

기술과 교육

TECHNOLOGY AND EDUCATION

제12권 제2호, 2024년 9월 | VOL.12, NO.2, September 2024

대한기계학회 논문집

C

TRANSACTIONS OF THE KSME C

TECHNOLOGY AND
EDUCATION

기술과 교육

(대한기계학회논문집)



제12권 제2호, 통권 제27호

ISSN 2288-3991(Online)

2024년 9월

차례

< 응용기술논문-특집호: 제13회 전국학생설계경진대회 >

| | |
|---|-----|
| 구조 상황 감지 및 자동 팽창 구멍조끼 발사 메커니즘을 가진 무인 수난 구조 플랫폼의 설계 및 개발 남다현 · 최서연 · 고준호 · 김승진 · 고영언 · 남형우 · 이진 · 김대은 | 57 |
| 테슬라 압축기와 사이클론 집진기를 응용한 공기청정기 유제윤 · 김현우 · 정현욱 · 김나희 · 안재현 · 이선곤 | 63 |
| 개선된 로커보기(Rocker-Bogie) 구조를 채택한 로봇 구동부 설계 최준혁 · 허웅 · 백지수 · 장채원 · 전수빈 · 강대식 | 73 |
| 관절형 단일 무한궤도 로봇의 설계: 기구학적 모델과 최적 기동 알고리즘 박순용 · 홍장환 · 정동민 · 정희준 · 김홍근 | 81 |
| 자전거 전도전복사고 예방을 위한 전자식 ABS 박상환 · 박승표 · 염홍철 · 민중호 · 윤주일 | 95 |
| 스마트 방법 차수 시스템 개발 강찬 · 한태웅 · 전형준 · 박근영 · 이승훈 · 김영수 | 105 |

< 응용기술논문 >

| | |
|--|-----|
| 과학상자와 Labview를 이용한 메카트로닉스 설계 교육 사례 김정현 | 113 |
| 원전 중대사고 해석코드 MAAP5의 코어캐치 열전달 모델 변경을 위한 API 개발 이대형 · 김병조 · 윤선홍 | 121 |
| 축소차수모델(ROM)을 활용한 다중이용건물의 실내 공조 예측 차경환 · 강경혁 · 이명석 · 김주한 | 135 |
| 플랜트산업의 가상현실기반 실감형 안전교육콘텐츠 개발 고광춘 · 박기웅 · 김병준 | 149 |
| 선박 벽체 도장 작업을 위한 임피던스 접촉모델 기반 협동로봇 제어 이준재 · 이효석 · 이학 | 157 |
| 오픈소스 및 프리웨어를 이용한 디지털 제어기 설계 및 제작 정광석 · 이상현 | 163 |
| 보이스코일모터 제어에 의한 앰플 주사기의 주입 효과 연구 김영흡 · 황기철 | 175 |
| 플립러닝을 적용한 협동로봇 제어 실습 교육 박종욱 | 185 |

| | | |
|--|-----------------------------------|-----|
| 탄소중립을 위한 자연모방 기술혁신: 전략과 정책 과제 | 곽기호 · 김완두 · 정영도 | 193 |
| 플립 러닝과 문제 중심 학습 교수법을 적용한 수치해석 교과 설계 및 운영 연구 | 이 민 우 | 209 |
| 캠 메커니즘을 활용한 자동 심폐소생 압박 모션 발생 메커니즘 연구 | 최원석 · 성민영 · 김혜리 · 김동우 · 정상훈 · 서진성 | 219 |

TECHNOLOGY AND EDUCATION

Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers



Vol. 12, No. 2

ISSN 2288-3991(Online)

September, 2024

C O N T E N T S

< Application Technical Papers-Special Edition: KSCDC 2023 >

- Design and Development of an Unmanned Water Rescue Platform with Emergency Detection and Self-Inflating Life Jacket Launching Mechanism
..... Dahyun Nam, Seoyeon Choi, Joonho Ko, Seungjin Kim, Youngeon Ko, Hyeongwoo Nam, Jin Lee and Dae-Eun Kim... 57
- Air Purifier Utilizing Tesla Compressor and Cyclone Dust Collector
..... Je-Yoon Ryu, Hyunu Kim, Hyun-Wook Chung, Na-Hee Kim, Jae-Hyeon An and Sun-Kon Lee... 63
- Design of Robot Drive Adopting Improved Rocker-Bogie Structure
..... Jun-hyeok Choi, Woong Heo, Jisu Baek, Chae-won Jang, Subin Jeon and Daesik Kang... 73
- Design of Single Continuous Tracked Robots with Joints: Kinematic Model and Optimal Maneuvering Algorithm
..... Soon-Yong Park, Jang-Hwan Hong, Dong-Min Jung, Hui-Jun Jeong and Hongkeun Kim... 81
- Electronic ABS for Preventing Bicycle Overturn Accident
..... Sang-Hwan Park, Seung-Pyo Park, Hong-Chul Youm, Jong-Ho Min and Juil Yoon... 95
- Design of Smart Security Window with Water Barrier System
..... Chan Kang, Tae-Woong Han, Hyeong-Jun Jeon, Ho-Jun Lee, Geun-Young Park, Seung-Hun Lee, and Youngsoo Kim... 105

< Application Technical Papers >

- Case Study for Mechatronics Design Education Using Labview and Science Box
..... Jung Hyun Kim... 113
- Development of an API for Modifying the Core Catcher Heat Transfer Model in the Severe Nuclear Accident Analysis Code MAAP5
..... Dae-Hyung Lee, Byung-Jo Kim and Seon-Hong Yoon... 121
- Indoor HVAC Prediction in Multi-Use Building Using Reduced Order Model
..... Kyunghwan Cha, Gyeonghyeok Kang, Myungsung Lee and Joo-Han Kim... 135
- Development of Virtual Reality based Immersive Safety Training Content for Plant Industry
..... Kwang-Chun Koh, Kiwoong Park and Byungjun Kim... 149
- Control of Collaborative Robot Based on Impedance Contact Model for Ship Hull Painting Operations
..... JunJae Lee, HyoSeok Lee and Hak Yi... 157
- Design and Implementation of Digital Control System Using Open-Source and Freeware
..... Kwang Suk Jung and SangHeon Lee... 163

A Study on the Injection Effect of Ampoule Syringe by Voice Coil Motor Control
..... Youngheub Kim and Kichul Hwang*** 175

Collaborative Robot Control Practice Education Using Flipped Learning
..... Jong-Wuk Park*** 185

Biomimicry Innovation for Carbon Neutrality: Strategies and Public Policies
..... Kiho Kwak, WanDoo Kim and Youngdo Jung*** 193

Incorporation of Flipped Learning and Problem-Based Learning Methods for the Numerical Analysis Course
Design
..... Minwoo Lee*** 209

A Study on Automatic Generation of CPR Compression Motion Using a Cam Mechanism
..... Won-Seok Choi, Min-Young Sung, Hye-Ri Kim,
Dong-Woo Kim, Sang-Hoon Jeong and Jin Sung Suh*** 219

구조 상황 감지 및 자동 팽창 구명조끼 발사 메커니즘을 가진 무인 수난 구조 플랫폼의 설계 및 개발[§]

남다현* · 최서연* · 고준호* · 김승진* · 고영언** · 남형우* · 이진* · 김대은**

* 연세대학교 기계공학부, ** 서울대학교 기계공학부

Design and Development of an Unmanned Water Rescue Platform with Emergency Detection and Self-Inflating Life Jacket Launching Mechanism

Dahyun Nam*, Seoyeon Choi*, Joonho Ko*, Seungjin Kim*,
Youngeon Ko**, Hyeongwoo Nam*, Jin Lee* and Dae-Eun Kim**†

* Dept. of Mechanical Engineering, Yonsei Univ.,
** School of Mechanical Engineering, Seoul Nat'l Univ.

(Received December 28, 2023 ; Revised May 3, 2024 ; Accepted May 3, 2024)

Key Words: Water Rescue(수난 구조), Unmanned Rescue Platform(무인 구명 플랫폼), Automatic Emergency Detection(응급 상황 자동 감지), Launching Mechanism Design(발사 장치 설계)

초록: 본 논문에서는 강 및 호수 인근에서 수난 구조 작업을 위해 무인 익수자 인식 및 자동 팽창식 구명조끼 발사 메커니즘을 가진 구조 플랫폼을 제안한다. 기존의 구조장비들은 모두 사용이 어렵고, 수동으로 작동한다는 단점이 있다. 본 시스템은 IR 카메라, LiDAR, 객체탐지 인공지능 모델의 기술을 활용하여 야간 및 인적이 드문 환경에서의 자동 구조 상황 감지를 효과적으로 수행할 수 있다. 또한, 상하 좌우 회전부와 피칭 머신 메커니즘을 설계하여 익수자까지의 정밀 조준과 자동 발사가 가능하다. 이러한 플랫폼은 기존 장치의 제약을 극복하고, 익수자 구조의 효율성을 향상시킬 것으로 기대된다.

Abstract: In this paper, we propose an unmanned water rescue platform with self-inflating life jacket launching mechanism and emergency detection for efficient rescue operations near rivers and lakes. Existing rescue devices are difficult to use and requires manual operation. The presented system integrates an IR camera, a LiDAR, and an object detection machine learning model for effective detection in night and unpopulated environments. Moreover, the system features vertical and horizontal rotation and a pitching machine mechanism that enable precise detection and automatic launching. This system is expected to overcome the limitations of conventional systems and enhance the efficiency of water rescue operations.

1. 서론

수난 사고는 예측하지 못한 상황에서 발생하며, 빠른 구조가 필수적이다. 물놀이 및 익수 사고의 비율은 전체 수난 사고 중 41%에 육박하며, 익수 사고 중 실족으로 인한 사고는 54%의 비율을 차지한다.⁽¹⁾ 이러한 수난 사고 대응하기 위하여, 강 및 호수 근처에는 수난 사고 인명구조 장비함 설치가 권고되나, 실질적인 규정이 없어 설치 및 관리가 미흡한 상황이다.⁽²⁾ 또한, 기존의 수동 구조 장비는 인적이 드물거나, 익수자 식별이 어려운 야간 상황에서는 빠른 대응이 어렵고, 먼 거리에서 구조가 물리적으로 어렵다는 한계를 가진다. 이러한 한계를 개선하기 위하여 압축공기를 통하여 구명조끼를 발사하는 고정장치⁽³⁾와 가스실린더를 사용하여 구명튜브를 발사하는 핸들링 장치⁽⁴⁾ 등이 연구되었다.

[§] 이 논문은 대한기계학회 제13회 전국학생설계경진대회(2023. 10. 21., 고려대학교) 발표 논문임.

[†] Corresponding Author, kimde@yonsei.ac.kr

© 2024 The Korean Society of Mechanical Engineers

하지만, 기존 장치는 모두 수동 구조 방식이다. 따라서, 본 연구에서는 자동으로 익수자를 탐지하고 구조할 수 있는 무인 수난 구조 플랫폼을 제안한다. 카메라를 통하여 무인으로 익수 상황을 감지하고, 거리센서를 통하여 구명조끼를 익수자를 향하여 정확하게 발사함으로써, 야간 및 인적이 드문 환경에서 효과적인 구조 작업을 수행할 수 있다. 본 플랫폼은 기존 장치들의 제약을 극복하여 수난 사고 대응의 효율성을 향상시킬 것으로 기대된다.

2. 전체 시스템 소개

2.1 시스템 개요

본 연구에서 제시하는 시스템은 수동 구조가 어려운 상황에서의 주/야간 자동 구조를 목표로 한다. 고안된 시스템은 감지, 조준, 발사, 신고 순으로 작동한다(Fig. 1). 먼저 주/야간 카메라와 객체탐지 모델을 통하여 익수자가 식별되면, 장치가 상하좌우 회전을 통하여 익수자를 카메라 화면의 중앙에 조준하게 된다. 그 후 거리 센서를 이용하여 장치에서 익수자까지의 거리를 측정하고, 측정된 거리에 맞추어 자동으로 구명조끼를 발사하여 익수자를 구조한다. 구명조끼 발사와 동시에 구조 상황을 신고하고, 구조 완료 후 다시 자동 감시모드로 돌아간다.

2.2 시스템 구성부 소개

본 플랫폼은 기능에 따라 감지부, 상하좌우 회전부, 발사부, 그리고 기타 구성부로 구분된다(Table 1, Fig. 2). 감지부는 익수 상황을 식별하는 주/야간 카메라와 거리센서(LiDAR)로 구성된다. 상하좌우 회전부는 익수자를 향해 조준하는 역할을 하며 감지부를 회전시키는 상하 회전과 발사부를 포함하는 전체 프레임의 좌우 회전으로 구성된다. 발사부는 자동 팽창 구명조끼가 위치하는 보관함과, 이를 자동으로 투입하는 장전 장치, 마지막으로 발사를 담당하는 발사 장치로 구성된다. 그 외의 구성부는 상단의 경보 장치와 외관으로 구성된다.

Table 1 System components

| Detection unit | Pan/tilt unit | Launching unit | Other components |
|---|---|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> Emergency detection Distance measurement | <ul style="list-style-type: none"> Pan/tilt mechanism Targeting algorithm | <ul style="list-style-type: none"> Launching mechanism Feeding mechanism | <ul style="list-style-type: none"> Exterior desing Alert control |

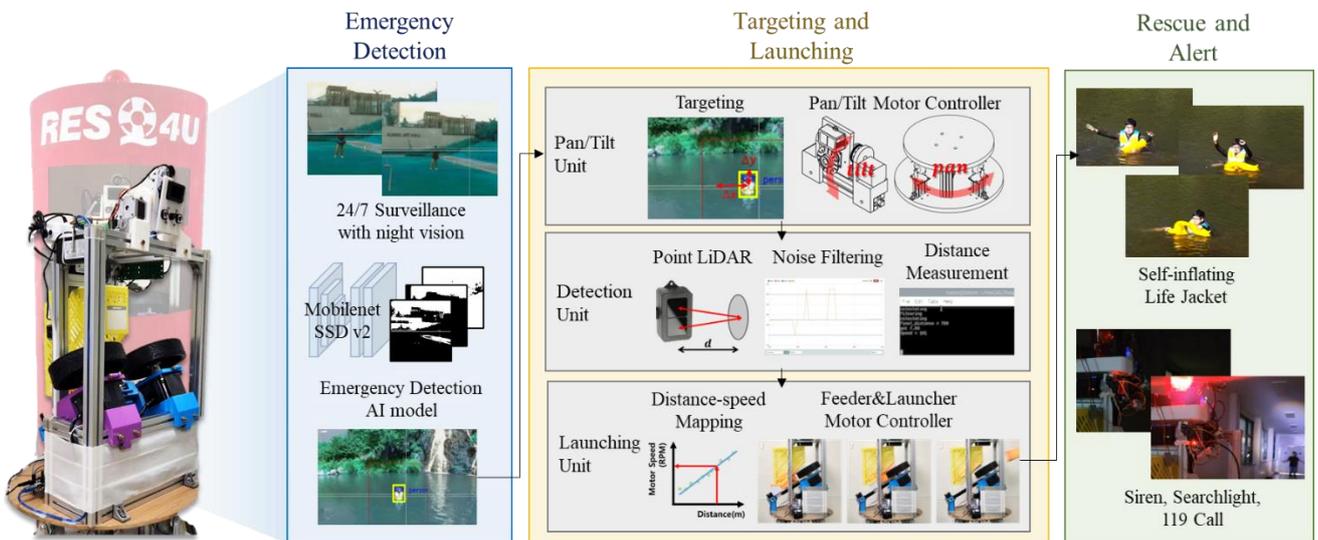


Fig. 1 System overview

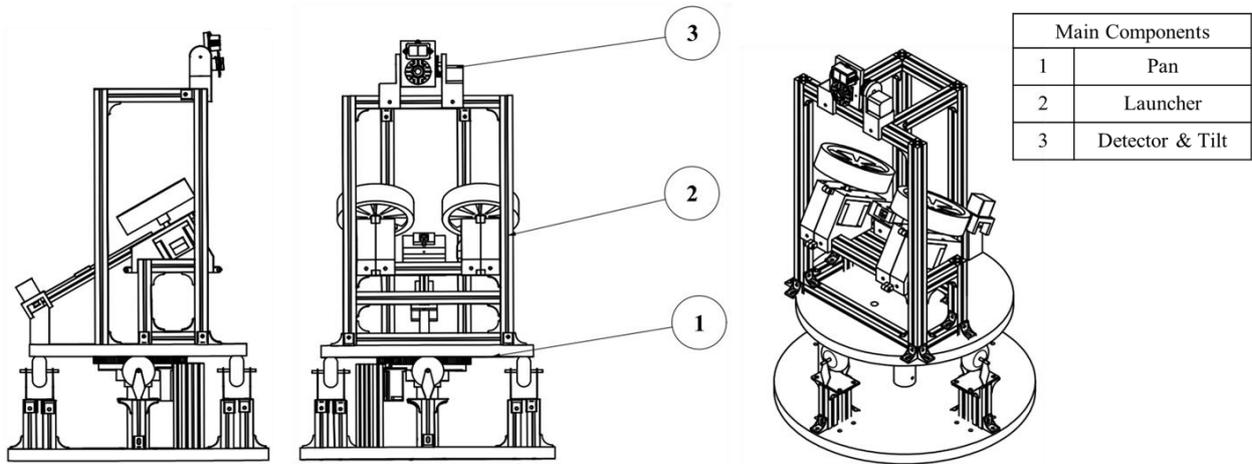


Fig. 2 Design overview



Fig. 3 Detection in (a) day (bright light); (b) night (low light)

3. 설계 및 제작

3.1 감지부

본 시스템은 카메라를 통하여 주/야간 구조 상황을 인지한다. 사용한 카메라 모듈은 조도가 높을 때 적외선 차단 필터를 사용해 색상을 정확하게 표현하고, 조도가 낮을 때 필터를 제거하여 어두운 상황에서도 선명한 적외선 영상을 제공한다. 적외선 영상 탐지 거리 개선을 위하여 적외선 LED 조명을 추가하였다.

카메라 화면 내 익수자를 탐지하기 위하여 객체탐지(object detection) 인공지능 모델 MobileNet SSD (single shot detector) v2⁽⁶⁾를 사용한다. 익수자의 위치는 경계상자의 너비와 높이로 표시되며, 이 정보는 상하좌우 회전부로 전달되어 발사 장치를 익수자를 향하여 정밀하게 조준할 수 있도록 한다. 화면 내 익수자를 추적하기 위하여 슬라이딩 윈도우(sliding window) 기법을 이용하여 화면을 300 × 300 픽셀 사이즈로 작게 분할하여 객체탐지 모델을 통과시킨다. 윈도우 내 익수자가 탐지되면, 탐지된 익수자를 중심으로 윈도우를 재조정하여 화면 내 움직이는 익수자를 실시간으로 추적한다. 주/야간 상황에서의 객체탐지 모델 실험 모습은 Fig. 3에 나타나 있다.

구조 상황 탐지 후, 구멍조끼를 익수자까지 발사하기 위하여 장치부터 익수자까지의 거리를 측정한다. 정확한 거리 측정을 위하여 야외에서 강건한 성능을 보이는 단일 포인트 LiDAR 모듈을 사용하였다. LiDAR 레이저는 물에 닿았을 때 산란되어 측정되는 강도가 약해지기 때문에 구조자에게 닿았을 때만 높은 강도의 값을 측정하게 된다. 이러한 특성을 이용해 익수자를 조준하기까지 강도에 대한 대역 통과(band-pass) 필터와 측정된 값에 대한 이동평균 필터를 이용해 익수자까지의 거리를 정확히 측정한다.

3.2 상하좌우 회전부

감지부에서 구조 상황이 감지되면 카메라 프레임 내 익수자의 위치 값이 전달된다. 해당 정보를

바탕으로 상하좌우 회전을 통하여 감지부와 발사부가 익수자를 향하도록 조준한다. 이후 발사 거리에 따라 모터의 출력을 조절하고 구멍조끼를 익수자를 향하여 발사한다.

상하 방향 회전부는 카메라와 조명, 그리고 거리 센서를 포함한 감지부와, 이를 상하 방향으로 회전하는 평기어 및 모터로 구성된다(Fig. 4(a)). 양 끝단 스탠드를 통해 상하 회전의 축이 고정된다. 한쪽 스탠드에 구동 모터와 기어가 위치하여 피동 기어가 장착된 감지부를 회전한다. 평기어의 기어비는 1:2로, 0.5의 감속비를 갖는다.

수평 방향 회전부는 샤프트, 베어링, 캐스터 휠과 모터로 구성되며, 감지부와 발사부를 포함한 전체 프레임에 회전시킨다(Fig. 4(b)). 고중량의 전체 프레임을 정밀 회전하기 위하여 메인 샤프트로 중심축을 고정, 캐스터 휠로 중량을 분산한 뒤 평기어를 통하여 구동하도록 설계하였다. 수평 회전 평기어의 기어비는 1:4로, 0.25의 감속비를 갖는다.

3.3 발사부

기존 공압 발사 장치의 가스 충전 문제를 해결하고, 실제 설치 및 관리가 용이하도록 2휠 전동 피칭 머신 발사 메커니즘(Fig. 4(c))을 사용하였다. 양 휠은 서로 반대 방향으로 회전하며, 익수자까지의 거리에 따른 목표 회전수에 도달 시 회전하는 휠 사이로 구멍조끼가 투입된다. 모터의 회전수를 결정하는 duty cycle을 바꿔가며 발사 거리를 실험하였고, 데이터를 바탕으로 측정된 거리에 대응하는 회전수를 스플라인 보간을 통해 계산하였다(Fig. 5(a)). 구멍조끼는 발사부에 투입되며 휠과 마찰을 통하여 모터의 동력을 전달받아 발사된다.

발사될 구멍조끼는 보관함에 위치하며, 휠과 마찰을 최대한으로 하여 발사 속도를 확보할 수 있도록 압축성 고무찰의 케이스가 장착된다. 장전 장치는 선형 이송계를 일정 각도로 고정하여 구현하였다. 선형 이송계는 타이밍 벨트, 폴리, 그리고 스텝 모터로 구성되고, 모터 회전을 선형 운동으로 변환하여 구멍조끼를 발사 장치로 투입한다. 발사 후, 이송계는 초기 위치로 돌아오며, 이때 보관함에 위치한 다음 구멍조끼가 아래로 떨어져 이송계 위로 위치하게 된다(Fig. 5(b)). 이러한 자동 장전 메커니즘을 통하여 제품이 연속적인 발사에도 작동할 수 있도록 한다.

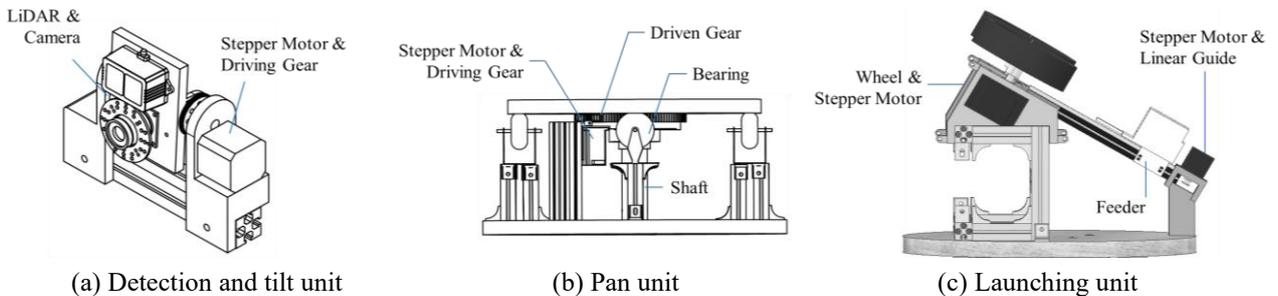


Fig. 4 Design by components



Fig. 5 Launching mechanism

4. 실험

본 설계를 바탕으로 제품의 프로토타입을 제작하였다. Table 2는 본 실험(Fig. 6)에서 사용된 프로토타입의 부품 목록이다. 프로토타입을 여러 차례 야외에서 실험하며 2 m부터 15 m까지 구멍조끼를 발사할 수 있다는 것을 확인하였다(Fig. 6(b)). 비거리는 각 모터출력에 따라 10번씩 테스트하였고, 최대 표준편차는 0.16으로 나타났다. 실험에서 측정 한 거리와 모터출력의 관계는 Fig. 7에서 확인할 수 있다.

Table 2 System specifications

| Component | Device name | Use |
|----------------|--|---|
| Computer | RaspberryPi 4B+, 8 GB RAM | Main computing resource |
| | Google Coral USB Accelerator | Tensor processing unit |
| Detection unit | Arducam OV5647 IR Camera | Camera |
| | 850 IR High Power Night Vision Infrared Illuminator with Adjustable Resistor | Auto-switching IR light source for night vision |
| | Benwake TF02-pro one-point LiDAR | Distance measurement |
| Pan/tilt unit | NEMA 17HS4401 Bipolar Stepper Motor | Tilt actuator |
| | NEMA 24V CNC Rouser Stepper Motor | Pan actuator |
| | TB6560 3A Driver Board | Stepper motor driver |
| Launching unit | Arduino UNO board | BLDC, LiDAR control |
| | ShinYong Motor 24V 3,000 rpm BLDC Motor | Launcher actuator |
| | ShinYong Motor MD200T BLDC Controller | BLDC motor dual driver |
| | Solid Rubber Load-bearing Wheel 180 mm | Rotating wheels for launching |
| | NEMA 17 Linear Guide with G2 belt drive | Linear guide for feeding |
| | NEMA 17HS4401 Bipolar Stepper Motor | Linear guide driving actuator |
| | TB6560 3A Driver Board | Stepper motor driver |

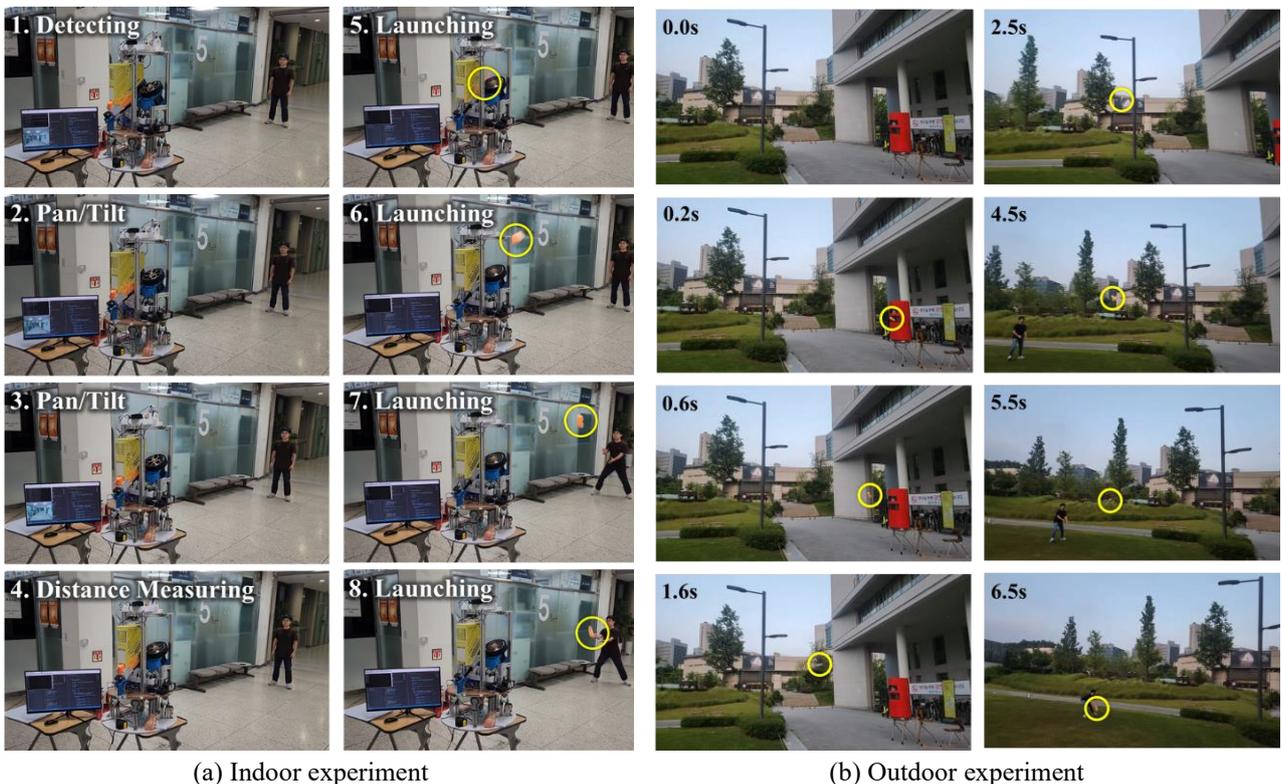


Fig. 6 Experimental results

| | | | | | | |
|-----------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Duty cycle (%) | 66.67 | 68.63 | 70.59 | 72.55 | 74.51 | 76.47 |
| Avg. dist. (m) | 2.02 | 2.94 | 4.13 | 5.56 | 7.47 | 9.11 |
| S.D. (m) | 0.12 | 0.08 | 0.16 | 0.10 | 0.11 | 0.07 |
| Duty cycle (%) | 78.43 | 80.39 | 82.35 | 84.31 | 86.27 | 88.24 |
| Avg. dist. (m) | 11.25 | 12.42 | 13.69 | 14.25 | 14.56 | 14.83 |
| S.D. (m) | 0.12 | 0.12 | 0.08 | 0.15 | 0.09 | 0.11 |

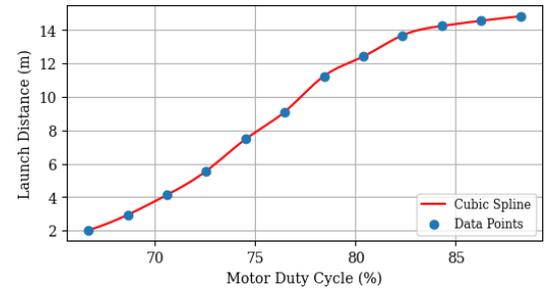


Fig. 7 Launch distance by motor duty cycle (average and standard deviation for 10 trials)

5. 결 론

본 논문에서는 강 및 호수 인근에서 활용할 수 있는 자동 무인 수난 구조 플랫폼을 설계하고 제안하였다. 본 플랫폼은 자동감지 및 발사 메커니즘을 통해 초기대응이 가능하고 자동 구조 신고가 이뤄져 후속 조치를 가능케 한다. 이는 무인 및 야간 상황의 열악한 구조 환경에서도 유효하다. 제시한 플랫폼은 반드시 물 밖에 구조해줄 사람이 필요하며, 미숙련자는 사용하기 어려운 기존 장비들이 갖는 한계를 극복할 수 있다.

제안한 플랫폼을 더욱 발전시키기 위해 다음의 추가적인 연구를 검토해볼 수 있다. 구조상황 감지 개선을 위해 좋은 컴퓨팅 리소스를 활용하여 객체탐지 모델을 개선하고, 정확한 측정을 위하여 단일 포인트가 아닌 멀티채널의 LiDAR를 활용할 수 있다. 또한 추가적인 메커니즘을 통하여 설계를 개선함으로써 연속 발사 기능과 조준 및 발사의 정확도를 확보할 수 있다. 본 연구에서 제시한 플랫폼과 후속 연구들을 통하여 사람들의 안전과 생명을 보호에 기여할 것으로 기대한다.

후 기

본 연구를 수행하면서 협력하고 조언을 제공해 주신 모든 분들께 깊은 감사의 말씀을 드립니다. 본 제품의 제작을 지원해주신 연세대학교 기계공학과, 그리고 공과대학 공학교육혁신센터 관계자 분들께 감사 인사를 드립니다.

참고문헌 (References)

- (1) Park, J. H., 2019, *The Ministry of the Interior and Safety will Strengthen Disaster Safety Management in the Summer* (https://www.mois.go.kr/fri/bbs/type010/commonSelectBoardArticle.do?bbsId=BBSMSTR_000000000008&nttId=71159), Ministry of the Interior and Safety, Sejong, Republic of Korea (in Korean).
- (2) Kim, G. W., 2021, *Handicapped Life-Saving Equipment Box that is not Next to or cannot be Used even if it is not Next to it* (<https://www.kihoilbo.co.kr/news/articleView.html?idxno=910694>), Kihoilbo, Suwon, Republic of Korea (in Korean).
- (3) Seo, S. D., 2019, *Fixed Life-Saving Device Launcher*, Patent No. 1020180144054, Korean Intellectual Property Office, Daejeon, Republic of Korea.
- (4) Jung, Y. C., 2015, *Throwable Drowning Person Rescue Device*, Patent No. 1020130140990, Korean Intellectual Property Office, Daejeon, Republic of Korea.
- (5) Sandler, M., Howard, A., Zhu, M., Zhmoginov, A. and Chen, L. C., 2018, "Mobilenetv2: Inverted Residuals and Linear Bottlenecks," *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Salt Lake City, USA, pp. 4510~4520.

테슬라 압축기와 사이클론 집진기를 응용한 공기청정기[§]

유제윤* · 김현우* · 정현욱* · 김나희** · 안재현** · 이선곤*†

* 인하대학교 기계공학과, ** 인하대학교 전자공학과

Air Purifier Utilizing Tesla Compressor and Cyclone Dust Collector

Je-Yoon Ryu*, Hyunu Kim*, Hyun-Wook Chung*,
Na-Hee Kim**, Jae-Hyeon An** and Sun-Kon Lee*†

* School of Mechanical Engineering, Inha University,

** School of Electronic Engineering, Inha University

(Received December 29, 2023 ; Revised March 4, 2024 ; Accepted March 5, 2024)

Key Words: Tesla Compressor(테슬라 압축기), Cyclone Dust Collector Model(사이클론 집진기), Streamline Behavior(유선형 거동), Tesla Turbine(테슬라 터빈), Filter-less Purifier(무필터 공기청정기)

초록: 최근 심각해진 대기 오염으로 공기청정기의 사용량이 증가함에 따라 많은 양의 필터 폐기물이 발생하고 있다. 본 연구에서는 사이클론 집진기에 테슬라 압축기를 결합한 필터 없는 공기청정기를 개발하였다. 테슬라 압축기의 송풍기(blower) 역할을 통해 유동을 형성하고, 입구 질량 흐름의 원심력을 높여 입자 집진을 유도하였다. 전산유체역학(CFD) 해석으로 기류의 유선 거동을 확인하였으며, 실험을 통해 목표 유입속도(inlet velocity)에서의 분당 회전수(RPM)를 확인하였다. PM 2.5와 PM 10.0의 미세먼지 농도가 초당 각각 $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 감소하였으며, 이는 테슬라 압축기와 사이클론 집진기를 활용한 공기청정기의 개발이 가능함을 보여준다.

Abstract: The escalating air pollution has led to increased usage of air purifiers, resulting in a significant amount of filter waste. This study developed a filter-less air purifier by integrating a Tesla compressor into a cyclone dust collector. The Tesla compressor functions as a blower, increasing the centripetal force of the inlet mass to induce particle capture. The streamline behavior of the airflow was confirmed through CFD analysis, and the RPM at the target inlet velocity was confirmed through experiment. The fine dust concentration of PM 2.5 and PM 10.0 decreased by $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ and $16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ per second, which shows that the development of an air purifier using a Tesla compressor and cyclone dust collector is possible.

- 기호설명 -

- m_p : 입자 질량(particle mass)
 V : 접선방향 속도(tangential velocity)
 V_r : 반경방향 속도(radial velocity)
 ρ_q : 가스 밀도(gas density)
 \dot{m}_p : 입자의 질량 유량(flow rate)
 C_d : 항력계수(drag coefficient)

[§] 이 논문은 대한기계학회 제13회 전국학생설계경진대회(2023. 10. 21., 고려대학교) 발표 논문임.

† Corresponding Author, sunkon.lee@gmail.com

© 2024 The Korean Society of Mechanical Engineers

- A_p : 항력을 받는 입자의 기준 단면적
 η : 분리효율(collection efficiency)
 \dot{m}_{p_in} : 사이클론으로 들어오는 입자 질량 유량
 \dot{m}_{p_out} : 밖으로 나가는 입자의 질량 유량

1. 서 론

미세먼지는 지름이 $10 \mu m$ 이하인(PM 10.0) 먼지이다. 실내 공간에서는 미세먼지 정화를 위해 HEPA 필터(HEPA filter)를 활용한 공기청정기를 주로 사용한다. HEPA는 high efficiency particulate air의 약자로, HEPA 필터는 $0.3 \mu m$ 정도의 극도로 미세한 입자 대부분을 걸러낼 수 있는 고성능 필터를 의미한다. 2019년을 기준으로 전 세계 가정용 공기청정기 시장 점유율 77%를 HEPA 필터를 사용한 공기청정기가 차지하고 있다.⁽¹⁾ HEPA 필터는 재활용 및 자연분해가 불가능하고, 주기적인 교체를 요구하여, 추가적인 환경오염의 원인이 되고 있다.

사이클론 집진기는 원심력을 활용하여 부유 중인 부산물과 대기 간의 분리속도 차이를 만들어 부산물의 침강을 유도한다. 사이클론 집진기는 사이클론을 이용하여 $25 \mu m$ 이상의 입자에 대하여 90% 이상의 집진 효율을 가지는 것으로 알려져 있다.⁽²⁾ 이는 구조가 간단하고 제작이 용이하며, 유지비가 적게 들고, 가혹한 환경에서도 사용 가능하다는 장점이 있어 다양한 산업 분야에 널리 사용되고 있다.⁽³⁾ 사이클론 집진을 활용한 공기 청정 방식은 기존에도 존재하지만, 본 연구에서는 사이클론 집진기에 테슬라 압축기를 접목한 공기청정기를 개발하였다.

사이클론 집진기에 테슬라 압축기를 접목한 공기청정기는 일차적으로 테슬라 터빈을 압축기로 사용하여 입/출구 사이에 압력을 형성하고, 이차적으로 원심력을 이용해 입자를 분리하여 공기를 정화하는 방식이다. 기존의 사이클론 집진기에, 송풍기 역할을 하는 테슬라 압축기를 결합하여 효율적인 선회류를 발생시키고, 다양한 환경에서 사용될 수 있도록 축상유입식 사이클론 집진 방식을 참고하여⁽⁴⁾ 전체 형상을 소형화시켰다. 이는 추가적인 필터 폐기물이 발생하지 않아 산업 폐기물을 줄일 수 있으며, 기존의 사이클론 집진기의 단점인 비효율적인 공간 활용도를 개선할 수 있다는 장점이 있다.

2. 설 계

2.1 설계방법

본 연구에서는 기존 원심 압축기의 부식, 침식, 크기 등의 문제를 개선하기 위해, 유동을 공급하는 기기로 테슬라 압축기를 사용하였다. 테슬라 압축기는 사이클론 집진기와 하나의 시스템으로 구성된다. 압축기를 공기청정기 내부에 위치시켜 원통 안에서 여러 층의 원형 디스크가 회전할 수 있도록 하고, 판의 경계층을 통해 점착 조건에 따라 유속이 발생하도록 설계한다. 먼지를 포함한 유체는 사이클론 집진기 입구로 들어가게 된다. 이는 식 (1)⁽³⁾과 같이 표현할 수 있다.

$$m_p \frac{d^2 r}{dt^2} - m_p \frac{V^2}{r} + C_d A_p \rho_a \frac{V_r^2}{2} = 0 \quad (1)$$

이후 유체는 사이클론 집진기의 구조에 따라, 나선 형태의 유선을 그리며 회전한다. 원심력에 의해 먼지가 분리되고, 먼지와 분리된 가스는 집진기의 최하단에 도달 후 다시 상승하여 집진기 출구로 배출된다. 입자 분리 효율(η)은 식 (2)⁽³⁾와 같이 표현할 수 있다.

$$\eta = 1 - \frac{\dot{m}_{p_out}}{\dot{m}_{p_in}} \quad (2)$$

Table 1 Design factor for standard cyclone dust separator (left)⁽²⁾; modified dimensions (right)

| Category | High-efficiency dust collector | | General dust collector | | High-capacity dust collector | | Modified dimensions | |
|------------------------------|--------------------------------|------|------------------------|------|------------------------------|------|---------------------|---------|
| | (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) | | |
| Body diameter (D/D) | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | D | 180 mm |
| Inlet height (H/D) | 0.5 | 0.44 | 0.5 | 0.5 | 0.75 | 0.8 | H | 90 mm |
| Inlet width (W/D) | 0.2 | 0.21 | 0.25 | 0.25 | 0.375 | 0.35 | W | 15 mm |
| Upper outlet diameter (De/D) | 0.5 | 0.4 | 0.5 | 0.5 | 0.75 | 0.75 | De | 35 mm |
| Vortex flow length (S/D) | 0.5 | 0.5 | 0.625 | 0.6 | 0.875 | 0.85 | S | 80 mm |
| Body length (Lb/D) | 1.5 | 1.4 | 2.0 | 1.75 | 1.5 | 1.7 | Lb | 260 mm |
| Cone length (Le/D) | 2.5 | 2.5 | 2.0 | 2.0 | 2.5 | 2.0 | Le | 450 mm |
| Lower outlet diameter (Dd/D) | 0.375 | 0.4 | 0.25 | 0.25 | 0.375 | 0.4 | Dd | 67.5 mm |

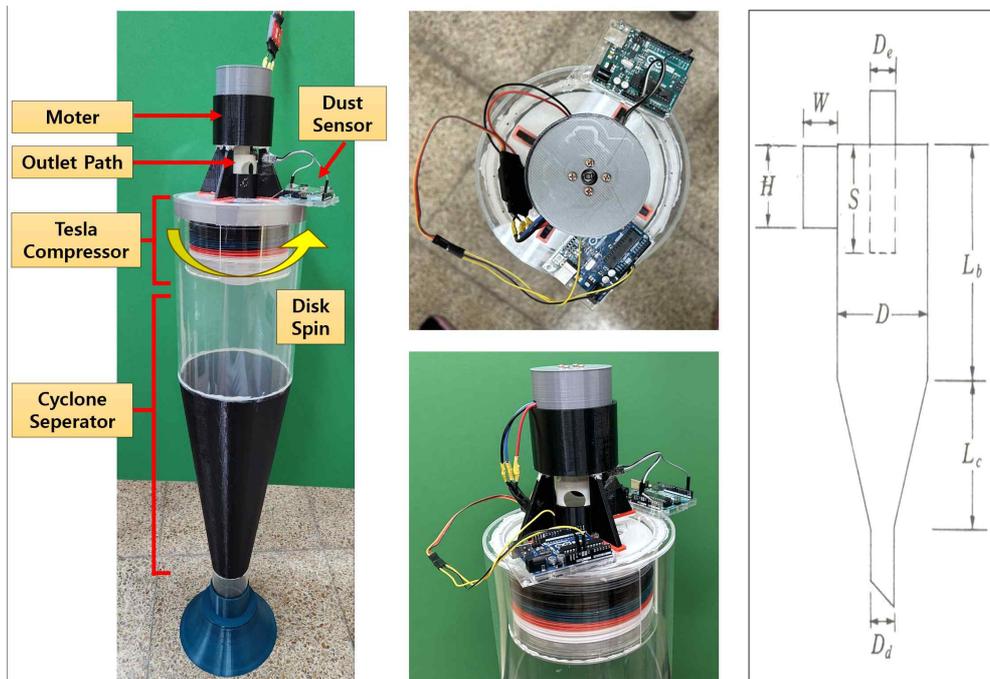


Fig. 1 Prototype of air purifier utilizing Tesla compressor and cyclone dust collector (left); Tesla compressor (middle); designation of standard cyclone (right)⁽²⁾

2.2 테슬라 압축기, 사이클론 집진기 설계

2.2.1 공기청정기 전체 외형 및 사이클론 집진기 치수 설계

사이클론 집진기에 대한 최적의 규격은 1940년에 Shepherd와 Lapple에 의해 제시되었다.⁽²⁾ 따라서 사이클론 집진 장치를 설계할 경우 기본적인 구조에 대한 치수 선정은 Table 1(left)와 같이 치수를 무차원화하여 용도에 맞는 설계 사양을 적용할 수 있다.⁽²⁾ 본 연구에서는 이미 실험적 검증이 완료된 시험 자료⁽²⁾를 참고하여 사이클론 집진기를 설계하였다. 다만, 테슬라 터빈과의 결합에 사용되는 표준화 부품(베어링)의 치수를 고려하여 결정하였다. 고효율 집진기⁽¹⁾를 이용하여 수정한 치수는 Table 1(right)와 같다.

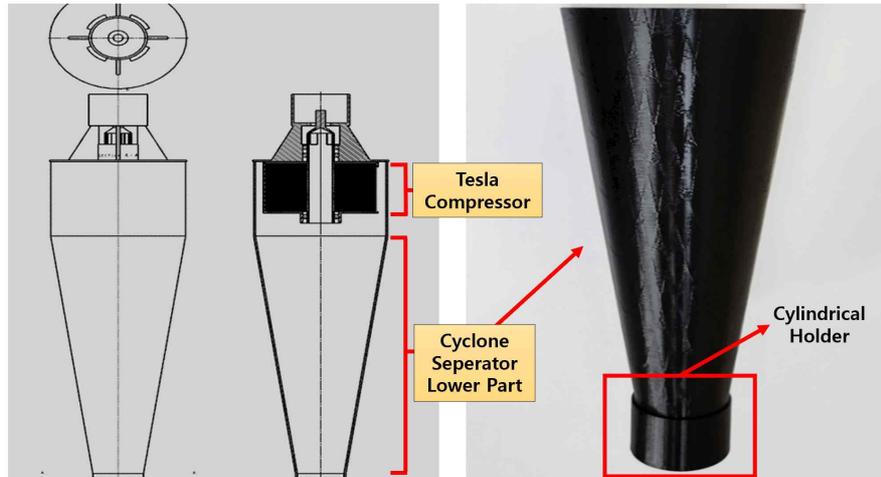


Fig. 2 Entire structure (left); lower part of cyclone separator (right)

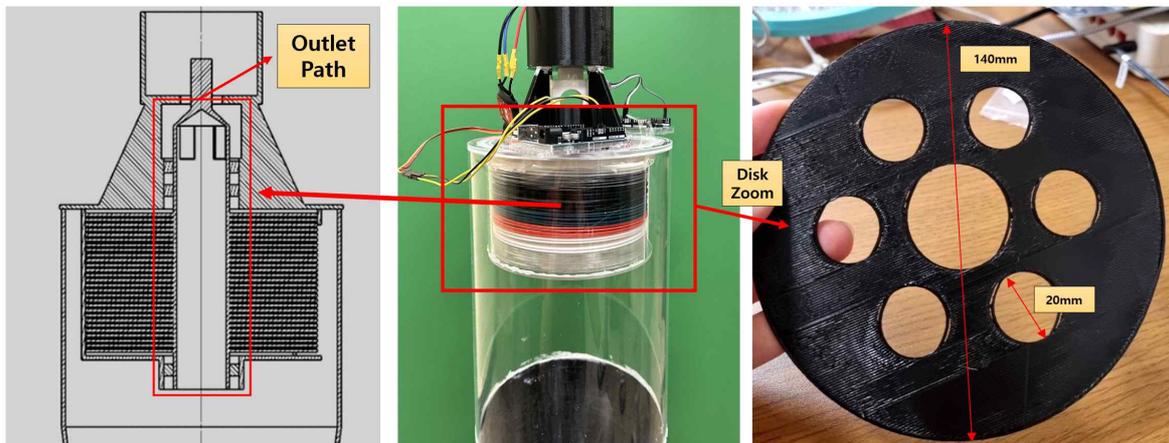


Fig. 3 Tesla compressor sectional diagram (left); upper part of air purifier (middle); Tesla disk (right)

2.2.2 사이클론 집진기 하단부 구조 설계

사이클론 집진기의 하단부는 점차 좁아지는 구조를 갖기 때문에 3D 프린터를 사용하였다. PLA(poly lactic acid) 필라멘트로 출력한 하단부의 내부를 사포 등으로 추가적인 후처리 가공을 하여 유체와 접촉하는 접촉면의 표면 가공성을 확보하였다. Fig. 2에서 사이클론 집진기 최하단에 원통형의 받침을 추가했음을 확인할 수 있다. 이는 집진 과정에서 포집한 입자를 한 곳에 응집시키는 역할을 한다.

2.2.3 테슬라 압축기 설계 및 유체출구(outlet path) 설계

사이클론 집진기 상단부에는 테슬라 압축기를 배치했다. 테슬라 압축기는 내부 유체의 거동 확인을 위해 아크릴을 이용하여 제작했다. 기기에 설치되는 디스크는 총 28개이다. 아크릴 디스크는 최대 유입 속도가 2.4 m/s로, 무거운 무게로 인해 모터 회전에 방해가 되므로 PLA 재질의 디스크를 사용했다. Fig. 3(right)에서처럼, 각각에 유동을 위한 6개의 구멍을 뚫었다. 디스크의 두께는 1 mm이다.

테슬라 압축기는, 하나의 축에 여러 디스크가 겹겹이 쌓인 로터와, 이를 감싸는 하우징으로 구성된다. 축을 회전시키면 디스크와 그 사이의 유체 사이에 운동에너지가 교환되며 압력을 증가시키고 유속을 형성하게 된다. 사이클론 집진기에서 정확히 공기가 나올 수 있도록 기기 중간에 유체출구(outlet path)를 제작했다. 이에 맞춰 구동축 형태 또한 수정했다. 유체출구를 테슬라 압축기에 만들기 위해, 손잡이 형태의 샤프트(shaft)와 베어링을 사용하였다. Fig. 3(left)처럼, 테슬라 압축기의 중심부 샤프트를 빈 공간이 있는 중공 형태로 설계함으로써 공기 출구를 확보했다.

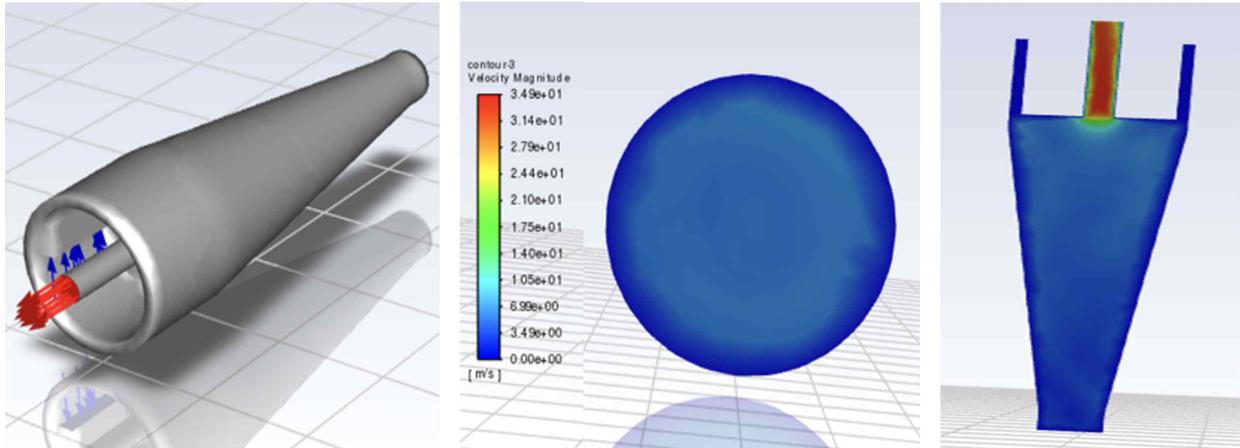


Fig. 4 Simulation result of the ANSYS FLUENT (left); top view (middle); side view (right) of the flow inside the dust collector

2.2.4 유입속도 설정

축상유입식 사이클론 집진기 성능시험 결과⁽³⁾ 중 $30 \mu\text{m}$ 이상의 입자는 유입속도 10 m/s 이상에서 분리 효율 100% 를 나타냈지만, $5 \mu\text{m}$ 이하의 입자는 30 m/s 에서도 50% 이하의 분리 효율을 나타냈음을 참고하여, 직경 $10 \mu\text{m}$ 입자의 50% 집진 효율 성능을 위해, 테슬라 압축기의 유입속도를 10 m/s 로 설정하였다.

2.3 전산유체역학(CFD)를 활용한 사이클론 집진기 내 유체 거동 확인

지금까지 참고문헌을 기반으로 전체 외형 및 사이클론 집진기, 테슬라 압축기의 치수, 유입속도를 설정하였다. 시제품 실 제작에 앞서, 10 m/s 의 유속을 형상에 공급했을 때, 사이클론 유동이 실제로 발생하는지 사전에 검증하고자 하였다. 기기 내부에 사이클론 유동 발생이 확인되면 실제 시제품을 제작하고 실험을 진행하여, 사이클론 유동으로 인한 공기 청정이 가능한지를 확인할 예정이었다. 전산 유체역학 프로그램의 유동 해석 조건으로 층류 조건과 10 m/s 의 유입속도, 2.2.3까지 설계한 치수를 사용하여 기기 내 유체 거동을 확인하였다.

Fig. 4(left)에서 테슬라 압축기를 통과한 유체가 사이클론 집진기로 유입됐을 때, 사이클론 집진기의 하단부를 거쳐 유체출구를 통해 빠져나가는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 4(right)을 통해 내부의 유속 변화를 통해 사이클론 형상이 생성되는 것을 확인하였다.

간단한 전산유체역학 해석을 통해, 유체의 이동 경로와 테슬라 압축기가 발생시키는 출구 속도(outlet mass flow)가 10 m/s 정도이면 기기 내부에 사이클론 형상이 생성될 수 있다는 결과를 얻을 수 있었다. 하지만, 이는 간단한 조건들만 고려했다는 한계점이 있다. 따라서 시제품을 실 제작하여 변화하는 유속에 따른 실제 형상에서의 유동 현상과 미세먼지 집진 여부를 실험을 통해 확인하고자 하였다.

3. 실험

3.1 유속 측정 실험

Fig. 1의 시제품으로 테슬라 압축기의 목표 유입속도에서의 모터 RPM을 측정하였다. 유입속도 10 m/s 를 달성하는 방법으로 모터의 회전력(torque)을 조절하였기에, RPM에 따라 테슬라 압축기에 생성되는 유속을 확인하였다. RPM은 홀센서를 이용하여 측정하였고 모터는 드론 모터를 이용하였다. 모터의 회전력을 점진적으로 증가시키면서 실험한 결과, 유입속도가 10 m/s 에 도달하기 위해서는 $1,600 \text{ RPM}$ 수준의 모터 회전력을 요구한다는 결론을 도출할 수 있었다. Fig. 5는 유입속도에 따른 RPM 값을 그래프로 나타낸 것이다.

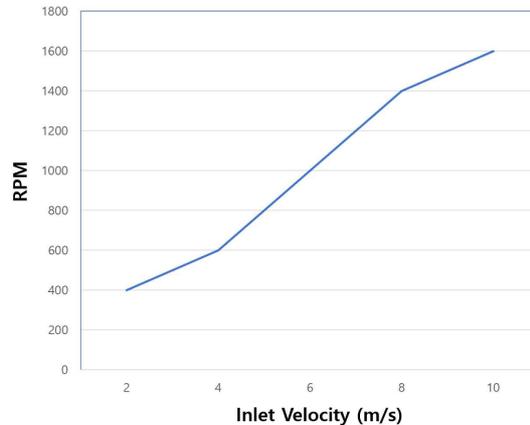


Fig. 5 Tesla compressor inlet velocity for motor RPM



Fig. 6 Particulate matter generation through incense burning (left); air purification validation test set-up (middle); PM sensor installed at the outlet (right)

3.2 미세먼지 집진 실험

테슬라 압축기와 결합한 사이클론 집진기의 미세먼지 집진 성능 실험을 진행하였다(Fig. 6). 미세먼지 발생 방법으로 향을 연소시켰고, 기기 전체와 향을 비닐로 덮어 외부로 미세 입자가 유출되는 것을 방지하였다. 미세먼지 센서로 결과값을 측정하였다. 실험 1에서는 1,400 RPM과 1,600 RPM을 인가하였을 때 미세먼지 농도 감소 여부를 확인하였다. 개발한 장치가 공기청정기로서 역할을 할 수 있는지 판단하는 것이 목표였다. 실험 1에서 감소가 확인될 경우, 실험 2를 통해 1,600 RPM에서의 감소량만을 정확히 측정할 계획이었다. 실험 2에서는 1,600 RPM을 인가하였을 때의 감소량과 기기를 작동시키지 않았을 때의 자연 감소량을 비교하였다.

또한, 실험 1과 2의 미세먼지 발생 위치를 다르게 하여 측정하였다(Fig. 7). 실험 1에서는 공기청정기 외부를 미세먼지로 채우고 내부는 청정한 상태로 유지, 미세먼지 센서는 외부에 위치시켰다. 실험 2에서는 공기청정기 내부를 미세먼지로 채우고 외부는 청정한 상태로 유지, 미세먼지 센서는 외부에 위치시켰다. 공기청정기는 외부의 오염된 공기를 기기 내부로 빨아들여 정화한 뒤 다시 외부로 깨끗한 공기를 내보내는 장치이다. 실험 1에서 공기청정기 외부의 미세먼지 농도가 감소한 이유가 처음 공기청정기를 작동시켰을 때 내부에 있던 깨끗한 공기가 밖으로 나와 외부 미세먼지 농도를 희석해서 나온 결과일 수 있기 때문에, 이를 확실하게 규정하고자 실험 2에서는 오염된 공기의 위치를 다르게 한 것이다. 실험 2에서 기기 내부를 오염된 공기로 채우고 외부를 청정한 공기로 채우면, 기기를 처음 작동했을 시 내부의 공기가 외부로 나와 외부의 오염도가 급격하게 상승하게 된다. 공기청정기가 제대로 정화 작용을 한다면, 기기를 계속 가동할 경우, 외부로 방출되었던 오염된 공기가 공기청정기에 의해 흡수되고, 내부 정화 작용을 거쳐, 외부로 깨끗한 공기를 방출할 것이다. 따라서 외부 오염도는 점점 감소할 것이다.

Table 2 Experiment summary

| Test_1 | | Test_2 | |
|---|---|-------------------------|--------------|
| Inside of air purifier | Fresh air | Inside of air purifier | Fresh air |
| Outside of air purifier | Polluted air | Outside of air purifier | Polluted air |
| Applied RPM | 1,400 RPM / 1,600 RPM | Applied RPM | 1,600 RPM |
| Purpose 1: check whether the purifier has a purification function | Purpose 1 : checking dust purification rate at 1,600 RPM | | |
| | Purpose 2 : comparison of purification rate according to purifier operation | | |
| | Purpose 3 : checking whether the result of test_1 is purification by dilution or purification of purifier | | |

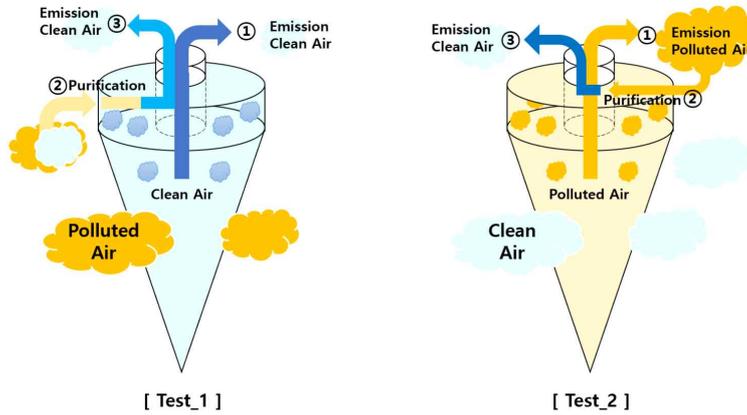


Fig. 7 Test_1 illustration (left); test_2 illustration (right)

3.2.1 실험 1 : 미세먼지 농도 감소 여부 확인

공기청정기 내부는 깔끔한 상태로 유지한 채, 공기청정기 외부로 미세먼지로 채우고 공기청정기 외부에 미세먼지 센서를 놓고 측정하였다(Fig. 8). 약 2분 30초 동안 향을 충분히 연소시켰고, 측정되는 PM 값이 일정해질 때까지 대기하였다. 이후 모터에 약 1,400 RPM과 1,600 RPM을 인가했을 때 포집되는 먼지양을 기기 토출구에서 측정하였다. 실험 1의 목표는 1,400 RPM과 1,600 RPM을 인가하였을 때의 미세먼지 농도 감소 여부 확인이다. 감소 여부만 확인하는 게 목표이기 때문에, 1,400 RPM을 인가했을 때 감소 여부가 확인되는 경우, 바로 이어서 1,600 RPM을 인가하는 방식으로 실험하였다. 실험 결과, PM 1.0의 경우 미세먼지가 센서 측정 가능 범위 내에서 발생하였고, 1,400 RPM과 1,600 RPM에서 모두 미세먼지 농도가 지속적으로 감소하였다. PM 2.5, PM 10.0에서는 미세먼지 농도가 센서 측정 가능 범위를 넘어섰기 때문에 1,400 RPM을 인가하였을 때의 농도 감소 여부는 확인할 수 없었다. 1,600 RPM에서는 PM 2.5는 50% 이상, PM 10.0은 약 40% 정도 감소하였다. PM 1.0의 미세먼지 농도도 1,600 RPM에서 약 10% 정도 감소하였다. 목표 유입속도인 10 m/s에서 미세먼지 농도가 확실히 감소함을 확인할 수 있었다. 다만, 1,400 RPM과 1,600 RPM을 연속적으로 실험했기에 1,400 RPM의 결과가 1,600 RPM 결과에 영향을 미쳤을 가능성이 있었다. 따라서 1,600 RPM만을 인가했을 때의 감소량을 확인하기 위해 실험 2를 진행하였다.

3.2.2 실험 2 : 1,600 RPM에서의 감소량과 자연감소량 비교

실험 2에서는 실험 1과 반대로, 공기청정기 내부를 미세먼지로 채우고 바깥 공간은 청정한 상태로 유지한 채, 기기 외부에 미세먼지 센서를 놓고 측정하였다(Fig. 9). 유입속도 10 m/s에서 측정하기 위해

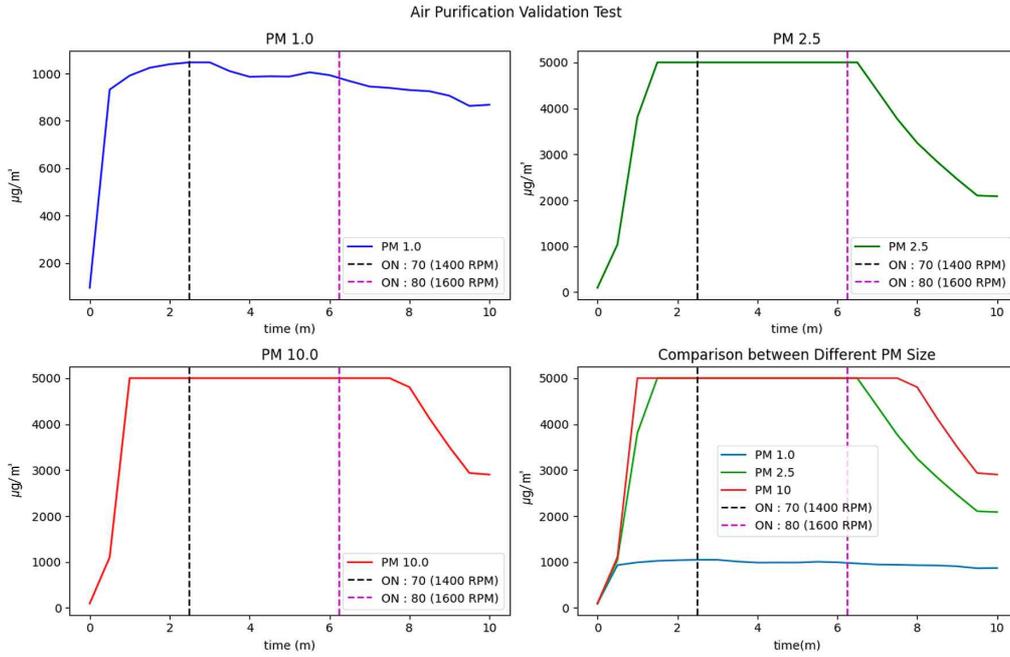


Fig. 8 Air purification validation test_1 result

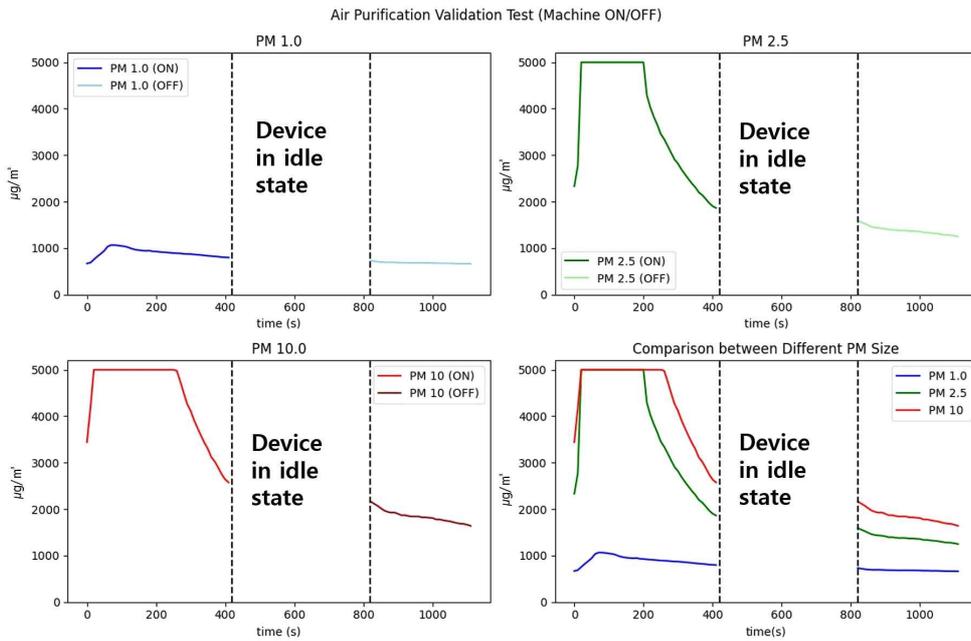


Fig. 9 Air purification validation test_2 result

1,600 RPM을 인가하였다. 공기청정기를 가동하자 공기청정기 내외부의 공기가 순환하여 외부 미세먼지 농도가 급격하게 상승하였다. 기기가 계속 가동함에 따라 미세먼지 농도가 큰 폭으로 감소하였다. 개발한 공기청정기가 정화 작용을 하고 있음을 확인할 수 있었다.

공기청정기로 인한 미세먼지 감소와 자연 감소를 비교하기 위해 400 s에서 집진기 가동을 일정 시간 동안 중단시켰다. 기기를 중단시킨 뒤, 미세먼지 농도 하락 폭이 많이 감소하였다. PM 1.0에서 공기청정기 가동 시, 미세먼지 농도가 초당 $0.62 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 감소하였고 정지 시에는 초당 $0.22 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 감소하였다.

PM 2.5에서는 기기 가동 시 초당 $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 감소하였고, 정지 시 초당 $1.13 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 감소하였다. PM 10.0에서는 기기 가동 시 초당 $16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 감소하였고 정지 시에는 초당 $1.75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 감소하였다. 공기청정기 작동 시와 정지 시의 감소 폭이 유의미한 차이를 보임을 확인할 수 있다.

결론적으로, 실험 2를 통해, 유입속도 10 m/s에서 공기 정화가 가능하며 미세먼지의 저감이 테슬라 압축기와 사이클론 집진기를 결합한 공기청정기 때문임을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 테슬라 터빈을 역회전시켜 압축기로 활용하여 공기청정기를 제작하였다. 기존 압축기 및 송풍기와 달리, 테슬라 압축기는 블레이드가 없는 송풍기로, 디스크를 회전시켜 유체 전단력에 의해 유동을 형성한다. 사이클론 집진기 내부에 이를 배치하여 기존 공기청정기에 존재하는 필터 폐기물 문제, 공간 효율성 문제, 내구성 문제 등의 단점을 보완할 수 있었으며, 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다. (1) 전산유체역학 해석을 통해, 집진기 내부에 사이클론 형상이 생성되었음을 확인할 수 있다. (2) 집진기에 형성되는 유입속도를 측정된 결과, 사용 모터의 절반 정도의 출력에서 1,620 RPM의 디스크 회전이 가능했고, 사이클론 집진기 내부에 유선형 유동과 10.2 m/s의 유속이 형성되었다. (3) 미세먼지 센서를 통해 공기청정기 작동 전, 후의 오염도를 측정해 본 결과, 초미세먼지인 PM 1.0에서는 저감효과가 미비했으나, PM 2.5와 PM 10.0에서는 측정 가능 범위 내에서 초당 $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 저감효과를 확인할 수 있다. 이 결과는 입자 직경이 감소할수록 분리 효율이 감소하는 기존의 연구 결과와 일치한다. 이는 기존 공기청정기보다 강한 흡입력으로, 알레르겐과 같은 큰 입자의 먼지를 안정적인 출력으로 포집할 수 있음을 의미해, 공사장 및 건설 현장, 지하철 등에서 활용할 수 있음을 보여준다.⁽⁵⁾

후 기

본 연구를 보완할 방안으로 다음과 같은 방법을 제시한다. (1) 제작한 기기의 사이클론 집진부에 전압을 인가하여 정전기를 사용하는 전기집진 방식을 적용한다. 이는 $2.5 \mu\text{m}$ 미만의 입자에 대한 분리 효율이 감소하는 사이클론 집진기의 단점을 개선할 수 있을 것으로 예상된다. (2) 모터 회전으로 인한 진동 특성을 파악해 주요 저감 필요 대역을 선정하고 connector, attachments, insulator와 같은 진동 감쇄용 기체를 함께 설치한다. 이는 진동 및 소음 문제로 인해 발생하는 운용의 어려움을 보완하고, 부품에 가해지는 손상을 최소화할 수 있을 것으로 예상된다.

본 연구에서는 테슬라 압축기를 사이클론 집진기에 적용하여 공기청정기로 활용할 수 있다는 가능성을 확인했으며, 향후 산업현장 및 미세먼지 농도가 높은 환경 전반에 도입하여, 국제 암 연구 기관(IARC: international agency for research on cancer)가 규정한 1군 발암물질인 미세먼지로부터 건강 문제 및 피해를 줄일 것을 기대한다.

참고문헌 (References)

- (1) Innopolis R&D Special Zone Promotion Foundation, 2021, *Home Air Purifier Market* (<https://www.innopolis.or.kr/board/view?pageNum=8&rowCnt=10&no1=706&linkId=44821&menuId=MENU00999&schType=0&schText=&boardStyle=&categoryId=&continent=&country=>), Daejeon, Republic of Korea.
- (2) Lee, C. W., 2011, "A Numerical Analysis on Flow Characteristic in a Standard Cyclone Dust Separator," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 10, No. 5, pp. 97~98.
- (3) Go, H. G. and Kim, H. S., 2013, "Theoretical Analysis and Experimental Evaluation of Small Cyclone Separator to Remove Fine Particulate Matter," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 37, No. 1, pp. 77~82.
- (4) Chin, D. H., 2020, "A Study on the Performance Test of Axial-flow Cyclone Separator," *The Korean*

Society of Industry Convergence, Vol. 23, No. 1, pp. 102~103.

- (5) Koo, J. K., Kang, M. Y. and Seo, Y. C., 2009, “Comparative Study on the Control Technologies of Fugitive Dusts and Noise of Construction Project in Korea,” *Journal of Korean Institute of Ecology and Environment*, Vol. 9, pp. 55~60.

개선된 로커보기(Rocker-Bogie) 구조를 채택한 로봇 구동부 설계[§]

최준혁^{*†} · 허 웅^{*} · 백지수^{*} · 장채원^{*} · 전수빈^{*} · 강대식^{*}

* 아주대학교 기계공학과

Design of Robot Drive Adopting Improved Rocker-Bogie Structure

Jun-hyeok Choi^{*†}, Woong Heo^{*}, Jisu Baek^{*}, Chae-won Jang^{*}, Subin Jeon^{*} and Daesik Kang^{*}

* School of Mechanical Engineering, Ajou Univ.

(Received December 30, 2023 ; Revised April 3, 2024 ; Accepted April 8, 2024)

Key Words: Rocker-Bogie Mechanism(로커보기 메커니즘), Design Optimization(설계 최적화), Genetic Algorithm(유전 알고리즘) Delivery Robot(배달 로봇), Leveling Platform(수평유지 플랫폼), Gyro Sensor(자이로센서), Six-Wheel Drive System(6륜 구동)

초록: 본 연구는 로커보기(rocker-bogie) 구조를 활용하여 높은 무게 중심에도 안정적인 주행을 보장하는 구동부를 개발하는 것을 목표로 한다. 설계 변수를 설정하고 적절한 가중치를 할당하여 최적화 함수를 적용하며, 유전 알고리즘(genetic algorithms)을 활용해 링크 길이를 최적화한다. Signal / noise ratio 개념을 활용하여 계단 등반 시에 안정성을 갖도록 무게중심을 최적화하고, 상부 수평 유지 장치와 쇼크 업소버(shock absorber)를 도입함으로써 상부에 가해지는 충격을 완화시킨다. 무게 중심이 20% 높아졌음에도 계단 및 연석을 등반 가능하고 험지에서 주행 안정성을 갖기 때문에, 이를 통한 자율 주행 배달 로봇 시장에 혁신적인 기여를 기대할 수 있다.

Abstract: This study uses the rocker bogie structure to develop a driving unit that ensures stable driving even with a high center of gravity. An optimization function is applied by assigning design variables and weights, and the link length is optimized through a genetic algorithm. The Signal-Noise ratio is used to optimize the center of gravity when climbing stairs, and the upper horizontal maintaining system and shock absorber are used to alleviate shock to improve driving stability. Even though the center of gravity has been raised by 20%, it has high driving stability when climbing stairs and driving stability at a rough road. So this driving system can contribute to the delivery robot market.

1. 서 론

1.1 필요성 정의

최근 자율 주행 로봇이 합법적으로 보도를 통행하게 하는 법안이 최근 국회 소위를 통과하고, 산업이 확대될 수 있는 규제 개선이 2023년에 본격화되었다. 세계시장조사업체 마켓 앤마켓이 2021년 4월 발표한 자료에 따르면 세계 배달 로봇 시장 규모는 연평균 35%씩 성장해 2026년에는 9억 5,700만 달러에 이를 것으로 전망된다. 이러한 전망으로 우아한형제들 등 자율 주행 로봇 관련 기업은 빌딩 밀집 지역을 중심으로 배달 서비스를 시작해, 주택단지까지 사업 영역을 확대할 방침이라고 밝힌 바 있다.

하지만 현재 시행되고 있는 배달 로봇 서비스는 1) 4륜 구동이나 6륜 구동 같은 구조적 한계로 장애물(연석, 건물의 턱)을 통과할 수 없는 단점이 존재하고, 2) 평지와 포장도로를 중심으로 이동하기 때문에 배달 시간이 두 배 이상 소요되기 때문에 소비자와 업주들에게 외면받고 있다. 이런 사례를 토대로 실생

§ 이 논문은 대한기계학회 제13회 전국학생설계경진대회(2023. 10. 21., 고려대학교) 발표 논문임.

† Corresponding Author, chlwns125@ajou.ac.kr

© 2024 The Korean Society of Mechanical Engineers

Table 1 Design problems

| | | |
|------------------|---|--|
| Design problem ① | Optimize the rocker-bogie link to achieve a 20% higher center of gravity than the existing design | |
| | Soulution | Optimize the link length using a genetic algorithm, and utilize the S/N ratio to improve driving stability on stairs and rough terrain |
| Design problem ② | Ensure driving stability during object loading | |
| | Soulution | Measure the robot's tilt using an Arduino and a gyro sensor, maintain the upper platform's horizontal position using a servo motor |

Table 2 Design restriction conditions

| Item | Constraint | Item | Constraint |
|----------------|------------|----------------------|------------|
| Maximum load | 2 kg | Material | PLA |
| Average speed | 4.2 m/h | | CFRP |
| Wheel diameter | 13.4 cm | Drivable curb height | 15 cm |

활에서 서비스 주행로봇이 활성화되려면 실외 이동을 위한 로봇의 구동부에 대한 연구는 필수적인 분야라고 말할 수 있다.

본 논문에서는 rocker-bogie 구조를 배달 로봇 구동부로 채택할 수 있도록 최적화 작업을 진행한다. 현재 배달 로봇의 구동은 평지 주행에 한정되어 있는데, 험지 주행에 안정적인 rocker-bogie 구조⁽⁶⁾를 도입한다면 험지 주행이 가능해 우회가 불필요하므로 배달 시간을 단축시킬 수 있다. 그러나 화성 탐사 로봇은 센서를 이용한 데이터 취득이 목적이기 때문에 물건 적재의 필요성이 없어, 주행 안정성을 확보하기 위해 낮은 무게 중심을 가지는 구조에 해당한다. 이를 배달 로봇에 바로 적용할 경우 물건 적재로 인해 무게 중심이 높아지므로 주행 안정성이 떨어진다. 따라서 높은 무게중심을 가지면서 험지 주행이 가능하도록 최적화 작업을 진행하여 배달 로봇의 안정적인 주행성능을 보장하고, 나아가 배달 로봇 산업뿐만 아니라 재난, 응급 산업 등 다양한 분야에서 rocker-bogie 구조가 사용될 수 있도록 할 것이다.

1.2 설계 문제 및 해결 방안 정의

선행 기술 조사 결과,⁽⁴⁾ 간단한 구조로 험지 주행 가능한 rocker-bogie 구조가 배달 로봇의 구동부로서 적합했다. 그러나 rocker-bogie 구조는 무게중심이 로봇 높이의 1/3지점보다 아래 위치하기 때문에 배달 로봇에 채택하기에는 보완이 필요하다.⁽⁵⁾ 이에 따라 Table 1과 같이 설계 문제를 정의하고자 한다.

1.3 설계 제약조건

Table 2와 같은 제약조건을 도출하여 제작 시에 필요한 부품 spec을 선정했다. 배달 로봇으로 활용될 경우를 가정해 2인분 기준 배달 음식 무게가 평균적으로 2 kg인 것을 감안하여 최대 적재하중을 선정하였다. 주행 속도는 성인 평균 보행 속도 4.5 km/h보다 느린 4.2 km/h로 선정하였다. 로봇의 속도가 너무 빠를 경우 보행자와 충돌이 발생할 수 있기 때문에 보행자의 안전을 위해 더 느린 속도로 선정하였다. 주행 가능 연석 높이와 시플레이션에 필요한 바퀴 지름의 경우, 건축 설계법상 도로 연석 높이가 15 cm인 점과 시중 판매하는 바퀴 중 본 로봇의 무게를 버티며 적절한 폭을 갖는 바퀴 지름이 13.4 cm인 점을 고려했다.

1.4 비교군 선정 및 평가방법 제시

본 논문에서 실효성 여부를 판단하기 위해 논문을 참고하여 비교군을 선정했다. 선정한 비교군은 Table 3과 같으며, 논문 “Design of Rocker-Bogie Mechanism(Abhisek Verma 외 5명)”⁽⁶⁾을 참고했다.

본 연구 모델의 설계 목표 달성도를 판단하기 위해, 비교군을 가장 일반적인 형상의 rocker-bogie 링크 구조를 비교군으로 채택하였다. 그러나 연구 모델의 형상의 경우 bogie와 rocker가 만나는 지점이 전체 링크의 가장 높은 부분이므로 다음과 같은 세부 기준을 설정하고 비교군의 모델을 설정한다.

1. 비교군과 우리의 모델의 전장은 동일하다고 가정한다.
2. 비교군과 모델의 무게중심 x축 좌표 위치는 동일하다고 가정한다.
3. 비교군의 바퀴 간 간격은 동일하다고 가정한다.

선정한 비교군과 우리 모델의 시뮬레이션, S/N비 비교를 통한 계단 주행 시 구동안정성을 평가한다. 설계 목표인 비교군 대비 무게중심의 높이가 20% 이상 증가했음에도 동일한 구동 안정성을 보여주는지 판단하고자 한다.

2. 설계 내용

2.1 ANSYS 해석을 통한 Rocker-Bogie 형상 설계

로커 보기(rocker-bogie) 구조는 로커와 보기의 디자인이 삼각형, 사각형 등 다양하게 구성할 수 있다. 배달 로봇은 물건 적재가 필요하므로 해석을 통해 하중을 잘 버티는 형상으로 설계를 진행하였다.

로커 보기 형상 3개를 ANSYS 해석한 결과인 Table 4를 확인하면, 최대 응력은 133.9 kPa, 최대 변형률은 0.696 μ 로 가장 하중을 잘 버티는 rocker-사각형, bogie-삼각형 링크 구조를 채택했다. 로커가 사각형 형상이기 때문에 적재 능력 향상과 움직임의 유연성을 기대할 수 있고, 보기가 삼각형 형상이기 때문에 이동 시 지형에 따른 바퀴의 안정성을 확보할 수 있다.

2.2 유전 알고리즘을 이용한 링크 길이 최적화

바퀴의 크기, 제품 크기 등을 제한 조건으로 선정⁽¹⁻⁴⁾하고 링크 길이 I_1, I_2, I_3, I_4 를 설계 변수⁽¹⁾로 두어 Matlab을 이용해 유전 알고리즘 최적화⁽²⁾를 진행하고 최종적으로 링크의 길이(I_1, I_2, I_3, I_4), 링크의 각도(θ_1, θ_2)를 구한다. Matlab 내 “optimization Toolbox-genetic algorithm”에 적합도 함수를 대입하고 선택과 교차, 돌연변이, 대치 등의 방법으로 세대를 거쳐 목적함수에 맞는 링크 길이를 도출한다.⁽²⁾

링크 길이와 링크 길이 구조식을 토대로 바퀴와 링크, 바퀴와 바퀴 사이의 간섭과 로봇의 전체 크기를 고려하여 제한 조건을 정한다. 적합도 함수는 본 설계 목적에 맞게 재구성하고 가중치와 변수를 변경하여, 최종적으로 링크의 길이(I_1, I_2, I_3, I_4), 링크의 각도(θ_1, θ_2)를 도출한다.⁽¹⁻³⁾

Table 5에 작성된 변수와 식을 토대로 Matlab 내의 optimization toolbox - GA algorithm을 이용해 링크 길이 최적화를 진행하였다.

Table 3 Selection of comparative object

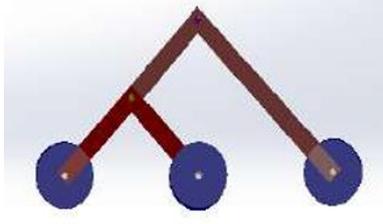
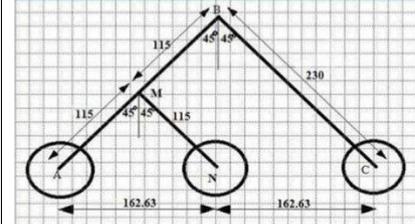
| | | | | |
|---|---|---------------|----------------|-----|
|  |  | Bogie | Angle | 90° |
| | | Rocker | Angle | 90° |
| | Length | | 2 * bogie_link | |

Table 4 Rocker-bogie shape

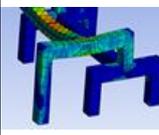
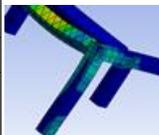
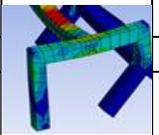
| Rocker / bogie | Rectangle/rectangle | | Triangle/triangle | | Rectangle/triangle | |
|--|---------------------|---|--|---|--|---|
| | Analysis result |  | Maximum stress [kPa] |  | Maximum stress [kPa] |  |
| 147.1 | | | 143.2 | | 133.9 | |
| Maximum strain [μ] | | 0.766 | Maximum strain [μ] | 0.746 | Maximum strain [μ] | 0.696 |
| | | | | | | |

Table 5 Define variables and apply fitness functions

| Variable | Variable name | | Note |
|------------------|---|---|--|
| | Link length | I_1, I_2, I_3, I_4 | $I_2 = I_1$ |
| | Link angle | θ_1, θ_2 | $\theta_1 = \sin^{-1}\left(\frac{I_4}{2 \times I_2}\right)$ $\theta_2 = \sin^{-1}\left(\frac{I_2 \times \cos\theta_1}{I_3}\right)$ |
| Constraints | $67 \text{ mm} = R_i < I_i \leq 550 \text{ mm}$ (67 mm = wheel radius), $I_1 + I_2 \geq I_4, I_3 - I_2 > 2R, \theta_1 + \theta_2 < 90^\circ$ | | |
| Fitness function | Friction coefficient μ^* | $\mu^* = \frac{T}{N} = \frac{2500 \text{ gf} \cdot \text{cm}}{22 \text{ rpm}} = 0.1056$ | |
| | Force P | $P = \frac{R_M G_M^2}{K_t^2} \sum_{i=1}^n \tau_i^2 = \frac{\left(\frac{12 \text{ V}}{125 \text{ mA}}\right) \left(\frac{1}{316}\right)^2}{(2500 \text{ gf} \cdot \text{cm} / 12 \text{ V})^2} (2500 \text{ gf} \cdot \text{cm})^2 = 0.1384$ | |
| | Design angle θ_{rover} | $\theta_{rover} = \frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2} = \frac{\left(\frac{\pi}{2} - \theta_1\right) + \left(\frac{\pi}{2} - \theta_2\right)}{2}$ | |

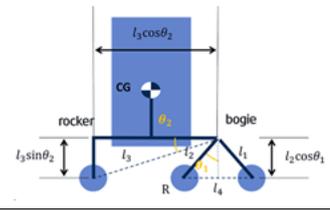


Table 6 Results of S/N ratio by link length and link angle

| Try num. | Try 1 | Try 2 | Try 3 | Try 4 | Try 5 |
|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|
| S/N ratio | 69.4812 | 56.5545 | 61.5747 | 63.2557 | 43.126 |
| Try num. | Try 6 | Try 7 | Try 8 | Try 9 | Try 10 |
| S/N ratio | 49.7189 | 45.038 | 62.5336 | 48.7122 | 51.9526 |

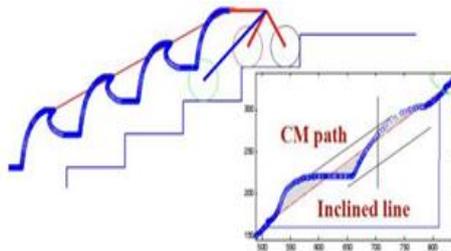


Fig. 1 S/N ratio

2.3 Signal-noise ratio를 이용한 무게중심 위치 최적화

S/N비란 “signal / noise ratio”를 의미하며 signal은 계단의 기울기, noise는 무게중심의 궤적이다. 로봇이 계단을 오를 때 그려지는 무게중심의 궤적이 직선의 계단 기울기 형상에 멀어질수록 로봇의 움직임이 불안정하다는 것을 의미한다.⁽³⁾ 따라서 계단 등반 시 계단의 slope와 무게중심의 궤적 사이 면적이 최소화 하는 것이 최적화 목표이다. S/N비를 계산해 넓이가 최소가 되는 링크 길이를 최종 형상으로 선정하였다.

Matlab과 Simulink을 이용하여 로봇이 계단을 등반하는 모습을 시뮬레이션 하고 로봇의 무게중심의 궤적을 그려 S/N비를 분석하였다. 이를 위해 Simulink를 활용하여 로봇의 운동을 구현하였고 Fig. 1의 그래프와 같이 시간(x축)에 따른 무게중심이 그리는 궤적(y축)의 변화를 확인하였다. 이 데이터 값을 이용하여 계단의 기울기로 인해 만들어지는 직선과 비교해 만들어지는 총면적을 계산하였다.⁽³⁾

이처럼 유전 알고리즘을 통해 도출한 링크 set의 각각 S/N비를 분석하고 S/N비가 제일 작은 링크 길이를 안정성이 제일 높은 개체로 판단하여 최종적인 링크 길이를 선정하였다. Table 6은 각 링크 길이에 대해 S/N비 최적화를 진행한 결과이고 try 5의 링크 set의 값이 43.126로 가장 작은 S/N비 값을 가졌다. 따라서 본 프로젝트에서는 구동 안정성이 가장 뛰어난 링크 set5를 이용해 모델을 제작하고자 한다.

