

한국정밀공학회지

JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR
PRECISION ENGINEERING

VOLUME 41, NUMBER 5

May 2024

ISSN 1225-9071 (Print)

ISSN 2287-8769 (Online)

Editor-in-Chief

Bo Hyun Kim

Soongsil University
bhkim@ssu.ac.kr

Editors

Jihwan An
POSTECH

Baeksuk Chu
Kumoh National Institute of Technology

Won-Shik Chu
Gyeongsang National University

Doo-Man Chun
University of Ulsan

Koo Hyun Chung
University of Ulsan

Duhwan Mun
Korea University

Jihong Hwang
Seoul National University of Science & Technology

Jonghan Jin
Korea Research Institute of Standards & Science

Maolin Jin
Korea Institute of Robotics & Technology Convergence

Dong Sung Kim
POSTECH

Yang Jin Kim
Pusan National University

Seung Hwan Ko
Seoul National University

Moonkyu Kwak
Kyungpook National University

Sung-Mook Kang
Daegu Catholic University

Changwoo Lee
Konkuk University

Chang-Whan Lee
Seoul National University of Science & Technology

Hyunseop Lee
Dong-A University

Jongkil Lee
Andong National University

Hyung Wook Park
UNIST

Min Soo Park
Seoul National University of Science & Technology

Jung Woo Sohn
Kumoh National Institute of Technology

Chul Ki Song
Gyeongsang National University

Duck Hyun Wang
Kyungnam University

Sung Ho Yoon
Kumoh National Institute of Technology

Members of Editorial Board

Jangho Bae
Kyungsung University

Younghak Cho
Seoul National University of Science & Technology

Dongwhi Choi
Kyung Hee University

Jin-Seung Choi
Konkuk University

Jungwook Choi
Chung-Ang University

Young-Man Choi
Ajou University

Jinah Jang
POSTECH

Yongho Jeon
Ajou University

Bongchul Kang
Kookmin University

Hyun-Wook Kang
UNIST

Beomjoon Kim
University of Tokyo

Chang-Ju Kim
Korea Institute of Machinery & Materials

Gap-Yong Kim
Iowa State University

Jae-Yeol Kim
Chosun University

Kee Joo Kim
Tongmyong University

Woo Kyun Kim
University of Cincinnati

Patrick Kwon
Michigan State University

Bong-Kee Lee
Chonnam National University

Donghun Lee
Soongsil University

Howon Lee
Seoul National University

Kwang-II Lee
Kyungil University

Sangkee Min
University of Wisconsin-Madison

Jungjae Park
Korea Research Institute of Standards & Science

Jung Whan Park
Yeungnam University

Simon Park
University of Calgary

Hae-Sung Yoon
Korea Aerospace University

JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR PRECISION ENGINEERING

VOLUME 41, NUMBER 5 / May 2024

ISSN 1225-9071 (Print) / 2287-8769 (Online)

Aims and Scope The Journal of the Korean Society for Precision Engineering is devoted to publishing original research articles on all aspects of precision engineering and manufacturing. Specifically, the journal focuses on various fields including: Precision Manufacturing Processes, Precision Measurements, Robotics, Control and Automation, Smart Manufacturing System, Design and Materials, Machine Tools, Nano/Micro Technology, Bio Health, Additive Manufacturing, Green Manufacturing Technology.

Year of Launching Journal of Korea Society for Precision Engineering was launched by the Korea Society for Precision Engineering in June of 1984. The name was changed to the Journal of the Korean Society for Precision Engineering in December of 1985.

Abbreviation of Title J. Korean Soc. Precis. Eng.

Full Text Available at <http://jkspe.kspe.or.kr/>

Indexed in SCOPUS, Korea Citation Index (KCI) and Korea Science

Subscription Fee Free to KSPE Members (Membership Fee: 50,000 KRW per Year)

Published on May 1, 2024 (Monthly)

Published by The Korean Society for Precision Engineering

Publisher Byung-Kwon Min (President, KSPE)

Manuscript Editor Eunhee Park

Journal Office 12F, SKY 1004 Bldg., 50-1 Jungnim-ro, Jung-gu, Seoul, 04508, Republic of Korea / TEL +82-2-518-2928 / FAX +82-2-518-2937 / paper@kspe.or.kr / <http://www.kspe.or.kr>

Printed by Hanrimwon Co., Ltd.

Copyright © The Korean Society for Precision Engineering

This work was supported by the Korean Federation of Science and Technology Societies (KOFST) Grant funded by the Korean Government.

목차

특 집 주제: 주제: 스마트로봇 및 모빌리티 기술
책임편집인 : 정재일(국민대학교)

- 333 VR 인터페이스 기반의 동적 물체의 원격 매니플레이션을 위한 실시간 환경 가상화 방법
정재훈, 이진강, 김단, 최해겸, 이동훈
- 341 Object Pose 추정을 이용한 의수 손목 제어
박성빈, 윤상호, 신은수, 최태환, 남우철
- 347 Steer-by-Wire 시스템 고장 대응을 위한 차량 거동 기반 전륜 조향각 추정
최승용, 조완기, 유승한
- 355 강화학습에 기반한 전기차의 에너지 최적 주행제어
김현중, 김동민, 김수현, 이희윤
- 365 자율주행 발렛 주차 시스템을 위한 계층적 주차 경로 계획
이찬영, 이기범
- 375 자율주행 차량의 능동안전성 시험을 위한 초박형 타깃로봇의 현가장치 설계
유재상, 김도현, 정재일

일 반

- 383 철도용품 기술기준 기반 FMECA 수행에 관한 연구
이강호, 신덕호, 조현정, 이강미
- 395 하이퍼루프 초전도 전자석과 진공튜브 연결부 사이에 발생하는 자기 저항력 특성 연구
임정열, 최수용
- 401 Poppy Robot의 모션 제어를 위한 디지털 트윈 기반의 머신러닝 및 Openpose의 활용 방법에 관한 연구
김범진, 김석, 조영태
- 407 반응표면법을 이용한 유도가열식 전기레인지 코일 형상 최적 설계 기법
황순재, 이창연, 홍석무

JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR PRECISION ENGINEERING

VOLUME 41, NUMBER 5 / May 2024

ISSN 1225-9071 (Print)
ISSN 2287-8769 (Online)

CONTENTS

SPECIAL **Title: Smart Robot and Mobility Technology**

Guest Editor: Geon Hee Kim (Hanbat University)

- 333 Real-time Environmental Virtualization Method for Telemanipulation of Dynamic Objects Using VR Interface
Jae Hoon Jeong, Jin Gang Lee, Dan Kim, Hae Gyeom Choi, and Dong Hun Lee
- 341 Wrist Control of Prosthetic Hands with Object Pose Estimation
Seong Bin Park, Sang Ho Yun, Eun Soo Shin, Tae Hwan Choi, Woo Chul Nam
- 347 Vehicle-motion-based Front Wheel Steer Angle Estimation for Steer-by-Wire System Fault Tolerance
Seungyong Choi, Wanki Cho, and Seung-Han You
- 355 Optimal Eco Driving Control for Electric Vehicle based on Reinforcement Learning
Hyun Joong Kim, Dong Min Kim, Su Hyeon Kim, and Heeyun Lee
- 365 Hierarchical Path Planning Method for Automated Valet Parking Systems
Chanyoung Lee and Kibeom Lee
- 375 Suspension Mechanism Design of a Low-platform Target Robot for Evaluating Autonomous Vehicle Active Safety
Jae Sang Yoo, Do Hyeon Kim, and Jayil Jeong

REGULAR

- 383 A Study on FMECA by Technical Specification for Railway Constituent
Kang Ho Lee, Duck Ho Shin, Hyun Jeong Jo, and Kang Mi Lee
- 395 Characteristics of Magnetic Drag Forces near Vacuum Tube Junctions for Hyperloop Using HTS Magnets
Jungyoul Lim and Suyong Choi
- 401 A Study on How to Utilize Digital Twin-based Machine Learning and Openpose for Poppy Robot's Motion Control
Bum Jin Kim, Seok Kim, and Young Tae Cho
- 407 Optimal Design Technique for the Shape of Induction Heating Electric Range Coil Using Response Surface Method
Soonjae Hwang, Changyeon Lee, and Seokmoo Hong

책임편집인
정재일
국민대학교



스마트로봇 및 모빌리티 기술 Smart robot and mobility technology

- (1) VR 인터페이스 기반의 동적 물체의 원격 매니플레이션을 위한 실시간 환경 가상화 방법
- (2) Object Pose 추정을 이용한 의수 손목 제어
- (3) Steer-by-Wire 시스템 고장 대응을 위한 차량 거동 기반 전문 조향각 추정
- (4) 강화학습에 기반한 전기차의 에너지 최적 주행 제어
- (5) 자율주행 발렛 주차 시스템을 위한 계층적 주차 경로 계획
- (6) 자율주행 차량의 능동안전성 시험을 위한 초박형 로봇의 현가장치 설계

로봇기술의 최신 트렌드는 스마트 로봇의 개발과 로봇 기술의 모바일 플랫폼의 적용, 즉 모빌리티 기술이라고 할 수 있다. 로봇의 스마트화는 크게 외부 물체의 상황을 센싱을 통하여 측정하고 그 측정 데이터를 이용하여 대상 물체의 위치, 속도 등의 운동을 측정하는 것으로 시작하며, 측정된 결과를 바탕으로 대상 로봇시스템의 매니플레이션을 자동화하여 환경에 적응시킬 수 있게 하는 작업이 흔히 수행된다. 모빌리티 시스템은 모바일 로봇의 기술분야가 자동차 및 드론 시스템처럼 사람이 타고 다닐 수 있는 수송기술 분야로 확장된 것으로 볼 수 있다. 모빌리티 분야는 지상 이동의 경우에 자동차의 형태를 가지며, 이동을 위한 기계시스템인 자동차에 각종 센서 및 통신을 이용하여 스스로 주행할 수 있는 자율주행 자동차로 발전하였다. 자율주행 자동차는 모바일 로봇의 특성인 주위환경에 따른 적응적 이동, 동시적위치 추적 및 지도작성 (SLAM) 등을 이용한 주행 제어가 적용되고 있으며, 특히, 현대의 자율주행 자동차는 차량에 설치된 각종 센서등을 센서를 이용하여 모빌리티 기술은 로봇분야에서 개발된 최적 주행 제어, 경로계획, 자체 고장 감지 및 대응 등의 기술이 모빌리티 분야에 적용되며 발전하고 있다.

본 특집에서는 최근 로봇기술의 최신 동향이라고 할 수 있는 스마트로봇 기술과 모빌리티 기술을 소개한다. 특히 스마트 로봇 분야에서는 VR 인터페이스를 기반으로 하는 실시간 환경 가상화 및 Object 자세 추정을 통한 의수 손목제어를 소개한다. 매니플레이션을 기반으로 하는 가상환경 제작 및 말단장치 개발 분야를 확인할 수 있다. 모빌리티 분야에서는 자율주행 차량의 시스템 고장 대응을 위한 조향각 추정 알고리즘, 전기차 시스템의 에너지 최적주행제어, 자율주행 차량의 주차 시스템을 위한 경로계획 알고리즘, 자율주행 차량의 안전성 시험을 위한 로봇의 현가 장치 설계등에 대한 내용을 다룬다. 본 특집논문이 최신의 로봇 트렌드의 연구를 한국정밀공학회 회원들께 소개하는 좋은 기회가 되기를 바라며, 끝으로 좋은 논문을 준비해주신 저자분께 감사드린다.

• 특집 • 스마트로봇 및 모빌리티 기술(Smart Robot and Mobility Technology)

VR 인터페이스 기반의 동적 물체의 원격 매니플레이션을 위한 실시간 환경 가상화 방법

Real-time Environmental Virtualization Method for Telemanipulation of Dynamic Objects Using VR Interface

정재훈¹, 이진강², 김 단¹, 최해겸¹, 이동훈¹
Jae Hoon Jeong¹, Jin Gang Lee², Dan Kim¹, Hae Gyeom Choi¹, and Dong Hun Lee¹

¹ 숭실대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Soongsil University)

² 성균관대학교 지능형로봇학과 (Department of Intelligent Robotics, Sungkyunkwan University)

Corresponding Author / E-mail: dhlee04@ssu.ac.kr

ORCID: 0000-0003-1814-2683

KEYWORDS: Telemanipulation (원격 제어), VR interface (VR 인터페이스), 3D visual map (3차원 시각 지도), Telepresence (원격 현장감)

With the evolution of robotic technology, the expansion of operations into challenging environments underscores the growing need for effective teleoperation systems. In such an environment, robots or machines can improve the efficiency and safety of tasks by delivering more detailed and accurate information to workers through virtual reality (VR). Current teleoperation systems have limitations in providing a comprehensive understanding of the work environment. Accordingly, this study proposes a technology that utilizes VR to provide a high level of telepresence to workers and enable intuitive control. To achieve this, we introduce a pre-generated computer-assisted design model for static objects beyond the viewing area of RGB-D cameras and a method to update the point cloud of the target objects, which are dynamic objects, in real-time. By incorporating this information, we created a 3D visual map and delivered it to the operator in real-time through HMD, enabling the operator to clearly recognize the robot's current location and surroundings. In addition, we introduced hand motion recognition through HMD viewpoints and VR controllers, allowing the operator to intuitively control the robot. These techniques can improve the efficiency and safety of remote work.

Manuscript received: March 11, 2024 / Revised: April 4, 2024 / Accepted: April 9, 2024

1. 서론

로봇 기술의 발전에 따라 사람이 접근할 수 없는 지역에서의 작업 또는 시간과 비용의 절감을 위해 원격 제어(Telemanipulation) 기술과 관련된 연구가 활발하게 진행되고 있다[1-3]. 로봇이 재난 환경, 산악 지역, 우주 공간 등 다양한 환경에서 인간의 업무를 보조하거나 대행하는 경우, 이러한 로봇의 효율적인 원격 제어가 필수적으로 요구되고 있다. 그중에서도 가상 현실(Virtual Reality, VR)과 증강 현실(Augmented Reality, AR)을 통한 원격 제어는 사용자에게 원격 현장감(Telepresence)을 제공함으로써

효과적인 작업 수행을 가능하게 한다. 따라서 VR과 AR을 활용한 원격 제어 연구는 최근 몇 년 동안 활발하게 이루어지고 있다[4,5].

VR/AR 기반 원격 현장감을 위한 시각 정보 전달 기술에 관한 연구[6]에서는 원격 현장감의 필요성과 VR/AR 기반의 원격 현장감을 위한 시각 정보 전달 기술 중 Point Cloud, 복셀(Voxel), View Synthesis와 객체 자세 추정의 특징과 문제점에 대해 설명하였다. 그중 Point Cloud의 경우, 원격 환경을 그대로 전달하기 때문에 사용자가 환경에서 객체를 구분하기 어렵다는 단점이 있다.

Head Mounted Display (HMD)를 활용해 4족 보행 로봇을 원격으로 제어한 연구[7]에서는 VR 환경을 통해서 작업자에게

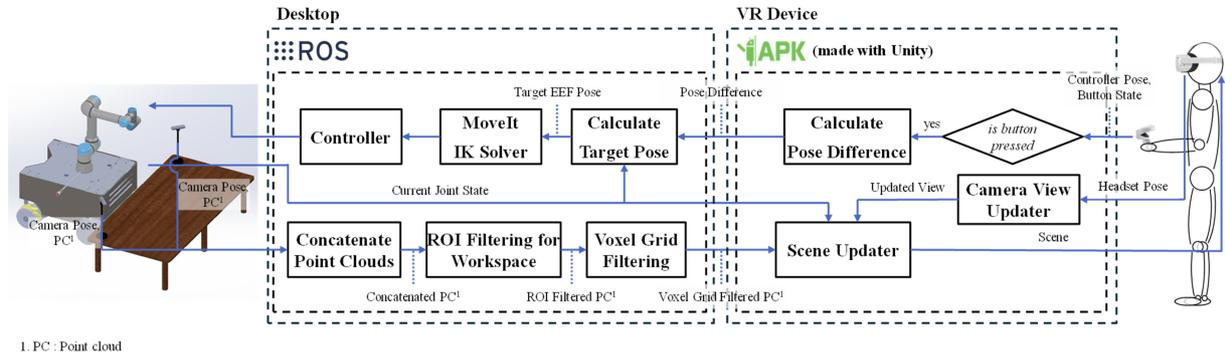


Fig. 1 Framework of VR interface for telemanipulation

로봇에 부착된 카메라로부터 얻은 Depth 정보와 RGB 이미지 정보 그리고 로봇의 현재 상태에 대한 정보를 실시간으로 제공하여 Target Object를 Pick and Place 하는 것을 목표로 한다. 하지만 로봇에 부착된 카메라로부터 작업자에게 전송된 화면은 2D 이미지로 제공되는 반면, 로봇의 현재 상태는 3D로 표현되기 때문에 작업자는 로봇의 카메라 화면과 로봇의 상태를 연결 지어 이해해야 된다는 문제점이 존재한다.

HMD를 활용해 Manipulator를 원격 제어하는 연구[8]에서는 작업자에게 로봇의 현재 상태와 로봇의 부착된 카메라의 RGB 이미지, Point Cloud 데이터를 실시간으로 제공한다. 이 데이터를 통해 작업자는 현재 로봇의 상태를 파악하고, Target Object와 Manipulator End Effector(이하 EEF) 사이의 거리를 쉽게 파악할 수 있다. 하지만 로봇에 부착된 카메라의 현재 Point Cloud만을 활용하기 때문에 Field of View(이하 FOV) 내의 환경 정보를 얻을 수는 있지만, 로봇이 위치한 전체적인 환경에 대한 포괄적인 정보를 얻을 수 없다는 문제점이 존재한다.

본 연구는 로봇의 현재 자세와 작업 공간의 이해를 돕고, FOV 내에 동적인 물체에 대한 실시간 업데이트를 통해 원격 작업 환경의 원격 현장감을 향상시키는 기술을 제시한다. 사전에 작업 환경의 모델링을 통해 CAD 모델과 획득된 Point Cloud를 결합하여 3D Visual Map을 생성한다. 이를 통해 작업자는 작업 환경을 더 명확하게 이해할 수 있다. 또한, 작업자의 시점을 작업자가 바라보는 방향을 기반으로 동적으로 설정하여 작업자가 필요한 위치와 방향에서 작업 환경을 쉽게 파악할 수 있도록 지원한다. 3D Visual Map은 작업자의 HMD로 공유되어 작업자가 로봇의 현재 자세와 주변 환경을 명확하게 인식할 수 있도록 한다. 더불어, VR 컨트롤러를 통해 작업자의 손동작을 실시간으로 추적하여 Manipulator를 직관적으로 원격 제어함으로써 작업 효율성을 향상시킨다. 또한 본 논문에서 제안하는 방법을 활용하여 실험을 통해 Target Object를 Pick and Place 하는 작업의 효율성과 정확성이 향상됨을 증명한다.

2. 문제 정의

본 논문에서는 원격 현장감 있는 VR 인터페이스 개발을 위해

RGB-D 카메라를 통해 획득한 Point Cloud 정보를 전처리 과정을 통해 Target Objects' Point Cloud와 Solidworks를 통해 제작한 고정된 환경 요소들의 CAD Model, Manipulator 상태가 포함된 3D Visual Map을 생성한다. 생성된 3D Visual Map을 VR 디바이스인 Meta 사의 Oculus Quest 2(이하 VR 디바이스)를 활용하여 VR 인터페이스를 통해 작업자에게 제공한다. 이때 RGB-D 카메라의 데이터 처리와 Manipulator의 제어는 데스크탑 OS인 Ubuntu 20.04에서 ROS Noetic을 활용하여 개발하였고, VR 인터페이스의 개발은 게임 엔진 중 Unity를 사용하여 Fig. 1와 같이 진행하였다.

작업 공간 내의 Target Object를 확인하기 위해 작업 공간의 양 옆으로 설치한 두 카메라의 데이터를 하나의 일관된 좌표계로 매핑하고 병합함으로써 통합된 시각적 정보를 얻는다. 다음으로, 관심 영역(Region of Interest, ROI)을 설정하고 Passthrough Filter를 적용하여 특정 작업 영역에 대한 정보를 추출한다. 데이터 처리의 효율성을 높이기 위해 Voxel Grid Filter를 사용하여 중복점을 제거하고 Down Sampling된 Point Cloud를 생성한다. 이 데이터는 Unity의 Scene Updater를 통해 VR 헤드셋으로 전송된다.

원격 제어를 위해 작업자가 헤드셋을 통해 Manipulator 주변 환경을 공유받고 컨트롤러의 버튼을 누른 상태에서 VR 디바이스의 컨트롤러를 움직일 경우, 컨트롤러의 자세 변화량을 ROS로 전달한다. ROS에서는 자세 변화량을 활용해서 EEF의 목표 자세를 계산한다. EEF의 목표 자세를 IK (Inverse Kinematics) Solver에서 Manipulator 각 축의 각도로 역기구학 해석한 후 Controller에서 Manipulator를 제어한다.

3. VR 인터페이스 디자인 및 원격 제어

3.1 작업 공간 내 Object 스캔

Manipulator의 작업 공간 내의 존재하는 Objects를 특정하고 VR 인터페이스에 시각화하기 위해서 두 대의 RGB-D 카메라를 통해 얻은 RGB 정보를 포함한 Point Clouds를 사용한다. 전처리 과정에서 연산 횟수를 최소화하기 위해 두 Point Clouds를 병합한다. 두 Point Clouds를 하나의 Point Cloud로 병합하기 위해, 각 RGB-D 카메라로부터 획득한 Point Clouds의 좌표는 각

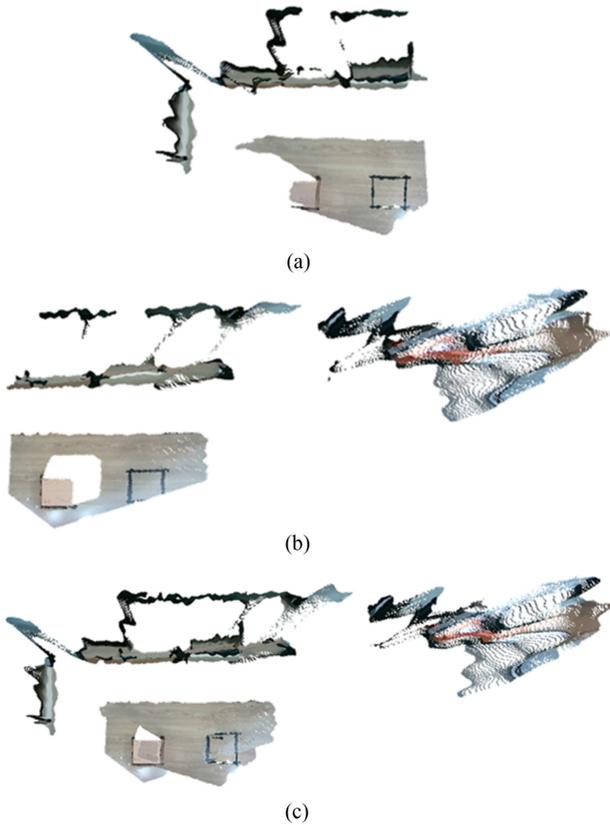


Fig. 2 Concatenate point clouds (a) Right camera's point cloud, (b) Left camera's point cloud, and (c) Concatenated point cloud

RGB-D 카메라의 자세를 원점으로 하는 좌표계로부터 통일시키기 위해 새롭게 생성한 기준 좌표계로 매핑(Mapping)하여 표현한다. 각 Point Cloud를 기준 좌표계로 매핑하는 과정은 식(1)과 같다.

For every points in pointcloud,

$$\begin{bmatrix} x_{map} \\ y_{map} \\ z_{map} \\ 1 \end{bmatrix} = {}_{reference}^{camera_i}T \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (i = 1, 2) \quad (1)$$

$x_{map}, y_{map}, z_{map}$ 은 매핑 후 좌표를 의미한다. ${}_{reference}^{camera_i}T$ 는 각 카메라 좌표계로부터 기준 좌표계로 매핑을 위한 변환 행렬이고, x, y, z 는 매핑 전 좌표를 의미한다. 식(1)을 통해 하나의 기준 좌표계로 매핑한 두 Point Clouds를 병합한다. 위와 같은 과정으로 서로 다른 시점의 Point Cloud인 Figs. 2(a)와 2(b)를 병합하여 Fig. 2(c)와 같은 결과를 획득하였다.

병합된 Point Cloud는 작업 공간 내의 Objects만 특정하기 위해서 다음과 같은 과정으로 전처리한다. 먼저 Objects에 해당하는 점들만 남을 수 있도록 카메라의 FOV 내에 고정된 환경을 제외한 영역을 ROI로 설정한다. Passthrough Filter를 통해 XYZ 좌표 공간에서 ROI 범위에 해당하는 각 축에 대한 최솟값과 최댓값을 설정하여 범위에 속하지 않는 점들을 제거한다.

이후 병합된 Point Cloud에서 중복되거나 불필요한 정보를



Fig. 3 Removing noise data with DBSCAN

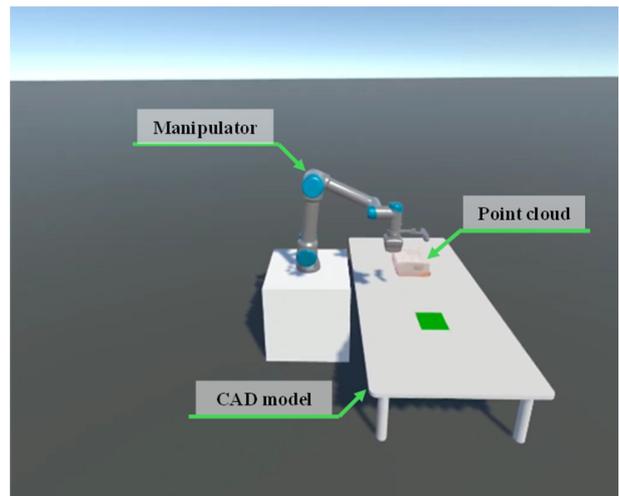


Fig. 4 VR Interface including 3D visual map

제거하고 데이터를 효과적으로 축소하기 위해 Voxel Grid Filter를 사용한다. Voxel Grid Filter는 3D 공간을 격자로 분할하고, 각 격자 내에서의 대푯값으로 복셀화하여 작업 공간 내의 객체를 표현하면서도 계산 비용을 최소화한다.

최종적으로, 복셀화된 Point Cloud의 Noise를 제거하기 위해 밀도 기반 클러스터링(DBSCAN, Density-based Spatial Clustering of Applications with Noise)을 적용한다. DBSCAN은 각 점을 중심으로 하는 반경(Epsilon) 내에 최소한의 이웃 점이 존재하면 해당 점을 클러스터에 할당한다. 이웃 점의 밀도가 일정 기준 이상이 되면 클러스터를 확장한다. 이 과정에서 클러스터에 속하지 못한 점들을 Noise로 간주한다. DBSCAN을 활용하여 작업 공간 내의 Object를 명확하게 구분하고 Noise를 제거한다. Fig. 3에서 ROI Filter와 Voxel Grid Filter를 거친 Point Cloud에서 DBSCAN을 통해 Noise가 제거됨을 확인할 수 있다.

3.2 VR 인터페이스

Manipulator를 원격으로 제어할 작업자에게 Manipulator의 현재 상태 및 Target Objects와 같은 환경 정보를 시각적으로 제공하기 위해 Unity를 사용한 VR 인터페이스를 개발한다. 인터페이스를 통해 3차원 공간에 전처리된 Point Cloud와 Solidworks를 사용하여 CAD Model로 제작한 고정된 환경 요소들을 Fig. 4와 같이 렌더링한다. Manipulator의 CAD Model은 ROS로부터 현재 조인트 상태를 반영하여 위치 및 방위를 현재 Manipulator의 상태와 동일하게 조정한다. 이를 통해 작업자는 VR 환경에서

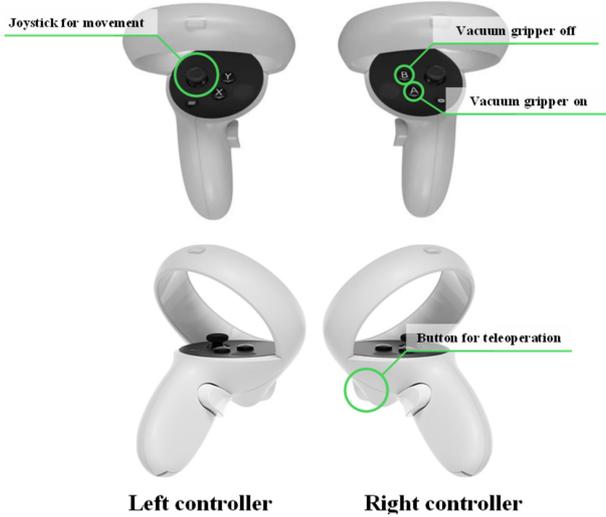


Fig. 5 Controller buttons for operation

Manipulator의 현재 상태를 시각적으로 파악할 수 있다.

VR 공간에서의 상호작용을 통해 원격 제어를 하기 위해서 작업자의 VR 디바이스를 통해 헤드셋과 컨트롤러의 자세 및 조이스틱과 버튼의 상태를 실시간으로 획득한다. 이 정보를 활용하여 VR 환경에서 양손의 컨트롤러를 렌더링하여 작업자가 현재 가상 공간에서 어떻게 상호작용하고 있는지 시각적으로 확인할 수 있다. 또한, Fig. 5와 같이 지정된 왼쪽 컨트롤러의 조이스틱을 조작하면 입력된 값을 2D 벡터로 표현한다. 2D 벡터를 바탕으로 VR 공간상의 시점을 이동시키기 위한 이동 방향과 속도를 결정한다. 조이스틱을 활용한 시점의 이동은 작업자는 물리적인 이동 없이도 VR 공간 내에서 다양한 위치로 이동할 수 있다. 또한, VR 헤드셋의 위치 및 방위를 활용하여 VR 공간 내에서 시점의 위치와 방위를 동적으로 조절한다. 이를 통해 작업자는 컨트롤러의 조이스틱 조작과 헤드셋의 위치 및 방위 조절을 통해 다양한 시점에서 VR 공간의 작업 환경을 관찰할 수 있다. 이러한 시스템은 고정된 위치에서 작업을 수행하는 작업자가 다양한 시점에서 작업 공간을 자세히 살펴보고 상호작용할 수 있도록 한다.

3.3 원격 제어

Manipulator를 VR 디바이스의 컨트롤러를 활용해서 원격 제어하기 위해서 다음과 같은 과정을 통해 EEF의 목표 자세를 계산하였다. 먼저, Fig. 5와 같이 지정된 오른쪽 컨트롤러의 버튼이 눌렸을 경우, 그때의 컨트롤러의 자세와 EEF의 자세를 각각 Home Pose로 설정한다. 버튼이 눌리는 동안 VR 공간의 원점에서 바라본 컨트롤러의 Home Pose ${}^{ORG_{VR}}_{home}T$ 와 현재 컨트롤러의 자세 ${}^{ORG_{VR}}_{current}T$ 로 식(2)을 통해 컨트롤러의 Home Pose로부터 자세의 변화량 ${}^{home_{VR}}_{current}T$ 를 구한다.

$${}^{home_{VR}}_{current}T = {}^{ORG_{VR}}_{home}T^{-1} {}^{ORG_{VR}}_{current}T \quad (2)$$

컨트롤러의 Home Pose로부터 자세의 변화량 ${}^{home_{VR}}_{current}T$ 와

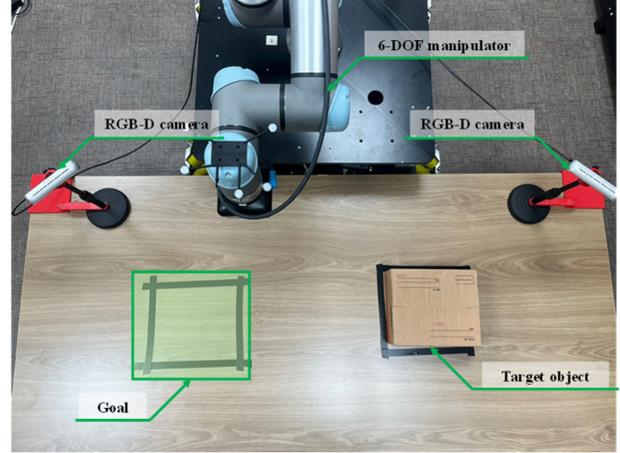


Fig. 6 Experimental set up including 6-DOF manipulator, two RGB-D cameras, target object and goal

EEF의 Home Pose ${}^{ORG_{mani}}_{home_{EEF}}T$ 를 통해 EEF의 목표 자세를 구할 수 있다. 이때 VR 공간의 좌표계 Manipulator의 좌표계가 다르므로, 식(3)을 통해 VR 공간의 좌표계로부터 Manipulator의 좌표계로 변환하는 행렬인 ${}^{ORG_{mani}}_{ORG_{VR}}T$ 를 활용하여 EEF의 목표 변화량인 ${}^{home_{EEF}}_{target}T$ 를 구한다.

$${}^{home_{EEF}}_{target}T = {}^{ORG_{mani}}_{ORG_{VR}}T {}^{home_{VR}}_{current}T \quad (3)$$

최종적으로, 계산된 EEF의 목표 변화량 ${}^{home_{EEF}}_{target}T$ 과 EEF의 Home Pose ${}^{ORG_{mani}}_{home_{EEF}}T$ 를 활용하여 EEF의 목표 자세 ${}^{ORG_{mani}}_{target}T$ 를 계산한다. 그 과정은 식(4)와 같다.

$${}^{ORG_{mani}}_{target}T = {}^{ORG_{mani}}_{home_{EEF}}T {}^{home_{EEF}}_{target}T \quad (4)$$

4. 실험 평가

4.1 실험환경 구축

본 논문에서는 새롭게 디자인한 원격 제어를 위한 VR 인터페이스를 검증하기 위해 실험환경을 Fig. 6와 같이 구축하였다. 6-DOF Manipulator인 Universal Robotics 사의 UR5e를 원격 제어하여 Target Object의 Pick and Place를 수행할 때, Objects의 위치, 크기, 색상 등의 정보를 획득하기 위해 Fig. 6과 같이 작업 공간의 사각지대를 최소화하여 촬영할 수 있도록 RGB-D 카메라인 RealSense 사의 D455를 작업 공간의 양쪽으로 FOV가 겹치도록 두 대 설치하였다.

4.2 실험 방법

4.2.1 추중 정확성 평가

추중 정확성을 평가하기 위해 Fig. 7과 같이 작업자의 손과 Manipulator EEF에 마커를 부착하고 모션 캡처 카메라인

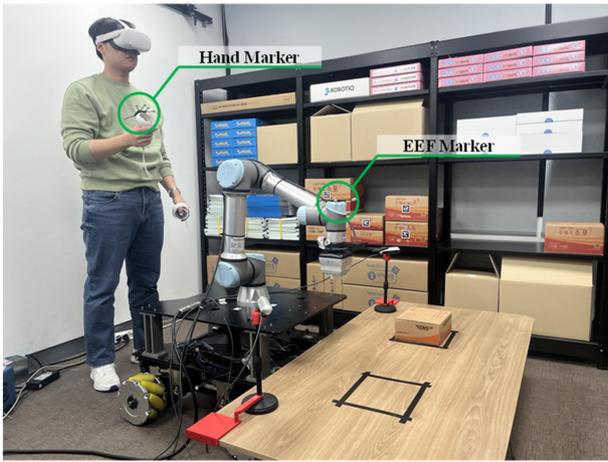
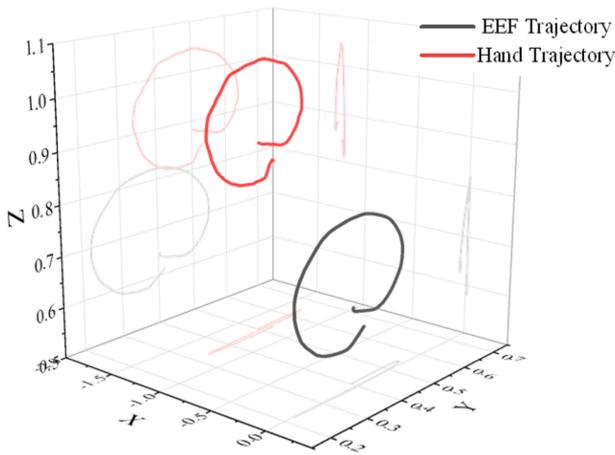
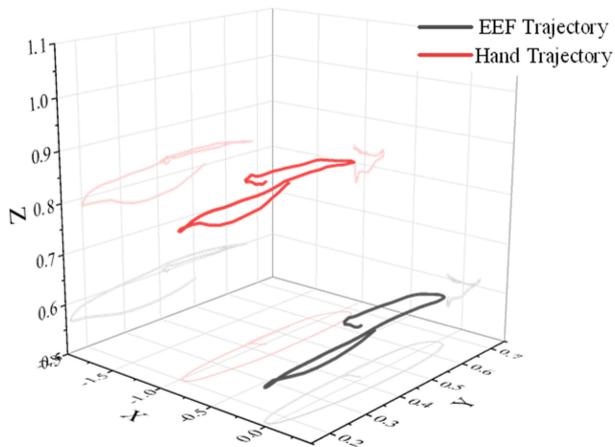


Fig. 7 Attached markers on operator's hand and manipulator EEF



(a) Drawing circle on YZ-plane



(b) Drawing circle on XY-plane

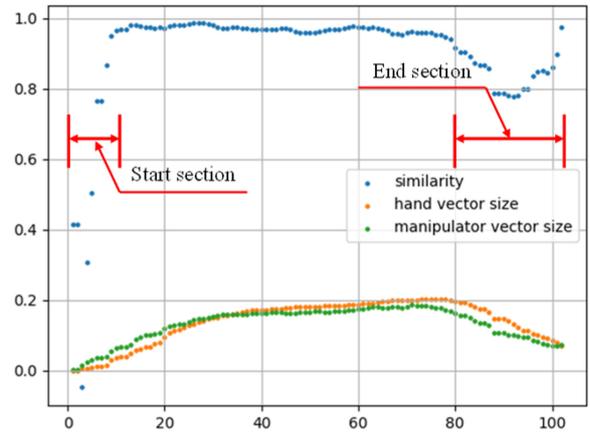
Fig. 8 Trajectory of operator's hand and manipulator EEF

Optitrack사의 Prime 13을 이용하여 원격 제어할 때 작업자의 손 궤적과 Manipulator EEF 궤적을 획득하였다.

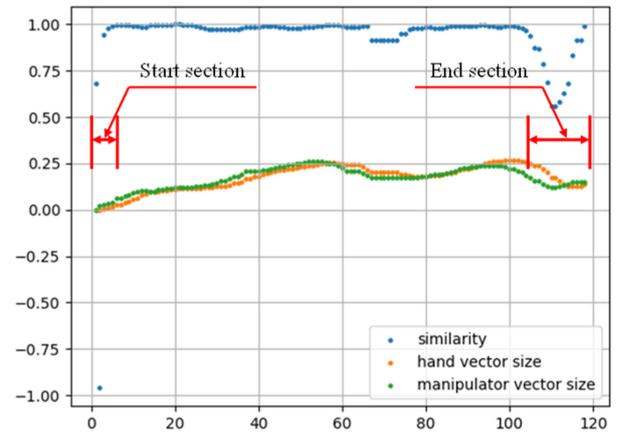
Figs. 8(a)와 8(b)는 각각 YZ 평면과 XY 평면에 원을 그렸을 때

Table 1 Cosine similarity between operator's hand trajectory and manipulator EEF trajectory

	Max	Min	Mean	Standard deviation
YZ-plane	0.985	-0.048	0.904	0.153
XY-plane	0.999	-0.961	0.937	0.197



(a) Drawing circle on YZ-plane



(b) Drawing circle on XY-plane

Fig. 9 Result of cosine similarity between operator's hand trajectory and manipulator EEF's trajectory

작업자의 손과 Manipulator EEF 궤적을 나타낸 것이다.

두 궤적의 유사성을 확인하기 위해 코사인 유사도(Cosine Similarity)를 활용한다. 코사인 유사도는 내적공간의 두 벡터 간 각도의 코사인 값을 이용하여 측정된 벡터 간의 유사한 정도를 의미한다. 식(5)을 통해 두 궤적의 시작점을 시점으로 하고 같은 시간에 측정된 두 궤적상의 점을 종점으로 하는 두 벡터의 코사인 유사도를 계산한다. 각 실험에 대한 코사인 유사도 결과는 Table 1과 Fig. 9와 같다.

$$similarity = \cos(\theta) = \frac{A \cdot B}{\|A\| \|B\|} \quad (5)$$

코사인 유사도의 평균은 YZ 평면에 원을 그렸을 때가 0.904,



Fig. 10 2D RGB image of two RGB-D cameras

Table 2 Comparison execution time and number of failures for picking

Tester	Method	Execution time	Number of failures
M1	2D RGB image	1min 55sec	2
	3D visual map	1min 52sec	0
M2	2D RGB image	2min 52sec	0
	3D visual map	2min 34sec	0
W1	2D RGB image	2min 30sec	0
	3D visual map	2min 13sec	0
W2	2D RGB image	3min 28sec	0
	3D visual map	3min 04sec	0

M : Man, W: Woman

XY 평면을 원을 그렸을 때 0.937로 두 궤적이 유사도가 높음을 알 수 있다. 이때 최솟값이 각각 -0.048, -0.961로, 코사인 유사도가 낮은 구간이 있음을 알 수 있다. 이는 Fig. 9의 두 그래프를 통해 두 벡터의 크기가 작은 원격 제어 시작 구간과 종료 구간에서 정지 상태에서의 측정 오차로 인해 유사도가 떨어지는 것을 확인하였다. 또한 코사인 유사도의 표준 편차가 낮은 것을 통해 대부분의 코사인 유사도가 평균에 가까움을 알 수 있다. 따라서 작업자의 손 궤적을 Manipulator EEF가 올바르게 추종함을 알 수 있다.

4.2.2 2D RGB 이미지와 3D Visual Map의 Pick and Place 작업 시간 비교

성인 남성 2명과 성인 여성 2명을 대상으로 Fig. 10과 같은 두 RGB-D 카메라로부터 획득한 서로 다른 시점의 2D RGB 이미지 또는 Fig. 4와 같은 3D Visual Map을 활용하여 하나의 Target Object에 대해서 Pick and Place를 수행하는데 걸리는 시간과 Picking에 실패한 횟수를 두 경우 각각 측정하였다. 그 결과는 Table 2와 같다.

측정 결과 모든 피실험자가 2D RGB 이미지를 활용하여 Pick and Place를 수행할 때보다 3D Visual Map을 활용하여 Pick and Place를 수행하였을 때 작업 시간이 평균 15.5초 짧은 것을 알 수 있다. 또한 3D Visual Map을 활용하여 Pick and Place를 수행한 경우 Picking에 실패한 경우가 없는 반면, 2D RGB 이미지를 활용하여 Pick and Place를 수행한 경우 Manipulator의 현재 자세를 알 수 없고 Target Object와 EEF 사이의 거리를 정확하게 가늠하지 못해 EEF와 Target Object가

충돌하는 경우가 발생하여 Pick and Place에 실패한 경우가 발생하였다. 이를 통해 Pick and Place를 수행할 때, 3D Visual Map을 활용하는 것이 2D RGB 이미지를 활용하는 것보다 작업의 정확성을 향상시키고 작업 시간이 단축됨을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 원격 현장감을 향상시키기 위해서 RGB-D 카메라의 Point Cloud 정보와 3D CAD Model 등으로 구성된 3D Visual Map을 생성하였다. 생성된 3D Visual Map을 기반으로 Manipulator의 원격 제어를 수행하는 작업을 위한 VR 인터페이스를 제안하고 이를 검증하기 위한 실험을 진행하였다.

제안한 VR 인터페이스를 활용한 원격 제어의 추종 정확성을 검증하기 위해 모션 캡처 카메라를 활용하여 작업자의 손 궤적과 Manipulator EEF의 궤적을 비교하는 실험을 진행하였다. 두 번의 실험 동안 EEF가 작업자의 손 궤적 사이의 코사인 유사도가 평균 0.9 이상임을 알 수 있었다. 이를 통해 Manipulator EEF가 작업자의 손 궤적을 정확하게 추종함을 알 수 있었다.

다음으로 작업자가 활용하기에 적합한가를 확인하기 위해 두 번의 같은 작업을 수행할 때 서로 다른 영상을 활용하는 실험을 진행하였다. 이를 통해 2D RGB 이미지를 활용하는 것보다 3D Visual Map을 활용하는 것이 작업 시간을 평균 15.5초 단축시키고 정확도를 향상시키는 것을 확인할 수 있었다.

위 실험들을 통해 본 논문에서 제안한 3D Visual Map 기반 원격 제어를 위한 VR 인터페이스가 원격 현장감을 가진다는 것을 확인하였다. 이를 통해 제안된 VR 인터페이스가 Pick and Place 등과 같은 원격 제어 작업을 수행할 때, 정확성을 향상시키고 수행시간을 단축시킬 수 있을 것이라 기대한다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 논문은 2024년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 지역진흥혁신인재양성사업(No. IITP-2024-RS-2022-00156360)과, 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(No. 2024R1F1A1074704), 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원(No. P0017033, 2024년 산업혁신인재성장지원사업)을 받아 수행된 연구임.

REFERENCES

1. Noh, D., Choi, H., Jeon, H., Kim, T., Lee, D., (2024), Upper extremity motion-based telemanipulation with component-wise rescaling of spatial twist and parameter-invariant skeletal kinematics, *Mathematics*, 12(2), 358.

2. Choi, H., Jeon, H., Noh, D., Kim, T., Lee, D., (2023), Hand-guiding gesture-based telemanipulation with the gesture mode classification and state estimation using wearable imu sensors, *Mathematics*, 11(16), 3514.
3. Pan, Y., Chen, C., Li, D., Zhao, Z., Hong, J., (2021), Augmented reality-based robot teleoperation system using RGB-D imaging and attitude teaching device, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 71, 102167.
4. Kim, M. U., Choi, J., Yoon, Y., Park, J., (2023), VR-based remote robotic control for reusable launch vehicle refueling, *Proceedings of the Symposium of the Korean Institute of communications and Information Sciences*, 582-583.
5. Stotko, P., Krumpfen, S., Schwarz, M., Lenz, C., Behnke, S., Klein, R., Weinmann, M., (2019), A VR system for immersive teleoperation and live exploration with a mobile robot, *Proceedings of the 2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 3630-3637.
6. Kim, M., Kim, H.-S., Kim, H.-J., Hwang, C.-H., (2023), Visual information transmission methods for virtual/augmented-reality-based telepresence, *Journal of Digital Contents Society*, 24(10), 2509-2517.
7. Jo, H.-H., Ishangulyyev, G., Kim, J.-Y., (2023), Development and motion control of a lightweight robot arm for teleoperation using VR headset, *Proceedings of the Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers-A*, 47(12), 927-935.
8. Su, Y., Chen, X., Zhou, T., Pretty, C., Chase, G., (2022), Mixed reality-integrated 3D/2D vision mapping for intuitive teleoperation of mobile manipulator, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 77, 102332.



Jae Hoon Jeong

B.Sc. candidate in the School of Mechanical Engineering, Soongsil University. His research interest is robot engineering.

E-mail: wogns1218@gmail.com



Jin Gang Lee

M.Sc. candidate in the Department of Intelligent Robotics, Sungkyunkwan University. His research interest is robot engineering.

E-mail: jinkanglee@g.skku.edu



Dan Kim

B.Sc. candidate in the School of Mechanical Engineering, Soongsil University. Her research interest is robot engineering.

E-mail: gdan7140@gmail.com



Hae Gyeom Choi

Ph.D. candidate in the School of Mechanical Engineering, Soongsil University. His research interest is robot engineering.

E-mail: choihg@soongsil.ac.kr



Dong Hun Lee

Professor in the School of Mechanical Engineering, Soongsil University. His research interest is robot engineering.

E-mail: dhlee04@ssu.ac.kr

• 특집 • 스마트로봇 및 모빌리티 기술(Smart Robot and Mobility Technology)

Object Pose 추정을 이용한 의수 손목 제어

Wrist Control of Prosthetic Hands with Object Pose Estimation

박성빈^{1,*}, 윤상호^{1,*}, 신은수¹, 최태환¹, 남우철^{1,#}
Seong Bin Park^{1,*}, Sang Ho Yun^{1,*}, Eun Soo Shin¹, Tae Hwan Choi¹, Woo Chul Nam^{1,#}

¹ 중앙대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Chung-Ang University)
Corresponding Author / E-mail: wcnam@cau.ac.kr, TEL: +82-2-820-5270

*These authors contributed equally to this work.
ORCID: 0000-0002-2747-4850

KEYWORDS: Prosthetic hand (의수), 6D Pose estimation (6D 포즈 추정), Wrist control (손목제어)

This paper introduces a novel approach for prosthetic wrist control, addressing limitations of traditional electromyography-based methods. While previous research has primarily focused on hand and gripper development, our study emphasizes the importance of wrist mobility for enhancing dexterity and manipulation skills. Leveraging a combination of visual data and inertial sensors, we proposed a system capable of estimating object orientation in real-time, enabling automatic and natural control of a prosthetic wrist. Our deep learning-based model can accurately interpret object posture from the user's perspective, facilitating seamless wrist movement based on object inclination. In addition, Gaussian filtering was employed to mitigate noise in image-based posture estimation while preserving essential trends. Through this approach, users can achieve natural positioning without needing additional muscle movements, thus significantly improving prosthetic usability and user experience.

Manuscript received: February 18, 2024 / Revised: March 30, 2024 / Accepted: April 1, 2024

1. 서론

인간 손목은 팔/손 시스템의 이동성에 크게 기여하여 손재주와 조작 능력에 있어서 큰 역할을 한다. 그러므로 손이나 그립퍼와 같은 엔드 이펙터를 통해 원하는 작업을 수행하는 능력을 구현하기 위한 로봇 및 보철 팔은 손목관절을 가지고 있다. 그러나, 의수에 관한 연구에서는 손목보다 손/그립퍼 개발에 초점을 맞추고 있다[1]. 최근 보철 연구에 따르면, 손목 보철물의 민첩성이 향상되면 손목 기능이 제한된 전통 의수 장치보다 조작 능력이 뛰어난 것으로 보고되었다[2]. 손목은 파지에 필요한 추가적인 병진 운동을 하지 않고도 시스템의 엔드 이펙터 방향을 지정할 수 있기 때문에 조작 능력을 크게 향상시킬 수 있다.

만약, 손목의 회전 움직임이 부족하면 손목과 팔의 다른 부분이 이를 보상하려고 하면서 통증, 불편함, 그리고 이차적인 골근계 질환의 발생 가능성이 커진다[3].

그동안의 의수 제품들은 주로 근전도(Electromyography) 센서를 활용한 손가락 제어 방식을 채택해왔다. 그러나 이러한 방식은 한 근육을 통해 여러 동작을 제어하기 때문에 손목과 손을 동시에 연속적으로 제어가 불가능하다. 이로 인해 사용자는 의도치 않은 중단을 겪거나 의도치 않은 움직임을 하게 되거나 정신적인 부담을 받을 수 있다. 시각 데이터에 기반한 의수 제어는 이러한 문제를 해결할 수 있다. 컴퓨터 비전은 실시간성을 보장할 수 있고 지속적으로 상황을 감지할 수 있기 때문에 의수 제어에 활용된 예가 있다. 의수의 파지 성능을 위해 Depth 카메라를 통해 파지 대상의 Orientation과 형상 및 크기 파라미터를 획득하는 데 사용되었으며 [4], 의수 손목에 위치한 카메라를 통해 딥러닝 기법의 이미지 Classification을 사용하여 대상을 파지하기에 적절한 제스처를 선택하는 것에 사용되었다[5].

본 연구에서는 단일 카메라와 관성 측정장치만으로 파지 대상의 형상 및 기울기를 추정하고 이를 이용하여 의수 손목을 자동적으로

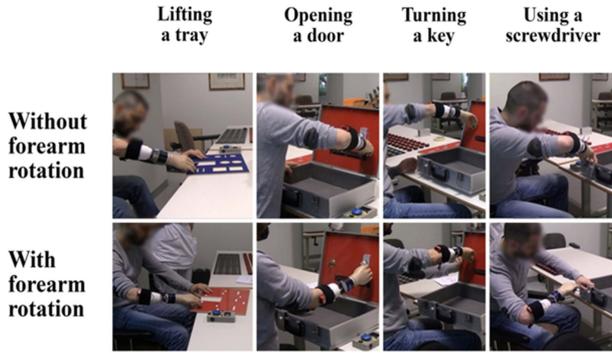


Fig. 1 Prosthetic hand with or without forearm rotation [2] (Adapted from Ref. 2 on the basis of OA)

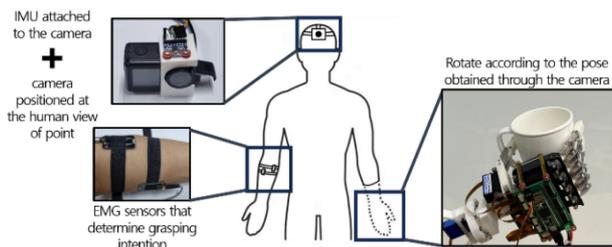


Fig. 2 The system overview

제어하여 사용자의 편의성 증대에 적용할 수 있음을 보이고자 한다. 본 논문의 2장에서는 의수를 구성하는 하드웨어, 3장에서는 제어부 설계에 관한 내용을 상세히 다루고, 4장에서는 제안한 방법을 적용한 의수와 그에 대한 테스트 베드에서의 실험 결과를 소개한다. 5장에서는 이러한 결과를 토대로 한 본 연구의 결론을 도출한다. 이를 통해 새로운 의수 제어 방식의 가능성과 향후 연구 방향에 대한 논의로 마무리하고자 한다.

2. 하드웨어 설계

2.1 시스템 개론

본 연구에서 개발된 시스템은 물체의 기울기를 감지해 의수를 알맞은 각도로 회전 후 파지한다. Fig. 2와 같이, 의수시스템은 시야 정보를 얻는 카메라, 카메라의 기울기를 보정하기 위한 관성측정센서(Inertial Measurement Unit, IMU), 파지 여부를 판단하는 근전도센서로 구성된 센서부, 그리고 물체를 파지하는 로봇손으로 구성된다.

2.1.1 파지부(Grasping Part)

본 연구에서 사용된 의수(Fig. 3)는 Linkage-driven 방식으로 제어하는 HRI Hand 모델을 참고하여 제작되었다[6]. 기존의 HRI Hand 모델과 비교하여, 본 연구를 위하여 제작된 의수는 다음과 같이 변경되었다. 첫째, 손목 회전 기능을 추가하기 위하여 HRI Hand의 하단을 수정해 서보 모터를 추가하고 제어 기판을 수정하였다. 둘째, 가벼우면서도 높은 내구성을 지닌 의수를 만들기 위하여, 손가락 관절에서 높은 하중을 받는 링크는 알루미늄으로

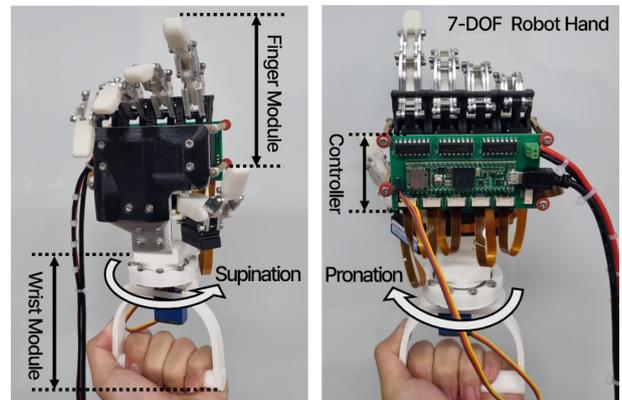
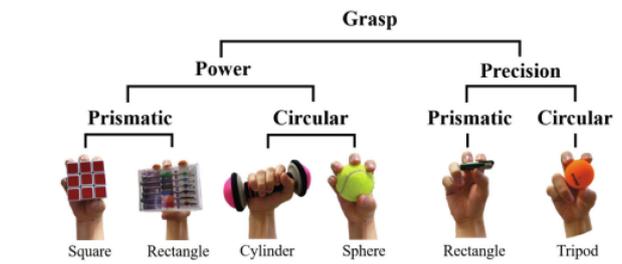
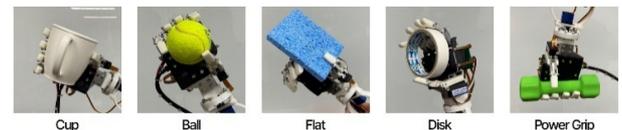


Fig. 3 Grasping part of the system



(a) The grasp taxonomy [6] (Adapted from Ref. 6 on the basis of OA)



(b) Applications to the multiple grasp target

Fig. 4 Illustration of the grasp performance

제작되었으며, 나머지 링크는 PLA/SLA를 이용한 3D 프린팅을 통하여 제작되었다.

완성된 의수는 약 0.8 kg의 무게를 지니며 검지부터 약지까지는 각각 하나의 리니어 모터, 엄지에는 2개의 리니어 모터를 사용하고 손목회전을 위한 서보 모터를 활용해 총 7자유도를 지닌다.

실제 사람의 손목과 전완의 움직임은 3자유도를 지니며 손목의 굽힘/펼(Wrist Flexion/Extension), 손목의 척측/요측 편위(Ulnar/Radial Deviation), 전완의 내/외회전(Forearm Pronation/Supination)이 있다[7]. 그 중에서 가장 중요한 축 방향의 회전인 전완의 내/외회전을 베어링과 서보 모터(SG-90, TowerPro)를 통해서 구현하였다.

제작한 의수의 다양한 형태에 대한 파지 기능을 검증하기 위해서 실험을 진행하였다. Fig. 4(a)와 같이 파지 대상이 되는 다양한 형태를 파지 형태에 따라 나누고 실제로 파지하였다(Fig. 4(b)). 실험 결과 Power Grip의 경우에는 약 5 kg의 물체를 파지할 수 있었으며, 다양한 파지 동작을 수행하는 것을 확인하였다.

2.1.2 센서부(Sensor Part)

카메라(Brave 7 LE, AKASO)는 파지하고자 하는 대상의 기울기 정보를 얻기 위해서 사용한다. 사람이 바라보는 방향의 물체를

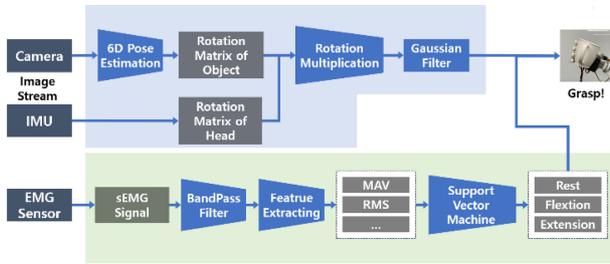


Fig. 5 Flow chart of the control procedure

감지하기 위해서 카메라는 사용자의 머리에 장착하였다. 카메라에서 얻은 물체의 기울기를 실제 좌표계로 보정하기 위해서 카메라에 관성 측정장치(MPU 6050, Invensense)를 고정해 카메라의 기울기를 측정한다. 관성 측정장치에 내장된 Digital Motion Processor (DMP)를 사용하여 자세 추정을 실행하였다. 물체의 파지 여부를 판단하기 위해서 전완의 2개 부위에 표면 근전도 센서(SEN0240, DFRobot)를 부착하여 평소 상태와 손을 쥐거나 펼 때를 판단한다. 노이즈의 영향을 줄이기 위해서 일반적으로 근전도 신호에 사용되는 20-500 Hz의 대역 통과 필터(Band-pass Filter, BPF)를 사용한다[8]. 필터를 통과한 데이터로부터 통계적 수치(MAV, RMS, VAR, WL, SSC, WAMP)를 학습데이터로 사용하였다. 이후 SVM (Support Vector Machine)으로 작성된 모델을 통해 Rest, Flexion, Extension으로 분류하였다. 근전도 신호가 Rest로 분류되면 의수의 손은 정지상태에 있고, Flexion으로 분류될 경우에는 파지 동작이 수행되고, Extension으로 분류될 경우에는 손을 펴는 동작을 수행하도록 제어하였다.

3. 제어부 설계

3.1 MCU 및 통신

Fig. 6은 전체 시스템의 제어 구성도를 보여주고 있다. 2개의 MCU가 각각 파지부와 센서부에서 사용되며 MCU로는 Teensy 4.1(32-bit ARM Processor, 600 MHz)을 사용한다. 파지부에서 MCU는 PWM 신호를 모터로 전송하여 손목 회전 및 손가락의 움직임을 제어한다. 센서부에서는 2채널 표면 근전도 센서와 카메라에 고정된 관성 측정장치에서 각각 1,000, 10 Hz의 Sampling Rate로 센서값을 측정한다. 이미지 처리와 근전도신호 분류에 필요한 PC로는 MacBook Pro(64-bit ARM Processor, 3.2 GHz)가 사용되었다. PC와 Teensy 4.1은 시리얼 통신을 통해서 연결된다. 서로 다른 이미지 처리 빈도와 센서의 Sampling Rate문제를 해결하기 위해서 시리얼 통신은 Threading을 사용해 처리하였다.

