

한국정밀공학회지

JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR
PRECISION ENGINEERING

VOLUME 40, NUMBER 11

NOVEMBER 2023

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

Young Hun Jeong
Kyungpook National University

Jonghan Jin
Korea Research Institute of Standards & Science

Dong Sung Kim
POSTECH

Ho-Chan Kim
Andong National University

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

In Hwan Lee
Chungbuk National University

Hyung Wook Park
UNIST

Min Soo Park
Seoul National University of Science & Technology

Sang-Hu Park
Pusan National University

Jung Woo Sohn
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

Young-Kug Hwang
Chosun College of Science & Technology

Jinah Jang
POSTECH

Yongho Jeon
Ajou University

Jayil Jeong
Kookmin University

Maolin Jin
Korea Institute of Robot & Convergence

Beomjoon Kim
The 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

Jongkil Lee
Andong National University

Kwang-Il Lee
Kyungil University

Sangkee Min
University of Wisconsin-Madison

June Park
Korea Photonics Technology Institute

Jungjae Park
Korea Research Institute of Standards & Science

Jung Whan Park
Yeungnam University

Simon Park
University of Calgary

Yong Son
Korea Institute of Industrial Technology

Chul Ki Song
Gyeongsang National University

Ki-Sik Tae
Konyang University

Duck Hyun Wang
Kyungnam University

Hae-Sung Yoon
Korea Aerospace University

Sung Ho Yoon
Kumoh National Institute of Technology

JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR PRECISION ENGINEERING

VOLUME 40, NUMBER 11 / November 2023

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 November 1, 2023 (Monthly)

Published by The Korean Society for Precision Engineering

Publisher Seok-Woo Lee (President, KSPE)

Managing Editor Bo Hyun Kim

Manuscript Editor Su-Hyun Kang

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

일 반

- 855 하이브리드 이동 로봇의 다리 보행과 스케이트 주행을 위한 역기구학의 해석
황창순, 이 호, 강보영
- 867 조립 반복과 활성화 추가의 PEMFC 전기화학적 특성 영향 연구
전지웅, 장계은, 이영조, 송동근, 유호준, 홍승혁, 김정수, 권예림, 금다혜, 조구영
- 873 미시적 수준에서 인공 고관절 삽입 후 근위 대퇴골의 구조적 거동 분석
류승현, 김정진
- 881 볼 조인트형 메카니컬 스피 구조의 회전 용접토치 설계 및 동특성 해석
이동준, 김정민, 정철수, 진상록
- 891 열가스 가황물 글라스런 채널의 마찰 및 파손 특성에 관한 연구
차수빈, 배준호, 정구현
- 899 항공우주 응용을 위한 반사형 광학 시스템
김기수, 배지훈, 박종복
- 907 볼 및 롤러 LM가이드의 마찰특성 비교분석에 관한 연구
라현정, 김동욱, 이준만, 류한선, 정재한, 정영훈
- 915 스퍼터링 기법을 이용한 백금-사마륨 도핑 세리아 복합 환원극 제작
박용찬, 정다빈, 김현택, 김형민, 홍순욱
- 921 비지도학습 기반 복합 구동시스템 이상 탐지
박기창, 이용관
- 929 초정밀 가공에서 건식 냉각과 가공정밀도에 관한 연구
이경일

CONTENTS

REGULAR

- 855 Analysis of Inverse Kinematics for Legged Walking and Skated Driving with Hybrid Mobile Robot
Chang-Soon Hwang, Ho Lee, and Bo-Yeong Kang
- 867 A Study of Effects of the Repetition of Assembly and the Addition of Activation on Electrochemical Characteristics of PEMFCs
Ji Woong Jeon, Gye Eun Jang, Young Jo Lee, Dong Kun Song, Ho Jun Yoo, Seung Hyeok Hong, Jung Soo Kim, Ye Rim Kwon, Da Hye Geum, and Gu Young Cho
- 873 Structural Behavior Analysis of the Proximal Femur after Artificial Hip Joint Implantation at Micro Level
Seung Hun Ryu and Jung Jin Kim
- 881 Design and Dynamic Characteristics Analysis of Rotating Welding Torch with Ball Joint Type Mechanical Seal structure
Dong Jun Lee, Jung Min Kim, Chul Soo Jeong, and Sangrok Jin
- 891 Study on of Friction and Degradation Characteristics of TPV Glass Run Channel
Su-Bin Cha, Junho Bae, and Koo-Hyun Chung
- 899 Reflective Optical Systems for Aerospace Applications
Kisoo Kim, Ji-Hun Bae, and Jongbok Park
- 907 Study on Comparison of Friction Force between Ball- and Roller-LM Guides
Hyeon Jeong Ra, Dong Wook Kim, Jun Man Lee, Han Seon Ryu, Jae Han Joung, and Young Hun Jeong
- 915 Fabrication of Platinum-Samarium Doped Ceria Composite Cathode Using Sputtering Technique
Yongchan Park, Davin Jeong, Hyeontaek Kim, Hyeongmin Kim, and Soonwook Hong
- 921 Anomaly Detection in a Combined Driving System based on Unsupervised Learning
Kichang Park and Yongkwan Lee
- 929 Research on Dry Cooling and Processing Precision in Ultra-precision Machining
Gyung-II Lee

하이브리드 이동 로봇의 다리 보행과 스케이트 주행을 위한 역기구학의 해석

Analysis of Inverse Kinematics for Legged Walking and Skated Driving with Hybrid Mobile Robot

황창순^{1,#}, 이 호², 강보영²

Chang-Soon Hwang^{1,#}, Ho Lee², and Bo-Yeong Kang²

¹ 경북대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Kyungpook National University)

² 경북대학교 융합학부 (School of Convergence, Kyungpook National University)

Corresponding Author / E-mail: robot@knu.ac.kr, TEL: +82-53-950-7516

ORCID: 0009-0008-5852-9253

KEYWORDS: Hybrid mobile robot (하이브리드 이동 로봇), Legged walking (다리 보행), Skated driving (스케이트 주행), Inverse kinematics (역기구학), Switching end-effectors (말단 교체)

Hybrid mobile robot is the system that will practically combine legged walking and skated driving in the same system. Therefore, this robot has own problems of inverse kinematics that are not considered in typical walking robots. In this paper, I fully categorized the inverse kinematics problems for hybrid mobile robot with general motion by walking and driving on an inclined plane, including switching end-effectors between foots and blades. I also solved the inverse kinematics for each case of problems. I here actively adopted the coordinate transformation derived from the inclined plane to cope with the random motion of foots and blades on the plane. I then presented several examples of the inverse kinematics problems with specific situations, and verified the validity of the analysis method from the results.

Manuscript received: June 8, 2023 / Revised: July 15, 2023 / Accepted: August 28, 2023

1. 서론

하이브리드 이동 로봇은 1개의 시스템에 2개 이상의 이동 방법을 통합한 형태[1-4]인데, 이 연구에서는 다리에 의한 보행과 스케이트에 의한 주행을 동일한 시스템에 통합하는 것을 목표로 한다. 사람은 걷거나 뛰는 것보다 자전거나 인라인 스케이트 등의 도구를 이용하면 훨씬 적은 에너지로 매우 빠르고 멀리 갈 수 있는데, 사람이 그렇다면 로봇도 마찬가지일 것이다. 따라서 주변 상황과 지면 상태에 맞게 저속의 다리 보행과 고속의 스케이트 주행을 적절히 결합해서, 로봇의 이동 능력을 극대화하면서 에너지 효율적인 이동 방법을 제시하고자 한다. 아울러 인간의 스케이트 동작을 공학적으로 구현하는 것만으로도 충분한 의미가 있다고 생각한다. 2족 로봇에 의한 보행 및 주행은

지금까지 수많은 이론 연구[5-7]가 진행되었고, 다양한 동영상 [8-12]으로 연구 결과를 실증하고 있다. 하이브리드 이동 로봇을 개발하기 위해서는 스케이트 주행의 구현이 가장 큰 난관인데, 이 연구에서는 스케이트 주행의 기초적인 이론 연구[13,14]를 진행했고, Fig. 1과 같이 몸통과 2족 10자유도의 구성인 스케이트 로봇(SkaBot)을 개발해서 부족하지만 동영상[15]으로 연구 결과를 예시했는데, 백문이 불여일견(百聞不如一見)이다.

로봇의 역기구학은 일반적으로 주어진 End-effector의 위치와 자세로부터 관절 변수를 구하는 문제인데, 더이상 연구할 것이 남아있지 않다는 소극적인 인상을 가지기 쉽다. 그러나 보편적인 상황에 대한 일반 해법이 존재하더라도, 제한적인 상황에 대한 특수해가 필요한 경우가 있는데, 이 논문은 후자에 해당한다. 스케이트 주행의 경우에는 전방에서 간략하게 본 Fig. 2와 같이

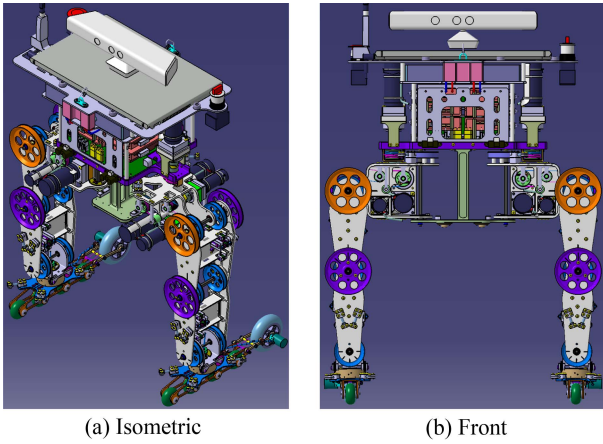


Fig. 1 Inline skating robot (SkaBot)

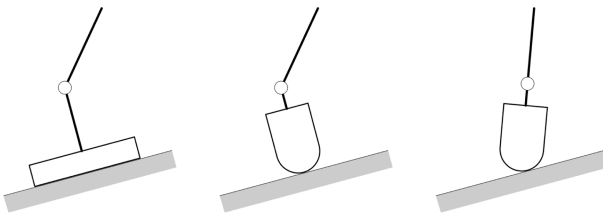


Fig. 2 Switching end-effectors between foot and blade

발목의 불편한 부담을 덜기 위해서 스케이트를 옆으로 기울이게 되는데, 이것은 주어진 발목의 각도를 맞추기 위한 스케이트의 기울기를 구하는 문제가 된다. 그리고 다리 보행의 경우에는 경사면의 기울기와 발바닥의 자세가 기본적으로 서로 같지만, 스케이트 주행의 경우에는 경사면의 기울기와 스케이트 날의 자세가 기본적으로 서로 같지 않다. 따라서 하이브리드 이동 로봇의 스케이트 주행에는 일반적인 보행 로봇에서 상정할 수 없는 고유한 역기구학 문제가 발생한다. 이것은 기존의 역기구학 [5,6,16]에서 다루지 않은 내용인데, 보행 로봇에서는 기지(既知)의 End-effector의 위치와 자세로부터 미지(未知)의 관절 변수를 구하는 것이 주된 문제가 되지만, 스케이트 주행 로봇에서는 기지의 관절 변수에서 미지의 End-effector의 위치와 자세를 구하는 것이 주된 문제가 되는데, 미지수의 개수는 서로 같다.

이 논문에서는 하이브리드 이동 로봇의 다리 보행과 스케이트 주행을 위한 역기구학 문제를 고찰한다. 역기구학 문제를 경사 지면에서 다리 보행과 스케이트 주행에 의한 일반적인 이동, 발바닥과 스케이트 날의 교체 등을 포함해서 체계적으로 분류하고, 각각에 대해서 해석한다. 그리고 구체적인 상황에 대한 역기구학 예제를 계산하고, 결과로부터 해석 방법의 유효성을 확인하고자 한다.

2. 보행, 주행에 대한 역기구학의 해석

2.1 보행, 주행에 대한 역기구학 문제의 분류

Fig. 3은 개발 중인 로봇으로 몸통과 2축 12자유도의 구성인데,

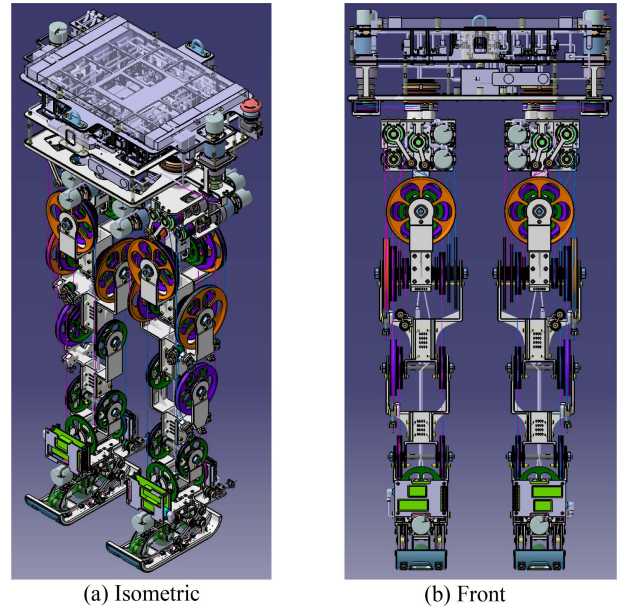


Fig. 3 Hybrid mobile robot (HymBot)

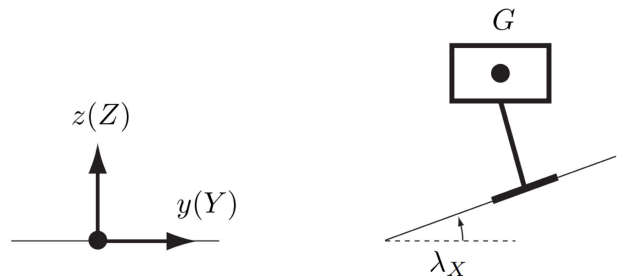


Fig. 4 Robot and inclined plane

Fig. 1과 같이 스케이트 주행만이 가능한 2축 10자유도의 스케이트 로봇[15]과 달리 다리 보행과 스케이트 주행이 동일한 시스템에서 가능하기 때문에 진정한 의미의 하이브리드 이동 로봇이라고 할 수 있다. 여기서는 역기구학 문제를 다루므로 3장에 기하학적인 정보만을 언급하겠다.

모든 좌표계는 일반적으로 원점과 좌표축으로 구성되는데, 평탄 수평면의 기준 및 고정 좌표계는 0-XYZ 좌표계이고, 수평 지면이 XYZ축 방향의 병진 및 회전으로 일정한 경사 지면이 된다. 로봇의 기준 및 고정 좌표계는 0-xyz 좌표계인데, 평탄 수평면의 0-XYZ 좌표계와 서로 같다. 여기서 몸통, 다리의 좌표축은 xyz와 같이 소문자로 표시하고, 경사면, 발바닥, 스케이트 날의 좌표축은 XYZ와 같이 대문자로 표시한다. Fig. 4와 같이 로봇은 경사면 위에서 다리 보행 또는 스케이트 주행에 의해서 직진 또는 선회로 이동한다. 2축 로봇의 입장에서 오른 다리가 제1 다리, 왼 다리가 제2 다리이다.

보행과 주행의 역기구학에 필요한 동차 변환 행렬을 Table 1에 정리했는데, 예를 들면 오른 발바닥의 Ψ_1 은 0-XYZ 고정 좌표계에서 병진과 XYXZ-X+ Euler Angles인 $\lambda_x, \lambda_y, \gamma_x, \gamma_y, \beta_z, \beta_x$ 의 회전으로 $0_1^0 - X_1^0 Y_1^0 Z_1^0$ 이동 좌표계가 되는 것을

Table 1 Homogeneous transformation matrix of inverse kinematics for legged walking and skated driving

	Matrix	Euler angles	Frame
Right plane	A_1	$XYXY (\gamma_Y = 0^\circ)$	$0_1 - X_1 Y_1 Z_1$
Left plane	A_2	$XYXY (\gamma_Y = 180^\circ)$	$0_2 - X_2 Y_2 Z_2$
Foot/blade	Δ_i	$XYXZ^-$	$0'_i - X'_i Y'_i Z'_i$
Right foot	Ψ_1	$XYXZ^- X^+$	$0''_1 - X''_1 Y''_1 Z''_1$
Left foot	Ψ_2	$XYXZ^- X^-$	$0''_2 - X''_2 Y''_2 Z''_2$
Right blade	Ψ_1	$XYXZ^- Y^-$	$0''_1 - X''_1 Y''_1 Z''_1$
Left blade	Ψ_2	$XYXZ^- Y^+$	$0''_2 - X''_2 Y''_2 Z''_2$

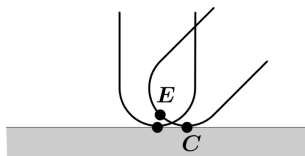


Fig. 5 Contact of blade and plane

의미하고, 오른 스케이트의 Ψ_1 은 $0-XYZ$ 고정 좌표계에서 병진과 $XYXZ^-$ Euler Angles인 $\lambda_X, \lambda_Y, \gamma_X, \gamma_Y, \beta_Z, \beta_Y$ 의 회전으로 $0''_1 - X''_1 Y''_1 Z''_1$ 이동 좌표계가 되는 것을 의미한다. 여기서 Z^- Euler Angle인 β_Z 는 $-Z$ 축 중심의 회전각이고, 생략된 상첨자의 부호는 +이고, $i = 1, 2$ 이다. 우좌(右左) 발바닥의 자세는 $XYXZ^- X^\pm$ Euler Angles로 나타낼 수 있는데, 이것은 경사면의 기울기인 $XYXY$ Euler Angles에 발바닥의 회전인 ZX^\pm Euler Angles를 추가한 형태로서 경사면 위의 자유로운 발바닥의 운동을 나타낸다. 특히 γ_Y 는 보행과 주행의 좌우 다리에서 X_1^+ 축과 X_2^+ 축이 서로 대칭적인 바깥쪽을 가리키도록 추가한 회전각인데, 오른 다리에서 $\gamma_Y = 0^\circ$, 왼 다리에서 $\gamma_Y = 180^\circ$ 이다. Table 1에 포함된 부호의 구분으로 좌우 발바닥에서 회전각은 서로 대칭이 되는데, β_Z 는 바깥으로 돌리는 것이 양이고, β_X 는 앞으로 드는 것이 양이 된다. 그리고 우좌(右左) 스케이트의 자세는 $XYXZ^- Y^\pm$ Euler Angles로 나타낼 수 있는데, 이것은 경사면의 기울기인 $XYXY$ Euler Angles에 스케이트 날의 회전인 $Z^- Y^\pm$ Euler Angles를 추가한 형태로서 경사면 위의 자유로운 스케이트 날의 운동을 나타낸다. Table 1에 포함된 부호의 구분으로 좌우 스케이트에서 회전각은 서로 대칭이 되는데, β_Z 는 바깥으로 돌리는 것이 양이고, β_Y 는 바깥으로 드는 것이 양이 된다. 따라서 경사면 위의 발바닥과 스케이트의 자유로운 운동을 나타내기 위해서 경사면을 기준으로 하는 좌표 변환을 적극적으로 사용했다.

그리고 Fig. 5와 같이 인라인 스케이트 휠의 끝부분이 종단면으로 원호의 형상이다. End-effector의 교체 중에 스케이트 날과 지면의 접촉 조건이 미끄러짐이 없는 Pure Rolling이라고 하면, 접촉 상태는 수직인 선 접촉 또는 경사인 선 접촉으로 서로 변하기 때문에 End-effector의 위치인 E 와 접촉점의 위치인 C 가 바뀌게 된다. 실제로 스케이트 날의 마찰력에는 방향성이

있어서 날 방향의 마찰력이 그 수직 방향의 값보다 대단히 작기 때문에 옆으로 미끄러지지 않는 논홀로노믹(Nonholonomic) 구속이 작용한다. 그리고 많은 4족 보행 로봇[17,18]의 발끝이 마찰력 증가를 위해서 고무 재질의 원기둥 또는 구 형상이므로 Fig. 5와 유사한 상황이 발생하지만, 발목의 자세를 고려하지 않아도 되므로 충분히 회피할 수 있다.

경사 지면에서 보행을 위한 발바닥과 주행을 위한 스케이트 날의 교체를 고찰하는데, Fig. 2와 같이 스케이트 날은 발바닥 안에 수납되어 있다. Fig. 6과 같이 발목의 관절각을 θ_6 이라고 하면, Fig. 2와 같이 보행에서 주행으로 교체하는 경우에는 미지의 θ_6 과 기지의 $\beta_X = 0^\circ$ 으로 발바닥과 지면이 수직의 면 접촉인 상태, 미지의 θ_6 과 기지의 $\beta_Y = 0^\circ$ 으로 스케이트와 지면이 수직의 선 접촉인 상태, 기지의 $\theta_6 = 0^\circ$ 과 미지의 $\beta_Y \neq 0^\circ$ 으로 스케이트와 지면이 경사의 선 접촉인 상태의 순서로 바뀐다. 특히 기지의 $\beta_Y = \beta_{Y_a} = 0^\circ$ 에서 꺾인 발목을 얼마나 돌려야 미지의 $\beta_Y = \beta_{Y_b}$ 에서 $\theta_6 = 0^\circ$ 인 곧게 뻗은 발목이 되는가를 해석하는 것이 핵심이다. 그리고 주행에서 보행으로 교체하는 경우에는 기지의 $\theta_6 = 0^\circ$ 과 미지의 $\beta_Y \neq 0^\circ$ 으로 스케이트와 지면이 경사의 선 접촉인 상태, 미지의 θ_6 과 기지의 $\beta_Y = 0^\circ$ 으로 스케이트와 지면이 수직의 선 접촉인 상태, 미지의 θ_6 과 기지의 $\beta_X = 0^\circ$ 으로 발바닥과 지면이 수직의 면 접촉인 상태의 순서로 바뀐다. 특히 기지의 $\beta_Y = \beta_{Y_a}$ 에서 $\theta_6 = 0^\circ$ 인 곧게 뻗은 발목을 얼마나 돌려야 기지의 $\beta_Y = \beta_{Y_b} = 0^\circ$ 에서 꺾인 발목이 되는가를 해석하는 것이 핵심이다. 여기서 스케이트와 지면이 경사의 선 접촉인 상태는 발목의 불편한 꺾임을 막으면서 부담을 더는 안락한 주행을 위한 것으로 현실적인 선택이다. 따라서 일반적인 이동, 말단(End-effector)의 교체 등을 포함해서 보행과 주행의 역기구학을 분류하면 크게 다음과 같이 3종류의 문제로 정리할 수 있다.

- 기지의 말단 위치, 기지의 말단 자세에 대한 보행과 주행의 역기구학
- 기지의 말단 위치, 미지의 말단 자세에 대한 주행의 역기구학
- 미지의 말단 위치, 미지의 말단 자세에 대한 주행의 역기구학

각각의 문제에 대해서 구체적으로 설명하고, 역기구학을 해석하기로 한다. 아울러 해석 과정은 계산의 연속적인 순서가 매우 중요하므로, 대표적인 저술[19]과 같이 순차적으로 나열하고자 한다.

2.2 기지 말단 위치, 기지 말단 자세의 보행, 주행에 대한 역기구학의 해석

Fig. 3의 로봇에 대한 좌표계는 Fig. 6과 같은데, $0-xyz$ 좌표계는 기준 및 고정 좌표계, $G-x_G y_G z_G$ 좌표계는 몸통의 무게 중심인 G 에 고정한 이동 좌표계, $0'_{i-1} - x'_{i-1} y'_{i-1} z'_{i-1}$ 좌표계는 다리의 제 i 관절에 고정한 이동 좌표계, $0''_i - x''_i y''_i z''_i$ 좌표계는 다리의 End-effector에 고정한 이동 좌표계 등이고, $i = 1,$

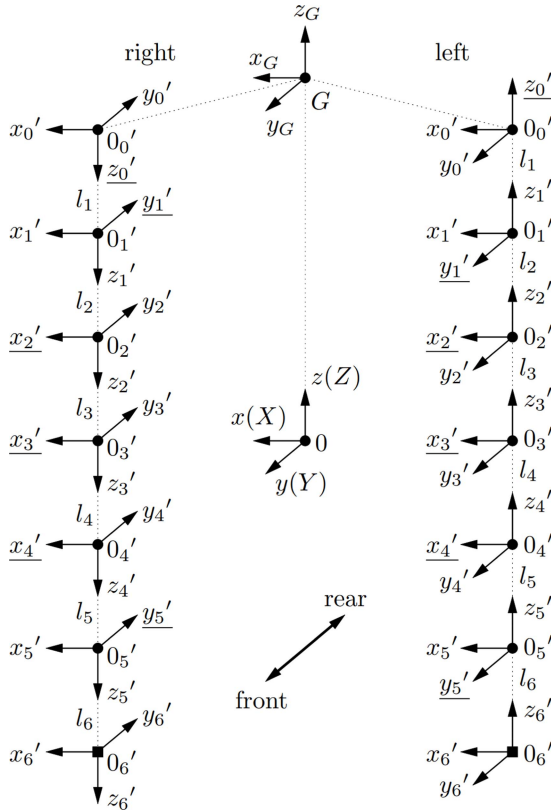


Fig. 6 Coordinate systems of robot

2, ..., 6이다. 몸통의 자세는 xyz Fixed Angles로 나타낼 수 있는데, $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ 는 각각 xyz 축 중심의 회전각을 의미한다. $\theta_z = 0^\circ$ 인 경우에 로봇의 입장에서 오른쪽이 +x축, 앞쪽이 +y축, 위쪽이 +z축이다. 특히 간단한 수식을 위해서 $\theta_x = 0^\circ, \theta_y = 0^\circ$ 으로 놓지만, $\theta_x \neq 0^\circ, \theta_y \neq 0^\circ$ 인 경우도 용이하게 계산할 수 있다. 다리는 2축 12자유도의 구성으로 각 다리에는 6개의 회전 관절이 있고, 관절의 배치는 다른 휴머노이드 로봇[6]과 같이 JR_z-JR_y-JR_x-JR_x-JR_x-JR_y이다. 여기서 JR_x, JR_y, JR_z는 각각 x_{i-1}'축, y_{i-1}'축, z_{i-1}'축 중심의 회전 관절을 의미한다. 좌우 다리에서 관절각은 서로 대칭이 되도록 정했는데, 똑바로 선 자세에서 JR_x는 앞으로 드는 것이 양이고, JR_y는 바깥으로 드는 것이 양이고, JR_z는 바깥으로 돌리는 것이 양이다. 사람의 다리와 비교하면 제1, 2, 3 관절은 고관절에, 제4 관절은 무릎에, 제5, 6 관절은 발목에 각각 해당한다. 그리고 제i 관절의 회전각은 θ_i , 제i 링크의 길이는 l_i 이다. 각 관절의 실질적인 가동 범위는 $\theta_1 = \pm 90^\circ, \theta_2 = \pm 90^\circ, \theta_3 = \pm 90^\circ, \theta_4 = \pm 150^\circ, \theta_5 = \pm 90^\circ, \theta_6 = \pm 90^\circ$ 이고, 간단한 표기를 위해서 $C \equiv \cos, S \equiv \sin, T \equiv \tan$ 등이다. 특히 가장 일반적인 경우인 $\pm 180^\circ$ 의 범위를 이론적으로 고민하기보다는 $\pm 90^\circ$ 에는 arctan 함수를, $\pm 180^\circ$ 에는 arctan2 함수를 구분해서 사용하기로 하는데, 다리의 가동 범위는 팔보다 좁으므로 큰 무리가 없다고 판단된다. 따라서 Fig. 6과 같이 몸통을 포함한 오른 다리의 동차 변환 행렬은 다음과 같다.

$$A_0^G = \begin{pmatrix} C_{\theta_z} & -S_{\theta_z} & 0 & b_{0_x}^G \\ S_{\theta_z} & C_{\theta_z} & 0 & b_{0_y}^G \\ 0 & 0 & 1 & b_{0_z}^G \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{1a}$$

$$A_G^{0'} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & b_{G_x}^{0'} \\ 0 & -1 & 0 & b_{G_y}^{0'} \\ 0 & 0 & -1 & b_{G_z}^{0'} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{1b}$$

$$A_{0'}^{1'} = \begin{pmatrix} C_{\theta_1} & -S_{\theta_1} & 0 & 0 \\ S_{\theta_1} & C_{\theta_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{1c}$$

$$A_{1'}^{2'} = \begin{pmatrix} C_{\theta_2} & 0 & S_{\theta_2} & l_2 S_{\theta_2} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -S_{\theta_2} & 0 & C_{\theta_2} & l_2 C_{\theta_2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{1d}$$

$$A_{2'}^{3'} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_{\theta_3} & -S_{\theta_3} & -l_3 S_{\theta_3} \\ 0 & S_{\theta_3} & C_{\theta_3} & l_3 C_{\theta_3} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{1e}$$

$$A_{3'}^{4'} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_{\theta_4} & -S_{\theta_4} & -l_4 S_{\theta_4} \\ 0 & S_{\theta_4} & C_{\theta_4} & l_4 C_{\theta_4} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{1f}$$

$$A_{4'}^{5'} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_{\theta_5} & -S_{\theta_5} & -l_5 S_{\theta_5} \\ 0 & S_{\theta_5} & C_{\theta_5} & l_5 C_{\theta_5} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{1g}$$

$$A_{5'}^{6'} = \begin{pmatrix} C_{\theta_6} & 0 & S_{\theta_6} & l_6 S_{\theta_6} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -S_{\theta_6} & 0 & C_{\theta_6} & l_6 C_{\theta_6} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{1h}$$

여기서 $b_0^G = (b_{0_x}^G, b_{0_y}^G, b_{0_z}^G)^T$, $b_G^{0'} = (b_{G_x}^{0'}, b_{G_y}^{0'}, b_{G_z}^{0'})^T$ 은 좌표계 원점 사이의 상대 위치이다. 그리고 기준 및 고정 좌표계에 의한 End-effector의 위치와 자세는 다음과 같은 동차 변환 행렬로 사전에 주어진다.

Table 2 Solution of inverse kinematics for common walking and skating with known location of end-effector

Case	$\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6$
(a)	1 pair of solution

$$T = T_0^{6'} = \begin{pmatrix} i_0^{6'} & j_0^{6'} & k_0^{6'} & b_0^{6'} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & b_{0_x}^{6'} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & b_{0_y}^{6'} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & b_{0_z}^{6'} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

여기서 $b_0^{6'} = (b_{0_x}^{6'}, b_{0_y}^{6'}, b_{0_z}^{6'})$ 은 좌표계 원점 사이의 상대 위치이고, $i_0^{6'} = (R_{11}, R_{21}, R_{31})^T$, $j_0^{6'} = (R_{12}, R_{22}, R_{32})^T$, $k_0^{6'} = (R_{13}, R_{23}, R_{33})^T$ 은 End-effector의 자세를 나타낸다. 특히 End-effector의 자세는 Table 1의 Ψ_1 로 주어지는데, 오른 발바닥과 오른 스케이트 날에서 $X_1''Y_1''Z_1''$ 축 방향의 단위 벡터를 각각 $u_{X_1''}$, $u_{Y_1''}$, $u_{Z_1''}$ 이라고 하면, Fig. 6에서 $i_0^{6'} = +u_{X_1''}$, $j_0^{6'} = -u_{Y_1''}$, $k_0^{6'} = -u_{Z_1''}$ 인 것에 유의하자. 따라서 Ψ_{ij} 를 Ψ_1 의 (i, j) 성분이라고 하면, T 와 Ψ_1 의 자세 행렬은 다음과 같게 된다.

$$\begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Psi_{11} & -\Psi_{12} & -\Psi_{13} \\ \Psi_{21} & -\Psi_{22} & -\Psi_{23} \\ \Psi_{31} & -\Psi_{32} & -\Psi_{33} \end{pmatrix} \quad (3)$$

식(1), 식(2)에서 몸통을 포함한 오른 다리의 동차 변환 행렬과 End-effector의 동차 변환 행렬은 다음과 같이 동일한 것이다.

$$A_0^{6'} = A_0^G A_0^0 A_0^1 A_1^2 A_2^3 A_3^4 A_4^5 A_5^6 = T \quad (4)$$

이 문제는 주어진 $T = \Psi_1$ 에서 미지의 $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6$ 을 구하는 것이 되고, 미지수는 6개이다. 먼저 $\theta_1, \theta_2, \theta_6$ 을 구하기 위해서 식(4)에서 다음을 계산한다.

$$(A_0^G A_0^0 A_0^1 A_1^2)^{-1} T = A_2^3 A_3^4 A_4^5 A_5^6 \quad (5)$$

θ_1, θ_2 를 구하기 위해서, 식(5)의 (1, 2) 성분을 정리하면 다음과 같다.

$$(P_1 C_{\theta_1} + P_2 S_{\theta_1}) C_{\theta_2} + P_3 S_{\theta_2} = 0 \quad (6)$$

여기서 $P_1 = R_{12} C_{\theta_2} + R_{22} S_{\theta_2}$, $P_2 = -R_{22} C_{\theta_2} + R_{12} S_{\theta_2}$, $P_3 = R_{32}$ 이다. θ_1, θ_2 를 구하기 위해서, 식(5)의 (1, 3) 성분을 (1, 4) 성분에 대입해서 정리하면 다음과 같다.

$$(P_4 C_{\theta_1} + P_5 S_{\theta_1}) C_{\theta_2} + P_6 S_{\theta_2} = 0 \quad (7)$$

여기서 $P_4 = (b_{0_x}^{6'} - b_{0_x}^G - l_6 R_{13}) C_{\theta_2} + (b_{0_y}^{6'} - b_{0_y}^G - l_6 R_{23}) S_{\theta_2} - b_{0_x}^{0'}$, $P_5 = -(b_{0_y}^{6'} - b_{0_y}^G - l_6 R_{23}) C_{\theta_2} + (b_{0_x}^{6'} - b_{0_x}^G - l_6 R_{13}) S_{\theta_2} + b_{0_y}^{0'}$, $P_6 = b_{0_z}^{6'} - b_{0_z}^G - l_6 R_{33} - b_{0_z}^{0'} + l_1$ 이다. 식(6), 식(7)에서 각각 T_{θ_2} 를 구한 다음에 $T_{\theta_2} = T_{\theta_2}$ 를 정리하면 다음과 같다.

$$(P_1 P_6 - P_3 P_4) C_{\theta_1} + (P_2 P_6 - P_3 P_5) S_{\theta_1} = 0 \quad (8)$$

가동 범위가 $\theta_1 = \pm 90^\circ$ 이므로, 식(8)에서 θ_1 은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\theta_1 = \arctan(T_{\theta_1}) = -\arctan\left(\frac{P_1 P_6 - P_3 P_4}{P_2 P_6 - P_3 P_5}\right) \quad (9)$$

여기서 분자인 $P_1 P_6 - P_3 P_4$ 와 분모인 $P_2 P_6 - P_3 P_5$ 가 $\frac{0}{0}$ 이 아니어야 한다. 가동 범위가 $\theta_2 = \pm 90^\circ$ 이므로, 식(7)에서 θ_2 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\theta_2 = \arctan(T_{\theta_2}) = -\arctan\left(\frac{P_4 C_{\theta_1} + P_5 S_{\theta_1}}{P_6}\right) \quad (10)$$

여기서 분자인 $P_4 C_{\theta_1} + P_5 S_{\theta_1}$ 와 분모인 P_6 가 $\frac{0}{0}$ 이 아니어야 한다. 특히 2.3.2항에서 언급하는 것과 같이 End-effector의 위치 정보를 포함한 P_4, P_5, P_6 을 반드시 사용해야 한다. 그리고 θ_6 을 구하기 위해서, 식(5)의 (1, 1) 성분과 (1, 3) 성분을 정리하면 다음과 같다.

$$(P_7 C_{\theta_1} + P_8 S_{\theta_1}) C_{\theta_2} + P_9 S_{\theta_2} = C_{\theta_6} \quad (11a)$$

$$(P_{10} C_{\theta_1} + P_{11} S_{\theta_1}) C_{\theta_2} + P_{12} S_{\theta_2} = S_{\theta_6} \quad (11b)$$

여기서 $P_7 = R_{11} C_{\theta_2} + R_{21} S_{\theta_2}$, $P_8 = -R_{21} C_{\theta_2} + R_{11} S_{\theta_2}$, $P_9 = R_{31}$, $P_{10} = R_{13} C_{\theta_2} + R_{23} S_{\theta_2}$, $P_{11} = -R_{23} C_{\theta_2} + R_{13} S_{\theta_2}$, $P_{12} = R_{33}$ 이다. 식(11)에서 θ_6 은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\theta_6 = \arctan2(S_{\theta_6}, C_{\theta_6}) \quad (12)$$

그러므로 식(9), 식(10), 식(12)에서 $\theta_1, \theta_2, \theta_6$ 은 1쌍의 해가 존재한다. 다음으로 $\theta_3, \theta_4, \theta_5$ 를 구하기 위해서 식(4)에서 다음을 계산한다.

$$(A_0^G A_0^0 A_0^1 A_1^2)^{-1} T (A_5^6)^{-1} = A_2^3 A_3^4 A_4^5 \quad (13)$$

$\theta_3 + \theta_4 + \theta_5$ 를 구하기 위해서, 식(13)의 (2, 2) 성분과 (3, 2) 성분을 정리하면 다음과 같다.

$$P_2 C_{\theta_1} - P_1 S_{\theta_1} = C_{\theta_3 + \theta_4 + \theta_5} \quad (14a)$$

$$-P_3 C_{\theta_2} + (P_1 C_{\theta_1} + P_2 S_{\theta_1}) S_{\theta_2} = S_{\theta_3 + \theta_4 + \theta_5} \quad (14b)$$

식(14)에서 $\theta_3 + \theta_4 + \theta_5$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\theta_3 + \theta_4 + \theta_5 = \arctan2(S_{\theta_3 + \theta_4 + \theta_5}, C_{\theta_3 + \theta_4 + \theta_5}) \quad (15)$$

θ_4 를 구하기 위해서, 식(13)의 (2, 4) 성분과 (3, 4) 성분을 제곱해서 C_{θ_4} 로 정리하면 다음과 같다.

$$C_{\theta_4} = \frac{Q_3^2 + Q_6^2 - l_3^2 - l_4^2}{2l_3 l_4} \quad (16)$$

여기서 $Q_3 = -P_6 C_{\theta_2} + (P_4 C_{\theta_1} + P_5 S_{\theta_1}) S_{\theta_2} - l_2 - l_5 C_{\theta_3 + \theta_4 + \theta_5}$, $Q_6 = -P_5 C_{\theta_1} + P_4 S_{\theta_1} - l_5 S_{\theta_3 + \theta_4 + \theta_5}$ 이고, 분모인 $2l_3 l_4$ 가 영이 아니어야 하고, $-1 \leq C_{\theta_4} \leq 1$ 이어야 한다. 삼각함수의 관계에서 $S_{\theta_4} = \pm \sqrt{1 - C_{\theta_4}^2}$ 이므로, θ_4 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\theta_4 = \arctan2(S_{\theta_4}, C_{\theta_4}) = \arctan2(\pm\sqrt{1-C_{\theta_4}^2}, C_{\theta_4}) \quad (17)$$

θ_3 을 구하기 위해서, 식(13)의 (2, 4) 성분과 (3, 4) 성분을 C_{θ_3} , S_{θ_3} 에 대한 연립 방정식으로 정리하면 다음과 같다.

$$Q_1 C_{\theta_3} + Q_2 S_{\theta_3} = Q_3 \quad (18a)$$

$$Q_4 C_{\theta_3} + Q_5 S_{\theta_3} = Q_6 \quad (18b)$$

여기서 $Q_1 = l_3 + l_4 C_{\theta_4}$, $Q_2 = -l_4 S_{\theta_4}$, $Q_4 = -Q_2$, $Q_5 = Q_1$ 이다. 식(18)에서 θ_3 은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$C_{\theta_3} = \frac{Q_1 Q_3 - Q_2 Q_6}{Q_1^2 + Q_2^2} \quad S_{\theta_3} = \frac{Q_1 Q_6 + Q_2 Q_3}{Q_1^2 + Q_2^2} \quad (19)$$

$$\theta_3 = \arctan2(S_{\theta_3}, C_{\theta_3})$$

여기서 분모인 $Q_1^2 + Q_2^2$ 가 영이 아니어야 하고, $-1 \leq C_{\theta_3} \leq 1$, $-1 \leq S_{\theta_3} \leq 1$ 이어야 한다. θ_3 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\theta_5 = (\theta_3 + \theta_4 + \theta_5) - \theta_3 - \theta_4 \quad (20)$$

그러므로 식(9), 식(10), 식(12), 식(17), 식(19), 식(20)에서 θ_1 , θ_2 , θ_6 , θ_4 , θ_3 , θ_5 는 전체적으로 2쌍의 해가 존재하므로 적절하게 선택해야 한다. 특히 사람과 같이 $\theta_4 \leq 0^\circ$ 이라고 하면, Table 2와 같이 전체적으로 1쌍의 해가 해석적으로 존재하게 된다. 그리고 가장 일반적인 경우인 $\pm 180^\circ$ 의 범위에서 계산하면 식(8)에서 2쌍, 식(7)에서 2쌍, 식(17)에서 2쌍으로 전체적으로 8쌍의 해가 존재하는데, 구체적인 해석 과정은 생략하기로 한다. 아울러 왼 다리의 경우도 용이하게 해석할 수 있다.

2.3 기지 말단 위치, 미지 말단 자세의 주행에 대한 역기구학의 해석

이 문제는 주어진 스케이트의 위치에서 주어진 θ_6 을 만족하기 위한 스케이트의 자세인 β_Y 와 미지의 θ_1 , θ_2 , θ_3 , θ_4 , θ_5 를 구하는 것이 되고, 미지수는 6개이다. 특히 2.2 절과 같이 오른 스케이트의 자세는 Table 1의 Δ_1 , Ψ_1 로 나타내는데, 미지수인 β_Y 를 구하기 위해서 따로 분리해야 한다. 따라서 Δ_{ij} 를 Δ_1 의 (i, j) 성분이라고 하면, 식(3)과 같이 T 와 Ψ_1 의 자세 행렬은 다음과 같게 된다.

$$\begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Psi_{11} & -\Psi_{12} & -\Psi_{13} \\ \Psi_{21} & -\Psi_{22} & -\Psi_{23} \\ \Psi_{31} & -\Psi_{32} & -\Psi_{33} \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} \Delta_{11} C_{\beta_Y} + \Delta_{13} S_{\beta_Y} & -\Delta_{12} & -\Delta_{13} C_{\beta_Y} + \Delta_{11} S_{\beta_Y} \\ \Delta_{21} C_{\beta_Y} + \Delta_{23} S_{\beta_Y} & -\Delta_{22} & -\Delta_{23} C_{\beta_Y} + \Delta_{21} S_{\beta_Y} \\ \Delta_{31} C_{\beta_Y} + \Delta_{33} S_{\beta_Y} & -\Delta_{32} & -\Delta_{33} C_{\beta_Y} + \Delta_{31} S_{\beta_Y} \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} R_{11}^1 C_{\beta_Y} + R_{11}^2 S_{\beta_Y} & R_{12} & R_{13}^1 C_{\beta_Y} + R_{13}^2 S_{\beta_Y} \\ R_{21}^1 C_{\beta_Y} + R_{21}^2 S_{\beta_Y} & R_{22} & R_{23}^1 C_{\beta_Y} + R_{23}^2 S_{\beta_Y} \\ R_{31}^1 C_{\beta_Y} + R_{31}^2 S_{\beta_Y} & R_{32} & R_{33}^1 C_{\beta_Y} + R_{33}^2 S_{\beta_Y} \end{pmatrix} \quad (21)$$

Table 3 Solutions of inverse kinematics for comfortable skating with known position and unknown orientation of end-effector

Case	Conditions	$\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \beta_Y$
(a)	$\theta_6 = 0$	1 pair of solution
(b)	$\theta_6 \neq 0, P_3 = 0$	2 pairs of solution
(c)	$\theta_6 \neq 0, P_3 \neq 0$	Maximum 4 pairs of solution

이 문제는 Table 3와 같이 크게 3경우로 나눌 수 있는데, 각각의 경우에 대해서 역기구학을 해석하기로 한다.

2.3.1 기지 말단 위치, 미지 말단 자세의 주행에서 $\theta_6 = 0$ 인 경우

$\theta_6 = 0^\circ$ 인 경우에, 먼저 θ_1 , θ_2 , β_Y 를 구하기 위해서 식(5)를 계산한다. θ_1 , θ_2 를 구하기 위해서, 식(5)에서 β_Y 를 포함하지 않는 (1, 2) 성분과 (1, 4) 성분을 정리하면 각각 식(6)과 식(22)와 같다.

$$(P_4 C_{\theta_1} + P_5 S_{\theta_1}) C_{\theta_2} + P_6 S_{\theta_2} = P_7 \quad (22)$$

여기서 $P_4 = (b_{0_x}^{6'} - b_{0_x}^G) C_{\theta_2} + (b_{0_y}^{6'} - b_{0_y}^G) S_{\theta_2} - b_{0_z}^{6'}$, $P_5 = -(b_{0_y}^{6'} - b_{0_y}^G) C_{\theta_2} + (b_{0_x}^{6'} - b_{0_x}^G) S_{\theta_2} + b_{0_z}^{6'}$, $P_6 = b_{0_z}^{6'} - b_{0_z}^G - b_{0_z}^{0'}$, $P_7 = l_6 S_{\theta_6} = 0$ 이다. 식(6), 식(22)에서 각각 T_{θ_2} 를 구한 다음에 $T_{\theta_2} = T_{\theta_2}$ 를 정리하면 다음과 같다.

$$(P_1 P_6 - P_3 P_4) C_{\theta_1} + (P_2 P_6 - P_3 P_5) S_{\theta_1} = 0 \quad (23)$$

가동 범위가 $\theta_1 = \pm 90^\circ$ 이므로, 식(23)에서 θ_1 은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\theta_1 = \arctan(T_{\theta_1}) = -\arctan\left(\frac{P_1 P_6 - P_3 P_4}{P_2 P_6 - P_3 P_5}\right) \quad (24)$$

여기서 분자인 $P_1 P_6 - P_3 P_4$ 와 분모인 $P_2 P_6 - P_3 P_5$ 가 $\frac{0}{0}$ 이 아니어야 한다. 가동 범위가 $\theta_2 = \pm 90^\circ$ 이므로, 식(22)에서 θ_2 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\theta_2 = \arctan(T_{\theta_2}) = -\arctan\left(\frac{P_4 C_{\theta_1} + P_5 S_{\theta_1}}{P_6}\right) \quad (25)$$

여기서 분자인 $P_4 C_{\theta_1} + P_5 S_{\theta_1}$ 와 분모인 P_6 가 $\frac{0}{0}$ 이 아니어야 한다. 특히 2.3.2항에 언급하는 것과 같이 말단의 위치 정보를 포함한 P_4 , P_5 , P_6 을 반드시 사용해야 한다. 그리고 β_Y 를 구하기 위해서 식(5)의 (1, 1) 성분과 (1, 3) 성분을 C_{β_Y} , S_{β_Y} 에 대한 연립 방정식으로 정리하면 다음과 같다.

$$V_1 C_{\beta_Y} + V_2 S_{\beta_Y} = P_{14} \quad (26a)$$

$$V_3 C_{\beta_Y} + V_4 S_{\beta_Y} = P_{21} \quad (26b)$$

$$V_1 = (P_8 C_{\theta_1} + P_9 S_{\theta_1}) C_{\theta_2} + P_{10} S_{\theta_2}$$

$$V_2 = (P_{11} C_{\theta_1} + P_{12} S_{\theta_1}) C_{\theta_2} + P_{13} S_{\theta_2}$$

$$V_3 = (P_{15}C_{\theta_1} + P_{16}S_{\theta_1})C_{\theta_2} + P_{17}S_{\theta_2}$$

$$V_4 = (P_{18}C_{\theta_1} + P_{19}S_{\theta_1})C_{\theta_2} + P_{20}S_{\theta_2}$$

여기서 $P_8 = R_{11}^1C_{\theta_2} + R_{21}^1S_{\theta_2}$, $P_9 = -R_{21}^1C_{\theta_2} + R_{11}^1S_{\theta_2}$, $P_{10} = R_{31}^1$, $P_{11} = R_{21}^2C_{\theta_2} + R_{21}^2S_{\theta_2}$, $P_{12} = -R_{21}^2C_{\theta_2} + R_{21}^2S_{\theta_2}$, $P_{13} = R_{31}^2$, $P_{14} = C_{\theta_6} = 1$, $P_{15} = R_{13}^1C_{\theta_2} + R_{23}^1S_{\theta_2}$, $P_{16} = -R_{23}^1C_{\theta_2} + R_{13}^1S_{\theta_2}$, $P_{17} = R_{33}^1$, $P_{18} = R_{13}^2C_{\theta_2} + R_{23}^2S_{\theta_2}$, $P_{19} = -R_{23}^2C_{\theta_2} + R_{13}^2S_{\theta_2}$, $P_{20} = R_{33}^2$, $P_{21} = S_{\theta_6} = 0$ 이다. 식(26)에서 β_Y 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$C_{\beta_Y} = \frac{P_{21}V_2 - P_{14}V_4}{V_1V_4 - V_2V_3} \quad S_{\beta_Y} = \frac{P_{21}V_1 - P_{14}V_3}{V_1V_4 - V_2V_3} \quad (27a)$$

$$\beta_Y = \arctan2(S_{\beta_Y}, C_{\beta_Y}) \quad (27b)$$

여기서 분모인 $V_1V_4 - V_2V_3$ 가 영이 아니어야 한다. 그러므로 $\theta_6 = 0^\circ$ 인 경우에 식(24), 식(25), 식(27)에서 θ_1 , θ_2 , β_Y 는 1쌍의 해가 존재한다.

다음으로 θ_3 , θ_4 , θ_5 를 구해야 하는데, 나머지 과정은 2.2절의 내용과 기본적으로 동일하므로 2.2절을 참고하길 바란다. 특히 식(16)에서 $Q_3 = -P_{24}C_{\theta_2} + (P_{22}C_{\theta_1} + P_{23}S_{\theta_1})S_{\theta_2} - l_2 - l_5C_{\theta_3 + \theta_4 + \theta_5}$, $Q_6 = -P_{23}C_{\theta_1} + P_{22}S_{\theta_1} - l_5S_{\theta_3 + \theta_4 + \theta_5}$, $P_{22} = P_4 - l_6(P_{15}C_{\beta_Y} + P_{18}S_{\beta_Y})$, $P_{23} = P_5 - l_6(P_{16}C_{\beta_Y} + P_{19}S_{\beta_Y})$, $P_{24} = P_6 - l_6(P_{17}C_{\beta_Y} + P_{20}S_{\beta_Y})$ 등인 것에 유의하자. 그러므로 사람과 같이 $\theta_4 \leq 0^\circ$ 이라고 하면, Table 3과 같이 $\theta_6 = 0^\circ$ 인 경우에 θ_1 , θ_2 , β_Y , θ_4 , θ_3 , θ_5 는 전체적으로 1쌍의 해가 해석적으로 존재하게 된다. 그리고 가장 일반적인 경우인 $\pm 180^\circ$ 의 범위에서 계산하면 식(23)에서 2쌍, 식(22)에서 2쌍, 식(17)에서 2쌍으로 전체적으로 8쌍의 해가 존재하는데, 구체적인 해석 과정은 생략하기로 한다. 아울러 왼 다리의 경우도 용이하게 해석할 수 있다.

2.3.2 기지 말단 위치, 미지 말단 자세의 주행에서 $\theta_6 \neq 0$, $P_3 = 0$ 인 경우

$\theta_6 \neq 0^\circ$ 인 경우에, θ_1 , θ_2 , β_Y 를 구하기 위해서 식(5)를 계산한다. θ_1 , θ_2 를 구하기 위해서, 식(5)에서 β_Y 를 포함하지 않는 (1, 2) 성분과 (1, 4) 성분을 정리하면 각각 식(6)과 식(28)과 같다.

$$(P_4C_{\theta_1} + P_5S_{\theta_1})C_{\theta_2} + P_6S_{\theta_2} = P_7 \quad (28)$$

여기서 $P_4 \sim P_6$ 은 식(22)와 서로 같고, $P_7 = l_6S_{\theta_6} \neq 0$ 이다. 수평 지면에서 $\theta_x = \theta_y = \theta_z = 0^\circ$ 인 몸통으로 똑바로 서면 식(2)에서 $R_{11} = 1$, $R_{22} = R_{33} = -1$, $R_{12} = R_{13} = R_{21} = R_{23} = R_{31} = R_{32} = 0$ 이므로 식(6), 식(28)에서 $P_1 = P_3 = P_4 = P_5 = 0$, $P_2 \neq 0$, $P_6 \neq 0$ 등이 되는데, 이것은 지금껏 평범한 상황이므로 역기구학의 해석이 반드시 가능해야 한다. 하지만 $P_3 = P_4 = P_5 = 0$ 이면 식(6), 식(28)이 $(P_1C_{\theta_1} + P_2S_{\theta_1})C_{\theta_2} = 0$, $P_6S_{\theta_2} = P_7$ 이 되어서 C_{θ_2} , S_{θ_2} 에 대한 연립 방정식의 일반적인 해법으로 $\theta_2 = \arctan2(S_{\theta_2}, C_{\theta_2})$ 를 구할 수 없다. 따라서 운동 상황을 고려한 해석 방법을 고민하게 되었는데, 수많은 시행착오로부터

Table 3과 같이 $\theta_6 \neq 0^\circ$ 인 경우를 크게 $\theta_6 \neq 0^\circ$, $P_3 = 0$ 인 경우와 $\theta_6 \neq 0^\circ$, $P_3 \neq 0$ 인 경우로 구분하는 것이 타당하다고 판단했다. 간단히 설명하면 $P_3 = 0$ 인 경우에 식(6), 식(28)을 연립해서 θ_1 을 구할 수 없지만, $P_3 \neq 0$ 인 경우에 θ_1 을 구할 수 있다.

$\theta_6 \neq 0^\circ$, $P_3 = 0$ 인 경우에, 먼저 θ_1 , θ_2 를 구하기 위해서 식(5)를 계산한다. 식(5)의 (1, 2) 성분인 식(6)이 성립하기 위해서 $C_{\theta_2} \neq 0$, $P_1C_{\theta_1} + P_2S_{\theta_1} = 0$ 을 만족해야 하므로, 가동 범위가 $\pm 90^\circ$ 인 θ_1 은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\theta_1 = \arctan(T_{\theta_1}) = -\arctan\left(\frac{P_1}{P_2}\right) \quad (29)$$

여기서 분자인 P_1 와 분모인 P_2 가 $\frac{0}{0}$ 이 아니어야 한다. θ_2 를 구하기 위해서, 식(5)의 (1, 4) 성분을 정리하면 다음과 같다.

$$U_1C_{\theta_2} + U_2S_{\theta_2} = U_3 \quad (30)$$

여기서 $U_1 = P_4C_{\theta_1} + P_5S_{\theta_1}$, $U_2 = P_6$, $U_3 = P_7$ 이고, $P_4 \sim P_7$ 은 식(28)과 서로 같다. 식(30)에서 θ_2 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$C_{\theta_2} = \frac{U_1U_3 \pm \sqrt{U_2^2(U_1^2 + U_2^2 - U_3^2)}}{U_1^2 + U_2^2}$$

$$S_{\theta_2} = \frac{U_2^2U_3 \mp U_1\sqrt{U_2^2(U_1^2 + U_2^2 - U_3^2)}}{U_2(U_1^2 + U_2^2)}$$

$$\theta_2 = \arctan2(S_{\theta_2}, C_{\theta_2}) \quad (31)$$

여기서 $U_2 \neq 0$, $U_1^2 + U_2^2 - U_3^2 \geq 0$ 이어야 한다. 그러므로 $\theta_6 \neq 0^\circ$, $P_3 = 0$ 인 경우에 식(29), 식(31)에서 θ_1 , θ_2 는 2쌍의 해가 존재한다.

다음으로 β_Y , θ_3 , θ_4 , θ_5 를 구해야 하는데, 나머지 과정은 2.3.1항의 내용과 기본적으로 동일하므로 2.3.1항을 참고하길 바란다. 그러므로 사람과 같이 $\theta_4 \leq 0^\circ$ 이라고 하면, Table 3과 같이 $\theta_6 \neq 0^\circ$, $P_3 = 0$ 인 경우에 θ_1 , θ_2 , β_Y , θ_4 , θ_3 , θ_5 는 전체적으로 2쌍의 해가 해석적으로 존재하게 된다. 그리고 가장 일반적인 경우인 $\pm 180^\circ$ 의 범위에서 계산하면 식(29)인 $P_1C_{\theta_1} + P_2S_{\theta_1} = 0$ 에서 2쌍, 식(31)에서 2쌍, 식(17)에서 2쌍으로 전체적으로 8쌍의 해가 존재하는데, 구체적인 해석 과정은 생략하기로 한다. 아울러 왼 다리의 경우도 용이하게 해석할 수 있다.