Table 7 Robot climbing in cases

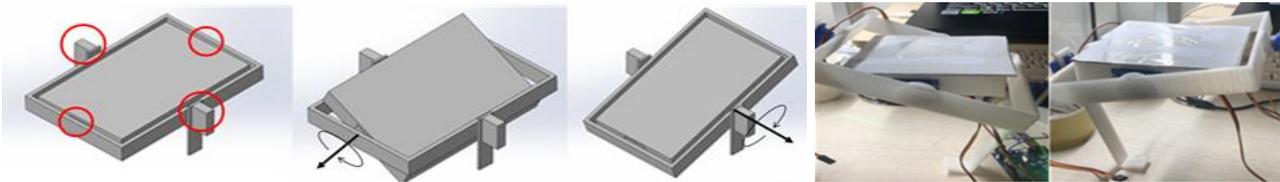
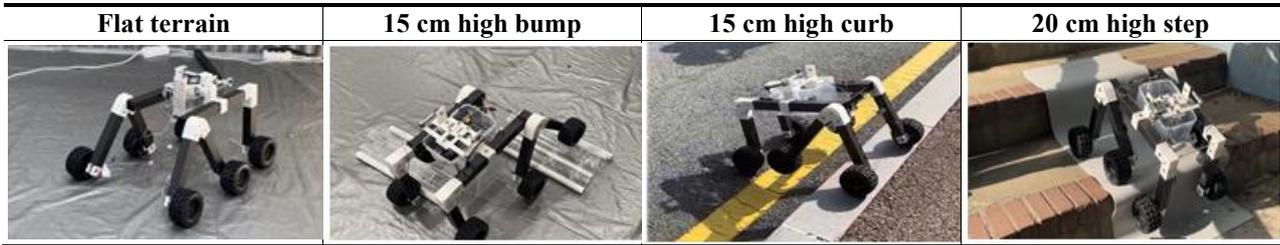


Fig. 2 Horizontal maintenance structure

Table 8 S/N ratio, link length and link angle set of try 5

| Try 5 S/N ratio | 비교군 S/N ratio | Try 5 link length set result | |
|-----------------|---------------|------------------------------|--------|
| <p>43.126</p> | <p>44.303</p> | l1 [mm] | 320 |
| | | l2 (= l1) [mm] | 320 |
| | | l3 [mm] | 443 |
| | | l4 [mm] | 280 |
| | | theta1 [°] | 29.335 |
| | | theta2 [°] | 32.26 |

2.4 상부 수평 유지 시스템

링크 길이, 무게중심 위치 최적화 결과를 바탕으로 상부 수평 유지 시스템을 설계한다. 자이로센서를 이용해 로봇의 기울기를 감지하고, 아두이노에서 서보모터를 제어하여 상부의 수평을 유지한다. 이때 서보모터는 각 제품마다 출력 속도 차이가 있다는 것을 고려해 SG90 2개를 사용하여 2개의 축(rolling, pitching)을 제어하고, 자이로센서는 자체적으로 보정 기능이 있는 MPU6090을 사용한다. 서보모터의 기준치가 90°인 것을 고려해 0° ≤ 입력값 < 90°이면 시계 방향으로 회전하고 90° ≤ 입력값 < 180°이면 반시계 방향으로 회전하는 코드를 작성한다. 위 시스템을 통해 적재 물건의 쏠림을 방지하여 등판 성능이 향상되고 부하가 고르게 분포됨으로써 유지 보수 기간이 길어진다는 장점을 얻을 수 있다. 상부 수평유지 장치를 설계한 결과는 Fig. 2와 같다.

2.5 구동 평가

주행 테스트 결과 Table 7을 참고하면 설계조건으로 선정된 15 cm의 연석을 충분히 등반할 수 있는 것으로 나타났다. 넓은 폭을 가진 20 cm의 계단의 경우에도 연속적으로 등판 가능한 만큼, 배달 로봇 구동부로서의 개선점이 명확한 것으로 드러났다. 추가적으로 계단 하강, 제자리 회전 등의 주행 테스트를 진행해 본 결과, 계단을 내려가는 과정에서 로봇에 충격이 많이 가해지므로 모터 부분에 서스펜션을 추가하는 설계를 진행하였다.

Table 9 Expected effects through introduction of rocker-bogie driving system

| | |
|--|--|
| Improvement in stability and durability | <p>Thanks to the rotational joints allowing the robot's joints to move flexibly, stable driving is possible even on rough terrain as the wheels maintain contact with the ground</p> <p>Absorbing shocks and vibrations reduces wear on the robot's components, extending the lifespan of the parts</p> <p>The robot's applicability across various fields enhances its market potential</p> |
| Increased load capacity | <p>Thanks to the Rocker-Bogie structure and the leveling device, the load capacity is increased compared to other delivery robots</p> <p>Because it allows stable driving regardless of the type of product, delivery time and costs are reduced, and customer satisfaction is improved</p> |

3. 결 론

본 논문에서는 연석 및 계단을 안정적으로 등반할 수 있는 rocker-bogie 메커니즘 기반의 로봇 구동부를 설계하였다. 유전 알고리즘을 이용해 기존 메커니즘에서 배달 로봇에 구동부를 최적화하여 설계하였으며, 등반 안정성 또한 확보하기 위해 S/N비 해석을 통해 최적의 무게중심 궤적을 확인하고 로봇 구동부의 설계 변수 값을 도출하였다. 배달 로봇의 경우 안정적인 배달 또한 중요하므로 수평유지 장치와 충격 완화를 위한 쇼크 업소버를 추가하여 사용자의 배달 만족도를 올리고자 하였다. 설계 내용을 기반으로 제작한 최종 모델은 카본 파이프, PLA 구조물, 감속 기어 모터, 배터리 등의 모든 부품을 포함해 약 9g의 무게를 갖는 것을 확인하였다. Table 8을 참고하면 동일 형상을 가진 비교군과 대조 시 무게중심이 20% 높음에도 S/N ratio 2.66% 감소함을 확인함으로써 설계 목표를 달성했다.

본 아이디어를 통해 험지 주행이 탁월하고 물건 운송에서의 안정성이 높은 구동부를 갖추게 된다면 다양한 산업 현장과 더불어, 오프로드에서의 주행 및 재난 현장에서 폭넓게 사용 가능할 것이다. Table 9는 개선된 rocker-bogie의 기대성을 나타낸 표이다.

본 실험에서는 유일한 비교군으로 동일한 형상의 무게중심이 20% 낮은 모델을 선정하여 성능을 비교하였다. 이전의 설계 내용에서 언급했듯이 rocker-bogie 메커니즘에는 다양한 형상이 존재하므로, 향후에 다양한 rocker 및 bogie 형상을 갖는 구동부를 비교군으로 선정하여 성능 비교 실험을 진행한다면 더 많은 분야에 유용적으로 사용될 수 있을 것이다. 또한 제한된 조건의 실험 환경과 시뮬레이션이 아닌 추가로 실제 주행 환경에서 테스트를 진행하여 데이터를 수집하여, 더욱이 축적된 성능 비교 데이터를 이용한다면 향후 로봇 구동부의 등반 안정성을 파악하는 지표로서 역할을 수행할 것으로 기대된다.

후 기

본 프로젝트를 진행하는 데에 많은 도움을 주신 아주대학교 강대식 지도 교수님께 감사의 말씀을 전합니다. 저희의 작품에 방향을 제시해 주심으로써 마지막까지 유종의 미를 거둘 수 있었습니다. 또한 제작에 있어 지원을 아끼지 않으신 아주대학교 LINC 3.0 사업단에도 진심으로 감사합니다. 더욱 정진하여 기계공학을 빛내기 위한 엔지니어로서 성장하도록 노력하겠습니다.

참고문헌 (References)

- (1) Ullrich, F. M., Goktogan, A. H. and Sukkarieh, S., 2010, "Design Optimization of a Mars Rover's Rocker-Bogie Mechanism Using Genetic Algorithms," *Proceedings of the Australian Space Science Conference*, Brisbane, Australia, pp. 4-9.
- (2) Senjaliya, H., Gajjar, P., Vaghasiya, B. and Shah, P., 2022, "Optimization of Rocker-Bogie Mechanism Using Heuristic Approaches," *ArXiv*, arXiv:2209.06927.
- (3) Kim, D. M., Hong, H. S., Kim, H. S. and Kim, J. W., 2011, "Optimal Design and Kinetic Analysis of a Stair-Climbing Mobile Robot with Rocker-Bogie Mechanism," *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 50, pp. 90-108.

- (4) Hong, H. S., Kim, J. W., Kim, D. M. and Kim, S. H., 2010, "Optimization of the Stair-Climbing Ability of Cart with Rocker-Bogie Mechanism," *Proceedings of the Korean Society of Precision Engineering Conference*, Jeju, Republic of Korea, pp. 1147~1148.
- (5) Verma, A., Yadav, C., Singh, B., Gupta, A., Mishra, J. and Saxena, A., 2017, "Design of Rocker-Bogie Mechanism," *International Journal of Innovative Science and Research Technology*, pp. 312~338.

관절형 단일 무한궤도 로봇의 설계: 기구학적 모델과 최적 기동 알고리즘[§]

박순용* · 홍장환* · 정동민* · 정희준* · 김홍근^{**†}

* 한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부,

** 한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부 미래융합공학전공, 첨단메카트로닉스연구소

Design of Single Continuous Tracked Robots with Joints: Kinematic Model and Optimal Maneuvering Algorithm

Soon-Yong Park*, Jang-Hwan Hong*, Dong-Min Jung*,
Hui-Jun Jeong* and Hongkeun Kim^{**†}

* School of Mechatronics Engineering, KoreaTech,

** ARC-MEE, Future Convergence Engineering, School of Mechatronics Engineering, KoreaTech

(Received February 1, 2024 ; Revised April 15, 2024 ; Accepted April 15, 2024)

Key Words: Single Continuous Tracked Robots with Joints(관절형 단일 무한궤도 로봇), Path Tracking(이동 경로 추종), Inverse Kinematics(역기구학), Optimal Maneuvering Algorithm(최적 기동 알고리즘)

초록: 본 논문에서는 관절형 단일 무한궤도 로봇을 설계한다. 해당 로봇은 머리마디, 다수의 몸통마디, 꼬리마디로 구성되며, 인접한 두 마디들은 모터가 부착된 관절로 서로 연결된다. 또한, 모든 마디는 하나의 유니버설 체인으로 묶여있으며, 이 체인은 로봇의 진행 방향에 대하여 수직으로 회전 가능하다. 로봇의 이러한 구조로부터, 요구 기동성과 자유도를 분석하여 제어변수들을 특정하고, 역기구학적 관계식을 유도한다. 즉, 추종하고자 하는 로봇의 이동경로(또는 로봇의 자세)에 대응하는 로봇의 관절각들을 모두 제시한다. 이후, 해당 경로를 실제 추종하도록 하는 기동 제어 알고리즘을 제안한다. 이 알고리즘은 머리와 꼬리마디에서의 해당 경로 구간에 대한 오차각들과 그 변화율들을 최소화한다. 마지막으로, 제안된 최적 기동 알고리즘을 무한궤도 로봇에 적용하여, 로봇이 주어진 경로를 적절히 추종함을 모의 실험 및 실제 실험을 통해 확인한다.

Abstract: In this paper, we design articulated single continuous tracked robots. The robot consists of a head segment, a set of body segments, and a tail segment. Any pair of two consecutive segments are connected via a joint with a motor attached. The segments are all tied up with a single universal chain which is designed to be able to rotate perpendicularly to the heading direction of the robot. With this structure of the robot, we first identify control variables based on the degree-of-freedom analysis and the required maneuvering ability of the robot. Then we derive the inverse kinematics of the robot, i.e., given a path to be tracked (or what is the same, given an attitude of the robot), we compute all the joint angles. This inverse kinematic behavior of the robot enables us to propose an optimal maneuvering algorithm which allows the robot to track the path, minimizes the heading and tailing angles with respect to the corresponding path segments and at the same time, minimizes the rate of changes of the angles. Finally, a computer simulation and experiment are given to demonstrate the validity of the proposed algorithm.

§ 이 논문은 대한기계학회 제13회 전국학생실계경진대회(2023. 10. 21., 고려대학교) 발표 논문임.

† Corresponding Author, hkkim@koreatech.ac.kr

© 2024 The Korean Society of Mechanical Engineers

1. 서론

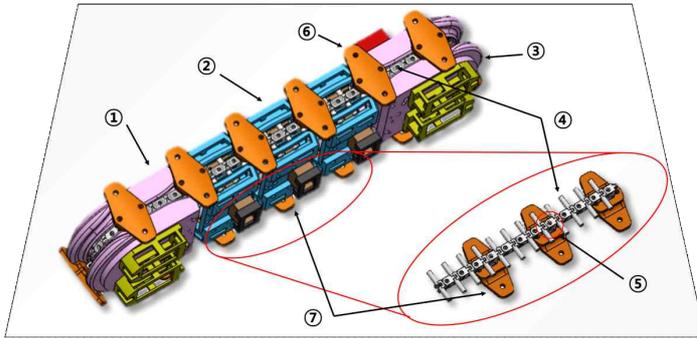
최근 지구 온난화가 가속화되면서 자연재해의 발생 빈도가 크게 늘고 있다. 일례로, 2021년 한 해의 자연재해 발생 빈도가 이전 30년 대비 13%가 증가하였다고 유엔재해경감사무국이 발표하였다.⁽¹⁾ 특히, 건축물들이 즐비한 도시에서의 자연재해는 재난적 상황을 초래하며, 이때에는 그 지형적 특성으로 인하여 구조인력의 접근이 어렵다. 때문에 접근이 용이하지 않은 지형에서의 생존자를 탐색하기 위하여, 2000년도 이후부터 이동로봇을 도입하는 시도가 이어지고 있다. 이러한 로봇을 탐색·구조 로봇(search and rescue robots)이라 하는데,⁽²⁾ 현재까지 매우 다양한 형태가 제시되고 있으며, 그중에서도 협소한 지형을 탐사하기 위한 뱀 형태의 로봇들이 활발히 개발되고 있다.^(3,4)

뱀 로봇은 그 형태에 따라 ACM(active cord mechanism)과 TSD(toroidal skin driving), omni-tread 등의 방식으로 구분할 수 있다. ACM은 Frenet-Serret의 방정식을 사용하여 로봇의 바디를 묘사하고 제어하는 방식이다.^(3,5,6) TSD는 로봇의 각 마디를 토로이드 형태의 외피로 감싼 후 해당 외피를 움직여 나아가는 방식이다.⁽⁷⁾ Omni-tread는 로봇을 구성하는 각 마디에 4방위의 무한궤도들을 장착하고, 이들을 모두 일괄적으로 연동하여 구동하는 방식이다.^(3,8)

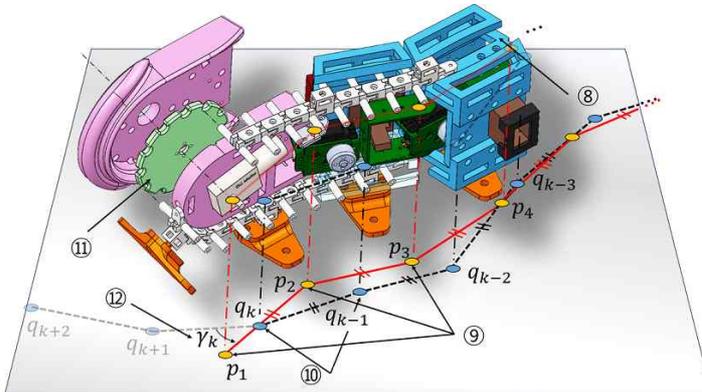
한편, 뱀 로봇의 구동 및 추진 방식에 따라, 수동바퀴(passive wheel)와 능동추진(active propulsion) 방식으로 분류하기도 한다. 수동바퀴를 사용하는 뱀 로봇으로는 동경공업대학에서 개발한 ACM-III⁽⁹⁾가 대표적이다. 해당 로봇은 수동바퀴를 통해 이방적인 마찰(anisotropic friction)을 구현하였으며, 그 결과 뱀의 구불구불한 움직임을 흉내낸다. 반면에, 다수의 변수들을 제어해야 하는 복잡성에도 불구하고, 뱀 로봇의 자유로운 자세 구현 및 이동경로 제어의 용이성으로 인하여, 다양한 종류의 능동추진 뱀 로봇들이 개발되고 있다. 그 중, ACM-R4⁽¹⁰⁾와 GMD-SNAKE2⁽¹¹⁾는 수동바퀴 대신 능동바퀴를 사용한다. ACM-R4에서는 한 쌍의 능동바퀴들이 로봇의 한 마디를 구성하며, 각 마디들은 서로 수직방향으로 교차하는 방식으로 제작되어 로봇의 자세 및 이동을 제어한다. GMD-SNAKE2는 원통형의 로봇 마디 둘레에 6개의 작은 능동바퀴들을 등간격으로 설치하여 로봇의 전·후진이 가능하도록 설계하였다. 한편 앞에서 간략히 소개한 omni-tread 로봇⁽⁸⁾은 바퀴 대신 무한궤도를 사용한 능동추진 로봇이다. 이 로봇은 공압폴무(pneumatic bellows)를 사용하여 로봇 마디의 방향과 위치를 제어한다. Souryu-IV^(4,12)는 무한궤도를 사용하는 또 다른 형태의 로봇으로, 세 개의 마디로 구성되며, 각 마디마다 단방향 무한궤도가 개별적으로 장착되어 있고, 마디 사이를 잇는 관절에는 모터의 회전운동을 직선운동으로 변환해주는 유닛을 배치하여 자세를 제어한다. 마지막으로, 바퀴나 궤도 대신 토로이드의 외피를 이용하여 이동하는 TSD 로봇⁽⁷⁾은 외피를 로봇의 머리에서 꼬리방향으로 이동시켜 전·후진 추진력을 구현한다. 또한 각 관절에 모터와 기어를 장착하여 로봇의 자세를 제어한다.

탐색·구조 로봇에는 그 특성상 다양한 종류의 센서들이 구비되며, 보통 이 센서들을 통하여 로봇의 위치와 자세, 주행정보 등을 측정하고자 한다. 특히, 센서를 통한 위치 및 주행정보 등을 칼만 필터(Kalman filter) 또는 마르코프 필터(Markov filter)를 통해 필터링하여 보다 정확한 정보를 추정하기도 한다.⁽¹³⁾ 그러나 다수의 뱀 형태의 로봇들은 뱀의 움직임 묘사로 인하여 지면에서 원치 않게 미끄러지는 상황이 발생하고, 이는 로봇의 위치 및 자세 등의 측정 또는 추정을 부정확하게 만드는 요인이 된다. 이에 반해 무한궤도 방식을 사용하는 로봇들은 높은 기동성을 보유하는 대신, 보통 두 개의 무한궤도를 각 마디의 양옆에 쌍으로 배치하는 관계로 로봇의 크기가 커진다.^(8,12) 이는 협소한 지형을 통과해야 할 수도 있는 탐색·구조 로봇으로서의 활용도를 떨어뜨릴 수 있다.

이러한 제반 상황을 고려하여, 본 논문에서는 관절형 단일 무한궤도 로봇을 제안한다. 머리와 꼬리마디, 그리고 다수의 몸통마디로 구성된 해당 로봇은 그 명칭으로부터 알 수 있듯이, 한 쌍이 아니라 단 하나의 무한궤도만을 사용하며, 마디별로 무한궤도가 장착되는 것이 아니라 모든 마디가 그 하나의 무한궤도로 묶이는 고유한 구조를 가장 큰 특징으로 한다. 또한 인접한 두 마디는 모터와 같은 구동기가 장착된 관절로 연결되어 로봇의 회전운동이 가능하도록 고안된다. 모든 마디를 묶는 단 하나의 무한궤도로 직선 및 회전운동이 동시에 가능한 이유는 해당 무한궤도의 핵심이 되는 유니버설 체인과 패드에 있다.



(a) An SCTR having three body segments



(b) An exploded view with joint positions and a path drawn

| | |
|---|------------------------------|
| ① | Head segment |
| ② | Body segment |
| ③ | Tail segment |
| ④ | Chain |
| ⑤ | Grounded chain |
| ⑥ | Pad |
| ⑦ | Grounded pad |
| ⑧ | Chain passage |
| ⑨ | Joint positions |
| ⑩ | Path points |
| ⑪ | Sprocket wheel |
| ⑫ | Angle difference at the head |

Fig. 1 A 3D model of single continuous tracked robots with joints

유니버설 체인을 구성하는 개별 체인의 수평 및 수직축이 교대로 배치되고, 지면과 맞닿는 패드들이 유니버설 체인에서 등간격으로 떨어져 부착되기 때문이다. 본 논문에서는 이렇게 특수하게 고안된 관절형 단일 무한궤도 로봇의 주행경로 자동 추종 문제를 다룬다. 즉, 로봇이 주행하고자 하는 경로의 정보가 주어진 상태에서, 원격조종과 같은 인위적인 개입이 없이 로봇이 해당 경로를 정확히 따라가도록 하고자 한다. 이 문제를 해결하는 최적 기동 알고리즘을 본 논문에서 제안한다. 해당 알고리즘은 로봇 바디의 요동을 최소화하여 안정한 기동이 가능하도록 하는 특징이 있다. 이 알고리즘은 제안된 관절형 단일 무한궤도 로봇의 관절각 제어에 기반하고 있으며, 이를 위하여 로봇의 기구학 및 역기구학적 특징을 엄밀히 분석한다. 요약하자면, 1) 관절형 단일 무한궤도 로봇의 설계 및 제안, 2) 로봇의 기구학적, 역기구학적 분석을 통한 관절각 계산, 3) 주행경로 추종을 위한 최적 기동 알고리즘 개발, 4) 실제 구현 및 실험을 통한 입증 이 본 논문의 주요 결과이다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 제안하는 로봇과 경로 추종 문제에 대한 상세 설명 및 관련 용어를 기술한다. 3장에서는 로봇의 제어변수들을 특정하고, 기구학적/역기구학적 분석을 수행한다. 최적 기동 알고리즘은 4장에서 제시하며, 동시에 컴퓨터 기반의 모의실험과 실제 구현 및 실험을 통하여 결과를 검증한다. 5장에서 본 논문을 마무리 짓는다. 본 논문의 예비 버전이 대한기계학회 제13회 전국학술대회에 보고서 형태로 출간되었음을 밝힌다.⁽¹⁴⁾

2. 관절형 단일 무한궤도 로봇 상세와 관련 용어

본 논문에서 제안하는 관절형 단일 무한궤도 로봇을 편의상 SCTR(a single continuous tracked robot with joints) 또는 단순히 로봇이라 칭하겠다. SCTR의 구조는 Fig. 1과 같으며, 평면 주행을 대전제로 한다. Fig. 1에서 볼 수 있듯이, SCTR은 그 형상과 구동 방식이 다소 복잡한 관계로, 관련 용어를 먼저 명확히 정의한다. 그 후, 전체적인 구동 방식을 설명한다.¹⁾

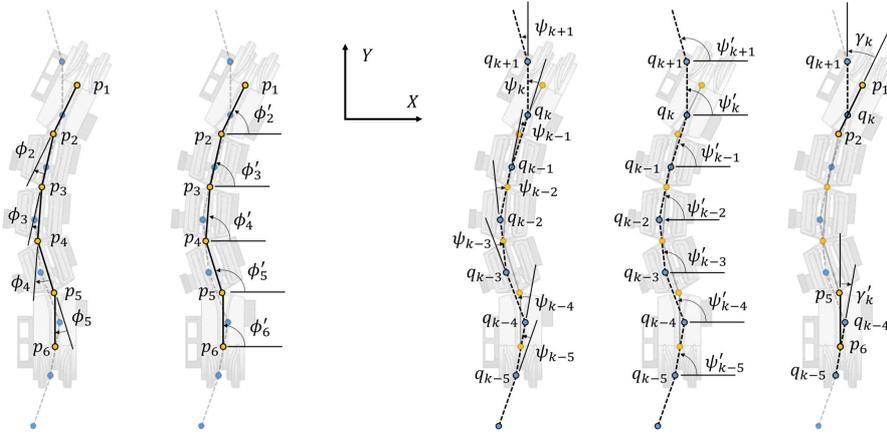


Fig. 2 Joint angles, path angles, and angle differences of an SCTR for a given path

SCTR은 진행 방향을 따라 머리마디(head segment)와 다수의 몸통마디(body segments), 그리고 꼬리마디(tail segment)가 연결된 구조를 갖는다. 인접한 두 마디가 연결된 관절들을 로봇의 진행 방향을 따라 순차적으로 번호를 붙인다. 가령, 머리마디와 다음 마디를 잇는 관절은 1번 관절이다. 다수의 십자 형태 체인들을 연결하여 로봇의 무한계도(또는 유니버설 체인)를 구성하며, 개별 체인은 그 형태로 인하여 로봇의 진행방향에 대하여 수직으로 회전 가능하다. 지면과의 안정적인 접지를 위하여 일부 체인에 패드를 부착하며, 실제 지면과 접촉해 있는 패드는 접지패드(grounded pad)라 칭한다. 십자 형태인 체인의 로봇 진행 방향으로의 길이를 d 로 표기한다.

가정 1. 로봇의 몸통마디는 n 개이며, 모든 몸통마디의 길이와 인접한 두 패드의 중심 간의 거리는 모두 L 로 동일하다. 아울러, 몸통마디 하나의 길이는 N 개 체인의 총 길이와 같다. 즉, $L = Nd$ 이다.

SCTR의 기하적 형상은 관절에 의하여 결정되므로, 이들의 위치를 정의한다. 편의상, 첫 번째 관절점(joint position) $p_1 \in \mathbb{R}^2$ 은 머리마디와 인접한 관절로부터 거리가 L 만큼 떨어진 머리마디 대칭축 상의 점을 X-Y 평면상으로 정사영한 점으로 정의한다(Fig. 2 참고). 본 논문에서는 p_1 을 머리 관절점이라고도 부른다. $i = 2, \dots, n+2$ 일 경우, i 번째 관절점 p_i 는 $i-1$ 번째 관절의 위치를 X-Y 평면상으로 정사영한 점이다. 이들을 통칭하여 내부 관절점이라 부른다. $n+3$ 번째 관절점 p_{n+3} 은 꼬리 관절점이라고도 부르며, 꼬리마디와 인접한 관절로부터 거리가 L 만큼 떨어진 꼬리마디 대칭축 상의 점을 X-Y 평면상으로 정사영한 점이다. $j = 2, 3, \dots, n+2$ 일 때, j 번째 상대 관절각(relative joint angle) ϕ_j 는 관절점 p_{j-1} 에서 p_j 방향으로 연장한 반직선과 선분 $\overline{p_j p_{j+1}}$ 가 이루는 각을 나타낸다. 편의상, $\phi_1 = \phi_{n+3} = 0$ 으로 정의한다. 한편, $j = 2, 3, \dots, n+3$ 일 때, 전역 좌표계에서 양의 X-축 방향과 $\overline{p_{j-1} p_j}$ 가 이루는 각도를 j 번째 절대 관절각(absolute joint angle) ϕ'_j 이라 하며, 편의상 $\phi'_1 = 0$ 으로 정의한다.

보조정리 1. 가정 1이 만족되면, 접지패드의 개수는 항상 $n+2$ 또는 $n+3$ 이다.

보조정리 1은 모든 관절점의 위치와 접지패드의 중심이 정확히 일치할 때만 접지패드 개수가 $n+3$ 이란 점을 통해 쉽게 유추할 수 있다. 한편, 몸통 마디가 n 개이면 마디의 총 개수는 $n+2$ (머리 및 꼬리마디 포함), 관절점의 개수는 $n+3$ 임에 유의한다($n=3$, $N=4$ 인 경우를 나타내는 Fig. 1 참고). 참고로, 각 관절점에서 Z-축 방향으로 적절한 높이에 모터의 축을 배치하여 SCTR을 제어하게 된다. 머리와 꼬리마디에 배치된 모터로 로봇의 진행을, 각 관절에 배치된 모터로 로봇의 자세를 제어한다.

X-Y 평면상에서의 m 개의 점들($m > n_0$, n_0 는 접지패드의 초기 개수; 보조정리 1 참고)의 집합 $\{q_1, q_2, \dots, q_m\}$ 을 고려하자(Fig. 2 참고). 각 $i = 2, 3, \dots, m$ 에 대하여 $\overline{q_{i-1} q_i}$ 의 길이가 모두 L 과 같을 때, 점 q_1, q_2, \dots, q_m 을 경로점(path points), q_i 를 i 번째 경로점, 집합 $\{q_1, q_2, \dots, q_m\}$ 을 로봇의 이동경로 또는 주행경로(path)

1) SCTR의 전체 형상 및 구동과 관련하여, 독자의 이해를 돕고자 4.3절에서 실제 구현 및 실험을 제시하였다.

라고 한다. $j = 2, 3, \dots, m-1$ 에 대하여, 경로점 q_{j-1} 에서 q_j 방향으로 이은 반직선과 $\overline{q_j q_{j+1}}$ 가 이루는 각을 j 번째 상대 경로각(relative path angle) ψ_j 라 한다. $j = 1, 2, \dots, m-1$ 에 대하여, 전역 좌표계에서의 양의 X-축 방향과 $\overline{q_j q_{j+1}}$ 가 이루는 각도를 j 번째 절대 경로각(absolute path angle) ψ_j' 이라 한다. 편의상, $\psi_1 = \psi_m = \psi_m' = 0$ 으로 정의한다. 다음으로, 로봇의 이동경로가 주어진 상태에서, 처음 n_0 개의 경로점들과 접지패드의 중심 위치가 정확히 일치하도록 로봇의 초기 자세가 설정되었다고 가정해보자. 그러면 로봇이 이동함에 따라, $n_0 + 1$ 번째 경로점을 다음 접지패드가 지나가도록 관절각을 적절히 제어할 수 있다. 즉, 이러한 방식으로 접지패드의 중심들이 모든 경로점들을 순차적으로 통과하도록 제어 가능하다. 이때 머리마디에 위치한 접지패드의 중심과 맞닿아 있는 경로점을 머리 경로점(path point at the head)이라 하며, 특별히 밀접자 k 를 사용하여 q_k 로 나타낸다(Fig. 1(b) 또는 2 참고). 꼬리마디의 접지패드 중심에 위치한 경로점은 꼬리 경로점(path point at the tail)이라 한다. 다음으로 머리와 꼬리에서의 각도 오차를 정의한다. $\overline{p_1 p_2}$ 와 $\overline{q_k q_{k+1}}$ 이 이루는 각, 즉, $\angle p_1 q_k q_{k+1}$ 을 머리 오차각(angle difference at the head) γ_k , $\angle p_{n+2} q_{k-n-2} q_{k-n-1}$ 을 꼬리 오차각(angle difference at the tail) γ_k' 이라 한다. 가령, $\gamma_k = \psi_k' - \phi_2'$ 이 성립한다.

SCTR은 그 물리적 구조로 인하여 관절각에 제약이 생길 수밖에 없으며, 이로 인하여 경로각 또한 제약조건이 생긴다.

가정 2. $j = 2, 3, \dots, n+2$ 에 대하여, 각 관절점에서 물리적으로 가능한 최대, 최소 각도는 각각 $\phi_{j,\max} > 0$, $-\phi_{j,\max} < 0$ 이다. $j = 2, 3, \dots, m-1$ 일 때, 각 경로점에서 가능한 최대, 최소 각도는 $\psi_{j,\max} > 0$, $-\psi_{j,\max} < 0$ 이다. 또한, 경로각과 관절각 사이에는 $\psi_{j,\max} \leq \phi_{\max}$, $j = 2, 3, \dots, m-1$ 이 성립한다. 여기서 $\phi_{\max} := \min\{\phi_{2,\max}, \dots, \phi_{n+2,\max}\}$ 이다.²⁾

마지막으로, 각 마디의 이동거리와 연관되는 용어를 정의한다. 머리 경로점이 q_k 일 때, $i = 1, \dots, n+3$ 에 대하여, 관절점 p_i 와 경로점 q_{k-i+1} 사이의 거리를 i 번째 국소 이동거리(local distance traveled) v_i 라 한다. 가령, 첫 번째 국소 이동거리는 $\overline{p_1 q_k}$ 의 길이와 같다. $i = 2, \dots, n+3$ 에 대하여, $\overline{p_i q_{k-i+2}}$ 의 길이를 i 번째 국소 잔여거리(local distance to be traveled) w_i 라 한다. 이들은 $i = 3, \dots, n+1$ 에 대하여, 항상 $0 \leq v_i, w_i \leq L$ 와 $w_i = L - v_i$ 를 만족한다. 단, 예외적으로, $w_2 = L - v_1$ 이다.

3. 기구학적 모델과 관절각³⁾

본 절에서는 자유도 분석을 통하여 제어변수를 특정하고, 기구학적 분석을 수행하여 국소 이동거리를 계산한다. 이로부터 로봇의 경로 추종을 위한 관절각을 계산한다. 즉, 역기구학(inverse kinematics)⁽¹⁵⁾을 풀어 요구되는 관절각을 찾는다.

3.1 자유도 분석을 통한 제어변수 결정

먼저 로봇의 구동 방식에 대하여 설명한다. Fig. 1에서와 같이, 스프로킷 휠(sprocket wheel)은 모터에 부착되어 회전하며, 이 회전력이 유니버설 체인을 구동 및 접지패드를 통해 추력을 발생시킨다. 로봇이 주어진 경로를 추종하기 위해서는 경로점들에 따른 관절점들의 위치를 적절히 특정해야 하는데, 다음 두 가지 방법을 고려할 수 있다.

- 인접한 두 관절점들을 잇는 선분에 경로점이 위치하도록 제어하는 경우
- 인접한 두 경로점들을 잇는 선분에 관절점이 위치하도록 제어하는 경우

2) ϕ_{\max} 와 $\psi_{\max} := \max\{\psi_{2,\max}, \dots, \psi_{m-1,\max}\}$ 를 최대 관절각, 최대 경로각으로 각각 부르며, 가정 2가 만족되면 $\psi_{\max} \leq \phi_{\max}$ 임을 쉽게 알 수 있다. 한편, 모든 몸통마디를 대칭이 되도록 동일하게 설계하면, 가정 2가 만족된다.

3) 본 논문에서 제안하는 SCTR의 동역학 또한 모델링 가능하다. 이와 관련해서는 본 논문의 예비 버전인 보고서⁽¹⁴⁾를 참고한다.

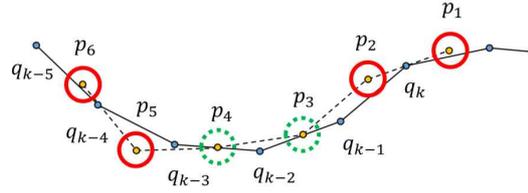


Fig. 3 The head and tail segments (solid circles) pass through the path points at the head and tail, respectively. The joint positions p_3 and p_4 (dotted circles) are on their respective segments of the path

본 논문에서는 머리와 꼬리마디에 인접한 관절점들에 한하여 a)를 적용하고, 나머지 $3, 4, \dots, n+1$ 번째 관절점에는 관절각의 연속성을 보장하기 위해 b)를 적용한다(Fig. 3 참고). 이들은 제약조건에 해당한다.

지표면 상에서 SCTR이 구동 및 조향하기 위해서는 로봇의 자유도가 2 이상이어야 한다. 로봇의 마디는 총 $n+2$ 개이며, 내부 관절점은 $n+1$ 개, 평면 운동을 하며 프레임(로봇이 지표면에 고정된 상태가 아님)이 존재하지 않는다. 따라서 제약조건을 고려하지 않은 로봇 자체의 자유도는 $DOF_{unconstrained} = 3(n+2) - 2(n+1) = n+4$ 이다. 이제 앞의 제약조건 a)와 b)를 고려하자. 머리와 꼬리마디가 머리 및 꼬리 경로점들을 각각 지나야 하므로, 2개의 제약조건이 생긴다. 또한 b)에 의하여, $3, \dots, n+1$ 번째 관절점들이 주어진 이동경로의 해당 선분 상에 위치해야 하므로, 각각 하나씩하여 총 $n-1$ 개의 제약조건이 추가된다. 따라서 SCTR의 최종 자유도는 $DOF = DOF_{unconstrained} - 2 - (n-1) = 3$ 이다. 자유도가 3이므로 구동은 가능하나, 이를 위해서는 3개의 제어변수들이 필요하다. 본 논문에서는 로봇의 첫 번째 국소 이동거리, 머리 오차각, 꼬리 오차각을 제어변수로 취급한다. 이들 변수가 결정되면 나머지 국소 이동거리들과 모든 관절각들이 결정되며, 따라서 SCTR의 전체 자세가 결정된다. 아래의 세부 절 3.2와 3.3에서 이를 자세히 기술한다.

3.2 국소 이동거리의 계산

첫 번째 국소 이동거리 v_1 과 머리 오차각 γ_k 가 제어변수이므로, 본 세부 절에서는 이미 주어졌다고 가정한다. 그런 후, 나머지 국소 이동거리들을 순차적으로 구한다. 이렇게 구한 국소 이동거리들을 사용하여, 세부 절 3.3에서 역기구학을 풀어 최종 관절각들을 계산한다.

먼저, Fig. 4(a)와 (d)를 참고하여 머리마디에서의 국소 이동거리들을 구한다. 두 번째 국소 잔여거리가 $w_2 = L - v_1$ 이고 $\angle q_{k-1}q_k p_2 = \psi_k - \gamma_k$ 이므로, $\triangle q_{k-1}q_k p_2$ 에 코사인 법칙을 적용하면

$$v_2 = \sqrt{L^2 + w_2^2 - 2w_2L \cos(\psi_k - \gamma_k)} \quad (1)$$

를 얻는다. 다음으로 v_3 를 구하기 위해, 세 번째 국소 잔여거리 w_3 를 먼저 구한다. $\alpha_{k-1} := \angle q_k q_{k-1} p_2$ 로 정의하고, $\triangle q_k q_{k-1} p_2$ 에 사인 법칙을 적용하여 $v_2 \sin(\alpha_{k-1}) = w_2 \sin(\psi_k - \gamma_k)$ 를 얻는다. 따라서

$$\alpha_{k-1} = \sin^{-1} \left(\frac{w_2}{v_2} \sin(\psi_k - \gamma_k) \right) \quad (2)$$

이다. 이렇게 구한 α_{k-1} 과 $\triangle p_3 q_{k-1} p_2$ 의 한 내각 $\beta_{k-1} := \angle p_3 q_{k-1} p_2$, 상대 경로각 ψ_{k-1} 사이에는 $\beta_{k-1} + \alpha_{k-1} + (\pi - \psi_{k-1}) = 2\pi$ 가 성립하므로, $\beta_{k-1} = \pi + \psi_{k-1} - \alpha_{k-1}$ 을 얻는다. 이제 $\triangle p_3 q_{k-1} p_2$ 에 코사인 법칙을 적용하여 세 번째 국소 잔여거리에 관한 식

$$w_3^2 + v_2^2 - 2w_3 v_2 \cos(\beta_{k-1}) = w_3^2 + v_2^2 + 2w_3 v_2 \cos(\alpha_{k-1} - \psi_{k-1}) = L^2 \quad (3)$$

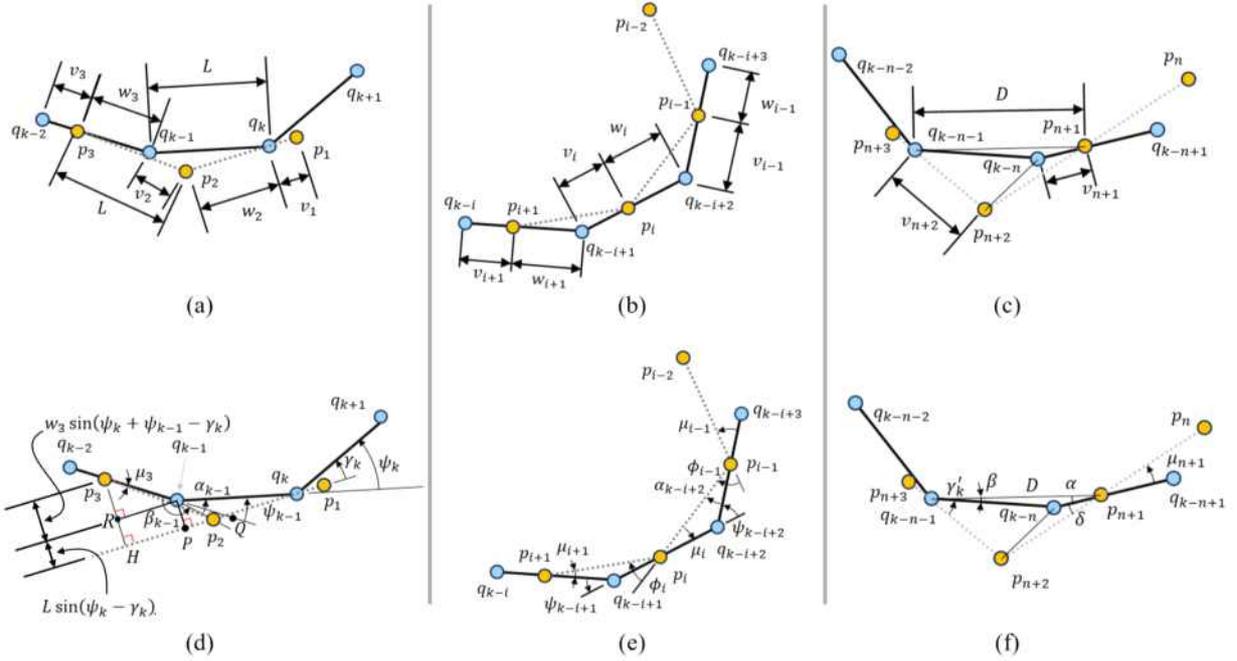


Fig. 4 Schematic diagrams of (left column) head, (middle) body, and (right) tail segments with the corresponding segments of the path drawn

을 얻는다. 이는 w_3 에 관한 이차 방정식이므로, 근의 공식을 적용하여

$$w_3 = -v_2 \cos(\alpha_{k-1} - \psi_{k-1}) \pm \sqrt{L^2 - v_2^2 \sin^2(\alpha_{k-1} - \psi_{k-1})} \quad (4)$$

을 구한다. $w_3 \geq 0$ 이고 $v_2 \leq L$ 이므로, $w_3 = \sqrt{L^2 - v_2^2 \sin^2(\alpha_{k-1} - \psi_{k-1})} - v_2 \cos(\alpha_{k-1} - \psi_{k-1})$ 로 최종적으로 주어진다. 따라서 세 번째 국소 이동거리 $v_3 = L - w_3$ 은

$$v_3 = L - \sqrt{L^2 - v_2^2 \sin^2(\alpha_{k-1} - \psi_{k-1})} + v_2 \cos(\alpha_{k-1} - \psi_{k-1}) \quad (5)$$

이다. 가정 1과 관절점, 경로점의 정의로부터 $\overline{p_1 p_2}$, $\overline{p_2 p_3}$, $\overline{q_k q_{k-1}}$, $\overline{q_{k-1} q_{k-2}}$ 의 길이가 모두 L 과 같음에 유의하라.

다음으로, 몸통마디에서의 국소 이동거리를 구한다. 이는 i 번째 국소 이동거리 v_i 가 주어졌다고 가정한 후, $i+1$ 번째 국소 이동거리를 구하는 방식으로 진행한다(Fig. 4(b)와 (e) 참고). $\triangle p_{i+1} q_{k-i+1} p_i$ 의 세 변의 길이가 w_{i+1} , v_i , L 이고 $\angle p_{i+1} q_{k-i+1} p_i = \pi - \psi_{k-i+1}$ 이므로, 코사인 법칙에 의하여

$$L^2 = w_{i+1}^2 + v_i^2 - 2v_i w_{i+1} \cos(\pi - \psi_{k-i+1}) = w_{i+1}^2 + v_i^2 + 2v_i w_{i+1} \cos(\psi_{k-i+1}) \quad (6)$$

이다. w_3 을 구할 때처럼, $w_{i+1} \geq 0$ 이고 $v_i \leq L$ 이므로 $w_{i+1} = \sqrt{L^2 - v_i^2 \sin^2(\psi_{k-i+1})} - v_i \cos(\psi_{k-i+1})$ 을 얻는다. 따라서 $i+1$ 번째 국소 이동거리 $v_{i+1} = L - w_{i+1}$ 은 다음으로 구해진다.

$$v_{i+1} = L - \sqrt{L^2 - v_i^2 \sin^2(\psi_{k-i+1})} + v_i \cos(\psi_{k-i+1}) \quad (7)$$

마지막으로, 꼬리마디를 다루기 위하여, $n+1$ 번째 국소 이동거리 v_{n+1} 과 제어변수 중 하나인 꼬리 오차각 γ_k' 이 주어졌다고 가정한다. Fig. 4(c)와 (f)를 참고하여, 우선 $\overline{q_{k-n-1}p_{n+1}}$ 의 길이를 D 라 하자. 그러면 $\triangle q_{k-n-1}q_{k-n}p_{n+1}$ 에 대한 코사인 법칙에 의하여, $D^2 = L^2 + v_{n+1}^2 - 2v_{n+1}L\cos(\pi - \psi_{k-n}) = L^2 + v_{n+1}^2 + 2v_{n+1}L\cos(\psi_{k-n})$, 즉, $D = \sqrt{L^2 + v_{n+1}^2 + 2v_{n+1}L\cos(\psi_{k-n})}$ 이 성립한다. $\beta := \angle q_{k-n}q_{k-n-1}p_{n+1}$ 이라 정의하고 사인 법칙을 적용하면, $D\sin(\beta) = v_{n+1}\sin(\pi - \psi_{k-n}) = v_{n+1}\sin(\psi_{k-n})$ 을 얻는다. 따라서

$$\beta = \sin^{-1}\left(\frac{v_{n+1}}{D}\sin(\psi_{k-n})\right) \quad (8)$$

이다. 이번에는 $\triangle q_{k-n-1}p_{n+2}p_{n+1}$ 에 코사인 법칙을 적용하면, $v_{n+2}^2 + D^2 - 2v_{n+2}D\cos(\beta + \gamma_k') = L^2$ 로부터 $v_{n+2} = D\cos(\beta + \gamma_k') \pm \sqrt{L^2 - D^2\sin^2(\beta + \gamma_k')}$ 을 얻는다. 이때 $\beta + \gamma_k' \rightarrow 0$ 이면, $p_{n+2} \rightarrow q_{k-n-1}$ 과 $p_{n+1} \rightarrow q_{k-n}$ 이다. 이로부터 $v_{n+1} \rightarrow 0$ 이어야 하고, 따라서 $n+2$ 번째 국소 이동거리는 다음과 같다.

$$v_{n+2} = D\cos(\beta + \gamma_k') - \sqrt{L^2 - D^2\sin^2(\beta + \gamma_k')} \quad (9)$$

3.3. 관절각의 계산

Fig. 4(a)와 (d)를 참고하여, 머리마디에서의 상대 관절각 ϕ_2 를 구한다. $\phi_1 = 0$ 임을 참고하라. 관절점 p_3 에서 $\overline{p_1p_2}$ 에 내린 수선의 발을 H , $\overline{p_3H}$ 의 길이를 λ 라 하면, $\triangle p_2Hp_3$ 로부터 $\lambda = L\sin(\angle p_3p_2H) = L\sin(\phi_2)$ 가 성립한다. 즉, $\phi_2 = \sin^{-1}(\lambda/L)$ 이다. 또한, $\angle p_3q_{k-1}R = \pi - \angle Rq_{k-1}P - \angle Pq_{k-1}Q$ 이며, $\angle Pq_{k-1}Q = \angle Pq_{k-1}q_k - \angle Qq_{k-1}q_k = (\pi/2 - (\psi_k - \gamma_k)) - \psi_{k-1}$ 이다. 따라서,

$$\lambda = \overline{q_{k-1}P} + \overline{p_3R} = L\sin(\angle q_{k-1}q_kP) + w_3\sin(\angle p_3q_{k-1}R) = L\sin(\psi_k - \gamma_k) + w_3\sin(\psi_k - \gamma_k + \psi_{k-1}) \quad (10)$$

이므로, 두 번째 관절각 ϕ_2 는

$$\phi_2 = \sin^{-1}\left(\frac{\lambda}{L}\right) = \sin^{-1}\left(\sin(\psi_k - \gamma_k) + \frac{w_3}{L}\sin(\psi_k + \psi_{k-1} - \gamma_k)\right) \quad (11)$$

로 주어진다.

다음으로, Fig. 4(b)와 (e)를 참고하여, 몸통마디에서의 관절각을 구한다. $\alpha_{k-i+2} := \angle p_i p_{i-1} q_{k-i+2}$ 로 정의하고, $\triangle p_i p_{i-1} q_{k-i+2}$ 에 사인 법칙을 적용하면, $L\sin(\alpha_{k-i+2}) = w_i\sin(\pi - \psi_{k-i+2})$ 를 얻는다. 즉,

$$\alpha_{k-i+2} = \sin^{-1}\left(\frac{w_i}{L}\sin(\psi_{k-i+2})\right) \quad (12)$$

이다. 또한, 관절각 ϕ_{i-1} 은 그림으로부터

$$\phi_{i-1} = \mu_{i-1} + \alpha_{k-i+2} \quad (13)$$

임을 알 수 있다. $\triangle p_i p_{i-1} q_{k-i+2}$ 의 한 내각 $\mu_i := \angle p_{i-1} p_i q_{k-i+2}$ 에 대하여 사인 법칙을 적용하면, $L\sin(\mu_i) = v_{i-1}\sin(\pi - \psi_{k-i+2})$ 로부터

$$\mu_i = \sin^{-1}\left(\frac{v_{i-1}}{L}\sin(\psi_{k-i+2})\right) \quad (14)$$

를 얻는다.4) 따라서, 이렇게 구한 μ_i 와 식 (12), (13)으로부터 관절각 ϕ_{i-1} 는

$$\phi_{i-1} = \sin^{-1}\left(\frac{v_{i-2}}{L}\sin(\psi_{k-i+3})\right) + \sin^{-1}\left(\frac{w_i}{L}\sin(\psi_{k-i+2})\right), \quad i = 4, \dots, n+1 \quad (15)$$

으로 구해진다.

마지막으로, Fig. 4(c)와 (f)를 참고하여, 꼬리마디에서의 관절각 ϕ_{n+2} 를 구한다. $\Delta p_{n+1}q_{k-n}q_{k-n-1}$ 의 두 내각 $\alpha := \angle q_{k-n-1}p_{n+1}q_{k-n}$ 과 β 를 고려하자. 참고로, β 는 3.2절에서 $\beta = \angle q_{k-n}q_{k-n-1}p_{n+1} = \pi - \psi_{k-n}$ 으로 이미 정의되었다. 사인 법칙으로부터 $L\sin(\beta) = v_{n+1}\sin(\alpha)$ 가 성립하여,

$$\alpha = \sin^{-1}\left(\frac{L}{v_{n+1}}\sin(\psi_{k-n})\right) \quad (16)$$

을 얻는다. 또한, $\delta := \angle q_{k-n}p_{n+1}p_{n+2}$ 라 정의하면, $\Delta q_{k-n-1}p_{n+1}p_{n+2}$ 로부터 $L\sin(\alpha + \delta) = v_{n+2} \times \sin(\beta + \gamma'_k)$ 이 성립하므로,

$$\delta = \sin^{-1}\left(\frac{v_{n+2}}{L}\sin(\beta + \gamma'_k)\right) - \alpha \quad (17)$$

를 얻는다. 이제 $n+2$ 와 $n+1$ 번째의 상대 관절각들을 계산한다. 역시나 $\Delta q_{k-n-1}p_{n+1}p_{n+2}$ 로부터, $D\sin(\beta + \gamma'_k) = L\sin(\pi - \phi_{n+2})$ 을 이용하여 관절각 ϕ_{n+2} 를 다음과 같이 얻는다.

$$\phi_{n+2} = \sin^{-1}\left(\frac{D}{L}\sin(\beta + \gamma'_k)\right) = \sin^{-1}\left(\frac{D}{L}\sin(\psi_{k-n} - \gamma'_k)\right) \quad (18)$$

꼬리 오차각 γ'_k 은 제어변수로, 주어지는 값임을 참고하라. 끝으로, $n+1$ 번째 상대 관절각은 $\phi_{n+1} = \mu_{n+1} - \delta$ 이므로, μ_{n+1} 과 δ 에 대한 식들을 이용하여

$$\phi_{n+1} = \sin^{-1}\left(\frac{v_n}{L}\sin(\psi_{k-n+1})\right) - \sin^{-1}\left(\frac{v_{n+2}}{L}\sin(\psi_{k-n} - \gamma'_k)\right) + \sin^{-1}\left(\frac{L}{v_{n+1}}\sin(\psi_{k-n})\right) \quad (19)$$

을 얻는다. 참고로 $\phi_{n+3} = 0$ 으로 이미 정의되었다.

4. 최적 기동 알고리즘과 실험

4.1 최적 기동 알고리즘(optimal maneuvering algorithm)

로봇의 이동경로, 즉, 경로점 q_j 와 경로각 ψ_j 가 주어지면, 해당 경로를 추종하도록 3개의 제어변수(첫 번째 국소 이동거리 v_1 , 머리 오차각 γ_k , 꼬리 오차각 γ'_k)를 결정하여야 한다. 어떠한 방식으로든 이러

4) μ_3 은 예외적으로 다음과 같이 계산된다. $\mu_3 = -\sin^{-1}\left(\frac{v_2}{L}\sin(\beta_{k-1})\right) = -\sin^{-1}\left(\frac{v_2}{L}\sin(\alpha_{k-1} - \psi_{k-1})\right)$

한 변수들을 적절히 결정한 후 3절의 결과를 활용하여 각각의 관절각을 제어하면 되겠지만, 본 절에서는 이에 대한 하나의 방편으로 최적화 기반의 제어 알고리즘을 제시하고자 한다. 즉, v_1 은 로봇의 스프로킷 휠에 부착된 모터의 각 변위 제어로 제어 가능한 관계로 독립변수로 취급하고, 로봇의 실제 자세를 결정하는 핵심 제어변수인 오차각을 수치해석의 스플라인 보간법⁽¹⁶⁾과 라그랑주 승수법(Lagrange multiplier method)을 활용하여 결정한다. 설명을 간편히 하기 위하여, $\nabla := \left[\frac{\partial}{\partial c_k} \quad \frac{\partial}{\partial d_k} \quad \frac{\partial}{\partial e_k} \right]^\top$ 또는 $\nabla := \left[\frac{\partial}{\partial c_k'} \quad \frac{\partial}{\partial d_k'} \quad \frac{\partial}{\partial e_k'} \right]^\top$ 로 정의하여 문맥에 따라 적절히 사용하고자 한다.

4.1.1 오차각 γ_k 와 γ_k' 의 결정

머리 오차각 γ_k 를 우선 결정하고자 하고, 이를 위하여 γ_k 를 $\gamma_k(v_1) = a_k + b_k v_1 + c_k v_1^2 + d_k v_1^3 + e_k v_1^4$ 와 같은 v_1 의 함수로 두고 스플라인 보간법을 적용한다. Fig. 4(a)와 (d)를 참고하면, $v_1 \rightarrow 0$ 이면 $\gamma_k \rightarrow \psi_k$ 이어야 하므로 $\gamma_k(0) = a_k = \psi_k$ 이어야만 한다. 또한, 로봇의 진행방향을 따라, $v_1 \rightarrow L$ 이면 $\gamma_k \rightarrow 0$ 이어야 하므로 $\gamma_k(L) = 0$ 을 만족하여야만 한다. 마지막으로, 머리마디가 $q_k \rightarrow q_{k+1}$ 로 지나감에 따라 v_1 은 $L \rightarrow 0$ 으로 변한다(γ_k 는 머리마디 $\overline{p_1 p_2}$ 가 경로점 q_k 를 지날 때, γ_{k+1} 은 q_{k+1} 이 $\overline{p_1 p_2}$ 위에 있을 때의 오차각임을 상기하라). 따라서, 로봇의 연속적인 주행을 위하여 $\frac{d\gamma_k}{dv_1}(L) = \frac{d\gamma_{k+1}}{dv_1}(0)$ 이 만족되어야 한다. 이상으로부터 다음의 세 조건식들

$$a_k = \psi_k, \quad a_k + b_k L + c_k L^2 + d_k L^3 + e_k L^4 = 0, \quad b_{k+1} = b_k + 2c_k L + 3d_k L^2 + 4e_k L^3 \quad (20)$$

이 도출된다. 즉, 첫 번째와 세 번째 구속조건들로부터 a_k 와 b_k 를 결정할 수 있으므로, 위 문제는 식이 하나(두 번째 구속조건), 미지수가 3개(c_k, d_k, e_k)인 부정정 문제(statically indeterminate problem)이다. 이를 풀기 위하여 라그랑주 승수법을 적용하되, 머리 오차각의 크기와 변화율을 최소화하도록 다음의 비용함수를 고려한다.

$$J_{\text{head}} = \int_0^L \gamma_k^2 + \left(\frac{d\gamma_k}{dv_1} \right)^2 dv_1. \quad (21)$$

따라서 $G(c_k, d_k, e_k) := a_k + b_k L + c_k L^2 + d_k L^3 + e_k L^4$ 이라 하고 λ 를 라그랑주 승수라 하면, 최적해는 $\nabla G = \lambda \nabla J_{\text{head}}$ 와 $G(c_k, d_k, e_k) = 0$ 을 만족해야 하므로

$$\frac{\partial G}{\partial c_k} \frac{\partial J_{\text{head}}}{\partial d_k} - \frac{\partial G}{\partial d_k} \frac{\partial J_{\text{head}}}{\partial c_k} = 0, \quad \frac{\partial G}{\partial d_k} \frac{\partial J_{\text{head}}}{\partial e_k} - \frac{\partial G}{\partial e_k} \frac{\partial J_{\text{head}}}{\partial d_k} = 0, \quad G(c_k, d_k, e_k) = 0 \quad (22)$$

을 얻는다. 식 (20)의 첫 번째와 세 번째 구속조건과 식 (22)의 세 수식들로부터 계수 a_k, b_k, c_k, d_k, e_k 를 구하여, 머리 오차각 $\gamma_k(v_1) = a_k + b_k v_1 + c_k v_1^2 + d_k v_1^3 + e_k v_1^4$ 을 결정한다.

다음으로, 꼬리 오차각 γ_k' 을 결정하기 위하여 $\gamma_k'(v_{n+1}) = a_k' + b_k' v_{n+1} + c_k' v_{n+1}^2 + d_k' v_{n+1}^3 + e_k' v_{n+1}^4$ 을 고려한다. 머리 오차각의 경우와 유사하게, Fig. 4(c)와 (f)를 참고하면, $v_{n+1} \rightarrow 0$ 이면 $\gamma_k' \rightarrow \psi_{k-n-1}$ 이어야 하고, $v_{n+1} \rightarrow L$ 이면 $\gamma_k' \rightarrow 0$ 이어야 하며, $v_{n+1} \rightarrow 0$ 또는 $v_{n+1} \rightarrow L$ 일 때 오차각의 변화율은 0이어

야 한다. 즉, $\gamma_k'(0) = \psi_{k-n-1}$, $\gamma_k'(L) = 0$, $\frac{d\gamma_k'}{dv_{n+1}} \Big|_{v_{n+1}=0} = \frac{d\gamma_k'}{dv_{n+1}} \Big|_{v_{n+1}=L} = 0$ 이 성립해야 하며, 이들로 부터 구속조건

$$a_k' = \psi_{k-n-1}, \quad a_k' + c_k' L^2 + d_k' L^3 + e_k' L^4 = 0, \quad b_k' = 0, \quad 2c_k' L + 3d_k' L^2 + 4e_k' L^3 = 0 \quad (23)$$

을 얻는다. 식 (23)에서 실제 미지수는 3개인 반면 실제 구속조건은 2개이므로, 역시나 비용함수 $J_{tail} = \int_0^L \gamma_k'^2 + \left(\frac{d\gamma_k'}{dv_{n+1}}\right)^2 dv_{n+1}$ 을 최소화하는 최적해를 구하여 해결한다. $G_1(c_k', d_k', e_k') := a_k' + c_k' L^2 + d_k' L^3 + e_k' L^4$, $G_2(c_k', d_k', e_k') := 2c_k' L + 3d_k' L^2 + 4e_k' L^3$ 이라 하면, 구속조건이 2개이므로 최적해는 $\nabla J_{tail} = \lambda_1 \nabla G_1 + \lambda_2 \nabla G_2$ 를 만족해야 한다. 여기서 λ_1 과 λ_2 는 라그랑주 승수들이다. 이는 세 벡터들의 선형종속성을 의미하므로, $\det[\nabla J_{tail} \quad \nabla G_1 \quad \nabla G_2] = 0$ 을 만족해야 한다. 정리하자면, 다음 3개의 구속조건들

$$\det[\nabla J_{tail} \quad \nabla G_1 \quad \nabla G_2] = 0, \quad G_1(c_k', d_k', e_k') = 0, \quad G_2(c_k', d_k', e_k') = 0 \quad (24)$$

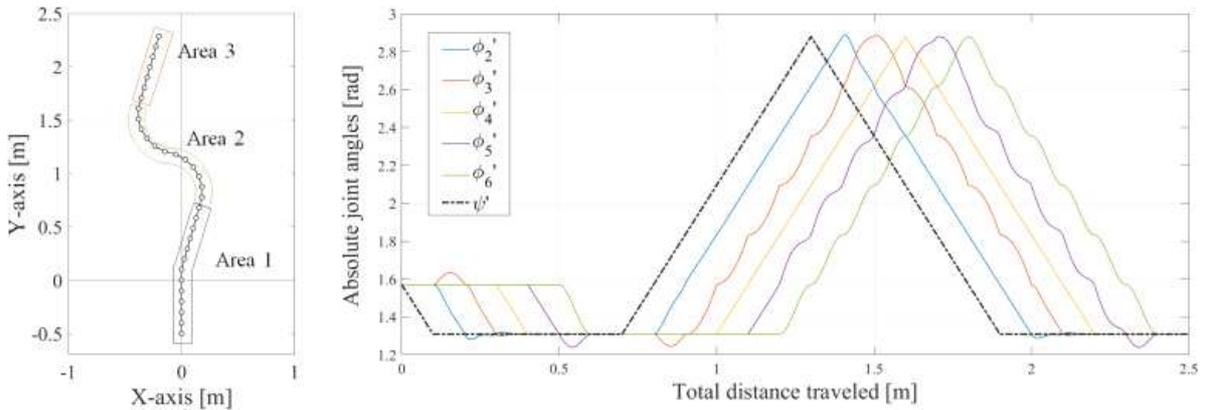
을 얻게 되며, 이와 식 (23)의 첫 번째, 세 번째 구속조건들로부터 $\gamma_k'(v_{n+1})$ 을 결정할 수 있다.

4.1.2 제어 알고리즘

지금까지의 논의를 바탕으로 SCTR의 이동경로 추종 및 자세 제어 알고리즘을 제시한다. 이를 위하여, 독립 제어변수인 첫 번째 국소 이동거리 v_1 과 경로각 정보 ψ_j 가 주어졌다고 가정한다.

최적 기동 알고리즘: 아래 단계를 따라 상대 관절각 ϕ_i 를 구하여 SCTR을 제어한다.

- a) 식 (20)과 (22)를 사용하여 최적의 머리 오차각 γ_k 를 구한다.
- b) 3.2절로부터, 모든 국소 이동거리 v_i 와 잔여거리 w_i , $i = 2, \dots, n+1$ 을 구한다.
- c) 전 단계에서 구한 v_{n+1} 과 식 (23), (24)을 사용하여, 꼬리 오차각 γ_k' 을 구한다.
- d) 결정된 γ_k' 과 식 (9)로부터, $n+2$ 번째 국소 이동거리 v_{n+2} 를 구한다.
- e) 단계 a) ~ d)에서 얻은 값들과 식 (11), (15), (18), (19)를 이용하여, 상대 관절각 ϕ_i , $i = 2, \dots, n+2$ 를 구한다.
- f) 각 관절에 부착된 모터들을 단계 e)에서 구한 ϕ_i 만큼 회전하도록 제어한다.



(a) A path with path points (b) Absolute joint and path angles with respect to the traveled distance

Fig. 5 A simulation result of SCTR controlled by the proposed optimal maneuvering algorithm

Table 1 Specification of the SCTR

| | | | |
|--|----|--|-----|
| # of body segments, n (ea) | 3 | Length of body segments, L (cm) | 10 |
| Total # of pads (ea) | 13 | Length of chains, d (cm) | 2.5 |
| # of chains between consecutive joints, N (ea) | 4 | Maximally achievable angle at the joints, ϕ_{\max} ($^{\circ}$) | 30 |

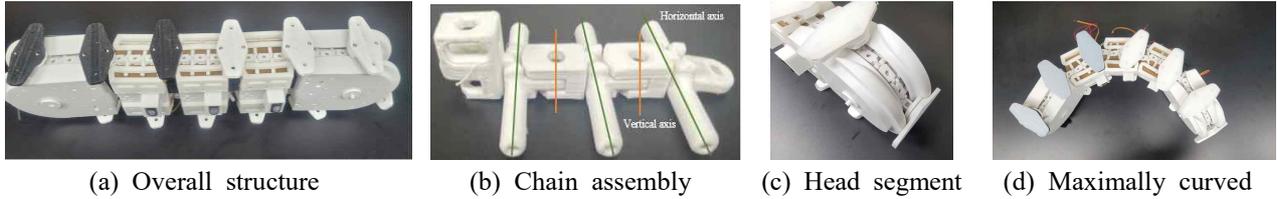


Fig. 6 SCTR implemented, with circuitry removed

4.2 모의실험

본 절에서는 Mathworks사의 MATLAB을 이용하여 모의실험을 수행한다. 첫 번째 국소 이동거리 v_1 이 단계적으로 증가할 때마다, 세부 절 4.1.2의 최적 기동 알고리즘을 적용하여 각 관절에 부착된 모터의 상대 관절각을 도출 및 제어한다. 본 모의실험에서는 몸통마디는 $n=3$ 개, 몸통마디의 길이(또는 인접한 두 경로점 사이의 거리)는 $L=0.1$ [m]로 설정하였다.

Fig. 5(a)는 모의실험에서 사용된 이동경로이다. 구역(area) 1은 하나의 변곡점만을 지나는 경우이고, 구역 2는 최대 곡률 주행⁵⁾ 및 주행 방향 전환을 다루기 위한 경우, 구역 3은 곡선 주행 후 직선 주행을 다루기 위한 경우이다. Fig. 5(b)는 5(a)의 이동경로에 대한 모의실험 결과로, 이동경로 정보에 해당하는 절대 경로각과 로봇이 주행하면서 변화하는 각각의 절대 관절각을 이동거리에 따라 나타낸 것이다. 해당 결과로부터, 절대 관절각들의 그래프가 대체적으로 절대 경로각의 그래프로부터 일정한 거리만큼 순차적으로 평행이동 되었음을 알 수 있다. 이는 본 논문에서 제안한 SCTR의 독특한 구조로부터 예상 가능한 결과이며, 결론적으로 제안된 최적 기동 알고리즘이 해당 SCTR의 경로 추종을 적절히 수행함을 알 수 있다. SCTR의 구조 상, 절대 관절각의 기준이 되는 각 관절점들이 $L=0.1$ [m]만큼 떨어져 위치함을 상기하라. 즉, 이동거리에 따른 관절각들의 그래프는 100 [mm]만큼씩 평행이동 된다. 세부 절 3.1의 시작부에서 언급하였듯이, 관절각들이 이동거리에 대하여 연속적임을 참고하라.

4.3 실제 구현 및 실험

지금까지의 논의를 바탕으로 본 절에서는 SCTR의 실제 구현 및 실험을 다루며, 이를 통하여 제안된 SCTR과 최적 기동 알고리즘의 물리적인 구현 가능성을 입증한다. 기본적으로 다수의 몸통마디를 갖도록 구현 가능하나, 본 논문에서는 3개의 몸통마디를 갖는 SCTR을 3D 프린터를 활용하여 Fig. 6과 같이 구현하였다. 특히, 유니버설 체인은 수직축과 수평축이 교차하도록 구현 및 조립되어, 로봇의 진행방향에 대하여 수직으로 회전이 가능하도록 설계되었다. SCTR의 머리와 꼬리마디 내부에 각각 부착된 DC 모터는 스프로킷 휠을 회전시키면서 스프로킷 휠과 결속된 무한케도를 밀어내는 것으로 로봇의 순방향 구동을 가능케 한다. 각 DC 모터에는 증분식 엔코더를 설치하여 v_1 을 직접적으로 측정할 수 있도록 하였다. 인접한 두 마디 사이에는 위치 제어 방식의 서보모터를 배치하여 각 관절에서의 관절각을 직접적으로 제어할 수 있도록 하였다. 또한, Fig. 6(c)와 (d)에서 볼 수 있듯이, 로봇의 접지력을 극대화시키기 위하여 각 패드에 실리콘 커버를 부착하였다. 로봇의 상세 사항은 Table 1에 수록되었으며, 해당 표로부터 $L=Nd$ 를 만족하도록 구현되었음을 알 수 있다. 즉, 실제 구현된 로봇은 가정 1을 만족한다.

5) SCTR은 그 구조로 인하여 물리적으로 가능한 관절각의 범위가 제한됨에 유의하라(가정 2 참고).

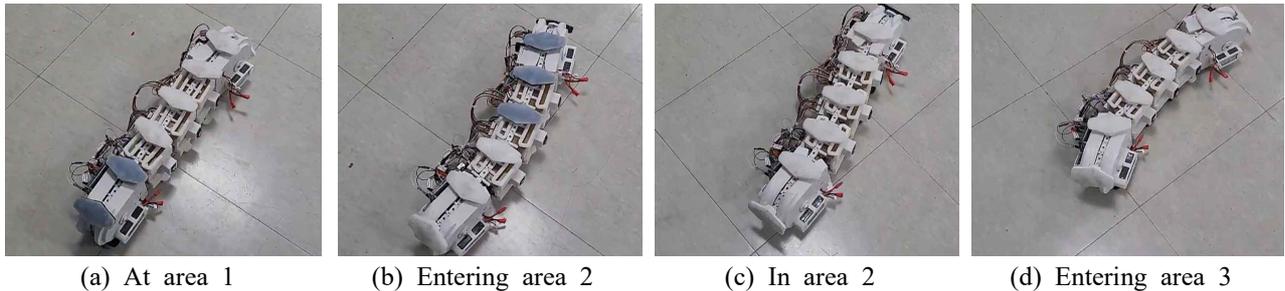


Fig. 7 An experimental result for the path given in Fig. 5(a)

Fig. 7은 Fig. 5(a)에서 제시된 주행경로와 4.1절의 최적 기동 알고리즘을 활용하여 실험한 결과이다. 구체적으로, Fig. 7(a)는 SCTR이 구역 2에 진입하기 전, Fig. 7(b)는 구역 2에 진입하는 중인 순간, Fig. 7(c)는 구역 2에서 주행 방향을 전환하는 순간(구역 2의 가운데 부분), Fig. 7(d)는 구역 3에 진입하는 순간을 촬영한 사진이다. 이로부터, 모의실험뿐만 아니라 실제 실험에서도 의도한 바와 같이 동작함을 확인할 수 있다.

5. 결론

평면상에서 주행 가능한 관절형 단일 무한궤도 로봇의 설계를 본 논문에서 제시하였다. 해당 로봇은 머리마디, 다수의 몸통마디, 꼬리마디로 구성되어 있으며, 모든 마디가 단일 무한궤도로 묶여있는 구조이다. 각 마디는 모터가 부착된 관절로 서로 연결되어 있어, 관절의 각도를 제어할 수 있다. 본 논문에서는 이러한 독특한 구조를 갖는 단일 무한궤도 로봇의 경로 추종 문제를 다루었고, 이를 해결하기 위하여 로봇의 역기구학적 관계식을 유도하였다. 그 후, 수치해석의 스플라인 보간법과 최적화의 라그랑주 승수법을 활용하여, 머리와 꼬리마디의 진동을 최소화하는 최적 기동 제어 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 로봇의 역기구학을 반복적으로 풀어, 로봇의 경로 추종을 달성한다.

한편, 본 논문에서 제안된 기법이 기구학에 기반하고 있는 관계로, 모터 및 로봇의 동역학은 고려되지 않았다. 사실 이러한 동역학 역시 본 논문의 예비 버전⁽¹⁴⁾에서 이미 유도되었다. 다만, 이를 이용하여 로봇의 (강인)경로 추종 자동제어기법을 설계하는 문제는 한 차원 더 복잡하다. 이는 해당 로봇이 불확실성 및 비선형성이 강한 시스템일 뿐만 아니라, 로봇의 자세 및 위치를 적절한 센서 등을 통해 측정해 제환제어(feedback control)하여야 하기 때문이다. 이를 위해서는 상업용 툴을 이용한 평가를 수행해보거나, 더 근원적으로는 추가적인 심도 깊은 연구가 필요하다.

마지막으로, 기계적인 요소 관점에서의 분석도 필요하다. 제안된 SCTR이 관절이 많은 관계로 마모와 파손에 취약할 수 있다. 유니버설 체인이 대표적인 예이며, 이물질 유입 시 마모가 심해지거나 심지어 파손될 우려도 있다. 이를 방지하기 위해서는 SCTR의 구조 및 재료 변경 등의 추가적인 개선 작업이 필요하다.

후 기

본 논문은 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 BK21+ 사업, 한국기술교육대학교 LINC 사업단, 2021년도 한국기술교육대학교 교수연구제 과건연구비의 지원을 받아 연구되었습니다.

참고문헌 (References)

- (1) Ministry of Emergency Management, Beijing Normal University, National Disaster Reduction Centre of China, and International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies (IFRC), 2022, *2021 Global*

- Disaster Assessment Report* (<https://www.preventionweb.net/publication/2021-global-disaster-assessment-report>), United Nations Office for Disaster Risk Reduction, Geneva, Switzerland, pp. 3~48.
- (2) Murphy, R. R., 2017, *Disaster Robotics*, The MIT Press, Cambridge, USA, pp. 1~61.
- (3) Yang, X., Zheng, L., Lü, D., Wang, J., Wang, S., Su, H., Wang, Z. and Ren, L., 2022, “The Snake-Inspired Robots: A Review,” *Assembly Automation*, Vol. 42, No. 4, pp. 567~583.
- (4) Hirose, S. and Yamada, H., 2009, “Snake-Like Robots: Machine Design of Biologically Inspired Robots [Tutorial],” *IEEE Robotics & Automation Magazine*, Vol. 16, No. 1, pp. 88~98.
- (5) Mori, M. and Hirose, S., 2001, “Development of Active Cord Mechanism ACM-R3 with Agile 3D Mobility,” *Proceedings of the 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Maui, USA, pp. 1552~1557.
- (6) Mori, M., Yamada, H. and Hirose, S., 2005, “Design and Development of Active Cord Mechanism “ACM-R3” and its 3-dimensional Locomotion Control,” *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol. 23, No. 7, pp. 886~897.
- (7) McKenna, J. C., Anhalt, D. J., Bronson, F. M., Brown, H. B., Schwerin, M., Shamma, E. and Choset, H., 2008, “Toroidal Skin Drive for Snake Robot Locomotion,” *Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Pasadena, USA, pp. 1150~1155.
- (8) Borenstein, J., Granosik, G. and Hansen, M., 2005, “The OmniTread Serpentine Robot — Design and Field Performance,” *Proceedings of the SPIE*, Vol. 5804, pp. 324~332.
- (9) Mori, M. and Hirose, S., 2006, “Locomotion of 3D Snake-like Robots: Shifting and Rolling Control of Active Cord Mechanism ACM-R3,” *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 18, No. 5, pp. 521~528.
- (10) Yamada, H. and Hirose, S., “Development of Practical 3-Dimensional Active Cord Mechanism ACM-R4,” *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 18, No. 3, pp. 305~311.
- (11) Klaassen, B. and Paap, K. L., 1999, “GMD-SNAKE2: A Snake-like Robot Driven by Wheels and a Method for Motion Control,” *Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 4, pp. 3014~3019.
- (12) Arai, M., Tanaka, Y., Hirose, S., Kuwahara, H. and Tsukui, S., 2008, “Development of “Souryu-IV” and “Souryu-V:” Serially Connected Crawler Vehicles for in-Rubble Searching Operations,” *Journal of Field Robotics*, Vol. 25, No. 1, pp. 31~65.
- (13) Siegwart, R., Nourbakhsh, I. R. and Scaramuzza, D., 2004, *Introduction to Autonomous Mobile Robots*, The MIT Press, Cambridge, USA, pp. 181~256.
- (14) Park, S. Y., Hong, J. H., Jung, D. M., Jeong, H. J., Lee, J. M., Park, S. W. and Kim, H., 2023, “Survivor Searching Robots Using Non-Slip Snake Robots,” *Proceedings of the 13th KSME Student Creative Design Competition* (<http://kscdc.ksme.or.kr/past.asp>), Seoul, Republic of Korea, pp. 1~39.
- (15) Craig, J., 2017, *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*, Pearson, London, UK, pp. 1~456.
- (16) Chapra, S. C., 2017, *Applied Numerical Methods with MATLAB: For Engineers and Scientists*, McGrawHill, New York, USA, pp. 1~720.

자전거 전도전복사고 예방을 위한 전자식 ABS[§]

박상환* · 박승표* · 염홍철* · 민종호* · 윤주일*[†]

* 한성대학교 기계전자공학부

Electronic ABS for Preventing Bicycle Overturn Accident

Sang-Hwan Park*, Seung-Pyo Park*, Hong-Chul Youm*, Jong-Ho Min* and Juil Yoon*[†]

* School of Mechanical and Electronic Engineering, Hansung Univ.

(Received December 31, 2023 ; Revised April 3, 2024 ; Accepted April 8, 2024)

Key Words: Anti-lock Brake System(잠김 방지 브레이크 시스템), Near Field Communication(근거리 무선 통신), Road Friction Coefficient(노면마찰계수), Hall Sensor(홀센서)

초록: 자전거 사용 문화의 확산에 따라 자전거 전도전복사고의 예방에 대한 관심이 커지고 있다. 이를 해결하기 위한 방안으로 자전거 급제동 시 전도전복사고를 방지하고, 효과적인 제동거리 조절 및 도난 방지를 목적으로 하는 전자식 ABS 개발에 대한 연구를 수행하였다. 전자식 ABS 시스템은 바퀴 슬립을 실시간으로 감지하고, 분석하여 노면 상태를 판단한다. 실험을 통해 노면에 따른 브레이크의 작동에 최적화하여 긴급상황에서 자전거 제어를 효과적으로 구현하였다. 더불어, NFC 기술을 활용하여 자전거 도난을 방지하는 전자식 잠금 시스템을 통합하였다. 이로써 자전거의 안전성과 보안성을 강화하는 통합 시스템을 제안하였다.

Abstract: This study developed an electronic ABS for the purpose of preventing overturning accidents when a bicycle suddenly brakes, controlling effective braking distance, and preventing theft. The electronic ABS system detects and analyzes wheel slip in real time to determine road surface conditions. Through experiments, we optimized the operation of the brakes according to the road surface to effectively implement bicycle control in emergency situations. In addition, an electronic locking system that uses NFC technology to prevent bicycle theft has been integrated. This proposed an integrated system that enhances the safety and security of bicycles.

1. 서론

현재 환경에 대한 관심도가 증가하면서 친환경 운행 수단으로 자전거 이용 인구가 증가하고 있다. 서울시 공공자전거 따릉이의 정성적 이용 행태 분석 연구에 따르면 공공자전거 “따릉이”는 2015년 도입 이후 2021년 기준 회원수 325만명, 일평균 이용횟수가 8만 7천건으로 크게 성장하였다.⁽¹⁾ 이러한 자전거 사용 문화와 산업의 성장세에 비해 관련된 도시 인프라가 부족하여 자전거와 관련된 안전사고가 꾸준히 발생하고 있다. 도로교통공단의 보도자료에 따르면 2018년부터 2022년 사이 5년간 자전거 교통사고 분석한 결과 자전거 승차 중에 발생한 사망자가 959명, 부상자는 57,706명으로 나타나 자전거 이용자의 안전이 위협받고 있다.⁽²⁾ 이 중 행정안전부의 ‘2022년(2021년 기준) 자전거 이용 현황’에 따르면 2021년 자전거 단독 전도전복사고 부상자 수는 67명, 사망자 수는 10명으로 14.3%의 유독 높은 치사율을 보였다.⁽³⁾

§ 이 논문은 대한기계학회 제13회 전국학생설계경진대회(2023. 10. 21., 고려대학교) 발표 논문임.

† Corresponding Author, juilyoon@hansung.ac.kr

© 2024 The Korean Society of Mechanical Engineers

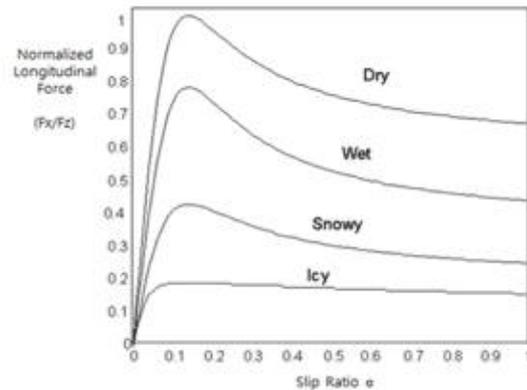


Fig. 1 Friction and slip ratio of various road conditions⁽⁴⁾

또한 자전거에 대한 수요와 운행이 증가하면서 자전거에 대한 범죄 사고도 증가하고 있는데, 특히 도난 사건의 경우, 경찰청 자료의 ‘절도 수법’에 따르면 2021년 자전거 절도 건수는 12,148건이 있었고 그중 검거 건수는 4,358건으로 검거율이 전체의 36%도 채 되지 않는다.⁽⁵⁾ 따라서 자전거 전도전복사고의 예방과 자전거 도난 사고 방지에 대한 대책 마련이 필요하다.

본 논문의 연구는 이러한 전도전복사고의 원인으로써 자전거 브레이크 작동 시 바퀴가 완전히 잠기어 미끄러짐을 유발하는 lock-up 현상¹⁾을 지목하고 이를 예방하기 위한 전자식 ABS(anti-lock braking system) 장치를 개발하였다. 더 나아가, 기존 ABS의 노면에 따른 작동의 차이를 두지 않는 문제점을 보완하여 자전거 운행 중 노면을 실시간으로 분석, 그 반응을 다르게 한다. 브레이크의 조작 의사를 힘 인식 센서인 로드 셀 센서로 측정하여 분석한 노면의 변화를 기반으로 최적화된 ABS 작동을 적용한다. 이를 통해 제동거리를 줄여 전도전복사고를 예방하는 목적을 달성한다. 또한 도난 방지를 위하여 자전거 중앙부에 있는 NFC 센서를 통한 전자식 자전거 보안 장치 및 제어 알고리즘을 개발하였다. 이로써 자전거의 안전성과 보안성을 강화하는 통합 시스템을 개발하여 자전거 이용자의 사고 예방을 강화할 것으로 예상된다.

2. ABS 작동 메커니즘

2.1 기존 제품 및 특허 분석

기존의 ABS 작동 방식은 사용자가 풀 제동 시에 위급한 상황이라고 판단, ABS를 작동하여 사용자가 풀 브레이킹을 하지 못하는 경우 작동이 저하된다. 또한 기존 제품은 노면의 차이를 두지 않고 ABS 작동을 하는데 실제 노면은 노면에 따라 바퀴와 노면의 슬립률(slip ratio)이 다르므로 각각의 차이를 두고 ABS의 반응을 다르게 하는 것이 효과적이다. 본 연구에서 개발한 ABS는 풀 브레이킹 시 무조건 작동하는 기존 제품과는 달리 풀 브레이킹까지의 시간이 0.5초 이내 인가로 구분하여 ABS가 작동하는 시스템을 가진다. 따라서 기존 제품보다 효율적인 ABS 작동이 가능하다. 또한 Fig. 1의 자율 주행 자동차의 노면 마찰계수 추정 장치 및 방법 특허에 기초하여 다양한 노면에 따른 슬립률이 각기 다를 것을 확인하고, 일반 아스팔트 노면과 젖은 노면에서의 아스팔트 두 노면과 바퀴 간의 슬립률에 따라 노면의 상황을 실시간으로 분석하고 ABS의 가동을 다르게 하는 시스템을 구축하였다.

2.2 본 연구에서 제안된 ABS 기본 원리

자전거가 급제동 시 자전거의 바퀴는 완전히 정지한다. 이때 자전거의 바퀴에 작용하는 마찰력은 최대

1) Lock-up 현상: 운전자가 갑작스럽게 브레이크를 밟으면 제동력(움직이는 자동차를 정지시키는 타이어와 노면과의 마찰력)이 높아져 일부 바퀴가 멈추는 잠김(lock-up) 현상 발생

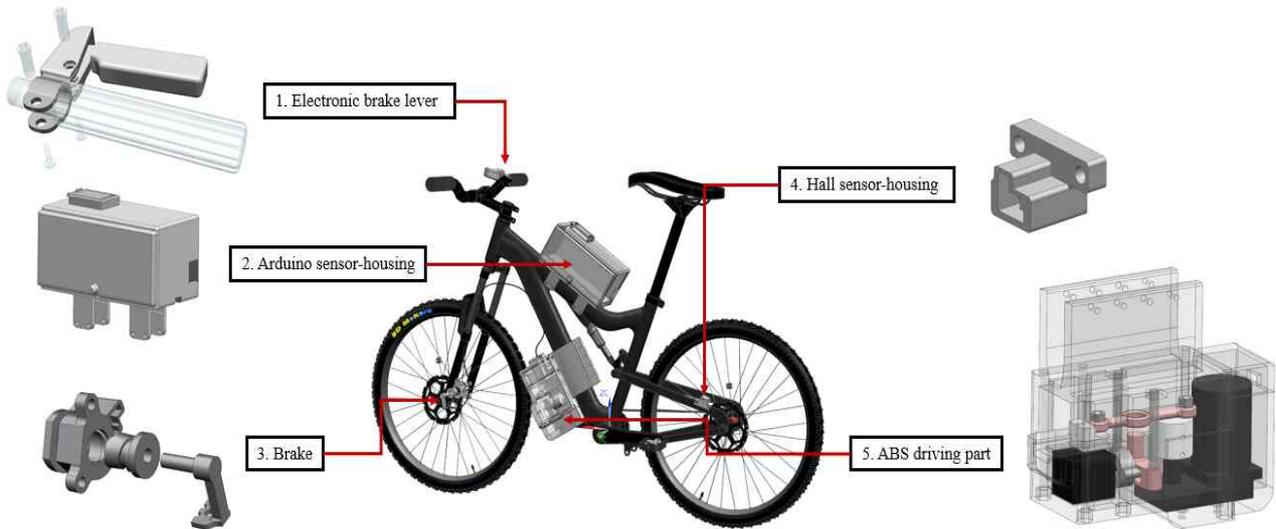


Fig. 2 The entire ABS system 3D modeling

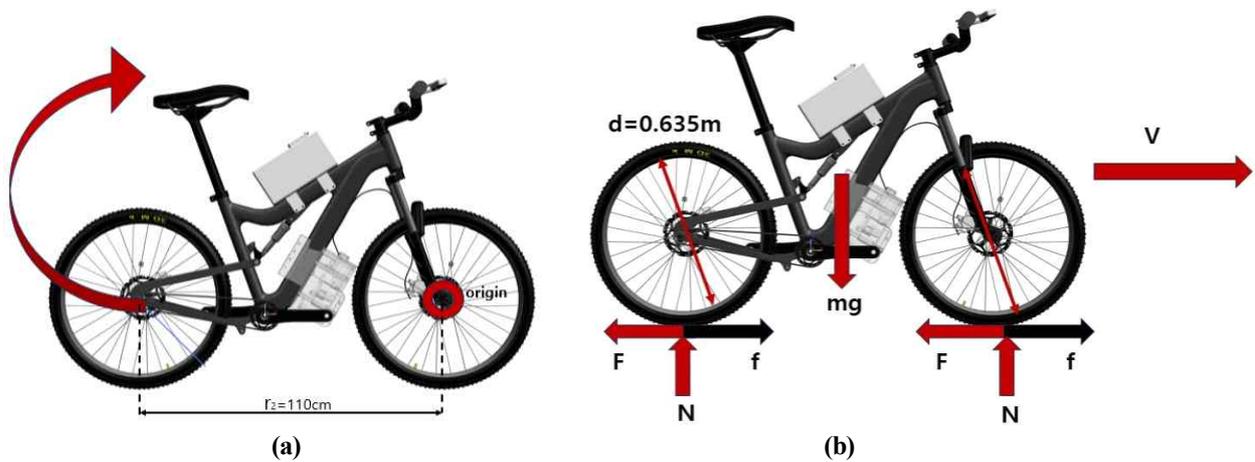


Fig. 3 (a) Bicycle torque free-body diagram; (b) bicycle's linear motion free-body diagram

정지마찰력에서 운동마찰력으로 바뀌게 된다. 이때 브레이크를 이용하여 바퀴의 잠김을 조절한다면 바퀴에 작용하는 마찰력이 최대정지마찰력으로 작용하게 만들 수 있다. Fig. 2에서는 ABS 구동부와 브레이크가 이러한 역할을 하며 이 장치를 통해 자전거의 제동거리를 줄일 수 있다. 또한 홀 센서하우징이 노면 변화를 감지, 전자식 브레이크 레버가 급제동 상황을 인식하여 센서 하우징 안에 있는 아두이노가 ABS를 제어한다.

