

# 기술과 교육

TECHNOLOGY AND EDUCATION

제14권 제1호, 2026년 3월 | VOL.14, NO.1, March 2026

대한기계학회 논문집

C

TRANSACTIONS OF THE KSME C

TECHNOLOGY AND  
EDUCATION



# 기술과 교육

(대한기계학회논문집)



제14권 제1호, 통권 제30호

ISSN 2288-3991(Online)

2026년 3월

## 차례

### < 응용기술논문-특집호: 제15회 전국학생설계경진대회 >

위급상황 시 차량탈출을 위한 파워 윈도우 강제개방 기구설계  
..... 이창훈 · 이원명 · 방찬혁 · 석규은 · 이승민 · 이도건 · 송용남... 1

### < 응용기술논문 >

다품종 제품 생산 및 AI 기반 모니터링, 의사결정, 피드백 제어가 가능한 자율제조  
교육용 테스트베드 구축  
..... 백 수 정... 15

스마트폰 앱을 활용한 차량 주행 성능 분석  
..... 엄 정 식 · 최 복 록... 27

해안가 가로등의 부식과 파손에 관한 고찰  
..... 이 원 호... 37

제어기 설계 교육용 소프트웨어 개발  
..... 이 상 현... 43

카트리지 기반 자동 교체형 롤투롤 무인 해충 예찰 트랩 개발  
..... 임도연 · 김성민 · 최육태 · 송수환... 55

딥러닝을 이용한 PIC 범퍼 빔 설계 성능 향상을 위한 연구  
..... 지 승 민 · 전 성 식... 63

기계공학 전공 학생을 위한 PBL 기반 교과목의 효과성 검증 연구  
..... 유선중 · 김영흡 · 김 한 · 강신길... 77

전기식 연속 강판 소둔로의 예측 진단 및 운전 효율화를 위한 실시간 2차원 온도장  
재구성 소프트웨어 개발  
..... 최종원 · 문준일 · 최진현 · 이후경... 87

실험계획법을 이용한 보행해충 스마트 포획 장치 흡입 원심팬 설계  
..... 정시우 · 정가은 · 윤예지 · 이다혜 · 윤재현... 99

데이터 희소 환경에서의 합성 소나 데이터 생성 및 도메인 간극 해소 기법을 통한  
딥러닝 모델의 해저 침적 폐기물 식별 성능 향상  
..... 전해명 · 정태경 · 김진균 · 이익수 · 노재규... 111

# TECHNOLOGY AND EDUCATION

Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers



Vol. 14, No. 1

ISSN 2288-3991(Online)

March, 2026



## < Application Technical Papers-Special Edition: KSCDC 2025 >

Power Window Forced Opening Device Design for Vehicle Escape in case of Emergency  
..... Changhoon Lee, Wonmyung Lee, ChanhyeokBang,  
Gyueun Seok, Seungmin Lee, Dogun Lee and Yongnam Song... 1

## < Application Technical Papers >

Development of an Educational Testbed for Autonomous Manufacturing Capable of Producing  
Personalized Products and Providing AI-based Monitoring, Decision-Making and Feedback-Control  
..... Sujeong Baek... 15

Vehicle Driving Performance Analysis Using Smart Phone App  
..... Jeong-Sik Eom and Bok-Lok Choi... 27

A Study on Corrosion and Failure of Coastal Streetlights  
..... Wonho Lee... 37

Development of an Education Software Tool for Controller Design  
..... Sang Heon Lee... 43

Development of an Automatic Cartridge-Type Roll-to-Roll Unmanned Pest Monitoring Trap  
..... Doyeon Im, Sungmin Kim, Uk-Tae Choi and Su-Hwan Song... 55

Research on Improving PIC Design Performance Using Deep Learning  
..... Seung Min Ji and Seong Sik Cheon... 63

A Study on the Effectiveness of PBL-Based Course of Mechanical Engineering Students  
..... Sun-Joong Ryu, Youngheub Kim, Haan Kim and Shingil Kang... 77

Development of a Real-Time 2D Temperature-Field Reconstruction Software for Predictive Diagnostics  
and Operational Efficiency Improvement in an Electrified Continuous Steel-Strip Annealing Furnace  
..... Jongwon Choi, Junil Mun, Jinheon Choi and Hookyung Lee... 87

Centrifugal Fan Design for a Smart Pest Trapping Device Using Design of Experiments  
..... Siwoo Jung, Ga Eun Jung, Yeji Yun, Dahye Lee and Jaehyun Yoon... 99

Analysis of the Current Status of Artificial Intelligence Research at Major Universities and  
Companies in Korea  
..... Haemyung Chon, Taegyong Jeong, Jingyun Kim, Iksoo Lee and Jackyou Noh... 111

## 위급상황 시 차량탈출을 위한 파워 윈도우 강제개방 기구설계§

이창훈\* · 이원명\* · 방찬혁\* · 석규은\* · 이승민\* · 이도건\* · 송용남\*†

\* 고려대학교 기계공학부

### Power Window Forced Opening Device Design for Vehicle Escape in case of Emergency

Changhoon Lee\*, Wonmyung Lee\*, Chanhyeok Bang\*,  
Gyueun Seok\*, Seungmin Lee\*, Dogun Lee\* and Yongnam Song\*†

\* School of Mechanical Engineering, Korea University

(Received December 31, 2024 ; Revised August 27, 2025 ; Accepted August 28, 2025)

**Key Words:** Linkage(링크지), Toggle Mechanism(토글 메커니즘), Toggle Point Position(토글 위치), Double Toggle Mechanism(이중 토글 메커니즘), Forced Opening(강제개방)

**초록:** 본 설계는 위급상황 시 파워 윈도우 시스템의 창문을 수동 강제개방이 가능하게 하는 것을 목표로 한다. 레버를 당기는 동작을 통해 창문의 움직임을 제한하는 평기어-웜기어의 연결을 끊어 사람에게 의해 강제개방이 가능케 한다. Dead-point position을 활용한 double toggle mechanism을 이용하여 차량 운행 시 발생하는 강한 진동과 충격에도 오작동하지 않으며, 힘이 증폭된다는 점을 이용하여 작은 힘으로도 쉽게 작동한다. 또한, 기존의 차량 내부 디자인 및 부품 디자인을 유지할 수 있도록 설계하여 공정의 변화도 최소화 하고자 하였다. 본 설계를 통해 긴급하게 차량을 탈출해야 하는 상황에서 탑승자의 신속한 탈출을 도와 인명을 보호할 수 있을 것으로 기대된다.

**Abstract:** This design aims to enable manual forced opening of the windows of the power window system in case of an emergency. A double toggle mechanism utilizing the dead-point position was designed to prevent malfunction even under strong vibrations and shocks during vehicle operation. By leveraging the force amplification effect, the system allows for easy operation with minimal effort. Through this design, it will be possible to protect human life by helping passengers to escape quickly in situations where they urgently need to escape the vehicle.

## 1. 서론

시간이 흐르며 자동차 산업이 급격한 기술 발전을 거듭함에 따라 수동 장치들은 점차 사라지고, 차량의 사용자 편의성은 비약적으로 향상되었다. 전기 모터를 사용해 운전자가 버튼 하나로 창문을 쉽게 조절할 수 있도록 돕는 파워 윈도우 시스템은 이러한 변화의 상징적인 예시이다. 그러나 이러한 자동화로 얻는 편리함은 위급 상황에서 심각한 제약을 초래할 수 있다.

현재 자동차의 파워 윈도우 시스템은 웜기어와 평기어의 결합을 통해 창문의 운동을 위한 동력이 전달되며, 이 시스템은 전기 모터가 작동해야만 정상적으로 기능한다. 이러한 구조는 전기 공급이 중단되거나 시스템에 오류가 발생한 경우, 창문을 수동으로 여는 것을 불가능하게 만든다.<sup>(1,2)</sup> 이로 인해 화재, 침수 사고 등 위급상황에서 차량이 가동되지 않으면 창문을 통한 탈출이 어려워질 수 있다.<sup>(3,4)</sup>

특히 전기차와 자율주행차는 복잡한 전자 시스템을 갖추고 있지만, 이들 차량의 창문에 대한 비상 탈

§ 이 논문은 대한기계학회 제14회 전국학생설계경진대회(2024. 10. 26., 고려대학교) 발표 논문임.

† Corresponding Author, [kurtbain@korea.ac.kr](mailto:kurtbain@korea.ac.kr)

© 2026 The Korean Society of Mechanical Engineers

출 기능은 충분히 고려되지 않았다.<sup>(5)</sup> 그에 따라 일반적으로 비상용 망치, 안전벨트 클립, 헤드레스트 등의 물체로 유리를 깨뜨려 탈출하는 방법이 권장되지만, 이러한 장비는 위급상황에서 협소한 공간 내에서 활용하기 어렵다.<sup>(6)</sup> 또한 창문을 파괴하는 것은 안전성의 위험이 있고, 쉽게 깨지지 않는 신뢰성 문제도 존재한다. 널리 알려진 방법 중 헤드레스트를 사용하여 창문을 깨는 방법은 헤드레스트를 탈거하는 시간이 소요되고, 창문을 깨기엔 충격력이 부족할 수 있다. 최근에는 적층유리와 같은 특수유리가 차량의 측면유리로 사용되며,<sup>(7)</sup> 이는 시중에 나와 있는 장치로도 파괴하기 어려운 특성을 지니고 있다.<sup>(8,9)</sup> 따라서 본 설계는 전력 장치를 사용하거나 유리창을 깨는 방식 대신, 사용자가 기계적으로 힘을 전달하여 파워 윈도우 시스템을 수동으로 전환할 수 있는 장치를 개발하고자 한다.

## 2. 설 계

### 2.1 설계 목표

본 설계의 목표는 전기 공급이 중단되거나 배터리가 방전된 경우에도 창문을 수동으로 개방할 수 있는 안전장치를 개발하는 것이다. 구체적인 설계 목표는 다음과 같다.

- 1) 신속하고 단순한 작동: 긴급상황에서는 소요 시간의 절약과 조작의 단순함이 생존의 중요한 요소이다. 따라서 최소한의 사용자 조작으로 즉각적인 작동이 이루어지도록 해야 한다. 훈련이나 사용 경험이 없는 사람들도 즉시 사용할 수 있도록 직관적인 인터페이스를 가지도록 설계해야 한다.
- 2) 신뢰성이 높은 설계: 사람의 안전과 관련된 장치는 신뢰성이 가장 중요하다. 따라서 다양한 환경 조건에서 오작동 없이 항상 작동 가능해야 한다. 그와 동시에 일반적인 상황에서 안전장치가 다른 기능의 사용을 방해하거나 신뢰도를 낮추어서도 안 된다. 따라서 차량의 운행 중에 발생할 수 있는 강한 진동과 충격에서도 오작동하지 않으며 파워 윈도우의 작동에 영향을 주어서 안 된다.
- 3) 유연한 설치 및 범용 호환성: 차량 도어 샷시와 도어 트림 간의 공간을 유연하게 활용할 수 있도록 와이어를 이용하고, 차량 샷시를 재설계하지 않고 파워 윈도우 커버의 변형과 링크 추가로 다양한 자동차 모델에 적용할 수 있도록 한다.

### 2.2 내부 분석

차량에 일반적으로 사용되는 파워 윈도우 시스템은 대부분 로프-풀리 방식이며 창문과 연결된 형태에 따라 single bowden과 double bowden 방식으로 나뉜다.<sup>(10)</sup> 로프-풀리 방식의 내부 구조는 다음과 같다.

파워 윈도우는 다음과 같은 원리로 동작한다.

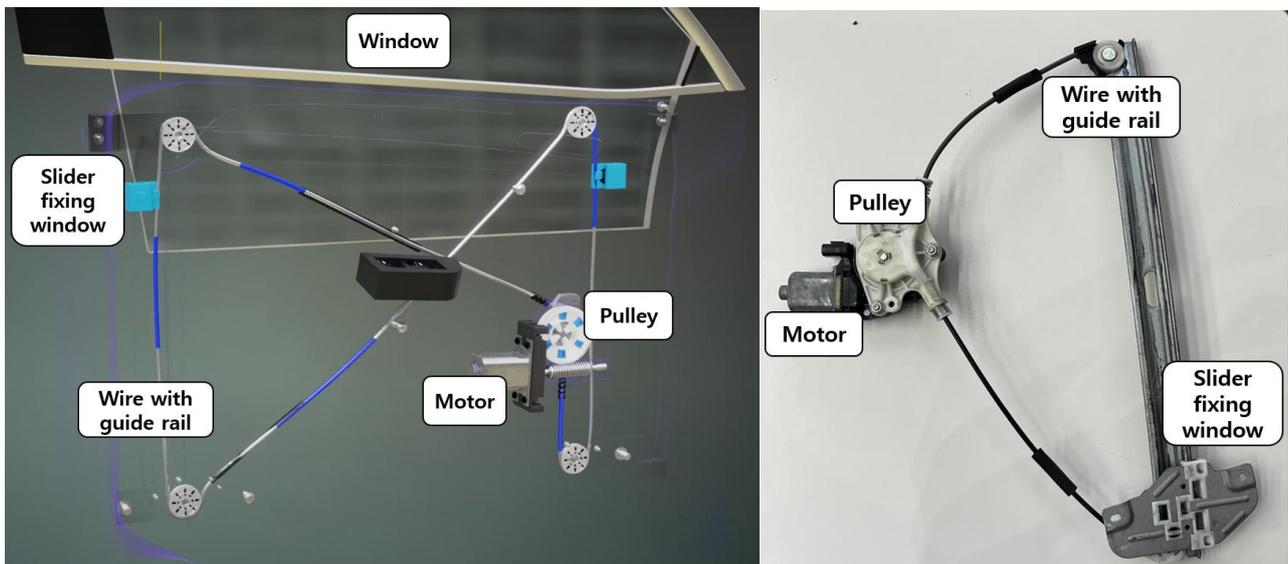


Fig. 1 Internal structure of power window system: (left) illustrated diagram of double bowden type<sup>(11)</sup>; (right) actual photograph of single bowden type



Fig. 2 (Left) Internal structure of the motor section: illustrated diagram<sup>(11)</sup>; (right) actual photograph of motor section

1) 모터부(motor)의 DC 모터(DC motor)가 동작하면 모터에 연결된 웜기어(worm gear)가 평기어(spur gear)를 회전시킨다. 이때 두 기어의 높은 기어비로 인하여 동력의 흐름이 반대로 된다. 즉, 평기어를 통해 웜기어를 회전시키는 운동은 불가능하며, 이를 통해 창문의 강제개방을 막는다.

2) 모터부의 기어가 풀리부(pulley)의 기어를 회전시키며 기어와 연결된 폴리도 함께 회전한다. 이로 인해 폴리 주변에 감긴 와이어(wire)가 감기고 풀리게 된다.

3) 감기고 풀리는 와이어에 의하여 차량 창문이 가이드레일(guide rail)을 따라 상하운동을 한다.

파워 윈도우 시스템의 구조를 고려, 기존 부품을 변화시키지 않고 목표를 달성하기 위해 모터부와 풀리부 사이 기어를 탈거하는 방향으로 설계하였다. 본 설계의 목표를 달성하기 위한 필수 기능은 아래와 같다.

1) 자동차 운행 상황과 정차 상황에서 파워 윈도우 시스템이 본래의 기능을 할 수 있도록 모터부와 풀리부가 강하게 결합되어 있어야 한다.

2) 모터부와 풀리부의 완전한 탈거를 위해 모터 축 방향으로 일직선상 운동을 해야 한다.

3) 모터부와 풀리부가 탈거된 후, 탈거 상태를 유지해야 한다.

위의 조건들을 고려했을 때 메커니즘의 구조적 안정성(structural stability)과 입력 제어의 강건성(robustness of input control)을 확보하는 것이 중요하다.

본 연구에서는 이러한 요구사항을 만족시키기 위해 더블 토글 메커니즘(DTM: double toggle mechanism)을 적용하였다. DTM은 단일 지점에서 집중 하중을 지지하는 단일 토글 메커니즘(STM: single toggle mechanism)과 비교할 때, 하중을 다수의 지점으로 분산시켜 응력 집중을 완화하고 구조적 안정성을 크게 향상시킨다. 더 나아가, DTM의 구조적 특성은 메커니즘의 오작동을 유발할 수 있는 외력의 유효 방향을 제한함으로써, 단일 방향의 입력만으로도 안정적인 구동이 가능하도록 한다.

DTM의 기구학적 원리는 다수의 STM을 조합하여 단일 자유도(DOF: degree of freedom)를 구현하는 과정으로 설명할 수 있다. 즉, 복수의 STM을 사용하여 단일 출력부의 순수한 병진 운동을 생성하기 위해서는 각 STM의 입력 링크와 출력 링크가 모두 동기화되어야 한다. DTM은 이러한 다중 입출력 링크를 각각 하나의 슬라이딩 입력부와 출력부로 통합하여 이상적인 1-DOF 슬라이딩 메커니즘을 구현한 것이다.

이러한 구조적 안정성과 입력 방향 제한을 통한 구동 신뢰성 확보라는 장점에 근거하여, 본 설계의 핵심 구동부로 DTM을 채택하는 타당성을 확보하였다.

### 2.3 더블 토글 메커니즘(double toggle mechanism)

#### 2.3.1 개요

DTM은 9개의 링크, 10개의 회전 조인트, 그리고 2개의 프리즈매틱(prismatic) 조인트가 구조적으로 대칭을 띄고 이러한 구성에 따르면, Grubler-Kutzbach 공식에 의해 메커니즘의 자유도(DOF)는 0으로 계산된다.

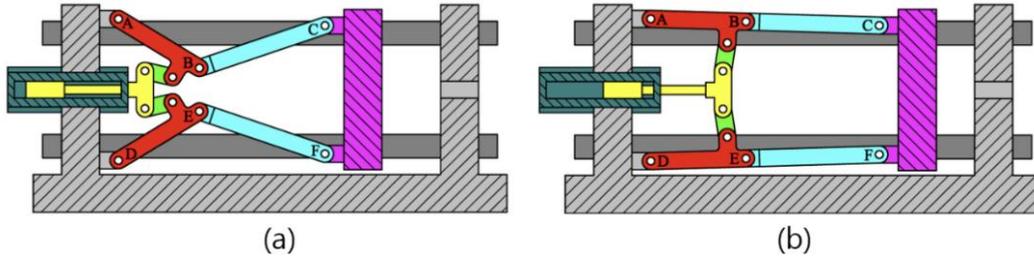


Fig. 3 Configurations of a nine-link type double-toggle mold/die clamping mechanism: (a) final position; (b) initial position<sup>(12)</sup>

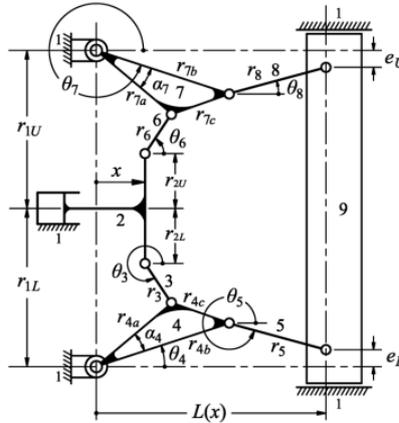


Fig. 4 Structural diagram of a nine-link type double-toggle mold/die clamping mechanism<sup>(12)</sup>

$$F_p = 3(N - 1) - 2(J_R + J_P) = 3(9 - 1) - 2(10 + 2) = 0 \quad (1)$$

여기서  $N$ 은 링크의 개수,  $J_R$ 은 회전 조인트의 개수,  $J_P$ 은 프리즈매틱 조인트의 개수이다. 이 공식은 메커니즘이 움직일 수 없는 상태, 즉 0 DOF를 가진 과구속(overconstrained) 상태임을 의미한다. 그러나 실제로 이 메커니즘은 1 DOF를 가지며, 이는 대칭적인 구조와 특별한 기하학적 배치 덕분에 가능해진다. 이를 통해 DTM은 3가지의 기능을 수행할 수 있다.

1) 모든 링크가 일렬로 정렬되어 있을 경우 대칭적인 두 링크가 토글 위치에 존재하여 배력 기구로서 강한 힘에도 견딜 수 있는 상태가 된다.

2) 대칭적인 구조를 바탕으로 중앙링크를 기준으로 일직선상 운동을 할 수 있다.

3) 중앙 링크의 움직임이 끝나 모든 링크가 접혀질 경우 0 DOF로 전환되어 강한 고정력을 제공한다.

DTM 링크는 총 9개의 링크로 이루어진 상부(top)와 하부(bottom) 대칭 구조를 가지고 있으나, 본 설계에서는 자유도를 고정하여 링크가 동일한 거동을 보이도록 할 예정이다. 따라서, 설계 과정에서는 상부와 하부 구조 모두를 고려할 필요가 없으며, 하부 구조에 대해서만 집중하여 분석을 진행할 것이다.

따라서 본 설계에서 사용될 링크의 치수는 Fig. 4의  $r_{1L}$ ,  $r_{2L}$ ,  $r_3$ ,  $r_{4a}$ ,  $r_{4b}$ ,  $r_{4c}$ ,  $r_5$ 로 명명되며, 이와 더불어 상대적 위치  $L(x)$ 가 정의된다. 여기서  $L(x)$ 는 자동차 문의 샤프에 부착된 링크(ground link)에서부터 모터부와 풀리부가 맞닿는 지점까지의 거리를 나타낸다. 링크 치수 간의 기하학적 관계는 다음과 같다.<sup>(12)</sup>

$$\alpha_4 = \cos^{-1} \left( \frac{r_{4a}^2 + r_{4b}^2 - r_{4c}^2}{2r_{4a}r_{4b}} \right) \quad (2)$$

$$l_L = \sqrt{x^2 + (r_{1L} - r_{2L})^2} \quad (3)$$

$$\gamma_{1L} = \sin^{-1}(x/l_L) \quad (4)$$

$$\gamma_{2L} = \cos^{-1}\left(\frac{l_L^2 + r_{4a}^2 - r_3^2}{2l_L r_{4a}}\right) \quad (5)$$

$$\theta_3 = 270^\circ - \gamma_{1L} + \cos^{-1}\left(\frac{l_L^2 + r_3^2 - r_{4a}^2}{2l_L r_3}\right) \quad (6)$$

$$\theta_4 = 90^\circ - (\alpha_4 + \gamma_{1L} + \gamma_{2L}) \quad (7)$$

$$\theta_5 = 360^\circ - \sin^{-1}\left(\frac{r_{4b} \sin \theta_4 - e_L}{r_5}\right) \quad (8)$$

$$L(x) = r_{4b} \cos \theta_4 + \sqrt{r_5^2 - (r_{4b} \sin \theta_4 - e_L)^2} \quad (9)$$

### 2.3.2 DTM 설계

위의 식을 바탕으로 프로그래밍을 통해 링크 길이를 선정한다. 링크 길이 산정을 통해 설계된 DTM 링크가 차량에 적합하게 설치될 수 있도록 하기 위한 초기 조건과 제약 조건은 다음과 같다.

자동차 도어 샤시 및 도어 트림에서 최소한의 변형을 주어야 하기 때문에 링크의 설치 가능 여유 공간을 50 mm로 설정한다.<sup>(13)</sup> 해당 치수를 바탕으로 각 링크의 길이를 산출하였다.

추가적으로, 모터부의 기어축이 풀리부로부터 분리되어야 하는 거리는 9 mm로 측정되었다. 이를 고려하여, 모터부의 축이 원활하게 빠져나갈 수 있는 최소 길이를 12 mm로 설정하고 DTM 링크 길이를 산정한다.

프로그래밍을 통해 1,000개의 각 샘플에서 파라미터  $L, l_L, r_{4a}, r_{4b}, r_{4c}, r_5, r_3$ 는 지정된 범위 내에서 무작위로 생성되며,  $x$ 값은 3과 25로 고정된다.  $x$ 값은 축 구멍을 위한 조인트의 최소 위치, 슬라이드 구조물에 대한 최대 위치로 임의 설정되었다. 특히,  $r_{4b} + r_5$ 는 차량 공간을 나타내기 위해 48 ~ 50 mm로 제한했다. 최종 설계를 위해 선정한 링크 치수 길이는 다음과 같다.

$$r_{1L} = 26 \text{ mm} \quad (10)$$

$$r_{4b} = 26 \text{ mm} \quad (11)$$

$$r_5 = 22 \text{ mm} \quad (12)$$

이는 임의로 설정한 링크 길이이며, 아래 표를 참고하면 차량 도어의 내부 공간이 협소하여  $r_{4b} + r_5$ 가 약 30 mm로 좁아지는 경우에도 호환되는 케이스를 보여준다. 이처럼  $r_{4b} + r_5$ 가 최종 설계보다 더 짧게 설계할 수 있다. 그럼에도 해당 설계를 최종 설계로 채택하지 않은 이유는 본 메커니즘의 핵심적인 사용 시나리오와 기구학적 특성을 종합적으로 고려한 결과이기 때문이다. 고려된 주요 사항은 다음과 같다.

#### 1) 작동 전 구간에서의 ‘사용자 편의성’ 확보(힘 증폭비의 안정성)

일반적인 클램핑용 토글 메커니즘은 토글 위치에서의 최대 힘 증폭이 가장 중요하다. 하지만 본 설계는 사용자가 레버를 ‘당기는’ 전체 과정에서 무리 없는 힘을 유지하는 것이 핵심이다. 즉, 토글 위치를 벗어나는 순간부터 작동이 끝날 때까지 힘 증폭비가 급격히 감소하지 않고 완만하게 유지되어야 한다. 기구학적으로, 장치의 크기를 줄여 이동 거리 대비 작동 거리(스트로크 비)를 높이면, 필연적으로 특정 구간에서 힘 증폭비가 크게 감소하는 상충 관계(trade-off)가 발생한다. 크기를 과도하게 줄일 경우, 레버를 당기는 마지막 구간에서 사용자가 매우 큰 힘을 가해야 하는 문제가 발생하여 긴급 상황에서의 사용성이 저하될 수 있다. 최종 설계의 링크 조합은 12 mm의 작동 거리를 확보하면서도 전 구간에서 힘 증폭비를 안정적으로 유지하여 사용자가 작은 힘으로도 쉽게 조작할 수 있도록 설계된 결과이다.

#### 2) 소형화에 따른 ‘오차 민감도’ 증가 문제

Table 1 Results of the parameter study for the function  $L(x)$ :  $30 \text{ mm} < r4b + r5 < 40 \text{ mm}$ 

r1L	r2L	r4a	r4b	r4c	r5	r3	x1	x2	L(x1)	L(x2)	$\Delta L$	r4b+r5
20.4	20.6	12.1	12.8	9.9	17.2	14.7	3.0	25.0	4.6	16.9	12.3	30.0
25.3	20.2	14.5	19.4	10.6	20.2	19.5	3.0	25.0	1.6	15.0	13.4	39.6
27.0	22.2	12.4	16.5	6.9	13.9	13.2	3.0	25.0	16.1	28.4	12.3	30.4
24.2	24.0	14.5	13.5	7.2	17.7	15.2	3.0	25.0	6.2	19.3	13.1	31.3
28.9	12.7	9.0	13.6	12.7	20.2	21.0	3.0	25.0	14.4	28.1	13.7	33.7
28.5	10.5	9.3	12.6	5.9	22.2	26.8	3.0	25.0	16.8	28.9	12.1	34.8
25.5	22.6	12.7	13.6	5.9	16.6	14.5	3.0	25.0	9.8	23.7	14.0	30.2
29.5	19.3	12.6	18.3	6.6	18.0	20.7	3.0	25.0	14.9	28.4	13.5	36.3
22.6	23.5	14.2	15.9	8.7	21.7	14.4	3.0	25.0	11.1	24.6	13.5	37.6
20.7	22.3	18.9	17.6	6.2	19.0	21.5	3.0	25.0	2.2	14.5	12.3	36.6
29.6	12.6	9.8	17.5	11.6	16.3	21.2	3.0	25.0	16.5	31.2	14.7	33.9
20.4	16.3	11.5	11.0	5.6	22.3	16.0	3.0	25.0	14.4	28.4	14.0	33.3
24.3	24.5	15.4	18.5	9.4	19.2	14.2	3.0	25.0	5.1	19.2	14.1	37.7
29.5	14.5	8.6	14.1	12.1	25.7	23.2	3.0	25.0	14.2	27.6	13.5	39.8
22.1	21.2	14.8	14.7	6.1	16.3	15.3	3.0	25.0	5.0	19.1	14.1	31.0
23.5	21.0	12.9	15.2	6.4	18.9	13.7	3.0	25.0	14.9	28.2	13.3	34.1
25.7	16.7	11.3	17.8	17.1	18.8	16.5	3.0	25.0	3.6	15.6	12.0	36.6
26.9	22.6	12.3	15.6	11.2	20.9	15.6	3.0	25.0	9.5	22.5	12.9	36.5
27.4	17.3	10.3	15.2	15.9	23.4	16.8	3.0	25.0	13.6	26.6	13.1	38.6
25.5	23.3	15.3	12.9	5.8	20.0	18.0	3.0	25.0	10.2	22.4	12.2	32.8
29.3	13.8	8.7	12.8	6.8	22.3	23.7	3.0	25.0	16.3	30.5	14.2	35.1
25.6	23.5	14.1	17.0	7.3	20.2	14.7	3.0	25.0	13.8	26.1	12.3	37.1
25.1	10.8	9.0	14.2	9.7	21.9	21.7	3.0	25.0	15.2	29.7	14.5	36.1
23.7	11.4	11.1	15.4	7.3	21.2	22.3	3.0	25.0	14.8	27.6	12.9	36.6
21.1	24.3	18.1	14.8	5.7	17.4	22.4	3.0	25.0	3.3	16.0	12.7	32.2
26.0	18.6	11.4	17.1	8.6	20.7	16.3	3.0	25.0	17.9	32.5	14.6	37.8
24.8	19.3	10.9	13.2	5.3	20.7	15.0	3.0	25.0	17.8	32.5	14.7	33.9
25.2	22.5	18.9	14.1	6.4	20.8	22.8	3.0	25.0	7.9	21.0	13.0	34.9
26.4	14.6	12.7	15.5	5.8	18.7	24.5	3.0	25.0	7.4	21.6	14.1	34.2

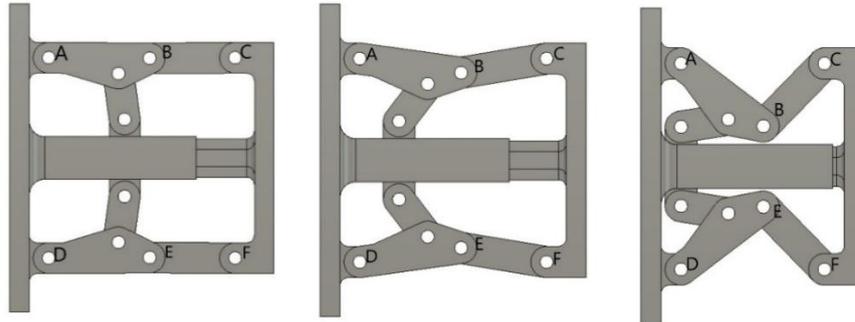


Fig. 5 Configurations of double toggle mechanism (from left to right: initial; intermediate; final position)

Double toggle mechanism은 여러 링크가 복합적으로 움직이는 구조적 특성상, 각 부품의 제작 공차나 조립 오차에 성능이 민감하게 영향을 받는다. 메커니즘의 전체 크기가 작아질수록 동일한 크기의 오차(예: 0.1 mm)가 전체 시스템에 미치는 상대적인 영향은 더욱 커진다. 이는 링크 간의 간섭, 의도치 않은 잠김(jamming) 현상, 또는 토글 위치 유지가 불안정해지는 문제로 이어질 수 있다. 따라서 최종 설계는 제조 및 조립 과정에서 발생할 수 있는 잠재적 오차를 고려하여, 강건성(robustness)과 신뢰성을 확보할 수 있는 균형점을 찾은 결과물이다. 무리한 소형화보다는 위급 상황에서 어떠한 경우에도 오작동 없이 안정적으로 기능하는 것을 최우선 목표로 설정하여 최종 설계를 결정하였다.

#### 2.4 작동 원리

DTM의 작동 순서는 다음과 같다.

- 1) 초기 상태 : 대칭적인 구조를 띠는 A, B, C 조인트와 D, E, F 조인트가 각각 일직선을 이루며 배열되어 각 링크가 토글 위치에 존재하며 배력 구조로서 강한 힘에도 견딜 수 있는 상태이다. 이를 통해 평상시 모터부와 풀리부의 강력한 결합을 제공할 수 있다.
- 2) 중간 상태 : 본 설계에서 요구하는 점은 모터부-풀리부의 탈거이다. 중앙 링크를 당기게 되면 대칭적인 A, B, C 조인트와 D, E, F 조인트가 토글 위치에서 벗어나게 되며 배력 효과가 감소한다. 이를 통해 모터 축을 기준으로 한 슬라이딩 운동이 가능하게 된다.

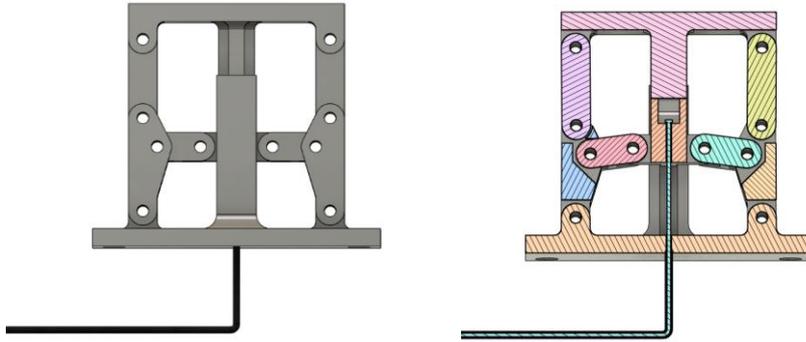


Fig. 6 (Left) DTM with wire before operating; (right) DTM with wire-cross section before operating

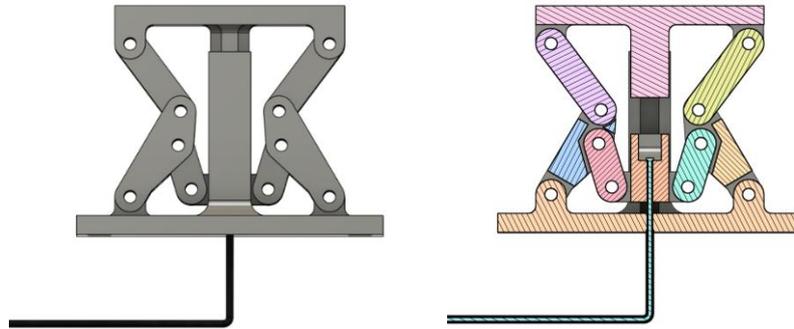


Fig. 7 (Left) DTM with wire after operating; (right) DTM with wire-cross section after operating

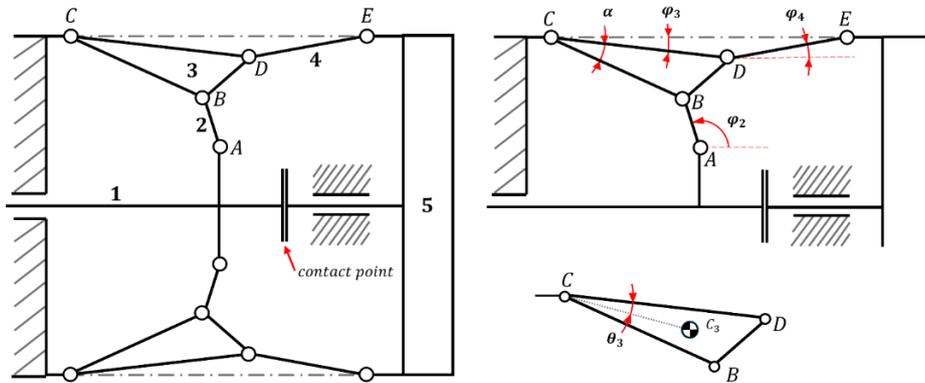


Fig. 8 The diagrams to calculate force balance

3) 최종 상태 : 모든 링크들이 고정된 구조를 이루고 있어, 이동이 불가능한 0 DOF 상태다. 모터부와 연결된 플레이트는 두 대칭 링크 C와 F의 연결로 인해 움직임이 제한된다. 이를 통해 모터부-폴리부 탈거 후 복구를 불가능하게 만든다.

와이어를 사용하는 것으로 설계적 유연성을 얻는 것과 더불어 와이어 커버를 통해 힘이 전달되는 방향을 고정할 수 있다. 따라서 와이어가 항상 일정한 방향으로 링크에 동력을 전달할 수 있어 동작의 안정성을 높일 수 있다.

### 2.5 토글 위치 유지 설계 및 검증

DTM 링크는 차량운행에 의해 발생하는 진동이나 충격 또는 오조작으로 인해 토글 위치에서 벗어나서는 안 된다. 이를 위하여 이론적 토글 위치에서 미세하게 이탈한 위치를 초기위치로 설정하였고, 이탈

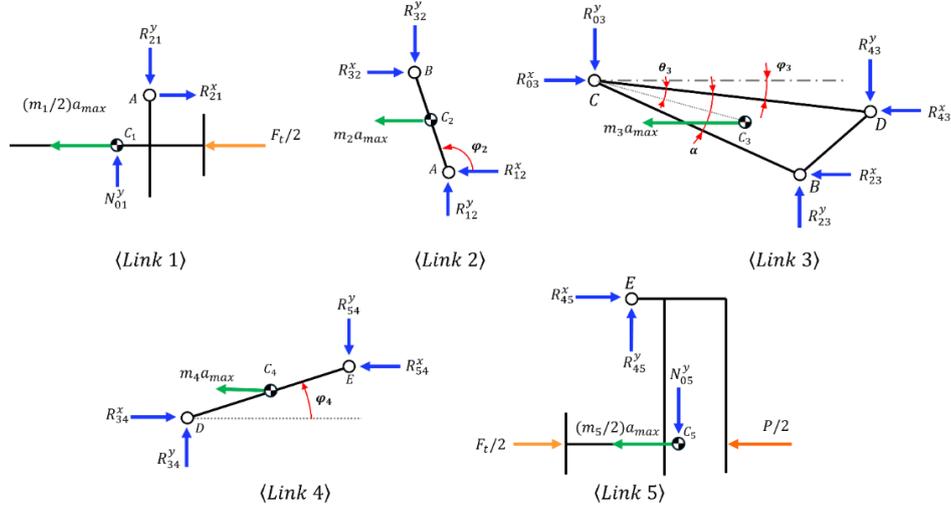


Fig. 9 Force analysis on each link

한 위치에서 Fig. 8의 1번 링크와 5번 링크(이하 링크 1, 링크 5)를 접촉하게 만드는 설계를 통해 저항성을 얻을 수 있었다. 와이어로 일정한 크기 이상의 힘을 가하여 모터부에 작용하는 외력을 이겨내야 사점에서 벗어날 수 있으며 모터부에서 외력이 가해질 경우 링크의 구조에 의해 링크 1과 링크 5가 서로 반대방향으로 힘을 가하기 때문에 토글이 오히려 더욱 강하게 유지된다.

차량 주행 중의 기계적 진동에 의해 접촉 상태에 있던 링크 1과 링크 5의 접촉이 분리될 가능성이 있다. 이를 방지하기 위해 모터부에 인가되는 외력  $P$ 는 하중 불균형과 진동 가속도를 상쇄할 수 있는 임계값 이상으로 설정되어야 한다. 해당 임계값을 구하기 위해 링크 간 접촉력  $F_t$ , 모터부 외력  $P$ , 주행 진동으로부터 유발되는 최대 가속도  $a_{max}$ 를 정의하고, 자유물체도(free body diagram)에 기반하여 평형식을 세우면 다음의 관계식을 얻는다.

$$[\text{Link 1}] \quad \begin{cases} \sum F_x = R_{21}^x - \frac{1}{2}m_1 a_{max} - \frac{F_t}{2} = 0 \\ \sum F_y = -N_{01} + R_{21}^y = 0 \\ \sum M_z = M_{01} = 0 \end{cases} \quad (13)$$

$$[\text{Link 2}] \quad \begin{cases} \sum F_x = R_{32}^x - R_{12}^x - m_2 a_{max} = 0 \\ \sum F_y = R_{12}^y - R_{32}^y = 0 \\ \sum M_{\frac{z}{A}} = -AB \sin \varphi_2 R_{32}^x - AB \cos \varphi_2 R_{32}^y + l_{A,c2} \sin \varphi_2 m_2 a_{max} = 0 \end{cases} \quad (14)$$

$$[\text{Link 3}] \quad \begin{cases} \sum F_x = R_{03}^x - R_{23}^x - R_{43}^x - m_3 a_{max} = 0 \\ \sum F_y = -R_{03}^y + R_{23}^y - R_{43}^y = 0 \\ \sum M_{\frac{z}{C}} = -CD \sin \varphi_3 R_{43}^x - CD \cos \varphi_3 R_{43}^y - BC \sin(\varphi_3 + \alpha) R_{23}^x + BC \cos(\varphi_3 + \alpha) R_{23}^y - l_{C,c3} \sin(\theta_3 + \varphi_3) m_3 a_{max} = 0 \end{cases} \quad (15)$$

$$[\text{Link 4}] \quad \begin{cases} \sum F_x = R_{34}^x - R_{54}^x - m_4 a_{max} = 0 \\ \sum F_y = R_{34}^y - R_{54}^y = 0 \\ \sum M_{\frac{z}{D}} = DE \sin \varphi_4 R_{54}^x - DE \cos \varphi_4 R_{54}^y + l_{D,c4} \sin \varphi_4 m_4 a_{max} = 0 \end{cases} \quad (16)$$

$$[\text{Link 5}] \quad \begin{cases} \sum F_x = R_{45}^x + \frac{F_t}{2} - \frac{m_5}{2} a_{max} - \frac{P}{2} = 0 \\ \sum F_y = R_{45}^y - N_{05} = 0 \\ \sum M_{z/E} = M_{05} = 0 \end{cases} \quad (17)$$

이때 link 2와 link 4는 대칭형태임을 이용하면 다음과 같다.

$$l_{A,c2} = \frac{1}{2}AB \quad (18)$$

$$l_{D,c4} = \frac{1}{2}DE \quad (19)$$

$F_t = 0$ 인 경우는 DTM에 가해지는 가속도( $a_{max}$ )에 의해 링크 1과 링크 5의 접촉이 분리되는 상황을 의미하고, 이는 곧 토글이 풀릴 수 있는 상황이다.  $F_t = 0$ 으로 두고  $P$ 와  $a_{max}$ 의 관계식을 구하면, DTM이 토글 위치에서 벗어나는 시점에서의 가속도와 필요 하중간의 관계를 알 수 있다. 따라서  $F_t = 0$ 을 대입하고  $P$ 와  $a_{max}$ 에 대하여 항을 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & P \left[ -\frac{CD}{2}(\sin \varphi_3 + \tan \varphi_4 \cos \varphi_3) \right] \\ & - a_{max} \left[ CD \left\{ \sin \varphi_3 \left( m_4 + \frac{m_5}{2} \right) + \frac{\cos \varphi_3}{2} \tan \varphi_4 (m_4 + m_5) \right\} \right. \\ & \left. + BC \left\{ \sin(\varphi_3 + \alpha) \left( m_2 + \frac{m_1}{2} \right) + \frac{\cos(\varphi_3 + \alpha)}{2} \tan \varphi_2 (m_1 + m_2) + l_{C,c3} \sin(\theta_3 + \varphi_3) m_3 \right\} \right] \\ & = 0 \end{aligned} \quad (20)$$

$$\frac{a_{max}}{P} \left[ \frac{1}{kg} \right] = \frac{-\frac{CD}{2}(\sin \varphi_3 + \tan \varphi_4 \cos \varphi_3)}{\left[ \begin{aligned} & CD \left\{ \sin \varphi_3 \left( m_4 + \frac{m_5}{2} \right) + \frac{\cos \varphi_3}{2} \tan \varphi_4 (m_4 + m_5) \right\} \\ & + BC \left\{ \sin(\varphi_3 + \alpha) \left( m_2 + \frac{m_1}{2} \right) + \frac{\cos(\varphi_3 + \alpha)}{2} \tan \varphi_2 (m_1 + m_2) + l_{C,c3} \sin(\theta_3 + \varphi_3) m_3 \right\} \end{aligned} \right]} \quad (21)$$

본 연구에서 설계한 DTM을 바탕으로 위 식에서의 변수에 대한 값들을 결정한다.

위 값들을 바탕으로  $\frac{a_{max}}{P}$  식을 계산한 결과는 다음과 같다.

$$\frac{a_{max}}{P} = 0.42446871 \left[ \frac{1}{kg} \right] \quad (22)$$

따라서 차량에서 발생하는  $a_{max}$ 가 정해질 경우, 해당 가속도에서 토글 위치를 유지하기 위한 하중  $P$ 의 범위는 다음과 같다.

$$P \geq \frac{a_{max}}{0.42446871} [N] \quad (23)$$

일반적인 주행 환경에서 차체 진동 가속도는 약 2.2 ~ 4.4 G 수준으로 보고되어 있으므로,<sup>(14)</sup> 본 연구에서는  $a_{max} = 4.4$  G를 적용하였다. 그 결과는 다음과 같다.

**Table 2** Parameter values for DTM linkage

Length of link	Center of mass	Angle between links	Mass of link
$CD = 26 \text{ mm}$ $BC = 18.439 \text{ mm}$	$l_{A,c2} = \frac{1}{2}AB = 6 \text{ mm}$ $l_{C,c3} = 13.466 \text{ mm}$ $l_{D,c4} = \frac{1}{2}DE = 11 \text{ mm}$	$\varphi_2 = 98.28106^\circ$ $\varphi_3 = 0.40032^\circ$ $\varphi_4 = 0.47311^\circ$ $\alpha = 12.52713^\circ$ $\theta_3 = 4.25421^\circ$	$m_1 = 5.428g$ $m_2 = 2.719g$ $m_3 = 7.676g$ $m_4 = 5.212g$ $m_5 = 19.193g$

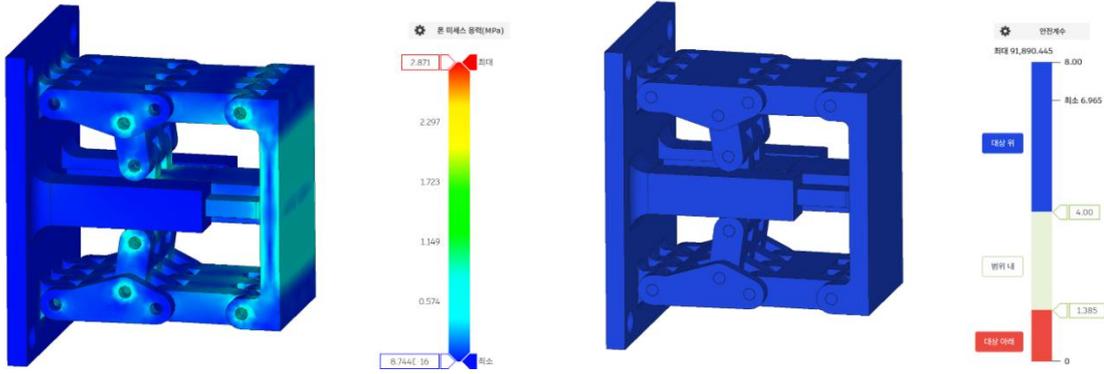


Fig. 10 Static stress analysis of DTM (material: ABS)

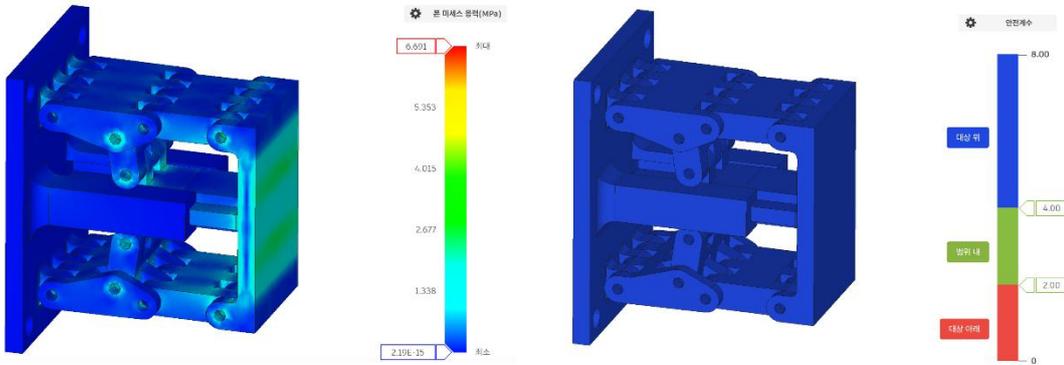


Fig. 11 Static stress analysis of DTM (material: aluminium 6061-T6)

$$P \geq 101.6547486 [N] \tag{24}$$

이를 통해 모터부의 외력  $P$ 가 101.6547 N 이상이면 통상적인 차량 진동으로 인한 링크 이탈(오작동)을 방지할 수 있음을 확인하였다.

또한 위 임계하중에 대한 정적 응력 해석(Fusion 360)을 진행하여 임계하중의 타당성을 검증하였다.

3D 프린터(ABS 플라스틱 소재) 시제품의 질량·무게중심 길이 등의 값을 기반으로 정적 응력 및 안전계수를 분석한 결과 최소 안전계수는 약 6.965으로, 3 이상이기 때문에 DTM이 구조적 여유를 확보한 채 정상적으로 작동할 수 있음을 알 수 있다.<sup>(15)</sup> 아울러 실제 차량 양산에서는 금속 소재를 적용할 수 있으므로 ABS를 사용할 때보다 더 높은 안전계수를 얻을 수 있다.

알루미늄 6061-T6 소재를 적용하여 동일한 계산을 진행, 최소 하중을 구하면 다음과 같다.

$$P \geq 258.865112 [N] \tag{25}$$

해당 최소하중  $P$ 를 바탕으로 정적응력 해석을 진행한 결과 최소 안전계수는 15로 ABS 링크의 안전계수보다 2배 이상 높은 것을 확인할 수 있었다.

다음으로 토글 위치를 유지하기 위한 최소 하중  $P$ 가 가해질 때의 사용성에 대한 검증을 진행하였다.

최소 하중  $P$ 가 가해질 때의 사용자가 탈출장치를 작동시키기 위한 최소힘을 구하기 위해 해당 위치에서의 힘 증폭비를 구한다. 위의 FBD에서  $a_{max} = F_t = P = 0$ 으로 두고, 링크 1과 링크 5에  $F_p$ 와  $F_c$ 가 각각 입력힘과 출력힘으로 작용한다고 수정하고 식을 정리한다.

$$FA = \frac{F_c}{F_p} = -\frac{BC \sin(\varphi_3 + \alpha) + \tan\varphi_2 \cos(\varphi_3 + \alpha)}{CD \sin\varphi_3 + \tan\varphi_4 \cos\varphi_3} \tag{26}$$

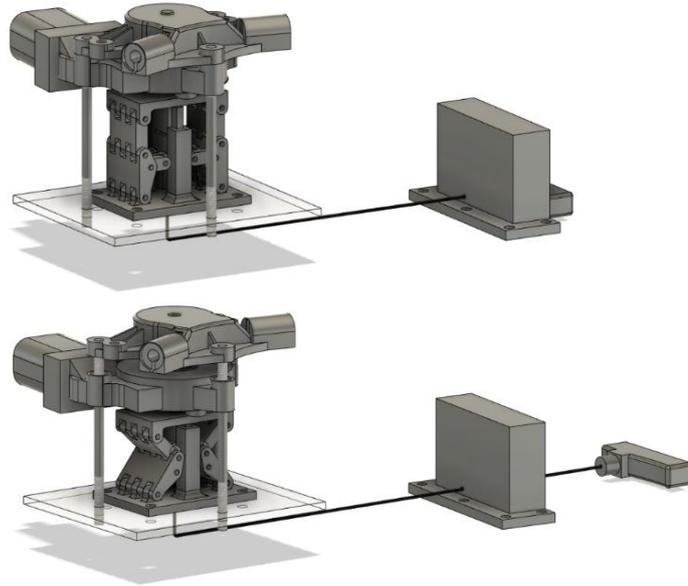


Fig. 12 DTM system with half-screw thread bolt and the lever (top: before operating; bottom: after operating)

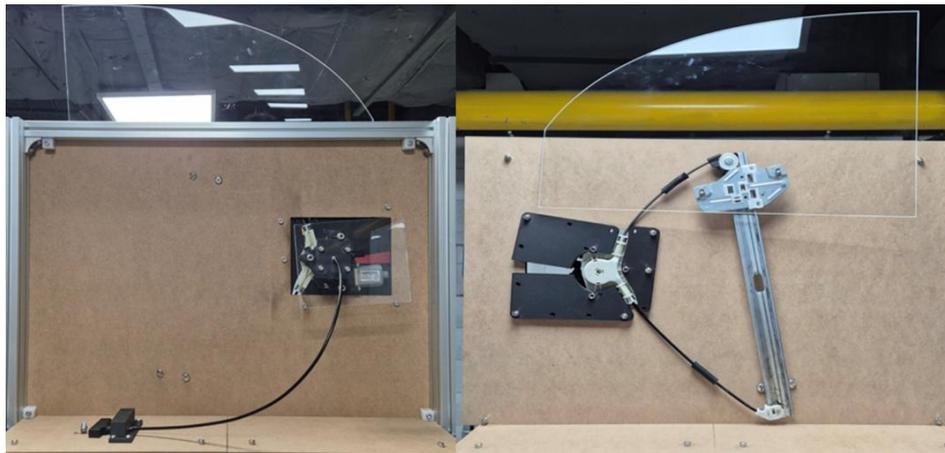


Fig. 13 Newly designed power window system (left: inner side of the vehicle; right: outer side of the vehicle)

이때, 입력 링크(링크 1)가 토글 위치를 지나치면 링크 1과 링크 5의 운동방향이 반대가 되므로  $FA$  값은 음수가 된다.

$$FA = \frac{F_c}{F_p} = -301.1298 \quad (27)$$

따라서 사용자가 필요로 하는 입력힘의 크기는 다음과 같다.

$$F_p = 0.3375777[N] \quad (28)$$

또한, 사용자가 장치를 작동시키기 위해 당겨야 하는 최소 구동력은 0.3376 N으로 산출되었다. 이는 성인 남녀의 평균 손가락 굽힘 및 인장력이 수십 뉴턴 이상임을 고려할 때,<sup>(16)</sup> 본 장치의 요구력은 실제 사용자가 손쉽게 작동 가능한 수준임을 확인할 수 있다. 따라서 본 장치는 대부분의 사용자가 무리없이 한 손으로 조작할 수 있다.

## 2.6 최종 설계

파워 윈도우 강제개방 기구의 작동 과정은 아래와 같다.

- 1) 사용자가 레버를 당긴다.
- 2) 레버에 연결된 와이어에 의해 Fig. 8의 링크 1이 당겨진다.
- 3) 그로 인해 Fig. 8의 링크 3과 링크 4도 당겨지면서 토글 위치를 벗어나 1 DOF 평행이동을 시작한다.
- 4) 모터부가 12 mm만큼 슬라이딩을 하여 모터부가 폴리부로부터 탈거된다.
- 5) 최종적으로 파워 윈도우 강제개방 기구는 토글 위치(1 DOF)에서 최종위치(0 DOF)로 도달하여 고정된다.

## 3. 결론

### 3.1 최종 결과물

Fig. 13은 자동차 문에서 파워 윈도우와 본 설계의 동력 전달 부분만 제작한 시제품 모습이다.

파워 윈도우 강제개방 기구를 사용하는 과정은 다음과 같다.

- 1) 위급상황 시 탑승자는 레버를 당긴다.
  - 2) 레버에 연결된 와이어에 의해 DTM 링크가 접힌다.
  - 3) DTM 링크가 접히며 모터부가 폴리부로부터 탈거된다.
  - 4) 탑승자가 수동으로 창문을 내린다.
- 1)의 과정에서 탑승자가 레버를 당기는 방식은 레버를 팔로 잡아당기는 방식뿐 아니라 자전거 브레이크처럼 악력을 사용하는 방식으로도 변형이 가능하다. 이와 같은 브레이크 레버 방식은 체구가 작은 사용자나 한 손만 사용할 수 있는 긴급 상황에서도 작동의 편의성과 직관성을 높이는 대안적 설계로 적용될 수 있다.

Fig. 14는 본 장치의 작동 전과 후의 모습이다.

DTM 링크의 자세한 각 상태 및 작동 과정은 다음과 같다.

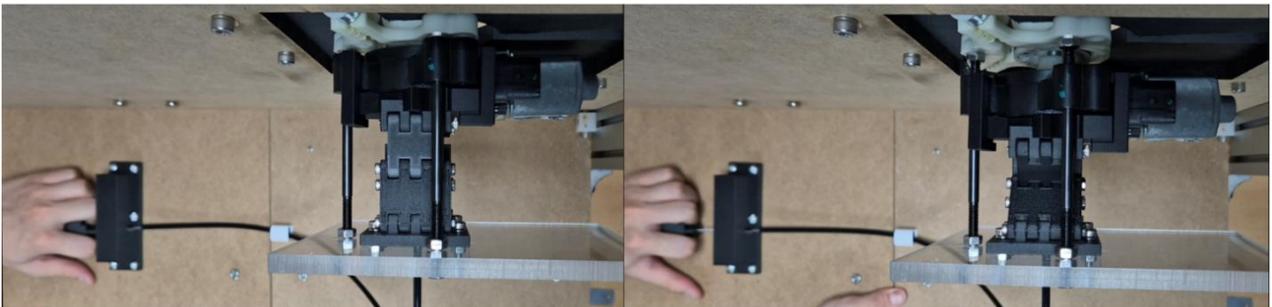
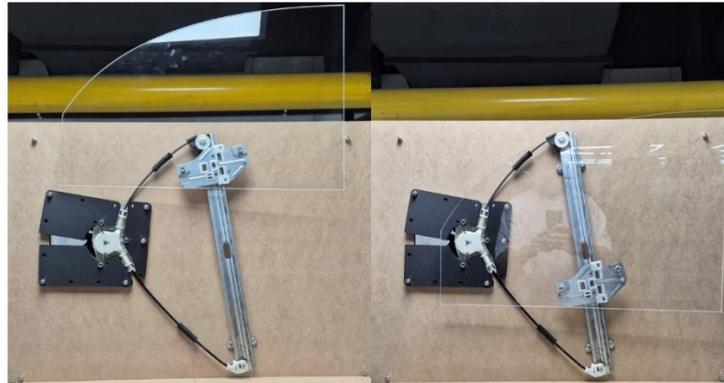


Fig. 14 Top view of the proposed design: (left) before; (right) after



Fig. 15 The appearance of the DTM at each stage (from left to right: initial; intermediate; final position)



**Fig. 16** Manual operation of the power window (left) before; (right) after

Fig. 16은 모터부와 폴리부의 탈거 후 파워 윈도우 강제개방 이전과 이후를 보여준다.

### 3.2 연구의 효과

본 연구는 기존방식과 다르게 창문을 파괴하지 않고 탈거하는 방식을 통해 탑승자의 탈출을 돕는다. 그 이점은 다음과 같다.

1) 본 설계는 유리의 종류에 상관없이 창문을 안전하게 탈거할 수 있는 기능을 제공하기 때문에, 강화 유리, 적층유리 등 다양한 유형의 유리가 사용된 파워 윈도우를 가진 모든 차량에 적용이 가능하다. 기존 시스템에서는 유리의 파손 가능성과 구조적 제약으로 인해 차량마다 다른 대응 방식이 필요할 수 있었으나, 본 설계는 유리 종류에 구애받지 않고 동일하게 적용되기 때문에 호환성과 신뢰성이 높다.

2) 창문이 파손되지 않은 상태로 자동차 문 내부로 안전하게 수납될 수 있기 때문에, 사용자가 직접적인 부상을 입을 가능성이 작다. 기존의 창문 파괴 방식을 사용할 경우, 유리가 산산이 부서지면서 날카로운 파편에 의해 부상 위험이 커지는 반면, 이 시스템은 창문을 제거하는 방식으로 작동하여 이러한 위험을 크게 줄인다.

3) 강제로 창문을 손으로 내릴 때의 방향과 창문이 실제로 움직이는 방향이 일치하기 때문에 사용자가 직관적으로 쉽게 이해할 수 있다. 이러한 창문의 움직이는 동작은 사용자에게 이미 익숙한 동작이므로, 별도의 학습이나 숙련도를 요구하지 않는다. 따라서 긴급상황에서도 사용자는 혼란 없이 쉽게 수동 조작을 할 수 있다.

## 후 기

아낌없는 조언을 주신 송용남 교수님께 다시 한 번 감사의 인사를 드립니다.

## 참고문헌 (References)

- (1) Transport Canada, 2009, *Technical Standards Document No. 118, Revision 1R: Power-Operated Window, Partition, and Roof Panel Systems*, Transport Canada, Ottawa, Canada, pp. 1~12.
- (2) Koopman, P., 2024, *People are Still Being Burned Alive in Teslas* (<https://philkoopman.substack.com/p/people-are-still-being-burned-alive>), Substack, San Francisco, USA.
- (3) Dayan, L., Guoqing, Z., Hui, Z., Zhichao, Y., Yunji, G. and Xiaohui, J., 2017, "Flame Spread and Smoke Temperature of Full-Scale Fire Test of Car Fire," *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol. 10, pp. 315~324.
- (4) Giesbrecht, G. G., Percher, M., Brunet, P. and McDonald, G. K., 2017, "An Automatic Window Opening System to Prevent Drowning in Vehicles Sinking in Water," *Cogent Engineering*, Vol. 4, No. 1, Article 1347990.
- (5) Tesla Inc., 2024, *Model Y Owner's Manual* ([https://www.tesla.com/ownersmanual/modely/ko\\_us/GUID-AAD769C7-88A3-4695-987E-0E00025F64E0.html](https://www.tesla.com/ownersmanual/modely/ko_us/GUID-AAD769C7-88A3-4695-987E-0E00025F64E0.html)), Tesla Inc., Austi, USA, pp. 1~273.

- (6) Clawson, J. and Thompson, M., 2023, *Vehicle Escape - Field Testing Summary with Dr. G. Giesbrecht* (<https://www.iaedjournal.org/vehicle-escape>), IAED Journal, Salt Lake City, USA.
- (7) Market US Research, 2025, *Automotive Glass Market: Size, Share, and Trends 2023–2033*, Market US Insights, New York, USA.
- (8) Zemanová, A., Konrád, P., Hala, P., Sovják, R., Hlůžek, R., Zeman, J. and Sejnoha, M., 2021, “Experimental Study on the Gradual Fracture of Layers in Multi-Layer Laminated Glass Plates under Low-Velocity Impact,” *arXiv: 2107.12151*, pp. 1~40.
- (9) Edmonds, E., 2019, *Vehicle Escape Tools are a Lifesaver – in the Right Situation*, AAA Newsroom Technical Report, Heathrow, USA.
- (10) Patalano, S., Vitolo, F. and Lanzotti, A., 2016, “Automotive Power Window System Design: Object-Oriented Modelling and Design of Experiments Integration within a Digital Pattern Approach,” *Mechanics & Industry*, Vol. 17, No. 5, Article 505.
- (11) Engineering Explained, 2022, *How Automatic Braking Really Works* (<https://youtu.be/Y140Uj8KcWU?si=G8otytmsZpsv-bYr>), YouTube, San Bruno, USA.
- (12) Chang, W. T., Lee, W. I. and Hsu, K. L., 2021, “Analysis and Experimental Verification of Mechanical Errors in Nine-Link Type Double-Toggle Mold/Die Clamping Mechanisms,” *Applied Sciences*, Vol. 11, No. 2, Article 832.
- (13) SAE International, 2001, *SAE J1100: Motor Vehicle Dimensions* (<https://ia800507.us.archive.org/20/items/gov.law.sae.j1100.2001/sae.j1100.2001.html>), SAE International, Warrendale, USA.
- (14) Izumi, J., *Combined Environmental Testing for Equipment Used on Automobiles: Overview and Test Approach*, (<https://www.test-navi.com/eng/report/pdf/CombinedEnvironmentalTestingForEquipmentUsedOnAutomobiles.pdf>), ESPEC CORP., Osaka, Japan, pp. 1~18.
- (15) Mascarenhas, W. N., Ahrens, C. H. and Ogliari, A., 2004, “Design Criteria and Safety Factors for Plastic Components Design,” *Materials & Design*, Vol. 25, No. 3, pp. 257~261.
- (16) Kong, Y. K. and Lowe, B. D., 2005, “Optimal Cylindrical Handle Diameter for Grip Force Tasks,” *International Journal of Industrial Ergonomics*, Vol. 35, No. 6, pp. 495~507.

# 다품종 제품 생산 및 AI 기반 모니터링, 의사결정, 피드백 제어가 가능한 자율제조 교육용 테스트베드 구축

백 수 정<sup>\*†</sup>

\* 국립한밭대학교 산업경영공학과

## Development of an Educational Testbed for Autonomous Manufacturing Capable of Producing Personalized Products and Providing AI-based Monitoring, Decision-Making and Feedback-Control

Sujeong Baek<sup>\*†</sup>

\* Dept. of Industrial & Management Engineering, Hanbat National University

(Received April 15, 2025 ; Revised September 1, 2025 ; Accepted September 1, 2025)

**Key Words:** Smart Factory Testbed(스마트 제조 테스트베드), Autonomous Manufacturing(자율제조), AI(인공지능), Feedback-Control(피드백 제어)

**초록:** 제조 환경의 유연성과 복잡성이 증가함에 따라, AI 기반 자율제조 시스템의 중요성이 부각되고 있다. 그러나 기존의 제조 테스트베드의 경우 AI 기반 기능을 탑재하기 위해 PC 기반의 제어 시스템으로 구축되어 PLC 기반의 현업과의 직접적인 연계가 어렵다. 또는 PLC 기반의 시스템에서 오프라인 상의 AI 모니터링 및 의사결정을 위한 데이터를 수집하여 분석하는 형태로만 구축되어 분석 결과를 실시간 적용하는데 한계가 있었다. 본 연구는 다품종 소량생산 환경에 대응하며, open platform communication unified architecture(OPC-UA) 기반으로 데이터를 주고 받음으로써 AI 기반 모니터링과 의사결정 결과를 PLC 제어기에서 실시간으로 반영할 수 있는 교육용 테스트베드를 구축하였다. 이를 통해 스마트 제조 관련 교육과정에서 센서 기반 데이터 수집, AI 모델 추론, 제어 연동과 관련해 학생들에 개발한 AI 성능을 실제 시스템에서 검증 및 실현 할 수 있는 기반을 제공할 수 있다.