2.3.3 기지 말단 위치, 미지 말단 자세의 주행에서 $\theta_6 \neq 0$, $P_3 \neq 0$ 인 경우

$\theta_6 \neq 0^\circ$, $P_3 \neq 0$ 인 경우에, 먼저 θ_1 , θ_2 를 구하기 위해서 식(5)를 계산한다. 식(5)의 (1, 2) 성분과 (1, 4) 성분을 연립해서 C_{θ_1} , S_{θ_1} 을 구하면 다음과 같다.

$$C_{\theta_1} = \frac{(P_2P_6 - P_3P_5)S_{\theta_2} - P_2P_7}{(P_1P_5 - P_2P_4)C_{\theta_2}} \quad (32a)$$

$$S_{\theta_1} = -\frac{(P_1P_6 - P_3P_4)S_{\theta_2} - P_1P_7}{(P_1P_5 - P_2P_4)C_{\theta_2}} \quad (32b)$$

여기서 $P_1 \sim P_7$ 은 식(6), 식(28)과 서로 같고, 분모인 $(P_1P_5 - P_2P_4)C_{\theta_2}$ 가 영이 아니어야 하고, $-1 \leq C_{\theta_1} \leq 1$, $-1 \leq S_{\theta_1} \leq 1$ 이어야 한다. θ_2 를 구하기 위해서, 식(32)의 C_{θ_1} , S_{θ_1} 을 $C_{\theta_1}^2 + S_{\theta_1}^2 = 1$ 에 대입해서 새롭게 S_{θ_2} 에 대해서 정리하면 다음과 같이 S_{θ_2} 에 관한 2차 방정식이 된다.

$$U_5S_{\theta_2}^2 + U_6S_{\theta_2} + U_7 = 0 \tag{33}$$

여기서 $U_1 = (P_1P_5 - P_2P_4)^2$, $U_2 = -P_3^2(P_4^2 + P_5^2) - P_6(P_1(P_1P_6 - 2P_3P_4) + P_2(P_2P_6 - 2P_3P_5))$, $U_3 = 2P_7(P_1(P_1P_6 - P_3P_4) + P_2(P_2P_6 - P_3P_5))$, $U_4 = -P_7^2(P_1^2 + P_2^2)$, $U_5 = U_1 - U_2$, $U_6 = -U_3$, $U_7 = -U_1 - U_4$ 이다. 가동 범위가 $\theta_2 = \pm 90^\circ$ 이므로, 식(33)에서 θ_2 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\theta_2 = \arcsin(S_{\theta_2}) \tag{34}$$

여기서 $-1 \leq S_{\theta_2} \leq 1$ 이어야 한다. 2.3.2항에 언급한 것과 같이 $P_4 = P_5 = 0$ 이 자주 발생하므로, θ_1 을 구하기 위해서 식(5)의 (1, 2) 성분을 정리하면 다음과 같다.

$$U_8C_{\theta_1} + U_9S_{\theta_1} = U_{10} \tag{35}$$

여기서 $U_8 = P_1C_{\theta_2}$, $U_9 = P_2C_{\theta_2}$, $U_{10} = -P_3S_{\theta_2}$ 이다. 식(35)에서 θ_1 은 기본적으로 식(30), 식(31)과 같은 형태로 구할 수 있는데, 여기서 $U_9 \neq 0$, $U_8^2 + U_9^2 - U_{10}^2 \geq 0$ 이어야 한다. 특히 $P_4 = P_5 = 0$ 이면, 식(32)에서 분모가 영이 되어서 θ_1 을 구할 수 없으므로 θ_1 은 반드시 식(35)에서 구해야 하고, 게다가 2.3.2항에 언급한 것과 같이 식(6), 식(28)의 연립 방정식으로 θ_2 를 제대로 구하지 못하게 된다. 그러므로 $\theta_6 \neq 0^\circ$, $P_3 \neq 0$ 인 경우에 식(34), 식(35)에서 θ_2 , θ_1 은 최대 4쌍의 해가 존재한다.

다음으로 β_Y , θ_3 , θ_4 , θ_5 를 구해야 하는데, 나머지 과정은 2.3.1항의 내용과 기본적으로 동일하므로 2.3.1항을 참고하길 바란다. 그러므로 사람과 같이 $\theta_4 \leq 0^\circ$ 이라고 하면, Table 3과 같이 $\theta_6 \neq 0^\circ$, $P_3 \neq 0$ 인 경우에 θ_2 , θ_1 , β_Y , θ_4 , θ_3 , θ_5 는 전체적으로 최대 4쌍의 해가 해석적으로 존재하게 된다. 그리고 가장 일반적인 경우인 $\pm 180^\circ$ 의 범위에서 계산하면 식(34)에서 최대 4쌍, 식(35)에서 2쌍, 식(17)에서 2쌍으로 전체적으로 최대 16쌍의 해가 존재하는데, 구체적인 해석 과정은 생략하기로 한다. 아울러 윈 다리의 경우도 용이하게 해석할 수 있다. 2.3절에 대한 시행착오를 언급하자면, 식(7)을 포함해서 연립 방정식을 해석적으로 풀고자 했지만 수많은 조합으로도 해를 구할 수 없었고, 3개의 미지수인 θ_1 , θ_2 , β_Y 를 한꺼번에 수치해석적인 방법으로 풀고자 했지만 해를 구할 수 없었다.

2.4 미지 말단 위치, 미지 말단 자세의 주행에 대한 역기구학의 해석

Fig. 2와 같이 기지의 $\beta_Y = \beta_{Y_a}$ 에서 꺾인 발목을 얼마나 돌려야 미지의 $\beta_Y = \beta_{Y_b}$ 와 기지의 θ_6 에서 안락하게 뺀 발목이 되는가를 해석하는 것인데, 이 문제는 주어진 θ_6 을 만족하기 위한 스케이트의 위치, 스케이트의 자세인 β_{Y_b} , 미지의 θ_1 , θ_2 , θ_3 , θ_4 , θ_5 를 구하는 것이 되고, 미지수는 6개이다. 특히 오른

스케이트의 위치는 Table 1의 Δ_1 , Ψ_1 로 나타내는데, 미지수인 β_{Y_b} 를 구하기 위해서 따로 분리해야 한다. Table 1의 Δ_1 에서 $X'_1Y'_1Z'_1$ 축 방향의 단위 벡터를 각각 $u_{X'_1}$, $u_{Y'_1}$, $u_{Z'_1}$ 이라고 하면, Fig. 5와 같이 $\beta_Y = 0^\circ$ 인 기지의 $C_0 = E_0$ 과 Pure Rolling을 기준으로 β_Y , C , E 가 기지의 β_{Y_a} , C_a , E_a 에서 미지의 β_{Y_b} , C_b , E_b 로 바뀌게 되는데, C_a , C_b , E_a , E_b 는 다음과 같다.

$$C_a = C_0 - r_w \beta_{Y_a} u_{X'_1} \tag{36a}$$

$$C_b = C_0 - r_w \beta_{Y_b} u_{X'_1} \tag{36b}$$

$$E_a = E_0 - r_w ((\beta_{Y_a} - S_{\beta_{Y_a}}) u_{X'_1} - (1 - C_{\beta_{Y_a}}) u_{Z'_1}) \tag{36c}$$

$$E_b = E_0 - r_w ((\beta_{Y_b} - S_{\beta_{Y_b}}) u_{X'_1} - (1 - C_{\beta_{Y_b}}) u_{Z'_1}) \tag{36d}$$

$$\delta C = -r_w (\beta_{Y_b} - \beta_{Y_a}) u_{X'_1} \tag{36e}$$

$$\delta E = -r_w ((\beta_{Y_b} - S_{\beta_{Y_b}}) u_{X'_1} + C_{\beta_{Y_b}} u_{Z'_1} - (\beta_{Y_a} - S_{\beta_{Y_a}}) u_{X'_1} - C_{\beta_{Y_a}} u_{Z'_1}) \tag{36f}$$

여기서 r_w 는 Fig. 5와 같이 스케이트 휠의 반지름이고, $\delta C = C_b - C_a$, $\delta E = E_b - E_a$ 는 C , E 의 증분이다. 특히 스케이트의 위치는 기지의 E_a 에서 미지의 $E_b = E_a + \delta E$ 로 바뀌는데, $\delta E = (\delta x_E, \delta y_E, \delta z_E)^T$ 를 미지수인 β_{Y_b} 로 나타내면 다음과 같다.

$$\delta x_E = E_{11}(\beta_{Y_b} - S_{\beta_{Y_b}}) + E_{12}C_{\beta_{Y_b}} + E_{13} \tag{37a}$$

$$\delta y_E = E_{21}(\beta_{Y_b} - S_{\beta_{Y_b}}) + E_{22}C_{\beta_{Y_b}} + E_{23} \tag{37b}$$

$$\delta z_E = E_{31}(\beta_{Y_b} - S_{\beta_{Y_b}}) + E_{32}C_{\beta_{Y_b}} + E_{33} \tag{37c}$$

여기서 $E_{11} = -r_w \Delta_{11}$, $E_{12} = -r_w \Delta_{13}$, $E_{13} = r_w ((\beta_{Y_a} - S_{\beta_{Y_a}}) \Delta_{11} + C_{\beta_{Y_a}} \Delta_{13})$, $E_{21} = -r_w \Delta_{21}$, $E_{22} = -r_w \Delta_{23}$, $E_{23} = r_w ((\beta_{Y_a} - S_{\beta_{Y_a}}) \Delta_{21} + C_{\beta_{Y_a}} \Delta_{23})$, $E_{31} = -r_w \Delta_{31}$, $E_{32} = -r_w \Delta_{33}$, $E_{33} = r_w ((\beta_{Y_a} - S_{\beta_{Y_a}}) \Delta_{31} + C_{\beta_{Y_a}} \Delta_{33})$ 이다. 그리고 2.3 절과 같이 오른 스케이트의 자세는 Table 1의 Δ_1 , Ψ_1 로 나타내는데, 미지수인 β_{Y_b} 를 구하기 위해서 따로 분리해야 한다. 따라서 자세 행렬은 식(21)에서 회전각인 β_Y 를 β_{Y_b} 로 바꾼 것과 서로 같다. 이 문제는 Table 4와 같이 크게 2경우로 나눌 수 있는데, 각각의 경우에 대해서 역기구학을 해석하기로 한다.

2.4.1 미지 말단 위치, 미지 말단 자세의 주행에서 $P_3 = 0$ 인 경우

θ_1 , θ_2 , β_{Y_b} 를 구하기 위해서 식(5)를 계산한다. 식(5)에서 β_{Y_b} 를 포함하지 않는 (1, 2) 성분을 정리하면 식(6)과 같다. 2.3.2항과 2.3.3항에서 설명한 것과 같이 식(6)에 대한 해석 방법은 크게 $P_3 = 0$ 인 경우와 $P_3 \neq 0$ 인 경우로 구분하는 것이 타당하다고 판단했다.

$P_3 = 0$ 인 경우에, 먼저 θ_1 , θ_2 , β_{Y_b} 를 구하기 위해서 식(5)를

Table 4 Solutions of inverse kinematics for comfortable skating with unknown location of end-effector

Case	Conditions	$\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \beta_{Y_b}$
(a)	$P_3 = 0$	1 pair of solution
(b)	$P_3 \neq 0$	1 pair of solution

계산한다. 식(5)의 (1, 2) 성분인 식(6)이 성립하기 위해서 $C_{\theta_2} \neq 0, P_1C_{\theta_1} + P_2S_{\theta_1} = 0$ 을 만족해야 하므로, θ_1 은 식(29)와 같이 구할 수 있다. β_{Y_b} 를 구하기 위해서 식(5)의 (1, 1) 성분과 (1, 3) 성분을 $C_{\beta_{Y_b}}, S_{\beta_{Y_b}}$ 에 대한 연립 방정식으로 정리하면 다음과 같다.

$$V_1C_{\beta_{Y_b}} + V_2S_{\beta_{Y_b}} = P_{14} \tag{38a}$$

$$V_3C_{\beta_{Y_b}} + V_4S_{\beta_{Y_b}} = P_{21} \tag{38b}$$

여기서 $V_1 \sim V_4, P_8 \sim P_{21}$ 은 식(26)과 서로 같다. 식(38)에서 식(27)과 같은 형태로 $C_{\beta_{Y_b}}, S_{\beta_{Y_b}}$ 을 구하면 다음과 같다.

$$C_{\beta_{Y_b}} = -\frac{P_{21}V_2 - P_{14}V_4}{V_1V_4 - V_2V_3} \quad S_{\beta_{Y_b}} = \frac{P_{21}V_1 - P_{14}V_3}{V_1V_4 - V_2V_3} \tag{39}$$

여기서 분모인 $V_1V_4 - V_2V_3$ 가 영이 아니어야 한다. 따라서 β_{Y_b} 는 $\beta_{Y_b} = f(\theta_2)$ 와 같이 θ_2 의 함수이다. θ_2 를 구하기 위해서, 식(5)에서 β_{Y_b} 를 포함하는 (1, 4) 성분을 $\beta_{Y_b}, C_{\beta_{Y_b}}, S_{\beta_{Y_b}}$ 에 대해서 정리하면 다음과 같다.

$$V_5\beta_{Y_b} + V_6C_{\beta_{Y_b}} + V_7S_{\beta_{Y_b}} + V_8 = P_{34} \tag{40}$$

$$V_5 = (P_{22}C_{\theta_1} + P_{23}S_{\theta_1})C_{\theta_2} + P_{24}S_{\theta_2}$$

$$V_6 = (P_{25}C_{\theta_1} + P_{26}S_{\theta_1})C_{\theta_2} + P_{27}S_{\theta_2}$$

$$V_7 = (P_{28}C_{\theta_1} + P_{29}S_{\theta_1})C_{\theta_2} + P_{30}S_{\theta_2}$$

$$V_8 = (P_{31}C_{\theta_1} + P_{32}S_{\theta_1})C_{\theta_2} + P_{33}S_{\theta_2}$$

여기서 $P_{22} = E_{11}C_{\theta_2} + E_{21}S_{\theta_2}, P_{23} = -E_{21}C_{\theta_2} + E_{11}S_{\theta_2}, P_{24} = E_{31}, P_{25} = E_{12}C_{\theta_2} + E_{22}S_{\theta_2}, P_{26} = -E_{22}C_{\theta_2} + E_{12}S_{\theta_2}, P_{27} = E_{32}, P_{28} = -E_{11}C_{\theta_2} - E_{21}S_{\theta_2}, P_{29} = E_{21}C_{\theta_2} - E_{11}S_{\theta_2}, P_{30} = -E_{31}, P_{31} = (x_{E_a} + E_{13} - b_{0_x}^G)C_{\theta_2} + (y_{E_a} + E_{23} - b_{0_y}^G)S_{\theta_2} - b_{0_x}^{0'}$, $P_{32} = -(y_{E_a} + E_{23} - b_{0_y}^G)C_{\theta_2} + (x_{E_a} + E_{13} - b_{0_x}^G)S_{\theta_2} + b_{0_y}^{0'}$, $P_{33} = z_{E_a} + E_{33} - b_{0_z}^G - b_{G_z}^{0'}$, $P_{34} = l_6S_{\theta_6}$ 이다. 식(40)에 식(39)를 대입하면 최종적으로 θ_2 의 함수가 되므로, 식(40)에서 θ_2 는 수치해석적으로 구할 수 있다. 회전 범위가 $\beta_{Y_b} = \pm 90^\circ$ 이므로, 식(39)에서 β_{Y_b} 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\beta_{Y_b} = \arctan(T_{\beta_{Y_b}}) = -\arctan\left(\frac{P_{21}V_1 - P_{14}V_3}{P_{21}V_2 - P_{14}V_4}\right) \tag{41}$$

여기서 분자인 $P_{21}V_1 - P_{14}V_3$ 와 분모인 $P_{21}V_2 - P_{14}V_4$ 가 $\frac{0}{0}$ 이 아니어야 한다. 그러므로 $P_3 = 0$ 인 경우에 식(29), 식(40), 식

(41)에서 $\theta_1, \theta_2, \beta_{Y_b}$ 는 1쌍의 해가 존재한다.

다음으로 $\theta_3, \theta_4, \theta_5$ 를 구해야 하는데, 나머지 과정은 2.2절의 내용과 기본적으로 동일하므로 2.2절을 참고하길 바란다. 특히 식(16)에서 $Q_3 = -P_{37}C_{\theta_2} + (P_{35}C_{\theta_1} + P_{36}S_{\theta_1})S_{\theta_2} - l_2 - l_5C_{\theta_3} + \theta_4 + \theta_5$, $Q_6 = -P_{36}C_{\theta_1} + P_{35}S_{\theta_1} - l_5S_{\theta_3} + \theta_4 + \theta_5$, $P_{35} = P_{22}\beta_{Y_b} + P_{25}C_{\beta_{Y_b}} + P_{28}S_{\beta_{Y_b}} + P_{31} - l_6(P_{15}C_{\beta_{Y_b}} + P_{18}S_{\beta_{Y_b}})$, $P_{36} = P_{23}\beta_{Y_b} + P_{26}C_{\beta_{Y_b}} + P_{29}S_{\beta_{Y_b}} + P_{32} - l_6(P_{16}C_{\beta_{Y_b}} + P_{19}S_{\beta_{Y_b}})$, $P_{37} = P_{24}\beta_{Y_b} + P_{27}C_{\beta_{Y_b}} + P_{30}S_{\beta_{Y_b}} + P_{33} - l_6(P_{17}C_{\beta_{Y_b}} + P_{20}S_{\beta_{Y_b}})$ 등이고, 식(37)에서 $b_{0_x}^{6'} = x_{E_b} = x_{E_a} + \delta x_E$, $b_{0_y}^{6'} = y_{E_b} = y_{E_a} + \delta y_E$, $b_{0_z}^{6'} = z_{E_b} = z_{E_a} + \delta z_E$ 인 것에 유의하자. 그러므로 사람과 같이 $\theta_4 \leq 0^\circ$ 이라고 하면, Table 4와 같이 $P_3 = 0$ 인 경우에 $\theta_1, \theta_2, \beta_{Y_b}, \theta_4, \theta_3, \theta_5$ 는 전체적으로 1쌍의 해가 수치해석적으로 존재하게 된다. 그리고 가장 일반적인 경우인 $\pm 180^\circ$ 의 범위에서 계산하면 식(29)에서 2쌍, 식(17)에서 2쌍으로 전체적으로 4쌍의 해가 존재하는데, 구체적인 해석 과정은 생략하기로 한다. 아울러 왼 다리의 경우도 용이하게 해석할 수 있다.

2.4.2 미지 말단 위치, 미지 말단 자세의 주행에서 $P_3 \neq 0$ 인 경우

$P_3 \neq 0$ 인 경우에, 먼저 $\theta_1, \theta_2, \beta_{Y_b}$ 를 구하기 위해서 식(5)를 계산한다. θ_2 를 구하기 위해서, 식(5)에서 β_{Y_b} 를 포함하는 (1, 2) 성분을 정리해서 T_{θ_2} 를 구하면 다음과 같다.

$$T_{\theta_2} = -\frac{P_1C_{\theta_1} + P_2S_{\theta_1}}{P_3} \tag{42}$$

따라서 θ_2 는 $\theta_2 = f(\theta_1)$ 과 같이 θ_1 의 함수이다. β_{Y_b} 를 구하기 위해서 식(5)의 (1, 1) 성분과 (1, 3) 성분을 $C_{\beta_{Y_b}}, S_{\beta_{Y_b}}$ 에 대한 연립 방정식으로 정리하면 식(38)과 같다. 식(38)에서 $C_{\beta_{Y_b}}, S_{\beta_{Y_b}}$ 를 구하면 식(39)와 같다. 따라서 β_{Y_b} 는 $\beta_{Y_b} = f(\theta_1)$ 과 같이 θ_1 의 함수이다. θ_1 을 구하기 위해서, 식(5)에서 β_{Y_b} 를 포함하는 (1, 4) 성분을 $\beta_{Y_b}, C_{\beta_{Y_b}}, S_{\beta_{Y_b}}$ 에 대해서 정리하면 식(40)과 같다. 식(40)에 식(39)를 대입하면 최종적으로 θ_1 의 함수가 되므로, 식(40)에서 θ_1 은 수치해석적으로 구할 수 있다. 가동 범위가 $\theta_2 = \pm 90^\circ$ 이므로, 식(42)에서 θ_2 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\theta_2 = \arctan(T_{\theta_2}) = -\arctan\left(\frac{P_1C_{\theta_1} + P_2S_{\theta_1}}{P_3}\right) \tag{43}$$

여기서 분모인 P_3 가 영이 아니어야 한다. 회전 범위가 $\beta_{Y_b} = \pm 90^\circ$ 이므로, β_{Y_b} 는 식(41)과 같이 구할 수 있다. 그러므로 $P_3 \neq 0$ 인 경우에 식(40), 식(43), 식(41)에서 $\theta_1, \theta_2, \beta_{Y_b}$ 는 1쌍의 해가 존재한다.

다음으로 $\theta_3, \theta_4, \theta_5$ 를 구해야 하는데, 나머지 과정은 2.4.1항의 내용과 기본적으로 동일하므로 2.4.1항을 참고하길 바란다. 그러므로 사람과 같이 $\theta_4 \leq 0^\circ$ 이라고 하면, Table 4와 같이 $P_3 \neq 0$ 인 경우에 $\theta_1, \theta_2, \beta_{Y_b}, \theta_4, \theta_3, \theta_5$ 는 전체적으로 1쌍의 해가 수치해석적으로 존재하게 된다. 그리고 가장 일반적인 경우인 $\pm 180^\circ$ 의 범위에서 계산하면 식(43)인 $(P_1C_{\theta_1} + P_2S_{\theta_1})$

Table 5 Location of inclined planes for inverse kinematics examples

Case	Matrix	Position	Euler angles for orientation
(a)	A_1	$(0,0,0)^T$	$\lambda_X = 0^\circ, \lambda_Y = 15^\circ, \gamma_X = 0^\circ$
(b)	A_2		$\lambda_X = 15^\circ, \lambda_Y = 15^\circ, \gamma_X = 0^\circ$

$C_{\theta_2} + P_3 S_{\theta_2} = 0$ 에서 2쌍, 식(17)에서 2쌍으로 전체적으로 4쌍의 해가 존재하는데, 구체적인 해석 과정은 생략하기로 한다. 아울러 왼 다리의 경우도 용이하게 해석할 수 있다. 2.4절에 대한 시행착오를 언급하자면, 식(7)을 포함해서 연립 방정식을 해석적으로 풀고자 했지만 수많은 조합으로도 해를 구할 수 없었고, 3개의 미지수인 $\theta_1, \theta_2, \beta_Y$ 를 한꺼번에 수치해석적인 방법으로 풀고자 했지만 해를 구할 수 없었다.

3. 보행, 주행에 대한 역기구학의 해석 예제

이 논문에서는 역기구학 문제만을 다루기 때문에 Fig. 3의 로봇을 Fig. 7과 같이 간략하게 표현했다. 여기서 다리 사이의 간격이 220[mm], 링크의 길이가 $l_1 = 193$ [mm], $l_2 = 115$ [mm], $l_3 = 175$ [mm], $l_4 = 165$ [mm], $l_5 = 60$ [mm], $l_6 = 150$ [mm] 등이다. 그리고 Table 5와 같이 예제의 경사 지면은 $0_i - X_i Y_i Z_i$ 좌표계의 위치와 자세로 나타내었는데, Fig. 8과 같이 로봇의 입장에서 Table 5(a)는 우저좌고(右低左高)의 지면이고, Table 5(b)는 우저좌고(右低左高)와 전고후저(前高後低)의 지면인데, Fig. 7과 Fig. 8은 동일한 시점에서 본 것이다.

Fig. 7은 역기구학을 해석한 예제인데, Fig. 8과 같이 End-effector와 경사면에 주목하길 바란다. Fig. 7(a)는 Table 5(a)의 경사면에서 Table 2(a)의 $\beta_X = 0^\circ$ 인 보행을 계산한 예제이고, Fig. 7(b)는 Table 5(a)의 경사면에서 Table 2(a)의 $\beta_Y = 0^\circ$ 인 주행을 계산한 예제이다. Fig. 7(c)는 Table 5(a)의 경사면에서 Table 3(b)의 계산 예제이고, Fig. 7(d)는 Table 5(b)의 경사면에서 Table 3(c)의 계산 예제인데, $\theta_6 = 20^\circ$ 이다. 그리고 Fig. 7(e)(f)는 Table 5(a)의 경사면에서 Table 4(a)의 계산 예제이고, Fig. 7(g)(h)는 Table 5(b)의 경사면에서 Table 4(b)의 계산 예제인데, 꺾인 발목을 곧게 뻗게 되는 과정에서 전후(前後)의 상황이고, $\theta_6 = 0^\circ$ 이다. 아울러 모든 예제는 역기구학과 정기구학의 계산 결과를 서로 비교해서 검산했다. Table 6에 Fig. 7의 결과를 단위가 도(度)인 수치로 간단히 정리했는데, q_i 는 제*i* 다리의 관절각을 의미한다.

4. 결론

하이브리드 이동 로봇의 다리 보행과 스케이트 주행을 위한 역기구학 문제를 고찰했다. 역기구학 문제를 경사 지면에서 다리 보행과 스케이트 주행에 의한 일반적인 이동, 발바닥과

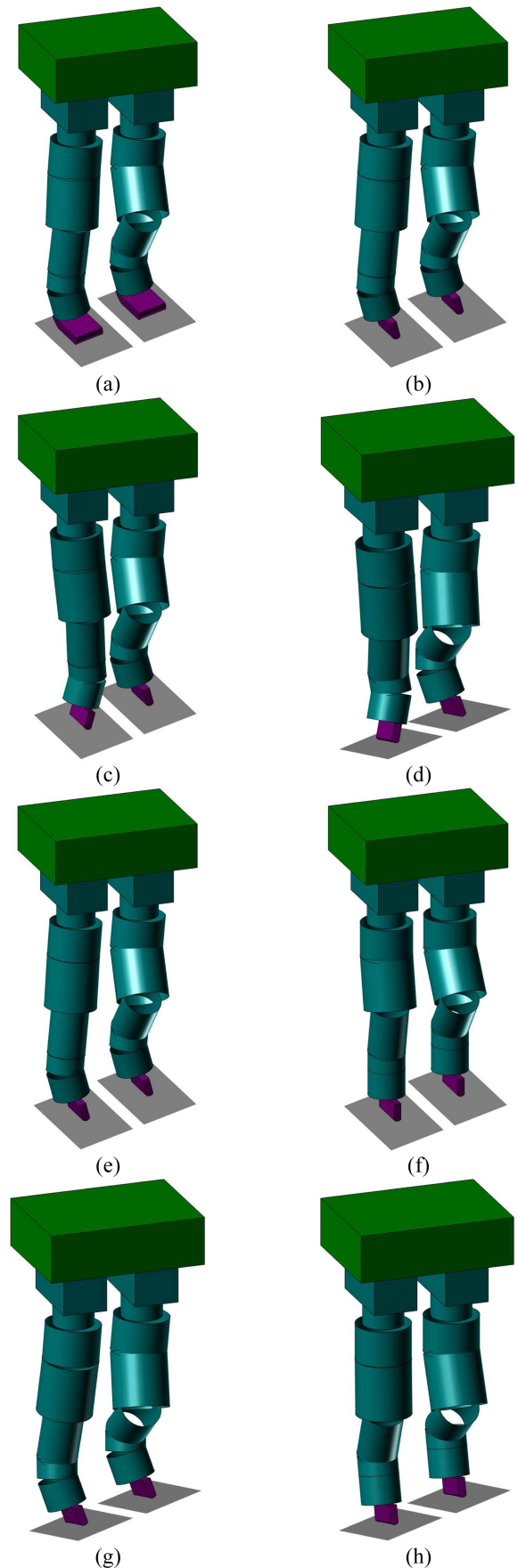


Fig. 7 Examples of inverse kinematics problems

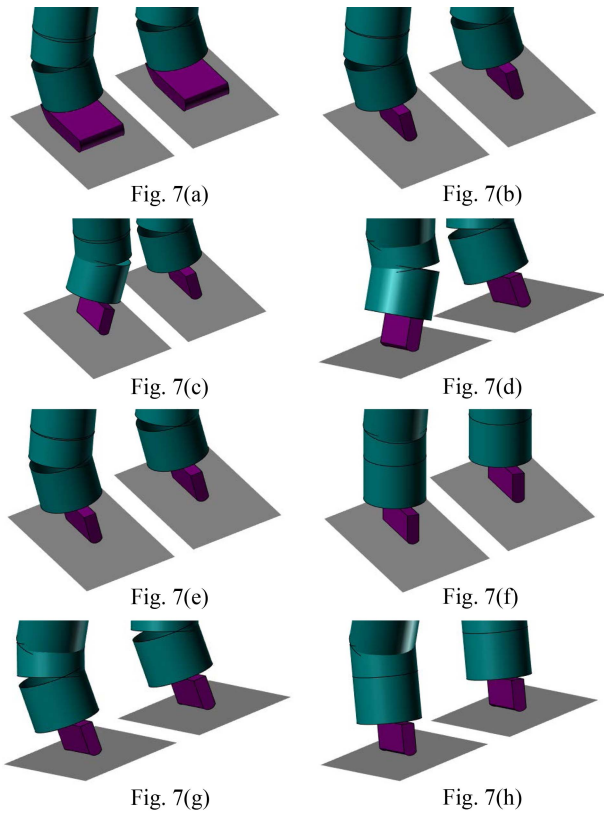


Fig. 8 Partial details of end-effectors and inclined planes

Table 6 Results of inverse kinematics examples

Fig. 7	Joint angles of $q_1[^\circ], q_2[^\circ]$
(a)	$q_1 = (0, 4.34, 5.63 - 11.60, 5.97 - 19.34)$ $q_2 = (0, -4.90, 33.56, -69.45, 35.89, 19.90)$
(b), (e)	$q_1 = (0, 4.28, 2.43 - 5.00, 2.57, -19.28)$ $q_2 = (0, -4.84, 33.16, -68.61, 35.45, 19.84)$
(c)	$q_1 = (0, -4.43, 6.07, -12.50, 6.43, 20)$ $q_2 = (0, -4.87, 33.12, -68.54, 35.42, 20)$
(d)	$q_1 = (-1.21, -4.51, -2.83, -12.53, 30.41, 20)$ $q_2 = (-1.34, -4.98, 22.85, -69.40, 61.61, 20)$
(f)	$q_1 = (0, 0.01, 11.58, -23.87, 12.29, 0)$ $q_2 = (0, -0.01, 35.16, -72.81, 37.65, 0)$
(g)	$q_1 = (1.19, 4.42, -6.36, -5.00, 26.41, -19.58)$ $q_2 = (-1.35, -5.03, 22.82, -69.32, 61.56, 20.21)$
(h)	$q_1 = (0.00, 0.01, 1.80, -22.98, 36.18, 0)$ $q_2 = (-0.00, -0.01, 23.89, -73.13, 64.24, 0)$

스케이트 날의 교체 등을 포함해서 체계적으로 분류했고, 각각의 문제에 대해서 역기구학을 해석했다. 특히 경사면 위에서 발바닥과 스케이트 날의 자유로운 운동을 포괄하기 위해서 경사면을 기준으로 하는 좌표 변환을 적극적으로 사용했고, 해석적인 방법과 수치해석적인 방법을 혼용했다. 그리고 구체적인 상황에 대해서 역기구학 예제를 계산했고, 결과로부터 해석 방법의 유효성을 확인했다.

REFERENCES

1. Endo, G., Hirose, S., (2012), Study on roller-walker—improvement of locomotive efficiency of quadruped robots by passive wheels, *Advanced Robotics*, 26(8-9), 969-988.
2. Roller-walker. <https://www.youtube.com/watch?v=P5ay5VC9ba4>
3. Bjelonic, M., Grandia, R., Harley, O., Galliard, C., Zimmermann, S., Hutter, M., (2021), Whole-body MPC and online gait sequence generation for wheeled-legged robots, *Proceedings of the 2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 8388-8395.
4. The future of robotic mobility. <https://www.youtube.com/watch?v=RJyhZUqj3hM>
5. Nenchev, D. N., Konno, A., Tsujita, T., (2018), *Humanoid robots: Modeling and control*, Butterworth-Heinemann.
6. Goswami, A., Vadakkepat, P., (2019), *Humanoid robotics: A reference*, Springer.
7. Kaul, L. S., (2019), *Human-inspired balancing and recovery stepping for humanoid robots*, KIT Scientific Publishing.
8. ASIMO robot demo 2/9: Walking over an uneven surface. <https://www.youtube.com/watch?v=nVScax9uviM>
9. ASIMO robot running fast. <https://www.youtube.com/watch?v=D6VG9E06LyI>
10. Atlas, The next generation. <https://www.youtube.com/watch?v=rVlhMGQgDkY>
11. Getting some air, Atlas?. <https://www.youtube.com/watch?v=vjSohj-Iclc>
12. ‘Cassie’ sets world record for fastest 100 meters by a bipedal robot. <https://www.youtube.com/watch?v=64hKiuJ31a4>
13. Hwang, C.-S., (2009), Dynamic consideration of athletic constraints on skating motion, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 26(3), 55-67.
14. Hwang, C.-S., (2009), Gaits control for skating motion with nonholonomic constraint, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 26(6), 59-67.
15. SkaBot 1 (part 1). <https://www.youtube.com/watch?v=Sr23tFqCvkg>
16. Inoue, K., Shiina, K. I., Takano, M., Sasaki, K., (1996), Study on total computer-aided design system for robot manipulators, *Journal of the Robotics Society of Japan*, 14(5), 710-719.
17. UpTown spot. <https://www.youtube.com/watch?v=kHBCVlqpVZ8>
18. Bledt, G., Powell, M. J., Katz, B., Di Carlo, J., Wensing, P. M., Kim, S., (2018), MIT cheetah 3: Design and control of a robust, dynamic quadruped robot, *Proceedings of the 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2245-2252.
19. Craig, J. J., (1989), *Introduction to robotics: Mechanics and control* 2nd edition, Addison-Wesley.

**Chang-Soon Hwang**

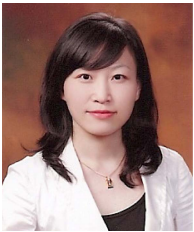
He joined Kyungpook National University in 2005, where he is currently a Professor with the School of Mechanical Engineering. His current research interests include robotic systems for hybrid moving and object manipulating.

E-mail: robot@knu.ac.kr

**Ho Lee**

He joined Kyungpook National University in 2006, where he is currently a Professor with the School of Convergence. His current research interests include smart manufacturing and measurement, robot gripper.

E-mail: holee@knu.ac.kr

**Bo-Yeong Kang**

She joined Kyungpook National University in 2009, where she is currently a Professor with the School of Convergence. Her current research interests include artificial intelligence implementation for intelligent devices.

E-mail: kby09@knu.ac.kr

조립 반복과 활성화 추가의 PEMFC 전기화학적 특성 영향 연구

A Study of Effects of the Repetition of Assembly and the Addition of Activation on Electrochemical Characteristics of PEMFCs

전지웅¹, 장계은¹, 이영조¹, 송동근¹, 유호준¹, 홍승혁¹, 김정수¹, 권예림¹, 금다혜¹, 조구영^{1, #}
Ji Woong Jeon¹, Gye Eun Jang¹, Young Jo Lee¹, Dong Kun Song¹, Ho Jun Yoo¹, Seung Hyeok Hong¹,
Jung Soo Kim¹, Ye Rim Kwon¹, Da Hye Geum¹, and Gu Young Cho^{1, #}

¹ 단국대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Dankook University)
Corresponding Author / E-mail: guyoungcho@dankook.ac.kr TEL: +82-31-8005-3520
ORCID: 0000-0000-7263-8172

KEYWORDS : Polymer electrolyte membrane fuel cell (고분자 전해질 연료전지), Assembly (조립), Activation (활성화), Membrane-electrode assembly (막-전극 조립체)

In this study, the effects of repetition of assembly and disassembly of polymer electrolyte membrane fuel cells on electrochemical performance were systematically investigated. Additionally, the effects of additional activation on polymer electrolyte membrane fuel cells were evaluated. All fuel cells were measured every three days. For the disassembled polymer electrolyte membrane fuel cells, membrane electrode assemblies were stored in a vacuum desiccator. For the maintained assembly, fuel cells were stored at room temperature. The performance and electrochemical characteristics of the fuel cell were analyzed by electrochemical impedance spectroscopy. As a result, the addition of activation to maintained assembly fuel cells showed the best performance among fuel cells with other assembly and activation conditions. Repetition of assembly and disassembly, as well as insufficient activation, caused degradation of the performance of fuel cells.

Manuscript received: March 7, 2023 / Revised: June 28, 2023 / Accepted: August 7, 2023

1. 서론

최근 기후변화로 인하여 사회 전반에 친환경과 지속 가능한 발전이 강조되고 있다. 따라서, 기존 내연기관을 대체할 친환경 동력원으로 연료전지가 주목받고 있다. 특히 연료전지 중 PEMFC (Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell, 고분자 전해질 연료전지)는 이온 전도성 고분자 전해질 막을 사용하는 연료 전지다[1-5]. PEMFC는 비교적 간단한 구조와 낮은 온도(100°C 이하)에서 높은 성능을 제공하는 특징을 가지고 있다.

PEMFC에서 전기화학반응이 일어나는 MEA (Membrane Electrode Assembly, 막 전극 조립체)는 저온에서 전기화학반응을 활발하게 일으키기 위해 Pt(백금) 촉매가 사용된다. 또한, PEMFC의 성능을 극대화하기 위해 활성화(Activation) 과정으로 전해질의 충분한 수화 과정을 거쳐 이온 전도도를 극대화한다[6]. 한편, Feng et al.은 산 처리 접근법을 통해 MEA의 핵심

물질을 재활용하여 자원 소비와 환경 오염을 줄일 수 있다고 보고하였다[7]. 또한, Laetitia et al.은 연료전지의 스택 해체 및 재조립이 Ohmic Loss와 대량의 Mass Transport Loss로 인하여 셀 전압 저하를 야기한다는 것을 확인하였고, 이는 곧 PEMFC의 성능 저하로 이어진다[8]. 선행 연구는 MEA의 재활용과 작동 조건에 따른 PEMFC 성능에 미치는 영향을 평가하였다.

그러나 반복적인 PEMFC의 조립상태와 활성화 추가에 따른 성능 평가는 아직 진행되지 않았다. 본 연구의 목적은 PEMFC의 1) 조립 및 해체의 반복과 2) 활성화 과정의 추가가 연료전지의 전기화학적 특성에 미치는 영향을 분석하는 것이다.

2. 실험

각 경우에 따른 PEMFC의 성능 변화를 분석하기 위하여,

Table 1 Experimental variable settings

Case 1	Maintenance of cell assembly, no addition of activation
Case 2	Maintenance of cell assembly, addition of activation
Case 3	Repetition of cell disassembly and assembly, no addition of activation
Case 4	Repetition of cell disassembly and assembly, addition of activation

모든 경우의 첫 번째 측정에 대하여 공통적으로 활성화 과정을 추가하였다. 매번 PEMFC를 분해하는 경우 다음 성능을 측정하기 전까지 분리한 MEA를 감압 데시케이터(Vacuum Desiccator, i-Nexus, Korea)에 보관하였다. 반면에, 분해하지 않는 경우는 상온에서 조립 상태를 유지하였다. 그리고 활성화를 반복하는 경우에 첫 측정과 동일한 활성화를 진행하였다.

PEMFC는 End-plate와 집전판, 가스켓, Bipolar Plate, GDL (Gas Diffusion Layer, 기체확산층), 그리고 반응면적이 5 cm² 인 상용 MEA (CNL MEA C Type)로 구성되었다. MEA의 Pt Loading은 Anode와 Cathode 모두 0.4 mg/cm²이다. PEMFC는 1.02 kgf·m의 체결압으로 조립하였으며, 모든 실험은 70°C에서 진행하였다. H₂와 Air 모두 1.2 bar에서 70°C의 온도로 공급하였다. H₂ 100 sccm, Air는 500 sccm의 유량으로 공급하였고, Air는 상대습도 100%의 가습 조건으로 진행하였다. 그리고 PEMFC의 Anode와 Cathode에 공급되는 기체(H₂, Air)는 MFC가 내장된 Fuel Cell Test Station (CNL Energy, Korea)으로 공급하였다.

PEMFC 조립을 유지하는 경우와 Cell 분해 후 재조립하는 경우, 활성화 반복 유무를 4가지 경우로 구성하였다. 또한, 모든 경우에 대하여 3일 주기로 측정하였다. 각 경우의 첫 번째 실험에서 OCV를 측정하고 전압을 변화시키면서 활성화를 진행하였다. PEMFC의 성능은 활성화 이후 측정하였다. 또한, 두 번째 측정부터 활성화를 추가하는 경우에는 첫 번째 실험과 동일하게 진행하였다. 또한, 활성화를 추가하지 않는 경우에는 OCV 측정 직후 성능을 측정하였다. 또한, 성능을 측정한 후 0.5 V에서 EIS (Electrochemical Impedance Spectroscopy, 전기화학 임피던스 분광법) 측정을 통해 전기화학적 특성을 분석하였다[9]. PEMFC의 전기화학적 측정은 포텐시오스탯(Potentiostat, HCP-803, Biologic, France)으로 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 각 Case에 따른 성능 변화

Fig. 1은 각 경우의 전류밀도, 전압, 그리고 전력 밀도를 나타내주는 J-V-P 그래프다. Fig. 1(a)는 매 측정마다 PEMFC를 조립을 유지하되 활성화를 추가하지 않는 Case 1이다. Case 1에서 2회차의 Maximum Power Density가 소폭 증가하다가 이후 감소하였다. 5번째 측정에서의 Maximum Power Density는 432 mW/cm²로 최대값인 2번째 측정한 성능(508 mW/cm²)보다

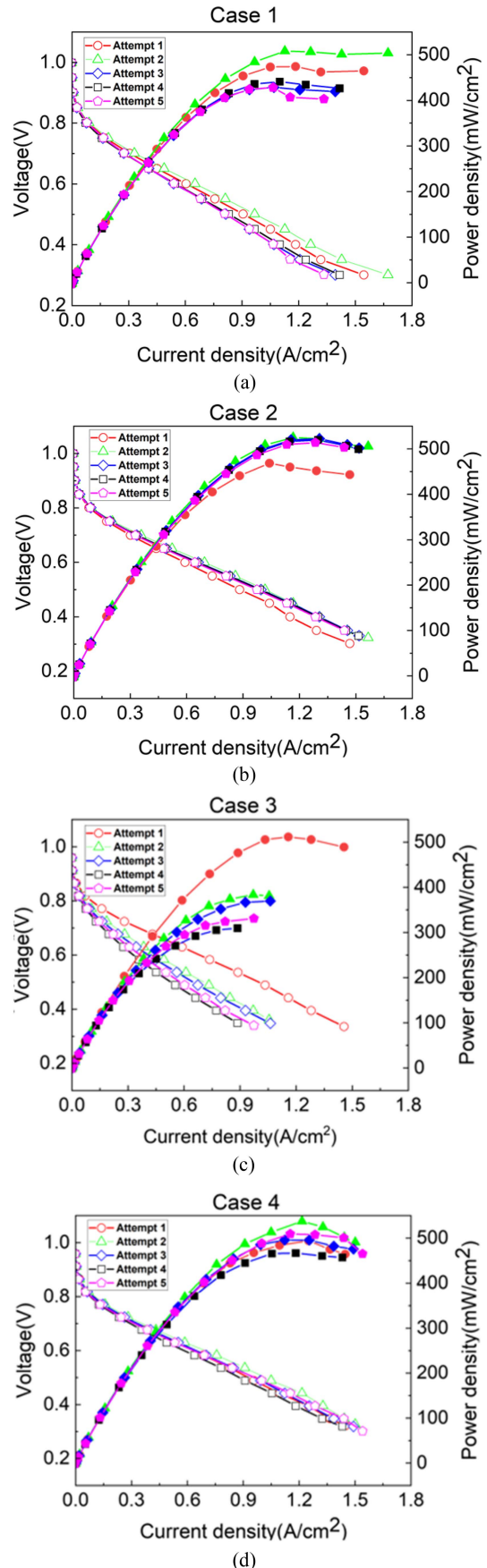


Fig. 1 J-V-P graph (a) Case 1 (b) Case 2 (c) Case 3 (d) Case 4

15.3% 감소하였다. Case 1은 PEMFC를 작동시키지 않는 시간 동안 대기에 노출된 Pt/C 촉매가 열화되어 성능이 저하된 것으로 추정된다[1].

Fig. 1(b)는 PEMFC 조립 상태를 유지하며 매 측정마다 활성화를 추가하는 경우이다. 2번째 측정에서 526 mW/cm²로, 이는 첫 번째 측정값인 470 mW/cm²보다 약 10% 증가하였다. 그리고 2번째 측정 이후에는 성능이 감소하였다. 또한, 5번째 측정에서 Maximum Power Density는 515 mW/cm²로 최대 성능을 보인 2회차보다 2.1% 감소하였다. 매 450회의 활성화가 진행되어 같은 Cell 조립 상태를 유지한 Case 1보다 성능 감소폭이 적다. 이는 PEMFC의 활성화가 충분하지 않은 것이 원인이다.

Fig. 1(c)는 PEMFC를 매 측정마다 분해-조립을 반복하며 활성화 추가를 하지 않은 Case 3이다. Case 3의 경우, 모든 경우에서 가장 큰 성능 저하를 보였다. Case 3에서 가장 낮은 성능을 보인 4회차의 성능은 310 mW/cm²로, 첫 번째 측정값인 516 mW/cm²보다 39.8% 감소하였다. PEMFC를 분해하여 MEA를 데시케이터에 별도로 보관할 경우 감압에 의해 건조가 되는데, 이는 수화된 MEA의 Nafion이 탈수되어 Case 1(활성화 추가 없음) 대비 성능 감소가 컸다고 추정하였다[1,9].

매 측정마다 PEMFC의 해체와 조립을 반복하며, 450회의 활성화 추가를 하는 Case 4의 경우, 2회차에서 최대 538 mW/cm² 성능을 보인 후 4회차에서 가장 성능이 낮은 470 mW/cm²로 약 12.5%의 차이를 보였다. 다만, 5회차에서 4회차 대비 7.83% 증가하였다. Cell을 매번 동일하게 분해하는 Case 3 대비 성능이 높는데, 이는 Cell의 조립 상태보다 활성화 유무가 PEMFC의 성능에 더 큰 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다.

3.2 각 Case에 따른 EIS 변화

Ohmic Resistance는 PEMFC의 전기화학 반응에서 이온과 전자로 인한 저항을 말한다. Fig. 2에 나타난 EIS 그래프에서 고주파수 영역에서의 x절편이 Ohmic Resistance이다. 또한, 그래프에서 반원 곡선은 Anode와 Cathode의 Activation Resistance를 나타낸다[1,10]. 이상적인 경우, Anode보다 Cathode에서 활성화 손실이 더 크기 때문에 반원 크기 차이가 존재한다.

Fig. 2는 모든 Case에 대하여 0.5 V에서 EIS 결과를 나타낸 것이다. Case 1에서, 초기 0.15 Ω·cm²였던 Ohmic Resistance의 크기가 5번째 측정에서 0.16 Ω·cm²로 6.25% 증가하였다. 한편, Case 2에서 0.14 Ω·cm²였던 Ohmic Resistance는 5번째 측정에서 0.12 Ω·cm²로 14.3% 감소하였다. Cell 조립 상태를 유지한 두 조건에서, 활성화를 추가하면 Ohmic Resistance가 감소한다. 즉, 활성화 과정이 증가할수록 PEMFC의 충분한 수화 과정을 거치기 때문에 Ohmic Resistance가 감소한다는 Valter et al.의 선행 연구 결과와 일치한다[11].

Case 3의 Ohmic Resistance는 초기 0.14 Ω·cm²에서 0.17 Ω·cm²까지 17.6%가 증가하였다. Cell을 분해하여 MEA를 감압 데시케이터에 반복적으로 보관한 결과, MEA가 건조해져 Ohmic Resistance가 증가하였다. 이는 Zawodzinski의 선행 연

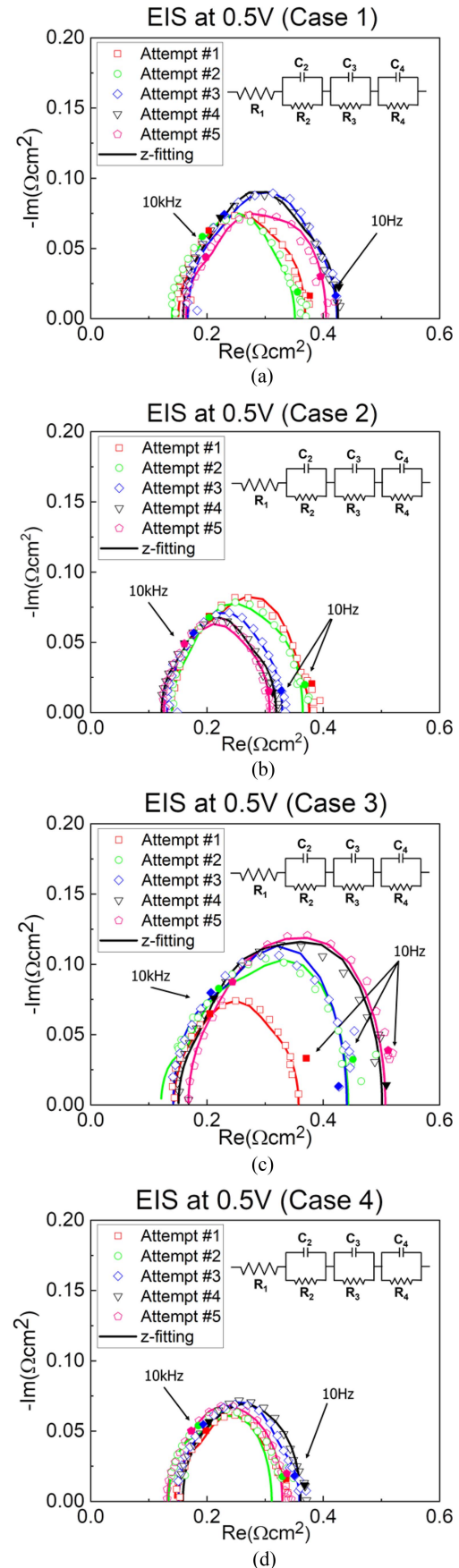


Fig. 2 EIS results at 0.5V (a) Case 1 (b) Case 2 (c) Case 3 (d) Case 4

구와 같이 MEA가 탈수되어 양성자 수송이 현저하게 느려져서 계면 양성자 교환을 수반하는 산소 환원 반응에 영향을 미친다[12].

Case 4의 Ohmic Resistance는 초기 $0.15 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 에서 5번째 측정에서 $0.13 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 로, 13.3% 감소하였다. Case 3과 동일하게 Cell을 분해하였지만, 활성화를 반복하였다는 점에서 충분한 수화 과정을 거쳤기 때문에 Ohmic Resistance가 감소하였다. 또한, 이번 실험에서는 MEA의 탈수보다 활성화를 추가하는 것이 PEMFC 성능에 더 큰 영향을 미친다고 추정된다.

한편, Activation Resistance는 수소산화반응(Hydrogen Oxidation Reaction)과 산소환원반응(Oxygen Reduction Reaction)의 반응 속도 차이로 인하여 연료극보다 공기극에서 Activation Resistance가 더 크다. Case 1에서 Activation Resistance의 크기는 $0.23 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 에서 $0.26 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 로 11.5%가 증가하였고, Case 2의 경우 $0.25 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 에서 $0.18 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 로 28% 감소하였다. Case 1과 Case 2의 Activation Resistance 경향성은 Mohammad et al.의 선행 연구처럼, 활성화 과정으로 인한 MEA의 불순물 제거가 작용하였다[13].

반면, Case 3의 Activation Resistance는 $0.22 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 에서 $0.35 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 로 37% 증가하였고, Case 4의 경우 $0.19 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 에서 $0.2 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 로 5% 증가하였다. 이는 Cell을 분해하는 과정에서 MEA에 불순물이 침투하여 전기화학적 반응 속도를 저하시켰을 것으로 추정한다.

4. 결론

Fig. 3은 모든 경우에 대하여 측정 횟수에 따른 정량적인 성능을, Fig. 4는 Ohmic Resistance, 그리고 Activation Resistance을 나타낸 것이다. Fig. 3을 통해 매 측정마다 전반적으로 성능이 감소하는 경향을 보이지만 일부 향상됨을 확인할 수 있다. Case 1과 Case 2, Case 4의 2회차 측정이 1회차보다 성능이 좋아짐을 확인할 수 있다. Case 2와 Case 4의 경우는 매번 활성화가 진행되었지만, 실험에 사용된 PEMFC의 성능을 최적화하는데 최초의 활성화가 부족하다는 것을 알 수 있다. 그리고 Case 1의 경우 활성화를 추가하지 않았지만, 활성화와 동일한 방법으로 성능을 측정하는 과정이 반영되어 PEMFC의 성능을 소폭 향상시켰을 것이다.

공통적으로 활성화가 추가된 Case 2와 Case 4에서 조립 유지와 분해 및 재조립은 큰 성능 차이를 보이지 않았다. 반면, 매번 활성화가 추가되지 않는 Case 1과 Case 3의 경우, PEMFC의 조립 유지와 분해는 성능에 큰 영향을 미친다는 것으로 추정된다. 이는 PEMFC를 분해하여 MEA를 감압 데시케이터에 보관할 경우 Pucheng et al.의 선행 연구와 같이 Fe^{3+} , Ni^{2+} , Cu^{2+} , Cr^{3+} 와 같은 양이온과 MEA 막의 오염을 제거해주는 주요 매개체인 물이 중간 보관단계에서 Nafion으로부터 증발했다고 추정된다. 따라서, 선행연구와 비슷하게 PEMFC의 성능 감소가 두드러진 것을 알 수 있다[14].

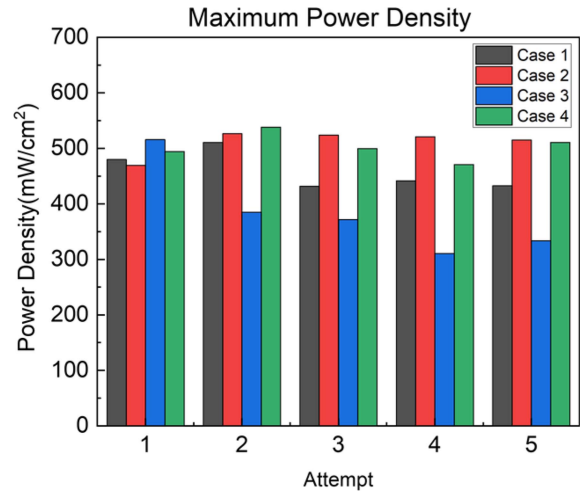


Fig. 3 Performance and resistance variation in each case

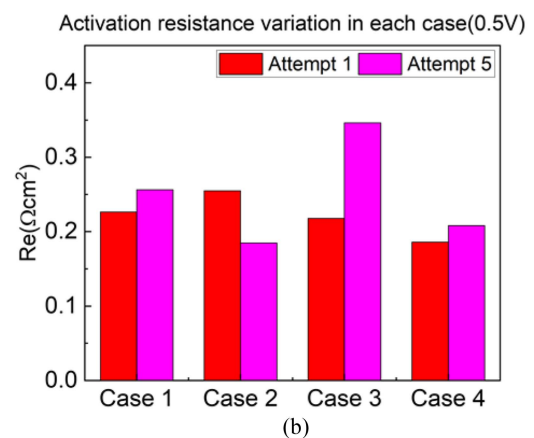
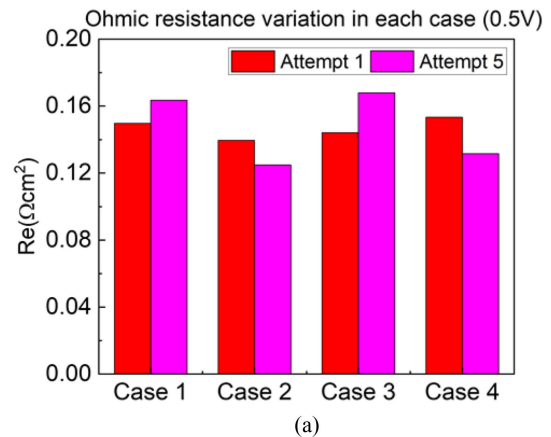


Fig. 4 Ohmic & Faradaic resistance variation at 0.5 V (a) Ohmic resistance variation in each case, (b) Faradaic resistance variation in each case

ACKNOWLEDGEMENT

이 논문은 산업통상자원부 ‘산업전문인력역량강화사업’의 재원으로 한국산업기술진흥원(KIAT)의 지원을 받아 수행된

연구임(2022년 친환경자동차(xEV) 부품개발 R&D 전문인력양성사업, No. P0017120). 또한, 이 논문은 2021년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(20213030030260, 항공용 모빌리티를 위한 연료전지 경량화 기술 개발). 또한 이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2023-00213741).

