면활성제를 넣고 덩어리가 보이지 않을 정도로 10분 동안 유리막대로 저어준다. 이 과정에서 계면활성제의 종류를 TMAH, 시트르산, 에탄올, 글리세롤, 세제로 바꾸어가며 실험한다.

다. 생성된 자성유체의 정량화 방법

페트리 접시를 저울에 올려놓고, [Fig. 3]과 같이 스탠드와 클램프를 설치한다. 이후, 자석과 페트리 접시의 중심이 일치하게 놓은 뒤 질량을 측정한다. 이후 자석을 없애고 질량을 측정한다. 이 과정을 세 번 반복한다.

페트리 접시를 건조기에 넣고 완전히 건조시킨 후 자성유체의 질량을 측정한다. 자석이 있을 때와 없을 때 변화량을 자성유체의 질량으로 나누어 단위 질량 당 변화량을 계산한다.



[Fig. 3] Sketch of proper measuring equipment (left) and the result (right).

성유체의 유동성이 좋아야 한다. 같은 위치에서 같은 자석을 이용해 자성유체의 피크를 생성시켰을 때 피크가 높고 크게 형성될수록 자기력이 잘 표현되는 것으로 유체가 잘 형성되었다는 것을 의미한다. 측정 시 시료가 담긴 페트리 접시로부터 2 cm 떨어진 위치에서 사진을 찍은 뒤 사진 상으로 가장 크다고 간주되는 피크 세 개를 선정해 피크 길이를 재고 이를 평균 내었다.



[Fig. 4] Measuring peak's height.[2]

다. 자성유체의 움직임 관찰

생성된 자성유체에 자석을 가까이 하면 넓게 퍼져있던 자성유체가 움직인다. 이때, 자성유체가 잘 형성되었다면 페트리 접시에 붙지 않고 액체와 같이 움직인다. 하지만 잘 형성이 되지 않았다면 유동성이 거의 없으며 바닥에 붙는다. 정성적으로 움직임을 통해 자성유체의 형성 정도를 비교할 수 있다.

2. 결과분석 및 논의

가. 비율에 따른 자성유체의 형성

FeCl₂ : FeCl₃의 비율을 바꾸어 가며 진행한 결과는 <Table 2, 3>과 같다. <Table 2>는 형성된 자성유체가 자기장 속에서 받는 자기력의 정도를 나타낸 것으로 자성유체 형성의 수득률을 나타낸 것이며, <Table 3>은 자성이 있는 유체로서의 능력을 스파이크의 길이(피크 길이)로 나타낸 것이다.

<Table 2> The change of magnetic field depending on ratio

[FeCl ₂] : [FeCl ₃]*	실험 번호	자기장에 의한 질량 변화량 (g)	자성유체 질량 (g)	단위 질량 당 변화량	평균	표준편차
5 : 1	set1	0.0463	0.6017	0.0770	0.2905	0.1577
	set2	0.0692	0.2027	0.3416		
	set3	0.1016	0.2242	0.4530		
2 : 1	set1	0.0979	0.4250	0.2303	0.3485	0.1275
	set2	0.1762	0.3387	0.5202		
	set3	0.2950	0.3537	0.2950		
1.5 : 1	set1	0.1867	0.7687	0.2429	0.8512	0.6468
	set2	0.2284	0.4107	0.5562		
	set3	0.6593	0.3779	1.7446		

IV. 결과분석 및 논의

1. 안정적인 자성유체의 기준 및 측정 방법

가. 자기력에 의한 질량 변화

자성유체를 이루고 있는 것은 마그네타이트로서 자성을 가지고 있는 물질이다. 즉, 마그네타이트 형성이 잘 되었으면 잘 되었을수록 자기장에 대한 반응이 강하게 일어난다. 이는 마그네타이트의 수득률을 의미한다. 따라서 자석을 같은 위치에 고정 시킨 후에 자석이 있을 때와 없을 때의 질량 변화가 크면 클수록 자성유체가 잘 형성되었다고 간주한다. 한 시료에 대해 3번 씩 측정한 뒤 평균을 구해 기록하였다.

나. 생성된 피크의 높이

자성유체의 피크는 자기력선을 따라서 형성된다. 피크가 잘 형성되기 위해서는 자기력뿐만 아니라 자

1 : 1	set1	0.1966	0.5383	0.3652	1.4438	1.2761
	set2	0.2340	0.3205	0.7301		
	set3	0.7664	0.2325	3.2362		
0.5 : 1	set1	0.1668	1.0213	0.1634	0.7007	0.3884
	set2	0.1179	0.1104	1.0682		
	set3	0.0607	0.0697	0.8704		

*이하 [FeCl₂] : [FeCl₃] = 5:1을 [비율 1], [FeCl₂] : [FeCl₃] = 2:1을 [비율 2], [FeCl₂] : [FeCl₃] = 1.5:1을 [비율 3], [FeCl₂] : [FeCl₃] = 1:1을 [비율 4], [FeCl₂] : [FeCl₃] = 0.5:1을 [비율 5]라고 칭한다.

실험결과 모든 비율에 대해서 자성유체가 형성되었다는 것을 알 수 있다. 자성유체의 자기력의 정도는 4번째 비율([FeCl₂] : [FeCl₃] = 1 : 1)에서 단위질량 당 변화량 값이 가장 크게 나타나 [비율 4]의 반응조건의 비율이 가장 효과적이라는 것을 알 수 있다.

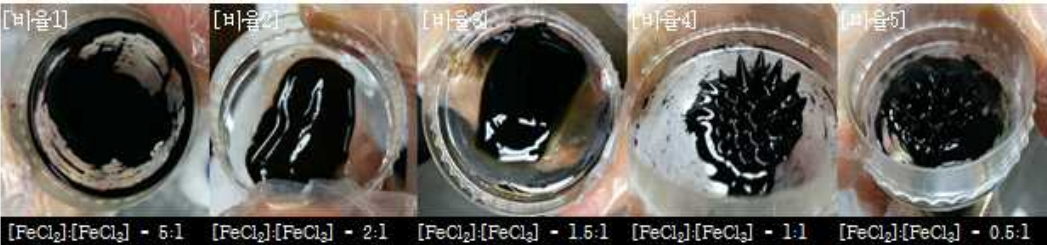
<Table 3> The result of peaks' length depending on ratio

[FeCl ₂] : [FeCl ₃]	실험 번호	세트 별 피크 길이 평균 (cm)*	비율 별 피크 길이 평균 (cm)**
3.6 : 2.4 = 1.5 : 1	set1	0.78	0.70
	set2	0.73	
	set3	0.60	
3 : 3 = 1 : 1	set1	0.91	0.82
	set2	0.69	
	set3	0.87	

* 세트 별 피크 길이는 각 실험 시에 세 개의 피크를 추출해 측정한 길이의 평균값임.

** 비율 별 피크 길이 평균은 각 비율에서 세 개의 실험 세트의 길이의 평균값임.

모든 비율에서 자성유체가 형성되었지만 스파이크 형성 정도를 살펴본 결과 피크가 형성되었거나 형성되지 않은 두 가지 결과로 나타났다. 피크가 형성된 것은 [비율 3]([FeCl₂] : [FeCl₃] = 1.5 : 1)과 [비율 4]([FeCl₂] : [FeCl₃] = 1 : 1)로 피크의 길이는 각각 평균값이 0.70 cm, 0.82 cm로 나타났다. 두 시료 간 큰 차이를 보이지는 않았지만 [비율 4]의 피크가 상대적으로 큰 것을 관찰할 수 있었다. 각 비율별 피크의 형성 결과 모습은 [Fig. 5]와 같다.



[Fig. 5] Appearance of peak depending on rates (rate 1~5 from left side).

[비율 1, 2 ,3]은 피크가 형성되지 않음. [비율 4]는 피크가 형성되고 깔끔하게 움직임.

[비율 5]는 피크가 형성되었으나 깔끔하게 움직이지는 않음.

비율을 다르게 하며 자성유체를 형성시킨 결과 사진을 분석해보면 [비율 1, 2, 3]은 피크가 형성되지 않았다. 또한 하나의 덩어리로 존재하였으며 많은 양의 물이 포함되어 있었지만 잘 제거 되지 않았다. [비율 4]의 경우 피크가 형성되었고 개별적으로 원뿔의 모양을 나타내었다. 자석을 따라 깔끔하게 움직

이며 접시에 붙어 남는 물질이 없었다. [비율 5]의 경우 피크는 생성되었으나 덩어리 진 상황에서 피크가 생성되었으며 두드러지게 개별적인 형태로는 존재하지 않았다. 이를 통해 [비율 4]가 자성유체 형성 조건에 가장 효과적이라는 것을 알 수 있다.

이후 다른 변인들에 대한 연구는 [비율 4]를 기준으로 하여 추가 변인에 대해 진행하였다.

나. pH에 따른 자성유체의 형성

[FeCl₂] : [FeCl₃]의 비율을 [비율 4]로 하여 자성유체 형성과정의 마지막 단계를 증류수를 사용하지 않고 pH 변화를 주어 처리한 결과는 <Table 4, 5>와 같다.

<Table 4> The change of magnetic field depending on pH

pH	실험 번호	자기장에 의한 질량 변화량 (g)	자성유체 질량 (g)	단위 질량 당 변화량	평균	표준편차
3	set1	0.2518	0.8034	0.3134	0.3834	0.1591
	set2	0.1931	0.8281	0.2332		
	set3	0.2830	0.4689	0.6035		
7	set1	1.0536	0.8064	1.3066	1.3042	0.4343
	set2	0.5693	0.7384	0.7710		
	set3	1.8349	0.4057	1.8349		
10	set1	0.2213	0.5990	0.3694	0.4410	0.1486
	set2	0.2428	0.7941	0.3058		
	set3	0.4978	0.7248	0.6479		

pH에 따른 실험을 진행해 자기장 변화에 따른 변화를 측정한 결과 pH 7인 경우가 압도적으로 큰 변화를 보였다. pH 3과 pH 10의 경우에는 변화가 pH 7에 비해 매우 작은 것을 알 수 있다. 실험결과 pH 7이 가장 효과적이라는 것을 알 수 있다.

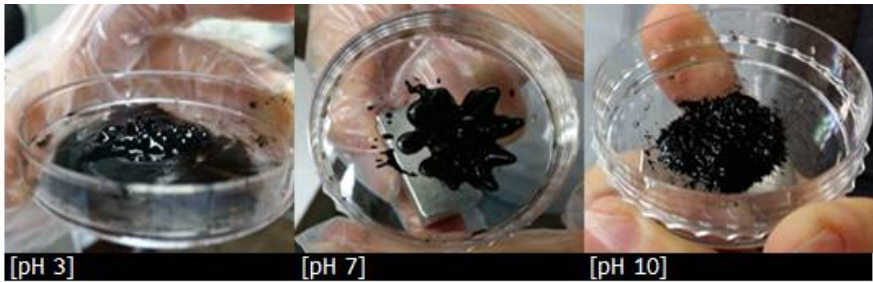
<Table 5> The result of peaks' length depending on pH

pH	실험 번호	세트 별 피크 길이 평균 (cm)*	pH 별 피크 길이 평균 (cm)**
3	set1	0.15	0.14
	set2	0	
	set3	0.28	
7	set1	1.27	0.98
	set2	0.99	
	set3	0.67	
10	set1	0.31	0.61
	set2	1.18	
	set3	0.35	

* 세트 별 피크 길이는 각 실험 시에 세 개의 피크를 추출해 측정한 길이의 평균값임.

** 비율 별 피크 길이 평균은 각 비율에서 세 개의 실험 세트의 길이의 평균값임.

pH를 변화 시키며 생성시킨 자성유체의 피크 길이를 측정한 결과를 보면 pH 7로 세척해 준 자성 유체가 다른 pH의 자성유체보다 피크가 긴 것을 확인할 수 있다. pH 7이 큰 자성을 떨 뿐만 아니라 유체로서의 역할도 더 효과적인 조건이라는 것을 알 수 있다. [Fig. 6]은 실제 실험결과를 사진으로 나타낸 것이다.



[Fig. 6] Appearance of peak depending on pH.
pH 3, pH 10는 자성유체가 뭉쳐서 덩어리로 움직이는 반면 중성 pH에서는 액체처럼 자유롭게 이동하는 것을 관찰할 수 있다.

피크가 형성된 사진을 분석해보면 pH 3과 pH 10은 뭉쳐서 자유롭게 이동하지 못한다. 실제로 pH 3, pH 10의 경우 최종적으로 생성된 자성유체가 매우 뻣뻣해 이동조차 힘든 정도였고, pH 7에 비해 빠르게 건조되었다. 피크 또한 덩어리에서 튀어나온 것을 확인할 수 있다. 이동시켰을 때 접시에 가루 형태로 자성유체가 남는다. 하지만 pH 7의 경우에는 액체처럼 흘러 다니며 피크가 개별적인 원뿔의 형태를 가지고 있다. 이를 통해 pH 7의 자성유체가 가장 형성이 잘 되었다고 할 수 있다.

다. 사용하는 염기 종류에 따른 자성유체의 형성

[FeCl₂] : [FeCl₃] 의 비율을 [비율 4]로 한 후 염기 적정 시 염기의 종류를 달리하여 실험한 결과는 <Table 6, 7>과 같다.

<Table 6> The change of magnetic field depending on base

사용하는 염기 종류	실험 번호	자기장에 의한 질량 변화량 (g)	자성유체 질량 (g)	단위 질량 당 변화량	평균	표준편차
NH ₄ OH	set1	0.5659	0.3401	1.6640	1.2711	0.6217
	set2	0.1854	0.1056	1.7560		
	set3	0.1360	0.3457	0.3935		
NaOH	set1	0.0086	0.2478	0.0346	0.3243	0.2897
	set2	- *	-	-		
	set3	0.6139	0.2923	0.6139		
KOH	set1	0.0223	0.0256	0.8711	0.4677	0.3186
	set2	0.0090	0.0823	0.0922		
	set3	0.0051	0.0116	0.4397		

* 마그네타이트가 형성되지 않음을 나타냄.

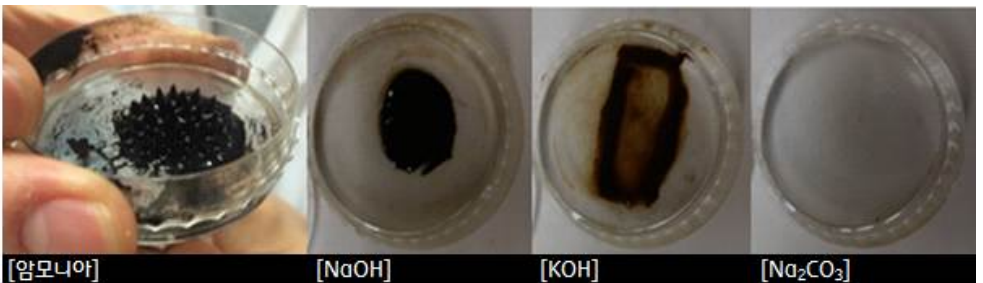
적정 시에 사용하는 염기의 종류에 따른 실험을 진행해 자기장 변화에 따른 변화를 측정한 결과 암모니아수를 사용한 경우가 압도적으로 큰 변화를 보였다. 다음은 KOH가 큰 변화를 보였으며 NaOH은 세

번의 실험 중 한 번은 자성을 띠는 철가루가 형성되지 않았다. 탄산나트륨의 경우는 모든 실험에서 침전물이 자석에 끌려오지 않아 세척 시 모두 떠내려갔다.

<Table 7> The result of peaks' length depending on base

사용하는 염기 종류	실험 번호	세트 내 피크 길이 평균 (cm)*	비율 별 피크 길이 평균 (cm)**
NH ₄ OH	set1	0.73	0.98
	set2	1.47	
	set3	0.74	

* 세트 별 피크 길이는 각 실험 시에 세 개의 피크를 추출해 측정한 길이의 평균값임.
** 비율 별 피크 길이 평균은 각 비율에서 세 개의 실험 세트의 길이의 평균값임.



[Fig. 7] Formation of peak depending on base.
NH₄OH를 사용한 경우에만 피크가 형성되었으며 Na₂CO₃의 경우 따라오는 입자가 없어서 시료를 형성시키지 못하였다.

염기의 종류를 바꾸어 가며 실험을 진행한 결과 암모니아수를 사용한 경우에만 피크가 생성되었다. NaOH, KOH, Na₂CO₃의 경우, 자석에 끌려오는 것으로 보아 마그네타이트는 생성되었으나 자성유체가 될 만큼 분산되지는 않은 것으로 보인다. 같은 계면 활성제를 사용한 것을 고려해볼 때 입자 크기가 영향을 주었을 것으로 예상된다.

라. 계면활성제 종류에 따른 자성유체의 형성

[FeCl₂] : [FeCl₃]의 비율을 [비율 4]로 한 후 계면활성제의 종류를 달리하여 실험한 결과는 <Table 8, 9>와 같다.

<Table 8> The change of magnetic field depending on surfactants

계면활성제	실험 번호	자기장에 의한 질량 변화량 (g)	자성유체 질량 (g)	단위 질량 당 변화량	평균	표준편차
TMAH	set1	0.2355	0.3190	0.7384	0.5837	0.1103
	set2	0.1756	0.3593	0.4887		
	set3	0.1898	0.3623	0.5240		
시트르산 (C ₆ H ₈ O ₇)	set1	0.1982	0.3406	0.5820	0.5794	0.0426
	set2	0.1295	0.2463	0.5259		
	set3	0.1256	00.1993	0.6302		

에탄올 (C ₂ H ₅ OH)	set1	0.2417	0.3990	0.6058	0.6090	0.0239
	set2	0.2750	0.4730	0.5815		
	set3	0.2216	0.3463	0.6398		
글리세롤 (C ₃ H ₅ (OH) ₃)	set1	0.1862	0.3884	0.4793	0.2156	0.1866
	set2	0.0366	0.0594	0.0943		
	set3	0.0285	0.0559	0.0733		
세제	set1	0.1288	0.3407	0.3781	0.4373	0.0964
	set2	0.2127	0.3710	0.5733		
	set3	0.1228	0.2337	0.3605		

계면 활성제를 바꾸어가며 실험을 진행시킨 결과 에탄올을 사용하였을 때가 가장 큰 자기장 변화를 보였으나 TMAH, 시트르산, 에탄올을 사용한 결과가 모두 미소한 차이만을 보였다. 다만 글리세롤과 세제를 사용했을 때에는 비교적 큰 차이를 보이며 자성유체의 성능이 저하된다는 것을 알 수 있었다.

<Table 9> The result of peaks' length depending on surfactants

계면 활성제 종류	실험 번호	세트 별 피크 길이 평균 (cm)*	비율 별 피크 길이 평균 (cm)**
TMAH	set1	1.08	1.03
	set2	1.06	
	set3	0.95	

* 세트 별 피크 길이는 각 실험 시에 세 개의 피크를 추출해 측정한 길이의 평균값임.

** 비율 별 피크 길이 평균은 각 비율에서 세 개의 실험 세트의 길이의 평균값임.



[Fig. 8] Appearance of peak depending on kind of surfactant.
TMAH를 계면 활성제로 사용하는 경우에만 뾰족한 피크를 발견할 수 있었다.

계면 활성제의 종류를 바꾸었을 때 시트르산, 에탄올, 글리세롤, 세제에서는 피크가 생성되지 않았으나 TMAH를 사용한 시료의 경우는 피크가 형성되었다. 자기장 변화 값과 아울러 생각을 해볼 때, 계면 활성제를 처리하기 전까지 생성된 철가루는 모두 동일해 자기장 변화 값은 비슷하겠지만 계면 활성제를 TMAH로 사용하는 것이 자성유체의 유동성이 더 좋다는 것을 알 수 있다.

V. 결과 및 제언

현재 주로 사용되는 자성유체는 유기 용매 상태(기름)에서 만든 것들이다. 하지만 실험자들이 실험실에서 주로 사용하는 반응계는 물을 용매로 사용하는 수용액 상태이다. 자성유체를 유기용매 상태가 아닌 수용액 상태에서 잘 형성할 수 있다면 조금 더 편리하게 실험할 수 있고, 다른 실험들과의 연계성이나 응용성이 증대될 것이다. 이를 위해 수용액 상태에서의 안정적인 자성유체를 생성하고자 하였다.

안정성에 영향을 미치는 요인을 찾아, 자성유체를 형성하는 물질인 FeCl₃, FeCl₂의 비율을 조절해보고 사용하는 물질이 염기성이라는 점에서 세척 시 사용하는 용액의 pH를 조절해보기도 하였다. 또한 흔히 알려진 매뉴얼에 없는, ‘계면 활성제 혼합 후 증류수로 한 번 세척해주는 과정’을 통해 성공률을 높였다.

비율의 경우에는 대체로 FeCl₃의 비율이 커지면 자성유체의 형성이 잘 되는 것을 확인할 수 있었다. 반응 물질의 몰수 비가 일정한, 즉 FeCl₂ : FeCl₃ = 1 : 1인 경우가 자기장에 의해 질량이 크게 변하고, 피크 길이 또한 길었다. 따라서 반응 물질의 몰수 비가 1 : 1이 될 때가 최적 조건이라고 결론지을 수 있다. 이는 매뉴얼과는 다른 결과인데, 매뉴얼에서는 FeCl₂ : FeCl₃ = 1 : 2의 비율을 언급하고 있다. 이는 마그네타이트 생성 반응식에서 FeCl₂과 FeCl₃의 계수 비를 고려한 것으로 생각된다. 그러나 실험에서 약염기를 사용하기 때문에 이온화도가 작다는 점을 고려하면, 일부 염화 철만이 반응을 하여 자성유체를 형성하게 되므로, 계수 비의 영향보다는 FeCl₃의 효과가 더욱 클 것이라고 추측된다. FeCl₃은 수용액 상태에서 FeCl₂보다 강산인데, 이러한 이유 때문에 르사틀리에의 원리에 의해 염기로부터 떨어진 OH⁻와 더욱 잘 반응한다. 이러한 효과는 확률적으로 FeCl₂과 OH⁻의 반응도 더욱 많이 일어날 수 있도록 한다. 마그네타이트는 염화 철이 수용액상태에서 OH⁻와 반응하여 2가 수산화 철과 3가 수산화 철을 형성한 이후, Fe(OH)₂ + 2Fe(OH)₃ → Fe₃O₄ + H₂O의 반응을 통해 생성되므로, 수산화 철의 형성이 자성유체의 수득률에 큰 영향을 준다. 따라서 일정 정도까지는 FeCl₃의 양이 많을수록 자성유체의 형성에 유리하다는 것을 예측할 수 있다.

pH의 경우 pH 7의 용액을 사용하여 자성유체를 세척했을 때 압도적으로 나머지 두 pH에 비해 좋은 결과를 얻을 수 있었다. 이 변인이 최종 생산물이 염기성이니 pH를 변화시켜주면 구체적으로 pH를 낮추어주면 자성유체의 생성이 잘 될 것이라는 생각에서 시작된 것을 고려하면 별 다른 성과를 얻을 수 없었다. 이에 대해서는, pH가 7일 때 OH⁻이 대부분 반응한 상태이므로 물의 양에 따른 pH변화가 적은 상태이고, 따라서 자성유체의 물에 대한 안정도가 좋다는 점을 그 이유로 생각해 볼 수 있다. 또한, 산성의 경우에는 염화철로부터 H⁺가 많이 떨어졌다는 의미이므로, 자체의 양전하 효과가 약화되므로 자성유체의 분산에 악영향을 주게 된다. 따라서 pH 7이 최적의 조건이라고 생각할 수 있다. 이와 같이 변인을 조작한 실험 결과를 통해 우리는 염기성, 정확히는 계면 활성제까지 처리하고 나온 자성유체의 상태(pH 10)가 가장 자성유체가 잘 형성된다는 것을 알 수 있다.

마그네타이트 입자를 형성시키기 위해 사용한 염기의 종류를 바꾸어 실험해본 결과, 기존에 사용하던 1 M NH₄OH 수용액을 제외한 나머지 용액들에서는 피크가 전혀 형성되지 않았고, Na₂CO₃ 용액의 경우 마그네타이트가 전혀 형성되지 않는 것을 확인할 수 있었다. 이는 탄산수소나트륨이 수용액 상태에서 OH⁻이 존재하지 않기 때문에 수산화 철이 생성될 수 없기 때문으로 보인다. 강염기의 경우에는, 강산인 염화 철 수용액과 중화반응에 의한 물의 생성이 많기 때문에 자성유체의 형성에 악영향을 주는 것으로 판단된다.

마그네타이트 입자를 분산시키기 위해 사용한 계면활성제의 종류를 바꾸어 실험해본 결과, 기존에 쓰던 계면활성제인 TMAH(tetramethylammonium hydroxide, 25% in methanol)을 사용했을 때 유동적이고 가장 높은 피크의 자성유체가 형성되었다. 이를 통해 수용액 상태에서 자성유체를 만들기 위해서는 TMAH가 가장 적합한 계면활성제임을 알 수 있었다. 또한, 자성유체의 자기력은 쓰인 계면활성제의 중

류에 영향을 받지 않았는데, 이는 입자를 분산시키는 정도가 자기력에 큰 영향을 끼치지 않기 때문인 듯하다.

기존의 매뉴얼에 없던 최종적으로 증류수로 세척하는 과정을 추가함으로써 계면 활성제가 과량 투입 되어 계면활성제끼리 엉겨서 분산을 막는 것을 방지하고, 적절한 양의 계면활성제만을 남김으로써 자성 유체의 유동성에 다른 영향을 주지 않게 하였다. 이를 통해 이전보다 큰 피크의 크기와 높은 성공률을 얻을 수 있었다.

실험을 통해 얻을 수 있었던 비율과 pH, 염기의 종류와 계면활성제는 다른 변인을 사용하여 자성유체에 관한 연구를 할 시 유용하게 응용될 것이다. 이 조건이 대조군이 되어 변인을 처리하였을 때 결과 비교를 하기에 적절할 것이다.

본 연구를 통해 자성유체 형성에 있어서 최적의 반응 물질 비를 찾을 수 있었고, 최적 pH를 찾을 수 있었지만 수용액 상태에서의 자성유체의 보존 시간은 유기 용매 상태에서보다 현저히 짧았다. 이는 유기 용매 상태에서도 분산이 잘 되는 것도 있지만 더욱 중요한 것은 자성유체에 존재하는 수분의 보존이다. 자성유체 자체의 수분이 너무 많으면 피크가 생기지 않지만 너무 없을 시에는 자성유체의 움직임이 둔화되고 결국 굳게 된다. 이를 해결하기 위해 자성유체에 보습을 할 수 있게 하는 방법에 대한 연구가 필요하다. 또한, 이를 정확하게 관찰하기 위해서 시간에 따른 자성유체의 효율성에 관한 탐구가 추가적으로 필요할 것으로 생각된다.

V. 참고문헌

[1] 김태욱. (1990). 자성유체-자석에 끌리는 액체. **과학동아**, 5(5), 128-131.

[2] 진대성 (2010). 자성 유체의 제조 및 다이나모 이론의 모델링 탐구 지도. **제 56회 전국과학전람회 지도논문 연구대회**.

[3] 김만, 오재현, 이유영 (1993). 포화지방산에 의한 수상자성유체의 분산특성. **Journal of Korean Magnetics Society**, 3(3), 241-246.

[4] 김만, 오재현, 조명호, 민동준 (1995). 포화지방산에 의한 Kerosene-based 자성유체의 제조 및 분산특성. **Journal of Korean Magnetics Society**, 5(6), 956-962.

[5] 오재현, 김민석, 김만, 김성완 (1993). 해교법에 의한 수상자성유체의 제조 및 특성에 관한 연구. **Journal of Korean Magnetics Society**, 3(3), 234-240.

[6] 김태욱, 김상문 (1990). Magnetite 强磁性流體의 제조와 그 특성. **Journal of the Korean Ceramic Society**, 27(1), 13-22.

[7] Iron(II) chloride(FeCl_2). wikipedia(게재일: 2014.12.02), <http://en.wikipedia.org/wiki/FeCl2>, (검색일: 2015.05.20)

[8] Iron(III) chloride(FeCl_3). wikipedia(게재일: 2014.12.28), <http://en.wikipedia.org/wiki/Fec13>, (검색일: 2015.05.31)

[9] Oleic acid. wikipedia. 올레인산 구조식 참고(게재일: 2015.10.29), https://en.wikipedia.org/wiki/Oleic_acid, (검색일: 2015.06.17)

[10] Tetramethylammonium hydroxide. wikipedia(게재일: 2015.10.19), https://en.wikipedia.org/wiki/Tetramethylammonium_hydroxide, (검색일: 2015.07.10)

[11] TMAH; Tetramethylammonium hydroxide(TMAH 구조식 참고). wikipedia(게재일: 2015.10.19), https://en.wikipedia.org/wiki/Tetramethylammonium_hydroxide#/media/File:TMAH.svg, (검색일: 2015.04.07)

[12] Ferric chloride hexahydrate(제 3 염화철 구조식 참고). Chemical Book(게재일: 2014.12.19), http://www.chemicalbook.com/ChemicalProductProperty_EN_CB6450492.htm, (검색일: 2015.07.21)

[13] Ferrous chloride tetrahydrate(제 2 염화철 구조식 참고). Chemical Book(게재일: 2014.12.19), http://www.chemicalbook.com/ChemicalProductProperty_EN_CB0853068.htm, (검색일: 2015.10.19)

[14] Vékás, L. (2008). Ferrofluids and magnetorheological fluids. In *science and technology* 54, 127-136.

[15] Mohapatra, M., & Anand, S. (2010). Synthesis and applications of nano-structured iron oxides/hydroxides-a review. *International Journal of Engineering, Science and Technology*, 2(8), 127-146.

[16] youtube의 mrhomescientist. How to make Ferrofluid(작성일: 2011.01.28.), <https://www.youtube.com/watch?v=LIQw9dfexBQ>, (검색일: 2015.08.15)

| 연구진 |

김준서 (Kim Joonseo, 대전동신과학고등학교, joonseo111@naver.com)
신정원 (Shin Jungwon, 대전동신과학고등학교, garden0813@naver.com)
유원정 (Yu Wonjeong, 대전동신과학고등학교, haej9721@naver.com)
장건호 (Chang Gunho, 대전동신과학고등학교, tiger1527@naver.com)
조혜지 (Jo Hyeji, 대전동신과학고등학교, whgpwl321@naver.com)

지도교사 : 이수복 (Lee Soobok, 대전동신과학고등학교, 화학, e-jukyoung@daum.net)

외래식물 미국자리공의 도입이 수지상균근균 군집에 미치는 영향

전유진 · 임유정 · 박우주 · 전상준 – 강원과학고등학교

Exotic Plant Invasion of *Phytolacca americana* Affects to Arbuscular Mycorrhizal Fungal Community

Jeon Yujin · Lim Yoojeong · Park Wooju · Jeon Sangjun - Kangwon Science High School

ABSTRACT

The successful invasion of exotic plants often cause a serious damage by reducing species diversity, ultimately leading to deleterious effects on the ecosystem. There are some researches on how the invasion of exotic plants affect and change the aboveground ecosystem. However, it is not well known how the underground microbial community is affected. Therefore, we looked for changes of underground fungal community caused by exotic plant *Phytolacca americana* in the context of arbuscular mycorrhizal fungi(AMF). AMF plays an important role in growth of vascular plants. We collected soil and root samples of *Phytolacca americana* and Korean native plants *Persicaria blumei* and *Setaria viridis*, and investigated difference in AMF community using PCR, DNA cloning and DNA sequence analysis. Analysis of soil samples revealed significant decrease in evenness for AMF species distribution in *Phytolacca americana* as compare to the two native plants. In addition, a notable difference of AMF community in the roots between the exotic plant and native plants was discovered. *Acaulospora*, which is the most abundant AMF genus in Korea, was found to be the major genus colonized in the roots of exotic plant. Phylogenic analysis of host plants indicated that two native plants share the common AMF species in spite of their far genetic distance. The results suggest that the exotic plant has changed soil fungal community in species distribution. Also, forming symbiosis with the most abundant local AMF species may be a factor which contributed to the successful establishment of exotic plant *Phytolacca americana* in Korean peninsula.

Key words:
AMF, Exotic Plant, *Phytolacca americana*, Cloning, AMF Community Analysis

국문초록

충북 청주 지역에서 2종의 토착 식물인 강아지풀(*Setaria viridis*)과 개여뀌(*Persicaria blumei*)와 외래 식물인 미국자리공(*Phytolacca americana*)을 식물의 근권 토양과 함께 채집하였다. 근권 토양의 AMF(Arbuscular Mycorrhizal Fungi) 포자 분석 및 채집된 식물 뿌리에서 18S rDNA를 추출하여 DNA 클로닝 방법을 이용해 분석해 본 결과, 미국자리공 뿌리 근권의 AMF 군집이 토착 식물 뿌리 근권의 AMF 군집과 확연한 차이를 보이는 것을 확인하였다. 근권 토양의 AMF 군집 분석 결과 미국 자리공 근권 토양의 종 균등도가 토착 식물과 비교했을 때 확연히 낮은 수치를 보였다. 각 숙주식물의 뿌리에 공생하는 AMF의 18S rDNA 클로닝 결과에서 외래 식물인 미국자리공의 공생 AMF는 *Acaulospora* 속이 가장 많은 것으로 나타났으며, 국내 토착종인 강아지풀과 개여뀌의 공생 AMF에는 *Glomus* 속과 *Rhizophagus* 속이 가장 많은 것으로 나타났다. 이 중 *Rhizophagus* 속의 경우 미국자리공과 거의 공생관계를 맺지 않았다. 실험 결과를 종합해 보았을 때, 외래 도입종과 고유종 간의 AMF 군집 차이가 명확하게 나타났으며, 미국자리공이 국내에 가장 많은 AMF와 공생함으로써 성공적으로 정착할 수 있었음을 알 수 있었다.

중심어 :
수지상균근균, 외래 도입종, 미국자리공, 클로닝, 군집분석

I. 서론

1. 수지상균근균(Arbuscular Mycorrhizal Fungi, AMF)

균류와 식물 뿌리 사이의 상호 공생 관계를 균근(mycorrhizae)이라고 한다. 거의 모든 관다발식물은 균근 구조를 형성하며 필수 영양분의 많은 부분을 균류에게 의존한다. 균근은 일반적으로 뿌리에 감염하는 형태에 따라서 외생균근(ectomycorrhizae)과 내생균근(endomycorrhizae, arbuscular mycorrhizae;수지상균근)으로 나뉜다[15]. 이 중 식물 뿌리와 내생균근을 형성하는 수지상균근균(arbuscular mycorrhizal fungi ; AMF)은 지구상에서 가장 대표적인 식물공생 균근균이며 시아노박테리아와 공생 관계를 형성하는,

Geosiphonaceae과에 속하는 한 종을 제외한 모든 종이 식물과 내생균근을 형성한다[25]. 현재까지 육상 식물의 80% 정도에 해당하는 250,000종 이상의 식물이 AMF와 공생관계를 형성하는 것으로 알려져 있다[29]. AMF는 토양 내에서 포자 상태로 존재하다가 식물 뿌리를 만나면 식물의 피층 세포에서 여러 가지 군사 구조물을 형성한다. AMF는 군사를 뺀어 피층세포 사이에서 내부군사(intraradical hyphae)를 발달 시키고, 일부 군사는 식물세포 내부로 함입하여 군사코일(hyphae coil), 나뭇가지 모양의 수지상체(arbuscule)를 발달시킨다. 어떤 AMF는 식물의 뿌리에서 포자나 소낭(vesicle)을 형성하기도 하는데, 수지상체와 소낭은 각각 식물과 AMF 사이의 양분 교환 장소, 양분 저장소로서의 역할을 한다고 추정된다[7,25]. 기주 식물은 AMF와의 공생을 통해 환경에 대한 적응도를 높일 수 있다. 예를 들어 식물에게 있어 토양 내의 인산(phosphate)은 식물의 성장에 방해가 될 수 있는데, AMF는 식물의 인산 흡수를 유의미하게 증가시켜 준다[23]. 또한 AMF는 중금속 오염 및 염분에 대한 기주식물의 저항성을 높여주고[9], 뿌리 병원균에 대한 내성을 증가시켜주면서 상대적으로 생존하기 불리한 상황에서의 식물의 성장과 생존을 유지하는 데 중요한 역할을 한다[21]. 이러한 대가로 기주식물은 AMF에게 광합성을 통해 고정된 탄소를 공급해 주는 데, 이렇게 공급받는 광합성 탄소의 양이 전체 탄소 고정량의 30%에 이른다는 연구 결과가 있다[10]. 이러한 공생은 척박한 환경에서 식물의 적응도를 높이는 데 중요한 요인이 되며[18,22, 30], 나아가 산림 생태계의 다양성과 생산성에도 영향을 미친다. AMF의 다양성이 식물 군집의 생산성에 유의미한 변화를 가져올 수 있다는 많은 선행연구들이 있으며 식물 군집 내에서의 종 다양성 및 천이 과정에 영향을 줄 수 있음을 보여주었다. 그러므로 AMF는 생태적 관점에서 뿐만 아니라 농업 및 산림 자원의 이용에 있어서도 중요한 가치를 지닌다고 할 수 있다.

2. 외래 식물

가. 외래 도입 식물의 정의

외래 도입종, 그 중에서도 외래식물(exotic plant)이란 인위적이거나 자연적으로 그 본래의 생육지가 아닌 다른 지역에서 이입된 식물을 뜻한다. 보다 세분된 분류로는 원예나 재배 등 특정한 목적을 위해 의도적으로 도입된 도입식물(introduced plant)과 인위적 혹은 자연적으로 도입되어 생태계 내에서 도태되지 않고 자력으로 생존하며 나뭇대로 토착 생태계와 공존하는 귀화식물(naturalized plant)로 분류된다. 또한 귀화식물 중에서 생태계 혹은 인간에게 해를 주는 식물을 침입식물(invasive plant)이라고도 한다[4]. 일반적으로 이렇게 유입된 외래 식물들의 24% 정도는 원예, 토양침식방지, 식·약용 등 인간생활에 긍정적인 영향을 주는 것들도 있으나 국내 연구 결과에 의하면 가시박, 돼지풀 등 생태계에 부정적 영향을 미치거나 인간에게까지 물리적, 화학적 피해를 끼치는 종들이 다량 분포한다[5].

나. 미국자리공(*Phytolacca americana*)

미국자리공은 자리공과에 속하는 다년생의 초본으로, 국내에 도입된 시기는 1960년대 중반 정도로 추정되고 있다. 한반도 중부에서부터 제주도 지역까지 널리 분포하며, 6~7월에 개화하고 9~10월에 결실한다. 높이는 1~1.5 m 정도까지 자라며, 열매에서 떨어진 종자와 분근을 이용해 번식한다[6]. 생태학 연구자들에 의해 미국자리공의 뿌리에서 나오는 독극물질이 국내 고유 식물을 말라죽게 하여 생태적 피해가 우려되고 있다는 지적이 있다[19].

3. 연구의 필요성 및 목적

우리나라 생태계에서 외래 식물종의 도입은 국가 생물자원의 생물다양성을 위협하는 중요한 요인 중

하나이다. 현재 전 세계적으로 외래식물의 종별 특성, 영향 및 관리 등에 대한 연구가 활발히 진행 중이다. 이와 같이 외래식물에 대한 관심이 높은 것은 외래식물로 인한 생태학적인 피해와 경제적인 손실 등의 막대함을 인지했기 때문이다[1]. 국내에서는 1980년경 외래종에 대한 조사가 시작되어, 110여 종의 외래식물종이 확인되었고, 2002년에는 281종까지 늘어난 것이 확인되었다. 이러한 외래식물종들의 유입은 토착 생태계에 대한 교란 및 파괴의 원인이 되는 중요한 요인 중 하나이다[1]. 외래식물종에 의한 피해를 예방하기 위한 방안을 개발하고 그 피해를 절감하기 위해서는 외래식물이 생태계에 미치는 정확한 영향을 파악하는 것이 우선적으로 이루어져야 한다. 이런 이유로 외래식물종의 특성과 외래식물종으로 인한 피해에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있고[2], 연구의 대부분은 지상부의 생태계에서 식물 군집이 외래식물종의 도입에 의해 어떻게 변화하는지에 대한 연구들이다. 그러나 토양 생태계 내에는 식물 뿐만 아니라 다른 생물들도 함께 서식하고 있으며, 이들 중 하나가 대부분의 식물과 상호작용하며 살아가는 토양 미생물이다[3]. 따라서 외래식물종에 의한 토양 내 생물 군집의 정확한 변화와 영향에 대해 파악하기 위해서는, 지상부의 생태계에 대한 연구뿐만이 아니라 토양 지하부의 생물 군집에 대한 연구 역시 필수적이라고 생각한다. 토양미생물의 한 종류인 수지상균근균은 식물 뿌리에 균근을 형성하는 식물의 매우 중요한 공생 균으로, 식물개체뿐만 아니라 식물군집에까지 영향을 미치기도 한다[21]. 수지상균근균이 식물에게 미칠 수 있는 이 같은 큰 영향력을 고려하면 외래종이 도입되었을 때 수지상균근균 군집 변화에 대해 알아볼 가치가 충분히 있다고 보아 본 연구를 시작하였다.

본 연구에서는 수지상균근균의 군집이 토착 식물 개여귀(*Persicaria blumei*), 강아지풀(*Setaria viridis*)의 뿌리와 외래 식물 미국자리공(*Phytolacca americana*)의 뿌리에서 어떠한 차이를 보이는지 확인하여, 외래식물종의 도입이 지상부의 식물 군집뿐만이 아니라 지하부에 서식하며 식물과 공생 관계를 맺는 토양 내 수지상균근균의 생태계에도 영향을 미칠 수 있음을 밝혀내고자 하였다.

수지상균근균의 숙주 식물에 따른 특이성이 존재한다는 연구 결과[30,31]는 숙주식물의 특징에 의해 수지상균근균 군집의 변화가 일어날 수 있다는 점을 시사한다. 이에 따라 다음 두 가지의 가설을 설정하였다. 첫 번째로 외래유입종 미국자리공이 우리나라에 성공적으로 정착했을 때 미국자리공은 AMF와 공생관계를 맺을 것이고, 두 번째로는 외래유입종인 미국자리공과 공생하는 AMF 군집은 토착식물 개여귀, 강아지풀과 공생하는 AMF 군집과 차이가 있을 것이라는 가설을 세우고 실험을 수행하였다.

II. 연구 방법 및 절차

1. 기주 식물 및 근권 토양 채집

충북 청주시 흥덕구 강내면의 미국자리공 서식지 3곳을 선택하여 토착식물과 미국자리공(Fig. 1)을 근권 토양과 함께 채집하였다. 토착식물은 국내 토양에 흔히 분포하는 강아지풀(*Setaria viridis*)과 개여귀(*Persicaria blumei*) 2종을 선택하였고, 3곳의 채집지에서 3종의 식물을 각각 채집하여 총 9점의 기주 식물과 근권 토양을 수집하였다(〈Table 1〉). 이때 3종의 식물이 서식하는 반경이 직경 1 m 이내에서 같이 서식하고 있는 연구 지역을 찾아 실험을 수행하였다.



[Fig. 1] Three kinds of host plants used in this study. The exotic plant used in this study was *Phytolacca americana*. Two native plants used in this study were *Setaria viridis* and *Persicaria blumei*.

<Table 1> GPS coordination of sampling sites

Sites	N	E
KN-1	36.609161	127.362136
KN-2	36.609912	127.36305
KN-3	36.60657	127.362763

2. 근권 토양으로부터 AMF 포자 추출

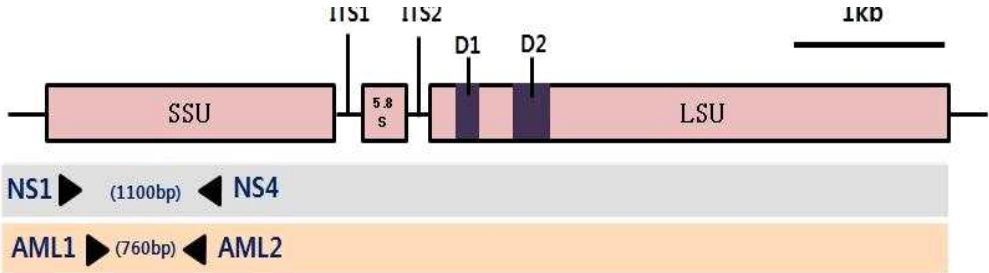
토양 내의 AMF 포자 군집을 확인하기 위해 수집된 근권 토양에서 AMF 포자의 분리를 실시하였다. 채집된 아외 토양을 실험실에서 건조시킨 후 토양 10 g씩을 덜어 내어 wet sieving 및 sucrose density gradient centrifugation method를 수행하였다[8]. 토양을 준비하기 전 40% 설탕물, 60% 설탕물을 준비하여 centrifugation tube에 각각 15 mL 씩 넣어주었다. 페트리디쉬에 라벨링 후 각 토양 10 g을 수저로 채취하여 담고, 페트리디쉬의 흙을 믹서기에 10~20초간 갈아주었고 600 μ m, 150 μ m 및 63 μ m 크기의 pore 가 있는 sieve를 이용하여 흙을 걸러 600 μ m의 흙은 버리고 150 μ m와 63 μ m의 흙을 centrifugation tube에 넣었다. 이를 2000 rpm에서 1분 30초간 원심분리를 수행하였다. 상층액을 63 μ m체에 거르고 충분히 헹구어 준 후 페트리디쉬에 부어 해부현미경으로 관찰하며 포자를 분리하였다. 크기와 형태가 비슷한 포자를 모아 추출하여 동정에 이용하였다. 추출한 포자 중 형태가 비슷하다고 생각되는 한 무리의 포자군을 슬라이드 글라스에 두 부분으로 나누어 올려놓고, 한 쪽에는 PVLG(Polyvinyl alcohol-lactic acid-glycerol) 고정액을, 다른 한 쪽에는 PVLG와 Melzer’s reagent를 1:1로 혼합한 고정액을 각각 1방울씩 처리한 후 커버 글라스를 덮고 지우개 달린 연필 끝으로 적당한 힘을 주어 포자를 깨뜨렸다. 슬라이드 글라스를 광학현미경 상에서 관찰하면서 포자벽의 수와 구조 및 두께, 부착균사, 표면에 나타나는 무늬 (ornamentation) 등과 더불어 Melzer’s reagent에서 나타나는 색 변화 등을 종합하여 형태적 특징을 기록하였고[13] INVAM(<http://invam.caf.wvu.edu>)의 종 기재를 참고하여 종을 동정하였다.

3. 18S rDNA 절편을 이용한 DNA 클로닝 분석

가. Nested PCR

포자 관찰만으로는 식물 뿌리에 실제로 공생하는 AMF의 군집을 정확히 반영할 수 없기 때문에 DNA 를 식물 뿌리로부터 추출하여 18S rDNA 클로닝을 수행하였다. 채집된 9개체의 식물 뿌리에서 Plant DNA Isolation Mini Kit(Geneall, Korea)의 protocol에 따라 DNA를 추출하였고, DNA 농도를 측정하였다.

추출된 DNA 원액을 멸균수를 이용하여 1/10로 희석한 후 PCR 반응의 주형 DNA로 이용하였다. PCR은 Nested PCR 방법으로 진행하였다. 1차 PCR은 universal primer인 NS1/NS4를 이용하였고 1차 PCR 후 1.5% agarose gel 상에서 22분간 전기 영동 후 밴드를 확인하여 밴드가 선명하게 표시된 PCR산물을 2차 PCR의 주형으로 이용하였다. 2차 PCR은 AMF에 특이적인 primer인 AML1/AML2를 이용하여 진행하였으며[20], 2차 PCR이 끝난 후 다시 한 번 전기영동을 수행하여 약 760 bp의 DNA band를 확인하여 클로닝을 하기 위한 대략적인 DNA의 농도를 결정하였다.



[Fig. 2] Primers' position on rDNA and expected DNA length for polymerase chain reaction used in this study. Svedberg sedimentation (S), internal transcribed spacer(ITS), small subunit(SSU), large subunit(LSU).

나. PCR 반응산물 정제

PCR 반응산물은 Solgent PCR Purification Kit(solgent, Korea)의 실험방법에 따라 정제하였다. PCR 반응산물을 1.7 mL micro-centrifuge tube에 모두 옮긴 후 반응물 총량의 3배 부피에 해당하는 Buffer PCRb와 2배 volume에 해당하는 Isopropanol을 첨가하여 잘 섞어준 후 Spin column을 2 mL collection tube에 장착하고 반응산물이 섞인 용액을 Spin column에 옮겨 10,000 rpm으로 1분간 원심분리를 수행, 걸러진 용액을 버리고 Spin column을 다시 장착하였다. Spin column에 750 μ L의 Buffer WB(80% ethanol)를 첨가하고 12,000 rpm으로 1분간 원심분리를 수행하였다. 걸러진 용액은 버린 후 12,000 rpm으로 5분간 다시 원심 분리하였고, Spin column을 다시 멸균된 새로운 1.7 mL tube에 장착하였다. 30 μ L의 Buffer EB를 Spin column의 membrane 중앙에 바로 떨어뜨린 후 상온에서 2분간 방치한 뒤 12,000 rpm으로 1분간 원심분리를 수행하여 걸러진 용액을 ligation 반응에 이용하였다.

다. Ligation

0.2 mL PCR tube에 정제된 PCR 반응산물을 2 μ L 넣어준 후 6X T-blunt vector 1 μ L, 6X T-blunt Buffer 1 μ L, 멸균수 2 μ L를 넣어 최종 부피가 6 μ L가 되도록 한 후, 이 반응물을 조심스럽게 pipetting하여 섞어 주고 상온에서 1시간 동안 반응시켰다.

라. Transformation

T-blunt 반응액 5 μ L를 얼음에 꽂아 둔 competent cell(Solgent, Korea) 100 μ L가 담긴 tube에 조심스럽게 넣어주었다. 이때는 cell이 부서질 수 있으므로 pipetting을 수행하지 않았다. 얼음에서 1시간 동안 반응시킨 후 42 $^{\circ}$ C의 항온 수조에서 정확히 30초간 반응시키고 바로 얼음에 담가 2분간 안정화시켰다. 실온으로 예열된 LB배지(10 g NaCl; 10 g trypton; 5 g Yeast extract/1L)를 950 μ L 첨가하여 37 $^{\circ}$ C 항온 수조에서 1시간 40분간 150 rpm의 속도로 transformants cell을 배양하였다. 세포 배양 후 형광등에 비추어 탁도를 확인, 적당한 농도가 되었을 때 10,000 rpm으로 10분간 원심분리를 수행하였다. 이후 상등액을 버리고 200 μ L LB배지를 넣고 재부유 시켜주는 농축 과정을 진행하였다. 그 후 LB/ampicillin(50 g/ μ L), kanamycin(50 g/ μ L) plates에 각각의 transformation된 cell 배양액을 2~300 μ L씩 3개의 plate에 도말하였다. 도말된 plate는 37 $^{\circ}$ C incubator에서 overnight 배양한 후 colony를 확인하였다.

마. Transformation 배양과 Insert DNA 확인

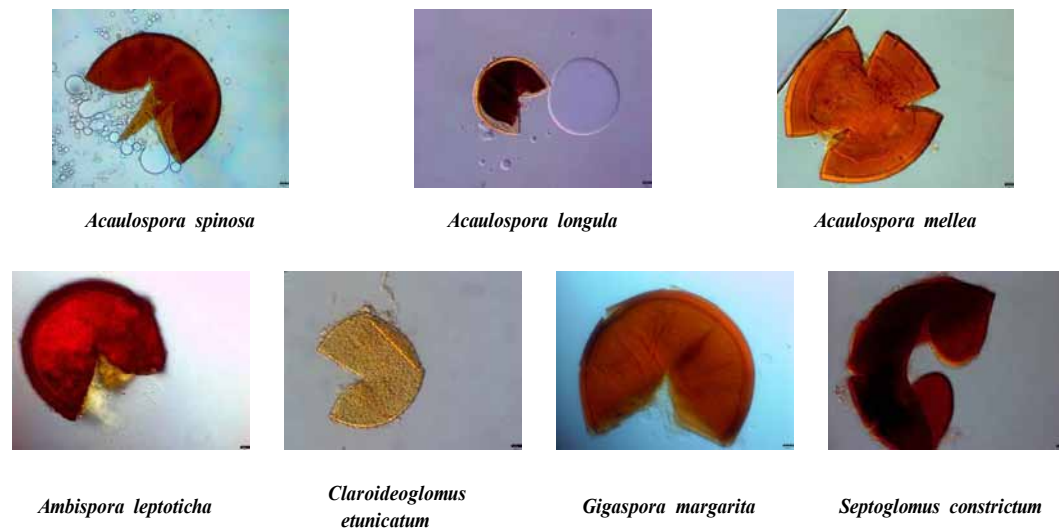
멸균된 Loop & Needle(SPL, Korea)을 이용하여 plate에 배양된 흰 색의 colony를 시료 당 각각 20개씩 채취한 후, 채취된 colony를 30 μ L 멸균수가 든 0.2 mL PCR tube에 넣고 pipetting을 수행하였다. 이 혼합액을 micropipet으로 1 μ L씩 취하여 colony PCR의 주형으로 사용하였다. PCR 반응의 primer로는 AMF 염기서열을 확인하기 위해 앞서 언급된 AML1/AML2 primer를 사용하였으며 PCR 반응 후에 전기영동을 진행하여 band가 확인된 DNA는 솔젠트(Solgent, <http://solgent.com>)에 의뢰하여 염기서열 분석을 진행하였다. 분석된 염기서열은 NCBI(<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/>)에서 BLAST(Basic Local Alignment Search Tool)를 이용하여 일치도가 가장 높은 종을 확인하고 염기서열들을 MEGA 6을 이용하여 alignment 후 유연관계 계통도(neighbor-joining phylogenetic tree)로 나타내었다[26].

III. 연구 결과

1. 토양 포자 군집 분석

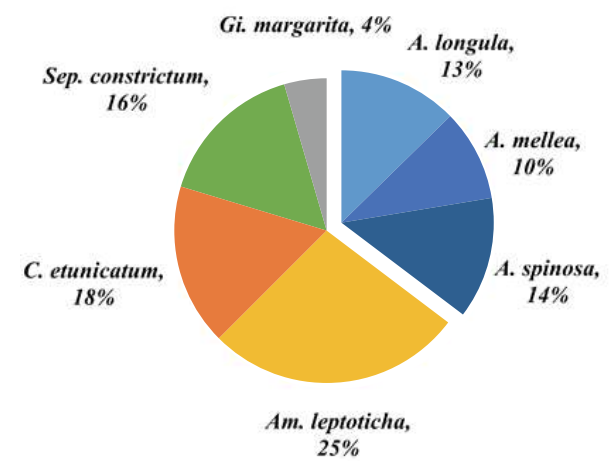
가. 포자 군집

연구 지역 건조 토양 10 g에서 관찰된 AMF 포자는 INVAM(<http://invam.wvu.edu/>)의 형태 중 기재 내용과 분자적 방법을 종합하여 5속 7종을 확인하였다. 확인된 종은 *Acaulospora spinosa*, *Acaulospora longula*, *Acaulospora mellea*, *Ambispora leptoticha*, *Claroideoglossum etunicatum*, *Gigaspora margarita*, *Septoglossum constrictum*([Fig. 3]) 등이다.



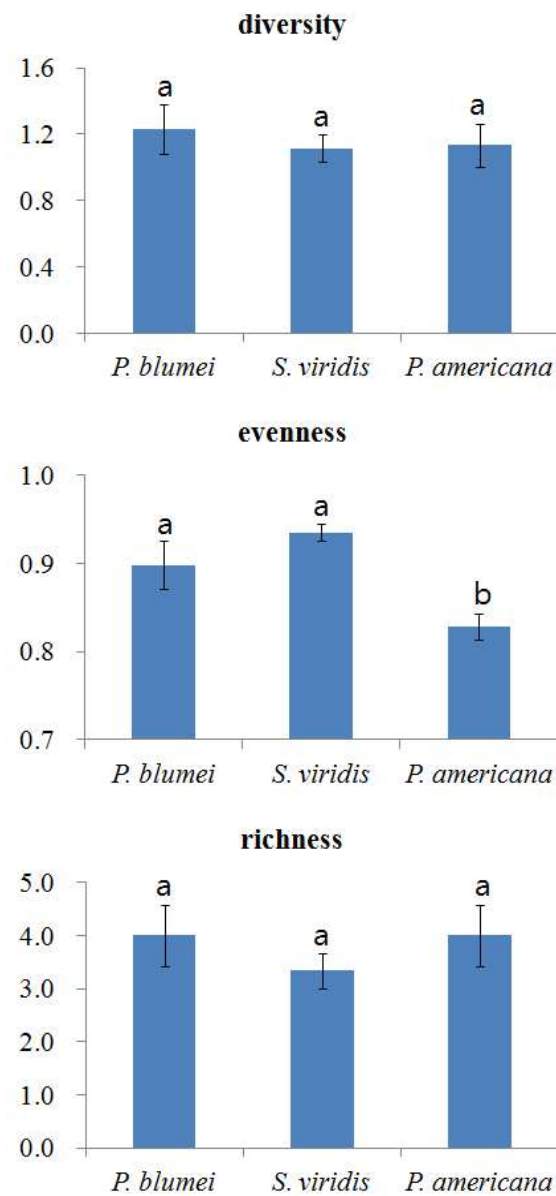
[Fig. 3] Total of 7 AMF species belonging to 5 genera. AMF spore species belonging to *Acaulospora* genus turned into red color when stained with Melzer's reagent.

동정 결과를 바탕으로 AMF의 포자 군집을 분석한 결과 *Am. leptoticha*의 상대수도가 3곳의 채집지에서 25%로 가장 높게 나타났고 *Gi. margarita*의 상대수도는 4%로 가장 낮게 나타남을 확인할 수 있었다([Fig. 4]). 속 수준에서 분석해본 결과에서는 *Acaulospora*속의 상대수도가 총 37%로 가장 높았다.



[Fig. 4] Overall relative abundance (RA) of AMF spores. AMF species belonging to *Acaulospora* genera were the most abundant.

포자 군집의 다양성 차이를 알아보기 위해 MVSP(ver 3.12) 프로그램을 이용하여 AMF 종 풍부도와 균등도를 조사하였고, 종 다양성 지수를 shannon diversity index를 이용하여 분석한 결과([Fig. 5]), 숙주 식물에 따른 종 다양성과 종 풍부도의 유의미한 차이는 나타나지 않았다. 그러나 숙주 식물에 따른 AMF의 종 균등도는 유의미한 차이를 보였다. 종 균등도는 미국자리공이 가장 낮게 나타났고 개여뀌와 강아지풀과 유의미한 차이를 나타내었다. 개여뀌와 강아지풀은 미국자리공에 비해 종 균등도가 높음을 확인할 수 있었고 개여뀌와 강아지풀 간의 AMF 종 균등도는 유의미한 차이를 나타내지 않았다.

