기술과 교육

TECHNOLOGY AND EDUCATION

제11권 제2호, 2023년 9월 | VOL.11, NO.2, September 2023

대한기계학회 논문집 TRANSACTIONS OF THE KSME C

C

TECHNOLOGY AND EDUCATION

대한기계학회 KSME www.ksme.or.kr

기술과 교육

(대한기계학회논문집)

C

제11권 제2호, 통권 제25호 ISSN 2288-3991(Online) 2023년 9월

차 례

<응용기술논문-특집섹션: 제12회 전국학생설계경진대회>

객체 추종 시스템을 적용한 높이 조절 리프팅 카트의 개발
……조명현·박건영·박성준·김범주… 65

고효율 브레이크 미세먼지 집진 장치의 개발
……서장원·이지수·이혁진·박이정·신정헌… 75

재활용 용기의 불순물 제거를 위한 스카라 로봇 개발
……김지원·권혁주·황우현… 83

롤러형 압전 에너지 하베스팅 시스템 설계 최적화
……최민혁·이현승·김시후·방진홍·임기훈·도재혁… 95

폴딩 구조를 활용한 전동 화물 이송 장치의 개발
……양재성·김태연·김범주… 109

<응용기술논문>

실내 전차포 사격을 위한 유·무인 협업 기반의 시험 장치 개발
……김보성·김윤건·김응수·정희영·김영빈… 119

시추장비 통합운용제어시스템 및 HILS 개발
……문건혁·김성태·임범현·석진욱·조승호·이재용·우남섭·김영주·김종민… 129

오픈 소스 및 프리 소프트웨어를 이용한 제어기 설계 및 제작
……이 상 헌… 137

지지격자의 비탄성 특성을 적용한 핵연료집합체 내진해석
……임혜진·문종성·박남규·김태순… 147

인공 지능 기반의 앉은 자세 모니터링 시스템 설계
……김건우·우재협·이상현·주영현·황희윤… 155

디자인 씽킹 기반 집단창의성 교육목표 분류체계에 대한 중요도-수행도와 사용성 분석
……김 선 연· 신 재 호… 165

TECHNOLOGY AND EDUCATION

C

Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers

Vol. 11, No. 2 ISSN 2288-3991(Online) September, 2023

C O N T E N T S

<Original Research Articles-Special Section: KSCDC 2022>

Development of Height Adjustable Lifting Cart Using Object Tracking System
……Myeonghyeon Cho, Geonyoung Park, Seongjun Park and Bumjoo Kim…65

Development of High Efficiency Brake Fine Dust Collecting System
……Jang Won Seo, Ji Soo Lee, Hyuk Jin Lee, Lee Jung Park and Jeong Heon Shin…75

Development of Scara Robot to Remove Impurities from Recycling Containers
……Ji-won Kim, Hyeok-ju Gwon and Woohyeon Hwang…83

Design Optimization of Piezoelectric Energy Harvesting System of Roller-type
……Minhyeok Choi, Hyeonseung Lee, Sihu Kim, Jinhong Bang, Kihoon Lim and Jaehyeok Doh…95

Development of Powered Cargo Converying System Utilizing Folding Structure
……Jaeseong Yang, Taeyoun Kim and Bumjoo Kim…109

<Original Research Articles>

Development of a Test System for Human – Robot Cooperation in the Indoor Gun and Ammunition Firing Range……Bo Seong Kim, Yoon Koen Kim, Eung Su Kim, Hee Yung Jeong and Young Bin Kim…119

Development of Drilling Control System and HILS
……Geonhyeok Moon, Sungtae Kim, Bum Hyun Lim, Jinwook Seok, Seong Ho Cho, Jaeyong Lee, Nam Sub Woo, Young Ju Kim and Jongmin Kim…129

Design and Implementation of Control System Using Open-source and Free Software
……SangHeon Lee…137

Seismic Analysis for Fuel Assembly using Inelastic Properties of Spacer Grid
……Hye-Jin Lim, Jong-Sung Moon, Nam-Gyu Park and Tae-Soon Kim…147

Design of Sitting Posture Monitoring System based on Artificial Intelligence
……GeonWoo Kim, Jaehyup Woo, Sang-hyun Lee, Young-hyun Joo and HuiYun Hwang…155

IPA and Usability Analysis on the Taxonomy of Educational Objectives for Group Creativity based on Design Thinking……Sun-Yun Kim and Jaeho Shin…165

<응용기술논문> DOI http://dx.doi.org/10.3795/KSME-C.2023.11.2.065 ISSN 2288-3991(Online)

객체 추종 시스템을 적용한 높이 조절 리프팅 카트의 개발§

조명현* · 박건영* · 박성준* · 김범주*†
*공주대학교 기계자동차공학부

Development of Height Adjustable Lifting Cart Using Object Tracking System

Myeonghyeon Cho*, Geonyoung Park*, Seongjun Park* and Bumjoo Kim*†
*Dept. of Mechanical & Automotive Engineering, Kongju Nat'l Univ.

(Received December 22, 2022 ; Revised January 30, 2023 ; Accepted February 9, 2023)

Key Words: Object Tracking (객체 추종), Mobile Robot (이동로봇), Deep Learning (딥러닝), Universal Design (유니버셜 디자인), Rasberry Pi (라즈베리파이)

초록: 4차 산업 기술의 대표적 기술 중 하나인 로봇 기술은 산업과 일상 속 다양한 분야에서 활용되고 있다. 본 연구에서는 이동로봇의 구현 방식인 색 변환 딥러닝 알고리즘을 기반으로 하는 Open CV 라이브러리 및 초음파 센서를 활용한 객체 추종 이동로봇 시스템을 구현한다. 또한 시저 구조와 리드 스크류를 활용한 자동화 리프트 기능을 카트에 결합하여, 사용자로 하여금 중량물 운송 및 이동의 편의성을 극대화하는 카트를 개발하는 것을 연구의 목적으로 한다. 제작 결과 1/8 크기로 제작된 카트에서 5kg의 중량물을 적재한 상태로 객체를 추종하며 구동하는 카트를 구현하였다. 본 작품은 일상생활뿐만 아니라 농업, 물류 산업, 레저스포츠 산업 등 다양한 분야에 활용될 것으로 기대된다.

Abstract: Robot technology, one of the representative technologies of the 4th industrial technology, is being used in various fields in the industry and daily life. In this study, we implement an object-following mobile robot system using an Open CV library and an ultrasonic sensor based on a color conversion deep learning algorithm. The purpose of the study is to develop a cart that maximizes the convenience of transporting and moving heavy goods by combining an automated lift function using a scissor structure and a lead screw with the cart. As a result, a cart that follows and drives objects with 5kg of weight loaded in a cart made of 1/8 size was implemented. This work is expected to be used not only in daily life but also in various fields such as agriculture, logistics industry, and leisure sports industry.

1. 서 론

산업혁명이란 기술 발전이 경제 구조의 변화 및 정치, 사회문화 등의 구조 변화를 가져오는 것으로서, 최근에는 인공지능, 빅데이터, 로봇공학 등의 발전이 산업혁명의 성격을 나타내며 4차 산업혁명이라는 이름으로 일상 속 모습을 변화시키고 있다.(1,2)

4차 산업혁명 기술의 종류에는 위에서 언급한 바와 같이 대표적으로 인공지능(AI: Artificial Intelligence), 빅데이터, 사물인터넷(IOT: Internet of Things), 로봇공학 등이 있다.(3,4) 로봇공학이란 로봇의 설계 구조, 제어, 지능, 운용 등에 대한 학문으로 4차 산업에서의 인공지능, 빅데이터, 사물인터넷 등 정보처리 기술의 발전이 로봇공학에 적용되어 큰 발전이 이루어지고 있다.(5,6) 로봇 기술 중 이동로봇은 4차 산업 기술의 발전과 함께 관심과 수요가 증가하고 있다. 이동로봇은 대형 물류 센터용 로봇, 군사 분야의 이동로봇, 스포츠 및 레저용 전동 카트 등 광범위한 분야에 활용되고 있다.(7) 최근에는 고령화 사회로의 진입, 장애인의 편의성 및 복지 분야의 관심 증가와 더불어 기술 발전에 따른 삶의 질 향상으로 인한 편의, 서비스 분야의 시장규모 확대에 따라서 서비스 로봇 시장에서도 이동로봇의 사용이 증가하고 있다.(8,9) 이

§ 이 논문은 제12회 전국학생설계경진대회 수상작을 토대로 한 논문임.
† Corresponding Author, bumjoo@kongju.ac.kr
ⓒ 2023 The Korean Society of Mechanical Engineers

를 통해 인간을 대신하여 물건을 목적지까지 이동시키는 이동로봇 기술은 앞으로 적용 분야와 활용성이 점점 증가할 것으로 기대된다.

주행 기술은 이동로봇의 핵심 기술 중 하나로서, 센서를 이용하여 주변의 위치나 환경의 정보를 입력받아 로봇의 주행 경로 및 속도 등을 제어하는 기술이다. 이동로봇의 주행 기술은 센서를 기반으로 얻은 정보를 처리하여 주행 방법을 결정하는 SLAM(Simultaneous Localization and Mapping) 기술, 사전에 입력된 지도와 GPS 정보를 이용하여 주행하는 지도 기반 주행 기술, 주변 환경의 랜드마크나 사물을 인식하여 주행하는 비지도 기반 주행 기술 등이 있으며 이 외에도 다양한 주행 기술이 연구되고 있다.[10-12] 이동로봇의 주행 기술 중 SLAM 방식은 다른 주행 기술 등과 다르게 미지의 환경에서 다양한 센서를 이용해 위치를 추적하는 방식이다. 이 방식은 데이터베이스 기반 기술이 아니므로 새로운 환경에서 즉각적으로 대응할 수 있으며, 기본 데이터베이스의 양이 적어 접근성이 높다는 장점을 갖고 있다.[13,14] SLAM 방식 주행 기술의 구현 방법에는 RFID(Radio Frequency Identification) 태그를 사용한 방식, 2D Lidar 센서 이용 방식, 카메라 기반 Open CV 라이브러리 활용 기법 등이 있다. 그중 Open CV 라이브러리를 활용한 방식은 다양한 동작 및 제어 기능을 간단한 프로그래밍 언어로 입력 가능하며, 오픈소스 코드라는 특징 및 다양한 영상처리 기법을 지원한다는 점에서 응용 및 수정의 자유도가 높은 장점이 있다.[15-17]

본 연구에서는 라즈베리파이와 아두이노를 제어 장치로 사용하며, Open CV 라이브러리를 활용한 색 변환 알고리즘 및 초음파 센서를 이용한 객체 추종 이동로봇을 구현하고자 한다. 또한 리드 스크류 및 시저 구조를 활용한 중량물 자동 승강 제어 기술을 결합하여 ‘객체 추종 리프팅 카트’ 시스템을 제작하는 것을 목적으로 한다. 이미지 처리 기법을 기반으로 하는 객체 추종 방식은 기존 RFID 방식과 달리 송수신기가 불필요하며, 사용자와 카트의 거리 조절 및 객체 추종에 초음파 센서를 함께 활용해 기존 객체 추종 카트보다 정확한 주행제어를 구현하고자 한다. 리드 스크류 및 시저 구조를 활용한 자동화 리프트 제어는 기존 실린더, 랙과 피니언 방식 대비 공간 활용성이 좋고 소음이 적으며 저렴하다는 장점을 가진다. 이를 통해 객체 추종 카트와 자동 리프팅 기능을 결합하여 사용자로 하여금 중량물 운반 시 편의성을 제공할 수 있는 카트를 제작하고자 한다.

2. 설 계

2.1 시스템 개요 및 설계 목표 사양

Fig. 1에서는 본 연구에서 제작한 객체 추종 시스템을 적용한 높이 조절 리프팅 카트의 작동 개요도를 나타냈다. 객체 추종 리프팅 카트의 기능은 크게 두 가지로 나뉜다. 첫 번째 기능은 사용자를 따라다니며 카트를 이동하게 하는 객체 추종 구동부이다. 객체 추종 구동부의 경우 초음파 센서 및 카메라 모듈이 사용자와의 거리 및 방향 정보를 수집하게 되며 이는 라즈베리 파이를 이용해 연산 및 계산된다. 이후 제어 정보가 DC 모터로 전달되어 카트의 이동 동작이 실행되며 이 과정이 계속 반복되며 카트가 운행된다. 두 번째로는 중량물 리프팅 기능부이다. 리프팅 기능부의 경우 리프트 조작 스위치를 이용한 상승, 하강 및 정지 정보를 입력하게 되면 리프트에 연결된 DC 모터의 정회전, 역회전 및 정지 동작이 이루어지고, 이 힘은 리드 스크류를 통해 전달되어 시저 구조의 리프트를 통한 승 하강 제어가 실행된다. 위 두 가지의 기능이 결합되어 함께 이루어지는 것이 객체 추종 리프팅 시스템이다.

Table 1에서는 본 연구의 객체 추종 리프팅 카트의 설계 사양을 나타냈다. 주행 속도의 경우 사람의 일반적인 보행 속도인 3km/h의 환산 값인 1m/s로 설정하였으며, 추종 대상인 객체와 카트와의 유지 거리는 30cm로 설정하여 사용자가 카트 내부의 물건을 이동하는데 용이하도록 한다. 리프트의 최대 상승 높이의 경우 마트에서 사용되는 상용 카트의 1/8로, 0.25m의 상승이 가능하도록 설정하였으며, 중량물의 승강 속도 및 하중의 경우 5kgf의 하중이 부여된 상태에서 사용자가 적절한 속도로 중량물을 상승 및 하강할 수 있는 속도인 0.2m/s의 속도로 승강 및 하강할 수 있도록 목표 스펙을 설정하였다.

2.2 역학적 해석

Fig. 2(a)에서는 시저 구조 리프트 및 리드 스크류의 자유물체도를 나타냈다. 리프트의 경우 시저스(scissors) 구조를 가지게 되며 하단의 모터와 리드 스크류로 연결되어 구동하게 된다. 모터의 회전력은 리드 스크류를 통해 직선운동으로 변환되며 이후 리프트의 중량물의 수직운동으로 전달된다. 모터의 경

Table 1 Target specifications for object tracking cart

	Velocity	Object retention distance	Maximum rise height	Elevating speed	Portable load
Target spec	1 m/s	0.3 m	0.25 m	0.2 m/s	5 kgf

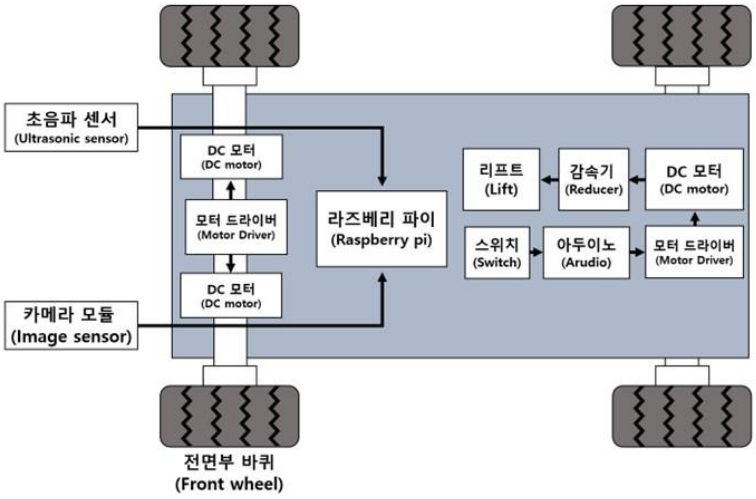


Fig. 1 Schematic diagram of height-adjusted lifting cart with object tracking system

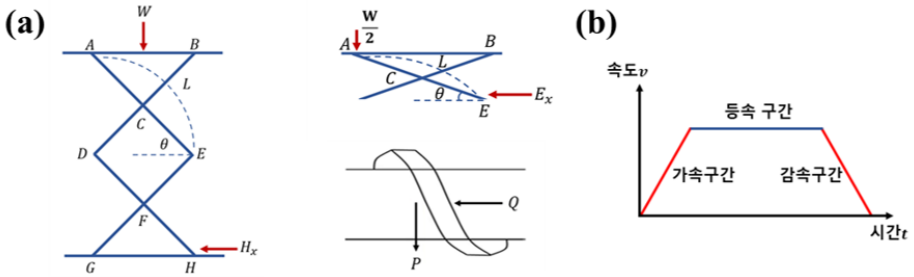


Fig. 2 (a) Free body diagram of scissors structure and lead screw; (b) velocity plot

우 나사의 지름, 피치와 관련한 나사역학 및 시저스 구조의 구조역학을 고려한 토크 값을 계산한 후 최적 값을 반영해 설계하였다. Fig. 2(b)에서는 바퀴 구동 모터의 구간별 가속도를 나타냈다. 바퀴 구동모터는 관성체로 가정할 수 있는 바퀴에 연결되어 있으며, 모터는 가속 구간에서 가장 높은 출력을 요구하므로, 최고 출력 값을 계산하여 모터 선정에 반영한다. 아래의 식 (1)~(6)에서는 시저스 구조 리프트의 구조역학 및 나사역학, 모터역학 등 장치 동력부 제작에 사용된 수식을 나타냈다.[18,19]

식 (4)~(6)에서 H_x는 리프트 구동을 위한 H점에 가해지는 힘, θ는 시저 구조의 각도, W는 리프트에 가해지는 최대 하중, P는 회전력, μ는 마찰계수, d는 리드 스크류의 지름, p는 리드 스크루의 피치, Q는 나사 축 방향 하중, S는 안전율이다. 식 (1)에서 W는 중량물의 무게 5kg을 가정하여 중력가속도를 곱한 값인 49.05N, θ는 10° 로 설정했을 때, H_x는 278.2N이다. H_x는 반력으로 나사에 작용하는 축 방향 하중 Q와 같고, 식 (2)에서 d는 8mm, p는 KS B 0235규격에 따라 1.5mm, μ는 강의 마찰계수 0.5로 설정했을 때, P는 160.5N이다. 최종적으로 S를 1.5로 설정하여 계산하면 리프트 구동을 위한 토크 T는 0.963 $N \cdot m$ 로 계산된다.

$$H_x = 2 \times \frac{W}{2} \sin\theta \tag{1}$$

$$P = \left(\frac{\mu \pi d + p}{\pi d - \mu p} \right) Q \tag{2}$$

$$T = P \times \frac{d}{2} \times S \tag{3}$$

식 (4), (5), (6)에서 T_m은 동륜 축의 전체 토크, T_a는 관성 부하 토크, T_e는 마찰 부하 토크, m은 관성체의 질량, r은 관성체의 반지름, V는 속도, t는 가속 시간이다. 식 (5)에서 m은 작품의 전체 무게인 12.5 kg, 작품제작에 사용한 바퀴의 지름인 r은 63.5mm, 사람의 평균 보행속도인 V는 1m/s, 가속시간 t는 5s로 설정했을 때, T_a는 $0.079\,N \cdot m$로 계산된다. 식 (6)에서 μ는 일반적으로 사용되는 고무 바퀴와 바닥의 구름 마찰계수인 0.2로 설정했을 때, T_e는 $0.77829 N \cdot m$로 계산된다. 최종적으로 S를 1.5로 설정하여 계산하면 바퀴 구동을 위한 토크 T_m은 $1.29 N \cdot m$로 계산된다. 위와 같은 계산과정은 모두 설계과정의 모터 및 재료선정에 반영하였다.

$$T_m = (T_a + T_e) \times S \tag{4}$$

$$T_a = \frac{1}{2} m r^2 \times \frac{v}{rt} \tag{5}$$

$$T_e = \frac{\mu m r}{2} \tag{6}$$

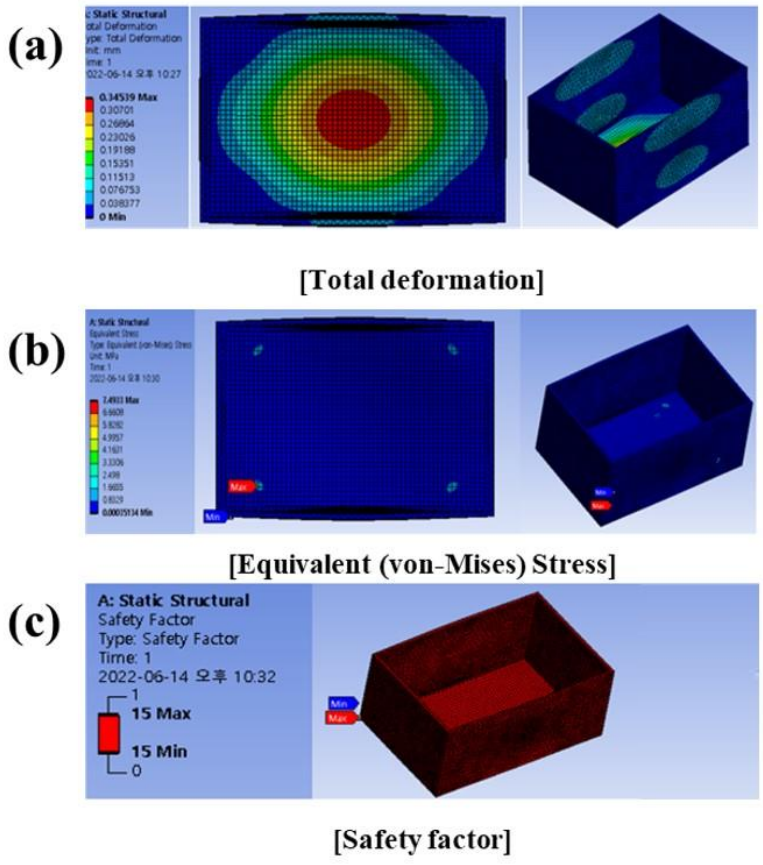


Fig. 3 Numerical modelling using the ANSYS program: (a) total deformation; (b) equivalent stress; (c) safety factor

Fig. 3에서는 상용 역학 시뮬레이션 프로그램인 ANSYS를 이용한 구조해석 결과를 나타냈다. 해석 모델의 경우 정하중 상황을 고려하여 정하중 방식(static structural)을 사용하였다. 모델링에서 객체 추종 카트의 몸체 부분을 박스 형태로 모델링하였으며, 내부에는 보강을 위한 10mm 두께의 아크릴판이 접합된(bonded) 접촉 조건으로 부여되었다. 치수는 실 제작 사이즈를 반영한 가로×세로×높이 총 400mm×600mm×430mm의 크기로 모델링하였다. 경계 조건에서는 몸체 하단의 바퀴 브라켓 부에 고정 지지(fixed support)로 하중을 지지하도록 부여하였으며, 몸체 내부에는 목표 하중인 30kg의 하중을 내부 아크릴판에 분포하중으로 부여하였다. 재료의 경우 내구성과 비중을 고려하여 사용하기로 결정한 외부의 플라스틱과 내부의 고정을 위한 아크릴, 모터 브라켓부의 알루미늄으로 각각의 물체(body)에 물성치(material) 조건을 부여하였다. 내부 아크릴판의 메시(mesh) 타입은 hex dominant, 메시의 크기(mesh size)는 0.015m로 부여하였으며, 외부 플라스틱 상자의 경우 2mm의 얇은 두께로 인해 자동 메시(auto mesh) 방식으로 0.015mm의 크기를 부여하였다. 전체 모델의 메시에서 노드(nodes)의 갯수는 97,751, 요소(element)의 수는 43,336으로 나타났다. Fig. 3(a)의 총 변형량(total deformation)의 경우 최대 변형량이 0.34539mm로 안정적인 사용이 가능함을 확인하였으며, 파단 예측에 사용되는 상당응력(von-Mises stress)의 경우 Fig. 3(b)에서 모델링한 구조의 항복 응력은 7.4933MPa로 항복 응력 값에 도달하지 않음을 확인하였다. 마지막으로 Fig. 3(c)에서 안 전율을 확인했을 때, 모델링한 모든 부분에서 안전율이 15 이상으로 안전한 사용이 가능함을 확인하였다.

2.3 3D 모델링

Fig. 4에서는 Autodesk Inventor 프로그램을 이용하여 디자인한 상세 설계 도면을 나타냈다. 설계에 있어 앞서 진행한 역학 계산을 바탕으로 재료의 재질 및 구성, 배치 등의 실제 치수를 반영해 모델링하였다. 제품의 치수는 기존 카트 대비 1/8 크기로 설계하였으며 가로×세로×높이의 치수는 총 400mm×600mm×435mm이다. 설계 도면에서 카트의 전면부에는 객체의 정보를 수집하는 초음파 센서와 카메라 모듈이 위치하며, 정보를 처리한 이후 모터에 신호로 전달하는 제어부는 리프트 구동 모터의 측면에 배치된다. 전원 공급을 위한 배터리와 리프트 모터를 양쪽에 배치하였으며, 바스켓에 담기는 중량물을 포함한 전체 장치의 안정적 구동을 위해 무게 중심을 고려한 설계를 3D 모델링에 반영했다. 바퀴는 몸체의 4곳의 모서리에 위치하며, 이중 전면 2개의 바퀴는 구동 바퀴로 조향 및 구동을 담당한다. 물건을 담는 바스켓의 경우 시저 구조의 리프트의 위에 위치하며 리프트를 이용한 물품의 승하강이 가능하도록 설계했다.

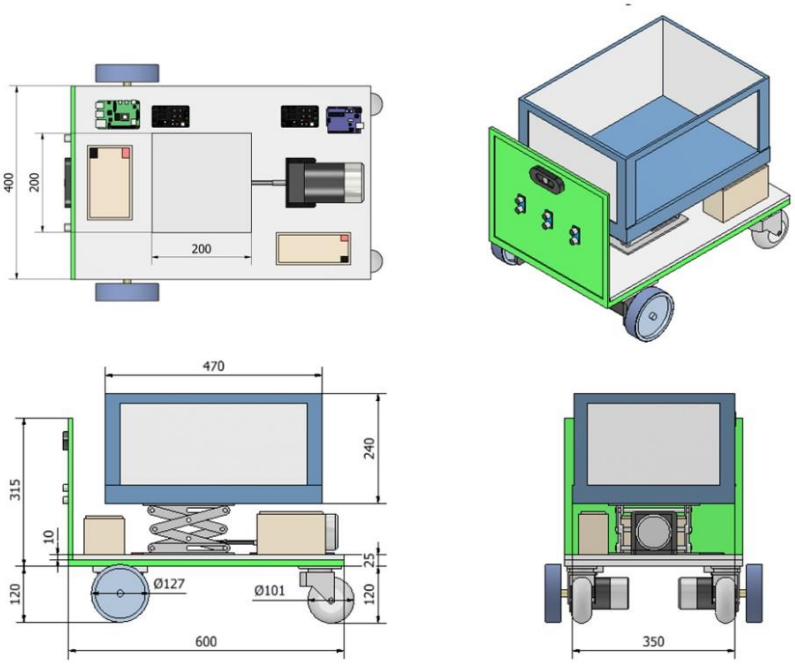


Fig. 4 3D design drawings using AutoCAD inventor

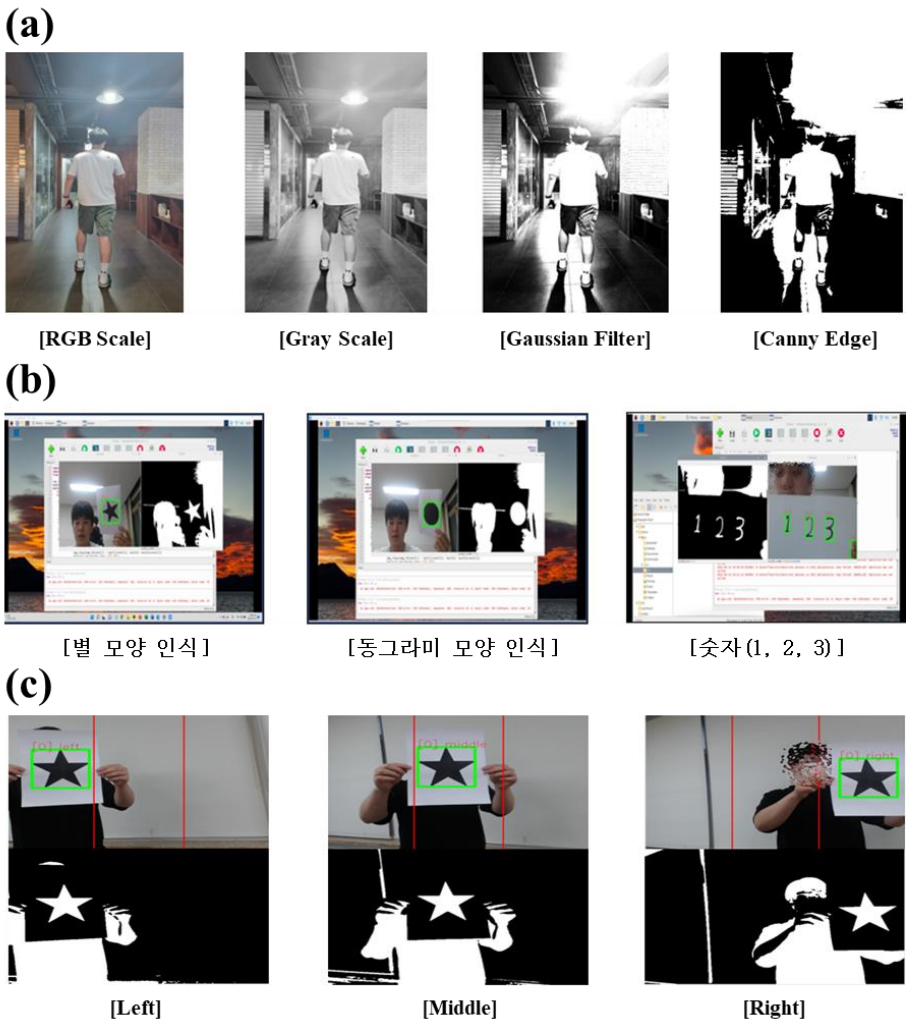


Fig. 5 Object recognition flow: (a) image conversion process; (b) star, circle, number recognition; (c) object positional orientation recognition

3. 제 작

3.1 객체 인식 소프트웨어

Fig. 5(a)에서는 객체 추종 카트 사용자의 뒷모습을 원본 이미지로 하여, 객체 인식을 위한 영상 처리의 일련의 과정을 나타낸다. 딥러닝 기반의 객체 추종 시스템은 영상 처리를 통해 사전에 특정된 객체를 인식하고 알고리즘을 설계한다. 카메라를 통하여 실시간으로 수집되는 객체의 RGB scale 영상을 이미지 연산 처리 속도와 정확성을 향상시키기 위해 gray scale로 변환한다. 이후 이미지의 가장자리를 쉽게 검출하기 위해 가우시안 필터를 적용하여 이미지의 노이즈와 고주파 성분을 제거한다. gray scale에서 0~255 밝기 중 적당한 임계 값을 설정하여 흑(0), 백(255)으로 이진화(binary)를 적용하며 이는 이후 적용할 케니 엣지(Canny edge) 알고리즘의 처리 속도 향상에 도움을 준다. 이미지에 낮은 에러율, 정확한 가장자리 위치, 응답 최소화를 목표로 하는 Canny edge를 적용하여 입력된 이미지의 가장자리를 검출한다. Fig. 5(b)에서는 카메라 및 라즈베리파이를 이용하여 학습한 도형을 인식한 모습을 나타낸다. 객체 인식을 위해 먼저 Google Colab 개발 환경에서 TensorFlow를 활용한 딥러닝 학습 모델을 생성한다. Fig. 5(b)의 경우 별 모양, 동그라미 모양, 숫자를 그림으로 학습시키고 인식한 결과를 확인할 수 있다. TensorFlow에서는 이미지 인식을 위해 CNN(Convolution Neural Network) 알고리즘이 사용되며 이후 영상 처리를 위한 방식으로는 Canny edge 방식의 변환 과정을 통해 정확한 객체 인식이 이루어진다. 위 일련의 과정을 통한 학습

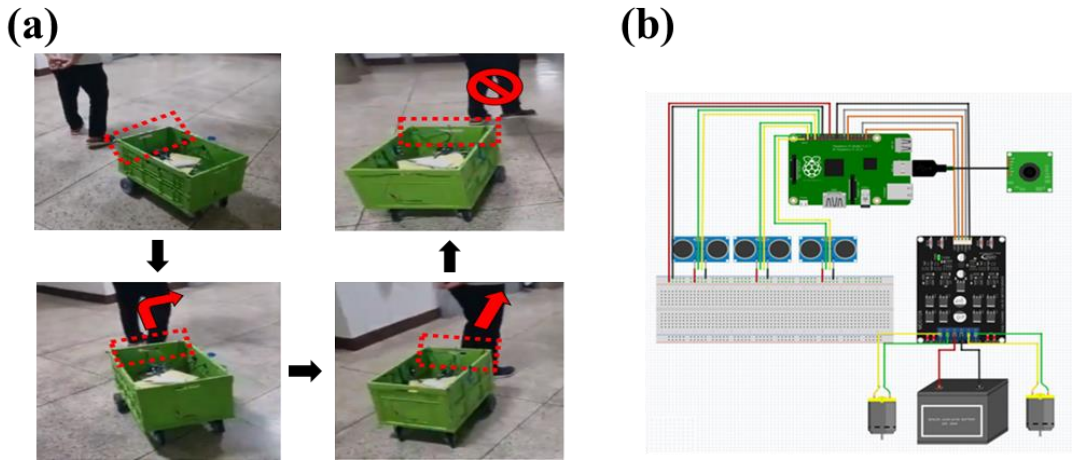


Fig. 6 (a) Object tracking using ultrasonic sensors and cameras; (b) object tracking circuit diagram

모델이 생성되면 라즈베리파이의 IDE 개발 환경(Integrated Development Environment)에서 인식된 개체를 contour box로 표시하게 되고 박스의 형상 및 크기에 따라 객체 인식의 정확도를 향상시킨다. 이후 카메라 상의 면적을 Fig. 5(c)와 같이 3분할하여 객체의 위치를 좌측, 중앙, 우측으로 판별하고 좌우 조향 및 직진 등의 제어 신호로 변환하게 된다. 제어 신호는 객체의 위치에 따라 인식된 값을 바탕으로 모터의 속도를 조절하여 좌우 조향 및 전 후진 기능을 수행한다.

3.2 객체 추종 하드웨어 제작

Fig. 6(a)에서는 객체 추종 카트의 구동 사진을 확인할 수 있다. 카트는 초기 정지 상태에서 카메라를 활용하여 Fig. 5에서의 영상 변환 및 인식 과정을 거쳐 추종 대상인 사용자의 후면에 부착된 별 모양 표식을 인식한다. 이후 초음파 센서를 활용하여 거리를 측정 및 연산하게 되고 초기 설정 거리인 30cm를 기준으로 거리를 판단하여 작동한다. 사용자와의 거리가 30cm 이상일 경우, 카트는 사용자를 따라 전진하며, 그 후 사용자가 왼쪽 또는 오른쪽으로 이동하면 카메라를 통해 사용자의 좌측, 정면 우측 위치를 판단하게 되고 이후 좌, 우 구동 속도(입력 토크) 값을 조절하며 주행하게 된다. 이후 사용자가 정지하면 카트는 사용자와의 거리를 판단하여 30cm 이내에 위치하면 정지한다. Fig. 6(b)에서는 라즈베리파이 및 초음파 센서, 카메라 및 모터드라이버를 활용해 구성한 객체 추종 제어 회로도를 확인할 수 있다. 카메라와 초음파 센서를 통해 입력된 객체의 거리 정보 및 방향 정보는 라즈베리파이를 통해 제어 신호로 변환되며 이후 전력 분배 및 변환을 위한 모터드라이버를 거쳐 모터가 조작되는 방식이다.

3.3 자동화 리프트 제작

리프트의 상승 및 하강 제어는 모터 축과 체결된 리드 스크류를 통해 작동된다. 상용 시저 리프트의 경우, 리드 스크류가 중단에 위치하며 이로 인해 리드 스크류의 상하좌우 움직임이 발생한다. 따라서 이를 모터 축과 직접 체결할 시 모터가 같이 움직이는 문제가 발생하여 안정적인 동력공급이 어려우며, 또한 움직임 제어를 위한 추가적인 제어 소요의 발생으로 복잡한 제어가 필요한 어려움이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 기존의 중단에 위치하는 리드 스크류를 분리하여 하단에 위치시켜 상하좌우 움직임을 제어하였다. Fig. 7(a)는 리프트의 하단 축에 M8 너트를 용접한 모습이며, 너트를 통해 리드 스크류를 구동하여 고정된 모터에서 안정적인 동력 공급으로 리프트의 움직임을 제어하였다. 리프트의 모터는 상세설계에서 진행한 역학계산을 바탕으로 상승 속도 0.1m/s와 모터의 토크를 고려하여 1/20의 감속기를 사용하였다. 초기 설계에서 감속기의 모터 축과 리드 스크류는 커플링을 통해 체결하려 했지만, 제작 과정에서 커플링의 약한 내구성 및 동력의 손실로 인해 제거하였다. 커플링의 대체 방안으로 감속기의 모터 축과 리드 스크류를 용접 가공하여 커플링 사용으로 인한 내구성 감소 및 동력 손실을 최소화하였다. Fig. 7(b)는 바스켓을 시저 구조 리프트 위에 설치하고 바스켓 내에 중량물(5kg 원판)을 적재하여 최대

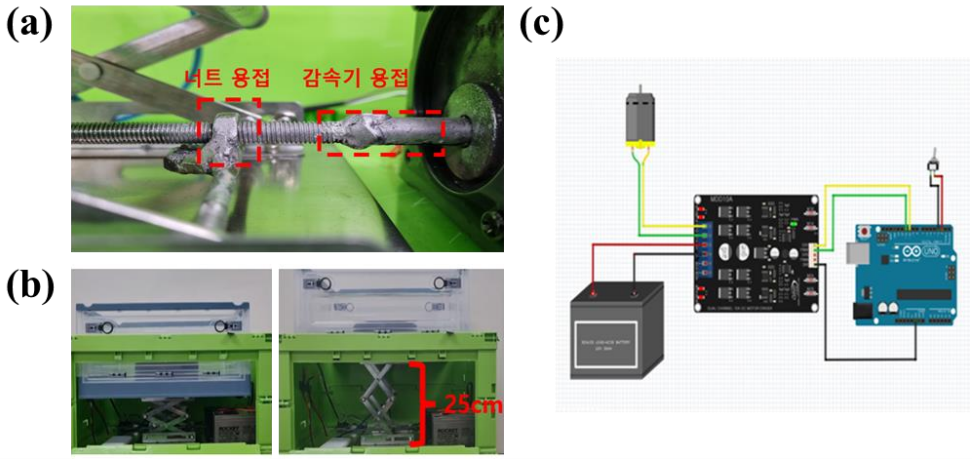


Fig. 7 Automatic lift using scissors structure and lead screw: (a) connection using nuts and reducer; (b)scissors structure lift; (c) automatic lift circuit diagram

Fig. 8 Fabricated object-tracking cart

리프팅 하중 상승 속도, 최대 상승 높이를 측정하기 위해 구동한 사진이다. Fig. 7(b)의 좌측 사진에서는 시저 구조 리프트가 전개되지 않은 상태이며, 이후 리드 스크류의 회전에 따라 리프트 하단의 지지대가 전진하며 시저 구조 리프트가 우측과 같이 펼쳐지며 중량물이 상승하게 된다. Table 1에서 나타낸 바와 같이 제작된 자동화 리프트의 구동을 통해 초기 설계 단계에서 설정했던 목표 스펙의 최대 가반 하중(5kgf)을 적재한 상태에서 0.2m/s로 중량물을 승강 및 하강 동작하는 것을 확인하였으며, 초기 설계 시 설정한 전개 높이 25cm로 상승하는 것을 확인하였다. Fig. 7(c)에서는 아두이노 메가 및 모터드라이버를 활용한 리드 스크류 모터 제어의 회로도를 나타냈다. 토글 스위치를 활용한 상승, 하강, 정지 정보가 입력되면 아두이노에서 모터의 제어 신호로 변환되고, 이를 통해 모터드라이버에서의 전력 변환 및 공급이 이루어져 자동화 리프트가 동작하게 된다.

3.4 작품 제작

Fig. 8에서는 실제 제작한 카트의 사진을 확인할 수 있다. 카트의 전면부에는 영상 녹화를 위한 카메라와 거리 인식 및 측정을 위한 초음파 센서가 부착되어 있다. 3개의 초음파 센서가 각각 좌측, 중앙, 우측에 간격을 두고 위치하여 전방과 측면 인식이 가능하다. 하단에는 구동을 위한 모터와 바퀴가 위치한다. 후면 바퀴는 원활한 회전이 가능하도록 360° 회전이 가능 한 4인치 캐스터 바퀴를 사용하였다. 전면의 구동 바퀴는 모터와 함께 사용되며, 모터는 브라켓을 통해 몸체와 고정된다. 바퀴는 후면 바퀴와의 단차를 고려하여 5인치 바퀴를 사용하여 제작하였다. 내부에는 중량물을 상승, 하강할 수 있는 시저 구조의 리프트와 모터, 감속기, 배터리, 제어부로 구성된다. 제어부는 리프트의 및 바퀴 구동을 위한 아두이노, 브레드보드, 모터 드라이버 등이 포함된다. 감속기와 배터리는 각각 상세 설계에서 진행한 역학계산을 바탕으로 리프트 상승 속도 0.1m/s, 리프팅 하중 5kgf, 구동 시간 2시간을 고려하여 1/20의 감속기와 12A

의 배터리를 사용하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 OpenCV라이브러리 및 딥러닝 기술을 기반으로 한 객체 추종 기술과 시저스 구조 및 리드 스크류를 활용한 중량물 자동 승강 제어 기술의 결합을 통한 객체 추종 리프팅 카트를 제작하였다. 객체 추종 리프팅 카트의 설계 및 제작과정을 통해 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 딥러닝 기반의 이미지 처리 기술을 활용한 객체 추종 주행 기술의 구현을 위해 OpenCV 라이브러리를 활용하여 추종 대상의 이미지 정보를 변환하였고, Google TensorFlow 프로그램을 활용하여 객체 정보를 학습하였다.

(2) 사전에 학습된 객체의 정보를 라즈베리파이 내의 개발 환경에서 카메라를 통해 입력 받은 실시간 영상 정보를 처리해 입력된 영상 내에서 객체를 인식한다. 인식된 객체의 위치를 좌, 중, 우 3개의 구간으로 분할하여 위치를 판단하고 판단된 객체의 방향 정보와 초음파 센서를 활용하여 측정된 거리 정보를 기반으로 조향 및 전후진 제어를 수행한다.

(3) 리프트의 경우 시저스 구조 및 리드 스크류를 이용한 중량물의 자동 상승 및 하강을 목적으로 설계 및 제작을 진행했다. 제어 방식으로는 아두이노를 마이크로 제어 장치로 사용하며, 스위치를 통한 제어를 이용해 자동 승하강을 사용하였다. 자동화 리프트는 시저스 구조를 활용하여 다른 리프트 구조와 비교했을 때, 공간 활용성이 높으며 간단하고 직관적인 구조의 리프트를 구현하였다. 리프트 승하강의 동력 전달 방식은 리드 스크류를 통한 동력 전달 방식을 활용해, 브레이크의 사용이 불필요하며 기어드 모터와 함께 안정적인 동력 전달 및 중량물 승하강이 가능한 시스템을 구현했다.

로봇 기술은 인공지능, 빅데이터 기술 등과 접목되어 빠르게 변화하고 있으며, 일상생활 속 많은 부분에서 변화를 가져오고 있다. 나아가 고령 인구 및 사회적 약자들을 위한 유니버설 디자인에 함께 접목되어 편의 및 복지 분야에 확대 적용되고 있다. 이후 지속적인 연구 개발을 통해 활용성을 개선한다면 향후 다양한 산업에서 노동력 절감 및 편의성 증대를 위해 높은 이용률을 보일 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 공주대학교 공학교육혁신센터의 지원과 2022년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학협력기반 지역혁신 사업(2022RIS-004)의 결과입니다.

참고문헌
(References)

(1) Won, D. G. and Lee, S. P., 2016, “Artificial Intelligence and Implications of the Fourth Industrial Revolution,” *Industrial Engineering Magazine*, Vol. 23, No. 2, pp. 13~22.

(2) Ahn, S. H. and Lee, M. H., 2016, “Fourth Industrial Revolution Impact: How it Changes Jobs,” *Convergence Academic Conference of the Korean Management Association*, pp. 2344~2363.

(3) Whittaker, M., Crawford, K., Dobbe, R., Fried, G., Kaziunas, E., Mathur, V. and Schwartz, O., 2018, *AI Now Report 2018*, New York: AI Now Institute at New York University., USA, pp. 1~62.

(4) Eom, W. S., Kim, Y. K., Lee, J. H., Choi, G. H. and Sim, E. S., 2013, “Development Trend of Intelligent Robots,” *Current Industrial and Technological Trends i Aerospace*, Vol. 11, No. 1, pp. 150~160.

(5) Kim, D. W., 2013, “Big Data Use Cases of the Sector,” *Dong-a University Business Research Center*, Vol. 34, pp. 39~52.

(6) Shin, S. H., 2020, “A Study on Trends in the Use of Logistics Technology based on the 4th Industrial Revolution,” *e-Business Research*, Vol. 21, No. 2, pp. 17~27.

(7) Kim, W. C., Lee, S. W., Choi, Y. Y., Kim, K. L. and Lee, Y. I., 2011, “On the Self-driving of a Model Car using Image Processing,” *Proceedings of the 26th ICROS Annual Conference*, pp. 660~663.

(8) Kim, U. S., Jeon, W. J., Kim, B. U., Han, K. T. and Mun, S. D., 2016, “Study on Intelligent Custom Cart for the Elderly

in An Aging Society," *Proceedings of the KSMPE Conference*, pp. 191~191.
(9) Schulz, D., Burgard, W., Fox, D. and Cremers, A. B., 2001, "Tracking Multiple Moving Objects with a Mobile Robot," *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference. CVPR 2001*, Vol. 1, pp. 371~377.
(10) Yu, W. P., Choi, S. L., Lee, J. Y. and Park, S. H., 2011, "Robot Navigation Technology and its Standardization Trends," *Electronic Communication Trend Analysis*, Vol. 26, No. 6, pp. 108~119.
(11) Grisetti, G., Kümmerle, R., Stachniss, C. and Burgard, W., 2010, "A Tutorial on Graph-based SLAM," *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, Vol. 2, No. 4, pp. 31~43.
(12) Brown, B. and Laurier, E., 2012, "The Normal Natural Troubles of Driving with GPS," *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1621~1630.
(13) Jeong, H. R., 2020, "Trends of Autonomous Driving Technology for Outdoor Mobile Robots," *Journal of the Society for Control Robot Systems,* Vol. 26, No. 1, pp. 24~32.
(14) Kim, T. S., Jang, Y. H. and Jeong, H. D., 2018, "Implementation of Autonomous Vehicle using Raspberry Pi," *Proceedings of the Korean Society of Computer Information Conference*, pp. 287~288.
(15) Want, R., 2006, "An Introduction to RFID Technology," *IEEE Pervasive Computing*, Vol. 5, No. 1, pp. 25~33.
(16) Yagfarov, R., Ivanou, M. and Afanasyev, I., 2018, "Map Comparison of Lidar-based 2D Slam Algorithms using Precise Ground Truth," Proceedings of the *International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (ICARCV*), pp. 1979~1983.
(17) Chandan, G., Jain, A. and Jain, H., 2018, "Real Time Object Detection and Tracking using Deep Learning and OpenCV," Proceedings of the *2018 International Conference on Inventive Research in Computing Applications (ICIRCA)*, pp. 1305~1308.
(18) Barry, J. G. and James, M. G., 2017, *Mechanics of Materials*, Cengage Learning, Canada, pp. 372~417.
(19) Spackman, H., 1994, "*athematical Analysis of Actuator Forces in a Sissor Lift*, Technical Document 2643, pp. 1~14.

<응용기술논문> DOI http://dx.doi.org/10.3795/KSME-C.2023.11.2.075 ISSN 2288-3991(Online)

고효율 브레이크 미세먼지 집진 장치의 개발§

서장원* · 이지수* · 이혁진*† · 박이정* · 신정헌*
* 홍익대학교 기계시스템디자인공학과

Development of High Efficiency Brake Fine Dust Collecting System

Jang Won Seo*, Ji Soo Lee*, Hyuk Jin Lee*† , Lee Jung Park* and Jeong Heon Shin*
* Dept. of Mechanical System Design Engineering, Hongik Univ.

(Received December 23, 2022 ; Revised February 12, 2023 ; Accepted February 14, 2023)

Key Words: Brake Fine Dust(브레이크 미세먼지), Brake Filter(브레이크 필터), CFD(전산유체역학), Suction Motor(흡입 모터), Flow Visualization(유동 가시화)

초록: 친환경 차량의 등장으로 배기가스에 의한 미세먼지 발생 비율은 시간이 지남에 따라 점차 낮아져 나중에는 결국 비배기 미세먼지가 대부분이 될 것으로 예상된다. 그럼에도 불구하고 현재 연구된 브레이크 미세먼지 집진 필터는 효율이 약 40% 정도밖에 미치지 못한다. 본 연구에서는 차량 주행 시 타이어 및 디스크 주위의 유동을 해석하고, 유동 가시화 실험 및 위치별 포집량 비교 실험을 통해 포집량이 최대가 될 수 있는 최적 위치를 선정하였다. 미세먼지 포집을 위해 흡입 모터(suction motor)의 흡입력(suction power)을 최적화한 후 디스크 주위의 미세먼지 집진 실험을 하였으며 이는 기존의 필터형 집진 장치 효율의 2배 정도 되는 84.3%의 효율을 나타내었다. 결과로서, 본 연구에서는 브레이크 디스크 미세먼지 포집에 기존 필터형 방식과 달리 흡입 방식을 적용함으로써 고효율의 미세먼지 집진 장치 개발 가능성을 확인하였다.

Abstract: With the advent of eco-friendly vehicles, the proportion of fine dust generated by exhaust gas gradually decreases over time, and it is expected that non-exhaust fine dust will eventually become the majority. Nevertheless, the currently studied brake fine dust filter has only about 40% efficiency. In this study, the flow around tires and discs was analyzed during vehicle driving, and the optimal location where the collection amount could be maximized was selected through the flow visualization experiment and the comparison experiment of the collection amount by location.
After optimizing the suction power of the suction motor to collect fine dust, a fine dust collection experiment was conducted around the disc, which showed an efficiency of 84.3%, about twice that of the existing filter-type dust collector. As a result, this study confirmed the possibility of developing a high-efficiency fine dust collector by applying the suction method, unlike the existing filter type, to the brake disc fine dust collection.

1. 서 론

브레이크 미세먼지는 브레이크가 작동할 때 브레이크 패드와 디스크의 마찰로 인한 마모로 생성된다.[1] 이때 발생한 미세먼지에는 금속 성분들이 포함되어 있어 심각한 대기 오염과 호흡기 질환을 유발한다. 기존의 브레이크 미세먼지 포집 장치는 동력 없이 필터만을 사용하였다. 필터에 디스크를 따라 유동하는 미세먼지가 가두어지며 포집된다. 한 보고서에 따르면 장치를 사용하여 브레이크에서 발생하는 미세먼지를 약 40% 정도 감소시켰다.[2] 필터형 미세먼지 포집 장치는 브레이크 냉각에 좋지 않은 영향을 주며, 포집 효율이 낮다. 먼지의 입자 지름이 작은 경우, 운동량이 작아 필터에 직접 부딪히는 경우가

§ 이 논문은 제 12 회 전국학생설계경진대회 수상작을 토대로 한 논문임.
† Corresponding Author, gurwls0070@g.hongik.ac.kr
ⓒ 2023 The Korean Society of Mechanical Engineers

적어 포집이 어렵기 때문이다.[3] 따라서 본 연구에서는 기존의 필터형 브레이크 미세먼지 집진 장치의 한계를 보안한 고효율의 흡입형 차량 브레이크 미세먼지 집진 장치를 개발하였다.