3.2 파지 대상의 기울기에 맞춰 의수 손목각도 제어

3.2.1 딥러닝 모델을 통한 파지 대상의 6D Pose 추론

파지 대상의 기울기를 추론하기 위해 물체의 형상과 Orientation을 추정할 필요가 있다. 이를 수행하기 위해 거리를 측정할 수

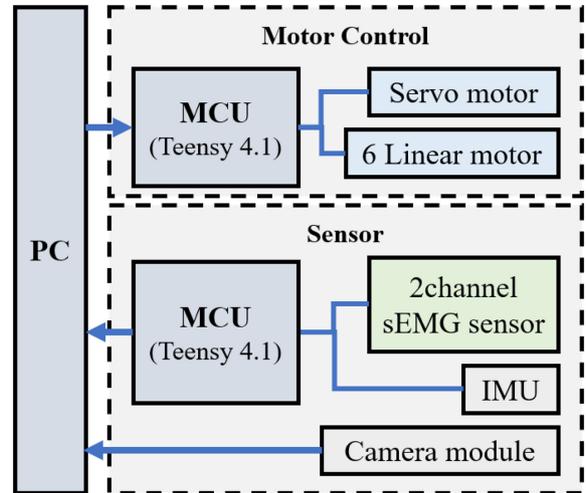


Fig. 6 Architecture of the control system

있는 Depth 카메라나 LiDAR를 사용할 수 있지만, 본 연구는 실제 의수 사용 환경에 맞는 컴퓨팅 리소스와 추정 속도, 가격 그리고 무게를 고려하여 단안 카메라만으로 일상생활에서 마주할 수 있는 물체의 기울기를 추론하는 것을 목표로 설정했다. 이를 위해 2D 영상으로부터 물체를 감지하고, 카메라 좌표계 기준 3D Bounding Box와 Rotation Matrix를 추정하는 모델인 Objectron[9]을 사용하였다.

Objectron은 총 8개 종류의 일상생활에서 마주할 수 있는 물체(Bikes, Books, Bottles, Cameras, Cereal Boxes, Chairs, Cups, Laptop)를 인식할 수 있도록 학습되었으며, 다른 모델들에 비해 적은 컴퓨팅 리소스를 소모하면서도 추정속도가 빠르다는 장점을 지닌다.

3.2.2 IMU 센서 퓨전을 통한 실제 기울기 도출

위 모델로부터 추정한 물체의 기울기는 카메라 좌표계를 기준으로 정의되어, 카메라가 기울어져 있다면 실제 기울기와 오차가 생긴다. 이를 카메라에 부착된 관성 측정장치로부터 카메라의 기울기를 얻고, 데이터를 종합하여 월드 좌표계에 맞도록 보정해야 한다.

Objectron으로부터 추정한 카메라 좌표계로 정의된 회전행렬 $R_{Objectron}$ 과 관성 측정장치로부터 추정한 카메라의 회전행렬 R_{IMU} 를 곱하여 월드 좌표계로 정의된 물체의 회전행렬 R_{World} 를 도출할 수 있다. 이때 Objectron과 관성 측정장치가 서로 다른 방향의 좌표계를 지녔기 때문에 좌표계 간의 회전행렬 R_{axis} 을 곱하여 좌표계 변환을 수행하였다. 따라서 현실 좌표계를 기준으로 정의된 물체의 회전행렬 R_{World} 는 식(1)과 같이 구할 수 있다.

$$R_{World} = R_{IMU} \times R_{axis} \times R_{objectron} \times R_{axis}^T \quad (1)$$

3.2.3 딥러닝 모델의 노이즈 제거

딥러닝 모델의 치명적인 단점은 불충분한 학습데이터, 편향된 훈련, 관찰 소음, 어수선한 배경 등으로 인해 부정확한 추론 값을

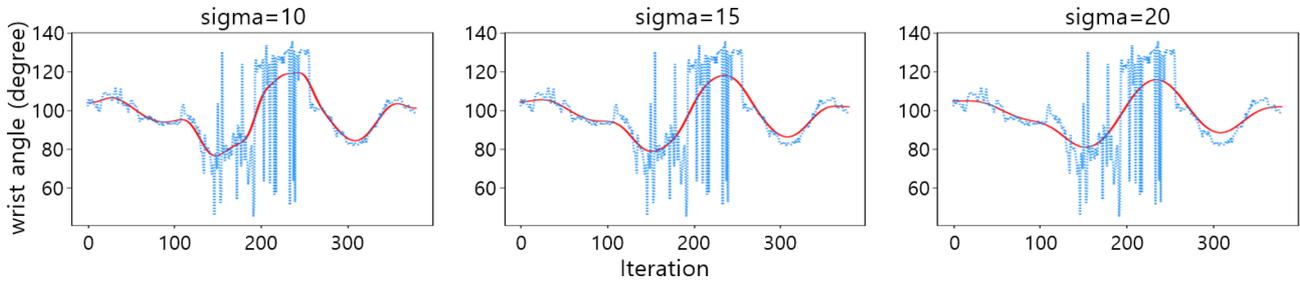


Fig. 7 Noise reduction by the gaussian filter

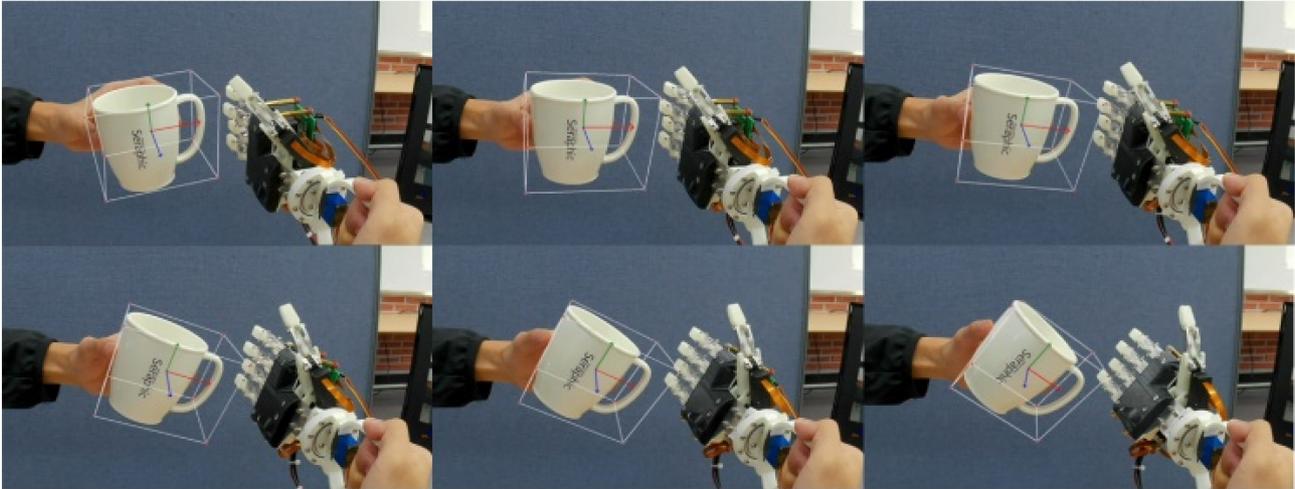


Fig. 8 Demonstration of the wrist control of the prosthetic hand

가질 수 있다는 점이다. 이러한 불확실성과 예측 오차의 문제점을 해결하기 위해서 Gaussian Filter를 사용하였다.

Fig. 7에서와 같이 반복된 실험을 통해 필터를 거친 결과가 실제 기울기의 경향성을 보이면서도 급격한 변화를 보이지 않는 결과값을 추정하는 σ 값인 10을 사용하였다.

4. 실험

4.1 실험 조건

제작한 의수의 손목 각도 자동 제어 시스템의 효과성을 검증하기 위해 실내 환경에서 컵을 대상으로 실험을 수행하였다. 파지 대상의 6D Pose 추정을 위해 사용한 모델인 Objectron에서 학습한 클래스 대상 중에서 한 손으로 파지가 가능하고 다른 사람이 건네주는 상황에 있어서 다양한 각도로 파지해야 할 필요성이 있는 대상인 컵을 선정하였다. 실험에서 사용한 컵은 너비 60 mm, 길이 80 mm, 높이 120 mm의 크기를 가진 플라스틱 컵을 대상으로 하였다. 실험은 피실험자가 전완의 내/외회전 움직임을 제한한 상태로 제작한 의수를 사용하는 상태로 약 1분간 이루어졌다. 다른 피실험자가 파지 대상인 컵을 의수를 착용한 피실험자에게 건네주는 상황에서 의수의 손목 각도가 컵의 각도를 얼마나 잘 따라가는지를 확인하였다.

4.2 실험 결과

Fig. 8에서 보여지듯이 실제로 제작한 의수의 손목 각도가 물체의 기울기를 잘 따라감을 확인하였다. 의수 손목 각도의 제어는 앞선 식(1)에서 설명했듯이 Objectron으로 측정하고 카메라에 고정된 관성 측정장치를 통해 보정한 기울기에 필터를 적용한 최종 예측 기울기를 사용해 제어하였다. 약 10 Hz의 빈도로 제어 명령이 수행되었으며, 따라서 제어명령까지의 지연이 약 100 ms이었음을 확인할 수 있다. 인체의 반응속도를 250 ms 이상으로 고려하면 의수의 사용에는 제한이 적음을 확인할 수 있다[10].

5. 결론

본 논문은 의수 사용자의 시야각으로부터 얻은 이미지와 관성 측정장치 데이터를 바탕으로 파지 대상의 자세를 추정하여 의수 손목의 회전을 제어하는 방법을 제안하였다.

딥러닝 기반의 모델을 통해 사람의 시야각에서 실시간으로 물체의 자세와 주변 상황을 추정하여, 파지 대상의 기울어진 정도에 따라 의수 손목을 자연스럽게 제어할 수 있었다. 또한, 이미지 기반 자세 추정값의 노이즈를 제거하면서도 경향성을 보존하기 위해 Gaussian Filter를 활용하였다.

본 논문에서 제안하는 방법을 통해 파지를 위해 추가적인 근육의

움직임을 필요로 하지 않으면서도 의수의 손목 각도가 물체의 기울기를 10 Hz의 빈도로 따라가며 사람의 움직임과 비슷한 파지를 수행할 수 있음을 보였다.

본 연구에서는 손목 자동제어가 의수 사용의 편의성을 높일 수 있는 가능성을 확인하였다. 그러나 제안한 시스템의 활용성을 높이기 위해서는 아래와 같은 추가적인 검증이 필요하다. 먼저, 다양한 물체에 따른 6D Pose 예측 확률이 충분히 높은 수치인지 확인해야 한다. 둘째로, 물체의 다양한 Pose에 대한 파지 확률을 측정하는 실험이 수행되어야 한다. 셋째로, 보다 복잡한 상황에서도 의수의 손목을 제어하기 위해 자유도를 추가하여 손목의 굽힘/펼 (Wrist Flexion/Extension)과, 척측/요측 편위(Ulnar/Radial Deviation)를 가능하도록 하고, 물체의 Pose에 따라 손목의 3 자유도를 제어하는 알고리즘 개발이 필요하다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 연구재단의 지원(No. 2023R1A2C1006655)과 서울시 산학연 협력사업 2023년도 캠퍼스타운 기술매칭 지원사업(No. CT230026) 지원을 받아 수행된 연구임.

REFERENCES

1. Montagnani, F., Controzzi, M., Cipriani, C., (2015), Is it finger or wrist dexterity that is missing in current hand prostheses?, *Journal of the Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 23(4), 600-609.
2. Boni, I., Millenaar, J., Controzzi, M., Ortiz-Catalan, M., (2018), Restoring natural forearm rotation in transradial osseointegrated amputees, *Journal of the Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 26(12), 2333-2341.
3. Markovic, M., Dosen, S., Popovic, D., Graimann, B., Farina, D., (2015), Sensor fusion and computer vision for context-aware control of a multi degree-of-freedom prosthesis, *Journal of Neural Engineering*, 12(6), 066022.
4. DeGol, J., Akhtar, A., Manja, B., Bretl, T., (2016), Automatic grasp selection using a camera in a hand prosthesis, *Proceedings of the 2016 38th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, 431-434.
5. Ren, S., He, K., Girshick, R., Sun, J., (2016), Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks, *Journal of the Institute of Electrical and Electronics Engineers transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 39(6), 1137-1149.
6. Park, H., Kim, D., (2020), An open-source anthropomorphic robot hand system: HRI hand, *HardwareX*, 7, e00100.
7. Widodo, R. B., Quita, R. M., Setiawan, R., Wada, C., (2019), A study of hand-movement gestures to substitute for mouse-cursor placement using an inertial sensor, *Journal of Sensors and Sensor Systems*, 8(1), 95-104.
8. Merletti, R., (1999), Standards for reporting EMG data, *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 9(1), 3-4.
9. Ahmadyan, A., Zhang, L., Wei, J., Ablavatski, A., Grundmann, M., (2020), Objectron: A large scale dataset of object-centric videos in the wild with pose annotations, *Proceedings of the 2021 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 7818-7827.
10. Abbasi-Kesbi, R., Memarzadeh-Tehran, H., Deen, M. J., (2017), Technique to estimate human reaction time based on visual perception, *Healthcare Technology Letters*, 4(2), 73-77.

**Seong Bin Park**

B.S. candidate in the School of Mechanical Engineering, Chung-Ang University. His research interests include prosthetics and IMU sensor fusion.

E-mail: parksb1109@gmail.com

**Sang Ho Yun**

B.S. candidate in the School of Mechanical Engineering, Chung-Ang University. His research interests include prosthetics and object detection.

E-mail: gaonmail@cau.ac.kr

**Eun Soo Shin**

M.S. candidate in the School of Mechanical Engineering, Chung-Ang University. His research interests include object detection, prosthetics, and IMU signal processing.

E-mail: eunsoo6920@gmail.com

**Tae Hwan Choi**

M.S. candidate in the School of Mechanical Engineering, Chung-Ang University. His research interests include prosthetics and EMG signal processing.

E-mail: xoghks410@gmail.com

**Woo Chul Nam**

Professor in the School of Mechanical Engineering, Chung-Ang University. His research interests include autonomous control of UAVs, object detection, and IMU signal processing.

E-mail: wcnam@cau.ac.kr

• 특집 • 스마트로봇 및 모빌리티 기술(Smart Robot and Mobility Technology)

Steer-by-Wire 시스템 고장 대응을 위한 차량 거동 기반 전륜 조향각 추정 Vehicle-motion-based Front Wheel Steer Angle Estimation for Steer-by-Wire System Fault Tolerance

최승용¹, 조완기², 유승한^{1,2,#}
Seungyong Choi¹, Wanki Cho², and Seung-Han You^{1,2,#}

¹ 한국기술교육대학교 기계공학과 미래융합전공 (Future Convergence Engineering, Korea University of Technology and Education)
² 한국기술교육대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Korea University of Technology and Education)
Corresponding Author / E-mail: shyoo@koreatech.ac.kr
ORCID: 0000-0002-6545-4172

KEYWORDS: Steer-by-wire system (전기신호식 조향 시스템), Failure tolerance (고장 허용), Front wheel steer angle (전륜 조향각), Differential braking (편제동), Rear wheel steer (후륜 조향)

The Steer-by-Wire (SbW) system is a system that eliminates the physical connection structure of the steering system. Instead, it steers the tires through electrical communication that transmits the driver's intention to the motor. However, the SbW system poses a significant risk in the event of a system failure. This highlights the need for effective failure backup strategies. In our study, we propose a new estimation technique. This technique accurately predicts the magnitude of the front wheel steering angle, which is determined by the vehicle motion. This prediction is particularly useful when rear wheel steering and differential braking are applied to facilitate vehicle steering in the event of a fatal SbW system failure. The estimation model is derived based on the single track model. To construct the prediction model using only measurable states, we replaced the side slip angle with the lateral acceleration signal. Additionally, we incorporated compensation for changes in cornering stiffness due to differential braking. This enhances the accuracy of the model. We validated the proposed steer angle estimation model in a virtual environment using CarSim SW and MATLAB/Simulink.

Manuscript received: February 16, 2024 / Revised: March 5, 2024 / Accepted: March 6, 2024

NOMENCLATURE

δ_f = Front Wheel Steer Angle
 δ_r = Rear Wheel Steer Angle
 V_x = Longitudinal Velocity
 a_y = Lateral Acceleration
 γ = Yaw Rate
 β = Vehicle Side Slip Angle
 C_f = Front Tire Cornering Stiffness
 C_r = Rear Tire Cornering Stiffness

L_f = Length of Vehicle from Front Axle to C.G
 L_r = Length of Vehicle from Rear Axle to C.G
 I_z = Vehicle Vertical Inertia
 m = Vehicle Mass
 M_z = Vehicle Vertical Moment of Difference Braking
 μ = Road Friction Coefficient
 ϕ = Road Bank Angle
 F_x = Tire Longitudinal Force
 F_z = Tire Vertical Force

1. 서론

최근 자율주행 기술이 점차 고도화되고 자동차의 전장화가 진행[1,2]되면서 기계적인 연결을 배제하고 순수 전기적 신호를 통해 운전자의 조향, 제동, 구동 기능을 통제하는 X-by-Wire 시스템들이 자동차에 적용되고 있다. 그 중 SbW (Steer-by-Wire) 시스템은 기존의 조향 장치에서 조향 칼럼 등의 물리적 연결을 제거하고, 스티어링 휠 조작에 의한 운전자의 조향 의도를 전기적 통신을 통해 조향 액추에이터 시스템에 전달한다[3]. 따라서, 기존 조향 시스템에 비해 많은 기계 요소들이 제거되기 때문에 그 공간에 다른 장치를 배치하거나 수납공간으로 활용하는 등 공간적인 이득을 볼 수 있다. 또한, 자율 주행 중에는 스티어링 휠과 차량 바퀴의 조향 연결을 완전히 차단하여 운전자의 오조작으로 인한 사고 위험을 방지할 수 있다.

이러한 장점에도 불구하고, 시스템 고장 시 운전자에 의한 최후의 기계적 백업 수단이 부재하기 때문에 시스템 차원의 고장에 대한 이중화 개념을 포함한 신뢰도 확보와, 더불어 충분한 고장 대응 전략 수립이 필수적이다[3-5].

다양한 이중화 설계에도 불구하고 SbW 시스템의 심각한 Fail 이 발생한 경우 휠 조향이 일정한 각도로 Stuck 되거나 혹은, 조향 시스템 모터가 Torque-free 상태가 되어 휠 조향이 Free-rolling 되는 상황이 생길 수 있다. 이 상황에서는 타 사시시스템의 협조제어를 통해 위험을 최소화하는 조치를 취할 수 있다. 기존의 많은 연구에서 전륜 조향 대신 후륜 조향 시스템을 이용하여 차량을 안전하게 선회시키거나, 편제동(Differential Braking)을 이용한 차선 변경을 통해 위험이 최소화된 안전한 곳, 예를 들어 갓길에 비상 정차하도록 하는 시도를 수행하였다[4,6,7].

본 연구에서는 SbW 시스템의 조향 모터가 완전히 고장이 난 LOA (Loss of Assist) 상태[4]를 고려하며, 특히 이때 전륜 조향 시스템이 Torque Free 상태가[8] 되어 주행 중 타이어 힘에 의해 피동적으로 휠 조향이 발생하게 되는 상황(Free-rolling)에서 전륜 타이어 조향각을 실시간 추정하는 것을 목표로 한다. SbW 모터의 고장으로 인한 Torque Free 상황에서는 노면과 차량의 상태에 따라 자유롭게 조향 되기 때문에, 타 사시 시스템과의 연계를 통한 성공적인 위험최소화운행 제어를 달성하기 위해서는 실시간으로 전륜 조향각의 정확한 추정이 필수적이다.

본 연구에서는 복잡한 타이어 모델 기반 방법론을 배제하고 휠 속도, 요 레이트, 횡 가속도 등 차량에서 측정되는 상태량들과 선형 차량 횡방향 동역학 모델을 활용하여 전륜 조향각을 실시간 추정하는 방법을 제안한다. 한편, 조향각 예측을 위해 사용된 Single Track Model의 경우 차량 횡방향 동역학 관점에서 모델 정확도를 개선하기 위한 다음의 노력을 시도하였다. 첫째, Single Track Model의 상태 변수 중 하나인 횡 슬립 각의 경우 차량에서 측정이 어렵고 정밀한 추정 또한 매우 어렵기 때문에 모델에 존재하는 횡 슬립 각 미분, 횡 슬립 각 신호를 계측가능한 횡 가속도, 요 레이트 등 신호들의 조합으로 소거하여 전체적인 횡 동역학 모델의 정확도를 개선하였다. 둘째, 본 연구에서

대표적 테스트 시나리오에 해당하는 위험최소화운행은 갓길 정차에 해당된다. 이때, 주 조향 장치인 SbW 고장 상황에서 차량 선회를 위해 후륜 조향과 좌/우 편제동을 실시하기 때문에 제동력에 의한 코너링 강성의 감소가 발생한다. 이러한 제동 시 코너링 강성의 감소량을 적절히 보상하여 해당 상황에서의 차량 횡거동에 대한 모델 예측 정확도를 올리고 이로 인해 조향각 추정 정확도의 개선을 이뤄냈다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 차량 거동을 기반으로 전륜 조향각을 예측하는 추정 모델을 설계하는 과정의 전반을 기술한다. 설계에 기반이 되는 차량 모델, 조향각 추정을 정확히 하기 위한 차량 모델의 정확도 개선을 위한 과정을 다룬다. 3장에서는 CarSim 시뮬레이션 환경을 이용하여 대표 주행 시나리오에서 제안 추정 모델의 성능을 검증하고 4장에서 결론을 맺는다.

2. 전륜 조향각 추정 모델 설계

2.1 Single Track Model

Single Track Model 은 타이어 횡력을 선형으로 가정하고 조향각을 입력으로 하여 횡 슬립 각과 요 레이트를 출력하는 차량 모델이다. 일반적인 모델 구조는 다음 식(1)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} \beta \\ \gamma \end{bmatrix} + B \delta_f \quad (1)$$

$$A = \begin{bmatrix} \frac{C_f + C_r}{mV_x} & -\frac{l_f C_f - l_r C_r}{mV_x^2} - 1 \\ \frac{l_f C_f - l_r C_r}{I_z} & -\frac{C_f l_f^2 + C_r l_r^2}{I_z V_x} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} \frac{C_f}{mV_x} \\ \frac{C_f l_f}{I_z} \end{bmatrix}$$

본 연구에서는 SbW 시스템 고장 시 후륜 조향과 편제동을 이용한 비상 운행 제어 상황을 고려하므로 Fig. 1 및 식(2)와 같이 후륜 조향각 δ_r 과 편제동에 의한 요모멘트 M_x 를 모델에 반영하였다[9].

$$\begin{bmatrix} \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} \beta \\ \gamma \end{bmatrix} + B' \begin{bmatrix} \delta_f \\ \delta_r \\ M_x \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$A = \begin{bmatrix} \frac{C_f + C_r}{mV_x} & -\frac{l_f C_f - l_r C_r}{mV_x^2} - 1 \\ \frac{l_f C_f - l_r C_r}{I_z} & -\frac{C_f l_f^2 + C_r l_r^2}{I_z V_x} \end{bmatrix}, B' = \begin{bmatrix} \frac{C_f}{mV_x} & \frac{C_r}{mV_x} & 0 \\ \frac{C_f l_f}{I_z} & -\frac{C_r l_r}{I_z} & \frac{1}{I_z} \end{bmatrix}$$

한편, 편제동을 이용하여 선회하게 되면, 선회하는 동안 항상 타이어에 제동력이 작용한다. 선회 중 타이어에 적지 않은 종방향 힘이 계속 작용하므로, 코너링 강성이 마찰원리에 의해 제동력이 없는 일반 상황보다 작아지게 된다[10,11]. 본 연구에

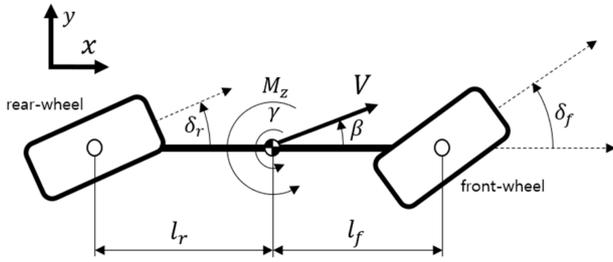


Fig. 1 Single track model (with rear wheel steer and yaw moment)

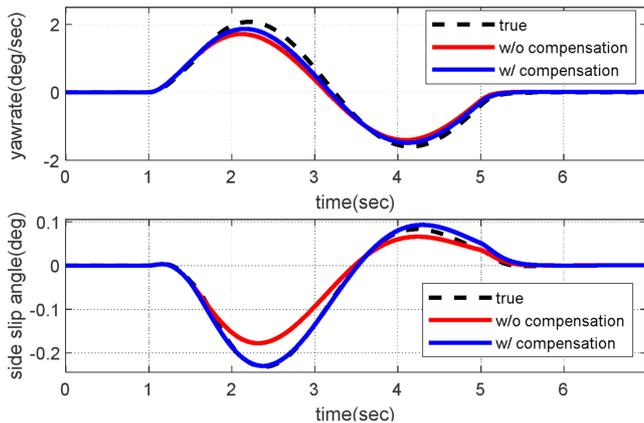


Fig. 2 Single track model accuracy comparison w/ and w/o cornering stiffness variation compensation due to longitudinal force

서는 식(3)과 같이 제동력에 의한 코너링 강성의 감소를 표현하였으며($C_{i,nominal}$ 은 제동력이 없을 때 코너링 강성을 의미), 여기서 필요한 종력과 수직력, 마찰계수는 정확히 알고 있다고 가정하고 상세히 다루지 않는다[10,11].

$$C_i = C_{i,nominal} \sqrt{1 - \left(\frac{F_{xi}}{\mu F_{zi}}\right)^2} \quad (i=f,r) \quad (3)$$

식(3)은 타이어에 작용 가능한 종횡 방향 힘의 한계인 최대 종 마찰력에서 종 방향 힘의 비율만큼 크기를 낮추어 반영하여, 종 방향 힘에 의한 코너링 강성의 크기 변화를 산출하여 보상한다. 해당 보상의 유무에 따른 Single Track Model의 정확도 변화를 Fig. 2에 비교하여 나타내었다. CarSim SW를 사용하여 -0.3 g의 제동을 인가하면서 조향하는 시나리오를 적용하였고, 그때 Single Track Model의 요 레이트와 횡 슬립 각을 비교하여 보상 유무에 따른 식(3) 적용에 따른 차량 모델의 정확도 변화를 확인하였다.

제동 선회 상태에서 종 방향 힘에 의한 코너링 강성 변화를 식(3)과 같이 보상하면 Single Track Model의 정확도를 상당히 향상되는 것을 확인하였다.

2.2 전륜 조향각 추정 모델

식(2)에서 정리된 Single Track Model로부터 전륜 조향각을

계산하는 모델을 유도한다. 모델은 다음과 같은 연립 미분 방정식의 형태이다.

$$\dot{\beta} = -\frac{C_f + C_r}{mV_x} \beta - \left(\frac{l_f C_f - l_r C_r}{mV_x^2} + 1 \right) \gamma + \frac{C_f}{mV_x} \delta_f + \frac{C_r}{mV_x} \delta_r \quad (4)$$

$$\dot{\gamma} = -\frac{l_f C_f - l_r C_r}{I_z} \beta - \frac{C_f l_f^2 + C_r l_r^2}{I_z V_x} \gamma + \frac{C_f l_f}{I_z} \delta_f - \frac{C_r l_r}{I_z} \delta_r + \frac{1}{I_z} M_z \quad (5)$$

차량에서 측정이 어려운 상태량인 횡 슬립 각을 소거하는 방향으로 수식을 정리하기 위하여 차량에서 측정 가능한 횡 가속도를 고려한다. 이때, 횡 슬립 각 소거와 함께 모델에 대한 도로 횡 경사의 영향을 제거하는 것이 가능하다. 이는 횡가속도 센서가 횡 경사에 의한 중력성분을 함께 측정하기 때문이다. 그 과정은 다음과 같이 기술된다. 식(4)에 횡 경사를 고려한 항을 추가하면 식(6)과 같다.

$$\dot{\beta} = -\frac{C_f + C_r}{mV_x} \beta - \dots + \frac{C_r}{mV_x} \delta_r + \frac{g \sin \phi}{V_x} \quad (6)$$

횡 경사를 고려해도 모멘트 평형 식(5)는 변하지 않는다. 한편, 횡 가속도 센서가 실제로 측정하는 신호들을 표현하면 식(7)과 같다. 즉, 실제 관성력뿐만 아니라 노면 기울어짐에 의한 중력 성분도 함께 측정한다.

$$a_y = V_x(\gamma + \dot{\beta}) - g \sin \phi \quad (7)$$

식(7)을 횡 슬립 각의 미분에 대하여 정리한 다음 식(6)에 대입하면 다음과 같이 횡 경사에 대한 항이 자연스럽게 소거된다.

$$a_y = -\frac{C_f + C_r}{m} \beta - \frac{l_f C_f - l_r C_r}{mV_x} \gamma + \frac{C_f}{m} \delta_f + \frac{C_r}{m} \delta_r \quad (8)$$

그러므로 실제 횡 경사가 존재하더라도 횡 가속도 측정치를 사용하여 정리된 최종적인 식(8)에서는 횡 경사 성분이 포함되지 않는다. 횡 슬립 각 소거를 위해 횡 가속도를 도입하는 것으로 추정 모델의 횡 경사에 대한 강건성을 확보하는 추가적인 이점을 얻었다.

이제 수식을 결합하는 과정에서 횡 슬립 각을 소거하기 위하여 식(8)을 횡 슬립 각에 대해 정리하여 식(5)에 대입한다. 이를 정리하면 식(9)와 같다.

$$\delta_f = \frac{I_z(C_f + C_r)}{C_f C_r(l_f + l_r)} \dot{\gamma} - \frac{m(l_f C_f - l_r C_r)}{C_f C_r(l_f + l_r)} a_y + \frac{l_f + l_r}{V_x} \gamma + \delta_r - \frac{C_f + C_r}{C_f C_r(l_f + l_r)} M_z \quad (9)$$

목적한 대로 조향각 추정 모델이 측정 가능 신호인, 요 레이트, 횡 가속도와 제어량인 후륜 조향각, 요 모멘트로 구성되었다. 제안된 추정 모델이 위험최소화운행과 함께 작동할 때의 전체적인 블록선도를 Fig. 3에 나타냈다. 한편 식(9)에서도 알 수 있듯이 해당 예측 모델은 일종의 Open-loop 예측 모델이며, 저마찰

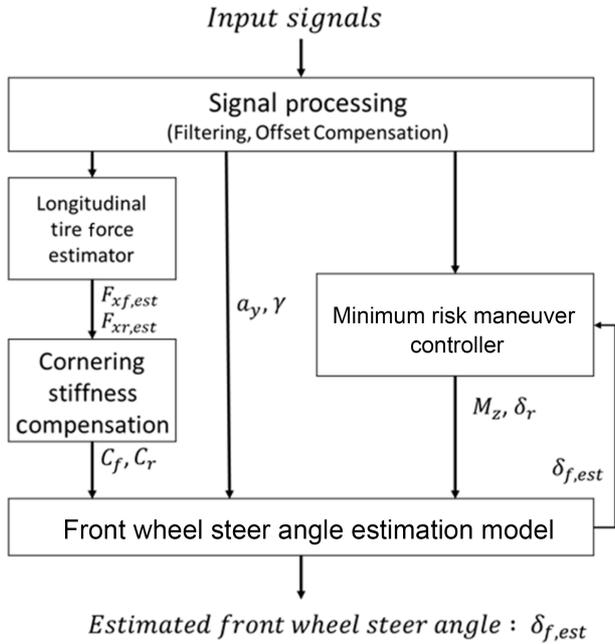


Fig. 3 Front wheel angle estimation model block diagram

노면이나 한계 주행 상황 등과 같이 해당 모델의 정확도가 떨어지는 상황에서는 예측 성능상의 한계가 존재하며 또한, 요 레이트 미분 시에 센서 노이즈에 대한 적절한 필터링도 요구된다.

3. 전륜 조향각 추정 모델 성능 해석 검증

본 연구에서 제안된 전륜 조향각 추정 모델의 예측 성능을 CarSim SW와 MATLAB/Simulink로 구성된 가상 해석 환경에서 검증한다.

검증 시나리오는 레벨3 이상의 자율주행에서 SbW 시스템의 치명적 고장이 발생하여 전륜 조향 모터가 Torque Free 상태가 되고 후륜 조향 및 편제동을 활용하여 갓길로 차선 변경하여 정차하는 전형적인 위험최소화운행 상황이다.

CarSim SW에서 전륜 조향 Torque를 0으로 설정하여 Torque Free 상태가 되도록 설정했다.

3.1 Open-loop 사인파 후륜 조향, 편제동 입력에서 추정 성능 검증

갓길 정차 시나리오에 앞서 우선 후륜 조향과 편제동을 Open-loop 사인파 형태로 입력하였을 때, Torque Free 상태의 전륜 조향각 거동 추정 성능을 검증하였다. 후륜 조향 및 편제동은 감속이 시작되는 순간부터 입력하며, 편제동의 경우 속도 제어 중 토크 분배 단계에서 입력한다. 차량 모델에 입력되는 편제동 모멘트의 범위는 $\pm 1,000$ Nm, 후륜 조향의 범위는 ± 5 deg로 설정하였다. 전체적인 주행 시나리오 정보를 Fig. 4에 나타냈다.

제안된 전륜 조향각 추정 모델이 SbW 시스템 고장 상황을

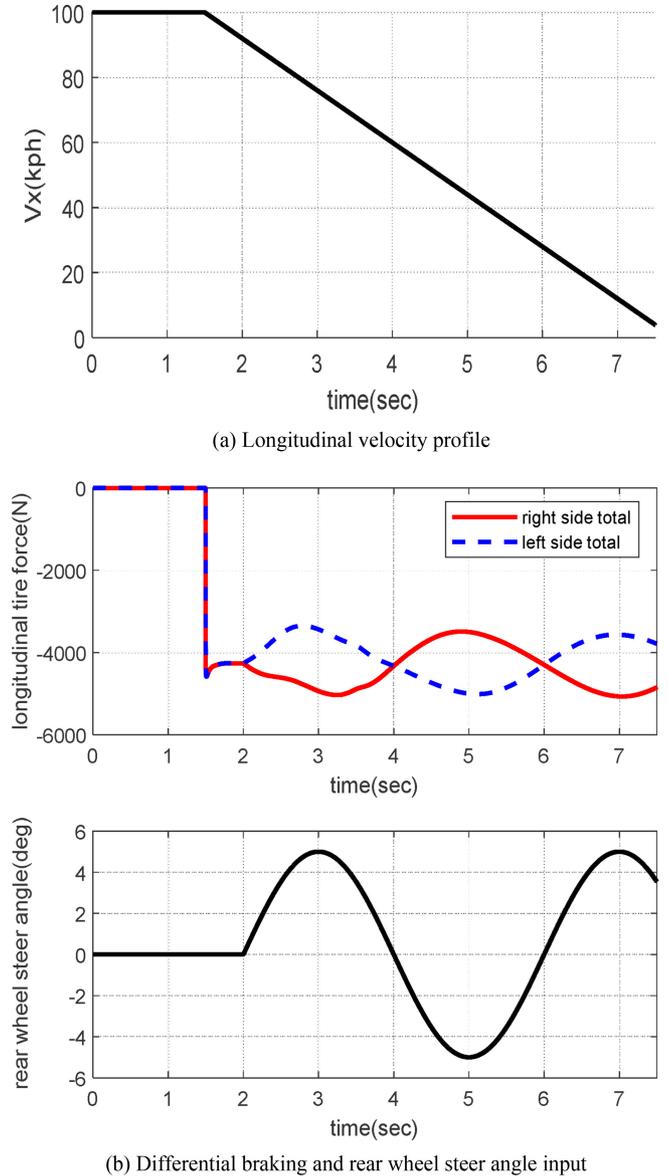


Fig. 4 Driving scenario for open-loop rear wheel steer and differential braking input

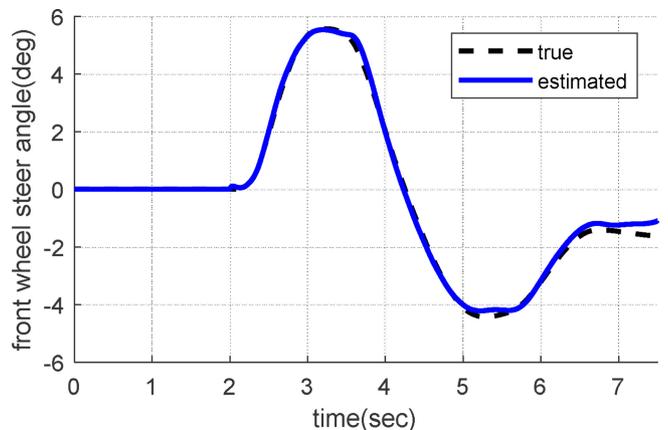


Fig. 5 Front wheel steer angle estimation result

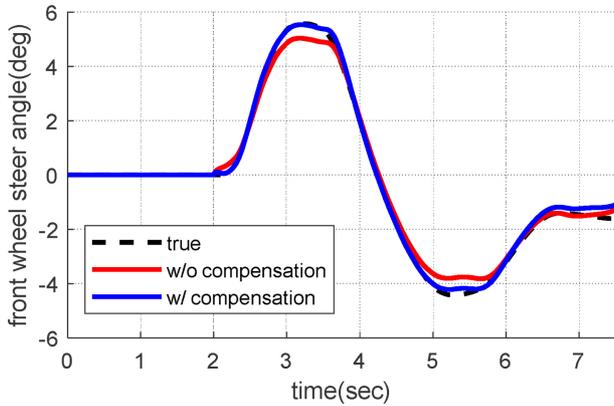


Fig. 6 Compensation result of cornering stiffness variation due to longitudinal force

모사한 사인과 형태의 후륜 조향 및 편제동 입력상황에서 차량 거동 및 타이어 힘 등에 의해 피동적으로 결정되는 실제 전륜 조향각을 잘 추정하는 것을 Fig. 5에 나타난 결과와 같이 확인하였다.

3.2 종방향 힘에 의한 코너링 강성 변동 보상 효과 검증

앞서 2장에서 편제동에 의한 코너링 강성 감소를 모델에 적용하여 보상하는 방법을 제안하였다. 본 절에서는 3.1절의 주행 시나리오에서 해당 방법의 효용성을 검증한다.

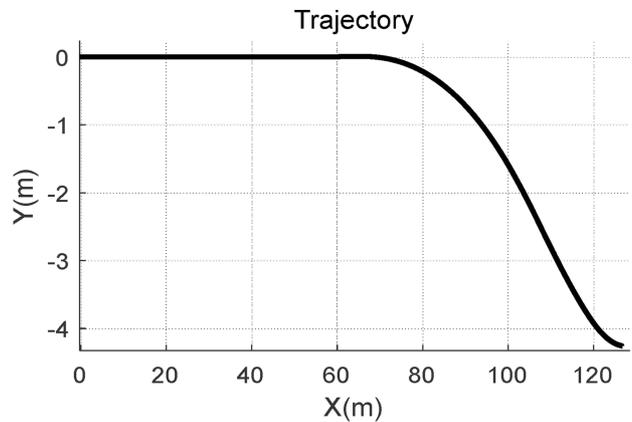
Fig. 6에 제동력에 의한 코너링 강성 저감 효과를 추정 모델에서 보정한 경우와 보정하지 않고 코너링 강성을 종 방향 힘이 없는 경우에 맞춰진 Nominal 값을 사용한 경우를 비교하여 나타냈다.

종 방향 힘에 의한 코너링 강성 변화를 보정한 제안추정 모델이 보정하지 않는 추정 모델보다 Peak치 기준 10% 개선된 오차율로 예측하는 것을 확인하였다. 따라서, 제동 상황에서 코너링 강성 변화 보상이 유의미하게 추정 모델의 정확도와 추정 결과를 개선시킴을 확인했다.

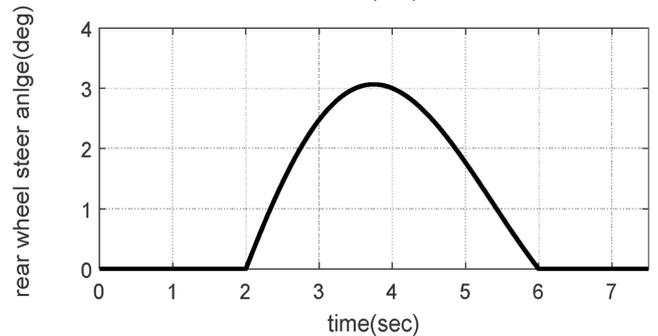
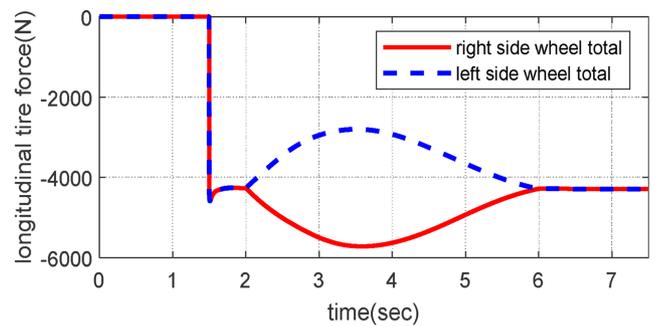
3.3 갓길 정차 시나리오에서 추정 성능 검증

본 연구의 최종 검증 단계에서는 갓길 정차 시나리오에서 전륜 조향각이 잘 추정되는지 검증한다. 차량의 속도는 Fig. 4(a)에 나타난 100 kph에서 5초간 감속하여 정차하는 시나리오를 그대로 적용하며, 목표한 궤적에 따라 갓길로 이동한다. 외곽 차로 중심에서 갓길로 완전히 벗어날 때까지의 횡방향 변위는 4m로 가정한다. Fig. 7(a)는 정차할 때까지 차량의 목표 궤적이며, Fig. 7(b)는 해당 주행을 위해 차량에 입력된 후륜 조향각과 좌우 제동력을 나타낸다. 제안 추정 모델의 예측 결과는 Fig. 8에 나타내었다. 추정 결과에는 코너링 강성 변화를 보정하지 않은 경우도 함께 나타내어 추정 성능을 비교하였다.

실제 자율주행 상황에서 SbW 시스템 고장 시 발생 가능한 갓길 정차 시나리오에서도 매우 작은 추정 오차를 보이며 전륜



(a) Target vehicle trajectory



(b) Differential braking and rear wheel steer angle input

Fig. 7 Driving scenario for minimum risk maneuver

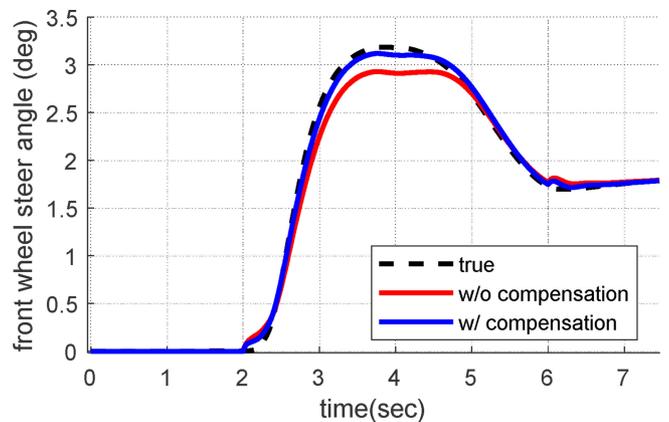


Fig. 8 Front wheel steer angle estimation result for minimum risk maneuver

조향각이 효과적으로 추정되는 것을 확인하였다. 정확히 추정된 전륜 조향각 정보는 실제 갓길로의 차선변경을 하는 상위 제어 로직에 전달되어 전체 차량 거동 제어 페루프 제어 성능에 큰 도움이 될 것으로 예상된다. 한편, 3.2절의 결과와 마찬가지로 종 방향 힘에 의한 코너링 강성 변화를 보상하는 것이 효과적으로 전륜 조향각 추정 성능을 개선함을 확인했다.

4. 결론

본 연구에서는 레벨 3 이상의 자율주행에서 SbW 시스템이 심각한 고장을 일으켜 전륜 조향 모터가 Torque Free 상태로 된 경우에 휠 조향각이 차량 거동 및 타이어 힘에 의해 피동적으로 결정되는 Free-rolling 상황에서 전륜 조향각을 실용적으로 추정하는 모델을 제안하였다.

차량 거동을 효과적으로 표현하는 Single Track Model을 기반으로 전륜 조향각 추정 모델을 유도하였다. SbW 고장 상황에서는 차량을 선회시키기 위한 편제동을 고려하기 때문에 큰 제동력에 의한 코너링 강성의 변화를 조향각 예측 모델에 반영하였다. 또한, 실제 차량에서 측정이 어려운 횡 슬립 각을 모델에서 소거하기 위해 횡 가속도와 횡 슬립 각 사이의 기구학적 관계를 고려하여 횡 가속도로 치환하여 결과적으로 횡 경사에 무관하고 측정이 용이한 센서 신호들로 구성된 전륜 조향각 추정 모델을 도출하였다.

제안된 전륜 조향각 추정 모델은 CarSim SW와 MATLAB/Simulink를 활용하여 검증하였다. 실제 자율주행에서 SbW 고장 시 실행해야 하는 갓길 비상 정차 주행상황에서 의도한 대로 전륜 조향각이 효과적으로 잘 추정되는 것을 확인하였다. 또한, 종 방향 힘에 의한 코너링 강성 변화 보상이 유의미하게 추정 성능을 개선한다는 것을 확인했다.

한편, 제안 추정 모델은 일종의 Open-loop 모델이기 때문에 차량 모델의 오차, 파라미터의 변동, 외란 등에 취약할 수 있는 한계가 존재한다. 따라서, 향후 모델 오차가 커지는 저마찰로와 같은 조건에서 제안 조향각 예측 모델이 상위 위험최소화운행 제어기와 함께 동작할 때 전체 페루프 제어 성능을 분석해 보고 개선점을 도출해보도록 할 예정이다.

본 연구에서 제안된 전륜 조향각 추정 모델이 SbW 시스템의 고장 상황에서, 통제 불가능한 Torque Free 상태의 전륜 조향각을 효과적으로 추정하여 SbW 시스템 고장 시 전체 차량 거동 제어 시스템의 신뢰도 향상에 도움이 되기를 기대한다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 연구는 2024년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원 (KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(No. 20015831). 이 논문은 2024년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2022R1A2C1004405).

REFERENCES

1. Bang, S.-H., Park, S.-M., Chu, M.-G., Song, J.-H., Lee, D.-R., (2021), Smart design of rotor and permanent magnet considering torque and torque ripple of interior permanent magnet synchronous motor of electronic vehicle, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 38(8), 605-612.
2. Bang, S.-H., Lee, D.-R., (2021), A study on the smart design and cooling performance of electric vehicle motor using metal-hybrid materials, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 38(8), 595-603.
3. Kim, K., Kim, J., Koo, T., (2021), New steering system for future vehicle, Steer-by-Wire into product development, *Journal of the Korean Society of Automotive Engineering*, 43(2), 13-19.
4. Ryu, J. H., Kim, J. S., Cho, Y. G., Ko, S. J., (2023), A method of front wheel steering motion estimation according to differential braking and rear steer for Steer-by-Wire failover system developing, *Proceedings of the Korean Society Automotive Engineering 2023 Annual Autumn Conference*, 1500-1501.
5. Kim, M. Y., Lee, J., Jeong, J., (2022), Driver behavior simulation considering crash condition of an automated vehicle, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 39(3), 187-192.
6. Sung, J., Choi, S., Huh, K., (2024), A differential brake-actuated steering system for redundancy of Steer-by-Wire, *Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Intelligent Vehicles*, 9(1), 993-1004.
7. Kwon, B.-S., (2023), Fault-tolerant control strategy for Steer-by-Wire vehicles using rear-wheel steering, *Journal of Institute of Control, Robotics and System*, 29(4), 289-293.
8. Yeo, S. H., Seo, J. W., Ko, J. N., Lee, M. J., (2022), A study on the development of validation technology reflecting complex failure combination for SbW system robustness, *Proceedings of the Korean Society Automotive Engineering 2022 Annual Autumn Conference*, 417-423.
9. Nagai, M., Hirano, Y., Yamanaka, S., (1997), Integrated control of active rear wheel steering and direct yaw moment control, *Vehicle System Dynamics*, 27(5-6), 357-370.
10. Gillespie, T. D., (2021), *Fundamentals of vehicle dynamics*, SAE International.
11. Brach, R., Brach, M., (2011), The tire-force ellipse (friction ellipse) and tire characteristics, (Report No. 2011-01-0094), SAE International. <https://saemobilus.sae.org/content/2011-01-0094/>



Seungyong Choi

M.S. candidate in the Future Convergence Engineering, Korea University of Technology and Education. His research interest is vehicle chassis control.

E-mail: djffkf12@koreatech.ac.kr



Wanki Cho

Professor in the School of Mechanical Engineering, Korea University of Technology and Education. His research interests include integrated chassis control systems, and intelligent vehicle control.

E-mail: wkcho@koreatech.ac.kr



Seung-Han You

Professor in the School of Mechanical Engineering, Korea University of Technology and Education. His research interests include control systems, state estimations, parameter estimations, and their applications in future vehicles.

E-mail: shyoo@koreatech.ac.kr

• 특집 • 스마트로봇 및 모빌리티 기술(Smart Robot and Mobility Technology)

강화학습에 기반한 전기차의 에너지 최적 주행제어

Optimal Eco Driving Control for Electric Vehicle based on Reinforcement Learning

김현중¹, 김동민¹, 김수현¹, 이희윤^{1,#}

Hyun Joong Kim¹, Dong Min Kim, Su Hyeon Kim, and Heeyun Lee^{1,#}

¹ 단국대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Dankook University)

Corresponding Author / E-mail: heeyunlee@dankook.ac.kr, TEL: +82-31-8005-3526

ORCID: 0000-0003-1737-962X

KEYWORDS: Electric vehicle (전기 자동차), Reinforcement learning (강화학습), Eco-driving (에코 드라이빙), Optimal control (최적 제어)

Environmental issues have become a global concern recently. Countries worldwide are making efforts for carbon neutrality. In the automotive industry, focus has shifted from internal combustion engine vehicle to eco-friendly vehicles such as Electric Vehicles (EVs), Hybrid Electric Vehicles (HEVs), and Fuel Cell Electric Vehicles (FCEVs). For driving strategy, research on vehicle driving method that can reduce vehicle energy consumption, called eco-driving, has been actively conducted recently. Conventional cruise mode driving control is not considered an optimal driving strategy for various driving environments. To maximize energy efficiency, this paper conducted research on eco-driving strategy for EVs-based on reinforcement learning. A longitudinal dynamics-based electric vehicle simulator was constructed using MATLAB Simulink with a road slope. Reinforcement learning algorithms, specifically Deep Deterministic Policy Gradient (DDPG) and Deep Q-Network (DQN), were applied to minimize energy consumption of EVs with a road slope. The simulator was trained to maximize rewards and derive an optimal speed profile. In this study, we compared learning results of DDPG and DQN algorithms and confirmed tendencies by parameters in each algorithm. The simulation showed that energy efficiency of EVs was improved compared to that of cruise mode driving.

Manuscript received: February 18, 2024 / Accepted: April 4, 2024

NOMENCLATURE

v	=	Longitudinal Vehicle Speed [m/s]
\dot{v}	=	Longitudinal Vehicle Acceleration [m/s ²]
I_{bat}	=	Battery Current [A]
Q_{bat}	=	Battery Capacity [Ah]
V_{oc}	=	Open Circuit Voltage [V]
R_{int}	=	Battery Internal Resistance [Ω]
P_{bat}	=	Battery Power [W]
η_{mot}	=	Motor Efficiency
T_m	=	Motor Torque [$N \cdot m$]

ω_m	=	Motor Speed [rad/s]
T_{whl}	=	Wheel Torque [$N \cdot m$]
R_{tire}	=	Tire Radius [m]
F_{brk}	=	Brake Force [N]
F_{load}	=	Road Load Force [N]
f_0, f_1, f_2	=	Road Load Coefficient [N, $N \cdot s/m$, $N \cdot s^2/m$]
M	=	Vehicle Mass [kg]
g	=	Gravity Acceleration [m/s^2]
θ	=	Road Slope [deg]
J	=	Cost

π	= Control Policy
x	= State Variable
a	= Action Variable
u	= Control Variable
λ	= Discount Factor
α	= Weighting Coefficient for Vehicle Speed
β	= Weighting Coefficient for SOC
γ	= Weighting Coefficient for Acceleration
g	= Instantaneous Cost
v_{ref}	= Reference Vehicle Speed
v_{curr}	= Current Vehicle Speed
ϕ	= Behavior Network of Critic
θ	= Behavior Network of Actor
$\hat{\phi}$	= Target Network of Critic
$\hat{\theta}$	= Target Network of Actor

1. 서론

산업의 지속적인 발전으로 인해 온실가스 배출량 증가로 인한 지구온난화 및 환경 문제에 대한 국제적인 관심이 증가하고 있다. 특히, 차량 분야의 온실가스 배출량을 줄이고자 자동차 시장은 기존 내연기관 차량에서 Electric Vehicle(전기 자동차), Hybrid Electric Vehicle(하이브리드 자동차), Fuel Cell Electric Vehicle(수소 연료전지 자동차)과 같은 친환경 차에 대한 관심이 증가하고 있다.

이와 같은 전동화 차량의 개발과 함께, 차량 자체를 보다 효율적으로 주행함으로써, 차량의 연료 소모량을 줄이는 에코 드라이빙(Eco-driving) 분야에 관한 연구도 활발히 이루어지고 있다. Eco-driving은 차량을 통해 사람이나 화물을 이동 시에, 에너지 소비를 줄이는 주요 전략으로 인식되고 있으며, 특정 주행 환경에서 에너지 소모가 동일하지 않은 여러 가지 방법이 있다는 아이디어에 기반한다. 특히 Eco-driving 기술은 자율주행 자동차 시대에 운전자 없이 최적의 속도 프로파일, 또는 운전 방식 등을 찾음으로써 에너지 소모율을 줄일 수 있는 중요한 전략이다[1,2].

Eco-driving 제어 관련하여서는 다양한 연구가 진행되어왔으며, 크게 규칙 기반(Rule Based) 방법론과 최적화 기반(Optimization Based) 방법론으로 구분할 수 있다. 규칙 기반 방법론은 실제 경험이나 실험 결과를 토대로 에너지 소모를 줄일 수 있지만 주행 상황에서 구체적인 최적화된 솔루션이 아닐 수 있다. 반면 최적화 기반 방법론은 최적화 알고리즘을 통해 차량 제어를 최적화한다. 계산 복잡성이 존재하지만, 이론적으로 에너지를 최적으로 관리할 수 있다[3]. 이러한 최적화 기반 Eco-driving 전략에는 Dynamic Programming (DP), Model Predictive Control (MPC), Reinforcement Learning (RL) 등이 있다.

Mensing 등[4-6]은 DP 알고리즘을 운전자를 위한 최적의 속도를 계산하는 데 사용하였지만, 이 알고리즘은 계산 시간이 매우 오래 걸리기 때문에 실시간 응용에 적합하지 않다. Han 등[7]은 EV 주행 시 선행 차량과의 안전거리 및 제한 속도를 상태 제약 변수로 설정하였으며 MPC 알고리즘을 사용하여 알고리즘 계산 시간 감소, 해석적 상태 제약 솔루션을 도출했다. 또한, Santin 등[8,9]은 적응형 비선형 MPC를 활용하여 표준 생산 파워트레인 제어 모듈이 장착된 차량을 구현했다. Abbsa 등[10]은 EV의 Eco-driving을 위해 Pontryagin's Maximum Principle (PMP)과 예를 함께 사용했다. PMP 알고리즘은 필요조건을 충족하는 운전 모드를 찾기 위해 사용되었고, 그런 다음 DP가 최적 제어 문제를 거리 영역에서 다시 해결하기 위해 사용되어 DP 계산의 계산 부담을 줄였다. 하지만 MPC, PMP 등의 알고리즘은 로컬 최적해에 중점을 두고 있어 글로벌 최적해를 찾는 것이 아니라는 한계가 있다[2].

본 논문에서는 강화학습 알고리즘을 사용하여 Eco-driving 전략을 수립했다. 강화학습은 환경과 에이전트 간의 상호 작용을 통해 최적 제어 정책을 학습할 수 있는 알고리즘이다[11]. 강화학습은 DP 알고리즘과 벨만 방정식을 기반으로 한다는 점에서 유사한 성질을 가진다. 따라서 DP 기반 방법을 RL 알고리즘을 통해 접근하는 방법으로 대체할 수 있다. 여기서 DP와 달리 강화학습은 확률적 방법으로 학습을 하며 실시간 컨트롤러로 사용될 수 있다. 따라서 복잡하고 다양한 주행 환경에서 확률적인 관점을 통해 최적의 솔루션을 찾아야 하는 Eco-driving에 적합하다[2]. Lee 등[12]은 도로의 구배와 차량 추종을 고려한 EV의 Eco-driving을 위해 Model Based Reinforcement Learning (MBRL) 알고리즘을 사용했으며, 최적의 해를 얻을 수 있는 DP와 MBRL의 결과를 비교했다. Ma 등[13]은 Multi-objective Deep Q-learning (MOM-DQL)이 Eco-routing 문제에 활용되어 최적의 경로를 찾아 주행 시간과 연료 소비를 최소화하였다. Shi 등[14]은 고립된 신호 교차로 근처에서 Q-learning 알고리즘을 사용하여 연료 소비를 최소화하는 Eco-driving을 위해 차량 주행 동작을 최적화했다. Guo 등[15]은 종방향 가/감속뿐만 아니라 횡방향 차선 변경까지 고려하는 Hybrid RL 알고리즘을 통해 주행 시간을 유지하면서 연료 소모율을 크게 줄였다.

본 논문에서는 구배가 있는 도로 환경에서 전기자동차의 에너지 효율을 개선하기 위한 Eco-driving 전략에 대해, Deep Q-network (DQN) 및 Deep Deterministic Policy Gradient (DDPG) 알고리즘을 활용하여 연구를 진행하였다. 시뮬레이션을 기반으로 연구가 진행되었으며, Eco-driving 전략의 성능검증을 위해 기존의 크루즈 모드 주행과 에너지 소모량을 비교하였다. 크루즈 모드 주행은 차량을 일정한 속도로 주행하기 때문에 다양한 도로 환경에서 차량의 에너지 소모량을 최소화하는 최적의 주행 전략으로 보기 어렵다. 따라서 강화학습을 적용하여 에너지 효율을 최적화한 EV의 전비 성능을 크루즈 모드 주행과 비교하여 연비 향상도를 검증하였다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2절에서는 본 연구에서

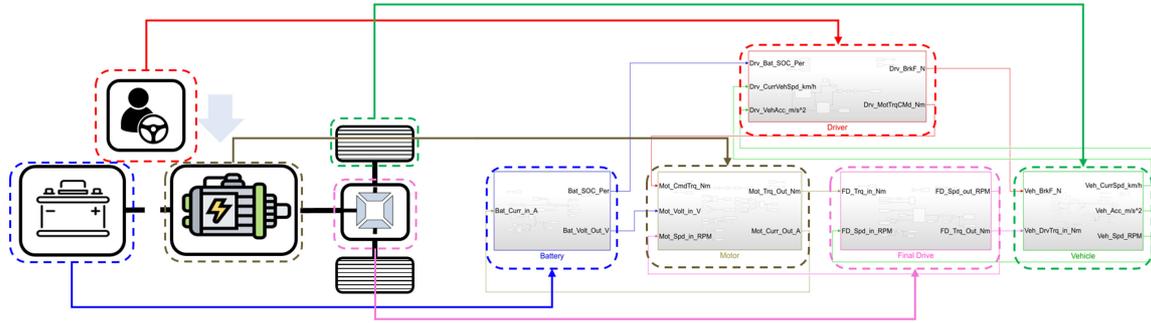


Fig. 1 EV simulator with battery, motor, final drive, vehicle and driver model for eco-driving

활용된 전기차 시뮬레이션 모델에 대해서 소개하고, 3절에서는 Eco-driving을 위한 강화학습 알고리즘에 관해 설명한다. 4 절에서는 전기차 시뮬레이션 모델에 강화학습 알고리즘을 적용한 시뮬레이션 결과를 제시하고, 마지막 5절에서는 결론을 제시한다.