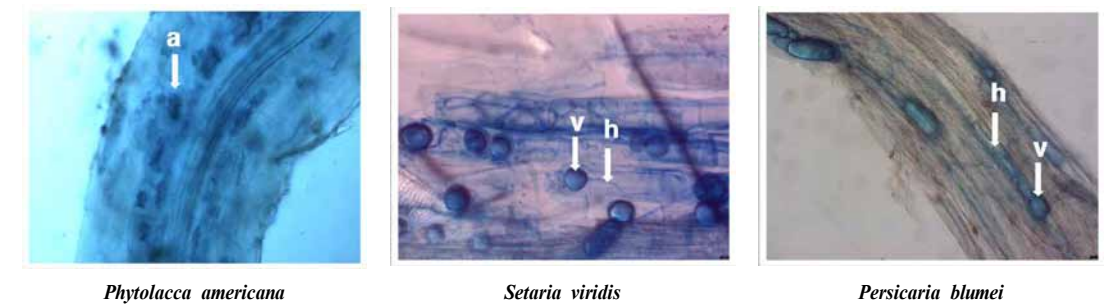


[Fig. 5] Shannon diversity, evenness and richness of AMF spore communities. Letters above bars indicate significant differences among the sites($P < 0.05$) and the error bars represent standard errors of the mean.

2. 숙주 식물 내부의 AMF 군집 분석

가. 숙주 식물 뿌리의 AMF 감염 형태

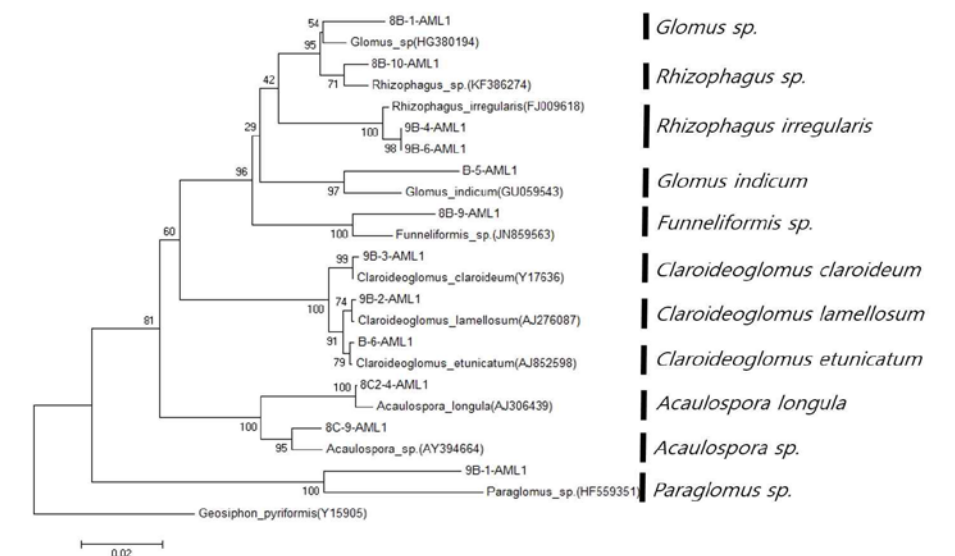
미국자리공, 강아지풀, 개여뀌 뿌리에 공생하는 AMF의 감염 형태를 알아보았다. 3종의 숙주 식물에서 intraradical hyphae와 vesicle, arbuscule이 관찰되었다([Fig. 6]).



[Fig. 6] AMF colonized in roots of *Persicaria blumei*, *Setaria viridis* and *Phytolacca americana*. Vesicles(v), hyphae(h) and arbuscule(a) of AMF in the roots were stained with trypan blue.

나. 클로닝 분석 결과

3개의 연구지역에서 미국자리공, 강아지풀, 개여뀌 각각의 식물 즉 3개 site * 3개 숙주 식물 총 9개체의 뿌리를 이용하여 DNA를 추출하였다. 이 추출된 DNA를 주형으로 AMF 특이적인 프라이머를 사용하여 증폭된 1 gS rDNA 조각을 클로닝에 이용하였다. 클로닝 결과 얻은 white colony를 각각의 샘플 당 무작위로 20개씩 선발하여 총 9개체 * 20 sampling 총 180개의 염기 서열 분석을 실시하였다. 그 결과 4개의 숙주 식물에서 총 6속이 확인되었으며 확인된 종으로는 *Rhizophagus sp.*, *Rhizophagus irregularis*, *Funneliformis sp.*, *Acaulospora sp.*, *Acaulospora longula*, *Claroideoglomus claroideum*, *Claroideoglomus etunicatum*, *Claroideoglomus lamellosum*, *Glomus sp.*, *Glomus indicum*, *Paraglomus sp.* 등이 있다. 염기서열 분석 결과를 활용하여 계통도를 나타내었다([Fig. 7]).



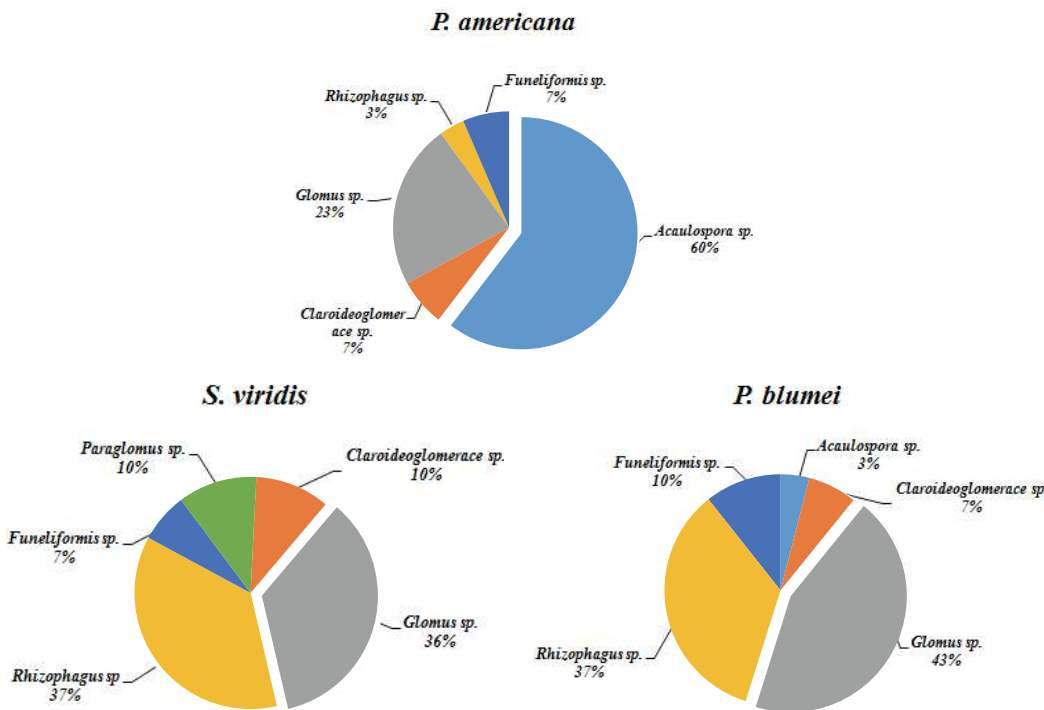
[Fig. 7] Neighbor-joining phylogram for partial 18S rDNA sequence that obtained from three host plants(*Phytolacca americana*, *Setaria viridis*, *Persicaria blumei*). Numbers at nodes indicate percent bootstrap support(1000 replicates).

전체 샘플을 대상으로 상대수도와 빈도를 분석한 결과 *Glomus sp.*가 상대수도 24.4%, 출현 빈도 88.8%로 3종의 숙주 식물과 공생하는 AMF 중 중에서 우점을 차지하는 것을 알 수 있었다(<Table 2>). 숙주식물별로 나누어 보면 고유종인 개여뀌와 강아지풀의 경우 *Glomus* 속과 *Rhizophagus* 속에 속하는 AMF가 많이 발견됨을 확인(<Table 2>)할 수 있었다. 그러나 외래 식물종인 미국자리공의 경우 *Acaulospora* 속에 속하는 AMF가 59.9%로 고유종의 3.3%와 비교하여 매우 높은 수치를 보임을 확인할 수 있었다. 또한 고유종에 많이 있는 *Rhizophagus* 속의 경우 미국자리공은 3.3%로 고유종의 36.6%와 비교해 매우 큰 차이를 나타냄을 확인할 수 있다.

<Table 2> Overall relative abundance(RA), frequency(F) of AMF colonising roots.

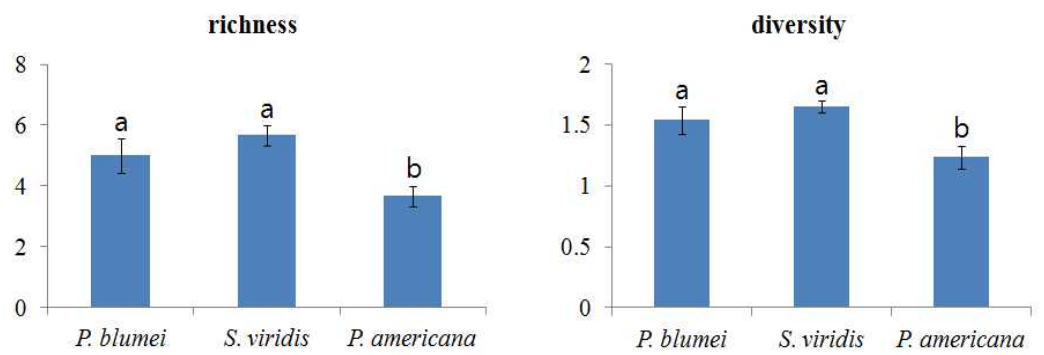
Species	RA(%)	F(%)	<i>Phytolacca americana</i>	<i>Setaria viridis</i>	<i>Persicaria blumei</i>
<i>Rhizophagus sp</i>	13.3	66.6	0	16.6	23.3
<i>R. irregularis</i>	12.2	66.6	3.3	20	13.3
<i>Funeliformis sp</i>	7.8	22.2	6.6	6.6	10
<i>Acaulospora sp.</i>	13.3	44.4	36.6	0	3.3
<i>A. longula</i>	7.8	33.3	23.3	0	0
<i>C.claroideum</i>	1.1	22.2	0	3.3	0
<i>C.etunicatum</i>	4.4	33.3	6.6	3.3	3.3
<i>C.lamellosum</i>	2.2	22.2	0	3.3	3.3
<i>Glomus sp</i>	24.4	88.8	23.3	23.3	26.6
<i>G.indicum</i>	10	55.5	0	13.3	16.6
<i>Paraglomus sp.</i>	3.3	22.2	0	10	0

클로닝 결과를 바탕으로 각 숙주 식물의 AMF 군집간의 차이를 분석한 결과 토착 식물인 개여뀌, 강아지풀과 외래 도입종인 미국자리공 간의 확연한 차이를 확인할 수 있었다. 토착 식물인 개여뀌, 강아지풀에서는 *Glomus* 속 AMF의 상대수도가 가장 높았고, 외래 도입종인 미국자리공에서는 우리나라 토양에서 가장 많은 AMF 속인 *Acaulospora* 속 AMF의 상대수도가 가장 높음을 확인 했다. 그리고 두 종의 토착식물에서 *Acaulospora* 속의 상대수도가 낮은 것으로 보아 토착식물과 *Acaulospora* 속 사이의 공생이 잘 이루어지지 않음을 확인했다(Fig. 8).



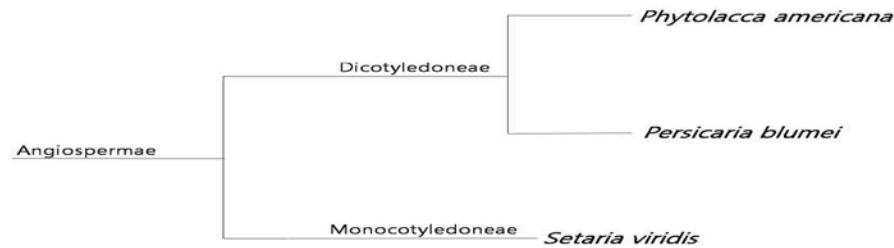
[Fig. 8] Overall relative abundance (RA) of AMF colonized in three host plants. Significant difference of AMF community was discovered between exotic plant and native plants. In exotic plant *P. americana*, AMF specie belonging to *Acaulospora* was the most dominant. In both of the native plants, AMF species belonging to *Glomus* and *Rhizophagus* genera were the most dominant.

확인된 종은 shannon diversity index를 활용하여 종 다양성 지수와 종 풍부도, 종 균등도를 측정하였고 각각의 수치를 숙주 식물에 따라 분석하였다. 분석 결과 종 다양성(Fig. 9)과 종 풍부도(Fig. 9)에서 숙주식물에 따른 유의미한 차이가 나타났다. 고유종인 개여뀌와 강아지풀 간에는 유의미한 차이가 나타나지 않았으나, 외래 도입종인 미국자리공의 경우 뿌리 내부에 공생하는 AMF의 종 다양성과 종 풍부도가 고유종에 비해 유의미하게 낮게 나타남을 확인할 수 있었다.



[Fig. 9] Shannon diversity index, and richness of AMF colonized roots. Letters above bars indicate significant differences among the host plants ($p<0.05$) and the error bars represent standard errors of the mean.

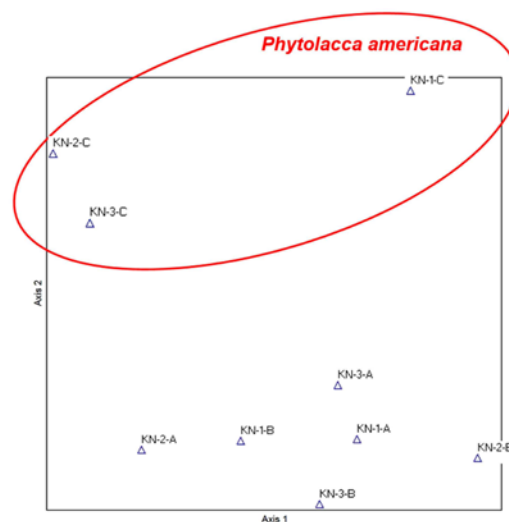
실험에서 사용된 세 식물간의 유연관계를 확인해 본 결과, 개여뀌와 미국자리공이 속씨식물문의 쌍떡잎식물 강이고, 강아지풀은 속씨식물문의 외떡잎 식물강으로 확인되었다(Fig. 10). 숙주식물에 공생하고 있는 미생물의 군집은 숙주식물 간의 유연관계에 따라 공생하는 미생물 군집도 차이를 보일 수 있다. 그러나 숙주식물 간의 AMF 군집을 비교해 보면, 유연관계가 비교적 먼 개여뀌와 강아지풀 간의 AMF 군집이 유연관계가 가까운 개여뀌와 미국자리공의 AMF 군집보다 유사함을 확인할 수 있었다. 이와 같은 결과를 토대로 AMF 군집 변화의 원인이 숙주식물 간의 유연관계에 따른 것이 아닌, 외래종과 고유종 간의 AMF 군집 차이라는 것을 확인할 수 있었다.



[Fig. 10] Phylogenetic tree of the three host plants used in this study.

다. 뿌리 내부의 AMF 군집 구조 분석

숙주식물의 뿌리 내부에 존재하는 AMF의 군집구조를 분석하기 위해 세 종류 식물에서 얻은 아홉 개의 샘플의 DNA 분석 결과를 바탕으로 종 동정을 수행한 후 NMS 분석을 수행하였다. 그 결과 서로 다른 세 지역에서 채집했음에도 불구하고 고유종인 개여뀌와 강아지풀에서는 AMF 군집의 유사함을 확인할 수 있었다. 이와 대조적으로 미국자리공은 고유종들과 비교하여 확연한 차이를 나타내었다(Fig. 11). 3종류의 숙주 식물은 반경 1 m 이내의 근접한 토양 입에도 불구하고 외래 도입종인 미국자리공은 고유종인 2종과는 전혀 다른 AMF 군집 구조를 나타냄을 확인할 수 있었다. 또한 서로 다른 3곳의 떨어져 있는 site 입에도 불구하고 미국자리공의 군집 구조가 유사함을 확인할 수 있었다.



[Fig. 11] Non-metric multidimensional scaling plots of the AMF community composition by colonized roots of 9 samples. Letters A, B, and C each represents *Persicaria blumei*, *Setaria viridis* and *Phytolacca americana*.

IV. 결론

1. 연구 결과 분석

가. 토양 포자 군집 분석

연구 대상으로 삼은 3개 지역에서 채집한 토양을 건조시켜 건조 토양 10 g에서 포자를 추출하여 동정을 수행한 결과 5속 7종을 확인할 수 있었다. 관찰된 종 중 *Am. leptoticha*의 상대 수도가 가장 높게 나타남을 확인할 수 있었고, 속 수준에서 분석해본 결과 *Acaulospora* 속의 상대 수도가 가장 높음을 확인할 수 있었다. 서로 다른 3개 지역과 숙주를 고려하여 포자 군집 분석을 진행한 결과 외래 식물인 미국자리공이 고유종과는 다르게 종 균등도에서 확연히 낮은 수치를 나타내는 것을 확인하였다. 하나의 채집지에서만 이와 같은 일이 발생하는 것이 아니라 서로 떨어져 있는 3곳의 채집지에서 모두 같은 현상이 발생한 것으로 미루어 보아 미국자리공이 포자의 종 균등도를 낮추고 있음을 유추해 볼 수 있다. 이를 통해 실험의 두 번째 가설인 미국자리공과 토착식물의 공생 AMF 군집에 차이가 존재함을 세 곳의 채집 장소에서 동일하게 확인 할 수 있었다. 미국자리공의 어떤 메카니즘에 의해 이와 같은 현상이 발생하는 것인지에 대해 추후 연구가 필요할 것이라고 생각한다.

나. 숙주 식물 내부의 AMF 군집 분석

뿌리의 감염 상태를 확인하기 위해 뿌리를 염색하여 현미경을 통해 관찰한 결과(Fig. 6)로 실험의 첫 번째 가설인 미국자리공과 AMF의 공생관계를 AMF 감염 여부를 통해 확인할 수 있었다. 뿌리 DNA를 추출하여 AMF 특이적인 프라이머로 증폭한 절편을 클로닝하여 분석한 결과(Fig. 7) 6속이 확인되었으며 확인된 종으로는 *Rhizophagus sp.*, *Rhizophagus irregularis*, *Funeliiformis sp.*, *Acaulospora sp.*, *Acaulospora longula*, *Claroideoglossum claroideum*, *Claroideoglossum etunicatum*, *Claroideoglossum lamellosum*, *Glomus sp.*, *Glomus indicum*, *Paraglomus sp.* 등이 있다. 3종의 숙주식물 전체를 대상으로 분석한 결과 *Glomus sp.*의 상대 수도 및 출현 빈도가 가장 높은 것으로 나타났다. 그리고 각 숙주 식물별로 분리하여 살펴보면 개여뀌, 강아지풀 모두 공생하는 AMF 중 우점을 차지하는 것은 *Glomus sp.*임을 확인할 수 있었다. 그러나 미국자리공의 경우 개여뀌, 강아지풀과는 전혀 다른 양상을 보였다. 미국자리공의 경우 *Acaulospora sp.*의 상대수도가 36.6%로 가장 높게 나타났다. 서식지 상으로 봤을 때 직경 1 m 이내의 가까운 거리임에도 개여뀌와 강아지풀의 경우 *Acaulospora sp.*의 상대수도는 3.3%와 0%로 매우 낮은 반면에 미국자리공의 경우에는 매우 높은 수치를 보였다. 또한 숙주식물에 다른 공생 AMF의 종 풍부도와 종 다양성을 분석해 본 결과 외래종인 미국자리공에서 종 풍부도와 종 다양성 모두 두 고유종과 비교하여 확연히 낮게 나타났다. 채집지의 직경이 1 m 정도인 점을 감안하면 거의 유사한 근권 환경에서 뿌리 내부에 공생하는 AMF의 뚜렷한 차이는 숙주 식물이 미치는 영향을 제외하면 설명하기가 어렵다. 숙주식물 간의 AMF 군집차이는 식물간의 유연관계에 따라서 다를 수 있다. 그러나 숙주식물 간의 유연관계도(Fig. 10)를 보면 숙주식물 간의 AMF 군집 차이와 유연관계는 관련이 없다는 것을 알 수 있다. 또한 NMS 분석을 통하여 군집 분석을 수행한 결과(Fig. 11) 외래종인 미국자리공의 경우 서로 떨어져 있는 채집지 입에도 불구하고 뿌리 내부의 AMF 군집 양상이 매우 유사하였고, 동일 근권 토양 범위에서 미국자리공은 근처 고유 식물과는 전혀 다른 양상의 AMF 군집 양상이 나타남을 알 수 있었다. 따라서 외래종 미국자리공의 공생 AMF 군집과 토착식물의 공생 AMF 군집에 차이가 있다는 실험의 두 번째 가설을 확인 할 수 있었다. 또한 토착종과는 다르게 미국자리공이 우리나라 토양에 가장 많이 서식하는 AMF속인 *Acaulospora* 속과 대부분의 공생관계를 맺는다는 사실을 확인하였다. 이를 통해, 오랜 시간 전부터 우리 토양에 살며 자신에게 유리한 특정 AMF 군집이 확립되어 온 토착종들과는 달리 유입된 지 몇 십 년 밖에 되지 않아 자신만의 AMF 군집을 확실히 고정하지 못한 외래종들은 정착하려는 토양의 가장 많은 AMF와 공생관계를 맺음으로써 더 원활하게 퍼져나갈 수 있게 되었음을 추측해 볼 수 있다.

2. 기대 효과

본 연구에서는 고유종과 외래 도입종 각각이 공생관계를 맺는 AMF 군집 구조를 확인하고 외래 도입종이 AMF 군집에 어떤 영향을 미치는지 알아보고자 하였다.

그러나 본 연구는 실험의 특성상 일반화하기에는 제한점이 있다. 샘플의 수가 적고 넓으며, 다양한 지역에서 통합적으로 수집한 데이터가 아니므로 확대 적용하기에 어려움이 있다. 또한, 숙주 식물 내부의 AMF 군집 비교 시 클로닝 샘플의 수가 적어 명확한 통계 분석 자료로 활용되기에 어려움이 있다. 보다 다양한 샘플링을 실시하고, 다양한 지역에서 동일 숙주 식물을 대상으로 연구를 진행한다면 명확한 차이를 확인할 수 있어 더욱 좋은 연구가 될 것이라고 생각한다. 미국자리공과 고유종 식물의 AMF 군집 차이의 이유를 알아보기 위해 미국자리공 뿌리 추출 물질의 성분 분석과 분석된 물질이 각각 AMF 군집에 어떤 영향을 미치는지를 관찰한다면 그 원인을 보다 명확하게 알 수 있을 것이라고 생각한다.

매년 생태 교란종으로 인한 생태계의 피해가 막대한 상황이다. 일반적으로 외래 도입종이 우리 생태계에 미치는 영향을 논할 때 지상부를 대상으로 진행하는 것이 대부분이다. 그러나 생태교란종의 생태 파괴의 근본적인 원인을 알아보기 위해서는 생태교란종과 AMF 간의 상호작용에 대한 연구 또한 중요하다. 본 연구에서는 외래 도입종이 토양에 존재하는 공생균에 어떤 영향을 미치는지 알아보는 초기 연구를 진행하였다. 보다 다양한 생태 조사가 이루어져 많은 지역의 자료가 축적된다면 외래 유입종이 근권의 AMF 군집에 미치는 영향이 보다 확실히 밝혀질 것이라고 생각한다. AMF는 지구상 식물의 80% 이상이 공생하며 식물군집에 큰 영향력을 줄 수 있는 공생균이다. 따라서 본 연구를 시작으로 AMF의 군집변화를 이해하는 것은 외래종에 의한 생태계에 미치는 정확한 영향, 피해와 그의 예방, 이익 등을 예측해 볼 수 있는 매우 좋은 자료가 될 것이라고 생각한다.

V. 참고문헌

- [1] 고강석, 서민환, 김지현, 구연봉, 오현경, 연명훈, 이민호, 박수현, 양영환 (2004). **외래식물의 영향 및 관리방안 연구(V)**. 인천: 국립환경연구원.
- [2] 기동원, 박준홍, 이재진, 노백호 (2007). 현장 측정된 토양미생물 중 다양성과 생태자연도 등급 자료 간의 통계적 상관관계 평가와 토양생태의 질 산정방안 제안. **대한토목학회논문집**, 27(6B), 27:703-710.
- [3] 류태복 (2012). **한국 귀화식물상의 생태분류**. 석사학위논문. 계명대학교. 대구.
- [4] 방상원, 김문화, 노태호. 생태계 위해종의 통합 관리 방안 연구. 한국환경정책평가연구원2004.
- [5] 산림청 국가생물종 지식정보시스템. <http://www.nature.go.kr/> [database on the Internet]. (검색일 : 2015. 11. 27)
- [6] 산림청 국가생물종지식정보시스템-귀화식물. http://www.nature.go.kr/newkfsweb/kfi/kfs/kbi/plant/ntrlz/selectNtpltGnrlList.do?mn=KFS_28_01_05_04_02&orgId=kbi, (검색일: 2015.11.28).
- [7] Cox, G., & Sanders, F. (1974). Ultrastructure of the host-fungus interface in a vesicular-arbuscular mycorrhiza. *New Phytologist*, 73(5), 901-912.
- [8] Daniels, B. A., & Skipper, H. A. (1982). Methods for the recovery and quantitative estimation of propagules from soil. In Schench & N.C. (Eds), *Methods and principles of mycorrhizal research* 29-35. St. Paul, MN: American Phytopathological Society.
- [9] del Val, C., Barea, J. M., & Azcón-Aguilar, C. (1999). Assessing the tolerance to heavy metals of arbuscular mycorrhizal fungi isolated from sewage sludge-contaminated soils. *Applied Soil Ecology*, 11(2), 261-269.
- [10] Drigo, B., Pifl, A. S., Duyts, H., Kielak, A. M., Gamper, H. A., Houtekamer, M. J., Boschlker, H. T., Bodelier, P. L., whiteley, A. S., & Veen, J. A. (2010). Shifting carbon flow from roots into associated microbial communities in response to elevated atmospheric CO₂. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(24), 10938-10942.

- [11] Feng, G., Zhang, F., Li, X., Tian, C., Tang, C., & Rengel, Z. (2002). Improved tolerance of maize plants to salt stress by arbuscular mycorrhiza is related to higher accumulation of soluble sugars in roots. *Mycorrhiza*, 12(4), 185-190.
- [12] George, E., Marschner, H. & Jakobsen, I. (1995). Role of Arbuscular Mycorrhizal Fungi in Uptake of Phosphorus and Nitrogen From Soil. *Critical Reviews in Biotechnology*, 15(3-4), 257-270.
- [13] Gerdemann, J. W., & Trappe, J. M. (1974). *The Endogonaceae in the Pacific Northwest*. Bronx, NY: New York Botanical Garden & Mycological Society of America.
- [14] Göhre, V., & Paszkowski, U. (2006). Contribution of the arbuscular mycorrhizal symbiosis to heavy metal phytoremediation. *Planta*, 223(6), 1115-1122.
- [15] Graham, J. H., Leonard, R. T., & Menge, J. A. (1981). Membrane-Mediated Decrease in Root Exudation Responsible for Phosphorus Inhibition of Vesicular-Arbuscular Mycorrhiza Formation. *Plant Physiology*, 68(3), 548-552.
- [16] Hartnett, D. C., & Wilson, G. W. (2002). The role of mycorrhizas in plant community structure and dynamics: lessons from grasslands. *Plant and Soil*, 244, 319-331.
- [17] Helgason, T., Merryweather, J. W., Denison, J., Wilson, P., Young, J. P. W., & Fitter, A. H. (2002). Selectivity and functional diversity in arbuscular mycorrhizas of co-occurring fungi and plants from a temperate deciduous woodland. *Journal of Ecology*, 90(2), 371-384.
- [18] Hildebrandt, U., Regvar, M., & Bothe H. (2007). Arbuscular mycorrhiza and heavy metal tolerance. *Phytochemistry*, 68(1), 139-146.
- [19] Kil, B. S., Yun, K. W., Lee, S. Y., & Han, D. M. (1994). Influence of chemicals from *Artemisia argyi* on the growth of selected species of plants and microorganisms. *Korean Journal of Ecology*, 17, 23-35.
- [20] Lee, J., Lee, S., & Young, J. P. W. (2008). Improved PCR primers for the detection and identification of arbuscular mycorrhizal fungi. *FEMS Microbiology Ecology*, 65(2), 339-349.
- [21] McGonigle, T. P., & Fitter, A. H. (1990). Ecological specificity of vesicular-arbuscular mycorrhizal associations. *Mycological Research*, 94(1), 120-122.
- [22] Newsham, K. K., Fitter, A. H., & Watkinson, A. R. (1995). Arbuscular mycorrhiza protect an annual grass from root pathogenic fungi in the field. *Journal of Ecology*, 991-1000.
- [23] Pearson, J. N., & Jakobsen, I. (1993). The relative contribution of hyphae and roots to phosphorus uptake by arbuscular mycorrhizal plants, measured by dual labelling with ³²P and ³³P. *New Phytologist*, 124(3), 489-494.
- [24] Ruiz-Lozano, J. M., Azcón, R., & Gomez, M. (1995). Effects of arbuscular-mycorrhizal glomus species on drought tolerance: physiological and nutritional plant responses. *Applied and Environmental Microbiology*, 61(2), 456-460.
- [25] Schüßler, A. (2002). Molecular phylogeny, taxonomy, and evolution of Geosiphon pyriformis and arbuscular mycorrhizal fungi. In *Diversity and Integration in Mycorrhizas*, 75-83. Springer Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- [26] Smith, S. E., & Read, D. J., (2010). *Mycorrhizal symbiosis*. London, UK: Academic press.
- [27] Tamura K., Peterson D., Peterson N., Stecher G., Nei, M., & Kumar, S. (2011). MEGA5: Molecular evolutionary genetics analysis using maximum likelihood, evolutionary distance, and maximum parsimony methods. *Molecular Biology and Evolution*, 28(10), 2731-2739.
- [28] Vandenkoornhuysen, P., Ridgway, K. P., Watson, I. J., Fitter, A. H., & Young, J. P. W., (2003). Co-existing grass species distinctive arbuscular mycorrhizal communities. *Molecular Ecology*, 12(11), 3085-3095.
- [29] Wang, B., & Qiu, YL. (2006). Phylogenetic distribution and evolution of mycorrhizas in land plants. *Mycorrhiza*, 16(5), 299-363.
- [30] Weissenhorn, I., Leyval, C., & Berthelin, J. (1993). Cd-tolerant arbuscular mycorrhizal (AM) fungi from heavy-metal polluted soils. *Plant and Soil*, 157(2), 247-256.
- [31] Willis, A. J. (1989). Coastal sand dunes as biological systems. *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh Section B. Biological Sciences*, 96, 17-36.

| 연구진 |

전유진 (Jeon Yujin, 강원과학고등학교, jeonyujin17@naver.com)

임유정 (Lim Yoojeong, 강원과학고등학교, uj5412@naver.com)

박우주 (Park Wooju, 강원과학고등학교, woojoooo16@naver.com)

전상준 (Jeon Sangjun, 강원과학고등학교, sangjunjeon9@naver.com)

지도교사 : 최항석 (Choi Hangseok, 강원과학고등학교, 생물학, zzipzukk@naver.com)

지도교수 : 엄안흠 (Eom Ahnhum, 한국교원대학교 생물교육과, eomahkr@gmail.com)

지도조교 : 박혁 (Park Hyuk, 한국교원대학교 생물교육과, hawknike5780@gmail.com)

곤충 사이보그 개발을 위한 잠자리 날개 신경망 Mapping 및 근육운동 측정

정석영 · 이주은 · 박하민 · 이정선 · 홍용권 – 충남과학고등학교

Mapping Neural Networks and Measuring Muscular Movement of Dragonflies' Wings for Development of Insect-Cyborg Robot

Jung Seokyeong · Lee Jueun · Park Hamin · Lee Jeongseon · Hong Yongkwon - Chungnam Science High School

ABSTRACT

Developments of minimized robots and cyborgs are necessary due to the limitations of human resources in some parts such as life exploration at the disaster sites, resources and terrain exploration in the wilds, and the military area reconnaissance. Especially, development of “Cyborg Insects”, which utilizes insects’ basic capacities for locomotion and their small bodies, is getting attention. However, cyborg insects with abilities to do stable flight and landing are not developed until now. There are 2 reasons for this. The first reason is that selected insects for development didn't have outstanding basic locomotion. Second, there are no enough foundational researches to understand insects’ flight mechanism. Therefore, we progressed a research for physiological characteristic to understand outstanding flight mechanism of the dragonfly by mapping wing muscles nerve networks through electro-stimulation, and EMG recording. As a result, we found locations of wing muscles nerve network, inducing each wing’s upward or downward movements. Also, the best stimulating conditions to control each wings’ movement optimally were found. This research is expected to be used as basic data for developing cyborg dragonfly with remarkable flight ability, in the future.

Key words:

Cyborg Dragonfly, Cyborg Insect, Mapping, EMG

국문초록

재난 현장에서의 인명 탐사, 오지에서의 자원 및 지형 탐사, 군사 지역 정찰 등은 인력이 가진 한계 때문에 소형 로봇 및 사이보그의 개발이 필수적인 분야이다. 그 중에서도 동물이 가진 고유한 운동 능력과 작은 크기를 활용할 수 있는 곤충 사이보그 개발이 주목받고 있는데, 아직까지 안정적인 비행이나 착륙을 조절할 수 있는 곤충 사이보그는 개발되지 않았다. 그 이유는 크게 두 가지로 나눌 수 있는데, 첫 번째 이유는 고유 운동능력이 뛰어난 곤충을 선정하지 못했다는 점이고 두 번째 이유는 아직까지 곤충의 비행을 이해할 수 있는 기초 연구가 부족하다는 점이다. 따라서 본 연구에서는 고유 운동능력이 매우 뛰어난 잠자리의 비행 Mechanism을 이해하기 위해 전기 자극을 통한 날개 근육의 Mapping과 EMG Recording을 통한 날개 근육의 생리적 특성 연구를 진행하였다. 그 결과 잠자리의 각 날개의 상승과 하강을 조절하는 날개 근육 위치를 동정하였고, 각 날개의 움직임을 최적으로 조절할 수 있는 근육 자극 조건을 설정할 수 있었다. 이는 앞으로 뛰어난 비행 능력을 보유한 잠자리 사이보그 개발에 바탕이 되는 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

중심어 :

잠자리 사이보그, 곤충 사이보그, 도표화, 근전도

I. 서론

전장에서의 은밀한 정보 수집이나 재난 현장에서의 인명 탐사는 인력이 가진 한계 때문에 로봇 및 사이보그의 개발이 필수적인 분야이다. 현재 상용화되어 있는 드론(Drone)은 로봇으로서 사람이 작업하기 힘든 공간에서 정보를 전달 해 줄 수 있다는 장점을 가지고 있다. 하지만 드론은 매우 비싸고 무거우며 몸체도 커 협소적인 재난현장에서는 한계가 있다. 이를 보완하기 위하여 주변에서 흔히 관찰 될 수 있으면서 활용 가능하고 가벼운 곤충을 이용하여 만드는 곤충 사이보그의 개발이 시작되었다. 미국을 비롯한 주요 선진국에서는 오래 전부터 이에 대한 중요성을 알고 연구 개발에 투자해 왔으며, 특히 2008년 Defence Advanced Research Project Agency의 지원으로 미국의 한 대학 연구진들이 Cyborg Beetle 개발에 성공하였다. 현재까지 보고된 비행 가능한 곤충 사이보그는 Cyborg Beetle이 유일한데, 이 사이보그는 뇌와 날개 근육 전기 자극을 통해 이륙과 비행 방향 조종이 가능하지만 아직까지 가만히 한 지점에 떠

있는 Hovering 비행이나 부드러운 착륙이 불가능하며 비행 또한 불안정하다. 더욱이 1초에 40번 이상 날갯짓을 하는 비효율적인 비행을 해 가동시간이 짧아 Cyborg Beetle은 상용화되기에는 부적절하다.

따라서 이를 극복하기 위해서는 딱정벌레를 대체할 다른 곤충 사이보그 개발이 필요하다. 안정적인 Hovering 비행이 가능한 잠자리의 날개근육을 조종함으로써, 새로운 종류의 곤충 사이보그를 만들 수 있다. 이는 현재 보고된 Cyborg Beetle보다 더 적은 에너지를 사용하여 오랜 시간 가동이 가능하고 더 유연한 비행이 가능할 것으로 예상된다. 이에 따라 본 연구에서는 1초에 20번 날갯짓의 날갯짓을 하여 딱정벌레보다 효율성이 높고 비행하는 곤충 중 가장 유연한 비행이 가능한 잠자리를 사이보그 개발에 이용한다.

본 연구로 인하여 잠자리 날개 근육 신경망의 해부학적 구조뿐만 아니라 기능적 구조 또한 동정 할 수 있다. 이는 잠자리를 묶어 놓고 비행 운동을 관찰하는 수동적인 방식에서 벗어나 날개 근육 자극을 통한 능동적인 비행 Mechanism 연구 방식에도 응용될 수 있다. 또한 향후에 잠자리를 이용한 곤충 사이보그는 재난 현장에서의 인명 탐사, 오지에서의 자원 및 지형 탐사, 군사 지역 정찰 등의 분야에서 사용될 것이다.

II. 연구 과정 및 방법

1. 실험 대상

가. 잠자리목(Anisoptera)

1) 잠자리 종류

가) 뽕잠자리(*Pantala Flavescens*)(Fig. 1)

주로 연못, 습지, 하천, 저수지에서 발견된다. 크기는 약 3.7~4.2 cm이고 가슴과 배마디의 색상이 뽕색과 닮았다. 붉은 얼굴에 눈알이 크며, 몸통과 꼬리부분, 입과 턱 부분까지 황색을 띤다.

나) 깃동잠자리(*Sympetrum Iginfuscum*)(Fig. 2)

주로 연못, 습지, 논에서 서식하는 종으로써 크기는 약 4.2~4.8 cm이다. 암수 모두 날개 끝에 깃동무늬가 있고 몸통과 꼬리부분은 갈노랑색 바탕에 검정색 줄이 있다. 미성숙 개체는 황색이며 성숙 수컷은 전체적으로 붉은 갈색을 띤다.

다) 고추 좀 잠자리(*Sympetrum Frequens*)(Fig. 3)

주로 연못, 습지, 논, 하천, 저수지에서 발견되는 종이다. 크기는 약 3.8~4.4 cm이고, 옆 가슴선이 가슴 부위의 가운데까지 있다. 크기가 작은 편이나 국내에서 가장 개체가 많은 잠자리이다.



[Fig. 1] *Pantala flavescens*



[Fig. 2] *Sympetrum Iginfuscum*



[Fig. 3] *Sympetrum Frequens*

2) 잠자리 크기

실험에 사용된 잠자리는 몸통 길이 4~6 cm, 날개 길이 7~10 cm, 몸통 두께 0.6~0.8 cm인 개체이다.

3) 채집 방법 및 채집 장소

가) 채집 방법

분류군의 특성상 대부분의 개체들은 포충망(직경: 40 cm)을 이용하여 포획하는 방법인 채어 잡기로 2015년 8월에서 9월 사이에 채집하였다.

나) 채집 장소

충청남도 공주시 반포면 마암리 충남과학고등학교 마암천 인근과 KAIST 중앙 도서관 부근에서 채집하였다.

4) 잠자리 표본 제작 및 동정 방법

가) 비커에 뜨거운 물을 담고 그 위에 거즈를 덮은 후, 그 위에 잠자리를 올려 연화시켰다. 잠자리의 가슴 부분 중 오른쪽에 0.3 cm 곤충 핀을 꽂았다. 그 잠자리를 하드보드지로 제작한 전시판 위에 올린 후 고정시켰다. 잠자리의 날개를 직각이 되도록 편 후, Tracing Paper를 올렸다. 고정된 잠자리의 날개와 잠자리의 머리를 시침핀으로 고정시켰다. 잠자리 옆에 실험에 쓰인 순서를 Labeling한다. 표본을 제작한 후 약 1주에서 2주정도 건조시켰다.

나) 채집된 표본의 세밀한 형질은 해부현미경(모델명 : Leica zoom 2000)을 사용하여 동정하였고, 표본의 크기 측정은 버니어 캘리퍼스(Mitutoyo 530-101)를 이용하였다.

다) <한국의 잠자리>[2]와 산림청 국가 생물종 지식정보시스템[3]을 참고하여 개체의 형태학적 특징을 기준으로 분류하였다.

2. 잠자리 날개근육 전기 자극을 통한 신경망 Mapping

가. 사용 장비

VOLTAGE/CURRENT CALIBRATOR CC-421

DC 전기 자극을 주기 위하여 Lutron사에서 제작한 CC-421 제품을 이용하였다(전압 범위 ± 199.9 mV, 전류 범위 24.0 mA).

나. 잠자리 마취 방법

- 1) 변온 동물인 잠자리를 마취시키기 위해 얼음물을 사용하였다.
- 2) 잠자리의 날개를 잡고 몸통을 얼음물에 3분간 넣어 움직임이 없어진 후 실험을 진행하였다.
- 3) 마취된 잠자리를 얼음물에서 꺼내어 물기를 완전히 제거한 뒤 전기 자극을 실시하였다.

다. 잠자리 날개 근육 전기 자극을 통한 날개 움직임 관찰 및 기록

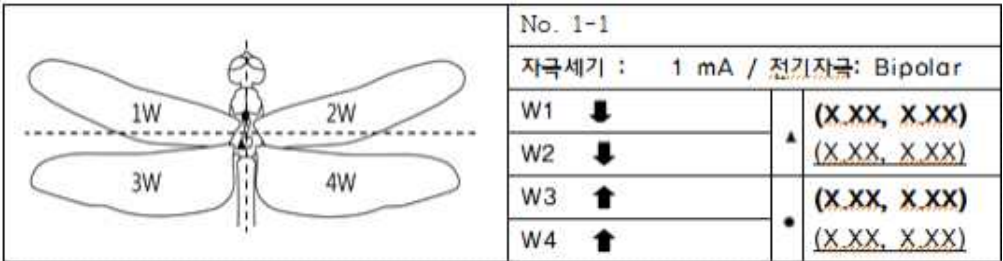
- 1) 자극 전극을 몸통의 레퍼런스 전극을 기준점(0, 0.75)에 고정한 후, 다른 전극을 몸통의 임의의 위치에 고정해 CC-421의 양, 음극과 연결하였다.
- 2) 자극 전극의 위치를 기입하고, 잠자리의 자의적인 움직임을 배제하기 위해 2, 1, 0.5 mA의 차례로 전류 자극을 가하며 잠자리 날개의 움직임을 Video Recording 하였다.
- 3) 위 과정을 반복하여 다양한 위치에서 전기 자극을 주고, 자극 위치에 따른 날개의 움직임을 기록하였다.

라. 날개 움직임 Video Recording

모든 전기 자극은 Video camera(CANON PowerShot G16)로 Recording 하였으며 좌측 전방(1번 날개), 우측 전방(2번 날개), 좌측 후방(3번 날개), 우측 후방(4번 날개)의 움직임을 각각 관찰하였다.

마. 날개 움직임 기록 방법

1) 전기 자극을 준 후 [Fig. 4]와 같은 형식으로 정리한 후 분석을 진행하였다.



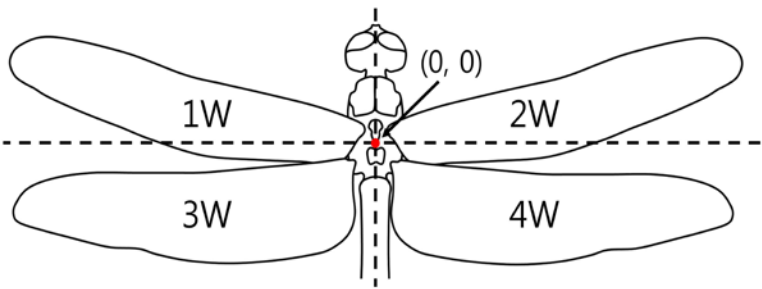
[Fig. 4] Method to record movement of wings

Recording the wings' movements by video recording whether upside, downside, or non-reaction when electro-stimulation is given
(000,000) - Real Coordinates Value(cm)
(000,000) - Standard Coordinates Value (length from starting point / half of length of body width)

바. 전기 자극 좌표 설정

1) 전극을 꽂은 곳의 좌표는 잠자리 가슴의 뒷부분의 앞날개와 뒷날개 사이의 마디의 중심을 원점으로 설정하여 기록하였다([Fig. 5]). 실제로 측정된 실측 좌표와 잠자리 가슴의 너비와 길이에 비례하게 계산하여 만든 표준 좌표를 표시하였다. 표준 좌표를 구하는 공식은 다음과 같다.

$$\text{표준좌표} = \frac{\text{실제 좌표의 값(너비 또는 길이)}}{\text{기준에서부터 가슴의 끝(너비 또는 길이)까지의 거리}}$$



[Fig. 5] Starting point on atlas of the dragonfly
Setting the center of dragonfly's joint between fore and hind wing located at back of dragonfly as a starting point

3. EMG Recording을 통한 활동전위 측정

가. 사용 장비 및 분석 소프트웨어

1) Neural Spiker Box
Backyardbrains사의 'Neural Spiker Box'를 사용하여 EMG 시 발생하는 활동 전위를 시각적, 청각적으로

Recording 하였다. 동사의 'Spike Recorder' 어플리케이션을 이용하여 활동 전위 신호를 Recording 및 시각화하였다.

2) MATLAB
공학, 시뮬레이션 전문 코딩 소프트웨어인 MATLAB(Matrix Laboratory)을 사용하여 'Neural Spiker Box'에서 Recording한 활동 전위 신호를 분석하였다.

나. 잠자리 마취 과정

변온 동물인 잠자리를 마취시키기 위해 얼음물을 사용하였다. 잠자리의 날개를 잡고 몸통을 얼음물에 3분간 넣어 움직임이 없어진 후 실험을 진행하였다. 이후 얼음물에 꺼내어 물기를 완전히 제거한 뒤 EMG Recording을 실시하였다.

다. Recording 위치 및 시간

1) Recording 전극은 II -2와 동일한 위치에 매설하였다.
2) 약 45초 ~ 1분간 측정하여 연구를 진행하였다.

라. EMG Recording 방법

1) 잠자리의 각 날개에 [Fig. 5]의 표기방식같이 번호를 부여하였다.
2) Neuron Spiker Box를 핸드폰 또는 컴퓨터에 연결하였다.
3) 손의 미세한 전류를 차단시키기 위하여 잠자리의 날개를 움직일 때 손에 고무장갑을 착용하였다.
4) 1W, 2W, 3W, 4W의 순서로 움직이며 기기를 통해 변환되어지는 활동전위의 시각적, 청각적 변환을 관찰한 후 이를 음성파일과 영상파일로 저장하였다.

4. EMG 분석

'Neural Spiker Box'로 Recording한 근육의 활동전위 신호를 자체 코딩한 MATLAB 코드를 사용하여 날개 자극이 없을 때의 Base Frequency, Base Amplitude와 날개 자극을 줄 때의 Moving Frequency, Moving Amplitude를 구하였다.

가. MATLAB을 활용한 활동전위 Frequency & Amplitude 분석

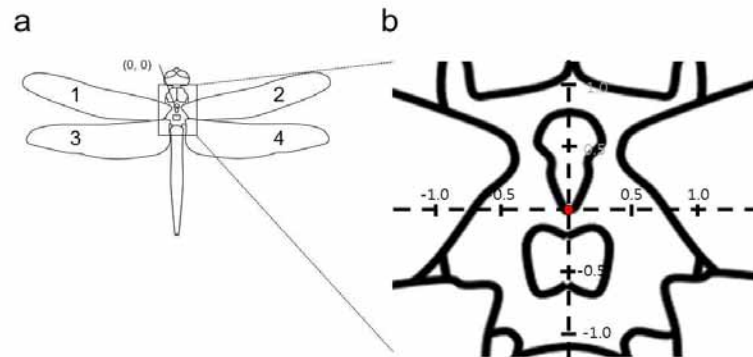
1) 자체 코딩한 MATLAB 코드를 이용하여 EMG Recording을 통계 처리하였다.
2) Threshold_low란 자극이 없을 때(Base)에도 발생하는 노이즈를 통계 처리에서 제외시키기 위한 함수로, 이 이상의 값에 해당하는 데이터만 통계 처리에 반영하였다.
3) Threshold_high란 Recording 중 비정상적으로 크게 발생하는 데이터, 즉 Threshold_high 값을 초과하는 값을 통계 처리에서 제외시키는 함수이다.
4) Threshold_low 값은 각 잠자리 당 Base Frequency가 10(±2.5) Hz가 되도록 지정하였다.
5) Threshold_high 값은 0.3으로 지정하였다.
6) 5초 동안 Threshold_low 값 이상의 데이터들을 연산해 자극을 주지 않았을 때의 Frequency와 최대 Amplitude, 자극을 줄 때의 Frequency와 최대 Amplitude를 구하였다.

나. Paired t-Test를 통한 유의미 검증

자극을 줄 때와 자극을 주지 않을 때의 평균과 표준 오차를 구하고 활동전위 신호 Frequency와 Amplitude의 유의미한 차이를 검증하였다.

III. 연구 결과

1. 전기 자극을 통한 날개 근육 신경망 Mapping

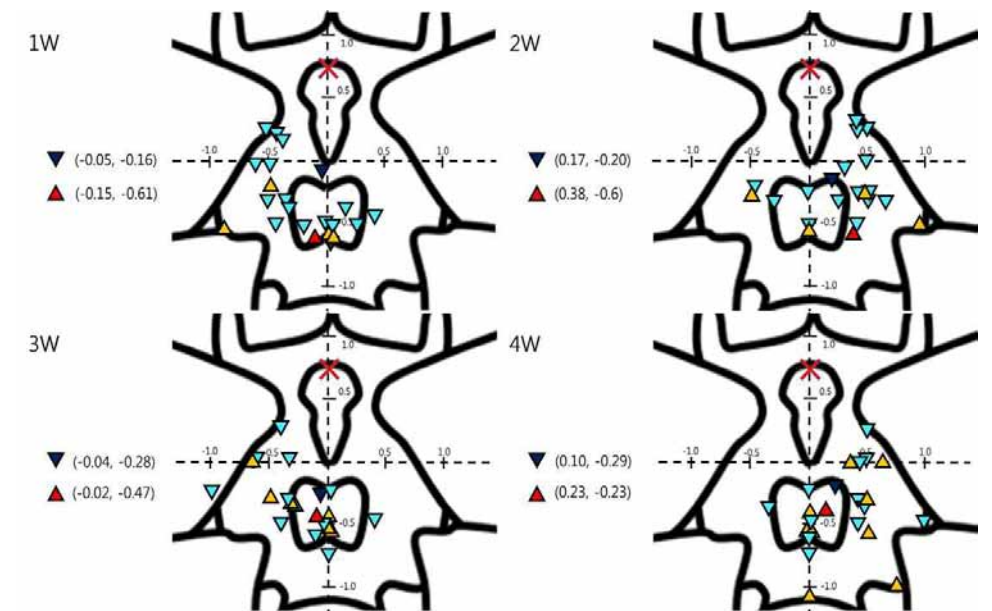


[Fig. 6] Atlas of dragonfly's body

- Numbering each dragonfly wings, shown over, for convenience in the analysis
- Setting the Starting point (Red Circle) of the body Atlas for Mapping of wing muscles of a dragonfly. Setting the center of dragonfly's joint between fore and hind wing as a starting point

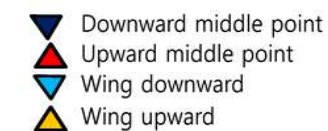
전기 자극을 통한 잠자리의 비행 운동을 조절하기 위해서는 날개 근육의 Mapping이 필수적이다. 왜냐하면 각 날개의 상승 및 하강을 담당하는 날개 근육 신경의 Mapping이 완료되어야만 원하는 날개 움직임을 조절할 수 있기 때문이다. 따라서 잠자리의 몸통을 임의적으로 위치를 정하여 전기 자극하고, 이로 인해 나타나는 날개 움직임을 모두 기록하여 잠자리 몸통 Atlas 위에서 근육의 경계를 파악하였다. 좌측 전방(1번), 우측 전방(2번), 좌측 후방(3번), 우측 후방(4번)과 같이 각 날개에 번호를 부여하여 분석에서 편의를 도모하였다([Fig. 6]-a). 이후 모든 잠자리에 대해 잠자리의 앞날개와 뒷날개를 구분 짓는 가슴마디의 중심을 Atlas의 원점으로 지정하였고, 크기가 다른 잠자리의 좌표를 정확성을 높이기 위하여 원점에서 가슴 끝마디의 길이를 기준으로 좌표 값을 나누었다([Fig. 6]-b).

Atlas를 정립한 뒤 임의의 좌표들에서 2, 1, 0.5 mA로 전기 자극을 하였을 때 각 날개의 상승 및 하강 움직임을 관찰하였다([Fig. 7]). 그 결과 1번 날개의 하강 운동을 유도한 근육의 위치는 평균 $(-0.05, -0.16)$, 상승 운동을 유도한 근육의 위치는 $(-0.15, -0.61)$ 로, 하강 운동을 유도한 근육의 위치가 상승 운동을 유도한 근육의 위치보다 0.45만큼 전방에 위치함을 알 수 있었다([Fig. 7]-a). 2번 날개의 하강 운동을 유도한 근육 위치는 $(0.17, -0.20)$, 상승 운동 위치는 $(0.38, -0.6)$ 로 1번 날개와 마찬가지로 하강 운동을 유도한 근육이 상승 운동을 유도한 근육보다 0.4만큼 전방에 위치하고 있었으며([Fig. 7]-b), 3번 날개의 하강 운동을 유도한 근육 위치는 $(-0.04, -0.28)$, 상승 운동을 유도한 위치 $(-0.02, -0.47)$ ([Fig. 7]-c), 4번 날개의 하강 운동을 유도한 근육의 위치는 $(0.14, -0.29)$, 상승 운동을 유도한 위치는 $(0.23, -0.23)$ ([Fig. 7]-d)로 3번과 4번 날개 모두 하강 운동을 유도한 근육이 상승 운동을 유도한 근육보다 각각 0.19, 0.06만큼 전방에 위치하고 있음을 발견하였다.



[Fig. 7] Result of mapped neural network of dragonflies' wings. Observing movement of the wings when give electric-stimulation on unselective coordinates.

- Indicating coordinates inducing rising or descending movement of left fore wing (1W)
- Indicating coordinates inducing rising or descending movement of right fore wing (2W)
- Indicating coordinates inducing rising or descending movement of left hind wing (3W)
- Indicating coordinates inducing rising or descending movement of right hind wing (4W)



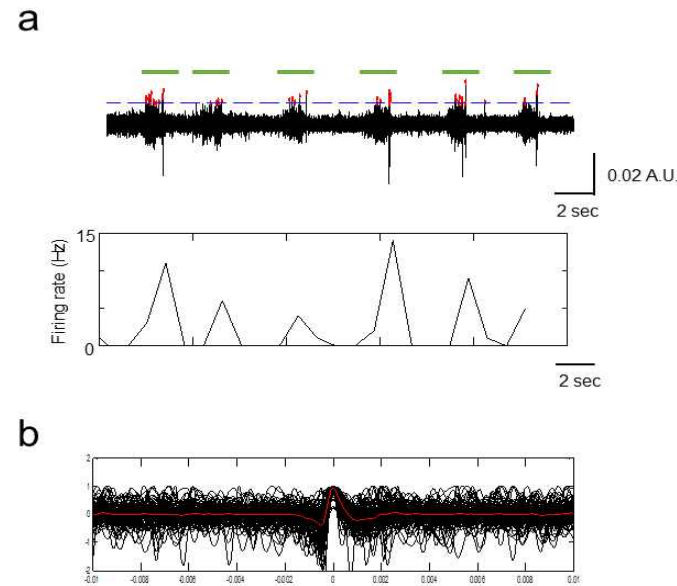
[Fig. 8] Marks for atlas

모든 날개의 하강 운동을 유도하는 근육은 상승 운동을 유도하는 근육에 비해 평균적으로 0.275 ± 0.09115 (paired *t*-Test, $p=0.028$)만큼 전방에 위치함을 알 수 있었고, 통계적으로 유의미하였다. 반면 상승 및 하강 운동 유도 근육 위치들의 내/외측 좌표를 비교해 보면 1번부터 4번 날개까지 하강 운동을 유도한 근육이 상승 운동 유도 근육에 비해 각각 0.1, -0.21, -0.02, -0.09 만큼 외측에 위치하여 평균적으로 -0.05 ± 0.0648 의 차이를 보였으며, 통계적으로 차이가 없었다(-0.05 ± 0.0648 , paired *t*-Test, $p=0.23$).

즉, 위 실험에서 우리는 전기 자극을 통해 각 날개의 상승과 하강을 담당하는 근육의 위치를 유추할 수 있었으며, 이를 Mapping을 위해 우리가 정립한 Atlas 위에 표시한 결과 하강 운동을 담당하는 근육의 위치가 상승 운동을 담당하는 근육의 위치보다 전방에 있음을 알 수 있었고, 내/외측의 차이는 보이지 않았다.

2. EMG Recording을 통한 날개 근육 생리학적 특징 규명

잠자리의 각 날개 근육의 Mapping 이후에 이를 효율적으로 조절하기 위해선 EMG의 생리학적 특징을 이해한 뒤 이를 모방하여 전기 자극을 주어야 한다. 그러므로 우리는 'Neural Spiker Box'를 통해 Mapping을 통해 알아낸 날개 근육 위치 근처에서 EMG Recording을 실시하였다.