2.3 ABS 설계 방법

상세 설계를 위해 20 km/h로 주행 중 급정지 시 제동거리 5 m 이하, 전복 각도 90° 미만으로 설계조건을 설정하고, 계산 조건으로는 자전거의 속도(v)는 20 km/h, 자전거의 질량(m_b)은 17 kg, 자전거 탑승자의 질량(m_p)은 60 kg, 그리고 자전거의 바퀴 반경(r)은 0.3175 m를 적용하였다. 이를 통해 ABS 없이 급정거 시 제동거리와 전복 각도를 계산하였다. Fig. 3(b)의 운동 상황에서 자전거의 직선 운동 에너지는 식 (1)이며 1,188.27 Nm로 계산된다. 직선 운동 시의 운동 에너지가 회전 운동으로 전환된 후에도 보존됨을 이용하여 자전거가 급정지하여 Fig. 3(a)와 같이 앞바퀴를 원점으로 회전 운동하고 회전 운동이 짧은 시간 동안 이뤄진다고 가정할 때 ω 계산식인 식 (2)의 ω 는 5.05 rad/s이다. 즉 회전각이 1초에 289.37°

Table 1 Coefficient of friction values for clean surfaces⁽⁶⁾

| Wheel | Surface | Coefficient of kinetic friction |
|--------|---------------|---------------------------------|
| Rubber | Asphalt (dry) | 0.5 - 0.8 |
| Rubber | Asphalt (wet) | 0.25 - 0.75 |

가 나옴을 알 수 있다. 이를 통해 설정 조건에서 자전거는 ABS 없이 급정거 시 전복됨을 확인하였다.

$$KE = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}I\omega^2 = \frac{1}{2}mr_2^2\omega^2 \quad (1)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{2 \times KE}{mr_2^2}} \quad (2)$$

Table 1에서 아스팔트의 노면 상태에 따라 바퀴와 노면 사이의 마찰계수가 변화하여 제동거리에 영향을 준다는 것을 확인할 수 있으며, 또한 제동 시 자전거의 뒷바퀴는 림 브레이크 방식을 통해 완전 정지가 가능하다. 이를 통해 젖은 아스팔트 노면과 마른 아스팔트 노면에서의 제동거리를 자전거 운동 에너지와 바퀴의 토크 값을 통해 추정할 수 있다. 상세 설계를 위한 계산 조건으로는 자전거와 탑승자의 총질량(m)이 77 kg, 이에 따라 자전거의 바퀴 각각에 작용하는 하중(N)은 377.69 N, 타이어와 노면 사이의 마찰계수는 마른 아스팔트(μ_s)는 0.8이며 젖은 아스팔트(μ_d)는 0.5이다.

마른 아스팔트 노면에서 마찰계수에 따라 마찰력 $F = 302.15$ N이 작용한다. 이것과 자전거 바퀴 반지름을 이용하여 제동을 위해 바퀴에 가해지는 돌림힘 $\tau_B = 95.93$ Nm을 계산할 수 있다. 또한, 젖은 아스팔트 노면에서 제동을 위한 돌림힘 $\tau_B = 59.96$ Nm도 계산할 수 있다. 상대적으로 젖은 아스팔트 노면에서의 제동력이 작기에 같은 속도에서 더욱 긴 제동거리를 가질 것이다. 위 상황을 바탕으로 ABS 설계는 앞바퀴의 토크 값과 바퀴의 잠김 횡수를 조절하여 제동거리와 전복 각도를 설계조건에 만족시킨다.

2.4 ABS 설계

ABS의 구동부는 빠르고 반복적인 움직임을 위해 Fig. 4(left top)과 같이 크랭크-슬라이드 기구를 사용하였고, 브레이크는 Fig. 4(left bottom)에서 볼 수 있듯이 회전 운동을 수직운동을 변환하기 위해 나사 구조를 사용하여 설계하였다. 설계를 통한 예상 제동거리를 구하기 위해 브레이크에서 작용하는 수직력 Q를 계산하였다. 계산 조건으로는 ABS 모터의 구동 토크(τ_D)가 4 Nm이며 ABS 크랭크 링크의 길이($r_1 = 0.015$ m)는 0.015 m, 브레이크 레버의 길이(r)는 0.04 m이다. 또한 나사 상세 설계를 위해 브레이크 나사의 유효 지름(d_m)은 0.0225 m, 나사산의 마찰계수(μ_s)는 0.35, 나사의 줄 수(n)가 1, 피치를 0.02 m로 설정하였다.

모터의 돌림힘과 크랭크의 길이를 통해 266.67 Nm의 브레이크 나사에 가해지는 힘 F_3 을 계산하고, 브레이크 레버 길이 r을 통해 나사에 가해지는 회전력 τ 를 식 (3)에 의해 10.67 Nm으로 계산된다. 추가로 설계조건을 통해 나사의 리드각 λ 가 15.8°, 마찰각 ρ 는 19.29°로 계산한 뒤, 이를 모두 나사의 축방향하중 Q에 대해 정리한 식 (4)에 대입한 결과, 브레이크에서 디스크에 1,349.54 N의 수직력 Q가 가해지는 것을 확인하였다.

$$\tau = F_3 \times r = \frac{d_m}{2} \times Q \times \tan(\lambda + \rho) \quad (3)$$

$$Q = \frac{2\tau}{d_m \cdot \tan(\lambda + \rho)} \quad (4)$$

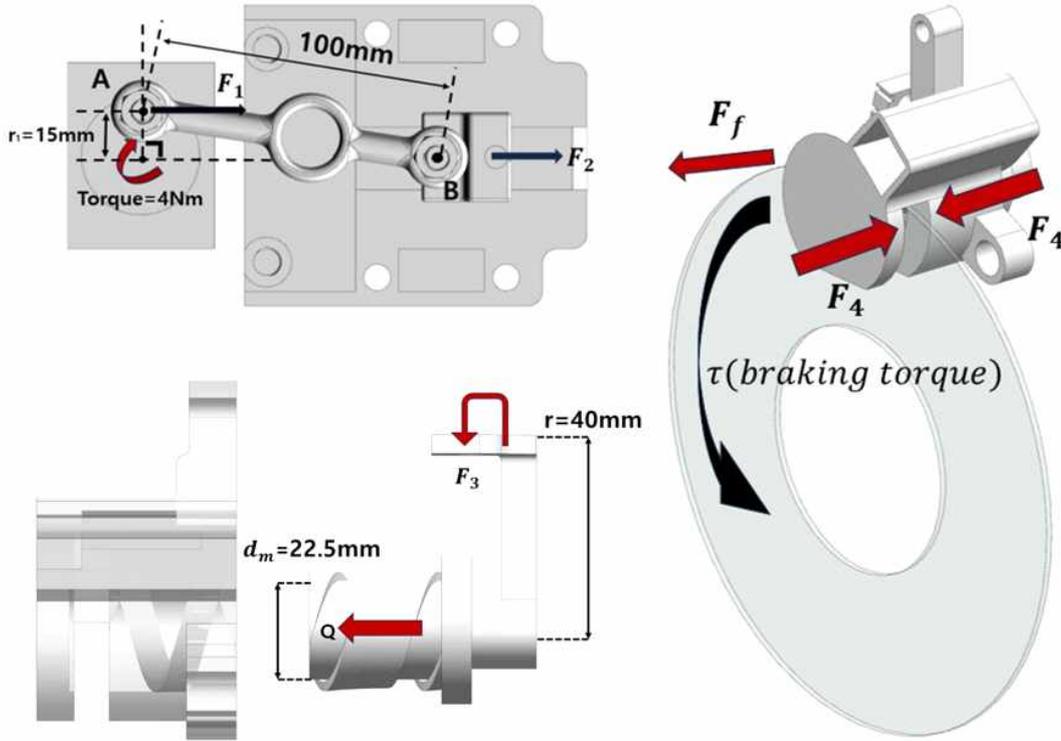


Fig. 4 Slider-crank mechanism of ABS drive (left top); screw thread on brake (left bottom); forces applied to disc brakes (right)

제동 중인 디스크 브레이크에서는 Fig. 4(right)에서 볼 수 있듯 F_4, F_f 등의 힘이 가해진다. 앞서 계산한 수직력 Q 와 바퀴의 토크 값을 이용하여 ABS가 작동할 때의 제동거리를 계산한다. 설계를 위해 브레이크 패드의 마찰계수($\mu_b = 0.39$)를 0.39, 브레이크 로터의 외측 반지름(r_o)이 0.09 m, 안쪽 반지름(r_i)을 0.07 m, 초기 속도(v_0)와 각속도(ω) 모두 앞선 계산과 같이 5.56 m/s와 5.05 rad/s, 속도(v)와 초기 변위(s)는 모두 0으로 설정하였다.

수직력 Q 와 브레이크 패드의 마찰계수로 인해 브레이크 로터 양면에 각각 526.32 N의 힘이 작용하여 총 1,052.64 N의 마찰력이 발생하고, 식 (5)는 브레이크의 τ 계산식으로 브레이크 로터에 84.21 Nm의 돌림힘(τ_f)이 발생한다. 식 (6)은 돌림힘과 운동 에너지와의 상관관계를 통해 앞바퀴 ABS와 뒷바퀴 브레이크로 인해 발생하는 돌림힘이 작용하는 동안의 각도 θ 를 계산하는 식으로 θ 는 6.6 rad로 계산되었다. θ 값과 바퀴의 각속도를 통해 ABS가 작동하는 동안의 시간 t 가 0.38초라는 것을 계산하여, 이를 통해 ABS가 작동한 후 정지하기까지의 운동을 등가속도 직선 운동으로 해석하여 자전거가 제동 시의 가속도(a)가 14.75 m/s^2 , 총 이동 거리가 1.1 m인 것을 알아내었다. 설계 결과 ABS를 통해 자전거가 마른 아스팔트에서 급정지 시 0.38초 동안 1.1 m의 제동거리를 가지며 정지하여 전복 사고의 위험을 예방한다. 이후 노면 주행 실험을 통해 노면에 따라 ABS 구동부 안에 모터의 rpm 값을 조정하여 제동거리가 가장 짧은 rpm 값을 설정하여 ABS의 설계를 마친다.

$$\tau_f = F_f \times \frac{(r_o + r_i)}{2} \tag{5}$$

$$\theta = KE / (\tau_f + \tau_B) \tag{6}$$

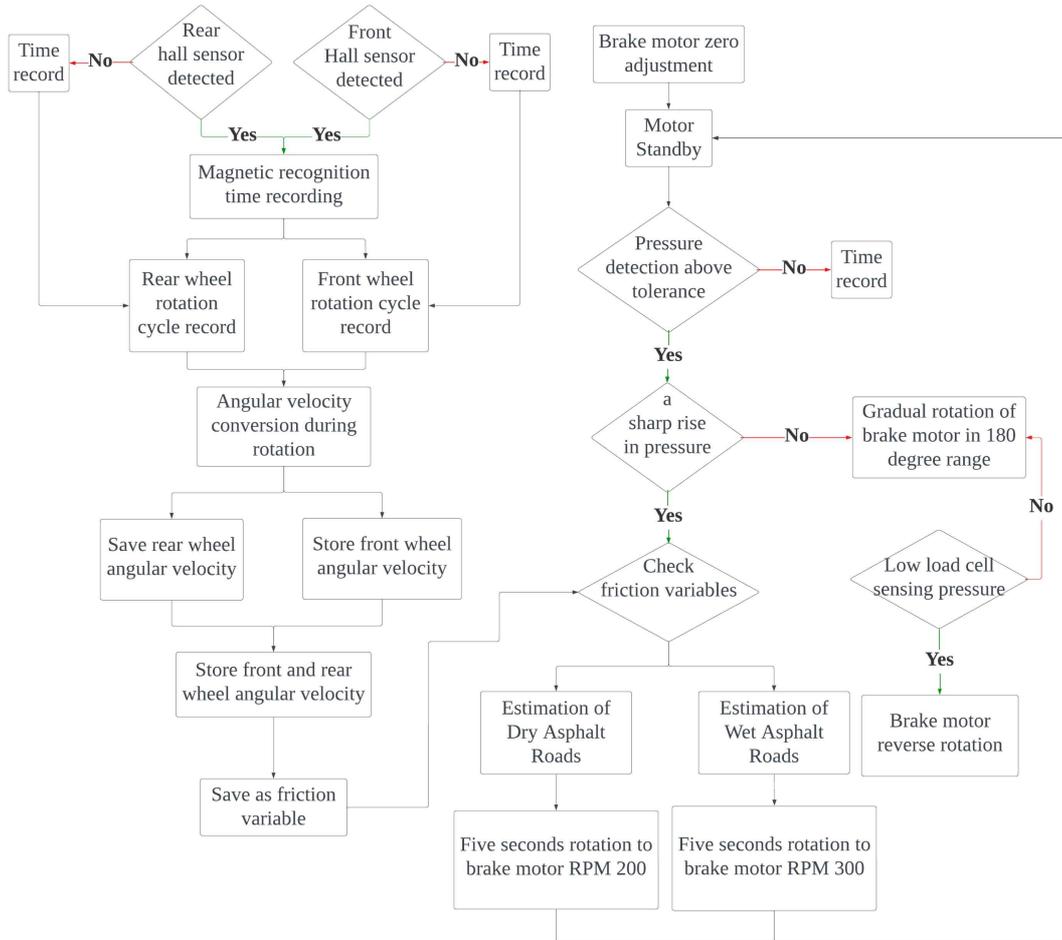


Fig. 5 Program algorithm diagram

2.5 ABS 소프트웨어 구성

대략적인 ABS의 구동 과정은 Fig. 5에 정리되어 있다. 먼저 장치가 장착된 자전거의 주행이 시작되면 각 바퀴에 설치한 홀센서와 자석을 이용하여 바퀴 회전 주기를 측정하고, 이를 회전 각속도로 변환하여 앞, 뒷바퀴 각속도의 3초 평균값의 차를 마찰 변수 데이터로 저장한다. 그와 동시에 하중을 감지하는 로드 셀 센서를 통해 사용자가 브레이크 손잡이를 잡는 힘을 측정한다. 사용자가 의도하지 않은 작동을 막기 위하여 오차 범위를 설정하고 센서에 가해진 하중이 오차범위를 넘길 때 장치가 작동하게 된다. 센서의 하중 값이 대기 상태에서 최대 강도까지 0.5 sec 이상의 시간이 걸리거나 최대하중까지 도달하지 못할 경우, 자전거가 감속 중이라고 판단하여 모터 영점의 0°에서 180°의 가동 범위를 10으로 나눠 단계 당 18°를 회전하는 전자식 브레이크 시스템이 작동한다. 센서 하중 값이 대기 상태에서 최대 강도까지 0.5 sec 이내로 도달하면 급정지 상황이라고 인식하여 마찰 변수 데이터를 통해 현재 노면 상황을 판단하여 이에 맞는 ABS 작동 빈도로 브레이크 모터를 회전시킨 후, 다시 대기 상태로 전환한다.

자전거 잠금 시스템의 구동 과정의 경우, 대기 상태의 RFID 패드에 RFID 태그가 근접하면 리더기가 태그의 고유 아이디 데이터를 읽는다. 읽힌 데이터와 등록된 데이터가 일치하면 controller에서 피에조 버저를 통해 아이디가 일치하는 것을 알림음으로 표시한다. 사용자에게 키 인식 결과를 알린 후, ABS 구동부의 홀센서가 크랭크축에 있는 DC 모터를 180도 회전을 시켜 브레이크를 최대 강도로 작동시킨다. 그 후 lock 스텝 모터가 90도 회전하는 것으로 크랭크축을 고정하여 자전거를 잠근다. 그리고 다시 리더기에 등록된 고유 아이디의 태그를 접촉하면 버저에서 아이디 인식 결과를 알리고 ABS 구동부에 신호를 주어서 잠금 과정을 역으로 진행하여 잠금을 해제한다.

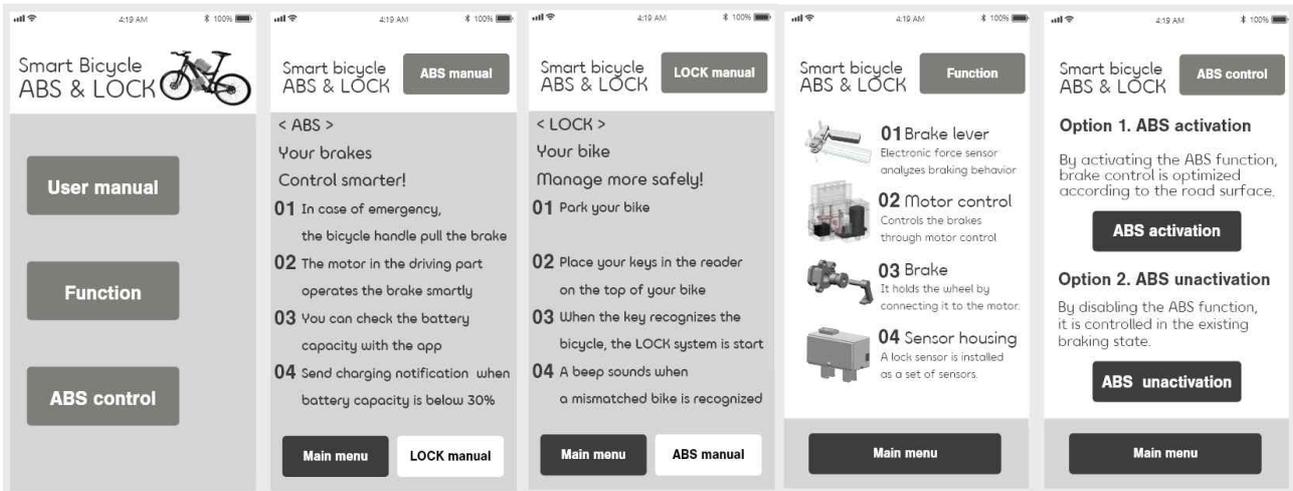


Fig. 6 UI interactive prototype

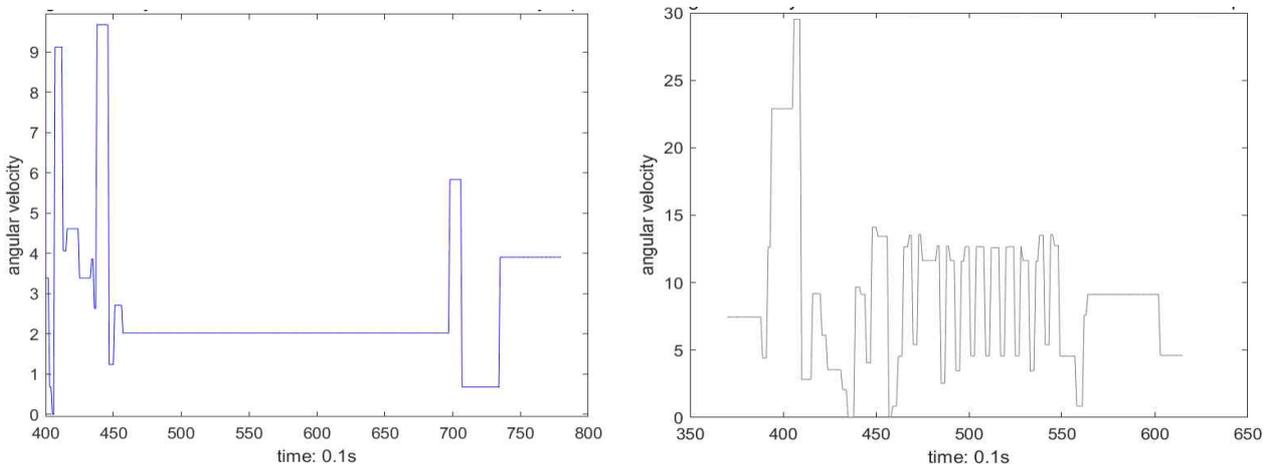


Fig. 7 Angular velocity difference between wheels: dry asphalt (left); wet asphalt (right)

2.6 사용자 인터페이스 구성

자전거 ABS 시스템과 잠금장치 시스템을 사용자가 더 쉽게 이해하고 사용할 수 있도록 애플리케이션을 제작하여 연동할 수 있는 기능을 고안하였다. 이를 위해 Fig. 6의 UI 인터랙티브 프로토타입을 제시하였다. 스마트 자전거의 사용 설명서를 통해 사용자들에게 기능 및 특징을 더욱 쉽게 전달한다. 또한, ABS 제어기능을 추가하여 사용자가 ABS 기능을 수동으로 제어할 수 있도록 한다.

3. 실험 및 결과

3.1 노면에 따른 자전거 앞/뒷바퀴 각속도 차이 측정 실험

자전거 주행 시 노면의 상태에 따라 자전거 앞/뒷바퀴의 각속도 차이가 있음을 측정하였다. 실험 조건은 마른 아스팔트와 젖은 아스팔트 두 가지 경우에서 자전거 속도 20 km/h, 온도 23℃일 때 측정하였다. 실험 방법은 앞/뒷바퀴에 자석을 부착 후 홀센서를 이용하여 바퀴가 한번 도는 시간을 측정하였다. 그다음 각속도의 차이를 계산하였다. 실험 결과는 Fig. 7의 마른 아스팔트와 젖은 아스팔트 각각의 상황에 대한 각속도 차이를 그래프로 표현하였다. 마른 아스팔트의 경우 속도가 일정해지는 구간에서 각속도 차이 평균값은 약 2.65 rad/s이고 젖은 아스팔트의 경우 각속도 차이 평균값은 약 8.93 rad/s이다. 3번의 반복된 실험 결과 유사한 값들을 도출하였다. 마른 아스팔트와 젖은 아스팔트에서 값의 차이는 약 6.26

Table 2 ABS test results according to rpm

| ABS status | Non-operational | Operational | | | Condition | |
|---|-----------------|-------------|---------|---------|-------------|-----------|
| | | 100 rpm | 200 rpm | 300 rpm | Temperature | Speed |
| Dry road surface | 1.33 m | 1.24 m | 1.17 m | 1.16 m | 21.5°C | 20.3 km/h |
| Wet road surface | 1.72 m | 1.52 m | 1.36 m | 1.18 m | 21.5°C | 19.8 km/h |
| Sidewalk block (concrete) road surface | 1.23 m | 1.15 m | 1.08 m | 1.04 m | 7°C | 19.5 km/h |
| Dry dirt road surface | 1.76 m | 1.60 m | 1.42 m | 1.25 m | 7°C | 20.1 km/h |

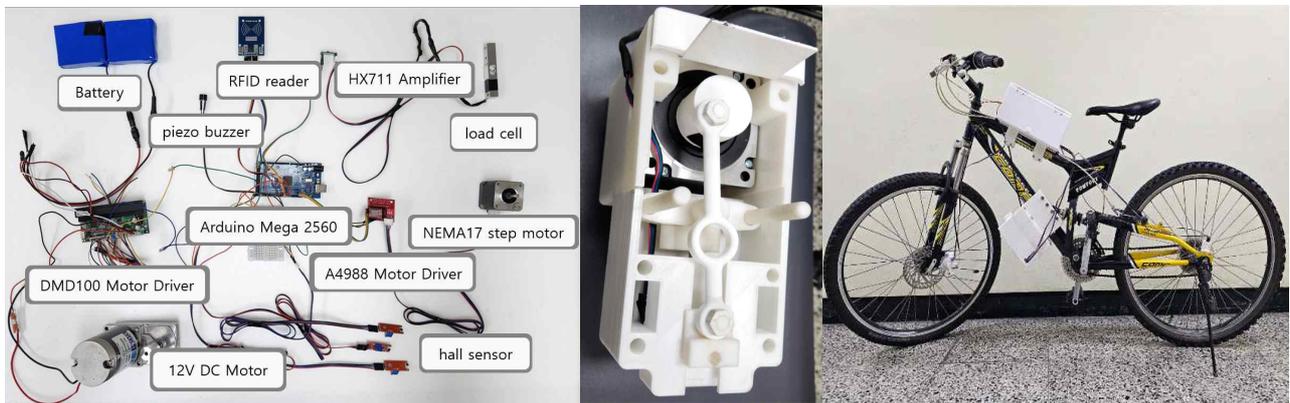


Fig. 8 Sensor and motor configuration details (left); ABS prototype detail photo (middle); completed prototype (right)

rad/s이므로 노면의 상태를 파악할 수 있다. 실험의 내용을 바탕으로 실시간으로 노면의 변화를 측정하고 저장하는 시스템을 구축하였다.

3.2 다양한 노면에서 ABS 구동부 rpm에 따른 자전거 제동거리 실험

Table 2는 마른 아스팔트와 젖은 아스팔트 환경, 그리고 보도블록과 흙 노면에서의 ABS를 사용하지 않은 일반적인 제동과 ABS 작동 RPM에 따른 제동 거리를 측정하였다. 브레이크 작동을 시킨 곳부터 정지한 곳의 거리를 측정하였고 GEOID-속도 센서와 trimmOne LITE 사이클링 컴퓨터로 제동 시의 속도를 측정하였다. 실험 결과, 마른 아스팔트 상에서는 ABS를 사용하지 않았을 때의 정지거리보다 ABS 작동 시 모터 RPM이 증가함에 따라 정지거리가 감소하는 경향을 보였다. 그러나 모터 RPM이 300인 경우에는 약간의 찍나이프 현상이 발생하였다. 젖은 아스팔트 상에서는 모터 RPM 300에서도 안정적으로 제동거리가 감소하였다. 이에 따라 마른 아스팔트에서 최적은 200 rpm이며, 젖은 아스팔트에서는 300 rpm으로 결정되었다. 또한 보도블록과 흙길 환경에서도 동일한 실험을 시행한 결과 ABS 작동에 따라 제동거리가 감소하는 것을 확인하였다.

3.3 결과

Fig. 8(middle)은 ABS 구동부의 실제 프로토타입이다. 이 프로토타입을 활용하여 ABS 구동 RPM을 조절할 수 있다. Fig. 8(left)는 센서 모터 구성 상세한 도식을 보여주는 사진이다. 이 센서를 통해 필요한 정보를 얻고 효과적으로 사용한다. Fig. 8(right)은 ABS를 착용한 자전거의 완성된 프로토타입이다.

4. 결 론

본 연구를 통하여 자전거 전도전복사고와 도난 사고를 예방하기 위한 전자식 ABS 모듈을 개발하였다. 이 시스템 기존 제품의 차별성을 확보하기 위해 노면의 상태 변화를 감지하고 이에 따라 ABS 작동 방식을 동적으로 조절하도록 구현하였다. 실험을 통해 노면의 차이를 식별하고 분석하여, 최적의 브레이크 제어 방식을 제시하였다. 따라서 제품의 목적인 자전거 전도전복사고 방지와 제동거리 감소를 효과적으로 달성하였다. 그뿐만 아니라, 자전거 도난 사고를 방지하기 위하여 NFC 전자식 잠금 시스템을 통합하였다. 사용자의 ID 카드를 리더기에 접촉하면 브레이크 상태 유지, 잠금장치가 활성화하며 효과적인 도난 방지 기능을 가질 수 있다. 이로써 자전거의 안전성과 보안성을 강화하는 통합 시스템을 개발하였다. 또한, 본 논문에서의 총 제작 비용은 231,347원 가량이 소비되었고, 양산 시에는 이보다 더 적은 수준의 제조 비용이 들 것으로 예상된다. 따라서 기술적, 경제적으로 소비자에게 충분한 가치를 가진 제품이 될 수 있을 것이다. 본 연구의 결과는 증가하는 자전거 관련 사고에 대한 종합적이고 효과적인 대응책으로서, 자전거 이용자들의 안전과 보안을 강화하는 데 이바지하며, 미래의 자전거 관련 사고 예방에 유용할 것으로 기대한다.

후 기

본 연구는 한성대학교 학술연구비 지원 과제로 이에 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌 (References)

- (1) Ok, N. K., Park, J. H. and Ko, J. H., 2021, "Qualitative Analysis of Seoul Public Bike Usage Patterns," *Journal of Korean Society of Transportation*, Vol. 18, No. 6, pp. 52~59.
- (2) Park, H. S., 2023, *959 Traffic Fatalities in 5 Years While Riding a Bicycle* (https://www.koroad.or.kr/main/board/6/88849/board_view.do?&cp=2&listType=list&bdOpenYn=Y&bdNoticeYn=N), KoROAD, Gangwon, Republic of Korea (in Korean).
- (3) Park, J. H., 2022, *Current Status of Bicycle Use in 2022 (as of 2021)* (https://www.mois.go.kr/frt/bbs/type001/commonSelectBoardArticle.do?bbsId=BBSMSTR_00000000014&nttId=95018), Ministry of the Interior and Safety, Sejong, Republic of Korea (in Korean).
- (4) Korean National Police Agency, 2021, *2021 Crime Statistics from Korean National Police Agency* (https://www.police.go.kr/user/bbs/BD_selectBbsList.do?q_bbsCode=1115&estnColumn2=%EB%85%84%EB%8F%84&q_searchKeyTy=estnColumn1__1001&q_searchVal=2021), Korean National Police Agency, Seoul, Republic of Korea (in Korean).
- (5) Hwang, Y. H. and Kang, B. J., 2017, *Apparatus and Method for Estimating Friction Coefficient of Road Surface*, Patent No. 10-2017-0057480, Korean Intellectual Property Office, Daejeon, Republic of Korea.
- (6) Kurtus, R., 2005, *Coefficient of Friction Values for Clean Surfaces* ([web.archive.org/web/20070929005725/http://www.school-for-champions.com/science/frictioncoeff.htm](http://www.school-for-champions.com/science/frictioncoeff.htm)), School for Champions.

스마트 방법 차수 시스템 개발§

강 찬* · 한태웅* · 전형준* · 박근영* · 이승훈* · 김영수*†

* 부산대학교 기계공학부

Design of Smart Security Window with Water Barrier System

Chan Kang*, Tae-Woong Han*, Hyeong-Jun Jeon*,
Geun-Young Park*, Seung-Hun Lee* and Youngsoo Kim*†

* School of Mechanical Engineering, Pusan National University

(Received February 5, 2024 ; Revised April 4, 2024 ; Accepted April 5, 2024)

Key Words: Water Barrier(차수막), Security Window(방법창)

초록: 본 연구에서는 자동으로 작동하는 차수막과 개폐식 방법창으로 구성된 스마트 방법 차수 시스템을 개발하였다. 제안한 스마트 방법 차수 시스템은 창문에 설치되며, 반지하 가구의 침수 피해를 방지하고 반지하 거주자에게 창문을 통한 탈출로를 제공하는데 목적이 있다. 시스템의 구조는 크게 알루미늄 프로파일을 이용한 견고한 외부 프레임, 물의 유입을 막는 타포린 차수막, 슬라이딩 메커니즘 기반의 방법창으로 구성하였다. 우천 시 센서가 빗물을 감지하면 리드 스크류 모터가 차수막을 적정 위치까지 전개하고, 알루미늄 프로파일로 제작된 바이스가 차수막을 압착시켜 수압 및 여러 외란에 대한 방수를 유지한다. 또한 실내의 침수 상황을 수위 센서가 감지하면 방법창의 잠금장치가 해제되어 탈출 도움을 받을 수 있어 방법창을 통한 탈출을 할 수 있다. 설계 과정에서 역학 해석을 통해 모터 및 구동부 요소를 선정하였으며, 제작 및 실험을 통해 각 기능의 성능을 검증하였다. 제안한 스마트 방법 차수 시스템은 빗물의 유입을 막고 거주자가 탈출할 수 있을 뿐만 아니라 우천 시 차수판을 매번 직접 설치해야 하는 번거로움도 해소할 수 있는 대안이며, 효과적으로 활용되어 침수 피해를 줄일 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract: This design is smart system that combines an automatically operated barrier and an open-closed security window. The purpose of design is to prevent flooding damage to semi-underground households and to provide escape routes to inner residents in the flood. When the sensor detects rainwater, the lead screw motor deploys the water barrier to a specific position, and a vice made of aluminum profile compresses the water barrier. This product is expected to reduce the hassle of installing the water barrier, prevent the inflow of rainwater, and reduce casualties as residents can escape.

1. 서론

일반적으로 반지하 주택은 아파트나 전원주택과는 달리, 주거 공간이 아래에 위치하고 현관문과 창문이 땅과 가까이 위치한 것이 특징이다. 이런 반지하 주택은 집중호우나 태풍 등 많은 비가 쏟아지면 외부에 물이 차오르다 창문을 통해 내부에 물이 유입되고, 상대적으로 높아진 외부 수압으로 현관문을 열지 못해 주거자의 의사 위험이 증가한다. 또한, 현관문과 창문이 상대적으로 위쪽에 위치한 일반 주택

§ 이 논문은 대한기계학회 제13회 전국학생설계경진대회(2023. 10. 21., 고려대학교) 발표 논문임.

† Corresponding Author, ys.kim@pusan.ac.kr

© 2024 The Korean Society of Mechanical Engineers

에 비해 반지하 주택은 출입이 쉽고, 내부 구조가 쉽게 보이는 구조로 외부 침입에 취약하다. 고로 반지하 주택에는 방범창이 필수로 설치되는데, 주로 사용되는 고정형 방범창이 침수 상황 시 큰 문제를 일으킨다. 지난 8월, 수도권을 비롯한 중부지방에는 많은 비가 내렸고, 서울시 관악구의 한 반지하에서 침수로 인해 일가족이 탈출하지 못해 익사하는 안타까운 사고가 발생했다.⁽¹⁾ 현관문도 수압으로 막히고, 유일한 탈출구인 창문도 고정형 방범창으로 막혀 내부의 거주자들이 대피 적기를 놓쳐 참사가 발생했다. 따라서 우리는 반지하에 적용할 수 있는 차수막과 방범창 모듈을 설계하였다. 설계에 앞서 특허정보 검색서비스 KIPRIS를 이용하여 기존에 많이 사용되는 자동 차수판과 슬라이딩 방범창 특허를 조사하였다. 우선 자동 차수판의 특허는 ‘바닥 상승식 차수 장치’(특허 출원번호 10-2016-0055467)⁽²⁾와 ‘업다운 스윙식 차수 장치’(특허 출원번호 10-2016-0036874)⁽³⁾가 있다. 두 장치 모두 단단한 재질의 차수판이 회전하여 물을 막는 구조이기 때문에 장치 자체의 부피가 크다는 특징이 있다. 또한 평상시에도 외부에 차수판이 드러난다는 단점이 있어 반지하 창문에는 설치하기 어렵다. 개폐형 방범창의 특허는 ‘슬라이딩 방범창’(특허 출원번호 10-2005-0087432)⁽⁴⁾이 있다. 이는 방범창 이동부가 위에서 아래로 내려오는 구조이기 때문에 하단부 1 / 3 지점이 항상 방범창으로 막혀있다. 이로 인해 침수 상황 시, 반지하 거주자가 탈출하기 어렵고 반지하 내부에서 상단의 방범창을 내리는 것은 거주자 입장에서 어려울 수 있다.

따라서 본 설계는 기존 특허의 단점을 보완하여 자동 작동 및 보관이 용이한 소재의 차수막을 통해 사전에 빗물 유입을 차단하여 침수를 방지하고, 평상시에도 안전하게 침입을 막아주는 여단을 수 있는 개폐형 방범창을 도입하였다. 또한, 침수 상황이나 탈출이 필요한 경우에는 잠금장치를 해제하여 방범창을 열고 탈출할 수 있게 하였다. 차수막과 방범창을 하나의 창틀에 결합하여 모듈 형태로 제작하고, 어떠한 반지하에도 보편적으로 사용할 수 있는 ‘스마트 방범 차수 시스템’을 설계하였다.⁽⁵⁾

2. 설 계

2.1 설계 목표

본 설계에 앞서 아래와 같은 목표를 정의하였다. 우선 방범창의 경우, 개폐형으로 제작하여 위급 상황 시 탈출을 도울 수 있어야 하며, 잠금과 해제가 쉽고 빨라야 한다. 차수막의 경우, 유연한 재질을 사용하여 보관이 용이하고 자동으로 전개되어 빗물이 실내로 유입되는 것을 막을 수 있어야 한다.

- ① 방범창은 비상 시에 창문을 통해 탈출 경로를 확보하고, 좁은 반지하에서도 사용할 수 있는 좌우 슬라이딩 방식으로 제작한다.
- ② 방범창 잠금 및 해제는 전자식으로 쉽게 작동해야 한다.
- ③ 차수막은 평상 시 물러에 말려있고, 비가 오는 것을 감지하면 15초 내에 자동으로 전개된다.
- ④ 차수막은 최대 20 cm 수위의 수압을 견뎌야 한다.
- ⑤ 반지하 창문의 특성 상 전체 제품의 폭은 300 mm 이하로 제작해야 한다.

2.2 제품 전체 레이아웃

제품의 전면부는 Fig. 1, 후면부는 Fig. 2와 같다. 본 제품은 차수막을 위로 끌어올리는 부품인 플레이트, 유연한 재질의 차수막을 감아서 보관하는 롤러, 차수막 전개 시 단단히 고정하는 바이스, 좌우로 개폐가 가능한 방범창, 위급 상황 시 탈출로를 확보할 수 있는 탈출 도움문으로 구성되어 있다. 이때, 전체 프레임은 알루미늄 프로파일로 조립하여 1,080 mm × 260 mm × 570 mm 크기로 제작하였다. 전면부 기준 우측 상단에 빗물 감지 센서를 고정하였고, 전면부 기준 좌측 약 20 cm 높이에 수위 감지 센서를 고정하였다. 방범창의 경우 전면부 기준 좌측은 프레임에 고정되어 있으며 우측은 아래에 바퀴를 고정하여 슬라이드가 가능하다. 이동부 상단과 프레임에 잠금 장치를 고정하여 방범창이 닫힐 때 잠길 수 있도록 하였다. 탈출 도움문은 프레임과 힌지로 고정되어 위로 열고 닫을 수 있게 설계하였다.⁽⁶⁾

2.3 플레이트 설계 및 중앙 모터 선정

차수막을 끌어올리는 본체가 되는 플레이트는 Fig. 3과 같은 형상으로 제작하였다. 우선 플레이트 중

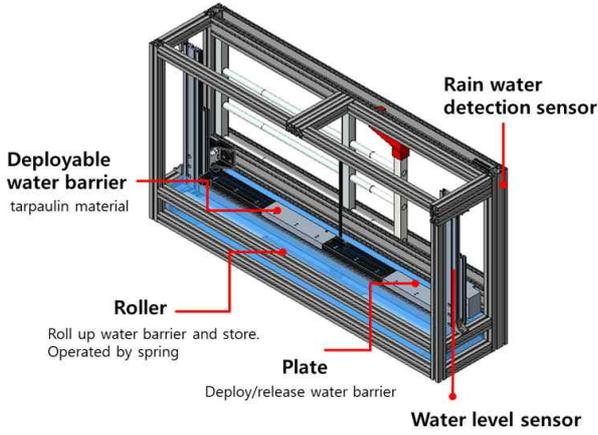


Fig. 1 Front view of the entire product

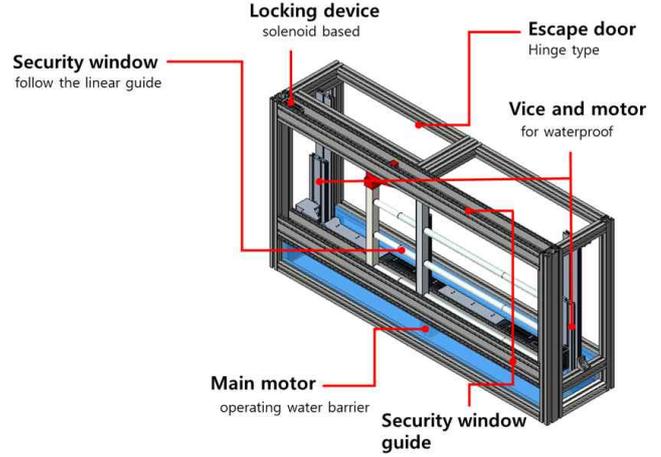


Fig. 2 Rear view of the entire product

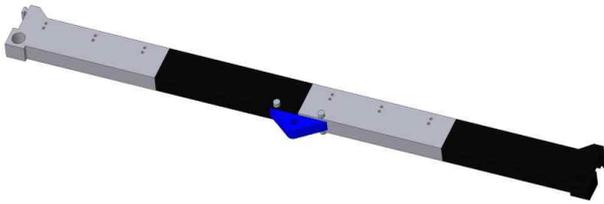


Fig. 3 Modeling of plate

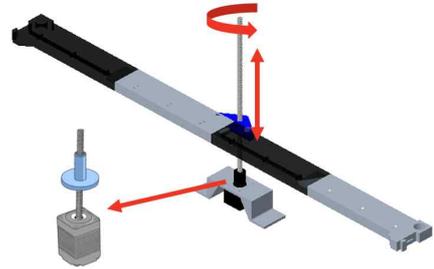


Fig. 4 Working mechanism of plate

간에 긴 홈을 만들었다. 플레이트와 가이드 플레이트 사이에 차수막을 삽입한 후 두 플레이트를 볼트와 너트로 체결하였다. 그 후 차수막을 올려주는 리드 스크류의 너트와 체결되는 부품을 따로 제작하여 플레이트와 결합하였다. 수압으로 인해 리드 스크류가 받을 하중을 분산시켜 주기 위하여 바이스 고정부에 끼울 수 있도록 플레이트 양옆에 T자 모양의 형상을 설계하였다. Fig. 4는 플레이트의 작동 메커니즘을 보여준다. 중앙 모터가 회전함에 따라 스크류가 회전하고 플레이트에 고정된 스크류 너트가 위아래로 움직이며 플레이트가 움직인다.

플레이트의 경우, 총 5개의 파트로 나누어 PLA 소재를 이용하여 3D 프린팅하여 조립하였다. 이 때, 플레이트의 총 부피 V 를 CAD 프로그램으로 구하였을 때 $839,656 \text{ mm}^3$ 이며, PLA 소재의 밀도인 $\rho = 1,250 \text{ kg/m}^3$ 와 3D 프린팅 시 설정했던 infill 값 70%를 고려하여 구한 플레이트의 무게 W_1 는 다음과 같다.

$$W_1 = 0.7 \times V \times \rho = 0.7 \times 839,656 \times 1,250 \times 10^{-9} = 0.734 \text{ kg} \quad (1)$$

플레이트에 고정된 차수막의 질량 W_2 는 약 0.0394 kg 이며, 후에 설명할 차수막에 작용하는 테엽스프링의 탄성력은 $F_s = 0.526 \text{ N} = 0.0536 \text{ kg}$ 이다.

설계 토크 T 는 식 (2)에 플레이트에 작용하는 하중인 $F = W_1 + W_2 + 2F_s = 0.881 \text{ kg}$ 와 리드 스크류 피치 $l = 2 \text{ mm}$, 리드 스크류의 효율 η 를 대입하여 구할 수 있다.

$$T = \frac{Fl}{2\pi\eta} = \frac{(0.8813 * 2)}{2\pi \times 0.472} = 0.594 \text{ kg} \cdot \text{mm} \quad (2)$$

이 때, 리드 스크류의 효율 η 는 리드 스크류의 유효지름 $d_e = 7 \text{ mm}$ 과 피치 $l = 2 \text{ mm}$ 를 통하여 리드 각 $\alpha = \arctan(l/(\pi*d_e)) = 5.2^\circ$ 을 구하고, 이 값과 리드 스크류의 마찰계수 $\mu = 0.1$ 를 식 (3)에 대입하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\eta = \frac{1 - \mu \times \tan \alpha}{1 + \mu / \tan \alpha} = \frac{1 - 0.1 \times \tan(5.2)}{1 + 0.1 / \tan(5.2)} = 0.472 \quad (6) \quad (3)$$

따라서 주어진 모터의 정격토크 $4.2 \text{ kg} \cdot \text{mm} \geq 0.594 \text{ kg} \cdot \text{mm}$ 이므로 만족한다.⁽⁷⁾

2.4 롤러 설계 및 태엽스프링 선정

롤러는 차수막이 감겨있는 장치이며 롤러 본체, 태엽 스프링 케이스 2개, 롤러 홀더 2개로 구성되어 있다. 롤러는 길이 900 mm, 직경 50 mm의 기다란 원통 형상인 롤러 본체, 롤러 홀더, 태엽 스프링 케이스를 플레이트와 마찬가지로 PLA 소재를 이용하여 3D 프린팅으로 제작 후 조립하였다. 롤러 본체와 차수막은 직결 피스로 결합되어 있고 평상시에는 롤러 본체에 차수막이 감겨있다. 태엽 스프링은 롤러 홀더의 중심부에 있는 얇은 틈으로 결합되며 태엽 스프링은 케이스에 담겨 있고, 케이스는 롤러 본체와 직결 피스로 고정되어 있다. 강우 시, 플레이트에 의해 차수막이 위로 이송되게 되면 롤러 본체는 회전하면서 말려있는 차수막은 서서히 풀리게 된다. 이때 본체 내부에 있는 태엽 스프링에 의해 초기지점으로 복원하려는 탄성력이 발생한다. 강우가 끝나고 다시 차수막이 하강 시, 롤러 본체가 탄성력으로 이전과 반대로 회전하며 차수막을 다시 감는다. 롤러에 들어가는 태엽 스프링의 경우 식 (4)를 통하여 탄성력을 구하였다.

$$F_s = \frac{M}{d_r/2} = \frac{k \times \theta}{d_r/2} \quad (6) \quad (4)$$

이때, 태엽 스프링의 스프링 상수 k 는 스프링의 외경 $D = 34 \text{ mm}$, 내경 $d = 26 \text{ mm}$, 감긴 횟수 $n = 28$ 을 통하여 태엽스프링의 길이 $L = \frac{\pi n(D+d)}{2} = 2,639 \text{ mm}$ 를 구하고, 탄성 계수 $E = 186 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$, 스프링 폭 $b = 13.5 \text{ mm}$, 스프링 두께 $t = 0.2 \text{ mm}$ 를 스프링 상수 공식에 대입하여 계산하면 $k = \frac{Eb^3}{12L} = 0.6394 \text{ N} \cdot \text{mm}$ 이다. 플레이트의 동작범위는 200 mm이므로 차수막도 200 mm가 올라가게 된다. 따라서 직경 $d_r = 50 \text{ mm}$ 인 롤러 본체는 $\frac{20}{5\pi} \times 2\pi = 8 \text{ rad}$ 만큼 회전을 하게 된다. 추가로 2바퀴를 회전시켜 스프링 탄성력이 걸린 상태로 조립할 예정이기 때문에 스프링은 자유 위치에서 총 $\theta = 6.54 \pi \text{ rad}$ 을 회전되는 상태다. 따라서 구한 값들을 식 (4)에 대입하면 태엽 스프링의 탄성력은 0.526 N임을 알 수 있으며 이는 타포린 재질인 차수막을 다시 말리게 하기 충분한 힘이다.

2.5 바이스 설계 및 모터 선정

바이스는 전개된 차수막을 단단히 압착하여 고정하기 위한 부품으로 Fig. 5와 같이 알루미늄 프로파일을 이용하여 U자 형상으로 제작하였다. 바이스의 구성은 프로파일 프레임과 브라켓이 연결된 고정부, 너트와 결합된 스크류의 회전을 통해 이송되는 동작부, 동력을 제공하는 리드 스크류 모터, 동작부와 스크류를 연결하는 스크류 너트로 구성되어 있다. 플레이트가 움직여 차수막이 정해진 위치까지 상승하면 차수막은 바이스 고정부와 동작부 사이에 위치하게 된다. 그 다음 Fig. 6처럼 바이스 양단에 있는 모터들이 작동하여 동작부를 고정부를 향해 밀어준다.

바이스를 작동하는 모터에 필요한 토크는 다음과 같이 구할 수 있다. 우선 폭 $b = 900 \text{ mm}$, 높이 $h = 210 \text{ mm}$ 인 차수막에 작용하는 정수압을 식 (5)를 통해 구할 수 있다. 이때, 물의 밀도 $\rho_{water} = 1,000 \text{ kg/m}^3$ 이다.



Fig. 5 Modeling of vise

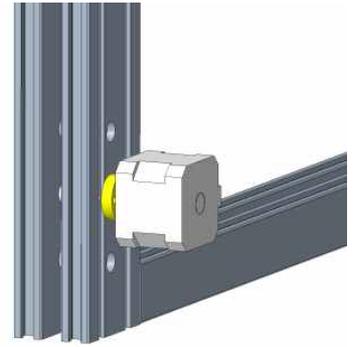


Fig. 6 Vise and motor

$$F = \frac{1}{2} \rho_{water} g h^2 \times b = 194.68 N \quad (5)$$

차수막에 가해지는 힘은 바이스가 온전히 감당하게 된다. 바이스는 2개의 스텝모터로부터 압착력을 받게 되므로, 1개의 모터에서 필요한 힘은 연속체 장력 $T=194.68/2 = 97.34 N$ ⁽⁹⁾이다. 타포린이 두께가 얇아 알루미늄 프로파일끼리 맞물리는 것을 고려하면, 요구되는 바이스 모터의 힘 F_V , 마찰계수 $\mu_1 = 1.35$ 이므로 $2.7F_V = 97.34 N$, $F_V = 36.05 N$ 이다. 하중 $F_V = 36.05 N$, 피치 $p = 2 mm$, 나사 효율 $\eta = \frac{1 - 0.1 \cdot \tan(5.2)}{1 + 0.1/\tan(5.2)} = 0.472$, 리드각 $\alpha = \arctan(p/(\pi \cdot d_c)) = 5.2^\circ$, 리드스크류 마찰계수 $\mu = 0.1$, 유효 지름 $d_c = 7 mm$ 이며 이를 식 (6)에 대입하여 계산하면 바이스 모터의 설계 토크 T_d 는 다음과 같다.

$$T_d = \frac{F_V l}{2\pi\eta} = \frac{36.05 \times 2}{2\pi \times 0.472} = 24.31 N \cdot mm \quad (6)$$

주어진 모터의 정격토크 T 는 $280 N \cdot mm \geq 24.13 N \cdot mm$ 이므로 만족한다.

3. 결과 및 고찰

3.1 제품 성능 평가

완성된 제품은 Fig. 7과 같다. 본 설계가 잘 작동하는지, 차수 성능이 뛰어난 지를 확인하기 위해 비가 많이 와 물이 고이는 상황을 가정하여 실험을 수행하였다. 우선 빗물 감지 센서가 비를 감지하여 차수막이 상승하는 것을 확인하기 위해 센서에 분무기로 물을 뿌린다. 차수막이 상승하고 바이스가 이를 튼튼히 압착한 것을 확인할 수 있었다. 빗물이 고이는 상황을 만들기 위해 Fig. 8과 같이 타포린 천과 철제 스트립과 앵글을 이용하여 차수막 크기의 박스를 만들었고, 이를 차수막 앞에 설치한 뒤 물을 부었다. 약 12시간 동안 실험을 진행하였고, 실험 결과는 Table 1과 같다.

3.2 고찰 및 향후 계획

우선 시제품의 상부에 힌지를 연결하여 탈출 도움문을 제작했는데, 이는 각 가구의 설치 환경에 따라 사용이 불가할 수 있다. 따라서 차후 제품은 슬라이딩 레일 프로파일을 사용하여 탈출 도움문을 슬라이딩 식으로 열고 닫아서 공간 활용성을 극대화할 것이다. 알루미늄 프로파일로 제작 후, 완전한 방수를 위해 아크릴판을 각 면에 고정하고 실리콘으로 마감처리 하였는데 생각보다 쉽게 되지 않았다. 또한 지지분하게 된 부분들이 많아 아쉬움이 남았다. 플레이트가 상승하며 모멘트가 발생하고 모터의 스크류가 고정되어 있지 않아 overturning이 발생하였다. 이에 스크류 모터의 끝을 천장에 고정하면 개선될 것으로

Table 1 Comparison of objectives and experiments

| | Design objectives | Experimental results |
|-----------------------------------|-------------------|----------------------|
| Maximum height of water barrier | 200 mm | 214 mm |
| Deployment speed of water barrier | 15 sec | 10.2 sec |
| Waterproof | O | 1 raindrop/min |
| Width of overall product | 300 mm | 260 mm |

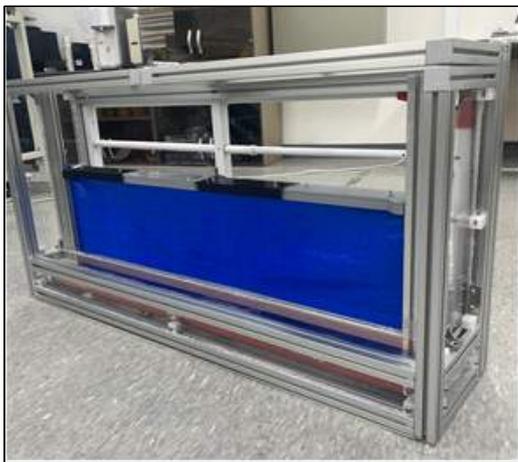


Fig. 7 Prototype



Fig. 8 Water barrier test

보인다. 차수막을 이송시키는 리드 스크류의 경우, 예산의 문제로 인하여 삼각나사를 사용하여 이송 과정에서 많은 소음과 진동이 발생하였다. 따라서 사각나사 또는 사다리꼴 나사를 아용하여 개선할 수 있을 것으로 예상된다. 실험을 진행하면서 완전한 차수가 아닌 1분에 한 방울씩 누수가 있었다. 물방울이 하부에 맺히는 원인이 타포린 차수막에 부착한 실리콘이 균일한 두께로 제작이 되지 않았기에 발생한 것으로 추정된다. 향후 실리콘을 제작할 때 균일한 두께로 제작하면 더 좋은 성능을 보일 것으로 기대된다.

4. 결 론

대부분의 반지하 가구에는 고정형 방범창 또는 고정형 차수판이 설치되어 있다. 이로 인해 침수상황 발생 시 신속한 대피가 힘들다. 이를 해결하기 위해 본 설계에서 리드 스크류 모터로 작동하는 자동형 차수막과 솔레노이드 잠금장치가 부착된 개폐식 방범창이 결합된 하나의 시스템을 구축하였다. 본 설계는 센서들을 통해 우천상황을 인식하여 차수막이 전개되고, 방범창을 통한 탈출로 확보가 가능하게 설계되었다. 이에 따라 급박한 상황에서 차수판 설치의 번거로움을 줄일 수 있고, 침수 피해로 인한 인명 피해를 줄일 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

이 과제는 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음. 이 논문을 작성하는 데 아낌없이 도움을 주신 김영수 교수님께 감사드립니다. 학문의 장을 펼치게 해주신 기계학회 관계자분들에게 감사의 인사를 드립니다.

참고문헌
(References)

- (1) Kim, J. W., 2022, *Inundated in a Flash Underground, Devastation of a Family* (https://news.sbs.co.kr/news/endPage.do?news_id=N1006854351&plink=LI), SBS, Seoul, Republic of Korea.
- (2) Oh, D. S., 2016, *Bottom Up and Down Type Water Proof Apparatus*, Patent No. 1020160055467, Korean Intellectual Property Office, Daejeon, Republic of Korea.
- (3) Oh, D. S., 2016, *Up and Down Swing Type Automatic Water Proof Apparatus*, Patent No. 1020160036874, Korean Intellectual Property Office, Daejeon, Republic of Korea.
- (4) Kim, D. J., 2005, *Sliding Prevention of Crimes Using Window*, Patent No. 1020050087432, Korean Intellectual Property Office, Daejeon, Republic of Korea.
- (5) Kim, J. W., 2008, *Engineering Design: Creative New Product Development Methodology*, Munundang, Seoul, Republic of Korea, pp. 1~416.
- (6) Park, S. H., Bae, W. B., Song, J. B., Cho, Y. J. and Hwang, S. M., 2013, *Mechanical Design*, Books Hill, Seoul, Republic of Korea, pp. 1~536.
- (7) Samick THK Co. Ltd., 2024, *Screw Nut: THK Catalog* (https://e-lmsystem.co.kr/product/ViewPDF.do?pf_seq=17600), Samick THK Co. Ltd., Daegu, Republic of Korea.
- (8) Gerhart, P. M., Gerhart, A. L. and Hochstein, J. I., 2017, *Munson's Fluid Mechanics*, John Wiley & Sons, Hoboken, USA, pp. 65~67.
- (9) Halliday, D., Resnick, R. and Walker, J., 2021, *Fundamentals of Physics, Extended*, John Wiley & Sons, Hoboken, USA, pp. 256~260.

과학상자와 Labview를 이용한 메카트로닉스 설계 교육 사례

김 정 현^{*†}

* 경성대학교 메카트로닉스공학과

Case Study for Mechatronics Design Education Using Labview and Science Box

Jung Hyun Kim^{*†}

* Dept. of Mechatronics Engineering, Kyung Sung University

(Received August 28, 2023 ; Revised June 13, 2024 ; Accepted June 17, 2024)

Key Words: Engineering Education(공학교육), Mechatronics(메카트로닉스), Design Education(설계교육), Labview(랩뷰), Science Box(과학상자)

초록: 본 논문은 과학상자와 Labview를 이용해 탁구공 분류기를 설계하고 제작하는 메카트로닉스 설계 교육 사례를 제시한다. 학생들은 과학상자 부품의 모델로 3D CAD 모델을 설계하고 Labview로 제어하는 분류기를 제작하며 아이디어를 실천에 옮기는 메카트로닉스 시스템의 설계 과정을 경험한다. 과학상자와 Labview의 조합은 기계, 전기전자 및 소프트웨어의 융합적 특성이 강한 메카트로닉스 설계 교육에 많은 장점을 제공한다. 과학상자의 이용을 통해 학생들은 정해진 절차에 얽매이지 않고 자유롭게 아이디어를 구현할 수 있고 표준 부품을 이용하여 설계할 수 있는 경험을 할 수 있다. Labview 활용의 장점은 비교적 짧은 교육 시간으로 성능이 우수한 시스템을 구축할 수 있는 것이다. 이러한 수업 방법은 기계·메카트로닉스 계열의 저학년 설계 수업에 아주 우수한 설계교육 모델이 될 수 있다.

Abstract: This paper presents an educational case study on a mechatronics engineering design class that designs a ping-pong ball classifier using Science Box and Labview. Students experience the process of mechatronics design by building 3D CAD models using actual science box parts and by creating and controlling actual classifier systems using Labview. The combination of using Science Box and Labview provides many advantages for designing mechatronics systems which are a fusion of electronics, mechanics and software. Science Box provides an abundance of freedom in creating different designs and gives students a chance to design with standard mechanical parts. Labview allows students to build up a running systems with minimum training. Overall this method provides a great engineering design class model for freshman/sophomore level students in mechatronics or mechanical engineering disciplines.

1. 서론

메카트로닉스(mechatronics)는 기계(mecha)와 전자(electronics)가 합쳐진 어원을 가지며 실제로는 기계, 전기, 전자, 제어, 로봇틱스 그리고 소프트웨어 분야까지 광범위하게 아우르는 융합 학문이다. 메카트로닉스의 존재 이유는 무엇보다 이러한 다양한 분야의 지식과 노하우를 융합적으로 활용한 설계 솔루션을 제공하는 것이다. 그러므로 설계 교육은 메카트로닉스 교육과정에서 필수적이며 가장 중요한 부분을 차지한다고 해도 과언이 아니다.

이렇게 융합적인 특성이 강한 메카트로닉스 시스템을 제대로 설계하기 위해서는 다양한 분야에 대한 사전 지식이 필요하여, 보통은 캡스톤디자인(capstone design) 수업 형식으로 대학교 고학년에서 설계 수

† Corresponding Author, dwellnom@ks.ac.kr

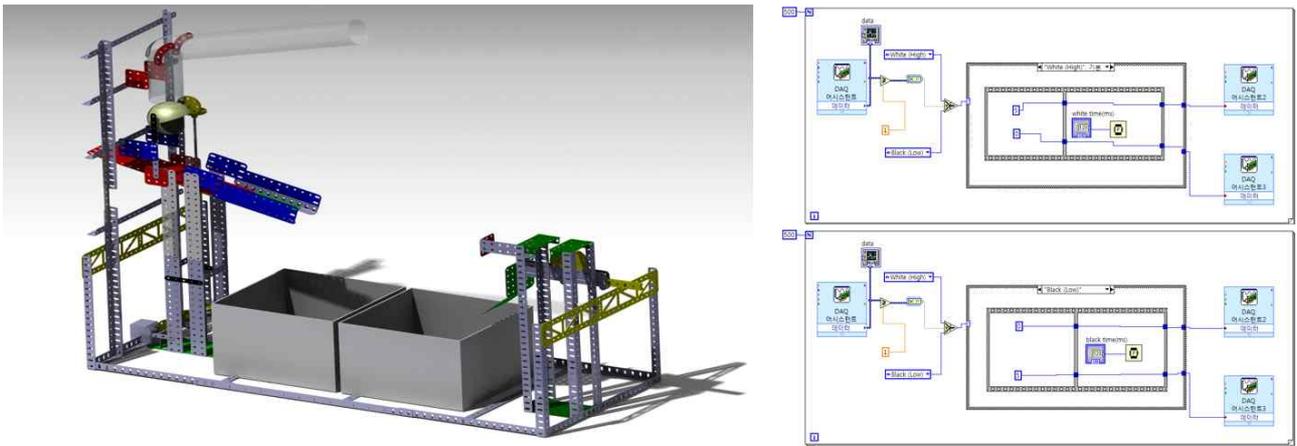


Fig. 1 An example of 3D CAD model of ping-pong ball classifier (left); labview program of controller (right)

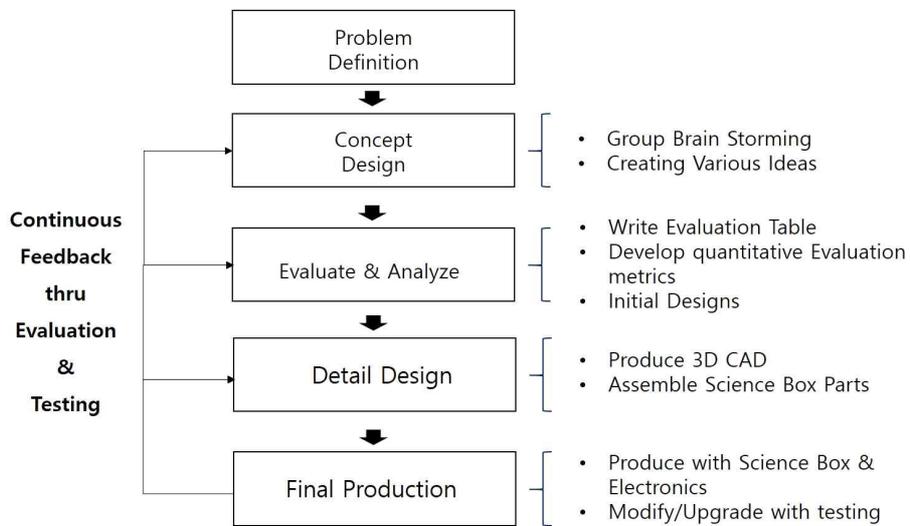


Fig. 2 Systematic process of design

업을 진행하게 된다. 기본적인 기계설계에 대한 지식과 CAD tool 사용 경험, 센서 및 구동기 회로에 대한 이해 그리고 소프트웨어 프로그래밍 능력까지 필요하기 때문이다. 일반 메카트로닉스공학과와 고학년 학생들은 3년 내외의 시간 동안 축적된 역량을 종합하여 설계를 진행할 수 있다. 반면, 저학년 수준에서의 메카트로닉스 설계는 그 눈높이와 역량에 맞는 수업이 필요하다. 최근 설계 역량에 대한 산업의 수요 및 학생들의 교육적인 만족도를 고려했을 때 저학년의 설계 교육은 매우 중요하며 이 논문은 기존의 설계 교육 방식들⁽¹⁻⁴⁾과는 차별되며, 저학년 공학도를 위한 메카트로닉스 융합설계⁽⁵⁾ 교육의 좋은 사례를 제시한다.

설계 주제는 탁구공 분류기(Fig. 1)로 선정되었는데 난이도가 적당하고 다양한 창의적인 아이디어들이 가능하다는 특징이 있다. 무엇보다 설계를 평가하는 데에 있어서 탁구공 분류의 정확성과 분류 속도라는 객관적 정량 기준을 세울 수 있다는 장점이 있다. 제안된 융합설계는 기계설계, 회로설계, 소프트웨어의 세 요소로 이루어지는데, 기계설계는 과학상자를, 소프트웨어는 Labview를 사용했다. 과학상자⁽⁶⁾는 1982년에 한국기계연구원과 (주)제일과학이 공동으로 개발한 기계·과학 교구(教具)로서 다양한 기계부품 및 모터로 구성되어 학생들이 자유롭게 기계적 아이디어를 구현할 수 있게 한다.

2. 설계 프로젝트 구성

2.1 설계 주제 및 과정

설계 주제는 과학상자 부품을 이용해 탁구공 분류기(흑/백 탁구공 분류)를 설계·제작하고 Labview 소프트웨어를 이용해 제어하는 것이다. 작품에 대한 핵심 평가 기준은 분류 속도와 정확도이며 부품의 개수, 창의성, 완성도 등을 추가로 고려한다.

학생들은 체계적인 설계 절차(Fig. 2)에 따라 탁구공 분류기를 설계하고 제작한다. 개념 설계 단계에서는 조원들과의 브레인스토밍을 통해 다양한 설계 가능성을 탐색하고 다양한 솔루션을 제안하고 평가한다. 이러한 과정을 통해 채택된 아이디어는 CAD 소프트웨어를 이용한 상세설계 과정을 거치며 구체화되고 최종적으로 실제 부품을 이용해 제작한다.

시작 단계에서의 개념 설계는 실제 최종 실물 제작품까지 이어지는 경우는 거의 없는데, 이것은 시초의 개념설계 시점에서는 각 부품의 작동원리 및 Labview의 기능에 대한 지식이 부족하기 때문이다. 학생들이 수업 과정에서 센서와 모터의 구동 및 소프트웨어 제어를 배우고, 실제 시스템을 구축하고 나면 다양한 시행착오 및 실험을 통해 개념설계, 상세설계, 실물 제작의 과정은 환류되고 지속적인 개선 작업이 이루어진다.

2.2 설계 요소

2.2.1 기계부

전체적인 기계부의 설계 과정은 Fig. 3을 통해 제시된 것과 같은 개념 설계, 상세 설계, 실물 제작의 과정으로 이루어진다. 개념 설계는 형식에 얽매이지 않고 학생들이 떠오르는 아이디어를 Fig. 3(a)와 (b)에서 제시된 스케치 형태를 통해 표현함으로써 다양한 아이디어를 도출하고 브레인스토밍하게 된다. 과학상자 부품들의 구체적인 기능이나 센서와 구동기의 특성 및 소프트웨어에 대한 사전 지식 없이 학생들은 자유롭게 상상하며 자신만의 아이디어를 시각화한다. 향후 직접 제작과 실험을 통해 자신의 아이디어를 수정, 보완하고 더 나은 방법을 스스로 깨달을 기회를 제공하기도 한다.

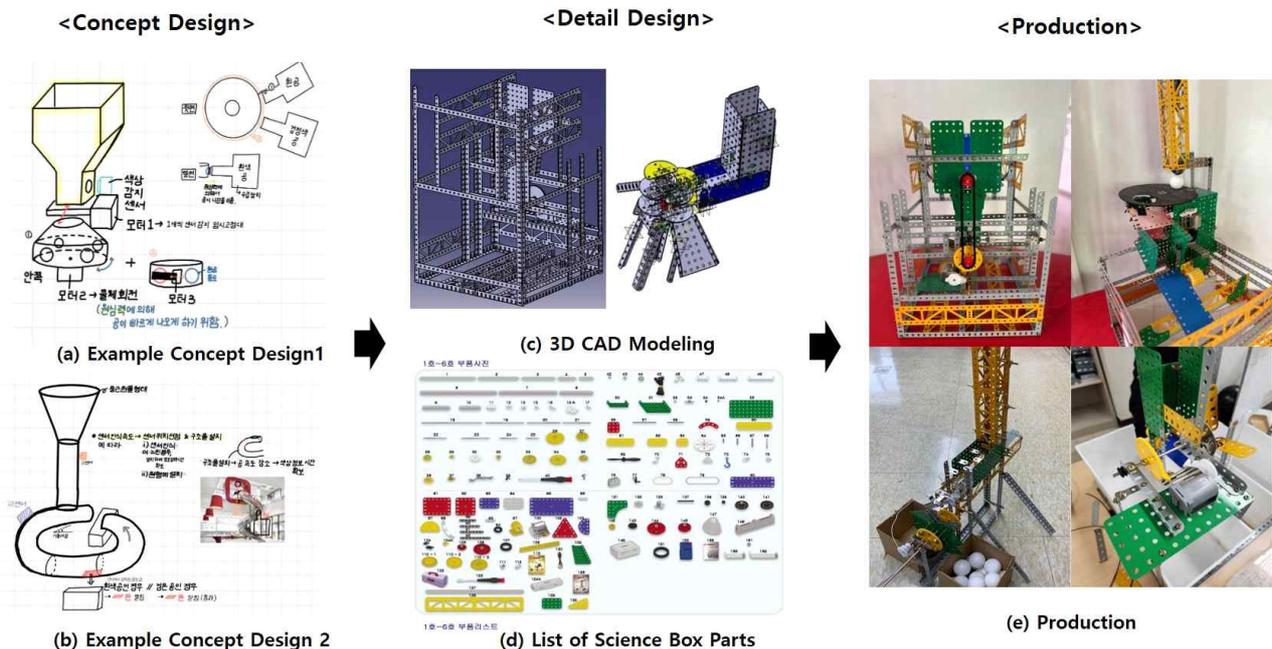


Fig. 3 Process of mechanical design: (a) example of concept design 1; (b) example of concept design 2; (c) 3D CAD modeling; (d) list of science box parts; (e) example of actual system



Fig. 4 Shelf of categorized science box parts

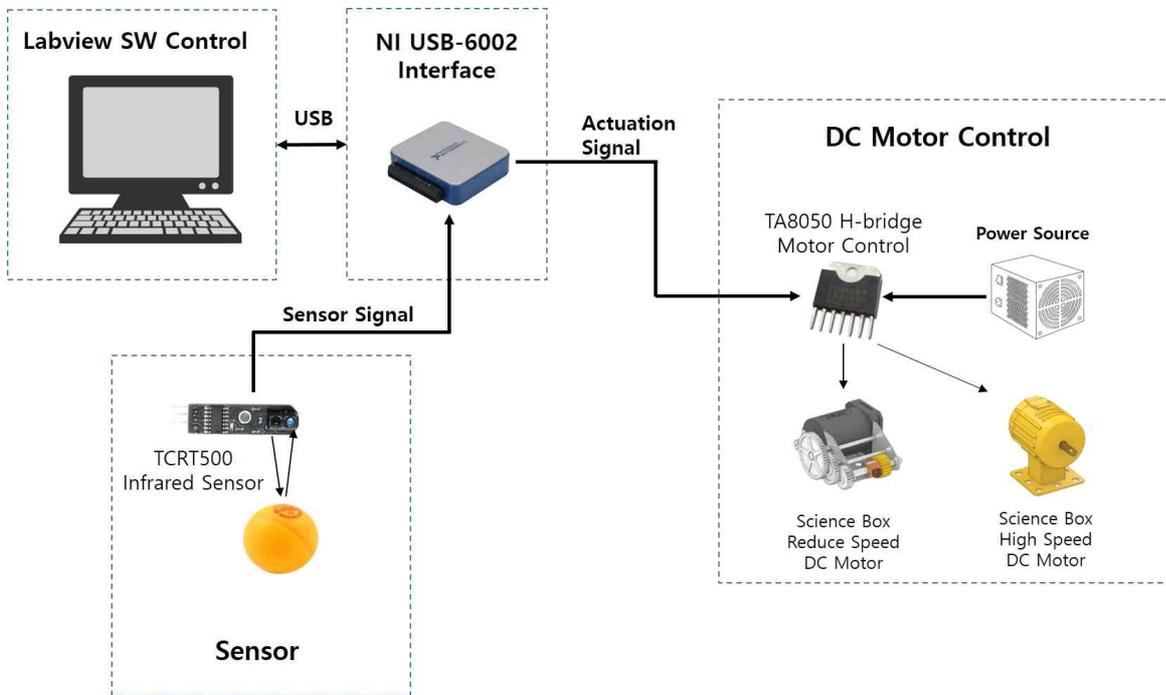


Fig. 5 Schematic of aystem control consisting of Labview SW control; USB interface; infrared aensor; DC motor control

다음 단계인 상세설계는 개념설계 단계에서 도출된 아이디어를 3D CAD 모델로 설계해 보는 것이다. 제작에 사용될 과학상자 부품들은 모두 사전에 3D 모델링 되었으며 학생들은 CAD의 assembly 기능을 이용해 설계한다. 과학상자를 이용하는 이유 중의 하나가 이렇게 표준 부품을 이용한 기계설계의 기회를 제공함으로써 산업 현장의 설계를 경험하게 하는 것이다. 3D CAD 사용법은 학생들이 선이수한 CAD 설계 과목에서 배운 경험을 바탕으로 진행한다.

실물 제작 단계에서 학생들은 구비된 과학상자 부품 진열대(Fig. 4)에서 자유롭게 원하는 부품을 사용하여 상세설계된 시스템을 조립한다. 시스템의 움직임은 과학상자에 포함된 모터를 통해서 이루어지며, 랙/피니언을 포함한 다양한 기어 부품을 통해 필요한 움직임을 만들어낼 수 있다. 진열대에는 대략 150개의 부품이 구비되어 있고 맞춤 제작해야 하는 부품이 있을 경우, 학과 내 3D 프린터를 이용하든지 일정 한도 내에서 실습비를 이용해 구매할 수도 있다. 최종 작품이 완성될 때까지 실험을 통해 분류기 구

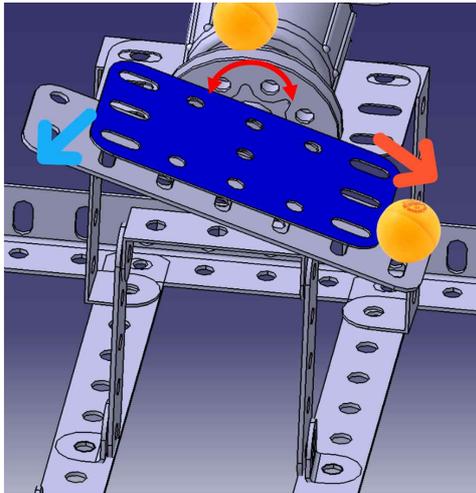


Fig. 6 Example of device that changes ball path

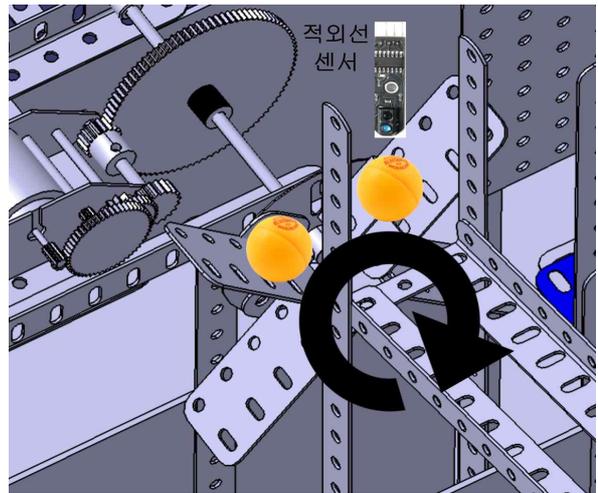


Fig. 7 Example of ball supplier with infrared sensor

조를 계속해서 개선해 나가고 최종 작품이 완성된 후에는 완성된 작품의 3D CAD 모델을 결과 리포트에 함께 제출하도록 한다.

2.2.2 제어부

제어부는 Fig. 5에서 제시된 바와 같이 Labview를 이용한 SW control, 탁구공 색을 분류하기 위한 적외선 센서, DC 모터 제어부로 분류할 수 있다. Labview 사용법은 본 수업을 통해 배우게 되는데 최종 제작 및 실험을 하게 될 시기가 되면 학생들은 분류기를 자유롭게 구성할 수 있는 수준의 코딩 능력을 갖추게 된다. NI-USB 6002 daq 장치를 통해 센서부의 신호를 입력하며, 모터 구동부로 구동 신호를 송출한다. Daq 장치는 8개의 analog input 채널, 2개의 analog output 채널 그리고 13개의 digital I/O 채널로 구성되어 있어 학생들이 원하는 만큼의 모터와 센서 대수를 사용할 수 있다.

제어의 기본 원리는 센서에 입력된 값을 토대로 DC 모터를 이용하여 탁구공의 경로를 변화시키는 장치(Fig. 6)를 구동하는 것이다. 아울러 탁구공을 질서정연하게 공급할 수 있는 공급기(Fig. 7)와 같은 장치를 설계에 따라서 활용하기도 하는데 전체적인 시스템의 제어는 Labview를 통해 자유롭게 할 수 있다.

센서는 아두이노 line tracing 키트에서 흔히 사용되는 적외선 센서(Fig. 5)를 사용한다. 검은색 탁구공은 적외선을 흡수하고 흰색 공은 반사하는 원리를 이용하여 공의 색을 감지할 수 있고 결과는 daq 장치를 통해 Labview 프로그램에 전달된다.

DC 모터의 제어는 H-bridge를 구현하는 TA8050 부품(Fig. 5)을 이용한다. Labview와 daq의 신호를 전달받아 모터에 정방향 또는 역방향의 전류를 보내는 기능을 통해 모터를 필요에 따라 제어할 수 있고 이를 통해 탁구공의 경로를 변경한다. 과학상자에는 Fig. 5의 그림처럼 두 종류의 DC 모터, 즉 고속모터와 감속모터가 포함되어 있다. 학생들은 주로 경로 변경을 위해서 고속모터, 탁구공 공급기를 위해서는 감속모터를 이용한다. 모터의 실시간 속도 제어는 수업의 범위를 넘어서는 내용이라 다루지 않는다. 모터의 세팅 속도를 더욱 세밀하게 변경하기 위해서는 파워 소스를 통해 공급되는 전압을 변경하던지 과학상자 안에 포함된 다양한 기어부품을 이용해 필요한 움직임 속도를 만들어낼 수도 있다

3. 프로젝트 결과 및 평가

프로젝트의 평가는 Table 1에 제시된 정량적 지표와 정성적 지표를 통해 이루어진다. 점수의 60%가 분류 속도와 정확도를 통해 이루어지기 때문에 학생들은 이 부분에 가장 신경을 많이 쓰며 평가 당일

Table 1 Ball classification project evaluation factors, point distribution and evaluation results summary

| | Metric name | Points | Average points (2022) | Remarks |
|---------------------------------------|--------------------------------|--------|--------------------------|------------------------------------|
| Quantitative evaluation metrics | Classification speed (sec) | 30 | 21 seconds | Time for classifying 30 balls |
| | Classification accuracy (%) | 30 | 88% | % of balls correctly classified |
| | No. of parts (unit) | 10 | 77 | Number of parts |
| Qualitative evaluation metrics | Completeness | 10 | - | |
| | Creativity | 10 | - | |

전까지 계속해서 시스템의 구조와 제어 방식을 개선한다. 총 부품 수에 대한 점수를 통해 설계에 사용된 부품에 대한 체계적인 기록을 유도하고 불필요한 부품과 자원의 낭비를 최소화하는 설계를 교육한다. 정성적 평가는 완성도와 창의성을 평가로 이루어지는데, 비중을 20%로 비교적 낮게 둔 이유는 정량적 평가와 성능을 강조하고 학생들의 최종 평가와 학점에 대한 불만을 낮추기 위함이다.

평가는 흑색과 흰색 탁구공 30개를 분류하는 방식으로 진행한다. Table 1에는 2022년도에 진행된 수업의 평균 분류 속도와 분류 정확도 및 부품 수가 제시되어 있다. 흥미로운 것은 대체로 분류 속도와 분류 정확도 간의 trade-off가 존재하는 것인데, 공급기를 빠르게 가동하여 분류 속도를 높이면 분류 정확도가 떨어지고 그 반대도 마찬가지다. 학생들은 이러한 과정을 통해 시스템을 최적화하는 경험을 자연스럽게 하게 된다.

4. 결 론

과학상자와 Labview의 조합은 메카트로닉스 설계 수업을 위한 많은 장점을 제공한다. 과학상자 이용의 최대 장점은 학생들이 자유롭게 아이디어를 구현할 수 있다는 것이다. 이것은 설계도가 정해진 많은 교육 키트들과 확실한 차별점이다. 아울러 표준 부품을 이용하여 설계할 수 있는 경험을 제공하는 장점도 있다. Labview 활용의 장점은 비교적 짧은 교육 시간으로 성능이 우수한 시스템을 구축할 수 있는 것이다.

끝으로 본 프로젝트는 메카트로닉스를 공부하는 공학도에게 기계설계, 전기전자 및 소프트웨어 제어를 저학년의 눈높이에 맞게 경험토록 하는 좋은 기회를 제공한다. 체계적인 설계 과정을 통해 아이디어를 끝까지 실행에 옮기고 눈으로 그 결과를 확인하는 과정은 학생에게 자신감을 불어넣고, 수많은 시행착오를 통해 시스템이 만들어지는 엔지니어링 과정을 체험하는 것은 값진 경험이 된다. 이러한 수업 방법은 기계·메카트로닉스 계열의 저학년 설계 수업에 아주 우수한 설계교육 모델이 될 수 있다.

참고문헌 (References)

- (1) Park, J. W., 2023, "Case Study of Mechanical Design Engineering Education for Practical Application," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. C*, Vol. 11, No. 1, pp. 29~36.
- (2) Lee, H. W., 2014, "Effectiveness of Project Based Learning in Mechanical Drawing Education Using CAD," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. C*, Vol. 2, No. 2, pp. 125~130.
- (3) Kang, C. G., 2016, "Convenient and Economic Mechatronics Education Using Small Portable Electronic

- Devices,” *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. C*, Vol. 4, No. 1, pp. 63~71.
- (4) Kim, Y. S., 2018, “Introducing All-Semester Design Based Learning and It’s Educational Outcome,” *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. C*, Vol. 6, No. 1, pp. 59~64.
- (5) Kang Y., 2009, “A Case Study of Introduction to Engineering Design Course Using Lego Mindstorm NXT,” *Journal of Engineering Education Research*, Vol. 12, No. 2, pp. 83~88.
- (6) Sciencebox, 2012, *Sciencebox* (sciencebox.co.kr), Paju, Republic of Korea.

원전 중대사고 해석코드 MAAP5의 코어캐처 열전달 모델 변경을 위한 API 개발

이대형*† · 김병조* · 윤선홍*

* 한국전력기술

Development of an API for Modifying the Core Catcher Heat Transfer Model in the Severe Nuclear Accident Analysis Code MAAP5

Dae-Hyung Lee*†, Byung-Jo Kim* and Seon-Hong Yoon*

* Dept. of Nuclear Research, Korea Electric Power Engineering and Construction

(Received November 20, 2023 ; Revised February 8, 2024 ; Accepted February 8, 2024)

Key Words: Severe Accident(중대사고), Core Catcher(코어캐처), MAAP5(모듈형 사고분석 프로그램), CFD(전산유체역학)

초록: 원자력 발전소에서 발생할 수 있는 냉각재 상실이나 전기 고장은 노심의 충분한 냉각을 방해하여 과열로 인한 노심 손상을 초래할 수 있다. 이러한 위험에 대비하여, 유럽 수출형 원전인 APR1000은 코어캐처를 도입하였다. 코어캐처는 노외로 방출된 노심용융물을 냉각함으로써 중대사고를 완화하는 핵심적인 설비이다. 본 연구에서는 코어캐처 성능 평가를 위해 필요한 다양한 열속 분포를 고려하여, 중대사고 해석코드 MAAP5의 열속 분포를 조정할 수 있는 API를 개발하였다.

Abstract: Coolant loss or electrical failure in nuclear power plants can impair the adequate cooling of the reactor core, potentially leading to core damage. To mitigate this risk, the APR1000, a European export-type nuclear power plant, incorporates a core catcher. This device is essential for managing severe accidents by cooling the molten core that may be released from the reactor vessel. This study has developed an API for the severe accident analysis code MAAP5 to refine the heat flux distribution modeling. This enhancement aims to improve the evaluation of core catcher performance under various heat flux conditions, thereby contributing to more accurate severe accident simulations.

1. 서론

원자력 산업계는 후쿠시마 사고 이후 전 세계적으로 중대사고 대처 능력을 확보하도록 규제를 강화하고 있는 추세이다. 유럽 사업자 요건에 의하면 중대사고 대처설비는 일반 설계기준사고용 안전계통과 분리된 전용계통으로 설계되어야 하며, 원자로공동충수계통이나 노내억류설비 만으로 노심용융물 냉각 성능을 입증하기 어려운 고출력 원전에 대해서는 별도의 노심용융물 냉각설비를 설치해야 한다. 코어캐처는 원자로용기 파손 후 노심용융물을 원자로공동에 설치된 코어캐처에서 안전하게 노심용융물을 냉각시켜 원자로건물의 건전성을 확보할 수 있도록 하는 중대사고 대처설비이다. 즉, 노외 노심용융물이 원자로건물로 방출된 경우에도 공학적 설계를 통해 노심용융물의 안정적인 냉각을 유지하고 원자로건물 바닥의 용융관통(BMT: basement melt-through)을 방지하기 위해 개발된 설비로서, 유럽 시장에서는 일반적으로 코어캐처 설계를 선호하고 있으며, 이를 반영하여 유럽 수출형 원전인 APR(advanced power reactor) 원전에는 코어캐처를 채택하기로 결정하였다.

† Corresponding Author, bigbro@kepco-enc.com

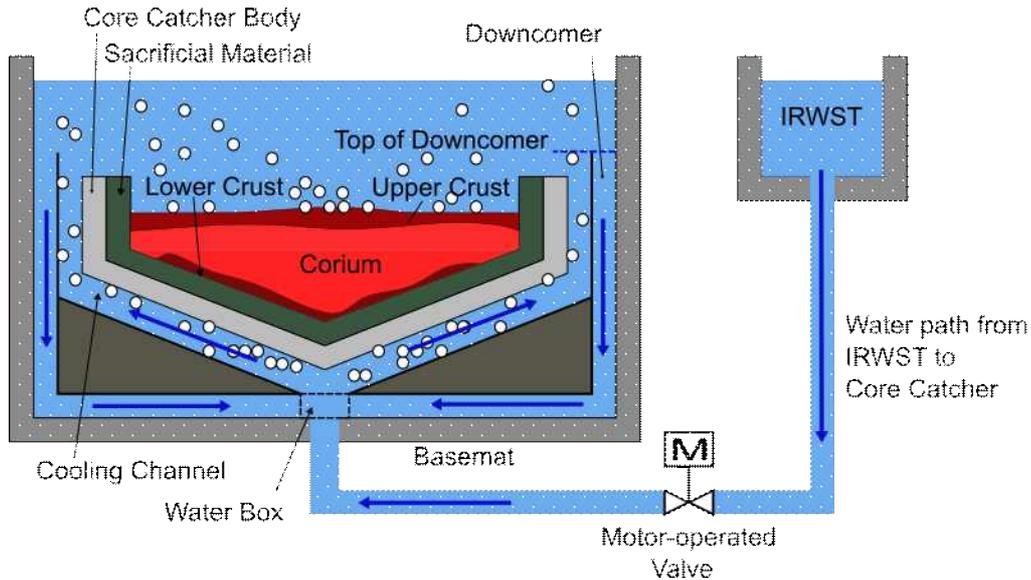


Fig. 1 Schematic diagram of core catcher

과거 EU-APR1400 개발 시 코어캐처 설계와 관련하여 기본설계 및 일부 실험이 수행되었으나,⁽¹⁾ 이때는 2D 슬라이스 구조의 시험설비를 이용하여 3차원적인 유량 분포, 불안정성, 냉각성능은 확인하지 못하였다. 그러므로 향후 인허가 쟁점사항을 해소하고, 검증 항목 및 비용을 최소화하기 위한 코어캐처 설계의 최적화가 필요하며, 설비의 3차원 형상을 고려한 냉각 유동실험을 통해, 국부적 유량 불균형에 의한 불안정성과 냉각성능 영향을 파악하고, 냉각성능을 최적화하기 위한 설계기술 개발이 진행 중이다.

본 연구에서는 중대사고 전용 해석코드인 MAAP5⁽²⁾를 이용한 코어캐처 냉각성능 평가 관점에서 불확실성이 높은 코어캐처 냉각 채널의 열전달 모델에 대해 다양한 열속 분포를 적용할 수 있도록 API를 개발하고 이를 이용한 해석 결과를 소개한다. API를 통해 다양한 해석 결과를 반영한 열속 분포를 적용하여, 더욱 정확하고 현실적인 성능 평가를 수행하고 실증실험 기반 3차원 냉각성능 평가기술 개발에 활용하고자 한다.

2. APR1000 코어캐처

원자력발전소에서 냉각재 상실이나 전기 고장으로 인해 핵연료의 열제거가 충분히 이루어지지 않을 경우, 노심 손상이 발생할 수 있다. 중대사고 조건에서는 연료 경계 내에 존재하는 다양한 핵분열 생성물이 원자로 냉각재 계통이나 원자로건물 대기로 전달되어 최종적으로는 환경으로 방출될 수 있다. 기존의 가압경수로로는 가능한 한 일찍 원자로 하부의 침수 또는 외부 열 제거를 통해 원자로 압력용기의 건전성을 유지하려는 목표를 가지고 있다. 하지만 충분한 열 제거가 이루어지지 않는다면 노심 손상 후 몇 시간 이내에 원자로 압력용기의 파손은 피할 수 없을 것으로 예상된다. 원자로 압력용기 파손 이후 원자로 공동에 재배치된 노심용융물은 콘크리트 구조물과 접촉하여 콘크리트를 침식시키기 시작한다. 가압경수로에서는 원자로 압력용기 파손 시 원자로 공동 내에 물의 존재 여부에 따라 노외 단계의 사전 충수 그리고 사후 충수의 두 가지 다른 사고 관리 전략이 존재한다. 유럽 수출형 원전인 APR1000에는 MCCI(molten core-concrete interaction)를 피하고 노외 노심용융물을 냉각하기 위한 전용 수단으로 코어캐처(Fig. 1)가 제안되었으며, 코어캐처는 노심용융물을 지지하고 냉각하기 위해 원자로 공동에 배치된 긴 직사각형 철타 형태의 본체, 하부에 위치한 경사 냉각 채널, 희생물질(sacrificial material)로서 철타 내부 표면에 적층된 두꺼운 콘크리트 층, 그리고 원자로 공동과 원자로건물내재장전수조(IRWST: in-containment refueling water storage tank) 사이에서 자동으로 냉각수를 공급하는 배관 등으로 구성되어 있다. 코어캐처 계통의 필수적인 기능은 다음과 같다.