2. 전기차 시뮬레이션 모델 개발

본 연구에서 사용하는 전기차 시뮬레이션 모델은 Quasi-static 모델링 방법을 사용하고, 운전자 모델, 주행 사이클, 변수들의 동역학적 상태를 고려하기 위해 Forward simulator 방식의 차량 종방향 다이내믹스를 MATLAB Simulink를 통해 구성한다.

전기차 시뮬레이터는 Fig. 1과 같이 배터리, 모터, Final Drive, 차량 동역학, 운전자 모델로 구성된다. 배터리 모델은 식 (1)과 같이 배터리의 내부 저항과 Open Circuit Voltage를 통해 Sate of Charge (SOC)에 대한 식으로 나타낸다.

$$SOC = \frac{I_{bat}(t)}{Q_{bat}} = \frac{V_{oc} - \sqrt{V_{oc}^2 - 4R_{int}P_{bat}}}{2R_{int}Q_{bat}} \quad (1)$$

배터리의 SOC에 따른 내부 저항과 Open Circuit Voltage는 Fig. 2와 같다.

모터 모델은 모터 RPM, 모터 토크를 통한 모터 효율 맵을 통해 정해진 효율을 통해 모터 출력 동력이 결정된다. 모터 출력 동력에 대한 수식은 식(2)와 같으며 모터 효율 맵은 Fig. 3과 같다.

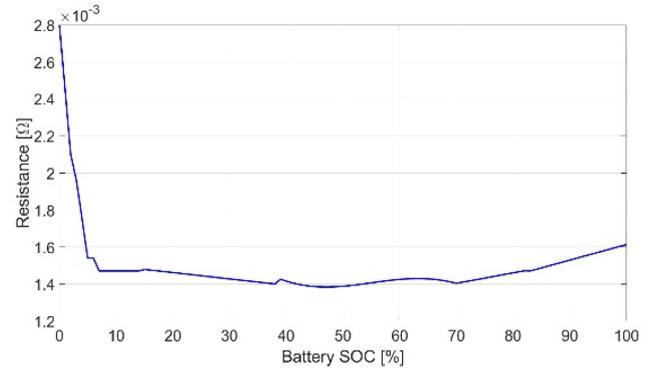
$$P_{bat} = \eta_{mot}^{-sgn(T_m)} \cdot T_m \cdot \omega_m \quad (2)$$

Final Drive 모델은 별도의 효율 맵을 구성하지 않고 96%의 효율과 기어비는 7.4로 구성한다.

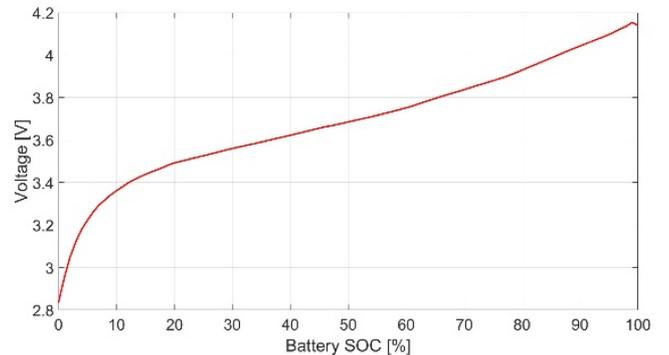
차량 동역학 모델은 식(3)과 같이 1차원 종방향 다이내믹스로 구성되며 식(4)에서 Table 1의 도로 부하 계수를 사용한다.

$$\dot{v} = \frac{T_{whl}/R_{tire} - F_{brk} - F_{load}}{M} \quad (3)$$

$$F_{load} = f_0 + f_1 \cdot v + f_2 \cdot v^2 + Mg \cdot \sin \theta \quad (4)$$



(a) Internal resistance



(b) Open circuit voltage

Fig. 2 Internal resistance and open circuit voltage with SOC

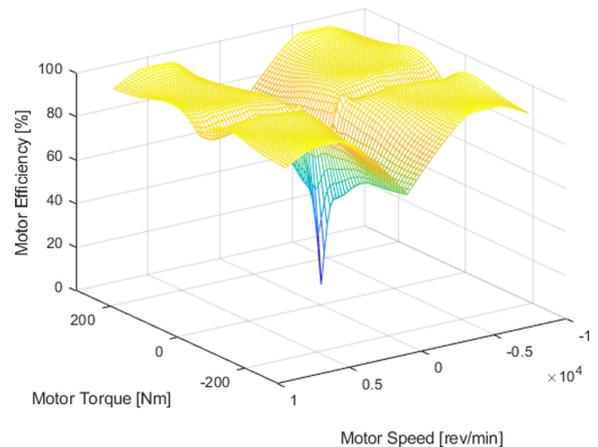


Fig. 3 Motor efficiency map by motor rpm and motor torque

Table 1 Vehicle specification

Component	Value
Vehicle mass	1,644.3 [kg]
Motor	Max 295 [N · m], Max 11,000 [RPM], Max 100 [kW]
Final drive	Efficiency: 96%, Gear Ratio: 7.4
Battery	Li-ion, Capacity: 118 [Ah]
Road load coefficient	$f_0 : 53.90$ $f_1 : 0.21$ $f_2 : 0.02$

운전자 모델은 Reference 속도와 현재 속도 차이에 대한 PID 제어를 통해 모터의 요구 토크를 생성한다. 또한, 회생 제동은 PID 제어 신호에서 음수인 브레이크 신호가 발생하고 10 km/h 이상의 차속인 상황에서 100% 작동하도록 가정한다.

시뮬레이터에 사용된 차량 제원은 Table 1과 같다.

3. 강화학습 알고리즘

3.1 최적 제어 문제 정의

Eco-driving을 위한 최적 제어 문제는 차량의 에너지 소모량(배터리 SOC사용량)을 최소화하면서, 차량의 현재 속도가 목표하는 속도에 근접하도록 설정하고, 차량의 운전성을 향상시키기 위한 가속도 항을 추가하여 최적 제어 문제의 비용함수를 정의한다. 전체 최적 제어 문제에 대한 식은 (5)와 같다.

$$\begin{aligned} \text{minimize } J_{\pi}(x_0) &= \lim_{N \rightarrow \infty} E \left\{ \sum_{k=0}^{N-1} \lambda^k g(x_k, \pi(x_k)) \right\} \\ \text{Subjec to } SOC_{min} &\leq SOC(k) \leq SOC_{max} \\ T_{m,min} &\leq T_m(k) \leq T_{m,max} \\ Acc_{min} &\leq Acc(k) \leq Acc_{max} \end{aligned} \quad (5)$$

State 변수 x_k 는 SOC_k , v_k , Alt_k , $Slope_k$, $v_{error,k}$, $\int v_{kk}$ 이다. Action 변수는 가속도이며 λ 는 감가율이다. Control 변수 u 는 차량의 목표 속도를 따라가기 위한 Driver 모델에서의 커맨드 모터 토크이다. $J_{\pi}(x_0)$ 는 시스템이 Policy, π 에 따라 State x_0 에서 시작할 때의 예상되는 Cost이다. g 는 차량의 속도, SOC, 가속도를 포함하는 순간의 Cost이다. g 에 대한 식은 식(6)과 같다.

$$g = -\{\alpha \cdot (v_{ref} - v_{curr})^2 + \beta \cdot \Delta SOC + \gamma \cdot Acc^2\} \quad (6)$$

v_{error} 는 $v_{ref} - v_{curr}$ 이며, 본 논문에서의 v_{ref} 는 차량의 목표 속도인 60 km/h로 설정했다. α , β , γ 는 각각 v_{error} , ΔSOC , Acc 항에 대한 가중치이다.

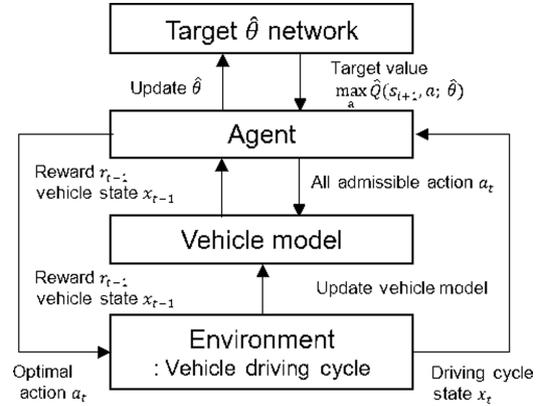


Fig. 4 DQN algorithm

3.2 DQN 알고리즘

Deep Q-Network (DQN) 알고리즘은 Q-learning을 기반으로 학습하고, Q function을 업데이트하는 알고리즘이다. DQN 알고리즘은 연속적인 Observation 공간과 이산화된 Action 공간을 사용한다. Q function이 업데이트되는 원리는 식(7)과 같다.

$$Q(s_t, a_t) \leftarrow Q(s_t, a_t) + \alpha [R_{t+1} + \gamma \max_a Q(s_{t+1}, a) - Q(s_t, a_t)] \quad (7)$$

처음 제안된 DQN 알고리즘은 샘플들 사이의 Temporal Correlation과 Target이 고정되지 않는 문제점이 있었고, 이를 해결하기 위해 Experience Replay와 Target 네트워크를 사용했다. Experience Replay를 사용함으로써 Temporal Correlation이 줄어들고 추가로 미니 배치를 활용함으로써 학습 속도가 빨라졌다. 또한, 같은 샘플을 재사용함으로써 데이터 효율이 증가했다. Mnih 등[16,17]의 연구에서, Target 네트워크는 Behavior 네트워크가 업데이트되는 동안 실시간으로 업데이트되지 않고 일정 스텝 후에 Behavior 네트워크로 업데이트됨으로써 네트워크 업데이트에 따라 수렴에 어려움이 발생했던 문제를 개선했다. 이 2가지 개선점이 적용된 Loss Function은 Gradient Descent 방식을 사용하여 Loss Function이 최소화되도록 네트워크를 업데이트한다. Loss Function은 식(8)과 같다.

$$L(\theta) = \frac{1}{B} \sum_{\{i\}=B} [r_{i+1} + \gamma \max_a \hat{Q}(s_{i+1}, a; \hat{\theta}) - Q(s_i, a_i; \theta)]^2 \quad (8)$$

DQN 알고리즘이 적용되는 원리는 Fig. 4와 같다.

본 논문에서 DQN 알고리즘을 적용하기 위해 다음과 같이 알고리즘 모델을 설정했다. 첫째, Observation은 v , Alt , $slope$, SOC , v_{error} , $\int v_{error}$ 이다. 둘째, Action인 가속도를 -3부터 3까지의 범위로 이산화하여 연구를 진행했다. 마지막으로, 목적함수는 식(5)와 같으며 Cost는 식(6)과 같다. 또한, DQN 알고리즘에서의 파라미터에 따른 경향성을 확인하기 위해 1) 학습률 $10^{-2} - 10^{-6}$ 에 따라, 2) Action의 이산화 수 1, 10, 50, 100, 1000에 따라, 3) 가중치 계수 γ 를 1, 10, 50, 100, 1000으로 증가시킬 때의 경향성을 확인했다.

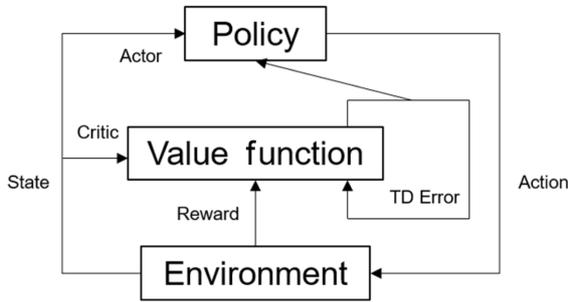


Fig. 5 DDPG algorithm

3.3 DDPG 알고리즘

Deep Deterministic Policy Gradient (DDPG) 알고리즘은 DQN과 Deterministic Policy Gradient (DPG) 알고리즘에 기반한다. DDPG 알고리즘은 Observation 공간과 Action 공간이 연속적인 특징이 있다. 이 알고리즘은 DQN 알고리즘에서 사용되는 Loss Function의 Critic 네트워크와 DPG 알고리즘에서 사용되는 Objective Function의 Actor 네트워크를 통해 업데이트된다. Critic 네트워크는 식(9)와 같이 업데이트된다.

$$\phi \leftarrow \phi - \{r + \gamma \hat{Q}_\phi(s', \hat{\mu}_\theta(s')) - Q_\phi(s, a)\} \nabla_\phi Q_\phi(s, a) \quad (9)$$

DPG 알고리즘에서 Gradient Ascent는 식(10)과 같고 Actor 네트워크는 식(11)과 같이 Gradient Ascent 방식으로 업데이트한다.

$$J(\theta) = E_{s \sim \rho_\theta} [Q_\phi(s, a)] \quad (10)$$

$$\theta \leftarrow \theta + \nabla_a Q_\phi(s, a)|_{a=\mu_\theta(s)} \nabla_\theta \mu_\theta(s) \quad (11)$$

이때 Critic 네트워크 업데이트는 DQN 알고리즘과 유사하지만, Action이 정해져 있다는 차이점이 있다. 또한, DPG 알고리즘에 의해 Policy가 결정되어 있어 알고리즘의 Variance가 낮아짐에 따라 탐험의 효과가 감소한다. 따라서 식(12)의 Extra Noise를 추가하여 탐험의 효과를 증가시킨다.

$$N : a_t = \mu_\theta(s_t) + N_t \quad (12)$$

DDPG 알고리즘은 DQN 알고리즘과 다르게 식(13)에서와 같이 τ 를 조정하여 네트워크를 매번 업데이트할 수 있다.

$$\hat{\phi} \leftarrow \tau \phi + (1 - \tau) \hat{\phi} \quad (13a)$$

$$\hat{\theta} \leftarrow \tau \theta + (1 - \tau) \hat{\theta} \quad (13b)$$

DDPG 알고리즘이 적용되는 원리는 Fig. 5과 같다.

본 논문에서 DDPG 알고리즘을 적용하기 위해 다음과 같이 알고리즘 모델을 설정했다. 첫째, Observation은 v , Alt , $slope$, SOC , v_{error} , $\int v_{error}$ 이다. 둘째, Action인 가속도를 -3부터 3까지의 범위로 설정한다. 마지막으로, 목적함수는 식(5)와 같으며 Cost는 식(6)과 같다. 또한, DDPG 알고리즘에서의 파라미터에 따른 경향성을 확인하기 위해 1) Critic의 학습률 $10^{-3} \sim 10^{-6}$ 에 따라, 2) Actor의 학습률 $10^{-3} \sim 10^{-6}$ 에 따라, 3)

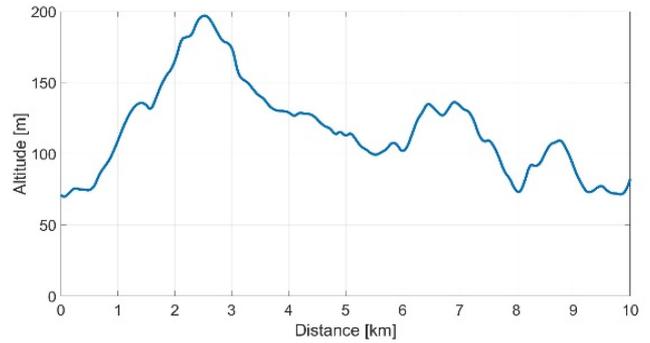


Fig. 6 Distance-based altitude driving cycle

Critic과 Actor의 학습률을 고정하고 가중치 계수 α 를 0.01~0.1까지 0.01씩 증가시킬 때의 경향성을 확인했다.

4. 시뮬레이션 결과

본 연구에서는 2절에서 설명한 차량 Simulink 모델을 기반으로 MATLAB 강화학습 알고리즘을 적용했으며, 주행 사이클은 총 10 km이며 거리에 따른 고도의 정보는 Fig. 6과 같다.

또한, 초기 SOC는 100%, 초기 차량 속도는 60 km/h로 설정했다. 식(6)에서의 가중치는 식(14)와 같이 적용했으며, DQN 알고리즘의 경우 가중치 γ 에 의한 경향성을 확인하고자 다른 케이스와 다른 비율을 적용했다.

$$\beta = 20\alpha, \gamma = 10\alpha \quad (14)$$

학습 수렴성, 크루즈 모드 대비 SOC 개선 정도, 타깃 속도 근접성을 기준으로 강화학습의 결과 비교, 분석을 진행했다. 이때 크루즈 모드 속도는 강화학습이 적용된 시뮬레이션과 동일한 거리를 동일한 시간으로 일정하게 주행하는 속도로 선정했다.

4.1 DQN 알고리즘 결과와 크루즈 모드 결과 비교

DQN 알고리즘을 적용한 연구에서는 액션 수, 학습률, 가중치 계수 γ 에 따른 강화학습 결과와 파라미터에 의한 경향성을 확인했다. 먼저, Action 수에 따른 결과 비교 과정에서 사용된 파라미터는 Table 2와 같다.

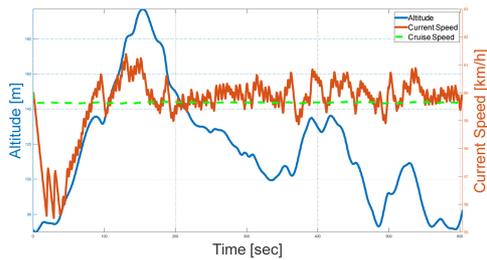
액션 수에 따른 DQN 알고리즘의 결과는 Fig. 7(a)와 같다. 이 케이스에서는 액션 수를 증가시키기에 따라 가속도를 더 세분화하여 나누었기 때문에 속도 프로파일의 진동이 개선되는 경향을 보였다. 또한, 고도가 증가/감소함에 따라 차량의 속도가 감소/증가하는 경향성을 확인할 수 있었으며, 액션 수가 커짐에 따라 크루즈 모드 대비 에너지 효율이 향상하는 경향을 보였다. 하지만 연속적인 값을 가지는 차량의 속도, 가속도와 같은 변수를 이산화하여 계산하고, 이를 충분하지 않은 에피소드에서 학습을 진행시켰기에 학습의 성능이 좋지 않다고 생각된다. 이러한 문제는 액션 수와 에피소드 수를 증가시키면 더 많은 학습이 되므로 개선될 것으로 예상된다.

Table 2 DQN algorithm parameter with respect to number of action

Parameter	Value
Learn rate	10^{-4}
Weighting coefficient, α	0.01
Number of minibatch size	64
Number of action	500, 1000, 1500
Number of episode	1000

Number of action	SOC [%]	Cruise speed [km/h]
500	-0.55	60.1
1000	-0.47	59.7
1500	-0.38	61.3

(a) Cruise speed and improved SOC of DQN algorithm



(b) Speed profile for 500 Actions

Fig. 7 DQN algorithm parameter with respect to number of action

Table 3 DQN algorithm parameter with respect to learn rate

Parameter	Value
Learn rate	$10^{-2} \sim 10^{-6}$
Weighting coefficient, α	0.01
Number of minibatch size	64
Number of action	500
Number of episode	1000

다음으로, 학습률에 따른 결과 비교 과정에서 사용된 파라미터는 Table 3과 같다.

학습률에 따른 결과는 Fig. 8(a)와 같다. Fig. 8(b)에서와 같이 학습률이 10^{-2} , 10^{-6} 에서는 학습이 수렴하지 않았으며, 이 케이스를 통해 학습률이 10^{-4} 에서 가장 안정적으로 학습이 되었고 학습 속도가 너무 빠르거나 너무 느리면 학습이 안정적으로 수렴하지 않는 경향성을 확인할 수 있다.

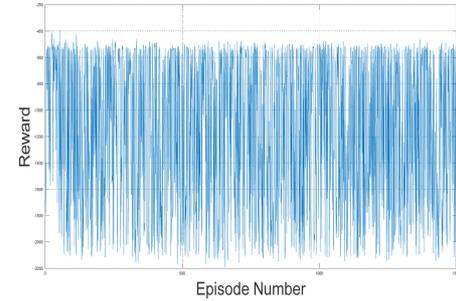
앞서 진행한 연구에서 학습된 속도 프로파일들이 진동하는 경향을 보였으며 이를 개선하고자 가중치 계수 γ 에 따른 결과를 비교하는 연구를 진행했다. 가중치 계수 γ 에 따른 결과 비교 과정에서 사용된 파라미터는 Table 4와 같다.

$$\beta = c\alpha \tag{15}$$

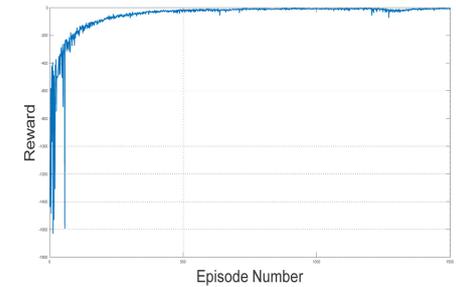
이때 가중치 계수 γ 를 앞선 연구에서 사용된 계수 10α 뿐만 아니라 식(15)와 Table 4와 같이 다양한 케이스에 대해 연구를

Critic learn rate	SOC [%]	Cruise speed [km/h]
10^{-3}	-67.0	52.1
10^{-4}	-0.47	59.7
10^{-5}	-13.6	61.9

(a) Cruise speed and improved SOC of DQN algorithm



(b) Learn rate profile for 10^{-2} , 10^{-6}



(c) Learn rate profile for $10^{-3} \sim 10^{-5}$

Fig. 8 DQN algorithm parameter with respect to learn rate

Table 4 DQN algorithm parameter with respect to weighting coefficient γ

Parameter	Value
Learn rate	10^{-4}
Weighting coefficient, α	0.01
Coefficient of γ , c	1, 10, 50, 100, 1000
Number of minibatch size	64
Number of action	500
Number of episode	1000

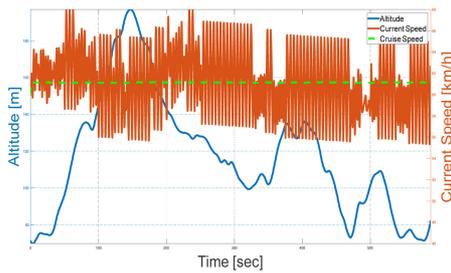
진행했다.

가중치 계수 γ 에 따른 결과는 Fig. 9(a)와 같다. Figs. 9(b), 9(c)와 같이 가중치 계수 γ 를 증가시키기에 따라 속도 프로파일의 진동이 감소하는 경향을 확인할 수 있었고, 이 결과를 통해 차량 운전성이 향상되었다고 볼 수 있다.

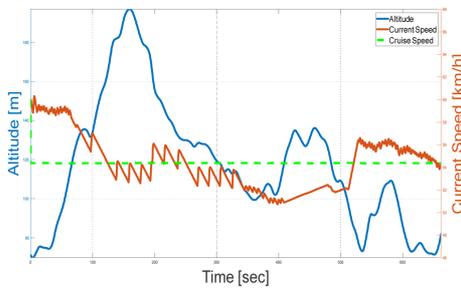
DQN 알고리즘을 적용한 EV 시뮬레이터의 결과는 학습 수렴성, 크루즈 모드 대비 SOC 개선정도 등을 고려했을 때, 전반적으로 학습이 안정적으로 되지 않았다. 이에 대한 이유는 액션 공간을 이산화하는 DQN 알고리즘의 특성에 의한 것이라 생각된다. 연속적인 차량 시스템 모델을 이산화된 시스템으로 변환하는 과정에서 차량 시스템의 특성을 충분히 반영하지 못하고 이에 따라 학습의 성능이 저하될 수 있다. 본 연구에서 사용된

Coefficient, c	SOC [%]	Cruise speed [km/h]
1	-44.7	61.1
10	-0.47	59.7
50	-0.25	59.7
100	1.23	54.4
1000	3.17	52.7

(a) Cruise speed and improved SOC of DQN algorithm



(b) Speed profile at c = 1



(c) Speed profile at c = 100

Fig. 9 DQN algorithm parameter with respect to weighting coefficient γ

Table 5 DDPG algorithm parameter with respect to critic learn rate

Parameter	Value
Critic learn rate	$10^{-2} \sim 10^{-6}$
Actor learn rate	10^{-4}
Weighting coefficient, α	0.01
Number of minibatch Size	64
Number of episode	1000

에피소드보다 더 많은 에피소드 수로 학습을 시키고, 액션을 이산화하는 과정을 연속 시스템에 유사하도록 더 세분화하는 방법을 통해 DQN 알고리즘의 학습 성능을 향상시킬 수 있을 것으로 생각된다.

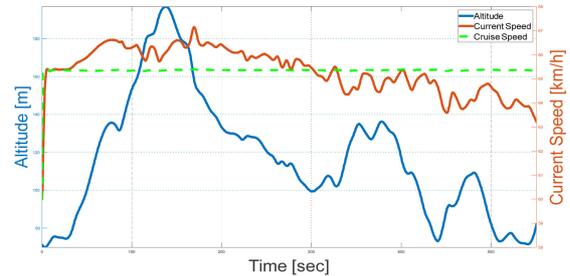
4.2 DDPG 알고리즘 결과와 크루즈 모드 결과 비교

DDPG 알고리즘을 적용한 연구에서는 Critic 학습률, Actor 학습률, 가중치 계수 α 에 따른 강화학습 결과와 파라미터에 의한 경향성을 확인했다. 먼저, Critic 학습률에 따른 결과 비교 과정에서 사용된 파라미터는 Table 5와 같다.

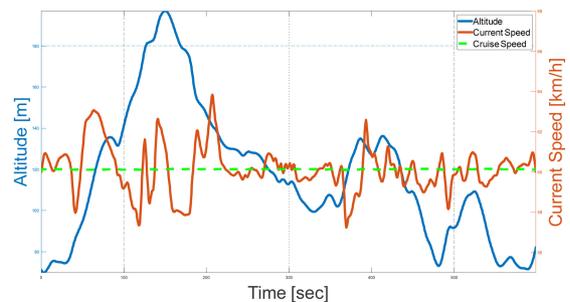
이때 Critic 학습률에 따른 결과는 Fig. 10(a)와 같다. 학습률이 10^{-2} 일 때는 Fig. 8(b)와 같은 학습 수렴성을 보이며, 학습률

Critic learn rate	SOC [%]	Cruise speed [km/h]
10^{-3}	+1.13	65.4
10^{-4}	+0.03	60.1
10^{-5}	-7.05	60.0
10^{-6}	-9.02	55.8

(a) Cruise speed and improved SOC of DDPG algorithm



(b) Speed profile at critic learn rate 10^{-4}



(c) Speed profile at critic learn rate 10^{-4}

Fig. 10 DDPG algorithm parameter with respect to critic learn rate

Table 6 DDPG algorithm parameter with respect to actor learn rate

Parameter	Value
Critic learn rate	10^{-4}
Actor learn rate	$10^{-2} \sim 10^{-6}$
Weighting coefficient, α	0.01
Number of minibatch size	64
Number of episode	1000

이 10^{-5} 인 케이스에서는 에너지 소모율이 악화되었다는 점에서 Critic 학습률이 너무 느리거나 빠르면 학습이 안정적으로 되지 않는 것을 확인할 수 있었다.

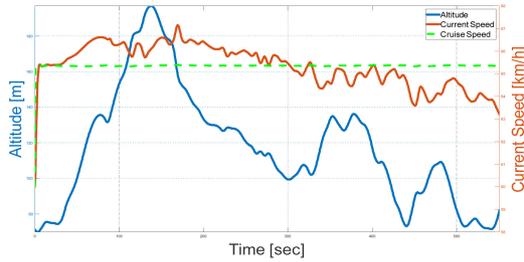
다음으로, Actor 학습률에 따른 결과 비교 과정에서 사용된 파라미터는 Table 6과 같다.

Actor 학습률에 따른 결과는 Fig. 11(a)와 같으며, 학습률이 10^{-2} 인 케이스를 제외한 모든 케이스에서 학습은 수렴하였다. 학습률이 너무 빠른 케이스에서는 동일한 경향을 보이지만, Critic 학습률에 따른 결과에 비해 Actor 학습률의 변화에 대해서 전체적으로 학습이 안정적으로 되었음을 확인할 수 있었다. 이를 통해 이 시스템에는 Actor 학습률보다 Critic 학습률의 영향이 큰 것을 확인할 수 있었다.

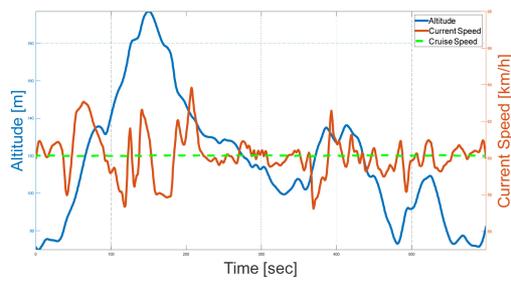
마지막으로 전체 Cost에 따른 결과를 확인하고자 가중치 계

Actor learn rate	SOC [%]	Cruise speed [km/h]
10^{-3}	-0.41	60.8
10^{-4}	+0.03	60.1
10^{-5}	-0.19	60.6
10^{-6}	+1.12	64.8

(a) Cruise speed and improved SOC of DDPG algorithm



(b) Speed profile at actor learn rate 10^{-4}



(c) Speed profile at actor learn rate 10^{-5}

Fig. 11 DDPG algorithm parameter with respect to actor learn rate

Table 7 DDPG algorithm parameter with respect to weighting coefficient α

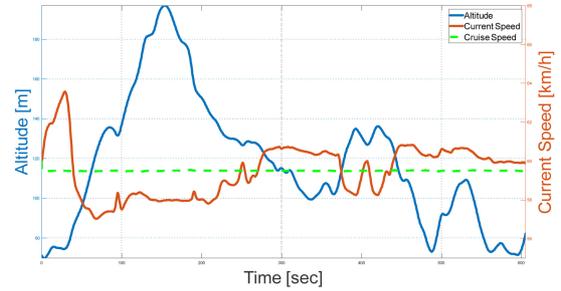
Parameter	Value
Critic learn rate	10^{-4}
Actor learn rate	10^{-4}
Weighting coefficient, α	0.01-0.1
Number of minibatch size	64
Number of episode	1000

수 α 의 변화에 따른 결과를 비교하는 연구를 진행했다. 가중치 계수 α 에 따른 결과 비교 과정에서 사용된 파라미터는 Table 7 과 같다.

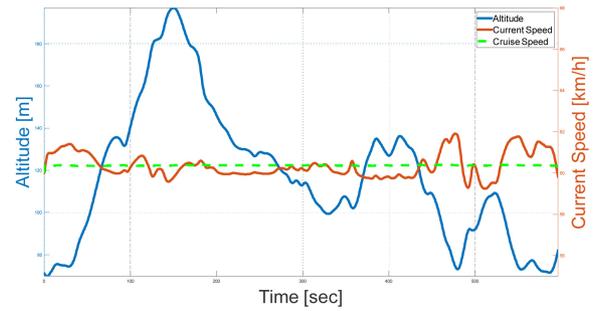
가중치 계수 α 에 따른 결과는 Fig. 12(a)와 같으며, 이 결과를 통해 다양한 케이스에서 에너지 효율이 개선되었음을 확인했다. 경사가 있는 도로를 주행할 때, EV 파워트레인의 개입 없이 운동에너지가 위치에너지로, 위치에너지가 운동에너지로 직접 변환되는 과정을 통해 전기차 에너지 효율이 증가될 수 있다. Figs. 12(b), 12(c)에서 고도가 높아질 때 속도는 감소하고, 고도가 낮아질 때 속도는 증가하는 경향을 확인할 수 있으며 두 케이스에서 모두 에너지 효율이 개선되었음을 Fig. 12(a)에서 확인할 수 있다.

Coefficient, α	SOC [%]	Cruise speed [km/h]
0.01	+0.03	60.1
0.02	+0.62	59.5
0.03	+1.22	59.4
0.04	+0.08	60.5
0.05	-0.31	59.5
0.06	+0.69	60.4
0.07	+0.13	59.1
0.08	-0.30	60.2
0.09	-0.17	60.6
0.1	+0.38	60.1

(a) Cruise speed and improved SOC of DDPG algorithm



(b) Speed profile at $\alpha = 0.02$



(c) Speed profile at $\alpha = 0.06$

Fig. 12 DDPG algorithm parameter with respect to weighting coefficient α

DDPG 알고리즘을 적용한 EV 시뮬레이터의 결과는 DQN 알고리즘과 비교했을 때, 전반적으로 안정적인 학습 결과를 보였다. 또한, DDPG 알고리즘의 연속적인 액션 공간 특성으로 인해 학습 과정에서 차량 시스템의 특성이 잘 반영되었다고 할 수 있다. 본 연구에서 DDPG 알고리즘을 활용하여 에너지 효율 증가 원리를 만족하는 EV의 속도 프로파일을 도출할 수 있었다.

5. 결론

본 논문은 Eco-driving 제어 방법 중 RL을 활용하여 EV의 에너지 효율을 개선하고자 했으며 강화학습 알고리즘이 효과적으로 적용될 수 있음을 확인했다. 또한, DQN 알고리즘과 DDPG 알고리즘에 따른 결과와 각 알고리즘의 파라미터에 따른 경향성을 확인할 수 있었다. DQN 알고리즘에 의한 결과는 크루즈

주행 모드 대비 에너지 소모율이 악화되었는데, 이에 대한 이유는 액션 공간을 이산화하는 DQN 알고리즘의 특성에 의한 것이라 생각된다. 시스템을 이산화하는 과정에서 연속적인 차량 시스템을 충분히 반영하지 못함에 따라 학습 성능이 저하될 수 있으며, 이러한 문제점은 더 많은 에피소드 수와 액션을 더 세분화하는 방법을 통해 개선될 수 있을 것으로 생각된다. DDPG 알고리즘을 적용한 결과에서는 전반적으로 안정적인 학습을 보였다. 또한, 연속적인 차량 시스템이 학습 과정에 잘 반영되어 에너지 효율이 개선되는 결과를 도출할 수 있었다. 본 연구의 결과를 통해 운전자의 개입 없이 최적의 속도 프로파일, 또는 운전 방식 등을 찾음으로써 해당 알고리즘을 실제 차량에 적용한다면, Cruise 모드 대비 에너지 소모율을 줄일 수 있을 것으로 생각된다.

본 연구에서는 도로의 구배 정보만으로 Eco-driving 제어 기반 속도 프로파일을 도출하였지만, 추후 연구에서는 선행 차량과의 안전거리, 신호 체계 등을 고려하여 EV 시뮬레이터 모델을 보완하고, DQN, DDPG 알고리즘 이외의 DP, MBRL 등과 같은 알고리즘을 적용하여 성능 비교 연구를 진행하고자 한다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 논문은 2024년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국 산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임 (P0017120, 2024년 산업혁신인재성장지원사업).

REFERENCES

1. Dib, W., Chasse, A., Moulin, P., Sciarretta, A., Corde, G., (2014), Optimal energy management for an electric vehicle in eco-driving applications, *Control Engineering Practice*, 29, 299-307.
2. Lee, H. Y., Kim, N. W., Cha, S. W., (2020), Model-based reinforcement learning for eco-driving control of electric vehicles, *Journal of the Institute of Electrical and Electronics Engineers Access*, 8, 202886-202896.
3. Xu, N., Li, X., Liu, Q., Zhao, D., (2021), An overview of eco-driving theory, capability evaluation, and training applications, *Sensors*, 21(19), 6547.
4. Mensing, F., Bideaux, E., Trigui, R., Tattgrain, H., (2013), Trajectory optimization for eco-driving taking into account traffic constraints, *Transportation Research Part D*, 18(1), 55-61.
5. Mahler, G., Vahidi, A., (2014), An optimal velocity-planning scheme for vehicle energy efficiency through probabilistic prediction of traffic-signal timing, *Journal of the Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Intelligent Transportation System*, 15(6), 2516-2523
6. Ozatay, E., Onori, S., Wollaeger, J., Ozguner, U., Rizzoni, G.,

- Filev, D., Micheli, J., Cairano, S. D., (2014), Cloud-based velocity profile optimization for everyday driving: A dynamic-programming-based solution, *Journal of the Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 15(6), 2491-2505.
7. Han, J. H., Sciarretta, A., Ojeda, L. L., Nunzio, G. D., Thibault, L., (2018), Safe-and eco-driving control for connected and automated electric vehicles using analytical state-constrained optimal Solution, *Journal of the Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Intelligent Vehicles*, 3(2), 163-172.
8. Santin, O., Beran, J., Pekar, J., Micheli, J., Jing, J., Szwabowski, S., Filev, D., (2017), Adaptive nonlinear model predictive cruise controller: Trailer tow use case, (Report No. 2017-01-0090), SAE Technical Paper, (<https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2017-01-0090/>)
9. Santin, O., Pekar, J., Beran, J., D'amato, A., Ozatay, E., Micheli, J., Szwabowski, S., Filev, D., (2016), Cruise controller with fuel optimization based on adaptive nonlinear predictive control, *SAE International Journal of Passenger Cars-Electronic and Electrical Systems*, 9(2), 262-274.
10. Abbas, H., Kim, Y., Siegel, J. B., Rizzo, D. M., (2019), Synthesis of pontryagin's maximum principle analysis for speed profile optimization of all-electric vehicles, *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 141(7), 071004.
11. Lewis, F. L., Vrabie, D., (2009), Reinforcement learning and adaptive dynamic programming for feedback control, *Journal of the Institute of Electrical and Electronics Engineers Circuits and Systems Magazine*, 9(3), 32-50.
12. Lee, H., Kim, K., Kim, N., Cha, S. W., (2022), Energy efficient speed planning of electric vehicles for car-following scenario using model-based reinforcement learning, *Applied Energy*, 313, 118460.
13. Ma, X., Xie, Y., Chigan, C., (2019), Meta-deep q-learning for eco-routing, *Proceedings of the 2019 Institute of Electrical and Electronics Engineers 2nd Connected and Automated Vehicles Symposium(CAVS)*, 1-5.
14. Shi, J., Qiao, F., Li, Q., Yu, L., Hu, Y., (2018), Application and evaluation of the reinforcement learning approach to eco-driving at intersections under infrastructure-to-vehicle communications, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2672(25), 89-98.
15. Guo, Q., Angah, O., Liu, Z., Ban, X. (J.), (2021), Hybrid deep reinforcement learning based eco-driving for low-level connected and automated vehicles along signalized corridors, *Journal of the Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 124, 102980.
16. Mnih, V., Kavukcuoglu, K., Silver, D., Graves, A., Antonoglou, L., Wierstra, D., Riedmiller, M., (2013), Playing Atari with Deep Reinforcement Learning, *arXiv preprint arXiv:1312.5602*.
17. Mnih, V., Kavukcuoglu, K., Silver, D., Rusu, A. A., Bellemar,

M. G., Graves, A., Riedmiller, M., Fildjeland, A. K., Ostrovski, G., Peterson, S., Beattie, C., Sadik, A., Antonoglou, L., King, H., Kumaran, D., Wierstra, D., Legg, S., Hassabis, D., (2015), Human-level control through deep reinforcement learning, *Nature*, 518, 529–533.

**Hyun Joong Kim**

received B.S. degree in Mechanical Engineering from Dankook University, Korea, in 2023. He is currently in graduate school, pursuing M.S. degree in Mechanical Engineering at Dankook University, Korea. His research interests include Reinforcement Learning, Modeling and Simulation of Intelligent Vehicle.

E-mail: hyunjoong6788@gmail.com

**Dong Min Kim**

received B.S. degree in Mechanical Engineering from Dankook University, Korea, in 2024. He is currently in graduate school, pursuing M.S. degree in Mechanical Engineering at Dankook University, Korea. His research interests include Autonomous Driving, Modeling and Simulation of Intelligent Vehicle.

E-mail: mechdmkim42@gmail.com

**Su Hyeon Kim**

is currently B. S. student in Mechanical Engineering, Dankook University. His research interests include Reinforcement Learning and Optimal Control for Vehicle Energy Management.

E-mail: suhun419@gmail.com

**Heeyun Lee**

received his B.S. degree in Mechanical Engineering from Sungkyunkwan University, Korea, in 2013, and the Ph.D. degree in Mechanical Engineering from Seoul National University, Korea, in 2018. Currently, he is an assistant professor in the Department of Mechanical Engineering, Dankook University. His research interests include optimal control, Reinforcement Learning, Modeling, and Simulation of Electrified Vehicles.

E-mail: heeyunlee@dankook.ac.kr

• 특집 • 스마트로봇 및 모빌리티 기술(Smart Robot and Mobility Technology)

자율주행 발렛 주차 시스템을 위한 계층적 주차 경로 계획

Hierarchical Path Planning Method for Automated Valet Parking Systems

이찬영¹, 이기범^{1,#}
Chanyoung Lee¹ and Kibeom Lee^{1,#}

¹ 가천대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Gachon University)
Corresponding Author / E-mail: kibeom.lee@gachon.ac.kr, TEL: +82-31-750-2639
ORCID: 0000-0002-9745-7116

KEYWORDS: Automated valet parking (자율 발렛 주차), Path planning (경로 계획), Path smoothing (경로 평활화), Cubic polynomial (3차 다항식), Bidirectional A* (양방향 에이 스타)

Automated valet parking systems have been researched because they provide a good service condition for autonomous vehicles, with their limited space and unmanned environment. Previous parking algorithms focused on planning a path to a parking space based on geometry. However, this approach only works when the parking space is simple. To make automated parking algorithms useful in different environments, it is crucial to drive a path from the entrance to the target space and plan a safe parking path, taking into account the surrounding vehicles in the parking lot. This study organizes the structure of the automated valet parking system into two phases. The first phase involves driving from the origin to the destination. The second phase focuses on planning a path for parking the vehicle in the parking lot. It considers the position, orientation, and parking space to plan a path that aligns correctly. Simulation results demonstrate that the proposed algorithm can plan paths in various parking environments and park vehicles in narrow parking spaces. It is expected that this proposed automated valet parking algorithm can be further improved to contribute to the early commercialization of automated driving technology.

Manuscript received: February 18, 2024 / Accepted: March 25, 2024

NOMENCLATURE

X	=	Horizontal Axis Position of Vehicle from Global System
Y	=	Vertical Axis Position of Vehicle from Global System
x	=	Horizontal Axis Position of Vehicle from Vehicle System
y	=	Vertical Axis Position of Vehicle from Vehicle System
θ	=	Yaw Angle of Vehicle
S	=	Spline Set
c	=	Cubic Coefficient

1. 서론

자율 발렛 주차 시스템의 경우 제한된 공간에서 승객이 탑승하지 않은 환경이라는 점에서 자율주행 차량의 좋은 서비스 조건으로 부각되며 많은 연구가 이뤄지고 있다[1-3]. 기존의 많은 주차 알고리즘의 경우 발렛 기능을 고려하지 않고, 주차 가능 공간에서 차량을 목표 위치와 방향각으로 주차하기 위한 경로를 생성하는 것에 초점이 맞춰져 있다[4,5]. Qiu[4] 등은 평행 주차 시나리오에서 종횡 방향 위치 오차와 방향 오차를 줄이는 연구를 진행했으며, 궤적 계획과 궤적 추종 제어의 계층구조를 가지는 시스템을 구성하여 모델 예측 제어(MPC) 기반의

알고리즘을 통해 장애물을 제약조건으로 설정하여 이차 프로그래밍 알고리즘으로 주차 연구를 진행했다. 반면, Liu[5] 등은 차량 모델을 사용하지 않고 원호 궤적을 이용하여 장애물을 제약조건으로 설정하고 비선형 최적화 문제를 통해 주차 연구를 진행했다. 하지만 이와 같은 경로 생성 방법은 주차 공간이 단순하거나 주변에 장애물이 없는 환경에서만 가능하다는 단점이 있다.

실제 자율 발렛 주차 알고리즘을 활용하기 위해서는 입구에서부터 주차 공간까지 협로를 주행하기 위한 방법과 주차 공간에서 주변 차량들을 고려하여 목적지에 원하는 방향각을 만족하며 안전하게 주차할 수 있는 경로를 생성하는 것이 필수적이다. 따라서 두 가지의 서로 다른 방법의 유기적인 연결을 위해 자율주행 발렛 주차 시스템의 경로 계획을 위한 계층구조가 필수적이다. 계층구조의 주요 목적은 자율 발렛 주차 시스템의 도전 과제인 주차 공간까지 이동 단계에서 안전한 협로 주행을 위한 경로 생성과 주차 단계에서 주변 차량 및 장애물을 고려하여 효율적이고 안전하게 주차하는 것이다. 고려해야 할 파라미터와 추구하는 효율이 서로 다른 도전 과제의 유기적인 연결을 위해 계층구조를 가진다.

자율 발렛 주차를 위해 먼저 주차 공간까지 이동하는 단계에서는 장애물을 회피하며 목표 위치까지 도달하는 것이 주요 목표이고 경로의 복잡성이 낮을수록 시간 효율성과 안전성이 높아지기 때문에 최단 거리 경로 계획이 필요하다. 기존의 최단 거리 경로 계획은 주로 그래프 탐색과 샘플링 기반의 방법을 사용해왔다. 그래프 탐색기반은 주변 환경과 자유공간을 그래프를 통해 표현하고 관련 정보들을 비용으로 사용한다. 전통적인 Dijkstra[6], A*[7] 등 탐색 알고리즘을 사용하여 비용을 평가하여 최선의 경로를 계획할 수 있다. 그래프 탐색 기반의 방법은 경로가 존재한다면 반드시 결과를 도출해 낼 수 있지만, 그래프의 차원이 증가할수록 계산 비용이 증가할 수 있다. 샘플링 기반의 방법 또한 먼저 주변 환경들을 표현하고 자유공간에서 무작위의 샘플들을 생성하여 충돌을 평가한 후 샘플을 반복 생성하여 탐색 알고리즘으로 경로를 계획한다. 샘플링 기반의 방법은 고차원의 환경에서도 빠른 성능을 기대할 수 있지만, 반복 횟수 제약에 따라 결과를 제공하지 못할 수도 있다는 단점을 가지고 있다. 이번 연구에서는 2차원 그래프에서 장애물과 충돌하지 않는 최단 거리 경로 생성을 위해 단순하고 수렴성이 보장되는 그래프 탐색 방법을 이용한다. 그래프 탐색을 이용하여 생성된 경로는 차량이 주행하기에 부드럽지 않은 경로로써 기준 경로로 사용하기에 적합하지 않다. 따라서 부드러운 경로 계획을 위해 경로 평활화를 이용하여 기준 경로를 생성한다[8].

그래프 탐색 방법은 위치 정보만 고려하고 방향 정보는 고려하지 않기 때문에 차량이 기준 경로를 따라 주행하며 주차 가능 공간에 위치하면 새로운 기준 경로가 필요하다. 새로운 기준 경로는 주변 차량과 충돌하지 않고 안전하게 주차하기 위해서는 목표 위치에서 목표 방향각으로 주차를 완료해야 한다. 따라서 방향까지 고려된 경로 계획이 필요하며, 이번 연구에서는 3차 다항식을 이용하여 방향각이 고려된 주차 경로 계획을 통해

안전한 경로를 생성하는 목표를 가진다. 3차 다항식 경로 계획은 주로 자율주행 차량의 부드러운 경로 계획을 위해 이용되지만, 출발지와 목적지의 위치 및 방향 관계에 따라 추종 불가능한 곡선이나 목적지에서의 급격한 방향 전환으로 인해 원하는 방향각을 만족하기 어려운 경우가 있다. 이러한 문제들을 해결하기 위해 차량의 방향각에 여유를 두어 후보 경로들을 생성하고 주차에서 고려되는 효율성 들을 비용 함수로 설계하여 여러 조건을 만족하며 목표 방향각 오차를 줄일 수 있는 최적 경로를 생성할 수 있다.

계층구조의 자세한 내용은 섹션 2에 설명되어 있으며 섹션 3에서는 진행한 연구를 검증하기 위한 시뮬레이션과 분석 그리고 섹션 4는 결론으로 구성했다.

2. 자율 발렛 주차 경로 계획

자율주행 발렛 주차 시스템의 경로 계획을 위한 계층 구조도를 Fig. 1에 나타내었다. 앞서 설명한 두 가지 목적에 따른 계층구조는 주차장 외부에서부터 주차 공간까지 이동하는 목적지 경로 계획과 주차 가능 공간에서 활성 조건을 가지는 주차 경로 계획으로 구성되어 있다. 두 알고리즘 모두 자차량으로부터 좌표 정보를 받고 기준 경로를 생성한다. 주차 경로 계획은 경로에 방향까지 고려돼야 하기 때문에 현재 차량의 방향각 정보와 목표 공간의 위치와 방향각 정보를 추가로 제공받는다. 전체 알고리즘의 작동 순서는 먼저 목적지 경로 계획에서 주행 가능 경로가 생성된 후 기준 경로를 차량이 추종하는 모든 시간 동안 두 번째 알고리즘이 실행되며 충돌 위험 및 제약조건이 만족될 경우 작동조건이 활성화된다. 두 알고리즘은 독립적으로 기능하며 충돌 위험이 없는 경로가 우선순위로 선택되고, 최적 경로 선택 방법에 따라 최종적으로 기준 경로가 생성된다. 계층구조의 첫 번째 알고리즘인 목적지 경로 계획은 2.1에서, 두 번째 알고리즘인 주차 경로 계획은 2.2에서 자세히 설명한다.

2.1 Phase 1: 목적지 경로 계획

계층구조의 첫 번째 알고리즘인 목적지 경로 계획은 주차장에서 주차 공간까지 장애물과 충돌하지 않는 최단 거리 경로를 생성하는 목표를 가지고 있다. 안전한 최단 거리 경로를 생성하기 위해 목적지 경로 계획은 연속된 두 가지 방법으로 이루어져 있다. 먼저, 자율주행 차량이 주차 가능 공간까지 주행하기 위한 전역 경로를 생성한다. 다음으로 주행 안정성과 경로의 연속성을 보장하기 위해 경로 평활화를 진행한다. 전역 경로 계획은 섹션 2.1.1에 자세히 설명되어 있고, 부드러운 경로를 위한 경로 평활화는 섹션 2.1.2에 자세히 설명되어 있다.

2.1.1 전역 경로 계획

전역 경로는 자율주행 차량이 목적지까지 도달하기 위해 기본이 되는 경로이며, 안전한 최단 거리 경로를 탐색을 위해 A*

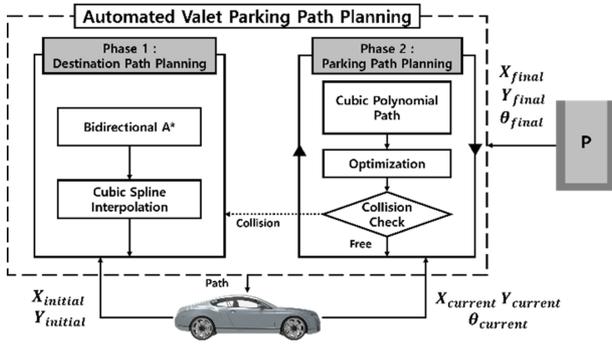


Fig. 1 System structure of path planning for automated valet parking

알고리즘의 변형인 양방향 A* 알고리즘을 사용한다. 양방향 A* 알고리즘은 복잡한 장애물이 존재하는 넓은 공간에서 최적 효율성을 보장하는 경로를 탐색할 수 있다는 장점이 있다.

양방향 A* 알고리즘은 시작 노드에서 목표 노드로의 탐색과 동시에 목표 노드에서 시작 노드로의 역 탐색을 병행하는 탐색 알고리즘이다. 이 알고리즘은 전체 탐색 공간을 두 부분으로 나누어 각 부분에서 독립적으로 A* 알고리즘을 실행한다. 각각의 탐색은 시작 노드와 목표 노드에서 출발하여 다른 쪽 노드를 향해 진행된다. Fig. 2에 설명된 알고리즘의 흐름은 다음과 같다:

- 1) 각 노드의 열린 집합, 닫힌 집합, 비용 및 부모 노드 등을 초기화한다.
- 2) 열린 집합이 비어 있지 않는 한 최소 비용을 갖는 노드들을 선택한다.
- 3) 시작 노드 쪽에서 A* 알고리즘을 수행한다. 시작 노드에서 가장 적절한 다음 노드를 선택하여 탐색을 진행한다. 이 과정에서는 시작 노드의 이웃 노드를 검토하고 각 이웃 노드의 비용 및 부모 노드를 갱신한다.
- 4) 목표 노드 쪽에서도 3.과 동일한 방법을 수행한다.
- 5) 두 탐색이 상호간섭 없이 독립적으로 진행된다. 만약 시작 노드 쪽의 탐색이 목표 노드 쪽의 닫힌 리스트에 있는 노드를 방문하거나, 목표 노드 쪽의 탐색이 시작 노드 쪽의 닫힌 리스트에 있는 노드를 방문하면, 양방향 탐색은 종료된다.
- 6) 양방향 탐색이 종료되면 최종 경로를 생성하여 반환한다.

양방향 A* 알고리즘은 출발지와 목적지에서 병렬적으로 노드를 탐색하기 때문에 A* 알고리즘의 단점인 넓은 공간에서의 탐색 시간을 줄여 시간 효율성 측면에서 큰 장점을 가지고 있다.

양방향 A* 알고리즘을 사용하기 위해 주차장을 위에서 본 이미지를 그래프화 하여 주차장의 장애물과 차선의 위치 정보를 노드로 나타낸다. 주행 가능 공간에는 일반적인 휴리스틱 함수를, 장애물과 차선에는 매우 큰 비용을 부여하여 경로를 탐색할 때 주행 불가 영역 위로 경로가 생성되는 것을 방지한다. 출발지 노드와 목적지 노드에서 병렬적으로 주변 노드를 탐색을 진행하며 두 탐색 노드가 중복되거나 기존에 탐색을 마친 노드와 중복될 시 탐색을 종료하고 탐색한 노드 중에서 가장 낮은 비용을 가지는 최적 경로를 생성한다. 이렇게 생성된 전역 경로는

Algorithm 1 Bidirectional A* Algorithm

```

1: INPUT: S (Start node), G (Goal node)
2: OUTPUT: Optimal path from S to G
3:  $O_S \leftarrow \{S\}, C_S \leftarrow \{\}, g_S[S] \leftarrow 0, h_S[S] \leftarrow \text{Heuristic}(S, G), P_S \leftarrow \{\}$ 
4:  $O_G \leftarrow \{G\}, C_G \leftarrow \{\}, g_G[G] \leftarrow 0, h_G[G] \leftarrow \text{Heuristic}(G, S), P_G \leftarrow \{\}$ 
5: while  $O_S \neq \emptyset$  and  $O_G \neq \emptyset$  do
6:    $current_S \leftarrow \arg \min_{n \in O_S} (g_S[n] + h_S[n])$ 
7:    $current_G \leftarrow \arg \min_{n \in O_G} (g_G[n] + h_G[n])$ 
8:   if  $current_S \in C_G$  or  $current_G \in C_S$  then
9:     path  $\leftarrow$  PathConnection( $current_S, current_G, P_S, P_G$ )
10:    return path
11:  end if
12:  remove  $current_S$  from  $O_S$ 
13:  remove  $current_G$  from  $O_G$ 
14:  add  $current_S$  to  $C_S$ 
15:  add  $current_G$  to  $C_G$ 
16:  for all neighbor  $n$  of  $current_S$  do
17:     $temp_g \leftarrow g_S[current_S] + \text{distance}(current_S, n)$ 
18:    if  $n \in C_S$  and  $temp_g \geq g_S[n]$  then
19:      continue
20:    end if
21:    if  $n \notin O_S$  or  $temp_g < g_S[n]$  then
22:       $P_S[n] \leftarrow current_S$ 
23:       $g_S[n] \leftarrow temp_g$ 
24:       $h_S[n] \leftarrow \text{Heuristic}(n, G)$ 
25:      if  $n \notin O_S$  then
26:        add  $n$  to  $O_S$ 
27:      end if
28:    end if
29:  end for
30:  for all neighbor  $n$  of  $current_G$  do
31:     $temp_g \leftarrow g_G[current_G] + \text{distance}(current_G, n)$ 
32:    if  $n \in C_G$  and  $temp_g \geq g_G[n]$  then
33:      continue
34:    end if
35:    if  $n \notin O_G$  or  $temp_g < g_G[n]$  then
36:       $P_G[n] \leftarrow current_G$ 
37:       $g_G[n] \leftarrow temp_g$ 
38:       $h_G[n] \leftarrow \text{Heuristic}(n, S)$ 
39:      if  $n \notin O_G$  then
40:        add  $n$  to  $O_G$ 
41:      end if
42:    end if
43:  end for
44: end while
    
```

Fig. 2 Pseudo code of bidirectional A* algorithm

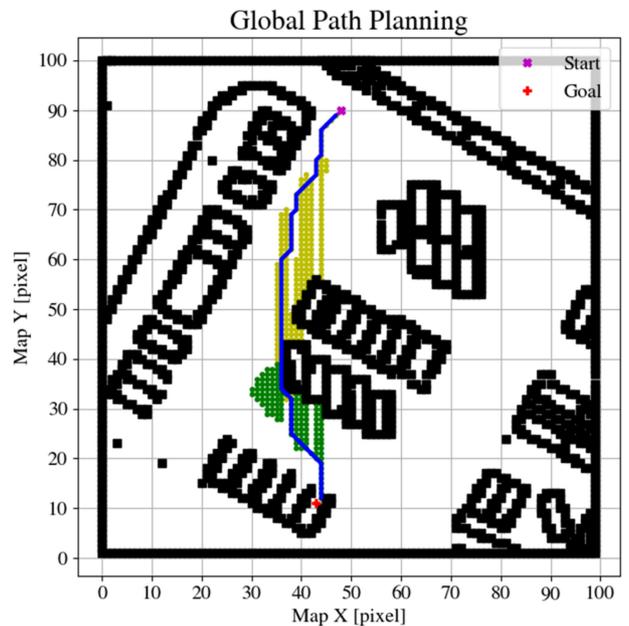


Fig. 3 Global path planning using bidirectional A* algorithm

최적 효율성을 보장한다. Fig. 3은 주차장 지도를 그래프화 하고 양방향 A* 알고리즘을 이용하여 주차장에서의 전역 경로를

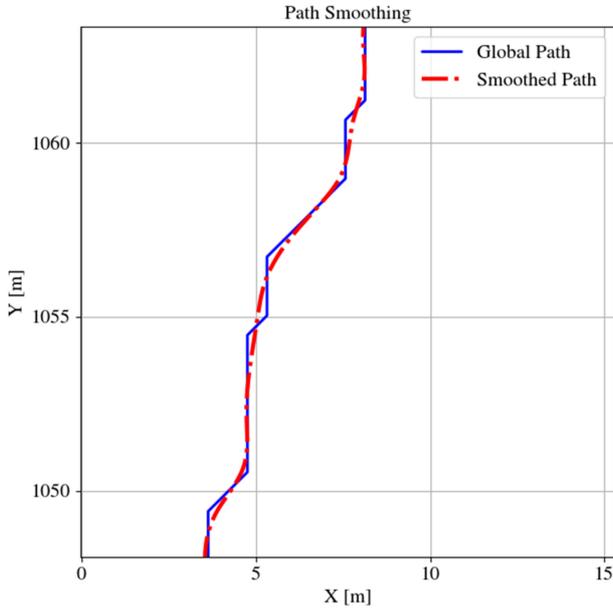


Fig. 4 The global path shows a linear variation in slope, while the smoothed path demonstrates a gradual slope change, maintaining the overall shape observed in the global path

생성한 그래프이다. 연두색 원은 출발지 노드로부터 탐색을 마친 노드이고, 초록색 원은 목적지 노드로부터 탐색을 마친 노드이다. 출발지와 목적지에서 병렬적으로 노드 탐색을 통해 연두색 노드와 초록색 노드가 만나게 되어 탐색이 중단되고, 탐색한 노드들 중 이웃한 노드에서 가장 비용이 적은 노드들의 연속인 파란색 전역 경로로 생성된다.

2.1.2 전역 경로 평활화

그래프 탐색 기반으로 생성된 전역 경로는 이산화 된 그리드로 인해 차량이 경로를 따라 이동할 수 없는 경우가 있다. 따라서 추종 가능한 경로를 생성하기 위해 꺾여 있는 전역 경로를 부드럽게 퍼주는 과정이 필요하다. 경로 평활화를 이용하여 경로를 연속적이고 미분 가능성을 보장하여 차량의 경로 추종 성능을 높이고 주행 가능성이 보장된 경로를 제공한다. 주로, 연속성을 보장하기 위해 보간법을 사용하여 불연속 경로를 연속 경로로 만들고, 미분 가능성을 보장하며 부드러운 경로를 위해 스플라인 [9]을 사용한다. 자율주행 차량을 위한 기준 경로로서 연속성과 미분 가능성을 보장하여 부드러운 경로를 필요로 하기 때문에 스플라인과 보간법을 융합한 스플라인-보간법을 사용한다.