REFERENCES

1. Ryan, O'H., Cha, S.-W., Colella, W., Prinz, F. B., (2016), Fuel cell fundamentals 3rd edition, WILEY.
2. Yoo, H. J., Cho, G. Y., (2022), Effects of humidification with NaCl solution mist on electrochemical characteristics of polymer electrolyte membrane fuel cells, Sustainability, 14(23), 16242.
3. Jang, G. E., Cho, G. Y., (2022), Effects of Ag current collecting layer fabricated by sputter for 3D-printed polymer bipolar plate of ultra-light polymer electrolyte membrane fuel cells, Sustainability, 14(5), 2997.
4. Yoo, H. J., Jang, G. E., Lee, Y. J., Song, D. K., Lee, H., Cho, G. Y., (2022), Analysis of electrochemical behavior of PEMFC humidified with NaCl solution mist using an ultrasonic vibrator, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 39(12), 939-946.
5. Niya, S. M. R., Hoorfar, M., (2013), Study of proton exchange membrane fuel cells using electrochemical impedance spectroscopy technique—A review, Journal of Power Sources, 240, 281-293.
6. Ko, J.-J., Ko, H.-J., Song, M.-K., Yang, Y.-C., Lee, J.-H., (2005), Activation of polymer electrolyte membrane fuel cells, New & Renewable Energy, 1(2), 34-40.
7. Xu, F., Mu, S., Pan, M., (2010), Recycling of membrane electrode assembly of PEMFC by acid processing, International Journal of Hydrogen Energy, 35(7), 2976-2979.
8. Dubau, L., Durst, J., Maillard, F., Chatenet, M., André, J., Rossinot, E., (2010), Influence of PEMFC operating conditions on the durability of Pt3Co/C Electrocatalysts, ECS Transactions, 33(1), 399.
9. Ciureanu, M., (2004), Effects of Nafion® dehydration in PEM fuel cells, Journal of Applied Electrochemistry, 34, 705-714.
10. Kang, J., Kim, J., (2010), Membrane electrode assembly degradation by dry/wet gas on a PEM fuel cell, International Journal of Hydrogen Energy, 35(23), 13125-13130.
11. Silva, V. B., Rouboa, A., (2012), Hydrogen-fed PEMFC: Overvoltage analysis during an activation procedure, Journal of Electroanalytical Chemistry, 671, 58-66.
12. Zawodzinski Jr, T. A., Springer, T. E., Uribe, F., Gottesfeld, S., (1993), Characterization of polymer electrolytes for fuel cell applications, Solid State Ionics, 60(1-3), 199-211.

13. Zhiani, M., Majidi, S., (2014), Effect of gas diffusion electrode pre-treatment by ultrasonic bath cleaning technique on proton exchange membrane fuel cell performance, International Journal of Hydrogen Energy, 39(24), 12870-12877.
14. Pei, P., Fu, X., Zhu, Z., Ren, P., Chen, D., (2022), Activation of polymer electrolyte membrane fuel cells: Mechanisms, procedures, and evaluation, International Journal of Hydrogen Energy, 47(59), 24897-24915.



Ji Woong Jeon

B.S. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Dankook University. His research interests are fabrication and characterization of polymer electrolyte membrane fuel cells.
E-mail: 32184031@dankook.ac.kr



Gye Eun Jang

M.S. in the Department of Mechanical Engineering, Dankook University. Her research interests are fabrication and characterization of ultra light polymer electrolyte fuel cells.
E-mail: wkdrpdm12@dankook.ac.kr



Young Jo Lee

M.S. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Dankook University. His research interests are fabrication and characterization of solid oxide fuel cells.
E-mail: cell_72210559@dankook.ac.kr



Dong Kun Song

M.S. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Dankook University. His research interests are fabrication and characterization of polymer electrolyte membrane fuel cells.
E-mail: d72220125@dankook.ac.kr



Ho Jun Yoo

M.S. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Dankook University. His research interests are fabrication and characterization of polymer electrolyte membrane fuel cells.
E-mail: dku72220126@dankook.ac.kr

**Seung Hyeok Hong**

M.S. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Dankook University. His research interests are fabrication and characterization of polymer electrolyte membrane fuel cells.

E-mail: tmdgur3583@naver.com

**Jung Soo Kim**

M.S. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Dankook University. His research interests are fabrication and characterization of polymer electrolyte membrane fuel cells.

E-mail: dexasd916@naver.com

**Ye Rim Kwon**

M.S. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Dankook University. Her research interests are fabrication and characterization of solid oxide fuel cells

E-mail: dpfla1262@dankook.ac.kr

**Da Hye Geum**

B.S. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Dankook University. Her research interests are fabrication and characterization of polymer electrolyte membrane fuel cells.

Email: 32205079@dankook.ac.kr

**Gu Young Cho**

Assistant Professor in the Department of Mechanical Engineering, Dankook University. He received his Ph.D. in Mechanical and Aerospace Engineering from Seoul National University. His research interest is fuel cells, thin films, and semiconducting processes.

E-mail: guyoungcho@dankook.ac.kr

미시적 수준에서 인공 고관절 삽입 후 근위 대퇴골의 구조적 거동 분석

Structural Behavior Analysis of the Proximal Femur after Artificial Hip Joint Implantation at Micro Level

류승헌¹, 김정진^{1,#}
Seung Hun Ryu¹ and Jung Jin Kim^{1,#}

¹ 계명대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Keimyung University)
Corresponding Author / E-mail: kj4537@gmail.com, TEL: +82-53-580-5290
ORCID: 0000-0001-6948-6027

KEYWORDS: Artificial hip joint (인공 고관절), Micro level (미시적 수준), Proximal femur (근위 대퇴골), Stress shielding phenomenon (응력방패 현상), Total hip replacement (인공 고관절 전치환술)

Total hip replacement is a representative treatment for avascular necrosis of the femoral head. However, the stress shielding caused by the replacement induces dissociation of the artificial hip joint and various complications. Many studies have tried to explore the stress shielding but, most studies have been conducted at macro level and not at micro level. Thus, this study aimed to quantitatively analyze the structural behavior of the proximal femur according to total hip replacement at the micro level to explore the stress shielding. For this purpose, this study selected the artificial hip joint of the single wedge type and implanted the joint into a proximal femur that has a high resolution of 50 μm . Then the structural behavior of the implanted femur was analyzed by comparing that of the intact femur under three daily activity loads. As a result, the high possibility was confirmed that the stress shielding will occur in both cortical and cancellous bones under the one-legged stance movements. Additionally, it was discovered that the cancellous bone had a considerably lesser chance of adducting at an angle similar to the neck shaft angle of an artificial hip joint.

Manuscript received: May 1, 2023 / Revised: July 15, 2023 / Accepted: July 20, 2023

1. 서론

대퇴골두 무혈성 괴사는 대퇴골로의 혈류가 줄어들어 따라 영양분 부족으로 골의 괴사를 일으키는 골격계 질환이다[1]. 이는 고관절의 자유로운 보행과 운동을 불가능하게 할 뿐만 아니라 극심한 통증도 수반한다. 특히 해당 질환의 정확한 원인이 규명되지 않았으며 초기 발병 시 특별한 자각 증상이 없어 더욱 주의가 요구되는 질환이다[2]. 이 질환의 치료법은 골의 괴사 정도에 따라 일반적으로 비수술적 치료와 수술적 치료로 구분된다. 먼저 골두의 괴사가 경미한 경우 자연 경과를 지켜보거나 약물 치료를 통해 증상을 호전시킨다[3]. 하지만 비수술적 치료에도 증상이 호전되지 않거나, 괴사의 정도가 심한 경우 수술적

치료가 시행되며 대표적으로 인공 고관절 전치환술(Total Hip Replacement, THR)이 대표적으로 사용된다[4].

인공 고관절 전치환술은 괴사한 대퇴골두를 제거하고 금속으로 이루어진 인공 고관절을 단단히 끼워 넣어 고정하여 인공 삽입물로 실제 관절을 대신하는 수술이다[5]. 해당 수술 방법은 고관절 통증을 경감하고 관절운동을 증대시켜 일상적인 활동을 가능하게 한다. 특히 골절 질환이 동반된 노인 환자들에게 매우 성공적인 수술법으로 알려져 있다[6]. 이러한 장점에도 불구하고 해당 수술법은 다양한 부작용이 존재한다. 대표적으로 부작용으로 인공 고관절의 탈구(Dislocation), 감염(Infection), 대퇴골 골절(Fracture), 혈전(Blood Clot), 인공 고관절의 해리(Loosening) 등이 존재한다[7]. 특히 인공 고관절의 해리 현상은

수술 후 가장 빈번하게 나타날 뿐만 아니라 다양한 합병증을 야기시켜 임상 분야에서 큰 문제로 대두되고 있다[8].

인공 고관절의 해리 현상은 삽입된 인공물에 의한 응력방패 현상(Stress Shielding)으로부터 야기된다[9]. 골격계에서 발생하는 응력방패 현상이란 삽입된 인공 고관절이 삽입 주변부의 정상골 대비 높은 강성으로 인해, 응력이 인공 고관절에서 대부분 발생하고 주변 골에는 거의 발생하지 않는 현상을 말한다[10]. 일반적으로 인체의 골은 자기 최적화 능력을 보유하고 있어 응력이 높은 부위에 골을 생성하고, 반면 응력이 적은 부위는 골을 소실시킨다[11]. 따라서 응력방패 현상이 장기간 지속될 시 골 소실로 인한 인공 고관절의 해리가 유발된다. 또한 인공 고관절의 해리는 염증 및 통증 유발, 주변부 골의 파손 등 다양한 합병증을 야기시켜 인공 고관절의 일부 또는 전부를 교체하거나 재배치하는 재치환술을 요구한다[8]. 따라서 고관절 전치환술 전 응력 방패 현상을 미연에 분석하고 예방하는 것이 매우 중요하다.

이러한 중요성과 함께 이전 연구자들은 응력방패 현상을 파악하기 위한 다양한 연구를 진행하였다. 특히, 동일 하중 아래 정상골과 인공 고관절이 삽입된 골의 구조적 거동의 차이를 비교함으로써 응력방패 현상을 파악하는 연구가 대표적이다[12-14]. 비록 위 연구들은 인공 고관절 삽입골과 정상골간 구조적 거동의 상이함을 정량적으로 보였지만, 골 밀도 영상 기반 거시적 수준(Macro Level)의 연구로 대퇴골 미세구조의 특징을 반영하지 못하는 한계점을 가진다. 하지만, 미세구조로 구성된 근위 대퇴골의 해면골은 삽입된 인공 고관절과 직접적인 기계적 상호작용을 한다[15]. 따라서 정확한 응력방패 현상을 분석하기 위해서는 골 미세구조의 특징을 고려한 미시적 수준(Micro Level)에서의 거동 분석이 필수적이다[16,17].

따라서, 본 연구는 미시적 수준에서 인공 고관절 전치환술 이후 인공 고관절이 삽입된 근위 대퇴골의 구조적 거동을 정량적으로 분석하고 응력방패 현상을 파악하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해 50 μm 고해상도 근위 대퇴골에 인공 고관절을 삽입 후 일상 하중 조건 아래 발생하는 구조적 거동의 분석을 통해 응력방패 현상을 파악하였다.

2. 본론

2.1 근위 대퇴골과 인공 고관절 모델

본 연구는 대퇴골두 무혈성 괴사의 대표적 환부인 근위 대퇴골을 인공 고관절 삽입 골격계로 선정하였다. 다만, 미시적 수준에서 미세구조의 거동을 분석하기 위해서는, 최소 100 μm 의 높은 영상 해상도를 필요로 한다. 하지만, 100 μm 의 이상의 해상도는 과도한 방사선량을 요구하여 생체 내(*in vivo*) 근위 대퇴골 영상의 촬영은 현실적으로 불가능한 상황이다[18]. 반면, 현재 촬영 가능한 근위 대퇴골의 임상 영상은 평균 600 μm 의 낮은 해상도를 가져 골 미세구조 표현이 불가하며, 환자

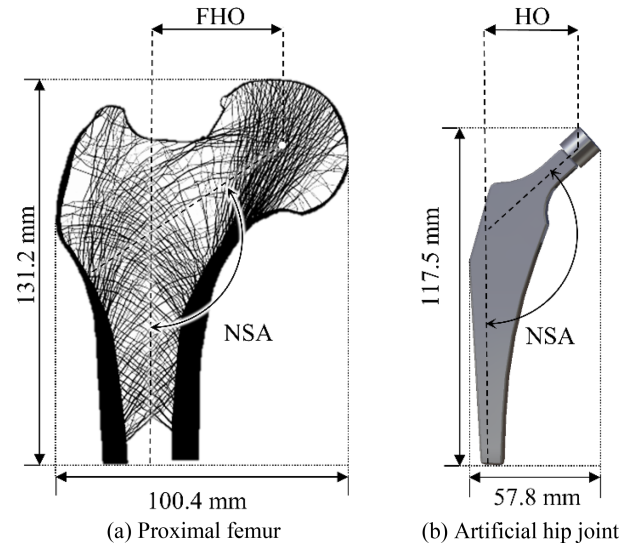


Fig. 1 High-resolution proximal femur (50 μm resolution) (a) and artificial hip joint (b)

맞춤형 하중의 확보가 매우 어렵다. 이에, 본 연구에서는 이전 연구[19]에서 제시된 50 μm 고해상도 인공 근위 대퇴골 영상을 사용하였다.

Fig. 1(a)는 본 연구에서 사용한 고해상도 근위 대퇴골 영상을 나타낸다. 해당 근위 대퇴골 영상은 영역별 골 미세구조 고유 패턴(Principal and Secondary Compressive Groups, Principal and Secondary Tensile Group) [20,21] 잘 나타낼 뿐만 아니라 해당 미세구조를 생성하는 맞춤형 하중 정보를 포함하고 있다[22]. 이러한 특성으로 인해 해당 근위 대퇴골 영상은 많은 연구에서 활용된 바 있다[17,23]. 근위 대퇴골의 크기는 100.4 \times 131.2 mm이며, FHO (Femoral Head Offset)와 NSA (Neck Shaft Angle)는 각각 44.6 mm와 128°이다. 여기서 FHO와 NSA는 임상의 전치환술에서 인공 고관절의 크기를 결정하는데 매우 중요한 변수로 알려져 있다[24].

본 연구는 인공 고관절 모델로 구조의 단순성과 뛰어난 치료 결과로 인해 임상에서 가장 많이 사용되는 Single Wedge Type을 선정하였다[25]. 인공 고관절의 크기는 57.8 \times 117.5 mm이며, HO (Head Offset)와 NSA는 각각 44 mm와 128°로 근위 대퇴골의 치수와 유사하게 선정하였다. 대퇴골과 인공 고관절의 유사한 Head Offset과 Neck Shaft Angle은 기계적 안정성에 기여한다고 보고된 바 있다[24].

2.2 인공 고관절 삽입에 따른 골 미세구조의 구조적 거동 변화 분석

본 연구는 유한요소해석을 통해 정상골과 인공 고관절이 삽입된 근위 대퇴골의 구조적 거동 분석을 수행하였다. 이를 위해 정상 근위 대퇴골과 인공 고관절이 삽입된 근위 대퇴골 영상을 유한요소 모델로 생성하였다. 유한요소 모델은 ANSYS의 PLANE 42를 사용하여 4절점 2차원 사각 요소들로 구성하였다. 각 요소 크기는 영상의 픽셀 해상도와 동일하게 50 \times 50 μm 로

부여하였다. 따라서 정상골의 유한요소 모델은 2,770,997개의 절점과 2,766,064개의 요소로 구성되었으며, 인공 고관절 삽입골의 유한요소 모델은 2,115,241개의 절점과 2,110,774개의 요소로 구성되었다. 인공 고관절에 해당하는 요소의 물성치는 티타늄 합금(TiAl6v4)의 포아송비(0.32)와 탄성계수(114 GPa)를 부여하였다. 치밀골에 해당하는 모든 요소는 0.3의 포아송비와 22.5 Gpa의 탄성계수 값을 부여하였으며, 해면골에 해당하는 요소는 동일한 0.3의 포아송비와 밀도-탄성계수 변환식(식(1))을 통해 탄성계수를 부여하였다[26].

$$E_i = 0.4567(2\rho_i)^{1.49} \text{ if } \rho_i \leq 0.84$$

$$E_i = 0.2862(2\rho_i)^{2.39} \text{ if } \rho_i > 0.84 \tag{1}$$

여기서 E_i 는 i 번째 요소의 탄성계수이며, ρ_i 는 i 번째 요소의 상대 밀도값을 말한다.

본 연구는 인공 고관절 삽입골의 응력방패 현상을 분석하기 위해, 먼저 정상골과 인공 고관절이 삽입된 근위 대퇴골의 구조적 거동을 3가지 일상 하중 조건(외발서기, 외전, 내전) 아래 각각 계산하였다. 다만, 해당 근위 대퇴골에 발생하는 일상 하중을 고려하기 위해, 본 연구는 해당 근위 대퇴골의 미세구조를 생성하는 맞춤형 하중을 적용하였다[27-29].

Fig. 2는 본 연구에서 사용한 하중 조건을 나타내며, 본 연구는 각 하중을 대퇴골두와 대퇴전자 부위에 분포 하중의 형태로 부여하였다. 경계조건으로는 3가지 하중 조건 모두 가장 아래 절점을 모든 방향으로 구속했다. 그리고 인공 고관절 삽입골의 치밀골 전체를 첫 번째 관심영역(Region of Interest, ROI)으로 선정하였으며, 두 번째 관심영역으로는 삽입골에서 인공 고관절을 제외한 해면골 전체를 선정하였다(Fig. 3). 그리고 동일한 관심영역에서 정상골과 삽입골의 구조적 거동을 비교 분석하여 응력방패 현상을 파악하였다.

본 연구는 응력방패 현상의 정량적인 비교 분석을 위해 관심영역에서 발생한 변형을 에너지의 평균값(식(2))과 표준편차(식(3))를 정량적 지표로 사용하였다. 그리고 각 관심영역에서의 하중조건에 따른 응력방패 현상의 발생 가능성은 정상골과 삽입골에서 발생한 변형률 에너지 평균값과 표준편차 값의 상대 변화율로 평가하였다.

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n SE_i \tag{2}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (SE_i - \mu)^2} \tag{3}$$

여기서 SE_i 는 각 관심영역의 i 번째 요소에서 발생한 변형률 에너지 값이며, n 은 각 관심영역의 총 요소 수를 의미한다.

본 연구의 유한요소해석은 ANSYS의 Mechanical APDL 2022 R1과 개인용 데스크탑(CPU: i9-12900K, RAM: 64 GB, GPU: GeForce RTX 3080)을 이용하여 수행되었다.

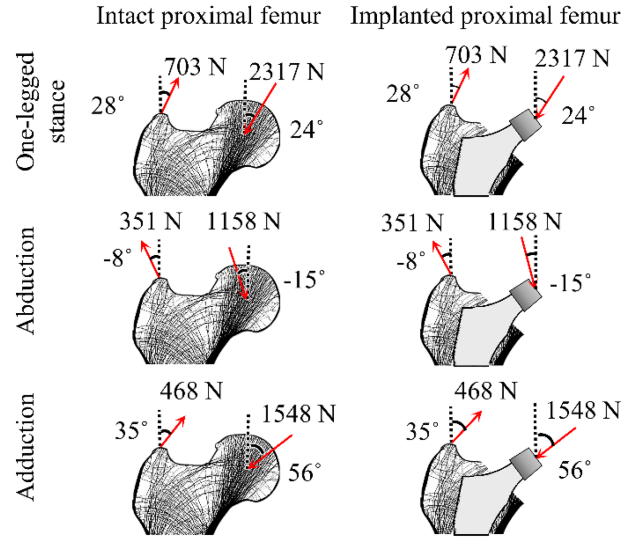


Fig. 2 Three load conditions to consider daily activities

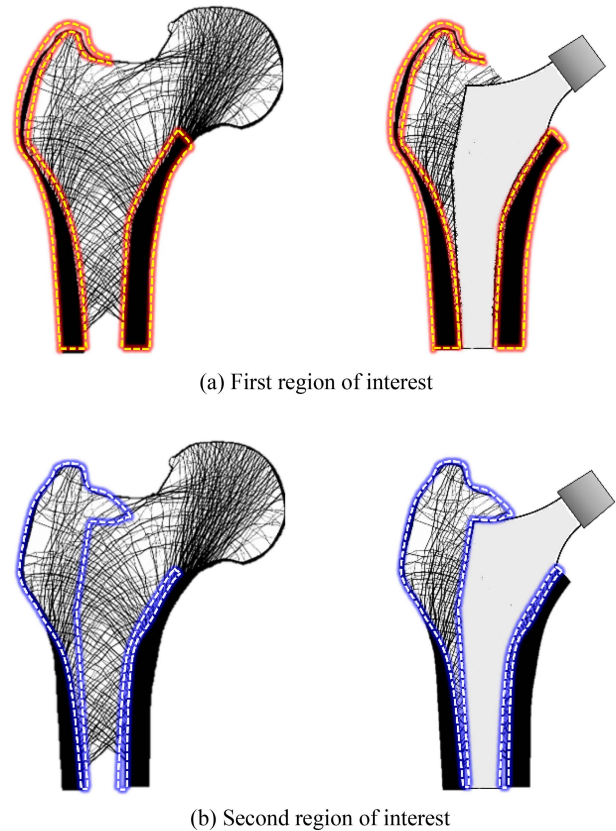


Fig. 3 Two regions of interest: cortical bone (1st row) and cancellous bone (2nd row)

3. 결과 및 고찰

본 연구는 인공 고관절 삽입에 따른 미세적 수준에서의 골 미세구조 구조적 거동과 응력방패 현상의 파악을 목적으로 한다.

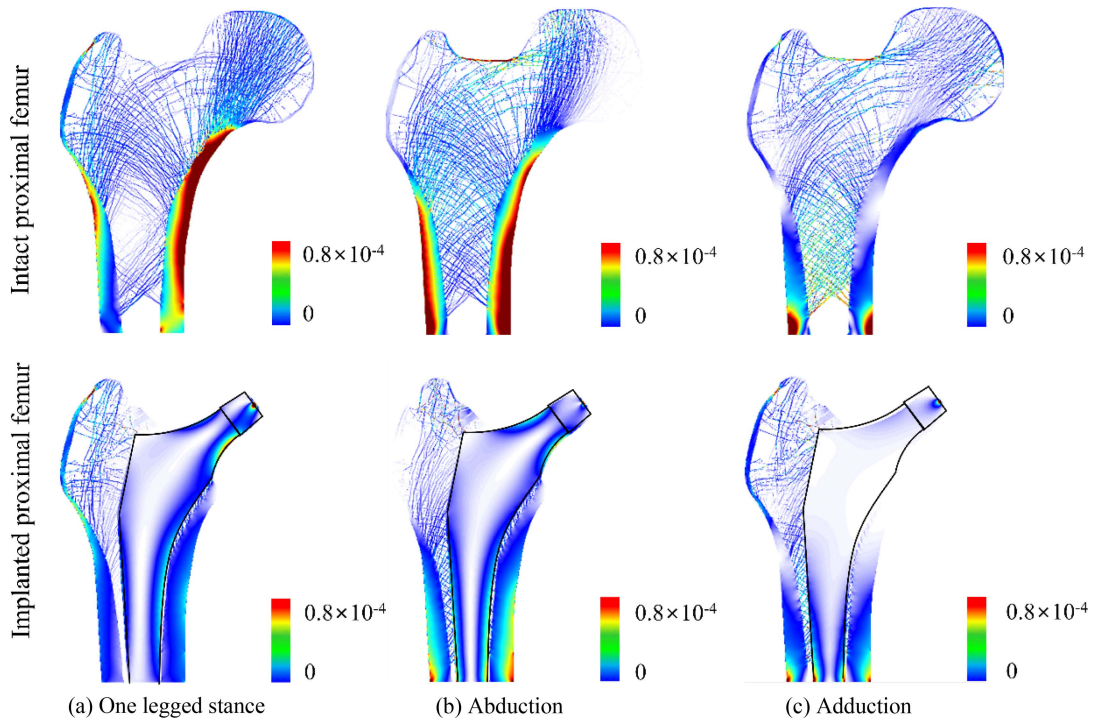


Fig. 4 Comparison of strain energy among the implanted proximal femur and intact proximal femur under daily activities (The maximum of the legend was set to $0.8 \times 10^{-4} \mu\text{J}$ to visually compare results on the same criteria) [Unit: μJ]

Table 1 Strain energy distribution of normal bone and proximal femur with artificial hip joint implanted at ROI 1 [Unit: μJ]

Load condition	One-legged stance			Abduction			Adduction		
	Intact	Implanted	Relative change	Intact	Implanted	Relative change	Intact	Implanted	Relative change
Avg.	4.746×10^{-1}	1.363×10^{-1}	-71.3%	5.219×10^{-1}	1.911×10^{-1}	-60.8%	1.643×10^{-1}	1.021×10^{-1}	-63.4%
Std.	3.350×10^{-1}	9.548×10^{-2}	-71.5%	3.456×10^{-1}	1.463×10^{-1}	-57.7%	2.696×10^{-1}	1.137×10^{-1}	-57.8%
Max.	$7.320 \times 10^{+0}$	$6.178 \times 10^{+0}$	-15.6%	$9.243 \times 10^{+0}$	$3.655 \times 10^{+0}$	-60.5%	$1.500 \times 10^{+1}$	$4.139 \times 10^{+0}$	-72.4%
Min.	3.867×10^{-7}	2.834×10^{-9}	-99.0%	2.695×10^{-6}	2.141×10^{-9}	-99.9%	1.066×10^{-9}	4.707×10^{-12}	-99.6%

이를 위해 본 연구는 유한요소해석 절차의 타당성을 정상골 구조적 거동 결과와 이전 연구의 결과를 비교 분석하여 검증하였다[16,30,31]. Fig. 4는 3가지 일상 하중 조건 아래 정상골과 인공 고관절이 삽입된 근위 대퇴골의 변형률 에너지 분포를 나타낸다. 먼저 정상골에서 외다리 서기, 외전, 내전 하중에 대해 발생한 최대 변형률 에너지는 치밀골에서 발생하였으며, 각각 에너지는 대퇴경부(Femoral Neck), 골간단(Metaphysis) 내측, 외측에서 발생하였다. 반면 해면골에서는 외다리 서기, 외전, 내전에 대해 각각 대퇴경부, 전자간부, 골간단 외측에서 하중을 담당하며 치밀골로 전달하였다. 이는 이전 연구와 동일한 결과로, 본 연구의 유한요소해석에 대한 절차의 타당성을 입증한다.

본 연구는 치밀골과 해면골을 각각 관심 영역으로 선정하고, 인공 고관절의 삽입에 따른 관심 영역에서의 구조적 거동을 정상골과 대비하여 비교 분석하였다. Fig. 4에서 확인할 수 있듯, 인공 고관절 삽입에 따른 치밀골(즉, 첫 번째 관심 영역)에서

변형률 에너지는 모든 하중 조건에 대해 감소하였다. 이는 인공 고관절이 정상골의 해면골 대비하여 외부 하중을 더 많이 담당하는 것을 의미한다. 다만, 변형률 에너지의 평균 감소량이 최소 60.8%(외전 하중 조건) 이상으로 상당히 크다는 결과에 주목해야 한다(Table 1). 더욱이 치밀골의 골외막(Periosteum) 대비 골내막(Endosteum) 부분의 변형률 에너지 감소량이 더 많았다. 이는 골내막 부분의 치밀골 소실을 유발하고 최종적으로는 인공 고관절 해리 현상으로 이어질 수 있음을 말한다.

치밀골에서 하중 조건별 변형률 에너지의 평균 감소량을 정량적으로 분석한 결과(Table 1), 외다리 서기 하중 조건이 71.3%로 가장 큰 감소를 보였다. 반면, 외전과 내전은 각각 63.4%, 60.8%의 평균 에너지 감소량을 보였다. 또한 변형률 에너지의 표준 편차 역시 외다리 서기 하중에서 가장 큰 감소(71.5%)가 확인되었으며, 외전과 내전에서 각각 57.7%와 57.8%로 유사한 감소가 확인되었다. 이는 외다리 서기 하중에 의해

Table 2 Strain energy distribution of normal bone and proximal femur with artificial hip joint implanted at ROI 2 [Unit: μJ]

Load condition	One-legged stance			Abduction			Adduction			
	State	Intact	Implanted	Relative change	Intact	Implanted	Relative change	Intact	Implanted	Relative change
Avg.		9.888×10^{-2}	5.803×10^{-2}	-41.3%	1.134×10^{-1}	6.228×10^{-2}	-45.1%	7.334×10^{-2}	6.169×10^{-2}	-15.9%
Std.		9.875×10^{-2}	8.073×10^{-2}	-18.2%	1.070×10^{-1}	1.339×10^{-1}	0.25%	1.063×10^{-1}	1.050×10^{-1}	-1.1%
Max.		$1.678 \times 10^{+0}$	$1.574 \times 10^{+0}$	-6.2%	$1.312 \times 10^{+0}$	$5.886 \times 10^{+0}$	348.6%	$2.003 \times 10^{+0}$	$3.655 \times 10^{+0}$	82.5%
Min.		1.019×10^{-6}	1.278×10^{-8}	-98.7%	2.665×10^{-6}	3.912×10^{-8}	-98.5%	1.773×10^{-7}	4.747×10^{-9}	-97.3%

발생한 정상 내측 치밀골에서의 변형률 에너지 분포가 인공 고관절의 곡선 형상과 유사하여 발생한 결과로 볼 수 있다. 실제 인공 고관절 형상 설계 시 인체의 하중을 지탱하기 위해 근위 대퇴골 내측 치밀골의 곡선 형상과 유사하게 설계한다고 보고된 바 있다[32]. 다만, 외다리 서기 하중에서 71.3%의 변형률 에너지 감소는 다른 하중 조건 대비 더 많은 응력 방패 현상을 유발할 수 있음을 의미한다.

두 번째 관심 영역인 해면골에서의 변형률 에너지는 치밀골과 동일하게 모든 하중 조건에 대해 감소하였다. 다만, 변형률 에너지의 평균 감소량이 최대 45.1%(외전 하중 조건)로 치밀골 대비 낮은 수치를 보였다. 그럼에도 45.1%의 감소량은 상당히 큰 감소량으로 인공 고관절의 삽입이 치밀골과 더불어 해면골에도 구조적으로 많은 영향을 미침을 의미한다. 감소량으로 인공 고관절의 삽입이 치밀골과 더불어 해면골에도 구조적으로 많은 영향을 미침을 의미한다. 특히 해면골에서 변형률 에너지 감소는 인공 고관절과 직접적인 결합 관계를 가지는 골 미세구조들의 소실을 일으키기 때문에 매우 중요하다.

해면골에서 하중 조건별 변형률 에너지의 평균 감소량을 정량적으로 분석한 결과(Table 2), 치밀골과 달리 외전 하중 조건이 45.1%로 가장 큰 감소를 보였다. 반면, 외다리 서기와 내전은 각각 41.3%, 15.9%의 평균 에너지 감소량을 보였다. 또한 변형률 에너지의 표준 편차는 치밀골과 같이 외다리 서기 하중에서 가장 큰 감소(18.2%)가 확인되었다. 반면, 외전과 내전은 각각 0.25%, 1.1%의 무시할 만한 증가와 감소가 확인되었다.

흥미로운 사실은 외다리 하중 조건에서의 변형률 에너지의 평균 및 표준편차의 감소량이 치밀골과 유사하게 매우 높다는 것이다. 일반적으로 3가지 일상 하중 조건 중 외다리 하중이 차지하는 비율(60%)이 매우 높는데, 이는 다른 하중 조건 대비 외다리 하중 조건에 의해 많은 골 소실이 발생할 수 있음을 말한다. 반면, 내전 하중 조건에서의 매우 적은 에너지 감소도 확인되었다. 이는 내전 하중 시 인공 고관절에 가해지는 하중의 각도가 Neck Shaft Angle(128°)와 유사하여 하중 분산에 불리하여 생긴 현상으로 볼 수 있다. 다시 말해 인공 고관절에 가해지는 하중 각도와 Neck Shaft Angle과 유사할수록 해면골에서 응력 방패 현상의 발생 가능성이 낮아짐을 의미한다. 다만, 해당 각도의 하중이 가해질 경우 인공 고관절의 구조적 안전성이 낮아지는 현상도 발생할 수 있음에 주의해야 한다.

미시적 관점에서의 연구를 통해 크게 2가지의 유의미한 결과를 얻을 수 있었다. 첫 번째로 골 미세구조의 이방성 특성을 고려한 연구를 통해 근위 대퇴골과 삽입된 인공 고관절에서 발생하는 기계적 상호작용을 보다 정확히 표현하였다. 특히 이는 인공 고관절과 직접 결합되는 해면골에서의 응력방패 현상을 정확히 분석하는 데 유리하다. 두 번째는 실제와 유사한 골 강성을 적용한 결과를 얻을 수 있었다. 거시적 관점의 연구는 골 밀도 영상을 기반으로 하여 실제보다 높은 골 강성을 가진다. 하지만 본 연구에서는 미시적 관점에서의 연구로 골 미세구조의 특징을 고려하여 실제와 유사한 골 강성을 적용하였다. 이는 마찬가지로 정확한 응력방패 현상을 파악하는 데 유리하다.

본 연구는 다음과 같은 한계점이 존재한다. 첫째, 본 연구는 3가지 일상 하중 조건 아래 구조적 거동 분석을 진행하였다. 하지만 환자의 거동은 다양하고 복잡한 하중에 의해 발생하므로 이후 연구로 다양한 복합 하중 조건 아래 구조적 거동 분석이 필요하다. 둘째, 2차원 인공 근위 대퇴골 모델을 사용하여 구조적 거동을 분석하였다. 정확한 구조적 거동을 분석을 위해서는 3차원 모델을 활용한 연구가 필수적이다. 그럼에도 불구하고 본 연구에서는 환자별 맞춤 하중 아래 정상골과 인공 고관절이 삽입된 근위 대퇴골의 구조적 거동을 비교 분석하였고 이를 토대로 응력방패 현상을 파악하였다. 본 연구의 결과를 바탕으로 위 한계점을 극복할 수 있는 추후 연구가 진행되기를 기대한다.

4. 결론

본 연구에서는 미시적 수준에서 인공 고관절 전치환술 이후 인공 고관절이 삽입된 근위 대퇴골의 구조적 거동을 정량적으로 분석하고 응력방패 현상을 파악하였다. 이를 위해 임상에서 가장 많이 사용되고 있는 Single Wedge Type의 인공 고관절을 선정하였으며, 50 μm 의 고해상도를 가지는 근위 대퇴골에 삽입하였다. 이어서 인공 고관절이 삽입된 근위 대퇴골의 치밀골, 해면골을 각각 관심 영역으로 정하였다. 이후 3가지 일상 하중 조건 아래 정상골과 인공 고관절이 삽입된 근위 대퇴골에서 발생하는 구조적 거동을 정량적으로 비교 분석하였다. 그리고 변형률 에너지의 평균값, 표준편차를 정량적 지표로 사용해 응력방패 현상을 파악하였다.

정량적인 분석을 통해 관심 영역인 치밀골과 해면골에서 모두 응력방패 현상이 발생할 가능성을 확인하였다. 먼저 치밀골에서는 외다리 서기 하중 시 응력방패 현상의 발생 가능성이 가장 컸다. 이는 인공 고관절의 곡선 형상이 정상 내측 치밀골에 많은 거동이 발생하는 외다리 서기 하중을 받는 데 유리하기 때문이다. 따라서 응력방패 현상을 예방하기 위해서는 내측 치밀골에서 하중이 발생하는 동작에 유의할 필요가 있다는 것을 의미한다. 그리고 해면골에서의 거동 변화는 치밀골에 비해 현저히 낮은 것을 확인하였다. 이러한 결과는 응력방패 현상이 해면골에 비해 치밀골에서 발생할 가능성이 크다는 것을 시사한다. 또한 해면골에서 내전 동작 시 정상골과 인공 고관절이 삽입된 근위 대퇴골의 거동 변화가 크게 나타났다. 이는 내전 동작 시 인공 고관절에 가해지는 하중의 각도가 Neck Shaft Angle과 비슷하기 때문이다. 따라서, 내전 동작 시 응력방패 현상의 발생 가능성은 줄어들지만, 장기적으로 인공 고관절의 안전성과 내구성에 영향을 미치므로 주의할 필요가 있다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 논문은 2021년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업입(No. 2021R111A3043967).

REFERENCES

- Guerado, E., Caso, E., (2016), The physiopathology of avascular necrosis of the femoral head: An update, *Injury*, 47, S16-S26.
- Hwang, S. K., (2014), Experience of complications of hip arthroplasty, *Hip & Pelvis*, 26(4), 207-213.
- Liu, N., Zheng, C., Wang, Q., Huang, Z., (2022), Treatment of non-traumatic avascular necrosis of the femoral head, *Experimental and Therapeutic Medicine*, 23(5), 1-15.
- Savio, D., Bagno, A., (2022), When the total hip replacement fails: A review on the stress-shielding effect, *Processes*, 10(3), 612.
- Learmonth, I. D., Young, C., Rorabeck, C., (2007), The operation of the century: Total hip replacement, *The Lancet*, 370(9597), 1508-1519.
- Monzón, D. G., Iseron, K. V., Jauregui, J., Musso, C., Piccaluga, F., Buttarò, M., (2014), Total hip arthroplasty for hip fractures, *Geriatric Orthopaedic Surgery & Rehabilitation*, 5(1), 3-8. doi: 10.1177/2151458514520700
- Mullins, M. F., Sutton, R. N., Lodwick, G. S., (1974), Complications of total hip replacement, *American Journal of Roentgenology*, 121(1), 55-60. <https://www.ajronline.org/doi/abs/10.2214/ajr.121.1.55>
- McGee, M. A., Howie, D. W., Costi, K., Haynes, D. R., Wildenauer, C. I., Pearcy, M. J., McLean, J. D., (2000), Implant retrieval studies of the wear and loosening of prosthetic joints: A review, *Wear*, 241(2), 158-165.
- Sumner, D., (2015), Long-term implant fixation and stress-shielding in total hip replacement, *Journal of Biomechanics*, 48(5), 797-800.
- Be'ery-Lipperman, M., Gefen, A., (2006), A method of quantification of stress shielding in the proximal femur using hierarchical computational modeling, *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 9(1), 35-44.
- Cowin, S. C., (1986), Wolff's law of trabecular architecture at remodeling equilibrium, 108(1), 83-88.
- Joshi, M. G., Advani, S. G., Miller, F., Santare, M. H., (2000), Analysis of a femoral hip prosthesis designed to reduce stress shielding, *Journal of Biomechanics*, 33(12), 1655-1662.
- Fukuoka, K., Todo, M., (2018), Analysis of principal stress projection in femur with total hip arthroplasty using CT-image based finite element method, *International Archives of Orthopedic Surgery*, 1(1), 1-10.
- Behrens, B.-A., Wirth, C., Windhagen, H., Nolte, I., Meyer-Lindenberg, A., Bouguecha, A., (2008), Numerical investigations of stress shielding in total hip prostheses, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, 222(5), 593-600.
- Noyama, Y., Miura, T., Ishimoto, T., Itaya, T., Niinomi, M., Nakano, T., (2012), Bone Loss and Reduced Bone Quality of the Human Femur after Total Hip Arthroplasty under Stress-Shielding Effects by Titanium-Based Implant, *MATERIALS TRANSACTIONS*, 53(3), 565-570, <https://doi.org/10.2320/matertrans.M2011358>.
- Yamako, G., Chosa, E., Zhao, X., Totoribe, K., Watanabe, S., Sakamoto, T., Nakane, N., (2014), Load-transfer analysis after insertion of cementless anatomical femoral stem using pre-and post-operative CT images based patient-specific finite element analysis, *Medical Engineering & Physics*, 36(6), 694-700.
- Kim, J. J., Jang, I. G., (2016), Image resolution enhancement for healthy weight-bearing bones based on topology optimization, *Journal of Biomechanics*, 49(13), 3035-3040.
- Krug, R., Burghardt, A. J., Majumdar, S., Link, T. M., (2010), High-resolution imaging techniques for the assessment of osteoporosis, *Radiologic Clinics*, 48(3), 601-621.
- Jang, I. G., Kim, I. Y., (2008), Computational study of Wolff's law with trabecular architecture in the human proximal femur using topology optimization, *Journal of Biomechanics*, 41(11), 2353-2361.
- Dyson, E., Jackson, C., Whitehouse, W., (1970), Scanning electron microscope studies of human trabecular bone, *Nature*, 225(5236), 957-959.
- Whitehouse, W., Dyson, E., (1974), Scanning electron microscope studies of trabecular bone in the proximal end of the

human femur, *Journal of Anatomy*, 118(3), 417-444.

22. Jang, I. G., Kim, I. Y., (2010), Computational simulation of simultaneous cortical and trabecular bone change in human proximal femur during bone remodeling, *Journal of Biomechanics*, 43(2), 294-301.
23. Yoon, S., Schiffer, A., Kim, J. J., Jang, I. G., Lee, S., Kim, T.-Y., (2020), Numerical predictions of the interaction between highly nonlinear solitary waves and the microstructure of trabecular bone in the femoral head, *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 109, 103805.
24. Kim, H.-J., Kim, J.-S., Han, S.-M., You, J.-H., Choi, K.-W., Youn, I.-C., (2009), Evaluation of mechanical stability in development of customized hip implant, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 26(7), 31-37.
25. Khanuja, H. S., Vakil, J. J., Goddard, M. S., Mont, M. A., (2011), Cementless femoral fixation in total hip arthroplasty, *Journal of Bone and Joint Surgery*, 93(5), 500-509.
26. Kim, J. J., Nam, J., Jang, I. G., (2018), Computational study of estimating 3D trabecular bone microstructure for the volume of interest from CT scan data, *International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering*, 34(4), e2950.
27. Beaupré, G., Orr, T., Carter, D., (1990), An approach for time-dependent bone modeling and remodeling—application: A preliminary remodeling simulation, *Journal of Orthopaedic Research*, 8(5), 662-670.
28. Beaupré, G., Orr, T., Carter, D., (1990), An approach for time-dependent bone modeling and remodeling—theoretical development, *Journal of Orthopaedic Research*, 8(5), 651-661.
29. Tsubota, K.-I., Adachi, T., Tomita, Y., (2002), Functional adaptation of cancellous bone in human proximal femur predicted by trabecular surface remodeling simulation toward uniform stress state, *Journal of Biomechanics*, 35(12), 1541-1551.
30. Monzón, D.G., Iserson, K. V., Jauregui, J., Musso, C., Piccaluga, F., Buttaró, M., (2014), Total hip arthroplasty for hip fractures, *Geriatric Orthopaedic Surgery & Rehabilitation*, 5(1), 3-8. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3962050/>
31. Naghavi, S. A., Lin, C., Sun, C., Tamaddon, M., Basiouny, M., Garcia-Souto, P., Taylor, S., Hua, J., Li, D., Wang, L., (2022), Stress shielding and bone resorption of press-fit polyether-ether-ketone (PEEK) hip prosthesis: A sawbone model study, *Polymers*, 14(21), 4600.
32. Abdelaal, O., Darwish, S., El-Hofy, H., Saito, Y., (2019), Patient-specific design process and evaluation of a hip prosthesis femoral stem, *The International Journal of Artificial Organs*, 42(6), 271-290.



Seung Hun Ryu

B.S(c) candidate in the Department of Mechanical Engineering, Keimyung University. His research interest is stress shielding simulation under the bone implant.
E-mail: bestryu234@gmail.com



Jung Jin Kim

Assistance Professor in the Department of Mechanical Engineering, Keimyung University. His research interest is biomechanical engineering based on optimization and artificial neural network.
E-mail: kjj4537@gmail.com

볼 조인트형 메카니컬 씰 구조의 회전 용접토치 설계 및 동특성 해석

Design and Dynamic Characteristics Analysis of Rotating Welding Torch with Ball Joint Type Mechanical Seal structure

이동준¹, 김정민², 정철수², 진상록^{1,#}
Dong Jun Lee¹, Jung Min Kim², Chul Soo Jeong², and Sangrok Jin^{1,#}

¹ 부산대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Pusan University)

² (주)한화오션 생산혁신연구소 (Production Innovation R&D Center, Hanhwa Ocean Co., Ltd.)

Corresponding Author / E-mail: rokjin17@pusan.ac.kr, TEL: +82-51-510-2984

ORCID: 0000-0002-5594-4231

KEYWORDS: Rotating welding torch (회전 용접 토치), Dynamic characteristics (동특성), Mechanism schematic (메카니즘 도식화), Vibration analysis (진동 해석), Resonance frequency (공진 주파수)

This paper proposes a new rotary welding torch with a ball-jointed mechanical seal structure that simultaneously realizes the enclosure of CO₂ gas, the energization of welding current, and the insulation for system protection. In order to effectively compare the operation mechanism of the proposed device with the conventional rotary welding torch, a schematic technique is introduced to clearly visualize the operation and connection structure of the model. The kinematic state and constraint degrees of freedom of the tool are clearly shown, and it is easy to distinguish between the two designs that use different component parts and connection structures but result in the same final motion. In addition, the four dynamic characteristics of a rotary torch operating at 20 Hz (driving torque, vibration reaction force, natural frequency, and inertial mismatch) were analyzed to demonstrate superior performance to conventional products. The welding test showed that the tool normally operated even in a harsh welding environment, verifying its applicability in the field.

Manuscript received: May 22, 2023 / Revised: July 23, 2023 / Accepted: July 28, 2023

NOMENCLATURE

B_{ML} = Viscous Damping of the Coupling
 B_M = Viscous Damping between Ground and Rotor
 B_L = Viscous Damping between Ground and Load
 $D(s)$ = A Denominator Function for Simplicity
 GMF = Gear Mesh Frequency
 J_M = Rotor Inertia of the Motor
 J_L = The Load Inertia
 K = Reciprocal of the Sum of Rotor and Load Inertia
 K_s = Coupling Elasticity
 T = Applied Torque
 τ = Stiffness Ratio

$\theta(L)$ = Load Velocity
 $\theta(M)$ = Motor Velocity
 W_R = The Resonance Frequency
 W_{AR} = The Anti-resonance Frequency
 ζ_R = The Coupling Resonance Compliance
 ζ_{AR} = The Coupling Anti-resonance Compliance

1. 서론

회전 용접토치는 토치의 아크(Arc)가 회전하면서, 용접물을 휘저어 용접물을 고르게 퍼뜨리고 열원을 분산시키는 효과로

용작량을 늘려 용접속도를 빠르게 할 수 있다[1].

회전 용접토치는 수동용접기준 30 cpm (Centimeter per Minute)의 수평 용접속도 대비 70 cpm까지도 조건에 따라 용접속도를 높일 수 있다[2]. 국내에서 개발된 회전 용접토치[3,4]는 캐리지 형태[5]의 기계장치에 랙&피니언 구조 혹은 편심회전 링크 메커니즘을 적용하였으나 부피가 크고 무거운 로봇용으로 사용하기에는 진동반력이 커서 사용되지 않는다.

Binzel 사(독일, 드레스덴)의 스피나크 토치[6]는 편심 축과 독자적인 스프링 구조물을 활용하여 경량으로 개발되었다. 하지만 회전 용접토치의 모터에 엔코더가 없어 위치나 속도 제어를 할 수 없어 로봇용으로 사용하기에는 부적절하고, 원뿔 회전 운동을 지지해주는 판 스프링 구조물이 약하여 내구성이 좋지 못하다.

본 논문에서는 서보모터를 활용한 로봇용 회전토치로서 볼 조인트형 메카니컬 씰 구조의 강건하고 경량화된 새로운 메카니즘의 설계를 제안하며, 메커니즘의 도식화[7,8] 및 동특성 해석을 통해 기존 개발된 회전 용접토치와 비교하여 성능 분석하였다.

2. 기구부 설계

2.1 기구부 설계사양

본 논문에서 비교 분석하고자 하는 두 가지 설계 모델을 Fig. 1에 나타냈다. 좌측의 모델이 볼 조인트형 메카니컬 씰 구조의 회전토치이며, 우측은 볼 조인트형 메커니즘과 동일한 자유도를 가지나, 좌측에 비해 더 많은 기계요소부품과 복잡한 구조로 설계된 회전 용접토치이다.

두 설계 모델의 메커니즘을 비교하기 위해 Fig. 2와 같이 단순화하여 나타내었다. Fig. 2(b)의 모델이 Fig. 1의 우측 설계 모델의 단면도로서, 편심운동을 만들기 위하여 2개의 자동조심 베어링이 적용되었으며 편심하우징에 설치된 자동조심 베어링은 평기어로 연결된 모터에 의해 회전을 하면서 토치 몸체를 원뿔 회전 운동을 하도록 한다. 하지만 원뿔 회전중심점을 기준으로 뒤쪽으로도 토치 몸체가 돌출이 되어 회전하기 때문에 고정 지지부와 연결하기 위해 유연한 재질의 고무튜브와 같은 부품이 적용된다. 용접을 위해서는 용접 전류가 흘러야 하는데, 고무튜브와 같은 절연구조물로 인해 별도의 통전 라인을 구성 해야한다. 이는 기구적으로 매우 복잡하고, 동특성이 떨어지는 단점이 있다.

Fig. 2(a)의 모델은 본 논문에서 제안하는 볼 조인트형 메카니컬 씰이 적용된 구조로서, 구현하고자 하는 메커니즘을 단순화하여 기존 2개의 자동조심 베어링을 1개로 줄였고, CO₂ 가스의 봉입을 위한 메카니컬 씰 구조와 볼 조인트형 기구 구조를 통해서 용접 전류가 흐를 수 있도록 함과 동시에 원뿔 회전 메커니즘이 작동하도록 설계하였다.

두 설계 모델의 수치적인 사양을 Table 1과 같이 정리하였다.

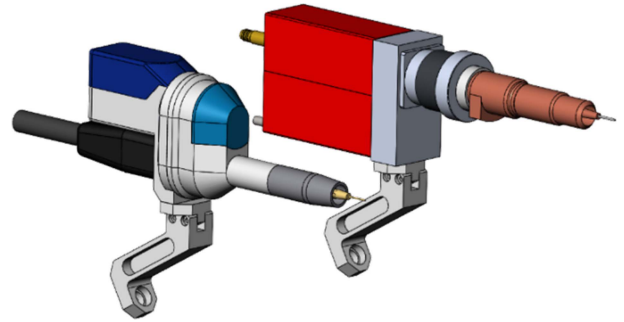
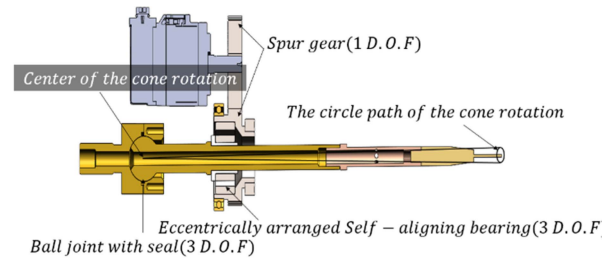
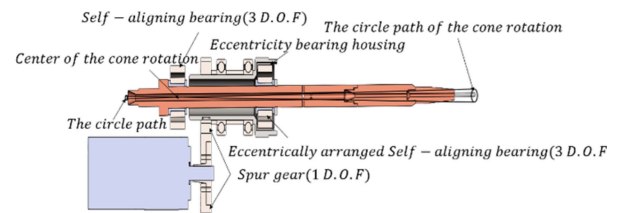


Fig. 1 The proposed rotating welding torch (left) and conventional rotating welding torch (right)



(a) The proposed rotating welding torch to express the mechanism



(b) Conventional rotating welding torch to express the mechanism

Fig. 2 Cross section view of two rotating welding torchs

Table 1 Specification of mechanical and dynamics properties

Item	Unit	Conventional	Proposed
Rotation radius	mm	1.53	1.47
Number of teeth	-	42	45
Gear module	-	1	1
Motor speed	Hz	20	20
GMF	Hz	840	900
Motor power	W	100	50
Weight	kg	2.87	1.85

두 모델은 약 직경 3 mm 수준의 원뿔 회전 운동을 하며, 20 Hz의 속도로 고속 회전한다.

기어물림주파수는 모터 회전수와 기어잇수의 곱으로 계산되며, 설계 모델 별로 동특성 분석을 위한 가진주파수 중 하나로 사용된다. 두 모델은 기어물림주파수와 모터용량 그리고 무게에서 큰 수치적인 차이를 보이며, 이러한 설계 요소들이 동 특성에 어떤 영향을 미치는지 3장에서 해석하였다.

Table 2 Mechanism motion definition

Initials	Type	Description
R	Rotary motion	360° rotation
O	Oscillate motion	Rotating and reciprocating motion based on a certain central axis
L	Linear motion	Straight reciprocating motion
C	Complex motion	Closed curve motion
CR	Cone rotary motion	360° cone rotation motion

2.2 메커니즘의 도식화

메커니즘의 도식화를 통해 다양한 입출력 운동으로 동작하는 복잡한 기계장치의 움직임을 직관적으로 이해하는데 도움을 준다. 메커니즘의 도식화는 Chiou와 Kota [7]에 의해 제안되었으며 이를 응용하여 Lee [8]에 의해 메커니즘의 합성을 도식화하는 형태로도 제안되었다. 상기 2가지 메커니즘의 도식화 방법은 복잡한 링크 구조의 메커니즘을 도식화 하는데는 유용하지만, 현존하는 모든 메커니즘의 운동 상태를 표현하기에는 추가적인 운동의 정의가 필요하다. 이에 본 논문에서는 기존 회전 용접토치와 제안하는 회전 용접토치의 서보 시스템의 구성을 직관적으로 도식화하고 운동 상태와 메커니즘의 표기를 추가하여 두 회전 용접토치의 운동 메커니즘을 표현하는 도식도를 비교 분석해보고자 한다. Kirschman and Fadel [9]의 운동 분류법에서는 메커니즘이 전달하는 운동을 4가지 형태로 분류하였는데, 이에 회전 원뿔 운동을 추가하여 다음의 Table 2의 5가지로 정의하고자 한다.

상기 5가지 운동의 머리글자 R, O, L, C, CR이 도식적 메커니즘 요소의 입출력 운동상태를 나타내주는 문자이고, 이 문자의 오른쪽 밑에 첨자로서 i, j, k 방향 벡터를 표기하여 운동의 방향을 나타낸다.

메커니즘의 도식화를 위해 원 모양 도형에는 입출력 운동이 명확한 단순 기계요소부품명을 표기하고, 사각박스에는 메커니즘의 약어와 조립상태 그리고, 주요 기계요소부품명을 기입하는 방식으로 표기하였다.

Lee [8]는 메커니즘 요소의 조인트를 P, S, H, C, T와 조인트의 개수를 숫자로 기입하여 표현하였는데, 여기에 3자유도 볼 조인트의 조립상태 혹은 구속상태를 나타내는 약어를 하기의 Table 3와 같이 추가로 정의하였다.

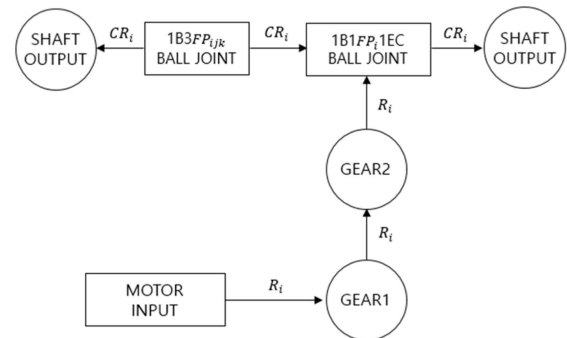
상기 조인트의 구속 자유도 상태를 표기하는 FP_{ijk} , FO_{ijk} , EC 를 통해 직관적인 조인트의 운동 가능 상태를 이해할 수 있다. Fig. 3은 기존 회전 용접 토치 모델의 도식화를 나타내었다.

Fig. 3(a)의 도식도는 기존 회전 용접토치의 도식도로서 2개의 Shaft Output을 가진다. Shaft Output은 CR_i 로 표현된 원뿔 회전 운동이며, FP_{ijk} 로 표현된 3자유도 위치가 고정된 볼 조인트의 중심을 기준으로 i 벡터 방향으로 전후로 원뿔 회전운동함을 확인할 수 있다. Fig. 3(b)는 기존 회전 용접토치의 단면도로서, 기계요소부품의 구성상태를 Fig. 3(a)와 비교해 볼 수 있다.

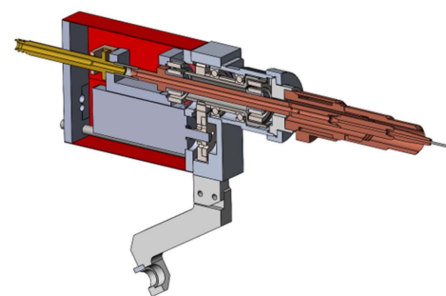
Fig. 4는 볼 조인트형 메카니컬 씰이 적용된 회전토치로서

Table 3 Joint mechanism definition

Initials	Type	Description
P	Pin joint	1 D.O.F rotation joint
S	Sliding joint	1 D.O.F translation joint
H	Half joint	A state in which the degree of freedom of motion between two link mechanisms connected by a joint is 2
C	Contact joint	A state of connection caused by contact between two curved surfaces. In this case, both complete joints and incomplete joints are possible
T	Touch joint	Transmission of force by contact between two links. The two links always have 3 D.O.F.
B	Ball joint	A state where there are 3 D.O.F in posture based on the center of motion between two links
FP_{ijk}	1) Freedom of position 2) Fixed position	Indicates constraints on the location of the center of motion between two links, and indicates the direction of the constrained position through the subscript of 'ijk'
FO_{ijk}	1) Freedom of orientation 2) Fixed orientation	It represents the constraints for the posture of the center of motion between two links, and the subscript 'ijk' indicates the constrained posture direction
EC	Eccentricity	Rotational motion means rotation with eccentricity

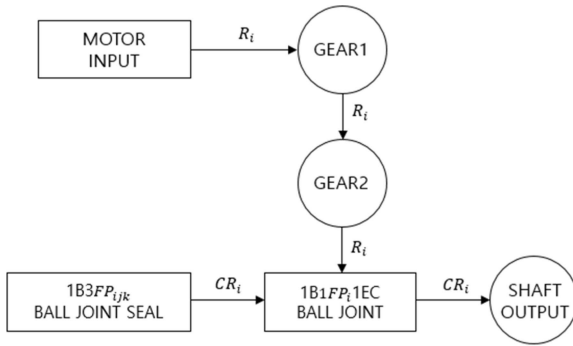


(a) Schematic diagram of conventional rotating welding torch

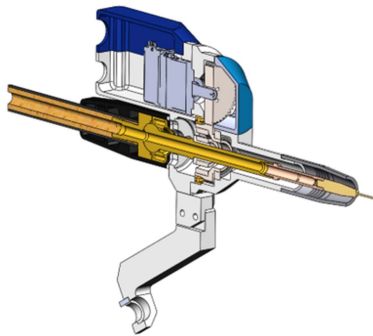


(b) Cross section view of conventional rotating welding torch to compare the mechanism

Fig. 3 Mechanism schematic diagram and cross section view of conventional rotating welding torch



(a) Schematic diagram of the proposed rotating welding torch



(b) Cross section view of the proposed rotating welding torch to compare the mechanism

Fig. 4 Mechanism schematic diagram and cross section view of the proposed rotating welding torch and the existing rotating welding torch

어떠한 기계요소부품의 조합과 조인트 메커니즘으로 구성되어 있는지 도식화되어 있다. Fig. 4(a)는 제안하는 회전 용접토치의 도식도로서 Fig. 3(a)와 달리 Shaft Output이 하나이며, 볼 조인트와 메커니컬 씰로 구성된 원점기준으로 전진 방향으로만 용접토치가 원뿔 회전 운동함을 알 수 있다.