- 파손된 원자로 압력용기로부터 노심용융물 수용
- 사후 충수 전략을 통해 가능한 한 빠른 노심용융물 냉각
- 원자로건물로의 핵분열 생성물 방출 억제

3. MAAP5 코어캐처 열전달 모델

3.1 냉각 채널 모델

Fig. 1은 코어캐처 계통의 전체적인 개략도이다. 중대사고 동안에 IRWST와 코어캐처 사이의 모터구동 밸브(MOV: motorized operating valve)는 원자로용기의 파손 신호를 수신하면 자동으로 개방된다. IRWST의 냉각수가 중력에 의해 코어캐처 냉각 채널 아래의 냉각수 분배조(water box)로 들어가면 수 백초의 시간 동안 채널을 천천히 채우며 수위가 상승한다. 냉각 채널의 수위가 최상부에 다다르면, 코어캐처 내부 노심용융물 풀의 상부 공동을 채우기 시작하며, 동시에 일부 냉각수는 인접 배수조로 유입된다. 원자로공동 내부의 냉각수 수위가 강하관(downcomer) 최상부에 다다르면, 강하관과 냉각 채널 사이에 자연순환유동 루프가 형성된다. 강철 재질의 코어캐처를 통해 노심용융물의 열을 냉각 채널로 지속적으로 전달하면, 냉각수는 비등하기 시작하고 이 순환 유동을 추진시킨다.

3.2 코어캐처 열전달 상관식

코어캐처 냉각 채널은 하부에서 유입되는 냉각수의 흐름을 용이하게 하기 위해 수평 방향에서 10° 의 경사를 가지고 있다. 코어캐처 냉각 채널 설계의 효율성은 코어캐처 내부의 단위 체적당 열 발생량과 코어캐처 냉각 채널의 열속 분포에 의해 결정될 수 있다. 현재 코어캐처 냉각 채널을 따라 분포되는 열속에 대해 동일 형태의 자료가 없기 때문에 원자로 하부 헤드와 같은 구 형태의 경계조건에서 노심용융물이 형성하는 열속 분포를 코어캐처 냉각 채널 상의 열속 분포로 이용하고자 한다.

코어캐처는 냉각 채널 상의 열속 분포를 정형화하기 위해 다음과 같은 가정사항들이 고려되었다.

- 1) 열속 분포 관점에서 코어캐처 바닥을 완만한 곡선 형태로 모사
- 2) 완만한 곡선 형태 풀에 대해 보고된 열속 분포 자료가 없는 관계로 활용 가능한 구 형태 풀에 대한 열속 분포 자료를 완만한 곡선 형태의 풀 열속 분포 자료로 가정

완만한 곡선 형태의 풀이 갖는 기울기는 실제 10° 경사 채널의 기울기보다 클 것이며 이에 따라 열속 분포 또한 실제 경사각의 냉각 채널이 갖는 열속 분포보다 클 것이다.

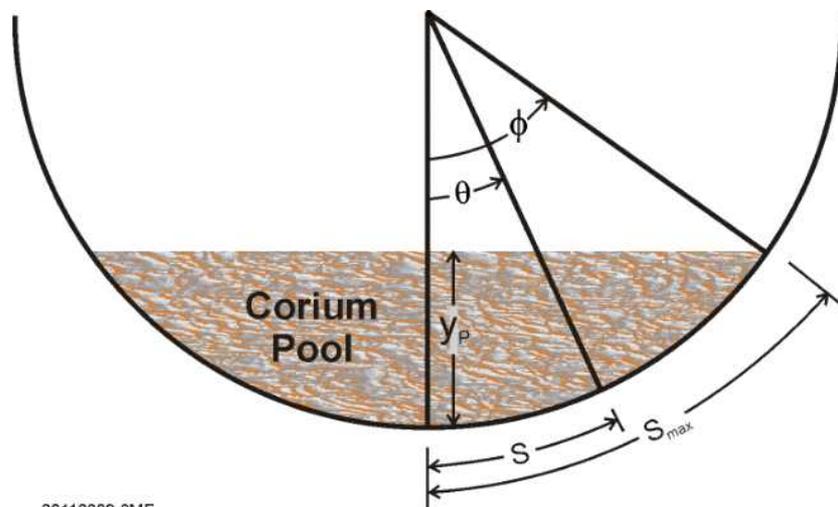


Fig. 2 Definition of pool angles θ and ϕ for spherical segment pools

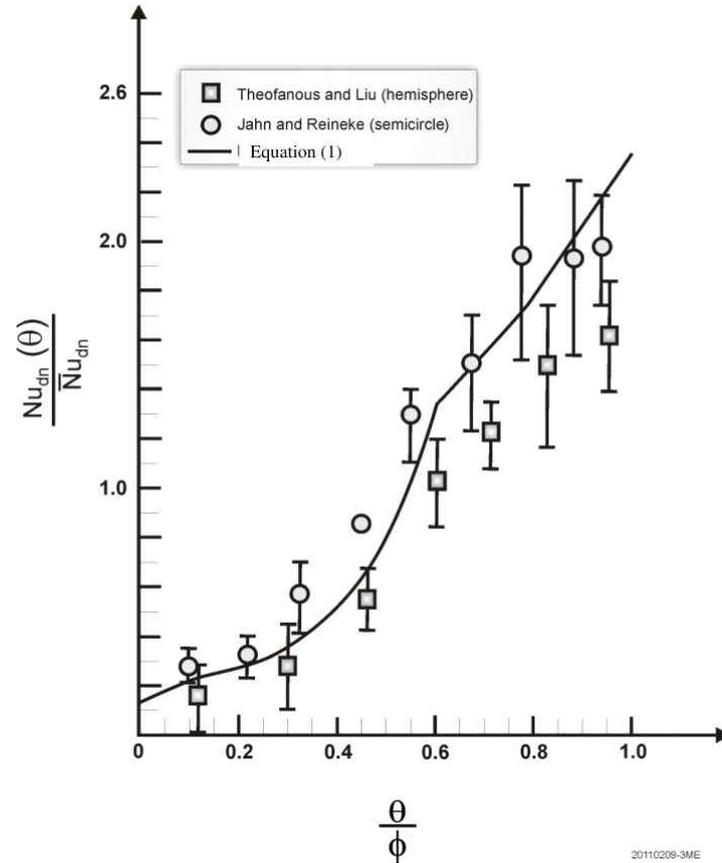


Fig. 3 Heat flux profile data of Theofanous and Liu for a hemispherical pool and Jan and Reineke for a semi-circular pool

실험결과를 기준으로 Theofanous와 Liu⁽³⁾는 반구형 풀에 대해 다음과 같은 열속 분포를 제안하였다.

$$\left[\frac{N_{dn}(\theta)}{\overline{N_{dn}}} \right]_{sph} = \begin{cases} 1 + 1.08\left(\frac{\theta}{\phi}\right) - 4.5\left(\frac{\theta}{\phi}\right)^2 + 8.6\left(\frac{\theta}{\phi}\right)^3; & 0 \leq \left(\frac{\theta}{\phi}\right) \leq 0.6 \\ 1 + 0.35\left(\frac{\theta}{\phi}\right) + \left(\frac{\theta}{\phi}\right)^2 & ; 0.6 \leq \left(\frac{\theta}{\phi}\right) \leq 1.0 \end{cases} \quad (1)$$

여기서 $N_{dn}(\theta)$ 는 원자로용기 중심부에서 각 θ 위치의 국부 열전달계수이고, $\overline{N_{dn}}$ 은 하향 열전달에 대한 Nusselt 수이다. ϕ 는 원자로용기 내부의 노심용융물 풀 표면의 각도이다.

코어캐처에 등가인 완만한 곡선 형태의 풀 열속 분포 상관식에서 국부 열속 분포를 계산하기 위해서는 평균 열속에 해당하는 $\overline{N_{dn}}$ 을 구하여야 한다. 이를 위해 Jahn과 Reineke⁽⁴⁾가 완만한 곡선 풀에 대해 제안한 평균 열속 상관식은 다음과 같다.

$$\overline{N_{dn}} = 0.54Ra^{0.18} \left(\frac{y_p}{R}\right)^{0.26} \quad (2)$$

여기서 Ra 는 Rayleigh 수로 다음과 같이 정의된다.

$$Ra = \frac{g\beta R^5 Q}{ka\nu} \quad (3)$$

여기서, g , β , k , α , ν 는 노심용융물 풀의 대류 열전달 측면에서 물리적 의미를 갖고 있다. 만일 코어 캐처 내부의 노심용융물의 깊이(H)가 코어캐처의 경사 바닥 깊이 y_b 보다 깊다면 y_b 를 H 로 대체하고 측 방향 평균 열속 계산은 다음과 같이 Steinbrenner과 Reincke⁽⁵⁾가 제안한 상관식을 사용한다.

$$Nu_{side} = 0.85Ra_H^{0.19} \quad (4)$$

이때, $Ra_H = \frac{g\beta H^5 Q}{k\alpha\nu}$ 이다.

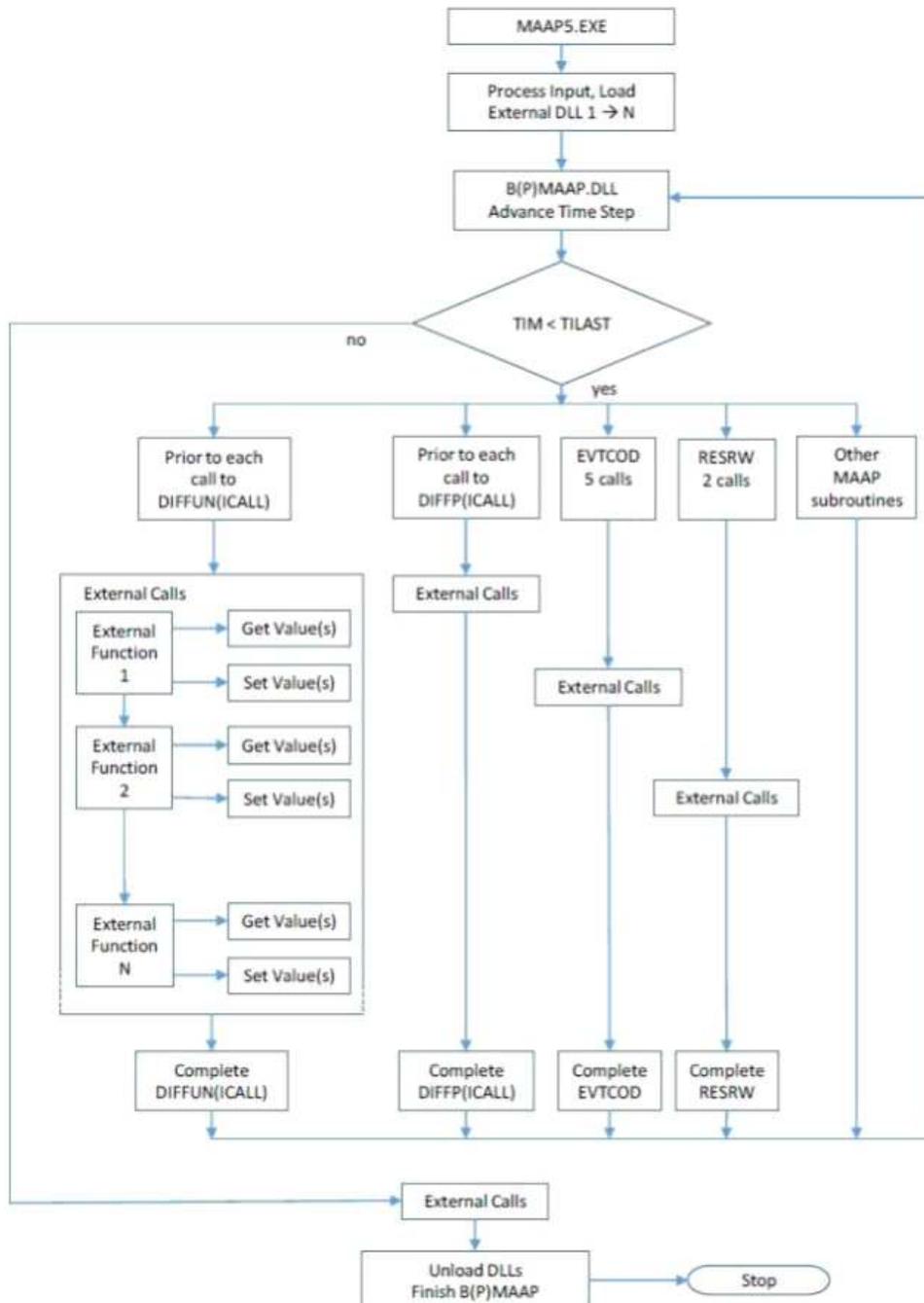


Fig. 4 Code flow diagram depicting the locations in MAAP code

4. 열전달 모델 변경을 위한 API 개발

4.1 MAAP API 개요

MAAP은 애플리케이션 프로그래밍 인터페이스(API: application programming interface)를 통해 사용자 정의 코드를 MAAP 시퀀스 실행 중에 실행할 수 있다. 이는 사용자 정의 코드가 포함된 외부 연결 dynamic link library(DLL)를 MAAP에 제공함으로써 수행된다. 외부 DLL은 MAAP 입력 텍스트 구문을 통해 로드되며, 이는 MAAP 서브루틴 ExternCall에서 필요로 하는 DLL LOAD 블록으로 구성된다. MAAP 실행 파일은 DLL LOAD 블록을 처리하여 MAAP에서 호출할 외부 서브루틴을 정의하고, MAAP 실행 중에 필요한 외부 호출을 수행한다. 외부 DLL은 MAAPInterface.dll 라이브러리와 상호작용하여 MAAP와 변수 값을 교환한다. ExternCall의 작동 로직에 대한 간략한 다이어그램은 Fig. 4와 같다.

4.2 CoreCatcherAPI DLL

MAAP 코드에서 Core Catcher 모델에 대한 추가 기능을 모델링하기 위해 “CoreCatcherAPI.dll”이라는 외부 DLL을 생성하였다. CoreCatcherAPI는 MAAP input 또는 include 파일에 다음과 같이 입력함으로써 MAAP 코드에 의해 로드된다.

```
DLL LOAD
  64
  DX
  C:\PathString\CoreCatcherAPI.dll
  CORECATCHERAPI
END
```

DLL LOAD 블록은 MAAP에 API DLL을 로드하도록 지시한다. “64”는 이 사양이 64비트 아키텍처를 위한 것임을 나타내며 “DX”는 이 로드 사양이 double precision 코드 버전을 위한 것임을 지정한다. “C:\PathString\CoreCatcherAPI.dll”는 DLL 파일의 전체 경로를 지정하며, 다른 컴퓨터에서 실행하거나 다른 디렉토리에서 실행해야 하는 경우 업데이트할 수도 있다. “CORECATCHERAPI”는 DLL에 의해 MAAP이 호출하기 위해 내보내는 함수의 이름을 지정한다.

4.3 열속 프로파일 사용자 입력

본 연구에서는 API를 이용하여 노심용융물 풀에서 주변 크리스트로의 열속 분포를 입력으로 지정할 수 있도록 변경하였다. 기존의 코드는 하부 헤드 열전달 실험에서 유도된 반원 기반 프로파일을 가정하였으나, 이 변경으로 인하여 사용자는 대류 열전달을 위한 임의의 프로파일을 지정할 수 있다. 사용자 열속 프로파일은 FEXTRA 변수를 사용하여 지정하며 각 요소는 해당 코어캐치의 열침원 노드와 대응하여 열속의 배율을 나타낸다. 노드 번호는 코어캐치 중심의 바닥면부터 경사면을 따라 순차적으로 증가하며, 경사면 10개 노드, 수직면 10개 노드로 구성된다. 본 연구에서 사용한 임의의 열속 배율 값은 Table 1과 같다. 기존보다 경사면의 중간 부분에 더 많은 열속이 인가되도록 값을 구성하였으며 냉각 채널로의 열속을 더 상세히 확인하기 위해 용융물 상부로의 열속은 감소하도록 입력하였다.

4.4 분석 경계조건 및 열속 프로파일 정의

본 절에서는 MAAP5.06 코드의 API를 이용하여 중대사고 케이스들을 테스트하였다. 실제 코어캐치 계통은 원자로용기 파손 이후 300초 만에 냉각수 주입이 시작되며 해석에 따르면 수 시간 이내에 노심용융물의 냉각이 완료된다. 또한 해석코드에서는 용융물 분출(melt eruption), 입자층(particle bed) 현상을 모델하고 있는데 이들은 노심용융물의 냉각을 가속한다. 본 연구에서는 열전달 메커니즘의 세부 사항을 확인하기 위하여 이러한 현상 모델들을 비활성화하고, 용융물 상부 냉각수로의 열전달을 제한하였다. 또한 냉각수 주입 시점을 2시간 지연시켜 희생물질이 충분히 침식된 이후의 냉각 채널 거동을 확인하였다.

초기 사건은 대형 파단 냉각재상실사고 시퀀스를 선택하였으며 다음과 같이 기본 케이스와 사용자 입력 열속을 적용한 케이스에 대해 분석을 수행하였다.

- 케이스 1: 기본 열전달 상관식 적용
- 케이스 2: Table 1의 사용자 입력 열속 분포 적용

Table 1 User input heat flux profiles

| Parameter | Value | Description |
|--------------------------|-------|--|
| FEXTRA(1) | 0.7 | Multiplier for the heat transfer coefficient for the molten pool to lower crust #1 (middle bottom) |
| FEXTRA(2) | 0.8 | Molten pool to crust #2 (1st in the inclined core catcher wall) |
| FEXTRA(3) | 1.1 | Molten pool to crust #3 (2nd in the inclined core catcher wall) |
| FEXTRA(4) | 1.12 | Molten pool to crust #4 (3rd in the inclined core catcher wall) |
| FEXTRA(5) | 1.13 | Molten pool to crust #5 (4th in the inclined core catcher wall) |
| FEXTRA(6) | 1.14 | Molten pool to crust #6 (5th in the inclined core catcher wall) |
| FEXTRA(7) | 1.15 | Molten pool to crust #7 (6th in the inclined core catcher wall) |
| FEXTRA(8) | 0.9 | Molten pool to crust #8 (7th in the inclined core catcher wall) |
| FEXTRA(9) | 0.75 | Molten pool to crust #9 (8th in the inclined core catcher wall) |
| FEXTRA(10) | 0.6 | Molten pool to crust #10 (9th in the inclined core catcher wall) |
| FEXTRA(11) | 0.5 | Molten pool to crust #11 (10th in the inclined core catcher wall) |
| FEXTRA(12) to FEXTRA(21) | 1 | Molten pool to crusts #12 to 21 (vertical wall) |
| FEXTRA(101) | 0.2 | Multiplier for heat transfer coefficient for the molten pool to upper crust |

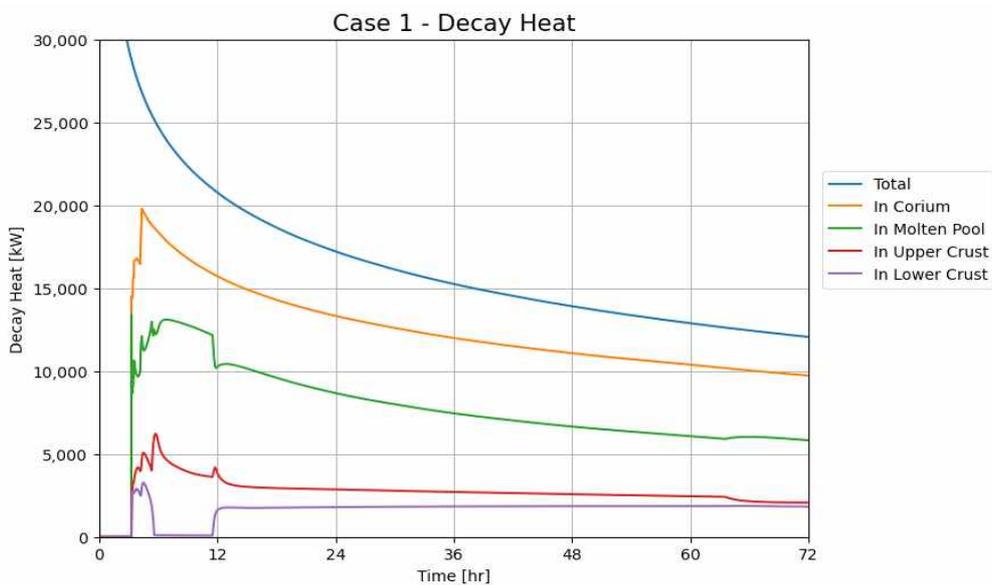


Fig. 5 Case 1 decay heat distribution

5. 결과 및 토의

사용자 입력 열속 분포 결과를 확인하기 위해, Table 1에 정의된 임의의 값을 적용한 케이스 2를 분석하였다. 분석 결과에 따르면 케이스 1과 케이스 2는 전반적으로 유사한 추세를 나타냈으며 노심용융물의 붕괴열, 질량과 온도 분포, 용융 풀과 하부 크러스트 간의 열속과 같은 분석 결과들을 Fig. 5부터 Fig. 14에 나타냈다.

Fig. 5와 Fig. 6은 노심용융물이 가지는 붕괴열의 분포를 나타낸다. 전체 붕괴열과 노심용융물의 붕괴열의 차이는 방출된 핵분열 생성물에 기인한다. 케이스 2에서는 용융풀 상부 방향의 열속을 감소시킨 효과로 인해 상대적으로 상부에서는 용융풀이 크러스트로 잘 고화되지 않았기 때문에 해당 붕괴열이 케이스 1에 비해 작은 것을 확인할 수 있다.

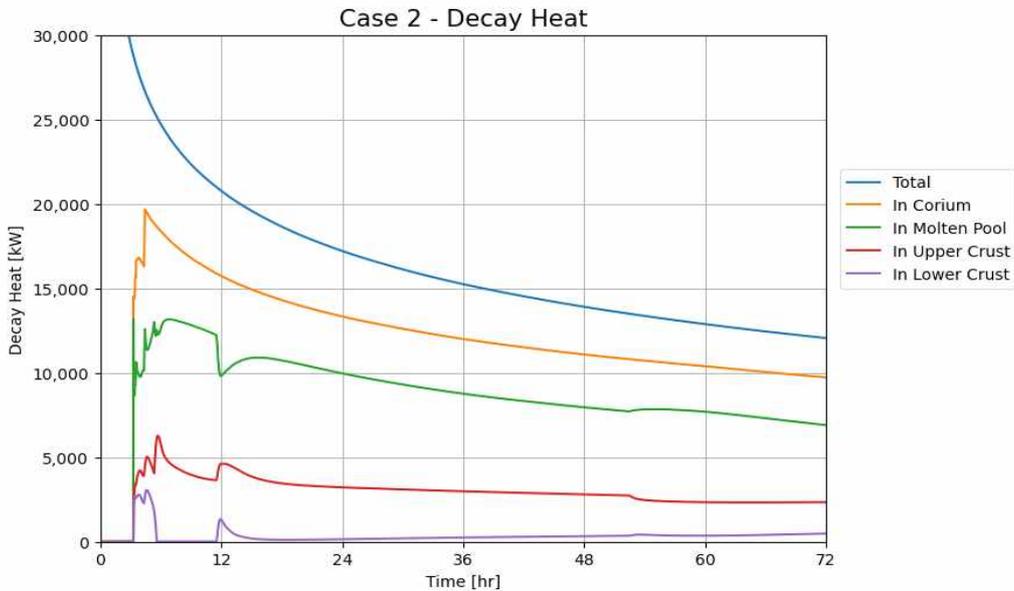


Fig. 6 Case 2 decay heat distribution

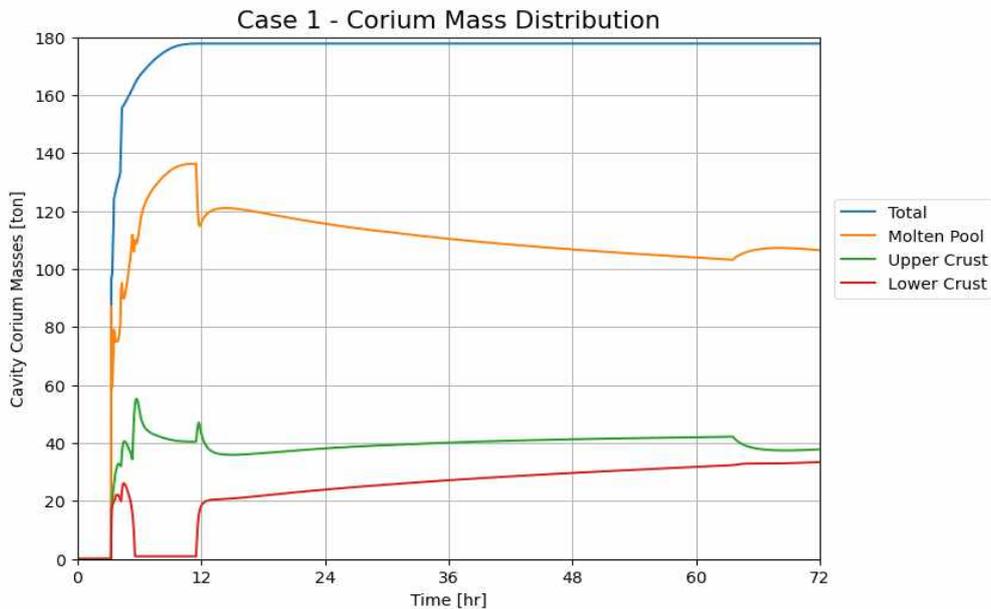


Fig. 7 Case 1 corium mass distribution in the core catcher

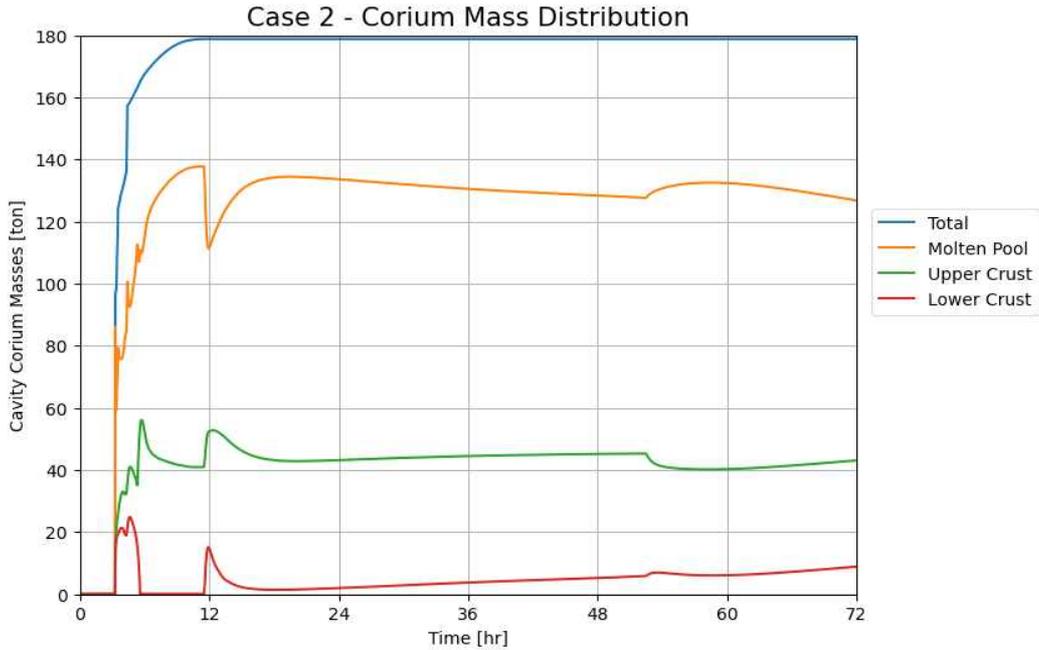


Fig. 8 Case 2 corium mass distribution in the core catcher

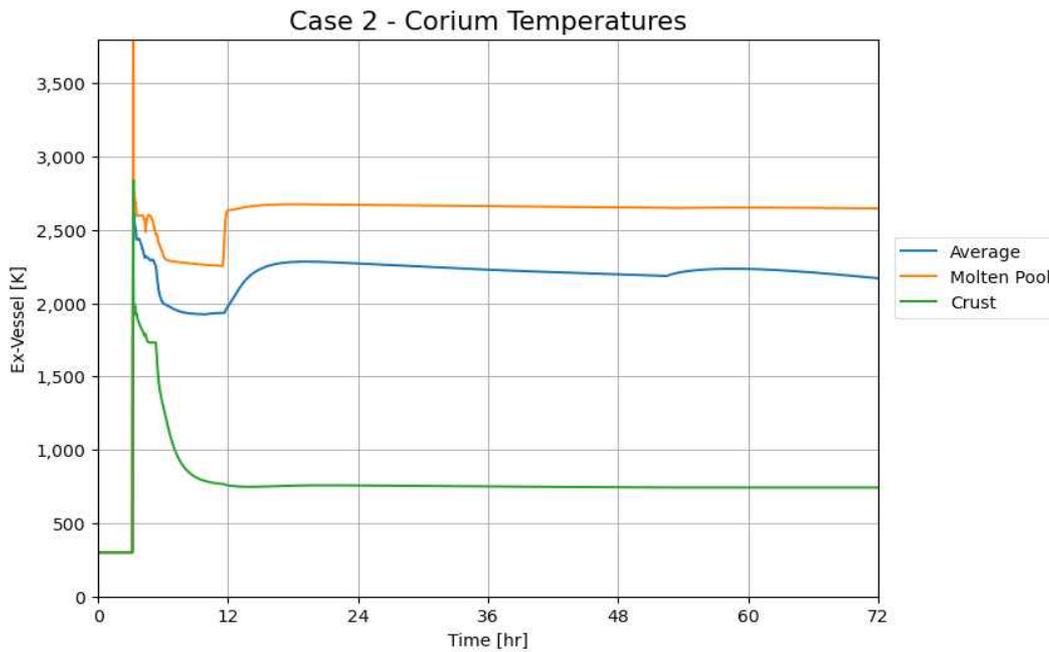


Fig. 9 Case 2 corium temperatures in the core catcher

Fig. 7과 8은 코어캐처에서 노심용융물의 질량 분포를 나타낸다. 두 케이스 모두 그림에 나타나듯이 해석이 진행되는 72시간 동안 용융풀이 완전히 냉각되지 않았다. 이는 노심용융물을 냉각하는 다양한 현상학적 모델을 비활성화하였기 때문으로 매우 보수적인 가정을 적용한 결과임을 알 수 있다. 실제 코어캐처는 노심용융물이 매우 빠르게 냉각될 것으로 예상되지만 냉각 채널의 성능 검증 실험에서 인가되는 열속 분포에 따른 거동을 집중적으로 확인하기 위해 이러한 가정을 사용하였다.

용융풀의 온도는 Fig. 9 및 Fig. 10과 같이 MCCI가 끝난 후 약 2,500 K 이상으로 각각 거의 일정한 온도를 유지한다. 상부 열속이 제한된 케이스 2에서 더 높은 온도를 나타냄을 확인할 수 있다.

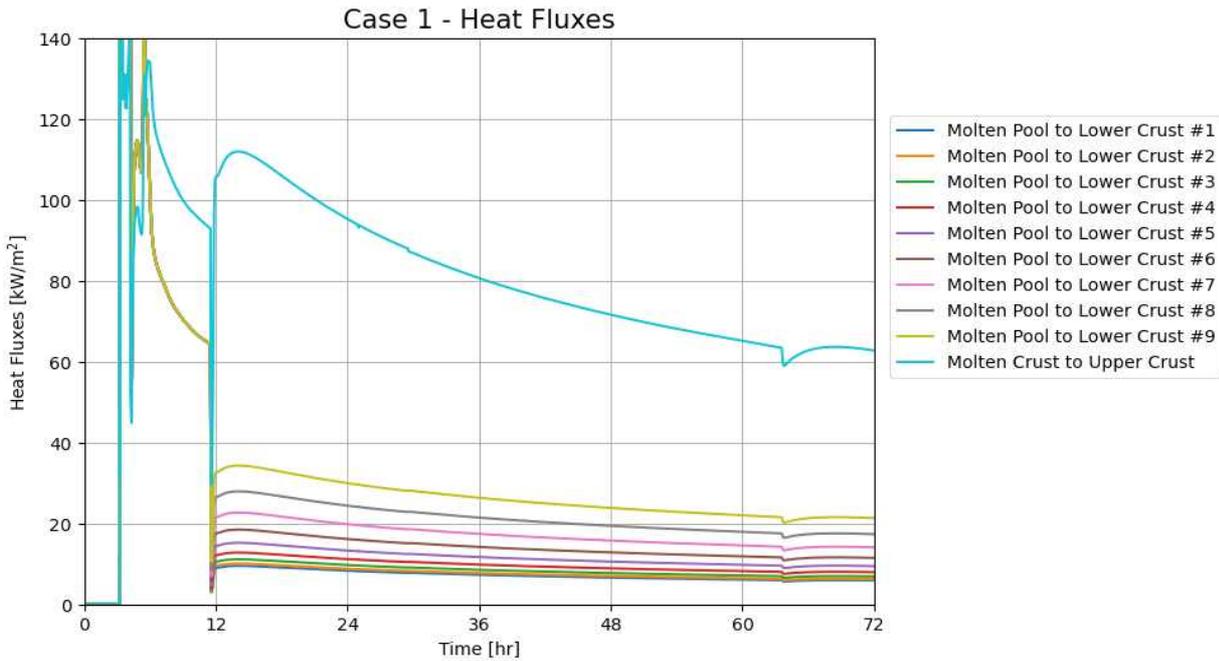


Fig. 10 Case 1 heat fluxes from the molten pool to lower and upper crust

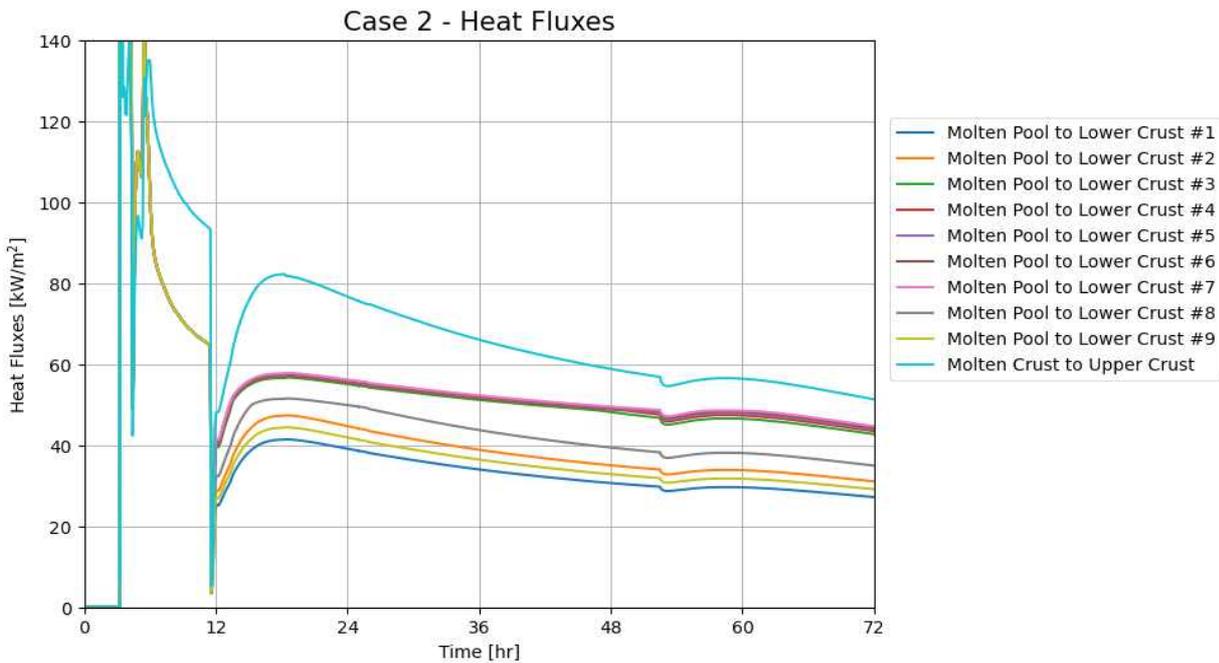


Fig. 11 Case 2 heat fluxes from the molten pool to lower and upper crust

Fig. 11과 12는 10개로 구분된 경사면의 각 노드에서의 용융풀에서 하부 크러스트로 전달되는 열속을 나타낸 그래프이다. 케이스 2에서 제한된 상부 열속 대비 하부로 전달되는 열속이 전반적으로 상승하였음을 알 수 있다. Fig. 13과 14는 용융풀에서 각 크러스트로의 열전달계수를 상부, 바닥면, 그리고 경사면 노드 일부에 대해 나타낸 그래프이다. 앞선 열속과 유사한 형태를 나타내고 있으며 MAAP5 코어캐처 모델은 Jahn-Reineke 상관 관계를 기반으로 하고 있기 때문에 케이스 1은 경사면을 따라 상부의 대류 열전달계수가 하부 대류 열전달계수보다 커지는 것을 확인할 수 있다. 이에 반해 케이스 2는 사용자가 지정한 입력 계수를 따라 노드별 열전달계수가 변경되었다.

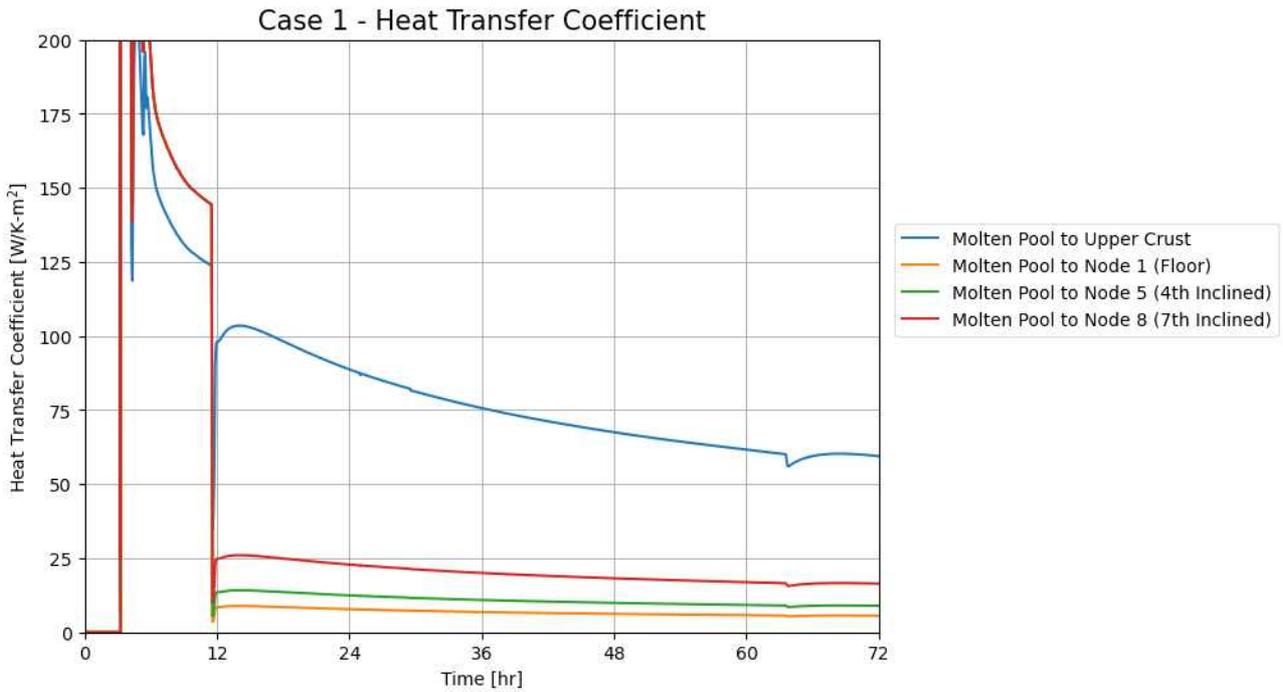


Fig. 12 Case 1 heat transfer coefficient

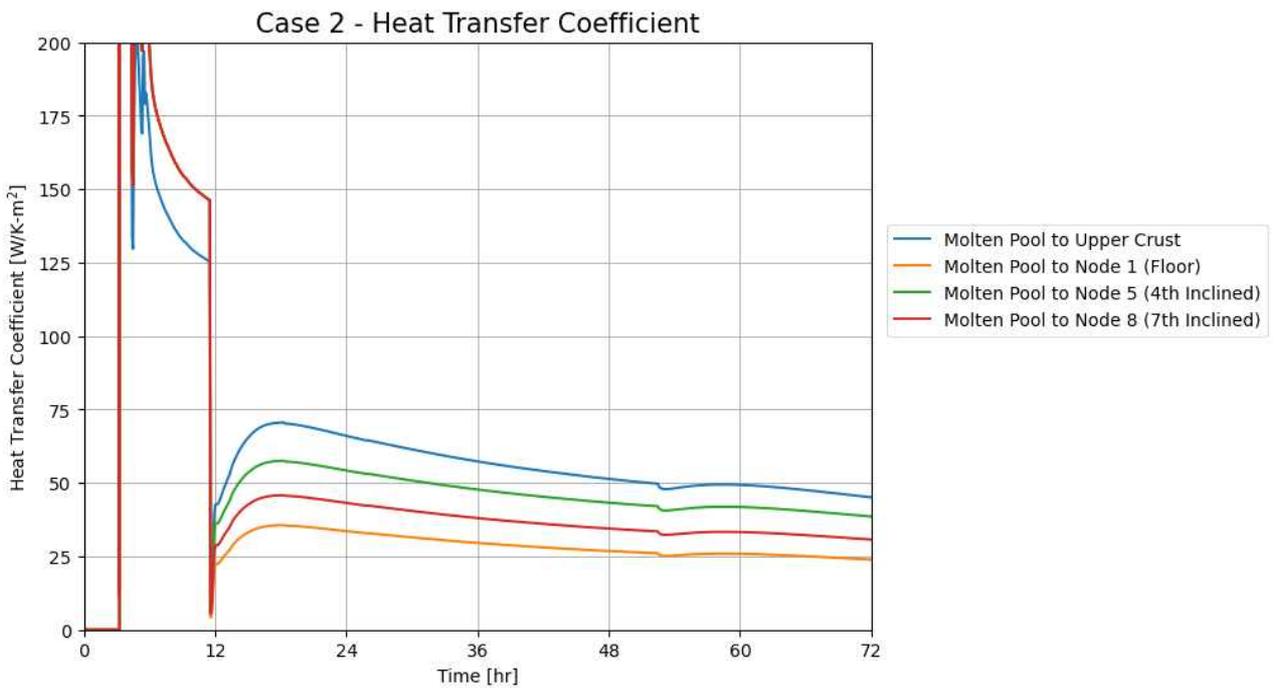


Fig. 13 Case 2 heat transfer coefficient

냉각 채널로 용융풀 상부로의 열속을 줄이고 하방 열속 프로파일을 조정한 입력이 적용된 케이스 2에서는 상대적으로 많은 양의 열부하가 코어캐치의 냉각 채널로 인가되며 이는 Fig. 15에 나타나있다. Fig. 16은 각 케이스 별 냉각수 재순환 유량을 나타낸 그래프로 72시간 전체 구간에 대해 적분한 재순환 유량은 케이스 1에서 약 11,241 ton, 케이스 2에서 약 25,505 ton으로 사용자 입력에 맞춰 냉각 채널로 더 많은 열이 유입됨에 따라 재순환 유량이 증가하는 것을 확인할 수 있다.

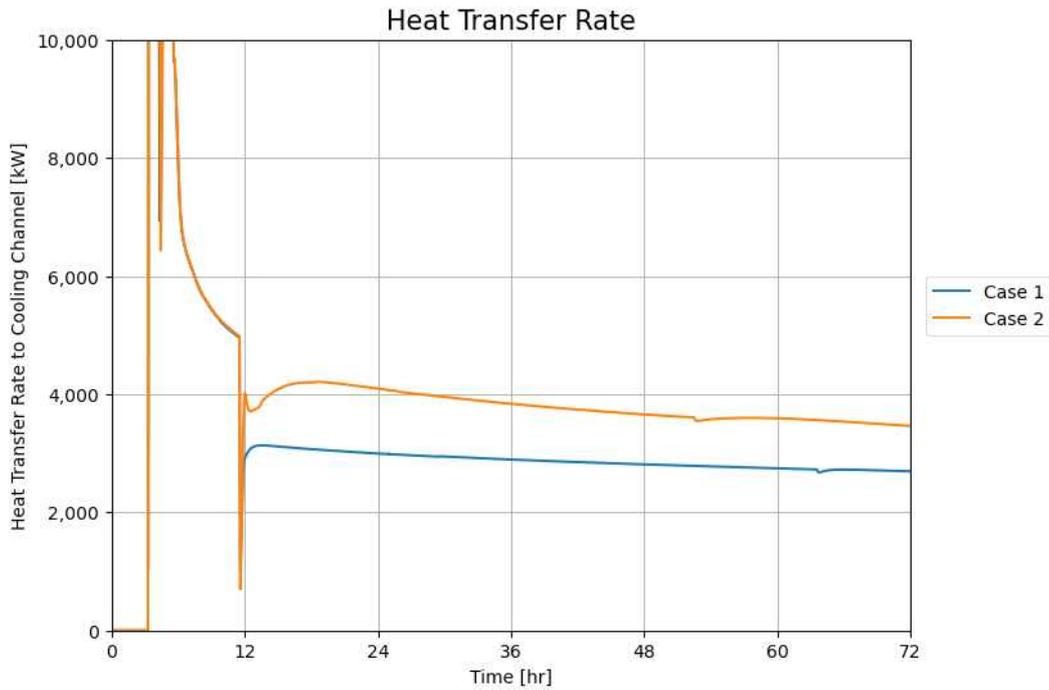


Fig. 14 Comparison of heat transfer rate to cooling channel

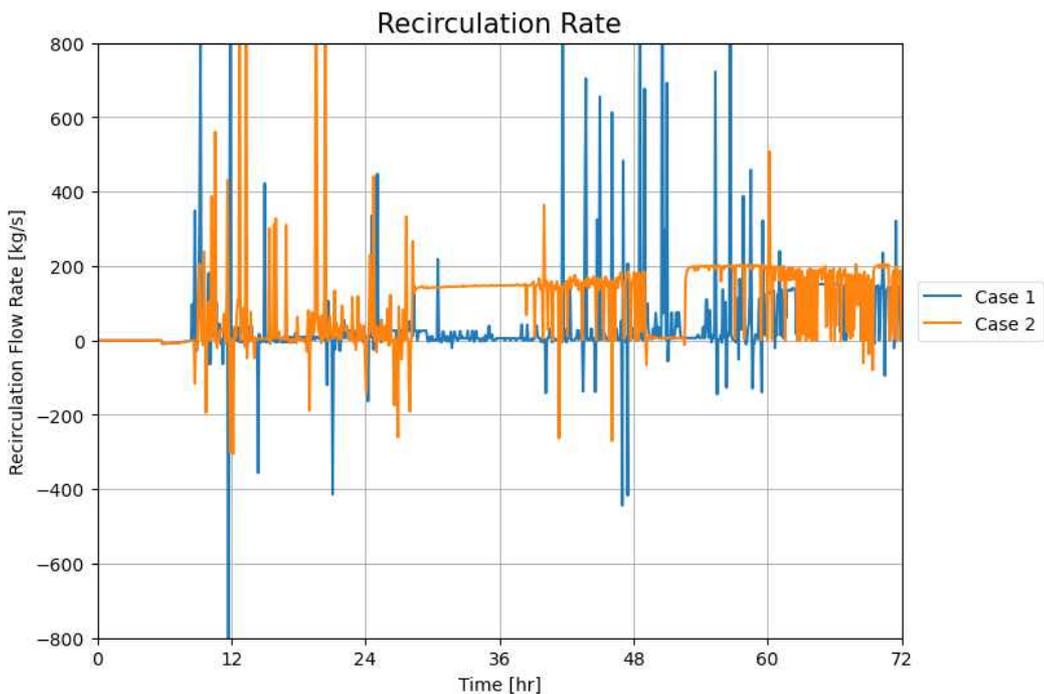


Fig. 15 Comparison of recirculation flow in cooling channel

6. 결론

중대사고 해석코드 MAAP5의 코어캐처 냉각 채널 열속 분포를 사용자가 수정할 수 있도록 해석코드의 API 개발하였다. 앞서 확인한 바와 같이 MAAP5에서 적용하고 있는 냉각 채널 열속 분포 모델은 여러 차례 수행된 CFD 해석 결과와 일치하지 않았다. 이는 형상에 따른 효과를 비롯하여 노심용융물과

희생물질 간의 상호작용, 노심용융물 내 층 분리 현상, 물질의 고화 및 용융, 화학 반응 등 고려해야 하는 현상이 다양하고 복잡하며, 불확실성이 높기 때문에 따라서 여러 가지 방법으로 실험 또는 평가를 수행하여 종합적으로 해석하고 판단할 필요가 있다. 따라서 다양한 방법론을 통해 도출된 열속 분포를 MAAP5 해석 모델에도 적용할 수 있도록 MAAP5 API를 이용하여 사용자가 지정한 대로 열속을 수정할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 이를 통해 향후 인허가 현안 해결을 위한 성능평가 실험 등을 수행할 때 MAAP5를 통해 그 결과를 검증해 볼 수 있는 기반을 마련하였다.

후 기

본 연구는 한국 산업통상자원부가 지원하는 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원(과제번호 : 2021781 0100040)으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌 (References)

- (1) Song, K. W., Park, H. S., Revankar, S. T. and Kim, H. Y., 2016, "Experimental Analysis of Ex-Vessel Core Catcher Cooling System Performance for EU-APR1400 during Severe Accident," *Trans. of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting*, Gyeongju, Republic of Korea.
- (2) EPRI, 2021, *Modular Accident Analysis Program Version 5.06* (<https://www.epri.com/research/products/00000003002020728>), Palo Alto, USA.
- (3) Theofanous, T. G. and Liu, C., 1995, "Natural Convection Experiments in a Hemisphere with Rayleigh Numbers up to 10^{15} ," *Proc. ANS Nat'l Heat Transfer Conf.*, Portland, USA, pp. 349~365.
- (4) Jahn, M. and Reineke, H. H., 1974, "Free Convection Heat Transfer With Internal Heat Sources, Calculations and Measurements," *Proc. of the 5th Intl. Heat Transfer Conf.*, Tokyo, Japan, pp. 74~78.
- (5) Steinbrenner, V. and Reineke, H. H., 1978, "Turbulent Buoyancy Convection Heat Transfer with Internal Heat Sources," *Proc. 6th Int'l Heat Transfer Conf.*, Toronto, Canada, pp. 305~310.
- (6) Asfia, F. J., Frantz, B. and Dhir, V. K., 1996, "Experimental Investigation of Natural Convection Heat Transfer in Volumetrically Heated Spherical Segments," *J. Heat Transfer*, Vol. 118, No. 1, pp. 31~37.

축소차수모델 (ROM)을 활용한 다중이용건물의 실내 공조 예측

차경환[†] · 강경혁* · 이명성* · 김주한*

* 한국전자기술연구원 지능로봇틱스연구센터

Indoor HVAC Prediction in Multi-Use Building Using Reduced Order Model

Kyunghwan Cha[†], Gyeonghyeok Kang*, Myungsung Lee* and Joo-Han Kim*

* Intelligent Robotics Research Center, Korea Electronics Technology Institute

(Received December 19, 2023 ; Revised May 13, 2024 ; Accepted May 14, 2024)

Key Words: Computational Fluid Dynamics(전산유체역학), Fluid Dynamics(유체역학), Heat Transfer(열전달), Multi-Use Building(다중이용건물), Digital Twin(디지털트윈), Reduced Order Model(축소차수모델), Proper Orthogonal Decomposition(적합직교분해)

초록: 축소차수모델을 적용하여 다중이용건물을 위한 시뮬레이션 기반 디지털트윈을 구축함으로써, 실시간 해석, 가상 시나리오, 그리고 권장 풍량 예측을 포함하는 시스템 시뮬레이션을 수행하였다. 다중이용건물의 테스트베드로 백화점이 고려되었고, 디지털트윈의 시뮬레이션 정확도는 계측 데이터와 비교하여 8% 이내의 오차 범위에서 검증되었다. 공조 쾌적지표 중 하나인 PPD(예상불만족율)를 기반으로 한 최적 HVAC 풍량 알고리즘을 구현하였고, 쾌적 모드와 준쾌적 모드에 대해 각각 실내 쾌적성과 에너지 절감 기준에 기반한 최적 풍량이 제안되었다. 실시간 시스템 시뮬레이션 결과에 따르면, 현재 테스트베드의 공조 운영은 쾌적한 상태로 유지되는 것이 확인되었다. 한편, 준쾌적 모드에서는 HVAC 풍량이 약 40% 감소할 것으로 예측되어, 에너지 절감 가능성을 확인하였다.

Abstract: A reduced-order model was applied to construct a simulation-based digital twin for a multi-use building. The digital twin includes system simulations for real-time analysis, virtual scenarios, and recommended airflow prediction. A department store was considered as a testbed of the digital twin for multi-use building. The reduced-order model's accuracy was validated, showing an error margin within 8% of the measured data. An optimal HVAC airflow algorithm based on the PPD (Predicted Percentage Dissatisfied) was designed and implemented in the system simulations. For the comfort and semi-comfort modes, optimal airflow recommendations were proposed, based on indoor comfort and energy-saving criteria, respectively. The result of the real-time system simulation of the testbed confirmed that the HVAC operations were maintained in the comfort mode. In the semi-comfort mode, a predicted reduction of approximately 40% in HVAC airflow was observed, indicating potential energy savings.

- 약어설명 -

ROM : Reduced Order Model, 축소차수모델
RSM : Response Surface Model, 반응표면모델
AHU : Air Handling Unit, 공조기
SA : Supply Air, 공급공기

† Corresponding Author, khcha@keti.re.kr

© 2024 The Korean Society of Mechanical Engineers

| | |
|------|--|
| RA | : Return Air, 회수공기 |
| CMH | : Cubic Meter per Hour, 단위시간당 체적 |
| POD | : Proper Orthogonal Decomposition, 적합직교분해 |
| SVD | : Singular Value Decomposition, 특잇값분해 |
| GARS | : Genetic Aggregation Response Surface, 유전집합반응표면 |
| PPD | : Predicted Percentage of Dissatisfied, 예상불만족율 |
| PMV | : Predicted Mean Vote, 예상평균온열감 |

1. 서론

1.1 연구 배경 및 목적

현대 사회는 에너지원 사용에 따른 비용 증가, 환경오염 그리고 불안정성과 관련된 중대한 과제에 직면하고 있으며, 지속 가능한 에너지 소비를 보장하기 위해 에너지 효율성을 높이는 것이 점차 더 중요해지고 있다. 또한, 건물은 전체 세계 에너지 소비의 최대 40%를 차지하며, 그중 약 30 ~ 40%는 실내의 열적 편안함을 유지하기 위해 사용되고 있다.^(1,2) 특히 다중이용건물 내에서 실내 공기질의 최적화와 에너지 효율성은 인간의 편안함과 환경의 지속가능성에 대한 잠재적인 영향으로 인해 상당한 관심을 받고 있으며, 에너지 소비에 대한 규제를 요구하고 있다. 그러나 에너지 소비를 줄이기 위해 냉·난방 에너지 사용량을 절감할 수는 있지만, 온열 환경의 변화로 재실자의 열 쾌적성이 저하되어 업무 및 시설 이용에 불편함을 야기한다. 또한, 건물의 규모에 따라서 시설 공조 운영자의 공조방식과 이용자의 출입에 따른 외기 침투 및 에스컬레이터 존과 같은 공간 개방부로 인해 비균일한 온도 차가 조성될 수 있다. 공조기 운영과 설계 구조상의 이유로 공기의 흐름이 변하며, 외부 환경으로부터의 열전달과 내부 발열로 인해 온도 차가 증가한다. 특히, 다중이용건물은 매장에 따라 재실자의 이용 비중이 달라지므로 실내의 부하량이 달라 구역별 온도 차가 발생하며, 재실자 기준의 열 쾌적성의 예측에 어려움이 있다.

건물에서의 실내 환경 부하 및 열 쾌적성은 계측 데이터 기반으로 솔루션을 제공하거나 시뮬레이션 기반 모델을 생성하여 예측 연구가 진행되고 있다. 시뮬레이션 기반의 축소차수모델(ROM: reduced order model)은 계산을 위한 초기비용이 크게 발생하지만, 충분한 데이터가 쌓이면 고충실도 결과를 빠른 시간 안에 제공이 가능하기 때문에 다양한 예측에 활용되고 있다. 이때, 빠른 결과 제공을 위해 적합직교분해(POD: proper orthogonal decomposition) 기반 기술이 건축환경 분야에도 도입이 되었다.

Guay⁽³⁾과 Sempey⁽⁴⁾는 전산유체역학(CFD)으로부터 각각 속도와 온도 필드(field)를 추정하기 위해 POD 기법을 제안하여 빌딩시스템에서의 공기 흐름과 열적 쾌적함을 위한 시뮬레이션 연구를 수행하였다. 또한, Mullen⁽⁵⁾은 BEMS(building energy management systems)와 통합한 ROM 모델링을 위한 방법 연구를 수행하였으며, Kim⁽⁶⁾과 Ayed⁽⁷⁾는 BES(building energy simulation)와 ROM을 결합하여 소규모 건물에 에너지 소비를 위한 RTUs(rooftop units) 제어 성능 예측을 위해, 시뮬레이션을 적용하여 동적 응답의 최적 제어를 위한 연구를 수행하였다. 그러나 선행연구의 경우, 설비 제어를 위한 목적으로 실내 부하를 일정한 상황으로 간주하여, 열 쾌적성 관점에서 정확성에 한계가 존재한다.

본 연구에서는 다중이용건물을 대표하는 백화점 건물 1개 층을 테스트베드로 선정하고, 열 쾌적성을 위해 계측 데이터를 기반으로 실내 부하를 예측하여 시뮬레이션에 적용하였다. 계측 데이터를 활용한 정확도 높은 실내 부하 적용으로 실시간 해석 및 가상 시나리오에서의 실내 환경 변화를 예측하고, 열 쾌적성과 에너지 사용량 절감을 위한 공조 운영안을 제안하고자 한다.

1.2 연구 방법

본 연구에서는 시뮬레이션 기법을 활용하여 축소차수모델을 구축하고 운영에 따른 예측 및 가상 시나리오 운전, 쾌적 지표 기반의 제어 알고리즘을 적용한 실시간 예측 시스템을 구축하고자 다음의 연구를 수행하였다.

1) 시뮬레이션 기법 검토

- 2) 시뮬레이션 데이터베이스 생성
- 3) POD 기법 활용 ROM 생성
- 4) ROM 적용 시스템 시뮬레이션 설계
- 5) ROM 및 PPD 활용 쾌적 풍량 알고리즘 구현
- 6) 실시간 예측 프로세스 구축 및 검증

2. 축소차수모델(ROM)

2.1 적합직교분해(POD)

POD는 Sirovich⁽⁸⁾가 제시한 스냅샷 기법으로, CFD 해석 결과로부터 최적의 기저(basis)와 가중치를 구하고 고차원 공간으로 투영하여 새로운 해석 조건에서의 유동장 데이터를 재구성이 가능하다.⁽⁹⁾ n 개의 입력 매개변수와 m 개의 격자 상에서의 결과를 가지는 열벡터 x 로 구성된 행렬을 M 이라고 가정하자.

$$M(m,n) = [\vec{x}_1, \vec{x}_2, \vec{x}_3, \dots, \vec{x}_n] \tag{1}$$

POD 기법에서 벡터장을 아래와 같은 식 (2)의 형태로 다수의 모드로 선형 중첩한다.

$$\vec{x}(m,n) \approx \sum_i^n a_i(n) \vec{\phi}_i(m) \tag{2}$$

기저로 표현된 축소 모델을 사용하면 초기에 없었던 임의의 n 에서 \vec{x} 를 예측할 수 있게 된다. 이때, 기저벡터는 시간과 공간에 따라 동시 모사가 필요하지만, 수식화를 위해 시간과 공간을 분리하는 방법이 사용된다. 식 (2)를 위해 POD 기저 $\phi_j(m)$ 와 확대 계수 $\alpha_j(n)$ 결정을 위해 특잇값 분해(SVD: singular value decomposition)을 수행하며, 식 (3)과 같다.

$$M = U \Sigma V^T \tag{3}$$

U 와 V 는 각각 좌특이 행렬과 우특이 행렬에 해당하며, Σ 는 대각행렬로 대각성분 σ_i 를 특잇값이라 한다. 특잇값 분해를 사용하면 확대 계수를 기반으로 행렬 M 의 저차원 근사화가 가능하다.

2.2 모델링 및 해석 조건

본 연구를 위해 실제 이용 중인 백화점을 Fig. 1과 같이 모델링 하였으며, 저층을 제외한 상층부 매장의 경우 레이아웃과 공조기 운영 조건이 유사하여 상부 1개 층(5F)을 테스트베드로 선정하였다. 다중이용건물의 경우 매장별 유동 인구, 공조기의 실내 급기/환기량 설계에 따라 구역별 온도 차가 크게 발생하기 때문에 센서 전원 공급 가능 유무 및 재실자의 동선을 고려하여 Fig. 2에 표시된 위치에 환경 센서를 설치하였다. 또한, 하절기 동안의 계측 데이터를 분석한 결과 영역별 최대 4℃의 온도 차가 발생하였으며, 공간 내 영역별 부하 예측이 필요함을 확인하였다. 본 연구를 위해 생성한 격자는 내부에 장애물이 없고 저속의 기류 변화로 격자수에 따른 결과의 영향성이 크지 않았으며, 해석 데이터베이스 구축을 위한 계산시간을 고려하여 약 350만 개의 셀과 90만 개의 노드로 Fig. 3과 같이 구성하였다. 그리고 설치된 센서 데이터를 기반으로 실내 온도 및 기류 예측을 위해 공조기(AHU)의 공조 담당 영역을 기준으로 Fig. 2와 같이 공간 영역을 나누어 부하를 적용할 수 있도록 하였다. 부하는 센서가 설치된 영역(zone 4, 6, 11)과 센서가 없는 영역(zone 7, 8, 10)의 1년간 구매 건수를 확인하여 재실 인원 에 대한 부하를 비율로 계산하였다. 이때, 계산된 비율을 부하량에 곱해 센서가 없는 영역의 부하를 추정하였으며, 균일하

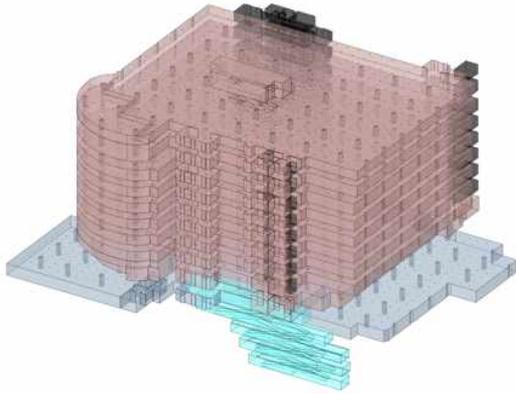


Fig. 1 Modeling of a department store building

Table 1 Domain & boundary setting

| | |
|------------------|--------------------------------|
| Analyze | Steady state |
| Material | Incompressible ideal gas (air) |
| Turbulence | Realizable KE |
| Operation | Gravity |
| Heat | Zone heat source |
| Inlet (SA) | Mass flow rate & temperature |
| Outlet (RA) | Mass flow rate |
| Outlet (opening) | Pressure & temperature |
| Others | No-slip wall |

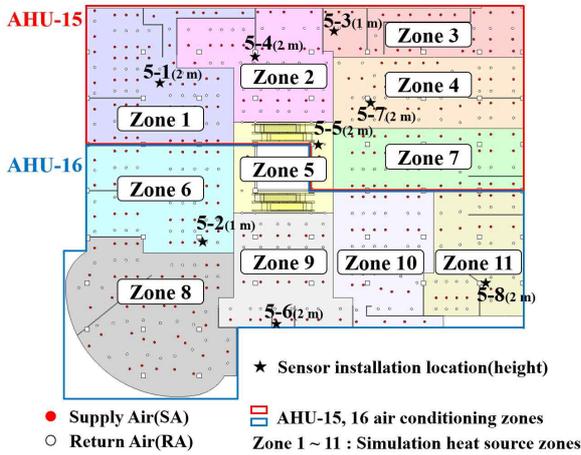
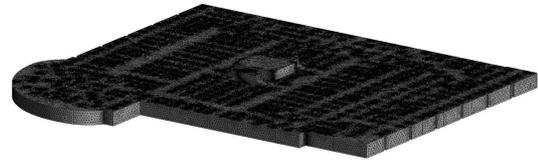
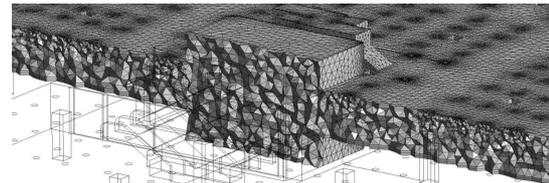


Fig. 2 Testbed heat zone & sensor locations



(a) Grid distribution in the full-scale domain



(b) Inner grid distribution

Fig. 3 Mesh of the testbed on 5F, department store

지 않은 센서 배치로 인한 오차를 줄이고자 하였다. 또한, 실내 환경 센서뿐만 아니라 공조기에도 센서를 설치하여, 유량 및 온도의 계측 데이터를 해석에 활용하여 영역별 발열량을 식 (4)로 계산하여 적용하였다.

$$q = \dot{m}c_p(T_{out} - T_{in}) \tag{4}$$

식에서 q 는 발열량[W], \dot{m} 은 질량유량[kg/s], c_p 는 비열용량[J/kg°C], T_{out} 은 실내 계측 온도[°C], T_{in} 은 AHU 급기 온도[°C]에 해당한다. 이때, T_{out} 은 공조기로 회수된 온도를 사용하여 발열량을 계산해야 하지만, 회수된 온도는 공간 내 취합된 온도로 영역별 발열량을 적용하는 데에는 제한적이다. 따라서 실내의 계측 온도로 대체하였다.

해석을 위한 도메인 및 경계조건은 Table 1과 같으며, 급기/환기 취출구의 풍량 및 온도는 균일한 것으로 가정하였다. 해석은 Ansys fluent 2022R2를 사용하였고, 인텔 Xeon(R) Gold 6230R CPU(@2.10 GHz), 192 GB RAM을 탑재한 컴퓨터로 병렬 계산하였으며, 1개 case가 수렴하는 데 약 60분이 소요된다.

2.3 해석결과

앞서 시물레이션 기법의 적용성 검증을 위해 하절기 동안 수집된 운영 데이터 중 10개를 선별하여,

Table 2 Comparison of measure data & simulation temperature results

| Case | Sensor data/simulation error | 5-1 | 5-2 | 5-3 | 5-4 | 5-5 | 5-6 | 5-7 | 5-8 |
|------|------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | Temperature [°C] | 24.43 | 24.32 | 23.28 | 23.52 | 23.73 | 23.40 | 24.50 | 22.35 |
| | Simulation error [%] | 1.05 | 4.56 | -0.27 | -0.64 | 1.47 | 0.22 | 3.18 | -3.42 |
| 2 | Temperature [°C] | 24.15 | 23.27 | 23.05 | 23.02 | 23.80 | 22.43 | 24.42 | 22.70 |
| | Simulation error [%] | 3.25 | 6.23 | 1.48 | -0.84 | 3.95 | -1.67 | 4.70 | -2.12 |
| 3 | Temperature [°C] | 22.90 | 23.00 | 21.75 | 21.75 | 22.13 | 22.20 | 22.95 | 21.13 |
| | Simulation error [%] | 1.75 | 2.88 | 0.68 | -1.30 | 1.58 | 0.57 | 4.22 | -1.79 |
| 4 | Temperature [°C] | 22.70 | 22.90 | 21.50 | 21.60 | 22.40 | 21.90 | 22.80 | 20.90 |
| | Simulation error [%] | 2.86 | 5.57 | 1.26 | -0.83 | 2.87 | 0.21 | 3.29 | -3.19 |
| 5 | Temperature [°C] | 23.93 | 24.05 | 22.80 | 23.00 | 23.50 | 23.20 | 24.00 | 22.27 |
| | Simulation error [%] | 0.33 | 1.99 | -0.45 | -0.93 | 2.13 | 0.00 | 2.90 | 0.66 |
| 6 | Temperature [°C] | 24.47 | 24.27 | 23.67 | 23.60 | 24.43 | 24.27 | 24.30 | 22.10 |
| | Simulation error [%] | 2.96 | 6.19 | 2.14 | -0.35 | 3.87 | 1.85 | 5.33 | -3.83 |
| 7 | Temperature [°C] | 23.70 | 23.07 | 22.73 | 22.87 | 23.63 | 23.07 | 24.30 | 22.10 |
| | Simulation error [%] | 3.77 | 7.05 | 2.64 | -0.06 | 4.61 | 0.89 | 6.32 | -2.85 |
| 8 | Temperature [°C] | 23.90 | 23.60 | 23.07 | 23.10 | 23.77 | 23.60 | 24.13 | 22.13 |
| | Simulation error [%] | 1.11 | 4.42 | -0.12 | -0.58 | 2.51 | 1.43 | 3.02 | -3.69 |
| 9 | Temperature [°C] | 25.53 | 25.33 | 24.63 | 24.63 | 25.20 | 25.33 | 25.57 | 24.43 |
| | Simulation error [%] | 0.99 | 2.72 | 0.51 | -0.53 | 1.84 | 0.94 | 2.53 | -2.05 |
| 10 | Temperature [°C] | 26.37 | 25.97 | 25.27 | 25.37 | 26.13 | 25.97 | 26.50 | 24.23 |
| | Simulation error [%] | 0.93 | 2.13 | 0.30 | -0.54 | 3.08 | 1.64 | 3.17 | -2.71 |

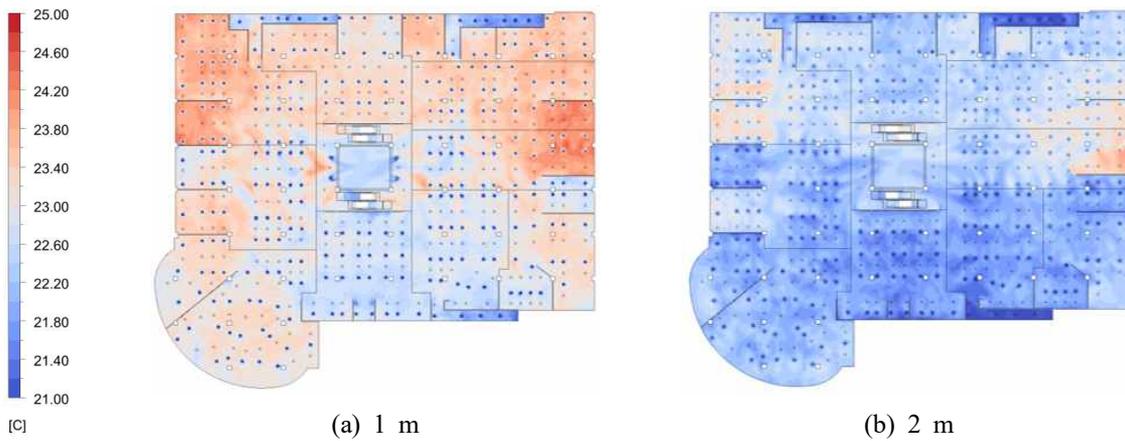


Fig. 4 Temperature contours of height (case 1)

시뮬레이션과 측정 데이터 간의 오차를 Table 2에 비교하였다. 측정 데이터 기반의 해석접근으로 영역별 부하량 예측이 가능하며, 시뮬레이션과 측정 데이터 간에 약 7% 이내의 오차를 확인하였다. Fig. 4는 case 1의 시뮬레이션 결과로 환경 센서가 설치된 높이의 온도분포를 보여주고 있으며, 높이와 위치별로 온도 차가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이는 밀도 차에 의해 발생하는 부력의 영향으로 높이에 따라 온도 차가 발생했기 때문이다. 앞서 언급한 Table 2의 오차 원인으로서는 영역별 발열량 계산 시, 식 (4)의 T_{out} 을 공조기로 회수된 온도가 아닌 실내의 온도를 반영하여 발열량을 계산하였기 때문으로 판단된다. 또한, 발열량이 같은 영역 내에서도 온도 차가 발생하는 것을 볼 수 있는데, 이는 급기 및 회수 취출구

Table 3 List of input parameter for reduced order model

| Parameter list | Number of parameters | Description |
|-------------------------|----------------------|--|
| AHU temperature (SA) | 2 | Supply air temperature of AHU 15, 16 |
| AHU mass flow rate (SA) | 2 | Supply mass flow rate of AHU 15, 16 |
| AHU mass flow rate (RA) | 2 | Return mass flow rate of AHU 15, 16 |
| Heat source (zones) | 11 | Heat source by zone (zone 1 ~ 11) |
| Opening temperature | 2 | Temperature in open areas of floors 4, 6 |

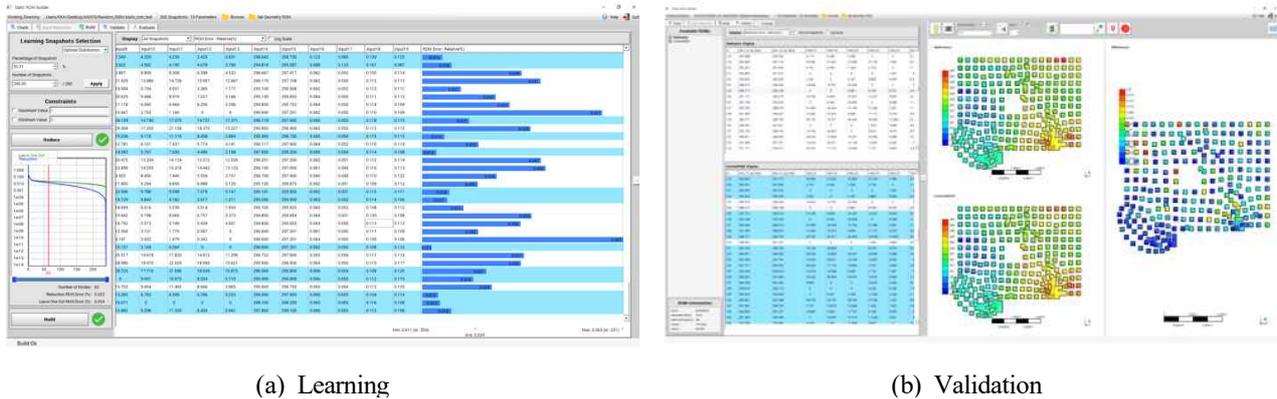


Fig. 5 Construction of the testbed reduced order model

의 배치에 따른 공기량의 차이로 온도 불균일을 초래하는 것으로 사료된다.

2.4 축소차수모델(ROM) 구축

ROM 생성을 위한 시뮬레이션 데이터베이스(DB) 구축을 위하여 설치된 공조기의 장비 용량 계산서와 계절별 운용조건을 분석하고, DB 구축 범위를 선정하여 315개의 시나리오에 대한 해석을 수행하였다. 실시간 예측을 위한 ROM의 입력 매개변수는 급기 풍량, 온도 및 영역별 발열량 등 총 19개로 Table 3 과 같으며, 출력 매개변수는 해석 공간 내의 온도, 속도, 유체 체류시간으로 구성하였다. 디지털트윈 구현 시 작동 응답성에 대한 데이터 처리 및 통신 딜레이 등을 최소화하기 위해, 요소의 field 데이터를 축소하여 459개의 가상센싱 데이터를 출력하도록 수정하였다. ROM은 Ansys twin builder 2022R2의 ROM builder로 DB의 약 90%에 해당하는 290개 case에 대하여 학습을 진행하였으며, 나머지 10%의 데이터와 검증하여 Fig. 5와 같이 static ROM을 생성하였다.

2.5 예상불만족율(PPD) 기반 메타모델 구축

재실자의 실내 쾌적성을 근거로 한 실내 공조 운영 예측을 위해, 쾌적지표 중 하나인 예상불만족율(PPD: predicted percentage of dissatisfied)을 활용하였다. PPD는 예상평균온열감(PMV: predicted mean vote)의 값을 재실자가 불쾌적하다고 느끼게 되는 비율로 나타난 값으로, 수치가 작을수록 재실자가 쾌적하다고 느끼게 된다. PPD 계산을 위해서는 온도, 습도, 기류 속도, 착의량의 정보가 필요하며, 계산을 위해 앞서 생성된 ROM을 통해 온도, 기류 속도의 시뮬레이션 예측 데이터와 상대습도 및 착의량의 예측 데이터를 사용하였다. 이 데이터는 PPD 계산 결과 데이터베이스를 통해 구성된 메타모델에 연결되어, PPD를 실시간으로 계산할 수 있도록 설정하였다. PPD 메타모델은 계산된 raw data를 Fig. 6과 같이 twin builder로 GARS(genetic aggregation response surface) 모델로 생성되었다.

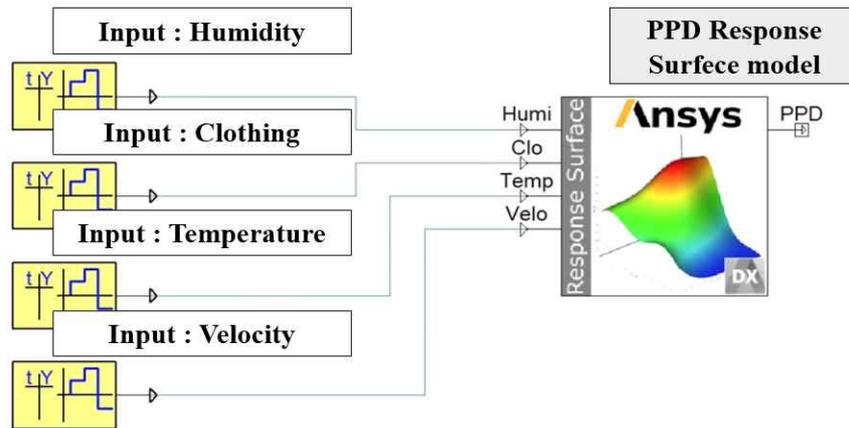


Fig. 6 Construction of the PPD response surface model

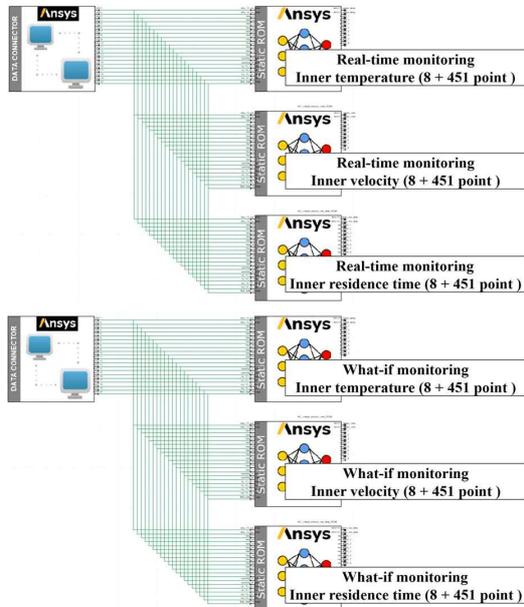


Fig. 7 Simulation process of the testbed ROM



Fig. 8 Air conditioning zones for AHU-15 and AHU-16

3. 시스템 구축

3.1 시스템 설계

ROM을 활용한 실시간 해석을 위해서는 시스템 시뮬레이션 구성이 필요하다. 시스템은 twin builder로 구성되었으며, 서버와의 통신은 틀에서 제공하는 data connector를 통해 TCP/IP 방식으로 이루어진다. 이를 통해 시뮬레이션 데이터와 계측 데이터를 연계할 수 있게 해주며, Fig. 7에서 볼 수 있듯이 사용자가 온도, 속도, 유체 체류시간의 분포를 확인할 수 있도록 구성하였다. 또한, 연계 해석 간 실시간 응답성 테스트를 수행하여 데이터 통신, 해석, 결과 출력까지 완료 시간을 확인한 결과 1 s의 응답성을 확인하였으며, 시스템에 ROM을 추가하여도 초 단위로 시스템 구현이 가능하였다.

시뮬레이션 결과는 Fig. 5와 같이 twin builder 프로그램 내에서는 viewer 기능을 통해 가시화가 가능하지만, 외부에서 계산된 field data를 사용하기에는 제한적이다. 따라서 프로그램에서 사용되는 포맷을 변경하여 출력하도록 Python으로 변환 코드를 작성하여 계산 결과가 업데이트될 시 실시간 예측 및 사용자

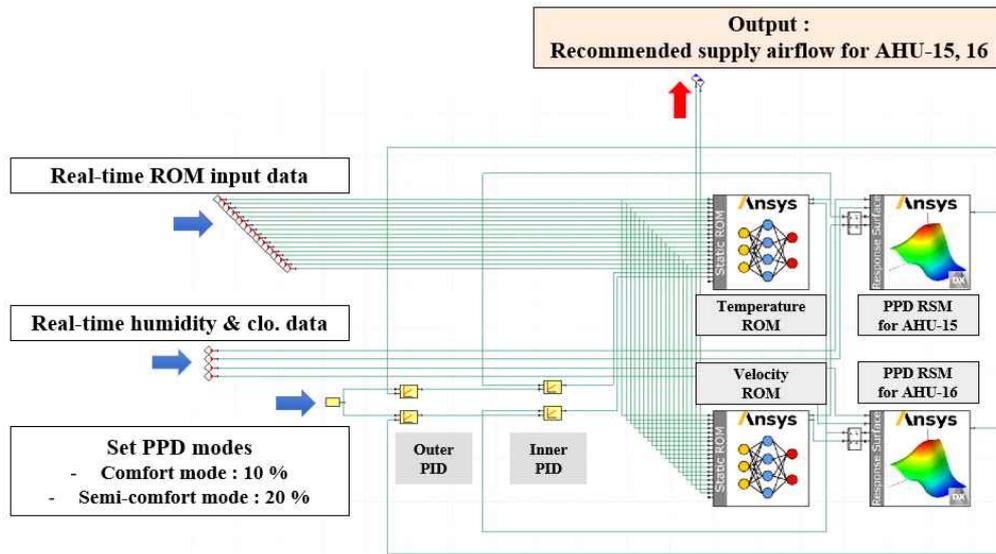


Fig. 9 Optimal PID control algorithm for HVAC airflow based on PPD

설정(what-if)에 따른 온도, 속도, 체류시간에 해당하는 ROM 6종에 대해 총 2,754개의 가상센싱 데이터를 출력되도록 적용하였다.

3.2 시스템 제어

ROM과 PPD 기반의 공조 쾌적 풍량 제시를 위해, 시스템 시뮬레이션 레벨에서 PPD 10과 20에 대하여 ‘쾌적 모드’와 ‘준쾌적 모드’로 설정하여 해당 PPD를 만족하는 공조 풍량을 도출할 수 있도록 PID(proportional integral differential) 제어 시스템을 구성하였다. 테스트베드는 Fig. 8과 같이 중앙 개방부를 기준으로 남과 북의 2개의 공조기(AHU)로 테스트베드의 구역을 나누어 담당하고 있어, 각 구역을 담당하는 AHU의 개별 풍량을 제시할 수 있도록 구성하였다. Fig. 9는 구성한 PID 제어 시스템을 보여주고 있으며, 제어는 다음과 같은 절차로 진행하여 권장 풍량을 도출한다.

- 1) 실시간 계측 데이터에 따른 ROM의 가상센서 실내 평균 온도를 기반으로 피드백을 수신하여 AHU의 급기 풍량을 조절
 - 2) 1의 풍량 조절에 따른 AHU 구역별 평균 실내 온도와 실내 기류 속도를 계산
 - 3) 2의 계산된 온도, 속도 가상센서 결과를 통해 AHU 구역별 평균 PPD 가상센서를 계산
 - 4) AHU 구역별 PPD 가상센서가 설정값(PPD)을 만족할 때까지 1 ~ 3을 반복 계산하여 권장 풍량 도출
- ROM과 PPD 기반의 제어 시스템을 적용하여 Fig. 10과 같이 실시간 예측과 사용자 시나리오, 쾌적 풍량을 제시할 수 있는 프로세스를 구축하였다.

3.3 시스템 연동

DB 서버와 시뮬레이션 서버 간에 네트워크가 분리된 상황을 고려하여, 데이터 통신을 원활하게 진행할 수 있도록 중계 서버를 구축하였다. 중계 서버는 데이터 수집과 시뮬레이션 결과 제공을 담당하며, Fig. 11과 같은 통신 프로세스로 구성되어 있다. 중계 서버는 일정 시간 간격(15 min)으로 DB 서버로부터 데이터를 수집하고, 중계 서버에 수집된 데이터는 data connector를 통하여 시뮬레이션의 입력데이터로 적용되어 실시간 해석이 진행된다. 테스트 진행 중 센서 고장, 미계측 등으로 인해 계측 데이터 누락이 발생할 경우, 입력 값의 오류로 시뮬레이션이 중단되는 상황이 발생할 수 있다. 따라서 Fig. 12와 같이 계측 데이터를 시뮬레이션으로 사용하기 전에 누락된 센서 유무를 판별하는 알고리즘을 생성하여 누락된 센서값이 있을 경우, 인접한 계측 센서 데이터를 사용하도록 Python으로 코드를 작성하였다. 이를 통해 일부 계측 데이터 누락으로 인한 시스템 문제가 발생하지 않도록 조치하여, 지속적인 운영이 가능하다.

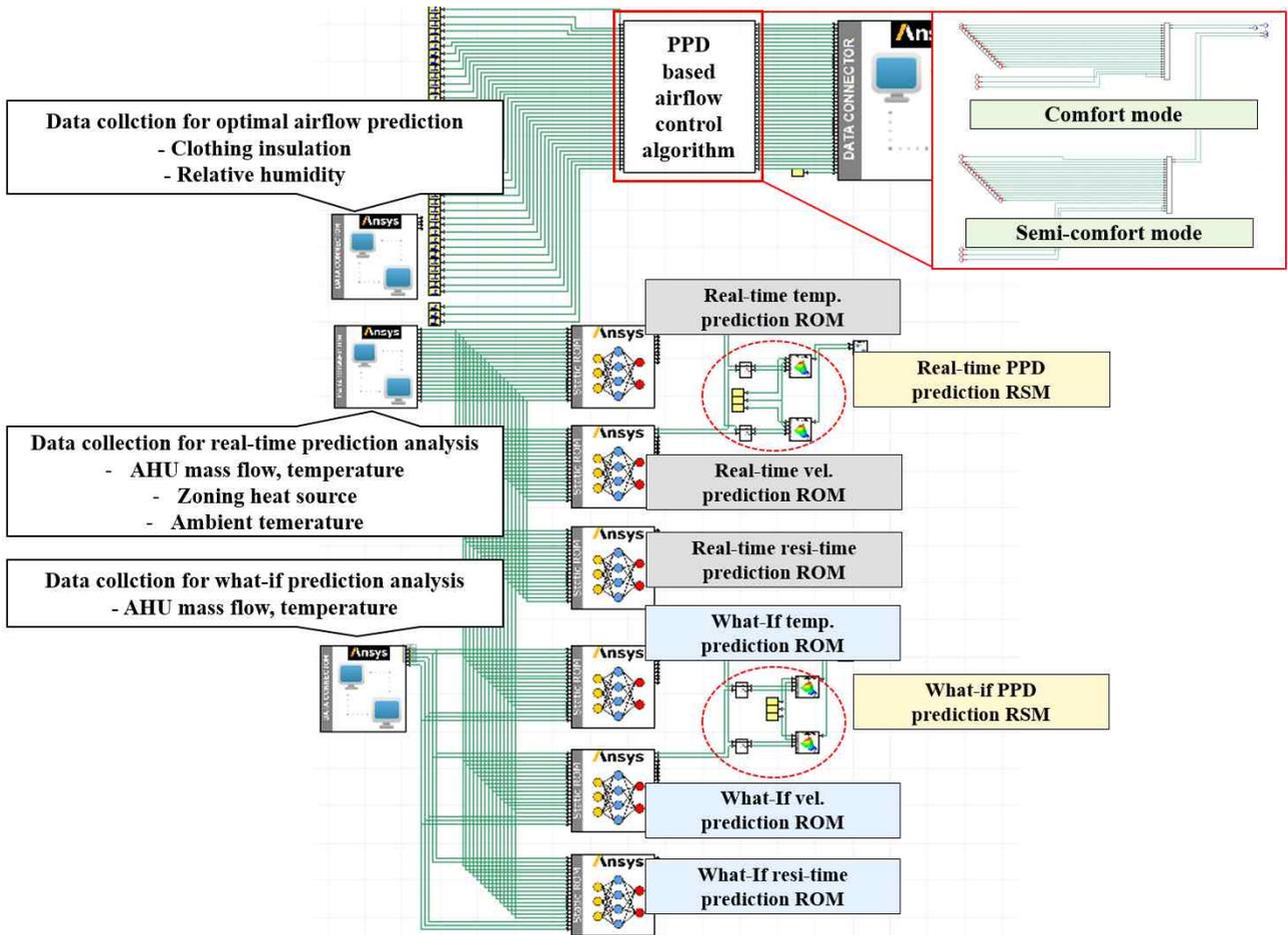


Fig. 10 Testbed simulation system for real-time analysis, virtual scenarios, recommended airflow prediction

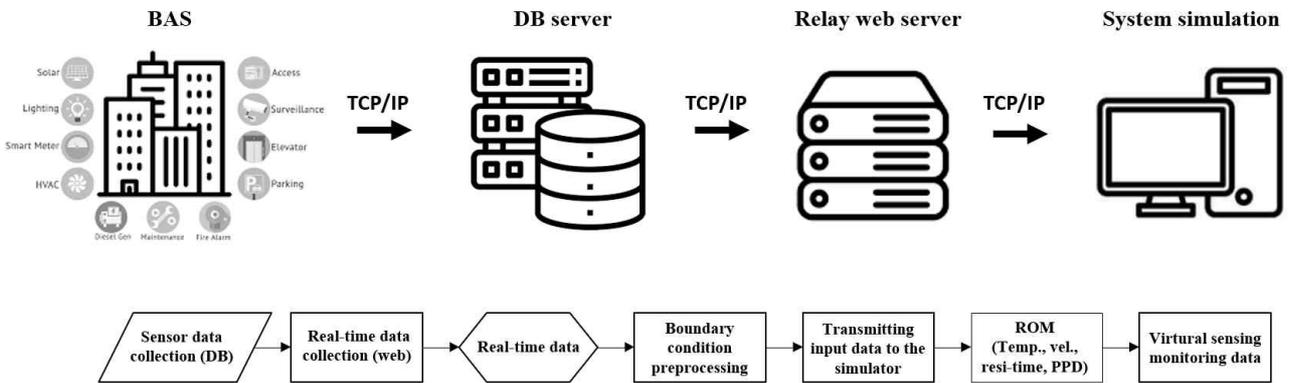


Fig. 11 Real-time sensor data collection and simulation work flow

4. 결과 및 고찰

4.1 축소차수모델(ROM) 검증

앞서, 생성한 ROM의 예측 정확도 검증을 위하여 실시간 계측 데이터와 연동하여 에너지 사용량이 가장 높은 하절기의 운영 데이터와 시뮬레이션으로 예측한 결과를 비교 검증하였다.