[Fig. 9] Example of analyzed EMG Recording by MATLAB

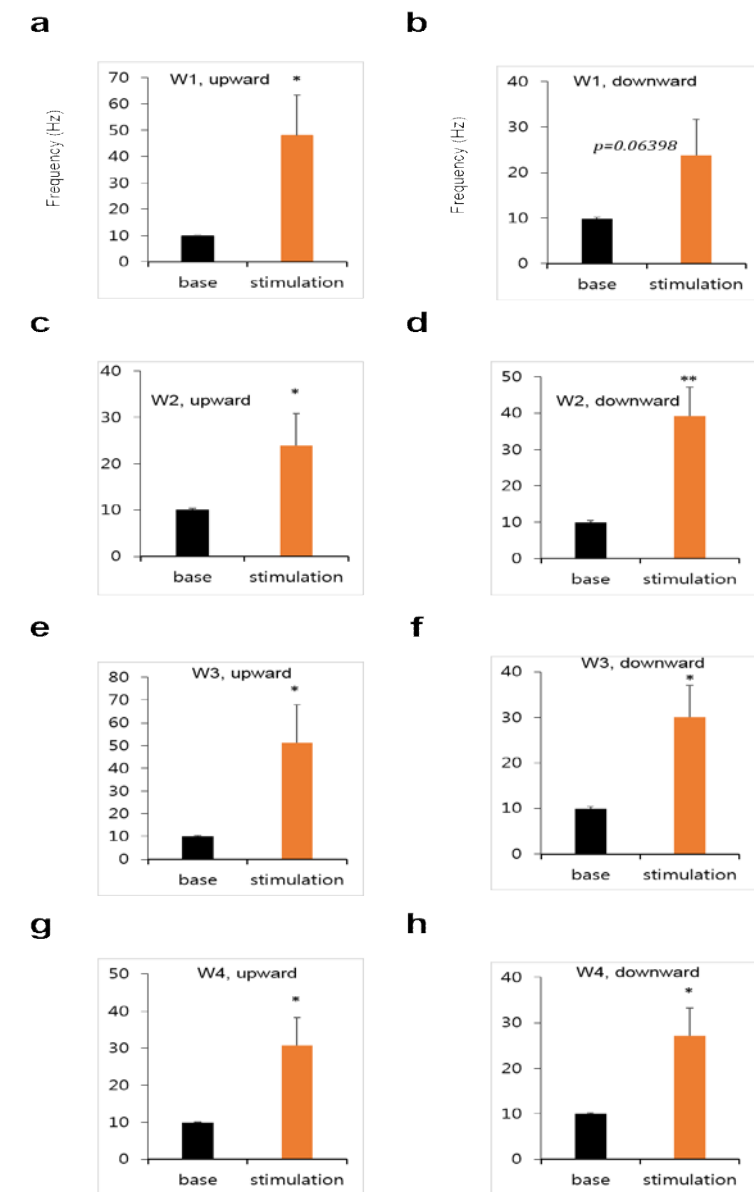
- a. Typical signal of spikes(black line).
Only spikes over threshold value(Blue dotted line) are admitted as spike(Red dots). Firing Rate increase when wings move(Green line).
b. Average traces of spikes.
Decided overall shape of spikes by calculating the average of traces of spikes over threshold value(Unit of x axis : ms. Unit of y axis: Normalization by maximum to spikes)

우리는 날개를 인위적으로 움직이고 있을 때와 아무런 자극을 가하지 않았을 때의 차이를 비교하면, 인위적으로 자극한 날개의 움직임에 모방하기 위한 최적의 생리적 조건을 잡을 수 있을 것이라 가정하고 실험하였다. 따라서 위의 근육 Mapping 실험에서 얻은 각 날개의 상승 및 하강 운동을 담당하는 좌표 근처에 EMG Recording 전극을 삽입하고 날개를 인위적으로 상승, 하강 운동 시키며 EMG 활성을 측정하였다([Fig. 9]-a). 여기서 우리는 인위적인 날개 상승, 하강 운동을 일으킬 때 EMG 활성이 증가함을 알 수 있었는데, 이를 정량하기 위해 각 잠자리 별로 역치 값을 설정하여 스파이크를 감지하였다([Fig. 9]-a, 위 패널).

감지된 스파이크들의 활동 빈도를 정량하였을 때, 인위적인 날개 운동을 유도하고 있을 경우 빈도가 증가함을 확인할 수 있었다([Fig. 9]-a, 아래 패널). 본 실험에서 1 ms 이하로 빠르게 나타나는 피크는 실험에서 발생한 노이즈로서, 각 개별 스파이크의 형태를 파악한 뒤 정량에서 제거하였다([Fig. 9]-b).

잠자리 날개의 인위적 운동 유도 시 EMG 활성이 증가함을 확인 한 후 정확한 생리적 특징을 규명하기 위해 활동 전위의 Frequency 변화를 관찰하였다([Fig. 10]). 그 결과, 1번 날개의 상승 운동을 유도하는 근육의 EMG는 정상시 5.89 Hz에서 상승 운동을 유도할 경우 34.09 Hz로 활성빈도가 유의미하게 증가하였다([Fig. 10]-a, *paired t-Test*, $p=0.029$). 1번 날개의 하강 운동을 유도하는 근육의 EMG는 평균 5.892 Hz에서 19.53 Hz로([Fig. 10]-b, *paired t-Test*, $p=0.06$), 2번 날개의 상승 운동 EMG는 5.6 Hz에서 10.4 Hz

([Fig. 10]-c, *paired t-Test*, $p=0.03$), 하강 운동 EMG는 6.5 Hz에서 29.9 Hz([Fig. 10]-d, *paired t-Test*, $p=0.029$), 3번 날개의 상승 EMG는 5.32 Hz에서 29.3 Hz([Fig. 10]-e, *paired t-Test*, $p=0.03$), 하강 EMG는 5.3 Hz에서 26.2 Hz([Fig. 10]-f, *paired t-Test*, $p=0.008$), 4번 날개의 상승 EMG는 6.6 Hz에서 19.5 Hz([Fig. 10]-g, *paired t-Test*, $p=0.033$), 하강 EMG는 6.7 Hz에서 22.7 Hz([Fig. 10]-h, *paired t-Test* $p=0.02$)로 증가함을 확인할 수 있었다.



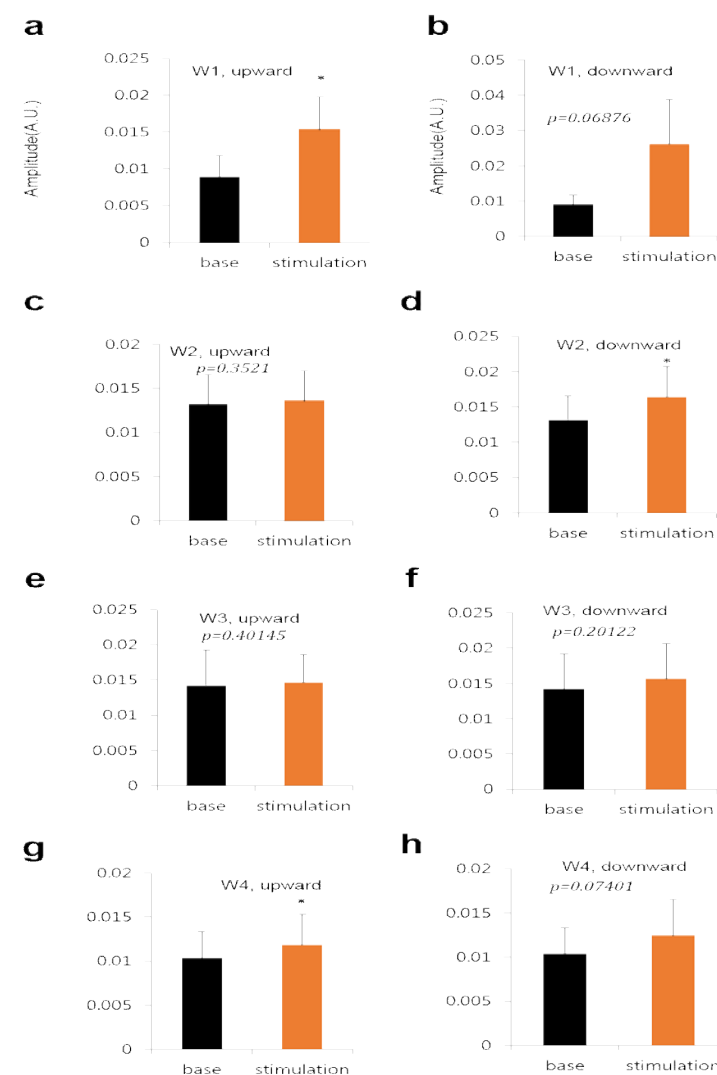
[Fig. 10] Changes in frequency of each wing's spikes(*paired t-Test*, * $p \leq 0.05$, ** $p \leq 0.01$)

즉, 1번 날개의 하강 운동을 제외하고 모든 날개의 상승 및 하강 운동에서 EMG가 증가함을 확인할 수 있었으며 이는 각 근육이 날개 운동에 작동한다는 근거이다. 정량하게 되면 각 날개의 정상시 EMG 활성은 5.99 ± 0.2 Hz이며, 운동 시 EMG 활성은 24.07 ± 2.7 Hz로 증가하게 된다는 것을 발견하였다. 이

는 잠자리의 날개 운동을 모방하기 위한 전기 자극의 최적 조건으로 판단된다.

EMG 활동 전위의 크기 역시 정량하였다(Fig. 11). 그 결과 1번 날개의 상승 운동 때 평균 0.008에서 0.015으로(Fig. 11]-a, *paired t-Test*, $p=0.35$), 하강 때 평균 0.008에서 0.02로(Fig. 11]-b, *paired t-Test*, $p=0.068$), 2번 날개 상승 때 0.013에서 0.013으로(Fig. 11]-c, *paired t-Test*, $p=0.35$), 하강 때 0.013에서 0.016 으로(Fig. 11]-d, *paired t-Test*, $p=0.046$), 3번 날개 상승 때 0.014에서 0.014로(Fig. 11]-e, *paired t-Test*, $p=0.401$), 하강 때 0.014에서 0.014로(Fig. 11]-f, *paired t-Test*, $p=0.201$), 4번 날개 상승 때 0.019에서 0.011로(Fig. 11]-g, *paired t-Test*, $p=0.015$), 하강 때 0.01에서 0.012로(Fig. 11]-h, *paired t-Test*, $p=0.07$)로 변화함을 관찰하였다. 비록 1번 상승, 2번 하강, 4번 상승 운동 시 EMG Amplitude의 미약한 증가가 있지만 그 차이는 미미하며 대부분의 경우 날개 운동 유도 시 Amplitude의 변화는 없다는 것을 알 수 있다.

즉, 날개 운동 유도 시 EMG의 Amplitude는 평상시 평균 0.012 ± 0.0008 A.U.이며, 날개 운동 시 0.015 ± 0.0015 A.U.임을 확인하였고, 이후 날개 움직임 모방을 위한 최적의 전류 자극 세기에 반영될 수 있다.



[Fig. 11] Changes in amplitude of each wing's spikes (*paired t-Test*, $*p<0.05$, $**p<0.01$)

IV. 결론

본 연구의 목적은 안정적이고 유연한 비행 운동이 가능한 잠자리의 날개 근육을 전기자극하여 원하는 비행을 가능케 하는 사이보그 개발의 이론적 바탕을 마련하는 것이었다. 우리가 얻은 결과는 크게 두 가지 의의가 있다.

첫 번째는 다양한 종과 다양한 크기의 잠자리를 포괄할 수 있는 Atlas를 도입하여 각 날개의 상승, 하강 운동을 담당하는 근육을 Mapping했다는 점이다. 본 연구에서 도입한 Atlas는 다양한 종에서 공통으로 보이는 형태학적 부위를 원점으로 하며, 기준 Atlas를 만들기 위해 역시 공통으로 존재하는 형태학적 부위를 잡아 원점과의 거리를 1로 두어 잠자리 크기에 상관없이 좌표를 알 수 있도록 하였다. 즉, 이후 야생의 잠자리를 포획하여 사이보그 제작에 들어갈 때 전극을 매설할 위치를 쉽게 지정할 수 있다. 우리가 얻은 날개 근육 Mapping 결과는 기존 잠자리 날개 연구와 동일한 결과를 보인다. 즉, 전방 날개는 몸통 전방에 위치하며 후방 날개는 몸통 후방의 근육이 조절한다. 다만 날개 상승 운동을 일으키는 근육과 하강 운동을 일으키는 근육의 차이는 기존 알려진 보고와 차이를 보였다. 기존 보고에 따르면 상승 운동을 일으키는 날개 근육은 Medial쪽에, 하강 운동을 일으키는 날개 근육은 Lateral쪽에 위치한다고 알려져 있는데 본 연구 결과에서는 Medial, Lateral의 차이는 없으며 하강 운동을 일으키는 근육이 전방에, 상승 운동을 일으키는 근육이 후방에 위치해 있다. 이 결과는 본 연구에서 진행한 근육의 기능적 Mapping과 더불어 잠자리 몸통의 형태학적 Mapping도 복합적으로 고려하여 결론을 내려야 할 것이다.

두 번째는 상승 및 하강 운동 시 날개 근육의 생리적 활성을 측정했다는 것이다. 이는 결국 전기 자극을 통한 날개 조종 시 원하는 날개각도 및 날갯짓을 만드는 이론적 근거가 될 것이다. 본 실험에서 정확한 날개의 각도를 조절하지 않았기 때문에 편차가 존재하지만 각 날개의 평상시 EMG 활성은 5.99 ± 0.2 Hz이며, 운동 시 EMG 활성은 24.07 ± 2.7 Hz로 나타난다는 것을 측정하였고, Amplitude는 평상시 평균 0.012 ± 0.0008 A.U.이며, 날개 운동 시 0.015 ± 0.0015 A.U.인 것을 확인하였다. 즉, 해당 조건에 부합하는 전기 자극을 우리가 본 실험의 근육 Mapping에서 밝혀낸 좌표에 줄 경우, 인위적인 날개의 움직임을 그대로 모방할 수 있을 것이다.

또한, 본 연구는 기존 곤충을 묶어놓고 비행 운동을 관찰하여 비행 Mechanism을 이해하는 수동적인 방식에서 벗어나 잠자리의 날개 근육을 Mapping하고 생리적 특성을 이해함으로써 능동적인 비행 Mechanism을 이해하는데 기여하였고, 나아가 안정적이고 효율적인 곤충 사이보그 개발에 바탕이 될 것이며 또한 향후에 잠자리를 이용한 곤충 사이보그는 지진이나 해일이 발생한 재난 현장에서의 인명 탐사, 오지에서의 자원 및 지형 탐사, 군사 지역 정찰 등의 분야에서 사용될 것이다.

V. 참고문헌

- [1] 국가 생물 종 지식 정보 홈페이지. <http://www.nature.go.kr/> (검색일: 2015.06.04.)
- [2] 김원갑, 변도영, 박훈철 (2008). Numerical Study on the Effects of Corrugation of the Gliding Dragonfly Wing. *Journal of the Korean society for Aeronautical and space Sciences*, 36(9), 835-840.
- [3] 한국의 잠자리 홈페이지. <http://www.jasa.pe.kr/> (검색일: 2015.05.16.)
- [4] Xie, C. M., & Huang, W. X. (2015). *Vortex interactions between forewing and hindwing of dragonfly in hovering flight*. Sino-French Engineer School, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China.
- [5] Sato, H., Berry, C. W., Casey, B. E., Lavella, G., Yao, Y., Vandenbrooks, J. M., & Mahabiz, M. M. (2008). A cyborg beetle: insect flight control through an implantable, tetherless microsystem. In *Micro Electro Mechanical Systems*. Department of Electrical Engineering and Computer Science, University of Michigan, USA.
- [6] Hu, Z., Deng, X. (2009). *Aerodynamic Effect of Forewing-Hindwing Interactions in Hovering and Forward Flight of*

Dragonfly. Department of Mechanical Engineering, University of Delaware, 126 Spencer Laboratory, Newark, DE 19716, USA.

- [7] Sato, Ho., Berry, C. W., & Maharbiz, M. M. (2008). *Flight control of 10+ gram insects by implanted neural stimulators*. Electrical Engineering and Computer Science. University of California, Berkeley, CA, USA.
- [8] Godoy-Diana, R., Jain, P., Centeno, M., Weinreb, A., & Thiria, B. (2015). Four-winged flapping flyer in forward flight. In *Selected of Computational and Experimental Fluid Mechanics*.147-158.
- [9] Pringle, J. W. S. (1975). *Insect Flight*, 52, Oxford Biology Reader (Head ed.). Oxford: Oxford University Press
- [10] Sato, H., Peeri, Y., Baghoomian, E., Berry, C. W., & Maharbiz, M. M. (2009). *Radio-controlled cyborg beetles: A radio- frequency system for insect neural flight control*. Electrical Engineering and Computer Science, University of California, Berkeley, CA, USA.
- [11] Premachandran, S., & Giacobello, M. (2010). *The effect of wing corrugations on the aerodynamic performance of low-Reynolds number flapping flight*. Air Vehicles Division, Defence Science and Technology Organization, 506 Lorimer St, fishermans Bend VIC 3207, Australia.

| 연구진 |

정석영 (Jung Seokyeong, 충남과학고등학교, bombaram0790@naver.com), 주저자

이주은 (Lee Jueun, 충남과학고등학교, dlwndms425@daum.net), 교신저자

박하민 (Park Hamin, 충남과학고등학교, haminpark0519@hanmail.net)

이정선 (Lee Jeongseon, 충남과학고등학교, raqjstns@naver.com)

홍용권 (Hong Yongkwon, 충남과학고등학교, ghddydrnjs1@daum.net)

지도교사 : 유선아 (Yu Seona, 충남과학고등학교, 생물학, seona93@hanmail.net)

지도조교 : 신안나 (Shin Ahnna, 한국과학기술원(KAIST) 생명과학과, hejan1@kaist.ac.kr)

대기 오염 물질이 구름입자 성장 과정에 미치는 영향 탐구

임승현 · 윤가희 · 서주형 · 이태동 — 대구일과학고등학교

Study of Effects of Air Pollution on the Growth of Cloud Condensate

Lim Seunghyeon · Yun Gahui · Seo Juhyung · Yi Taedong - Daegu Il Science High School

ABSTRACT

Increasing aerosol concentration in the atmosphere due to urbanization is considered to act as a condensation nucleus inside clouds causing rainfall and elevated air currents near buildings. Air pollutants are the main source of aerosol. Aerosol is not only related to air pollution, but also to weather, as it affects cloud development. Aerosol acts as a condensation nucleus, a seed that helps vapor clump together to form clouds. Therefore, if the concentration of aerosol increases, the probability of cloud formation increases. In this study, we have found that air pollutants affect the solution effect and curvature effect, acting as a better condensation nucleus than NaCl, a natural condensation nucleus. We found this by measuring the surface tensions and performing condensation experiments. Therefore, it is speculated that aerosol also plays an important role in the climate change model. In this study, by examining the properties of aerosol, we were able to better understand the properties of air pollutants. Also, by examining how air pollutants affect the growth of cloud droplets from analyzing the rain of different parts of certain regions, we investigated how air pollutants affect the formation of smog and clouds. But, further research to relate precipitation efficiency is necessary.

Key words:

Aerosol, Surface Tension, Condensation Nucleus, Curvature Effect, Solute Effect

국문초록

도시화가 진행되면서 증가하는 에어로졸은 구름 속에서 응결핵 역할을 해서 비를 많이 뿌리고 고층빌딩 주변엔 강한 상승기류를 잘 생기게 하여 구름 생성을 증가시킬 것으로 여겨지고 있다. 대기 중에 주로 에어로졸 역할을 하는 것은 대기 오염 물질들이다. 에어로졸은 대기 오염 뿐만 아니라 구름형성에 영향을 미치기 때문에 각종 대기 현상과도 관련이 있다. 에어로졸은 상공에서 수증기를 뭉치게 해 구름으로 성장시키는 씨앗이 되는 응결핵 역할을 하기도 한다. 따라서 에어로졸의 농도가 짊어지면 구름의 형성 가능성이 높아진다. 용액의 종류에 따른 표면장력 측정과 응결실험을 통해 대기 오염 물질이 응집효과와 곡률효과에 영향을 주어, 자연발생 응결핵인 NaCl보다 응결핵으로의 역할을 더 잘 수행한다는 것을 밝혀냈다. 따라서 에어로졸은 기후 변화 모델에도 중요한 역할을 하게 된다. 본 연구에서는 에어로졸의 특성 분석을 통해 대기 오염 물질의 특성을 파악하고, 대기 오염 물질이 구름 미세 물리과정에 미치는 영향을 지역에 따른 강수에 포함된 이온들을 통해 탐구함으로써 구름 및 안개(스모그) 형성에 어떤 영향을 주는지 연구하였다. 하지만 이 연구를 강수효율과 연관 짓기 위해서는 더 많은 연구가 필요하다.

중심어 :

구름 미세 물리 과정, 에어로졸, 곡률효과, 응집효과, 응결핵

I. 서론

도시화가 진행되면서 증가하는 에어로졸은 구름 속에서 응결핵 역할을 해서 비를 많이 뿌리고 고층빌딩 주변엔 강한 상승기류를 잘 생기게 하여 구름 생성을 증가시킬 것으로 여겨지고 있다. 대기 중에 주로 에어로졸 역할을 하는 것에는 대기 오염 물질들이 있다. 에어로졸은 대기 오염 뿐만 아니라 구름형성에 영향을 미치기 때문에 각종 대기 현상과도 관련이 있다. 에어로졸은 상공에서 수증기를 뭉치게 해 구름으로 성장시키는 씨앗이 되는 응결핵 역할을 하기도 한다. 이 때문에 에어로졸의 농도가 짊어지면 구름의 형성 가능성이 높아진다.

본 연구에서는 에어로졸의 특성 분석을 통해 대기 오염 물질의 특성을 파악하고 대기 오염 물질이 구름 및 안개(스모그) 형성에 미치는 영향에 대해 탐구하고자 한다. 이 탐구 과정을 통해 과학적으로 문제에 접근하는 방법을 익히고 문제를 해결해 나가는 탐구 능력 및 문제 해결 능력을 높인다.

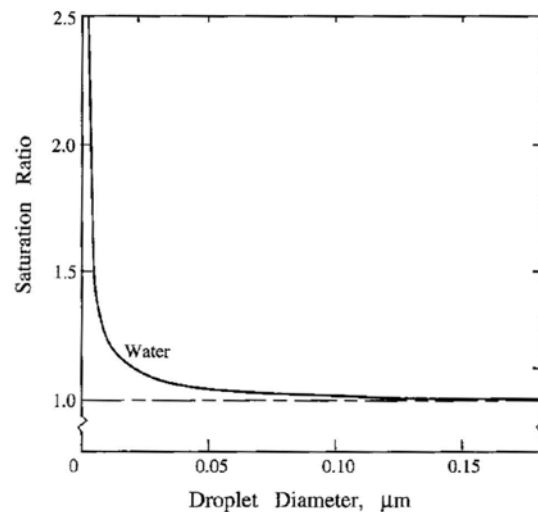
II. 이론적 배경

1. 수적의 성장

가. 표면장력

표면장력이란 ‘액체의 자유표면에서 표면을 작게 하려고 작용하는 장력’이다. 수증기가 응결해서 물방울이 생기는 과정은 공기 중의 수증기 분자가 충돌해서 결합하는 것이다. 이 물방울에 수증기가 더 들어가면 표면적이 증가하므로 표면장력에 의해 수증기 분자가 들어가기 힘들다. 구형의 물방울의 부피의 변화와 표면적의 변화에 대한 관계식은 $\frac{\Delta A}{\Delta V} = \frac{2}{r}$ 가 된다. 즉, 물방울이 작을수록(반지름이 작을수록) 분자는 그 물방울에 들어가기 힘들다.

한편 수증기압을 e , 평면에 대한 포화수증기압을 e_s 라 할 때, 과포화도는 $\frac{e - e_s}{e_s} \times 100$ 으로 표현되는데 [Fig. 1]에서 작은 물방울일수록 과포화도가 높지 않다면 평형상태로는 존재할 수 없다는 것을 알 수 있다.



[Fig. 1] Saturation ratio S as function of droplet size for pure water(From Seinfeld and Pandis, 2006).

곡률이 큰(크기가 작은) 물방울이 곡률이 작은(크기가 큰) 물방울보다 증발이 잘 일어나는 현상을 곡률효과라 한다. 곡률이 큰 물방울 표면에 있는 물 분자와 접하고 있는 물 분자의 수가 편평한 표면을 가진 수면 위에 있는 물 분자와 접하고 있는 물 분자의 수보다 적으므로 곡률이 큰 물방울의 표면에 존재하는 물 분자는 쉽게 증발하게 된다. 결국 큰 물방울과 작은 물방울이 공존하면 작은 물방울에 대하여 대기의 상태가 포화일 때 큰 물방울에 대하여는 과포화 상태가 되기 때문에 큰 물방울은 커지면서 작은 물방울은 사라지게 된다.

대부분의 응결핵은 흡습성이 강하다. 흡습성 응결핵이 물에 녹게 된다면 물방울은 순수한 물이 아닌 용액이 된다. 일반적으로 화학물질이 녹은 물의 포화수증기압은 순수한 물보다 낮아진다.

나. 핵생성(nucleation)

핵생성(nucleation)이란 물 분자들이 더욱 정렬된 상태로 놓이게 되는 것을 말한다. 핵생성은 두 가지로 나뉘는데 균질핵화와 비균질핵화가 있다. 균질핵화는 순수한 그 물 자체로 물방울을 이루는 것을 말하고 비균질핵화는 외부의 물질이 그 중심이 되어 물방울을 이루는 것을 말한다.

$$R_c = \frac{2\sigma_{vl}}{n_l k_B T \ln(e/e_s)} \quad \dots\dots\dots (1)$$

σ_{vl} : 표면장력

μ_v : 기체 한 분자당의 깃스 자유에너지

μ_l : 액체 한 분자당의 깃스 자유에너지

n_l : 한 방울 당 들어있는 분자 수

$\mu_v - \mu_l = k_B T \ln(e/e_s)$

e : 증기압

k_B : 볼츠만 상수 $(1.380622 \pm 0.000043) \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$

R_c 란 한계 반지름으로써 물방울이 증발하지 않고 존재할 수 있는 최대한의 반지름이다. 이때 R_c 는 식 (1)에 따라 대기의 온도의 영향을 적게 받고 과포화 할수록 물방울의 초기 최소크기가 작아지게 된다. 물에 녹을 수 있는 물질이 응결핵으로써의 역할을 하게 되면 더욱 핵생성이 잘 일어나게 된다. (포화 수증기압)/(액체의 수증기압)이 (포화 수증기압)/(순수한 물의 수증기압)보다 작아지면 e/e_s 가 증가하게 된다. 그럼 R_c 가 줄어들고 핵생성이 더 쉽게 일어나게 된다. 첫 물방울은 가장 큰 CCN에서 일어난다는 것을 알고 있다. 따라서 물에 대한 용해성이나 CCN의 크기가 핵생성에 영향을 준다.

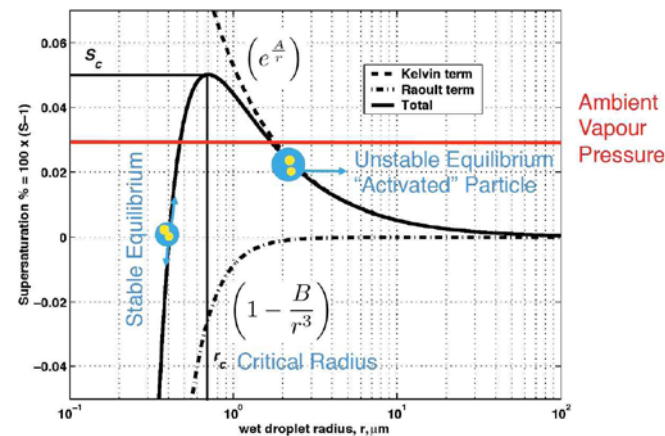
다. Köhler theory

실제 대기는 깨끗하지 않지만 자연적이고 인공적인 에어로졸을 포함한다. Köhler theory는 평형 열역학에 기반하여 수증기 응결과정과 구름방울 형성과정을 설명한다. 이는 곡률효과와 라울의 법칙(용해되기 위한 포화수증기압에 관계)에 의거하여 포화수증기압의 변화를 설명하는 Kelvin effect를 포함하는 이론이다.

$$e_s^{sol}(r) = e_s(\infty) \left(1 + \frac{A}{r} - \frac{B}{r^3}\right) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$\frac{A}{r}$: Kelvin term(곡률효과) $\frac{B}{r^3}$: Raoul term(용질효과)

아래의 [Fig. 2]는 식 (2)에 관련되는 그래프로 수적의 형성 조건을 알 수 있는 그림이다.



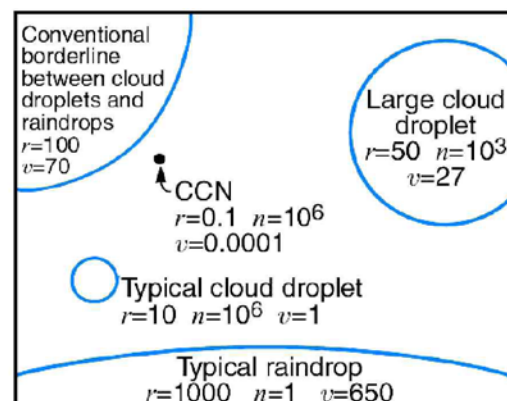
[Fig. 2] Köhler curve.(From McFiggans et al. (2006).)

용액의 증기 압력 내림 현상은 용질 분자가 용매 분자의 증발을 방해하기 때문에 일어나는 현상이므로, 만일 용액의 농도가 증가하여 용질 분자가 많아진다면 용매 분자의 증발을 더 많이 방해할 것이다. 즉, 용액의 농도가 증가하면 증기 압력도 더 많이 떨어질 것이다. Raoul은 실험을 통하여 용액의 증기 압력 내림은 용액 속에 녹아 있는 용질의 물분율에 비례함을 밝혀냈다. 이것을 라울의 법칙(Raoult's law)이라고 한다.

$p_i = p_i^o x_i$ (p_i : 용액에 있는 용매의 증기압, p_i^o : 순수한 용매의 증기압, x_i : 용액에 있는 용매의 물분율)

2. Atmospheric Aerosols(대기 에어로졸)

에어로졸의 기원에는 지표에서 불어올라간 토양입자, 해면의 물보라에서 형성된 해염입자, 화산분출에 의해 대기 중에 분출된 입자, 인간 활동에 수반되어 방출된 오염입자, 대기 중의 미량가스(아황산가스, 염소, 암모니아, 오존, 산화질소 등)가 있다. 또한 핵이 더 클수록 그 주변의 막에 의해 형성된 방울의 유지가 더 쉽기 때문에 에어로졸 입자가 더 클수록 자연적 구름 속에 물방울 형성을 위한 장소는 더 많다. 밑의 [Fig. 3]에서는 응결핵, 수적과 강수입자의 크기, 종단속도를 비교하고 있다.

[Fig. 3] Typical properties of aerosol, cloud droplets and raindrops: r is the radius in micrometers, n the number per liter of air, and v the terminal fall speed in centimeters per second(Wallace and Hobs, 2006; adapted from MacDonald, 1958).

III. 연구 방법 및 절차

1. 대기 오염 물질의 표면장력 측정

표면장력은 식 (1)에서 볼 수 있듯이 수적의 한계반지름(critical radius)에 영향을 미치는 주요한 요인이 된다. 이는 수적의 곡률효과와 미치는 요인이라고 볼 수 있다. 따라서 대기 오염 물질이 곡률효과(Curvature effect)에 미칠 수 있는 영향을 탐구하기 위해 대표적인 오염 물질인 HNO_3 , NH_4OH , H_2SO_4 용액의 표면장력을 측정하고, 증류수(Distilled water), 대표적인 자연발생 응결핵인 NaCl과 비교하기 위해 KCl 용액의 표면장력을 측정하였다. 이때, [Fig. 4]와 같이 0.5 M, 1.0 M, 1.5 M, 2.0 M의 HNO_3 , NH_4OH , H_2SO_4 , NaCl, KCl의 용액을 제조하고 표면장력 측정기([Fig. 5])로 용액의 농도를 달리하면서 표면장력을 측정함으로써 농도별 표면장력의 변화를 알아보았다.



[Fig. 4] Solutions made to measure surface tension.



[Fig. 5] Surface tension measuring machine.

2. 강수 중에 용해된 대기 오염 물질의 성분 분석

대기 오염 물질(미세먼지)은 연소 작용에 의해 발생되므로 황산염(sulfate), 질산염(nitrate), 암모니아 등의 이온 성분과 금속화합물, 탄소화합물 등의 유해물질로 이루어져 있으며 대도시의 미세먼지는 대부분 자동차 배기가스에서 나온다. 강수의 세정효과를 이용하여 빗물의 화학적 구성 성분을 분석하면 대기 중의 이러한 성분들을 분석할 수 있다. 그러므로 빗물의 성분을 분석하여 실제 황산염, 질산염, 암모니아 성분이 얼마나 많은지 확인해 보기로 하였다. 대기 오염도가 높을수록 수적 형성 시 용액의 농도가 높아질 확률이 커지므로 구름 미세물리 과정에서 용질효과(Raoult term)와 밀접한 관련을 가지고 있으며, 영향을 준다고 한다.

가. 강수 수집

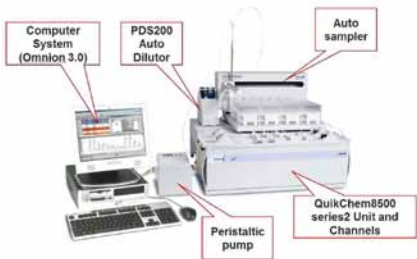
강수 수집은 우리학교를 비롯하여 오염도가 높은 곳으로 예상되는 대구의 본동(교통량 많음), 황금동(교통량 많음), 성서지역(공단지역)과 오염도가 낮을 것으로 예상되는 지묘동(팔공산 인근)에서 각각 채취하였다([Fig. 6]).

나. 강수 성분 분석 장비

학교에 있는 자동 수질 분석기([Fig. 7])를 통해 분석하였다. 일반적으로 에어로졸이라고 하는 물질들의 성분인 질산성이온, 암모늄이온의 농도를 측정하였다. [Fig. 6]에서 같은 날짜에 강수를 수집하였다. [Fig. 7]에서 볼 수 있듯이 수질 분석기는 오른쪽의 Autosampler를 이용하여 수집한 결과를 왼쪽의 컴퓨터 시스템이 해석한다. 이때, Autosampler는 검정곡선을 찾기 위해 시약을 희석시켜 희석시킨 용액의 흡광도를 모두 측정한다. 그 후 측정하고 싶은 물질의 흡광도를 측정한다. 컴퓨터 시스템을 통해서 검정곡선을 그리고 그 검정곡선에 농도를 알고 싶은 시료의 흡광도 값을 대입시켜 농도를 구해준다.



[Fig. 6] Collected rainfall sample.



[Fig. 7] Automatic chemistry analyzer.

1) 측정 원리 분석 항목

가) 질산염 이온(NO_3^-)

필터(filter)로 거른 샘플을 카드뮴-구리환원 칼럼에 통과시킴으로 해서 질산성질소(NO_3^-)가 아질산성질소(NO_2^-)로 환원된다. 이 아질산성질소(환원된 질산성질소와 기존의 아질산성질소의 합)의 양은 NED와 sulfanilamide와 반응하여 생성된 발색물을 흡광도 540 nm파장에서 측정한다. <Table 1>은 수질 분석기에서 사용될 질산염 이온들과 반응할 시약들이다.

<Table 1> Synthesis of nitrate analytical reagents

Sodium Hydroxide	250 mL flask	NaOH		DI water	매우 뜨거우므로 천천히 섞어줌
	DI water	150 g		표선 채움	
Ammonium chloride buffer	1 L flask	Ammonium chloride (NH_4Cl)	Na2 EDTA. $2\text{H}_2\text{O}$	DI water	시약1 5ml 첨가해 pH를 8.5에 맞춤
	DI water			DI water	
Sulfanilamide color reagent	800 mL	85.0 g	1.0 g	표선 채움	30분 이상 교반
	85% H_3PO_4	sulfanilamide	NED	DI water	
Diluent for Preserved Standards	600 mL	100 mL	40.0 g	1.0 g	표선 채움
	1 L flask	Sulfuric Acid(H_2SO_4)		DI water	
	DI water	2 mL		표선 채움	

나) 암모니아 이온(NH_4^+)

암모니아는 alkaline phenol과 sodium Hypochlorite와 반응하여 indophenol blue를 형성한다. 반응의 감도를 높이기 위해 Sodium nitroprusside(Nitroferricyanide)를 첨가한다. 630 nm에서 최종 발색된 반응물 인도페놀(indophenol blue)의 흡광도를 측정한다. <Table 2>는 수질 분석기에서 사용될 암모니아 이온들과 반응할 시약들이다.

<Table 2> Synthesis of ammonia nitrogen analytical reagents

Sodium phenolate	1 L flask	88% liquefied phenol($\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$)	NaOH	DI water	보존기간 3-5일
	DI water				
Sodium hypochlorite	600 mL	88 mL	32 g	표선 채움	보존기간 1일
	0.5 L flask	5.25% Sodium hypochlorite(NaOCl)		DI water	
Buffer	800 mL	250 mL		표선 채움	
	1 L flask	disodium ethylenediamine tetraacetic acid(Na_2EDTA)	NaOH	DI water	
Sodium Nitopruesside	600 mL	50.0 g	5.5 g	표선 채움	
	1 L flask	Sodium Nitopruesside		DI water	
	DI water				
		3.5 g		표선 채움	



[Fig. 8] Making reagent.



[Fig. 9] Synthesized ammonia nitrogen analytical reagents.

[Fig. 8]은 시약 제조 과정, [Fig. 9]는 제조한 시약들이다.

2) 시료 분석

가) 시약과 원하는 농도의 Standard를 Method에 따라 준비한다.

나) 반응관(Manifold)을 장비에 설치한다.

다) DI water를 모든 시약라인에 흘려보내주어 System에서 물이 새지 않는지 확인하고 Baseline의 흐름이 일정 해지면 각각의 시약라인에 시약을 흘려보낸다.

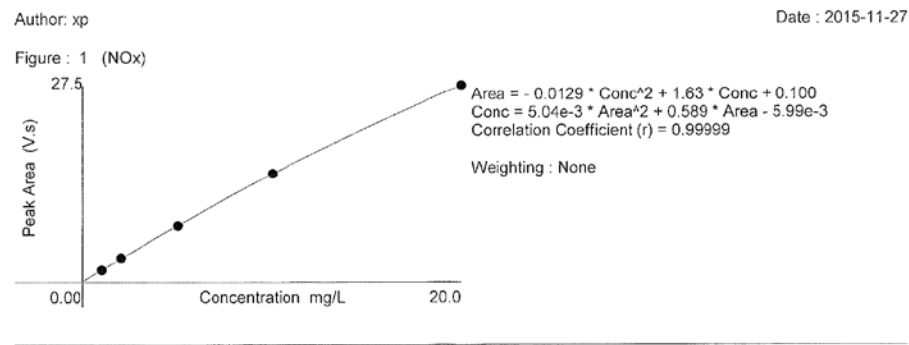
라) 분석할 시료와 Standard를 Autosampler에 설치한 후 시료에 대한 정보를 Software(Omnion 3.0 프로그램)에 입력해준다.



[Fig. 10] Reagent and standard installed in the Autosampler.

[Fig. 10]은 반응 시약과 표준 용액이 Autosampler에 설치되어 있는 모습이다.

마) Calibration 곡선을 그린 후 생성된 Calibration 곡선([Fig. 11])을 가지고 샘플을 측정한다(단, Calibration 곡선의 상관계수(correlation coefficient)가 0.9990보다 작으면 재분석하여야 한다.).



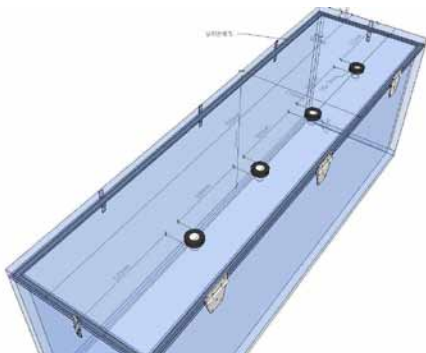
[Fig. 11] Calibration curve of NO_x.

다. 오염물질의 농도에 따른 증발량 실험

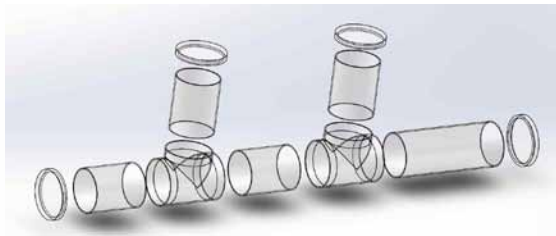
- 1) 증류수, 0.5몰과 2몰의 암모니아, 질산, 황산, 소금물 200 mL를 제조한다.
- 2) 증류수, 0.5몰과 2몰의 암모니아, 질산, 황산, 소금물을 같은 비커의 질량 포함 100 g이 되게 담는다.
- 3) 후드에 비커 10개를 동시에 넣고 50분, 100분 후에 질량을 측정했다.
- 4) 변화된 질량을 관찰하였다.

3. 응결실험

대기 오염 물질의 종류에 따라 수적의 형성에는 차이가 있을 것이다. 즉 응결핵으로써의 효과가 좋은 대기 오염 물질이 있을 것이고, 상대적으로 응결핵으로써 작용이 약한 물질이 있을 것이다. 이것에 대해 알고자 우리는 인위적인 구름을 만들어, 비취주고 있던 빛의 조도 하락을 통해 구름이 어느 정도 형성되었는지 알고자 한다. [Fig. 12]와 같이 설계도를 제작하고 [Fig. 13]과 같이 장치를 제작하였다. 장치의 한쪽 끝에 레이저포인트를 설치하고 그 반대편에 조도계를 설치한다. 장치 상단의 구멍을 통해 기압계와 온도계를 설치하고 구멍을 통해 실험할 물질을 투여한다.



[Fig. 12] The first blueprint.



[Fig. 13] The final blueprint.

가. 압력계, 펌핑장치 등이 달린 응결실험 장치를 만든다.

나. 응결실험 장치의 짧은 구멍 한쪽에는 압력계를, 다른 한쪽에는 공기를 뿜 수 있는 밸브를 달고, 긴 통의 한 쪽에는 레이저를, 한쪽에는 조도 센서를 단다.

다. 압력계 뚜껑을 열고, 대기 오염 물질을 작은 물방울 입자로 만든 것을 주입한 후 레이저 빛을 한쪽에서부터 쏜다. 그 다음 뚜껑과 밸브를 닫고, 압력이 1.02가 될 때까지 펌핑한다.

라. 압력이 1.02가 되면 펌핑하던 것을 중단하고, 밸브를 연다. 그러면 순간적으로 압력이 낮아지면서 구름이 생긴다.

마. 구름이 생기면 순간적으로 조도가 낮아진다. 조도가 낮아진 폭을 기록한 후 다른 대기 오염 물질과 비교한다.



[Fig. 14] Condensation equipment.



[Fig. 15] The process of using condensation equipment.

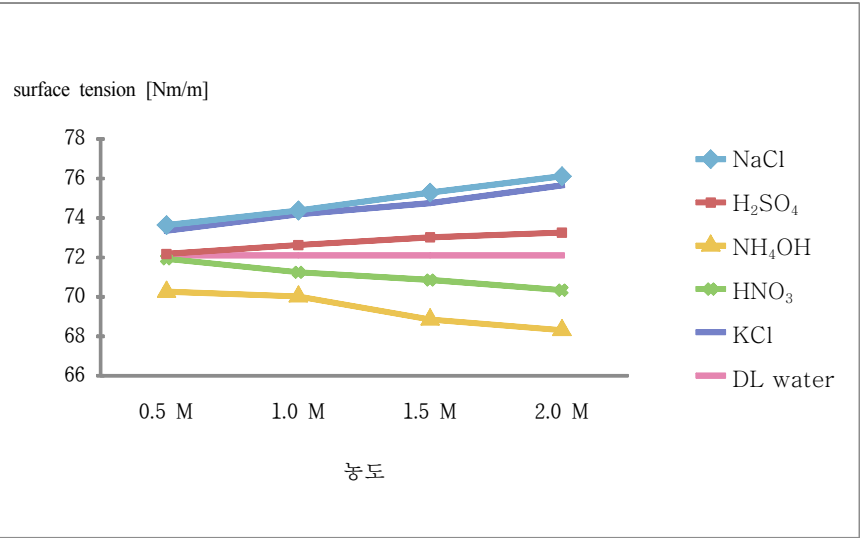
[Fig. 14]는 실험장치 제작 과정이다. [Fig. 15]는 실험 장치를 완성시켜 실험을 하는 모습이다.

IV. 연구 결과 및 분석

1. 대기 오염 물질의 표면장력 측정

<Table 3> The surface tension of NaCl, H₂SO₄, NH₄OH, KCl, HNO₃ by concentration

	0.5 mol	1 mol	1.5 mol	2 mol
NaCl	73.64	74.38	75.29	76.12
H ₂ SO ₄	72.18	72.63	73.02	73.26
NH ₄ OH	70.26	70.02	68.85	68.31
HNO ₃	71.93	71.25	70.86	70.34
KCl	73.36	74.19	74.75	75.65
DI water	72.1			



[Fig. 16] The surface tension of NaCl, H₂SO₄, NH₄OH, KCl, HNO₃ by concentration.

<Table 3>에서는 측정된 표면장력 값들을 표현하고 있다. [Fig. 16]의 경우, 물질의 농도에 따른 표면장력을 그래프로 표현하였다. 위와 같이 HNO₃, NH₄OH 용액은 증류수보다 표면장력이 낮았으며 농도가 높아질수록 더 낮아졌다. H₂SO₄ 용액은 증류수보다 표면장력이 크지만 대표적인 자연 발생 응결핵인 NaCl이 용해될 경우보다 표면장력이 작았다.

이론적 배경에서 보았을 때 표면장력과 한계반지름(critical radius)은 비례관계를 가지고 있다. 이것은 표면장력이 작을수록 응결핵이 잘 생성된다는 것을 의미한다. 즉, 같은 포화도에서 한계반지름이 작을수록 작은 물방울이 형성되었을 때도 물방울이 쉽게 증발되지 않고 성장할 수 있는 가능성이 있기 때문에 수적형성에는 한계반지름이 작을수록 유리하다.

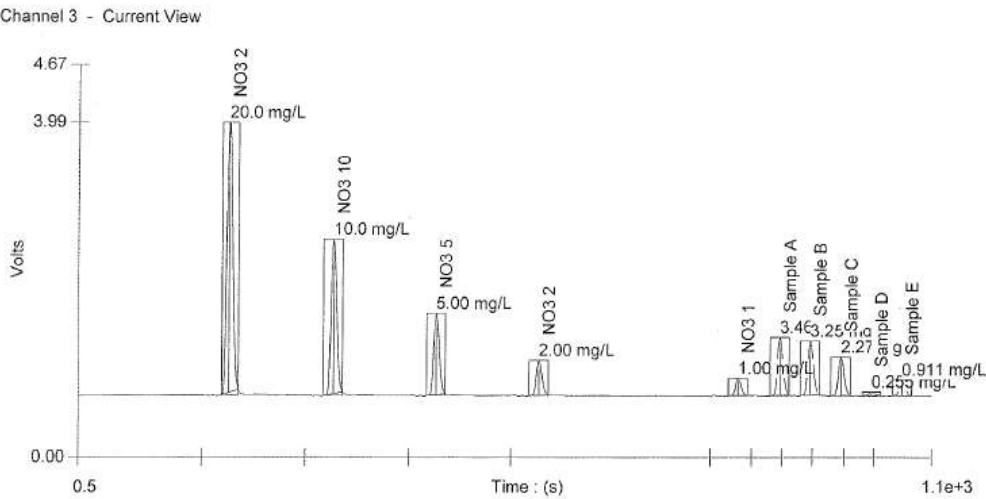
따라서 대기 오염 물질이 응결핵으로 작용했을 때 한계반지름의 측면 즉, 곡률효과(Curvature effect)의 면에서 자연발생응결핵인 NaCl보다 더 좋은 조건을 준다는 것을 알 수 있다.

2. 강수 중에 용해된 대기 오염 물질의 성분 분석

가. 질산염 이온(NO₃⁻) 분석 결과

<Table 4> NO₃⁻ of melting in raindrop by analysing

분석 시료	강수 수집 장소	NO ₃ ⁻ (mg/L)
Sample A	본동	3.46
Sample B	황금동	3.25
Sample C	성서지역	2.27
Sample D	지묘동	0.255
Sample E	각산동(대구일과학고)	0.911

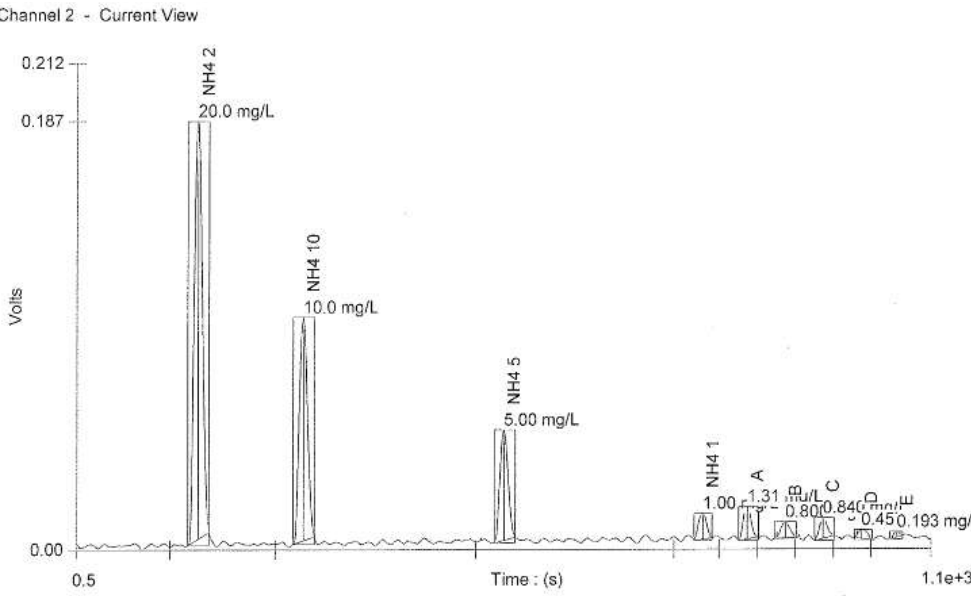


[Fig. 18] A chart of NO₃⁻ of melting in raindrop by analysing.

나. 암모니아성 질소(NH₄⁺) 분석 결과

<Table 5> NH₄⁺ of melting in raindrop by analysing

분석 시료	강수 수집 장소	NH ₄ ⁺ (mg/L)
Sample A	본동	1.31
Sample B	황금동	0.800
Sample C	성서지역	0.840
Sample D	지묘동	0.457
Sample E	각산동(우리학교)	0.193



[Fig. 19] A chart of NH₄⁺ of melting in raindrop by analysing.

<Table 4>와 [Fig. 17]에서는 각 지역에 따른 질산성 이온의 농도 그래프를 표와 그래프로 표현하였다. <Table 5>와 [Fig. 18]에서는 각 지역에 따른 암모니아성 이온의 농도 그래프를 표와 그래프로 표현하였다. 이 자료들 통해 대기 오염도가 높은 지역인 대구 본동, 황금동, 성서지역의 강수 시료에서는 대구일과학고등학교와 지묘동에서 수집한 강수 시료에 비해 NO_3^- , NH_4^+ 성분이 많이 검출된 것을 알 수 있다. 즉, 대기 오염도가 높은 지역일수록 빗물에 녹아 있는 오염 물질의 농도가 높게 검출되었다는 것을 의미한다.

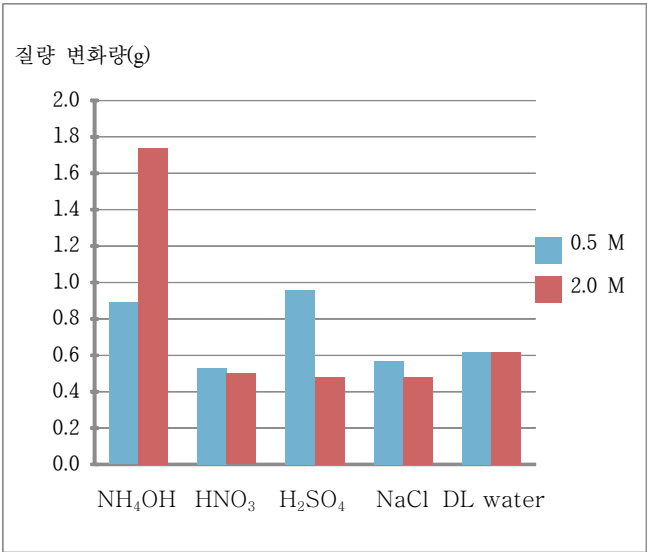
3. 대기 오염 물질의 농도에 따른 증발량 측정

<Table 6> Mass of a solution 0.5 M

질량(g)	NH ₄ OH	HNO ₃	H ₂ SO ₄	NaCl	DI water
50분	99.49	99.79	99.4	99.74	99.67
100분	99.11	99.47	99.04	99.43	99.38
변화량	0.89	0.53	0.96	0.57	0.62

<Table 7> Mass of a solution 2.0 M

질량(g)	NH ₄ OH	HNO ₃	H ₂ SO ₄	NaCl	DI water
50분	98.98	99.8	99.76	99.78	99.67
100분	98.26	99.5	99.52	99.53	99.38
변화량	1.74	0.5	0.48	0.47	0.62

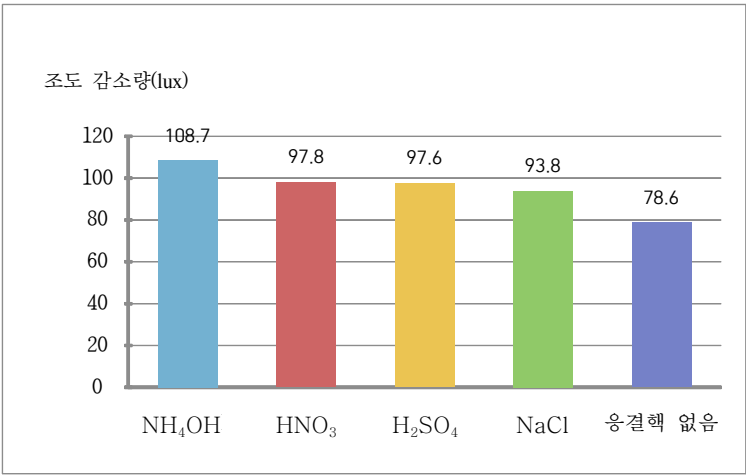


[Fig. 19] Mass of a solution 0.5 M, 2.0 M.

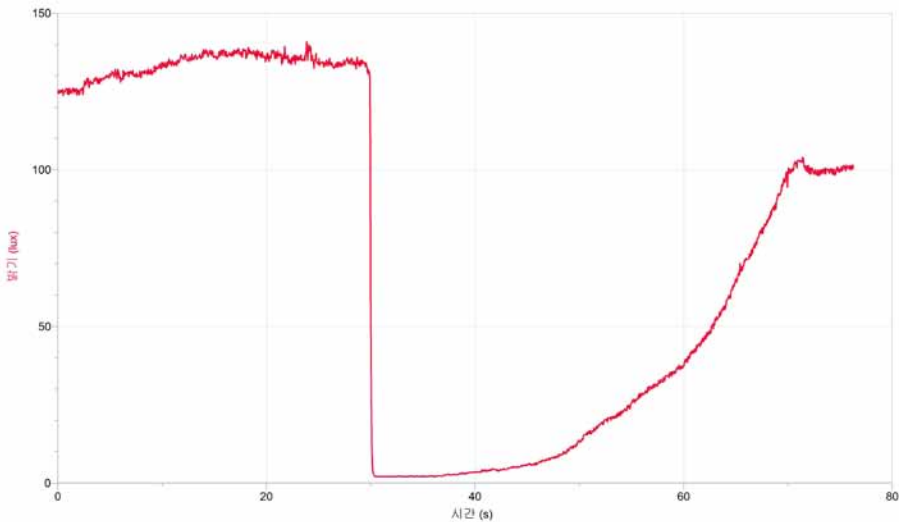
<Table 6, 7>을 통해 0.5 M, 2.0 M의 물질들의 증발량을 표현하였고 [Fig. 19]를 통해 농도에 따른 증발량을 비교하였다. 이들을 통해 NH_4OH 수용액을 제외한 다른 시약들은 물보다 적은 증발량을 보였고, 농도가 증가할수록 증발량이 적어지는 것을 보였다. 그러나 NH_4OH 의 경우, 공기보다 평균 분자량이 작으므로 휘발되기 쉬우며 NH_4OH 가 휘발될수록 농도 역시 달라지므로 정확한 값을 얻을 수 없었다.

4. 응결 실험

조도가 떨어지는 양을 비교한 결과, 다음과 같았다.



[Fig. 20] Change a mount of lux by reagents.



[Fig. 21] A change amount of lux when NH_4OH is functioning as condensation nucleus.

<Table 8> Change a mount of lux By species of air pollutants

	NH ₄ OH	HNO ₃	H ₂ SO ₄	NaCl	응결핵없음
구름 생성 전	110.9	107.7	212.6	123.2	189.2
구름 생성 후	2.1	9.9	115.0	30.3	110.6
조도의 감소량(lux)	108.7	97.8	97.6	93.8	78.6

[Fig. 20]은 각 물질이 투입되었을 때 응결장치를 통해 응결되는 양을 비교한 다이어그램이고, [Fig. 21]은 실험에서 암모니아용액을 이용했을 때의 조도량 변화를 표현한 그래프이다.

<Table 8>에서 알 수 있듯이 응결핵이 없는 경우는 78.6 lux의 빛이 감소한 반면 NH₄OH, HNO₃, H₂SO₄, NaCl 수용액을 응결핵으로 분사시켰을 때는 90 lux이상의 조도감소량을 보였다. 응결핵이 없을 때보다 있을 때 구름 생성이 더 잘 되었다. NH₄OH, HNO₃, H₂SO₄, NaCl 순으로 조도 감소량이 컸고, 조도 감소량이 클수록 응결량이 많은 것이기에 표면장력이 작을수록 한계반지름이 작아져 응결이 더 잘 됨을 알 수 있다.

V. 결론 및 고찰

HNO₃, NH₄OH 용액은 증류수보다 표면장력이 낮았으며 농도가 증가할수록 더 낮아졌다. H₂SO₄ 용액은 증류수보다 표면장력이 크지만 대표적인 자연 발생 응결핵인 NaCl이 용해될 경우보다 표면장력이 작았다. 또한 용액의 농도가 증가할수록 증류수와 의 표면장력 차이가 증가했다. 표면장력과 한계반지름은 비례하므로 인공적으로 발생한 대기 오염 물질이 응결핵으로 작용하면 한계반지름이 작아져 응결이 더 잘 일어날 것이라는 것을 알 수 있다.

대기 오염도가 높은 지역인 대구 본동, 황금동, 성서지역의 강수 시료에서는 지묘동과 대구일과학고등학교에서 수집한 강수 시료에 비해 NO₃⁻, NH₄⁺ 이온 성분이 많이 검출되었다. 즉, 대기 오염도가 높은 지역에서 구름입자의 오염 물질 농도가 높게 검출되었고, 대기 오염 물질이 응결핵으로 작용했으며 용질효과에 따라 증발될 확률이 작아, 구름방울이 형성되더라도 소산이 덜되어 구름이 발달하는데 유리하다는 것을 도출할 수 있었다.