메커니즘의 도식화를 통해, 두 설계 모델의 메커니즘 차이를 쉽게 구분하여 표현할 수 있고, 출력 운동의 결과를 도식도를 통해 이해할 수 있다.

3. 기구부 동특성 해석

3.1 구동토크 해석

두 가지 설계 모델의 구동토크 해석은 Recurdyn (FunctionBay, 한국)을 이용하여 해석하였다. 모터의 구동토크는 정적인 상태에서 동적인 상태로 변하는 초기 짧은 시간 이후에는 정현파 형태의 토크 변화량을 가지는데, 이것은 회전 토치의 회전운동에 따라 질점의 위치가 변하기 때문이다.

회전 중심 기준으로 회전 용접토치의 자세가 지면과 수평하게 있고, 시계방향으로 회전한다고 가정할 시 토치의 위치가 12 시에서 6시로 이동 시 중력 부하가 줄어드는 만큼 부하 토크가 줄어들게 되고, 6시에서 12시로 이동 시 중력 부하를 받는 만큼

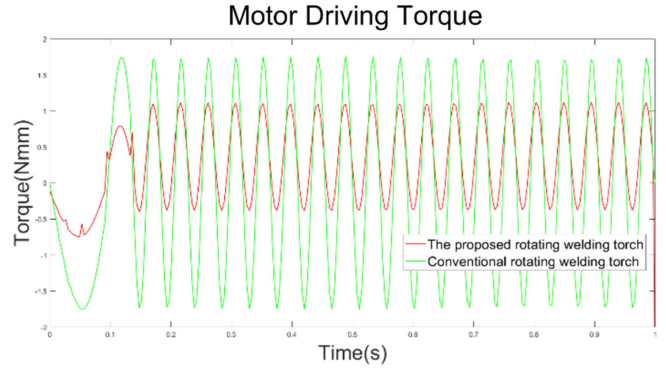


Fig. 5 Comparison of driving torque between the proposed rotating torch and conventional rotating torch

토크 부하가 커지게 된다. 작용하는 관성부하가 더 큰 기존 회전 용접토치의 구동토크가 제안하는 회전 토치 대비 약 2배 이상 큰 것을 Fig. 5를 통해 확인할 수가 있다. 편심 회전운동에 따른 질점의 위치변화로 인하여 구동토크 또한 반복적인 정현파 형태의 출력을 가진다. 정현파 출력은 회전 용접토치의 질점의 진동을 야기하며, 이는 곧 기구부 지지부에 반복적인 동하중이 생길 수 있음을 생각해 볼 수 있다.

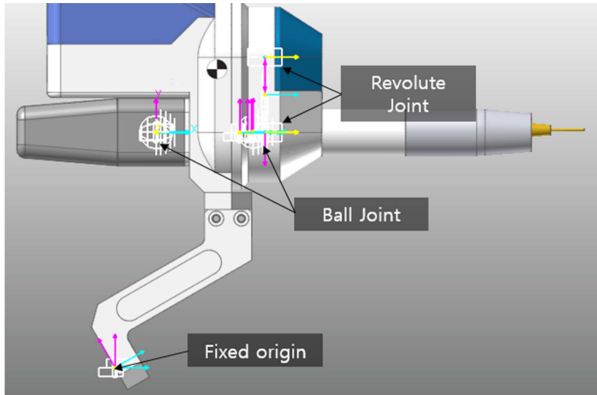
3.2 진동에 의한 동 하중 반력 해석

회전 용접토치는 로봇의 End-effector에 장착되며 구동 시 20 Hz (1,200 RPM)의 빠른 속도로 편심 회전하는 토치 몸체의 질점의 진동으로 인해 회전 토치를 지지하는 부위에 반복적인 동 하중 반력이 발생하게 된다. 동 하중은 소음 및 피로 파괴를 유발하기도 하며, 동 하중이 클 경우 안정적인 로봇 제어를 위해서 더 큰 가반하중을 요구하기도 한다. 이에 두 가지 모델의 모터 구동 시에 지지부에 발생하는 진동반력을 Recurdyn을 활용하여 해석하였다.

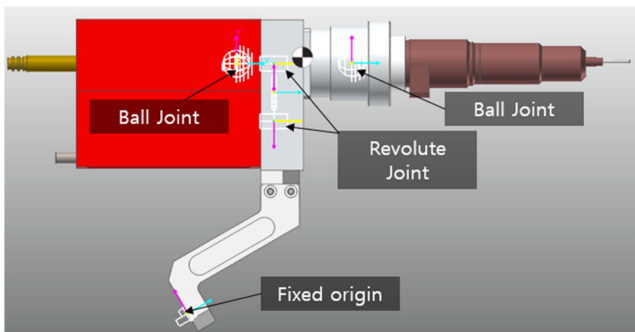
진동반력 해석을 위하여 Fig. 6에 보이는 두 회전토치의 기구부 몸체는 강체로 정의되었다. 토치 몸체의 변형에 의한 영향은 미비하고 진동에 의한 질점의 떨림이 반력에 가장 큰 영향을 주기 때문이다. 변형까지 고려할 수 있지만, 해석시간 대비 결과에 주는 유의미한 영향이 크지 않기 때문에 기구 변형에 의한 영향은 배제하기로 한다.

진동반력은 Fig. 6에 보이는 Fixed Origin에서 각 방향 별로 발생하는 힘의 합성을 계산하였다. 진동 반력 역시 원뿔 회전 운동하는 토치 몸체의 위치에 따라 정현파 형태의 반력 변화를 보여준다. 기본적인 반력의 크기는 토치 몸체의 중력에 의한 부하 하중이며, 진동에 의해 질점이 떨리기 때문에 동 하중이 발생한다. 구형과 신형 회전 용접토치의 무게가 각각 2.87 kg과 1.85 kg임을 감안할 시 진동에 의한 반력의 최소치가 회전 토치의 무게임을 Fig. 7을 통해 알 수 있다.

또한 구형과 신형의 기구부 진동에 의한 반력 변화량 평균이 각각 31.1 N과 19.2 N으로 구형 대비 신형 회전 용접토치가 동일한 메커니즘을 구현함에도 로봇 End-effector에 주는 영향은 구형 대비 62% 수준임을 확인하였다.



(a) Mechanism configuration of the proposed rotating welding torch



(b) Mechanism configuration of conventional rotating welding torch

Fig. 6 Comparison of the mechanism configuration of conventional rotating welding torch and the newly proposed rotating welding torch

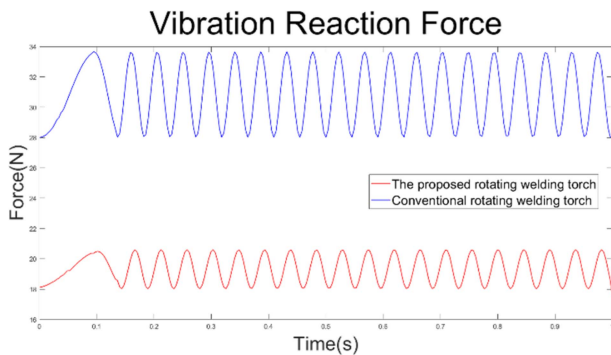


Fig. 7 Vibration reaction force magnitude for each rotating welding torch at a fixed origin of a mounting bracket

3.3 고유진동수 해석

회전 용접토치는 20 Hz의 빠른 회전속도로 토치 몸체가 회전하면서 기구부 진동을 야기한다. 이때 회전토치 기구의 고유진동수가 기어물림주파수 및 구동에 따른 진동수와 일치하게 되면 공진이 발생하게 되고 시스템에 치명적인 파손을 야기할 수 있기 때문에 고유진동수 해석이 필요하다.

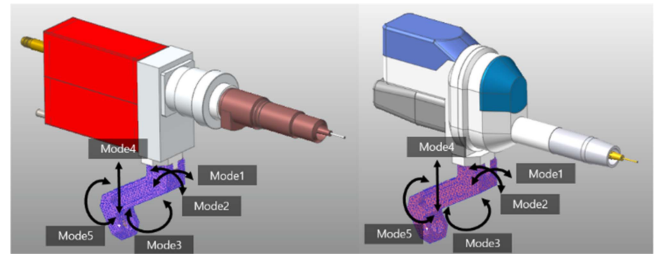


Fig. 8 Natural frequency direction for each mode

Table 4 Natural frequency for each mode

Item	Unit	Conventional	Proposed
Operating Vel.	Hz	20	20
GMF	Hz	840	900
Mode 1	Hz	95.48	112.47
Mode 2	Hz	106.20	112.98
Mode 3	Hz	190.01	255.83
Mode 4	Hz	881.18	812.45
Mode 5	Hz	2,139.49	1,910.00

고유진동수는 회전 용접토치의 전체 몸체에 대한 것이 아닌 회전 용접토치와 로봇의 End-effector를 연결하는 브라켓 부품을 기준으로 평가하였다. 왜냐하면 회전 용접토치의 전체 무게를 지지하는 브라켓의 고유진동수와 가진주파수가 일치하는 경우가 가장 위험한 경우이며, 강성과 강도 또한 회전 용접토치의 몸체 대비 브라켓이 더 낮다.

고유진동수의 모드 형상별 운동 방향은 Fig. 8의 화살표로 방향을 도식화하였다. 고유진동수의 모드해석은 5단계 모드 형상까지 수행하였으며, 모드 형상별 고유진동수와 가진 주파수를 Table 4에 정리하였다.

두 설계 모델 모두 마운팅 브라켓 부품의 5가지 고유진동수 모드 형상별로 가진주파수와 겹치지는 않았다. 기어물림주파수의 경우 모드 4에서 두 모델의 고유진동수와 가장 근접하였으나, 신형 모델이 구형 모델에 비해 기어물림주파수와 차이가 더 크게 계산되었다. 이 차이가 클수록 공진주파수 범위에서 멀어지는 것이기 때문에 상대적으로 안정적이라 할 수 있다.

3.4 관성 불일치 해석

관성 불일치 해석은 부하측 관성과 커플링 강성이 결합하여 서보 축 작동 시 야기될 수 있는 불안정성을 평가하는 해석이다 [10]. 부하와 모터 사이의 높은 관성비는 커플링, 축 및 벨트의 상당한 컴플라이언스로 인해 기계요소부품의 기계적 특성이 불량한 경우 기계적 공진으로 인해 모션 제어가 불안정해질 수 있다[11]. 회전 용접토치의 서보모터와 토치 몸체는 평기어로 연결되며, 평기어의 치강성 뿐만 아니라 모터관성 및 부하관성 간

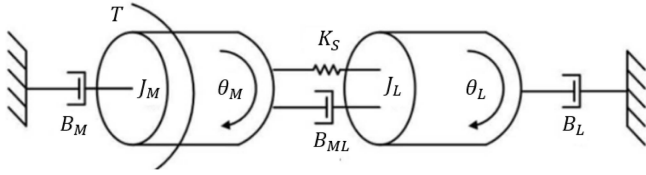


Fig. 9 Relationship factors between mechanical motor actuation system and load

의 관성비가 관성불일치 해석에 큰 영향을 끼친다. 또한, 관성 불일치는 식(1)의 관성비와 밀접한 연관이 있는데, 관성비가 높을수록 제어가 어렵고 민감한 시스템이 된다.

Fig. 9는 모터와 연결된 부하 하중 간의 관계를 도식화한 것으로서, 중간에 연결된 커플러들의 강성 인자와 점성 댐핑 계수, 관성모멘트, 토크 등을 나타내고 있다. 관성비와 커플링 강성 간의 상호작용에 의한 기계적인 공진의 관계를 정의하기 위하여 모터와 부하 간의 각속도에 대한 정의가 필요하다. 이에 대한 정의는 식(2)와 식(3)과 같다.

$$\text{Inertia ratio} = J_L/J_M \quad (1)$$

$$T - B_M \dot{\theta}_M - B_{ML}(\dot{\theta}_M - \dot{\theta}_L) - K_s(\theta_M - \theta_L) = J_M \ddot{\theta}_M \quad (2)$$

$$-B_L \dot{\theta}_L - B_{ML}(\dot{\theta}_M - \dot{\theta}_L) + K_s(\theta_M - \theta_L) = J_L \ddot{\theta}_L \quad (3)$$

식(2)와 식(3)을 Laplace Transform을 이용하여 하기 식과 같이 주파수 영역의 해석으로 변환한다.

$$\begin{bmatrix} J_M s^2 + (B_{ML} + B_M)s + K_s & -(B_{ML}s + K_s) \\ -(B_{ML}s + K_s) & J_L s^2 + (B_{ML} + B_L)s + K_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_M(s) \\ \theta_L(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T(s) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} [J_M s^2 + (B_{ML} + B_M)s + K_s] \theta_M(s) &= (B_{ML}s + K_s) \theta_L(s) \\ &= (B_{ML}s + K_s) \theta_L(s) + T(s) \end{aligned} \quad (5)$$

$$[J_L s^2 + (B_{ML} + B_L)s + K_s] \theta_L(s) = (B_{ML}s + K_s) \theta_M(s) \quad (6)$$

이를 전달함수인 식(7)과 식(8)의 형태로 수식을 정리한다.

$$\frac{\theta_M(s)}{T} = \frac{J_L s^2 + (B_{ML} + B_L)s + K_s}{D(s)} \quad (7)$$

$$\frac{\theta_L(s)}{T} = \frac{B_{ML}s + K_s}{D(s)} \quad (8)$$

D(s)는 두 전달함수의 공통분모로서 식(9)와 같다.

$$\begin{aligned} D(s) &= [J_M J_L] s^4 + [(J_M + J_L) B_{ML} + J_M B_L + J_L B_M] s^3 + \\ &+ [(J_M + J_L) K_s + B_M B_L + B_{ML} (B_L + B_M)] s^2 + [(B_M + B_L) K_s] s \end{aligned} \quad (9)$$

B_M 과 B_L 이 공진에 미치는 영향은 거의 없기 때문에 0으로

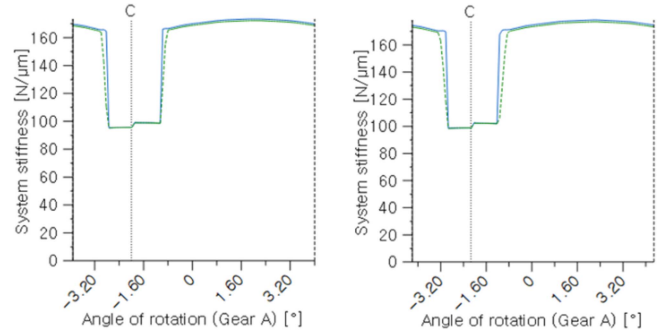


Fig. 10 A gear teeth rotation compliance of the old (left) and new (right) rotating welding torch

설정하여 식을 정리하면 식(10), 식(11)과 같다.

$$\frac{\theta_M}{T}(s) = \left[\frac{1}{(J_L + J_M)s^2} \right] \left[\frac{J_L s^2 + B_{ML}s + K_s}{\frac{J_L J_M}{J_L + J_M} s^2 + B_{ML}s + K_s} \right] \quad (10)$$

$$\frac{\theta_L}{T}(s) = \left[\frac{1}{(J_M + J_L)s^2} \right] \left[\frac{B_{ML}s + K_s}{\frac{J_L J_M}{J_L + J_M} s^2 + B_{ML}s + K_s} \right] \quad (11)$$

식(10)과 식(11)을 식(12)로 그룹화하여 정리하면 최종적인 관성비와 커플링 강성 간의 전달함수 형태인 식(13)과 식(14)를 도출할 수 있다.

$$\frac{\theta_M}{T}(s) = \frac{K \left[\frac{s^2}{w_{AR}^2} + \frac{2\zeta_{AR}s}{w_{AR}} + 1 \right]}{s^2 \left[\frac{s^2}{w_R^2} + \frac{2\zeta_R s}{w_R} + 1 \right]} \quad (12)$$

$$\frac{\theta_L}{T}(s) = \frac{K[\tau s + 1]}{s^2 \left[\frac{s^2}{w_R^2} + \frac{2\zeta_R s}{w_R} + 1 \right]} \quad (13)$$

$$K = \frac{1}{J_M + J_L}$$

$$\tau = \frac{B_{ML}}{K_s}$$

$$\zeta_{AR} = \frac{B_{ML}}{2\sqrt{K_s J_L}}$$

$$\zeta_R = \frac{B_{ML}}{2\sqrt{\frac{K_s J_M J_L}{J_M + J_L}}} \quad (14)$$

$$w_{AR} = \sqrt{\frac{K_s}{J_L}}$$

$$w_R = \sqrt{\frac{K_s (J_M + J_L)}{J_M J_L}}$$

Table 5 Parameters for inertia mismatch analysis

Item	Unit	Conventional	Proposed
J_M	kgf·mm ²	22.109	30.52
J_L	kgf·mm ²	60.510	34.04
K_s	kgf/mm	16.26122	15.73776
B_{ML}	kgf s/mm	0.016261	0.015737
J_L/J_M	-	2.736	1.115

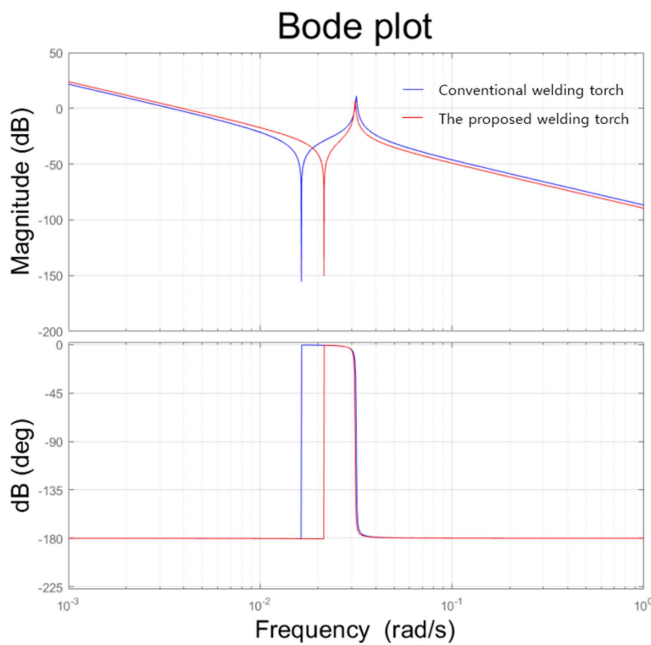


Fig. 11 Bode plot of θ_M/T for the old and new rotating welding torch shows the effects on the position in magnitude of the anti-resonance and resonance peaks

전달함수의 핵심인자는 J_M, J_L, B_{ML}, K_s 의 4가지로 기어치의 강성인 K_s 는 실험 혹은 해석적인 기법을 이용하여 구할 수 있는데, 본 논문에서는 Recurdyn의 Meta 모델을 활용하여 기어치의 강성 값을 Fig. 10과 같이 해석하였다[12].

기어의 회전에 따른 맞물림 위치 별로 강성이 변화하게 되고 그에 대한 기어 강성 평균값이 K_s 이다. 기어의 점성 댐핑계수 B_{ML} 또한 실험적으로 구해야 하는 수치이지만 실제 값은 0에 가까울 정도로 매우 미소하며, 수치의 정밀성이 떨어지더라도 2가지 설계 모델에 동일한 기준이 적용되기 때문에 그 차이를 구분하기에는 충분하다고 판단된다. 기어치 강성 K_s 의 1/1000로 두 가지 모델에 각각 적용하였다. 그리하여, 관성 불일치 해석을 위한 인자들을 Table 5에 정리하였다.

Fig. 11은 관성 불일치 해석결과로서 Bode Plot은 공진 영역에 대해 두 설계 모델의 Resonance 및 Anti-resonance 주파수 크기와 위상값 결과를 나타내준다. Anti-resonance와 Resonance Magnitude는 공진 주파수와 일치하는 가진 주파수가 가해질 시 커지는 진폭의 크기이며, Anti-resonance와 Resonance 주파수



Fig. 12 The welding test bed for proposed rotating welding torch

Table 6 Test results of Welding flat beads on plate

Item	Unit	Bead width
170 A	mm	12-14
250 A	mm	22-26
290 A	mm	24-29
320 A	mm	30-34

사이의 주파수 영역 범위가 공진 주파수 범위이다.

따라서, 주파수 영역에서 Anti-resonance와 Resonance Magnitude가 작고 공진 위상 범위가 작을수록 기계적 동특성이 우수하다고 할 수 있다. 기존의 회전토치 대비 본 논문에서 제안하는 회전 용접토치가 공진 주파수 범위가 작고, Magnitude가 상대적으로 작다는 것을 확인할 수 있다.

4. 용접시험

본 논문에서의 회전 용접토치 시험은 다양한 용접 전류 조건 상에서 회전 용접토치가 본래의 아크 회전 기능을 구현하면서 정상적인 용접작업을 수행하는지 여부를 검증하는 차원에서 수행되었다.

회전 용접토치는 용접 시 고전류, 고전압의 통전성을 만족함과 동시에 고전류, 고전압이 서보 시스템에 파손을 일으키지 않도록 절연 설계가 완전히 되어야 한다. 또한, 500 W급의 용접 열원에 의한 복사, 전도, 대류 열에 대해 기구부가 충분한 내구성을 갖추고, 20-25분간의 연속 용접에서도 기구부가 정상 동작하여야 한다. 이러한 기계적, 전기적, 열적 환경 내에서 시험을 하기 위하여 Fig. 12와 같이 용접 시험 베드를 구축하였다. 용접



Fig. 13 Welding results of the proposed rotating welding torch for each welding currents

시험 베드는 DSME의 3 kg 가반하중의 6자유도 수직 다관절 로봇인 DANDY-II 모델이 사용되었으며, 회전 용접토치를 Open-loop 속도제어하기 위해 모터 개발사의 상용 프로그램을 활용하여 시험을 수행하였다.

용접 시험은 전류조건 170 A / 250 A / 290 A / 320 A로 순차적으로 전류를 높여가며, 용접 중 회전 용접 토치의 기구적인 손상이나 시스템의 이상이 생기는지 확인하였다.

Table 6은 전류 변화에 따른 용접 비드폭을 정리하였다. 용접 비드의 품질은 용접기의 캘리브레이션 상태, 용접재의 물성, 피더기의 노후화, 주변 노이즈의 영향을 받는다. 이에 본 논문에서는 용접 품질이 아닌 가혹한 용접 전류조건에서도 회전토치가 용접을 수행하면서 충분한 내구성을 갖추고 있는지 확인하고자 하였다. 시험결과 최대 용접전류 320 A에서도 20 Hz의 서보 속도지령에 따라 용접 아크가 고속 회전하면서, 정상적인 용접 작업을 수행하였고, 전류와 비례 관계인 용착량이 Fig. 13과 같이 용접 전류의 상승에 따라 비드의 폭이 넓어짐을 통해 늘어났음을 확인할 수 있었다.

5. 결론

제안하는 회전 용접토치에 볼 조인트형 메카니컬씰 구조를 적용한 기구 설계를 통해 CO₂ 가스 봉입 및 용접전류의 통전과 더불어 시스템 보호를 위한 절연 설계를 동시에 구현하였다.

또한 메커니즘의 도식화를 통해 복잡한 기구의 운동상태와 구속 자유도를 직관적으로 이해할 수 있도록 표현하고 동일한 최종 운동을 만들어내는 두 설계 모델의 구성 부품과 연결 구조의 차이를 명확히 구분할 수 있도록 하였다.

기존 제품 대비 35%가량 경량화하여 장착되는 로봇의 기번 하중 부하를 줄였고, 4가지 동특성(구동토크, 진동반력, 고유진동수, 관성불일치) 해석을 통해 기존 제품보다 우수한 동특성을 가짐을 확인하였다. 또한, 실제 용접시험을 통해 기구부가 용접 전류변화에 따른 기계적, 열적, 전기적 영향에도 정상 작동을 검증하였다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 연구는 ‘(주)한화오션선’의 지원을 받아 수행된 연구임.

REFERENCES

- Nomura, H., Sugitani, Y., MURAYAMA, M., (1987), Development of automatic fillet welding process with high speed rotating arc, Transactions of the Japan Welding Society, 18(2), 116-124.
- Kang, S. W., Youn, H. J., Kim, J. H., Han, J. M., (2002), A study on the arc sensor algorithm for welding robot using rotating torch, The Korean Welding and Joining Society, 46-48.
- Samsung Heavy Industries, (2014), Weaving submerged welding apparatus, KR101571410B1.
- HD Korea Shipbuilding & Offshore Engineering Co., Ltd., (2018), Auto welding apparatus for corrugation plate, KR1018749430000. <https://doi.org/10.8080/1020160058887>
- HD Korea Shipbuilding & Offshore Engineering Co., Ltd., (2011), Welding carriage, 2020110008159. <https://doi.org/10.8080/2020110008159>
- SpinArc automatic MIG gun, ABICOR BINZEL. https://www.binzel-abicor.com/uploads/Content/USA/PDF-Files/PDF_Files_MIGMAG/Catalogs/LIT.9249_ABIMIG_SpinArc_04-19_Web.pdf
- Chiou, S.-J., Sridhar, K., (1999), Automated conceptual design of mechanisms, Mechanism and Machine Theory, 34(3), 467-495.
- Lee, J.-Y., (2011), Mechanism design using a mechanism configuration method, Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, 35(12), 1613-1618.
- Kirschman, C., Fadel, G. M., (1998), Classifying functions for mechanical design, Journal of Mechanical Design, 120(3), 475-482.
- Kristin L., (2015), Understanding the mysteries of inertia mismatch, Association for Advancing Automation. <https://www.automate.org/industry-insights/understanding-the-mysteries-of-inertia-mismatch>
- A3 online marketing team, (2021), 7 resources for understanding inertia and inertia mismatch, Association for Advancing Automation. <https://www.automate.org/blogs/7-resources-for-understanding-inertia-and-inertia-mismatch>
- Song, J.-S., Lee, G.-H., Park, Y.-J., Bae, D.-S., Lee, C.-H., (2012), Development of gear stiffness module for multi-body dynamic analysis on gears, Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, 21(1), 130-136.



Dong Jun Lee

Ph.D. candidate in the Department of Control Automations Systems, Pusan University. His research interests include robotics, optimal design of the articulated robot, robot simulator.

E-mail: ldj3688@pusan.ac.kr



Jung Min Kim

Principal researcher in the Production Innovation R&D Center, Hanhwa Ocean Co., Ltd.. His research interests include robot dynamics, articulated robot design.

E-mail: jmin209@hanhwa.com



Chul Soo Jeong

Principal researcher in the Production Innovation R&D Center, Hanhwa Ocean Co., Ltd.. His research interests include electrical hardware design, robot control, CAD Interface.

E-mail: charles_jung_83@hanhwa.com



Sangrok Jin

Associate Professor in the Department of Mechanical Engineering, Pusan University. His research interests include robot design and control.

E-mail: rokjin17@pusan.ac.kr

열가소 가황물 글라스런 채널의 마찰 및 파손 특성에 관한 연구

Study on of Friction and Degradation Characteristics of TPV Glass Run Channel

차수빈¹, 배준호², 정구현^{3,#}
Su-Bin Cha¹, Junho Bae², and Koo-Hyun Chung^{3,#}

¹ 울산대학교 대학원 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Graduate School, University of Ulsan)

² 화승 R&A 기술 연구소 (R&D center, HWASEUNG R&A)

³ 울산대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, University of Ulsan)

Corresponding Author / E-mail: khchung@ulsan.ac.kr, TEL: +82-52-259-2744

ORCID: 0000-0002-9092-6784

KEYWORDS: Plastic deformation (소성 변형), Wear (마모), Friction (마찰), Glass run channel (글라스런 채널)

Recently, the demand for electric vehicles is intensively increasing in accordance with environmental issues in automotive industries. Given that noise level from the electric vehicles is significantly lower than that from conventional vehicles with internal combustion engine, noise management has become more critical. Conventionally, glass run channel (GRC) is used to block the noise and contaminants from outside of vehicle. In this work, the friction and degradation characteristics of GRC with thermoplastic vulcanizate substrate were assessed. The tests were performed using the reciprocating tribo-tester developed to replicate the contact sliding between GRC and window glass. Also, the test conditions were determined in consideration of operating condition of GRC. As a result, the plastic deformation of the lips due to creep and wear of the slip coating deposited on the lip surface were found to be major degradation mechanisms. Furthermore, it was shown that the friction and degradation increased significantly due to the misalignment between GRC and window glass, associated with the significant increase in the reaction force. The results of this work provide fundamental understanding of the degradation characteristics of GRC, and therefore are expected to be useful for the design of GRC with improved performance.

Manuscript received: July 6, 2023 / Revised: August 9, 2023 / Accepted: August 10, 2023

1. 서론

최근 지속적으로 자동차 산업의 환경 규제가 강화되고 있으며, 이를 해결하기 위하여 친환경 자동차의 개발과 보급이 빠르게 이루어지고 있다. 친환경 자동차의 파워트레인(Powertrain)으로부터 발생하는 소음은 기존 내연 기관을 사용하는 차량 대비 상대적으로 적으므로, 주행 중 발생할 수 있는 풍절음, 도로 노면과 타이어 사이의 마찰 소음 등의 관리가 보다 중요해지고 있다. 이에 따라, 차량 외부로부터 유입되는 소음, 비, 먼지 등을 차단하는 Door Seal, Windshield Seal 및 글라스런 채널(Glass Run Channel, GRC) 등과 같은 부품에 대한 관심이 증대되고 있다.

특히, 글라스런 채널은 차량 창 유리의 가장자리를 둘러싸고 있으며, 창 유리의 승하강 가이드 및 창 유리로 가해지는 진동 및 충격을 방지하는 역할을 수행한다[1]. 그러나 상대적으로 높은 기계적 물성을 가지는 창 유리와의 지속적인 접촉 상대 운동에 따라, 글라스런 채널에서는 소성 변형(Plastic Deformation) 및 마모(Wear)와 같은 파손이 발생하기 쉽다[2]. 글라스런 채널의 소성 변형은 기밀(Sealing) 성능을 저하시킬 수 있고, 코팅 표면에 발생하는 마모 현상은 불안정한 마찰 거동을 초래할 수 있기 때문에 글라스런 채널의 파손 특성을 정확하게 파악하는 것이 중요하다. 그러나 주로 유한요소해석을 통해 Door Seal 파손에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있는 반면에[3-5], 상대적으로

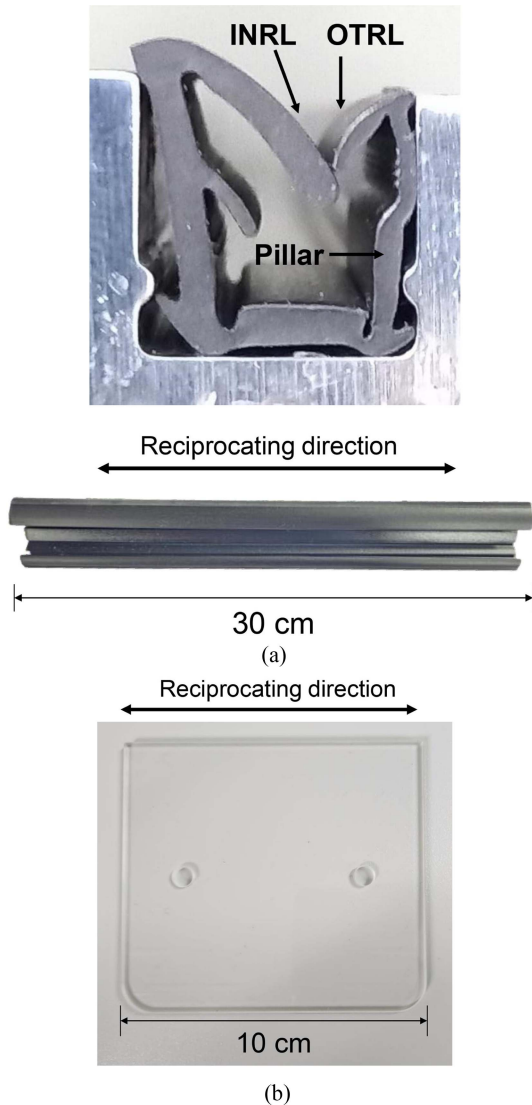


Fig. 1 Photographs of (a) glass run channel and (b) window glass specimens

글라스런 채널의 파손에 대한 연구는 매우 부족한 실정이다.

글라스런 채널에는 창 유리와의 정합 접촉(Conformal Contact)을 위하여, Ethylene-propylene Diene Monomer (EPDM)와 열가소 가황물(Thermoplastic Vulcanizate, TPV) 같은 Polymer가 모재(Substrate)로 많이 사용된다. 특히, TPV는 내후성 및 내열성이 높으며 성형 가공성이 뛰어나지만, 비중이 낮기 때문에 경량화를 위하여 점차 많이 사용되고 있는 추세이다[6]. 그러나, 영구압축 줄임율(Compression Set)이 크게 발생할 수 있는 문제를 가지고 있다[7]. 한편, 글라스런 채널의 표면에는 창 유리와의 상대 운동에서 발생하는 마찰력을 저감시키고, 표면 내구성을 향상시키기 위하여 다양한 표면 Texture 및 Polymer Slip 코팅 등이 적용될 수 있다. 우수한 기밀 성능을 가지는 글라스런 채널을 설계하기 위하여, 위와 같은 요인들이 체계적으로 고려되어야 하나, 이를 위한 정량적인 근거가 부족한 실정이다. 따라서 글라스런 채널의 파손 기구를 이해하고, 파손 특성을

정량적으로 평가하는 것이 요구되며, 이를 통하여 궁극적으로는 신뢰성 높은 글라스런 채널 설계에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구에서는 실제 차량에 적용되는 열가소 가황물 글라스런 채널의 마찰 및 파손 특성을 이해하고자 하였다. 이를 위하여 실제 글라스런 채널과 창 유리 사이의 상대 운동을 모사하는 실험 장치를 개발하였으며, 표면 Slip 코팅이 적용된 열가소 가황물 글라스런 채널을 시편으로 사용하였다. 글라스런 채널과 창 유리 사이의 마찰 특성은 실험장치를 이용하여 실시간으로 측정하였으며, 실험 전후 글라스런 채널의 형상과 표면은 공초점 레이저 주사현미경(Laser Scanning Confocal Microscope, LSCM)을 이용하여 분석함으로써, 글라스런 채널의 파손 특성을 정량적으로 평가하였다. 실험 조건은 실제 글라스런 채널의 작동 조건을 고려하여 결정하였으며, 글라스런 채널과 창 유리 사이 상대 위치의 영향을 살펴보기 위해 두 가지 상대 위치 조건에서 실험을 수행하였다. 본 연구의 결과는 글라스런 채널의 파손 특성을 이해하고, 향상된 성능을 가지는 글라스런 채널을 설계하기 위한 기반 데이터를 축적하는데 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 실험 세부사항

2.1 실험 시편

본 연구에서는 실제 차량에 적용되는 열가소 가황물 모재를 가지는 글라스런 채널을 사용하였다. Figure 1(a)는 실험을 위한 홀더에 장착된 상용 글라스런 채널의 단면 및 절단된 시편을 나타낸다. 글라스런 채널의 단면에는 Inner Lip (INRL), Outer Lip (OTRL) 및 Pillar가 형성되어 있다. 여기서 OTRL은 차량 외부로부터의 소음, 먼지, 비 등의 유입을 일차적으로 차단하는 역할을 하며, INRL은 OTRL에서 차단되지 못한 잔여물들이 차량 내부로 유입되는 것을 방지한다. 이러한 Lip들과 창 유리의 접촉에 의하여 기밀이 이루어지기 때문에 주요 파손은 Lip들에서 일어날 것으로 예측되었다. 또한, 그림에서 확인할 수 있는 바와 같이, 시편은 30 cm 길이로 절단하여 단면 형상에 맞게 제작된 홀더에 고정하여 실험에 사용되었다. Figure 1(b)는 본 연구의 상대 시편으로 사용된 창 유리 시편을 나타낸다. 창 유리 시편은 실험을 위하여 실제 차량에 적용되는 창 유리와 같은 소재를 이용해 10 cm로 제작되었으며, 4 mm 두께로 곡률없이 평평한 형상으로 제작되었다.

Figures 2(a)-2(c)는 각각 실험 전 글라스런 채널 시편의 OTRL, INRL 및 Pillar에 적용된 코팅의 표면과 3차원 LSCM 이미지를 나타낸다. 본 연구에 사용된 열가소 가황물 모재 글라스런 채널 시편의 각 Lip들과 Pillar의 표면에는 Slip 코팅이 적용되어 있었다. 창 유리와 접촉하도록 설계된 OTRL과 INRL의 표면에는 마찰 저감을 위하여 Ultra-high Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE) 입자가 포함된 Slip 코팅이 사용되었으며, 반면에

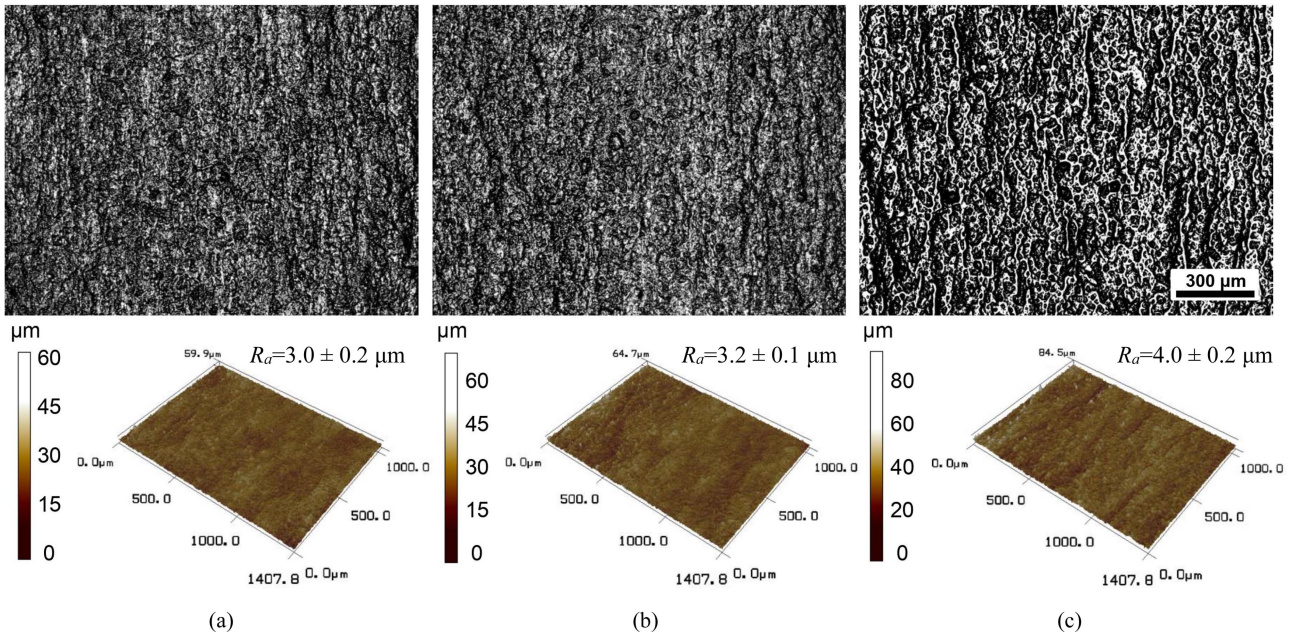


Fig. 2 Surface and three-dimensional height images of (a) OTRL, (b) INRL, and (c) pillar of GRC specimen obtained by laser scanning confocal microscope

창 유리와 직접적으로 접촉하지 않는 Pillar 표면에는 내구성 향상을 위하여 Polypropylene (PP) 입자가 포함된 Slip 코팅이 적용되었다. 이에 실험 전 서로 다른 4개의 측정 위치로부터 계산된 평균 표면 거칠기(R_a)는 OTRL, INRL 및 Pillar에서 각각 $3.0 \pm 0.2 \mu\text{m}$, $3.2 \pm 0.1 \mu\text{m}$ 및 $4.0 \pm 0.2 \mu\text{m}$ 로 측정되었다.

2.2 실험 방법

본 연구에서는 글라스런 채널과 창 유리 사이의 왕복 상대운동을 재현하기 위하여 Fig. 3과 같은 실험장치를 제작하여 이용하였다. 그림에서 확인할 수 있듯이, 실험장치는 상단에 고정된 창 유리 시편을 하단 홀더에 고정된 글라스런 채널 시편의 OTRL과 INRL 사이에 위치시킨 후, 왕복 상대운동을 하도록 설계되었다. 또한, 본 실험장치에서는 글라스런 채널이 차량에 잘못 조립되거나, 실제 차량 운전 중 유입되는 이물질에 의하여 유발될 수 있는 글라스런 채널과 창 유리의 상대 위치의 영향을 평가하기 위하여, 글라스런 채널 운동 방향과 수직인 방향으로 창 유리의 위치를 조절할 수 있도록 마이크로 스테이지를 장착하였다. 글라스런 채널 시편의 이송속도는 실제 창 유리의 승하강 속도가 0.15-0.20 m/s임을 고려하여, 중앙에서 최대 0.20 m/s가 되도록 결정하였다. 왕복 운동 시의 거리는 125 mm로 결정하였으며, 총 미끄럼 거리 50 km에 해당하는 200,000회 동안 실험을 수행하였다. 또한, 글라스런 채널과 창 유리의 상대 위치의 영향을 파악하기 위하여, 설계상 주어진 위치(Normal 조건)와 OTRL 방향으로 창 유리 시편이 0.35 mm만큼 이동한 위치(Offset 조건)에서 실험을 수행하였다. 각 실험조건에서의 4회씩 반복하여 실험을 수행하였다. 또한, 모든 실험은 상온 및 건식 윤활 상태에서 수행되었다.

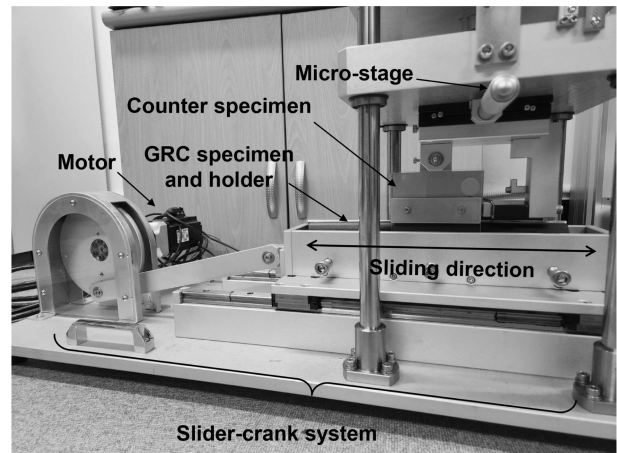


Fig. 3 Photograph of glass run channel tester

앞서 언급된 바와 같이, 글라스런 채널의 Lip들과 창 유리 사이의 접촉에 의하여 기밀이 이루어지며, 이를 위한 반력이 작용하게 된다. 이러한 반력은 마찰 및 파손 특성에 큰 영향을 미칠 것으로 예상되었으며, 본 연구에서는 글라스런 채널 Lip의 상대 위치 조건에 따른 반력을 추정하기 위하여, MSC. Marc (MSC Software Co.)를 이용한 2D 유한요소해석을 수행하였다. 유한요소해석을 위한 재료의 물성은 Ogden 모델에 기초하여, 인장시험을 통하여 얻었다. Quad Mesh가 적용되었으며, 경계조건으로서, 글라스런 채널의 기저부를 모든 방향으로 구속시킨 후 해석을 수행하였다. 해석을 통하여 추정된 반력은 Normal 조건에서 OTRL과 INRL에 대하여 각각 6.7 N 및 6.9 N으로 나타났고, Offset 조건에서 각각 44.5 N 및 4.3 N으로 나타났다. Normal

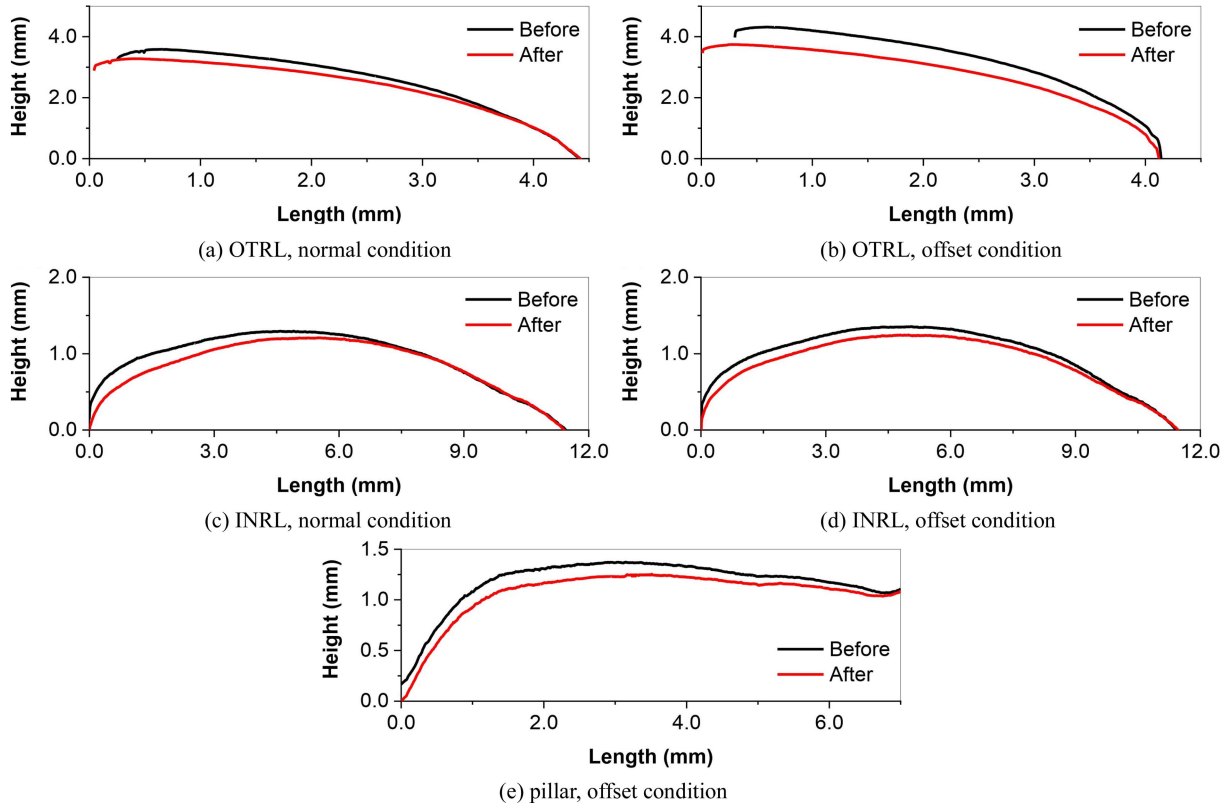


Fig. 4 Cross-sectional height profiles of (a), (b) OTRL and (c), (d) INRL, and (e) pillar before and after tests under normal and offset conditions

조건에서는 OTRL과 INRL에 의해 작용하는 반력이 유사한 반면, Offset 조건에서는 OTRL의 반력이 크게 증가하는 것을 알 수 있었는데, 이는 창 유리 시편이 OTRL 방향으로 이동함에 따라, Pillar와의 접촉이 발생하기 때문이다. 따라서, Offset 조건에서는 OTRL의 파손이 상대적으로 크게 발생할 것으로 예측되었을 뿐만 아니라, Pillar의 파손도 함께 발생할 것으로 예상되었다.

글라스런 채널과 창 유리 사이의 마찰 특성은 실험 장치에 부착된 Loadcell을 통하여 실시간으로 측정하였고, 1회 왕복 운동 간 평균 마찰력을 미끄럼 거리에 대해 나타냈다. 글라스런 채널 시편의 OTRL, INRL 및 Pillar에 발생하는 소성변형 및 표면 마모 등과 같은 파손 특성을 확인하기 위하여 LSCM (VK-X200, Keyence)을 이용하여 시편을 정밀하게 측정하였다. OTRL, INRL 및 Pillar의 변형은 실험 전후 LSCM으로 측정된 2차원 높이 프로파일을 통하여 정량적으로 측정하였다. 또한, Lip 표면에서 발생하는 파손 특성도 함께 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 파손 특성

Figures 4(a)와 4(c)는 Normal 조건 실험 전후 LSCM으로 측정된 OTRL과 INRL의 단면 높이 프로파일을 각각 나타낸다. 두 경우에서 모두 실험 전 높이 프로파일 대비 실험 후 높이

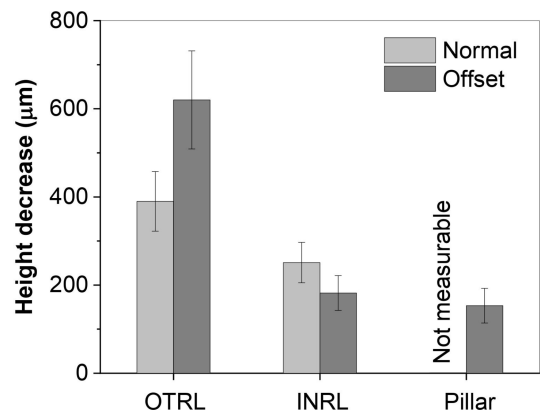


Fig. 5 The height decreases of the OTRL, INRL, and pillar after tests under normal and offset conditions

프로파일에서 확인한 높이 감소가 발생한 것을 알 수 있다. Normal 조건에서는 Pillar와 상대 소재 간 직접적인 접촉이 발생하지 않기 때문에 OTRL과 INRL의 높이 프로파일만을 제시하였다. 반면, Figs. 4(b), 4(d) 및 4(e)는 Offset 조건 실험 전후 LSCM으로 측정된 OTRL, INRL 및 Pillar의 단면 높이 프로파일을 각각 나타낸다. 예상된 바와 같이 Offset 조건에서는 증가한 하중에 의하여 OTRL에서의 높이 감소가 커진 반면, INRL에서는 감소한 것을 알 수 있다. 또한, Offset 조건에 따라 상대 소재와 접촉하는 Pillar에도 높이 감소가 발생하였음을 확인할

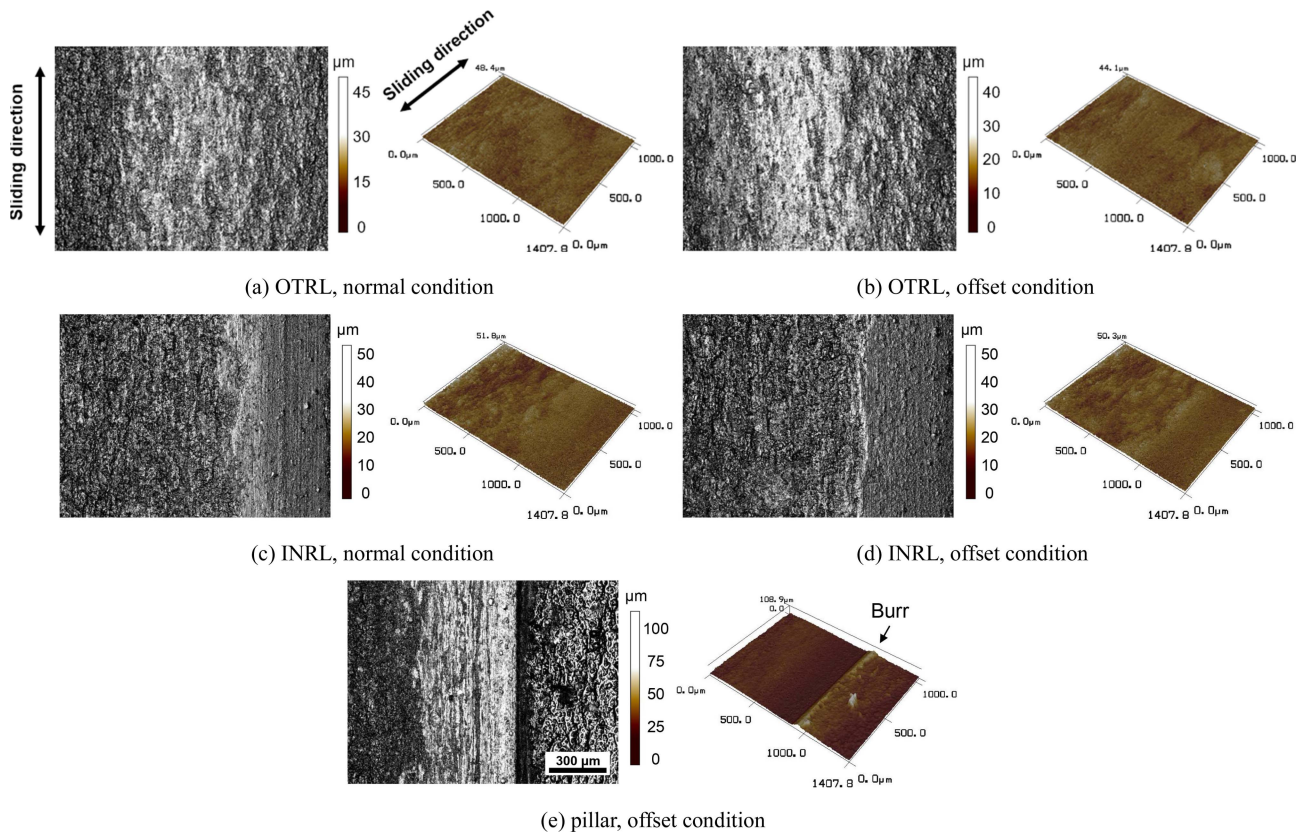


Fig. 6 Surface and three-dimensional height images of (a), (b) OTRL and (c), (d) INRL, and (e) pillar before and after tests under normal and offset conditions

수 있다. 실험 전후 시편의 Lip 형상 및 LSCM 프로파일을 비교할 때, 이와 같은 높이 감소는 주로 Creep에 의한 소성 변형에 기인하는 것으로 생각된다. 특히, 이러한 소성 변형은 창 유리와 Lip 사이에 작용하는 수직하중의 감소를 유발하므로, 글라스런 채널의 기밀 특성에 지배적인 영향을 미칠 것으로 예상된다. 이러한 관점에서 Lip의 소성변형은 글라스런 채널의 주된 파손기구 중 하나일 것으로 판단된다.

Fig. 5는 Fig. 4의 2차원 높이 프로파일 변화로부터 측정된 소성 변형량을 나타낸다. Normal 조건 실험 후, OTRL 및 INRL 변형량은 각각 $390 \pm 68 \mu\text{m}$, $251 \pm 46 \mu\text{m}$ 로 계산되었으며, Offset 조건 실험 후 OTRL, INRL 및 Pillar의 변형량은 각각 $620 \pm 111 \mu\text{m}$, $182 \pm 40 \mu\text{m}$ 및 $153 \pm 39 \mu\text{m}$ 로 측정되었다. Normal 조건에서 OTRL과 INRL에 작용하는 하중이 유사함에도 불구하고 상대적으로 OTRL의 변형이 큰 것으로 나타났다. 이는 INRL 대비 상대적으로 얇은 OTRL의 두께에 의한 영향으로 생각된다. 반면, Offset 조건에서는 예상된 바와 같이, OTRL의 변형은 증가하고, INRL의 변형은 감소하는 것을 확인할 수 있다. Normal 조건 대비 Offset 조건에서, OTRL의 소성변형은 약 59% 증가하고 INRL의 소성변형은 27% 감소하는 것으로 계산되었다. 또한 Pillar에서의 추가적인 소성변형을 관찰할 수 있었다. 이는 Offset 조건 적용에 따른 수직 하중의 변화와 밀접하게 관련이 있을 것으로 생각된다.