Table 4는 하루 동안의 운영 실측 데이터와 매시 정각의 시뮬레이션 결과 오차를 나타내었다. 비교 결과 계측 데이터의 누락이 발생함을 확인하였으며, 누락된 계측 데이터를 제외하고 실측 온도 데이터와 약 8% 이내의 결과 차이를 보여 시뮬레이션 ROM을 적용하여 운영에 따른 정확도 높은 예측이 가능함을 확인하였다. 또한, 해석에 적용한 데이터를 활용하여, 사용자 설정에 따른 what-if 시나리오에 대한 예측 시, 정확도 높은 시뮬레이션 결과 제공이 가능할 것으로 판단된다.

Table 4 Comparison of real-time measured data and ROM simulation result errors (%)

| Time | 5-1 | 5-2 | 5-3 | 5-4 | 5-5 | 5-6 | 5-7 | 5-8 |
|---------------------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| 2023-08-06 09:59:59 | 3.44 | 7.69 | 5.19 | 3.06 | 7.26 | 7.27 | 3.67 | -1.95 |
| 2023-08-06 10:59:59 | 3.50 | 6.35 | 4.38 | 0.75 | 6.91 | 5.46 | 3.42 | -5.21 |
| 2023-08-06 11:59:59 | 3.52 | 7.54 | 3.61 | 0.85 | 6.96 | 5.32 | 4.17 | -5.78 |
| 2023-08-06 12:59:59 | 3.28 | 7.68 | 3.78 | 1.17 | 7.40 | 5.24 | 3.74 | -5.67 |
| 2023-08-06 13:59:59 | 3.03 | 6.45 | 2.55 | 0.67 | 5.52 | 3.57 | 2.50 | N/A |
| 2023-08-06 14:59:59 | 3.70 | 6.04 | 3.89 | 1.15 | 7.42 | 6.51 | 3.70 | -5.96 |
| 2023-08-06 15:59:59 | 3.25 | 5.78 | 2.53 | 0.15 | 6.03 | 4.96 | 3.34 | -2.72 |
| 2023-08-06 16:59:59 | N/A | 5.36 | 5.67 | 3.76 | 6.90 | 6.43 | 7.07 | -4.52 |
| 2023-08-06 17:59:59 | 4.13 | 5.88 | 2.34 | 0.93 | 6.35 | 5.50 | 4.06 | -2.24 |
| 2023-08-06 18:59:59 | 4.04 | 6.22 | 2.88 | 0.72 | 7.20 | 6.59 | 4.85 | -6.12 |
| 2023-08-06 19:59:59 | 3.47 | 5.79 | 2.83 | 1.00 | 7.87 | 6.77 | 4.91 | -6.72 |
| 2023-08-06 20:59:59 | 3.17 | 3.22 | N/A | 0.08 | 6.82 | 6.60 | 4.53 | -4.58 |
| 2023-08-06 21:59:59 | 2.49 | 3.33 | 0.61 | 0.30 | 6.31 | 5.96 | 3.79 | -4.10 |

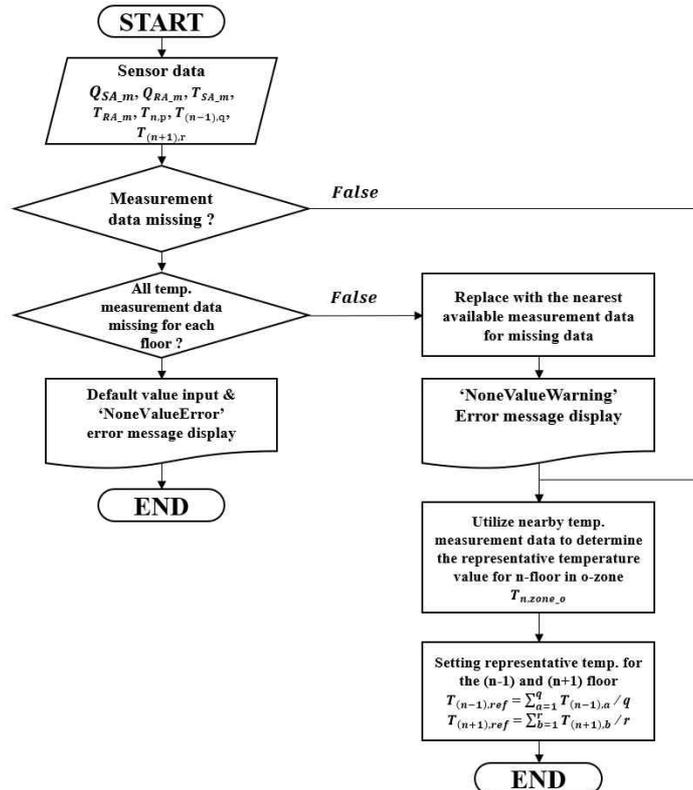


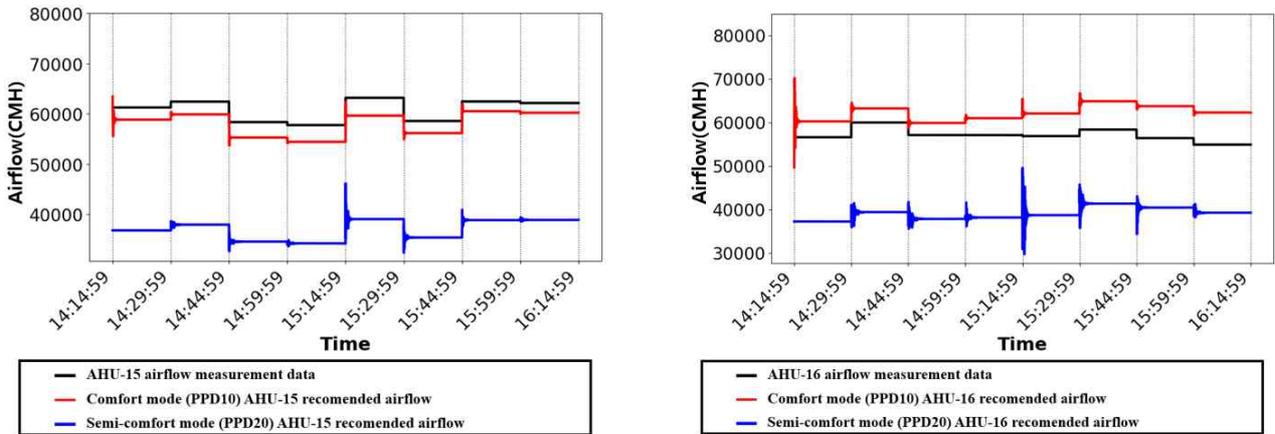
Fig. 12 Algorithm for detecting missing sensors and operation of substitute sensors

마지막으로, 시뮬레이션 오류방지를 위해 대체 센서 개념을 적용하여 시뮬레이션 진행 간 누락된 계측 데이터로부터 발생할 수 있는 오류를 최소화하여 해석이 가능한 것을 확인하였다.

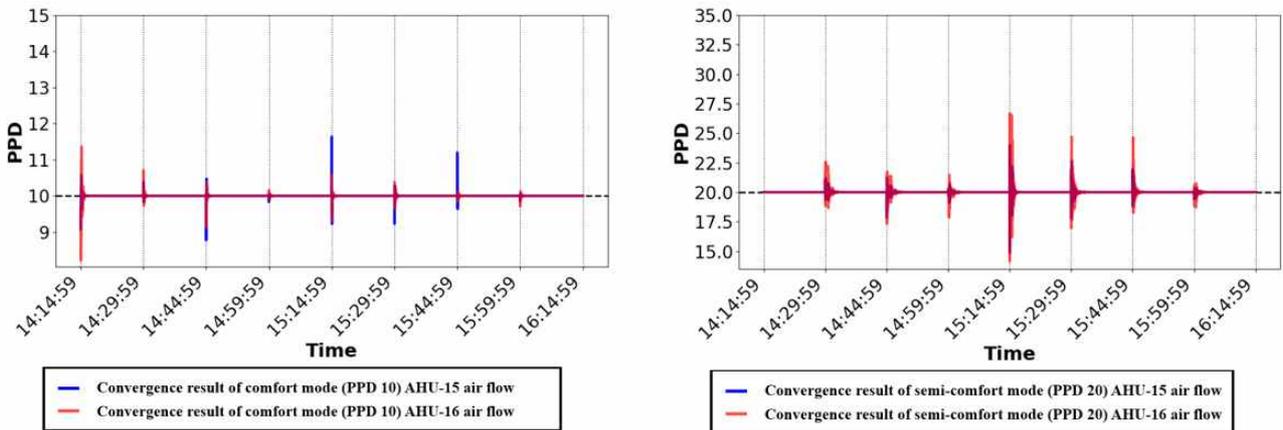
4.2 시스템 설계 예측 결과

ROM과 PPD 제어 기반 기술을 적용하여 시뮬레이션한 결과를 Fig. 13에 비교하였다. Fig. 13은 Table 4와 같은 날짜로, 하절기 중 에너지 사용량이 많은 낮 14 ~ 16시 동안의 데이터를 비교하였다. 공조기 운영 데이터와 시스템 제어 알고리즘으로 예측한 권장 풍량을 비교한 결과 현재 운영되고 있는 공조기의 풍량과 ‘쾌적 모드(PPD 10)’일 때의 풍량이 유사한 수준으로 확인되어, 비교적 쾌적한 환경을 유지하며 운영 중임을 확인할 수 있다. 또한, 열 쾌적성과 공조 에너지 절감을 위한 ‘준쾌적 모드(PPD 20)’로 공조기를 가동 시, 약 40%의 풍량 감소가 가능한 것으로 예측되었다. 송풍기 풍량은 상사법칙에 의해 모터 회전수에 비례하고, 동력은 회전수의 세제곱에 비례하기 때문에 가동 중인 모터 회전수를 알 경우, 상사법칙을 통하여 에너지 절감량 예측이 가능할 것으로 판단된다.

또한, 제어를 적용한 시스템에 계측 데이터의 대체 센서 개념을 적용하여, Table 4에서 누락된 데이터가 있음에도 시뮬레이션에 오류 없이 계산이 수행되는 것을 확인하였다. 제어 알고리즘을 포함한 시스템 시뮬레이션 결과로 초기의 시스템은 초 단위로 해석이 가능하였으나, 제어를 포함할 경우 제어 시스템 내의 반복 계산으로 인해 계측 데이터 입력 후 수렴된 결과를 도출하는데 약 30초 이내의 시간이 필요하였다.



(a) Recommend supply airflow for indoor air conditioning



(b) Convergence results of PPD virtual sensors by modes

Fig. 13 Recommended supply airflow calculation results based on PPD

5. 결 론

다중이용건물의 시뮬레이션 기반 디지털트윈 구축을 위해 축소차수모델 기법을 적용하여 실시간 해석 및 가상 시나리오, PPD 기반의 권장 풍량 예측을 위한 시스템 시뮬레이션 프로세스를 구축하여 시뮬레이션 예측 연구를 수행하였다. 본 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다.

빠른 결과 제공이 가능한 시뮬레이션을 위해 테스트베드에 290개의 case로 축소차수모델을 생성하여, 운영 중인 계측 데이터와 비교 검증한 결과 약 8% 이내의 오차를 확인하였다.

실시간 예측을 위해 시스템 시뮬레이션 모델을 구축하였고, CFD 해석의 경우 약 60분의 계산시간이 소요된 데 반해, 축소차수모델을 활용한 시뮬레이션은 1초 이내의 응답 성능을 확인하였다.

실내 쾌적성과 에너지 사용량 절감을 위한 방법으로 PPD 기반의 권장 풍량 제어 알고리즘을 생성하여 운영 중인 데이터와 비교하였다. 비교 결과 테스트베트는 쾌적한 환경으로 운영 중임을 확인할 수 있었으며, 에너지 사용량 절감을 위한 준쾌적 모드로 운영 시 기존 운영 중인 풍량의 약 40%의 감소가 가능함을 예측하였다.

계측 데이터 활용 실시간 시스템 시뮬레이션을 위한 프로세스 구축 시, 누락된 계측 데이터로 인해 시뮬레이션 중에 발생할 수 있는 오류를 최소화하기 위한 대체 센서 알고리즘을 적용하였다. 알고리즘을 적용하여 실시간 구동 시, 계측 데이터가 일부 누락 되어도 고정밀도 결과를 도출하였으며 이상 없이 정상 작동함을 확인하였다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 결과입니다(No. 20212020900090).

참고문헌 (References)

- (1) Lombard, L. P., Ortiz, J. and Pout, C., 2008, "A Review on Buildings Energy Consumption Information," *Energy and Buildings*, Vol. 40, pp. 394~398.
- (2) Mullen, D. T., Keane, M. M., Geron, M. and Monaghan, R. F. D., 2015, "Automatic Extraction of Reduced-Order Models from CFD Simulations for Building Energy Modelling," *Energy and Buildings*, Vol. 99, pp. 313~326.
- (3) Guay, M. and Hariharan, N., 2008, "Airflow Velocity Estimation in Building Systems," *Proceedings of the 2008 American Control Conference*, Seattle, USA, pp. 908~913.
- (4) Sempey, A., Inard, C., Ghiaus, C. and Allery, C., 2009, "Fast Simulation of Temperature Distribution in Air Conditioned Rooms by Using Proper Orthogonal Decomposition," *Building and Environment*, Vol. 44, pp. 280~289.
- (5) Mullen, D. T., Keane, M. M., Geron, M. and Monaghan, R. F. D., 2015, "Automatic Extraction of Reduced-Order Models from CFD Simulations for Building Energy Modeling," *Energy and Buildings*, Vol. 99, pp. 313~326.
- (6) Kim, D., Braun, J. E., Cliff, E. M. and Borggaard, J. T., 2015, "Development, Validation and Application of a Coupled Reduced-Order CFD Model for Building Control Applications," *Building and Environment*, Vol. 93, pp. 97~111.
- (7) Ayed, S. B., Kim, D., Borggaard, J. T. and Cliff, E. M., 2016, "Optimal Control of Indoor-Air Cooling in Buildings Using a Reduced Order Model," *Energy*, Vol. 116, pp. 1191~1204.
- (8) Sirovich, L., 1987, "Turbulence and the Dynamics of Coherent Structures Part 1: Coherent Structures,"

Quart. Applied Mathematics, Vol. 45, No. 3, pp. 561~571.

- (9) Lee, W. H. and Lee, S. D., 2022, "Development of a Framework for the Automated Construction of an Reduced Order Model based on Proper Orthogonal Decomposition and Artificial Neural Network for the Development of Real-Time Simulation of Fluid Motion," *Korean Soc. Comput. Fluids Eng.*, Vol. 27, No. 4, pp. 20~27.

플랜트산업의 가상현실기반 실감형 안전교육콘텐츠 개발§

고광춘* · 박기웅* · 김병준*†

* 한국폴리텍7대학 석유화학공정과

Development of Virtual Reality based Immersive Safety Training Content for Plant Industry

Kwang-Chun Koh*, Kiwoong Park* and Byungjun Kim*†

* Dept. of Petrochemical Engineering, Korea Polytechnic VII

(Received January 3, 2024 ; Revised May 27, 2024 ; Accepted May 28, 2024)

Key Words: Safety Training(안전교육), Virtual Reality(가상현실), Plant industry(플랜트산업), Chi-Square Test(카이스퀘어검정), Immersive Content(실감형콘텐츠), Occupational Safety and Health (산업안전보건)

초록: 고용노동부가 발표한 산업안전보건 실태조사에 따르면, 근로자의 안전교육 시간 감소에도 불구하고 산업재해 발생 건수는 전년 대비 감소한 것으로 나타났다. 본 연구는 플랜트산업의 가상현실 기술을 활용한 체험형 안전교육 콘텐츠를 개발하여 산업 안전을 강화하기 위한 새로운 접근법을 개발하였다. 개발 과정은 실제 사고 시나리오를 기반으로 하여 학습자가 가상 및 혼합현실 환경에서 각 공정별 물질 안전보건자료, 안전보호구, 필수 장비 등을 살펴볼 수 있도록 구성하였다. 이러한 현실적인 교육 자료를 활용하여 사고를 간접적으로 체험함으로써 근로자에게 안전 의식을 향상시키는 학습을 통하여 궁극적으로는 작업장 내 안전 사각지대를 줄이고 산업재해를 최소화하여 근로자의 안전과 산업 발전에 기여하는 것이 목표이다.

Abstract: According to the Occupational Safety and Health Survey released by the Ministry of Employment, Labor, and Welfare, the number of workplace accidents has decreased compared to the previous year, despite a reduction in the number of safety training hours for workers. This study introduces a novel approach to enhance safety training contents of plant industry by developing experiential safety training content utilizing virtual reality technology. The development process is grounded in real-world accident scenarios, enabling learners to explore safety data sheets, safety protective equipment, and essential equipment for each process in a virtual and mixed reality environment. By employing these realistic training materials to indirectly simulate accidents, the objective of this research is to provide workers with valuable experience that enhances their safety awareness. Ultimately, the aim is to diminish safety blind spots in the workplace and minimize industrial accidents, thereby contributing to the overall safety of workers and the advancement of the industry.

1. 서 론

2022년 중대재해처벌법 시행 후 안전사고에 대한 국민적 관심이 증가되고 있다. 하지만 안전규제 및 관리의 강화에도 불구하고 연도별 사망재해 추이는 Fig. 1과 같이 지속적으로 발생하고 있다.⁽¹⁾ 산업전반에서 사망자수는 2016년 이후 매년 증가하는 추세이며, 근로자 1만명당 사고사망자수를 따지는 사망만인율의 경우도 2013년 최대 1.25에서 2016년 최소 0.96 감소 후 계속 증가하고 있는 추세이다.

특히 중대재해처벌법이 시행된 2022년의 사망자수는 2,223명으로 최근 10년간 가장 많은 사망자가 발

§ 이 논문은 대한기계학회 2023년 학술대회(2023. 11. 1. - 4., 송도컨벤시아) 발표 논문임.

† Corresponding Author, bjking@kopo.ac.kr

© 2024 The Korean Society of Mechanical Engineers

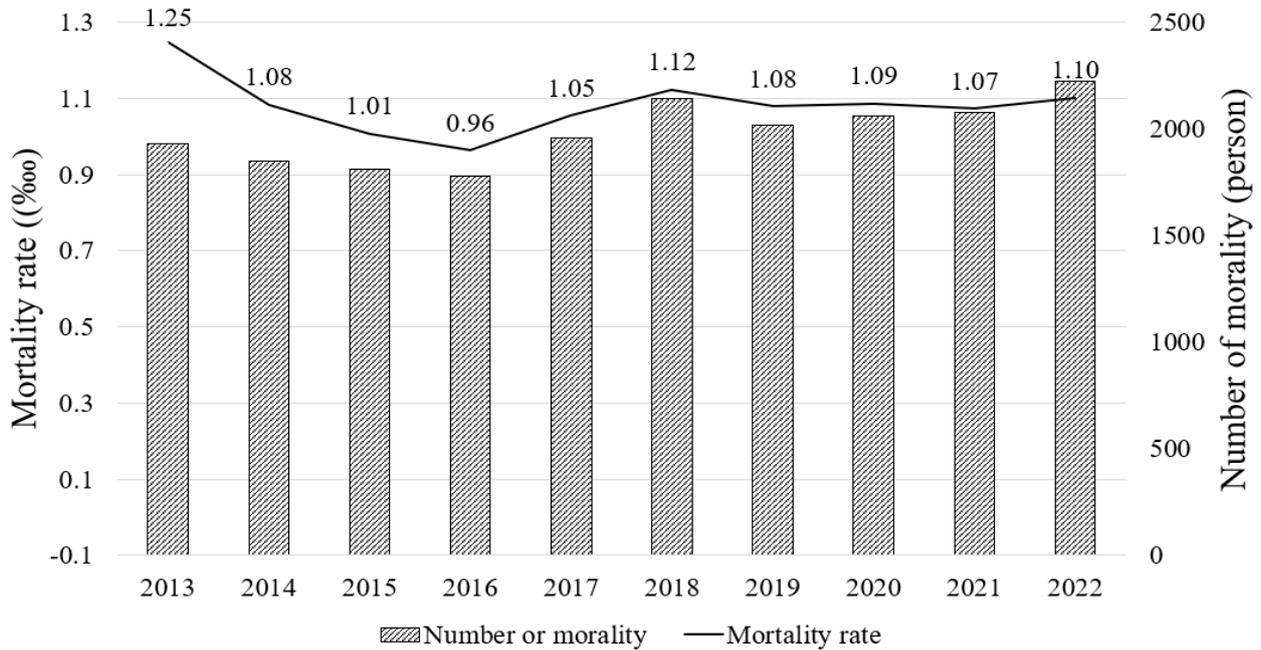


Fig. 1 Trends in mortality accidents from 2013 to 2022⁽¹⁾ (number of mortalities and mortality rate)

생된 것이며, 사망만인율은 최근 10년 중 3번째로 높았다. 중대재해처벌법이 제정된 이유는 기업에 안전보건관리체계가 제대로 구축되지 않아서 발생하는 중대재해를 사전에 방지하는 것이다. 노동자의 사망도 제로화를 달성해야 하며, 누출, 폭발, 화재 등의 산업재해사고로 인한 기업의 경제적 환경적 손실도 최소화해야 한다.⁽²⁾ 이에 근본적이고 실질적인 안전보건관리체계 구축이 필수적이다. 고용노동부에서 발표한 산업안전보건실태조사⁽³⁾에 따르면 사업장 내 안전보건 교육시간은 감소하였음에도 불구하고, 산업재해 발생 사업자수가 감소한 것을 알 수 있다. 일반적으로 안전교육과 산업재해는 양의 상관관계를 갖는 것이 일반적이지만, 해당 연구결과는 그렇지 않은 이유에 대해서 분석을 진행하였다. 분석 결과들을 기반으로 산업재해사고를 예방할 수 있는 가상현실기반의 실감형 안전교육콘텐츠 개발 과정에 대해서 연구를 수행하였다. 최근 다양한 분야에서 가상현실기반의 교육훈련이 실시되고 있다.⁽⁴⁻¹¹⁾ 특히 가상현실기반의 학습이 피학습자의 몰입도를 향상했다는 결과가 많은 연구결과로 제시되고 있다.⁽⁷⁻⁹⁾ 가상현실을 기반으로 한 교육^(12,13)은 과거의 주입식 교육의 한계를 극복하며, 피학습자의 학습능력을 향상시킬 수 있다. 가상현실이라는 공간에서의 몰입 기반 안전교육이 근로자의 지식습득 및 유지 측면에서 기존 교육보다 우수한 성과를 보이는 것을 규명하였다.⁽¹⁴⁾ 이 같은 결과는 체험이 불가능한 산업재해를 체험할 수 있어 가능한 것이다. 본 연구에서는 플랜트산업의 실감형 안전교육 콘텐츠 개발 과정을 소개하고, 가상현실에서 산업재해를 체험하여 근로자의 안전의식을 향상시켜 플랜트산업의 재해 예방과 발전에 기여하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1 사고유무와 안전교육과의 관계성 분석

본 연구에 활용된 자료⁽³⁾는 제조업 50인 이상 사업장에서의 자료를 활용하였으며, Table 1과 같이 2015년과 2018년 자료를 비교 분석하였다. 2015년부터 조사를 50인 이상 사업장으로 변화시켰기에, 두 조사 결과의 비교 분석의 신뢰성을 확보할 수 있었다. 표본크기도 제조업 2015년과 2018년 각각 2,000개, 2015개였으며, 조사대상은 사업장의 안전보건관리자였다. 산업재해 발생여부를 2015년과 2018년을 비교한 결과 2018년 산업재해가 발생한 사업장은 18.3%로 나타났으며, 2015년 26.1% 대비 약 7.8% 감소한 것으로 나타났다. 실제 사업장 안전보건관리 조직 구성 여부는 2015년 77.8%에서 2018년 78.2%로 유사한 수준으로 확인되었다.

Table 1 Comparing occupational accident and safety training surveys in manufacturing between 2015 and 2018⁽³⁾

| Items | Unit | 2015 | 2018 |
|--|--------|-------|-------|
| Number of samples | Counts | 2,000 | 2,015 |
| Whether or not accidents | % | 26.1 | 18.3 |
| Whether or not safety and health management organization | % | 77.8 | 78.2 |
| Average number of safety manager trainings | Counts | 6.4 | 3.9 |
| Average hour of safety manager trainings | Hour | 25.1 | 19.6 |
| Average number of health manager trainings | Counts | 5.5 | 3.6 |
| Regular training for office worker | % | 95.1 | 94.8 |
| Regular training for non-office worker | % | 95.8 | 95.4 |
| Training for supervisors | % | 95.2 | 95.6 |
| Onboarding training | % | 89.0 | 76.0 |
| On the job training | % | 88.1 | 75.5 |
| Training when work changes | % | 80.8 | 51.8 |
| Training of special health and safety | % | 87.0 | 69.5 |
| Other training | % | 76.6 | 60.2 |

안전 및 보건관리자의 평균교육횟수 및 시간을 살펴보면 2015년 대비 횟수 및 시간이 감소된 것으로 확인되었다. 2015년 안전관리자 평균 교육 횟수는 6.4회에서 2018년 3.9회로 2015년 대비 39.1% 감소하였으며, 안전관리자 평균 교육시간도 2015년 25.1시간에서 2018년 19.6시간으로 2015년 대비 21.9% 감소하였다. 보건관리자 평균 교육횟수도 2015년 5.5회에서 2018년 3.6회로 2015년 대비 34.5% 감소하였다. 근로자 안전보건교육 실시 현황을 살펴보면 사무직의 정기교육은 2015년 95.1%에서 2018년 94.8%를 실시하였고, 사무직 외 정기교육은 2015년 95.8%, 2018년 95.4%를 실시하였다. 관리감독자 교육은 2015년 95.2%에서 2018년 95.6%를 실시하였다. 채용 시 집체교육과 현장교육은 각각 2018년 89.0%, 88.1%에서 2015년 76.0%, 75.5%로 감소하였다. 작업내용 변경 시 교육은 2015년 80.8%에서 2018년 51.8%로 감소하였다. 특별안전보건교육 및 법정교육 외 교육은 2015년 87.0%, 76.6%에서 2018년 69.5%, 60.2%로 감소하였다. 2018년 산업안전보건 실태조사결과 중 재해발생유무를 종속변수로 사용하고, 위에서 차이를 보이는 안전보건 관리조직 유무, 사무직 정기안전 교육실시 유무, 사무직 외 근로자 정기안전교육실시 유무 관리감독자 교육실시 유무, 채용 시 집체교육 실시 유무, 채용 시 현장교육 실시 유무 총 6가지 독립변수와의 상관관계를 분석하였다. 모두 이산형 데이터로 상관관계분석을 위한 방법으로는 Chi-square test를 이용하여 분석하였다. Chi-square test 관측 값과 기대 값의 차이를 검정하여 두 변수의 독립성 여부를 확인할 수 있다. 두 변수의 독립여부를 판단하는 가설을 검증하기 위해서 각 범주에 대한 기대 빈도 e_{ij} 는 식 (1)과 같이 계산할 수 있다.

$$e_{ij} = \frac{n_i \times n_j}{N} \quad (1)$$

기대빈도는 i 범주의 합계인 n_i 와 j 범주의 합계인 n_j 의 곱을 전체 관측치 N으로 나눠서 구할 수 있다. 그 이유는 두 범주형 변수가 서로 독립일 경우, 동시에 발생할 빈도는 두 주변 빈도의 곱을 전체 관측치로 나눠준 것과 같기 때문이다. 기대빈도 계산 후 Chi-square coefficient(χ^2)를 식 (2)와 같이 계산할 수 있다.

$$\chi^2 = \sum_i \sum_j \frac{(n_{ij} - e_{ij})^2}{e_{ij}} \quad (2)$$



Fig. 2 Flow chart of immersive safety training content

관측 빈도인 n_{ij} 와 기대 빈도인 e_{ij} 의 차이를 판단하여 두 변수 간의 독립여부를 Chi-square coefficient를 사용하여 판단할 수 있는 것이다. Chi-square coefficient이 클수록 두 변수 간에 독립성이 없을 가능성이 커진다. 계산된 검정 값을 유의 확률 값인 P-value를 확인하여 유의수준인 0.05보다 작으면 두 변수는 독립이라는 귀무가설을 기각하고, 두 변수 간에는 통계적으로 유의한 관계가 있다고 판단할 수 있는 것이다.

2.2 가상현실기반 실감형 안전교육콘텐츠 개발

플랜트산업의 특징은 원료가 투입되며, 다양한 장치로 구성된 복합 시스템이다.⁽²⁾ 플랜트산업에서는 다양한 장치에서 다양한 형태의 산업재해가 발생할 수 있다. 하지만 산업안전보건실태조사⁽³⁾를 분석한 결과와 같이 사무직 외 근로자들 대상의 정기안전교육, 채용 시 집체교육, 현장교육은 원료와 장치에 대한 이해를 기반으로 실시된다. 기본적으로 플랜트산업에서의 안전교육은 원료와 장치에 대한 이해가 필수적이다. 원료에 대한 정보는 물질안전보건자료를 통해서 파악할 수 있다. 물질안전보건자료는 물질을 취급하기 위해 필요한 정보를 담은 자료이다. 총 16가지 항목으로 구성되어 있으며 물질의 구성성분, 유해성, 위험성, 보관방법, 응급조치 등의 정보가 포함된다. 플랜트산업에서 종사하는 근로자들은 사전 학습을 통해서 물질안전보건자료의 숙지는 사고 예방에 필수적임을 알 수 있다. 또한 근로자의 안전을 지킬 수 있는 가장 기본적인 안전보호구에 대한 인식이 필요하다. 안전보호구는 근로자를 보호할 수 있는 가장 기본적이고 실질적인 도구이다. 안전보호구는 앞서 설명한 물질안전보건자료의 항목 중 노출방지 및 개인보호구 항목에 명시되어 있으며 근로자는 취급하는 원료 및 근로상황에 맞는 안전보호구를 착용해야만 한다. 다양한 장치로 구성된 복합 시스템의 이해도 중요하지만, 사고는 개별장치에서 발생되므로 장치에 대한 학습도 필요하다. 물질, 장치, 그리고 안전보호구에 대한 학습은 사고 예방에 매우 중요한 요소이며 사전 학습을 통해 충분히 숙지하게 된다면 사고 예방에 도움이 될 수 있다. 가상현실에서 학습을 하는 피학습자에게 해당 사항을 교육 훈련시키는 것은 중요하다. 기존 연구와 같이 실제 상황에 대한 시나리오는 피교육자들의 교육효과를 증가시킬 수 있으며,⁽¹⁵⁾ 가상현실에서의 구성단계에서의 상호작용의 중요성을 제시하고 있고,⁽¹⁶⁾ 특히 게임방식의 콘텐츠 형식은 피학습자의 주체적인 입장에서 효율성이 높다는 결과를 도출하였다.⁽¹⁷⁾

Fig. 2와 같이 본 연구에서 개발된 실감형콘텐츠는 사고 사례에 대한 개요 설명 후 물질안전보건자료를 학습한다. 물질안전보건자료 학습 후 안전보호구 착용 학습을 진행한다. 안전보호구 착용 학습은 게임방식으로 구성하여 피학습자의 학습효과를 증가시킨다. 적용되는 주요 장치에 대한 학습을 진행한다. 장치 학습 시 장치의 상태에 대한 퀴즈를 도입하여 게임방식으로 구성하였으며, 퀴즈는 랜덤으로 정답과 오답을 병행하여 출제하여 반복학습에 취약한 기존의 가상현실학습의 단점인 상호작용의 감소로 인한 추상적 UI 빈도 수 증가를⁽¹⁶⁾ 보완하였다. 실제 사고 기반으로 제작된 사고 체험학습을 진행한 후, 사고 발생의 원인 및 해결방법에 대한 요약으로 학습을 마무리한다. 콘텐츠 개발을 위해 UNITY SW를 사용하였으며, 대표적인 virtual reality(VR) 장비인 오클러스퀘스트 2로 동작하였다.

3. 연구 결과 및 분석

3.1 사고유무와 안전교육과의 관계성 분석결과

사고유무와 각 독립 변수들 간의 분석결과를 Table 2에 제시하였다. 안전보건관리조직 유무와의 관계분석 결과 Chi-square coefficient는 35.263으로 분석결과 중 두 번째로 높은 결과를 보였으며, P-value는 0.000으로 통계적으로 유의한 결과를 확인하였다. 사무직 정기안전교육실시 유무와의 관계분석결과 Chi-square

Table 2 Results of correlation analysis between accidents and safety actions

| # | Independent variable | Dependent variable | Chi-square coefficient | P-value |
|---|--------------------------|---|------------------------|---------|
| 1 | Whether or not accidents | Whether or not safety and health management organization | 35.263 | 0.000 |
| 2 | Whether or not accidents | Whether or not regular safety training for office workers | 0.865 | 0.352 |
| 3 | Whether or not accidents | Whether or not regular safety training for non-office workers | 22.801 | 0.000 |
| 4 | Whether or not accidents | Whether or not safety training for supervisors | 38.973 | 0.000 |
| 5 | Whether or not accidents | Whether or not onboarding training | 17.237 | 0.000 |
| 6 | Whether or not accidents | Whether or not on the job training | 22.320 | 0.000 |

coefficient는 0.865로 분석결과 중 가장 낮은 결과를 보였으며, P-value는 0.352로 통계적으로 유의하지 않다는 결과를 확인하였다. 사무직 외 정기안전교육 실시 유무와의 관계분석 결과 Chi-square coefficient는 22.801로 분석결과 중 3번째로 높은 결과를 보였으며, P-value는 0.000으로 통계적으로 유의한 결과를 확인하였다. 관리감독자 교육 실시 유무와의 관계분석 결과 Chi-square coefficient는 38.973으로 분석결과 중 가장 높은 결과를 보였으며, P-value는 0.000으로 통계적으로 유의한 결과를 확인하였다.

채용 시 집체교육 실시 유무와의 관계분석 결과 Chi-square coefficient는 17.237으로 분석결과 중 5번째로 높은 결과를 보였으며, P-value는 0.000으로 통계적으로 유의한 결과를 확인하였다. 채용 시 현장교육 실시 유무와의 관계분석 결과 Chi-square coefficient는 22.320으로 분석결과 중 4번째로 높은 결과를 보였으며, P-value는 0.000으로 통계적으로 유의한 결과를 확인하였다. 분석에 활용한 총 6가지 변수 중 사무직 정기안전교육 실시 유무를 제외한 나머지 변수는 모두 사고와 관계가 있는 것으로 규명되었다. 결론적으로 Table 2의 분석결과와 같이 안전교육은 의미가 있지만, Table 1의 교육시간과 횟수는 사고에 영향을 주지 않는다는 것으로 판단해 볼 수 있는 것이다. 그렇기 때문에 안전교육 수립 시 Fig. 2와 같이 실질적이고 체계적인 접근이 필요하다는 것을 알 수 있다.

3.2 가상현실기반 실감형 안전교육콘텐츠 개발 결과

가상현실교육의 효율성⁽¹⁵⁾을 위하여 10분 이내의 학습으로 내용을 구성하였으며 실제 사고 기반의 시나리오를 Fig. 2와 같은 절차로 구현하였다. 피학습자는 Fig. 3(a)와 같이 가상현실에서 사고 관련 정보를 습득할 수 있다. 제공되는 정보로는 사고 발생 일시, 장소, 재해 상황 및 인명피해 관련된 내용이 제공되며, 피학습자는 이를 통하여 사고의 체험을 진행할 사고에 대한 사전 지식을 습득할 수 있다. Fig. 3(b)와 같이 사용되는 원료에 대한 정보는 물질안전보건자료로 제공된다. 총 16가지 물질안전보건자료 중 사고 상황에 대처할 수 있는 적합한 항목이 제공된다. 물질안전보건자료에 기입된 핵심내용을 학습하여 비상상황에 어떻게 대처해야 하는지 알 수 있다. Fig. 3(c)는 안전보호구 착용 학습이다. 물질안전보건자료의 숙지 및 기존 학습내용을 기반으로 게임형식으로 구성하였다. 피학습자에서는 다양한 안전보호구가 제시된다. 앞서 제공되는 정보와 보유한 지식을 기반으로 안전보호구를 착용할 수 있다. 상황에 맞지 않는 안전보호구를 선택하였을 경우 다음 과정으로 넘어가지 않는다. 또한 다른 안전보호구를 착용하였을 경우 경고음을 발생시켜 학습자에게 안전보호구의 중요성에 대해서 다시한번 상기시켜줄 수 있도록 구성하였다. Fig. 3(d)는 실제 사고가 발생한 장치에 대한 학습 내용이다. 장치의 구성요소에 대한 명칭, 역할 등에 대해서 가상현실환경에서 이동하면서 외부 및 내부를 확인해 볼 수 있다. 실제 공장에서는 장치의 내부를 보기가 어렵다. 그렇기 때문에 가상현실에서 가동하는 장치에 대한 상세한 설명 및 실물을 확인할 수 있는 학습은 내부에서 발생될 수 있는 비상상황을 효과적으로 대비할 수 있는 역량을 습득할 수 있는 장점이 있다. Fig. 3(e)는 사전점검 학습이다. 안전보호구와 같이 게임형식으로 구성하였다. 장치를 가동하기 전에 설비에 대한 사전점검리스트를 바탕으로 시나리오를 구성하였으며, 정

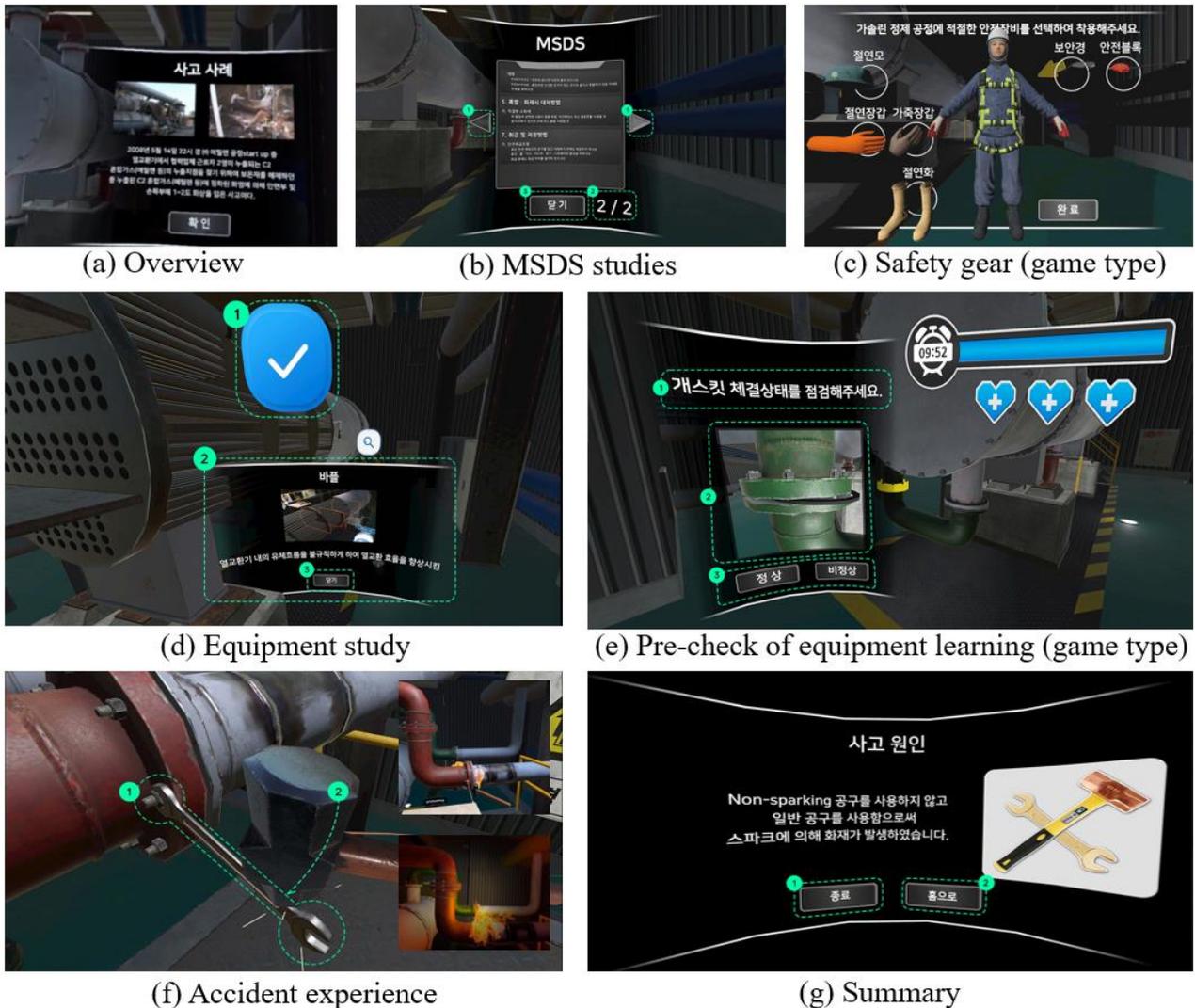


Fig. 3 Sequence of virtual reality learning in mechanical industry section: (a) accident overview statement; (b) material safety data sheet lesson learn; (c) learn to wear safety gear in a game; (d) study equipment of heat exchanger; (e) study on pre-check of equipment statement in a game; (f) experience of fire accident; (g) summary of learning

상상태 및 비정상상태를 피학습자가 선택하여 사전점검을 실시한다. 사전점검 학습은 랜덤형식으로 제시되며, 기회는 3번으로 주어지며, 3번의 오답이 발생될 경우 피학습자는 사망한다. 사망할 경우 다시 사전점검을 수행하는 과정으로 구성하였다. 사전점검을 완료하게 되면 Fig. 3(f)와 같이 사고 체험을 실시한다. 실제 발생된 시나리오를 기반으로 사고 상황을 모사하였으며, 작업절차 미준수에 대한 상황을 가정하여 사고를 체험할 수 있다. Fig. 3(g)와 같이 체험이 끝나게 되면 사고 원인에 대한 내용을 피학습자에게 전달한다. Fig. 4는 개발된 콘텐츠를 실제 피학습자가 가상현실에서 체험하고 있는 현장이다. Fig. 4(a)는 피학습자들이 앉아서 학습하고 있고, Fig. 4(b)는 피학습자가 서서 학습하고 있다. 콘텐츠에 따라 차이가 있지만, 서서 하는 것보다는 앉아서 학습하는 것이 피학습자의 움직임을 상대적으로 통제할 수 있어 보다 안정적인 교육 운영이 가능하였다.

4. 토론

그동안의 안전교육은 주로 전통적인 주입식 프로그램을 통해 진행되었다. 하지만 산업재해의 근본원인인 근로자의 안전불감증을 없애기 위해서는 다른 관점에서의 교육 방법을 적용하여 근로자의 인식을 변화시키는 것이 필수적이다. 본 연구를 통하여 안전교육은 산업재해 유무와 관련이 있지만, 교육의 횟수



(a) Seated position

(b) Standing position

Fig. 4 Learners experiencing an industrial accident in virtual reality: (a) training in progress while seated; (b) training in progress while standing

와 시간의 증가가 꼭 산업재해 감소에 영향을 주는 것이 아님을 규명하였다. 일반적인 안전사고 예방을 위해서 실시되는 안전 교육 프로그램은 과거 사고의 원인을 요약하고 개선 방안을 개략적으로 설명하는 경우가 많다. 또한 실제 사고를 시뮬레이션하여 분석하는 것도 역시 위험성을 내포한다. 따라서 근로자의 안전불감증을 해소하고, 산업재해를 예방하기 위해서는 기존의 접근법과 다른 실감형 교육이 중요하다. 이러한 한계를 극복하기 위해 가상현실 기반기술을 안전 교육에 활용하는 것을 제안한다. 최근 널리 보급되고 있는 VR 기기는 안전하면서도 몰입감 있는 교육기반을 제공할 수 있다. 본 연구에서 사용한 휴대용 오쿨러스퀘스트 기기 및 스마트폰을 이용한 카드보드 형태의 기기를 사용한다면 소규모, 대규모 산업 현장에서 모두 동일한 품질의 교육 제공이 가능하다고 사료된다. VR을 통한 체험 학습을 접목함으로써 근로자들이 안전문제에 대한 인식을 제고하고 이를 바탕으로 산업재해를 최소화하여 궁극적으로 플랜트산업에서의 산업재해 제로화 달성 및 성장을 도모할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구는 플랜트산업의 산업재해를 예방하기 위한 가상현실기반 실감형 안전교육콘텐츠 개발을 수행하였다. 고용노동부에서 발표한 산업안전보건실태조사에서 사업장내 재해 유무와 안전교육과의 관련성을 통계적 방법을 통해서 검증하여 교육의 필요성은 매우 중요하지만, 단순 횟수와 시간의 증가는 재해 유무와 관련이 없음을 규명하였다. 체험할 수 없는 산업재해 학습을 위해 최근 가파르게 발전하고 있는 가상현실기술을 활용하여 피학습자의 몰입도를 증가시킬 수 있는 교육콘텐츠 개발을 완료하였다. 실제 사고 사례를 기반으로 피학습자의 효율적인 학습을 위해 물질안전보건자료를 확인하기 위한 사고 사례 학습을 선행하고, 게임형식의 안전보호구 착용 절차를 도입하였다. 주요 장치에 대한 학습을 통해 실제 현장에서 확인하기 어려운 내부 구조 등에 대한 이해도를 향상시킬 수 있으며, 게임 형식의 사전점검과정을 통하여 실제 공정에서 실시해야 하는 선행학습을 경험할 수 있게 구성하였다. 사전학습 후 실제 사고를 체험하고, 체험 후 사고발생원인에 대한 정리를 끝으로 피학습자의 안전교육은 마무리된다. 플랜트분야의 사고를 예방하기 위해서는 물질과 주요장치 및 작업절차에 대한 학습이 필수적이며, 본 연구에서 개발된 실감형 안전교육콘텐츠를 통하여 학습한다면 근로자는 작업장에서 지켜야 할 실질적이고

체계적인 학습을 할 수 있다. 또한 실제 사고를 가상현실에서 체험하여 작업 전 안전사고를 대비할 수 있다. 체험형 안전교육의 확산을 통하여 플랜트산업의 작업장 내 안전 사각지대를 줄이고 산업재해를 제로화하여 근로자의 안전과 산업 발전에 기여하고자 한다.

후 기

본 연구는 고용노동부 일학습병행 공동훈련센터 실감형콘텐츠 개발지원사업의 지원과 농촌진흥청 연구사업(과제번호: PJ0164902022)의 지원으로 수행되었음.

참고문헌 (References)

- (1) Ministry of Employment and Labor, 2023, *2022 Occupational Accident Analysis*, Moonjung Design and Print, Sejong, Republic of Korea, pp. 1~655.
- (2) Koh, K. C., Koo, S. J. and Kim, B., 2022, "A Study on Selection of Feed and Facility for Educational Petrochemical Plant," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. C*, Vol. 10, No. 1, pp. 107~114.
- (3) KOSHA, 2018, *Occupational Safety and Health Survey Analysis Report 2*, KOSHA, Ulsan, Republic of Korea.
- (4) Chen, H., Hou, L., Zhang, G. and Moon, S., 2021, "Development of BIM, IoT and AR/VR Technologies for Fire Safety and Upskilling," *Automation in Construction*, Vol. 125, Article 103631.
- (5) Li, X., Ling, J., Lu, T., Feng, S. and Zhu, H., 2021, "The Impact of CCT on Driving Safety in the Normal and Accident Situation: A VR-Based Experimental Study," *Advanced Engineering Informatics*, Vol. 50, Article 101379.
- (6) Rokooei, S., Shojaei, A., Alvanchi, A., Azad, R. and Didehvar, N., 2023, "Virtual Reality Application for Construction Safety Training," *Safety Science*, Vol. 157, Article 105925.
- (7) Kim, D. J. and Noh, D. K., 2023, "Implementation of Virtual Reality Training Contents Using Haptic Devices for Enhancing User Engagement," *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, Vol. 27, No. 7, pp. 846~852.
- (8) Kim, J. and Oh, J., 2022, "Development of VR-Based Safety Education Content for Sailors," *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, Vol. 26, No. 12, pp. 1898~1907.
- (9) Kim, M. and Lee, E., 2022, "A Study on the Safety VR Training and Satisfaction, Safety Behavior, and Learning Outcomes of Airline Cabin Crews Based on Metaverse," *Industrial Research*, Vol. 46, No. 3, pp. 193~231.
- (10) Park, M., Choi, E., Jo, J. and Moon, S., 2022, "Trend of Virtual/Augmented Reality Technology in the Field of Aviation," *Current Industrial and Technological Trends in Aerospace*, Vol. 20, No. 1, pp. 38~54.
- (11) Oh, J., Lee, J. and Oh, J., 2022, "Development of VR-Based Ship Emergency Response Training Contents," *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, Vol. 26, No. 2, pp. 214~222.
- (12) Park, Y. H., 2022, "Analysis of Perceptions on Safety and Health Training and Measures to Improve the Training," *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol. 21, No. 4, pp. 246~355.
- (13) Kim, T. W., 2019, "An Empirical Study on the Impact of Safety Consciousness on the Construction Industry Disaster: Focusing on Chungcheongbuk-do Area -," *GRI Review*, Vol. 21, No. 4, pp. 155~176.
- (14) Scorgie, D., Feng, Z., Paes, D., Parisi, F., Yiu, T. W. and Lovreglio, R., 2024, "Virtual Reality for Safety Training: A Systematic Literature Review and Meta-Analysis," *Safety Science*, Vol. 171, Article 106372.
- (15) Lee, J. and Chang, S., 2022, "Development of Realistic Scenarios Framework for the Production of Virtual Reality Safety Education Contents," *Journal of Digital Contents Society*, Vol. 23, No. 1, pp. 1~9.
- (16) Chang, H. and Change, S., 2021, "Interaction Design Study of Virtual Reality Safety Education Contents," *Journal of the Korea Contents Association*, Vol. 21, No. 9, pp. 75~87.
- (17) Chang, S., Chang, H. and Kim, S., 2021, "Types of Virtual Reality-Based Safety Education Contents," *Journal of the Korea Contents Association*, Vol. 21, No. 1, pp. 434~445.

선박 벽체 도장 작업을 위한 임피던스 접촉모델 기반 협동로봇 제어

이준재* · 이효석** · 이 학†

* 경북대학교 대학원 기계공학과,

** 경북대학교 공과대학 기계공학부

Control of Collaborative Robot Based on Impedance Contact Model for Ship Hull Painting Operations

JunJae Lee*, HyoSeok Lee** and Hak Yi†

* Department of Mechanical Engineering, Kyunpook National University,

** School of Mechanical Engineering, Kyunpook National University

(Received January 4, 2024 ; Revised March 2, 2024 ; Accepted March 4, 2024)

Key Words: Ship Hull(선박 벽체), Paint Coating(도장 작업), Collaborative Robot(협동 로봇), Impedance Contact Model(임피던스 접촉 모델), Virtual Wall(가상 벽)

초록: 선박 벽체 도장 공정에서 대부분의 도장 공정은 작업자의 숙련도에 의존하기 때문에, 작업자의 오랜 작업 시간 및 위험성 노출 가능성이 매우 높다. 따라서 본 연구에서는 작업자의 안전성 확보와 작업 효율화를 위한 임피던스 접촉 모델 기반의 협동 로봇 제어를 하였다. 임피던스 접촉 모델을 기반으로 도장 공정에서 예상되는 협동 로봇의 바닥 접촉 실험을 통해 강성 변화에 따른 로봇의 제어 결과를 비교 및 분석하였고, 접촉 모델의 강성 변화에 따른 제어 성능 결과를 보였다. 본 연구는 향후 다양한 선박 내부 도장 공정에 응용 가능할 것으로 예상된다.

Abstract: Ensuring a uniform paint coating, heavily reliant on the operator's skill and proficiency, is crucial to prevent corrosion and oxidation of ship hulls. This research aims to explore a painting control technique employing a collaborative robot to enhance worker safety and the efficiency of the ship hull painting process. In this context, the robot's contact experiment demonstrates minimal contact force, aligning with expectations based on the impedance contact model during the painting process. This study holds potential for application across various ship painting procedures in the future.

1. 서 론

1980년대 이후, 국내 조선 산업은 빠르게 성장하였지만, 작업 노동자의 고령화와 작업 위험성 증가로, 최근에는 자동화 시스템의 고도화 및 무인화가 많은 관심을 받고 있다.⁽¹⁾ 그중에서도 도장 로봇은 자동차 분야 등의 타 분야에서 많은 연구가 수행되고 있으나, 선박 분야에서의 도장 로봇 개발 및 응용 연구는 밀폐된 공간 또는 고소(高所) 등의 작업 공간 특성 및 제약으로 기대에 미치지 못하고 있다.⁽²⁾ 최근 이러한 한계를 극복하기 위해, 본 연구에서는 대표적인 인간-로봇 협업 시스템인 협동 로봇의 선박 도장 작업 활용을 위한 제어 연구를 진행하였다.⁽³⁾

도장 작업은 주로 물리적 구조물이나 제품 표면에 페인트 도막을 형성하여 작업 대상의 수명과 효율성을 연장하는 과정이다. 불균일한 페인트 도막은 도장 작업 효율성을 감소시키며, 결과적으로는 구조물

† Corresponding Author, yihak@knu.ac.kr

Table 1 D-H parameter table of A0509 robot

| Link | α_i | a_i | d_i | θ_i |
|------|------------|-------|-------|------------|
| 1 | 0 | 0 | 155.5 | 0 |
| 2 | -90° | 0 | 0 | -90° |
| 3 | 0 | 409 | 0 | 0 |
| 4 | 90° | 0 | 367 | 0 |
| 5 | -90° | 0 | 0 | 90° |
| 6 | -90° | 0 | 124 | 0 |

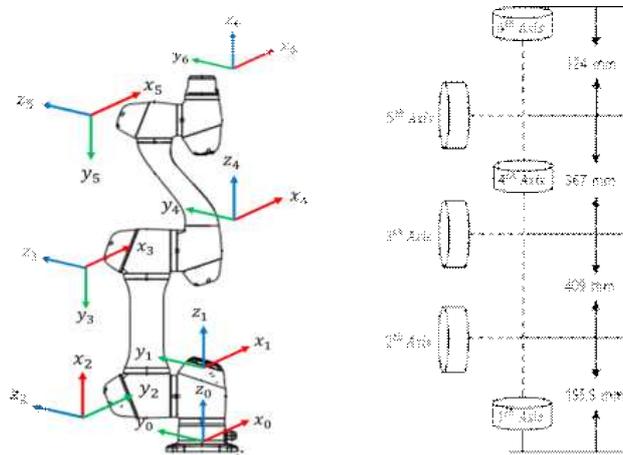


Fig. 1 Coordinates of A0509 robot

수명을 단축시킨다. 그러나, 이를 해결하기 위한 로봇 기반의 도장 작업은 도장 장비가 대상물과 접촉 시, 작업 환경의 복잡성에 의한 불확실성에 의해서 대상물 및 로봇을 파손하는 등의 문제가 발생한다.^(4,5) 따라서 본 연구에서는 임피던스 모델 기반의 가상 벽을 적용한 로봇 기반의 도장 장비가 일정 접촉력을 제공하는 제어 기술을 제시한다.

2. 협동 로봇의 기구학

본 연구에서는 6 자유도, 가반 중량 5 kg의 Doosan Robotics 협동 로봇(A0509)을 사용하였다. Fig. 1은 로봇의 각 링크의 관절 좌표계를 보여준다. Table 1은 각 관절의 좌표 축 및 링크 길이를 D-H parameter로 나타내었다. 각각의 변수 a_i 는 x_i 축에서 z_i 축과 z_{i+1} 축 사이의 길이, α_i 는 x_i 축에서 z_i 축과 z_{i+1} 축이 이루는 각도, d_i 는 z_i 축에서 x_{i-1} 축과 x_i 축 사이의 거리, θ_i 는 z_i 축에서 x_{i-1} 축과 x_i 이 이루는 각도이다.^(6,7) 변환 행렬을 통해 로봇 말단부의 위치 및 방향은 각 관절 정보를 바탕으로 로봇 말단부의 최종 위치와 방향은 식 (1)처럼 계산한다.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_4 * s\alpha_4 * s\theta_2 \\ 0 \\ a_3 * s\alpha_2 * s\theta_2 - d_6 * s\alpha_2 * s\theta_2 * s\theta_5 + d_1 \end{bmatrix} \tag{1}$$

여기서 $\theta_1 = \text{atan2}(y, x)$, $\theta_2 = \alpha + \beta$, $\theta_5 = \alpha' + \beta'$
 $\theta_3 = (\theta_2 + \theta_5) - \varnothing$, $\theta_4 = \text{atan2}(s\theta_4, c\theta_4)$, $\theta_6 = \text{atan2}(s\theta_6, c\theta_6)$

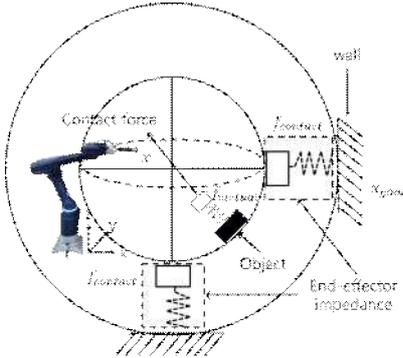


Fig. 2 Impedance contact model

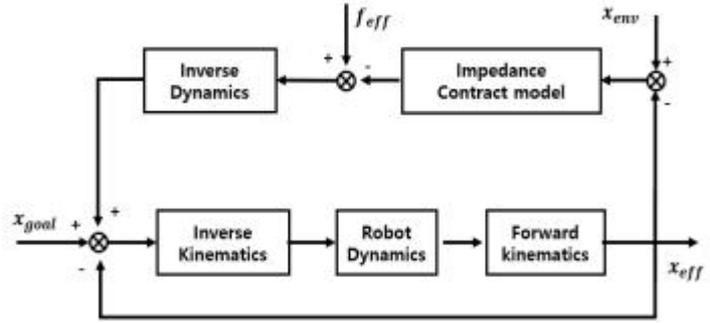


Fig. 3 Block diagram of the proposed control system

3. 가상 임피던스 접촉 모델

3.1 임피던스 접촉 모델

본 연구에서는 도장 공정에서 도구와 벽면 사이 접촉 상황을 표현하는 임피던스 접촉 모델을 식 (2)와 같이 설계하였다.^(5,8,9) x_{goal} , x , $f_{contact}$ 은 로봇 말단부의 목표 위치, 로봇 말단부의 현재 위치, 로봇 말단에 가해진 외력이다. m , b , k 는 협동 로봇의 질량, 댐핑, 강성 값이다.

$$M(\ddot{x}_{goal} - \ddot{x}) + B(\dot{x}_{goal} - \dot{x}) + K(x_{goal} - x) = \bar{f}_{contact} \tag{2}$$

Fig. 2는 로봇 말단부와 가상 벽(wall) 간의 접촉 모델링으로, $k_{virtual}$ 및 $x_{virtual}$ 은 로봇 말단부와 가상 벽 사이의 임피던스 강성 및 거리이며, 가상 벽의 반력 ($f_{virtual}$) 은 다음 식 (3)과 같다.

$$\bar{f}_{contact} = \bar{f}_{virtual} = k_{virtual}(x_{goal} - x) \text{ if } x_{virtual} - (x_{goal} - x) \geq 0 \tag{3}$$

로봇 말단부가 가상 벽과 접촉하지 않으면 식 (2)는 식 (4)처럼 표현이 가능하다.

$$M(\ddot{x}_{goal} - \ddot{x}) + B(\dot{x}_{goal} - \dot{x}) + K(x_{goal} - x) = \bar{0} \tag{4}$$

Fig. 3은 본 연구에서 제안한 임피던스 접촉 모델 기반의 협동 로봇 제어 블록도를 나타낸다. 피드백 제어기 설계를 위해 측정하는 물리량은 협동로봇 각 축의 토크와 조인트 각도 위치이다. 시스템에 입력되는 값(x_{goal})은 목표 위치, (x_{eff})은 로봇 말단부의 실제 위치를 나타낸다. 임피던스 제어기는 가상 벽 모델을 통해 힘을 계산하는데 사용하였으며, 로봇 말단부 및 도장용 롤러는 동일 좌표계로 가정하였다. 또한 로봇 말단부와 도장 대상물 사이의 거리 측정은 레이저 거리 측정기를 이용하였다.

3.2 바닥 접촉 실험

Fig. 4는 페인트 작업 로봇 시스템의 안전성을 검증하기 위해 compliance 부품을 로봇의 말단부에 장착하여 가상 벽 (강성) 적용 유무에 따른 토크 값 실험을 보인다. 바닥 접촉 실험은 중력을 제외하면 기본적으로 도장 대상 물체 접촉과 유사하며, 로봇 강성은 5,000 N/m로 설정하였다. Fig. 5는 3초 동안 측정된 협동 로봇의 5번 축 토크 값이다. 로봇 강성 제어 적용 전($k_{eff} = 0$), 바닥과 접촉하는 1초 정도에서 토크 값이 9 N·m 상승, 약 2초까지 토크 값이 유지되다가 0 N·m로 감소하는 경향을 보인다. 로봇이 바닥과 접촉할 때 수직 항력 영향으로 높은 토크를 보인다. 로봇 강성 ($k_{eff} = 5,000$ N/m) 적용한 경우, 약

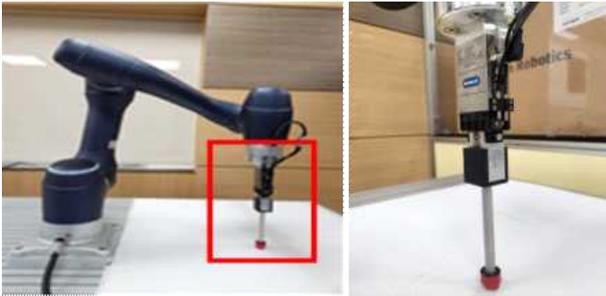


Fig. 4 Robot's floor contacting in experiment

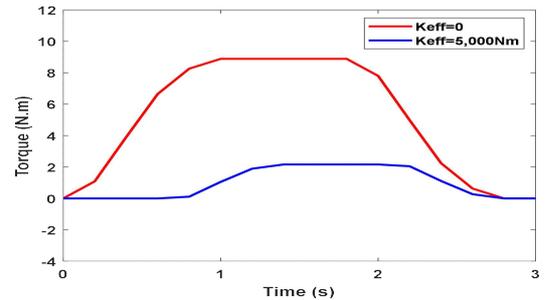


Fig. 5 Torque in z axis of 5th joint



Fig. 6 Robot's paint contacting in experiment

1초에서 1 N·m토크 값이 상승하고 2초까지 일정한 토크를 유지하다 감소한다. 가상 벽이 고려된 경우, 로봇 말단부의 접촉 충격으로 인해 발생된 힘을 충분히 분산시켜 로봇에 가해지는 토크값이 상대적으로 작아진다. 또한, 로봇이 바닥과 접촉할 시 5번 축에 힘이 집중되는 것을 알 수 있다. 이는 바닥을 향해 수직으로 말단부를 눌렀을 시, 다른 축으로는 힘이 전달되지 않고 5번 축에만 집중적으로 가해졌기 때문에 나머지 조인트에 대한 측정값은 변화가 없는 것을 확인할 수 있다.

4. 페인트 도장 실험

4.1 페인트 도장 시스템

본 실험에서는 Fig. 6과 같이 로봇 말단부가 20초 동안 초기 위치에서 목표 위치로 이동한다. 20초 이후에는 말단부에 장착된 페인트 롤러가 벽과 접촉한 상태에서 협동 로봇 말단부가 왼쪽에서 오른쪽으로 직선 이동하며, 각 축의 측정 토크 값을 분석하여 가상 벽에 따른 효과를 확인하였다.

도장 로봇과 대상 벽의 접촉 시, 조인트 1번(Fig. 7(a))에서 4번(Fig. 7(d))까지 가상 벽 적용에 따른 각 조인트 회전축의 토크 값은 유사하였다. 축 5번(Fig. 7(e))은 로봇의 벽 접촉 이전(0 ~ 15초) 구간에서는 토크 변화가 없었다. 가상 벽 강성 적용 여부에 관련 없이, 로봇의 말단부가 벽과 접촉하는 20초 이후 토크 값이 4 N·m에서 8 N·m 까지 증가하는 경향을 보이며, 강성 값이 적용된 경우는 강성 적용 전에 비하여 2 N·m의 차이를 보였다. 이는 로봇이 벽과 접촉할 때 발생하는 반력에 대응한 강성 제어 효과이다. 6번 축(Fig. 7(e))은 강성 값 설정이 없는 경우는 0 ~ 15초 동안 로봇 말단부의 페인트 롤러 무게에 의해 초기 위치에서 목표 위치로 이동하는 동안 토크 값이 0 N·m에서 6 N·m으로 증가하였다. 강성 적용 시에는 로봇 강성의 영향으로, 상대적으로 4 N·m의 토크 값 차이를 보였다. 15초 이후 페인트 작업 시, 수직 항력의 영향으로 토크 값이 양에서 음으로 바뀌었다. 5번 축은 로봇이 벽과 접촉할 때 고려한 가상 벽에 의해 토크 값이 감소한다.

6번 축은 로봇이 벽에 도장 작업 중에는 마찰력, 수직항력 등 기타 힘의 영향을 받아, 해당 축들이 벽과 접촉하는 접촉부와 가까워져 강성 제어의 영향을 더 많이 받은 것이다. 로봇의 강성 적용 여부와 관

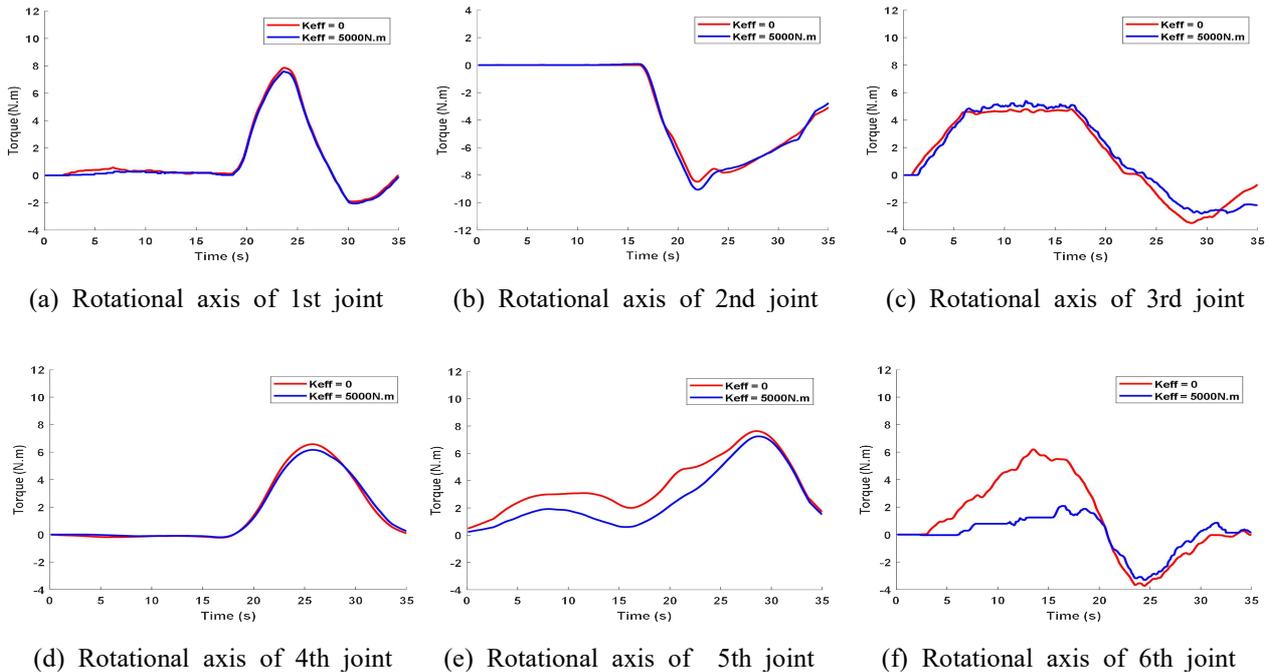


Fig. 7 Torque of robot's each Joint in experiment

런 없이, 말단부가 벽과 접촉하는 20초 이후 토크 값은 유사한 경향을 보였으며, 작업이 완료되는 30초 이후에는 일정하였다.

5. 결론

본 연구에서는 최근 국내 조선 산업의 작업자 안전 문제와 고령화로 인해 자동화 필요성이 높은 선박 벽체 도장에 주목하였다. 선박 벽체 도장은 선박 표면에 균일한 페인트 도막을 형성하여 제품 수명과 안전을 연장하는 과정으로 본 연구에서는 임피던스 접촉 모델 기반 협동 로봇 제어에 관한 연구를 진행하였다. 협동 로봇의 말단부에 페인트 롤러를 장착하여 임피던스 접촉 모델 기반의 도장 모의 실험을 진행하여, 가상 벽에 따른 특정 축의 외력에 의한 토크 값이 감소하는 경향을 확인하였다. 제안된 선박 벽체 도장 작업에 대한 효과적인 협동로봇 제어 방법은 추후 현장 적용 시, 안전성 및 효율성 개선에 도움이 될 것이라 예상된다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부 해양모빌리티 스마트페인팅 시스템기술개발(RS-2024-00431769)의 지원을 받아 수행됨.

참고문헌 (References)

- (1) Lee, S. B., 2021, "A Study on the Selection of Optimum Fire Extinguishing System for Spontaneous Ignition Fires in Shipyard Painting Shop," *Ph.D. Thesis*, Gachon University, Seongnam, Republic of Korea.
- (2) Zbiss, K., Kacem, A., Santillo, M. and Mohammadi, A., 2022, "Automatic Collision-Free Trajectory Generation for Collaborative Robotic Car-Painting," *IEEE Access*, Vol. 10, pp. 9950~9959.
- (3) Park, J., 2013, "Evaluation and Verification for Optimum Spray Coating Conditions of Epoxy Paints for Shipbuilding," *Mater's Thesis*, Busan University, Busan, Republic of Korea.

- (4) Le, H. and Jin, T., 2016, "Development and Performance Evaluation of Hull Blasting Robot for Surface Pre-Preparation for Painting Process," *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems*, Vol. 26, No. 5, pp. 383~389.
- (5) Park, T. and Yi, H., 2023, "Decision of Impedance-Based Scaling Factor for Workspace Mapping in Teleoperation," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 37, No. 11, pp. 6003~6009.
- (6) Doosan Robotics, 2024, *Doosan Robotics Training & Service* (<https://robotlab.doosanrobotics.com/ko/Index>), Suwon, Republic of Korea.
- (7) Robotics Explained, 2021, *Inverse Kinematics* (<https://robotics-explained.com/inversekinematics>), Zurich, Switzerland.
- (8) Jung, S., Hsia, T. C. and Bonitz, R. G., 2004, "Force Tracking Impedance Control of Robot Manipulators under Unknown Environment," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 12, No. 3, pp. 474~483.
- (9) Song, I., Ryu, H. and Choi, J., 2015, "The Efficient Dynamic Modeling of a Manipulator Robot System," *Transaction of Korean Society and Mechanical Engineering C*, Vol. 3, No. 2, pp. 155~164.

오픈소스 및 프리웨어를 이용한 디지털 제어기 설계 및 제작

정 광 석* · 이 상 현**†

* 국립한국교통대학교 기계공학과, ** 국립안동대학교 기계로봇공학과

Design and Implementation of Digital Control System Using Open-Source and Freeware

Kwang Suk Jung* and SangHeon Lee**†

* Dept. of Mechanical Engineering, Korea National University of Transportation,

** Dept. of Mechanical & Robotics Engineering, Andong National University

(Received January 9, 2024 ; Revised March 11, 2024 ; Accepted March 11, 2024)

Key Words: Open Source Software(오픈 소스 소프트웨어), Freeware(프리웨어), Controller Design(제어기 설계), Digital Controller(디지털 제어기), Lead-Lag Compensator(앞섬-뒤짐 보상기)

초록: 본 논문에서는 오픈소스 및 프리웨어를 이용하여, 2차 시스템을 대상으로 주파수 응답법을 이용하여 lead-lag 보상기와 zigler-nichols 방법으로 설계된 PID 제어기를 오픈 소스장치인 아두이노 보드를 이용하여 디지털 제어 시스템으로 구현하였다. 두 제어 시스템 모두 설계목표를 달성하였고, 논문에서 제시되는 제어기의 설계 및 구현과정은 아두이노 보드를 비롯한 다양한 오픈소스 장치를 활용하여 제어 시스템을 구축하는데 도움을 줄 것으로 기대된다.

Abstract: In this paper, we utilize open-source and freeware to design a lead-lag compensator and a PID controller for a second-order system using the frequency response method and the Zigler-Nichols method, respectively. These controllers were implemented as a digital control system using the Arduino Uno board, an open-source device. Both control systems successfully met their design objectives. The paper outlines the design and implementation processes of the controllers, anticipating that it will facilitate the development of control systems using various open-source devices, including the Arduino board.

1. 서 론

기계공학분야 뿐만 아니라 다양한 학문 분야에서 오픈소스 및 프리웨어의 개발과 활용이 활발히 진행되고 있다. 이러한 추세에 맞추어 공개자원의 체계적인 유지관리가 기존의 아파치 소프트웨어 재단, 리눅스 재단, 오픈소스 이니셔티브 재단과 같은 전통적인 재단들에 의해 진행되고 있다.⁽¹⁾ 또한, 오픈 소프트웨어 뿐만 아니라 하드웨어에 대한 내용을 다루는 학술지도 발간되고 있으나,⁽²⁾ 여전히 많이 공개된 오픈소스 자료들은 정보의 접근성과 공개성의 측면에서 높은 장점을 지니고 있음에도 불구하고, 기술적이나 이론적으로 검증되지 못한 내용으로 제작 및 공개되는 경우도 종종 있기 때문에 공개된 자료의 사용에 있어서의 검증과 책임은 결국 사용자가 감당하여야 한다. 따라서, 사용자는 단순 소비자의 역할뿐만 아니라, 오픈 소스 자료들의 검증을 위한 이론적인 지식도 함께 구비하여야 할 필요가 있다.

이러한 배경으로 오픈소스 소프트웨어 또는 하드웨어를 사용자들이 정확하게 사용할 수 있도록 돕는 연구들이 진행되고 있다. 그 예로 대학교 학부에서 교육받는 제어이론을 오픈소스 및 프리 소프트웨어를 활용한 제어기의 개발이 보고되었으며,⁽³⁾ 웹 상에 공개된 오픈 소스 로봇을 대상으로 한 기구학 해석

† Corresponding Author, shlee@anu.ac.kr

Table 1 Elements of plant

| R_{p1} | R_{p2} | R_{p3} | R_{p4} | C_{p1} | C_{p2} |
|----------------|------------------|----------------|--------------|----------|-----------|
| 100 k Ω | 100 k Ω , | 100 k Ω | 5 k Ω | 100 nF | 2 μ F |

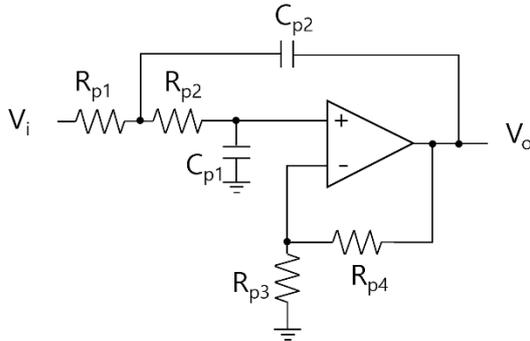


Fig. 1 Plant circuit: 2nd order Sallen-Key low pass filter

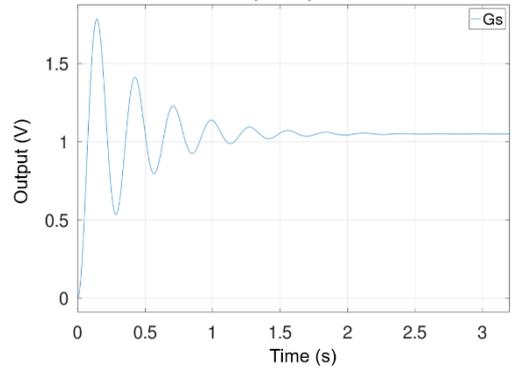


Fig. 2 Step response of the plant

및 시뮬레이션의 개발도 보고되었다.⁽⁴⁾ 특히, 전자의 사례에서는 공개 수치연산 프로그램인 octave⁽⁵⁾와 웹 기반 semi-real 시뮬레이션 프로그램인 TinkerCad circuits⁽⁶⁾을 이용하여 PID 제어기를 이론적으로 설계하는 것 뿐만 아니라, 특별한 장비없이 간단한 전기회로와 아두이노 우노 보드를 이용하여 독자가 직접 아날로그 제어기를 구현할 수 있는 방법을 제시하였다. 그러나, 아두이노 보드와 같은 디지털 장치에 적용할 수 있는 디지털제어기에 대한 내용을 다루지 못한 부족함이 있어, 본 논문에서는 오픈 소스 및 프리웨어를 이용하여 주파수 응답설계법을 기반으로 한 제어시스템의 설계와 아두이노 보드를 이용한 디지털 제어시스템의 구축에 대한 내용을 다루고자 한다.

2장에서는 2차 시스템의 플랜트를 정의하였고, 주파수응답법을 기반으로 앞섬-뒤짐(lead-lag)보상기의 이론적 설계에 대해서 다루었고, 3장에서는 설계된 제어기의 디지털 전환과 구현에 대해서 다루고 제어 실험의 결과를 비교하였다.

2. 제어기 설계

2.1 플랜트⁽³⁾

본 논문에서 다룰 제어시스템에서의 플랜트는 이전 논문에서와 같이 2차 시스템으로 설계하였으며, 실제 제어시스템으로의 구현을 용이하게 하기 위하여 Fig. 1과 같은 2차 Sallen-Key low pass filter를 플랜트로 설정하였으며, 전달함수는 식 (1)과 같이 유도된다.

$$G(s) = \frac{K}{s^2(R_{p1}R_{p2}C_{p1}C_{p2}) + s(R_{p1}C_{p1} + R_{p2}C_{p1} + R_{p1}C_{p2}(1 - K)) + 1} \quad (1)$$

여기서, K는 gain으로 회로식의 정의에 따라 식 (2)와 같이 정의된다.

$$K = 1 + R_{p4}/R_{p3} \quad (2)$$

회로에 사용된 저항과 커패시터는 각각 Table 1에 정리하였고, 수치대입으로 플랜트의 전달함수는 최종적으로 식 (3)과 같이 얻어진다.

$$G(s) = \frac{1.05}{0.002s^2 + 0.01s + 1} \quad (3)$$

Table 2 Time response parameter data of open loop control system

| | Rise time (s) | Overshoot (%) | Peak time (s) | Settling time (s) | Steady state error |
|------|---------------|---------------|---------------|-------------------|--------------------|
| Open | 0.045 | 70.1 | 0.14 | 1.85 | 0.05 |

그리고, Octave를 이용하여 플랜트에 대한 개루프 계단응답을 구하였을 때 Fig. 2와 같은 계단응답을 구할 수 있었다. 시간성능은 Table 2에 정리하였는데, 상승시간은 0.045초로 크지 않은 편이나, 70%의 큰 오버슈트와 약 2초의 정착시간은 개선의 필요가 있었으며, 정상상태오차도 0.05이므로 함께 개선되어야 했다. 따라서, 이러한 사항을 개선할 수 있도록 제어기의 설계를 진행하였다.

2.2 제어기 설계

이전 연구⁽³⁾에서는 PID 제어기를 적용하고, Ziegler-Nichols 튜닝방법으로 각 제어기의 이득값을 결정하였으나, 본 논문에서는 현장에서 좀더 많이 활용되고 있는 주파수 응답설계법을 기반으로 앞섬-뒤짐 보상기를 설계하고자 한다.

주파수 응답설계법은 개루프 시스템의 주파수 응답에서의 크기와 위상선도를 나타내는 bode 선도에서의 크기 및 위상선도의 상관관계가 폐루프 제어시스템의 특성을 결정한다는 원리를 기반으로 개발되었으며, 추가적인 제어기 또는 보상기의 적용으로 폐루프 제어시스템이 원하는 특성을 갖도록 주파수 응답곡선의 형태를 바꾸는 것으로 요약할 수 있다.

주파수 응답곡선의 형태를 정의하는 주요 요소는 주파수의 정보를 나타내는 게인 크로스오버 주파수 (gain crossover frequency, ω_{gc}), 위상 크로스오버 주파수(phase crossover frequency, ω_{pc})와 이 둘 주파수에서 시스템이 불안정해지기까지의 게인과 위상의 여유를 나타내는 게인여유와 위상여유가 있다. 위상여유와 게인여유의 값에 의해 폐루프 제어 시스템의 안정도를 판별할 수 있으며, 2차 시스템의 경우 위상여유는 감쇠비에도 비례하는 특성이 있다. 따라서 제어기 또는 보상기를 적용하여 주파수 응답곡선의 형태변경과 이로 인한 주요 요소의 변화를 통해 최종적으로 폐루프 제어시스템의 특성을 개선할 수 있다.

일반적으로 앞섬보상기는 특정 주파수에서 위상을 증가시킬 수 있기 때문에 위상여유를 조절하는 목적으로 주로 활용되어 최종적으로 감쇠비를 조절하여 과도응답특성을 향상시키는 특성이 있다. 반면, 뒤짐보상기는 위상은 감소시키나 저주파대역이나 원하는 주파수에서의 게인을 증가시켜 정상상태오차를 조절하는 효과가 있다. 따라서, 본 논문에서는 앞섬보상기와 뒤짐보상기를 함께 사용하여 시스템의 응답 특성을 향상시키고자 한다. 아래에 본 연구에서 적용하고자 하는 앞섬-뒤짐보상기의 설계절차를 정리하였다.⁽⁷⁾

- Step 1: 목표 성능 설정
- Step 2: 정상상태 오차를 줄이기 위한 게인 설정
- Step 3: 앞섬 보상기를 이용한 목표 주파수에서의 위상 조절
- Step 4: 뒤짐 보상기를 이용한 목표 주파수에서의 게인 조절

2.2.1 제어목표 설정

폐루프 제어시스템의 목표는 최대 시간은 고려하지 않고 Table 3과 같이 설정하여, 성능지표가 개 루프 제어 대비 각각 56%, 85%, 51% 개선되도록 하였고, 정상상태 오차도 80% 이상 향상되도록 하였다.

Table 3의 목표성능은 시간영역에서의 정의이고, 주파수 응답설계법에 적용하기 위해 주파수와 위상의 정보로 변환이 필요한데, 우선 주파수 정보는 상승시간을 정의하는 식 (4)로부터 목표 고유진동수(ω_n)를 90 rad/s로 정하였다.

$$\frac{1.8}{\omega_n} < 0.02 \tag{4}$$

그리고 위상의 정보는 감쇠비와 관계되기 때문에 정착시간의 관계식 (5)로부터 목표 감쇠비를 구하여 위상여유를 정할 수 있다.

Table 3 Time response parameter for a desired feedback control system

| | Rise time (s) | Overshoot (%) | Settling time (s) | Steady state error |
|--------|---------------|---------------|-------------------|--------------------|
| Target | < 0.02 | < 10 | < 0.9 | < 0.01 |

$$t_s = \frac{4.6}{\zeta\omega_n} \quad (5)$$

감쇠비(ζ)를 최소 0.6 이상이 되도록 하면, 정착시간을 0.085초로 얻을 수 있기 때문에 목표 위상여유를 60° 이상이 되도록 하였다. 감쇠비가 0.6 이상인 경우 대역폭(ω_{bw}), 고유진동수(ω_n), 계인 크로스오버 주파수(ω_{gc})가 거의 동일해지므로, 목표 계인 크로스오버 주파수를 90 rad/s로 정하였다.

2.2.2 계인 설정

본 설계에서 주어진 플랜트는 식 (2)에서와 같이 type 0의 시스템으로 feedback 제어 적용 시 계단입력에 대한 정상상태 오차(ess)는 식 (6)과 같이 된다.⁽⁷⁾

$$E_{ss} = \frac{1}{1 + k_p} \quad (6)$$

여기서 k_p 는 위치오차상수로서 식 (7)과 같이 정의되는데,

$$k_p = \lim_{s \rightarrow 0} KG(s) \quad (7)$$

목표정상상태 오차값 0.01을 달성하기 위해서는 위치오차상수(k_p)는 99가 되어야 하고, 식 (7)에 의해 이득 K는 94.3이 된다. 따라서 이득 K를 포함한 플랜트의 전달함수는 식 (2)로부터 연산하여 식 (8)과 같이 구해진다.

$$KG(s) = \frac{99}{0.002s^2 + 0.01s + 1} \quad (8)$$

2.2.3 앞섬보상기 설계

위상여유 향상을 위한 앞섬 보상기의 설계에 앞서, 식 (8)에 정리된 이득이 포함된 플랜트의 위상여유를 우선 확인한다. Fig. 3은 Octave를 이용하여 얻은 해당 플랜트의 보드선도를 나타내는데, 계인 크로스오버 주파수(ω_{gc})는 223.6 rad/s이며, 위상여유는 1.3로 확인되었고, 목표로 정한 계인 크로스오버 주파수(90 rad/s)에서의 위상여유 역시 비슷한 수준으로 나타났다. 앞서 설계에서 목표로 잡은 위상여유를 만족시키기 위해서, 계인 크로스오버 주파수에서 위상여유를 목표치보다 조금 더 여유를 두어 70° 로 향상시키는 앞섬 보상기를 설계하였다.