2. 설계 및 해석

2.1 설계 방법

본 연구는 기존 필터형 브레이크 미세먼지 집진 장치의 한계인 낮은 효율을 개선하기 위하여 흡입 방식을 적용하였다. 진공청소기의 원리에서 착안하여 압력 강하를 생성해 미세먼지를 빨아들이는 원리로, 집진장치는 미세먼지가 들어오는 inlet, 압력 강하를 만드는 흡입 모터, 장치에 들어온 미세먼지를 걸러주는 필터로 구성된다.

설계에 앞서 CFD를 이용하여 차량 주행 시 디스크와 타이어의 공기 유동을 분석하여 최적 효율의 장치 위치를 찾았다. 이후, 실제 차량에 적용할 수 있는 크기의 흡입 모터를 선정한 후, 모터에 사용된 impeller의 압력분포를 바탕으로 inlet 면적을 구하여 흡입 모터의 흡입력(suction power)을 최적화하였다. 마지막으로 미세먼지 농도 측정 센서를 이용하여 최종 장치의 집진 효율을 구하였다.

2.2 브레이크 주위 유동 해석

2.2.1 유동 해석을 위한 가정

브레이크 마모 미세먼지는 크기가 매우 작은 입자로, 질량 분포 곡선은 2~4㎛의 입경 범위에서 최댓값을 갖는 단봉 분포인 것으로 보고되었다. 이렇게 크기가 작은 입자는 항력(drag force)의 영향을 지배적으로 받는다.[4] 따라서 미세먼지의 움직임을 추측하기 위해 공기의 유동을 가시화하였다.

브레이크 주위 유동의 특성을 알아내기 위해 CFD(전산유체역학)를 사용하였다. 유동해석을 위한 가정은 다음과 같다. (1) 3차원, 비압축성, 정상 상태이다. 차량 제동 시 과정은 시간에 따라 속력이 변하는 과도 상태(transient state)이다. 하지만 달리는 차량이 정지하기까지 속력을 구간별로 나누어 각각을 정상 상태(steady state)로 가정하였다. 구간은 타이어의 회전 속도를 100rad/s에서 0rad/s까지 10구간으로 나누었다. 타이어의 지름이 18인치라고 가정했을 때 차량의 속력은 82.3km/h(22.86m/s)에서 정지 시까지 10구간 각각이 정상 상태이다. (2) 타이어의 슬립(slip)이 없고 각속도와 차량의 속력이 선형 관계이다.

2.2.2 CFD 경계 조건 및 해석 모델

차량의 주행풍, 타이어의 회전에 의한 유동 등을 모두 고려하기 위해 Fig 1과 같이 차량의 휠 하우스 부분을 검사 체적(control volume)으로 설정하였다.

CFD 해석을 위한 경계 조건은 Fig. 1과 같다. Velocity inlet에서 주행풍의 속력으로 공기가 유입되고 차량 뒤쪽의 pressure outlet과 휠 바깥쪽의 pressure outlet으로 유입된 공기가 빠져나간다. 브레이크 디스크와 휠, 타이어는 100rad/s으로 회전하는 rotation wall, 지면은 차량의 속력인 22.86m/s로 움직이는 moving wall

Table 1 Boundary condition

Velocity inlet	Pressure outlet	Rotation wall	Moving wall
22.86 m/s	0 Pa(gauge pressure)	100 rad/s	22.86 m/s

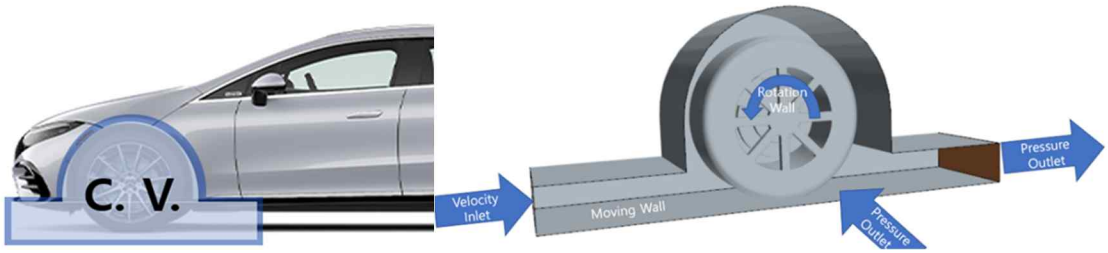


Fig. 1 Control volume (left) and boundary condition (right)

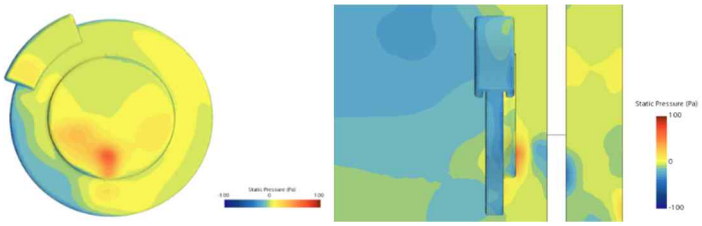


Fig. 2 Static pressure distribution

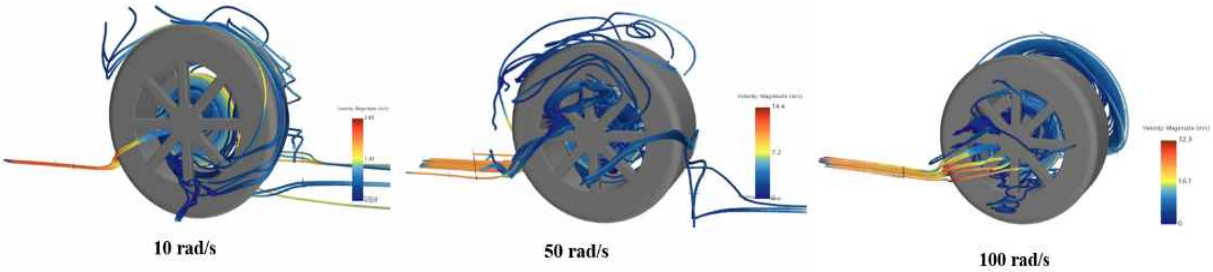


Fig. 3 Streamline of tyre and disc

이다. 그 외의 휠 하우스로 인해 막힌 벽 부분과 캘리퍼는 wall 조건으로 설정하였다.

CFD 해석을 위해 격자(mesh)를 생성하였다. 벽 근처의 유동이 미세먼지 거동에서 가장 중요한 부분을 차지하므로 벽 주위에 10개의 프리즘 격자(prism layer)를 만들어 벽 주위에 더 조밀한 mesh를 생성하였으며 총 942,024개의 격자를 생성하였다. 해석 모델은 three dimensional, segregated flow, constant density, steady state, RANS(Reynolds-Averaged Navier-Stokes), 레이놀즈 수는 $Re = \frac{\rho VD}{\mu} = \frac{1.225\,(22.86)0.646}{1.789\times10^{-5}} \approx 10^6$ 이므로 K-epsilon turbulence 모델을 사용하였다. 해석 결과는 residual 값이 10^{-3} 이하로 떨어지면 수렴한다고 보았다.

2.2.3 브레이크 주위 유동 특성

유동 해석 결과를 통해 알아낸 검사 체적의 유동 특성은 다음과 같다.

1) 디스크가 타이어 안쪽에 있어 주행풍이 유동에 미치는 영향은 상대적으로 적으며, 디스크 주위의 유동은 디스크의 회전에 의한 영향을 지배적으로 받는다. (Fig.3)

2) 회전 속도가 커질수록 디스크 주위의 유동이 복잡해진다. (Fig.3)

3) Velocity inlet을 통해 들어온 공기는 대체로 타이어 안쪽에 오랜 시간 머무르다 차량의 뒤쪽과 휠 바깥쪽의 pressure outlet을 통해 나간다. (Fig.3)

4) 정체점이 타이어 안쪽에서 생긴다. (Fig.2)

따라서 브레이크에서 발생된 미세먼지는 타이어 안쪽에서 포집하는 것이 효과적이며, 와류가 가장 심하고 포집이 어려울 것이라고 판단되는 100rad/s를 기준으로 미세먼지 제거 장치를 설계하였다.

2.3 흡입 모터의 suction power 최적화

Impeller 에 의해 회전하는 유체가 원심력을 받고 있다고 가정하면 유체의 압력과 가속도는 식 (1), (2)와 같이 표현 가능하다.

$$dp = \rho a_c dr \quad (1)$$

$$a_c = r\omega^2 \quad (2)$$

이 때 압력분포를 식으로 나타내면 식 (3)과 같다.

$$dp = \rho r\omega^2 dr, \quad p = -p_{vac} + \int_0^r dp = -p_{vac} + \int_0^r \rho\omega^2 r dr$$

$$p = -p_{vac} + \frac{1}{2}\rho\omega^2 r^2 \quad (3)$$

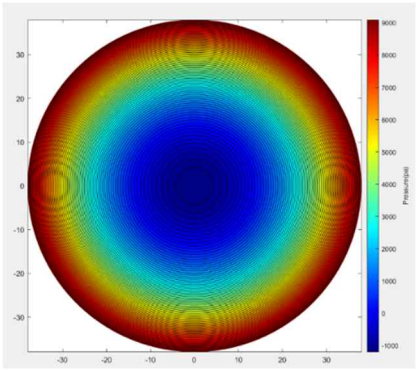


Fig. 4 Pressure contour of impeller

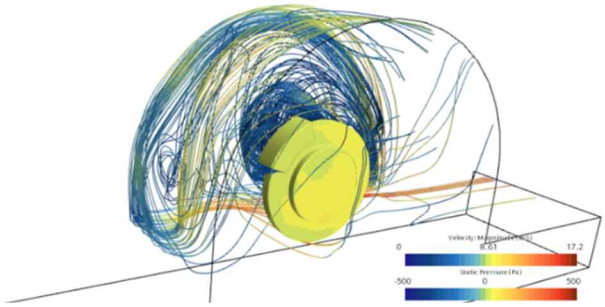


Fig. 5 Streamline (no suction, 100 rad/s)

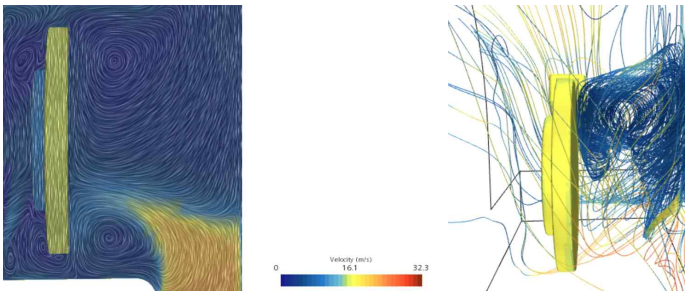


Fig. 6 Vortex around the disc (side view)

압력강하에 의한 suction force와 suction power는 각각 식 (4), (5)와 같이 표현 가능하다.

$$dF = -pdA = (p_{vac} - \frac{1}{2}\rho\omega^2 r^2)2\pi r dr$$

$$F_{Suction} = \pi r^2(p_{vac} - \frac{1}{4}\rho\omega^2 r^2) F_{Suction} = \pi r^2(p_{vac} - \frac{1}{4}\rho\omega^2 r^2) \quad (4)$$

$$P_{Suction} = F_{suction} v = Q(p_{vac} - \frac{1}{4}\rho\omega^2 r^2) P_{Suction} = F_{suction} v = Q(p_{vac} - \frac{1}{4}\rho\omega^2 r^2) \quad (5)$$

$\omega = 3500 rad/s, Q = 0.01 m^3/s \omega = 3500 rad/s, Q = 0.01 m^3/s$ 일 때, suction power가 최대가 되는 입구의 지름은 24mm이고, 이때 suction power는 6.8W이다.

2.4 장치 입구 위치 별 유동 해석

브레이크 미세먼지는 캘리퍼와 브레이크 디스크가 마찰하여 발생한다. 따라서 캘리퍼 안쪽에서 미세먼지가 생성되므로 그 면에서부터 유선이 생성되도록 설정하였다. 따라서 나타낸 유선의 방향으로 미세먼지가 항력을 받을 것이다. 먼저 suction이 없을 때 유선은 Fig. 5와 같다. 공기의 유동은 브레이크 회전의 영향으로 디스크 회전의 방향인 아래쪽으로 이동한 후 Fig. 6에서 보이는 디스크 뒤쪽에 형성되어 있는 와류에 합류하고 이후 휠 하우스 벽면에서 와류를 형성한 후 휠쪽 pressure outlet과 차량 뒤쪽 pressure

outlet으로 나간다.

앞의 유동 해석 결과 Fig. 5에서 suction을 추가하였다. 오염원과 가까울수록 포집 효율이 증가한다는 가설로 suction 00과 suction 01의 위치를 비교하였다. 또한 높은 난류 운동에너지가 나타내는 곳에서 미세먼지의 혼합이 크게 일어나 포집 효율이 높을 것이라는 가설로 Fig. 7 turbulent kinetic energy의 값이 큰 곳과 가까운 suction 02와 suction 03의 위치를 비교하였다.

Fig. 8에서는 Fig. 5에서 suction inlet을 추가하여 유선을 나타낸 것이다. 캘리퍼 안쪽에서 생성된 공기는 suction inlet 또는 pressure outlet으로 빠져나간다. 유선이 suction inlet에 들어가면 유선의 추적을 멈춘다.

먼저, Fig. 8(a)와 같이 오염원과 가장 가까운 suction 00에서는 오염된 공기의 유선이 대부분 suction inlet으로 들어가는 경향성을 보였다. 따라서 미세먼지는 공기의 움직임을 따라 항력을 받으면서 suction inlet으로 들어가 정화될 것이다. Fig. 8(b)와 같이 오염원과 흡입구 사이의 거리가 멀어진 suction 01에서는 유선의 일부는 suction inlet으로 들어가지만 일부는 pressure outlet을 통해 나간다.

Table 2 Positions of suctions

Suction no.	Position of suction inlet (r [mm] , θ [°])
Suction 00	(180, 165)
Suction 01	(180, 180)
Suction 02	(180, 225)
Suction 03	(180, 270)
Disc radius 160 mm, direction of rotation + θ	

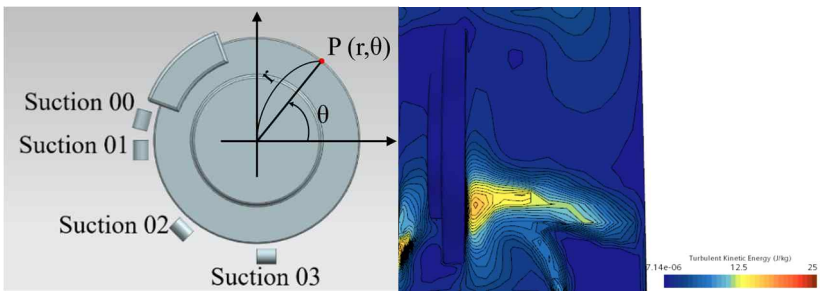


Fig. 7 Suction inlet positions (left) and turbulent kinetic energy (right)

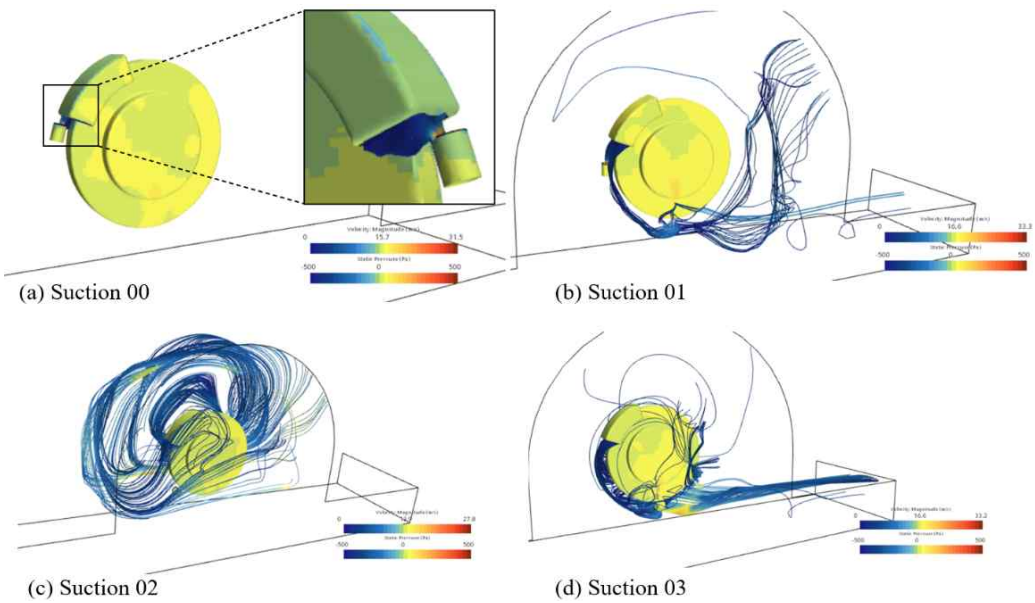


Fig. 8 Streamline by inlet position

Fig. 8(c)와 같이 suction 02 위치에서는 유선이 suction inlet으로 거의 들어가지 않고 뒤쪽 벽 부분에서 회전하다가 휠 쪽 pressure outlet으로 나간다. Fig. 8(d)와 같이 suction 03 위치에서는 낮은 압력으로 인해 유선이 밑 쪽으로 끌어당겨지고 이후 뒤쪽 pressure outlet으로 나가는 경향성을 보였다. 따라서 suction 02와 suction 03 같이 오염원과 멀리 떨어진 위치에서 장치 흡입구를 설치하는 것은 무의미하다고 판단하였다.

따라서 캘리퍼 회전 방향인 바로 아래쪽에, 오염원과 가까운 위치에 suction inlet을 설치하는 것이 바람직하다. 하지만 유선만으로는 절대적인 수치를 통해 값을 비교할 수 없으므로 이후 실험을 통해 바람직한 suction inlet의 위치를 검증하였다.

3. 실 험

3.1 미세먼지 유동 가시화

앞서 진행한 해석과 선정된 모터를 바탕으로 실험 환경을 조성하였다. 먼저 회전하는 브레이크 디스크는 MDF에 중형모터를 연결하여 형상화하였다. MDF는 레이저 커팅하여 실제 브레이크 디스크와 모양과 크기가 같도록 제작했으며, 3D 프린팅으로 제작한 커플러를 이용하여 모터와 연결하였다. 아이소핑크를 이용하여 캘리퍼를 대체하였으며 제작된 MDF에는 사포를 부착하여 아이소핑크와의 마찰로 미세 입자를 발생시켰다.

Fig. 9 유동 가시화 실험으로 디스크가 회전하면 그 영향으로 아이소핑크와 디스크가 닿는 지점에서 접선방향으로 유동이 발생한다는 사실을 알 수 있었다. 따라서 장치의 inlet 위치를 미세먼지 발생 위치의 접선 방향으로 결정하면 포집 효율을 높일 것이라 판단하였다. 이를 검증하기 위해 3.2에서 장치 위치 별 미세먼지 포집량 측정 실험을 진행하였다.

3.2 장치 위치별 미세먼지 포집량

Fig. 10은 Fig. 9의 회전축을 원점으로 설정한 후, 미세먼지 발생 위치(fine dust generation)와 포집 위치(position 1~3)를 극좌표계로 나타낸 그림이다. 캘리퍼의 위치를 고려하여 아이소 핑크를 미세먼지 발생

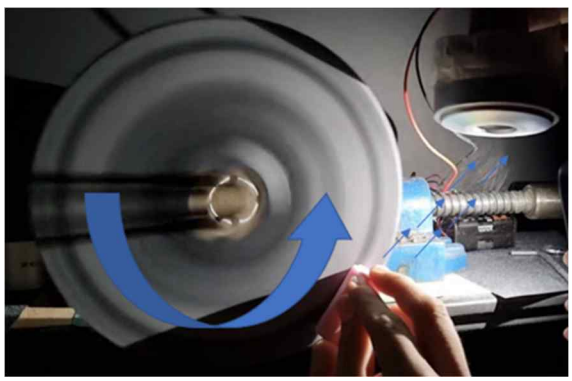


Fig. 9 Flow visualization experiment

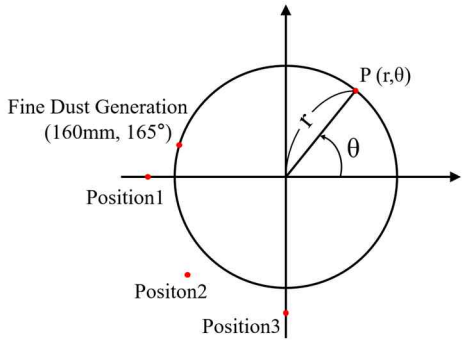


Fig. 10 Positions of fine dust generation, collection

Table 3 Result of experiment

Position no.	Position of suction inlet (r [mm] , θ [°])	Amount of fine dust collected [mg] (per 500 g)
Position 1	(180, 180)	216.65
Position 2	(180, 225)	83.35
Position 3	(180, 270)	60

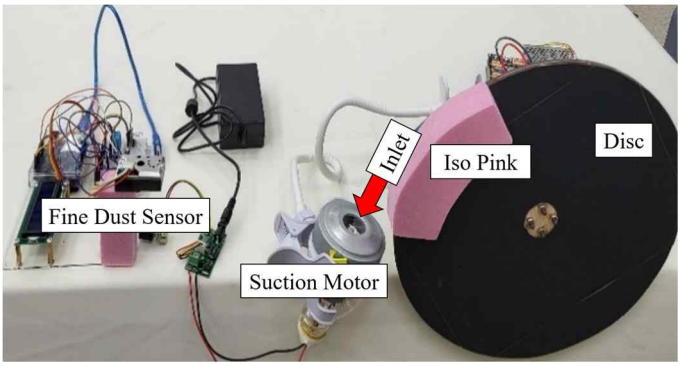


Fig. 11 Experiment of dust collection efficiency

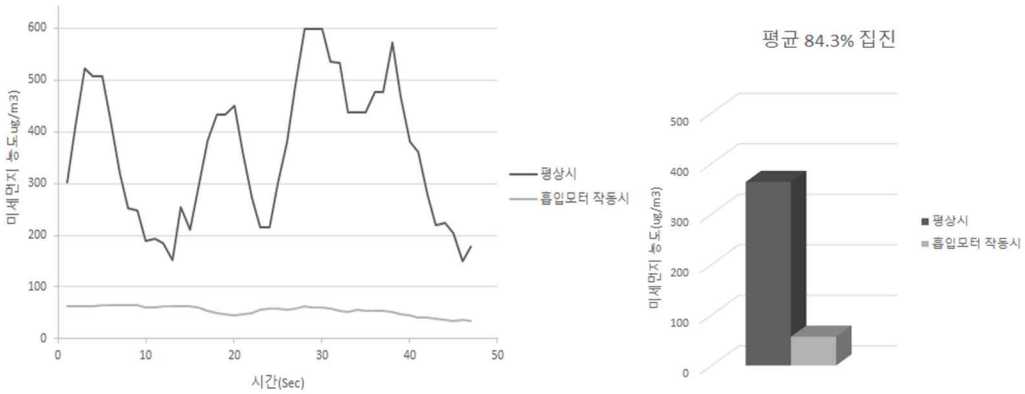


Fig. 12 Result of fine dust collection efficiency experiment

위치에 위치시키고, 흡입 모터의 위치를 position 1, 2, 3으로 변화시켜가며 포집량을 측정하였다. 장치의 inlet에 필터를 부착하고, 아이소핑크와 디스크를 마찰시켰을 때 감소한 아이소핑크의 무게와 필터에 포집된 아이소핑크 입자의 무게를 전자저울을 이용하여 0.01g 단위까지 측정해 보았다. 생성된 미세먼지가 500mg으로 동일하다고 설정했을 때 Table 1과 같이 position 1에서는 216.65mg, position 2에서는 83.35mg, position 3에서는 60mg이 포집되었으며 포집 비율은 각각 43.3%, 16.67%, 12%이다.

예상했던 대로 위치 1에서의 포집량이 가장 많았고, 위치 3에서는 실질적으로 포집되는 입자가 거의 없었으며 이는 유동 가시화 실험에서 판단한 것과 같이 먼지 발생 위치의 접선 방향으로 장치를 설치하는 것이 적합하다는 의미를 갖는다.

3.3 최종 장치의 집진 효율

흡입형 브레이크 미세먼지 제거 장치의 집진 효율을 구하기 위해 Fig. 11과 같이 실험 장치를 구성하였다. 3.1 유동 가시화 실험과 마찬가지로 디스크에 모터를 연결하였고, 캘리퍼의 위치를 고려하여 아이소핑크로 미세먼지를 생성하였다. 생성된 미세먼지를 흡입할 수 있는 모터를 최적의 위치에 위치시켰다. 각각의 모터는 전원과 모터 컨트롤러를 연결하였다. 미세먼지 제거 효율을 측정하기 위하여 디스크와 흡입모터 옆 공간에 미세먼지 측정 센서를 설치하였다.

Fig. 12에서 미세먼지 측정 센서를 이용하여 대기 중 미세먼지 농도 데이터를 그래프로 변환해 보았다. 평상시는 브레이크와의 마찰로 인해 아이소핑크 입자가 생성될 때의 농도를 측정한 것이고, 흡입 모터 작동 시는 미세 입자를 모터가 작동하면서 흡입했을 때 주위의 미세먼지 농도를 그래프로 나타낸 것이

다. 두 가지 상황의 농도는 항상 일정한 값을 가지는 것이 아니므로 각각의 평균값을 이용하였다.

$$\text{집진효율} = \frac{\text{장치 on, off 미세먼지 농도차 } [\mu g/m^3]}{\text{장치 off 미세먼지 농도차 } [\mu g/m^3]} \times 100\%$$

측정한 농도를 집진 효율 식에 대입하여 84.3%의 최종 장치 효율을 얻었다. 한 연구[5]에서 자체적으로 개발한 브레이크 패드-미세먼지의 집진 효율은 72%이다. 본 연구에서 같은 방식으로 실험하여 동일한 집진 효율 공식을 사용하였으므로 비교하였을 때 우수한 수치이다.

4. 결 론

브레이크 미세먼지 제거 장치 개발을 위한 미세먼지의 유동 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 도출하였다. (1) 필터형 미세먼지 제거장치에 비해 suction motor를 사용한 흡입형 미세먼지 집진 장치는 미세먼지의 효율적인 포집이 가능하다. (2) CFD를 이용한 유동 해석을 통해 타이어 안쪽에서 정체점을 찾았고 공기가 휠 안쪽에 머무른다는 유동 양상을 파악했다. (3) 장치의 부착 위치는 효율성과 부착 가능성을 고려하여 미세먼지 발생 위치의 접선 방향에 설치하는 것이 적절하다. (4) 미세먼지 농도 변화를 측정하여 실험한 결과, 84.3%의 효율을 달성하였으며 이는 필터형 미세먼지 제거 장치의 효율보다 약 2배 이상의 수치이다. 향후 소형화된 브레이크 미세먼지 제거 장치를 설계 제작하여 미세먼지 저감 효과를 달성할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌
(References)

(1) Lee, S., 2017, “Characterization of Non-exhaust Particulate Matters (PM) Generated from Tire and Brake,” *Auto Journal*, Vol. 39, No. 8, pp. 34~38.
(2) Lee, W., Cho, Y., Kim, S., Jo, S. and Hwang, H., 2021, , “New Development of Friction Materials and Dust Collector in Response to the Criteria of Brake Dust”, *Proceedings of the KSAE 2021 Annual Autumn Conference & Exhibition*, p. 234.
(3) Lee, Y. L. and Hwnag, I. S., 2020, “Flow Analysis for the Development of Automobile Brake Fine Dust Filter,” *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 44, No. 4, pp. 245~253.
(4) Kim, D. J. and Jeong, S. M, 2020, “CFD-DEM Analysis for Particle Collisions and Multiphase Flow,” *Journal of the KSME*, Vol. 60, No. 9, pp. 45~49.
(5) Yoo, D. H., 2017, *Development of a Tire-asphalt- and Brake Pad-disk-oriented Dust Collecting System*, Ministry of Science and ICT, TRKO201800002986, pp. 6~23.

<응용기술논문> DOI http://dx.doi.org/10.3795/KSME-C.2023.11.2.083 ISSN 2288-3991(Online)

재활용 용기의 불순물 제거를 위한 스카라 로봇 개발§

김지원*† · 권혁주* · 황우현*
* 동양미래대학교 자동화공학과

Development of Scara Robot to Remove Impurities from Recycling Containers

Ji-won Kim*† , Hyeok-ju Gwon* and Woohyeon Hwang*
*Departmentl of Automation Engineering, Dongyang Mirae University

(Received December 23, 2022 ; Revised March 3, 2023 ; Accepted April 10, 2023)

Key Words: Modular Design(모듈화 설계), Scara Robot(스카라 로봇), Motor Control(모터제어), Peristaltic Pump(연동 펌프), Actuator Design(구동부 설계)

초록: 본 연구는 스카라 로봇을 활용한 세척 시스템을 통해 고품질의 재활용품 획득과 실질적인 재활용률을 높이는 것을 목표로 하였다. 픽앤 플레이스 동작 수행과 더불어 물체를 펌프로 제작된 세척 시스템을 이용해 소독한 후 원하는 위치 및 방향으로 놓음으로써 효율적인 분류를 하도록 하였다. 현재 인구 및 소비가 증가함에 따라 매년 플라스틱 제품 사용 증가로 처리 비용도 증가하는 추세이다. 이를 해결하기 위해서 본 연구에서 개발한 스카라 로봇을 이용해 플라스틱 세척 및 살균을 수행하면 고품질의 재료를 획득하여 실질 재활용률을 높일 수 있다. 궁극적으로 우리 사회의 폐기물 문제를 해결하여 친환경 에너지 발전에 도움을 줄 수 있을 것으로 가정하여 적용하였다.

Abstract: This study aims to acquire high-quality recyclables and increase the actual recycling rate through a washing system using a scara robot. In addition to performing the pick-and-place operation, the objects are disinfected using a washing system made with a pump, and then placed in the desired location and direction for efficient sorting. As the current population and consumption increase, the use of plastic products increases every year, so the disposal cost also tends to increase. In order to solve this problem, if plastic cleaning and sterilization is performed using the scara robot developed in this study, high-quality materials can be obtained and the actual recycling rate can be increased. Ultimately, it is expected to contribute to the development of eco-friendly energy by solving the waste problem in our society.

1. 서 론

현재 전 세계적으로 83억 톤의 플라스틱[(1)]이 생산되고 있으며 이는 환경을 넘어서 생태계 먹이 사슬에 의해 우리 인체에 해로운 영향을 미칠 가능성이 크다. 우리나라의 재활용 수치는 2019년 기준 86%로 높으며 폐플라스틱은 62%이지만, 실제로 고품질의 제품으로 전환되는 경우는 적다. 수거 후 선별 과정에서 버려지는 쓰레기가 매우 많으며 실질적인 재활용률은 40%에 불과하며 이 중에서 35%는 이물질이 많아서 버려지게 되거나 저급 솜을 만들 때 사용된다.[(2)] 또한 한국 포장재 재활용 사업 공제 조합[(3)]에서 2015년에 조사한 바에 따르면 페트병의 경우 재활용이 유리한 1등급은 0.1%(2015년)에 불과했다. 페트병 내부의 이물질이 플라스틱의 순도를 낮추는 원인 중 하나이다.

본 논문의 연구는 이런 원인 중 하나인 내용물을 제거할 수 있도록 하는 것이 목적이며, 실질적 재활용률을 높이고 재료와 제품으로 재순환되는 플라스틱의 비율을 높이고 소각장으로 보내지는 쓰레기의 양을 줄일 수 있으므로, 순환 경제를 활성화하고 소각 비용을 줄임으로써 이득을 창출할 수 있을 것으

§ 이 논문은 제12회 전국학생설계경진대회 수상작을 토대로 한 논문임.
† Corresponding Author, kimgiwon1812@gmail.com
ⓒ 2023 The Korean Society of Mechanical Engineers

Table 1 Design considerations

Key design considerations	Method
Robot arm design and joint mechanism implementation	Robot production using 3D printer and error correction, outer wall thickness increase and designed to be installed, separated and assembled from top to bottom and left to right
Actuator design	Stepping motors are used to transmit power to timing belts and pulleys. Chrome rod and bearings support the load
Cleaning system and pump design	Implementation of the system using peristaltic pumps and nozzles
Gripper design and object recognition	Recognizing objects using infrared sensors, design of a parallel gripper to perform a gripping action

로 계산하여 적용하였다. 그동안 이물질 제거용 장비는 효율성이 낮아서 시도하지 않은 것 같지만, 센터에 오염된 플라스틱과 유리를 따로 분류하는 컨베이어 설비를 추가하고, 여러 협동 로봇이 동시에 세척 작업을 수행한다면 고품질의 재료를 얻을 때 큰 도움이 될 것으로 예상하였다.

2. 설계 핵심 내용

2.1 설계 문제의 정의

로봇을 사용한다면 선별 업체에서 수작업으로 진행되어 불가능하던 이물질 제거 및 선별을 무인 시스템이 수행하게 되므로 실질 재활용률을 높이는 데 큰 역할을 할 것으로 예상하였다. 고품질의 재료를 얻어 가공을 통해 섬유, 합성 목재 등을 얻어 새로운 제품으로 제작하여 궁극적으로는 대체재 제작에 도움을 주므로 에너지를 절감하고 자원의 선순환에 도움을 줄 것이다. 이를 위해 로봇을 설계하고 원활한 동작을 위해서 역 기구학, 응력 및 관성을 계산하는 것이 프로젝트 목표이며, 구체적인 요구 조건은 Table 1과 같다.

2.2 설계 방법 및 제약조건

2.2.1 설계 방법

본 연구는 바텀-업 방식으로 설계를 설정하였다. 방법은 가장 보편적인 방법으로 먼저 파트를 설계하고 모델링한 다음, 어셈블리에 삽입하고 메이트를 사용해서 파트를 배치하였다. 파트를 변경하려면, 개별적으로 편집을 진행해야 하지만, 3D 프린터를 활용하여 각 파츠를 제작하고 수정이 필요한 작품의 특성상 적합하다고 판단하여 진행하였다.

2.2.2 로봇 형태 및 구조 결정

SCARA(Selective Compliance Assembly Robot Arm)는 x-y축의 평면상에서 고정되어 있는 2개의 수평 관절과 1개의 수직 운동을 할 수 있는 축으로 운용되며 관절 4의 말단 장치를 장착하여 조립, 정밀 생산, 절삭 분야에 사용하는 자동화 로봇 설비이다.

로봇이 원하는 좌표로 이동하고 동작을 수행하기 위해서는 역 기구학(Inverse kinematics)에 따라서 해석되어야 한다. 로봇은 3개의 회전축을 사용하여 좌표 이동을 할 것이므로 3DOF manipulator 역 기구학 풀이에 따라서 동작하게 설계하였다.

로봇은 Fig. 1과 같이 크게 5가지 구조물로 구성하였다.

a. 페리스탈틱 펌프(pump) : 재활용품 세척을 위한 용수를 공급하는 펌프로 내부 베어링이 실리콘 튜브를 눌러 정해진 용량만큼 공급하는 구조로 설계하였다.

b. 몸체(body) : 로봇 암과 결합한 액추에이터를 안정적으로 고정 및 지지함으로써 원활한 동작 수행

Table 2 Stepping motor specification

	NK243-01AT(4P)	Nema17	Nema23
Voltage	4.56	4.0	12
Current	0.95	0.95	2.4
Step angle (°)	1.8	1.8	1.8
Holding torque (kgh*cm)	2.1	1.58	0.64
Size (cm)	42x42	42x42	57x57
Weight (g)	224 g	220 g	520 g

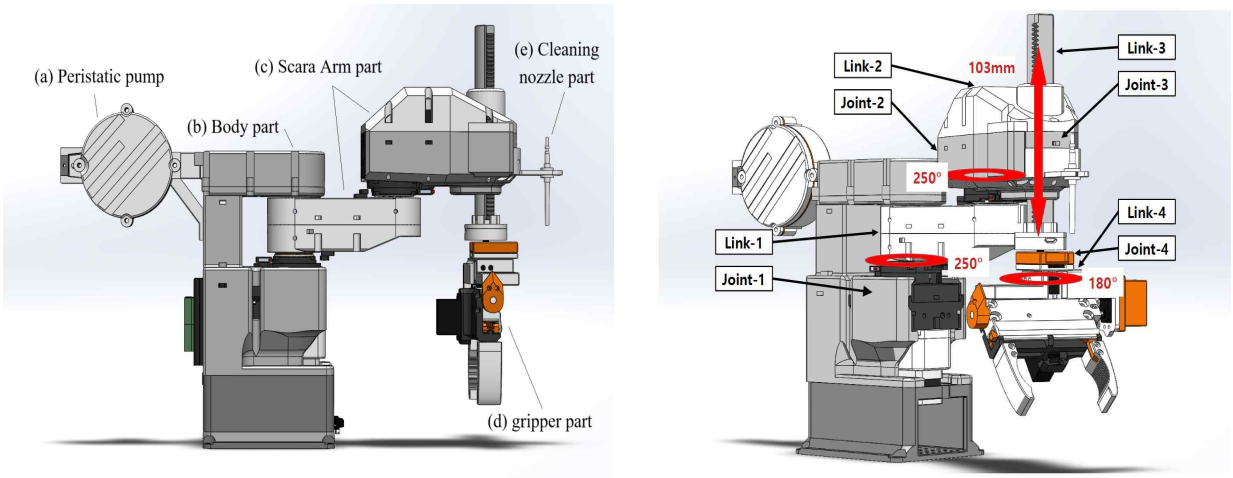


Fig. 1 Name of each structure and assembled robot

을 위한 구조물이며, 마이크로프로세서, 펌프(pump), 모터 드라이버, 환경 센서 등도 장착하여 일체감을 주도록 하였다.

c. Scara arm part : 프린터로 제작된 하우징으로 구성한 후 조립하였고, 스테핑 모터와 액추에이터 내부 풀리 및 타이밍 벨트를 통해 동력을 전달하였다.

리밋 스위치를 장착하여 스테핑 모터의 원점복귀를 수행하였다. 2축은 pitch 운동을 위한 액추에이터가 장착되었고, 3축의 yaw 운동을 담당하는 rack gear와 서보 모터가 장착되었다.

d. 그리퍼(gripper part) : 3축 직선 관절 끝에 장착되며, 3개의 서보 모터를 이용하여 사람의 쥠 동작을 흉내를 내며 목표로 하는 물체를 들어 올려 세척용 노즐에 위치하도록 임무를 수행하였다.

e. 세척용 노즐(cleaning nozzle part) : Arm part 끝 부분에 장착되며, 그리퍼를 통해 들어 올려진 물체를 펌프를 통해 공급된 용수로 세척 하는 작업을 수행하였다.

2.2.3 부품 선정

2.2.3.1 모터 선정

움직임을 구현하기 위해서 모터의 선정은 무엇보다 중요하다. 기본적으로 PLS 필라멘트를 재료로 로봇 프레임을 제작하였다. 팔 내부에 모터가 있는 것을 고려하여 작고 무게가 적지만, 높은 토크로 동작할 수 있는 모터를 선정하는 것이 중요하다. 로봇 무게를 10kg 이상으로 가정하여 NK243-01AT 모터를 선정하였다. 사양은 Table 2와 같다.

2.2.4 로봇 프레임 설계

2.2.4.1 액추에이터 설계

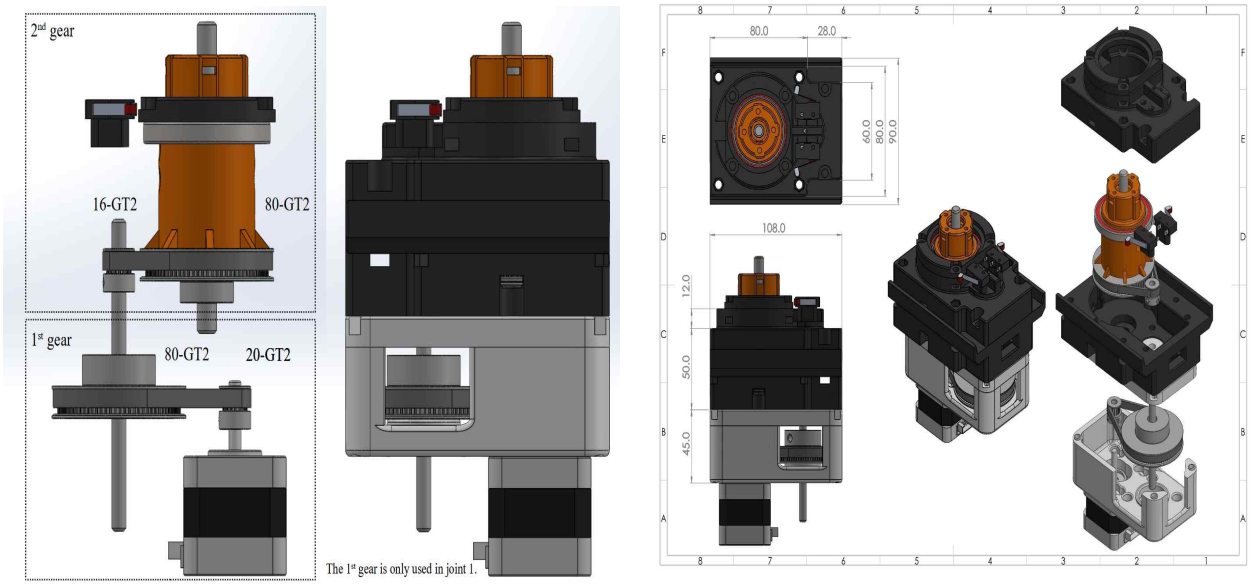


Fig. 2 Actuator module with various pulley and timing belt

로봇이 움직이기 위해서는 구동부(액추에이터)를 설계할 필요가 있다. 모터를 포함하여 모터 드라이브, 원점 센서, 감속기, 베어링 등등으로 구성되며 사용되는 모터의 전압 토크에 따라 사양은 크게 변하며, 기어의 형태 기어비도 로봇이 움직이는데 중요한 요소다. 따라서 모터를 선정하고 액추에이터를 설계하면서 기어의 구성 그리고 움직임에 따른 관성과 축에 가해지는 응력 또한 계산해야 할 과제이며, 타이밍 벨트와 풀리를 사용하여 기어비를 조절하고 모터의 토크 값을 높이고 동력을 전달하였다.

액추에이터는 타이밍 벨트와 잇수 16과 20, 그리고 80으로 이루어진 풀리, 움직임을 위한 NK243-01AT 스테핑 모터, 축을 고정하는 (6π x 100mm), (8π x 100mm) 연마 봉과 이를 고정하는 608ZZ 베어링으로 구성되었다. 모듈화를 위해서 액추에이터를 따로 구성되도록 설계하였고, 교환하기 쉽도록 최대한 작은 크기로 모든 부품이 구성되도록 Fig. 2와 같이 구성되었다.

모터의 동력 전달을 위해 기어의 동작을 대신할 수 있으며, 경량화 및 정숙성 높은 내구성이 특징인 타이밍 벨트를 적용하여 사용하였다. 타이밍 벨트를 선정하기 전에 사용되는 모터와 요구되는 조건을 종합한 후 설계 동력을 결정하였다.

설계 동력 계산식은 다음과 같다.

설계 동력(Pd) kW = 전동 동력(Pt) kW×과부하 계수(Ks)

Ko : 부하 보정 계수(경하 중 벨트 기준 1.7), Kr : 회전비 보정 계수(회전비 3.50 이상 0.4)
Ki : 아이들러 보정 계수(안쪽부터 사용하는 경우. 0.1), Tq : 설계 토크(N·m)
tq : 전동 토크(N·m) 2.1kg*fcm, Ks : 과부하 계수(Ko + Kr + Ki) = 2.2
Pd : 설계 동력(kW), n : 회전수(rpm) 360rpm

토크(Tq) = tq×Ks = 0.021 × 2.2 = 0.0462kgf*m = 46.2kgf*mm

설계 동력(Pd) = Tq × n / 974,000 = 46.2 x 360/974,000 = 0.017kW

회전수와 설계 동력형을 고려하여 2GT형 타이밍 벨트를 선택하였다. 엑추에이터 2단 기어는 다음 계산식을 사용하여 축간거리를 계산하였다.

b=2Le- π (De + de) (1)

$$c = \frac{b + \sqrt{b^2 - 8(De - de)^2}}{8} \quad (2)$$

2단 기어는 길이 180, 200mm 폐쇄형을 사용하였기 때문에 다음 계산식을 사용하여 축간거리를 각각 계산하였다. 식 (1)을 사용하여 도출된 값을 식 (2)에 대입하여 축간거리를 계산하였다.

$$c = \frac{143.23 + \sqrt{143.23^2 - 8(55-14)^2}}{8} = 35.5mm \quad c = \frac{176.95 + \sqrt{176.95^2 - 8(55-16)^2}}{8} = 39.4mm$$

풀리 잇수 차이로 타이밍 벨트를 통해 증폭된 모터 토크는 2.1Kg.cm * 5 * 4 = 42Kg.cm이다.

2단 기어를 단독 사용하면 2.1Kg.cm * 5 = 10.5Kg.cm이다.

액추에이터 축은 로봇 암과 연결을 위해 X 모양으로 제작된 상부 결합 홈과 볼트 체결용 구멍을 가지고 있다. 이를 위해 볼트의 전단 강도를 계산하며, 고정하는 재료는 PLA로 설정하여 계산하였다.

PLA의 기본 인장강도는 $63.63Mpa = 63.63N/mm^2$이다.[4]

안전율을 고려하면 다음과 같다.

$\sigma_s = 63.63N/mm^2 \cdot 0.7(\text{안전율}) = 44.54N/mm^2$, $A = \frac{\pi d^2}{4} = 7.07mm^2$ 이다. 응력에 대한 $P_S = 44.54N/mm^2 \cdot 7.07mm^2 = 314.9N$ 이다. 볼트 1개당 P = 20kgf가 작용하고 있다고 가정해도, $P = 20kg(f) \cdot 9.81m/s^2 = 196.2N$ 이다. $P_S > P$ 이므로 M3 볼트를 사용해도 안전하다.

액추에이터 하우징은 내부 풀리 및 타이밍 벨트를 보호하고 진동을 억제할 수 있도록 설계하며, 모든 부품은 분해 및 조립이 쉽도록 가정하여 설계하였다.

하우징은 몸체(body) 및 SCARA 암에 들어갈 수 있도록 끼워 맞춤 공차 및 3D 프린터 오차를 고려하여 0.5mm 공차를 계산하여 적용하였다. 액추에이터가 삽입되는 구멍 또한 업데이트 및 수리를 고려하여 같은 치수를 사용하였다.

2.2.4.2 로봇 팔과 관절 설계

로봇 모듈화를 고려하여 설계하였다. 각 부품을 분리하기 쉽게 설계하며 조립용 볼트 등 결합 및 끼워 맞춤식 설계를 적용하여 고정 장치를 구상한다면 부품을 고정할 수 있으면서 분리하기 쉽게 만들 수 있도록 하였다.

팔의 주재료는 PLA 필라멘트이며 옥수수, 사탕수수 또는 당분을 함유한 농작물에서 추출하는 중합된 젖산으로 만들며, 가장 친환경적인 3D 프린팅 재료이다. 따라서 특징을 살펴본 후 재료의 안전계수를 측정하였다. 구조물의 실제 강도는 요구 강도보다 커야 하며 실제 강도의 비를 의미한다.

PLA의 물성값[5]을 고려하여 항복 응력을 계산하면 다음과 같다.

항복 응력 = (28.8-13.6)/(100-50)*20 = 6.08(MPa)

탄성계수 = (3,150-2,028)/(100-50)*20 = 448.8(MPa)

계산을 위해서 Joseph Vidosic이 제안한 값으로 항복강도(yield stress)[6]를 토대로 구한 값을 기준으로 안전계수의 계산을 적용하였다.

안전계수는 4(3~4) 잘 알려진 재료이지만 불확실한 환경과 응력 조건에서 사용할 때를 적용하였다. 항복강도 6.08(MPa), 파괴 강도 8.00(MPa)을 식 (3)에 대입하여 식 (4)를 계산하였다.

$$\text{허용 응력}\sigma_a = \frac{\text{항복강도}}{\text{안전계수}} \tag{3}$$

$$\text{허용 하중} = (\text{허용응력})(\text{면적}) \tag{4}$$

대입한 식을 계산하면 각각 다음과 같다.

$$\text{허용 응력}\sigma_a = \frac{6.08(MPa)}{4} = 1.52(MPa)$$

$$\text{허용 하중} = 1.52(MPa) * 140cm^2 = 212.8kg \tag{5}$$

파괴 응력 및 하중 또한 다음 계산식을 적용하여 계산한다.

$$\text{파괴 응력}\sigma_a = \frac{\text{파괴강도}}{\text{안전계수}} \tag{6}$$

$$\text{파괴 하중} = (\text{파괴응력})(\text{면적}) \tag{7}$$

대입한 식을 계산하면 각각 다음과 같다.

$$\text{파괴 응력}\sigma_a \frac{8.00(MPa)}{4} = 2.00(MPa)$$

$$\text{파괴 하중} = 2.00(MPa) * 140cm^2 = 280.0kg \tag{8}$$

이며, 안전계수를 개선한 식은 다음과 같다.

$$Factor\,of\,safety = \frac{Yield\,point\,stress}{Working\,\text{or}\,Design\,Stress} \tag{9}$$

식 (5), (8) 하중 계산을 대입하면 $\frac{280.0kg}{212.8kg} = 1.31$ 이므로 매우 신뢰성 있는 재료로 확인할 수 있다.

2.2.4.3 3축 직선 관절 설계

래크 피니언 기어로 구성된 직선 관절이다. 이수 24모듈 1.5로 제작된 기어이며, 서보 모터 1회전 시 래크 기어 103.67mm가 이동하는 구조이다. 레크 피니언의 규격은 Table 3과 같다.

2.2.4.4 페리스탈틱 펌프(Peristaltic pump) 설계

페리스탈틱 펌프는 다양한 유체를 정해진 시간에 일정량의 유체를 송출하기 위해서 사용하는 positive displacement pump의 하나다.

소독제와 같이 유독하고 낭비 없이 사용하는 공정 특성상 정확한 유량을 주입하는 로봇을 제작하는 본 작품에 어울리며, 설계 및 제작을 진행하였다.

모양은 Fig. 4와 같으며, 실리콘 튜브의 고정 및 정확한 밀착을 위해서 펌프 헤드에는 길이를 가변할 수 있는 M3 수나사와 암나사가 장착되었다. 이를 통해서 실리콘 튜브가 밀착되지 않아 액체가 이송되지 않는 현상과 과밀착으로 인해 모터에 무리가 가는 현상을 방지할 수 있도록 적용하였다. 또한 몸체와 결착될 수 있도록 구조물과 볼트 체결 부품을 갖추었다.