스플라인-보간법이란, 불연속 항들을 보간법을 이용하여 낮은 차수의 다항식으로 만들고 불연속점들을 스플라인의 제어점으로 이용하여 부드러운 곡선을 만들어 불연속적이고 비선형을 연속적이고 선형으로 근사하는 방법이다. 식(1)과 같이 먼저 스플라인 집합을 위한 구간을 정의하고 식(2)의 형태인 3차 다항식 스플라인 집합을 정의한다. 이때, 연속성을 보장하기 위해 식(3)과 식(4)의 보간 조건을 만족해야 하며, 미분 가능성을 보장하고 부드러운 경로를 위해 식(5)와 식(6)의 연결 조건을 만족해야 한다. 이러한

조건을 모두 만족시키는 c 를 구하여 각 구간에서 3차 다항식으로 연결된 경로를 생성할 수 있다. 스플라인-보간법을 이용해 생성된 경로는 Fig. 4의 그래프이며, 파란색 실선은 전역 경로이고 빨간색 쇄선은 전역 경로를 평활화한 경로이다. 전역 경로는 꺾인 직선의 형태로 차량이 추종하기 어려운 경로이지만, 평활화한 경로는 전역 경로의 모양을 띠며 부드러운 기울기를 보여준다.

$$\bar{X} = X - X_i, 1 \leq i \leq n-1, i \in N \quad (1)$$

$$S_i(X) = c_3 \bar{X}^3 + c_2 \bar{X}^2 + c_1 \bar{X} - c_0, \quad (2)$$

$$S_i(X_i) = Y_i \quad (3)$$

$$S_{i+1}(X_i) = Y_i \quad (4)$$

$$S'_i(X_i) = S'_{i+1}(X_i) \quad (5)$$

$$S''_i(X_i) = S''_{i+1}(X_i) \quad (6)$$

2.2 Phase 2: 주차 경로 계획

Phase 2는 계층구조 경로 계획의 두 번째 알고리즘으로 목적지의 위치와 방향을 고정하고 현재 차량의 방향에 여유를 두어 여러 후보 경로들을 제안하고 평가하여 최고의 효율을 가지는 경로를 계획한다. 여러 후보 경로를 제안하는 이유는 현재 차량의 방향에 고정된 하나의 경로만 제시했을 때, 목적지에서 목표 방향을 만족하기 위해 급격하게 기울기가 변하는 경로가 생성되는 경우가 있어 실제 기준 경로는 목표 방향을 만족하지만, 추종 가능성이 보장되지 않아 주차의 안전성이 감소하기 때문이다. 따라서 현재 차량의 방향각에 여유를 두어 경로의 다양성을 증가시켜 더 안전한 경로를 선택할 가능성을 높이고 비용 함수에 따라 최고 효율을 가지는 경로를 선택할 수 있다.

Phase 2의 작동조건은 Phase 1의 경로를 따라 차량이 목적지까지 이동하는 도중 차량의 현재 위치와 방향 그리고 목적지의 위치와 방향을 고려한 경로가 장애물과 충돌하지 않는 경로로 판단될 때이다. 이 경우 Phase 1이 종료되고 실시간으로 Phase 2가 작동하여 지속해서 최적의 경로를 계획한다.

2.2.1 3차 다항식 경로 계획

자율 주차가 진행되는 환경은 주변 장애물이 복잡한 상황으로 충돌이 일어나지 않도록 안전하게 주행해야 한다. Phase 1의 경로 계획과 달리 도착지에 차량이 정렬되어야 하므로 차량의 위치뿐만 아니라 방향까지 고려한 경로 계획이 필수적이다. 차량의 위치와 방향을 고려하기 위해 3차 다항식을 이용하여 경로를 계획한다. 3차 다항식을 구성하기 위해서는 현재 및 목적지의 위치 및 방향 정보가 필요하다. 식(7)과 식(8)은 차량의 현재 위치와 목적지의 위치로 두 개의 식이 정의되고, 차량 좌표계에서 dy/dx 는 차량의 방향각으로 근사 될 수 있기 때문에

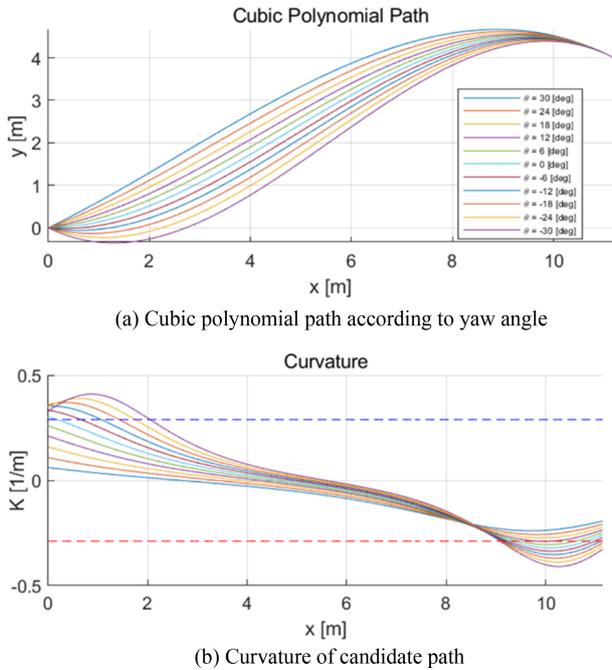


Fig. 5 Path planning optimization

식(9)와 식(10)은 현재 차량의 방향과 목적지의 목표 방향으로 정의된다. 최종적으로 후보 경로는 식(11)의 형태를 띠게 된다.

$$y_{cur} = c_3x_{cur}^3 + c_2x_{cur}^2 + c_1x_{cur} + c_0 \quad (7)$$

$$y_{tar} = c_3x_{tar}^3 + c_2x_{tar}^2 + c_1x_{tar} + c_0 \quad (8)$$

$$\theta_{cur} = 3c_3x_{cur}^2 + 2c_2x_{cur} + c_1 \quad (9)$$

$$\theta_{tar} = 3c_3x_{tar}^2 + 2c_2x_{tar} + c_1 \quad (10)$$

$$C(x) = c_3x^3 + c_2x^2 + c_1x + c_0 \quad (11)$$

같은 방법으로 현재 차량의 방향각을 실제와 여유를 두어 차량의 방향각을 변경해가며 그린 후보 경로들은 Fig. 5(a)와 같다. 후보 경로는 0도부터 음의 방향과 양의 방향 모두 30도까지 6도씩 증가하여 총 11개의 후보 경로로 이루어져 있다.

2.2.2 경로 최적화

후보 경로에서 안전성 및 추종 가능성을 보장하며 주차의 경로가 단순할수록 얻는 이득을 높이기 위하여 제어 노력과 경로 길이에 대한 항을 비용 함수를 구성하는 데 포함한다.

안전성을 보장하기 위하여 차량을 간단한 기구학적 모델로 나타낸다[10]. 차량 모델은 Fig. 6과 같이 차량의 전장을 이등분하여 두 개의 원을 차량의 길이 중심에 접하도록 하고, 두 개의 원과 접하는 점에서 동일한 반지름을 가지는 원을 그린다. 3개의 원은 장애물과의 충돌 예측에 사용되며, 3차 다항식 경로 위에 식(9)를 이용하여 구한 θ 로 3개의 연속된 원을 회전하여 주변

장애물들과 충돌을 비교한다. 충돌이 일어나는 경로는 후보 경로에서 제외되며 충돌이 일어나지 않는 경로는 후보 경로에 추가된다. 실제 주차장과 같이 폐쇄적인 공간에서는 위치와 방향 각의 추정 불확실성이 존재하므로 해당 모델에서 사용한 원의 반지름을 증가시켜 사용해야 할 필요가 있다.

안전성이 보장된 경로 후보들이 결정된 후, 추종 가능성을 판단하기 위해 차량의 최대 조향 각도를 이용하여 최대 곡률을 구할 수 있다. 대부분의 주차가 저속에서 진행되기 때문에 Ackermann Steering Geometry를 이용하여 차량의 주행 가능한 최대 곡률을 구한다. 다항식의 곡률 공식인 식(12)를 이용하여 경로에서 최대 곡률이 최소 선회 반경을 넘지 않도록 제약조건을 설정하여 추종 가능성을 보장하고 각 후보 경로에서 최대 곡률을 비용 함수의 첫 번째 항으로 구성한다. Fig. 5(b)의 그래프를 보면 최대 곡률 제약조건이 위배된 경로들을 확인할 수 있다.

$$K = \frac{C''(x)}{\sqrt{1 + C'(x)^2}} \quad (12)$$

주차 경로에서 제어 노력이 적을수록 부드러운 곡선을 따라 차량이 주행할 수 있으며 이는 에너지 효율성과 주행 안전성 그리고 추종 정확도가 높아진다. 제어 노력의 효율을 높이기 위하여 3차 다항식 경로의 기울기 변화량이 최소가 되는 경로를 선택하기 위해 경로의 2계 도함수의 절댓값의 합을 비용 함수의 두 번째 항으로 구성한다.

마지막으로 경로의 길이를 줄여 시간 효율성을 높이기 위해 후보 경로 길이를 식(13)과 같이 직선 경로 길이로 정규화하여 비용 함수의 세 번째 항으로 구성한다.

$$L = \frac{\int_{x_{cur}}^{x_{tar}} \sqrt{1 + C'(x)^2} dx}{\sqrt{(x_{cur} - x_{tar})^2 + (y_{cur} - y_{tar})^2}} \quad (13)$$

각각의 서로 다른 의미를 가지는 비용 함수의 항들은 물리적 의미가 서로 다르며 이에 따라 단위 또한 통일되지 않는다. 이를 위해 각 항을 식(14)를 이용해서 정규화한다.

$$X_{normalized} = \frac{X}{X_{max}} \quad (14)$$

완성된 비용 함수는 식(15)에 표현되어 있으며, 각 항에 대한 가중치인 α, β, γ 는 음이 아닌 실수이다. 가중치는 사용자의 효율 추구에 따라 다르게 설정할 수 있으며, 중요한 의미를 가질 수록 가중치의 값을 크게 설정한다. 비용 함수의 세 항을 각각 P, Q, R 로 나타냈다.

$$P, Q, R = \operatorname{argmin}(P + Q + R)$$

$$P = \alpha K_{max,normalized} \quad (s.t. |K_{max}| \leq \frac{\tan|\delta_{max}|}{l}) \quad (15)$$

$$Q = \beta \sum_{cur}^{x_{goal}} |\nabla^2 C(x)|_{normalized}$$

$$R = \gamma L_{normalized}$$

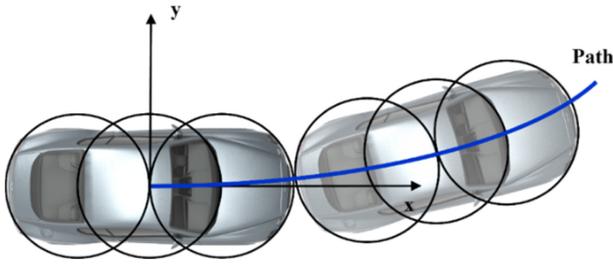
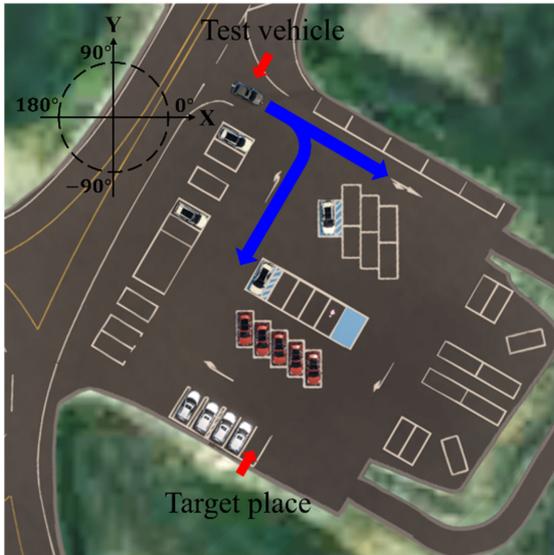


Fig. 6 3 circle model to ensure safety



(a) Scenario in which the test vehicle departs from outside the parking lot shown in the KATRI parking lot of the MORAI SIM and automated valet parking to the target place



(b) Test vehicle

Fig. 7 Simulation environment

최종적으로 후보 경로들의 비용 중 가장 작은 비용을 가지는 경로를 최종 선택하여 기준 경로로 사용하며 차량의 변화하는 위치와 방향에 따라 지속적으로 더 적은 비용을 가지는 경로를 선택한다.

3. 시뮬레이션 및 분석

시뮬레이터를 이용하여 자율주행 발렛 시스템의 계층적 주차

Table 1 Test vehicle parameters

Wheelbase (l) [mm]	2,700
Maximum steering angle (δ_{max}) [deg]	36.3

Table 2 Cost weights

α	β	γ
1.0	1.0	1.0

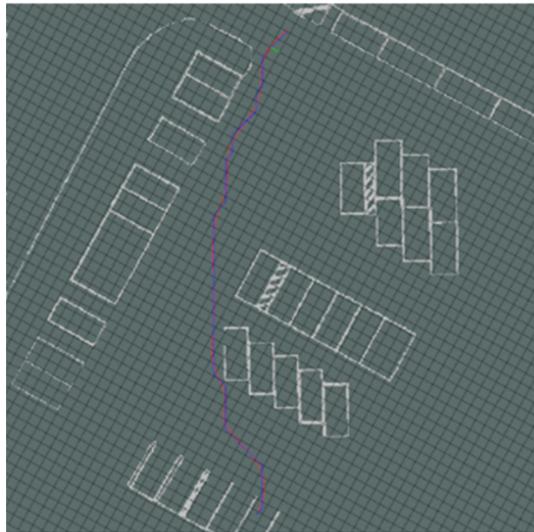
경로 계획과 경로 최적화가 적절한지 평가한다. 평가를 위한 주차장 환경은 교통안전공단 자동차안전연구원의 K-city 주차장 환경을 사용하였으며, 동일하게 구현된 MORAI SIM의 K-city 환경에서 시뮬레이션을 진행하였다. 주차장 외부에서부터 주차 완료 구역까지 기준 경로를 따라 주행하며, 주차 구역에는 다른 차량들이 주차 되어있어 안전성 높은 주차를 요구하는 시나리오로 구성하였으며, 주차장 환경은 Fig. 7(a)에 나타내었다. 시뮬레이션에 사용된 차량은 KIA의 Niro 차량을 사용하였으며, Fig. 7(b)에 나타내었다. 실험에 사용된 차량의 파라미터는 Table 1과 같으며, 비용 함수의 가중치는 기본값으로 Table 2에 구성했다. 기준 경로를 추종하기 위한 횡방향 제어기는 모델 예측 제어(MPC)를 이용했다.

3.1 자율 발렛 주차 경로 계획 평가

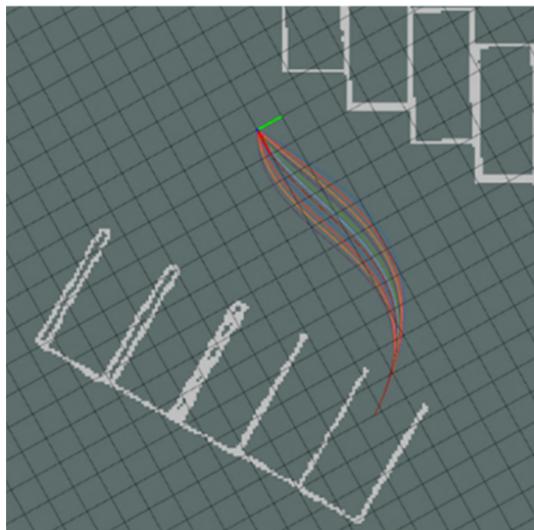
Phase 1에서 양방향 A* 알고리즘을 이용하여 주차장 외부에서부터 목적지까지 전역 경로를 생성하고 경로 평활화를 진행했다. Fig. 8(a)의 그래프가 보여주듯이, 평활화된 경로를 따라 차량이 차선을 밟지 않으며 차량이 경로를 추종하며 주차 완료 장소 주변에 차량이 근접하였을 때 Phase 2에서 계획한 3차 다항식 경로 후보 중 차선과 타 차량과의 충돌 가능성이 없는 경로가 존재하여 Phase 1의 경로 추종을 중단하였다. Fig. 8(b)가 보여주듯이, Phase 2의 후보 경로들이 장애물과 충돌하지 않고 차량의 현재 방향각에 여유를 두어 경로의 최대 곡률이 작아 완만한 곡선을 그리는 경로, 목표 위치 부근에서 기울기 변화율이 작은 경로 그리고 경로의 길이가 가장 짧은 경로 등 여러 효율 특성을 가지는 경로가 생성되었다. 이 중 최적 경로를 따라 주차 완료 후 차량의 목표 위치와 방향각을 고정된 단일 경로와 최적 경로에 따른 비교 값을 Fig. 9와 Table 3에 나타냈다. Fig. 9의 결과에서 최적 경로로 주차를 진행했을 때, 단일 경로 주차보다 방향각 오차가 상당량 줄어들음을 확인할 수 있다. 단일 경로로 주차했을 때와 비교하여 최적 경로로 주차했을 때, 위치 오차는 0.8 m, 74.1% 감소했고 방향 오차는 7.0 deg, 62.4% 감소했다.

3.2 비용 함수 최적화 평가

비용 함수가 적절하게 설계되었나 확인하기 위하여 비용 함수 최적화 평가를 진행했다. Phase 2가 작동조건이 활성화된 이후부터 주차 완료까지 최적 경로가 선택되는 과정을 5단계로 나눠 Figs. 10과 11에서 나타냈다. Fig. 10은 11개의 후보 경로들의 비용 함수 합이며, 각 후보 경로들의 제약조건과 함께



(a) Phase 1

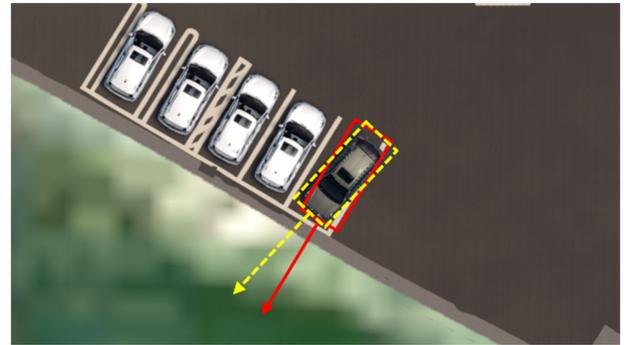


(b) Phase 2

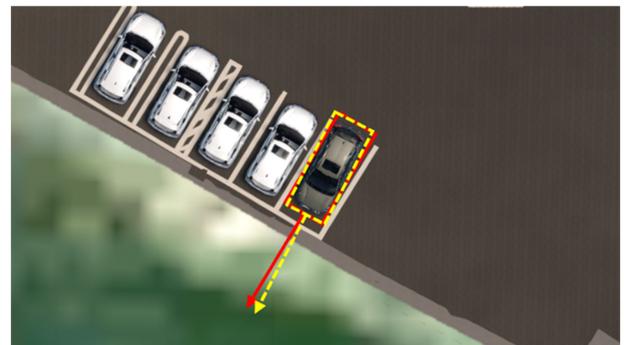
Fig. 8 Path generation result

나타내어 제약조건을 만족하며 가장 적은 비용을 가지는 최적 경로를 확인할 수 있다. Figs. 11은 10에 대응하는 후보 경로의 모습이며, 경로를 명확히 구별하기 위해 5개의 경로만 시각화하였다. Fig. 10에서 연두색 상자로 둘러 쌓인 막대 그래프가 제약 조건을 만족하는 최적 경로이고 빨간 상자로 둘러싸인 막대 그래프는 가장 작은 비용을 가지지만 제약조건을 만족하지 못하는 후보 경로이다. Fig. 10(d)와 같이 후보 경로 중 비용이 최소인 경우에도 제약조건이 위배되어 최적 경로 선택에서 제외되는 경우를 확인할 수 있다.

Figs. 10(a)-10(c)에서 확인할 수 있듯이, 방향각에 여유를 둔 후보 경로들이 최적 경로로 선택되고 있으며 차량이 주행하며 목적지의 방향 오차를 줄이는 최적 경로가 선택되는 것을 확인했다. 따라서 설계한 비용 함수가 주차 경로 계획 목적에 맞게 설계되었음을 확인했다.



(a) Single path result



(b) Optimal path result

Fig. 9 Result comparison of yaw angle between parking on the single path and the optimal path

Table 3. Evaluation of pose accuracy

	Position [m]		Heading [deg]
	X	Y	θ
Target	8.136	1021.906	-118.589
Single path	8.599	1020.877	-129.879
Error	1.128		11.290
Optimal path	8.040	1021.630	-114.355
Error	0.292		-4.234
Improvement	74.114 [%]		62.498 [%]

4. 결론

본 연구에서는 자율주행 발렛 주차 시스템을 위한 계층적 경로 계획 방법을 제안하였다. 이 방법은 주차장 외부에서부터 목적지까지 경로 계획과 주차 가능 구역에서의 후보 경로 최적화로 나누어져 자율 발렛 주차 시스템의 안전하고 효율적인 주행을 보장할 수 있다. 기존에 문제가 되었던 먼 거리에서의 주차 공간까지의 주행과 연결되는 목적지에서 주차 공간의 목표 방향각과 차량의 주차 방향의 정확도를 높이는 것이 핵심 목표였으며, 시뮬레이션 결과 제안한 방법이 단순하고 효율적인 경로를 계획하고 안전하게 차량의 목표 방향각과 차량의 방향각

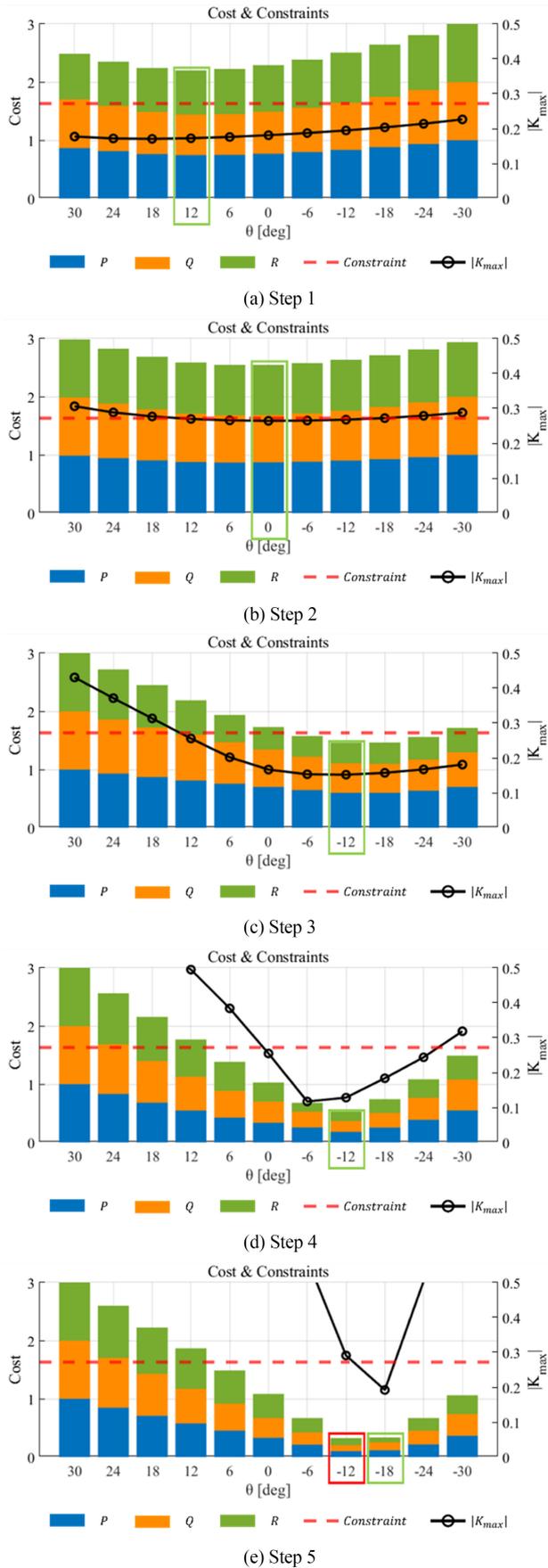


Fig. 10 Costs and constraint of candidate optimal path

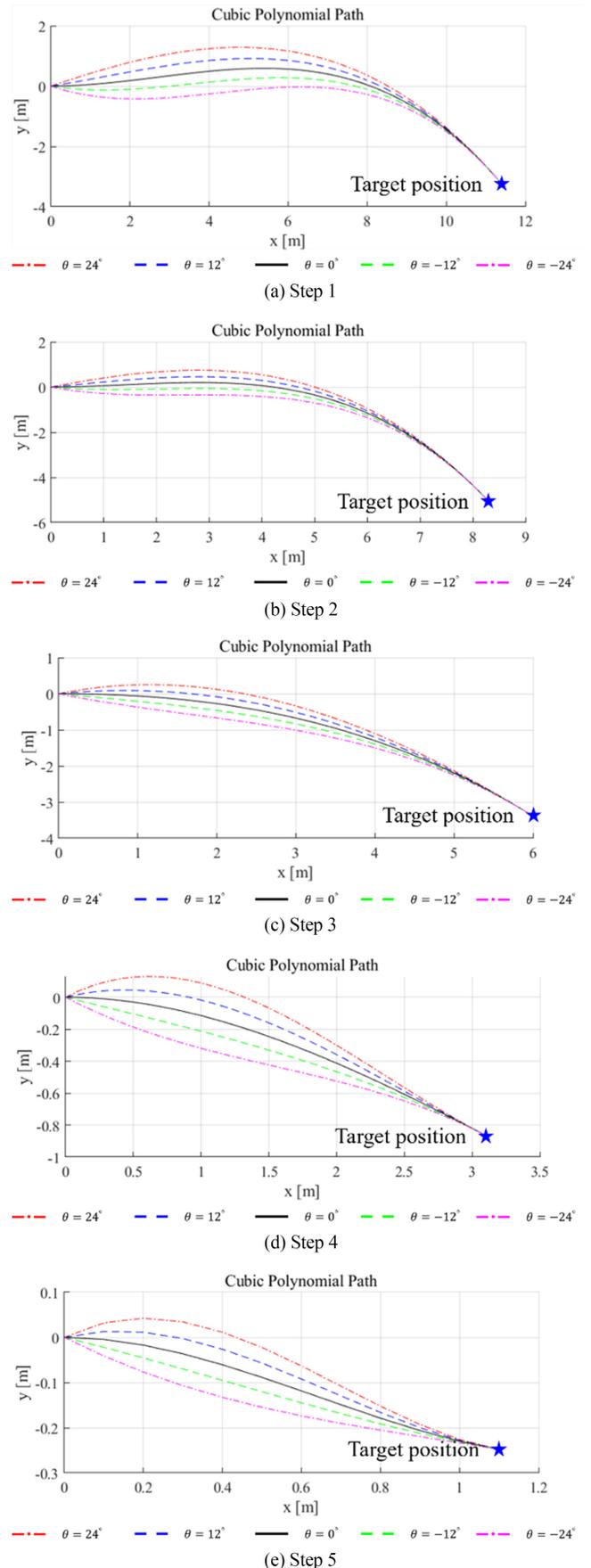


Fig. 11 Phases of candidate optimal path

오차를 62.4% 향상시켜 주차하는 것을 확인하였다. 경우에 따라 비용 함수의 특정 효율 향이 최솟값 값을 가지지만 총 비용 함수가 최소가 아닌 후보 경로들을 확인할 수 있었다. 이는 각 비용 함수의 가중치에 따라 최적 경로가 선택되는 경향을 변경할 수 있다는 것을 의미하고, 다양한 시나리오에 따라 가중치가 변경될 수 있음을 의미한다.

본 연구에서는 차량이 주차함에 있어 후진 주행을 고려하지 않았으나, 후진 주행 알고리즘을 추가할 경우 알고리즘의 활용도가 높아질 것으로 기대한다.

다양한 시나리오에서 비용 함수의 가중치를 변경하며 각 가중치에 따른 경로 선택의 경향성과 특성을 분석하고 직각, 대각, 평행주차 환경에서 정형화될 수 있는 가중치 집합에 대한 추가 연구가 필요하다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2021R1C1C1004154).

REFERENCES

1. Hussain, R., Zeadally, S., (2018), Autonomous cars: research results, issues, and future challenges, Institute of Electrical and Electronics Engineers Communications Surveys & Tutorials, 21(2), 1275-1313.
2. Jhang, J.-H., Lian, F.-L., (2020), An autonomous parking system of optimally integrating bidirectional rapidly-exploring random trees and parking-oriented model predictive control, Institute of Electrical and Electronics Engineers Access, 8, 163502-163523.
3. Zips, P., Böck, M., Kugi, A., (2016), Optimisation based path planning for car parking in narrow environments, Robotics and Autonomous Systems, 79, 1-11.
4. Qiu, D., Qiu, D., Wu, B., Gu, M., Zhu, M., (2021), Hierarchical control of trajectory planning and trajectory tracking for autonomous parallel parking, Institute of Electrical and Electronics Engineers Access, 9, 94845-94861.
5. Liu, S., An, X., Shang, E., He, H., (2012), A path planning method for assistant parallel car-parking, Proceedings of the 2012 Fifth International Symposium on Computational Intelligence and Design, 65-68.
6. Dijkstra, E. W., (1959), A Note on two problems in connexion with graphs, Numerische Mathematik, 1, 269-271.
7. Hart, P. E., Nilsson, N. J., Raphael, B., (1968), A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths, Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Systems Science and Cybernetics, 4(2), 100-107.

8. Kim, J., Park, S. H., Shin, D.-G., Kim, M.-G., Chung, S. Y., Hwang, M. J., Kim, M., (2021), 3-D model-based trajectory generation algorithm for robotic shoe sole spray system, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 38(11), 825-832.
9. Ravankar, A., Ravankar, A. A., Kobayashi, Y., Hoshino, Y., Peng, C.-C., (2018), Path smoothing techniques in robot navigation: State-of-the-art, Current and Future Challenges, Sensors, 18(9), 3170.
10. Lin, F., Wang, K., Zhao, Y., Wang, S., (2020), Integrated avoid collision control of autonomous vehicle based on trajectory re-planning and V2V information interaction, Sensors, 20(4), 1079.



Chanyoung Lee

He received the bachelor's degree in mechanical engineering from Gachon University, Seongnam, South Korea, in 2024 and is currently pursuing the master's degree at the same university. His main research interests include the path planning and path tracking control of autonomous vehicles.
E-mail: chan6125@gachon.ac.kr



Kibeom Lee

He received the B.S. degree in mechanical and system design engineering from Hongik University, Seoul, South Korea, in 2012, and the M.S. and Ph.D. degrees from the Graduate School of Green Transportation, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), Daejeon, South Korea, in 2014 and 2020, respectively. He is currently an Assistant Professor with the Department of Mechanical Engineering, Gachon University, and the Director of the Autonomous Mobility Systems Laboratory (AMSL). His research interests include the fields of autonomous mobility systems, autonomous vehicle, digital twin, and vehicle dynamics and control.
E-mail: kibeom.lee@gachon.ac.kr

• 특집 • 스마트로봇 및 모빌리티 기술(Smart Robot and Mobility Technology)

자율주행 차량의 능동안전성 시험을 위한 초박형 타깃로봇의 현가장치 설계

Suspension Mechanism Design of a Low-platform Target Robot for Evaluating Autonomous Vehicle Active Safety

유재상¹, 김도현¹, 정재일^{2,#}
Jae Sang Yoo¹, Do Hyeon Kim¹, and Jayil Jeong^{2,#}

¹ 국민대학교 대학원 기계시스템공학과 (School of Mechanical Systems Engineering, Graduate School, Kookmin University)
² 국민대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Kookmin University)
Corresponding Author / E-mail: jayjeong@kookmin.ac.kr, TEL: +82-2-910-5039
ORCID: 0000-0001-7237-4413

KEYWORDS: Target robot (타깃로봇), Crank rocker mechanism suspension (크랭크 로커 메커니즘 현가장치), Multibody dynamics (다물체 동역학), Design of experiment (실험 계획법), Optimum design (최적설계)

As advanced driver-assistance systems become more common in commercial vehicles, there is a growing need for evaluating safety of vehicles. Low platform target robot systems play a crucial role in this evaluation process as they can assess safety performances of autonomous vehicles. Driving stability of a target robot during real vehicle tests depends significantly on its suspension system. Therefore, developing an appropriate suspension device for the target robot is of utmost importance. This study aimed to improve driving stability by comparing two different suspension configurations: a single rocker and a double rocker, both incorporating a crank rocker mechanism. Initially, a two-dimensional model that met constraints of the suspension device was developed, followed by an analysis of reaction forces. Subsequently, an optimal design was determined using design of experiments principles based on parameters of a 2D model. The manufactured suspension system model based on the optimal design underwent multi-body dynamics simulation to evaluate driving stability. Comparative analysis of driving stability for both configurations was performed using MBD simulation, offering insights into the superior suspension design for the target robot.

Manuscript received: February 20, 2024 / Revised: April 1, 2024 / Accepted: April 3, 2024

NOMENCLATURE

ADAS	=	Advanced Driver Assistance System
NHTSA	=	National Highway Traffic Safety Administration
NCAP	=	New Car Assessment Program
GVT	=	Guided Vehicle Target
VRU	=	Vulnerable Road User

1. 서론

최근 자율주행 차량의 운전자 보조 시스템인 첨단운전자보조장치(ADAS)의 양산 차 적용이 확대됨에 따라 ADAS 적용 차량의 안전도 평가 시험의 필요성이 대두되고 있다. 다양한 자율주행 차량의 ADAS 성능을 평가하기 위해 국내외 자율주행 단계별 실차시험에 대한 평가가 진행되고 있다. 미국 도로 교통안전국(NHTSA)과 유럽 신차 안전도 평가기관인 Euro NCAP

그리고 한국 신차 안전도 평가기관인 KNCAP 같은 안전도 평가기관에서는 자율차량의 긴급 제동과 같은 사고를 유발할 수 있는 시험에 대응하기 위해 Fig. 2과 같이 초박형 로봇 위에 더미를 올린 GVT를 사용하고 있다[1-3].

본 논문에서는 자율주행 차량의 안전도 평가를 위한 타깃로봇에 대한 소개와 안전도평가 실차시험 시 타깃로봇의 주행 안정성에 큰 영향을 미치는 현가장치 설계 및 검증에 대해 다룬다. 두 가지 형상의 현가장치를 비교하며 설계 변수 설정을 통한 최적설계와 다물체 동역학 시뮬레이션을 통한 주행 안정성 평가를 수행하였다.

관련 연구의 경우 Sabry은 크랭크-로커 메커니즘의 링크 길이를 최적으로 합성하는 방법론을 제시했다[4]. Singh은 제약조건 내에서 결함 없는 크랭크-로커 메커니즘을 합성하는 방법을 제시했으며, TLBO (Teaching-learning-based Optimization) 알고리즘을 사용하여 최적화 문제를 해결하였다[5]. Park은 자율주행 2단계 차량의 끼어들기 평가방법론을 제시하기 위해 타깃로봇을 제작하였으며 4절 링크 기구를 활용한 현가장치를 설계하였다[6]. Yuk은 서스펜션의 장애물 극복을 위한 제어와, 도로 조건에 따른 주행 데이터를 비교하였다[7]. 위의 연구들은 최적설계를 기반으로 한 메커니즘을 설계했다.

초박형 타깃로봇은 제약조건 내에서 현가장치를 구현해야 한다. 따라서 본 논문에서는 타깃로봇의 목적인 자율주행 차량의 안전도 평가 시, 로봇과 차량의 충돌간 발생하는 충격을 버티며 주행 안정성이 뛰어난 현가장치 설계를 목표로 한다. 본 연구는 자율자동차의 안전도 평가를 위하여 개발된 로봇에 대한 서스펜션 설계에 대한 설계방법론을 제시한다. 설계 목표로 설정된 최소 두께 90 mm의 로봇에 대하여 시험 차량이 로봇을 밟고 지나가는 상황을 고려하면서도 안정적인 운행이 가능한 서스펜션 설계의 최적값을 실험방법론을 이용하여 설계하고 이를 시뮬레이션으로 검증하는 방법론을 제안한다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2장은 초박형 타깃로봇에 대한 설명과 사용 목적에 관해 설명한다. 3장은 초박형 타깃로봇 주행 안정성에 중요한 역할을 하는 현가장치의 기구 설계를 설명한다. 4장에서는 최대 기구 이득을 만들어 내기 위한 최적설계에 대해 다루며 5장은 결론으로 구성되어 있다.

2. 초박형 타깃로봇

2.1 타깃로봇 구조

ADAS 성능 평가 시 자율 차의 ADAS 기능 실패가 일어날 경우 자율차와 더미 로봇(GVT) 간의 충돌이 일어나며 로봇의 지상고가 높을 시 차량 하부와 로봇의 충돌이 발생할 수 있다. 이런 상황에 대비하여 AB-Dynamics, 4activeSystems 등의 회사는 Fig. 1과 같이 높이를 100 mm로 제한한 타깃로봇을 개발하였으며 위에 언급한 안전도 평가기관에서는 이러한 타깃로봇 및 더미를 사용하여 안전도 평가 시험을 진행 중이다.

Description	AB Dynamics	Humanetics	4Active	Kookmin univ.
				
Height	100mm	100mm	90mm	100mm

Fig. 1 Guided vehicle target robot with dummy



Fig. 2 Guided vehicle target robot with dummy

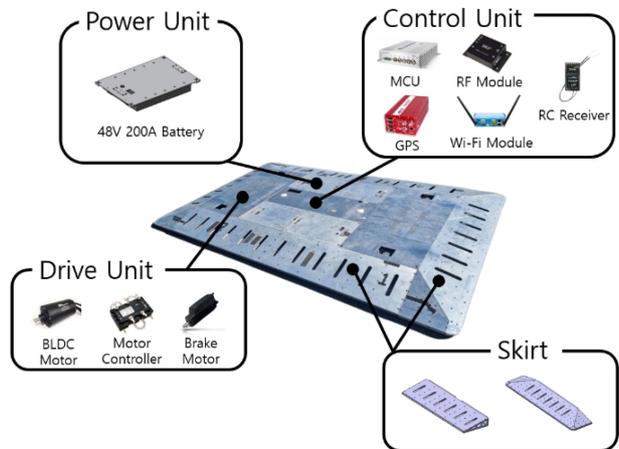


Fig. 3 Guided vehicle target robot unit

초박형 타깃로봇은 3,100 × 1,800 × 100 mm의 크기를 가지며 스킨트는 7도의 경사를 가지고 있어 차량이 로봇을 밟고 넘어가도 구동 및 내구성에 문제가 없도록 설계하였다. 타깃로봇은 크게 프레임 및 스킨트(Frame and Skirt), 구동부(Drive Unit), 제어부(Control Unit), 전원부(Power Unit)으로 구성되어 있다. 로봇을 구동하는 모터는 BLDC 모터를 사용하였으며 약 6,000 RPM의 회전속도로 최대 100 km/h의 속도를 가진다. 속도 및 위치의 제어는 ±1 cm급의 정밀도를 가지는 GPS의 위치 데이터와 로봇에 장착된 제어기(Main Control Unit)에 의해 제어된다[8].

타깃로봇을 이용한 실차시험에서 시험 차량은 전방 차량은



Fig. 4 Guided vehicle target robot test

레이더 센서와 카메라 센서 퓨전을 통해 인식한다. 타깃로봇을 차량으로 인식하기 위한 차량 모형이 필요하다. 이를 위해 Euro NCAP 시험에서 인증된 GVT를 사용하였다. GVT는 안전성을 위해 스펀지로 제작되었으며 시험차량과 충돌 시 충격 흡수를 위해 분해된다. 스펀지 위에 특수 제작된 천막을 씌우며 차량으로 인식되기 위해 내부에 반사판을 설치하여 레이더에 차량으로 인식된다.

2.2 타깃로봇 시험

Euro NCAP, KNCAP, 그리고 여러 자동차 기업 등, 자동차를 평가하거나 자동차를 만드는 기업들은 안전도 테스트를 위해 초박형 타깃로봇을 사용하고 있다. 해외 자동차 안전 연구 프로젝트인 OSCCAR에서는 고속도로 끼어들기 상황에서의 ADAS 테스트를 위해 타깃로봇을 사용했으며 최근 유럽에서 진행된 SAFEUP 프로젝트에서는 차대차 사고만이 아닌 도로 취약자(Vulnerable Road User)에 대한 실험도 진행됨에 따라 안전성 평가용 타깃로봇에 대한 수요가 높아지고 있는 추세이다[9,10]. 여기서 교통취약자란 자동차에 탑승하지 않은 일반 행인과 오토바이, 그리고 자전거 등을 지칭한다.

타깃로봇은 주로 도심 교차로에서의 ADAS 성능평가 및 고속도로 끼어들기 상황에서의 실험차의 반응 및 안전성 평가 등을 위해 사용된다. 도심 도로 회전 및 고속도로 끼어들기 시 경로(Pathway)를 설정해줘야 한다. 이때 부드러운 경로 생성과 오버슈트가 발생하지 않는 곡선의 연속성을 유지하며 횡 방향 가속을 최소화하는 특징을 가지고 있는 Bezier 곡선을 사용하였다 [11]. 경로를 벗어나지 않고 추종하기 위해서는 GPS를 기반으로 한 상대위치 및 가속도의 정확도가 중요한데 이는 로봇의 주행 안정성의 영향을 크게 받는다.

3. 초박형 타깃로봇 기구 설계

3.1 기구설계 제약조건

로봇의 주행 안정성은 도로의 단차에 큰 영향을 받는다. 노면 상황이 일정하지 않으면 접지부에 큰 진동이 발생하게 된다.

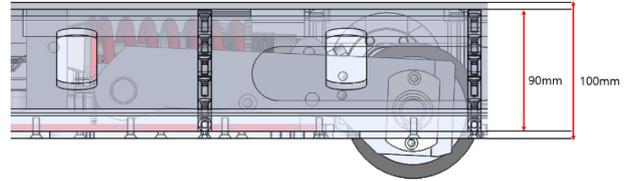


Fig. 5 Height of target robot

또한 시험 시 차량이 로봇의 상부를 밟게 되면 파손의 위험이 발생한다. 이러한 외란과 외력에 대응하기 위해서는 힘을 흡수해 줄 제약 조건을 만족하는 현가장치의 설계가 필요하다. 여기에서는 로봇의 주행 안정성과 차량 시험 시 로봇의 파손을 방지하는 현가장치의 설계 및 검증에 대해 다룬다.

초박형 타깃로봇은 프레임을 제외하고 90 mm의 설계공간을 갖는다. 설계공간을 고려하여 암의 길이를 215 mm로 설계하고 휠의 지름이 100 mm이므로 상판과 스윙암의 각도 조건이 최대 +3.98°로 정해진다.

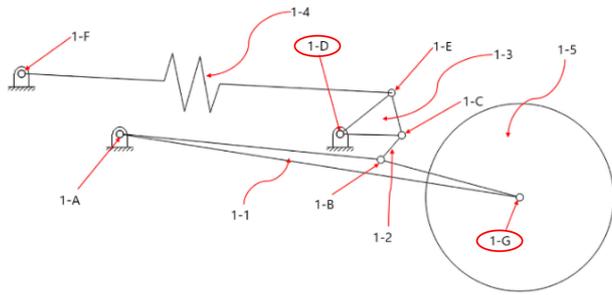
타깃로봇은 프레임과 스커트를 포함하여 약 300 kg의 무게를 가진다. 또한 시험 시 위에 올려지는 GVT 덤미는 약 100 kg 이므로 총 400 kg의 무게를 가진다. 이를 4륜이 나누어 가지며 시험 차량과 충돌 시 가해지는 하중을 고려했을 때 현가장치는 약 2,500 N의 하중을 받게 된다. 따라서 현가장치의 여유 반력 조건을 2,500 N으로 설정하였다.

현가장치 기구는 약 10 kN의 하중을 버틸 수 있으며 650 lbs(118 N/mm)의 강성을 가진 속업쇼버를 사용했다. 속업쇼버는 스프링의 텐션을 조절하기 위한 나사산이 있는데 이는 25 mm의 길이를 가진다. 나사산 부분은 속업쇼버와 기구가 결합되는 위치이기 때문에 각 피벗포인트의 거리는 속업쇼버와의 간섭을 피하기 위해 25 mm 이상으로 설계하였다. 또한 가해지는 하중을 버티기 위해 결합 샤프트를 제외한 샤프트의 지름은 10 mm로 설계하였다.

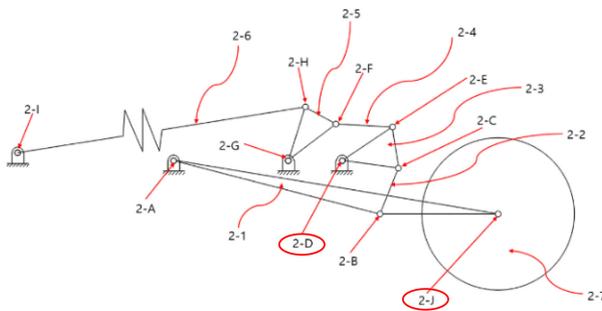
3.2 현가장치 기구 해석

설명한 제약조건을 바탕으로 두 가지 형상의 현가장치를 설계했다. 싱글로커 현가장치는 Fig. 6(a)와 같이 총 12개의 요소로 구성되어 있다. 휠의 회전 조인트 1-G가 하중에 의해 힘을 받으면 1-A를 중심으로 회전한다. 이때 1-B 또한 1-A를 중심으로 회전하며 1-C에 힘을 전달한다. 1-C, 1-D, 1-E로 구성된 로커 1-3은 1-D를 중심으로 회전하며 속업쇼버의 수축과 회전을 발생시키며 1-F를 중심으로 회전한다.

더블로커 현가장치에서는 기구의 스트로크 증폭을 위해 로드와 로커를 추가하였다. 속업쇼버와 로커의 피벗포인트 간섭을 줄여 하중조건을 만족하며 스트로크를 증폭한 기구를 설계하였다. 더블로커 현가장치는 Fig. 6(b)와 같이 17개의 요소로 구성되어 있다. 메커니즘은 같으나 싱글로커에서 암이 로커에 반력을 전달하는 메커니즘이 추가로 설치되어 있는 점이 다르다. 싱글로커 현가장치의 경우 속업쇼버의 변위와 스트로크 극대화를 위해서 1-D, 1-E의 수직 길이를 25 mm로 선정하였다. 싱글로커



(a) Single rocker suspension skeleton diagram



(b) Double rocker suspension skeleton diagram

Fig. 6 Skeleton diagram of different Target robot suspension

Table 1 2D reaction force analysis result of different model

Factor	Max [N]	End point [N]
1-G	3,103.8	3,103.8
1-D	5,150.6	4,996.2
2-J	2,697.7	2,531.3
2-D	4,301.3	3,345.2

Table 2 Ground clearance result of different model

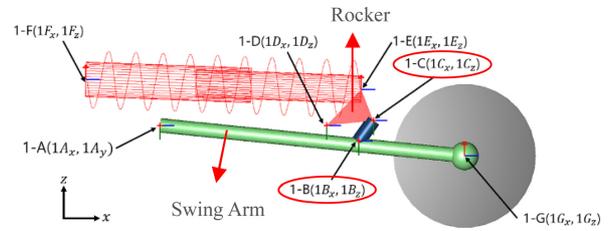
Single rocker	22.8 mm
Double rocker	25.3 mm

모델의 기구 스트로크는 36.2 mm가 된다.

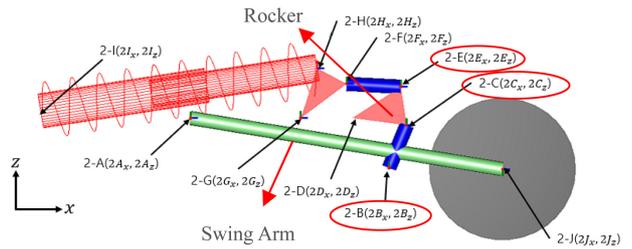
Fig. 6과 같은 기구 모델의 해석을 진행하기 위해 1-G에 Z축 방향으로 0-36.2 mm의 변위를 가했다. 1-G가 움직이며 속업쇼버 반력에 의해 생긴 각 피벗포인트의 반력과 각도 변화를 확인하였다.

더블로커 현가장치도 싱글로커와 동일한 좌표축을 기준으로 기구 해석 모델을 작성하였다. 더블로커의 경우 최대 스트로크가 50.8 mm로 싱글로커에 비해 높은 지상고를 가진다. 더블로커 기구 해석의 경우 싱글로커와의 비교를 위해 최대 스트로크인 50.8 mm가 아닌 36.2 mm의 변위를 가했다.

기구 해석 결과 1-D, 2-D 피벗포인트에서 가장 큰 반력이 발생한다. 싱글로커에서는 안전계수 1.49의 값을 가지는 5,150 N이 발생한다. 따라서 안전계수 1.5를 넘길 수 있는 5,140 N을 최대 반력으로 설정하였다. Table 1은 최대 반력이 작용하는 지점(Max)과 최대 스트로크 길이(End Point)에서 피벗 포인트에 작용하는 반력을 나타내며 Table 2는 두 기구 형상의 지상고를 나타낸다.



(a) 2D Model of single rocker suspension



(b) 2D Model of double rocker suspension

Fig. 7 2D simulation model of different target robot suspension

4. 현가장치 기구 최적설계 및 해석검증

4.1 현가장치 기구 설계 변수 및 목적함수

5,140 N 이하의 반력을 가지면서 휠 반력을 가장 크게 가지는 파라미터를 찾기 위해 최적설계를 진행하였다. 길이 파라미터를 변수로 설정하였으며 완전요인배치법(Full Factorial Design)을 사용하여 최적설계를 진행했다[12].

현가장치 기구 모델의 피벗 포인트 중, 설계 변형이 수월한 요소들을 선정하여 민감도 해석을 진행했다. 싱글로커의 경우 기구 간섭만을 고려한 1-B와 속업쇼버와의 간섭만을 고려해도 되는 1-C를 선정하였고, 더블로커의 경우 속업쇼버와의 간섭이 발생하지 않는 2-B, 2-C, 2-E를 선정하였다. 선정된 피벗포인트를 실험계획법(DOE) 알고리즘을 사용한 최적설계를 진행했다.

현가장치는 타깃로봇의 조종안정성과 거동 안정성을 위해 필요하다. 또한 차량이 로봇을 밟고 지나갈 때 충격의 분산과 도로 포장 상태에 따라 발생하는 외란에 대처하는 능력이 중요하다. 이러한 상황을 극복하기 위해 피벗 포인트의 안전계수 1.5를 넘길 수 있는 최대하중 5,140 N와 속업쇼버와의 간섭을 막기 위한 25 mm이상의 피벗포인트 거리, 그리고 휠에서의 반력을 최대한 높이는 것을 목적함수로 최적설계를 진행했다.

4.2 현가장치 기구 변수에 대한 설계 변수 영향도 평가

설계 제한 조건을 만족하는 범위 내에서 설계 변수들의 거리 조건을 10단계 수준으로 나누어 민감도 해석을 진행하였다. 1-B와 1-C는 스윙암과 마운트를 연결하는 로커의 피벗 포인트이다. 2-B, 2-C, 2-E의 경우 이중 로커의 첫 번째 로커와 마운트, 그리고 두 번째 로커와의 연결 피벗포인트이다. 1-B(x)의 경우 136.5-142.5 mm까지 해석을 진행한 결과 136.5-138.5 mm까지는 1-D의 반력이 5,140 N을 초과하여 조건을 만족하지 못한다. 다음으로

Table 3 Reaction force of pivot points

Factor	Max [N]	End point[N]
1-G	3,184	3,184
1-D	5,043	5,045
2-J	2,847	2,846
2-D	5,108	5,004

Table 4 Ground clearance of the single and double rocker model

Single rocker	23.2 mm
Double rocker	31.6 mm

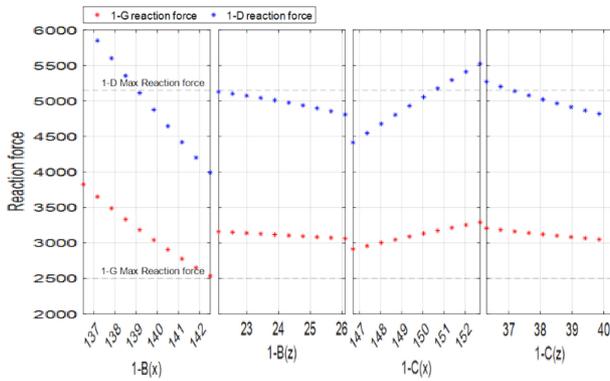


Fig. 8 Sensitivity analysis of single rocker of joints 1-B and 1-C

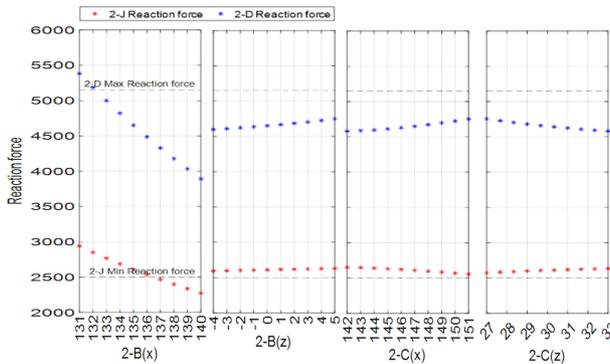


Fig. 9 Sensitivity analysis of double rocker of joints 2-B and 2-C

1-C(x)를 146.7-152.7 mm까지 해석을 진행했을 때 150.7-152.7은 1-D의 반력이 5,140 N을 초과하여 조건을 만족하지 못한다. 더블 로커의 경우 싱글로커와 마찬가지로 10단계 수준의 민감도 해석을 진행했을 때 2-B(x)가 131, 132 mm일 때를 제외하곤 모든 반력을 만족하는 것을 확인하였다. Fig. 8은 싱글로커 기구의 피벗 포인트 별 민감도 해석 그래프이며 Figs. 9와 10은 더블로커 기구의 피벗포인트 별 민감도 해석 그래프이다. Fig. 11은 민감도 해석 결과 가장 큰 반력 변화를 보인 피벗포인트의 반력 결과이다.

이 결과를 바탕으로 완전인인 배치법을 활용하여 최적설계를 진행했을 때, 5,140 N 이하의 반력을 만족하면서도 휠 반력이 가장 큰 결과를 도출했다. Table 3를 보면 싱글로커가 더블로커에 비해 휠 반력이 크고 피벗 포인트의 반력이 작지만 Table 4에서

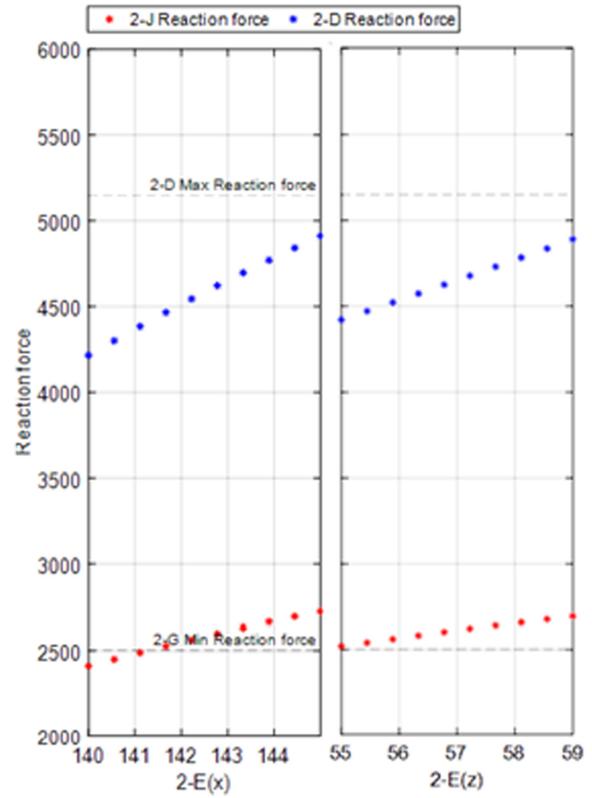


Fig. 10 Sensitivity analysis of double rocker of joint 2-E

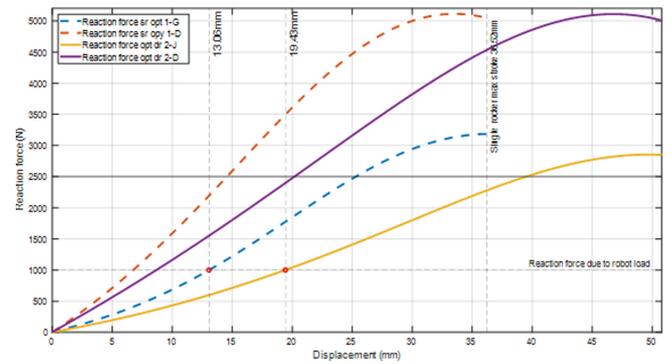


Fig. 11 Reaction force at pivot points 1-D, 1-G, 2-D and 2-G

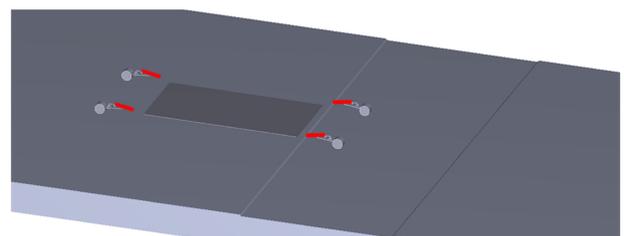
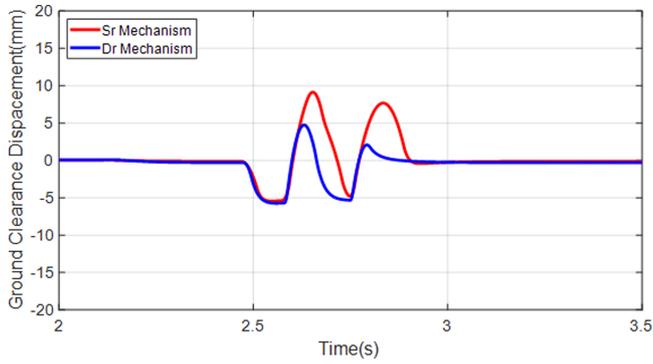
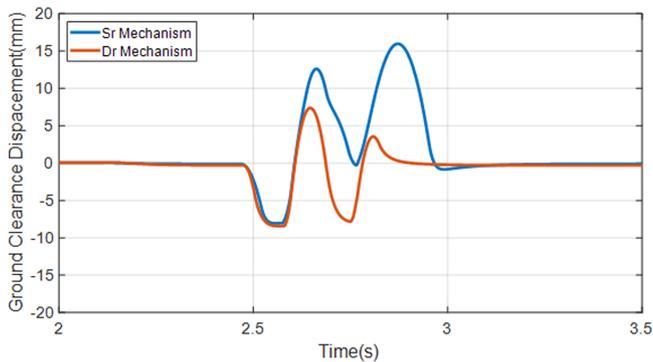


Fig. 12 Motion simulation model of target robot

지상고를 비교해 봤을 때 더블로커가 더 높은 지상고를 가지므로 스트로크에서 이점을 갖는 것을 알 수 있다. Fig. 11은 두 기구의 반력을 비교한 그래프이다.



(a) Displacement comparison according to mechanism, 10 mm step



(b) Displacement comparison according to mechanism, 15 mm step

Fig. 13 Displacement comparison of two different target robot suspension model

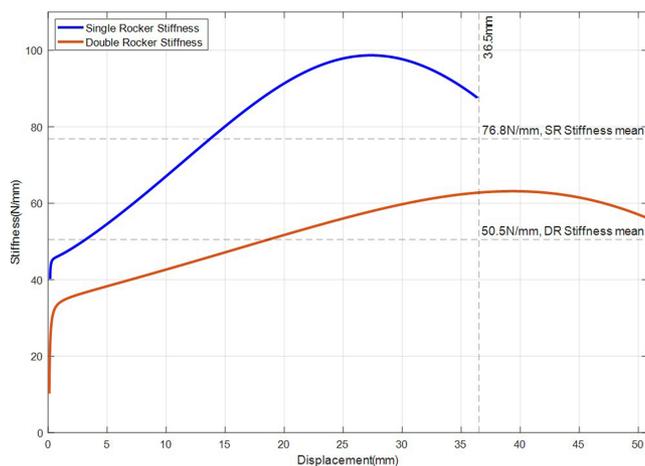


Fig. 14 Stiffness of different suspension model

4.3 다물체 동역학 기반 기구검증

싱글로커와 더블로커의 주행 시 안정성을 비교하기 위해 Fig. 12과 같이 10, 15 mm의 단차를 갖는 도로에서의 동역학 시뮬레이션을 진행하였다. 바퀴의 좌표는 실제 타깃로봇 모델을 기준으로 작성하였으며 속도 파라미터는 국내 고속도로 최저 속도인 50 kph로 선정하였다. 프레임은 강체로 구성하였으며 무게 중심에 실제 타깃로봇의 무게를 가하였다.

