

# 한국정밀공학회지

JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR  
PRECISION ENGINEERING

VOLUME 40, NUMBER 7

JULY 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**  
Kyungsoong 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-II 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 7 / July 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 July 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](mailto:paper@kspe.or.kr) / <http://www.kspe.or.kr>

**Printed by** Hanrimwon Co., Ltd.

**Copyright** © The Korean Society for Precision Engineering

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

## 목차

특 집 주제: 스마트/디지털 헬스케어 기술  
책임편집인 : 김병희(강원대학교)

- 511 OpenCV와 모션 캡처를 이용한 어깨관절 가동범위 측정 신뢰도 검증  
조근식, 조영준, 최인식, 송치연, 염성환, 장웅기, 박희원, 김현욱, 하석진, 김병희, 박용재
- 519 딥러닝 기반 발가락 근력 및 힘 안정성을 이용한 낙상 위험도 예측: 예비실험  
김진선, 최성운, 금창엽, 이재희, 장웅기, 임광석, 이형석, 김병희, 윤태진
- 527 랜덤포레스트를 활용한 필드하키 포지션 분류 가능성 분석  
김지웅, 이승훈, 정희덕
- 533 OpenCV를 이용한 부위별 안면마비 등급 측정 시스템 설계  
기범근, 장웅기, 박용재

## 일 반

- 539 PEMFC용 MEA의 가압 공정을 통한 전기화학적 저항 변화 연구  
권예림, 송동근, 유호준, 장계은, 이영조, 김정수, 전지웅, 금다혜, 조구영
- 545 유화 분석을 위한 현미경 이미지의 다중 초점 기법 연구  
김형태, 이덕연, 최동운, 강재현, 이동욱
- 553 파킨슨병 환자의 임상평가척도와 관성신호 특성 간 상관성 분석  
김태희, 조하은, 최희우, 최평화, 이원재, 양희승, 심우섭
- 563 고속 조건에서 테이퍼 롤러 베어링에 적용되는 리테이너의 특성에 관한 연구  
김강석, 이경구, 이득우
- 571 생체모방형 UAM 블레이드의 공력 소음 특성에 관한 연구  
손창호, 김상현, 송지훈, 이동렬
- 581 DED 공정을 이용한 직선형 손상부 보수 시 기저부 끝단 길이와 경사각에 따른 보수부 인근 잔류 응력 및 변형 특성 분석  
임성훈, 이광규, 안동규

# JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR PRECISION ENGINEERING

VOLUME 40, NUMBER 7 / July 2023

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

## CONTENTS

### SPECIAL Title: Smart/Digital Healthcare Technology

Guest Editor: Byeong Hee Kim (Kangwon National University)

- 511 Reliability Verification of Shoulder Joint Range of Motion Measurement Using OpenCV and Motion Capture  
Geun Sik Cho, Young Jun Cho, In-Sik Choi, Chi-Yeon Song, Seong-Hwan Yeom, Woong Ki Jang, Hee-Won Park, Hyun-Ouk Kim, Suk-Jin Ha, Byeong Hee Kim, and Yong-Jai Park
- 519 Prediction of Falls Risk Using Toe Strength and Force Steadiness based on Deep Learning: A Preliminary Study  
Jin Seon Kim, Seong Un Choi, Chang Yeop Keum, Jaehee Lee, Woong Ki Jang, Kwang Suk Lim, Hyungseok Lee, Byeong Hee Kim, and Tejin Yoon
- 527 Analysis of the Possibility of Classifying Field Hockey Positions Using Random-forest  
Ji Eung Kim, Seung Hun Lee, and Hoi Deok Jeong
- 533 Design of Facial Paralysis Class Measurement System Using OpenCV  
Beom Geun Ki, Woong Ki Jang, and Yong-Jai Park

### REGULAR

- 539 A Study on Electrochemical Resistance Change through the Pressurization Process of MEA for PEMFC  
Ye Rim Kwon, Dong Kun Song, Ho Jun Yoo, Gye Eun Jang, Young Jo Lee, Jung Soo Kim, Ji Woong Jeon, Da hae Guem, and Gu Young Cho
- 545 A Study on the Multi-focus Method of Microscopic Images for Oil-painting Analysis  
Hyung Tae Kim, Duk-Yeon Lee, Dongwoon Choi, Jaehyeon Kang, and Dong-Wook Lee
- 553 Correlation Analysis between Clinical Rating Scales and Inertial Signal Features in Parkinson's Disease Patients  
Tae Hee Kim, Ha Eun Jo, Hui Woo Choi, Pyoung-Hwa Choi, Won Jae Lee, Hee Seung Yang, and Woo Sub Sim
- 563 A Study on the Characteristics of the Retainer applied to Taped Roller Bearings under High Speed Operating Condition  
Kang Seok Kim, Kyoung Ku Lee, and Deug Woo Lee
- 571 A Study on Aerodynamic and Acoustic Characteristics of Blades by Biomimetic Design for UAM  
Chang Ho Son, Sang Hyun Kim, Jihun Song, and Dong-Ryul Lee
- 581 A Study on the Effects of Edge Length and Substrate Slope on Residual Stress and Deformation Characteristics in the Vicinity of the Repaired Region for Straight Damaged Region Repair Using a DED Process  
Sung Hoon Yim, Kwang Kyu Lee, and Dong-Gyu Ahn

# Topical Issue Articles

Volume 40 Number 7  
July 2023

책임편집인  
김병희  
강원대학교



## 스마트/디지털 헬스케어 기술

### Smart/Digital Healthcare Technology

- (1) OpenCV와 모션캡처를 이용한 어깨관절 가동범위 측정 신뢰도 검증
- (2) 딥러닝 기반 발가락 근력 및 힘 안정성을 이용한 낙상 위험도 예측: 예비실험
- (3) 랜덤 포레스트를 활용한 필드하키 포지션 분류 가능성 분석
- (4) OpenCV를 이용한 부위별 안면마비 등급 측정 시스템 설계

스마트 헬스케어(Smart Healthcare) 혹은 디지털 헬스케어(Digital Healthcare) 기술은 개인의 건강과 의료에 관한 정보, 기기, 시스템, 플랫폼을 다루는 산업분야로서 IoT와 데이터 분석기술 및 클라우드가 융합된 정밀 의료서비스의 일종이다. 휴대형(Portable), 웨어러블(Wearable), 센서의 주변설치(Ambient-Installed) 방식 등으로 클리닉, 생활, 체육활동, 자동차 등에서 인간의 생활습관, 생체정보, 의료정보, 유전체정보 등을 실시간 수집, 모니터링하고 빅데이터 기술, 인공지능 기술, 가상현실 기술 등의 기술 등을 통해 새로운 지식과 정보를 창출해내는 기술을 포괄적으로 일컫는다.