**Abstract:** As the complexity of manufacturing systems increases, AI-based autonomous systems are becoming more important. However, conventional factory testbeds, built on PC-based control systems that support AI functionalities, are not straightforward to integrate with real-world PLC-based control environments. In other cases, PLC-based systems are primarily used to collect and analyze datasets in terms of offline AI training, which limits real-time application of AI feedback. This study proposes an educational autonomous manufacturing testbed that supports personalized production and enables real-time AI feedback to PLC controllers via open platform communication unified architecture (OPC-UA) communication. It will provide an integrated educational platform for students to experience sensor data acquisition, AI inference, and control integration in real systems.

### 1. 서론

소비자의 요구가 점차 다양화됨에 따라, 다양한 제품을 생산하면서도 높은 생산성과 품질을 유지하기 위하여 스마트팩토리가 도입되고 있다.<sup>(1,2)</sup> 스마트팩토리는 사물인터넷, 빅데이터, 인공지능, 분산제어 등

† Corresponding Author, [sbaek@hanbat.ac.kr](mailto:sbaek@hanbat.ac.kr)

의 기술을 사용함에 따라, 자동화와 함께 실시간 데이터 분석이 가능해진 제조 시스템을 의미한다. 나아가 현대의 제조 시스템은 빅데이터, 사물인터넷 등의 4차 산업혁명 기술을 도입하여 현재 상황을 실시간으로 확인하고 진단하는 수준을 넘어, 인공지능과 로봇 기술을 통해 별도의 작업자의 개입 없이도 생산 공정이 스스로 의사결정을 내리고 작업을 수행할 수 있는 자율제조로 발전하고 있다.<sup>(3,4)</sup> 이와 같은 과정에서 다양한 최신 기술을 기존 자동화 공정에 접목하는데 있어 그 성능이나 실현가능성을 검증해보기 위한 컴퓨터(PC) 기반의 스마트팩토리 또는 자율제조 테스트베드가 제작되고 있다.<sup>(5,6)</sup> 예를 들어 Kim 등은 치과용 핸드피스, 전동 칫솔 및 휴대용 보조 배터리 팩을 조립하는 다품종 스마트팩토리 테스트베드를 구축하였다.<sup>(7)</sup> 각 공정 셀별로 자신에게 할당된 액추에이터 제어에 있어 의사결정권을 가질 수 있도록 3단계 통신 및 제어 구조도를 적용하였다. 또한 다양한 셀 레이아웃 결정, 조립 경로 결정 및 품질 검사 등과 같은 지능 제조 모듈의 적용을 위하여 내셔널 인스트루먼트(National Instrument)사의 c-RIO 컨트롤러 기반의 제어 시스템을 탑재하였다. Malburg 등의 경우에는 비즈니스 프로세스 관리와 사물인터넷의 적용을 위하여 피셔 테크닉(fischertechnik) 기반의 테스트베드(learning factory)를 구축하였다.<sup>(8)</sup> 6개의 공정으로 구성되어 있으며, 액추에이터로부터 수집된 광차단기 센서, 스위치, 정전식 센서 값을 포함하여 근거리 무선 통신(NFC) 리딩 정보, 카메라를 통한 공정 이미지, 기후 데이터 등을 fishertechnik 전용 컨트롤러 또는 라즈베리파이, 아두이노를 통해 관리하였다. 또한 다양한 제조 데이터 분석 기반의 인공지능(AI) 응용 실습을 위하여 컨트롤러는 C, C++ 또는 파이썬(python) 코드를 통해 작동되었다. 인공지능과 사물 인터넷을 결합한 기술인 인공지능 사물인터넷(AIoT: artificial intelligence of things)의 제조 시스템에서의 적용을 위한 스마트팩토리 테스트베드를 개발한 연구에서도 주요 제어기로는 라즈베리파이가 사용되었다.<sup>(9)</sup> 라즈베리파이를 통해 수집된 데이터를 실시간으로 파이어베이스 데이터베이스에 저장하고, 안드로이드 애플리케이션을 통해 이를 가시화하였다. 자율제조를 위한 기술 중 생산율 향상에 있어 중요한 고장 감지 및 예측 기능을 위한 테스트베드를 개발한 경우에도 PC 기반 제어기(National Instrument사의 c-RIO 컨트롤러와 벡호프(Beckhoff)사의 산업용 PC)를 기반으로 구축되었다.<sup>(10)</sup> c-RIO 제어기로부터 수집된 모터의 위치와 토크 정보와 같은 아날로그 센서 데이터를 마이크로소프트의 윈도우즈 운영체제(Windows) 기반의 PC에 저장한 후, 제조 인공지능에 적용하여 고장 여부를 판별하고자 하였다.

위의 연구들과 같이 PC 기반의 제어기를 활용할 경우, 제조 시스템으로부터 다양한 데이터를 수집하기에 용이할 뿐만 아니라, AI 모델 개발에 많이 사용되는 프로그래밍 언어인 python을 통해 하드웨어 제어를 연계하기도 수월하여 다시 피드백을 주는 시스템을 구축하는데 어려움이 없다. 그러나 실제 산업 현장에서는 PC 기반의 제어기가 아닌 프로그램 가능 논리 제어기(PLC: programmable logic controller)와 같은 산업용 특화 제어기가 사용됨에 따라 AI 모델의 적용을 직접적으로 손쉽게 하지 못한다는 한계점이 등장한다. 이로 인해 많은 연구에서는 실제 산업 현장에 맞게 구현된 테스트베드를 이용할 경우 AI로 해결하고자 하는 문제를 정의하고 유사한 데이터를 수집하거나, 동일한 디지털 트윈 모델을 구축하여 피드백 결과를 예상하는 형태로 수행되고 있다.<sup>(11-13)</sup> 이러한 어려움으로 인해 교육기관의 경우에도 산업 현장의 문제를 풀고자하는 캡스톤디자인 프로젝트에서 AI 모델 기반으로 개발한 결과물을 실제 테스트베드에 적용하기보다는, 테스트베드로부터 수집한 정보를 분석에만 활용하거나 PC 기반의 제어기를 이용한 별도 시스템을 제작하는 형태로 교육이 많이 진행되었다. 예를 들어 Yu 등의 연구에서는 H 대학교의 공정에서 발생하는 조립 불량률 해결하는 것을 목표로 실제 테스트베드에서 사용되는 재료로부터 데이터를 수집하였다.<sup>(14)</sup> 이를 통해 조립 불량 유무를 오토엔코더(autoencoder)와 합성곱 신경망(CNN: convolutional neural network)을 이용하여 예측하였다. 그러나 데이터를 수집한 테스트베드에 해당 검사 모듈을 적용하기는 어려워 아두이노 기반의 모듈을 제작하여 그 성능을 검증하였다. 동일한 문제에 대해서 Jeon의 연구에서는 레고마인드스톰 EV3와 아두이노를 결합하여 하드웨어를 제작한 후, 본인들이 개발한 딥러닝 기반 품질 검사 기능의 성능을 평가하였다.<sup>(15)</sup> Kim 등의 연구에서도 자동화 제조 공정 내에서 많이 사용되는 공압 실린더의 고장을 실시간으로 감지하고자 하였다.<sup>(16)</sup> 스마트팩토리 테스트베드 내의 공압 실린더를 선정하여 다양한 아날로그 센서 데이터를 수집한 후, 장·단기 기억(LSTM: long-short term memory) 모델을 개발하여 현재 실린더의 건전 상태를 4단계로 분류하였다. 실제 테스트베드 상에

서 해당 성능을 검증하고자 유에스비(USB) 통신을 통한 PC 기반의 데이터 수집기를 이용하여 실시간으로 데이터를 수집하고 데이터베이스에 저장하면, PC 내 python 프로그래밍 코드를 통해 LSTM 기반의 고장 감지를 수행하였다. 그 후, 알림은 PC 기반의 GUI에서 제공하거나 아두이노 기반으로 제작한 신호 등 형태의 경고등시스템을 통해 확인할 수 있었다. 다품종 제품이 생산되는 현장에서의 최적의 작업 할당 및 지시(dispatching) 전략을 제시한 연구에서는 구축된 스마트팩토리 테스트베드 시스템을 기반으로 애니로직(Anylogic) 소프트웨어 기반의 가상 공장을 구축하여 수행하였다.<sup>(17)</sup> 가상 공장에서 현재의 하드웨어 설정을 반영한 후, 여러 가지 상황과 전략에서의 성능을 비교하여 제안하는 강화학습 기반의 작업 할당 및 지시 전략이 다중구역 제조시스템 환경에서 가장 적절함을 검증하였다.

그러나 자율제조 테스트베드의 기능이 활성화되기 위해서는 현재 산업 현장의 실정에 맞는 제어기를 사용하면서 간편하게 AI 모델을 적용할 수 있는 방법에 대해 모색이 되어야 한다. 개방형 플랫폼 통신 통합 구조(OPC-UA: open platform communication unified architecture) 기술의 경우 대표적인 해결 방법으로 이기종 제어기로부터 하나의 서버로 데이터를 수집할 수도, 서버에서 원하는 제어기로 명령을 내려 보낼 수도 있다. 그러나 현재 많은 연구에서는 여전히 데이터를 수집하여 실시간 상황을 중앙 데이터베이스 상에서 확인하거나, 공정시작, 종료, 비상정지와 같은 단일 스위치로서의 피드백만이 가능한 형태였다.<sup>(18,19)</sup> 예를 들어 Martins 등의 연구에서는 다양한 컴퓨터 수치 제어(CNC: computer numeric control) 장비에 대한 통합 관리를 위해 OPC-UA를 사용하였다.<sup>(20)</sup> OPC-UA를 통해 각 장비가 가진 이기종 통신 방식에 따라 모니터링을 수행하는 것이 주된 업무였으며, 장비의 제어를 위해서는 대부분 부가적인 기능을 위해 적용하거나 우회적으로 수행하여야 했다. 그러므로 본 연구에서는 PLC 기반의 자율제조 테스트베드에 OPC-UA 기술을 통해 데이터를 수집하고, 피드백을 보낼 수 있는 시스템을 구현하여 AI 모델과의 접목 방법을 제시하고자 한다. 특히 자율제조, 스마트제조 등의 교육 과정에서 제조 데이터 분석 관점에서 학생들이 개발한 AI 모델을 실제 적용하여 이를 실재적으로(tangibly) 체험할 수 있는 교육용 테스트베드로서의 역할을 하고자 한다. 이어지는 제2장에서는 구축한 자율제조 교육용 테스트베드의 하드웨어 구성에 대해 살펴본다. 제3장에서는 AI 모델과의 접목을 위하여 적용, 개발된 OPC-UA 기술과 python 기반의 응용 프로그래밍 인터페이스(API: application programming interface)에 대해 설명한다. 제4장에서는 이를 제조 관련 교육 과정에서 어떻게 적용할 수 있을지에 대해 제안한다. 제5장에서는 결론과 향후 연구에 대해 요약하였다.

## 2. 자율제조 교육용 테스트베드 구축을 위한 공정 기능 설계

먼저 스마트팩토리의 컨셉을 충족하기 위하여, 테스트베드에서 생산할 제품은 종류가 다양하지만 하나의 공통 모듈(common module)을 기반으로 하여 다양한 차별화 요소(differentiation components)를 조합해 형성되는 제품군으로 선정하고자 하였다. 이를 통해 제품군(product family) 단위의 관리가 가능할 것을 목표로 하였다. 또한 교육기관에서 설치되어 운영될 교육용 테스트베드임에 따라 제품을 생산하는

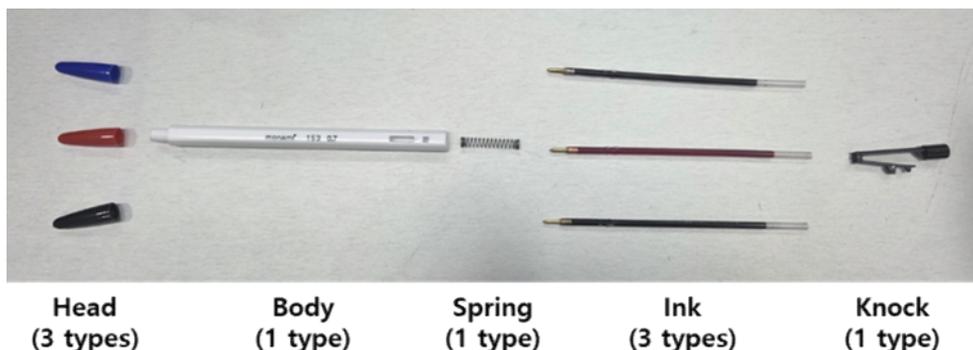


Fig. 1 Exploded view of the produced pen by the developed testbed

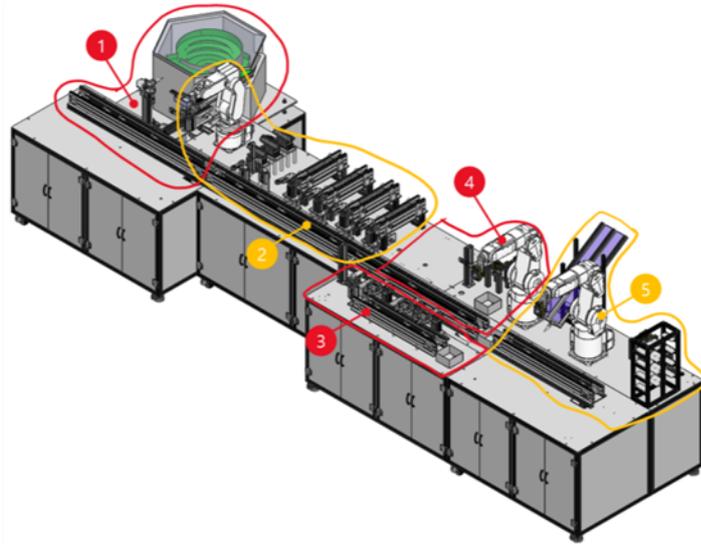
과정에서 유해 물질이 발생하거나, 계속해서 소진되는 재료를 사용하는 데는 어려움이 있었다. 위와 같은 제약을 기반으로 제안하는 테스트베드에서 생산하는 제품은 ‘볼펜’으로 결정하였다. 볼펜으로 필기를 할 때 손잡이 부분을 담당하는 바디 부분을 공통 모듈로 지정하였으며, 헤드와 잉크를 차별화 요소로 하여 검정색, 파란색, 빨간색의 3종의 종류로 구분하였다. 이에 따라 총 9개의 제품(헤드 3종 × 잉크 3종)이 생산될 수 있다. 그 외의 조립에 적용되는 부품은 Fig. 1과 같다.

선정된 펜 제품을 생산하기 위하여 조립 공정은 다음과 같이 필요하다: 1) 팔레트 공급, 2) 바디 공급, 3) 바디 방향 정렬, 4) 헤드 공급 및 조립, 5) 바디 방향 재정렬, 6) 스프링 공급 및 조립, 7) 잉크 공급 및 조립, 8) 노크 공급 및 조립. 또한 생산된 제품의 품질 검사 공정과 물류 센터 등으로 이동을 위한 적재 공정이 필요하다. 이를 기반으로 Table 1 및 Fig. 2, Fig. 3과 같이 스테이션(공정 셀)을 구축하였다. 각 스테이션에는 PLC 제어기가 설치되어 각자의 스테이션에 대해 개별 제어도 가능하며(반자동 동작 모드), 전체 생산 시스템으로의 역할을 위한 제어(자동 생산 모드)도 가능하다.

사용된 액츄에이터는 미쯔비시 사의 6축 로봇 또는 공압 액츄에이터를 사용하였다. 특히 펜을 파지할 때와 팔레트를 파지할 때의 물리적 제약 조건이 다름에 따라 로봇 팔의 경우 상황에 맞추어 앤드그리퍼를 교체할 수 있게 하였다. ‘공통 모듈 공급’ 스테이션의 경우 원형의 볼(bowl) 타입의 부품 피더를 사용하여 구축한 테스트베드에서 푸시(push) 프로세스와 풀(pull) 프로세스에 대한 문제 체험이 가능하게끔 하였다. Push 프로세스란 소비자가 주문할 제품의 수량을 공급자가 예측할 수 있다는 가정 하에 사전에 미리 대량 생산을 해두는 생산 전략을 의미한다.<sup>(21)</sup> 본 테스트베드에서는 볼 타입의 부품 피더에서 바디 부품을 계속해서 바디방향 정렬 공정으로 제공하는 것을 통해 구현하였다. 반면에 pull 프로세스란 실제 소비자의 주문이 발생할 때 그에 맞춰 제품을 생산하는 전략을 의미한다.<sup>(21)</sup> 특히 다품종 소량생산 제품,

**Table 1** Lists of manufacturing process stations in the developed educational testbed for autonomous manufacturing

Station no.	Station name	Description of actuator-based tasks
1	Common module supply	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Feeding a pallet</li> <li>- Feeding a ‘body’ part</li> <li>- Aligning the ‘body’ direction (top-bottom, left-right)</li> <li>- Transferring to the next task via a conveyor</li> </ul>
2	Pen assembly	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Feeding and screwing ‘head’ part</li> <li>- Re-aligning the ‘body’ direction (top-bottom)</li> <li>- Feeding and assembling a ‘spring’ part</li> <li>- Feeding and assembling a ‘ink’ part</li> <li>- Feeding and assembling a ‘knock’ part</li> <li>- Transferring to the next task via a conveyor</li> </ul>
3	Vision inspection 1 (single-face)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Conducting vision inspection on a single side of the assembled pen via pneumatic actuators</li> <li>- Transfer the pallet according to inspection result via a conveyor and pneumatic actuators</li> <li>- Transferring to the next task via a conveyor</li> </ul>
4	Vision inspection 2 (multi-faces)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Conducting vision inspection on a multiple poses the assembled pen via a 6-axis robot arm</li> <li>- Transfer the pallet according to inspection result via a 6-axis robot arm</li> <li>- Changing a end-gripper (tool) of the robot arm</li> <li>- Transferring to the next task via a conveyor</li> </ul>
5	Warehouse loading	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Packing in a box</li> <li>- Retrieving the pallet by a 6-axis robot arm</li> <li>- Stacking the product box by the 6-axis robot arm</li> <li>- Changing a end-gripper (tool) of the robot arm</li> <li>- Transferring to the next task via a conveyor</li> </ul>



**Fig. 2** 3D rendering (isometric view) of the constructed autonomous manufacturing educational testbed (each number indicates the corresponding station number in Table 1)



(a) Isometric view of the entire testbed



(b) Front view of common module supply station



(c) Front view of pen assembly station



(d) Front view of vision inspection 1 station



(e) Front view of vision inspection 2 station



(f) Front view of warehouse loading station

**Fig. 3** Physical testbed for autonomous manufacturing education

개인 맞춤형 제품은 제품 생산 시 어떤 옵션을 선택할지 알 수 없어, pull 프로세스를 적용해야 하므로 본 연구에서는 주문 소프트웨어를 별도로 개발하여 원하는 제품을 주문하면 정보에 맞게 펜을 생산하는 형태로 구현하였다.

또한 ‘검사 공정 1’과 ‘검사 공정 2’ 스테이션의 경우, 제조 시스템의 목적 상으로는 동일한 제품의 품질 검사(정상 또는 불량 판정)로 동일한 기능을 수행한다. 그러나, 단일 면에 대해서 검사하는가, 제품의 여러 면에 대해서 검사하는가에 따라 생산 경로를 선택할 수 있는 분기점을 생성하였다. 이에 따라 병목현상이 발생할 경우 두 병렬 스테이션의 활용법 또는 검사 품질과 비용에 따른 최적의 선택 등에 대해 AI 모델에서 도출한 결과를 실제 하드웨어 상에서 관찰할 수 있다. 기본적으로는 두 스테이션의 비전 검사를 위해서 teachable machine이라는 노코드 기반의 웹 플랫폼을 이용할 수 있다. 웹캠을 통해 수집된 사진을 통해 주문에 맞게 제품이 생산되었는지를 확인하는 모델을 탑재하였다. 그 외 전체 공정의 운영 상황을 감시하기 위하여 각 공정별 카메라를 설치하여 현재의 상황을 확인할 수 있도록 하였다. 공정 및 비전 검사 이미지를 포함하여, 대부분의 PLC 제어 명령을 위한 디지털 입출력 신호(digital I/O) 값은 제조 데이터 수집의 관점으로 메인 서버에 저장하였다.

### 3. AI 모델 개발을 위한 PLC 기반 데이터 송수신 프레임워크

OPC-UA를 통하여 모든 스테이션에서 제어를 위해 사용 중인 PLC로부터 실시간으로 데이터를 수신하고, PLC에 실시간으로 명령을 내릴 수 있도록 테스트베드의 통신 및 제어 프레임워크를 구축하였다. 본 연구에서는 미쓰비시 전기(Mitsubishi Electric) 사의 OPC-UA 서버 모듈과 컴피규레이터(MX OPC UA module configurator-R)를 이용하였다. 또한 AI 모듈 개발을 위한 PC와는 이더넷 기반 전송 제어 프로토콜(TCP/IP ethernet: transmission control protocol/Internet protocol) 방식으로 통신을 하여 원거리에서도 충분히 접근할 수 있도록 하였다. Table 2와 같이 OPC-UA 서버를 통해 다수의 PLC에서 사용되는 디지털 입출력 신호 정보를 모두 태그(tag)로 저장하였다. 이 과정은 대부분의 OPC-UA를 적용한 테스트베드 개발 및 연구에서와 흡사하다.<sup>(18-20)</sup> 접근 모드(access mode)가 ‘읽기(read)’인 것은 현재의 스테이션 상황을 정수 값이나, 참/거짓 형태로 확인할 수 있음을 의미한다. ‘읽기/쓰기(readwrite)’는 해당 태그의 값 확인 기능과 더불어 PLC로 제어 정수 값이나 참/거짓 형태로 명령을 하달할 수 있음을 의미한다.

다만 본 연구에서는 AI 모델을 적용하였을 때의 결과를 실제 테스트베드에서 물리적으로, 실제적으로 관찰하고 싶다는 것이 주된 목적임에 따라 태그 별로 우선순위(priority)를 반영하고자 하였다. 예를 들어 기존의 테스트베드의 현장에서 HMI를 통해 주문을 넣는 것과 OPC-UA를 통해 설정된 태그를 통해 외부에서 주문을 넣는 것은 공정의 행위 상으로 동일하다. 그러나 실제 공정의 운영 상에서 HMI를 통해 직접적으로 들어온 명령과 OPC-UA를 통해 들어온 제어 명령이 상이한 형태로 동시에 주어진다면 충돌이 발생하여 그 후의 제어 로직이 어떻게 작동할지에 대해 장담할 수 없게 된다. 이러한 문제로 기존의 연구들에서는 테스트베드 제작 시 OPC-UA를 통한 시작, 종료와 같은 필수 기능 외의 외부 제어 기능을 많이 도입하지 않았다. 예를 들어 본교의 이전 버전의 테스트베드(USB 포장)의 경우에도 시작, 종료, 비상종료만을 OPC-UA로 제어할 수 있게 하였으며, OPC-UA에서 어떤 명령이라도 보냈다면 현장에서 HMI를 통한 제어는 불가능하도록 막아두는 형태였다.<sup>(22)</sup> 그러나 본 연구에서는 PLC에서 다루는 대부분의 태그에 대해서 AI 모델이 개입하여 상황 모니터링 및 제어 명령 하달이 가능하도록 읽기/쓰기 접근 권한을 부여하고 제어 로직상에서 동일한 역할에 대해 병렬적으로 수행할 수 있도록 프로그래밍하였다. 다만 이 과정에서 OPC-UA를 통한 태그의 반영을 우선 순위를 항상 HMI보다 높게 지정하여, 기존의 명령은 대기하는 형태로 구성하였다.

태그를 설정한 후, 테스트베드에서 AI 모델과 접목하여, 교육용으로 더욱 효과적으로 사용하기 위하여 python 언어 기반의 함수로 구축된 PLC와의 OPC-UA 기반 데이터 교환용 API를 제공하고자 하였다. OPC-UA상의 PLC 장비 이름, 태그 이름을 통해 현재의 PLC 값을 확인하는 read\_bool, read\_int 함수와 명령 값까지 포함하여 PLC에게 실시간으로 명령을 내리는 write\_bool, write\_int로 구성된 함수 라이브러리

**Table 2** Description of OPC-UA configuration with industrial PLCs for monitoring data and giving a command

Station no.	OPC address	OPC tag name	Data type	Access mode
1	D1120.0	Supply_P_Reset_completed_status	Bit	Read
1	D1120.0	Supply_P_Reset_completed_status	Bit	Read
1	D1120.1	Supply_P_Auto_mode_status	Bit	Read
1	D1120.2	Supply_P_System_run_status	Bit	Read
1	D1120.3	Supply_P_Semi_auto_status	Bit	Read
1	D1122	Supply_P_Current_supply_quantity_state	Word	Read
1	D1123	Supply_P_Accumulated_supply_quantity_state	Word	Read
1	D1540.0	Supply_P_Accumulated_supply_reset_control	Bit	Readwrite
1	D1540.1	Supply_P_Select_auto_mode_control	Bit	Readwrite
1	D1540.2	Supply_P_System_run_control	Bit	Readwrite
1	D1540.3	Supply_P_System_stop_control	Bit	Readwrite
1	D1542	Supply_P_System_target_quantity_control	Word	Readwrite
...				
3/4	D1561.1	Vision_Inspection1_P_Vision1_activated_2disabled_control	Bit	Readwrite
3/4	D1561.2	Vision_Inspection1_P_Vision2_activated_1disabled_control	Bit	Readwrite
...				

기반의 API로 구축하였다. Python에서 AI 모듈 개발에 필요한 라이브러리 및 함수를 사용해 본 학생 또는 작업자라면 별도의 추가 학습 없이 접근 가능한 형태로 개발하고자 하였다. 또한 PLC에서 발생한 태그 데이터와 더불어 제품 품질 검사를 위한 비전 데이터 및 카메라를 통한 공정 이미지 데이터 역시 TCP/IP 통신을 통해 수집하고 있다. 데이터베이스 및 로컬 폴더에 저장되는 형태이며 이 역시 API로 구축하여, 교육용으로 언제든 수집 주기, 위치 등을 변경할 수 있게 하였다.

#### 4. 스마트제조 교육과정에서의 자율제조 교육용 테스트베드 적용 방법

앞서 구축된 자율제조를 위한 교육용 테스트베드를 스마트제조 교육과정의 실습에서 적용하고자 한다. 본 교육과정은 국립한밭대학교의 학부과정의 ‘스마트팩토리’ 융합전공 커리큘럼과 석사과정의 ‘디지털제조 고급인력 양성을 위한 산업경영공학과’ 커리큘럼을 차용하였다. 석사과정의 ‘설비관리시스템’과

목은 자율제조 시스템을 위한 디지털화 과정에서 설비 관리를 위한 데이터 분석 기법에 대해 학습하는 것을 목표로 한다. 전통적인 신뢰성 공학부터 머신러닝, 딥러닝 모델이 설비에서 발생하는 고장을 감지하기 위해 어떻게 적용되는지를 학생들이 배우게 된다. 이 과정에서 구축한 교육용 테스트베드에서 수집된 공정 이미지와 python API를 통한 기기 정지 기능을 사용하여 실시간 설비의 고장 감지를 실습할 수 있다. 일단 먼저 학생은 사전에 충분히 수집된 공정 이미지를 확보하여 해당 이미지를 입력 값으로 하고, 현재의 설비(또는 공정)의 건전상태를 정상 또는 고장으로 판단하는 딥러닝 모델을 학습한다(현재 수업에서는 주로 순환 신경망(recurrent neural network) 기반의 모델을 학생들이 많이 적용하고 있다). 공정 이미지의 경우 개발된 테스트베드의 기본 어플리케이션으로 제작된 소프트웨어를 통해 일정 주기를 가지고 약속된 저장 위치에 실시간으로 저장된다. 이를 이용하여 학생은 실시간 고장 감지 코드를 개발한다. 예를 들어, 저장된 이미지를 불러오고, 학습된 모델에 입력 값으로 넣어 출력값을 도출한 후, 출력값을 참 또는 거짓으로 구분하여 OPC-UA 기반의 API 함수로 명령을 하달할 수 있다. 위의 코드를 TCP/IP 통신을 통해 연결된 PC에서 실행한다면 실시간으로 학생이 만든 딥러닝 기반 고장 감지 모델에서 고장이 감지되면 공정이 정지되는 것을 실제적으로 관찰 가능하다. 또한 이 과정에서 교수자가 python 프로그래밍 상에서 가장 최신의 이미지를 행렬로 변환하는 과정과 학습 결과에 따라 PLC에 명령어를 보내는 코드를 미리 작성하여 제공할 경우 프로그래밍의 어려움이 해결되므로 조금 더 설비 관리에 관한 수업의 내용에 집중하여 진행할 수 있을 것이다.

학부 과정의 ‘스마트팩토리품질관리’ 과목은 전통적인 통계적 품질관리 교과에서 출발한 수업으로, 통계적 품질 관리도(statistical quality control(SQC) chart) 작성과 샘플링 검사 전략 결정하는 이론 수업 위주로 진행된다. 그러나 학생들이 수업 내용을 이해하는 데 있어, 수학 공식으로만 계산하는 것과 본인이 선택한 기법을 공정에 실제로 적용하여 수치 결과를 직접 체험하는 것 사이에는 유의미한 차이가 나타날 것이다. 예를 들어, 기존 테스트베드가 없는 경우에는 생활 주변에서 일정하게 유지되어야 하는 것을 선정하여 그에 대해 SQC chart를 그려보는 실습을 하였다. 구축한 테스트베드를 이용할 경우 샘플링 검사 실습을 추가적으로 수행할 수 있을 것이다. 먼저 교수자가 python 프로그래밍을 통해 전체 생산 단위 묶음(lot) 내에서 지정된 샘플링 검사 전략에 따라 검사를 해야 하는 제품이 ‘검사 공정 1’ 스테이션으로, 그렇지 않은 경우는 ‘검사 공정 2’ 스테이션으로 이동하는 틀을 구축한다. 또한 검사를 해야 하는 제품의 경우 이동된 스테이션에서 검사를 수행한 후의 검사 결과를 python 상의 변수로 다시 불러온다. 이는 조건문에서 샘플링 변수 값에 따라 write\_bool 함수를 통해 ‘비전검사 1 활성화(2 해제)’, ‘비전검사 2 활성화(1 해제)’ 태그 값을 변경하고, ‘비전검사 결과 양품/불량’ 태그 값을 읽어오는 것으로 작성 가능하다. 학생은 본인이 주어진 조건에 따라 결정한 표본의 크기(전체 생산 단위 묶음 중 검사해야 할 제품의 수)와 합격판정개수(표본 중 몇 개가 품질 합격이면 생산 단위 묶음 전체를 합격으로 볼 것인지)를 코드 상에 입력하여 실제 본인의 샘플링 전략이 현재의 테스트베드 상에서 적절할지 확인할 수 있다.

또한 품질검사의 관점에서 AI 모델을 추가적으로 개발한 경우, 품질 검사 결과까지도 학생의 모델로 도출한 후 그에 따른 공정의 운행(계속 생산 또는 중지)을 제어하는 실습까지 확장할 수 있다. 예를 들어 ‘스마트팩토리랩(캡스톤디자인)’ 교과를 통해 4학년 학생들이 CNN 모델을 기반으로 한 볼펜 헤드 조립 불량 검사 시스템과 펜대의 표면 스크래치 검사 시스템을 개발하였다. 이 시스템은 검사 공정에서 촬영된 사진을 입력 데이터로 하여 CNN 모델에 적용하면 불량이 발생하였는지 아닌지를 검사해주는 AI 모델이다. 본 연구에서 개발된 테스트베드가 존재하지 않았다면, 학생들은 펜 사진을 통해 검사 결과(정상, 불량)를 컴퓨터 상에서만 확인할 수 있었겠지만, 현재는 OPC-UA 통신을 기반으로 한 데이터 교환용 API를 사용하여 자율제조를 구현할 수 있다. 사진이 촬영되고 나면 학생들의 CNN 모델을 통해 사진을 분석한다. 이후, 분석 결과를 다시 API를 통해 테스트베드의 액츄에이터 명령 신호로 전송하여 정상일 경우 계속 생산, 불량일 경우 불량품으로 배출하여 더 이상 생산이 진행되지 않게 조치하는 형태이다. 이와 같이 AI 모델을 테스트베드에서 의사결정하는 데 손쉽게 적용할 수 있음에 따라, 언젠든 고도화된 AI 모델로 변경할 수 있으므로 자율제조 교육에 있어 큰 역할을 수행할 수 있다.

확률 기반 시뮬레이션(가동률 및 생산율)과 두 개의 검사 스테이션의 비용을 고려하여 생산되는 제품

의 생산 가격을 결정하는 실습, 강화학습 기반의 스케줄링 및 작업 할당 및 지시 결과를 확인하는 실습도 가능하다. 예를 들어, 현재는 비교과 프로그램을 통해 주문과 생산품이 일치하는지 여부를 검사하는 AI 모델을 추가 개발하고 있다. 이는 이전의 제품의 품질 검사를 통해 생산 계속 여부를 결정한 것에서 나아가, 불량 발생 시 어떻게 처리할 것인지에 대한 고민을 추가적으로 요구한다. 본 테스트베드의 기능이 없었을 경우, 작업자가 다시 생산 명령을 내리는 형태가 되었어야 한다. 그러나 본 연구를 통해 개발된 테스트베드를 사용할 경우, 의사결정을 수행하는 AI 모델과 데이터 송수신을 담당하는 API를 통해 불량이 발생한 경우, 해당 불량품은 제거하고, 이를 대체할 제품 생산을 긴급 생산 명령으로 API를 통해 전송함으로써, 작업자의 중간 개입을 최소화한 자율제조로써의 면모를 구현할 수 있다.

이 외에도 개발된 API를 사용하여 테스트베드의 공정을 효과적으로 모니터링하기 위해서는 데이터 샘플링 길이가 중요할 것이다. 시계열 데이터의 특성상, 높은 품질의 데이터가 되기 위해서는 샘플링 길이가 일정해야 한다. 그러나 실제 API를 활용한 통신을 수행할 경우, 네트워크 환경의 영향으로 다소 달라질 확률이 있다. 개발된 AI 모델에 보간법을 통한 리샘플링(resampling), 시간 윈도우 기반 집계(time window-based aggregation)와 같은 다양한 방법 중 어떤 것이 가장 효과적인지를 분석하는 실습 수업도 운영 가능하다. 또한, 샘플링 길이 자체가 길고 짧은 것 역시 AI 모델의 성능에 큰 영향을 미칠 것이다. 샘플링 길이가 길면 짧은 시간의 변화를 데이터 내에 담을 수 없어 AI 모델의 성능에 부정적인 영향을 주지만, 샘플링 길이가 짧으면 수집된 데이터의 양이 방대해져 저장소에 부담을 줄 수 있다. 이에 대해 최적의 샘플링 길이가 얼마인지 찾는 실습 수업 역시 실험계획법을 기반으로 수행할 수 있을 것이다. 예를 들어 Beak 등의 연구에 따르면, 아날로그 센서 신호를 이용하여 엔진 시스템의 고장 감지를 수행하는 데 있어 나이퀴스트 샘플링 레이트(nyquist sampling rate)를 적용하였을 때의 성능을 확인하였다.<sup>(23)</sup> 일원분산분석과 사후검정을 통해 분석한 결과, 샘플링 길이가 짧을수록 고장 감지 성능이 좋아지는 것은 유지되었으나, 나이퀴스트 샘플링 레이트보다 약 10배 정도 빠른 속도에서 이미 고장 감지 성능이 유의미하게 낮아짐을 확인할 수 있었다. 다시 말해, 다양한 AI 모델을 학습하는 교육과정 상에서 개발된 AI의 성능을 눈으로 확인하는 용도로, 개발된 교육용 테스트베드는 손쉽게 활용될 수 있다.

## 5. 결론

제조 환경의 유연성과 복잡성이 증가하는 상황에서, AI 기반 자율제조 시스템의 중요성은 높아지고 있다. AI 기반의 자율제조 시스템은 대부분 PC 기반의 제어로 구축되는 반면, 기존에 구축된 제조 테스트베드는 현장의 상황을 반영해야 하는 특성에 따라 PLC 기반으로 구축되어, AI 기반의 자율제조 시스템의 개발 결과를 직접적으로 연계하는 것에 어려움이 있다. 이에 본 연구는 현재의 제조 트렌드인 다품종 소량생산 환경에 대응하면서 OPC-UA 기반으로 PLC 기반의 제조 시스템에서 손쉽게 데이터를 주고 받을 수 있는 자율제조를 위한 교육용 테스트베드를 개발하였다. 특히, OPC-UA 기반의 모니터링 및 제어를 위한 프레임워크를 AI 모델 개발에 많이 사용되는 python 함수 라이브러리 형태의 API로 개발하였다. 이를 통해 AI 기반 모니터링과 의사결정 결과를 PLC 제어기에 실시간으로 반영할 수 있는 교육용 테스트베드로 구축되었다. 최종적으로 자율제조 관련 교육과정에서 센서 기반 데이터 수집, AI 모델 기반의 의사결정, 결과에 따른 피드백 제어 연동까지의 폐쇄 피드백 루프(closed feedback-loop) 형태의 제조 시스템으로서 테스트베드가 역할을 할 수 있음에 따라 학생들이 개발한 AI 모델의 성능 및 결과를 실제 시스템에서 검증 및 실현할 수 있는 기반이 되었다.

현재까지 본 연구에서는 AI 모델 접목이 가능한 피드백 루프 형태의 제조 시스템을 PLC 기반의 자동화 공정에서 구현하는 것에 초점을 맞추었기에 수집하고 명령을 내릴 수 있는 디지털 입출력 신호에 대한 태그의 종류가 매우 다양하지는 않다. 앞으로 나아가서는 모든 센서와 액추에이터 명령을 태그로 구축하여 조금 더 다양한 실습이 가능하도록 지원할 예정이다. 추가적으로 스스로 판단하고 최적화할 수 있는 자율제조 기능을 본 테스트베드에서 다양하게 실험하고자 한다. 예를 들어, 어느 장비에 어떤 작업을 실시간으로 배정할지를 결정하는 작업 할당 및 지시 실습을 위해 동일한 스프링, 노크의 조립을

위한 스테이션을 다수를 배치해야 한다. 한 단계 더 나아간 설비의 열화와 고장을 감지하는 기능을 실습하기 위해서는 실제 스테이션 내의 액츄에이터를 고장내어야 하지만 실제로 회복할 수 없는 파괴 검사 형태를 재현할 수는 없다. 이를 위하여 액츄에이터 내 고장난 부품을 조립하거나, 외부 로드를 단계적으로 추가할 방법에 대해 고려하여야 한다. 또한 개발된 테스트베드 내에서 생산되는 불량률을 옵션을 통해 조정할 수 있다면 샘플링 검사 또는 스케줄링, 작업 할당 및 지시의 실제 성능과의 비교에서 직관적인 실습이 될 수 있을 것이다.

## 후 기

본 연구의 결과인 자율제조를 위한 교육용 테스트베드는 2024년 대전산단 스마트제조 고급인력 양성 사업(한국산업단지공단)의 지원을 받아 구축된 결과로서, 설계안에 따른 제작에는 (주)FM솔루션의 지원이 있었음.

## 참고문헌 (References)

- (1) Choi, S, Woo, J., Song, I., Hiep, H. M., Tam, L. M. and Quyen, V. T., 2023, "Layout-based Smart Manufacturing Assessment Method and System," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 47, No. 2, pp. 163~172.
- (2) Wu, K., Xu, J. and Zheng, M., 2024, "Industry 4.0: Review and Proposal for Implementing a Smart Factory," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 133, No. 3, pp. 1331~1347.
- (3) Wang, H., Wang, C., Liu, Q., Zhang, X., Liu, M., Ma, Y., Yan, F. and Shen, W., 2024, "A Data and Knowledge Driven Autonomous Intelligent Manufacturing System for Intelligent Factories," *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 74, pp. 512~526.
- (4) Leng, J., Zhong, Y., Lin, Z., Xu, K., Mourtzis, D., Zhou, X., Zheng, P., Liu, Q., Zhao, J. L. and Shen, W., 2023, "Towards Resilience in Industry 5.0: A Decentralized Autonomous Manufacturing Paradigm," *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 71, pp. 95~114.
- (5) Kang, Y. S., Jang, W. K., Lee, S. W., Choi, I. H, Seo, Y. H. and Kim, B. H., 2020, "Development of PC-Based CNC Test-Bed with LinuxCNC," *Proceeding of KSMTE 2020 Annual Autumn Conference*, Daejeon, Republic of Korea, p. 46.
- (6) Yu, W. P. and Lee, Y. C., 2021, "A Multi-Robot Task Scheduling Simulation Testbed for Logistics and Manufacturing Automation," *Proceedings of ICROS 2021*, Yeosu, Republic of Korea, pp. 91~92.
- (7) Kim, D. Y., Park, J. W., Baek, S., Park, K. B., Kim, H. R., Park, J. I., Kim, H. S., Kim, B. B., Oh, H. Y., Namgung, K. and Baek, W., 2020, "A Modular Factory Testbed for the Rapid Reconfiguration of Manufacturing Systems," *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 31, pp. 661~680.
- (8) Malburg, L., Seiger, R., Bergmann, R. and Weber, B., 2020, "Using Physical Factory Simulation Models for Business Process Management Research," *Proceeding of BPM 2020 International Workshops*, Vol. 397, pp. 95~107.
- (9) Choi, S., Lee, J., Kwon, M. and Kim, Y., 2022, "Test-bed Implementation for AIoT Smart Factory System Research," *Proceedings of KIIT 2022 Fall Conference*, Jeju, Republic of Korea, pp. 879~882.
- (10) Song, Y. H., Cho, C. N., Lee, C. H., Kang, M. J., Park, Y. S. and Lee, H. J., 2019, "Designing Test-bed for Fault Diagnosis and Failure Prognostics of Cooperative Robot," *Proceeding of KSMTE Annual Autumn Conference 2019*, Pyeongchang, Republic of Korea, p. 159.
- (11) Park, C., Park, S. H. and Kim, S. B., 2019 "Structured Regularization Modeling for Virtual Metrology in Semiconductor Manufacturing Processes," *International Journal of Industrial Orienting: Theory, Applications*

*and Practices*, Vol. 26, No. 6, pp. 835~849.

- (12) Lee, K., Park, S., Sung, S. H. and Park, D., 2019, "A Study on the Prediction of CNC Tool Wear Using Machine Learning Technique," *Journal of the Korea Convergence Society*, Vol. 10, No. 11, pp. 15~21.
- (13) Kim, A. R., Kim, H. S. and Kim, S. Y., 2024, "Artificial Intelligence-Based Fault Detection of Hydraulic Pump According to Missing Value Handling," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 48, No. 7, pp. 445~454.
- (14) Yu, N. H., Lee, Y. B. and Baek, S., 2023, "Development of Product Picking-Quality Inspection System through Convolution Filter and Ensemble-based Deep Learning Analysis for Distance Deviation Measurement and 2D Image," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 47, No. 3, pp. 283~293.
- (15) Jeon, S. H. and Song, E. C., 2019, "Implementation of Real-time Quality Inspection Automation Process Based on Machine Learning," *Proceedings of KIIE 2019 Fall Conference*, Seoul, Republic of Korea, pp. 3720~3734.
- (16) Kim, B. S., Song, G. M., Lee M. J. and Baek, S., 2024, "Real-Time Fault Detection System of a Pneumatic Cylinder Via Deep-learning Model Considering Time-Variant Characteristic of Sensor Data," *Journal of Korean Society of Industrial and Systems Engineering*, Vol. 47, No. 2, pp. 10~20.
- (17) Kim, M. and Shin, M., "Agent-based Dispatching System for a Multi-area Manufacturing System," *Journal of Korean Society of Industrial and Systems Engineering*, Vol. 47, No. 4, pp. 12~21.
- (18) Kim, N. J. and Wang, J. N., 2017, "CPS-Integrated Architecture for Smart Factory," *Proceeding of KIEE 2017 Spring Conference*, Pyeongchang, Republic of Korea, pp. 5326~5337.
- (19) Lee, W., 2024, "A Research on OPC UA PubSub Model for Manufacturing Environment Monitoring," *Proceedings of KIIT 2024 Conference*, Jeju, Republic of Korea, pp. 274~277.
- (20) Marins, A., Lucas, J., Costelha, H. and Neves, C., "CNC Machines Integration in Smart Factories Using OPC UA," *Journal of Industrial Information Integration*, Vol. 34, Article 100482.
- (21) Groover, M. P., 1980, *Automation, Production Systems and Computer-Aided Manufacturing*, Prentice Hall, Hoboken, USA, pp. 1~592.
- (22) Kim, J., Jeong, S. C., Seo, D. and Kim, D., 2022, "Development of OPC UA based Smart Factory Digital Twin Testbed System," *Journal of Korea Multimedia Society*, Vol. 25, No. 8, pp. 1085~1096.
- (23) Baek, S. and Kim, D. Y., 2015, "Effects of Sampling Rate on the Performance of Multidimensional Discretization-based Fault Detection," *Proceedings of KIIE 2015 Spring Conference*, Jeju, Republic of Korea, pp. 1905~1910.



## 스마트폰 앱을 활용한 차량 주행 성능 분석

엄 정 식\* · 최 복 록\*\*†

\* 강릉원주대학교 대학원 자동차공학과, \*\* 강릉원주대학교 자동차공학과

### Vehicle Driving Performance Analysis Using Smart Phone App

Jeong-Sik Eom\* and Bok-Lok Choi\*\*†

\* Graduate School of Mechanical & Automotive Engineering, Gangneung-Wonju Nat'l University,

\*\* Dept. of Mechanical & Automotive Engineering, Gangneung-Wonju Nat'l University

(Received May 6, 2025 ; Revised August 30, 2025 ; Accepted September 1, 2025)

**Key Words:** Data Acquisition System(DAS, 데이터 수집 장치), Data Analysis(데이터 분석), Driving Line(주행경로), Data Logger(데이터 로거), Slalom(슬라럼), Smart Phone(스마트폰)

**초록:** 계측된 데이터를 바탕으로 운전자의 기량과 차량 주행 성능을 정확하게 파악하고 문제점을 개선하는 것은 자동차 개발과 모터스포츠에서 매우 중요하다. 이를 위해 data acquisition system(DAS)을 활용하게 되는데 DAS의 가격이 매우 높아 이를 다룰 수 있는 엔지니어 교육 프로그램은 자동차 회사나 대형 레이싱 팀에서나 가능할 것이다. 데이터 계측 및 분석을 할 수 있는 엔지니어에 대한 수요는 충분하지만 대학에서는 시스템 구축 비용이 과다하여 교육이 어려운 실정이다. 이에 본 연구는 스마트폰 app을 이용하여 DAS를 쉽게 접근하고, 신뢰도 높은 결과를 얻을 수 있는 방법을 제시하고자 한다. 이를 통해 대학에서도 비용 부담 없이 데이터 분석 엔지니어 양성 교육이 가능하게 될 것이다.

**Abstract:** In automotive company and motorsports, the data acquisition system (DAS) is used to assess the driver's skill and vehicle driving performance. So DAS plays an important role. But due to the high expenses of DAS, training systems for engineers to handle them in university has been very limited. This study aims to propose a method to easily access DAS using a mobile phone app and obtain reliable results in school. It emphasizes that this approach can expand engineering training with almost at no costs.

## 1. 서 론

운전자의 기량과 차량의 주행 성능을 정확하게 파악하는 것은 자동차의 개발과 모터스포츠 분야에서 매우 중요하다. 특히 모터스포츠에서는 계측된 데이터를 통하여 문제점을 분석하고 개선책을 적용하여 좋은 결과를 얻어내는 신속한 대응이 필수적이다. 이러한 계측 시스템을 데이터 수집 장치(DAS: data acquisition system)라고 하며 여기에 사용되는 장비를 data logger(데이터 로거)라고 하는데 DAS의 가격이 매우 높아 이를 효과적으로 운용하기 위해서는 숙련된 데이터 측정 및 분석 엔지니어가 필요하다. 자동차 회사나 레이싱 팀에서의 수요뿐만 아니라 자동차 관련 부품 업체에서도 데이터 계측 및 분석을 할 수 있는 엔지니어에 대한 수요는 충분한 상황이지만 국내 대학에서는 시스템 구축 비용이 너무 높아 교육이 어려운 실정이다. 그러므로 본 연구에서는 비용의 문제로 접근이 어려운 DAS를 이용한 데이터 계측 및 분석 분야를 스마트폰 app을 이용하여 매우 용이하게 접근하는 방법을 제시하고자 한다. 이를 통

† Corresponding Author, blchoi@gwnu.ac.kr

해 대학에서 데이터 분석 엔지니어 양성 교육이 가능함을 제시하여 대학에서의 역할 가능성을 확대하고자 한다.

## 2. App과 DAS의 비교

Table 1에 보인 바와 같이 app과 DAS의 측정 가능 항목을 비교하면, DAS는 추가 센서를 통해 더 많은 데이터를 측정할 수 있지만 높은 가격과 분석 기술의 난이도로 활용이 어렵다. 실제 데이터 분석에 필요한 속도, 가속도, 주행 경로, 시간 항목은 app으로도 저렴한 비용으로 충분히 기록할 수 있다. DAS는 Race Technology DL1<sup>(1)</sup>으로 Fig. 1(a)와 같이 실내 편평한 곳(대시보드 상단 혹은 실내 바닥)에 고정하고, app은 VTA Program<sup>(2)</sup>을 사용하여 Fig. 1(b)와 같이 고정한다. 스마트폰 내부 센서를 이용해 차량의 속도, 가속도, 경로 데이터를 계측하며, 저장된 데이터는 다양한 방법으로 PC나 저장 장치로 이동할 수 있다. App은 USIM 칩 없이 설치 후 사용이 가능하다.

**Table 1** Comparison of app and DAS configuration

Category	App	DAS
GPS	O	O
Acceleration	O	O
Velocity	O	O
Time	O	O
Option port	X	O
CAN signal	X	O
Dashboard	X	O



(a) DAS

(b) Smart phone

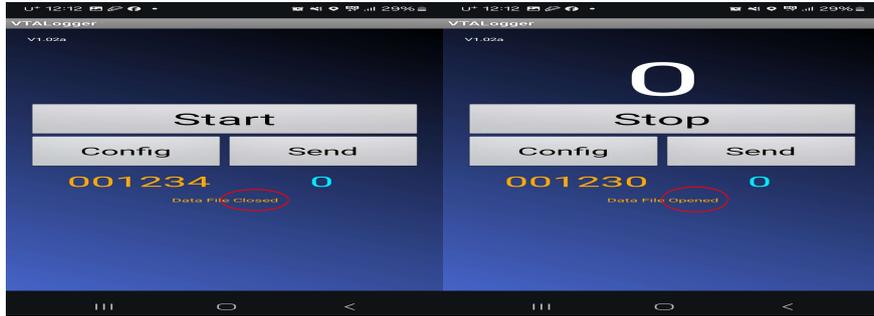
**Fig. 1** Fixation of the device



(a) First standby screen

(b) Configuration screen

**Fig. 2** VTA first standby and configuration



(a) Logging start screen (b) Logging closed screen

Fig. 3 VTA data logging screen

Index	Time	X	Y	Z (Alt)	Latitude	Longitude	Velocity	Bearing	NumSat	Entity
1	00160703	405713.0	4128892.6	236	37.301881	127.936106	0.0	249	23	77937952
2	00160704	405713.0	4128892.6	236	37.301881	127.936106	0.0	249	23	77940256
3	00160705	405713.0	4128892.6	236	37.301881	127.936106	0.0	249	23	77940976
4	00160706	405722.1	4128894.7	236	37.301900	127.936208	0.0	249	23	77938960
5	00160707	405722.1	4128894.7	236	37.301900	127.936208	0.0	249	23	77939968
6	00160708	405722.1	4128894.7	236	37.301900	127.936208	0.0	249	22	77938816
7	00160709	405722.1	4128894.7	236	37.301900	127.936208	0.0	249	25	77940112
8	00160710	405722.1	4128894.7	236	37.301900	127.936208	0.0	249	22	77940400
9	00160711	405721.5	4128894.9	236	37.301901	127.936202	10.0	248	22	77939824
10	00160712	405717.4	4128893.3	236	37.301887	127.936156	14.0	249	23	77939536
11	00160713	405710.3	4128890.9	237	37.301864	127.936076	22.0	250	20	77941120
12	00160714	405698.4	4128886.8	238	37.301826	127.935943	39.0	243	20	77939248
13	00160715	405687.9	4128881.7	238	37.301779	127.935825	44.0	247	21	77940832
14	00160716	405675.7	4128876.7	238	37.301733	127.935687	48.0	250	22	77938384
15	00160717	405661.7	4128871.9	238	37.301688	127.935530	54.0	247	23	77940544

**Velocity**

Minimum	10.0	kmh	Average	74.3	kmh
Maximum	136.0	kmh	Count	247	

Save to Excel      Save to PDF      Close

Fig. 4 Driving data output from app

### 3. APP 사용 방법

App을 실행하면 첫 화면은 Fig. 2(a)와 같다. GPS 신호가 app 작동 중 정상적으로 연결되어야 주행 데이터를 기록하므로 스마트폰을 차량에 거치한 후 GPS calibration 과정을 거쳐야한다. Fig. 2(a)의 config 메뉴와 Fig. 2(b)의 calib 메뉴를 사용하여 GPS calibration을 진행한다. 이 과정으로 스마트폰에 내장된 가속도계(IMU)의 초기방향을 설정하여 가속도의 종방향과 횡방향을 정한다.

Fig. 2(a)의 초기에 calibration 작업을 하지 않아도 측정은 가능하나 속도계가 작동을 시작하는 민감도가 높아 스마트폰이 흔들리지 않도록 고정 후 calibration을 진행해야 하며 과정이 완료되면 Fig. 2(b)와 같이 상단의 숫자가 사라지며 측정을 시작할 수 있는 대기 상태가 된다.

측정을 시작하면 Fig. 3(a)와 같은 화면으로 변경된다. GPS 기록이 시작되며 화면 상단 중앙의 속도계가 활성화되고 아래쪽에 “Opened”라는 문구가 나타난다. 기록을 마친 뒤 STOP 버튼을 선택하면 Fig. 3(b)로 전환된다. App 측정 중에는 Fig. 3(a)만 표시되며, 데이터를 분석하려면 PC에 설치된 VTA 프로그램을 실행해야 한다.

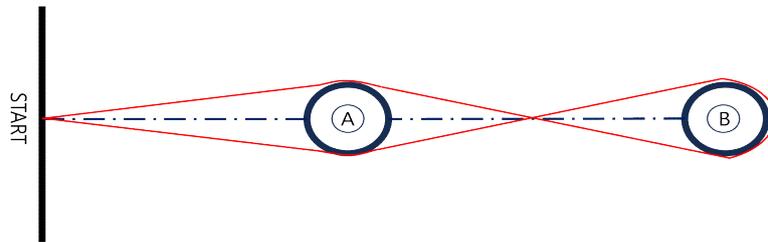
Fig. 4는 PC에서 출력한 VTA 가속도값이고, 스마트폰에 기록된 데이터를 분석에 활용한다. 가속도는 X, Y, Z 3축을 측정하고, 속도는 시간에 따른 데이터를 그래프로 출력하며, GPS와 가속도는 별도의 데이터 시트로 출력된다.

### 4. 주행 데이터 상대 비교 분석

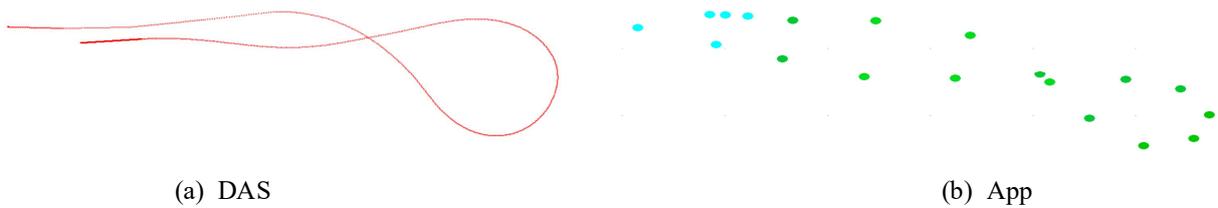
App과 DAS를 동시에 장착하여 다음의 세 가지 경우를 계측 및 분석해 본다. Case 1에서는 Fig. 5와 같은 슬라럼(slalom) 코스를 계측, 분석, 비교하여 app의 활용 가능성을 확인한다. Case 2에서는 실제 레

**Table 2** Slalom course specification

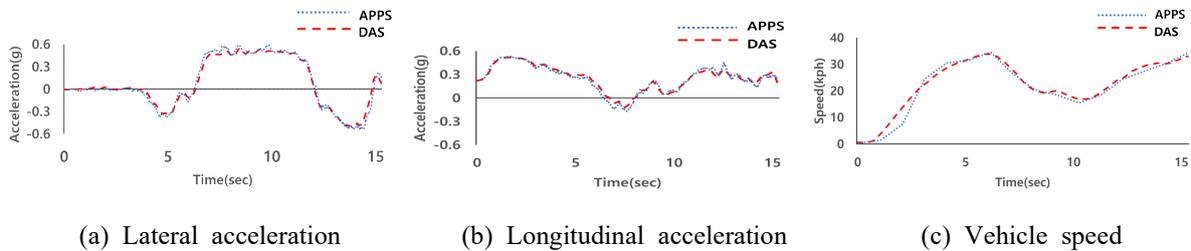
Distance between start line and A	20 m
Distance between A and B	20 m
Obstacle diameter	0.4 m
Minimum turning radius	1 m



**Fig. 5** General shape of a slalom course



**Fig. 6** Slalom GPS route data



**Fig. 7** Comparison of slalom driving data recorded by DAS and app

이성 서킷에서 주행한 데이터를 계측, 분석, 비교하여 case 1과 같은 간단한 형태의 슬라럼 뿐만이 아니라 매우 복잡한 형상과 주행 특성을 가지는 서킷에서도 app을 활용 가능한지를 확인한다. Case 3은 더욱 일반적인 주행 특성을 가지는 일반도로, 즉 공도(road) 데이터를 계측, 분석, 비교한다.

4.1 Case 1 - 슬라럼 코스

슬라럼 코스를 선택한 이유는 짧은 경로에서 다양한 주행 특성이 나타나며 그에 따른 가속도 변화가 많기 때문이다.<sup>(3-5)</sup> 코스 규격은 Table 2와 같으며, 테스트 진행 전에 DAS와 app을 지정된 위치에 고정하고 GPS 신호를 연결하고 보정하는 calibration을 시행하였다.

Fig. 6에 GPS 경로 데이터를 나타내었다. Fig. 6(a)의 DAS는 데이터를 100 Hz로 계측하여 점과 점 사이 간격이 좁아 하나의 선으로 보이는데 Fig. 6(b)의 app은 데이터를 1 Hz로 계측하여 점과 점 사이 간격이 멀게 표시된다. 또한 코스의 시작점과 끝점의 위치가 같아도 GPS 오차, 계측기기 오차 등에 의해 실제 계측값이 같지 않은 경우가 발생할 수 있다.

가속도 데이터를 보면 Fig. 7(a)는 횡 가속도(lateral acceleration), Fig. 7(b)는 종 가속도(longitudinal

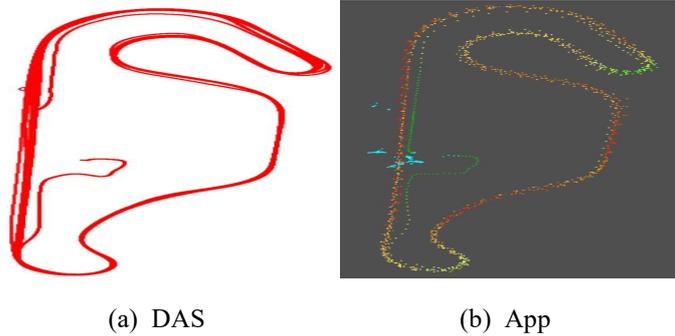


Fig. 8 Circuit GPS route data by (a) DAS; (b) app

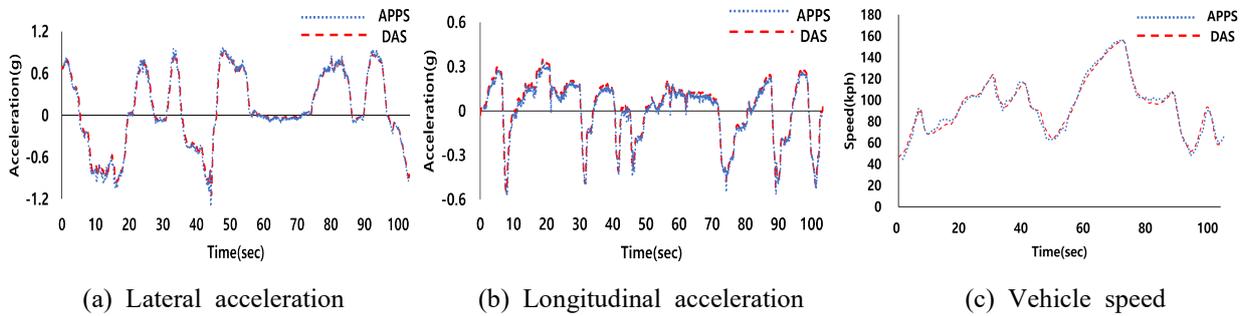


Fig. 9 Comparison of circuit driving data recorded by DAS and app

acceleration) 값을 나타낸다. 횡 가속도 그래프에서 DAS와 app 데이터는 스마트폰의 고정 장치의 견고성 때문에 오차가 다소 있을 수 있으며 DAS는 대시보드 상단에 고정되고, app은 대시보드 중간에 고정되어 설치 높이 차이로 측정 결과에 차이가 발생할 수 있다. 이에 계측기의 측정 위치를 달리하여 측정된 결과 높이 차이에 따라 실제 계측값이 달라질 수 있음을 확인하였다. 이에 높이 차이를 최대한 작게 하여 10 cm 이내로 하였으며 이에 따른 영향은 크지 않은 것으로 판단하였다. 종 가속도 그래프에서는 계측된 데이터에 큰 차이를 보이지 않는다. 이것은 종 가속도는 거치 방법에 따른 영향이 횡 가속도보다 작은 것으로 추측할 수 있다. 주행에서 app과 DAS의 데이터를 비교하면 종 가속도는  $\pm 0.06$  g 이하 수준의 차이로 매우 양호하였다. 그에 반해 횡 가속도는 종 가속도보다 계측된 값이 차이가 조금 더 발생하게 되는데 그 원인으로 실측 시 스마트폰이 거치대 유격에 의해 DAS보다 횡방향 민감도가 영향을 받았을 것으로 판단된다. 그러나  $\pm 0.08$  g 수준으로 분석에 충분히 사용할만한 수준으로 판단되었다. Fig. 7(c)는 속도를 나타낸다. 작은 차이가 보이지만 전체적인 그래프 형상은 매우 유사하다.

#### 4.2 Case 2 - 레이싱 서킷

Fig. 8에 인제 스피디움 서킷의 계측된 형상을 나타내었다. 서킷의 형상이 매우 유사한 것을 알 수 있다. 서킷에서는 연속으로 여러 랩을 계측하였으므로 임의로 1개의 랩 데이터를 분석하였다. Fig. 9(a)는 횡 가속도 그래프로 case 1과는 다르게 DAS와 app의 결과가 매우 유사함을 알 수 있다. 이는 서킷과 슬라럼의 크기가 달라 속도와 가속도 값의 크기가 다르게 되는데 슬라럼의 경우가 급격한 가속, 감속, 회전이 많아 고정된 시스템의 흔들림이 서킷의 경우보다 더 커서 오차가 있었다고 판단된다. Fig. 9(b)는 종 가속도 그래프로 데이터의 차이가 거의 없다.

서킷 주행에서는 Fig. 9(c)의 속도 그래프에서처럼 급격한 주행 상황 변화가 필수적이므로 속도 및 가속도의 변화도 크게 나타나므로 주행 데이터 분석을 가장 많이 활용한다. 일반적으로 서킷 주행을 가속도만으로 분석하는 경우는 매우 드물고 더 많은 데이터가 필요하나 초기 단계에서는 속도 및 가속도만으로도 기본적인 분석이 가능하므로 app도 매우 유용할 수 있다.<sup>(6-9)</sup>

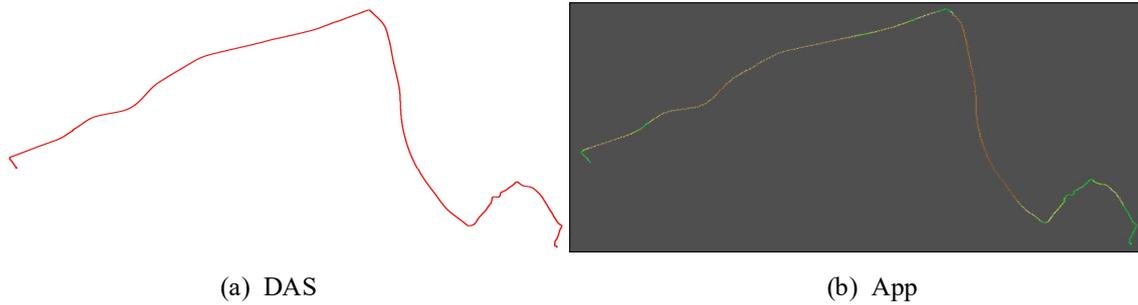


Fig. 10 Road GPS route data by (a) DAS; (b) app



Fig. 11 Segments with disrupted GPS signal marked on app driving route

#### 4.3 Case 3 - 일반도로

계측 시스템은 서킷에서 주로 사용되지만 WRC(World Rally Championship)와 같이 일반도로를 주행하는 경기에서도 많이 사용되고 있다. 측정한 GPS 경로를 Fig. 10에 나타내었는데 매우 유사함을 알 수 있다. 경로에 있는 터널, 고가도로 아래와 같이 GPS 신호가 끊기는 곳은 제대로 계측되지 않고 있음을 알 수 있다. 일반도로의 특성상 GPS 신호의 끊김이 발생하는데 이러한 부분은 두 계측 시스템에서 연산을 통해 경로를 이어서 출력하고 있다. App의 경로는 DAS의 경로와 달리 터널이나 고가도로 아래 등을 통과할 때 GPS 신호 단절 시 경로에 표시되고 있다.