Fig. 13을 보면 주행 시뮬레이션 결과 더블로커 현가장치가

싱글로커에 비해 스트로크 중립점으로의 복귀가 빠른 것을 확인하였다. 또한 싱글로커는 스트로크의 부족으로 인해 단차를 넘을 때 바퀴와 지면의 접촉이 발생하지 않는 문제가 있다.

타깃로봇 주행 시 로봇의 지상고 변화의 민감도는 현가장치의 강성에 따라 달라진다. 강성이 큰 경우 노면 상황 같은 외란에 민감한 반응을 보이지만 차체의 진동이 커지고 제어 시 불안정함이 발생한다. 강성이 작을 경우 외란에 민감한 반응을 보일 수 없지만, 제어 시 안정성이 커진다. Fig. 14은 두 기구 형상의 강성을 나타낸다. 싱글로커는 최대 98 N/mm의 강성을 가지며 더블로커는 최대 63 N/mm의 강성을 가진다. 따라서 더블로커 현가장치가 더욱 안정적인 주행이 가능하다.

5. 결론

본 논문에서는 ADAS 성능 평가를 위한 초박형 로봇에 대한 소개와 타깃로봇의 실차시험 시 안정성에 가장 중요한 역할을 하는 현가장치에 대한 설계를 진행했다. 타깃로봇은 실차시험 시 시험 차량의 기능 실패로 인한 차량 손상을 막을 수 있는 로봇으로 여러 평가기관에서 사용 중이다. 실차시험 시 타깃로봇의 주행 안정성을 향상시키기 위한 두 가지 형상의 현가장치 설계 및 검증을 진행했다.

타깃로봇의 현가장치를 설계하기 위해 싱글로커, 더블로커 두 가지 기구의 비교를 진행했다. 우선 기구 선도를 모델링 하여 스트로크를 비교하였다. 싱글로커는 36.2 mm의 스트로크를 가지며 더블로커는 최대 50.8 mm의 스트로크를 가진다. 이 두 모델로 기구 해석을 진행하여 반력을 확인하고 지상고를 확인하였다.

최적설계를 위해 기존 모델의 설계 인자를 10단계 수준으로 구분하여 민감도 해석을 진행하였다. 길이 파라미터를 설계 변수로 설정하였으며 안전계수 1.5를 만족하는 5,140 N 이하의 반력 조건에서 최대의 휠 반력을 이끌어 내는 길이를 선정했다. 최적 설계를 진행한 후 두 기구 형상의 반력과 지상고를 확인했다.

이를 바탕으로 단차가 있는 도로에서의 동역학 해석을 진행하였다. 해석 결과 싱글로커는 15 mm 단차에서 지면과 바퀴의 접촉이 일어나지 않는 문제가 발생하였으며 더블로커는 안정적인 주행이 가능했다. 이에 따라 더블로커 기구가 도로 주행 안정성 측면에서 뛰어나다는 것을 확인했다. 또한 강성 측면에서도 더블로커 기구가 더 낮은 강성을 보이며, 외란에 민감하게 반응하지 못하지만, 더 안정적인 주행이 가능하다는 결론을 얻었다.

ACKNOWLEDGEMENT

This research was supported by a grant (No. RS-2021-KA160637) from R&D Program funded by Ministry of Land, Infrastructure and Transport of Korean government.

REFERENCES

1. KNCAP, Safety Assessment Method. <http://www.kncap.org/indexNew.jsp>
2. Snyder, A. C., Forkenbrock, G. J., Davis, I. J., O'Harra, B. C., Schnelle, S. C., (2019), A test track comparison of the global vehicle target and NHTSA's strikable surrogate vehicle, (Report No. DOT HS 812 698), Department of Transportation in U.S., <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/41936>
3. EuroNCAP, (2024), Assisted driving highway & interurban assist systems test & assessment protocol. <https://www.euroncap.com/media/79863/euro-ncap-ad-test-and-assessment-protocol-v20.pdf>
4. El-Shakery, S., Ramadan, R., Khader, K., (2020), Analytical and graphical optimal synthesis of crank-rocker four bar mechanisms for achieving targeted transmission angle deviations, Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering, 14(3), 303-313.
5. Singh, R., Chaudhary, H., Singh, A. K., (2017), Defect-free optimal synthesis of crank-rocker linkage using nature-inspired optimization algorithms, Mechanism and Machine Theory, 116, 105-122.
6. Park, Y. G., (2017), Safety assessment methodology of level-2 automated vehicle installed with autonomous emergency braking in cut-in situations, Ph.D. Thesis, Kookmin University.
7. Yuk, D.-G., Sohn, J., (2024), Active suspension control using reinforcement learning, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 41(3), 223-230.
8. Kim, D. H., (2022), Safety assessment indicators for automated vehicle in highway cut-in situation, M.Sc. Thesis, Kookmin University.
9. OSCCAR, (2018), Accident data analysis-remaining accidents and crash configurations of automated vehicles in mixed traffic. http://osccarproject.eu/wpcontent/uploads/2020/04/OSCCAR_D_1.1.pdf
10. SAFE-UP, (2023), Demo 4 System for on-time warning provisions to VRUs and drivers in critical conditions. https://static1.squarespace.com/static/5efaed43294db25b18168717/t/627e76f6a3a76b60f1519662/1652455180307/SAFE-UP_D.3.4_Demo%2B4%2BSystem%2Bfor%2Bon-time%2Bwarning%2Bprovisions%2Bto%2BVRUs%2Band%2Bdrivers%2Bin%2Bcritical%2Bconditions_.pdf
11. Korzeniowski, D., Slaski, G., (2016), Method of planning a reference trajectory of a single lane change manoeuver with Bezier curve, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 148, 012012.
12. Kim, D. H., (2022), Suspension mechanism design of ultra thin field robot, M.Sc. Thesis, Kookmin University.

**Jae Sang Yoo**

MS candidate in the Department of Mechanical Engineering, Kookmin University. His research interest is Mechanical dynamics and design of robot systems
E-mail: dlasb3720@kookmin.ac.kr

**Do Hyeon Kim**

MS in the Department of Mechanical Engineering, Kookmin University. His research interest is Mechanical dynamics and design of robot systems
E-mail: kdh4012@kookmin.ac.kr

**Jayil Jeong**

Professor in School of Mechanical Engineering, Kookmin University. His research interest is system design for robot systems and safety system design of automated vehicles in accident situation.
E-mail: jayjeong@kookmin.ac.kr

철도용품 기술기준 기반 FMECA 수행에 관한 연구

A Study on FMECA by Technical Specification for Railway Constituent

이강호^{1,#}, 신덕호¹, 조현정¹, 이강미¹
Kang Ho Lee^{1,#}, Duck Ho Shin¹, Hyun Jeong Jo¹, and Kang Mi Lee¹

¹ 한국철도기술연구원 철도시험인증센터 (Railway Test & Certification Division, Korea Railroad Research Institute)
Corresponding Author / E-mail: khlee@krii.re.kr, TEL: +82-43-249-8235
ORCID: 0009-0007-6038-5976

KEYWORDS: FMECA (고장모드 영향 및 치명도분석), Railway constituent (철도용품), Conformity assessment (적합성평가)

The Technical Specification for Interoperability (TSI) legally mandates the prediction and verification process of the Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS) in signaling and communication systems. Recently, domestic regulations, including the Railroad Safety Act, have been strengthened in order to better meet the requirements for participating in international projects. To comply with these regulatory requirements, manufacturers and development organizations must prepare verification data pertaining to the reliability and safety of railway components and related systems. This paper aims to analyze the requirements of Failure Mode, Effects and Criticality Analysis (FMECA) through international laws and standards, and subsequently propose a compliant FMECA system for the domestic railway industry. The proposed FMECA system is then compared with the analysis results of actual failure data to determine its suitability for establishing a Reliability, Availability, Maintainability (RAM) verification standard for railway products in relation to conformity assessment.

Manuscript received: October 30 2023 / Revised: March 8, 2024 / Accepted: March 12, 2024

1. 서론

최근 국내 철도분야 기술이 발전하면서 주요 장치 및 구성품은 물론 철도차량 단위의 해외 수출이 활발하게 이루어지고 있다. 철도 산업은 대규모 운송을 기본으로 하기 때문에 성능은 물론 안전 측면이 강조되고 있으며 신뢰성이 낮은 제품의 사용은 대규모 인명 사고로 이어질 수 있으므로 철도차량 관련 부품은 높은 신뢰성 및 안전성이 요구되고 있다. 현재 해외 시장에서는 철도부품에 대한 검사 및 인증 등의 절차를 이미 오래전부터 국제표준(EN, IEC 등)으로 제정하여 체계적으로 평가하고 있으며, 이를 바탕으로 철도차량의 성능 및 안전에 대해 높은 수준을 요구하고 있다[1,2]. 이미 European Union (EU: 유럽연합)에서는 Technical Specifications for Interoperability (TSI: 유럽연합 회원국 주요 노선 간 열차 상호운영을 위한 기술기준)를 통해 신호·통신 분야에 RAM 예측 및 인증을 법률로 의무화하였으며, 철도차량과 같은 타 분야로 순차적으로 확대하고 있다.

국내 기술의 해외 진출을 위해서는 기술개발과 동시에 다양한 국제 규제에 대해 대응할 수 있는 입증 체계를 마련할 필요가 있으며, 이와 같은 기술 및 개발품의 해외진출 기반 마련을 목적으로 국내에서도 철도안전법 등을 통해 철도 부품 규제요건이 강화되고 있다.

철도안전법 제27조 관련 철도용품 기술기준에서 각 분야 별 차량용품 7종, 궤도용품 3종, 신호통신용품 3종, 전철전력용품 3종에 대해 형식승인 검사를 강제하고 있으며, 2015년 철도신호용품 전자연동장치의 RAMS 인증이 의무화되었고, 차량 기술 기준에서도 2020년에 차상신호장치, 2022년에는 종합제어장치 (Train Control and Monitoring System, TCMS)의 RAMS인증 의무화가 차례로 진행되고 있다[3].

이처럼 철도부품의 성능 및 수준을 입증하기 위해 국내·외 법령 및 표준에서는 신뢰성 및 안전성 관련 입증자료를 요구하고 있으나 정량적 또는 구체적인 가이드는 제시되지 않고, 국내 제작사들이 이에 대응하기에는 역량 및 환경 조건이 부족한 실정

이다. 따라서 입증 관련 자료를 마련하기 위한 수단으로써 철도용품 기술기준의 기능 요구사항을 바탕으로 고장모드를 도출하여 분석하는 FMECA 체계를 활용할 것을 제안하고자 한다.

FMECA는 많은 분야에서 제품의 설계와 운영단계의 신뢰도를 분석하는 데 사용되고 있는 방법으로서 시스템에 속하는 모든 구성요소 들을 고장 가능한 인자로 사용하고, 각 인자들의 고장상태 별로 고장모드를 정함에 따라 각 고장 모드에 따르는 고장유형별 발생빈도와 치명도 등을 종합적으로 분류하고 분석하여 부품 및 시스템의 신뢰성과 안전성을 확보할 수 있는 체계적인 접근 방법이다[4-7].

본 논문에서는 국제표준을 준수하는 FMECA 체계를 제시하기 위해 국제 규격 및 법령 등을 토대로 FMECA 관련 요구사항을 분석하고, 국내 철도용품 차량 분야 RAMS 평가 시 활용할 수 있는 FMECA 체계를 마련하고자 철도안전법 철도용품 기술기준의 기능요구사항을 기반으로 고장유형(Mode)을 선별하였다. 또한, 도출된 결과를 현재 운행 중인 전동차의 운영데이터에 적용하여 비교·분석함으로써 해당 FMECA 체계의 적용 가능성을 검토하였다.

2. FMECA 체계 수립을 위한 연계성 분석

2.1 FMECA 관련 표준 등의 요구사항

EU Directive (EU 안전법), 상호운용성을 위한 기술사양(TSI) 및 유럽표준(EN Standard) 간의 FMECA 요구사항 연계성을 바탕으로 국내 철도용품의 적합성평가 관련 FMECA 체계 수립을 위해 분석한 내용은 다음과 같다.

EU Directive 2016/797은 Regulation (EU) 2016/796 European Union Agency for Railways and Repealing Regulation (EC)에 따라 고시된 유럽 내 철도 시스템의 상호운용성을 위한 지침으로, 유럽 내에서 철도운송에 대한 촉진과 철도 시스템의 상호운용성 확보를 위해 제정되고 유럽 철도망의 상호 운용성을 확보하기 위한 가장 상위법이다.

이에 근거하여 유럽 철도망의 상호운용성을 위한 기술 사양(TSI)과 국가별 국가 기술기준으로 기술적 사항을 규정하고 있다. TSI에 언급된 EN 50126, 50128, 50129, 50159 에서는 리스크 평가와 신뢰성 및 안전성 분석의 방법으로 Failure Mode and Effects Analysis (FMEA)와 FMECA를 제시하고 있고, 안전무결성 수준(SIL)에 따라 FMEA를 필수적으로 수행할 것을 요구하고 있다.

EU Directive 2016/798에 따르면 철도 사업체, 인프라 관리자 및 유지보수 관리를 담당하는 주체는 계약자 및 기타 당사자가 위험 통제 조치(Risk Control Measure)를 이행하도록 해야 하며, 이를 위해 각 철도 사업체, 인프라 관리자 및 유지보수 관리를 담당하는 주체는 공통 안전 방법(Common Safety Method, CSM)에 명시된 모니터링 방법을 적용해야 한다. CSM에 대한 가이드스를 통해 시스템정의, 위험원식별에 대해

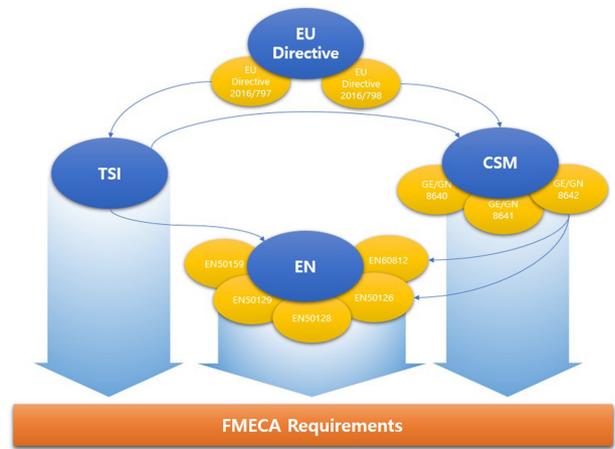


Fig. 1 Correlation of requirements between standards

설명하고 있으며, 위험원 식별을 위한 접근방식 관련 프로세스는 일반적으로 FMEA 또는 FMECA를 기반으로 수행되며 국내에서는 위험원 분석을 위해 FMECA 기법이 일반적으로 적용되고 있다.

TSI는 EU Directive 2016/797에서 유럽 내 열차의 상호운용성 확보를 위해 지정한 기술 사양으로, 리스크 평가와 신뢰성 및 안전성 분석의 방법으로 FMEA와 FMECA를 포함한 활동을 요구하고 있으며 이를 위해 EN 50126, 50128, 50129, 50159와 같은 EN 표준에 대한 보증을 요구하고 있다. FMECA 방법론에 대한 가이드는 EN 60812에서 제시하고 있으며[8], EN 60812는 분석의 목적에 따라 FMECA 기법을 활용하여 적용할 것을 요구하고 있다.

이처럼 EU Directive와 TSI, CSM 및 EN 표준 간의 FMECA 관련 요구사항의 연계성을 Fig. 1과 같은 과정을 통해 분석하였으며, 철도용품 FMECA 체계 수립 시 이러한 요구사항의 분석 결과를 반영하였다.

3. 철도용품 기술기준 기반 FMECA

3.1 대상 범위 정의

철도안전법 철도용품 기술기준에서 정의하는 대상용품은 총 4개 분야(차량, 궤도, 신호통신, 전철 전력)이고, 이 중에서 본 논문의 적용 대상은 차량분야 용품에 해당하는 차륜, 차축, 연결장치, 활차방지장치, 제동실린더, 제동디스크, 제동패드이다. 철도안전법에서 요구하는 차량분야 7종의 철도용품 기술기준 항목에 따라 기능을 정의하고 관련 고장유형을 식별함으로써 고장 원인, 영향 및 치명도분석 등을 통하여 철도용품 적합성평가 시 활용 가능한 FMECA체계를 도출하는 것이 목적이다.

기술기준의 요구사항에 따라 정의된 기능은 Line Replaceable Unit (LRU) 또는 구성품 수준의 기능 정보보다 상위장치(System) 수준의 기능으로 식별됨에 따라, 장치 단위에서 요구하는 수준의 기능으로 재정의하여 FMECA를 수행하였다.

Table 1 Criteria of severity

Lv.	1	2	3	4	5
Train delay (min)	< 5	5≤to <10	10≤to <30	30≤to <60	≥ 60

Table 2 Criteria of frequency

Lv.	1	2	3	4	5
Frequency (case/year)	0.05	0.25	1.25	6.25	31.25

Table 3 Criticality matrix considering frequency and severity

Severity		Classification			Lv.5	Lv.4	Lv.3	Lv.2	Lv.1
		Operation delay(min)			Severe	Significant	Moderate	Minor	Negligible
		≥ 60	30≤to<60	10≤to<30	5≤to<10	< 5			
Lv.5	Frequent	Once within 12 days	31.25 case/year	4.28E-03 case/hour	5	5	5	4	3
Lv.4	Probable	Once within 2 months	6.25 case/year	8.56E-04 case/hour	5	5	4	3	3
Lv.3	Occasional	Once within 9 months	1.25 case/year	1.71E-04 case/hour	5	4	3	3	2
Lv.2	Improbable	Once within 4 years	0.25 case/year	3.42E-05 case/hour	4	3	3	2	1
Lv.1	Incredible	Once within 20 years	0.05 case/year	6.85E-06 case/hour	3	3	2	1	1

3.2 평가기준 및 가정사항

본 분석에서 적용되는 치명도(Criticality) 평가 기준은 국내 전동차 운영사인 A사의 기준을 참조하였으며, 특정 사업 또는 프로젝트에서 요구하는 평가 기준이 있을 경우, 해당 기준을 적용하도록 한다. 치명도 산정 시 반영되는 심각도는 열차 운행 지연시간에 따라 구분하고, 빈도수는 연간 발생하는 고장 건수를 적용하였으며 정리하면 다음 Tables 1 및 2와 같다.

철도용품 기술기준에 따른 FMECA는 특별하게 적용되는 기준 또는 요구사항이 없으며, 부품 단위 장치별 기능 요구사항에 대한 고장유형을 바탕으로 수행함에 따라 고려한 가정사항은 다음과 같다.

입증 관련 법령의 요구사항은 일반적인 내용으로서 발주 사양 등과 같이 특정 조건(선로, 차량 등)을 제시하고 있지 않음에 따라, 해당 용품의 기능별로 각 제작사의 실제 고장률 값은 반영이 불가함에 따라 빈도수는 안전 영향을 고려하여 Safety Integrity Level (SIL) Lv1 수준의 1.0E-06/Hour로 가정하였으며 Table 2의 빈도로 정의된 연간 발생 건수를 시간당 발생 건수로 환산 시에는 열차 운행 시간을 20시간/일, 365일/년으로 적용하였다.

분석을 통해 도출된 치명도는 다음 Table 3을 통해 관리하며 각 등급에 따른 조치는 아래와 같이 가정한다.

1, 2등급은 수용이 가능하고 별도의 조치사항은 없지만 필요한 경우 별도의 판단 절차에 따라 위험 경감 대책 마련 또는 안전 조치는 가능. 3등급은 수용이 가능하지만, 추가적인 위험 경감 대책 또는 안전조치 필요. 4등급 또한 경감수용 가능하여 해당 위험요인이 제거되거나, 위험요인의 제거가 즉시 어려운 경우에는 치명도가 보통 이하가 되도록 위험 경감 대책 수립 후, 조건부 사용 가능. 5등급은 수용 불가 수준으로 해당 위험요인은 즉시 제거되어야 하며, 제거 불가 시 운영 중단 등의 조치가 필요하다. 이처럼 각 등급에 따른 수용 여부를 가정하였으나, 프로젝트 또는 사업 등에 실제 적용되는 경우에는 발주처 등의 요구사항 및 기준에 따라 해당 내용을 반영하여 분석해야 한다.

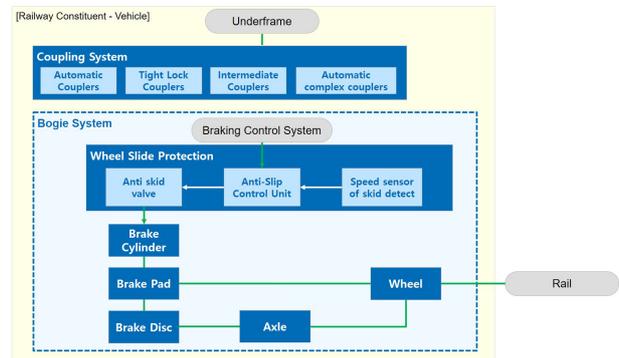


Fig. 2 Configuration diagram of vehicle (system) constituent

3.3 차량용품 FMECA 수행

차량용품의 FMECA를 위한 항목별 기능 분석은 철도용품 기술기준 Part3 차량용품(KRTS-CO-Part3-2020)에 정의된 용품(7종)을 기준으로 수행하였다. 또한, Korea Railway Standards (KRS RN 0007-14 철도차량 차륜 시험 방법 등), 코레일 표준규격(KRCS B305 03 화차용 일체형 차륜 등), KS 규격(KS R 9221 철도차량용 차륜 등) 및 철도차량의 장치 단위 FMECA 수행 관련 해외사례를 참조하였다.

국내 철도용품은 일반적으로 차량단위에서 Fig. 2의 청색 Box와 같이 구성되어 있으며 이는 기능을 수행하는 기계적 요소의 최하 단위 부품 레벨로서, 철도용품 기술 기준에서는 각 장치 단위의 기능적인 요구사항 외에 차량 시스템 단위의 기능 및 동작, 성능 등에 대한 내용도 포함하여 다루고 있음에 따라 FMECA 수행 시 제한 요소로 작용하였다.

국내/외 철도 관련 FMECA 수행 사례 및 관련 표준인 EN 60812를 참조하여 철도용품 FMECA를 위한 양식을 아래 Table 4와 같이 도출하고 이를 적용하여 FMECA를 수행하였으며, 각 항목 및 분석에 대한 설명은 다음과 같다.

Item은 각 차량용품(차륜 등)을 나타내며, Function은 해당 용품 관련 기술기준 기반으로 정의된 기능이다. ID는 대상 항목의

고장유형(Failure Mode)별 고유 식별 번호 체계이며,

Failure Mod는 분석한 기능을 대상으로 의도된 기능에서 벗어나는 경우를 식별하고 기술적/물리적 용어로 기술하였으며 호찌민 및 마닐라 메트로에 적용되는 전동차를 대상으로 분석되었던 자료를 참조했다. 검지 방법(Detection Method)은 고장유형 발생 시 운영자/운전자 또는 유지보수자 육안 검수, 자가 진단 시스템의 자체 검수 등으로 구분되며, 고장원인(Failure Cause)은 고장유형을 발생시키는 원인으로 관련 장치 또는 구성품의 고장, 통신 등과 같은 외부 요소, 재질 등과 같은 물리적 특성을 고려하였다. 시스템 영향(System Effect)은 고장유형이 발생한 경우, 시스템(국지적, 전체)에 미치는 영향을 반영하고, 시간 영향(Time Affected)은 고장유형 발생 시 시스템 영향에 따른 열차 운행에 미치는 지연 시간을 분석하고, 안전 영향(Safety Affected)은 해당 고장이 안전에 영향이 있는지 유무를 식별하였다. 고장률(Failure Rate)은 앞서 언급한 바와 같이 제작사의 장치 단위의 고장별 실제 데이터를 참조할 수 없음을 따라 가정된 값을 적용했다.

유형별 할당(Modal Apportionment)은 각 철도용품(Item) 기능 관련 여러 고장유형 중, 해당 유형의 발생빈도가 전체 고장유형의 발생빈도 중에서 차지하는 비율이며, 철도 용품 FMECA 체계 도출 시 전문가의 경험을 바탕으로 비율을 정하였으나, 실제 누적된 Field Data가 반영된다면 더욱 신뢰 있는 값으로 산정 가능하다. 유형별 고장률(Effective Modal Failure Rate)은 고장률과 고장유형별 발생률인 유형별 할당을 곱한 값으로 치명도 분석(Criticality Analysis) 시, 빈도(Frequency)로서 적용되는 값이다.

Table 4의 치명도(C) 분석을 위하여 빈도수(F)에는 유형별 고장률 값을 적용하고 심각도(S)에는 해당 고장유형의 Overall System Effect를 고려한 운행 지연시간을 적용하여 Table 3의 Criticality Matrix를 통해서 고장유형별 치명도를 도출하였다.

FMECA를 수행하기 위하여 철도용품 기술기준의 요구 사항을 바탕으로 기능을 정의하고 관련 고장유형을 분석하였다. 차륜의 경우에는 기술기준의 요구사항 28개 항목에 대해 기능 요구사항을 2가지로 구분하고 이에 따른 고장유형은 이상마모, 진원도 불량 등 8건으로 분석되었으며 시스템에 미치는 영향은 주행 안전성 저하에 따른 탈선까지 고려되었다. 차축은 기술기준 관련 요구사항의 25개 항목 중 기능요구사항은 2개, 고장유형은 3개가 도출되었으며, 위와 같은 방식으로 연결장치는 38개 항목 중 각 7개의 기능과 고장유형, 활주방지장치는 29개 항목 중 2개의 기능과 4개의 고장유형이 확인되었다. 제동 관련 용품인 제동실린더는 19개 항목 중 3개의 기능 및 고장유형 5개, 제동디스크는 18개 항목 중 제동 관련 1개의 기능과 2개의 고장유형(마모, 균열), 마지막으로 제동패드에는 15개의 항목 중 1개의 기능과 고장유형 2개로 분석되었다. 분석 결과, 차량용품 관련 고장유형이 시스템에 미치는 영향은 열차 탈선에서 운행지연까지 다양하게 나타났으며, 기술기준에서 요구하는 항목은 단품 단위의 기계적 성능 및 기능뿐만 아니라 구성품 또는 그 이상의 시스템 단위의

기능을 요구하는 사항이 대부분임에 따라 철도용품 FMECA를 수행하기 위하여 기술기준의 요구사항을 부품 단위의 기능으로 재정의하고 이에 따른 고장유형으로 구분하였다.

4. 전동차 Field Data 분석

4.1 실제 운행 노선의 차량 고장기록 분석

철도용품 기술기준에서 제시하는 차량용 부품에 대하여 FMECA 분석을 통해 도출한 용품별 기능과 이에 따른 고장유형이 적합하게 식별 및 분석되었는지 검토하고, 실제 열차 운행 데이터 및 유지보수 결과와 연관성이 있는지 그 유효성을 확인하기 위하여 실제 운영 중인 B사 전동차의 운행(고장) 데이터를 분석하였다.

2019년부터 현재 시점까지 해당 노선을 운행하는 전체 열차에 대한 고장 기록을 바탕으로, 철도 용품 기술기준 적용 대상인 장치를 기준으로 각 기능과 고장유형을 분석하였다. 실제 열차에서 발생하는 장치별 고장유형을 분석함으로써 앞서 제시한 FMECA 체계와의 일치성과 누락된 부분을 검토하였으며, 발생빈도인 고장률 관련 가정사항을 보완하기 위하여 장치(부품)별 고장유형에 대한 실제 고장률을 산출하여 반영하였다.

심각도의 경우 철도용품 기술기준에서 정의하는 장치 단위의 고장은 실제 운영 중인 열차의 본선 운행에 지장을 주는 고장이 아닌, 유지보수가 필요한 정도의 고장이 대부분임에 따라 고장 데이터 상의 유지보수 수행 기록을 바탕으로 적용하고, 치명도는 앞에서 제시한 동일한 방식으로 산정하여 고장유형별 치명도 등급을 도출한 결과는 아래 Table 5와 같다.

아래와 같이 철도용품 기술기준 대상 장치의 실제 고장 데이터를 기반으로 각 고장유형에 따른 치명도를 계산한 결과, 용품별 고장유형은 차륜 6개, 차축 1개, 연결장치 6개, 활주방지 장치 4개, 제동실린더 8개, 제동디스크 3개, 제동패드 3개로 분류되었다. 심각도의 경우, 분석된 고장 데이터에 따르면 용품별 부품 단위 고장은 유지보수 수행 시 발생한 결과로서 본선 열차 운행에 영향을 주지 않음에 따라 심각도 관련 운행지연은 5분 미만(미미함)으로 적용하였다.

차륜의 경우 고장유형의 약 50%를 차지하는 차륜 내경 손상은 중정비 시 작업자의 숙련도에 따라 발생한 사항이며, 차축의 경우 차륜과 고착된 것을 제외하면 특별한 고장은 발견되지 않았다.

연결장치는 접지선 고장이 상당히 많이 발생했는데 이는 열차가 곡선부 또는 분기기를 통과하면서 연결기 간 접지 역할을 하는 케이블이 손상되는 사항이며, 차량은 접지 관련 구조 및 시스템에 의해 보호됨에 따라 해당 고장이 심각도에 미치는 영향은 크지 않은 것으로 확인되었다.

제동디스크 및 제동패드의 고장유형의 경우, 이상 마모는 간헐적으로 발생하는 편마모 또는 과다 마모 외에도 정기 검수 시에 점검하여 조치하는 사항으로 해당 건수도 고장으로 분류됨에 따라 발생빈도가 높게 분석된 것으로 보인다.

Table 4 FMECA results based on vehicle constituent of technical specification for railway constituent

Item	Function	Id	Failure mode	Detection method				Failure analysis					Criticality analysis					
				Detectable means to operator	Detectable means to maintainer	Built-in test function	Failure cause	Local system effect	Overall system effect	Time affected (minutes)	Safety affected (Y/N)	Failure rate (/hour)	Modal apportionment (%)	Effective modal failure Rate	Criticality			
															F	S	C	Treatment action
Wheel	Supports the weight of the railway vehicle	RST01.01.FM01	Crack	None	Non-destructive testing	None	Inappropriate internal and surface characteristics	Impact during driving	Derailment ≥ 60	Y	1.00E-06	3%	3.00E-08	1	5	3	Compliance with KS R 9221, regular inspection (including non-destructive testing)	
		RST01.01.FM02	Damage	None	Visual inspection	None	Inappropriate material and strength, exceeding maximum axle load	Impact during driving	Derailment ≥ 60	Y	1.00E-06	3%	3.00E-08	1	5	3	Compliance with KS R 9221, regular inspection (including non-destructive testing)	
		RST01.02.FM01	Abnormal wear	None	Visual inspection	None	Inappropriate wheel profile	Decreased driving safety	Derailment ≥ 60	Y	1.00E-06	20%	2.00E-07	1	5	3	Regular inspection (compliance with wheel management standards) application of normal wheel profile	
		RST01.02.FM02	Excessive flange wear	None	Visual inspection	None	Inappropriate material and strength, insufficient wheel management	Decreased driving safety	Derailment ≥ 60	Y	1.00E-06	10%	1.00E-07	1	5	3	Compliance with KS R 9221, regular inspection (including non-destructive testing), installation of lubricator	
		RST01.02.FM03	Defective Wheel Tread Roundness	decreased ride comfort	During wheel turning	None	Poor wheel turning	Decreased ride comfort	None	< 5	Y	1.00E-06	2%	2.00E-08	1	1	1	Use of appropriate wheel turning equipment, experienced workers
		RST01.02.FM04	Delamination	None	Visual inspection	None	Inappropriate material and strength	Decreased ride comfort	None	< 5	N	1.00E-06	30%	3.00E-07	1	1	1	Compliance with KS R 9221, regular inspection (compliance with wheel management standards)
Axle shaft	Supports the weight of the railway vehicle while transferring rotational motion to the wheels	RST01.02.FM05	Abrasion	None	Visual inspection	None	Adhesion with rail	Decreased ride comfort	None	< 5	N	1.00E-06	30%	3.00E-07	1	1	1	W.S.P.D application, regular inspection (compliance with wheel management standards)
		RST01.02.FM06	Corrosion	None	Visual inspection	None	Insufficient corrosion prevention treatment	Decreased durability	None	< 5	N	1.00E-06	2%	2.00E-08	1	1	1	Corrosion prevention treatment
		RST02.01.FM01	Axle overheating	Overheat detection device	Preventive maintenance	Inspection data	Assembly defect	None	Derailment ≥ 60	N	1.00E-06	50%	5.00E-07	1	5	3	KS R 9220 railway vehicle axle, use of overhear detection device	
		RST02.01.FM02	Axle deformation	None	Preventive maintenance	None	Insufficient mechanical strength	None	Derailment ≥ 60	Y	1.00E-06	50%	5.00E-07	1	5	3	KS R 9220 railway vehicle axle	

Table 4 Continued

Item	Function	Id	Failure analysis					Criticality analysis								
			Detection method		Failure mode	Failure cause	Local system effect	Overall system effect	Time affected (minutes)	Safety affected (Y/N)	Failure rate (/hour)	Modal apportionment (%)	Effective modal failure Rate	Criticality F S C	Treatment action	
			Detectable means to operator	Detectable means to maintainer												Built-in test function
Axle shaft	Bears a shocking load during driving, and wheels, gears, brake disc seats, etc. are pressed onto the axle	RST02.02.FM01	Press Fit failure	None	Preventive maintenance	None	Assembly defect	Part detachment	Derailment	≥ 60	Y	1.00E-06	100%	1.00E-06	1 5 3	Compliance with related parts pressing procedure
		RST03.01.FM01	Connector deformation	None	Preventive maintenance	None	Defective buffer device impact when connecting	Abnormal connection	Operation delay	≥ 60	N	1.00E-06	100%	1.00E-06	1 5 3	Compliance with KRTS-CO-Part3-3-2019
Coupler	It must be equipped with a cushioning device capable of withstanding loads that occur under operating conditions It must be structured to automatically fix when connecting to another railway vehicle, and an anti-loosening device must be installed to prevent the connection device from being separated by vibration, shock, etc. during train operation	RST03.02.FM01	Connector disconnection	Visual inspection	Preventive maintenance	None	Incomplete coupling	Vehicle separation during driving	Train collision	≥ 60	Y	1.00E-06	100%	1.00E-06	1 5 3	Compliance with KRTS-CO-Part3-3-2019, thorough coupling status check
		RST03.03.FM01	Electrical circuit connection impossible	Function check	Preventive maintenance	None	Waterproofing defect	Unable to form electrical circuit between vehicles	Operation delay	10 ≤ to <30	N	1.00E-06	100%	1.00E-06	1 3 2	Compliance with KRTS-CO-Part3-3-2019, compliance with coupling procedure
Coupler	The connection release device of the automatic composite coupler should be able to open and close the circuit by control, and should be equipped with a device that allows the driver to confirm the connection and release of the vehicle	RST03.04.FM01	Connection status check impossible	Visual inspection	Preventive maintenance	None	Defective release or verification function	Abnormal connection	None	< 5	N	1.00E-06	100%	1.00E-06	1 1 1	Compliance with KRTS-CO-Part3-3-2019
		RST03.05.FM01	Defective connector coupling on curved track	None	Preventive maintenance	None	Design defect (lateral displacement not reflected)	Unable to connect	Operation delay	≥ 60	N	1.00E-06	100%	1.00E-06	1 5 3	Compliance with KRTS-CO-Part3-3-2019

Table 4 Continued

Item	Function	Id	Failure analysis				Criticality analysis											
			Detection method		Failure mode	Failure cause	Local system effect	Overall system effect	Time affected (minutes)	Safety affected (Y/N)	Failure rate (/hour)	Modal apportionment (%)	Effective modal failure Rate	Criticality	Treatment action			
			Detectable means to operator	Detectable means to maintainer												Built-in test function	F	S
Coupler	When the structure of the coupler is changed, the structural compatibility with the existing coupler must be proven	RST03.06.FM01	None	Preventive maintenance	None	Incompatibility between connectors	Unable to connect	Operation delay	≥ 60	N	1.00E-06	100%	1.00E-06	1	5	3	Compliance with KRTS-CO-Part3-3-2019	
		RST03.07.FM01	None	Preventive maintenance	None	Abnormal connection at minimum speed	Non-compliance with drawings	Connection delay or impossible	≥ 60	N	1.00E-06	100%	1.00E-06	1	5	3	Compliance with KRTS-CO-Part3-3-2019, compliance with coupling procedure	
Wheel slide protection device (W.S.P. D)	It must detect the runaway condition of the wheel and alleviate part of the braking force to prevent friction damage to the wheel tread	RST04.01.FM01	None	Preventive maintenance	Brake test	W.S.P. function operation failure	W.S.P. valve malfunction	Wheel abrasion	None	< 5	N	1.00E-06	50%	5.00E-07	1	1	1	Multiple design and installation for function implementation
		RST04.01.FM02	None	Preventive maintenance	Brake test	Wheel slide detection failure	Speed sensor malfunction	Wheel abrasion	None	< 5	N	1.00E-06	25%	2.50E-07	1	1	1	Multiple design and installation for function implementation
Brake cylinder	It must monitor wheel runaway information and provide it to the operator	RST04.01.FM03	None	Preventive maintenance	Brake test	W.S.P. function control failure	Control device malfunction	Wheel abrasion	None	< 5	N	1.00E-06	25%	2.50E-07	1	1	1	Function test and bypass function installation
		RST04.02.FM01	None	Preventive maintenance	Brake test	W.S.P. Information monitoring impossible	Interface defect	Wheel abrasion	None	< 5	N	1.00E-06	100%	1.00E-06	1	1	1	Function test and installation of defect detection device
Brake cylinder	It operates the piston by sending high-pressure air	RST05.01.FM01	None	Preventive maintenance	Brake test	Insufficient braking force	Cylinder leakage	Insufficient braking force	Operation delay	5 ≤ to <10	N	1.00E-06	50%	5.00E-07	1	2	1	Compliance with KRTS-CO-Part3-5-2017, function test
		RST05.01.FM02	None	Preventive maintenance	Brake test	Brake release impossible	Cylinder sticking	Brake release defect	Operation delay	5 ≤ to <10	N	1.00E-06	50%	5.00E-07	1	2	1	Compliance with KRTS-CO-Part3-5-2017, function test
Brake cylinder	It must be installed with an automatic gap adjuster that maintains a constant gap between the wheel/brake shoe or the brake disc/pad	RST05.02.FM01	None	Preventive maintenance	Brake test	Automatic spacing deficiency	Automatic spacing function failure	Brake release defect	Operation delay	5 ≤ to <10	N	1.00E-06	100%	1.00E-06	1	2	1	Compliance with KRTS-CO-Part3-5-2017, function test

Table 4 Continued

Item	Function	Id	Failure analysis						Criticality analysis									
			Failure mode	Detection method		Local system effect	Overall system effect	Time affected (minutes)	Safety affected (Y/N)	Failure rate (hour)	Modal apportionment (%)	Effective modal failure Rate						
				Detectable means to operator	Detectable means to maintainer							Built-in test function	F	S	C			
Brake cylinder	In the parking disc brake unit, if the supply air is abnormally exhausted, the parking brake should be contracted	RST05.03.FM01	Parking brake release impossible	Cab's display unit	Preventive maintenance	Brake test	Cylinder leakage	Brake release impossible	Operation delay	5≤to <10	N	1.00E-06	50%	5.00E-07	1	2	1	Compliance with KRTS-CO-Part3-5-2017, function test
		RST05.03.FM02	Parking brake operation failure	Cab's display unit	Preventive maintenance	Brake test	Cylinder operation defect	Brake spring defect	None	<5	N	1.00E-06	50%	5.00E-07	1	1	1	Compliance with KRTS-CO-Part3-5-2017, function test
Brake disc(k)	It performs disc braking by pressing the brake pad that includes a friction surface	RST06.01.FM01	Abnormal disc wear	None	Preventive maintenance	None	Use of unsuitable material	Abnormal precision stop	Operation delay	<5	N	1.00E-06	50%	5.00E-07	1	1	1	Compliance with KRTS-CO-Part3-6-2017, function test
		RST06.01.FM02	Disc crack	None	Preventive maintenance	None	Use of unsuitable material	Abnormal precision stop	Operation delay	<5	N	1.00E-06	50%	5.00E-07	1	1	1	Compliance with KRTS-CO-Part3-6-2017, function test
Brake pad	The pad is installed between the piston of the wheel cylinder where the caliper is installed and the disc, and performs direct braking through friction by receiving the pressure of the piston and contacting the rotating disc	RST07.01.FM01	Abnormal pad wear	None	Preventive maintenance	None	Use of unsuitable material	Abnormal precision stop	Operation delay	<5	N	1.00E-06	50%	5.00E-07	1	1	1	Railway vehicle brake friction material KRS BR 0025-21(R)
		RST07.01.FM02	Pad crack	None	Preventive maintenance	None	Use of unsuitable material	Abnormal precision stop	Operation delay	<5	N	1.00E-06	50%	5.00E-07	1	1	1	Railway vehicle brake friction material KRS BR 0025-21(R)

Table 5 Failure mode analysis and criticality result of actual operation data

Constituent	Failure mode	Severity Lv	Failure rate (case/hour)	Modal apportionment	Effective modal failure rate (case/hour)	Criticality Lv
Wheel	Abnormal wear	1	1.19E-04	19 %	2.26E-05	1
	Excessive flange abrasion	1	2.97E-05	5 %	1.42E-06	1
	Defect roundness of wheel tread	1	5.95E-05	10 %	5.66E-06	1
	Damage (inner diameter)	1	3.27E-04	51 %	1.67E-04	1
	Tread damage (flat, detachment)	1	5.95E-05	10 %	5.66E-06	1
	Wheel axle sticking	1	2.97E-05	5 %	1.42E-06	1
Axle shaft	Wheel axle sticking	1	2.97E-05	100 %	2.97E-05	1
Coupler	Ground wire damage (breakage et al.)	1	1.69E-03	81 %	1.38E-03	3
	Cover close failure	1	5.95E-05	3 %	1.70E-06	1
	Crack, deformation	1	8.92E-05	4 %	3.82E-06	1
	Corrosion, rust	1	8.92E-05	4 %	3.82E-06	1
	Bracket breakage	1	2.97E-05	2 %	5.95E-07	1
	Contacting breakage	1	1.19E-04	6 %	6.79E-06	1
W.S.P.D (wheel slide Protection device)	Leakage (slide protection valve)	1	1.49E-04	7 %	9.78E-06	1
	Dump valve failure	1	1.99E-03	88 %	1.76E-03	3
	Anti skid function failure	1	2.97E-05	1 %	3.91E-07	1
	Breakage of parts	1	8.92E-05	4 %	3.52E-06	1
Brake cylinder	Lack of braking (air leakage)	1	8.03E-04	33 %	2.65E-04	2
	Lack of braking (breakage)	1	3.27E-04	13 %	4.33E-05	2
	Auto clearance failure	1	5.95E-05	3 %	1.43E-06	1
	Corrosion, rust	1	1.78E-04	7 %	1.29E-05	1
	Assemble defect (breakage)	1	4.46E-04	18 %	8.06E-05	2
	Assemble defect (loss)	1	2.97E-04	12 %	3.58E-05	2
	Parking brake release failure	1	1.78E-04	7 %	1.29E-05	1
	Parking brake operation failure	1	1.78E-04	7 %	1.29E-05	1
Brake disc(k)	Surface (state) defects	1	2.38E-04	12 %	2.85E-05	1
	Assemble defect	1	1.19E-03	57 %	6.79E-04	2
	Abnormal wear	1	6.54E-04	31 %	2.06E-04	2
Brake pad	Assemble defect	1	1.10E-03	24 %	2.64E-04	2
	Abnormal wear	1	3.18E-03	70 %	2.23E-03	3
	Pad crack	1	2.97E-04	6 %	1.93E-05	1

이처럼 실제 운영데이터의 고장기록을 바탕으로 분석한 결과, 철도용품 FMECA를 통해 파악한 장치별 기능 요구사항에 따른 고장유형이 실제로 나타났으며 고장유형별 발생률인 유형별 할당(Modal Apportionment)의 값을 객관적 및 정량적으로 확인할 수 있었다.

4.2 FMECA 결과와 실제 고장데이터 분석결과 검토

앞의 과정을 통해 철도용품 차량분야 기술기준 기반 FMECA 체계 수립에 대해 검토하였으며, 검토 결과를 보완하고 그 유효성을 확인하고자 실제 전동차의 고장 데이터를 같은 방식을 적용하여 추가 분석하였다.

먼저 차량의 경우, 실제 고장 데이터의 분석 결과에 따르면 기능별 고장유형은 부식을 제외하면 이상 마모, 진원도 불량, 박리, 찰상 등이 발생함에 따라 기술기준 기반 FMECA 분석 결과와 거의 유사하게(약 88% 일치) 도출되었다. 차축 또한 고장유형 중 과열 또는 변형을 일으킬 수 있는 압입 불량과 같은 조립 불량이 실제 운영 중에도 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

연결장치는 FMECA 결과, 기술기준에서 요구하는 항목 대비 실제 운영 중에는 연결기 변형 관련 고장 외에는 일치하는 내용이 없는 것으로 분석되었는데(약 15% 일치) 그 원인은 기술기준 기반 FMECA 수행 시 분석된 열차 간 분리, 전기적연결 및

연결상태감시 기능 등과 관련된 고장유형의 경우, 실제 차량 운영 시에는 용품단위의 고장은 관리하지 않고, 차량(System) 단위를 기반으로 해당 용품과 관련된 기능 고장을 관리하고 있기 때문에 사료된다.

활주방지장치는 활주 정보 모니터링 관련 고장유형을 제외하고는 실제 고장 데이터와 대부분 일치하고 있으며(75% 일치), 제동실린더는 조립 불량에 따른 제동 기능 상실 관련 고장유형을 제외하고는 분석결과가 실제 데이터와 모두 일치했다. 제동 디스크 및 제동패드 역시 제동실린더와 마찬가지로 기능 관련 고장유형에 대해 유지보수 미흡에 따른 조립 불량과 같은 고장을 제외하고는 누락 없이 일치하는 것이 확인되었다.

고장유형별 발생빈도 및 유형별 할당 관련하여, 차륜의 경우 운영기관의 유지보수 활동에 따른 각 고장유형의 발생빈도가 기술기준 FMECA 수행을 위해 가정한 값보다 전체적으로 크게 나타났으며, 유형별 할당은 진원도 불량을 제외하면 전문가 의견을 반영한 값과 비슷한 경향을 보였다.

차축은 실제 고장데이터에 따르면 차축 기능에 따른 고장유형의 발생빈도가 거의 없었는데, 이는 연결장치와 마찬가지로 열차 운행 중 발생하는 차축 관련 기능을 별도로 관리하는 것이 아닌 차량 단위로 관련 고장 발생 여부를 관리하기 때문인 것으로 판단된다.

활주방지장치의 경우 유형별 할당 분석 시, 4개의 고장유형에 동일하게 비율이 배분되었으나, 실제 고장 데이터에서는 활주방지장치의 기능에 영향을 주는 밸브 관련 고장이 상대적으로 많이 발생함(약 90% 이상)에 따라 이러한 부분은 향후 철도 차량 단위 FMECA 수행 시 추가로 가중치를 반영하는 등이 조치가 필요할 것으로 보인다.

제동실린더 관련하여 실제 데이터에서 분석된 고장유형은 기술기준 기반 FMECA의 고장유형에 대부분 반영되었으며, 각 고장유형의 발생빈도는 전문가 의견을 반영한 값과 비교했을 때, 실제 운영에서는 그 값이 더 크게 나타나는 것으로 분석되었다.

제동디스크와 제동패드의 경우, 각 고장유형 관련하여 유형별 할당은 실제 데이터와 기술기준 기반 FMECA 결과가 비슷한 경향을 보였으나 역시 발생빈도는 실제 고장 데이터의 분석 결과가 더욱 크게 나타났다.

이와 같은 비교 분석한 결과를 바탕으로 장치별 FMECA 수행 결과 대비 실제 고장 관련 운영데이터에서 각 고장유형이 누락되는 경우에 따른 위험도 증가를 다음과 같이 확인할 수 있었다. 차축의 경우 실제 운영 데이터상에서 차축의 고착(Wheel Axle Sticking)만 고장유형으로 식별되어 관리되고 있으나, FMECA 수행 결과에서 알 수 있듯이 차축의 과열, 변형 등도 발생할 수 있다. 실제 차량에서 차륜 내경 손상(Damage)이 상당히 많이 발생한 것을 확인할 수 있으며, 이는 차륜을 차축에 압입 시 발생하는 사항으로, 차륜이 손상을 입었다는 것은 차축 또한 손상이 발생할 수 있다는 것이다. 이러한 경우, FMECA를 통해 정의한 고장유형 중 차축의 변형에 해당하고 이때 심각도(S)는 Lv5이고, 치명도 계산을 위한 유형별 고장률(Effective

Modal Failure Rate)은 $3.27E-04 \times 51\% = 1.67E-04$ 이다. 이 값을 통해 Table 3의 Criticality Matrix를 바탕으로 누락된 고장유형의 치명도(Criticality)를 산출하면 3등급임을 확인할 수 있다. 또한, 해당 용품인 차축의 위험도를 계산하면, 위험도는 심각도(S) × 빈도수(고장률)임에 따라 누락된 고장유형이 추가되는 경우 기존 대비 위험도가 $2.97E-05$ 에서 $3.57E-04(2.97E-05 + 3.27E-04)$ 로 약 12배 증가하는 것을 확인할 수 있다.

연결기도 마찬가지로 FMECA 수행결과 대비 운영 데이터에서는 완충장치, 풀림방지장치 설치 및 동작에 대한 고장유형이 누락되었고 이에 대한 심각도는 Lv 5이며, 유형별 고장률은 SIL Lv 1 수준의 $1.0E-0.6$ 을 적용하더라도 치명도는 3등급이 되고, 위험도 역시 기존대비 증가함을 알 수 있다.

이처럼 고장유형이 누락되는 경우 장치 또는 시스템의 위험도가 증가할 수 있음에 따라 체계적인 FMECA 수행이 필요하다는 것을 확인할 수 있었으며, 장치별 고장 발생빈도인 고장률과 고장유형별 할당을 정의하기 위하여 전문가 의견을 반영하는 것도 필요하고 도움이 되지만, 실제로 나타나는 현상을 정확하게 분석하고 오차를 줄이기 위해서는 최대한 객관적인 근거를 바탕으로 해당 값을 적용해야 함을 알 수 있었다.

본 논문에서는 앞에서 분석한 내용과 같이 실제 현장의 운영 데이터를 바탕으로 각 차이점을 파악하고 반영함으로써 새로운 FMECA 수행방법을 도출하고 이에 대한 유효성을 확인하였다.

5. 결론

최근 국내는 물론 해외에서도 국제표준에 대한 적합성 평가를 요구하고 있으며 이에 대한 입증자료로서 FMECA가 활용되고 있음에 따라, 본 논문에서는 철도안전법 철도용품 기술기준 차량 분야의 기능 요구사항에 따른 상위수준 고장유형을 분석하고 국제표준에 따른 FMECA 체계를 제시하기 위하여 국제법령 및 표준 등을 분석하였으며, 도출된 고장유형이 유효한지 검토하기 위해 실제 고장 데이터(Field Data)와 비교하였다. 이는 FMECA 수행 시 객관적인 데이터를 참조하여 기능에 따른 고장유형이 올바르게 정의되어야만 이후 분석 절차 및 결과가 유효하기 때문이다.

따라서, 본 논문에서 수행한 결과를 바탕으로 수립한 새로운 FMECA 체계가 기술기준 철도용품 적합성평가 시 신뢰성 관련 입증자료로서 적용될 수 있는지에 대한 가능성을 검토하였으며 다음과 같은 결과를 확인하였다.

FMECA 관련하여 용품 단위의 고장유형 도출 시, 기술기준에서 요구하는 항목 수 대비 고장유형의 수가 정확하게 일치하지 않은 이유는 기술기준의 적용 대상인 차량용품이 기능을 수행하는 구성품(Component)의 하부 장치 단위로 정의되어 있으며, 해당 내용에는 기능적 요구사항뿐만 아니라 구조적 성능 및 기계적 특성 등을 확인하기 위한 시험 등의 내용도 포함되어 있기 때문이다.

즉, 기계적 물성치 확인 등을 위한 시험자료의 제출을 제시하는 경우가 많음에 따라, FMECA 수행을 위한 요구사항 분석과정에서 기능과 관련성이 적은 시험 결과 제출 관련 요구항목은 제외되었기 때문이다.

또한, 실제 Field Data를 통해 알 수 있듯이 철도 용품 단위의 고장유형은 주로 유지보수를 통해 확인 및 조치되는 내용이 대부분으로서 승객의 안전을 직접적으로 위협하는 요소는 없는 것으로 확인됨에 따라 철도용품 기술기준 FMECA 수행 관련하여 고장유형별 심각도는 사상사고 등이 아닌 열차 운행지연 단위로 정의하는 것이 적합하다고 분석되었다.

치명도 등급을 산정하기 위한 발생빈도 적용 시, 해당 용품이 실제 적용된 차량의 고장데이터를 반영하거나 다양한 차종 및 구간의 데이터(기 적용된 유사사례 등)를 바탕으로 발생빈도를 통계적으로 산출하여 이를 적용하는 것이 객관적인 결과를 도출할 수 있을 것으로 판단되며, 고장유형이 일부 누락되는 경우 이에 따라 위험도가 증가할 수 있음을 확인하였다.

최종적으로, 철도안전법 기술기준에서 제시하는 철도 용품에 대해 본 논문을 통해 FMECA 체계를 도출하고 실제 고장데이터와 비교·분석을 통해 유효성을 확인하였다. 기존에는 법에서 요구하는 국제표준에 대한 적합성평가와 관련된 FMECA 수행 시, 고장유형 및 각 고장률 선정을 위하여 과거 경험을 반영하는 경우가 대부분이었으며, 이와 같은 방식은 분석인력의 경험 차이에 따라 실제 운영 현황과는 차이를 보이는 경우가 많았다.

새롭게 제안하는 FMECA 방법의 경우, 법령(철도용품 기술 기준)에서 제시하는 모든 요구사항을 고려하여 기능별로 고장유형을 도출하고 각 고장률을 현장의 실제 데이터를 적용함으로써 보다 객관적이고 정량적인 FMECA 수행이 가능하며 철도 용품 적합성평가 시 RAMS 관련 신뢰성 입증을 위한 자료로써 활용 가능성을 확인하였다.

향후에는 본 논문에서 제안한 FMECA 체계 및 수행 방법을 토대로 차량 또는 시스템 단위 주요 장치의 기능별 분석이 필요하다고 판단되며, 이는 철도차량(일반, 고속 철도차량 등) 기술 기준의 요구사항 중 신뢰성 및 가용성 분석 관련 항목에서도 FMECA 수행을 의무화하고 있는 법적 요구사항과도 부합하게 된다. 또한, 이처럼 새롭게 도출한 FMECA 체계를 적용하여 적합성평가를 수행하는 절차는 제작사 및 운영사가 객관적인 근거를 바탕으로 데이터를 체계적으로 수집하고 설계에도 해당 내용을 피드백할 수 있도록 하는 선순환 체계를 구축하는데도 기여할 수 있다고 사료된다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 연구는 한국철도기술연구원 기본사업(오송 철도시험선 기반 철도부품 개방형 RAM 기술 개발, PK2304D1)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

1. Chung, I.-S., Kim, J.-W., Lee, K.-W., (2008), The study on the demonstration test of quantitative reliability requirement for rolling stock, Journal of the Korean Society for Railway, 11(3), 233-239.
2. Chang, Y.-W., Kim, G.-W., Ryu, S.-H., Park, W.-C., Kim, J.-M., (2019), A study on legal system suggestion of rolling stock components reliability verification and certification system in Korea, Proceedings of the Korean Institute of Electrical Engineers, 135-136.
3. Lee, H., Park, J., (2022), A study on the application method of RAMS analysis and reliability management system for railway vehicle components, Journal of the Korean Data & Information Science Society, 33(6), 1053-1064.
4. Youn, E.-K., Choi, K.-Y., (2015), A study on reliability analysis of electric railway catenary system using FMECA, The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, 64(11), 1618-1625.
5. Kim, S.-R., Moon, Y.-S., Choi, K.-H., (2015), FMECA procedure for failure analysis of train high-speed circuit breaker, Journal of the Korea Academia-industrial Cooperation Society, 16(5), 3370-3377.
6. Choi, K.-Y., Park, M.-G., (2014), Criticality analysis for FMECA on train traction control system, Proceedings of the Korea Academia-industrial Cooperation Society, 394-397.
7. Jeon, Y. H., Kim, I. S., Lee, M. G., (2021), Analysis of results according to the YOLOv5 model, Proceedings of the Korean Society for Precision Engineering 2021 Autumn Conference, 508.
8. BS EN IEC 60812, (2018), Failure modes and effects analysis (FMEA and FMECA).



Kang Ho Lee

Senior Engineer in the Railway Designated Certification Department, Korea Railroad Research Institute.

Department of Rolling Stock System, Graduate School of Railroad, Seoul National University of Science and Technology.

E-mail: khlee@krri.re.kr



Duck Ho Shin

Chief Researcher in the Railway Designated Certification Department, Korea Railroad Research Institute.

E-mail: ducko@krri.re.kr



Hyun Jeong Jo

Principal Researcher in the Railway Designated Certification Department, Korea Railroad Research Institute.

E-mail: hjo@krri.re.kr



Kang Mi Lee

Principal Researcher in the Railway Designated Certification Department, Korea Railroad Research Institute.

E-mail: kmlee246@krri.re.kr

하이퍼루프 초전도 전자석과 진공튜브 연결부 사이에 발생하는 자기 저항력 특성 연구

Characteristics of Magnetic Drag Forces near Vacuum Tube Junctions for Hyperloop Using HTS Magnets

임정열¹, 최수용^{2,#}
Jungyoul Lim¹ and Suyong Choi^{2,#}

¹ 한국교통대학교 철도운전시스템공학과 (Department of Railroad Operation System Engineering, Korea National University of Transportation,)

² 한국철도기술연구원 하이퍼튜브연구실 (HyperTube Research Team, Korea Railroad Research Institute)

Corresponding Author / E-mail: suchoi@krii.re.kr, TEL: +82-31-460-5735

ORCID: 0000-0001-7227-7066

KEYWORDS: Hyperloop (하이퍼루프), Magnetic drag force (전자기 저항력), Vacuum tube junction (진공튜브 연결부)

The hyperloop is a revolutionary form of ground transportation that can reach speeds of up to 1,200 km/h. However, there is a challenge with the superconducting electromagnets used in its propulsion and levitation systems. These magnets generate strong magnetic fields, which can create resistance when they interact with the surrounding structures, including the vacuum tubes. Therefore, it is important to study this magnetic resistance and understand how it affects the acceleration of the hyperloop vehicles. This research aims to analyze the changes in magnetic drag force near the junctions of vacuum tubes, particularly when these tubes are made of identical or different materials.

Manuscript received: January 4, 2024 / Revised: February 15, 2024 / Accepted: February 19, 2024
This paper was presented at KSPE Autumn Conference in 2023

1. 서론

최근 차세대 지상 교통수단으로 1/1,000 기압 수준의 진공튜브에서 음속에 가까운 최대 1,200 km/h의 속도를 내는 하이퍼루프에 관한 관심이 지속되고 있다[1-9]. 일반적으로 하이퍼루프는 진공에 가까운 주행환경을 조성하여 공력 저항을 크게 낮춰 지상 교통수단의 속도한계를 극복한다. 그리고, 전자기 추진 및 부상 시스템으로 주행체를 자기 부상하여 최대 속도까지 가속 주행한다. 또한, 추진/부상 시스템에 고자장 초전도 전자석을 활용하면, 고속에서의 추진성능을 상당히 높일 수 있을 뿐만 아니라 자기부상 공극 증가로 진공튜브 등을 포함한 인프라 건설 비용 저감을 기대할 수 있다. 초전도 전자석이 탑재된 하이퍼루프 주행체는 공간을 빠르게 이동하는 고자장을 형성하며, 전도성을 지닌 지상의 구조물과 반응하면 주행체의 이동을 막는

자기저항(또는 자기주행저항)을 발생한다. 특히, 주행체를 둘러싼 진공튜브는 튜브의 재질에 따라 무시할 수 없는 수준의 자기저항을 발생하기도 한다. 진공튜브에 가장 적합한 재질로는 높은 진공 기밀성을 보이는 강자성체 특성을 가지는 강재를 들 수 있으며[10,11], 비자성체 고강간재가 적용된 진공튜브의 적용에 대한 검토와 강재 튜브에 비해 낮은 건설 비용의 고밀도 콘크리트 튜브[12]에 관한 연구도 진행되고 있는 상황이다. 기존 연구에서는 강재 및 고강간재 튜브로 인해 발생하는 자기저항을 다양한 주행 조건에서 분석하였고[13], 저속구간에서 일시적으로 발생하는 최대 자기저항은 추진성능의 25% 수준 이내로 설계하였다.