본 특집 논문은 정밀공학과 빅데이터, 인공지능을 기반으로 하는 4편의 스마트/디지털 헬스케어 기술 분야 논문을 수록하고 있다. 이 논문들은 정밀 의료, 스포츠 과학 등에서 모션 캡처, 카메라 등의 비전 시스템을 사용하여 획득한 이미지 데이터를 OpenCV(Open Source Computer Vision Library)와 딥러닝(Deep Learning), 머신러닝(Machine Learning) 등의 인공지능 기술을 활용하여 분석하고 적용한 기술적 특성을 가지고 있다. 게재된 연구결과들은 컴퓨터비전 기반 스마트헬스케어 시스템 개발의 기술적 방향을 제시하고 해당 분야의 다양한 확장성을 보여주고 있어 그 의미가 크다고 할 수 있다.



# • 특집 • 스마트/디지털 헬스케어 기술(Smart/Digital Healthcare Technology) OpenCV와 모션 캡처를 이용한 어깨관절 가동범위 측정 신뢰도 검증 Reliability Verification of Shoulder Joint Range of Motion Measurement Using OpenCV and Motion Capture

조근식<sup>1</sup>, 조영준<sup>2</sup>, 최인식<sup>1</sup>, 송치연<sup>1</sup>, 염성환<sup>1</sup>, 장웅기<sup>1</sup>, 박희원<sup>3</sup>, 김현욱<sup>1</sup>, 하석진<sup>1</sup>, 김병희<sup>1</sup>, 박용재<sup>1</sup>#  
Geun Sik Cho<sup>1</sup>, Young Jun Cho<sup>2</sup>, In-Sik Choi<sup>1</sup>, Chi-Yeon Song<sup>1</sup>, Seong-Hwan Yeom<sup>1</sup>, Woong Ki Jang<sup>1</sup>,  
Hee-Won Park<sup>3</sup>, Hyun-Ouk Kim<sup>1</sup>, Suk-Jin Ha<sup>1</sup>, Byeong Hee Kim<sup>1</sup>, and Yong-Jai Park<sup>1</sup>#

1 강원대학교 대학원 스마트헬스과학기술융합학과 (Department of Smart Health Science and Technology, Graduate School, Kangwon National University)  
2 강원대학교 대학원 기계융합공학과 (Department of Mechanical Convergence Engineering, Graduate School, Kangwon National University)  
3 강원대학교 의과대학 재활의학교실 (Department of Rehabilitation Medicine, School of Medicine, Kangwon National University)  
# Corresponding Author / E-mail: yjpark@kangwon.ac.kr, TEL: +82-033-250-6371  
ORCID: 0000-0002-8830-3270

KEYWORDS: OpenCV (영상 인식), Motion capture (모션 캡처), Rotator cuff tear (회전근개 손상), Adhesive capsulitis (유착성관절낭염), Self-diagnosis (자가진단)

*As the population ages, the concept of active seniors has been emerging recently. Among various body parts that are cared for by an active elderly, the shoulder has a unique exercise structure. Therefore, the incidence of shoulder injuries might be high. In the case of a shoulder disease, the method of measuring the movement angle of the shoulder is mainly used. To measure the movement angle of a shoulder accurately, a goniometer is used. In addition, we suggested self-diagnosis, believing that if shoulder disease could be detected early through self-diagnosis, rapid treatment will be possible. This paper measured and compared shoulder angles with the goniometer, OpenCV, and motion capture systems to determine measurement errors between them. Through experimental results of this paper, the possibility of self-diagnosis with precise measurement of the movement angle of a shoulder oneself with a goniometer was confirmed even if the expert could not measure the shoulder angle.*

Manuscript received: April 24, 2023 / Revised: April 24, 2023 / Accepted: June 8, 2023

## 1. 서론

선진국들은 고령화 사회로의 빠른 진입으로 인하여 고령층이 과거보다 경제력이 높은 노인의 비중이 증가하고 있다. UN의 정의한 고령화에 따르면 총 인구수 대비 65세의 인구를 비율로 나뉘서 7%를 넘기면 고령화 사회라고 하였으며 14%를 넘길 시 고령화 사회, 20%를 넘기게 될 시 초고령화 사회라고 정의하였다[1,2]. 과거 기성세대보다 경제력이 증가한 노인들은 다양한 여가활동을 즐기며 이 생활을 유지하기 위하여 건강에 관한 관심을 가진다. 이러한 노인들을 액티브 시니어(Active-senior)라

정의한다. 액티브 시니어는 정년퇴직을 한 후 시간적, 경제적인 여유가 있어 다양한 사회활동을 참여하는 생활을 하는 50-60대의 세대를 뜻한다. 이전 실버 세대와 구분이 되는 특징이 바로 소비이며 문화생활과 여가활동에 적극적이다[3]. 나이가 들면서 사람의 신체능력은 떨어지게 되며 다양한 질병에 걸리기 쉬우므로 이러한 사람들은 여러가지 다양한 활동을 하기 위하여 과거의 세대보다 건강을 관리하는 것에 신경을 쓰고 있다. 연령이 증가함에 따라 빈도가 늘어나는 대표적인 질병은 관절 질환, 고혈압, 심장병, 치매, 근골격질환 등이 있다. 이중 근골격질환은 퇴행성 질환으로써 인구의 상당수가 겪고 있으며 관절연골의