Fig. 11은 주행 계측 중 GPS 끊김이 발생한 구간으로 일반도로에서 빠르게 주행할 때 GPS 신호의 끊김이 짧을 시 해당 구간의 실제 주행 거리 대비 GPS 기반으로 기록된 거리 값이 실제보다 더욱 짧게 표시되는 경향이 있다. 이로 인해 주행 속도에 따라 시간 대비 거리 기록 간의 불일치가 발생할 수 있으나, 이러한 데이터 오차의 특성을 인지하고 전처리 단계에서 이를 보정하거나 분석 대상 구간을 선별함으로써 분석 결과에 미치는 영향을 최소화할 수 있다.

예를 들어, 본 연구에서는 고속 주행 시 GPS 기반 거리 정보의 시간 불일치 문제를 고려하여, IMU 기반 가속도 데이터를 병행 분석하였고, 연속성과 신뢰도가 확보된 구간만을 분석 대상으로 선정하였으며, 거리 및 속도 데이터 간 변화율이 급격히 불일치하는 구간은 분석에서 제외하거나 보간 처리하는 방식으로 오차를 감소하는 방법을 적용하였다. 특히 일반도로는 정지선, 신호등과 같이 주행 중 감속, 정지, 출발, 가속 등 다양한 변수가 존재하므로 그 변수들을 분석할 수 있을 정도의 데이터 기록 여부가 매우 중요하다. 또한 돌발상황 계측도 가능해야 하므로 차선 변경, 제동 등의 주행 상황을 파악할 수 있는지 등을 분석하였다.

Fig. 12(a)의 횡 가속도의 특징은 슬라럼이나 서킷 주행과 달리 가속도가 크게 발생하지 않았다. 이는 공도의 특성상 주행 속도가 제한되어 있고, 극한에 가까운 주행이 아니므로 선회 시 큰 가속도가 발생되지 않았기 때문으로 판단된다. 또한 경사로, 도로 배수 설계로 인한 역방향 기울기의 영향도 있을 수 있다. Fig. 12(b)의 종 가속도에서도 두 시스템의 계측값이 감속이나 가속 시 차이가 크지 않다. 주행 시

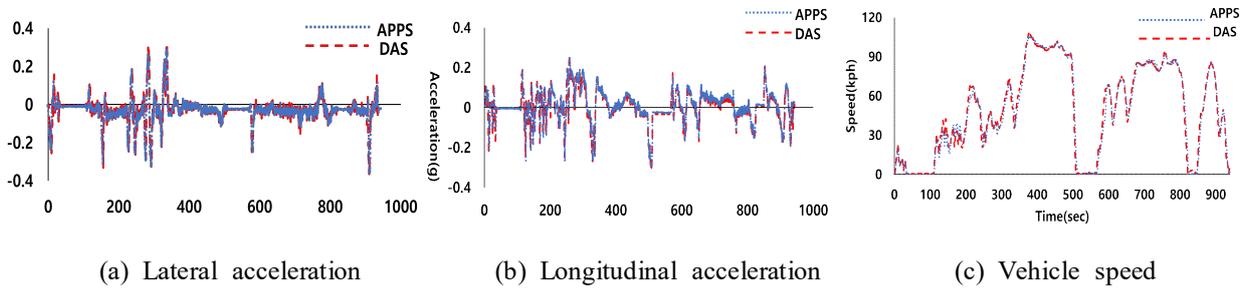


Fig. 12 Comparison of road driving data recorded by DAS and app

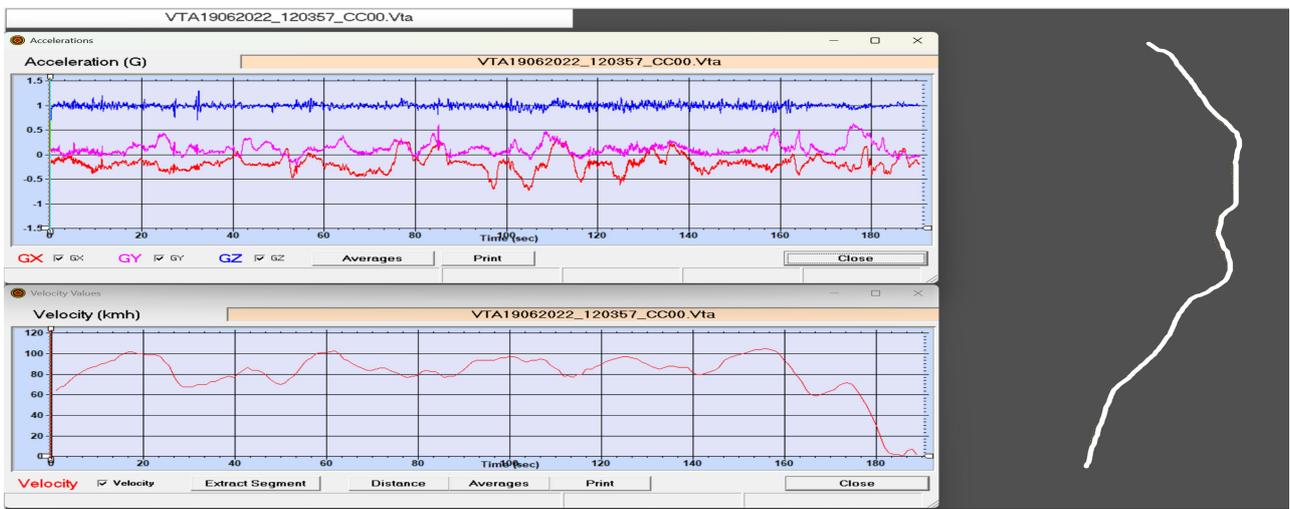


Fig. 13 Motorcycle data screen

감속이 가속보다 큰 값을 갖게 되는데 본 연구에서는 급정거와 같은 돌발상황이 발생하지 않았다. 또한 경사로 주행 시 종 가속도의 변화가 확연하며 경사로의 기울기, 가속 후 정속주행과 정지 상태에 따라 가속도 값의 변화가 발생함을 확인하였다. Fig. 12(c)에 있는 속도 데이터를 비교해도 app과 DAS의 결과는 매우 유사한 것을 알 수 있다.

### 5. 교육 활용 사례

실제 수업에 활용한 사례를 살펴본다. VTA 계측을 위해 스마트폰을 휴대한 상태로 도보, 달리기, 키보드, 대중교통, 자전거 등 매우 다양한 계측을 시도하였다.

Fig. 13은 속도와 가속도 그래프 및 위치, 경로 정보를 확인하여 운송 수단을 분석하는 것으로 계측된 VTA 정보 이외의 어떤 것도 제공되지 않은 상황에서 분석을 진행하였다. 분석 목표는 선회 시 속도와 가속도의 관계를 통해 운송 수단이 모터사이클임을 찾아보는 것이었다. Fig. 13의 그래프에서는 일정한 속도를 유지하며 좌우로 반복 선회하는 구간에서 횡 가속도가 양과 음으로 대칭적으로 반복되며, 진폭이 급격히 변화하는 패턴이 나타나는데 이는 차체를 기울이며 주행하는 모터사이클의 대표적인 동적 특성이다.

Fig. 14는 기차에 탑승하여 계측한 app 데이터로 자동차와 비교하여 빠른 속도로 주행하며 가속도 변화가 작고 기차의 주행 특성상 스마트폰의 상하 방향으로 노이즈가 많이 발생하는 것을 알 수 있다. 또한 터널 구간이 많아 중간중간 기록 끊김이 발생한다.

이외에도 스마트폰의 가속도 센서를 활용하여, 스마트폰이 세워진 상태인지 눕혀진 상태인지를 중력 가속도값을 통해 판별할 수 있다. 스마트폰이 평면에 눕힌 경우 중력 가속도(y축)는 약 1 g으로 측정되

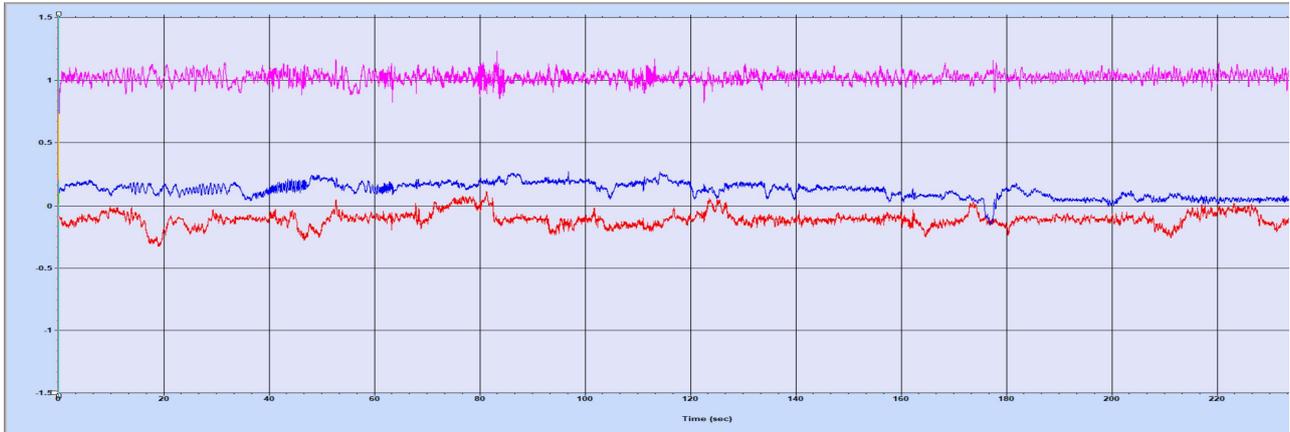


Fig. 14 Onboard train data screen

며, 스마트폰을 세워서 거치한 경우 중력 가속도(z축)의 값이 약 1 g으로 나오게 된다.

이러한 특성을 기반으로, 일정한 주행 조건 중 스마트폰 자세에 급격한 변화가 발생한 구간은 사용자가 스마트폰을 조작했을 가능성이 있는 구간으로 추정할 수 있으며, 이는 계측 신뢰도 분석이나 교육적 활용의 참고 지표로 활용될 수 있다.

## 6. 결 론

이번 연구는 차량의 성능 계측 및 분석에 DAS와 스마트폰 app을 이용하여 동일한 조건에서 동시에 측정하여 결과를 비교해 보았다. 시스템 구축 비용이 매우 높은 DAS와 추가 비용이 필요없는 스마트폰 app을 활용할 경우 결과 값의 상대 비교를 통해 스마트폰 app의 활용 가치를 비교 분석해 보았다. 스마트폰 app을 사용하는 것에 대한 교육 현장 및 실제 상황에서의 활용 가치에 대해서 비교분석 과정을 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

거치 방법에 따른 영향이 있을 수 있어 정확한 데이터를 얻기 위해 최적의 위치를 정하고, 유격을 최소화하면 가속도와 속도데이터를 통한 차량의 주행 성능 분석에 있어 app은 매우 효과적이며 DAS와 매우 유사한 데이터 측정이 가능하다.

App의 경우 DAS에 비해 기록되는 GPS 데이터의 절대량이 적지만, 가속도 데이터의 경우 종 가속도 및 횡 가속도, 속도 및 거리가 충분히 측정되고, 그 결과값의 차이는 무시할 만한 수준이다.

GPS 신호는 장애물에 의해 신호가 끊김과 재수신 과정에서 시간 지연이 존재할 수 있다. 실제 터널을 주행하며 기록된 데이터를 보면 끊김이 발생한 구간의 지연 시간이 존재하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 GPS 신호의 끊김과 재수신 과정에서 실제 위치, 거리, 주행 속도에 따라 계측된 이동거리가 실제 값과 차이가 있으므로 계측된 데이터의 필터링을 통해 분석에 주는 영향을 줄일 수 있을 것이다.

App 계측데이터는 차량의 주행 성능 및 운전자의 기량 분석에 활용할 뿐만 아니라 운전 중인 차량에서 운전자의 스마트폰 조작 여부를 분석하는 것도 가능할 것이다.

## 참고문헌 (References)

- (1) Race Technology, 2013, *DLI Sports* (<https://www.race-technology.com/gb/racing/data-logging/dli1-sport>), Race Technology, Nottingham, UK.
- (2) VTA Vehicle Trajectory Analysis, 2019, *Vehicle Performance Programs* ([www.testcell3.com](http://www.testcell3.com)), VTA Vehicle Trajectory Analysis, Ormond, Australia.
- (3) Eom, J. S. and Choi, B. L., 2023, "A Study on the Analysis of Driving Performance of Slalom Course

- Using Acceleration Data Measured during Driving,” *Journal of the Korean Society of Mechanical Technology*, Vol. 25, No. 4, pp. 482~486.
- (4) Kim, K. S., 2009, “A Study on the Virtual Proving Ground for Vehicle Dynamics Simulation,” *Journal of the Korean Society of Mechanical Technology*, Vol. 11, No. 4, pp. 7~13.
- (5) Kim, Y. H., 2010, “Data Logger Development and Performance Evaluation for Kart Vehicle Dynamic Analysis,” *Journal of the Korean Society of Mechanical Technology*, Vol. 12, No. 2, pp. 53~60.
- (6) Jang, S. K., 2010, “What is Data Logging?,” *Auto-Journal of KSAE*, Vol. 32, No. 4, pp. 86~90.
- (7) Jang, S. K., 2011, “Application of Motorsports to the New Approach for Automobile Engineering Education,” *Auto-Journal of KSAE*, Vol. 33, No. 2, pp. 18~28.
- (8) Kwon, O. B. and Kim, K. S., 2013, “The Design and Implementation of Location Information System using Wireless Fidelity in Indoors,” *The Journal of Digital Policy & Management*, Vol. 11, No. 4, pp. 243~249.
- (9) Eom, J. S. and Choi, B. L., 2018, “A Theoretical Study on Optimal Driving of Racing Circuit,” *Journal of the Korean Society of Mechanical Technology*, Vol. 20, No. 5, pp. 658~663.



## 해안가 가로등의 부식과 파손에 관한 고찰

이 원 호<sup>\*†</sup>

\* 포스코기술대학 철강융합과

### A Study on Corrosion and Failure of Coastal Streetlights

Wonho Lee<sup>\*†</sup>

\* Department of Steel Convergence Technologies, POSCO Technology University

(Received May 20, 2025 ; Revised October 27, 2025 ; Accepted November 2, 2025)

**Key Words:** Streetlight Failure(가로등 파손), Airborne Salt(비래염분), Corrosion(부식), Welding Strength(용접강도), Structural Safety(구조 안전성)

**초록:** 본 논문은 해안가에 위치한 가로등의 파손 현상에 대한 현장관찰 및 기계공학적 분석결과를 제시한다. 2020년부터 2024년까지 4년간의 장기 관찰 결과, 해안가에 설치된 가로등의 등기구구는 내륙 지역의 가로등에 비해 현저히 높은 파손율을 보였다. 이러한 현상의 주요 원인으로는 해풍에 포함된 비래염분이 가로등 용접부의 강도를 약화시키고, 등기구와 등주(燈柱)의 접합부에 가해진 과도한 굽힘응력이 복합적으로 작용된 것으로 판단된다. 따라서 해안가 가로등의 안전성 향상을 위해서는 내염설계, 용접 품질 관리, 그리고 유지보수 체계 구축이 시급한 것으로 판단된다.

**Abstract:** This paper presents field observations and mechanical engineering analysis of failure phenomena in streetlights located in coastal areas. Based on long-term observations conducted over four years from 2020 to 2024, luminaires of streetlights installed in coastal areas showed significantly higher failure rates compared to those in inland regions. The main causes of this phenomenon are determined to be a combination of airborne salt in sea winds weakening the strength of welded joints and excessive bending stress applied to the connection points between the luminaire and the light pole. Therefore, to improve the safety of coastal streetlights, it is urgent to establish salt-resistant designs, welding quality control, and maintenance systems.

### 1. 서론

도로 조명시설은 도로 이용자의 안전한 이동을 보장하는 필수적인 도시 인프라 중 하나이다. 특히 야간 운전자의 시야 확보와 보행자의 안전을 위해 가로등은 모든 도로 환경에서 중요한 역할을 담당한다. 그러나 이러한 가로등 시설물이 파손되어 도로 위로 낙하하는 사고는 차량 파손은 물론 인명 피해까지 초래할 수 있는 심각한 안전 문제를 야기한다.<sup>(1-3)</sup>

우리나라는 3면이 바다로 둘러싸인 반도국가로서, 해안을 따라 많은 도로와 가로등이 설치되어 있다. 이러한 지리적 특성은 해안 지역의 도로 시설물이 해풍에 의한 염해(鹽害)에 지속적으로 노출되는 환경을 조성한다.<sup>(4,5)</sup> 해안가 가로등의 파손 현상은 단순한 시설물 유지관리 문제를 넘어 도로 이용자의 안전과 직결되는 중요한 공학적 과제이다.

저자는 2020년 5월에 해변가에 위치한 가로등 중에서 양쪽의 등기구가 모두 떨어진 가로등의 기둥, 즉 등주(燈柱)가 저절로 흔들리는 현상을 발견하였다. 이에 유체역학 관점에서 가로등이 흔들리는 원인

† Corresponding Author, [leegyber@posco.com](mailto:leegyber@posco.com)

© 2026 The Korean Society of Mechanical Engineers

을 밝히고 논문을 게재한 바 있다.<sup>(6)</sup> 그로부터 4년이 경과한 시점에 동일한 장소를 방문하여 가로등의 상태를 관찰해 본 결과, 4년 전에 비해 더 많은 가로등 기구가 파손되어 있거나 새로운 형태로 교체되어 있음을 발견하게 되었다.

따라서 이번에는 가로등의 등기구가 어떤 원인에 의해 파손되었는 지에 대해 알아보기로 하였다. 특히, 해안 지역과 내륙 지역 가로등의 파손 양상 비교를 통해 비래염분(飛來鹽分)의 영향을 확인하고, 구조역학적 관점에서 가로등 등기구의 탈락 과정을 고찰해보았다. 또한 실제 등기구의 낙하 사고 사례를 수집하여 가로등 파손이 초래할 수 있는 위험성을 검토하였다. 이러한 종합적 분석을 바탕으로 해안가 가로등의 안전성 향상을 위한 설계 및 유지관리 방안을 제시하였다. 본 연구의 결과는 향후 해안가 도로 시설물의 설계 기준 개선과 안전 관리 정책 수립에 기여할 수 있을 것으로 생각된다.

## 2. 관찰 및 분석방법

본 연구는 Fig. 1의 지도상에 나타낸 바와 같이 경상북도 영덕군 대진해수욕장 주변의 가로등을 대상으로 하였다. 해안에서 가까운 위치에 설치된 11개의 가로등의 상태를 관찰하고, 비교군으로 동일 지역 내 해안으로부터 직선거리로 약 1.4 km 떨어진 내륙 지역의 가로등 10개를 함께 조사하였다. 이를 통해 해안 근접성에 따른 가로등 파손 양상의 차이를 분석하고자 하였다.

가로등의 상태는 2020년 5월과 2024년 7월, 두 시점에 현장 방문을 통해 관찰되었다. 각 가로등의 위치는 위성사진을 기반으로 기록하였으며, 차도와 보행도로가 나뉘어지는 지점을 기준으로 해변으로 가까워지는 방향과 내륙으로 향하는 도로변에 설치된 가로등을 비교해보았다. Fig. 2는 해안지역에서 관찰된 가로등의 상태를 나타내는 사진으로서 각각 (a) 정상 가로등(정상, normal), (b) 등기구의 한쪽이 탈락한 가로등(외등, one-side), (c) 양쪽 등기구가 모두 탈락한 가로등(탈락, detached), 그리고 (d) 새로운 등기구로 교체된 가로등(교체, replaced)을 나타낸다. 참고로 내륙지역의 가로등은 전혀 파손되지 않았으므로 Fig. 2의 (a)와 같은 정상상태를 유지하고 있었다.

관찰된 결과는 시간 경과에 따른 변화와 위치에 따른 차이를 중심으로 분석하였다. 특히 가로등 파손의 주요 원인으로 추정되는 비래염분의 영향을 검증하기 위해 해안가와 내륙 지역의 가로등 상태를 비교하였다. 또한, 가로등의 파손부위의 관찰과 구조역학적 관점에서 등기구와 암에 발생하는 굽힘 응력을 고려하여 파손 메커니즘을 규명하고자 하였다.

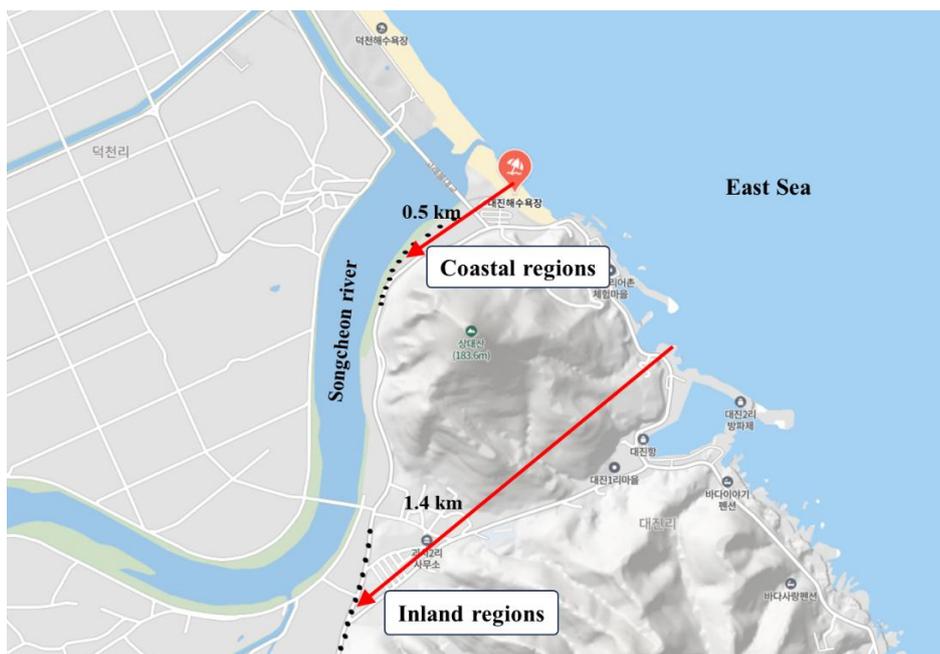


Fig. 1 Observation sites of streetlight failures in coastal and inland regions

그리고, 가로등 파손의 위험성을 객관적으로 평가하기 위해 국내외에서 발생한 가로등 낙하 사고 사례를 수집하여 검토하였다. 이를 통해 가로등 파손이 초래할 수 있는 실질적 위험을 확인하고 예방적 조치의 필요성을 강조하였다.

### 3. 분석결과

#### 3.1 가로등의 파손 현황

Fig. 3의 (a)에서 볼 수 있는 바와 같이 2020년 5월 관찰 당시에는 해안지역 11개 가로등 중에서 9개(82%)가 정상 상태였다. 차도와 보행도로가 나뉘어지는 지점의 가로등은 한쪽 등기구가 탈락된 외등이었으며, 나머지 1개는 양쪽 등기구가 모두 탈락된 상태였다. 양쪽 등기구가 모두 탈락된 가로등은 논문<sup>(6)</sup>에서 언급된 유동유발 진동이 관찰되었던 가로등이다.

그런데, 2024년 7월에는 Fig. 3의 (b)에 표기한 바와 같이 11개의 가로등 중에서 정상 상태는 단 2개(18%)에 불과했다. 4개의 가로등은 외등이었으며 5개의 가로등은 등기구가 모두 탈락되어 새로운 등기구로 교체된 상태였다. 반면, 해안으로부터 약 1.4 km 떨어진 내륙 지역에 위치한 10개의 가로등은 모두 정상 상태로 유지되고 있었다.

4년 사이에 해안가 가로등의 파손 비율은 18%에서 82%로 크게 증가하였다. 특히 해변과 가까운 가로등은 모두 양쪽 등기구가 탈락되어 교체가 이루어진 상태였다. 이러한 결과는 시간이 경과함에 따라 해안가 가로등의 파손이 점진적으로 진행되었음을 나타낸다. 또한 해안선으로부터의 거리가 가로등 파손에 유의미한 영향을 미침을 시사한다.

#### 3.2 등기구 파손의 원인

해안가와 내륙지역 가로등의 상태 차이는 해풍에 포함된 비래염분이 가로등 파손에 주요 영향을 미침을 시사한다. 경상국립대학교의 연구<sup>(7)</sup>에 따르면 “강구조물은 해안에 가깝게 설치될수록 부식층의 두께가 증가한다”는 결과가 보고된 바 있다. 이는 해안선으로부터의 거리가 가까울수록 비래염분의 영향이 커져 금속 부식이 가속화됨을 의미한다.

비래염분은 해수 입자가 파도나 바람에 의해 대기 중으로 비산되어 주변 구조물에 부착되는 현상으로, 염화물 이온(Cl<sup>-</sup>)이 금속 표면의 산화막을 파괴하여 부식을 촉진시킨다.<sup>(8)</sup> 특히 강재의 용접부는 열영향부(HAZ)의 미세구조 변화로 인해 부식에 더욱 취약할 수 있다.<sup>(9)</sup>



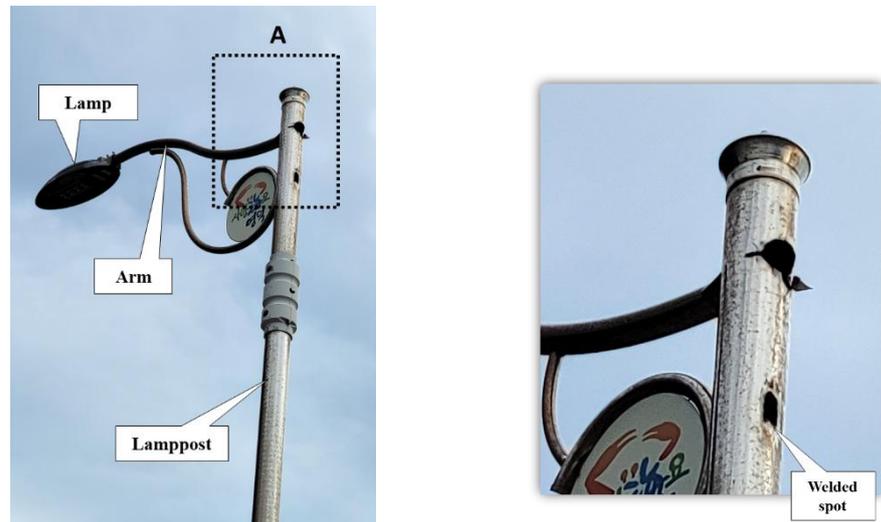
Fig. 2 Various configurations of coastal area streetlights



(a) May 2020

(b) July 2024

Fig. 3 Temporal progression of coastal streetlight conditions



(a) The joint between a streetlight and pole

(b) Enlargement of area 'A'

Fig. 4 Observed luminaire detachment condition in failed streetlights

가로등의 구조는 크게 기둥이 되는 등주와 등기구 그리고 이들을 연결해주는 암(arm)으로 구성된다. 암과 등주는 대부분 용접으로 결합되며, 이 용접부는 구조적 취약점이 될 수 있다. Fig. 4는 등기구가 등주로부터 탈락된 가로등의 접합부위를 나타내는 사진이다.

접합부위를 확대해 보면 용접으로 접합했다고 볼 수 없을 정도로 파단 부위가 비교적 깨끗하게 분리되어 있음을 알 수 있다. 이것은 용접 시에 모재와 용접재료가 충분히 용착되지 못한 상태, 이른바 용입 부족 상태로 제작되었을 가능성을 시사한다.

다음은 구조역학 관점에서 가로등의 등기구 무게로 인해 접합부위에 발생하는 응력의 영향을 살펴보자. Fig. 5의 (a)는 정상적인 가로등에서 등기구의 무게( $W_1 = 2.5 \text{ kgf}$ )와 암의 길이( $L_1 = 1,800 \text{ mm}$ )에 의한 굽힘 모멘트( $M = W_1 \times L_1$ )가 용접부에 지속적으로 인장응력이 가해지고 있다. 정상적인 조건에서는 용접부의 강도가 가해진 응력을 충분히 견딜 수 있겠지만, 비례염분에 의한 부식으로 용접부의 강도가 약화된다면 설계시에는 예상치 못했던 상황에서 조기에 파손된다.

Fig. 5의 (b)와 같이 최근에 보수된 가로등을 관찰해보면 암의 길이가 짧아지고( $L_2 = 1,000 \text{ mm}$ ), LED 등기구의 무게도 감소( $W_2 = 0.8 \text{ kgf}$ )되었다. 따라서, 보수된 가로등의 용접부에 작용하는 굽힘 모멘트는  $7.84 \text{ N}\cdot\text{m}$ 로서, 기존의 굽힘 모멘트  $44.1 \text{ N}\cdot\text{m}$ 에 비해 크게 감소되었음을 알 수 있다. 이는 구조적 안전성을 향상시키기 위한 조치로 평가된다.

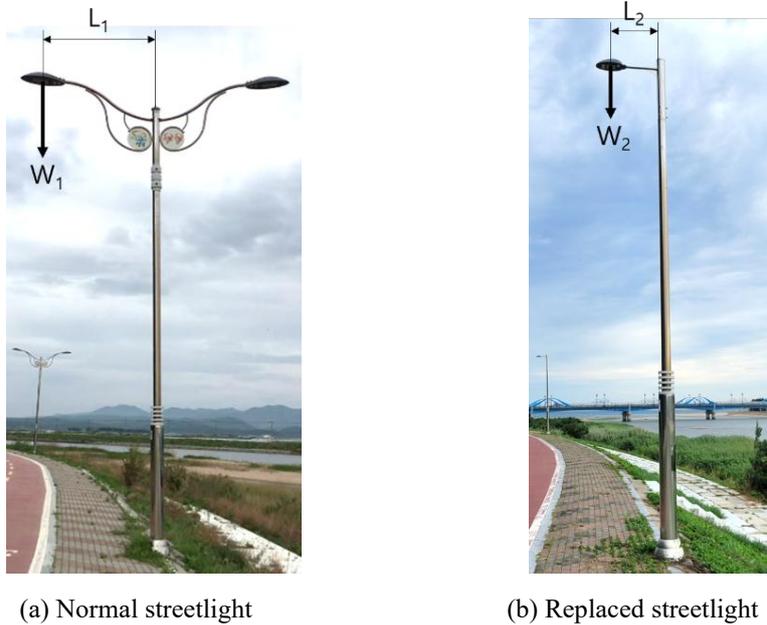


Fig. 5 The bending moment acting on the joint of a streetlight fixture

이상과 같은 관찰결과를 정리해보면, ① 부적절한 용접에 접합상태의 불량, ② 비래염분에 의한 부식으로 접합강도 저하, ③ 등기구의 중량에 의한 굽힘응력 작용 등이 차례로 영향을 미쳐서 등기구가 파손된 것으로 판단된다.

#### 4. 논의

##### 4.1 가로등 등기구의 낙하사고 사례

가로등 등기구의 낙하는 심각한 안전 문제를 초래할 수 있다. 본 연구에서는 공개된 자료를 통해 국내외에서 발생한 가로등 낙하사고 사례를 확인하였다.<sup>(10)</sup>

1) 2016년 성수대교 사고 : 용접부위가 파손되어 낙하한 등기구가 주행 중인 차량의 전면부와 충돌한 사고. 다행히 차량 보닛 부분만 경미하게 파손되었다.

2) 2020년 4월 서울 동작대교 부근 사고 : 가로등 등기구가 낙하하여 차량을 파손시킨 사고. 해당 사고 보고서에서는 이러한 낙하 사고가 주변 시설물 파손은 물론 인명 피해 등의 2차 사고로 연결될 가능성이 크다고 지적하였다.

3) 국외 사례 : 대만으로 추정되는 도로 위를 주행하던 오토바이 운전자 앞으로 가로등 기구가 낙하한 아찔한 사고. 주변 차량 통행이 많았다면 대형 사고로 이어질 수 있었던 상황이었다.

이러한 사례들은 가로등 기구의 탈락이 단순한 시설물 파손을 넘어 도로 이용자의 안전을 심각하게 위협할 수 있는 문제임을 보여준다.

##### 4.2 해안가 가로등의 안전성 제고방안

앞서 설명한 바와 같이 해안가에 설치되는 가로등은 내륙지역과는 달리 비래염분을 고려하여 제작단계부터 보다 강건한 설계와 용접 품질관리가 필요하다. 그리고, 내륙지역에 비해 더 빈번한 점검과 유지보수가 필요하다. 가로등의 제작단계와 설치후의 운영단계에서 고려할 사항들을 정리하면 다음과 같다.

###### 4.2.1 가로등 제작단계

- 1) 스테인리스 스틸, 플라스틱 또는 플라스틱 복합재 등 내식성이 우수한 재료 선택
- 2) 암의 길이와 등기구 무게를 최적화하여 굽힘 응력발생 최소화
- 3) 충분한 용입 깊이 확보, 용접부 결함의 최소화 등의 용접품질 관리

#### 4.2.2 가로등 운영단계

- 1) 해안선으로부터의 거리에 따른 차별화된 점검 주기 설정
- 2) 부식 진행 상태 모니터링을 위한 정기 검사
- 3) 용접부 균열 및 부식 초기 징후에 대한 검사

#### 4.2.3 정책 제언

우리나라는 삼면이 바다로 둘러싸인 반도국가로서, 많은 해안 도로와 가로등이 설치되어 있다. 이러한 지리적 특성을 고려하여 다음과 같은 정책적 접근도 필요하다.

- 1) 해안가 도로시설물에 대한 특화된 설계기준 마련
- 2) 환경조건에 따른 시설물 안전등급 분류
- 3) 데이터 기반의 예방정비 시스템 구축

## 5. 결 론

본 연구는 해안가에 설치된 가로등의 파손현상을 4년간의 관찰을 통해 체계적으로 분석하였다. 연구 결과, 해안가 가로등은 내륙 지역에 비해 현저히 높은 파손율을 보였으며, 이는 비래염분에 의한 부식과 구조적인 굽힘 모멘트의 복합적 작용에 기인한 것으로 분석되었다. 가로등 등기구의 낙하는 단순한 시설물 파손을 넘어 도로 이용자의 안전을 심각하게 위협할 수 있는 문제이다. 국내외 사례에서 확인된 바와 같이, 주행 중인 차량이나 보행자 위로 등기구가 낙하할 경우 심각한 인명 사고로 이어질 수 있다. 본 연구는 현장 관찰과 공학적 직관에 기반한 분석이라는 한계가 있으므로, 향후 보다 객관적이고 체계적인 연구를 통해 가로등 파손 원인과 메커니즘을 정밀하게 규명하고, 이를 바탕으로 안전한 가로등의 제작 및 관리 기준이 정립될 필요가 있다.

## 참고문헌 (References)

- (1) Ministry of Land, Infrastructure and Transport of the Republic of Korea, 2016, *Guidelines for the Installation and Management of Road Safety Facilities – Lighting Facilities Section*, Ministry of Land, Infrastructure and Transport of the Republic of Korea, Sejong, Republic of Korea, pp. 1~107.
- (2) Korea Expressway Corporation, 2018, *Standards for the Installation of Road Lighting Facilities*, Korea Expressway Corporation, Gimcheon, Republic of Korea, pp. 1~214.
- (3) Korea Authority of Land & Infrastructure Safety, 2021, *Report on the Status Survey of Safety Management for Road Structures*, Korea Authority of Land & Infrastructure Safety, Jinju, Republic of Korea.
- (4) Ministry of Oceans and Fisheries of the Republic of Korea, 2022, *Survey on the Current Status of Coastal Infrastructure*, Ministry of Oceans and Fisheries of the Republic of Korea, Busan, Republic of Korea.
- (5) Kim, Y. and Lee, C., 2015, “A Study on Salt Damage and Durability of Coastal Structures,” *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 35, No. 3, pp. 487~495.
- (6) Lee, W., 2022, “Review of The Possibility of Flow-induced Vibration of Streetlight by Computer Simulation,” *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. C*, Vol. 10, No. 1, pp. 99~105.
- (7) Park, J. and Kim, M., 2022, “A Study on the Corrosion Characteristics of Steel Structures Based on Distance from the Coast,” *Journal of Gyeongsang National University*, Vol. 28, No. 2, pp. 112~120.
- (8) Lee, J., 2018, “Effect of Airborne Salt on the Corrosion of Steel Structures,” *Journal of the Korean Society of Steel Construction*, Vol. 30, No. 4, pp. 231~240.
- (9) Jung, Y. and Kim, T., 2019, “An Experimental Study on Salt-Induced Corrosion Characteristics of Welded Joints in Steel Structures,” *Journal of the Korean Welding and Joining Society*, Vol. 37, No. 1, pp. 45~53.
- (10) Korea Road Traffic Authority, 2021, *Casebook of Safety Accidents Involving Road Structures*, Korea Road Traffic Authority, Wonju, Republic of Korea.

## 제어기 설계 교육용 소프트웨어 개발

이 상 현<sup>\*†</sup>

\* 국립경국대학교 전자·기계공학부 로봇공학전공

## Development of an Education Software Tool for Controller Design

Sang Heon Lee<sup>\*†</sup>

\* School of Electrical and Mechanical Engineering, Gyeongbuk Nat'l Univ.

(Received June 30, 2025 ; Revised December 26, 2025 ; Accepted December 26, 2025)

**Key Words:** Controller Design(제어기 설계), Root Locus Method(근궤적법), Frequency Response Method(주파수 응답법), Educational Software(교육용 소프트웨어)

**초록:** 제어기 설계는 제어공학 교육의 핵심 주제 중 하나이다. 근궤적법과 주파수응답법은 고전 제어 설계 기법 중에서도 중요한 위치를 차지하지만, 수학적으로 복잡하고 시각적 이해가 어려워 학습에 어려움이 존재한다. 본 논문에서는 근궤적 및 주파수응답 설계법의 직관적 이해를 돕기 위한 교육용 소프트웨어를 개발하고, 이를 통해 제어기 설계 교육의 효과성을 향상시키고자 한다. 제안된 소프트웨어는 시각화 기반의 실시간 피드백 기능과 사용자 친화적인 조작 환경을 제공하며, 실제 예제를 통해 소프트웨어의 효과를 확인하였다.

**Abstract:** Controller design is a core topic in control engineering education. Root locus and frequency response methods hold significant positions among classical design techniques, but their mathematical complexity and the need for visual understanding often make them difficult to learn. This study presents the development of an educational software tool aimed at facilitating intuitive understanding of root locus and frequency response-based controller design. The proposed software offers real-time visual feedback and a user-friendly interface, helping learners grasp key concepts through direct interaction. The effectiveness of the tool was demonstrated through example applications and user evaluation.

## 1. 서 론

제어기술은 우주발사체, 자율주행차, 지능형 로봇과 같은 최첨단 기술 분야는 물론, 일상생활에서 흔히 접할 수 있는 방 온도 조절기, 정수기 온도제어기 등 다양한 응용 분야에서 핵심적인 역할을 수행하고 있다. 이러한 제어기술은 시스템의 동작을 안정적으로 유지하고 성능을 향상시키는 데 필수적인 요소로, 공학 분야의 기초이자 응용을 위한 기반 기술로 자리 잡고 있다.

대학의 제어공학 교육에서는 일반적으로 고전 제어 이론을 중심으로 한 학습이 이루어진다. 이는 근궤적법, 주파수응답법, 시간응답 해석 등으로 구성되며, 다양한 시스템의 거동을 분석하고 제어기를 설계하는 방법을 익히는 데 중점을 둔다. 이러한 이론을 실습으로 연결하기 위해서는 MATLAB<sup>(1)</sup>과 같은 상용 소프트웨어의 활용이 요구되지만, 고가의 라이선스 비용과 유지비용은 교육 현장에서의 접근성을 제한하는 요소가 된다. 이에 따라 Octave,<sup>(2)</sup> Scilab<sup>(3)</sup> 등 오픈소스 기반의 소프트웨어가 대안으로 사용되고 있으며, 본 연구진 또한 Octave 및 Tinker CAD Circuit<sup>(4)</sup>을 이용한 제어기 설계 및 가상 구현 실험<sup>(5,6)</sup>을 수행한 바 있다.

그러나 기존의 대부분 소프트웨어는 텍스트 기반의 인터페이스로 구성되어 있어 초보 학습자에게 직

† Corresponding Author, shlee@gknu.ac.kr

관적이지 않으며, 학습자와의 인터랙션이 제한적이라는 단점이 있다. 이로 인해 제어이론의 핵심 개념과 설계 원리를 충분히 이해하고 적용하는 데 어려움이 존재한다.

이에 본 연구에서는 그래픽 기반의 사용자 인터페이스를 제공하여 학습자가 보다 직관적으로 제어 이론을 학습하고 실습할 수 있도록 지원하는 교육용 소프트웨어를 제안한다. 특히, 근 궤적 설계법과 주파수 응답 설계법을 중심으로 설계 파라미터의 변화에 따른 시스템 응답 변화를 실시간으로 시각화함으로써, 제어기 설계의 개념을 체계적으로 습득할 수 있도록 한다. 또한 실제 제어기 설계 예제를 통해 제안된 소프트웨어의 활용 가능성과 교육적 효율성을 검증하고자 한다.

## 2. 프로그램 설계 및 구현

본 장에서는 본 연구에서 개발한 제어기 설계 교육용 소프트웨어의 구조와 주요 기능을 설명하고, 각 모듈의 구성 요소와 구현 방식에 대해 기술한다. 고전 제어기법은 크게 두 가지로 구분되며, 첫째는 근 궤적 설계법으로, 이는 폐루프 시스템의 극점이 개루프 이득의 변화에 따라 복소평면상에서 어떻게 이동하는지를 분석하고, 극점의 위치와 감쇠비, 고유진동수 등 시스템의 특성 간 관계를 이용하여 제어기를 설계하는 방식이다. 둘째는 주파수 응답 설계법으로, 시스템이 주파수에 따라 어떻게 응답하는지를 분석하고, Bode 선도 및 Nyquist 선도를 통해 안정성 여유와 응답 특성을 기반으로 보상기를 설계하는 기법이다.<sup>(7-9)</sup>

본 연구에서는 이러한 이론적 배경을 바탕으로, 소프트웨어를 근궤적 설계부와 주파수 응답 설계부로 구성하여 각 기법을 학습하고 실습할 수 있도록 하였다. 특히 제안된 소프트웨어는 그래픽 기반 프로그래밍 언어인 LabVIEW<sup>(10)</sup>를 이용하여 개발되었으며, Windows 환경에서 실행 가능한 형태로 제작되었다. 이를 통해 사용자 친화적인 인터페이스와 실시간 시각화 기능을 효과적으로 구현하였다.

Fig. 1은 개발된 소프트웨어의 전체 화면 구성을 보여준다. 화면 좌측 상단은 시스템 정의 영역으로, 전달함수를 구성하기 위한 계수 입력 기능이 포함되어 있으며, 좌측 하단에는 피드백 시스템의 계단 응답 및 주요 성능 지표가 시각적으로 제공된다. 우측 영역은 탭 방식으로 구성되어 있으며, 각 탭은 근궤적 설계법과 주파수 응답 설계법의 학습 및 설계를 위한 기능들로 구성되어 있다. 이들 세부 기능은 다음 절에서 구체적으로 설명한다.

또한, 본 소프트웨어는 설치형 실행 파일 형태로 배포되며, 별도의 링크를 통해 다운로드하여 사용할 수 있다.<sup>(11)</sup>

### 2.1 시스템 정의

소프트웨어의 구성을 나타내는 Fig. 1에서의 좌측 노란색 박스 영역은 시스템 정의를 위한 영역으로, 사용자가 전달함수의 분자 및 분모 계수를 입력하여 시스템을 설정할 수 있다. 전달함수 입력창은 좌측부터 높은 차수의 항으로 배열되어 있으며, 회색으로 표시된 입력창은 사용자가 값을 입력하면 자동으로 활성화된다. 입력된 계수는 우클릭 팝업 메뉴에서 ‘삭제’를 선택하면 다시 비활성화되어 값을 제거할 수 있다. 입력이 이루어지는 동안, 전달함수가 실시간으로 업데이트되어 변경 사항을 즉시 확인할 수 있다.

시스템 이득(K)은 슬라이드 바를 통해 조정할 수 있으며, 특정 이득값에서의 폐루프 시스템의 계단 응답과 이에 따른 정착시간, 최대시간, 오버슈트 등 주요 제어 성능 지표도 함께 확인할 수 있다. 슬라이드 바 및 그래프의 범위는 마우스 좌클릭으로 직접 편집할 수 있으며, 그래프 내에서 마우스 우클릭을 통해 범위 조정 등 다양한 옵션을 선택할 수 있어, 특정 영역을 확대하여 확인하는 것도 가능하다. GUI 사용법에 대한 자세한 설명은 프로그램 내 ‘도움말’ 탭에서 그림과 함께 확인할 수 있다.

### 2.2 근궤적 설계 모듈

근궤적 설계법은 기본적으로 폐루프 극점의 위치와 시스템의 동특성 간의 관계를 이용하여, 목표 극점에서의 이득(K)을 결정하는 방식으로 이루어진다. 하지만 정상상태 오차, 정착 시간, 감쇠비 등의 목표 성능을 만족하는 극점이 기존 근궤적 경로에 포함되지 않는 경우, 설계자는 보상기를 통해 개루프 전달함수의 극점 및 영점을 추가하여 근궤적의 경로를 변화시키고, 이를 통해 목표 극점을 통과하도록 조정

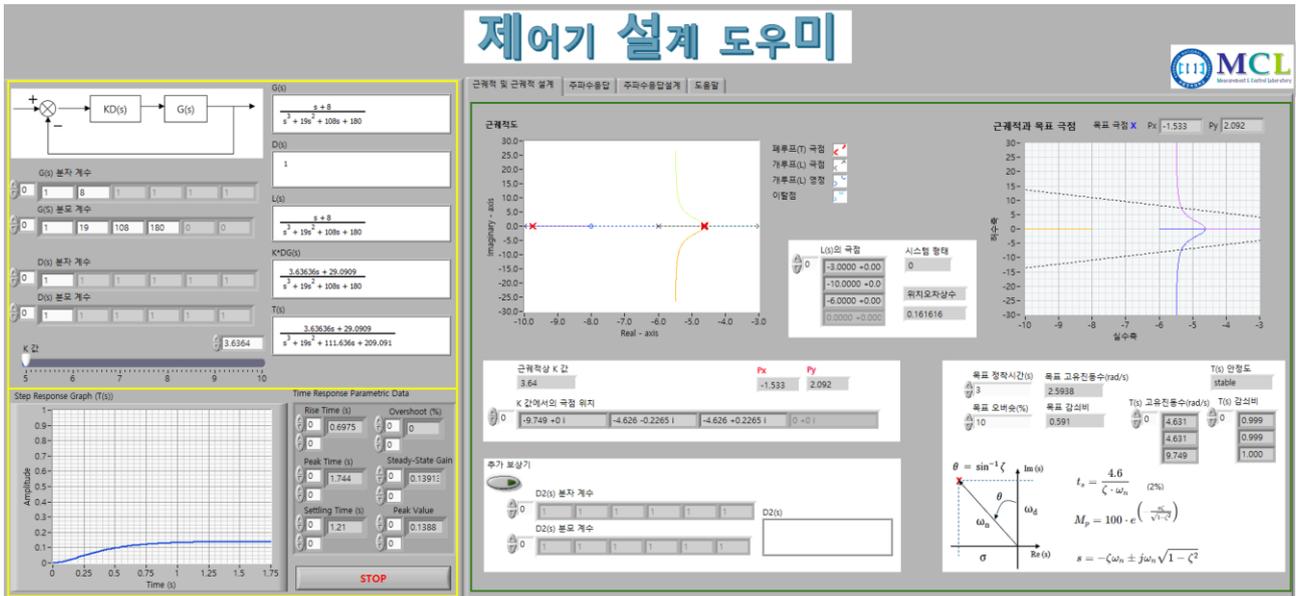


Fig. 1 Overview of the developed controller design software

한 후 적절한 이득을 결정하게 된다.

본 소프트웨어는 이러한 설계 절차를 직관적으로 지원하도록 구성되어 있으며, 관련 기능은 Fig. 1의 녹색 박스 영역에 구현되어 있다. 우선 좌측 상단의 ‘근궤적도’에서는 사용자가 입력한 플랜트 전달함수 (G(s))와 보상기 전달함수(D(s))를 기반으로, 슬라이더 또는 직접 입력을 통해 이득(K)을 조절할 수 있다. 이득값이 변경되면, 페루프 극점의 위치가 실시간으로 계산되어 복소평면상에 표시되며, 이를 통해 이득 변화에 따른 극점의 이동 경로를 직관적으로 확인할 수 있어, 학습자들이 근궤적 설계법의 원리를 쉽게 이해하는 데 도움을 준다.

오른쪽 상단의 ‘근궤적과 목표 극점 그래프’ 영역에서는 설계자가 지정한 목표 정착시간과 오버슈트 값을 바탕으로 계산된 감쇠비( $\zeta$ )와 고유진동수( $\omega_n$ )를 통해 도출된 목표 극점의 위치를 시각적으로 표시한다. 이를 통해 사용자는 해당 목표 극점이 실제 근궤적 경로상에 존재하는지를 확인할 수 있으며, 아래에는 감쇠비 및 고유진동수와 극점의 위치 간의 관계식과 특성 곡선이 함께 제공되어 이해를 돕는다.

이득의 조정이나 보상기 구조의 변경을 통해 제어기를 설계하는 과정에서, 좌측 하단에 실시간으로 갱신되는 계단응답 곡선을 확인할 수 있다. 이를 통해 설계 결과가 시스템의 시간 응답에 미치는 영향을 직관적으로 파악할 수 있으며, 상승시간, 오버슈트, 정착시간 등의 주요 성능 지표도 수치로 함께 제공되어 시각적인 피드백이 가능하다. 또한, 정상상태 오차는 계단응답 곡선으로도 확인할 수 있으나, 시스템의 타입 정보를 함께 제공하여 사용자가 입력 유형에 따라 직접 정상상태 오차를 계산해볼 수 있도록 하였다. 이러한 구성은 반복 학습과 설계 감각 향상에 효과적이다.

### 2.3 주파수응답 설계 모듈

주파수응답 설계법은 시스템이 다양한 주파수 성분에 대해 어떻게 반응하는지를 분석함으로써, 제어기의 안정성과 성능을 평가하고 보상기를 설계하는 고전 제어기법 중 하나이다. 특히, 실험 데이터 기반으로 설계를 진행할 수 있다는 점에서 실용적인 접근 방식으로 널리 활용되며, 위상 여유(phase margin), 이득 여유(gain margin), 대역폭(bandwidth) 등의 지표를 통해 설계 성능을 정량적으로 평가할 수 있는 장점을 가진다. 본 소프트웨어의 주파수응답 설계 모듈은 이러한 이론적 배경을 바탕으로, Bode 선도, Nyquist 선도, 응답 비교, 자동 보상기 설계 등의 기능을 통합하여 구성되었다. 이를 통해 사용자가 주파수응답 설계법의 개념을 직관적으로 이해하고, 실제 보상기 설계에 적용해볼 수 있도록 하였다.

주파수응답 설계와 관련된 탭은 Fig. 2와 Fig. 3에 나타난 두 가지 화면으로 구성되어 있다. 우선, Fig. 2의 “주파수 응답” 탭은 주파수응답 개념의 이해를 돕기 위한 기능들을 중심으로 구성되어 있다. 상단에

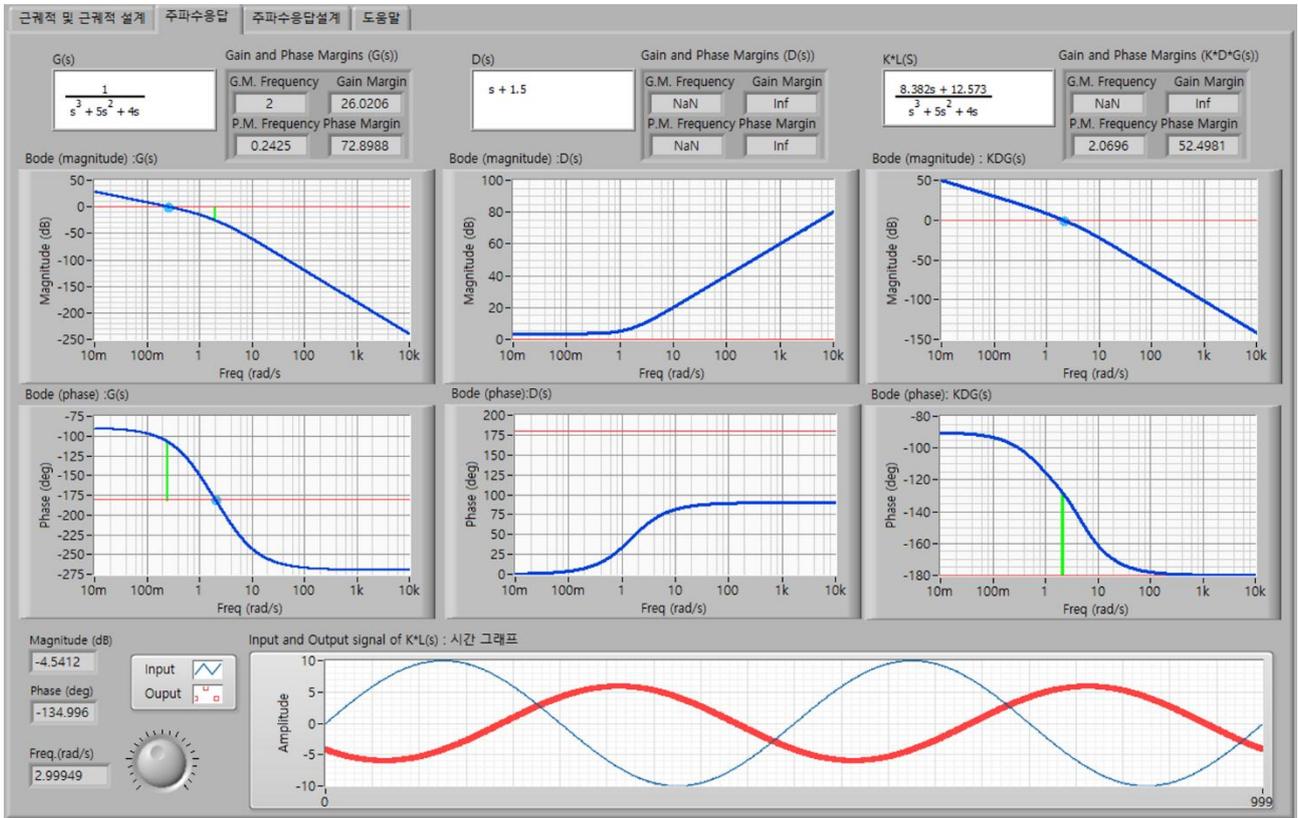


Fig. 2 Overview of the frequency response tab

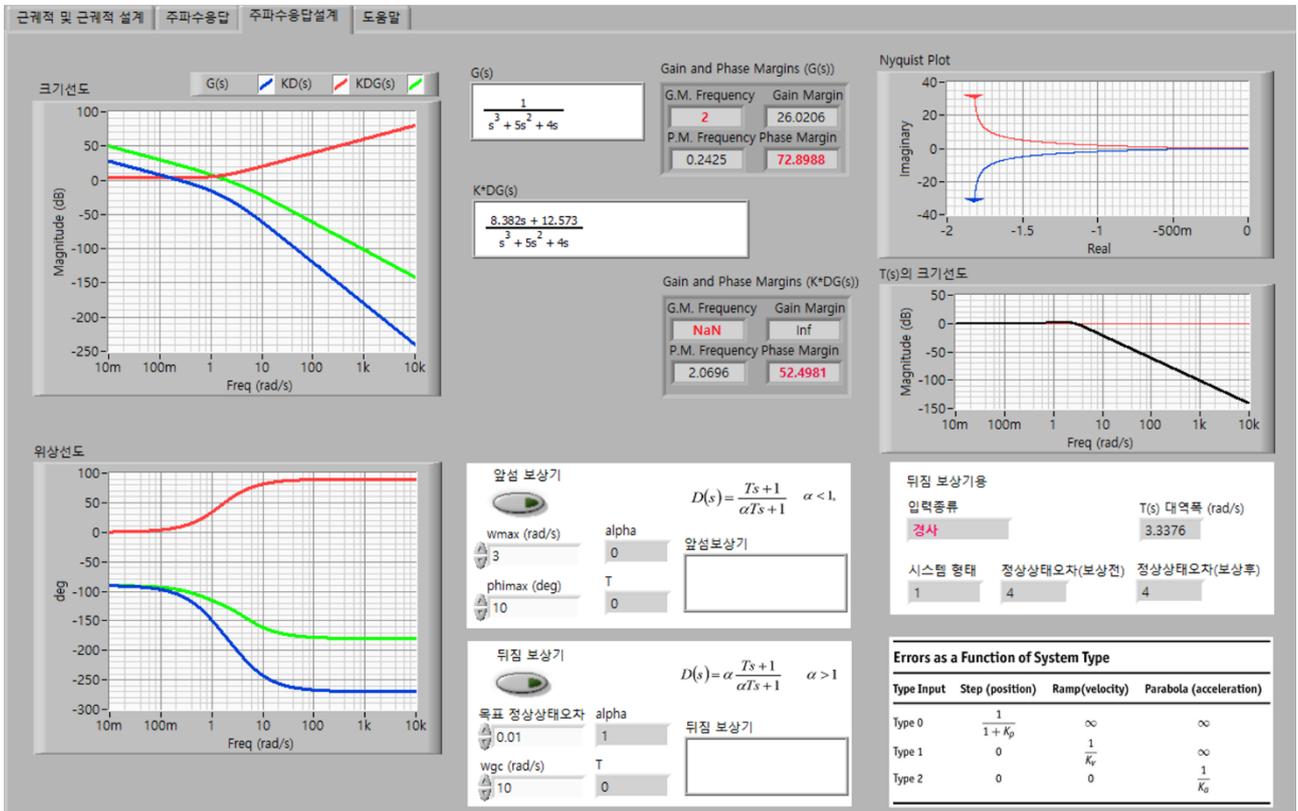


Fig. 3 Overview of the frequency response design tab

표시되며, 각 선도에는 이득 여유와 위상 여유가 시각적으로 강조되어 표시된다. 사용자가 보상기 파라미터를 조정하면, 전체 시스템의 주파수 응답이 실시간으로 반영되어, 설계 전후의 응답 변화를 직관적으로 확인할 수 있다. 또한, 주파수별 입력 신호에 대응하는 출력 신호가 시간 영역에서 함께 그래프로 표시되어, 입력과 출력 간의 위상 차이 및 게인 차이를 시각적으로 이해하는 데 도움을 준다. 이러한 기능은 주파수응답의 개념과 효과를 학습자가 체계적으로 익힐 수 있도록 설계되어 있다. Fig. 3은 주파수 응답 기반 보상기 설계를 직접 수행할 수 있도록 구성된 탭으로, 좌측에는 플랜트  $G(s)$ , 보상기  $KD(s)$ , 그리고 전체 개루프 전달함수  $K*DG(s)$ 의 Bode 선도가 함께 제시되어, 보상기 적용 전후의 응답을 비교하며 제어기의 설계를 진행할 수 있다. 그리고, Nyquist plot과 페루프 민감도 함수  $T(s)$ 의 크기 선도도 포함되어 있어 안정성 및 강인성 평가가 가능하다. 화면 중앙에는 앞섬·뒤짐 보상기의 파라미터 입력창이 제공되어, 사용자가 목표 성능을 지정하면 그에 따른  $D(s)$ 가 계산되고 주파수응답에 즉시 반영되고, 하단의 정상상태 오차 표를 배치하여 시스템 유형과 보상기의 영향 관계를 사용자가 직관적으로 확인할 수 있도록 하여, 설계 과정 전반을 보다 체계적으로 이해할 수 있도록 돕는다.

### 3. 설계 예제

본 장에서는 이론적인 제어기 설계 절차와 개발된 소프트웨어를 활용한 설계 과정을 함께 제시함으로써, 각각의 방법이 가지는 특징을 비교하고, 소프트웨어의 활용 방식에 대한 이해를 높이고자 한다.

#### 3.1 제어 대상 모델

제어기 설계에 앞서, 제어 대상이 되는 시스템의 모델을 식 (1)과 같이 정의하였다.

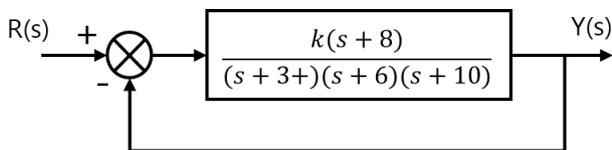
$$G(s) = \frac{(s+8)}{(s+3)(s+6)(s+10)} \tag{1}$$

이 플랜트를 대상으로 Fig. 4와 같이 단순한 피드백 제어 시스템을 구성할 수 있으며, 우선적으로 이득을 1인 경우를 보상 전 제어시스템으로 정의하였다. 이상태에서 시스템의 성능을 평가하기 위해 계단응답을 시뮬레이션한 결과는 Fig. 5에 나타내었다. 그리고 개발된 소프트웨어를 통해 분석된 시스템의 주요 성능 지표는 Table 1에 정리하였다. 시뮬레이션 결과, 이득이 작기 때문에 정상상태 오차가 약 0.96으로 매우 크게 나타났으며, 이는 개선이 필요한 주요 항목으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 정상상태 오차를 줄이는 동시에 과도 응답 성능 또한 향상시키는 방향으로 제어기를 설계하고자 한다.

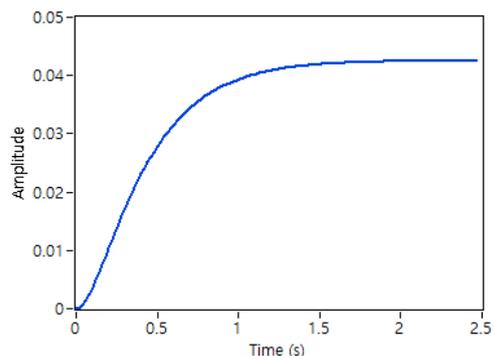
#### 3.2 근궤적 설계법을 이용한 보상기 설계

**Table 1** Performance indices of the uncompensated system

Peak time (s)	Rise time (s)	Overshoot (%)	Settling time (s)	Steady-state error
2.46	0.81	0	1.41	0.96



**Fig. 4** Block diagram of the feedback control systems



**Fig. 5** Step response of the uncompensated system

근궤적 설계법에서는 원하는 성능을 만족하는 극점이 근궤적 상에 존재할 경우, 추가적인 영점이나 극점 없이 단순한 이득 조정을 통해 제어기 설계가 가능하다. 그러나 목표 극점이 근궤적 위에 존재하지 않는 경우에는, 영점 또는 극점을 추가하여 근궤적의 형태를 변경하는 보상 설계가 필요하다.

본 논문에서는 Table 2에 제시된 목표 성능을 달성하기 위해, 먼저 시스템의 시간 영역 성능과 관련된 식 (2)와 식 (3)을 이용하여 감쇠비( $\zeta$ )와 고유진동수( $\omega_n$ )를 계산하였다.

$$t_s = \frac{4.6}{\zeta\omega_n} \quad (2)$$

$$M_p = 100 e^{\frac{-\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \quad (3)$$

여기서,  $t_s$ 와  $M_p$ 는 각각 정착시간과 오버슈트를 나타낸다.

이후, 계산된 감쇠비와 고유진동수를 바탕으로 식 (4)에 따라 목표 극점의 위치를 도출하였다.

$$s_t = \zeta\omega_n \pm \omega_n\sqrt{1-\zeta^2} \quad (4)$$

설계 조건에 따라 목표 극점의 위치는 최종적으로  $s_t = -9.2 \pm j12.55$ 로 구해졌다.

한편, Fig. 6은 보상 전 피드백 시스템의 근궤적을 나타낸 것으로, 해당 근궤적이 앞서 도출된 목표 극점( $s_t$ )을 통과하지 않음을 확인할 수 있다. 따라서 목표 성능을 만족하기 위해서는, 근궤적이 해당 극점을 통과하도록 개루프 전달함수를 변경할 필요가 있으며, 이를 위해 추가적인 영점 또는 극점의 도입이 요구된다.