Table 3 Rack pinion gear spec sheet

Rack pinion gear spec sheet			
Sortation		Rack	Pinion
Gear tooth type		표준(standard basic)	
Tool	Modules (m)	1.5	
	Tooth type	보통 이(ordinary tooth)	
	Input angle	20°	
The whole height		3.375	
Pitch circle diameter		-	36
The number of teeth		45	24

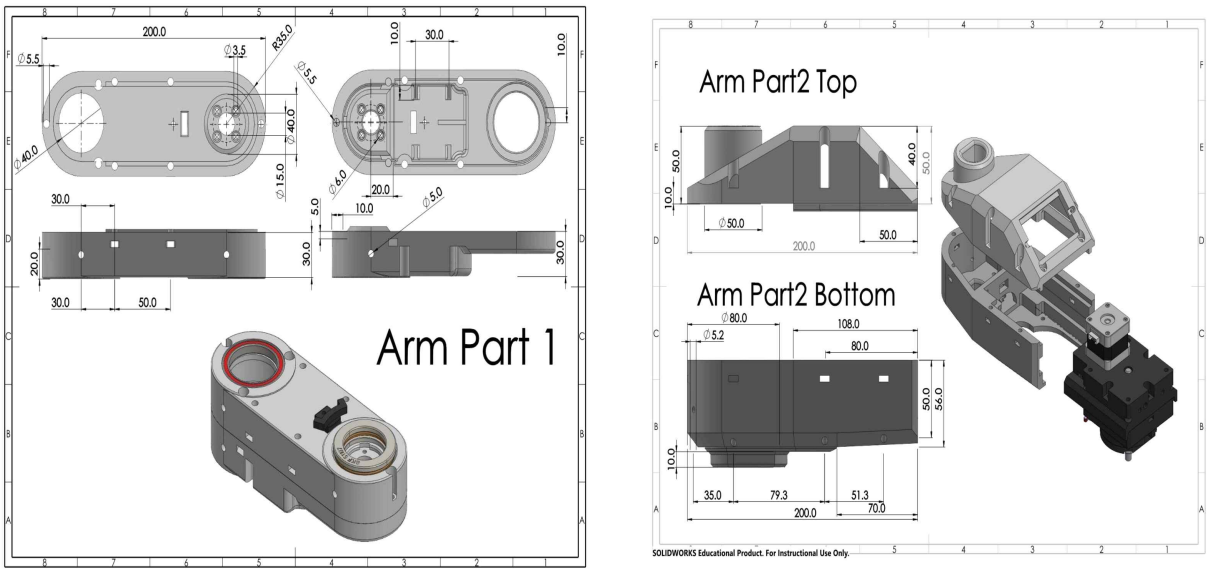


Fig. 3 Joint arm drawing and sectional view

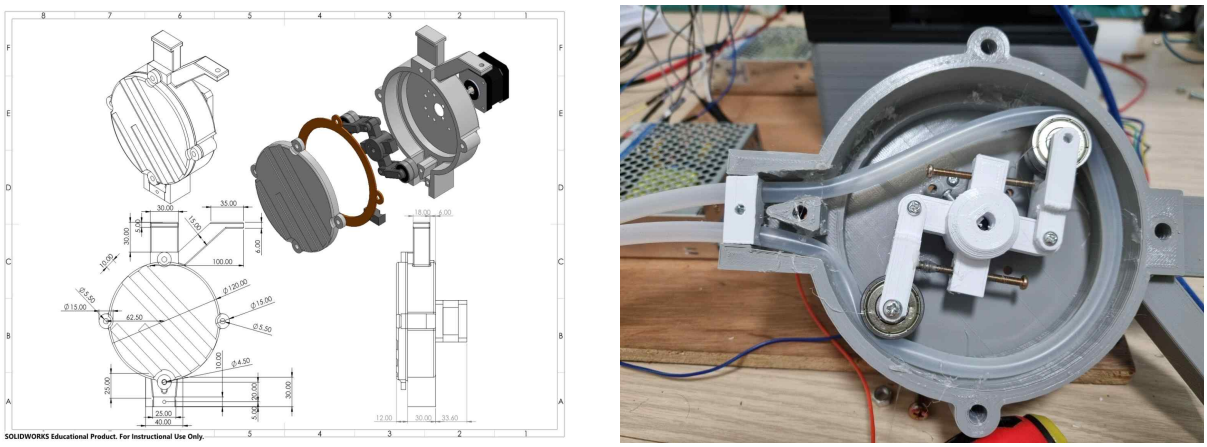


Fig. 4 Peristaltic pump drawings and designed pumps

2.2.4.5 그리퍼 설계

그리퍼(gripper)는 사람의 동작을 흉내 내는 장비이며, 자동화 장치에서 사람의 손가락과도 같은 역할을 한다. 그리퍼는 다음과 같은 두 가지 형태의 주요 동작을 적용하였다.[7]

본 연구는 평행이동 그리퍼를 사용하였다.[8] 이유는 그리퍼가 쥐게 되는 물체에 평행하게 열리고 닫히

며 가장 폭넓게 쓰이는 그리퍼이며, 사용법이 가장 간단하며 일정 치수의 변화에 보상할 수 있기 때문이다.

2.2.5 소프트웨어 설계

2.2.5.1 프로그램 동작 및 역 기구학 설명

로봇의 동작 순서도는 위의 그림 Fig. 5을 참고하여 이해할 수 있다. 로봇을 작동시키기 시작하면 적외선 센서와 거리 측정 카메라 센서가 컨베이어 벨트 위의 폐-플라스틱 용기를 탐지하였다. 로봇의 활동 범위 안에 쓰레기가 진입하면 서보 모터 1, 2를 이용해 플라스틱을 집어 들고, 서보 모터 3, 4를 이용해 소독액을 쉽게 넣을 수 있도록 플라스틱 용기 입구를 위로 향하게 하였다. 그 후 소독액을 집어넣어 세척 후 플라스틱 용기를 목표 위치에 내려두도록 설계하였다.

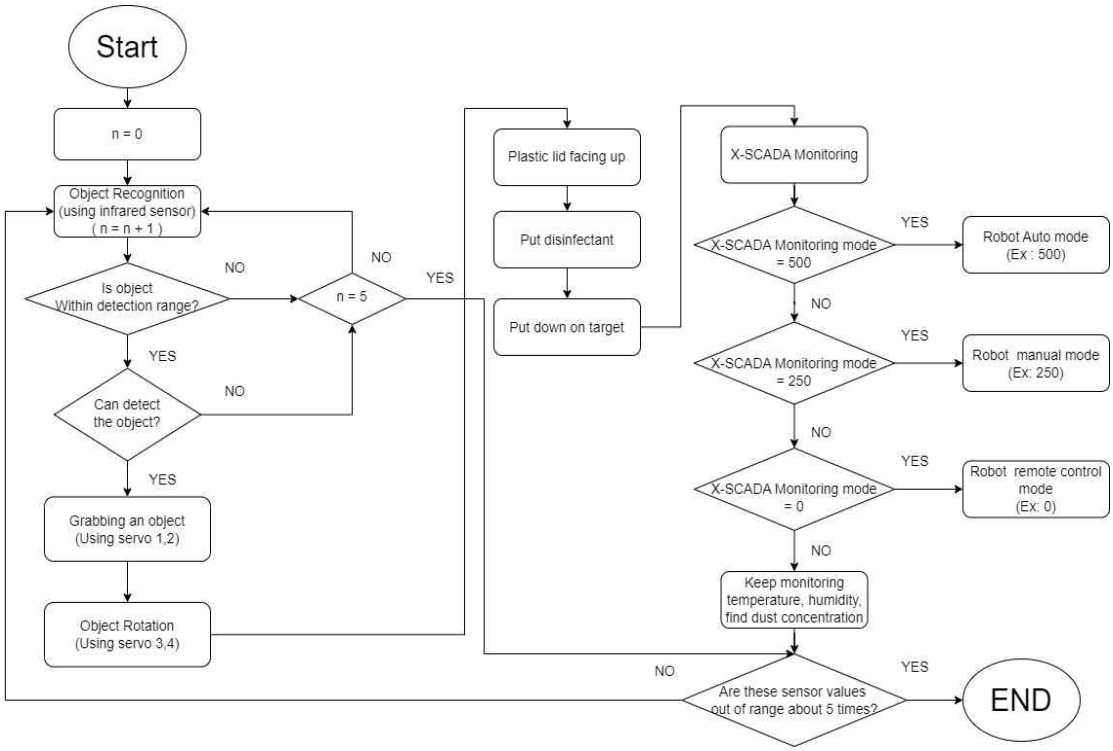


Fig. 5 Flow chart that summarizes robot movements

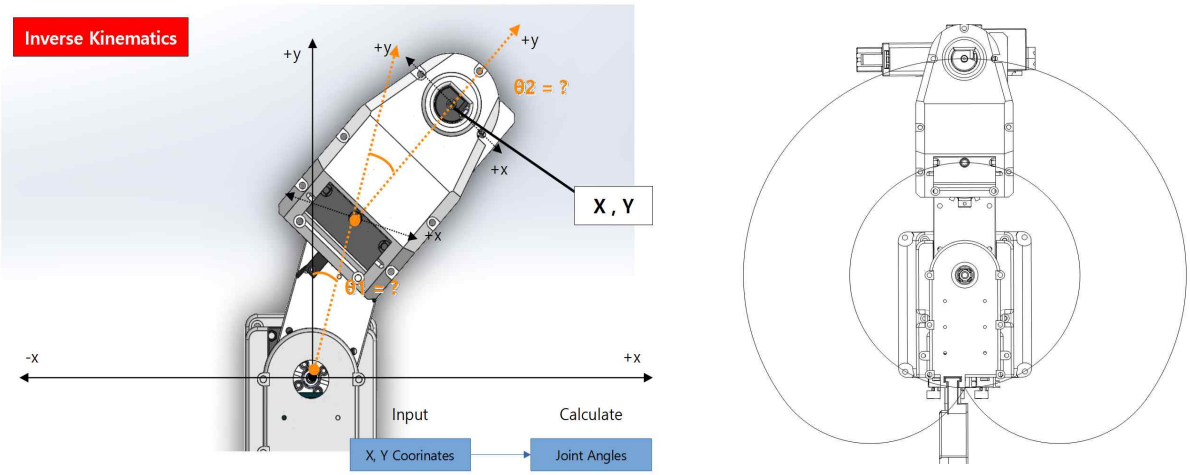


Fig. 6 Inverse kinematics and workspace

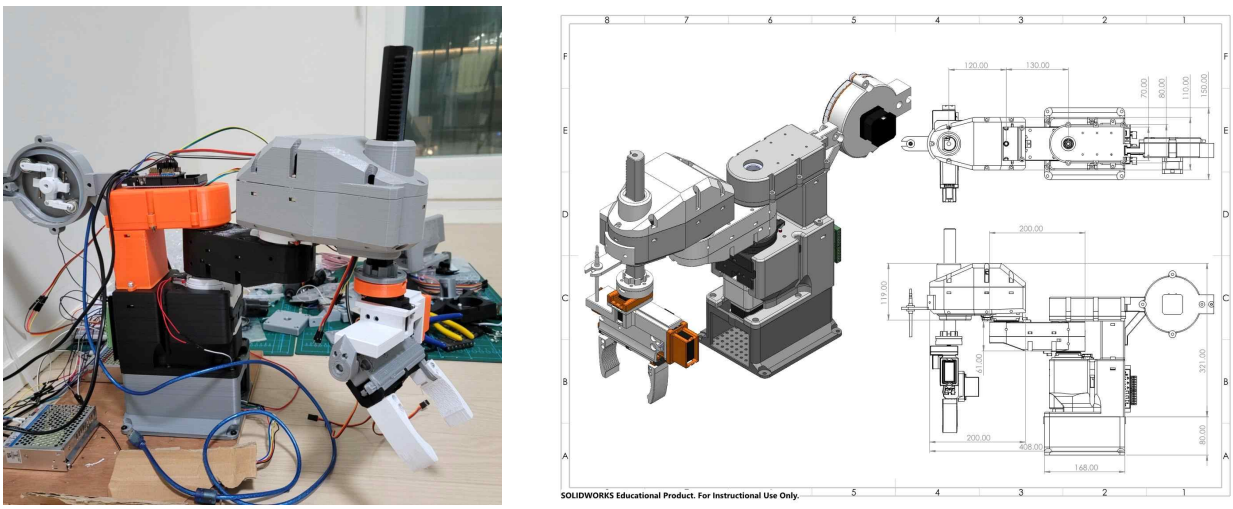


Fig. 7 Robot drawing and final assembly appearance

Fig. 6에 같이 각도 Θ1, Θ2를 이용한 로봇의 동작을 역 기구학 식으로 구한 후 이것을 이용하여 아두이노 프로그래밍을 진행하였다.[9]

스테핑 모터 2개를 이용한 2자유도 매니퓰레이터(로봇 팔)의 inverse kinematics의 해는 구조상 0개이거나, 2개이다. 특수한 경우가 한 가지 존재하는데, 2개의 링크 길이의 합과 끝점의 위치(x, y)가 원점으로부터 떨어진 거리가 같은 것, 즉 로봇 팔이 일직선일 때 해가 하나가 있다는 것을 확인할 수 있다. 따라서 동차 변환을 진행하여 다음과 같이 표현하였다.

$$\cos\theta 2 = \frac{x^2 + y^2 - l1^2 - l2^2}{2l1l2}, \sin\theta 2 = \pm\sqrt{1 - \cos^2\theta 2} \tag{10}$$

$$\theta 2 = a * tan2(\sin\theta 2, cons\theta 2) \tag{11}$$

$$\theta 1 = a * tan2(y,x) - a * tan2(L1 + L2 * cos\theta 2, L2 * sin\theta 2) \tag{12}$$

식 (10)-(12)의 최종 식들을 이용하면 위치에 따른 팔의 각도를 계산할 수 있으며 다음 식을 프로그래밍 코드로 변환하여 사용하였다.

다음 코드는 계산된 각도를 스텝 모터 구동을 위한 스텝 값으로 변환하였다. Table 2와 다음 자료[10]를 참고하면 NK243-01AT 모터는 step당 1.8°로 이동하며 TB6600 모터 드라이버 마이크로스텝 기능을 활용하므로 0.45°로 움직이도록 적용하였다. 추가로 풀리와 타이밍 벨트를 통해 1:5, 1:20 기어비로 구동되므로 각각의 액추에이터는 0.09°, 0.0225°로 움직인다.

따라서 360°를 움직이기 위해서 1축 액추에이터는 16,000, 2축은 4,000 스텝이 필요하다는 것을 판단하였다. 원점복귀 동작을 수행하는 경우 리밋 스위치 인식을 305°(2축 3,389, 1축 13,555 step)을 기준으로 180°(2축 2,000, 1축 8,000 step)으로 이동 명령을 모터로 전송하며, 원점복귀를 수행하였다.

3. 결과 및 토의

재활용을 분류하고 이를 압축하는 센터에서 높은 등급의 폐-플라스틱과 유리병의 회수율을 높이도록 로봇을 활용하여 시스템을 구성하였다.

그리하여 우리는 로봇의 하드웨어와 소프트웨어를 설계하며 로봇의 형상을 결정하고 원활한 움직임을 위해 프레임과 베어링 모터의 선정 및 선택을 위해 역학적 수식을 바탕으로 설계하였다. 로봇의 각 관절을 설계하였고 움직임은 원활하였으며 이를 위해 PLS 필라멘트를 사용하여 3D 프린터로 제작하였고

아두이노 보드 및 센서들을 이용하여 프로그래밍한 후, 수학적 좌표 계산을 통해서 평면좌표 상으로 이동할 수 있도록 메커니즘을 설계하였다.

글로벌 시장조사기관인 리서치앤드마켓에 따르면 플라스틱 재활용 시장은 54조 원 규모로 높은 것으로 나타났다. 전 세계적으로 재활용되는 플라스틱 시장 규모는 1억 3,600만 톤이다. 폐플라스틱의 가격 또한 연간 20%로 가파르게 성장하고 있다. 페트병은 재활용률이 45%에 불과하다. 그중에서 제품을 생산할 수 있는 품질은 9%이며 1등급은 0.1%에 불과하다. 버려지는 플라스틱 중에서 35%는 이물질에 의한 것으로 이는 작업자가 제거하기에 어렵고 위험하고 비용적인 문제 때문에 소각되거나 매립된다. 본 연구의 로봇이 플라스틱의 이물질 제거 시스템을 활용한다면 재활용품이 소각되는 문제를 낮추고 고품질의 원료를 얻어 다시 제품으로 만들어지는 선순환 구조를 만드는 데 이바지할 것으로 생각한다.

4. 결 론

설계의 목표는 비용이 적고 운용이 쉬워 작은 규모의 중소 폐기물 업체에서 사용할 수 있는 설비를 제작하는 것이 목적이었고, 로봇을 활용하여 이를 구현하는 것이었다. 이를 위해 3D 프린터로 대부분의 몸체를 제작하며 작은 무게와 비용으로 로봇을 쉽게 제작할 수 있도록 설계를 진행하였고, 부품 또한 인터넷에서 찾기 쉬운 것으로 선정하였다. 메인터넌스 작업이 수월하도록 모든 프레임은 드라이버와 같은 도구로 쉽게 분해되도록 하였고 교체를 위해 상부와 하부로 분리되며 핵심이 되는 액추에이터는 고장이 날 때 현장에서 쉽게 제거하여 편의성을 높였다.

설계 데이터를 공유한다면 많은 업체에서 활용 및 변환하여 사용할 수 있을 것으로 가정한 후 제작을 진행하였다. 여러 관절로 구성된 위의 로봇은 평면좌표에서 자유로운 움직임을 구사할 수 있고, 평면에 놓인 재활용품을 자유도가 높은 그리퍼를 이용하여 들어 올리고 노즐에 맞춰서 작업을 연속적으로 진행할 수 있도록 하였다. 환경 센서는 작업이 진행되는 과정을 실시간으로 감시하여 작업 환경의 안전성을 증명하며 위기 상황을 신속하게 탐지할 수 있도록 설계하였으므로 산업 현장에서 작업자들의 안전을 최대한 확보할 것이라고 기대한다.

참고문헌
(References)

(1) Hong, Y., Lim, S., Jeon, S. and Hong, N., 2020, *Plastics Business Guidelines – Focusing on Korean Companies*, WWF-Korea, pp. 1~46.

(2) Choi, D., Woo, T. and Choi, E., 2020, “60% of Your Recycling Effort Goes to Waste,” *Hankookilbo*, Korea (in Korean).

(3) 환경부 고시 제2019-71호, 2019, *Criteria for Improvement of Packaging Material Structure, etc.*, Resource Recycling Division, Ministry of Environment, pp.1~12 (in Korean).

(4) Park, S. J., Park, J. H., Lee, K. H. and Lyu, M.-Y., 2016, “Deposition Strength of Specimens Manufactured Using Fused Deposition Modeling Type 3D Printer,” *Polymer*, Vol. 40, No. 6, pp.846~851.

(5) Nam, H.-W. and Hong, K.-J., 2018, “Safety and Serviceability of Form-liners Manufactured by a FDM 3D Printer,” *Journal of the Korean Society for Advanced Composite Structures*, Vol. 9, No. 3, pp. 54~63, DOI:10.11004/kosacs.2018.9.3.054.

(6) Engineering ToolBox, 2010, *Factors of Safety - FOS - are Important in Engineering Designs* (https://www.engineeringtoolbox.com/factors-safety-fos-d_1624.html), The Engineering ToolBox.

(7) Birglena, L. and Schlicht, T., 2018, “A Statistical Review of Industrial Robotic Grippers,” *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 49, pp. 88~97, DOI: 10.1016/j.rcim.2017.05.007.

(8) Andronas, D., Xythalis, S., Karagiannis, P., Michalos, G. and Makri, S., 2021, “Robot Gripper with High

Speed, In-hand Object Manipulation Capabilities," *Procedia CIRP*, Vol. 97, pp. 482~486, DOI: 10.1016/j.procir.2020.08.007.

(9) Misra, A., Sharma, A., Singh, G., Kumar, A. and Rastogi, V., 2020, "Design and Development ofa Low-Cost CNC Alternative SCARA Robotic Arm," *Procedia Computer Science*, Vol. 171, pp. 2459~2468, DOI: 10.1016/j.procs.2020.04.266.

(10) Khairudin, M., Asnawi, R. and Shah, A., 2020, "The Characteristics of TB6600 motor driver in producing optimal movement for Nema23 stepper motor of CNC machines," *TELKOMNIKA*, Vol. 18, No. 1, pp. 343~350, DOI: 10.12928/telkomnika.v18i1.12781.

<응용기술논문> **DOI http://dx.doi.org/10.3795/KSME-C.2023.11.2.095** ISSN 2288-3991(Online)

롤러형 압전 에너지 하베스팅 시스템 설계 최적화§

최민혁* · 이현승* · 김시후* · 방진홍* · 임기훈* · 도재혁*†

* 경상국립대학교 기계소재융합공학부

Design Optimization of Piezoelectric Energy Harvesting System of Roller-type

Minhyeok Choi*, Hyeonseung Lee*, Sihu Kim*, Jinhong Bang*, Kihoon Lim* and Jaehyeok Doh*†

* School of Mechanical and Material Convergence Engineering, Gyeongsang Nat'l Univ.

(Received December 23, 2022 ; Revised February 11, 2023 ; Accepted February 14, 2023)

Key Words: Carbon Neutral(탄소 중립), Piezoelectric Energy Harvesting(압전 에너지 하베스팅), Finite Element Analysis(유한요소해석), Multi-objective Design Optimization(다중목적 설계 최적화)

초록: 본 연구에서는 컨베이어 롤러에 적용하기 위해 롤러형 압전 에너지 하베스팅 시스템을 최적화하여 전압을 최대화하고 충돌하중에 의한 응력을 최소화하였다. 이를 위해 시험 전압 데이터를 기반으로 압전 전압 방정식과 유한요소모델을 보정하였다. 성능지수를 얻기 위해 중심합성계획을 사용하였으며, 이를 바탕으로 반응표면법을 사용하여 대리모델을 생성하였다. 반력 대리모델은 오일러-베르누이 보 이론식과 압전 전압 방정식으로 대체된다. 다중목적 최적화는 비지배 분류 유전자 알고리즘을 사용하여 수행하였다. 그 결과 중량 제한함수를 만족하였고, 전압 목적함수는 7.413% 증가하였으며, 시험적으로는 13.06% 증가하였다. 응력 목적함수는 17.31% 증가하였지만, 이 설계는 파괴응력(251.9 MPa)보다 적은 164.2 MPa이 발생하였기 때문에 최적의 설계로 판단하였다.

Abstract: In this study, to apply to the conveyor roller, the piezoelectric energy harvesting system of roller-type was optimized to achieve the maximized voltage and minimized stress by clash loading. For this work, the piezoelectric voltage equation and finite element model were calibrated based on experimental voltage data. The central composite design was employed to obtain the performance factors, and based on this, surrogate models were generated using the response surface method. The surrogate model of reaction force is substituted into the Euler-Bernoulli beam and piezoelectric voltage equation. Multi-objective optimization was conducted by non-dominated sorting genetic algorithm II. As a result, the constraint function of weight was satisfied, and the objective functions of voltage was increased by 7.413%, experimentally increased by 13.06%. Although the objective function of stress was increased by 17.31%, we considered it the optimal design because this design generated 164 MPa, less than the failure stress (251.86 MPa).

-기호설명-

L_p, L_b	길이 (mm)	k_b	굽힘 처짐 상수
H_p, H_b	두께 (mm)	B	굽힘 강성 (N·mm^2)
W_p, W_b	너비 (mm)	S	유연 계수 (mm^2/N)
V	전압 (V)	ν	푸아송 비
E_p, E_b	탄성계수 (MPa)	ρ	밀도 (kg/mm^3)
F_p, F_b	끝단 반력 (N)	w	돌기 1개의 중량 (kg)
δ_p, δ_b	끝단 변위 (mm)	ω	진동수 (Hz)

§ 이 논문은 제12회 전국학생설계경진대회 수상작을 토대로 한 논문임.

† Corresponding Author, jdoh@gnu.ac.kr

ⓒ 2023 The Korean Society of Mechanical Engineers

1. 서 론

최근 세계 각국에서는 탄소 중립에 대한 중요성이 대두되고 있다. 이에 따라 대한민국 정부는 2050 탄소 중립 전략을 펼침으로써 화석 연료를 대체할 신재생 에너지에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 에너지 하베스팅(energy harvesting) 기술은 자연에서 에너지를 얻을 수 있는 신재생 에너지 중 하나이며, 이 중 압전(piezoelectric) 에너지 하베스팅은 진동과 하중 같은 기계적 에너지를 축적한 후 전기에너지로 변환하여 발전한다. 이는 발전량이 작은 문제점이 있어 통상적으로 공진(resonance)을 통해 발전하는 것이 효과적이나 공진 대역이 좁아 응용 범위가 제한적이다.[1] 이를 해결하고자 압전소자에 직접적인 변형을 가하여 출력 전압을 평가하는 연구들이 시도되고 있다.

Priya[2]는 풍차의 축(shaft)에 스토퍼(stopper)를 구성하여, 압전소자가 직접적인 굽힘(deflection)에 의해 발전하는 압전 에너지 하베스팅 시스템을 제안하였다. Pozzi 등은[3] 인체의 운동에너지를 이용하여 돌기(plectrum)에 의한 바이모프 압전 외팔보(BPC: Bimorph Piezoelectric Cantilever)의 굽힘 거동 및 출력 전압을 분석하였다.

본 연구에서는 BPC에 직접적인 충돌하중을 가하여 발전하는 롤러형 압전 에너지 하베스팅 시스템을 통해 출력 전압 최대화 및 발생 응력 최소화를 동시에 만족하는 다중목적 설계 최적화를 수행하고자 한다. 이에 이론적 해석, 유한요소해석(FEA: Finite Element Analysis) 및 강제 변위 인가시험을 통해 BPC 출력 전압을 분석하였다. 이어 돌기와 BPC 충돌 시 출력 전압 최대화, 발생 응력 최소화를 다중목적 함수로 선정하고 제한조건으로 초기 돌기 모델 1개의 중량을 선정하였다. 이를 기반으로 중심합성계획(CCD : Central Composite Design)과 반응표면법(RSM : Response Surface Method)을 사용하여 대리모델(surrogate model)을 생성하고 비지배 분류 유전자 알고리즘(NSGA-II : Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II)을 사용하여 다중목적 설계 최적화를 수행하였다. 이를 통해 얻은 최적해로 프로토타입(prototype)을 제작하여 시험적 검증을 수행하였다. 이에 대한 전체 연구 과정을 Fig. 1에 나타내었다.

2. 다중목적 설계 최적화

2.1 목적함수 및 제한함수 선정

본 연구에서는 롤러형 압전 에너지 하베스팅 시스템의 다중목적 설계 최적화에 앞서 설계변수, 목적

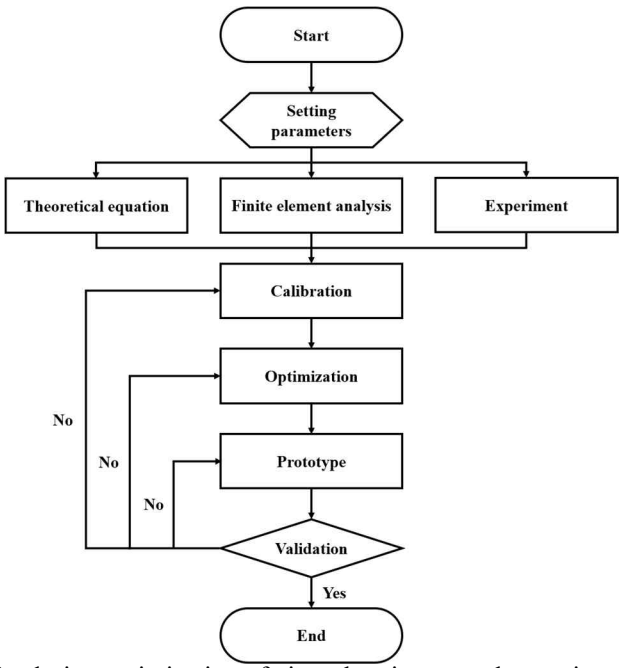


Fig. 1 A flowchart for design optimization of piezoelectric energy harvesting system of roller-type

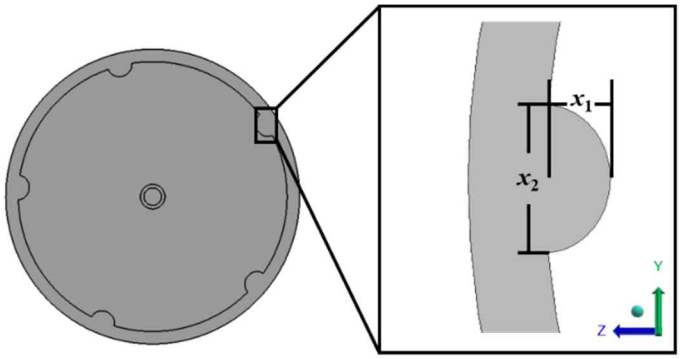


Fig. 2 Design variables according to the geometric shape

함수, 제한함수를 선정하였다. 정식화 및 대리모델 사용에 있어 Fig. 2와 같이 돌기의 단축(x_1) 및 장축(x_2)을 각각 설계변수로 선정하였으며, 각 설계변수의 범위는 전체 시스템 형상을 고려하여 각각 5.8mm ~ 6mm, 12mm ~ 16mm로 적용하였다. 이어 롤러의 회전을 통해 돌기와 CPC가 충돌하며 발전하므로 설계변수 x_1, x_2의 변화에 따른 CPC 출력 전압 최대화와 발생 응력 최소화를 다중목적 함수로 선정하였다. 본 연구에서는 편의를 위하여 본-미세스 응력(von-Mises stress)을 응력으로 정의한다. 또한, 시스템의 생산 비용을 줄이기 위한 제한함수는 기하학적 형상을 고려하여 선정한 초기 돌기 모델 [x_1, x_2] = [5.8, 14] 1개의 초기 중량 0.2891kg 이하가 되도록 설정하였다. 이를 수학적으로 정식화하여 다중목적 함수를 식 (1), 제한함수를 식 (2), 설계변수 범위를 식 (3) 및 초기 설계변수를 식 (4)와 같이 나타내었다.

Objective function:

$$\begin{aligned} &\textbf{Min.}\, f_{Stress}(x_1, x_2)\,(\text{MPa}) \\ &\textbf{Max.}\, f_{Voltage}(x_1, x_2)\,(\text{V}) \end{aligned} \tag{1}$$

Constraint function:

$$g_{Weight}(x_1, x_2) \le 0.2891\ (\text{kg}) \tag{2}$$

Design variables:

$$\begin{aligned} &5.80 \le x_1 \le 6.00\ (\text{mm}) \\ &12.0 \le x_2 \le 16.0\ (\text{mm}) \end{aligned} \tag{3}$$

$$\textbf{Initial parameters}: [x_1, x_2] = [5.80\,\text{mm}, 14.0\,\text{mm}] \tag{4}$$

3. 출력 전압 보정

3.1 시편 제조

본 연구에서는 롤러형 압전 에너지 하베스팅 시스템의 출력 전압 최대화를 위해 이론적 해석, FEA 및 강제 변위 인가시험을 수행하였으며, 출력 전압 분석 시 표준이 될 강제 변위 인가시험을 선행하였다. 이에 사용할 시편은 충돌하중에 대한 안전성을 고려하여 기존 BPC 사이에 황동(brass)판을 삽입한 복합 압전 외팔보(CPC : Composite Piezoelectric Cantilever) 형상으로 제작하였으며, 이를 도식화하여 Fig. 3에 나타내었다. CPC의 압전소자 시편은 SJ Instrument 사의 thin type piezo ceramic을 사용하였으며, 황동 시편은 Full Metal 사의 C2680을 사용하여 적층 제조하였고, 이에 대한 기성품 제원을 Table 1에 나타내었다. CPC 시편을 제조하기 위해 알코올 솜을 사용하여 PZT-5J와 황동 시편 표면의 불순물을 제거하였다. 이후 황동 표면에 AXIA 사의 BE-05 에폭시 글루(epoxy glue)를 도포하여 PZT-5J 시편과 적층 공정을 수행하였다. PZT-5J의 취성을 고려하여 압력이 가해질 상, 하부에 실리콘 및 금속 패드를 적층하였으며, 약 10시간 동안 압력을 가해주어 CPC 시편을 제조하였다.

Table 1 The specimen specification of PZT-5J and brass

PZT-5J		Brass	
L_p (mm)	45.7	L_b (mm)	60
H_p (mm)	0.15	H_b (mm)	1.0
W_p (mm)	20.6	W_b (mm)	20

Table 2 Mechanical and electrical material constant of PZT-5J for analytical equations

Material	E_p (MPa)	g_{31} (-Vmm/N)
PZT-5J	51,000	-10.4

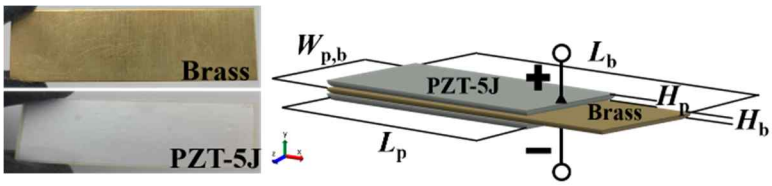


Fig. 3 Layered plates of PZT-5J and brass

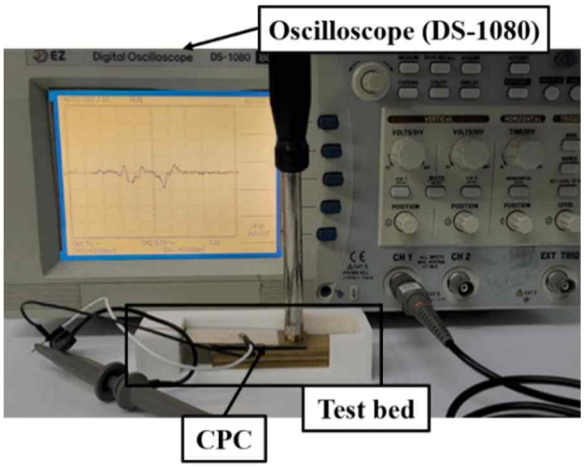


Fig. 4 Test bed for voltage measurement of PZT according to the forced displacement

3.2 강제 변위에 의한 발생 전압 측정 시험

강제 변위 인가시험에 사용된 장비 구성은 Fig. 4와 같다. 테스트 베드(test bed)는 PLA(Poly Lactic Acid) 소재와 용융 적층 모델링(FDM : Fused Deposition Modeling) 방식으로 적층 제조하였으며, EZ 사의 DS-1080 오실로스코프(oscilloscope)를 사용하여 전압을 측정하였다. 이를 기반으로 좌측 끝단이 고정된 CPC 시편 우측 끝단에 평균 30번의 강제 변위 인가 시험을 수행하였으며, 5.0mm 변위를 인가하였을 때 PZT-5J 시편에 파단이 발생하는 것을 확인하였다. 따라서 4.5mm까지 0.5mm 간격으로 강제 변위를 인가하여 p-p (peak to peak) 전압 데이터를 측정하였다. 이는 향후 이론적 해석 및 FEA 출력 전압과 비교 분석 시 적합 기준으로 사용된다.

3.3 압전 전압 이론식

롤러형 압전 에너지 하베스팅 시스템의 다중목적 설계 최적화를 위한 이론적 해석으로 CPC 끝단에 변위를 인가하였을 때 출력 전압에 대한 거동을 이론 식으로 정의하였다. CPC는 총 두께가 1.3mm인 박판 외팔보 형태로 오일러-베르누이 보 이론(Euler-Bernoulli beam theory)을 적용하였으며, 이를 식 (5)에 나타내었다. 이는 압전소자 끝단 반력(F_p) 데이터를 통해 전압을 도출할 수 있는 관계를 지니고 있다. 본 연구에서 적용한 PZT-5J의 물성치를 Table 2에 나타내었으며, 여기서 압전계수(g_{31})의 31모드는 분극 방향

과 변위 방향이 수직인 경우를 뜻한다.

$$V = -\frac{3(2H_p)^2}{8L_p^2} g_{31} E_p \delta_p \text{ where}, \delta_p = k_b \frac{F_p L_p^3}{B} \tag{5}$$

3.4 정적해석

3.4.1 유한요소모델링

본 연구에서는 롤러가 회전할 때 정지 상태에서 일정 RPM(Revolutions Per Minute)까지 도달하는 과정에는 동적 하중이 작용하나 목표 RPM까지 도달한 후에는 일정한 속도로 회전하기 때문에 본 연구에서는 정적 하중이 작용하는 문제로 가정하였다.[5] 이에 CPC의 정량적인 출력 전압을 FEA로 검증하고자 상용 패키지 ANSYS Workbench[4]의 정적 구조(static structural) 해석을 사용하였다.

이에 대한 유한요소모델은 3차원 8절점 요소(Solid 45)를 사용하여 0.5mm 크기의 격자를 생성하였다. 이를 기반한 유한요소모델의 총 요소(elements) 및 절점(nodes) 수는 각각 16,800개, 105,791개로 생성하였다.

3.4.2 재료 물성 및 경계조건

롤러형 압전 에너지 하베스팅 시스템의 발전부인 CPC는 PZT-5J와 황동으로 이루어져 있으며, 정적 해석에 사용된 재료 물성치는 Table 3과 같다. 경계조건은 Fig. 5와 같이 접촉 조건이 부여된 황동과 PZT-5J의 좌측 끝단에 구속조건을 부여하고 우측 끝단에 변위 조건을 인가하였다. 또한, 3차원 PZT-5J모델에 압전 특성을 적용하고자 ANSYS Workbench에 내장된 piezoelectric and MEMS tool을 사용하였다. 이를 통해 압전계수(g_{31})에 대해 압전 응력 계수(e_{31}, e_{33}, e_{15})로 대체하여 각각 -5.061e-06, 21.17 e-06, 13.39 e-06 (C/mm^2)의 수치를 행렬 형태로 적용하였다. 이를 기반으로 정적해석을 수행하여 전압 데이터를 측정하였다.

Table 3 Mechanical material properties for static analysis

Material	Stiffness matrix (MPa)	ν	ρ (kg/mm^3)
PZT-5J (Anisotropic elasticity)	S_{11} = 133,650 S_{12} = 85,729 S_{13} = 89,749 S_{22} = 109,450 S_{32} = 85,729 S_{33} = 133,650 S_{44} = 18,500 S_{55} = 18,500 S_{66} = 21,951	0.31	7.46e-06
Brass	E_b (MPa)	0.33	8.47e-06
	105,000		

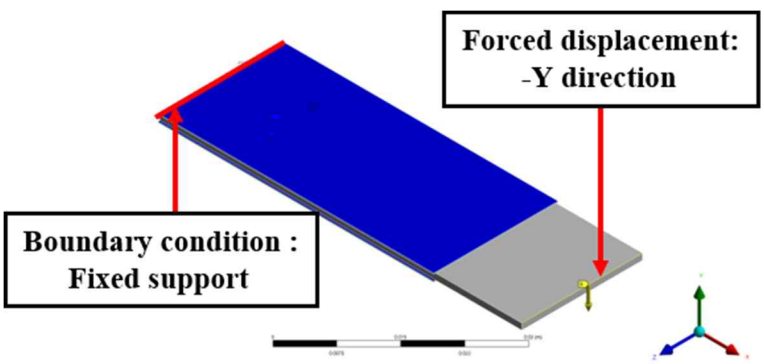


Fig. 5 Boundary conditions for static analysis

Table 4 Accuracy of calibrated piezoelectric coefficient

	Exp.	Theory	FEA
g_{31} (Vmm/N)	-	-5.405	-
e_{31} (C/mm^2)	-	-	-1.461e-06
e_{33} (C/mm^2)	-	-	12.57e-06
e_{15} (C/mm^2)	-	-	5.394e-06
R^2	-	0.913	-
RMSE (V)	-	0.947	1.253

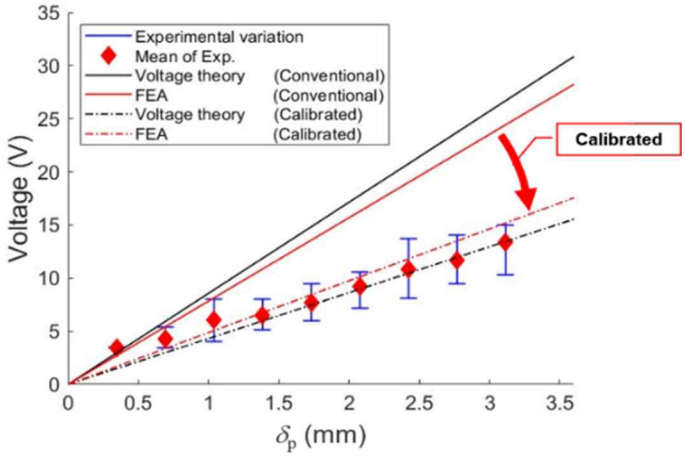


Fig. 6 Result of calibrated voltage according to forced displacement between experiment, theory and static analysis

3.5 출력 전압 비교 분석 및 압전계수 보정

롤러형 압전 에너지 하베스팅 시스템의 다중목적 설계 최적화를 위해 강제 변위 인가 시험의 출력 전압을 기반으로 이론적 해석 및 정적해석의 출력 전압을 비교 분석하였으나 큰 차이를 보였다. 이는 황동과 PZT-5J의 적층 공정에서 고온, 고압 환경이 조성되지 못해 도전성 저하가 발생하였으며, 이에 압전계수가 감소하여 기존 값과 상이한 것으로 판단된다.[6] 따라서 강제 변위 인가 시험에 따른 출력 전압 데이터 기반 압전 전압 이론 식의 압전계수(g_{31})와 정적해석의 압전 응력 계수(e_{31}, e_{33}, e_{15})를 시험적으로 보정하였다. 이를 위해 정적해석을 수행하여 CPC 끝단 강제 변위에 따른 반력을 산출하였으며, 오일러-베르누이 보 이론 식의 굽힘처짐상수(k_b)를 곡선 피팅(curve fitting)하여 0.3063으로 도출하였다. 이어 시험 전압 데이터를 기반으로 압전 전압 이론 식의 압전 계수(g_{31}) 또한, 곡선 피팅을 통해 산출하였다. 더불어 정적해석을 통해 산출된 전압 데이터와 시험 전압 데이터의 오차를 줄이기 위해 압전 응력 계수(e_{31}, e_{33}, e_{15})를 보정하였다. 이를 통해 시험 전압 데이터와 이론 식 및 정적해석 간 적합도와 오차를 결정계수(R-squared, R^2)와 평균 제곱근 오차(RMSE : Root Mean Square Error)로 각각 평가하였다. 이를 Table 4에 나타내었으며, 보정 전후 출력 전압 데이터를 Fig. 6에 나타내었다.

3.6 돌기 형상 선정 및 동적해석 결과

3.6.1 유한요소모델링

본 연구에서는 롤러의 돌기와 CPC의 충돌 시 CPC의 발생 응력을 최소화할 수 있는 돌기 형상을 선정하며, 롤러형 압전 에너지 하베스팅 시스템의 동적 특성을 확인하고자 ANSYS Workbench의 동적(explicit dynamics)해석을 사용하였다. 롤러형 압전 에너지 하베스팅 시스템의 구조와 구동 개략도를 Fig. 7에 나타내었으며, 이에 대한 유한요소모델은 3.4.1절과 동일한 3차원 8절점 요소를 사용하여 격자를 생성하였다. 이어 실제 모델을 간소화하고자 롤러 형상을 제외하였으며, 벨트 컨베이어용 롤러(KS B 6229)의 치수를 참고하여 원점에서 돌기의 거리를 75.6 mm로 설정하였다. 돌기는 초기 돌기 모델의 단축(x_1)과 장축(x_2)값인 5.8mm와 14mm로 설정하여 사각형(rectangle), 삼각형(triangle) 및 원형(circle) 돌기를 모델링하였다. 이를 기반한 유한요소모델의 총 요소 및 절점 수를 Table 5와 같이 생성하였다.

Table 5 Nodes and elements according to each plectrum shape

	Rectangle	Triangle	Circle
Elements	28,368	26,064	27,192
Nodes	21,321	19,228	20,171

Table 6 Mechanical material properties for dynamic analysis

Material	E (MPa)	ν	ρ (kg/mm^3)
PZT-5J	51,000	0.31	7.46e-06
Brass	105,000	0.33	8.47e-06
PLA	3,450	0.39	1.25e-06

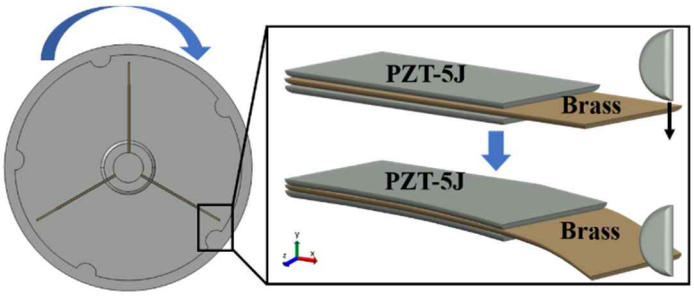


Fig. 7 Structure and schematic diagram of piezoelectric energy harvesting system of roller-type

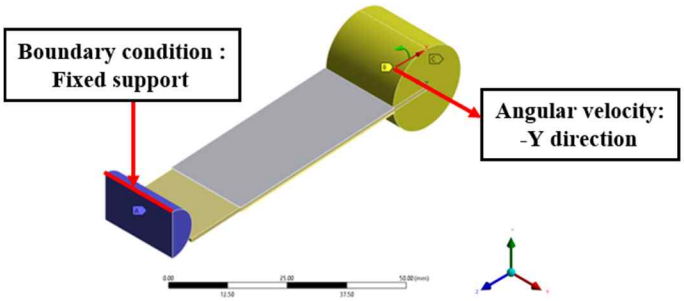


Fig. 8 Boundary conditions for dynamic analysis

3.6.2 재료 물성 및 경계조건

앞서 수행한 유한요소모델링의 CPC는 3.4.2절의 재료와 동일하며, CPC를 고정하는 축과 돌기는 PLA 재료로 이루어져 있다. 이에 재료 물성치는 Table 6과 같다. 경계조건은 Fig. 8과 같이 돌기 후면에 구속조건을 부여하였으며, 회전 방향이 아닌 x, z축 변위를 0으로 설정하였다. 또한, 회전체를 모사하고자 원통 좌표계(cylindrical coordinate)를 설정하였으며, 컨베이어 롤러에 적용함을 고려하여 15 rad/s의 각속도(angular velocity)를 부여하였다. 또한 CPC에서의 발생 응력만 확인하고자 돌기에 강체(rigid body) 조건을 부여하였다.

3.6.3 돌기 형상 선정 및 동적해석 결과

CPC와 돌기가 충돌할 시 돌기 형상은 CPC의 발생 응력에 큰 영향을 미친다. 본 연구에서는 발생 응력을 최소화하고자 사각형, 삼각형 및 원형 돌기 형상을 선정하였으며, 동적해석 수행 결과를 Table 7에 나타내었다. 이때 국부적으로 항복점을 넘는 응력이 도출되어 CPC가 적층 형태의 복합 재료라는 점을 고려하여 CPC 전체의 평균응력을 적용하였다. 이에 따르면 원형 돌기에 의한 도출 평균응력(σ_{mean})이 138.291MPa로 가장 낮아 롤러의 돌기 형상을 원형으로 선정하였다. 이를 기반으로 롤러형 압전 에너지 하베스팅 시스템의 동적 특성을 확인하고자 앞서 2.1절에서 선정한 설계변수 범위를 기반으로 직교배열표($L_9 3^2$)를 이용하여 Table 8과 같이 실험계획을 수립하였다. 이에 대해 동적 해석을 수행하여 황동 끝단 변위(δ_b)의 최댓값과 평균 응력(σ_{mean})을 도출하였다.

Table 7 Result of stress according to impact load by dynamic analysis

Geometry	σ_{mean} (MPa)
Rectangle	286.974
Triangle	318.220
Circle	138.291

Table 8 Result of mean stress and brass tip displacement for piezoelectric energy harvesting system of roller-type based on the orthogonal array($L_9 3^2$)

Input data		Output data	
x_1 (mm)	x_2 (mm)	δ_b (mm)	σ_{mean} (MPa)
5.8	12	2.8267	144.03
5.8	14	2.7779	143.77
5.8	16	2.9229	150.73
5.9	12	3.0258	156.09
5.9	14	3.0717	158.23
5.9	16	3.1130	159.28
6.0	12	3.2260	163.52
6.0	14	3.3280	167.27
6.0	16	3.2196	162.54

Table 9 Static analysis result based on brass tip displacement of dynamic analysis

Input	Output data			
δ_b (mm)	σ (MPa)	F_b (N)	F_p (N)	w (kg)
2.8267	142.38	11.941	17.553	0.2888
2.7779	139.93	11.735	17.250	0.2891
2.9229	147.23	12.348	18.150	0.2894
3.0258	152.41	12.782	18.790	0.2889
3.0717	154.73	12.976	19.074	0.2891
3.1130	156.81	13.151	19.331	0.2894
3.2260	162.50	13.628	20.032	0.2889
3.3280	167.64	14.059	20.666	0.2892
3.2196	162.18	13.601	19.993	0.2895

3.6.4 동적해석과 정적해석의 비교

현실에서 작용하는 모든 하중은 시간에 따라 하중의 크기가 변하는 동하중으로 작용한다. 하지만 해석 비용을 고려하여 구조물에 대해 정적해석을 수행하는 경우가 많다.[7] 본 연구에서 동적해석에서 얻은 황동 끝단 변위값을 정적해석의 강제 변위로 인가하였으며, 도출된 최대 응력(σ_{max})과 동적 해석의 평균 응력을 비교 분석하였다. 정적해석의 결과값을 Table 9 에 나타내었으며, 이는 Table 8 의 동적해석 결과값과 유사한 응력 수준을 보였다. 따라서 해석 비용을 줄이고자 정적해석을 수용하여 향후 최적화 시 적용되는 응력(σ), 압전소자 끝단 반력(F_p) 및 돌기 1 개의 중량(w) 성능지수를 도출하였다.