Figures 6(a)와 6(c)는 Normal 조건 실험 후 OTRL과 INRL의 표면 및 3차원 LSCM 이미지를 각각 나타낸다. 두 경우 모두에서 상대 시편과의 접촉에 의한 Slip 코팅의 표면 파손 흔적을 관찰할 수 있다. 특히, OTRL에는 INRL 대비 넓은 면적에 걸쳐 표면파손 흔적이 확인되었으나, 그 파손의 정도는 상대적으로 적은 것으로 나타났다. 또한, INRL에는 미끄럼 방향을 따라 발생한 스크래치(Scratch)가 형성되어 있는 것을 관찰할 수 있다. Figs. 6(b), 6(d) 및 6(e)는 각각 Offset 조건에서의 실험 후 얻은 OTRL, INRL 및 Pillar의 표면 및 3차원 LSCM 이미지를 나타낸다. Normal 조건과 Offset 조건에서 발생한 OTRL 및 INRL의 표면파손 정도는 크게 차이가 나지 않는 것으로 나타났다. 그러나 Fig. 6(e)에 제시된 바와 같이, Offset 조건에서는 창 유리의 끝부분과 접촉하게 되는 Pillar의 표면 위에 미끄럼 방향을 따라 파손이 발생한 것을 명확하게 관찰할 수 있으며, 접촉부위의 끝단에는 Burr가 형성된 것을 알 수 있었다. Normal 조건 실험 후, OTRL 및 INRL 표면 파손 영역의 R_a 는 각각 $3.7 \pm 0.2 \mu\text{m}$ 및 $3.3 \pm 0.2 \mu\text{m}$ 로 나타났다. 또한, Offset 조건 실험 후 OTRL, INRL 및 Pillar 표면 R_a 는 각각 $3.3 \pm 0.3 \mu\text{m}$, $3.0 \pm 0.3 \mu\text{m}$ 및 $3.2 \pm 0.5 \mu\text{m}$ 로 측정되었다. 이러한 결과로부터, Lip의 접촉부위에서 표면파손이 명확하게 발생하였으나, 그 수준은 표면 거칠기에 큰 영향을 미칠 정도로 크지는 않는 것으로 판단된다. 이러한 OTRL, INRL 및 Pillar의 표면파손은 창 유리와의 접촉

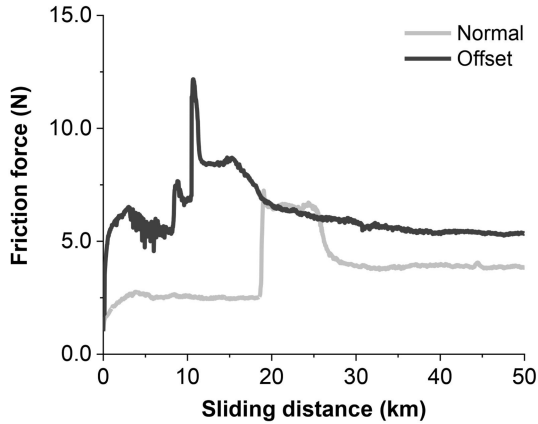


Fig. 7 Variation of friction forces with respect to sliding distance under normal and offset condition tests

상대운동에 의한 마모에 의한 것으로 판단되며, 불안정한 마찰 특성을 유발하여 마찰소음 유발의 원인이 될 수 있을 것으로 생각된다. 이러한 관점에서 마모는 글라스런 채널의 주요한 파손 기구로 고려되어야 할 것으로 여겨진다.

3.2 마찰 특성

Figure 7은 Normal 및 Offset 조건 실험으로부터 얻은 미끄럼 거리에 따른 마찰력의 변화를 나타낸다. 두 조건 모두에서 접촉 초기에 마찰력이 급격하게 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 그 후의 마찰력의 변화는, Normal 조건에서 약 20 km의 미끄럼 거리까지 비교적 일정하게 유지한 후 급격하게 상승한 반면, Offset 조건에서 매우 불안정하게 나타나고 있는 것을 알 수 있다. 두 경우 모두에서 약 30 km 이후에서의 마찰력의 변화는 비교적 일정한 값을 유지하는 것으로 나타났다. 실험 초기 발생한 마찰력의 상승과 불안정한 마찰 거동은 마찰 저감을 위해 사용된 Slip 코팅의 초기 파손에 의한 것으로 생각되며, 점차 Lip과 Pillar의 소성변형이 발생함에 따라 상대 시편에 작용하는 반력이 감소하며 마찰력이 안정화되는 것으로 생각된다. 한편, Normal 조건 및 Offset 조건에서 최종 5 km의 미끄럼 거리에 대한 평균 마찰력은 각각 3.9 N 및 5.3 N으로 측정되었다. 예상된 바와 같이 Offset 조건에서 마찰력이 더 큰 것을 확인할 수 있는데, 이는 두 조건에서 작용하는 반력의 차이에 의한 것으로 판단된다. 즉, Normal 조건에서 작용하는 반력은 약 13.6 N으로 추정된 반면, Offset 조건에서는 Pillar와의 접촉에 의하여 약 48.8 N까지 상승하는 것으로 예측되었으며, 이러한 반력의 증가에 따라, Normal 조건에 비하여 Offset 조건에서 더 큰 소성변형이 발생하였음에도 불구하고, 마찰력이 크게 나타난 것으로 여겨진다. Fig. 7에 제시된 바와 같은 불안정한 마찰 거동은 마모에 의한 Lip의 표면 파손과 직접적인 관계를 가지고 있을 것으로 판단되며, 결과적으로 차량 운전 중 소음을 유발하는 주요한 원인 중 하나이므로, 최소화되어야 한다.

4. 결론

본 연구에서는 친환경 자동차를 위한 신뢰성 높은 글라스런 채널을 설계하기 위하여, 창 유리에 대해 상대 운동하는 글라스런 채널의 파손 특성을 실험적으로 평가하였다. 시편은 실제 차량에 사용중인 열가소 가황물 소재의 상용 글라스런 채널을 이용하였다. 또한, 글라스런 채널과 창 유리 사이의 상대 위치에 따른 영향도 평가하였다. 실험 결과로부터 글라스런 채널의 주요 파손은 Creep에 의한 Lip과 Pillar의 소성변형과 마모에 의한 표면 코팅의 파손에 의한 것으로 나타났다. Lip의 소성변형은 OTRL에서 특히 큰 것으로 나타났으며, 글라스런 채널의 기밀 성능 저하를 유발할 것으로 여겨진다. 또한, 창 유리와 글라스런 채널의 상대 위치의 차이에 의한 반력의 영향으로 소성변형 발생이 크게 영향을 받는 것을 알 수 있었다. 특히, 이러한 상대 위치의 차이는 마모에 의한 표면 파손 정도를 증가시켜 마찰력의 증가와 불안정한 거동을 유발하는 것으로 생각된다. 그러므로, 글라스런 채널의 내구성을 향상시키기 위해서는 위치변화에 강건한 Lip의 형상 설계 및 표면의 내마모 특성을 향상시키는 것이 요구된다. 본 연구 결과는 상용 글라스런 채널에서 발생하는 파손 특성을 이해하는데 도움이 될 것으로 기대되며, 향후 글라스런 채널의 기밀 성능 및 소음 특성과 본 연구의 정량적 데이터 간의 상관 관계를 파악하여 수명을 예측하는데 기여할 수 있을 것으로 생각된다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 논문은 2023년도 과학기술정보통신부 및 교육부 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 각각 수행된 기초연구사업(No. NRF-2020R1A2C1011630) 및 지자체-대학 협력기반 지역혁신사업(No. 2021RIS003)의 결과입니다.

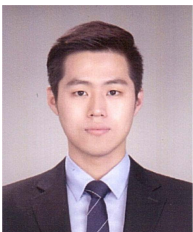
REFERENCES

- Ryu, M. H., Jang, K. S., Lee, S. H., Lee, J. S., Choi, H. S., (2017), A development of the inside belt weather-strip mount structure for improved BSR performance, Proceedings of the Autumn Conference on the Korean Society of Automotive Engineers, 1045-1049.
- Jeoung, S. K., Yoo, S., Lee, J. Y., Koh, J. S., Kim, D. H., Lee, K. Y., Lee, S. C., (2009), A study on elevating durability performance and an anti-environment property of a weather strip for the window of a vibration-noise reduction type automobile, Proceedings of the Spring Conference of Korean Society of Automotive Engineers, 1361-1366.
- Kim, B. S., Moon, B. Y., Kim, K. H., (2005), A study on contact deformation of automotive door weatherstrip using non-linear

- finite element method, Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers, 13(4), 1-7.
4. Wang, J. J., Lee, J., Woo, C. S., Kim, B. K., Lee, S. B., (2011), An experimental study and finite element analysis of weatherstrip, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 12(1), 97-104.
 5. Moon, H., Kim, H., Kim, H. Y., Park, J. C., Min, B., (2011), Acoustic isolation analysis of door weatherstrip considering permanent deformation effects, Proceedings of the Spring Conference of Korean Society of Automotive Engineers, 1934-1939.
 6. Bhattacharya, A. B., Chatterjee, T., Naskar, K., (2020), Automotive applications of thermoplastic vulcanizates, Journal of Applied Polymer Science, 137(27), 49181.
 7. Cho, S., Yoon, B., Lee, S., Hong, K. M., Lee, S. H., Suhr, J., (2021), Investigation of viscoelastic properties of EPDM/PP thermoplastic vulcanizates for reducing innerbelt weatherstrip squeak noise of electric vehicles, Composites Research, 34(3), 192-198.

**Su-Bin Cha**

M.S. in the School of Mechanical Engineering of University, University of Ulsan. His research interest is tribology.
E-mail: tci9612@ulsan.ac.kr

**Junho Bae**

Engineer in R&D center of HWASEUNG R&A. His research interest is precision engineering and tribology.
E-mail: jbae@hsrna.com

**Koo-Hyun Chung**

Professor in the School of Mechanical Engineering, University of Ulsan. His research interest is tribology and surface engineering.
E-mail: khchung@ulsan.ac.kr

항공우주 응용을 위한 반사형 광학 시스템

Reflective Optical Systems for Aerospace Applications

김기수¹, 배지훈², 박종복^{1,#}
Kisoo Kim¹, Ji-Hun Bae², and Jongbok Park^{1,#}

¹ 한국광기술원 지능형광학모듈연구센터 (Intelligent Optical Module Research Center, Korea Photonics Technology Institute)

² 국방과학연구소 (Agency for Defense Development)

Corresponding Author / E-mail: jb.park@kopti.re.kr, TEL: +82-62-605-9595

ORCID: 0009-0009-7033-8959

KEYWORDS: Reflective optical systems (반사형 광학 시스템), Aerospace (항공우주), Optical payload (광학 페이로드), Environment simulation (환경 시뮬레이션), Optical mirror (광학 거울)

The utilization of aerospace technology is growing to meet various requirements of climate change sensing, communications, and the military. Large aperture and precise reflective optical systems such as mirrors are needed to acquire high-quality data, and the requirements of lightness, low cost, and low deformation should also be met to operate in the space environment. In this review, we highlight the recent progress of reflective optical systems for aerospace applications. In particular, optical systems for artificial satellites and homing optics are mainly introduced, and optical and mechanical simulations are discussed according to operating environments. We also discuss various reflective optic designs, materials, and operating principles for aerospace applications, such as a homing head and optical payload. We hope that this review provides approaches for developing surveillance systems, exploring space, and addressing the climate crisis.

Manuscript received: July 26, 2023 / Revised: August 25, 2023 / Accepted: August 30, 2023

1. 서론

우주 광학 및 항공우주 기술의 급속한 성장과 원거리 고해상도 관측 시스템에 대한 기술 요구가 증가됨에 따라 우주 광학계에 대한 중요성이 지속적으로 증가하고 있다. 망원경과 같은 이미징 시스템을 통하여 원거리 고해상도 이미지를 획득하기 위해서는 집광 능력이 큰 조리개를 갖는 광학계가 필요하며, 수차를 최소화하고 무게를 감소시키기 위하여 렌즈 대신 거울 (Mirror)과 같은 반사형 광학계가 주로 사용된다[1,2]. 위성용 우주 광학계의 경우 발사체를 이용하여 광학계를 우주 환경에 이동시켜야 함으로 조리개 구경의 증가는 발사 비용을 증가시키는 문제가 있다. 이러한 문제를 해결하고자 다양한 우주 광학계들은 경량화 설계가 고려되고 있으며, 우주 및 발사 환경에서 발생하는 진동 및 열 등의 외부 환경시뮬레이션을 통하여 미리 변형을 예측함으로써 최적의 구조를 설계한다[3-5].

반사형 광학계 설계에 있어 재료 선택은 비용, 성능 및 신뢰성 측면에서 매우 중요하며 운용하고자 하는 환경에 맞게 적절한 소재를 선택하는 것이 필요하다[6]. 관측하고자 하는 거리, 시야각, 파장 및 탑재체의 크기에 따라서 광학설계가 달라지게 된다. 대부분의 위성 광학계는 주경과 부경을 포함하는 카세그레인(Cassegrain)식 구조를 채택하며, 이미지 해상도를 높이기 위하여 주경과 부경에서 반사된 빔을 최적 광학 구조를 통하여 집중한다[7,8]. 거울을 포함한 광학 부품들의 정렬, 편심 오차 등에 의하여 파면(Wavefront), 빔 직경 등의 광학적 특성이 변경되므로 제작 및 운용 환경에 따른 광학계 오차를 분석하는 것이 매우 중요하다[9].

항공 응용분야에서는 빛을 추적하는 호밍(Homing) 시스템에도 반사형 광학시스템이 주로 사용된다. 호밍 광학계는 열을 통하여 방사되는 적외선을 감지함으로써 실시간으로 대상 물체를 추적하는 역할을 수행한다. 호밍 광학계는 위성용 광학계와

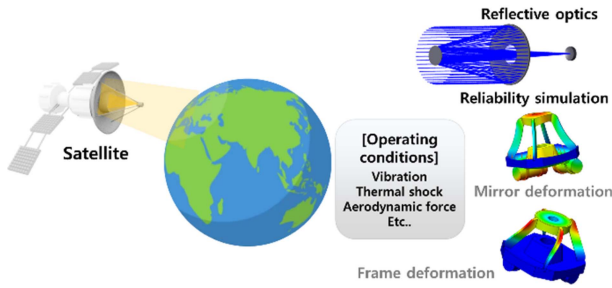


Fig. 1 Schematic illustrations of reflective optical system design through simulations of operating conditions such as vibration, thermal, and aerodynamic force for aerospace applications

달리 주로 대기 환경에도 사용되기 때문에 공기역학적 시뮬레이션에 대하여 환경 평가를 고려해야 하며, 레티클(Reticle)을 통하여 위치를 실시간으로 보정한다[10,11]. 운용 환경에 따라서 공기역학적 힘에 의한 광학계의 변형을 막기 위하여 돔 형태의 보호막을 장착하기도 한다. 또한, 움직이는 물체를 정확하게 추적하기 위해서는 예측 제어 알고리즘이 필요하며, 기존 좌표를 기반으로 벡터를 추정할 수 있다[12-14].

본 논문에서는 항공우주 응용을 위한 반사형 광학 시스템 연구 동향에 대하여 소개한다(Fig. 1). 지구 또는 우주 관측용 위성 및 호밍 시스템에 장착되는 광학 시스템에 대하여 주로 다루며 광학 설계 및 신뢰성 시뮬레이션에 대한 연구 소개도 포함한다. 가장 먼저 항공우주용 광학계의 핵심 부품인 반사형 광학 부품의 소재, 제작 공정 및 측정 방법에 대하여 연구 동향을 소개하고, 위성용 광학계 및 호밍 유도 시스템에 적용되는 반사형 광학 시스템에 대하여 구체적으로 설명한다. 각 절에서는 요구 조건 및 최신 연구동향에 대하여 제시하며 각 시스템의 원리 및 최적화 방법에 대하여 소개한다.

2. 반사형 광학 부품

2.1 반사형 광학 부품 소재

반사형 거울의 소재로 세라믹, 유리 및 금속이 주로 사용된다(Table 1). 그 중에서도 우주형 광학계로 탄화규소(Silicon Carbide, SiC), 제로듀어(Zerodur), 용융 실리카(Fused Silica), 알루미늄 합금(Aluminum Alloy), 베릴륨(Beryllium, Be) 재료가 가장 많이 사용되며, 각각의 재료들은 비용, 열 안정성(Thermal Stability) 및 강성의 변수들에서 장단점이 있다[6]. 알루미늄 합금과 금속 소재는 열 안정성이 다른 소재 대비 낮은 단점이 있지만, 제조 및 처리가 쉽고 매우 가벼우며 비용이 저렴하다는 장점이 있다[15,16]. 또한 다이아몬드 정밀 선삭 가공(Single-point Diamond Turning, SPDT)와 같은 정밀 가공 기술을 이용하면 금속 거울의 높은 형상 및 광학적 정확도를 구현할 수 있다[17-19]. 이러한 알루미늄 합금의 장점을 이용하여 광역적외선 탐사 위성(Wide-field Infrared Survey Explorer)의 광학계는

금(Gold)이 코팅된 알루미늄 소재로 채택 되었다[20]. 금속 소재 중 베릴륨은 무게 대비 강성이 높고 열 안정성이 알루미늄보다 높아 제임스 웹 우주망원경(James Webb Space Telescope)의 주 거울의 재료로 사용되었다[21]. 용융 실리카와 같은 유리 소재는 상용 렌즈로 많이 사용되나 높은 무게로 인하여 대형 우주 광학계 부품으로 이상적인 물질이 아니다. 하지만, 초소형 위성용 광학계의 경우 소구경의 광학계가 장착되기 때문에 거울 또는 렌즈 소재로 용융 실리카가 사용된다. 대표적인 예로 과학기술위성 3호(STSAT3)에 사용되는 광학계는 대부분 용융 실리카를 채택하였다[22]. 탄화규소소재는 높은 열 안정성 및 우수한 기계적 특성으로 인하여 우주 광학계에서 매우 잠재력이 높은 후보 물질 중 하나이다. 탄화규소와 같은 세라믹 기판 제작방법은 반응결합(Reaction Bonded), 열압착, 소결(Sintering) 및 화학 기상증착(Chemical Vapor Deposition, CVD)이 있으며, 제작방법에 따라서 각 재료의 특성이 달라질 수 있다. 탄화규소는 다공성 및 미세구조 결합을 가지고 있어 가공이 어려우며, 표면 손상을 일으키지 않고 연삭 및 연마 작업을 수행하는 고정밀 가공 기술이 필요하다[23].

2.2 반사형 광학 부품 제작 방법

반사형 광학부품을 제작하는 방법은 크게 연삭 및 연마와 같은 기계적 가공과 3D 프린팅과 같은 적층형 제조(Additive Manufacturing)로 구분할 수 있다[24]. 기계적 가공의 경우 다양한 재료를 사용할 수 있으며 높은 형상정밀도를 구현할 수 있다는 장점이 있으나, 비구면 형상과 같은 표면 가공 시 가공의 복잡도가 높아진다. 반면, 적층형 제조는 재료 선택의 다양성이 제한되지만 자유 곡면을 제작하는데 용이하다.

기계적 가공을 통하여 화학기상증착 탄화규소(CVD SiC) 거울을 제작하기 위해서는 Fig. 2에 묘사된 공정 절차가 필요하다[25]. 탄화규소 소재를 합성하기 위하여 탄화규소 파우더와 용제를 혼합하여 젤 형태의 슬러리를 만들고, 젤을 주조하여 탄화규소 부품을 제작한다. 합성된 탄화규소 부품의 외형을 가공하여 곡률 형상을 제작하고 뒷면을 가공하여 경량화 작업을 진행한다. 화학기상증착 방법을 통하여 곡률 면에 탄화규소를 약 500 μm 증착시킨 후, 연삭과 연마를 통하여 곡률을 재가공한다. 화학기상증착 방법으로 증착된 표면이 고르지 못하기 때문에 추가적인 재가공이 필요하다. 광학적으로 반사도를 향상시키기 위하여 크롬(Cr), 알루미늄(Al), 이산화규소(SiO₂), 오산화나이오븀(Nb₂O₅) 등의 재료를 적층하여 최종적으로 거울을 제작한다.

기계적 가공 방법을 통해 비구면 거울을 제작하기 위해서는 고정밀 가공 기술이 요구된다. 최근 헤테로세칼 스트레스 랩핑(Heterocercal Stressed Lapping) 연삭/연마, 컴퓨터-제어 광학표면(Computer-controlled Optical Surfacing, CCOS) 및 자기유동 유체(Magnetorheological Finishing, MRF) 연마 기술을 통하여 직경 4.03 m의 대구경 거울 제조 방법이 소개되었다(Fig. 3(a)) [26]. 헤테로세칼 스트레스 랩핑 기술은 불균일한 압력 분포를 보상하여 엣지 효과(Edge Effect)라고 불리는 연마 공정의

Table 1 Mechanical and thermal properties of reflective mirror substrates

Material	Elastic modulus, E [GPa]	Thermal expansion α [/k]	Thermal conductivity k [W/m-k]	Thermal stability k/ α [W/m]
Aluminum alloy	68.9	23.6×10^{-6}	170	7
Fused silica	72.7	0.52×10^{-6}	1.3	2.5
Zerodur	90.3	0.02×10^{-6}	1.6	80
SiC	130	2.6×10^{-6}	155	59.62
Sintered SiC	410	2.2×10^{-6}	175	79.55
CVD SiC	465	2.2×10^{-6}	200	90.9
Beryllium	303	5×10^{-6}	180	16

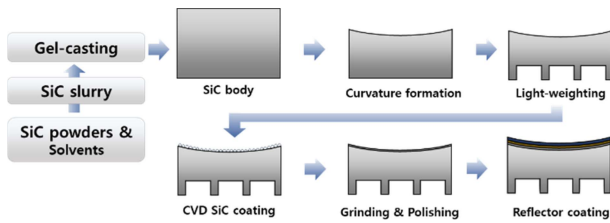


Fig. 2 Schematic illustrations of CVD SSiC mirror manufacturing. After synthesizing the SiC body, the CVD SiC mirror is fabricated through mechanical processing, deposition, grinding, polishing, and reflective material coating

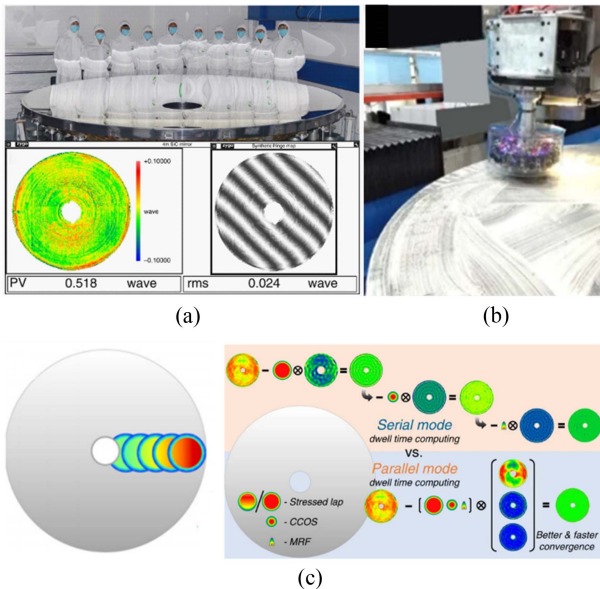


Fig. 3 Photographs and schematics of SiC aspheric mirror manufacturing. (a) Fabrication and measurement results of the aspheric mirror. Images and illustrations of (b) heterocercal stressed lap polishing and (c) mode comparison [26] (Adapted from Ref. 26 on the basis of OA)

문제점을 감소시킬 수 있다(Fig. 3(b)). 거울의 중심에서 외곽을 가공할수록 발생하는 연마 압력을 보상하기 위하여, 일반적인 가공은 측정된 형상 오차에 따라 체류 시간을 계산하는 직렬 모드(Serial Mode)를 사용하고 있다. 하지만, 직렬 모드는 CCOS

및 MRF와 같은 공정을 직렬로 계산하여 상대적으로 느리다는 단점이 있어, 서로 다른 공정들의 영향을 동시에 보상하는 병렬 계산 모델이 제안되었다(Fig. 3(c)). 이러한 방법을 통하여 최종적으로 표면 에러 15.2 nm Root Mean Square (RMS), 조도 0.8 nm RMS를 달성하였으며, 5% 이하의 클래딩(Cladding) 층 두께 불균일도를 갖는 거울을 제작하였다.

적층형 제조방법을 통하여 경량 거울을 제작하기 위한 다양한 방법들도 소개되었다[24,27]. 대부분의 경량 거울은 뒷면에 벌집 형태와 유사한 유닛 셀 구조를 가지고 있으며, 이 서포트 구조는 직육면체, 삼각형, 프리즘, 또는 육각 프리즘 형태 등 다양하게 설계될 수 있다. 적층형 제조방법은 다양한 형상의 서포트 구조를 구현 가능하며 이를 통하여 구조적 안정도를 향상시킬 수 있다[28,29]. 알루미늄 합금 거울을 제작하기 위해서는 금속 선택적 레이저 용융(Selective Laser Melting, SLM) 장비를 사용하며, 레이저를 통하여 분말을 용융시켜 형상을 구성하고 분말을 제거한 후 열처리를 통하여 형상을 고정한다[30]. 적층형 제조 시 발생하는 골격(Scaffold)을 제거한 후, 형상을 보정하기 위하여 다이아몬드 정밀 선삭 가공이 추가적으로 필요하다. 그 이후 광학적 코팅을 통하여 반사도를 향상 시킨다.

2.3 반사형 광학 부품 측정

반사형 광학 부품 제조 과정에서 표면가공 정확도 및 중력 등의 외부 환경에 따른 변형을 검사하기 위하여 간섭계를 통하여 표면 오차(Surface Error)와 파면 오차(Wavefront Error, WFE)를 측정한다(Fig. 4(a)) [31,32]. 표면 오차는 완벽한 표면 형상 대비 편차를 관측하고, 파면 오차는 기존 파면 형상 대비 반사된 파면의 편차를 관측한다. 구면 거울의 광학 품질을 관측하기 위해서는 간섭계와 구면 거울의 초점이 같은 축에서 잘 맞도록 정렬해야 하며, 비구면 거울의 광학 품질은 일반적으로 비축 정렬을 통하여 측정한다. 중력에 의한 영향을 분석하기 위해서는 거울과 광축을 중력방향으로 맞추어 거울의 표면 변화를 관측한다[33]. 형상 오차는 또한 플로필리미터(Profilometer)를 통해서도 측정이 가능하다[34]. 접촉식 플로필리미터는 미세 캔틸레버(Microcantilever)를 샘플에 접촉 후 레이저 빔의 편차를 이용하여 형상의 프로파일을 관측한다. 비접촉식 광학 플로필리미터는 공초점 또는 홀로그래픽 방식 등을 통하여 표면의 형상

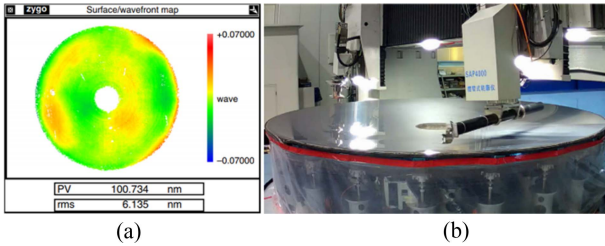


Fig. 4 Measurement of reflective optics. (a) An image of surface error measurement through the interferometer. (b) A photograph of swing arm profilometry measurement approach [26] (Adapted from Ref. 26 on the basis of OA)

및 조도를 관측한다. 하지만 일반적인 플로필러미터는 관측 범위가 좁아 대구경광학계의 전체 표면오차를 관측하기에 어려움이 있다. 이러한 한계를 극복하고자 플로필러미터를 회전시켜가며 거울의 넓은 영역을 측정하는 스윙 암 플로필러메트리 (Swing Arm Profilometry, SAP) 방법도 소개되었다(Fig. 4(b)) [26,35].

거울을 지지하는 양각대(Isostatic Bipod) 조립 및 주경과 부경의 정렬에 의한 파면 오차도 측정이 필요하다. 조립 정렬 불량은 토크, 굽힘 모멘트 및 중력과 결합된 영향으로 인하여 파면 왜곡을 발생시키고, 이는 결과적으로 변조전달함수 (Modulation Transfer Function, MTF)와 같은 광학적 해상도에 영향을 준다. 파면 오차를 관측하는데 제르니케 다항식 (Zernike Polynomials) 계수가 사용되며 포커스, 코마, 비점 수차와 같은 항목의 RMS 값을 분석한다[4,28]. 조립 정렬 시 제르니케 계수의 정보를 관측하며 파면 오차가 최소화되도록 틸트 및 변위를 조절한다.

3. 항공우주 광학계 응용

3.1 위성용 광학계 설계

인공위성은 무게 및 사이즈에 따라서 대형, 중형, 소형, 마이크로, 나노(or CubeSat), 피코, 펨토위성으로 분류되며, 위성의 크기와 관측 목표(Target)에 따라 광학계의 설계가 달라진다 [36]. 나노위성 이상의 크기에서는 대부분 반사형 광학계를 채택하며, 카세그레인식 구조를 통하여 빛을 1차적으로 집속시킨다[37]. 관측하고자 하는 대상물의 위치, 크기뿐 아니라 관측 파장에 따라서 광학계의 설계가 달라질 수 있다. 지구 관측용 위성은 관측 파장에 따라 기후변화, 토양수분, 해수온도 등 다양한 정보를 획득 가능하여 다양한 파장을 획득할 수 있는 광학 설계가 필요하다. 이러한 요구조건을 충족시키기 위하여, 가시광 (Visible) 영역의 파장과 장파장 적외선(Long Wave Infrared, LWIR)을 분리시키는 광학계 설계가 소개되었다(Fig. 5(a)) [38]. 이 광학계는 동축 반사 시스템을 통과한 시야각이 서로 다른 빔을 분리하여 흡수 파장이 서로 다른 센서에 결상되도록 설계하였다.

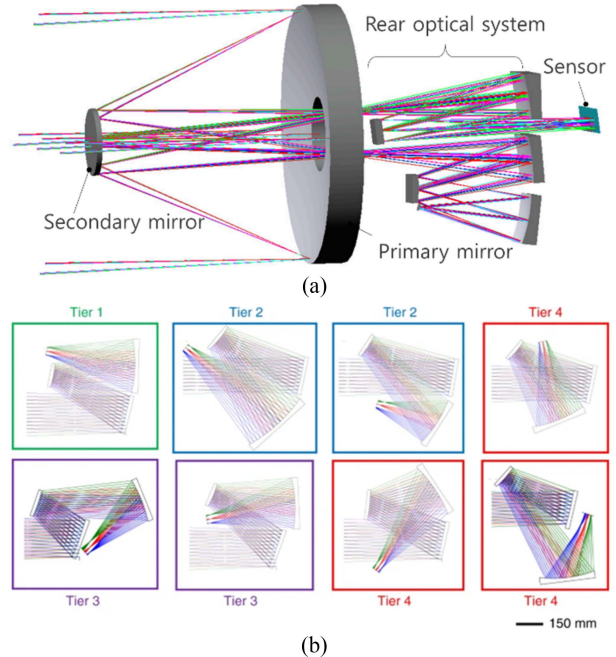


Fig. 5 Design schematics of reflective optics (a) The optical design of a dual-band imaging system [40] (Adapted from Ref. 40 on the basis of OA) (b) Different geometric diagrams of folding reflective imagers [40] (Adapted from Ref. 40 on the basis of OA)

광학 시스템의 사이즈를 최소화하기 위하여 폴딩(Folding) 거울 구조를 통하여 빔을 집속시켰으며, 이러한 시스템을 통하여 낮과 밤 동안 관측이 가능한 광학계를 설계하였다. 이 광학계는 가시광 파장에서 50 lp/mm (Line Pair per Millimeter)의 MTF 값 0.45를 달성 하였으며, 적외선 파장에서는 0.35 값을 보였다. 앞서 소개한 방식과 같이 광학계의 전체 공간을 최소화하기 위하여 위성용 광학계에서는 폴딩 거울 구조를 주로 사용한다. 폴딩 거울 구조를 설계하기 위해서는 거울 기울기 방향과 이미지 평면의 위치를 설정하여야 한다. 거울 기울기는 광선이 가려짐을 방지하는데 필요한 정도로 최소화해야 하며 초점거리, 시야각, 플랫폼 필드 등의 요구조건에 따라서 거울의 곡률 및 배치 각도 등이 변경될 수 있다[39]. Fig. 5(b)와 같이 다양한 설계 예시를 그룹별로 분류한 후 공간 제약 및 광학적 성능을 비교하여 최종 선택할 수 있다[40]. 여기서 Tier2는 공간 제약의 한계가 있으며, Tier3은 광학 성능이 우수하지 못한 설계이다. Tier4는 공간과 광학 성능 이슈가 동시에 있으며, Tier1이 가장 최적화된 설계이다.

3.2 반사형 광학계 환경 시뮬레이션

우주환경에서 임무를 수행하는 광학계는 주로 외부에 노출이 되어 있어 온도에 의한 변형, 중력 및 진동 등에 의한 분석이 필요하다[33,41]. 특히, 광학계의 형상 변화 및 내부 정렬이 틀어질 경우 광학적 성능이 저해되는 문제가 있어, 광학 허용오차 범위 내에서 형상 및 정렬을 유지시키기 위한 시뮬레이션 검증이

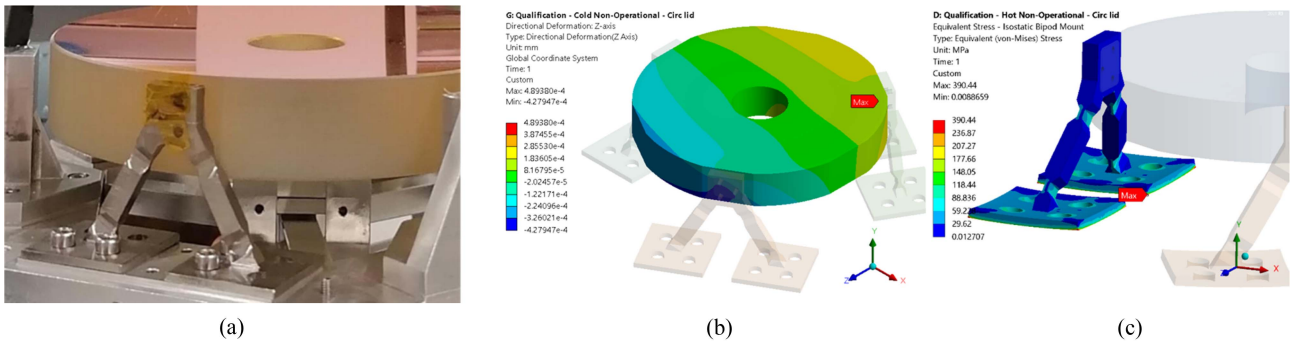


Fig. 6 A photograph and simulation results of a space mirror. (a) A photograph of a mount assembled mirror. Simulation results of (b) the deformation of mirror surface and (c) the stress of bipod mount [42] (Adapted from Ref. 42 on the basis of OA)

필요하다. 온도의 변화는 광학 표면을 변형시키거나, 열팽창의 따른 고정 부품의 변형을 야기시켜 온도변화가 클 경우 초점 변화가 나타나며 영상의 왜곡이 발생한다. 시스템이 갖는 고유 진동 및 가속에 의한 압력에 광학계에 변형을 주는 인자로 설계 시 고려가 필요하다. HERA 위성이 포함하고 있는 탑재체의 변형을 분석하기 위한 연구가 소개되었다(Fig. 6(a)) [42]. HERA 위성의 광학계는 티타늄 소재의 등압 양각대에 의해 제로두어 거울이 지지되며, 온도 변화에 따른 거울 및 고정 부품의 형상 변화를 관측하였다. 거울과 양각대 부품의 고정에는 에폭시가 이용되었다. 시뮬레이션을 위하여 양각대가 볼트에 의해 바닥에 고정되어 있으며, 열이 바닥에서부터 전달되는 경계조건을 설정하였다. -60°C 및 $+80^{\circ}\text{C}$ 조건에서의 시뮬레이션을 진행한 결과 주경에서 곡률 및 XZ축 변형 등이 발생하였지만 수백 nm 수준으로 허용 오차 기준에 충족되었다(Fig. 6(b)). 열에 의하여 양각대에 전달되는 최대 응력도 안전 계수(Safety Factor)의 허용응력 기준에 충족된 결과를 보였다(Fig. 6(c)). 최근 거울과 하우징(Housing)을 동일한 소재로 제작하여 재료 차이에 의한 열팽창 차이를 제거하기 위한 구조가 많이 사용되고 있으며, 이러한 구조의 환경 시뮬레이션도 진행되었다[43].

3.3 호밍 유도 시스템

대상을 추적하는 호밍 유도에는 신호를 직접 발생시켜 탐지하는 능동(Active) 방식, 외부에서 신호 발생시켜 수집하는 반능동(Semi-active) 방식, 표적에서 발생하는 신호를 획득하는 수동(Passive) 방식이 있다[44]. 탐지형 호밍 유도시스템은 대상물의 열에서 방출되는 적외선을 추적하는 능동형 방식을 주로 이용한다[45]. 호밍 유도 시스템은 위성용 광학계와 달리 주로 항공기 외부에 부착이 되어 외부 날씨나 유체역학적 응력으로부터 광학계를 보호하기 위하여 적외선 투과 돔이 주로 설치된다[46]. 광학계 구성은 위성용 광학계와 유사하게 주경과 부경을 포함하는 반사형 타입을 이용하며, 반사된 빔은 레티클을 통과하여 센서로 전달된다. 레티클은 광 변조의 목적으로 장착이 되며, 레티클의 투명하고 불투명한 배열과 간격에 따라서 다른 주파수를 획득된다. 대상물의 위치에 따라 뉴테이션 원(Nutation Circle)의 위치가 달라지고, 지속적으로 광학계 구경의 위치를

조정하며 대상물을 추적한다[47,48]. 레티클이 회전하는 경우 진폭변조(Amplitude Modulation, AM)을 통하여 신호를 처리하고, 레티클이 고정되어 있는 경우 주파수 변조(Frequency Modulation, FM)을 통하여 신호를 획득한다(Fig. 7(a)) [49]. 광기구적으로 적외선 유도 광학계를 스캐닝하여 대상물을 추적하는 구조는 대상물을 지속적으로 추적하는데 도움을 준다(Figs. 7(b), 7(c)) [12]. 스캐닝 기구물 구조로는 자이로 로터(Gyro Rotor), 구동모터(Control Motor), 각도 보정 광섬유 센서(Fibre-optical Sensor), 하우징 등이 있다. 고정되어 있는 외부 하우징과 움직임이 있는 내부 하우징의 좌표축의 차이를 지속적으로 수정하여 회전 각도를 계산한다.

4. 결론

본 논문에서는 항공우주 기술에 활용되는 반사형 광학 시스템에 대하여 소개를 하였다. 반사형 광학계는 지구 및 우주 관측용 위성뿐 아니라 호밍유도를 위한 추적 시스템에 사용되고 있다. 반사형 광학 부품은 주로 세라믹, 유리 및 금속 재료를 통하여 제작이 되며 비용, 열안정성 및 기계적 특성에 따라 소재를 선택해야 한다. 반사형 광학부품을 제작하는 방법은 크게 기계적 가공과 적층형 제조로 구분되며, 적층형 제조 방법은 경량화 구조를 제작하는데 장점이 있으나 소재의 한계로 인하여 열안정성이 높은 광학부품 제작이 어렵다는 단점이 있다. 위성용 광학계의 경우 주경과 부경이 포함된 카세그리안식 형태를 주로 채택하며, 환경 시뮬레이션을 통하여 광학적 특성 변화를 예측한다. 호밍 유도 시스템에도 반사형 광학계가 주요 부품으로 장착이 되며, 레티클을 통과한 신호를 분석하여 대상물의 위치를 실시간으로 파악한다. 반사형 광학계의 경우 크기가 커질수록 높은 성능을 구현할 수 있어 시스템 크기도 지속적으로 커질 것으로 예상된다. 특히, 우주 망원경의 경우 원거리 이미징을 위하여 대형 광학계가 요구되어지고 있으나 발사체 공간의 한계가 있어 전개형 반사 광학계를 주로 채택한다. 광학계 전개시 발생할 수 있는 여러 가지 환경 및 정렬 오차에 의한 변형들은 광학 성능을 결정하는 주요 요소이기 때문에 외부 환경조건에

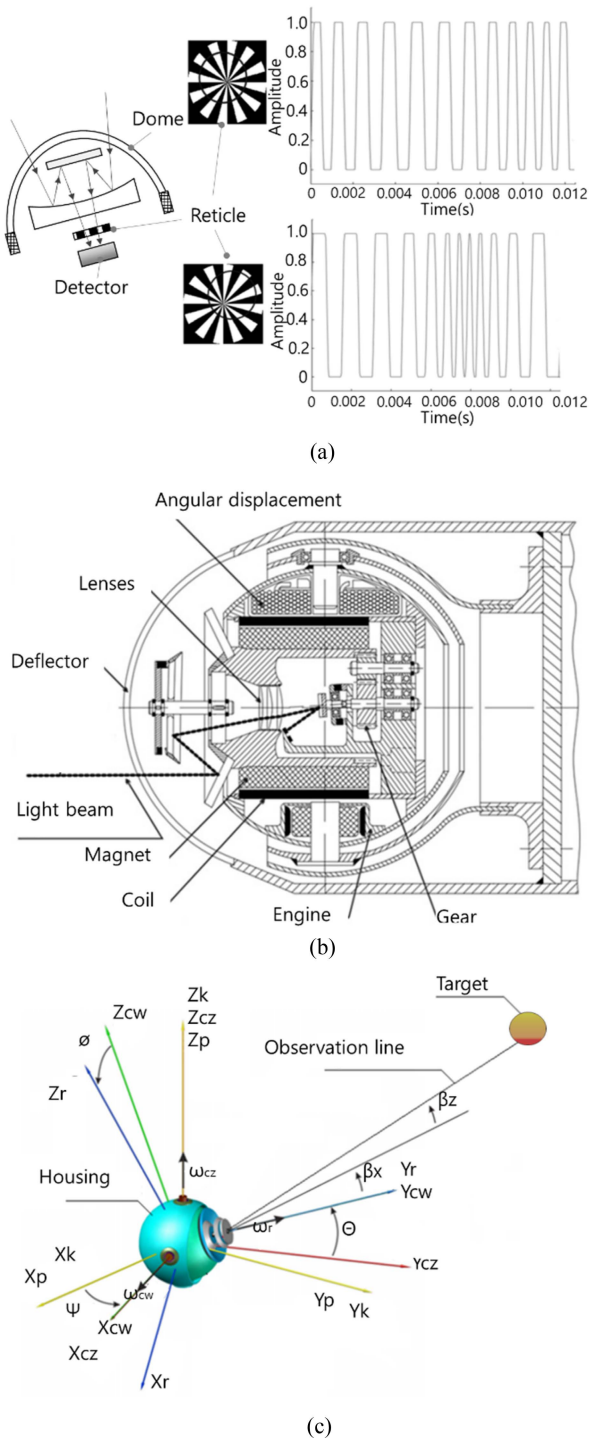


Fig. 7 Principles and configurations of homing optical systems. (a) Principles of tracking error signal extraction using a reticle [49] (Adapted from Ref. 49 on the basis of OA) (b) A schematic of a scanning homing system structure. (c) Tracking diagram with an established coordinate [12] (Adapted from Ref. 12 on the basis of OA)

다른 광학성능을 사전에 예측하는 연구의 중요성이 증가할 것으로 예상된다. 또한, 항공우주 응용분야의 효율적인 임무 수행을 위하여 여러 가지 파장을 동시에 관측하는 초분광 이미징용

반사형 광학부품에 대한 공정 및 분광 측정 기술도 지속적으로 발전할 것으로 예상된다.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the Agency for Defense Development Grant Funded by the Korean Government (UI230005SD).

REFERENCES

1. Lightsey, P. A., Atkinson, C., Clampin, M., Feinberg, L. D., (2012), James webb space telescope: Large deployable cryogenic telescope in space, *Optical Engineering*, 51(1), 011003-011003.
2. Rigby, J., Perrin, M., McElwain, M., Kimble, R., Friedman, S., Lallo, M., Doyon, R., Feinberg, L., Ferruit, P., Glasse, A., (2023), The science performance of JWST as characterized in commissioning, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 135(1046), 048001.
3. Zhang, C., Li, Z., (2022), A review of lightweight design for space mirror core structure: Tradition and future, *Machines*, 10(11), 1066.
4. Qu, Y., Jiang, Y., Feng, L., Li, X., Liu, B., Wang, W., (2018), Lightweight design of multi-objective topology for a large-aperture space mirror, *Applied Sciences*, 8(11), 2259.
5. Wu, J., (2020), Design of high-lightweight space mirror component based on automatic optimization, *Journal of Physics: Conference Series*, 012023.
6. Wu, H.-Y., Chang, W.-C., Huang, P.-H., Huang, Y.-K., (2019), New candidate substrate materials for space mirror optics, *Material Technologies and Applications to Optics, Structures, Components, and Sub-Systems IV*, 157-161.
7. Zhang, Y., Liu, D., Zheng, Z., Liu, Z., Hu, D., Qi, B., Liu, C., Bi, L., Zhang, K., Wen, C., (2018), Effects of auxiliary atmospheric state parameters on the aerosol optical properties retrieval errors of high-spectral-resolution lidar, *Applied Optics*, 57(10), 2627-2637.
8. Hou, Y., Wang, C., Duan, P., Yu, H., Zhao, X., Chen, S., Zhang, L., (2023), A general method to obtain the frequency response function from the disturbance source to the sensitive payload, *Applied Sciences*, 13(8), 4844.
9. Kazasidis, O., Verpoort, S., Wittrock, U., (2019), Image-based wavefront correction for space telescopes, *Proceedings of the International Conference on Space optics-ICSO 2018*, 11180, 2854-2866.
10. Abbas, O., Arvan, M. R., Mahmoodi, A., (2020), Real time extraction of tracking error signal in IR seeker with a plus

- stationary reticle, *Infrared Physics & Technology*, 104, 103145.
11. Ocołojčić, G. J., Rašuo, B. P., Bengin, A. Č., (2017), Aerodynamic shape optimization of guided missile based on wind tunnel testing and computational fluid dynamics simulation, *Thermal Science*, 21(3), 1543-1554.
 12. Gapiński, D., Koruba, Z., (2021), Control of optoelectronic scanning and tracking seeker by means the LQR modified method with the input signal estimated using of the extended kalman filter, *Energies*, 14(11), 3109.
 13. Zhu, M., Chen, H., Xiong, G., (2017), A model predictive speed tracking control approach for autonomous ground vehicles, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 87, 138-152.
 14. Guo, H., Cao, D., Chen, H., Sun, Z., Hu, Y., (2019), Model predictive path following control for autonomous cars considering a measurable disturbance: Implementation, testing, and verification, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 118, 41-60.
 15. Steinkopf, R., Gebhardt, A., Scheiding, S., Rohde, M., Stenzel, O., Glied, S., Giggel, V., Löscher, H., Ullrich, G., Rucks, P., (2008), Metal mirrors with excellent figure and roughness, *Optical Fabrication, Testing, and Metrology III*, 162-173.
 16. Ji, S., Yu, H., Zhao, J., Liu, X., Zhao, M., (2016), Ultra-precision machining of a large amplitude sinusoidal ring surface based on a slow tool servo/Ультранатанчна обделавна sinusoidne površine obrocev z veliko amplitudo po tehnologiji Slow Tool Servo, *Strojnikski Vestnik-Journal of Mechanical Engineering*, 62(4), 213-221.
 17. Vukobratovich, D., Schaefer, J. P., (2011), Large stable aluminum optics for aerospace applications, *Optomechanics 2011: Innovations and Solutions*, 260-272.
 18. Du, C., Dai, Y., Guan, C., Hu, H., (2021), High efficiency removal of single point diamond turning marks on aluminum surface by combination of ion beam sputtering and smoothing polishing, *Optics Express*, 29(3), 3738-3753.
 19. Li, L., Yu, N., Chan, C., Lee, W., (2018), Al6061 surface roughness and optical reflectance when machined by single point diamond turning at a low feed rate, *Plos One*, 13(4), e0195083.
 20. Sampath, D., Akerstrom, A., Barry, M., Guregian, J., Schwalm, M., Ugolini, V., (2010), The WISE telescope and scanner: design choices and hardware results, *An Optical Believe It or Not: Key Lessons Learned II*, 79-89.
 21. Gardner, J. P., Mather, J. C., Clampin, M., Doyon, R., Greenhouse, M. A., Hammel, H. B., Hutchings, J. B., Jakobsen, P., Lilly, S. J., Long, K. S., (2006), The james webb space telescope, *Space Science Reviews*, 123, 485-606.
 22. Lee, J.-H., Lee, C.-W., Kim, Y.-M., Kim, J.-W., (2009), Optomechanical design of a compact imaging spectrometer for a microsatellite STSAT3, *Journal of the Optical Society of Korea*, 13(2), 193-200.
 23. Pawar, P., Ballav, R., Kumar, A., (2017), Machining processes of silicon carbide: A review, *Review on Advanced Materials Science*, 51, 62-76.
 24. Zhang, K., Qu, H., Guan, H., Zhang, J., Zhang, X., Xie, X., Yan, L., Wang, C., (2021), Design and fabrication technology of metal mirrors based on additive manufacturing: A review, *Applied Sciences*, 11(22), 10630.
 25. Jalluri, T. D., Rao, B. V., Rudraswamy, B., Venkateswaran, R., Sriram, K., (2023), Optical polishing and characterization of chemical vapour deposited silicon carbide mirrors for space applications, *Journal of Optics*, 52(3), 969-983.
 26. Zhang, X., Hu, H., Wang, X., Luo, X., Zhang, G., Zhao, W., Wang, X., Liu, Z., Xiong, L., Qi, E., Cui, C., Wang, Y., Li, Y., Wang, X., Li, L., Bai, Y., Cheng, Q., Zhang, Z., Li, R., Tang, W., Zeng, X., Deng, W., Zhang, F., (2022), Challenges and strategies in high-accuracy manufacturing of the world's largest SiC aspheric mirror, *Light: Science & Applications*, 11(1), 310.
 27. Fan, Y., Dong, D., Li, C., Sun, Y., Zhang, Z., Wu, F., Yang, L., Li, Q., Guan, Y., (2021), Research and experimental verification on topology-optimization design method of space mirror based on additive-manufacturing technology, *Machines*, 9(12), 354.
 28. Snell, R., Atkins, C., Schnetler, H., Todd, I., Hernández-Nava, E., Lyle, A. R., Maddison, G., Morris, K., Miller, C., Roulet, M., (2020), An additive manufactured CubeSat mirror incorporating a novel circular lattice, *Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation IV*, 58-73.
 29. Schneider, J., Norman, A., Gumpinger, J., Brückner, F., Bavdaz, M., Leyens, C., Ghidini, T., (2023), Additive manufacturing of a metallic optical bench—process development, material qualification and demonstration, *CEAS Space Journal*, 15(1), 55-68.
 30. Hilpert, E., Hartung, J., von Lukowicz, H., Herffurth, T., Heidler, N., (2019), Design, additive manufacturing, processing, and characterization of metal mirror made of aluminum silicon alloy for space applications, *Optical Engineering*, 58(9), 092613-092613.
 31. Malacara, D., (2007), *Optical shop testing*, John Wiley & Sons.
 32. Zhang, H., Liu, H., Lizana, A., Xu, W., Caompos, J., Lu, Z., (2017), Methods for the performance enhancement and the error characterization of large diameter ground-based diffractive telescopes, *Optics Express*, 25(22), 26662-26677.
 33. Tan, S., Zhang, X., Wang, L., Wu, H., Fu, Q., Yan, L., Hu, M., (2022), Equivalent modeling and verification of a high-steepness and lightweight elliptical aluminum mirror, *Applied Sciences*, 12(18), 9091.
 34. Tsutsumi, H., Yoshizumi, K., Takeuchi, H., (2005), Ultrahighly accurate 3D profilometer, *Optical Design and Testing II*, 387-394.
 35. Anderson, D. S., Burge, J. H., (1995), Swing-arm profilometry of aspherics, *Optical Manufacturing and Testing*, 169-179.
 36. Radhakrishnan, R., Edmonson, W. W., Afghah, F., Chenou, J.,

- Rodriguez-Osorio, R. M., Zeng, Q.-A., (2014), Optimal multiple access protocol for inter-satellite communication in small satellite systems, 4S Small Satellite Systems and Services Symposium, 1-15.
37. Kerstel, E., Gardelein, A., Barthelemy, M., Fink, M., Joshi, S. K., Ursin, R., (2018), Nanobob: A CubeSat mission concept for quantum communication experiments in an uplink configuration, EPJ Quantum Technology, 5(1), 6.
38. Li, R., Zou, G., Feng, L., Fan, X., (2021), Design of a dual-band compact integrated remote sensing system for visible light and long-wave infrared, Applied Sciences, 11(20), 9370.
39. Zhang, B., Jin, G., Zhu, J., (2021), Towards automatic freeform optics design: Coarse and fine search of the three-mirror solution space, Light: Science & Applications, 10(1), 65.
40. Bauer, A., Schiesser, E. M., Rolland, J. P., (2018), Starting geometry creation and design method for freeform optics, Nature Communications, 9(1), 1756.
41. Jeong, S., Nam, J. W., Ahn, K. B., Park, I. H., Kim, S. W., Lee, J., Lim, H., Brandt, S., Budtz-Jørgensen, C., Castro-Tirado, A. J., Chen, P., Cho, M. H., Choi, J. N., Grossan, B., Huang, M. A., Jung, A., Kim, J. E., Kim, M. B., Kim, Y. W., Linder, E. V., Min, K. W., Na, G. W., Panasyuk, M. I., Ripa, J., Reglero, V., Smoot, G. F., Suh, J. E., Svertilov, S., Vedenkin, N., Yashin, I., (2013), Slewing mirror telescope optics for the early observation of UV/optical photons from gamma-ray bursts, Optics Express, 21(2), 2263-2278.
42. Dias, N. G., Gordo, P., Onderwater, H., Melicio, R., Amorim, A., (2022), Analysis on the isostatic bipod mounts for the HERA mission LIDAR, Applied Sciences, 12(7), 3497.
43. Peschel, T., Damm, C., Beier, M., Gebhardt, A., Risse, S., Walter, I., Sebastian, I., Krutz, D., (2017), Design of an imaging spectrometer for earth observation using freeform mirrors, Proceedings of the International Conference on Space Optics—ICSO 2016, 928-936.
44. Palumbo, N. F., (2010), Guest editor's introduction: Homing missile guidance and control, John Hopkins APL Technical Digest, 29(1), 2-8.
45. Pandey, D., Wairya, S., Sharma, M., Gupta, A. K., Kakkar, R., Pandey, B. K., (2022), An approach for object tracking, categorization, and autopilot guidance for passive homing missiles, Aerospace Systems, 5(4), 553-566.
46. Kakkar, R., Singh, S., Singh, J., Goyal, S., Khosla, D., Sharma, M., (2021), Investigations on mathematical modeling of imaging infrared (IIR) missile, Recent Innovations in Computing: Proceedings of International Conference Recent Innovations in Computing 2020, 381-390.
47. Bae, T.-W., Kim, B.-I., Kim, Y.-C., Ahn, S.-H., (2012), Jamming effect analysis of infrared reticle seeker for directed infrared countermeasures, Infrared Physics & Technology, 55(5), 431-441.
48. Figen, Z. G., (2019), Mid-infrared laser source for testing jamming code effectiveness in the field, Optical Engineering, 58(8), 086101.
49. Abbas, O., Arvan, M. R., Mahmoudi, A., (2018), Improving the tracking error signal extraction in IR seeker with stationary wagon wheel reticle over all field of view, Journal of Electrical and Computer Engineering Innovations (JECEI), 6(2), 151-158.



Kisoo Kim

Received his Ph.D. degree in the Department of Bio and Brain Engineering from Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), in 2021. Now, he is a senior researcher at Korea Photonics Technology Institute (KOPTI). His research interests include optical module design and evaluation for arrayed camera systems.

E-mail: kisookim@kopti.re.kr



Ji-Hun Bae

Received his Ph.D. degree in the School of Mechanical Engineering from Chung-Ang University, in 2018. Now, he is a senior researcher at Agency for Defense Development (ADD). His research interests include EO/IR systems.

E-mail: ghunb16@add.re.kr



Jongbok Park

Received his Ph.D. degree in the Department of Mechatronics Engineering from Gwangju Institute of Science and Technology (GIST), in 2009. Now, he is a director of Intelligent Optical Module Research Center at Korea Photonics Technology Institute (KOPTI). His research interests include optical system design for laser and imaging optic system.

E-mail: jb.park@kopti.re.kr

볼 및 롤러 LM가이드의 마찰특성 비교분석에 관한 연구

Study on Comparison of Friction Force between Ball- and Roller-LM Guides

라현정¹, 김동욱², 이준만³, 류한선³, 정재한³, 정영훈^{1,2,#}
Hyeon Jeong Ra¹, Dong Wook Kim², Jun Man Lee³, Han Seon Ryu³, Jae Han Jung³, and Young Hun Jeong^{1,2,#}

¹ 경북대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Kyungpook University)

² 경북대학교 일반대학원 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Kyungpook University)

³ 삼익THK(주) 기술연구소 (R&D Center, SamickTHK Co., Ltd.)

Corresponding Author / E-mail: ykjeong@knu.ac.kr, TEL: +82-53-950-5577

ORCID: 0000-0002-0830-4135

KEYWORDS: Roller LM guide (롤러 LM가이드), Friction (마찰력), Stribeck curve (Stribeck 곡선), Lubrication (윤활)

The linear motion guideway (LM guide) is one of the key parts of precision motion and positioning, and it requires high straightness, form accuracy, stiffness, and surface quality. LM guides are actively used in manufacturing facilities for automobiles, aerospace, optics, semiconductors, robots, displays, and portable communication equipment. At present, most of LM guides are based on rolling contact, using either balls or rollers. Roller LM guides have been in high demand in recent years in various industrial fields that require high rigidity. In this study, the friction characteristics of ball and roller LM guides with the same rail width were compared, and friction behavior was analyzed. An experimental setup consisting of a driving unit, specimen, force sensor, and signal acquisition unit was constructed, and signals were collected under various conditions. Three lubrication conditions were used: no lubrication (dry surface), ISO-VG 32, and 68, and a wide feed-rate range from 1 to 100 mm/s was selected. The experimental results showed that the ball LM guide and the roller LM guide had significantly different friction characteristics, which were analyzed from the aspect of Stribeck curve components. In conclusion, friction behavior differed according to lubrication conditions in the no-payload state of the ball and roller LM guides, and the effect of lubrication conditions on friction behavior was shown.