본 연구에서는 PD 제어기의 도입을 고려하여, 영점을 추가하는 방식으로 보상을 설계하였다. Fig. 7은 루프 전달함수 상에서 기존의 극점 및 영점, 그리고 새롭게 추가할 영점( $z_c$ )의 위치를 임의로 설정하여 시각적으로 표현한 것이다. 이때, 추가 영점의 위치는 근궤적의 위상 조건을 만족해야 하므로, 식 (5)에 따라 목표 극점에서의 위상 조건을 만족하도록 영점( $z_c$ )의 위치를 결정할 수 있다.

$$\phi_x + \phi_1 - \theta_1 - \theta_2 - \theta_3 = \pm 180^\circ \quad (5)$$

계산을 통해 목표 극점에서의 위상 차는 약  $31.5^\circ$ 로 도출되었으며, 이를 기준으로 위상 조건을 만족하는 영점( $z_c$ )의 위치는  $-29.7$ 로 계산되었다. 이 값을 반영한 근궤적을 Fig. 8에 나타내었으며, 목표 극점이

Table 2 Design specifications

Settling time (s)	Overshoot (%)	Steady-state error
< 0.5	< 10	< 0.01

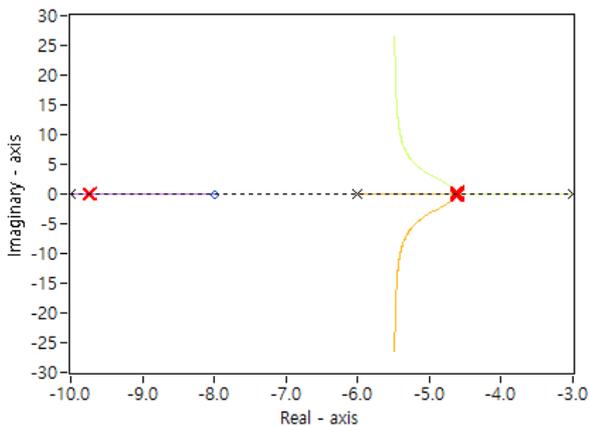


Fig. 6 Root locus of the uncompensated system

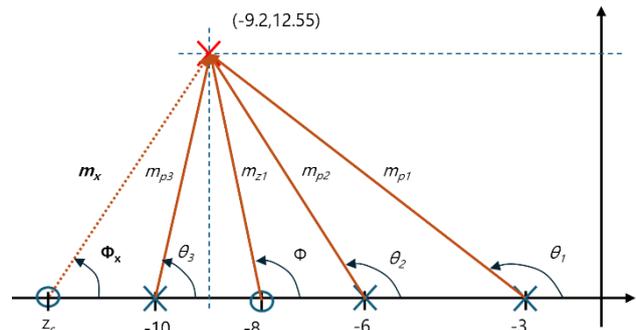
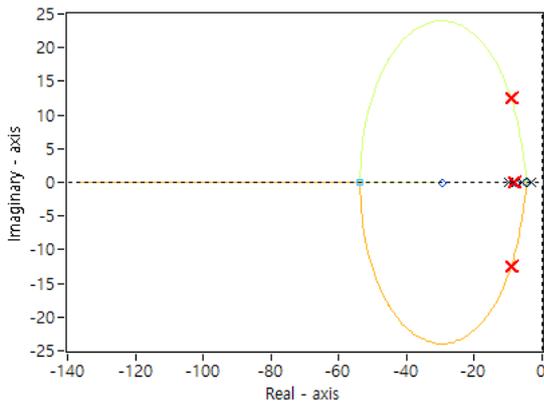


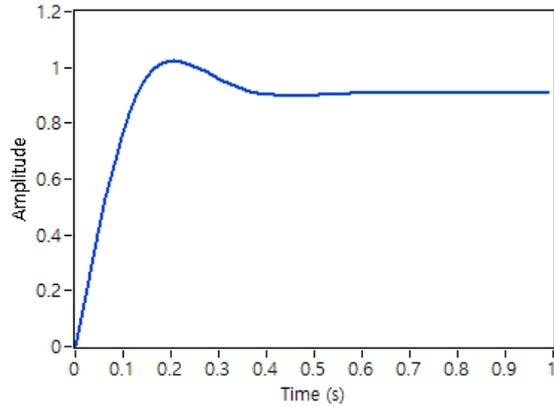
Fig. 7 Pole zero map with undetermined additional zero

**Table 3** Time response parameter data of the control systems

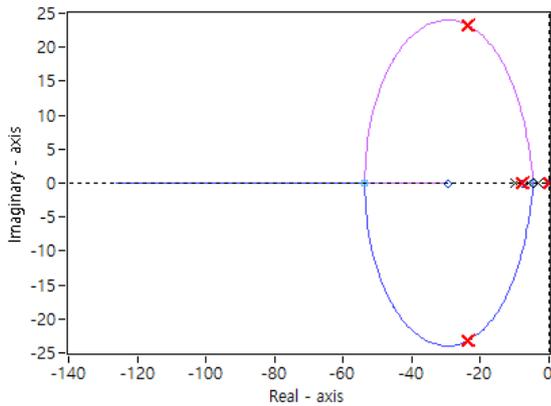
	Peak time (s)	Rise time (s)	Overshoot (%)	Settling time (s)	Steady-state error
Uncompensated	2.46	0.81	0	1.41	0.96
Compensated	0.076	0.034	10.45	0.30	0



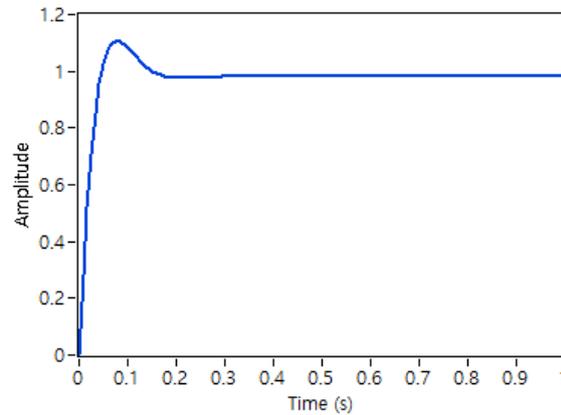
**Fig. 8** Root locus of the PD-compensated system passing through the desired pole location



**Fig. 9** Step response of the feedback system with PD controller



**Fig. 10** Root locus of the PID-compensated system passing through the desired pole location



**Fig. 11** Step response of the feedback system with PID controller

근궤적 상에 위치함을 확인할 수 있다. 이후, 목표 극점( $s_t$ )에서의 시스템 이득( $K$ )은 식 (6)의 근궤적 크기 조건을 이용하여 계산하였다.

$$K = \frac{m_{p1}m_{p2}m_{p3}}{m_{z1}m_x} \tag{6}$$

최종적으로 계산된 영점( $z_c$ )과 이득( $K$ )을 반영하여 PD 제어기는 다음과 같은 전달함수로 구성되었다.

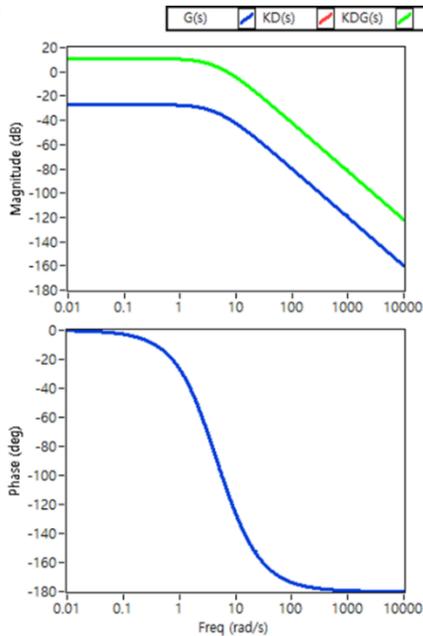
$$D(s) = 7.51(s + 29.7) \tag{7}$$

$$D(s) = \frac{36.7(s+29.7)(s+0.01)}{s} \tag{8}$$

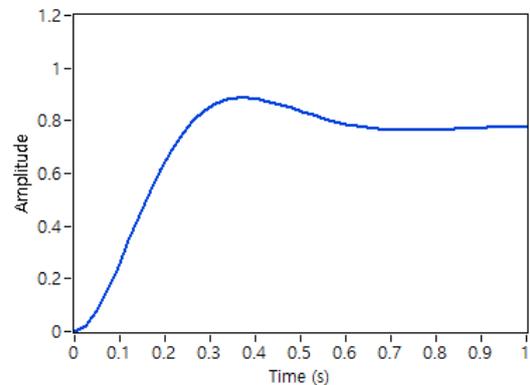
최종 보상기를 적용한 시스템의 근궤적은 Fig. 10에, 이에 대한 계단 응답 곡선은 Fig. 11에 각각 나타내었다. 이때의 응답 성능은 보상 전 시스템의 성능과 함께 Table 3에 정리하였다. 비록 오버슈트가 다소 초과하긴 하지만, 전체적으로 설계 목표를 전반적으로 만족한 것으로 평가할 수 있다.

**Table 4** Time response parameter data of the control systems

	Peak time (s)	Rise time (s)	Overshoot (%)	Settling time (s)	Steady-state error
Constant gain	0.38	0.17	13.87	0.58	0.21



**Fig. 12** Bode plot of the compensated system with constant gain



**Fig. 13** Step response of the compensated system with constant gain

3.3 주파수응답 설계법을 이용한 보상기 설계

주파수응답 설계법은 근계적 설계법과 달리, 보상기에 추가되는 영점과 극점이 Bode 선도의 형상에 미치는 영향을 바탕으로 제어기를 설계하는 방식이다. 따라서 Bode 선도의 실시간 갱신이 가능한 본 소프트웨어의 특성을 적극 활용하여 제어기 설계를 진행하였다.

먼저, 단위 이득인 보상 전 상태에서의 저주파수 이득이 약 -30 dB로 매우 낮게 나타났기 때문에, 초기에는 정착시간 요구를 대략적으로 만족시키기 위해 적절한 임의의 게인 값을 적용한 후, 보다 정밀하게 설계 조건을 조정하는 방식으로 설계를 수행하였다.

감쇠비( $\zeta$ )가 0.707인 경우에는 이득 교차 주파수( $\omega_c$ ), 고유진동수( $\omega_n$ ), 그리고 대역폭( $\omega_{BW}$ )이 거의 일치한다는 특성이 있다.<sup>(9)</sup> 식 (2)에서의 관계를 이용하면, 정착시간 조건을 만족시키기 위한 고유진동수 즉, 이득 교차 주파수( $\omega_c$ )는 약 13 rad/s임을 확인할 수 있다. 이에 따라, 게인 교차 주파수가 대략 이 값을 중심으로 형성되도록 시스템의 이득(K)을 79로 설정하였다.

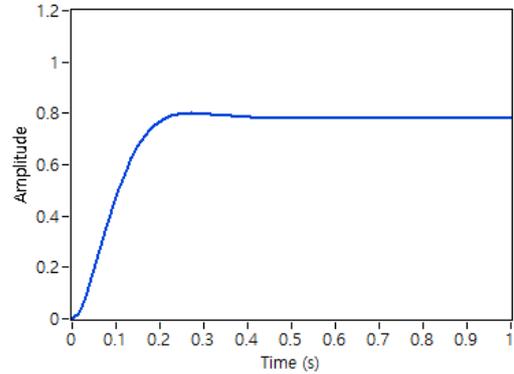
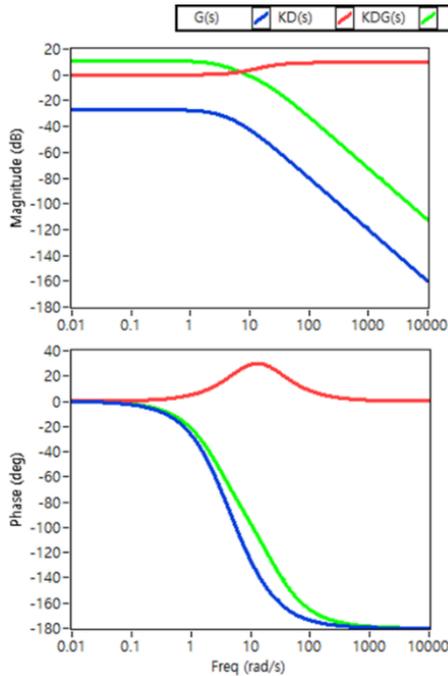
Fig. 12는 해당 설정에서의 Bode 선도를 나타낸다. 보상 전의 저주파수 이득은 약 -28 dB였으나, 보상 후 약 10 dB까지 상승한 것을 확인할 수 있으며, 이때의 이득 교차 주파수는 6.9 rad/s, 위상 여유는 약 70°로 측정되었다. Fig. 13은 이 조건에서의 계단응답 곡선을, Table 4는 시간응답 성능을 각각 요약하고 있다. 설계 결과, 오버슈트와 정착시간은 각각 목표 대비 약 30% 및 16% 부족하였으며, 정상상태 오차도 여전히 존재함을 확인할 수 있었다.

따라서 우선 앞섬 보상기를 적용하여 과도응답 특성을 향상시키고자 한다. 앞섬 보상기는 시스템에 영점과 극점을 각각 추가함으로써, 게인 교차 주파수에서의 위상 여유를 증가시켜 과도응답을 개선하는 방식이다.

이때의 설계는 특정 주파수( $\omega_{max}$ )에서 얼마만큼의 위상 여유( $\phi_{max}$ )를 증가시킬 것인지에 대한 문제로 정의될 수 있다. 식 (10)과 같이 정의되는 앞섬 보상기에 대해, 식 (11)과 (12)를 이용하여 영점과 극점의 위치를 결정할 수 있다.

**Table 5** Time response parameter data of the control systems

	Peak time (s)	Rise time (s)	Overshoot (%)	Settling time (s)	Steady-state error
Constant gain	0.38	0.17	13.87	0.58	0.21
Lead	0.27	0.33	2.68	0.33	0.22
Lead-lag	0.31	0.15	5.26	0.49	0.006



**Fig. 14** Bode plot of the compensated system with lead compensator

**Fig. 15** Step response of the compensated system with lead compensator

$$D(s) = \frac{Ts+1}{\alpha Ts+1}, \alpha < 1 \tag{9}$$

$$T = \frac{1}{\omega_{max}\sqrt{\alpha}} \tag{10}$$

$$\alpha = \frac{1-\sin\phi_{max}}{1+\sin\phi_{max}} \tag{11}$$

개발된 프로그램에서는 위상 최대 주파수와 위상 증가량의 정보만 입력하면, 해당 값을 기반으로 보상기의 극점과 영점 위치가 자동으로 계산되어 보상기에 반영된다. 본 설계에서는 목표 계인 교차 주파수와 위상 여유를 고려하여, 위상 최대 주파수와 위상 증가량을 각각 13 rad/s와 30°로 설정하였다.

Fig. 14는 앞섬 보상을 적용한 Bode 선도를 나타낸 것으로, 붉은색으로 표시된 앞섬 보상의 응답 형태를 확인할 수 있다. 보상기 적용 후, 계인 교차 주파수와 위상 여유는 각각 9 rad/s와 86.9°로 증가한 것을 확인할 수 있다. 또한, Fig. 15와 Table 5에는 계단 응답 곡선과 해당 시스템의 성능 지표를 각각 정리하였다. 이를 통해 오버슈트와 정착시간이 모두 설계 목표를 만족함을 확인할 수 있었다. 다만, 정상상태 오차는 여전히 존재하므로, 이를 보완하기 위해 뒤짐 보상을 추가로 적용하고자 한다. 뒤짐 보상기 역시 극점과 영점을 추가하여 주파수 응답 특성을 변화시키는 방식으로 설계되며, 주로 정상상태 오차와 관련된 저주파수 대역의 계인을 증가시키는 데 중점을 둔다. 식 (13)과 같이 정의되는 뒤짐 보상기에서는, 목표 정상상태 오차에 대응하는 저주파수 계인 정보를 바탕으로 보상기의 계인 계수( $\alpha$ )를 결정하고, 과도 응답에 영향을 최소화하기 위해 영점의 위치(1/T)는 계인 교차 주파수의 1/2에서 1/10 정도로 설정한다.<sup>(9)</sup>

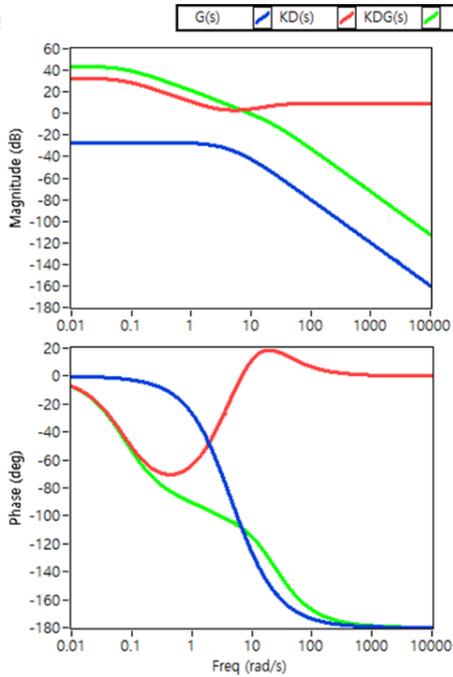


Fig. 16 Bode plot of the compensated system with lead-lag compensator

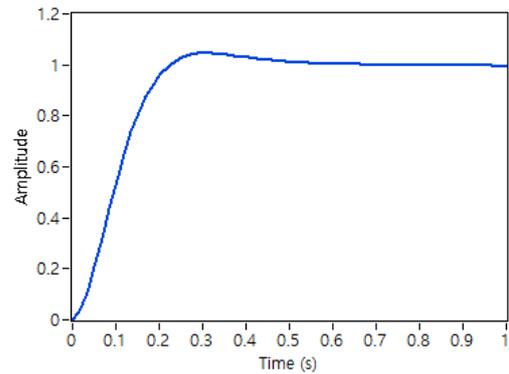


Fig. 17 Step response of the compensated system with lead-lag compensator

$$D(s) = \alpha \frac{Ts+1}{\alpha Ts+1}, \quad \alpha > 1 \quad (12)$$

개발된 소프트웨어는 보상 전 정상상태 오차 대비 목표 감소비와 이득 교차 주파수를 입력하면, 이에 따라 적절한 뒤짐 보상을 자동으로 계산해준다. 이득 교차 주파수를 여러 차례 조정할 결과, 3 rad/s로 설정했을 때 만족스러운 성능을 얻을 수 있었다. 이 과정은 입력값만 변경하면 결과가 즉시 반영되므로, 반복적인 설계를 손쉽게 수행할 수 있다.

Fig. 16은 앞섬-뒤짐 보상을 적용한 후의 Bode 선도를 보여주며, 보상기 적용 후 이득 교차 주파수는 9.5 rad/s, 위상 여유는 66.1°로 확인되었다. 또한, Fig. 17과 Table 5의 계단 응답 결과를 통해, 과도 응답 성능뿐만 아니라 정상상태 오차까지 개선되었음을 확인할 수 있었다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 고전 제어기 설계 기법인 근궤적법과 주파수응답법의 학습 및 실습을 지원하기 위한 교육용 소프트웨어를 개발하였다. 제안된 소프트웨어는 직관적인 그래픽 기반 사용자 인터페이스를 바탕으로 실시간 시각화를 제공함으로써, 학습자가 제어기 설계의 핵심 개념을 보다 명확하게 이해할 수 있도록 설계되었다. 근궤적 설계 모듈은 목표 성능에 따른 극점 계산, 극점-영점 배치 조정, 실시간 계단응답 확인 기능을 통해 이론과 실습의 유기적 연계를 지원하며, 주파수응답 설계 모듈은 Bode 선도 기반의 앞섬 및 뒤짐 보상기 설계를 시각적으로 확인하고 조정할 수 있는 학습 환경을 제공한다.

설계 예제를 통해 개발된 소프트웨어가 정량적 성능 지표를 기반으로 보상기의 효과를 명확히 확인할 수 있었으며, 사용자 중심의 반복 학습 환경을 제공함으로써 제어기 설계 교육의 효율성을 높일 수 있었다. 더 나아가, 본 소프트웨어는 학습자의 이해도와 학습 능력 향상을 목적으로 개발된 도구로서, 향후 실제 교육 현장에서 적용하여 학습자의 역량이 향상되는지를 평가하고 그 결과를 바탕으로 한 반성적 논의가 이루어질 필요가 있다. 이러한 논의는 소프트웨어의 교육적 효과를 보다 체계적으로 검증하고, 개선 방향을 도출하는 데 중요한 기반이 될 것으로 기대된다.

한편 현재 개발된 프로그램은 고전제어이론을 기반한 제어기 설계법만을 다루고 있기 때문에, 향후

상태공간을 기반으로 한 제어기 설계와 실제 제어기의 구축에 있어 필수적인 디지털 제어기의 설계도 지원이 가능하도록 프로그램의 기능을 확장할 예정이다.

## 후 기

본 결과물은 한국연구재단의 재원으로 지원을 받아 수행된 국립경국대학교 글로컬대학추진단의 연구 결과입니다. 또한 2025년도 교육부 및 경상북도의 재원으로 경북 RISE 센터의 지원을 받아 수행된 지역 혁신중심 대학지원체계(RISE)의 결과입니다.(B0080526002355)

## 참고문헌 (References)

- (1) The MathWorks, Inc., 2025, *MATLAB* (<https://www.mathworks.com>), The MathWorks, Inc., Natick, USA.
- (2) John W. Eaton, 2025, *GNU Octave* (<https://octave.org>), Octave.
- (3) Dassault Systèmes S.E., 2025, *Scilab* (<https://www.scilab.org>), Dassault Systèmes S.E., Vélizy-Villacoublay, France.
- (4) Autodesk, Inc., 2023, *AUTODESK Tinkercad Circuits* (<https://www.tinkercad.com/circuits>), Autodesk, Inc., San Rafael, USA.
- (5) 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.
- (6) Jung, K. S. and Lee, S. H., 2024, “Design and Implementation of Digital Control System Using Open-Source and Freeware,” *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. C*, Vol. 12, No. 2, pp. 163~173.
- (7) Franklin, G. F., Powell, J. D. and Emami-Naeini, A., 2022, *Feedback Control of Dynamic Systems*, Pearson, New York, USA, pp. 1~396.
- (8) Nise, N. S., 2019, *Control Systems Engineering*, Wiley, Hoboken, USA, pp. 1~919.
- (9) Ogata, K., 2009, *Modern Control Engineering*, Pearson, New York, USA, pp. 1~912.
- (10) National Instruments Corp., 2025, *LabVIEW* (<https://www.ni.com>), National Instruments Corp., Seoul, Republic of Korea.
- (11) Buildream, 2025, *Controller Design Software* (<https://drive.google.com/file/d/1ahqsc03EEEmUrF3VbdZpRKb3Kn1OmSoY/view?usp=sharing>), Buildream, Andong, Republic of Korea.



카트리지 기반 자동 교체형 롤투롤 무인 해충 예찰 트랩 개발<sup>§</sup>임도연\* · 김성민\* · 최육태\* · 송수환\*<sup>†</sup>

\* 한국미래농업연구원 시스템개발실

**Development of an Automatic Cartridge-Type Roll-to-Roll Unmanned Pest Monitoring Trap**Doyeon Im\*, Sungmin Kim\*, Uk-Tae Choi\* and Su-Hwan Song\*<sup>†</sup>

\* System Development Lab., Korea Institute of Future Agriculture

(Received August 11, 2025 ; Revised December 31, 2025 ; Accepted January 2, 2026)

**Key Words:** Smart Agriculture(스마트 농업), Unmanned Pest Monitoring(무인 해충 예찰), Cartridge(카트리 지), Roll-to-Roll(롤투롤), Image-based Pest Detection(영상 기반 해충 식별)

**초록:** 최근 농업 분야에서 해충 모니터링의 중요성이 커짐에 따라 무인 해충 예찰 트랩 개발 연구가 활발히 이루어지고 있다. 기존의 무인 트랩은 점착판의 유지보수를 위해 정기적인 현장 방문이 요구되며, 이로 인한 인력 및 시간 소모로 운용 효율성이 저하되는 문제가 제기되고 있다. 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해, 카트리지 형태의 점착판 자동 교체형 기능을 갖춘 롤투롤 방식의 무인 해충 예찰 트랩을 개발하였다. 개발된 트랩은 설정된 주기에 따라 점착물이 자동 회전하여 점착판을 무인으로 교체하고, 포집된 해충은 자동 촬영 후 포집통에 수집된다. 촬영된 이미지는 OpenCV 기반 영상 처리 기법을 통해 명도 및 채도를 보정하여 해충 분석 정확도를 향상시켰다. 개발된 시스템은 유지보수의 효율성, 해충 탐지의 정밀성, 데이터 관리의 자동화 측면에서 기존 수동 트랩 대비 우수한 성능을 보였으며, 향후 스마트 농업 현장에서의 실질적인 적용 가능성을 제시한다.

**Abstract:** The importance of pest monitoring in agriculture has increased, leading to active research on unmanned traps. Conventional systems require regular on-site adhesive plate replacement, causing labor and time inefficiency. We developed a cartridge-type unmanned pest trap with an automatic roll-to-roll plate replacement mechanism. At preset intervals, the roll rotates to replace plates, and captured pests are photographed and stored. Images are processed using an OpenCV-based algorithm to adjust brightness and saturation, improving pest analysis accuracy. The system showed superior maintenance efficiency, detection precision, and automated data management, indicating strong potential for practical use in smart farming.

## 1. 서 론

최근 이상 기온과 국지성 폭우 등 기후변화로 인해 외래해충 및 돌발병해충의 발생 빈도가 높아지고 있다. 따뜻한 겨울과 이른 봄 날씨는 해충의 월동 생존율을 높여 발생 시기를 앞당기고, 개체 수를 증가시킬 수 있으며, 이는 농작물과 산림 생태계에 심각한 피해를 초래할 수 있다. 특히, 해충 피해는 농작물 생산량과 품질 저하로 직결되기 때문에, 정확하고 지속적인 해충 모니터링 체계의 구축은 농업 안정화를 위한 핵심 과제로 부각되고 있다.<sup>(1-3)</sup> 병해충의 확산 방지, 농업 생산성 향상과 농업 생태계 피해

<sup>§</sup> 이 논문은 대한기계학회 IT지능융합부문 2025년 춘계학술대회(2025. 5. 7. - 9., 국립공주대학교) 발표 논문임.

<sup>†</sup> Corresponding Author, [shsong@kifa.re.kr](mailto:shsong@kifa.re.kr)

© 2026 The Korean Society of Mechanical Engineers

최소화를 위해 지능형 농업 기술의 도입이 활발히 진행되고 있다.<sup>(4,5)</sup>

기존 해충 예찰 방식은 사람이 직접 트랩 상태를 점검하고 점착판을 수동으로 교체하는 방식으로 운영되어 왔다. 이러한 방식은 현장 노동력과 유지보수 비용을 증가시키고, 운영 효율성을 저해하는 주요 원인이 된다. 최근에는 카메라, 센서, 통신 기술을 융합한 자동화 기반의 무인 해충 예찰 시스템이 등장하고 있으나, 장비 가격이 높고 유지관리 방안이 복잡하여, 인력과 자원이 제한된 소규모 농가에서는 실질적인 도입이 어렵다. 또한, 일부 시스템은 해충의 크기나 형태에 따라 이미지 데이터 해상도 및 분석 정밀도가 떨어져, 정밀한 분류나 예측이 어렵다는 한계가 있다.<sup>(6,7)</sup>

이에 본 연구에서는 기존 시스템의 한계를 보완하고, 실용적으로 현장 적용이 가능한 저비용·고효율의 무인 해충 예찰 트랩을 개발하였다. 본 시스템은 롤투롤 매커니즘 기반 점착판 자동 교체 모듈, 고해상도 이미지 수집 모듈, 센서 기반 제어 및 통신 모듈, 영상 데이터 자동 저장 및 분석 시스템으로 구성된다. 특히, 카메라 높이 및 렌즈 교체 기능을 통해 다양한 크기의 해충에 대응이 가능하며, 영상 처리는 OpenCV 기반 알고리즘을 활용하여 분석 정확도를 향상시켰다. 모든 영상 데이터는 데이터베이스에 저장되어 향후 AI 기반 정밀 분석에도 활용 가능하도록 설계되었다.

## 2. 시스템 설계

### 2.1 점착판 자동 교체 모듈

점착판 자동 교체 모듈은 공급롤과 회수롤로 구성된 롤투롤 매커니즘을 적용한 카트리지형 구조로 설계되었다. 롤투롤이란 필름, 시트 등 유연 소재를 롤 형태로 감아두고, 이를 다른 롤로 이송·감김 처리하여 연속적으로 공정을 수행하는 기술을 의미한다. 본 모듈에서는 해충 포집 후 사용된 점착판이 회수롤로 감기며, 공급롤로부터 새로운 점착판이 자동으로 공급된다. Fig. 1은 전체 시스템의 3D 모델링을 나타

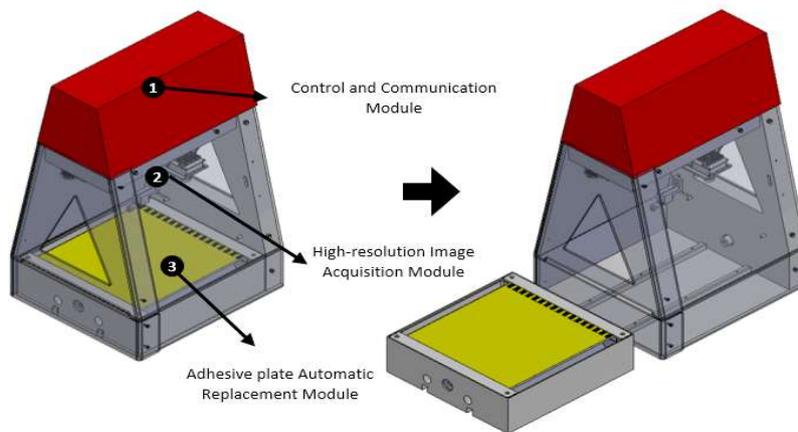


Fig. 1 3D modeling concept of an automatic cartridge-type roll-to-roll unmanned pest monitoring trap system

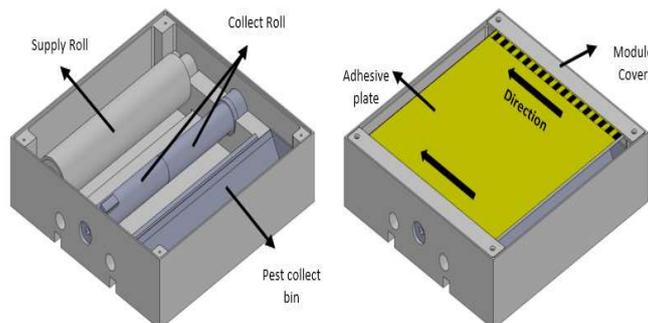


Fig. 2 Cartridge-type automatic adhesive sheet replacement module with roll-to-roll mechanism

내며, 롤투롤 방식의 점착판 자동 교체 구조와 카트리지 결합, 내부 구동부 배치를 표현하였다.

Fig. 2는 카트리지 모듈 구조를 나타내며, 공급롤, 회수롤, 해충 수거함, 모듈 커버로 구성되어 있으며, 모듈 커버의 윗면이 점착판으로 감겨있다. 점착판은 롤투롤 감김 과정에서 균일한 장력 분포를 유지하여 주름 발생을 최소화하고, 포획면 전 영역에서 시각 유인 효과를 균질하게 확보하기 위하여 200 mm × 200 mm 규격의 노란색 OPP 필름 시트를 사용하여 제작하였다.<sup>(8)</sup> 또한, 우수한 점착력을 유지하면서도 풀림이 용이하도록 높은 박리력을 확보하였다. 제작된 점착판은 롤 형태로 공급롤에 감아 사용하며, 회수롤은 PE 소재의 코어에 양면테이프를 부착하여 사용된 점착판이 안정적으로 감기도록 구성하였다. 점착판 하단에는 포토커플러가 인식할 수 있도록 채색된 실색 사각형과 윤곽선 사각형이 교대로 배열된 패턴을 인쇄하였다. 이 패턴은 회수롤이 회전할 때마다 일정 길이 단위를 포토커플러에 의해 디지털 펄스를 생성하며, 펄스 수를 집계하여 현재까지 소비된 점착판 길이를 실시간으로 산출한다. 이를 통해 엔코더 없이도 회수롤 직경 변화에 관계없이 패턴 통과 횟수를 기반으로 사용량을 정밀하게 산출할 수 있다. 산출된 사용량 정보는 피드백 루프를 통해 제어 모듈에 전달되며, 이를 기반으로 회수롤 구동 속도와 교체 시점을 실시간으로 보정한다. 회수롤은 스텝모터로 구동되며, 사용된 점착판을 감으면서 동시에 공급롤이 풀려 새로운 점착판이 노출된다. 공급롤과 회수롤이 장착된 카트리지는 모듈형 구조로 제작되어, 현장에서 손쉽게 분리·교체가 가능하다. 이러한 구조를 통해 대규모 설치 환경에서의 유지·보수 부담을 효과적으로 해소하고, 장기간 무인 운용이 가능하도록 하였다.

2.2 고해상도 이미지 수집 모듈

해충 포획을 위해 사용된 점착판의 실제 크기는 200 mm × 200 mm이며, 카메라는 점착판의 가로·세로 200 mm를 약 110 mm씩 나누어 촬영할 수 있도록 배치하여 인접 이미지가 일부 영역에서 서로 중복되도록 촬영한 뒤 중복 구간을 잘라내어 하나의 전체 이미지로 병합하였다. Table 1은 본 연구에서 사용된 고해상도 카메라의 주요 사양을 나타낸 표로, 해당 카메라는 IMX586 센서를 사용하는 고해상도 렌즈로 미소 해충까지 선명하게 촬영할 수 있는 사양을 가진다. 해상도는 110 mm / 6,000 px ≈ 0.018 mm / px로, 1 mm 길이는 영상 상 약 55 pixel에 해당하므로 1 mm 이하 크기의 미소 해충을 촬영하는데 충

Table 1 High-resolution camera specifications for automatic cartridge-type roll-to-roll unmanned pest monitoring trap

Sensor model	IMX 586	Active pixel array	8,000 * 6,000
EFL	4.77 mm	F/no	1.75
Field angle	D: 79°, H: 66°, V: 52°	Lens formsize	1/2 inch
Distortion	< 1.5%	Package	PLCC

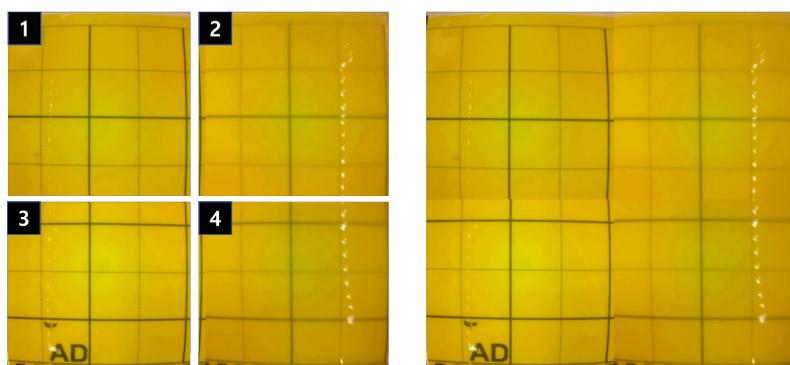


Fig. 3 (Left) An image of each image by taken diving an adhesive plate into four sections; (right) an merged images of the four sections

분한 공간 해상도를 확보하였다. 고해상도 카메라는 이송 모터에 의해 좌우 방향으로 이동하면서 일정 간격만큼 점착판을 4분할하여 각 영역을 개별적으로 촬영한 뒤, 중복 영역을 제거하고 병합하여 고해상도 단일 이미지를 생성하였다. Fig. 3의 좌측 이미지는 한 점착면을 상하좌우 4분할로 나누어 촬영한 각각의 점착면 이미지를 나타낸다. 우측 이미지는 해당 4분할 이미지를 본 연구에 사용된 알고리즘을 통해 왜곡 보정 및 중복 영역 제거 후 최종 병합한 이미지를 나타낸다. Open CV 기반으로 개발된 알고리즘을 통해 촬영된 이미지의 명도, 채도, 선명도와 이미지 왜곡을 자동 보정하고, 4분할로 촬영된 이미지를 병합할 때 중복 영역을 삭제한다. 또한 RGB 색공간으로 촬영된 원본 이미지를 HSV로 변환한 후, 점착면 자체의 밝기를 균질화하고 채도에 대한 스케일링을 수행하여 해충 개체의 색 대비를 강조하였다. 또한 해충 윤곽을 선명하게 해석할 수 있도록 샤프닝 필터를 적용하였다.

2.3 제어 및 통신 모듈

제어 및 통신 모듈은 Raspberry Pi 5와 STM32L151RC MCU로 구성하였다. Fig. 4는 데이터 통신과 저장 방안을 나타낸 구조도로, 센서·카메라·모터 구동부와 서버 간 데이터 흐름을 도식화하였다. 전체 시스템은 두 장치 간의 시리얼 통신을 기반으로 동작하며, RS232 통신을 통해 수집된 환경 데이터를 실시간으로 서버에 전송한다. 이를 통해 시스템 내 각 장치 간 데이터 교환이 원활히 이루어져 전체 시스템의 통합성과 안정성을 확보된다. MCU는 GPIO를 통해 동작의 완료 상태를 확인하고, 모터 전원과 Raspberry Pi 구동 회로 전원을 분리하여 각각 독립적으로 제어한다. 또한, 릴레이 제어 기능과 RTC 기반 sleep/wake-up 기능을 지원하여 저전력 동작이 가능하도록 설계하였다. 이러한 구조를 통해 에너지 소비를 최소화하며, 야외 환경에서 장기간 자율 운용을 목표로 한다. 모터 구동부는 스텝모터 두 개를 사

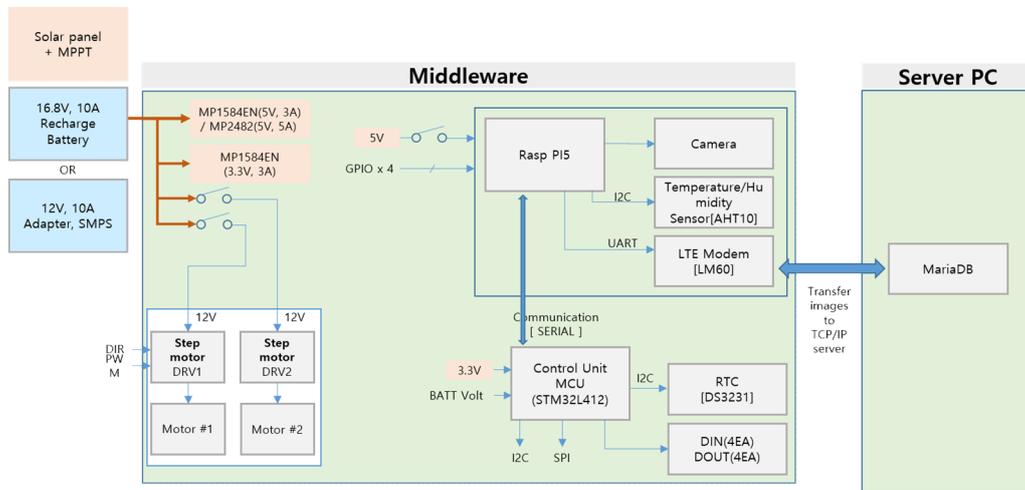


Fig. 4 Schematic diagram of data communication and storage structure showing data flow between sensors, cameras, motor drives, and servers

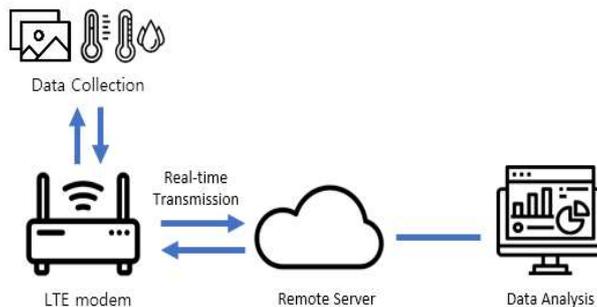


Fig. 5 Diagram of the process from data collection to server transmission, analysis, and storage

용하여 각각 카메라 위치 조정과 점착판 자동 교체를 위한 회수를 회전을 담당한다.

#### 2.4 데이터 저장 및 분석 시스템

데이터 저장 및 분석 시스템은 이미지 데이터 및 환경 데이터를 통합 관리하고, 해충 분류 결과를 자동으로 기록·조회할 수 있도록 설계되었다. Fig. 5는 데이터 저장과 분석 시스템의 구조를 도식화한 것으로, 이미지 및 환경 데이터 수집, 서버 전송, 분석·저장 과정을 단계별로 나타낸다. 촬영된 이미지는 OpenCV 기반으로 이미지 왜곡 보정 및 중복영역 삭제하고 YOLOv5 모델을 학습시켜 나방, 노린재를 분류하는 모델을 생성하고 해당 모델을 활용하여 촬영된 이미지의 추론 결과값을 사용하여 해충을 분류하였다. 해충 분류에는 YOLOv5 기반 객체 검출 모델을 사용하였으며, 복숭아식심나방, 복숭아순나방, 사과무늬잎말이나방 3종에 대해 각 1,000장씩의 원본 이미지를 수집하고, 이를 확대·회전·분할하는 데이터 증강을 수행하여 해충별로 10,000장 규모의 학습 데이터셋을 구성하였다. YOLOv5 모델은 이렇게 구축된 데이터셋을 이용해 각 해충 개체의 위치와 종을 동시에 예측하도록 학습하였으며, 운용 시에는 추론 결과의 신뢰도가 70% 이상인 경우에만 해당 해충으로 인식하도록 설정하여 오탐지와 중복 탐지 비율을 조정하였다. 최종 분류 결과는 내부 데이터베이스에 자동 저장되며, 종별 개체 수, 포획 일시 등의 정보와 함께 LTE 모뎀을 통해 서버와 동기화되어 해충 발생 추세 분석 및 방제 의사결정에 활용된다. 향후 AI 기반 해충 식별 및 밀도 분석 알고리즘 적용을 고려하여 테이블 구조와 인덱스 설계를 확장성 있게 구성하였다. 또한, 일정 기간 동안의 해충 발생 추세를 그래프 형태로 시각화할 수 있도록 API를 제공함으로써 방제 의사결정에 활용할 수 있는 기반을 마련하였다.

### 3. 제작 및 구현

시제품은 아크릴, 폴리락티산, 폴리카보네이트 소재를 사용하여 3D 프린팅, MCT 가공과 아크릴 절곡 방식을 통해 제작되었으며, 양산을 고려하여 금형 적용이 가능한 디자인으로 설계하여 제작하였다. 시제품의 외형 크기는 가로×세로×높이 250 mm × 280 mm × 440 mm이며, 내부는 2단 적층 구조로, 하단에 Raspberry Pi, 상단에 미들웨어 PCB, 측면에 LTE 모뎀을 배치하여 배선 길이를 최소화하고 유지보수성을 높였다. 영상 촬영 소프트웨어는 Python 기반으로 GStreamer와 OpenCV를 적용하여 Raspberry Pi에 최적화하였다. 촬영 명령은 MCU로부터 트리거 신호 형태로 전송되고, Raspberry Pi는 수신된 신호에 따라 카메라를 구동하고, 촬영된 이미지를 전처리 후 서버로 업로드한다. 시제품은 표면 연마 및 아크릴 퍼터 도포, 도색을 통해 내구성과 완성도를 확보하였다. Fig. 6은 제작된 카트리지 기반 자동 교체형 롤투롤 무인 해충 예찰 트랩의 시제품을 촬영한 이미지로, 전면에는 점착면 카트리지, 상단에는 전원 및 통신 단자가 배치되어있다. 개발된 시스템은 점착면 오염율이 70% 이상일 때 자동 교체되도록 설정하여, 1일



Fig. 6 Prototype of a cartridge-type automatic roll-to-roll unmanned pest monitoring trap

1회 이미지 수집을 기본 주기로 운용하였다. 또한, 전일 촬영된 이미지와 당일 이미지 비교·분석 기능을 통해 일 단위의 변화 감지 성능을 테스트하였다. 최종적으로 영상 보정 알고리즘 적용 시 복숭아심식나방, 복숭아순나방과 사과무늬잎말이나방 3종의 해충에 대해 93%의 인식률을 확보하였다. 점착판 소모량은 포토커플러를 기반으로 점착판 패턴 인식 신호를 통해 실시간으로 측정되며, 사용자에게 잔여량이 퍼센트 단위로 제공된다. 이를 통해 점착판 교체를 위한 현장 방문 시점과 교체 주기를 효율적으로 계획할 수 있다. 모터 구동부에는 가속·감속 제어 기능을 적용하여 초기 돌입 전류를 낮추고 과전류 보호 기능을 확보하였다. 전원은 DC, AC, 태양광 3가지 형태를 지원하도록 설계하였으며, RTC 기반 절전 모드 운영을 통해 에너지 효율성을 강화하였다. 전원 기능, 회수롤 구동 기능, 1회 테스트 기능 버튼을 추가함으로써 현장에서 즉각적인 이상 상태 점검이 가능하도록 하였으며, 부가적으로 온도 및 습도 측정, 적산온도 계산이 가능하다. 본 시스템은 현장 실증 결과, 안정적인 구동이 가능하고 점착판 자동 교체 기능을 통해 현장 방문 횟수를 줄이면서도 고정밀 해충 예찰이 가능하였다. 또한 통합 데이터 관리 구조를 통해 해충 발생 패턴을 시공간적으로 분석할 수 있는 기반을 제공함으로써, 향수 스마트 방제 전략 수립에 활용할 수 있음을 확인하였다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 톨투를 방식의 점착판 자동 교체 기능을 갖춘 카트리지형 무인 해충 예찰 트랩을 개발하고 현장 적용 가능성을 검증하였다. 개발된 시스템은 고해상도 영상 수집, 자동화된 점착판 관리, 무선 통신 기반 데이터 저장 및 분석, 에너지 효율 설계 등을 통해 점착판 수동 교체 방식의 기존 트랩 대비 운용 효율성과 정밀성이 크게 향상되었다. 점착판 자동 교체 알고리즘을 적용함으로써 점착판 오염률과 사용량에 따라 교체 시점을 자동 결정할 수 있었으며, 포토커플러 기반 패턴 인식 기법을 통해 별도의 엔코더 없이도 점착판 소모량을 정밀하게 관리할 수 있었다. 또한 IMX586 기반 고해상도 카메라와 OpenCV 영상 보정, YOLOv5 해충 분류 모델을 결합한 결과, 3종 주요 해충에 대해 최대 93% 수준의 인식률을 확보하여, 이미지 기반 무인 예찰 시스템으로서의 타당성을 검증하였다. 현장 적용 결과, 개발된 트랩은 장기간의 무인 운용이 가능하였으며, 데이터 품질과 시스템 안정성이 실증되었다. 향후 본 트랩은 AI 기반 실시간 해충 분석 알고리즘과 연계하여 정밀 예찰 및 방제 전략 수립에 활용될 수 있으며, 자가 충전형 구조와 클라우드 기반 데이터 연동 기능을 추가함으로써 완전 자율형 해충 모니터링 플랫폼으로 발전시킬 수 있을 것으로 기대된다.

#### 후 기

본 연구는 산림분야 재난·재해의 현안해결형 연구개발사업(No. RS-2024-00417303)의 연구 성과를 기반으로 확장 및 발전시켜 수행되었다.

#### 참고문헌 (References)

- (1) Michele, P., Christianm, M., Cabriele, S., Giovanni, G. and Sergio, A., 2021, "Developing a Smart Trap Prototype Equipped with Camera for Tortricid Pests Remote Monitoring," *Bulletin of Insectology*, Vol. 74, No. 1, pp. 147~160.
- (2) Liu, C., Zhai, Z., Zhang, R., Bai, J. and Zhang, M., 2022, "Field Pest Monitoring and Forecasting System for Pest Control," *Front. Plant. Sci.*, Vol. 13, Article 990965.
- (3) Čirjak, D., Miklečić, I., Lemić, D., Kos, T. and Pajač Živković, I., 2022, "Automatic Pest Monitoring Systems in Apple Production under Changing Climatic Conditions. *Horticulturae*," Vol. 8, No. 6, Article 520.
- (4) Aker, J. C., 2011, "Dial "A" for Agriculture: A Review of Information and Communication Technologies for Agricultural Extension in Developing Countries," *Agricultural Economics*, Vol. 42, pp. 631~647.

- (5) Passias, A., Tsakalos, K. A., Rigogiannis, N., Voglitsis, D., Papanikolaou, N. and Michalopoulou, M., 2023, "Comparative Study of Camera- and Sensor-Based Traps for Insect Pest Monitoring Applications," *2023 IEEE Conference on AgriFood Electronics (CAFE)*, Torino, Italy, pp. 55~59.
- (6) Leybourne, D. J., Musa, N. and Yang, P., 2025, "Can Artificial Intelligence Be Integrated into Pest Monitoring Schemes to Help Achieve Sustainable Agriculture?: An Entomological, Management and Computational Perspective," *Agricultural and Forest Entomology*, Vol. 27, No. 1, pp. 8~17.
- (7) Preti, M., Verheggen, F. and Angeli, S., 2021, "Insect Pest Monitoring with Camera-Equipped Traps: Strengths and Limitations," *J. Pest. Sci.*, Vol. 94, pp. 203~217.
- (8) Byrne, D. N., Von Bretzel, P. K. and Hoffman, C. J., 1986, "Impact of Trap Design and Placement When Monitoring for the Bandedwinged Whitefly and the Sweetpotato Whitefly (Homoptera: Aleyrodidae)," *Environmental Entomology*, Vol. 15, No. 2, pp. 300~304.



## 딥러닝을 이용한 PIC 범퍼 빔 설계 성능 향상을 위한 연구§

지 승 민\* · 전 성 식\*\*

\* 국립공주대학교 대학원 기계공학과

## Research on Improving PIC Design Performance Using Deep Learning

Seung Min Ji\* and Seong Sik Cheon\*\*

\* Dept. of Mechanical Engineering, Graduate School, Kongju Nat'l Univ.

(Received August 28, 2025 ; Revised January 5, 2026 ; Accepted January 7, 2026)

**Key Words:** Composite Material(복합 재료), Bumper Beam(범퍼 빔), Piecewise Integrated Composite(구간 조합 복합재)

**초록:** 본 연구는 기계 학습 기반 piecewise integrated composite(PIC) 구조 설계의 성능 향상을 위해 최적화된 학습 데이터 할당 방법을 제안한다. 기존 연구에서는 학습 데이터를 일정한 간격으로 배치하여, 특히 전단 하중 유형에 대한 예측 정확도에 한계가 있었다. 이러한 문제를 해결하기 위해 차원 축소 및 클러스터링 기법을 활용하여 학습 데이터를 불규칙적으로 할당하는 새로운 알고리즘을 개발했다. 고차원 데이터는 차원 축소 기법을 사용하여 먼저 축소한 후, 클러스터링을 통해 대표적인 학습 샘플을 추출했다. 이후 각 클러스터에서 무작위로 선택된 샘플을 사용하여 기계 학습 모델을 학습하여 전체 구조물의 응력 값과 하중 유형을 예측했다. 그 결과, 모든 하중 유형에서 예측 정확도가 향상되었으며, IIHS 범퍼 빔 해석 결과 향상된 하중 지지력과 에너지 흡수 성능을 보였다.

**Abstract:** This study proposes an optimized training data assignment method to enhance the performance of machine learning-based piecewise integrated composite (PIC) structural design. In previous studies, training data were arranged by regularly distance, which led to limitations in prediction accuracy especially for shear loading type. To overcome this issue, a new algorithm was developed that irregularly assigns training data using dimensionality reduction and clustering techniques. High-dimensional data were first reduced using a dimensionality reduction technique, followed by clustering to extract representative training samples. A machine learning model was then trained using randomly selected samples from each cluster to predict stress values and load types across the entire structure. As a result, prediction accuracy improved across all load types, and the IIHS bumper beam analysis demonstrated enhanced load-bearing capacity and energy absorption performance.

## 1. 서 론

미국 도로교통안전국(NHTSA)에 따르면 2022년 총 5,930,496건의 교통사고가 보고되었는데 승용차 사고 4,015,818건 중 57.4%는 정면 충돌이었다.<sup>(1)</sup> 또한, 승용차 정면 충돌의 59.8%는 사망 사고 또는 부상 사고로 이어져, 정면 충돌은 2022년 가장 위험한 충돌 유형으로 집계되었다. 충돌 속도에 따라 분류해보면, 도심 지역에서 발생한 사망 사고의 86.4%는 약 48 km/h 미만의 속도에서 발생했다. 이는 저속 충돌 시 충격 에너지를 흡수하고 탑승자를 보호하는 데 중요한 역할을 하는 범퍼 빔과 같은 핵심 차량 부품의 충돌 안전성을 강화해야 함을 시사한다.<sup>(2-6)</sup> 반면에 현대 차량의 설계는 저공해와 같은 환경규제로 인해 차량의 무게를 줄여 연료 효율이 높은 차량을 설계해야 하는 과제가 생겼다.<sup>(7)</sup> 질량을 줄이면서 동등

§ 이 논문은 대한기계학회 IT지능융합부문 2025년 춘계학술대회(2025. 5. 7. - 9., 국립공주대학교) 발표 논문임.

† Corresponding Author, sscheon@kongju.ac.kr

© 2026 The Korean Society of Mechanical Engineers

한 충돌 안전 성능을 보장하기 위해, 동일한 수준의 충격 에너지를 흡수할 수 있는 다양한 얇은 두께의 판재 구조 설계에 대한 광범위한 연구가 진행되어 왔다.<sup>(8~14)</sup> 현재 에너지 흡수를 위한 판재에 일반적으로 사용되는 재료로는 알루미늄 합금, 연강과 같은 금속과 복합재가 있다.<sup>(15)</sup> 특히 복합재는 높은 비강도, 높은 비강성, 그리고 탁월한 에너지 흡수 능력으로 인해 큰 관심을 받고 있다.<sup>(16,17)</sup> 또한, 복합재 구조물은 금속 구조물보다 더 높은 비에너지 흡수율을 제공하여 연구 및 실제 적용 분야에서 점점 더 중요해지고 있다.

범퍼 빔을 복합재로 제조하여 중량을 줄이면서 강도를 유지 또는 향상시키거나 에너지 흡수성을 향상시키기 위한 연구들이 진행되어 오고 있다. Cheon 등<sup>(18)</sup>은 FE 해석과 충돌 시험을 통해 강철 범퍼 빔보다 30%의 중량을 감소하면서 동일한 굽힘 강도를 유지할 수 있는 새로운 유형의 하이브리드 복합재 범퍼 빔을 제안하였다. Hosseinzadeh 등<sup>(19)</sup>은 저속 충돌에 대한 합성 범퍼 빔 설계를 위한 재료 및 형상에 따른 제조 공정 영향도 연구를 수행하였다. Davoudi 등<sup>(20,21)</sup>은 변형 SMC를 제조 공법으로 천연섬유와 유리 혼합하여 기계적 물성을 향상시켰다. Kim 등<sup>(22)</sup>은 하이브리드 유리/탄소 매트 열가소성 복합재 범퍼 빔에 대한 최적화된 설계를 제안했고, 향상된 충격 성능으로 효과적인 중량 감소를 보였다. Belingardi 등<sup>(23)</sup>은 복합재 범퍼 빔에 대한 경량 소재와 제조 공정을 제안하였다. Liu 등<sup>(24)</sup>은 탄소 섬유 평직 복합재로 만든 상업용 전면 범퍼 시스템에 대해 정적 강도 조건과 동적 충격 사례를 고려한 구조 설계 및 최적화 방법으로 Kriging 모델링 기법과 입자군 최적화 알고리즘을 제안하였다.

현재까지 진행된 연구들은 범퍼 빔의 재료를 복합재료로 변경하여 특성을 개선하는 것에 대해 많이 진행되었지만, 범퍼 빔 전체에 적용되는 적층 각도 순서 또는 재료가 동일하게 적용되는 것이 일반적이었다. Jeong 등<sup>(25)</sup>은 충돌 시 범퍼 빔 전체에 나타나는 하중 유형을 분석하여 서로 다른 적층 각도 순서, 즉 각 영역에 따라 인장, 압축 및 전단 하중이 우세하게 나타나는 곳의 적층 각도 순서를 다르게 할당하는 PIC(piecewise integrated composite)이라는 새로운 개념을 제안했다. PIC 설계 기법을 이용해 범퍼 빔을 5개의 영역으로 나눠 각 영역에 우세하게 나타난 하중 유형에 따라 적층 각도 순서를 다르게 적용하여 하중 저항 능력을 향상시켰다. Ham 등<sup>(26)</sup>은 적층 각도 순서가 적용되는 영역의 단위를 유한 요소의 크기로 나누어 하중 저항 능력 및 에너지 흡수율을 높였다. 이때, 유한 요소의 크기 단위로 범퍼 빔 전체에 나타나는 하중 유형을 예측하기 위해서 머신 러닝 모델이 이용되었다. 하지만 머신 러닝 모델 학습을 위한 학습데이터 구성 과정에서 범퍼 빔에 일정한 간격으로 reference element로부터 데이터가 추출되어 진행되었는데 이로 인해 학습 데이터의 수가 적었던 전단 하중 유형 예측 정확도가 다른 하중 유형에 비해 약 10% 낮게 나타나는 문제가 발생되었다. 따라서, 학습 데이터 구성을 위한 reference element의 배치를 규칙적으로 일정한 간격이 아닌 범퍼 빔 전체에 나타나는 데이터 예측 시 영향력이 높은 reference element들이 선정되어 학습 데이터가 구성될 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 세 가지 하중 유형 모두에 대한 예측 성능을 균일하게 확보하기 위해, 학습 데이터 구성 방식 개선에 관한 연구가 수행되었다. 먼저, IIHS에서 제안된 bumper 저속 정면 충돌 유한요소 해석이 수행되었다. 해석 결과로부터 얻은 von Mises stress 분포 데이터를 바탕으로 차원 축소 및 군집화 기법을 적용하여, 범퍼 빔 내 위치에 따른 데이터의 특성이 반영된 군집들이 도출되었다. 각 군집에서 일부 요소만을 선별하여 학습 데이터를 구성하고, 이를 이용해 딥러닝 기반 예측 모델(DNN: deep neural network)이 학습되었다. 학습된 모델의 예측 정확도가 95% 이상을 달성할 때까지 요소 선별 및 학습 데이터 구성이 반복되었다. 최종적으로, 새롭게 구성된 학습 데이터를 기반으로 하중 유형 예측을 위한 새로운 DNN 모델이 학습되었으며, 세 가지 하중 유형 모두에서 예측 정확도가 향상되었음이 확인되었다. 또한, 본 연구의 새로운 학습 데이터 구성 방식을 통해 예측된 하중 분포 결과를 활용하여 설계된 PIC 범퍼 빔은 기존 방식 대비 에너지 흡수 성능에서도 향상된 결과를 나타냈다.

## 2. PIC 범퍼 빔 설계의 개요

PIC 설계 기법은 기존의 단일 적층 각도 순서를 적용하는 복합재료 구조체와 달리, 구조 내 각 구간 별로 상이한 적층 각도 순서를 배치함으로써 기계적 특성을 향상시키는 새로운 설계 기법이다. 이때, 적층 각도 순서가 변화하는 구간 간의 경계는 외부 하중에 대한 구조적 견고성을 확보하기 위해 완전 결합된 것으로 가정된다.

PIC 설계법을 구조물에 적용하기 위해서는 각 영역에 작용하는 하중 유형을 식별하기 위한 선행 해석이 요구된다. 이 해석을 바탕으로 각 영역에 적절한 적층 순서가 할당된다. 이러한 영역의 구분은 유한 요소해석모델의 요소 크기에 의해 결정된다. 본 연구의 궁극적인 설계 대상은 복합재 범퍼 빔이지만, 선행 해석에서는 응력 데이터를 수집하기 위해서 등방성 재료인 알루미늄 합금 7021이 사용되었다. 이는 응력 분포가 재료의 특성보다는 구조적 형상에 의해 결정되며, 재료가 달라지더라도 분포 형태 자체는 유사하게 나타나기 때문이다.<sup>(27)</sup> 그 대표적인 사례로 광탄성을 들 수 있다. 따라서 본 연구에서는 선행 해석을 위한 재료로 알루미늄 합금 7021<sup>(28)</sup>이 사용되었다.

선행 해석을 통해 구조 전체에 나타나는 데이터를 추출할 수 있으나, 유한 요소의 수가 증가할수록 전체 데이터를 직접 취득하고 처리하는 것은 비효율적이다. 따라서 기존 연구에서는 머신 러닝 모델을 활용하여 구조 내 일부 요소의 하중 유형 데이터를 기반으로 전체 구조의 하중 유형을 예측하는 방법이 제안되었다. 그러나 해당 방법은 참조 요소가 규칙적으로 배치됨에 따라 일부 데이터를 예측하는 데 있어 정확도가 저하되는 한계가 있었다. 본 연구에서는 참조 요소를 불규칙적으로 배치하는 방식을 도입하여, 범퍼 빔 전체에 나타나는 데이터의 예측 정확도를 향상시키는 방법이 제안되었다.

### 3. 선행 범퍼 빔 충돌 유한 요소 해석

유한 요소 해석은 대표적인 explicit 유한 요소 프로그램 중 하나인 ANSYS LS-DYNA(ANSYS, Inc., Canonsburg, PA, USA)를 사용하여 수행되었다. 두께 방향에 3개의 적분점과 6 mm의 평균 요소 크기를 기반으로 하는 Belytschko-Lin-Tsay 사변형 쉘 요소는 모래시계 모드를 제외한 범퍼 빔의 얇은 벽 구조를

Table 1 Mechanical properties of Aluminium alloy 7021<sup>(28)</sup>

Mechanical properties		Value					
Density $\rho$		2,700 kg/m <sup>3</sup>					
Young's modulus $E$		70 GPa					
Poisson's ratio $\nu$		0.3					
Yield stress $Y$		360 MPa					
Effective plastic strain							
0	0.007	0.029	0.041	0.057	0.068	0.085	0.192
Effective plastic stress [MPa]							
385	396	411	419	428	435	443	491

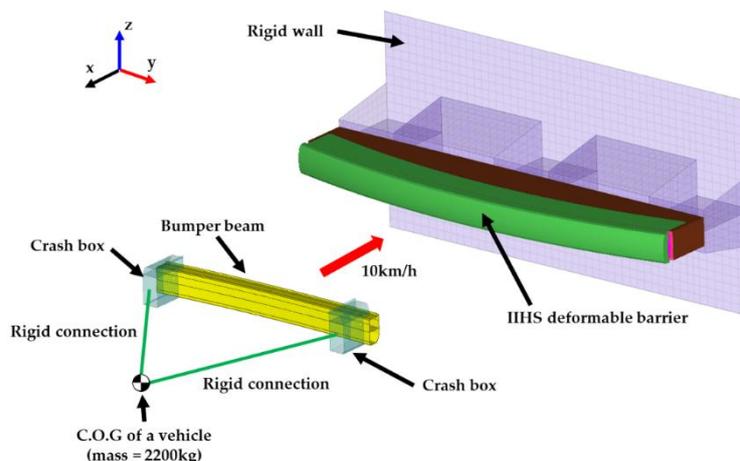


Fig. 1 The bumper beam model and the deformable barrier for IIHS bumper crash analysis

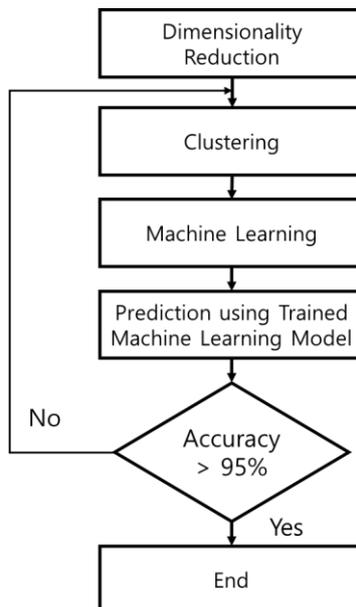
모델링하기 위해 선택되었다.<sup>(29)</sup> 이는 복잡한 하중과 큰 변형을 포함하여 얇은 셸 구조의 비선형 이방성 거동을 표현하는 데 적합한 것으로 알려져 있기 때문에 계산 시간을 효과적으로 절약할 수 있다.<sup>(30)</sup> 임의의 응력을 변형률 곡선과 임의의 변형률 속도 종속성의 함수로 나타내는 탄소성 거동을 표현해야 하는 재료 모델이 선택되었다.<sup>(31)</sup> 앞서 언급했듯이 예비 유한요소 충돌 해석 동안 알루미늄 합금 7021이 범퍼 빔 재료로 사용되었다. 알루미늄 합금 7021의 기계적 특성은 Table 1에 요약되어 있다.<sup>(28)</sup> 범퍼 빔의 설계(단면 형상, 전체 길이, 곡률 반경 포함)는 회사 “A”에서 제조한 일반 승용차에 설치된 기존 제품을 기반으로 했다. 실제 차량 중량은 집중 질량 요소<sup>(25)</sup>를 사용하여 표현되었다. IIHS 범퍼 테스트는 저속 충돌 시 차량 손상 영역을 평가하는 주요 방법으로 선택되었다. 이 테스트에는 차량과 변형 가능한 장벽이 모두 필요하다. 시뮬레이션에서 변형 가능한 장벽은 IIHS 범퍼 테스트 프로토콜<sup>(32)</sup>에 따라 39,800개의 요소로 모델링 되었다. Fig. 1은 범퍼 크래시 박스와 IIHS 표준 변형 가능한 장벽을 포함하는 자동차 범퍼 빔의 유한 요소 모델을 나타낸다. 범퍼 빔의 양쪽 끝에 직사각형 단면으로 단단히 고정된 범퍼 크래시 박스 또한 알루미늄 합금 7021로 제작되었다. Fig. 1에서 볼 수 있듯이, 초기 충돌 속도는 10 km/h로 설정되었고, 차량 중량은 2,200 kg으로 정의되었으며, 승용차의 실제 무게 중심에 해당하는 특정 지점에 적용되었다. IIHS 충돌 분석에 사용된 경계 조건 및 차량 중량에 대한 자세한 내용은 Table 2에 요약되어 있다.

#### 4. 불규칙적 reference element 할당

머신 러닝 모델 학습 데이터는 범퍼 빔에 배치된 reference element에서 추출된 데이터로 구성되었다. 이전 연구에서는 reference element가 규칙적으로 배치됨에 따라 범퍼 빔 전체 구조의 하중 유형을 예측하

**Table 2** Boundary conditions and vehicle mass in the IIHS crash analysis

	Boundary condition	Mass
Bumper beam	10 km/h	2,200 kg on C.O.G.
Crash box		
Vehicle		
IIHS deformable barrier	Deformable (front)	-
	Stationary (rear wall)	



**Fig. 2** Flow chart for irregular assignment of reference elements

는 과정에서, reference element의 수가 적은 전단 하중에서 예측 정확도가 저하되는 문제가 나타났다. 이에 본 연구에서는 예측 정확도가 95% 이상이 되도록 reference element를 불규칙적으로 배치하는 방법이 제안되었으며, 해당 과정은 Fig. 2에 나타난 절차를 따른다. Reference element를 배치하기 위한 기준을 잡기 위해서 von-Mises 응력 데이터가 사용되었고 차원 축소와 군집화를 통해 영향도가 높은 element 집단을 찾고 반복적인 선정과정을 통해서 딥러닝 모델의 예측 정확도를 최대한 높일 수 있는 reference element가 선정되었다. 높은 예측 정확도를 달성하기 위해 reference element의 재선정 및 하이퍼파라미터 조정이 필수적으로 수행되며, 이를 통해 범퍼 빔 구조에 최적화된 reference element 배치 및 머신 러닝 모델이 구축된다.