4. 다중목적 설계 최적화

4.1 중심합성계획법

본 연구에서 선정한 설계변수 범위마다 평가를 수행할 경우 많은 시간과 비용이 필요하다. 이를 효율적으로 사용하기 위해 최소 실험 횟수로 최대 정보를 얻을 수 있는 실험계획법(DOE : Design of Experiment)을 수행하였다. DOE의 방법으로 CCD를 선정하였다. CCD는 변수 범위의 중간 값부터 멀어질 때 경향을 분석하여 블록 안의 모든 결과를 추가 실험 없이 도출할 수 있다.[8] 이는 식 (6)과 같이 설계변수 k와 반복 횟수 n_c로 표현되며, 본 연구에서는 정적해석을 수행하여 Table 10과 같이 성능지수를 얻었다. 또한, 시스템의 안정성 평가를 수행하고자 모드(mode) 해석을 통해 공진 대역을 확인한 결과 롤러

Table 10 Central composite design

	σ (MPa)	F_p (N)	w (kg)	ω (Hz)		
				1st	2nd	3rd
1	142.4	17.55	0.2888	590.32	1,163.0	1,163.1
2	139.9	17.25	0.2891	591.87	1,165.3	1,165.3
3	147.2	18.15	0.2894	593.23	1,167.1	1,167.2
4	152.4	18.79	0.2889	590.86	1,163.7	1,163.8
5	154.7	19.07	0.2891	592.35	1,165.9	1,165.9
6	156.8	19.33	0.2894	593.82	1,167.9	1,168.1
7	162.5	20.03	0.2889	591.43	1,164.6	1,164.6
8	167.6	20.67	0.2892	592.98	1,166.8	1,166.8
9	162.2	19.99	0.2895	594.35	1,168.6	1,168.8

의 회전수 15 rad/s에 대한 진동수 2.387 Hz 대비 큰 차이를 보여 최적화 진행 시 고유진동수 조건을 제외하였다.

$$2^k + 2k + n_c \tag{6}$$

4.2 대리모델

정적해석을 통해 도출된 데이터를 기반으로 다중목적 함수에 대한 정량적인 수치를 추정하고자 대리모델을 반응표면법으로 생성하였다. 이는 여러 설계변수가 복합적인 작용을 하여 목적함수에 영향을 주고 있을 때 반응의 변화가 이루는 반응표면에 대한 통계적인 분석 방법이다.[9] 본 연구에서는 응력 및 압전소자 끝단 반력 데이터로 2차 대리모델을 생성하였으며, 이를 식 (7)과 식 (8)에 나타내었다. 돌기 중량 데이터의 경우 설계변수 변화에 따라 일정하게 변하는 선형적인 거동을 보이기 때문에 1차 대리모델을 생성하여 식 (9)에 나타내었다. 압전소자 끝단 반력 데이터는 식 (5)를 활용하여 CPC 출력 전압 최대화를 위한 전압 데이터로 변환하였다. 이어 해석 데이터에 대한 모델 적합도는 R^2 값을 통해 평가하여 Fig. 9에 나타내었다.

$$\begin{aligned} y_{Stress} = & -4496.37250 + 1375.10833x_1 + 80.19583x_2 \\ & -100.00000x_1^2 - 0.17500x_2^2 - 12.92500x_1x_2 \end{aligned} \tag{7}$$

$$\begin{aligned} y_{Voltage} = & -\frac{3(2H_p)^2}{8L_p^2} g_{31} E_p \left(k_b \frac{F_p L_p^3}{B} \right) \text{where,} \\ F_p = & -554.77622 + 169.71733x_1 + 9.85770x_2 \\ & -12.34667x_1^2 - 0.02097x_2^2 - 1.5900x_1x_2 \end{aligned} \tag{8}$$

$$y_{Weight} = 284.73556 + 0.40000x_1 + 0.29000x_2 \tag{9}$$

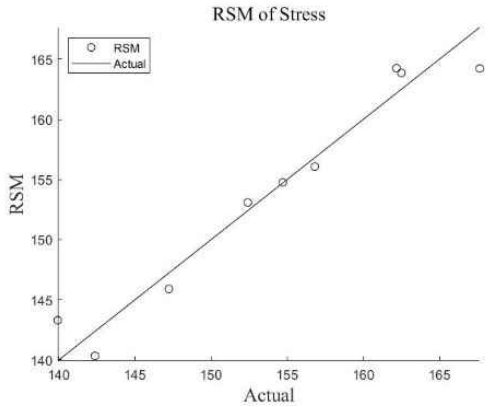
4.3 최적화

4.2절에서 생성된 대리모델을 바탕으로 다중목적 설계 최적화를 수행하고자 NSGA-II를 사용하였다. 이는 기존 유전자 알고리즘의 연산 복잡도, 사전 우수해 선별 조건 미흡 및 공유 변숫값 결정 등을 개선한 알고리즘이다. 본 연구에서는 인구수(population) 및 세대 수(generation)를 각각 100, 300으로 설정하였으며, 다중목적 함수는 최소화를 위한 방향으로 수렴함으로 최대화를 위한 전압 대리모델 함수에 –1을 곱해주었다.[10,11] 이를 Fig. 10에 나타내었다.

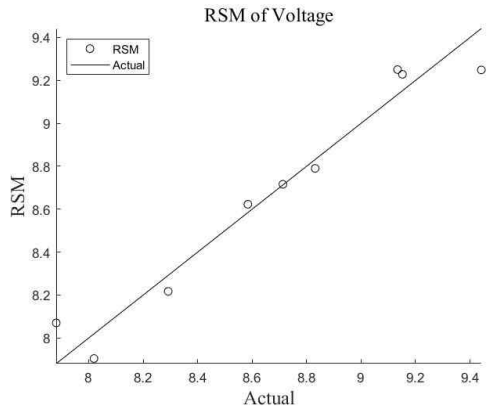
NSGA-II로 도출된 최적해 파레토 차트(Pareto chart)는 최적 설계 조건을 만족하는 집합으로 모든 최적해에서 검증을 수행하여야 하나 유한요소해석의 전후 처리에 많은 시간이 소요되어 양단 끝점(Opt. 1, Opt. 3)과 중간 점(Opt. 2)을 추출하여 정적해석을 통해 검증한 값을 Table 11에 나타내었다.[12] 이어 Table

12는 도출된 최적 설계변수에 따른 응력 및 전압 데이터를 초기 돌기 모델과 비교 분석하였다.

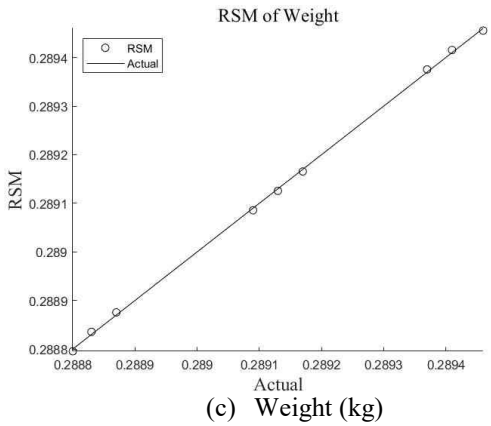
롤러형 압전 에너지 하베스팅 시스템의 다중목적 설계 최적화를 통해 선정한 최적해(Opt. 3)는 중량 제한조건인 0.2891kg 이하를 만족하였다. 이에 따른 전압 최대화 목적함수는 9.245V로 기존 8.607V 대비 7.413% 증가하였으나, 응력 최소화 목적함수는 164.2MPa로 기존 139.9MPa 대비 17.32% 증가함을 확인하였다. 본 연구에서는 롤러형 압전 에너지 하베스팅 시스템의 출력 전압 최대화에 중점을 두었으며, 최적해(Opt. 3)는 정적해석을 통해 확인한 CPC 파단 변위(5mm)에서 발생 응력 251.9MPa보다 낮은 164.2MPa이 도출되었으므로 이는 안전할 것으로 판단하여 Opt. 3을 최적해로 간주하였다.



(a) Stress (MPa)



(b) Voltage (V)



(c) Weight (kg)

Fig. 9 Accuracy of RSM (CCD)

Table 11 Summary of optimal results according to weights of objective functions

	x_1 (mm)	x_2 (mm)	g_{Weight} (kg)	f_{Stress} (MPa)	$f_{Voltage}$ (V)
Initial	5.800	14.00	0.28910	139.9	8.607
NSGA-II					
Opt. 1	5.800	12.00	0.28871	140.3	7.905
Opt. 2	5.896	12.17	0.28888	152.8	8.607
Opt. 3	6.000	13.48	0.28909	164.1	9.245
FEA					
Opt. 1	5.800	12.00	0.28880	142.3	8.777
Opt. 2	5.896	12.17	0.28885	146.7	9.061
Opt. 3	6.000	13.48	0.28909	158.0	9.739

Table 12 Verification of initial and optimal design

	x_1 (mm)	x_2 (mm)	g_{Weight} (kg)	f_{Stress} (MPa)	$f_{Voltage}$ (V)
Initial	5.800	14.00	0.28910	139.9	8.607
Opt. 3	6.000	13.48	0.28909	164.2	9.245

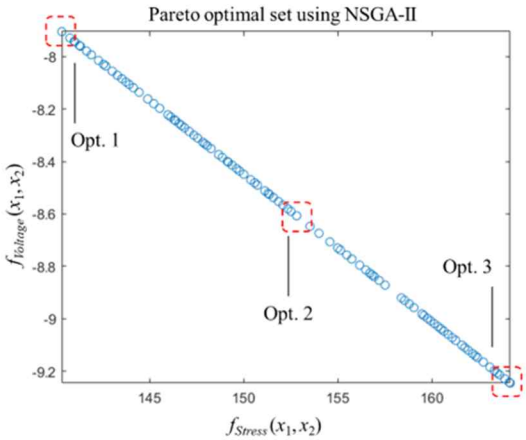


Fig. 10 Result of pareto optimal set using NSGA-II

5. 결 과

5.1 프로토타입 제작

CCD를 통해 생성한 대리모델을 이용하여 도출된 최적해와 초기 돌기 모델 간 출력 전압을 시험적으로 검증하고자 Fig. 11과 같이 실험장비를 구성하였다. 프로토타입은 3차원 CAD 설계 소프트웨어 CATIA를 사용하여 Fig. 12와 같이 모델링하였다. 이를 기반으로 2.3절과 동일하게 PLA 소재를 FDM 방식으로 적층 제조하였으며, 롤러에 회전을 가하기 위해 NIDEC 사의 KH42JM2-901 모터를 장착하였다. 또한, 출력 전압 측정을 위해 오실로스코프를 사용하였다.

5.2 회로 구성

본 연구에서는 PZT-5J 출력 전압을 효율적으로 사용하고자 교류 전압을 직류 전압으로 변환해주는 다이오드(diode)를 포함한 정류 브릿지(bridge rectifier)와 전압을 완만하게 출력시켜주는 커패시터(capacitor)를 사용하여 회로를 구성하였다. 이를 PZT-5J 에 부착하여 발전된 에너지 정류 및 배터리를 충전하였다. 이에 회로 구성을 Fig. 13 에 나타내었다.

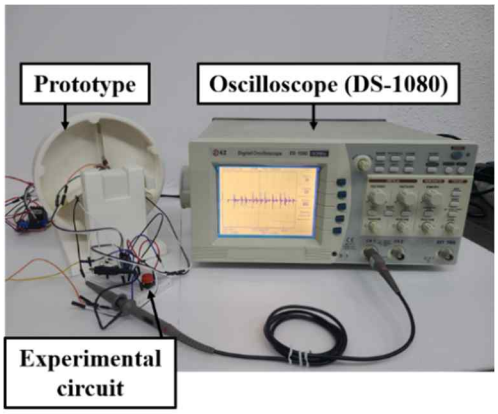


Fig. 11 Voltage measurement of the proposed energy harvesting system

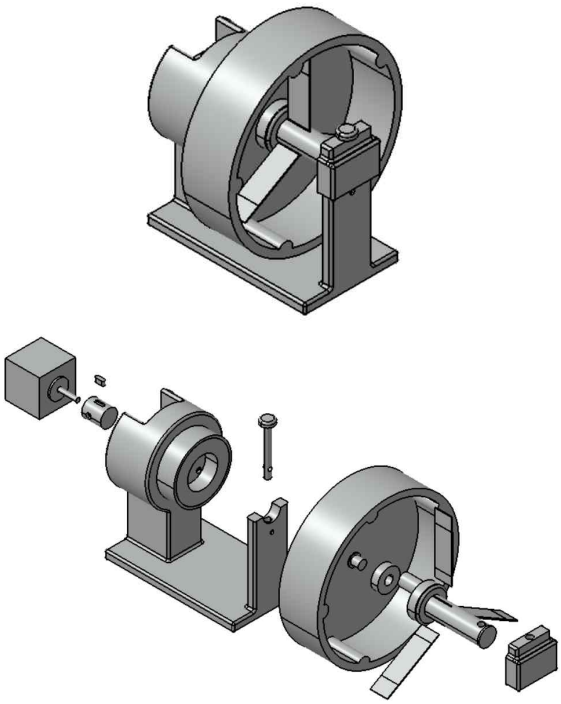


Fig. 12 3D CAD model of the prototype

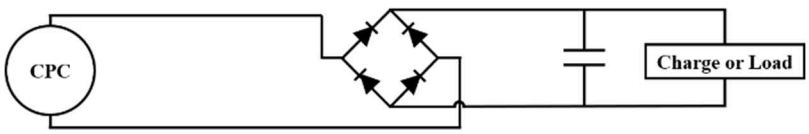


Fig. 13 Schematic diagram of circuit connection

5.3 프로토타입 출력 전압 분석

적층 제조된 롤러와 체결된 모터에 15rad/s의 일정한 속도로 회전운동을 부여하여 돌기와 CPC 간 평균 22회 충돌 시 출력 전압을 Table 13에 나타내었다. 이에 따르면 최적해가 전압 목적함수를 만족함을 알 수 있었다. 이어 NSGA-II를 사용하여 도출된 최적해는 초기 돌기 모델 대비 7.413% 전압 상승이 예측되었으나, 시험적으로 13.06%의 전압 상승을 확인하여 상이함을 보였다. 본 연구에서 CPC 파단 발생 전 탄성영역에서의 전압을 확인하였기 때문에 압전 전압 이론식을 통해 선형적인 전압 모델을 생성하였

Table 13 Validation of initial and optimal design

		Initial	Opt. 3
	x_1 (mm)	5.800	6.000
	x_2 (mm)	14.00	13.48
NSGA-II	V	8.607	9.245
	Improving	7.413%	
Exp.	Mean of V	8.491	9.600
	Improving	13.06%	

다. 그러나 프로토타입을 통해 측정된 전압은 비선형적인 거동을 보였으며, 3.5절의 압전 계수 보정 시 활용한 시험 전압 데이터 측정 과정에서 불확실성이 내재되어 있어 NSGA-II를 기반한 전압 예측치와 시험적으로 도출된 전압 간 차이가 발생한 것으로 판단된다. 향후 연구에서는 측정 불확실성을 최소화한 전압 데이터를 확보하며, 전압 모델의 변경을 통해 이를 보완할 수 있을 것으로 판단된다.

6. 결 론

본 연구에서는 다중목적 함수를 가진 롤러형 압전 에너지 하베스팅 시스템의 다중목적 설계 최적화를 수행하였다. 롤러형 압전 에너지 하베스팅 시스템의 출력 전압을 검증하기 위해 이론적 해석, 정적해석 및 시험을 수행하였으며, 시험 데이터 기반 압전계수 보정을 통해 출력 전압 예측 정확도를 개선하였다. 이어 정적해석을 통해 응력(σ), 압전소자 끝단 반력(F_p), 돌기 1개의 중량(w) 성능지수를 확보하였으며, 이를 기반으로 돌기와 CPC 충돌 시 CPC 출력 전압 최대화와 발생 응력 최소화를 동시에 만족하는 시스템의 다중목적 설계 최적화를 수행하였다. 대리모델 생성을 위한 실험계획으로 CCD를 사용하였으며, 선정한 최적해를 기반으로 프로토타입을 적층 제조하였다. 이는 기존 모델 대비 시험적으로 13.06% 전압 증가와 정적해석을 통해 17.32%의 응력 증가를 확인하였다. 본 연구에서는 시스템 출력 전압 최대화에 초점을 두었으며, 증가한 응력이 CPC 파단 시 발생 응력 251.9MPa에 비해 낮은 164.2MPa이 발생하여 안전할 것으로 판단하였으며, 이를 최적해로 간주하였다. 향후 연구에서는 압전소자와 황동의 기하학적 설계변수 선정 및 적층 제조 시 재료 변경을 기반하여 최적화를 수행하고자 한다. 또한, 설계변수별 전압 목적함수와 관계를 통계적으로 분석하여 민감도 조사를 수행하고자 한다.

후 기

본 논문은 2021년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었습니다(No. 2021R1I1A3044394).

참고문헌
(References)

(1) Kim, J. I., Kim, Y. S., Kim, I. S. and Kim, J. S., 2011, “Modeling and Power Prediction of Piezoelectric Material-based Energy Harvesting Device,” *Proceedings of the 2011 KSME Annual Meeting*, pp. 193~198.
(2) Priya, S., 2005, “Modeling of Electric Energy Harvesting using Piezoelectric Windmill,” *Applied Physics Letters*, Vol. 87, No. 18, Article 184101.
(3) Pozzi, M. and Zhu, M., 2011, “Plucked Piezoelectric Bimorphs for Knee-joint Energy Harvesting: Modelling and Experimental Validation,” *Smart Materials and Structures*, Vol. 20, No. 5, Article 055007.
(4) ANSYS Inc., 2022, *ANSYS 2022-R1 Manual Set*, ANSYS Inc, Canonsburg, USA.
(5) Lim, K. H., Ryu, H. S., Sim, J. M., Han, C. W. and Doh, J. H., 2022, “Reliability-based Design Optimization of Bearing Housing for Heat Exchanger Cooling Fan,” *Journal of Applied Reliability*, Vol. 22, No. 3, pp. 229~239.
(6) Park, J. M. and Song, C. H., 2020, “Study on the Small Sized Robots Actuator using Piezoelectric Ceramic Bender,” *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol. 21, No. 5, pp. 337~343.
(7) Kang, B. S., Kim, J. S. and Park, G. J., 2004, “An Investigation of Dynamic Characteristics of Structures in Optimization,” *Proceedings of the 2004 KSME Annual Meeting*, pp. 1011~1016.
(8) Hong, S. H., Lee, W. J. and Lee, S. B., 2017, “Optimization of Waste Cooking Oil-based Biodiesel Production Process

using Central Composite Design Model," *Applied Chemistry for Engineering*, Vol. 28, No. 5, pp. 559~564.
(9) Lee, S. H. and Yu, E. J., 2017, "Model Updating of a RC Frame Building using Response Surface Method and Multiobjective Optimization," *Computational Structural Engineering Institute of Korea*, Vol. 30, No. 1, pp. 39~56.
(10) Park, S. K., Lee, S. B. and Lee, W. C., 2007, "Goal-pareto based NSGA-II Algorithm for Multiobjective Optimization," *The Journal of Korea Information and Communications Society*, Vol. 32, No. 11, pp. 1079~1085.
(11) Kim, D. S., Lee, J. S. and Choi, H. Y., 2013, "Optimization of Stress and Deformation of Culvert Gate by using RSM and NSGA-II," *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 27, No. 2, pp. 27~32.
(12) Doh, J. H. and Lee, J. S., 2015, "Approximate Multi-objective Optimization of a Wall-mounted Monitor Bracket Arm Considering Strength Design Conditions," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 39, No. 5, pp. 535~541.

<응용기술논문> DOI http://dx.doi.org/10.3795/KSME-C.2023.11.2.109 ISSN 2288-3991(Online)

폴딩 구조를 활용한 전동 화물 이송 장치의 개발§

양재성*# · 김태연*# · 김범주*†
* 공주대학교 기계자동차공학부

Development of Powered Cargo Converying System Utilizing Folding Structure

Jaeseong Yang*#, Taeyoun Kim*# and Bumjoo Kim*†
*Department of Mechanical and Automotive Engineering, Kongju National University

(Received December 26, 2022 ; Revised February 9, 2023 ; Accepted February 10, 2023)

Key Words: Folding Structure(폴딩 구조), Powered Cargo Conveying System(전동 화물 이송 장치)

초록: 현재 국내 택배 물동량이 증가함에 반하여 기사의 충원량이 미진하다. 따라서 배송 효율의 관심도가 증가하고 있다. 본 연구에서는 배송 업무의 효율을 높이고 택배 근로자의 업무 부담을 줄이기 위해 리드 스크루와 폴딩 구조를 결합한 전동 화물 이송 장치를 설계하였다. 본 장치는 폴딩 구조를 통해 기존의 화물 운송 보조 장치의 고질적인 부피 문제를 효율적으로 개선하였으며, 간단한 구성으로 유지보수 측면을 고려한 설계를 통해 생산성 및 안정성을 증대시켰다. 실험은 실제 택배 차량의 1/16 scale로 진행하였으며, 성능 및 기능 시험을 진행하였다. 실험 결과 100kg의 화물을 1cm/s로 이송할 수 있음을 확인하였다.

Abstract: Currently, the number of drivers filled is insufficient while the volume of domestic parcel delivery volume is increasing. Therefore, interest in delivery efficiency is increasing. In this study, an electric cargo transfer device that combines a lead screw and a folding structure was designed to increase the efficiency of delivery work and reduce the burden on delivery workers. This device efficiently improved the chronic volume problem of the existing cargo transport assistance devices through a folding structure, and increased productivity and stability through a design that considers the maintenance aspect with a simple configuration. The experiment was conducted on 1/16 scale of the actual delivery vehicle, and performance and functional tests were conducted. As a result of the experiments, it was confirmed that 100 kg of cargo can be transferred at 1 cm/s.

1. 서 론

물류의 거래 방법은 대면 거래 형태에서 인터넷 거래, 온라인 쇼핑몰, 배달 대행 사업 등 온라인 채널을 통한 비대면 거래로 그 형태가 변하는 추세를 보이며, 이러한 사업은 앞으로도 지속해서 성장할 것으로 예상된다.(1) 이에 따라 택배 물류량도 점차 증가하고 있으며, 특히 코로나19로 인해 2020년 한 해 동안 평균 10% 내외였던 택배 물류량 증감률이 약 20%로 급증하는 모습을 보였다.(2) 또한 택배 근로자 한 명이 하루에 배송해야 하는 택배도 2012년 48,925건에서 2020년 67,067건으로 약 37% 상승했다.(3)

택배 근로자의 업무는 크게 분류 작업과 배송 작업으로 나뉜다. 분류 작업은 택배 배송 전, 택배를 무게와 배송지에 따라 분류하는 작업이며, 배송 작업은 분류된 화물을 배송지로 전달하는 작업이다. 현재 분류 작업은 로봇을 이용한 자동 분류기를 도입해 기존 인력을 대체하는 방안이 적용되어 늘어나는 물

§ 이 논문은 제12회 전국학생설계경진대회 수상작을 토대로 한 논문임.
† Corresponding Author, bumjoo@kongju.ac.kr
# These authors equally contributed to this word as first author.
ⓒ 2023 The Korean Society of Mechanical Engineers

류량을 안정적, 효율적으로 처리하고 있다.[4,5] 하지만 배송 작업은 택배 근로자가 직접 수행하며, 택배 물량에 비해 부족한 택배 근로자의 인원수로 인해 업무를 효율적으로 처리하지 못하고 있다.[3] 해당 문제를 해결하기 위해 택배 근로자의 배송 작업을 효율적으로 수행하기 위한 화물 이송 보조 장치의 개발이 필요하다.[6] 배송 업무 특성상 적재함 내부에서부터 외부로 무거운 화물을 들고 승, 하차를 반복해야 한다. 따라서 본 설계에서는 적재함 내부에서 화물을 이송시켜주는 장치를 개발하여 택배 근로자가 차량 적재함 내부에서 외부로 화물을 옮기는 시간을 줄이고자 한다. 이를 통해 낭비되는 시간을 줄여 업무 수행의 전반적 효율을 상승시키며, 근로자의 업무 부담감 또한 상당 부분 해소하고자 한다.

2. 본 론

2.1 선행 특허 분석

선행연구를 통해 고안된 보조 장치로는 '택배 차량용 컨베이어 장치'와 '택배 차량용 소화물인-아웃 장치'가 있다.[7,8] 각각의 보조 장치는 적재함 내부에 컨베이어 벨트와 눕힌 시저 리프트를 배치하여 적재함의 전후방으로 물품을 이동시키는 장치이다. 택배 차량용 소화물인-아웃 장치는 간단한 구조이나 화물을 이송하는 과정에서 장치와 벽면 사이에서 발생하는 끼임으로 화물이 파손된다. 또한 이송 장치의 구동부 및 전력 장치의 부피 차지가 큰 단점이 있다. 컨베이어 벨트의 경우 장치가 적재함 내부 전반에 설치되어 내부에 필요한 공간의 부피가 크다는 단점이 있으며, 장치의 요구되는 모터의 출력값이 크다는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하며, 효율을 증대하는 장치를 만들기 위하여 본 연구에서는 폴딩 구조를 활용한 전동 화물 이송 장치를 개발하고자 한다.

2.2 개념설계

선행 특허에서 고안된 장치의 단점을 보완하며 설계 목적을 달성하기 위해 장치의 설계 제약 조건을 정의했다. 적재함 내부 공간과 적재 중량이 제한되어 있음을 고려해 설계 제약조건을 설정했으며 상세 내용은 Table 1과 같다.

Fig. 1의 (a)는 설계 제약 조건을 반영한 장치의 개념 설계도이다. 장치는 크게 장치의 작동을 담당하는 구동부, 화물을 지지하는 수납부, 장치가 작동함에 따라 부품이 저장되는 압축부, 장치의 작동을 제어하는 제어부로 나뉜다.

Table 1 Design constraints

Driving part	• Allow the required power of the motor to operate on batteries in vehicles with equipment. • Drive at an appropriate speed to prevent cargo from falling due to concentration, and complete the drive before the worker arrives at the next destination. • Reduce the weight and volume of the motor so that it is not site specific.
Transfer part	• The weight of the loaded cargo should not be damaged or deformed. • The thickness of the fold plate must be thin to reduce weight, cost, and reduce the volume of the device. • Minimize the space occupied by folded boards and increase the operating range of equipment. • It provides the simplest structure possible to achieve a folding structure
Automation part	• To operate a device when starting of a vehicle is detected. • After starting, the device is operated and stopped without any additional operation. • Smartphone applications are provided so that workers can operate their own devices in case of emergency.

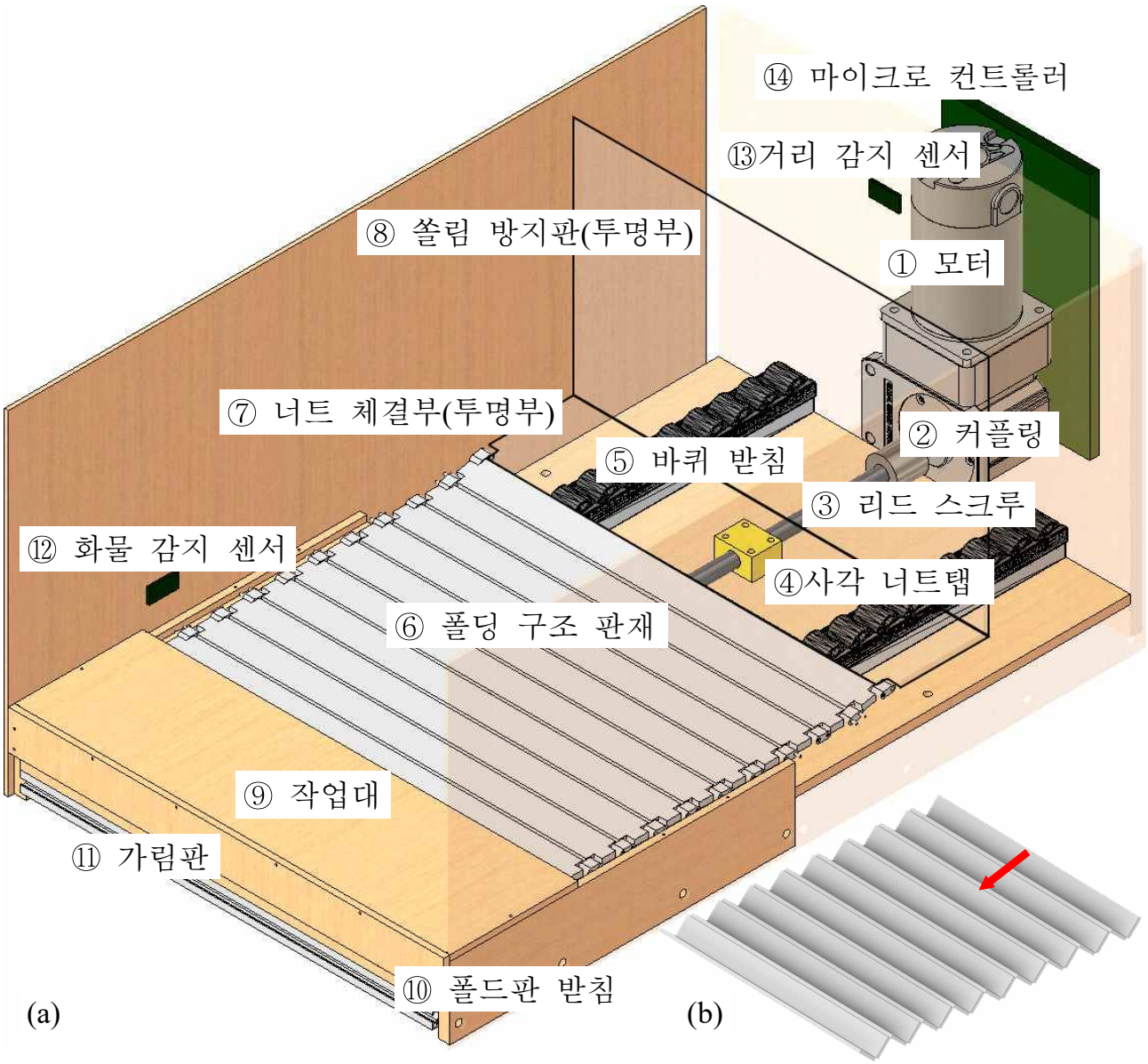


Fig. 1 (a) Scheme of the powered cargo conveying system; (b) scheme of folding structure

장치의 부피를 최소화하기 위해 '폴딩 도어'(folding door)의 구조를 활용한 '폴딩 구조 판재'(이하 폴드판)로 장치의 상단을 구성한다. 폴드판은 얇은 판재들이 경첩과 같은 구조로 연결되어 있어 지그재그로 접히거나 펴지는 구조를 가진다. Fig. 1의 (b)는 화살표 방향으로 힘이 가해질 때 폴드판이 접히는 모습이다.

장치가 작동하기 전엔 폴딩 구조 판재가 모두 펼쳐져 있으며 그 위에 화물을 실을 수 있다. 펼쳐진 폴딩 구조 판재는 하부의 바퀴 받침에 의해 받쳐지도록 하며, 폴딩 구조 판재에 결합한 사각 너트 탭을 통해 리드 스크루와 연결한다. 제어부의 두 센서가 각각 화물의 유무와 장치의 위치를 감지하면 마이크로 컨트롤러가 구동부의 모터를 제어한다. 모터의 회전축에는 커플링을 통해 리드 스크루가 결합되어 있으며, 리드 스크루에 결합된 사각 너트 탭과 너트 탭이 결합된 너트 체결부와 폴딩 구조 판재에 동력을 전달해 장치가 적재함 앞, 뒤로 작동할 수 있도록 한다. 폴딩 구조가 리드 스크루를 따라 이동하여 접히기 시작하면 폴딩 구조 양단의 돌기가 폴드판 받침의 홈을 따라 걸쳐지게 되며 지그재그로 접혀 작업대 안으로 들어가 보관된다. 이러한 과정을 통해 화물이 적재함 앞으로 이동하게 된다.

2.3 부품 선정을 위한 이론적 배경

2.3.1 모터 사양

리드 스크루는 모터의 토크를 이용해 체결된 너트를 이동시켜야 한다. 본 연구에서 모터의 토크는 너트를 이동시키는 데 필요한 힘이며, 이는 곧 화물을 이송시키는 데 필요한 힘이다. 화물을 원활하게 이송하는 데 필요한 토크를 계산하여 알맞은 모터의 사양을 결정한다.[9] 필요 토크는 다음 식과 같다.

$$T_m = T_1 + T_2 \tag{1}$$

모터의 필요 토크(T_m)는 자중토크(T_1)와 가속토크(T_2)의 합으로 나타낸다. 모터는 가속 구간에서 등가속도 회전 운동을 하여 등속 구간에 도달하는데, 가속 구간은 자중 토크와 가속 토크 모두 고려된다. 따라서 모터의 사양 결정 시엔 요구되는 토크가 큰, 가속 구간의 토크를 고려해야 한다. 자중 토크는 너트의 추력과 스크루의 리드를 통해, 가속 토크는 모터 회전 시 함께 회전하는 부품들의 관성모멘트와 각가속도의 곱으로 구한다.

2.3.2 스크루와 너트의 사양

너트가 리드 스크루를 따라 이동할 때 너트는 하중을 받으며 이동하기 때문에 작용하는 하중에 대해 치면에 마모가 일어나지 않는 너트를 선정해야 한다. 너트 재질은 접촉 면압 p와 미끄럼 속도 V의 곱인 pV치를 이용하여 선정한다.[10] 마찰 거동에서 압력과 속도가 점차 증가하면 일정 시점에서 소재가 견디지 못하고 용융되며, 한계 pV치는 용융되지 않고 구동이 가능한 조건의 최대치를 나타낸다.

이때 미끄럼 속도가 감소하면 pV치가 줄어들지만, 화물 이송 속도도 감소해 작업에 영향을 끼칠 우려가 있다. 따라서 스크루의 리드와 모터의 rpm을 통해 너트의 이동속도를 조절해 이를 방지한다.

2.4 상세설계

2.4.1 기본 제원 설정

Table 2는 본 장치의 적용 차량인 ‘포터 2’ 1톤 탑차의 제원이다. 장착 위치를 고려해 적재함 내측 치수에 맞춰 장치를 설계한다.

2.4.2 화물의 이송 속도 결정

택배 기사 적정 근로시간에 대한 연구[12]에 따르면 택배 기사가 옮겨야 하는 연평균 1일 배송량은 321개이다. 배송량을 일 평균 근로시간인 6시간으로 나누어 연평균 1회 배송 시 소요 시간을 구한다.

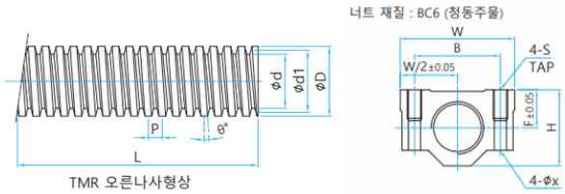
계산 결과 1.12분에 한 건씩 택배를 배송해야 한다. 이 시간을 차량을 이용해 택배 기사가 다음 배송지까지 가는 데 걸리는 시간으로 해석하면, 장치는 해당 시간 내에 화물을 이송할 수 있어야 한다. 국내 전용 우체국 택배 상자 중 가장 큰 5호 상자의 길이가 48cm임을 고려할 때, 0.714cm/s 이상의 속도로 장치가 화물을 이송해야 한다. 그러나 해당 상자보다 더 큰 가전제품과 같은 화물을 고려하여, 이를 무리 없이 이송하기 위하여 장치의 속도를 1cm/s로 정하였다.

Table 2 Vehicle specifications[11]

	Maximum load	Body scale			Loadbox internal scale		
		Length	Width	Height	Length	Width	Height
Poter II, heigh built-in car, supercap	1,000 kg	5,170 mm	1,745 mm	2,640 mm	2,830 mm	1,670 mm	1,800 mm

Table 3 Motor specifications

Motor specifications (reducer coupling)							Required torque			Quantity
Output (W)	Voltage (V)	Weight (kg)	Gear ratio	Rated			Acceleration torque (N·m)	Dead weight torque (N·m)	Total (N·m)	3
				rpm	Torque (N·m)	Current (A)				
90	12	4.71	1:20	150	4.26	12	0.891	7.202	3.292	



∅ *D*	TMS number	Lead	Lead angle	∅ *d*	∅ *d*1	Unit weight
20	TMR20	4	4.05	15.5	18	2

a: 리드 스크루 규격표 (단위: mm)

∅	TMS number	Lead	**W**	**H**	**F**	**B**	**S**	∅ x	°F	Weight
16	BTM20	4	48	32	16	36	M6	5.1	640	0.4

b: 사각 너트 규격표 (단위: mm)

Recommend PV	Quantity	1	3
Under 1.2	PV	3.32	1.1

c: pV치 계산 결과

Fig. 2 Selected lead screw and nut[13]

2.4.3 모터 사양과 스크루, 너트 선정

화물 무게와 이송 속도 등을 고려해 Fig. 2, Table 3과 같이 부품들의 사양을 선정했다. 조립 용이성을 위해 모터 몸체와 회전축이 직각인 모터를 선정하였다.

2.4.4 폴딩 구조 판재 설계

폴드판을 설계하기 위해 판재 하나의 치수를 바탕으로 Table 4와 같이 치수에 대한 미지수를 설정하고 관계식을 세웠다. 이 중 가장 핵심은 폴드판의 길이 X와 개수 Y이다. 적재함 내부의 치수는 정해져 있으므로 그에 따라 폴드판의 길이와 두께, 압축부를 가리는 작업대의 너비 조정이 필요하다. 또한 장치의 부피를 최대한 줄이기 위해 폴드판의 높이 t의 축소가 요구된다. 폴드판의 치수는 폴드판의 내구도와 관련되어 있기 때문에 소재에 따른 역학계산이나 구조 해석을 통한 유기적인 설계가 요구된다. 따라서 상용 역학 해석 프로그램인 Ansys를 활용해 두 가지 조건에서 폴드판의 두께에 따른 안전율을 해석하였다. 소재는 경제성, 가공 용이성과 무게를 고려해 아크릴로 설정했으며, 해석 리소스를 줄이기 위해 1/16 scale의 모델을 통해 해석을 진행했다. Ansys가 제공하는 아크릴의 물성과 해석 경계조건, 선정된 치수와 안전율은 Table 4와 같다.

Table 5에 나타낸 T가 너무 커지는 것을 막기 위해 Fig. 3과 같은 힌지형 결합 방식을 고안했다. 힌지형 결합 방식이란 폴드판 옆면에 축을 삽입하고, 인접한 축을 연결하여 폴드판 사이를 '폴더블 스마트폰'의 힌지 형태로 결합하는 방식이다. 인접한 폴드판의 모서리를 라운딩 처리하면 가공 오차를 고려하지 않았을 때 T가 0이 될 수 있어 가장 효율적인 결합 방식이다.

Table 4 Physical properties of acrylic and boundary conditions

			Ideal condition	Harsh condition
Density	1,185 kg/m^3	Load condition	Maximum load appliesto allplates	Maximum load appliesto singleplate
Young's modulus	2.694 GPa			
Poisson's ratio	0.3952			
Bulk modulus	4.2844 GPa	Safety factor	8.19	4.28
Shear modulus	965.45 MPa	Dimension	417×30×6 mm	
Tensile ultimate strength	62.35 MPa	Maximum load	62.5 kg	
Tensile yield strength	62.35 MPa			

Table 5 Defined parameters

Width of each plate	X (X<height of wheel)	Total length (unfolded)	XY
Nut fastening	2X	Total length (folded)	Yt+T(Y-1)
Number of plates	Y	Storage part support	h1(height of wheel)
Thickness	t	Compressed part support	h2(h2≤height of wheel)
Gap between plate	T	Total height	h=h1+t(h>height of nut)
Number of hindge	Y-1	Compressibility	Z=1-[Yt+T(Y-1)/XY]

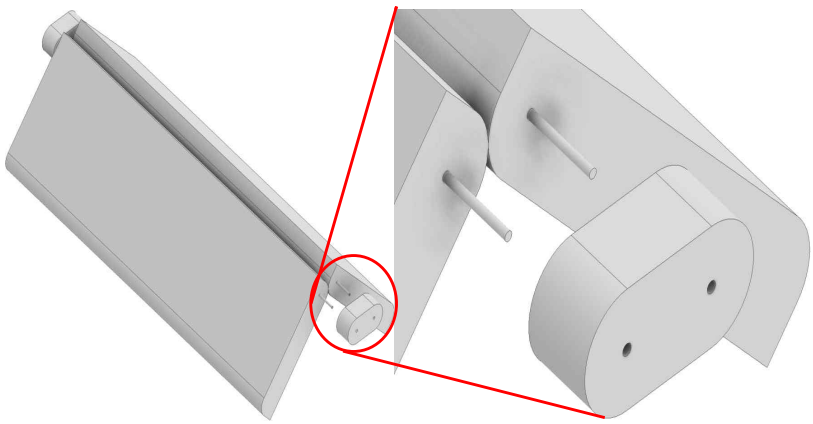


Fig. 3 Schematics of folding structure

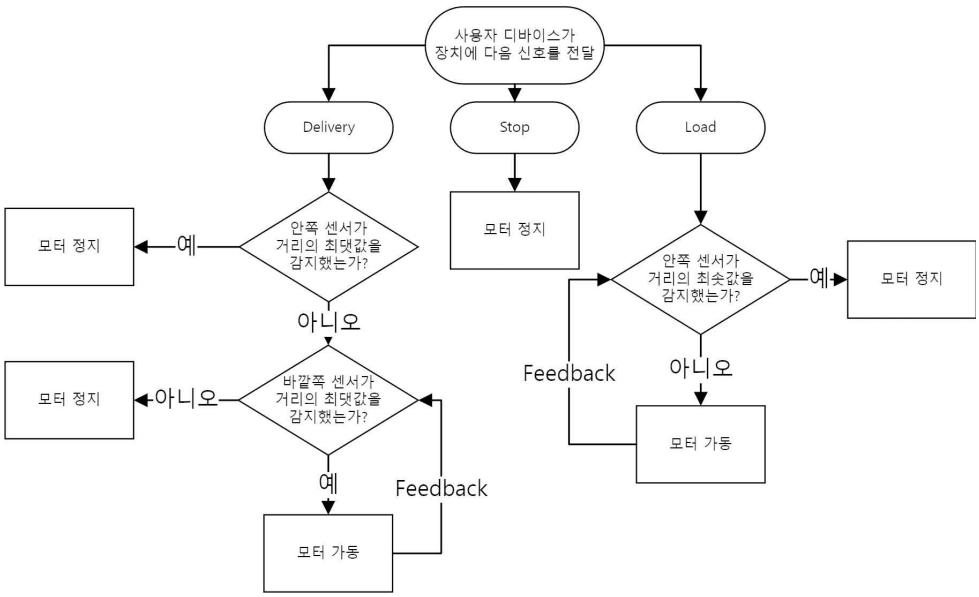
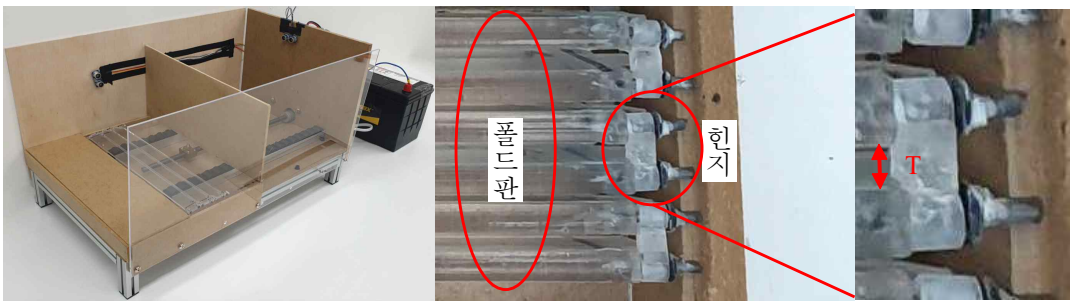


Fig. 4 Logic diagram of automation



(a) (b) (c)

Fig. 5 (a) Fabricated prototype; (b) combined folding plate; (c) hinge

2.4.5 자동화 알고리즘 설계

본 장치는 택배 근로자가 차량을 운행 중일 때 작동하도록 하며, 사물과의 거리를 감지하는 두 개의 센서를 이용하여 적재함 입구에 화물이 있을 때 장치를 멈추도록 하고, 택배 근로자가 화물을 하차하여 공간이 비었을 때 장치를 구동시키도록 한다. 화물 감지 센서는 화물의 유무를 감지하며, 거리 감지 센서는 등받이와의 거리를 감지하여 장치가 최대, 최소 가동범위로 이동했을 경우 장치가 멈추도록 한다. 알고리즘의 논리회로도는 Fig. 4와 같다.

3. 결 과

3.1 프로토타입 제작

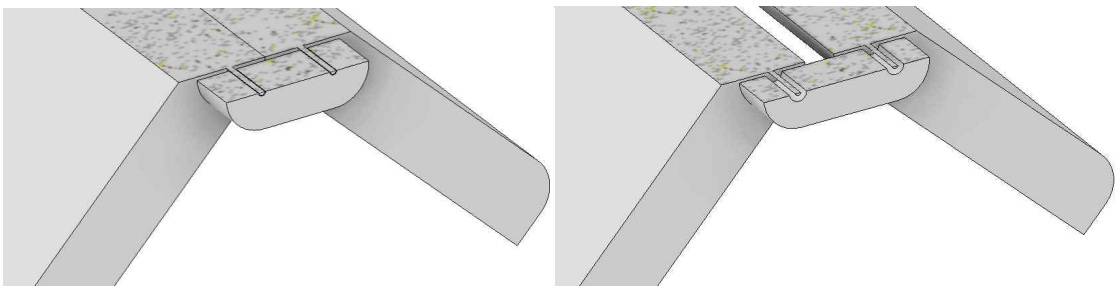
Fig. 5는 설계를 통해 제작한 1/16 scale의 프로토타입과 폴딩 판재를 연결하는 힌지의 모습이다. 수작업으로 제작되어 축의 위치, 축과 고정용 홈의 직경 차이, 모서리 라운딩 처리 불가로 인해 T가 약 3mm로 증가했고, 이로 인해 Z도 설계 수치보다 커졌다. 상세 모습을 Fig. 6에 나타냈다.

3.2 설계 검증

설계 제약조건을 달성했는지 파악하기 위해 성능평가를 진행했다. 평가는 최대 적재 하중의 화물을

Table 6 Result of performance test

Load (kg)	Velocity (cm/s)
0	1
15	1
30	1
40	1
62.5	1
100	1
200	0.95



(a) Ideally joined parts (b) Actually joined parts

Fig. 6 Cross-section of schematics folding structure

이송할 수 있는지 평가하는 성능실험과 자동화 알고리즘이 원활히 작동하는지 평가하는 기능실험으로 나누어 평가했다. 기능실험은 화물의 무게를 0kg부터 15kg씩 추가하여 운송 능력을 평가하였다. 실험 결과 최대 100kg의 화물을 1cm/s의 속도로 운반할 수 있었으며 상세 실험 결과는 Table 6와 같다.

3.2.1 분석

실험 결과 요구사항보다 더 높은 부하를 견디는 것을 Table 6에서 확인했다. 이는 안전을 위해 설정한 판과 모터 사양의 안전율로 인한 것으로 보이며, 현재 쓰인 장치의 사양보다 낮은 사양의 부품을 사용해 장치 단가를 낮출 수 있을 것으로 보인다.

그러나 1:1 scale의 장치는 모터 수량과 적재 하중 증가로 위의 실험 결과와 다른 결과가 나올 수 있다. 폴드판은 그 길이와 적재 하중이 늘어남에 따라 휨이 더 크게 발생할 수 있으며, 이를 방지하기 위해 바퀴 받침의 추가와 배치에 관한 연구가 필요하다. 또한 모터와 리드 스크루의 수량이 증가하기 때문에 각 모터의 RPM 오차로 인해 뒤틀림이 발생할 수 있어 정밀 조작이 가능한 스테핑 모터 등을 사용해 이를 방지해야 한다. 작업대 받침과 양 단면에 설치된 돌기 받침 역시 증가한 자중을 버티기 위한 추가 설계와 검증이 필요하며, 안전율을 고려해 부품의 사양을 선정해야 한다.

4. 결 론

본 설계에서는 택배 근로자의 업무효율을 개선하고 업무강도를 줄이기 위해 택배 운송 차량 내부에 설치되는 화물 운송 보조 장치를 설계했다. 상세 내용은 다음과 같다.

1) 택배 배송 업무의 배송 효율을 높이기 위해 폴딩 구조를 기반으로 한 전동 화물 이송 장치를 설계하였고 1/16 scale의 프로토타입까지 제작을 완료하였다.

2) 폴딩 구조를 설계/제작하기 위해 화물 파손 방지와 적재 효율을 위해 폴딩 구조 전체가 움직이도록 했으며 힌지 구조를 통해 접힌 폴딩 구조 판재 사이의 유격을 최소화했다.

3) 장치 가동 여부가 택배 배송 업무에 미치는 영향을 최소화하기 위해 모터와 초음파센서를 통해 차

량이 배송지로 이동 중일 때 화물을 적재함 출구까지 자동으로 이송하도록 설계했다.

4) 프로토타입을 통해 장치의 메커니즘에 문제가 없음을 확인하였고, 최대 100kg의 화물을 1cm/s의 속력으로 운반할 수 있음을 확인했다. 그러나 1:1 scale의 장치에서 발생할 수 있는 문제에 대한 추가 검증이 필요하다.

본 장치의 완성도를 높여 실제 택배 차량에 적용한다면 택배 근로자의 업무 환경을 개선하고 배송 효율을 높일 것으로 기대된다. 또한, 택배 업무뿐만 아니라 다양한 화물 이송 분야에서 활용될 것으로 예상된다.

후 기

본 연구는 공주대학교 공학교육혁신센터의 지원과 2022년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학협력기반 지역혁신 사업(2022RIS-004)의 결과입니다.

참고문헌
(References)

(1) Bae, K. S., 2020, “Courier and Delivery Labor Increased due to COVID-19,” *Monthly Transportation*, Vol. 269, pp. 80~81.

(2) National Logistics Integrated Information Center, *Delivery Volume Trend* (https://www.nlic.go.kr/nlic/parcelServiceLogistics.action) Accessed on June 10, 2022.

(3) National Statistical Office, *Searching for Transportation Class 2021* (https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=101&tblId=DT_1I100001&vw_cd=MT_ZTITLE&list_id=I11_I10&scrId=&seqNo=&lang_mode=ko&obj_var_id=&itm_id=&conn_path=K2&path=%252Fcommon%252Fmeta_onedepth.jsp) Accessed on June 11, 2022.

(4) Jeon, S. W. and Hwang, J. H., 2020, “Trends in Research on Logistics Robot Technology for the Non-face-to-face Era,” *Journal of the Korean Society of Telecommunications*, Vol. 18, No. 2, pp. 18~23.

(5) Lee, S., Han, S. M. and Won, J. W., 2020, “Efficiency Analysis of the Introduction of a Cargo Disembarkation Robot in a Delivery Logistics Terminal,” *The Korean Society of Logistics*, Vol. 28, No. 6, pp. 1~11.

(6) Kim, J. and Kim, M. Y., 2021, “The Problem of Working Environment of Courier and Improvement Plan,” *Seoul Research Institute Policy Report*, Vol. 319, pp. 1~24.

(7) Kim, Y. B., 2021, 10-2290917, *Small Package In-out Apparutus for Delivery Vehicle*, KIPO (in Korean).

(8) Revance Co., Ltd, 2003, 20-0327916, *A Goods Transferring Apparatus for the Freight Car*, KIPO (in Korean).

(9) MC Tech, *To Select a Lead Screw Motor* (http://mc-t.co.kr/?page_id=36), Accessed on April 1, 2022.

(10) Varanasi, K. K. and Nayfeh, S. A., 2004, “The Dynamics of Lead-Screw Drives: Low-Order Modeling and Experiments”, *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 126, No. 2, pp. 388~396.

(11) Hyundai Motor Company, *Porter II Specifications* (https://www.hyundai.com/kr/ko/e/vehicles/porter2-special/spec) Accessed on August 20, 2021.

(12) Jang, T., Kim, H. R., Yoon, J. H., Kang, C. W., Lee, Y. M. and Min, J. H., 2021, *A Study on the Proper Working Hours of Courier*, Institute of Occupational Safety and Health, Korea, pp. 42~60.

(13) Dukitec, *TOYO Japan Slip Screw* (http://www.dukitec.co.kr/pdf/Duki%20TM%20screw.pdf) Accessed on April 1, 2022.

<응용기술논문> DOI http://dx.doi.org/10.3795/KSME-C.2023.11.2.119 ISSN 2288-3991(Online)

실내 전차포 사격을 위한 유·무인 협업 기반의 시험 장치 개발

김보성*† · 김윤건* · 김응수* · 정희영* · 김영빈*
* 국방과학연구소

Development of a Test System for Human – Robot Cooperation in the Indoor Gun and Ammunition Firing Range

Bo Seong Kim*†, Yoon Koen Kim*, Eung Su Kim*, Hee Yung Jeong* and Young Bin Kim*
*Agency for Defense Development

(Received December 30, 2022 ; Revised February 7, 2023 ; Accepted February 13, 2023)

Key Words: Human-Robot Cooperation(유·무인 협업), Test Methodology(시험 기법), Gun and Ammunition Test(총포탄약시험), Autonomous Transport (자율 이송), Autonomy Loader (자율 장전)

초록: 총포탄약시험은 고 중량의 자주포, 전차포 탄약을 사격하는 시험으로 반복적으로 인력에 의한 탄약의 이송과 장전이 요구된다. 그 동안 고 중량 탄약의 취급으로 인한 근로자의 안전확보와 근로환경 개선을 위한 다양한 노력들이 시도되었으나, 재래의 방식이 항시 인력을 필요로 하는 특성으로 인하여 위험환경 개선에 원천적인 한계를 나타내었다. 본 연구에서는 기존 시험 절차 중 위험도가 높은 이송과 장전 과정을 무인화하는 유·무인 협업 기술을 대안으로 제시하였다. 무인 기반의 자율 이송 기술과 로보틱스 기반의 장전 기술을 융합한 탄약 이송 장전 장치를 개발하고, 실 사격 시험에 적용함으로써 타당성과 실용성을 입증하였다.