손상과 염증으로 통증이 발생하는 골관절염, 힘줄이나 인대의 손상과 파열, 허리 추간관 탈출에 의한 허리통증 및 신경 손상, 운동 부족과 활동 제한으로 인한 근육 감소 현상인 근감소증 등을 포함한다. 근골격질환은 질환자의 삶의 질을 떨어뜨리며 확실한 치료법이 없는 경우가 많아서 천문학적인 치료비용 지출과 근로일수손실 등 사회경제적인 영향을 끼친다. 따라서 근골격 질환을 예방하고 조기에 치료하기 위한 노력이 다방면에서 진행되고 있으며 개인 각자가 부상과 근골격의 과사용을 피하며 적절한 활동의 유지를 통해 퇴화를 방지하는 것이 매우 중요하다[4]. 이러한 근골격 질환에 쉽게 이환되는 부위는 인체에서 매우 다양하나 그 중에서도 대표적인 부위로서 어깨관절을 들 수 있다. 어깨관절은 자유도가 높은 독특한 구조로 이루어져 있어 평생 시 움직일 수 있는 가동범위가 다른 관절에 비해 매우 크지만 반면에 한번 손상되면 자연 회복이 어려워 재활에 많은 시간이 필요하다. 일반적으로 일반인들도 어깨관절의 통증을 겪는 일은 평생에 매우 흔하며 한번 이환되면 일과 여가 활동을 수행할 수 없게 되어 삶의 질에 큰 영향을 주고 사회적 손실을 가져온다[5].

대표적으로 흔한 어깨 관절 질환들은 유착성관절낭염(오십견), 회전근개(Rotator Cuff)의 손상(건증 또는 파열), 상완골목(Neck) 또는 대관절(Greater Tuberosity)에 많이 발생하는 골절, 어깨 관절에 침범되는 류마티스관절염, 근막의 통증, 저림 증상 등을 유발하는 말초신경의 포착과 손상 등이 있다[6]. 어깨충돌증후군의 경우 흔하게 삼각근 쪽에서 통증이 발생하게 되고 상완부까지 통증이 이어져 60도에서 120도까지 거상을 할 시 통증으로 인한 운동 제한이 될 수 있다. 또한, 후방에 위치한 관절낭은 구축이나 유착이 있는 경우가 많다. 이에 내전과 내회전의 운동이 제한될 수 있다. 회전근개 파열의 경우 회전근의 힘줄 중에서 하나 이상의 근육이 상완골에서 찢어지거나 아예 떨어져 분리될 때 발생한다. 회전근개 파열은 나이가 들수록 유병률이 증가하며 증상이 있는 환자들은 일반적으로 우울증과 불안, 수면, 업무, 여가 및 심리, 사회적 기능에 영향을 받게 된다[7-9].

이러한 다양한 질환들로 인해 어깨의 기능은 제한을 받게 되는데 특히 관절가동범위(Range of Motion, ROM)의 감소가 나타나는 경우 환자는 심한 불편을 겪게 되고 일상생활에 제약을 받는 경우도 나타난다. ROM의 감소는 특히 회전근개 파열과 유착성 관절낭염에서 흔한데 회전근개 파열의 경우 능동적 ROM, 즉 스스로의 힘으로 관절을 움직일 수 있는 범위가 줄어들게 되며 유착성 관절낭염의 경우에는 능동적 ROM뿐만 아니라 수동적 ROM 즉, 타인이 어깨를 움직여주는 경우에도 가동 범위에 제한이 발생하는 차이가 있다.

따라서 어깨 관절의 이상이 발생할 시 ROM의 변화를 측정하는 것은 매우 중요한데 기본적인 방법은 고니오미터를 이용하는 것이다[10-13]. 고니오미터로 측정된 ROM을 정상범위와 비교하며 진단에 활용하거나 반대로 치료중인 환자의 회복 정도를 파악하여 재활에 응용하기도 한다[14]. 고니오미터를

활용한 ROM 측정 이외에도 다양한 진단 방법이 어깨 질환의 검사에 사용되고 있는데 의료현장에서 활발히 사용 중인 X-ray 나 자기공명영상검사 등이 대표적이고[15,16], 모션 센서를 사용하여 어깨의 움직임을 입체적으로 파악하는 방법도 사용되고 있다[17-22].

그러나 고니오미터를 이용한 측정에는 숙련된 검사자가 필요하며 모션센서 등 다른 방법도 장비의 부착과 활용에 타인의 도움이 필요하다. 따라서 의료진이나 타인의 도움 없이 스스로 회복을 위해 운동 재활을 해야 하는 경우 환자가 혼자서 스스로의 어깨 관절 ROM을 파악하는 방법으로서 적용이 곤란한 대신 모션 캡처를 활용하는 방안이 제시되고 있다. 과거에는 모션 캡처를 위해 전용 마커를 신체에 부착하여 이의 움직임을 광학적으로 추적하는 방식이 주로 연구되었으나[23-26], 최근에는 AI 기반 CNN 알고리즘이나 OpenCV 기반 영상처리를 활용하여 마커가 없이도 ROM을 측정할 수 있는 방법이 활용되고 있다[27-29].