4.1 데이터 추출

IIHS 저속 충돌 해석을 통해 알루미늄 범퍼 빔의 전체 데이터가 수집되었다. IIHS 저속 충돌 데이터에서 추출된 정보는 각 요소의 좌표와 시간에 따른 von Mises stress의 변화이다. Fig. 3과 Fig. 4는 충돌 시간에 따른 von Mises stress 최대 지점 변화를 설명하는 그림과 선도이다. Section A의 경우 범퍼 빔이 최대 압축되는 시점인 30 m/sec일때 von Mises stress 값이 최대가 되고 section C는 크래쉬 박스의 압축으로 인해 하중을 받는 시점인 42 m/sec일때 von Mises stress가 최대가 된다. 따라서, 우세하게 나타나는 하중의 유형에 맞춰 적층각도 순서를 적용하는 PIC 설계기법을 위해서는 von Mises stress가 최대가 될 때 하중 유형을 파악해 적용하는 것이 범퍼 빔의 성능향상에 더 효과적이기 때문에 요소별로 von Mises stress가 최대가 될 때를 고려하여 데이터가 추출되었다. Section B는 앞서 설명된 두 시점에서 하중을 많이 받지 않는 영역으로 급격하게 von Mises stress 증가하지 않는 곳이다. 다음 절부터는 추출된 좌표와 von Mises stress 데이터를 이용해 범퍼 빔 구조에 나타나는 결과를 예측하기 위해 필요한 reference element 할당 과정이 설명된다.

4.2 차원 축소

앞 절에서 추출된 3차원 좌표와 최대 von Mises stress 값으로 구성된 데이터는 네 개의 축을 가지는 4차원 데이터로, 직접적인 가시화가 어려워 분석에 제한이 따른다. 또한, 고차원 공간에서는 거리라는 개념이 의미 없어지면서 인덱싱 알고리즘 기법의 성능이 떨어진다.<sup>(33)</sup> 클러스터링 기법을 이용해 데이터를 분류하고 학습 데이터를 배치하기 위해서는 차원 축소 기법을 활용하여 데이터를 2차원 공간으로 축소시켜 클러스터링 기법의 성능을 높여야 한다. 고차원 데이터를 저차원 공간으로 변환할 때, 차원 축소 기법을 이용해 데이터의 구조적 특성을 최대한 보존하면서 변환하는 것이 중요하다. 차원 축소 기법은

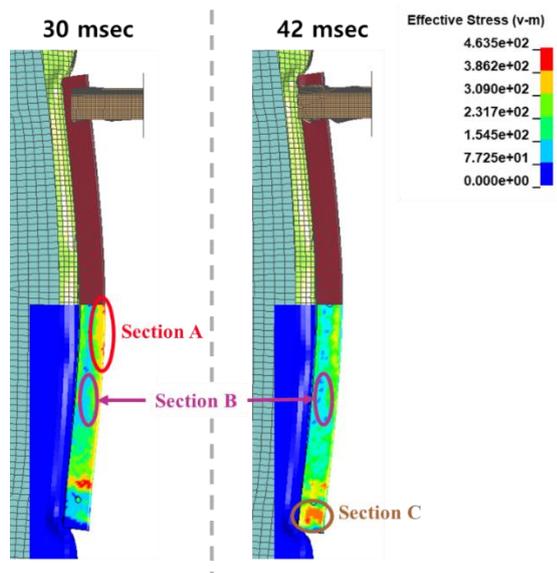


Fig. 3 Difference of von Mises stress by location and time

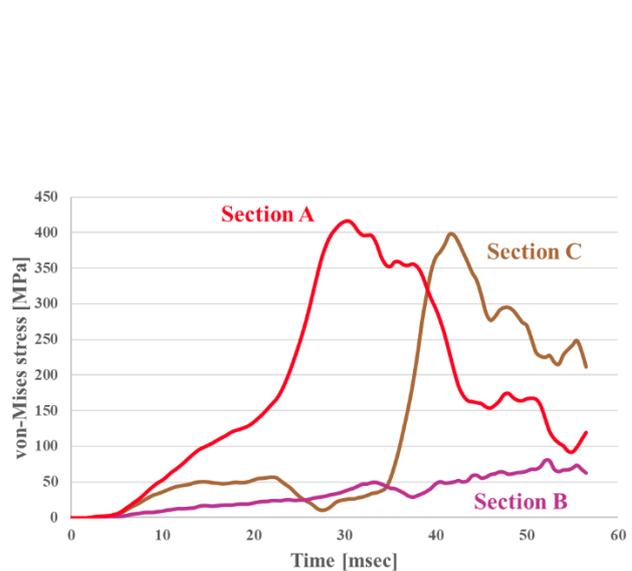


Fig. 4 Time history of von Mises stress by section on bumper beam crash analysis

크게 선형 변환을 기반으로 하는 선형 차원 축소 기법과 비선형 변환을 활용하는 비선형 차원 축소 기법으로 구분된다. 본 연구에서는 복잡한 구조의 데이터를 차원 축소 후 효과적으로 보존할 수 있는 비선형 차원 축소 기법 중 하나인 UMAP(uniform manifold approximation and projection)이 사용되었다. 또한, UMAP 기법은 리만 기하학과 위상 수학 기반으로 다른 비선형 차원 축소 기법에 비해 데이터의 국소적(local) 관계뿐만 아니라 전역적(global) 관계까지 보존할 수 있도록 설계되어, 범퍼 빔 국부적인 영역에서 나타나는 세밀한 응력분포 뿐만 아니라 전체적인 응력 분포도 보존하여 차원 축소가 필요한 범퍼 빔 응력 분포 데이터에 적합한 차원 축소 기법이다. UMAP은 지수 확률 분포를 사용하여 고차원 데이터 포인트 간의 유사도를 계산한다.

$$p_{i|j} = \exp\left(-\frac{d(x_i, x_j) - \rho_i}{\sigma_i}\right) \quad (1)$$

여기서  $d(x_i, x_j)$ 는  $i$ 번째와  $j$ 번째 데이터 포인트 사이의 거리이며  $\rho_i$ 번째 데이터 포인트와 첫 번째 최근접 이웃 사이의 거리이다. 이때 고려하는 이웃의 수( $n\_neighbors$ )는 하이퍼파라미터로 값이 작을 경우 국소적인 구조 기반으로 추정되고 값이 커질수록 전역적인 영역을 기반으로 추정된다. 또한, 점과 점 사이에 허용되는 최소 거리( $min\_dist$ )도 하이퍼파라미터이며 값이 낮을수록 저차원 공간에서 데이터들이 밀집되어 배치되어 세밀한 위상구조 분석에 유용해지고 값이 커지면 데이터들이 밀집되지 않고 전체적인 위상 구조를 보존하는데 초점이 맞춰진다.

#### 4.3 군집화

군집분석은 전체 데이터 내에서 유사한 특성을 가진 데이터들을 그룹으로 묶어 군집을 형성하는 비지도 학습 기법이다.<sup>(34)</sup> 군집분석 기법은 크게 중심 기반 군집화, 분포 기반 군집화, 밀도 기반 군집화, 계층적 군집화 4가지 유형으로 분류된다.<sup>(35)</sup> 밀도 기반 군집화 모델을 제외한 3가지 유형의 군집분석 기법들은 군집의 개수를 사전에 설정해야 한다. 설정된 군집 수에 따라 결과가 다르게 나타나며, 유사하지 않은 데이터들이 동일한 군집으로 분류되는 경우가 발생된다.<sup>(36)</sup> 이러한 결과는 학습 데이터를 선정하는 과정에서 노이즈를 유발하여 학습 모델의 예측 정확도가 저하될 가능성이 있다. 따라서, 본 연구에서는 데이터의 위치정보를 활용하여 군집을 생성하는 밀도 기반 군집분석 기법 중 하나인 OPTICS(ordering points to identify the clustering structure)가 적용되어 군집분석이 수행되었다. OPTICS는 다른 밀도 기반 군집분석 기법들과 달리 데이터 처리 순서를 유지하여 밀도가 다른 군집들이 가까이 위치한 경우 분리된 군집으로 구분하기 어려운 문제를 해결하였다.<sup>(37)</sup> 다시 말해서 고밀도 군집의 순서를 저밀도 군집보다 우선시하여 군집화가 진행되어 가까이 위치한 군집들을 분리된 군집으로 가능하다는 장점을 통해 다양한 밀도를 가지는 데이터 분포에서 다른 밀도 기반 군집분석 기법들보다 우수한 성능을 발휘한다.<sup>(38)</sup> OPTICS의 주요 하이퍼파라미터로는  $min\_sample$ 과 최대 거리반경이 있다.  $Min\_samples$ 는 특정 데이터 포인트가 군집의 중심으로 간주되기 위해 요구되는 최소 이웃 개수를 의미하고 최대 거리 반경은 군집의 중심으로부터 고려될 최대 반경을 의미하지만 매우 작은 값이 아니면 군집화 과정에서 큰 영향을 주지 않는다.

#### 4.4 딥러닝 모델

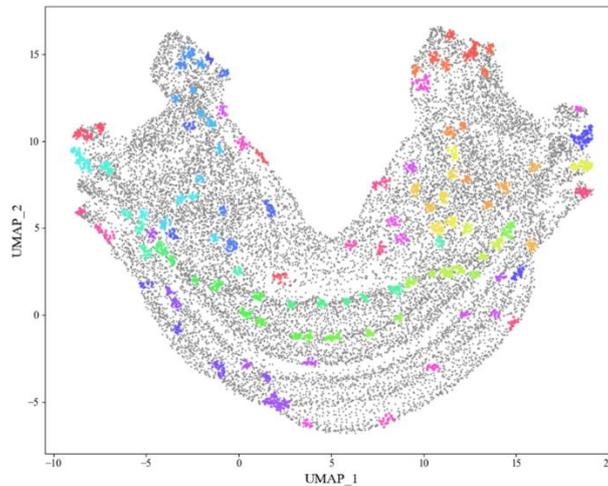
군집화된 데이터에서 무작위로 추출된 reference element들을 학습 데이터로 활용하여 DNN 모델이 학습되었다. DNN은 입력 데이터와 출력 데이터 간의 복잡하고 비선형적인 관계를 모델링할 수 있다.<sup>(39)</sup> 범퍼 빔 모델에서 최대 von Mises stress 값이 추출된 시점은 위치에 따라 상이하여 데이터가 선형적인 형태를 보이지 않는다. 또한, 저속 충돌 시 범퍼 빔 전체 구조에 나타나는 하중 유형은 좌표에 따라 단순한 패턴으로 표현되지 않는다. 이에 따라, 본 연구에서는 비선형적이고 복잡한 데이터 패턴을 효과적으로 학습할 수 있는 DNN 모델이 선정되었다. DNN 모델의 성능과 학습 효율성은 모델의 구조와 하이퍼파라미터 설정에 크게 영향을 받는다. 모델의 복잡도는 hidden layer의 수, 각 hidden layer의 노드 수가 매개변수이고 주요 하이퍼파라미터는 learning rate, batch size, epoch, 활성화 함수, 최적화 모델 등이 있다. 이때, 활성화 함수와 최적화 모델은 ReLu 함수와 Adam 최적화 모델로 고정되어 진행되었다. DNN 모델의 구

**Table 3** Architecture variations for structural adequacy evaluation

Case	Hidden layer	Nodes
1	2	[64, 32]
2	6	[64, 128, 128, 64, 32]
3	4	[64, 128, 64, 32]
4	4	[128, 256, 128, 64]
5	4	[32, 64, 32, 16]

**Table 4** Quantitative evaluation of UMAP embedding quality according to hyperparameter settings

No.	N_neighbors	Min_dist	KNN preservation	Trustworthiness
1	5	0.1	0.54	0.92
2	50		0.70	0.96
3	500		0.72	0.98
4	800		0.74	0.99
5	1,000		0.73	0.98
6	5	0.5	0.58	0.92
7	50		0.72	0.97
8	500		0.73	0.98
9	<b>800</b>		<b>0.76</b>	<b>0.99</b>
10	1,000		0.76	0.98



**Fig. 5** Clustering result through OPTICS after dimensionality reduction

조는 Table 3에 나타난 것과 같이 5가지 조합에서 변경되면서 각각의 DNN 모델 학습이 진행되었다.

## 5. 결 과

### 5.1 Reference element 불규칙적 할당 결과

#### 5.1.1 차원 축소 결과

차원 축소 모델 UMAP의 하이퍼파라미터는 Table 4에 나타난 것과 같이 정량적인 평가를 통해  $n\_neighbors = 800$ ,  $min\_dist = 0.5$ 로 최적화되어 차원 축소가 수행되었으며, 그 결과는 Fig. 5에 나타나 있다. KNN 보존율(KNN preservation)과 trustworthiness 평가는 차원 축소된 데이터가 원본 데이터의 구조를 적절히 보존하고 있는지 검증하기 위해 수행되었다. KNN 보존율은 원본 데이터에서 인접했던 데이터 포인

트들이 차원 축소 후에도 인접한 상태로 유지되는지를 평가하는 지표로, 일반적으로 70% 이상의 값을 보이면 원본 구조가 효과적으로 유지되었다고 판단된다. Trustworthiness는 고차원 공간에서 멀리 떨어져 있던 데이터 포인트가 차원 축소 후 비정상적으로 가까워지는 현상을 방지하기 위해 설계된 지표로, 0.8 이상의 값을 보일 경우 신뢰할 수 있는 차원 축소 결과로 간주된다. 본 연구에서 수행된 신뢰성 분석 결과, KNN 보존율은 약 76%, 신뢰도는 0.99로 나타나 차원 축소 결과가 신뢰할 수 있는 것으로 확인되었다. 이를 통해 위치에 따른 von Mises stress 값의 변화를 효과적으로 분석할 수 있는 기초 데이터가 확보되었으며, 이후 군집화 기법을 활용하여 유사한 위치에서 유사한 von Mises stress 값을 가지는 요소들을 그룹화하고, 이들 중에서 reference element가 선정되는 과정이 수행되었다.

### 5.1.2 군집화 결과

차원 축소된 전체 요소의 좌표 및 von Mises stress 값 데이터를 군집 분류하기 위해 OPTICS 군집화 모델을 적용하였으며, 그 결과는 Fig. 5에 제시되어 있다. OPTICS 군집화 기법의 하이퍼파라미터인 min\_samples와 최대 거리반경은 최대 학습 데이터 수를 범퍼 빔 전체 요소의 15% 이하로 구성하기 위해서 각각 15 samples, 최대 거리반경 10으로 설정되어 군집화가 진행되었다. 군집화 결과 총 118개의 군집이 형성되었으며, 군집에 속한 요소의 수는 총 2,897개로 전체 요소의 약 15%이다. 각 군집의 내부 응집도와 군집 간 분리도를 평가하기 위해 silhouette score를 계산한 결과 0.7로 나타나, 군집이 효과적으로 구분되었음이 확인되었다. 이를 통해 공간적 위치와 von Mises stress 값이 유사한 요소들이 동일한 군집으로 분류되었으며, 이를 기반으로 학습 데이터가 생성되었다. 이후 생성된 학습 데이터를 활용하여 DNN 모델이 학습되었으며, 이를 바탕으로 전체 모델에서 발생하는 하중 유형을 예측하는 과정이 수행되었다.

### 5.1.3 딥 러닝 모델 학습 결과

군집화된 데이터에서 무작위로 학습 데이터가 선정되어 학습이 진행되었으며, 이를 기반으로 전체 구조에서의 von Mises stress를 예측하였다. 이때, 학습 데이터의 입력 데이터로는 x, y, z 좌표값을 사용하였으며, 출력 데이터로는 von Mises stress 값이 설정되었다. 앞절에서 설명된 것과 같이 범퍼 빔 전체에 나타나는 von Mises stress 예측 정확도가 95%를 초과하지 못할 경우, 학습 데이터의 개선, 딥러닝 모델 구조 변경 및 하이퍼파라미터 조정을 통해 모델을 다시 학습시킨 후 예측을 반복적으로 수행되었다. 최종적으로 epoch는 500, batch size는 64, learning rate은 0.005로 하이퍼파라미터가 설정되었다. Fig. 6은 딥러닝 모델 구조 조합에 따른 평균 정확도이다. Case 1은 학습 데이터에 비해 단순한 구조로 구성되어 정확도가 낮게 나타났고 case 2의 경우 과적합으로 인해 예측 정확도가 하락된 것으로 사료된다. Case 3의 경우 제일 높은 정확도가 도출되었고 case 3과 hidden layer 수는 같지만 node의 수가 다른 case 4, 5에서는 node 수가 많은 case 4는 case 3과 유사한 결과가 나타났고 node 수가 적은 case 5는 낮은 예측 정확도가 나타났다. 예측 정확도가 가장 높게 나타나며 노드의 수가 적은 case 3이 딥러닝 모델 구조로 선정되었다. 앞서 제안된 반복적인 학습 데이터 선정 알고리즘을 통해 Fig. 7과 같이 학습 데이터가 할당되었으며, 해당 데이터를 기반으로 학습된 DNN 모델은 전체 구조에서의 von Mises stress 값을 97.2%의 높은 정확도로 예측

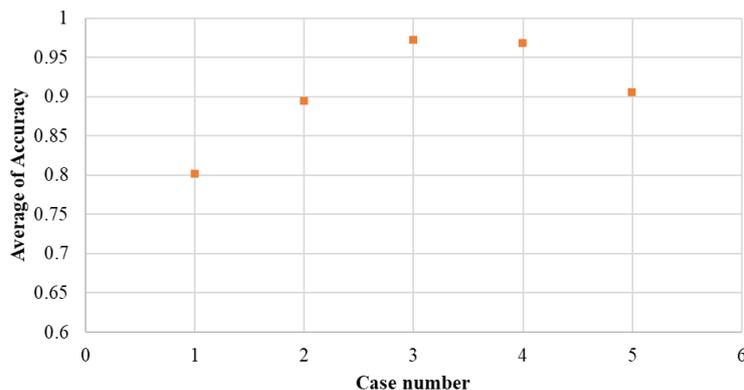
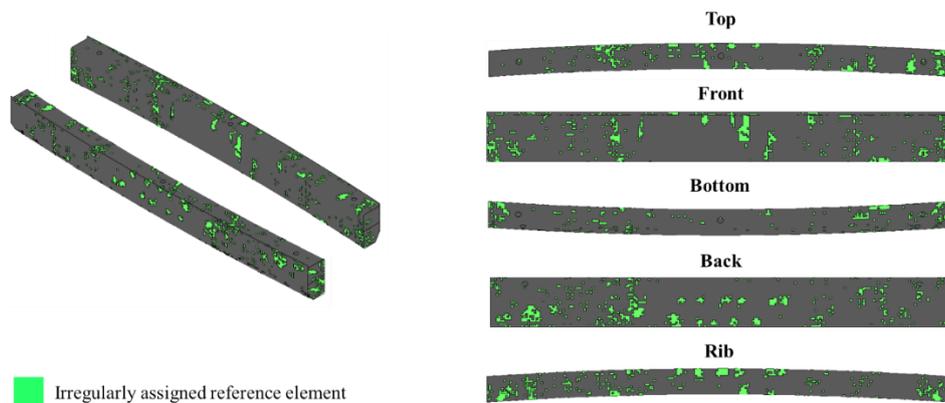


Fig. 6 Comparison of prediction accuracy according to model architecture configurations

**Table 5** Comparison of reference element assignment results (bumper beam total element quantity: 18,907)

	Irregularly assigned reference element (ea)	Ratio (%)	Previous reference element from Ham et al (ea)	Ratio (%)	Difference
Tensile	683	35.5	1,003	41.9	-6.4%
Compression	1,018	52.9	1,150	48.1	+4.8%
Shear	222	11.5	239	10.0	+1.5%
Total	1,923	-	2,392	-	-

**Fig. 7** Irregularly assigned reference element result

되는 것이 확인되었다. 추가적으로, 본 연구에서 선정된 학습 데이터와 이전 Ham 등의 연구에서 사용된 규칙적으로 배치된 학습 데이터와의 비교 분석이 진행되었다. Table 5에 나타난 바와 같이, von Mises stress 값이 최대일 때의 하중 유형을 기반으로 reference element를 불규칙적으로 배치한 결과, 전체 reference element 수는 약 469개 감소하였으며, 학습 데이터 내 인장, 압축, 전단 하중의 비율에도 약간의 변화가 발생한 것이 확인되었다. 인장 하중 유형의 학습 데이터 비율만 감소하였고 압축 및 전단 하중 유형의 학습 데이터 비율은 증가된 것을 확인할 수 있다.

## 5.2 PIC 범퍼 빔

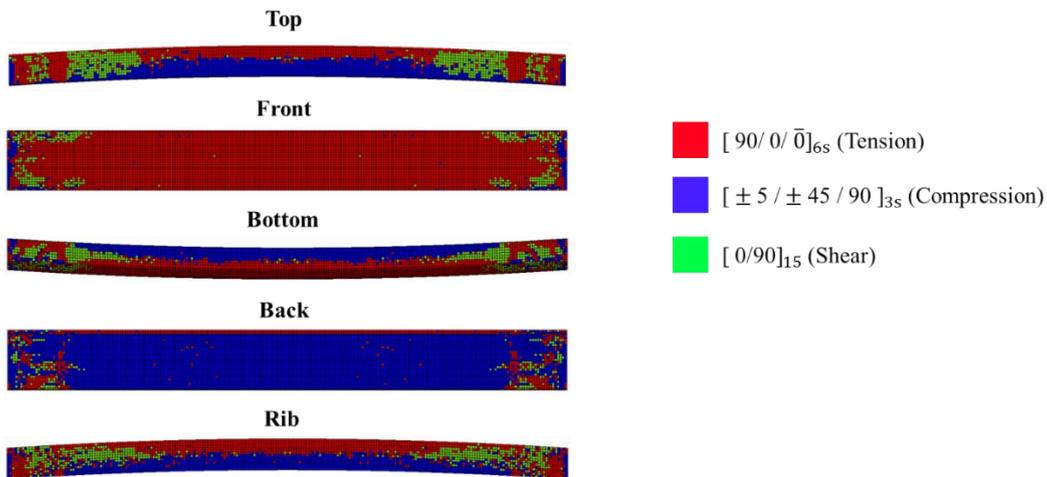
앞 절에서 von Mises stress 값을 출력 데이터로 사용하여 학습된 DNN 모델을 이용해, 범퍼 빔 전체 구조에 대한 하중 유형 예측이 수행되었다. 이때, 입력 데이터는 학습 데이터 도출 때와 같이 3차원 좌표가 사용되었으며, 출력 데이터는 하중 유형으로 변경되어 학습 및 예측이 수행되었다. 그 결과, 하중 유형 예측의 정확도는 von Mises stress 예측 시보다 2.1% 낮은 95.1%로 나타났으며, 예측된 결과는 Fig. 8과 같이 범퍼 빔에 하중 유형별 적층각도 순서가 적용된 형태로 시각화되었다. 각 하중 유형에 우세한 적층각도 순서는 Table 6에 정리되어 있다. 하중 유형 예측의 정확도가 von Mises stress 예측 시보다 2.1% 하락한 것은, 연속적인 수치 값인 von Mises stress에 비해 하중 유형은 범주형 데이터로 출력 형태가 변경되면서 분류 경계가 뚜렷해지고, 이로 인해 모델이 예측 과정에서 더 큰 오차를 발생시킬 수 있기 때문으로 판단된다. 그럼에도 불구하고 95.1%의 예측 정확도는 여전히 매우 높은 수준으로, 유의미한 결과로 간주된다. Table 7은 이전 Ham 등의 연구 결과와, 동일한 규칙적으로 배치된 학습 데이터를 사용하여 DNN 모델을 학습시켰을 때의 각 하중 유형별 예측 정확도 및 전체 예측 정확도를 비교 분석한 결과이다. 먼저, Ham 등의 선행 연구에서 제시된 바와 같이, 머신러닝 모델인 k-NN을 활용하여 규칙적으로 배치된 학습 데이터를 기반으로 학습한 경우, 전단 하중 유형의 예측 정확도가 다른 하중 유형에 비해 낮게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 규칙적으로 배치된 학습 데이터를 활용하여 DNN 모델을 학습시킨 경우에도, 전단 하중 유형의 예측 정확도는 약 3.5% 향상되었으나 여전히 59.1%로 낮은 수준을 보였다. 또한, 인장 및 압축 하중 유형에 대해서는 각각 4.1%, 2.6%의 예측 정확도 향상이 나타났으며, 이는

**Table 6** Robust stacking sequences against each loading type

Dominant loading	Stacking sequence
Tension	$[90/0/\bar{0}]_{6s}$
Compression	$[\pm 5/\pm 45/90]_{3s}$
Shear	$[0/90]_{15}$

**Table 7** Comparison of prediction accuracy by each load type

	Prediction accuracy			
	Tensile	Compression	Shear	Total
Regular reference element for k-NN	88.9%	88.4%	55.6%	86.3%
Regular reference element for DNN	93%	91%	59.1%	88%
<b>Irregular reference element for DNN</b>	94.2%	96.7%	95.2%	95.1%

**Fig. 8** Mapping results from DNN model learned by irregularly assigned reference element

DNN 모델이 k-NN 모델에 비해 비선형적이고 복잡한 패턴의 데이터 학습에 보다 적합하여 향상된 것으로 판단된다. 군집화를 통해 영향도가 높은 요소들을 선별해 불규칙하게 배치된 학습 데이터로 학습된 DNN 모델은 모든 하중 유형에서 94% 이상의 높은 예측 정확도를 보였다.

### 5.3 Redesigned PIC 범퍼 빔

Fig. 7과 같이 새로운 배치 방식으로 구성된 학습 데이터를 기반으로 학습된 DNN 모델을 이용하여 하중 유형이 예측되고, 해당 예측 결과가 적용되어 IIHS 범퍼 빔 해석이 수행되었다. 이때 적용된 재료 물성은 T700/2510이며, 상세한 물성은 Ham 등의 논문과 동일하다. Fig. 9는 IIHS 범퍼 빔 해석 결과를 나타낸 force-displacement 선도로서, 이전 Ham 등의 연구에서 k-NN 머신러닝 모델을 사용하여 예측된 결과가 적용된 범퍼 빔과 비교한 결과를 제시하고 있다. Table 8은 IIHS 범퍼 빔 해석 결과를 정리한 내용으로, 최대 하중의 경우 본 연구에서 제안된 학습 데이터 배치 방식이 적용된 redesigned PIC 범퍼 빔은 약 212.0 kN의 하중을 지지한 반면, Ham 등의 연구에서 제안된 방식이 적용된 PIC 범퍼 빔은 206.5 kN으로 약 2.6%의 차이를 보였다. 한편, 최대 하중 도달 시까지의 에너지 흡수율을 비교하면, redesigned PIC 범퍼 빔이 약 11.4% 더 높은 흡수율을 나타내는 것이 확인되었다. 이는 전단 하중의 예측 정확도를 향상시켜 mapping의 적용 범위를 확대한 것이 최대 하중에는 큰 영향을 주지 않았지만, 전체 변형량을 증가시켜

Table 8 Comparison strength and energy absorption performance

Model	Maximum load	Energy absorption until maximum load
Previous PIC bumper beam	206.5 kN	6,664.9 J
Redesigned PIC bumper beam	212.0 kN	7,520.3 J
Difference	2.6%	11.4%

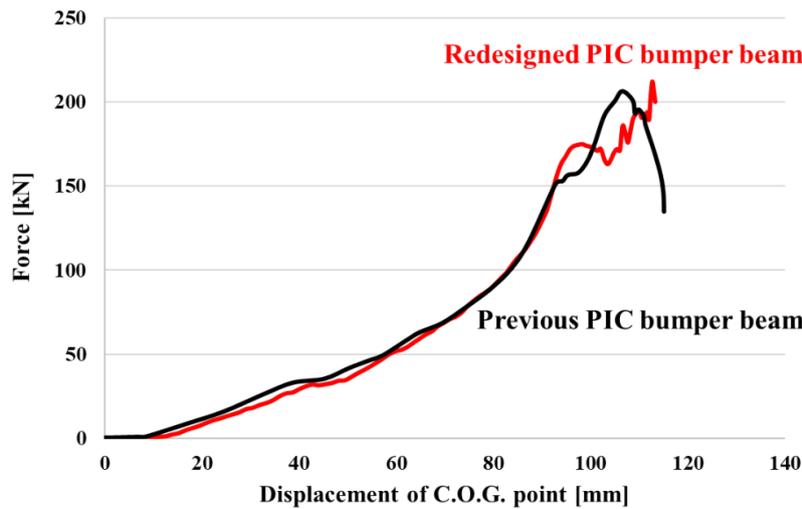


Fig. 9 Force-displacement curve of composite bumper beams

결과적으로 에너지 흡수 성능 향상에 기여한 것으로 판단된다. 따라서, 향후 충격 에너지 흡수체 설계 시 전단 하중은 강도에 미치는 영향은 제한적일 수 있으나, 에너지 흡수 성능 측면에서는 간과할 수 없는 중요한 하중 유형으로 고려되어야 할 것으로 사료된다.

## 6. 결론

본 연구에서는 딥러닝 모델을 이용한 PIC 설계 기법에서 reference element 배치 방법에 대해 연구되었다. 기존 연구에서는 학습 데이터가 규칙적으로 배치됨에 따라 특정 데이터의 예측 정확도가 상대적으로 낮게 나타나는 문제가 있었다. 이러한 문제를 해결하기 위해, 본 연구에서는 reference element를 불규칙적으로 선정하여 구조 내에서 영향력 있는 학습 데이터를 선별하는 알고리즘이 제안되었다. 해당 알고리즘은 차원 축소 기법과 군집화를 활용하여 범퍼 빔 전체에 나타나는 하중 및 하중 유형을 예측하는데 영향을 미치는 주요 요소들을 선정하는 방식으로 구성되었다.

먼저, 차원 축소 기법을 적용하여 요소의 위치에 따른 von Mises stress 값을 2차원 공간으로 변환되었다. 이후 KNN 보존율과 trustworthiness 지표를 활용하여 차원 축소 과정에서 원본 고차원 데이터의 구조가 유지되었는지가 검증되었다. 다음으로, 군집화를 수행하여 유사한 위치에 유사한 von Mises stress 값을 갖는 요소들을 그룹화함으로써 위치에 따른 von Mises stress 값의 패턴이 분석되었다. 군집화 결과는 silhouette score를 통해 평가되었으며, 이를 통해 각 군집의 내부 응집도와 군집 간 분리가 적절하게 이루어졌음이 확인되었다.

군집화된 데이터에서 무작위로 선정된 학습 데이터를 활용하여, 비선형적이고 복잡한 패턴을 효과적으로 학습할 수 있는 DNN 모델이 학습되었다. 훈련된 DNN 모델을 이용해 범퍼 빔 전체의 하중 유형을 예측한 결과, 기존 k-NN 지도학습 모델을 사용한 경우보다 예측 정확도가 약 8.8% 향상되었으며, 규칙적으로 배치된 학습 데이터로 훈련된 DNN 모델과 비교했을 때도 7% 높은 정확도를 보였다. 또한, 불규칙적으로 배치된 학습 데이터를 이용해 훈련된 DNN 모델을 적용한 범퍼 빔을 대상으로 IHS 충돌 해석

을 수행한 결과, 기존 연구 대비 하중 저항 능력이 약 2.6% 향상되었으며, 에너지 흡수율은 약 11.4% 증가되었다. 이를 통해, 전단 하중에 우세한 적층각도 순서를 적용하는 것이 하중 지지력에는 큰 영향을 미치지 않지만, 구조물의 변형량을 증가시켜 에너지 흡수율에는 유의미한 영향을 미치는 것으로 확인되었다.

본 연구를 통해 머신러닝을 활용한 PIC 설계 시, 규칙적으로 배치된 학습 데이터를 사용하는 방법보다 하중을 고려하여 불규칙적으로 배치된 학습 데이터를 활용하는 것이 더욱 효과적인 것으로 확인되었다. 하지만 본 연구에서 제시된 방법론은 범퍼 빔의 형상, 외부 하중 조건 및 경계조건이 변경될 경우 매번 진행될 필요가 있다. 따라서 향후 연구에서는 제안된 학습 데이터 배치 알고리즘이 다양한 형상, 외부 하중 조건 및 경계조건에서 적용될 수 있도록 확장될 예정이다.

## 후 기

본 논문은 한국 정부(MSIT)의 재원으로 국가과학기술연구회(NST)의 지원을 받아 수행되었습니다. (CRC23011-210)

## 참고문헌 (References)

- (1) United States Department of Transportation, 2022, *Traffic Safety Facts Annual Report* (<https://cdan.dot.gov/tsftables/tsfar.htm>), Washington, D. C., USA.
- (2) Marzbanrad, J., Alijanpour, M. and Kiasat, M. S., 2009, "Design and Analysis of an Automotive Bumper Beam in Low-Speed Frontal Crashes," *Thin-Walled Structures*, Vol. 47, No. 8-9, pp. 902-911.
- (3) Tanlak, N., Sonmez, F. O. and Senaltun, M., 2015, "Shape Optimization of Bumper Beams under High-Velocity Impact Loads," *Engineering Structures*, Vol. 95, pp. 49-60.
- (4) Dai, C., Yu, P., Yin, M. and Long, J., 2023, "Optimization of the Crashworthiness Design of Carbon Fiber-Reinforced Polymer Bumper Beam," *International Journal of Crashworthiness*, Vol. 29, No. 1, pp. 163-177.
- (5) Enamadi Setty, R. and Rao, L., 2015, "Design and Analysis of an Automotive Frontal Bumper Beam for Low-Speed Crashes," *Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology*, Vol. 2, pp. 994-998.
- (6) Du, B., Li, Q., Zheng, C., Wang, S., Gao, C. and Chen, L., 2023, "Application of Lightweight Structure in Automobile Bumper Beam: A Review," *Materials*, Vol. 16, No. 3, Article 967.
- (7) Pei, T. S., Nadiyah, S., Aishah, S. and Nadiyah, N., 2017, "Oblique Impact on Crashworthiness : Review," *International Journal of Engineering Technology and Sciences*, Vol. 4, No. 2, pp. 32-48.
- (8) Mohammadi, H., Ahmad, Z., Mazlan, S. A., Faizal Johari, M. A., Siebert, G., Petru, M. and Rahimian Koloor, S. S., 2023, "Lightweight Glass Fiber-Reinforced Polymer Composite for Automotive Bumper Applications: A Review," *Polymers*, Vol. 15, No. 1, pp. 1-30.
- (9) Tiwari, G., Iqbal, M. A. and Gupta, P. K., 2018, "Energy Absorption Characteristics of Thin Aluminium Plate against Hemispherical Nosed Projectile Impact," *Thin-Walled Structures*, Vol. 126, pp. 246-257.
- (10) Chen, C., Wang, X., Hou, H., Cheng, Y., Zhang, P. and Liu, J., 2020, "Effect of Strength Matching on Failure Characteristics of Polyurea Coated Thin Metal Plates under Localized Air Blast Loading: Experiment and Numerical Analysis," *Thin-Walled Structures*, Vol. 154, Article 106819.
- (11) Faraz, M. R., Ahmadi, H., Liaghat, G., Vahid, S., Razmkhah, O. and Tarafdar, A., 2022, "Energy Absorption Assessment of Bio-Mimicked Hybrid Al/PP Sandwich Tube: Experimental and Numerical Investigation," *Thin-Walled Structures*, Vol. 181, Article 110116.
- (12) Lian, X. G., Lu, L. X. and Pan, L., 2022, "Investigation of Energy Absorption Characteristics of Circular Paper Tubes under Axial Impact Loading," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 165, No. 1800, pp. 104-210.
- (13) Yu, Z., Liu, K., Zhou, X. and Jing, L., 2023, "Low-Velocity Impact Response of Aluminum Alloy Corrugated Sandwich Beams Used for High-Speed Trains," *Thin-Walled Structures*, Vol. 183, pp. 110-375.
- (14) Mei, J., Liu, J., Zhang, M. and Huang, W., 2022, "Experimental and Numerical Study on the Ballistic Impact Resistance of the CFRP Sandwich Panel with the X-Frame Cores," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 232, pp. 107-649.
- (15) Baroutaji, A., Sajjia, M. and Olabi, A. G., 2017, "On the Crashworthiness Performance of Thin-Walled Energy

- Absorbers: Recent Advances and Future Developments,” *Thin-Walled Structures*, Vol. 118, pp. 137~163.
- (16) Prabhakaran, S., Chinnarasu, K. and Kumar, M. S., 2012, “Design and Fabrication of Composite Bumper for Light Passenger Vehicles,” *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)*, Vol. 2, No. 4, pp. 2552~2556.
- (17) Ramakrishna, S. and Hamada, H., 1997, “Energy Absorption Characteristics of Crash Worthy Structural Composite Materials,” *Key Engineering Materials*, Vols. 141~143, pp. 585~622.
- (18) Cheon, S. S., Choi, J. H. and Lee, D. G., 1995, “Development of the Composite Bumper Beam for Passenger Cars,” *Composite Structures*, Vol. 32, No. 1~4, pp. 491~499.
- (19) Hosseinzadeh, R., Shokrieh, M. M. and Lessard, L. B., 2005, “Parametric Study of Automotive Composite Bumper Beams Subjected to Low-Velocity Impacts,” *Composite Structures*, Vol. 68, No. 4, pp. 419~427.
- (20) Davoodi, M. M., Sapuan, S. M., Ahmad, D., Ali, A., Khalina, A. and Jonoobi, M., 2010, “Mechanical Properties of Hybrid Kenaf/Glass Reinforced Epoxy Composite for Passenger Car Bumper Beam,” *Materials and Design*, Vol. 31, No. 10, pp. 4927~4932.
- (21) Davoodi, M. M., Sapuan, S. M., Ahmad, D., Aidy, A., Khalina, A. and Jonoobi, M., 2011, “Concept Selection of Car Bumper Beam with Developed Hybrid Bio-Composite Material,” *Materials and Design*, Vol. 32, No. 10, pp. 4857~4865.
- (22) Kim, D. H., Kim, H. G. and Kim, H. S., 2015, “Design Optimization and Manufacture of Hybrid Glass/Carbon Fiber Reinforced Composite Bumper Beam for Automobile Vehicle,” *Composite Structures*, Vol. 131, pp. 742~752.
- (23) Belingardi, G., Beyene, A. T., Koricho, E. G. and Martorana, B., 2015, “Alternative Lightweight Materials and Component Manufacturing Technologies for Vehicle Frontal Bumper Beam,” *Composite Structures*, Vol. 120, pp. 483~495.
- (24) Liu, Z., Lu, J. and Zhu, P., 2016, “Lightweight Design of Automotive Composite Bumper System Using Modified Particle Swarm Optimizer,” *Composite Structures*, Vol. 140, pp. 630~643.
- (25) Cho, Y. S. and Cheon, S. S., 2018, “Crash Simulation of a Piecewisely-Integrated Composite Bumper Beams,” *International Journal of Mechanical and Production Engineering*, Vol. 6, No. 4, pp. 37~40.
- (26) Ham, S., Ji, S. and Cheon, S. S., 2024, “The Design of a Piecewise-Integrated Composite Bumper Beam with Machine-Learning Algorithms,” *Materials*, Vol. 17, No. 3, pp. 1~18.
- (27) Crandall, S. H., Dahl, N. C., Lardner, T. J. and Sivakumar, M. S., 2012, *An Introduction to the Mechanics of Solids*, McGraw-Hill Education Private Limited, Columbus, USA, pp. 1~586.
- (28) Bai, Y. and Wierzbicki, T., 2008, “A New Model of Metal Plasticity and Fracture with Pressure and Lode Dependence,” *International Journal of Plasticity*, Vol. 24, No. 6, pp. 1071~1096.
- (29) Reichert, R. and Kan, S., 2019, *Structural Countermeasure/Research Program* (<https://doi.org/10.21949/1530165>), United States Department of Transportation, Washington D. C., USA, pp. 1~96.
- (30) Key, S. W. and Hoff, C. C., 1995, “An Improved Constant Membrane and Bending Stress Shell Element for Explicit Transient Dynamics,” *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 124, No. 1-2, pp. 33~47.
- (31) Livermore Software Technology Corporation, 2002, *LS-DYNA Manual* ([https://www.dynasupport.com/manuals/lis-dyna-manuals/lis-dyna\\_manual\\_volume\\_ii\\_r13.pdf](https://www.dynasupport.com/manuals/lis-dyna-manuals/lis-dyna_manual_volume_ii_r13.pdf)), Livermore Software Technology Corporation, Livermore, USA, pp. 1~1993.
- (32) Insurance Institute for Highway Safety, 2010, *Bumper Test and Rating Protocol (Version VIII)* ([https://www.iihs.org/media/07bf4085-8c25-4972-aa56-c06ff19dae05/L5AZKw/Ratings/Protocols/archive/test\\_protocol\\_bumper\\_vVIII\\_0910.pdf](https://www.iihs.org/media/07bf4085-8c25-4972-aa56-c06ff19dae05/L5AZKw/Ratings/Protocols/archive/test_protocol_bumper_vVIII_0910.pdf)), Insurance Institute for Highway Safety, Arlington, USA, pp. 1~23.
- (33) McInnes, L., Healy, J. and Melville, J., 2018, “UMAP: Uniform Manifold Approximation and Projection for Dimension Reduction,” *Journal of Open Source Software*, Vol. 3, No. 29, Article 861.
- (34) Maaten, L. V. and Hinton, G. E., 2008, “Visualizing Data Using t-SNE,” *Journal of Machine Learning Research*, Vol. 9, pp. 2579~2605.
- (35) De Bock, K. W., Coussement, K., Caigny, A. De, Słowiński, R., Baesens, B., Boute, R. N., Choi, T. M., Delen, D., Kraus, M., Lessmann, S., Maldonado, S., Martens, D., Óskarsdóttir, M., Vairetti, C., Verbeke, W. and Weber, R., 2024, “Explainable AI for Operational Research: A Defining Framework, Methods, Applications, and a Research Agenda,” *European Journal of Operational Research*, Vol. 317, No. 2, pp. 249~272.
- (36) Khan, I. K., Daud, H. B., Zainuddin, N. B., Sokkalingam, R., Abdussamad, Museeb, A. and Inayat, A., 2024, “Addressing Limitations of the K-Means Clustering Algorithm: Outliers, Non-Spherical Data, and Optimal Cluster Selection,” *AIMS Mathematics*, Vol. 9, No. 9, pp. 25070~25097.
- (37) Kanagala, H. K. and Jaya Rama Krishnaiah, V. V., 2016, “A Comparative Study of K-Means, DBSCAN and

- OPTICS,” *2016 International Conference on Computer Communication and Informatics (ICCCI)*, Coimbatore, India, pp. 1~6.
- (38) Ankerst, M., Breunig, M. M., Kriegel, H. P. and Sander, J., 1999, “OPTICS: Ordering Points to Identify the Clustering Structure,” *SIGMOD Record (ACM Special Interest Group on Management of Data)*, Vol. 28, No. 2, pp. 49~60.
- (39) Bolandi, H., Li, X., Salem, T., Boddeti, V. N. and Lajnef, N., 2022, “Bridging Finite Element and Deep Learning: High-Resolution Stress Distribution Prediction in Structural Components,” *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, Vol. 16, No. 11, pp. 1365~1377.

## 기계공학 전공 학생을 위한 PBL 기반 교과목의 효과성 검증 연구

유선중\*<sup>†</sup> · 김영흡\* · 김 한\* · 강신길\*

\* 동양미래대학교 기계공학과

### A Study on the Effectiveness of PBL-Based Course for Mechanical Engineering Students

Sun-Joong Ryu\*<sup>†</sup>, Youngheub Kim\*, Haan Kim\* and Shingil Kang\*

\* Dept. of Mechanical Engineering, Dongyang Mirae University

(Received October 10, 2025 ; Revised February 3, 2026 ; Accepted February 5, 2026)

**Key Words:** PBL(문제기반학습법), Automata(오토마타), Pre-Post Survey(사전·사후 설문), Independent Samples t-test(독립표본 t-검정)

**초록:** 본 연구는 전문대학 기계공학 전공 학생을 대상으로 도입된 PBL 기반 교과목의 교육적 효과를 실증적으로 검증하고자 하였다. 2024년과 2025년 2개 연도에 걸쳐 총 248명의 학생을 대상으로 사전·사후 설문을 실시하였으며, 분석 영역은 ‘학습자 문제해결 활동’, ‘학습 성취도’, ‘학습 만족도’로 설정하였다. 연구 결과, ‘학습 성취도’와 ‘학습 만족도’에서 통계적으로 유의미한 향상이 확인되었고, 특히 문제 해결력, 협업 및 소통 능력 등 ‘기능’ 요소의 개선이 두드러졌다. 오토마타 제작을 중심으로 한 PBL 수업이 학생들의 학습 흥미와 몰입도를 제고하고 전공지식의 실제적 적용을 촉진한 것을 알 수 있었다. 연구는 PBL 기반 교과목이 기계공학 교육의 핵심 역량을 강화하는 효과적 교육 방법임을 실증하였으며, 향후 공학교육에서 PBL 확산을 위한 근거를 제공하는 것에 의의가 있다.

**Abstract:** This study aimed to empirically examine the educational effects of a PBL based course implemented for students majoring in mechanical engineering at a college. The research was conducted over two years, 2024 and 2025, with a total of 248 students, using pre and post course surveys. The analysis focused on three areas: ‘learners problem-solving activities’, ‘learning achievement’, and ‘learning satisfaction’. The results indicated statistically significant improvements in both ‘learning achievement’ and ‘learning satisfaction’, with particularly notable enhancements in functional aspects such as problem-solving skills, collaboration, and communication abilities. Moreover, PBL classes centered on automata construction increased students’ interest and engagement in learning and promoted the practical application of major-related knowledge. This study demonstrates that PBL based courses are an effective educational method for enhancing core competencies in mechanical engineering education and provides empirical evidence supporting the expansion of PBL in future engineering education.

## 1. 서 론

현대 공학 교육은 지식의 단순한 암기를 넘어, 창의적 문제 해결 능력과 실무 적응력을 갖춘 인재를 양성하는 데 초점을 맞추고 있다. 그러나 기존의 강의식 수업만으로는 이론과 실제의 간극을 좁히고 학생들의 협업 및 자기 주도 학습 역량을 충분히 함양하는 데 한계가 있다. 이러한 배경에서 문제기반학

<sup>†</sup> Corresponding Author, [sjryu70@dongyang.ac.kr](mailto:sjryu70@dongyang.ac.kr)

습법(PBL: problem based learning)은 학습자에게 실제적이고 복잡한 문제 상황을 제시하여 능동적인 학습 참여와 심층적인 지식 구성을 유도하는 가장 효과적인 수업 방법으로 주목받고 있다. PBL은 공학 분야에서 요구되는 비판적 사고, 소통, 협업이라는 핵심 역량을 강화하는 데 적합한 학습 방법론으로 인식되고 있다.<sup>(1)</sup>

대학 교육에서 PBL 수업의 효과는 다양한 학과의 다양한 수업에서 반복적으로 확인되고 있다. Hong 등은 국내학술지 및 석박사논문을 이용한 메타분석을 통하여 국내 대학의 다양한 수업에서 PBL의 효과를 확인하였다.<sup>(2,3)</sup> 공학 분야에서 최근에 수행된 PBL의 효과에 대한 연구는 다음과 같다. Lee 등은 생명화학공학 분야에서 PBL을 적용한 수업을 설계 및 운영하였으며 학생 대상으로 사전·사후 설문을 실시하여 자기주도적학습역량 및 문제해결능력의 의미있는 향상을 확인하였다.<sup>(4)</sup> Park 등은 기계공학 분야에서 플립러닝을 적용한 비대면 수업의 PBL 수업 효과를 사후 설문을 통하여 확인하였다.<sup>(5)</sup> Lee는 전기공학 분야에서 연도별로 캡스톤디자인수업 이수 여부가 서로 다른 대조군과 실험군 학생 집단을 이용하여 PBL 수업의 효과를 파악하였는데, 특히 자기주도학습역량의 유의미한 향상을 확인하였다.<sup>(6)</sup> Ko는 SW 분야에서 프로그래밍 수업을 PBL을 적용한 반과 적용하지 않은 반으로 분리 운영하는 방법으로 PBL 수업의 효과를 파악하였는데, 학업성취도와 컴퓨팅사고력에서 향상이 있었음을 확인하였다.<sup>(7)</sup>

이상과 같은 연구의 연장선에서 본 연구는 전문대학 기계공학 전공 학생들을 위해 교육과정에 새롭게 도입된 PBL 기반 프로젝트 교과목의 교육적 효과성을 실증적으로 검증하는 것을 목표로 한다. 연구자 소속 대학의 기계공학과는 이론 기반 선수 과목의 학습 내용을 종합적으로 적용할 수 있도록 오토마타 제작이라는 구체적이면서도 창의적인 설계 주제를 중심으로 PBL 교과목을 구성하여 학생들의 학습 참여도와 몰입도를 극대화하고자 하였다. 오토마타 제작은 학생들이 기구학, 도면해독 및 CAD 지식을 활용하여 1 자유도 링크기구로 복잡한 움직임을 개념 설계하고 최종 산출물까지 제작하는 일련의 과정을 포함하며, 이는 기계공학 설계 능력을 통합적으로 향상시키는 데 기여할 것으로 기대한다.<sup>(8)</sup>

본 연구는 2024년 및 2025년 2개 연도에 걸쳐 해당 교과목에 참여한 총 248명의 학생 모집단을 대상으로 진행되었다. 관련된 선행 연구를 기반으로 한 설문 도구를 활용하여, 학생들의 수업 사전·사후 변화를 ‘학습자 문제 해결 활동’, ‘학습 성취도’, ‘학습 만족도’의 세 가지 핵심 영역에서 각각적으로 측정하였다. 궁극적으로 본 연구는 새롭게 도입된 PBL 기반 교과목이 기계공학 전공 학생들의 ‘학습 성취도’ 및 ‘학습 만족도’에 미치는 긍정적 효과를 정량적으로 제시함으로써, 향후 공학교육에서 PBL 방법론의 확산을 위한 실증적 근거와 시사점을 제공하고자 한다.

## 2. 기계공학의 PBL 기반 교과목

연구자 소속 대학의 기계공학과에서는 교육과정 전반에 대한 학습 내용을 종합적으로 적용하는 성격의 프로젝트 교과목을 교육과정에 새로이 도입하였다. 프로젝트 교과목은 기구학 도면해독 및 CAD와 같은 교육과정의 선수과목을 이수한 학생들이 학습 내용을 충분히 활용하여 제시된 문제를 해결하도록 하는 PBL 방식으로 구성되었다.<sup>(9)</sup>

수업의 참여도와 몰입도를 높이기 위해서는 PBL 주제의 선정이 매우 중요하다. 프로젝트에서는 ‘오토마타(automata)’를 주제로 선정하였다. 오토마타는 일종의 ‘무동력 기계장치’로서 그 역사는 고대 그리스까지 거슬러 올라가는데 크테시비우스(Ctesibius)의 자동물시계 및 헤론(Heron)의 공 등이 알려져 있다. 중세에는 인간 행동을 모사하는 다양한 오토마타가 제작되었으며 이는 시계 제작 산업을 거쳐 근대의 다양한 동력 기계 장치의 개발로 연결되기도 하였다. 현대의 오토마타는 취미 또는 예술 영역에서 계속되고 있으며 키네틱아트(kinetic art)와도 깊은 관계를 맺고 있다.<sup>(10,11)</sup>

오토마타는 주제와 구현 방법에 따라 난이도와 복잡성이 매우 다양하나, 전문대학의 기계공학 교육과정의 수준 및 학생의 흥미를 고려하여 사람, 동물, 자연 및 일상생활에서 쉽게 관찰할 수 있는 단순하면서도 구체적인 움직임을 PBL 주제로 제시하였다. 수업에 참여하는 학생들은 제시된 주제를 1 자유도 링크기구(linkage)로 개념설계하고 이를 기본설계 및 상세설계 단계를 거쳐 최종 작품까지 제작하게 된다.

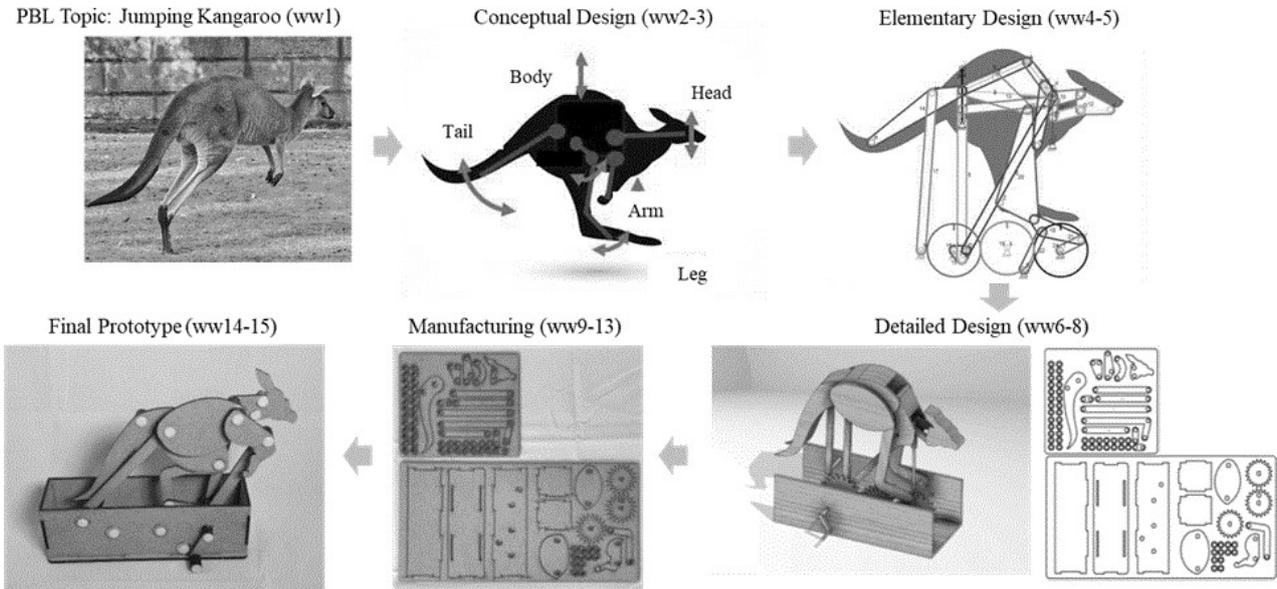
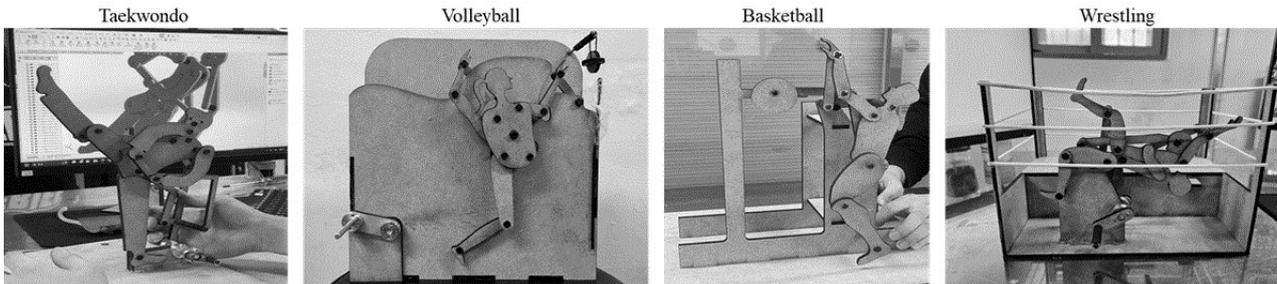
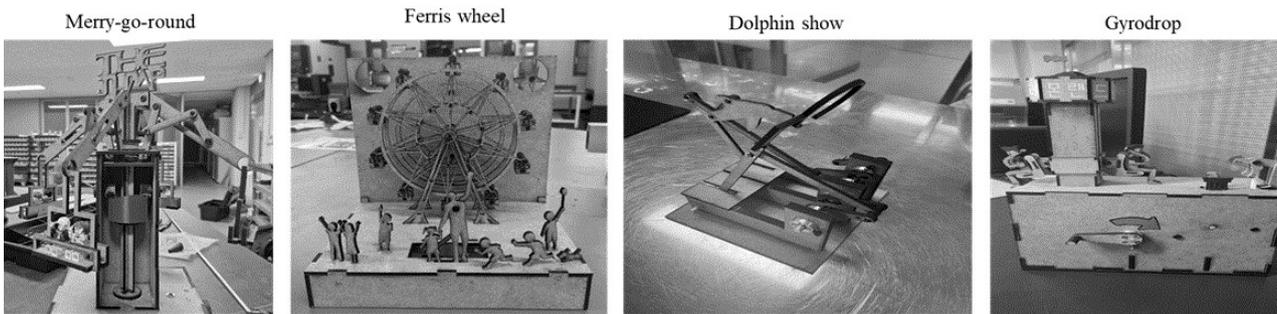


Fig. 1 Example of PBL theme and project process (jumping kangaroo)



(a) 2024 PBL theme : athletics



(b) 2025 PBL theme : amusement park

Fig. 2 PBL theme by year and project works

Fig. 1은 ‘뛰는 캥거루’가 PBL 주제로 제시되는 경우 교과목에서 수행되는 15주 동안의 프로젝트 단계를 예로 든 것이다.

PBL 교과목의 효과성 연구는 2024년 및 2025년의 2개 연도에 걸쳐서 진행되었는데 각 연도별로 오토마타의 구체적 주제에는 변화를 주었다. Fig. 2(a)와 (b)에 각각 운동경기(athletics) 및 놀이공원(amusement park)을 주제로 하여 진행된 프로젝트의 최종 결과물 몇가지를 보여주고 있다. 제시된 주제는 포괄적인 것이므로 학생들은 팀별로 구체적인 automata의 종류를 자율적으로 선택하여 프로젝트를 수행하였다. 운동경기라는 PBL 주제가 주어진 2024년 수업의 경우 태권도, 배구 등 다양한 운동경기 동작이 그리고

Table 1 Subject of study

Year	No. of students enrolled in the course	No. of teams	No. of courses	No. of professors
2024	121	31	4	3
2025	127	32	3	3

2025년 경우는 놀이공원을 주제로 회전그네, 대관람차 등의 기계 장치가 1 자유도 링크기구로 설계 및 제작되었다. 수업은 Fig. 1의 단계별로 진행되었으며 최종 15주차에는 전 학년의 작품을 대상으로 심사하여 우수 작품을 시상하기도 하였다.

### 3. 효과성 검증 방법

#### 3.1 연구 대상

연구자가 소속된 대학 기계공학과와 PBL 교과목은 2년 교육과정에서 2학년 1학기에 ‘창의공학프로젝트’라는 명칭으로 운영되고 있다. PBL 교과목은 2023년에 교육과정에 새롭게 도입되었으며 2025년까지 총 3개 연도 운영되었다. 교과목의 효과성에 대한 검증 연구는 수업 운영이 안정화된 이후인 2024년 및 2025년에 참여한 학생들을 진행되었다. PBL 교과목은 기계공학과 교육과정에서 필수과목으로 지정되어 있으므로 2학년의 모든 학생이 참여하고 있다.

Table 1과 같이 2개 연도에 걸쳐 총 248명의 학생 모집단을 대상으로 효과성 검증 연구가 진행되었다. 수업은 수강 인원을 감안하여 연도별로 3명의 교수가 3 ~ 4개 강좌로 나누어 운영되었으며 4명 내외의 학생이 팀을 이루어 PBL 수업에 참여하였다. 팀은 강좌 학생들이 자율로 구성하였다. PBL 교과목의 효과성 검증을 위한 설문에는 모집단 학생 중 다수가 참여하였다.

#### 3.2 측정 도구

효과성 검증을 위한 측정 도구로서의 설문은 관련된 선행 연구를 활용하였다. Lee 등<sup>9)</sup>은 PBL 수업의 효과를 측정하기 위한 설문 구조 및 항목을 개발하였다. 개발된 설문은 각각 ‘수업설계 및 운영’, ‘학습자 문제 해결 활동’, ‘학습성취도’, ‘학습만족도’의 4개 영역으로 구성되어 있다. 본 연구에서는 4개 영역 중 교수자 측면의 PBL 수업 설계 및 운영의 효과를 측정하는 ‘수업설계 및 운영 영역’을 제외하고 학생 본인의 수업 참여 활동에 대한 효과를 측정하는 나머지 3개 영역의 설문을 활용하여 효과성을 측정하고자 하였다.

Table 2는 연구에 사용된 설문의 구조 및 내용이다. ‘학습자 문제 해결 활동’ 영역은 학습자 활동 요소에 초점을 맞추어 ‘팀 상호작용’, ‘개인의 팀 기여’, ‘자기주도 학습노력’에 대한 자기 인식 정도를 측정한다. 이는 자기주도 학습과 협력 학습이라는 PBL 수업의 순환적 문제 해결 과정과 수업 효과와의 상관관계를 탐색해 보고자 한 것으로 총 10개의 설문(Q1 ~ Q10)으로 구성되어 있다. 다음으로 ‘학습성취도’ 영역에서는 ‘지식’, ‘기능’, ‘태도’ 측면에서의 PBL 수업 효과를 결과적 측면에서 측정한다. 이를 통해 학습자의 인지적, 행동적, 정의적 변화라는 다각적 측면의 PBL 수업 효과를 살펴볼 수 있으며 설문은 총 11개(Q11 ~ Q21)로 구성된다. 마지막으로 ‘학습만족도’ 영역에서는 PBL 학습만족도 수준 확인을 통해 과정적 수업 목표의 획득 수준을 가늠할 수 있으며 총 7개 설문(Q22 ~ Q28)이 제시되어 있다.

#### 3.3 측정 방법

수업의 효과성을 측정하기 위하여 Table 2의 설문을 PBL 수업 1주차 및 15주차에 Table 1의 모집단을 대상으로 2회 조사를 실시하였다. 설문은 개인이 특정되는 것을 꺼려하는 학생들의 특성을 반영하여 익명으로 진행되었다. 설문은 Google form으로 조사되었으며, 학생들이 수업 중에 스마트폰을 이용하여 온라인으로 응답하도록 지도하였다. 설문 각 항목의 응답은 1점(전혀 아니다)부터 5점(매우 그렇다)까지 점수 척도로 되어 있어 각 항목에 대해서 1주차 및 15주차의 점수를 비교할 수 있도록 했다. 이와 같은 소위 사전·사후의 비교를 통하여 PBL 수업의 효과성을 검증하고자 하였다.

**Table 2** Measurement tools: survey structure and items

Domain	Element	Item	Survey question
Learner problem-solving activities	Team interaction	Q1	I can efficiently define the roles and responsibilities of team members during team activities.
		Q2	I can build trust and maintain close relationships with team members during team activities.
		Q3	I can sufficiently exchange opinions with other team members during team activities.
		Q4	I can cooperate with and help other team members so that everyone can perform their roles effectively.
	Individual contribution	Q5	I participate in activities by fulfilling my assigned roles and responsibilities.
		Q6	I actively propose ideas and opinions to solve problems during team activities.
		Q7	I listen to and am open to accepting the opinions of other team members.
	Self-directed learning	Q8	I strive to search for diverse materials and resources in my major courses.
		Q9	I strive to understand core theories and key concepts in my major courses.
		Q10	I can relate the content learned in major courses to real-world situations.
Learning achievement	Knowledge	Q11	My understanding of how course content is applied in the industry has improved.
		Q12	The courses helped me acquire knowledge in specific industrial fields.
		Q13	My understanding of actual industrial site conditions has improved.
	Skills	Q14	My problem-solving skills have improved through these courses.
		Q15	My ability to collaborate with others has improved through these courses.
		Q16	My communication skills with others have improved through these courses.
		Q17	My self-reflection skills for problem-solving have improved.
	Attitude	Q18	I have developed a desire to gain a deeper understanding of my major.
		Q19	My interest in the learning process itself has increased.
		Q20	I have gained confidence in problem-solving through these courses.
		Q21	The courses were helpful for career exploration and setting future goals.
Learning satisfaction	Experience satisfaction	Q22	I have had a satisfying experience solving problems in my major courses.
		Q23	I have had a satisfying experience exploring and solving problems independently.
		Q24	I have had a satisfying experience encountering diverse perspectives different from my own.
		Q25	I have had a satisfying experience dealing with authentic, real-world problems.
	Overall satisfaction	Q26	I am willing to take more diverse and in-depth major courses in the future.
		Q27	I would recommend the Mechanical Engineering major courses to other students.
		Q28	I am generally satisfied with the major courses provided by the department.

**Table 3** Number of students who participated in the survey

Year	No. of students enrolled in the course	Total no. of respondents	
		Pre (ww1)	Post (ww15)
2024	121	121	113
2025	127	84	113

수업의 효과성을 측정하기 위해 사전·사후 설문을 실시하는 경우 설문 결과의 유의성을 통계적으로 검정하기 위해 일반적으로 사용되는 방법은 쌍체 t-검정(paired t-test)이다. 쌍체 t-검정은 설문의 결과가 학생 별로 짝지어져 있는 경우 사용할 수 있는 방법이다. 그러나 본 연구에서 설문은 익명으로 실시 되었으며 Table 3과 같이 사전·사후 응답에 참여한 학생의 수도 서로 다르다. 특히 2025년 설문의 경우 이와 같은 차이가 컸는데 이는 3명의 교수가 3개 강좌를 진행하면서 각각 설문 유도 방법에 차이가 있었기 때문이다. 이와 같은 현실을 반영하여 쌍체 t-검정 대신 독립표본 t-검정(Welch's test) 방법을 이용하여 유의성을 검정하였다. 독립표본 t-검정을 이용함으로써 설문 결과의 짝지워짐 및 등분산 여부에 관계 없이 설문 결과의 유의성을 통계적으로 검정할 수 있다.