Abstract: The gun ammunition test performs to shoot an ammunition of self-propelled howitzer and tank gun, which requires the transfer and loading of ammunition by manpower repeatedly. In the meantime, various efforts have been made to secure the safety of workers and improve the working environment due to the repeated transfer operation of heavy-weight ammunition. However, as the traditional method always requires manpower, the improvement of the dangerous environment has revealed limitations. In this study, Human-Robot Cooperation that unmanned the risky transfer and loading process was studied as an alternative to the existing work. Autonomous transport technology and robotics-based loading technology were combined and an ammunition transport and loading autonomy system(ATLAS) was developed. This was applied to gun ammunition tests to prove its feasibility and practicality.

1. 서 론

1.1 진보된 시험 기술의 필요성

자주포, 전차포와 같은 대구경 탄약은 신뢰성을 판단하기 위하여 생산 로트별 샘플링 시험, 장기 저장 영향성을 확인하기 위한 저장탄약신뢰성평가(ASRP)의 실시가 요구된다. 시험 포는 유지보수 및 관리가 용이하도록 Fig. 1과 같은 고정된 포가에 주포를 얹어 사용하는데, 매년 수백 회의 사격 시험이 수행되는 조건 속에서 근로자가 직접 탄약을 운반하고 장전하는 고전적인 방식으로 인해 근골격계 질환 발생의 보고와 우려가 지속되는 실정이다. 이는 시험 수량, 빈도에 따라 관련 지침[1-3]에서 권고하는 인체 작업 기준별 제한치를 상회하는 수준으로, 근로자의 신체적 나이 및 노화에 따라 그 수준이 점차 가혹하게 여겨질 것으로 분석된다. 게다가 무엇보다 시험용 탄약 취급에 관한 안전 규정의 강화로 시험 자원의 확보와 업무 수행에 대한 부담이 가중되는 상황 속에서 안전과 업무 효율 향상을 위한 기술적, 제도적 개선이 요구되는 실정이다. 다음은 이와 관련하여 선행 연구로 보고되는 개선 시도를 요약한 결과이다.

† Corresponding Author, nockcha19@add.re.kr

ⓒ 2023 The Korean Society of Mechanical Engineers

박성호[4] 등은 사격시험으로 인한 근골격계 질환 예방에 초점을 맞춰 산업안전보건법, NOISH 작업 기준을 토대로 재래방식 업무 환경에 대한 정량적 분석을 실시하였다. 고중량 탄약 이송과 장전에 요구되는 들기, 이송, 적재 등의 작업이 근로자 신체에 큰 부하를 주는 것으로 나타났으며, 인간공학적 측면에서 사용자의 부담을 저감할 수 있는 기구 장치로 호이스트형, 테이블 형 탄약 이송 장치를 개발하여 작업자의 부하를 경감하는 연구를 수행하였다.

또한 이후 동 연구자에[5] 의해 최초로 인력이동식 대차와 장전장치를 통합한 새로운 장치가 고안되었는데, 개발 장비의 실증을 통해 효용성을 확인하고 통계적 분석을 기반으로 효과를 분석하여 종합적인 연구의 타당성을 확인하였다.

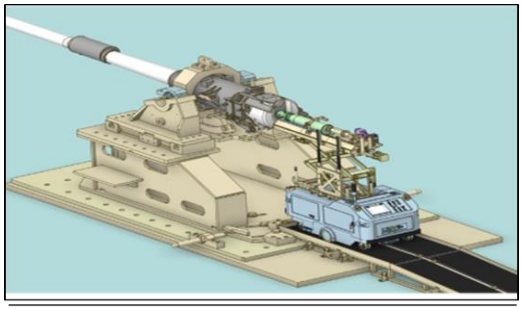
최근 이정호 등은[6] 동일 목적을 달성하기 위한 방법으로 기존 방식에 일부 시스템을 전동화하여 개선하였는데, 유인 전동식 운반 장치를 이용한 탄약 이송과 동일 장치에 일체로 부착된 레이저 가이드 방식의 반자동 장전 장치를 구성해 작동시킴으로써 근로자의 시험 환경개선과 시험 효율 향상을 도모하였다.

다만 상기 연구들이 작업자가 탑승하여 유인 현장 업무를 처리하는 방식으로 인해 업무 수행 과정에서 지속적으로 위험 반경에 노출되는 점, 장전 단계에서 정밀한 레이저 가이드를 이용하나 작업자의 조작 숙련도 또는 신체적 상태에 따라 휴먼에러 발생이 지속적으로 우려되는 점을 고려하였을 때, 최근 무인 자동화를 이용한 유·무인 협업의 시대적 관점에서 단순한 이송, 장전 과정을 무인화하여 유 · 무인 협업을 기반으로 하는 진보된 시험 기법 적용의 필요성이 예상된다.

1.2 유 · 무인 협업 기술과 적용 분석

유 · 무인 협업(HRC: Human-Robot Cooperation) 기술에 관한 표준화는 ISO, IEEE 등에서 시도되었으며, 최근 그 범위가 인간과 로봇의 직접적인 상호작용을 넘어 로봇 시스템과 작업 환경을 공유하는 것을 포함하도록 확대되고 있다.[7-9] 이는 로봇 기반의 협업이 활발한 물류, 산업 현장에서 기술적 범위가 세분화되고 점차 체계적으로 발전하고 있음을 의미하며, 향후 인력 대체하거나 지원하는 로봇 개발에 대한 안전 규범 적용이 점차 강화, 진보될 것으로 예상된다. 이와 달리 고중량물을 취급하는 총포 탄약 시험 분야에서 로봇 협업 또는 자동화의 시도는 국내외 사례를 찾아보기 어려운 상황인데, 폭발성 물질의 취급으로 인해 로봇에 적용되는 다양한 성능적, 환경적 요구를 충족하기 어렵고 작동에 있어서 고도의 신뢰 동반이 반드시 요구되기 때문에 그 동안 유 · 무인 협업 기술의 적용이 어려운 분야로 존재하였다. 그러나 2010년대 이후, 무인 이송 기술의 신뢰성 향상과 각종 센서 및 제어 기술의 집약이 보고됨에 따라 박관진[10], 이승재[11] 등이 선행적으로 총포 시험 무인화 적용을 위한 제도적, 기술적 분석 연구를 수행하였으며, 그 결과로 차세대 무인 시험 기술에 대한 연구개발의 필요성과 타당성 확인이 대두되었다. 본 논문에서는 해당 연구 결과를 기반으로 하여, 차세대 총포 탄약 시험 기술 개발의 일환으로 무인 이송 장치와 무장 체계의 자동 장전 기술이 융합된 ATLAS(Ammunition Transport and Loading Autonomy System)를 개발하고, 실제 운용 시험을 통해 개발 장비의 성능을 실증함으로써 사격 시험 적용을 위한 유 · 무인 협업 기술의 타당성을 확인하였다.

Fig. 1 The scene of the live firing test



Specifications of ATLAS I	
Dimension	1776(W) × 770(L) × 1700(H)
Payload	Max 30 Kg
Empty weight	~ 530 Kg
Guide method	Optical Lane Guided System (White)
Driving Speed	Max. 45m /Min
Electric Power	Incell Li-ion 45.6Ah (22.8Ah × 2)
Wireless Communication	ZIGBEE, RF(2.4GHz)
Gun Type	K1, K1A1, K2

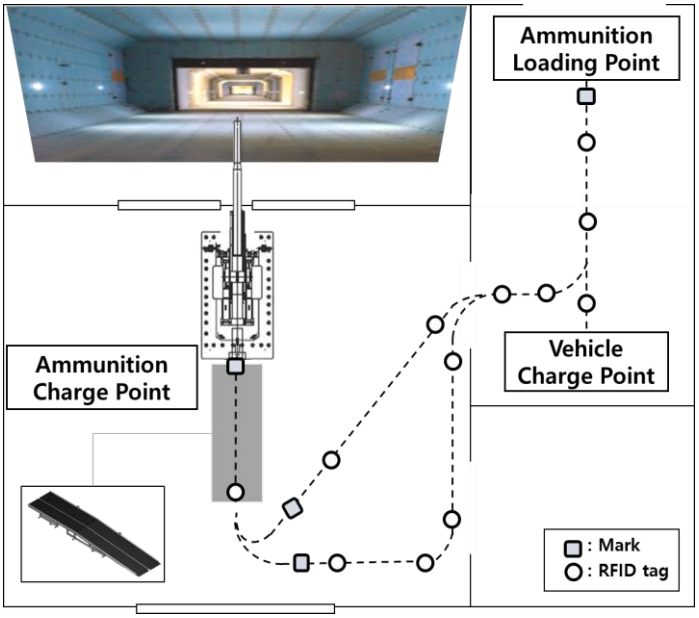


Fig. 2 ATLAS I specifications (left) and mission profile for indoor firing range (right)

2. 무인 탄약 이송 장전 장치 설계

2.1 장전 시스템 설계 및 개발

2.1.1 목표 성능 및 임무 형상

국방과학연구소 다락대시험장의 여러 임무 중 하나는 전차포 사격 시험이다. 해당 시험은 전천후 시험이 가능한 실내시험과 다양한 종류의 사격이 가능한 야외시험으로 구분되어 수행된다. 본 연구의 첫 시도인 ATLAS 1호기는 초도 개발을 고려하여 환경조건의 변화가 비교적 둔감한 실내시험장 운용을 목표로 개발하였다. Fig. 2에 목표 성능과 임무 형상(mission profile)을 나타내었다. 유인 운반, 장전 절차의 소요시간을 고려하여, ATLAS의 적재, 이송, 장전, 복귀의 총 소요시간은 5분을 목표로 하였으며, 완충 시 최대 8시간 연속 가동이 가능하도록 설계하였다.

2.1.2 설계요구조건 분석

실내 사격시험은 시험 포의 고각 또는 방위각의 변화가 없는 표준화된 사격을 수행된다. 따라서 설계 주요 변수는 탄종별 외형 차이, 탄약과 약실 간 정렬 상태, 밀대의 장입속도와 장입력으로 선정하였다. 이러한 이유는 첫 번째로 시험 탄약에 미치는 충격의 최소화가 요구되기 때문에 협소한 약실에 세장비가 긴 탄약이 삽입되는 특성을 고려하면, 장전 과정에서 충돌, 끼임(locking) 방지를 위한 균일한 정렬 기술의 적용이 필요하다. 따라서 무인 이송 장치의 유도 기법(guidance method) 선택이 반복적인 정렬을 결정하는 중요한 요소로 작용하는데, 폐쇄경로 내에선 사물 인식과 같은 방법보다는 연속적인 유선 경로를 인식하고 주요위치별로 기준을 설정하는 방법이 매회 정밀한 정렬에 유리할 것으로 분석되었다.

둘째로 전차포 무장은 탄미에 위치한 넓은 판(rim)이 폐쇄기 갈퀴(Fig. 3)를 활성화시키도록 구성되는데, 만일 탄약의 장전 속도가 폐쇄기 작동 속도보다 느린 조건으로 설계될 경우, 폐쇄기와 간섭을 일으키거나 탄약 손상에 영향을 미칠 수 있다. 더군다나 이 폐쇄기 내부에는 탄약을 격발하는 공이가 위치하기 때문에 만일 간섭 혹은 끼임으로 인하여 폐쇄기 상승이 낮은 비정상적 상황에 놓일 경우 격발이 불량한 상황이 나타날 수 있으며, 이와 반대로 장입속도가 너무 빠를 경우엔 탄약 후미에 과도한 장입력을 제공하여 뇌관 작동에 우려가 예상되기에 적절한 속도의 장입력이 요구된다. 본 개발에서는 원격 모니터링 중 정상 장입 여부의 판단과 시험탄약 취급 조건을 고려하여 밀대가 저속의 등속 운동을 하도록 하였다. 이를 운동량 보존을 가정한 이론적 분석과 Fig. 4와 같은 실험적 접근을 통해 최종적으로 갈퀴 작동력에 120mm/s의 이송 조건에서 40kgf 수준의 장전력 요구를 확인하였다.

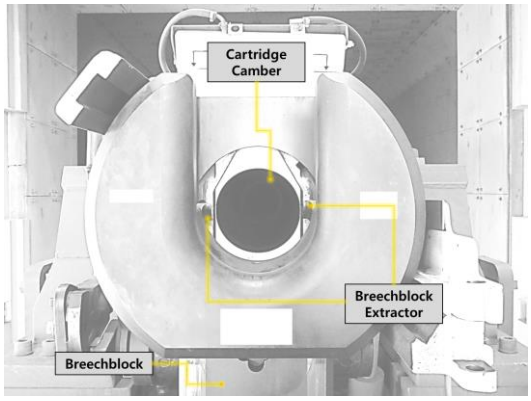


Fig. 3 Gun breechblock extractor

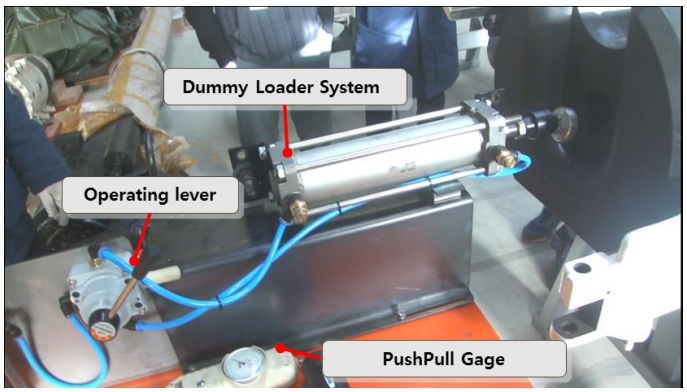


Fig. 4 Loading force measuring device

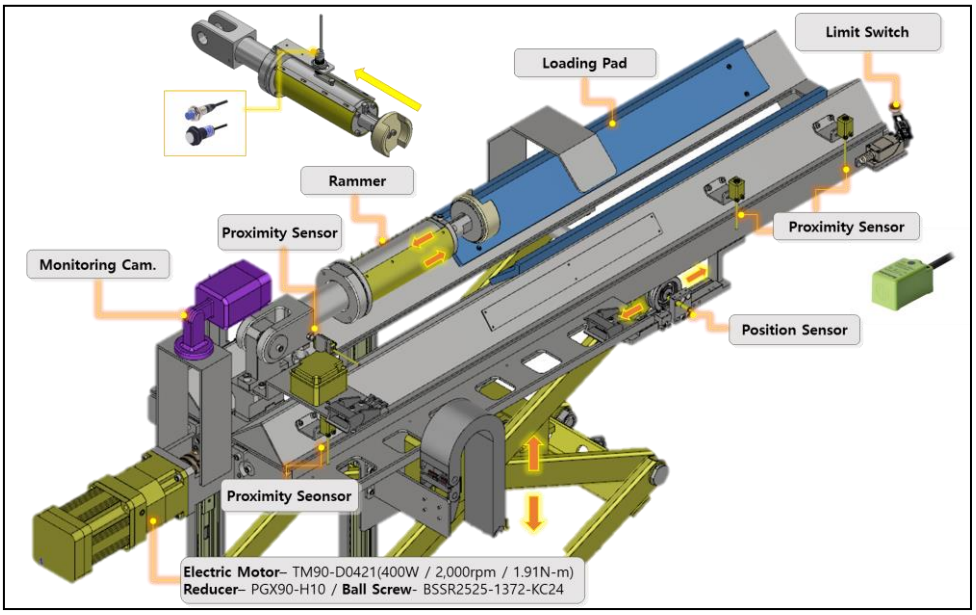


Fig. 5 Loader system configuration

2.1.3 자동 장전 시스템 구성

자동 장전 시스템은 탄약을 적재하는 트레이, 약실 높이에 맞게 트레이를 상승시키는 승강장치, 탄약을 이송하고 장전하는 밀대 장치로 구성되며, Fig. 5의 시스템이 Fig. 6의 절차에 따라 구동되도록 설계하였다. 탄약 적재 트레이는 다종의 탄약 거치가 가능하도록 적재부를 V 형태로 배치하였으며, 탄약과 직접 접촉되는 패드 부분은 MC나일론 소재의 엔지니어링 플라스틱 소재를 적용하여 전기전도의 위험성 저감과 손상 시 쉬운 교체가 가능하도록 설계하였다. 승강 장치는 유압실린더로 구동되는 X 바 형태의 기구 장치를 적용하여 승강이나 하강 시에 적재 하부의 휠 타입의 승강 위치 센서가 무장별로 구분된 지점에 정지하도록 하였으며, 이때 트레이가 목표한 위치 도달 여부를 ATLAS가 인지하도록 센서부를 구성하였다. 밀대 장치 설계는 BLDC모터와 볼 스크류를 직결 구조로 설계하여 직선 운동을 하도록 구성하였다. 이 장치는 밀대 후방의 회전 힌지 축을 기준으로 하여 회전이 자유롭도록 설계되었기 때문에 폐쇄기 상승 시 밀대가 상 방향으로 밀려나도록 한다. 밀대장치 측면에 설치된 전자식 감지 센서는 이를 감지함으로써 ATLAS가 최종적인 장전 완료 상황을 인지하도록 하였다. 또한 이 과정에서 비정상 상황 시 탄약 후미에 과도한 힘이 작용하지 않도록 밀대 내부에 스프링을 적용하였는데, 이는 비정상적으로 장전력이 발생하면 밀대 내부의 축이 압축되도록 하여 기준되는 압축량에 따라 일정 수준 이상의 힘이 작용하면 임무를 중단하도록 시스템을 구성하였다.

2.2 무인 이송 시스템 구성

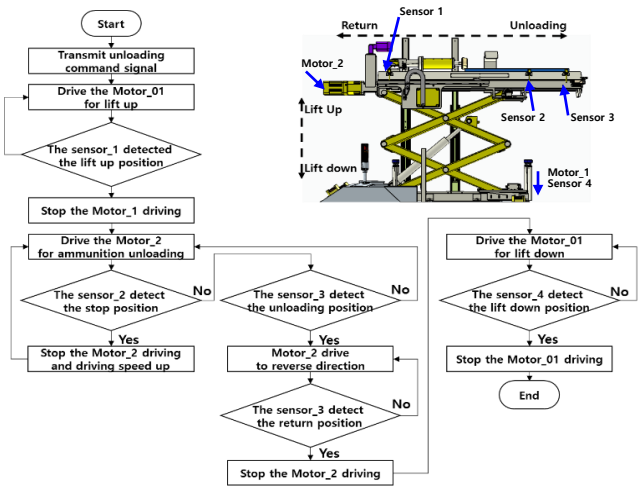


Fig. 6 Flow diagram of loader system

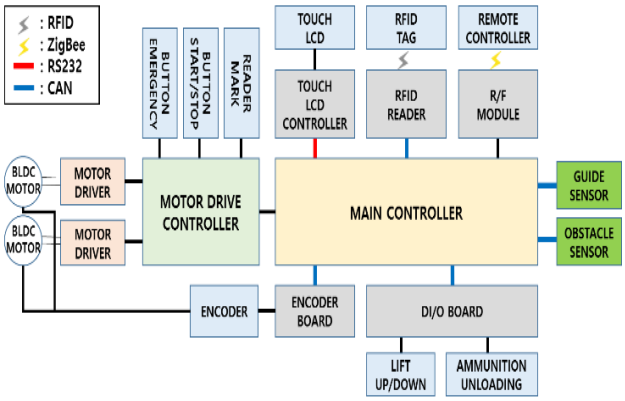


Fig. 7 System integrations of autonomous vehicle

Table 1 Guidance and position mark sensor shape

Product	OGS600	Mark (Non Commercial)
Application	Optical Guidance	Position Sensor
Trace Type	Dark Trace on light background	Magnetic Target

Table 2 Route and control tag information

Moving_Route
-The ammunition loading route from the charge spot -The ammunition unloading route from loading spot -The ammunition loading route from unloading spot -The charge spot route from loading spot

RFID_Tag_Info
-Driving Direction -Branching Direction -Moving Speed -Sensing ON/OFF of Obstacle Sensor -Sensing Level of Obstacle Sensor for Driving -Driving Command (Ex. After Mark Stop, Wait for 00 sec and go to the reverse direction)

무인 이송 장치는 유인 탄약 이송 절차를 무인화하는 핵심적인 기술로서 주행 성능과 반복적인 위치 정렬에 고도의 신뢰성 확보를 요구한다. 본 연구에서는 개발 장비의 신뢰성 확보를 위하여 상용으로 검증된 ㈜이노텍 사의 AGV-V354XL 제품을 활용하였다. 개발 장비의 성능과 환경을 고려하여, Fig. 7과 같이 시스템을 구성하였다. 주행 기술은 시험장 환경을 고려하여 폐쇄 회로로 구성된 유선 경로를 추적하여 주행하는 경로 계획 기법을 적용하였다. Table 1의 레이저 기반의 선 유도 가이드 장비(OGS 600)를 적용하였으며, Table 2의 RFID tag를 이용해 구간별 주행 정보를 인지하도록 시스템을 구성하였다. 기점 정렬은 S극의 자성 표식을 인식하는 자기 인식 센서를 차량 하부에 부착하여, 각 주요 지점에 배치된 표식을 통해 기준 점 도착 여부를 인지할 수 있도록 설계하였다. 이를 통해 적재, 장전, 충전 등의 기점 도달 정밀도를 향상시켜 매 회 약실 정렬이 일정한 수준으로 유지되도록 하였다

3. 성능 확인 및 실증 시험 결과

3.1 ATLAS 제작 및 검증

본 연구의 결과물로 시험 탄약의 무인 이송과 자동 장전이 가능한 ATLAS 1호기를 제작하여 Fig. 8에 이를 나타내었다. 실내시험장에 구축된 운용 환경을 토대로 개발 성능에 대한 확인실험과 검증시험을 순차적으로 시행하였으며, 이를 통해 사격 시험 분야에서 유·무인 협업 운용 가능성을 확인하였다.

3.1.1 장전 탄약 충격량 계측 실험

3.1.1.1 실험 설계

로봇 또는 기구장치를 이용한 자동 장전에는 반드시 탄약 취급에 대한 안전성 검토가 요구된다. 따라

서 장전 간 발생하는 충격량이 탄약의 충격허용 범위를 만족하는지 확인이 필요하다. 이를 위해 숙련된 사수의 수동 장전과 ATLAS의 자동 장전의 비교 실험을 실시하였으며, 상대적 분석을 통해 개발 장비의 안전성을 확인을 목표하였다.

Fig. 9와 같이 탄 체의 충격량(가속도) 획득이 가능하도록 실험 환경을 구축하였다. 계측을 위한 대표 탄 종은 센서 부착이 용이한 KM490으로 선정하였다. 이 모의용 탄약 전방부에 3축 배치가 가능한 브라켓을 활용하여 PCB PIEZOTRONICS사 350C03센서를 3축으로 부착하였으며, 강 내에 케이블이 DAQ로 연결되도록 구성하여 가속도 측정 값의 수신이 용이하도록 환경을 구축하였다. DAQ 장비는 DEWETRON 사의 2072를 이용하였고 350C03 센서의 가속도 측정 범위는 ±10,000g, 주파수 영역은 0.4~10,000Hz이다. 이 방식은 장전간 탄체 물리량 획득이 어려운 점을 고려하여 전방에 센서를 위치시켰기에 계측 값이 직접적인 접촉력을 의미하지 않음을 유의해야 한다.

Fig. 8 Fabrication results of ATLAS I

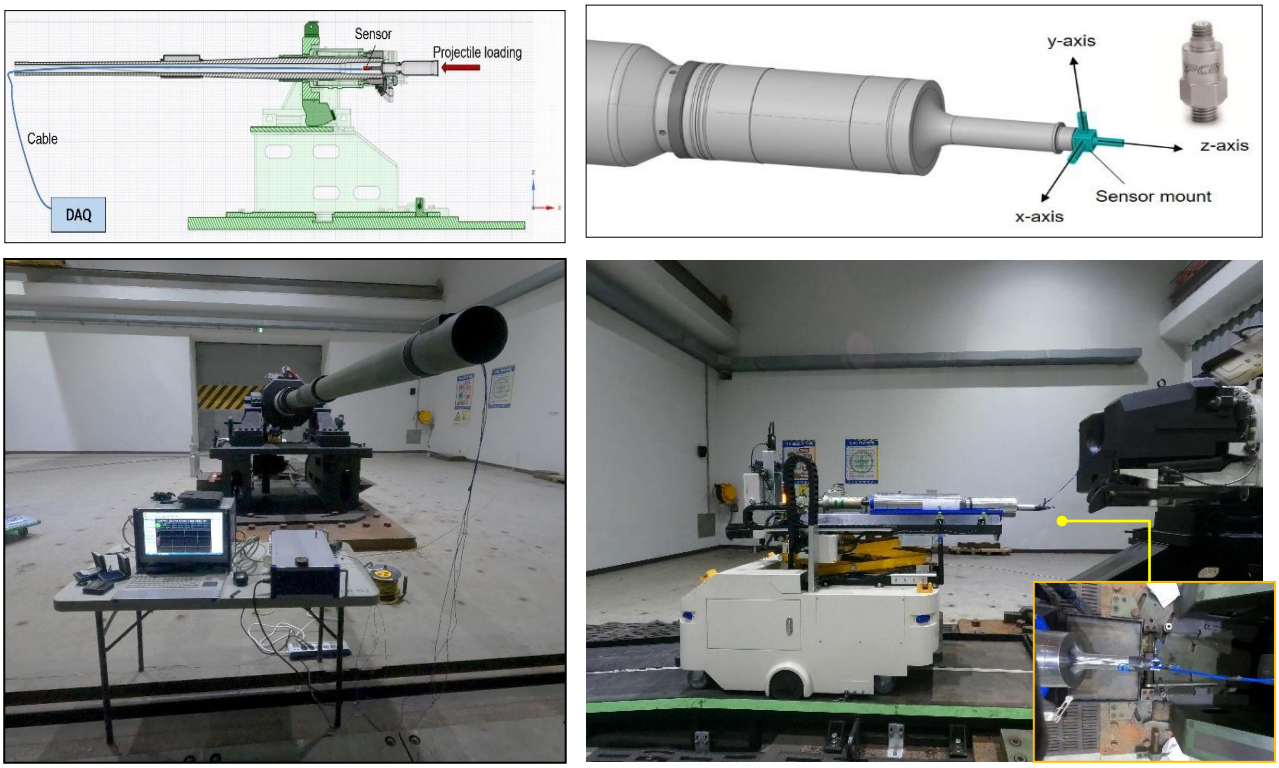


Fig. 9 Photos of shock test environment

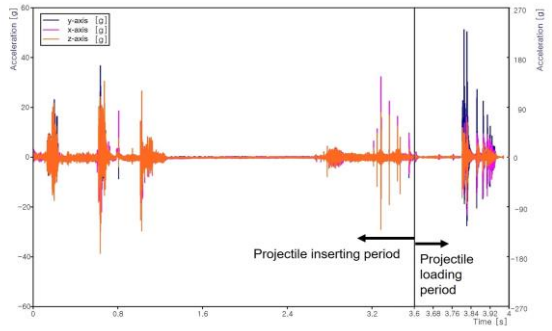


Fig. 10 Acceleration of projectile with ATLAS

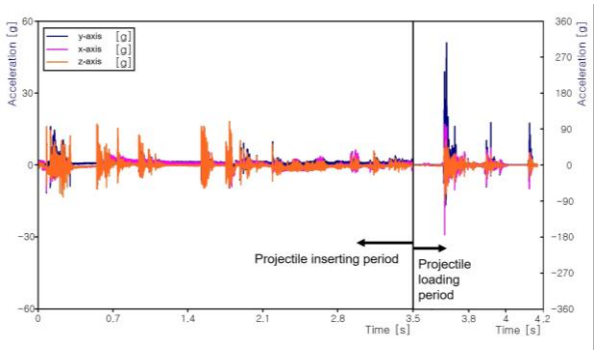


Fig. 11 Acceleration of projectile with manual loading

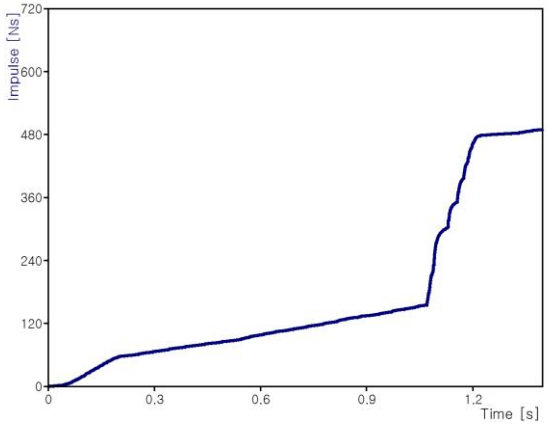


Fig. 12 Impulse of projectile with ATLAS

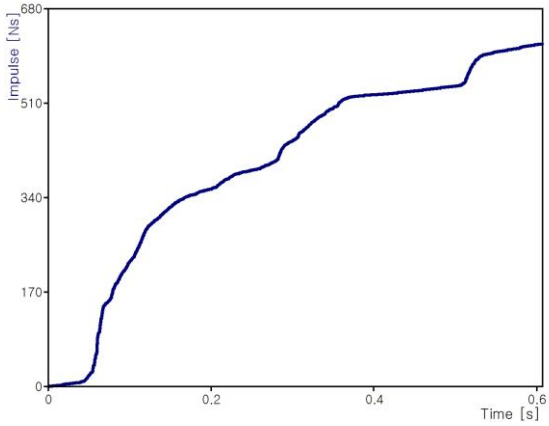


Fig. 13 Impulse of projectile with manual loading

3.1.1.2 계측 결과 및 분석

Fig. 10, 11은 ATLAS를 이용한 자동 장전과 수동 장전의 가속도 계측 결과를 비교한 그림이다. 두 방법 모두 탄약의 1/3 가량을 약실에 거치해 두고 최종 장전을 실시하는 특징으로 인해 가속도 구간을 두 구간으로 구분지었다. 약 3.6초의 시간까지는 탄약이 약실에 삽입되는 구간이고, 약 3.6초 후의 시간은 칼퀴가 작동하여 폐쇄기가 닫히는 장전 구간이며 이를 시간 축으로 구분하여 표현하였다. 먼저 장입 구간에서 발생하는 충격량은 일부 구간에서 수동 최대 18g, 자동 최대 37g으로 발생하였는데, 이는 탄두부가 결합되는 부분의 형상(테이퍼)이 약실 벽에 충돌하면서 발생하는 충격으로 확인되었다. 해당 최댓값을 기준으로 산출된 충격력은 10,000N 수준으로 탄약 기준 허용치를 충족하므로 약실 삽입 구간에서 안전성을 지님을 확인하였다.

다음으로 탄약의 최대 가속도는 폐쇄기가 상승하여 닫힐 때 발생하게 되는데, Fig. 10, 11에서 ATLAS의 자동 장전의 경우 최대 가속도는 231g이고, 사람의 힘으로 장전할 때의 최대가속도는 307g으로 확인되었다. 두 값 모두 y축에서 발생되는 값으로 차이의 원인은 수동장전 과정에서 사수가 손과 폐쇄기 간섭을 피하고자 탄을 강하게 밀어 가속시키는 것과 달리, 자동 장전은 밀대가 폐쇄기 작동에 패시브하게 작동하므로 장전 과정이 상대적으로 균일하고 안정적이기 때문으로 분석된다. 이는 폐쇄기 작동 구간 내 z축(장입방향) 가속도 프로파일을 비교해보면 알 수 있는데, 수동 장전은 강한 반력으로 인해 반대방향으로 탄에 충격이 가해지고 이후 폐쇄기에 의해 충격 감쇄가 길게 진행되는 것을 볼 수 있다. Fig. 12, 13은 장전 조건별 시간에 따른 충격량을 나타낸 그래프이다. 정량적인 수치 비교를 위해 그래프를 비교해보면 자동 장전이 480N · s, 수동 장전이 640N · s으로 나타나며, 정상적인 장전 조건에서 자동 장전이 수동 장전에 비해 약 30%의 충격량 저감이 가능함을 확인하였다.

3.1.2 유 · 무인 협업 기반의 사격 시험

총포탄약 사격시험은 탄약의 준비(환경처리), 탄약의 이송과 장전, 발사장치 준비, 사격 순으로 수행된다. 기존의 사격 시험은 전적으로 인력에 의해 수행되나, 본 연구에서는 개발 장비를 이용하여 이송과 장전 단계가 무인화된 유 · 무인 협업 기반의 시험을 계획하였다. 시험은 모의 시험과 실 사격 시험을 단계적으로 계획하여 ATLAS의 반복적인 임무 수행 능력을 확인하였는데, 사용자의 의도와 다르게 정지

Fig. 14 The scene of live firing test procedure

하거나 경로의 이탈, 탄약 끼임 등 비정상적 현상이 발생할 경우 해당 시도는 실패로 판정하였다. 비활성 7종 탄약을 이용하여 총 245회의 연속적인 모의 시험을 수행하여 정상적인 이송, 정렬, 장전이 가능함을 확인하였다. 이후 Fig. 14의 실탄 사격 시험에 적용하여 무장 종류 변경뿐만 아니라 국방 규격에 따른 환경처리(상온, 저온, 고온) 조건에서도 임무가 가능함을 확인하였으며, 최종적으로 전차포 탄약 시험에서 ATLAS를 이용한 유 · 무인 협업의 가능성과 개발 타당성을 확인하였다.

4. 결 론

본 연구는 작업자의 안전과 근로환경 개선을 위하여 총포탄약시험 중 전차포 사격시험을 대상으로 하는 유 · 무인 협업 기술 개발을 목표로 하고 있다. 이를 위한 첫 시도로 본 원의 실내시험장을 대상으로 하는 ATLAS 1호기를 개발하고 일부 시험절차를 무인화하여 개발 타당성과 지향 목표를 실증하였다. 최종적으로 다음과 같이 결과를 요약할 수 있다.

1. 그 동안 사격 시험분야에서 무인 로봇 협업 기술의 적용은 탄약 취급의 특수성으로 인해 어려움이 존재하였으나, 관련 기술의 고도화로 본 연구에서 최초로 무인화 시도에 관한 실증 연구를 수행하였음.
2. 정상적인 장입조건에서 탄약에 미치는 충격력은 허용 기준 이내로 분석되며, 특히 장전이 완료되는 종말 단계에서는 수동 장전에 비교해 70% 수준으로 나타남.
3. 유 · 무인 협업 기반의 실증 시험을 수행하여, 정상조건에서 ATLAS의 이송, 장전 성능을 검증함.
4. 결론적으로 본 개발 장치를 이용한 사격 시험의 유 · 무인 협업으로 작업자의 위험업무의 부담완화, 근골격계 질환 발생 완화의 효과가 예상되며, 향후 기술 성숙도 향상으로 시험 업무 효율 증대가 기대됨.

후 기

이 논문은 2020 년 정부의 재원으로 수행된 연구임(UG20006HD). 연구과제 완수를 위해 물심양면 기여해주신 다락대시험장 관계자 및 ㈜영흥이엔지, ㈜풍산 시험평가팀 관계자분들께 감사의 말씀을 전합니다.

참고문헌
(References)

(1) Lee, S. D., 1999, “An Ergonomic Study on the Work Loads of Manual Workers,” *Journal of the Korean Society of Safety*, Vol. 14, No. 3, pp.174~180.
(2) Kim, H. H., 2009, “An Analysis of Characteristics of Musculoskeletal Disorders Risk Factors,” *Journal of the Ergonomics Society of Korea*, Vol. 28, No. 3, pp. 17~25.
(3) MIL-STD-1472G, 2012, *Department of Defense Design Criteria Standard: Human Engineering*, Department of Defense, ilitary Standard.
(4) Park, S. H., 2015, “Development of Projectile Transfer System to Prevent Musculoskeletal Problems,” *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, Vol. 41, No. 6, pp. 551~558.
(5) Park, S. H., 2016, “Ergonomic Verification of Suitability of the 4-Wheeled Hand Cart to Transfer a Projectile for Towed Howitzer,” *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, Vol. 42, No. 3, pp. 165~172.
(6) Lee, J. H., 2019, “Development of The Transporting System for The Automatic Carrying and Arming of Test Ammunition,” *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol. 20, No. 8, pp. 156~163.
(7) Vicentini, F., 2021, “Collaborative Robotics: A Survey,” *Journal of Mechanical Design*, Vol. 143, No. 4, Article 040802.
(8) Kopp, T., 2020, “Success Factors for Introducing Industrial Human-robot Interaction in Practice: An Empirically Driven Framework,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 112, pp. 685~704.
(9) Mukherjee, D., 2022, “A Survey of Robot Learning Strategies for Human-Robot Collaboration in Industrial Settings,” *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vo.73, Article 102231.
(10) Lee, S. J., 2021, “A Concept Review for the Unmanned Autonomy of an Ammunition Test Procedure,” *2021 Autumn Conference Proceedings of Korea Institute of Military Science and Technology*, pp. 1~2.
(11) Park, K, J., 2021, “Design of Ammunition Transport and Loading Autonomy System on the Indoor Firing Test Range,” *2021 Autumn Conference Proceedings of Korea Institute of Military Science and Technology*, pp. 543~544.

<응용기술논문> DOI http://dx.doi.org/10.3795/KSME-C.2023.11.2.129 ISSN 2288-3991(Online)

시추장비 통합운용제어시스템 및 HILS 개발

문건혁*·김성태*·임범현**·석진욱**·조승호**·이재용***·우남섭****·김영주****·김종민*†
*(주)유아이티, **삼성중공업(주), ***동의대학교, ****한국지질자원연구원

Development of Drilling Control System and HILS

Geonhyeok Moon*, Sungtae Kim*, Bum Hyun Lim**, Jinwook Seok**, Seong Ho Cho**, Jaeyong Lee***, Nam Sub Woo****, Young Ju Kim**** and Jongmin Kim*†
* UIT Inc.,
** Samsung Heavy Industrires,
*** Dong-eui Uiversity,
**** KIGAM

(Received January 9, 2023 ; Revised January 31, 2023 ; Accepted February 3, 2023)

Key Words: Drilling Control System(시추장비 통합운용제어시스템), HILS(Hardware In the Loop Simulation), HMI(Human Machine Interface, 휴먼머신인터페이스)

초록: 해양시추시스템은 해양시추작업을 위해 해양플랜트에 탑재되는 각종 장비 및 제어시스템을 의미하며, 이 중 50%이상의 장비는 특정 기업이 독점하고 있는 상황이다. 이에 중국 및 싱가폴 조선소에 대비하여 국내에서 제작되는 시추선의 원가가 상대적으로 높아 가격경쟁력에 매우 불리한 상황이다. 또한, 해양시추시스템의 오류로 발생하는 공정지연 방지를 위해 야드에 입고 하기전에 선주들이 보통 시추시스템의 성능 및 안정선 검증을 위해 HIL Test를 요구한다. 해외에 HIL Test를 의뢰할 경우 Test 비용은 약 20-30억원 정도로 비용이 소요되는 문제점이 있다. 이에 본 논문에서는 시추장비를 통합 제어 및 운영할 수 있는 기술과 HILS 시스템의 국산화하고자 한다.

Abstract: Drilling control system means mounted equipments and control systems on offshore plants, more than 50% of the equipment is monopolized by a specific company. According to compared to Chinese and Singapore shipyards, the cost of drilling rigs manufactured in Korea is relatively high, which is very unfavorable to price competitiveness. In addition, in order to prevent process delays caused by errors in drilling control system, ship owners usually require HIL tests. because verify the performance and stability of the drilling system before installed devices on offshore plant. When requesting an HIL test abroad, there is a problem in that the cost of the test is about 2 to 3 billion won. In this paper, we intend to domestically producing HILS system that can control and operate the drilling control system.

1. 서 론

해양시추시스템은 해양시추작업을 위해 해양플랜트에 탑재되는 각종 장비 및 제어시스템을 의미한다. 국내에서 제조하는 해양시추선의 topside의 장비는 50% 이상이 특정 기업이 독점하고 있는 상황이다. 이에 중국 및 싱가폴 조선소에 대비하여 국내에서 제작되는 시추선의 원가가 상대적으로 높아 가격경쟁력에 매우 불리한 상황이다.[1-5]

해양시추시스템의 오류로 발생하는 공정지연 방지를 위해 선주들은 보통 야드 입고 전에 시추시스템의 성능 및 안정선 검증을 위한 HIL test를 요구한다. 이는 야드에 입고 후 시운전 진행 시 문제가 발생

† Corresponding Author, mark.kim@uitsolutions.com
ⓒ 2023 The Korean Society of Mechanical Engineers

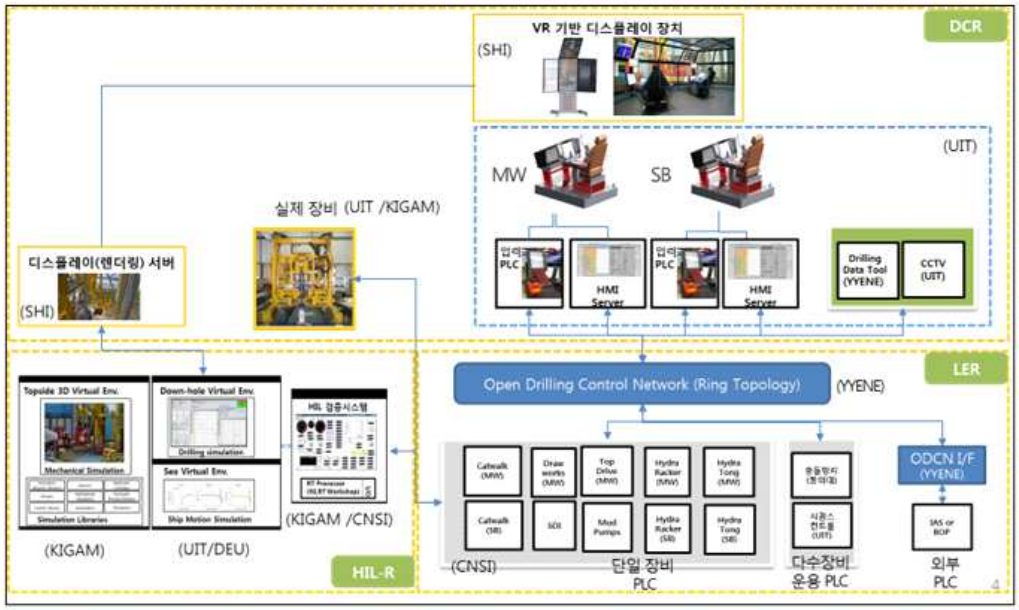


Fig. 1 Schemetic of Drilling Control System (DCS) and HILS

되면, 수정시간 및 비용이 과다하게 발생되기 때문이다. 또한, HIL test를 해외 업체에 의뢰할 경우 test 비용 약 20-30억 원 정도로 비용이 과다 소요되는 문제점이 있다.

Fig. 1은 다양한 시추시스템을 제어할 수 있는 통합운용제어시스템과 시추시스템의 성능 및 안전성을 검증할 수 있는 HILS 시스템에 대한 개략도를 나타낸 것이다. 본 연구에서는 Fig. 1과 같이 시스템을 구성하여 앞에서 언급한 문제를 해결하기 위해서 시추 장비의 분리발주를 통해서 원가를 절감을 할 수 있도록 시추장비를 통합 제어 및 운영할 수 있는 기술과 HILS 시스템의 국산화를 하고자 한다.

2. 개발 방법

2.1 시추시스템 구현

시추시스템을 제어할 수 있는 통합운용제어시스템은 DCR(Drillers Control Room), LER(Local Instrumentation Room) 및 HIL-R(HIL Test Room)로 구성하였다. DCR은 실제 장비와 똑같이 작동하는 디지털 트윈 기반의 장비를 운영하는 서버, VR 기반의 디스플레이 장치, 실제 시추선에 장착되어 있는 Main-Well과 AUX-Well을 제어할 수 있는 cyber chair 등으로 구성하였다. LER은 실제 시추선에서 사용하는 network 시스템과 장비를 제어해주는 PLC 등의 장비들로 구성하였으며, 장비를 추가로 연결할 수 있도록 시스템을 구비하였다. HIL-R에는 실제 장비와 똑같이 작동할 수 있는 장비들을 3D 모델링 및 cyber physical model을 적용하여 구현하였다. 여기에 사용된 3D 플랫폼은 Unreal Engine을 이용하여 구현하였으며, cyber physical model은 장비의 성능 및 움직임 등의 정확성을 위해 Matlab을 사용하였다.

2.2 시추장비 구현

Table 1은 본 연구에서 개발한 시추선의 기본 사양을 나타낸 것이다. 본 연구에서는 총 4가지 시추 작업을 할 수 있도록 만들어 구성하였으며, 여기에 필요한 장비를 구현하여 개발하였다. 시추 작업 시나리오는 스탠드빌딩 공정, 트리핑 공정, subsea 공정, 시추공정 등 4가지의 top side 공정을 구현하였으며, 장비는 derrick(single), draw-works, top drive, mud pump, Hydra Tong을 구현하였다. 추가로 BOP 시뮬레이터와 연계되어 kick 발생을 모사 렌더링하여 subsea drilling에 대한 훈련의 이해도를 높일 수 있도록 구현하였다.

Table 1 Specification of drillship in drilling control system and HILS

Component		Specification
Operational capacities	Water depth	12,000 ft
	Drilling depth	40,000 ft
Drilling equipment	Derrick (single)	52 * 55 * 210 ft
	Draw-works	9,000 hp
	Top drive	Hosting : 1,250 ton Torque : 105,000 ft-lbs
	Mud pump	Power : 2,200 hp Pressure : 7,500 psi
	Hydra tong	Max torque : 200 kNm
	Hydra racker	Arm reach: 4.8 m SWL: 7t@4.8 m Moving speed: 0.33 m/s
Well control	BOP	15,000 psi, 6 ram cavities

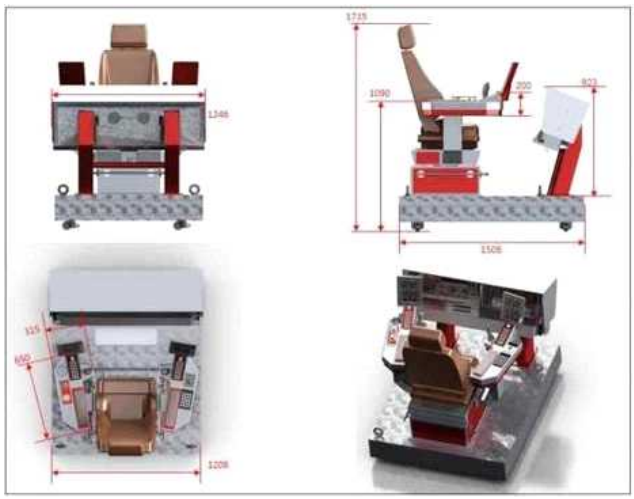


Fig. 2 Design of cyber chair

2. 연구 내용

2.1 시추제어시스템

2.1.1 Cyber chair 설계 및 제작

Fig. 2는 본 연구에서 설계 및 제작한 cyber chair의 3D 도면이다. 그림에서와 같이 operator가 앉을 수 있는 의자, 장비를 제어할 수 있는 joystick 및 패드, 제어화면 및 장비의 신호를 확인할 수 있는 HMI로 구성되어 있다. Cyber chair는 실제 시추선에 장착되어있는 형태와 거의 유사하며, 기능은 동일하게 제작하였다. 먼저, 의자는 operator가 장비를 작동하기 편하고 쉽게 조작할 수 있도록 높낮이 및 앞뒤 간격을 조절할 수 있도록 하였으며, joystick 및 패드는 실제 시추선에 있는 장비와 똑같이 모사하여 구현하였다. 기존 cyber chair는 일반 아날로그 방식의 패드만을 사용하지만, 추가로 장착한 터치패드는 스크린을 통해 작동하기 때문에 버튼의 클릭 여부, joystick의 움직임 정도 등을 시각적으로 확인할 수 있으며, 터치패드 또는 기존 아날로그 패드가 고장이 나도 둘 중 하나로 작동이 가능하게 설계 및 제작하였다. HMI는 사용자가 쉽게 화면을 볼 수 있는 높이에 설치하였으며, 실제 시스템과 동일하게 구성하였다.

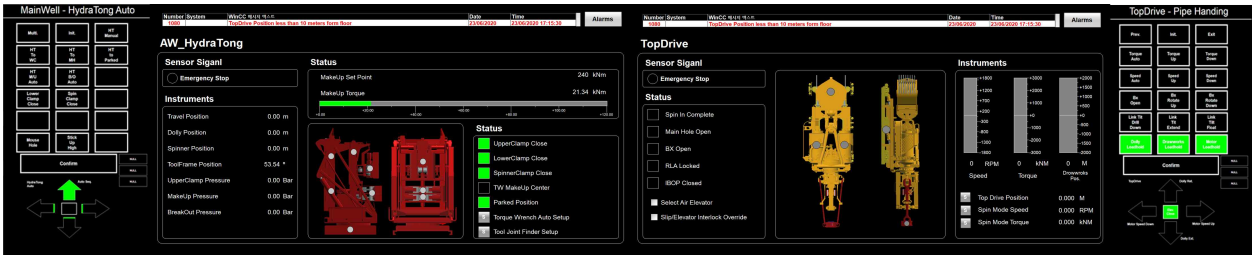


Fig. 3 HMI display

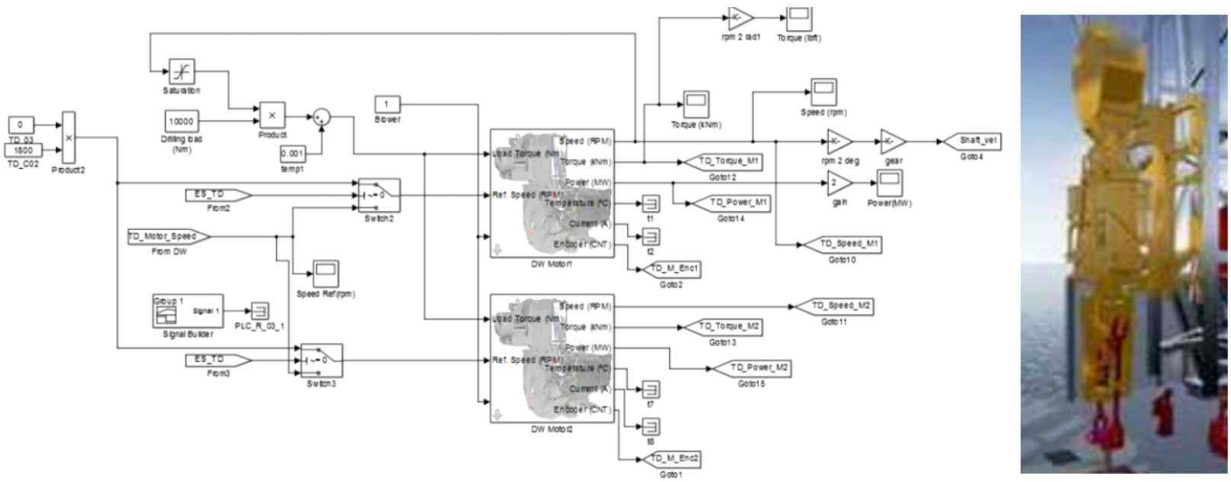


Fig. 4 3D cyber physical model

2.1.2 HMI (Human Machine Interface)

Fig. 3은 시추제어시스템의 HMI 화면을 나타낸 것이다. 그림에서 보는바와 같이 총 4개의 화면으로 구성되어 있으며, 2개의 화면은 패드의 작동여부와 joystick의 조작(장비) 속도 등을 파악할 수 있도록 HMI를 터치패드에서 작동할 수 있도록 설정하였다. 가운데 2개의 모니터에서는 실제 시스템에서 작동하는 장비의 상태를 확인할 수 있는 화면을 구성하였다. 장비는 Table 1에 작성되어 있는 drill equipment들이 각 페이지 별로 구성되어 있으며, HMI의 터치 부분을 활영하여 각 장비를 조작할 수 있고, 이를 통해 시추 시나리오 중 스탠드빌딩, 트리핑, 시추, subsea 공정에 대한 조작을 할 수 있다.