본 연구에서는 어깨 관절 질환의 진단과 치료, 재활에 필요한 어깨 관절 ROM을 고니오미터, OpenCV, 모션 캡처 시스템으로 측정하고 각각의 결과를 비교하여 OpenCV, 모션 캡처 시스템을 통한 ROM 측정의 신뢰도를 확인하고 향후 자가진단이나 원격의료 등의 용도로 사용될 수 있는지 그 가능성을 확인하고자 하였다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 연구 목표

본 연구에서는 서론에서 설명한 대표적인 어깨 퇴행성 질환인 회전근개 파열과 유착성 관절낭염 등에서 나타나는 어깨 운동 범위 감소의 특징을 잘 파악할 수 있도록 다양한 선행 연구에서 제시된 여러 측정 방식들을 확인하여 이를 토대로 연구를 진행하였다. 특히 몸의 움직임 각도 측정을 위한 여러 실험 방식 중에서 카메라를 통해 실시간 비전으로 검사하기 위한 OpenCV와 모션 캡처 시스템을 이용하였다. 실제 회전근개 파열 질환이 있는 검사 대상자와 질환이 없는 정상인 대상으로 각각 측정을 진행하며 먼저 고니오미터로 측정된 데이터를 기준으로 OpenCV와 모션 캡처 시스템을 통해 얻어진 데이터의 정확성을 검증하고자 하였다.

### 2.2 측정 장비와 측정 방법

본 논문에서의 실험에 사용한 장비는 OpenCV를 적용한 라즈베리파이 4B와 라즈베리파이 카메라 모듈과 OptiTrack社の 모션 캡처 시스템이다.

앞서 설명한 바와 같이 어깨의 회전근개에 파열이 있는 대상자의 어깨 움직임 각도와 특별한 증상이 없는 사람의 어깨 움직임 각도 차이를 측정하여 두 장비로 비교 연구를 진행한다. 어깨의 회전근개 파열 시 일반적인 상태와 다르게 통증이



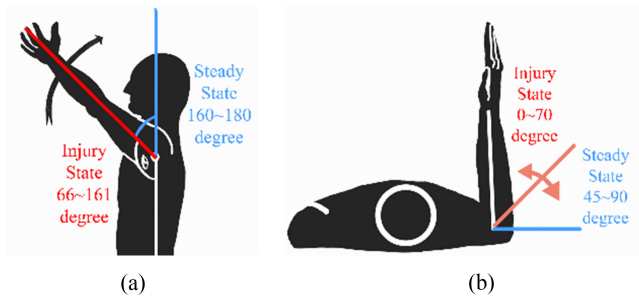


Fig. 1 Two motions to check for shoulder injuries (a) Forward elevation, (b) External rotation

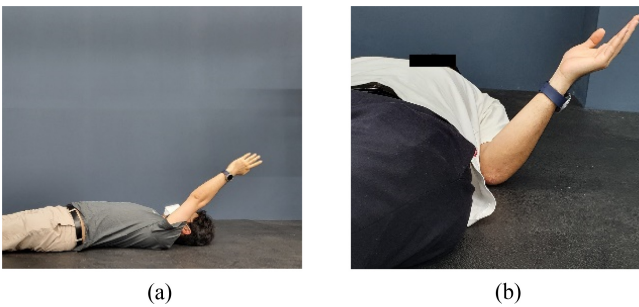


Fig. 2 Motion used at experiment (a) Forward elevation, (b) External rotation

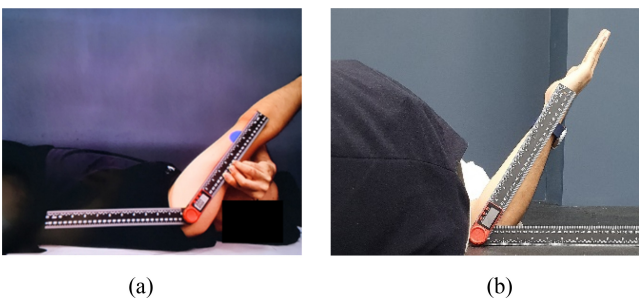


Fig. 3 Example method of measuring goniometer (a) Forward elevation, (b) External rotation

없이 움직일 수 있는 각도가 제한적이며 부상이 심할 경우 움직일 수 있는 각도가 완전하게 제한되어 특정 각도 이상으로 움직일 수 없는 것이 특징이다. 이들을 고려하고 정확한 모션 측정을 위하여 2D에 가까운 상태로 배치, 측정하기 위해 바닥에 누워서 진행하여 각도 측정에 용이하도록 한다. 또한, 이를 측정하기 위한 모션은 회전근개 파열 측정에 이용되는 모션인 Forward Elevation 모션과 External Rotation 모션을 기반으로 하였다. Forward Elevation은 정자세인 양팔을 아래로 둔 상태에서 팔을 어깨 위쪽으로 180도 올리는 모션이며 External Rotation은 정자세에서 팔꿈치 아래쪽만 팔을 들어 90도를 만들고 이를 몸 밖으로 회전하여 각도를 측정하는 방식이다.

설명한 모션들은 Figs. 1과 2와 같다. Forward Elevation은

160-180도가 정상 각도이며 External Rotation은 45-90도가 정상 각도이다. 부상자의 Forward Elevation 시 각도는 66-161도 정도이고 External Rotation 시 각도는 0-70도이다. 위에서 설명한 각도 측정 방식을 기반으로 각 실험방법을 비교하도록 하였다. 이에 적합한 측정 시스템을 비교하기 위해 Fig. 3의 예시와 같이 피측정자는 자세를 취하고 측정자가 고니오미터로 측정하고 고니오미터를 제거하는 동시에 실험 장비에 입력된 마커를 통한 각도의 값을 추출하여 값을 비교해 오차 값으로 비교한다. 마커는 앞서 소개한 논문[26,27]에서 선정한 위치를 기반으로 최대한 어깨를 움직여 팔을 들 때 위치가 크게 바뀌지 않는 부위에 마커를 부착하여 측정하도록 한다. 이때, 고니오미터를 사용하여 측정할 때는 마커의 중앙을 기준으로 측정하도록 한다.

2.2.1 OpenCV

영상을 통한 이미지 분석과 각도 계산을 위해 OpenCV를 적용한 라즈베리파이 4B와 카메라 모듈을 이용해 어깨 구동 각도를 측정하고자 하였다. OpenCV는 영상처리를 위한 함수들의 라이브러리로, 카메라의 영상에서 Pivot과 Target을 설정하고, 각도를 계산하는 것이 가능하다. 이를 구현하기 위해 Pivot과 Target 각각의 RGB 색상 범위를 정하여 영역을 구분하고, 도심 좌표를 계산하여 어깨의 구동 각도를 측정하였다. 라즈베리파이 상에서 카메라를 통해 연속적으로 업데이트되는 프레임 이미지를 이미지로 취급하여 사전에 지정한 색상 범위에 포함되는 영역을 OpenCV의 Contour 함수를 사용하여 외곽선으로 구분한다.