앞섬보상기는 식 (9)에 의해 정의되는데, 여기서 α 와 T는 식 (9)와 식 (10)에 의해 정의된다.

$$D_{ld}(s) = \frac{Ts + 1}{\alpha Ts + 1} \quad (9)$$

$$\omega_{max} = \frac{1}{T\sqrt{\alpha}} \quad (10)$$

$$\alpha = \frac{1 - \sin \varphi_{max}}{1 + \sin \varphi_{max}} \quad (11)$$

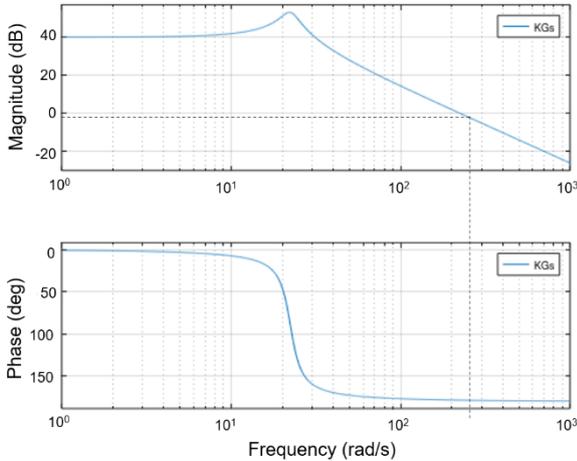


Fig. 3 Bode plot of KG(s)

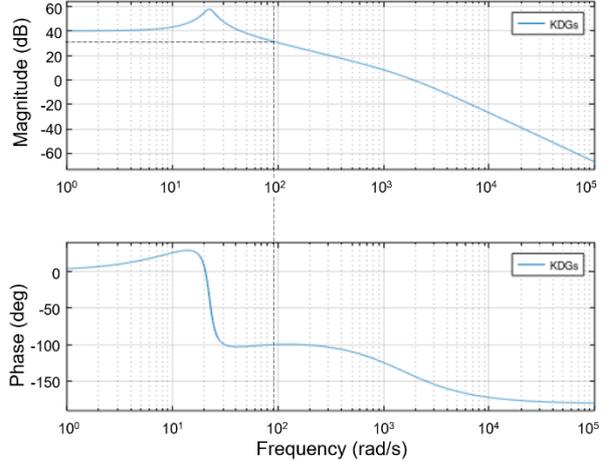


Fig. 4 Bode plot of KD_{id}G(s)

여기서, ω_{max} 와 ϕ_{max} 는 각각 목표 계인 크로스오버 주파수와 위상 증가값에 대하여, 각각 90 rad/s와 70°의 값을 입력하여 계산하면, 앞섬 보상기는 식 (12)와 같이 구해진다.

$$D_{id}(s) = \frac{0.06301s + 1}{0.0006636s + 1} \tag{12}$$

이를 적용한 시스템에 대한 보드선도를 구하면 Fig. 4와 같다. 여기서, 실제 계인 크로스오버 주파수는 2,000 rad/s로 나타나지만, 우리가 목표로 잡은 계인 크로스 오버 주파수인 90 rad/s에서는 계인여유가 80°까지 증가하였음을 확인할 수 있다. 따라서, 감쇠비 조건을 맞추기 위한 앞섬 보상기의 설계가 바르게 이루어졌음을 확인할 수 있고, 다음으로 90 rad/s에서 실제 계인 크로스오버 주파수가 되도록 뒤짐 보상기를 설계한다.

2.2.4 뒤짐보상기 설계

Fig. 4의 크기선도곡선에서 설계 목표로 한 계인 크로스오버 주파수에서의 크기가 31 dB이므로 뒤짐보상기를 추가하여 크기가 0 dB로 맞추어 계인 크로스오버 주파수를 변경한다. 뒤짐 보상기의 전달함수는 앞섬 보상기와 동일한 형태로 식 (13)과 같이 정의되는데,

$$D_{lg}(s) = \frac{Ts + 1}{\alpha Ts + 1} \tag{13}$$

여기서, 뒤짐보상기를 통해 감소되는 계인의 크기는 α 로 결정되기 때문에, 이를 데시벨로 변환하여 목표치인 31 dB로 맞추어 계산하면 α 는 35.5가 된다. 그리고 영점의 위치는 동적특성의 변화를 주지 않기 위해 통상적으로 계인크로스오버 주파수의 1 / 10보다 작게 정해서 식 (14)와 같이 최종적인 뒤짐보상기의 전달함수를 구할 수 있다.

$$D_{lg}(s) = \frac{0.1111s + 1}{3.942s + 1} \tag{14}$$

Fig. 5의 뒤짐 보상기가 포함된 최종 플랜트의 보드선도에서 계인 크로스오버 주파수가 목표 주파수 (90 rad/s)로 변경된 것을 확인할 수 있고, 위상여유는 75°로 앞섬 보상기만을 추가했을 때보다는 줄어 들었지만, 최종 목표인 60° 이상보다는 높은 것을 확인할 수 있다. 따라서, 최종 피드백 제어시스템의 구성은 Fig. 6과 같이 정리된다. 이를 대상으로 Octave로 계단응답 곡선을 구하여 Fig. 7에 나타내었고, 주요 성능은 Table 4에 정리하였다. 오버슈트가 10% 이하로 줄어들었음을 확인할 수 있으며, 상승시간, 정착시간

Table 4 Time response parametric data of feedback control system

| Rise time(s) | Overshoot (%) | Peak time (s) | Settling time(s) |
|--------------|---------------|---------------|------------------|
| 0.017 | 4.8 | 0.036 | 0.58 |

Table 5 Values for electrical elements for lead and lag controller

| | R ₁ | C ₁ | R ₂ | C ₂ |
|---------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Lead _(d) | 10 kΩ | 6.3 μF | 10 kΩ | 0.066 μF |
| Lag _(g) | 1.01 MΩ | 0.11 μF | 1 MΩ | 3.94 μF |

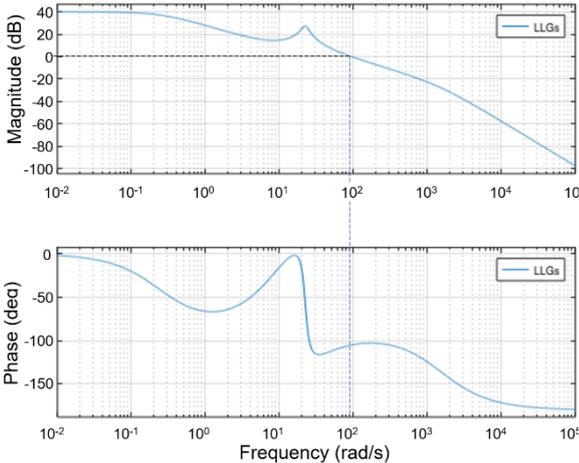


Fig. 5 Bode plot of $KD_{id}D_{ig}(s)$

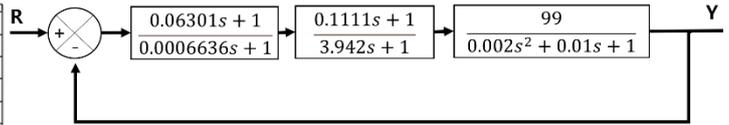


Fig. 6 Block diagram of feedback control system

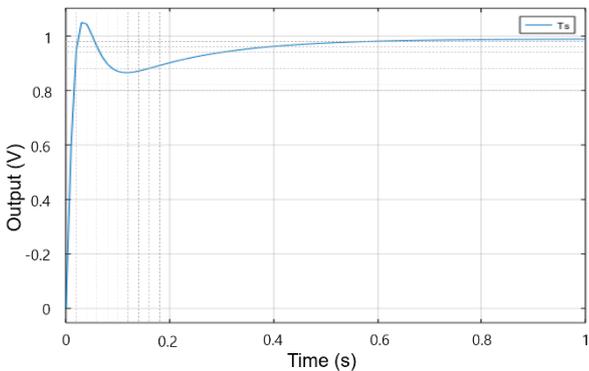


Fig. 7 Step response of feedback control system

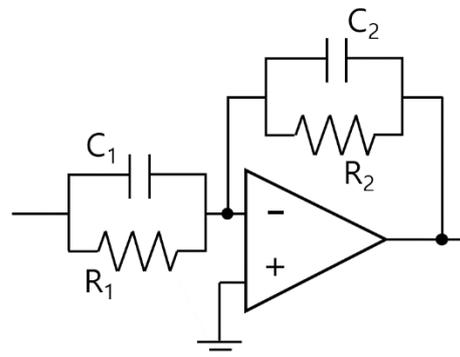


Fig. 8 Circuit for lead and lag compensator

모두 설계목표치를 만족하고, 정상상태 오차도 줄어들었음을 확인할 수 있다.

2.2 아날로그 제어기 구현 및 모의실험

기본적으로 앞섬 보상기와 뒤짐 보상기는 Fig. 8과 같이 동일한 형태를 가지며, 각 소자의 값에 따라 앞섬, 뒤짐 보상기로 정해진다. 따라서, Fig. 8과 같은 보상기 회로를 직렬로 연결하여 앞섬-뒤짐 보상기를 구현할 수 있다. 이 때 각 회로의 전달함수는 식 (15)에 의해서 정해지는데, 앞서 설계된 보상기의 전달함수와 식 (15)를 비교하여 각각의 소자를 Table 5와 같이 구할 수 있다.

$$D(s) = - \frac{C_1(s + \frac{1}{R_1 C_1})}{C_2(s + \frac{1}{R_2 C_2})} \tag{15}$$

따라서 전체 제어시스템의 회로는 Fig. 9와 같이 구성이 되고, 여기서 제어기 설계 1단계에서 구한 이득(94.3)은 오차를 구하기 위한 차동 증폭기에 반영하여 구현하였고, 차동 증폭기의 저항(R)은 1 kΩ으로

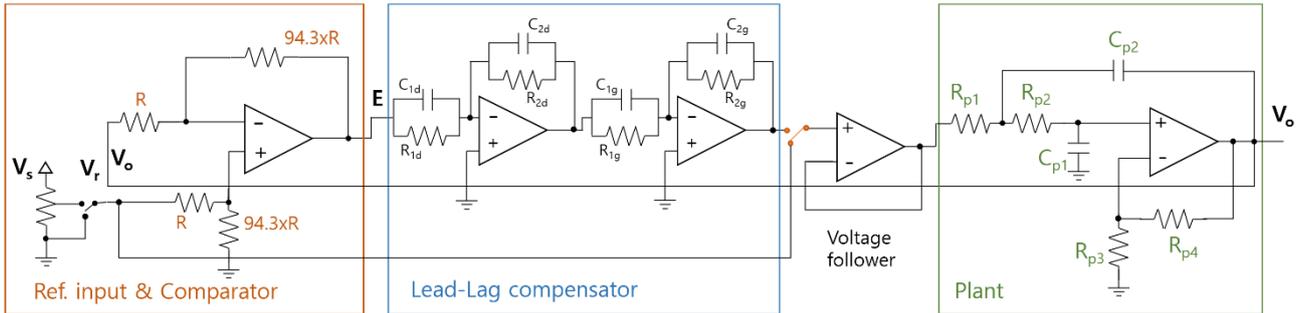


Fig. 9 Circuit for feedback control system with lead-lag compensator

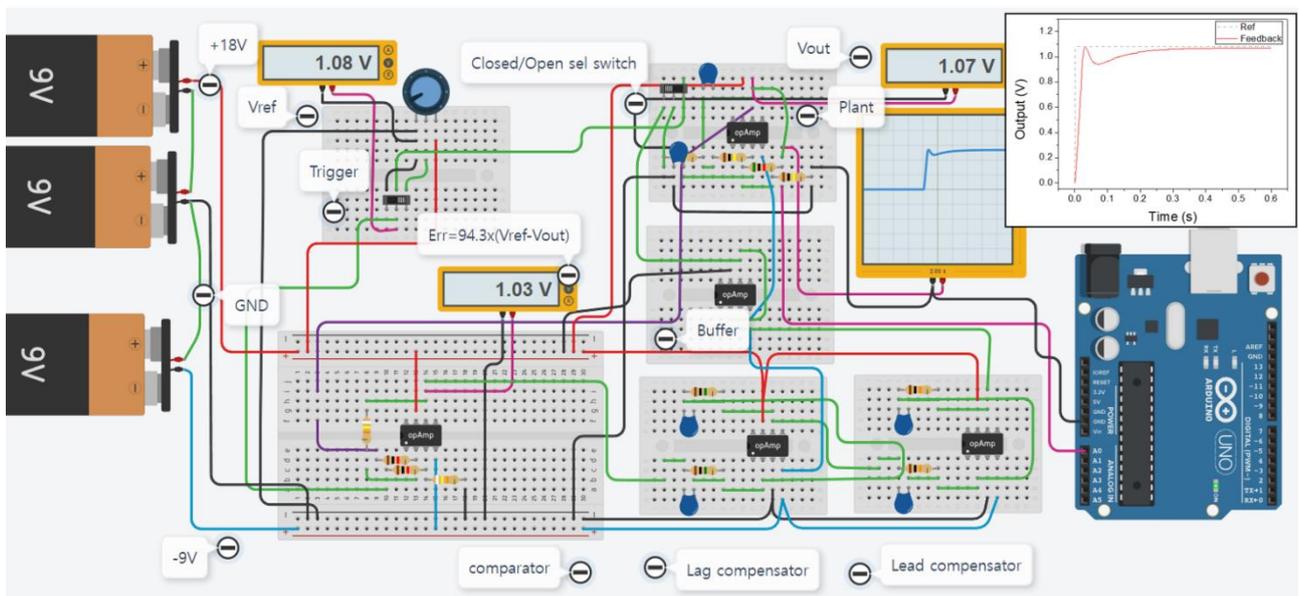


Fig. 10 Feedback control system with lead-lag compensator and step response (top right)

설정하였다. 그리고, 플랜트와 보상기 회로간의 임피던스 매칭 문제를 제거하기 위해 버퍼를 추가하였다.

이전 연구⁽³⁾에서 Tinkercad circuits의 유효성이 확인되었기 때문에 실제 아날로그 제어 시스템의 구현 대신 Tinkercad circuits을 이용하여 제어시스템을 평가하였다. Fig. 10은 Tinkercad circuits의 회로 모델로 다음의 링크로 복사가 가능하며, 사용자의 최종목적에 맞추어 수정이 가능하다(<https://bit.ly/48hW6cJ>). 개발된 회로는 기준입력을 생성하는 회로, 오차를 구하는 회로, 앞섬-뒤짐 보상기 회로, 버퍼, 플랜트 회로로 구성되어 있으며, 제어결과는 오실로스코프와 멀티미터로 확인이 가능하며, 아두이노 우노보드를 활용하여 모니터링 창에 출력된 값들을 복사하여 저장할 수도 있도록 코드를 작성하였다.

Tinkercad circuits으로 얻은 계단응답결과를 Fig. 10의 우측 상단에 나타내었는데, 앞서 Table 3에서 목표로 정했던 성능은 모두 달성하는 것으로 확인되었으나, 오버슈트값이 Octave를 통해 얻은 결과와 차이가 있었는데 이것은 Tinkercad circuits의 한계로 파악되었으며, Tinkercad circuits에서는 디지털 신호를 아날로그 신호로 변환해주는 기능이 없어서 현재로서는 디지털 시스템의 시뮬레이션은 불가능한 것으로 확인되었다.

3. 디지털 제어기

3.1 제어기 설계

앞장에서 다룬 제어시스템은 연속 신호를 기반으로 한 아날로그 제어기로 설계 변경 시 회로를 수정해야 하는 불편함이 있다. 그러나 최근에는 아두이노와 같은 마이크로 콘트롤러의 보급을 통해 제어시

시스템을 디지털 방식으로 쉽게 제작할 수 있기 때문에, 이번 장에서는 설계된 아날로그 제어시스템의 디지털 시스템으로의 전환 및 구현에 대해 다룬다.

디지털 제어기의 설계방법은 시작부터 이산시간영역에서 제어기를 설계하는 방법과 연속시간영역에서 설계된 제어기의 이산등가 모델을 이용하는 방법이 있는데,⁽⁷⁾ 본 논문에서는 앞서 제어기의 설계결과를 활용하기 위해 후자의 방법으로 설계를 진행하였다. 디지털 제어기의 설계에 있어서는 샘플링속도가 우선 정해져야 하는데, 기본적인 샘플링 이론에 따르면 샘플링속도는 대역폭의 2배보다 커야 하지만, ADC(analog-digital converter), DAC(digital-analog converter)의 동작시간과 디지털 제어기의 연산속도를 고려하여, 식 (16)과 같이 샘플링속도(ω_s)는 대역폭(ω_{BW})의 20배보다 빠르게 잡는 것이 일반적이다.⁽⁸⁾

$$\omega_s > 20 \omega_{BW} \quad (16)$$

따라서, 본 연구에서의 목표 대역폭이 90 rad/s임을 고려하면, 샘플링속도는 283 Hz (= 20 x 90 / 2 π)보다 커야 하므로, 충분한 여유치를 두어 샘플링속도를 500 Hz로 정하였다. 한편, 너무 높은 속도의 샘플링이 이루어질 경우, 데이터 처리를 위한 추가적인 부담이 제어기에 가해질 수 있기 때문에 주의할 필요가 있지만, 아두이노 우노보드의 성능을 고려할 경우, 500 Hz의 샘플링속도는 적용이 가능한 것으로 확인되었다. 앞서 구한 앞섬-뒤짐 보상기의 이산등가모델을 Octave를 이용하여 구하면 식 (17)과 같이 얻어지는데, Octave에서 지원되는 이산등가모델의 변환법은 zero-order holder, first-order hold, bilinear 등이 있는데, 이중 zero-order holder 방법을 사용하여 이산등가모델을 얻었다. 이산등가모델의 역변환을 통해 시간의 제어기 관계식을 식 (18)과 같은 차분방정식으로 정리할 수 있다.

$$KD_{lead-lag}(z) = \frac{85.5 - 168.2 z^{-1} + 82.8 z^{-2}}{1 - 1.36 z^{-1} + 0.36 z^{-2}} \quad (17)$$

$$u(k) = 1.36 u(k-1) - 0.36 u(k-2) + 85.5 e(k) - 168.2 e(k-1) + 82.8 e(k-2) \quad (18)$$

그리고 식 (19)와 같이 얻어진 이전 논문에서 설계된 PID 제어기에 대한 디지털 제어기도 동일한 샘플링 속도를 기반으로 이산등가모델을 Octave를 이용하여 이산모델을 구할 수 있는데, 높은 주파수의 노이즈에 의한 악영향을 줄이기 위해 미분 제어기에 저역통과필터를 추가한 식 (20)의 전달함수를 이용하여, 이산등가모델을 구하도록 하였다.⁽⁹⁾

$$D(s) = \left(4.54 + 0.05s + \frac{98.7}{s} \right) \quad (19)$$

$$D(s) = \left(4.54 + \frac{0.05s}{\tau s + 1} + \frac{98.7}{s} \right) \quad (20)$$

식 (20)의 미분제어기에 적용된 저역통과필터의 차단 주파수는 기본적으로 샘플링 주파수의 절반 이하가 되도록 설정되어야 하며, 차단주파수와 시정수의 관계로부터 저역통과필터의 시정수(τ)를 구할 수 있다. 본 연구에서는 샘플링주파수가 500 Hz로 설정되었기 때문에 저역통과필터의 시정수(τ)는 0.7 ms (> 1 / (2 x π x 250))로 설정하였다. Octave를 이용하여 PID 제어기의 이산등가모델은 식 (21)과 같다.

$$KD_{PID}(z) = \frac{75.97 - 147.5 z^{-1} + 71.68 z^{-2}}{1 - 1.057 z^{-1} + 0.05743 z^{-2}} \quad (21)$$

식 (21)의 이산등가모델의 역변환을 통해 얻어지는 차분방정식은 식 (22)와 같이 정리된다.

$$u(k) = 1.057 u(k-1) - 0.05743 u(k-2) + 75.97 e(k) - 147.5 e(k-1) + 71.68 e(k-2) \quad (22)$$

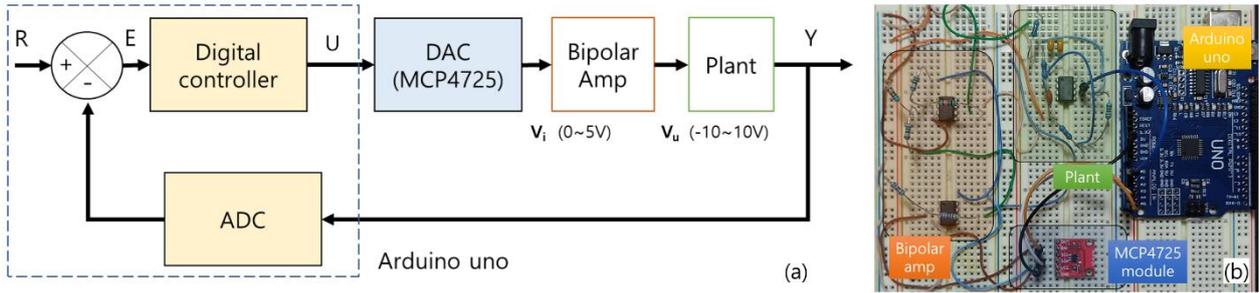


Fig. 11 (a) Component of digital feedback control system; (b) implemented control system

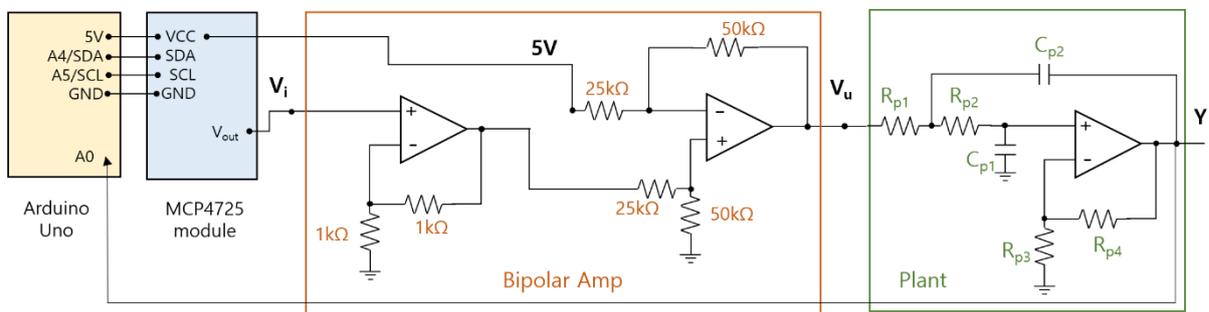


Fig. 12 Wiring diagram containing Arduino uno; MCP4725 module; circuits of bipolar amplifier and plant

최종적으로 제어기 구현은 식 (18)과 식 (22)의 이산 시간에 따른 제어입력의 관계식을 코드로 작성하여 이루어지게 된다.⁽¹⁰⁾

3.2 제어기 구현

본 논문에서는 디지털제어기를 아두이노 우노보드에 구현하고자, Fig. 11과 같이 디지털 제어시스템을 구성하였다. 출력값(Y)의 측정은 우노보드에는 장착된 ADC(10 bit, 1 CH, 9.8 kbps)를 이용하여 문제가 없으나, 플랜트로의 제어 입력(U)은 우노보드에 DAC가 구비되어 있지 않기 때문에 추가적인 DAC(MCP4725, 12 bit, 100 kbps)모듈을 사용하여 생성하였다. ADC에서 DAC까지 한 제어루프가 실행되는데 소요되는 시간을 측정된 결과 최장 868 μ S가 나왔으며, 이를 통해 앞서 제어루프의 업데이트를 500 Hz로 진행하는데 문제가 없음을 확인하였다. 그런데, 사용된 DAC의 출력범위가 0 ~ 5 V로 제한되기 때문에, 양극성(bipolar)의 출력값과 출력범위를 확대시키기 위한 양극성 증폭기(bipolar amplifier)를 추가하였다. Fig. 12에 우노보드, DAC 모듈간의 배선과 양극성 증폭기의 회로와 플랜트의 회로를 포함한 상세도를 나타내었는데, 양극성 증폭기는 비반전 증폭기와 차동증폭기로 구성되어 있으며 식 (23)으로 관계식이 정의 되어, 0 ~ 5 V 입력값을 -10 V에서 10 V의 전압으로 출력할 수 있도록 하였다.

$$V_u = 2 \times (2V_i - 5) \tag{23}$$

플랜트의 출력값(Y)은 우노 보드의 ADC 채널 0번으로 측정이 되고, 우노 보드와 DAC 모듈은 I2C 통신으로 정보를 송수신한다.

디지털 제어기는 아날로그 제어기와 달리 프로그램 코드로 작성되는데, Fig. 13에 계단응답을 얻기 위한 제어시스템의 의사코드를 정리하였다. 우노 보드에 적용된 아두이노용 제어코드는 제어기 설계에 사용된 octave 코드와 함께 본 논문용 github 사이트에 다운로드 가능하다.⁽¹¹⁾ 최종 제작된 제어코드에서는 아두이노 IDE의 시리얼 모니터에서의 명령입력을 통해서 개루프제어, lead-lag 보상기 및 PID 제어기의 실험을 수행할 수 있으며, 응답결과는 시리얼 모니터에서 확인할 수 있도록 하였다.

Fig. 14는 개루프, 앞섬-뒤짐 보상기와 PID 제어기를 사용한 폐루프 제어의 계단응답곡선을 나타내는데, 앞섬-뒤짐 보상기와 PID 제어기 모두 상승시간을 제외한 나머지 제어목표들은 만족하는 것으로 나타났다.

```

Algorithm Feedback( ):
  Ref ← 1.0
  Control input ← 0.0

  For time from 0s to 3s do:
    Output ← Analog_read(A0)
    Print(Output)
    Error ← (Ref - Output)
    Control input ← Controller(error)
    Analog_write(control_input)
  EndFor
    
```

Fig. 13 Pseudocode for a digital controller

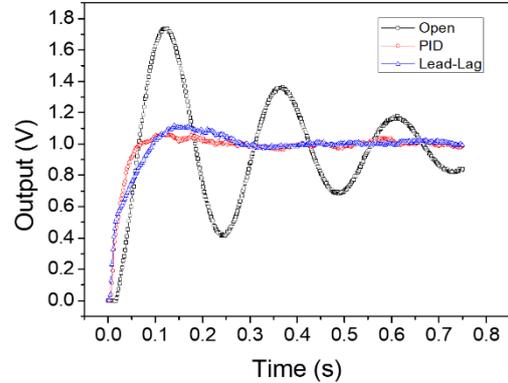


Fig. 14 Comparison of step responses of open loop, PID, and lead-lag compensators

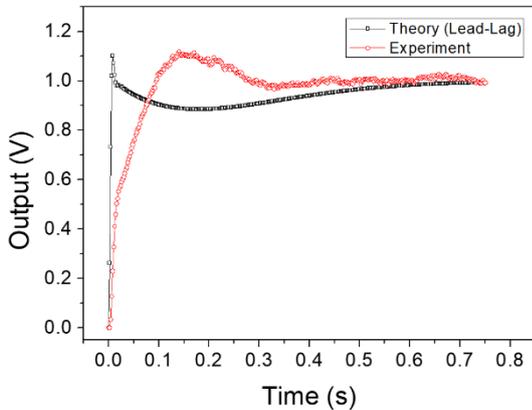


Fig. 15 Step responses of lead-lag compensator: theoretical vs. experimental

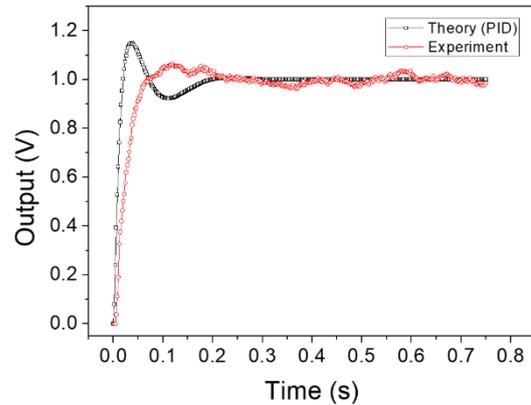


Fig. 16 Step responses of PID controller: theoretical vs. experimental

Fig. 15와 Fig. 16은 각각 앞섬-뒤짐 보상기와 PID 제어기를 이용한 제어시스템의 이산 모델의 이론적 응답곡선과 실험에 의한 응답곡선을 나타내는데, 두 경우 모두 실험으로 얻은 결과에서 상승시간이 증가한 것을 확인할 수 있다. 이는 이론 모델과 달리 실제 실험에서는 제어입력을 발생시키는 양극성 증폭기의 출력 제한이 있기 때문에 상승시간이 증가한 것으로 분석된다. 그리고, 두 경우의 이론적 응답을 비교해 보면 앞섬-뒤짐 보상기에서 상승구간에서의 응답의 변화율이 크게 나타나는데, 이는 결국 시간당 제어입력의 변화율도 앞섬-뒤짐 보상기가 PID 제어기 보다 큰 것을 의미하므로, 앞섬-뒤짐 보상기에서 양극성 증폭기 출력 제한의 영향이 더 크게 나타나서, 결국 PID 제어기보다 큰 상승시간을 나타내는 것으로 분석된다. 반면, PID 제어기에서의 오버슈트는 이론치보다 감소한 것으로 나타나는데, 이는 제어입력의 변화율 및 양극성 증폭기의 출력제한등의 복합적인 영향으로 인해 나타난 현상으로 파악된다.

4. 결 론

본 논문에서는 공개 수치연산 프로그램인 Octave를 이용하여 주파수응답법을 기반으로 앞섬-뒤짐 보상기로 이루어진 제어시스템을 설계하였으며, 이를 구현하기 위해 웹 기반 프리웨어인 Tinkercad circuits을 이용하여 플랜트를 포함한 제어시스템을 제작하여 모의실험을 실시하였다. 그리고 아두이노 보드와 같이 오픈 소스 기반의 다양한 디지털 장치에서도 제어시스템을 구현하기 위해 디지털 제어기를 설계하여, 실제 제어시스템과 아두이노 보드를 이용한 디지털 제어시스템도 함께 구축하여, 실험을 통해 설계와 제작된 제어 시스템이 유효함을 확인하였다.

또한, 오픈소스를 이용한 제어시스템의 이론적인 설계뿐만 아니라, 쉽게 구할 수 있는 부품들을 이용한 디지털 제어시스템의 구축까지 다루었기 때문에, 본 논문을 통해 학생뿐만 아니라 현장의 초급기술

자들도 제어이론의 이해력 향상뿐만 아니라 제어시스템의 제작능력도 향상할 수 있을 것으로 기대된다. 비록 본 논문에서는 아날로그 구동기와 센서로 이루어진 시스템을 대상으로만 제어시스템을 다루었지만, 디지털 센서의 대표격인 엔코더와의 인터페이스등을 추가할 경우, 좀 더 다양한 제어시스템으로의 확장적용도 가능할 것이다.

후 기

이 논문은 안동대학교 기본연구지원사업에 의하여 연구되었음.

참고문헌 (References)

- (1) Wikipedia, 2024, *Open-Source Software* (https://en.wikipedia.org/wiki/Open-source_software), Wikimedia Foundation, San Francisco, USA.
- (2) Elsevier, 2024, *HardwareX* (<https://www.sciencedirect.com/journal/hardwarex>), Elsevier, Amsterdam, Netherlands.
- (3) Lee, S. H., 2023, "Design and Implementation of Control System Using Open-source and Free Software," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. C*, Vol. 11. No. 2, pp. 137~145.
- (4) Lee, S. H., 2022, "Kinematic Analysis and Development of Robot Simulator for Open-Source Six-Degree-of-Freedom Robot Arm," *J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng.*, Vol. 31, No. 5, pp. 338~346.
- (5) Eaton, J. W., 2024, *GNU Octave* (<https://octave.org>), Free Software Foundation, Inc., Boston, USA.
- (6) Autodesk, Inc., 2024, *AUTODESK Tinkercad Circuits* (<https://www.tinkercad.com/circuits>), San Francisco, USA.
- (7) Franklin, G. F., Powell, J. D. and Emami-Naeini, A., 2022, *Feedback Control of Dynamic Systems*, Pearson, New York, USA, pp. 1~928.
- (8) Franklin, G. F., Powell, J. D. and Workman, M., 1998, *Digital Control of Dynamic Systems*, Ellis-Kagle Press, Half Moon Bay, USA, pp. 1~742.
- (9) Dassault Systèmes, 2024, *Discrete-time PID Controller Implementation* (<https://www.scilab.org/discrete-time-pid-controller-implementation>), Vélizy-Villacoublay, France.
- (10) Koh, K. C., 2016, *Technology and Practice of Digital Control in C language*, Hongreung Publishing Company, Seoul, Republic of Korea, pp. 1~337.
- (11) Github, 2024, *Digital_Controller* (https://github.com/buildream/Digital_controller), San Francisco, USA.

보이스코일모터 제어에 의한 앰플 주사기의 주입 효과 연구

김 영 흡[†] · 황 기 철^{**}

* 동양미래대학교 기계공학과, ** 리브메카

A Study on the Injection Effect of Ampoule Syringe by Voice Coil Motor Control

Youngheub Kim[†] and Kichul Hwang^{**}

* Dept. of Mechanical Engineering, Dongyang Mirae University, ** LivMecha

(Received January 12, 2024 ; Revised July 12, 2024 ; Accepted July 16, 2024)

Key Words: Voice Coil Motor(보이스코일모터), Servo Control(서보제어), Ampoule Syringe(앰플 주사기), Injection(주입), Jet Flow(제트유동)

초록: 오늘날 흔하게 나타나는 만성질환인 당뇨병은 최근 그 발생 빈도수가 확대되고 있으며, 치료와 관리를 위해서는 매일 적정량의 인슐린의 투여가 필요하다. 잦은 당뇨병 치료 주사로 인한 환자의 공포감과 고통을 최소화하기 위해서는 바늘에 의한 영향을 최소화하는 것이 필요한데, 이러한 주사 방법 중에서 약물을 제트유동의 형태로 피부의 지방층에 주입하는 방법이 있다. 본 연구에서는 선형 구동기 일종인 보이스코일모터를 이용하여 앰플 주사기의 구동시스템을 개발하였다. 또한 서보제어기를 이용하여 보이스코일모터의 위치제어와 속도제어를 수행하였고, 앰플 주사기에서 발생하는 제트유동의 주입 시험을 통해 그 영향을 고찰하였다.

Abstract: For the treatment and management of diabetes, an appropriate amount of insulin should be administered daily. In order to minimize the fear and pain of patients caused by frequent diabetes treatment injections, there is a method of administering the drug into the fat layer of the skin in the form of a jet flow. In this study, a driving system for an ampoule syringe was developed using a voice coil motor, a type of linear actuator. In addition, position control and speed control of the voice coil motor were performed using a servo controller, and the effects were examined through an injection test of jet flow generated from an ampoule syringe.

1. 서론

오늘날 만성질환 중에서 가장 흔하게 들을 수 있는 병명인 당뇨병은 주로 성인 남성을 위주로 발생하였으나, 현재는 다양한 연령대와 성별로 그 발생 빈도수가 확대되면서 전 세계적으로 2021년 기준 5.37억명에 이르고 있다.⁽¹⁾ 당뇨병은 적당한 시기에 적절한 치료가 병행되는 경우 병증을 현저하게 감소시킬 수 있고 환자가 일상생활 및 경제 활동을 병행하는 데에도 크게 문제가 발생하지 않는 것으로 알려져 있으며, 입원환자의 경우 특히 체중과 나이에 따라 매일 적정량의 인슐린 투여가 필요하다.⁽²⁾

따라서 효과적인 병증의 관리를 위해서는 환자의 공포감과 고통을 최소화하는 장비가 필요한데, 이와 같은 목적을 위해 세계 각국에서는 다양한 형태의 바늘 없는 주사기가 연구되고 있다. 바늘 없는 주사기는 가스, 스프링, 압전소자 등 다양한 동력원을 이용하여 용기의 토출구에서 발생하는 제트유동을 피

[†] Corresponding Author, prokyh@dongyang.ac.kr

Table 1 VCM specification

| Item | Specification |
|-------------------|---------------|
| DC resistance | 6.8 Ω |
| Rated voltage | 24 V |
| Maximum current | 4 A |
| Force sensitivity | 17.5 N/A |
| Back EMF constant | 17.5 V·s/m |
| Inductance | 1.8 mH |
| Peak force | 70 N |
| Continuous force | 23.65 N |
| Power | 110 W |
| Effective stroke | 20 mm |

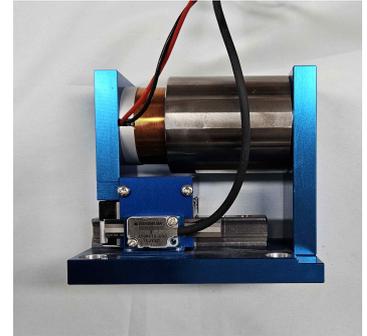
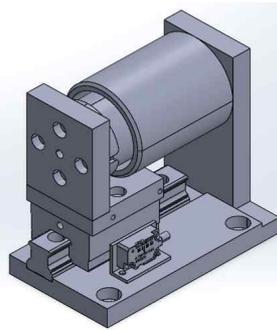


Fig. 1 VCM system 3D model and real equipment



Fig. 2 Servo drive for VCM



Fig. 3 GUI for servo drive

부의 진피층 또는 그 이하의 지방층으로 도달시키는 방식³⁾을 사용하고 있다. 본 연구에서는 제트유동의 발생을 위한 보이스코일모터(VCM: voice coil motor)의 특성을 분석하고 정밀하게 제어함으로써 약물이 충전된 앰플 주사기에서 발생하는 제트유동의 주입 효과를 고찰하였다.

2. 보이스코일모터 제어 시스템

2.1 보이스코일모터

보이스코일모터(이하 VCM)는 선형구동기(linear actuator)의 일종이며, 한정된 기구 공간에서 빠른 응답 속도를 갖는 단상 모터이다. VCM은 왕복 운동만 하는 솔레노이드(solenoid)와 달리, 초정밀 제어, 등속도가속도제어 및 힘까지 제어할 수 있어 최근 카메라, 미세가공기 등으로 그 응용 분야가 늘어나고 있다. 본 연구에서는 Fig. 1과 같이 선형엔코더를 포함한 VCM 시스템을 설계 및 제작하였고, VCM의 주요 사양은 Table 1에 나타난 바와 같다.

2.2 서보드라이브

VCM 제어를 위해 Fig. 2와 같이 피드백 제어가 가능한 서보드라이브(servo drive)를 이용하였으며, 서보드라이브의 기본 사양은 Table 2에 나타난 바와 같다.

Fig. 2의 서보드라이브는 모터의 파라미터를 바탕으로 제어 프로그램을 이용하여 다양한 각종 제어를 수행할 수 있는데, Fig. 3은 서보드라이브 GUI 화면을 나타낸다.

Table 2 Servo drive specification

| Feature | Specification | |
|-----------------------------|--|---|
| Contunious output current | 10 A | |
| Peak output current | 20 A | |
| Input voltage | 12 ~ 48 VDC | |
| Current control | Control perioc | 20 KHz |
| | Control loop | PI + feed-forward |
| Velocity & position control | Control perioc | 2 KHz |
| | Control loop | Cascade P/PI + feed-forward |
| | Filters | First order low pass filter, four notch filters, first order adaptive windowing filters |
| Reference command | Current/velocity/position | USB, CAN (CANopen) |
| Auto tuning | Automatic self-configuration and optimization of motor phasing, wires, current loop, velocity control loop | |

Table 3 Load cell specification

| Item | Specification |
|----------------------------------|------------------|
| Maximum capacity (kgf) | 15 |
| Rated output (mV/V) | 2.0 ± 0.2 |
| Accuracy class | D3/C3 |
| Combined error (%RO) | ≤ 0.03 / ≤ 0.025 |
| Creep (30 min) (%RO) | ≤ 0.03 / ≤ 0.017 |
| Recommended excitation (V) | 10 |
| Maximum excitation (V) | 15 |
| Operating temperature range (°C) | -20 ~ +40 |



Fig. 4 Load cell with Jig



Fig. 5 Calibration of load cell with balance weight

2.3 로드셀

VCM이 앰플 주사기의 피스톤을 움직여 발생하는 제트유동의 힘을 측정하기 위하여 로드셀(load cell)을 사용하였다. 본 연구에 사용된 로드셀은 Fig. 4에 나타난 바와 같이 15 kgf(약 147 N)까지 측정이 가능한 싱글포인트 타입이며 지그를 제작하여 장착하였고 주요 사양은 Table 3과 같다. 로드셀은 Fig. 5와 같이 분동을 이용하여 데이터 수집을 위한 파라미터를 조정하였다.

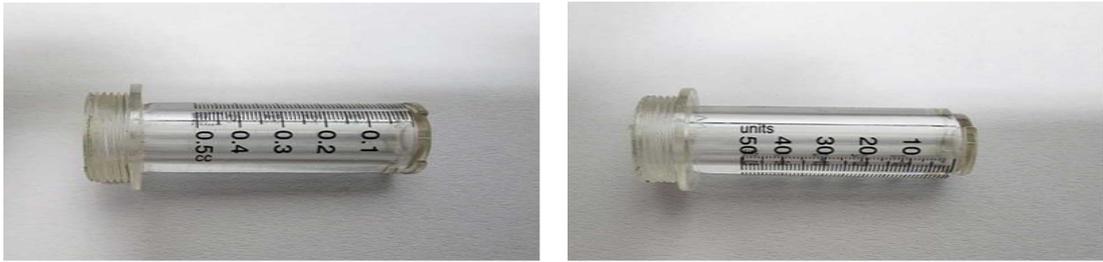


Fig. 6 Ampoule syringe

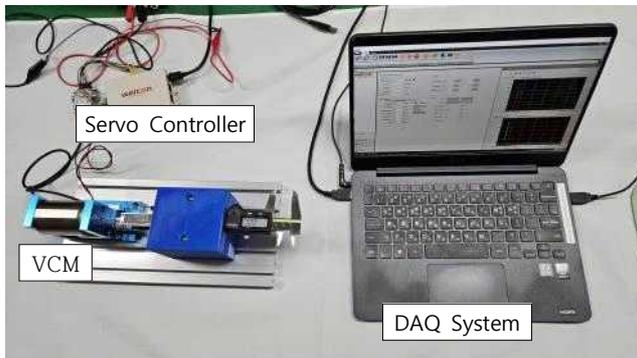


Fig. 7 Equipment for VCM displacement control test



Fig. 8 Digital multimeter with jig

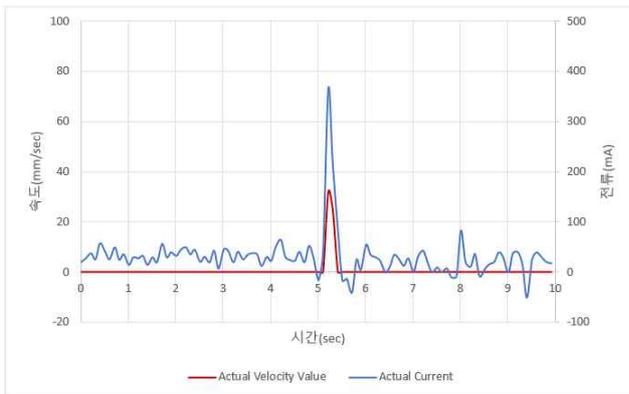


Fig. 9 Displacement control results (5 mm)

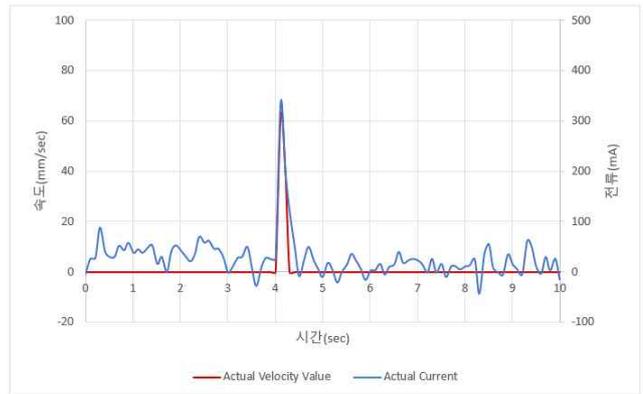


Fig. 10 Displacement control results (10 mm)

2.4 앰플 주사기

본 연구의 시험에 사용된 앰플 주사기는 Fig. 6에 나타난 바와 같으며, 인슐린의 주사 단위인 *unit* 과 유체 단위인 *cc(ml)* 눈금이 병기되어 있다. 앰플의 내경은 4.7 mm 이고 토출구의 지름은 0.2 mm 이다.

3. VCM 제어 시험

3.1 VCM 변위제어

Fig. 7은 서보드라이브의 변위제어에 의한 VCM의 이동 거리를 측정하는 장치를 나타내고 있다. 이동 거리는 Fig. 8과 같이 지그에 장착된 디지털멀티미터로 측정하였으며 그 결과는 다음과 같다.

Fig. 9 ~ Fig. 12는 VCM이 무부하 상태에서 각각의 속도 변화선도에 나타난 바와 같이 약 4 ~ 5 sec 사이에서 이동을 시작하여 5 mm, 10 mm, 15 mm, 20 mm의 변위를 이동했을 때의 전류와 이동 속도를 나타내고 있다. 변위는 모두 엔코더의 카운트 신호에 따라 정확한 값을 이동하였는데, 이동 거리가 늘어

남에 따라 속도가 증가하며 전류 또한 증가하는 경향을 나타내고, 특히 VCM의 최대 변위인 20 mm의 경우 다른 경우에 비하여 최대 전류값이 약 480 mA로 특히 높게 나타났다.

3.2 VCM 속도제어

Fig. 13 ~ 16은 무부하 상태에서 VCM 구동부에 20 mm의 변위를 설정하고 정현파(sinusoidal) 신호에 따라 속도를 제어한 결과를 나타낸다. 모든 경우에서 요구 신호에 충실하게 정현파 형태의 속도를 잘 따라가고 있으며 상황에 따라 적절한 전류를 공급하고 있음을 알 수 있다. 일반적으로 모터의 속도제어

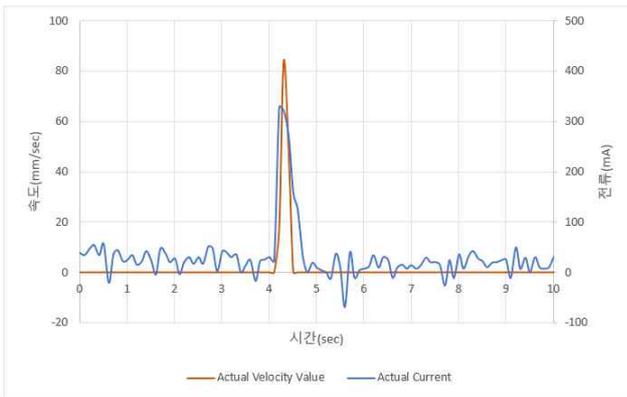


Fig. 11 Displacement control results (15 mm)

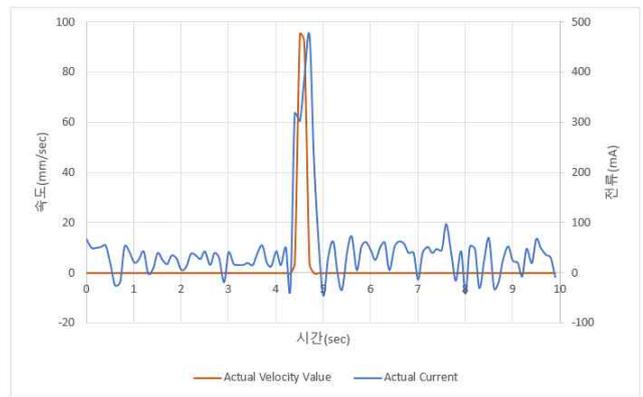


Fig. 12 Displacement control results (20 mm)

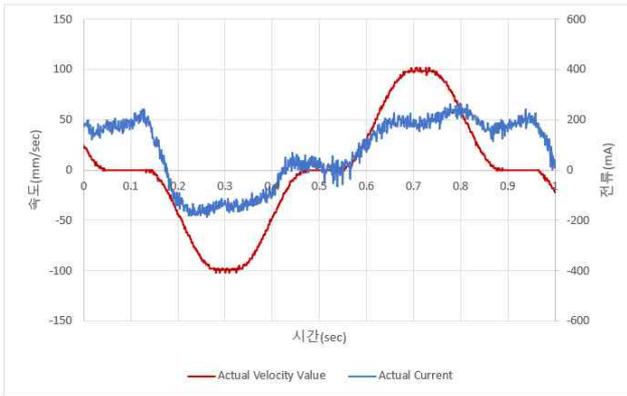


Fig. 13 Velocity control results (100 mm/sec)

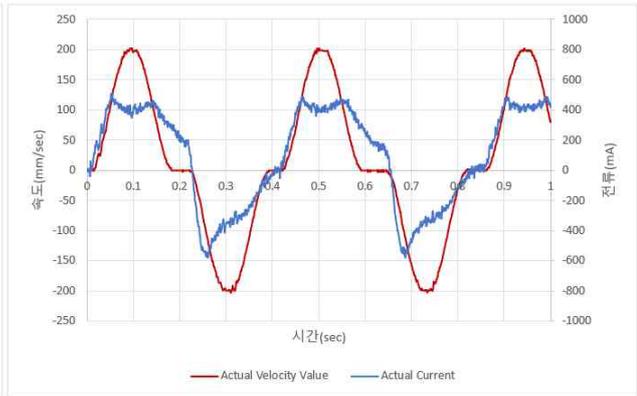


Fig. 14 Velocity control results (200 mm/sec)

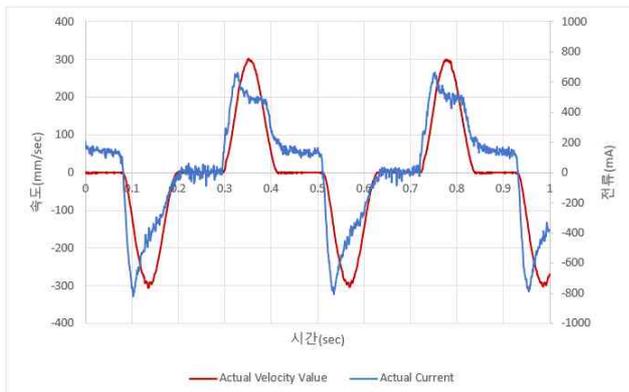


Fig. 15 Velocity control results (300 mm/sec)

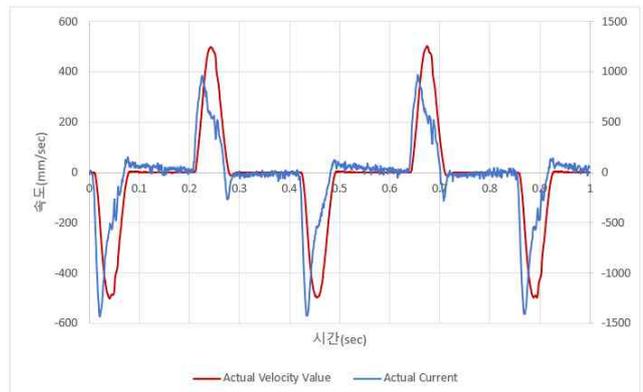


Fig. 16 Velocity control results (400 mm/sec)

시에는 속도가 높아질수록 이동속도의 추종이 어려워지는데, 이동속도를 가장 높게 설정한 400 mm/sec의 경우에도 정현파 형상의 속도를 잘 추종하였다. 최대 전류는 정방향의 경우 약 700 mA, 역방향의 경우 약 1.1 A의 값을 나타내었는데, 이것은 정방향 이동에 비하여 역방향 이동 시에는 VCM 시스템의 기구적인 부하가 증가한 것이 원인으로 판단된다.

3.3 유체 토출 시험

Fig. 17은 VCM 제어 시스템과 앰플 주사기 및 로드셀로 구성된 시험 장치를 나타내고 있다. Fig. 18에 나타낸 바와 같이 제어된 VCM의 운동부가 제어 신호에 따라 이동하면서 앰플 주사기의 피스톤을 누를 때 앰플의 토출구 발생하는 제트유동이 로드셀에 가하는 힘을 측정하였다. 앰플의 토출구에서 발생하는 제트유동의 힘을 측정하기 위해서는 이상적으로는 유체의 유실 없이 제트유체가 힘 센서에 전달하는 힘을 측정해야 하는데, 실제 측정을 위해서는 주사기 피스톤의 이동에 의한 최소한의 유체 토출 공간이 필요하므로 앰플 주사기와 로드셀 지지대의 간극을 0.1 mm로 설정하였다.

Fig. 19 ~ 22는 100 mm/sec에서 400 mm/sec까지 단계별로 VCM의 속도제어를 수행했을 때 로드셀에서 측정된 힘과 속도 및 전류의 측정값을 나타낸다. 제트유동의 힘은 제어속도가 증가함에 따라 비례적으로 증가하는 경향을 나타내고 전류는 모든 경우에서 최대 설정값인 3A에 도달하였음을 알 수 있다. 제어값 100 mm/sec에서의 속도는 약 60 mm/sec, 200 mm/sec 이상에서는 모두 약 98 mm/sec의 값을 나타내는데, 이것은 어느 속도 이상에서는 제트유동이 토출구와 로드셀 지지대 사이의 좁은 틈새로 짧은 시간에 주변으로 분사되는 유체 움직임이 한계에 이르렀기 때문으로 판단된다. 즉, 본 실험에서 사용한 VCM에서 3 A의 전류로 발생시킨 힘이 액체가 충전된 앰플 주사기의 저항을 밀고 나갈 수 있는 최대 속도로 생각할 수 있다.

또한 제어값 200 mm/sec 이상의 경우 속도 제어 신호의 증가에 따라 전류, 속도 곡선이 유사한 경향을 나타내고 있으나 힘의 값은 다소 증가하는 것으로 나타났는데, 이것은 제어값을 100 mm/sec에서



Fig. 17 Equipment for ampoule syringe test

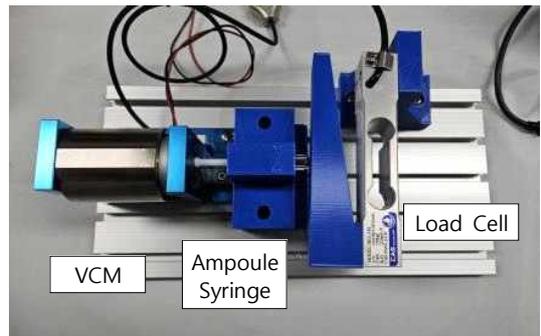


Fig. 18 Ampoule syringe with load cell

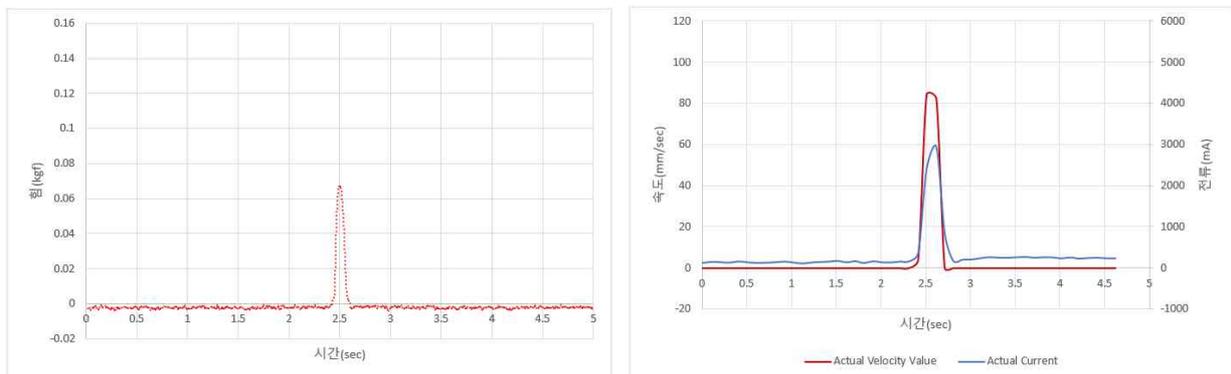


Fig. 19 Ampoule syringe test results (velocity control 100 mm/sec)

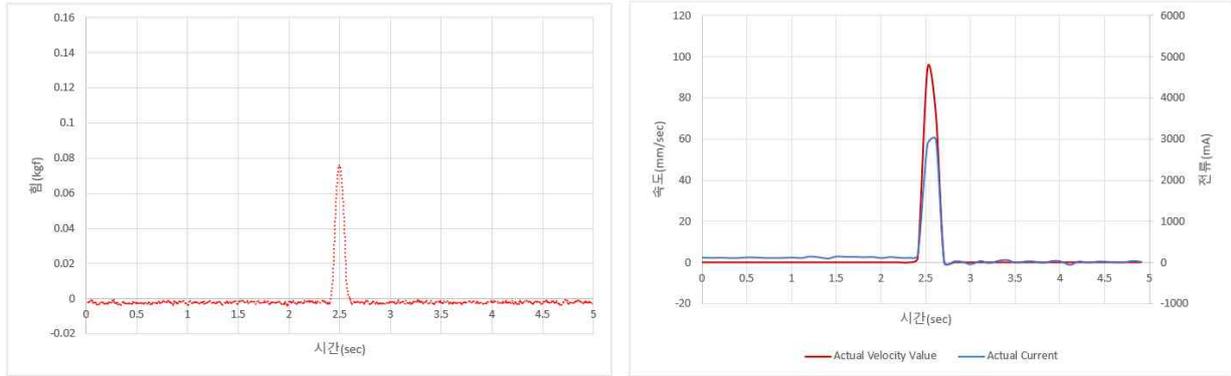


Fig. 20 Ampoule syringe test results (velocity control 200 mm/sec)

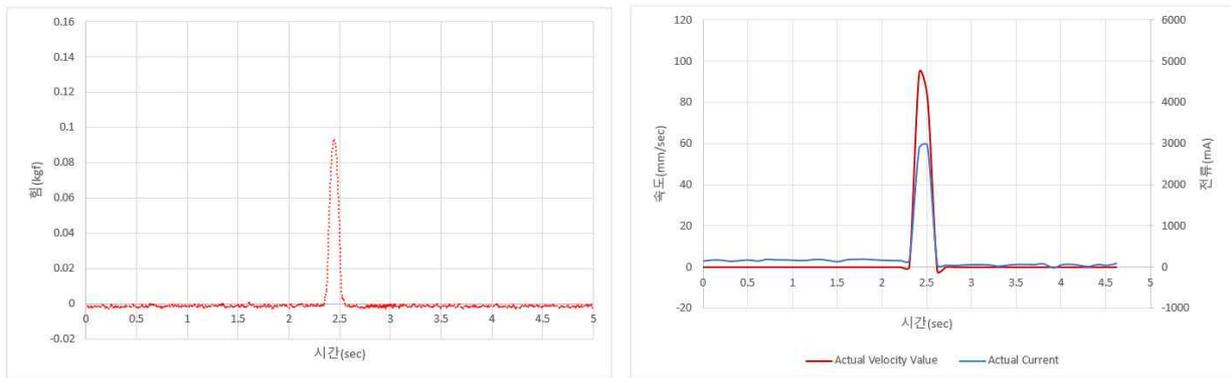


Fig. 21 Ampoule syringe test results (velocity control 300 mm/sec)

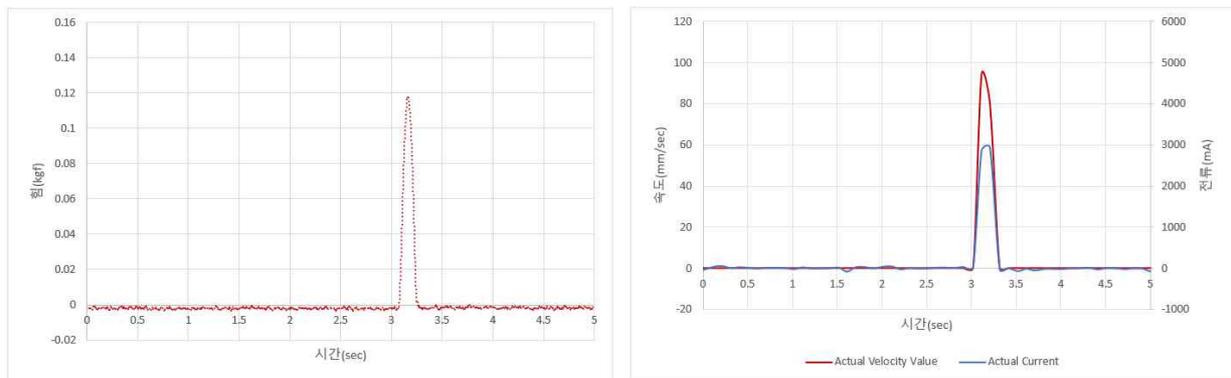


Fig. 22 Ampoule syringe test results (velocity control 400 mm/sec)

400 mm/sec 까지 증가시킴에 따라 정지 상태에서 100 mm/sec 의 속도까지 도달하는 가속도가 미소량 증가한 것이 원인의 하나로 추정되며, 향후 추가적인 시험을 통하여 적절한 유체 반력과 제어 속도에 대한 검증이 필요한 것으로 판단된다.

3.4 피부 주사 시험

일반적으로 사람의 피부는 Fig. 23에 나타난 바와 같이 각질층을 포함하는 표피층, 진피층, 피하 지방층으로 이루어지며,⁽⁴⁾ 두께는 나이, 성별, 부위에 따라 다르나 평균 두께는 약 1.2 mm 이고 표피층 약 200 μ m, 진피와 피하 지방층은 각각 약 2 mm 로 볼 수 있다. 인슐린의 경우 대부분 복부의 지방층에 주사하는 경우가 많으므로 앰플 주사기의 경우 제트유동이 피부의 2 mm 깊이 이상으로 침투할 수 있

는지가 주요 관심사이며, 앰플의 토출 압력은 약 15MPa 이상의 값에서 피부를 뚫고 침투할 수 있다고 알려져 있다.⁽⁶⁾

Fig. 24, 25는 피부 주사 시험을 위한 장치와 시험 피부를 장착한 모습을 나타내는데, 제트유동의 힘을 효과적으로 전달하기 위한 지그를 제작하여 시험 피부를 장착하였다. 시험에서는 400mm/sec 로 VCM을 속도제어하여 인슐린의 1회 투여량인 10unit (0.1ml)의 액체를 앰플에 장착하여 피부 주사 시험을 수행하였다. 시험에는 실제 사람 피부와 유사한 것으로 알려진 돼지 피부⁽⁶⁾를 시험 피부로 가공하여 유체가 이를 통과하여 침투할 수 있는지의 여부를 고찰하였다.

Fig. 26은 최종 시험 결과를 나타내고 있는데, 제트유동에 의해 시험 피부 표면에 작은 구멍이 생긴 것을 알 수 있다. 또한 시험 피부의 단면을 살펴보면 액체가 깊이 방향으로 2mm 이상 충분히 주입된 것으로 나타나 제트유동에 의해 시험 피부에 액체가 성공적으로 침투하여 하부 조직에 액체가 주입되었음을 확인할 수 있다.

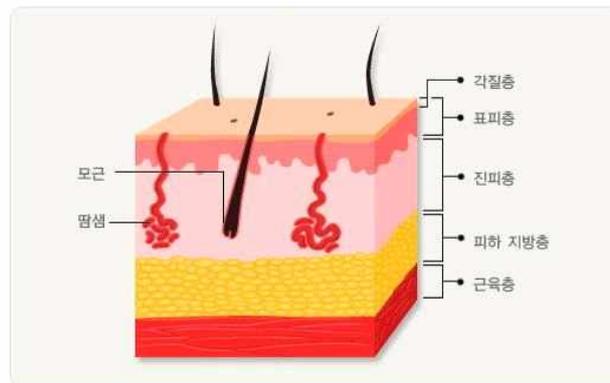


Fig. 23 Structure of human skin



Fig. 24 Equipment for skin injection test

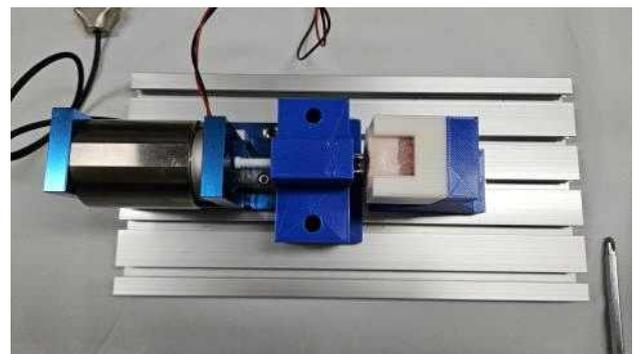


Fig. 25 Ampoule syringe and sample skin



Fig. 26 Results of skin injection test

피부 주사 시험에서 앰플 토출구의 최대 유량과 압력을 알아보기 위해 앰플의 사양과 유체 토출 시험 데이터를 살펴보면 다음과 같다. 즉 앰플의 내부 지름은 4.7 mm, 토출구의 지름은 0.2 mm 이고, 400 mm/sec 유체 토출 시험에서의 최대 힘은 0.118 kgf, 최대 속도는 98 mm/sec 이다. 따라서 피부 주사 시험에서 앰플 토출구의 최대 압력 P 와 최대 유량 Q 는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$P = (0.118 \times 9.81) / (\pi/4) / (0.2 \times 10^{-3})^2 = 36.86 \times 10^6 \text{ N/m}^2 = 36.9 \text{ MPa}$$

$$Q = (98 \times 10^{-3}) (\pi/4) (4.7 \times 10^{-3})^2 = 1.700 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{sec} = 1.70 \text{ ml}/\text{sec}$$

계산 결과로부터 앰플 토출구의 최대 압력값은 제트유동이 사람의 피부에 침투하기에 충분한 15 MPa 이상임을 알 수 있다. 또한 VCM은 이론적으로 10 unit의 액체를 최대 약 0.06초에 토출할 수 있는 성능을 나타내고 있으므로 VCM의 빠르고 정교한 응답성을 바탕으로 목표 토출량을 위한 속도 프로파일을 설정함으로써 환자에게 적절한 약물의 주입시간과 주입량을 구현할 수 있을 것으로 판단된다.

인슐린을 주사하는 경우 약물의 역류 등을 방지하기 위해 주사의 주입 버튼을 누른 후 10초 이상을 기다린 후 바늘을 빼도록 안내하고 있는데,⁽⁷⁾ 향후 이러한 임상적인 조건과 앰플과 피부의 접촉 상태, 주사 시 약물의 손실량 등을 고려하여 최적의 제어 전략을 수립하고 실제 사람의 피부 조직에 대한 데이터를 충분히 확보함으로써 완성도 높은 제품의 개발이 가능할 것으로 기대한다.

4. 결 론

본 연구에서는 보이스코일모터(VCM)를 동력원으로 하는 앰플 주사기에서 발생하는 제트유동의 영향을 고찰하였다. VCM의 위치제어, 속도제어 등을 수행하였으며 앰플 주사기에서 토출되는 제트유동에 의한 힘을 측정하였는데, 앰플 주사기 시스템에 의한 최대 압력 및 속도는 각각 36.9 MPa, 95 mm/sec로 알려진 수치 상으로 사람의 피부에 침투하여 약물을 주입하기에 충분한 성능을 나타내었다. 또한 앰플 주사기를 돼지 피부를 대상으로 적용한 결과 VCM을 적용한 결과 충분한 침투 효과를 나타내었는데, 이는 살아 있는 상태의 피부와는 차이가 있을 수 있으나 기본적인 제트 유체의 침투 작용을 확인할 수 있었다.

본 연구를 통하여 제트유동을 이용하여 약물을 주입하는 다양한 방법 중에서 VCM이 이를 구현할 수 있는 효과적인 방법이며, 빠른 응답성과 제어 성능을 가지는 VCM을 적용한 시스템이 유효함을 확인하였다. 향후 사람의 피부 조직에 대한 적용 연구를 통하여 주사를 위한 최적의 조건에 대한 데이터를 확보함으로써 당뇨 환자의 고통을 현저히 감소시킬 수 있는 시스템을 개발하고자 한다.

후 기

본 논문은 교육부와 한국연구재단의 재원으로 지원을 받아 수행된 3단계 산학협력 선도전문대학 육성사업(LINC 3.0)의 연구결과입니다.

참고문헌 (References)

- (1) International Diabetes Federation, 2022, *IDF Diabetes ATLAS 2021* (<https://diabetesatlas.org/atlas/tenth-edition/>), International Diabetes Federation, Brussels, Belgium.
- (2) Moon, S. J. and Cho, Y. M., 2018, "Insulin Treatment in Hospitalized Patients," *The Journal of Korean Diabetes 2018*, Vol. 19, pp. 214~223.
- (3) Mohizin, A. and Kim, J. K., 2018, "Current Engineering and Clinical Aspects of Needle-Free Injectors: A Review," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 32, No. 12, pp. 5737~5747.

- (4) KDCA, 2019, *The Structure of The Skin* (<https://health.kdca.go.kr/healthinfo/biz/health/ntcnInfo/mediaRecsroom/imageRecsroom/imageRecsroomView.do>), KDCA, Cheongju, Republic of Korea.
- (5) Mohizin, A., Reby Roy, K. E., Lee, D. H., Lee, S. K. and Kim, J. K., 2018, "Computational Fluid Dynamics of Impinging Microjet for a Needle-Free Skin Scar Treatment System," *Computers in Biology and Medicine*, Vol. 101, pp. 61~69.
- (6) Han, J. H., Kim, C. Y., Lim, C. H., Na, Y. R., Kim, T. H., Jung, H., Seok, S. H., Jung, C. R. and Park, J. H., 2017, "Comparison of Reconstructed Human Skin Models with Human and Pig Skin in In-Vitro Percutaneous Absorption," *Journal of Alternatives to Animal Experiments*, Vol. 11, No. 1, pp. 11~18.
- (7) Korean Diabetes Association, *Diabetes FAQ* (<https://www.diabetes.or.kr/general/pds/faq.php>), KDA, Seoul, Republic of Korea.

플립러닝을 적용한 협동로봇 제어 실습 교육

박 종 욱^{*†}

* 동양미래대학교 기계설계공학과

Collaborative Robot Control Practice Education Using Flipped Learning

Jong-Wuk Park^{*†}

* Department of Mechanical Design Engineering, Dongyang Mirae Univ.

(Received January 25, 2024 ; Revised February 13, 2024 ; Accepted March 4, 2024)

Key Words: Collaborative Robot(협동로봇), Control Practice Education(제어 실습 교육), Flipped Learning(플립러닝)

초록: COVID-19 팬데믹 사태 이후로 대학에서는 효과적인 기계공학 실습교육을 위해 다양한 교육 방법이 제시되었다. 플립러닝 방식은 학습자가 수업에 앞서 교육자가 제공한 영상 등으로 선행 학습을 수행하고 본 수업을 수강하는 방식으로 최근 다양하게 사용되는 복합 교육법이다. 본 연구에서는 스마트 제조, 서비스 산업에 적용되고 있는 협동로봇의 운전 및 제어 실습 교육에 플립러닝 방식을 접목하여 학생들의 학습 이해도를 높이고자 교과목을 설계하고 운영한 방안에 대해 소개하였다.

Abstract: Since the COVID-19 pandemic, various educational methods have been proposed at universities for effective practical mechanical engineering education. The flipped learning method is a complex teaching method that has been widely used recently in which learners perform prior learning through videos provided by the educator prior to class and then take the main class. In this study, we introduced a method of designing and operating a course to improve students' learning understanding by applying the flipped learning method to practical training for driving and controlling collaborative robots applied to the smart manufacturing and service industries.

1. 서 론

2020년에 발생한 COVID-19 팬데믹 사태를 계기로 군집을 통한 대면 수업과 모임이 불가능함에 따라 전국의 모든 대학교는 비대면 온라인 수업을 포함하여 다양한 수업 방식을 도입하였다. 정부 방침에 따라 2020년 1학기 및 2학기 교육과정의 모든 교과목은 강의자료 모니터 화면을 녹화한 강의나 교수가 강의실에서 실제 강의하는 모습의 사전 녹화본을 제공하여 학습하는 것으로 진행되었으며, 강의 수강 학생의 평가도 절대 평가로 이루어져 대학뿐만 아니라 초중등 각 교육계의 모든 이가 생소한 상황에 어려움을 겪을수 밖에 없었다. 2021년 백신의 개발과 더불어 팬데믹 상황의 장기화가 정착됨에 따라 선별적 대면 강의를 가능하게 되었으며, 실험 장비를 사용하는 공학 실습 교과목에 대하여 대학 및 각 교수별로 한정된 시간 안에 효과적인 강의를 하는 연구가 진행되어왔다. 당시에 개발된 우수한 교육 콘텐츠나 교육방법은 팬데믹 사태가 종결된 이후에도 수강생의 효과적인 학습 도구로서 지속적으로 사용되거나 개선되어 현재 진행중인 대학 기계공학 교육에 적용되고 있다.

플립러닝(flipped learning)은 교수자가 강의 내용을 사전에 동영상 등으로 제작하고 학생에게 제공하여

† Corresponding Author, jongwukpark@dongyang.ac.kr

선행학습을 권장하고, 본 강의 시간에는 질의응답, 토론 수업 및 실습 위주로 진행하는 방식이며 판데믹 이전 시대에서도 효율적인 강의를 위해 적용되던 방법이었다. 플립러닝은 ICT 정보통신 기술이 발달함에 따라 강의실 밖에서도 양질의 교육을 선행 학습하도록 하고, 본 강의 및 실습수업에 있어서 교수-학습자 간의 풍부한 커뮤니케이션을 유도할 수 있다는 특징을 가지고 있다.⁽¹⁻⁴⁾

협동로봇은 4차 산업혁명 흐름에 맞는 스마트 제조, 서비스 산업에서 다양하게 적용되고 있는 제품으로 로봇의 엔드이펙터(end effector)의 부착물에 따라 어플리케이션이 구분된다. 따라서 학생들에게 로봇의 엔드이펙터부의 이송 및 제어법을 교육하는 것이 중요하며 충분한 실습을 병행하여 로봇의 이송을 명령하는 역량(teaching, 이하 티칭이라고 한다)을 함양하도록 해야한다.⁽⁵⁾ 본 연구에서는 학생들의 학습이해도를 높이고자 플립러닝을 적용하여 협동로봇을 제어 실습 교과목을 설계하고 운영한 방안에 대해서 소개하였다.

2. 교과목 개발

2.1 교육법 설정

본교 기계설계공학과에서는 학생들에게 생산 제조 현장 스마트팩토리화에 적용되고 있는 협동로봇을 티칭하고 제어하는 로봇제어실습 교과목(3학점 3시수)을 2학년 1학기에 운영하고 있다. 설계나 코딩을 위해 특정 소프트웨어로만 학습하는 교과목과 달리, 상기 교과목은 실습 기자재로써 협동로봇을 직접 운용하며 실물 제어에 익숙해지는 교육단계가 필요하다. 당시에는 판데믹 상황에 따라 선별적 대면 강의를 수행할 수 밖에 없었으므로, 플립러닝 교육법을 적용하여 협동로봇의 이론과 제어 실습을 운용하는 방안을 모색해야 했으며, 학생들의 만족도를 고려하여 동일한 방법으로 지속 운영하고 있다.

Fig. 1은 해당 교과목을 운영하면서 적용한 플립러닝 협동로봇 제어 실습 교육 단계를 보여준다. 사전 수업 단계로 선행 강의자료 학습 및 영상 시청을 실시하였다. 학생들은 업로드된 이론-실습 강의 교보재를 pdf 형식으로 제공받아 해당 주차에서 학습할 이론 원리를 미리 접할 수 있다. 또한, 교수가 미리 촬영하여 업로드한 영상으로 주차별 이론 수업과 본 강의에서 실습할 로봇 제어 실습 내용을 선행하여 공부한다. 대면으로 진행되는 본 강의에서는 영상으로 선행한 이론에서 핵심이 되는 내용을 반복하여 지도하며, 학생들이 사전수업 단계에서 발생한 질의에 대한 응답시간을 갖도록하여 비대면 이론 실습의 한계를 극복하고자 하였다.

본 수업의 강의 목표는 수강생들이 협동로봇의 엔드이펙터 부분을 특정 위치로 이송하도록 티칭하고 모션을 제어하는 것으로 로봇 운용 실습이 필수적이다. 학생들은 교수가 대리 실습한 영상을 선행 시청하고 본 수업에서 직접 협동로봇을 운용하며 반복 실습을 수행한다. 또한, 조별 토론 및 결과 분석 시간을 두어 학생들이 실습을 수행하며 봉작하는 어려움을 스스로 고민하고 해결하는 시간을 갖도록 하였다.

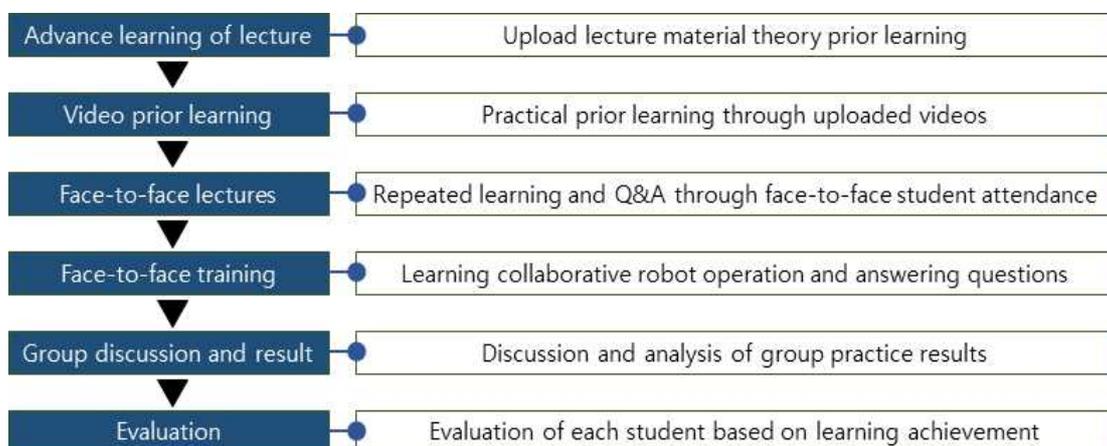
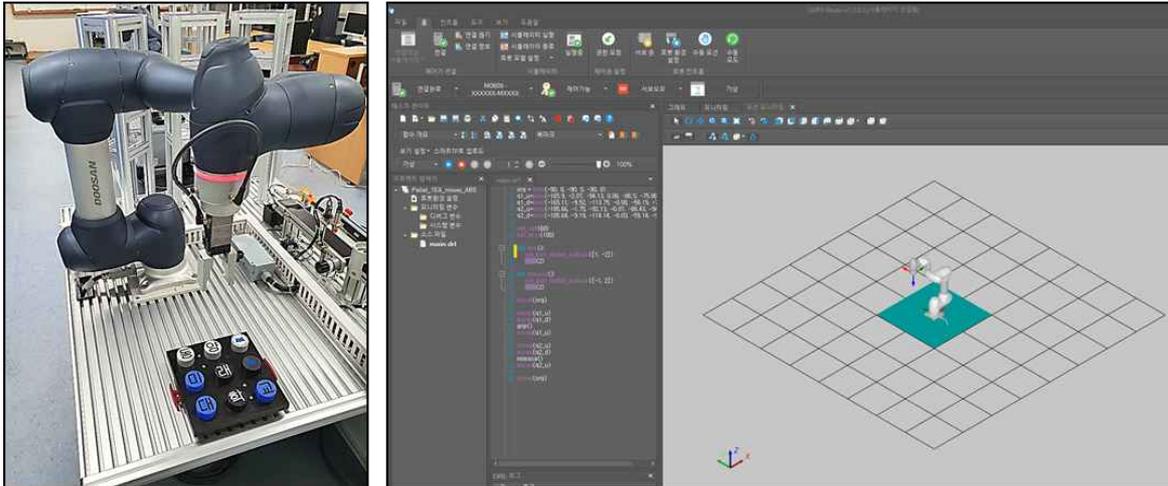


Fig. 1 Step for collaborative robot control education using flipped learning



(a) Collaborative robot
Doosan Robotics M0609

(b) DART Studio

Fig. 2 Educational tools for collaborative robot control: (a) collaborative robot M0609; (b) simulation program DART studio

전술한 바와 같이, 학생들이 로봇의 운용에 익숙해지는 것이 우선적인 목표이므로, 본 대면 강의에서는 실습과 조별 토론 및 결과 분석 단계의 시간 분포를 높이도록 하였다.

2.2 교육도구

플립러닝을 적용한 협동로봇 제어 교육을 수행하기 위해 다음과 같은 협동로봇 및 제어/시뮬레이션 소프트웨어를 선정하였다. Fig. 2는 본 교과목에서 적용한 교육도구인 (a) 협동로봇과 (b) 제어/시뮬레이션 소프트웨어의 개략적인 모습을 보여준다.

1) 협동로봇

본 수업에서는 Doosan Robotics사의 M0609 모델을 사용하였다. Doosan Robotics사는 사용자와 안전하게 협업할 수 있는 협동로봇을 제조하는 곳으로 조립, 머신텐딩, 용접, 서비스 등 다양한 분야에서 협동로봇 어플리케이션 솔루션을 제공하고 있다. 로봇제어실습 교과목에서는 6 kg 가반중량, 900 mm 작업반경, ± 0.03 mm 반복정밀도, 0.2 N 수준의 힘 변화를 감지하는 토크/힘센서를 탑재한 6축 협동로봇을 사용하였다. 일반적인 협동로봇은 ISO10218-1 표준에 따라 performance level d(PL d), category 3(cat 3)의 레벨을 달성하면 된다고 정의하였으나, Doosan Robotics사의 협동로봇은 안전정지 기능 및 비상정지 기능에 있어 국제 안전 등급 PL e, cat 4로 최고 등급을 보유하고 있어 학생들의 안전한 협동로봇 제어 실습 교육에 최적화되어있다.

2) DART studio

DART studio는 Doosan Robotics사에서 제공하는 자체 로봇 제어 및 시뮬레이션 프로그램이다. Doosan Robotics 협동로봇의 제어에 사용하는 파이썬 기반의 자체 언어인 DRL을 통하여 스크립트 코딩으로 로봇을 운전하거나 가상 테스트가 가능하다. 로봇제어실습 강좌의 후반부에서는 해당 프로그램을 이용하여 DRL 언어를 통한 협동로봇 가상 제어 실습을 수행하여, 본래 목표인 로봇제어 실습 이외에 프로그래밍 역량을 함양할 수 있는 교육과정을 구성하였다.

2.3 교과목 구성

본 교과목은 Table 1에서 제시한 바와 같이 15주로 구성되었다. 4차 산업혁명의 흐름인 스마트팩토리에 적용 가능한 협동로봇의 특징에 대해서 소개하고 로봇 제어를 통해 적용할 수 있는 응용분야를 보여 주어 학생들이 협동로봇을 운용 및 프로그래밍 실습에 흥미를 갖도록 하였다. 중간평가 주차를 기점으로

Table 1 Educational contents of the class for 15 weeks

| Week | Learning course | Flipped learning contents |
|------|--|---|
| 1 | Course outline, Smart factory, understanding of robots | Outline, smart factory video-theory lecture |
| 2 | Definition of collaborative robots, application areas, composition of collaborative robots | Definition, application areas, composition of collaborative robots video-theory lecture |
| 3 | HW configuration, teaching pendant, driving the robot manually | HW configuration explanation, manual robot driving video-practice demonstration |
| 4 | Singularity area, robot motion, move J motion command | Singularity, motion explanation video-theory lecture, move J command video-practice demonstration |
| 5 | Move L motion command, end effector (gripper), move J motion command-advanced | Move L command, move J command-advanced video-practice demonstration |
| 6 | Move L motion command-advanced: absolute movement vs relative movement | Move L command-advanced video-practice demonstration |
| 7 | Pick&place (palletizing) : stacking blocks | Stacking blocks video-practice demonstration |
| 8 | Midterm exam | - |
| 9 | Compliance control, force control | Compliance, force control video-theory lecture compliance, force control video-practice demonstration |
| 10 | Understanding DART studio, Python basics | DART studio video-practice demonstration Python basics-theoretical lecture |
| 11 | DART studio : rroordinate command, motion command | Coordinate, motion command explanation video-theory lecture, examples for each command video-practice demonstration |
| 12 | DART studio : drive command, control command, speed command | Drive, control, speed command explanation video-theory lecture, Examples for each command video-practice demonstration |
| 13 | DART studio : IO system command, definition for end effector command function | IO system command, end effector command function explanation video-theory lecture Example for end effector command video-practice demonstration |
| 14 | DART studio : pick&place (palletizing), project | Examples for palletizing video-practice demonstration |
| 15 | Final exam | - |

전반부는 협동로봇의 기본적인 구성과 조작법에 대해서 학습한 후, 로봇 제어용 티칭펜던트를 이용하여 엔드이펙터부를 특정 위치로 움직이는 모션 제어 실습을 수행하였다. 본 교과목에 사용된 협동로봇의 엔드이펙터 부분에는 물건을 잡고 옮길 수 있는 그리퍼를 장착하여 최종적으로 학생들이 교육용 블록을 팔레트 내에서 픽앤플레이스(pick and place)하거나 쌓는 모션 제어를 수행하도록 하였다. 후반부에는 폴리싱 및 조립 등의 로봇 어플리케이션으로 사용할 때 필요한 순응, 힘 제어의 원리와 적용법에 대해서 학습하고, DART studio 로봇 제어/시뮬레이션 프로그램으로 모션 프로그래밍을 수행하도록 하였다. 이를 통해 로봇의 운전 및 제어에 대해서 학습할 뿐만 아니라 팔레타이징과 같은 특정 미션을 수행하기 위한 제어 스크립트의 코딩, 디버깅 과정을 경험하도록 함으로써 코드 언어를 적용한 프로그래밍 과정에 익숙해지도록 구성하였다.

3. 교과목 운영 및 결과

이번 챕터에서는 전술한 교육도구 및 플립러닝법을 적용한 교육단계를 바탕으로 협동로봇 제어 실습 교과목을 운영한 과정과 결과에 대해서 기술한다. Fig. 3은 사전 수업 단계에서 학생들이 학습할 강의자

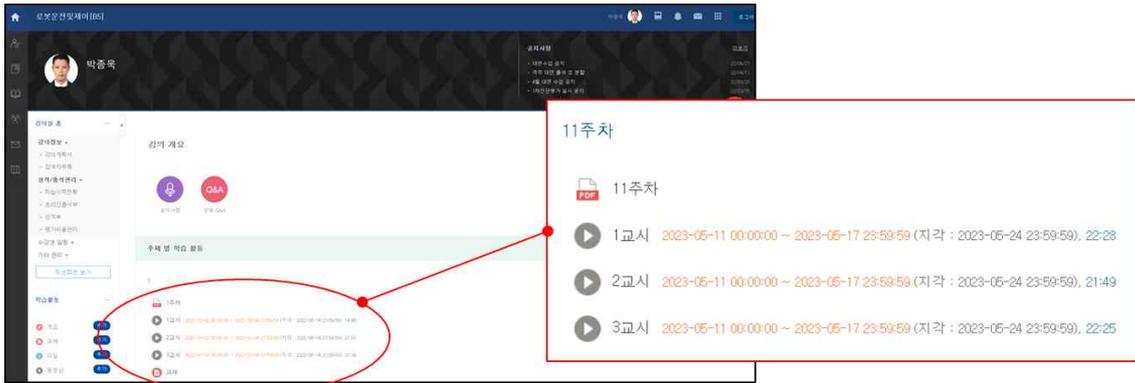


Fig. 3 Online educational system and detail for flipped learning

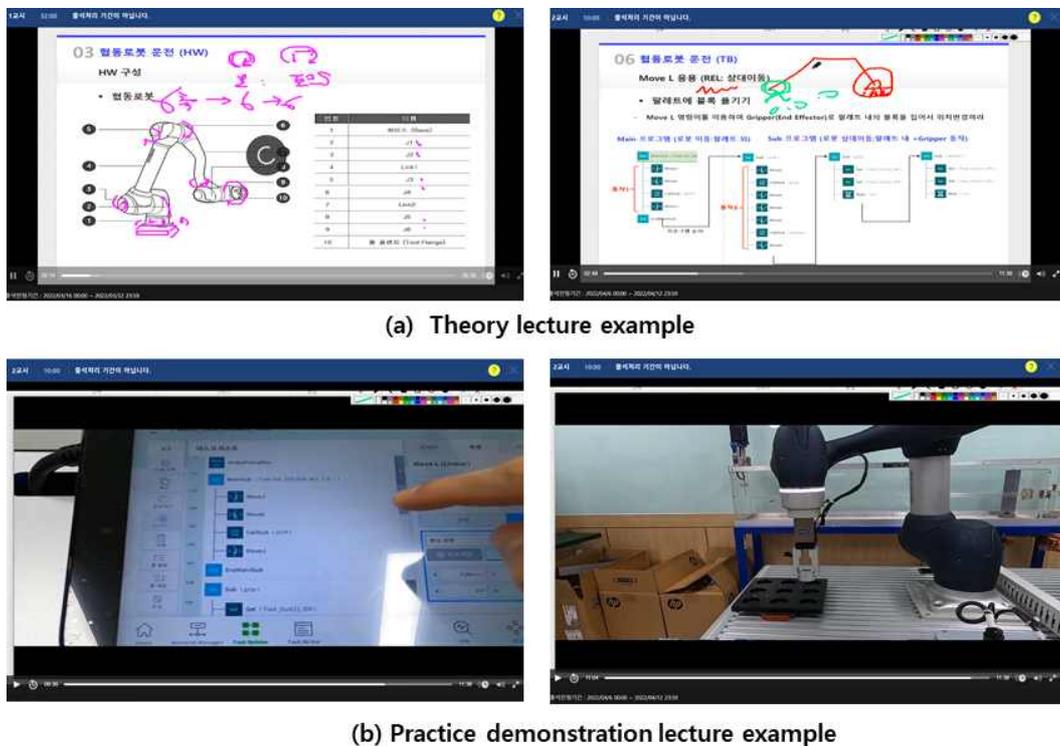


Fig. 4 Video that comprise theoretical and practical lecture for pre-class

료 및 강의영상을 업로드하여 제공한 화면을 보여준다. 본교에서는 판데믹 상황에 맞추어 학생들에게 효율적인 비대면 수업을 제공하도록 온라인 원격수업 플랫폼을 구축하였으며 교수자가 강의물을 업로드 하면 수강 학생은 해당 강의물을 학습할 수 있는 시스템이다. 그림에서 볼 수 있듯이, 총 15주에 걸쳐 각 주차별 강의자료를 pdf 파일 형태로 업로드하고 3회로 나누어 수업 영상을 제공하였다. 학생들은 대면 강의가 시작하기 전까지 해당 영상을 시청하고 참여하도록 하였으며, 학기를 마치기 전까지 반복 시청할 수 있도록 구성하였다.