오염 물질의 농도에 따른 증발량 차이 실험을 통하여 암모니아를 제외한 황산, 질산, 소금물 모두 농도가 높아질수록 증발을 잘 하지 않는다는 용질효과를 확인하였다. 증발이 적게 되는, 즉 농도가 높은 용액일수록 응결이 잘 된다는 결론을 도출할 수 있었다. 이를 2번 실험과 관계시켜 오염 물질의 농도가 높은 지역은 운량이 많을 것이라고 결론 내렸다.

응결 실험과 표면장력 측정 실험의 결과를 토대로 한계반지름의 크기에 따른 응결 정도를 확인 할 수 있었다. 대기가 오염된 정도와 대기 중의 물질들을 2번 실험을 통해 어느 지역에서 구름이 잘 생길지에 대하여 추측하였다.

황산, 암모니아, 질산과 같은 대기 오염 물질들이 구름 응결핵(Cloud Condensation Nuclei, CCN)으로 작용하여 구름의 미세물리과정에 관여함으로써 구름 방울 형성에는 기여할 수 있지만, 그것이 강수효율과의 어떤 직접적인 연관을 가지는 지를 결론 내리기에는 더 많은 연구가 필요할 것이다. 강수를 위해서는 다양한 크기의 수적들이 크기차이로 인한 종단속도 차이로 충돌할 확률이 높아져, 충돌하며 성장해

야 한다. 그러나 구름 응결핵의 증가는 구름 방울 수를 증가시키는 대신 구름 방울의 크기가 줄어들게 하여 구름이나 안개 생성에는 도움을 주겠지만 강수 효율을 감소시킬 수 있기 때문이다.

VI. 참고문헌

[1] 광종흠, 소선섭 (1987). **일반기상학**. 서울: 교문사

[2] Houze Jr, R. A. (2014). *Cloud Dynamics* (2nd ed.). Burlington: Academic press.

[3] Köhler, H. (1936). The nucleus in and the growth of hygroscopic droplets. *Transactions of the Faraday Society*, 32, 1152–1161.

[4] Seinfeld J. H., & Pandis S. N. (2006). *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change* (2nd ed.). New York: Wiley, J.

[5] McFiggans, G., Artaxo, P., Baltensperger, U., Coe, H., Facchini, M. C., Feingold, G., Fuzzi, S., Gysel, M., Laaksonen, A., Lohmann, U., Mentel, T. F., Murphy, D. M., O'Dowd, C. D., Snider, J. R., & Weingartner, E. (2006). The effect of physical and chemical aerosol properties on warm cloud droplet activation. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6(9), 2593–2649.

| 연구진 |

임승현 (Lim Seunghyeon, 대구일과학고등학교, llsh0331@naver.com), 주저자
윤가희 (Yun Gahui, 대구일과학고등학교, salmo15@naver.com), 교신저자
서주형 (Seo Juhyung, 대구일과학고등학교, chris05191@naver.com)
이태동 (Yi Taedong, 대구일과학고등학교, taedong122@naver.com)

지도교사 : 백명희 (Baek Myunghee, 대구일과학고등학교, 대기과학, 97donggle@hanmail.net)
지도교수 : 이규원 (Lee Gyuwon, 경북대학교 지구시스템과학부, gyuwon@knu.ac.kr)

교차로에서 원활한 차량 통행과 횡단보도에서 보행자의 대기 시간 단축을 위한 신호등 제어 시스템 연구

류지석 · 권해진 · 정승연 · 채정범 · 최원석 – 인천과학고등학교

A Traffic Signal Control Systems to Ease Traffic Jams on Intersections and Shorten Pedestrians Waiting Time at Crosswalk

Ryu Jiseok · Kwon Haejin · Jung Seongyeon · Chae Jeongbeom · Choi Wonseok - Incheon Science High School

ABSTRACT

Nowadays, traffic congestion iscommon because the number of vehicles is mounting, while roads are limited. So, we felt a need of a new system which controls intersections efficiently by recognizing vehicles which are waiting for signal and pedestrians. It will shorten waiting time for both vehicles and pedestrians. In this research we pay attention to the raspberrypi. And we made real-time recognition system using raspberrypi camera module. Also, we checked the optimal height of camera to recognize vehicles effectively. After that, we designed two algorithms called 'Best Fit' and 'Multi Overlap' to control an intersection which uses data about the number of waiting vehicles and pedestrians. Finally, we confirmed whether our algorithms are effective or ineffective through simulator which we developed ourselves by using Game Maker. Before we simulate, we made four seeds which represent four different traffic situations. We performed experiments to check four things: the average waiting time of vehicles and pedestrians, the number of passed people, the time that simulator take to shut down, the number of signal transduction. As a result, 'Best Fit' and 'Multi Overlap' showed better performance than existing intersection-controlling algorithms in all respects.

Key words:

Camera Recognition, Control Algorithm, Intersection, Signal Control System, Simulator

국문초록

점점 증가하는 자동차 수에 비해 도로 여건은 한정되어 있기 때문에 교통체증이 가중되고 있다. 이런 문제점을 해결하기 위해서는 교차로에 신호 대기로 정제되어 있는 차량 대수와 횡단보도에서 신호 대기하는 사람들의 개체수를 인식하여 차량뿐만 아니라 보행자의 대기시간을 신속하고 효율적으로 제어할 수 있는 시스템이 필요하다고 인식하였다. 본 연구는 이런 문제점을 개선하기 위해서 라즈베리파이 카메라를 활용하여 실시간으로 정제되어 있는 차량과 신호 대기 중인 보행자를 감지하여 새로운 신호 시스템을 개발하였다. 라즈베리파이 카메라를 활용하여 차량과 보행자 수를 파악하는 시스템을 구현하고, 그 결과를 이용해 통행이 원활해질 수 있도록 신호를 조절하는 알고리즘을 설계하였다. 최종 시뮬레이션을 통해 교통 신호를 효율적으로 제어할 수 있는 방법을 개발하게 되었다.

중심어 :

카메라 인식, 제어 알고리즘 , 교차로, 신호제어 시스템, 시뮬레이터

I. 서론

1. 연구 동기

자동차는 이제 사치품이 아니라 생활 속의 필수품이 되었다. 우리나라에는 약 2천 12만대의 자동차가 있으며, 이것은 2명당 1명꼴로 자동차를 소유하고 있는 것이다. 즉, 한 가구당 약 2대씩 자동차를 소유하고 있다고 볼 수 있는 정도이다. 심지어는 앞으로도 자동차의 수가 계속적으로 증가할 것이라고 한다. 이처럼 자동차가 기하급수적으로 증가하는 상황에서 도심 내의 도로 증설은 한정되어 있다. 한정된 도로 상황에서 차량들의 원활한 통행을 위해 신호등을 설치하고, 교통법에 따라 신호를 내보내고 있다. 하지만 계속적으로 증가하는 차량 때문에 기존의 교통 제어 및 신호시스템이 정제되는 교차로를 통제하는데 점점 한계를 드러내고 있다.

현재 시행되고 있는 교통 제어 방법은 실시간 신호제어 시스템이다. 이 실시간 신호제어 시스템은 지나간 차량의 실시간 검지자료를 분석하여 센터의 중앙컴퓨터에서 주기와 연동제어군 결합·분리를

결정하고 지역 제어기에서는 각 접근로별로 이동류¹⁾의 포화도비²⁾에 따라서 신호제어를 한다. 현시체계³⁾가 가변적이라는 특징이 있다. 하지만 이 실시간 신호제어 시스템은 이미 지나간 차량을 분석하는 시스템이므로 평상시에는 문제없이 잘 작동할 수 있지만 이미 지나간 차량수와 다른 차량의 수가 올 경우 허비하는 대기시간이 많을 수밖에 없다. 최근에 이 문제를 해결하기 위해 실시간으로 교통량을 받아들인 후 최적의 신호를 계산하고 그에 따라 신호등을 제어하는 연구가 많이 진행되었다. 하지만 이러한 연구들은 보행자의 수는 배제하고 오직 차량의 수만을 바탕으로 신호를 결정하는 연구들 뿐이었다. 또한, 차량의 수를 인식하는 방법이 도로에 자석을 인식하는 장치를 심어두고, 차량에 자석을 부착해 차량의 수를 결정하는 방법과 차량이 통과하거나 정지해 있는 경우, 도로 바닥에 센서를 매설해 놓고 차량이 지나갈 경우 자기장 변화를 검지하여 차량의 통과 또는 존재 여부를 감지하는 시스템뿐이었다[2,15,24].

본 연구는 차량만을 위한 교통 시스템에서 벗어나 보행자와 차량을 함께 고려한 교통 시스템의 필요성을 인식하고 연구를 시작하게 되었다. 라즈베리파이를 기반으로 웹캠과 OpenCV 라이브러리 등을 이용하여 ‘교차로에서 대기시간 단축을 위한 신호 제어 시스템’을 구성하여 보행자 및 자동차의 이동 속도를 보다 효율적으로 증진할 수 있는 신호 제어 시스템을 개발하고자 한다.

2. 연구 목적

교차로는 좁은 지역에 4개의 도로가 집중되어 있을 뿐 아니라 각 도로에서도 차선마다 가고자 하는 방향이 다르기 때문에 교차로는 거의 대부분 혼잡하고 교통체증이 심해 차량들이 대기하는 시간이 많은 편이다. 심지어 보행자들이 길을 건너는 횡단보도가 있는 교차로라면 그것의 혼잡한 정도나 교통체증의 정도가 더욱 심해질 것이다. 지금 대부분의 교차로에서는 한꺼번에 동시에 표시되어도 충돌이 나지 않는 신호들을 묶어 ‘현시 셋’⁴⁾을 설정하고 특정한 시간대마다 정해진 신호 시간과 신호 순서로 ‘현시 셋’을 반복 실행하는 방식으로 운영하는 곳이 대부분이다.

예를 들면, 보통 오전 7시부터 오전 9시까지의 출근시간에는 출근차량의 이동 패턴에 따라 교통 흐름이 효율적이도록 특정 ‘현시 셋’의 시간을 조정하여 미리 설정해놓고, 오후 5시부터 오후 8시까지의 퇴근시간에는 퇴근차량의 이동 패턴에 따라 효율적이도록 미리 설정을 해놓는 것이다. 이러한 방식으로는 어느 정도까지는 교차로 제어의 효율을 높일 수 있겠지만, 날마다 매시간의 차량 대수 및 보행자수가 다른 만큼 효율을 더욱 높이기 위해선 주어진 상황에 맞게 가장 효율적인 ‘현시 셋’을 찾아 적절한 신호시간만큼 그 신호를 틀어줘야 할 것이다.

이런 현행 신호 체계의 문제점을 개선하기 위해서 교차로에서 카메라를 통해 주변을 인식하고 실시간으로 주어지는 서로 다른 상황에 맞게 가장 효율적인 신호를 찾아 그 신호를 틀어주어 ‘교차로에서 대기시간 단축을 위한 효율적인 신호 제어 시스템’을 구현하려 한다.

3. 연구 범위

교차로에서 대기하는 차량이나 보행자의 수를 실시간으로 측정한다. 하지만 실제 상황에서 실험하는데 한계가 있기 때문에 자동차와 신호등의 축소 모형을 사용하여 테스트하고자 한다.

보행자의 대기 시간까지 고려한 신호 체계가 기존 방식보다 효율적인지 분석하기 위해 주어진 교통량을 모두 통행시키는 데까지 걸리는 시간, 각 차선에서 대기한 차량 및 보행자들의 대기시간 등의 측정을 통하여 비교한 표와 그래프를 통해 이 시스템의 효율성을 분석하고자 한다.

실제 도로에서는 여러 교차로가 연속되어 있는 경우가 많지만, 이번 연구에서는 교차로 하나만을 제어하는 상황이라고 가정하였다. 각 방향의 도로는 1개의 좌회전 차선과 1개의 직진 차선을 고려하였고 우회전하는 차량은 고려하지 않았다. 또한, 실험 모델 제작에서는 자동차의 모양과 크기가 일정하다고 가정하여 3D 디자인을 통해 자동차 모형 출력 후 인식하는 시스템을 만들어 연구하였다.

4. 용어의 정의[9]

현시: 교차로에서 동시에 통행할 수 있도록 각 방향 교통류에 부여되는 통행권

- 현시 셋: 같은 주기에 허용 가능한 현시의 집합이다.

- 출발 지체 시간(start-up delay): 신호가 적색에서 녹색으로 바뀐 후 첫 번째 차량이 교차로를 통과하기까지의 손실시간(통상 1~2초)이다.

- 포화도: 어떤 시간이나 기간 동안 도로를 통과한 차량 개수(측정) / 어떤 시간동안 도로를 통과할 수 있는 최대 차량 개수(정해진 값)이다.

- 교통량(volume): 일정시간동안 지점 또는 구간을 통과하는 차량 수(대/시)이다.

- 신호 주기: 교차로 신호등에서 녹색 신호가 켜진 후 다시 녹색 신호가 켜지기까지의 시간이다.

II. 연구 수행 내용

1. 선행 연구 분석

교차로에서 신호 제어에 관한 선행 연구를 통해 본 연구의 필요성에 대해 고찰하는 과정을 거쳤다. 늘어나는 차량들로 인해 많은 연구 논문이 있는데 선행연구를 통해 본 연구의 당위성과 나아갈 방향에 대한 지표로 삼았다.

가. ‘차량도로간 통신기반의 교통신호제어 기법에 관한 연구’[5]

차량-도로 간 통신 기반의 차량검지시스템으로서 차량과 센서 네트워크 사이에 통신을 통하여 교통정보를 획득하는 방법을 소개하고 있다. 센서 네트워크는 교차로 주변에 일정한 간격으로 설치된 센서 노드들로 구성되며, 모든 차량은 RF 송수신기, GPS 수신기를 내장한 텔레매틱스 단말기를 장착하고 있다. 차량에 설치된 텔레매틱스 단말기는 주변 교통상황을 추정하기 위해 무선통신을 통해 노드들에게 교통정보를 제공한다. 이 연구에서 제안하는 구역 분할 기법은 최적의 신호 현시 지속시간을 구하기 위해 모든 구역의 차량 밀도를 검사하는데, 각 구역은 센서 노드가 가지는 검지영역을 의미하고 교차로 주변의 도로는 각 센서 노드들에 의해 구역별로 구분되는 방식이다. 구역분할 기법은 신호 현시 순서의 결정방식에 따라 고정된 신호 현시 순서를 가지는 고정형 신호 현시(FSP: Fixed Signal Phase) 기반의 교통신호 제어 기법과 차량 밀도에 따라 신호 현시 순서가 선택되는 신호 현시(SSP: Selective Signal Phase) 기반의 교통신호 제어기법으로 구분하여 실험을 진행하였다. 이 방법은 도로에 노드가 있어야 한다는 점이 특이한 점이다.

1) 이동하는 사물을 의미하는데 여기서는 차량을 의미한다.

2) 각 개체의 포화도의 비이다.

3) 교차로에서 동시에 통행할 수 있도록 각 방향 통행권에 부여되는 통행권의 체계이다.

4) 같은 주기에 허용 가능한 현시의 집합이다.

나. '지능형 교통체계의 활성화 방안과 교통신호 제어 전문가 시스템 모델에 관한 연구'[11]

각국의 ITS(Intelligent Transport System)라고도 하는 지능형 교통제어시스템 추진실태를 파악하고 교통제어 시스템의 신호 주기의 조정을 위한 문제를 보완하기 위한 교통신호 제어 전문가 시스템의 모델에 대해 제안하고 있다. 결국 이 연구도 지능형 교통제어시스템이 필요하다는 인식을 하고 있는 연구이다. 본 연구가 추구하고자 하는 목적과 유사하지만 사용한 방법에서 차이가 있어서 그 목적만을 참고하였다.

다. '실시간 교통신호 제어시스템 실증 분석을 통한 개선 및 평가'[3]

대전광역시 기존의 실시간 교통신호제어시스템 운영 실태를 바탕으로 차량 및 보행신호 감응제어 시스템을 단일로, 교차로까지 확대적용이 가능한 알고리즘을 개발 제시하였다. 제시한 방법으로는, 실시간 신호제어 방법으로서 대응제어(TRC: Traffic Response Control), 감응제어(TAC: Traffic Actuated Control), 시각제어(TOD: Time of Day) 운영방법의 현황을 비교하여 가장 적합한 방법을 제시하였다. 검지 방법으로서도 여러 가지 검지방법을 제시하고 있다. 이 연구 방법이 본 연구가 추구하는 목적과 가장 비슷하지만 카메라를 이용하지 않는다는 점에서 차이가 있다.

라. 'PIC Microcontroller를 활용한 교차로 교통신호 제어시스템에 관한 연구'[7]

PIC microcontroller⁵⁾를 이용하여 모형으로 만든 교통 제어 시스템으로 특정 현시 셋에 국한하여 연구하였다. 이 연구에서 고안된 교통 신호 제어기는 교통량에 따라 3가지 Mode로 제어되는 실험으로서 PIC microcontroller라는 칩을 사용하였고, 차량 인식은 차 밑에 자석을 달아 리더기가 읽는 형식을 사용하였다. 차 밑에 자석을 달아야하는 제한점이 있다.

2. 개발환경 및 플랫폼

가. 게임메이커를 통한 프로그램 환경 구축

게임메이커는 네덜란드의 컴퓨터 프로그래머이며, 위트 르호트 대학의 교수인 마르크 오르마르스가 만든 프로그램이다. 이는 다른 프로그램이 언어를 이용하여 게임을 개발하는 것보다 더 빠르고 편하게 게임을 개발할 수 있도록 고안한 프로그램인데, 쉽게 그래픽기능을 사용하고 소스코드를 첨부할 수 있기 때문에 굳이 게임이 아니더라도 다른 프로그램을 만드는데 유용하게 사용될 수 있는 프로그램이다. 이 게임메이커를 통해 교통상황을 직접 시뮬레이션 하였다.

나. 웹캠을 통한 실시간 영상 촬영

실시간으로 비디오 화상을 촬영하고 전송하거나 인터넷을 이용하여 화상 회의를 하는 데 사용하는 소형 디지털 카메라다. USB, 이더넷, 와이파이 등을 통해 컴퓨터나 컴퓨터 네트워크로 실시간으로 이미지를 공급한다. 웹캠을 사용하여 도로의 영상정보를 촬영하고 라즈베리파이로 영상을 전송하였다.

다. OpenCV(Open Computer Vision)를 활용한 영상 인식

실시간 이미지 프로세싱을 위한 오픈 소스 라이브러리로 영상 처리에 필요한 다양한 기능들을 제공한다. 윈도우, 리눅스 등 여러 플랫폼에서 제공되어 다양한 환경에서 개발할 수 있다. OpenCV 라이브러리를 사용하여 웹캠으로 읽어 들인 영상정보를 바탕으로 교통량을 측정하였다.

라. 라즈베리파이를 활용한 프로그래밍

물리적인 세계를 감지하고 제어할 수 있는 인터랙티브 객체들과 디지털 장치를 만들기 위한 도구로, 간단한 마이크로컨트롤러(Micro Controller) 보드를 기반으로 한 오픈 소스 컴퓨팅 플랫폼과 소프트웨어 개발 환경을 말한다.

마. 3D 프린터를 통한 차량 모형 제작

3차원 인쇄는 연속적인 계층의 물질을 뿌리면서 3차원 물체를 만들어 내는 제조기술로, 3D 프린터란 이 3차원 인쇄를 하는 기계 장치이다. 3차원 인쇄 기술로 직접 디자인한 3차원 물체를 실제로 출력할 수 있다. 인쇄 방식으로 커다란 원재료 덩어리를 칼날을 이용해서 조각하는 절삭형, “Printing layer by layer” 매질을 층층이 쌓아 올려 조형하는 방식인 적층형 등이 있다. 실제 교통상황에서 연구를 진행할 수 없으므로 3D 프린터를 이용하여 자동차 모형을 만들어 교통량 인식 가능 여부를 확인하였다.

바. C언어를 통한 프로그래밍

C언어는 켄 톰슨과 데니스 리치가 벨 연구소에서 일할 당시 새로 개발된 유닉스 운영 체제에서 사용하기 위해 개발한 프로그래밍 언어이다. C는 실질적으로 모든 컴퓨터 시스템에서 사용할 수 있는 프로그래밍 언어이다. C++는 C에서 객체 지향형 언어로 발전된 것이다. 이 언어를 통해서 본 프로그램이 추구하는 효율적인 교통 제어 시스템을 구현하였다.

3. 연구 절차

본 연구에서는 카메라 센서를 이용하여 대기하는 개체 수(차량 및 보행자)를 감지하는 방법에 대하여 연구하고 실제 적용 가능 여부에 대하여 축소된 모형을 제작하여 적용해본다. 또한 감지된 데이터를 바탕으로 최적의 신호가 실행되도록 알고리즘을 연구해본다. 게임메이커 프로그램을 이용하여 모의 상황을 만들어 시뮬레이션해보고 신호체계의 효율성을 테스트해본다. <Table 1>은 본 연구 절차에 대해 나타난 것이다.

<Table 1> Research procedures		
단계	실시간 상황 인식(차량 및 보행자 수 감지)	효율적인 신호 제어 알고리즘 개발
1	개체에 대한 학습 - 개체에 대한 여러 장의 이미지 파일을 이용하여 개체의 특징을 파악하여 개체를 인식하기 위한 정보를 담은 파일 생성	상황별 현시 셋 찾기
2	개체 검출 프로그램 구현 - 학습에 의해 생성된 파일을 적용하여 개체 검출 프로그램 구현	신호 제어 알고리즘 구현 - Best Fit, Multi_overlap
3	라즈베리파이에 적용하여 확인 - 개체 검출 프로그램을 라즈베리파이에 적용시켜 실제로 카메라를 통한 개체 검출 여부 확인	게임메이커를 이용한 가상 시뮬레이션
4	실제 적용 가능 여부 확인 - 축소 모형에서 여러 개체 검출 여부를 확인함	포화도 및 대기시간 계산 - 시뮬레이션 통한 기존 방식과 연구한 알고리즘의 효율성 비교

5) PIC microcontroller는 연산기, 레지스터, 제어회로 등 입출력 할 수 있는 one-chip microcontroller(cpu,ram,eprom/prom/rom)이다 (양윤석, 안병원, 2013).

4. 연구 내용

가. 상황에 따른 정보 인식 방법 탐색 : 카메라 센서를 이용한 개체 수 감지 방법 연구

1) 개체 검출을 위한 기준 생성 과정

개체를 감지하는 시스템을 구현하기 위해서 그 개체가 있는지 없는지를 판단할 수 있는 기준이 있어야 한다. 이러한 기준 역할을 하는 것을 분류기(classifier)라고 한다. 컴퓨터에서 그런 기준을 세우고 적용하기 위해서 수치적으로 표현하는 물체의 특성 값을 특징(feature)이라고 한다[16].

본 연구에서는 Cascade라고 불리는 방식의 분류기(classifier)를 사용하였다. 이 Cascade 방식은 하나의 검출기로 개체인지 아닌지를 판단하는 것이 아니라, 여러 개의 검출기를 차례대로 사용하여 개체를 검출하는 과정을 거친다. 처음에는 간단한 검출기를 사용하고 단계가 올라갈수록 점점 더 엄격한 검출기를 사용하며 판단하는 것이다[18]. 특징(feature)으로는 ‘HOG(Histogram of Oriented Gradient)’ 특징과 ‘Haar’ 이라고 불리는 특징을 사용하였다[24].

OpenCV에서는 Cascade형태의 학습 방식을 기반으로 다양한 특징에 관한 분류기를 만들 수 있도록 지원한다. 분류기(classifier)를 개체에 대해 학습시키기 위해 다음과 같은 과정을 진행했다.

가) positive 샘플 및 negative 샘플 촬영

분류기(classifier)에 물체를 학습시키기 위해서는 인식하고자 하는 물체가 들어있는 positive 샘플과 인식하고자 하는 물체가 들어있지 않은 negative 샘플이 모두 필요하다. positive 샘플과 negative 샘플들을 가장 잘 구분할 수 있는 영상 특징을 찾고 이 특징을 조합하여 강력한 검출기를 얻는 과정을 classifier 학습이라고 한다[18]. 본 연구에서는 개체 인식 학습을 위해 필요한 자동차 모형을 123D Design 프로그램을 이용하여 디자인 했고, 3D 프린터를 이용하여 디자인한 3D 자동차 모형을 [Fig. 1]과 같이 출력하였다.



[Fig. 1] View of the 3D-printed model cars

제작된 자동차 모형을 이용하여 [Fig. 2]와 같이 교내의 도서관, 전산실, 스마트실을 배경으로 자동차 모형이 있는 positive이미지를 300장 가량 촬영하고, 동일 장소를 배경으로 [Fig. 3]과 같이 자동차 모형이 없는 negative이미지를 1,500장 촬영하여 연구에 활용하였다.



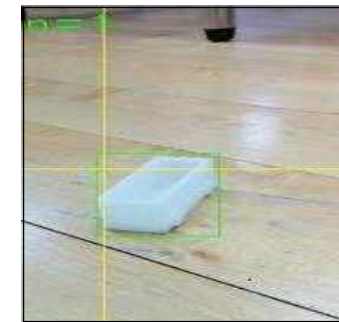
[Fig. 2] Positive image sample



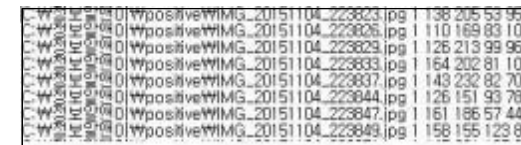
[Fig. 3] Negative image sample

나) positive 샘플 내에서 경계사각형 데이터 파일 생성

개체 인지를 위한 학습을 위해서는 1단계에서 찍은 이미지 파일(.jpg)을 그대로 사용하는 것이 아니라 .vec 파일 형태의 트레이닝 데이터 파일의 생성이 필요하다. 트레이닝 데이터를 생성하기 위해서는 positive 샘플들에 관한 정보를 저장한 txt파일과 negative 이미지에 관한 정보를 저장한 txt파일이 필요하다. [Fig. 4]와 같이 경계사각형을 그리면 그 좌표를 출력해 주는 ‘GT_Extractor 2.1’⁶⁾이라는 툴[17]을 이용하여 이미지 내부에서 자동차 사진 내부의 경계사각형의 좌표 값을 알아내는 작업을 수행하였다. 이 작업으로 [Fig. 5]와 같이 positive 샘플들에 관한 정보를 저장한 txt파일을 생성할 수 있다. negative 이미지에 관한 정보는 [Fig. 6]과 같이 샘플의 이미지 경로명만 활용한다.



[Fig. 4] Using the tool, draw the boundary of the square



[Fig. 5] Example of txt file about positive sample



[Fig. 6] Example of txt file about negative sample

다) 트레이닝 데이터 및 학습 수행

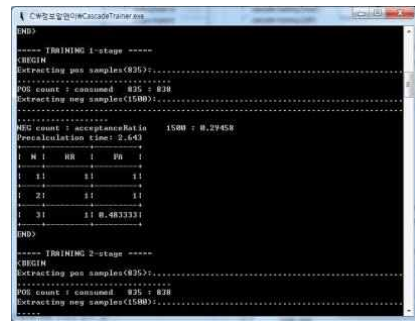
OpenCV에서는 트레이닝 데이터 생성과 그를 이용한 학습을 수행해 주는 기능을 제공한다.

이를 기반으로 하여 다량의 이미지 파일에서 각각의 이미지를 변환하여 더 많은 트레이닝 데이터를 만들 수 있는 ‘CascadeTrainer.exe’⁷⁾라는 툴[19]을 사용하여 40*60크기의 트레이닝 데이터를 생성하였다.

위에서 설명한 Harr 특징에 관한 학습과 HOG 특징에 관하여 Cascade classifier는 총 14단계로 설정하여 [Fig. 7]과 같이 학습을 진행시켰다.

6) <http://darkpgmr.tistory.com/16> ‘GT_Extractor 2.1’ 제공 사이트, 영상 연구 내용 중 사용한 툴

7) <http://darkpgmr.tistory.com/73> CascadeTrainer.exe 제공 사이트, 영상 연구 내용 중 사용한 툴



[Fig. 7] Learning progress screen

2) 라즈베리파이를 이용한 개체 검출 및 수량 카운팅 적용

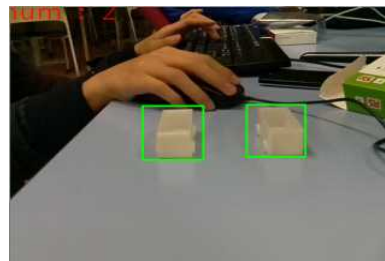
4.-가.-1)에 의해 생성된 개체 판별을 위한 기준이 적용된 파일을 개체 검출 프로그램에 적용한다. 개체 검출 프로그램은 개체를 검출하고 수량을 카운팅 하도록 구현하였다. 개체 검출 프로그램을 라즈베리파이에서 구동시켜서 카메라에 찍힌 영상을 분석하도록 하였다.

개체 검출 프로그램을 구현하기 위해 어떤 개체를 검출할지에 대한 정보를 주어야 한다. OpenCV에서는 물체 인식을 위해 'CascadeClassifier' 라는 클래스를 제공하는데, 이를 이용하면 학습하여 생성된 개체에 대한 정보가 담긴 xml파일을 적용하도록 할 수 있다. xml파일을 적용하여 개체를 인식하고, 인식 여부를 확인하기 위해 인식된 부분에 사각형을 출력하는 프로그램을 구현하였다.

라즈베리파이 카메라를 이용하여 미리 학습시켜둔 많은 모형 차량의 사진을 바탕으로 실제 모형 차량의 수를 인식했다. [Fig. 8-11]과 같이 카메라를 고정시켜 배경과 모형의 수를 바꾸어가며 구현한 프로그램을 바탕으로 개체의 수를 인식해보았다.



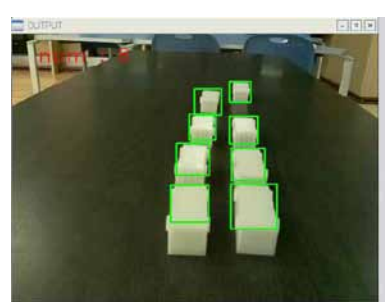
[Fig. 8] Photos of the test when the object is zero



[Fig. 9] Photos of the test when the object is two



[Fig. 10] Photos of the test when the object is three



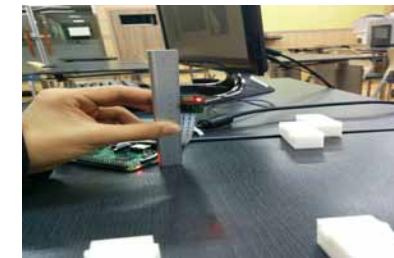
[Fig. 11] Photos of the test when the object is eight

3) 축소 모형 적용 테스트

카메라를 달기 위한 새로운 구조물을 설치하는 것보다 기존에 설치되어 있는 구조물인 신호등에 카메라를 부착하는 것이 경제적으로 훨씬 효율적이라고 생각하였다. 따라서 카메라를 신호등의 어느 위치에 설치해야 가장 높은 인식률을 보일지 실험해 보았다.

가) 실험 조건

- 영상 인식 방법 : 본 연구에서는 한 방향 당 2개의 차선(좌회전 차선, 직진 차선)에 대한 연구이기에 실험에서는 2개의 차선에 있는 차량을 따로 인식해야 한다. 그러기 위해 하나의 카메라로 받아들이는 영상을 각 차선에 맞게 두 개로 분할하고, 분할한 각 영역에 있는 차량을 각각 인식하도록 하였다.
- 카메라의 가로 위치 : 영상을 반으로 나누면 각 영역이 차선을 알맞게 분할할 수 있는 위치에서 실험한다. 즉, 왼쪽 영역은 직진 차선에 있는 차량 수, 오른쪽 영역은 좌회전 차선에 있는 차량 수를 측정할 수 있는 위치에 카메라가 설치되어야 한다.
- 카메라의 세로 위치(높이) : 연구에서는 실제크기의 1.5% 크기로 모형 자동차를 축소 제작했다. 따라서 개체를 카메라로 측정한 높이도 실제 크기의 1.5%의 높이에서 실험한다. [Fig. 12]와 같은 테스트를 통해 카메라 설치 높이를 판단하였다.



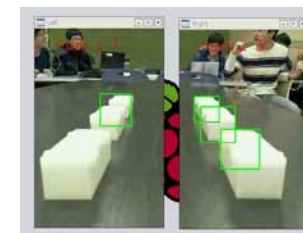
[Fig. 12] The position of the camera measurement scene

- 영상에서의 차량 인식률 : 영상에서의 차량 인식률을 (인식된 차량 수 - 잘못 인식된 개체수)/(전체 차량 수)로 정의하고 카메라 높이별 인식률 실험을 해보았다.

나) 카메라 높이 6.0 cm에서 테스트한 결과

카메라 높이 6.0 cm는 실제 4 m 높이에 해당하는 비율의 높이로 횡형 신호등보다 낮은 위치이다.

[Fig. 13]과 같이 물체를 인식하지 못하는 경우도 꽤 자주 볼 수 있었고, 한 물체를 여러 개의 물체로 인식하는 경우도 발생하였다. 인식률은 33.9%로 낮은 결과를 나타냈다.

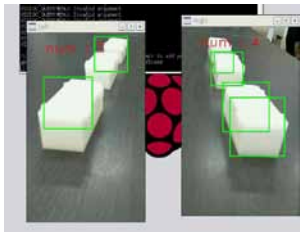


[Fig. 13] Test at the height 6.0 cm

다) 카메라 높이 7.5 cm에서 테스트한 결과

카메라 높이 7.5 cm는 실제 5 m 높이에 해당하는 비율의 높이로 횡형 신호등과 비슷한 위치이다.

[Fig. 14]와 같이 높이 6.0 cm에 비해서는 비교적 인식이 잘 되기는 했으나, 물체를 인식하지 못하는 경우나 하나의 물체를 두 개로 인식하는 경우가 발생했다. 7.5 cm의 경우에는 52.5%의 인식률을 보였다.

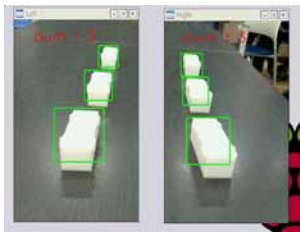


[Fig. 14] Test at the height 7.5 cm

라) 카메라 높이 12.0 cm에서 테스트한 결과

카메라 높이 12.0 cm는 실제 높이 8 m에 해당하는 비율의 높이로 횡형 신호등보다 높은 위치이다.

[Fig. 15]와 같이 나), 다)보다 확연히 인식률이 좋아짐을 관찰할 수 있었다. 물체를 인식하지 못하는 경우의 횡수도 많이 줄어들었고, 하나의 물체를 여러 개로 인식하는 경우도 많이 줄었다. 인식률은 70.3%로 가장 높았다.

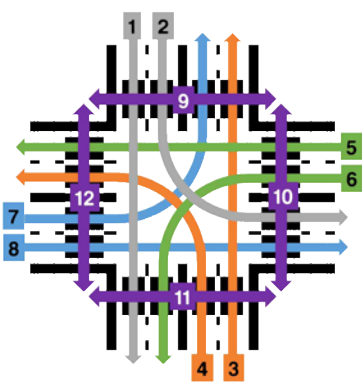


[Fig. 15] Test at the height 12.0 cm

나. 상황에 따른 최적의 신호체계 알고리즘 탐색 : 최적의 신호체계 연구(알고리즘)

1) 현시 셋 찾기

왕복 4차선의 교차로에서 각 방향으로의 우회전은 비보호로 가정하여 따로 차선을 부여하거나 우회전하는 차량을 시뮬레이션에 포함시키지 않았다. 신호를 거쳐야 할 2차선은 각각 전진하는 차량, 좌회전하는 차량만이 대기하고 있다고 가정한다. 이를 바탕으로 각 방향으로 가는 차선에 [Fig. 16]과 같이 번호를 붙인다.



[Fig. 16] The number of the route

동시에 들어도 충돌이 일어나지 않는 두 현시에 표시를 하여 <Table 2>를 구성하였다.

<Table 2> Presence or absence of collision between signals

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1		○	○			○				○		○
2	○			○			○				○	○
3	○			○				○		○		○
4		○	○		○				○	○		
5				○		○	○		○		○	
6	○				○			○	○			○
7		○			○			○	○		○	
8			○			○	○			○	○	
9				○	○	○	○			○	○	○
10	○		○	○				○	○		○	○
11		○			○		○	○	○	○		○
12	○	○	○			○			○	○	○	

<Table 2>를 바탕으로 동시에 신호를 받아도 충돌이 일어나지 않는 현시 집단, 즉 현시 셋을 모두 찾기 위해 프로그램을 구현하였다. 이때, DFS(깊이 우선 탐색)와 같은 방법을 사용하여, 현시를 계속적으로 선택되 지금까지 선택한 현시와 충돌하지 않는 현시를 선택하는 방식을 반복하여 <Table 3>과 같이 모든 현시 셋을 구하였다.

<Table 3> Signal sets which don't occur collision

현시 셋 번호	1	2	3	4	5	6
구성 현시	1 2 12	5 6 9	3 4 10	8 9 11	2 4	6 8
현시 셋 번호	7	8	9	10	11	12
구성 현시	2 11 12	4 9 10	6 9 12	8 10 11	1 6 12	3 8 10
현시 셋 번호	13	14	15	16	17	
구성 현시	4 5 9	2 9 11	1 3 10 12	5 7 9 11	9 10 11 12	

2) 알고리즘 및 스크립트 구현

시뮬레이터 상에서 알고리즘을 효율적으로 실행시키고 비교하기 위해 그 기반이 되는 스크립트를 설계하였다.

먼저 시뮬레이터 상에서 사용되는 대표적인 함수는 다음과 같다.

setset()는 global.litset 배열을 설정하는 스크립트이다. global.litset은 현시 셋을 저장하는 배열로서 이후 알고리즘상에서 쓰인다. setset()는 프로그램을 실행시킬 때 한번 작동한다.

trafficlight(argument0,argument1)는 argument0, argument1 두 개의 인자를 필요로 한다. argument0은 표시 또는 종료하고자 하는 현시의 번호, argument1은 표시할 것인지 종료할 것인지를 1, 0으로 나타낸 인자이다. 예를 들어 trafficlight(4,1)을 호출하면 4번 현시를 표시하게 된다. argument1에 0이 입력되어 현시가 종료될 경우에는 황색신호를 표시하고 일정 시간 후에 적색신호가 표시된다.

효율성 비교를 위한 기본적인 알고리즘(Original 1, 2)과 효율적인 신호 체계를 위해 개발한 두 가지 알고리즘(Best fit, Multi_overlap)에 대하여 다음과 같이 구현하였다.

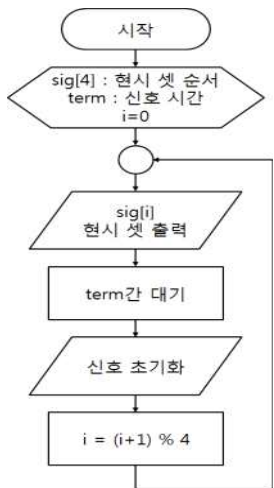
가) Original 1, 2 알고리즘

Original 1, 2는 기존에 존재하는 알고리즘으로 특별한 고려사항 없이 <Table 4>와 같이 정해진 현시 셋을 정해진 시간에 실행하는 방식이다. 각 알고리즘은 총 4개의 현시 셋을 주기로 반복 표시하며 12개의 현시는 표시 되는 현시 셋에 각각 한 번씩 만 포함되어 있다.

<Table 4> Original 1,2 order of signal sets

순서	Original 1	Original 2
현시 셋 1	15	15
현시 셋 2	5	5
현시 셋 3	16	2
현시 셋 4	6	4

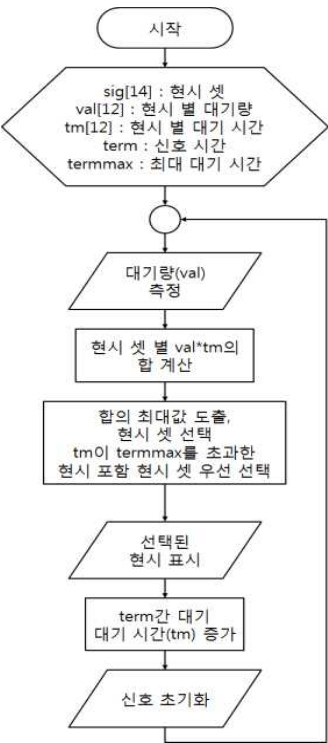
Original 1, 2의 메커니즘은 [Fig. 17]과 같다.



[Fig. 17] Mechanism of Original 1, 2

나) Best fit 알고리즘

Best fit은 17개의 현시 셋 중 가장 정체량이 큰 현시 셋을 실행하는 알고리즘이다. 메커니즘은 [Fig. 18]과 같다. 여기서 현시 셋의 정체량은 현시 셋에 포함되는 모든 현시들에 대해 현시의 정체량의 합으로 정의했고, 현시의 정체량은 (현시가 커지기를 기다리는 사람들의 수)×(현시를 기다리는 사람들 중 가장 오랫동안 기다린 사람의 대기시간)으로 정의했다. 차량 1대는 사람 3명으로 간주하였다.



[Fig. 18] Mechanism of Best fit

- Best fit Judge

[Fig. 19]는 Best fit 알고리즘의 메인 스크립트로 17개의 현시 셋 중에서 정체량이 가장 큰 현시 셋을 골라내는 스크립트이다. 각각의 현시에 대해 정체량을 계산해 그들의 합으로 현시 셋의 정체량을 계산해내고, 이 값을 바탕으로 정체량이 가장 큰 현시 셋의 번호를 저장한다.

```
MAX=0;
for(i=1;i<=17;i+=1){
    sum=0;
    for(j=1;j<=12;j+=1){if(global.litset[i,j])sum+=global.cnt[j]*global.cvsm[j]*global.w[j];
    if(sum>=MAX){MAX=sum;num=i;}}
    global.gnum=num;
```

[Fig. 19] Script of Best fit_Judge

- Time check

Best fit의 방법으로 신호 체계를 만들 경우, 정체량을 (현시가 커지기를 기다리는 사람들의 수)×(현시를 기다리는 사람들 중 가장 오랫동안 기다린 사람의 대기시간)으로 정의했기 때문에 적은 사람이 기다리는 현시는 너무 오랫동안 기다려야 하거나 아예 길을 건널 수 없는 상황에 처할 가능성이 있다. [Fig. 20]의 Time check 스크립트는 이러한 문제점을 해결하기 위해 설계된 보조 스크립트로, 12개의 현시에서 각각의 현시를 가장 오랫동안 기다린 사람의 대기시간을 실시간으로 체크하다가 대기시간의 최대치(maxtime)를 초과하면 호출되는 스크립트이다. 이 스크립트는 Best fit_Judge와 같이 정체

량이 가장 큰 현시 셋 번호를 저장하는 스크립트인데, 최대치 이상으로 기다린 현시를 포함하는 현시 셋 중에서 정체량이 가장 큰 현시 셋의 번호를 저장한다. Time check에서 호출된 현시 셋 번호는 항상 Best fit_Judge에서 호출된 현시 셋보다 우선시된다.

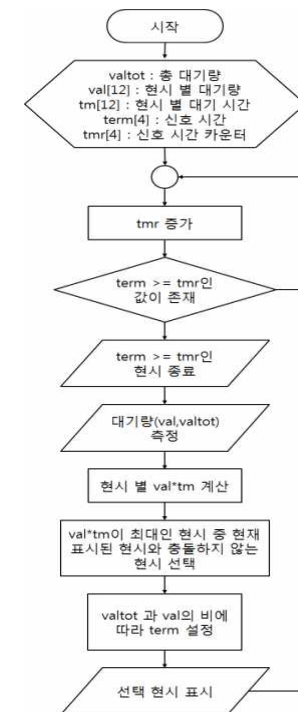
```
MAX=0;
num=global.gnum;
k=0;
for(i=1;i<=12;i+=1)if(global.w[i]>=global.maxtime)k=i;

for(i=1;i<=17;i+=1){
    if(global.litset[i,k])
    {
        sum=0;
        for(j=1;j<=12;j+=1)if(global.litset[i,j])sum+=global.cnt[j]*global.cvs[m[j]]*global.w[j];
        if(sum>=MAX){MAX=sum;num=i;}
    }
}
global.gnum=num;
```

[Fig. 20] Script of Time check

다) Multi_overlap 알고리즘

이 알고리즘은 현시 셋을 무시하고 각각의 신호에 서로 다른 시간을 부여하여 엇갈려 신호를 표시하는 방식이다. 어떤 신호가 할당된 시간이 끝나 종료된다면 앞의 Best fit 방식과 같이 (대기량 x 대기시간)으로 순위를 매기게 된다. 이때, Best fit 방식과 달리 현시 셋에 포함된 (대기량 x 대기시간)의 합을 구하는 것이 아니라 각 신호별로 각각 구하여 내림차순으로 정렬한다. 이로써 현재 가장 정체량이 큰 차선을 선별한다. 만약 그 차선이 현재 표시되고 있는 신호의 차선과 충돌할 경우 다음 순위의 신호를 확인하여 현재 표시되고 있는 차선과 충돌하지 않는 것에 한하여 정체량이 가장 큰 차선을 선별해 다음 신호로 정한다. 이때, 그 차선의 현재 대기량에 따라 대기량이 많으면 그 신호에 더 긴 시간을 부여한다. 이러한 알고리즘을 적용할 때 충돌 방지를 위해 신호를 지나치는 방식 때문에 몇몇 신호는 표시되지 않는 오류가 발생한다. 그러므로 일정 시간, 혹은 일정 개수의 신호가 표시되는 동안 한 번 표시된 신호는 다시 켜지지 않게 하거나, 일정 순위 이하의 신호는 다음 신호 후보로 인정하지 않는 등 보정을 거쳐야 한다. 메커니즘은 [Fig. 21]과 같다.



[Fig. 21] Mechanism of Multi_overlap

- create_변수설정

Multi_overlap 코드에 쓰일 변수들을 초기화한다. 특히 1)의 <Table 2>의 현시 간 충돌여부를 avail 배열에 입력한다. avail[i,j]는 i와 j 현시가 충돌하지 않는 것을 의미한다.

- step_종료 판정

Multi_overlap 알고리즘에서는 각 현시가 켜지고 꺼지는 시간이 앞의 알고리즘과 다르게 불규칙적이기 때문에 매 step마다 현시 표시시간 초과 여부를 확인해야 한다. [Fig. 22]의 1번째 줄에서 현재 표시된 현시에 주어진 시간을 비교하며 종료할 때가 되었는지를 판단한다. 만약 시간이 초과되었다면 trafficlight(sig[i],0) 구문을 사용하여 초과된 현시를 종료한다. [Fig. 22]의 2-3번째 줄에서 앞서 말했던 보정 과정을 거치게 된다. global.maxtime은 한 현시가 꺼진 상태로 존재할 수 있는 최대 시간을 의미한다. 이때, 각 현시가 꺼져있는 시간 즉 대기시간을 확인하여 global.maxtime을 초과한 현시는 must 배열에 기록하여 최대한 빨리 켜질 수 있도록 한다.

그 예로 현재 1번 현시가 표시된 상황이고 그와 충돌하는 5번 현시의 대기시간이 global.maxtime을 초과했다고 가정하면, 이때, 1번 현시와 충돌하지 않는 2번 현시가 표시될 수 있는 상황이라도 5번 현시의 표시가 늦어질 수 있으므로 2번 현시를 표시하지 않고 다음 현시 결정 때 5번 현시를 표시하게 된다. 그리고 [Fig. 22]의 2-5번째 줄에서 각 현시의 대기량을 기준으로 다음 현시를 결정하기 위해 현시 별 (대기량 x 대기시간)을 구해 내림차순으로 정렬한다.

```

for(i=1;i<=4;i+=1){if(sig[i]){tm[i]+=1;if(tm[i]>=tms[i]){trafficlight(sig[i],0);ons[sig[i]]=0;sig[i]=0;cnd=1;}}}
for(i=1;i<=12;i+=1){
if(global.w[i]>global.maxtime)must[i]=1;sortv[i]=global.cnt[i]*global.w[i]*global.cvsm[i];sorti[i]=i;vsum+=sortv[i];}
for(i=1;i<=11;i+=1)for(j=1;j<=12;j+=1)
    if(sortv[i]<sortv[j]){tmp=sortv[i];sortv[i]=sortv[j];sortv[j]=tmp;tmp=sorti[i];sorti[i]=sorti[j];sorti[j]=tmp;}

```

[Fig. 22] Script of Multi_overlap step termination decision

- step_현시 결정

[Fig. 23]은 step_종료판정에서 정렬한 (대기량 x 대기시간)을 바탕으로 다음 표시될 현시를 결정하는 코드이다. Multi_overlap 알고리즘은 각각의 현시가 켜지는 시간이 다른 현시의 시간과 관계가 없는 방식이기 때문에 다음 현시를 결정하는 순간에도 다른 현시가 이미 표시되고 있다. 따라서 새 현시를 결정할 때에는 현재 표시되고 있는 현시와 충돌하지 않는 한에서 선택해야 한다. 따라서 [Fig. 23] 코드에서 (대기량 x 대기시간) 순위가 높은 현시부터 avail 배열을 통해 현재 표시되고 있는 현시와 충돌하는지를 판정하여야 한다. 또한 step_종료판정에서 기술된 must배열에 표기된 현시와 겹치지 않는 한에서 현시를 선택한다. 그리고 하나의 현시를 연속하여 여러 번 표시하거나 어느 한 현시가 완전히 틀어지지 않게 되는 것을 방지하기 위해 [Fig. 23]의 9번째 줄에서 표시되지 얼마 되지 않은 현시는 표시될 수 없게 하였다. 마지막으로 21번째 줄에서 현재 순위가 1위이나 현재 표시되고 있는 현시와 충돌하여 표시될 수 없는 현시를 must 배열에 기록하여 최대한 빨리 표시될 수 있게 보장하였다.

```

if(cnd)
{
    ords=1;
    for(i=1;i<=4;i+=1)
    {
        if(sig[i])continue;
        for(tmp=0;ords<=12;ords+=1)
        {
            if(ons[sorti[ords]] or cnts[sorti[ords]]<lims)continue;
            tmp=0;
            for(j=1;j<=12;j+=1)if(must[sorti[ords]]!=0 and must[j]!=0 and (1-avail[j,sorti[ords]])){tmp=1;break;}
            for(j=1;j<=4;j+=1){if(sig[j]){if(1-avail[sig[j],sorti[ords]]){tmp=1;break;}}}
            if(tmp)continue;
            sig[i]=sorti[ords];ons[sig[i]]=1;cnts[sig[i]]=0;tm[i]=0;justs[i]=1;must[sorti[ords]]=0;
            for(j=1;j<=12;j+=1)cnts[j]+=1;
            if(sig[i]<=8)tms[i]=min(mint+(maxt-mint)*sortv[ords]/(vsum+1),mint+30*global.cnt[sig[i]]);
            else tms[i]=pt;
            break;
        }
    }
    if(ons[sorti[1]]!=0 and cnts[sorti[1]]>=lims)must[sorti[1]]=1;
}

```

[Fig. 23] Script of Multi_overlap step signal decision

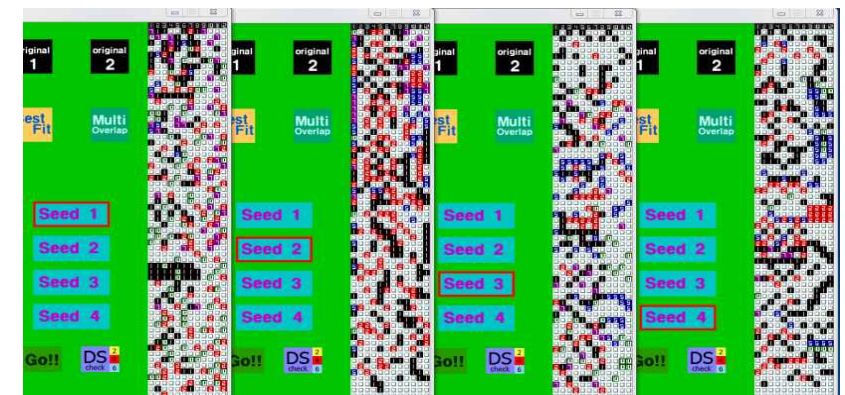
3) 시뮬레이터의 구현

개발한 알고리즘들을 실제로 구현하고 이를 시각적으로 확인할 수 있도록 게임메이커를 이용하여 교차로 시뮬레이터를 제작했다. 시뮬레이터를 통해 개발한 알고리즘들이 교통의 흐름과 대기시간에 얼마나 영향을 미치는지 알아보기 위해 임의의 교통 상황을 만들어 위의 세 가지 알고리즘에 동일하게 적용해 보았다. 실험을 위해 모의 상황 네 가지 경우를 설정하고, 상황별로 차량과 보행자의 정보를 만들어서 적용해 보았다.

가) 시드의 구성

3가지 알고리즘에 동일하게 적용하기 위한 차량 및 보행자의 정보를 저장하기 위해 시드(seed)⁸⁾라는 개념을 이용하였다. 시드(seed)를 이용해서 [Fig. 24]와 같이 모의 상황 네 가지 경우에 대해 개별적으로 만들었다.

시드의 가로방향은 1번부터 12번 경로를 나타내고, 세로방향은 위에서 아래로 순차적인 시간의 흐름을 나타낸다. 1번부터 12번 경로에 시간 순서에 따라 배치되어 차량과 보행자가 언제 얼마나 만들어지는지에 대한 정보를 담은 노드(node)로 구성된다. 노드에 표시된 숫자는 그 경로에서 나타날 차량 및 보행자의 수를 의미한다. 시드의 가로줄 하나를 읽고 대입할 때 걸리는 딜레이(delay)는 200 step(=6.667초)로 설정했으며, 시뮬레이터가 알고리즘에 시드를 끝까지 대입하는데 걸리는 시간은 총 7 분이다.

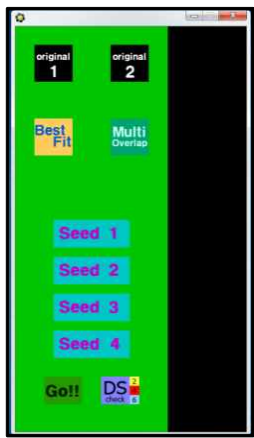


[Fig. 24] Four kinds of appearance of seeds

나) 인터페이스 구성

[Fig. 25]의 상단에 보이는 4개의 버튼을 이용하여 시뮬레이터로 시각화할 알고리즘을 선택할 수 있고, 중간에 보이는 시드 Seed 1, 2, 3, 4 버튼으로 임의의 교통 상황을 지정할 수 있다. 하단의 Go 버튼으로 시간제한 없이 시뮬레이터를 실행할 수 있고, DS check 2, 4, 6 버튼으로 시뮬레이터를 각각 2분, 4분, 6분 동안만 실행시킬 수 있는 시간을 지정할 수 있다. Go 버튼은 임의의 교통상황에서의 교통정체를 특정한 알고리즘이 전부 해결하는데 걸리는 시간을 비교하는데 사용하였고, DS check 2, 4, 6 버튼은 임의의 교통상황을 정해진 시간동안만 실행시켜봄으로써 각 알고리즘의 세밀한 분석과 포화도를 계산하는데 사용하였다.

8) 차량 및 보행자가 언제 어디서 얼마만큼의 양으로 나타나는지에 대한 정보를 저장한 것.

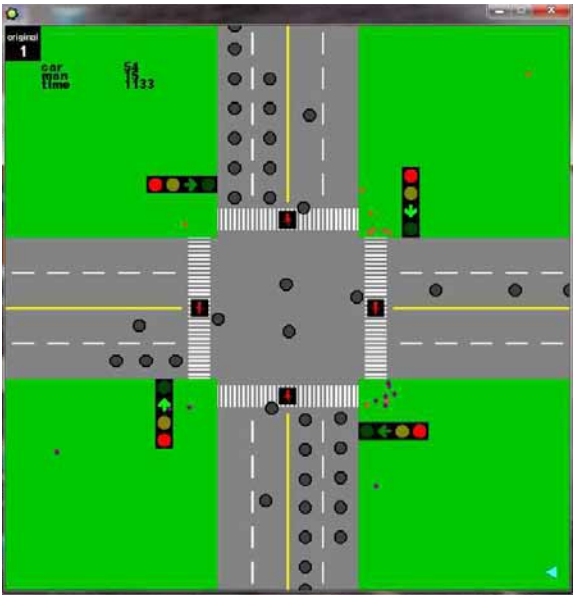


[Fig. 25] Startup screen of simulator

다) 시뮬레이터 실행

시뮬레이터를 실행시키면 [Fig. 26]과 같은 인터페이스가 보인다. 이 인터페이스를 통해 현시가 어떻게 들어지는지 확인하고, 차량과 보행자들의 이동을 시각적으로 확인할 수 있다.

좌측 상단의 총 3개의 값이 표시되는데, 첫 번째 값은 현재까지 지나간 차량의 수, 두 번째 값은 현재까지 지나간 보행자의 수, 세 번째 값은 시뮬레이터가 실행되고 있는 시간을 나타낸다.



[Fig. 26] Running screen of simulator

4) 알고리즘 효율 비교

모의 상황 네 가지 경우를 다음과 같이 설정하고, 각 경우를 기본 알고리즘과 개발한 알고리즘에 적용하여 효율을 비교하였다.

상황 1. 한 도로에 갑작스럽게 많은 양의 차량이 통행하게 되며, 이런 현상이 여러 도로에 반복되는 상황이다.

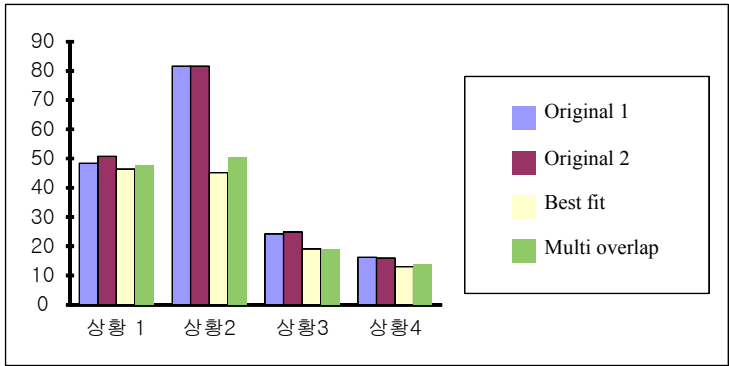
- 상황 2. 1번 방향의 도로만 막히는 상황으로 초반엔 보행자도 함께 몰리다가 뒤로 갈수록 보행자는 적게 몰리는 상황이다.
- 상황 3. 처음 8타입정도 보행자와 차량이 모두 적게 오는 경우와 다음 타임부터 그 반대인 모든 방향의 도로에서 보행자와 차량이 모두 많은 상황이다.
- 상황 4. 처음엔 대체적으로 차는 적게 오면서 보행자가 많은 상황이며, 그 후 반대로 차는 많이 몰리고 보행자가 적게 오는 상황이다.