생성된 외곽선을 도형으로 판단하여 x축으로부터의 단면 1차 모멘트는 식(1), y축으로부터의 단면 1차 모멘트는 식(2)를 사용하여 계산하고, 식(3)을 사용하여 도심 좌표( $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$ )를 구한다. 또한, 이는 Fig. 4와 같이 도심(圖心)을 인지하는 과정을 거친다. 여기서 x와 y는 각축이며  $\bar{x}$ 와  $\bar{y}$ 는 도심 좌표이고 A는 면적이다.

$$Q_x = \int ydA = A \times \bar{y} \tag{1}$$

$$Q_y = \int xdA = A \times \bar{x} \tag{2}$$

$$\bar{x} = \frac{Q_y}{A}, \bar{y} = \frac{Q_x}{A} \tag{3}$$

단면 1차 모멘트를 면적으로 나누어 도출한 Pivot의 도심 좌표( $\bar{x}_1$ ,  $\bar{y}_1$ )와 Target의 도심 좌표( $\bar{x}_2$ ,  $\bar{y}_2$ )를 사용하여 각도( $\theta$ )를 삼각함수 공식인 식(4)로 구할 수 있다.

$$\theta = atan\left(\frac{\bar{y}_1 - \bar{y}_2}{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}\right) \tag{4}$$

위 과정을 통해 도심 좌표 간 각도를 구하는 과정의 도식화는 Fig. 5와 같으며 각도( $\theta$ )를 구하여 어깨의 구동 각도를 도출한다.

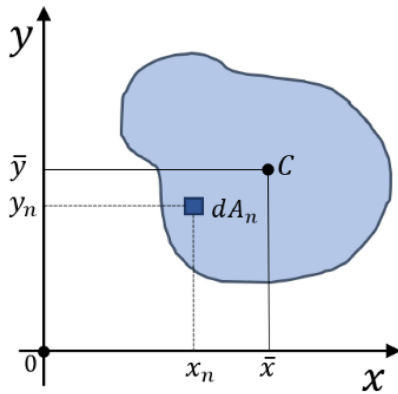


Fig. 4 Example of calculating first moment of area

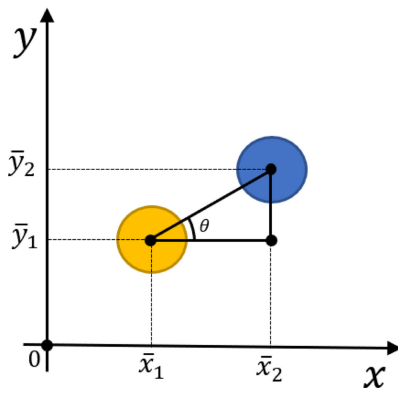
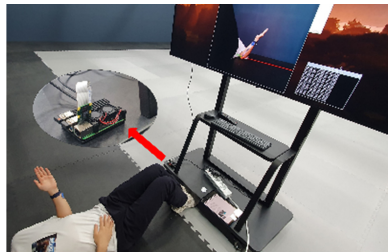
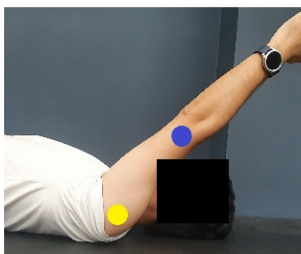


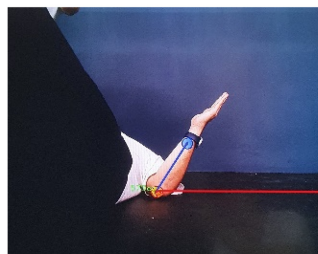
Fig. 5 Example of calculating angle



(a)



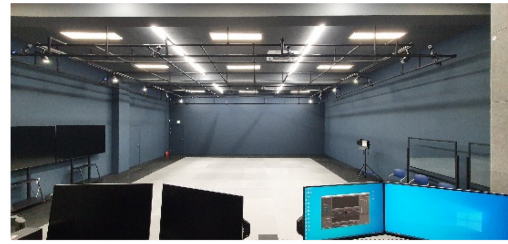
(b)



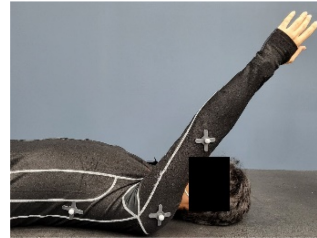
(c)

Fig. 6 OpenCV system setting used in the experiment (a) OpenCV system, (b) Forward elevation, (c) External rotation

위의 내용들을 통해 각도를 구하게 되며 어깨의 구동 각도를 측정하기 위한 실제 실험은 Fig. 6과 같이 구성되어 측정하였다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 7 Motion capture system used in the experiment (a) Motion capture system, (b) Forward elevation, (c) External rotation

### 2.2.2 모션 캡처

본 논문에서 사용한 모션 캡처 시스템 즉, 동작분석시스템은 OptiTrack 社의 카메라(Prime x 13) 16개로 구성되어 있으며 모션 캡처 프로그램인 Motive로 측정 데이터를 받아 분석하였다. 본 시스템은 다수의 카메라가 적외선을 보내고 마커가 이를 반사하여 돌아오는 적외선을 받아 측정하는 방식이다. 모션 캡처는 Fig. 7(a)와 같이 구성된 실험장소에서 진행하였다. 고니오미터로 측정한 값과 모션 캡처 데이터를 비교하는 모션 캡처 실험은 앞서 설명한 고니오미터로 측정함과 동시에 모션 캡처 시스템으로 인식된 어깨의 움직임 각도를 비교하도록 하여 실험을 진행한다. Figs. 7(b)와 7(c)같이 모션 캡처를 통해 측정하는 방식은 마커를 부착할 슈트를 입고 측정하고자 하는 부분에 마커를 부착해 각도를 측정하는 방식으로 사전에 Mask 과정과 Calibration 과정을 거쳐 모션 캡처 시스템의 정밀도를 올린 후 측정할 대상의 어깨와 팔 부분에 마커를 부착하고 측정 환경 안에서 측정한다.