Fig. 4는 학생들이 시청하는 온라인 선행 강의 영상의 예시를 보여준다. 영상은 로봇 제어 이론과 실습 예제로 구성되어 있으며, 강의자료의 구성에 따라 20 ~ 45분 분량의 3회 영상으로 나누어 제공된다. 이론 영상 부분은 온라인 판서를 더하여 학생들의 로봇 공학적 기본지식을 전달하고자 하였으며 로봇 제어 실습에 적용되는 프로그램의 해설을 제공하였다. 실습 영상 부분은 학생들이 대면 수업에서 진행할 협동로봇 제어 실습을 교수자가 직접 시연하는 영상으로 구성되었다. 각 실습 프로그램별로 로봇 엔

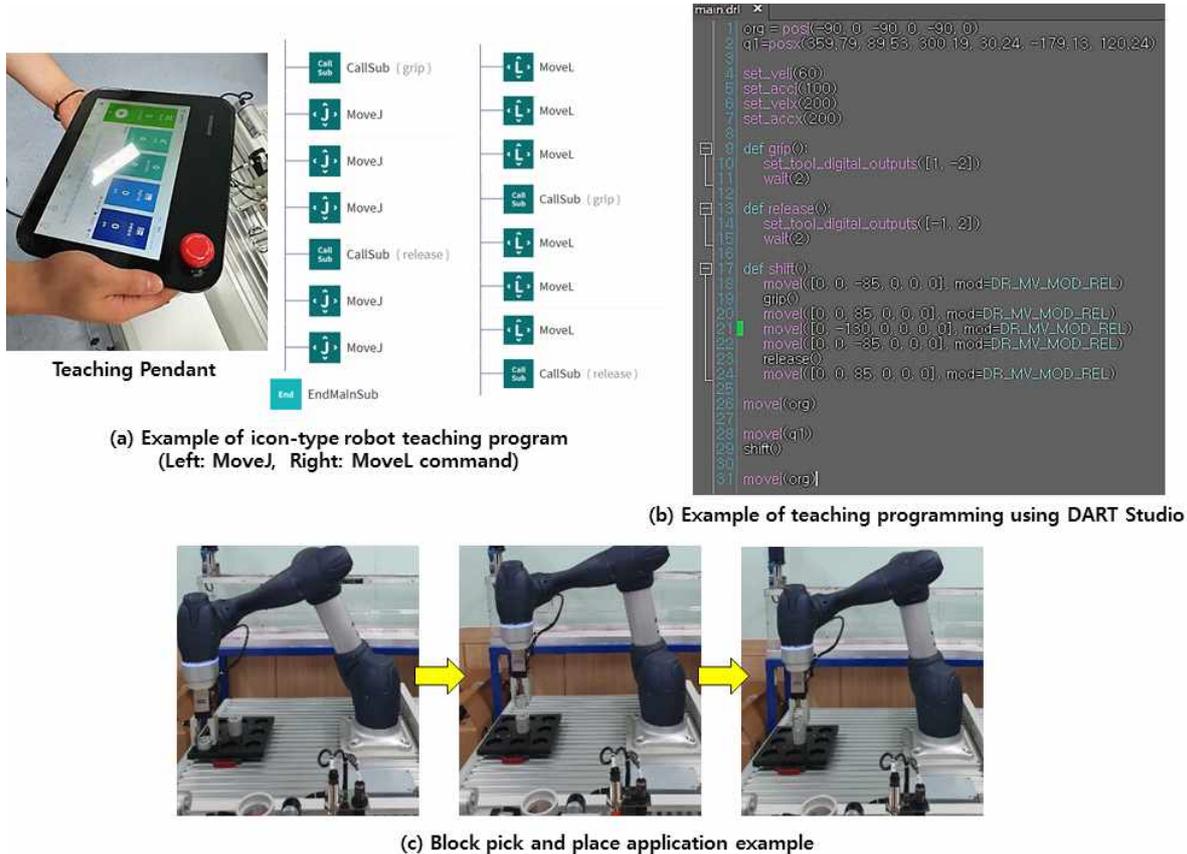


Fig. 5 Examples for collaborative robot control practice using: (a) teaching pendant; (b) DART studio; (c) pick and place application example

드라이어의 위치와 모션을 티칭하는 과정을 단계별로 시연하며 설명함으로써 학생들의 이해를 돕고자 하였다.

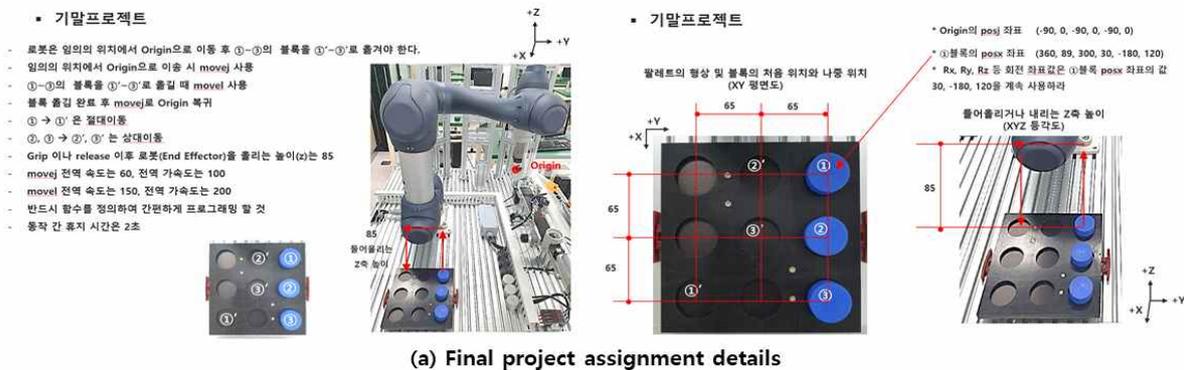
대면 수업에서는 사전 수업단계에서 학습한 이론과 시연 실습영상을 토대로 학생들이 직접 협동로봇을 제어/실습하도록 구성하였다. 모든 협동로봇 제어/실습은 조별로 이루어져 제어 스크립트를 프로그래밍, 디버깅하거나 로봇의 충돌/ 티칭 실수가 발생하였을 때 조원 간의 유기적인 협업으로 해결하도록 하였으며, 실습을 수행하는 동안 교수와 학생들의 자유로운 토론과 질의응답을 독려하였다.

Fig. 5는 본 교과목에서 수행한 협동로봇 제어 실습 예시를 보여준다. 중간평가 기점으로 전반기에는 티칭펜던트를 이용한 협동로봇 제어 실습을 수행하였다. 아이콘 기반으로 제어 스크립트 프로그래밍을 수행하는 티칭펜던트에서 학생들은 직접 디스플레이를 터치하고 협동로봇의 6축 모터 속성, 수치 등을 변경해가며 실습하였다. 협동로봇 모션은 각 모터의 회전각도를 조정하여 티칭하는 방식(모션 명령어 move j)과 특정 좌표계 기준으로 축별 직선, 회전 값을 조정하여 티칭하는 방식(모션 명령어 move l)이 있다.

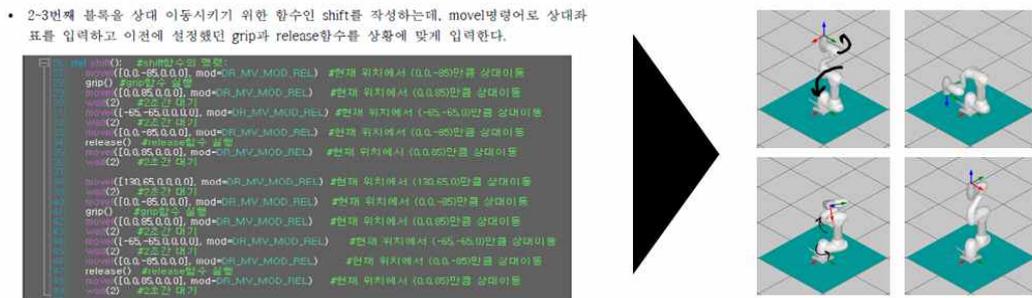
따라서, 로봇 엔드이펙터의 그리퍼가 실습용 블록을 잡고 팔레트 내의 특정 위치로 옮기는 픽앤플레이스 어플리케이션 티칭 실습을 각 모션 명령어(move j, move l)별로 수행하였다(Fig. 5(a)). 교과목 후반기에는 제조사에서 제공한 DART studio 제어/시뮬레이션 소프트웨어를 PC 기반으로 운용하여 프로그래밍하고 로봇을 제어하는 실습을 수행하였다. 제조사가 구축한 파이썬 기반 프로그래밍 언어(DRL)로 스크립트를 작성하여 협동로봇을 제어하는 것으로, 전반기에 학습한 티칭펜던트 실습과 동일한 예제를 DART studio 기반으로 수행하며 프로그래밍 역량을 높이도록 하였다(Fig. 5(b)). 해당 DART studio 프로그램은 협동로봇의 모션 시뮬레이션이 가능하므로, 자유로운 스크립트 프로그래밍과 디버깅을 통해 티칭 상황을 확인을 할 수 있어 학생들이 프로젝트 과제를 효율적으로 수행할 수 있었다.

Fig. 6은 DART studio를 이용하여 협동로봇이 특정 미션을 수행하도록 제어하는 프로그래밍 프로젝트 내용과 보고서 결과물 예시를 보여준다. 학생들은 수업에서 학습한 제어 명령어 및 DRL 언어를 기반으로 팔레트 내부에서 다수의 블록 위치를 옮기는 픽앵플레이스 프로그래밍을 수행하였다. 특정 미션을 달성하기 위해 직접 프로그래밍 하고 시뮬레이션 결과를 디버깅하면서 로봇운전 및 제어 역량을 함양시키고자 하였다. 또한, 본인이 작성한 제어 스크립트를 주석으로 설명함으로써 타인에게 프로그래밍 의도를 전달하고 커뮤니케이션하는 경험을 갖도록 하였다.

Fig. 7은 플립러닝을 적용한 협동로봇 제어 실습 교과목 수강 학생들의 강의평가 결과를 보여준다. 해당 교과목의 강의평가는 4.81점(5점 만점)으로 동일 학기에 진행한 기타 교과목 4개 평균 점수인 4.40점에 비하여 0.41점 높았음을 확인하였다. 특히, <교수의 교수방법에 만족하였고, 질의 응답이 가능하였다>는 강의 만족도 항목에서 <매우 그렇다>는 답변이 81%를 기록하여, 한정된 강의 시간과 로봇 기자재로 인해 실습 집중도가 떨어지는 단점을 플립러닝 교육법으로 극복하고 실무에 적용할 수 있는 로봇 제어 역량을 함양할 수 있었다는 강의 후기가 많았다. 학과내 타 교과목과 비교하였을 때 상대적으로 높은 강의평가 및 만족도 결과를 보였으며, 학생들이 본 플립러닝을 적용한 로봇제어 실습 교육법에 만족하였음을 알 수 있었다.



(a) Final project assignment details



(b) Examples of final project assignments completed by students

Fig. 6 Examples for final assignment using DART Studio program



| 내용 / [답변] 보기1(전혀아니다), 2(아니다), 3(그저그렇다), 4(그렇다), 5(매우그렇다). | 보기1 | 보기2 | 보기3 | 보기4 | 보기5 |
|---|-----|-----|-----|-----|-----|
| 항목별 비율(응답한명/전체학생) | | | | | |
| 교수의 강의내용에 만족하였다. | 0% | 0% | 2% | 8% | 42% |
| 교재나 수업자료의 내용 및 수준이 적절하였으며 학습에 도움이 되었다. | 0% | 0% | 4% | 15% | 81% |
| 교수는 강의에 필요한 충분한 지식과 경험을 갖추고 있었다. | 0% | 0% | 2% | 10% | 40% |
| 교수의 교수방법(언어표현의 정확성, 설명의 명확성, 사례제시의 적절성)에 만족하였고, 질의 응답이 가능하였다. | 0% | 0% | 4% | 19% | 77% |
| 과제의 내용이 좋았고, 그 결과를 적절할 시기에 알려 주어서 학습에 도움이 되었다. | 0% | 0% | 4% | 8% | 42% |
| 과제의 내용이 좋았고, 학습에 도움이 되었다. | 0% | 0% | 2% | 8% | 42% |
| | 0% | 0% | 4% | 15% | 81% |
| | 0% | 0% | 1% | 5% | 20% |
| | 0% | 0% | 4% | 19% | 77% |
| | 0% | 0% | 1% | 5% | 20% |
| | 0% | 0% | 4% | 19% | 77% |

Fig. 7 Survey result and evaluation details for the lecture

4. 결 론

본 논문에서는 다양한 산업 현장에서 적용되는 협동로봇 제어를 위한 플립러닝 실습 교육법에 대해 제안하였고, 실제 수업 운영 사례를 살펴보았다. 효율적인 실습 교육을 위해 사전 수업의 개념으로 강의 자료와 이론 설명, 실습 시연이 포함된 온라인 영상을 선행학습하도록 하였으며, 이를 통해 학생들은 본 강의에서 강조하는 핵심 내용과 안전 실습 사항을 대리 경험할 수 있었다. 대면으로 이루어지는 본 수업에서는 사전 단계에서 학습한 이론과 시연 실습 영상을 토대로 학생들 스스로 로봇제어 실습을 수행하였다. 또한, 교수와 학생들 간의 자유로운 토론 및 질의응답 시간을 갖도록 하여 사전 학습한 이론의 궁금증 해소와 안전하고 효과적인 협동로봇 제어 실습을 수행할 수 있었다.

이처럼 실습을 포함하거나 프로젝트를 수행하는 교과목 운영에 플립러닝을 적용한다면, 짧은 강의시간, 한정된 기자재, 다수의 학생 실습으로 인해 겪는 어려움을 극복하고 교수자와 학습자 간의 효율적인 지식교류의 장을 마련할 수 있을 것이다.

후 기

이 연구는 동양미래대학교 2022 교내 학술연구 사업의 지원을 받아 수행된 연구임.

참고문헌
(References)

- (1) Lee, H. S., Kang, S. C. and Kim, C. S., 2016, "A Study on the Effect of Flipped Learning on Learning Motivation and Academic Achievement," *The Journal of Korean Association of Computer Education*, Vol. 18, No. 2, pp. 47~57.
- (2) Jung, J. Y. and Lee, M. H., 2020, "A Study on the Research and Operation Trends of Learner Centered Teaching Methods - Focusing on Flipped Learning -," *Journal of Fisheries and Marine Sciences Education*, Vol. 32, No. 1, pp. 194~202.
- (3) Jo, H. Y., 2022, "Effect of Participation in Flipped Learning Class on Continuous Intention to Participate: Focusing on the Mediating Effect of Learner-centered Flipped Learning Level and Self-efficacy," *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol. 23, No. 6, pp. 486~495.
- (4) Han, S. M. and Rim, K. H., 2021, "A Study on The Design and Application of Non-Face-to-Face Flipped Learning for Intensified Theory Subject in Engineering Education," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. C*, Vol. 9, No. 2, pp. 153~163.
- (5) Milan, W., Tom, T., Mirte, D. V. G. and Stephan, C., 2021, "A Collaborative Robot in the Classroom: Designing 21st Century Engineering Education Together," *Journal of Higher Education Theory and Practice*, Vol. 21, No. 16, pp. 177~187.

탄소중립을 위한 자연모방 기술혁신: 전략과 정책 과제

곽기호* · 김완두** · 정영도***†

* 한밭대학교 산업경영공학과, ** 한국기계연구원, *** 한국기계연구원 바이오기계연구실

Biomimicry Innovation for Carbon Neutrality: Strategies and Public Policies

Kiho Kwak*, WanDoo Kim** and Youngdo Jung***†

* Dept. of Industrial & Management Engineering, Hanbat Nat'l Univ.,

** Korea Institute of Machinery & Materials,

*** Dept. of Biomachinery, Korea Institute of Machinery & Materials

(Received February 21, 2024 ; Revised May 18, 2024 ; Accepted June 24, 2024)

Key Words: Biomimicry Innovation(자연모방 기술혁신), Carbon Neutrality(탄소중립), Sustainable Innovation(지속가능 혁신), Disruptive Innovation(와해적 혁신), Low-end Disruption(저비용형 혁신), New Market Disruption(신시장 창출형 혁신)

초록: 본 논문은 탄소중립에 대한 자연모방 기술의 잠재력에 주목하고, 자연모방 기술혁신의 특성에 대한 이해에 기반하여 이를 달성하기 위한 과제를 제시코자 한다. 이를 위해 자연모방 기술혁신 관련 문헌 고찰과 다중 사례연구 결과의 통합을 통한 가추법 추론 결과, 자연모방 기술혁신은 와해적 혁신 특성과 성과 창출이 가능함을 발견하였다. 즉, 자연모방 기술혁신은 기존기술의 과잉 성능에 염증을 느낀 고객을 노리는 저가 시장 공략에서 출발하여 종래에 환경 혁신을 달성하는 저비용형 와해적 혁신과 처음부터 지속가능성이라는 새로운 가치를 지향하는 신시장 창출형 와해적 혁신에 초점을 맞출 필요가 있음을 발견하였다. 그럼에도 불구하고 현재의 자연모방 기술혁신은 낮은 시장 수용성과 기술적 한계로 인해 기존 기술을 파괴하지는 못하고 있다. 이에 본 논문은 기업의 자연모방 기술혁신 전략으로 중장기 R&D와 독립 부서 운영, 정부 정책으로 환경 혁신 공헌도에 따른 정책 우선순위 정립과 독자적인 R&D 프로그램 운영을 제시하였다.

Abstract: We aim to explain the potential of biomimicry innovation for carbon neutrality and suggest managerial and policy insights to achieve the potential. Based on an abductive approach, a combination of in-depth literature review on biomimicry innovation and multiple case-studies, we observed that biomimicry innovation shows disruptive innovation characteristics, consists of (1) 'low-end disruption' and (2) 'new market disruption'. Nevertheless, we found that the biomimicry innovation did not yet destroy incumbent technologies due to the low market readiness and technical limitations. Accordingly, we propose firm innovation strategies and public policies for facilitating biomimicry innovation from a long-term perspective, such as mid- to long-term R&D investment, independent department on biomimicry innovation in a firm, and the establishment of policy priorities corresponding to the potential contribution to carbon neutral.

1. 서론

2100년까지 산업화 시대(1850년 - 1990년) 대비 지구평균온도 1.5°C 이하 상승을 목표로 하는 파리협정(Paris Agreement, 2015년) 체결과 IPCC 총회(Intergovernmental Panel on Climate Change, 2018년)의 특별

† Corresponding Author, yjung@kimm.re.kr

보고서 발간 이후 기후 변화 위기에 대한 전세계적 대응이 본격화되었다. 이러한 대응은 2019년 9월 개최된 UN 기후정상회의에서 온실가스 배출량과 흡수량을 같게 하는 이른바 ‘탄소중립’달성을 공언하면서 더욱 강화되고 있다.⁽¹⁾ 우리나라 또한 2030년까지의 온실가스 배출량 감소 목표를 대폭 상향(‘17년 배출량 대비 24.4% 감축에서 ‘18년 배출량 대비 40% 감축으로 변경)하는 등 기후 변화 위기 대응을 선도하고 있다.^(2,3) 이에 따라 탄소중립 및 기후 변화 위기 대응에 대한 과학기술적 대응으로 기존 생산 체제에서의 효율적 자원 사용·재사용·재활용과 같은 (1) 환경 효율성(eco-efficiency)은 물론, 지속가능성(sustainability)이라는 새로운 가치 창출을 목표로 하는 제품·공정·서비스를 개발하는 (2) 환경 효과성(eco-effectiveness), 그리고 기후 변화 위기에 따른 부정적 영향에도 생존·성장할 수 있는 (3) 복원력(resilience) 달성에 관심이 집중되고 있다.⁽⁴⁻⁶⁾ 이러한 과학기술적 대응 방안의 실현을 위한 도구이자 접근법 중 하나로 생체모방 기술혁신(biomimicry innovation) 또는 자연모방 기술혁신(nature inspired innovation)이 주목받고 있다.^(4,5,7,8) 생체모방 또는 자연모방 기술혁신은 생물체의 구조(form 또는 structure), 주변 환경에 대한 적응·진화와 활용 과정(process), 그리고 이들이 존재하는 생태계(ecosystem)의 작동 원리(principle)와 패턴(pattern)을 모방해서 제품·서비스를 개발하거나 기술적 문제를 해결하는 것으로 정의할 수 있다.⁽⁹⁾ 특히 생체·자연모방 기술혁신은 오랜 기간 진화를 통해 에너지 사용과 폐기물 배출 최소화, 자원의 재활용 등을 달성한 생물체와 그들의 생태계를 공학적으로 응용한다는 점에서 환경 혁신을 달성하는데 중요한 접근으로 인식되고 있다.^(10,11) 이는 흰 개미집(animal colony)의 통풍 원리를 모방하여 에너지 사용량을 90% 절감한 짐바브웨의 이스트게이트 센터(Eastgate center) 사례,⁽¹²⁾ 흑등고래 지느러미를 모방하여 에너지 효율을 각각 40%, 10% 개선한 풍력 터빈 블레이드와 에어컨 팬 등의 사례에서도 확인할 수 있다.^(8,13)

이와 같은 생체·자연모방 기술의 환경 혁신, 즉, 탄소중립 달성에 대한 잠재력에도 불구하고, 그 고유의 특성을 기술전략 이론 관점에서 이해하고, 기업의 전략과 정부의 정책 개발을 체계적으로 제시한 논의는 제한적이다. 특정 기술의 혁신 특성을 체계적으로 이해하는 시도는 정부의 기술·산업 정책 수립과 기업의 기술 전략 수립에 매우 중요하다.^(14,15) 따라서 본 연구의 연구문제로 우리는 “생체·자연모방 기술의 환경 혁신 특성은 무엇인가”와 “환경 혁신을 위한 생체·자연모방 기술전략과 정책은 무엇인가”를 제시하고, 이에 따른 기업의 기술혁신 전략과 정부의 정책 과제를 제시코자 한다. 이를 위해 본고는 생체·자연모방 기술혁신 관련 연구 및 사례에 대한 고찰과 다수의 일화적 증거(anecdotal evidence)에 대한 관찰을 통합하여 생체·자연모방 기술혁신 특성을 일반화하고, 이를 기술전략 이론의 관점에서 해석하는 가추법 추론(abductive reasoning)을 활용하였다.⁽¹⁶⁻¹⁸⁾ 가추법 추론은 이론으로부터 현상을 설명하는 연역법과 반복 실증을 통해 이론화를 시도하는 귀납법의 반복 연계로써 현상에 대한 체계적 이해와 개념화를 목표로 한다.^(19,20) 이에 따라 본 연구는 환경 혁신과 관련한 생체·자연모방 기술혁신 사례를 다수 발굴하고, 연구결과의 외적 타당성을 높이고자 한다.⁽²¹⁾

연구결과, 생체·자연모방 기술의 환경 혁신은 와해적 혁신(disruptive innovation) 특성과 성과 창출의 잠재력이 있음을 확인하였다.⁽²²⁻²⁴⁾ 즉, 생체·자연모방 기술의 환경 혁신은 기존 기술의 존속적 혁신(sustaining innovation)으로 인한 과잉 성능(performance overshoot)에 염증을 느낀 저가 시장 공략을 위한 저비용 혁신(low-end disruption)에서 출발하여 종래에 환경 혁신을 달성하는 접근과 처음부터 탄소중립이라는 새로운 가치를 지향하는 신시장 창출(new market disruption) 접근이 모두 가능성을 발견하였다. 특히 생체·자연모방 기술이 꾸준한 기술 진보를 통해 기존 기술의 존속적 진보에 못지않은 성능을 달성한다면, 탄소중립이라는 새로운 경쟁 기반(basis of competition)에서의 우위를 바탕으로 기존 기술을 파괴할 수 있을 것으로 기대된다.

이에 따라 생체·자연모방 기술의 환경 혁신을 위한 기업의 전략은 와해적 혁신 달성의 관점에서 독립사업부 신설과 예산·수익·비용 구조 확립, 발견 중심의 기획, 학제적·이해관계자 간 협력 및 이를 위한 최고경영진의 지속 지원에 초점을 맞춰야 할 것이다. 그러나 이와 같은 생체·자연모방 기술혁신은 많은 경우 아직 틈새시장(niche market) 개발에 머무르고 있다(예: 벨크로, 초발수 페인트, 액체 비누 배출기 등).^(10,22-24) 또한 현시대 자연모방 기술 진보가 직면한 확장성(scalability), 소재 개발(materials), 설계 전환

(design)에서의 기술적 난제는 와해적 혁신 달성을 더 어렵게 할 것으로 예상된다. 따라서 정부 정책 또한 중장기적 관점에서 생체·자연모방 기술혁신과 이를 위한 교육 프로그램 개발, 대국민 홍보 등을 강화 하되, 기술별 탄소중립에 대한 공헌도를 파악하고, R&D 및 산업기술정책 지원의 우선순위를 정립할 필요가 있을 것이다. 나아가 생체·자연모방 기술혁신의 적용 범위를 기후 변화로 인한 재난재해로부터의 복원력 달성으로 확대하고, 이를 위한 R&D 기획과 지원도 모색할 것을 제안한다.

2. 자연모방 기술혁신의 탄소중립 달성 잠재력과 경제적 파급효과 전망

2.1 자연모방 기술혁신의 정의와 분류

앞서 간략히 살펴본 생체모방 기술혁신은 Benyus⁽²⁷⁾에서 생물학적 구조 설계와 진화 과정에서 영감을 얻어 이를 공학적으로 활용함으로써 사회기술 문제를 해결하는 활동으로 최초로 정의되었다. 이후 Benyus⁽²⁸⁾에서 모방과 영감의 대상을 동식물 자체와 이를 포함하는 생태계의 작동 원리와 패턴으로 확장 하고,^(10,11,29) 2015년 ISO/TC 266에서 모방의 대상을 자연과 생물학적 시스템들(biological systems)로 공식 화하면서,^(30,31) 생체모방 기술혁신⁽²⁹⁾과 자연모방 기술혁신^(7,8)이 통용되기 시작했다. 실제로 모방 대상은 동식물 및 곤충의 구조, 자기 조립·정화·세정과 같은 적응·진화 과정, 흰개미집, 개미 집단의 움직임과 같은 시스템 등으로 광범위하다.^(9,29) 이러한 모방 대상 범위에 대한 확장적 해석은 자연이 지배(domination)와 활용(exploitation)의 대상이 아니라 학습(learning)과 탐험(exploration)의 대상임을 시사하고 있다.⁽²⁹⁾ 이에 따라 이후 본고에서는 생체 대신 자연이라는 단어를 사용코자 한다.

그렇다면 자연에 대한 공학적 모방 수준(level)은 어떠하며, 응용(application) 결과는 어떻게 분류할 수 있는가? 이는 Lurie-Luke⁽⁹⁾와 Hayes 등⁽²⁹⁾의 연구를 통해 이해할 수 있다. 첫째, 형태(form) 모방으로 자연의 물리적 모양과 구조에 대한 모방을 통해 공학적 해결책을 얻는 것을 의미한다. 형태 모방을 통한 공학적 해결책은 주로 재료 개발(예: 새의 뼈를 모방한 경량 및 고강도 비행기 동체용 복합재료)과 구조 설계(예: 물총새의 부리 모방을 통해 고속·저전력 소비를 달성한 신칸센 기관차)를 통해 달성된다.⁽¹¹⁾

둘째, 환경 적응 및 진화 과정(process)에 대한 모방으로 자연의 자기 조립 및 치유(self-assembly & repairing), 초발수(hydrophobic), 실시간 감지(real-time sensing)에 대한 모방을 통해 문제를 기술적으로 해결함을 의미한다. 과정 모방을 통한 기술적 문제 해결은 주로 기계 및 전기기기(예: 물고기 떼의 헤엄을 모방한 펌프, 박쥐의 음파 발사 및 지형지물 인식 과정을 모방한 음향 보안 센서 개발)와 재료(예: 연꽃 잎을 모방한 자기 세정 섬유 및 직물) 개발을 통해 실현된다.

셋째, 생태계 또는 생물체의 군집(swarm) 행위 등 시스템 수준에서 작동 원리, 패턴, 전략에 대한 모방이다. 대표적인 예로 자연상태의 빗물 침투 및 저류를 모방함으로써 홍수 위험을 줄이고 오염 물질 배출을 줄인 영국의 배수체계,⁽³²⁾ 초파리 신경계를 모방한 컴퓨팅 알고리즘 및 무선 네트워크 개발, 개미의 집단 움직임을 모방한 생산·물류 생산성 제고 소프트웨어 개발 등이 있다.⁽³³⁾

2.2 자연모방 기술혁신의 환경 성과 달성에 따른 경제적 파급효과 전망

2.1절을 통해 우리는 자연모방 기술혁신이 구조 및 시스템 최적화를 통한 에너지·자원 효율성 제고, 환경 친화적 과정을 통한 폐기물·오염물질 배출 최소화, 그리고 재난재해에 대한 복원력(resilience) 관점에서 환경 혁신, 즉 탄소중립 달성에 따른 잠재력이 높음을 알 수 있다.^(7,9,11,29,34) 그리고 그에 따른 경제적 파급효과도 상당할 것으로 기대된다. 구체적으로 Fermanian Business & Economic Institute(이하 FBEI)⁽³⁵⁾에서는 2030년 자연모방 기술 기반 환경 혁신 시장이 미국 GDP 기준 4,250억 달러, 전 세계 GDP 기준 1.6조 달러에 이를 것으로 전망한 바 있다. 이와 함께 FBEI는 자연모방 기술혁신에 따른 자원 소비 절약 및 환경 오염 저감의 경제적 효과(환경 부담금 감소 효과) 또한 미국에서 650억 달러, 전 세계에서 5,000억 달러로 추산한 바 있다. 한편, 한국의 자연모방 기술 기반 환경 혁신 시장은 2035년 76조 원에서 2050년 469조 원으로, 환경 부담금 감소 효과 또한 동기간 1.5조 원에서 4.6조 원으로 커질 것으로 기대 하였으며, 200만 개의 관련 일자리가 창출될 것으로 전망한 바 있다.⁽³⁶⁾

Table 1 Cumulative funding for top 10 biomimicry innovation start-ups (10,000 USD)

| 2020 | | 2021 | | 2022 | | 2023 | |
|-----------------------------|---------|-------------------------------|---------|------------------------------|---------|------------------------------|---------|
| Firm (country) | Funding | Firm (country) | Funding | Firm (country) | Funding | Firm (country) | Funding |
| Change:Water Labs (USA) | 9 | Spintex Engineering (UK) | 30 | Amphibio (UK) | Closed | Sparxell (UK) | Closed |
| Cypris Materials (USA) | 120 | Aquammodate (Sweden) | 106 | Biome Renewables (Canada) | 190 | Anodyne Chemistries (Canada) | 61 |
| EConcrete (Israel) | 1,400 | Biohm (UK) | 850 | Fusion Bionic GmbH (Germany) | Closed | Acatechol (USA) | 28 |
| Helicoid Industries (USA) | 240 | Grow Oyster Reef (USA) | Closed | GreenPod Labs (India) | 58 | BloomX (Israel) | 800 |
| Metalmark Innovations (USA) | 470 | Impossible Matertials (Swiss) | 368 | Intropic Materials (USA) | 25 | Cellugy (Denmark) | 260 |
| Nanomilk Biotech. (Türkiye) | Closed | Infinite Cooling (USA) | 1,770 | Metavoxel (USA) | 25 | CompPair Tech. (Swiss) | Closed |
| Pheronym (USA) | 210 | Mussel Polymers Inc (USA) | 50 | Mycocycle (USA) | 280 | Coral Vita (USA) | 200 |
| spotLESS Materials(USA) | 230 | New Iridium (USA) | 97 | Soliome (USA) | 54 | Ivu Biologics Inc (USA) | Closed |
| Werewool (USA) | 370 | Novobiom (Belgium) | 61 | Strong by Form (Chile) | 620 | Lux Bio (Canada) | Closed |
| | | Renaissance Fiber (USA) | 43 | Sudoc (USA) | 1,000 | Noovi (Slovakia) | 13 |
| Sum | 3,049 | Sum | 3,374 | Sum | 2,252 | Sum | 1,362 |

Note: Cumulative funding as of December 2023

Source: Authors' investigation from Crunchbase, CBInsights, PitchBook

이러한 성장 전망에 따라 자연모방 기술혁신 관련 스타트업에 대한 투자도 활발히 이루어지고 있다. 미국의 비영리 기구인 Biomimicry Institute는 2020년부터 매년 10개 정도의 자연모방 10대 혁신 기술과 이를 보유한 스타트업을 선정하고 있는데, 이는 위 Table 1과 같다. 주목할만한 점은 선정 스타트업의 국적이 미국, 독일 등 선진국뿐 아니라 인도, 슬로바키아, 칠레 등 신흥국이 포함되어 있다는 점이다. 또한 투자 유치 규모가 알려지지 않은 8개 기업을 제외한 31개 기업의 총 투자 유치액은 2023년 12월 기준 1억 달러가 넘는다. 이는 벤처 투자자들이 환경 성과 달성에 대한 자연모방 기술혁신의 잠재력을 높이 평가하고 있으며, 선진국 뿐 아니라 개도국의 경제 성장에 중요한 역할을 할 수 있음을 인식하고 있음을 의미한다.^(8,35)

그러나 이러한 성장 전망과 스타트업에 대한 투자는 어디까지나 기대치이지 실현된 경제적 효과는 아니다. 실제로 Chirazi 등⁽³⁴⁾에 따르면 자연모방 기술을 활용한 33개 제품 개발 사례에서 확인된 시장 출시 소요 기간은 평균 6년이며, 최대 23년에 이르기도 한다. 비록 탄소중립이 글로벌 과제이긴 하나, 아직 환경 혁신에 대한 투자와 실행 주체가 정부에 편중되어 있다는 점, 환경 혁신에 대한 소비자의 낮은 인식과 저조한 지불 의사 또한 자연모방 기술혁신 시장 성장을 저해하고 있다.⁽³³⁾ 자연모방 관련 논문, 특허, 연구과제 및 연구비 관련 현황을 모니터링하는 da vinci 지수(2,000 = 100) 또한 2019년까지 완만한 성장에 그치고 있다.⁽⁸⁾ 이는 자연모방 기술혁신 성과 창출을 위해 기술혁신 관점에서 고유 특성을 이해하고 기업 전략과 정부 정책 수립이 필요함을 시사한다.

본 고에서는 환경 혁신을 추구하는 자연모방 기술혁신의 고유 특성으로 와해적 혁신(disruptive innovation)에 주목한다.⁽²²⁻²⁴⁾ 자연모방 기술혁신이 기술적 틈새(niche)로서 주류 기술의 존속적 혁신을 파괴할 수 있는 잠재력에 대한 언급은 기존 연구에 있었으나,^(5,7,34) 환경 혁신의 맥락에서 기업의 전략과 정부의 정책을 구체적으로 제시한 연구는 찾아보기 힘들다. 이에 3장에서는 와해적 혁신 이론에 대한 고찰과 이에 기반한 자연모방 기술의 환경 혁신 사례를 분석하고, 탄소중립 자연모방 기술혁신 전략 수

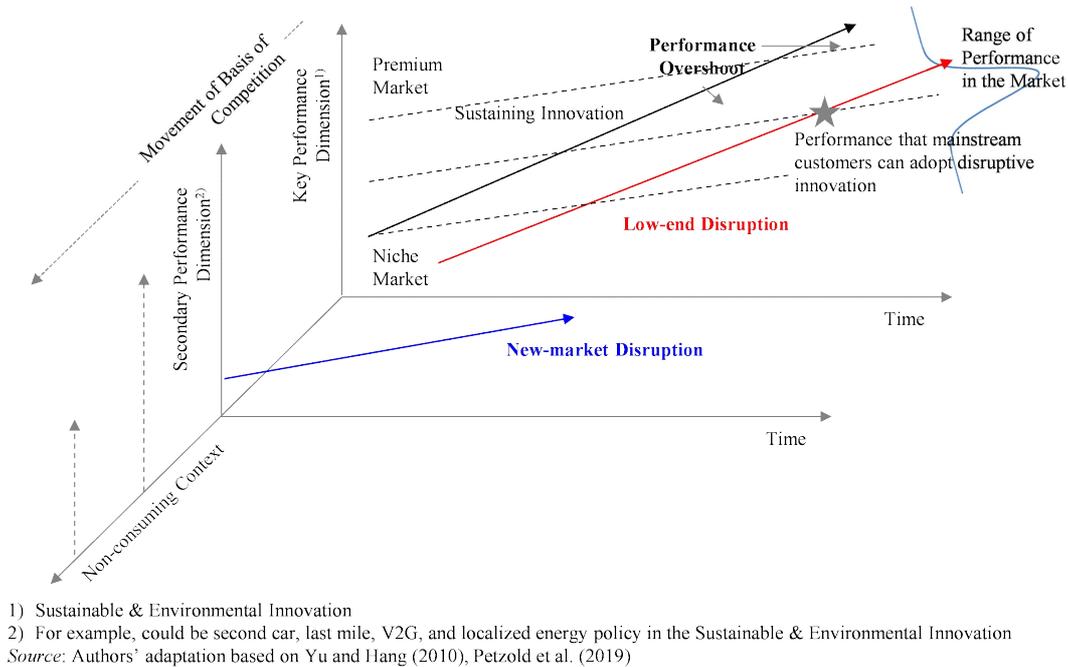


Fig. 1 Disruptive innovation model and sustainable innovation

립에 대한 와해적 혁신 이론의 이해 타당성(nomological validity)을 확인한다.⁽³⁷⁾

3. 탄소중립을 위한 자연모방 기술혁신 전략: 와해적 혁신

3.1 와해적 혁신 개요

와해적 혁신이란 산업의 기존 기술 역량을 활용하고 발전시켜 고성능의 제품·서비스를 개발하는 존속적 혁신을 추구하던 선도 기업이 신기술을 보유한 후발 기업에 의해 몰락하는 원인과 과정을 설명하기 위해 제시된 이론이다.⁽²³⁾ Christensen⁽²³⁾에 따르면 선도 기업은 (1) 과잉 성능에 지불하고 싶지 않은 고객을 공략하기 위한 획기적으로 낮은 가격의 재화를 공급하는 ‘저비용형 와해적 혁신(low-end disruption)’과 (2) 새로운 성능·가치를 제시하여 기존에 없던 시장을 개발하는 ‘신시장 창출형 와해적 혁신(new market disruption)’으로 무장한 후발 기업의 도전에 직면하게 된다. 그리고 이러한 후발 기업은 지속적인 노력을 통해 빠른 속도로 신기술의 성능을 개선하고, 종래에 기존 기술보다 더 높은 성능을 달성하면서 선도기업의 시장 점유를 파괴하게 된다.⁽³⁸⁻⁴⁰⁾ 이는 아래 Fig. 1과 같이 나타낼 수 있다.

와해적 혁신은 기존 기술의 성숙기 또는 시장 후기에 주로 관찰되며, 신기술은 비록 초기에는 주류 시장 고객 요구 수준에 미치지 못하는 성능을 보이나, 비고객(신규 고객)을 유인할 수 있는 새로운 가치를 낮은 가격에 제안할 수 있으며, 틈새시장 공략에서 시작하는 특성을 가진다.^(41,42) 이는 굴착기 산업의 유압식 기술 사례에서 확인할 수 있다. 유압식 기술은 케이블식 기술이 출시된 지 20년 이상 지난 1947년에 시장에 최초 진입하였다. 비록 유압식 기술은 케이블식 기술(운하/지하차도, 노천채굴, 상하수도 공사)에 비해 삽(bucket) 용량도 작았고, 도달 거리도 짧았지만 작업의 정확성(좁고 얇은 도랑 굴착), 빠른 이동 속도, 좁은 공간에서의 작업 용이성을 무기로 대략 1 / 5 수준의 삽 용량만 필요로 하던 소규모 도시 주택 건설 업자(신시장 창출형 와해적 혁신)에게 채택되었다(1950년대 초). 이후 유압식 기술의 빠른 성능 개선에 힘입어 1960년대 중반 케이블식 기술과 유사한 수준의 삽 용량을 달성하게 되고(저비용형 와해적 혁신), 케이블식 기술에 비해 뛰어났던 내구성과 작업 안정성이 부각되면서 유압식이 케이블식 시장을 급속히 잠식(주류 시장 획득)하게 된다. Christensen⁽²³⁾은 이를 성능 초과(performance overshoot)에 따른 경쟁 기반(basis of competition)의 이동으로 설명하고, 이러한 이동이 최종적으로 가격 경쟁에 이르게 될 경우, 제품의 범용화(commoditization)가 일어난다고 하였다.

이러한 설명에 따라 와해적 혁신은 국내에서 파괴적 혁신으로도 널리 소개되었으며,⁽⁴³⁾ 와해적 혁신을 활용하거나, 경쟁기업에 대응하기 위한 전략으로 (1) 신기술의 잠재력에 대한 꾸준한 검토, (2) 새로운 잠재 고객과 미래의 가치 창출 원천(새로운 성능 지표)의 지속적 발굴, (3) 와해적 혁신을 추구할 수 있는 독립적인 사업 단위 구축(분사 등 포함), (4) 신기술에 대한 최고경영진의 전략적 인내, (5) 불확실성에 유연하게 대응할 수 있는 ‘발견(discovery) 중심의 기획’, (6) 외부 파트너와의 전략적 협력(개방형 혁신) 등이 제시된 바 있다.

이후 와해적 혁신 이론은 하드 디스크 드라이브, MP3(음악), 카메라 등 다양한 산업에서 와해성 신기술에 의해 선도기업이 파괴되고 후발 기업이 성장하는 현상을 설명하는데 활용되었다.⁽⁴⁴⁻⁴⁷⁾ 구체적으로 살펴보면 하드 디스크 드라이브의 경우 신생 기업이 저장 용량 성능은 부족하나 소형화, 경량화라는 새로운 가치를 토대로 미니, 데스크톱, 랩톱 등의 개인 컴퓨터(PC) 시장에 진출한 후 신기술에 대한 성능 개선을 통해 선발 주자를 파괴한 사례를 확인할 수 있다.⁽⁴⁴⁾ MP3의 경우 CD보다 음질은 떨어지지만 자유로운 음악 선택, 작은 장치 크기, 싼 가격, 스트리밍 서비스 등의 가치를 토대로 CD 시장을 급속히 잠식하였다.^(45,48) 마지막으로 디지털 카메라는 시장 출시 해상도와 촬영 저장 용량 등에서 아날로그 카메라보다 열세였으나 인화 속도라는 장점을 바탕으로 신문 기사용 사진 촬영이라는 틈새시장을 공략한 후 자유로운 촬영·삭제, 피사체 인식 및 촬영 기능 자동 설정, 동영상 촬영이라는 새로운 무기를 바탕으로 카메라의 대중화를 이끌었다.^(47,49)

특히 2018년 학술지 energy research & social science 특별호 ‘critical perspectives on disruptive innovation and energy transformation’이 발간된 이후 친환경 에너지 전환, 기후 변화 대응 등의 맥락에서 와해적 혁신에 대한 논의가 확대되고 있다.⁽⁵⁰⁾ 구체적으로 Sprei⁽⁵¹⁾는 공유 자동차, mobility as a service(MaaS), 전기자동차 등이 자원·에너지·배출가스 저감과 같은 지속가능 가치뿐 아니라, 유연한 세컨드 카(second car) 선택권, 이동에서의 라스트 마일(last mile), 배터리에 남아 있는 전력을 수요 피크(peak) 시간에 판매하는 V2G(vehicle to grid)라는 새로운 가치를 창출할 수 있는 잠재력이 있으며, 이를 실현하기 위한 규제가 필요함을 주장한 바 있다. 또한 Dutschke 등⁽⁵²⁾은 지역별 태양광·바이오매스 기반 재생에너지 난방(renewable district heating)이 온실가스 배출 저감뿐 아니라 열원 공급 관련 지역 산업 활성화(수입에서 지역 농업·제조업으로의 전환)와 에너지 수급 정책에서의 지방자치단체의 역할 확대라는 추가적인 가치를 제안할 수 있음을 독일의 사례를 통해 주장한 바 있다. 이와 같은 환경 혁신을 위한 와해적 혁신 추진은 중국의 전기자동차,⁽⁵³⁾ 3D 프린팅⁽⁵⁴⁾ 등의 사례에서도 확인할 수 있다.

3.2 와해적 혁신 관점에서 바라본 자연모방 기술의 환경 혁신 사례

앞서 지속가능 환경 성과 달성을 위한 와해적 혁신에 대한 논의를 토대로 본 절에서는 와해적 혁신의 관점에서 자연모방 기술의 환경 혁신 사례를 이해코자 한다. 이는 아래와 같이 형태(form), 환경 적응 및 진화 과정(process), 그리고 동식물 시스템(system)으로 나누어 살펴본다.

3.2.1 형태 모방 사례: 벨크로

흔히 찍찍이라고 불리는 벨크로는 단추나 지퍼, 그리고 신발 끈을 대체할 수 있는 묶기용 제품으로 조르주 드 메스트랄이라는 엔지니어가 우영열매 갈고리의 ‘형태’를 모방하여 1941년에 개발, 사업화되었다.⁽²²⁾ 사실 벨크로는 드 메스트랄이 개발한 제품의 상표명이었으나 오늘날 훅앤루프 시스템(hook-and-loop system)의 고유명사가 되었다.⁽³⁴⁾

벨크로는 와해적 혁신 전략 실행 방안 중 하나인 ‘발견 중심의 기획’의 산물로 볼 수 있다.^(8,55) 왜냐하면 벨크로의 발명은 메르스탈이 산토끼를 사냥하러 우영이 우거진 숲속으로 우연히 뛰어들었다가 옷과 사냥개 털에 무수히 달라붙은 우영 열매 갈고리를 보고 화를 내면서 관찰한 것에서부터 시작되었기 때문이다.⁽³¹⁾ 비록 벨크로는 사업화 초기 단추, 지퍼, 끈에 비해 떨어지는 접착·봉합력, 갈고리·테이프 구조에 따른 탈부착 시의 소음 등으로 인해 많은 비판을 받았으나, 사용하기 쉽고, 빠른 탈부착이라는 가치 제안을 통해 아동용 의류나 신발에 우선 채택되었다. 특히 빠른 탈부착의 가치는 제2차 세계대전 중 군

화와 군복에 채택되며 더욱 극대화되었다.⁽⁵⁶⁾

이후 벨크로는 지속적인 성능 개선을 통해 기저귀, 붕대, 장난감 등 아동용품과 성인의 일상 운동화 등 다양한 소비재뿐 아니라 소방관 유니폼, 자동차 경주선수 옷, 우주복 등 산업재 분야로도 응용처를 확대하였다. 특히 최근 개발된 3M의 듀얼락은 소화기도 벽에 고정시킬 수 있을 정도로 강력한 접착력을 자랑한다. 이에 따라 벨크로의 세계 시장 규모는 2022년 23.5억 달러에서 2030년 34.0억 달러로 꾸준히 성장할 것으로 기대된다.⁽⁵⁷⁾

뿐만 아니라 벨크로는 본래 단추, 지퍼, 신발 끈에 비해 생산 공정이 단순하고 그에 따른 에너지 소비가 적다는 장점이 있다. 특히 테이프 부분에 사용되던 접착제의 친환경화 등이 지속적으로 진행되면서 환경 혁신 성과도 더욱 개선되고 있다.⁽⁵⁸⁾

3.2.2 환경 적응 및 진화 과정 모방 사례: Sto의 초발수 페인트 Lotusan

물 속에 뿌리와 가지를 두고 일만 물 위로 내민 연의 잎 표면은 물이 묻을 일이 매우 잦다. 이렇게 연잎 표면에 물이 묻어있고 먼지나 흙과 같이 여러 지저분한 물질과 섞이게 되면 광합성을 하기 힘들어지고 연은 성장이 어려워진다. 그래서 연잎의 표면은 초소수성(초발수성) 특성을 가지기 위해 오랜 기간에 걸쳐 진화해 왔다.⁽⁵⁹⁾ 이러한 초소수성(초발수성)은 자기세정효과(self-cleaning effect)를 가진 코팅 기술로서 다양한 산업 분야에 응용되고 있는데, 대표적인 사례가 독일의 페인트 분야 중소기업 Sto가 2001년 사업화에 성공한 외장 페인트 Lotusan이다. Lotusan은 페인트를 구성하는 분말에 표면의 물방울 접촉각을 최소화하고 자기세정 기능을 보유한 안료를 섞은 제품으로써 일반 페인트에 비해 10 ~ 15% 비싼 가격에도 불구하고 평균 수명이 약 2배(8년)에 이르기 때문에 경제성을 확보하는데 성공하였다.⁽³³⁾ 특히 Lotusan은 제품수명주기에 걸쳐 일반 페인트에 비해 에너지 소비, 토지 산성화, 하천 및 해양 부영양화, 오존층 파괴, 미세먼지 배출 등에서 우수한 환경 성과를 확인한 바 있다.⁽⁶⁰⁾

그러나 Lotusan의 기술사업화 역시 사전에 응용 분야를 기획하기보다는 탐색과 시행착오, 사업화를 위한 인내, 그리고 다양한 이해관계자와의 협력을 통해 이루어졌다.⁽²⁵⁾ 연꽃잎의 진화와 초소수성은 1977년 독일의 식물학자 Barthlott 박사에 의해 처음 보고되었으나, 이에 대한 사업화 관심은 1990년대까지 극히 저조하였다. 실제로 Barthlott 박사는 1992년부터 접착제 기업 등을 찾아다니며 사업화를 타진했으나 번번이 퇴짜를 맞았고, 연구결과에 대한 논문 출판도 Nature, Science 등의 학술지에서 번번이 게재 불가 판정을 받다가 1997년에서야 Planta에 게재된다. 그러나 그는 포기하지 않고 특허 출원(1994년) 및 상표권 등록(1995년)을 이어갔고 홀로 시제품도 개발하였다. 때마침 그의 노력은 1995년 루프트한자 기내용 잡지에 소개되었고, 이를 본 대중들의 관심에 힘입어 10개 기업으로 구성된 사업화 컨소시엄이 꾸러졌다. 그리고 2001년 Sto가 컨소시엄에 참여했던 건물용 페인트 중소기업 ISPO를 인수하면서 사업화가 실현되었다.

현재 Lotusan은 비가 많이 내리는 지역 또는 정기적으로 건물 외벽 청소가 필요한 환경(주거용 건축물, 전시장, 박물관 등)에 널리 활용되고 있다. 특히 Lotusan은 나노미터 수준의 입자를 바탕으로 분사식(spraying) 페인트칠을 가능케 함으로써 사용 용이성을 무기로 자가 건축(DIY: do it yourself)이라는 틈새 시장을 초기에 창출하였다.⁽²⁵⁾ 이후 2005년에는 미국 재건축용 페인트 시장에 진출하여 2010년대 초까지 매년 2배에 달하는 매출 신장세를 기록한 바 있으며,⁽⁶¹⁾ 이후에도 성능을 보다 개선한 Stocoat Lotusan, StoTherm Lotusan NExT 등의 제품을 출시하며 시장 공략을 가속화하고 있다. Sto는 Lotusan 제품이 공략 가능한 시장 규모는 2017년 기준 미국 내에서만 연간 20억 달러(전체 시장 규모 116억 달러의 17.2% 수준)에 달하며, 연평균 10 ~ 12%의 성장을 기대하고 있다.⁽²⁵⁾ 이는 2022년 Sto 매출액인 19.2억 달러에 육박하는 규모이며,⁽⁶²⁾ 향후 높은 성장 잠재력을 시사하고 있다.

이 밖에도 연꽃잎의 자기세정효과는 디스플레이(표면 세척), 태양전지(발전 효율 개선), 의류(청결), 의료기기(멸균), 자동차 사이드 미러(안전 운전), 제트 엔진(결빙 방지) 등의 분야에 폭넓게 활용되면서 그에 따른 세척·세탁 및 멸균 물질 사용량 감소, 에너지 효율 개선 등을 통해 환경 혁신에 기여하고 있다.^(9,63,64)

Table 2 Performance comparison between biomimicry and historical projects

| | Biomimicry project | | | Historical project |
|-----------------------------|---|---|---|---|
| Man hours | 285 | | | 1,620 |
| R&D budget | \$23,000 - Labor 13,000(Δ87,000) - Design service 10,000(Δ19,000) | | | \$129,000 - Labor 100,000 - Design service 29,000 |
| Patent application | 4 | | | 2 |
| Sustainable innovation | ① | ② | ③ | |
| Energy savings | √ | √ | √ | |
| Material optimization | | √ | | |
| Waste reduction | | √ | √ | |
| Lead concept energy savings | 50-80% | | | 20% |

Note: ①, ②, and ③ mean ‘double-acting bladder pump’, ‘elastic bladder dispenser’, ‘pressurized, collapsible liquid container’, respectively.

Source: adapted from Kennedy et al.⁽¹¹⁾

3.2.3 동식물 시스템 모방 사례: GOJO Industries의 액체 비누·세정제 디스펜서

알코올 기반 손 소독제 펌프의 생산업체로 유명한 미국의 GOJO Industries(이하 GOJO)(1946년 설립)는 2012년 ~ 2016년에 자연모방 관련 비영리 기구인 Great Lakes Biomimicry 및 Univ. of Akron과 함께 R&D 협력 프로그램을 운영하고 다양한 자연모방 기술혁신 제품을 출시한 바 있다. 그 중의 대표 사례는 인간의 심장을 모방한 액체 비누·세정제 디스펜서(dispenser) ‘double-acting bladder pump(2013년)’이다.⁽¹⁰⁾ 당시 GOJO는 비접촉식(touch-free, 센서용) 액체 비누·세정제 디스펜서를 학교, 레스토랑, 병원, 제조공장, 피트니스 센터, 사무용 빌딩 등에 대량으로 공급하고 있었는데 액체 이송 및 분사를 위한 배터리 사용에 따른 환경 부하 증가로 고심하고 있었다. 더불어 배터리 사용은 디스펜서가 비치된 곳 전반에서 잦은 유지보수의 번거로움을 초래하였다. 이러한 문제 해결을 위해 GOJO는 공학, 생물학, 화학, 마케팅, 지속가능성 분야 전문가 15명으로 구성된 다기능팀(cross functional team)을 조직하고 연인원 103명 투입과 3차례의 워크숍을 통해 해결책을 도출코자 하였다. 이를 위해 GOJO는 다양한 자연모방 도구 활용, 최신 연구 동향에 대한 세미나, 개념 설계와 선정 과정을 체계적으로 진행하였다.

그 결과 GOJO는 ① ‘double-acting bladder pump’ 외에도 ② ‘elastic bladder dispenser’(척추동물 혈액 순환 시스템 모방), ③ ‘pressurized, collapsible liquid container’(식물의 영양분 및 수분 운송 시스템 모방) 등 다양한 동식물의 시스템을 모방함으로써 기존 디스펜서(2010년 출시) 대비 원자재 사용 최적화, 전력 소비 절감, 폐기물 축소 등의 성과를 달성하였다(Table 2). 특히 이러한 접근은 기존 디스펜서 개발에 비해 인력 투입(시간)과 R&D 예산은 20% 미만으로 줄이고, 에너지 절감 효과는 2.5 ~ 4배 이상을 달성하는 성과를 거두었다.⁽¹¹⁾ 이는 자연모방에 기반한 제품 혁신이 기업의 혁신 활동 속도와 신규성을 높이며, 엔지니어의 문제 해결 역량을 높이는 새로운 가치를 포함함을 시사한다.⁽⁶⁵⁾

디스펜서는 비누·세정제와 함께 2022년 29.5억 달러의 매출을 기록한 GOJO의 2대 제품군이다.⁽⁶⁶⁾ 비록 세계 시장 규모는 2023년 1.2억 달러로 작지만 2028년까지 연평균 18.6%의 성장률을 보이며 3억 달러의 시장이 기대되는 유망 품목이다.⁽²⁶⁾ 2024년 2월 현재 GOJO는 130개의 디스펜서 모델을 판매하고 있으며, 그중 56개가 상기 자연모방 기술 적용이 가능한 비접촉식 모델이다.

3.2.4 소결: 자연모방 기술혁신에 대한 와해적 혁신 이론의 이해 타당성

세 가지 사례에서 살펴본 자연모방 기반 환경 혁신의 공통점은 쉬운 사용(벨크로, 분사식 페인트칠), 유지보수의 번거로움 해소(액체 비누·세정제 배출기)라는 새로운 성능 지표를 제안함으로써 틈새시장(아동용, 군용, DIY 건축용, 간편한 유지보수)을 창출했다는 점에 있다. 이는 사업화 초기, 주류 시장의 핵심 성능 측면에서는 열위에 있으나 경제·기술적 이유로 제품을 사용하지 않는 고객(신시장 창출형), 썩

비용으로 꼭 필요한 기능만 원하는 고객(저비용형)을 공략했다는 점에서 와해적 혁신의 사례로 이해할 수 있다. 또한 이들 사례에서는 신기술 잠재력에 대한 꾸준한 검토, 발견 중심의 기획, 신기술에 대한 전략적 인내, 독립적 사업 단위 구축, 개방형 혁신과 같은 와해적 혁신 실행을 위한 모범 지침(best practice)을 확인할 수 있다. 벨크로 개발은 사냥에 나섰다가 온몸에 달라붙은 우렁 열매 갈고리에 대한 면밀한 관찰에서 시작되었으며, Lotusan 또한 한 연구자의 장기간에 걸친 인내와 노력이 기내용 잡지에 소개되면서 발견 후 20년이 지난 시점에서야 건축용 페인트 전문기업에 의해 사업화되었다. GOJO의 자연모방 기술혁신 기반 배출기 또한 연구부서에서 자체적으로 시작된 것이 아니라 경영진의 의지를 바탕으로 5년에 걸친 비영리 기구, 대학과의 공동 R&D 프로그램과 별도의 조직 구성에 의해 이루어졌다. 그 덕분에 GOJO는 단발성이 아닌 지속적인 자연모방 기술혁신을 달성하였으며, 그 파급효과는 인력 투입과 R&D 예산 절감까지 이어졌다. 이러한 사실은 와해적 혁신 전략 실행의 관점에서 자연모방 환경 혁신을 추진한다면 동식물의 형태, 환경 적응 및 진화 과정, 시스템 등 다양한 수준에서 기술혁신 성과를 창출할 수 있음을 시사한다.

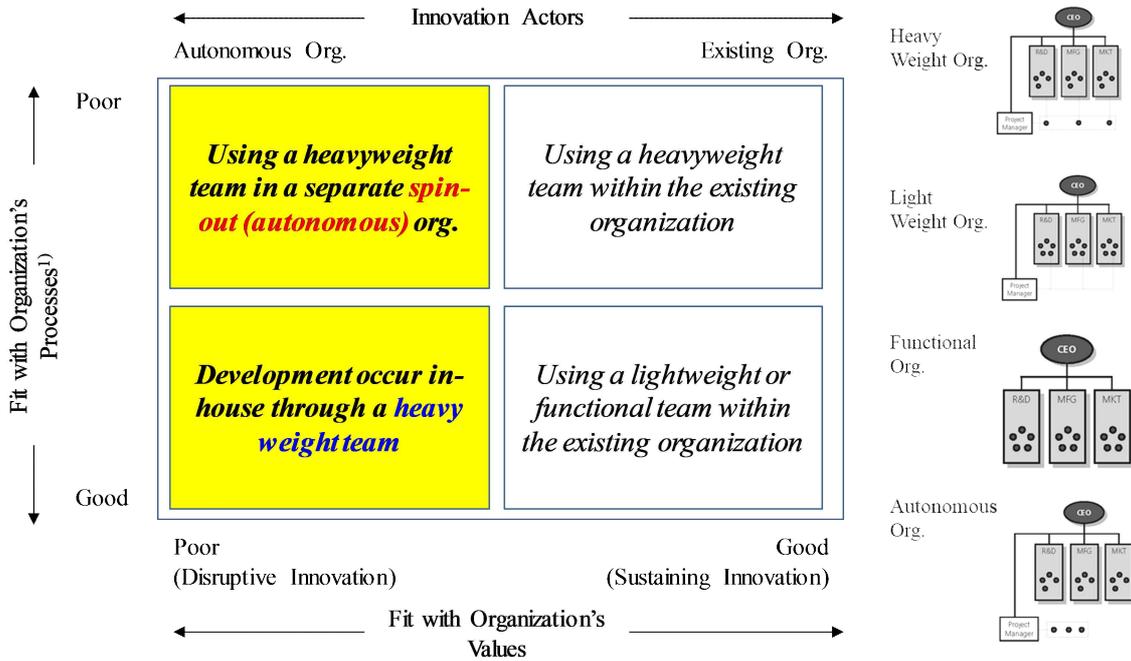
그럼에도 불구하고 위와 같은 자연모방 기술혁신의 대표 사례들은 아직까지 기존 기술 또는 선도 기업을 파괴하지는 못하고 있다. 대표적인 환경 혁신을 위한 와해적 혁신 사례인 전기자동차와 양모 기반 친환경 스니커즈 또한 각각 최초 제품 출시 이후 35년과 100년이 지난 시점에서야 겨우 확산 모형 내조기 수용자(early adopter)에 채택되었다.⁽⁶⁷⁻⁶⁹⁾ 이를 고려하면 자연모방 기술혁신이 와해적 혁신 성과를 달성하기 위해서는 보다 중장기적이고 지속적인 관점에서 자연모방 기술혁신을 추진해야 함을 시사한다.

더욱이 자연모방 기술은 1장에서 간단히 살펴본 바와 같이 다양한 기술적 한계에 직면해 있다.⁽⁷⁰⁾ 먼저 ‘확장성’의 한계는 마이크로 또는 나노미터 수준에서는 구현되는 성능이 실제 사람이 사용하는 매크로(scale) 수준에서는 구현이 어려운 한계를 의미한다. 예를 들어 게코 도마뱀 발바닥의 점착 메커니즘은 매크로 수준에서는 마찰력 등의 영향으로 구현이 어렵다. 둘째, 생물학적 소재를 대체할 수 있는 ‘인공 소재 합성’은 많은 기술적 난관에 봉착해 있다. 예를 들어 거미줄을 인공적으로 만들기 위해 화학합성, 유전공학적 접근이 있었으나 거미줄의 구조 및 이에 기반한 유연성, 내열성, 탄성률, 밀도, 자외선 내성(강도)을 구현하는 것은 여전히 연구개발 단계에 머물러 있다.⁽¹²⁾ 셋째, ‘설계 복잡성’으로 기본적으로 성장과 진화에 초점을 둔 동식물의 구성이 공학적 응용 관점에서는 적합하지 않다는 점이다. 이에 따라 자연모방 기술혁신은 대량생산의 어려움, 틈새시장 적용 한계, 소비자 인식 부족 등의 어려움에 빠져 있으며, 종래에 상용화 실적(track record) 부족이 누적되고 있다.⁽³¹⁾ 이는 자연모방 기술이 환경혁신을 넘어 탄소중립을 달성하기 위해서는 와해적 혁신 관점의 기업 전략 수립·실행과 정부의 중장기적이면서 전략적인 지원이 필요함을 시사한다. 이는 4장에서 보다 자세히 살펴보겠다.

4. 결론: 탄소중립을 위한 자연모방 기술혁신 전략과 정책 과제

먼저 자연모방 기술 기반 와해적 혁신을 추구하는 기업은 자연모방 기술을 중장기적 관점에서 기업의 주요 혁신 수단으로 인식하여 투자할 필요가 있다. 왜냐하면 자연모방 기술혁신이 요구하는 실패와 시행착오의 용인, 다양한 실험 장려, 모호성에 대한 인내, 다학제 전문가의 참여 등은 단기적인 R&D 활동에서는 허용될 수 없기 때문이다.⁽⁷⁾ 실제로 자연모방 기술을 비용 절감, 기술 문제 해결 관점에서 일시적으로 활용한 기업, 기존 제품·서비스의 점진적 혁신 도구로 인식한 기업들이 제한적 성과를 달성했다는 점,⁽⁷⁾ 평균 6년, 최장 23년에 이르는 자연모방 기술사업화 소요 기간⁽³⁴⁾을 고려하면 중장기적 관점을 견지하는 것은 매우 중요하다. 즉, 기업은 자연을 자원의 더미(bank of resource)가 아니라 주주와 같은 중요한 이해관계자로 인식해야 할 것이다.

둘째, 중장기적 접근 속에서도 사업화 성과를 달성할 수 있는 조직을 운영해야 할 것이다. 그 시작은 아래 Fig. 2와 같이 자연모방 기술혁신 관련 부서 독립적으로 운영(분사 또는 스타트업)하거나 중량급(heavyweight) 부서를 기업 내부에 설치하여 운영하는 것이다.⁽⁷¹⁾ 먼저 자연모방 기술혁신이 기업의 기존



1) Interaction, Communication, Collaboration, Decision Making, and so on
 Source: Authors' analysis based on Christensen and Overdorf (2000), Wheelwright and Clark (1992), and Schilling(2012)

Fig. 2 Organization design for biomimicry innovation

운영 방식 및 추구 가치와 부합하지 않는다면, 해당 부서를 기업에서 완전히 분리하여 독립적으로 운용하는 것이 적절하다. 이를 위해 부서장은 기업 내 최고참급을 선임하며, 기존 기업과 구분되는 독자적인 비용·수익구조를 확보하는 것이 필요하다.

만약 자연모방 기술혁신이 기업의 기존 운영 방식과는 부합하나, 가치 제안과는 부합하지 않는다면 기능 부서 구성원들을 파견하여 프로젝트 책임자에 권한을 부여하는 중량급 부서 운영이 적절하다. 이는 앞서 GOJO 사례에서 살펴보았던 다기능 운영팀보다 더욱 프로젝트에 매진(참여율 100%까지 가능)하는 것으로, 파견 인력들은 전적으로 프로젝트 책임자의 지시에 따르게 된다. 이와 같은 자연모방 기술혁신 담당 부서 운영의 자율성 확보를 통해 기업은 기존 고객의 압력으로부터 자율성을 확보(resource dependence 극복)할 수 있을 뿐 아니라, 와해적 혁신 초기의 작은 시장 규모에 적합한 운영 구조를 확보할 수 있다. 특히 자연모방 기술혁신을 추진하는 기업이 중소 또는 벤처기업이라면 내부 보유 자원 부족을 극복하기 위해 응용연구 및 상업적 타당성 검증(proof-of-concept) 단계에서 산학연 협력에 집중하고 생산 파트너를 확보하는 데 많은 노력을 기울여야 할 것이다.⁽³⁴⁾

한편 정부는 자연모방 기술혁신을 탄소중립 달성을 위한 중요한 기술적 수단으로 인식하고 환경 혁신에 대한 공헌도에 기반하여 R&D 지원의 우선순위를 정립할 필요가 있다. 자연모방 기술혁신 별로 (1) 환경 효율성, (2) 환경 효과성에 대한 공헌도가 각기 다른 만큼,⁽⁵⁾ R&D 프로그램 및 과제를 각 정책 목표에 연계하고 환경 혁신에 대한 파급효과를 중심으로 예산을 배정하는 등 체계적인 지원을 수행할 필요가 있다. 특히 자연모방 기술혁신이 발견, 탐사, 시행착오, 실패 등의 반복과 같이 우연적 혁신 (serendipitous innovation) 특성이 강한 만큼,⁽⁸⁾ 정부 또한 중장기적 관점의 지원을 견지해야 한다. 그럼에도 불구하고 기술혁신 활동을 지속할 수 있도록 틈새시장 공략과 신시장 창출이 가능한 사업화 기획과 추진을 유도하고 이에 대한 지원과 평가 방안도 마련해야 할 것이다. 일례로 독자적 기술개발 로드맵, 기술 수준 평가, 선진국·기관과의 격차 조사 등도 필요할 것이다. 이미 일본은 2000년대 중후반 자연모방 환경 혁신의 대량 생산기술에 대한 기획 및 지자체 수준에서 자연모방 환경 혁신의 잠재력을 조사한 바 있어,⁽⁷²⁾ 우리나라 또한 조속히 대책을 마련해야 할 것이다.

Table 3 Tools in biomimicry-based new product development process steps

| Step | Tools (example) |
|---|---|
| 1. Problem definition and analysis | <ul style="list-style-type: none"> ▪ LP (life's principles): Providing design patterns for existing organisms ▪ KLP (KARIM's version of LP): KARIM (knowledge acceration and responsible innovation meta network): Developed by Europe based on LP. More explanations on questions, benefits, and biological/technical examples for each design pattern than LP |
| 2. Biological reframing | <ul style="list-style-type: none"> ▪ IP (inventive principles): Consisting of 40 invention and design principles that can solve defined problems ▪ BIOPS (biology inspired problem solving): Serving as a dictionary that starts from a technical problem and connects it to a biological structure |
| 3. Discovery and selection of biological models | <ul style="list-style-type: none"> ▪ AskNature: Web-based search engine for natural phenomena to support design ideas and applications ▪ 4-box & T-chart: Tool to analyze and evaluate problems, defined in four dimensions, i.e., operating environment, function, technical specifications, and performance criteria, in terms of biological characteristics |
| 4. Abstraction of design principle extraction | <ul style="list-style-type: none"> ▪ DANE (design analogy to nature engine): SBF (structure-behavior-function): Copyright database for model-based functional design ▪ SaPPhIRE (state change, action, part, phenomenon, input, organ and effect model) <ul style="list-style-type: none"> - Explains the structure and functional information of natural and technological systems based on causal relationships - Characterized by emphasizing functions from a physical perspective |
| 5. Design principle application | <ul style="list-style-type: none"> ▪ IP (inventive principles): Consisting of 40 invention and design principles that can solve defined problems ▪ BioCards: Formal descriptions of biological phenomena and their underlying functional principles, used as communication tool among design engineers |
| 6. Implementation and evaluation | <ul style="list-style-type: none"> ▪ Customized evaluation tools for design under the context of initial setting corresponding to the operation |

Source: authors' analysis based on Appio et al.,⁽⁷³⁾ Fayemi et al.,⁽³⁰⁾ Qureshi,⁽⁷⁴⁾ and Rovalo et al.⁽³¹⁾

또한 정부는 자연모방 기반 환경 혁신에 대한 대중 홍보와 초중등 교육 강화에 힘을 쏟을 필요가 있다. 왜냐하면 과거의 자연모방 기술혁신 사례는 많은 경우, 가격에 민감한 주류 소비자의 채택이 어려웠으며, 학제적 특성으로 인해 자발적인 학습과 이해를 기대하기가 쉽지 않기 때문이다.⁽³³⁾ 이에 정부는 자연모방 기술개발의 경제·사회적 중요성은 물론, R&D 단계별로 필요한 도구에 대한 교육 프로그램·콘텐츠 개발(Table 3), 모방 수준 별 기술사업화 모범 사례 발굴·확산 등의 정책을 추진할 것을 제안한다.

이러한 자연모방 기술혁신 정책은 선진국뿐 아니라 신흥국에서도 본격적으로 추진될 필요가 있다. 왜냐하면 신흥국은 다양한 생물자원(종)의 부국으로서 자연모방 기술혁신을 통한 지식집약적 산업 육성과 부가가치 창출 잠재력이 높기 때문이다.⁽⁸⁾ 이미 우리는 Table 1에서 자연모방 기술혁신에 뛰어난 다양한 개도국 스타트업들을 확인하였으나, 이들은 자국 내 교육 및 연구기관 부재에 따른 전문인력 부족, 투자 유치 및 정부 R&D 부족, 생태관광(eco tourism) 산업 육성에 따른 생물자원 활용에 대한 과도한 규제 등의 어려움에 직면해 있다.⁽⁸⁾ 이러한 어려움이 지속된다면 이들은 빠른 성장을 위해 인력 확충, 투자 유치 및 R&D 지원이 용이한 선진국으로 이전할 수 있다. 따라서 개도국 정부는 자국 내 자연모방 기술 역량 축적을 위한 혁신 생태계·클러스터 조성, 학제적 전문 인력 양성, 그리고 생태관광 산업과 자연모방 기술혁신 간 공진화 정책 수립에 앞장서야 할 것이다.

본고는 환경 혁신 및 탄소중립을 달성할 수단으로써 자연모방 기술의 경제·사회적 잠재력에 주목하고, 모방 수준별(형태, 진화 과정, 시스템) 성공 사례를 와해적 혁신 이론의 관점에서 체계적으로 설명했다는 점에서 이론적 의의를 가진다. 이를 통해 향후 국내 자연모방 기술혁신의 논의를 공학과 생물학에서 사회과학 분야로 확장시키는데 기여할 수 있다. 특히 기업의 전략과 정부 정책을 제안함으로써 향후

자연모방 기반 환경 혁신 성과가 촉진될 수 있을 것으로 기대된다. 그럼에도 불구하고 본고는 탄소중립의 중요한 축인 복원력 달성에서의 자연모방 기술혁신의 역할은 구체적으로 제시하지 못하였다. 특히 도시화에 따른 인구 집중과 그에 따른 기반 시설에 대한 수문학적 부하가 심화되고 있다.⁽⁷⁵⁾ 그러나 현재로서는 복원력과 관련한 자연모방 기술혁신은 벌집 구조, 굴 껍데기 등 형태 수준에 그치고 있다.⁽⁶⁾ 따라서 동식물의 진화 과정 및 시스템과 관련한 모방 사례가 확산되어 보다 과급력이 큰 복원력 관련 성과 창출이 필요하다. 이는 자연모방 기술혁신이 틈새시장 창출의 한계를 넘어 주류 시장에서의 혁신을 달성하는데 중요한 역할을 할 것이다.⁽⁶⁾ 향후 다양한 성공 사례의 탄생을 통해 자연모방 기술혁신이 기후 변화에 따른 재난·재해로부터의 복원력 달성에도 이바지하길 기대한다.

후 기

본 논문은 국립한밭대학교 2023학년도 교내학술연구비 지원을 받아 수행된 연구입니다.

참고문헌 (References)

- (1) Kim, C. H., Oh, S. H., Kim, H. T., Lee, J. E. and Park, J. Y., 2021, "Global Carbon Neutrality Trends and Implications," *Technology Policy*, Vol. 101, pp. 1~30.
- (2) Government of the Republic of Korea, 2020, *Korea's 2050 Carbon Neutrality Strategy for Sustainable Green Society*, Government of the Republic of Korea, Seoul, Republic of Korea, pp. 1~120.
- (3) Related Government Ministry of Korea, 2021, *2030 National Greenhouse Gas Reduction Target (NDC) Enhancement Proposal*, Related Government Ministry of Korea, pp. 1~39.
- (4) Seebode, D., Jeanrenaud, S. and Bessant, J., 2012, "Managing Innovation for Sustainability," *R&D Management*, Vol. 42, No. 3, pp. 195~206.
- (5) Hayes, S., Desha, C. and Baumeister, D., 2020, "Learning from Nature-Biomimicry Innovation to Support Infrastructure Sustainability and Resilience," *Technological Forecasting and Social Change*, Vol. 161, Article 120287.
- (6) Ministry of Environment, 2022, *A Closer Look at the Paris Climate Agreement*, Ministry of Environment, Sejong, Republic of Korea, pp. 1~76.
- (7) Mead, T., Jeanrenaud, S. and Bessant, J., 2020, "Factors Influencing the Application of Nature as Inspiration for Sustainability-Oriented Innovation in Multinational Corporations," *Business Strategy and the Environment*, Vol. 29, No. 8, pp. 3162~3173.
- (8) Lebdoui, A., 2022, "Nature-Inspired Innovation Policy: Biomimicry as a Pathway to Leverage Biodiversity for Economic Development," *Ecological Economics*, Vol. 202, Article 107585.
- (9) Lurie-Luke, E., 2014, "Product and Technology Innovation: What Can Biomimicry Inspire?" *Biotechnology Advances*, Vol. 32, No. 8, pp. 1494~1505.
- (10) Kennedy, E., Fechey-Lippens, D., Hsiung, B., Niewiarowski, P. H. and Kolodziej, M., 2015, "Biomimicry: A Path to Sustainable Innovation," *Design Issues*, Vol. 31, No. 3, pp. 66~73.
- (11) Kennedy, E. B. and Marting, T. A., 2016, "Biomimicry: Streamlining the Front End of Innovation for Environmentally Sustainable Products," *Research Technology Management*, Vol. 59, No. 4, pp. 40~48.
- (12) Oh, T. G., 2022, "Current Status of Biomimetic Technology Research and Development (First Volume)," *BioINpro*, Vol. 104, pp. 1~22.
- (13) Park, K. T., 2015, *An Air Conditioner Fan Modeled after a Humpback Whale Fin*, Korea Economic Magazine Co. Ltd, Seoul, Republic of Korea.
- (14) Pavitt, K., 1984, "Sectoral Patterns of Technical Change: Towards a Taxonomy and a Theory," *Research*

- Policy*, Vol. 13, No. 6, pp. 343~373.
- (15) Kim, S. K., 2004, *Innovation Patterns and Strategies of Pharmaceutical Industry*, Science & Technology Policy Institute, Sejong, Republic of Korea, pp. 1~229.
- (16) Dubois, A. and Gadde, L. E., 2002, "Systematic Combining: an Abductive Approach to Case Research," *Journal of Business Research*, Vol. 55, No. 7, pp. 553~560.
- (17) Tavory, I. and Timmermans, S., 2014, *Abductive Analysis: Theorizing Qualitative Research*, University of Chicago Press, Chicago, USA, pp. 1~176.
- (18) Van Maanen, J., Sørensen, J. B. and Mitchell, T. R., 2007, "The Interplay between Theory and Method," *Academy of Management Review*, Vol. 32, No. 4, pp. 1145~1154.
- (19) Mills, A. J., Durepos, G. and Wiebe, E., 2010, *Encyclopedia of Case Study Research*, SAGE Publications Inc., Thousand Oaks, USA, pp. 1~1106.
- (20) Timmermans, S. and Tavory, I., 2012, "Theory Construction in Qualitative Research: From Grounded Theory to Abductive Analysis," *Sociological Theory*, Vol. 30, No. 3, pp. 167~186.
- (21) Yin, R. K., 2014, *Case Study Research: Design and Methods*, Sage Inc., London, UK, pp. 1~282.
- (22) Chirazi, J., 2022, "Commercialization Journeys: Bringing Biomimetic Innovation to the Market," *Biomimicry for Materials, Design and Habitats*, Elsevier, Amsterdam, Netherlands, pp. 393~436.
- (23) Christensen, C., 1997, *The Innovator's Dilemma: When New Technologies Cause Great Firms to Fail*, Harvard Business Review Press, Boston, USA, pp. 1~225.
- (24) Hart, S. L. and Milstein, M. B., 2003, "Creating Sustainable Value," *Academy of Management Perspectives*, Vol. 17, No. 2, pp. 56~67.
- (25) Biomimicry 3.8, 2017, *Sto Case Study Spreads* (https://issuu.com/biomimicry38/docs/sto_case_study_spreads), Issuu Inc., Palo Alto, USA.
- (26) Business Research Company, 2024, *Hand Sanitizer Dispenser Global Market Report 2024 - By Type, By Modality, By Price Point, By Distribution Channel - Market Size, Trends, and Global Forecast*, Business Research Company, London, UK, pp. 2024~ 2033.
- (27) Benyus, J. M., 1997, *Biomimicry: Innovation Inspired by Nature*, William Morrow, NewYork, USA, pp. 1~308.
- (28) Benyus, J. M., 2011, *A Biomimicry Primer*, Biomimicry 3.8, Missoula, USA, pp. 1~8.
- (29) Hayes, S., Desha, C. and Baumeister, D., 2020, "Learning from Nature-Biomimicry Innovation to Support Infrastructure Sustainability and Resilience," *Technological Forecasting and Social Change*, Vol. 161, Article 120287.
- (30) Fayemi, P. E., Wanieck, K., Zollfrank, C., Maranzana, N. and Aoussat, A., 2017, "Biomimetics: Process, Tools and Practice," *Bioinspiration and Biomimetics*, Vol. 12, No. 1, Article 011002.
- (31) Rovalo, E., McCardle, J., Smith, E. and Hooker, G., 2020, "Growing the Practice of Biomimicry: Opportunities for Mission-Based Organisations Based on a Global Survey of Practitioners," *Technology Analysis and Strategic Management*, Vol. 32, No. 1, pp. 71~87.
- (32) Kim, S. W., 2022, "Part 04. Smart Maintenance Solutions for Aging Sewer Pipelines," *Water Journal*, Vol. 215, pp. 1~87.
- (33) Kwak, K. H. and Park, H. J., 2013, "Nature Inspired Technology and Industrial Economy," *Journal of the KSME*, Vol. 53, No. 2, pp. 54~61.
- (34) Chirazi, J., Wanieck, K., Fayemi, P., Zollfrank, C. and Jacobs, S., 2019, "What Do We Learn from Good Practices of Biologically Inspired Design in Innovation?," *Applied Sciences*, Vol. 94, Article 650.
- (35) Fermanian Business & Economic Institute, 2013, *Bioinspiration: An Economic Progress Report*, Point Loma Nazarene University, San Diego, USA, pp. 1~46.

- (36) National Institute of Ecology, 2020, *Link Between Nature and Economy: A New Direction for Korea*, National Institute of Ecology, Seochon, Republic of Korea, pp. 1~40.
- (37) Sutton, R. I. and Staw, B. M., 1995, "What Theory is Not," *Administrative Science Quarterly*, Vol. 403, pp. 371~384.
- (38) Christensen, C. and Raynor, M., 2003, *The Innovator's Solution: Creating and Sustaining Successful Growth*, Harvard Business Review Press, Boston, USA, pp. 1~320.
- (39) Christensen, C., Raynor, M. and McDonald, R., 2015, "What is Disruptive Innovation," *Harvard Business Review*, Vol. 93, No. 12, pp. 44~53.
- (40) Cha, M. S., 2023, "The Ad-hoc of Disruptive Innovation and A Typology of Transformational Innovations: Tesla Case of Avalanche Innovation and Exemplars of Authentic Entrepreneurship," *Journal of Entrepreneurship Studies*, Vol. 4, No. 1, pp. 79~107.
- (41) Christensen, C., Grossman, J. H. and Hwang, J., 2009, *The Innovator's Prescription: A Disruptive Solution for Health Care*, McGraw-Hill, New York, USA, pp. 1~441.
- (42) Govindarajan, V. and Kopalle, P. K., 2006, "The Usefulness of Measuring Disruptiveness of Innovations Ex Post in Making Ex Ante Predictions," *Journal of Product Innovation Management*, Vol. 23, No. 1, pp. 12~18.
- (43) Lee, H. J., Kim, K. S. and Kim, M. R., 2016, "Understanding Disruptive Innovation from a Market Perspective," *Korea Business Review*, Vol. 20, No. 1, pp. 43~68.
- (44) Adner, R., 2002, "When are Technologies Disruptive? A Demand-Based View of the Emergence of Competition," *Strategic Management Journal*, Vol. 23, No. 8, pp. 667~688.
- (45) Ansari, S. and Krop, P., 2012, "Incumbent Performance in the Face of a Radical Innovation: Towards a Framework for Incumbent Challenger Dynamics," *Research Policy*, Vol. 41, pp. 1357~1374.
- (46) Husig, S., Hipp, C. and Dowling, M., 2005, "Analysing Disruptive Potential: The Case of Wireless Local Area Network and Mobile Communications Network Companies," *R&D Management*, Vol. 35, No. 1, pp. 17~35.
- (47) Klenner, P., Hüsig, S. and Dowling, M., 2013, "Ex-ante Evaluation of Disruptive Susceptibility in Established Value Networks—When are Markets Ready for Disruptive Innovations?," *Research Policy*, Vol. 42, No. 4, pp. 914~927.
- (48) Kim, G. T., 2004, *Be Reborn as a Disintegrating Innovator*, LG Weekly Economy, Seoul, Republic of Korea, pp. 16~20.
- (49) Lee, S. H., 2009, *The Unstoppable Evolution of Digital Cameras* (<https://www.newswire.co.kr/newsRead.php?no=426268>), SERI, Seoul, Republic of Korea.
- (50) Wilson, C. and Tyfield, D., 2018, "Critical Perspectives on Disruptive Innovation and Energy Transformation," *Energy Research and Social Science*, Vol. 37, pp. 211~215.
- (51) Sprei, F., 2018, "Disrupting Mobility," *Energy Research & Social Science*, Vol. 37, pp. 238~242.
- (52) Dutschke, E. and Wesche, J. P., 2018, "The Energy Transformation as a Disruptive Development at Community Level," *Energy Research & Social Science*, Vol. 37, pp. 251~254.
- (53) Shang, T. T., Miao, X. M., Lu, D. and Xin, X. H., 2020, "The Evolutionary Process of Disruptive Green Innovation in China: Evidence from the Electric Bicycle Sector," *Technology Analysis & Strategic Management*, Vol. 32, No. 8, pp. 910~922.
- (54) Garmulewicz, A., Holweg, M., Veldhuis, H. and Yang, A., 2018, "Disruptive Technology as an Enabler of the Circular Economy: What Potential Does 3D Printing Hold?" *California Management Review*, Vol. 60, No. 3, pp. 112~132.
- (55) Roberts, R. M., 1989, *Serendipity: Accidental Discoveries in Science*, Wiley, New York, USA, pp. 1~288.

- (56) Electronic Industry, 2010, “George de Mestral’s Magic Tape Invention,” *Elenews*, Seoul, Republic of Korea (<http://m.elenews.co.kr/news/articleView.html?idxno=2618>).
- (57) Business Research Insights, 2023, *Hook&Loop Market Size, Share, Growth, and Industry Analysis By Type By Application Regional Forecast to 2031*, Business Research Insights, Maharashtra, India, pp. 1~134.
- (58) Cooper, T., 2023, “Sustainability and Biomimicry,” *Bachelor of Science*, Williams Honors College, Akron, USA.
- (59) Lin, J., Cai, Y., Wang, X., Ding, B., Yu, J. and Wang, M., 2011, “Fabrication of Biomimetic Superhydrophobic Surfaces Inspired by Lotus Leaf and Silver Ragwort Leaf,” *Nanoscale*, Vol. 3, No. 3, pp. 1258~1262.
- (60) Antony, F., Grießhammer, R., Speck, T. and Speck, O., 2016, “The Cleaner, the Greener? Product Sustainability Assessment of the Biomimetic Façade Paint Lotusan® in Comparison to the Conventional Façade Paint Jumbosil®,” *Beilstein Journal of Nanotechnology*, Vol. 71, pp. 2100~2115.
- (61) Korea Institute of Machinery & Materials, 2012, “Nature Inspired Technology and Industrial Economy,” *KIMM Technology Policy*, Vol. 6, No. 8, pp. 1~28.
- (62) Sto SE & Co. KGaA, 2023, *2022 Annual Report*, Sto SE & Co. KGaA, Stühlingen, Germany, pp. 1~142.
- (63) Kim, J. H., 2015, “The Cleanup Function of Antifreeze and Lotus Leafs in Penguin’s Body: Creating a Market in Nature’s Function,” *DBR*, Seoul, Republic of Korea (https://dbr.donga.com/article/view/1203/article_no/6948).
- (64) Joongangilbo USA, 2016, “A Lotus Leaf with Self-Cleaning Function that Keeps itself Clean,” *Joongangilbo USA*, Los Angeles, USA (<https://news.koreadaily.com/2016/11/21/society/generalsociety/47869933.html>).
- (65) Seebode, D., Jeanrenaud, S. and Bessant, J., 2012, “Managing Innovation for Sustainability,” *R&D Management*, Vol. 42, No. 3, pp. 195~206.
- (66) Summerville, A. and Sen, A., 2023, “Sale of Maker of Purell Hand Sanitizer Falls Flat,” Reuters, London, UK (<https://www.reuters.com/markets/deals/sale-maker-purell-hand-sanitizer-falls-flat-sources-2023-06-27/>).
- (67) Bohnsack, R. and Pinkse, J., 2017, “Value Propositions for Disruptive Technologies: Reconfiguration Tactics in the Case of Electric Vehicles,” *California Management Review*, Vol. 594, pp. 79~96.
- (68) Dijk, M., Wells, P. and Kemp, R., 2016, “Will the Momentum of the Electric Car Last? Testing an Hypothesis on Disruptive Innovation,” *Technological Forecasting and Social Change*, Vol. 105, pp. 77~88.
- (69) Kwak, K., Kim, D. and Heo, C., 2023, “Sustainable Innovation in a Low - and Medium-Tech Sector: Evidence from an SME in the Footwear Industry,” *Journal of Cleaner Production*, Vol. 397, Article 136399.
- (70) Cohen, Y. H. and Reich, Y., 2016, *Biomimetic Design Method for Innovation and Sustainability*, Springer, Berlin, Germany, pp. 1~284.
- (71) Christensen, C. and Overdorf, M., 2000, “Meeting the Challenge of Disruptive Change,” *Harvard Business Review*, Vol. 78, No. 2, pp. 66~77.
- (72) Chungnam Techno Park, 2016, *Planning Report for the Establishment of the Nature Inspired Technology Industrialization Support Center*, Chungnam Techno Park, Cheonan, Republic of Korea, pp. 1~171.
- (73) Appio, F. P., Achiche, S., Martini, A. and Beaudry, C., 2017, “On Designers’ Use of Biomimicry Tools during the New Product Development Process: An Empirical Investigation,” *Technology Analysis & Strategic Management*, Vol. 29, pp. 775~789.
- (74) Qureshi, S., 2022, “How Students Engage in Biomimicry,” *Journal of Biological Education*, Vol. 56, No. 4, pp. 450~464.
- (75) Kang, J. E., 2012, “An Assessment of Flood Mitigation Policies Integrated in Local Comprehensive Plans: The Case of Florida in the United States,” *Journal of Environmental Policy*, Vol. 11, No. 4, pp. 59~84.