Fig. 4는 HILS와 연동되는 3D cyber physical model을 나타낸 것이다. 실제 시추 장비들의 도면 데이터를 활용하여 실제와 동일한 가상의 공간에 만들어진 입체형 모델이며, 실제 현장에서 사용되는 물체를 묘사하거나 혹은 물리적 환경을 만들어 3D 그래픽 기법으로 메쉬(meshes), 곡선(curves), 서페이스(surfaces) 등 렌더링을 구현하고 있다. 3D 모델링 표현은 시각화에 매우 유용하며, 장기적으로 봤을 때 비용 효율 절감에 솔루션을 제공한다. 여기에 적용된 cyber physical model을 적용하여, 물리적 움직임과 속도 등을 동일하게 적용하였다. 이는 실제 장비를 운용하는 것과 동일하게 작동할 수 있다는 것을 의미한다.

Fig. 5는 실제 시추시스템에서 실제 operator가 시추를 할 때 보게 되는 화면을 가상현실로 구현한 것이다. 보는 바와 같이 cyber chair당 4개의 display로 구성하였으며, 두 화면은 실제 operator가 보는 것이기 때문에 서로 연동되어 있다. Main chair, aux chair에서 각각 보는 화면을 실제와 동일하게 구성하였으며, 화면에 구현된 장비들은 실제 장비의 움직이는 속도 및 방향 등 physical적인 부분은 Matlab 등을 이용하여 동일하게 구성하였다

Fig. 6은 LER을 실제로 구현한 것이다. 실제 시추 장비의 제어기 및 drilling control system을 모아 놓은 공간으로, 시추 4개의 공정을 구성하는 장비들의 제어 장치로 구성되어 있으며, 각각은 DCS & DCN

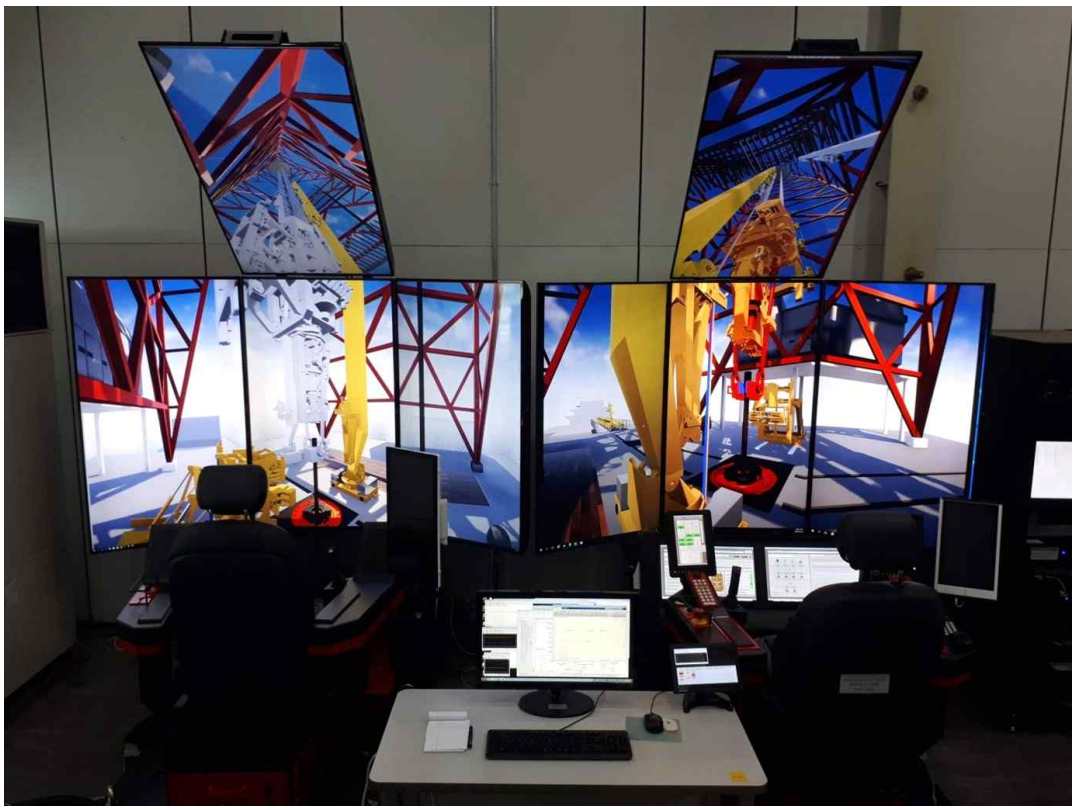


Fig. 5 Rendering system (display device)

Fig. 6 Local instrumentation room (LER)

IF용 캐비닛(시추용 HMI, 스탠드빌딩용 HMI, OPC-UA용 W/S), multi-machine control용 캐비닛(MMC 캐비닛), sub-sea용 캐비닛(BOP, backup), 시추 공정용 캐비닛(TopDrive, Catwark), 파이프 핸들링 장비용 캐비닛(MW-HT, MW-HR, AW-HT, AW-HR), anti-collision system용 캐비닛(anti-collision 제어기, anti-collision 수동 입력 시스템)로 PLC, workstation, 네트워크 장치(HUB)로 구성되어 있으며 유선 랜으로 연결되어 있다. 이는 개별 PLC 구축으로 유지보수 및 시뮬레이션 접근성 확대와 운전반에서 별도 전원 연결하여 안정적 전력 공급이 가능한 이 점을 가지고 있다.

Fig. 7은 시추통합운용제어 시스템 및 HILS를 나타낸 것이다. 실제 드릴쉽의 시추제어시스템과 같이 구성하였으며, 다음과 같이 DCR, LER, HILS-ROOM, BOP 등으로 구성된다. 각각의 공간은 4개의 공정에 해당하는 시추 장비를 운영, 제어 및 시뮬레이션할 수 있다. 실제 시추선의 시추 장비와 같이 개별 장비의 제어뿐만 아니라 충돌 방지 시스템 및 multi machine control처럼 다수개의 장비 통합도 제공하고 있다. 마지막으로 시추 및 BOP와 같은 subsea 제어도 제공한다. BOP 시뮬레이터와 연계되어 kick 발생 모사 렌더링을 추가하여 subsea drilling에 대한 훈련의 이해도를 높였다. HILS 테스트룸 해양 시추 통합

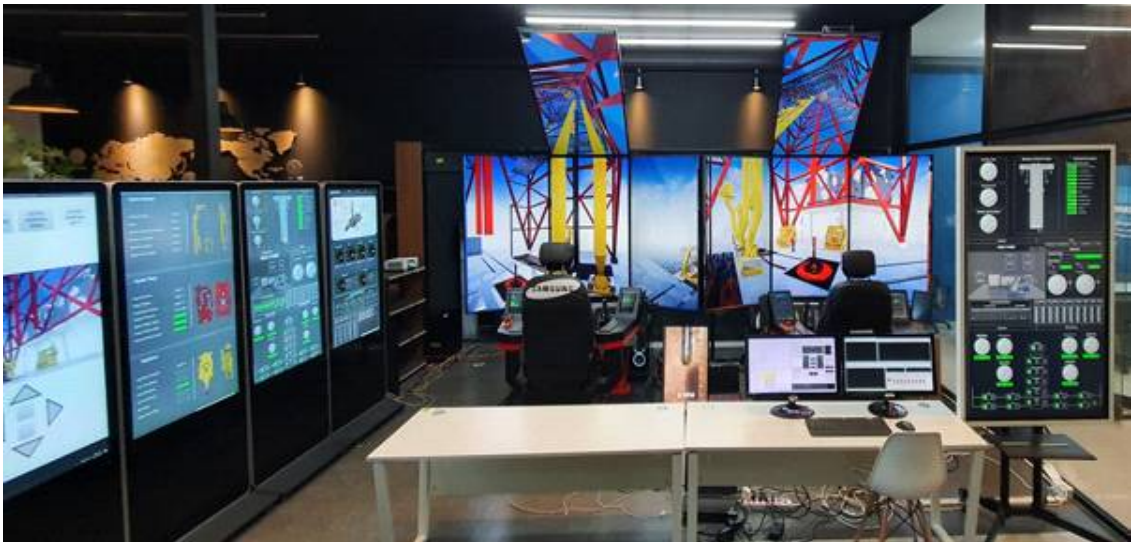


Fig. 7 Drilling control system for subsea

운영시스템과 HIL 테스트를 진행하며 관련 내용을 공유하기 위한 공간을 제작, 각각의 장비 개별적인 테스트가 가능한 공간으로 구성, 장비 원격 모니터링 공간 제작, HIL 테스트 공간과 연결하여 전체 장비 모니터링이 가능한 원격 모니터링 공간을 제작, 해양 시추 공정에 필요한 다양한 장비를 개별적으로 모니터링 가능, 터치스크린으로 구성하여 별도의 입력장치 없이 원하는 장비를 선택, 입력값을 확인 또는 수정이 가능하도록 구성하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 시추시스템의 다양한 장비를 통합하여 운용할 수 있는 통합운용제어시스템 및 이를 검증 할 수 있는 HILS 및 cyber physical model이 적용된 가상시스템을 개발하여, 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 다양한 장비를 통합 운용할 수 있는 통합운용제어시스템을 개발하여, 다양한 회사의 제품을 활용하여 시추시스템을 제작할 수 있는 시스템을 개발하였다.

2) 고가 장비의 제어로직 및 성능을 검증할 수 있는 HILS를 국산화하였다.

3) HILS와 연계하여 시추시스템을 운용할 수 있도록 cyber physical model을 만들었다.

4) 그 결과 시추선을 제작할 때 다양한 제작사의 제품을 적용할 수 있게 되었으며, HILS 및 cyber physical model을 이용하여 성능 및 안전성을 시뮬레이터를 활용하여 검증할 수 있게 되었다.

후 기

이 연구는 2016년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임 (‘10070163’).

참고문헌
(References)

(1) Ji, S. M., Kim, S. T. and Kim, J. M., 2018, “Development of Standbuilding Control System,” *Proceedings of the Plant Division of the KSME Spring Conference 2018*, Lotte City Hotel, Jeju.

(2) Moon, G. H., Kim, S. T. and Kim, J. M., 2019, “Development of Tripping Control System,” *Proceedings*

of the Plant Division of the KSME Spring Conference 2019, BEXCO, Busan.

(3) Moon, G. H., Kim, S. T., Kim, J. M., Ko, L. W., Woo, N. S., Kim, Y. J., Lee, W. D., Seok, J. W. and Lim, B. H., 2020, "Virtual HILS Test Environment-Based Integrated Control System Design for Offshore Drilling Rig," *Proceedings of the Plant Division of the KSME Spring Conference 2020*, On-line Conference.

(4) Ko, L. W., Kim, S. T., Kim, J. M. and Moon, G. H., 2021, "Development of Integrated Operation System for Offshore Drilling Equipment," *Proceedings of the Plant Division of the KSME Spring Conference 2021*, Ramada Plaza Jeju Hotel, Jeju Island.

(5) Moon, G. H., Kim, S. T. and Kim, J. M., 2022, "Development of Integrated Operation Control System for Ocean Drilling Equipment and HILS-based Verification System," *Proceedings of the Plant Division of the KSME Spring Conference 2022*, Ramada Plaza Jeju Hotel, Jeju Island.

<응용기술논문> DOI http://dx.doi.org/10.3795/KSME-C.2023.11.2.137 ISSN 2288-3991(Online)

오픈 소스 및 프리 소프트웨어를 이용한 제어기 설계 및 제작

이 상 헌*†
* 안동대학교 기계로봇공학과

Design and Implementation of Control System Using Open-source and Free Software

SangHeon Lee*†
* Dept. of Mechanical & Robotics Engineering, Andong Nat'l Univ.

(Received February 6, 2023 ; Revised July 5, 2023 ; Accepted July 7, 2023)

Key Words: Open Source Software(오픈 소스 소프트웨어), Free Software(프리 소프트웨어), Controller Design(제어기 설계), Analog Controller(아날로그 제어기)

초록: 본 논문에서는 오픈소스 및 프리 소프트웨어를 이용하여, 2차 시스템을 대상으로 feedback 제어 시스템을 설계하고 평가하였다. 제어시스템의 구현에 앞서, 웹 기반 프리 소프트웨어를 이용하여 아날로그제어시스템을 구축하여 평가하고, 제어기와 프리 소프트웨어의 유효성을 확인하였다. 최종적으로 제어시스템을 회로로 구현하여 제어기의 성능을 비교 평가하였다. 본 논문에서 기술한 내용은 특별한 장비 없이 구현 가능하기 때문에 제어이론을 학습하는 학생들에게 큰 도움이 될 것으로 기대된다.

Abstract: In this paper, a feedback control system was designed and evaluated for second order system using open source and free software. Prior to implementation of the control system, an analog control system was built and evaluated using web-based free software to confirm the validity of the controller and free software. Finally, the control system was implemented as a circuit, and the performance of the controller was compared and evaluated. Since the contents described in this paper can be implemented without special equipment, it is expected to be of great help to students learning control theory.

1. 서 론

최근에 기계공학의 다양한 세부 분야에서부터 생명과학, 메카트로닉스, AI 분야, 재료과학 등 여러 분야까지 오픈소스 및 프리 소프트웨어의 개발과 활용이 증가하고 있다. 이러한 오픈소스 및 프리 소프트웨어의 움직임은 개별 연구자의 활동의 한계로 인해서 아파치 소프트웨어 재단, 리눅스 재단, 이클립스 재단, 오픈소스 이니셔티브와 같은 여러 재단들에 의해 체계적으로 유지관리가 되기도 하고, 특히 오픈소스 이니셔티브재단의 경우 오픈소스 및 프리 소프트웨어의 보급을 위해 학술지도 발간하고 있다.[1] 이러한 체계적인 움직임과 별개로 다양한 분야에서 개인 연구자에 의해 여전히 오픈소스 및 프리 소프트웨어의 개발 및 활용이 이루어져,[2,3] 교육 분야나 특히 로봇 분야에서는 다양한 형태의 오픈 소스로봇이 공개되어 개인이 로봇을 직접 제작하거나 제작 과정 등이 교육에도 활용이 되고 있다.[4]

오픈소스는 공개성이라는 측면에서는 높은 접근성의 장점이 있으나, 간혹 검증되지 못한 오류를 기반으로 제작된 소스들이 존재하여 최종 사용자로서는 추가적인 검증을 할 필요가 있다. 특히 인터넷상에 공개된 많은 오픈소스들이 정확한 정보를 기인하지 않고 제작되거나 사용되는 사례도 존재하고 있다. 그리고 최종 사용자가 오픈소스가 구현 또는 적용되는 분야의 이론적 배경에 대한 지식이 부족하여 오픈 소스의 활용에 있어 어려움이 있기도 하다. 학계에서도 이러한 문제를 파악하고, 이에 대응하기 위해

† Corresponding Author, shlee@anu.ac.kr
Ⓒ 2023 The Korean Society of Mechanical Engineers

정식적인 검증 체계에 따라 오픈소스 장치를 검증하기 위한 HardwareX 라는 논문집도 엘스비어에서 발간되기 시작하였으며,[5] 이 논문집은 오픈소스의 취지에 맞추어 모든 논문이 무료로 열람이 가능하며, 논문 발간을 위한 비용도 아주 합리적으로 책정한 것이 특징이다. 한편, 본 연구진에서는 오픈소스 소프트웨어 또는 하드웨어를 사용자들이 정확하게 사용할 수 있도록 돕는 연구를 진행해오고 있으며, 그 일환으로 본 논문에서는 대학교 학부 수준에서 교육받는 제어 이론을 오픈소스 및 프리 소프트웨어를 활용하여 학습하는 내용을 다루고자 한다. 특히 오픈소스 및 프리 소프트웨어를 활용할 경우 라이선스 비용절감이라는 측면에서 학습자 개인이 쉽게 이론을 학습할 수 있는데 이와 더불어 특별한 장비 없이 실제 시스템을 구현할 수 있도록 지원하는 것이 본 연구의 목적이다.

기계공학 분야에서의 제어공학 수업은 일반적으로 연속 선형 시불변 시스템의 모델링 및 해석, 제어기설계까지를 한 학기 동안 교육하기 때문에 본 논문에서도 이 범위의 문제를 다루는 것을 목표로 하였다.[6~8] 이들 주제들은 소프트웨어를 활용하여 교육 및 학습이 가능한데, 많은 교재들이 주로 상용 소프트웨어인 Matlab을[9] 기반으로 하여 학습을 진행하도록 하지만, 상용 소프트웨어의 한계로 인해 학습자들이 이를 쉽게 활용하는 데에는 한계가 있다. 따라서 Octave[10]와 Scilab[11]과 같은 오픈소스 소프트웨어가 이에 대한 대안으로 활용되고 있고, 본 논문에서도 Octave를 활용하여 제어공학의 문제를 다루고자 한다. 모든 학문이 최종적으로 실제 시스템에 적용하는 것을 목적으로 하듯이, 본 논문에서도 2차 시스템을 대상으로 아날로그 제어기를 직접 구현하는 것을 최종 목적으로 한다. 아날로그 제어기의 구현에 앞서 하드웨어 장치에 대한 사용법 및 이해를 높이기 위해 실제 하드웨어를 사용하는 환경과 거의 유사한 환경을 제공해주는 웹 기반의 프리 소프트웨어인 Tinkercad Circuits[12]을 이용하여 아날로그 제어기를 제작하여 하드웨어 환경을 구축할 수 없는 경우에도 충분히 학습이 가능할 수 있도록 한다.

본 논문은 총 4장으로 구성되어 있으며, 2장에서는 2차 시스템을 대상으로 피드백제어기 설계를 위한 이론과 Octave를 활용한 제어기의 설계에 대해서 다루고, 3장에서는 Tinkercad Circuits을 이용한 제어시스템의 구현 및 실제 제어시스템을 통한 실험결과에 대해서 다룬다.

2. 제어기 설계

2.1 플랜트

제어 대상인 플랜트는 2차 시스템으로 설정하였다. 기계시스템에서의 2차 시스템은 식 (1)과 같이 질량-감쇠-스프링으로 구성되어 2차 미분방정식의 형태로 동적모델을 가진다.

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + kx = f \tag{1}$$

여기서, m, b, k는 각각 질량, 감쇠계수, 스프링상수를 나타내며, x 와 f는 각각 변위와 힘을 나타낸다. 그러나, 제어 시스템의 구현에 있어서 기계시스템은 부품 선정, 기구 구성 등의 어려움이 있기 때문에, 본 논문에서는 상대적으로 구현하기가 쉬운 전기시스템으로 상사하여 플랜트를 구현하였다. 따라서, Fig. 1의 2차 Sallen-key 저역 통과 필터를 플랜트로 설정하였으며, 식 (2)에 플랜트의 전달함수를 정리하였다[13].

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

여기서, K는 $1+R_{p4}/R_{p3}$로 정의되고, 회로에 사용된 저항과 커패시터는 각각 Table 1에 정리하였으며 이 값을 식 (2)에 대입하여 플랜트의 전달함수를 식 (3)과 같이 구할 수 있다.

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

이 시스템의 계단응답을 Octave로 Fig. 2와 같이 얻었고, 계단응답에 대해 시간 성능을 나타내는 사양들을 Table 1에 정리하였다. 상승시간은 0.045초로 크지 않은 편이나, 70%의 큰 오버슛과 약 2초의 정착

Table 1 Elements of plant

R_{p1}	R_{p2}	R_{p3}	R_{p4}	C_{p1}	C_{p2}
100 kΩ	100 kΩ,	100 kΩ	5 kΩ	100 nF	2 μF

Table 2 Time response parameter data of open loop control system and a desired feedback control system

	Rise time (s)	Overshoot (%)	Peak time (s)	Settling time (s)	Steady state error
Open	0.045	70.1	0.14	1.85	0.05
Closed (target)	0.022	45	0.07	0.9	0.005

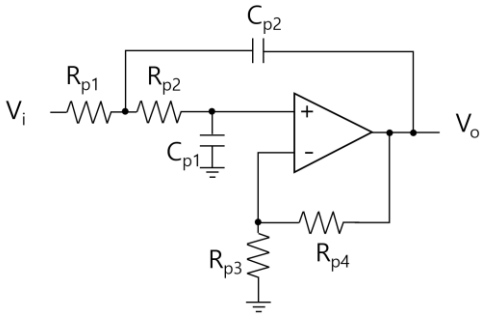


Fig. 1 Plant circuit: 2nd order Sallen-key low pass filter

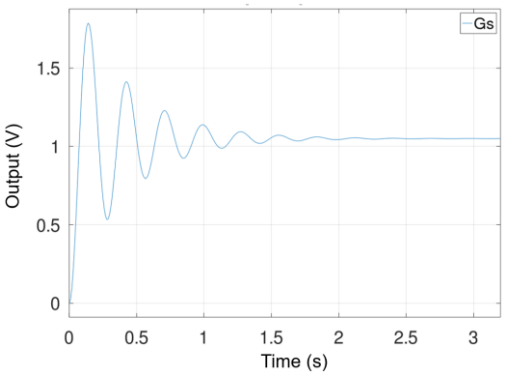


Fig. 2 Step response of the plant

시간은 개선되어야 할 것이며, 정상상태오차도 0.05이므로 함께 개선되어야 할 것이다.

2.2 제어기 설계

앞서 확인한 바와 같이 플랜트는 과도응답 성능 및 정상상태 오차의 개선을 위해 폐루프 제어시스템의 도입이 필요한데, 폐루프 시스템의 목표 성능은 시간 파라미터는 모두 50% 향상시키고, 오버슛과 정상상태오차는 각각 36%와 50% 이상의 향상이 있도록 설정하여, Table 2에 정리하였다. 최종적으로 동적 성능뿐만 아니라 정상상태 오차의 개선도 필요하기 때문에 비례-적분-미분(PID: Proportional-Integral-Derivative)제어기를 도입하였다. 제어기 설계는 근궤적 설계법 또는 주파수 응답설계법이라는 대표적인 방법이 있지만, 본 연구에서는 오픈 소스 및 프리 소프트웨어를 이용한 제어시스템의 구현에 중점을 두었기 때문에, 실험에 기반하여 비교적 간단히 제어기의 설계가 가능한 Ziegler-Nichols 튜닝 방법을 이용하여 제어기를 설계하였다. Ziegler-Nichols 방법은 플랜트를 1차 시스템으로 가정하여, 계단응답으로부터 측정되는 지연시간(L)과 시정수(T)를 이용하는 방법과 P제어기를 포함한 폐루프구조에서 P이득값을 조정하여 안정한계에서의 임계 이득값과 임계 주기를 이용하여 구하는 방법 두가지가 있다.[2] 본 논문에서 다루는 플랜트는 근궤적 작성 시 폐루프 극점이 항상 좌반 평면에 존재하기 때문에 두번째 방법을 사용할 수 없기 때문에 첫 번째 방법을 사용해야 한다. 그러나, Fig. 2에서와 같이 계단응답이 명확한 2차 시스템의 특성을 나타내기 때문에 원하는 성능을 얻기 위해서는 추가적인 튜닝이 필요할 것으로 예상된다.

Fig. 3 은 Fig. 1 의 계단응답곡선을 확대한 것으로 이를 통해 지연시간(L: 0.023s)과 시정수(T: 0.087s)를 구할 수 있으며, 이를 이용하여 식 (4)와 같이 PID 제어기를 설계하였다.

$$D(s) = K_p\left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s\right) \tag{4}$$

여기서, K_p, T_I, T_D는 각각 게인, 적분시간, 미분시간으로 Table 2와 같이 정해진다.[3]

Fig. 4는 PID 제어기로 구성된 폐루프 제어시스템의 블록선도를 나타내며, 폐루프 제어시스템의 계단응답은 Octave를 이용하여 Fig. 5와 같이 구하였는데, 우선 적분제어기의 도입을 통해 시스템이 형태 0

에서 형태 I로 변화하여 정상상태오차가 사라졌음을 확인할 수 있다. 그리고, Table 4에 정리된 시간응답 지표들을 보면 모든 지표가 Table 2에 제시된 목표 값보다 향상된 것을 확인할 수 있다. 앞서 Ziegler-Nichols 첫 번째 방법이 1차 시스템을 기반으로 하여 한계가 있을 수 있다는 예상을 깨고 만족스러운 설계 결과를 보여주었기 때문에 추가적인 튜닝은 실시하지 않았다.

3. 제어기 구현 및 실험

3.1 제어기 구현

2.2절에서 설계된 제어기를 연산증폭기를 이용하여 구현하였다. 회로로 구현하는데 있어, 병렬형태의 PID제어기가 직관적으로 이해하기 쉬우나, 회로 구성을 위한 부품수가 늘어나기 때문에 본 논문에서는 Fig. 6과 같이 등가형으로 PID 제어기를 구현하였다.[4] 식 (5)는 Fig. 6의 PID 제어기의 전달함수를 나타낸다.

$$D(s) = -\left[\left(\frac{R_{c2}}{R_{c1}} + \frac{C_{c1}}{C_{c2}}\right) + R_{c2}C_{c1}s + \frac{\frac{1}{R_{c1}C_{c2}}}{s}\right] \tag{5}$$

저항값과 커패시터값을 구하기 위해, 식 (4)의 형태로 설계된 제어기에 Table 3에서의 PID 제어기의 파라미터를 입력하여, 식 (5)의 형태로 정리하면 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$D(s) = -\left[4.54 + 0.05s + \frac{98.7}{s}\right] \tag{6}$$

Table 3 Parameters for PID controller

K_p	T_I	T_D
4.54 (1.2 T/L)	0.045 (2L)	0.012 (0.5L)

Table 4 Time response parameter data of PID feedback control system

Rise time (s)	Overshoot (%)	Peak time (s)	Settling time (s)
0.02	42.2	0.05	0.56

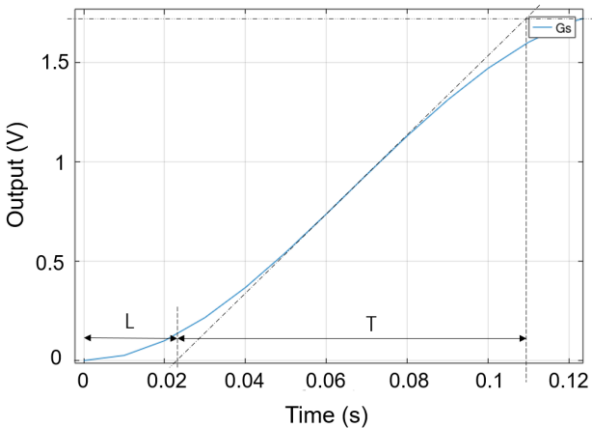


Fig. 3 Step response and parameters for Ziegler-Nichols tunning method

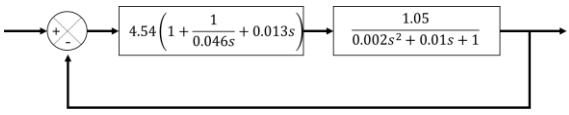


Fig. 4 Block diagram of feedback control system

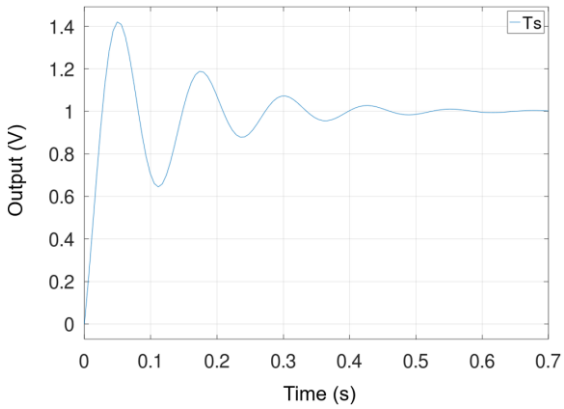


Fig. 5 Step response of PID feedback control system

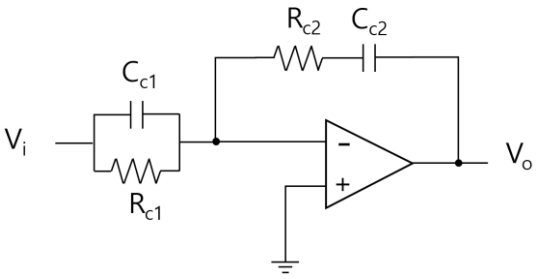


Fig. 6 Circuit for PID controller

Table 5 Values for electrical elements for PID controller

R_{c1}	R_{c2}	C_{c1}	C_{c2}	R
101.32 kΩ	277.3 kΩ (182.7 kΩ)	0.18 μF (0.27 μF)	0.1 μF	10 kΩ

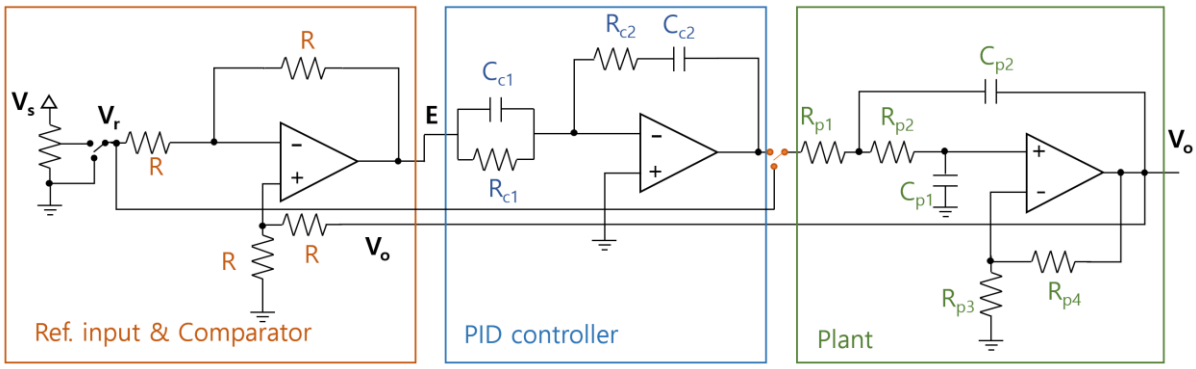


Fig. 7 Circuit for feedback control system with PID controller

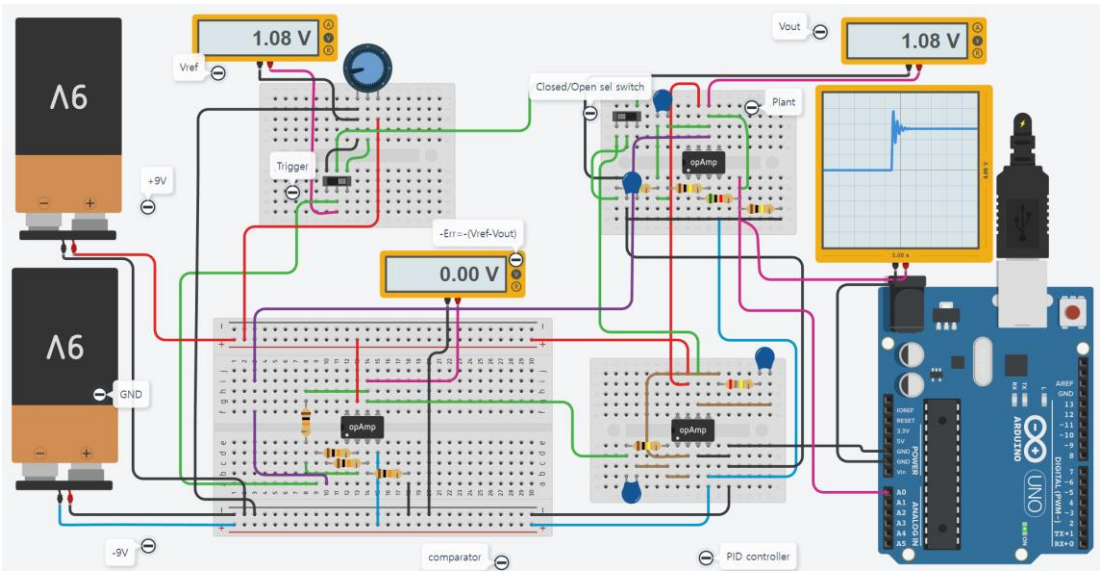


Fig. 8 Feedback control system with PID controller generated by Tinkercad circuits

식 (5)와 식 (6)의 계수를 비교하여, 제어기를 구성하는 저항과 커패시터의 값을 정할 수 있는데, 다양한 값이 존재하는 저항과 달리 커패시터는 종류가 다양하지 못하기 때문에 커패시터(C_{c2})를 가장 쉽게 구할 수 있는 0.1μF로 정한 후에, 세 번째 항의 계수 비교를 통해 저항 R_{c1}의 값을 구한다. 그리고, 나머지 소자 R_{c2}와 C_{c1}은 식 (5)와 식 (6)의 첫 번째 항과 두 번째 항을 이용하여 정리하면, 각각 2차 방정식으로 정리가 되어, 값이 두 개씩 얻어진다. 최종적으로 계산된 소자값은 Table 5에 정리하였다. R_{c2}와 C_{c1}은 두 개의 값 중 하나를 선택하면 된다. (예: R_{c2}: 277.3kΩ, C_{c1} : 0.18 μF 또는 R_{c2}: 182.7kΩ, C_{c1} : 0.27 μF) 플랜트와 설계된 제어기를 포함한 폐루프 제어시스템에서 오차를 구하기 위한 차동 증폭기가 필요하며, 본 연구에서는 Fig. 7과 같이 이득인 1인 차동 증폭기를 설계하였다. (R: 10 kΩ)

설계된 제어시스템을 실제 구현하기에 앞서 Tinkercad circuits을 이용하여, 모의실험을 수행하였다. Fig. 8은 구현된 제어시스템의 회로를 나타내는데, 다음 링크에서 복사가 가능하다(https://url.kr/1oerh2). 제

어시스템 회로는 기본적으로 Fig. 7의 회로도를 기반으로 제작하여, 기준입력을 생성하는 회로, 오차를 구하는 회로, PID 제어기 회로, 플랜트 회로로 구성되어 있다. 계단입력을 생성시키기 위하여 trigger 스위치를 적용하였으며, closed/open loop 선택 스위치를 두어 개루프 제어와 폐루프 제어의 결과값을 따로 확인할 수 있도록 하였다. 제어 결과는 Tinkercad circuits 내의 오실로스코프와 멀티미터로 확인이 가능하며, 가상 아두이노 우노 보드를 활용하여 Tinkercad circuits 내의 시리얼 모니터링 창에서도 확인이 가능하도록 하였다. 그런데, Tinkercad circuits의 시리얼 모니터는 결과를 출력하는 용량에 한계가 있어서, 설정 시간에 맞추어 100개의 데이터가 분리되어 출력되는 방법으로 아두이노 코드를 작성하여, 여러 번의 반복실험으로 계단응답 전구 간의 출력값을 측정하였다. 앞서 공개된 링크에서 코드메뉴에서 아두이노 코드를 확인할 수 있다.

Fig. 9에 모의실험을 통해 얻은 개루프 및 폐루프 제어 결과를 Otave를 이용하여 얻은 결과와 함께 나타내었는데, 개루프 제어 결과 대비 폐루프 제어 결과가 향상된 것도 모의실험을 통해서 확인할 수 있었다. 그리고 두 소프트웨어로 얻은 결과가 거의 동일하게 나타나서 Tinkercad circuits를 제어시스템의 설계 및 해석에도 충분히 활용 가능함을 확인하였다.

3.2 실험

앞서 설계된 제어시스템을 회로로 구현하여, 개루프 및 폐루프 제어시스템에 대한 계단응답을 구하였다. Fig. 10은 구현된 제어시스템을 나타내는데, 회로의 주요부분을 색깔로 분리 표시하였다. 저항과 커패시터는 설계치(R_{c1}: 101.32kΩ, R_{c2}: 182.7kΩ, C_{c1} : 0.27μF, C_{c2} : 0.1μF)에 정확히 맞는 소자들이 존재하지 않아서, 소자의 직렬 또는 병렬 결합을 통한 합성으로 최대한 비슷한 값을 가지도록 하여 대부분 1% 이하의 오차를 가지도록 하였으나, C_{c1}는 합성의 한계로 인해서 설계치보다 약 10% 작은 값(0.24uF)으로 구현되었다. 이 오차의 영향을 알아보기 위해, 오차를 반영한 PID 제어기의 전달함수를 다시 정리하면 식 (7)과 같이 되는데, 비례이득과 미분이득이 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 계산을 통해서 비례이득과 미분이득이 설계치에 비해서 각각 6%, 10% 줄어드는 것으로 확인되었다. 10% 이하의 오차는 통상적으로 받아들일 수 있는 수준이지만, 계단응답에 있어 설계치로부터 얻은 이론적인 응답과는 차이가 있을 것으로 예상되어 실제 회로를 통한 실험을 통해서 그 영향을 파악하도록 하였다.

$$D(s) = -\left[\left(\frac{R_2}{R_1} + \frac{0.9C_1}{C_2}\right) + R_2 \cdot 0.9C_1\, s + \frac{\frac{1}{R_1C_2}}{s}\right] \tag{7}$$

전원은 9V 건전지 두 개를 직렬로 연결하여, 중간탭을 그라운드로 설정하여 ±9V의 양전원을 공급하였다. 실험 결과는 아두이노 우노보드의 ADC(Analog to Digital Converter)를 이용하여 1kHz의 속도로 측정하였는데, Tinkercad circuits에서와는 달리 타이머 인터럽트를 사용할 수 있기 때문에 더욱 정확한 측정주기로 데이터를 측정할 수 있고, 아두이노 우노보드의 기본 세팅에서 ADC의 최대 속도는 단일 채널에 대해서 약 9.6kHz이기 때문에 더욱 높은 측정 속도를 구현할 수도 있다. 실험을 위한 아두이노 코드는 부록에 수록하였다.

Fig. 11(a)은 개루프 및 폐루프 제어 시스템에서의 계단응답을 나타내는데, Table 6에 정리된 것처럼 전반적으로 폐루프 제어시스템의 성능이 시간성능 50% 향상의 설계 목표에 맞춰 성능이 개선된 것을 확인할 있다. 정상상태오차도 줄어들었으나, 이론과 달리 작은 값이 존재하는 것으로 나타나는데, 이것은 신호 측정에 사용된 아두이노 우노의 ADC의 분해능(10bit) 한계로 인해 발생하는 측정 오차로 분석된다. 그리고, 앞서 제어기의 이론모델과 실제모델의 차이의 영향을 비교하기 위해 Fig. 11(b)에 Octave에서 구한 폐루프 제어시스템의 응답과 실험을 통해 구한 응답을 나타내었다. 실험치가 이론치에 비해 전체적으로 응답속도가 느리고 오버슛은 작게 나타나는데, 응답속도의 차이는 실험에서의 기준입력이 Octave에서 사용되는 계단응답과 같이 이상적인 계단입력의 형태로 구현되지 못했기 때문에 나타나는 것으로 분석되었다. 이는 Otave에서의 응답과 달리, 실험에서 얻은 계단응답의 진동주기가 기준입력의 진동주기와 일치하는 것으로도 확인되는데, 이는 곧 제어기가 기준입력을 충실히 추종하고 있음을 반증하기도 한다. 오버슛이 작게 발생하는 것은 기준입력의 상승구간에서의 최종값과 기준입력의 최종값과의 차이

Table 6 Time response parameter data of open and closed loop control systems obtained by experiment

	Rise time (s)	Overshoot (%)	Peak time (s)	Settling time (s)	Steady state error
Open	0.056	56.8	0.143	1.906	0.041
Closed	0.026	45.2	0.062	0.792	0.003

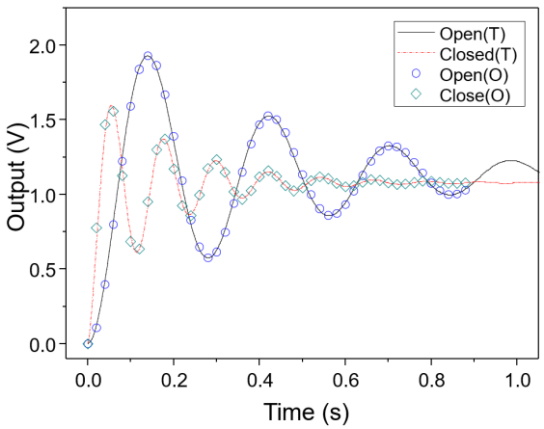


Fig. 9 Step responses for open and closed loop control system obtained by Tinkercad circuits and Octave

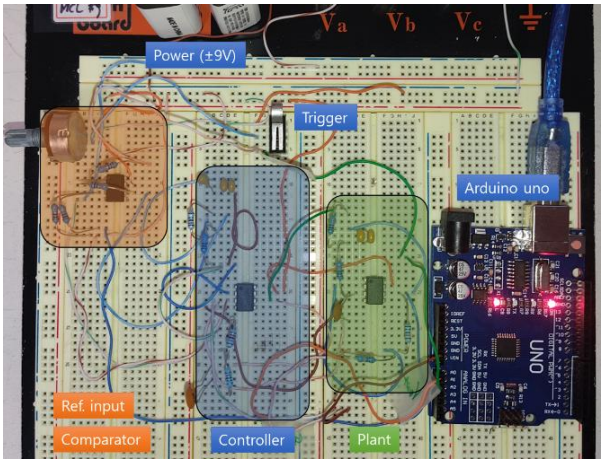


Fig. 10 Implemented control system

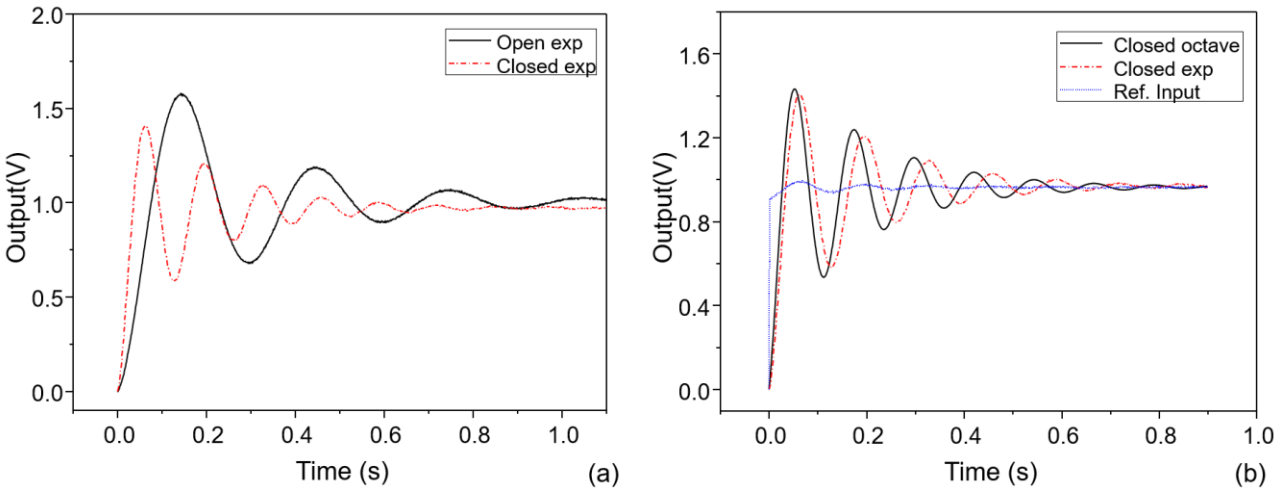


Fig. 11 (a) Step response of open and closed loop control systems; (b) reference input and step responses of closed loop control systems

로 인한 것으로 파악되는데, 결국 실험에서의 기준입력의 크기가 이론치보다 작게 인가되었기 때문에 그래프상에서도 오버슈트가 작게 나타난 것이다. Table 6의 실험 결과에서도 이론값 대비 낮은 성능을 나타내는 것을 확인할 수 있는데, 이 또한 기준입력의 한계로 인한 것임을 확인할 수 있다. 이와 같이 기준입력의 한계로 인한 영향이 응답에 지배적이었기 때문에 제어기의 이론모델과 실제모델의 차이는 응답에 큰 영향을 끼치지 못한 것으로 분석되었다.

4. 결 론

본 연구에서는 올바른 오픈소스 및 프리 소프트웨어의 활용과 이해도를 높이기 위한 일환으로 대학교 학부 수준에서 배우는 제어이론을 바탕으로 제어기의 설계와 구현을 오픈소스 및 프리 소프트웨어로 실시하였다. PID제어기를 Ziegler-Nichols 방법을 이용하여 설계하였으며, 오픈소스 소프트웨어인 Octave를

이용하여, 개루프 및 폐루프 제어기의 성능을 비교하였다. 그리고 설계된 제어시스템의 구현에 앞서 웹 기반 프리 소프트웨어인 Tinkercad circuits를 이용하여 제어모델 생성 및 실험을 실시하여 제어시스템과 Tinkercad circuits의 유효성을 확인하고, 최종적으로 제어시스템을 회로로 구현하였다.

본 논문을 통해서 학습자는 특별한 도구없이 오픈 소스 및 프리 소프트웨어만을 이용하여 제어이론을 적용하고, 실제 제어시스템도 구축이 가능하기 때문에 제어이론 학습에 큰 도움을 줄 것으로 기대된다. 비록, 본 연구에서는 가장 기초적인 제어기 설계법인 Ziegler-Nichols 방법을 이용하여 PID 제어기만을 설계하였지만, 향후 추가적인 연구를 통해 주파수응답법을 기반한 제어기 및 보상기의 설계를 오픈소스 및 프리 소프트웨어를 이용하여 실시할 것이며, 회로를 기반한 아날로그 제어시스템의 구현뿐만 아니라, 오픈 소스 하드웨어를 이용한 디지털 제어시스템의 구현도 함께 진행할 예정이다.

후 기

이 논문은 2022 학년도 안동대학교 학술연구조성비에 의하여 연구되었음.

참고문헌
(References)

(1) Wikipedia, *Open-source Software* (https://en.wikipedia.org/wiki/Open-source_software), Wikipedis Foundation, Accessed on February 4, 2023.
(2) Autodesk, Inc., *Autodesk Instructables* (https://instructables.com), Accessed on July 3, 2023.
(3) Github, Inc., https://github.com, Accessed on July 4, 2023.
(4) Lee, S. H., 2022, “Kinematic Analysis and Development of Robot Simulator for Open-Source Six-Degree-of-Freedom Robot Arm,” *J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng.*, Vol. 31, No. 5, pp. 338~346.
(5) HardwareX, https://www.sciencedirect.com/journal/hardwarex, Accessed on July 3, 2023.
(6) Franklin, G. F., Powell, J. D. and Emami-Naeini, A., 2022, *Feedback Control of Dynamic Systems*, Pearson, New York, USA.
(7) Nise, N. S., 2019, *Control Systems Engineering*, Wiley, New Jersey, USA.
(8) Ogata, K., 2009, *Modern Control Engineering*, Pearson, New York, USA.
(9) The MathWorks, Inc., https://www.mathworks.com, Accessed on January 3, 2023.
(10) Eaton, J. W., *GNU Octave* (https://octave.org), Accessed on January 3, 2023.
(11) Scilab, https://www.scilab.org, Accessed on January 3, 2023.
(12) Autodesk, Inc., *Autodesk Tinkercad Circuits* (https://www.tinkercad.com/circuits), Accessed on January 3, 2023.
(13) Texas Instrument, 2002, *Analysis of the Sallen-Key Architecture: Application Report*, Texas Instruments.

부 록

1. Octave code for simulation

```
pkg load control
t=0:0.01:3;
s=tf('s');
%Plant parameters
C1=100e-9;C2=2e-6;
R1=100e3;R2=R1;
R3=100e3;R4=5e3;
K=1+(R4/R3)
%Plant model
Gs=K/((R1*R2*C1*C2)*s^2+(R1*C1+R2*C1+R1*C2*(1-K))*s+1)
figure(1);step(Gs,t) % step response of open loop control
figure(2);rlocus(Gs) % Root locus
% PID controller model
```

```
Rc2=182.7e3;Rc1=101.32e3;Cc1=0.27e-6;Cc2=0.1e-6;
Ds=(Rc2/Rc1 +Cc1/Cc2) + Rc2*Cc1*s …
+(1/(Rc1*Cc2))/s; % Feedback control system model
Ts=feedback(Ds*Gs,1,-1)
figure(3);step(Ts) % step response of feedback control
```

2. Arduino code for data acquisition during experiment with implemented circuit

```
#include <TimerOne.h>
volatile int adc_value, flag=0;
char in_data; long int i=0;
void setup(){
   Serial.begin(115200);    Timer1.initialize(1000);
   Timer1.attachInterrupt(timerIsr);}
void loop()
{    while(Serial.available())    {
       in_data = Serial.read();
       if(in_data=='s') {
while(i<3000) {
             if(flag) {
                  Serial.println(adc_value);
                  flag=0;
                  i++;}          } }
else ;    }}
void timerIsr()
{    adc_value=analogRead(0);    //output
   //adc_value=analogRead(1); //ref. input
   flag=1;}
```

<응용기술논문> DOI http://dx.doi.org/10.3795/KSME-C.2023.11.2.147 ISSN 2288-3991(Online)

지지격자의 비탄성 특성을 적용한 핵연료집합체 내진해석

임혜진*† ·문종성*·박남규**·김태순***
*한국전력기술(주) , **한전원자력연료(주) , ***한국수력원자력

Seismic Analysis for Fuel Assembly using Inelastic Properties of Spacer Grid

Hye-Jin Lim*† , Jong-Sung Moon*, Nam-Gyu Park** and Tae-Soon Kim***
* NSSS Division, KEPCO E&C, ** R&D Center, KEPCO Nuclear Fuel,
*** Central Research Institute, Korea Hydro & Nuclear Power Co.

(Received February 27, 2023 ; Revised May 24, 2023 ; Accepted July 10, 2023)

Key Words: Inelastic Property(비탄성 특성), Fuel Assembly(핵연료집합체), Seismic Analysis(내진해석), Residual Strain(잔류변형)

초록: 핵연료집합체 지지격자는 핵연료집합체를 지지하고, 냉각을 위해 연료봉 사이 간격이 확보되도록 설치된다. 지진으로 인해 핵연료집합체가 충돌하여 지지격자에 항복점을 초과하는 큰 충격하중이 작용하면, 지지격자가 소성 변형하여 기능을 상실할 수 있으므로 내진해석을 통해 지지격자의 건전성을 확인한다. 일반적인 탄성 해석과 달리 비탄성 해석은 구조물이 항복점을 초과하는 외력을 받았을 때 잔류변형이 남으므로 계산이 복잡하지만, 실제와 유사한 부재의 거동을 모사하므로 설계 여유도를 추가로 확보할 수 있다. 본 논문에서는 지지격자의 비선형 및 비탄성 특성이 핵연료집합체 내진해석에 미치는 영향을 상용 전산프로그램 ANSYS LS-DYNA를 이용하여 연구하였다.

Abstract: Spacer grids are installed to provide support for each fuel assembly and to maintain gaps between rods for effective cooling. However, during seismic events, the spacer grids may deform plastically and lose their functionality due to collisions and the impact forces exceeding the yield point. Thus, it is essential to confirm their integrity. In seismic events beyond design base, the resulting deformation may not elastically restored, and residual strain remains. This paper investigates the effects of nonlinearity and inelastic properties of spacer grids on the seismic analysis of fuel assemblies using ANSYS LS-DYNA.

1. 서 론

지진하중은 지반을 통해 원자로건물 및 원자로냉각재계통을 가진하고, 원자로내부구조물 및 핵연료집합체로 전달된다. 지진에 의한 핵연료집합체 응답을 구하기 위해서는 원자로냉각재계통 내진해석에서 계산된 원자로용기 시간이력으로 원자로내부구조물 내진해석을 수행하고[1], 그 결과로 얻는 핵연료집합체 주변 부품의 거동을 입력 하중으로 적용하여 핵연료집합체 내진해석을 수행한다.