가) 평균 대기시간 비교

본 연구에서 알고리즘을 설계하는 기본적인 목적이 대기하는 시간을 최대한 줄여 모든 차량과 보행자가 최대한 빨리 교차로를 원활히 빠져나가는 것이기 때문에, 각각의 차량과 보행자가 교차로에 등장하는 시간부터 신호가 켜져 대기 열을 빠져나가는 순간 까지를 대기시간으로 설정하고, 차량 한 대에 사람이 3명 타고 있다고 가정하여 알고리즘별 사람들의 평균 대기시간을 구하였다.

<Table 5> The average waiting time for each algorithm

모의 상황	Original 1	Original 2	Best fit	Multi_overlap
상황 1(시드1)	48.41	50.79	46.38	47.69
상황 2(시드2)	81.65	81.65	45.16	50.50
상황 3(시드3)	24.19	24.86	19.06	18.83
상황 4(시드4)	16.22	15.97	12.99	13.86



[Fig. 27] The average waiting time for each algorithm

<Table 5>와 그에 따른 비교 그래프 [Fig. 27]과 같이 각 상황(시드)에서 사람들의 평균 대기시간을 구했을 때 Original 1, Original 2 알고리즘 보다 Best fit과 Multi_overlap 알고리즘이 더 짧은 대기시간 결과가 나왔다. 이는 개발한 알고리즘으로 신호 체계를 구현하면 사람들이 더 빠르게 교차로를 통과할 수 있다는 가능성을 확인한 것이다.

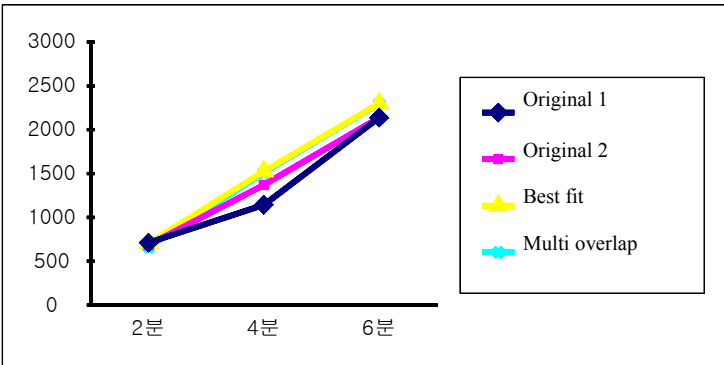
나) 지나간 사람 수 비교

상황별(시드별)로 시뮬레이터를 실행하고 일정한 시간이 지난 후 지나간 사람의 수를 측정하였다. 차량 1대는 사람 3명으로 간주하였다.

- 상황 1(시드1)에 대한 모의실험 결과

<Table 6> The number of People were passed in measuring time for seed 1

측정시간	Original 1	Original 2	Best fit	Multi_overlap
2분	711	686	704	663
4분	1144	1372	1526	1512
6분	2139	2140	2301	2299

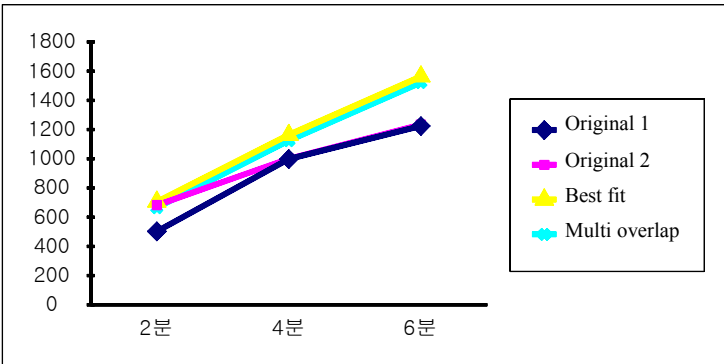


[Fig. 28] The number of People were passed in measuring time for seed 1

- 상황 2(시드2)에 대한 모의실험 결과

<Table 7> The number of People were passed in measuring time for seed 2

측정시간	Original 1	Original 2	Best fit	Multi_overlap
2분	503	682	705	665
4분	999	1001	1164	1125
6분	1225	1234	1563	1523

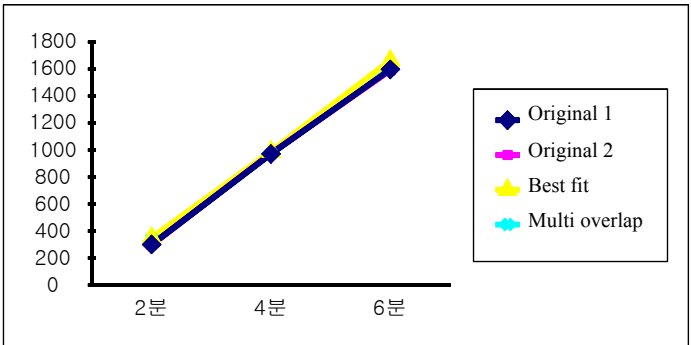


[Fig. 29] The number of People were passed in measuring time for seed 2

- 상황 3(시드3)에 대한 모의실험 결과

<Table 8> The number of People were passed in measuring time for seed 3

측정시간	Original 1	Original 2	Best fit	Multi_overlap
2분	300	298	350	346
4분	972	975	989	980
6분	1598	1592	1663	1622

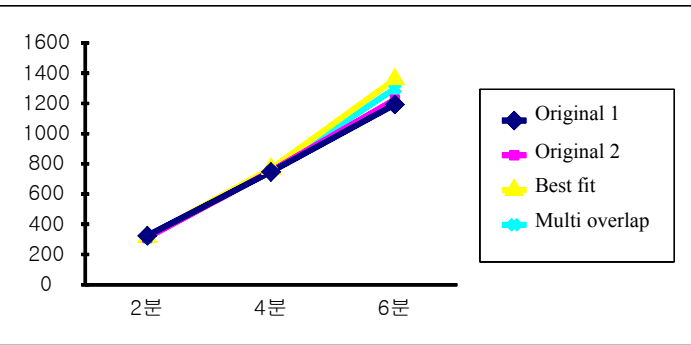


[Fig. 30] The number of People were passed in measuring time for seed 3

- 상황 4(시드4)에 대한 모의실험 결과

<Table 9> The number of People were passed in measuring time for seed 4

측정시간	Original 1	Original 2	Best fit	Multi_overlap
2분	324	311	318	311
4분	747	752	768	755
6분	1194	1226	1360	1298



[Fig. 31] The number of People were passed in measuring time for seed 4

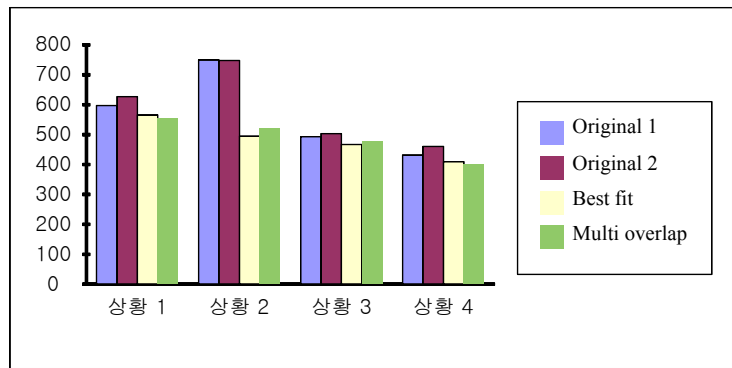
<Table 5-9>와 그에 따른 비교 그래프 [Fig. 28-31]과 같이 각각의 상황에 알고리즘을 적용시켜 시간 대별로 분석해 본 결과, 모든 경우에서 대체적으로 Original 1, Original 2 알고리즘 보다 Best fit과 Multi_overlap 알고리즘이 같은 시간에 더 많은 사람을 지나가게 한다는 것을 알았다. 또한, Besti fit과 Multi_overlap 알고리즘은 시간이 지날수록 효율이 점점 더 좋아지며, 모든 방향에서 정체가 있을 때 보다, 특정한 방향에서의 정체가 심할 때 알고리즘의 효율이 극대화됨을 알았다.

다) 종료시간 비교

상황별(시드별)로 시뮬레이터를 시간제한 없이 실행시키고 주어진 교통상황을 전부 정리해 시뮬레이터가 종료될 때 까지 걸리는 시간을 측정했다.

<Table 10> End times for each algorithm

모의 상황	Original 1	Original 2	Best fit	Multi_overlap
상황 1(시드1)	597.13	626.9	565.13	554.53
상황 2(시드2)	749.67	748.03	495.1	519.93
상황 3(시드3)	492.67	503.37	466.73	477.7
상황 4(시드4)	431.73	460.1	409.57	399.37



[Fig. 32] End times for each algorithm

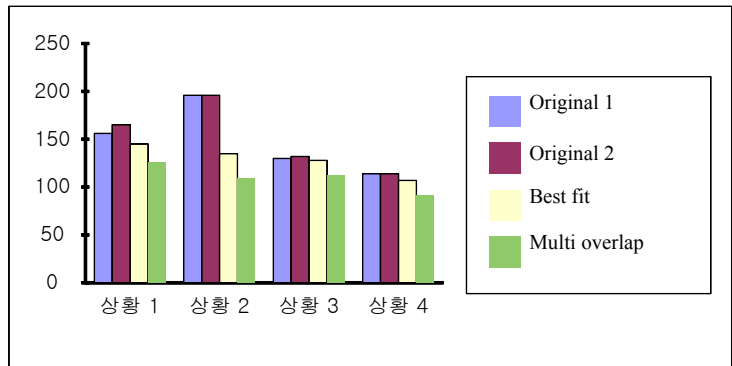
<Table 10>과 그에 따른 비교 그래프 [Fig. 32]와 같이 각 상황별(시드별)로 특정 알고리즘을 사용할 때 시뮬레이터의 종료 시간을 측정하여 비교해 본 결과, 모든 경우에서 Original 1, Original 2 알고리즘 보다 Best fit과 Multi_overlap 알고리즘이 더 교통상황을 빨리 정리한다는 것을 알았다.

라) 신호 변환 횟수 비교

출발 지체 시간⁹⁾은 해당 차선의 차량이 빠른 시간 내에 지나가는데 영향을 미치며 이는 멈추는 횟수, 즉 신호 변환 횟수가 증가할수록 늘어난다. 따라서 신호 변환 횟수가 교통 흐름에 영향을 미칠 수 있기에 실험해 보았다. 각 알고리즘별 시드를 실행하는데 신호를 변환하는 횟수이다.

<Table 11> Signal conversion frequency of each algorithm

모의 상황	Original 1	Original 2	Best fit	Multi_overlap
상황 1(시드1)	156	165	145	126
상황 2(시드2)	196	196	135	109
상황 3(시드3)	130	132	128	112
상황 4(시드4)	114	114	107	91



[Fig. 33] Signal conversion frequency of each algorithm

<Table 11>과 그에 따른 비교 그래프 [Fig. 33]과 같이 네 개의 알고리즘의 표시되는 현시 수를 세어보니 모든 시드에서 Original 1, Original 2 알고리즘 보다 Best fit과 Multi_overlap 알고리즘이 더 적은 현시를 이용하여 모든 차량과 사람을 지나가게 하였다. Best fit과 Multi_overlap 알고리즘이 출발 지체의 영향을 덜 받아 낭비하는 시간이 적다는 것을 알 수 있다.

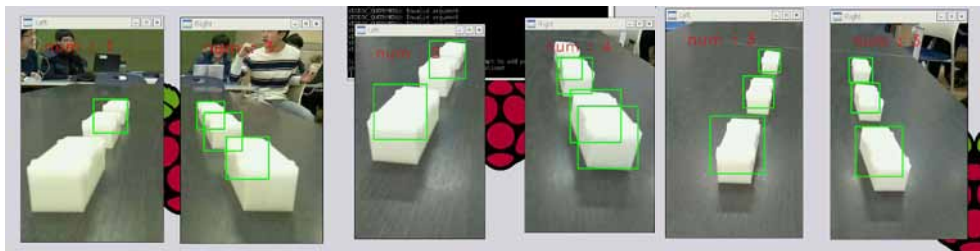
III. 연구 결과

1. 개체 감지에 대한 정확도

차량 수를 측정하기 위해 카메라를 사용하였고, 카메라로 개체를 감지하기 위해 개체를 학습한 데이터를 이용하였다. 학습하여 얻은 데이터와 비슷한 모양의 개체를 인지하여 수량 측정하는 방법으로 연구를 진행하였다. 연구 결과는 다음과 같다.

첫째, 카메라로 개체를 인식하여 수량을 셀 수 있었다. 다소 정확하게 검출되지 않거나 전혀 검출되지 않은 부분이 있기도 했다. 개체를 학습한 데이터가 그 개체를 감지하기 위한 기준이 되기에 기준 설정이 미흡하면 개체 감지율이 낮아졌다. 현재까지 연구 진행 결과 개체 감지에 간혹 오류가 발생하였는데 그 이유가 학습에 의한 것인지 다른 요인에 의한 것인지는 과제로 남았다.

둘째, 카메라의 설치 높이는 [Fig. 34]와 같이 높을수록 인식률이 높아지는 것을 알 수 있었다. 카메라 센서를 실제 교통 상황에 적용한다면 현재 설치된 횡형 신호등보다 높은 위치에 설치하는 것이 바람직하다.



[Fig. 34] From left, the result of having recognized when placed in 6 cm, 7.5 cm, 12 cm

9) 차량은 신호를 받기 전에 정지해 있으며 본래 속도를 갖게 될 때까지 가속을 하게 되는데 이 시간을 출발 지체 시간이라고 한다.

본 연구의 결과, 효율적인 신호 체계를 위해 차량 수를 측정하기 위해 카메라를 사용할 수 있다는 것을 알게 되었고, 개체의 정확한 측정을 위해서는 개체에 대한 정확한 사전 학습이 필요하다는 것을 알게 되었다. 또한, 횡형 신호등보다 높은 곳에 카메라를 설치하면 보다 정확하게 개체를 측정할 수 있다는 결과를 도출하였다.

2. 알고리즘의 효율성

실험한 네 가지의 상황에서 Original 1, Original 2 알고리즘 보다 Best fit과 Multi_overlap 알고리즘이 사람들의 평균 대기시간이 더 짧았다. 즉, 사람들이 더 빠르게 교차로를 통과할 수 있다는 것을 알 수 있다. Original 1, Original 2 알고리즘 보다 Best fit과 Multi_overlap 알고리즘이 같은 시간에 더 많은 사람을 지나가게 한다는 것을 알았다. 또한, Best fit과 Multi_overlap 알고리즘은 시간이 지날수록 효율이 점점 더 좋아지며, 모든 방향에서 정체가 있을 때보다, 특정한 방향에서의 정체가 심할 때 알고리즘의 효율이 극대화됨을 알았다. 각 상황별로 특정 알고리즘을 사용할 때 시뮬레이터의 종료 시간을 측정하여 비교해본 결과, 모든 경우에서 Original 1, Original 2 알고리즘 보다 Best fit과 Multi_overlap 알고리즘이 더 교통상황을 빨리 정리한다는 것을 알았다. 네 개의 알고리즘의 표시되는 현시 수를 세어보니 모든 상황(시드)에서 Original 1, Original 2 알고리즘 보다 Best fit과 Multi_overlap 알고리즘이 더 적은 현시를 이용하여 모든 차량과 사람을 지나가게 하였다. Best fit과 Multi_overlap 알고리즘이 출발 지체의 영향을 덜 받아 낭비하는 시간이 적다는 것을 알 수 있다.

Original 알고리즘과 같이 정해진 시간동안 정해진 현시 셋을 반복적으로 실행하는 것보다 현재의 차량과 보행자수를 바탕으로 Best fit과 같이 현시 셋 중에서 가장 정체량이 큰 현시 셋을 실행하는 것이 더 효율적이라는 결론을 얻었다. 또한 Multi_overlap과 같이 각 신호별 정체량에 따라 가장 정체량이 큰 현시 셋을 실행하되, 다음 순위의 신호 선택 시 현재 표시되고 있는 차선과 충돌하지 않는 것에 한하여 정체량이 가장 큰 차선을 선별하는 방법도 Original 알고리즘보다 효율이 좋았다.

IV. 고찰

연구를 시작하면서 카메라를 이용한 교통량 분석을 위하여 OpenCV를 이용하였다. 입력되는 영상에 부분영역을 설정하였다. 부분영역에 해당하는 픽셀 값의 평균을 계속해서 측정하고 있다가 평균값이 갑자기 변하게 되면 그때 차량이 있다고 감지하려 했다. 그러나 차량이 지나가는 도중에도 평균값의 변화량이 너무나 불규칙적이라 다양한 방법을 적용해도 제대로 개체량을 측정할 수 없었다. 여러 시행착오 끝에 학습을 통하여 개체를 인지하는 방법을 생각하고 OpenCV의 물체 인식 기능을 활용하여 연구를 진행하게 되었다.

지금까지 구현한 개체 검출 프로그램은 학습시킨 파일을 기반으로 물체를 판별하고 판별된 개수를 출력해주는 수준까지 구현에 성공했다. 하지만 본 연구에서 사용한 자동차 모델이 작은 직육면체 모양이라 비슷한 사각형의 물체를 인식하는 등의 잘못된 물체를 인식하는 경우가 종종 발생했다. 조명에 따라 인식률이 달라지는 문제점도 발생했다. 따라서 본 연구에서 제작한 자동차 모델이 좀 더 명확한 윤곽선을 가질 수 있도록 디자인을 수정하고, 검출하고자 하는 개체에 대하여 보다 정확하게 학습될 수 있는 방법을 모색하여 좀 더 정확하게 인식할 수 있는 프로그램을 구현하도록 해야 한다. 이번 연구에서는 차량에 대한 인식 부분만 진행된 상태이다. 후행 연구는 보행자 판별을 위해 사람을

감지하는 실험도 진행해 보았으면 한다.

Multi_overlap 알고리즘의 대략적인 구조를 만드는 것은 어렵지 않았지만 Multi_overlap 알고리즘의 효율을 결정하는 것은 현시 별 시간 배분과 다음 현시를 결정할 때 모든 현시가 공평하게 표시되도록 하는 보정 작업이었다. 현시 표시의 최소 시간과 최대 시간을 어떻게 바꾸느냐에 따라 Original 알고리즘보다 효율이 안 좋아지기도 하였다. 또한 보정작업의 정도를 바꿈에 따라 포화도의 표준편차가 매우 크게 나오기도 하였다. 이 연구를 기반으로 연구가 계속된다면 알고리즘 간의 비교가 아니라 위와 같은 알고리즘 내의 상수값에 따라 변화하는 포화도를 측정하여 가장 적절한 Multi_overlap 알고리즘을 만들 수 있을 것이다.

카메라 센서를 이용하여 대기하는 개체 수(차량 및 보행자)를 감지하고, 감지된 데이터에 의해 최적의 신호가 실행되는 신호 제어 시스템을 만들어 모의 상황에 적용하는 시뮬레이션까지 연구하려 했다. 하지만 모의 상황 구축에 어려움이 있어 각각의 연구가 따로 진행된 상태이다. 추후 개체 인식과 연동된 모의 상황 시뮬레이션까지 구현해보면 더 좋은 연구가 될 것이다. 또한, 교차로 하나만을 염두하고 진행되었기에 그 전후의 교차로 상황을 고려한 연구도 진행되면 좋을 듯하다.

V. 결론

본 연구에서 카메라로 차량 수를 감지하고, 차량이 움직이는 패턴을 학습한 알고리즘을 모의 교통 신호 시스템에 적용한 결과 다음과 같은 함의를 얻을 수 있었다.

첫째, 라즈베리파이 카메라로 자동차를 인식하여 교통 정보를 얻을 수 있었다. 인식된 교통 정보를 바탕으로 효율적 알고리즘을 적용해 보았다. 그 결과 기존의 교통 신호 제어 시스템보다 주어진 통행량을 빠른 시간에 제어할 수 있었다. 똑같은 상황에서 기존의 시스템보다 더 효율적인 교통 통제를 할 수 있다는 것은 본 연구 결과를 사용하여 교통 신호의 새로운 패러다임을 열 수 있다는 의미이다.

둘째, 현재 도로 곳곳에는 많은 CCTV가 있다. CCTV의 용도가 방법용 혹은 교통 흐름을 조사하기 위한 것에 머물고 있다. 본 연구 결과에서 카메라를 높이 설치할 경우 더 정확한 인식을 할 수 있었다. 본 연구는 축소 모형을 통해 신호등에 카메라를 설치할 경우에 대해서만 실험했다. 만약 카메라의 종류와 성능에 대한 제한을 극복하고, 기존의 CCTV와 연동될 수 있다면 훨씬 수월하게 차량을 인식하고 교통을 통제할 수 있을 것이며 막대한 카메라 설치 경비도 절감할 수 있을 것이다.

셋째, 카메라로 인식한 데이터를 사용하여 교통 신호를 제어할 경우, 차량 흐름에 대한 데이터가 축적되어 전반적인 교통 시스템 구축의 데이터베이스를 구축할 수 있을 것이다. 카메라를 통한 인식은 교통 신호 제어뿐만 아니라 공공 데이터로 많은 생활에 도움을 줄 것이다. 현대 사회는 공공 데이터를 통해 사회 전반의 시스템을 구축하는 것이 패러다임이다. 본 연구는 그런 패러다임과 부합하는 연구로 부상할 수 있을 것으로 기대된다.

넷째, 기존 교통 제어 시스템에 비해 차량의 평균 대기시간이 줄어들어 차량의 연료비가 줄어들 것이다. 최근 교통 신호 대기나 차량 정체 시 시동이 꺼지는 기능을 가진 자동차가 많이 등장하였다. 이런 기능이 탑재되어 있는 차량이 증가했다는 것은 교통 체증이 늘어나고 있다는 것을 의미하기도 하며, 에너지 절약이 소중한 것임을 나타내기도 한다. 본 연구의 결과물을 교통 체증 해소와 에너지 절감이라는 두 영역을 전부 해결할 수 있는 효율적인 시스템으로 제안해본다.

VI. 참고문헌

[1] 고광용 (2015). 스마트 신호제어시스템 개발 현황과 교차로의 미래. **한국정보통신기술협회**, 160, 44-50.

[2] 김종철. (2007). **경주시 지능형 교통신호를 위한 교통제어 전략 및 구축에 관한 연구**. 석사학위 논문. 경주대학교 대학원, 경주.

[3] 김태길, 도명식(2009). **실시간 교통신호 제어시스템 실증 분석을 통한 개선 및 평가**. 석사학위 논문, 한밭대학교 산업대학원, 대전.

[4] 박윤선 (1999). 지능형 교통체계에서의 신호제어와 동적 경로안내. **산업경영시스템학회지**, 22(50), 333-340.

[5] 심우석, 이용두, 홍원기 (2007). **차량도로간 통신기반의 교통신호제어 기법에 관한 연구**. 공학석사 학위논문. 대구대학교 대학원, 대구.

[6] 안민준, 박준열 (2005). **최적 교통신호 제어를 위한 제어모형 알고리즘 개발**. 석사학위논문. 홍익대학교 대학원, 서울.

[7] 양윤석, 안병원 (2013). **PIC Microcontroller를 활용한 교차로 교통신호 제어시스템에 관한연구**. 공학석사 학위논문. 목포해양대학교 기관시스템공학과, 목포.

[8] 노기석 (2003). **차량 트래픽 자동 생성 시뮬레이터**. 석사학위 논문. 동국대학교 대학원, 서울.

[9] 원재무 (2000). **알기 쉬운 도시교통**. 서울: 박영사.

[10] 이재상, 표윤석 (2013). **라즈베리파이 활용백서**. 고양: 비제이퍼블릭.

[11] 한상윤, 박윤규 (2006). **지능형 교통체계의 활성화 방안과 교통신호 제어 전문가 시스템 모델에 관한 연구**. 석사학위논문. 용인대학교 경영대학원, 용인.

[12] 한원석 (2010), 표준규격 교통신호제어기 합체 소형화 설계 방안 연구(A Study on the Downsizing Design for the Standard Traffic Signal Controller's Cabinet), **교통안전연구논집**, 29

[13] 허경용 (2014). **아두이노 상상을 스케치하다**. 파주: 제이펍.

[14] FGSV (2014). **교통신호체계론**. 파주: 청문각.

[15] 도로교통공단 홈페이지. (웹문서) https://www.koroad.or.kr/kp_web/knTrafficSign2-01.do (검색일: 2015.6.24).

[16] 네이버 블로그.. <http://blog.naver.com/jaehyubious> (검색일: 2015.9.19.).

[17] 티스토리 홈페이지. <http://darkpgmr.tistory.com/73> (검색일: 2015.9.15).

[18] 티스토리 홈페이지. <http://darkpgmr.tistory.com/16> (검색일: 2015.9.17).

[19] 티스토리 홈페이지. <http://darkpgmr.tistory.com/70> (검색일: 2015.9.19).

[20] Upton, E., & Halfacree, G. (2015). **거침없이 배우는 라즈베리 파이**. 고양: 지앤선.

[21] Brodsky, G., & Keller, A. (2009). **Open CV 제대로 배우기**. 서울: 한빛미디어.

[22] Monk, S. (2015). **Raspberry Pi Cookbook**. 서울: 한빛미디어.

[23] TECHNOBIUM 홈페이지. <http://technobium.com/object-detection-with-opencv/> (검색일: 2015.10.5)

[24] Cornell University 홈페이지. <http://www.cs.cornell.edu/courses/cs4670/2012fa/projects/p5/index.html> HOG (검색일: 2015.7.23).

| 연구진 |

류지석 (Ryu Jiseok, 인천과학고등학교, roadmageb@naver.com)

권해진 (Kwon Haejin, 인천과학고등학교, haejin1320@gmail.com)

정승연 (Jung Seongyeon, 인천과학고등학교, jsy990412@naver.com)

채정범 (Chae Jeongbeom, 인천과학고등학교, chae_jb@naver.com)

최원석 (Choi Wonseok, 인천과학고등학교, cws991104@naver.com)

지도교사 : 조윤정 (Cho Yunjeong, 인천과학고등학교, 정보 · 컴퓨터, best3647@naver.com)

지도연구원 : 고광용 (Ko Gwangyong, 도로교통공단 교통과학연구원, gwangyong@gmail.com)

개인화된 부분 이미지를 활용한 새로운 훔쳐보기 방지 기법

김기홍 · 김창훈 · 김상은 · 안수영 · 이가은 – 부산과학고등학교

A New Anti-Shoulder Surfing Method Using Personalized Sub-Image

Kim Kihong · Kim Changhun · Kim Sangeun · An Suyeong · Rhee Kaeun - Busan Science High School

ABSTRACT

The accessibility to mobile devices and the amount of exposed private information have increased rapidly since smart devices were released. Private information disclosure through shoulder surfing has been one of serious problems which are continually increasing. This research suggests a new password input method which has better resistance for both shoulder surfing and random attack, and has easier usability. To prevent shoulder surfing, we have researched the method to cut the personalized image which the user only knows into the appropriate portion of it, to add a variety of partial images, to put a square arrangement in random and pick up sub-images of user's private pictures. In addition, we suggest the best condition to apply the new method in real password system through various experiments in progress.

Key words:
Shoulder-Surfing, Personal, Sub-Images, Color Distribution, Password

국문초록

스마트기기의 보급 이래로 모바일 기기에 대한 접근성이 향상됨에 따라, 유출되는 개인정보의 양도 기하급수적으로 증가하고 있다. 많은 문제 중 최근 대두하고 있는 어깨너머 훔쳐보기(Shoulder surfing)로 인한 개인정보 유출은 매우 심각한 문제이다. 본 연구에서는 훔쳐보기 공격과 랜덤 공격에 대한 저항성을 더욱 높이고 사용하기 편리한 새로운 암호 입력 기법을 제시한다. 우리는 훔쳐보기를 방지하기 위해 사용자 자신만이 아는 개인화된 이미지를 적당한 부분 이미지로 자르고 다른 여러 개의 부분 이미지를 추가하여 정사각형 배열에 무작위로 배치하여 그중 자신의 사진을 골라내는 기법으로 훔쳐보기 방지에 대해 연구하였다. 또한, 이를 실제로 적용하기 위한 여러 가지 실험을 진행하여 새로운 기법에 적용할 수 있도록 최적의 조건을 제시한다.

중심어 :
어깨너머 훔쳐보기, 개인화, 부분 이미지, 색 분포, 패스워드

I. 서론

개인정보보호의 중요성이 높아짐에 따라 노트북이나 스마트폰을 잠금 해놓는 경우가 많다. 기기의 잠금을 해제하기 위해서는 개인을 인증해야 하는데 많은 기기에서 숫자나 문자로 구성된 패스워드를 입력하는 방법을 사용하고 있다. 그러나 사람이 많은 장소에서 패스워드를 입력해야 할 때 어깨너머 훔쳐보기 공격(Shoulder surfing attack)에 주의해야 한다[8]. 훔쳐보기 공격은 패스워드 등의 중요정보를 기기에 입력하고 있는 사용자의 어깨너머로 몰래 훔쳐보는 등의 방식으로 사용자의 개인정보를 얻어내는 공격 방식을 말한다.

[Fig. 1]1)은 훔쳐보기의 전형적인 예를 잘 보여주고 있다. 현재 여러 전자 기기에서는 보안방법으로 흔히 4자리 비밀번호 혹은 패턴을 입력하는 방법을 채택하여 사용하고 있다. 이는 훔쳐보기 공격에 쉽게 노출되어 보안상의 취약점을 드러낸다.

1)좌측 사진 출처: <https://www.vice.com>



[Fig. 1] Typical examples of Shoulder Surfing (ATM, Smart phone)

[Fig. 2]²⁾는 훔쳐보기를 방지하기 위한 극단적인 방법이다. 최근 화면 훔쳐보기 해킹 프로그램을 사용하여 다른 사람의 PC를 훔쳐봐 5억 5천만 원 상당의 부당이득을 취하여 경찰에 적발된 사건도 발생하였다. 이와 같은 훔쳐보기 공격을 방지하는 방법으로는 크게 두 가지가 있는데, 첫 번째로는 [Fig. 2]처럼 상대방이 훔쳐보기 어렵게 하는 방법이 있고, 두 번째로는 상대방이 훔쳐보더라도 패스워드를 알아내기 어렵게 하는 방법이 있다. 실제로는 [Fig. 2]와 같이 극단적으로 훔쳐보기를 방지하는 방법은 사용이 불편하므로 우리는 후자의 방법으로 새로운 훔쳐보기 방지 기법을 제안한다.



[Fig. 2] Drastic examples of Anti-Shoulder Surfing

II. 본론

1. 이론적 배경

가. 관련 연구 조사

앞에서 언급한 바와 같이 훔쳐보기를 방지하기 위해 다양한 암호 체계들이 제안되어왔다. 암호 체계는 크게 텍스트 패스워드와 그래픽 패스워드로 분류된다. 그중 텍스트 패스워드는 입력 가능한 경우의 수가 많아 안전성이 높아서 오랫동안 사용되어 왔지만 훔쳐보기에는 매우 취약하다. 무인 카메라 한 대

만 있으면 사용자의 암호를 알아내는 것은 시간문제이기 때문이다. 그러므로 훔쳐보기를 방지하기 위해 제안되는 암호 체계는 대부분이 그래픽 패스워드이다. 패스워드 이미지 위에 다른 사진을 덧씌워 멀리서 보는 상대방에게는 제대로 된 패스워드가 보이지 않도록 하는 방법[7]은 암호 입력을 잘 알지 못하게 하는 방법이다. 또, 한붓그리기를 이용하여 패스 이미지를 순서대로 선택하는 동시에 마인 이미지를 선택하지 않는 패스워드[2]나 이미지 밝기 등을 조절하여 무작위로 배열한 후 사용자가 지정해 놓은 이미지를 순서대로 지나가는 곡선을 그리는 패스워드[5]의 경우는 훔쳐보아도 해독하기가 힘들다. 훔쳐보기에는 텍스트나 단순한 그림 또는 사진으로 구성된 패스워드가 취약하기 때문에[4] 텍스트 기반의 그래픽 패스워드도 제시된다. 기존의 패스워드 문자에서 3개씩 뽑아 각각의 패스 삼각형을 그린 후, 그 내부의 문자를 입력하는 방법[6]과 그리드 기반의 패스워드 기법을 개선하여 패스워드를 직접 입력하는 대신 주어진 $M \times N$ 입력 그리드 상에서 제한된 크기의 패스워드 윈도우(window) 내에 패스워드를 위치시키도록 함으로써 사용자를 인증하는 방법[1]도 제시되었다. 그밖에도 ATM 기기에서 QR코드를 활용하여 PIN 번호를 입력하는 방법[3]이 있다.

나. 패스워드 모델에 대한 고찰

[Fig. 3]은 연구자 중 한 명의 책상 사진이다. 사진 원본은 연구자의 사진임을 알 수 있는 요소들이 많아 다른 사람도 연구자의 사진임을 알아볼 수 있다.



[Fig. 3] Original photo of one of the experimenter's desk

[Fig. 4]는 원본 사진의 부분 이미지들이다. 각 부분 이미지에서 연구자의 사진과 책의 일부분이 보인다. 이처럼 원본 사진의 부분 이미지는 원본 사진 혹은 원본 사진에 찍힌 물건들에 익숙한 본인 외에는 인지할 수 없는 고유한 특징을 가지고 있으며 이러한 사진에 대해서는 훔쳐보는 사람이 이 사진이 사용자의 것인지 알아낼 수 없다. 이 성질이 본 연구의 주요 착안점이다. 훔쳐보기를 방지하기 위한 알고리즘으로 사용자 자신만이 아는 개인화된 이미지를 적당한 부분 이미지로 잘라 또 다른 부분 이미지와 함께 정사각형 배열에 무작위로 배치하여 그 중 자신의 사진을 골라내는 방법을 사용했다. 이를 구현하기 위한 프로그래밍 언어로는 PIL(Python Image Library)을 지원하여 이미지를 다루기 용이한 Python을 사용했다. 또한, 본 연구에서의 모든 실험은 Microsoft사의 Windows7 운영 체제의 노트북으로 수행하였고 display에서 부분 이미지의 크기는 100×100 픽셀로 하였다.



[Fig. 4] Sub-images of [Fig. 3]

패스워드가 보편화되고 상용화되기 위해서는 여러 가지 조건을 만족시켜야 한다. 무작위적인 공격에 대한 저항성이 충분해야 하며 사용자가 패스워드를 통과하는데 걸리는 시간이 적어야 한다. 먼저 무작위적인 공격에 대한 저항성을 고려하기 위하여 사용자가 아닌 사람이 임의로 답을 선택했을 때 그 답이 정답일 확률을 고려하여야 한다. 본 연구에서는 위의 확률 값이 $1/1000$ 보다 작을 때 무작위적인 공격에 대한 저항성이 충분하다고 정의한다. $n \times n$ 의 배열을 가진 사진 중 사용자의 사진의 개수가 k 개 일 때 무작위로 선택하여 사용자의 사진들을 모두 선택할 확률은 $1/n^2 C_k$ 이다. 즉 계산하여 얻은 확률 $1/n^2 C_k$ 가 $1/1000$ 보다 작을 때에 배열하는 사진의 개수와 사용자의 사진의 수의 비율이 잘 채택되었다고 할 수 있다. 이를 실제로 스마트폰과 같은 기기에 구현하고자 하면 화면의 크기를 고려해야 하므로 n 의 값은 5미만이 되는 것이 사용자의 인지 측면에서 적합하다. $n=3$, 즉 3×3 의 정사각형 배열에 사진을 배열할 때는 0에서 9 사이의 어떠한 자연수 k 에 대해서도 $1/9 C_k$ 가 $1/1000$ 이하가 되지 않는다. 따라서 우리는 3×3 의 정사각형 배열을 이용할 때 시행 횟수를 늘려 무작위적인 공격에 대한 저항성을 가지게 했다. 예를 들어, 9개의 사진 중 3개를 선택한다고 할 때 가능한 경우의 수는 ${}_9 C_3 = 84$ 가지 밖에 되지 않지만, 시행을 두 번 반복하게 되면 $({}_9 C_3)^2 = 7056$ 가지의 경우가 생기기 때문에 무작위적인 공격이 성공할 확률이 $1/1000$ 보다 작아지게 된다.

또한 고려해야 할 것은 사용자가 암호를 푸는 데 걸리는 시간이다. 실험을 통해 3×3 배열과 4×4 배열에서 각각 잠금 해제에 소요되는 시간을 측정한다. Python에 내장되어있는 함수 중 현재 시각을 알려주는 함수가 있다. 이를 이용하여 잠금 해제에 소요된 시간을 측정할 수 있다.

실험에서 사용되는 사진들의 색 구성과 관련하여 사용자의 사진을 판단할 수 있는지의 여부를 알기 위하여 각 사진에 대한 R, G, B값을 조사 할 필요가 있다. 이때 R, G, B값의 범위는 R, G, B 각각 0~255의 값을 가질 수 있으므로 가능한 R, G, B값의 경우의 수가 너무 많아 데이터 분석이 힘들다. 따라서 경우를 줄일 수 있도록 표준색을 지정할 필요가 있다. 어느 픽셀에 대하여 R, G, B값을 각각 조사한 후 각각의 표준색의 R, G, B값들과의 유클리드 거리를 계산한 후 가장 가까운 값의 거리를 가지는 표준색을 그 픽셀이 가지는 색으로 지정한다.

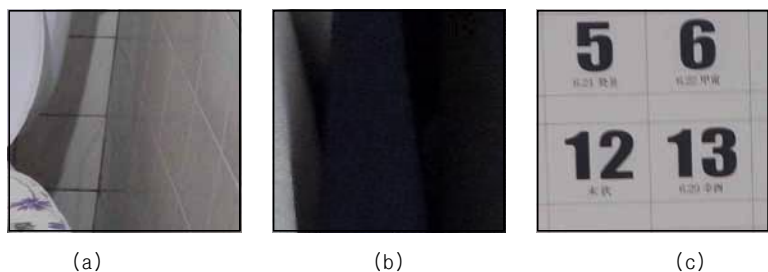
예를 들어 어떤 픽셀의 R, G, B값이 $(R, G, B) = (10, 180, 75)$ 라고 한다면 모든 표준색과의 거리 중 녹색과의 거리인 $\sqrt{(10-0)^2 + (180-176)^2 + (75-80)^2} = \sqrt{141}$ 이 최소이기 때문에 이 픽셀의 색은 녹색이 된다. <Table 1>은 본 연구에서 사용한 12개의 표준색으로, Microsoft사에서 지정한 12개의 표준색과 같다.

<Table 1> 12 RGB values of standard colors

색	번호	R	G	B
검은색	0	0	0	0
진한 빨강	1	192	0	0
빨강	2	255	0	0
주황	3	255	192	0
노랑	4	255	255	0
연한 녹색	5	146	208	80
녹색	6	0	176	80
연한 파랑	7	0	176	240
파랑	8	0	112	192
진한 파랑	9	0	32	96
자주	10	112	48	160
흰색	11	255	255	255

우리는 12개 각각의 표준색에 배정된 픽셀의 개수를 $a_i (i=1, 2, \dots, 12)$ 라 하였을 때 $\sum_{i=1}^{12} a_i^2$ 로 계산되는 색 분포 제곱 합을 실제로 사용할 사진을 선별하기 위한 기준으로 사용하였다. 이 값이 클수록 특정 색의 색에 치우쳐 있음을 나타낸다. 실제로 부등식 $(\sum_{i=1}^{12} a_i)^2 \geq \sum_{i=1}^{12} a_i^2$ 이 만족되기 때문에 색의 분포가 다양하여 a_i 가 다양하게 분포하고 있을 경우 색 분포 제곱 합이 감소할 것이고, 색의 분포가 고르지 못하고 특정 색으로 치우칠 경우 색 분포 제곱 합이 증가할 것이다. 표준색을 지정하기 위해 사용한 알고리즘을 이용하면 한 픽셀이 두 개 이상의 표준색을 가지는 경우가 간혹 발생할 수 있다. 이론상으로 100×100 픽셀의 크기를 가진 사진의 색 분포 제곱 합의 최댓값은 모든 픽셀이 한 가지의 표준색에 대응할 때 $10^8(1억)$ 을 가진다. 하지만 한 픽셀이 두 개 이상의 표준색을 가질 수 있기 때문에 실제로 10^8 보다 더 큰 값을 가질 수 있다.

색 분포 제곱 합이 같더라도 사진들은 전혀 다른 형태를 띌 수 있다. [Fig. 5]는 색 분포 제곱 합이 모두 4천만 내외인 세 사진이다. [Fig. 5]의 (a)와 (b)를 비교했을 때 색 분포 제곱 합이 거의 같음에도 불구하고 [Fig. 5]의 (a)가 (b)보다 자기 사진임을 인식하기에 더 적합하다. 또한 (c)의 경우 숫자를 통해 사용자는 자신의 사진임을 확실히 알 수 있다. 이렇게 색 분포 제곱 합의 값이 비슷하더라도 실제 사진에 따라 사용자의 인식률은 현저히 달라질 수 있다. 이때 인식률은 정답과 오답의 비율에 따라 값이 확연히 달라지도록 (정답 개수)/(오답 개수)로 정의했다. 우리는 이 세 사진의 인식률을 구분 짓는 요인으로 색 분포에 있어서의 component(구성 요소)수를 생각하였다. component수란 표준색이 같은 픽셀들이 얼마나 모여 있는지에 대한 정보로 사진 전체에서 동일한 표준색을 가진 픽셀들이 인접하여 모여 있는 덩어리의 개수를 뜻한다. (c)와 같이 쉽게 인식할 수 있는 글자가 있으면 글자 모두는 하나의 component가 되어 component수가 확연히 줄어들게 된다. component수를 구하는 방법은 <Table 2>와 같다.



[Fig. 5] Examples of Sub-images

<Table 2> Algorithm process of counting component number

11	2	0
8	2	6
11	2	11

(각 픽셀 안의 숫자는 <Table 1>에서 제시한 표준색 번호이다.)

① 행을 증가시키며 순차적으로 탐색한다. 이때 1행 1열의 경우 상하좌우에 같은 표준색을 가진 픽셀이 없으므로 component수를 1 더하고 1행 2열로 넘어간다.

② 1행 2열의 경우 인근에 같은 표준색을 가진 픽셀이 있으므로 재귀함수가 실행되어 2행 2열에 대해서 다시 같은 함수가 실행된다. 이때, 함수가 실행되면 그 픽셀은 이미 함수가 실행되었다는 표시를 한다. 즉, ①의 과정을 순차 탐색 과정에서 다시는 실행하지 않는다.

③ 2행 2열에서 3행 2열로 다시 같은 함수가 실행된다.

④ ③의 과정이 3행 2열에서 종료되고 component수가 1 더해지며 1행 3열부터 다시 탐색하게 된다.

⑤ 1행 3열부터 3행 3열까지는 인근에 같은 표준색을 가진 픽셀이 없으므로 각각 component수를 1씩 더해 총 component수가 7개가 되고 알고리즘이 종료된다.

2. 연구 방법

가. 본 연구에서 제안하는 새로운 패스워드 모델

원본 사진을 잘라 부분 이미지를 만들 때에는 그 사진의 가장자리를 제외한 부분에서 임의로 가져오게 된다. 이때 가장자리를 제외한 이유는 보통 사진을 찍을 때 중심에 초점을 맞추므로 가장자리에는 사용자만의 개인 물건들이 위치하지 않는 경우가 많아 자신도 구별하기 힘들 수 있기 때문이다. 홈쳐보기 공격을 하여 암호를 푸는 것을 여러 번 보고, 다음번에 암호를 풀 때는 같은 사진이 선택되더라도 매번 이전과 다른 부분이 임의로 잘리고 그 이미지들이 매번 다른 위치에 배치되기 때문에 전체 사진에 매우 익숙한 본인이 아니라면 아무리 친한 사람이라도 자신의 사진을 구분하기는 매우 힘들다. 패스워드 모델의 전체 작동 과정은 [Fig. 6]과 같다.

- 전체 시스템의 각 요소는 다음과 같다.
- 1) 사용자가 준비한 사진. 본 시스템에서는 30장을 준비했다.
 - 2) 타인의 사진. 본 시스템에서는 총 3명의 사진인 90장을 준비하였다.
 - 3) 사용자의 사진과 타인의 사진들 속에서 사용자가 인식하지 못할 사진들을 배제하는 필터. 예를 들어 특정 하나의 색으로 치우친 사진들은 사용자가 구분하기 힘들다고 판단하여 배제한다.
 - 4) 필터링 된 사진들을 이용하여 사용자의 사진 3장과 타인의 사진 6장 총 9장을 이용하여 3×3의 사진 배열 또는 사용자의 사진 4장과 타인의 사진 12장 총 16장을 이용하여 4×4의 사진배열을 하여 사용자가 사용자의 사진을 선택하는 것이다. 만약 위 과정에서 틀리게 되거나 사용자의 사진을 인식하지 못할 경우 재시도 하게 되고, 사용자의 사진을 정확히 인식하여 선택하게 되면 통과하게 된다.



[Fig. 6] The overall process of password model

본 연구에서 제안하는 패스워드는 무작위로 배열된 사용자의 사진으로부터 생성된 부분 이미지와 그렇지 않은 부분 이미지 속에서 사용자 자신의 것을 찾음으로써 잠금을 해제하는 기법을 이용한다. 최선의 패스워드 모델을 제안하기 위해서 여러 변인을 통제하며 진행한 실험을 통해 하나의 부분 이미지를 가지고 사용자의 사진인가를 판단할 수 있는 능력인 인식률을 분석했다. 또한 실제 패스워드 모델을 구현하여 패스워드 입력 시간과 통과율을 분석했다. 이와 같은 실험 목표를 토대로 두 가지 실험을 설계하였다. 첫 번째 실험은 사용자의 부분 이미지와 사용자가 모르는 부분 이미지 중 임의로 한 장을 불러와 사용자의 인식률을 분석하여 실제 패스워드 모델 개발 시 걸려낼 사진들의 조건을 찾는 것이다. 두 번째 실험은 실제 패스워드 모델을 개발해 사용자의 패스워드 입력 시간과 통과율을 측정하는 실험이다. 이때, 통과율은 전체 실험 횟수에서 통과한 횟수의 비를 백분율 단위로 나타낸 것이다. <Table 3>은 실험에 사용된 프로그램의 알고리즘을 나타낸 것이다. 알고리즘에서 쓰이는 $Panel(x,y)$ 은 $x \times y$ 로 버튼이 배치될 GUI 화면을 나타내는 것이다. I_n 는 이미지를 불러와서 임시로 저장해둘 변수로써, $User$ 의 정답이미지와 다른 이미지들을 포함하여 저장한다. 그리고 C_n 은 I_n 을 지정된 사이즈로 잘라서 저장해둘 변수로써, 후에 이미지버튼으로 만들어지게 될 것이다.

<Table 3> Main algorithms used in this research

Algorithm 1 : component수를 세는 알고리즘
<pre>def component process // <Table 2>의 알고리즘을 이용하여 한 component의 픽셀 수를 셈. for n=0 to xy : count_components(n) //component의 픽셀 수가 특정한 값 이상이면 component의 수에 1을 더함.</pre>
Algorithm 2 : 부분이미지로 잘라낸 이미지버튼을 만드는 알고리즘
<pre>Panel(x,y)에 대하여 In에 User의 정답이미지를 정답 개수만큼 포함, 오답이미지를 나머지 개수만큼 넣어서 이미지 저장. Answer[n]에 In이 정답이면 1, 아니면 0. for n=0 to xy : Cn = Crop(In) // Crop(img) : img를 지정된 크기로 자름. for n=0 to xy : if Test(Cn) : // Test() : 이미지가 사용되기 적절한지 색분포제공합과 component로 판단. An = 1 // An : 적절하면 1, 아니면 0. while ∃n ≤ xy; An = 0 : for n=0 to xy : if An = 0 : Answer[n]이 1이면 정답이미지, 0이면 오답이미지를 Cn에 Crop()해서 넣음. if Test(Cn) : // 적절한 이미지라면 An = 1로 만들어줌. An = 1 for n=0 to xy : Button(Cn) // Button() : 이미지버튼으로 만들어 Panel(x,y)에 x×y로 배치</pre>
Algorithm 3 : 정답인지 확인하는 알고리즘
<pre>Pressed에 눌러진 버튼의 번호를 넣음. Answer[n]=1을 만족하는 n과 Pressed를 비교하여 정답인지 확인. 정답이라면 “Answer”, 오답이라면 “Wrong”을 출력파일에 띄움. 다음 실행을 위하여 초기화한 후 Algorithm 1을 실행.</pre>

나. 실험 1: 색 분포 제공 합, component수와 사용자의 인식률의 관계

- 1) 실험을 수행할 사용자의 사진과 다른 사용자의 사진을 모은다. 모은 모든 사진 중에서 사진 하나를 임의로 가져와 부분 이미지로 자른 후 사용자가 판단하여 사용자의 사진이라고 판단한 경우 YES, 아니라고 판단한 경우 NO, 모르겠는 경우 Pass를 선택한다.
- 2) 실험 후 얻은 4가지 데이터는 텍스트 파일로 저장된다. 1)에서 선택한 3가지 데이터는 사용자의 인식률을 계산하기 위해 정답일 경우 Answer, 오답일 경우 Wrong, Pass를 누른 경우 Pass로 텍스트 파일에 저장된다.
- 3) 결과 분석을 위해 한 사진의 색 분포 제공 합, component수가 같이 저장된다.
- 4) 1)~3) 과정의 결과를 이용해 패스워드 모델에서 걸러내야 할 사진의 조건을 분석한다.



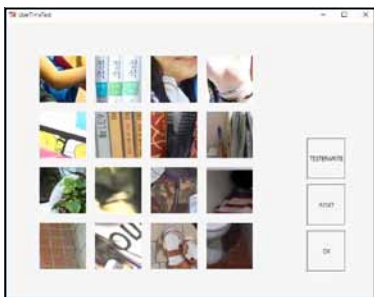
[Fig. 7] Display screenshot of the first experiment

다. 실험 2: 실제 패스워드 모델에서 통과율과 패스워드 입력 시간 측정

- 1) 3×3의 형태로 무작위로 배열된 사진들 중에서 사용자의 사진 3개를 선택하는 것으로 사용자의 사진으로 판단되는 사진 3개를 선택한 후 버튼 OK를 누른다. 이때 실험에서 사용한 사진들은 첫 번째 실험을 바탕으로 사용자가 구분하지 못하는 사진들을 제외한 사진들로 구성 되어 있다. 3×3배열에서는 [Fig. 8]과 같이 부분 이미지 3개를 고르는 과정을 두 번 연속 시행하여야 패스워드 1회 입력을 마치게 된다.
- 2) 1) 과정의 결과 값이 메모장에 txt파일 형식으로 저장된다. 사용자의 사진 3개를 정확히 선택하였을 경우 Correct 아닐 경우 Wrong으로 저장되고, 선택의 정답여부와 관계없이 첫 번째 사진을 선택하여 OK를 누르는데 까지 걸린 시간을 저장한다.
- 3) 4×4배열의 사진에서 사용자의 사진 4장을 고르고 OK를 누른다. 이 과정에서 사용되는 사진 역시 첫 번째 실험을 통해 사용자가 구분하지 못하는 사진을 제외한 사진들로 구성되어 있다. 4×4배열에서는 부분 이미지 4개를 고르는 과정을 한 번 시행하는 것으로 패스워드 1회 입력을 마치게 된다. 2) 과정에서와 마찬가지로 실험결과는 메모장으로 전송되어 정답 여부와 걸린 시간을 기록 및 저장한다.



[Fig. 8] Display screenshot of the second experiment (3×3 arrangement)



[Fig. 9] Display screenshot of the second experiment (4×4 arrangement)

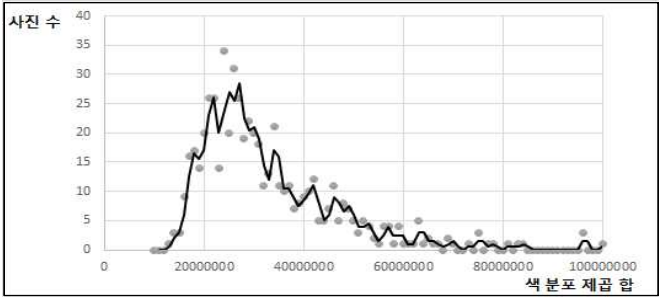
3. 연구결과 및 논의

가. 실험 1: 색 분포 제공 합, component수와 사용자의 인식률의 관계

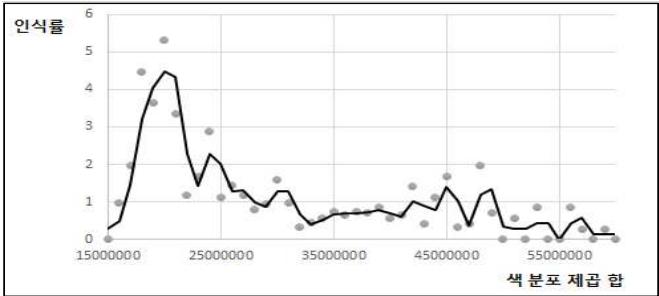
첫 번째 실험에서 4명의 사용자가 각각 16장, 30장, 30장, 35장의 개인화된 사진을 이용하여 데이터를 얻었다. 이때 얻은 700개 정도의 데이터를 분석했다.

1) 색 분포 제공 합과 사용자의 인식률의 관계

먼저 사용자가 통과한 경우의 데이터에서 각각의 사용자의 색 분포 제공 합에 따른 사진 수를 조사했다. 텍스트 파일에 저장된 결과를 이용하여 색 분포 제공 합(CDS: Color Distribution Squared Sum)과 통과 사진 수의 관계를 그래프로 나타낸 것이 [Fig. 10], 색 분포 제공 합에 따른 사진 인식률을 조사하여 그래프로 나타낸 것이 [Fig. 11]이다.



[Fig. 10] Numbers of passed images in relation to CDS



[Fig. 11] Recognition rate in relation to CDS

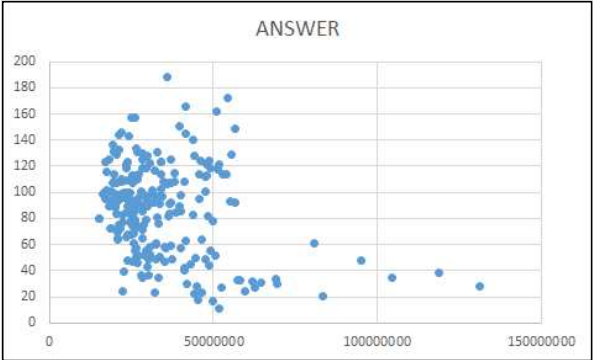
잘려진 부분 이미지의 색 분포 제공 합의 분포를 분석한 결과 2천만에서 4천만 사이의 값의 사진이 가장 많았다. 우리는 색 분포 제공 합이 6천만이 넘는 데이터들은 그 수가 부족하여 잘못된 결과를 낼 수 있다고 생각하고 1천5백만 이상 6천만 이하의 색 분포 제공 합을 가지는 데이터들을 다시 분석했다.

사용자가 인식한 사진들을 분석한 결과, 색 분포 제공 합이 2천만 정도에서 인식률이 가장 높고 그 이후로 색 분포 제공 합이 증가할수록 사진에 대한 사용자의 인식률이 감소함을 알 수 있다. 또한 색 분포 제공 합이 4천만을 넘는 부분 이미지에 대한 인식률이 현저히 낮았기 때문에 우리는 부분 이미지의 색 분포 제공 합이 4천만을 넘게 되면 그 사진을 사용하지 않고 새로운 부분이미지를 만들어 색 분포 제공 합이 4천만 이하인 것만 사용하도록 해야 실제 패스워드 모델에 사용하기에 용이하다는 결론을 도출할 수 있었다.

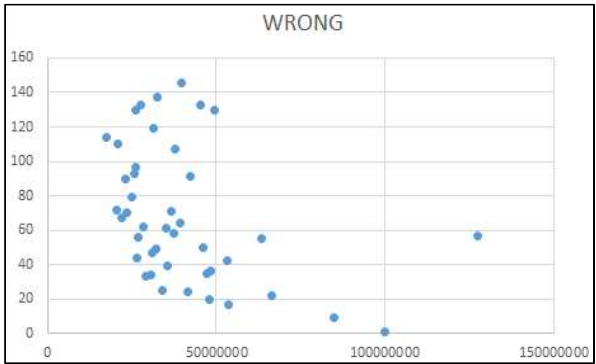
2) component수와 사용자의 인식률의 관계

component수와 색 분포 제공 합에 따른 사용자의 사진 인식률을 조사하기 위하여 x축이 색 분포 제공 합, y축이 component수인 그래프를 그렸다. 이때 component수에 따른 정답, 오답, 판단 불가능한 경우의 개수를 세어 (정답 개수)/(오답 개수+판단 불가능한 경우의 개수)를 구하여 component수에 따른 사용자의 인식률을 구해보았다.

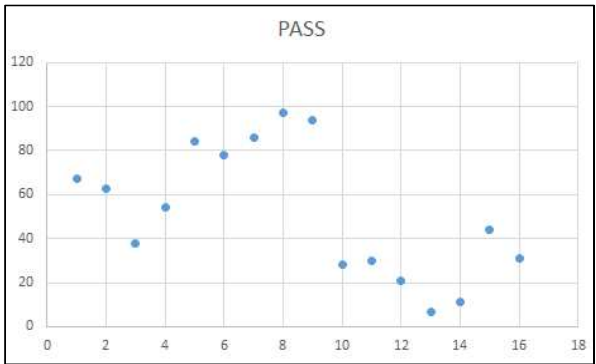
정답을 선택한 경우인 [Fig. 12]를 보면 component 수가 약 100, 색 분포 제공 합의 수가 약 40만에서 밀집하고 있다. 그러나 오답을 선택한 경우인 [Fig. 13] 또한 [Fig. 12]와 유사하게 그래프가 나타남을 알 수 있다. 실제로 사용자의 component수에 따른 사용자의 인식률을 계산해 본 결과 component수와 사용자의 인식률의 의미 있는 관계를 도출하기가 어려웠다. [Fig. 15]를 볼 때 component수와 인식률 사이에 선형적인 관계가 나타난다고 생각할 수 있지만, 이는 실험 시 사진들의 component수가 60~100 사이에 몰려 있었기 때문에 실험 데이터의 편향에 의한 데이터 부족으로 인한 잘못된 결과라고 생각했다. 우리는 component수를 사용자의 인식률이 낮은 부분 이미지를 걸러낼 수 있는 척도로 사용하기에 바람직하지 않다는 결론을 내렸다. 따라서 색 분포 제공 합으로 그 척도로 사용하기로 하여 실제 패스워드 모델을 제작할 때 이용하였다.