본 연구는 하이퍼루프 상용화를 위한 기초연구 중 하나로 진공튜브 연결부 부근에서 발생하는 자기저항 특성에 대한 분석을 목표로 한다. 진공튜브는 무한히 연속하게 제작할 수 없고, 제작 및 이송, 그리고 열팽창 등의 요인을 고려하면 수십 미터

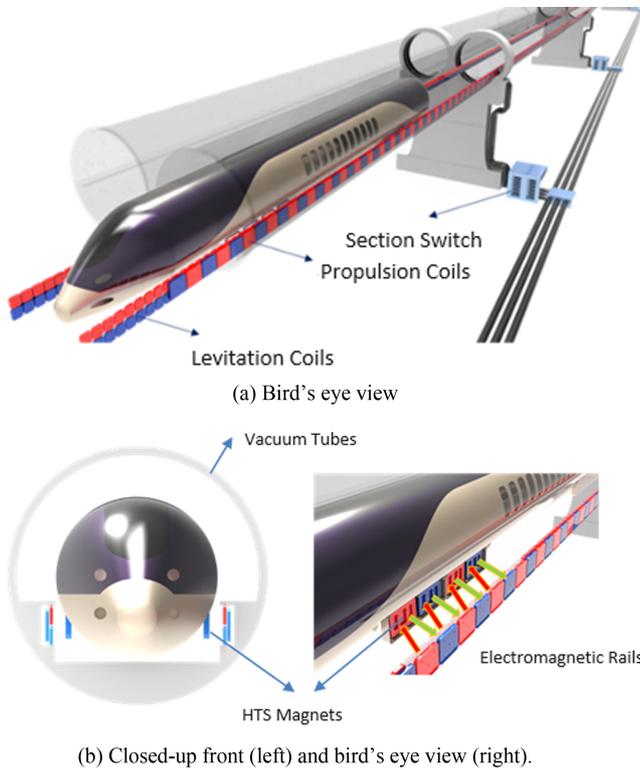


Fig. 1 Conceptual configuration of hyperloop using high-temperature superconducting (HTS) magnets

길로 제작된 진공튜브를 연결하여 구성하게 된다. 이때, 진공 튜브 연결부는 접촉부의 전기저항이 커지거나 일정 거리만큼 이격되어 절연될 수 있으며, 연결부 주변의 와전류 흐름 변화로 자기저항이 일시적으로 변할 수 있다. 또한, 저속에서의 강재튜브 흡입력은 시스템의 부상/안내 강성을 떨어뜨리기 때문에, 저속에는 고망간재를 적용하고 고속에서는 비교적 저렴한 강재 튜브를 적용하는 방식도 생각할 수 있다. 이처럼 연결부에서 진공튜브 재질이 변하는 상황에서의 자기저항의 순간적인 변화도 함께 분석하여 연결부에서의 자기저항 변화로 인한 영향에 대해 분석하도록 한다.

2. 본론

Fig. 1 은 상온 초전도 전자석을 이용하는 하이퍼루프 시스템 개념도를 나타낸다. 앞서 소개한 것과 같이 주행체는 진공튜브 내부를 주행하며, 주행체에 장착된 상온 초전도 전자석은 튜브 인프라의 지상전자레일과 상호작용하여 자기부상 및 추진을 달성한다. 진공튜브 연결부에서의 자기저항 변화를 분석하기 위해 상용 유한요소해석 소프트웨어 Simens MAGNET을 활용하였다. 각 요소들의 파라미터는 현재까지 정리된 상용화 모델[13]을 기준으로 설정했고, 이는 진공튜브 두께 100 mm, 직경 3,600 mm, 초전도 전자석과 튜브 사이 거리 750 mm 이다. 또한

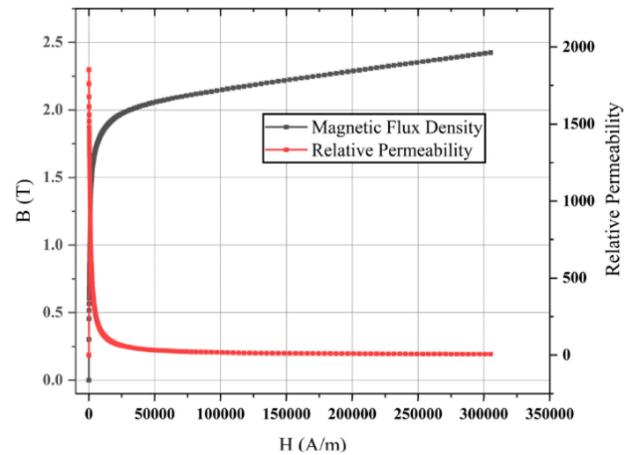
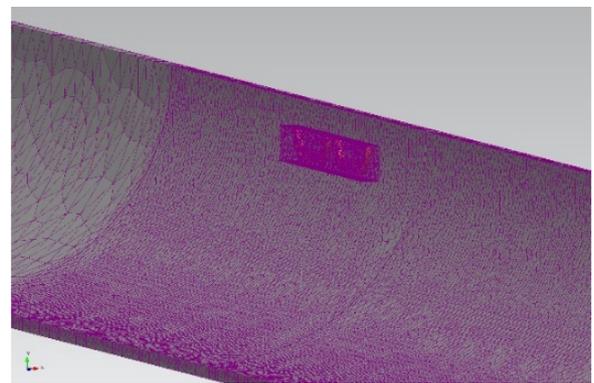
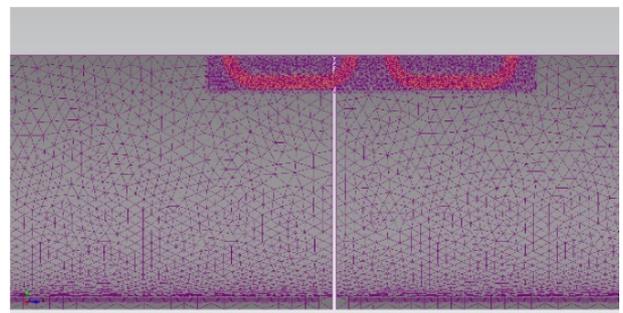


Fig. 2 Relative permeabilities and magnetic flux densities of AISI 1010 steels used in this manuscript [13] (Adapted from Ref. 13 on the basis of OA)



(a) Bird's eye view



(b) Side view

Fig. 3 3D FEA simulation models of vacuum steel tubes with the tube junction air-gap of 20 mm

이 논문에서 새롭게 소개되는 내용인 연결부에서 진공튜브간 이격거리는 20 mm 으로 설정하였다. 전자기 해석에 사용한 튜브 재질은 Fig. 2의 자화곡선을 갖는 AISI 1010 Steel을 적용하였고, 비저항은 $1.7 \times 10^{-7} \Omega \cdot m$ 값을 적용하였다.

또한, 고망간재 튜브는 상대 투자율 1에 비저항은 $7.0 \times 10^{-7} \Omega \cdot m$ 의 재질을 사용하였다. Fig. 3 는 초전도 전자석이 진공튜브 연결부 부근에 위치했을 때의 FEA 해석 메시를 보여주며, 주변의

Table 1 Main parameters of HTS magnets for hyperloop [13] (Adapted from Ref. 13 on the basis of OA)

Parameters	Values
Magnetomotive force per pole [kAT]	600
Dimension of coils [mm × mm]	600 × 300
Pole Pitch [mm]	1,200
Operating temperature [K]	30-40

메시는 보이지 않도록 생략하였다.

2극으로 구성된 2개의 초전도 전자석 모듈에 대한 주행저항 해석 속도 향상을 위해 1/4 모델을 사용하여 진행하였다. 이 논문에서 다루는 시뮬레이션 결과들은 주행체 양쪽에 초전도 전자석을 각 6극씩 배치하는 하이퍼루프 시스템을 기준으로 주행저항 해석 결과를 논의하며, 이러한 경우 진공튜브로 인한 전체 초전도 전자석의 자기저항은 Fig. 3 해석 결과의 12배가 된다. Table 1은 하이퍼루프 초전도 전자석의 상용화 목표 파라미터를 정리한 것이며, 이 파라미터들을 적용하여 시뮬레이션을 수행하였다.

2.1 강재 진공튜브 연결부에서의 자기저항 변화

앞서 소개한 AISI 1010 강재로 구성된 진공튜브를 20 mm의 이격거리로 연결하였을 때, 연결부 부근에서 초전도 전자석과 튜브 사이에 발생하는 주행저항의 변화에 대한 해석을 진행하였다.

Fig. 4에는 초전도 전자석이 연결부 부근을 지나갈 때, 진공튜브의 자기 밀도가 시각화되어 있다. 초전도 전자석에서 발생하는 자기장이 매우 강하기 때문에, 초전도 전자석 자극 위치에 따라 진공튜브 자기장 패턴이 정해진 것이 확인된다. 튜브 연결부 부근의 자기 밀도는 약간의 감소가 있지만, 자기 밀도 크기와 분포 측면에서는 큰 차이가 나타나지 않았다.

Fig. 5에서는 주행속도를 200-1,200 km/h까지 변화하면서 초전도 전자석이 연결부를 지나도록 했을 때, 자기저항의 과도응답을 보여준다. 200 km/h 이상으로 주행속도를 올리면, 강재튜브로 인한 자기저항이 감소하는 경향은 기존 연구[13]에서 이미 확인된 바 있으며, 해석 결과에서도 동일한 경향이 확인되었다.

여기서 Fig. 5의 x축은 초전도 전자석의 중심 위치이고, 진공튜브 연결부는 대략 x = 7 m 부근에 위치하였다. 자기저항은 예상한 것과 같이 연결부 부근에서 일정 수준의 변화가 발생하였으며, 일시적인 주행저항의 약간 감소→증가→감소→약간 증가의 정현파 패턴의 변화가 관찰되었다. 이러한 현상은 연결부에서의 절연으로 인해 와전류 패턴이 일시적으로 변화한 것과 초전도 전자석 극 위치에 따라 추가적인 흡인력이 진행 방향 또는 진행 반대 방향으로 발생했기 때문이다. 특히 상대적으로 낮은 속도에서는 주행저항을 일시적으로 감소하는 경향이 관찰되었다.

주행저항의 일시적인 증가 및 감소의 최댓값은 2-3 kN으로 전도성 진공튜브와 EDS 자기부상코일로 인해 발생하는 평균 10 kN 저항력에 대한 비율로는 20-30%로 상대적으로 크게

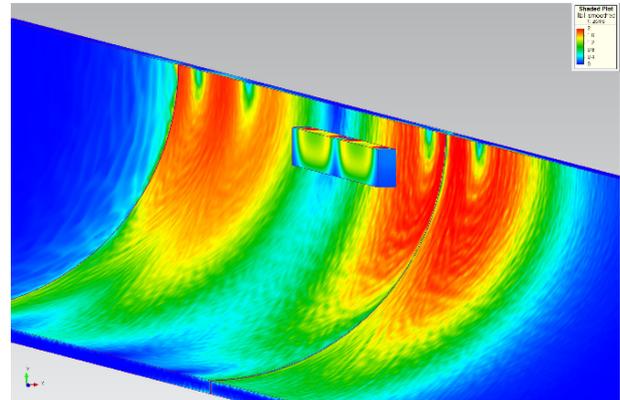


Fig. 4 Simulation results of magnetic flux densities on vacuum steel tubes with the junction air-gap of 20 mm

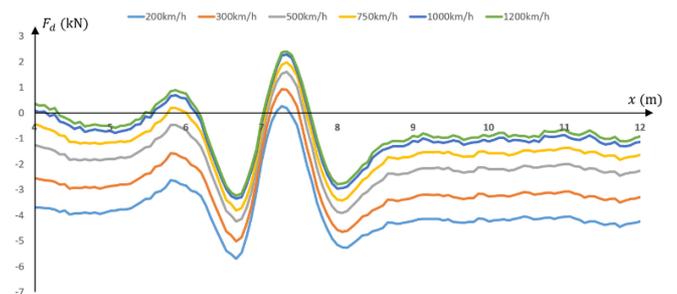


Fig. 5 Simulation results of magnetic drag forces on the AISI 1010 steel tube junction corresponding to various velocities

보이나, 하이퍼루프 시스템의 설계 추진력인 44 kN에 비하면 작은 값으로 시스템 레벨에서의 영향은 제한적일 것으로 판단된다[13].

다만, 수 kN의 정현파 주행저항 파동이 연결부로 인해 연속 발생하는 경우 승차감에 큰 영향을 줄 수 있기 때문에, 진공튜브 길이와 그 구간에서의 주행속도를 비교하여 주행 시 공진이 발생하지 않도록 주의할 필요가 있다.

2.2 강재/고망간 진공튜브 연결부에서의 자기저항 변화

저속에서는 고망간강 진공튜브를 적용하고, 고속에서는 상대적으로 저렴한 강재 튜브를 적용하는 방식에 대한 해석을 수행하였다. 이런 방식에서 속도를 가속하는 경우 진공튜브 재질은 고망간강에서 강재로 변화하고, 속도를 감속하는 경우는 강재에서 고망간강으로 변화하며, 이 두 경우를 모두 고려하여 해석할 필요가 있다. 진공튜브 재질이 변하는 속도는 300 km/h로 설정하였으며, 연결부에서 발생하는 일시적인 자기저항 변화는 Fig. 6에서 보여주고 있다.

기존 연구 결과와 같이 속도 300 km/h에서의 자기저항은 고망간강이 강재보다 낮은 것으로 확인되었다. 먼저, 파란색 선은 고망간강에서 강재 진공튜브로 진입할 때를 나타내며, 연결부에서 일시적으로 자기저항이 상당히 감소하는 것으로 나타났다. 이것은 강자성인 강재튜브에서 발생하는 흡인력으로 인해

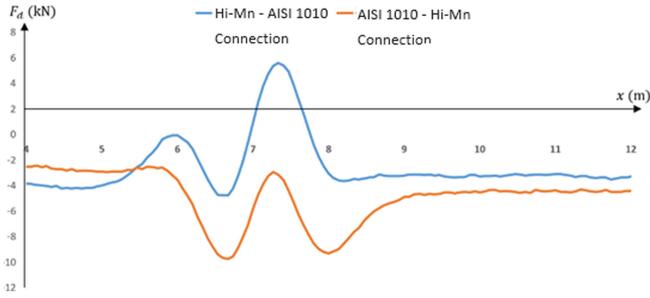


Fig. 6 Simulation results of magnetic drag forces on the tube junction with AISI 1010 and Hi-Mn steel tubes

진행방향으로 당겨지는 힘이 추가로 발생한 결과이다. 주황색 선은 강재에서 고망간재 튜브로 진입할 때를 보여주는데, 이때는 반대로 자기저항이 일시적으로 상당히 증가하며, 강재 진공 튜브의 흡인력이 주행체를 뒤로 당겨서 발생하는 현상이다. 다만, 이런 자기저항의 패턴은 단발성으로 발생하고, 그 크기도 추진력, 부상/안내력에 비하면 작은 값이기 때문에 주행체의 안정성이나 승차감에 주는 영향도 제한적일 것으로 보인다.

3. 결론

초전도 전자석이 적용된 하이퍼루프에서 진공튜브 연결부 부근에서 발생하는 자기 주행저항에 대한 분석을 진행하였다. 강재 진공튜브가 연속적으로 배치된 경우 연결부 부근에서의 자기저항 변화를 분석한 결과 수 kN 단위의 저항력 파동이 관찰되었고, 승차감 측면에서 주행속도와 진공튜브 길이 등을 고려한 설계가 필요할 것이다. 또한, 진공튜브에 발생하는 와전류는 부상/안내력에 부가적인 영향을 주며, 연결부로 인한 주기적인 부상/안내력 파동이 주행 안정성에 주는 영향도를 추가 분석할 필요가 있다. 그뿐만 아니라, AISI 1010 강재 및 고망간재 진공튜브 연결부에서의 자기저항도 분석하였으며, 강재 튜브에서 발생하는 흡인력으로 인해 자기저항이 진공튜브 재질 변화에 따라 추가적으로 증가하거나 감소하는 현상이 관찰되었다. 하지만, 이런 재질변화는 특정 속도 구간에서 단발성으로 발생하기 때문에 전체 시스템에 대한 영향은 제한적일 것으로 보인다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 논문은 2023년도 한국교통대학교 교내학술연구비 및 정부(국토교통부)의 재원으로 국토교통과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2021-KA164547, 철도시설물 전력 설비 배전 선로에 대한 무전원·무선 안전 감시 기술 개발).

REFERENCES

- Mun, J., Lee, C., Lee, C., Eom, B., Sim, K., Kim, S., (2021), Thermal and electromagnetic performance evaluation of REBCO magnet with solid nitrogen thermal battery for maglev train, Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Applied Superconductivity, 31(5), 1-5.
- Lim, J., Lee, C.-Y., Oh, Y. J., Jo, J.-M., Lee, J.-H., Lee, K.-S., Choi, S., (2021), Equivalent inductance model for the design analysis of electrodynamic suspension coils for hyperloop, Scientific Reports, 11(1), 23499.
- Lim, J., Lee, C.-Y., Lee, J.-H., You, W., Lee, K.-S., Choi, S., (2020), Design model of null-flux coil electrodynamic suspension for the hyperloop, Energies, 13(19), 5075.
- Choi, S. Y., Lee, C. Y., Jo, J. M., Choe, J. H., Oh, Y. J., Lee, K. S., Lim, J. Y., (2019), Sub-sonic linear synchronous motors using superconducting magnets for the hyperloop, Energies, 12(24), 4611.
- Lim, J., Lee, C.-Y., Choi, S., Lee, J.-H., Lee, K.-S., (2020), Design optimization of a 2 g hts magnet for subsonic transportation, Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Applied Superconductivity, 30(4), 1-5.
- Hamad, A., Izabela, K. S., John, P., (2020), Hyperloop-prediction of social and physiological costs, Инновационные транспортные системы и технологии Russian, 6(3), 43-59.
- Hansen, I. A., (2020), Hyperloop transport technology assessment and system analysis, Transportation Planning and Technology, 43(8), 803-820.
- Gkoumas, K., (2021), Hyperloop academic research: A systematic review and a taxonomy of issues, Applied Sciences, 11(13), 5951.
- Hyperloop Alpha. https://www.tesla.com/sites/default/files/blog_images/hyperloop-alpha.pdf
- Hardt Hyperloop. <https://hardt.global>
- Zeleros Hyperloop. <https://zeleros.com>
- Park, S., Wu, S., Liu, Z., Pyo, S., (2021), The role of supplementary cementitious materials (SCMs) in ultra high performance concrete (UHPC): A Review, Materials, 14(6), 1472.
- Choi, S., Cho, M., Lim, J., (2023), Electromagnetic drag forces between HTS magnet and tube infrastructure for hyperloop, Scientific Reports, 13(1), 12626.



Jungyoul Lim

Professor in the School of Railroad Operation System Engineering, Korea National University of Transportation. His research interests are mechatronics, magnetic levitations, and Hyperloop.

E-mail: jlim@ut.ac.kr



Suyong Choi

Senior Researcher in Korea Railroad Research Institute (KRRRI).

His research interests are electric machines, wireless power transfer, power systems, and Hyperloop.

E-mail: suchoi@krrri.re.kr

Poppy Robot의 모션 제어를 위한 디지털 트윈 기반의 머신러닝 및 Openpose의 활용 방법에 관한 연구

A Study on How to Utilize Digital Twin-based Machine Learning and Openpose for Poppy Robot's Motion Control

김범진¹, 김석¹, 조영태^{1,#}
Bum Jin Kim¹, Seok Kim¹, and Young Tae Cho^{1,#}

¹ 국립창원대학교 스마트제조융합협동과정 (Smart Manufacturing Engineering, Changwon National University)
Corresponding Author / E-mail: ytcho@changwon.co.kr, TEL: +82-55-213-3608
ORCID: 0000-0001-7545-4646

KEYWORDS: Digital twin (디지털 트윈), Unity (유니티), Deep neural network (심층신경망), Poppy robot (Poppy 로봇), Openpose (오픈 포즈), Motion control (모션 제어)

The key components of smart manufacturing, a central concept in the era of the 4th Industrial Revolution, consist of digital twin technology, AI, and computer vision technology. In this study, these technologies were utilized to govern the Poppy robot, a humanoid robot designed for educational and research purposes. The digital twin creates a virtual environment capable of real-time simulation, analysis, and control of the robot's motions. The digital twin of the robot was constructed using Unity, a 3D development program. Motion data was captured while simulating the physical structure and movements of the virtual robot. This data was then fed into a Tensorflow-based deep neural network to generate a regression model that predicts motor rotation based on the position of the robot's hand. By integrating this model with a Python-based robot control program, the robot's movements could be effectively managed. Additionally, the robot was controlled using Openpose, a computer vision algorithm that predicts characteristic points on a human body. Position data for human joint points was collected from 2D images, and the motor angle was calculated based on this data. By implementing this approach on an actual robot, it became possible to enable the robot to replicate human movements.

Manuscript received: February 5, 2024 / Revised: February 16, 2024 / Accepted: February 26, 2024
This paper was presented at KSPE Autumn Conference in 2023

1. 서론

4차 산업혁명(Industry 4.0) 시대에 핵심 패러다임 중 하나인 스마트 제조(Smart Manufacturing)는 다양한 정보통신기술(ICT)과 인공지능(AI)을 도입하여 제조업의 혁신을 추구한다. 스마트 제조는 제조 공정의 디지털화, 네트워킹, 그리고 지능화를 통해 생산성을 향상시키고, 제조업의 유연성과 효율성을 극대화하는 것을 목표로 하고 있다[1]. 이러한 변화의 중심에는 디지털 트윈(Digital Twin) 기술과 AI, 컴퓨터 비전 기술이 자리 잡고 있으며, 이들 기술은 제조업뿐만 아니라 여러 산업 분야에서 디지털 전환을 가속화하는데 중요한 역할을 하고 있다.

디지털 트윈은 물리적 객체와 시스템에 대한 정확한 디지털 쌍둥이를 생성하는 기술로, 현실에서 발생하는 상황을 시뮬레이션하여 다양한 시나리오에서 로봇의 성능을 시험할 수 있다[2]. 이 기술은 실제 환경에서 발생할 수 있는 다양한 조건과 상황을 모델링하여, 성능 최적화, 문제 해결 및 예측 분석에 활용된다[18].

이러한 디지털 트윈에 대한 연구는 특히 제조 산업에 많이 사용되는 로봇을 대상으로 활발히 진행되고 있다[7]. 이러한 연구의 일환으로, 본 논문에서는 교육 및 연구 목적으로 개발된 오픈소스 휴머노이드 로봇인 Poppy Robot[4]을 활용하였다. Poppy Robot은 인간의 운동과 인지 능력을 모방할 수 있도록 총 25개의 서보모터를 사용하여 디자인된 로봇이다[5-9].

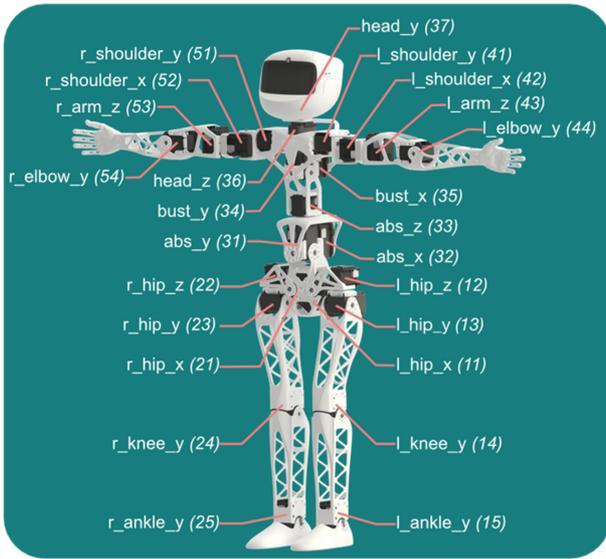


Fig. 1 Poppy robot's wiring diagram overview [9] (Adapted from Ref. 9 on the basis of OA)

Blanchard et al.[3]은 Poppy robot의 구조적 특성과 비전 시스템을 활용해 사람이 자신의 스트레칭 모션을 확인하고 교정할 수 있는 시스템을 개발하였고, Urban and Adorno[17]는 V-REP 기반의 Poppy Robot의 디지털 트윈 시뮬레이터를 활용한 이족보행을 모션을 제어하는 방법에 대해 연구한 바 있다.

본 논문에서는 Poppy Robot을 활용하여 디지털 트윈을 구현하고 시뮬레이션으로 데이터를 수집한 후 AI를 통해 활용해 보고자 하였다. 또한 컴퓨터 비전 기술 중 사람과 상호작용에 유리한 Openpose 기술을 활용하여 Poppy Robot의 제어에 적용해 보고자 하였다.

2. 디지털 트윈 시뮬레이터를 활용한 Poppy Robot의 제어

2.1 Unity 기반 디지털 트윈 시뮬레이터 구축

Unity는 시뮬레이션 플랫폼으로 널리 사용되는 3D 개발 프로그램이다[6]. Unity는 그래픽 렌더링과 물리엔진을 제공하여 다양한 시나리오에서의 물리적 시뮬레이션을 가능하게 한다. 실제 로봇과 시스템의 복제본을 통해 디지털 트윈 시뮬레이터의 구축에 사용되기도 한다[7]. 본 논문에서는 Poppy Robot의 디지털 트윈 시뮬레이터를 Unity를 활용하여 구축해 보고자 하였다.

디지털 트윈의 구현을 위해서는 우선 로봇의 모델 파일이 필요하다. Poppy Robot은 오픈소스로 로봇 하드웨어의 CAD 파일을 제공하기 때문에[8], 이를 Unity에서 사용 가능한 FBX형식으로 저장한 뒤 Unity 가상 공간에 가져와서 로봇의 물리적 구조를 디지털 환경에서 구현할 수 있다. 가상 모델이 실제 로봇과 동일한 움직임을 나타낼 수 있도록 구현하기 위하여, 로봇 모델링의 각 부품에 해당하는 Game Object들의 계층관계를 설정하여 종속 관계를 설정하였다. 또한 모터 회전부에 해당하는 회전 축 부품에 Articulation Body 기능을 활용하여 물리적 회전 기능을

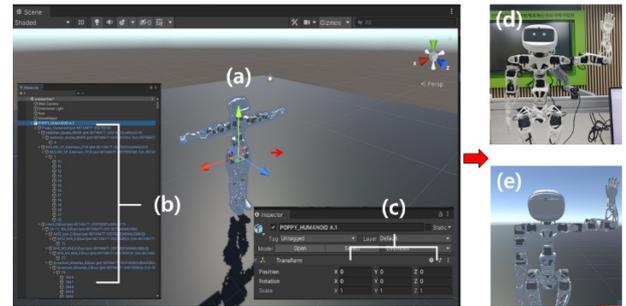


Fig. 2 Poppy robot's digital twin modeling in unity (a) Figure of robot, (b) Parts of poppy robot, (c) Transform of parts of robot, (d) Real robot figure, and (e) A virtual robot posing like a real robot

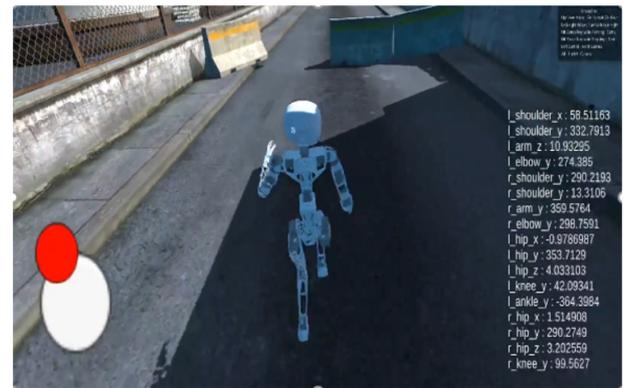


Fig. 3 Acquiring motor angles in poppy robot's digital twin simulator

추가하여 Fig. 2 와 같이 Unity 상에 가상 모델을 완성하였다.

가상 모델을 움직일 때 각 관절부로 설정한 부품의 회전 각도나 원하는 부품의 위치 데이터를 수집하는 C#스크립트를 추가하였고, Fig. 3과 같이 가상 모델을 움직였을 때 각 관절의 회전 데이터를 실시간으로 수집할 수 있음을 확인하였다.

제작된 디지털 트윈 시뮬레이터를 활용하여 로봇 모터의 회전 데이터에 따른 위치 데이터를 수집하였다. 왼손 끝을 로봇의 끝점으로 지정하여 상체가 고정되어 있을 때 Fig. 1과 같이 왼손 끝의 움직임에 관여하는 4개의 모터(l_shoulder_y, l_shoulder_x, l_arm_z, l_elbow_y)[9]의 회전 각도를 수집해 데이터베이스를 제작하였다.

각 모터를 5°씩 회전시켰고, 그때 왼쪽 손끝의 X, Y, Z 위치 데이터를 수집하여 결과적으로 Table 1과 같이 총 19,802개의 데이터가 수집된 것을 확인할 수 있다.

2.2 DNN을 활용한 수집된 데이터의 학습

디지털 트윈 시뮬레이터를 이용하여 수집된 데이터는 머신러닝 기법을 통해 학습되어 로봇에 적용시킬 수 있다[10]. 본 연구에서는 디지털 트윈 시뮬레이터를 이용하여 수집된 모터의 회전 각도 데이터에 따른 손끝의 위치 데이터를 활용하여 손 위치에

Table 1 Position data of the fingertip per motor's rotation value

	L_shoulder_x	L_shoulder_y	L_arm_z	L_elbow_y	Hand_pos_x	Hand_pos_y	Hand_pos_z
0	-120	-10	-30	-20	-0.3287	1.8475	3.8166
1	-120	-10	-30	-15	-0.3698	1.7979	3.8995
2	-120	-10	-30	-10	-0.4140	1.7420	3.9766
3	-120	-10	-30	-5	-0.4608	1.6800	4.0473
...
19799	-65	25	25	-10	-2.3436	-0.5908	3.9708
19800	-65	25	25	-5	-2.3134	-0.6913	3.9658
19801	-65	25	30	-90	-2.2400	-0.8850	3.9328

19802 rows X 7 columns

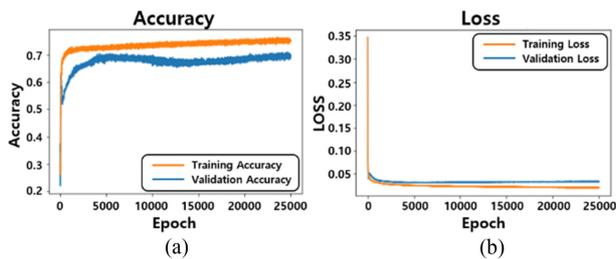


Fig. 4 Learning results of regression model for robot motion estimation (a) change in accuracy up to 25,000 epoch, and (b) change in LOSS (MSE) value up to 25,000 epoch

다른 모터의 회전 각도를 예측 머신러닝 모델을 개발하였다. 모델은 Tensorflow를 사용하여 DNN (Deep Neural Network)으로 구조로 제작하였다[11].

모델의 세부적인 구조는 다음과 같다. 입력층에서 3개의 입력값인 로봇 손 끝의 X, Y, Z 위치 데이터를 입력받았고, 은닉층에서는 기술기 소실 문제를 방지하기 위하여 ReLU[12] 활성화 함수를 사용하여 5개의 레이어로 구성하였다. 출력층에서는 선형 활성화 함수를 사용하여[13] 4개의 출력 데이터인 로봇의 왼팔에 해당하는 4개의 모터(l_shoulder_y, l_shoulder_x, l_arm_z, l_elbow_y)의 회전 값을 출력하도록 회귀(Regression) 모델을 구현하였다. 최적화 함수로는 Adam (Adaptive Moment Estimation)알고리즘을[14] 사용하였고, 학습률은 Adam에 가장 좋은 설정값이라고 알려진 0.001을 사용하였다[14].

총 19,802개의 데이터를 1,024 Batch로 나누어 25,000만큼의 Epoch로 학습을 진행하였다. 학습 과정에서는 손실함수(Loss)를 산정하여 모델의 성능을 평가했는데 회귀 모델에서 주로 평가 지표로 사용되는 MSE (Mean Square Error)[15] 방식으로 산정하였다. 학습 결과로, 모델은 74.5%의 정확도와 0.025의 Loss값을 가지도록 학습된 것을 Fig. 4와 같이 확인할 수 있다.

2.3 회귀 모델을 활용한 실제 로봇의 제어

2.3절에서 제작한 회귀 모델을 실제 Poppy Robot의 제어에 활용하였다. Poppy Robot은 Python 프로그래밍 언어로 제어가 가능한데, Poppy Robot에 부착된 Dynamixel 서보모터는

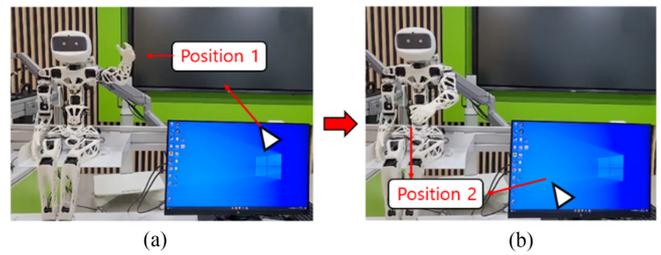


Fig. 5 As shown in (a) and (b), the robot arm is controlled by the regression model as the mouse pointer position changes

Pybot[4] 라이브러리를 통해 효율적으로 제어할 수 있다. 모터의 이름, 방향, 원점, 한계각도의 설정을 통해 제어 환경을 세팅하고, 모터의 각도, 동작 실행 시간, 동작 간격을 설정하여 전반적인 로봇의 움직임을 제어할 수 있다. 제작한 회귀 모델에 Pybot 라이브러리를 결합하여 출력값으로 나온 4개의 모터 각도를 실제 로봇에 실시간으로 적용할 수 있도록 하였고, 입력값으로는 쉽게 적용할 수 있는 모니터 속 마우스 포인터 위치 데이터를 사용하는 방법을 도입하였다. 사용자가 마우스 포인터를 이동시키면, 해당 위치 데이터가 실시간으로 회귀 모델에 입력되어 모터의 회전 데이터를 예측한다. 이 예측된 회전값은 Poppy Robot의 실제 모터 제어 데이터로 사용되어 Fig. 5와 같이 로봇의 팔 동작을 제어할 수 있다.

3. Openpose를 활용한 Poppy Robot의 제어

3.1 Openpose알고리즘

Openpose[16]란 이미지 처리를 위한 오픈소스인 OpenCV를 기반으로 한 사람의 자세 예측 알고리즘이다. 사람의 손이나 얼굴, 몸체에서 특징점들을 탐지하고 그 점들을 이어 자세를 추정하고 동작을 분석할 수 있는 알고리즘으로, 약 25,000개의 데이터를 바탕으로 CNN (Convolution Neural Network)을 기반으로 딥러닝 된 모델이다. Python 환경에서 구현할 수 있고, 추가적인 OpenCV 라이브러리를 활용해 다양한 작업이 가능하다[19]. Openpose 모델 중 몸체의 자세를 추정할 수 있는 모델은 3가지가



Fig. 6 Data on joint points extracted from photos using openpose applied to actual robot

있다. 몸의 전체 관절을 추출하는 MPI 모델과, 얼굴 인식이 추가된 Coco 모델, 발의 세부적인 특징점을 추출하는 Body-25 모델이 있다. 본 연구에서는 사람 몸체의 움직임으로 로봇에 적용하기 위해, MPI 모델을 사용하였다.

3.2 Openpose를 활용한 로봇제어

본 논문에서는 이 Openpose 알고리즘을 활용하여 사람 사진에서 자세를 추정하고, 추정된 점들의 2D 좌표를 추출한 뒤 가공하여 로봇에 적용해 보는 연구를 진행하였다. Openpose 모델을 활용하여 사람 사진에서 각 관절 점들을 추출하였고, 추출된 점들은 사진의 왼쪽 아래 끝을 영점으로 설정한 좌표 데이터로 변환하였다. 이후 두 점의 좌표 사이의 각도를 구할 수 있는 수식을 코드로 표현하였고, Openpose를 이미지에 적용해 나온 점들의 좌표 데이터를 수식으로 적용하여 로봇의 양 팔의 어깨와 팔꿈치에 해당하는 모터의 각도를 구했다. 이 각도 데이터를 Pypot 라이브러리[4]와 결합하여 Poppy Robot의 제어에 사용하였고, 로봇이 이미지 내 인간의 움직임을 모방할 수 있었다.

2D 사진에서 X축을 가로, Y축을 세로로 할 때, 깊이 정보인 Z축을 직접 얻을 수 없는 한계를 극복하기 위해, 특정 방법론을 도입하여 관련 모터의 각도를 계산하였다. Openpose가 적용된 이미지에서 손 끝의 점 픽셀의 Y값이, 어깨에 대항하는 점의 픽셀의 Y값보다 위, 아래에 있는지 여부를 계산하였다. 이때 손 끝 점의 Y값이 더 크다면 +90, 더 작다면 -90 값을 부여하여 Z 값을 필요로 하는 arm_z 모터를 제어하였다. Fig. 6과 같이 구한 모터 회전값들을 실제 로봇에 적용하였을 때 사진과 같은 형상으로 제어된 것을 확인할 수 있다. 손 끝에 해당하는 4, 6번 점의 Y값이 어깨에 해당하는 2, 번 점보다 위에 있어 arm_z 모터에 +90 값이 적용된 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 교육용 휴머노이드 로봇인 Poppy Robot을 활용하여 Unity 기반 디지털 트윈 시스템을 구축하고, AI 기반의 제어 기법을 결합하여, 실시간 로봇 제어의 가능성을 탐구하였다.

실제 로봇의 모터 각도 회전 값과 부품의 위치 측정에 어려움을 극복하기 위해, 디지털 트윈 시뮬레이터를 이용해 로봇 부품(손 끝)의 위치 데이터를 수집하였고, 이를 Python 기반의 Tensorflow로 구축한 DNN 모델의 훈련 데이터로 활용하였다. 학습 결과 로봇 손 위치에 따른 모터의 회전을 예측하는 모델이 완성되었다. 제작된 회귀 모델은 Pypot 라이브러리와 결합되어 로봇의 제어에 활용되었다. 최종적으로 마우스 포인터의 위치에 따라 로봇의 손 끝이 움직이는 방식으로 왼쪽 팔에 부착된 모터들의 동작을 성공적으로 확인하였다. 모델의 출력층에 선형 활성화 함수를 사용함으로써, 모터들이 최소한의 움직임으로 팔을 조절하도록 하였으나, 이로 인해 일부 어색한 움직임이 발생하는 한계가 있었다.

또한, 사진 속 인간의 관절 특징점을 추출하는 컴퓨터 비전 모델인 Openpose를 사용하여, 이를 로봇에 매핑하는 방법을 개발하였다. 사람 사진의 자세를 분석하고, 이를 통해 얻은 2D 좌표 데이터를 가공하여 로봇 제어에 적용하는 방법을 탐구하였다. 사람의 사진에서 추출된 각 관절 점들의 데이터를 활용하여 로봇의 양 팔 모터 각도를 계산하고, 이를 실제 로봇의 동작 제어에 성공적으로 적용함으로써, 로봇이 인간의 움직임을 효과적으로 모방할 수 있음을 확인하였다. 특히, 2D 이미지에서 깊이 정보의 부재라는 한계를 극복하기 위해, 손 끝과 어깨의 상대적 위치를 분석하여 arm_z 모터를 제어하는 방법론을 도입하였고, 이 접근 방식은 로봇이 사진과 동일한 형상을 재현하는 데 성공적으로 기여하였다. 추후 연구에서는 Depth Camera를 활용하여 3D Openpose 모델을 구현함으로써 로봇 모션의 정밀도를 향상시키고 최적화하는 방안을 모색할 필요가 있다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 과제(결과물)는 2023년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업의 결과입니다(2021RIS-003). 또한 이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2019R1A5A8083201).

REFERENCES

- Kang, H. S., Lee, J. Y., Choi, S., Kim, H., Park, J. H., Son, J. Y., Kim, B. H., Noh, S. D., (2016), Smart manufacturing: Past research, present findings, and future directions, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-green Technology, 3, 111-128.
- He, Y., Guo, J., Zheng, X., (2018), From surveillance to digital twin: Challenges and recent advances of signal processing for industrial internet of things, Institute of Electrical and Electronics Engineers Signal Processing Magazine, 35(5), 120-129.

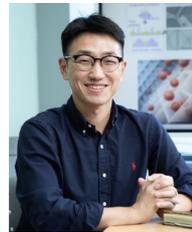
3. Blanchard, A., Nguyen, S. M., Devanne, M., Simonnet, M., Goff-Pronost, L., & Rémy-Néris, O. (2022). Technical feasibility of supervision of stretching exercises by a humanoid robot coach for chronic low back pain: The R-COOL randomized trial. *BioMed Research International*, 2022.
4. Lapeyre, M., Rouanet, P., Grizou, J., Nguyen, S., Depraetre, F., Le Falher, A., Oudeyer, P.-Y., (2014), Poppy project: Open-source fabrication of 3D printed humanoid robot for science, education and art, *Digital Intelligence 2014*, 6.
5. Mick, S., Lapeyre, M., Rouanet, P., Halgand, C., Benois-Pineau, J., Paclat, F., Cattaert, D., Oudeyer, P., de Rugy, A., (2019), Reachy, a 3D-printed human-like robotic arm as a testbed for human-robot control strategies, *Frontiers in Neurorobotics*, 13, 65.
6. Juliani, A., Berges, V.-P., Teng, E., Cohen, A., Harper, J., Elion, C., Goy, C., Gao, Y., Henry, H., Mattar, M., (2018), Unity: A general platform for intelligent agents, *arXiv preprint arXiv:1809.02627*.
7. Garg, G., Kuts, V., Anbarjafari, G., (2021), Digital twin for fanuc robots: Industrial robot programming and simulation using virtual reality, *Sustainability*, 13(18), 10336.
8. Lakmazaheri, A., (2018), Software architecture for humanoid control: Review & guide. Virginia Tech.
9. Poppy Project. Documentation of the Poppy Project. <https://docs.poppy-project.org/en/>
10. Matulis, M., Harvey, C., (2021), A robot arm digital twin utilising reinforcement learning, *Computers & Graphics*, 95, 106-114.
11. Pang, B., Nijkamp, E., Wu, Y. N., (2020), Deep learning with tensorflow: A review, *Journal of Educational and Behavioral Statistics*, 45(2), 227-248.
12. Ramachandran, P., Zoph, B., Le, Q. V., (2017), Searching for activation functions, *arXiv preprint arXiv:1710.05941*.
13. Sharma, S., Sharma, S., Athaiya, A., (2017), Activation functions in neural networks, *Towards Data Sci*, 6(12), 310-316.
14. Kingma, D. P., Ba, J., (2014), Adam: A method for stochastic optimization, *arXiv preprint arXiv:1412.6980*.
15. Chicco, D., Warrens, M. J., Jurman, G., (2021), The coefficient of determination r-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation, *Peerj Computer Science*, 7, e623.
16. Cao, Z., Simon, T., Wei, S.-E., Sheikh, Y., (2017), Realtime multi-person 2D pose estimation using part affinity fields, *Proceedings of the Institute of Electrical and Electronics Engineers Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 7291-7299.
17. Urban, S. D., Adorno, B. V., (2020), Biped walking control based on quadratic programming and differential inequalities1, *Congresso Brasileiro de Automática-CBA*, 2(1).
18. Liu, Y., Xu, H., Liu, D., Wang, L., (2022), A digital twin-based sim-to-real transfer for deep reinforcement learning-enabled industrial robot grasping, *Robotics and Computer-integrated Manufacturing*, 78, 102365.
19. Ramasubramanian, A. K., Kazasidis, M., Fay, B., Papakostas, N., (2024), On the evaluation of diverse vision systems towards detecting human pose in collaborative robot applications, *Sensors*, 24(2), 578.



Bum Jin Kim

M.Sc. candidate in the Department of Smart Manufacturing Engineering, Changwon National University. His research interests are Digital twin, AI and Robot control technology

E-mail: 20237176@gs.cwnu.ac.kr



Seok Kim

He is an assistant professor in the department of Smart Manufacturing and department of mechanical engineering, Changwon National University. His research focuses on the development of a variety of advanced manufacturing with functional materials for energy, environmental, and biological applications.

E-mail: kimseok@changwon.ac.kr



Young Tae Cho

He is a professor in the department of mechanical engineering, Changwon National University. Research interests are imprint process, super-hydrophobic and precision manufacturing system.

E-mail: ytcho@changwon.ac.kr

반응표면법을 이용한 유도가열식 전기레인지 코일 형상 최적 설계 기법

Optimal Design Technique for the Shape of Induction Heating Electric Range Coil Using Response Surface Method

황순재¹, 이창연², 홍석무^{2,3,#}
Soonjae Hwang¹, Changyeon Lee², and Seokmoo Hong^{2,3,#}

¹ 공주대학교 대학원 미래융합공학과 (Department of Future Convergence Engineering, Graduate School, Kongju National University)
² 공주대학교 미래자동차공학과 (Department of Future Automotive Engineering, Kongju National University)
³ 공주대학교 그린카연구소 (Institute of Green Car Technology, Kongju National University)
Corresponding Author / E-mail: smhong@kongju.ac.kr, TEL: +82-41-521-9114
ORCID: 0000-0001-5569-6285

KEYWORDS: Induction heating (유도가열), IH electric range (IH 전기레인지), Electromagnetic field analysis (전자기장 해석), Thermal analysis (열 해석), Coupled analysis (연성 해석), Response surface methodology (반응표면법)

Induction heating is a technology that uses heat generated by resistance when a high-frequency current is applied to a coil. An electric range using this is called an Induction Heating (IH) electric range. IH electric ranges are being widely applied in commercial products recently because they have higher thermal efficiency performances than other methods. The performance of a heating coil of an IH electric range greatly varies depending on the shape and number of coils. Thus, research on optimal coil shape and number according to product shape is required. Therefore, this study aimed to design an optimal heating coil at the set temperature of an electric range product. Target temperature was set to the temperature that a commercial stainless-steel container could withstand. The thickness of the coil copper wire, the number of windings, the applied voltage, and the frequency were set as design variables. A sensitivity analysis was performed to check the influence of each design variable on coil temperature. Based on this, optimal design was performed using the response surface method. Electromagnetic field-thermal analysis was performed with the designed coil and a very approximate result was obtained with a 0.07% error from the set target temperature.

Manuscript received: February 20, 2024 / Revised: March 11, 2024 / Accepted: March 18, 2024

NOMENCLATURE

A	=	Magnetic Vector Potential [Tm]
B	=	Magnetic Flux Density [A/m ²]
D	=	Electric Flux Density [C]
E	=	Electric Field Intensity [V/m]
H	=	Magnetic Field Intensity [AT/m]
J	=	Current Density [A/m ²]
V	=	Scalar Potential [V]
μ	=	Magnetic Permeability [H/m]
σ	=	Conductivity [A/V]

1. 서론

코일에 고주파 전류를 인가했을 때 자기장의 크기가 변화하면서 유도 전류가 생성되며 이를 와전류라고 한다. 이때 철판에 와전류가 흐르게 될 경우 저항으로 인해 발열이 생기게 된다. 또한, 자기장으로 인해 철판 내부 자석들의 방향이 바뀌면서 발생하는 마찰로 손실이 발생하게 되는데 이를 히스테리시스 손이라 한다. 유도 가열이란 히스테리시스 손과 와전류 손으로 인해 발생하는 손실을 이용해 물체를 가열하는 기술이며 유도 가열을 전기레인지에 적용한 것을 유도 가열식(Induction Heating, IH) 전기레인지라고 한다. 현재 상용되고 있는 IH 전기레인지는 자기장을

생성하는 가열코일과 인가전압을 조절하는 내부 회로로 구성되어 있다. 핫플레이트식 및 하이라이트식과 같은 전기레인지의 55-65%의 열효율을 갖는 데 비해 IH 전기레인지는 약 90%의 열효율이 나오며 화구에 출력을 집중할 수 있어 다른 방식의 전기레인지보다 가열 속도가 빠르다[1]. 게다가 IH 전기레인지용 조리기구는 전도체이면서 오래 사용 가능해야 하므로 보통 스테인리스 400 계열의 소재가 사용된다. 그러나 스테인리스 400 계열로 이루어진 용기는 타 소재로 이루어진 용기에 비해 열에 취약한 치명적인 단점이 있다. 그럼에도 불구하고 높은 열효율이라는 큰 장점으로 인해 IH 전기레인지는 점진적으로 더 많이 사용되고, 더 높은 출력과 열효율을 내기 위해 다양한 연구가 진행되고 있다.

Kim 등은 알루미늄, 구리 소재를 이용한 다양한 두께의 용기를 가열이 가능한 IH 전기레인지 설계를 제시하였다. 그 결과 가장 높은 효율을 보이는 용기를 선정하였으나 IH 전기레인지의 다양한 변수 중 온도 변화만을 선정하여 기존 모델과 개선점을 비교했으므로 다양한 변수를 고려한 최적 설계가 필요하다[2]. Lim은 IH 전기레인지의 다양한 변수가 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 그 결과 각 변수가 인덕션 전기레인지에 미치는 영향은 파악할 수 있었지만, 데이터를 이용한 구조적 개선을 진행하지는 않아 개선 설계가 필요하다[3].

따라서, 본 연구에서는 코일의 형태에서 변경이 가능한 요소를 변수로 선정 후 반응표면법을 통해 IH 전기레인지의 최적 설계기법을 제시하였다. 특히 내부 회로가 코일에 가하는 전압 및 주파수 그리고 주요 가열 부품인 가열코일의 형태와 권선수를 변수로 설정하였다. 이를 바탕으로 각 변수 사이의 교호작용을 고려하여 동일한 전류를 인가했을 때 높은 온도를 낼 수 있는 성능을 가진 IH 전기레인지를 설계했다. 이를 통해 기존 IH 전기레인지보다 동일한 화구 크기에서 더 높은 열을 낼 수 있는 IH 전기레인지를 설계하였다. IH 전기레인지 용기의 소재로 사용되는 STS 430은 300°C를 초과하는 온도에서 변형이 발생한다[4]. 따라서, 용기 온도가 300°C를 넘지 않기 위한 코일의 권선 수와 구리선의 두께, 인가되는 전압 및 주파수에 대하여 최적 설계를 진행하였다. 또한, 민감도 분석을 통해 최적 설계변수들이 가열된 용기의 온도에 영향을 주는 정도를 파악했으며, 스크리닝을 통해 주요 설계변수 수를 줄인 후 실험계획을 수립하였다. 이후 반응표면법을 통해 설정한 설계 목표에 가장 근사한 값을 내는 설계변수 값을 도출하였고, 이를 바탕으로 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS를 이용해 전자기장-열 연성 해석을 수행하였다[5,6]. 유한요소해석 결과를 통해 내열 온도에 가장 가까운 온도가 발생하는 코일의 형태와 전압 및 주파수 인가 조건을 설계하였다.

2. 본론

2.1 전자기장 이론

본 연구에 사용된 전자기장 해석 프로그램 ANSYS Maxwell은 Maxwell 방정식을 이용하여 전자기장을 계산하고 최종적으로는

식(1)을 이용해 유도된 와전류로 인해 발생하는 Joule Heating을 예측한다. 전자기장 분포에 관한 지배방정식은 다음 식(2)부터 식(5)로 표현된다.

$$\frac{1}{\mu} \nabla \times \nabla \times A - \sigma \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial E}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (3)$$

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (4)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (5)$$

고주파 영역에서 식(3)의 변위 전류항을 무시할 수 있으며, 이때 식(6)의 옴의 법칙을 식(3)에 대입하여 정리하면 식(7)과 같다.

$$J = \sigma E \quad (6)$$

$$\nabla \times H - \sigma E = 0 \quad (7)$$

한편 자기벡터 포텐셜 A와 전기 스칼라 포텐셜 V를 도입하면 자속밀도와 전기장의 세기는 식(8)과 식(9)와 같이 표현된다.

$$B = \nabla \times A \quad (8)$$

$$E = -\frac{\partial A}{\partial t} - \nabla V \quad (9)$$

고주파 가열의 경우 교류 전원에 대한 해석이므로 전기 스칼라 포텐셜 V의 영향을 무시하고 식(10)과 식(9)를 식(7)에 대입하면 식(1) 이를 사용하여 전자기장 해석이 수행 가능하며, 피가열체에 가해진 Joule Heating을 계산할 수 있다[7].

2.2 유한요소해석

2.2.1 재료의 기계적 성질

IH 전기레인지의 코일 및 용기에 사용된 소재 물성은 Table 1에 나타냈다[8]. Copper 소재 코일을 사용했으며, 코일을 받치고 있는 코어는 Ferrite를 적용하였고, 용기는 Stainless Steel이 사용된다. 용기에 사용된 Stainless Steel은 자성이 필요하기 때문에 400 계열인 STS 430을 사용한다. 이때 전용 소재로 이루어진 용기를 사용하지 않을 경우 열 효율이 떨어져 성능 감소로 이어질 수 있다.

2.2.2 해석 모델링

IH 전기레인지의 가열 프로세스를 구현하기 위해 연성 해석을 수행했으며 이때 사용된 모델은 3차원 CAD 프로그램 CATIA V5를 사용하여 모델링하였다. 본 연구에서는 코일로 인한 용기의 가열 프로세스에 집중하여 진행하였으므로 내부 회로는 생략하여 진행하였다. 코일은 고주파 전류에 의해 발생하는

Table 1 Material properties of FE simulation

	Copper	Ferrite	STS 430
Bulk conductivity	6E+07	0.01	1E+06
Relative permeability	0.999	12	1
Mass density [W/m°C]	400	4,600	8,055
Thermal conductivity [kg/m³]	8,933	4	13.8
Specific heat [J/kg°C]	385	750	480
Thermal expansion coefficient [1/°C]	1.77E-05	1.00E-05	1.08E-05

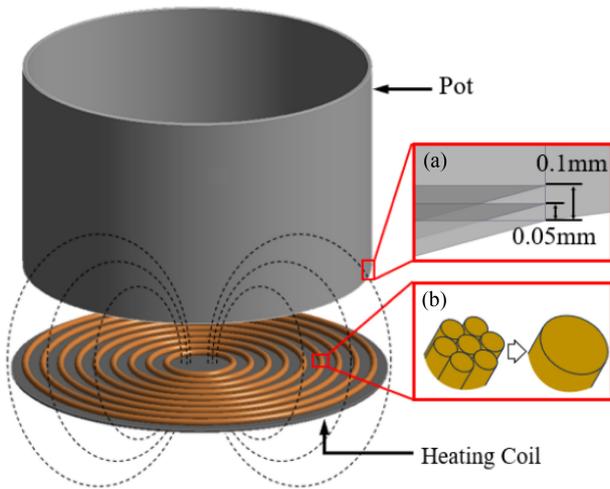


Fig. 1 Assembly of IH Electric Stove (a)Skin effect modeling (b)Copper wire modeling

표피효과(Skin Effect)로 인한 저항 손실을 최소화하기 위하여 단일 선이 아닌 연선 형태로 제작된다[9]. 표피효과란 교류전류를 이용할 때 주파수가 증가하면 전류의 밀도가 도체의 겉 둘레에 몰리게 되고 이때 도체의 유효면적이 감소하여 전송 손실이 증가하는 현상을 의미한다[10].

본 연구에 사용된 모델은 해석상 영향이 미미할 것으로 판단되어 Fig. 1의 (B)와 같이 여러 선으로 겹친 복잡한 형태를 단일 선으로 단순화했으며 Fig. 2의 하단부에 Ring 형태를 여러 개 나열한 형태로 모델링하였다. 코일을 고정하는 역할인 코어 또한 단순한 원판 형태로 모델링하였으며, 용기의 경우 Fig. 1의 상단부와 같이 상용 스테인리스 용기와 유사한 형태로 3 mm 두께를 가진 중앙이 파인 원통형으로 모델링하였다. 각 모델링간 간격은 접촉에 가까운 형태인 0.1 mm 간격을 두고 배치하였다. 용기 모델링 시 표피(Skin Effect)를 고려하기 위해 Fig. 1 (a)와 같이 용기의 하부 단면으로부터 Z축을 기준으로 0.05 mm씩 간격을 두고 면을 생성하였다.

2.3 민감도 분석 및 설계 정식화

민감도 분석(Sensitivity Analysis)이란 설정한 설계변수들의 변화가 목적함수에 끼치는 영향을 파악할 때 사용된다. 설계변수의 영향도는 수치상으로 표현할 수 있으며 파레토 차트(Pareto Chart)로

Table 2 Objective function and design variables

Object function	Max temperature of pot [°C]	Y1 ≤ 300
Design variables	Coil thickness [mm] = X1	2.5 ≤ X1 ≤ 10
	Number of turns [-] = X2	6 ≤ X2 ≤ 11
	Current [A] = X3	40 ≤ X3 ≤ 160
	Adaptive frequency [kHz] = X4	40 ≤ X4 ≤ 200

Table 3 Design of experiment (DOE)

No.	Design variable = X1,X2,X3,X4				Object function = Y1
	X1	X2	X3	X4	Y1
	Normalized coil thickness [mm]	Normalized no. of turns [-]	Normalized current [A]	Normalized adaptive frequency [kHz]	Normalized max. temperature [-]
1	0.25	0.55	0.25	0.2	0.06
2	1	0.55	0.25	0.2	0.05
3	0.25	1	0.25	0.2	0.09
4	1	1	0.25	0.2	0.07
5	0.25	0.55	1	0.2	0.3
6	1	0.55	1	0.2	0.24
7	0.25	1	1	0.2	0.37
8	1	1	1	0.2	0.35
9	0.25	0.55	0.25	1	0.1
10	1	0.55	0.25	1	0.09
11	0.25	1	0.25	1	0.15
12	1	1	0.25	1	0.11
13	0.25	0.55	1	1	0.58
14	1	0.55	1	1	0.37
15	0.25	1	1	1	1
16	1	1	1	1	0.63

나타낼 수 있다. 이는 각 변수의 수치가 클수록 목적함수에 끼치는 영향이 크다는 것을 의미한다[11]. 용기의 소재가 견딜 수 있는 내열 온도인 300°C를 목표로 설계변수를 판별하였다. 설계변수는 코일의 구조적으로 변경이 가능한 권선 수와 두께, 변경이 가능한 전압과 주파수를 설계변수 X1, X2, X3 그리고 X4로 지정하였다. 또한 Table 2에 설계변수 범위를 나타내었다.

각 설계변수가 용기의 온도를 변화시키는 정도를 파악하기 위해 4요소 2수준으로 총 16번의 민감도 해석을 수행하였다. 해석 결과를 정규화(Normalization)하여 Table 3에 나타내었으며 이를 통해 얻은 파레토 차트를 Fig. 2에 나타내었다. 정규화는 기존값을 최댓값으로 나누어 진행했다. 이때 오차가 생길 확률인 유의 수준은 0.05를 사용하였으며 이를 통해 결정된 요인의 효과 크기는 2.015로 설정하였다. X = 2.015 그래프를

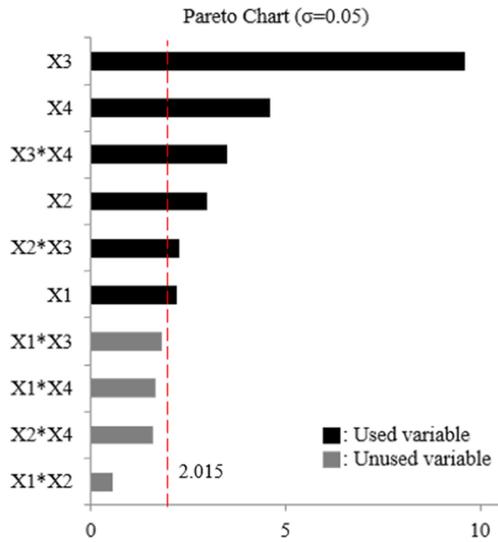


Fig. 2 Sensitivity analysis – Pareto chart

기준선으로 넘지 못하는 값은 통계적으로 유의미하지 못한 값으로 판단하여 스크리닝(Screening)을 통해 제거 후 반응표면법을 진행하였다. 민감도 분석 결과 설계변수 X3의 영향이 31.6%로 가장 크게 나타났으며, X1×X2, X1×X3, X1×X4 그리고 X2×X4의 변수가 유의미한 기준을 만족하지 못하였다. 따라서 앞선 4가지 변수를 제거하고 반응표면법을 진행하였다.