핵연료집합체 탄성 특성을 적용한 APR1400 내진해석 모델은 Fig. 1과 같다.[2] 해석 모델은 인접 구조물과의 상호작용을 고려하기 위해 한 방향으로 늘어선 핵연료집합체와 노심슈라우드(core shroud)를 포함하고, 각 핵연료집합체는 상부의 핵연료정렬판(fuel alignment plate)과 하부의 노심지지판(core support plate)으로 지지된다. 외부 가진은 상하부의 핵연료정렬판과 노심지지판 및 측면의 노심슈라우드를 통해 전달된다. 핵연료집합체는 주위 구조물과 작은 간격을 두고 배치되어 있으므로 지진에 의해 진동할 때 인접하는 핵연료집합체나 노심슈라우드에 충돌할 수 있다. 핵연료집합체의 충돌은 가장 외부로 돌출된

† Corresponding Author, jin@kepco-enc.com
© 2023 The Korean Society of Mechanical Engineers

지지격자에서 발생하며, 양쪽에서 큰 외력을 받을 때 지지격자의 비탄성적 좌굴이 발생할 수 있다. Fig. 2에서[2] 보여주듯이 지지격자는 연료봉과 제어봉 안내관의 조립을 도와주고 연료봉 사이의 간격을 유지하므로, 지지격자의 비탄성 변형은 노심 냉각을 어렵게 할 뿐만 아니라 제어봉 삽입성에 영향을 줄 수 있다.[3]

본 논문의 목적은 지지격자의 하중-변위 특성으로 기존의 선형 특성 대신 비선형 특성을 적용하였을 때 핵연료집합체 내진해석에 미치는 영향을 연구하고, 지지격자 비탄성 특성을 적용했을 때 지진하중이 가해지는 전체 시간 동안 누적되는 잔류변형량을 계산하는 것이다. 국내 원전의 핵연료집합체 내진해석은 전산프로그램 CESHOCK을 이용하지만, 최신 해석기법 적용 등의 한계로 인해 상용 전산프로그램인 ANSYS LS-DYNA를 이용하였다.[4,5] 이때 APR1400 원전의 설계기준지진에 의해서는 지지격자의 좌굴이 발생하지 않으므로 본 논문을 위해 지진하중의 크기를 두 배 증가시켜 연구하였다.

2. 지지격자의 비선형 탄성 특성 적용

핵연료집합체 지지격자는 정적 시험을 통해 강성이 정해지고 동적 시험으로 좌굴강도가 정해진다. 정적 시험을 통한 하중-변위 곡선은 Fig. 3의 (c)와 같으며, 탄성 해석에서는 k_2 강성만 사용하여 해석한다. 핵연료집합체 선형 탄성 해석은 Fig. 3의 (a)와 같이 지지격자의 강성이 하중에 따라 일정하여 실제로 지지격자가 비탄성 변형을 유발하는 큰 하중을 받더라도 해석상 선형 탄성 변화하는 것으로 간주하고, 해석 결과로부터 충격하중의 크기를 분석하여 지지격자의 좌굴 및 소성 여부를 판단한다. 반면 비탄성 해석은 지지격자의 강성이 Fig. 3의 (d)와 같이 하중에 따라 변화하고 항복점 이상의 하중을 받으면 그 하중을 제거하더라도 원래 상태로 복원되지 않는 잔류변형을 고려한다. 지지격자의 비탄성 특성 적용에 앞서, 실제 시험에서 얻은 지지격자의 비선형 강성을 Fig. 3의 (b)~(d)와 같이 단계별로 적용한 탄성 내진해석 결과를 Table 1에 정리하였다. Table 1의 해석 조건은 핵연료 종류 및 가진 방향(East-West, North-South)에 따라 조합하여 case 1~case 4로 나뉜다.

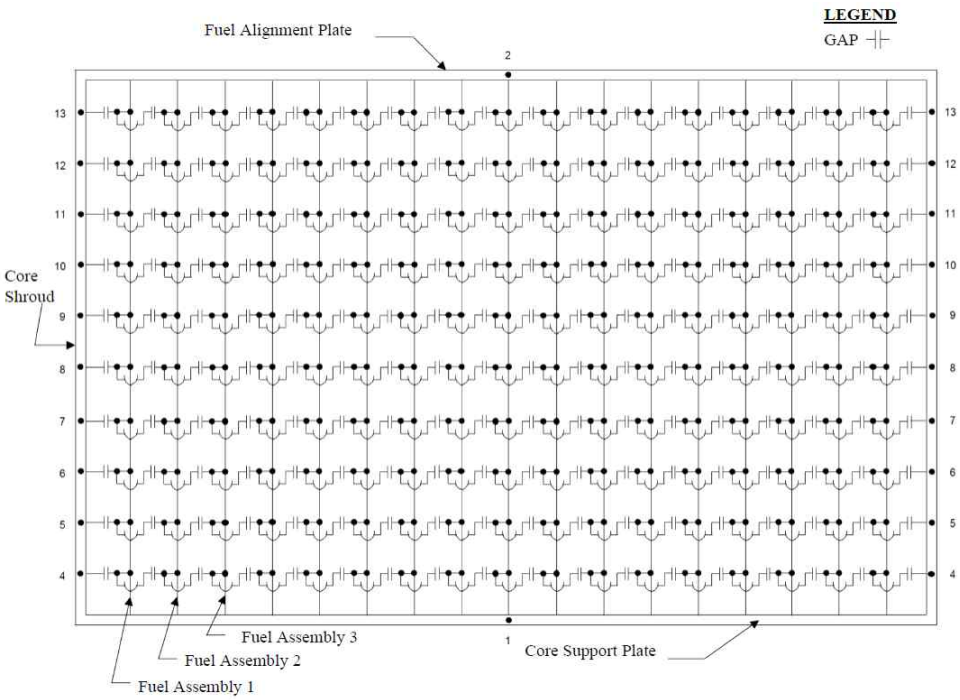


Fig. 1 Detailed core model (17 fuel assemblies)

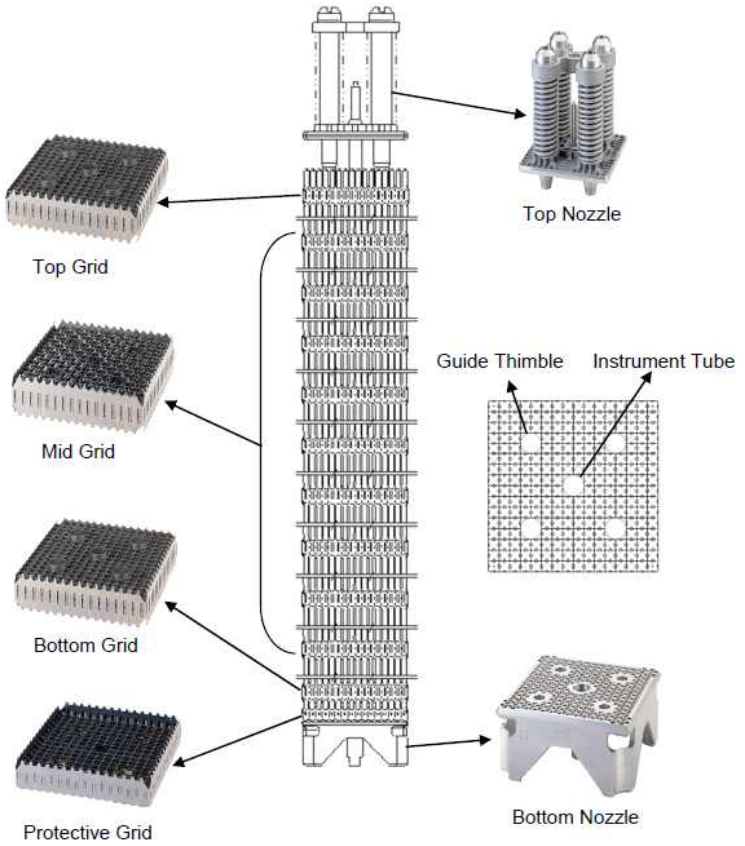
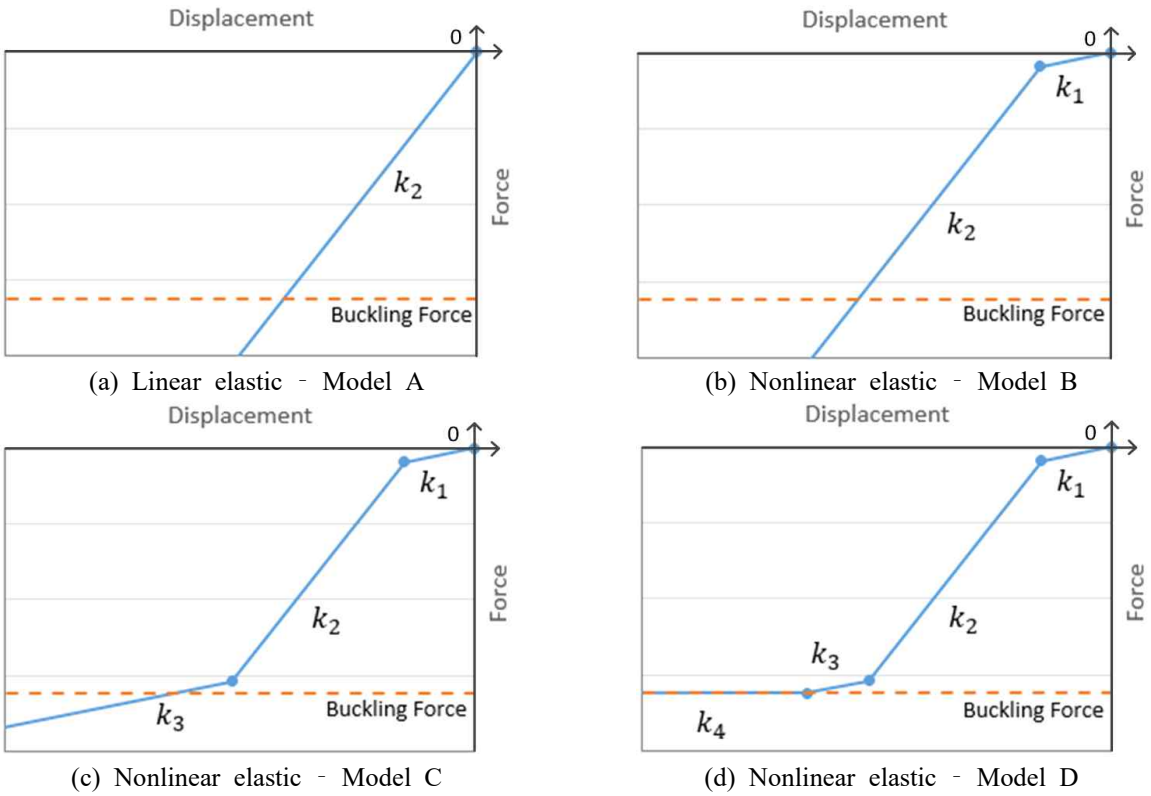


Fig. 2 Structural schematic for the APR1400 fuel assembly



(a) Linear elastic - Model A (b) Nonlinear elastic - Model B

(c) Nonlinear elastic - Model C (d) Nonlinear elastic - Model D

Fig. 3 Stiffness of spacer grid

Fig. 3의 (b)와 같이 k_1과 k_2만 사용하여 충돌 직후의 초기 비선형 강성을 적용한 2단 비선형 탄성의 해석 결과를 보면, 지지격자 충격하중은 약간 감소하고 핵연료집합체 변위가 증가한다. 충돌 직후 짧은 변위 구간의 작은 강성으로 인해 부재가 흡수하는 에너지가 적어 짧은 변위 구간은 핵연료집합체 사이의 간극 역할을 하게 되고, 작은 간극이 17개의 핵연료집합체에서 누적되어 최대 변위가 증가한 것으로 분석하였다. Fig. 4가 보여주듯이 변위가 증가한 부분은 핵연료집합체의 중심뿐이며 상, 하부의 변위는 탄성 해석과 동일하므로 양 끝단에서 최댓값이 발생하는 굽힘 모멘트와 전단력은 탄성 해석 대비 큰 차이가 없는 것을 확인하였다.

Fig. 3의 (c)와 같이 k_1, k_2 및 k_3를 사용하여 3단 비선형 강성을 적용하면 충격하중이 탄성 해석 대비 15% 이상 감소한다. 이것은 좌굴 직전의 작은 강성으로 인해 충돌에너지가 많이 흡수되었기 때문이다. 지지격자의 충격하중이 좌굴하중(buckling force)을 크게 넘지 않는다면, k_3 강성을 적용함으로써 충격하중을 좌굴하중 이하로 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다. Fig. 3의 (d)와 같이 k_1~k_4를 모두 사용한 4단 비선형 탄성 해석의 경우, 해석 조건에 따라 k_4의 영향이 다르다는 것을 알 수 있다. k_3 강성과 k_4의 강성의 차이가 클수록 k_4 강성으로 인한 에너지 흡수가 많아지므로 충격하중이 많이 감소하며, 3단 비선형 탄성 해석 조건에서 충격하중 크기가 좌굴하중보다 클수록 4단 비선형 탄성 해석 조건에서 충격하중이 많이 감소하는 것을 확인하였다.

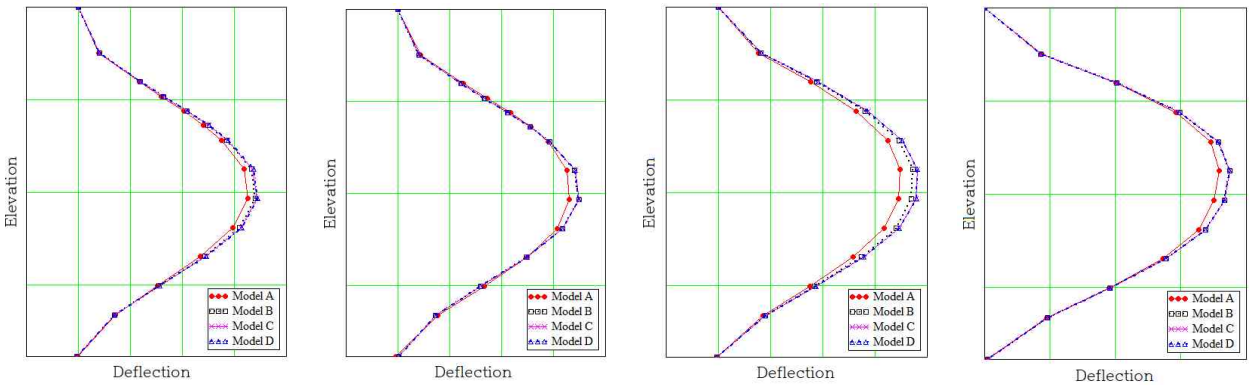
Table 2는 각 비선형 단계별로 좌굴이 발생하는 지지격자의 개수를 나타낸다. 지지격자 강성의 비선형성이 추가됨에 따라 소산되는 에너지가 증가하고, 인접 핵연료집합체 지지격자로 전달하는 충격에너지가 줄어들어 좌굴되는 지지격자의 개수가 감소하였다.

Table 1 Percent of nonlinear elastic analysis results to elastic analysis results

Analysis results	Case	Nonlinear Elastic		
		Model B	Model C	Model D
Impact force (%)	Case 1	2	-28	-38
	Case 2	-3	-15	-16
	Case 3	-3	-38	-40
	Case 4	-4	-28	-29
Displacement (%)	Case 1	5	5	6
	Case 2	6	6	6
	Case 3	7	10	10
	Case 4	5	5	5
Bending moment (%)	Case 1	0	3	2
	Case 2	0	0	0
	Case 3	0	4	4
	Case 4	1	1	1
Shear force (%)	Case 1	2	0	-1
	Case 2	-1	-1	-1
	Case 3	-2	3	3
	Case 4	-2	-2	-2

Table 2 The number of buckled grids

Case	Linear Elastic	Nonlinear Elastic		
	Model A	Model B	Model C	Model D
Case 1 (EA)	45	44	12	11
Case 2 (EA)	17	11	1	1
Case 3 (EA)	55	54	29	26
Case 4 (EA)	61	48	18	17



(a) Case 1 (b) Case 2 (c) Case 3 (d) Case 4

Fig. 4 Deflected shape of fuel assembly for nonlinear analysis

3. 지지격자의 비탄성 해석 모델 및 결과

선형 해석은 하중 크기와 무관하게 인접 핵연료집합체 지지격자에 충격하중이 그대로 전달되지만, 비선형 해석은 지지격자의 비탄성 변형이 발생할 때 충격에너지가 소산되므로 인접 핵연료집합체 지지격자로 전달되는 충격하중의 크기가 감소한다. 따라서 좌굴되는 지지격자 개수가 선형 해석에 비해 상대적으로 감소하여 동일한 하중조건에서 노심 냉각 성능이 건전하게 유지되는 결과를 보여줄 수 있으며, 이것은 앞서 비선형 탄성 강성을 적용한 해석에서도 확인한 바 있다. 여기에 추가로 비탄성 해석은 다수의 충격으로 인한 지지격자의 잔류변형이 누적되는 것을 계산하므로 최종 잔류변형량을 계산하여 제어봉 삽입을 위한 제어봉 안내관의 변형 예측에 사용할 수 있다.

지지격자의 비탄성 특성을 완벽히 구현하기 위해서는 하중 제거 시의 하중-변위 곡선이 필요하지만, 이러한 특성은 기존 시험을 통해서 구하기 어렵다. 따라서 별도의 동적 시험에서 최대 변형과 잔류변형량의 관계를 측정하여 해석 모델이 시험과 같은 최대 변형과 잔류변형량과의 관계를 갖도록 구현하였다. Fig. 5는 시험을 통해 얻은 지지격자의 최대 변형과 잔류변형량의 관계를 보여준다. 하중에 따른 변형과 변형에 따른 잔류변형량을 포함하여 나타낸 지지격자의 비탄성 특성은 Fig. 6과 같다.

ANSYS LS-DYNA의 요소 가운데 비선형 탄성(nonlinear elastic) 요소를 사용하면 비선형 탄성 또는 다중 선형 특성을 구현할 수 있다. 그러나 비선형 탄성 요소는 탄성으로 복원되며 잔류변형을 모사할 수 없으므로, 잔류변형량 계산을 위한 별도의 요소가 필요하다. ANSYS LS-DYNA의 요소 중 탄소성(elastoplastic) 요소를 사용하면 소성과 잔류변형을 구현할 수 있으나 다중 선형 특성을 구현할 수 없다. 따라서 비선형 특성과 소성 및 잔류변형을 구현하기 위해 비선형 탄성 요소와 탄소성 요소를 조합하는 복합요소를 Fig. 7의 (a)와 같이 개발하였다. 각 요소가 Fig. 7 (c) 및 (b)의 하중-변위 곡선과 같이 거동함으로써 복합요소의 잔류변형량이 Fig. 5의 시험 값을 포괄하는 것을 확인하였다.

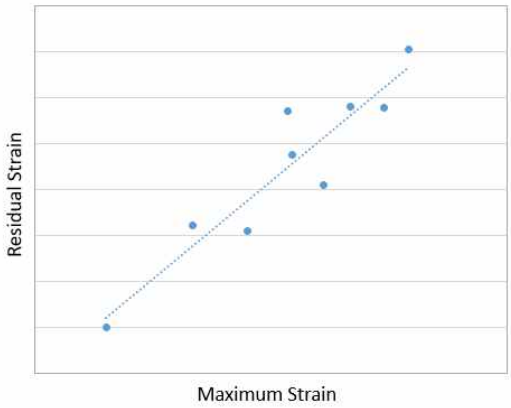


Fig. 5 Residual strain to maximum strain

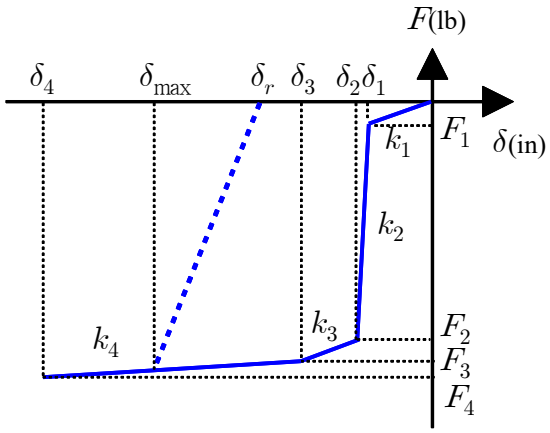
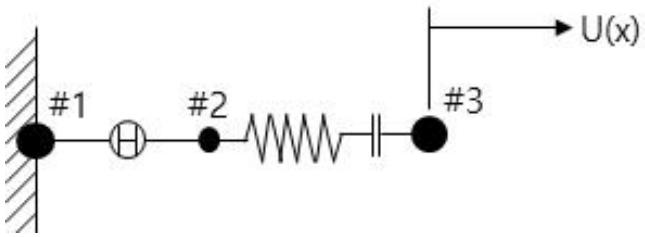
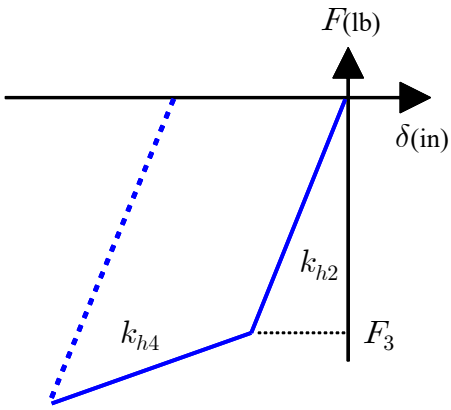


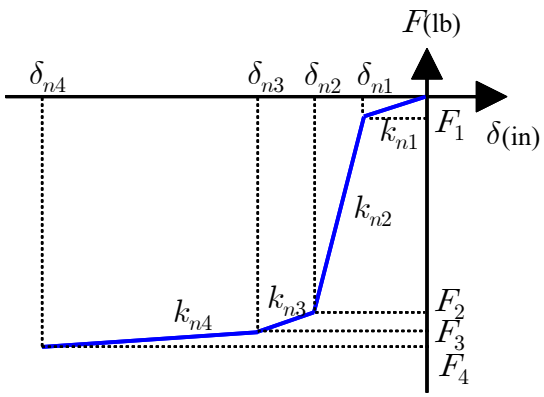
Fig. 6 Inelastic properties of spacer grid



(a) Combined element



(b) Elastoplastic element



(c) Nonlinear elastic element

Fig. 7 Model and properties of combined element

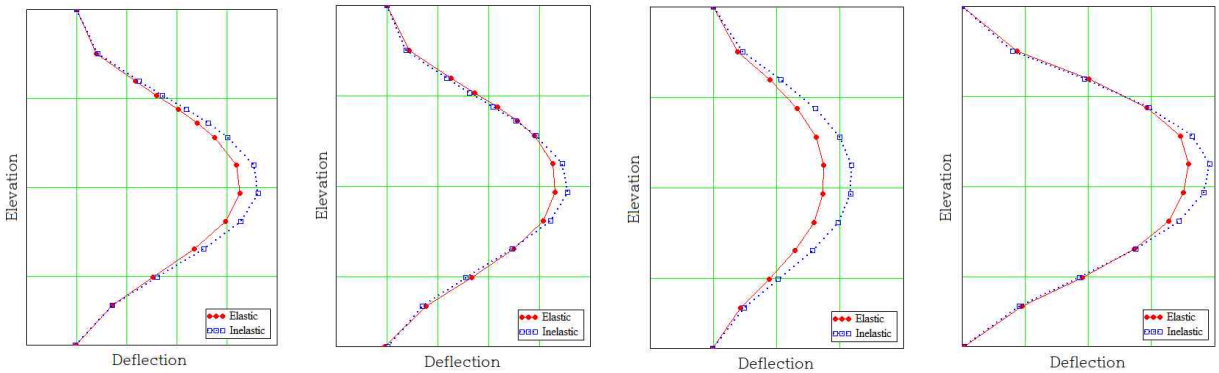
복합요소를 핵연료집합체 내진해석에 적용하여 계산한 지지격자 충격하중 및 변위를 Table 3에 정리하였다. 비탄성 특성 적용으로 인해 탄성 해석 대비 충격하중이 감소하고 변위가 증가하였다. 충격하중 감소 및 변위 증가는 지지격자의 비선형 강성 적용으로 인한 것이지만, 비선형 탄성 해석 결과보다 비탄성 해석에서 변위가 더 증가한 것을 알 수 있다. 이것은 탄성 해석에서 하중을 제거하면 회귀하는 변위의 특성이 비탄성 해석에서는 잔류변형으로 남기 때문에 변위가 누적되는 것에서 기인한다. 비선형 탄성 해석과 마찬가지로 주로 변형이 증가하는 곳은 핵연료집합체의 중간 높이인 것을 Fig. 8을 통해 확인할 수 있다.

Table 3 Percent of inelastic analysis results to elastic analysis results

Analysis results	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Impact force (%)	-38	-16	-40	-29
Displacement (%)	11	8	25	9
Bending moment (%)	-1	0	-5	-5
Shear force (%)	-1	0	-11	-9

Table 4 Residual displacement of FA grid

Analysis results	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Residual strain (in)	0.027	0.017	0.048	0.038



(a) Case 1 (b) Case 2 (c) Case 3 (d) Case 4

Fig. 8 Deflected shape of fuel assembly for inelastic analysis

비탄성 특성 적용을 위한 복합요소 중 탄소성 요소를 통해 잔류변형량을 계산할 수 있다. 지진하중이 가해지는 동안 누적되는 지지격자의 잔류변형량을 Table 4에 나타내었으며, 임의의 큰 설계기준 초과지진 하중을 적용했음에도 불구하고 0.1in 미만의 작은 변형임을 확인하였다.

4. 결 론

본 논문은 보다 실제적인 응답을 구하기 위하여 지지격자 비탄성 특성을 적용한 핵연료집합체 내진해석을 상용 전산프로그램 ANSYS LS-DYNA로 수행하였다. 지지격자의 비탄성 특성을 구현하기 위해 탄소성 요소와 비선형 탄성 요소를 조합하는 복합요소를 개발하였고, 비탄성 효과를 확인하기 위해 지지격자의 좌굴이 발생하도록 설계기준 지진하중을 임의로 증가시켜 내진해석을 수행하였다.

먼저, 충돌 직후 및 좌굴 전후 지지격자 강성 변화에 따른 영향을 검토하기 위해 단계별로 비선형 강성을 추가하며 내진해석을 수행하였다. 충돌 직후의 작은 강성으로 인하여 탄성 해석 대비 핵연료집합체 변위가 증가하였고, 좌굴 직전의 지지격자 강성이 작아짐에 따라 충격하중이 감소하였다. 좌굴 직후 지지격자의 강성은 충격하중 감소에 영향을 미치지만, 경우에 따라 다르게 나타나는 것을 확인하였다. 비선형 탄성 요소를 통해 비선형 강성을 적용함으로써 선형 강성을 적용했을 때보다 충격하중이 감소하고, 이에 따라 좌굴이 발생하는 지지격자의 개수가 감소함을 확인하였다.

지지격자 비탄성 특성을 적용한 내진해석을 수행한 결과, 핵연료집합체의 변위가 비선형 강성을 적용한 경우보다 더욱 증가하였다. 누적되는 잔류변형량을 계산한 결과, 임의의 큰 설계기준 초과지진에 대

해 최종 잔류변형은 0.1in 미만의 작은 값임을 확인하였다.

예전과 달리 우리나라 지진은 빈도가 잦아지고 발생 범위가 넓어지고 있다. 핵연료집합체의 건전성은 중요해지고 있으며, 규제요건 또한 강화되고 있다. 이러한 상황에서 핵연료집합체 내진해석에 지지격자 비선형 및 비탄성 특성을 적용한다면, 사실적인 거동 모사를 통해 큰 지진하중 조건에서 과도한 보수성을 줄이고 설계 여유도를 확보하는 효과를 기대할 수 있다. 하지만 앞의 결과가 보여주듯이, 강성 변화로 인해 핵연료집합체의 변형이 증가하기도 하므로 최종적인 핵연료집합체 건전성 평가가 필요하다.[6,7,8]

참고문헌
(References)

(1) Lee, J. W., Moon, J. S., Jheon, J. H., Kim, J. G. and Kim, H. M., 2019, “An Evaluation on the Seismic Performance of Reactor Internals with End-Of-Life Fuel Assembly Condition,” *Proceedings of the KSME Annual Meeting 2019*, pp. 2227~2228.

(2) APR1400-Z-M-NR-14010-NP, 2017, *Structural Analysis of Fuel Assemblies for Seismic and Loss of Coolant Accident Loading*, Korea Electric Power Corporation and Korea Hydro & Nuclear Power Co., Korea.

(3) Kim, T. S., 2022, “Characteristics of Permanent Deformation of Nuclear Fuel Assembly Spacer Grid by Using Buckling Strength Measurement,” *Proceeding of the 2022 KOES Conference*, p. 153.

(4) Livermore Software Technology Corporation (LSTC), 2015, *LS-DYNA Keyword User’s Manual – LS-DYNA R8.0*, LSTC.

(5) Nam, H. S., Kim, T. S., Kim, K. S., Lee, S. S., Lee, M. Y. and Kim, J. K., 2021, “Development of Seismic Analysis Program for Nuclear Fuel Assembly using Commercial FE Program,” *Proccedings of the KSME Annual Meeting 2021*, pp. 1231~1232.

(6) Park, N. G., Suh, J. M. and Jeon, K. L., 2013, “Nuclear Fuel Structural Integrity Test and Seismic Analysis,” *Proceedings of the 2013 KSNVE Conference*, pp. 874~875.

(7) Ha, D. G., Park, N. G., Suh, J. M. and Jeon, K. L., 2011, “Seismic Analysis Procedure and Evaluation of PWR Fuel Assembly,” *Proceedings of the 2011 KSNVE Conference*, pp. 323~324.

(8) Park, N. G., 2012, “핵연료집합체 진동 및 내진 성능 평가,” *Journal of KSNVE*, Vol. 22, No. 2, pp. 15~19 (in Korean).

<응용기술논문> DOI http://dx.doi.org/10.3795/KSME-C.2023.11.2.155 ISSN 2288-3991(Online)

인공 지능 기반의 앉은 자세 모니터링 시스템 설계

김건우*·우재협*·이상현*·주영현*·황희윤**†
* 국립안동대학교 기계설계공학과, **국립안동대학교 기계로봇공학과

Design of Sitting Posture Monitoring System based on Artificial Intelligence

GeonWoo Kim*, Jaehyup Woo*, Sang-hyun Lee*, Young-hyun Joo* and HuiYun Hwang**†
* Dept. of Mechanical Design Eng., Andong National Univ.,
** Dept. of Mechanical Robotics, Andong National Univ.

(Received April 16, 2023 ; Revised June 3, 2023 ; Accepted June 3, 2023)

Key Words: Sitting Posture(앉은 자세), Sensor(센서), Optimization(최적화), Feature Selection(특성 선택), Explainable Artificial Intelligence(설명 가능한 인공 지능)

초록: 본 논문은 총 100여 명의 앉은 자세 데이터를 기반으로 사용자의 앉은 자세를 모니터링하여 분석하고, 그에 따른 분석 결과를 휴대용 스마트 기기를 통해 시각화하여 보여주는 시스템을 제안한다. 총 25개의 압력센서를 사용하여 4가지의 앉은 자세를 분류하였을 때, 정확도가 99.61%로 도출되었다. 이에 센서 개수를 줄이더라도 충분히 높은 정확도를 얻을 수 있을 것으로 판단하였고, 두 가지 특성 선별 과정을 거쳤다. 그 결과, 각각 99.69%, 98.82%의 정확도를 얻을 수 있었으며, 해당 센서 배열을 바탕으로 설명 가능한 인공 지능을 통하여 검증을 진행하였다. 이를 통하여 센서 개수를 줄이는 것에 대하여 설명 가능한 근거를 제시함과 동시에, 보다 효율적인 앉은 자세 모니터링 시스템을 구성하였다.

Abstract: This paper proposes a system that monitors and analyzes a user's sitting posture based on sitting posture data, and visualizes the analysis results through a smart device. Using 25 pressure sensors to classify four different sitting postures, the accuracy was 99.61%. Then, two feature selection processes were performed on the sensor locations, and the accuracy of the sensor arrays was 99.69% and 98.82%. Validation was performed using explainable artificial intelligence. This provides an explanatory rationale for reducing the number of sensors, while configuring a more efficient sitting posture monitoring system.

1. 서 론

최근 COVID_19의 여파로 인해 재택근무와 학업 등 장시간 동안 의자에 앉아 있게 되는 상황에서 바른 앉은 자세는 건강한 생활을 위해서 필수적인 상황이 되었다.[1] 이때, 사람마다 평소 앉는 자세에 따라 각 부위별로 의자에 가해지는 하중의 비율이 미세하게 다를 수 있지만, 엉덩이를 의자 등받이에 최대한 밀착시키고 양발이 땅에 닿은 상태에서 허리를 곧게 편 정자세를 기준으로 하체가 의자와 닿는 면적에 체중의 약 76%, 상체가 의자의 등받이와 닿는 면적에 사용자의 체중의 약 3%가 가해진다는 선행연구[2]의 결과를 토대로, 의자와 하체가 닿는 부분에 압력센서를 배치하여 사용자의 앉은 자세에 따른 하중 정보를 분석하여 모니터링할 수 있는 시스템을 구성하였다. 선행 연구[3]에서의 시스템 성능이 실제로 사람이 사용하는 것임에도 불구하고, 정확도가 부족하다고 판단하여, 본 연구에서는 최대한 정확도가

† Corresponding Author, hyhwang@andong.ac.kr
ⓒ 2023 The Korean Society of Mechanical Engineers

100%에 근접하는 결과를 얻고자 25개의 압력센서로 구성된 앉은 자세 모니터링 시스템을 통하여 사용자의 앉은 자세를 모니터링하고자 하였다. 그 과정에서 특성 선별을 이용하여 사용자의 자세를 결과로 도출하는 데에 있어 불필요하거나, 자세 분석에 부정적 영향을 미치는 위치의 센서를 제거하면서 유의미한 센서들만 배치하여 센서 개수를 줄이고, 센서 배열을 최적화하는 동시에 설명 가능한 인공 지능(XAI: eXplainable Artificial Intelligence)을 통한 검증을 진행함으로써, 보다 적은 수의 센서를 사용하더라도 목표치에 근접하고 신뢰할 수 있는 모니터링 결과를 사용자에게 제공하는 것을 목표로 하였다.

2. 앉은 자세 모니터링 시스템 구성

2.1 하드웨어 설계

앉은 자세 모니터링 시스템은 25개의 압력센서(FSR-402, Interlink Electronics, USA)로부터 얻은 자세 데이터를 MCU(Micro Controller Unit)에서 처리하여 블루투스 모듈을 통해 사용자의 스마트 기기 앱으로 전송할 수 있도록 구성되어 있다. 개인의 몸무게 및 앉은 자세에 따라 압력센서에 가해지는 하중의 크기가 달라질 수 있으며, 이를 고려하여 100kg의 몸무게를 해당 시스템의 최대 가용 무게로 설정하였다. 따라서 저하중 구간에서 하중에 따른 센싱 값의 변동이 크며, 10kg까지의 하중을 측정할 수 있는 FSR-402 압력센서를 사용하였다. 해당 압력센서 25개를 시스템의 정중앙을 기준으로 90mm 간격을 두어 5x5의 형태로 배치하여 Fig. 1과 같이 구성하였다. 이때, 압력센서로부터 얻은 데이터를 처리하기 위해 MCU를 사용하였으며, 부족한 아날로그 핀은 멀티플렉서를 사용하여 해결하였다. 또한 앉은 자세 분석 결과를 사용자에게 무선으로 전달해주기 위해 블루투스 모듈을 통해 MIT App Inventor를 이용하여 만든 앱과 연동하였다. 최종적으로 앉은 자세 모니터링 시스템은 Table 1에 나와 있는 구성 요소들을 사용하여 멀티플렉서를 사용한 경우와 그렇지 않은 경우, 그리고 블루투스 모듈을 연결한 모습을 나타낸 Fig. 2의 회로도와 같이 제작하였다.

Table 1 Specification of the sitting posture monitoring system

Component	Model	Specification
MCU	Arduino Mega	·
Multiplexer	74HC4051	·
Pressure sensor	FSR-402	Available load : 0 kg ~ 10 kg
Bluetooth module	hc-06	Version : Bluetooth 2.0
Battery	Portable battery	Battery capacity : 10,000 mAh

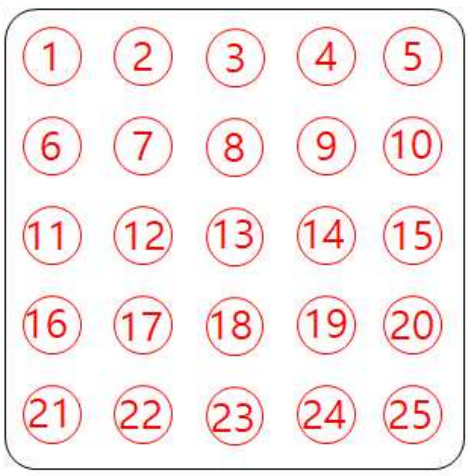


Fig. 1 5x5 type sensor arrangement

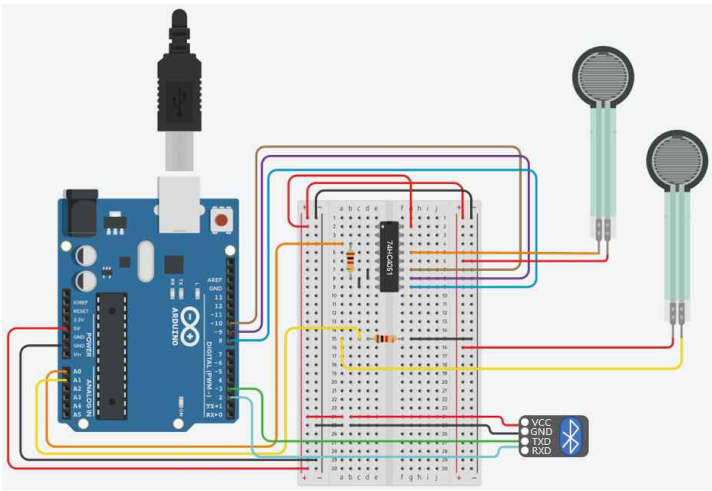


Fig. 2 Sitting posture monitoring system schematic

Table 2 Definition of the 4 postures

Sitting posture	Sitting posture with correct posture.	Sitting posture with left leg crossed	Sitting posture with right leg crossed	Sitting posture in front of a chair
Definition	Keep hips as close to the back of the chair as possible, and keep waist straight with feet in contact with the ground.	In the correct posture, raise left leg over right leg.	In the correct posture, raise right leg over left leg.	The distance between the backrest of the chair and the waist and hip is bigger than half the size of the lower plate of the chair.

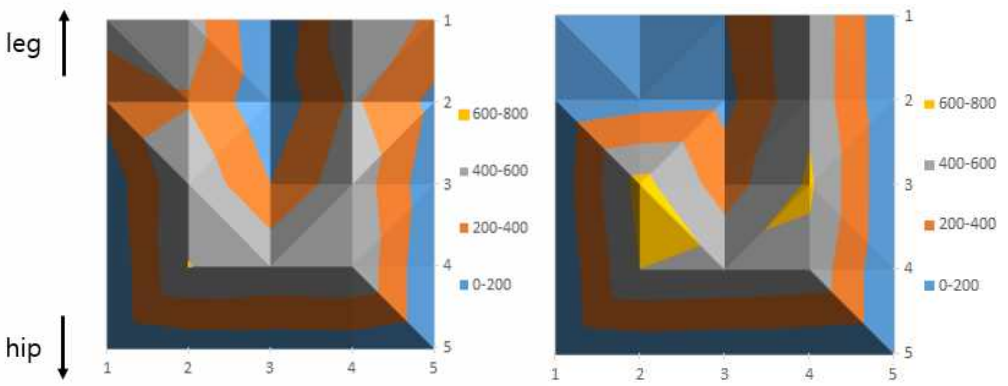
3. 앉은 자세 모니터링 시스템 학습

3.1 데이터 구축

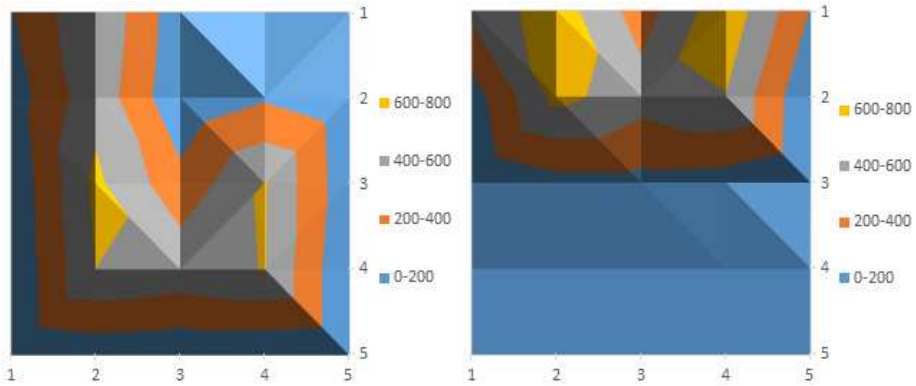
제작한 앉은 자세 모니터링 시스템에서 분류할 자세는 총 4가지로 정자세, 왼쪽 다리를 꼬고 앉은 자세, 오른쪽 다리를 꼬고 앉은 자세, 앞에 걸터앉은 자세를 분류하는 것을 목표로 하였다. 시스템의 데이터 학습을 위해 다양한 연령대의 총 100명을 대상으로 각 자세별로 10초간 착석시켜, 약 11,500여 개의 데이터를 구축하였다. 이때, 정확한 학습을 위해 피실험자들의 자세를 최대한 Table 2에서 제시한 기준에 부합하도록 자세를 교정하여 측정하였다.

3.2 앉은 자세 예측 모델

앉은 자세 모니터링 시스템은 사용자의 착석을 시작으로 압력센서에 가해진 하중 정보를 머신러닝 모델에서 구한 가중치와 편향을 통하여 MCU 내에서 자세를 분류하고, 해당 결과를 블루투스 모듈로 사용자의 기기와 무선으로 데이터를 송수신함으로써, 사용자에게 본인의 현재 자세를 앱을 통하여 확인할 수 있도록 구성하였다. Fig. 3은 4가지 자세에 따른 최솟값 0부터 최댓값 1,000까지 센싱된 하중 정보를 그림의 위가 사용자의 무릎 쪽으로, 아래를 허리 쪽으로 설정하여 표면형 차트를 통해 시각화한 것이다. 각 자세마다 반응하는 센서의 위치 및 가해지는 하중 정보가 다른 점을 이용하여 자세를 분류하기 위해 사용한 머신러닝 모델은 SGDClassifier(Stochastic Gradient Descent Classifier)이다. SGDClassifier는 확률적 경사 하강법을 이용한 정규화된 선형 분류 모델로[4], Linear SVM(Linear Support Vector Machine)을 사용하기 위해 loss는 hinge로, penalty는 l2로 설정하였다. 본 시스템에서는 종속변수의 유형이 범주형으로, 분류 모델을 사용하여야 하므로 예측 정도가 높고, 오류 데이터의 영향이 적은 SVM을 모델로 사용하였으며, 이를 평가하는 방법으로 정확도, 정밀도, 재현율, f1-score 등이 존재한다. 그중 모델 정확도는 전체 표본 중 정확히 분류된 표본의 수를 의미하는 지표로, 정확히 분류된 표본의 수를 전체 표본의 수로 나누어 계산할 수 있다. 이때, 모델 정확도는 데이터 세트의 편중을 고려하지 않는다는 결함이 존재하지만, 데이터 수집 과정에서 4가지 자세 모두 유사한 비율의 데이터를 수집하였기 때문에 해당 결함은 충분히 보완 가능하며, 본 모니터링 시스템은 실제로 사람이 사용하고, 그에 따라 정확하게 자세를 판단하는 것이 중요하기 때문에 모델 성능 평가의 기준을 모델 정확도로 설정하였다. 이에 따른 앉은 자세 모니터링 시스템의 모델 정확도는 99.61%로, 최종적으로 정확도가 100%에 근접하는 결과를 얻고자 하는 목표에는 부합하지만, 이전에 과적합을 의심하여 볼 수 있다. 그렇지만 학습에 사용된 데이터의 수가 많다는 점과 25개의 센서를 사용하여 4가지 자세만을 분류



(a) Sitting posture with correct posture (b) Sitting posture with left leg crossed



(c) Sitting posture with right leg crossed (d) Sitting posture in front of a chair

Fig. 3 Load information visualization of the 4 postures

하는 시스템 특성으로 미루어보아 충분히 타당성 있는 결과라고 판단하였다. 이때, 앞서 언급한 시스템 특성상 모델 정확도가 높을수록 성능이 좋다고 할 수 있다. 하지만 해당 모델 정확도가 목표치와 견주어 보았을 때 거의 차이나지 않는 점과 최적화를 통해 정확도를 개선해 볼 수 있는 가능성을 토대로, 적은 수의 센서를 사용한 배열을 통하더라도 사용자가 신뢰할 수 있는 결과를 얻을 수 있다고 판단하여 센서 개수를 줄이고, 배열을 최적화하는 작업을 진행하였다.

4. 앉은 자세 모니터링 시스템 센서 개수 최적화

센서 개수 최적화는 특성 선별을 통하여 진행되었으며, 총 2가지 기법을 사용하여 센서 개수에 따른 모델 정확도를 비교하였다.

4.1 RFE 및 RFECV

RFE(Recursive Feature Elimination)는 원하는 개수의 변수들이 남을 때까지 학습을 반복하고, 그 과정에서 유의미하지 않은 변수들을 제거해 나가는 기법으로, 모든 독립변수를 사용하여 모델을 학습하고, 변수들의 특성 중요도를 계산하여 해당 수치가 낮은 변수들을 단계적으로 제거함으로써 지정한 개수의 변수가 남을 때까지 해당 과정을 반복하게 된다. 이 과정에서 RFE를 실행할 때, 선택할 변수의 개수를 설정해 주어야 하는데, 최적의 변수 개수를 사용자가 임의로 정하기 어려우므로, 이를 해결하기 위해 파생된 기법인 RFECV(Recursive Feature Elimination Cross Validation)를 사용하였다. RFECV는 RFE와 마찬가지로, 낮은 특성 중요도를 갖는 변수들을 제거하는데, 해당 변수들을 제거하고 학습을 진행할 때마다 교차검증(CV: Cross

Validation)을 활용하여 성능을 계산하고, 최적의 변수 개수를 제시한다.[5] 이에 따라, 모델 성능 및 모델 정확도를 비교하였다. Fig. 4는 센서 개수에 따른 모델 정확도를 나타낸 그래프로, 해당 지표에서 눈여겨볼 지점은 센서의 개수가 18개일 때 모델 정확도가 99.69%인 지점으로, 다른 지점들과 비교하여 보았을 때, 모델 정확도가 가장 높은 동시에, 기존 모델 정확도를 상회하는 것을 확인할 수 있다.

4.2 SelectKBest

SelectKBest는 종속변수와 그 외 독립변수들 사이의 상관관계를 계산하여 가장 상관관계가 높은 k의 독립변수를 선정하는 기법이다.[6] 하지만 단일 변수의 성능이 높은 변수들만 모았을 때, 해당 모델의 성능이 반드시 향상된다는 보장은 없다. 따라서 해당 결점을 보완하기 위해 GridseachCV(Gridseach Cross Validation)를 사용하여 사용할 센서의 최소 및 최대 개수 설정을 통해 모델 성능을 비교하여 보고, 그에 따른 모델 정확도를 비교하였다. Fig. 5는 센서 개수에 따른 모델 정확도를 나타낸 그래프로, 센서 개수가 11개인 지점에서 10개인 경우에 비하여 모델 정확도가 약 3.41% 정도 급격하게 좋아진 것을 확인할 수 있으며, 줄어든 센서 개수 대비, 모델 정확도가 상대적으로 높은 12개 지점에서 98.82%의 정확도가 나온 것을 확인할 수 있다.

4.3 최적화 방법에 따른 정확도 비교

Fig. 6은 25개 센서를 모두 사용하였을 때의 모델 정확도와 최종적으로 특성 선별을 진행한 2가지 센서 배열의 센서 개수에 따른 모델 정확도를 모두 비교한 그래프로, 25개를 모두 사용하여 앉은 자세를 분석한 결과의 모델 정확도가 99.61%인 것에 비하여, RFECV는 99.69%, SelectKBest는 98.82%인 것을 통하여 특성 선별을 진행하여 센서 사용 개수를 대폭 줄였음에도 불구하고, 기존 모델 정확도와 크게 차이 나지 않음을 확인할 수 있다.

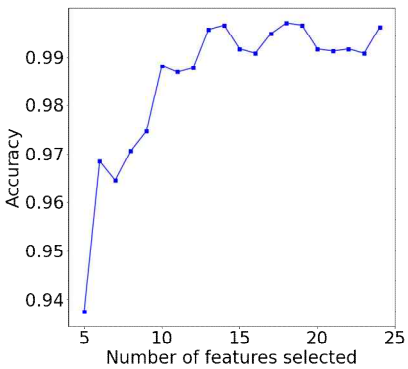


Fig. 4 Graph of the model accuracy with RFECV

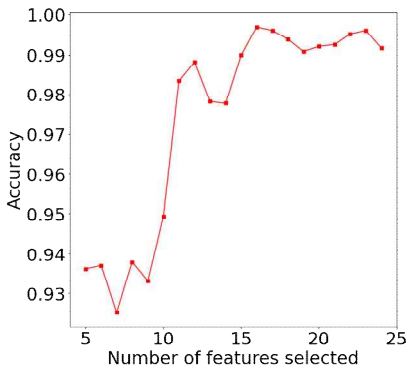
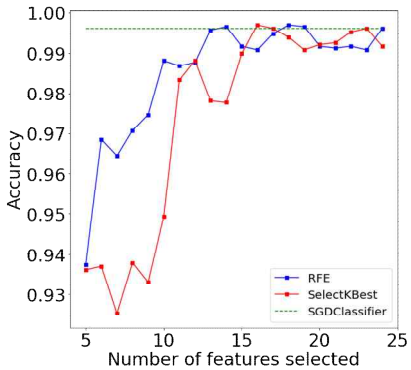


Fig. 5 Graph of the model accuracy with SelctKbest



	Sensor counts	Accuracy
SGDClassifier	25	99.61%
RFECV	18	99.69%
SelectKBest	12	98.82%

Fig. 6 Model accuracy comparison graph and table

4.4 설명 가능한 인공 지능을 통한 검증

본 앉은 자세 모니터링 시스템은 앞서 기술하였던 것처럼 실제로 사람이 사용하고, 그에 따른 정확한 피드백이 중요시되는 시스템이다. 하지만 머신러닝 모델로 사용한 SVM의 해석이 어렵고, 설명력이 떨어지는 결점이 존재한다. 따라서 단순히 특성 선별이 제시하는 그대로 센서 배열을 구축하기보다 XAI를 통해 검증함으로써 각각의 센서가 결과에 어떤 영향을 미치는지 확인하고, 그에 따라 최종 센서 배열을 정하는 것을 목표로 하였다. 여기서, XAI란, 인간이 인공 지능의 작용 과정을 훨씬 더 쉽게 이해할 수 있도록 인공 지능에 설명 능력을 부여함으로써 모델 내부가 설명되지 않는 블랙박스 성향을 분해 및 파악하여 설명 가능성을 제공하는 기법으로, 이를 통하여 인공 지능 결정에 대한 신뢰성이 향상될 수 있다.[7] 본 연구에서 사용한 SHAP(SHapley Additive exPlanations)는 shapley value와 특성 간 독립성을 핵심 아이디어로 사용하는 XAI 기법이다.[7] Table 3은 기존의 25개 센서를 모두 사용한 센서 배열에 따른 shapley value의 절댓값에 평균을 취한 값의 크기순으로 나타낸 표이다. 각 센서의 해당하는 값이 클수록 결과 예측 영향력이 크다는 것을 의미하며, 이는 사용자의 앉은 자세를 예측함에 있어 중요한 변수임을 나타내는 하나의 지표가 될 수 있다. 이에, Table 4는 두 가지 특성 선별 기법의 센서 개수 최적화에 따라 선택된 센서의 위치와 센서별 shapley value 절댓값에 평균을 취한 값의 크기 순서를 기재한 것과 비교한 표이다.