## 4. 효과성 검증

### 4.1 유의성 검정 결과

사전·사후 설문 결과에 대한 독립표본 t-검정의 결과가 Table 4에 수업 연도별 그리고 설문 항목별로

Table 4 Result of significance test (\* : p-value &gt; 0.05)

Domain	Element	Item	2024		2025	
			t-value	p-value	t-value	p-value
Learner problem-solving activities	Team interaction	Q1	-3.53	0.00	-4.07	0.00
		Q2	-2.32	0.02	-1.27	*0.20
		Q3	-2.40	0.02	-2.32	0.02
		Q4	-1.34	*0.18	-1.10	*0.27
	Individual contribution	Q5	-1.36	*0.18	-0.99	*0.32
		Q6	-2.85	0.00	-2.98	0.00
		Q7	-0.94	*0.35	-1.00	*0.32
	Self-directed learning	Q8	-2.17	0.03	-3.00	0.00
		Q9	-1.84	*0.07	-1.91	*0.06
		Q10	-2.90	0.00	-3.77	0.00
Learning achievement	Knowledge	Q11	-4.04	0.00	-2.90	0.00
		Q12	-2.11	0.04	-3.13	0.00
		Q13	-3.13	0.00	-3.51	0.00
	Skills	Q14	-4.13	0.00	-3.93	0.00
		Q15	-4.39	0.00	-3.33	0.00
		Q16	-3.69	0.00	-3.32	0.00
		Q17	-4.02	0.00	-4.09	0.00
	Attitude	Q18	-1.60	*0.11	-3.81	0.00
		Q19	-1.94	*0.05	-4.34	0.00
		Q20	-3.51	0.00	-4.19	0.00
Q21		-2.25	0.03	-2.88	0.00	
Learning satisfaction	Experience satisfaction	Q22	-3.42	0.00	-3.44	0.00
		Q23	-3.61	0.00	-3.75	0.00
		Q24	-3.15	0.00	-4.10	0.00
		Q25	-3.90	0.00	-4.04	0.00
	Overall satisfaction	Q26	-2.61	0.01	-3.88	0.00
		Q27	-3.69	0.00	-2.33	0.02
		Q28	-2.84	0.00	-2.29	0.02

제시되어 있다. 표에서 p-value는 유의확률로서 이 값이 0.05보다 작다면 사전 후 설문 of 평균점수 차이가 통계적으로 유의미함을 의미한다. 한편 t-value의 절대값이 클수록 두 번째 설문의 평균점수 차이가 우연에 의한 변동 즉 분산에 비해 크다는 의미로 해석된다. 반대로 그 값이 작다면 평균점수의 차이는 우연에 의한 변동에 기인한 것으로 해석될 수 있다. 여기서 평균점수라 함은 설문에 참여한 학생들의 설문 항목별 점수의 평균을 의미한다.

p-value를 보면 2024년 및 2025년의 대부분 설문 문항에서 사전·사후 유의미한 평균점수의 차이가 있었던 것으로 판단할 수 있다. 그러나 ‘학습자 문제 해결 활동’ 영역 경우 여러 문항에서는 p-value가 0.05보다 큰 것을 확인할 수 있다. 11문항 중 각각 2024년 경우 4개 그리고 2025년 경우 5개에서 사전·사후 평균점수가 유의미한 차이를 보이지 않는다. 그에 비하여 ‘학습 성취도’ 및 ‘학습 만족도’ 영역에서는 대부분 문항에서 유의미한 평균점수 차이가 확인되었다.

t-value의 절대값을 기준으로 보면 2024년 및 2025년 수업 공통으로 Q4, Q5, Q7, Q9 문항에서 상대적으로 작은 값을 보여주고 있다. 이는 설문 평균점수의 차이가 우연에 의한 가능성이 다른 문항에 비해서 높은 것으로 해석할 수 있는데, 이 문항 또한 ‘학습자 문제해결 활동’ 영역에 포함되어 있음이 확인된다.

#### 4.2 효과성에 대한 해석

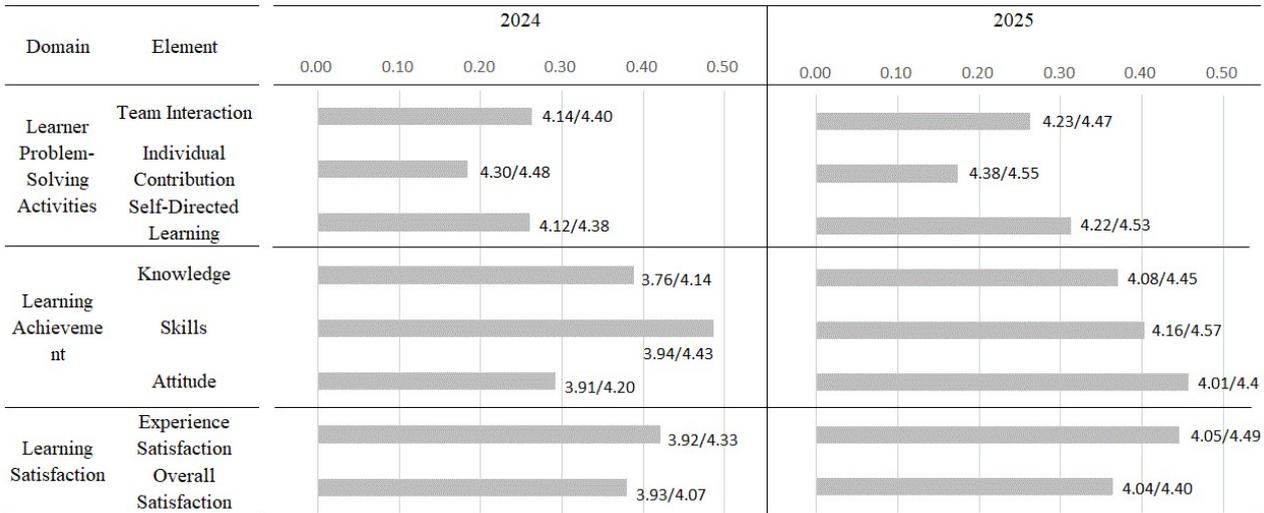


Fig. 3 Difference of average scores (post minus pre scores)

이제 설문지의 각 항목별로 사전·사후의 평균점수(average score) 차이를 기준으로 PBL 교과목의 효과성에 대한 해석을 해보고자 한다. Fig. 3은 항목별 평균점수 차이를 다시 영역별, 요소별로 평균하여 막대 그래프로 나타낸 것인데, 이는 효과성에 대한 해석을 용이하게 하고자 한 것이다. 막대그래프의 크기는 5점 척도 설문지의 사전·사후 평균점수 차이값이다. 또한 막대그래프 오른쪽에는 사전·사후 각각의 평균점수도 표시해 두었다. 해석에는 객관적 지표인 점수 차이뿐만 아니라 수업에 참여한 교수진의 주관적 의견도 반영되어 있음을 밝혀둔다.

영역별로 보면 ‘학습 성취도’ 및 ‘학습 만족도’에서 수업 전후로 0.39 ~ 0.41점이 향상되었는데 이는 5점 척도 기준으로 7.8 ~ 8.2% 정도의 향상 효과이다. 그러나 ‘학습자 문제해결 활동’ 영역에서 향상 정도는 0.24점 정도로 상대적으로 작은 값을 보여주었으며 더욱이 앞에서 설명한 것처럼 이 영역의 설문 중 상당수에서 향상 여부에 대한 통계적인 유의성을 확인할 수 없다. 따라서 해당 영역에서는 수업 전후 향상이 있었던 것으로 해석할 수는 없을 것이다. 한편 영역별로 이상과 같은 효과성의 추세는 2024, 2025년에 대해서 연도별로는 큰 차이가 없음도 알 수 있다.

학생들이 느끼는 수업의 결과적인 측면인 ‘학습 성취도’ 영역의 세부 요소를 보면 ‘기능’ 요소에서 가장 큰 효과성이 있었다. 설문 항목의 내용을 고려해 보면 PBL 수업에 필요한 문제해결 능력, 협업 능력, 소통 능력 그리고 자기성찰 능력 등이 향상된 것으로 학생들이 인식하였음을 알 수 있다. ‘지식’ 요소 또한 향상되었는데 산업에서의 활용, 산업 지식 그리고 산업 현장 이해 등이 향상되었다고 할 수 있다. 전공에 대한 흥미 및 진로 설정 등과 관련된 ‘태도’ 요소에 대해서는 연도별로 향상도에 큰 차이가 존재한다. 이는 2025년 경우 2023년 및 2024년의 경험을 바탕으로 교수가 수업 운영 방법 및 학생 상호작용의 질을 개선한 결과라고 추측된다. 구체적으로는 3명의 교수가 매년 강좌 운영 후 각자의 수업 경험을 공유하고 상호 합의한 개선 방안을 다음년도 수업에 적용해 왔다.

‘학습 만족도’ 영역에서는 ‘학습경험 만족도’ 요소에서 큰 향상이 있음을 알 수 있는데 이는 다른 전공 수업에 비해서 PBL 수업에서 학생들이 만족도를 크게 느꼈음을 나타낸다. 또한 ‘전반적 만족도’ 요소의 향상은 이번 수업을 통해 학생들의 PBL 방식 수업에 대한 의식이 긍정적인 방향으로 변화하였음을 보여주고 있다.

의미 있는 향상을 보여주지 못한 ‘학습자 문제해결 활동’ 영역에 대해서는 그 원인에 대한 추가적인 언급이 필요할 것 같다. 이 영역의 사전 설문지의 평균점수를 보면 요소별로 4.14 ~ 4.28점으로 타 영역에 비해서 상당히 높은 것을 알 수 있다. 이는 PBL 수업 이전에 이미 학생들이 이 영역에 대해서는 자신이 비교적 높은 능력을 가지고 있다고 생각하고 있음을 보여준다. 구체적으로는 팀 구성을 학생 자율로 하였기 때문에 팀원 간의 심리적 안전감과 친밀도를 높여 '팀 상호작용' 및 '개인의 팀 기여' 요소의 사전

점수를 높게 형성하는 원인이 될 수 있을 것으로 추측할 수도 있다. 이러한 인식은 PBL 수업을 통한 추가적인 향상도를 느끼게 하기에는 어려운 원인으로 작용한 것으로 해석할 수 있다. 한편 PBL 수업에서 팀 활동이 핵심임을 고려한다면 이를 향상시킬 수 있는 수업 진행 및 교수 방법의 문제점이나 한계를 또 다른 원인으로 추측해 볼 수 있다. 그러나 이 역시 본 연구의 범위를 벗어나는 것으로 더 이상의 추정보다는 추가적인 연구가 필요한 사항으로 언급해 두는 것이 좋을 것이다.

## 5. 결 론

본 연구는 전문대학 기계공학과에 도입된 PBL 기반 프로젝트 교과목의 교육적 효과성을 2024년과 2025년, 총 248명의 학생 모집단을 대상으로 실증적으로 검증하였다. 선수 과목 지식을 종합적으로 활용하는 오토마타 제작을 PBL 주제로 선정하고, 학생 의식의 학습 전후의 변화를 ‘학습자 문제 해결 활동’, ‘학습 성취도’, ‘학습 만족도’ 세 영역에서 각각도로 측정하였다. 연구 결과는 PBL 방법론이 공학교육에서 지식의 단순 암기를 넘어, 학습자 중심의 능동적 역량 강화에 의미있는 수준으로 기여했음을 정량적으로 보여주며, 향후 공학교육의 발전을 위한 실증적 근거와 시사점을 제공한다.

연구의 주요 결과는 다음과 같다. 첫째, PBL 교과목은 학생들의 ‘학습 성취도’와 ‘학습 만족도’ 영역에서 통계적으로 유의미한 평균점수 향상을 이끌어냈다. 특히, 학습 성취도의 세부 요소 중 ‘기능’ 요소에서 가장 큰 향상 효과가 확인되었다. 이는 오토마타 제작이라는 실제적 프로젝트 수행 과정을 통해 문제해결 능력, 협업 능력, 소통 능력, 자기성찰 능력 등 기계공학 실무에 필수적인 핵심 역량을 학생들이 스스로 향상시켰음을 의미한다. 이 결과는 PBL이 공학 교육의 본질인 이론과 실제 간의 간극을 좁히고, 산업 현장이 요구하는 실무 적합성을 효과적으로 높일 수 있는 학습 방법론임을 입증한다. 둘째, ‘학습 만족도’ 영역에서도 유의미한 향상이 나타났으며, 이는 특히 ‘학습 경험 만족도’ 요소에서 두드러졌다. 학생들은 스스로 탐구하고 실제적인 문제를 해결해 보는 경험을 통해 전반적인 수업 만족도 역시 높아졌음을 보고했는데, 이는 전공에 대한 긍정적인 태도 변화에 기여하는 효과가 발생했음을 시사한다.

반면, ‘학습자 문제해결 활동’ 영역에서는 다른 영역에 비해 상대적으로 낮은 향상 폭을 보였으며, 여러 세부 문항에서 통계적 유의성이 확인되지 않았다. 이는 사전 설문에서 해당 영역의 평균점수가 이미 높게 형성되어, 학생들이 PBL 수업 이전부터 자신들의 팀 기여도나 자기주도 학습 노력에 대해 과대평가하는 경향이 있었을 가능성을 시사한다. 또는 학생들이 PBL 수업의 실제적인 활동을 통해 자신의 능력 향상을 인지적으로 충분히 인식하지 못했거나, 설문 도구가 미묘한 변화를 포착하지 못했을 수 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해 후속 연구에서는 다음과 같은 방향을 제안한다. 첫째, 자기주도 학습 역량과 팀 상호작용 향상도를 정밀하게 측정하기 위해 관찰 평가나 동료 평가 등의 정성적 방법을 병행하여 객관적 데이터를 확보하는 것이 필요하다. 둘째, 팀 활동의 효율성을 극대화하기 위한 팀 빌딩 및 역할 분담에 대한 명확한 가이드라인 제시 등의 교수법 개선이 필요하며, 이에 대한 효과성은 추가적으로 검증할 필요가 있다.

마지막으로 연구 방법의 한계에 및 개선 방안에 대해서 언급하고자 한다. 설문이 익명으로 실시되어 사전·사후 응답자 수가 동일하지 않았으며, 분석 지표 또한 학습자의 자기 인식에 기반한 정성적 평가라는 제약이 있었다. 그럼에도 불구하고 동일 교과목을 2개 연도에 걸쳐 반복 운영하고, 비교적 큰 모집단을 대상으로 분석을 수행함으로써 교육적 경향성을 파악하고자 하였다. 향후 연구에서는 프로젝트 결과물 평가 점수, 수행 과제 성취도 같은 정량적 지표를 병행함으로써 PBL 수업 효과에 대한 보다 다각적이고 객관적인 검증이 가능할 것으로 기대한다.

## 참고문헌 (References)

- (1) Savery, J. R. and Duffy, T. M., 1996, “Problem Based Learning: An Instructional Model and its Constructivist Framework,” *Educational Technology*, Vol. 35, No. 5, pp. 31~38.
- (2) Hong, K. C., 2008, “A Meta-Analysis on the Effects of Problem-Based Learning,” *The Journal of Educational*

- Studies*, Vol. 39, No. 3, pp. 79~110.
- (3) Park, I. S., 2019, "The Effect of Problem-based Learning Strategies (PBL) on Problem Solving Skill: A Meta-Analysis," *Journal of the Korea Convergence Society*, Vol. 10, No. 10, pp. 197~205.
  - (4) Lee, H., 2025, "Design and Effectiveness Analysis of Problem-Based Learning (PBL) in a Cell Biology Course," *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol. 26, No. 8, pp. 295~301.
  - (5) Park, H. H. and Zhang, S. U., 2022, "Study of Flipped Learning-based PBL Teaching in 3D CAD Class," *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, Vol. 26, No. 5, pp. 779~785.
  - (6) Lee, K. H., 2024, "A Study on Exploring the Educational Outcomes and Value of Capstone Design Classes Experienced by Graduates of the Electrical Department of a Junior College," *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol. 25, No. 8, pp. 158~164.
  - (7) Ko, K., 2019, "A Study on the Effectiveness of EPL Utilizing Programming Education based on Problem Based Learning (PBL) for Non-SW Major," *Journal of Information Security*, Vol. 19, No. 2, pp. 105~111.
  - (8) Kim, Y., Ryu, S. J., Kim, H. and Kang, S., 2023, "Design Project for Link Mechanism on the Subject of Automata," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. C*, Vol. 11, No. 1, pp. 47~54.
  - (9) Lee, H., Park, H. and Yang, J., 2023, "Development and Validation of Measuring Problem-Based Learning Effectiveness," *Journal of Educational Technology*, Vol 39, No 1, pp. 35~63.
  - (10) Park, H. J., 2016, *The Story of Automata*, Yangcheol Book, Seoul, Republic of Korea, pp. 21~27.
  - (11) Peppe, R., 2020, *Automata and Mechanical Toys*, The Crowood Press, Marlborough, UK, pp. 29~48.



## 전기식 연속 강판 소둔로의 예측 진단 및 운전 효율화를 위한 실시간 2차원 온도장 재구성 소프트웨어 개발

최종원\* · 문준일\* · 최진현\*,\*\* · 이후경\*,\*\*\*†

\* 한국에너지기술연구원 에너지효율연구본부, \*\* 고려대학교 기계공학과,

\*\*\* 과학기술연합대학원대학교 에너지공학과

### Development of a Real-Time 2D Temperature-Field Reconstruction Software for Predictive Diagnostics and Operational Efficiency Improvement in an Electrified Continuous Steel-Strip Annealing Furnace

Jongwon Choi\*, Junil Mun\*, Jinheon Choi\*\*, and Hookyung Lee\*,\*\*\*†

\* Energy Efficiency Research Division, Korea Institute of Energy Research (KIER),

\*\* Department of Mechanical Engineering, Korea University,

\*\*\* Department of Energy Engineering, University of Science and Technology (UST)

(Received December 28, 2025 ; Revised January 7, 2026 ; Accepted January 7, 2026)

**Key Words:** Electrified Continuous Annealing Furnace(전기식 연속 소둔로), Multi-Point Thermocouple Data(다점 열전대 데이터), 2D Temperature-Field Reconstruction(2차원 온도장 재구성), Inverse Distance Weigting(역거리 가중 보간), Real-Time Monitoring(실시간 모니터링), Anomaly Diagnosis(이상진단)

**초록:** 본 연구에서는 전기식 연속 강판 소둔로에서 PLC로 수집되는 다점 열전대 데이터를 활용하여 로 내부 온도 분포를 2차원 온도장으로 실시간 재구성 및 시각화하는 모니터링 소프트웨어를 개발하였다. 불규칙하게 배치된 제한된 수의 센서 배치 환경을 고려해 역거리 가중 보간법을 적용하였으며, 데이터 누락 및 노이즈에 대한 전처리 기능으로 신뢰성을 확보하였다. 이력 재생 및 편열지수 등 정량 지표를 구현하여 모니터링의 효율성을 높였으며, 현장 조업 데이터 기반 정상 상태와 과도 상태, 이상상황 검증을 통해 운전자의 직관적 상황 인지와 조기 대응 가능성을 확인하였다. 개발된 소프트웨어는 향후 지능형 자동 제어 및 고장 예지 시스템 구축을 위한 기반 기술로 활용될 것이다.

**Abstract:** This study develops a real-time monitoring software that reconstructs and visualizes a two-dimensional temperature field inside an electrified continuous steel-strip annealing furnace using multi-point thermocouple data acquired from a PLC. To infer a continuous field from sparse and irregularly placed sensors, inverse distance weighting (IDW) interpolation is adopted along with robust preprocessing for noise and missing data. The tool supports adjustable grid resolution, time-history replay, zone-wise summaries, and quantitative thermal non-uniformity indices. Validation with industrial operating data demonstrates stable field rendering in steady operation, meaningful spatio-temporal trends under transient setpoint changes and cold strip loading, and clear signatures of abnormal events such as strip breakage, indicating its utility for intuitive situational awareness and early fault response.

## 1. 서론

철강 제조 산업은 연간 전 세계 에너지 수요의 5% 이상을 차지하는 에너지 다소비 산업이다.<sup>(1)</sup> 철강 공정 중 연속식 소둔로(continuous annealing furnace)는 목적 온도대로 피열물을 가열 및 열처리하여 목표

† Corresponding Author, [hk.lee@kier.re.kr](mailto:hk.lee@kier.re.kr)

한 소재 조직 특성을 얻기 위한 필수 설비로써 천연가스 등 가장 많은 화석연료가 사용된다.<sup>(2)</sup> 철강 산업에서 배출되는 다량의 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)와 질소산화물(NO<sub>x</sub>) 등 유해물질 저감을 위해 국제에너지기구(IEA)는 2050년까지 공정 전기화를 통한 전세계 이산화탄소 배출량의 20% 감축을 목표로 삼았다. 또한 전기화 방법이 탄소중립 시나리오 달성을 위한 강력한 수단임을 제시하였다.<sup>(3)</sup> 특히 근래 높아지는 도금 강판 수요에 의해 연속 용융아연도금공정(CGL: continuous galvanizing line)이 빠르게 확산되고 있고, 그에 따라 CGL 내 연속 강판 소둔로의 전기화 전환은 탄소배출 저감을 위한 과급 효과가 클 것으로 예상된다. 고품질 강판 생산을 위한 핵심 설비인 연속식 강판 소둔로는 전기식 가열 전환 시 분위기 온도 균일화 및 온도 제어가 용이해지는 장점이 있지만, 복사 열전달이 지배적인 전기 발열체의 특성을 고려하여 품질 균일성과 효율 제고를 위한 최적화된 운전 기술 개발이 여전히 요구된다.

연속 강판 소둔 공정에서 소재의 기계적 물성(인장강도, 연신율 등)과 표면 품질(산화, 아연 도금 밀착성)은 소둔로 내부의 온도 균일도에 의해 결정적인 영향을 받는다. 연속 강판 소둔로 내부는 일반적으로 1,200°C 수준의 분위기 온도가 형성되고, 이를 위해 전기식 소둔로에서는 발열체 표면 온도가 약 1,500 ~ 1,600°C까지 도달 가능한 실리콘 카바이드(SiC: silicon carbide) 소재가 활용될 수 있다. 발열체 그룹은 전기 인가 후 빠른 응답 특성을 가지고 고온 상태에 도달한다. 하지만 발열체 과손 등 국부적인 열원의 성능 저하나 냉간 피열물의 장입 조건 변동에 따른 급격한 온도 편차가 발생할 가능성이 존재한다.<sup>(4)</sup> 특히 연소 배가스가 없는 전기식 연속 소둔로 내부는 복사 열전달이 지배적인 환경이기 때문에 스테판-볼츠만 법칙에 따라 비선형적 전열 특성을 가진다. 이러한 환경으로 장입되는 상온의 강판은 주변 열을 빠르게 흡수하는 heat sink 역할을 하게 된다. 이때 발열체와 소둔로 벽면이 가진 열적 관성으로 인하여 제어 시스템이 목표 온도 유지를 위해 출력을 급격히 변동시키더라도 실제 소둔로 내부의 온도가 정상 상태로 수렴하기까지 상당한 시간이 소요될 수 있다.<sup>(5)</sup> 또한 소둔로 내부 온도가 불균일할 경우 제품의 품질 편차 외에도 에너지 효율 저하를 초래할 수 있기 때문에 소둔로 내부 온도 분포를 실시간으로 정확하게 파악하고 제어하는 운전 기술이 필수적이다.

대부분 산업 현장에서 소둔로 내부 온도 예측을 위한 방법으로써 CFD 시뮬레이션 혹은 현장에서 직접 소둔로 내부에 설치된 열전대에서 수집되는 온도 데이터를 PLC(programmable logic controller)를 통해 단순 디지털 숫자로 모니터링하고 있다. 전자의 경우, 연산 소모 기간의 장기화와 변수 특성 예측을 위한 활용 전문 인력이 필요하다. 후자 방식은 수십 개 이상의 온도 데이터를 운전자가 일일이 확인하고 공간적인 온도 분포를 재구성해야 하므로, 실시간 피드백이 가능한 직관적 상황 파악이 어렵다. 이를 해결하기 위한 선행 연구로 음향 토모그래피 등을 활용한 온도장 재구성 연구가 진행되었으나, 고가의 특수 센서가 필요하여 일반적인 산업 현장에서 비용적, 환경적 부담을 이유로 크게 선택받지 못하고 있다.<sup>(6,7)</sup> 이로 인해 보통의 열전대 측정값 모니터링 접근방법이 전기식 연속 강판 소둔로에 적용되었을 때는 발열체 열화, 내화재 및 단열재 손상, 센서 고장 등과 같은 이상 징후를 조기 발견하지 못하고, 숙련 운전자의 경험에 따른 사후 대응에 의존하게 된다.

소둔로 내부 열전대 또는 비접촉식 온도계 등 이산적인 온도 데이터를 활용하여, 비숙련자도 소둔로 내부의 열적 상황을 즉각적이고 쉽게 인지할 수 있는 연속적인 2차원 온도장 시각화 기술이 개발된다면 효과적인 소둔로 운영 방안이 될 것이다. 이를 위해서는 제한된 수의 센서 데이터를 기반으로 공간 전체의 온도를 합리적으로 추정할 수 있는 보간 알고리즘과, 현장에서 활용하는 데이터 통신 방식에서도 안정적으로 동작하는 모니터링 소프트웨어의 개발이 요구된다. 따라서 본 연구에서는 실제 전기식 연속 강판 소둔로를 대상으로 PLC 데이터와 연동 가능한 2차원 온도장 시각화 소프트웨어 'Data-Based Furnace Temperature Distribution Contour Software v1.0'을 개발하였다. 본 소프트웨어는 역거리 가중법(IDW: inverse distance weighting) 기반의 보간 알고리즘을 적용하여 실시간으로 소둔로 내부의 온도구배를 추산하여 시각화가 가능하도록 2차원 연속 온도장 분포를 제공하며, 데이터 통신에 문제가 발생하면 즉시 운전자가 확인할 수 있도록 데이터 전처리 기능을 포함하였다. 본 논문에서는 개발된 소프트웨어의 구성 및 맵핑 알고리즘을 소개하고, 실제 운전 데이터를 기반으로 정상 및 과도 상태에서의 온도 분포 시각화 결과를 제시함으로써, 해당 기술이 운전 편의성 증대와 이상 상황 조기 대응에 기여할 수 있음을 제시하고자 한다.

## 2. 연구 방법



Fig. 1 Experimental apparatus of an electrified continuous steel-strip annealing furnace

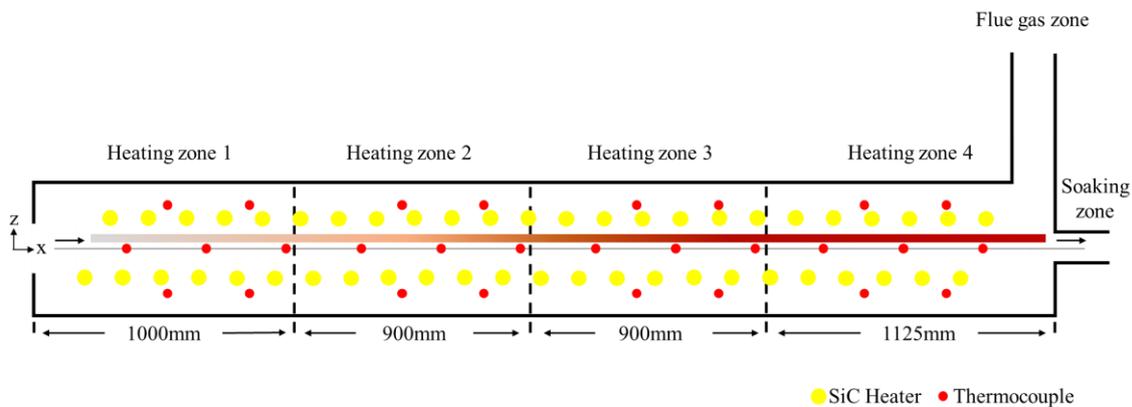


Fig. 2 Schematic diagram of an electrified continuous steel-strip annealing furnace structure

### 2.1 시스템 개요

연구 대상 시스템은 봉 타입 SiC 발열체를 열원으로 사용하는 전기 가열식 연속 강판 소둔로이다. 해당 설비는 강판의 장입 및 이송 방향을 따라 가열대(heating zone), 균열대(soaking zone), 서냉대(cooling zone) 등 기능별 구역으로 구분된다. 가열대 내부 상·하부에 배치된 SiC 발열체에 전류를 공급, 전기 저항식 SiC 발열체의 발열부 온도가 상승하게 되고 여기서 발생한 열에너지는 강판, 롤러, 내벽 등으로 전열된다. Fig. 1은 실제 실험 설비 사진을 보여준다. 한국에너지기술연구원은 세계 최초로 기존 연소 방식의 연속 강판 소둔로를 전기화하는 데 성공하였으며 이는 협력업체인 ㈜삼우에코에 실증되었다. Fig. 2는 해당 설비의 도식도를 발열체 및 열전대 위치와 함께 보여준다. 가열대는 측면도의 가로 길이 기준 1,000 mm, 900 mm, 900 mm, 1,125 mm 순서대로 총 4개의 zone으로 구성되어 있으며, 각 zone마다 중심점과 그를 둘러싼 육각형 구조와 유사하게 7개의 내부 돌출형(내화재 기준 100 mm 침투) R-type 열전대가 설치되어 있다. 열전대는 한 면에서 설치되어 있지 않고, 공간적인 균일성을 계측하기 위해 측면 양 방향에서 지그재그 형태로 설치되었다. 각 zone의 중심에 위치한 열전대는 소둔로 각 zone 내부 분위기 온도

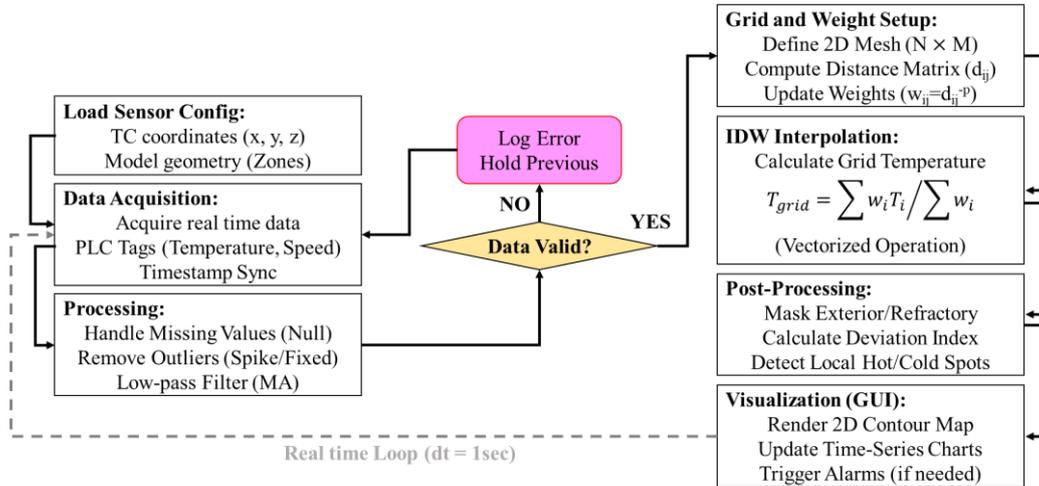


Fig. 3 Logic flowchart of the proposed 2D temperature field monitoring system

의 SV(set value)를 추종하기 위한 PV(process value)를 제공하는 역할을 한다.

2.2 온도장 구성을 위한 맵핑 알고리즘

Fig. 3은 소둔로 내부 격자 생성 및 보간 과정의 계산 알고리즘을 보여준다. 소프트웨어의 동작 과정 중 좌표계 및 격자 변환은 온도 분포를 추산하기 위해 필수적이다. 소둔로 내부 온도를 직관적으로 표현하기 위해, 설비의 길이(x)와 높이(z)를 축으로 하는 2차원 직교 좌표계를 정의하였다. 제한된 수의 열전대 점 데이터를 공간 전체의 연속적인 온도 분포로 확장하기 위해, 전체 영역을 미소 격자( $\Delta x \times \Delta z$ )로 분할하였다. 본 연구에서는 계산 효율성과 시각적 해상도를 고려하여 격자 크기를 5 ~ 50 mm 단위로 가변 적용할 수 있도록 설계하였으며, 이를 통해 사용자는 현재 소둔로 규격 기준 최소 10,000개, 최대 620,000개의 범위 내로 격자 개수를 조정할 수 있다.

불규칙적으로 배치된 센서 데이터를 정해진 격자점의 값으로 변환하기 위해 공간적인 보간 기법이 필요하다. Kriging이나 Spline 등의 기법은 연산 부하가 크고 연산 중 일시적으로 목표값보다 더 높은 값을 초과하는 오버슈트를 유발할 수 있기에, 실시간 모니터링 방식에 적합하지 않다. 따라서 본 소프트웨어는 연산 속도가 빠르고 오버슈트 발생율이 적으며 직관적인 IDW 접근방법을 채택함으로써 실시간 운전자의 직관적 확인 및 편의성을 최대화하였다.<sup>(8,9)</sup>

임의 격자점(x, z)에서 온도 T(x, z)는 인접 센서들의 온도 T<sub>i</sub>와 거리 d<sub>i</sub>를 이용하여 식 (1)과 같이 산출된다.

$$T(x, z) = \frac{\sum_{i=1}^N w_i T_i}{\sum_{i=1}^N w_i}, w_i = \frac{1}{d_i^p} \tag{1}$$

여기서 d<sub>i</sub>는 격자점과 i번째 센서 사이의 유클리드 거리이며, p는 가중치 지수이다. 복사 열전달이 지배적인 소둔로 내부 특성상 발열체 인접부의 온도 구배가 크므로, p값을 사용자가 직접 조정하여 시스템 내 국부적인 온도 집중 현상을 최대한 반영할 수 있도록 설계하였다. 또한 설비의 물리적 경계 조건을 반영하지 않은 보간 오류를 최소화하기 위해 데이터의 유효 반경을 제한적으로 설정하였다. 구체적으로는 개구부 외기의 비정상적 반영, 단일 벽면 외부 데이터의 참조, 그리고 상이한 열적 특성을 가진 공정 구간 간의 데이터 간섭을 차단하는 것이 목적이다. 이를 위해 노드 간의 데이터 영향 유효 반경을 열전대 평균 이격 거리의 3.0배로 정의하여, 데이터의 연속성을 보장함과 동시에 물리적 외삽 오류를 효과적으로 배제하였다. 본 연구에서 적용한 소둔로 시스템에 대하여 최소 센서 데이터를 기반으로 최적 공간 해상도를 확보하기 위해, 역거리 가중법의 가중치 지수(p)에 따른 민감도 평가를 수행하였다. Fig. 4는 동일한 센서 데이터에 대해 p = 1.0과 p = 4.0을 적용했을 때 민감도를 보여준다. p = 1.0인 경우 전체적으로 과도하게 평활화되어 국부적 온도 변화를 희석시키는 경향이 있는 반면, p = 4.0 적용 시에는 센서 주변의

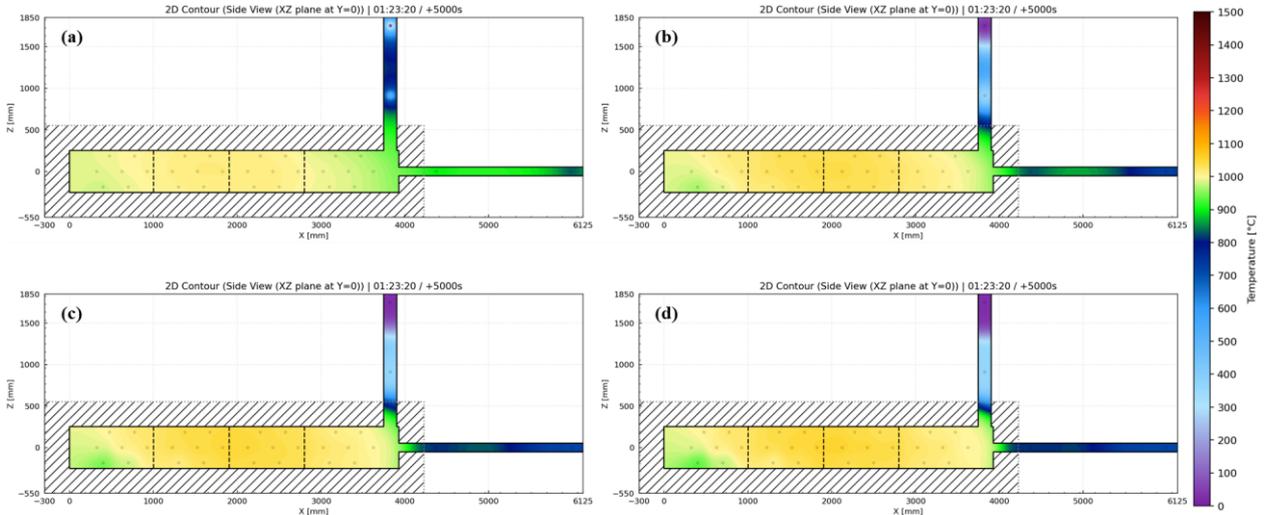


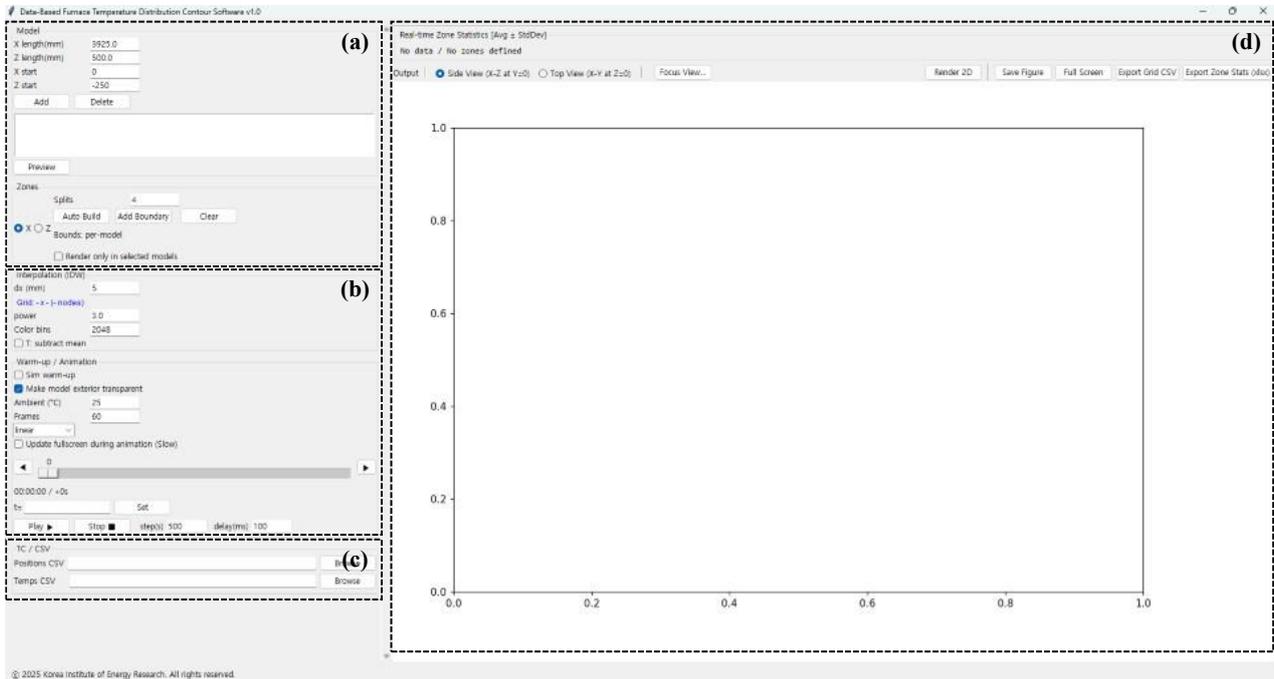
Fig. 4 Comparison of interpolation parameters: (a)  $p = 1.0$ ; (b)  $p = 2.0$ ; (c)  $p = 3.0$ ; (d)  $p = 4.0$

국부적 변화를 민감하게 반영하지만 등고선이 부자연스러운 패턴을 보였다. 본 연구에서는 복사 열전달이 지배적인 로 내부 특성을 고려하여, 국부 이상 감지 민감도와 공간 연속성의 균형을 맞춘  $p = 2.0 \sim 3.0$  구간을 최적값으로 선정하였고, 등온선의 가시화 명확성과 보수적인 모니터링을 위해  $p = 3.0$ 로 설정하여 소프트웨어를 활용하였다.

단순 시각화를 넘어 운전자가 이상 징후를 정량적으로 파악할 수 있도록 다음과 같은 지표를 추가적으로 산출하여 실시간으로 모니터링 할 수 있도록 구현하였다. 편열 지수(thermal non-uniformity indices)는 가열대의 강판 기준 상·하부 zone의 평균 온도 차이( $T_{top} - T_{bottom}$ )를 지표화한 것으로써 전력 계통 설비의 이상을 감지한다. 일반적으로 강판의 형상 불량을 방지하기 위해 상·하부 온도 편차는 최소화되어야 하므로, 본 연구에서는 해당 사항들을 고려하여 상·하부 온도 편차의 안정권을 소둔로 내 평균 온도의 정상상태 도달 시점을 기준으로 설정 온도의  $\pm 2\%$  내로 설정하였다. 온도 구배(temperature gradient)는 길이(x) 방향의 온도 변화율( $dT/dx$ )을 표시함으로써 급격한 가열 및 냉각에 의한 열 충격 위험을 감지할 수 있다. 급격한 온도 변화는 강판에 과도한 열응력을 유발하여 파단을 초래할 수 있다. 이에 본 시스템에서는 경험적으로 가열대 내 인접한 센서 간 온도 변화율이  $100\text{ }^\circ\text{C}$ 를 초과하는 국부적 급변 구간이 감지될 경우를 ‘열충격 위험’ 상태로 판정하도록 설정하였다. 센서 신뢰도(reliability)는 각 센서의 데이터가 인접 센서들의 IDW 추정값 대비 일치 정도를 계산하여 0~1 사이의 신뢰도로 평가한다. 센서의 단선 및 고착 시 주변 온도 값과 무관한 스파이크 신호가 발생할 수 있기에 신뢰도가 40% 미만으로 하락하는 센서는 계속 오류로 판단하여 보간 연산 가중치를 강제로 0으로 처리함으로써 전체 온도장의 왜곡을 방지하였다.

### 2.3 소프트웨어 툴 구현

앞서 2.2절에서 기술한 2차원 온도장 재구성 알고리즘은 오픈 소스인 python 환경에서 Fig. 5와 같은 GUI 기반의 소프트웨어로 구현되었다. 본 소프트웨어는 사용자가 직관적으로 소둔로 내부의 열적 상황을 모니터링할 수 있도록, 작업 흐름에 따라 다음과 같은 순차적 절차를 거쳐 운용된다. 우선 Fig. 5(a)의 모델 생성 패널에서는 시뮬레이션 대상인 소둔로의 기하학적 형상을 정의한다. 사용자는 가열대, 균열대, 배가스 배출구, 내화재 등 각 영역의 x-z 평면상 길이와 시작점을 입력하여 소둔로 모델을 구축할 수 있다. 이는 설비마다 상이한 규격을 유연하게 반영하고, 소프트웨어를 본 연구 대상 시스템 외로 확장하기 위함이다. Fig. 5(b)의 설정 및 제어 패널에서는 보간 연산의 정밀도를 결정하는 격자 크기(dx)와 IDW 가중치 지수(p)를 설정한다. 사용자는 센서의 배치 밀도나 요구되는 해상도에 맞춰 해당 파라미터들을 조정함으로써, 최적화된 시각화 결과를 얻을 수 있다. 또한, 하단의 타임 슬라이더를 통해 과거 특정 시점의 운전 상황을 1초 단위로 탐색하거나, 재생 속도를 조절하며 과도 상태의 변화 추이를 동적으로 관찰할 수 있다. Fig. 5(c) 데이터 입력 패널을 통해 소둔로 내부에 설치된 다점 열전대의 위치 좌표 파일과



**Fig. 5** Operational user interface of the software includes the following components: (a) generation model panel; (b) set the constant related with interpolation and control the time scale panel; (c) load the data of thermocouples locations and temperature; (d) rendering image check panel

시계열 온도 데이터를 파일 저장 위치를 지정하여 로드한다. 소프트웨어는 기본적으로 실시간 데이터를 받아 결과를 도출할 수 있지만, 과거 기록된 데이터를 불러와 표현할 수 있다. 입력된 좌표 정보를 생성된 소둔로 모델에 맵핑하고, 시계열 데이터를 동기화하여 온도장 연산을 위한 기초 데이터를 수립할 수 있도록 한다. 마지막으로, Fig. 5(d) 렌더링 및 분석 패널은 연산된 결과를 시각화하고 분석 정보를 제공한다. 사용자가 ‘Render 2D’ 기능을 실행하면, 설정된 파라미터에 따라 계산된 2차원 온도 등고선이 화면에 표출된다. 이때 Fig. 5(d) 상단에 위치한 ‘실시간 존 통계(real-time zone statistics)’ 창은 시각적 정보만으로는 파악하기 힘든 정량적 데이터를 보완한다. 이곳에는 각 zone의 평균 온도뿐만 아니라 상·하부 온도 편차, 최대-최소 온도 차이 등이 실시간 수치로 표시되어, 운전자가 색상 변화와 구체적인 수치에 동시에 확인하며 정밀한 모니터링과 신속한 의사결정을 내릴 수 있도록 지원한다.

### 3. 실험 결과 기반 소프트웨어 검증

개발된 소프트웨어의 유용성과 신뢰성을 검증하기 위하여 실제 조업 데이터를 바탕으로 다음과 같은 세 가지 운전 시나리오를 선정하여 테스트를 수행하였다. 1) 정상운전(steady-state): 목표 온도가 일정하게 유지되는 구간에서 2차원 온도장의 재현성과 기존 점 데이터 대비 가시성 효과를 검증, 2) 과도운전(transient-state): 강판의 냉간 장입, 이송 속도 변경 등 열부하가 급변하는 시점에서 온도장 전개 양상과 응답 지연을 분석, 3) 이상상황(abnormal condition): 설비 고장이나 조업 사고 상황(강판 파단 등)에서 센서 이상 계측에 대한 재현성을 검증하고 실시간 모니터링이 가능한지 여부를 확인하였다.

소프트웨어의 기본 성능 및 측정 신뢰성을 검증하기 위해, 소둔로의 분위기 온도가 SV값 1,050°C로 제어되는 정상운전 구간에서 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 6은 검증을 위해 실제 실험 시스템의 규격과 맞는 소둔로 모델을 생성한 이후 preview 창을 확인했을 때 얻은 결과이며, 가열대와 균열대, 배가스 배출구, 내화재가 형성된 것을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 7은 해당 구간에서 실험 시작 및 데이터 수집 시작 시점을 0초 기준, 목표 300초 간격(5,700 sec, 6,000 sec, 6,300 sec, 6,600 sec)으로 추출한 2차원 온도장 렌더링 결과이다.

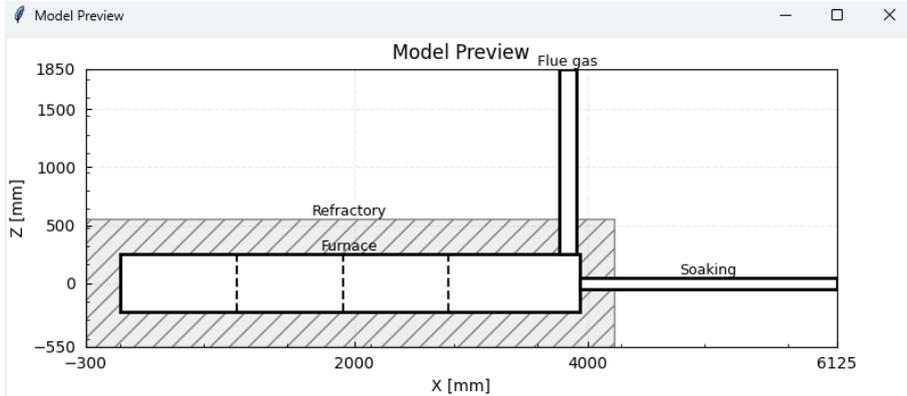


Fig. 6 Preview of the generated model

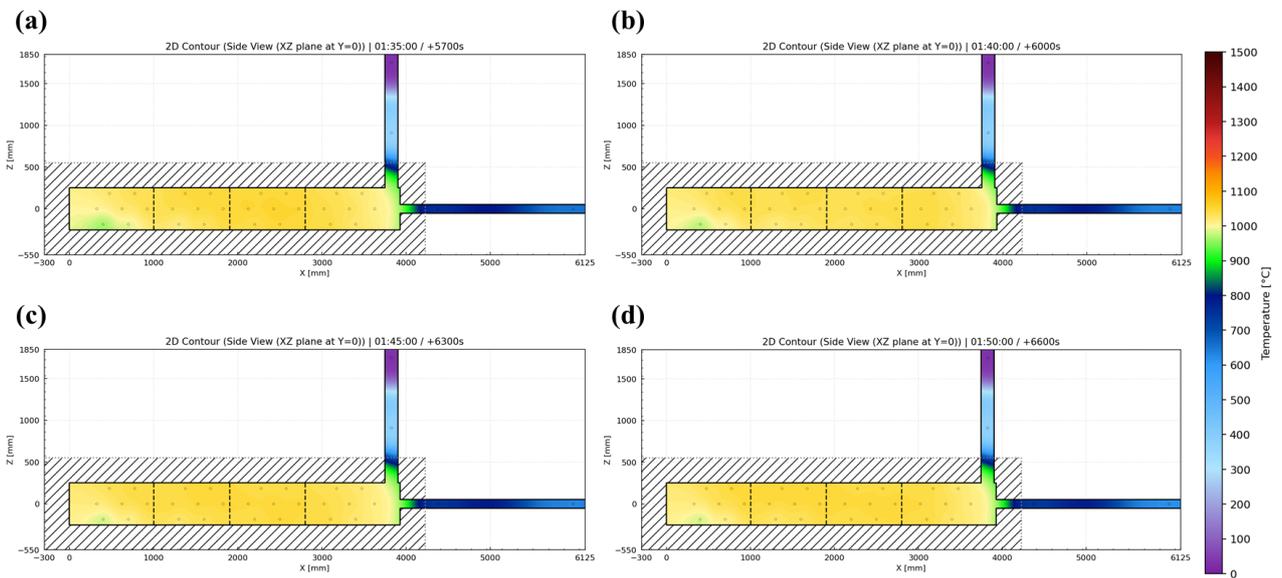
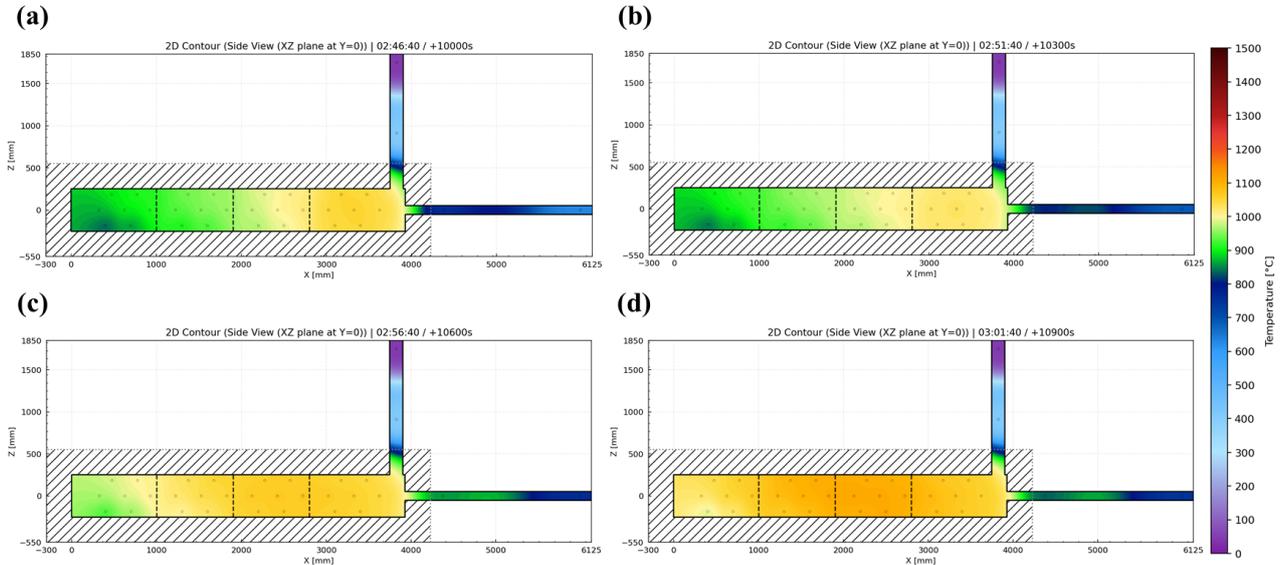


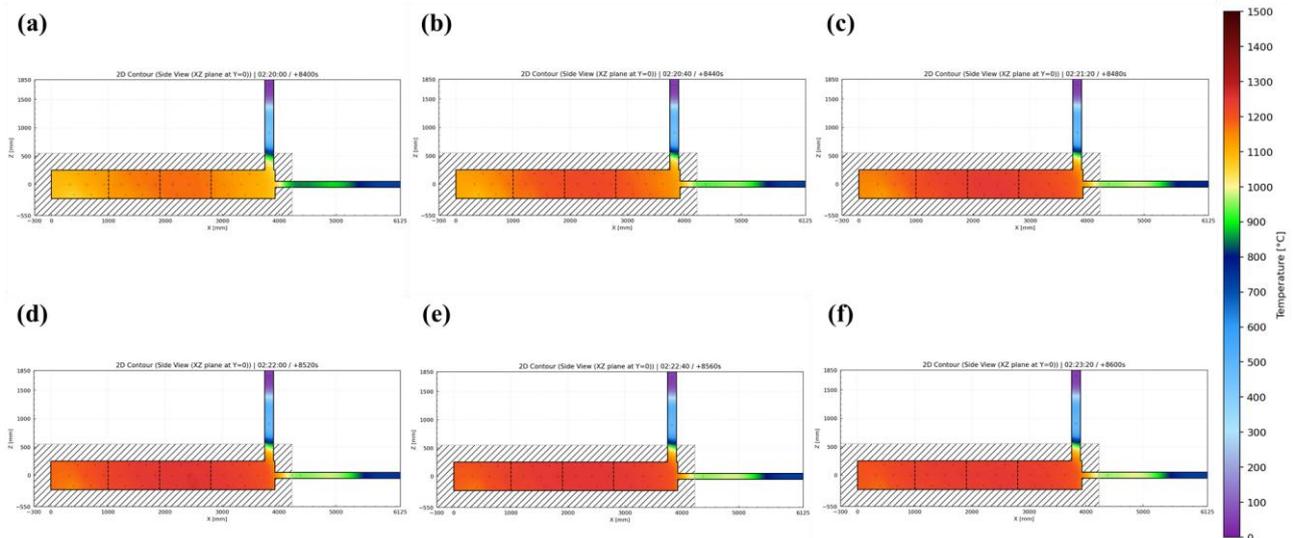
Fig. 7 Output images at 300 sec intervals based on steady-state driving data: (a) rendering image after 5,700 sec of experiment; (b) after 6,000 sec of experiment; (c) after 6,300 sec of experiment; (d) after 6,600 sec of experiment

센서 레벨에서는 통신 노이즈나 미세한 제어 헌팅으로 인해 시시각각 데이터 변동이 발생할 수 있으나, 제안된 시스템을 통해 시각화된 2차원 온도장은 시간 경과와 무관하게 공간적으로 매우 균일하고 일관된 분포 패턴을 유지함을 확인하였다. 구체적으로, Fig. 7(a) ~ (d)를 비교해 보면, 고온 영역과 상대적으로 낮은 영역의 위치가 300초가 경과한 시점들에서도 동일한 좌표상에 형성되고 있으며, 등온선의 형상 또한 큰 왜곡 없이 유지되고 있다. 이는 본 시스템에 적용된 전처리 필터와 IDW 보간 알고리즘이 개별 센서의 고주파 노이즈를 효과적으로 평활화하여, 소둔로 내부의 거시적인 열적 평형 상태를 안정적으로 재현하고 있음을 시사한다. 따라서, 본 소프트웨어는 운전자가 순간적인 데이터 변동에 혼란을 겪지 않고, 공정의 전체적인 건전성을 직관적으로 파악할 수 있는 시각적 안정성을 확보하였음이 검증되었다.

운전 조건 변경 시 발생하는 과도 상태에서 시뮬레이션 성능 검증을 위해, 가열대 중반부인 zone 3의 목표 설정 값을 기존 운전 온도에서 1,200°C로 급격히 상향 조정하는 계단 입력 시나리오를 적용하였다. Fig. 8은 설정 변경 직후(10,000 sec)부터 300초 간격으로 소둔로 내부 2차원 온도장의 변화를 시각화한 결과이다. 세 시점의 2D 컨투어 출력을 비교해 보면, 시간 경과에 따라 (a), (b), (c), (d) 순으로 zone 3 영역을 중심으로 고온의 등온선이 확장되며 전반적인 승온이 이루어지는 것을 확인할 수 있다. 이때, 목표 온도 추종을 위해 가열로의 PID 제어 알고리즘이 동작함에 따라, 발열체 1개당 평균 인가 전력은 초기 2.0 kW 수준에서 2.5 kW로 약 25% 상승한 것으로 나타났다. 특히 주목할 점은 소둔로 입구 영역에서 관찰



**Fig. 8** Sequential snapshots of the 2D temperature field during the transient response to a step increase in the third zone in heating zone target temperature 1,200°C: (a)  $t = 10,000$  sec; (b)  $t = 10,300$  sec; (c)  $t = 10,600$  sec; (d)  $t = 10,900$  sec



**Fig. 9** Sequential snapshots of the 2D temperature field during a strip breakage accident caused by local overheating: (a) normal operation at  $t = 8,400$  sec; (b) heat accumulation during line stop ( $t = 8,440$  sec); (c) breakage moment at  $t = 8,480$  sec; (d) ~ (f) post-breakage temperature distribution  $t = 8,520$  sec to 8,600 sec

되는 승온 지연 현상이다. 가열대의 중앙부인 zone 3의 온도가 상승하는 추세임에도 불구하고, 입구 측은 Fig. 8(c) 시점까지도 상대적으로 가열대 전 구간에서 비교적 낮은 온도를 유지하고 있다. 이는 연속식 시스템의 구조적 특징으로(강판 장입을 위한) 개구부를 통해 유입되는 상온 외기와 지속적인 냉간 강판의 장입으로 인해 소둔로 내 열축적이 방해되기 때문이다.

본 시뮬레이션 결과는 개발된 소프트웨어가 단순히 센서 값을 보간하는 것을 넘어, 개구부 열손실과 강판의 현열 흡수와 같은 물리적 경계 조건을 2차원 온도장에 반영하고 있음을 입증한다. 이를 통해 운전자는 특정 zone의 온도 설정 변경이 인접 zone에 미치는 열적 영향과 도달 시간을 시각적으로 예측하고, 과도한 부하가 걸리지 않도록 승온 패턴을 최적화하는 데 기여할 수 있다.

설비 고장이나 조업 사고와 같은 비정상 상황에서 본 소프트웨어의 진단 유효성을 검증하기 위해, 실

제 조업 중 발생한 강판 파단 사고 데이터를 기반으로 시뮬레이션을 수행하였다. 해당 사고는 강판 온도 측정을 위한 비접촉식 온도계의 측정 정확성을 검증하기 위한 강판에 직접 열전대를 부착한 이후 측정 데이터를 비교하기 위한 상황에서 발생하였다. 실험 시작 8,420초 경과 시점부터 약 40초간 강판 이송을 일시 중단한 직후 강판 과열에 의한 파단이 발생하였다. Fig. 9는 사고 발생 전후인  $t = 8,400 \text{ sec}$ 부터  $t = 8,600 \text{ sec}$ 까지 40초 간격으로 로 내부 온도장의 변화를 시각화한 결과이다. 이를 통해 사고의 전조 증상과 발생 메커니즘을 다음과 같이 분석할 수 있다. Fig. 9(a), (b)와 같이 열축적 단계에서는, 정상운전 상태인 (a) 시점과 달리, 강판 이송이 중단된 직후인 (b) 시점을 보면 가열대 영역의 색상이 급격히 붉게 변하며 온도가 상승하는 것을 확인할 수 있다. 이는 소둔로 내부의 주요 heat sink 역할을 하던 냉간 강판의 유입이 멈춤에 따라, 발열체에서 공급되는 열에너지가 강판 이외에 소둔로 내부에 급격히 축적되었기 때문이다. Fig. 9(c)와 같이 사고 발생 단계에서는, 강판 파단이 발생한 (c) 시점의 온도장은 소둔로 내부 온도가 국부적으로 임계치 이상으로 과열되었음을 보여준다. 짧은 시간 동안 발생한 급격한 온도 상승은 정지해 있던 강판에 심각한 과열 상황을 초래하였으며, 이로 인한 열응력 집중이 강판 파단의 직접적인 원인이 되었음을 시각적으로 입증한다. Fig. 9(d) ~ (f)와 같이 사고 후 거동 단계에서는, 파단 이후인 (d) ~ (f) 구간에서 제어 시스템이 과열을 감지하고 발열체 인가 전력을 조절함에 따라 온도가 다시 안정화되거나 재분포되는 양상을 보인다.

기존의 점 데이터 기반 모니터링 시스템에서는 이러한 급격한 온도 상승을 단순한 제어 헌팅이나 센서 노이즈로 오인하기 쉬워 즉각적인 대응이 어려웠다. 반면, 본 연구에서 개발된 2차원 시각화 시스템은 이송 중단, 국부적 과열, 파단으로 이어지는 사고의 인과관계를 명확한 공간적 패턴으로 제시하였다. 이는 본 시스템이 열적 부하의 불균형을 실시간으로 감지하고 파단과 같은 치명적인 사고를 예방하거나, 사고 발생 시 근본 원인을 분석하는 데 있어 매우 효과적인 툴로 활용될 수 있음을 시사한다.

## 4. 결과 및 논의

### 4.1 시각화 결과

진단 소프트웨어의 효용성을 확인하기 위해, 소둔로가 목표 온도로 제어되는 정상운전 상태에서 2차원 온도장을 분석하였다. Fig. 10은 가열대 각 구간 온도장의 시각화 결과로, 기존의 이산적인 센서 데이터 모니터링에서는 파악하기 어려웠던 zone 간의 열적 경계와 발열체 배치에 따른 온도 분포 특성이 명확한 등온선 형태로 나타났다. 특히 소둔로 내부 가열대에서 상부 온도가 하부 온도 대비 약  $15 \sim 20^\circ\text{C}$  높게 형성되는 비대칭 패턴이 관찰되었는데, 이는 자연 대류에 의한 열기 상승과 상부 발열체의 복사열 집중 현상이 2차원 맵핑을 통해 가시화된 결과이다. 이러한 시각적 정보는 운전자가 직관적으로 소둔로 내부의 열적 평형 상태를 판단하는 데 기여한다.

운전 조건 변경 시의 동적 거동을 분석하기 위해, 냉간 강판 장입 및 가열대 목표 온도 변경 시나리오를 적용하였다. 앞서 Fig. 8에서 확인된 바와 같이, 입구 측의 온도 하강이 시간이 지남에 따라 로 중앙부로 전파되는 열적 지연 현상이 뚜렷하게 포착되었다. 기존 점 데이터만을 활용한 트렌드 차트가 단순히 개별 지점의 온도 하강 시점만을 보여준다면, 본 시스템의 2차원 스냅샷은 저온 영역의 확산 속도와 범위를 공간적으로 제시한다. 이를 통해 운전자는 과도 구간에서 발열체 출력을 선제적으로 보정하거나 강판 이송 속도를 조절하여 품질 편차를 최소화할 수 있는 근거를 확보할 수 있다.

### 4.2 알고리즘 성능 평가

현장의 센서 결측 및 노이즈 발생 시 시스템 강건성을 평가하였다. 강판 파단 시나리오(Fig. 9)와 같이 특정 센서에 스파이크 노이즈가 발생하거나 통신이 단절되는 상황에서, 본 시스템에 적용된 전처리 필터와 적응형 가중치 알고리즘이 해당 이상치를 효과적으로 격리함을 확인하였다. 또한, 동일한 정상 운전 조건에서 300초 간격으로 생성된 온도장이 패턴 유사성을 유지함으로써, 알고리즘의 재현성과 시각적 안정성이 검증되었다.