## 3. 연구 결과

### 3.1 OpenCV

앞서 설명한 바와 같이 라즈베리파이와 카메라 모듈로 구성된 OpenCV를 통해 Forward Elevation과 External Rotation 방법으로 어깨 ROM을 측정하였다. 측정은 어깨의 회전근개 파열인 대상과 어깨의 기능에 문제가 없는 대상의 어깨 ROM을 고니오미터와 모션 캡처로 각 10회 각도를 측정한 평균값과 오차 그리고 그래프로 결과를 비교하였다. 고니오미터와 OpenCV로 측정하여 비교한 평균값은 Table 1과 같으며 이는 최대 평균

Table 1 OpenCV experimental result (degree)

	Measurement method		Measurement error [%]
	Goniometer 1st	OpenCV	
Rotator cuff tear forward elevation	128.55	127.79	0.59
Rotator cuff tear external rotation	36.17	35.91	0.72
Uninjured forward elevation	169.92	168.24	0.99
Uninjured external rotation	80.37	79.69	0.85

Table 2 Motion capture experimental result (degree)

	Measurement method		Measurement error [%]
	Goniometer 2nd	Motion capture	
Rotator cuff tear forward elevation	132.54	133.28	0.02
Rotator cuff tear external rotation	43.05	43.58	1.2
Uninjured forward elevation	169.54	169.19	0.08
Uninjured external rotation	83.65	83.26	0.54

측정오차가 0.99%로 매우 유사한 측정치를 보여주었다. 고니오미터와 OpenCV의 데이터 중 Forward Elevation을 기준으로 부상자의 각도는 최저 125.1°, 최대 130.5°로 이는 부상 상태 기준 각도인 161° 이하이다. 또한, 문제가 없는 대상의 각도는 최저 165.51°, 최대 172.51°로 보통 상태 기준 각도인 160° 이상이었다. 그리고 고니오미터와 OpenCV의 데이터 모두 포함한 External Rotation을 기준으로 부상자의 각도는 최저 30.87°, 최대 40.76°로 부상 상태 기준 각도인 70° 이하로 적합함을 확인하였다. 또한, 문제가 없는 대상의 각도는 최저 77.45°, 최대 82.9°로 보통 상태 기준 각도인 45° 이상이며 부상자 기준 최대 각도인 70° 이상의 각도를 보였다. 이는 Fig. 8을 통하여 확인할 수 있다. OpenCV를 이용한 결과 회전근개 파열이 있는 대상자의 어깨 ROM을 정확하게 측정할 수 있었다.

3.2 모션 캡처

앞서 설명한 바와 같이 모션 캡처를 통해 Forward Elevation과 External Rotation 방법으로 어깨 ROM을 측정하였다. 측정은 어깨의 회전근개 파열인 대상과 어깨의 기능에 문제가 없는 대상의 어깨 구동 각도를 고니오미터와 모션 캡처로 각 10회 각도를 측정하여 평균값과 오차 그리고 그래프로 결과를 비교하였다. 고니오미터와 모션 캡처로 측정하여 비교한 데이터는 Table 2와 같으며 최대 평균값의 최대 평균 측정오차가 1.2%로 매우 유사한 측정치를 보여주었다. 두 방식의 실험 데이터 모두 포함한 Forward Elevation을 기준으로 부상자의 각도는 최저 131.28°, 최대 149.48°로 부상 상태 기준

각도인 161° 이하로 적합함을 확인하였다. 또한, 문제가 없는 대상의 각도는 최저 168.54°, 최대 172.88°로 보통 상태 기준 각도인 160° 이상이었다. 그리고 고니오미터와 모션 캡처의 데이터 모두 포함한 External Rotation을 기준으로 부상자의 각도는 최저 38.24°, 최대 47.05°로 부상 상태 기준 각도인 70° 이하로 적합함을 확인하였다. 또한, 문제가 없는 대상의 각도는 최저 80.44°, 최대 87.2°로 보통 상태 기준 각도인 45° 이상이며 부상자 기준 최대 각도인 70° 이상의 각도를 보였다. 이는 Fig. 8을 통하여 확인할 수 있다. 또한, 본 실험을 통해 모션 캡처의 정확성이 캘리브레이션에 따라서 차이가 있을 수 있으나 실험을 통한 측정값을 확인한 결과 이 또한 정확성이 뛰어난을 확인하였다.

4. 결론

본 논문에서는 고령화사회로 급격하게 변화하고 있는 사회적 환경에서 그 수가 증가하고 있는 액티브 시니어들에게 발생하는 질병에 초점을 두었다. 특히, 다양한 질병 중 흔하고 삶의 질에 큰 영향을 미치는 어깨 관절 질환을 택하고 이를 확인할 수 있는 ROM 측정 방법에 대하여 연구를 진행하였다. ROM 중에서도 회전근개 파열과 유착성 관절낭염의 진단과 재활에 중요한 모션인 Forward Elevation 모션과 External Rotation 모션을 대상으로 측정을 진행하였다. 기존 의료현장에서 진단과 치료에 활용되는 방법인 고니오미터를 이용한 측정 결과와 OpenCV와 모션 캡처 시스템을 통해 측정한 값을 비교하였다. 이를 통해 두 검사 방법의 신뢰도가 고니오미터를 이용한 측정 방법을 대체할 수 있는 수준인지를 확인하고자 하였다. OpenCV를 이용한 실험에서는 최대 평균오차가 0.99%이며 모션 캡처 시스템을 이용한 실험에서는 최대 오차가 1.2%로 두 실험 모두 정밀한 결과를 보였다. 이로서 두 방법 모두 고니오미터를 이용한 측정법을 대체하여 어깨관절 ROM을 측정할 수 있는 가능성을 보였다. 특히 OpenCV는 단일한 카메라를 사용하며 별도의 마커 부착이 필요없는 간소한 시스템에도 불구하고 기존의 모션 캡처 시스템에 비해 평균오차의 측면에서 오히려 더 정밀함을 확인할 수 있었다. 따라서 원격 의료나 재택 훈련 재활과 같은 상황에서 환자의 어깨 ROM을 매일 측정하기 위해 보다 설치가 쉽고 관리가 편한 OpenCV의 활용 가능성이 매우 높다고 할 수 있다. 향후 다른 관절 부위의 평가에 대한 적용을 시도하면서 인식 방법을 보다 정밀하게 개선하는 등의 추가적 연구가 필요하다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 논문은 2023년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업의