2.4 반응표면법

민감도 분석을 바탕으로 설계변수들이 목적함수에 영향을 주는 것을 확인했고 이를 통해 목적함수와 설계변수들의 함수적인 관련성을 알아내고자 수학적 모형을 가정하는 방법을 회귀분석(Regression Analysis)이라고 한다. 이러한 회귀 분석을 통해 설정된 설계변수 범위 내의 목적함수의 경향을 예측할 수 있다. 반응표면법(Response Surface Method, RSM)은 일반적인 선형 회귀모델보다 더 좋은 반응의 근사치를 만들기 위해 곡선 형태의 회귀모델을 도출해 오차를 줄일 수 있는 회귀분석 방법이다[12]. 본 연구에서는 앞서 설정한 설계변수를 각 X1, X2, X3, X4로 나타냈고 이를 중심 합성계획법을 통해 Full Factorial로 성형해석을 진행했으며 Table 4에 나타냈다. 이를 통해 얻은 반응표면법의 회귀 모델 식(10)을 나타냈다.

$$\begin{aligned}
 Y = & 1.049 - 0.798(X1) - 1.802(X2) - 0.734(X3) - 0.378(X4) \\
 & + 0.512(X1 * X1) + 1.082(X2 * X2) + 0.288(X3 * X3) \quad (10) \\
 & + 0.243(X4 * X4) + 0.830(X2 * X3) + 0.557(X3 * X4)
 \end{aligned}$$

해당 예측 식의 타당성을 검토하고자 결정계수를 사용하였다. 결정계수는 0-100%의 값을 나타내며 100%에 가까워질수록 예측함수의 결과가 유효함을 뜻한다. 본 연구에서 97.85%로 회귀식의 일반적인 신뢰성 기준인 97% 이상을 만족한다[13]. 예측식을 바탕으로 각 변수의 목적함수에 대한 반응을 2D 그래프를

Table 4 Comparison of simulation and RSM

No.	Design variable = X1,X2,X3,X4				Object function = Y1
	X1 Normalized coil thickness [mm]	X2 Normalized no. of turns [-]	X3 Normalized current [A]	X4 Normalized adaptive frequency [kHz]	Normalized max. temperature [°C]
1	0.25	0.55	0.25	0.20	0.06
2	1.00	0.55	0.25	0.20	0.04
3	0.25	1.00	0.25	0.20	0.09
4	1.00	1.00	0.25	0.20	0.08
5	0.25	0.55	1.00	0.20	0.32
6	1.00	0.55	1.00	0.20	0.10
7	0.25	1.00	1.00	0.20	0.59
8	1.00	1.00	1.00	0.20	0.45
9	0.25	0.55	0.25	1.00	0.17
10	1.00	0.55	0.25	1.00	0.02
11	0.25	1.00	0.25	1.00	0.21
12	1.00	1.00	0.25	1.00	0.07
13	0.25	0.55	1.00	1.00	0.65
14	1.00	0.55	1.00	1.00	0.51
15	0.25	1.00	1.00	1.00	1.00
16	1.00	1.00	1.00	1.00	0.85
17	0.63	0.82	0.63	0.60	0.07
18	0.63	0.82	0.63	0.60	0.07
19	0.63	0.82	0.63	0.60	0.07
20	0.63	0.82	0.63	0.60	0.07
21	0.25	0.82	0.63	0.60	0.34
22	1.00	0.82	0.63	0.60	0.26
23	0.63	0.55	0.63	0.60	0.20
24	0.63	1.00	0.63	0.60	0.33
25	0.63	0.82	0.25	0.60	0.09
26	0.63	0.82	1.00	0.60	0.45
27	0.63	0.82	0.63	0.20	0.20
28	0.63	0.82	0.63	1.00	0.33
29	0.63	0.82	0.63	0.60	0.07
30	0.63	0.82	0.63	0.60	0.07

작성하여 Fig. 4에 나타내었다. 이를 통해 X1은 Y1에 반비례하는 경향을 보이며 X2, X3 그리고 X4는 Y1에 비례하는 경향을 보이는 것을 확인하였다. 앞선 결과들을 통해 변수들과 Y1간 관계를 3차원 그래프로 작성하였으며 Fig. 4에 나타내었고 Y1과 각 변수의 관계를 통해 목적함수에 부합하는 최적 설계변수를 Table 5 정리하였다.

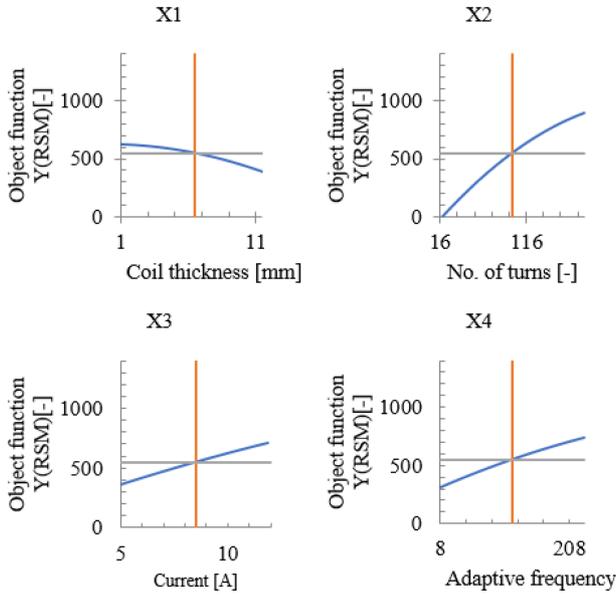


Fig. 3 Relationship between object function and design variable

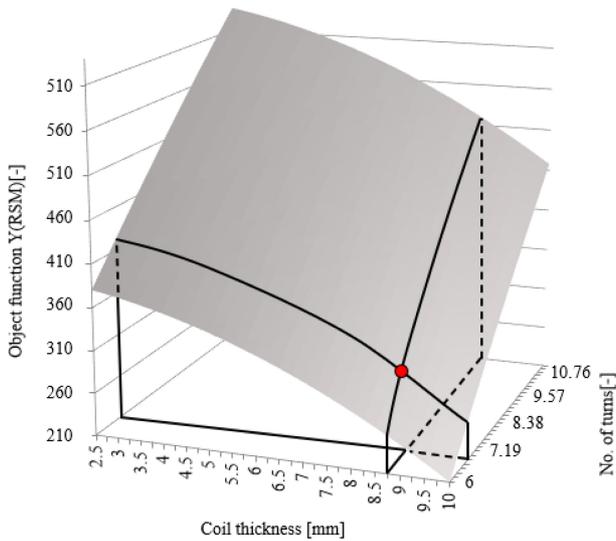


Fig. 4 Relationship between coil thickness and no. of turns

Table 5 Optimized design variables

Design variable	Value
Coil thickness = X1 [mm]	8.5
No. of turns = X2 [-]	6.4
Current = X3 [A]	99.5
Adaptive frequency = X4 [kHz]	119.8

2.5 전자기장-열 연성 해석

앞서 도출한 변수 Table 5를 바탕으로 전자기장-열 해석을 진행하였다. 먼저 전자기장 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS Maxwell을 이용해 저항 손실을 계산하였으며 이를 입력 데이터로 열 유한요소 해석 프로그램 ANSYS Icpak에서 용기의 온도를

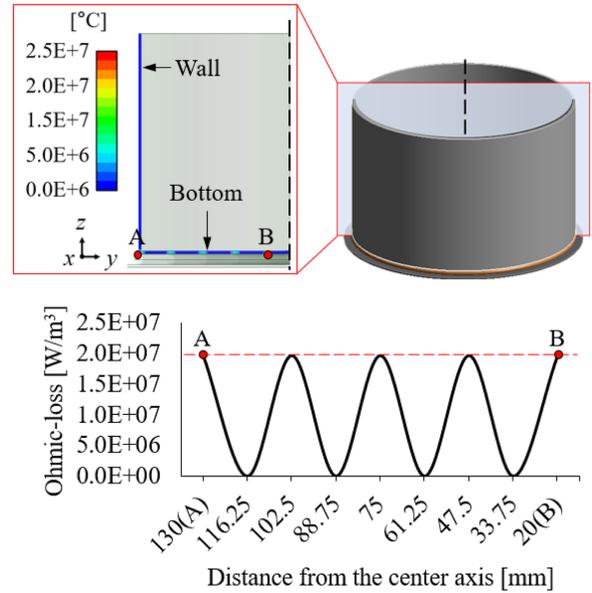


Fig. 5 Temperature distribution of FE result and ohmic loss according to distance from the center axis

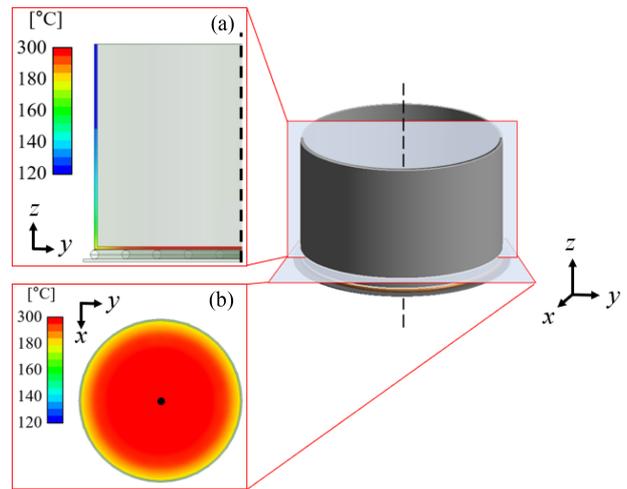


Fig. 6 Optimization result of pot's temperature (a) wall (b) bottom

구하였다[14]. 우선 진행한 전자기장 해석 결과는 Fig. 5에 나타내었다. 각 코일에서 발생한 자기장으로 인해 저항 손실 영역이 발생한다. 이는 Fig. 5와 같이 최대 2.76E+7 W/m³의 저항 손실이 발생하였다. 코일에 가까울수록 높은 손실률을 보였으며 표 면에서 멀어질수록 손실률이 낮아지는 값을 나타냈다. 이는 2.1에서 언급한 표피효과로 인해 발생한 경향으로 판단된다. 또한 Fig. 5 하단 그래프에서 나타내듯 모든 코일과 접촉되는 면의 최대 저항 손실률은 모두 동일한 값으로 나타났다.

저항 손실은 식(7)과 같이 전기에너지가 열에너지로 치환되어 열이 발생하게 된다. 따라서 앞선 저항 손실 값을 입력데이터로 활용하여 열 해석을 진행하였고 해당 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 열 해석 결과 그릇의 하단부에서 최대 299.8°C가 나타났다. 이는 용기의 내열 온도인 300°C와 0.07% 차이로 근사하다.

온도의 분포 경향은 Figs. 6(a)와 6(b)와 같이 하단부에서 상단부로 갈수록 중심에서 바깥으로 갈수록 온도가 점진적으로 감소하는 경향을 보였다. 이는 저항 손실영역이 가장 많이 중첩되는 곳이 하단부 중앙이기 때문에 발생한 경향으로 판단된다. 본 연구를 통해 IH 전기레인지용 내열 온도 내에서 최대 온도가 발생하는 코일의 형상 및 경계 조건이 제시되었다.

3. 결론

본 연구에서는 반응표면법을 통해 상용 스테인리스 용기가 견딜 수 있는 최적의 가열 코일 형태와 코일 수를 설계하였다. 또한 설계한 코일을 검증하기 위해 가열 프로세스를 전자기장-열 연성 해석을 통해 구현하였다.

1) 구리선의 두께, 권선 수, 인가전압 및 주파수가 코일을 통해 가열된 용기 온도에 주는 영향도를 파악하였으며 이를 통해 가열 코일은 인가전압의 영향을 가장 크게 받음을 확인하였다.

2) 민감도 해석으로부터 설계변수를 선정하고, 상용 스테인리스 용기의 내열 온도를 목표로 삼아 반응 표면법을 진행하였다. 그 결과 구리선 두께 7.2 mm, 권선 수 5개인 코일에 118.5 A, 33.9 kHz를 인가하는 것이 최적의 조건으로 도출되었다.

3) 최적의 코일의 형태 및 조건으로 전자기장-열 연성 해석을 수행하였다. 해석 결과 내열 온도와 0.07% 차이로 근사했다. 따라서 제품 설계 시, 제한된 프로세스를 통해 시뮬레이션으로 최적의 코일 형태와 조건을 구축할 수 있을 것으로 기대된다.

REFERENCES

- Sweeney, M., Dols, J., Fortenbery, B., Sharp, F., (2014), Induction cooking technology design and assessment, Small, 800(5).
- Kim, M. J., Um, D. Y., Lee, H. Y., Kang, D. H., Park, G. S., (2021), A study on the All-Metal Induction Range in Home application, Proceedings of the Korean Institute of Electrical Engineers Conference, 142-144.
- Im, S. H., (2021), A Study on the effect of the component of induction range, Proceedings of the Korean Institute of Electrical Engineers Conference, 162-163.
- Mitsuri Media, Experts explain the heat resistance temperature of stainless steel by type. <https://mitsu-ri.net/articles/stainless-steel-heat-resistant-temperature>
- Ansys, ANSYS Innovation courses Maxwell. <https://courses.ansys.com/>
- Sohn, D.-H., Seo, Y.-S., Park, K., (2010), Three-dimensional finite element analysis of the induction heating procedure of an injection mold, Transactions of Materials Processing, 19(3), 152-159.
- Kim, S. M., Moon, J. I., Cho, I. K., Yoon, J. H., Byun, W. J., (2014), The technical trend and future direction of wireless power transmission, Electronics and Telecommunications Trends, 29(3), 98-106.
- Material property data for engineering materials. <https://www.ansys.com/content/dam/amp/2021/august/webpage-requests/education-resources-dam-upload-batch-2/material-property-data-for-eng-materials-BOKENGEN21.pdf>
- Lee, I., Tak, S., Park, I., Lee, S., (2017), Comparative study on numerical analysis using co-simulation and experimental results for high frequency induction heating on SCM440 round bar, Journal of Aerospace System Engineering, 11(3), 1-7.
- Ku, B.-M., Kim, T.-H., Park, J.-S., (2021), Determination of the temperature coefficient of the constitutive equation using the response-surface method to predict the cutting force, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, 20(10), 9-18.
- Lee, C., Hong, S., (2018), Curvature area prediction for the deep drawing-ironing process of a cylindrical cup using finite element method and regression analysis, Journal of Mechanical Science and Technology, 32, 5913-5918.
- Gu, B.-J., Hong, S.-M., (2019), Numerical approach to optimize piercing punch and die shape in hub clutch product, Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, 20(9), 517-524.
- George, D., Mallery, P., (2003), SPSS for Windows step by step: A simple guide and reference. 11.0 update (4th Ed.). Boston: Allyn & Bacon.
- Ansys, ANSYS Innovation courses Icepak, <https://courses.ansys.com/>



Soonjae Hwang

M.S. candidate in the Department of Future Convergence Engineering, Kongju National University. His research interest is FEA.
E-mail: krsoonjae@naver.com



Changyeon Lee

B.S. candidate in the Department of Future Automotive Engineering, Kongju National University. His research interest is FEA.
E-mail: plump2001h@naver.com



Seokmoo Hong

Professor in the Department of Future Automotive Engineering, Kongju National University. His interest are Metal Sheet Forming and Forging, FEA, Optimizing.
E-mail: smhong@kongju.ac

창간

(사)한국정밀공학회에서 발행한 한국정밀기계학회지는 1984년 6월에 창간되었다. 이후 1985년 12월, 학술지명을 한국정밀공학회지로 변경하였다.

목적 및 연구 범위

한국정밀공학회지는 정밀공학 및 제조와 관련된 독창적 연구 논문을 게재하는 것을 목표로 한다. 구체적으로는 모든 학문분야나 산업분야에서 독창적인 아이디어의 실험적인 구현과정 및 제조과정에서의 반복정도, 신뢰성, 운동정밀도 및 측정정밀도에 영향을 미칠 수 있는 각 종 현상에 대하여, 기계공학적 또는 다학제적 접근방식으로 창의적인 실험, 해석 및 모델링 예측 등 한층 심화된 연구로 궁극적으로는 기계 및 생산공정의 정밀도향상에 기여하는 데 초점을 맞춘다, 연구범위로는 정밀가공, 정밀측정, 로봇제어자동화, 스마트생산시스템, 설계 및 재료, 공작기계, 나노마이크로기술, 바이오헬스, 적층제조시스템, 녹색생산기술 분야 등 정밀공학 관련분야를 포함하며 다른 간행물에 발표되지 않은 논문이어야 한다.

금액

구독료

이 논문집은 우리학회 회원에 한하여 무료로 제공됩니다.

게재료

- 기본면수 8면: 200,000원, 8면 초과 시 1면 당 30,000원으로 가산
- 용역 또는 지원금(Acknowledgement)으로 작성된 논문은 게재료의 50% 가산
- 게재료는 게재 확정 된 논문으로서, 용역 또는 지원금(Acknowledgement)으로 작성된 논문에만 한하여 청구
- 청구 후 15일 이내에 납부

연락처

[04508] 서울 중구 중림로 50-1, SKY1004빌딩 12층

전화 02-518-2928 / 팩스 02-518-2937 / paper@kspe.or.kr / https://www.kspe.or.kr

한국정밀공학회지 논문투고 및 심사: https://article.kspe.or.kr

한국정밀공학회지 저널: http://jkspe.kspe.or.kr

한국정밀공학회지 논문투고 및 게재규정 · 논문집필요령

논문투고 및 게재규정

제1조 (목적)

이 규정은 사단법인 한국정밀공학회(이하 '학회'라 한다)의 국문학술지(한국정밀공학회지, 이하 '학회지' 또는 'JKSPE'라 한다) 논문의 투고 및 게재에 대한 사항을 규정함을 목적으로 한다.

제2조 (투고자)

투고논문의 교신저자 및 제1저자는 학회 회원이어야 한다. 단, 편집장이 특별히 인정하는 자는 예외로 할 수 있다.

제3조 (책임 및 윤리규정 준수)

- ① 투고논문의 책임은 저자(들)에게 있다.
- ② 투고논문에 대하여 모든 저자들은 '(사)한국정밀공학회 학술활동 윤리규정'을 준수하여야 한다. 학술활동 윤리규정을 위반할 경우 편집장은 논문의 게재를 불허 또는 취소할 수 있으며, 규정에 따라 징계할 수 있다.

제4조 (연구범위)

논문의 연구범위는 정밀가공, 정밀측정, 로봇제어자동화, 스마트생산시스템, 설계 및 재료, 공작기계, 나노마이크로기술, 바이오헬스, 적응제조시스템, 녹색생산기술 등 정밀공학 관련분야로 하며 다른 간행물에 발표되지 않은 논문이어야 한다.

제5조 (투고 구분)

학회지에 투고되는 논문은 아래와 같이 구분하며, 기본면수는 8면 이내로 하되 내용에 따라 초과할 수 있다.

- ① 일반논문: 학술성 또는 실용성이나 응용성이 우수한 논문
- ② 특집논문: 별도로 규정된 특집논문 규정에 따라 작성된 논문
- ③ 기타투고: 전망, 해설, 강좌, 기타 원고 등

제6조 (접수)

- ① 논문은 수시로 접수하며 접수일은 학회에 접수절차가 완료된 일자로 한다.
- ② 논문은 학회에서 규정한 원고작성양식(Template)에 따라 작성한 후 등록 제출한다.
- ③ 이 규정과 '논문집필요령'에 위배되는 원고는 접수하지 않을 수 있다.
- ④ 접수된 원고는 반환하지 않는다.

제7조 (심사 및 게재 결정)

- ① 논문의 게재여부는 학회지 편집장이 결정한다.
- ② 논문의 심사는 학회지 편집장, 편집인, 또는 편집위원이 추천한 2인의 심사위원회에 의해 진행되며 심사 및 게재여부 판정 절차는 논문심사규정에 따른다.

제8조 (저작권)

- ① 논문내용에 대한 책임은 저자(들)에게 있다.
- ② 저자(들)는 제출된 논문의 저작권을 학회에 양도하여야 하며, 이를 위해 교신저자는 '한국정밀공학회지 연구윤리 및 저작권 동의서(Research Ethics and Copyright Transfer Agreement)'를 제출하여야 한다.
- ③ 게재된 논문 및 기타 투고물의 저작권은 학회에 있으며, 학회의 승인 없이 무단으로 복제할 수 없다.
- ④ 저자(들)는 자신(들)의 다른 연구물에 학회지에 게재된 논문 및 기타투고물의 일부를 사용할 수 있으나, 그 내용의 출처로 게재 논문을 인용해야 한다.

제9조 (자료공개)

학회는 논문 및 기타 투고물을 인쇄물과 온라인 출판물 등의 형태로 공개할 수 있다.

제10조 (원고작성요령)

- ① 학회에 투고하는 원고의 작성방법 및 편집은 별도로 규정된 '논문집필요령'에 따른다.
- ② 편집위원회는 채택된 원고에 대하여 용어, 문자, 맞춤법 등을 '논문집필요령'에 부합되도록 수정할 수 있다.

제11조(게재료)

저자는 학회지에 게재된 논문에 대하여 소정의 게재료를 납부하여야 한다. 규정면수를 초과한 논문의 경우 초과 면에 대한 게재료를 납부하여야 한다. 게재료는 이사회에서 결정한다.

한국정밀공학회지 논문투고 및 게재규정 · 논문집필요령

논문집필요령

1. 논문원고를 투고할 때는 한국정밀공학회지 양식에 맞춰 <https://article.kspe.or.kr/>로 온라인 투고한다.
2. 논문의 구성은 다음 순서로 함을 원칙으로 한다.
 - (1) 제목, (2) 영문제목, (3) 저자명, (4) 영문저자명, (5) 소속(국·영문 병기) 및 교신저자 정보, (6) Keywords,
 - (7) 초록, (8) 투고일자, (9) 서론, (10) 본론(이론해석, 실험방법, 결과, 토론, 고찰), (11) 결론, (12) 후기,
 - (13) 참고문헌, (14) 부록 기타, (15) 모든 저자의 소속·직위 등의 정보
3. 논문 원고는 한글 또는 영문 전용 및 한글과 영문 혼용, 한글과 한자 혼용으로 작성하고 용어의 의미가 난해할 경우는 () 안에 원어를 병기하도록 한다.
4. 논문의 제목은 10 단어 이내로 간결하게 표시해야 하고 Keywords는 영문(괄호 안에 국문)으로 6 단어 이내로 작성한다.
5. 논문이 한글 혹은 한자 혼용일 때는 한글로 제목을 표시한 다음 영문으로 제목을 작성한다. 이어서 저자명을 국·영문 병기로 작성한다. 다음에 초록과 Keywords를 삽입하여야 하며 초록은 영문 200 단어 이내로 작성한다. 초록에는 도표, 참고문헌 표시가 있어서는 안되며 한문단(Paragraph)으로 서술한다.
6. 표 및 그림은 영문(Table 1, Fig. 1...)으로 하고 번호순에 따라 본문중에 그 위치를 표시하고 설명을 병기해야 한다.
7. 숫자는 아라비아 숫자를 사용하며 수량단위는 SI 단위 사용을 원칙으로 한다.
8. 인용 및 참고문헌의 색인번호를 본문의 인용처에 반드시 기입하고, 인용순서대로 다음과 같이 표시 한다.
 - (1) 본문 중 인용 시: 대표저자의 성씨 뒤에 대괄호를 사용하여 일련번호를 쓴다.
예) Hong [1]은, Chandran [3]에 의하여
 - (2) 참고문헌 표기 시 영문으로 작성한다.
단행본일 경우: 저자, (년도), 제목, 출판사.
정기간행물인 경우: 저자, (년도), 제목, 저널명, 권(호수), 페이지.
예) Hong, K. D., (2022), A method to investigate mechanical properties, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 39(1), 1-18.
9. 부록은 본문 전체 서식과 동일

한국정밀공학회지 논문심사규정

제1조 (목적)

이 규정은 사단법인 한국정밀공학회(이하 '학회'라 한다) 국문학술지(한국정밀공학회지, 이하 '학회지' 또는 'JKSPE'라 한다) 투고된 논문의 심사와 관련된 사항을 규정함을 목적으로 한다.

제2조 (투고 및 접수)

- ① 학회지에 투고하고자 하는 자는 별도로 규정된 학회의 투고 규정에 따라 작성된 논문을 학회의 논문제출시스템을 이용하여 투고하며 학회는 이를 접수한다.
- ② ①항의 규정에도 불구하고, 학회지 편집장이 인정하는 경우에 한하여 기타의 방법으로 논문 투고 및 접수를 진행할 수 있다.
- ③ 학회의 연구 분야와 관련된 주제의 논문 접수를 원칙으로 한다. 투고된 논문이 학회의 연구 분야와 관련이 없거나 논문의 기본 요건이 갖추어져 있지 않은 경우 편집장은 논문의 접수를 거절할 수 있다. 연구 분야는 별도로 규정된 '논문투고 및 게재규정'과 '논문집필요령'에 따른다.

제3조 (심사위원 선정)

- ① 학회지 편집장은 접수된 논문의 분야를 고려하여 해당분야 학회지 편집인에게 심사 배정하며, 학회지 편집인은 부문별로 선정된 학회지 편집위원 중 1인을 심사주관 편집위원으로 위촉한다.
- ② 심사주관 편집위원은 접수된 논문의 심사에 적절하다고 판단되는 심사위원을 선정하여 편집장에게 추천한다.
- ③ 심사위원의 수는 논문 1편당 2인으로 하되 제3심사위원이 위촉될 수 있고, 이 경우를 포함하여 논문 1편당 최대 3인으로 한다. 심사위원으로는 논문저자와 소속이 다른 위원을 위촉함을 원칙으로 한다.
- ④ 편집장은 추천 받은 위원에게 논문심사 수락여부를 확인하기 위한 이메일을 송부한다. 추천 받은 위원 중 심사거부 의사를 표시한 위원이 있는 경우 편집위원에게 심사위원 재추천을 요청한다.

제4조 (심사 방법)

- ① 심사위원은 논문의 종합평가 후 객관적인 근거를 들어 심사결과를 기술해야 하며, 필요 시 수정요구를 명확하게 해야 한다.
- ② 심사결과는 '채택가(Accept)', '수정 후 채택(Accept Subject to Minor Revisions)', '수정 후 재심(Re-Review after Major Revisions)', '채택불가(Reject)' 중 선택한다.

제5조 (심사 기간)

- ① 학회지의 편집위원은 편집위원 위촉일로부터 7일 이내에 심사위원을 선정하고, 논문심사를 의뢰 받은 심사위원은 제1차 심사의 경우 심사수락일로부터 14일 이내, 제2차 심사인 경우 7일 이내에 심사를 완료하여야 한다.
- ② 편집인 및 편집위원의 판정은 심사결과 접수일로부터 7일 이내에 완료하여야 한다.
- ③ 심사위촉 후 14일이 지나도록 심사수락을 하지 않는 경우에는 다른 심사위원으로 변경할 수 있다.
- ④ 심사위원의 심사수락 후 1개월이 지나도록 심사가 완료되지 않은 경우에는 편집인 또는 편집위원이 심사위촉을 철회할 수 있다.
- ⑤ 상기의 규정에도 불구하고 논문접수일로부터 3개월이 소요된 시점까지 심사결과가 접수되지 않은 경우 다음과 같이 시행할 수 있다.
 1. 심사위원 중 1인의 심사결과가 접수되지 않은 경우: 해당논문의 편집위원이 3개월 소요 시점으로부터 7일 이내에 심사한다.
 2. 심사위원 2인의 심사결과가 모두 접수되지 않은 경우: 해당논문의 편집인 및 편집위원이 3개월 소요 시점으로부터 7일 이내에 심사한다. 단, 편집인이 편집위원을 겸한 경우 편집인 1인의 심사만으로 심사절차를 진행한다.

제6조 (저자수정기한)

- ① 저자는 학회지 편집장의 심사결과 판정에 따른 논문수정요구를 반영한 수정 논문을 접수일로부터 수정 후 재심일 경우 30일 이내, 수정 후 채택일 경우 14일 이내에 재제출하여야 한다.
- ② 수정논문 접수가 제출 마감일로부터 60일 이상 지체될 경우 편집위원회는 논문을 철회할 수 있으며, 저자가 그 이후 계속 심사를 받기 원할 경우 다시 투고 하여야 한다.

제7조 (게재 판정)

- ① 논문게재여부는 심사위원 2인의 심사결과를 검토하여 해당논문의 학회지 편집인 및 편집위원의 종합평가를 받아 학회지 편집장이 최종 결정한다.
- ② 심사위원 2인 이상이 '채택불가' 판정 한 논문은 학회지에 게재 할 수 없다.

제8조 (특집논문심사)

- ① 학회지 편집장은 특집논문을 주관할 책임편집인을 학회 임원의 추천을 받아 위촉한다.
- ② 책임편집인이 학회 이사 또는 부문화장인 경우, 책임편집인의 주관으로 접수된 논문에 대해 2인의 심사위원을 선정하여 심사하며 게재의 판정은 이 규정 제7조에 따른다. 책임편집인이 학회 이사 또는 부문화장이 아닌 경우, 편집위원회에서 논문심사를 담당할 편집인을 선정하여 논문 심사를 주관하도록 한다.

한국정밀공학회지 논문심사규정

제9조 (비밀유지)

- ① 심사위원은 누구에게도 밝히지 아니한다.
- ② 저자의 이름은 심사위원에게 밝힐 수 있다.
- ③ 심사내용은 저자 이외에는 밝히지 아니한다.

제10조 (이의제기)

- ① 저자가 심사 결과에 대하여 이의를 제기할 경우, 심사위원과 저자 간의 의견 교환은 편집인을 통해서 한다. 심사위원과 저자가 의견교환을 하고자 할 때, 편집인의 중개로 서로 의견을 교환할 수 있다.
- ② 저자의 재심요구는 원칙적으로 받아들이지 않는다.

제11조 (심사료)

필요 시 편집인, 편집위원에게는 소정의 편집비를, 심사위원에게는 소정의 심사료를 지급할 수 있다.

(사)한국정밀공학회 학술활동 윤리규정

- (사)한국정밀공학회 학술활동 윤리규정 전문: http://jkspe.kspe.or.kr/_common/do.php?a=html&b=16
- 규정에서 정의되지 않은 사안은 한국학술단체총연합회의 연구윤리지침을 따르되, 구체적인 판정은 (사)한국정밀공학회 편집위원회의 결정에 따른다.

제 1 장 총칙

제1조 (목적)

이 규정은 사단법인 한국정밀공학회(이하 '학회'라 한다)와 관련된 학술활동이 인간의 존엄성과 가치를 침해하거나 사회 공동의 이익을 손상하지 않는 높은 윤리적 수준을 유지하기 위하여, 우리 학회 구성원들이 지켜야 할 윤리적 기준을 제시, 학문 및 사회 발전에 건강하게 기여함에 그 목적이 있다.

제2조 (윤리규정 적용범위)

- ① 본 규정은 학회가 발간하는 모든 학술지 및 학술대회, 심포지엄, 워크샵, 포럼 등 학술활동 전반에 적용한다.
- ② 본 규정은 위 학술활동과 관련된 저자, 심사위원, 편집위원, 사무국 실무자에게 모두 적용한다.
- ③ 기타 위에 정하여 지지 않은 범위는 교육부 및 산하기관의 각급 규정을 준용할 수 있다.

제3조 (부정행위의 범위)

당 규정에서 제시하는 부정행위는 우리 학회와 관련된 학술활동과 논문 및 발표 등에서 행하여진 위조·변조·표절·부당한 논문저자 표시 행위·이중게재 등을 말하며 다음 각 호와 같다.

- ① '위조'는 존재하지 않는 데이터 또는 연구결과 등을 허위로 만들어 내는 행위를 말한다.
- ② '변조'는 연구 재료·장비·과정 등을 인위적으로 조작하거나 데이터를 임의로 변형·삭제함으로써 연구 내용 또는 결과를 왜곡하는 행위를 말한다.
- ③ '표절'이라 함은 타인의 아이디어, 연구내용·결과 등을 정당한 승인 또는 인용 없이 도용하는 행위를 말한다.
- ④ '부당한 논문저자 표시'는 연구내용 또는 결과에 대하여 과학적·기술적 공헌 또는 기여를 한 사람에게 정당한 이유 없이 논문저자 자격을 부여하지 않거나, 과학적·기술적 공헌 또는 기여를 하지 않은 자에게 감사의 표시 또는 예우 등을 이유로 논문저자 자격을 부여하는 행위를 말한다.
- ⑤ '이중게재란 2개 이상의 학술지에 동일한 내용을 게재하는 행위를 말한다.
- ⑥ 본인 또는 타인의 부정행위의 의혹에 대한 조사를 고의로 방해하거나 제보자에게 위해를 가하는 행위
- ⑦ 과학기술계에서 통상적으로 용인되는 범위를 심각하게 벗어난 행위 등
- ⑧ 기타 위 규정된 부정행위 외에도 우리 학회 자체적으로 조사 또는 예방이 필요하다고 판단되는 행위

제 2 장 저자

제4조 (저자의 정직성)

- ① 저자는 각자가 수행하는 연구에 있어서 정직하여야 한다. 여기서 정직은 아이디어의 도출, 실험에 대한 설계, 실험과 결과의 분석, 연구비 지원, 연구결과의 출판, 연구 참여자들에 대한 공정한 보상 등 연구과정의 전반에 관한 정직을 말한다.
- ② 연구자는 연구에 있어서의 표절, 사기, 조작, 위조 및 변조 등을 심각한 범죄행위로 간주하고, 이러한 부정이 발생하지 않도록 최선을 다하여야 한다.
- ③ 저자는 자신의 이익과 타인 또는 타 기관의 이익이 상충하거나, 상충할 가능성이 있을 경우 이를 공표하고 적절히 대응하여야 한다.

제5조 (저자의 기준)

논문의 저자가 되기 위해서는 아래 4개의 기준을 모두 충족하여야 한다. 이 기준은 제1저자, 교신저자를 포함한 모든 저자를 대상으로 한다.

- ① 연구 논문의 구상, 설계, 데이터의 획득과 분석, 해석에 실제로 기여한 자
- ② 논문의 초안을 작성하거나 논문의 주요 내용을 학술적으로 개선한 자
- ③ 최종 원고의 출판에 동의한 자
- ④ 논문 내용의 정확성과 진실성에 대한 의문이 있을 경우 대응 책임에 동의한 자

제6조 (저자의 준수사항)

- ① 투고한 논문의 연구 수행과정에서 저자는 인권존중, 생명윤리 준수 및 환경보호 등의 보편성을 확보하여야 한다.
- ② 저자는 투고한 논문에서 연구내용과 그 중요성에 대하여 정확하게 기술하여야 하고, 연구결과를 왜곡하지 말아야 한다.
- ③ 투고논문은 학술적으로 충분한 가치가 있는 결과와 그것을 뒷받침할 수 있는 논거를 포괄적으로 포함하고 있어야 한다. 이미 발표한 논문과 유사한 결론을 주장하는 논문의 경우에는 새로운 논거에 충분한 학술적인 가치가 있어야만 한다.
- ④ 공개된 학술자료를 인용할 경우에는 그 출처를 명백하게 밝혀야 한다. 공개되지 않은 논문이나 연구계획서, 또는 개인적인 접촉을 통해서 얻은 자료의 경우에는 그 정보를 제공한 연구자의 동의를 받은 후에 인용하여야 한다.
- ⑤ 다른 연구자의 연구결과를 참고문헌의 인용 없이 논문의 전부 혹은 일부로 사용하는 것은 표절에 해당하므로 허용되지 않는다.
- ⑥ 저자가 다른 학술지에 투고 혹은 게재하였거나 투고할 예정인 논문을 본 학회지에 이중으로 투고하는 행위는 부정한 행위로서 허용되지 않는다. 학술대회나 세미나 등에서 이미 발표한 내용을 학술지 규정에 맞추어 논문으로 작성하여 투고하는 것은 일반적으로 허용되지만, 해당 발표내용에 중요한 연구결과가 추가되어야함을 원칙으로 한다.

(사)한국정밀공학회 학술활동 윤리규정

- 연구 수행과정에서 중요한 기여를 한 모든 연구자는 공저자가 되어야 하며, 논문의 대표저자는 저자명단에 대해 모든 공저자에게 동의를 얻어야 한다. 행정적, 재정적 지원과 같은 학술외적인 지원이나 연구자료 제공 혹은 단순한 학술적 조언 등에 대해서는 “후기”를 통해서 그 내용을 표기한다.
- 연구에 학술적으로 기여하지 않았거나 기여도가 현저히 떨어지는 자를 학문 외적인 이유로 공저자로 기재하는 것은 학문의 권위를 실추시키는 부도덕한 행위이다.
- 저작권 등과 관련하여 관계자의 승인이 필요한 경우 저자는 논문을 투고하기 이전에 승인을 얻어야 하며, 논문의 출판으로 말미암아 영향을 받을 수 있는 계약 및 소유권의 분쟁이 발생하지 않을 것임을 확인하여야 한다.

제 3 장 학회 구성원의 역할과 책임

제7조 (편집위원 준수사항)

- 편집위원은 저자의 성별, 나이, 인종, 소속기관 또는 저자와의 개인적 친분 등에 따른 편견 없이 심사논문에 대한 판정업무를 정해진 규정에 따라 공정하고 객관적으로 수행하여야 한다.
- 편집위원은 투고된 논문에 대한 심사위원의 심사결과를 바탕으로 일관된 기준으로 논문의 재심 여부나 게재 여부를 결정하여야 한다.
- 투고논문의 연구분야에 대한 편집위원의 지식이 부족하여 심사결과를 판정하는데 곤란함이 있다고 판단될 경우에는 해당 분야에 전문적인 지식을 가진 자로부터 자문을 받을 수 있다.
- 편집위원은 심사과정에서 취득한 정보를 다른 사람에게 공개하거나 유용하지 않아야 한다. 학술지가 출판되기 전에는 저자의 동의 없이 해당 논문의 내용을 인용하는 행위도 허용되지 않는다.
- 편집위원은 저자와 심사위원의 비윤리적인 행위를 감시할 의무를 가지며, 윤리적으로 부적절한 행위가 발견될 경우 이를 지체 없이 편집장에게 보고하여 조사와 함께 필요에 따라 적절한 징계가 이루어질 수 있도록 하여야 한다.
- 편집위원은 투고된 논문이 자신과 직접적인 이해관계가 있는 논문일 경우, 편집인에게 보고하여 다른 편집위원이 해당 논문을 담당하게 하여야 한다.
- 편집위원이 담당 업무를 신속하게 처리하지 못할 사유가 발생할 경우 학회 사무국 혹은 해당 편집인에게 보고하는 것이 바람직하다.
- 투고논문이나 심사과정에서 비윤리적인 행위가 적발되거나 비윤리적 행위에 대한 탄원이 있을 경우 편집인은 그 사안의 비중을 판단하여 필요할 경우 관련분야 편집위원들로 조사위원회를 구성하여야 하며, 편집위원회는 조사위원회에서 작성된 보고서를 바탕으로 해당 행위자에 대한 징계를 결정하고, 기 게재된 논문이 관련되었을 경우 해당 논문의 게재를 소급하여 취소할 수 있다.

제8조 (심사위원 준수사항)

- 심사위원은 저자의 성별, 나이, 인종, 소속기관 또는 저자와의 개인적 친분 등에 따른 편견 없이 심사논문을 일관된 기준으로 공정하고 객관적으로 심사하여야 한다. 완벽하게 검증되지 않은 개인의 학술적 신념이나 가정에 근거한 심사는 배제하여야 한다.
- 심사위원은 심사논문에 대한 비밀을 보장하기 위해 심사과정에서 취득한 정보를 다른 사람에게 공개하거나 유용하지 않아야 한다. 논문집이 출판되기 전에는 저자의 동의 없이 해당논문의 내용을 인용하는 행위도 허용되지 않는다.
- 심사위원은 전문 지식인으로서의 저자의 인격을 존중하여야 한다. 개인적이고 주관적인 평가나 불쾌한 표현을 자제하고 학문적으로 겸손한 자세에서 객관적인 심사의견서를 작성하도록 노력하여야 한다. 심사논문에 대한 자신의 판단과 보완이 필요하다고 생각되는 내용을 그 이유와 함께 상세하게 명시하여야 한다.
- 심사위원의 개인적인 목적을 위하여 저자에게 추가 자료나 해명을 요구하는 것을 금지한다.
- 이미 다른 학술지에 공개된 논문의 내용과 유사한 내용이 심사논문에 인용 없이 포함되었을 경우에는 편집위원에게 그 사실을 상세하게 알려주어야 한다.
- 심사 의뢰된 논문과 직접적인 이해관계가 있거나 자신의 전공분야가 투고된 논문을 심사하기에 적합하지 않다고 판단되면 담당 편집위원에게 지체 없이 그 사실을 통보하여 다른 심사위원을 선정할 수 있도록 하여야 한다. 아울러, 기한 내에 심사를 마치지 못할 사유가 있을 경우 편집위원에게 이를 통보한다.

제 4 장 검증 절차와 기준

제9조 (윤리위원회)

- 우리 학회는 학술활동 윤리 위반 및 의심사례 발생 시 윤리위원회(이하 '위원회'라 한다)를 구성, 그 진위를 조사할 수 있다.
- 위원회 구성 및 직무
 - 위원회는 위원장 1명과 위원 5명으로 구성한다.
 - 위원장은 학술담당 부회장이 하며, 위원은 이사회에서 선출, 회장이 임명한다.
 - 위원장과 위원의 임기는 1년으로 1월 1일부터 12월 31일까지로 하며, 연임이 가능하다.
 - 위원장은 위원회를 대표하고 학회의 윤리에 관한 업무를 총괄한다.

제10조 (윤리위원회 기능)

위원회는 다음의 내용으로 활동한다.

- 연구윤리 수립 및 추진
- 연구 부정행위의 예방과 방지
- 연구 부정행위 심의 및 의결
- 부정행위자에 대한 제재내용 결정 및 이사회에 결과보고
- 기타 연구 윤리의 개선 및 증진에 관한 사항

(사)한국정밀공학회 학술활동 윤리규정

제11조 (윤리위원회 소집 및 의결)

- ① 위원회는 위원장이 필요에 따라 소집하며, 위원 과반수의 출석으로 개최하고 출석위원 2/3의 찬성으로 의결한다.
- ② 의결된 내용은 부정행위 의심자(피제소자)에게 통보하고 15일 이내에 서면으로 소명 의견을 받아야 한다.
- ③ 위원회에서는 부정행위 의심자로부터 받은 소명자료를 검토하거나 필요 시 의견을 청취하여 최종 의결토록 한다.
- ④ 의결된 내용은 이사회에 보고하여 최종 결정한다.
- ⑤ 위원장이 필요하다고 판정할 경우, 외부 인사나 위원이 아닌 자의 의견을 청취할 수 있다.
- ⑥ 위원회에서 참가자 발표내용 및 회의내용은 비공개를 원칙으로 한다.

제12조 (연구 부정행위의 제보)

- ① 연구 부정행위의 제보는 육하원칙에 따라 관련 자료를 첨부하여 서면으로 제출하여야 한다. 단, 익명제보라 하더라도 제보의 육하원칙이 명백한 제보의 경우, 위원회에서 조사개시에 대한 검토를 할 수 있다.
- ② 학회는 제보자가 부정행위 신고를 이유로 불이익, 차별, 부당한 압력 또는 위해 등을 받지 않도록 노력한다.
- ③ 제보자의 신원에 관한 사항은 정보공개 대상이 되지 않으며, 신원이 노출되지 않도록 최선의 조치를 취한다.
- ④ 제보자가 부정행위의 신고 이후에 진행되는 조사 절차 및 일정 등에 대하여 알고자 할 경우 학회는 이에 성실히 응하여야 한다.
- ⑤ 제보 내용이 허위인 줄 알았거나 알 수 있었음에도 불구하고 이를 신고한 제보자는 보호 대상에 포함되지 않는다.

제13조 (연구 부정행위에 대한 제재 및 사후조치)

- ① 연구 부정행위가 확인된 저자에게는 위원회 결정에 따라 부정행위의 경중을 고려하여 다음의 제재를 선택하여 가할 수 있다.
 1. 해당 발표연구물에 대한 학회 간행물에 게재취소
 2. 5년간 학회 발행 학술지에 투고금지
 3. 5년간 학회 학술대회 발표금지
 4. 해당 논문이 이미 출판된 경우에는 해당 학술지에 게재 취소를 공지하고, 부정행위자 소속기관에 부정행위 내용 통보
 5. 학회 회원자격 박탈
- ② 제보자가 고의로 허위제보를 하였을 경우 위원회의 결정에 따라 연구 부정행위자 수준과 동일한 제재를 가할 수 있다.

제14조 (피조사자 권리 보호)

- ① 피조사자는 제보 또는 학회 및 관련기관의 인지에 의하여 부정행위의 조사 대상이 된 자 또는 조사 수행 과정에서 부정행위에 가담 한 것으로 추정되어 조사의 대상이 된 자를 말하며, 조사과정에서의 참고인이나 증인은 이에 포함되지 아니한다.
- ② 학회는 검증과정에서 피조사자의 명예나 권리가 부당하게 침해되지 않도록 주의하여야 한다. 또한 결과가 확정되기 이전까지는 이의 제기 및 변론의 기회가 동등하게 주어져야 하며, 관련절차를 사전에 알려주어야 한다.
- ③ 부정행위에 대한 의혹은 판정 결과가 확정되기 전까지 외부에 공개되어서는 아니 된다. 다만, 공공의 복리 등 사회 통념에 중대한 위험사항이 발생할 경우는 해당되지 아니한다.
- ④ 피조사자는 부정행위 조사·처리절차 및 처리일정 등에 대해 학회에 알려줄 것을 요구할 수 있으며, 학회는 이에 성실히 응하여야 한다.

제15조 (조사의 기록과 정보의 공개)

- ① 위원회는 조사 과정의 모든 기록을 음성, 영상, 또는 문서의 형태로 작성한 조사결과 보고서를 반드시 5년 이상 보관하여야 한다.
- ② 조사결과 보고서 및 조사위원 명단은 판정이 끝난 이후에 공개할 수 있다.
- ③ 조사위원·증인·참고인·자문에 참여한 자의 명단 등에 대해서는 당사자에게 불이익을 줄 가능성이 있을 경우 공개하지 않을 수 있다.

제16조 (조사결과의 보고)

- ① 위원회는 조사의 결과와 내용을 조사의 종료 및 판정 후, 접수일 기준 6개월 경과 이전에 심의 내용을 확정하여 이사회에 보고한다.
- ② 결과보고서에는 다음 각 호의 사항이 반드시 포함되어야 한다.
 1. 제보의 내용
 2. 조사의 대상이 된 부정행위
 3. 조사위원회의 조사위원 명단
 4. 해당 연구에서의 피조사자의 역할과 부정행위의 사실 여부
 5. 관련 증거 및 증인
 6. 제보자와 피조사자의 이익제기 또는 변론 내용과 그에 대한 처리결과
- ③ 연구 부정행위에 대한 최종결과가 확정되기 전에는 외부에 공개되어서는 안 된다.

한국정밀공학회지 연구윤리 및 저작권 동의서

(사)한국정밀공학회 귀하

논문 제목

국문:

영문:

저자명 (전체):

저자(들)는 위 논문이 한국정밀공학회지에 게재되기를 희망하며 아래와 같은 사항들에 대하여 확인하고 동의합니다.

1. 저자(들)는 상기 제목의 논문이 한국정밀공학회지에 게재될 경우 저작권을 한국정밀공학회에 양도하며, 한국정밀공학회는 위 논문에 대한 포괄적이고 독점적인 권리를 가집니다.
2. 저자(들)는 위 논문이 다른 연구자들의 저작권 및 어떠한 권리들도 침해하지 않았으며, 이 논문에 포함된 다른 인쇄 및 전자출판물의 내용/표/그림들에 대한 합법적인 저작권 소유주(자, 기관)로부터 사용허가를 받았습니다.
3. 저자(들)는 위 논문의 작성과 연구에 실질적인 기여를 하였으며, 위 논문의 작성과 내용에 대한 책임이 있습니다.
4. 저자(들)는 위 논문에 대한 인쇄 및 전자 출판물의 일부를 저자(들)의 연구결과 보고 및 논문게재/발표에 수정 후 재사용/출간하고자 할 때에는 무료로 사용할 수 있습니다. 이 경우 이 같은 사실과 타당한 이유를 한국정밀공학회에 알려야 하고, 위 논문을 해당 연구결과 보고 및 논문/발표자료에 정확히 인용하며 적절한 저작권을 명시하여야 합니다.
5. 저자(들)는 위 논문이 과거에 어떠한 학술지에도 출판된 적이 없으며, 현재 다른 학술지에 게재를 목적으로 제출되었거나 제출할 계획이 없습니다.
6. 저자(들)는 한국정밀공학회의 윤리규정에 있는 학술활동 윤리규정을 준수합니다.
또한, 중복 출판이나 표절 예방을 위해 CrossCheck 확인에 동의합니다.
(*)(사)한국정밀공학회 학술활동 윤리규정 전문: http://jkspe.kspe.or.kr/files/KSPE_학술활동_윤리규정.pdf)
7. 책임저자는 위 논문의 공동저자들이 1항-6항의 사실들을 인식하고 있으며, 위 6가지 사항들에 대하여 동의합니다.
8. 한국정밀공학회는 저자(들)가 위 7가지 사항에 동의하지 않았을 경우, 위 논문의 출판을 지연시키거나 중지시킬 수 있는 권리를 가집니다.
9. 전체 저자들은 위 논문의 저작권과 일체 권리 양도에 관한 권한을 책임저자에게 일임하며, 책임저자는 전체 저자들을 대표하여 저작권을 양도합니다.

20 년 월 일

책임저자명:

서 명:

책임 저자

논문심사과정에서 교신저자의 역할을 수행함과 아울러 논문의 학술지 게재 시 저자들을 대표하여 저작권에 대한 일체의 책임을 담당하는 저자

(사)한국정밀공학회 소개 및 활동현황

설립목적

이 법인은 사회일반의 이익에 기여하기 위하여 공익법인의 설립운영에 관한 법률의 규정에 따라 정밀공학에 관한 학문 및 기술의 체계화를 도모하여 국가 산업 발전에 기여함을 목적으로 한다.

회원(사) 구성

1. 특별회원: 정밀공학 분야와 관련 있는 단체로서 본회의 목적에 찬조하는 자
2. 찬조회원: 개인 또는 단체로서 본회의 목적에 찬조하는 자
3. 정 회 원: 정밀공학에 관하여 학식과 경험이 있는자

관련정부기관과의 관계

1. 교육과학기술부 산하: 사단법인 설립 허가
2. 한국과학기술단체총연합회: 정회원
3. 특허청: 학술단체 지정 받음
4. 한국연구재단, 한국과학기술단체총연합회: 연구 활동 지원

주요활동현황

1. 논문 발표회(학술대회): 연 2회(춘·추계) - 1,600여 편 발표
2. 기술세미나(부문별) 개최: 생산현장과 학술적인 교류 촉진, 미래 산업의 방향 제시
3. 산학연 협동 체계 구축: 기술세미나 개최 및 학술대회
4. JSPE(일본정밀공학회) & TSPE(대만정밀공학회)와 협정
5. ASPE(미국정밀공학회)교류: 학술사업 공동 개최
6. PRESM, ASPEN, ISMTII, ICPT 등 국제학술대회 유치 및 개최
7. 싱가포르, 베트남 과학기술 교류

발간자료

1. 한국정밀공학회지(논문집 발간): JKSPe 연 12회
2. 국제학회지(논문집 발간): IJPEM 연 12회 / IJPEM-GT 연 6회
3. 기술세미나(부문별) Proceeding 발간: 연 5-7회
4. 국제학술대회 Proceeding 발간
5. 춘·추계 학술대회 논문집 발간: 연 2회
6. 국제표준도서번호(ISBN) 또는 국제표준연속간행물번호(ISSN) 부여

발행규정

1. 한국정밀공학회지(JKSPe)는 월간으로, 매월 1일 발행: SCOPUS, KCI 등재지
2. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing은 월간으로, 매월 1일 발행: SCIE, SCOPUS, KCI 등재지
3. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology는 격월간으로, 1월, 3월, 5월 (특집호), 7월호, 9월호, 11월 1일 발행: SCIE, KCI 등재지
4. 발행목적: 정밀공학에 관한 학술논문 및 학회 소식 등의 제공, 정밀공학 기술의 체계화를 도모하여 국가 산업 발전에 기여

부문위원회 활동

부문은 정밀가공, 정밀측정, 로봇제어자동화, 스마트생산시스템, 설계 및 재료, 공작기계, 나노마이크로기술, 바이오헬스, 적층제조시스템, 녹색생산기술의 10개 부문이 있으며, 부문별 기술 세미나를 개최

특별회원사 가입

구 분	회비(연)	비고
다이아몬드	300만원 이상	
플래티늄	200만원	학회 발간물 증정
골드	100만원	국내 학술행사 무료등록 등
패밀리	100만원 이하	

(사)한국정밀공학회 소개 및 활동현황

한국정밀공학회상

정밀공학대상

- 학회 발전에 현저하게 공헌한 자

학술상

- 정밀공학 분야에서 창의성을 발휘하여 연구를 계속한 자로서 탁월한 업적을 이룩한 자 중에서 선정

생산기술상, 정밀기술상

- 정밀공학에 관련된 산업분야에서 독창적인 의의를 가지는 제품을 제작한 자 또는 기업체, 연구단체

공로상

- 학회 발전과 운영에 지대하게 기여한 자

Best Editor Award

- 학회 학술지의 발전에 공헌한 편집인(Editor), 편집위원(Member of Editorial Board)

JKSPE, IJPEM, IJPEM-GT, IJPEM-ST Contribution Award

- JKSP, IJPEM, IJPEM-Green Technology, IJPEM-Smart Technology의 출판에 탁월한 공헌을 한 심사위원(Reviewer)

JKSPE, IJPEM, IJPEM-GT, IJPEM-ST Award

- JKSP, IJPEM, IJPEM-Green Technology, IJPEM-Smart Technology에 발표된 논문 중 가장 탁월한 가치의 논문 저자

KSPE Young Researcher Award

- 각 부문 젊은 연구자의 활동을 격려의 목적으로 해당 분야의 연구 업적이 탁월하고 유망한 젊은 연구자

특별상

가헌학술상

- 가헌신도재단의 지원으로 가헌학술상을 설정
- 한국정밀공학회지 및 국내외 학술지에 게재된 정밀공학 분야의 탁월한 논문저자 또는 정밀공학 분야 발전에 기여가 현저한 자

현송공학상

- 현송교육문화재단의 지원으로 현송공학상을 설정
- 한국정밀공학회지 및 국내외 학술지에 게재된 정밀기계공학 분야의 탁월한 논문저자 또는 정밀기계공학 분야 발전에 기여가 현저한 자

유정백합학술상

- 학회 초대 2대 회장인 유정 이봉진 회원이 기증한 기금을 바탕으로 유정백합학술상을 제정 및 시행
- FA, CNC, 제어 등을 비롯한 정밀공학 분야에서 탁월한 업적으로 학문발전에 기여한 자

백암논문상

- 백암 함인영 회원이 기증한 기금을 바탕으로 백암논문상을 제정 및 시행
- 한국정밀공학회지 및 국내외 학술지에 게재된 생산공학 분야의 논문저자 중 최우수 논문저자로 하며 해당 논문발표 시 만 40세 이하인 자

Year of Launching

Journal of Korea Society for Precision Engineering was launched by the Korea Society for Precision Engineering in June of 1984. The name was changed to the Journal of the Korean Society for Precision Engineering in December of 1985.

Aims and Scope

Journal of the Korean Society for Precision Engineering (JKSPE) is devoted to publishing original research articles with high ethical standard on all aspects of precision engineering and manufacturing. Specifically, the journal focuses on articles related to improving the precision of machines and manufacturing processes through implementation of creative solutions that stem from advanced research using novel experimental methods, predictive modeling techniques, and rigorous analyses based on mechanical engineering or multidisciplinary approach. The expected outcomes of the knowledge disseminated from JKSPe are enhanced reliability, better motion precision, higher measurement accuracy, and sufficient reliability of precision systems. The various topics covered by JKSPe include: Precision Manufacturing Processes, Precision Measurements, Robotics, Control and Automation, Smart Manufacturing System, Design and Materials, Machine Tools, Nano/Micro Technology, Bio Health, Additive Manufacturing, Green Manufacturing Technology.

Fee

Subscription Fee:

This print copy of the journal is provided free of charge to the members of KSPE.

Publication Fee:

1. Basic fee (up to eight pages): 200,000 won; additional pages: 30,000 won per page.
2. Manuscripts contributed as a result of funded research will be charged an extra 50%.
3. Publication fee is charged only for the papers contain 'Acknowledgement' that represent supports of academic research project by th fund of government, institutes or university, etc.
4. Publication fee should be paid within 15 days of the receipt of the publication fee invoice.

Contact Us

[04508] 12F, SKY1004 Bldg., 50-1 Jungnim-ro, Jung-gu, Seoul, Republic of Korea
TEL +82-2-518-2928 / FAX +82-2-518-2937 / paper@kspe.or.kr / <https://www.kspe.or.kr>
Submission to Journal of Korean Society for Precision Engineering: <https://article.kspe.or.kr>
Search for Journal of Korean Society for Precision Engineering: <http://jkspe.kspe.or.kr>

Rules for Submitting and Publishing Papers

Article 1 Purpose

The rules are designed to specify matters related to the submission and publication of papers in Journal of the Korean Society for Precision Engineering (hereinafter referred to as the "Journal") of the Korean Society for Precision Engineering (hereinafter referred to as the "Society").

Article 2 Submitter

The corresponding author and the first author of the submitted paper must be members of the Society. With special permission by the Editor-in-Chief, however, the person can be treated as the exceptional case.

Article 3 Responsibilities and Compliance with Code of Ethics

- A. The Authors are responsible for the submitted paper.
- B. With regard to their submitted paper, all its authors must comply with 'Code of Ethics for Academic Activities of the Korean Society for Precision Engineering'. When any of the authors violates Code of Ethics for Academic Activities, the Editor-in-Chief may disallow or cancel the publication of the paper and impose disciplinary actions as specified.

Article 4 Scope of Research

The scope of research for the paper shall cover areas of precision engineering such as Precision Manufacturing Processes, Precision Measurements, Robotics, Control and Automation, Smart Manufacturing System, Design and Materials, Machine Tools, Nano/Micro Technology, Bio Health, Additive Manufacturing, Green Manufacturing Technology, and the paper must not have been published in any other publication.

Article 5 Categorization of Submissions

The paper submitted to the Journal falls into one of the categories below, and should be within eight pages, which may be exceeded if need be.

- A. Ordinary paper: The paper that shows excellent scholarship, practicality, and applicability.
- B. Special paper: The paper that is written in accordance with a special provision for special papers.
- C. Other submissions: Forecast, explications, lectures, and other writings.

Article 6 Submission

- A. The Paper is accepted anytime and submission date is the day submission is completed at the Society.
- B. The paper must be written in compliance of the template specified by the Society to be registered and submitted.
- C. The paper that is found not to comply with 'Rules for Submitting and Publishing Papers in Journal of the Korean Society for Precision Engineering' and 'Guidelines for Manuscript Writing' may not be accepted.
- D. The submitted paper shall not be returned.

Article 7 Review and Decision to Publish Paper

- A. The Editor-in-Chief shall decide whether to publish the paper or not.
- B. The review of the paper is conducted by two reviewers recommended by the Editor-in-Chief, and the review and the decision over its publication shall comply with 'Rules for Reviewing Papers for Journal of the Korean Society for Precision Engineering Paper Review Rules'.

Article 8 Copyright

- A. The authors shall be responsible for the content of the paper.
- B. The author(s) must transfer the copyright for the submitted paper to the Society, and for this purpose, the corresponding author(s) must submit 'Research Ethics and Copyright Transfer Agreement'.
- C. The copyright for the submitted paper or other submissions shall lie with the Society and may not be reproduced without authorization from the Society.
- D. The author(s) may use part of their paper or other submissions published in the Journal in their other research, provided the published paper is referenced as its source.

Article 9 Disclosure of Materials

The Society may disclose a paper or other submissions in print or as online publications.

Article 10 Manual of Style

- A. Writing and editing the paper to be submitted to the Society must comply with 'Guidelines for Manuscript Writing' provided separately.
- B. Editorial Board may edit the selected paper so that terms, characters, and orthography may comply with 'Guidelines for Manuscript Writing'.

Article 11 Publication Fees

The author must pay the specified fee for the paper published in the Journal. For the paper that exceeds the specified number of pages, the author must pay the fee for those extra pages. The fee for extra pages shall be decided by the board of directors.