Manuscript received: April 25, 2023 / Revised: August 9, 2023 / Accepted: September 4, 2023

1. 서론

정밀공학 및 가공기술의 발전에 따라 높은 정밀도를 가지는 다양한 제품들이 생산되고 있다. 자동차, 항공우주, 광학, 반도체, 로봇, 휴대형 통신장비 등 다양한 분야에서 정밀한 제품의 수요가 더욱 증가하고 있다. 이러한 정밀 제조업에서는 정밀이송의 중요성이 매우 크다[1]. 직선이송안내면(Linear Motion Guideway, 이하, LM가이드)은 정밀 이송을 위한 핵심부품으로서 높은 직진도, 형상정밀도, 강성 및 표면품질이 요구된다[2]. 직선이송안내면은 전통적으로 미끄럼 접촉(Sliding Contact) [3]을 가지는 형태였으나, 최근에는 볼(Ball) 또는 롤러(Roller)를

이용한 구름접촉(Rolling Contact) 기반의 LM가이드가 주류를 이루고 있다. 이러한 구름접촉 기반의 LM가이드는 레일(Rail)과 블록(Block), 그리고 볼(또는 롤러)로 구성되어 있다[4]. 이들의 부드러운 상대운동을 위해 여러 개의 볼이 구름운동을 가지도록 하고 있으나, 볼의 형상오차, 접촉면의 상태, 접촉조건, 부품들 간의 불필요한 접촉 등 다양한 이유로 인해 미세진동, 마찰저항 증가 등 이송품질의 저하가 발생한다. 특히 최근에는 이러한 품질저하요인 중 하나인 볼 간의 접촉을 방지하고 접촉조건을 일관성을 강화하기 위해 리테이너(Retainer)가 사용되기도 한다[5].

최근에는 고강성 및 고정밀도의 이송작업이 더욱 중요해지면서

롤러 LM가이드에 대한 관심과 수요가 증가하고 있다[6]. 일반적으로 롤러 LM가이드는 볼 LM가이드에 비해 넓은 접촉면적을 가지기 때문에 높은 강성을 가지는 반면, 높은 이송저항(마찰력)을 가지는 동시에 롤러의 회전 운동이 1축으로 제한되는 점으로 인해 레일, 블록, 레이스(Race), 그리고 롤러에 대한 높은 형상 정밀도가 요구된다. 이러한 이유로 인해 롤러 LM가이드는 볼 LM가이드에 비해 제작이 어렵고, 품질관리에도 많은 주의가 요구된다.

최근까지 LM가이드와 관련한 많은 발전이 있었으며, 이와 관련한 다양한 연구들이 있다. Kim 등은 LM가이드의 운동오차를 해석하기 위해 등가해석법을 제안하고, 실험적으로 검증하였다[1]. Yi 등은 Hertz 접촉이론과 비선형 운동방정식 기반의 유한요소해석 접근을 통해 LM가이드의 강성 및 고유진동수를 평가하였다[4]. Shimizu 등은 볼 LM가이드에서의 힘의 분포를 모델링하고, LM가이드 부품의 형상 및 형상오차와 LM가이드의 수명 간의 상관관계를 제시하였다[2]. Heo 등은 롤러 LM가이드에 수직 및 수평방향의 하중이 인가되었을 때 LM가이드의 변형을 유한요소법 해석 및 측정결과의 결함을 통해 예측할 수 있음을 보였다[7]. 초정밀 이송과 관련한 연구로 Otsuka 등은 특수하게 설계된 선형모터와 볼 LM가이드를 적용하여 마찰력을 최소화한 직선이송테이블을 개발하였으며 이를 이용해 0.3 nm의 위치분해능을 얻을 수 있음을 발표하였다[8]. 최근에는 LM가이드의 마찰력을 최소화하기 위한 에어 베어링 기반의 LM가이드가 사용되기도 한다[9]. 특히 초정밀 이송 및 성능 향상을 위해서는 LM가이드의 마찰과 관련한 특성 검출 및 최적화가 필수적이다. LM가이드의 마찰력에 대한 연구로 Oh 등은 볼 LM가이드에 대해 이력현상, 미끄럼마찰, 점성마찰로 구성된 수학적 마찰력 모델을 제시하였으며 Hertz 접촉이론, 볼의 운동, 점성마찰 해석을 통해 마찰력 예측정밀도의 향상이 가능함을 보였다[10]. Cheng 등은 그리스(Grease)를 윤활제로 사용하는 롤러 LM가이드의 마찰특성을 해석하기 위해 미끄럼마찰, 구름마찰, 롤러 항력, 롤러-리테이너 마찰 등을 포함한 마찰력에 대한 수학적 모델을 제시하였다[5]. Miura 등은 마찰력의 변동특성에 영향을 주는 볼의 크기 및 운동, 예압, 표면품질 등을 분석하여 마찰력 변동이 최소화될 수 있는 방법에 대한 연구를 수행하였다[11]. 특히 볼 LM가이드와 롤러 LM가이드에 대한 개별적인 마찰력 특성에 대한 연구는 다양하게 진행되었으며, 일반적인 수준에서 롤러 LM가이드가 볼 LM가이드에 비해 마찰력이 크다고 언급되고 있다. 그러나, 이와 함께 정밀한 제어와 LM가이드 타입의 적절한 선정을 위해서는 볼과 롤러 LM가이드의 마찰특성과 관련한 거동에 대한 상대적인 비교의 제시결과를 확인하기 어렵다. 또한, 현재까지 유사한 치수 및 품질을 가진 볼과 롤러 LM가이드에 대한 마찰력에 대한 비교에 대한 연구는 찾아보기 어렵다.

본 연구에서는 동일한 레일 외형치수를 가지는 볼 LM가이드와 롤러 LM가이드에 대해 무부하 상태에서 다양한 윤활 및 이송조건에 따른 마찰거동을 비교하였다. 동일한 소재와 레일

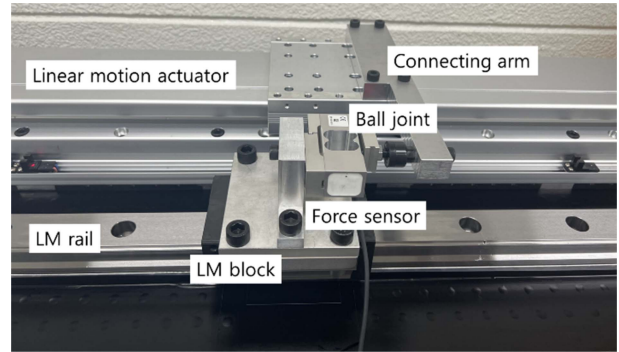


Fig. 1 Experimental setup to measure friction force in LM guide

외형치수를 가지는 볼과 롤러 LM가이드의 마찰력 비교를 위해 실험 장치를 구성하고, 다양한 윤활조건 상에서 Stribeck 곡선을 구성하여 마찰력 성분별로 비교 분석함으로써 두 종류의 LM가이드가 가지는 마찰력 특성과 윤활 조건의 마찰력 특성에 영향을 실험적으로 확인하였다.

2. 마찰력 측정실험

LM가이드의 마찰력을 측정하기 위해 실험 장치를 구성하였다. 실험장치는 측정 대상인 LM가이드와 LM가이드를 이송시키는 직선이송테이블(PSA16505-600S+3SR, i-ROBO), 그리고 힘센서(S2M, HBM)로 구성되었다. 특히, 정확한 위치 및 속도를 제어하기 위해 직선이송테이블은 서보모터(SGM7J-04AFD21, Yaskawa)로 구동되었으며, PMAC 제어기(Clipper, Delta Tau)를 이용하여 제어되었다. 직선이송테이블과 LM가이드 시료의 평행도 오차에 의한 마찰력 측정 오차를 최소화하기 위해 힘센서는 LM가이드의 블록에 정렬되도록 고정시키고 구동용 직선이송테이블에는 볼조인트(Ball Joint)와 커넥팅암(Connecting Arm)을 통해 연결되었다. 마찰력 신호는 아날로그-디지털변환기(Analog-to-digital Converter, cDAQ-9174, NI)를 이용하여 수집되었다. Fig. 1은 구성된 실험장치를 보여준다.

본 연구에서 사용한 LM가이드는 레일의 폭과 높이가 각각 45 mm와 60 mm로 동일한 레일 외형치수를 가지는 두 모델로 선정하였다. 볼의 직경은 6.355mm이고 롤러의 직경은 4 mm이다. 볼 LM가이드는 4개의 궤도형 볼열(Ball Train)으로 구성되고 각 열에는 36개의 볼이 리테이너(Retainer)와 함께 조립되어 있다. 한편 롤러 LM가이드는 4개의 궤도형 롤러열을 가지며, 각 열당 60개의 롤러가 마찬가지로 리테이너와 함께 조립되어 있다. Table 1은 본 연구에 사용된 LM가이드의 기본사양을 보여준다.

LM가이드의 이송실험을 통해 마찰력을 측정하기 위한 다양한 조건에서 실험을 수행하였다. LM가이드의 윤활조건은 무윤활, 국제규격점도(ISO Viscosity Grade, ISO-VG) 32, 68 등 세가지이다. LM가이드에는 별도의 하중이 부가되지 않은

Table 1 Specifications of LM guides

Model	SRG45C	SHS45C
Type of LM guide	Roller	Ball
Roller/ball diameter [mm]	4.000	6.355
Number of rollers/balls per train	60	36
Number of roller/ball trains	4	4

Table 2 Experimental conditions

Parameter	Value
Feed rate [mm/s]	1, 2, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100
Stroke [mm]	300
Lubrication	Dry surface, oil (ISOVG 32, 68)
Payload [kN]	0
Sampling rate [Hz]	3,000
Repetition	5

무부하 상태이다. LM가이드의 유효조건에 따른 Stribeck 곡선 구성을 위한 이송속도는 1, 2, 5, 10 mm/s의 저속구간과 이후 10 mm/s 간격으로 100 mm/s까지 다양한 속도조건이 주어졌다. Table 2는 실험에 사용된 조건을 요약하여 보여준다. 실험 시 신호는 3 kHz의 샘플링 주파수로 받아졌으며, 동일 조건에서 5번 씩 반복하여 진행되었다.

본 연구에서는 LM가이드의 마찰을 Stribeck 곡선[12, 13]으로 모델링하여 분석하였다. Stribeck 곡선은 윤활환경에서의 마찰거동을 쿨롱(Coulomb)과 점성(Viscous)마찰, Stribeck 효과로 구성되며 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_{sliding} = F_{Coulomb} + F_{viscous} + F_{Stribeck} \quad (1)$$

여기서, $F_{sliding}$, $F_{Coulomb}$, $F_{viscous}$, $F_{Stribeck}$ 은 각각 LM가이드의 동마찰과 그 성분인 쿨롱마찰, 점성마찰, Stribeck 효과이다. 각 마찰성분은 다음과 같이 모델링된다.

$$F_{Coulomb} = \frac{v}{|v|} \mu_{Coulomb} M_t g = \frac{v}{|v|} f_{Coulomb} \quad (2)$$

$$F_{viscous} = \frac{v}{|v|} \mu_{viscous} M_t g v = \frac{v}{|v|} f_{viscous} v \quad (3)$$

$$F_{Stribeck} = \frac{v}{|v|} \mu_{Stribeck} M_t g e^{-\frac{v}{\sigma}} F_{Stribeck} e^{-\frac{v}{\sigma}} \quad (4)$$

여기서, v , $\mu_{Coulomb}$, $\mu_{viscous}$, $\mu_{Stribeck}$, M_t , g 는 LM가이드 레일과 블록의 상대속도, 단위무게당 쿨롱마찰계수, 점성마찰계수, Stribeck 효과계수, LM가이드의 이송하중, 중력가속도이다. $f_{sliding}$, $f_{Coulomb}$, $f_{viscous}$, $f_{Stribeck}$ 는 각각 이송하중을 포함한 각 마찰 계수이다. 이로부터 알 수 있듯이, 쿨롱마찰은 이송방향에만 영향을 받는 것으로 모델링되었으며, 위치 의존성을 무시하였다.

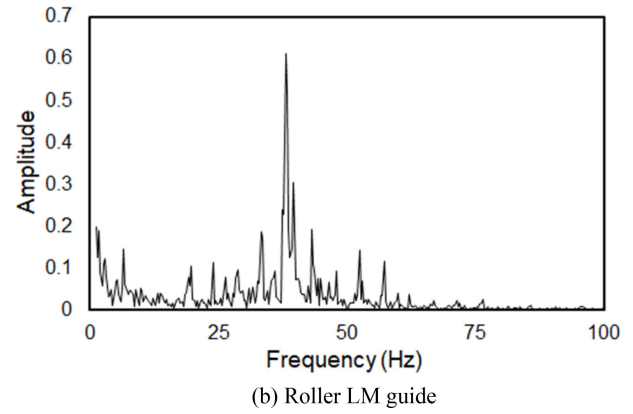
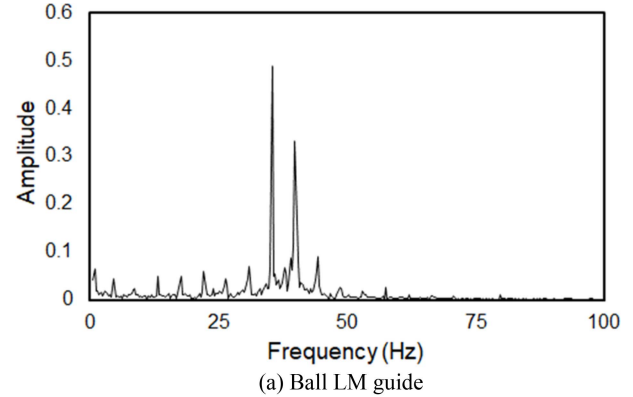


Fig. 2 Fast Fourier transform of friction force signal at a feed rate of 60 mm/s (lubricated with ISOVG 32 oil)

점성마찰과 Stribeck 효과는 상대속도에 대한 함수로 모델링되었음을 알 수 있다.

3. 실험 결과 및 분석

Fig. 2는 ISO-VG 32의 윤활유를 사용하면서 이송속도 60 mm/s로 이송할 때 힘 센서를 이용하여 측정된 볼과 롤러 LM가이드의 마찰력에 대한 0-100 Hz 범위의 고속 푸리에 변환(Fast Fourier Transform, FFT)을 보여준다. 100 Hz 이후부터 1,500 Hz까지 범위에서는 주목할 만한 피크(Peak)는 찾을 수 없었다. Fig. 2(a)에서 보인 바와 같이 볼 LM가이드는 60 mm/s의 이송 속도 조건에서 1 Hz 미만에서의 저주파 성분과 약 4.4 Hz의 조화성분(Harmonics), 그리고 약 35, 39 Hz에서 큰 진폭을 가지는 성분으로 구성된 마찰력을 가짐을 알 수 있다. 이때 4.4 Hz와 이의 조화성분은 구동용 직선이송테이블의 볼스크류 진동성분(특히, 케이지 주파수, Cage Frequency)에 대응하는 것을 확인하였으며, 30-40 Hz 범위 성분은 이송속도에 무관한 점으로부터 실험장치의 특성주파수인 것으로 추정하였다. Fig. 2(b)의 롤러 LM가이드에서도 볼 LM가이드와 유사한 특성을 가짐을 확인하였다. 특히, 롤러 LM가이드는 볼 LM가이드에 비해 전반적으로 신호의 각 주파수 성분들이 더 큰 진폭을 가졌다. 또한

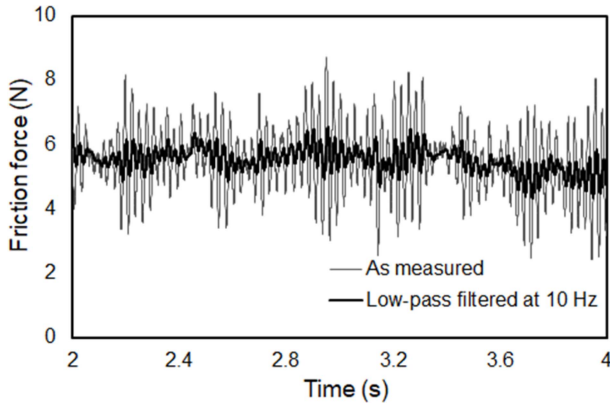
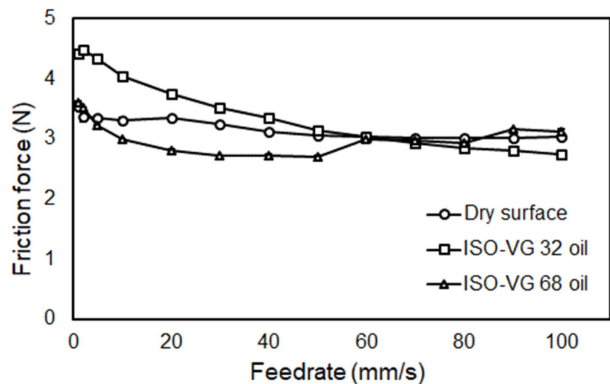
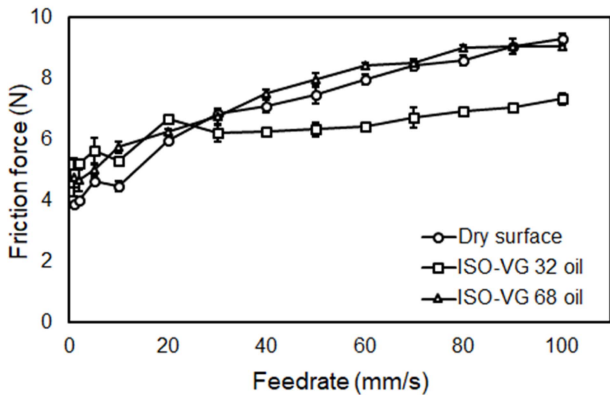


Fig. 3 Comparison of friction force signals between original and low-pass filtered at 10 Hz (lubricated with ISOVG 32 oil)



(a) Ball LM guide



(b) Roller LM guide

Fig. 4 Friction with respect to feedrate and lubrication conditions

볼 LM가이드와는 달리 3 Hz 미만의 주파수에서 큰 진폭을 가진 것으로부터 롤러 LM가이드가 상대적으로 월등히 큰 저주파 성분의 마찰력을 가짐을 확인하였다. 이는 롤러 LM가이드가 더 큰 접촉면적을 가지는 점에서 기인한 것으로 추정할 수 있다. 분석 결과로부터 신호의 지배적인 30-40 Hz의 성분이 LM가이드의 마찰력과는 직접적인 관계가 없는 것을 확인하였으며, 이러한 성분을 마찰력 분석에서 배제하기 위해 10 Hz의 절단주파수를 가지는 저주파통과필터로 신호를 필터링하였다. Fig. 3은 10 Hz의 절단주파수를 가지는 저주파통과필터의 사용 전 후의

롤러 LM가이드 마찰력 신호를 보여준다. 이로부터 실험장치의 등특성이 신호에서 상당수준 배제되었음을 확인할 수 있다. 마찰력의 크기는 정속조건 하에서 300 mm 왕복운동 시 얻어진 신호를 필터링한 후 평균값을 얻고, 동일 조건에서 5회 반복실험 결과들에 대한 평균과 표준편차로 정의되었다.

Fig. 4(a)는 세가지의 윤활조건에서 이송속도에 따른 볼 LM가이드의 마찰력 크기를 보여준다. 무윤활 조건에서는 속도의 변화에도 불구하고 비교적 일정한 마찰력을 유지함을 확인하였다. 마찰력의 변화는 1 mm/s에서 약 3.59 N이었으며, 100 mm/s에서 3.04 N으로 약 15%정도의 감소가 있었다. ISO-VG 32 윤활유를 이용한 윤활조건에서는 속도가 증가할수록 마찰력이 감소하는 것을 확인하였다. 마찰력은 1 mm/s에서 약 4.50 N에서 100 mm/s에서 약 2.75 N으로 약 38.9% 지속적으로 감소하는 거동을 확인하였다. ISO-VG 68의 윤활조건에서는 초기의 40 mm/s의 이송속도까지는 마찰력이 감소하다가 이후 서서히 증가하는 전형적인 Stribeck 곡선[12]의 거동을 가진다. 초기의 감소하는 구간은 Stribeck 효과에 의한 것으로 유막의 성장이 ISO-VG32 윤활조건보다 더 저속에서 완성되기 때문으로 추정된다 [12]. 윤활조건에 따라 거동을 비교하면, 1, 2 mm/s의 저속구간에서는 무윤활과 ISO-VG 68 윤활조건이 유사한 수준에 있으나, ISO-VG 32는 30 mm/s의 속도까지 다른 윤활조건에 비해 큰 마찰을 가짐을 알 수 있다. 그러나, 60-100 mm/s의 이송속도 범위에서는 마찰력의 크기가 비교적 유사하였다. 이로부터 ISO-VG 32는 저속에서의 마찰저항이 크고 유막의 성장도 늦어 ISO-VG 68에 비해 윤활효과가 불리함을 알 수 있다. 볼 LM가이드의 다양한 윤활조건에의 이송속도에 따른 마찰력의 거동은 매우 높은 일관성을 가지며, 표준편차는 대부분의 경우 평균값의 3% 이내였다. 그러나 ISO-VG 32와 68 윤활유를 사용하는 경우 1-5 mm/s의 저속 이송조건에서 표준편차는 평균의 5-13% 수준에 이르렀다.

Fig. 4(b)의 롤러 LM가이드의 경우는 Fig. 4(a)의 볼 LM가이드와는 상당히 다른 거동을 가짐을 확인하였다. 우선, 윤활조건에 상관없이 이송속도가 증가함에 따라 마찰력이 증가하는 추세이다. 저속구간에서는 볼 LM가이드에 비해 불안정한 거동을 보였으나, 30 mm/s 이상의 구간에서는 비교적 안정적인 거동을 보였다. 특히, 30 mm/s 이상의 조건에서는 ISO-VG 32의 조건이 가장 낮은 마찰력을 가졌으며, ISO-VG 68 윤활조건에서 가장 큰 마찰력이 발생하였다. 이는 점성마찰에 의한 특성으로 점도가 더 높은 윤활유가 더 큰 점성마찰을 발생시키기 때문이다. 한편, 무윤활조건에서 점성마찰과 유사하게 속도가 증가할수록 마찰력이 증가하는 특성이 나타나며, 이는 롤러의 구름운동 외 미끄럼 성분에 의한 것으로 속도에 따라 미끄럼이 점차 증가하기 때문으로 추정하였다. 롤러 LM가이드에서는 Stribeck 효과가 거의 드러나지 않았으며, 이는 볼 LM가이드에 비해 윤활막이 저속에서도 비교적 잘 유지됨을 의미한다. 롤러 LM가이드의 마찰력이 볼 LM가이드에 비해 대체적으로 크게 나타나지만, 저속구간에서는 비교적 유사한 수준임을 알 수 있다.

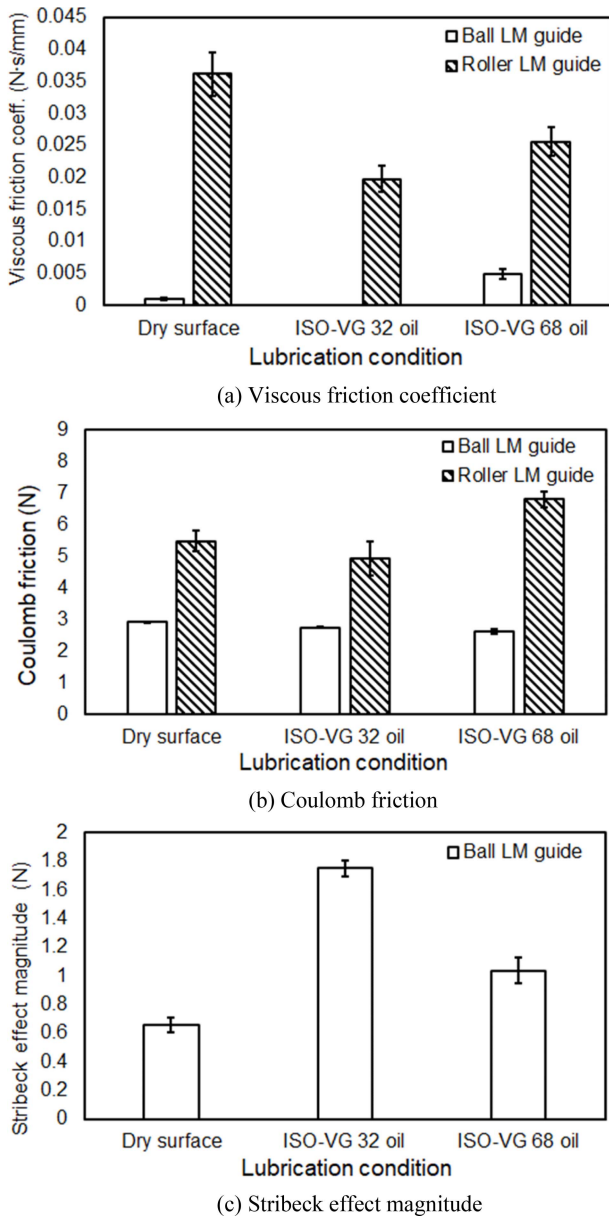


Fig. 5 Friction components according to type of LM guide and feed rate. Equivalent viscous friction coefficient and Stribeck effect magnitude under dry surface condition was obtained in same manner for other lubrication conditions even though there was no component related to hydrodynamic friction because of absence of lubrication oil

Stribeck 곡선을 고려하여 볼과 롤러 LM가이드의 마찰거동을 분석하였다. Figs. 4(a)와 4(b)에서 보인 볼과 롤러 LM가이드들의 마찰거동에서 공통적인 성분인 쿨롱마찰과 점성마찰을 중심으로 고려하고 Stribeck 효과는 볼 LM가이드에서만 그 크기에 대해 분석하였다.

Fig. 5(a)는 볼과 롤러 LM가이드의 점성마찰계수의 비교결과를 보여준다. 우선 획득 방법에 대해 간단히 정리하면, 볼 LM가이드에서는 점성마찰에 해당하는 거동인 저속구간 이후 속도에 비례하여 증가하는 부분이 무윤활조건에서는 70 mm/s 이후에

존재하고, ISO-VG 68의 윤활조건에서는 60 mm/s 이후에서 확인되었으며, 이 부분들로부터 점성마찰계수를 계산하였다. 그러나 ISO-VG 32의 윤활조건에서는 증가구간을 확인할 수 없었고, 본 연구의 실험장치의 한계로 최대 이송속도가 100 mm/s(분당 이송속도: 6 m/min)였기 때문에 점성마찰계수의 획득에 실패하였다. 롤러 LM가이드에서는 모든 조건에서 점성마찰 거동이 잘 드러났기 때문에 40 mm/s 이상 이송속도 구간으로부터 점성마찰계수를 확보하였다. 무윤활 상태에서는 점성마찰과 같이 속도에 비례하는 성분이지만, 윤활유가 존재하지 않으므로 미끄러짐에 의한 저항으로 볼 수 있으며, Fig. 5(a)의 무윤활조건과 비교할 때 볼에 비해 롤러에서 현저하게 큰 비례계수가 존재하는 것으로부터 롤러에서 훨씬 큰 미끄러짐이 존재하는 것을 알 수 있다. 특히 롤러에서는 윤활유가 있는 조건에 비해 비례계수가 현저히 크므로 윤활이 필수적임을 추측할 수 있다. 윤활유가 있는 상황에서는 볼 LM가이드의 경우는 ISO-VG 32의 경우 점성마찰거동의 확인이 어려워 비교가 어렵지만, 롤러 LM가이드에서는 점성계수가 큰 윤활유를 사용할수록 점성마찰계수가 큰 것을 알 수 있다. 특히, ISO-VG 68의 윤활조건에서 볼 LM가이드에 비해 롤러 LM가이드가 월등히 큰 것을 알 수 있다.

Fig. 5(b)는 쿨롱마찰의 비교결과를 보여준다. 우선, 볼 LM가이드는 윤활조건에 상관없이 쿨롱마찰 값이 유사한 수준에 있음을 알 수 있다. 그러나 ISO-VG 32의 윤활조건에서는 실험의 범위 상에서 Stribeck 효과가 완전히 사라지지 않았을 수 있으므로 더 낮은 쿨롱마찰일 수 있다. 롤러 LM가이드는 무윤활조건에서는 ISO-VG 32의 상태에 비해 미세하게 큰 반면, ISO-VG 68의 윤활조건은 큰 폭으로 쿨롱마찰을 증가시키는 것을 볼 수 있다. 이로부터 윤활유의 점성이 롤러 LM가이드의 쿨롱마찰에 큰 영향을 미침을 알 수 있다. 볼과 롤러 LM가이드 간의 비교에서는 윤활조건에 상관없이 롤러 LM가이드의 쿨롱마찰이 현저히 큼을 확인할 수 있다.

Stribeck 효과는 볼 LM가이드에서만 확인이 되었으며, 이중 Stribeck 효과 크기를 비교한 결과는 Fig. 5(c)에 보였다. 무윤활 조건에서는 Stribeck 효과로 볼 수 없으나 속도-마찰력 곡선에서 유사한 특성을 보이는 부분으로부터 해당 값을 도출하였다. 이는 볼과 레이스의 표면품질이 저속에서 크게 영향을 미치는 점이 원인으로 추정된다. ISO-VG 32와 68 조건에서는 점도에 따라 준정적 상태에서 초기 유막두께가 달라지는 점과 유막의 성장과 점도 간 관계가 직접적인 영향이 있음을 알 수 있다.

Fig. 6은 1 mm/s의 마찰력 크기를 비교한 결과를 보여주며, 이로부터 초저속 또는 준정적 상태에서의 마찰력을 추정할 수 있다. 볼 LM가이드에서는 ISO-VG 68의 조건과 미미한 차이지만, 무윤활조건에서 준정적마찰이 가장 적음을 알 수 있다. ISO-VG 32에서는 윤활유로 인해 준정적 마찰력에 큰 폭의 증가가 있었으며, ISO-VG 68의 경우에는 그 수준이 다시 낮아졌음을 볼 수 있다. 한편, 롤러 LM가이드에서는 무윤활 상태에서 준정적 마찰력이 가장 적고, 윤활유의 공급 시 20% 이상의 증가를 확인할 수 있다. 이로부터 구름마찰 장치에서 준정적 마찰

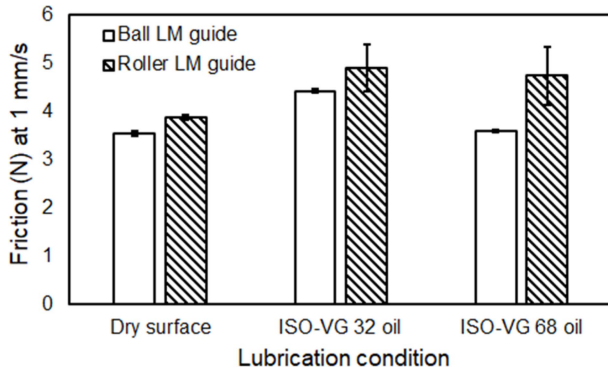


Fig. 6 Comparison of quasi-static friction between ball and roller LM guides (friction forces at a feedrate of 1 mm/s)

및 초저속에서의 마찰은 윤활유에 의해 증가함을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 동일한 LM가이드 레일 외형치수를 가지는 볼 LM가이드와 롤러 LM가이드의 무부하 상태에서 다양한 윤활 및 이송조건에 따른 마찰특성을 비교 분석하였다. 실험을 위해 각각의 구동부, 시편, 힘 센서 및 신호 획득부로 구성된 실험장치를 구성하고 다양한 조건에서 신호를 수집하였다. 윤활조건은 무윤활, ISO-VG 32와 68 등 세 종류였으며, 이송속도는 1-100 mm/s까지 저속에서 고속 이송을 포함하도록 넓은 범위로 선정되었다. 실험결과에서 볼 LM가이드는 실험조건에서는 주로 쿨롱마찰과 Stribeck 효과가 나타났으며, 점성마찰 거동을 제한적인 수준에서 보였다. 반면 롤러 LM가이드에서는 쿨롱마찰과 점성마찰 거동을 주로 확인할 수 있었으며, Stribeck 효과는 찾아보기 어려웠다. 이러한 거동을 볼과 롤러의 구름 및 미끄럼 운동, 그리고 접촉면적 측면에서 분석하였다. 나아가, 준정적 마찰 특성의 분석을 통해 윤활유가 준정적 마찰력을 증가시킴을 보였으며, 그 영향은 롤러 LM가이드에서 더욱 두드러짐을 보였다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 연구는 2022, 2023년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(P0017544-지역대표 중견기업 육성사업, P0020616, 2022년 산업혁신인재성장지원사업).

REFERENCES

1. Kim, K.-H., Park, C.-H., Lee, H.-S., Kim, S.-W., (2002), Analysis of the motion errors in linear motion guide, Journal of

the Korean Society for Precision Engineering, 19(5), 139-148.

2. Shimizu, S., Saito, E., Uchida, H., Sharma, C. S., Taki, Y., (1998), Tribological studies of linear motion ball guide systems, Tribology Transactions, 41(1), 49-59.
3. Lee, S.-K., Yoo, J.-H., Yang, M.-S., (2003), Effect of thermal deformation on machine tool slide guide motion, Tribology International, 36(1), 41-47.
4. Yong-Sub, Y., Kim, Y. Y., Choi, J. S., Yoo, J., Lee, D. J., Lee, S. W., Lee, S. J., (2008), Dynamic analysis of a linear motion guide having rolling elements for precision positioning devices, Journal of Mechanical Science and Technology, 22, 50-60.
5. Cheng, D.-J., Xu, F., Xu, S.-H., Kim, S.-J., (2020), Investigation of the frictional behavior in a roller linear motion guide under mixed EHL, Tribology Transactions, 63(3), 528-542.
6. Cheng, D.-J., Xu, S.-H., Kim, S.-J., Zhang, S.-W., (2021), Analysis of non-uniform load distribution and stiffness for a preloaded roller linear motion guide, Mechanism and Machine Theory, 164, 104407.
7. Heo, J.-H., Kwon, S.-W., Hong, S.-W., (2019), Study on the guide rail deformation in linear roller bearings subjected to external loading, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 36(1), 79-87.
8. Otsuka, J., Tanaka, T., Masuda, I., (2010), Development of a sub-nanometer positioning device: Combining a new linear motor with linear motion ball guide ways, Measurement Science and Technology, 21(3), 037001.
9. Lee, H.-H., Lee, I.-S., Lee, K.-I., Yang, S.-H., (2021), Development and performance evaluation of a fine stage for compensating 6-DOF motion errors of an ultra-precision linear stage, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 38(2), 123-129.
10. Oh, K.-J., Khim, G., Park, C.-H., Chung, S.-C., (2019), Explicit modeling and investigation of friction forces in linear motion ball guides, Tribology International, 129, 16-28.
11. Miura, T., Matsubara, A., Yamaji, I., Hoshide, K., (2018), Measurement and analysis of friction fluctuations in linear guideways, CIRP Annals, 67(1), 393-396.
12. Armstrong-Hélouvy, B., Dupont, P., De Wit, C. C., (1994), A survey of models, analysis tools and compensation methods for the control of machines with friction, Automatica, 30(7), 1083-1138.
13. Jeong, Y. H., Min, B.-K., Cho, D.-W., Lee, S. J., (2010), Motor current prediction of a machine tool feed drive using a component-based simulation model, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 11, 597-606.

**Hyeon Jeong Ra**

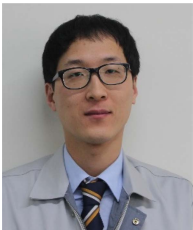
Currently, she is a research Engineer of Ultrasonic Sensor Develops Cell at Hyundai Mobis Company. Her research field is parking sensor.

E-mail: bi0605@knu.ac.kr

**Dong Wook Kim**

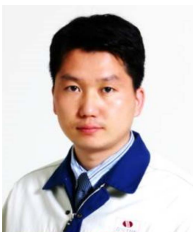
M.S. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Kyoungpook National University. His research interest is manufacturing processes.

E-mail: dokyo12@naver.com

**Jun Man Lee**

He is a Research Engineer of Technology Development Division at SamickTHK.

E-mail: jmlee@samickthk.co.kr

**Han Seon Ryu**

He is a Chief Research Engineer in the SamickTHK. His research fields are robot parts, linear guide and integrated production automation.

E-mail: sun@samickthk.co.kr

**Jae Han Jung**

Currently, he is CEO in the SamicksDT.

Email: jaehan@samicksdt.co.kr

**Young Hun Jeong**

Professor in School of Mechanical Engineering, Kyungpook National University. His research interest is advanced manufacturing processes.

E-mail: yhjeong@knu.ac.kr

스퍼터링 기법을 이용한 백금-사마륨 도핑 세리아 복합 환원극 제작

Fabrication of Platinum-Samarium Doped Ceria Composite Cathode Using Sputtering Technique

박용찬¹, 정다빈¹, 김현택¹, 김형민¹, 홍순욱¹,#
Yongchan Park¹, Davin Jeong¹, Hyeontaek Kim¹, Hyeongmin Kim¹, and Soonwook Hong¹,#

¹ 전남대학교 기계공학부 (Department of Mechanical Engineering, Chonnam National University)
Corresponding Author / E-mail: shong@jnu.ac.kr, TEL: +82-62-530-1686
ORCID: 0000-0003-1063-2995

KEYWORDS: Sputtering (스퍼터링), Platinum (백금), Samarium-doped ceria (사마륨 도핑 세리아), Solid oxide fuel cell (고체산화물 연료전지), Composite cathode (복합 환원극), Oxygen reduction reaction (산소 환원 반응)

In this study, we successfully demonstrated a fuel cell fabrication method using a platinum-samarium-doped ceria (Pt-SDC) composite cathode, which could reduce the platinum content while maintaining the same thickness as the functional layer. The Pt-SDC composite cathode was deposited by a sputtering process in which two materials were simultaneously deposited by a co-sputtering system. Despite the decreased platinum content in the composite cathode, we achieved high performance of the fuel cell since Pt-SCD was able to form triple-phase boundaries (TPBs) not only at the interface between the cathode and the electrolyte but at the entire volumetric surface of the cathode. This composite cathode revealed that Pt-SDC could enhance the oxygen reduction reaction rate by enlarging the TPB site in the cathode. The fuel cell fabricated in this study with a composite cathode demonstrated improved performance at 1.66 times the peak power density of a pristine fuel cell.

Manuscript received: April 27, 2023 / Revised: July 13, 2023 / Accepted: July 28, 2023

1. 서론

지속적인 화석연료의 사용으로 대기의 오염과 기후 변화의 가속화에 대한 심각성이 대두되어, 이산화탄소 및 온실가스를 배출하지 않는 신재생 에너지에 대한 관심이 높아지고 있다. 그 중 전기화학 반응을 통해 전기를 생산할 수 있는 연료전지는 높은 효율성과 연료 사용에 대한 유연성, 생성물로 물을 생성하는 장점이 있다. 따라서 연료전지는 친환경적인 발전 장치로서 다양한 환경 및 이동 장치에 적용 가능하기에 차세대 에너지 변환 시스템으로 각광받고 있다. 고체산화물 연료전지는 특히 높은 에너지 밀도와 다양한 종류의 연료를 사용할 수 있다는 장점을 가지고 있어 많은 연구가 진행되고 있으며 이온 전도성을 갖는 전해질로 세라믹과 같은 고체산화물이 적용되기 때문에 안정성이 높다는 특징이 있다[1,2]. 하지만 고체산화물 연료전지는

전해질의 이온 전도도를 보장하기 위해 높은 온도(800-1,000°C)에서 작동해야 하는데, 이로 인해 전극의 수명을 단축시키는 빠른 열화 현상과 물질 선택의 한계이라는 단점으로 실용화에 어려움을 겪고 있다[3]. 따라서 작동 온도를 상대적 저온 영역(400-600°C)으로 낮추기 위한 노력이 계속되고 있으며 구동 온도를 높이지 않고 줄어든 성능을 보상하는 방법으로 박막제작 공정이 제안되었다. 연료전지의 두께를 줄여 낮은 작동 온도에서 감소한 전해질의 이온전도도를 극복하는 방안으로 옴 저항(Ohmic Resistance)을 최소화하는 연구가 진행되고 있다. 박막으로 제작된 연료전지는 줄어든 옴 손실(Ohmic Loss)에도 불구하고 전극 계면에서 일어나는 산소환원반응(Oxygen Reduction Reaction)을 통해 여전히 큰 손실을 수반한다. 그 이유는 산소가 이온화되는 과정 중 활성화 에너지 장벽으로 인한 활성화 손실(Activation Loss)의 영향을 받기 때문이다. 이를 개선하기 위한

방법으로 산소환원반응 속도를 증가시킬 수 있는 촉매 물질을 전극으로 사용하거나, 이온 전도도가 높은 물질을 전해질로 사용하는 방법들이 제안되어 왔다. 그 중 전극과 전해질 사이에 기능층을 삽입하여 반응이 일어나는 지점인 삼상계면(Triple Phase Boundary)에서의 반응 속도를 증진시키는 것이 성능 향상에 도움이 된다고 알려져 있다. 전극과 전해질 계면 기능층의 표면 구조 제어를 통해 결정립 계의 밀도에 변화를 주어 산소 이온 흡착에 유리한 물리적 특성을 부여하여 연료전지의 성능을 개선할 수 있다[4-6].

본 연구에서는 박막제작에 용이한 물리적 기상 증착법(Physical Vapor Deposition, PVD) 중 하나인 스퍼터링(Sputtering) 기법을 사용하여 촉매 물질인 백금(Platinum)과 이온 전도성을 가진 사마륨 도핑 세리아(Samarium Doped Ceria)를 동시에 증착 후, 계면에서의 반응속도를 증진시킬 뿐 아니라 전극 표면에서 산소환원반응을 유도할 수 있는 삼상계면 형성을 통해 복합 환원극이 연료전지의 성능에 미치는 영향을 평가하고자 한다[7-9].

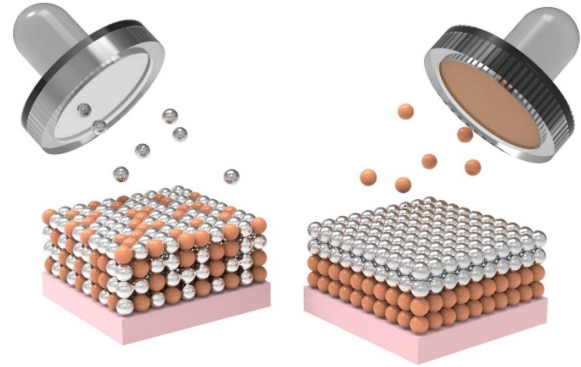
2. 실험 방법

2.1 환원극 제작방법

본 실험에서는 환원극의 표면구조, 결정성, 그리고 Pt와 SDC의 구성 원소의 비율을 조사하기 위해 $1 \times 1 \times 0.5 \text{ cm}^3$ 크기의 다결정 실리콘(110)이 기판으로 사용되었다. 연료전지 성능 평가를 위해 $10 \times 10 \times 0.2 \text{ mm}$ 크기의 8 mol% 상용 YSZ 기판이 전해질로 사용되었고, 이 기판 양면에 환원극과 산화극으로 백금을 이용하기 위해 스퍼터링 기법을 사용하여 75 mTorr의 압력 내에서 DC 100 W의 파워로 100 nm의 두께로 증착하여 Pt Reference 셀을 제작하였다. 복합 환원극 제작 방법으로 동일한 전해질 기판을 사용하여 산화극에 Pt를 증착하였고, 환원극 증착을 위해 75 mTorr의 작업압력에서 Pt target에 DC 15 W의 파워를 가하고 SDC Target에 RF 40 W의 파워를 가하여 두 가지의 물질을 동시에 증착하는 Co-sputtering 기법을 통해 100 nm의 두께로 제작하였다. 성능 비교를 위한 SDC 기능층이 포함된 셀 제작으로는 7 mTorr의 작업압력에서 YSZ 전해질 윗면에 SDC Target에 RF 70 W의 파워를 인가하여 100 nm의 두께로 증착하였고 그 위에 Pt Cathode를 $1 \times 1 \text{ mm}^2$ 크기로 앞선 환원극과 동일한 방법으로 전극을 증착하였다(Fig. 1).

2.2 환원극 물성 분석

백금-사마륨 도핑 세리아 복합 환원극의 표면 형상을 관찰하기 위해 Field Emission Scanning Electron Microscopy (FE-SEM, JSM-7900F, JEOL)를 사용하였다. 백금과 사마륨의 조성을 분석하기 위해 X-Ray Photoelectron Spectroscopy (XPS, K-Alpha, Thermo Fisher Scientific)를 이용하여 조성비를 확인하였다. 증착한 박막의 결정성 분석을 위해 X-Ray Diffraction (XRD, X'Pert Pro MPD, PANalytical)를 사용하였다.



Deposition parameters of Pt and SDC sputtered electrodes			
Gun power	Pt reference	SDC interlayer	Pt-SDC composite
Pt (DC power)	100W	100W	15W
SDC (RF power)	-	70W	40W
Deposition time (min)	3	3, 60	55

Fig. 1 Schematic of composite cathode fabrication via Sputtering process

2.3 연료전지 성능 평가

박막제작과정 중 스퍼터링 기법으로 제작한 복합 환원극을 고체산화물 연료전지에 탑재하여 전기화학적 특성을 평가하기 위해 자체 제작한 Cell Test Station을 이용하였다. Electrochemical Analyzer (Interface 1010E, Gamry Instrument)를 사용하여 측정하였으며 Polarization Curves를 얻기 위해 Anode 측에 연료로서 20 sccm의 수소를 MFC (Mass Flow Controller)를 통하여 공급하였으며 환원극을 대기 중에 노출시켜 공기와 반응할 수 있도록 하였고 셀은 450°C로 유지하였다. Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) 기법을 사용하여 저항을 분석하였으며 주파수를 1 MHz에서 1 Hz로 조절해가며 연료전지를 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 형상 및 결정성 분석

Fig. 2는 스퍼터링 기법을 사용하여 Si Wafer에 증착된 Pt-SDC 복합 환원극과 SDC 기능층을 SEM으로 관찰한 Top View Image와 Cross-sectional View Image이다. Pt-SDC의 Top-view Image는 Porous한 표면구조가 확인되며 미세 결정립을 이루고 있고 Grain Boundary가 발달하여 반응 표면적이 넓은 형상을 가지고 있는 것으로 관찰되었다. 이와 달리 Fig. 2(b)의 SDC 기능층은 결정립이 뚜렷하지만 그 크기가 크기 때문에 실제 반응이 일어나는 Grain Boundary의 면적은 상대적으로 감소한 것으로 확인된다. Figs. 2(c)와 2(d)는 박막의 단면을 보여주며 Columnar Grain이 형성된 것을 확인할 수 있다. Fig. 2(d)는 표면에서 확인했던 결정립의 크기에 맞게 두꺼운 주상형 구조를 나타내며 치밀한 것으로 보이고 Pt-SDC의 단면은 얇은 주상형 구조로 비교적 산소가 흡착되기에 유리한 조건을 가진 것으로 보인다[10].

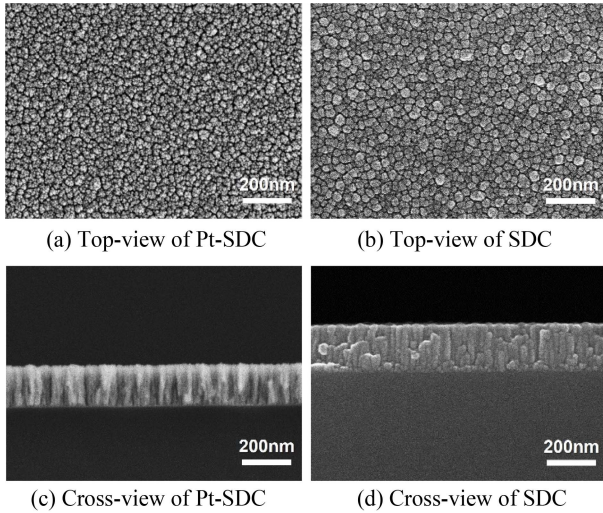


Fig. 2 FE-SEM images of as-deposited Pt-SDC and SDC on Si wafer

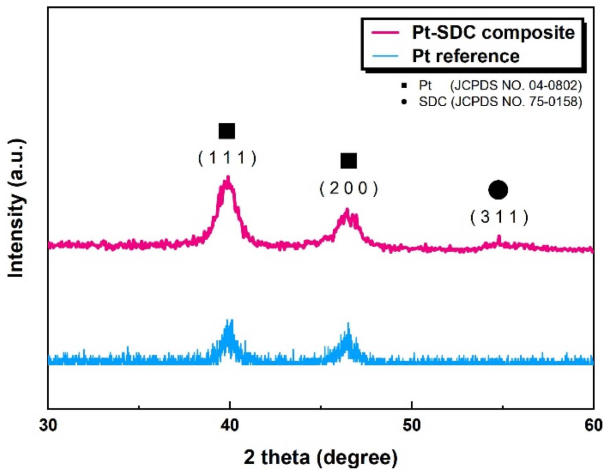


Fig. 3 XRD pattern of Sputtered films on a silicon wafer deposited with Pt-SDC composite and Pt reference

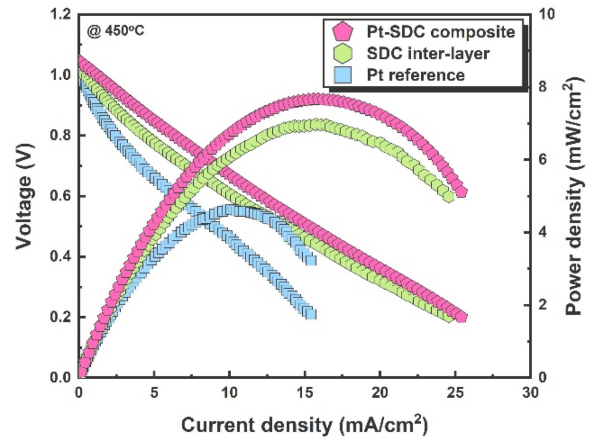
Fig. 3은 상온에서 증착한 박막의 결정성을 XRD로 확인한 결과이다. 스퍼터링 공정은 다결정 물질에 이온의 물리적 충돌을 이용하기 때문에 Pt의 경우 (1 1 1), (2 0 0) XRD Peak가 관찰되었고 SDC가 포함된 복합환원극에서는 Co-sputtering 공정 상 증착 물질간 간섭으로 SDC의 (3 1 1) Peak 크기가 작게 나타난 것으로 보인다. 이를 통해 복합 환원극이 제작되었음을 알 수 있다.

3.2 조성 분석

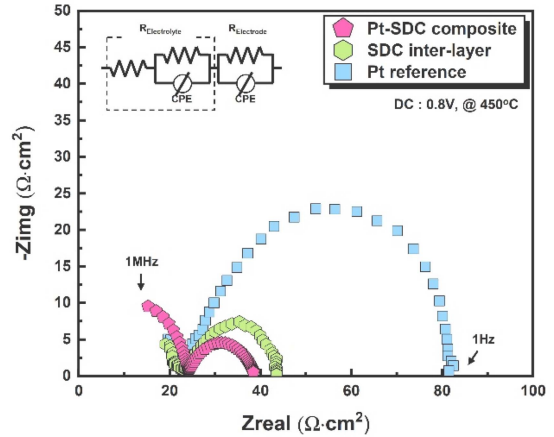
Table 1은 스퍼터링 기법으로 증착한 Pt Reference, SDC 기능층, Pt-SDC 복합 환원극의 원소 조성비를 나타낸다. Pt Reference의 환원극과 Pt-SDC Composite 환원극의 두께가 동일할 때 백금의 함량을 15% 이상 줄일 수 있는 것으로 확인되며 복합 환원극 내 사마륨 도핑 세리아의 조성 비율을 알 수 있다.

Table 1 Composition of Pt and SDC sputtered thin films

Elements	Pt reference	SDC interlayer	Pt-SDC composite
Pt4f [at%]	100	-	84.31
Ce3d [at%]	-	28.69	5.96
Sm3d5 [at%]	-	5.32	0.44
O1s [at%]	-	65.98	9.29



(a) Polarization curves of Pt-SDC cathode comparison for SOFC



(b) EIS spectra for Pt-SDC cathode comparison for SOFC

Fig. 4 Electrochemical performance of Pt-SDC cathode comparison for SOFC

3.3 연료전지 성능 분석

Fig. 4는 복합 환원극과 기능층을 스퍼터링 기법으로 탑재한 고체산화물 연료전지의 성능 평가를 위해 전압-전류밀도-전력밀도를 나타낸 Polarization Curve와 저항을 나타낸 EIS Spectra를 보여준다. 복합 환원극을 탑재한 연료전지와 기존의 방식으로 백금과 사마륨을 이용하여 제작한 연료전지의 성능 차이에 영향을 미치는 산소 환원 반응 속도의 개선효과를 세밀하게 비교 분석하기 위해 전류 교환 밀도 및 활성화 손실에 대해 Tafel Plot으로 Fig. 5에 나타내었다. Polarization Curve를 통해 알 수 있듯이 Pt Reference Cell의 성능에 비해 SDC 기능층과 Pt-SDC

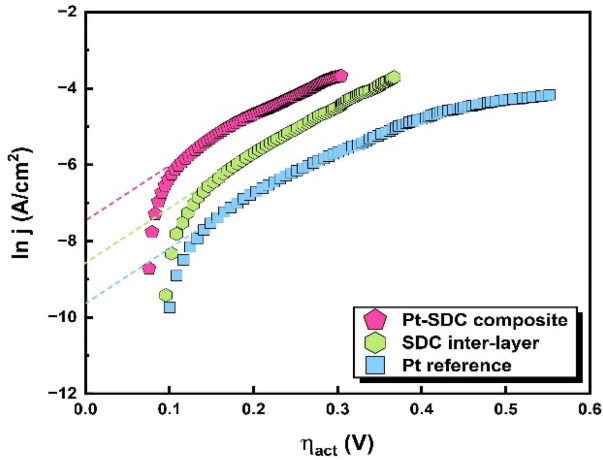


Fig. 5 Plotted relationship between current density and activation overpotential (Tafel plot) for SOFC

복합전극이 탑재 되어있는 연료전지의 성능이 보다 높다는 것을 확인할 수 있다. Pt Reference Cell의 Maximum Power Density 값이 4.64 mW/cm^2 인 반면 SDC 기능층이 탑재되어 있는 연료전지의 경우 6.97 mW/cm^2 의 성능을 나타내었으며, Pt-SDC 복합환원극의 경우 약 7.66 mW/cm^2 의 성능을 보이는 것을 확인할 수 있다. SDC 기능층의 경우, 환원극인 Pt와의 계면에서만 TPB를 형성하기 때문에 산소 환원 반응이 발생하는 활성 표면적이 상대적으로 적은 반면, Pt-SDC 복합환원극의 경우 Pt와 SDC가 경계를 이루고 있는 환원극 내부의 입체 구조 전체가 활성 표면적으로 작용하기 때문에 상대적으로 넓은 TPB 영역을 형성하여 산소 환원 반응이 극대화된 것으로 파악할 수 있다. Fig. 4(b)는 EIS 결과를 나타내며, 일반적으로 EIS Spectra 중 Second Semicircle의 지름(Radius)이 전극과 전해질의 계면에서 발생하는 저항으로 알려져 있다. Pt Reference Cell의 저항이 가장 큰 반면, SDC 기능층과 Pt-SDC 복합환원극이 탑재 되어 있는 연료전지의 전극-전해질 계면 저항은 상대적으로 감소 되어 있는 것을 확인할 수 있다. 또한 SDC 기능층이 탑재된 연료전지의 저항과 Pt-SDC 복합환원극이 탑재된 연료전지의 저항을 비교하여 보면, 후자의 경우가 상대적으로 더 작은 전극-전해질 계면 저항을 갖는 것을 확인할 수 있는데, 이는 Fig. 4(a)의 Maximum Power Density의 경향과 일치하는 결과로 생각할 수 있다. 또한 First Semicircle은 일반적으로 음 저항으로 알려져 있으며 이는 큰 차이를 보이지 않으므로, 두께에 의한 차이 보다는 TPB의 형성이 전기화학 성능에 절대적인 영향을 미친다는 것을 확인할 수 있다.

성능의 개선 효과를 보다 집중적으로 탐색하기 위해 Fig. 5의 Tafel Plot을 살펴 보면, Pt-SDC 복합환원극의 경우 가장 높은 교환 전류 밀도의 값을 나타내는 것이 확인되었다. 따라서 Pt-SDC 복합환원극이 탑재된 연료전지가 보다 빠른 산소 환원 반응 속도를 통해 연료전지의 성능을 향상시킨 것으로 판단할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 저온형 고체산화물 연료전지 성능 향상을 위해 빈번하게 사용되던 기능층을 대신하여 일정 두께를 유지한 채 백금의 함량을 줄일 수 있는 백금-사마륨 환원극을 증착한 연료전지를 제작하고 성능을 평가하였다. 복합 환원극에서 백금의 조성 비율은 기존보다 감소했지만 사마륨 도핑 세리아라는 이온전도체 물질과 전극 내에서 혼합되어 전해질과 만나는 전극의 경계뿐만 아니라 전체 표면에서 삼상경계를 이룰 수 있기 때문에 산소환원반응을 속도를 증진시킬 수 있다는 결과를 도출할 수 있었다. 특히 본 실험을 통해 제작된 연료전지는 복합 환원극을 탑재하여 일반 연료전지 대비 약 1.66배의 성능 향상 효과를 확인할 수 있었다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 논문은 전남대학교 학술연구비(No. 2022-2641) 지원에 의하여 연구되었음.