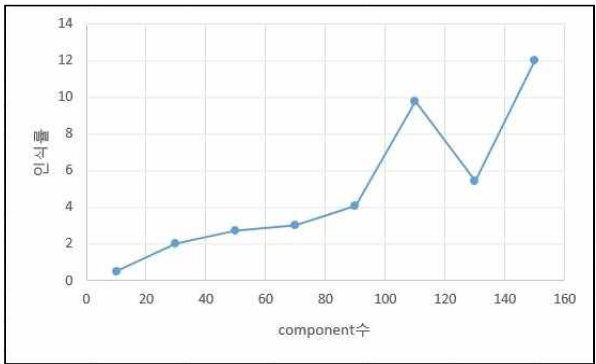
[Fig. 12] Distributions of correct cases in relation between component number and CDS



[Fig. 13] Distributions of wrong cases in relation between component number and CDS



[Fig. 14] Distributions of passed cases in relation between component number and CDS



[Fig. 15] Recognition rate in relation to component number

나. 실험 2: 실제 패스워드 모델에서 통과율과 패스워드 입력 시간 측정

두 번째 실험인 실제 패스워드 모델에서 통과율과 패스워드 입력 시간을 측정하는 실험은 총 9개의 사진 중 사용자의 사진 3개를 선택하는 3×3의 사진 배열과 총 16개의 사진 중 사용자의 사진 4개를 선택하는 4×4의 사진배열 두 가지로 진행하였다. 4명의 사용자의 개인화된 사진을 첫 번째 실험과 같이 준비하였고 사용자는 각 실험에 대해서 실험을 100회씩 진행하였다. 이 데이터를 토대로 사용자 4명의 평균 통과율과 입력 시간을 계산하였다.

<Table 4> Results of the second experiment

	사용자 통과율(%)	패스워드 입력 시간(s)
3×3 배열	89.6	8.37
4×4 배열	93.8	6.63

3×3 배열에서의 통과율과 4×4 배열에서의 통과율은 약 90%에서 근소한 차이를 보였다. 하지만 이는 실제 패스워드를 통과하는 데에 있어서 영향을 크게 주지 않을 것으로 보인다. 3×3 배열에서의 두 번의 시행 시간이 4×4 배열에서의 한 번의 시행 시간보다 평균적으로 약 1.26배 길었다. 이는 4×4 배열이 사용자에게 시간 측면에서 더 효율적임을 보여준다. 하지만 무작위적인 공격이 정답일 확률은 3×3 배열에서 두 번 시행할 때의 확률인 $1/({}_9C_3)^2 = 1/7056$ 이 4×4 배열에서 한 번 시행할 때의 확률인 $1/{}_{16}C_4 = 1/1820$ 보다 더 낮다. 이는 무작위적인 공격 방지를 더욱 강화해야 할 필요가 있는 상황에서는 3×3 배열에서 두 번 시행하는 것이 유리하고 사용자의 편리에 조금 더 중점을 둔다면 4×4 배열에서 한 번 시행하는 것이 더 유리하다는 것을 뜻한다. 따라서 두 모델 다 나름의 장단점을 가지고 있어 목적에 맞게 양쪽 중 하나를 사용하면 될 것이다.

실제로 실험을 하는 과정 중 교수님과 다른 연구자에게 패스워드를 입력과정을 훑쳐보게 한 결과 훑쳐보기를 한 사람은 입력하는 것을 알아보기 어려워했다. 즉, 훑쳐보기를 한 사람은 무작위로 정답을 입력하여 맞히는 경우와 다를 바 없었다. 기하학적으로 계산하였을 때 임의의 정사각형 부분 이미지 N 개를 이용할 때 1/4 이상 겹칠 확률은 $1/(9N)$ 이다. 이는 겹친 부분 이미지로 원본 이미지를 추측하여 랜덤하게 잘려진 이미지를 다시 맞추기 어려우며, 실제로 부분 이미지를 이용한 오랜 시간의 관찰을 통한 훑쳐보기에도 방지 효과가 있다는 것을 의미한다.

III. 결론

1. 실험 결과 요약 및 결론

우리는 앞의 실험들을 통해 component수가 아닌 색 분포 제곱 합을 사진 필터로 사용하는 것이 적절하고, 색 분포 제곱 합이 4천만 이하가 되도록 하면 실제 패스워드 모델에 사용하기에 용이하다는 것을 알아내었다. 또한, 우리가 제안한 어깨너머 훑쳐보기 방지 기법에서 사용자의 통과율이 약 90%, 무작위적인 공격이 정답일 확률이 각각 3×3 배열에서는 1/7056, 4×4 배열에서는 1/1820으로 어깨너머 훑쳐보기를 효과적으로 방지할 수 있음을 확인할 수 있었다. 다만 기존의 간단한 패스워드에 비해 입력 시간이 조금 긴 편이다. 그러나 훑쳐보기 방지를 위해 상대방이 패스워드를 알아보기 힘들게 하면 사용자 또한 그러한 경향이 있는 것은 당연하므로 이 점을 감안하면 결코 패스워드 입력 시간이 길지 않다. 따라서 우리가 제안한 기법은 훑쳐보기 공격을 당하기 쉬운 장소에서 하루에 수 회 정도만 잠금 해제하는 경우에 사용하면 매우 유용할 것이다.

2. 본 연구의 주요 기여점

가. 문자로 구성된 패스워드 대신 사용자만이 알아볼 수 있도록 사용자가 찍은 사진, 즉 개인화된 사진을 활용한 훑쳐보기 방지기법이다.

- 나. 정형화된 지식으로 타인에게 복사 및 전달될 수 없어 패스워드가 유출 또는 공개될 수 없다.
- 다. 선택하는 이미지의 개수를 적절히 조절하면 랜덤 공격에 대한 저항성도 가진다.
- 라. 훔쳐보는 사람이 수차례 훔쳐보더라도 매번 바뀌는 부분 이미지와 패스이미지가 배치되는 위치의 패턴을 알아내기 힘들다.

3. 고찰 및 추후연구 주제

실험을 완료한 후, 실험 과정을 고찰하고 추후 연구할 점에 대해 논의하였다. 먼저 실험에 사용된 데이터의 수가 모자랐다는 것이 결론 도출에 문제가 될 수 있다. 더욱 정확한 결론을 도출하기 위해서는 실험자가 4명이 아닌 훨씬 더 많은 사람이어야 할 것이다. 그리고 사용자가 준비한 사진의 개수, 사용할 사진이 찍은 시간(오래된 사진일수록 원 주인이 알아보기 힘들기 때문에 이 부분이 고려되어야 한다.)을 적당히 지정하여야 하며 부분 이미지의 크기에 따른 통과율과 패스워드 입력 시간의 상호 연관성에 대한 추가 실험이 필요할 것으로 생각한다. 또한 사람이 부분 이미지를 인식할 때와 실패할 때 어떤 기준이 가장 중요한 기준인지를 기계학습(machine learning)의 기법을 동원하여 다양하게 분석하면 정확한 필터링에 도움이 될 것이다. 또한 아직 모바일 환경 기반의 플랫폼에서 구현하여 실험해보지 않았기 때문에 상용화를 목적으로 연구를 계속 진행할 경우 실용적인 측면에서 기존의 패스워드 모델과의 비교 및 개선을 위한 추가 실험이 필요할 것으로 생각된다.

IV. 참고문헌

[1] 김중우, 김성환, 김광휘, 조환규 (2011). 훔쳐보기 공격에 견고한 그리드 기반 패스워드 시스템의 개선. **정보과학회 논문지**. 17(4), 264-268.

[2] 문건영, 김종욱, 홍만표 (2012). 모바일 환경에서 훔쳐보기 공격에 강한 그래픽 패스워드 인증 기법. **정보과학회 논문지**. 18(1), 90-94.

[3] De Luca, A., Frauendienst, B., Boring, S., & Hussmann, H. (2009). My phone is my keypad: privacy-enhanced PIN-entry on public terminals. In *Proceedings of the 21st Annual Conference of the Australian Computer-Human Interaction Special Interest Group*. 401-404. USA: ACM.

[4] Tari, F., Ozok, A., & Holden, S. H. (2006). A comparison of perceived and real shoulder-surfing risks between alphanumeric and graphical passwords. In *Proceedings of the Second Symposium on Usable Privacy and Security*. 56-66.

[5] Gao, H., Ren, Z., Chang, X., Liu, X., & Aickelin, U. (2010). A new graphical password scheme resistant to shoulder-surfing. In *Cyberworlds (CW), 2010 International Conference on*. 194-199.

[6] Zhao, H., & Li, X. (2007). S3PAS: A scalable shoulder-surfing resistant textual-graphical password authentication scheme. In *Advanced Information Networking and Applications Workshops, 2007, AINAW'07. 21st International Conference on*. 2. 467-472.

[7] Miyachi, T., Takahashi, K., Hasegawa, M., Tanaka, Y., & Kato, S. (2010). A study on memorability and shoulder-surfing robustness of graphical password using DWT-based image blending. In *Picture Coding Symposium (PCS), 2010*. 134-137.

[8] Goucher, W. (2011). Look behind you: the dangers of shoulder surfing. *Computer Fraud & Security*, 2011(11), 17-20.

| 연구진 |

- 김기홍 (Kim Kihong, 부산과학고등학교, kazugoon98@gmail.com)
- 김창훈 (Kim Changhun, 부산과학고등학교, ssohot1@gmail.com)
- 김상은 (Kim Sangeun, 부산과학고등학교, kse981735@gmail.com)
- 안수영 (An Suyeong, 부산과학고등학교, aslansoo0@naver.com)
- 이가은 (Rhee Kaeun, 부산과학고등학교, kaeun.r@gmail.com)
- 지도교사 : 고화정 (Ko Hwajung, 부산과학고등학교, 정보 · 컴퓨터, withhjko@naver.com)
- 지도교수 : 조환규 Cho Hwangyu, 부산대학교 컴퓨터공학과, hgcho@pusan.ac.kr)

가변형 캠버 에어포일을 적용한 2-로터 사이클로콥터의 수치해석적 인자 연구

조재영 · 이충우 · 오건 · 김승수 – 한국과학기술원(KAIST) 부설 한국과학영재학교

Numerical Parametric Study of Using Variable Camber Airfoil on a Twin-Rotor Cyclocopter

Jo Jaeyoung · Lee Choongwoo · Oh Keon · Kim Seungsu - Korea Science Academy

ABSTRACT

Cycloidal rotor is a thrust generating rotor which is made up with many blades rotating parallel to the axis of rotation. In this study, a variable camber airfoil, which has a flap in the blade, was invented to increase the thrust generating efficiency compared to the power consumption. As the result of comparing the traditional cycloidal rotor, using symmetric airfoil, and the rotor with variable camber airfoil, the thrust generating efficiency increased 23.1% as the secondary angle of attack decreases 5 degrees. The effect of flap size was inadequate. Also the realization of variable camber airfoil with 7-linkage mechanism was proved by making a test rotor. In the future, the experimental study of variable camber airfoil's thrust changing tendency should be performed.

Key words:
Cyclocopter, Computational-Fluid-Dynamics, Variable Camber Airfoil, Asymmetric Airfoil

국문초록

사이클로이드 로터는 회전축과 평행한 방향으로 회전하는 다수의 블레이드로 구성된 추력 발생 장치이다. 본 연구에서는 사이클로이드 로터의 전력 대비 양력 발생 효율을 증가시키기 위하여 블레이드 끝단에 플랩을 장착한 가변형 캠버 에어포일을 개발하였다. 전산 유체 역학 해석을 통해 기존 대칭형 에어포일을 적용한 사이클로이드 로터와 새롭게 제안하는 가변형 에어포일을 적용한 사이클로이드 로터의 양력을 비교한 결과, 전력 대비 양력 발생 효율은 2차 받음각이 5도 감소할 때마다 23.1% 증가하였고, 플랩 크기 변화에 의한 효과는 미비하였다. 또한 시험 로터를 제작하여 7절 링크 매커니즘을 통한 가변형 캠버의 구현이 가능함을 입증하였다. 향후 가변형 캠버의 추력 변화 경향성에 대한 실험적 연구가 필요할 것으로 보인다.

중심어 :
사이클로콥터, 전산유체역학, 가변형 캠버 에어포일, 비대칭형 에어포일

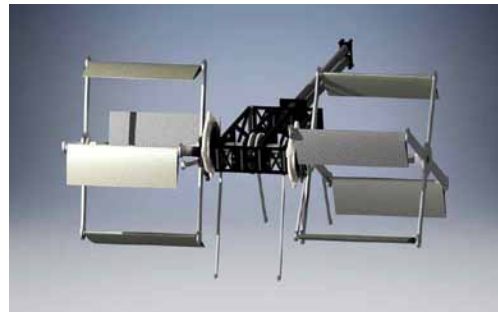
I. 서론

개인용 항공기(Personal Air Vehicle)는 개인의 항공 이동 수단으로써 군용 비행체 뿐만 아니라 민간용 비행체로의 활용이 연구되고 있다. 이는 도심 내의 운용이 필수적으로 여겨지기 때문에 적은 공력소음과 빠른 기동성, 편리한 조종이 요구된다. 신개념 비행체인 사이클로콥터는 기존 연구를 통해서 이러한 요구 조건을 만족하는 것으로 평가되고 있다[4]. 19세기 초반부터 그 개념이 제안되어 연구되어 왔으며 최근 고기동 비행체로서의 연구가 서울대학교, Univ of Maryland, D-Dalus사를 통해서 진행되고 있다[5,6,8,9]. [Fig. 1]과 같은 사이클로콥터는 사이클로이드 로터를 이용하여 추력을 발생하는 수직이착륙비행체로 회전하는 블레이드를 가진 로터로 구성된다. 원주 상에 위치한 블레이드의 받음각을 제어하여 회전축에 수직인 특정 방향으로 원하는 크기의 추력을 발생시킬 수 있다. 이러한 특징으로 운용 회전수가 낮아 공력소음이 적고 빠른 추력 방향 변경으로 높은 기동성, 그리고 높은 에너지 효율성을 가진다[2].

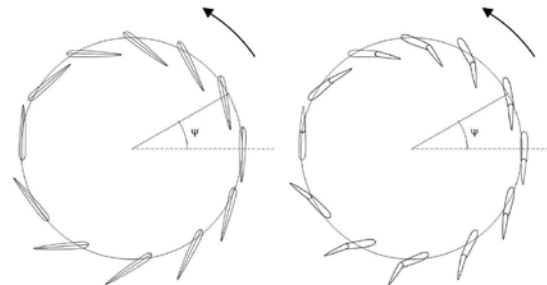
하지만 현재 사이클로콥터는 원주에 블레이드 질량이 밀집되어 있는 구조상의 특징 때문에 회전시 강한 원심력을 받는다. 이 때문에 제작 가능한 로터 반지름과 운용 회전수에 제약을 받고 블레이드와 받음각을 구현하는 링크절의 무게로 인해 중량 대비 양력비가 일반 프로펠러에 비해 낮다는 한

계를 가진다. 때문에 사람이 탑승 가능한 개인용 항공기의 실현을 위해서는 로터 크기와 중량에 비해 추력을 높이는 것이 우선시되어야 한다.

일반적으로 같은 크기의 로터에서 추력을 증가시키는 방법으로는 블레이드의 받음각을 증가시키는 것이다. 그러나 임계각도(critical angle)를 넘게 되면 블레이드 뒤쪽으로 실속(stall)이 발생하여 양력이 급감하고 저항이 크게 증가하는 역효과가 일어난다[6]. 따라서 본 연구에서는 실속을 억제하면서 블레이드의 받음각을 키우기 위하여 기존 사이클로이드 로터에서 사용되었던 대칭형 에어포일 대신 가변형 캠버 에어포일의 적용을 제안한다. 이것은 여객기의 주 날개에서 사용되는 고양력 장치로부터 착안한 것으로 상황에 따라 플랩의 받음각을 조절해 날개의 캠버 라인(camber line)을 변경함으로써 블레이드의 양력 계수와 항력 계수를 조절할 수 있다.



[Fig. 1] Designed twin-rotor cyclocopter (conventional cycloidal rotor)



[Fig. 2] Conventional cycloidal rotor(left) and cycloidal rotor with variable camber airfoil(right)

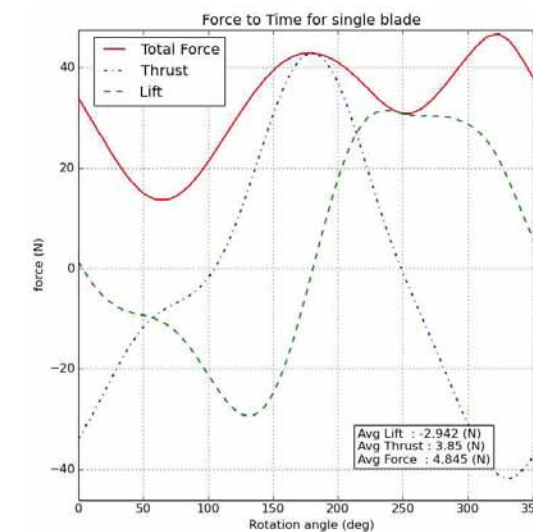
본 연구에서는 해당 장치를 기존 사이클로이드 로터에 응용해 방위각에 따라 블레이드의 형상을 바꿈으로써 양력 및 추력 생성에 유리한 조건을 형성할 수 있을 것으로 보았다. 사이클로이드 로터에서 가변형 캠버 에어포일의 적용은 최초로 제안되는 것이며 이것이 로터에 주는 영향을 밝히기 위해 [Fig. 2]와 같이 블레이드 인자로써 플랩의 최대 최소 받음각(이하 2차 받음각)과 전체 블레이드 길이에서 플랩과 주 블레이드가 이루는 축의 위치(이하 힌지 축 위치)를 선정하였다. 실험 인자의 변화에 따른 전산 유체 역학 해석을 중점적으로 진행하여 가변형 캠버 에어포일이 사이클로이드 로터에 적용될 때 추력과 양력, 전력 소모, 유동 분포에 대한 영향을 분석하였다. 해석 결과 비대칭형 에어포일의 형상을 사용하였을 때, 양의 2차 받음각을 가지는 플랩은 방위각 270도 부근에서 생성하는 양력을 증가시킬 수 있다는 것을 확인 했으며 음의 2차 받음각을 가지는 플랩은 방위각 90도 부근에서 생성하는 양력을 증가시킬 수 있다는 점을 볼 수 있었다. 따라서 가변형 캠버 에어포일을 적용해 각 방위각 영역에서 양력을 증가시키는 플랩의 2차 받음각을 취함으로써 같은 크기의 로터로부터 발생하는 전체 양력이 증가할 수 있다는 결론을 도출하였다.

또한 새롭게 제안하는 가변형 캠버 에어포일을 가지는 사이클로이드 로터 개념의 실현 가능성을 입증하기 위해 7절 링크절 메커니즘을 고안하였다. 이는 기존의 사이클로이드 로터가 4개의 링크절을 이용하여 주기적인 블레이드의 받음각 변화를 꾀한 것을 응용한 것으로 3개의 추가적인 링크절을 이용하여 플랩의 2차 받음각이 함께 진동하도록 하였다. 이러한 7절 링크절 메커니즘을 이용하여 시험 로터를 제작했으며 그 결과 로터가 회전함에 따라서 플랩의 2차 받음각이 주기적으로 진동하는 것을 확인할 수 있었다.

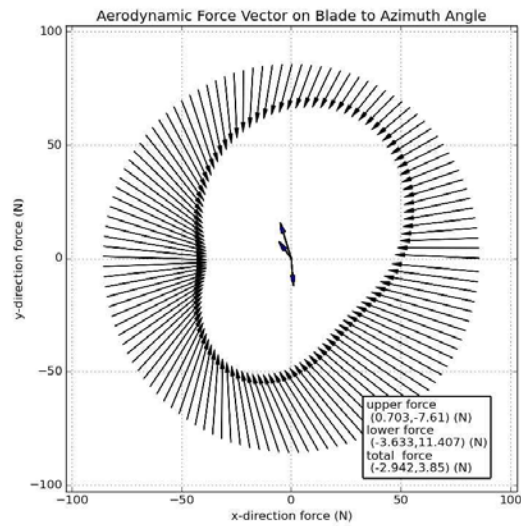
위와 같이 전산 유체 역학 해석을 통한 수치해석적 성능 향상의 결과와 실제 시험 로터를 통한 기계적 구동 가능성을 바탕으로 본 연구에서는 가변형 캠버 에어포일을 적용한 사이클로이드 로터를 제안하며 향후 사이클로콥터를 활용한 개인용 항공기의 상용화에 도움이 될 것으로 기대한다.

II. 사이클로이드 로터의 추력 발생 특성

[Fig. 3]은 사이클로이드 로터가 회전함에 따라 하나의 블레이드에 작용하는 총 추력(force), 양력(lift), 추력(thrust)을 나타낸 것으로 양력은 로터의 수직 방향으로 작용하는 힘으로 정의하며 추력은 로터의 수평 방향으로 작용하는 힘으로 정의한다. 이때 총 추력은 양력과 추력의 합성 벡터의 크기로 정의한다. 그래프를 통해 양력은 블레이드의 방위각이 90도인 지점과 270도인 지점, 즉 블레이드가 로터의 하단과 상단에 위치할 때 주로 발생함을 알 수 있으며, 추력의 경우 블레이드가 방위각이 90도인 지점과 340도인 지점 부근에서 발생함을 알 수 있다. 따라서 사이클로이드 로터의 중량 대비 양력을 증가시키기 위해서는 방위각이 90도, 270도인 지점에서 2차 받음각을 적절히 조절할 필요성이 있다. [Fig. 4]는 [Fig. 3]을 2차원 상에 표현한 것으로 블레이드가 각 위치에서 받는 양력과 추력의 합성 벡터를 표시한 것이다. 이 같은 후처리 방식은 사이클로이드 로터의 추력 발생 특성을 직관적으로 이해하는데 도움을 준다.



[Fig. 3] Force, lift, thrust on single blade with azimuth angle

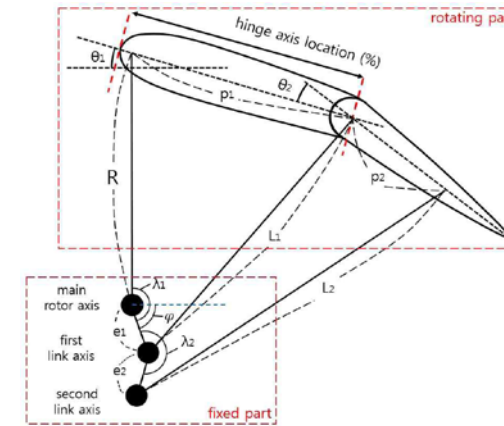


[Fig. 4] Force vector on single blade according to azimuth angle and blade position

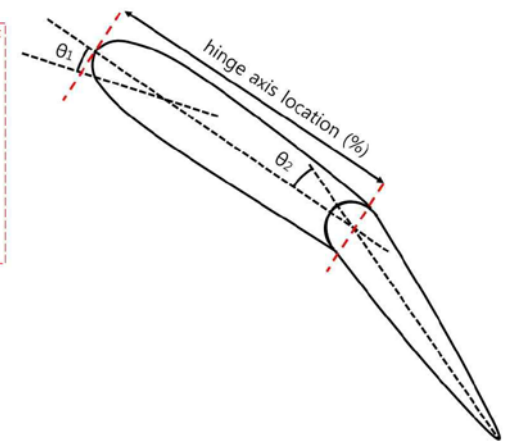
Ⅲ. 7절 링크지 메커니즘의 고안

1. 7절 링크지 메커니즘의 구성

[Fig. 5]는 본 연구에서 제안하는 가변형 캠버 에어포일의 구현을 위한 7절 링크지의 모식도이다. 선행 연구에서는 R, p1, L1, e1의 요소들로 이루어진 4절 링크가 주로 사용되어 왔으며 이로부터 기본적인 블레이드의 1차 받음각 변화를 만들어낼 수 있다. 본 연구에서는 p2, L2, e2의 요소를 추가해 로터가 회전함에 따라 플랩의 2차 받음각도 함께 변화하는 구조를 고안하였다. 방위각은 [Fig. 2]에 나타나 있듯이 수평방향으로부터 반시계 방향으로 회전한 각도를 의미하며 0도부터 360도의 값을 가진다. 1차 받음각은 [Fig. 6]에 나타나 있듯이 로터의 접선 방향에 대해서 주 블레이드가 이루는 각도(θ_1)를 말하며 2차 받음각은 주 블레이드에 대해서 플랩이 이루는 각도(θ_2)로 정의한다. 힌지 축 위치(hinge axis location)는 주 블레이드와 플랩 사이의 축의 위치를 전체 블레이드 길이에 대한 비율로 나타낸 값으로 정의했다. 일반적인 사이클로이드 로터에서 1차 받음각은 $\pm 25^\circ$ 의 값을 가진다. 본 연구에서 1차 받음각의 크기를 $\pm 20^\circ$ 로 고정시켰으며 새로이 제안하는 2차 받음각을 $\pm 0 \sim \pm 20^\circ$ 의 범위에 대해 분석하였다.



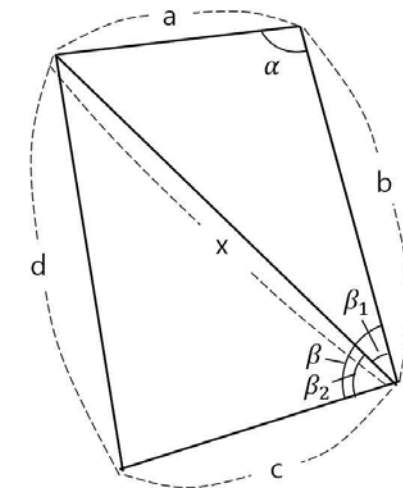
[Fig. 5] Scheme of 7 linkages mechanism



[Fig. 6] Diagram of study parameters

2. 최적화 수치 계산 과정

사이클로이드 로터의 효율성을 높이기 위해서는 방위각에 따른 받음각의 크기가 최적 값이 되어야 하며, 그를 위한 최적 수치의 결정은 필수적이다. 이를 위해 방위각에 따른 받음각의 크기를 각 수치를 변수로 한 수식화하여, 최적화된 받음각을 위한 수치를 결정할 수 있도록 하였다. 구하는 과정은 다음과 같다.



[Fig. 7] Scheme of 7 linkages mechanism

[Fig. 7]에서 x 는 $\sqrt{a^2 + b^2 - ab \cos \alpha}$ 의 형태로 나타낼 수 있다. 이때 $\beta_1 = \sin^{-1}(\frac{a \sin \alpha}{x})$,

$\beta_2 = \cos^{-1}(\frac{x^2 + c^2 - d^2}{2xc})$ 로 나타낼 수 있고 이것은 기존 연구 결과[10]와 같다.

$$\beta = \sin^{-1}\left(\frac{a \sin \alpha}{x}\right) + \cos^{-1}\left(\frac{x^2 + c^2 - d^2}{2xc}\right)$$

위의 결과에 따라 [Fig. 5]에서

$$\theta_1 = \sin^{-1}\left(\frac{e_1 \sin \alpha}{\sqrt{e_1^2 + R^2 - 2e_1 R \cos \alpha}}\right) + \cos^{-1}\left(\frac{R^2 + e_1^2 - L_1^2 - 2e_1 R \cos \alpha}{2P_1 \sqrt{e_1^2 + R^2 - 2e_1 R \cos \alpha}}\right) - \frac{\pi}{2}$$

$$\phi = \lambda_2 - \left(+ \sin^{-1}\left(\frac{R \sin \alpha}{\sqrt{e_1^2 + R^2 - 2e_1 R \cos \alpha}}\right) + \cos^{-1}\left(\frac{R^2 + e_1^2 + L_1^2 - P_1^2 - 2e_1 R \cos \alpha}{2L_1 \sqrt{e_1^2 + R^2 - 2e_1 R \cos \alpha}}\right) \right)$$

$$\theta_2 = \sin^{-1}\left(\frac{e_2 \sin \phi}{\sqrt{e_2^2 + L_1^2 - 2e_2 L_1 \cos \phi}}\right) + \cos^{-1}\left(\frac{L_1^2 + e_2^2 - L_2^2 + P_2^2 - 2e_2 L_1 \cos \phi}{2P_2 \sqrt{L_1^2 + e_2^2 - 2e_2 L_1 \cos \phi}}\right) - \theta_1$$

와 같은 결과를 얻을 수 있으며 이는 실제 7절 링크절 메커니즘을 적용한 사이클로이드 로터의 설계 시 구체적인 제원 결정에 바탕이 된다. 본 연구에서는 기존 4절 링크를 적용한 사이클로이드 로터와 새롭게 제안하는 7절 링크를 적용한 사이클로이드 로터의 성능 비교를 위해 $\theta_1 = \pm 20^\circ$, $\theta_2 = \pm 12^\circ$ 를 이루는 7절 링크를 적용한 사이클로이드 로터를 설계하였으며 이를 위한 각 링크절의 제원은 <Table 1>과 같다.

<Table 1> Design features of cycloidal rotor with 7 linkages mechanism

linkages features	R	L_1	p_1	e_1	L_2	p_2	e_2	λ_1	λ_2
value	0.20 m	0.202 m	0.035 m	0.012 m	0.207 m	0.027 m	0.014 m	265.0 °	170.5 °

IV. 가변형 캠버 에어포일의 CFD 해석

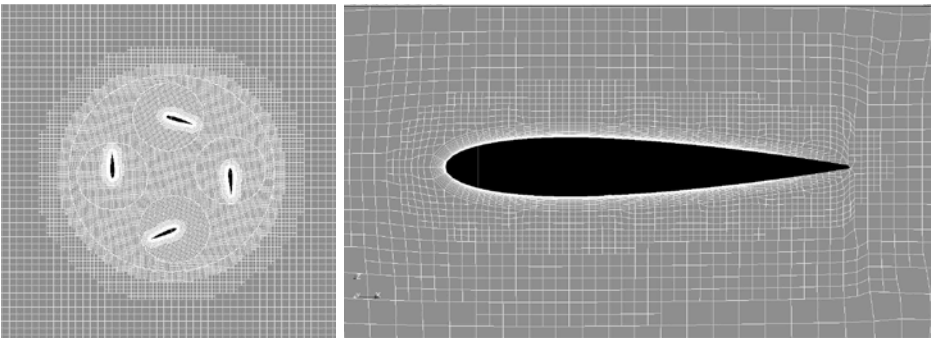
1. 대칭형 에어포일을 사용한 사이클로이드 로터의 CFD 해석 및 신뢰성 검증

가. 전산 유체 역학 해석 모델

사이클로이드 로터의 전산 유체 역학 해석을 통한 추력과 전력 소모량의 예측은 다수의 로터 제작을 대체해 연구 시간과 비용을 줄이기 위해 필수적이다. 해석 시간을 줄이기 위해 2D 해석을 진행하였고 끝단 효과는 고려하지 않았다. 사이클로이드 로터의 성능 예측을 위한 해석 격자는 [Fig. 8]과 같이 바깥 영역, 중심부, 블레이드의 3개 영역으로 구성하였다. 약 28,000개의 격자로 구성되어 있으며 블레이드 경계를 따라 1.2의 팽창비율(expansion ratio)을 갖는 16개의 레이어 격자를 생성하였다. 블레이드의 피치(pitch) 운동을 구현하기 위해 각 회전축을 중심으로 실린더 형태의 격자를 생성하였고 경계 면에서 AMI(Arbitrary Mesh Interface)기법을 통해 움직이는 두 격자 영역 간의 보간(interpolation)이 이루어지도록 하였다. 전산 유체 역학 해석에는 오픈소스 전산 유체 역학 해석 언어인 OpenFOAM을 사용하였고 pimpleDyMFoam 솔버와 난류 모델로 Spalart-Allmaras을 적용하였다.

구축한 시뮬레이션의 신뢰성을 검증하기 위해서 <Table 2>와 서울대학교에서 2006년에 제작해 실험한 사이클로이드 로터의 연구 결과[3]와 동일한 설계 조건 하에서 2D 해석을 진행하였고 로터의

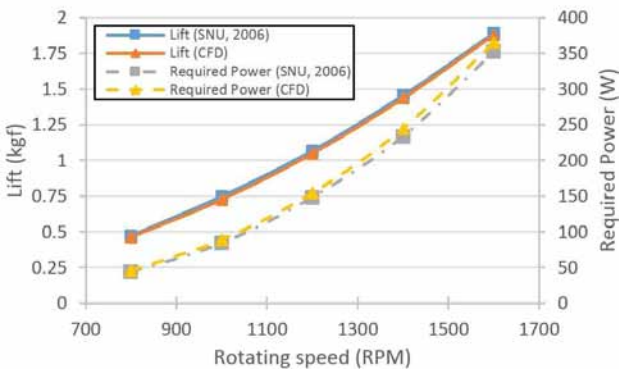
회전 속도를 달리하며 해석 결과와 실험값을 비교하였다. 향후 시험 기체 제작 시 중요하게 작용하는 총 추력과 소모 전력을 비교 요인으로 삼았다. 총 추력은 로터에 수직 방향과 수평 방향으로 각각 작용하는 평균 힘을 합성한 힘의 크기로 정의했으며, 소모 전력은 4개의 블레이드에 회전축 방향으로 작용하는 토크와 각속도의 곱으로써 정의했다.



[Fig. 8] Mesh of cycloidal rotor with symmetric airfoil

<Table 2> Design features of cycloidal rotor from Seoul National University Experiment

design features	Seoul National University (2006)
Radius of rotor	0.2 m
Span of blade	0.35 m
Chord of blade	0.05 m
Blade pitch amplitude	±26 deg
Blade pitch axis	25% from LE

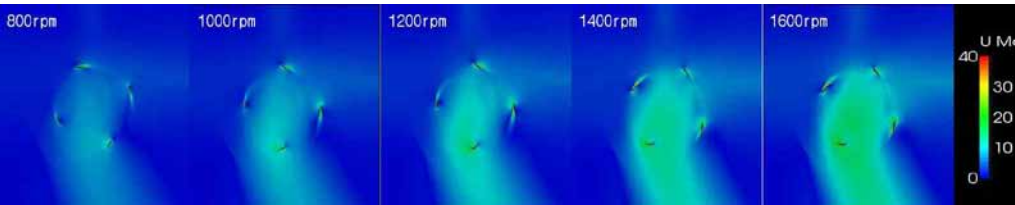


[Fig. 9] Lift and power consumptions to rotating speed (compared with Seoul National University, 2006)

나. 전산 유체 역학 해석 결과

해석 결과 정지 상태에서부터 15바퀴 가량 로터를 회전시켰을 때 해석 결과가 안정되는 것을 확인했으며 [Fig. 9]와 이 사이클로이드 로터의 회전수에 따른 추력과 소모 전력을 비교할 수 있었다. 그 결과

과 추력은 서울대학교의 실험 결과 값과 평균적으로 -1.7%의 오차를 보였으며, 소모 전력의 경우 4.7%의 오차를 보였다. [Fig. 10]은 서로 다른 회전수에 대해서 정지 상태에서부터 10바퀴의 회전 후 결과 값이 안정됐을 때의 속력 분포를 나타낸 것이다. 회전수에 따라 아래 방향으로 배출되는 공기의 유속이 증가함을 알 수 있으며 배출되는 공기의 흐름이 수직 방향에 대해서 20도 가량 기울어지는 것은 선행 연구들로부터 보고되는 바이다[1]. 이를 통해 해석에 사용된 사이클로이드 로터의 설계 제원 영역에서 구축한 2D CFD 해석이 신뢰성을 가진다고 말할 수 있다.

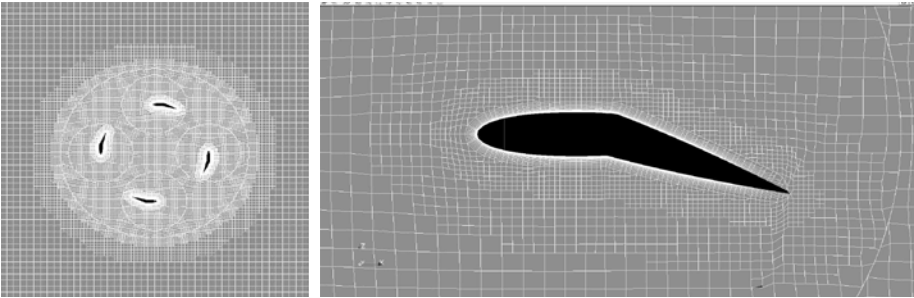


[Fig. 10] Velocity flow pattern difference with rotating speed of symmetric airfoil cycloidal rotor

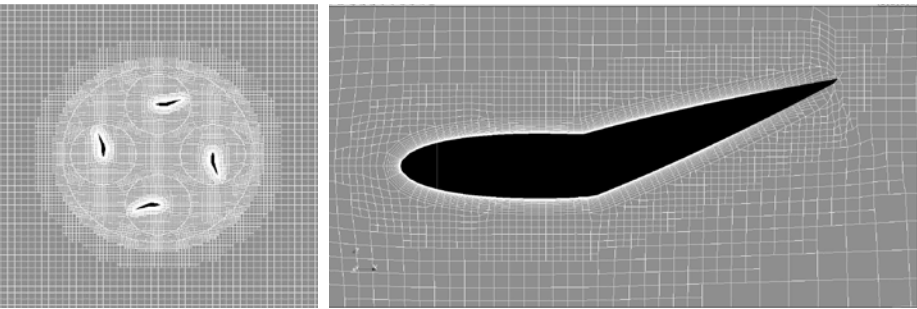
2. 비대칭형 에어포일을 사용한 사이클로이드 로터의 전산 유체 역학 해석

가. CFD 해석 모델

본 절에서는 앞에서 신뢰성을 검증한 대칭형 에어포일을 사용한 사이클로이드 로터 CFD 시뮬레이션을 활용해 비대칭형 에어포일을 사용한 사이클로이드 로터의 성능을 확인하였다. 해석 요인으로는 2차 받음각(secondary angle of attack)과 힌지 축 위치(hinge axis location)가 있으며, 주 블레이드와 플랩이 이루는 각도를 2차 받음각이라 정의하고 전체 코드(chord)길이에 대해 플랩의 축이 블레이드의 앞전(leading edge)으로부터 떨어진 길이의 비를 힌지 축 위치로 정의했다. [Fig. 11]과 [Fig. 12]는 2차 받음각이 각각 -20도와 20도를 이루는 사이클로이드 로터의 격자를 나타내는 것이며 약 28,000개의 격자가 사용되었고 블레이드 경계로 16층의 격자 층을 쌓았다. 로터의 회전속도는 1600 rpm으로 설정하였으며 이는 해석에 사용한 로터 운용에 적합한 회전수이다.



[Fig. 11] Mesh of cycloidal rotor with asymmetric airfoil(negative secondary angle of attack)



[Fig. 12] Mesh of cycloidal rotor with asymmetric airfoil(positive secondary angle of attack)

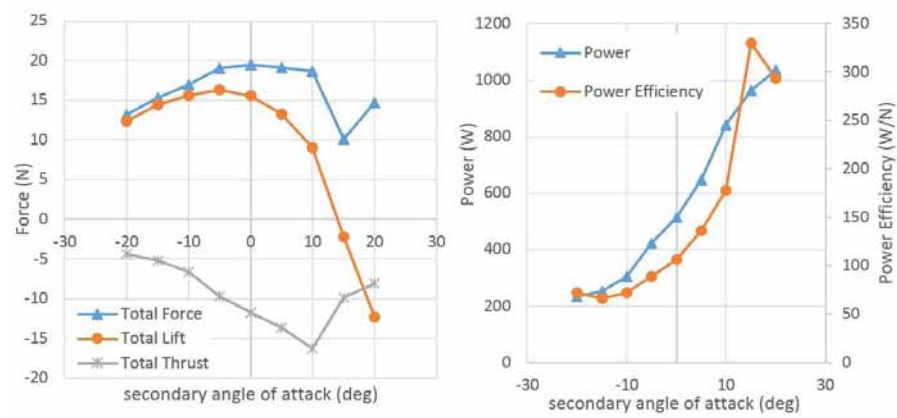
시뮬레이션을 통해 해석 요인에 대해 로터에 작용하는 추력, 양력, 전력 소모를 보았으며 이때, 방위각을 기준으로 상부(0도~180도) 영역과 하부(180도~360도) 영역에 대한 추력, 양력, 요구 전력을 각각 보았다.

나. 2차 받음각에 따른 CFD 해석 결과

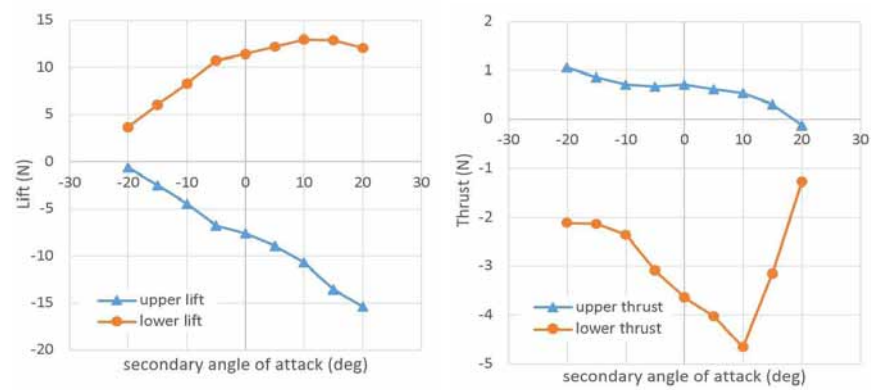
플랩의 2차 받음각의 크기에 따른 로터의 성능 변화를 알아보기 위해 <Table 3>과 같이 설정했으며 총 추력, 양력, 추력 변화, 요구 전력과 추력 효율의 변화를 시뮬레이션을 통해 도출하였다. [Fig. 13]의 왼쪽 그래프로부터 2차 받음각의 크기가 증가할 때 총 추력(total force)은 0도 부근에서 가장 컸으며 양력(total lift)은 -5도 부근에서 최대가 됨을 볼 수 있다. 또 추력(total thrust)의 경우 +10도 부근에서 최소가 되며 그 외의 지점에서는 증가하는 것을 볼 수 있다. [Fig. 13]의 오른쪽 그래프는 로터 가동에 필요한 전력과 추력 당 요구 전력을 나타낸 것으로 2차 받음각이 0도 이하로 감소할 때 전력과 추력 당 요구 전력이 모두 감소하는 걸 볼 수 있었다. 2차 받음각이 0도 이상인 영역에서 요구 전력이 급격하게 늘어나는 원인으로 접선 방향에 대한 블레이드의 단면적 증가가 있다. 음수의 2차 받음각을 가지는 블레이드는 원주 경로에 근접하여 회전하지만 양수의 2차 받음각을 갖는 블레이드의 경우 끝단이 원주 경로로부터 많이 떨어져 있어 접선 방향에 대해 받는 공기 저항과 요구 전력이 증가한다.

<Table 3> Simulation asetting features for asymmetric airfoil cycloidal rotor with secondary angle of attack

simulation setting features	value
Radius of rotor	0.2 m
Span of blade	0.3 m
Chord of blade	0.1 m
pivot axis location	8% from LE
hinge axis location	40% from LE
primary angle of attack	±20 deg
rotating speed	1600 rpm
secondary angle of attack	-20 deg ~ 20 deg
(independent variable)	(5 deg step)



[Fig. 13] Force(right) and power(left) variation with secondary angle of attack

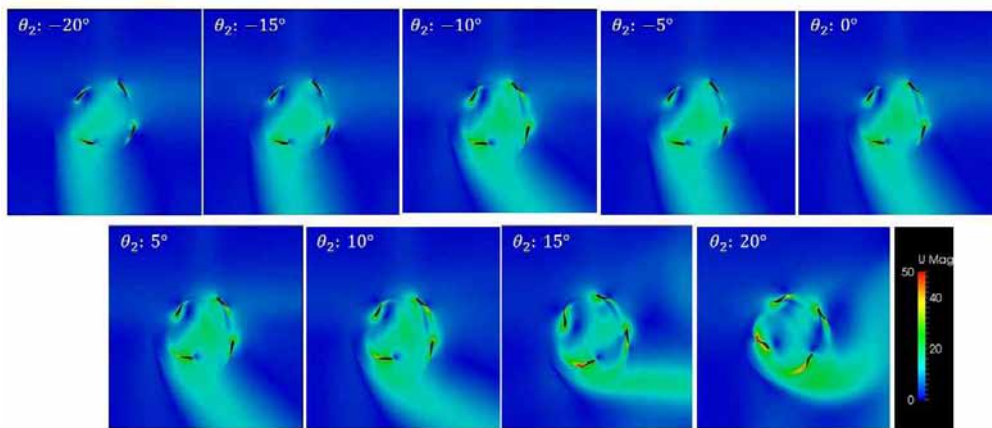


[Fig. 14] Lift(left) and thrust(left) variation with secondary angle of attack

[Fig. 14]는 방위각이 상부(0도~180도) 부근과 하부(180도~270도)인 영역으로 나누어 각 영역에서 블레이드에 작용하는 평균 양력과 평균 추력을 나타낸 것이다. 상부 영역에서 발생하는 공기 역학적 힘에는 ‘상부(upper)’ 접두사를 붙여 표기했으며 하부 영역에서 발생하는 공기 역학적 힘에는 ‘하부(lower)’ 접두사를 붙여 표기하였다. 분석 결과 사이클로이드 로터의 상부 영역에서는 2차 받음각이 감소할수록 양력이 증가하며 로터의 하부 영역에서는 2차 받음각이 증가할수록 양력이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이것은 비대칭형 에어포일이 각 영역에서 양력 증가의 효과를 일으킬 수 있다는 가능성을 보여줌으로 연구의 목표에 부합하는 결과이다.

[Fig. 14]의 오른쪽 그래프를 통해서 2차 받음각에 따른 수평 방향 힘인 추력 변화를 살펴보면, 로터의 상부에서는 2차 받음각이 감소할수록 추력의 크기가 커지는 것을 확인할 수 있으며 로터의 하부에서는 2차 받음각이 증가함에 따라 추력의 크기가 증가하다가 10도 부근에서 감소하는 것을 볼 수 있는데 이는 블레이드 끝단에서 실속이 일어나기 때문에 추력 크기가 급감하는 것으로 판단된다.

[Fig. 15]는 로터의 주위의 속력 분포를 나타낸 것으로 단위는 m/s이며 2차 받음각이 클수록 배출되는 공기가 시계 방향으로 더 많이 휘게 된다는 사실을 알 수 있었다. 이는 로터로부터 양력 대신 추력의 비중이 더 커지는 효과를 일으킨다. 2차 받음각이 15도와 20도를 이룰 때는 1차 받음각과 더불어 공기의 상대 속도 방향에 대한 받음각의 크기가 임계 각도를 넘어 블레이드 후류에서 실속이 일어나는 것으로 판단된다. 때문에 앞에서 보았던 급격한 요구 전력의 증가가 발생하는 것으로 추정된다.



[Fig. 15] Velocity flow pattern difference with secondary angle of attack of asymmetric airfoil cycloidal rotor

다. 힌지 축 위치에 따른 전산 유체 역학 해석 결과

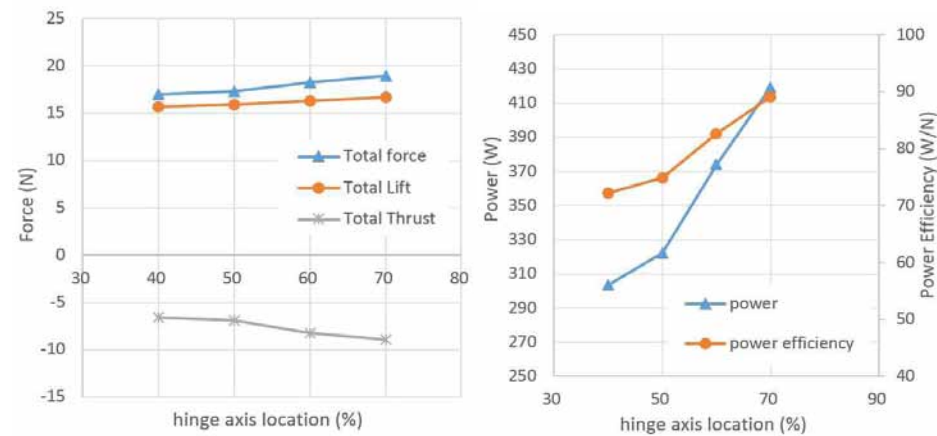
앞의 연구결과로부터 2차 받음각의 크기가 -10도일 때 양력과 추력 효율이 가장 우수함을 확인했다. 따라서 2차 받음각의 크기를 -10도로 고정 한 뒤, 플랩의 힌지 축 위치에 따른 로터의 성능 변화를 알아보았다. 이를 위해 <Table 4>와 같이 설정했으며 총 추력, 양력, 추력 변화, 소모 전력량과 추력 효율의 변화를 시뮬레이션을 통해 도출하였다.

<Table 4> Simulation setting features for asymmetric airfoil cycloidal rotor with secondary angle of attack

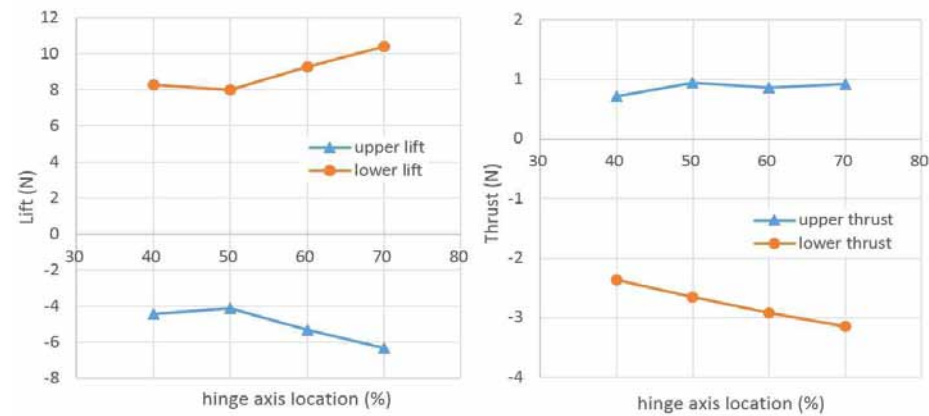
simulation setting features	value
Radius of rotor	0.2 m
Span of blade	0.3 m
Chord of blade	0.1 m
pivot axis location	8% from LE
primary angle of attack	± 20 deg
secondary angle of attack	-10 deg
rotating speed	1600 rpm
hinge axis location (independent variable)	40%~70% from LE

[Fig. 16]의 왼쪽 그래프로부터 전체 블레이드에 대한 플랩의 크기가 작아질수록 총 추력, 양력, 추력이 증가하는 것을 볼 수 있다. 요구 전력의 경우 총 추력 증가분에 비해 전력 소모가 급격하게 증가함을 보였다. 이러한 원인으로는 블레이드 끝단에서 유동의 방향이 급격하게 변화해 블레이드에 더 큰 저항이 작용하게 되는 것을 추정한다.

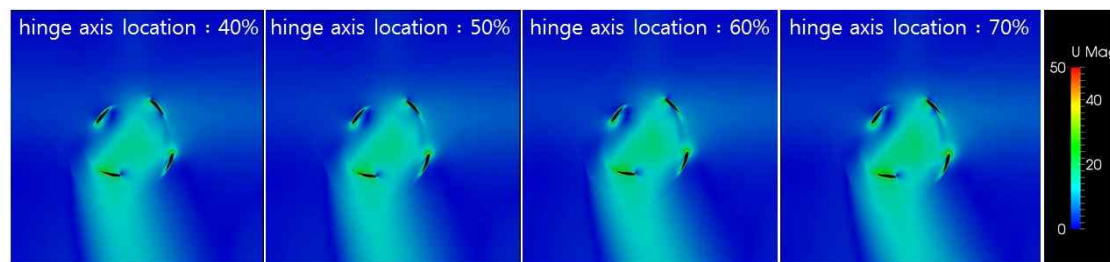
[Fig. 17]은 상부와 하부 영역에 대해 블레이드에 작용하는 양력과 추력의 평균을 각각 구한 것이다. 양력의 경우 힌지 축 위치가 블레이드 끝단으로 이동할수록 로터의 윗부분에서는 감소하고 아랫부분에서는 증가한다. 이때, 둘의 증감은 서로 상쇄되어 전체 양력 변화는 [Fig. 17]과 같이 미비하다. 하지만 추력의 경우 힌지 축 위치가 블레이드 끝단으로 이동할수록 로터의 윗부분에서 발생하는 추력은 일정하나 로터의 아랫부분에서 발생하는 추력의 크기가 증가한다. 따라서 힌지 축 위치가 블레이드 끝단으로 이동할수록 로터의 추력이 증가함을 알 수 있다.



[Fig. 16] Force(right) and power(left) variation with hinge axis location



[Fig. 17] Lift(right) and thrust(left) variation with hinge axis location

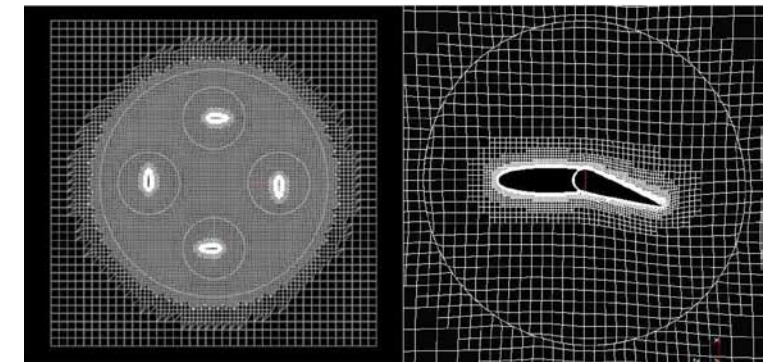


[Fig. 18] Velocity flow pattern difference with the hinge axis location of asymmetric airfoil cycloidal rotor

[Fig. 18]은 로터의 주위의 속력 분포를 나타낸 것으로 단위는 m/s이며 힌지 축 위치가 증가함에 따른 속력 분포 가시적인 차이는 찾아보기 힘들다. 다만 앞의 그래프로부터 알 수 있듯이 추력과 양력이 미세하게 증가한다. 이로부터 2차 받음각이 -10도일 때 힌지 축 위치가 성능 변화에 미치는 영향은 미비하다고 말할 수 있다. 하지만 다른 2차 받음각에 대한 힌지 축 위치의 영향은 추가로 조사해 볼 필요성이 있다.

3. 가변형 에어포일을 사용한 사이클로이드 로터 전산 유체 역학 해석

현재 방위각에 따라 캠버 라인이 변화하는 에어포일을 사용하는 사이클로이드 로터의 전산 유체 역학 해석을 구축 중이다. 앞에서 사용하였던 비대칭형 에어포일 사이클로이드 로터 해석에 사용했던 모델을 기반으로 플랩의 움직임을 구현하기 위해 [Fig. 19]와 같이 기존의 단일 블레이드를 주 블레이드와 플랩의 영역으로 형상을 분리했으며, 플랩의 경우 격자 변형 기법을 활용하여 특정 2차 받음각만큼 플랩 주위의 격자가 진동할 수 있도록 하였다. 향후 연구를 통해 이 같은 가변형 캠버 에어포일이 사이클로이드 로터에 미치는 영향을 조사할 예정이다.

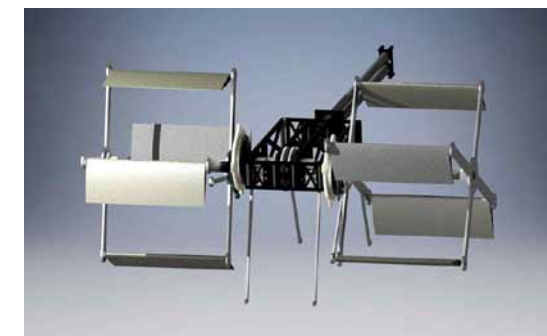


[Fig. 19] Mesh of variable camber airfoil

V. 가변형 캠버 에어포일을 적용한 2-로터 사이클로콥터의 제작

1. 설계상의 특징

본 연구에서 제작하는 2-로터 기체는 가변형 캠버 에어포일과 대칭형 에어포일을 적용한 사이클로이드 로터의 추력 발생 특성을 비교 분석하는데 그 목적이 있다. 따라서 연구 인자에 따른 다수의 사이클로이드 로터를 분석하기 위해 메인 축과 로터에 해당하는 부품의 교환을 용이하도록 설계하였다.

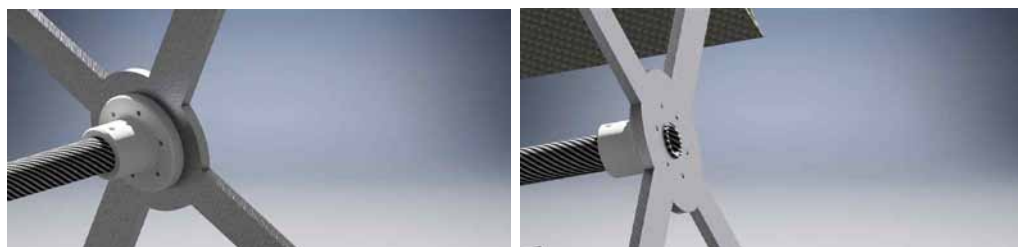


[Fig. 20] 2-Rotor system fuselage

[Fig. 20]은 Autodesk사의 Inventor 프로그램을 통해 설계한 2 로터 시스템 사이클로콥터의 모습이다. 총 2개의 로터, 8개의 블레이드로 구성되어 있으며 로터의 반지름은 0.2 m, 블레이드 스패(span) 길이는 0.3 m이다. 꼬리날개에는 2개의 모터가 위아래로 달려 있어서 제어에 필요한 반 토크를 만들어주는 역할을 한다.

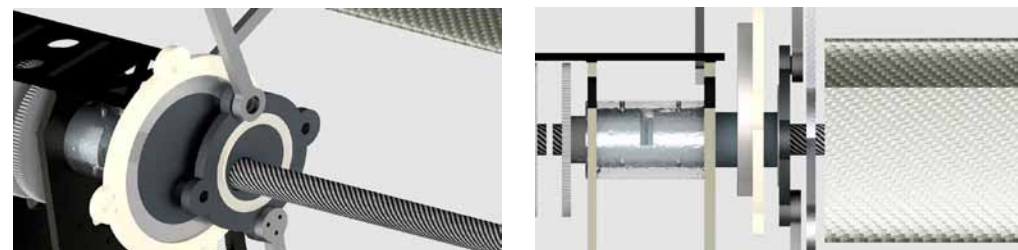
가. 휠

대칭형 에어포일에서 가변형 캠버 에어포일로 교체를 하는 경우 로터에서 블레이드를 분리하여 교체하는 작업을 진행해야 한다. 해당 과정을 편리하게 진행하기 위하여 휠을 메인 축에서 간단하게 분리할 수 있게 하였다. [Fig. 21]에 메인 축과 휠을 연결하는 부품이 명시되어 있다. 이 부품은 축에 옆에 있는 나사를 통해 완전히 고정되어 있고 휠은 이 부품과의 볼트와 너트로 연결하며 메인 축에 연결하는 구조이다. 연결 부품과의 휠 사이의 간단한 분해를 통해 휠을 메인 축에서 분리할 수 있다. 휠을 메인 축에서 분리하면 블레이드를 쉽게 교체 가능하다.