단순 시각적 모니터링을 넘어, 운전자가 소둔로 내부의 열적 건전성을 객관적으로 판단할 수 있도록 본 시스템은 2차원 온도장 데이터로부터 세 가지 핵심 편열 지수를 실시간으로 산출한다. Fig. 11은 가열대 영역에 대해 계산된 (a) 상·하부 평균 온도 차( $T_{\text{top}} - T_{\text{bottom}}$ ), (b) zone 내부 온도 표준편차( $\sigma_{\text{heating zone}}$ ), (c) 최

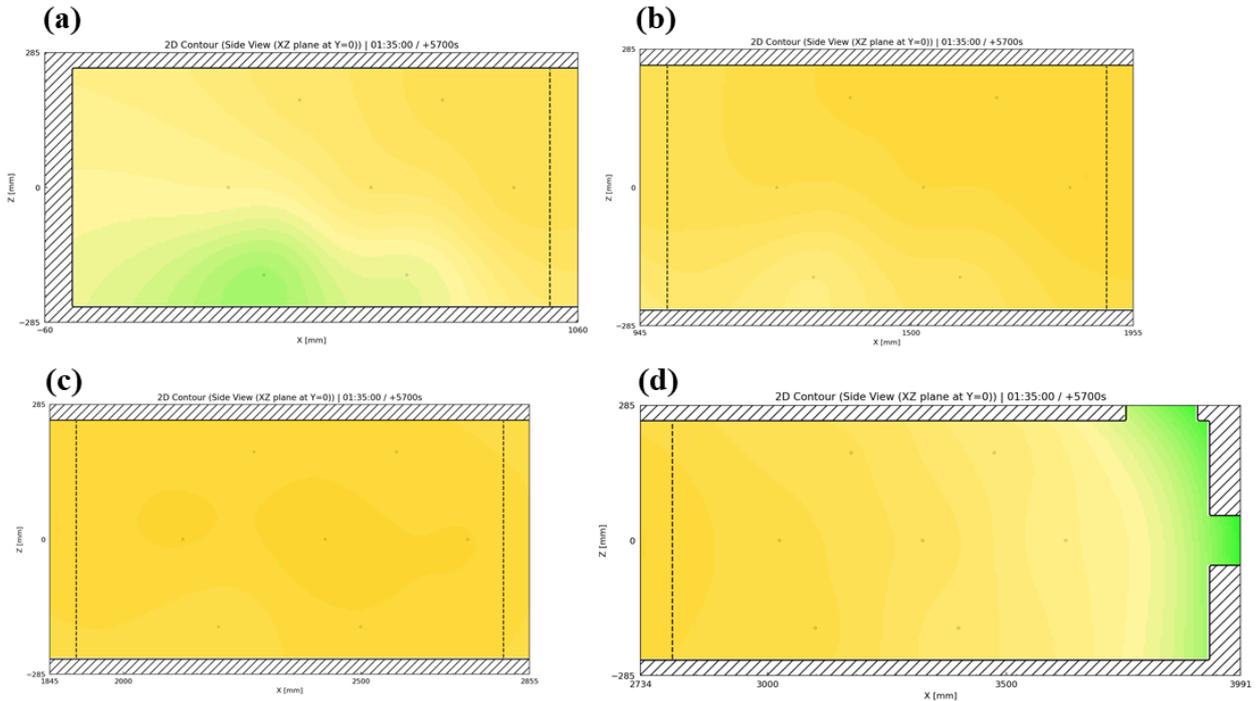


Fig. 10 2D contour map: (a) zone 1 in heating zone; (b) zone 2 in heating zone; (c) zone 3 in heating zone; (d) zone 4 in heating zone

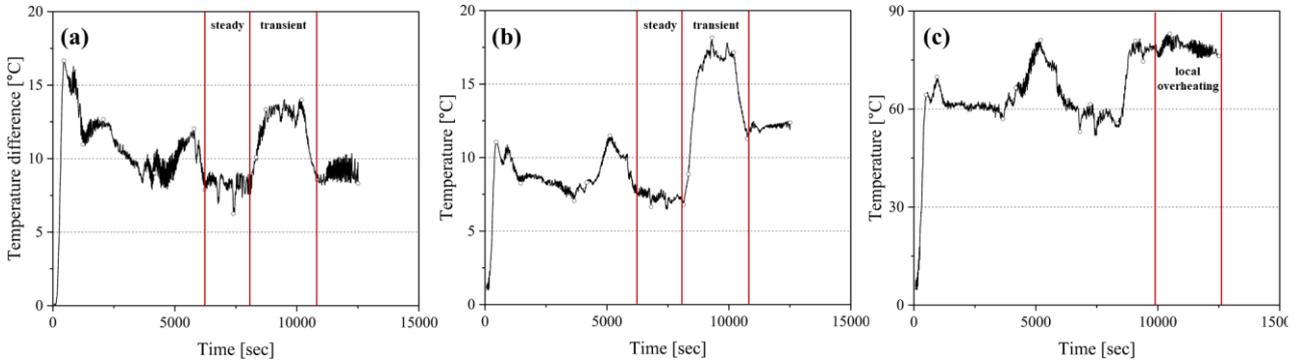


Fig. 11 Time-series analysis of quantitative thermal non-uniformity indices derived from the 2D temperature field: (a) vertical deviation ( $\Delta T_{top-bottom}$ ); (b) standard deviation ( $\sigma_{heating\ zone}$ ); (c) maximum temperature span ( $T_{max} - T_{min}$ ) within the heating zone

대-최소 온도 범위( $T_{max} - T_{min}$ )의 시계열 변화를 그래프로 변환한 것이다.

Fig. 11(a)의 상·하부 온도 편차를 보면 초기 장입 직후를 제외한 정상상태(5,800 ~ 7,500 sec 등)에서 상·하부 간 온도차는 10°C 이내로 유지되나, 과도상태(7,500 ~ 11,000 sec 등)에서 상·하부 온도차는 10 ~ 15°C로 변화하는 양상을 확인할 수 있다. 이는 냉간 강판이 하부 롤러를 타고 이동하며 하부 발열체의 열을 더 많이 흡수하거나, 대류에 의해 상부로 열이 쏠리는 비대칭 현상을 알고리즘으로 추정이 가능하다는 것을 의미한다. Fig. 11(b)의 공간 온도 균일도를 나타내는 표준편차는 과도 상태 진입 시 약 2배 이상 급증하는 경향을 나타냈다. 그리고 특히 Fig. 11(c)의  $\Delta T_{span}$ 은 국부적 과열이나 과냉 발생 시 가장 민감하게 반응하는 지표로서, 해당 사례에서는 정상상태에 도달한 약 11,000 sec 이후에도 최대 온도 편차 값이 높은 것을 바탕으로 국부적 과열 및 과냉에 대한 상세 모니터링 필요 근거를 마련할 수 있다. 이러한 지표들은 기존의 평균 온도 관리만으로는 놓칠 수 있는 국부적 이상 징후를 조기에 경보하는 트리거 역할을 수행할 수 있다.

이러한 정량적 지표들은 2차원 맵핑 알고리즘이 단순히 센서 데이터를 부드럽게 연결하는 것을 넘어, 물리적으로 유의미한 열적 불균형을 수치화하여 제공하고 있음을 입증한다. 현장 적용 시, 운전자는 이 편열지수들이 관리 한계선을 초과하는 순간을 이벤트 발생 시점으로 인지하고, 즉각적인 조치(속도 감속, 발열체 밸런싱)를 취함으로써 공정 안정성을 획기적으로 향상시킬 수 있다.

#### 4.3 현장 적용 방향성 및 한계점

본 시스템은 로 내에서 발생할 수 있는 열적 이상 상태의 발생 위치를 공간적으로 국소화 및 특정 가능하다. 예를 들어, 특정 zone 온도가 하락했을 때 이것이 전체적인 투입 열량 부족인지, 혹은 특정 위치의 발열체 열화나 단열재 손상에 의한 것인지를 온도장 패턴을 통해 구별할 수 있다. 만약 특정 센서 위치 주변에서만 지속적인 국부 냉각점이 관찰된다면, 이는 해당 위치의 발열체 손상이나 개구부 누설 일 가능성이 높다. 반대로 넓은 영역에 걸쳐 온도가 서서히 하락한다면 발열체의 전반적인 효율 저하나 이송 속도 과다로 판단하여 전체 출력을 조정하는 근거가 된다.

에너지 효율 및 향후 확장성 균일도 지표와 전력 소비량의 상관관계 분석을 통해, 품질 허용 범위 내에서 에너지를 최소화하는 최적 운전 패턴 도출이 가능하다. 향후에는 축적된 2차원 온도장 데이터를 기반으로 머신러닝 기반의 고장 예지 모델을 결합함으로써, 가동 중 특정 zone의 온도 이상 패턴을 감지하여 열전대 센서의 고장이나 인근 발열체의 수명을 예측 및 파악하는 지능형 자동 제어 시스템으로의 확장이 가능할 것이다.<sup>(10)</sup>

본 연구는 제한된 수의 열전대 데이터를 활용하므로, 센서가 설치되지 않은 영역에 대한 추정 정확도에 물리적 한계가 존재한다. 또한, 소둔로 폭 방향의 온도 변화나 국부적인 가스 유동 영향을 배제하고 길이-높이(x-z) 평면의 2차원으로 단순화했다는 점에서, 3차원적인 복잡한 열유동 현상을 완벽히 대변하기에는 부족함이 있다. 또한 열원과 거리 중요하게 여겨지는 복사 열전달이 지배적인 해당 환경에서 열전대의 온도 데이터와 역거리 가중법 보간을 기반으로 체적 내 온도장을 추정하는 것은 로체 내부의 열적 현상을 완벽히 모사할 수 없다는 한계가 존재한다. 이러한 한계를 극복하기 위해 향후 연구에서는 적합 직교 분해와 같은 수치해석적 모델을 활용한 센서 최적 배치 알고리즘을 도입해야 할 것이다. 이는 현장 데이터를 바탕으로 축적된 온도장 데이터에서 열적 현상이 빈번하게 변화하는 공간(지배 공간 모드)을 추출하고, 해당 공간에 센서를 재배치함으로써, 최소한의 센서 수량으로도 전체 온도장의 재구성 시 보간 오차를 최소화하고 센서 미설치 영역의 추정 신뢰도를 개선하는 효율을 제공할 것이다. 또한, 순수 데이터 기반 보간의 오차를 줄이기 위해 열전달 물리학 기반의 해석 모델이나 데이터 기반 보정 모델을 결합한 하이브리드 접근 방식을 통해, 복사 차폐 효과나 열적 관성을 고려한 3차원 온도장 모니터링 시스템으로 고도화할 계획이다.

## 5. 결론

본 연구에서는 철강공정 중 용융아연도금공정에서 사용되는 전기식 연속 강판 소둔로의 온도 균일성 확보와 운전 효율 향상을 위해, PLC에서 수집되는 다점 열전대 데이터를 기반으로 소둔로 내부 2차원 온도장을 실시간으로 재구성하고 시각화하는 모니터링 시스템을 개발하였다. 제한된 센서 데이터로부터 공간 전체의 연속적인 온도 분포를 추정하기 위해 역거리 가중법 기반의 보간 알고리즘을 적용하였으며, 실제 현장 데이터를 활용하여 다양한 운전 시나리오에서의 유효성을 검증하였다. 본 연구의 주요 결론은 다음과 같다.

1) 기존 숫자 리스트나 1차원 경향 그래프에 의존하던 방식에서 벗어나, 소둔로 내부의 열적 상황을 2차원 등온선 형태로 가시화함으로써 운전 편의성과 직관성을 획기적으로 향상시켰다. 정상 운전 시에는 zone 간의 열적 경계와 히터 배치에 따른 상-하부 온도 비대칭성을 명확히 식별할 수 있었으며, 이는 운전자가 소둔로의 전체적인 열적 평형 상태를 파악하는 데 기여한다.

2) 냉간 강판 장입과 같은 과도 운전 상황에서 발생하는 입구 측의 승온 지연과 열적 헌팅 현상을 시공간적으로 추적할 수 있음을 확인하였다. 이를 통해 운전자는 과도 상태의 진행 양상을 실시간으로 파악하고, 이송 속도나 히터 출력을 선제적으로 조절하여 제품 품질 편차를 최소화할 수 있는 근거를 확보할 수 있다.

3) 강판 파단 사고와 같은 이상 상황 재현을 통해, 이송 중단에 따른 급격한 열축적과 국부적 과열 과정을 규명하였다. 특히 편열지수와 같은 정량적 지표를 통해 센서 오작동이나 국부적 이상 징후를 조기에 진단할 수 있는 성능을 입증하였으며, 이는 설비 보호 및 2차 사고 예방에 중요한 역할을 수행한다.

본 연구에서 개발된 시스템은 숙련자의 경험에 의존하던 기존의 소둔로 운전 방식을 데이터 기반의 정량적 관리 체계로 전환하는 데 기여할 것이다. 현장 적용 시 운전 안정화와 품질 균일도 관리는 물론, 설비의 이상 징후를 조기에 포착하여 유지보수 효율을 높이는 실질적인 기대효과가 있을 것으로 판단된다. 향후에는 축적된 온도장 데이터를 활용하여 설비 고장 예지 및 에너지 최적 제어 모델로 확장할 수 있는 기반 기술로서의 활용이 기대된다.

## 후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.(RS-2023-00233397)

## 참고문헌 (References)

- (1) Hajaliakbari, N. and Hassanpour, S., 2017, "Analysis of Thermal Energy Performance in Continuous Annealing Furnace," *Applied Energy*, Vol. 206, pp. 829~842.
- (2) Lee, H. and Seo, D. M., 2025, "Thermal and NO<sub>x</sub> Emission Characteristics of Periodic Fuel-Flow-Pulsed Combustion at a Nozzle-Mixed Burner in a Direct-Fired Furnace," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 263, Article 125326.
- (3) IEA, 2021, *Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector* (<https://www.iea.org/>), International Energy Agency, Paris, France.
- (4) Yu, J., Baek, K. C., Chung, J. and Lee, H., 2025, "Transient Thermal Behavior of a Steel-Strip Loaded into a Continuous Annealing Furnace with SiC Electric Heaters," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 274, Article 126673.
- (5) He, F., Wang, Z. X., Liu, G. and Wu, X. L., 2022, "Calculation Model, Influencing Factors, and Dynamic Characteristics of Strip Temperature in a Radiant Tube Furnace during Continuous Annealing Process," *Metals*, Vol. 12, No. 8, Article 1256.
- (6) Arkhazloo, N. B., Bouissa, Y., Bazdidi-Tehrani, F., Jadidi, M., Morin, J. B. and Jahazi, M., 2019, "Experimental and Unsteady CFD Analyses of the Heating Process of Large Size Forgings in a Gas-Fired Furnace," *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol. 14, Article 100428.
- (7) Kong, Q., Jiang, G., Liu, Y. and Sun, J., 2020, "3D High-Quality Temperature-Field Reconstruction Method in Furnace Based on Acoustic Tomography," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 179, Article 115693.
- (8) Shepard, D., 1968, "A Two-Dimensional Interpolation Function for Irregularly-Spaced Data," *Proceedings of the 23rd ACM National Conference*, New York, USA, pp. 517~524.
- (9) Li, J. and Heap, A. D., 2008, "A Review of Spatial Interpolation Methods for Environmental Scientists," *Australian Geographer*, Vol. 45, pp. 137~161.
- (10) Liu, Q., Chai, T. and Qin, S. J., 2012, "Fault Diagnosis of Continuous Annealing Processes using a Reconstruction-Based Method," *Control Engineering Practice*, Vol. 5, pp. 511~518.

## 실험계획법을 이용한 보행해충 스마트 포획 장치 흡입 원심팬 설계

정시우\* · 정가은\* · 윤예지\* · 이다혜\* · 윤재현\*\*†

\* 이화여자대학교 휴먼기계바이오공학부, \*\* 서울사이버대학교 드론·로봇공학과

### Centrifugal Fan Design for a Smart Pest Trapping Device Using Design of Experiments

Siwoo Jung\*, Ga Eun Jung\*, Yeji Yun\*, Dahye Lee\* and Jaehyun Yoon\*\*†

\* Division of Mechanical and Biomedical Engineering, Ewha Womans Univ.,

\*\* Dept. of Drone and Robotics Engineering, Seoul Cyber Univ.

(Received January 5, 2026 ; Revised January 28, 2026 ; Accepted January 29, 2026)

**Key Words:** Cockroach(바퀴벌레), Design of Experiment(실험계획법), Computational Fluid Dynamics(CFD, 전산유체역학), Fan Blade(팬 블레이드)

**초록:** 본 연구는 자동화 보행해충 포획 장치의 흡입 성능 향상을 위해 원심팬 블레이드 형상의 유체 성능을 최적화하는 것을 목표로 하였다. 날개 개수, 테이퍼 각, 날개 폭, 허브 지름을 설계 인자로 선정하고, 4인자 3 수준 직교배열 기반 실험계획법을 적용하여 총 9개의 설계 조합에 대해 전산유체역학 해석을 수행하였다. 질량 유량을 목적 함수로 설정하여 평균분석을 통해 각 인자의 영향 경향과 최적 설계 조합을 도출하였으며, 예측 방정식과 추가 해석을 통해 결과의 타당성을 검증하였다. 본 연구는 센서 기반 자동 포획 시스템에 적용 가능한 흡입 팬 설계 지침을 제시함으로써 스마트 해충 방제 장치의 효율성과 실용성을 향상시키는 데 기여한다.

**Abstract:** This study aims to enhance the performance of an automated walking pest capture device by optimizing the fluid dynamic characteristics of a centrifugal suction fan blade. Four design parameters—number of blades, taper angle, blade width, and hub diameter—were selected, and a DOE (design of experiments) approach based on an L9 orthogonal array was applied. CFD (computational fluid dynamics) simulations were conducted for nine design configurations, with mass flow rate defined as the objective function. ANOM (analysis of means) was employed to evaluate the relative influence of each design parameter and to determine the optimal design combination. The predicted optimal configuration was further validated through additional CFD analysis, confirming consistency between the predicted and simulated results. By integrating CFD-based flow analysis with statistical design optimization, this study provides practical design guidelines for improving the efficiency and reliability of smart pest trapping systems.

## 1. 서론

도심 및 실내 환경에서의 해충 발생은 공중보건과 위생 관리 측면에서 지속적으로 중요한 문제로 인식되고 있다. 특히 바퀴벌레(cockroach)를 비롯한 보행해충은 식중독, 천식, 알레르기과 같은 다양한 질병의 매개체로 알려져 있으며, 인체 건강에 직접적인 위협을 가한다.<sup>(1)</sup> 이를 억제하기 위한 전통적인 해충 방제 방식으로는 화학 살충제가 주로 사용되어 왔지만, 인체 유해성과 환경 오염, 그리고 해충의 내성 증가<sup>(2)</sup>와 같은 문제로 인해 지속 가능한 방제 수단으로는 한계가 명확하다.

† Corresponding Author, yoonjh@iscu.ac.kr

이러한 배경 속에서 최근에는 센서 기술과 자동화 제어 기술을 접목한 스마트 해충 관리 시스템이 주목받고 있다.<sup>(3)</sup> 이러한 시스템은 해충과의 직접적인 접촉 없이 실시간으로 탐지하고 제거할 수 있다는 점에서 기존의 방식보다 위생적이며 효율적인 대안으로 평가된다. 그러나 끈끈이 트랩을 사용한 기존의 포획 장치는 트랩이 고정되어 있어 포획된 해충이 한곳에만 집중되는 비효율성, 해충의 사체를 사용자가 직접 마주하고 처리해야 하는 불편감, 해충이 없어도 기기가 계속 작동하는 에너지 비효율 문제가 존재한다.

이에 따라 본 연구에서는 보행해충 자동 포획 장치의 핵심 구성 요소인 흡입 팬의 성능에 주목하여, 포획 효율 향상을 위한 팬 블레이드의 유체 성능 최적화를 연구 주제로 설정하였다. 센서 기반 자동화 시스템을 통해 해충을 감지하고 흡입하는 과정에서, 팬 블레이드는 포획 성공률을 직접적으로 결정하는 요소로 작용한다. 따라서 본 연구에서는 팬 블레이드 형상이 유동 특성에 미치는 영향을 정량적으로 분석하고, 이를 통해 포획 성능을 향상시킬 수 있는 설계 접근 방식을 제안한다. 또한 본 설계는 단순히 자동화 시스템으로 보행해충을 처리하는 것을 넘어, 벌레 공포증을 가진 사용자들에게 해충 사체를 직접 보지 않고 처리할 수 있는 심리적 안정감이라는 차별화된 가치를 지닌다.

본 연구의 목적은 자동화 보행해충 포획 장치에 적용되는 흡입 팬 블레이드의 유체 성능을 향상시키기 위한 최적 설계 조합을 도출하는 데 있다. 이를 위해 팬 블레이드의 주요 설계 인자를 정의하고, 실험계획법을 기반으로 선정된 설계 조합에 대해 전산유체역학해석을 수행하였다. 이후 평균분석을 통해 각 설계 인자의 영향 경향을 분석하고 최적 설계 조합을 도출하였다. 이러한 연구 흐름은 Fig. 1에 개략적으로 나타내었다.

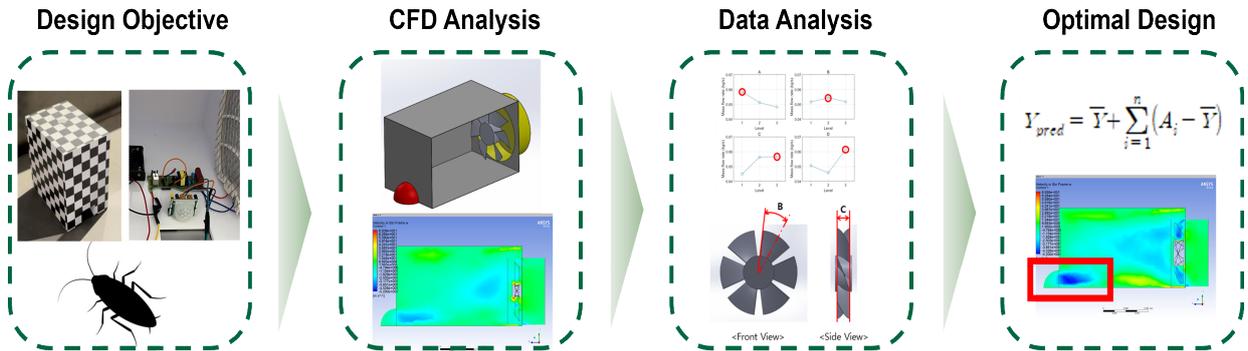


Fig. 1 Flow chart of the overall design and optimization procedure: design objective definition; CFD analysis; data analysis (DOE/ANOM); optimal blade design selection

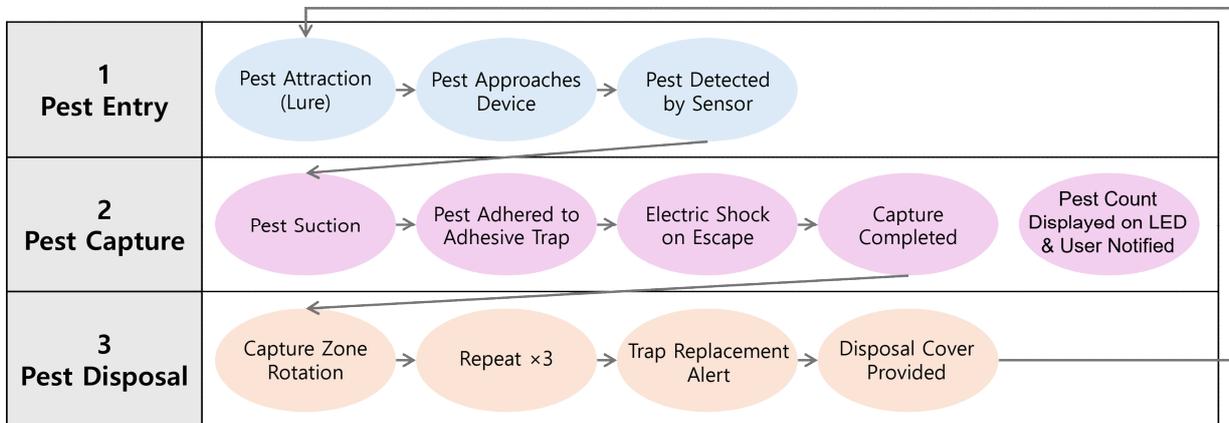


Fig. 2 Service flow diagram of the proposed device: showing the operational sequence from pest attraction; sensor-based detection to centrifugal suction; adhesive trapping with counting; rotational disposal; user notification

## 2. 연구 방법

본 설계의 보행해충 제거 및 처리가 가능한 기기의 구동 순서는 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2의 서비스 흐름도(service flow diagram)는 해충의 유입 및 감지 단계부터 흡입을 통한 포획, 회전식 트랩을 이용한 사체 처리 및 사용자 알림에 이르는 전 과정을 단계적으로 보여준다.

해충 유입 단계에서는 해충이 독먹이 타입의 유인제에 의해 유인되어 기기에 접근하면 초음파 센서가 이를 감지하여 원심팬을 작동시킨다. 해충 포획 단계에서는 원심팬이 해충을 흡입하여 포집 구간(끈끈이 트랩)으로 유인한다. 유인 및 포획 과정이 반복될 때마다, 기기 외부의 LED에 포획된 해충 수가 카운트 되고 포집 구역이 회전하여 새로운 포획 면을 제공한다. 이 과정이 3회 반복되면 기기는 자동으로 작동을 종료한다. 해충 사체 처리 단계에서는 사용자가 사체를 처리한 후 기기 재가동 버튼을 눌러 재가동시킨다.

3D CAD P/G인 SolidWorks를 활용하여 기기 본체를 설계하였다. 보행해충이 진입할 수 있는 경사로 영역, 끈끈이 트랩 영역, 본체 커버 영역, 원심팬 영역으로 구성하였다. 3D 프린터를 활용하여 Fig. 3, Fig. 4와 같이 출력하였다. 어지는 단계에서는 포획 성능을 결정짓는 또 하나의 핵심 요소인 흡입력에 주목하였다. 해충을 효과적으로 포획하기 위해서는 충분한 유속과 유량을 확보할 수 있는 팬 블레이드 구조가 필수적이며, 이에 따라 다양한 형상 변수에 따른 유동 특성을 정밀하게 분석하였다. 본 연구에서는 전산유체역학(CFD: computational fluid dynamics)을 기반으로 다양한 블레이드 형상에 대한 질량유량(mass flow rate)과 유속 분석을 수행하였으며, RANS(Reynolds-averaged Navier-Stokes) 방정식과 SST(shear stress transport) k- $\omega$  난류 모델을 적용하였다. 팬 회전에 따른 유동장은 frame motion 기법으로 구현되었고, 해석 결과는 평균분석(ANOM)과 예측 방정식을 활용하여 정량적으로 평가되었다.

선행 연구에서는 전산유체역학 해석 기반의 유동 분석이나 실험계획법을 활용한 변수 최적화에 초점을 맞추어 수행하였다.<sup>(4-6)</sup> 본 연구는 이러한 기법들을 유기적으로 통합하여, 설계 변수의 상호 작용 및 영향력을 종합적으로 고려한 형상 최적화 전략을 수립하였다. 특히, 해석 결과를 실험 설계와 연계한 통계적 검증을 통해 재현 가능한 해석 체계를 구축함으로써, 해충 포획 장치의 실제 적용 가능성을 높이는 데 주안점을 두었다.

해충 방제 업체에서 사용하는 시중의 제품들은 주로 단순한 트랩이나 살충제를 사용하는 데 반해, 본

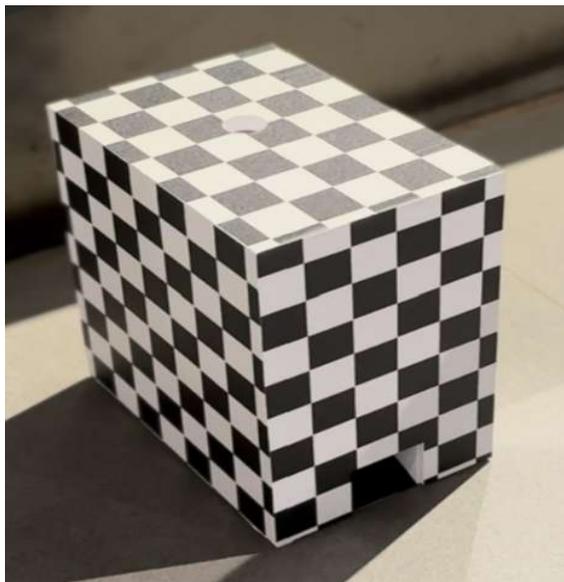


Fig. 3 External view of the 3D-printed outer housing (cover) of the proposed pest capture device



Fig. 4 Internal structure of the 3D-printed device, showing the pest entry ramp; adhesive trap region

설계는 보행해충을 유인하여 살충제, 끈끈이 트랩, 전기 충격의 기능까지 적용된 스마트 IOT 기기이다. 개미, 바퀴벌레와 같이 하나의 특정 해충에만 초점을 맞춘 시중의 제품들과 달리, 본 설계는 다양한 보행해충을 처리할 수 있도록 했다. 실시간으로 해충을 감지하고 즉각 대응할 수 있는 자동화 제어 시스템을 갖추어, 시중의 제품들보다 더욱 신속하게 해충을 방제하고 효율적으로 기기를 관리할 수 있다. 초음파 센서가 해충을 인식하면 포집 구역 트랩이 회전하여 보행해충이 균일하게 포획될 수 있도록 한다. 이로 인해 입구를 한 쪽에만 설치해도 해충 포획의 효율성이 높아져 비용 절감 효과가 뛰어나다. 초기 비용은 기존의 트랩 형식보다 높을 수 있으나, 유지보수 비용의 감소로 인해 전체 소유 비용(TCO)이 낮아져 시장에서 가격 경쟁력을 갖출 수 있다. 가정뿐만 아니라 농장, 공공시설 등 다양한 환경에서 활용할 수 있는 확장성을 가지고 있기에 넓은 잠재적 시장을 보유할 수 있다.

종합적으로 볼 때, 센서 감지 기능과 블레이드 유체 설계 요소를 통합적으로 분석함으로써, 자동화된 해충 포획 시스템의 성능을 향상시킬 수 있는 설계 기반을 마련하였다. 이를 통해 본 설계는 다양한 환경에서도 안정적으로 작동할 수 있는 효율적인 방제 솔루션을 제안한다.

### 3. 실험계획법

#### 3.1 직교배열

실험계획법이란 실험을 통해 해결하고자 하는 문제에 대해 실험 조건과 변수를 체계적으로 배열하고 분석함으로써, 효율적으로 데이터를 수집하고 결과를 해석하기 위한 통계적 방법이다. 본 연구에서는 실험계획법 중 적은 수의 실험만으로도 주요 설계 인자의 영향을 효율적으로 분석할 수 있는 직교배열법을 적용하였다.

직교배열법은 각 인자의 수준이 서로 직교성(orthogonality)을 갖도록 배열되어, 한 인자의 효과가 다른 인자의 영향을 받지 않고 독립적으로 평가될 수 있다는 특징을 가진다.<sup>(7,8)</sup> 이를 통해 인자 간 상호 간섭을 최소화하면서 주요 인자의 영향 경향을 명확히 파악할 수 있다. 또한 직교배열법은 복잡한 통계 이론이나 사전 지식이 없더라도 비교적 간단한 실험 설계와 분석이 가능하다는 장점이 있어, 공학 설계 문제에 널리 활용되고 있다.

본 연구에서는 4인자 3 수준의 직교배열표를 적용하여, 전수 실험 시 필요한 총 81회의 실험을 9회의 실험으로 축소함으로써 해석 효율을 크게 향상시켰다.<sup>(7,9,10)</sup> 특히 L9(3<sup>4</sup>) 직교배열은 각 인자의 주효과를 독립적으로 평가할 수 있도록 모든 수준이 균등하게 배치된 최소 실험점 집합으로, 평균분석(ANOM)을 적용하기에 적합한 구조를 가진다.

#### 3.2 인자/수준 선정

인자란 실험계획법에서 결과에 영향을 미칠 것으로 판단되는 원인 중 실제 실험에서 제어 가능한 설계 요소를 의미하며, 수준은 각 인자가 실험에서 취하는 구체적인 값의 범위를 의미한다. 본 연구에서는 바퀴벌레 포획 성능 향상을 위해 흡입 팬 블레이드를 핵심 설계 요소로 설정하였으며, 최적화된 블레이드 형상 도출을 위한 평균분석 기반 예측 모델을 구축하고자 Table 1에 제시된 4인자 3 수준 직교배열을 적용하였다.

흡입 성능의 목적 함수는 질량 유량으로 정의하였다. 본 장치의 포획 성능은 해충을 흡입하여 포집 구간(끈끈이 트랩 영역)으로 유입시키는 능력에 의해 좌우되므로, 유입부를 통과하는 질량 유량은 흡입

Table 1 Design factors and levels for DOE

	A Number of blades [ea]	B Baper angle [deg]	C Blade width [mm]	D Hub diameter [mm]
Level-1	6	15	10	24
Level-2	8	22.5	15	37
Level-3	10	30	20	50

성능을 직접적으로 대표하는 지표로 판단하였다. 또한 모든 설계 조합에 대해 회전 속도(20,000 rpm), 작동 유체(공기), 해석 도메인 형상 및 경계조건을 동일하게 유지하였기 때문에, 압력 입구에서 계산된 질량 유량은 설계 인자 변화에 따른 흡입 및 유입 능력(entrainment capacity)의 차이를 일관되게 비교할 수 있는 객관적인 성능 지표가 된다. 압력 상승, 소비 전력 및 소음 특성 또한 실제 제품 설계에서 중요한 요소이나, 본 연구에서는 DOE 기반의 단일 목적 최적화를 통해 흡입 성능 향상 경향을 우선적으로 도출하는 데 초점을 두었으며, 다목적 최적화에 대한 검토는 향후 연구로 남긴다.

질량유량에 영향을 미칠 수 있는 네 가지 설계 인자로 날개 개수(A), 테이퍼 각(B), 날개 폭(C), 허브 지름(D)을 선정하였다. 날개 개수는 블레이드에 의해 유체가 가속되는 정도와 직접적으로 관련되며, 일반적으로 날개 수가 증가할수록 유량이 증가하는 경향을 보이므로 주요 인자로 선정하였다. 날개 개수의 수준 범위는 소형 원심팬 설계 사례에서 일반적으로 사용되는 블레이드 수 범위를 참고하여, 유체 가속 효과와 유동 저항 증가 간의 균형을 평가할 수 있도록 설정하였다. 테이퍼 각은 Fig. 5(a)에 나타낸 바와 같이 블레이드 끝단으로 갈수록 폭 또는 두께가 점진적으로 감소하는 각도를 의미하며, 테이퍼 각이 커질수록 끝단 유속이 증가하여 유량 특성에 영향을 줄 것으로 판단하여 인자로 포함하였다. 테이퍼 각의 수준은 블레이드 끝단 형상 변화에 따른 유속 분포 차이를 확인할 수 있도록, 소형 팬 설계에서 사용되는 범위를 기준으로 단계적으로 설정하였다. 날개 폭은 Fig. 5(b)에 나타낸 바와 같이 블레이드가 유체와 접촉하는 길이를 의미하며, 해당 길이가 증가할수록 블레이드에 의해 가속되는 유체의 양이 증가할 것으로 판단하여 선정하였다. 날개 폭의 수준은 블레이드와 유체의 접촉 면적 변화가 질량 유량에 미치는 영향을 평가할 수 있도록, 실제 제작 가능성과 기기 내부 공간 제약을 고려하여 설정하였다. 허브 지름은 유체가 배출되는 출구 단면적을 결정하는 요소로, 출구 면적이 증가할수록 질량 유량이 증가할 가능성이 있다. 반면 허브 지름이 지나치게 작을 경우 블레이드 시작부의 설치 각이 커져 항력이 증가하고, 이에 따라 회전 토크 및 전력 소모가 증가할 수 있으므로, 유량 성능과 에너지 효율을 동시에 고려한 설계 인자로 설정하였다. 허브 지름의 수준은 출구 단면적 변화에 따른 질량 유량 특성을 분석할 수 있도록, 블레이드 설치 각도 및 구조적 간섭이 발생하지 않는 범위 내에서 설정하였다.

설정된 직교배열표의 각 실험 조합에 대해 전산유체역학 해석을 수행하여 질량 유량을 평가하였으며, 해석 결과에 대한 평균분석(ANOM)을 통해 최적 설계 조합을 도출하고 각 인자의 영향 경향을 분석하였다. 이러한 DOE 기반 유동 해석을 통한 원심팬 형상 최적화 접근은 기존 연구에서도 그 유효성이 검증된 바 있다.<sup>(11)</sup>

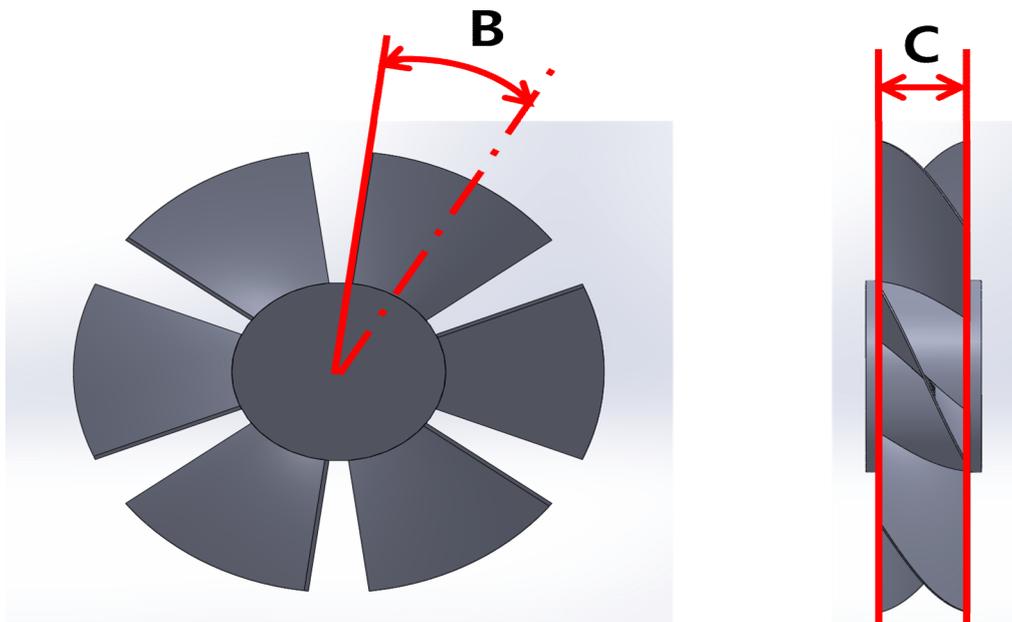


Fig. 5 Blade geometry parameters: front; side views

## 4. 전산유체

### 4.1 전산유체역학 해석

본 연구에서는 흡입 원심팬 블레이드의 유체 성능을 평가하기 위해 ANSYS Fluent 2023 R1을 이용한 전산 유체 해석을 수행하였다. 해석 대상 유동은 공기를 작동 유체로 하는 비압축성 유체의 정상 상태 난류 유동으로 가정하였으며, 지배 방정식으로는 질량 보존을 나타내는 연속 방정식과 운동량 보존을 나타내는 RANS(Reynolds-averaged Navier-Stokes) 방정식을 사용하였다.<sup>(12-15)</sup>

난류 모델로는 SST(Shear Stress Transport)  $k-\omega$  모델을 적용하였다.<sup>(12,16)</sup> SST 모델은 Menter에 의해 제안된 2 방정식 난류 모델로,  $k-\omega$  모델의 벽면 근처 예측 정확도와  $k-\epsilon$  모델의 자유 전류 영역 예측 성능을 결합한 모델이다. 계산 비용은 상대적으로 증가하지만, 복잡한 박리 유동과 벽면 근처 전단 유동을 보다 정확하게 예측할 수 있어 본 연구의 팬 블레이드 유동 해석에 적합하다고 판단하여 채택하였다.

팬 블레이드의 회전 효과를 모사하기 위해 MRF(moving reference frame) 기법을 적용하였다.<sup>(17,18)</sup> MRF 기법은 회전하는 영역을 하나의 정상 좌표계로 변환하여 해석하는 방법으로, 시간에 따른 격자 변형 없이 회전 유동을 정상 상태로 근사할 수 있다는 장점이 있다. 본 연구에서는 블레이드가 포함된 회전 영역에 대해 MRF를 적용하고, 주변 유동 영역은 고정 좌표계로 설정함으로써 회전 블레이드에 의해 유도되는 원심력 및 코리올리 효과를 고려하였다. 블레이드의 회전 속도는 소형 핸디 청소기와 유사한 흡입 성능을 구현하기 위해 20,000 rpm으로 설정하였으며, 주요 해석 조건은 Table 2에 정리하였다.

### 4.2 유동장

유동장 해석을 위해 실제 기기의 기하학적 형상을 1:1 스케일로 모델링하였으며, 해석에 사용된 전체 유동 영역과 형상 구성은 Fig. 6에 나타내었다. 경계조건은 Fig. 7에 제시하였으며, 입구 조건(inlet)은 공기가 균일하게 유입되도록 구형 형태의 압력 입구(pressure inlet)로 설정하였다. 벽면 조건(wall)의 경우, 입구 구를 제외한 사각형 육면체의 모든 벽면과 블레이드는 강체(rigid body)로 가정하고 no-slip 조건을 적용하여 고체 경계에서 유체 속도가 0이 되도록 하였다. 출구 조건(outlet)은 블레이드 후면에 압력 출구(pressure outlet)를 적용하였으며, 대기압 조건을 모사하기 위해 정압 0 Pa를 지정하였다.

Table 2 CFD analysis conditions

Governing equation	Model	Motor speed	Iterations
RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes)	SST (shear stress transport) $k-\omega$	20,000 rpm	1,200

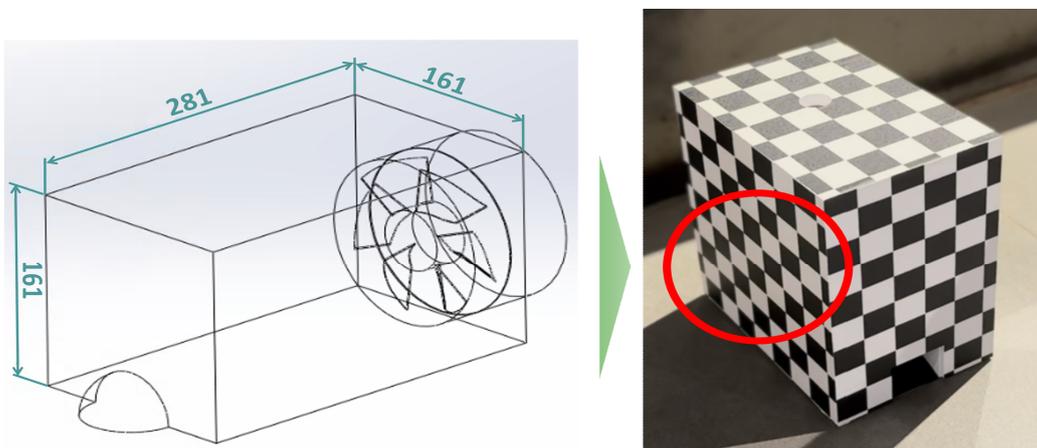


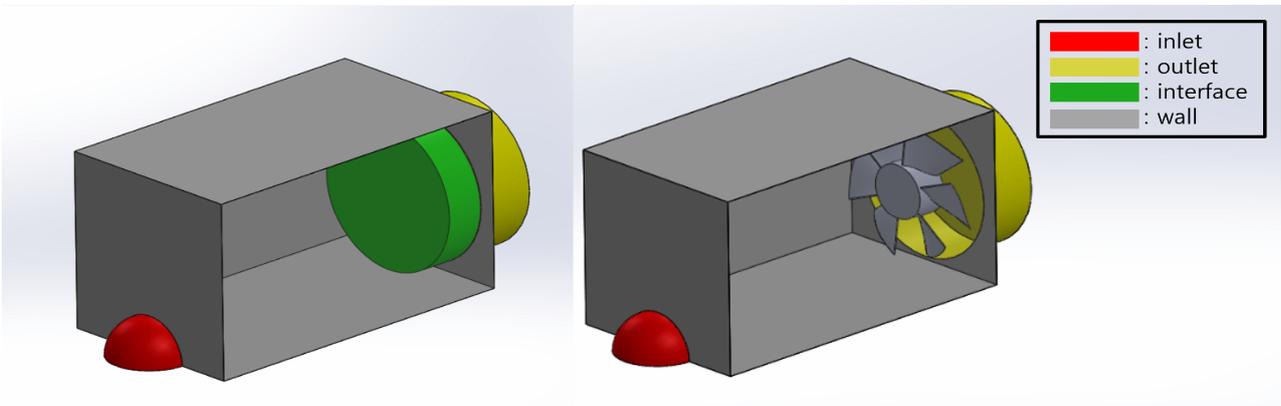
Fig. 6 Computational domain of the centrifugal fan region in the proposed pest capture device

**Table 3** Mass flow rate results of DOE experiments

Experiment no.	A Number of blades [ea]	B Taper angle [deg]	C Blade width [mm]	D Hub diameter [mm]	Mass flow rate [kg/s]
1	6	15	10	24	4.8881e-2
2	6	22.5	15	37	5.7595e-2
3	6	30	20	50	6.4637e-2
4	8	15	15	50	5.7772e-2
5	8	22.5	20	24	6.3490e-2
6	8	30	10	37	4.0278e-2
7	10	15	20	37	5.8343e-2
8	10	22.5	10	50	4.6116e-2
9	10	30	15	24	5.5730e-2

**Table 4** Design factor combinations corresponding to maximum and minimum mass flow rates

Experiment no.	A Number of blades [ea]	B Taper angle [deg]	C Blade width [mm]	D Hub diameter [mm]
Max. T DOE (#3)	6	30	20	50
Min. T DOE (#6)	8	30	10	37



**Fig. 7** CFD model of centrifugal fan

격자(mesh)는 유동 특성을 정확히 포착하기 위해 각 모델별로 평균 약 60만 개(546,543개)의 노드를 사용하여 구성하였으며, 특히 입구 부근에서의 질량 유량을 정확히 계산하기 위해 국부적으로 세밀한(fine) 격자를 적용하였다.<sup>(19)</sup> 해석의 안정적인 수렴을 위해 초기 단계에서 800회 이상의 반복(iteration)을 수행하여 잔차가 충분히 감소하도록 하였고, 형상 변화에 따른 수렴 지연을 고려하여 총 1,200회의 반복 계산을 수행하였다.

4.3 해석 결과

L<sub>9</sub>(3<sup>4</sup>) 직교배열에 따라 선정된 9개 블레이드 형상 실험점에 대해 전산유체역학 해석을 수행한 결과, 질량유량(kg/s)은 Table 3과 같으며, 9개의 실험점에 대한 전산유체역학 해석 결과, 최대 질량 유량은 3번 실험에서, 최소 질량 유량은 6번 실험점에서 각각 나타났으며, 해당 결과는 Table 4에 제시하였다.

## 5. 최적조합

### 5.1 평균분석(ANOM)

본 연구에서는 흡입 팬 블레이드 성능 실험 결과를 분석하기 위해 평균분석(ANOM: analysis of means)을 적용하였다. 평균분석은 실험계획법에서 각 설계 인자의 수준별 평균 응답값을 전체 평균 응답값과 비교함으로써, 인자가 응답 특성에 미치는 상대적 영향 경향을 직관적으로 파악하는 방법이다.

평균분석의 기본 개념은 전체 실험 결과로부터 전체 평균 응답값을 계산한 후, 각 인자에 대해 동일한 수준을 갖는 실험 결과들의 평균값을 산출하고 이를 전체 평균과 비교하는 것이다. 식 (1)에서 전체 평균 응답값  $\bar{y}$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \quad (1)$$

여기서  $y_i$ 는  $i$ 번째 실험의 응답값이며,  $N$ 은 전체 실험 횟수를 의미한다. 또한 특정 인자  $A$ 의  $k$ 번째 수준에 대한 평균 응답값  $\bar{y}_{A,k}$ 는 해당 수준을 포함하는 실험 결과들의 평균으로 계산된다.

$$\bar{y}_{A,k} = \frac{1}{n_k} \sum_{j=1}^{n_k} y_{A,k,j} \quad (2)$$

식 (2)에서는  $n_k$ 인자  $A$ 의  $k$ 번째 수준이 포함된 실험 횟수이며,  $y_{A,k,j}$ 는 해당 조건에서의 응답값이다. 각 수준의 평균 응답값을 전체 평균과 비교함으로써, 인자의 수준 변화에 따른 응답 특성의 변화를 시각적으로 확인할 수 있다.

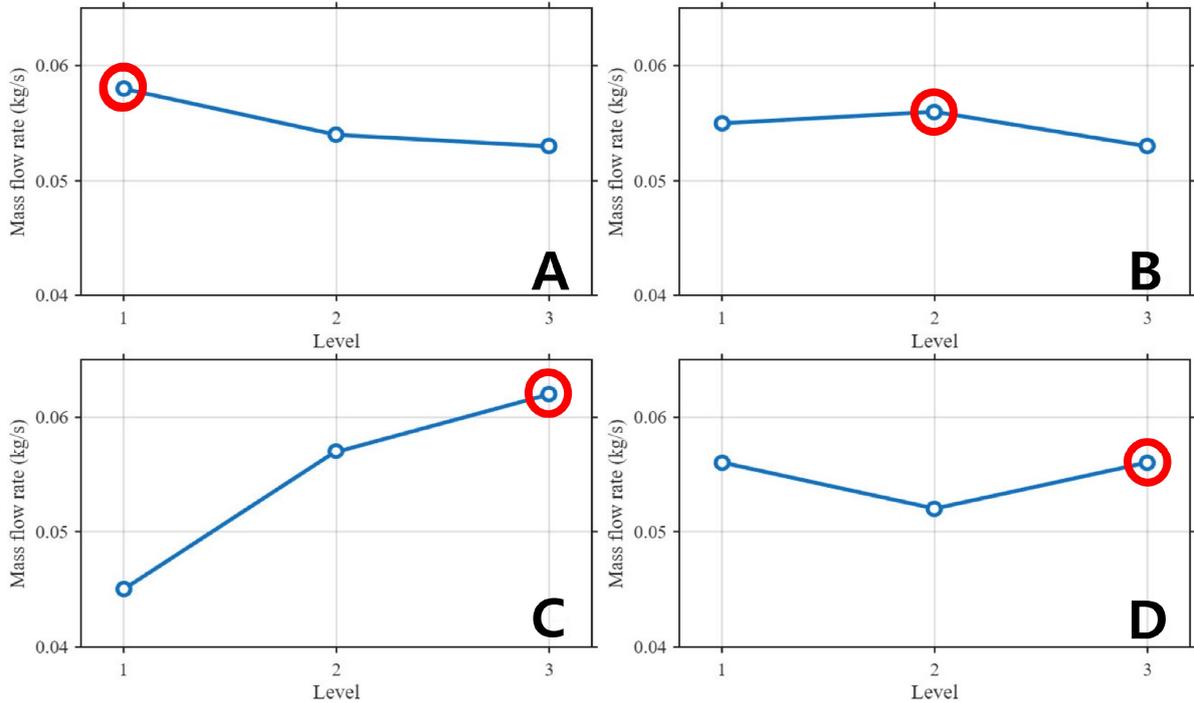
이러한 평균분석은 전통적인 분산분석과 달리 유의확률(p-value)이나 F-ratio를 요구하지 않으며, 제한된 수의 실험 결과에서도 인자의 영향 경향과 최적 수준을 효과적으로 도출할 수 있다는 장점이 있다. 따라서 본 연구와 같이 전산유체역학 기반 수치 실험을 활용한 설계 최적화 문제에 적합한 분석 방법으로 판단하였다.

### 5.2 블레이드

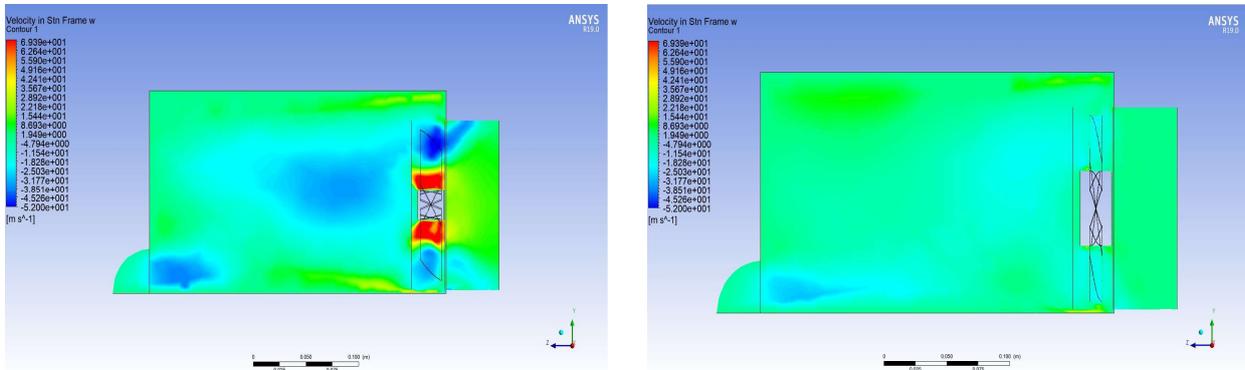
블레이드 실험에서는 질량 유량(mass flow rate)을 응답값으로 설정하고, 날개 개수(A), 테이퍼 각(B), 날개 폭(C), 허브 지름(D)의 네 인자를 독립 변수로 하여 4인자 3 수준 직교배열표(L9)를 구성하였다. 총 9개의 실험 조합에 대해 전산유체역학 해석을 수행하여 질량 유량 데이터를 수집하였으며, 이에 대한 ANOM 분석 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 분석 결과, 평균 응답값이 가장 높게 나타난 설계 조합은 A = 6 ea, B = 30°, C = 20 mm, D = 50 mm로, 실험 조건 중 최대 질량 유량인 0.0646 kg/s를 기록하였다.

Fig. 9에 제시된 ANOM 분석 결과를 보면, 블레이드 개수(A)는 감소할수록 질량유량이 증가하는 경향을 보였다. 이는 블레이드 수가 증가할 경우 유동 저항이 커져 손실이 증가하기 때문이며, 반대로 6개의 블레이드를 적용한 조건에서는 유체 가속 효과가 극대화되어 가장 효율적인 유량 성능이 확보되었다. 또한 날개 폭(C)은 증가할수록 블레이드와 유체의 접촉 면적이 확대되어 더 많은 유체를 가속시킬 수 있었으며, 허브 지름(D)은 출구 단면적 확대에 의해 질량 유량 증가에 기여하는 것으로 나타났다. 반면 테이퍼 각(B)은 본 실험 범위 내에서 다른 인자들에 비해 상대적으로 영향이 미미하였는데, 이는 소형 원심팬 구조 특성상 블레이드 끝단 각도보다는 전체 유로 면적과 블레이드 형상이 주요 지배 인자로 작용했기 때문으로 해석된다.

아울러 최대 질량 유량 조건에서는 입구 부근에서 고속의 유동이 형성되어 효율적인 흡입이 이루어진 반면, 최소 질량 유량 조건에서는 상대적으로 유동 속도가 낮고 불균일한 분포를 보였다. 이러한 유동



**Fig. 8** Effect of blade shapes by analysis of means (ANOM): (a) number of blades (ea); (b) taper angle (deg); (c) blade width (mm); (d) hub diameter (mm)



(a) Velocity magnitude contour for the blade configurations with maximum mass flow rates

(b) Velocity magnitude contour for the blade configurations with minimum mass flow rates

**Fig. 9** Velocity magnitude contours for the blade configurations with maximum and minimum mass flow rates

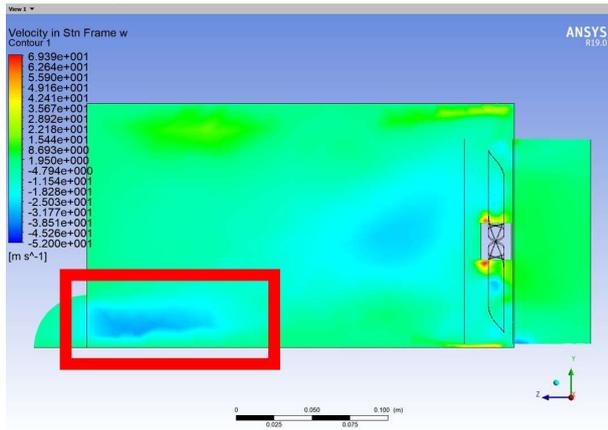
특성의 차이는 날개 형상과 배치에 따른 압력 구배 형성 및 와류 발생 특성의 차이에 기인하는 것으로 판단된다.

최적 설계 조합과 최소 성능 조건에서의 유동 특성을 비교하기 위해, 최대 및 최소 질량 유량 조건에 대한 유속 분포를 Fig. 9에 나타내었다. 최대 질량 유량 조건에서는 입구 부근과 블레이드 통과 영역에서 상대적으로 높은 유속이 형성되어 유체가 효율적으로 가속되는 양상을 보였다. 반면 최소 질량 유량 조건에서는 전반적으로 유속이 낮고, 블레이드 주변에 국부적인 정체 영역이 형성되어 비균일한 유동 분포가 나타났다. 이러한 유동 구조의 차이는 블레이드 형상 및 배치에 따른 압력 구배 형성과 와류 발생 특성의 차이에 기인하며, 결과적으로 흡입 성능 차이로 이어지는 것으로 판단된다.

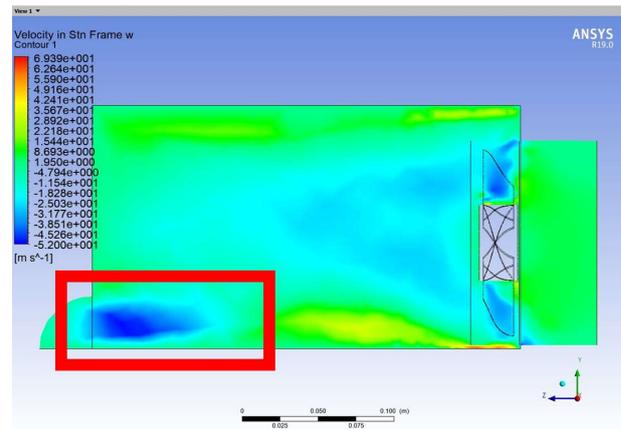
5.3 최적조합 예측

Table 5 Comparison of DOE; predictive design; CFD validation results

	A Number of blades [ea]	B Taper angle [deg]	C Blade width [mm]	D Hub diameter [mm]	Mass flow rate [kg/s]
Best in DOE	6	30	20	50	6.4637e-2
Predictive design (ANOM)	6	22.5	20	50	6.6823e-2
CFD validation					6.5516e-2



(a) Velocity contour of initial blade model



(b) Velocity contour of optimized blade model

Fig. 10 Comparison of CFD results between initial blade model; optimized blade model

평균분석을 통해 도출된 최적 수준 조합은 A1 B2 C3 D3(날개 개수 6개, 테이퍼 각 22.5도, 폭 20 mm, 허브지름 50 mm)으로, 이는 망대 특성(질량 유량의 최대화)을 고려한 결과이다. 이 최적 조합의 예측 성능을 계산하기 위해 다음과 같은 예측 방정식을 사용하였다.

$$Y_{pred} = \bar{Y} + \sum_{i=1}^n (A_i - \bar{Y}) \quad (3)$$

식 (3)에서  $Y_{pred}$ 는 최적 조합의 예측값,  $\bar{Y}$ 는 전체 실험의 평균값,  $A_i$ 는 각 최적 수준의 평균값이다. 이 예측방정식을 통해 계산된 최적 조합의 질량유량은 6.6823e-2kg/s로 예측되었다.

예측 방정식으로 계산된 최적 설계 조합의 성능을 검증하기 위해 해당 조합에 대한 전산유체역학 해석을 추가로 수행하였으며, 관련 결과를 Table 5에 정리하였다. 그 결과, 실제 전산유체역학 해석을 통해 얻은 질량 유량은 6.5515e-2kg/s로, 예측값 6.6823e-2kg/s 대비 약 1.96% 낮게 나타났다. 그러나 초기 L9 실험 중 최고 성능을 보인 실험 3의 질량유량 6.4637e-2kg/s와 비교하면 약 1.36% 높은 값을 유지하였다. 이러한 결과는 예측 경향과 실제 전산유체역학 결과가 전반적으로 일치함을 보여주며, 도출된 최적 설계 조합이 실제 해석에서도 우수한 성능을 갖는다는 것을 확인시켜준다. Fig. 10은 질량 유량과 비례하는 유속을 기준으로 속도 분포를 나타낸 것으로, 초기 모델에 비해 최적화 모델에서 입구 영역의 유속이 증가한 것을 확인할 수 있다.

## 6. 결론

본 연구에서는 실험계획법(DOE)과 전산유체역학 해석을 기반으로 보행해충 스마트 포획 장치에 적용되는 흡입 원심팬 블레이드의 유체 성능을 최적화하고, 이를 센서 기반 자동 제어 시스템과 통합한 시

제품을 제작하였다. 팬 블레이드의 주요 설계 인자를 체계적으로 분석하고 최적 설계 조합을 도출함으로써, 소형 원심팬 조건에서도 질량 유량이 향상된 안정적인 흡입 성능을 확보할 수 있음을 확인하였다.

또한 본 장치는 해충 감지 센서, 흡입 팬, 회전식 끈끈이 트랩, 제어 회로부로 구성된 자동화 시스템을 통해 무인 환경에서도 지속적인 포획이 가능하도록 설계되었다. 특히 해충 사체를 사용자가 직접 마주하지 않고 처리할 수 있는 구조를 적용함으로써, 기존 포획 장치에서 문제로 지적되던 위생적·심리적 거부감을 효과적으로 완화하였다. 이러한 결과는 본 연구가 단순한 장치 구현을 넘어, 유동해석 기반 기계 설계와 사용자 관점을 동시에 고려한 스마트 방제 시스템 설계를 제시한다는 점에서 의의를 갖는다.

본 연구에서는 바퀴목 포획 성능 향상을 위해 흡입 팬 블레이드를 핵심 설계 요소로 설정하였으며, 최적화된 블레이드 형상 도출을 위한 평균분석 기반 예측 모델을 구축하고자 Table 1에 제시된 4인자 3수준 직교배열을 적용하였다. 본 장치의 포획 성능은 해충을 흡입하여 포집 구간으로 유입시키는 능력에 의해 좌우되므로, 유입부를 통과하는 질량 유량은 흡입 성능을 직접적으로 대표하는 지표로 판단하였다. 실험은 직교배열표에 의해 진행하였으며 각 실험 조합에 대해 전산유체역학 해석을 수행하여 질량 유량을 평가하였으며, 해석 결과에 대한 평균분석(ANOM)을 통해 최적 설계 조합을 도출하고 각 인자의 영향 경향을 분석하였다.

ANOM 분석 결과 블레이드 개수는 감소할수록 질량유량이 증가하는 경향을 보였다. 이는 블레이드 수가 증가할 경우 유동 저항이 커져 손실이 증가하기 때문이며, 반대로 6개의 블레이드를 적용한 조건에서는 유체 가속 효과가 극대화되어 가장 효율적인 유량 성능이 확보되었다. 또한 날개 폭은 증가할수록 블레이드와 유체의 접촉 면적이 확대되어 더 많은 유체를 가속시킬 수 있었으며, 허브 지름은 출구 단면적 확대에 의해 질량 유량 증가에 기여하는 것으로 나타났다. 반면 테이퍼 각은 본 실험 범위 내에서 다른 인자들에 비해 상대적으로 영향이 미미하였는데, 이는 소형 원심팬 구조 특성상 블레이드 끝단 각도보다는 전체 유로 면적과 블레이드 형상이 주요 지배 인자로 작용했기 때문으로 해석된다.

평균분석을 통해 도출된 최적 수준 조합은 A1-B2-C3-D3으로, 예측방정식을 통해 계산된 최적 조합의 질량유량은 6.6823e-2kg/s로 예측되었다. 정식으로 계산된 최적 설계 조합의 성능을 검증하기 위해 해당 조합에 대한 전산유체역학 해석을 추가로 수행하였으며, 6.5515e-2kg/s로, 예측값 6.6823e-2kg/s 대비 약 1.96% 낮게 나타났다. 그러나 초기 L9 실험 중 최고 성능을 보인 실험3의 질량유량 6.4637e-2kg/s 과 비교하면 약 1.36% 높은 값을 유지하였다. 이러한 결과는 예측 경향과 실제 전산유체역학 결과가 전반적으로 일치함을 보여주며, 도출된 최적 설계 조합이 실제 해석에서도 우수한 성능을 갖는다는 것을 확인시켜준다. 이를 통해 바퀴목의 포획을 효과적으로 할 수 있는 흡입성능을 개선하였다 볼 수 있다.

종합적으로 본 연구에서 제안한 보행해충 스마트 포획 장치는 가정, 음식점, 병원과 같은 실내 환경뿐만 아니라 농업 시설 및 공공시설에서도 활용 가능한 자동화 방제 솔루션으로서 상용화 가능성을 지닌다. 향후 IoT 기반 원격 모니터링 및 제어 기술과 결합할 경우, 공중보건 및 위생 관리 분야에서 보다 높은 활용성과 과급 효과를 기대할 수 있을 것이다.