REFERENCES

1. Steele, B. C., Heinzel, A., (2001), Materials for fuel-cell technologies, *Nature*, 414(6861), 345-352.
2. Yamamoto, O., (2000), Solid oxide fuel cells: Fundamental aspects and prospects, *Electrochimica Acta*, 45(15-16), 2423-2435.
3. Wachsman, E. D., Lee, K. T., (2011), Lowering the temperature of solid oxide fuel cells, *Science*, 334(6058), 935-939.
4. Kishimoto, M., Lomberg, M., Ruiz-Trejo, E., Brandon, N. P., (2014), Enhanced triple-phase boundary density in infiltrated electrodes for solid oxide fuel cells demonstrated by high-resolution tomography, *Journal of Power Sources*, 266, 291-295.
5. Crumlin, E. J., Mutoro, E., Ahn, S.-J., la O', G. J., Leonard, D. N., Borisevich, A., Biegalski, M. D., Christen, H. M., Shao-Horn, Y., (2010), Oxygen reduction kinetics enhancement on a heterostructured oxide surface for solid oxide fuel cells, *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 1(21), 3149-3155.
6. Zhang, H., Gong, M., Gerdes, K., Liu, X., (2014), Surface transport mechanism and Bi-pathway ORR kinetics for solid oxide fuel cell cathode, *Journal of the Electrochemical Society*, 161(10), F983.
7. Preethi, S., Babu, K. S., (2019), Divalent cations modified grain boundary scavenging in samarium doped ceria electrolyte for solid oxide fuel cells, *Journal of Alloys and Compounds*, 792, 1068-1078.

8. Yan, Y., Sandu, S. C., Conde, J., Muralt, P., (2012), Experimental study of single triple-phase-boundary and platinum–yttria stabilized zirconia composite as cathodes for micro-solid oxide fuel cells, *Journal of Power Sources*, 206, 84-90.
9. Gong, M., Gemmen, R. S., Mebane, D. S., Gerdes, K., Liu, X., (2014), Simulation of surface-potential driven ORR kinetics on SOFC cathode with parallel reaction pathways, *Journal of the Electrochemical Society*, 161(3), F344.
10. Shim, J. H., Park, J. S., Holme, T. P., Crabb, K., Lee, W., Kim, Y. B., Tian, X., Gür, T. M., Prinz, F. B., (2012), Enhanced oxygen exchange and incorporation at surface grain boundaries on an oxide ion conductor, *Acta Materialia*, 60(1), 1-7.

**Yongchan Park**

M.S. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Chonnam National University. His research interest is sputtering for fuel cells.

E-mail: replab7@jnu.ac.kr

**Davin Jeong**

B.S.E candidate in the Department of Mechanical Engineering, Chonnam National University. His research interest is ultra sonic spray coating system for water electrolysis.

E-mail: davinjeong175165@jnu.ac.kr

**Hyeontaek Kim**

B.S.E candidate in the Department of Mechanical Engineering, Chonnam National University. His research interest is atomic layer deposition for fuel cells.

E-mail: taekadeg@gmail.com

**Hyeongmin Kim**

B.S.E candidate in the Department of Mechanical Engineering, Chonnam National University. His research interest is nano-engineering.

E-mail: abc@dfg.ac.kr

**Soonwook Hong**

Assistant Professor in the Department of Mechanical Engineering, Chonnam National University. His research interest is ALD and sputtering for renewable energy conversion devices.

E-mail: shong@jnu.ac.kr

비지도학습 기반 복합 구동시스템 이상 탐지

Anomaly Detection in a Combined Driving System based on Unsupervised Learning

박기창¹, 이용관^{2, #}
Kichang Park¹ and Yongkwan Lee^{2, #}

¹ (주)리쉐니에 제조지능화기술연구소 (Intelligent Manufacturing Technology Institute, Reshenie Co., Ltd.)
² 한국공학대학교 Grand ICT 연구센터 (Grand ICT R&D Center, Tech University of Korea)
Corresponding Author / E-mail: ivan.lee@tukorea.ac.kr, TEL: +82-31-8041-1588
ORCID: 0000-0002-6795-6723

KEYWORDS: Predictive maintenance (예지보전), Condition-based maintenance (상태기반 보전), Anomaly detection (이상 탐지), Unsupervised learning (비지도학습), Convolutional auto-encoder (합성곱 오토인코더)

Anomaly detection models using big data generated from facilities and equipment have been adopted for predictive maintenance in the manufacturing industry. When facility faults or defects occur, different patterns of abnormal data are shown owing to their component behaviors. By detecting these pattern changes, it is possible to determine whether a facility abnormality occurs. This study evaluated the anomaly detection results from a combined driving system consisting of three driving motors for about six months at a manufacturing site. The learning data with an autoencoder model for about a month at the beginning of vibration data collection and continuous monitoring of anomalies using reconstruction errors showed that a component defect occurred in one driving motor, and the reconstruction error increased progressively about three months earlier than a facility manager found the failure. In addition, the micro-electro-mechanical systems sensor showed high amplitude in the entire frequency domain when high reconstruction errors occurred. However, the integrated electronics piezoelectric sensor showed different patterns as high amplitude in a specific frequency domain. The results of this study will be helpful for detecting facility abnormalities in combined driving systems using vibration sensors.

Manuscript received: June 8, 2023 / Revised: September 13, 2023 / Accepted: September 18, 2023

1. 서론

제조산업을 ICT 기술로 혁신하는 Industry 4.0 환경에서 신뢰성 확보, 비용 절감, 안전을 위해서는 설비 예지보전(Predictive Maintenance, PdM)이 중요하다[1-3]. 딥러닝, 기계학습 등 인공지능 기술이 발전하면서 센서, PLC를 통해 확보된 대량의 제조 데이터를 다양한 인공지능 모델로 학습하고, 이를 PdM에 적용하는 연구가 활발하다[4]. 특히, 대부분 제조 설비는 모터로 구동되기 때문에, 설비 운용 중 발생하는 모터의 진동 데이터는 설비 상태 감시(Condition-based Monitoring, CBM)와 PdM에 주로 활용되고 있다[5-7].

기계학습은 모델 학습 시, 데이터 라벨 사용 여부에 따라, 지도학습과 비지도학습으로 구분되며, CBM, PdM을 위한 이상 탐지에 두 방식 모두 적용될 수 있다. 하지만, 고장, 결함 등 설비 이상은 발생 빈도가 매우 낮고, 유형이 다양하기 때문에, 충분한 설비 이상 데이터 확보가 어렵다. 따라서, 상대적으로 데이터 수집이 수월한 정상 설비 상태 데이터만을 이용한 지도학습 방식이 주로 활용되고 있으며, 오토인코더(Auto-Encoder, AE)가 대표적이다[8-10]. 진동데이터를 이용한 설비 이상 탐지와 관련한 기존 연구는 대부분 단일 모터로 구동되는 시뮬레이터[11-14] 환경에서 주로 수행되었으며, 여러 모터로 구동되는 복합 구동 시스템의 경우도, 자체 제작한 프로토타입[15]

환경에서 연구가 수행되었다. 따라서, 실제 운용 중인 복합 구동 시스템에 대한 이상 탐지 연구는 여전히 부족하다.

본 연구에서는 IEPE (Integrated Electronics Piezo Electric) 및 MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 타입 진동 센서를 사용해 3개의 구동 모터로 구성된 복합 구동시스템의 진동 데이터를 약 6개월간 수집하고, 비지도학습 모델을 이용해 이상 탐지를 수행했다. 데이터 수집 기간 중 1개 모터에서 부품 결함이 발생했으며, 이때 AE 모델의 재구성 오차를 이용한 이상 탐지 결과를 분석했다. 또한, 이상 탐지 시, IEPE, MEMS 타입 센서에서 수집된 진동 데이터 특성을 비교 분석했다.

2. 데이터 수집

대상 설비는 Fig. 1의 오프셋 인쇄기로 Koenig & Bauer (독일)의 RAPIDA 106 모델이다. 최대 1.8만장/시간 인쇄가 가능하며, 5일/주, 24시간/일 운용 환경에서 데이터를 수집하고 이상탐지를 수행했다.

복합 구동시스템은 대상 설비의 유틸리티 구동 시스템으로 Fig. 2와 같이 3개 공기압축기 구동 모터(Fig. 2 Motors #1-#3)가 1개 프레임에 고정된 구조이며, 3개 모터는 운용 중 상시 1,720 (Motor #1), 1,740 (Motor #2), 1,150 (Motor #3) RPM을 유지한다. 총 4개 진동센서(IEPE 타입 1개, MEMS 타입 3개)를 각 모터와 프레임에 설치하고 데이터를 수집했다.

진동 데이터 수집에 사용된 센서는 IEPE 타입 센서는 VibraSens(프랑스)의 Vibra 131.02-6D-2를 이용했으며, MEMS 타입 센서는 IQunet(벨기에)의 IVIB161410-24V-PWR 모델을 이용했다. 데이터 수집을 위한 에지 컴퓨터는 IQunet의 SERV-199010-USB-5V2A를 이용해 데이터 수집 환경을 구성했다. 복합 구동시스템의 각 센서에서 수집된 진동 데이터는 에지 컴퓨터의 내장 DB에 주기적으로 저장되고, 산업용 표준 통신 프로토콜인 OPC UA (Open Platform Communications Unified Architecture) 통신을 통해 제조 현장의 에지 컴퓨터에서 원격지에 위치한 감시 시스템으로 전송되어 모니터링된다. 데이터 수집과 분석과정의 전체 데이터 흐름은 Fig. 3과 같다.

수집데이터는 각 센서별 진동 측정 시각과 3축(x, y, z) 진동 주파수 데이터로 구성되며, 총 94,700,775개, 약 1.04 GB 용량의 데이터를 수집하고 분석에 활용했다. 이때, Motor #1의 IEPE 센서 경우, 0-1,952.05 Hz 주파수 범위에서 샘플 당 2,048개 수치 데이터가 수집되었고, MEMS 센서(Frame, Motor #2, Motor #3) 경우, 0-1,598.44 Hz에서 1,024개가 수집되었다. 센서별 데이터 수집 주기는 수신기 상태, 네트워크 환경 등 현장 상황에 따라 평균 약 30-60분에 거쳐 불규칙하게 수집되었다. 본 실험에 사용된 IQunet 에지 시스템을 이용해 Fig. 4와 같이 진동 신호에 대한 시간 영역(Time Domain)과 FFT를 거친 주파수 영역(Frequency Domain) 데이터를 수집할 수 있으며, 본 연구에서는 주파수 영역 데이터가 사용되었다.



Fig. 1 Offset press

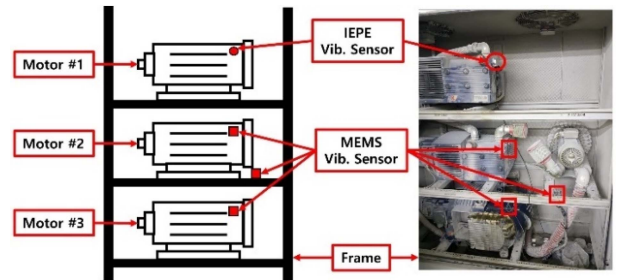


Fig. 2 Structure of the combined driving system

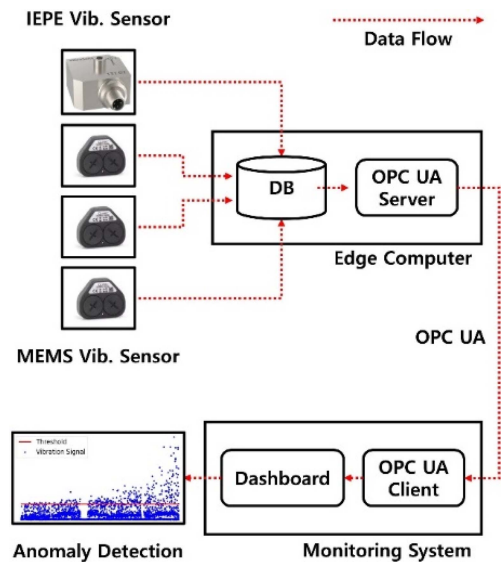


Fig. 3 Process of the data flow

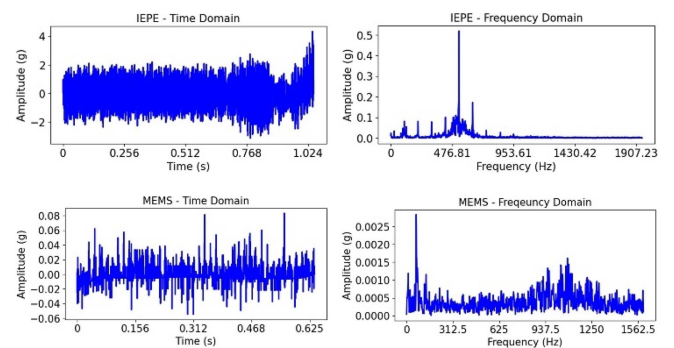


Fig. 4 Sample data

Table 1 Volume of the dataset

Target	Number of values (Row/Column)		
	X	Y	Z
Frame	7,685 / 1,025	7,669 / 1,025	7,654 / 1,025
Motor #1	8,320 / 2,049	7,996 / 2,049	8,284 / 2,049
Motor #2	3,814 / 1,025	3,794 / 1,025	3,773 / 1,025
Motor #3	3,024 / 1,025	2,972 / 1,025	2,930 / 1,025

전체 데이터 수는 Table 1과 같으며, 행(Row)은 데이터 샘플 수를, 열(Column)은 각 샘플 측정 시간과 수치 데이터 수를 포함한 샘플 당 데이터 수를 나타낸다.

3. 복합 구동시스템 이상 탐지

3.1 이상 탐지 모델

복합 구동시스템의 이상탐지 모델로 1차원 합성곱 오토인코더 (1Dimensional Convolutional Auto-Encoder, 1D CAE) [16]를 이용했다. 일반적인 AE는 입력 데이터를 더 작은 차원으로 압축하는 인코더와 원래 차원으로 복원하는 디코더로 구성되며, 1D CAE는 인코더와 디코더에 1차원 합성곱 층[17]을 적용한 모델이다. 1D CAE의 입력 신호와 출력(복원) 신호의 차이로 재구성 오차가 발생하며, 학습에 사용된 정상 신호들과 다른 패턴의 신호가 입력될 경우 더 큰 재구성 오차가 발생한다. 따라서, 재구성 오차 크기를 이용해 모델에 입력된 진동 데이터를 정상 신호와 이상 신호로 구분할 수 있다. 1D CAE 기반 이상 탐지 구조는 Fig. 5와 같다.

재구성 오차는 MAE (Mean Absolute Error), MSE (Mean Squared Error), RMSE (Root Mean Squared Error)와 같은 오차 함수를 이용해 계산할 수 있으며, 본 연구에서는 모든 오차에 동일 가중치를 부여하는 MAE(식(1))를 사용했다.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |X'_i - X_i| \quad (1)$$

1D CAE 모델은 각각 2개의 1차원 합성곱 층과 1차원 전치 합성곱 층을 이용해 인코더와 디코더를 구성했으며, Table 1과 같이 IEPE 센서에서 수집된 샘플 당 데이터 수가 MEMS 센서의 2배임을 고려해, 각 층 커널 사이즈와 학습 파라미터 수를 2배로 지정했다. 결과적으로 1D CAE 모델은 IEPE 센서 데이터와 MEMS 센서 데이터 학습을 통해 각각 67,745개, 33,953개 파라미터를 학습한다. 모델 각 층(Layer) 구성은 Table 2와 같다.

전체 데이터 수집 기간 중, 초기 1달 동안 수집된 데이터를 학습 데이터로 사용하고, 이후 모니터링 기간 약 5개월 동안 수집된 데이터를 시험 데이터로 사용했다. 결과적으로, 전체 데이터 샘플 67,915개 중 24,019개(35%)는 학습 데이터로, 43,896개(65%)는 시험 데이터로 사용되었다.

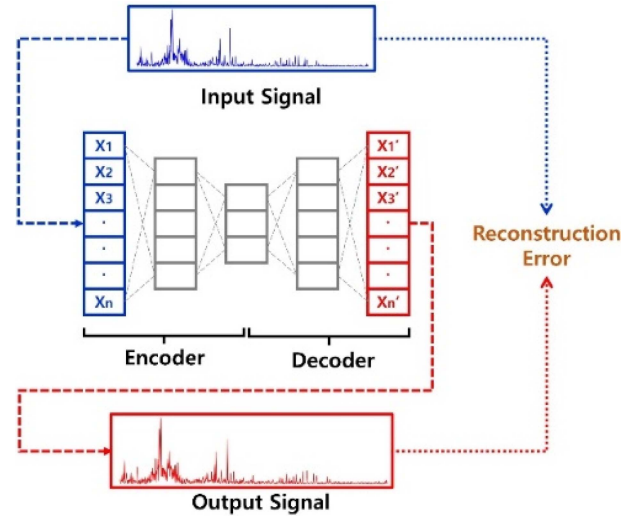


Fig. 5 Autoencoder model for anomaly detection

Table 2 Structure of the 1D CAE model

Layer	Filter	Kernel size (IEPE / MEMS)	Activation function	Parameter (IEPE / MEMS)
1D Conv.	64	16 / 8	RELU	1,088 / 576
1D Conv.	32	16 / 8	RELU	32,800 / 16,416
1D Trans. Conv.	64	16 / 8	RELU	32,832 / 16,448
1D Trans. Conv.	1	16 / 8	-	1,025 / 513

Table 3 Number of train and test data

Target	Number of data (Train / Test)		
	X	Y	Z
Frame	2,375 / 5,310	2,374 / 5,295	2,371 / 5,283
Motor #1	2,401 / 5,919	2,338 / 5,658	1,400 / 6,884
Motor #2	1,766 / 2,048	1,760 / 2,034	1,754 / 2,019
Motor #3	1,830 / 1,194	1,826 / 1,146	1,824 / 1,106

수집 기간을 기준으로 학습 데이터와 시험 데이터로 분류했음에도, 데이터 수집 현장 조건에 따라, 센서별 데이터 수집량에 차이가 발생했다. 예를 들어, Motor #1에서 수집된 전체 진동 데이터 24,600개 중 6,139개(25%)가 학습 데이터, 18,461개(75%)가 시험 데이터로 사용된 반면, Motor #3의 경우는 학습 데이터 5,480개(61%), 시험 데이터 3,446개(39%)로 차이가 발생했다. 각 센서별 학습 데이터와 시험 데이터 샘플 수는 Table 3과 같다.

모델 학습 시, 손실 함수(Loss Function)는 MAE, 배치 크기 (Batch Size)는 16, 최적화(Optimizer)는 Adam을 적용했으며, 하이퍼파라미터 튜닝은 학습횟수(Epoch)에 대해 조기종료 (Early Stopping)를 수행했다. 정상, 이상 신호를 판별하기 위한 임계치(Threshold)는 학습 데이터의 재구성 오차 중 최댓값을 적용했다.

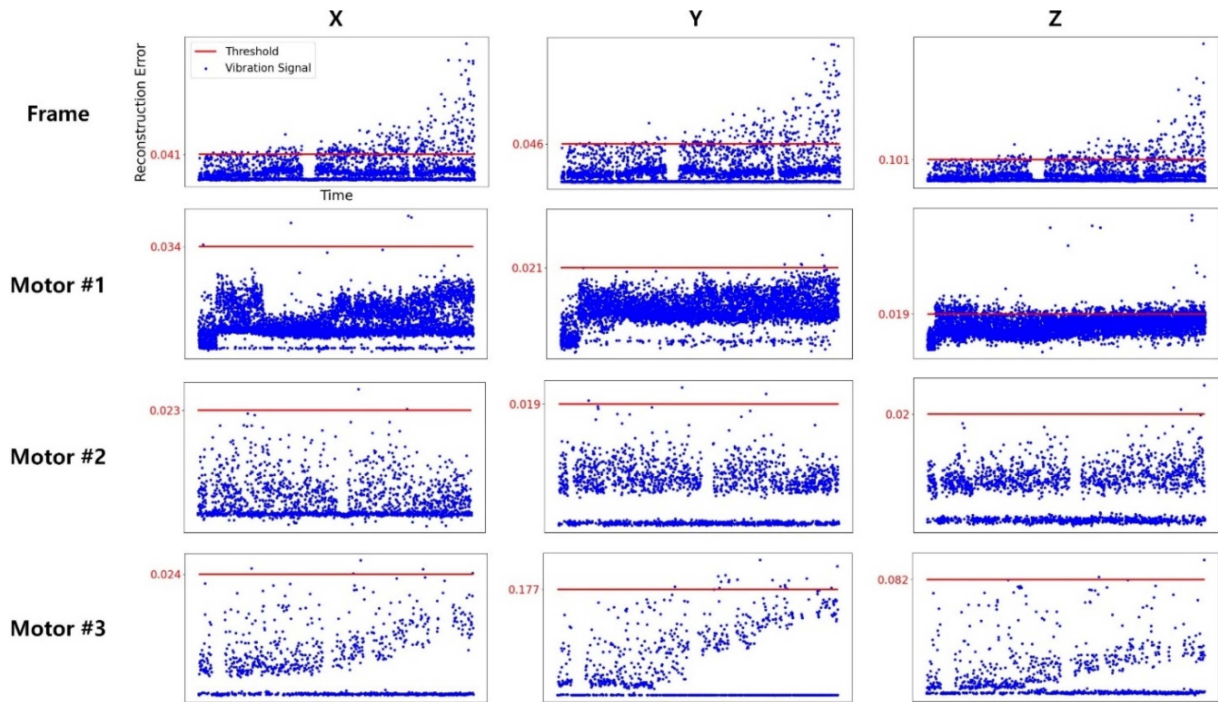


Fig. 6 Result of anomaly detection

$$Threshold = MAX(MAE_{train}) \quad (2)$$

3.2 이상 탐지 결과 분석

복합 구동 시스템의 전체 이상 탐지 결과는 Fig. 6과 같다. 모니터링 기간 후반에 Motor #3에서 베어링 파손으로 인해 베어링 하우징(Fig. 7(a))과 베어링 축(Fig. 7(b)) 등 관련 부품 손상이 발생했다.

모니터링 초기부터 베어링 파손 시점까지 시간 흐름에 따라 Frame x, y, z축과 Motor #1 z축에서 지속적으로 이상 신호가 탐지됐다. 특히, 3개 모터가 연결된 Frame 3축 진동 데이터에서는 재구성 오차가 시간이 지남에 따라 점차 커지는 양상으로 나타났다. 반면, 각 모터에서의 진동 데이터는 대부분 임계치보다 낮게 나타났으며, 시간 흐름에 따른 특이사항이 발견되지 않았다. 다만, 실제 결함이 발생한 Motor #3의 경우, Frame과 유사하게 재구성 오차가 점차 커지는 양상이 나타났다. 하지만, 이 경우도 임계치를 크게 넘어서는 재구성 오차는 나타나지 않았다. Motor #1의 z축에서 임계치를 넘어서는 신호가 초기부터 지속적으로 나타나는데, 이러한 결과는 본 연구에서 1D CAE 모델을 이용한 학습 시, 모든 데이터에 대해 1달 동안 수집된 데이터를 학습 데이터로 사용한 결과로 판단된다. 따라서, 해당 데이터의 경우 학습 데이터 수(기간)를 늘려 임계치를 재조정할 필요가 있다.

복합 구동시스템에서 임계치보다 높은 재구성 오차는 설비 관리자가 Motor #3의 부품 결함을 인지한 시점(Fig. 8 D-day)보다 약 3개월(Fig. 8 D-90) 앞서 발견되었으며, 이러한 양상은 Frame에서 측정된 x, y, z축 모두 유사하게 나타났다.

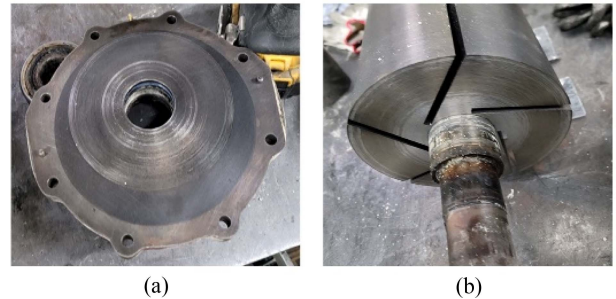


Fig. 7 Damaged equipment

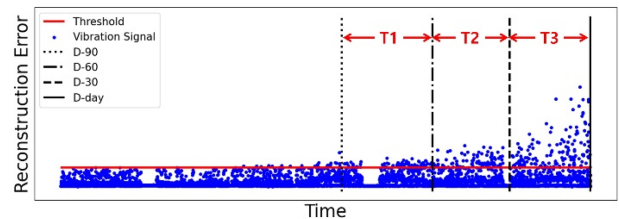


Fig. 8 Anomaly detection points

Frame 3축 진동 데이터 이상 탐지 결과를 3개 시점 구간(Fig. 8 T1, T2, T3)으로 나누어, 이상 신호 발생 빈도를 조사한 결과, 초기 T1 기간에는 같은 기간 중 발생한 전체 데이터의 약 2-5% 수준으로 이상 신호가 탐지되었으며, 이후 T2, T3 기간에는 각각 5-8%, 10-13% 수준으로 크게 증가하였다. Frame 각 축에서 탐지된 기간별 이상 신호 빈도는 Table 4와 같다.

이상 신호 발생 빈도 증가와 함께 이들 신호에서 계산된 재구성 오차도 크게 증가한 것으로 나타났다. T1 기간 내 탐지된

Table 4 Number of anomaly signals

Axis	Number of signals [%]					
	T1		T2		T3	
	Normal	Anomaly	Normal	Anomaly	Normal	Anomaly
x	1,266 (95%)	63 (5%)	1,087 (92%)	98 (8%)	970 (87%)	140 (13%)
y	1,275 (98%)	30 (2%)	1,067 (95%)	58 (5%)	1,052 (90%)	117 (10%)
z	1,245 (96%)	47 (4%)	1,047 (93%)	77 (7%)	1,038 (89%)	130 (11%)

Table 5 Reconstruction error of anomaly signals

Axis	Reconstruction error								
	T1			T2			T3		
	Min.	Avg.	Max.	Min.	Avg.	Max.	Min.	Avg.	Max.
x	0.04	0.05	0.06	0.04	0.05	0.08	0.04	0.07	0.18
y	0.05	0.05	0.06	0.05	0.06	0.08	0.05	0.08	0.15
z	0.10	0.11	0.14	0.10	0.13	0.19	0.10	0.18	0.58

이상 신호의 재구성 오차보다 T3 기간 내 이상 신호의 재구성 오차가 Frame x, y, z 각각 평균 약 40, 60, 64% 큰 오차를 나타냈다. 각 기간 내 이상 신호의 재구성 오차 최대, 최소, 평균은 Table 5와 같다.

3.3 센서 유형별 이상 탐지 특성 분석

MEMS 타입 센서는 IEPE 타입 센서에 비해 상대적으로 더 많은 잡음을 포함한다[18]. 이러한 특성은 재구성 오차 크기에 따른 센서 유형별 주파수 신호 비교에도 차이를 나타냈다. Fig. 9는 Motor #1 (IEPE 타입)과 Motor #2 (MEMS 타입)에서 수집된 x축 진동 데이터 중 재구성 오차가 큰 신호(Fig. 9 HIGH), 중간 신호(Fig. 9 MEDIUM), 작은 신호(Fig. 9 LOW) 3 그룹에 대해 각각 50개 신호를 가시화한 결과다. IEPE 타입 센서 데이터는 그룹별로 특정 주파수에서 신호 강도 차이가 나타났지만, MEMS 타입 센서 데이터는 전체 주파수 영역에서 신호 강도가 증가하는 것으로 나타났다.

주파수별 표준편차도 센서 유형에 따라 차이가 발생했다. Fig. 10은 이상 탐지 분석에 사용한 시험 데이터의 주파수별 표준편차를 시각화한 결과다. IEPE 타입 센서에서 수집된 데이터는 주파수별 표준편차가 상대적으로 명확히 구분된다. 따라서, IEPE 센서가 MEMS 센서에 비해 주파수 특성 학습에 필요한 데이터 수집 시 더 유리하다.

이상 데이터는 실제 현장에서 충분한 수집이 어려운 경우, 설비 입력값 조절[19], 신호 변조[20] 등 인위적으로 생성한 가상 데이터(Synthetic Data)를 모델 검증에 활용한다. 본 연구에서는 Motor #1과 Motor #2의 x축 학습데이터와 가상의 이상 데이터를 이용해 이상 탐지 결과를 비교하였다. 가상의 이상 데이터는

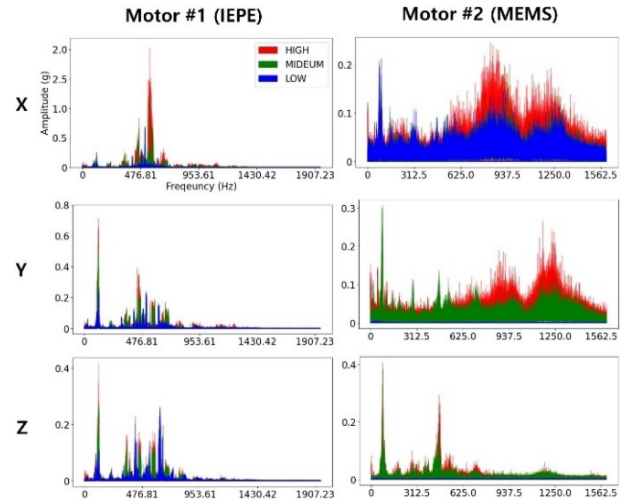


Fig. 9 Comparison of frequency signals

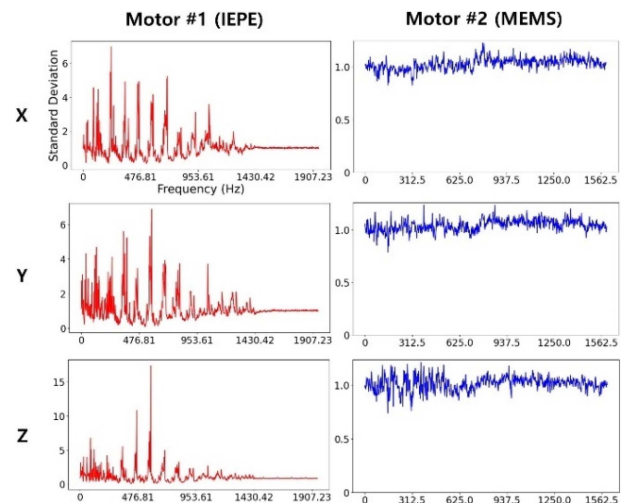


Fig. 10 Comparison of standard deviations

Motor #1과 Motor #2의 기본 주파수가 29 Hz임을 고려해 해당 주파수 근처에서 높은 강도 신호가 발생하는 이상 상황을 시뮬레이션하기 위해, 각각 30.52 Hz와 31.25 Hz 데이터값을 수집된 데이터 중 해당 주파수 데이터 최댓값으로 설정해 생성했다.

이상 탐지 결과는 Fig. 11과 같으며, IEPE 타입 센서 데이터의 경우, 가상의 이상 신호 2,401개 전체가 이상 신호로 탐지되었으나, MEMS 센서 데이터는 전체 이상 신호 1,766개 중 20개 (1.1%)만 이상 신호로 탐지됐다.

Motor #1과 Motor #2의 주파수 영역을 3개 영역으로 분할하고, 분리된 각 주파수 영역에서 재구성 오차(식(1))와 임계치(식(2))를 적용해 이상 탐지를 실행했다. Motor #1의 IEPE 타입 진동 센서는 0-1,952.05 Hz, Motor #2의 MEMS 진동 센서는 0-1,598.44 Hz를 각각 3개 주파수 영역으로 분할했다. IEPE 타입 센서 데이터의 경우, 가상의 이상 신호 30.52 Hz가 포함된 구간(0-649.41 Hz)에서 전체 2,401개를 이상 신호로, 나머지 구간에서는 정상 신호로 탐지되었다. 반면, MEMS 타입 센서 데이터의

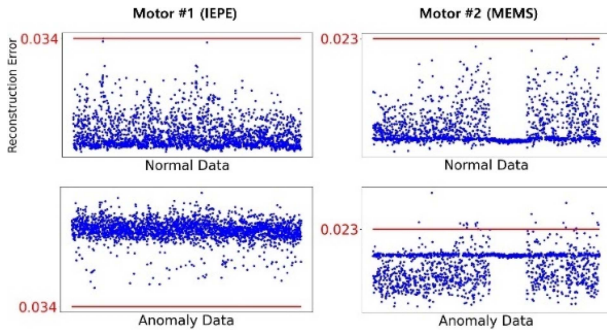


Fig. 11 Result of anomaly detection using generated signals

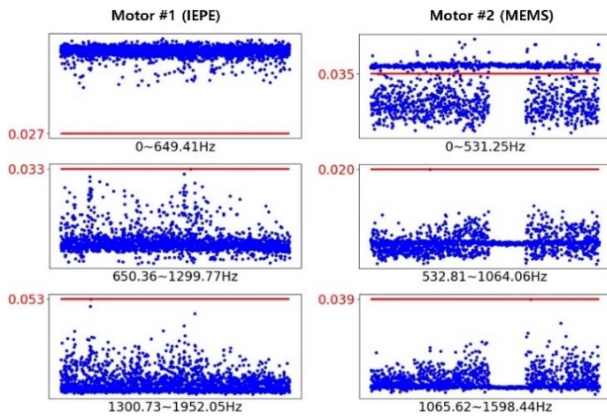


Fig. 12 Result of anomaly detection: the 1st frequency range

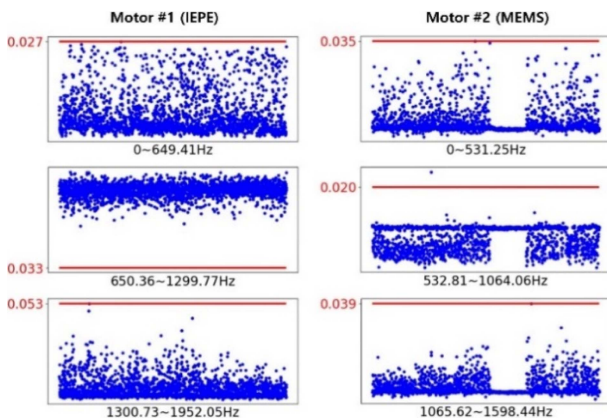


Fig. 13 Result of anomaly detection: the 2nd frequency range

경우, 31.25 Hz가 포함된 구간(0-531.25 Hz)에서 전체 1,766개 이상 신호 중 847개(47.9%) 신호만을 이상 신호로 탐지했다. 센서 유형별 분할된 각 주파수 영역에서의 이상 탐지 결과는 Fig. 12와 같다.

같은 방식으로, 나머지 두 주파수 영역에 대해서도 실험을 진행했다. Motor #1은 956.47, 1,606.84 Hz, Motor #2는 798.44, 1,331.25에 대해 가상의 이상 데이터를 생성하고, 이상 탐지를 수행했다. Fig. 13은 두 번째 주파수 영역(Motor #1 956.47 Hz, Motor #2 798.44 Hz), Fig. 14는 세 번째 주파수 영역(Motor #1 1,606.84 Hz, Motor #2 1,331.25 Hz)에 대한

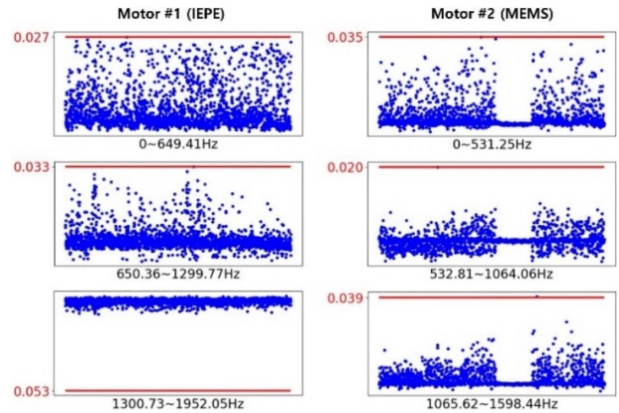


Fig. 14 Result of anomaly detection: the 3rd frequency range

이상 탐지 결과를 나타낸다. IEPE 타입 센서 데이터의 경우, Figs. 13, 14와 같이, 가상의 이상 데이터가 포함된 주파수 영역에서 이상 발생 여부를 정확히 탐지했다. 반면, MEMS 센서 데이터의 경우는 해당 주파수 영역에서 이상 신호로 탐지되지 않았다.

4. 결론

비지도학습을 이용한 복합 구동시스템 이상 탐지 분석 결과는 다음과 같다.

첫째, 단일 구동 시스템의 경우, 모터 자체 진동 데이터만으로 이상 탐지를 수행하는 것과 달리 여러 모터로 구성된 복합 구동시스템에서 비지도학습을 이용한 이상 탐지 시, 복합 구동시스템 구조에 따라 모터와 연결된 프레임과 같은 구조물에 대한 추가적인 데이터 모니터링이 요구된다. 본 연구 사례의 경우, Motor #3에서 발생한 설비 이상은 Motor #3에서 수집된 진동 데이터만으로 이상 탐지가 정상적으로 이루어지지 않았으며, Motor #3과 연결된 Frame에서 감지할 수 있었다.

둘째, 비지도학습을 이용한 이상 탐지 모델은 PdM을 위한 유의미한 정보를 생성할 수 있다. 본 연구 사례의 경우, 설비관리자가 결함을 인식하기 약 3개월 전부터 임계치를 벗어난 재구성 오차가 관찰됐으며, 시간이 지남에 따라 이상 신호 수, 재구성 오차 크기가 지속해서 증가했다. 따라서, 시간 흐름에 따른 이상 신호 출현 증가, 재구성 오차 크기 증가와 같은 정보를 PdM에 활용할 필요가 있다.

셋째, IEPE 타입 진동 센서에서 수집된 데이터는 MEMS 타입보다 정밀한 이상 탐지가 가능하다. 본 연구 사례의 경우, IEPE 타입 센서에서 수집된 데이터는 MEMS 타입보다 잡음이 덜한 데이터로 인해, 주파수 영역을 분할한 이상 탐지에서도 좋은 성능을 나타냈다. 따라서, 설비 불균형, 정렬 불량, 고정 불량 등 구체적인 설비 이상을 진단하기 위한 진동 주파수 영역 분석 시 IEPE 타입 센서가 고려될 수 있다.

본 연구의 한계와 향후 연구는 다음과 같다.

첫째, 복합 구동시스템 이상 탐지에 진동 데이터만을 활용해, 설비 이상 특성이 진동 데이터로 제한되었다. 향후, 전류, 온도 등 센서 데이터와 PLC 데이터를 추가한 이상 탐지 모델로 확장될 수 있다.

둘째, 비지도학습을 위한 정상 상태 데이터는 데이터 수집기간을 기준으로 결정했기 때문에, 정상적인 복합 구동시스템 상태에 대한 신뢰성이 확보되지 않았다. 향후, 대상 설비의 정상 상태에 대한 참조 데이터를 확보하고, 모델 학습에 활용할 필요가 있다.

셋째, 실험에 적용된 비지도학습 모델은 특정 결함 탐지가 불가능한 일반적인 설비 이상 탐지를 수행하기 때문에 실제 발생한 베어링 파손과 이상 탐지결과의 인과성을 해석하는데 한계가 있다. 향후, 베어링 결함 발생 시 발생하는 외륜 볼 통과 주파수, 내륜 볼 통과 주파수, 볼 자전 주파수, 기본 열 주파수 등 관련 주파수 데이터를 추가로 확보하고 모델을 학습함으로써 베어링 고장 탐지에 특화된 모델로 확장될 수 있다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 연구는 중소벤처기업부의 스마트제조혁신 R&D 지원사업 (RS-2022-00141076)과 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 지역지능화혁신인재양성사업(IITP-2023-2020-0-01741)의 연구결과로 수행되었음.

REFERENCES

1. Yan, J., Meng, Y., Lu, L., Li, L., (2017), Industrial big data in an industry 4.0 environment: Challenges, schemes, and applications for predictive maintenance, *IEEE Access*, 5, 23484-23491.
2. Sahli, A., Evans, R., Manohar, A., (2021), Predictive maintenance in industry 4.0: Current themes, *Procedia CIRP*, 104, 1948-1953.
3. Pech, M., Vrchota, J., Bednár, J., (2021), Predictive maintenance and intelligent sensors in smart factory, *Sensors*, 21(4), 1470.
4. Çınar, Z. M., Abdussalam Nuhu, A., Zeeshan, Q., Korhan, O., Asmael, M., Safaei, B., (2020), Machine learning in predictive maintenance towards sustainable smart manufacturing in industry 4.0, *Sustainability*, 12(19), 8211.
5. Manjare, A. A., Patil, B. G., (2021), A review: Condition based techniques and predictive maintenance for motor, *Proceedings of the 2021 International Conference on Artificial Intelligence and Smart Systems (ICAIS)*, 807-813.
6. Kiangala, K. S., Wang, Z., (2020), An effective predictive maintenance framework for conveyor motors using dual time-series imaging and convolutional neural network in an industry 4.0 environment, *Ieee Access*, 8, 121033-121049.
7. Magadán, L., Suárez, F., Granda, J., García, D., (2020), Low-cost real-time monitoring of electric motors for the Industry 4.0, *Procedia Manufacturing*, 42, 393-398.
8. Bampoula, X., Siaterlis, G., Nikolakis, N., Alexopoulos, K., (2021), A deep learning model for predictive maintenance in cyber-physical production systems using lstm autoencoders, *Sensors*, 21(3), 972.
9. Arellano-Espitia, F., Delgado-Prieto, M., Martínez-Viol, V., Fernández-Sobrino, Á., Osornio-Rios, R. A., (2021), Anomaly detection in electromechanical systems by means of deep-autoencoder, *Proceedings of the 2021 26th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, 01-06.
10. Jakubowski, J., Stanis, P., Bobek, S., Nalepa, G. J., (2021), Explainable anomaly detection for Hot-rolling industrial process, *Proceedings of the 2021 IEEE 8th International Conference on Data Science and Advanced Analytics (DSAA)*, 1-10.
11. Mohammed, S. A., Ghazaly, N. M., Abdo, J., (2022), Fault diagnosis of crack on gearbox using vibration-based approaches, *Symmetry*, 14(2), 417.
12. Mey, O., Neudeck, W., Schneider, A., Enge-Rosenblatt, O., (2020), Machine learning-based unbalance detection of a rotating shaft using vibration data, *Proceedings of the 2020 25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, 1610-1617.
13. Chen, T., Liu, X., Xia, B., Wang, W., Lai, Y., (2020), Unsupervised anomaly detection of industrial robots using sliding-window convolutional variational autoencoder, *IEEE Access*, 8, 47072-47081.
14. Huang, Y., Chen, C.-H., Huang, C.-J., (2019), Motor fault detection and feature extraction using RNN-based variational autoencoder, *IEEE Access*, 7, 139086-139096.
15. Aruquipa, G., Diaz, F., (2022), An IoT architecture based on the control of bio inspired manufacturing system for the detection of anomalies with vibration sensors, *Procedia Computer Science*, 200, 438-450.
16. Liu, X., Zhou, Q., Zhao, J., Shen, H., Xiong, X., (2019), Fault diagnosis of rotating machinery under noisy environment conditions based on a 1-D convolutional autoencoder and 1-D convolutional neural network, *Sensors*, 19(4), 972.
17. Kiranyaz, S., Avci, O., Abdeljaber, O., Ince, T., Gabbouj, M., Inman, D. J., (2021), 1D convolutional neural networks and applications: A survey, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 151, 107398.
18. Murphy, C., (2020), Choosing the most suitable predictive maintenance sensor, *Analog Devices, Inc.* https://b2.sisoog.com/file/zmedia/dex/39b7f409906731ada6383c691a22d54f_choosing-the-most-suitable-predictive-maintenance-sensor.pdf
19. Serradilla, O., Zugasti, E., Ramirez de Okariz, J., Rodriguez, J., Zurutuza, U., (2021), Adaptable and explainable predictive

maintenance: Semi-supervised deep learning for anomaly detection and diagnosis in press machine data, Applied Sciences, 11(16), 7376.

20. Tziolas, T., Papageorgiou, K., Theodosiou, T., Papageorgiou, E., Mastos, T., Papadopoulos, A., (2022), Autoencoders for anomaly detection in an industrial multivariate time series dataset, Engineering Proceedings, 18(1), 23.



Kichang Park

Professional in Intelligent Manufacturing Technology Institute, Reshenie Corp.. His research interest is software engineering and artificial intelligence.

E-mail: kc.park@reshenie.co.kr



Yongkwan Lee

Professor in Grand-ICT R&D Center at the Tech University of Korea. His research interest is manufacturing artificial intelligence, facility diagnosis technology, and smart-manufacturing solutions.

E-mail: ivan.lee@tukorea.ac.kr

초정밀 가공에서 건식 냉각과 가공정밀도에 관한 연구

Research on Dry Cooling and Processing Precision in Ultra-precision Machining

이경일^{1,#}
Gyung-Il Lee^{1,#}

¹ 송원대학교 자율전공학과 (Department Liberal Majors, Songwon University)
Corresponding Author / E-mail: jia789@songwon.ac.kr, TEL: +82-62-360-5729
ORCID 0000-0002-1485-5056

KEYWORDS: Ultra-precision positioning (초정밀위치제어), Dry cooling system (건식냉각시스템), Piezoelectric actuator (압전구동기), Flexure hinge (유연힌지)

Recently, with the development of the space, mobility, semiconductor, and precision machinery industries, the processing of precision mechanical parts has been recognized as an important and a high value-added technology. Research on ultra-precision processing is actively underway to produce such products. In addition, eco-friendliness and 0% carbon are emerging as key keywords in modern industrial society, and the need for this is also increasing in the ultra-precision processing field. As the industry advances, environmental issues are becoming a major concern, and in the processing technology field, environmental destruction caused by cutting oil is becoming an issue. To solve this problem, this study measured the movement precision of the global feed system and installed a Fine Servo that corrects the nm-level movement of the feed system in real time, using a piezoelectric actuator, to finely drive the cutting tool to control the movement necessary for machining. We intended to control variables for ultra-precision machining and measure cutting heat generation in real time to establish a dry cooling method using thermoelectric elements without using cutting oil.

Manuscript received: September 8, 2023 / Revised: September 26, 2023 / Accepted: September 27, 2023

CONVENTIONS

F_m = Main Cutting Force
 F_r = Radial/thrust Cutting Force
 F_a = Feed Cutting Force
 N = Shape Function
 \hat{a} = Parameter
 B = Deformation Rate Matrix
 E = Young's Modulus
 ν = Poisson Ratio
 σ_{ij} = Stress
 ϵ_{ij} = Deformation Rate
 f^e = Applied Force
 K^e = Element Rigidity Matrix

1. 서론

최근 우주산업, 모빌리티, 반도체, 정밀기계산업 등의 발달로 정밀기계부품의 가공은 고부가가치 기술로서 매우 중요하게 인식되고 있으며, 특히 이러한 제품을 생산하기 위해서 초정밀 가공에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 또한 현대 산업 사회는 친환경, 탄소 0%가 핵심 키워드로 나타나고 있으며 이는 초정밀 가공 분야에서도 필요성이 확대되고 있다. 산업이 고도화됨에 따라 환경 문제가 큰 이슈가 되고 있으며 가공기술 분야에서는 절삭유로 인한 환경 파괴가 이슈 되고 있다[1-3].

국내 연구소를 중심으로 초정밀가공기 기술개발 및 절삭유 저감에 대해 꾸준히 연구가 이루어지고 있지만 선진국에 비하여 극히 미진한 수준이다. 선삭의 특성상 고정밀도가 필요한 알루미늄, 구리 무전해 니켈 등의 금속 및 플라스틱, 실리콘,

게르마늄 등의 비금속 등이 사용되고 있으며 이런 재료들은 연삭 가공으로는 높은 정도를 내기 어렵고 절삭유를 많이 사용하게 된다[4-8].

이와 같은 문제를 해결하기 위하여 본 연구는 글로벌 이송계의 운동정밀도를 측정하여 압전구동기를 활용하여 이송계의 nm 급 운동을 실시간 보정하는 Fine Servo를 장착하여 절삭공구를 미세 구동제어하여 가공에 필요한 변수들을 제어하여 초정밀 가공하며, 실시간 절삭 발열을 측정하여 절삭유를 사용하지 않고 열전소자를 이용한 건식 냉각 법에 대하여 정립하고자 한다.

2. Dual Servo의 설계

2.1 Flexure Hinge 메카니즘

Fine Servo에 적용된 탄성 힌지 방식은 대칭 구조를 가지며 운동 방향에는 유연(Flexible) 성질을 지니고 있다. 탄성힌지 방식은 힌지가 운동방향에 대하여 가이드 하면서 동작하게 되므로 힌지의 설계가 Fine Servo의 특성을 지배하게 되는 중요한자이다[9-13].

본 논문에서는 탄성가이드에 10개의 원형 노치를 사용하여 T형 Flexure Hinge를 설계하였다. 굽힘 강성은 식(1), 축강성은 식(2)와 식(3), 전단강성은 식(4)와 같다. Fig. 1은 기본적인 Flexure Hinge를 나타내고 있으며, Fig. 2는 설계한 T형 힌지이다. Table 1은 Flexure Hinge 재질과 Stiffness를 표기하였다 [9-14].

$$\frac{\alpha_z}{M_z} = \frac{3}{2EbR^2} \left[\frac{1}{2\beta + \beta^2} \right] \left\{ \left[\frac{1 + \beta}{\gamma} + \frac{3 + 2\beta + \beta^2}{\gamma(2\beta + \beta^2)} \right] \times \left[\sqrt{1 - (1 + \beta - \gamma^2)} \right] + \left[\frac{6(1 + \beta)}{(2\beta + \beta^2)^{3/2}} \right] \right\} \times \left[\tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{2 + \beta}{\beta}} \times \frac{(\gamma - \beta)}{\sqrt{1 - (1 + \beta - \gamma^2)}} \right) \right] \quad (1)$$

$$\frac{\Delta_y}{F_y} = R^2 \sin^2 \theta_m \left(\frac{\alpha_z}{M_z} \right) - \frac{3}{2Eb} \left\{ \left[\frac{1 + \beta}{(1 + \beta - \cos \theta_m)^2} - \frac{2 + \frac{(1 + \beta)^2}{2\beta + \beta^2}}{(1 + \beta - \cos \theta_m)} \right] \times \sin \theta_m + \left[\frac{4(1 + \beta)}{\sqrt{2\beta + \beta^2}} - \frac{2(1 + \beta)}{(2\beta + \beta^2)^{3/2}} \right] \times \tan^{-1} \sqrt{\frac{2 + \beta}{\beta}} \tan \frac{\theta_m}{2} - (20_m) \right\} \quad (2)$$

$$\frac{\Delta_x}{F_x} = \frac{1}{Eb} \left[-2 \tan^{-1} \frac{\gamma - \beta}{\sqrt{1 - (1 + \beta - \gamma^2)}} + \frac{2(1 + \beta)}{\sqrt{2\beta + \beta^2}} \tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{2 + \beta}{\beta}} \times \frac{\gamma - \beta}{\sqrt{1 - (1 + \beta - \gamma^2)}} \right) \right] \quad (3)$$

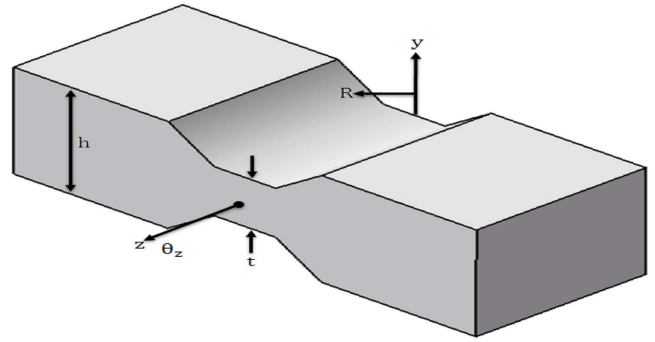


Fig. 1 Single linear spring model

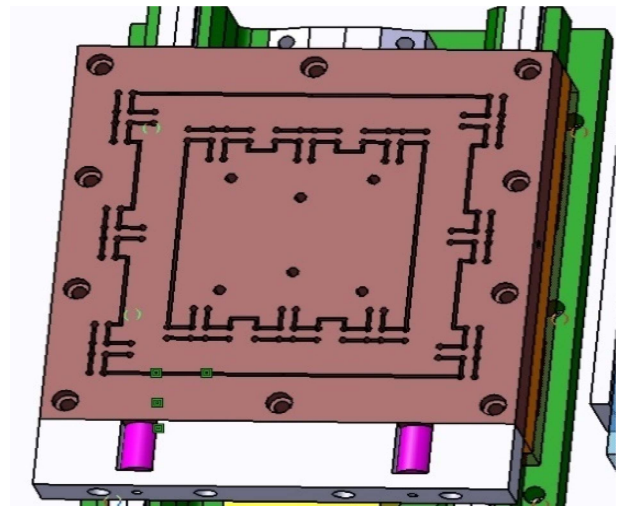


Fig. 2 Truss bar type motion guide

Shear compliance: shear modulus, $G = E/[2(1 + \nu)]$

$$\left[\frac{\Delta_y}{F_y} \right]_s = \frac{1}{Gb} \left[-\theta_m + \frac{2(1 + \beta)}{\sqrt{2\beta + \beta^2}} \times \tan^{-1} \sqrt{\frac{2 + \beta}{\beta}} \tan \frac{\theta_m}{2} \right] \quad (4)$$

2.2 Fine Servo 메카니즘

Fine Servo는 압전구동기의 변위에 의하여 유연힌지가 변형 함으로써 툴 홀더에 상대적인 변위가 유발된다. 이때 툴 홀더의 대변위는 각 압전구동기의 배열과 그 지점에서의 변위량으로 간단하게 구할 수 있고, Fig. 3은 Fine Servo를 나타내고 있으며, Fig. 4는 Dual Servo의 Diagram을 나타내고 있다.

Fine Servo에 가한 전압 입력과 그에 대한 Fine Servo의 출력 변위의 관계는 벡터 U_p , MU_p 를 다음 식(5)과 식(6)와 같이 정의한다.

$$U_p = [u_{p1} \ u_{p2} \ u_{p3} \ u_{p4} \ u_{p5}]^T \quad (5)$$

$$MU_p = [x_p \ x_{p1} \ x_{p2} \ z_{p1} \ z_{p2}]^T \quad (6)$$

이때 U_{pi} , MU_{pi} 는 각각 i 번째의 입력전압과 Fine Servo의 출력 변위를 나타낸다. 일반적으로 입력전압 U_p 와 Fine Servo의

Table 1 Material properties of flexure hinge

Material	Young's modulus [N/mm ²]	Stiffness [N/μm]	Poisson's ratio	Mass density [kg/mm ³]	Limit stress [N/mm ²]	
					Tension	Compression
AL7005	71,800	32.877	0.336	2.86×10 ⁻⁶	482.5	403.5

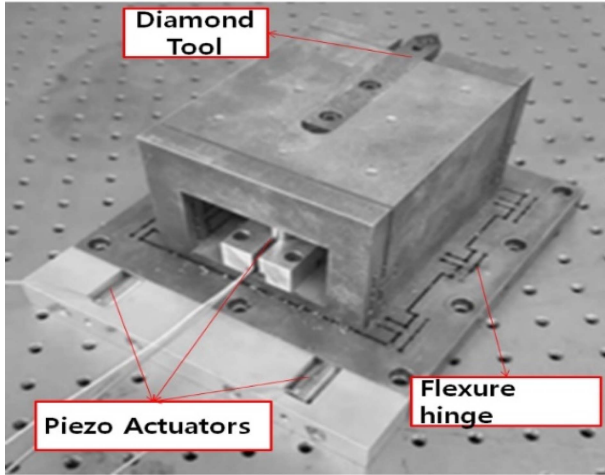


Fig. 3 Fine servo system

$$M = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 0 & -\frac{1}{d} & \frac{1}{d} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{d} & \frac{1}{d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_p \\ y_{p1} \\ y_{p2} \\ z_{p1} \\ z_{p2} \end{bmatrix} \quad (9)$$

식(7)과 식(8), 식(9)로부터 입력전압과 Fine Servo 톨 홀더의 상대변위와의 관계는 식(10)과 같이 정의된다.

$$MP_O(s) = {}_p^M J A(s) U_p(s) = {}_p^M J B G(s) U_p(s) \quad (10)$$

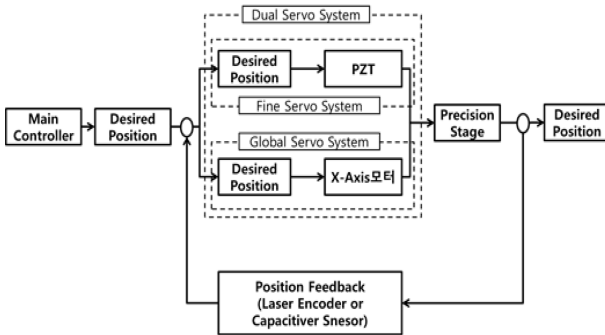


Fig. 4 Dual servo system diagram

출력 변위 MU_p 는 동적으로 결합되어 상호 영향을 주게 되며, 그 관계식은 식(7)과 같이 기술될 수 있다.

$$MU_p(s) = A(s)U_p(s) \quad (7)$$

$$MU_{p,i}(s) = \sum_{j=1}^5 a_{ij}(s)u_{pj}(s) \quad (i = 1,2,3,4,5)$$

이때 $a_{ij}(s)$ 는 j번째 인가한 전압과 i번째 출력 변위를 연결시켜주는 계수로 식(8)과 같이 표현된다.

$$a_{ij}(s) = b_{ij}g_{ij}(s) \quad (8)$$

b_{ij} 는 인가전압에 대한 Fine Servo의 변위의 정적이득을 나타내고 $g_{ij}(s)$ 는 동특성을 나타낸다. 또한 압전구동기의 변위 ($x_p, y_{p1}, y_{p2}, z_{p1}, z_{p2}$) 와 톨 홀더의 상대변위의 관계는 기하학적으로 식(9)와 같이 나타낼 수 있다.