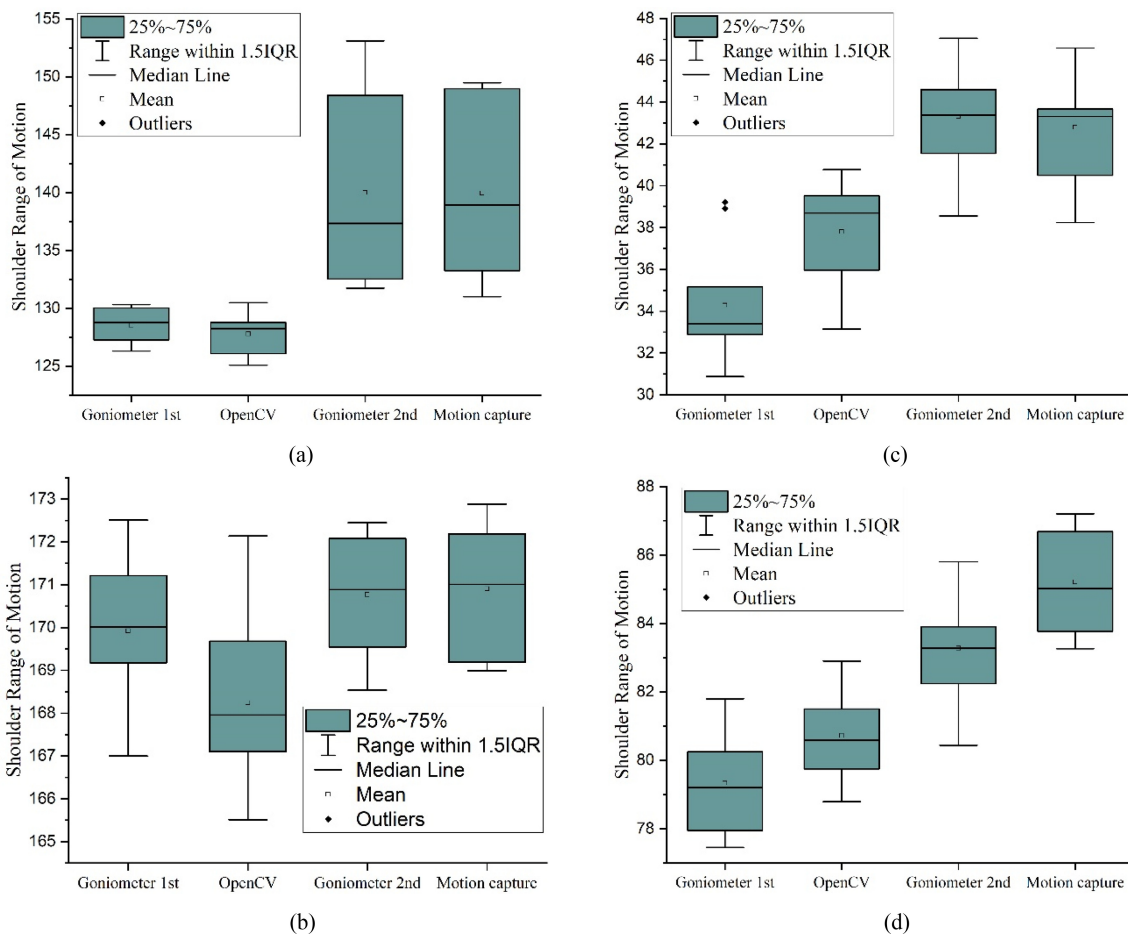


Fig. 8 Shoulder angle measurement experiment result graph (a) Rotator cuff tear Forward elevation (b) Uninjured Forward elevation, (c) Rotator cuff tear External rotation. (d) Uninjured External rotation

결과이며(2022RIS-005), 2020년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업으로 수행된 연구임(No. 2020R111A3073575).

REFERENCES

1. United Nations, (2019), World Population Ageing 2019.
2. Kim, D., Jung, H., Lee, D., Seung, M., (2019), Cognitive error on the age of death by stratum and its implications, Journal of Risk Management, 30(2), 1-32.
3. Public Officials Benefit Association, (2016), Active senior becomes new trend leader, 65(758), 74-75. <https://kiss.kstudy.com/Detail/Ar?key=3481313>
4. Janssen, I., Heymsfield, S. B., Ross, R., (2002), Low relative skeletal muscle mass (sarcopenia) in older persons is associated with functional impairment and physical disability, Journal of the American Geriatrics Society, 50(5), 889-896.
5. Luime, J., Koes, B., Hendriksen, I., Burdorf, A., Verhagen, A.,