Table 3 Shapley value of all sensors

Number of sensor	Shapley value
Sensor 19	0.339
Sensor 3	0.216
Sensor 2	0.159
Sensor 4	0.135
Sensor 14	0.108
Sensor 17	0.093
Sensor 1	0.089
Sensor 7	0.081
Sensor 9	0.059
Sensor 5	0.053
Sensor 8	0.045
Sensor 13	0.042
Sensor 18	0.038
Sensor 10	0.019
Sensor 23	0.0144
Sensor 12	0.0141
Sensor 15	0.014
Sensor 25	0.012
Sensor 22	0.011
Sensor 6	0.0099
Sensor 11	0.0098
Sensor 24	0.009
Sensor 20	0.0089
Sensor 21	0.008
Sensor 16	0.007

Table 4 Comparison of 3 methods (RFECV, SelectKbest, SHAP)

Number of sensor	RFECV	SelectKBest	SHAP
Sensor 1	O	O	7
Sensor 2	O	O	3
Sensor 3	O	X	2
Sensor 4	O	O	4
Sensor 5	O	X	10
Sensor 6	X	X	20
Sensor 7	O	O	8
Sensor 8	X	O	11
Sensor 9	O	O	9
Sensor 10	O	X	14
Sensor 11	X	X	21
Sensor 12	O	O	16
Sensor 13	O	X	12
Sensor 14	O	O	5
Sensor 15	O	X	17
Sensor 16	O	X	25
Sensor 17	O	O	6
Sensor 18	X	O	13
Sensor 19	O	O	1
Sensor 20	X	X	23
Sensor 21	X	X	24
Sensor 22	O	X	19
Sensor 23	O	X	15
Sensor 24	X	X	22
Sensor 25	O	O	18

Table 5 Confusion matrix of final sensor array

Confusion matrix					
		Prediction			
		Sitting posture with correct posture	Sitting posture with left leg crossed	Sitting posture with right leg crossed	Sitting posture in front of a chair
Actual value	Sitting posture with correct posture	2,129	3	5	32
	Sitting posture with left leg crossed	1	2,307	0	0
	Sitting posture with right leg crossed	3	1	2,360	3
	Sitting posture in front of a chair	0	1	1	2,300

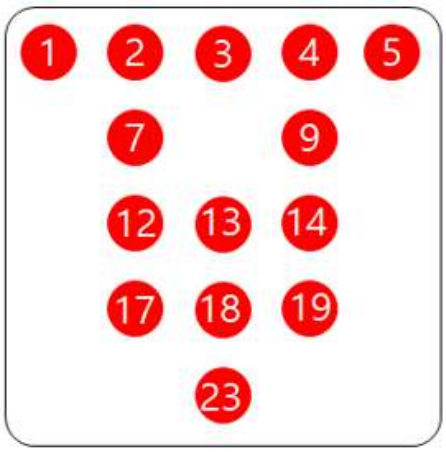
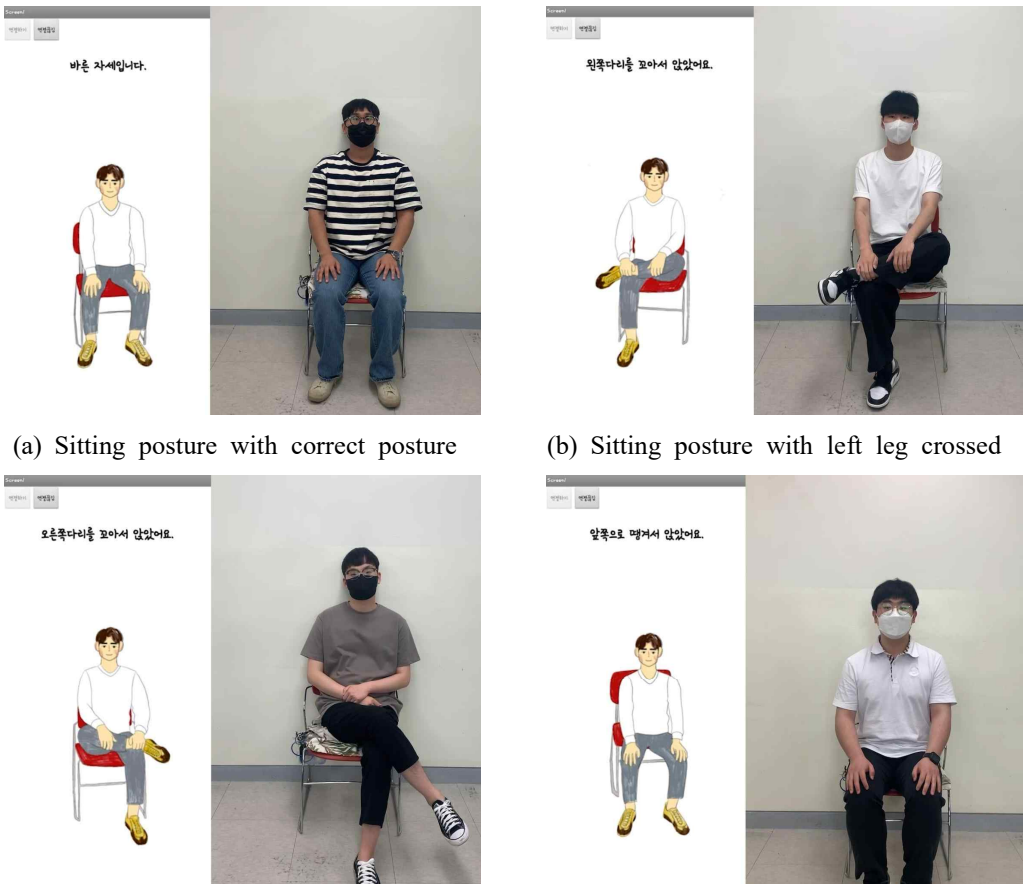


Fig. 7 Final sensor array

그에 따라, Fig. 7은 특성 선별 및 shapley value를 모두 고려하여 선정한 14개의 압력센서를 사용한 최종 센서 배열이다. 해당 센서 배열로 학습을 진행한 결과, 99.56%의 모델 정확도가 결과로 도출되었다. Table 5는 최종 센서 배열에 따른 confusion matrix로, 모델이 예상한 앉은 자세와 실제 사용자의 앉은 자세가 99.56%의 정확도에 상응하게 거의 차이 나지 않는 것을 확인할 수 있다. 이는 사용자의 체형 및 생활 습성에 따라 미세하게 차이가 있을 수 있으나, 11개의 센서 개수를 줄였음에도 불구하고 기존의 모델 정확도와 거의 차이 나지 않는 것을 확인할 수 있는 동시에, 최적화에 대해 충분히 설명 가능한 센서 배열임을 확인할 수 있다.

4.5 실사용 데이터를 통한 최종 검증

기존 데이터의 경우, 모델의 정확한 학습을 위해 데이터 수집 과정에서 피실험자의 자세를 교정함으로써



(a) Sitting posture with correct posture (b) Sitting posture with left leg crossed

(c) Sitting posture with right leg crossed (d) Sitting posture in front of a chair

Fig. 8 Actual use result

4가지 자세의 기준에 부합하도록 처리하는 과정을 거쳤다. 하지만 실제로 사용자가 앉은 자세 모니터링 시스템을 사용할 때, 항상 규정된 기준에 부합하게 앉지 않는다는 점을 고려하여 총 20명의 피실험자에게 4가지 자세에 대해 기준을 권고하지 않은 채로 데이터를 수집하였다. 그렇게 수집된 약 900여 개의 새로운 데이터는 개선된 센서 배열의 실성능 정확도 평가를 위해 테스트 데이터로 사용되었으며, Fig. 8은 그에 따른 실제 사용 결과를 사용자의 휴대용 스마트 기기의 화면에 시각화한 것을 보여준다. 그 결과, 해당 모델 정확도는 98.69%인 것을 확인할 수 있었고, 이를 통하여 센서 개수를 11개 줄였음에도 불구하고, 실제 사용 결과에 있어 정확도 면에서 충분히 신뢰 가능한 결과라고 판단하였다.

5. 결 론

본 앉은 자세 모니터링 시스템은 압력센서에 가해진 하중 정보를 머신러닝 모델을 통하여 사용자의 앉은 자세를 정해진 4가지 자세 중 하나의 자세로 분류하고, 이를 사용자의 스마트 기기를 거쳐 시각화된 결과를 보여주도록 설계하였다. 이 과정에서, 센서를 25개 사용하였을 때 해당 시스템의 정확도가 목표치에 근접하였다는 점을 고려하여, 센서 개수를 줄이고 배열을 최적화하더라도 신뢰도 있는 정확도가 결과로 나올 것이라고 예상하였다. 이에 따라, 특성 선별로 센서 개수를 줄이고, 배열을 최적화하는 과정에서 XAI를 통하여 검증을 거쳐 최종적으로 시스템을 개선하였다. 그 결과로, 센서 25개를 모두 사용하였을 때의 모델 정확도는 99.61%, 11개의 센서를 줄이고 14개 센서의 배열을 최적화하였을 때 모델 정확도는 99.56%였으며, 0.5% 이내의 차이를 보이는 것을 통하여 정확도가 거의 차이 나지 않음을 확인할 수 있었다. 또한 실제 사용을 가정한 정확도 테스트를 위해 새롭게 얻은 테스트 데이터로 테스트를

진행한 결과, 모델 정확도가 98.69%인 것을 통하여 실제 사용에서도 충분히 사용할 수 있음을 확인하였다. 하지만 사용자의 상체 부분을 받쳐주는 의자 등받이 부분에는 센서가 배치되어 있지 않기 때문에, 상체에 대한 기준을 정확히 충족하였는지 판단하기에는 다소 미흡한 부분이 있을 것이라고 예상된다. 이러한 측면에서, 앉은 자세의 상체 부분 정보에 대해 측정하는 방법이 등받이에 센서를 배치하는 것으로 국한되어 있지 않을 것이라고 예상하며, 해당 부분을 보완한다면 기존 4가지 자세를 측정하는 것에서 더욱 다양한 자세를 판별함과 동시에 정확도 또한 높일 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 국립 안동대학교 LINC 3.0 사업단의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

참고문헌
(References)

(1) Janssen, X., Fleming, L., Kirk, A., Rollins, L., Young, D., Grealy, M., MacDonald, B., Flowers, P. and Williams, L., 2020, “Changes in Physical Activity, Sitting and Sleep across the COVID-19 National Lockdown Period in Scotland,” *International Journal of Environmental Research and Public Health*, Vol. 17, No. 24.

(2) Moriguchi, C. S., Sato, T. O. and Coury, H. J. C. G., 2019, “An Instrumented Workstation to Evaluate Weight-Bearing Distribution in the Sitting Posture,” *Safety and Health at Work*, Vol. 10, No. 3, pp. 314~320.

(3) Jung, H. Y., Ji, J. K. and Min, S. D., 2015, “Real-time Sitting Posture Monitoring System using Pressure Sensor,” *Trans. Korean. Inst. Elect. Eng.*, Vol. 64, No. 6, pp. 940~947.

(4) Kwon, H. S., Ryu, K., Sim, I., Lee, C. K. and Oh, S., 2020, “Classification of Transport Vehicle Noise Events in Magnetotelluric Time Series Data in an Urban area Using Random Forest Techniques,” *Geophysics and Geophysical Exploration*, Vol. 23, No. 4, pp. 230~242.

(5) Misra, P. and Yadav, A. S., 2020, “Improving the Classification Accuracy using Recursive Feature Elimination with Cross-validation,” *Int. J. Emerg. Technol*, Vol. 11, No. 3, pp. 659~665.

(6) George, B., 2017, “A Study of the Effect of Random Projection and Other Dimensionality Reduction Techniques on Different Classification Methods,” *Baselius Res*, Vol. 18, No. 1, pp. 69~75.

(7) Ahn, J. H., 2020, *XAI 설명 가능한 인공지능, 인공지능을 해부하다*, Wikibooks, Korea, pp. 3~6, 148~151 (in Korean).

<응용기술논문> DOI http://dx.doi.org/10.3795/KSME-C.2023.11.2.165 ISSN 2288-3991(Online)

디자인 씽킹 기반 집단창의성 교육목표 분류체계에 대한 중요도-수행도와 사용성 분석

김 선 연* · 신 재 호**†
*영남대학교 사범대학 학교교육연구소 , **경일대학교 스마트디자인공학부

IPA and Usability Analysis on the Taxonomy of Educational Objectives for Group Creativity based on Design Thinking

Sun-Yun Kim* and Jaeho Shin**†
* Research Institute of School Education, Yeungnam University,
** School of Smart Design Engineering, Kyungil University

(Received July 5, 2023 ; Revised August 10, 2023 ; Accepted August 24, 2023)

Key Words: Group Creativity(집단창의성), Taxonomy of Educational Objectives(교육목표 분류체계), Design Thinking(디자인 씽킹), Importance-Performance Analysis(IPA, 중요도-수행도 분석), Usability Analysis(사용성 분석), Capston Design(캡스톤디자인), Creative Engineering Design(창의적공학 설계)

초록: 본 연구는 디자인 씽킹 기반 집단창의성 교육목표 분류체계에 대한 중요도-수행도와 사용성을 분석하는데 그 목적이 있다. 이를 위해 전문가 델파이 조사와 대학생 설문조사를 진행하였고, 주요 결과는 다음과 같다. 첫째, 전문가와 대학생 집단에서 IPA 분석 결과, 집중 영역에서 도입단계는 공유하기, 발견하기, (리)프레이밍하기가, 전개단계는 생성하기가, 정리단계는 확인하기와 평가하기가 도출되었다. 둘째, 전문가와 대학생 집단에서 사용성 분석 결과, 공통적으로 효율성은 교환하기, 생성하기, 순위정하기가, 효과성은 생성하기가, 만족성은 표현하기가 도출되었다. 이러한 결과는 한정된 자원을 갖고 실제 집단창의성 수업을 진행할 때, 상대적으로 중요한 우선순위가 무엇인지에 대한 정보를 제공한다.

Abstract: The purpose of this study is to analyze importance and performance and usability on the taxonomy of educational objectives for group creativity based on design thinking. For this, the study has conducted experts delphi survey and students survey and main research results were as follows: The IPA analysis of the expert and college student groups has revealed that the introduction steps in the focus area are sharing, discovering, and (re)framing; the development steps are creating; and the arrangement steps are checking and evaluating. These results provide prioritization importance of collective creativity class with limited resources.

1. 서 론

공학과 디자인 분야에서 집단이나 팀을 구성하여 다양한 아이디어를 산출하고, 이를 통해 새로운 제품을 개발하는 작업은 매우 중요하다. 왜냐하면 소비자의 경험과 욕구를 분석하여 새롭고 유용한 아이디어를 반영한 제품은 해당 기업의 이윤과 생산성을 향상시킬 수 있기 때문이다. 이러한 요구에 따라 대학교육에서 집단창의성 향상을 위한 수업이 활발히 운영되고 있다. 하지만 제한된 수업시간과 부족한 예산으로 현실적으로 진행할 수 있는 집단 단위의 창의적 활동이 많지 않다.

집단창의성은 개인의 창의성보다 더 복잡한 메커니즘이 적용된다. 집단창의성에 대한 다양한 개념 중

† Corresponding Author, jhshin@kiu.ac.kr
Ⓒ 2023 The Korean Society of Mechanical Engineers

에서 유용할 것이라 기대되는 아이디어를 개발하고 표현하는 집단의 사고과정[1,2]으로 개념화되는 경우, 집단의 사고과정이 집단창의성에 매우 중요하게 영향을 미친다. 최근 공학설계 분야에서 디자인 씽킹 프로세스가 창의성이 요구되는 집단의 사고과정을 향상시키는 데 중요하게 고려되고 있다.[1,3] 왜냐하면 디자인 씽킹은 기존의 논리적인 생각의 패턴에서 벗어나 새로운 생각을 체계적으로 재구성하는 방법이기 때문이다. 이러한 필요성에 따라 디자인 씽킹 프로세스를 반영한 집단창의성 사고과정 모형을 개발하였고,[1] 이를 토대로 집단창의성 교육목표 분류체계로 발전시켰다.[2] 특히 교육목표 분류체계에서 제공하는 수행목표들은 실제 집단창의성 관련 수업에서의 학습목표와 수행활동이 구체적으로 무엇인지에 대한 지식과 정보를 제공할 수 있다. 본 연구의 기본 전제는 집단의 창의적 사고과정에 기반한 수행목표와 활동을 집단창의성 수업에 제공한다면, 각 구성원이 갖고 있는 개인창의성의 합보다 더 높은 차원의 결과물을 생성하거나 시너지 효과를 발휘할 수 있을 것이라고 점이다. 하지만 실제 집단 단위의 창의성 수업에서 한정된 시간과 비용을 갖고 운영할 때 어떤 수행목표와 활동을 좀 더 중점적으로 투자하고 지원해야 하는지에 대한 연구는 찾아보기 어렵다.

따라서 본 연구에서는 실제 집단창의성 전문가와 집단창의성 관련 수업에 참여한 기계공학부 대학생을 대상으로 집단창의성 교육목표 분류체계의 수행목표에 대한 중요도-수행도와 사용성 분석을 실시하여 실제 수업에서의 상대적 우선순위가 무엇인지를 밝히고자 하였다.

2. 연구방법

2.1 전문가 집단 중요도-수행도와 사용성 분석

2.1.1 연구대상

본 연구는 전문가 11명을 대상으로 델파이 조사를 통해 집단창의성 교육목표 분류체계 수행목표에 대한 중요도-수행도와 사용성 분석을 진행하였다. 본 연구의 전문가들은 모두 팀 프로젝트 경력이 5년에서 20년 사이이며, 이들은 실제 교육학, 공학, 디자인학 등 다양한 전공의 수업에서 진행되는 집단 협력학습과 창의성에 대한 교육적 고찰을 심도 있게 이해하고 있기 때문에 선정하였다. 총 11명의 전문가들은 1차에서부터 2차 설문지까지 한 명도 불참 없이 조사에 참여하였다.(Table 1 참조)

2.1.2 연구 도구 및 자료 분석

전문가 델파이 조사는 총 2회로 진행하였다. 본 연구의 델파이 1차 조사는 집단창의성 교육목표 분류체계에 대한 중요도, 수행도, 효율성, 효과성, 만족성으로 질문을 구성하여 점수로 표시하도록 설문지를 구성하여 2022년 5월에 진행되었다. 1차 조사의 설문지는 김선연[2]의 연구에서 밝혀진 집단창의성 사고과정 각 단계별 수행목표로 구성되었으며, 19개의 수행목표를 대상으로 집단창의성 향상을 위해 얼마나

Table 1 Experts demographic factor

Division		Frequency	Percent
Gender	Man	8	72.7
	Woman	3	27.3
Age	Forty	7	63.6
	Fifty	4	36.4
Subject	Education	4	36.4
	Engineering	4	36.4
	Design	3	27.2
Team project career	5~9 years	5	45.5
	10~19 years	5	45.5
	20 years ~	1	9.0
Total		11	100.0

Table 2 Students demographic factor

Division		Frequency	Percent
Gender	Man	132	96.4
	Woman	5	3.6
Grade	Second year	29	21.2
	Third year	35	25.5
	Fourth year	73	53.3
Total		137	100.0

중요한지, 수행정도는 어느 정도인지, 얼마나 쉬운지, 얼마나 적절한지, 얼마나 만족하는지에 대해 1점에서 5점으로 표시하도록 하였다.

다음으로 2022년 11월에 진행된 델파이 2차 조사에서는 중요도-수행도 문항을 제외하고 1차 조사의 결과를 분석하여 집단창의성 수행목표에 대한 효율성, 효과성, 만족성을 정리하였다. 2차 조사의 설문지는 1차 조사의 점수를 분석하여 귀하의 1차 응답, 평균과 사분범위를 제시하고, 1차 조사결과를 재평가하여 자신의 의견을 최종적으로 수정할 수 있도록 구성하였다. 뿐만 아니라 집단창의성 수행목표의 효율성, 효과성, 만족성에 대한 전문가의 내용타당도 여부를 판단하기 위하여 각 항목별 내용타당도 비율(CVR: Content Validity Ratio)을 산출하였다.[4] Lawshe[4]에 따르면 전문가의 수가 11명일 경우, CVR의 최소값은 0.59이기 때문에 유의도 0.05에서 CVR이 0.59이상일 때 내용타당도가 있는 것으로 판단하였다. 1·2차 설문지 모두 교육학 및 교육공학 전공 박사학위 소지자 2명에게 자문을 받았으며, 설문지의 전달과 수거는 모두 전자메일로 이루어졌다.

2.2 기계공학부 대학생 집단 중요도-수행도와 사용성 분석

2.2.1 연구대상

본 연구는 2022년 1학기부터 2023년 1학기까지 총 3학기 동안 A지역에 소재한 B대학 기계공학부에서 개설된 [창의적공학설계]와 [캡스톤디자인] 수업에 참여한 학생 137명을 대상으로 하였다. 본 연구에서 집단창의성은 유용할 것이라 기대되는 아이디어를 개발하고 표현하는 집단의 사고과정[1,2]으로 이러한 목적에 부합되는 교과목이 [창의적공학설계]와 [캡스톤디자인] 수업이기 때문이다. [창의적공학설계]는 창의적인 아이디어를 도출하고 제품을 제작하는 프로젝트 기반 학습으로 기계공학부 2학년에 개설되며, [캡스톤디자인]은 팀별로 설정한 설계주제에 대해 동작 가능한 실물과 같은 최종 결과물을 산출하는 프로젝트 기반 학습으로 3학년 2학기와 4학년 1학기, 총 2학기 동안 개설된다. 남학생이 대부분이며, 2학년 29명, 3학년 35명, 4학년 73명으로 4학년이 가장 많았다.(Table 2 참조)

2.2.2 연구 도구 및 자료 분석

본 연구는 중요도-수행도 분석이라고 불리는 IPA(Importance - Performance Analysis)와 사용성 분석을 수행하였다. IPA의 특징은 x축의 중요도와 y축의 수행도로 구성된 2차원 매트릭스 도표 위에 측정된 각 중요도 수치와 각 수행도 수치를 함수값 (x, y)로 나타내고, 그 위치에 따라 의미를 부여하는 것이다. 이때 2차원 매트릭스 도표 상에 위치한 항목들은 중요도 평균값과 수행도 평균값을 기준으로 4개의 분면으로 나누어 배치된다. 1사분면은 계속 유지 영역으로 중요도도 높고 수행도도 높아서 계속 유지할 필요가 있는 것으로, 2사분면은 과잉 영역으로 중요도는 낮으나 수행도가 높아서 중요한 것에 비해 수행이 과도한 것으로, 3사분면은 저순위 영역으로 중요도도 낮고 수행도도 낮아서 크게 신경을 쓰지 않아도 되는 것으로, 4사분면은 집중 영역으로 중요도는 높으나 수행도가 낮아서 집중할 필요가 있는 것으로 해석된다.[5] 특히 집중 영역은 인력과 예산이라는 한정된 자원을 갖고 우선적으로 해결해야 할 사항, 정책들을 결정하는데 유용한 정보를 제공한다.(Fig. 1 참조)

사용성에 대하여 국제표준기구(ISO: International Organization for Standardization)는 특정한 맥락 하에서

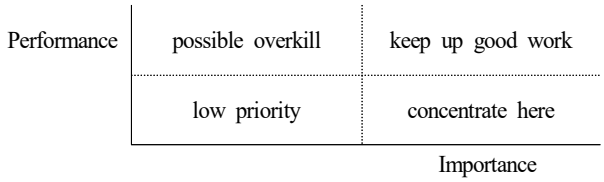


Fig. 1 Importance - performance matrix

특정 사용자가 특정한 과제를 수행할 수 있도록 돕는 효율성, 효과성, 만족도를 의미하는 것[6]으로 정의하는 것처럼 사용성은 일반적으로 효율성(용이성), 효과성, 만족성으로 구분한다.[7,8] 본 연구에서 효율성(용이성)은 집단창의성 교육목표 분류체계에 대한 수행활동 중에서 어떤 활동을 하는 것이 가장 쉬운지를, 효과성은 창의적인 결과물을 산출하는 데 있어서 어떤 활동이 가장 도움이 되었는지를, 만족성은 어떤 활동 결과에 가장 만족스러운지를 묻는 것이었다. 총 137명의 학생 중에서 [캡스톤디자인Ⅰ] 수업을 듣고 바로 이어서 [캡스톤디자인Ⅱ] 수업을 수강한 40명을 대상으로 19개 수행활동 중에서 효율성(용이성), 효과성 및 만족성에 가장 적절한 활동의 번호를 기입하도록 하고, 빈도를 산출하였다.

본 연구에서 활용한 디자인 씽킹 기반 집단창의성 교육목표 분류체계는 김선연[2]의 연구내용을 참고하였다. 김선연[2]은 전문가 델파이 방법을 통해 집단창의성 사고과정 모델의 각 단계별 하위목표를 개발하고 그것들의 위계를 분석하여 집단창의성 교육목표 분류체계 프로토타입을 개발하였다. 본 연구는 7개의 단계(①집단이해, ②공감, ③통찰, ④발상, ⑤선정, ⑥생각시각화 & 프로토타입, ⑦검토 & 파일럿테스트)에서 도출된 총 19개의 수행목표들을 활용하였다. 설문구성은 Table 3과 같으며, 구체적으로 집단이해에서 교환하기는 '집단 구성원 개인적 특성에 대해 서로 주고받는 것'으로, 공유하기는 '프로젝트 주제에 대해 다양한 지식과 경험을 함께 나누는 것'으로 문항을 구성하였다. 공감에서 탐색하기는 '합의된 공통 관심영역을 찾는 것'으로, 조사하기는 '실제 제품, 시스템 및 서비스 경험을 살펴보는 것'으로, 분석하기는 '사용자 경험에 대한 원자료와 데이터에서 관계를 분석하는 것'으로 문항을 구성하였다. 통찰에서 발견하기는 '미처 찾아내지 못하였거나 아직 알려지지 않은 중핵적 가치를 찾아내는 것'으로, (리)프레이밍하기는 '중핵적 가치를 다른 관점으로 전환하고, 그 관점에서 해석하여 명료화하는 것'으로, 정의하기는 '진짜 문제를 명확히 밝혀 구체화하는 것'으로 문항을 구성하였다.

발상에서 가설세우기는 '문제에 대한 가설을 설정하는 것'으로, 생성하기는 '여럿 아이디어를 만들어내는 것'으로 문항을 구성하였다. 선정에서 순위정하기는 '여럿 아이디어 가운데 순서를 정하는 것'으로, 선택하기는 '최적 아이디어를 골라내는 것'으로 문항을 구성하였다. 생각시각화 & 프로토타입에서 해석하기는 '선정된 아이디어에 포함된 정보와 의미를 파악하는 것'으로, 통합하기는 '선정된 아이디어를 기존 지식, 개념, 경험과 연결하여 하나로 합치는 것'으로, 표현하기는 '아이디어 개념을 눈으로 보이는 것으로 드러내어 나타내는 것'으로 문항을 구성하였다. 검토 & 파일럿테스트에서 확인하기는 '최종 아이디어의 실제 구현 가능성을 알아보는 것'으로, 점검하기는 '최종 아이디어가 주어진 데이터로부터 도출되었는지 검사하는 것'으로, 평가하기는 '객관적인 준거에 따라 최종 아이디어의 적합성을 판단하는 것'으로, 순환하기는 '잘못된 아이디어 혹은 불가능한 아이디어로 판단되어 필요한 단계와 과정을 되풀이하는 것'으로 문항을 구성하였다. 각 문항은 Likert식 5점 척도로 구성하였고, 신뢰도 값은 중요도 0.919, 수행도 0.880으로 양호한 편이었다.

3. 연구결과

3.1 집단창의성 교육목표 분류체계에 대한 중요도-수행도 분석

3.1.1 집단창의성 교육목표 분류체계 도입단계에 대한 중요도-수행도 분석

도입단계는 집단이해, 공감, 통찰의 하위단계로 세분화되며, 실제 수업에서 집단 구성원 간의 팀빌딩(집단이해), 사용자 경험 조사 및 분석(공감), 사용자 경험 분석 결과를 토대로 중핵적 가치 발견 및 진짜

Table 3 The taxonomy of educational objectives for group creativity content

Step		Performance objectives
Introduction	Group understanding	Exchange, sharing
	Empathy	Exploration, survey, analysis
	Insight	Discovery, (re)framing, definition
Development	Ideation	Hypothesis, creation
	Selection	Priority, choice
Arrangement	Visualization & prototype	Interpretation, integration, expression
	Review & pilot test	Realization checking, examination, evaluation, looping

Table 4 The taxonomy of educational objectives for group creativity: Introduction step IPA analysis results

Step	Performance objectives		Keep up good work (1 quadrant)		Possible overkill (2 quadrant)		Low priority (3 quadrant)		Concentrate here (4 quadrant)	
			Experts	Students	Experts	Students	Experts	Students	Experts	Students
Group understanding	A	Exchange		○			○			
	B	Sharing		○					○	
Empathy	C	Exploration			○			○		
	D	Survey	○					○		
	E	Analysis					○	○		
Insight	F	Discovery						○	○	
	G	(re)Framing					○			○
	H	Definition	○	○						

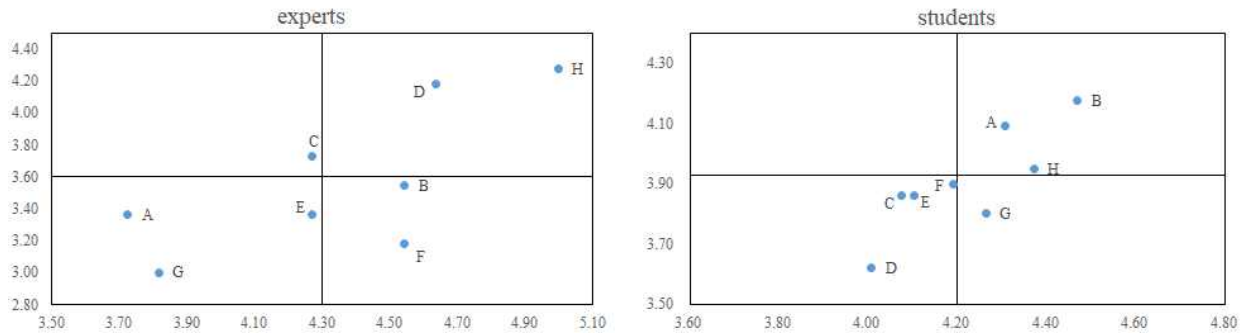


Fig. 2 The taxonomy of educational objectives for group creativity: Introduction step IPA matrix

문제 구체화(통찰)와 같은 수행활동을 진행할 수 있다. 전문가와 대학생을 대상으로 집단창의성 사고과정 도입단계 수행목표에 대한 중요도-수행도 매트릭스와 분석한 결과는 Fig. 2 및 Table 4와 같다.

IPA에서 핵심인 우선적으로 시급히 개선이 필요한 집중 영역에는 전문가 집단은 공유하기와 발견하기로 밝혀졌고, 대학생 집단은 (리)프레이밍하기로 나타났다. 이 같은 IPA 분석결과는 집단창의성 수업에서 특히 공유하기, 발견하기, (리)프레이밍하기가 시급히 개선되어야 할 수행목표임을 보여주었다. 이를 개선하기 위해 실제 수업에서 집단 구성원 간에 다양한 지식과 경험을 공유하는 토론 시간을 좀 더 확

Table 5 The taxonomy of educational objectives for group creativity: Development step IPA analysis results

Step	Performance objectives		Keep up good work (1 quadrant)		Possible overkill (2 quadrant)		Low priority (3 quadrant)		Concentrate here (4 quadrant)	
			Experts	Students	Experts	Students	Experts	Students	Experts	Students
Ideation	A	Hypothesis					○	○		
	B	Ereation	○							○
Selection	C	Priority			○	○				
	D	Choice	○	○						

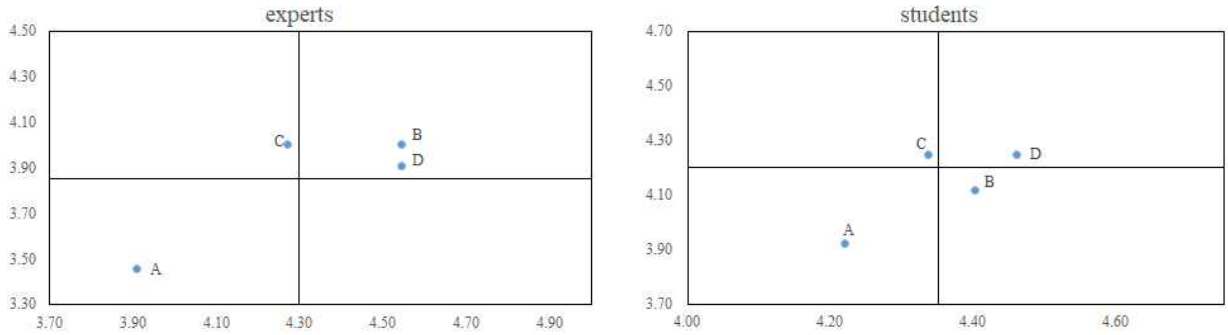


Fig. 3 The taxonomy of educational objectives for group creativity: Development step IPA matrix

보하고, 사용자 경험 분석결과를 토대로 중핵적 가치를 찾고, 그 중핵적 가치를 명료화하여 자신이 속한 집단의 주제를 탐색할 수 있도록 교수자의 스캐폴딩 전략과 학습활동을 설계하여 운영할 필요가 있다.

3.1.2 집단창의성 교육목표 분류체계 전개단계에 대한 중요도-수행도 분석

전개단계는 발상, 선정의 하위단계로 세분화되며, 실제 수업에서 진짜 문제에 대한 가설 설정 및 다양한 아이디어 생성(발상), 여럿 아이디어 중에서 순위정하기 및 최적 아이디어 선택(선정)과 같은 수행활동을 진행할 수 있다. 전문가와 대학생을 대상으로 집단창의성 사고과정 전개단계 수행목표에 대한 중요도-수행도 매트릭스와 분석한 결과는 Fig. 3 및 Table 5와 같다.

IPA에서 핵심인 우선적으로 시급히 개선이 필요한 집중 영역에는 전문가 집단에서는 없었으나, 대학생 집단은 생성하기로 나타났다. 이 같은 IPA 분석결과는 집단창의성 수업에서 특히 생성하기가 시급히 개선되어야 할 수행목표임을 보여주었다. 이를 개선하기 위해 실제 수업에서 여러 개의 다양한 아이디어를 도출하기 위해 충분히 논의할 수 있는 학습환경과 여건이 마련되어야 한다.

3.1.3 집단창의성 교육목표 분류체계 정리단계에 대한 중요도-수행도 분석

정리단계는 생각시각화 & 프로토타입, 검토 & 파일럿테스트의 하위단계로 세분화되며, 실제 수업에서 선정된 아이디어에 대한 해석/통합 및 아이디어 시각화(생각시각화 & 프로토타입), 최종 아이디어 구현 가능성 확인/점검/평가 및 순환(검토 & 파일럿테스트)과 같은 수행활동을 진행할 수 있다. 전문가와 대학생을 대상으로 집단창의성 사고과정 정리단계 수행목표에 대한 중요도-수행도 매트릭스와 분석한 결과는 Fig. 4 및 Table 6과 같다.

IPA에서 핵심인 우선적으로 시급히 개선이 필요한 집중 영역에는 전문가 집단은 확인하기가 밝혀졌고, 대학생 집단은 평가하기로 나타났다. 이 같은 IPA 분석결과는 집단창의성 수업에서 특히 확인하기와 평가하기가 시급히 개선되어야 할 수행목표임을 보여주었다. 이를 개선하기 위해 실제 수업에서 최종 결과물에 대한 평가보다 실제 구현가능성을 확인한 각 집단의 성공 또는 실패경험을 공유하거나, 전문가 자문 및 자체 평가 활동이 이루어지는 학습과정을 평가할 수 있는 시스템을 활용할 수 있다.

Table 6 The taxonomy of educational objectives for group creativity: Arrangement step IPA analysis results

Step	Performance objectives		Keep up good work (1 quadrant)		Possible overkill (2 quadrant)		Low priority (3 quadrant)		Eoncentrate here (4 quadrant)	
			Experts	Students	Experts	Students	Experts	Students	Experts	Students
Visualization & prototype	A	Interpretation		○			○			
	B	Integration	○	○						
	C	Expression	○	○						
Review & pilot test	D	Realization checking		○					○	
	E	Examination					○	○		
	F	Evaluation	○							○
	G	Looping					○	○		

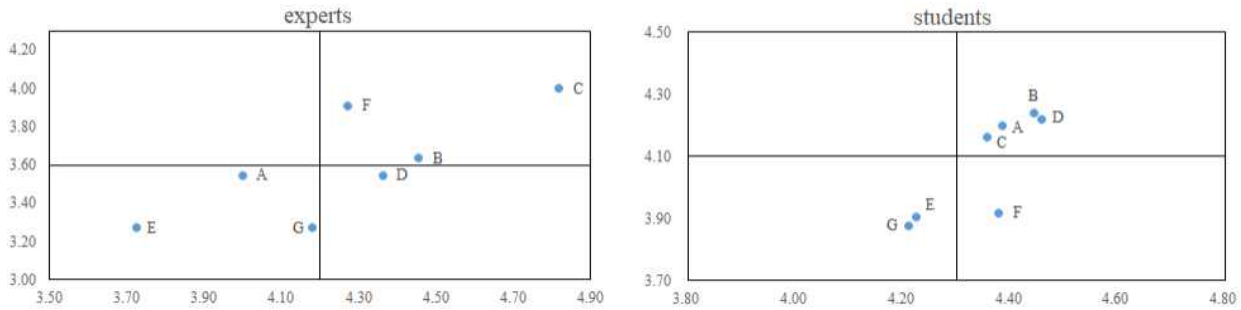


Fig. 4 The taxonomy of educational objectives for group creativity: Arrangement step IPA matrix

3.2 집단창의성 교육목표 분류체계에 대한 사용성 분석

3.2.1 전문가 집단의 집단창의성 교육목표 분류체계에 대한 사용성 분석

전문가 집단을 대상으로 집단창의성 교육목표 분류체계의 수행목표에 대한 사용성 분석결과는 Table 7과 같다. 일단 사용성의 대푯값을 산출하기 위하여 정규성 검증을 실시하였는데 정규성 검증 결과, 효과성의 교환하기, 순위정하기, 선택하기, 평가하기 문항이, 만족성의 순위정하기, 선택하기 문항이 비정규분포($p<0.05$)로 판정되었다. 따라서 비정규성을 띠는 문항에 대해서는 최빈수나 중위수를 대푯값으로 선택하고(최빈수와 중위수가 동일하였음), 정규성을 가진 문항은 산술평균을 대푯값으로 선택하였다.

대푯값은 기준으로 효율성, 효과성, 만족성 3순위에 해당되는 수행목표는 음영으로 표시하였는데, 효율성은 교환하기, 생성하기, 순위정하기, 평가하기로, 효과성은 생성하기, 표현하기, 정의하기, 발견하기로, 만족성은 생성하기, 표현하기, 조사하기로 밝혀졌다. 또한 전문가 내용타당도 CVR값(기준값 0.59)을 기준으로 살펴보면, 효율성과 만족성은 3순위로 해당되는 수행목표가 CVR값 기준에 부합되는 것으로 나타났고 효과성은 평가하기, 점검하기, 순환하기를 제외한 모든 수행목표가 CVR값 기준에 부합되는 것으로 분석되었다.

3.2.2 대학생 집단의 집단창의성 교육목표 분류체계에 대한 사용성 분석

기계공학부 137명 중에서 [캡스톤디자인Ⅰ] 수업을 듣고 바로 이어서 [캡스톤디자인Ⅱ] 수업을 수강한 40명의 학생에게 효율성, 효과성, 만족성에 대한 사용성 분석을 진행하였고, 그 결과는 Table 8과 같다.

3순위에 해당되는 수행목표를 살펴보면, 효율성은 교환하기, 순위정하기, 생성하기가, 효과성은 생성하기, 선택하기, 순위정하기가, 만족성은 표현하기, 선택하기, 정의하기로 분석되었다. 이러한 결과를 통해 집단창의성 수업에서 대학생들이 집단 구성원 개인적 특성에 대해 서로 주고받는 교환하기 활동을 다른 활동에 비해 좀 더 용이하게 느끼고, 다양한 아이디어를 만들어 내는 생성하기 활동을 가장 효과적이라고 느끼며, 아이디어 개념을 눈으로 보이는 구체적인 이미지, 그림, 그래프 등으로 시각적으로 나타내는 표현하기 활동에 대해 가장 만족하고 있는 것을 알 수 있다.

Table 7 Usability analysis (experts)

Ranking	Performance objectives	Efficiency (mean)	CVR	Ranking	Performance objectives	Effectiveness (mean)	CVR	Ranking	Performance objectives	Satisfaction (mean)	CVR
1	Exchange	4.27	0.82	1	Creation	4.55	1	1	Creation	4.55	1
2	Creation	4.18	0.64	2	Expression	4.45	0.82	2	Expression	4.45	1
2	Priority	4.18	0.82	3	Definition	4.36	1	3	Survey	4.27	0.82
2	Evaluation	4.18	0.82	3	Discovery	4.36	1	4	Priority*	4.00	0.45
5	Expression	4.09	0.64	5	Survey	4.27	0.82	4	Choice*	4.00	0.45
6	Realization checking	3.82	0.45	5	Analysis	4.27	0.82	6	Exploration	3.91	0.45
6	Examination	3.82	0.09	5	Integration	4.27	0.82	6	Integration	3.91	0.27
8	Exploration	3.73	0.45	8	Sharing	4.18	0.64	8	Realization checking	3.82	0.45
8	Survey	3.73	0.27	9	Exploration	4.09	0.64	9	Exchange	3.73	0.45
10	Definition	3.64	0.09	9	(re)Framing	4.09	0.82	9	Sharing	3.73	0.45
11	Sharing	3.55	0.09	11	Exchange*	4.00	0.64	9	Discovery	3.73	0.27
11	Analysis	3.55	-0.09	11	Priority*	4.00	0.64	9	Definition	3.73	0.45
11	Hypothesis	3.55	0.27	11	Choice*	4.00	1	9	Interpretation	3.73	0.27
11	Interpretation	3.55	0.09	11	Evaluation*	4.00	0.45	9	Analysis	3.73	0.27
15	Choice	3.45	0.09	11	Hypothesis	4.00	0.82	15	(re)Framing	3.64	0.09
15	Integration	3.45	-0.09	16	Interpretation	3.91	0.64	15	Evaluation	3.64	0.27
17	Looping	3.36	-0.27	16	Realization checking	3.91	0.64	17	Hypothesis	3.55	0.09
18	Eiscovery	3.00	-0.64	18	Examination	3.64	0.27	17	Examination	3.55	0.09
18	(re)Framing	3.00	-0.64	19	Looping	3.55	-0.09	19	Looping	3.18	-0.27

※ * = Non normality item

Table 8 Usability analysis (students)

Ranking	Performance objectives	Efficiency (frequency)	Ranking	Performance objectives	Effectiveness (frequency)	Ranking	Performance objectives	Satisfaction (frequency)
1	Exchange	10	1	Creation	11	1	Expression	6
2	Priority	7	2	Choice	5	2	Choice	5
3	Creation	6	3	Priority	4	3	Definition	4

4. 결 론

본 연구는 전문가와 대학생을 대상으로 디자인 씽킹 기반 집단창의성 교육목표 분류체계에 대한 중요도-수행도와 사용성을 분석하고, 전문가와 대학생의 각 의견들을 수렴하여 상대적으로 더 중요하고 사용성이 높은 수행활동이 무엇인지를 밝히는 것이었다.

전문가와 대학생 집단에서 IPA 분석결과 우선적으로 시급히 개선이 필요한 집중 영역에서 도입단계는 공유하기, 발견하기, (리)프레이밍하기가, 전개단계는 생성하기가, 정리단계는 확인하기와 평가하기가 도

출되었다. 이러한 결과를 통해 몇 가지 논의하면 다음과 같다. 첫째, 전문가와 대학생이 생각하는 집중 영역에 차이가 있다는 점인데, 특히 도입단계에서 전문가는 공유하기와 발견하기를, 대학생은 (리)프레이밍하기로 분석된 결과이다. 이에 대해 전문가와 대학생이 생각하는 문제 또는 주제를 발견하는 사고의 수준이 다르기 때문인 것으로 유추할 수 있다. 김선연[2]의 연구에서 전문가인 대학 교수가 집단창의성 수업에서 실제 대학생들이 본질적인 가치를 발견하거나 통찰 과정을 거치는 경우가 매우 드물다고 언급한 것처럼, 교수들이 생각하는 문제의 발견과 정의 수준이 매우 높기 때문에 중요성에 비해 대학생들의 수행 정도가 낮다고 인식할 가능성이 높다. 둘째, 도입, 전개, 정리단계 중에서 도입단계에서 집중 영역의 수행목표가 가장 많이 나타난 점이다. 특히 도입에서 통찰의 하위단계에서 발견하기와 (리)프레이밍 수행목표가 밝혀졌는데, 이러한 결과는 [창의적공학설계]와 [캡스톤디자인] 수업과 같이 대부분의 수업시간을 집단을 구성하여 창의적인 사고과정과 결과물을 산출하는 집단창의성 수업을 진행할 때, 통찰(insight) 단계를 매우 중요한 학습목표이자 활동으로 설계하여 운영할 필요가 있음을 시사한다.

또한 전문가와 대학생 집단에서 사용성을 분석한 결과, 공통적으로 효율성은 교환하기, 생성하기, 순위정하기가, 효과성은 생성하기가, 만족성은 표현하기가 도출되었고, 이 중에서 가장 높은 수행목표는 효율성은 교환하기가, 효과성은 생성하기가, 만족성은 표현하기로 분석되었다. 이러한 결과를 통해 집단창의성 수업에서 교환하기 수행활동을 진행하기 위한 팀빌딩 활동을 좀 더 세분화하여 설계해야 하고, 아이디어 생성하기는 이미 중요한 수행목표임을 알고 있지만, 한두 가지 아이디어가 아닌 다양한 아이디어를 도출할 수 있도록 학습활동 목표를 설정하여 운영해야 한다. 마지막으로 실제 수업에서 부족한 예산과 시간으로 실제 모형이나 제품을 만드는 프로토타입 제작이 어렵다면, 아이디어 개념을 그림으로 표현하는 정도의 생각 시각화 활동으로 대체하여 진행할 필요가 있다. 이러한 결과를 토대로 한정된 자원을 갖고 실제 집단창의성 수업을 진행할 때 상대적으로 중요한 우선순위가 무엇인지, 우선적으로 개선·보완해야 할 요소들이 무엇인지에 대한 정보를 제공할 수 있다.

후 기

본 논문은 2021년 대한민국 교육부와 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2021S1A5B5A16075910).

참고문헌
(References)

(1) Kim, S. Y., 2019, “The Development of Thinking Process Model for Group Creativity based on Design Thinking,” *Journal of Educational Technology,* Vol. 35, No. 3, pp. 621~653.

(2) Kim, S. Y., 2020, “The Development of a Taxonomy Prototype of Educational Objectives for Group Creativity based on Design Thinking,” *Journal of Learner-Centered Curriculum and Instruction,* Vol. 20, No. 13, pp. 277~304.

(3) Ryoo, E. J. and Kim, M. J., 2021, “An Study on Creative Problem Solving Experiences in Engineering Production Design Class Using Design Thinking,” *The Journal of the Convergence on Culture Technology,* Vol. 7, No. 1, pp. 223~233.

(4) Lawshe, C. H., 1975, “A Quantitative Approach to Content Validity,” *Personnel Psychology*, Vol. 28, No. 4, pp. 563-575.

(5) Martilla, J. A. and James, J. C., 1977, “Importance-Performance Analysis,” *Journal of Marketing,* Vol. 41, No. 1, pp. 13~17.

(6) Lee, H. J. and Park, K. S., 2009, “A Strategy of Learner-centered Usability Evaluation for Quality Management in e-Learning Contents Development,” *The Journal of Educational Information and Media,* Vol. 15, No. 3, pp. 63~88.

(7) Bevan, N., Kirakowski, J. and Maissel, J., 1991, “What is Usability?,” *Proceeding of the 4th International*

Conference on HCI, Stuttgart, Germany.

(8) Costabile, M. F., Marsico, M. D., Lanzilotti, R., Plantamura, V. L. and Roselli, T., 2005, "On the Usability Evaluation of e-learning Application," *Proceeding of the Hawaii International Conference on System Science,* Waikoloa, Hawaii.

기술과 교육 편집위원회

ISSN 2288-3991(Online)

편 집 장

박태선
경북대학교
E-mail: tsparkjp@knu.ac.kr

편 집 인

고한서 성균관대학교 hanseoko@skku.edu	구남서 건국대학교 nsgoo@konkuk.ac.kr	김흥수 동국대학교 heungsoo@dongguk.edu	박치용 한국수력원자력 parkchiyong@khnp.re.kr	유상석 충남대학교 stonex1004@hotmail.com
유승진 한국기계연구원 seungjinyoo@kimm.re.kr	윤현식 부산대학교 lesmodel@pusan.ac.kr	이경우 현대자동차 caselee@hyundai.com	임시형 국민대학교 shlim@kookmin.ac.kr	전주현 중앙대학교 memslee@kitech.re.kr
정영도 한국기계연구원 yjung@kimm.re.kr	홍주표 한국기술교육대학교 joopyo@koreatech.ac.kr	황욱렬 국립경상대학교 wrhwang@gnu.ac.kr		

부 편 집 인

구병춘 한국철도기술연구원 bcgoo@krri.re.kr	김동권 아주대학교 dkim@ajou.ac.kr	김태진 전북대학교 tjkim@jbnu.ac.kr	문장혁 중앙대학교 jhmoon84@cau.ac.kr	박원만 ㈜엘쏠텍 wmpark@elsoltec.com
박종원 한국기계연구원 jwpark@kimm.re.kr	손정현 부경대학교 jhsohn@pknu.ac.kr	송시몬 한양대학교 simonsong@hanyang.ac.kr	송찬호 한국기계연구원 sch@kimm.re.kr	신재호 경일대학교 jhshin@kiu.kr
이봉기 전남대학교 b.lee@jnu.ac.kr	정훈의 울산과학기술원 hoonejeong@unist.ac.kr	조주형 한국기계연구원 antocho@kimm.re.kr	최동일 명지대학교 dongilc@mju.ac.kr	최승준 LS Mtron hydride@lsmtron.com

한상목
한국지질자원연구원
smhan@kigam.re.kr

대한기계학회논문집 C
제11권 제2호

발 행 일 2023년 9월 1일
발 행 인 사단법인 대한기계학회 회장 윤의성
편 집 인 박태선
발 행 소 사단법인 대한기계학회, 서울시 강남구 테헤란로 7길 22
http://www.ksme.or.kr, TEL : (02)501-3646~8, FAX : (02)501-3649
은 행 지 로 7519743번
전 산 조 판 처 (주) 동 국 문 화

대한기계학회
KSME www.ksme.or.kr