[Fig. 21] Part connecting the main axis and the wheel

나. 이심률 장치



[Fig. 22] Link system with eccentricity device

가변형 캠버 에어포일의 장착은 대칭형 에어포일의 사용과는 달리 [Fig. 22]와 같이 추가적으로 하나의 이심률 장치가 추가된다. 부품의 교체 없이 두 개의 시스템에 모두 적용되는 블레이드의 받음각 운동을 구현하기 위하여 파이프에 이심률 장치를 설치하고 이심률 장치에 링크막대를 연결하여 링크 시스템을 구현하였다. 부품의 교체 없이 기존의 내부 파이프에 새로운 이심률 장치를 결합하여 새로운 링크 시스템을 구현할 수 있다.

다. 로터

만약 로터가 파손되는 상황 등 모든 상황에 대비하고 조립의 편리성을 위하여 로터 역시 메인 바디와 분리 가능하게 설계하였다. 메인 프레임에 연결된 투명한 파이프는 메인 프레임에 영구 결합되어있다. 링크 장치의 이심률 장치가 구성되어 있는 내부의 파이프는 외부의 파이프와 나사를 통해 [Fig. 23]과 같이 결합되어 있다. 외부 파이프에 나사를 통해 내부 파이프를 조아 위치를 결정해주는 방식이다. 나사를 풀면 내부 파이프는 외부 파이프와 쉽게 분리 가능하다.



[Fig. 23] Separable rotor system

라. 메인 프레임

메인 프레임에는 제어보드와 배터리 기어 그리고 모터가 위치한다. 메인프레임들의 사이가 좁기 때문에 이러한 부품들을 프레임 사이사이에 배치하는 것에 어려움을 겪어 [Fig. 24]와 같이 메인 프레임 역시 분리 가능하게 설계하였다. 메인 프레임은 크게 3개의 연결 부품을 통해 고정된다. 1개의 연결 부품은 앞쪽에 2개의 연결 부품은 뒤쪽에 위치한다. 뒤쪽의 연결 부품은 꼬리날개를 지지하는 역할도 한다. 위의 부품들은 단순히 끼임 형식으로 조립되어 있으며 이 결합이 약해질 것을 우려하여 또한 나사로 위치를 결정할 수 있게 3Φ 홀을 여러 개 파두었다.



[Fig. 24] Separable main body frame

2. 기체 제작

가. 기체 제원

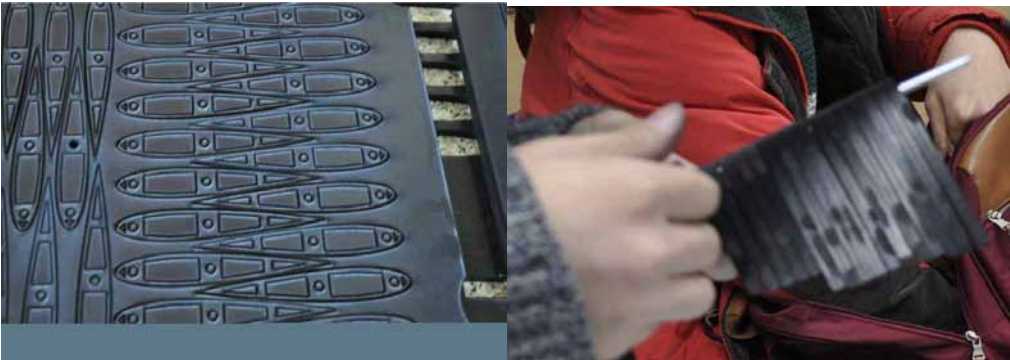
본 연구에서는 2가지 종류의 기체를 제작한다. 우선 기존에 널리 사용 되고 있는 대칭형 에어포일을 사용한 사이클로이드 로터와 새롭게 제안한 가변형 캠버 에어포일을 적용시킨 사이클로이드 로터를 제작한다. 두 기체 모두 2개의 로터로 구성되어 있으며 각각의 로터는 반지름 0.2 m, 블레이드 스패 길이 0.3 m, 블레이드 코드 길이 0.1 m를 가진다. 구체적인 기체 제원 <Table 5>와 같다.

가변형 캠버 에어포일은 θ_1 을 20도 θ_2 를 10도 총 30도의 총 받음각을 가진다. 대칭형 에어포일의 경우 θ_2 를 가지지 않으며 θ_1 이 20도 임으로 총 20도의 총 받음각을 가진다. 총 받음각을 제외한 나머지 조건을 모두 동일하게 설정하여 가변형 캠버 에어포일과 대칭형 에어포일의 차이로 발생하는 결과를 관찰하고자 하였다.

<Table 5> Fuselage specifications

design features	Variable camber airfoil system	Symmetric airfoil system
Number of rotor	2	2
Radius of rotor	0.2 m	0.2 m
Span of blade	0.3 m	0.3 m
Chord of blade	0.10 m	0.10 m
Blade pitch amplitude	$\pm(20+12)$ deg	± 20 deg
Pitch axis location	8% from L.E	8% from L.E
Hinge axis location	41% from L.E	-

나. 블레이드 제작



[Fig. 25] Production process of airfoil

블레이드는 아세탈 수지를 재료로 제작하였다. 먼저 6T 아세탈 판재를 블레이드 단면 모양으로 [Fig. 25]와 같이 레이저 커팅하였다. 그리고 블레이드 하나 당 48개의 판재를 두 개의 축을 사용하여 적층하였다. 마지막으로 카본 시트지를 블레이드에 랩핑하여 블레이드를 완성하였다. 총 8개의 블레이드를 제작하여 두 개의 로터를 제작하였다.

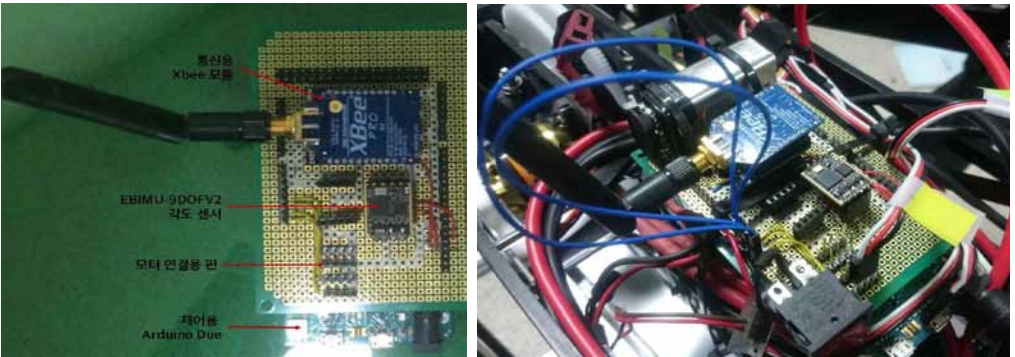
다. 메인 프레임 제작



[Fig. 26] Blade hub(upper left), main frame(upper right), motor and electrical device(lower left) assembled 2-rotor cycloidal system with variable camber airfoil(lower right)

설계 과정에서 모터, 배터리, 제어 보드 등의 위치를 결정하고, 아세탈 판재를 레이저 커팅하여 [Fig. 26]과 같이 메인 프레임을 제작하였다. 이때, 프레임의 무게를 최소화하기 위하여 시뮬레이션을 통해 얻어낸 각 부분에서의 응력 값을 고려하여 구멍을 배치하였다. 또한 블레이드는 카본 파이프에 고정된 두 개의 십자형 아세탈 판재를 통해 로터를 구성하였다. 십자형 아세탈 판재를 고정하기 위한 연결부품은 3D 프린터를 통해 출력하였다. 기체의 뒤쪽에는 기체의 제어를 위한 꼬리 날개가 사용되며, 꼬리 날개의 두 모터는 카본 파이프를 통해 메인 프레임과 연결 되고, 서로의 회전 운동량을 상쇄하기 위하여 서로 반대방향으로 회전한다.

라. 배선 및 제어 보드



[Fig. 27] Control circuit description(left), assembled control circuit(right)

제어 보드와 메인 모터, 꼬리 날개 모터 그리고 배터리를 연결하기 위해 연장 케이블을 제작하였다. 이때, 연장 케이블은 최대 160 A의 전류를 견뎌야 하므로 10 AWG 두께의 전선을 사용하였다.

배터리는 14.8 V, 6300 mAh, 4셀 배터리를 사용하였다. [Fig .27]은 제어용 회로의 사진이다. 회로에 는 제어용 아두이노 듀에(Arduino Due), 엑스비(Xbee) 통신 모듈, EBIMU-9DOFV2 각도 센서가 사용 되었다. 이 회로는 엑스비(Xbee) 통신 모듈을 통해 조종기로부터의 신호를 받고, 각도 센서로부터 현재 각도 값을 받아 PID 제어 알고리즘을 통해 모터의 추진력을 결정하여 변속기로 신호를 보내게 된다. 이때, 안정적이고 빠른 제어를 위하여 최소 300 Hz 이상의 측정 주기를 가지는 각도센서를 사용하여야 한다. EBIMU-9DOFV2는 최대 1000 Hz의 측정 주기를 갖는다.

VI. 결론

본 연구에서는 같은 크기의 기존 사이클로이드 로터의 추력을 증가시키기 위해 주 블레이드에 플랩을 장착해 블레이드의 실속을 지연시키고 받음각을 증가시켰다. 이들이 주는 영향을 파악하기 위해서 전산 유체 역학 해석을 수행하였고 실험용 로터를 제작하였다. 전산 유체 역학 시뮬레이션 결과를 기존 타 연구기관의 실험결과와 비교하여 그 정확성을 입증하였다. 이를 통해 비대칭형 에어포일의 2차 받음각과 힌지 축 위치에 따른 양력, 추력, 요구 전력 변화를 살펴본 결과 로터의 상부에서는 음의 2차 받음각을 가지는 블레이드가 양력을 증가시킴을 확인하였고, 로터의 하부에서는 양의 2차 받음각을 가지는 블레이드가 양력을 증가시킴을 확인하였다. 힌지 축 위치에 따른 사이클로이드 로터의 성능 변화의 경우, 플랩의 축의 위치에 따른 양력 변화는 미비하나 힌지 축이 블레이드 끝단으로 이동할 때 추력이 증가하는 것으로 드러났다. 이러한 결과로부터 차후 가변형 캠버 에어포일을 장착해 방위각에 따라 2차 받음각을 변화시킬 경우 로터의 상단과 하단에서 모두 양력을 증가시킬 수 있는 가능성을 입증하였다. 이것은 동일한 제원의 사이클로이드 로터로부터 더 큰 양력을 발생시킬 수 있음을 의미하며 사이클로콥터를 이용한 개인용 항공기 개발에 적용될 수 있을 것으로 본다.

또한 새롭게 제안하는 가변형 캠버 에어포일을 가지는 사이클로이드 로터 개념의 실현 가능성을 입증하기 위해 7절 링크절 메커니즘을 고안하였다. 이것은 기존의 4절 링크절 메커니즘을 응용한 것으로, 시험용 로터에 적용하여 7절 링크절 메커니즘의 가변형 캠버 구현 가능성을 입증하였다.

위의 두 연구 결과로부터 가변형 캠버 에어포일의 적용 시 전력 대비 양력 발생 효율이 증가함을 확인했다. 따라서 향후 고정된 비대칭형 에어포일 형상 대신 플랩이 방위각에 따라 진동하는 동적격자를 구축하여 가변형 캠버 에어포일이 사이클로이드 로터에 직접적으로 주는 영향에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 보인다. 이외에도 2차 받음각, 힌지 축 위치에 대한 성능 변화뿐만 아니라 블레이드 주 회전축의 위치(pivot axis location)에 따른 성능 변화와 기체의 전진 비행 시 유입 류가 있을 때의 영향에 대해 심도 깊은 연구가 필요하다.

VII. 참고문헌

[1] 조성환, 민승용, 이충희, 박진천 (2009). 블레이드 형상에 따른 사이클로콥터 로터 시스템의 추력 성능에 대한 실험적 연구. **한국항공우주학회 2009년도 춘계학술발표회 논문집**. 418-421.

[2] 황창섭, 황인성, 민승용 (2005). 4개의 로터를 갖는 수직이착륙기 사이클로콥터의 설계. **한국항공우주학회 2005년도 추계학술발표회 논문집(II)**. 1096-1099.

[3] Hwang, I. S., Hwang, C. S., Min, S. Y., Jeong, I. O., Lee, C. H., Lee, Y. H., & Kim, S. J. (2006). Design and testing of VTOL UAV cyclocopter with 4 rotors. In *Annual Forum Proceedings-American Helicopter Society*, 62(3),

2109.

[4] Katukam, R. (2014). Personal air vehicle & VTOL: An insight. *History, Discovery The International Daily Journal*, 27(69), 128-134.

[5] Kirsten, F. K. (1928). Cycloidal propulsion applied to aircraft. *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, 50(12), 25-47.

[6] Kirsten, F. K. (1935). Cycloidal propulsion in air. *Engineering Experiment Station Series*, 79.

[7] Tejaswi, J. (2013). An experimental investigation of a micro air vehicle-Scale cycloidal rotor in forward flight. *AIAA*, 2007-2247.

[8] Wheatley, J. B. (1933). Simplified aerodynamic analysis of the cyclogiro rotating-wing system. *Technical Notes NACA*, 467.

[9] Wheatley, J. B. (1935). Wind-tunnel tests of a cyclogiro rotor. *Technical Notes NACA*, 528.

[10] Yun, C. Y., Park, I. K., Hwang, I. S., & Kim, S. J. (2005). Thrust control mechanism of VTOL UAV cyclocopter with cycloidal blades system. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 16(11-12), 937-943.

| 연구진 |

조재영 (Jo Jaeyoung, 한국과학기술원(KAIST) 부설 한국과학영재학교, whwodud9@gmail.com), 주저자 및 교신저자

이충우 (Lee Choongwoo, 한국과학기술원(KAIST) 부설 한국과학영재학교, cwoo0516@gmail.com)

오건 (Oh Keon, 한국과학기술원(KAIST) 부설 한국과학영재학교, arsnalish@naver.com)

김승수 (Kim Seungsu, 한국과학기술원(KAIST) 부설 한국과학영재학교, seungsu0407@gmail.com)

지도교사 : 조철희 (Cho Chulhee, 한국과학기술원(KAIST) 부설 한국과학영재학교, 물리화학, chulcho@kaist.ac.kr)

지도교수 : 권장혁 (Kwon Janghyuk, 한국과학기술원(KAIST) 항공우주공학과, jhkwon@kaist.ac.kr)

지도조교 : 박태희 (Park Taehee, 한국과학기술원(KAIST) 항공우주공학과, staryth@kaist.ac.kr)

이학진 (Lee Hakjin, 한국과학기술원(KAIST) 항공우주공학과, hakjin@kaist.ac.kr)

공기 매개 감염을 최소화 할 수 있는 에너지 절약형 교실 공조장치의 개발

오진호 · 이준호 · 이도호 · 백민혁 · 양현우 – 인천과학고등학교

Development of the Air Conditioning Equipment that Minimize Air-borne Infection for the Energy-Saving Classrooms

Oh Jinho · Lee Junho · Lee Doho · Baek Minhyeok · Yang Hyunwoo - Incheon Science High School

ABSTRACT

After the 2015 MERS state, the air-borne infection has risen as a serious issue considering the feature of modern society where people are densely populated in specific area. However, air conditioning equipment has been installed in Korean schools in general, most of air conditioning and heating systems are attached on ceilings and only few schools have the inlet and outlet air conditioning system. These convection dependence systems are obedient to air-borne infection. Our research is about making the classroom a positive pressure environment for minimizing air-borne infection without changing the existing room heating system. We proposed the new air conditioning system for our classroom by mathematical and physical solutions and verified our system with simulation programs and real construction. Another objective was improving a waste heat recovery facility because our new air conditioning system accompanies the thermal losses and existing waste heat recovery facilities do not work well for our new air conditioning equipment. We changed the structure and material of the facility and verified with simulation programs. As a result, positive pressure environment from our new air conditioning equipment reduced the convection of infective particles effectively. An improved waste heat recovery facility showed the increase of heat exchange efficiency 0.39 points.

Key words:

Ventilation, Waste Heat Recovery, Energy Efficiency, Air Borne Infection, School Classroom

국문초록

MERS 사태 이후 공기 매개 감염은 사람이 밀집해 있는 현대사회에서 상당한 문제로 대두되었다. 그러나 학교의 공조시스템은 천장형 냉난방기만을 갖춘 경우가 대부분이고, 최근 건축물의 경우 천장 환기/배기 시스템이 있는 경우에 그친다. 이런 대류 중심의 공조환경에서 교실은 공기 매개 감염에서 자유로울 수 없다. 본 연구에서는 현 교실의 공조시스템을 최대한 유지하면서 교실을 양압 환경으로 만들어 공기 매개 감염을 최소화 할 수 있는 방안을 수학적으로 제시하고 시뮬레이션과 실제 시공을 통해 검증하였다. 또한, 시스템 구축 과정에서 폐열회수장치가 제 역할을 하지 못하게 되는 단점을 보완하기 위해 장치를 개선하였다. 연구결과 800 CMH 이상의 양압 환경을 교실에 구현할 경우 공기 매개 입자의 대류가 확연히 줄었고, 개선된 폐열회수장치의 경우 현재 교실상황(Mixing)과 양압환경(Downward & displacement)에서 사용 시 각각 열 교환지수를 0.39씩 증가시키는 결과를 얻었다.

중심어 :

환기, 폐열 회수, 에너지 효율, 공기 매개 감염, 학교 교실

I. 서론

1. 연구의 필요성

감기는 더 이상 가벼운 질병이라고 여기기 어려울 것으로 보인다. 2002년 SARS부터 2009년 신종 인플루엔자 바이러스, 2015년 MERS에 이르기까지 감기는 사회의 재난 수준으로 나타나고 있다. 특히 코로나 바이러스 등과 같은 병원성 감염 물질들은 교통수단의 발전과 높은 인구 밀도로 빠르게 전파되는 경향을 보였다. Klepeis et al.에 따르면 현대인들은 하루 85% 가량을 직장, 교통수단과 거주지 등의 실내에서 지낸다고 하였다[15]. 세계적인 감염성 질병의 유행으로 인해 관련 연구의 필요성이 증대되면서 공기 매개 감염(비말 감염)을 통한 감염 물질의 전달 메커니즘을 밝히는 연구결과가 증가하는 추세이다. 또한 공기를 매개로 한 감염성 물질의 전달에 관한 연구는 비행기, 거주환경, 빌딩, 병원 등의 다양한 분야에 대해 연구되고 있다. 2015년 수집된 연구결과[1]에 의하면 연령별 인플루엔자 의심환자의 비율이

7~18세가 59.3% 이고 0~6세가 31%로 조사된 것을 볼 수 있었다. 이를 통해 18세 이하의 학생들이 많이 모이는 학교 교실의 경우 공기 매개 감염의 확률이 상당히 높아 질 수 있다는 것을 유추할 수 있다. 그러나 아직까지 학교와 관련되어 감염성 물질의 전달에 관한 연구는 없는 실정이다. 2015년 MERS 사태 때 학교의 대응은 기침예절, 손 씻기 등의 개인 위생과 발열검사를 통한 의심학생 격리, 전염병 교육으로 정리될 수 있다. 이런 대응은 2002년 SARS 때와 상당히 유사한 것으로 공기 매개 감염에 대한 적극적인 대책은 아직 미흡한 실정이다. 특히 2015년 ○○도 행정사무감사에 관한 기사를 보면 메르스 사태 이후에도 학교의 감염병 관리에 허점이 많은 것을 알 수 있고 공기 매개 감염의 경우 적절한 환기와 확산 방지에 알맞은 공조시스템이 상당히 중요함에도 불구하고 여전히 학교의 냉난방과 환기 시스템은 대류를 바탕으로 이루어지고 있다. 대부분의 학교는 천장형 냉난방기만을 이용하고 일부의 최신 건축물들만이 천장에서 급기와 배기를 하는 시스템을 채택하고 있다.

이정훈과 한명창은 환기 설비를 갖춘 병실 내 감염자를 통해 감염입자의 확산과 이동에 의한 감염확률에 대해 연구하며 병원 내 환기의 중요성을 제시하였다[3,5].

선행연구들이 제시하는 바와 같이 감염자의 호기 및 비말에 의해서 전염되는 병원균의 경우 환기가 중요한 역할을 하고 있다. 그러나 학교 교실의 경우에는 공기 질 관리가 제대로 되지 않을 정도로 문제가 심각한 수준이다. 일반적인 주거 공간과는 달리 채실자의 밀집도가 높아 실내의 오염이 쉽고, 냉난방 설비의 온열환경적인 측면과 에너지 비용의 측면에 집중하여 교실의 공조 설비를 하는 경우가 많아 공기 질에 대한 배려는 소홀해지기 쉽다. 따라서 현재 교실에 많이 설치되고 있는 건축 규정상의 공조 설비를 대체로 유지하는 것을 바탕으로 공기 매개 감염을 최소화할 수 있는 방안을 탐색할 필요가 있다. 현재 건축 규정상 교실에 설치하는 공조설비는 천장형 냉/난방기, 천장 급기/배기 시스템, 급기 및 배기 시 열 교환을 시켜주는 폐열회수장치이다.

또한, 기존의 폐열회수장치는 천장내부에 설치되어 외기와 내기의 직접적인 열 교환을 바탕으로 하는 데 이는 새로운 공조시스템 구축에 제약을 준다. 따라서 기존의 폐열회수장치를 개선할 필요를 느꼈고, 이에 따라 연구방향을 추가하여 열효율을 높여 전기세 절감효과도 노릴 수 있으면서 동시에 새로운 공조시스템에서도 적용 가능한 폐열회수장치를 제안하는 것을 목표로 하였다. 결론적으로 교실의 냉난방 및 에너지 효율을 유지하면서 공기 매개 감염을 최소화할 수 있는 공조시스템을 개발하고, 폐열회수장치를 개선하는 것은 시기적으로 적절하며 현재 사회에 필요한 연구라고 판단된다.

2. 선행연구 분석

학교 교실에서 공기 매개 감염에 대한 연구와 유사한 실내 환경에서의 선행연구로 병원 내 실내 공기 감염에 대한 연구들을 들 수 있다. Chao et al.은 두 개의 천장형 디퓨저와 환기구를 설치한 병실을 모사하여 공기를 통한 감염 물질의 전달경로를 연구하였다[9]. 또한 Xie et al.은 감염자의 호기에서 발생하는 감염 물질의 증발 매커니즘을 적용하여 실내에서의 확산 및 전달에 관한 연구를 진행하였다[23]. 국내에서 입태섭은 의료시설에서 전염성 병원균이 기류 이동에 의해 확산될 수 있다는 사실을 SARS 환자가 발생한 병원에 대한 시뮬레이션 검증을 통해 제시하였다[4].

선행연구 중 병원성 오염물질 확산 분석과 관련된 주요 선행연구를 조사한 결과, 전통적으로 수술실이나 격리병실에서 세균성 병원균의 확산에 대한 해석을 중심으로 한 연구들이 있다[7-9,11-14,17-22]. 이 외의 감염경로의 분석과 관련된 연구들은 2003년을 전후하여 창궐했던 코로나 바이러스의 일종인 SARS에 대하여 소수 진행되었다.

이중 핵심 선행연구를 언급하면, Xie et al.은 기존 환기 시스템이 가동되고 있는 두 수술실을 대상으로 한 쪽 수술실에서는 세균성 물질을 배출하면서 각 실에 놓인 세균배양접시의 세균 수를 계산하는 방식으로 실측을 실시하였다[23]. 또한 여러 가지 환기모델을 만들어 입자해석이 가능한 CFD를 사용하여

환기성능을 비교하였다. 실측과 CFD 시뮬레이션 결과, 적정 환기 풍속으로 유지하는 경우 특정표면에 세균 개체수가 줄어드는 것을 확인할 수 있었으며, 또한 세균성 오염물질의 확산 방지를 위한 전략을 제안하고 있다. Richmond-Bryant는 Huang & Tsao.의 연구결과를 바탕으로 공기 감염 균에 오염된 격리병실에서 환자들의 병원균 배출형태(기침, 호흡 등)에 따른 기류의 이동과 병원균의 농도 분포에 대한 특징을 조사하였고, 각 상황별 병원 근로자의 노출 정도를 분석하는 연구를 수행하였다[14,20]. 그녀의 연구에서도 실측이 수행되었으며, 입자해석이 가능한 CFD 기법을 사용하였다. 이를 통하여 기침 등에 의해 토출된 병원균의 입자는 시간이 지나면서 그 수가 서서히 줄어들지만 특정 벽 표면에 달라붙어 축적될 가능성이 있고, 환기 시스템이 가동하여도 병원 근로자가 병원균에 노출될 가능성이 있다는 결과를 얻었다. 특히 호흡 공기는 입에서부터 빠른 속도로 토출되지만 0.1 m 지점에서는 속도가 0.09 m/s로 급격히 줄어들어 실내기류의 영향을 받는 것으로 나타났다. Qian 외 4명은 2인 병실을 대상으로 실내 공간의 공기 감염 병원균 확산을 최소화하기 위해 두 가지의 환기 시스템(Mixing, Downward & Displacement)을 비교 분석하였다[18]. 이 연구는 실제 크기의 2인 병실을 모사하고 실제 인체 모델을 마네킹으로 하여 코와 입에서 추적가스를 토출하는 방식으로 실험하였으며, 입자해석이 아닌 추적가스 분석이 가능한 CFD 기법을 통해 검증하였다. 연구 결과 환기 시스템에 의해 토출되는 호흡 공기는 전체 공기와 혼합되어 빠르게 희석되고 있었다. Downward & Displacement 시스템은 환기 회수가 6회/h에서 12회/h 사이에서 하방으로 급기되는 공기에 층류를 만들어 토출된 호흡 공기의 확산을 제한하지만, 4회/h 미만이면 층류를 쉽게 만들지 못하며 난류에 쉽게 혼합되는 것으로 나타났다.

기존 연구들의 대부분은 병원을 대상으로 하는 것을 볼 수 있다. 학교의 경우 상당수의 사람들이 모여 있으면서 오랜 시간을 함께 하는 곳이기 때문에 감염성 질병의 위험이 상당히 높지만 연구의 빈도는 높지 않은 실정이다. 이는 학교 공조시스템에 많은 비용을 투자하기 어렵고, 현재 있는 공조시스템 상황에서 감염성 질병을 최소화 할 수 있는 설비를 하기 어렵기 때문이다. 그러나 학생들의 건강을 생각한다면 감염성 질병을 예방하는 환기 시스템의 도입은 시급한 실정이다. 따라서 교실 상황에서 공기 매개 감염의 확률을 낮출 수 있는 공조시스템에 관한 연구를 하는 것은 시의적절하다 하겠다.

현재 폐열회수장치의 문제점은 내기와 외기가 폐열회수소자에서 만나야 한다는 점과 폐열회수소자의 물리적인 조건을 변경하여 열 교환지수를 크게 하기가 어렵다는 것이다. 따라서 천장에서 공기의 교환이 없는 환기 시스템을 설계하였을 시 폐열회수장치에서 열에너지를 교환할 수 없다. 이런 단점은 에너지 측면에서 많은 비용 소모를 초래하게 된다. 따라서 내기와 외기가 만나지 않아도 외기에 열에너지를 전달할 수 있는 방식과 폐열회수장치의 부피 확장을 최소로 하면서 그 효율을 증가시킬 방안에 대해 연구하였다.

KIPRIS조사를 통해 폐열회수장치와 관계된 특허 351개를 찾아내어 이를 [Fig. 1]과 같이 정리하였고, 이를 이용하여 [Fig. 2]와 같이 특허 맵을 만든 제작하였다. 특허맵을 제작한 결과 본 연구에 적용하고자 하는 폐열소자와 가장 유사하다고 판단한 선행연구는 태양열을 이용하여 폐열회수소자에 열에너지를 전달하는 방식이었으나, 이는 설비를 직접 적용하는 데 어려움을 가지고 있었다. 따라서 새로운 폐열회수장치의 제안은 본 연구에 있어서 필수적이라고 할 수 있다.



[Fig. 1] The search of patent information

구분	종류		개수
	구분	개수	
건조	식물	3	12
	생활용품	4	14
	폐기물		5
공기 조화기		2	20
	냉방		5
	난방		41
냉난방		3	27
	냉방		2
	냉온장고		7
냉온장고	냉방 기기	1	5
	냉방 기기	3	14
시스템		5	12
	열 교환기		3
	전동기	10	44
장치		17	3
	차량		46
	필터		6
필터	나노		5
	히트 파이프		5
	스케	46	75
스케			230
	계	351	

[Fig. 2] Patent Map

3. 연구 목표

- 가. 현재 교실의 공조 설비 자원을 최대한 활용하여 공기 매개 감염의 확산을 최소화 할 수 있는 공조 시스템을 설계한다.
- 나. 교실 공조자원 중 하나인 폐열회수장치의 활용범위를 확장하고, 열효율을 개선하는 방법을 구상한다.
- 다. 현재 교실 자원을 이용하고, 공기 매개 감염의 확산을 최소화 할 수 있는 공조 방안을 시뮬레이션과 실제 적용을 통해 검증한다.
- 라. 폐열회수장치의 개선안을 시뮬레이션과 열 교환지수를 통해 검증한다.

II. 이론적 배경

현재 교실은 지어진 시기에 따라 환기시설이 있는 경우와 그렇지 않은 경우도 나누어진다. 교실 내 환기 시설이 있는 경우는 [Fig. 4]와 같이 급기와 배기 시설이 모두 천정에 위치하고 있다. [Fig. 3]과 같이 환기 시설이 없이 천정형 냉/난방시스템만 갖추어진 경우로 공기가 대류하고 있는 상태를 Mixing, 환기 시설이 있으나 배기와 급기 설비가 모두 천장에 있어서 대류하고 있는 상태를 Mixing & Displacement로 정의하겠다. 설명의 편의를 위해 사진을 제외한 본문에서는 각각 모델 A, 모델 B라는 명칭을 사용하겠다.



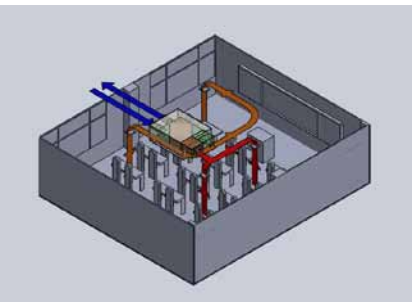
[Fig. 3] Classroom without air ventilation facility(Mixing)



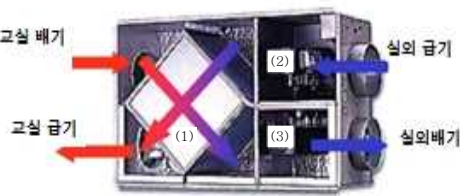
[Fig. 4] Classroom with air ventilation facility (Mixing & Displacement)

모델 B의 경우 교실 천정에 급기구와 배기구가 모두 있어 폐열회수장치에서 열을 회수하는 것이 가능했다. 배기구(교실→외부)로 나가는 열을 수집하여 교실로 들어오는 급기에 전달하는 것이 가능하였다.

모델 B의 경우 공기의 흐름은 [Fig. 5]와 같다.



[Fig. 5] Existing waste heat recovery facility

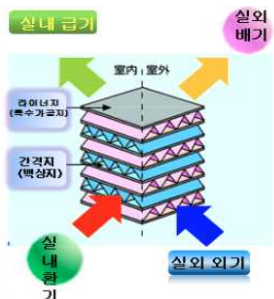


[Fig. 6] Existing waste heat recovery facility

기존 교실에 설치된 폐열회수 설비는 [Fig. 6]과 같은 방식으로 공기를 순환시키고 열을 회수한다. 그림에서 교실 배기는 교실에서 외부로 나가는 것으로 (1)로 표시된 폐열회수소자에서 열을 내주게 된다. 실외 급기는 차가운 외기로 (1)로 표시된 폐열회수소자에서 교실 배기의 열을 흡수하여 교실로 공급되게 된다. 폐열회수소자(1)의 구체적인 모습은 [Fig. 7]에 제시하였다. 폐열회수설비의 구조를 보면 교실 배기와 실외 급기가 교차하는 면적을 높이기 위해 여러 겹의 공기층을 만든 것을 볼 수 있다. 폐열회수소자에서 공기들이 만나는 면적이 넓어질수록 소자의 에너지 효율이 커지기 때문에 공기가 통과하는 간격은 작으면서 소자의 크기가 커질수록 효율이 좋다. 그러나 공기가 통과하는 간격이 작을수록 급기, 배기량이 줄어들고, 크기가 커지면 천장안의 공간을 효율적으로 사용하지 못하게 되므로 크기에 제한이 생기게 되어 소자의 에너지 효율이 단순히 증가할 수 없다.



[Fig. 7] waste heat recovery device



현재 폐열회수장치는 여러 종류가 있으나 열 교환지수의 경우 일반적으로 0.50 정도이다. 열 교환지수는 식 (1)을 통해 유도된다. 실제 열 교환지수 계산은 [6]을 참조하였고 참조논문에서 사용했던 상수와 변수들은 <Table 1>과 같다.

$$\eta(\text{열교환지수}) = \frac{q}{C_{\min}(T - \bar{t})NTU} \dots\dots\dots (1)$$

<Table 1> Variable and constant for calculating heat exchanger efficiency

C_c	차가운 유체의 열용량	C_n	따뜻한 유체의 열용량
q	열교환량($C_c(t_2 - t_1)$)	$C_{\min} : \min(C_c; C_n)$	따뜻한 유체의 열용량
C_{\max}	$\max(C_c; C_n)$	C_{\min}	$\min(C_c, C_n)$
NTU	UA/C_{\min}	A	열 교환면적
U	열전도계수	C_r	C_{\min}/C_{\max}

III. 연구 방법 및 절차

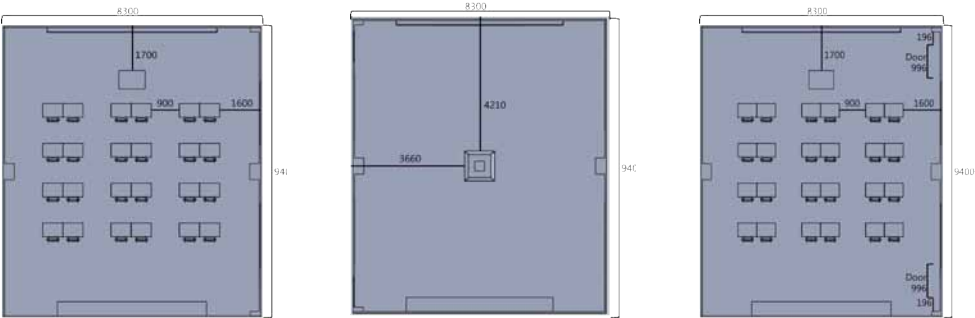
1. 시뮬레이션 기초 작업

가. 천장형 냉/온풍기 및 교실제원

시뮬레이션 장소는 학교 물리세미나실로 선정하였다. 물리세미나실에는 천장형 냉/난방기가 있으며 그 제원은 <Table 2>에 제시하였다. 물리세미나실에 다른 환기 및 배기 시스템은 없다. 물리세미나실은 일반 교실과 같은 크기로 세부 제원은 [Fig. 8]과 같다. [Fig. 8]과 같이 물리세미나실을 시뮬레이션 상에 구현했다.

<Table 2> Data of Ceiling type air-conditioning system

	토출 풍속	흡입 풍속	토출온도 범위	토출 각도
난방 시	4.5~5.5 m/s	2.7 m/s	35~49 ℃	35~40°
냉방 시	4.0~4.3 m/s	2.7 m/s	15~20 ℃	35~40°



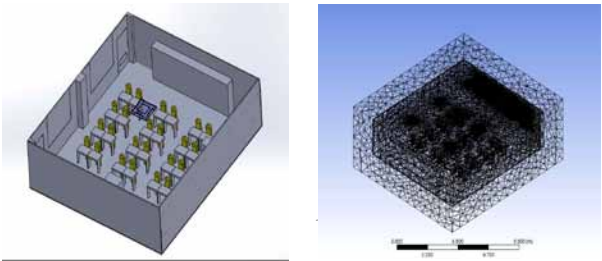
[Fig. 8] Location of desk, air conditioner, door in classroom

Brohus & Nielsen.[9]이 제시한 인체 모사 정보를 적용하여 연구를 진행하였다. 이 모델은 평균적인 사람의 신장과 표면적을 단순화하여 나타낸 것으로 현재 연구자들이 많이 사용하고 있는 자료이다. 구체적인 시뮬레이션 상의 인체 모사 정보는 <Table 3>에 제시하였다.

<Table 3> Information of describing the human body in simulation

머리(m)	몸통(m)	다리(m)	입(m)	전체 표면적(m ²)
0.18×0.2×0.13	0.14×0.7×0.3	0.14×0.8×0.3	0.01×0.02	0.101

천장형 냉/온풍기와 인체 모사 정보를 적용한 교실 모형과 메쉬는 [Fig. 9]와 같다.



[Fig. 9] Classroom simulation and mesh

나. 공기 유동 및 에너지 시뮬레이션

시뮬레이션은 질량보존법칙 식 (2), 운동량보존법칙 식 (3), 에너지 보존 법칙 식 (4)을 기본으로 하여 제작하였다. 또한 식 (5), 식 (6)의 RNG $k-\epsilon$ 난류모델 방정식을 활용하였다. RNG 난류모델은 실내 환경의 유동장 해석에 다른 난류 모델이나 층류 모델에 비해 더 적절한 것으로 알려져 있고, 실험과 전산 수치 해석 결과 사이의 더 나은 상관성을 보이는 것으로 보고되었다[19]. 식에서 나타난 변수로 ρ 는 공기의 밀도, u_i 와 u_j 는 축 방향 속도, p 는 정압, μ 는 점성도, τ_{ij} 는 응력 텐서, g 는 중력 가속도, E 는 총 에너지, k_{eff} 는 열전도도, J 는 열 확산율, h 는 엔탈피를 각각 의미한다.

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \overline{u'_i u'_j}) \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial t}[u_i(\rho E + \rho)] = \frac{\partial}{\partial x_i}(k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_j} + u_i(\tau_{ij})_{eff}) \dots\dots\dots (4)$$

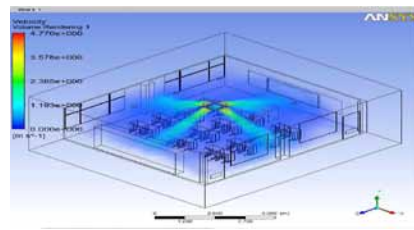
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j}) + G_k + G_b + \rho \epsilon \dots\dots\dots (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\alpha_\epsilon \mu_{eff} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j}) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} - R_\epsilon \dots\dots\dots (6)$$

2. 현재 교실 상태분석(환기 시설의 유무에 따라)

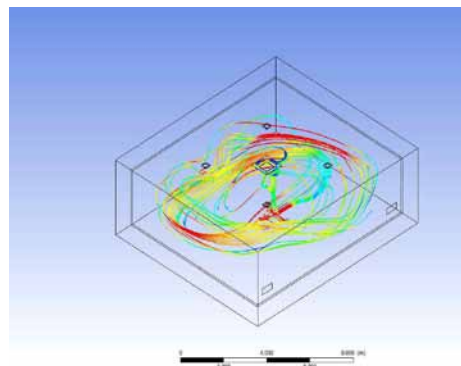
가. 모델 A 교실 공기 환경 분석

모델 A 교실을 Solidworks®를 이용하여 [Fig. 9]와 같이 묘사한 후 공학해석 프로그램 ANSYS를 이용하여 공기의 흐름을 표현한 결과는 [Fig. 10]과 같다.

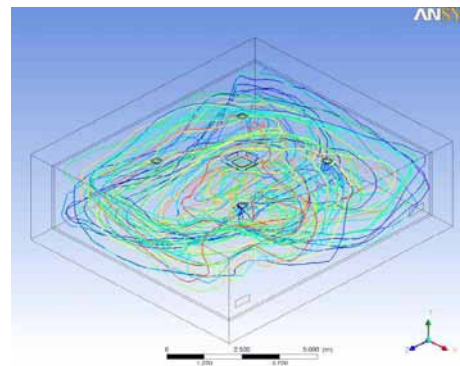


[Fig. 10] Air flow at the situation of Mixing

모델 A 교실의 경우 천장형 난방기 토출구를 통해 나온 공기의 유선은 [Fig. 11]과 같다. 또한 교실 내 감염자를 설정하여 감염자가 기침을 한 경우 토출된 입자는 [Fig. 12]와 같은 유동을 하는 것을 볼 수 있다. 따라서 공기 매개 감염 바이러스의 상당량이 다른 학생의 호흡기로 전달될 것으로 보인다. 시뮬레이션에서 감염자의 위치는 천장형 냉난방기의 바로 아래로 설정하였고, 사용한 재채기 총 토출유량은 0.1168 kg/s이다. 토출비말의 입경분포는 매우 다양한 것으로 알려져 있기 때문에 0.3, 0.5, 1.0, 5.0, 10 μm 의 물 입자가 균일한 분포 비율로 토출되는 것으로 하였다. 한 차례 모의 시뮬레이션 후 유선에 따라 교실 중앙에서 와류가 생성되는 부근의 학생을 감염자로 잡아서 시뮬레이션을 진행하였다.

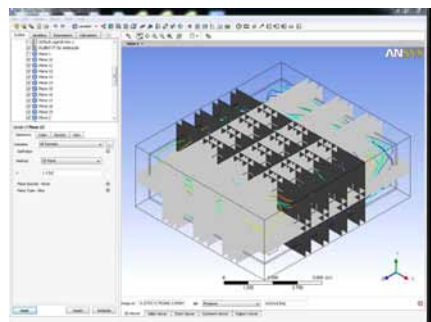


[Fig. 11] Mixing streamline



[Fig. 12] Movement of infective particle

공기 매개 감염 바이러스가 타인이 호흡기로 들어간 양을 명확하게 알아보기 위해 CFD 시뮬레이션 상에서 타인의 호흡기를 통과하는 입자의 개수를 알아보았다.

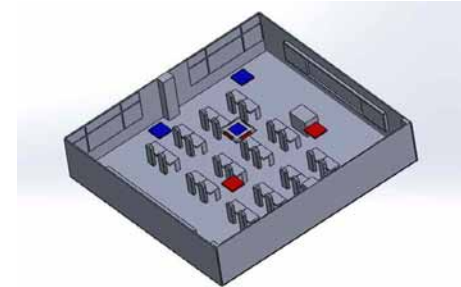


[Fig. 13] Unit boxes of count infective particles

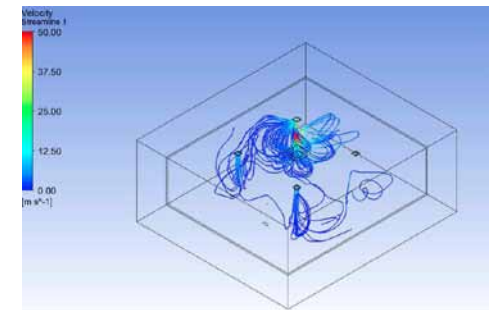
호흡선의 높이를 학생이 앉았을 때의 평균 호흡기 높이인 1.2 m로 잡고 [Fig. 13]과 같이 학생의 호흡기를 기준으로 가로, 세로, 높이 40 cm의 단위상자를 만들었다. 그리고 CFD의 결과 분석창에서 단위 상자 안에 들어간 감염입자의 수를 측정하였다.

나. 모델 B 교실 공기 환경 분석

모델 B는 천장형 냉난방기와 급기, 배기 환풍기 외에도 급기, 배기 간의 열 교환을 담당하는 폐열회수장치가 함께 설치되어 있다. 교실로 공기가 공급되는 부분은 붉은색으로 표시했고, 교실의 공기가 나가는 부분은 파란색으로 표시했을 때 모델 B는 [Fig. 14]와 같고, 이때 공기의 흐름은 [Fig. 15]와 같다.



[Fig. 14] Classroom model (Mixing & displacement)



[Fig. 15] Simulation result of air stream line (Mixing & Displacement)

3. 공기 감염을 최소화 할 수 있는 교실 공조장치 설계

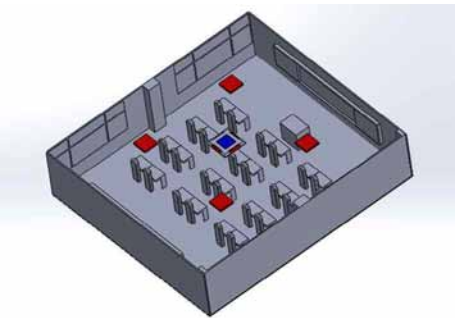
가. Downward & Displacement

모델 B는 모델 A에 비해 감염자에 의해 배출된 감염입자가 타인의 호흡기로 들어가는 현상이 줄어드는 것으로 나타났다. 그러나 일부 학생의 호흡기로 들어가는 감염입자의 농도가 높아지는 모습이 보일 정도로 대류에 의한 영향이 크게 나타나 새로운 방식의 공조시스템을 설계하였다. 새로운 공조시스템을 설계 할 때 고려한 조건 중 가장 우선시 한 것은 가급적 현재 공조시스템의 자원을 유지한 상태에서 조금씩의 변형을 주는 것이다. 실제로 병원이나 기타 시설에 공기 매개 바이러스를 차단하는 양압기 등의 공조시스템이 있다. 그러나 학교에서 교실마다 이를 설치하는 데에는 매우 큰 비용 부담이 따르게 된다. 따라서 현재 학교 교실에 실제로 적용가능한 공조장치의 설계를 위해서 현재 사용하는 제원을 이용하는 방향을 우선 조건으로 설정하였다.

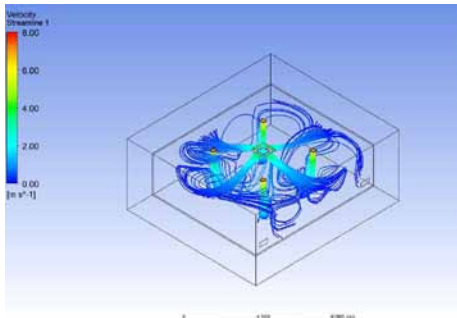
새로운 교실 공조장치를 설계하기 우선 고려한 방식은 교실 내부를 음압으로 만드는 방식과 양압으로 만드는 방법이다. 그러나 천장형 냉/난방기의 토출량이 너무 많아 음압은 적절하지 않은 방법으로 설계 방법에서 배제하였다. 양압의 경우 천장형 냉/난방기의 흡기량이 있으나 교실의 복도 쪽 문 아래쪽에서 흡기를 한다면 양압을 유지할 수 있을 것으로 판단하고 양압을 이용한 방법으로 설계를 하였다. 이런 양압과 환기를 이용한 교실 공조시스템을 Downward & Displacement로 정의하였다. 이 공조시스템을 사진을 제외한 본문에서는 모델 C라는 명칭을 사용해 나타냈다.

나. 모델 C 시스템 시뮬레이션

앞서 계산한 결과를 바탕으로 환풍기를 배치한 모델 C는 [Fig. 16]와 같다. 이의 공기 유동 상황을 시뮬레이션 한 결과는 [Fig. 17]로 공기의 주 흐름이 아래쪽으로 내려가는 것을 볼 수 있다. [Fig. 17]에서 교실 벽면 쪽에서 와류가 발생하는 것을 볼 수 있으나, 벽면 쪽, 특히 앞쪽과 뒤쪽에 학생들이 위치하지 않아 직접적으로 학생의 호흡선을 지나는 입자의 양은 감소할 것으로 예상하였다.



[Fig. 16] Classroom model
(Downward & Displacement)



[Fig. 17] Simulation result of air stream line

4. 공기 매개 감염입자를 호흡선 아래로 내리기 위한 환풍기 풍속 및 개수 결정

사람이 기침을 할 때 기침의 초기 속력은 상당히 빠르지만 기침이 공기 중에서 전달될 때 저항력에 의해 빠르게 속도가 작아지는 것에 초점을 두고, 입자들이 기침에 의해 퍼질 때 1 m 반경에 있는 사람의 호흡기 아래로 내려갈 수 있도록 환풍기의 풍속을 조절하고자 하였다. 이렇게 되면 감염입자가 타인에게 도달할 때 호흡선 아래로 내려갈 확률이 커지기 때문에 공기 매개 감염의 확률을 낮출 것이라고 생각하였다. 감염자가 재채기를 할 때는 입자의 초기속도는 선행연구에 따라 25 m/s[3]로 설정하였고, 계산을 위하여 호흡선 아래로 20 cm 내려갔을 때 감염확률이 낮아질 것이라는 가정을 세웠다. 입자가 토출 직후 저항을 받을 것으로 판단하여 저항력에 관한 식을 세웠다. 그리고 입자가 토출되어 직선거리 1 m를 이동할 동안 연직방향에 대해 20 cm 낙하하는 데에 걸리는 시간을 계산한 후 그에 따라 호흡선에서의 공기 속력을 구했다. 그리고 CFD 프로그램을 이용하여 환풍기의 토출 속력을 추정한 후 교실 권고 환기 유량과 교실의 부피 등을 이용하여 환풍기의 필요 개수를 결정하였다.

입자의 크기는 이정훈[3]의 연구결과를 이용하였고, 저항계수는 레이놀즈 수를 직접 대입하여 구한 값을 사용하였다. 이는 Reynolds number calculator을 이용해 계산하였다. 감염입자는 대부분 물로 이루어져 있으므로[3] 액체상태의 물과 같은 1000 kg/m³의 밀도를 사용하였다. 계산에 사용한 상수는 <Table 4>와 같다.

<Table 4> Constants for calculating

상수	ρ_{air}	$\rho_{particle}$	C_d	r
값	1.2045 kg/m ³	1000 kg/m ³	9.79×10^{-5}	10^{-6} m

5. 공조시스템을 실제 교실에 적용하여 비교(모델 A, 모델 C)

계산된 모델 C 시뮬레이션 결과를 [Fig. 18]과 같이 설계하여 물리 세미나실에 실제 설치를 하였다. 설치 전과 설치 후에 감염입자의 확산정도를 알아보는 실험을 하였는데, 감염입자를 실제로 실험할 수 없기 때문에 감염입자와 사이즈가 유사한 향 입자를 이용하여 실험을 진행하였다. 폐열회수장치 및 공조시스템 공사 설계도면과 공사 모습은 [Fig. 18-19]와 같다.



[Fig. 18] Blue print of construction



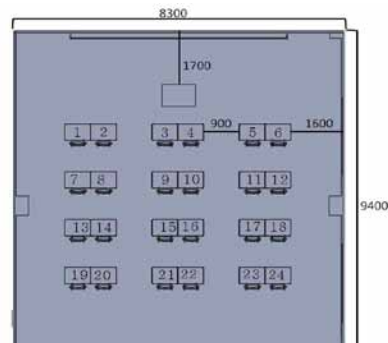
[Fig. 19] Construction of installing air ventilation system and waste heat recovery facility

세팅된 상황에서 모델 A 상황의 교실과 모델 C 상황의 교실을 구성하여 비교실험을 하였다. 입자의 농도를 측정하는 센서에 알맞은 입자로 향 입자를 선택하였다. 그리고 시뮬레이션 결과에 따라서 대략적인 공기의 유동을 파악한 후, 감염입자의 농도가 높다고 분석된 자리에 향을 배치하기로 하였다. 향을 피워 향입자가 확산되었을 때 모델 A 상황의 교실과 모델 C 상황의 교실에서 시스템을 작동하였고, 이 과정에서 학생들의 호흡선에서 미세먼지가 얼마나 감지되는지를 측정하였다. 호흡선에서 미세먼지의 양을 측정하기 위해 미세먼지 센서 24개를 책상 위에 스탠드를 이용하여 학생의 호흡선인 120 cm에 위치시켰다. 미세먼지 측정센서와 데이터를 컴퓨터로 넘기기 위한 인터페이스, 미세먼지를 호흡선에 위치시킨 모습은 [Fig. 20]에 제시하였다.



[Fig. 20] Setting for measuring concentration of fine dust

실험결과 제시의 편의를 위해 각 학생의 위치를 좌표로 설정하였다. 설정한 좌표는 [Fig. 21]과 같다.



[Fig. 21] Coordinate of each student

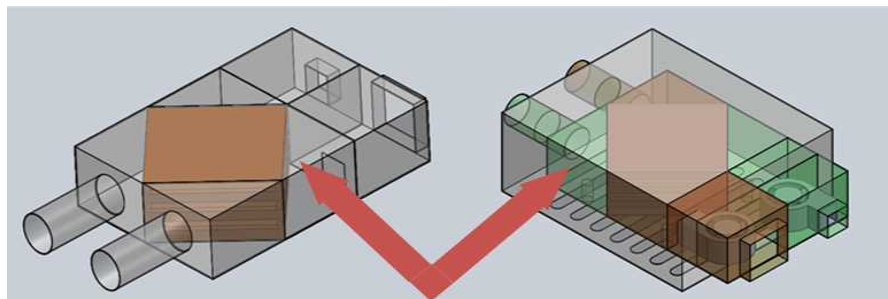
실험에 사용한 미세먼지 센서의 경우 12비트로 표시되어 숫자가 최대 4096까지 표현이 되며, 이는 전압으로 3.3 V로 환산된다. 또한 0.5 V당 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이므로 센서에 표시되는 숫자 1은 미세먼지 농도 $0.162 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 의미한다.

6. 창의적인 폐열회수장치 설계

교실환기 시스템 중 하나인 모델 B의 경우 모델 C로 바꿀 때 문제점이 생기는데 바로 폐열회수장치를 사용하지 못한다는 것이다. 모델 B의 경우에는 배기구로 나가는 열을 수집하여 교실로 들어오는 급기에 전달하는 것이 가능하지만, 모델 C의 경우에 기존 장치의 구조로는 불가능하므로 외기를 교실내부로 공급할 때 개선안을 통해 이 문제를 해결하고자 하였다.

또한 이런 폐열회수장치의 개선안을 기존 폐열회수장치와 CFD 시뮬레이션 상에서 비교분석하고자 한다.

가. 폐열회수장치의 1차 개선안



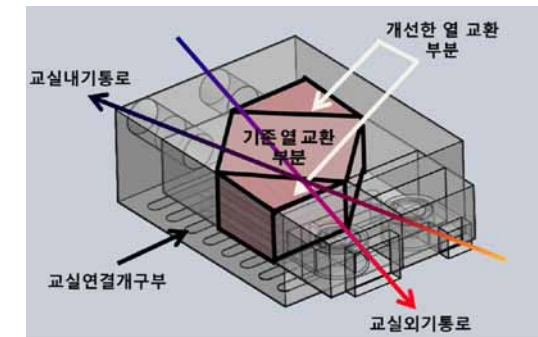
[Fig. 22] Difference between original waste heat recovery facility and 1st improved model

기존 폐열회수장치의 모습과 개선된 폐열처리장치의 모습은 [Fig. 22]에 제시하였다. 개선된 폐열회수장치는 폐열소자 안에서 외기와 내기가 만나는 것 외에 교실의 공기가 회수장치 내부로 들어가 폐열소자의 겉면에서 열을 교환하도록 설계하였다. 기존 폐열회수장치와 개선된 폐열회수장치의 차이점은 기존 장치에 비해 바깥 케이스를 더 가지고 있다는 것이다. 이 바깥 케이스는 아래쪽 개구부를 통해 상대적으로 온도가 높은 천장 부근의 공기가 장치 안쪽으로 유입되어 폐열소자의 겉면으로 가져 올수 있도록 한 것이다. 교실의 공기가 폐열소자의 겉면에 닿으면 벽면을 사이에 두고 외기와 교실의 공기가 열

교환을 할 수 있을 것으로 판단된다. 즉 [Fig. 22]에서 열 교환이 일어나는 부분은 갈색부분이 된다. 개선안의 경우가 기존 제품에 비해서 더 많은 면적에서 열 교환을 일으킬 것으로 예상할 수 있다.

나. 폐열회수장치의 2차 개선안

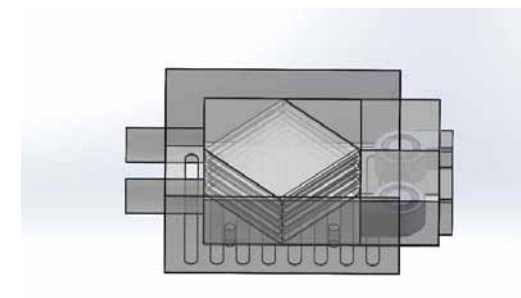
에너지 효율을 높이기 위해서 외부 벽 쪽에 교실 공기와 외기가 만나는 단면적을 증가시키는 것이 효율적이라는 아이디어를 통해 [Fig. 23]과 같이 에너지 교환 장치를 고안하였다.



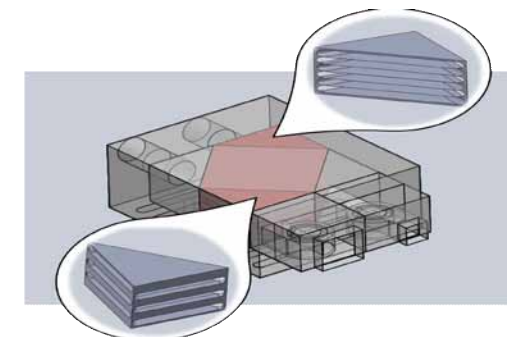
[Fig. 23] Difference between original waste heat recover facility and 1st improved model

[Fig. 23]을 보면 교실과 연결된 개구부에서 올라온 교실의 내부공기가 열 교환에 관여하게 된다. 내부공기가 기존의 폐열회수장치의 벽면과 열 교환을 하는 과정에서 얻는 열량을 크게 하기 위해서는 접촉면적이 커져야 한다는 아이디어를 이용한 것이다. 기존 열교환부분에서 폐열소자의 면적을 넓혀서 직접적인 열교환이 일어나는 부분을 넓혔다.

이를 세부적으로 [Fig. 24]에 제시하였다.