3. 건식 냉각 시스템

3.1 건식 냉각 시스템 구성 및 Programming

열전소자를 활용한 건식 냉각시스템은 가공 시 발생하는 가공 발열 분석을 위해 IR Camera를 적용 가공 시 발생하는 온도의 최고온도를 분석하여 냉각시스템에 설정된 온도까지 Peltier로 건식 냉각하도록 시스템을 구성하였다. 가공 시 발생하는 온도는 IR Camera 측정으로 최고온도를 확보하며, IN 9212 서모커플 모듈로 화이트에 온도와 Peltier의 온도를 측정하여 실시간으로 보상하였다. 냉각시스템의 제어는 Labview로 제어하였다. Fig. 5는 건식 냉각시스템 구성을 나타내었다.

실시간 절삭 발열 측정 IR Camera는 FLIR사의 A35모델이고 사양은 Table 2와 같다. IR Camera와 Labview의 연동은 Gigabit Ethernet을 통하여 연동하고 Peltier의 온도와 외부 온도를 측정하기 위하여 NI9212 and TB9212 Thermocouple 보드를 활용하고 NI9482 Relay 보드로 회로의 안정성을 확보하였다. IR Camera와 Labview의 연동을 확인하고자 Gigabit Ethernet Test 프로그램을 Fig. 6은 실시간 절삭 발열 측정을 위하여 FLIR T640 IR Camera Test이며, Test 결과 온도 차이를 명암을 통하여 시각적으로 온도를 나타내고 계측한 값을 수치로 정확한 온도를 확인할 수 있다. Fig. 7은 건식 냉각시스템 메인 프로그램이고 Fig. 8은 건식 냉각시스템 User Interface이다.

건식 냉각시스템은 Peltier A와 Peltier B 두 개의 Peltier를 각각 개별 ON/OFF가 가능하도록 개발하였으며, IR Camera의 ROI Set은 점, 선, 사각, 원, 사다리꼴 등 다양한 측정 ROI를 구현하였다.

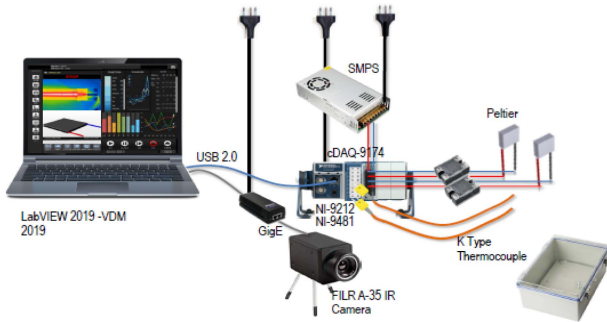
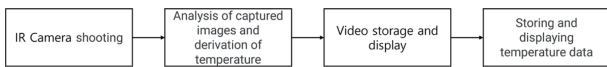


Fig. 5 Dry cooling system schematic

Table 2 FLIR T640 specifications

List	Specification
IR resolution [pixel]	320 × 256
Temperature range [°C]	-25~135, -40~550
Thermal sensitivity/NETD	50 mK @+30°C
Focus	Fixed
Data communication interfaces	Gigabit Ethernet, control and image
Size (L × W × H) [mm]	104 × 49.6 × 46.6



(a) Gigabit ethernet test labview



(b) IR camera image

Fig. 6 Gigabit ethernet test program block diagram

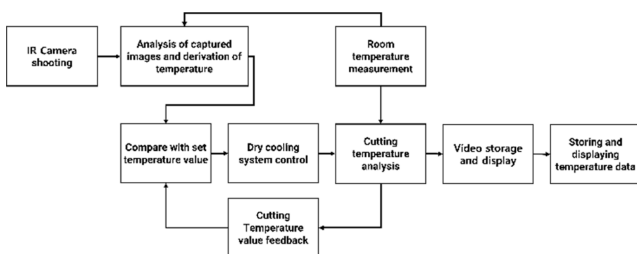


Fig. 7 Dry machining system block diagram

측정된 IR Camera Data는 최고점 온도를 그래프로 표현하고 Thermocouple Data는 Peltier의 온도와 바이트의 온도를 표기하여 열화상 온도와 비교를 통하여 Peltier의 On/Off 동작을 제어할 수 있도록 개발하였다.

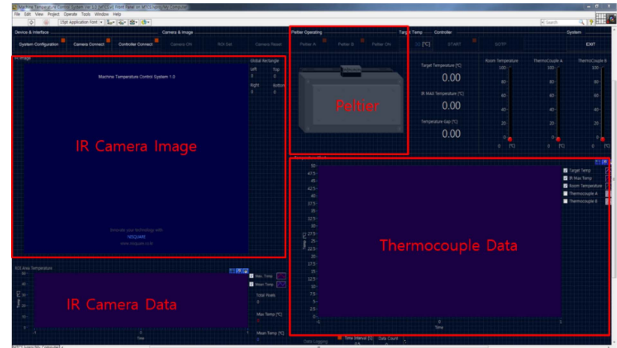


Fig. 8 Dry cooling system graphical user interface

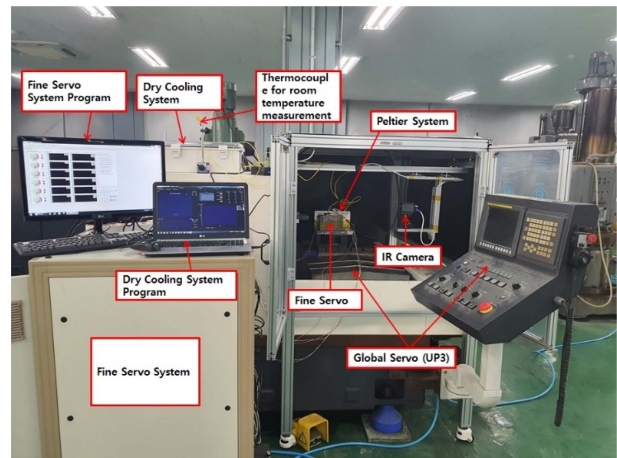


Fig. 9 CNC machine coordinate system with ECTS coordinate system

3.2 초정밀 가공 정밀도 및 건식 냉각 가공 실험

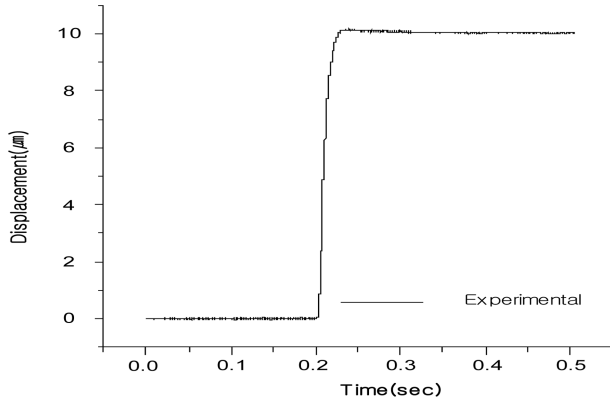
Fig. 9와 같이 실험장치를 구성하였다. Fine Servo System은 압전구동기에 전압을 인가하는 Amplifiers D/A Converters와 압전구동기를 센싱하는 광 피드백 포지션 컨트롤러, Fine Servo System 위치를 측정하는 Laser Interferometer와 진동과 온도를 보상해주는 환경보상장치가 장착되어있다.

Global Servo는 연구용장비인 UP3이며 1 μm의 정밀도를 갖는 초정밀 가공기이다.

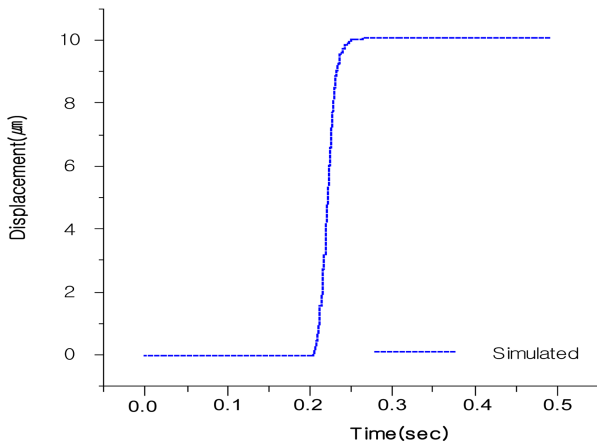
실험 장치는 UP3에 Fine Servo를 장착하고 Dry Cooling System을 적용하였으며 각 시스템의 제어는 별도 PC를 이용하여 제어하도록 구성하였다.

Figs. 10, 11, 12는 Global Servo의 스텝응답이다. 스텝응답은 본 시스템의 응답특성을 알아보기 위해서 10, 4, 2 μm 스텝을 주어 각각 그 응답을 관찰하였다. Fig. 12에서 볼 수 있듯이 Global Servo의 분해능이 2 μm로 나타나므로 응답특성은 목적 하고자 하는 Global Servo의 2 μm의 분해능을 충분히 구현하고 있다.

Figs. 13과 14는 듀얼 서보의 분해능 실험을 한 것이다. 앞서 실험했던 글로벌 서보의 분해능 실험과 비교한 결과 Fine Servo가 약 0.5 μm에서 ±10 μm까지 보상하였음을 알 수 있다. 위와



(a) Experiment



(b) Simulation

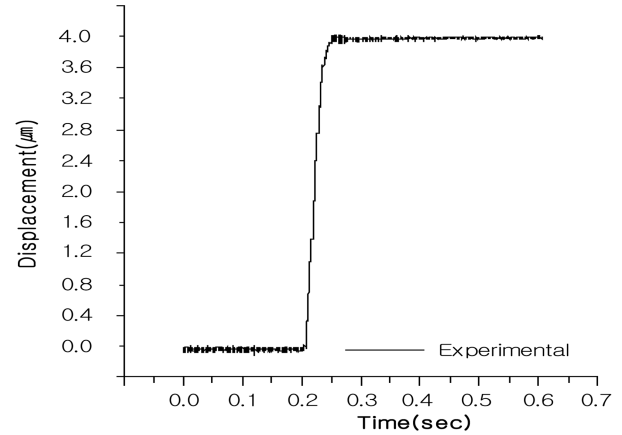
Fig. 10 10 μm step response of global servo

같이 실험을 통하여 얻은 본 기구의 분해능을 확인한 결과 ±10 μm 이하로 나타났다

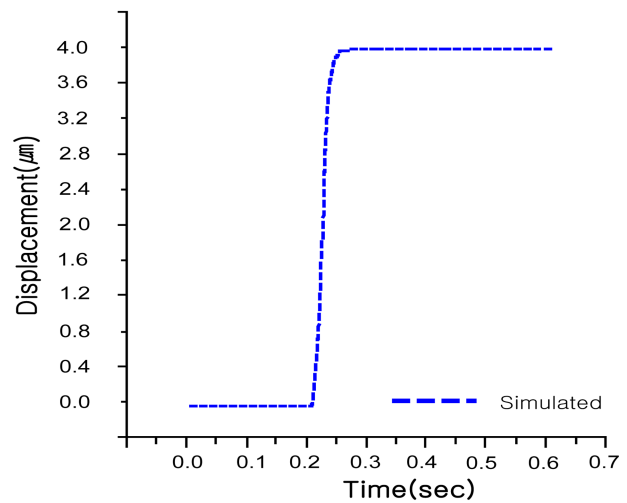
건식냉각 가공 실험은 절삭 발열을 확인하기 좋도록 아크릴 소재를 선정하였으며, 표면조도를 확보하기 위하여 8개의 Sample을 실험하였다. 실험 조건은 Table 3과 같으며 각 속도별 건식냉각 적용과 비적용 상태로 가공을 하여 표면조도를 비교 분석하였다. 또한, 가공용 바이트는 다이아몬드 바이트를 정밀 비구면 가공 특성에 맞추어 Included Angle를 90°, Radius 0.5 mm, First Clearance을 6°, Rake Angle을 0°로 설계 제작된 바이트이다. Fig. 15는 절삭 가공 시 적용할 다이아몬드 툴의 형상을 나타내고 있다.

실험은 건식냉각을 적용하지 않을 때와 적용 후로 나누어 동일 조건으로 진행하였으며, Fig. 16은 실시간 발열측정을 위한 적외선 열화상 카메라의 영상이며, Fig. 17은 냉각을 하지 않고 가공한 실험의 절삭 발열과 표면 거칠기를 나타내고 있다. Fig. 18은 건식냉각 시스템을 적용하여 냉각을 진행하며 가공한 실험의 절삭 발열과 표면 거칠기 나타내고 있다. 시험편의 표면 거칠기를 분석하였으며 측정 장비는 Kosaka 사의 DSF-1000 측정기를 사용하였다.

Table 4는 비냉각 시 가공시험 결과이며, Table 5는 건식냉각



(a) Experiment



(b) Simulation

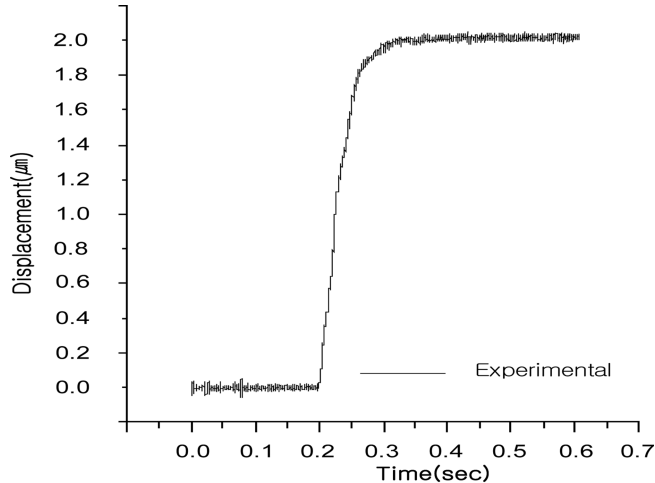
Fig. 11 4 μm step response of global servo

시 시험결과이다. Fig. 19는 시험한 아크릴 시험편으로 가공정밀도와 온도에 따라 아크릴 표면의 상태를 육안으로도 분별할 수 있다.

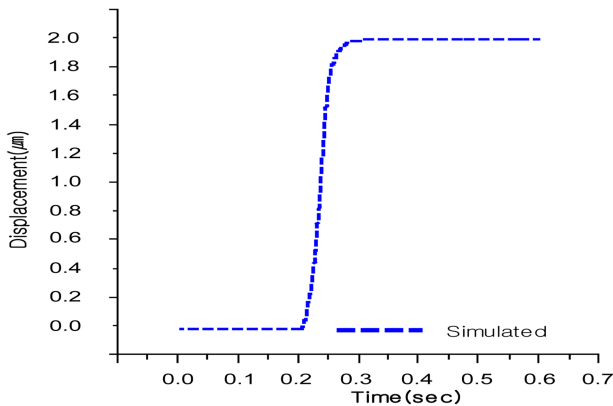
4. 결론

본 연구에서는 초정밀 가공을 위하여 Fine Servo를 가공 3분력의 힘에 대응하도록 설계하였으며 이를 이용한 Dual Servo를 개발하였다. 특히 절삭유를 활용하지 않는 건식냉각 시스템을 제시함으로써 앞으로 CNC 절삭가공 분야에서 환경 오염 문제를 억제할 수 있을 것이다. 본 연구에서 얻어진 결론은 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 듀얼 서보 구동실험을 수행한 결과 20 nm 이하의 분해능을 보여줌으로써 CNC 머신에서 제어하지 못하는 구간을 20 nm 이하 분해능 구현 가능하게 하였다. 이는 CNC 머신의 분해능을 20 nm로 상승시켰으며 Fine Servo의 미세 구동으로 에러를 제거함으로써 안정화된 제어를 할 수 있었다.



(a) Experiment



(b) Simulation

Fig. 12 2 μm step response of global servo

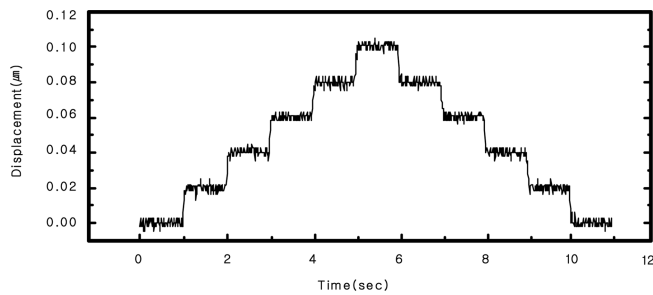


Fig. 13 Resolution experiment of X-axis dual positioning control

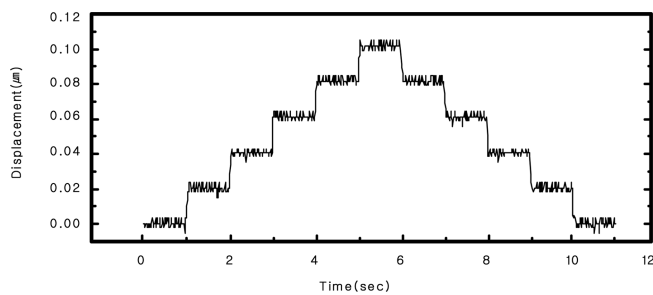


Fig. 14 Resolution experiment of Y-axis dual positioning control

Table 3 Spindle speed control machining condition

Spindle speed [RPM]	Feed speed [mm/min]	Depth of cut [μm]	Tool R [mm]
600	75	20	0.5
800			
1,000			
1,200			



Fig. 15 Diamond tools of fine servo

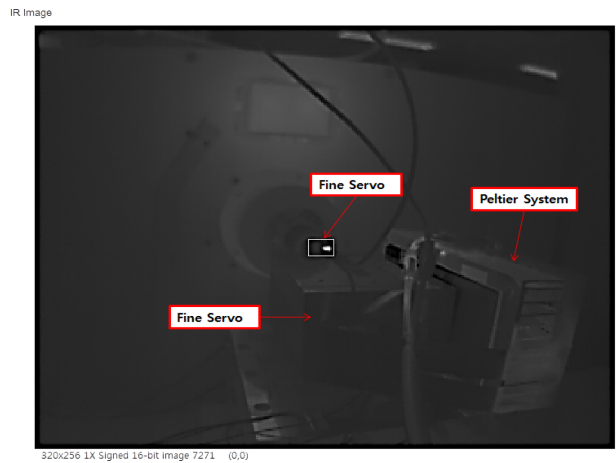


Fig. 16 IR camera image

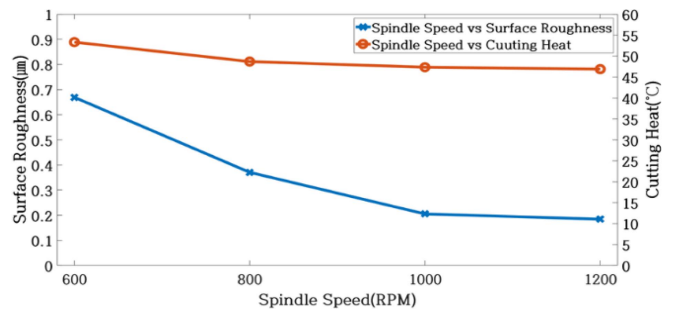


Fig. 17 Non-application of cooling cutting heat and surface roughness

2) 스핀들 속도제어 절삭실험에서 건식 냉각시스템 적용 시와 비적용 시의 절삭 발열을 정리한 결과 건식 냉각시스템 적용 시 32.67°C, 비적용 시 49.12°C로 나타났으며, 16.45°C의 차이를 보였다. 절삭온도 대비 표면 조도는 건식 냉각시스템 적용 시 0.0748 μm, 비적용 시 0.4065로 나타났으며, 0.3317 μm만큼 표면조도가 개선된 것을 확인할 수 있다.

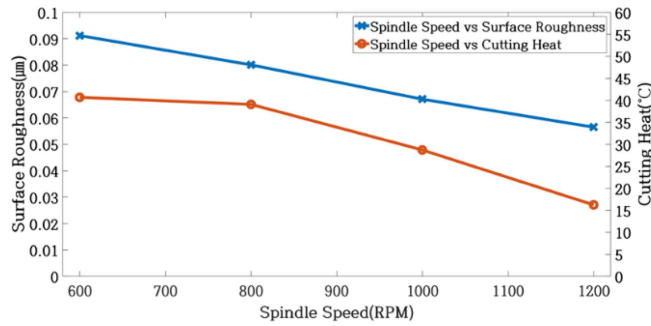


Fig. 18 Application of dry cooling system cutting heat and surface roughness

Table 4 Cutting heat and surface roughness by spindle speed when dry cooling system is not used

Spindle speed [RPM]	Cutting heat [°C]	Surface roughness [µm]
600	53.32	0.6691
800	48.68	0.3707
1,000	47.34	0.2052
1,200	46.88	0.1841

Table 5 Cutting heat and surface roughness by spindle speed when dry cooling system

Spindle speed [RPM]	Cutting heat [°C]	Surface roughness [µm]
600	40.68	0.0912
800	39.08	0.0801
1,000	28.72	0.0671
1,200	16.24	0.0565

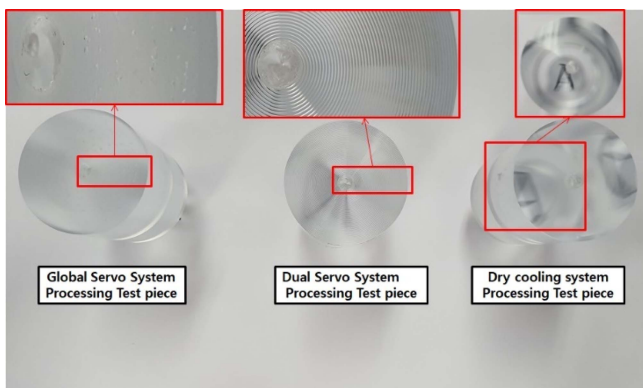


Fig. 19 Acrylic processing test piece

ACKNOWLEDGEMENT

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2022-00165745).

REFERENCES

- Geyl, R., (1994), Design and fabrication of a three-mirror, flat-field anastigmat for high-resolution earth observation, Space Optics 1994: Space Instrumentation and Spacecraft Optics, 2210, 739-746.
- Kim, J., Lee, H.-N., Kwac, L., Han, J., Cho, Y.-T., Jun, C.-G., (2000), Control performance evaluation of ultra precision Positioning apparatus, Proceedings of the ISIM, 252-255.
- Shiraishi, M., Uehara, K., (1979), In-process control of workpiece dimension in turning, Annals of the CIRP, 28(1), 333-337.
- Kim, H.-S., Kim, E.-J., (2003), Feed-forward control of fast tool servo for real-time correction of spindle error in diamond turning of flat surfaces, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 43(12), 1177-1183.
- Kohno, T., Okazako, Y., Ozawa, N., Mitui, K., Omoda, M., (1989), In-process measurement and a workpiece-referred form accuracy control system (WORFAC): Concept of the method and preliminary experiment, Precision Engineering, 11(1), 9-14. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0141635989900032>
- Peter, J., (1990), Diamond turning of nonrotationally symmetric surfaces, Ph.D. Thesis, North Carolina State University.
- Donaldson, R., Patterson, S., (1983), Design and construction of a large, vertical axis diamond turning machine, Contemporary Methods of Optical Manufacturing and Testing, 433, 62-67.
- Hiromu, N., (1994), Principles of precision engineering, Oxford University Press.
- Gan, S. W., Lim, H. S., Kim, H. W., M. Rahman, and Frank, Watt., (2007), A fine tool servo system for global position error compensation for a miniature ultra-precision lathe, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 47(7-8), 1302-1310.
- Yong, Y. K., Lu, T.-F., Handley, D. C., (2008), Review of circular flexure hinge design equations and derivation of empirical formulations, Precision Engineering, 32(2), 63-70.
- Henning, S., Linß, S., Zentner, L., (2018), detasFLEX-A computational design tool for the analysis of various notch flexure hinges based on non-linear modeling, Mechanical Sciences, 9(2), 389-404.
- Ding, B., Yang, Z.-X., Zhang, G., Xiao, X., (2017), Optimum design and analysis of flexure-based mechanism for non-circular diamond turning operation, Advances in Mechanical Engineering, 9(12), 1-10.
- Linß, S., Schorr, P., Zentner, L., (2017), General design equations for the rotational stiffness, maximal angular deflection and rotational precision of various notch flexure hinges, Mechanical Sciences, 8(1), 29-49.



Gyung-Il Lee

Assistant Professor in the Department of Liberal Majors, Songwon University. He is majoring in Mechanical Engineering and System Engineering. His current research is dual servo system for nano-level processing, and lightweight design by jointing of multi-material bonding.

E-mail: jjia789@songwon.ac.kr

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 각종 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 부정이 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 최종결정이 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

현승공학상

- 현승교육문화재단의 지원으로 현승공학상을 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 24 · Number 11 · November 2023

REGULAR PAPERS

On Accurate and Efficient Judgment Method of Milling Stability Based on Predictor–Corrector Scheme

W. Lou · G. Qin · X. Lai · Y. Hou 1915

Influence of Imbalance Factors Coupling with Manufacturing Error on the Rotational Accuracy of Aerostatic Spindle

D. Chen · P. Li · K. Sun · R. Pan · Y. Tang 1933

Study on Variable Parameter Helical Milling of TC4 Titanium Alloy Tube

A. Jiao · J. Yuan · Y. Zhang · J. Zhang · Y. Miao · G. Liu 1947

A Study on the Generation of Negative Tapered Holes in Laser Process of the Metal Material

S.C. Woo · J.H. Kim · J. Kim 1961

A Study of Ultrafast Ablation on ITO Thin Films with Wavelengths of 513 and 1026 nm for High Resolution Patterning

J. Choi · S.-H. Cho 1975

Tool Wear Reduction Using Directional Milling Considering Cutting Angle in Carbon fiber Reinforced Plastic Machining

G. Kim · H. Jo · J.S. Shin · B.-K. Min 1989

Disturbance Rejection Control Method Based on Variable Damping and Port Controlled Hamiltonian with Dissipation Model for Induction Drive Motor

B. Fan · G. Huang · L. Sun · Y. Zhao · H. Zhou · J. Wang 2009

Bifurcation and Chaotic Behaviors of a Passive Bipedal Walker with Leg Length Discrepancy and Unequal Leg Mass

J. Lee · K. Park 2021

Nonlinear Dynamic Characteristics Analysis of Planar Mechanism Multibody System Considering Lubrication Clearances

X. Chen · P. Pan · T. Wang 2033

Ankle Foot Orthosis for Patients with Drop Foot Using Shape-Memory-Alloy Actuators

B. Lee · J.S. Park · S. Park · C.H. Kim 2057

High Precision and Low Force Resonant Probe Based on Quartz Tuning Fork

Q. Huang · W. Wang · G. Wang · R. Cheng · L. Zhang · H. Li · R. Li 2073

Effects of Mid- and Low-Frequency Electromyostimulation for Prevention of Sarcopenia on Lower Extremity Muscles

J.W. Han · B.C. Cho · B.W. Jung · E.H. Pak · T.S. Bae 2083

Nondestructive Inspection of Directed Energy Deposited Components Using Scanning Acoustic Microscopy with Metalworking Fluids

S.-H. Park · S. Choi · K.-Y. Jhang · T. Ha 2099

Development of Additive Strategy Generator for Metal Additive Manufacturing Build Prediction Using Laser Path Generation Algorithm

B. Kim · S. Lee · J. Sung · J. Lee · M. Lee 2113

REVIEW

Additively Manufactured Lattice Structures and Materials: Present Progress and Future Scope

G.P. Borikar · A.R. Patil · S.B. Kolekar 2133

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 10 · Number 6 · November 2023

REGULAR PAPERS

A Novel Technique for Dressing Fixed Abrasive Lapping Pad with Abrasive Water Jet

Z. Wang · Y. Yang · Z. Zhang · M. Pang · M. Liang · L. Ma · J. Su 1351

An Analysis of the Uneven Tool Electrode Wear Mechanism in the Micro-electrical Discharge Machining Process

Z. Zou · X. Zhang · K. Chan · T. Yue · Z. Guo · C. Weng · J. Liu 1375

Comparison of Tool Wear, Surface Morphology, Specific Cutting Energy and Cutting Temperature in Machining of Titanium Alloys Under Hybrid and Green Cooling Strategies

M.K. Gupta · P. Niesłony · M.E. Korkmaz · M. Kuntoğlu · G.M. Królczyk · M. Günay · M. Sarikaya 1393

Energy Efficiency Assessment in Plunge-Face Grinding of Cemented Tungsten Carbide Cutting Inserts

L.A.S. Carreira · A. Hassui · C.E.H. Ventura 1407

Simple Fabrication of Transparent Triboelectric Nanogenerator Based on Coffee-Ring-Free AgNW Electrode via Spray Deposition with Surfactant

B. Kim · J.Y. Song · D.Y. Kim · J.G. Kim · J.-Y. Lee · D. Choi · S.M. Park 1417

Mechanisms of Droplet Formation and Deposition in Drop-On-Demand Needle-Valve Inkjets for Precision 3D Microprinting

J. Wang · M. Li · T. Nguyen 1433

A New Mechanical Cold Trimming Process Assisted by Dashed Lined Infrared Heat Treatment of Martensitic Steel Considering Energy Efficiency

T.-H. Kim · S.-H. Park · E.-H. Lee · Y.H. Kang · J.S. Chung · J. Ha 1447

Flashlight-Induced Explosive Chemical Reaction for Fabrication of Flameproof Nickel Electrode

T.H. Yun · N.B. Velhal · J. Ahn · D. Lee · T. Kim · J. Kim · C. Yim 1469

Collaborative Impact of Cryo-Treated Cutting Tool and Hybrid Milling Environment Towards Improved Sustainable Milling of ASTM F2063 Ni_{55.6}Ti_{44.4} Alloy

R. Davis · A. Singh · R.B.D. Pereira · R.M. Sabino · K. Popat · P. Soares · L.C. Brandão 1485

Development of a High-Frequency Discharge Power Source with Non-Equal Energy Relaxation Oscillator Circuit Applied to β -Ga₂O₃ Microstructure Array Wire Electric Discharge Machining

S.-T. Chen · S.-Y. Chen 1511

Efficient Solar Heat Absorption and Counter Passive Air Cooling Using Supersonically Sprayed rGO/AgNW Nanotextured Surface for Solar Devices

K. Jang · C. Park · T. Kim · A. Aldalbahi · M. El-Newehy · B.-H. Bang · S.S. Yoon 1529

High Performance Triboelectric Nanogenerator Based on Ultrastretchable Composite Electrode

J. Kim · H. Park · G. Kim · J.-H. Lee · J. Park · S.Y. Kim 1543

Energy-Saving Strategy for Speed Cruise Control Using Pulse and Glide Driving

T. Kim · W. Lee · D. Park · J. Jung · N. Kim 1553

Disassembly Process Planning and Its Lines Balancing Prediction

M. Aicha · I. Belhadj · M. Hammadi · N. Aifaoui 1565

Adhesion with Aluminum for Material Surfaces Additively Manufactured by Directed Energy Deposition

J.-Y. Jeong · H.-S. Kang · S.-H. Kim · K.-Y. Lee · D.-J. Kim · D.-S. Shim 1579

SHORT COMMUNICATION

A Novel Additive Texturing of Stainless Steel 316L Through Binder Jetting Additive Manufacturing

S. Dwivedi · A.R. Dixit · A.K. Das · A. Nag 1605

REVIEWS

A Review of Physics-based Models in Prognostics and Health Management of Laminated Composite Structures

A. Khan · M.M. Azad · M. Sohail · H.S. Kim **1615**

A State-of-the-Art Review on Recently Developed Sustainable and Green Cooling/Lubrication Technologies in Machining Metal Matrix Composites (MMCs)

R.A. Laghari · N. He · M. Jamil · M.I. Hussain · M.K. Gupta · G.M. Krolczyk **1637**

REVIEW PAPER

A Review of Recent Manufacturing Technologies for Sustainable Soft Actuators

M. Lalegani Dezaki · M. Bodaghi **1661**

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 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

International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Smart Technology

Volume 1 · Number 2 · July 2023

REGULAR PAPERS

Digital Twin Based Machining Condition Optimization for CNC Machining Center

B. Sim · W. Lee 115

Fiber Optic Sensor for Smart Manufacturing

F. Zhou · X. Fu · S. Chen · E. Kim · B.-G. Jun 125

Development of Melt-pool Monitoring System based on Degree of Irregularity for Defect Diagnosis of Directed Energy Deposition Process

J. H. Kong · S. W. Lee 137

A Design Optimization Framework for 3D Printed Lattice Structures

W. R. Jerin · S. J. Park · S. K. Moon 145

Surface Topography of Transparent Plate Using Fizeau Interferometer with Suppression of Intensity Modulation

S. Kim · Y. Kim · N. Sugita · M. Mitsuishi 157

REVIEWS

Smart Factory Transformation Using Industry 4.0 toward ESG Perspective: A Critical Review and Future Direction

H. Kim · Y.-J. Quan · G. Jung · K.-W. Lee · S. Jeong · W.-J. Yun · S. Park · S.-H. Ahn 165

Digitalization in Production Logistics: How AI, Digital Twins, and Simulation Are Driving the Shift from Model-based to Data-driven Approaches

Y. Jeong 187

AI-assisted Monitoring of Human-centered Assembly: A Comprehensive Review

V. Selvaraj · S. Min 201

Review on Machine Learning Based Welding Quality Improvement

I.-S. Kim · M.-G. Lee · Y. Jeon 219

Effectiveness of Mental Health Care by Using Machine Learning on Manufacturing Worker

J. Lim · S. Lee · J. Noh · W. Lee · P.-C. Su · Y.-J. Yoon 227

INDUSTRY CASE STUDY

An Exemplary Case of Industrial Metaverse: Engineering Product Demonstration Using Extended Reality Technologies

C.-H. Chu · D. K. Baroroh · J.-K. Pan · S.-M. Chen 243

2023년 사단법인 한국정밀공학회 임원

회장

이석우(한국생산기술연구원)

수석부회장

민병권(연세대학교)

부회장

안성훈(서울대학교) 이상원(성균관대학교) 배규호(DN솔루션즈) 김정(KAIST)

감사

김재환(인하대학교) 송창규(한국기계연구원)

총무이사

김동성(POSTECH) 김보현(송실대학교) 신현정(KAIST)

재무이사

김창주(한국기계연구원) 송용남(고려대학교) 정영훈(경북대학교)

편집이사

강현욱(UNIST) 고승환(서울대학교) 곽문규(경북대학교) 김규만(경북대학교) 김남근(서강대학교)
김동립(한양대학교) 김석민(중앙대학교) 김양진(부산대학교) 김영진(KAIST) 문두환(고려대학교)
박근(서울과학기술대학교) 박영빈(UNIST) 손정우(금오공과대학교) 안지환(POSTECH) 안형준(송실대학교)
이광일(경일대학교) 이창우(건국대학교) 이현섭(동아대학교) 장진아(POSTECH) 정구현(울산대학교)
정훈의(UNIST) 주백석(금오공과대학교) 천두만(울산대학교) 추원식(경상국립대학교) 황지홍(서울과학기술대학교)

사업이사

강태준(인하대학교) 권지연(동국대학교) 김무림(한국로봇융합연구원) 김승중(고려대학교) 김진호(영남대학교)
김태곤(한국생산기술연구원) 박성후(부산대학교) 박용재(강원대학교) 손용(한국생산기술연구원) 이경창(부경대학교)
이동원(전남대학교) 이문구(아주대학교) 이영수(삼성전자) 이인환(충북대학교) 이지혜(한국기계연구원)
임지석(영남대학교) 전용호(아주대학교) 주기남(조선대학교) 현승민(한국기계연구원) 홍성태(울산대학교)

기획홍보이사

노유정(부산대학교) 류시형(전북대학교) 이주연(서울과학기술대학교) 이현욱(한국철도기술연구원) 장원석(한국기계연구원)
최영재(한국생산기술연구원)

국제이사

Martin B. Jun(Purdue Univ.) Simon Park(Univ. of Calgary) 김대욱(Univ. of Arizona) 김범준(Univ. of Tokyo) 문승기(Nanyang Tech. Univ.)
민상기(Univ. of Wisconsin-Madison) 여운홍(Georgia Inst. of Tech.) 이동진(건국대학교) 이지현(Univ. of Calgary) 이차범(Texas A&M Univ.)
정용국(KTH Royal Inst. of Tech.) 정하승(Michigan State Univ.) 조영태(창원대학교) 차석원(서울대학교) 최재원(The Univ. of Akron)

대외협력이사

권석진(한국철도기술연구원) 김경동(한국공작기계산업협회) 김종혁(현대위아) 서진호(부경대학교) 이강재(DN솔루션즈)
조영환(LIG넥스원(주)) 조정대(한국기계연구원)

부문회장

김건희(한밭대학교) 진종한(한국표준과학연구원) 정재일(국민대학교) 이동윤(한국생산기술연구원) 박형욱(UNIST)
오정석(한국기계연구원) 김종백(연세대학교) 엄광문(건국대학교) 김호찬(안동대학교) 김영범(한양대학교)

특별회원사

다아아몬드

DN솔루션즈 (주)케이씨텍 화천기공(주) LIG넥스원(주) (주)키슬러코리아 (주)스맥 한국화낙(주) 신도리코(주) 현대위아(주) (주)이수페타시스 (주)화신정공

골드

(주)마리알로 (주)프로토텍 (주)에비던트코리아 핵사곤 (주)에이스나노퀸 (주)엔도로보틱스 지앤피테크놀로지(주)

패밀리

(주)웨이퍼펍 한국공작기계산업협회

Editor-in-Chief

김보현

송실대학교

bhkim@ssu.ac.kr

Editors

강성목
대구가톨릭대학교

고승환
서울대학교

곽문규
경북대학교

김동성
POSTECH

김양진
부산대학교

김호찬
안동대학교

문두환
고려대학교

손정우
금오공과대학교

박민수
서울과학기술대학교

박상후
부산대학교

박형욱
UNIST

안지환
POSTECH

이인환
충북대학교

이창우
건국대학교

이창환
서울과학기술대학교

이현섭
동아대학교

정구현
울산대학교

정영훈
경북대학교

주백석
금오공과대학교

진중환
한국표준과학연구원

천두만
울산대학교

추원식
경상국립대학교

황지홍
서울과학기술대학교

Members of Editorial Board

김기주
동명대학교

김무림
한국로봇융합연구원

김재열
조선대학교

김창주
한국기계연구원

박정재
한국표준과학연구원

박정환
영남대학교

박준
한국광기술원

배창호
경성대학교

손용
한국생산기술연구원

송철기
경상국립대학교

왕덕현
경남대학교

윤성호
금오공과대학교

윤해성
한국항공대학교

이광일
경일대학교

이봉기
전남대학교

이종길
안동대학교

장진아
POSTECH

전용호
아주대학교

정재일
국민대학교

조영학
서울과학기술대학교

최동휘
경희대학교

최영만
아주대학교

최정욱
중앙대학교

최진승
건국대학교

태기식
건양대학교

황영국
조선이공대학교

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 40, NUMBER 11/ November 2023

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

월간 · 제40권 제11호 [통권 제392호] · 비매품

등록일자 1987년 4월 25일

등록번호 서울 라 07037

인쇄일 2023년 10월 25일

발행일 2023년 11월 1일

발행인 이석우

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(한국정밀공학회지), IJPEM-ST 강수현 / (02)518-2928 / paper@kspe.or.kr, ijpem.st@kspe.or.kr

IJPEM(GT) 이성경 / (02)518-0723 / ijpem@kspe.or.kr

학술대회 김영심, 이성경 / (02)393-0725 / conf@kspe.or.kr, presm@kspe.or.kr

회계 김상원 / (02)393-0724 / account@kspe.or.kr

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



SCOPUS, KCI 등재 학술지

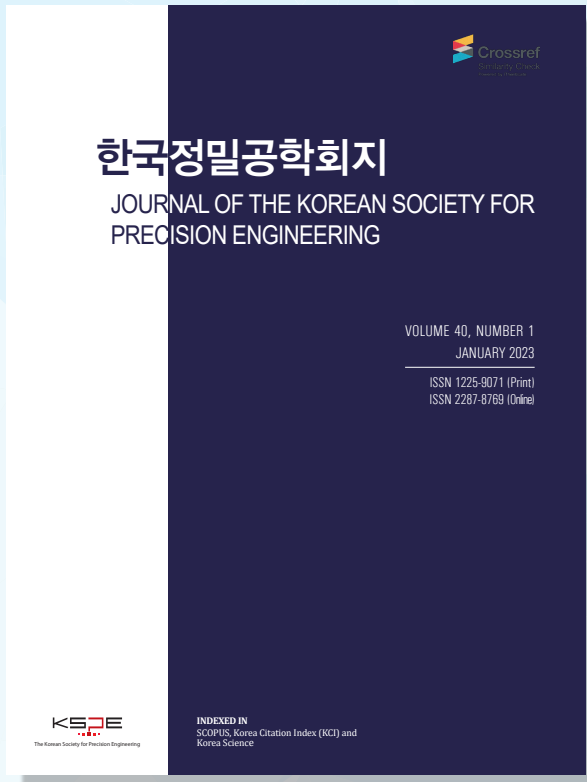
학회 회원님들의 많은 투고와 인용 부탁드립니다.

Scope

- 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

학술대회 Full Paper
논문을 투고 시 게재료가
면제됩니다.

논문 본문을 영문으로
작성하여 투고 시, 게
재료가 청구되지 않습
니다.



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

Editorial Board

• Editor-in-Chief

Bo Hyun Kim(Soongsil University)

• Editors

Jihwan An (Seoul National University of Science & Technology)

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)

Young Hun Jeong (Kyungpook National University)

Jonghan Jin (Korea Research Institute of Standards & Science)

Dong Sung Kim (POSTECH)

Ho-Chan Kim (Andong National University)

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)

In Hwan Lee (Chungbuk National University)

Hyung Wook Park (UNIST)

Min Soo Park (Seoul National University of Science & Technology)

Sang-Hu Park (Pusan National University)

Jung Woo Sohn (Kumoh National Institute of Technology)

AWARDS

한국정밀공학회지 최우수논문상

– 한국정밀공학회지에 발표된 논문 중 가장
탁월한 가치의 논문저자에게 포상

INDEXED IN

- SCOPUS
- Korea Citation Index (KCI)
- Korea Science

Submission to JKSP Search for JKSP

- <http://article.kspe.or.kr>
- <http://jkspe.kspe.or.kr>



+82-518-2928(T)

+82-518-2937(F)



paper@kspe.or.kr

<http://www.kspe.or.kr>



12F, SKY1004 Bldg., 50-1

Jungnim-ro, Jung-gu, Seoul,

04508, Republic of Korea

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"> • 한국정밀공학회지 최우수논문상 (상장, 상금) • 백암논문상 (상장, 상금) • 학술상 (상장, 상금) |

제 8 회 정밀공학 창의경진대회

The 8th Precision Engineering Creativity Competition

공모주제

초거대 인공지능과 Smart & Green 정밀공학 기술

미래운송(무인자동차/드론), 자율시스템(빅데이터, 인공지능), 메타버스(로보틱스, 사물인터넷), 첨단제조(적층제조/지속가능생산), 첨단바이오(나노바이오/헬스케어) 등 정밀공학 전 분야

접수기간

2023. 7. 3. 월 - 28. 금

최종 발표 및 시상

2023. 11. 17. 금 썬비치 삼척 호텔&리조트

주요 일정

07. 03.(월) ~ 28.(금)	연구 아이디어 제안서 접수
07. 31.(월) ~ 08. 31.(목)	중간보고서 접수
09. 08.(금)	본선 진출팀 선정
10. 02.(월) ~ 27.(금)	최종보고서 접수
11. 17.(금)	최종 발표 및 시상

※ 최종보고서 제출, 포스터 제작 및 발표는 본선진출자만 해당됩니다.
※ 위 일정은 사정에 따라 변경될 수 있습니다.

참가자격 및 접수방법

- 전국 대학(원)생 (2~4년제 포함, 대학원생 참여는 가능하나 전체 팀원 수의 1/3 이내여야 함)
- 2~6인 이하의 대학(원)생과 1인의 지도교수로 구성된 팀을 조직하여 신청 접수
- 단, 교외 경진대회에서 이미 입상한 주제에 대하여는 경연 자격이 부여되지 않음을 원칙으로 함. (* 개량·보완된 것은 심사 후 결과에 따라 허용 가능함)
- 경진대회 접수 메일(contest@kspe.or.kr) 주소로 제출내용 온라인 제출

제출내용

- 연구 아이디어 제안서(예선참가팀)
- 중간보고서(예선참가팀)
- 최종보고서(본선참가팀)
- 포스터 제작 및 발표(본선참가팀)

※ 제출 양식 및 세부 안내사항은 학회 홈페이지(www.kspe.or.kr) 참조해 주시기 바랍니다.
※ 중간보고서, 최종보고서 및 본선 발표 관련 제출내용 및 가이드라인, 평가기준 등은 추후 공지 예정입니다.

시상내역

대상	1팀	한국정밀공학회장상	(상금 100만원 상당)
최우수상	3팀	한국기계연구원장상 한국생산기술연구원장상 한국공작기계산업협회장상	(상금 50만원 상당)
우수상	4팀	특별회원기업 대표이사장상	(상금 25만원 상당)
장려상	8팀	한국정밀공학회장상	(상금 10만원 상당)

※ 위 상목 내역은 대회 준비 및 사정에 따라 변경될 수 있습니다.
※ 수상 이후라도 기존 연구와의 표절 및 중복의 사유가 발생할 경우 수상을 취소할 수 있습니다.

• 문의 한국정밀공학회 사무국 / Tel. 02-518-2928
E-mail. contest@kspe.or.kr / Homepage. www.kspe.or.kr

• 주최 **KSPE** 한국정밀공학회
Korean Society for Precision Engineering

• 주관 한국정밀공학회 교육위원회

• 후원 **KIMM** 한국기계연구원 **KITECH** 한국생산기술연구원 **Komma** 한국연구기술산업협회

DN 솔루션즈 **Sindoh** **LIG** 넥스월 **FANUC** 한국최대주조회사



두산공작기계의 새이름

DN SOLUTIONS의

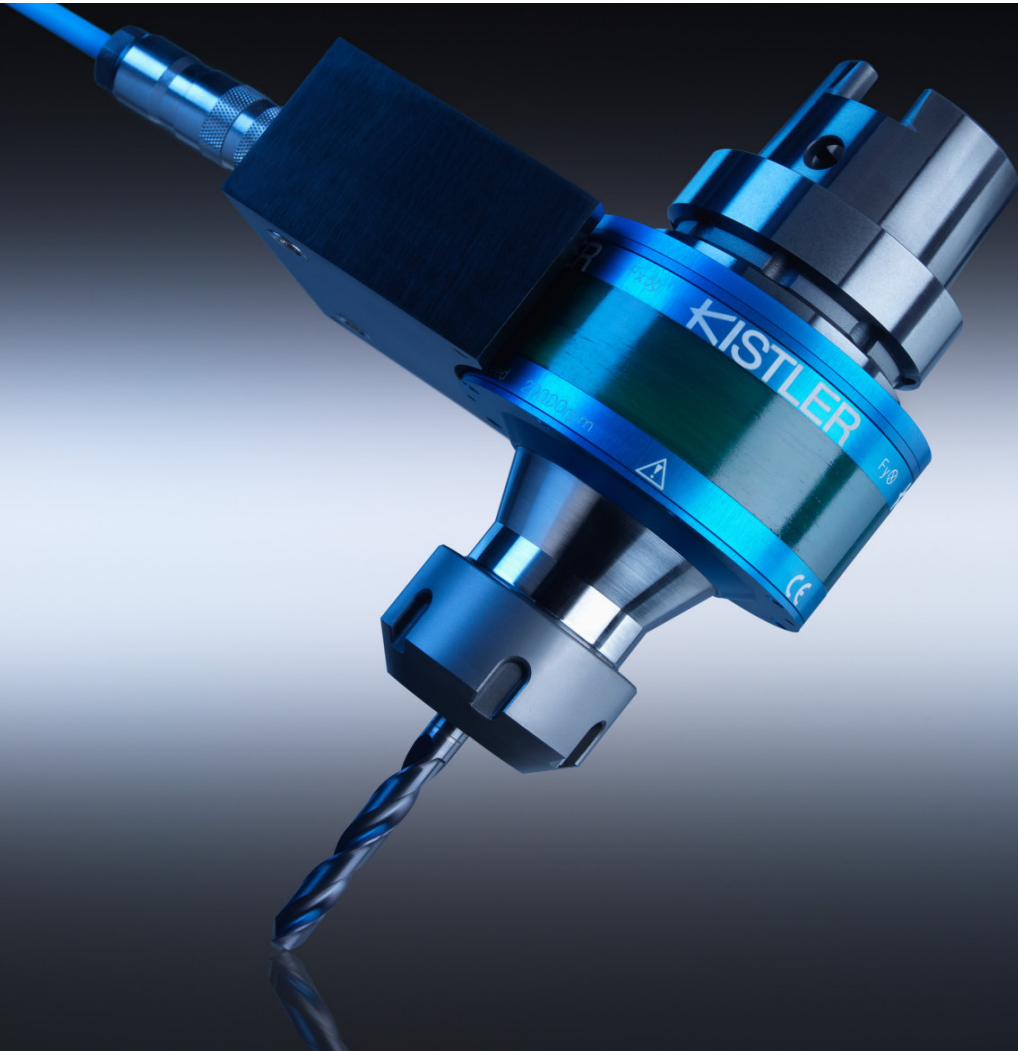
위대한 여정은 계속됩니다.

두산공작기계는 지난 50년 동안 Machine Greatness의 가치를 중심으로
공작기계 업계 글로벌 리더로서의 명성을 쌓아왔습니다.

이제 새로운 시대가 시작됩니다. DN 솔루션즈라는 새로운 이름과 함께
미래 지향적인 자동화, 소프트웨어 및 기술로 차별화된 공작 기계의 유산을 이어갈 것입니다.

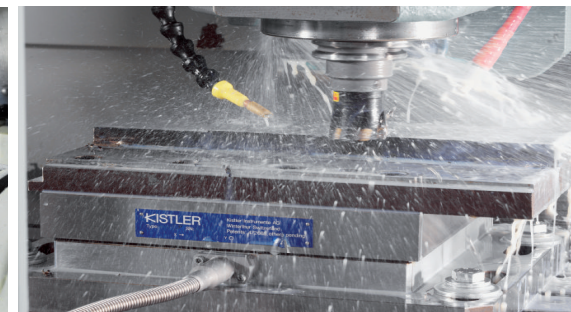
Manufacturing Solutions Leader, DN 솔루션즈

f You Tube  in
Learn more at [DN-SOLUTIONS.COM](https://www.dn-solutions.com)



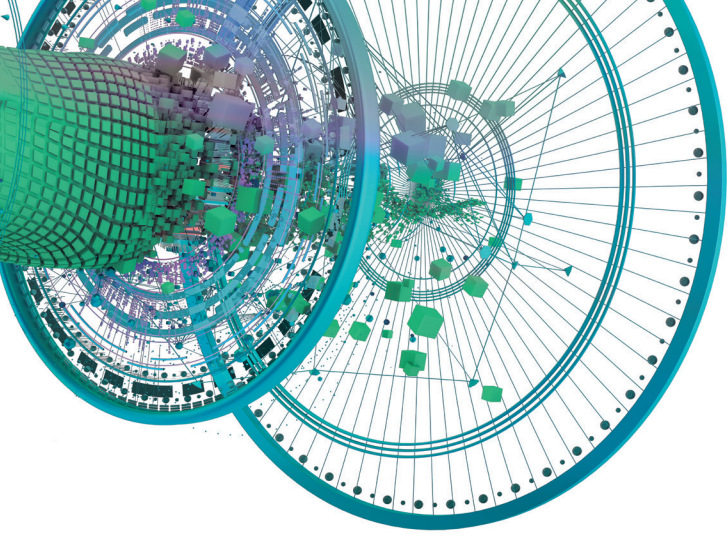
절삭력측정을위한공구동력계

Sensors and Solutions for Cutting Force Measurement



경기도 성남시 분당구 판교로 253 판교이노밸리 C동 702호 < Tel: 031-8045-0907 >

담당자: 최 장원 과장 , 010-2675-9466 www.kistler.com



Reinvent the wheel. And how you make it.



HP Jet Fusion 3D 프린팅 솔루션

HP Jet Fusion 5200 시리즈 3D 프린팅 솔루션



제조 예측 가능성



획기적인 경제성



새로운 응용 분야
및 시장으로 확장

HP Jet Fusion 4200 시리즈 3D 프린팅 솔루션



제조비용 최적화



높은 생산성



고품질 기능성 부품

HP Jet Fusion 500 시리즈 3D 프린팅 솔루션



설계 속도 향상 -
단시간에 제작
및 테스트
반복 수행 가능



복셀 제어를 사용
한 풀 스펙트럼 컬러
부품

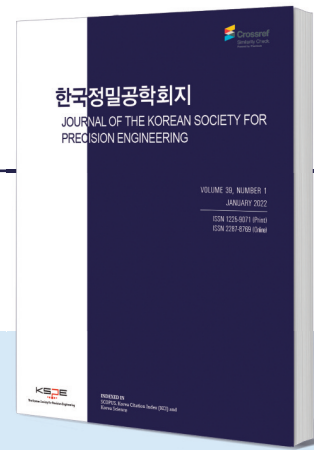


정밀한 기능성 부품
을 정확하게 제작

이제 이와 동일한 기술로 시제품을 제작하고 생산할 수 있습니다.
비즈니스의 경쟁력을 높이는 방법을 확인하세요: hp.com/go/3DPrint

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

* 국내외 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. * 특별화원사: 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

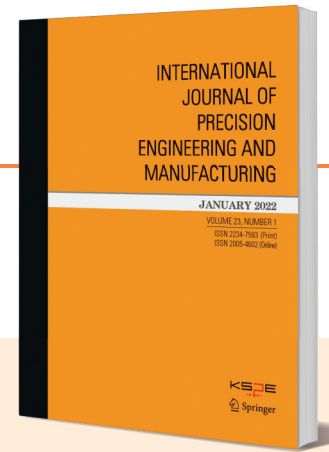
- Big Data Analytics and Informatics
- Sensors, Instrumentation and Process Monitoring
- Prognostics and Health Management (PHM)
- Industrial Internet of Things (IIOT)
- Industrial Artificial Intelligence
- Digital Twin, Cyber-Physical Systems (CPS) and Metaverse
- Augmented, Virtual and Extended Reality
- 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
- Machine Tools
- Measurements and Control
- Nano/Micro Technology
- Robotics and Automation
- Bio Health
- Manufacturing Systems
- Additive Manufacturing
- Design and Materials

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
- Design and Manufacturing of Green Products
- Manufacturing of New and Renewable Energy Devices
- 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

한국정밀공학회

KSPE 2023 Autumn Conference

2023 추계학술대회

2023. 11/15 WED - 17 FRI | **썰비치 삼척** (강원도 삼척시)

▶ 주요일정 Important Date

200단어 초록제출 마감 2023. 9. 15 FRI

초록채택 통지 발송 2023. 10. 2 MON

발표자 사전등록 마감 2023. 10. 10 TUE

▶ 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

KSPE 2023 추계학술대회 문의처

한국정밀공학회 사무국 (02)518-0722

프로그램, 논문 발표문의 : conf@kspe.or.kr, (02)393-0725

회원, 회계, 등록문의 : account@kspe.or.kr, (02)393-0724

주최 및 주관 **KSPE** 대한 한국정밀공학회
Korean Society for Precision Engineering

**K-Precision
Smart & Green**

2023년 국내/국제학술대회 일정 안내

한국정밀공학회

2023

KSPE 2023
Spring
Conference

춘계학술대회

2023.
5. 10(수) - 12(금)

라마다프라자제주호텔
(제주도 제주시)

International Conference on
Precision Engineering and Sustainable Manufacturing

PRESM 2023

2023. 7. 16(일) - 21(금)

Bankoku Shinryokan
Okinawa, Japan

한국정밀공학회

2023

KSPE 2023
Autumn
Conference

추계학술대회

2023. 11. 15(수) - 17(금)

솔비치삼척 리조트
(강원도 삼척시)

PIFOC Objectives Scanner



- 피에조 액추에이터를 사용하여 빠른 응답 시간 및 긴 수명
 - Z축으로 100, 400, 800 μ m 의 이동 범위
 - 서브나노미터 분해능으로 정밀한 스캐닝 가능
 - Zero-play flexure guides로 높은 가이드 정확도 보장
 - Capacitive sensors로 직접 위치 측정: 높은 선형성
 - \varnothing 29 mm의 넓은 애퍼처
- >> 현미경, 3-D 이미징, 반도체 테스트, 생명공학, 오토포커스 시스템 등

적용 분야



+ AFM, SEM, TEM, LSFM 등 현미경의 고정밀 Z-focus 포지셔닝에 적합!