Guidelines for Manuscript Writing

1. Manuscripts should be written according to the format of the Journal (<https://www.kspe.or.kr>) and should be submitted online (<https://article.kspe.or.kr>).
2. The manuscript should be organized in the following order: (1) The title in Korean, (2) The title in English, (3) Author names in Korean, (4) Author names in English, (5) Affiliations in Korean and English, and information of corresponding author, (6) Keywords, (7) Abstract, (8) Date of submission, (9) Introduction, (10) Main body (Theory, Experimental, Results, Discussion) (11) Conclusion, (12) Acknowledgements, (13) References, (14) Appendices, (15) Position format
3. A manuscript may be written in Korean or English. If necessary, the original terminology may be provided in parentheses to avoid confusion.
4. The manuscript title must be expressed concisely, preferably in ten words or less, and Keywords must be written in English, with Korean translations in parentheses, and numbering six words or less.
5. The abstract must be written in English and not exceed 200 words. Figures and tables shall not be included in the abstract.
6. Figures and tables shall be numbered in order in the main text, and captions should be written in English. Captions shall be labeled beginning "Fig. 1" for figures and "Table 1" for tables.
7. Arabic numbers and SI units shall be used in principle.
8. References shall be numbered in order of quotation.
 - (1) Citation in the main text: First author's last name with reference number in square brackets. e.g.) Hong [1]
 - (2) References shall be written in English at the end of the main body with the following formats.
 - Books: Author names, (Year of publication), Book title, Publisher.
 - Periodic Articles: Author names, (Year of publication), Paper title, Journal name, Vol.(No.), Cited pages.
e.g.) Hong, K. D., Kim, C. S., (2022), A method to investigate mechanical properties, John Wiley & Sons.
Hong, K. D., (2022), A method to investigate mechanical properties, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 39(1), 1-18.
9. Appendices shall be formatted in the same way as main body text.

Author's Check List

1. Are the affiliations of all authors indicated with the correct symbols?
2. Does the manuscript adhere to the style set forth in the template?
3. Are Korean and English titles written in ten words or less?
4. Are keywords written in English with Korean in parentheses, in six words or less?
5. Are all symbols listed with correct nomenclature and proper description?
6. Are all figures containing abscissas and ordinates labeled with the correct symbols and units?
7. Does the manuscript use Arabic numbers and SI units?
8. Is the English abstract within 200 words?
9. Are the captions of tables and figures in English, corresponding to the format?
10. Are appendices formatted in the same way as main body text?
11. Is the manuscript written according to the guidelines of the journal?

Rules for Reviewing Papers

Article 1 Purpose

The Rules are designed to specify matters related to the review of papers submitted to Journal of the Korean Society for Precision Engineering (hereinafter referred to as the "Journal") of the Korean Society for Precision Engineering (hereinafter referred to as the "Society").

Article 2 Submission and Reception

- A. The person who wants to submit the paper to the Journal shall use the Society's paper submission system to submit the paper that has been written in compliance with the Society's rules for submitting papers, which the Society shall receive.
- B. Notwithstanding the provision of A., the paper may be submitted and received in other ways so long as the Editor-in-Chief approves it.
- C. The Society shall basically receive papers that are related to the Society's areas of research. The Editor-in-Chief may refuse to receive the submitted paper, if it is not related to the Society's areas of research or has not fulfilled the requirements. Areas of research are specified in 'Rules for Submitting and Publishing Papers in Journal of the Korean Society for Precision Engineering' and 'Guidelines for Manuscript Writing'.

Article 3 Selection of Reviewers

- A. The Editor-in-Chief shall consider the areas for the submitted paper and assign its review to the Editor in the relevant area, and the Editor shall assign the Editorial Board Member in the given area as the review supervising Editorial Board Member.
- B. The review supervising the Editorial Board Member shall select and recommend to the Editor-in-Chief who he or she deems fit for the review of the submitted paper.
- C. The paper shall have two reviewers while the third reviewer may be appointed, in which case, the paper shall have the maximum of three reviewers. Reviewers shall basically belong to the different institution than the authors of the paper belong to.
- D. The Editor-in-Chief shall send the email to the recommended reviewer to confirm the acceptance of the reviewing duty. In case any of the recommended reviewers refuses to serve as the reviewer, the Editor-in-Chief shall ask the relevant The Editorial Board Member to recommend some other candidate.

Article 4 Review Procedure

- A. Following the comprehensive review of the paper, the reviewer shall record results of the review supported with objective grounds and make the clear request for revision, if necessary.
- B. For the review, the reviewer must choose 'Accept', 'Accept Subject to Minor Revisions', 'Re-Review after Major Revisions', or 'Reject'.

Article 5 Review Period

- A. The Editorial Board Member for the Journal must select reviewers within seven days from the appointment of the Editorial Board Member, and the reviewers who are asked to review a paper must complete the review within 14 days from their acceptance of the reviewer's duty for the primary review and within seven days for the secondary review.
- B. The ruling by the Editor and the Editorial Board Member must be completed within seven days from the reception of review results.
- C. In case the reviewer candidate fails to accept the reviewer's duty for more than fourteen days from the request, the candidate may be replaced with another reviewer.
- D. If review results fail to arrive for more than three months from the reception of the paper in contravention of the above provision, the following may be put into action.
 - ① If one of the reviewers has failed to deliver review results: The Editorial Board Member for the specific paper shall review it within seven days from the expiry of the three months.
 - ② If all of the reviewers have failed to deliver review results: The Editor and the Editorial Board Member for the specific paper shall review it within seven days from the expiry of the three months. If the Editor is the same person as the Editorial Board Member, the Editor alone may perform the review procedures.

Article 6 Deadline for Author's Revision

- A. The author must resubmit the revised paper that reflects requests for revisions in accordance with the Editor-in-Chief decision based on review results within thirty days for 'Re-Review after Major Revisions' or within fourteen days for 'Accept Subject to Minor Revisions'.
- B. In case a revised paper fails to be submitted for more than thirty days from the submission deadline, the Editorial Board may cancel its publication, and if the author wants a review to continue, he or she must resubmit the paper.

Rules for Reviewing Papers

Article 7 Decision over Publication

- A. The Editor-in-Chief shall make a final decision on whether to publish a paper or not by reviewing the results of the review by two reviewers and considering the comprehensive evaluation by the editing director and the Editor for the paper.
- B. A paper that has been ruled as 'Reject' by two or more reviewers cannot be published in the Journal.

Article 8 Review of Special Papers

- A. The Editor-in-Chief shall appoint a Special Editor for supervising the special paper, with recommendations from the officers of the Society.
- B. In case a Special Editor is the Director or the Division Chairman of the Society, the Special Editor shall supervise the selection of two reviewers for the review of the submitted paper and decide whether to publish it solely based on the review results. In case the Special Editor is not the Director or the Division Chairman of the Society, the Board of Editing Directors shall select the Editor for supervising the review of paper.

Article 9 Confidentiality

- A. The reviewer shall not disclose his or her assumed status to anyone else.
- B. The name of the author may be disclosed to the reviewer.
- C. Review results shall not be disclosed to anyone but the author.

Article 10 Objection

- A. If the author raises an objection to the review results, the exchange of views between the reviewer and the author shall proceed through the Editor. When the reviewer and the author want to exchange their views, they can do so through the mediation of the Editor.
- B. The author's request for the re-review shall not basically be accepted.

Article 11 Review Fee

If necessary, the specified editing fee may be paid to the Editor and the Editorial Board Member, while the specified review fee may be paid to the reviewer.

Code of Ethics for Academic Activities

- Full Text of Code of Ethics for Academic Activities of the Korean Society for Precision Engineering: http://jkspe.kspe.or.kr/_common/do.php?a=html&b=16
- For the policies on the research and publication ethics not stated in this instructions, International standards for editors and authors (<http://publicationethics.org/international-standards-editors-and-authors>) can be applied.

Chapter 1 Overall Rules

Article 1 Purpose

This regulation aims to establish the ethical standard for the members of this institute to comply with and to contribute to the healthy development of academics and society in order for our academic activities related with the Korean Society for Precision Engineering (hereinafter referred to as the "Society") to not infringe the dignity and value of human beings and maintain a high ethical standard that does not damage the benefits of public society.

Article 2 Application Area of Code of Ethics

- A. The code applies to the overall academic activities including all academic journals, academic conferences, symposiums, workshops, forums, etc. published and held by the Society.
- B. The code applies to all authors, reviewers, Editorial Board Members (hereinafter referred to as "EBM", and hands-on-workers in the service bureau related with the above academic activities.
- C. Other items not set forth above may comply with this article, each level of regulations of Ministry of Education and its annex institutions.

Article 3 Scope of Misconduct

Misconduct suggested in this code include forging, falsification, plagiarism, and false indication of the author of the paper in academic activities, papers and presentations related with the society, and are as follows:

- A. 'Forging' is the act of creating false data or non-existent research results.
- B. 'Falsification' is the act of perverting research content or results by artificially modifying research ingredients, equipment or processes, or arbitrarily modifying and deleting data.
- C. 'Plagiarism' is the act of appropriating others' ideas, research contents or results without proper approval or quotation.
- D. 'False indication of the author of the paper' is the act of not granting the qualification as an author of the paper without a reasonable cause to a person who contributed scientifically or technically on a research content or result, or granting qualification of an author of the paper to a person who did not contribute scientifically or technically to express gratitude or show respect.
- E. 'Duplicate publication' is the act of publishing the same content to two or more academic journals.
- F. Activity of intentionally interfering investigation on the doubts of one's own or other's misconduct, or disturbing the informant.
- G. Activity that seriously deviates from the scope commonly accepted in the science and technology sector.
- H. Activity other than the misconduct set forth above that needs to be independently investigated or prevented by the Society.

Chapter 2 Author

Article 4 Honesty of Author

- A. The author shall be honest in research carried out by an individual. Here, honesty refers to honesty in overall research processes including derivation of ideas, designing experiments, analyses of experiments and results, research funds, publishing research results, and fair compensation to research participants.
- B. The researcher shall consider plagiarism, fraud, manipulation and falsification during research as serious criminal activities, and endeavor to prevent these misconducts.
- C. The author shall announce and properly respond in case of contradiction or the possibility of contradiction of benefits of one's own and others or other institutions.

Article 5 Authorship

It is recommended for every author including the first and corresponding author that authorship be based on the following 4 criteria:

- A. Substantial contributions to the conception or design of the work; or the acquisition, analysis, or interpretation of data for the work; AND
- B. Drafting the work or revising it critically for important intellectual content; AND
- C. Final approval of the version to be published; AND
- D. Agreement to be accountable for all aspects of the work in ensuring that questions related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately investigated and resolved.

Code of Ethics for Academic Activities

Article 6 Compliance of Authors

- A. During the research implementation process of the submitted paper, the author shall respect human rights, comply with life ethics, and obtain universality such as environment protection.
- B. In the submitted paper, the author shall accurately illustrate the research content and its importance without perverting the research result.
- C. The submitted paper shall comprehensively include an academically valuable result and its basis of argument. If the paper asserts for a conclusion similar to an already announced paper, it should be academically valuable for a new basis of argument.
- D. If citing a public academic data, its source must be clearly stated. For data obtained from an undisclosed paper, research plan or personal contact, it should be cited after consent from the researcher who provided the information.
- E. Using the whole or part of another researcher's research result without citing the reference corresponds to plagiarism and is not allowed.
- F. The activity of duplicate publication by an author in the journal issued by the society where the paper is already published or planning to publish in other academic journal is considered misconduct and not allowed. Submitting content already presented in academic conferences or seminars by rewriting in a paper according to the academic journal standard is generally accepted, but it must additionally have an important research result for the relevant presentation.
- G. All researchers who made important contributions to research implementation shall become co-authors, and the representative author of the paper must have consents from all co-authors. For outside academic support such as administrative and financial support, provision of research data or simple academic advice shall be indicated in the 'Acknowledgement' for its content.
- H. Indicating a person who did not make academic contribution to research or falls short of contribution based on causes outside academics is unethical conduct that defames the dignity of academics.
- I. In relation to copyrights, if approval of a person in charge is needed, the author must be granted approval before submission of the paper, and confirm that there will be no dispute of contract or ownership that may be affected by the publication of said paper.

Chapter 3 Roles and Responsibilities of Members of Society

Article 7 Compliance of Editorial Board Member (EBM)

- A. The EBM shall fairly and objectively execute the revision process of the paper according to the set regulation without prejudice on the author's gender, age, race, affiliated institution or personal acquaintanceship with the author.
- B. The EBM shall determine whether to reconsider or publish the paper based on the consistent standard of the review results for the submitted paper.
- C. If it is determined that due to the lack of EBM's knowledge in the research area of the submitted paper, there may be difficulty in judging the result, the EBM may be advised by a person with professional knowledge in the relevant area.
- D. The EBM shall not disclose or make use of the information acquired in the review process to others. Before the publication in the journal, it is not even allowed to cite the content of the relevant paper without the consent of the author.
- E. The EBM has the responsibility to monitor any unethical activity of the author and reviewers, and when ethically inadequate behavior is discovered; the EBM shall investigate and give proper sanction as required by immediately reporting to the Editor-in-Chief.
- F. If the submitted paper has direct interest with the EBM, it should be reported to the Editor so that the relevant paper can be examined by another EBM.
- G. In case of reasons that prevent the EBM to promptly process the duty, it is advised to report to the editorial office of the society or the Editor.
- H. In case of discovering any unethical activity from a submitted paper or reviewing process, or in case of deprecation on unethical activities, the Editor shall determine the importance of the case, and organize an Investigation Committee with EBM in the relevant area if needed. The Editorial Board determines the level of sanction to the relevant person based on the report by the Investigation Committee, and if the already published paper is related, the publication of the relevant paper may be retracted and cancelled.

Article 8 Compliance of Reviewers

- A. The reviewer shall fairly and objectively perform reviewing duty for examining the paper according to the set regulation without the prejudice on the author's gender, age, race, affiliated institution or personal acquaintanceship with the author. Personal academic beliefs that have not been completed, verified or under judgment based on assumption must be eliminated.
- B. The reviewer, in order to assure the secrecy of reviewing the paper, must not disclose or make use of information acquired in the process of reviewing to others. Before the publication of the paper, it is not allowed to even cite the content of the relevant paper without the consent of the author.

Code of Ethics for Academic Activities

- C. The reviewer must respect the personality of the author as a professional. The reviewer shall endeavor to write the objective reviewer's opinion in an academically modest way by eliminating personal and subjective evaluations and offensive expressions. The reviewer shall state in details the review comments and basis for the comments of the paper under review.
- D. It is prohibited to request for additional information or explanation to the author for the reviewer's personal purpose.
- E. If the similar content to the paper disclosed in other academic journal has been included in the paper without citation, the EBM should be notified in detail.
- F. If the reviewer is in direct interest with the requested paper or it is determined that the reviewer's own professional area is not suitable for examining the submitted paper, the reviewer should immediately notify the EBM in charge so that other reviewers may be appointed. Also, in case of reason for not being able to finish the review within the deadline, it needs to be notified to the EBM.

Chapter 4 Verification Process and Standard

Article 9 Ethics Committee

- A. In case of breach of ethics and suspected cases during academic activities, the society may organize an Ethics Committee (hereinafter referred to as "Committee") to investigate the truth.
- B. Organization and Duties of Committee
 - ① The Committee shall be composed of one chairman and five members.
 - ② The Vice-President in charge of academic affairs shall be the chairman, and members shall be selected from the board of directors, and appointed by the chairman.
 - ③ The chairman and members shall take office for 1 year from January 1 to December 31 and can be reelected.
 - ④ The chairman shall represent the Committee and take charge of overall duties for ethics of society.

Article 10 Function of Ethics Committee

The Committee shall act in the following manners:

- A. Establish and promote research ethics.
- B. Prevent and discourage research misconduct.
- C. Deliberate and vote on research misconduct.
- D. Determine sanctions for wrongdoers and report the result to the board of directors.
- E. Improve and enhance other research ethics.

Article 11 Convocation and Voting of Ethics Committee

- A. The Committee shall be convened by the chairperson as needed, held in attendance of the majority of members, and resolved by over two-thirds of registered members' agreements.
- B. The decision shall be notified to the suspected person (accused) of misconduct, and the explanatory opinion shall be received in writing within 15 days.
- C. The Committee shall review an explanatory opinion from the suspected person of misconduct, and hear an opinion if needed before making the final decision.
- D. The decision shall be reported to the board of directors for the final decision.
- E. If the chairman deems it necessary, opinions by a person other than external personnel or members can be heard.
- F. Presented content by participants and details of the Committee shall be undisclosed in principle.

Article 12 Reporting Research Misconduct

- A. Research misconduct may be reported in writing with related documents attached according to the five W's and one H. However, even if anonymously reported, if it is clear based on the five W's and one H, the Committee may review the initiation of investigation.
- B. The Society shall endeavor not to give any disadvantage, discrimination, unreasonable pressure or damage to the informant for reporting misconduct.
- C. The identity of the informant shall not be subject to disclosure, and the best measures shall be taken to prevent identity disclosure.
- D. In case the informant wishes to know the investigation schedule and procedure after reporting misconduct, the Society shall respond sincerely.
- E. The informant who made the report although it was known or it could be known that the information given is false shall not be subject to protection.

Code of Ethics for Academic Activities

Article 13 Sanctions on Research Misconduct and Follow-up Actions

- A. The author whose research misconduct has been confirmed shall be imposed with sanction by selecting from the following considering the severity of the misconduct according to the decision made by the Committee:
- ① Cancel publication of relevant research subject to the Society publication
 - ② Prohibit submission of paper to the journal issued by the Society for five years
 - ③ Prohibit presentation in the Society academic conference for five years
 - ④ If the relevant paper has already been published, notify cancellation of publication in the relevant academic journal, and notify the misconduct to the affiliated institution of the wrongdoer
 - ⑤ Cancel membership to the Society
- B. If the informant intentionally made a false report, the sanction equivalent to the research misconduct may be given according to the decision of the Committee.

Article 14 Protection of Rights of Examinee

- A. The examinee refers to a person who has become the subject of investigation for misconduct due to the report or cognition by the Society or related institution, or a person who has become the subject of investigation by suspecting of taking part in misconduct during the investigation process. The examinee shall not include testifiers or witnesses.
- B. The Society shall be careful not to violate the dignity or rights of an examinee during the verification process. Also, until the confirmation of the results, the examinee shall have an equal opportunity for objection or defense, and shall be notified in advance of the related procedure.
- C. The suspicion on misconduct shall not be disclosed to the public until the judgment has been confirmed. However, this does not include cases where serious risk may be present to public welfare or social norms.
- D. The examinee may request for investigation and processing procedure as well the processing schedule for misconduct to the Society, and said the Society shall respond sincerely.

Article 15 Disclosure of Record and Information of Investigation

- A. The Committee shall store the investigation report of the entire investigation process obtained in the form of voice, video or written document for at least 5 years.
- B. The report of investigation and list of investigators may be disclosed after judgment has been made.
- C. If the list of investigators, witnesses, testifiers, or consultants has the possibility to cause disadvantage to the concerned personnel, it may not be disclosed.

Article 16 Report of Investigation Result

- A. The Committee shall report the confirmation of the examined content to the board of directors within 6 months of the submission date after completion and judgment of the investigation.
- B. The report of the result must include each of the following items:
- ① Content of information
 - ② Misconduct subject to investigation
 - ③ List of investigators of Investigation Committee
 - ④ The role of the examinee in the relevant research and validity of misconduct
 - ⑤ Related evidence and witnesses
 - ⑥ Objection or defense by informant and examinee, and its processing result
- C. Until the final judgment on the research misconduct, it must not be disclosed to the public.

Research Ethics and Copyright Transfer Agreement

To the Korean Society for Precision Engineering (KSPE)

Title	Korean
	English
Authors	

I hereby certify that I agreed to submit the manuscript entitled above to the Journal of the Korean Society for Precision Engineering with the following statements.

1. The submitting/corresponding authors (hereafter referred to as "authors") warrant that the copyright shall be transferred to the KSPE when the manuscript is accepted, and the KSPE will own the exclusive rights.
2. Authors certify that they have not impinged upon the rights or copyrights of other researchers, and have attained legal copyright to display items from the original copyright owners.
3. Authors certify that they have indeed contributed to the outcomes and writing of their manuscript and are responsible for the contents therein.
4. Authors may use or reproduce part of the published work in an annual report, magazine or another journal. In this case, they should inform the KSPE of the reproduction and cite the work with proper citation information.
5. Authors have never published the same work in any other journal and are not planning to do so.
6. Authors certify that they will abide by the ethics regulations of the KSPE related to academic activities given in [http://jkspe.kspe.or.kr/files/KSPE_Code of Ethics for Academic Activities \(English\).pdf](http://jkspe.kspe.or.kr/files/KSPE_Code%20of%20Ethics%20for%20Academic%20Activities%20(English).pdf). Authors also agree to CrossCheck verification of the manuscript for prevention of duplicate publication and plagerism.
7. The corresponding author is aware of the items 1-6 and agrees to them.
8. The KSPE will have the right to delay or cancel the publication if authors do not adhere to the above statements.
9. Corresponding author has the full authority to sign the Statement of Copyright Transfer form on behalf of all the co-authors.

**Corresponding
Author's
Signature**

- Corresponding author (name): _____
- Position: _____
- Affiliation: _____
- Date: ____ / ____ / ____

**Corresponding
Author**

The author to whom all correspondence should be addressed from submission to publication process and who is responsible for the published contents and communications with the co-authors.

International Journal of Precision Engineering and Manufacturing

Volume 25 · Number 5 · May 2024

REGULAR PAPERS

Analytical Modelling of Cutting Force in End-Milling with Minimum Quantity Lubrication

L. Cai · Y. Feng · S.Y. Liang 899

A FE Model for the Efficient Simulation of the Thermo-Elastic Machine Tool Behavior

C. Brecher · M. Dehn · S. Neus 913

Plasma Arc Welding of 780CP High Strength Steel Sheet Lap Joint for Tensile Strength of 100% Compared to Base Metal

S.-W. Han · S. Shin · H. Kim · G. Lee · J. Jeon · S. Han · G. Bae · J. Cho 925

Experimental Study on Step-by-Step Electrical Discharge Machining of Square Blind Holes in TC4 Titanium Alloy

E.-T. Wu · M.-B. Qiu · Z.-X. Yao · J.-T. Li · Y.-M. Zhang 933

Advancement of Analytical Model for Hydrophobic Rectangular Pillared Array on Al-Surface and Its Experimental Validation

S. Jaishree · A. Bhandari · N. Khatri · B. Singh · S. Jangra · A. Husain · A. Kumar · M.S. Goyat 947

Measuring Parametric and Volumetric Errors in a Four-Axis CMM Using a Hole Plate

T.-H. Hsieh · M.-X. Lin · K.-T. Yeh 959

An Active Geophone Sensor with Optimized State Variable Filter for Measuring Low-Band Frequencies

J. Choi · H. Yoo · E. Choi · K. Kim · H.-Y. Kim 981

Adaptive Identification of the Position-independent Geometric Errors for the Rotary Axis of Five-axis Machine Tools to Directly Improve Workpiece Geometric Errors

S.-H. Yang · K.-I. Lee 995

Gaidai Multivariate Reliability Method for Energy Harvester Operational Safety, Given Manufacturing Imperfections

O. Gaidai · V. Yakimov · F. Wang · Y. Cao 1011

Point Cloud 3D Weldment Reconstruction and Welding Feature Extraction for Robotic Multi-bead Arc Weld Cladding Path Planning

W. Wang · W. Zhang · X. Liu · X. Zhang · W. Huang · Z. Deng 1027

Investigation on Polymer Hybrid Composite Through CO₂ Laser Machining for Precise Machining Conditions

K.N. Kumar · P.D. Babu 1043

Effect of Silicon Content in Al–Si Welding Wire on Mechanical Properties of Al/Cu Laser Welded Joint

P. Wang · F. Liu · L. Pang · Z. Guo 1063

Platform Supporting Intelligent Human–Machine Interface (HMI) Applications for Smart Machine Tools

I.-H. Park · J.S. Yoon · J.H. Sohn · D.Y. Lee 1073

Interval Island Laser-Scanning Strategy of Ti–6Al–4V Part Additively Manufactured for Anisotropic Stress Reduction

J. Yang · D. Kang · S.M. Yeon · Y. Son · S.H. Park 1087

REVIEW

Green Fabrication of Superhydrophobic Surfaces Using Laser Surface Texturing Without Toxic Chemicals: A Review

W.-S. Chu · M.M. Shehroze · N.G. Tran · T.-H. Dinh · S.-T. Hong · D.-M. Chun 1101

CORRECTION

Correction to: An Active Geophone Sensor with Optimized State Variable Filter for Measuring Low-Band Frequencies

J. Choi · H. Yoo · E. Choi · K. Kim · H.-Y. Kim 1125

Further articles can be found at link.springer.com

Abstracted/Indexed in *BFI List*, *Baidu*, *CLOCKSS*, *CNKI*, *CNPIEC*, *Dimensions*, *EBSCO Discovery Service*, *Google Scholar*, *INSPEC*, *Japanese Science and Technology Agency (JST)*, *Journal Citation Reports/Science Edition*, *Korea Citation Index (KCI)*, *Naver*, *Norwegian Register for Scientific Journals and Series*, *OCLC WorldCat Discovery Service*, *Portico*, *ProQuest-ExLibris Primo*, *ProQuest-ExLibris Summon*, *SCImago*, *SCOPUS*, *Science Citation Index Expanded (SCIE)*, *TD Net Discovery Service*, *UGC-CARE List (India)*, *WTI AG*, *Wanfang*

Instructions for authors for *Int. J. Precis. Eng. Manuf.* are available at www.springer.com/12541

International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology

Volume 11 · Number 3 · May 2024

PREFACE

Preface for Advanced Manufacturing for ESG

B. Kim · S.-T. Hong · H.E. Jeong 707

REGULAR PAPERS

A Computer Simulation and Experimental Study of Weight Reduced Carbonated Soft Drink PET Bottle Manufacturing

A. Saini · D.-H. Choi · M.-Y. Lyu 709

A Comprehensive Investigation of Process Parameters and Material Properties Effects on Printed Line Quality of Aerosol Jet Printing Based on Coupled Three-dimensional Numerical Models

Z. Liu · Y. Liu · L. He · L. Cui · N. Liang · J.P. Choi · H. Zhang 727

Application of Reinforcement Learning to Dyeing Processes for Residual Dye Reduction

W. Lee · S.M.M. Sajadieh · H.K. Choi · J. Park · S.D. Noh 743

Industrial Energy Optimisation: A Laser Cutting Case Study

N. Goffin · L.C.R. Jones · J.R. Tyrer · J. Ouyang · P. Mativenga · L. Li · E. Woolley 765

Impacts of Environmentally Friendly Milling of Inconel-800 Superalloy on Machinability Parameters and Energy Consumption

E. Şap · Ü.A. Usca · S. Şap 781

Modeling and Assessment of Carbon Emissions in Additive-Subtractive Integrated Hybrid Manufacturing Based on Energy and Material Analysis

Z. Liu · Y. Zhao · Q. Wang · H. Xing · J. Sun 799

Exploring the Feasibility of Advanced Manufacturing for Mass Customization of Insoles in the Context of ESG

J. Cheng · J.-C. Wang 815

Enhanced Wear Properties of an Inspired Fish-Scale Film Structure in Terms of Microstructured Self-Lubrication Induced Effects by High-Speed Laser Surface Remelting Processing

W. Dai · C. Fang · X. Wu · Z. Zheng · J. Li 833

A Knowledge Graph Based Disassembly Sequence Planning For End-of-Life Power Battery

H. Wu · Z. Jiang · S. Zhu · H. Zhang 849

Battery State of Health Estimation from Discharge Voltage Segments Using an Artificial Neural Network

M.U. Javaid · J. Seo · Y.-K. Suh · S.Y. Kim 863

Comparative Study of Electrically Assisted Pressure Joining of Aluminum 6061-T6 Alloys and Copper C11000 Alloys

T.-A. Bui-Thi · T.T. Do · S. Zhang · Y. Kim · H.N. Han · S.-T. Hong 877

The Optimization of Energy Consumption and CO₂ Emission in the Product Hazardous Substances Report Making

C.-C. Hsu · C.-C. Lin 889

Towards Sustainable Manufacturing: A Maturity Assessment for Urban Smart Factory

S.M.M. Sajadieh · S.D. Noh 909

Digital Twin and Deep Reinforcement Learning-Driven Robotic Automation System for Confined Workspaces: A Nozzle Dam Replacement Case Study in Nuclear Power Plants

S.-Y. Park · C. Lee · S. Jeong · J. Lee · D. Kim · Y. Jang · W. Seol · H. Kim · S.-H. Ahn 939

REVIEWS

AI-Empowered Methods for Smart Energy Consumption: A Review of Load Forecasting, Anomaly Detection and Demand Response

X. Wang · H. Wang · B. Bhandari · L. Cheng 963

**Review of the Application of Acoustic Emission
Technology in Green Manufacturing**

J. Liu · C. Jiang · X. Yang · S. Sun **995**

**A Systematic Review on Extended Reality Applications
for Sustainable Manufacturing Across the Product Lifecycle**

C.-H. Chu · J.-K. Pan **1017**

**Green Manufacturing of Electrically-Tunable Smart
Light-Weight Planar Optics: A Review**

D. Yang · Y. Lee · H. Kang · Q.H. Vu · G. Kang · S.E. Lee ·
H. Han · S. Kim · H.K. Nam · S. Kwon · H.-G. Rhee ·
J. Lee · H. Yoo · H. Yoon · Y.-J. Kim **1029**

*Index (KCI), Naver, Norwegian Register for Scientific Journals
and Series, OCLC WorldCat Discovery Service, Portico,
ProQuest-ExLibris Primo, ProQuest-ExLibris Summon, SCImago,
SCOPUS, Science Citation Index Expanded (SCIE), TD Net
Discovery Service, UGC-CARE List (India), WTI AG, Wanfang*

Instructions for authors for *Int. J. of Precis. Eng. and
Manuf.-Green Tech.* are available at www.springer.com/40684

Further articles can be found at link.springer.com

Abstracted/Indexed in *Baidu, CLOCKSS, CNKI, CNPIEC,
Dimensions, EBSCO Discovery Service, EI Compendex, Google
Scholar, INSPEC, Japanese Science and Technology Agency
(JST), Journal Citation Reports/Science Edition, Korea Citation*

International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Smart Technology

Volume 2 · Number 1 · January 2024

REGULAR PAPERS

The Current Design for Additive Manufacturing Research Frontier

D. W. Rosen 1

Bayesian Hyper-parameter Optimization in One-dimensional Convolutional Autoencoder for Monitoring Bearing Health Status

S. Chae · S. J. Bae 15

Designable Data Augmentation-based Domain-adaptive Design of Electric Vehicle Considering Dynamic Responses

Y. Yoo · J. Lee 23

Directed Graph-based Refinement of Three-dimensional Human Motion Data Using Spatial-temporal Information

C. Choi · J. Lee · H.-J. Chung · J. Park · B. Park · S. Sohn · S. Lee 33

A Finite Element Model of an Electric Motor with an Unbalanced Rotor for Vibration Data Generation

H. Lee · S. Son · D. Jeong · K. H. Sun · B. C. Jeon · K.-Y. Oh 47

Development of 1D-convolutional Neural Network-based Height Profile Prediction Model in Directed Energy Deposition Process Using Melt-pool Image Data

H. Shin · J. Ahn · S. W. Beak · S. W. Lee 57

REVIEW

Recent Progress in Self-Powered Sensors for Structural and Human Monitoring Systems Using Thermoelectric Energy Harvesters

I.-S. Jo · S.-K. Chung · K. Choi 67

2024년 사단법인 한국정밀공학회 임원

회장

민병권(연세대학교)

수석부회장

안성훈(서울대학교)

부회장

이상원(성균관대학교) 오정석(한국기계연구원) 류상문(DN솔루션즈) 김정(KAIST) 이인환(충북대학교)
 박상후(부산대학교) 최영재(한국생산기술연구원)

감사

송창규(한국기계연구원) 이경창(부경대학교)

총무이사

김동성(POSTECH) 김보현(송실대학교) 신현정(KAIST)

재무이사

김창주(한국기계연구원) 송용남(고려대학교) 정영훈(경북대학교)

편집이사

강봉철(국민대학교) 강현욱(UNIST) 고승환(서울대학교) 광문규(경북대학교) 김규만(경북대학교)
 김남근(서강대학교) 김동립(한양대학교) 김산하(KAIST) 김석민(중앙대학교) 김양진(부산대학교)
 김영진(KAIST) 김종백(연세대학교) 김호영(한국공학대학교) 문두환(고려대학교) 박근(서울과학기술대학교)
 박영빈(UNIST) 손정우(금오공과대학교) 안지환(POSTECH) 안형준(송실대학교) 윤준영(연세대학교)
 이광일(경일대학교) 이동원(전남대학교) 이동훈(송실대학교) 이창우(건국대학교) 이호원(서울대학교)
 장진아(POSTECH) 정구현(울산대학교) 정훈의(UNIST) 주백석(금오공과대학교) 진종한(한국표준과학연구원)
 천두만(울산대학교) 추원식(경상국립대학교) 황지홍(서울과학기술대학교)

사업이사

강태준(인하대학교) 권지연(동국대학교) 김무림(한국로봇융합연구원) 김승종(고려대학교) 김진호(영남대학교)
 김충수(한국생산기술연구원) 김태곤(한국생산기술연구원) 김현준(경북대학교) 박석희(부산대학교) 박용재(강원대학교)
 서진호(부경대학교) 안상훈(한국기계연구원) 오기용(한양대학교) 윤주성(경남대학교) 이문구(아주대학교)
 이봉기(전남대학교) 이원규(충남대학교) 이지혜(한국기계연구원) 이현섭(동아대학교) 임지석(영남대학교)
 조영삼(원광대학교) 주기남(조선대학교) 최정욱(중앙대학교) 현승민(한국기계연구원)

기획홍보이사

노유정(부산대학교) 류시형(전북대학교) 이주연(서울과학기술대학교) 허세곤(한국기계연구원)

국제이사

남정수(한국생산기술연구원) 이동진(건국대학교) 전용호(아주대학교) 조영태(창원대학교) 차석원(서울대학교)
 허윤정(경희대학교) 홍성태(울산대학교)

대외협력이사

권석진(한국철도기술연구원) 김경동(한국공작기계산업협회) 김종혁(썬대위아) 장원석(한국기계연구원) 조영환(LIG넥스원(주))

부문회장

김건희(한밭대학교) 이현욱(한국철도기술연구원) 정재일(국민대학교) 이동윤(한국생산기술연구원) 박형욱(UNIST)
 이강재(DN솔루션즈) 조정대(한국기계연구원) 엄광문(건국대학교) 김호찬(안동대학교) 김영범(한양대학교)

특별회원사

다이아몬드

DN솔루션즈 LIG넥스원(주) (주)스맥 신도리코(주) (주)이수페타시스
 (주)케이씨텍 (주)기술러코리아 한국화낙(주) 현대위아(주) (주)화신정공
 화천기공(주)

골드

(주)마리알로 (주)에비던트코리아 (주)어드밴테크코리아 (주)에이스나노켄 (주)엔도로보틱스
 지애펜테크놀로지(주) (주)프로토텍 헥사곤

실버

(주)웨이퍼펍 한국공작기계산업협회

패밀리

(주)넥스페이스 (주)디엔디이 디케이에스에이치코리아(주) 리파인(주) 맥스트레이딩
 (주)미터랩 BIOPAC Systems KOREA (주)비솔 삼성SDI (주)팀솔루션
 (주)스포스 에이비씨무역 (주)에이엠코리아 (주)에임즈 위즈옵틱스
 (주)이엠엘 (주)캐리마 (주)케이랩스 하비스탕스(주) 한국데베소프트

Editor-in-Chief

김보현

송실대학교

bhkim@ssu.ac.kr

Editors

강성목
대구카톨릭대학교

고승환
서울대학교

곽문규
경북대학교

김동성
POSTECH

김무림
한국로봇융합연구원

김양진
부산대학교

문두환
고려대학교

박민수
서울과학기술대학교

박형욱
UNIST

손정우
금오공과대학교

송철기
경상국립대학교

안지환
POSTECH

왕덕현
경남대학교

윤성호
금오공과대학교

이종길
안동대학교

이창우
건국대학교

이창환
서울과학기술대학교

이현섭
동아대학교

정구현
울산대학교

주백석
금오공과대학교

진중환
한국표준과학연구원

천두만
울산대학교

추원식
경상국립대학교

황지홍
서울과학기술대학교

Members of Editorial Board

강봉철
국민대학교

강현욱
UNIST

김기주
동명대학교

김재열
조선대학교

김창주
한국기계연구원

박정재
한국표준과학연구원

박정환
영남대학교

배장호
경성대학교

윤해성
한국항공대학교

이광일
경일대학교

이동훈
송실대학교

이봉기
전남대학교

이호원
서울대학교

장진아
POSTECH

전용호
아주대학교

조영학
서울과학기술대학교

최동휘
경희대학교

최영만
아주대학교

최정욱
중앙대학교

최진승
건국대학교

김갑용
Iowa State Univ.

김범준
Univ. of Tokyo

김우균
Univ. of Cincinnati

민상기
Univ. of Wisconsin-Madison

Simon Park
Univ. of Calgary

Patrick Kwon
Michigan State Univ.

JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR PRECISION ENGINEERING

VOLUME 41, NUMBER 5/ May 2024

ISSN 1225-9071 (Print) / 2287-8769 (Online)

월간 • 제41권 제5호 [통권 제398호] • 비매품

등록일자 1987년 4월 25일

등록번호 서울 라 07037

인쇄일 2024년 4월 25일

발행일 2024년 5월 1일

발행인 민병권

편집인 김보현

인쇄 한림원

편집 한림원

발행소 사단법인 한국정밀공학회

[04508] 서울 중구 종림로 50-1(만리동 1가 51-1 SKY1004빌딩) 12층 / FAX (02)518-2937 / <http://www.kspe.or.kr>

사무국장 김영심 / (02)518-0722 / kspe@kspe.or.kr

JKSPE(한국정밀공학회), IJPEM-ST 박은희 / (02)518-2928 / paper@kspe.or.kr, ijpem.st@kspe.or.kr

IJPEM(GT) 이성경 / (02)518-0723 / ijpem@kspe.or.kr

학술대회 김영심, 김상원 / (02)393-0725 / conf@kspe.or.kr, presm@kspe.or.kr

회계 강수현 / (02)393-0724 / account@kspe.or.kr

INTERNATIONAL JOURNAL OF PRECISION ENGINEERING AND MANUFACTURING



About IJPEM-CFP IJPEM is published by the Korean Society for Precision Engineering with Springer. The journal has a history of 24 years and aims to disseminate relevant fundamental and applied research works of high quality to the international precision and manufacturing engineering community. The journal is indexed in SCIE (Impact factor 1.9) and downloaded more than 148,000 times a year around the world.

Topics of the Special Issue cover novel research contributions of precision engineering and manufacturing - theories and applications in the field of

Semiconductor Manufacturing Systems and Process

The potential focus areas to be covered in this Special Issue include, but are not limited to:

- Lithography systems
- Etching and/or deposition systems
- Probing and test systems
- Inspection and measurement
- Advanced packaging and assembly
- Manufacturing of multi-layer structures
- Chemical-mechanical planarization (CMP)
- Air conditioning and contamination control
- Automation & robot
- Control algorithm and/or AI application
- Key components for equipment and process

Guest editors

Martin Cech
University of West Bohemia Pilsen, Czech Republic

Jun Young Yoon
Yonsei University, Korea

Hakjun Lee
Korea Institute of Industrial Technology, Korea

Submission Procedures

Deadline for Submission Date
January 1, 2024

Publication Date
June 1, 2024

Volume, Number
Vol. 25, No. 6

INTERNATIONAL JOURNAL OF PRECISION ENGINEERING AND MANUFACTURING GREEN TECHNOLOGY



Impact Factor
4.660 by JCR in 2021

About IJPEM-GT

IJPEM-GT is co-published by the Korean Society for Precision Engineering and Springer Nature. The journal is published bimonthly, and JCR 2021 impact factor is 4.660, which ranks it top 18% (24/137) journal in the category of Engineering-Mechanical.

Topics of the Special Issue cover novel research contributions of "Green" precision engineering and manufacturing - theories and applications in the field of

Advanced Manufacturing for ESG

The potential focus areas to be covered in this Special Issue include, but are not limited to:

- RE100 (Renewable Electricity 100%)
- Green Manufacturing for Aerospace and Small Modular Reactor
- Smart and Sustainable Manufacturing for Semiconductors
- AI-assisted Manufacturing

Guest Editors

Professor Beomjoon Kim
The University of Tokyo, Japan

Professor Sung-Tae Hong
University of Ulsan, Korea

Professor Hoon-Eui Jeong
UNIST, Korea

Submission Procedures

Deadline for Submission Date
November 30, 2023

Publication Date
May 1, 2024

Vol., No.
Vol. 11, No. 3

International Journal of Precision Engineering and Manufacturing **SMART TECHNOLOGY**



IJPEM-Smart Technology (hereinafter 'IJPEM-ST') is a new-launched academic journal which will be published by the Korean Society for Precision Engineering (KSPE).

Submit an IJPEM-ST
<http://submit.ijpem-st.org>

Aims and Scope

Under the great wave of the 4th industrial revolution, smart technology is becoming ever more important in the precision engineering and manufacturing fields. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Smart Technology (IJPEM-ST)** is a fully open access, international journal that aims to rapidly disseminate relevant fundamental and applied research works of high quality to international academic and industrial communities. **The journal's specific focus areas in the precision engineering and manufacturing fields include, but are not limited to:**

- ✓ Big Data Analytics and Informatics
- ✓ Sensors, Instrumentation and Process Monitoring
- ✓ Prognostics and Health Management (PHM)
- ✓ Industrial Internet of Things (IIOT)
- ✓ Industrial Artificial Intelligence
- ✓ Digital Twin, Cyber-Physical Systems (CPS) and Metaverse
- ✓ Augmented, Virtual and Extended Reality
- ✓ Human-Robot Interaction, Augmentation and Collaboration
- ✓ Autonomous Things

IJPEM-ST covers various kinds of papers:

Research papers, Short communications, Technical briefs, Position papers, Industry case studies

• Publication Date (Scheduled)

Vol. 2 No. 1 January 1, 2024

Vol. 2 No. 2 July 1, 2024

• Publication and Distribution

by the Korean Society for Precision Engineering with Open-Access

Editorial Board

Editor-in-Chief

Sang Won Lee / Sungkyunkwan University, Korea

Co-Editors-in-Chief

Jay Lee / University of Maryland, USA

Jun Ni / University of Michigan, USA / Shanghai Jiao Tong University, China

Editors

Hyeong-Joon Ahn / Soongsil University, Korea

Hae-Jin Choi / Chung-Ang University, Korea

Chih-Hsing Chu / National Tsing Hua University, Taiwan

Martin B.-G. Jun / Purdue University, USA

Dong Yoon Lee / Korea Institute of Industrial Technology, Korea

Seungchul Lee / POSTECH, Korea

Sangkee Min / University of Wisconsin-Madison, USA

Seung-Ki Moon / Nanyang Technological University, Singapore

Duhwan Mun / Korea University, Korea

Simon Park / University of Calgary, Canada

Editorial Board

Seung-Kyum Choi / Georgia Institute of Technology, USA

Haseung Chung / Michigan State University, USA

Youngkuk Jeong / KTH Royal Institute of Technology, Sweden

Yongho Jeon / Ajou University, Korea

Jay-I. Jeong / Kookmin University, Korea

Hyungjung Kim / Seoul National University, Korea

Yangjin Kim / Pusan National University, Korea

Jihyun Lee / University of Calgary, Canada

Wonkyun Lee / Chungnam National University, Korea

David Rosen / Agency for Science, Technology and Research, Singapore

Joo-Sung Yoon / Kyungnam University, Korea

한국정밀공학회지

JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR
PRECISION ENGINEERING

Scopus, KCI 등재지

TOPICAL ISSUE



가공된 기능성 재료 기술 *Engineered Functional Materials*

KEYWORD

Functional materials

Micro/Nano materials

Energy materials

Micro/Nano structures

세부 내용

기능성 재료는 기존의 재료가 가지고 있는 물성치를 개선한 것으로 이를 구현하기 위해 다양한 공학적 기술이 사용된다. 두 물질의 화학적, 물리적 혼합으로 복합 기능성을 부여하거나 미세구조를 형성하여 표면의 특성을 변형시키는 연구는 그간 많이 진행되어 왔고 현재는 실제 응용 분야에 적용하기 위한 노력이 이어지고 있다. 표면에너지와 부착 특성을 조절하여 제작할 수 있는 방오기술, 발수기술, 방방기술 등이 대표적으로 개발되었고 발전 효율을 향상시키기 위한 미세구조나 약물 전달 효율을 향상시키기 위한 복합재료 등도 발표되고 있다. 지금까지의 연구가 특이한 성질의 재료를 개발하고 그 적용 가능성을 제언하는 형태로 이루어졌다면 최근에는 특정 적용 분야에서 필요한 기능성 재료를 개발하는 형태로 접근방식이 바뀌고 있다.

본 특집호에서는 정밀공학적 관점에서 재료에 특정 기능을 부여하는 기술에 관한 논문을 수록하고 있다. 이 논문들은 실제 응용 분야에 적용하기 위한 미세구조의 형성과 재료의 혼합 및 표면 특성 활용 등을 개발한 구체적 사례를 포함하고 있다. 기능성 재료의 개발뿐만 아니라 실용화에 무게를 둔 연구 결과로서 해당 분야에 널리 적용될 수 있으리라 예상된다.

제출 기한

출판 날짜

권호수

책임편집인

2024년 4월 30일

2024년 7월 1일

Vol. 41, No. 7

곽문규(경북대학교)



JKSPE 투고시스템
article.kspe.or.kr



JKSPE 홈페이지
jkspe.kspe.or.kr

KSPE 대한 한국정밀공학회
Korean Society for Precision Engineering

한국정밀공학회지(JKSPE) 투고 안내

귀 회원님의 건승을 기원합니다.

한국정밀공학회지(Journal of the Korean Society for Precision Engineering, JKSPE)는 정밀공학과 관련된 우수한 논문을 게재하고 있으며

특히 기계공학뿐만 아니라 다학제적 학문을 바탕으로

정밀공학 분야에서 새롭고 독창적인 연구결과를 소개함으로써

정밀공학의 발전에 기여하는 것을 목표로 합니다.

한국정밀공학회지(JKSPE)에 대한 투고 안내를 드리오니

적극적인 관심과 참여 부탁드립니다.



※ SCOPUS, KCI 등재 학술지
 ※ 학술대회 Full Paper 논문, 영문 논문 제출 시
 게재료 면제

한국정밀공학회지(JKSPE)

- | | |
|--------------|---|
| 발행간기 | 월간 (매월 1일 발행) |
| 등재여부 | SCOPUS, KCI 등재지 |
| 투고방법 | <ul style="list-style-type: none"> • 온라인 투고 (http://article.kspe.or.kr/) • JKSPE 저널 홈페이지 (http://jkspe.kspe.or.kr/) |
| 투고자격 | 학회 회원 |
| 제출분야 | 정밀가공, 정밀측정, 로봇제어자동화, 스마트생산시스템, 설계및재료, 공작기계, 나노마이크로기술, 바이오헬스, 적층제조시스템, 녹색생산기술 |
| 관련 상훈 | <ul style="list-style-type: none"> • JKSPE Award (상장, 상금) • 백암논문상 (상장, 상금) • 학술상 (상장, 상금) |

*문의처: 한국정밀공학회 사무국 (paper@kspe.or.kr, (02) 518-2928)

© Copyright 2001 by KSPE. All Rights Reserved

오늘을 지키는 기술, 세상을 향한 혁신

G O F O R W A R D

F O R W O R L D

Leading Innovation Group **LIG**

EVIDENT

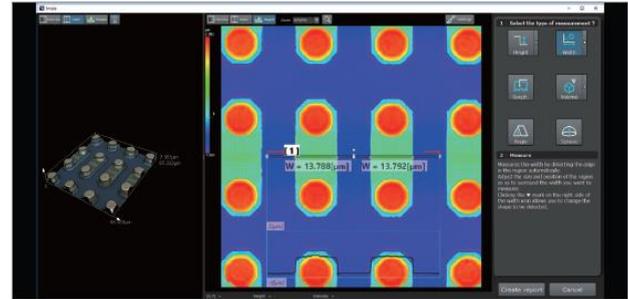
고해상도 3D 이미지와 러프니스에 특화된 OLS5100을 경험해보세요

LEXTM OLS5100

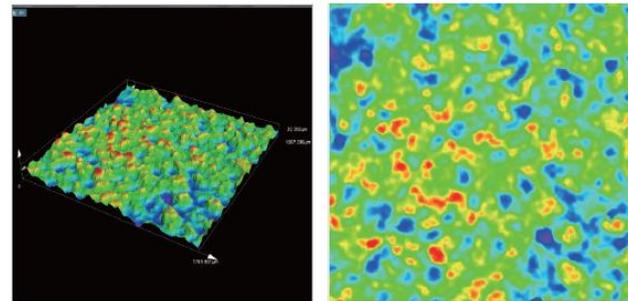
3D Measuring Laser Confocal Microscope



에비던트의 OLS5100은 정확성과 반복성의
동시 보증, 뛰어난 광학렌즈의 성능으로
서브미크론 수준의 모양과 표면 거칠기를 빠르고
효율적으로 정확하게 형상화하고 측정할 수
있습니다.



- 고해상도 3D 이미지를 수초 이내에!
- 17,000배의 비접촉 나노 단위 관찰
- 전문 러프니스 분석 (ISO 25178)
- 미세한 단차도 구현하는 레이저 DIC 기능



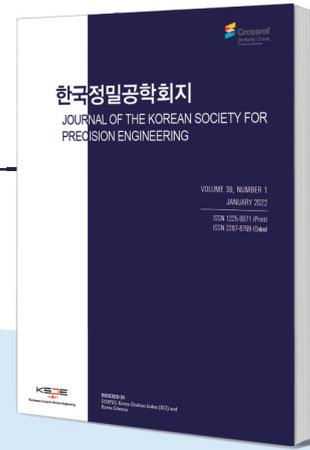
* 에비던트(EVIDENT)는 올림푸스사이언스솔루션 사업본부의 새로운 이름입니다.

본 제품에 대하여 궁금하시거나 제품 테스트를 희망하시면
에비던트코리아의 카카오톡 문의하기 버튼을 이용해주세요



한국정밀공학회지(JKSPE)

JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR PRECISION ENGINEERING



Indexed in SCOPUS, KCI

SCOPUS 등재지(2017~), KCI 등재지(2001~)
1984년 창간, 연간 12회, 매월 1일 발행
ISSN 1225-9071(Print) / 2287-8769(Online)

INTRODUCTION

1. 분기마다 특정 주제에 따른 특집논문 구성
2. 국내·국제 학술대회 발표 논문 중 우수 논문 선정 후 게재
3. 일반 투고 논문

PUBLICATION FEE

	국문 투고	영문 투고
기본 8페이지	200,000원	면제
1페이지 추가	30,000원	면제
후기(사사) 추가	총 금액의 50% 증가	면제

* 국내의 학술대회 발표 논문, 후기(사사)가 없을 경우 게재료 면제

ADVERTISEMENT

관련 기업 및 연구기관의 연구성 또는 제품 홍보, 각 공과대학 도서관·연구소·관련 산업체에 배포

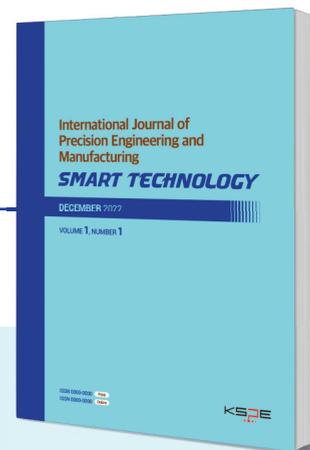
학회지 광고 게재 비용		특별광고료(연 6회 이상)		광고 필름	비고사항
뒷표지	750,000원	6회	정가의 30%	A4(210x297 mm) 제작	* 앞쪽은 광고가 불가능합니다. * 특별회원사: 칼라광고 연간 무료제공 (최대 3회)
칼라광고	500,000원	12회	정가의 50%		
흑백광고	250,000원				
홈페이지 배너		월 100,000원			

TOPICAL ISSUE

TOPIC | 2022: 재료성형 공정에서의 고효율 금형 기술
2023: 스마트/디지털 헬스케어 기술

IJPEM-ST

INTERNATIONAL JOURNAL OF PRECISION ENGINEERING AND MANUFACTURING-SMART TECHNOLOGY



2023 New Journal

2023년 창간, 연간 2회, 1월·7월 1일 발행
ISSN 2951-4614(Print) / 2951-6382(Online)

INTRODUCTION

1. Full Open Access
2. Research papers, Short communications, Technical briefs, Position papers, Industry case studies

AIMS AND SCOPE

- Big Data Analytics and Informatics
- Sensors, Instrumentation and Process Monitoring
- Prognostics and Health Management (PHM)
- Industrial Internet of Things (IIOT)
- Industrial Artificial Intelligence
- Digital Twin, Cyber-Physical Systems (CPS) and Metaverse
- Augmented, Virtual and Extended Reality
- Human-Robot Interaction, Augmentation and Collaboration
- Autonomous Things

WEBSITE

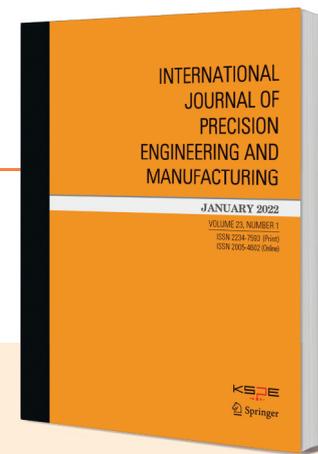
www.ijpem-st.org

IJPEM

INTERNATIONAL JOURNAL OF PRECISION ENGINEERING AND MANUFACTURING

2021 Impact Factor: 2.041

SCIE, SCOPUS, KCI 등재지
2000년 창간, 연간 12회, 매월 1일 발행
ISSN 2234-7593(Print) / 2005-4602(Online)



INTRODUCTION

1. Regular paper, Short communication, Review paper
2. 국제 학술대회 발표 논문 중 우수 논문 선정 후 게재
3. 인용, 다운로드 수 높은 논문 시상 및 홍보

AIMS AND SCOPE

- Precision Manufacturing Processes
- Measurements and Control
- Robotics and Automation
- Manufacturing System
- Design and Materials
- Machine Tools
- Nano/Micro Technology
- Bio Health
- Additive Manufacturing

SPECIAL ISSUE

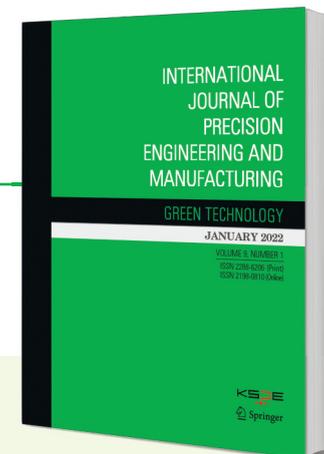
TOPIC | 2023: Robots for Manufacturing Processes and Systems

IJPEM-GT

INTERNATIONAL JOURNAL OF PRECISION ENGINEERING AND MANUFACTURING-GREEN TECHNOLOGY

2021 Impact Factor: 4.660

SCIE, SCOPUS, KCI 등재지
2014년 창간, 연간 6회, 홀수월 1일 발행
ISSN 2288-6206(Print) / 2198-0810(Online)



INTRODUCTION

1. Regular paper, Short communication, Review paper
2. 국제 학술대회 발표 논문 중 우수 논문 선정 후 게재
3. 인용, 다운로드 수 높은 논문 시상 및 홍보

AIMS AND SCOPE

- Energy Saving and Waste Reduction in Manufacturing Processes
- Manufacturing of New and Renewable Energy Devices
- Design and Manufacturing of Green Products
- Materials for Green Manufacturing
- Management and Policy for Sustainable Manufacturing

SPECIAL ISSUE

TOPIC | 2016: Hybrid Manufacturing
2017: 4D Printing
2018: Sustainable Manufacturing in 4th Industrial Revolution
2019: Energy Harvesting
2020: Green Smart Manufacturing
2021: Soft and Green Manufacturing and Applications
2022: Green Manufacturing Coping with Climate Change and Pandemics
2023: NetZero, Achievable by Manufacturing?
2024: Advanced Manufacturing for ESG

2024 **KSPE 2024**
AUTUMN CONFERENCE

한국정밀공학회 추계학술대회

2024. 11. 13. Wed. -15. Fri.

경주 화백컨벤션센터(HICO)
(경북 경주시)

주요일정

200단어 초록마감 **2024. 9. 23. Mon**

초록채택통지 **2024. 10. 2. Wed**

사전등록마감 **2024. 10. 7. Mon**

논문모집분야

- 정밀가공 Precision Manufacturing Processes
- 정밀측정 Precision Measurements
- 로봇제어자동화 Robotics, Control and Automation
- 스마트생산시스템 Smart Manufacturing System
- 설계및재료 Design and Materials
- 공작기계 Machine Tools
- 나노마이크로기술 Nano/Micro Technology
- 바이오헬스 Bio Health
- 적층제조시스템 Additive Manufacturing
- 녹색생산기술 Green Manufacturing Technology

주최 **KSP** 대한정밀공학회 한국정밀공학회
Korean Society for Precision Engineering

후원 **KFST**
한국과학기술단체총연합회

문의 한국정밀공학회 사무국 Tel. (02) 518-0722, (02) 393-0725 E-mail. conf@kspe.or.kr Homepage. <http://www.kspe.or.kr/event/>

International Conference on
*PR*recision *E*ngineering and *S*ustainable *M*anufacturing



PRESM 2024

July 7 Sun – 12 Fri, 2024

Paradise Hotel Busan, Busan, Korea

Important Dates

Deadline for Abstract Submission:
February 22 (Thu), 2024

Date for Acceptance Notification:
(Mail from the PRESM Secretariat)
March 15 (Fri), 2024

Deadline for Early Registration/
Presenter Registration:
May 1 (Wed), 2024

Full Paper Submission (Optional):
May 15 (Wed), 2024

Participating Journals

International Journal of Precision
Engineering and Manufacturing (IJPEM)
***SCIE, SCOPUS**

International Journal of Precision
Engineering and Manufacturing-Green
Technology (IJPEM-GT)
***SCIE, SCOPUS**

International Journal of Precision
Engineering and Manufacturing-Smart
Technology (IJPEM-ST)

Journal of the Korean Society for
Precision Engineering (JKSPE)
***SCOPUS**

Awards & Honors

- Best Paper Awards
- Young Researcher Awards
- Outstanding Presentation Awards

Organizer

 Korean Society for
Precision Engineering (KSPE, Korea)

Secretariat

Homepage www.presm.org | Email presm@kspe.or.kr
Tel +82-2-393-0725 | Fax +82-2-518-2937

2024년 국내 / 국제학술대회 일정 안내

한국정밀공학회

2024

KSPE 2024
Spring
Conference

춘계학술대회

KSPE 한국정밀공학회
Korean Society for Precision Engineering

2024
5. 8(수) - 10(금)

라마다프라자제주호텔
(제주도 제주시)

International Conference on
*PR*recision Engineering and *S*ustainable Manufacturing

PRESM 2024

2024. 7. 7(일) - 12(금)

Paradise Busan Hotel
Busan, Korea

KSPE 한국정밀공학회
Korean Society for Precision Engineering

한국정밀공학회

2024

KSPE 2024
Autumn
Conference

추계학술대회

KSPE 한국정밀공학회
Korean Society for Precision Engineering

2024. 11. 13(수) - 15(금)

경주화백컨벤션센터(HICO)
(경상북도 경주시)



스탠다드 헥사포드 3~4개월! ^{납기}



H-811

변 위: $\pm 17 \text{ mm} / \pm 21^\circ$
 정 밀 도: $\pm 0.06 \mu\text{m}$
 속 도: 10 mm/s
 가 반 하 중: 5 kg



H-840

변 위: $\pm 50 \text{ mm} / \pm 30^\circ$
 정 밀 도: $\pm 0.1 \mu\text{m}$
 속 도: 60 mm/s
 가 반 하 중: 40 kg



H-850

변 위: $\pm 50 \text{ mm} / \pm 30^\circ$
 정 밀 도: $\pm 0.2 \mu\text{m}$
 속 도: 8 mm/s
 가 반 하 중: 250 kg

적용분야

마이크로제조, 의료, 항공 우주, 실리콘 포토닉스, 이미지 안정화, 샘플 포지셔닝, 생명과학 등