[Fig. 24] 1st Improved wasted heat recovery facility

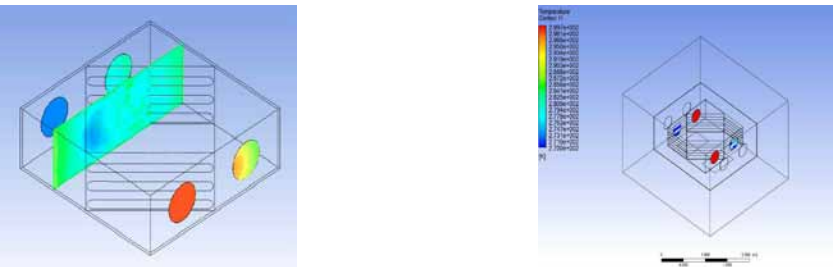


[Fig. 25] 2nd Improved model's additional heat exchange area

1차 개선안을 나타낸 [Fig. 24]에서는 교실 내부의 공기가 외기가 지나가는 벽면과 에너지 교환을 하는 방식이기 때문에 단순히 공기의 경로에서만 열교환이 추가로 일어나게 되었지만 2차 개선안을 나타낸 [Fig. 25]에서는 교실 내부의 공기와 외기가 만나는 부분에 폐열교환소자가 추가로 배치되어 실질적인 열 교환 효율을 늘릴 수 있다.

7. 폐열회수장치 시뮬레이션

기존 폐열회수장치의 열교환 모습과 열교환 정도를 수치적으로 해석하기 위해 CFD 프로그램을 통하여 시뮬레이션 해보았다.



[Fig. 26] Heat exchange simulation

교실외기의 온도는 겨울철 평균 기온인 270 K을 사용하였고, 교실 내부에서 외부로 나가는 공기는 겨울철 적정난방온도인 300 K을 적용하였다.

모델 B 환경에서는 교실로부터 나가는 공기와 교실에서 성층화 되어 장치 안으로 들어온 대기의 온도를 동일하게 300 K으로 하였다. 1차 개선안은 교실외기와 내기의 열교환만 일어나도록 조건을 설정하였고, 2차 개선안의 경우에 교실의 성층화된 공기, 교실의 외기와 내기가 모두 열 교환을 하도록 조건을 설정하였다.

모델 C 환경에서는 교실에서 나가는 공기가 폐열회수장치로 공급되지 않았다. 따라서 1차 개선안의 경우 교실외기와 교실의 성층화된 공기가 장치의 아래쪽 구멍을 통해 폐열소자의 겉면에 열에너지를 공급하는 방식으로 폐열의 교차 없이 폐열회수를 가능하게 하였다. 시뮬레이션의 온도 및 기본 조건은 기존 모델과 1차, 2차 개선안의 경우 동일하게 설정하였다.

IV. 연구결과

1. 양압 상황에서 환기구 개수 및 풍속 분석

호흡선에서 환풍기의 유속을 결정하기 위해 우선 공기의 저항력을 고려하여 x 축 방향에 대한 입자의 속도 식을 유도하였다. 재채기 입자에게 작용하는 저항력을 식 (7)로 나타내었다. 공기입자에 작용하는 힘은 저항력과 중력만 고려하였고, 부력의 경우 입자의 크기가 작아 무시하였다. 실제 교실 공기의 흐름은 난류이지만 계산의 편의를 위하여 공기의 흐름을 층류로 가정하여 계산을 진행하였다. 선행연구에 따라 입자가 감염환자의 호흡기에서 배출되자마자 환풍기 바람의 영향을 받는다고 가정하였다[3]. 이를 계산하여 v_x 와 t 를 도출하였다.

$$ma_x = -\frac{1}{2} \rho_{air} C_d A v_x^2 \dots\dots\dots (7)$$

$$v_x = \frac{1}{kt + 0.04} \dots\dots\dots (8)$$

$$S_x = \frac{1}{k} \ln \left(\frac{kt + 0.04}{0.04} \right) \dots\dots\dots (9)$$

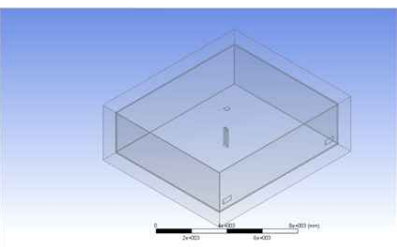
$$k = \frac{3C_d \rho_{\text{입자}}}{4R_{\text{입자}} \rho_{\text{입자}}} = 2.21 \times 10^{-2} \dots\dots\dots (10)$$

위 식을 통해 계산한 결과, 감염자의 입에서 토출된 액적 비말입자가 1 m를 진행하는데 걸린 시간은 0.0404 s가 된다. 환풍기가 천장 면에 대해 수직방향으로 공기를 토출한다고 가정하고 식 (11)과 식 (12)를 통해 환풍기의 토출속력을 계산한 결과 호흡선에서 환풍기에 의해 토출된 공기의 유속은 5.03 m/s로 도출되었다.

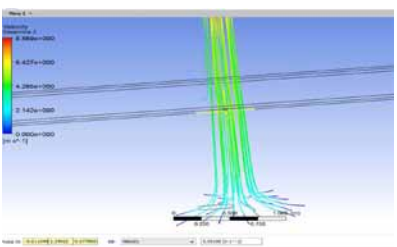
$$ma_y = mg + \frac{1}{2} C_d A \rho_{air} u^2 \quad (u = v_y - V) \dots\dots\dots (11)$$

$$\frac{du}{dt} = g + ku^2, \quad \int_{-v}^u \frac{1}{g + ku^2} du = \int_0^t dt \dots\dots\dots (12)$$

천장 높이가 2.7 m이고 학생이 앉았을 때의 호흡선의 높이가 1.2 m라 가정한 후 Solidworks®를 이용하여 상황을 [Fig. 27]과 같이 표현하였다. 위에서 도출된 속력으로 호흡선을 지나게 되는 환풍기에서의 유속을 CFD를 이용해 구한 결과 [Fig. 28]과 같은 방법을 이용하여 환풍기의 초기 유속이 7.5 m/s가 됨을 도출하였다. 이 과정에서는 주위 공기의 흐름은 배제하고 환풍기의 토출 공기와 아래에 위치한 학생의 호흡만 고려해 주었다.



[Fig. 27] Simulation design to calculate outlet velocity



[Fig. 28] Measuring initial velocity using CFD

감염자에게서 나오는 공기 매개 감염입자를 호흡선 아래로 내리기 위해 환풍기 배출 유속 7.5 m/s와 상주하는 학생 수(24명)에 따른 교실의 기준 권고 환기유량(800CMH)을 이용하여 환풍기의 개수를 결정하였다. 환풍기의 개수는 식 (13)을 이용하여 2개로 도출되었다. 따라서 모델 B의 경우 시뮬레이션에 급기구 2개, 배기구 2개로 설정하였다.

$$V = S \times v \times N \dots\dots\dots (13)$$

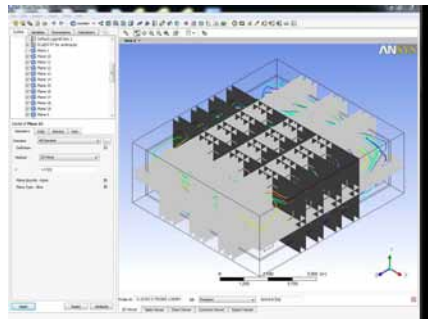
적정 환기 용량 : V 환풍기 속력 : v=7.5 m/s
환풍구 면적 : S 환풍기 개수 : N

2. 모델 A, B, C 상황에서 공기 매개 감염 상황 분석

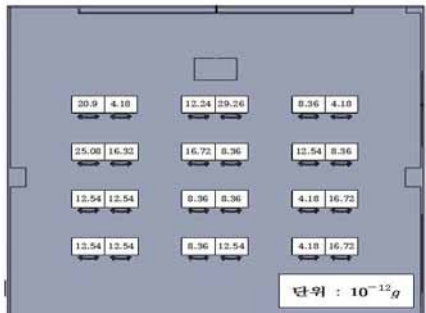
모델 A의 경우 천장형 냉/난방기만 있는 경우이고, 모델 B는 환기가 가능한 공조시스템으로 천장형 냉/난방기 외에 천장에 급기와 배기 환풍기가 있는 경우이다. 두 가지 경우 모두 기본적으로 대류를 통해 공기를 순환시키기 때문에 감염자가 기침을 했을 때 공기 매개 감염 바이러스가 공기의 흐름에 따라 대류를 하며 타인의 호흡기 쪽으로 이동하는 것을 볼 수 있었다.

가. 모델 A 상황에서 분석

24명의 학생들의 호흡선에서 [Fig. 29]와 같은 방법을 통해 [Fig. 30]의 결과를 얻을 수 있었다.



[Fig. 29] Way to count infective particle under breathing line

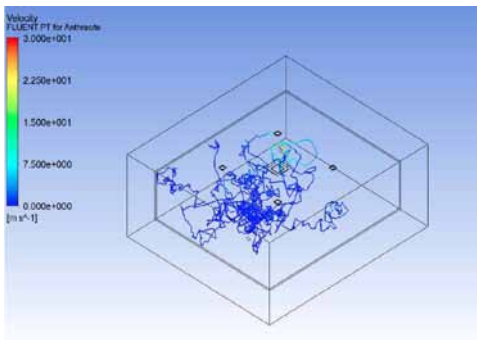


[Fig. 30] Amount of infective particle reaching each student(Mixing)

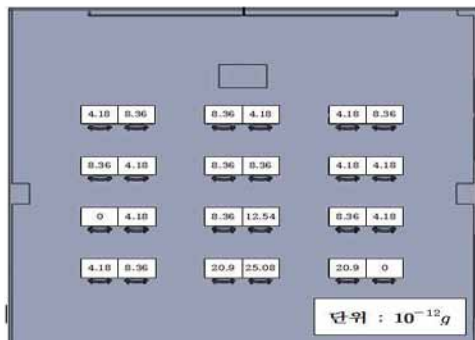
학생들의 호흡선을 통과하는 입자의 양을 보면 거의 대부분의 학생들에게 감염입자가 전달된 것을 볼 수 있다. 특히 감염자로 설정된 학생의 대각선 방향과 앞쪽 방향에 앉은 학생들이 많은 영향을 받는 것으로 나타났다. 대류가 상당히 강한 모델 A의 경우 감염자가 교실에 있을 경우 대부분의 학생이 감염의 위험에 노출된 것으로 나타났다.

나. 모델 B 교실 공기 환경 분석

시뮬레이션 결과를 보면 모델 B의 경우 상당 부분의 대류가 일어나는 것을 알 수 있다. 또한 공기 매개 감염입자가 움직인 궤적인 [Fig. 31]을 볼 때 입자의 이동도 불규칙하게 많은 숫자가 이루어진 것을 볼 수 있다. 감염자의 기침에 의해 타인의 호흡선에 입자가 들어간 개수를 시뮬레이션 상에서 찾은 결과는 [Fig. 32]와 같다. 급기 배기 시스템이 없는 모델 A의 경우와 비교했을 때 감염입자의 갯수가 감소한 결과를 얻을 수 있다.



[Fig. 31] Movement of infective particle (Mixing & Displacement)



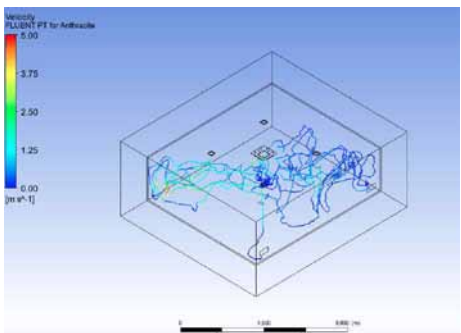
[Fig. 32] Amount of infective particle reaching each student(Mixing & Displacement)

[Fig. 32]를 보면 학생들의 호흡기 위치를 통과하는 입자가 전에 비해 줄어든 것을 볼 수 있다.

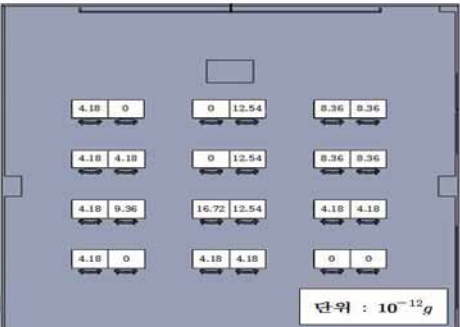
모델 A의 경우 학생의 호흡기를 통과하는 입자의 총량이 $289.68 \times 10^{-12} \text{ g}$ 이었으나, 모델 B의 경우 학생의 호흡기를 통과하는 입자의 총량이 $192.26 \times 10^{-12} \text{ g}$ 으로 44% 정도가 줄어든 것으로 나타났다. 다만 대류작용에 의해서 감염자 뒤쪽의 학생의 농도가 급격히 나빠진 곳이 발생하였다. 최근 학교의 공조 시스템인 모델 B의 경우 환기 효과에 의해 감염입자의 총량이 줄어드는 것을 볼 수 있으나 대류에 의해서 일부 학생에게 감염입자가 물리는 모습을 보였다.

다. 모델 C 공기 유동 환경 분석

시뮬레이션을 통해 얻은 결과는 [Fig. 33-34]와 같다.



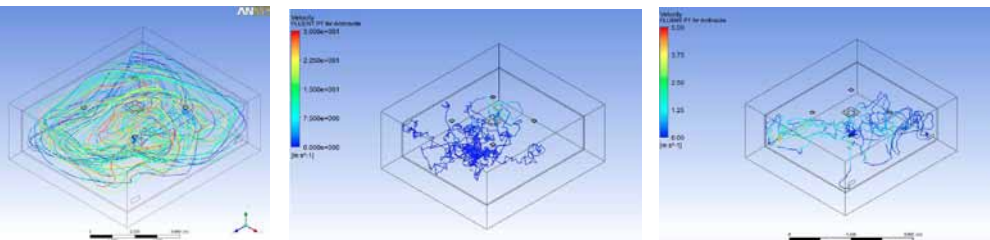
[Fig. 33] Movement of infective particle (Downward & Displacement)



[Fig. 34] Amount of infective particle reaching each student(Downward & Displacement)

결과를 보면 모델 C 교실의 경우 감염자에게서 나온 공기 매개 감염입자가 호흡선에 위치하는 양이 이전의 공조시스템과 비교했을 때 입자의 움직임과 그 숫자 모두 확연하게 줄어든 것을 볼 수 있다. 다만 국소적으로 감염입자의 질량이 0으로 측정된 것은 시뮬레이션 상에서 모든 구간에 대해 입자가 분포할 만큼 계산횟수가 충분하지 못했거나 입자 추적 과정이 정밀하지 못했기 때문으로 예상된다.

라. 공조시스템 시뮬레이션 결과 분석



[Fig. 35] Movement of infective particle on each air ventilation method

<Table 5> Simulation result of infective particle

	입자 질량 최댓값	입자 질량 평균값
Mixing	$24.48 \times 10^{-12} \text{ g}$	$18.72 \times 10^{-12} \text{ g}$
Mixing & Displacement	$20.90 \times 10^{-12} \text{ g}$	$4.18 \times 10^{-12} \text{ g}$
Downward & Displacement	$16.72 \times 10^{-12} \text{ g}$	$2.09 \times 10^{-12} \text{ g}$

감염입자의 시뮬레이션 결과를 표로 정리하면 <Table 5>와 같다.

모델 A의 경우 호흡선에 분포하는 감염입자의 총량이 289.68×10^{-12} g이고, 모델 B의 경우 192.26×10^{-12} g인 것에 비해 모델 C의 경우 138.68×10^{-12} g으로 나타났다. 이는 감염입자 총량이 모델 A에 비해 53% 감소하고 모델 B의 경우에 비해 38% 감소하는 것으로 나타났다. 또한 학생 개인 단위로 살펴본 경우에도 모델 A의 경우 호흡선에 감염입자가 가장 많은 학생이 29.24×10^{-12} g이고 모델 B의 경우 25.08×10^{-12} g이었다. 모델 C의 경우 16.72×10^{-12} g으로 앞의 경우에 비해 크게 감소한 것을 볼 수 있다.

실질적으로 공기 매개 감염 질병에 감염될 확률은 이미 선행연구들을 통해 그 방법이 소개되어 있다. 전염병에 걸릴 확률은 식 (14)와 같이 표현된다[7].

$$P_I(x_i, t_0) = 1 - e^{-\sum_{m=1}^n r_m \beta_m t_0 q b_m(x_i, t_0)} \dots\dots\dots (14)$$

<Table 6> Variable and constant for calculating infection probability

$P_I(x_i, t_0)$	x_i 에서 t_0 노출될 경우 감염확률
β	감염입자의 폐 침착확률(입경별)
r	감염입자의 감염정도 및 일반인의 생리적 보정 값
q	재채기 주기
$b(x_i, t_0)$	입의의 위치까지 전달된 감염입자의 양

식 (14)를 보면 감염입자의 양 외에 다른 값은 감염 바이러스의 특징이나 감염자 혹은 일반인의 특징은 상수 취급할 수 있다. 식 (14)를 교실상황에 적용할 경우 가장 중요한 변수는 $b(x_i, t_0)$ 인데 전달되는 감염입자의 양이 많을수록 감염될 확률이 1에 가까워지는 것을 확인할 수 있다. 따라서 $b(x_i, t_0)$ 를 가급적 적게 만드는 것이 중요하다. 본 연구에서 활용한 공조시스템별 감염입자의 호흡기 분포량을 보면 모델 A와 모델 B에 비해 모델 C에서 분포하는 입자의 양이 최대 53% 가량 줄어들기 때문에 감염되기 위해 필요한 노출시간도 그에 대한 비율로 길어짐을 알 수 있다.

본 연구를 통해 모델 C의 공조 방법을 활용하는 것이 교실 전염병의 감염확률을 줄이는데 효과적이라는 결론을 얻을 수 있다. 이는 병원을 대상으로 실시하였던 Qian 외 4명[18]의 연구와 유사한 결과로 교실의 천장형 냉난방기에 의해 위쪽으로 올라가는 기류가 있는 것을 감안하더라도 공기 매개 감염입자를 통한 감염을 최소화하기 위해서는 모델 C가 효과적이라는 결론을 얻을 수 있었다.

3. 실제 실험을 통한 시뮬레이션의 검증

실험결과를 표로 정리하면 <Table 7-8>과 같다.

<Table 7> Concentration of fine dust measured in Mixing situation

평균값	최대값	(단위 : $\mu g/m^3$)					
1번	2번	3번	4번	5번	6번	7번	8번
36.07	109.51	33.94	65.45	67.59	662.90	47.38	484.05
5번	6번	7번	8번	9번	10번	11번	12번
48.05	662.90	48.10	180.79	49.64	197.64	41.05	101.73
37.66	136.08	43.75	81.00	36.69	141.64	36.68	107.57
13번	14번	15번	16번	17번	18번	19번	20번
39.41	64.15	33.45	53.78	38.19	83.59	49.77	318.16
31.65	58.32	26.45	51.192	24.60	46.00	40.72	302.61
21번	22번						
41.36	484.70	39.47	88.77				

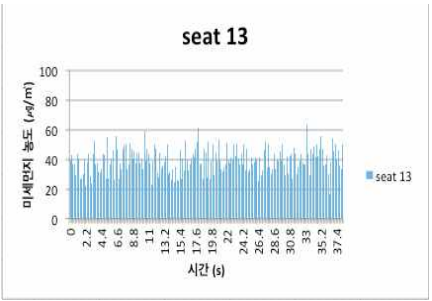
<Table 8> Measuring concentration of fine dust in Downward & Displacement situation

평균값	최대값	(단위 : $\mu g/m^3$)					
1번	2번	3번	4번	5번	6번	7번	8번
17.61	45.36	15.81	43.42	57.66	662.90	34.10	473.69
5번	6번	7번	8번	9번	10번	11번	12번
35.34	543.02	24.52	120.53	24.57	82.94	17.13	54.43
18.15	56.38	23.10	57.67	18.20	52.49	20.90	54.43
13번	14번	15번	16번	17번	18번	19번	20번
17.68	55.73	17.07	48.60	19.91	101.10	28.47	314.28
19.37	49.90	17.00	46.01	11.51	36.29	15.74	51.84
21번	22번						
16.90	51.84	21.21	55.08				

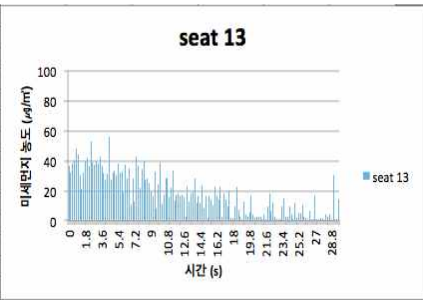
모델 A와 모델 C 시스템을 교실에 직접 설치하여 바이러스와 유사한 사이즈의 미세먼지(향)를 이용하여 실험한 결과, 모델 C가 학생들의 호흡선에 미세먼지의 농도를 <Table 8>과 같이 개선된 결과를 얻을 수 있었다. 입자농도 평균값의 경우 모델 A의 경우 $22.87 \mu g/m^3$ 이었지만 모델 C의 경우 $19.41 \mu g/m^3$ 로 감소하였다. 일정 시간이 지난 후 측정된 평균값을 비교해보았을 때는 시뮬레이션 결과에 비해서 감염입자의 농도 차이가 적어 보이지만 평균값의 경우는 측정 기준 시간에 따라 변화 될 수 있는 부분이고 학생들의 자리별 비교 및 시간대 별로 정리된 결과 값을 보았을 때는 모델 C가 확연히 낮은 감염입자의 농도를 나타냈다.

모델 C의 공조시스템을 제시한 이유는 천정형 냉난방기와 천장 급기/배기 공조시스템이 현재 가장 교실에서 많이 사용되고 있기 때문에 이를 유지하는 방식으로 적용 가능했기 때문이다. 따라서 제시한 모델 C의 공조시스템은 현재 학교 교실 상황에서 가장 현실적인 대안으로 판단된다. 모델 C는 사용자의 기호와 상황에 따라 평소에는 모델 A나 모델 B로 변경하여 사용할 수 있기 때문에 실제 교실 적용이 상당히 용이할 것으로 판단된다.

공기 매개 전염 바이러스를 모사하기 위해 향을 교실에 피워 놓은 상태에서 모델 C 경우와 모델 A의 경우를 비교하였다. 교실 중앙 부근에 앉은 학생의 변화를 살펴보았을 때 모델 A의 경우 13번 학생에 호흡선에 위치하는 미세 먼지의 양은 [Fig. 36]에 제시하였다. 모델 C의 경우 13번 학생의 호흡선에 위치하는 미세 먼지의 양은 [Fig. 37]에 제시하였다. 임의로 선택된 13번 학생의 결과를 보면 모델 C의 상황이 시작된 지 20초가 되었을 때 거의 대부분의 미세먼지가 환기 되었고, 그 이후 13번 학생의 호흡면에 위치하는 미세 먼지의 양이 약 1/4 수준으로 줄어든 것을 확인 할 수 있다.



[Fig. 36] Measuring fine dust using sensor(Mixing)



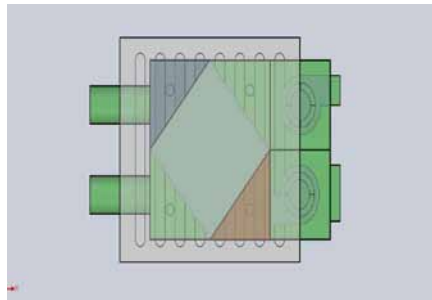
[Fig. 37] Measuring fine dust using sensor (Downward & Displacement)

4. 폐열회수 환기장치의 창의적 개선

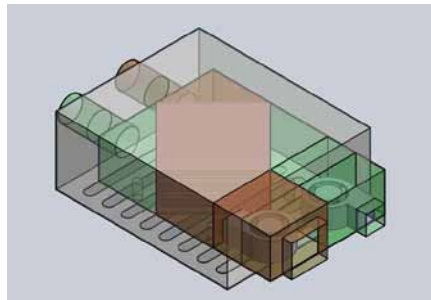
모델 C 환경으로 변환 시 발생했던 문제 상황은 폐열회수장치에 들어갈 폐열을 가진 공기가 없다는 점이다. 따라서 외기로부터 들어오는 공기가 너무 낮은 온도로 들어오기 때문에 에너지 효율측면에서 상당히 안 좋은 상황이 발생하였다. 이런 단점을 극복하기 위해 폐열회수장치를 분석한 결과, 장치에서 열 교환 하는 소자 외 비어있는 공간이 있다는 것에서 아이디어를 착안하여 폐열회수장치의 에너지 효율을 개선하고 소자로 들어가는 폐열이 없는 경우에도 외기의 온도를 높여줄 방법을 고안하였다. 이 폐열회수장치에 대한 개선된 아이디어는 모델 B 상황과 모델 C 상황에서 모두 에너지 효율을 높여줄 수 있다.

본 연구에서 제시한 폐열회수 환기장치의 아이디어는 크게 두 가지로 나타난다.

첫째, 겨울철 교실의 경우 교실 내 성층화에 의해 상당히 높은 열에너지를 가진 공기가 천정 쪽에 밀집해 있는 것을 볼 수 있다. 이렇게 높은 열에너지를 가진 공기가 폐열회수 환기장치의 외부에서 외기에 에너지를 전달하도록 하여 에너지 효율을 크게 하는 아이디어이다.



[Fig. 38] Added area(Colored)

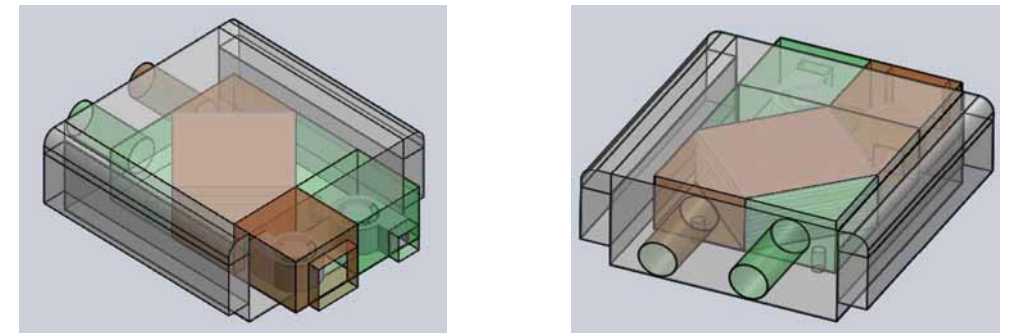


[Fig. 39] 1st Improved wasted heat recovery facility

폐열회수 환기장치에 있는 열 교환 소자는 열은 주고 받되 공기가 섞이지 않는 구조로 되어 있다. 이와 마찬가지로 교실 성층화에 의해 발생한 높은 열에너지를 가진 천장 쪽 공기도 폐열회수장치 내에서 섞이면 안 된다. 따라서 그림과 같이 폐열회수 처리장치의 바깥쪽을 감쌀 수 있는 이중 박스 구조를 제작하고 교실 천장과 장치 사이에 공기가 유동할 수 있는 개구부를 제작하였다. 또한 성층화된 높은 에너지를 가진 교실 공기와 외기가 에너지를 교환할 수 있도록 폐열소자를 추가했다. 이 부분은 [Fig. 38]에 표시되어 있다.

둘째, 바깥 공기가 지나는 통로 부분의 벽면만 전도성 물질로 처리([Fig. 39])하였을 경우 열전달 효율이 좋지 않기 때문에 성층화된 교실에서 올라온 공기가 들어갈 수 있는 길과 외부 공기가 유동하는 길을 교차 하는 폐열교환소자를 통해 열 교환하는 단면을 크게 만들었다. 이를 통해 열효율을 크게 개선할 수 있었다.

셋째, 전문가에게 본 설계를 검증받은 결과 차가운 공기와 따뜻한 공기가 만나는 지점에서 물이 발생하기 때문에 기존 폐열회수장치의 아래쪽이 방수처리 되어 있음을 알게 되었다. 따라서 아래쪽에 개구부가 있을 경우 자칫 물이 교실 쪽으로 떨어질 수 있다는 점을 보완하여 교실과 연결된 개구부를 장치의 옆쪽에 위치시켜 최종안을 설계하였다. 설계한 폐열회수장치의 설계도는 [Fig. 40]과 같다.

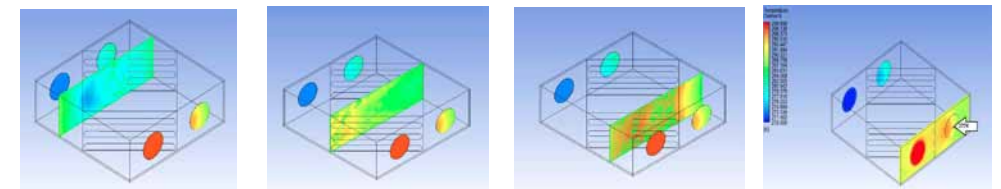


[Fig. 40] Blue print of improved waste heat recovery model

5. 폐열회수장치 시뮬레이션 결과

가. 기존 폐열회수장치 시뮬레이션

장치의 성능비교는 CFD 시뮬레이션을 이용하여 실시하였다. 기존의 폐열회수장치를 이용한 시뮬레이션 결과는 [Fig. 41]과 같다.

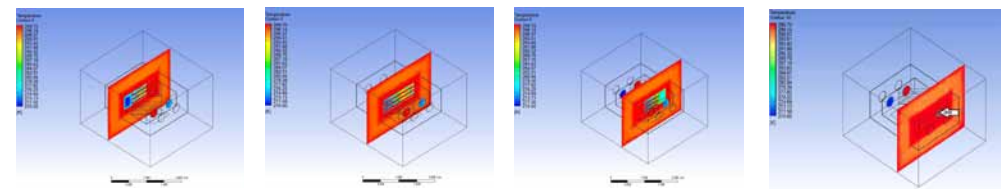


[Fig. 41] Heat exchange simulation(Original waste heat exchange facility)

기존 모델의 경우 파란색으로 표시된 외기(270 K)가 폐열회수장치를 거치면서 점차 온도가 높아지면서 277 K까지 온도가 높아져 열 교환지수가 0.53이 되는 것을 확인할 수 있었다. 시뮬레이션은 실제 제품의 성능시험과 비교하여 오차범위 안에 있는 설계로 나타났다. 실제 제품의 열 교환지수도 0.50-0.60이다.

나. 1차 개선된 폐열회수장치 시뮬레이션

1) 1차 개선된 폐열회수장치 시뮬레이션 - 모델 B

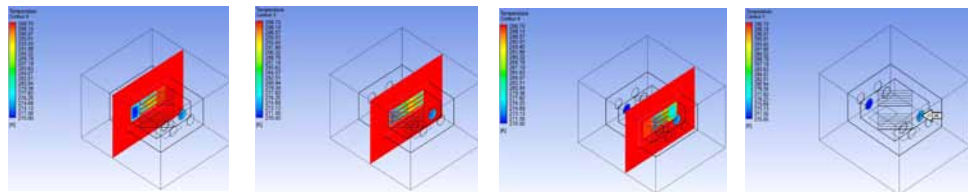


[Fig. 42] Heat exchange simulation of 1st improved model(Mixing&Displacement)

개선된 모델을 사용했을 경우의 시뮬레이션 결과는 [Fig. 42]와 같다. 시뮬레이션 상에서 설정한 외기 온도는 270 K이고, 교실 내 온도는 300 K이다. 개선된 모델의 경우 파란색으로 표시된 외기(270 K)가 폐열회수장치를 거치면서 점차 온도가 높아지면서 285 K까지 온도가 높아져 열 교환지수가 0.79이 되는 것을 관찰할 수 있었다. 폐열회수장치의 결면에도 교실의 공기가 유입되어 열을 공급하고, 개선된 폐열회수 장치의 경우 기존의 폐열장치에 비해 남은 공간에서 열을 교환하는 부분을 제공함으로써 장치의 열 교환지수가 상당히 높아지는 모습을 관찰할 수 있었다.

2) 1차 개선된 폐열회수장치 시뮬레이션 - 모델 C

개선된 폐열회수장치를 이용하여 모델 C 상태에서 시뮬레이션 한 결과는 [Fig. 43]과 같다. 시뮬레이션은 교실의 온기를 이용하여 폐열소자의 결면에 열에너지를 전달하는 것만으로 외기에 열에너지를 전달하는 것이다. 이때 내부의 공기가 폐열회수소자로 들어가는 것은 없는 것으로 설정하였다.



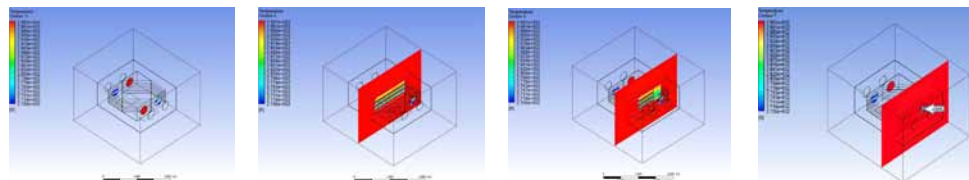
[Fig. 43] Heat exchange simulation of 1st improved model(Downward & Displacement)

본 과정은 폐열회수장치의 결면에서 열에너지를 전달하는 것이기 때문에 열에너지가 많이 전달되지 않는 모습을 보였다. 최초 270 K의 온도였던 외기는 결면에서 교실 공기가 전달하는 에너지를 일부 교환받아 272.4 K이 되었다. 폐열회수장치의 열 교환지수는 0.11로 열에너지의 전달이 상당히 미미한 것을 볼 수 있었다. 교실의 내부 열을 폐열수집장치의 외부에서만 에너지를 전달하는 경우 에너지 전달과정에 큰 도움을 줄 수 없는 것으로 시뮬레이션 상에 나타났다.

다. 2차 개선된 폐열회수장치 시뮬레이션

1) 2차 개선된 폐열회수장치 시뮬레이션 - 모델 B

2차 개선안을 이용하여 모델 B 상황에서 시뮬레이션 하였다.

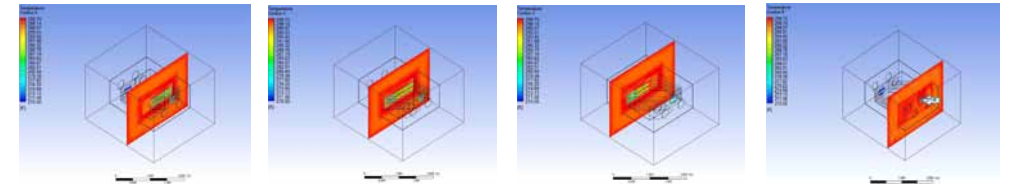


[Fig. 44] Heat exchange simulation of 2nd improved model(Mixing & Displacement)

시뮬레이션 상에서 설정한 외기온도는 270 K이고, 교실 내 온도는 300 K이다. 개선된 모델의 경우 파란색으로 표시된 외기(270 K)가 폐열회수장치를 거치면서 점차 온도가 높아지면서 289 K까지 온도가 높아져 열 교환지수가 0.92까지 높아졌다. 기존 폐열회수장치의 열 교환지수가 0.53이고 1차 개선된 폐열회수장치가 0.79임을 볼 때 2차 폐열회수장치의 열 교환지수가 상당히 높아진 것을 볼 수 있다.

2) 2차 개선된 폐열회수장치 시뮬레이션 - 모델 C

2차 개선된 폐열회수장치의 모델을 이용하여 모델 C 교실 상황에서 시뮬레이션 한 결과는 [Fig. 45]와 같다. 시뮬레이션은 교실의 온기를 새롭게 제작한 폐열교환소자를 통해 열 교환을 시키는 것으로 1차 아이디어에 비해서 열 교환이 훨씬 잘 일어나는 것을 관찰할 수 있었다.

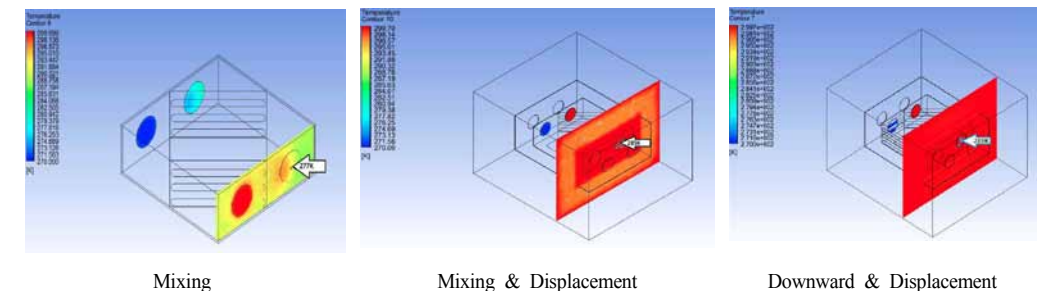


[Fig. 45] Heat exchange simulation of 2nd improved model(Downward & Displacement)

시뮬레이션 상에서 설정한 외기온도는 270 K이고, 교실 내 온도는 300 K으로 설정하였다. 2차로 개선된 모델의 경우 파란색으로 표시된 외기(270 K)가 폐열회수장치를 거치면서 점차 온도가 높아지면서 275 K까지 온도가 높아져 열 교환지수가 0.39가 되었다. 모델 C 상황에서 기존 열 교환 장치는 열 교환지수가 0(측정불가)이고, 1차 개선안에서 열 교환지수가 0.11임을 고려하면 상당한 에너지 절감효과를 가져 올 것으로 판단된다.

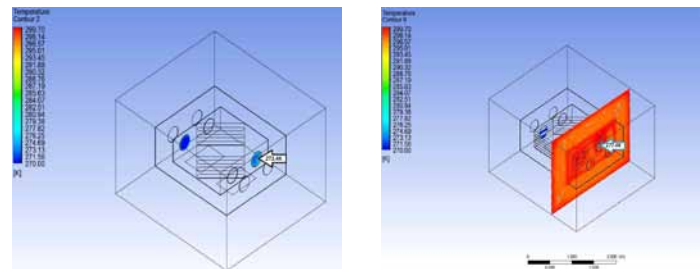
라. 시뮬레이션 결과

개선된 폐열회수장치의 효과성을 CFD 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 일반적으로 폐열회수장치의 열 교환지수는 0.50~0.60이다. 시뮬레이션 상황에서 기존 폐열회수장치의 열 교환지수는 0.53으로 나타나 시뮬레이션 상의 신뢰도를 확보하였다. 1차 개선된 폐열회수장치로 모델 B 상황에서 시뮬레이션 한 결과 열 교환지수가 0.79으로 0.26만큼 증가한 것을 볼 수 있었다. 폐열회수장치에 폐열회수소자를 추가로 설치한 2차 개선안의 경우 열 교환지수는 0.92로 개선 전에 비해 열 교환지수가 0.39 커지는 효과가 나타났다.



[Fig. 46] Heat distribution in waste heat recovery situation

모델 C 상황에서 1차 개선된 폐열회수장치로 교실의 열을 단순히 이용한 경우는 열 교환 0.11로 나타났다, 폐열회수장치에 폐열회수소자를 추가로 설치한 2차 개선안의 경우는 0.39로 나타나 소자에 의해 열 교환지수가 0.28 증가하는 것으로 나타났다.



[Fig. 47] Heat distribution in positive-pressure situation

개선된 폐열소자를 적용하는 경우 모델 C 상황에서도 폐열소자에 의해서 외기에 비해 증가하는 온도가 7.4 K에 이르기 때문에 교실 내부의 에너지 손실을 줄여주는데 상당한 기여를 할 것으로 판단된다.

위의 결과들은 이상적인 온도와 교실 환경에서 계산된 시뮬레이션 값이므로 실제 공조시스템이 설치했을 때는 시뮬레이션 상에서 고려되지 않은 장치 외부나 결면 등에서 열 손실이 추가로 일어날 수 있다.

V. 결론 및 고찰

1. 결론

교실 공조시스템과 폐열회수장치의 개선을 통해서 아래와 같은 결론을 얻었다.

현재 교실 공조시스템 상황에서 공기 매개 감염을 최소화하기 위해 고안된 모델 C의 교실 환경의 경우 감염입자의 농도가 모델 A에 비해 53% 감소하고 모델 B의 경우에 비해 38% 감소하는 것으로 나타났다. 공조시스템을 학교 교실에 실제로 설치하고 실험한 결과 모델 A에서의 평균입자 농도에 비해 모델 C의 평균입자 농도는 12% 감소하는 모습을 보였다. 이는 측정된 수치의 평균값을 비교한 것이고 각 학생별 그래프로 보면 모델 C에서 향 입자의 농도가 확연히 감소하였다.

교실의 공기를 폐열회수소자의 결면으로 끌어들이고 폐열회수소자를 추가로 장치한 2차 개선안의 폐열회수장치를 사용했을 경우, 모델 B 상황에서 열 교환지수가 0.39 증가하였고 이를 경제적인 측면으로 환산하였을 경우, 한 달에 한 개의 교실에서 114,000원의 전기세 절감 효과를 얻을 수 있다. 개선된 폐열회수장치를 활용하여 모델 C로 교실을 구성할 경우, 기존의 폐열회수장치에서는 할 수 없던 폐열회수가 가능해졌고 2차 개선안의 경우 열 교환지수가 0.39로 나타났다.

기존 폐열회수장치에서 폐열회수소자의 크기가 커질수록 에너지 효율이 커지지만, 그만큼 공간을 많이 차지하는 단점이 있다. 결론적으로 본 연구를 통해서 기존 폐열회수장치의 공간 확장을 최소화하면서 폐열회수소자의 열 교환계수를 증진시키는 효과를 얻었다.

위의 결과들을 종합해 보았을 때 평상시의 교실 환경은 열 손실을 최소로 하면서 감염입자의 유동을 억제 할 수 있는 모델 B로 교실 환경을 구성하고, 인플루엔자 등의 공기 매개 감염 질병이 유행하는 시기에는 감염입자의 농도를 최대한으로 줄일 수 있는 모델 C의 상황을 구현하는 것이 적절할 것이라 판단된다.

2. 고찰

본 연구에서는 시뮬레이션과 실험 상황에서 각 학생별 호흡 상황을 고려하지 못한 채 1인의 감염 학생이 호흡하고 감염입자를 토출하는 경우로만 설정하였다. 이에 따라 교실 내부에서 일어날 수 있는 다

양한 공기 유동 현상, 즉 학생들의 호흡이나 이동 등을 고려하지 못한 점에서 미흡하다고 볼 수 있다. 따라서 실제로 학생들이 상주하는 교실에 공조시스템을 설치하고 실제 감염입자와 물성이 비슷한 입자를 이용해 실험을 진행한다면 보다 실제적으로 적용 가능한 연구가 되었을 것이다.

폐열회수장치 관련 연구에서는 열효율 문제를 폐열소자 추가와 열교환 면적 증대를 통해 해결하고자 하였는데 장치의 소재를 다르게 하는 부분에 대해서 연구를 추가로 진행해 본다면 의미 있는 연구가 될 것이라 생각한다.

본 연구에서는 공조시스템에 기존에 사용되는 폐열회수장치를 사용하였기 때문에 연구를 통해 개량된 폐열회수장치를 새로운 공조시스템에 적용하는 부분까지는 연구를 진행하지 못했다. 이 부분까지 연구가 충분히 진행된다면 전국의 교실에 실질적으로 적용이 가능한 새로운 형태의 공조시스템을 개발할 수 있을 것이라 기대한다.

VI. 참고문헌

- [1] 기현옥, 김인호, 조은희, 강민구, 주혁, 이주연 (2015). 2014-2015절기 인플루엔자 표본감시 결과. **주간 건강과 질병**, 1096-1106.
- [2] 이연구 (2015. 7. 1). 메르스 사태와 건물 환기설비. **건설경제신문**
- [3] 이정훈 (2011). 환기 설비를 갖춘 병실 내 감염자를 통해 배출된 감염입자의 확산과 이동에 의한 감염 확률에 관한 연구. 석사학위 논문. 연세대학교 대학원, 서울.
- [4] 임태섭 (2009). 종합병원의 공기 감염균 확산 방지를 위한 건축공간 및 공조환경 계획 연구. 박사학위논문. 연세대학교대학원, 서울.
- [5] 한명창 (2010). 공기매체 감염격리병동에서 공기 감염균의 확산을 방지하기 위한 기류해석 연구. 석사학위논문. 한양대학교 대학원, 서울.
- [6] Fakheri, A. (2007). Heat exchanger efficiency. *Journal of Heat Transfer*, 129(9), 1268-1276.
- [7] Bjørn, E., & Nielsen, P. V. (2002). Dispersal of exhaled air and personal exposure in displacement ventilated rooms. *Indoor Air*, 12(3), 147-164.
- [8] Brohus, H., & Nielsen, P. V. (1996). Personal exposure in displacement ventilated rooms. *Indoor Air*, 6(3), 157-167.
- [9] Chao, C. Y. H., Wan, M. P., & Sze To, G. N. (2008). Transport and removal of expiratory droplets in hospital ward environment. *Aerosol Science and Technology*, 42(5), 377-394.
- [10] Chen, Q. (1995). Comparison of different k-ε models for indoor air flow computations. *Numerical Heat Transfer, Part B Fundamentals*, 28(3), 353-369.
- [11] Fennelly, K. P., Martyny, J. W., Fulton, K. E., Orme, I. M., Cave, D. M., & Heifets, L. B. (2004). Cough-generated aerosols of *Mycobacterium tuberculosis*: a new method to study infectiousness. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 169(5), 604-609.
- [12] Fraser, V. J., Johnson, K., Primack, J., Jones, M., Medoff, G., & Dunagan, W. C. (1993). Evaluation of rooms with negative pressure ventilation used for respiratory isolation in seven midwestern hospitals. *Infection Control & Hospital Epidemiology*, 14(11), 623-628.
- [13] Friberg, B., Friberg, S., Burman, L. G., Lundholm, R., & Östensson, R. (1996). Inefficiency of upward displacement operating theatre ventilation. *Journal of Hospital Infection*, 33(4), 263-272.
- [14] Huang, J. M., & Tsao, S. M. (2005). The influence of air motion on bacteria removal in negative pressure isolation rooms. *HVAC&R Research*, 11(4), 563-585.
- [15] Klepeis, N. E., Nelson, W. C., Ott, W. R., Robinson, J. P., Tsang, A. M., Switzer, P., Behar, J. V., Hern, S. C., & Engelmann, W. H. (2001). The national human activity pattern survey (NHAPS): a resource for assessing exposure to environmental pollutants. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, 11(3), 231-252.

[16] 네이버 매거진캐스트 파플러사이언스(2015년 2월호). <http://me2.do/5CdXuXaY>

[17] Pfost, J. F. (1981). A re-evaluation of laminar airflow in hospital operating rooms. *Ashrae Transactions*, 87(2), 729-739.

[18] Qian, H., Li, Y., Nielsen, P. V., Hyldgård, C. E., Wong, T. W., & Chwang, A. T. Y. (2006). Dispersion of exhaled droplet nuclei in a two-bed hospital ward with three different ventilation systems. *Indoor Air*, 16(2), 111-128.

[19] Rice, N., Streifel, A., & Vesley, D. (2001). An evaluation of hospital special-ventilation-room pressures. *Infection Control & Hospital Epidemiology*, 22(01), 19-23.

[20] Richmond-Bryant, J. (2009). Transport of exhaled particulate matter in airborne infection isolation rooms. *Building and Environment*, 44(1), 44-55.

[21] Rui, Z., Guangbei, T., & Jihong, L. (2008). Study on biological contaminant control strategies under different ventilation models in hospital operating room. *Building and Environment*, 43(5), 793-803.

[22] Sutton, P. M., Nicas, M., & Harrison, R. J. (2000). Tuberculosis isolation comparison of written procedures and actual practices in three california hospitals. *Infection Control & Hospital Epidemiology*, 21(01), 28-32.

[23] Xie, X., Li, Y., Chwang, A. T. Y., Ho, P. L., & Seto, W. H. (2007). How far droplets can move in indoor environments—revisiting the Wells evaporation–falling curve. *Indoor Air*, 17(3), 211-225.

| 연구진 |

오진호 (Oh Jinho, 인천과학고등학교, raphael119@naver.com), 교신저자

이준호 (Lee Junho, 인천과학고등학교, kuee1020@hotmail.com)

이도호 (Lee Doho, 인천과학고등학교, goodlpt74@naver.com)

백민혁 (Baek Minhyeok, 인천과학고등학교, minhaek06@naver.com)

양현우 (Yang Hyunwoo, 인천과학고등학교, y991007@naver.com)

지도교사 : 조대기 (Jo Daeki, 인천과학고등학교, 공학, hotkirara@naver.com)

지도조교 : 박정현 (Park Junghyun, 연세대학교 기계공학과, science1m@yonsei.ac.kr)

「청소년 과학창의연구」 학술지 투고 규정

| 학술지 투고 규정 |

- R&E 연구 활동의 학문 영역별 논문 작성 방식이 매우 다양함.
이에, 본 위원회에서는 아래와 같은 통일 양식을 마련하여 투고 규정으로 활용함.
- 아래 투고 규정은 논문의 편집 형식과 초록, 참고문헌 등의 기본 사항을 정하고 있음.
※ 이에 명시되지 않은 사항에 대해서는 논문 투고자가 자율적으로 결정할 수 있음.

1. (논문의 편집)

- ① 논문 편집은 한글2010 이상을 이용하여 작성해야 한다.
- ② 논문 투고 면수는 아래의 편집 기준에 따라 전체 25쪽을 초과하지 않는다.

2. 논문 제목 및 나머지 글자크기와 글자체는 다음의 학술지 편집 기준에 따른다.

- 편집용지 : A4
- 여백주기 : 위쪽 15mm, 아래쪽 10mm, 왼쪽 · 오른쪽 20mm, 머리말 10mm, 꼬리말 10mm
- 글자체 : 한글 휴먼명조체, 영문 Times New Roman, 장평 97, 자간 -3
- 줄간격 : 160%(도표 안은 130%)
- 제목의 번호 체계
 - 1수준 : I, II, III ... – 2수준 : 1, 2, 3 ...
 - 3수준 : 가, 나, 다 ... – 4수준 : 1), 2), 3) ...
 - 5수준 : 가), 나), 다) ...
- 글자모양 : 제목 12(진하게), 소제목 11(진하게), 본문 10(도표 안은 9)

- **대제목** 휴먼명조, 글자크기12, 장평97, 자간 -3 (진하게)
- **소제목** 휴먼명조, 글자크기11, 장평97, 자간 -3 (진하게), 들여쓰기 10
- **본문글자** 휴먼명조, 글자크기10, 장평97, 자간 -3
- **그림 · 표** 휴먼명조, 글자크기9, 장평97, 자간-3
- **각주글자** 휴먼명조, 글자크기8.5, 장평97, 자간 -3 (줄간격 130%)

3. ‘청소년 과학창의연구(JYSR)’의 형식에 맞추어 작성한다.

4. (논문의 체제)

- ① 첫 번째 페이지를 1페이지로 하여 참고문헌까지 반드시 페이지를 기입하여야 한다.
- ② 맨 앞쪽 표지에는 연구제목, 연구자 이름과 소속 학교명, 연구요약, 중심어 5개 이내를 기재하고, 이후부터 연구내용과 참고문헌 순으로 기술한다.
- ③ 연구 제목은 연구 내용을 간단명료하게 표현하여 제시한다.

5. (초록의 작성)

- ① 초록은 논문의 내용을 요약한 국문요약(400단어 이내)을 연구제목, 연구자명, 소속 학교명 다음, 중심어 앞에 기술한다.
- ② 중심어 명사: 논문 검색의 효율성을 위하여 5개 이내의 중심어를 초록의 아랫부분에 명시한다.

6. (논문의 작성)

① 연구 요약 이후부터 본문을 작성하되 서론, 본론(이론적 배경, 연구(실험)방법, 연구결과 및 논의), 결론 순으로 나누어 기술하여야 한다.

7. (언어) 논문 작성에 사용하는 언어는 한글 사용을 원칙으로 하되, 의미의 혼동 가능성이 있는 경우에 한해 ()속에 원어를 기록하며, 논문의 서식은 가로 쓰기로 한다.

8. (용어) 논문의 기술용어는 원칙적으로 관련 분야의 학회가 인정한 것을 사용하여야 한다.

9. (단위) 숫자는 아라비아 숫자를 사용하여야 하며, 모든 기호와 단위는 원어로 기입하되 ISO (International Standardization Organization)이 인정하는 IS(International System) Unit의 사용을 권장한다.

10. (표, 그림, 통계량)

① 모든 표, 그림은 본문의 적절한 위치에 원본대로 인쇄가 될 수 있도록 작성하며, 제목은 영문으로 기록한다.

② 표는 한 줄로 된 가로선만 사용하여 작성한다.

③ 표 안의 긴 단어는 적당한 약어로 표현하고, 표의 하단에 사용한 약어의 정의를 제시한다.

④ 모든 표는 표의 윗부분에 아라비아 숫자로 일련번호를 붙여야 한다(예: <Table 1>).

⑤ 모든 그림은 그림의 아래 부분에 아라비아 숫자로 일련번호를 붙여야 한다(예: [Fig. 1]).일련번호 다음에 그림의 제목을 적는다. 그림만으로 연구의 내용과 결과를 쉽게 이해할 수 있도록 충분한 설명을 적는다.

⑥ 모든 통계량은 기술표기법으로 표기한다. 예) *t* 검증, *r*=.85, *M*, *SD*, *F*(2, 20)=57.59

11. (인용 및 참고문헌 표시) 본문 중에서 참고문헌을 인용하는 방법은 해당되는 어귀의 우측의 '[]'안에 아라비아 숫자로 표시한다.

① 다음의 예와 같이 표기한다.

－ 이 실험결과는 기존의 연구결과[1]과 반대되는 것이다.
－ 이 실험결과는 기존의 연구결과[1~3]과 반대되는 것이다.
－ 기존에는 생물을 다섯 계(kingdom)로 나누었다[1,3].

② 본문에서 인용할 수 있도록 인용된 참고문헌들을 제10조의 규정에 따라 일련번호를 붙여서 제시한다.

12. (참고문헌 작성)

1) 참고문헌은 논문의 말미에 작성하며, 참고문헌마다 []안에 일련번호를 함께 기재한다.

2) 여러 나라의 문헌을 참고하였을 경우에 한국, 일본, 서양의 문헌 순으로 작성하며, 동양서는 가나다순, 서양서는 알파벳순으로 열거한다.

3) 참고문헌 작성 예시

• 단행본([6] 참조)

• 정기간행물 속의 논문(해당 권, 호, 페이지를 밝힐 것, 권수는 진한 글씨체 사용, [2] 참조)

• 학위논문([1] 참조)

• 인터넷에 탑재된 자료를 인용(인용한 연월일을 기입해야한다. [3,5,9,10] 참조)

• 신문의 기사를 인용한 경우([4] 참조)

• 영문 참고 문헌 작성 시 참조 사항

①정기간행물의 단독저자 논문(Journal article, one author)([12] 참조)

②정기간행물의 복수저자 논문(Journal article, three to six authors)([14] 참조)저자수가 11인 이상인 경우에는 10명까지 제시하고, 추가 저자에 대해서는 국문의 경우, “등”, 영어의 경우, “et al.”로 표시한다.

③단행본(book)([13] 참조)

④단행본(book, third edition, Jr. in name)([16] 참조)

⑤편저(edited book)([8] 참조)

⑥편저의 장 또는 논문 인용(article or chapter in an edited book, two editors)([7] 참조)

⑦ERIC(Educational Resources Information Center)의 자료 인용([11] 참조)

⑧번역서([15] 참조)

[1] 송경애 (2005). **중학생 영재의 비지적특성과 가정의 과정변인이 수학적 창의성에 미치는 영향**. 박사학위논문. 건국대학교.

[2] 윤형주, 윤여홍 (2003). 부모의 지각에 따른 유아영재의 비동시적 발달특성. **영재교육연구**, **13**(1), 65–80.

[3] 조석희(2004). 언어 영재교육의 필요성과 방향 탐색. http://www.ksg.or.kr (검색일: 2015.10.20).

[4] 한국신문 2015. 10. 620일자 4면

[5] 한국영재학회 홈페이지. http://www.ksg.or.kr (검색일: 2015.10.20)

[6] 황정규 (1984). **학교 학습과 교육평가**. 서울: 교육과학사.

[7] Bjork, R. A. (1989). (1972). Retrieval inhibition as an adaptive mechanism in human memory. In H. L. Roediger & F. I. Craik (Eds.), *Varieties of memory and consciousness* (pp. 309–330). Hillsdale, NJ: Erlbaum.

[8] Colangelo, N., & Davis, G. A. (Eds.) (2003). *Handbook of gifted education* (3rd Ed.). Boston, MA: Allyn & Bacon.

[9] Eid, M., & Langeheine, R. (1999). The measurement of consistency and occasion specificity with latent class models: A new model and its application to the measurement of affect. *Psychological Methods*, 4, 100–116. **Retrieved November 19, 2000, from the PsycARTICLES database.**

[10] *Electronic reference formats recommended by the American Psychological Association*. (2000, October 12). **Retrieved October 23, 2000, from http://www.apa.org/journals/webref.html**

[11] Mead, J. V. (1992). *Looking at old photographs: Investigating the teachers tales* (Report No. NCRTL–RR–92–4). East Lansing, MI: National Center for Research on Teacher Learning. (ERIC Document Reproduction Service No. ED346082)

[12] Pyryt, M. C. (2000). Finding “g”: Easy viewing through higher order factor analysis. *Gifted Child Quarterly*, *44*(3), 190–195.

[13] Runco, M. A. (2007). *Creativity*. San Diego, CA: Elsevier Academic Press.

[14] Saywitz, K. J., Mannarino, A. P., Berliner, L., & Cohen, J. A. (2000). Treatment of abused children and adolescents. *American Psychologist*, *55*, 1040–1049.

[15] Tannenbaum, A. J. (2004). 영재교육: 심리학과 교육학에서의 조망 [김태련, 김정휘, 조석희, 역]. 서울: 이화여자대학교 출판부. (원본 출간년도: 1983).

[16] Tannenbaum, A. J. (1983). *Gifted children: Psychological and educational perspectives*. New York: Macmillan.

편집 · 심사위원회

편집위원장	최호성 (경남대학교 교육학과) (한국과학창의재단 지정 과학영재 창의연구(R&E) 지원 센터장)
수학분과위원장 및 심사위원장	방승진 (아주대학교 수학과)
물리분과위원장	김재업 (울산과학기술원(UNIST) 물리학과)
화학분과위원장	방윤수 (광주과학기술원(GIST) 기초교육학부 화학전공)
생물분과위원장	김선정 (동국대학교 생명과학과)
지구과학분과위원장	정현철 (한국과학기술원(KAIST) 과학영재교육연구원)
정보과학분과위원장	정종인 (공주대학교 컴퓨터교육과)
융합 · I&D 분과위원장	최경호 (대구경북과학기술원(DGIST) 기초학부)

청소년 과학창의연구

창간호 Vol. 1. No. 1
THE JOURNAL OF YOUTHS IN SCIENTIFIC RESEARCH

발행일	2016년 3월 31일
발행인	김승환(한국과학창의재단 이사장)
편집인	최호성
발행처	한국과학창의재단 서울특별시 강남구 선릉로 602 02-555-0701
디자인인쇄	광개토디자인 경상남도 창원시 의창구 용지로 169번길 13, 서진라이크빌 617호 055-266-4776

이 학술지의 내용 전부 또는 일부를 무단으로 복제할 수 없습니다.