플립 러닝과 문제 중심 학습 교수법을 적용한 수치해석 교과 설계 및 운영 연구

이 민 우^{*†}

* 국립한밭대학교 기계공학과

Incorporation of Flipped Learning and Problem-Based Learning Methods for the Numerical Analysis Course Design

Minwoo Lee^{*†}

* Dept. of Mechanical Engineering, Hanbat Nat'l Univ.

(Received March 17, 2024 ; Revised June 10, 2024 ; Accepted June 10, 2024)

Key Words: Flipped Learning(플립 러닝), Problem-Based Learning(문제 중심 학습), Engineering Education (공학 교육), Numerical Analysis(수치해석)

초록: 에듀테크의 보급으로 시작된 전통적인 공학 교육 체계의 변화는 코로나 19 팬데믹을 거치며 혁신적 교수학습법에 대한 수요 증대로 이어지고 있다. 본 논문에서는 이러한 공학 교육 패러다임을 적용한 기계공학과 수치해석 교과목의 설계 및 운영에 관한 연구 결과를 제시한다. 구체적으로, 대표적인 혁신 교수법인 플립 러닝과 문제 중심 학습 기법을 수치해석 교과에 적용하여 이론 및 실습 교육을 병행한 수업 설계를 제시하고 4년간의 교과 운영 과정에서 습득한 주요 함의를 분석하고자 하였다. 분석 결과, 제안된 교수법을 통해 수치해석 교과에서 학습자의 만족도, 성취도 및 메타인지를 개선할 수 있을 것으로 판단하였다.

Abstract: The demand for innovative teaching and learning methods in engineering education keeps escalating as a result of the dissemination of EduTech, especially after the COVID-19 pandemic. In this paper, we propose and analyze an innovative engineering education exercise that incorporates the such engineering education paradigm, focusing on the numerical analysis course in the department of mechanical engineering. Specifically, we present the course design that comprises flipped learning and problem-based learning, and analyze the implications of three years' course operation. The results suggest that the proposed education methods can improve learners' metacognition, satisfaction and achievement levels.

1. 서 론

지난 수십 년간 영상 매체와 전자기기의 발달로 광범위한 교육 혁신이 지속되어 왔다. 특히, 전통적인 교육 체계에 대한 대안으로 동영상 강의를 이용한 ‘교실 밖 학습(learning outside the classroom)’ 프로그램이 20세기 말 고안되어 21세기 초까지 보급되었으며, 시공간의 제약을 넘은 교육에 대한 관심으로 각급 교육에 세계적으로 활발히 적용되었다.⁽¹⁾ 그러나, 이 시기 공학 교육에서는 비대면 교수학습이 다른 분야에 비해 다소 비선호되었는데, 이는 실습과 설계 등 동영상 강의로는 대체가 어려운 다수 공학 과목의 내재적 특성에 기인하는 것으로 평가되었다.⁽²⁾ 또한, 비교적 최근까지도 강의 이해도와 학습 경험, 평가의 공정성 측면에서 다수의 학습자가 비대면 학습을 선호하지 않는 추세가 지속되어 왔다.^(3,4) 하지만

† Corresponding Author, mwlee@hanbat.ac.kr

코로나-19 판데믹을 겪으며 모든 교육 체계의 비대면 전환이 강제되었고, 대학에서의 공학 교육 또한 전면적인 동영상 강의로 시행되었다.⁽⁵⁻⁷⁾ 이러한 과정에서 시공간적 유연성, 접근성 및 경제성 측면에서 비대면 교육의 장점이 재조명되었고, 판데믹 시기를 지나 포스트-코로나 교육 담론에서 비대면 학습이 빠질 수 없는 요소로서 주목받는 계기가 되었다. 일례로, 동영상 강의를 통한 예습, 복습 및 자율학습이 포함된 플립 러닝⁽⁸⁾과 액티브 러닝⁽⁹⁾ 등 혁신교수법이 공학 교육에 적용되고 있으며, 특히 비대면 공학 강의가 교수설계 측면에서 유용하게 활용되는 것으로 보고되었다.⁽¹⁰⁾

본 연구에서는 이러한 포스트-코로나 공학 교육 패러다임을 반영하여 기계공학과 수치해석 교과목을 4년간(2021 - 2024) 설계·운영한 사례를 제시하고, 이를 통해 얻은 주요 학습자 경험을 분석하고자 하였다. 구체적으로, 본 연구에서는 교과 설계에서 플립 러닝^(8,11)과 문제 중심 학습⁽¹²⁾을 주요 교수학습법으로 활용하였다. 플립 러닝, 또는 역진행 수업은 대면 수업 시 이론적 내용보다는 그와 관련된 과제에 대한 해결 등 실습에 집중하는 방식으로, 강의 전 동영상 등을 통한 지식 습득이 강조된다.⁽¹¹⁾ 문제 중심 학습은 학습자 위주의 교수학습 모형으로, 실제적 문제를 해결하는 과정에서의 학습을 도모한다.⁽¹²⁾ 수치해석 교과목은 다양한 알고리즘에 대한 코딩 실습 등 실제 문제 해결 능력이 중요시되는 교과로, 위 교수학습법을 적용하기에 적합한 과목으로 판단하였다. 또한, 이러한 과정에서 공학 문제의 수식화를 통해 다학제적이고 실제적인 공학 문제 해결에 대한 학습자의 관심을 유도하고자 하였다.

아래 2장에서는 플립 러닝과 문제 중심 학습을 적용한 교과 설계에 관해 기술하며, 효과적인 강좌 운영을 위해 활용한 구체적 교수법을 제시한다. 해당 교과에서 문제 중심 학습을 시행하기 위해 활용한 문제를 제시하도록 한다. 이어서 3장에서는 교과목 운영을 통해 얻은 결과를 강의평가와 학습자 메타인지 측면에서 분석하였으며, 이를 바탕으로 4장에서 결론을 도출한다.

2. 혁신교수법을 적용한 교과 설계

본 연구에서의 수업 설계는 상기한 바와 같이 크게 두 가지 개념을 적용하였다. 첫째는 플립 러닝으로, 온라인으로 사전에 공개한 동영상 강의를 통해 수치해석 이론을 강의 이전에 학습할 수 있도록 하고, 매주 대면 수업 중 이론 내용의 복습과 함께 부여되는 코딩 과제를 해결하도록 하였다. 이는 본 교과를 수강하는 학생들이 코로나 이후 비대면 공학 교육에 익숙한 세대로, 자율적인 학습이 가능한 동영상 강의를 선호하는 경향을 보이는 점을 감안한 것이다. 둘째는 문제 중심 학습으로, 이론과 관련된 간단한 코딩 문제 해결 방법을 강의한 후, 보다 난도가 높은 심화 문제를 교수·조교의 보조와 함께 수업 중 해결하도록 하였다. 또한, 후술할 바와 같이 학기 중 3회의 프로젝트 과제를 부여하여 수치적 문제를 스스로 발제하고 해결하도록 하였다.

전체적인 수업 운영 체계를 Fig. 1에 도시하였다. 본 강의는 MATLAB 등 수치해석 프로그램을 활용한 실습이 필수적이므로, 학기 초에 간단한 퀴즈를 통해 해당 프로그램에 대한 개별 학생의 이해도를 점검하고, 이해도가 낮은 학습자에게는 프로그램 사용법에 대한 기초적인 내용으로 구성된 별개의 동영상 강의를 제작하여 학습할 수 있도록 하였다. 이후, 8주차(중간고사) 및 15주차(기말고사)를 제외한 모든 주차에 ▲동영상 이론학습(비대면) → ▲이론 복습 및 코딩 실습(대면) → ▲교수와 조교가 보조하는 실습과제 해결(대면) 순서의 플립 러닝이 가능하도록 설계하였다. 학습자 중심 활동의 일환으로, 매주 대면 강의 시 이론으로 학습한 수치해석 내용을 MATLAB 코드에 반영하는 방법을 간단한 문제를 통해 강의(기본 실습)하고, 이보다 난이도가 높은 심화 실습 문제를 수업 시간 중 해결하여야 하는 개별 과제로 부여하였다. 심화 과제를 해결 완료하는 즉시 개별적으로 수업을 종료하고 귀가하도록 허용한 결과, 학생들이 자발적인 예습을 통해 심화 과제를 적극적으로 해결하고자 함을 관찰하였다. 또한, 실습 시 이해도가 낮은 학생을 위해 전년도 동일 과목에서 우수한 성적을 받은 학생을 조교로 활용하여 개별 피드백을 수행하였으며, 강의 종료 후 실습 코드를 온라인에 공개하여 복습을 유도하였다. 또한, 이론뿐 아니라 실습 내용도 중간/기말고사 범위에 포함하여 코딩 내용에 대한 이해를 적극적으로 독려하였다.

주차별 학습 내용과 기본·심화 실습 주제를 Table 1에 표기하였다. 예를 들어, 4주차에 개구간법을 통해

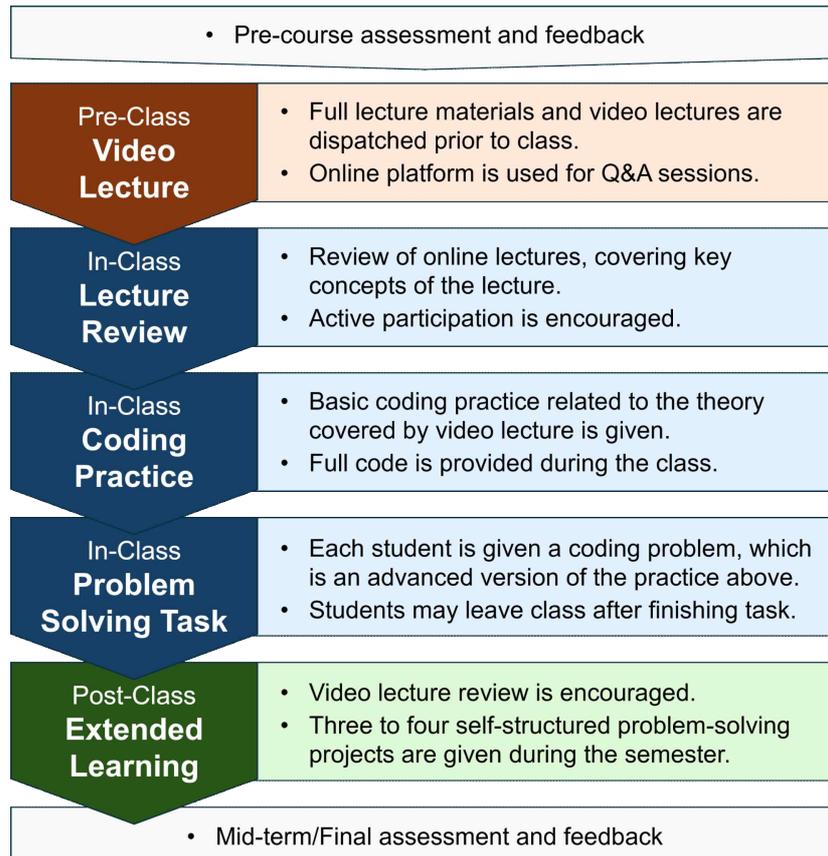


Fig. 1 Teaching and learning model incorporating the flipped learning and the problem-based learning methods

일변수 문제의 수치적 해를 찾는 방법을 사전 동영상 강의와 대면 복습을 통해 강의하고, 강의 중 뉴튼-랩슨법을 활용하여 다항함수의 해를 찾는 실습을 함께 수행하였다. 이후, 이보다 심화된 실습 과제인 뉴튼-랩슨법과 고정점 반복법의 수치적 효율을 비교하는 실습을 부여하여 문제 중심 학습의 일환으로 학습자의 자율적인 이해를 유도하였다. 중간, 기말고사 직전 주인 7주차, 14주차에는 기본 실습을 마친 후 심화 실습 과제를 부여하지 않고 그간 학습한 주요 내용에 대한 복습으로 이를 대체하였다. 또한, 학기 말미에는 대학원 고등수치해석 교과목의 주요 내용인 기계학습에 대한 개괄적인 소개를 포함한 이론 및 실제 연구 내용을 포함한 MATLAB 기계학습 실습^(13,14)을 학습 내용에 포함하여 심화 학습에 대한 관심을 유도하고 교육-연구 연계를 꾀하였다.

문제 중심 학습 측면에서 본 교과에서 부여한 과제는 Table 2와 같은 자율 프로젝트형으로, 학습 내용과 관련된 개략적인 주제만 부여하고 구체적인 과제는 학습자가 스스로 설계할 수 있도록 하였다. 예를 들어, 수치해를 구하기 위한 개구간법과 폐구간법의 차이 분석이라는 대주제를 제시하고 구체적인 문제는 학생 스스로가 부여하고 해결할 수 있도록 하였는데, 그 결과 난방을 통한 방 내부 온도 구하기, 발사체의 탄도 궤적 구하기 등 다양한 주제가 학습자로부터 발제되고 해결되었다. 이를 통해 실제 공학 문제와 그 해결 방법에 대한 학습자의 관심을 증대하고자 하였으며, 실제로 프로젝트형 과제 이후 수치해석 분야 연구에 관심을 가지고 학부연구생 등의 형태로 연구에 참여하고자 하는 사례가 있었다.

이러한 플립 러닝, 문제 중심 학습 교수학습법은 본 교과 운영 1차년도인 2021년에는 전면 비대면 강의로 인해 제한적으로만 수행하였고, 2 - 4차년도인 2022-2024년에 전면적으로 적용하였다. 구체적으로, 2021년도 강의에서는 동영상을 통해 강의와 실습을 진행하였고, 실습 내용에 대한 질의응답에 한해 대면 피드백을 수행하였다.

Table 1 Weekly learning contents and tasks in the proposed numerical analysis course

| Week | Learning contents (flipped learning) | Basic tasks | Advanced tasks |
|------|---|--|--|
| 1 | Introduction to numerical analysis, basic MATLAB practice | Drawing line and scatter plots using simple dataset | Drawing line and scatter plots for trigonometric and exponential functions |
| 2 | Error analysis | Calculating absolute and relative truncation errors using few Taylor terms | Calculating absolute and relative truncation errors of generalized Taylor series |
| 3 | Closed methods for solving one-variable problems | Implementing bisection and false position methods for polynomial functions | Implementing closed methods for trigonometric and exponential functions |
| 4 | Open methods for solving one-variable problems | Implementing Newton-Raphson method for a polynomial function | Comparing efficiency of Newton-Raphson and fixed-point iteration methods |
| 5 | Matrix analysis and review of linear algebra | Various methods for implementing Gaussian elimination using MATLAB | Implementing LU decomposition using MATLAB |
| 6 | Numerical methods for solving matrix problems | Implementation of Jacobi and Gauss-Seidel methods for solving a 3X3 matrix problem | Implementation of Jacobi and Gauss-Seidel methods for solving larger matrix problems |
| 7 | Numerical methods for solving matrix problems | Implementation of successive over-relaxation method for solving a matrix problem | N/A (Mid-term course review) |
| 8 | Mid-term examination | | |
| 9 | Interpolation | Lagrange and spline interpolation using given dataset | Derivation and implementation of higher-order Lagrange interpolation |
| 10 | Regression | Linear least-squares regression using given dataset | Polynomial and non-linear least-squares regression using given dataset |
| 11 | Numerical differentiation | First-order numerical differentiation of simple polynomial function | Second-order numerical differentiation of higher-order polynomial functions |
| 12 | Numerical integration | Implementing midpoint rule and trapezoidal rule for numerical integration | Implementing Simpson's 1 / 3 and 3 / 8 methods for numerical integration |
| 13 | Numerical methods for solving ordinary differential equations | Implementing forward Euler method for solving an initial value problem | Implementing Runge-Kutta method for solving an initial value problem |
| 14 | Special lecture in numerical analysis | Basic machine learning practice (signal and image processing) using MATLAB | N/A (final-term course review) |
| 15 | Final examination | | |

Table 2 Topics and examples of the self-designed projects

| Project number | Project topics | Projects proposed by learners (example) |
|----------------|--|--|
| 1 | Comparison of closed and open numerical methods for solving practical engineering problems | <ul style="list-style-type: none"> ● Finding the temperature in a room (transient heat transfer problem) ● Finding landing point of a cannon ball (trajectory formula) |
| 2 | Adjustment of successive over-relaxation method for fast solving of practical engineering problems | <ul style="list-style-type: none"> ● Estimating deflection of a bridge with a few elements (solid mechanics problem) |
| 3 | Comparison of numerical integration methods for solving self-designed nonlinear functions | <ul style="list-style-type: none"> ● Integration of trigonometric functions ● Integration of exponential and logarithmic functions |

Table 3 Survey of the present course in 2022 and 2023: number of learners taken the course was 54 (2022) and 81 (2023), while 53 (2022) and 78 (2023) students answered the survey (see Table 4)

| | Questions | Average score (present study) | Average score (college of engineering) | Average score (university) |
|------------------|---|-------------------------------|--|----------------------------|
| 1 | The course was systematically designed | 9.06 (2022) 8.97 (2023) | | |
| 2 | The essential contents of the course were clearly explained | 9.13 (2022) 8.97 (2023) | | |
| 3 | The lecturer was aware of the learners' level of understanding | 8.94 (2022) 8.87 (2023) | | |
| 4 | The lecturer sincerely consulted about exams, homework, and other questions | 9.13 (2022) 8.95 (2023) | | |
| 5 | Information about the course could be clearly understood from the course plan | 9.13 (2022) 8.95 (2023) | | |
| 6 | Homework helped me understand the lectures | 9.06 (2022) 8.95 (2023) | | |
| 7 | Knowledge about the course was improved from the lectures | 9.06 (2022) 8.92 (2023) | | |
| 8 | I was satisfied with the lectures | 9.06 (2022) 8.90 (2023) | | |
| 9 | Terms, concepts, and principles were clearly taught | 9.06 (2022) 8.92 (2023) | | |
| 10 | Lecture materials were well provided via online and offline platforms | 9.13 (2022) 8.95 (2023) | | |
| Score sum (2022) | | 90.75 | 87.91 | 87.51 |
| Score sum (2023) | | 89.36 | 88.85 | 88.71 |

3. 결과 및 분석

플립 러닝과 문제 중심 학습을 적용한 수치해석 교과 운영 결과를 Table 3 및 Fig. 2와 같이 분석하였다. 우선, 학습자 피드백 분석을 위해 Table 3에 학기말 강의평가 결과를 나타내었다. 강의평가는 본 연구에서 제시한 강좌 설계를 전면 적용하였고 평가가 완료된 2022 - 2023년 강의의 피드백 결과를 분석하였으며, 이를 공과대학 평균 및 전체 대학 평균과 비교하였다. 적용 1차년도인 2021년도는 상기한 바와 같이 전면 비대면 강의로 인해 본 연구의 강좌 설계를 전부 적용하지 못하였고, 2 - 3차년도와 다른 대학에서 강의를 이루어져 평가 항목 등에서 적절한 비교가 어려워 Table 3의 분석에서 제외하였다. 강의평가 점수는 Table 3과 같이 10개 문항의 합산으로 계산되며, 공과대학 평균 및 전체 대학 평균은 개별 문항에 대한 점수가 아닌 합산 점수만 제공되었다. 전체적인 강의평가 점수는 90.75점(2022년), 89.36점(2023년)으로, 공과대학 평균인 87.91점(2022년), 88.85점(2023년) 및 대학 평균인 87.51점(2022년), 88.71점(2023년)을 상회하는 것으로 나타났다. 이러한 결과를 바탕으로 플립 러닝, 문제 중심 학습 등 혁신교수법의 적용이 수치해석 강의 품질 향상에 기여할 수 있는 것으로 판단하였다. 강좌 운영 연도별 수강생과 분반 정보는 Table 4에 나타내었다.

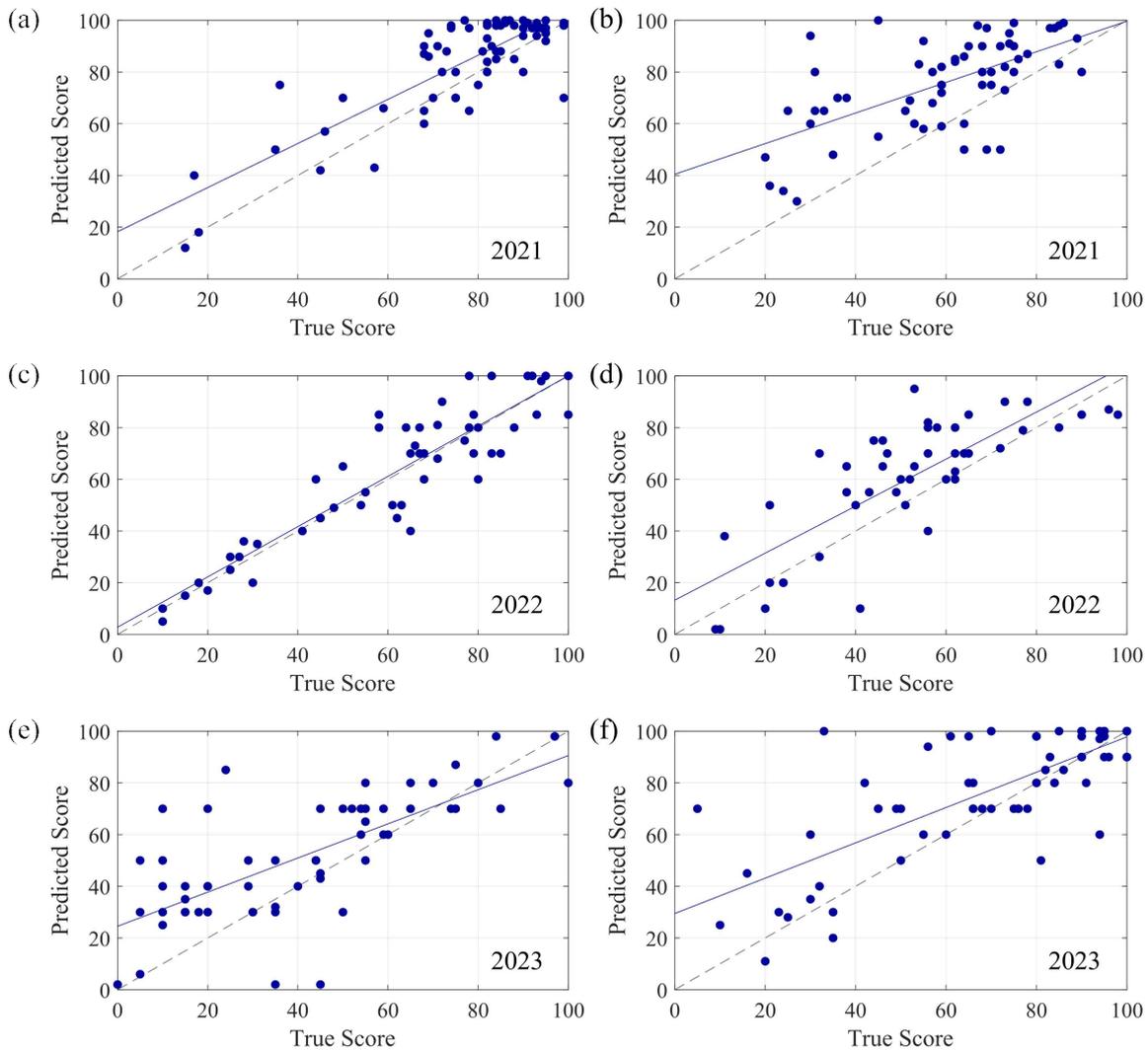


Fig. 2 True and predicted scores of mid-term (left column) and final (right column) exams during 2021 - 2023 numerical analysis course which used the course design of the present study. Blue lines are the linear regression and grey dashed lines indicate true guesses ($x = y$)

Table 4 Number of students and classes in 2021 - 2024 numerical analysis lecture

| | 2021 spring | 2022 spring | 2023 spring | 2024 spring (ongoing lecture) |
|--------------------|-------------|------------------|------------------|----------------------------------|
| Number of students | 83 | 54 | 78 | 83 |
| Number of classes | 1 | 2 | 2 | 2 |
| Students per class | 83 | 27 | 39 | 41.5 |
| Mode of lecture | Online | Flipped learning | Flipped learning | Flipped learning |

이어서, 강의평가 각 문항에 대한 분석을 수행하였다. 학습자들은 평가 문항 중 ‘교수님은 중요한 내용을 분명하게 설명하였다’, ‘교수님은 시험, 과제, 질문 등에 대해 성실하게 조언하였다’, ‘학습에 필요한 수업자료가 온·오프라인 매체를 통해서 잘 제공되었다’와 같은 항목에서 높은 점수를 매긴 것을 확인하였는데, 이는 플립 러닝을 통한 이해도 향상 시도가 효과적이었음을 나타낸 것으로 생각된다. 반면, ‘교수님은 학생들의 이해정도에 관심을 가지고 있었다’의 항목에서는 다소 미흡한 평가 점수를 확인하였는데, 플립 러닝과 문제 중심 학습을 통해 반복적인 이론/실습 교육이 이루어지더라도 학습자에 대한 교수자 피드백이 중요함을 나타내었다.

마지막으로, 본 과목 수업을 통해 학습자가 스스로의 성취 정도를 어떻게 평가하였는지 메타인지 분석을 실시하였다. 이는 중간고사 및 기말고사 마지막 문항에 본인의 예상 점수를 작성하도록 하여 실제 점수와 비교 분석하는 방식으로 수행하였으며, 예상 점수와 실제 점수의 차이가 2점 이내(100점 만점)일 경우 추가 점수 1점을 부여하였다. 해당 분석 결과는 Fig. 2에 나타내었으며, 예상 점수를 작성하지 않거나 0점으로 작성한 사례는 분석에서 제외하였다. Fig. 2의 좌열이 중간고사, 우열이 기말고사에 대한 그래프이며, (a), (b)가 2021년(1차년도), (c), (d)가 2022년(2차년도), (e), (f)가 2023년(3차년도) 강의에서의 메타인지 평가 결과이다. 전체적으로 학습자의 중간/기말고사 예측 점수의 분포가 실제 획득 점수의 분포와 유사한 추이를 보였으며, 이에 해당하는 청색 추세선(실선)이 참값(점선)과 다소 유사한 것을 확인하였다. 특히, 2022년(2차년도) 강의에서는 학습자 집단이 본인의 점수를 대단히 정확하게 예측하여, 혁신 교수학습법을 통해 학습자 스스로의 성취도에 대한 메타인지를 높일 수 있었던 것으로 확인되었다. 반면, 2023년(3차년도) 강의에서는 학습자 예측이 실제 획득 점수와 다소 벗어난 것을 확인하였으나, 이는 학습자의 메타인지 미흡보다는 시험 난이도의 상향과 부분 점수를 부여하지 않는 방향으로의 채점 기준 변경으로 인한 것으로 판단하였다. 또한, 대부분의 경우 예측 점수가 실제 점수보다 높은 추세를 확인하였는데, 이는 본 연구에서 적용한 플립 러닝 등 혁신적 교수학습법이 학습자의 자신감 향상⁽¹⁵⁾에 효율적임을 보인 선행 연구 결과와 부합하는 것으로 판단되었다. 학습자의 메타인지 수준이 높을수록 문제 중심 학습 교수법의 효과가 높음⁽¹⁶⁾을 고려할 때, 본 연구에서 활용한 교수법이 메타인지 수준의 향상과 문제 중심 학습 효율의 복합적 향상을 통해 수치해석 학습에 효과적으로 기여할 수 있을 것으로 생각된다.

4. 결론

본 연구에서는 혁신적 교수학습법을 적용한 기계공학과 수치해석 교과 설계를 제시하고 이를 운영한 결과를 분석하였다. 수치해석 교과목은 공학 문제를 수식화하여 해를 구하는 과정에 대한 이론적 이해와 함께 실습의 병행이 필수적인 과목으로, 플립 러닝과 문제 중심 학습을 통해 효과적인 학습을 유도하였다. 구체적으로, 사전 동영상 강의를 통한 이론 내용의 선제적 학습과 함께, 대면 수업에서 실습 위주의 수업을 설계·수행하였으며, 심화 실습 및 자율 프로젝트형 과제를 통해 학습자 중심의 강의를 추구하였다. 그 결과, 수업의 체계성 및 주요 내용에 대한 설명 부분에서 학습자 만족도가 높은 것으로 확인되어, 혁신적 교수학습법을 활용한 수업 설계가 학습자에게 유의했던 것으로 파악되었다. 또한, 중간·기

말고사에서 시행한 학습자 자신에 대한 성취도 평가에서 본 강의의 방식이 학습자의 메타인지를 개선할 수 있을 것으로 판단하였다. 향후 본 연구에서 제시한 교과 설계를 확장하여 실습을 통한 학습이 중요한 다양한 공학 교육에 활용할 수 있을 것으로 생각된다.

나아가, 다음과 같은 시도를 통해 본 연구에서 적용한 바와 같은 혁신교수학습법 기반 수치해석 강의를 개선할 수 있을 것으로 판단된다. 첫째로, 플립 러닝의 적용을 통해 동영상으로 이론 내용을 학습한 후 대면 강의 시 실습 위주로 강의를 수행하고자 하였으나, 사전 학습 콘텐츠에 대한 이해도가 학생별로 다소 상이하여 대면 강의에서의 실습 난이도 조절에 애로사항이 존재하였다. 향후 학생 맞춤형 사전 학습 콘텐츠 개발 등을 통해 강의 질을 제고할 수 있을 것으로 판단된다. 둘째로, 본 교과목 설계에서는 과제를 자율 프로젝트형으로 부여하여 학습자가 공학 문제를 스스로 설계하고 해결함으로써 자기 주도적 학습을 독려하고자 하였다. 그러나, 이론 내용에 대한 이해도가 낮은 학습자의 경우 문제 설정 단계부터 어려움을 겪는 경우가 다수 있었으므로, 이러한 학습자를 위한 과제 가이드라인이 제시될 필요가 있을 것으로 생각되었다.

또한, 본 연구에서 적용한 혁신적 교수학습법 기반 교과목 운영 결과 분석 과정에서의 한계점이 존재하였다. 예를 들어, 성취도 자가 분석을 위해 수행한 메타인지 평가에서는 연도별 시험 난이도 및 채점 방식의 차이로 인해 정량화가 다소 미흡하였으며, 향후 표준화 과정을 통해 보다 정확한 메타인지 평가를 수행할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 수강생의 수강 경험에 대한 심층적 분석을 위해 교육학에서 사용되는 면접 평가 방식 등을 도입하여 혁신교수학습법 적용 효과를 보다 상세히 평가할 수 있을 것으로 생각된다.

후 기

본 연구는 국립한밭대학교 교수학습센터의 지원(밀착형 충실학습 적용교과 지원사업)을 받아 수행되었습니다.

참고문헌 (References)

- (1) Mayadas, F., 2001, "Testimony to the Kerrey Commission on Web-Based Education," *Journal of Asynchronous Learning Networks*, Vol. 5, No. 1, pp. 134~138.
- (2) Bourne, J., Harris, D. and Mayadas, F., 2005, "Online Engineering Education: Learning Anywhere, Anytime," *Journal of Engineering Education*, Vol. 94, No. 1, pp. 131~146.
- (3) Holzweiss, P. C., Joyner, S. A., Fuller, M. B., Henderson, S. and Young, R., 2014, "Online Graduate Students' Perceptions of Best Learning Experiences," *Distance Education*, Vol. 35, No. 3, pp. 311~323.
- (4) Lee-Post, A. and Hapke, H., 2017, "Online Learning Integrity Approaches: Current Practices and Future Solutions," *Online Learning*, Vol. 21, No. 1, pp. 135~145.
- (5) Dhawan, S., 2020, "Online Learning: A Panacea in the Time of COVID-19 Crisis," *Journal of Educational Technology Systems*, Vol. 49, No. 1, pp. 5~22.
- (6) Park, J. Y., 2021, "Massive Expansion of Non-Face-to-Face Education Triggered by COVID-19," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. C*, Vol. 9, No. 1, pp. 1~5.
- (7) Vergara, D., Fernández-Arias, P., Extremera, J., Dávila, L. P. and Rubio, M. P., 2022, "Educational Trends Post COVID-19 in Engineering: Virtual Laboratories," *Materials Today: Proceedings*, Vol. 49, No. 1, pp. 155~160.
- (8) Bishop, J. and Verleger, M. A., 2013, "The Flipped Classroom: A Survey of the Research," *2013 ASEE Annual Conference & Exposition*, Atlanta, USA, pp. 23.1200.1~23.1200.18.
- (9) Lima, R. M., Andersson, P. H. and Saalman, E., 2017, "Active Learning in Engineering Education: A

- (Re)Introduction,” *European Journal of Engineering Education*, Vol. 42, No. 1, pp. 1~4.
- (10) Lee, H., 2021, “Analysis of Instructors’ Evaluations and Experiences in Non-Face-to-Face Online Classes at the College of Engineering,” *Journal of Engineering Education Research*, Vol. 24, No. 5, pp. 53~64.
- (11) Karabulut-Ilgu, A., Cherrez, N. J. and Jahren, C. T., 2018, “A Systematic Review of Research on the Flipped Learning Method in Engineering Education,” *British Journal of Educational Technology*, Vol. 49, No. 3, pp. 398~411.
- (12) Yew, E. H. J. and Goh, K., 2016, “Problem-Based Learning: An Overview of its Process and Impact on Learning,” *Health Professions Education*, Vol. 2, No. 2, pp. 75~79.
- (13) Lee, M., Yoon, S., Kim, J., Wang, Y., Lee, K., Park, F. C. and Sohn, C. H., 2022, “Classification of Impinging Jet Flames Using Convolutional Neural Network with Transfer Learning,” *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 36, No. 3, pp. 1547~1556.
- (14) Park, S. and Lee, M., 2024, “A Semi-Supervised Framework for Analyzing the Potential Core of a Low-Density Jet,” *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol. 95, Article 102516.
- (15) Chun, B., 2014, “A Case Study of Flipped Learning at College: Focused on Effects of Motivation and Self-Efficacy,” *Journal of Educational Technology*, Vol. 30, No. 3, pp. 467~492.
- (16) Choi, H., 2004, “The Difference of Problem-Based Learning(PBL) Effectiveness according to Learner’s Metacognition Level,” *Asian Journal of Education*, Vol. 5, No. 1, pp. 1~20.

캠 메커니즘을 활용한 자동 심폐소생 압박 모션 발생 메커니즘 연구

최원석* · 성민영* · 김혜리* · 김동우* · 정상훈* · 서진성*†

* 한국공학대학교 기계공학과

A Study on Automatic Generation of CPR Compression Motion Using a Cam Mechanism

Won-Seok Choi*, Min-Young Sung*, Hye-Ri Kim*,

Dong-Woo Kim*, Sang-Hoon Jeong* and Jin Sung Suh*†

* The Department of Mechanical Engineering, Tech University of Korea

(Received March 17, 2024 ; Revised June 10, 2024 ; Accepted June 10, 2024)

Key Words: Cardiopulmonary Resuscitation(CPR, 심폐소생), Cam Mechanism(캠 메커니즘), Roller Follower (롤러 종동절), Jamming(재밍), 3-4-5 Polynomial Cam Profile(3-4-5차 다항식 캠 프로파일), Cycloidal Cam Profile(사이클로이드 캠 프로파일), Cycle Per Minute(CPM), Jerk(저크), Wear (마모) Pitch Curve(피치커브), Sudden Cardiac Arrest(SCA, 급성심정지)

초록: 대부분의 심폐소생기는 피스톤 방식으로 작동한다. 이 방식은 별도의 액추에이터 등을 필요로 하여 제품의 무게를 증가시키고 편의성을 저하시키며, 심폐소생기 가격과 유지보수 비용을 증가시킨다는 단점을 가지고 있다. 본 연구에서는, 캠 메커니즘을 적용한 심폐소생기의 사용을 제안한다. 캠 메커니즘을 사용하면 압박깊이와 압박주기의 정확성을 높인다. 캠 메커니즘 사용 시 발생하는 속도, 가속도, 저크를 줄이는 것에 초점을 맞추어 설계를 진행했다. 다양한 캠 프로파일들 중에서 사이클로이드 캠 프로파일과 3-4-5차 다항식 캠 프로파일을 합성하였으며 또한 비교 분석했다. 두 개의 캠 프로파일 모두 종동절의 상승 또는 하강시 압력각의 절대값이 30°를 초과하지 않음을 확인하였다. 또한 언더컷 현상이 발생하지 않음을 확인하였다. 저크 측면에서 사이클로이드 캠 프로파일이 3-4-5차 다항식 캠 프로파일보다 더 유리하다는 것으로 판단되었다.

Abstract: Most CPR devices operate on a piston mechanism, which, however, comes with drawbacks such as the need for a separate actuator, increasing the weight, causing inconveniences and elevating maintenance costs. This study, proposes the use of a cam mechanism in CPR devices. The main focus is on enhancing the accuracy of compression depth and compression frequency while mitigating the velocity, acceleration and jerk associated with a cam mechanism. Cycloidal and 3-4-5 Polynomial Cam Profiles were synthesized and compared. It is observed that for both cam profiles the pressure angle does not exceed an absolute value of 30 degrees and the undercut does not occur. In the aspect of jerk, it was shown that a cycloidal cam profile is more advantageous than a 3-4-5 polynomial cam profile.

1. 서론

급성심정지(SCA: sudden cardiac arrest)는 심장의 기능이 갑자기 중단되어 생명을 위협하는 질환이다. 급성심정지 발생 시, 심폐소생술을 시행하였을 때 생존율은 11.9%로 시행하지 않았을 때 생존율인 4.9%

† Corresponding Author, jssuh@tukorea.ac.kr

의 2배가 넘는 생존율을 보인다. 따라서, SCA 발생 시 신속한 심폐소생술은 환자의 생존율을 높이는 데 매우 중요한 역할을 담당한다.

그러나, 실제 응급상황에서 최초 발견자가 당황하여 심폐소생술을 시행하지 못하는 경우가 많다. 최근 일반인의 심폐소생술 시행률에 관한 통계청 자료를 보면 의무교육임에도 불구하고, 2020년 기준 고작 평균 26.4% 정도 밖에 시행되지 못하였다.⁽¹⁾

SCA 상황에서 수동으로 심폐소생술을 실시하는 경우, 구조자의 숙련도, 피로도, 장소 등의 상황에 따라 흉부압박의 질(압박 깊이, 압박 횟수 등)이 균일하지 못할 수 있다.

이를 대비하기 위한 상용화된 제품들이 존재하지만 이들 대부분은 비좁은 장소 등 제한적 공간에서의 사용을 염두한 것이며, 피스톤 메커니즘을 채택하고 있다.

공압실린더나 액추에이터를 이용한 피스톤 방식은 별도의 액추에이터가 필요로 하므로 제품의 무게를 증가시키고, 소모성 부품들의 사용이 상대적으로 많아 제품의 사용성과 편의성이 저하되며, 유지보수의 필요성이 증가되는 단점이 존재한다. 또한 기존에 사용되는 자동흉부압박 기기의 작동방식은 모터를 통한 회전운동을 직선운동화 하는 액추에이터를 사용하였기 때문에 모터 회전 시 운동형태의 변환으로 인한 “저크”현상이 발생한다. 이는 안정적이고, 반복적인 흉부압박을 방해한다. 결과적으로 기존장치는 저크현상의 감소를 위해 장치고정을 강제한다. 그러므로 일반인의 응급상황에서 피스톤 방식을 대체할 수 있는 새로운 메커니즘을 설계할 필요가 있다.

본 연구에서는 정확한 압박 모션과 압박 주기를 구현할 수 있도록 해주는 캠을 설계하기 위해 기구학, 동역학 관점에서 유리하다고 판단되는 3-4-5차 다항식 캠 프로파일과 사이클로이드 캠 프로파일 두 개의 캠 프로파일을 매트랩을 이용하여 분석 및 합성하였다, 그리고 분석 결과를 바탕으로 두 가지 캠 프로파일을 비교하여, 정확한 압박 모션, 압박 주기 형성과 더불어 가속도와 저크 등을 고려한 기기의 피로수명과 내구성능을 향상할 수 있는 캠 프로파일을 선정하였다.

2. 캠 설계

2.1 심폐소생 모션 발생 메커니즘

심폐소생술 기기의 압박 부위는 대한심폐소생협회⁽²⁾에 의해 의학적으로 규정되어 있고, 규정된 압박 깊이가 일정한 주파수로 인체에 가해지도록 규정하고 있다.

본 연구에서는 상기 목적에 가장 부합하는 캠 메커니즘을 채택하고자 한다. 캠 메커니즘을 사용하여 원하는 모션을 설계할 경우 얻을 수 있는 장점들을 아래에 나열하였다.

i) 압박 부위에 작용하는 모션을 정확하게 구현할 수 있는 캠 프로파일을 프로그래밍을 통하여 해석적 방식으로 설계할 수 있다. 따라서 의학적으로 검증된 모션을 정확하게 구현할 수 있다.

ii) 압박 부위에 가해지는 직선운동 모션의 변위뿐만 아니라 속도, 가속도, 저크를 캠 회전 각도에 대하여 정확하게 계산할 수 있어 환자의 안전을 고려한 바람직한 압박 부위의 모션을 역설계할 수도 있다.

iii) 캠을 설계함에 따라 얻게 되는 압력각, 가속도, 저크 등을 정확하게 계산할 수 있으므로 심폐소생 기기의 피로수명과 내구성능을 향상시킬 수 있다.

iv) 원하는 모션 발생 메커니즘의 설계 기간을 단축시킬 수 있다.

2.2 캠 해석

캠을 설계하기에 앞서 캠 프로파일의 윤곽을 개략적으로 정했다고 하더라도, 다음과 같은 상황에서는 캠 프로파일의 형상을 확정할 수 없다.

- i) 캠 설계 시, 압력각이 허용범위(보통 30°)를 벗어나는 경우
- ii) 캠 윤곽의 곡부적인 곡률로 인해 중동절이 캠 프로파일을 따라갈 수 없는 경우
- iii) 중동절과 캠의 접촉을 유지하기 위한 스프링의 탄성계수가 충분하지 않은 경우
- iv) 평판 중동절의 평판 길이 혹은 중동절의 크기 등이 지나치게 커지는 경우

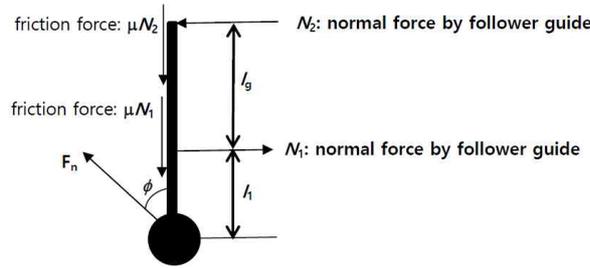


Fig. 2 Free body diagram of the roller follower for static analysis

$$N_1 = F_n \sin \phi \left(1 + \frac{l_1}{l_g} \right) \quad (2)$$

$$N_2 = \frac{l_1}{l_g} F_n \sin \phi \quad (3)$$

식 (1)에서, 압력각 ϕ 가 증가하면 F_n 이 증가함을 알 수 있다. 또한, l_g , l_1 은 F_n 을 결정하는 중요한 요소임을 알 수 있다. 캠과 종동절이 원활하게 동작하기 위해서는 종동절이 동작하는 도중 가이드에서 잼(jam)이 발생하지 않도록 유의하여야 한다. 또한 소재 선정에 있어 캠 가공에 주로 사용되는 주철을 사용하되, 강도 측면에서 유리한 냉간가공과 표면경도와 내마찰성 향상을 위해 표면질화처리를 하는 것을 추천한다.⁽⁵⁾

2.5 압력각

Fig. 1로부터 압력각 ϕ 를 유도할 수 있다.⁽⁶⁾

$$\phi = \tan^{-1} \left[\frac{\frac{dy}{d\theta} - e}{\sqrt{r_p^2 - e^2 + y(\theta)}} \right] \quad (4)$$

식 (4)를 고찰하면, 다음과 같은 결론을 도출할 수 있다. 종동절이 상승할 때, 즉 $dy/d\theta > 0$ 일때, 오프셋 e 의 존재로 인해 $e=0$ 일 때보다 압력각 ϕ 는 감소함을 알 수 있는데 이것이 오프셋 e 를 주는 주된 이유이다. 종동절이 하강할 때, 즉 $dy/d\theta < 0$ 일때, 오프셋 e 의 존재로 인해 압력각 ϕ 는 음수값이지만 그 절대값은 증가한다. 결론적으로, 종동절이 상승할 때에만 재밍이 발생할 가능성이 높아지며, 하강 시에는 일반적으로 재밍이 발생할 가능성은 낮다.⁽⁶⁾ 보통 최대 허용 가능한 압력각 ϕ_{\max} 은 30° 로 규정한다.

3. 캠 프로파일 합성(synthesis) 예제

캠의 소형화와 심폐소생술 시행 시 준수해야 하는 압박 깊이 및 압박 횟수를 고려하여, r_b , L , ω_0 를 선정하고, 언더컷(undercut) 방지를 위해 종동절 롤러 반경 r_r 을 다음과 같이 선정한다. 또한 계산 간략화를 위해 오프셋 e 를 “0”으로 선정하였다.

- i) Radius of the base circle $r_b = 50$ [mm]
- ii) Radius of the follower roller $r_r = 10$ [mm]
- iii) Constant cam angular velocity : $w_0 = 4\pi$ rad/s = 720 deg/s
- iv) Lift : $L = 50$ [mm]
- v) Offset : $e = 0$ [mm]

3.1 캠 프로파일 설계 조건

기구학적으로 그리고 동역학적으로 적합한 캠 프로파일을 합성하기 위해서 만족하여야 할 경계조건은 아래와 같이 선정한다. 단, θ 는 캠 앵글이다.

i) θ 에서 = 0 [rad]

$$y(\theta = 0) = 0, \quad \frac{dy}{dt}(\theta = 0) = 0, \quad \frac{d^2y}{dt^2}(\theta = 0) = 0$$

ii) θ 에서 = π [rad]

$$y(\theta = \pi) = L, \quad \frac{dy}{dt}(\theta = \pi) = 0, \quad \frac{d^2y}{dt^2}(\theta = \pi) = 0$$

경계조건 이외에 추가적으로 반드시 만족하여야 할 캠 프로파일의 조건들은 다음과 같다.⁽⁷⁾

- 1) 변위 $y(\theta)$, 속도 $\frac{dy}{dt}$, 가속도 $\frac{d^2y}{dt^2}$ 는 모두 연속함수이어야 한다.
- 2) 가속도 $\frac{d^2y}{dt^2}$ 는 무한대가 되지 않아야 한다.
- 3) 저크 $\frac{d^3y}{dt^3}$ 는 불연속함수이어도 허용되나, 무한대가 되지 않아야 한다.
- 4) 속도 $\frac{dy}{dt}$, 가속도 $\frac{d^2y}{dt^2}$, 저크 $\frac{d^3y}{dt^3}$ 의 최대값들은 가능한 작아야 한다.

위에서 제시한 조건들을 만족하는 두 개의 캠 프로파일은 3-4-5차 다항식 캠 프로파일과 사이클로이드 캠 프로파일이다.⁽⁷⁾

3.2 언더컷(undercut)

종동절 롤러의 반경이 큰 경우는, Fig. 3에서 표시된 커습(cusp)의 형상을 가진 캠 프로파일이 형성되며, 이것을 언더컷이라고 한다. 언더컷이 발생하면 원하는 캠 프로파일 즉, 원하는 종동절 모션을 얻을 수 없다. 따라서 언더컷을 방지하기 위해서는 피치커브의 곡률반경 $\rho(\theta)$ 는 종동절 롤러 반경 r_r 보다 반드시 커야한다. 언더컷이 발생하면, 불연속한 속도, 가속도, 저크를 발생시킨다. 반면 작은 크기의 종동절 롤러는 언더컷 없이 비교적 부드러운 캠 프로파일을 생성할 것이다. 이 조건은 아래식으로 표현할 수 있다.

$$\rho(\theta) > r_r \tag{5}$$

프라임 원의 반경이 r_p 이고, 종동절의 변위를 $y(\theta)$ 라 하면, 극좌표계로 표현한 피치커브 $r(\theta)$ 는 아래 식으로 주어질 것이다.

$$r(\theta) = r_p + y(\theta) \tag{6}$$

$$\frac{dr}{d\theta} = \frac{dy}{d\theta} \tag{7}$$

피치커브의 곡률반경 $\rho(\theta)$ 는 극좌표계에서 아래 식으로 주어진다.⁽⁷⁾

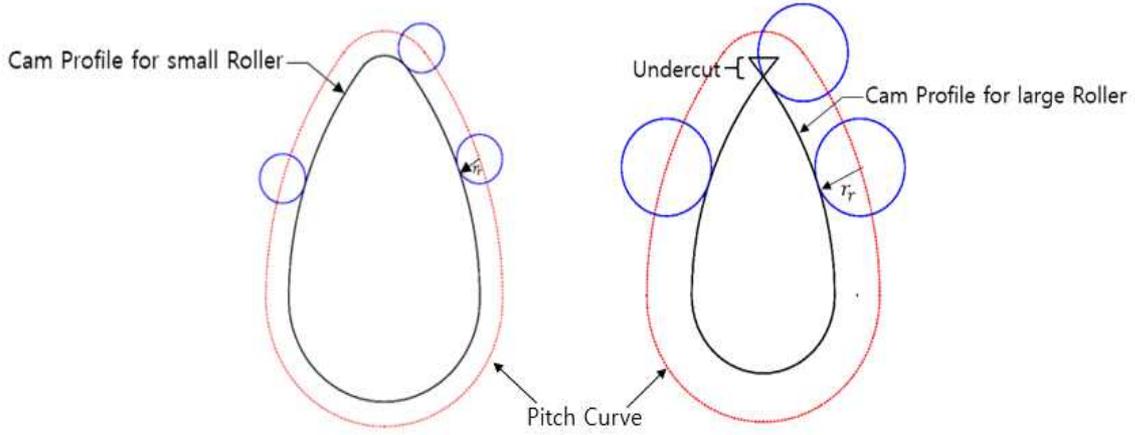


Fig. 3 Formation of an undercut for the case of a large roller diameter

$$\rho(\theta) = - \frac{[(r_p + y(\theta))^2 + (\frac{dy}{d\theta})^2]^{\frac{3}{2}}}{(r_p + y(\theta))^2 + 2(\frac{dy}{d\theta})^2 - (r_p + y(\theta))(\frac{d^2y}{d\theta^2})} \quad (8)$$

3.3 3-4-5차 다항식 캠 프로파일의 합성

1) 캠 프로파일의 상승 모션 ($0 \text{ rad} < \theta < \pi \text{ rad}$ 또는 $0^\circ < \theta < 180^\circ$)
 $y(\theta)$ 를 중동절의 변위라고 설정하였다.^(3,7)

$$y(\theta) = L[10(\frac{\theta}{\pi})^3 - 15(\frac{\theta}{\pi})^4 + 6(\frac{\theta}{\pi})^5]_{[mm]}, \theta \text{ is in radians} \quad (9)$$

2) 캠 프로파일의 하강 모션 ($\pi \text{ rad} < \theta < 2\pi \text{ rad}$ 또는 $180^\circ < \theta < 360^\circ$)
 y 를 중동절의 변위라고 설정하였다.^(3,7)

$$y(\theta) = L - L[10(\frac{\theta - \pi}{\pi})^3 - 15(\frac{\theta - \pi}{\pi})^4 + 6(\frac{\theta - \pi}{\pi})^5]_{[mm]} \quad (10)$$

캠의 각속도는 w_0 로 일정하다. 캠 앵글이 θ 일 때, 중동절의 속도 $v(\theta)$ 는 연쇄 법칙에 의해 다음과 같다.

$$v(\theta) = \frac{dy}{d\theta} w_0 \quad [mm/s] \quad (11)$$

캠 앵글이 θ 일 때, 중동절의 가속도 $a(\theta)$ 는 다음과 같다.

$$a(\theta) = \frac{d^2y}{d\theta^2} w_0^2 \quad [mm/s^2] \quad (12)$$

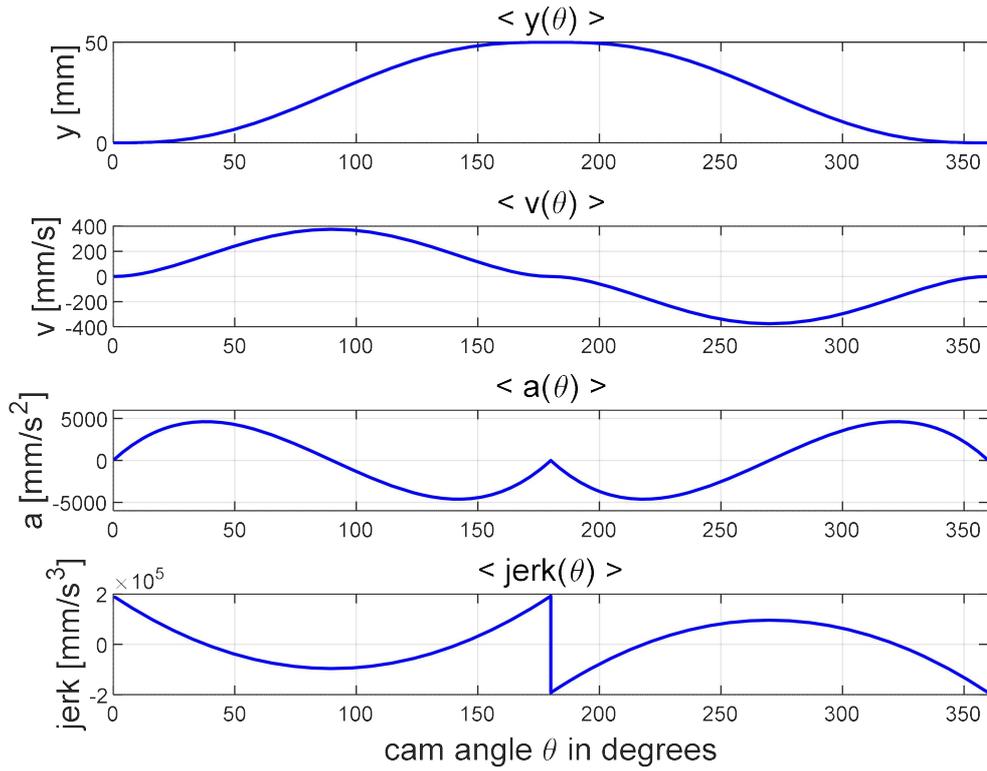


Fig. 4 Basic performance of 3-4-5 polynomial cam profile

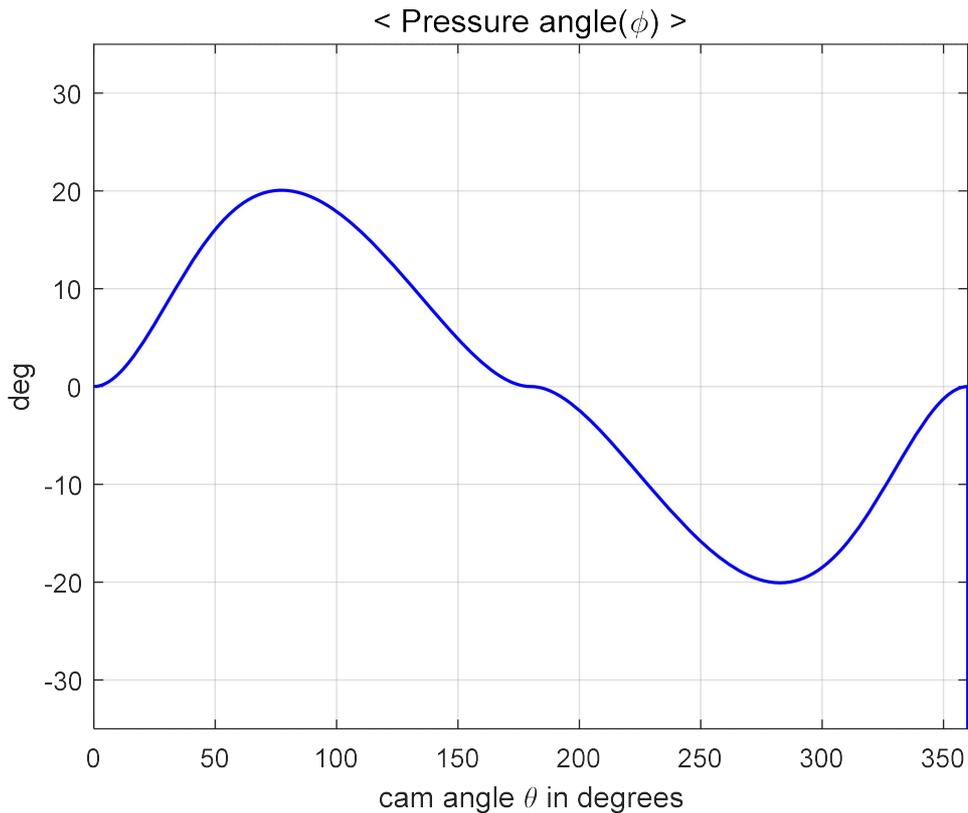


Fig. 5 Pressure angle for a 3-4-5 polynomial cam profile

캠 앵글이 θ 일 때, 종동질의 저크는 가속도의 시간 변화율로 정의된다.

$$Jerk(\theta) = \frac{d^3y}{d\theta^3} w_0^3 \quad [mm/s^3] \tag{13}$$

3) 시뮬레이션 결과 해석

편심 $e = 0$ 일 때, 압력각 ϕ 는 아래 식으로 주어진다.

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{y'(\theta)}{r_p + y(\theta)}\right) \tag{14}$$

종동질이 상승 중이거나, 하강 중이거나 상관없이 압력각(ϕ)의 절대값은 30° 를 초과하지 않도록 설계되어야 한다.

Fig. 5에서 압력각의 절대값은 30° 를 초과하지 않음을 알 수 있다.

피치 커브(pitch curve) $r(\theta)$ 는 극좌표계(polar coordinate system)에서, 다음과 같이 주어진다.⁽⁷⁾

$$r(\theta) = r_p + y(\theta) \tag{15}$$

피치 커브의 직교좌표(rectangular coordinate), $(x_p(\theta), y_p(\theta))$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$x_p(\theta) = r(\theta)\cos(\theta) \tag{16}$$

$$y_p(\theta) = r(\theta)\sin(\theta) \tag{17}$$

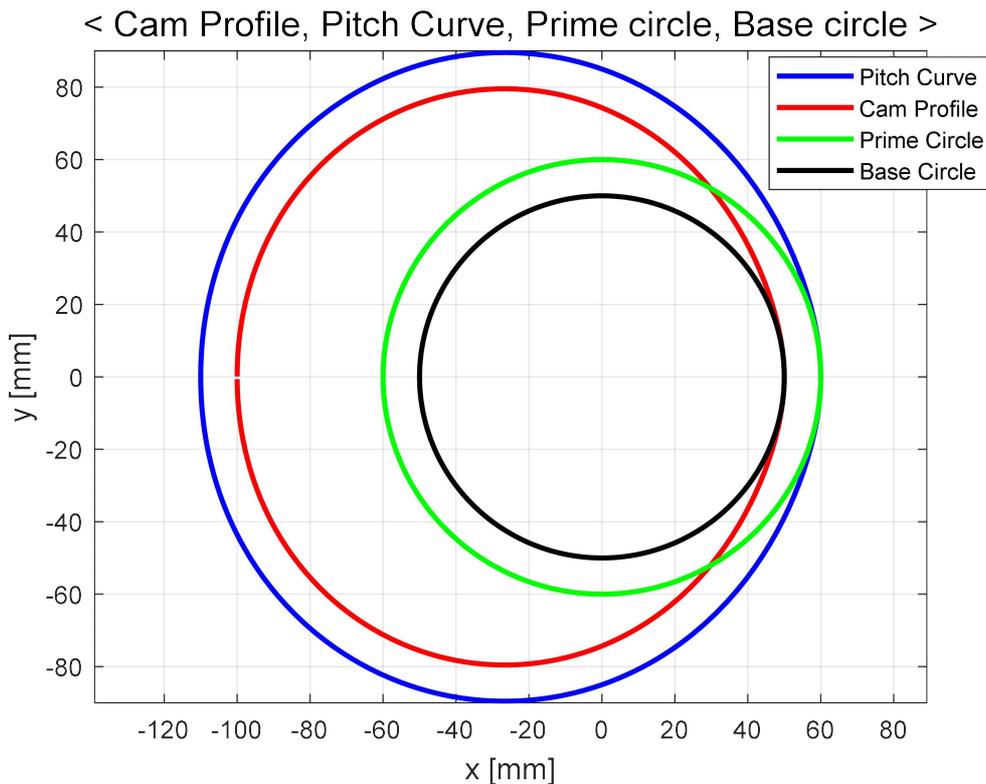


Fig. 6 Results for 3-4-5 polynomial cam profile

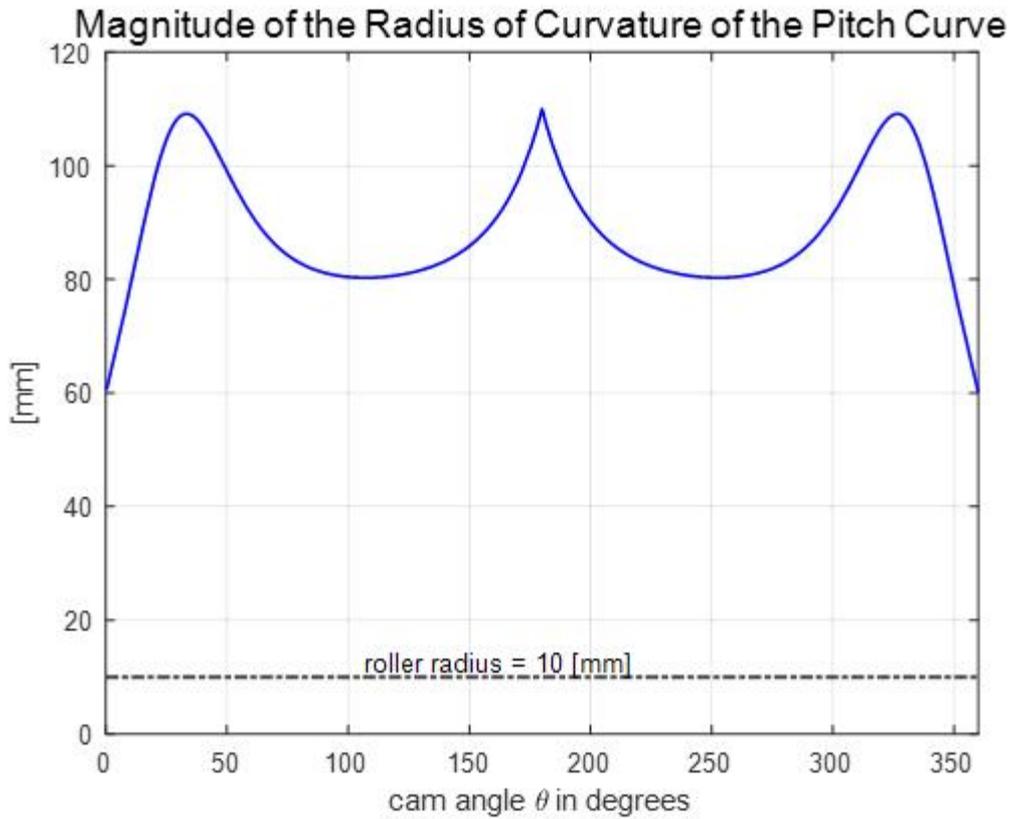


Fig. 7 Results for a radius of curvature of the 3-4-5 polynomial pitch curve

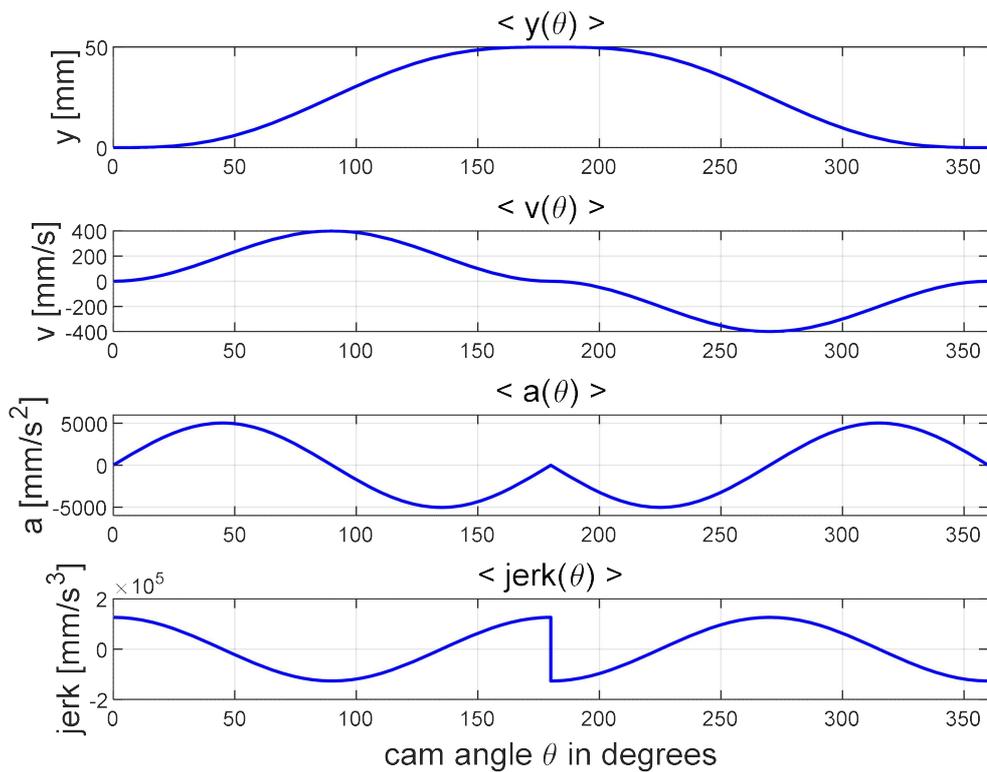


Fig. 8 Basic performance of cycloidal cam profile

캠 프로파일의 직교좌표 $(x_c(\theta), y_c(\theta))$ 는 다음과 같이 주어진다.⁽⁷⁾

$r'(\theta) = \frac{dr}{d\theta}$ 라 설정하였다.

$$x_c = x_p(\theta) + \frac{r_r}{\sqrt{[r'(\theta)]^2 + r^2}} \left[-\frac{dy_p}{d\theta} \right] \quad (18)$$

$$y_c = y_p(\theta) + \frac{r_r}{\sqrt{[r'(\theta)]^2 + r^2}} \left[\frac{dx_p}{d\theta} \right] \quad (19)$$

Fig. 7은 식 (8)을 이용하여 피치커브의 곡률반경 $\rho(\theta)$ 의 절대값을 그린 것이다. 3-4-5차 다항식 캠 프로파일의 경우, 피치커브의 곡률반경 $\rho(\theta)$ 는 캠 앵글 ($0^\circ \sim 360^\circ$)구간에서 식 (5)를 만족하므로 언더컷이 발생하지 않음을 확인할 수 있다.

3.4 사이클로이드 캠 프로파일의 합성

1) 캠 프로파일의 상승 모션 ($0 \text{ rad} < \theta < \pi \text{ rad}$ 또는 $0^\circ < \theta < 180^\circ$)

y를 중동절의 변위라고 설정하였다.^(3,7)

$$y(\theta) = L \left[\frac{\theta}{\pi} - \frac{1}{2\pi} \sin\left(\frac{2\pi\theta}{\pi}\right) \right] = L \left[\frac{\theta}{\pi} - \frac{1}{2\pi} \sin(2\theta) \right]_{[mm]} \quad (20)$$

2) 캠 프로파일의 하강 모션 ($\pi \text{ rad} < \theta < 2\pi \text{ rad}$ 또는 $180^\circ < \theta < 360^\circ$ from 50 mm ~ 0 mm)

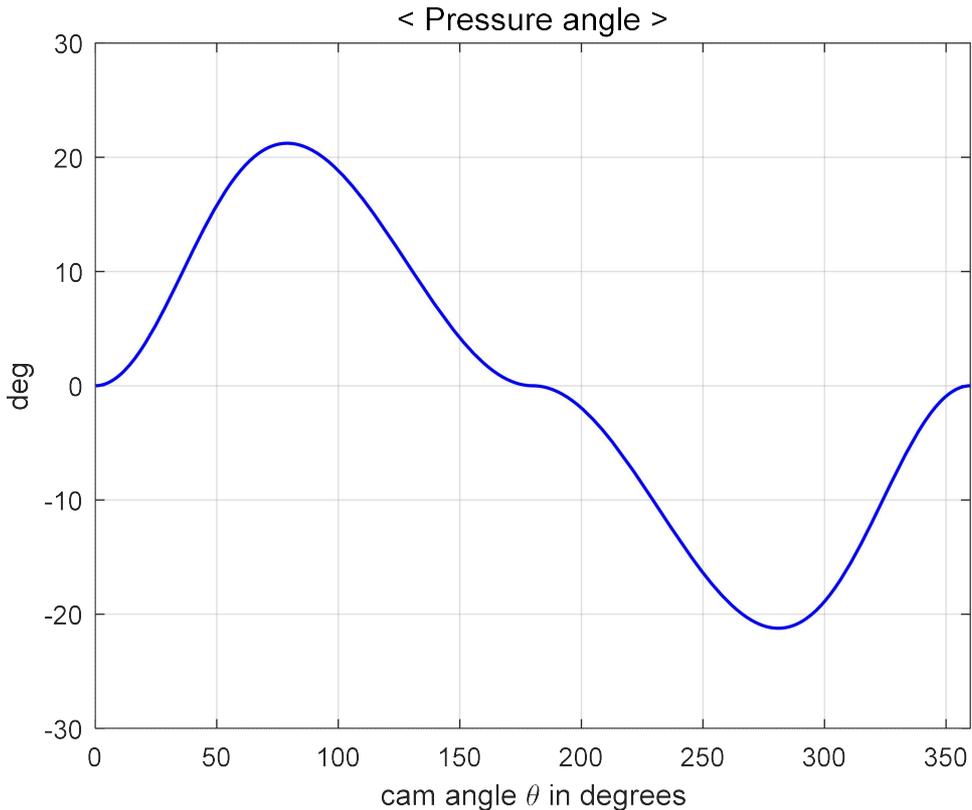


Fig. 9 Pressure angle for a cycloidal cam profile

y를 종동질의 변위라고 설정하였다.^(3,7)

$$y(\theta) = L - L \left[\frac{\theta - \pi}{\pi} - \frac{1}{2\pi} \sin(2(\theta - \pi)) \right]_{[mm]} \quad (21)$$

3) 시뮬레이션 결과 해석

Fig. 9에서, 압력각의 절댓값은 30°를 초과하지 않음을 알 수 있다.

Fig. 11은 식 (8)을 이용하여 피치커브의 곡률반경 $\rho(\theta)$ 의 절댓값을 그린 것이다. 사이클로이드 캠 프로파일의 경우, 피치커브의 곡률반경 $\rho(\theta)$ 는 캠 앵글 ($0^\circ \sim 360^\circ$)구간에서 식 (5)를 만족하므로 언더컷이 발생하지 않음을 확인할 수 있다.

Fig. 8 ~ 11을 산출하기 위한 Matlab 코드를 Appendix에 제시한다.

3.5 시뮬레이션 결과 비교분석

아래 Table 1은 3-4-5차 다항식 캠 프로파일과 사이클로이드 캠 프로파일을 최대속도와 최대가속도, 최대저크 측면에서 비교 분석하여 나타내었다.

Table 1 Comparison between 3-4-5 polynomial cam profile and cycloidal cam profile

| | Maximum velocity | Maximum acceleration | Maximum jerk |
|------------------------------|------------------|---------------------------|---|
| 3-4-5 Polynomial cam profile | 375[mm/s] | 4,614[mm/s ²] | 1.92 × 10 ⁵ [mm/s ³] |
| Cycloidal cam profile | 400[mm/s] | 5,026[mm/s ²] | 1.26 × 10 ⁵ [mm/s ³] |

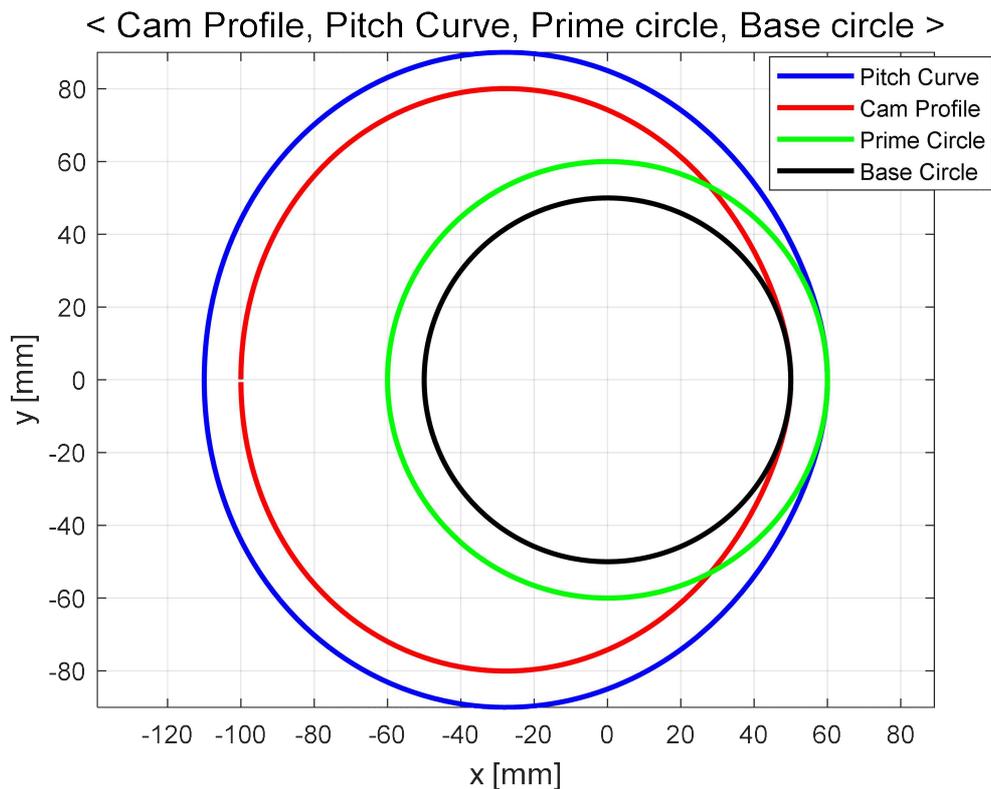


Fig. 10 Results for a cycloidal cam profile

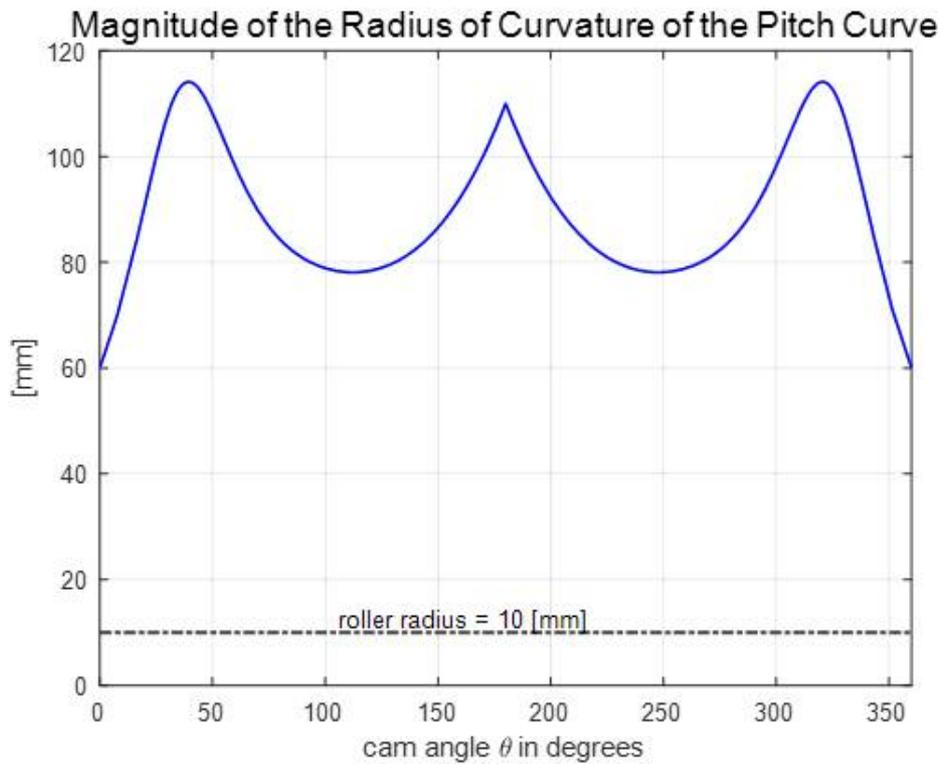


Fig. 11 Results for a radius of curvature of the cycloidal pitch curve

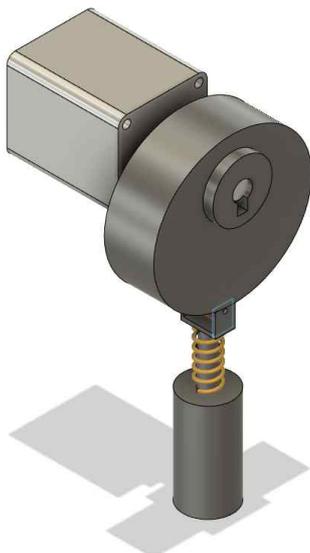


Fig. 12 A possible design of a cam mechanism proposed to be used in a CPR device

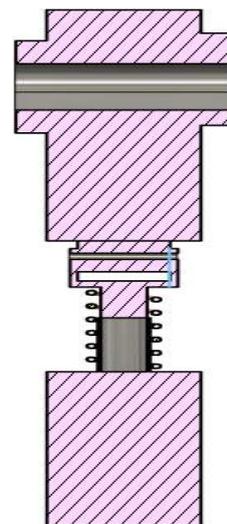


Fig. 13 Cross section of a cam mechanism in a CPR device

최대속도, 최대가속도 측면에서 3-4-5차 다항식 캠 프로파일과 사이클로이드 캠 프로파일의 값은 유사하다. 그러나 최대저크값 측면에서 Fig. 4에서 3-4-5차 다항식 캠 프로파일의 최대값이 $1.92 \times 10^5 [mm/s^3]$, Fig. 8에서 사이클로이드 캠 프로파일의 최대값이 $1.26 \times 10^5 [mm/s^3]$ 이다. 따라서 저크 측면에서 3-4-5차 다항식 캠 프로파일보다 사이클로이드 캠 프로파일이 34.4% 가량 더 작다. 따라서 피로, 파괴 측면에서 사이클로이드 캠 프로파일이 3-4-5차 다항식 캠 프로파일보다 더 우수한 성능을 발휘할 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는, 매트랩 프로그램을 이용하여 캠 프로파일을 합성하였고, 자동심폐소생기에 사이클로이드 프로파일을 바탕으로 한 캠 메커니즘을 적용하는 것이 타당함을 입증하였다.

사이클로이드 캠 프로파일은 3-4-5차 다항식 캠 프로파일과 비교하여 속도와 가속도 측면에서는 비슷하나, 저크 측면에서 작은 값을 가지기 때문에 최종 캠 형상을 설계하는 것에 있어서 유리하다. 사이클로이드 캠 프로파일을 적용하여 자동심폐소생기 구동 메커니즘을 구현할 경우, Fig. 12와 같이 최종 제작할 것을 제안한다. Fig. 13은 Fig. 12의 단면도를 나타내었다.

참고문헌 (References)

- (1) Korea Centers for Disease Control and Prevention, 2022, *A Statistical Survey on Sudden Cardiac Arrest*, National Fire Agency, Sejong, Republic of Korea, pp. 18~31.
- (2) Korea Centers for Disease Control and Prevention, 2020, *2020 Summary of Korean CPR Guidelines*, KDCA, Cheongju, Republic of Korea, pp. 1~34.
- (3) Mallik, A. K., 1994, *Kinematic Analysis and Synthesis of Mechanisms*, CRC Press, Boca Raton, USA, pp. 1~630.
- (4) Mallik, A. K., 1994, *Kinematics of Machines: Module 10 Lecture-2*, National Program on Technology Enhanced Learning (NPTEL), Chennai, India.
- (5) Groover, M. P., 2019, *Groover's Principles of Modern Manufacturing*, John Wiley & Sons Inc, New York, USA, pp. 1~816.
- (6) Mallik, A. K., 1994, *Kinematics of Machines: Module 11 Lecture-1*, National Program on Technology Enhanced Learning (NPTEL), Chennai, India.
- (7) Gravish, N., 2019, *MAE 150 - Computer-Aided Analysis & Design - LE [A00]* (https://podcast.ucsd.edu/watch/wi19/mae150_a00/21/audio), Regents of the University of California, San Diego, USA.

Appendix Matlab code for producing Fig. 8 ~ 11

```
% This Matlab code requires the Symbolic Math Toolbox
% for its execution.
format compact
clear all, close all, clc
syms theta
sympref('HeavisideAtOrigin',1);
% rb is the radius of the base circle.
rb = 50;
rf = 10; % radius of the roller
% rp is the radius of the prime circle.
rp = rb + rf;
w0 = 720; % constant angular velocity in degrees/s
% cam angle "theta" is in radians.
% When plotting, theta will be converted to degrees.
% Cycloidal rise;
L1 = 50; beta1 = pi;
```

```

y1(theta) = L1*( theta/beta1 - 1/(2*pi)*sin(2*pi*theta/beta1) );
% Cycloidal fall in [pi, 2*pi]
L5 = -L1; % Negative sign indicates fall.
beta5 = pi;
y5(theta) = L1 + L5*( (theta-pi)/beta5 - ...
    1/(2*pi)*sin(2*pi*(theta-pi)/beta5) );
y = y1*(heaviside(theta)-heaviside(theta-pi)) + ...
    y5*(heaviside(theta-pi)-heaviside(theta-2*pi));
% Plotting y(theta)
figure()
subplot(4,1,1), hold on, grid on, box on
% When plotting, y is stretched by (180/pi) for degree's representation.
fplot(y(theta/(180/pi)), [0, 360], 'b', "LineWidth", 1.2)
axis([0, 360, 0, L1])
ylabel('y [mm]', 'fontsize', 12)
title('< y(\theta) >', 'fontsize', 12)
% Plotting v = dy/dt
% The unit is in (mm/s)
subplot(4,1,2), hold on, grid on, box on
y_d(theta) = diff(y, theta);
fplot(y_d(theta/(180/pi))*(pi/180)*w0, [0 360], 'b', ...
    "LineWidth", 1.2)
axis([0, 360, -400, 400])
ylabel('v [mm/s]', 'fontsize', 12)
title('< v(\theta) >', 'fontsize', 12)
% Plotting acceleration
% The unit is in (mm/s^2)
subplot(4,1,3), hold on, grid on, box on
y_dd(theta) = diff(y_d, theta);
fplot(y_dd(theta/(180/pi))*(pi/180)^2*w0^2, [0 360], 'b', ...
    "LineWidth", 1.2)
axis([0, 360, -6000, 6000])
% xlabel('cam angle \theta in degrees')
ylabel('a [mm/s^2]', 'fontsize', 12)
title('< a(\theta) >', 'fontsize', 12)
% Plotting jerk
% The unit is in (mm/s^3)
subplot(4,1,4), hold on, grid on, box on
y_ddd(theta) = diff(y_dd, theta);
fplot(y_ddd(theta/(180/pi))*(pi/180)^3*w0^3, [0 360], 'b', ...
    "LineWidth", 1.2)
axis([0, 360, -200000, 200000])
xlabel('cam angle \theta in degrees', 'fontsize', 12)
ylabel('jerk [mm/s^3]', 'fontsize', 12)

```

```

title('< jerk(\theta) >', 'fontsize', 12)
% Plot the pressure angle.
figure(), hold on, grid on, box on
psi(theta) = atan2(y_d, rp+y);
fplot(psi(theta/(180/pi))*(180/pi), [0 360], 'b', "LineWidth", 1.2)
xlabel('cam angle \theta in degrees')
ylabel('deg')
title('< Pressure angle >', 'fontsize', 12)
axis([0, 360, -30, 30])
% Plot the pitch curve
figure(), hold on, grid on, box on, axis equal
R = rp+y;
xp = R*cos(theta);
yp = R*sin(theta);
fplot(xp, yp, [0, 2*pi], 'b', "LineWidth", 2.0)
% Plot the cam profile
A = rf / sqrt(R^2+diff(R)^2);
xc = xp + A*(-diff(yp));
yc = yp + A*(diff(xp));
fplot(xc, yc, [0, 2*pi], 'r', "LineWidth", 2.0)
% The radius of the the prime circle and the base circle
fplot(rp*cosd(theta), rp*sind(theta), [0 360], 'g', "LineWidth", 2.0)
fplot(rb*cosd(theta), rb*sind(theta), [0 360], 'k', "LineWidth", 2.0)
title('< Cam Profile, Pitch Curve, Prime circle, Base circle >', ...
      'fontsize', 14)
xlabel('x [mm]', 'fontsize', 12), ylabel('y [mm]', 'fontsize', 12)
legend('Pitch Curve', 'Cam Profile', 'Prime Circle', 'Base Circle')
% Radius of curvature of pitch curve
r = rp + y
rho = (r^2+diff(r)^2)^1.5 / (r^2+2*diff(r)^2-r*diff(r,theta, 2))
figure(), hold on, grid on, box on
fplot(abs(rho(theta/(180/pi))), [0, 360], 'b', "LineWidth", 1.2)
plot([0 360], [10 10], 'LineStyle', '-.', 'Color', [0.25 0.25 0.25], ...
      'LineWidth', 1.5)
xlabel('cam angle \theta in degrees')
ylabel('[mm]')
axis([0, 360, 0, 120])
gtext('roller radius = 10 [mm]', "LineWidth", 2.0)
% Pick the location to put the text in.
title('Magnitude of the Radius of Curvature of the Pitch Curve', ...
      'fontsize', 14)

```


기술과 교육 편집위원회

ISSN 2288-3991(Online)

편집장

박태선

경북대학교

E-mail: tsparkjp@knu.ac.kr

편집인

구남서

건국대학교

nsgoo@konkuk.ac.kr

김흥수

동국대학교

heungsoo@dongguk.edu

박치용

한국수력원자력

parkchiyong@khnp.re.kr

송시문

한양대학교

simonsong@hanyang.ac.kr

유상석

충남대학교

stonex1004@hotmail.com

유승진

한국기계연구원

seungjinyoo@kimm.re.kr

윤현식

부산대학교

lesmodel@pusan.ac.kr

이경우

현대자동차

caselee@hyundai.com

임시형

국민대학교

shlim@kookmin.ac.kr

전주현

중앙대학교

memslee@kitech.re.kr

정영도

한국기계연구원

yjung@kimm.re.kr

홍주표

한국기술교육대학교

joopyo@koreatech.ac.kr

황옥렬

국립경상대학교

wrhwang@gnu.ac.kr

부 편집인

강윤정

제주대학교

youn.kang@jejunu.ac.kr

구병춘

한국철도기술연구원

bcbgo@krti.re.kr

김동권

아주대학교

dkim@ajou.ac.kr

김선영

군산대학교

sykim77@kunsan.ac.kr

김태진

전북대학교

tjkim@jbnu.ac.kr

문장혁

중앙대학교

jhmoon84@cau.ac.kr

박종원

한국기계연구원

jwpark@kimm.re.kr

손정현

부경대학교

jhsohn@pknu.ac.kr

신재호

경일대학교

jhshin@kiu.kr

오동욱

조선대학교

dwoh@chosun.ac.kr

유재영

고려대학교

jryu@korea.ac.kr

이봉기

전남대학교

b.lee@jnu.ac.kr

정훈의

울산과학기술원

hoonejeong@unist.ac.kr

조주형

한국기계연구원

antocho@kimm.re.kr

최승준

LS Mtron

hydride@smtron.com

한상목

한국지질자원연구원

smhan@kigam.re.kr

대한기계학회논문집

C

제12권 제2호

발행
편집
은행
산

행
집
행
조

일
인
소
로
처

2024년 9월 1일
사단법인 대한기계학회
회장 김태동
박태선
사단법인 대한기계학회, 서울시 강남구 테헤란로 7길 22
http://www.ksme.or.kr, TEL : (02)501-3646~8, FAX : (02)501-3649
7519743번
(주) 동국문화

대

한

기

계

학

회

회

선