### 참고문헌 (References)

- (1) Yang, J. O., Kim, S. W., Noh, D. J., Yoon, C., Kang, S. H. and Kim, G. H., 2008, "Effective Control in Managing German Cockroach, *Blattella Germanica* (Orthoptera: Blattellidae) Using a Push-Pull Strategy," *Korean Journal of Pesticide Science*, Vol. 12, No. 2, pp. 162~167.
- (2) Bang, J. R., Lee, H. R. and Kim, J. H., 1993, "Studies on the Insecticide Resistance of the German Cockroach (*Blattella Germanica* L.) I. Comparisons of Toxicity by Bioassay," *Korean Journal of Applied Entomology*, Vol. 32, No. 1, pp. 24~29.
- (3) Azfar, S., Nadeem, A., Ahsan, K., Mehmood, A., Almoamari, H. and Alqahtany, S. S., 2023, "IoT-based Cotton Plant Pest Detection and Smart-Response System," *Applied Sciences*, Vol. 13, No. 3, Article 1851.
- (4) Yu, D. M., Kim, S., Jang, H. L., Han, D. H. and Kang, L. H., 2019, "Optimal Design of Impeller

- According to Blade Shape Variation Using CFD Simulation,” *Journal of Aerospace System Engineering*, Vol. 13, No. 1, pp. 29~37.
- (5) Kasmaice, S., Kasmaice, S. and Farshad, A., 2024, “Unsteady CFD Simulation of a Rotor Blade under Various Wind Conditions,” *Scientific Reports*, Vol. 14, Article 19176.
- (6) Lee, S. H., Kwon, O. J. and Hur, N., 2013, “Optimization of Duct System with a Cross Flow Fan to Improve the Performance of Ventilation,” *The KSFM Journal of Fluid Machinery*, Vol. 16, No. 1, pp. 40~46.
- (7) Parr, W. C., 1989, “Introduction to Quality Engineering: Designing Quality into Products and Processes,” *Technometrics*, Vol. 31, No. 2, pp. 255~256.
- (8) Phadke, M. S., 1995, *Quality Engineering Using Robust Design*, Prentice Hall, Hoboken, USA, pp. 1~250.
- (9) Montgomery, D. C., 2013, *Design and Analysis of Experiments*, John Wiley & Sons, New York, USA, pp. 1~752.
- (10) Myers, R. H., Montgomery, D. C. and Anderson-Cook, C. M., 2016, *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments*, John Wiley & Sons, New York, USA, pp. 1~856.
- (11) Kim, K. Y. and Seo, S. J., 2004, “Shape Optimization of a Centrifugal Fan Using Response Surface Methodology,” *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 126, No. 5, pp. 842~849.
- (12) Rajabi, N., Rafee, R. and Frazam-Alipour, S., 2017, “Effect of Blade Design Parameters on Air Flow through an Axial Fan,” *International Journal of Engineering*, Vol. 30, No. 10, pp. 1583~1591.
- (13) Launder, B. E. and Spalding, D. B., 1974, “The Numerical Computation of Turbulent Flows,” *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 3, No. 2, pp. 269~289.
- (14) Reynolds, O., 1895, “On the Dynamical Theory of Incompressible Viscous Fluids and the Determination of the Criterion,” *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, Vol. 186, pp. 123~164.
- (15) Wilcox, D. C., 1998, *Turbulence Modeling for CFD*, DCW Industries, La Cañada, USA, pp. 1~540.
- (16) Menter, F. R., 1994, “Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications,” *AIAA Journal*, Vol. 32, No. 8, pp. 1598~1605.
- (17) Luo, J. Y., Issa, R. I. and Gosman, A. D., 1994, “Prediction of Impeller-Induced Flows in Mixing Vessels Using Multiple Frames of Reference,” *8th European Conference on Mixing*, Cambridge, UK, pp. 549~556.
- (18) Montante, G., Lee, K. C., Brucato, A. and Yianneskis, M., 2001, “Numerical Simulations of Impeller Flows Using Multiple Frames of Reference,” *Chemical Engineering Science*, Vol. 56, pp. 2001~2011.
- (19) Chan, K. W., Taib, I. and Wong, X. Y., 2024, “Flow Characteristics Effect on Different Blades Number of Radial Fan,” *Semarak Journal of Thermal-Fluid Engineering*, Vol. 2, No. 1, pp. 1~8.

## 데이터 희소 환경에서의 합성 소나 데이터 생성 및 도메인 간극 해소 기법을 통한 딥러닝 모델의 해저 침적 폐기물 식별 성능 향상

전해명\* · 정태경\*\* · 김진균\*\* · 이익수\*\* · 노재규\*\*†

\* 국립군산대학교 초대용량풍력발전시스템 혁신연구센터, \*\* 국립군산대학교 조선공학과

### Enhancing Underwater Debris Detection in Data-Scarce Environments Using Synthetic Sonar Data and Domain Adaptation based Deep Learning

Haemyung Chon\*, Taegyeong Jeong\*\*, Jinyun Kim\*\*, Iksoo Lee\*\* and Jackyou Noh\*\*†

\* The Innovation Research Center for Wind Turbine System, Kunsan National University,

\*\* Dept. of Naval Architect, Kunsan National University

(Received January 9, 2026 ; Revised January 27, 2026 ; Accepted January 27, 2026)

**Key Words:** Underwater Debris(해저 침적 폐기물), Synthetic Sonar Data(합성 소나 데이터), Style Transfer(스타일 전이), Data Sparse Environment(데이터 희소 환경), Deep Learning(딥러닝)

**초록:** 해저 침적 폐기물은 생태계를 위협하고 항행 안전을 저해하지만, 실제 소나 데이터의 부족으로 인해 딥러닝 기반 탐지 모델을 개발하는 데 어려움이 있다. 본 연구에서는 이러한 데이터 부족 문제를 해결하기 위해 OceanSim을 사용하여 합성 데이터를 생성하였으며, 합성 이미지와 실제 이미지 사이의 도메인 간극(domain gap)을 극복하기 위해 스타일 전이(style transfer) 모듈을 구현했다. 이 방식은 대상 물체의 구조적 형태는 그대로 유지하면서, 실제 소나 데이터에서 관찰되는 사실적인 노이즈와 질감 특성을 주입한다. 실험 결과, 전처리된 합성 데이터만으로 학습된 모델은 실제 소나 이미지에서 70%의 정확도를 달성했으며, 이는 가공되지 않은 합성 데이터만으로 학습했을 때보다 4.6배 향상된 수치이다. 이러한 결과는 물리 기반의 합성 데이터 생성과 도메인 적응 기술의 결합이 데이터 부족 문제를 효과적으로 해결하고, 수중 탐지 모델의 일반화 성능을 크게 향상시킬 수 있음을 입증한다.

**Abstract:** Underwater debris threatens ecosystems and navigation, yet deep-learning detection is hindered by a scarcity of real-world sonar data. To address this, we generated synthetic data using OceanSim and implemented a style transfer module to bridge the domain gap between synthetic and real imagery. This approach preserves the structural integrity of target objects while incorporating realistic noise and texture. Experimental results show that a model trained exclusively on this preprocessed synthetic data achieved 70% accuracy on real sonar images—a 4.6-fold improvement over training on raw synthetic data. These findings demonstrate that combining physics-based synthetic generation with domain adaptation effectively overcomes data scarcity and significantly enhances the generalization of underwater detection models.

## 1. 서론

해저 침적 폐기물은 생태계 교란, 서식지 훼손, 미세플라스틱과 같은 유해물질의 확산을 초래하고 항행 안전과 어업활동의 위험을 높인다.<sup>(1)</sup> 문제의 심각성 때문에 신속한 탐지와 수거가 필요하지만, 폐기물을 처리하기 위한 첫 단계인 탐지 과정부터 어려움이 발생한다. 침적 폐기물 탐지는 해저에서의 탁도 상승과 기포, 난류로 인한 시야가 좁아지는 저가시성 환경에서 이루어지므로, 시야에 의존하는 광학적

† Corresponding Author, snucurl@kunsan.ac.kr

탐지 방법은 거의 불가능하다. 이러한 저가시성 환경을 극복하기 위해 침적 폐기물 탐지에는 음향 기반 진단 기술인 소나(sonar)를 대안으로 활용한다.

음향 기반 진단 기술 데이터의 획득에는 사이드스캔 소나(side scan sonar), 멀티빔 음향탐사(multibeam echo sounder)와 같은 기술이 활용되어 왔다.<sup>(2)</sup> 획득한 음향 진단 기술 데이터로부터의 해저 침적 폐기물 탐지는 관독자의 경험에 의존하여 물체를 식별하는 방법을 사용한다. 하지만 암반 능선, 사구, 해저 협곡 등이 음향 그림자를 만들어 물체를 가리거나 전파의 각도가 달라져서 생기는 노이즈로 인해 데이터로부터 해저 침적 폐기물의 식별 난이도가 높다. 이로 인해, 관독자가 물체를 잘못 식별할 오답률이 높으며, 관독자의 경험에 따른 정확도의 변동 폭이 크다. 따라서 관독자의 판단 능력과 상관없이 획득한 음향 진단 기술 데이터로부터 일관된 정확도로 해저 침적 폐기물을 식별할 수 있는 자동화된 탐지 기술이 필요하다.

최근에는 자동화된 탐지 기술의 개발을 위한 연구가 이루어지고 있으며, 딥러닝 기반 방법들이 제안되고 있다. 그러나 다수의 연구는 모델 학습 데이터 부족, 불균형 데이터셋 문제 그리고 낮은 데이터 품질로 인한 성능 일반화의 한계가 드러나고 있다.<sup>(3~7)</sup> 이러한 학습 데이터로 인한 문제는 음향 진단 기술 기반 데이터 획득이 어렵다는 점에서 드러난다. 고가의 장비와 선박 운용 비용, 해양의 기상 상태의 불확실성, 안전 규제 및 탐사 허가 절차, 라벨링에서 소요되는 인력 및 비용 등의 문제들이 복합적으로 작용한다. 또한 해저에서의 다양한 지형과 퇴적물, 센서의 설정으로 인한 것들이 변수로 적용하여 균형 잡힌 데이터셋을 구축의 난이도가 높다.

딥러닝 기반의 자동화된 침적 폐기물 탐지 모델이 높은 성능을 발휘하기 위해서는 대규모의 고품질 학습 데이터셋이 필수적으로 필요하다. 균형 잡힌 데이터셋의 구축 난이도 문제를 해결하기 위해 합성 데이터 생성 기법이 연구되고 있다. 합성 데이터 생성 기법은 물리 기반 가상 환경을 통해 가상의 데이터를 획득하는 것이다. 음향 기술 기반 합성 데이터 생성을 위해서는 해저 침적 폐기물과 해저 지형을 가상 환경에 구축하고, 음향 전파 모델을 구현하여야 한다. 하지만 이렇게 생성된 합성 데이터는 실제 데이터와 비교할 때 노이즈의 분포나 질감 등에서 차이를 보이는 도메인 간극(domain gap) 문제가 발생하게 된다. 따라서 합성 데이터로 딥러닝 기술의 학습 데이터셋을 구축하기 위해서는 도메인 간극 문제를 해결해야 할 필요성이 있다.

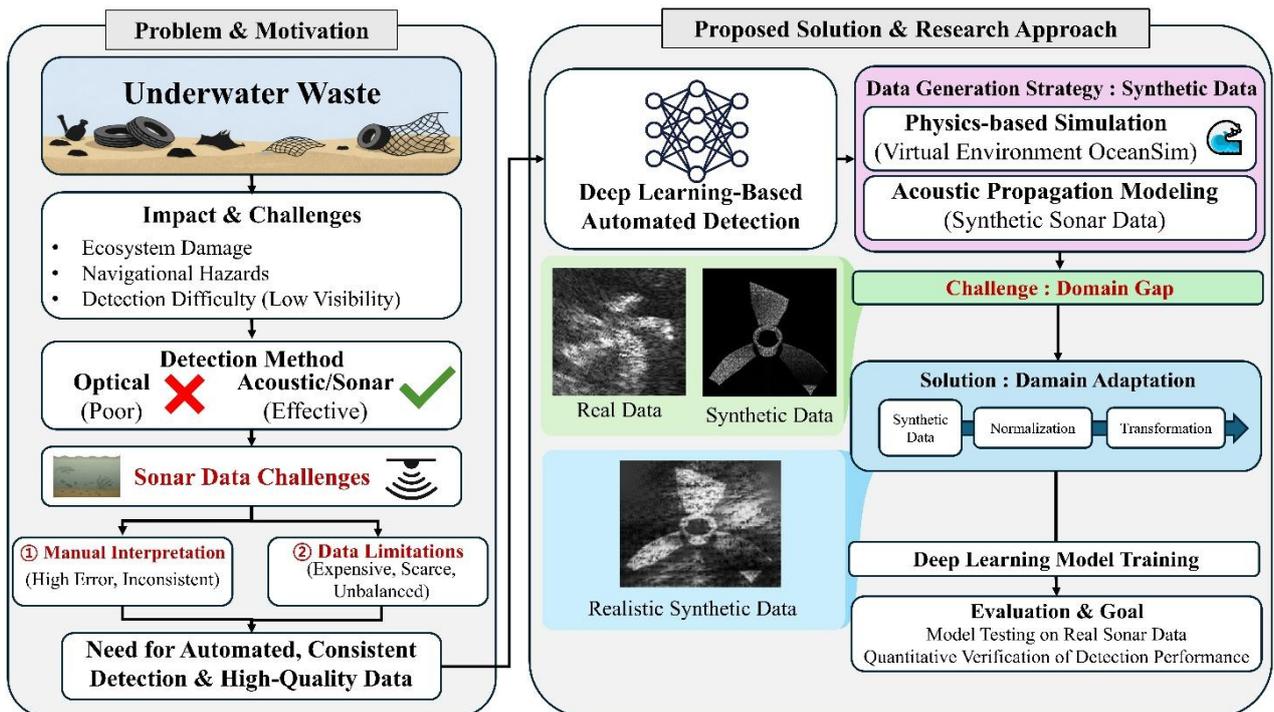


Fig. 1 Overall research framework and methodology

본 연구에서는 관독자의 판단 능력과 상관없이 자동화된 해저 침적 폐기물의 탐지를 위한 딥러닝 활용 기술을 연구하였다. 딥러닝 기반 자동화 기술 연구 과정에서 발생하는 데이터셋 구축 문제를 해결하기 위해 합성 데이터 생성 기법을 활용하였다. 본 연구에서는 도메인 간극 문제를 해소하기 위해 데이터의 현실성을 높이는 방법인 스타일 전이(style transfer) 모델을 전처리 과정에 활용하고자 한다. 생성된 합성 데이터를 학습 데이터로 사용하여 학습한 딥러닝 모델이 실제 해저 탐사에서 획득한 소나 데이터로부터 폐기물을 얼마나 정확하게 식별할 수 있는지 그 성능을 정량적으로 검증하고자 한다.

Fig. 1은 본 연구의 전체적인 수행 절차를 보여주는 개략도이다. 문제 제기 단계부터 합성 데이터 생성, 도메인 간극을 해소하기 위한 전처리 그리고 최종 모델 학습 및 평가에 이르는 일련의 과정을 도식화한 것이다. 본 논문은 다음과 같이 구성 되어있다. 2장에서는 합성 데이터를 이용한 관련 연구에 대해 기술하고, 3장에서는 데이터 생성 실험 및 전처리에 대한 설명을 기술하였다. 4장에서는 딥러닝 기반 탐지를 기술하고 5장에서는 결론과 향후 연구를 기술하였다.

## 2. 관련 연구

딥러닝 기반의 객체 탐지 기술은 고품질의 대규모 데이터셋을 요구하지만, 실제 환경에서의 데이터 확보는 물리적, 비용적 제약이 따른다. 이에 대한 대안으로 합성 데이터 생성 기법이 자율주행, 의료, 로봇 등 다양한 분야에서 실데이터의 한계를 보완하는 핵심 솔루션으로 자리 잡았다. 자율주행 분야에서는 가상 환경을 통해 다양한 기상 및 교통 상황을 구현하여 의미 분할 네트워크의 성능을 높였으며,<sup>(2)</sup> 의료 분야에서는 GAN 및 물리 기반 시뮬레이터를 활용해 희귀 질환 데이터의 부족 문제를 해결하고 있다.<sup>(8,9)</sup> 로봇 분야 또한 도메인 랜덤화를 통해 합성 데이터만으로 객체 검출 성능을 확보하는 등,<sup>(10)</sup> 합성 데이터 활용은 데이터 희소성 문제를 해결하는 타당하고 보편적인 접근법이다.

수중 원격 탐사 분야 중 해저 폐기물 탐지와 같은 과제에서도 이러한 합성 데이터 생성 연구가 활발히 진행되고 있다. 초기 연구들은 주로 Gazebo와 같은 가상 시뮬레이터 내에 소나 모델을 구현하여 데이터를 확보하는 데 주력하였다. Ściegienka 등은 Gazebo 환경에서 전방 주시 소나(forward-looking sonar) 데이터를 생성하여 불발탄 분류 모델을 학습시켰으나, 실제 소나 데이터에 대한 일반화 성능 검증에는 한계를 보였다.<sup>(3)</sup> Basha 등 또한 SAM(segment anything model)과 3D 모델링을 활용해 가상환경 내 합성 소나 데이터셋을 구축했으나, 가상 환경만으로는 실제 해양 환경의 복잡한 음향 특성을 완벽히 모사하기 어렵다는 점을 시사했다.<sup>(4)</sup> Nambiar 등의 연구 역시 공기 중 데이터 획득 후 영상화 하는 방법을 시도했으나, 실제 해양의 산란 특성과 자연스러운 운동을 반영하지 못해 합성 데이터와 실제 데이터 간의 도메인 간극 문제가 여전히 주요한 문제로 남았다.<sup>(5)</sup>

단순한 가상 환경을 넘어 도메인 간극을 줄이기 위해 전이(style transfer)나 도메인 적응(domain adaptation) 기법을 접목하는 연구들이 진행되었다. Jier 등은 노이즈 추가와 이진화 기반의 스타일 전이를, Zhou 등은 트랜스포머(transformer) 기반의 스타일 전이를 통해 합성 데이터에 실제 소나 이미지의 질감과 배경을 입혀 유사도를 높였다.<sup>(6,11)</sup> 또한, Chen 등과 Chengwei 등은 각각 DMCL(domain mix up and contrastive learning) 프레임워크와 CycleGAN 기반의 도메인 적응 기법을 제안하여 도메인 불변 특징을 강화하고자 했다.<sup>(7,12)</sup> 하지만 이러한 선행 연구들은 도메인 간극을 줄이는 과정에서 다음과 같은 한계를 가졌다. 첫째, 스타일 전이 과정에서 합성 데이터의 고유한 객체 특징이 과도하게 변형되거나 배경에 희석되어 작은 객체의 탐지 성능이 저하되는 문제가 발생했다.<sup>(6,12)</sup> 둘째, 복잡한 적응 구조를 적용했음에도 미세한 위치 추정 능력 부족이나 환경 변화에 대한 취약성으로 인해 완전한 도메인 간극 해소를 보여주지 못했다.<sup>(7)</sup> 이는 단순한 질감을 입히거나 복잡한 네트워크 구조만으로는 해저 폐기물 탐지에 필요한 정밀한 특징 보존과 도메인 간극 해소를 확보하기 어렵다는 것을 시사한다.

선행 연구들의 한계를 극복한 해저 폐기물 탐지를 위해서는 정교한 가상 환경 구축과 객체의 특징을 보존하면서도 배경의 이질감을 해소할 수 있는 효율적인 도메인 적응 기법이 필요하다. 이에 본 연구에서는 NVIDIA 사의 OceanSim을 활용하여 물리적 특성이 반영된 고품질의 수중 합성 소나 데이터를 생성함으로써 초기 데이터의 품질을 확보하였다. 나아가 기존 스타일 전이 기법들이 가진 객체 정보 손실과 과도한 변형 문제를 보완하기 위해, TF-hub 기반의 스타일 전이 전처리를 제안한다. 이러한 접근 방식을 통해 실제 소나 데이터의 배경 패턴과 질감을 합성 데이터에 효과적으로 적용하여 도메인 간극을 최소

화하는 동시에, 폐기물의 형태적 특징을 견고하게 보존함으로써 딥러닝 모델이 실질적인 탐지 성능과 일반화 성능을 가질 수 있도록 하였다.

### 3. 데이터 생성 실험 및 데이터 전처리

#### 3.1 가상 환경에서의 합성 소나 데이터 생성

딥러닝 기반의 객체 탐지 기술은 고품질의 대규모 데이터셋을 요구하지만, 실제 환경에서의 데이터 확보는 본 연구에서는 고품질의 합성 소나 데이터를 확보하기 위해 NVIDIA 사의 Omniverse 및 Isaac Sim 플랫폼을 기반으로 개발된 수중 가상 환경 프레임워크인 OceanSim을 활용하여 가상 환경을 구축하였다. OceanSim은 GPU 가속 렌더링과 고급 물리 기반 기술을 통해 수중 환경의 부력, 유체 저항, 파도 역학 등을 정밀하게 구현할 수 있다. 또한, 이미징 소나, DVL(doppler velocity log), 수중 카메라와 같은 다양한 센서 모델의 고충실도 가상 환경을 제공한다.<sup>(13)</sup>

합성 데이터 생성의 핵심이 되는 이미징 소나 모델은 실제 해저 폐기물 탐지 작업에서 널리 사용되는 Blueprint Subsea 사의 Oculus M750-d 제원을 기반으로 파라미터를 설정하였다. 가상 환경 상에서의 소나 빔 패턴은 수평 시야각 130도, 수직 시야각 20도로 설정하여 실제 장비의 빔 특성을 가상 환경 내에 동일하게 모사하였다.

Fig. 2는 광선추적(ray tracing) 개략도 및 가상 소나 데이터 형성 과정이다. 가상 환경에서는 실제 소나 모델을 동일하게 모사할 수 없기 때문에, 소나의 음향 신호를 광선(ray)으로 구현하였다. 가상 소나 시뮬레이터(virtual sonar simulator)에서 발신된 광선이 해저면(seafloor) 또는 표적 표면(target surface)에 도달하게 되면 데이터 포인트가 생성된다. 이때, 가상 소나 시뮬레이터에서 데이터 거리는  $d$ , 가상 소나 시뮬레이터에서 데이터 포인트로 향하는 입사 벡터는  $\vec{v}_{in}$ , 데이터 포인트에서의 표면 법선 벡터는  $\vec{v}_n$ , 표적 표면에 정의된 음향 반사율은  $A_r$ , 그리고 가상 소나 시뮬레이터에서 데이터 포인트까지 전파 거리 증가에 따른 신호 감쇠는  $e^{-\alpha d}$ 로 표기하였다. 각 파라미터는 식 (1)에 의해 음향 강도  $I_{sonar}$ 의 계산에 사용된다.

$$I_{sonar} = A_r \left( -\frac{\vec{v}_{in}}{|\vec{v}_{in}|} \cdot \frac{\vec{v}_n}{|\vec{v}_n|} \right) e^{-\alpha d} \quad (1)$$

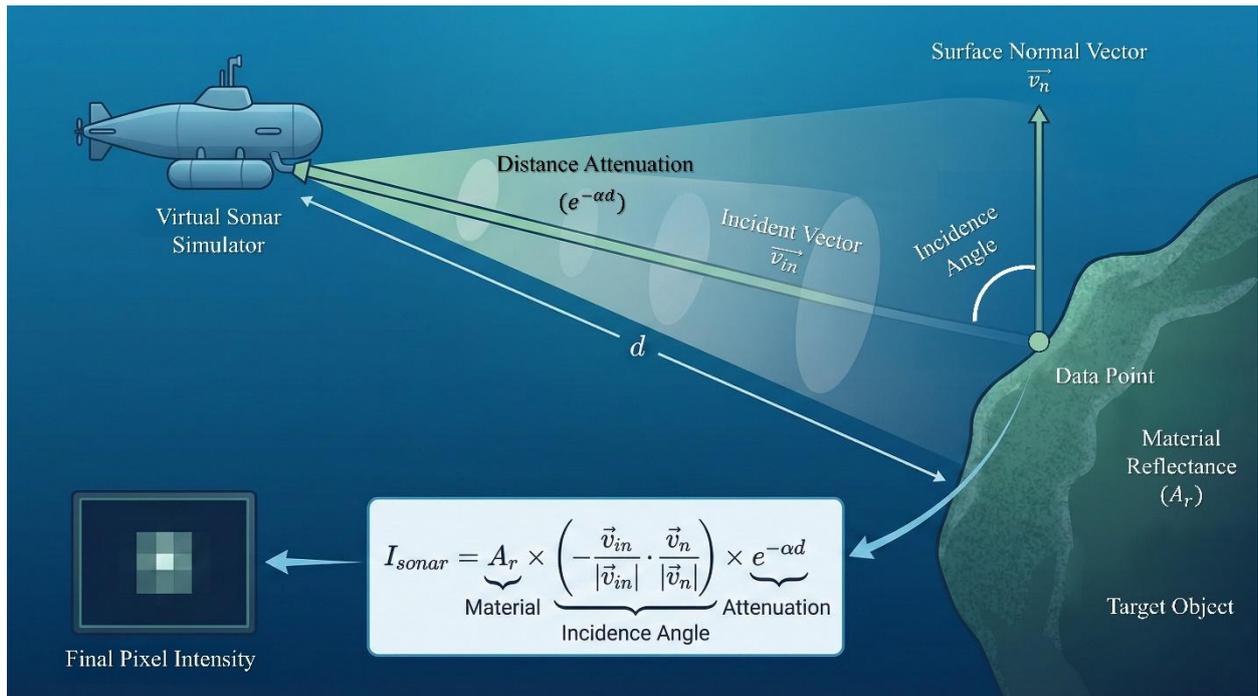


Fig. 2 Virtual sonar image formation process

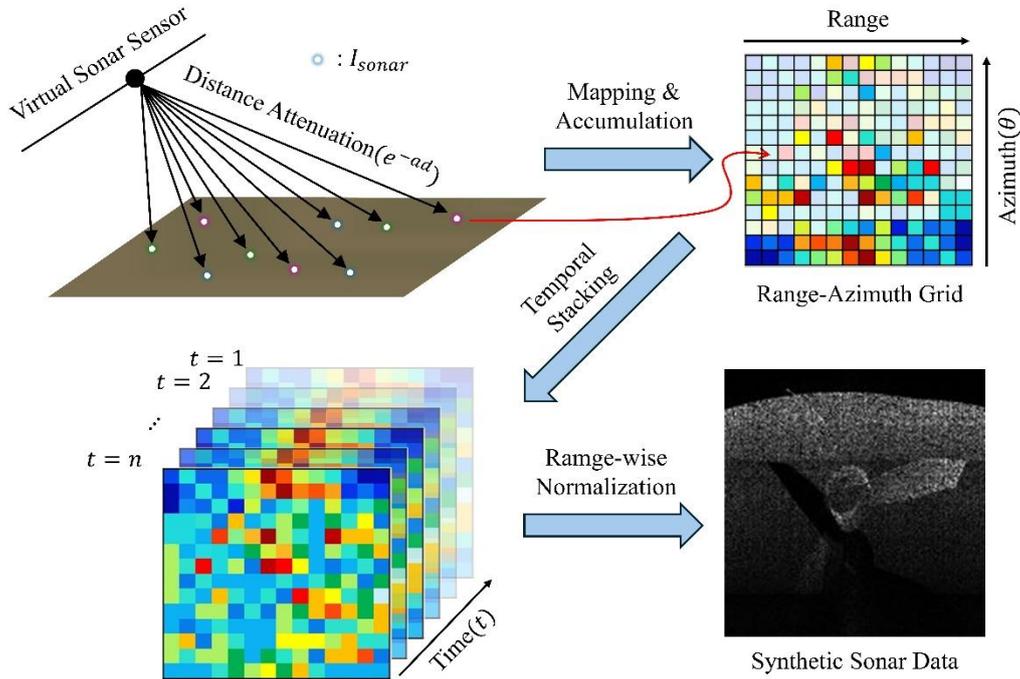


Fig. 3 Virtual sonar image formation process

광선추적을 통해 얻은 거리  $d$ , 입사 벡터  $v_{in}$ , 법선 벡터는  $v_n$ 를 식 (1)에 대입하여 음향 강도  $I_{sonar}$ 를 계산한다. 계산된 각 데이터 포인트의 음향 강도  $I_{sonar}$ 는 Fig. 3과 같이 센서 좌표계에서 거리와 방위각에 따라 대응하는 거리-방위각 셀에 누적하여, 거리-방위각 그리드(range-azimuth grid)를 구성한다. 이 그리드는 각 셀마다 수신된 음향 강도를 집계하여 2차원 강도 분포로 형성하고, 연속된 송, 수신 주기에 대해 시간 축으로 쌓아 올려 3차원 데이터로 확장한다. 이때 실제 이미징 소나에서 관찰되는 입체적인 질감과 형상을 가진 표면이라도 셀마다 다른 음향 강도가 나타나도록 모델링하여 실제 소나 이미지와 유사한 통계적 특성을 갖도록 하였다. 또한 송수신기 빔의 지향 특성을 반영하기 위해 빔 패턴에 따른 노이즈 이득 변화를 모델링하였다. 빔 축에 가까운 셀에는 상대적으로 높은 가중치를, 빔 가장자리와 사이드 로브 방향의 셀에는 낮은 가중치를 곱함으로써, 빔 패턴에 따른 공간적 감도 변화를 강도 값에 반영한다. 이렇게 보정된 거리-방위각 그리드를 2차원 영상으로 재배열 후, 거리별 정규화(range-wise normalization)을 수행해 최종 픽셀 강도(final pixel intensity)를 얻는다.

획득한 최종 픽셀 강도 데이터는 딥러닝 모델의 입력으로 사용할 수 있도록 0에서 255 사이의 정수 범위를 갖는 그레이스케일 이미지 형태로 변형된다. 정규화 된 최종 픽셀 강도 데이터는 이미지 형태의 합성 소나 데이터이며, 해저 폐기물 자동 식별을 위한 딥러닝 모델의 학습용 합성 소나 데이터셋으로 활용하였다.

### 3.2 도메인 간극 해소를 위한 합성 소나 데이터 전처리

물리 기반 가상 환경을 통해 생성된 합성 소나 데이터는 실제 데이터 수집의 한계를 극복할 수 있지만, 데이터 획득 환경의 차이로 인해 실제 데이터와 도메인 간극 문제가 발생하게 된다. 본 연구에서 활용한 OceanSim에서 획득한 합성 소나 데이터는 해저면의 복잡한 퇴적물 질감, 수중 환경에서의 노이즈 그리고 센서의 주파수 특성에 따른 미세한 음영 패턴을 실제 데이터와 동일하게 재현하는 데 한계가 있다. 이러한 도메인 간극은 딥러닝 모델이 합성 데이터의 특징에만 과적합 되게 만들며, 실제 데이터에 대해서는 오답률을 증가시키는 주요 원인이 된다.

이러한 도메인 간극의 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 Chon 등의 연구에서 제안된 변환 모듈(transformation module) 기법을 소나 탐지 분야의 특징에 맞춰 적용하였다.<sup>(14)</sup> 해당 연구는 합성 열화상 이

미지와 실제 이미지 사이의 특징 차이를 해소하기 위해 스타일 전이 기반의 변환 모듈을 제안하였으며, 이를 통해 도메인 간극을 효과적으로 완화하고 탐지 성능의 정밀도와 재현율을 유의미하게 향상시켰다. 본 연구는 해당 연구에서 제안된 모델의 구조를 소나 이미지 특유의 스펙클 노이즈와 음향 그림자 특성을 보존할 수 있도록 변환 프로세스를 변형하여 적용하였다.

연구에서 구현한 변환 모듈은 합성 이미지의 기하학적 구조를 담당하는 콘텐츠(content) 특징과 실제 소나 데이터의 시각적 질감을 담당하는 스타일 특징을 신경망을 통해 결합한다. 전처리 프로세스는 콘텐츠 특징 추출, 스타일 특징 추출 그리고 변환 및 합성 단계로 진행된다.

콘텐츠 특징 추출 단계에서는 OceanSim 가상 환경에서 생성된 합성 소나 이미지를 입력으로 하여, 폐기물의 형태적 특징과 그림자의 상대적 위치 정보를 포함하는 콘텐츠 특징 맵을 추출한다. 스타일 특징 추출 단계에서는 실제 소나 데이터에 포함되어 있는 해저면의 거친 질감, 배경 잡음 그리고 실제 수중 센서에서 나타나는 고유한 화소 분포 특성에 대한 특징을 추출한다. 변환 및 합성 단계에서는 콘텐츠 특징 추출 단계에서 추출된 합성 소나 이미지의 특징과 스타일 특징 추출 단계에서 추출된 실제 소나 이미지의 특징을 인코딩한다. 이 과정을 통해 합성 소나 데이터의 객체 정보는 손실되지 않으면서도 전체적인 질감은 실제 소나 이미지와 유사하도록 변환된다.

이러한 스타일 전이 기반 전처리 방식은 Chon 등이 입증한 바와 같이, 모델이 실제 데이터에서 나타나는 미세한 환경적 변수를 사전에 학습할 수 있도록 돕는다.<sup>(14)</sup> 본 연구는 이를 통해 전처리되어 생성된 합성 데이터를 학습 데이터셋으로 할당함으로써, 실제 소나 데이터 확보가 어려운 상황에서도 딥러닝 모델이 실제 데이터의 특징을 효과적으로 학습하여 높은 일반화 성능을 가질 수 있도록 하였다.

0에서 255 사이의 정수 범위로 정규화 된 이미지 형태의 합성 소나 데이터를  $SI$  행렬 형태로 표현하였을 때, 식 (2)와 같이 각 픽셀 위치를  $SI_{i,j}$  형태로 표현할 수 있다.  $H$ 는 이미지 형태의 합성 소나 데이터의 높이를 나타내며,  $W$ 는 너비를 나타낸다.

$$SI = \begin{bmatrix} SI_{1,1} & SI_{1,2} & \cdots & SI_{1,W} \\ SI_{2,1} & SI_{2,2} & \cdots & SI_{2,W} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ SI_{H,1} & SI_{H,2} & \cdots & SI_{H,W} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$SI$ 에 Chon 등이 제안하는 변환 모듈의 노이즈 계층을 적용하기 위해, 스타일 전이를 통해 스타일 전이 행렬  $STM$ 을 생성한다. 또한, 0.9에서 1.1 사이의 값을 갖는 난수 행렬  $RM$ 을 생성하여 스펙클 노이즈를 더욱 강하게 구현할 수 있도록 하였다. 노이즈 계층에서는 식 (3)과 같이 아다마르 곱(Hadamard product) 연산을 사용하여 세 행렬을 결합하고 전처리 된 합성 소나 데이터  $PSI$ 를 생성한다.  $PSI$ 를 행렬 형태로 표현하였을 때, 각 픽셀 위치  $PSI_{i,j}$ 의 전처리 과정은 식 (3)과 같이 계산된다.

$$PSI_{i,j} = RM_{i,j} \times (0.5 \times SI_{i,j} + 0.5 \times STM_{i,j}) \quad (3)$$

최종적으로  $SI$  행렬은 노이즈 계층의 계산 과정을 거쳐  $PSI$  행렬로 재구성된다. 이러한 과정을 통해

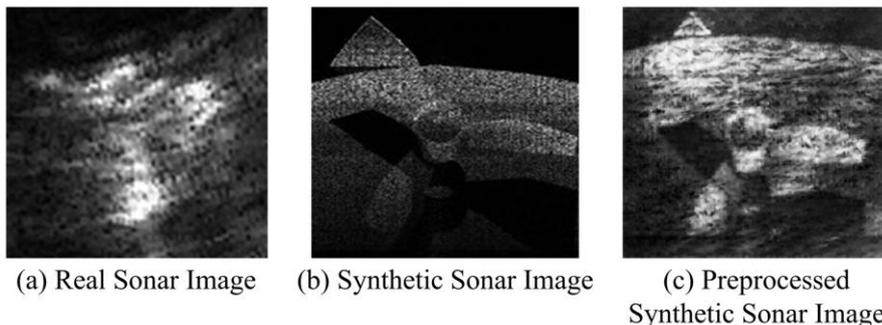


Fig. 4 Comparison of propeller sonar images

변환된 *PSI* 행렬은 다시 0부터 255 사이의 정수 범위로 정규화 되어 이미지 형태로 전처리 된 합성 소나 데이터셋으로 할당된다.

Fig. 4는 본 연구에서 가상 환경을 통해 획득한 합성 소나 이미지와 변환 모듈을 통해 생성된 전처리 된 합성 소나 이미지를 실제 소나 이미지와 비교한 것이다. 합성 소나 이미지가 가지는 객체의 모양은 그대로 보존하면서, 전처리 과정을 통해 실제 소나 이미지의 거친 질감과 노이즈 특성이 주입되었음을 확인할 수 있다.

### 3.3 실험 환경 구성

본 연구에서는 구축된 가상 환경을 통해 획득한 합성 소나 데이터를 활용하여 실제 데이터 부족 문제를 극복하고, 자동화된 침적 폐기물 탐지 기술의 성능을 향상시키는 것을 목표로 한다. 제안하는 합성 데이터 생성 기법의 유효성을 검증하기 위해 실제 수중 환경에서 획득된 공개 데이터셋인 NKSID(*nankwang sonar image-dataset*)를 활용하여 실험 환경을 구성하였다.

실제 소나 데이터 셋인 NKSID는 39°N 118°E는 보하이만(Bohai bay) 해역에서 ROV(*remotely operated vehicle*)에 장착된 전방 주시 소나 Oculus M750d를 통해 수집된 데이터셋이다. 데이터 수집 환경은 목표물과 해저 배경 간의 간섭을 줄이고 식별력을 높이기 위해 목표물을 부표에 매달아 수심 약 5~10 m 지점에 위치시켰다. 촬영은 2~15 m의 다양한 거리와 주파수 대역 750 kHz, 1.2 MHz에서 촬영을 수행되었다. NKSID는 총 8개 클래스, 2,617장의 이미지로 구성되어 있으나 클래스 간 데이터 수가 불균형한 롱테일(*long-tail*) 분포를 보이는 것이 특징이다.

NKSID를 활용한 선행 연구인 Lin 등에서는 가장 많은 표본을 가진 부표(*floats*) 클래스가 951장인 반면, 대형, 소형 프로펠러를 합한 프로펠러의 표본 수는 298장에 불과하는 전형적인 데이터 불균형 문제가 있음을 시사하였다. 이러한 불균형 문제는 딥러닝 모델 학습 시 꼬리 부분(*tail*)에 해당하는 프로펠러 클래스의 탐지 성능을 저하시키는 주요 원인이 된다.<sup>(15)</sup> 이에 본 연구에서는 부족한 프로펠러 클래스의 데이터를 가상 환경을 통해 집중적으로 확충함으로써 실제 소나 데이터셋의 데이터 불균형으로 인한 한계를 극복하고자 하였다.

합성 소나 데이터 획득을 위해 Fig. 5의 좌측과 같이 OceanSim을 활용해 구성한 가상 환경의 해저면에 3D 프로펠러 모델을 배치하여 데이터 수집 환경을 조성하였다. 데이터의 다양성을 확보하기 위해 프로펠러 모델의 배치 각도를 세 가지 유형으로 구성하였으며, Fig. 5의 우측 그림과 같이 DVL의 전진 방향을 기준으로 90도 각도에서 ±20도 범위 내로 시야각을 변경하며 촬영을 수행하였다.

데이터 수집은 각 프로펠러 모델 각도 당 400장씩 수행하여 총 1,200장의 원본 합성 이미지를 획득하

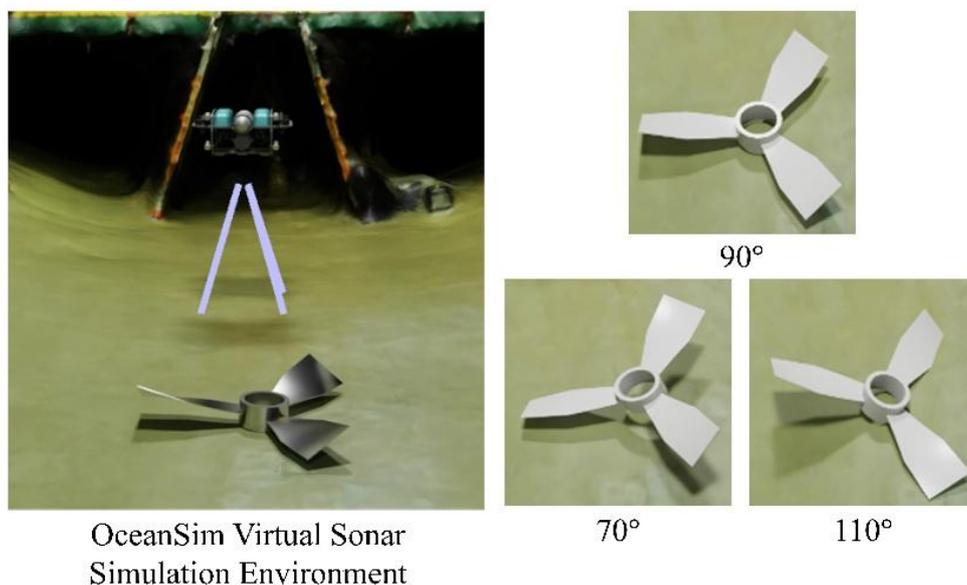


Fig. 5 Virtual environment and propeller model

였다. 이후 육안 검사를 통해 객체의 식별이 불명확하거나 노이즈가 과도한 이미지를 제외하고 최종적으로 1,000장의 프로펠러 합성 소나 이미지를 선별하여 학습용 합성 소나 데이터셋을 구축하였다.

실제 소나 데이터셋인 NKSID의 부표 클래스는 951개, 타이어 클래스는 834개의 실제 소나 데이터로, NKSID에서 가장 많은 데이터로 구성되어있다. 반면 프로펠러 클래스는 277개로 다른 클래스에 비하여 데이터 개수가 부족하다. 실험에 사용된 데이터셋은 NKSID를 구성하는 모든 클래스를 사용하지 않고, 데이터 불균형의 영향을 검증할 수 있도록 부표, 타이어, 프로펠러 클래스로만 구성하였다.

본 연구는 생성된 합성 소나 데이터가 실제 소나 데이터와의 간극을 얼마나 효과적으로 완화할 수 있는지 검증하기 위해, 데이터 부족이 심각한 프로펠러 클래스를 중심으로 세 가지 실험 시나리오를 구성하였다. 본 실험에서 모든 실험 시나리오의 성능 평가를 위한 공동 테스트 데이터셋은 실제 데이터셋 NKSID에서 학습 과정에 포함되지 않도록 각각 독립적으로 추출된 부표, 타이어, 프로펠러 클래스의 실제 이미지 20장씩 총 60장을 할당하여 구성하였다.

본 연구는 생성된 합성 소나 데이터가 실제 소나 데이터와의 간극을 얼마나 효과적으로 완화할 수 있는지 검증하기 위해, 데이터 부족이 심각한 프로펠러 클래스를 중심으로 세 가지 실험 시나리오를 구성하였다. 본 실험에서 모든 실험 시나리오의 성능 평가를 위한 공동 테스트 데이터셋은 실제 데이터셋 NKSID에서 학습 과정에 포함되지 않도록 각각 독립적으로 추출된 부표, 타이어, 프로펠러 클래스의 실제 이미지 20장씩 총 60장을 할당하여 구성하였다.

구체적인 실험 시나리오는 Fig. 6의 프레임워크와 같이 구성되어 있다. Fig. 6의 (a)는 RDM(real data on model training) 데이터셋으로 구성된 실험환경이다. RDM 시나리오에서는 실제 소나 데이터셋인 NKSID의 프로펠러 이미지만을 학습에 사용하여 모델을 구축하며, 이를 통해 실제 데이터를 확보했을 때 도달 가능한 기준 성능(baseline)을 정의한다. Fig. 6의 (b)는 SDM(synthetic data on model training) 데이터셋으로 구성된 실험환경이다. RDM과 대비되는 SDM 시나리오에서는 별도의 전처리를 거치지 않은 합성 소나 데이터만으로 모델을 학습시킨 뒤 실제 테스트 데이터셋으로 성능을 검증한다. 이를 통해 합성 소나 데이터와 실제 소나 데이터 간의 물리적 특성 차이인 도메인 간극이 딥러닝 모델의 식별 성능에 미치는 영향을 분석한다. 마지막으로 본 연구의 핵심인 Fig. 6의 (c)는 PDM(preprocessed synthetic data on model training) 데이터셋으로 구성된 실험환경이다. PDM 시나리오에서는 제안하는 전처리가 적용된 합성 프로펠러 소나 데이터를 학습에 사용하며, 이를 통해 도메인 간극 해소의 영향과 실제 탐지 현장에서의 실질적인 적용 가능성을 검증한다.

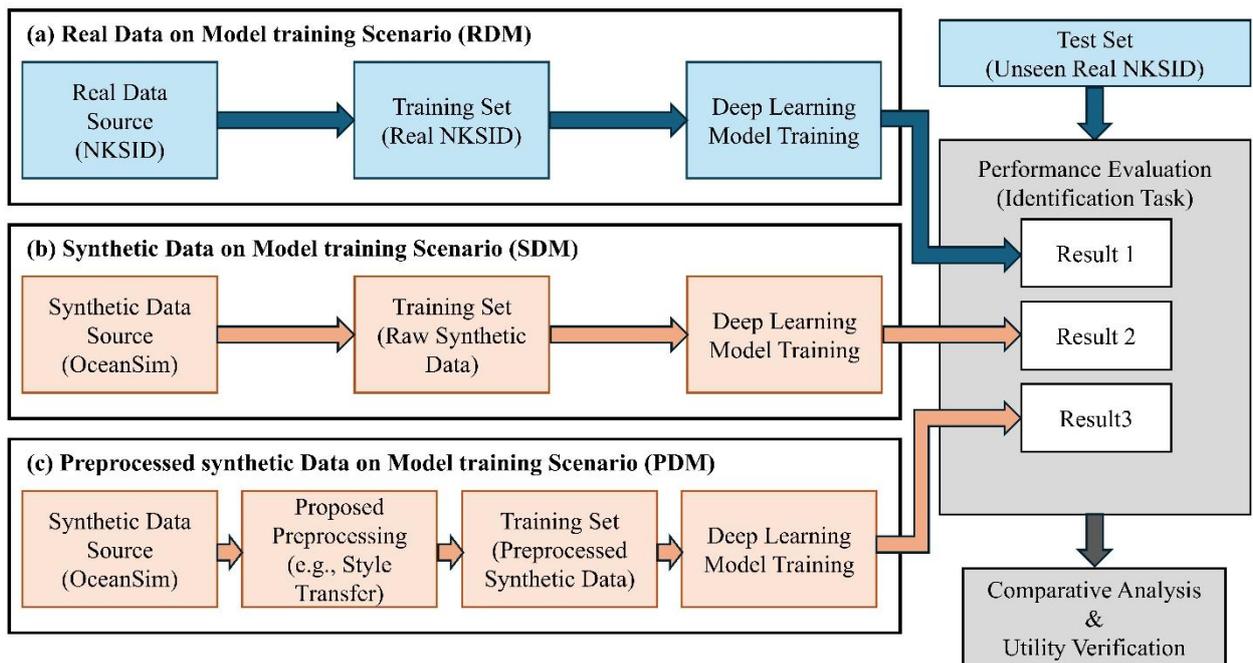


Fig. 6 Framework of experimental scenarios

#### 4. 딥러닝 기반 탐지 결과 및 분석

##### 4.1 딥러닝 모델 학습

본 연구에서는 생성된 합성 소나 데이터셋과 실제 소나 데이터셋을 활용하여 침적 폐기물을 식별하기 위한 딥러닝 모델로 ResNet-152v2를 채택하였다.<sup>(16)</sup> ResNet-152v2는 잔차연결(residual connection)을 통해 신경망의 층이 깊어짐에 따라 발생하는 경사 하강 소멸(vanishing gradient) 문제를 효과적으로 해결한 구조이다. 특히, v2 버전은 사전 활성화(pre-activation) 구조를 도입하여 정보 전달의 효율성을 높였으며, 152개의 깊은 층을 통해 소나 이미지와 같은 복잡한 질감과 미세한 형태적 특징을 정밀하게 추출할 수 있는 능력을 갖추고 있어 본 연구의 목적인 폐기물 식별에 적합할 것으로 판단하였다.

실제 소나 데이터의 희소성 문제를 극복하고 학습의 효율성을 극대화하기 위해, ImageNet 데이터셋으로 사전 학습된(pre-trained) 파라미터를 활용하는 전이 학습(transfer learning)을 사용하였다. 모델의 입력 이미지 크기는 ResNet-152v2 모델에 입력할 수 있는  $256 \times 256$  형태로 변환하였다.

ResNet-152v2 모델의 백본(backbone) 영역은 초기 학습 단계에서 사전 학습된 범용적 특징을 보존하기 위해 가중치를 고정하였으며, 최상단에는 글로벌 평균 풀링(global average pooling) 계층을 배치하여 특징 맵의 공간적 정보를 압축하였다. 이후 과적합을 방지하기 위한 드롭아웃(dropout) 계층과 다중 클래스 분류를 위한 소프트맥스(softmax) 출력 계층을 구성하였다. 모델 최적화를 위한 알고리즘으로는 Adam (adaptive moment estimation)을 사용하였으며, 학습율은  $1 \times 10^{-4}$ 로 설정하여 안정적인 수렴을 유도하였다. 손실 함수로는 다중 클래스 분류에 적합한 희소 범주형 교차 엔트로피(sparse categorical crossentropy)를 채택하였다.

학습 과정에서 배치 크기(batch size)는 32로 설정하였으며, 전체 데이터셋은 학습 데이터 80%, 검증 데이터 20%의 비율로 무작위 분할하여 사용하였다. 또한 모델의 일반화 성능을 확보하고 과적합을 방지하기 위해 두 가지 절차를 적용하였다. 첫째, 검증 손실(validation loss)의 개선이 일정 횟수 이상 지속되지 않을 경우 학습을 조기에 종료하는 조기 중단(early stopping) 기법을 도입하였다. 둘째, 전체 학습 과정 중 검증 정확도(validation accuracy)가 최고치를 기록한 시점의 가중치를 자동으로 저장하는 모델 체크포인트 기능을 활용하여 최적의 일반화 성능을 가진 모델을 최종 채택하였다. 최종적으로 저장된 가중치를 기반으로 실제 소나 데이터에 대한 테스트를 수행하였으며, 모델의 식별 성능을 객관적으로 평가하기 위해 혼동 행렬(confusion matrix)을 생성하여 시나리오별 학습 결과를 비교 및 분석하였다.

##### 4.2 시나리오별 성능 비교

설정한 세 가지 실험 시나리오에 따라 학습된 모델이 실제 수중 환경의 프로펠러 객체를 얼마나 정확하게 식별하는지 비교 분석하였다. 성능 평가는 테스트 데이터셋으로 할당된 60장의 실제 소나 이미지를 대상으로 수행하였다. 각 시나리오별 식별 결과를 혼동 행렬로 나타냈으며, Fig. 7은 RDM 시나리오의 식별 결과 혼동 행렬, Fig. 8은 SDM 시나리오의 식별 결과 혼동 행렬, Fig. 9는 PDM 시나리오의 식별 결과 혼동 행렬을 각각 나타낸다.

True Label	tire	8	0	12
	propeller	12	0	8
	floats	0	0	20
		floats	propeller	tire
		Predicted Label		

True Label	tire	6	4	10
	propeller	1	0	19
	floats	0	0	20
		floats	propeller	tire
		Predicted Label		

True Label	tire	8	10	2
	propeller	3	15	2
	floats	2	1	17
		floats	propeller	tire
		Predicted Label		

Fig. 7 Confusion matrix of RDM scenario Fig. 8 Confusion matrix of SDM scenario Fig. 9 Confusion matrix of PDM scenario

실험 결과, 실제 소나 데이터만을 학습에 활용한 RDM 시나리오에서는 20장의 프로펠러 이미지를 정확하게 분류하지 못하는 결과를 확인하였다. 실제 소나 프로펠러 이미지 20장 중 12장을 부표 클래스로, 8장을 타이어 클래스로 오분류하였다. 이는 NKSID 데이터셋이 가진 데이터의 롱테일 분포로 인한 불균형이 가지는 문제 때문인 것으로 사료된다. 상대적으로 표본 수가 압도적으로 분포된 부표 클래스와 타이어 클래스의 특징을 모델이 편향되게 학습하여, 표본이 부족한 프로펠러 클래스의 특징을 유의미하게 학습하지 못했음을 시사한다. 이는 데이터 희소 환경에서 단순한 실제 데이터 기반 학습만으로는 소수 클래스에 대한 탐지 성능을 확보하기 어렵다는 점을 보여준다.

별도의 전처리를 거치지 않은 합성 데이터를 활용한 SDM 시나리오에서는 20장 중 19장을 타이어 클래스로, 1장을 부표 클래스로 오분류하였다. RDM 시나리오에 비해 식별 성능의 변화가 없었으며, 이는 가상 환경에서 생성된 합성 데이터가 실제 소나 데이터가 가지는 복잡한 노이즈와 질감을 충분히 모사하지 못해 발생하는 도메인 간극의 영향으로 분석된다. 모델이 가상 데이터의 깨끗한 특징은 학습하였으나, 실제 수중 이미지의 불규칙한 특징으로 인해 식별하지 못한 것으로 사료된다.

본 연구에서 제안하는 스타일 전이 및 변환 모듈을 적용한 PDM 시나리오에서는 20장 중 14장을 정답으로 식별하며 70%의 높은 정확도를 달성하였다. 이는 SDM 시나리오 대비 4.6배 향상된 성능으로, 스타일 전이 기법이 합성 데이터에 실제 소나 이미지의 특징과 배경 질감을 효과적으로 모사했음을 의미한다. 결과적으로 모델은 가상 환경의 명확한 객체 형태 정보와 실제 환경의 복잡한 배경 노이즈를 동시에 학습할 수 있었으며, 이를 통해 도메인 간극을 극복하고 높은 일반화 성능을 확보할 수 있었다.

4.3 실험결과 분석

각 시나리오별 모델의 식별 성능이 달라진 원인을 시각적으로 분석하기 위해 Grad-CAM을 활용하였다. Grad-CAM은 최종 컨볼루션 계층의 그래디언트 정보를 활용하여 모델이 분류 결정을 내릴 때 중요하게 고려한 영역을 히트맵(heatmap) 형태로 보여준다.<sup>(17)</sup> 이를 통해 모델이 실제 소나 프로펠러 이미지를 구분할 때 어느 영역의 정보에 의존하고 있는지 분석하였다. Fig. 10은 동일한 실제 소나 프로펠러 이미지를 분류할 때 각 시나리오마다의 Grad-CAM이다.

Fig. 10의 (a)는 RDM 시나리오의 Grad-CAM 시각화 결과이다. 모델의 관심 영역이 프로펠러 객체가 아닌 주변 배경이나 부표 클래스와 유사한 둥근 형태의 노이즈에 분산되어 있음을 확인할 수 있다. 이는 NKSID의 롱테일 분포 문제로 인해 모델이 데이터 수가 압도적으로 많은 타 클래스의 특징을 프로펠러 식별에 잘못 적용하고 있음을 의미한다. 결과적으로 RDM은 프로펠러 고유의 기하학적 특징을 학습하지 못한 채 오분류를 일으키는 양상을 보인다.

Fig. 10의 (b)는 SDM 시나리오의 Grad-CAM 시각화 결과이다. SDM 시나리오에서도 모델이 실제 프로펠러 객체의 형태적 특징을 거의 포착하고 있지 못함을 확인할 수 있다. 특히 20장의 테스트 이미지 중 19장을 타이어 클래스로 오분류한 사례의 히트맵을 살펴보면, 활성 영역이 객체의 중앙부나 날개 구조가 아닌 이미지 하단 및 외곽의 배경 노이즈 영역에 강하게 형성되어 있다. 이는 가상 환경의 깨끗한

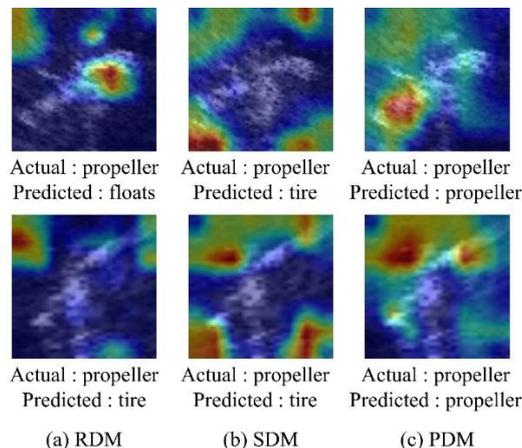


Fig. 10 Comparison of Grad-CAM results

합성 데이터로만 학습된 모델이 실제 소나 이미지의 복잡한 스펙클 노이즈와 배경 질감을 인식하지 못하는 도메인 간극으로 인해, 실제 환경의 불규칙한 노이즈 패턴을 타이어 클래스로 오분류한 것으로 분석된다. SDM 시나리오에서의 Grad-CAM 결과를 통해, 합성 데이터를 모델의 학습 데이터셋으로 활용할 경우 실제 도메인의 통계적 특성을 반영하는 전처리 과정이 도메인 간극 해소를 위해 필수적임을 알 수 있다.

본 연구에서 제안하는 스타일 전이 및 변환 모듈이 적용된 PDM 시나리오의 Grad-CAM 시각화 결과, RDM과 SDM 시나리오와 대비되는 히트맵 양상을 확인할 수 있었다. RDM과 SDM 시나리오에서의 모델이 객체와 무관한 외곽 노이즈에 집중했던 것과 달리, PDM 시나리오에서 모델의 활성 영역은 이미지 중앙에 위치한 프로펠러 객체의 구조적 형태와 일치한다. 히트맵을 살펴보면, 모델은 배경의 스펙클 노이즈보다 프로펠러의 중앙부와 날개가 가지는 형상에 집중하고 있다. 이는 전처리 과정을 통해 실제 소나 이미지의 질감과 노이즈 특성을 학습한 모델이 스펙클 노이즈 속에서도 객체의 기하학적 특징과 배경을 분리하고 있음을 시각적으로 입증한다. 결과적으로 PDM 시나리오에서의 모델은 스타일 전이를 통해 도메인 간극을 해소함으로써, 가상 환경에서 학습한 객체의 형태 정보를 실제 소나 도메인에서도 강건하게 유지할 수 있게 되었다.

## 5. 결론

본 연구에서는 해저 침적 폐기물 탐지의 자동화 과정에서 발생하는 실제 소나 데이터 부족 및 클래스 불균형 문제를 해결하기 위해, 합성 데이터 생성 기법과 스타일 전이 기반의 도메인 간극 해소 방법론을 연구하였다.

첫째, NVIDIA 사의 OceanSim 물리 기반 가상 환경을 활용하여 실제 소나 센서의 물리적 특성을 모사한 고충실도 합성 소나 데이터를 생성함으로써 데이터 희소성 문제를 극복하였다.

둘째, 합성 데이터와 실제 데이터 사이의 도메인 간극 문제를 해소하기 위해 제안된 스타일 전이 변환 모듈은 합성 데이터 속 객체의 형상 정보는 유지하면서 실제 소나 영상 고유의 스펙클 노이즈와 질감을 효과적으로 표현하였다. 이를 통해 모델이 실제 해양 환경의 특성을 사전에 학습할 수 있도록 하였다.

셋째, 성능 검증 시나리오를 통해 전처리된 합성 데이터가 실제 프로펠러 객체 식별에서 70%의 정확도를 달성하며, 실제 데이터만으로 학습했을 때나 전처리 없는 합성 데이터를 활용했을 때보다 우수한 일반화 성능을 보여줌을 확인하였다. Grad-CAM을 통한 분석 결과, 제안된 전처리 기법은 모델이 객체와 무관한 외곽 노이즈에 집중하던 현상을 억제하고 프로펠러의 구조적 형상에 집중하도록 유도하는 것을 확인할 수 있었다.

결론적으로 본 연구에서 제안한 합성 소나 데이터 생성 및 전처리 프레임워크는 실제 데이터 확보가 극도로 어려운 수중 환경에서 딥러닝 기반 폐기물 식별 모델의 성능을 향상시키는 실질적인 대안이 될 수 있음을 보여준다. 향후 연구에서는 프로펠러 외에도 다양한 침적 폐기물 클래스에 대한 데이터를 확보하고, 더욱 복잡한 해저 지형 조건에서의 강건성을 추가로 검증할 계획이다.

## 후 기

본 연구의 일부는 2025년 국립군산대학교의 국립대학 육성사업비의 지원을 받아 수행되었으며, 일부는 산업통상자원부(MOTIE)의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 연구과제(과제번호: RS-2022-KP002707)의 지원을 받아 수행되었습니다.

## 참고문헌 (References)

- (1) Agamuthu, P., Mehran, S. M., Norkhairah, A. and Norkhairayah, A., 2019, "Marine Debris: A Review of Impacts and Global Initiatives," *Waste Management*, Vol. 37, pp. 987~1002.
- (2) Ros, G., Sellart, L., Materzynska, J., Vázquez, D. and López, A. M., 2016, "The SYNTHIA Dataset: A Large

- Collection of Synthetic Images for Semantic Segmentation of Urban Scenes,” *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Las Vegas, USA, pp. 3234~3243.
- (3) Ściegienka, P. and Blachnik, M., 2024, “On the Development of an Acoustic Image Dataset for UXO Classification Using a Forward-Looking Sonar and Transfer Learning Methods,” *Sensors*, Vol. 24, No. 18, Article 5946.
- (4) Kamal Basha S. and Nambiar, A., 2024, “S3Simulator: A Benchmarking Side Scan Sonar Simulator dataset for Underwater Image Analysis,” *Pattern Recognition: 27th International Conference*, Kolkata, India, pp. 219~235.
- (5) Blanford, T. E., Williams, D. P., Park, J. D., Reinhardt, B. T., Dalton, K. S., Johnson, S. F. and Brown, D. C., 2024, “An in-Air Synthetic Aperture Sonar Dataset of Target Scattering in Environments of Varying Complexity,” *Scientific Data*, Vol. 11, No. 1, Article 1196.
- (6) Zhou, X., Yu, C., Yuan, S., Yuan, X., Yu, H. and Luo, C., 2023, “Learning Visual Representation of Underwater Acoustic Imagery Using Transformer-Based Style Transfer,” *ICDIP '23: Proceedings of the 15th International Conference on Digital Image Processing*, Nanjing, China, pp. 1~9.
- (7) Wei, C., Bai, Y., Liu, C., Zhu, Y., Wang, C. and Li, X., 2024, “Unsupervised Underwater Shipwreck Detection in Side-Scan Sonar Images based on Domain-Adaptive Techniques,” *Scientific Reports*, Vol. 14, No. 1, Article 12687.
- (8) Koetzier, L. R., Wu, J., Mastrodicasa, D., Lutz, A., Chung, M., Koszek, W. A., Pratap, J., Cbaudbari, A. S., Rajpurkar, P., Lungren, M. P. and Willeminck, M. J., 2024, “Generating Synthetic Data for Medical Imaging,” *Radiology*, Vol. 312, No. 3, Article e232471.
- (9) Gao, C., Killeen, B. D., Hu, Y., Grupp, R. B., Taylor, R. H., Armand, M. and Unberath, M., 2023, “Synthetic Data Accelerates the Development of Generalizable Learning-based Algorithms for X-ray Image Analysis,” *Nature Machine Intelligence*, Vol. 5, pp. 294~308.
- (10) Tobin, J., Fong, R., Ray, A., Schneider, J., Zaremba, W. and Abbeel, P., 2017, “Domain Randomization for Transferring Deep Neural Networks from Simulation to the Real World,” *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Vancouver, Canada, pp. 23~30.
- (11) Xi, J., Ye, X. and Li, C., 2022, “Sonar Image Target Detection Based on Style Transfer Learning and Random Shape of Noise under Zero-Shot Target,” *Remote Sensing*, Vol. 14, No. 24, Article 6260.
- (12) Chen, Y., Song, P., Liu, H., Dai, L., Zhang, X., Ding, R. and Li, S., 2023, “Achieving Domain Generalization for Underwater Object Detection by Domain Mixup and Contrastive Learning,” *Neurocomputing*, Vol. 528, pp. 20~34.
- (13) Song, J., Ma, H., Bagoren, O., Sethuraman, A. V., Zhang, Y. and Skinner, K. A., 2025, “OceanSim: A GPU-Accelerated Underwater Robot Perception Simulation Framework,” *arXiv preprint*, arXiv:2503.01074.
- (14) Chon, H., Oh, D. and Noh, J., 2025, “Enhanced Prediction Performance of Internal Defect Detection in Wind Turbine Blades on Thermography Using Deep Learning Models with Preprocessed Synthetic Data,” *Applied Sciences*, Vol. 15, No. 6, Article 3042.
- (15) Lin, Y., He, S. and Luo, W., 2025, “Dynamic Margin Contrastive Learning for Open-Set Recognition in Long-Tailed Sonar Imagery,” *Scientific Reports*, Vol. 15, No. 1, Article 22617.
- (16) He, K., Zhang, X., Ren, S. and Sun, J., 2016, “Identity Mappings in Deep Residual Networks,” *Computer Vision – ECCV 2016*, Amsterdam, Netherlands, pp. 630~645.
- (17) Selvaraju, R. R., Cogswell, M., Das, A., Vedantam, R., Parikh, D. and Batra, D., 2017, “Grad-Cam: Visual Explanations from Deep Networks via Gradient-based Localization,” *2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, Venice, Italy, pp. 618~626.

# 기술과 교육 편집위원회

ISSN 2288-3991(Online)

## 편집장

구남서

건국대학교

E-mail: nsgoo@konkuk.ac.kr

## 편집인

이경우

현대자동차

caselee@hyundai.com

김홍수

동국대학교

heungsoo@dongguk.edu

손정현

부경대학교

jhsohn@pknu.ac.kr

홍주표

한국기술교육대학교

joopyo@koreatech.ac.kr

윤현식

부산대학교

lesmodel@pusan.ac.kr

송시문

한양대학교

simonsong@hanyang.ac.kr

유상석

충남대학교

stonex1004@hotmail.com

박치용

경상국립대학교

sogaya3@hanmail.net

정영도

한국기계연구원

yjung@kimm.re.kr

박우태

서울과학기술대학교

wtpark@seoultech.ac.kr

김우현

전남대학교

whkim@jnu.ac.kr

유승진

한국기계연구원

seungjinyoo@kimm.re.kr

전주현

중앙대학교

jhjeon@cau.ac.kr

## 부편집인

김주용

한국지역난방공사

jkim43@kdhc.co.kr

김태진

전북대학교

tjkim@jbnu.ac.kr

문장혁

중앙대학교

jhmoon84@cau.ac.kr

임성진

서울과학기술대학교

acebtif@seoultech.ac.kr

박상인

인천대학교

sangin.park@inu.ac.kr

오동욱

조선대학교

dwoh@chosun.ac.kr

김동권

아주대학교

dkim@ajou.ac.kr

유재영

고려대학교

jryu@korea.ac.kr

조주형

한국기계연구원

antocho@kimm.re.kr

임재혁

경희대학교

jaehyuklim@khu.ac.kr

박종원

한국기계연구원

jwpark@kimm.re.kr

강윤정

제주대학교

youn.kang@jejunu.ac.kr

정훈의

울산과학기술원

hoonejeong@unist.ac.kr

한상목

한국지질자원연구원

smhan@kigam.re.kr

김선영

국립군산대학교

sykim77@kunsan.ac.kr

신재호

경일대학교

jhshin@kiu.kr

대한기계학회논문집

C

제14권 제1호

발행  
편집  
발행  
은

행  
산  
조

일  
인  
소  
로  
처

2026년 3월 1일  
사단법인 대한기계학회  
회장 리한기  
사무처장 남기광  
사단법인 대한기계학회, 서울시 강남구 테헤란로 7길 22  
http://www.ksme.or.kr, TEL : (02)501-3646 ~ 8, FAX : (02)501-3649  
7519743번  
한국학술정보(주)