- Miedema, H., Verhaar, J., (2004), Prevalence and incidence of shoulder pain in the general population; A systematic review, Scandinavian Journal of Rheumatology, 33(2), 73-81.
6. Koh, E. S., Lim, J. Y., (2013), The management of shoulder pain in the elderly: Focusing on clinical characteristics and conservative treatment, Journal of the Korean Geriatrics Society, 17(1), 1-6.
7. Yamamoto, A., Takagishi, K., Osawa, T., Yanagawa, T., Nakajima, D., Shitara, H., Kobayashi, T., (2010), Prevalence and risk factors of a rotator cuff tear in the general population, Journal of Shoulder and Elbow Surgery, 19(1), 116-120.
8. Craig, R., Holt, T., Rees, J. L., (2017), Acute rotator cuff tears, BMJ. <https://doi.org/10.1136/bmj.j5366>
9. Lee, B.-C., (2004), Diagnosis of rotator cuff disease and determination of treatment policy, Proceedings of the Academic Congress of Korean Shoulder and Elbow Society, 79-86.
10. Rosen. M., Meijer. K., Tucker. S., Wilcox. L., Plummer. H. A., Andrew. J. R., Ostrander. R. V., (2021), Shoulder range of motion deficits in youth throwers presenting with elbow pain, Sports Health, 14(4), 478-482. <https://doi.org/10.1177/>

- 19417381211036387
11. Lee, I., Park, J.-H., Son, D.-W., Cho, Y., Ha, S.-H., Kim, E., (2021), Investigation for shoulder kinematics using depth sensor-based motion analysis system, *The Journal of the Korean Orthopaedic Association*, 68-75.
  12. Mullaney, M. J., McHugh, M. P., Johnson, C. P., Tyler, T. F., (2010), Reliability of shoulder range of motion comparing a goniometer to a digital level, *Physiotherapy Theory and Practice*, 26(5), 327-333.
  13. Jeong, H.-J., (2007), What are valuable positive signs of supraspinatus test for diagnosis of torn rotator cuff?: Comparison of pain and weakness in "Empty can test" and "Full can test", *Journal of the Korean Shoulder and Elbow Society*, 27-32.
  14. Ellenbecker, T. S., Cools, A., (2010), Rehabilitation of shoulder impingement syndrome and rotator cuff injuries: An evidence-based review, *British Journal of Sports Medicine*, 44(5), 319-327.
  15. Heuberger, P. R., Plachel, F., Willinger, L., Moroder, P., Laky, B., Pauzenberger, L., Lomoschitz, F., Anderl, W., (2017), Critical shoulder angle combined with age predict five shoulder pathologies: A retrospective analysis of 1000 cases, *BMC Musculoskeletal Disorders*, 18(1), 1-9.
  16. Spiegl, U. J., Horan, M. P., Smith, S. W., Ho, C. P., Millett, P. J., (2016), The critical shoulder angle is associated with rotator cuff tears and shoulder osteoarthritis and is better assessed with radiographs over MRI, *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, 24(7), 2244-2251.
  17. Lee, S. H., Yoon, C., Chung, S. G., Kim, H. C., Kwak, Y., Park, H.-w., Kim, K., (2015), Measurement of shoulder range of motion in patients with adhesive capsulitis using a Kinect, *PLoS one*, 10(6), e0129398.
  18. Parel, I., Cutti, A., Fiumana, G., Porcellini, G., Verni, G., Accardo, A., (2012), Ambulatory measurement of the scapulohumeral rhythm: Intra-and inter-operator agreement of a protocol based on inertial and magnetic sensors, *Gait & Posture*, 35(4), 636-640.
  19. Osbahr, D. C., Murrell, G. A., (2006), The rotator cuff functional index, *The American Journal of Sports Medicine*, 34(6), 956-960.
  20. Ham, S. W., Yoo, C. Y., Jung, J. Y., Jang, W. K., Kim, B. H., Choi, S. W., Ha, S. J., Ha H. J., (2022), Gait analysis system for active seniors based on machine learning, *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, 31(2), 108-115.
  21. Liu, S., Zhang, J., Zhang, Y., Zhu, R., (2020), A wearable motion capture device able to detect dynamic motion of human limbs, *Nature Communications*, 11(1), 5615.
  22. Ko, K., Chae, S., Bae, S., Choi, J., Pan, S., (2014), A study on the 4-joint based motion capture system for spinal disease prevention, *The Journal of Korean Institute of Information Technology*, 12(8), 157-165.
  23. Charbonnier, C., Chagué, S., Kolo, F. C., Lädermann, A., (2015), Shoulder motion during tennis serve: Dynamic and radiological evaluation based on motion capture and magnetic resonance imaging, *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, 10, 1289-1297.
  24. Liguó, Z., Minshan, F., Xunlu, Y., Shangquan, W., Jie, Y., (2017), Kinematics analysis of cervical rotation-traction manipulation measured by a motion capture system, *Evidence-based Complementary and Alternative Medicine*, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/5293916>
  25. Šenk, M., Cheze, L., (2010), A new method for motion capture of the scapula using an optoelectronic tracking device: A feasibility study, *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 13(3), 397-401.
  26. Yang, U.-J., Kim, J.-Y., (2012), Development of frozen shoulder rehabilitation robot based on motion capture data, *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, 36(9), 1017-1026.
  27. Park, C., An, Y., Yoon, H., Park, I., Kim, K., Kim, C., Cha, Y., (2022), Comparative accuracy of a shoulder range motion measurement sensor and Vicon 3D motion capture for shoulder abduction in frozen shoulder, *Technology and Health Care*, 30(S1), 251-257.
  28. Mejia-Hernandez, K., Chang, A., Eardley-Harris, N., Jaarsma, R., Gill, T. K., McLean, J. M., (2018), Smartphone applications for the evaluation of pathologic shoulder range of motion and shoulder scores-a comparative study, *JSES Open Access*, 2(1), 109-114.
  29. Paterson, J., Aldabbagh, A., (2021), Gesture-controlled robotic arm utilizing OpenCV, *Proceedings of the International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA)*, 1-6.



**Geun Sik Cho**

Ph.D. candidate in the Department of Smart Health Science and Technology, Kangwon National University. His research interest is soft robotics.

E-mail: geunsik1124@kangwon.ac.kr



**Hee-Won Park**

Assistant professor in the Department of Rehabilitation Medicine, Kangwon National University Medical School

His research interests focus on rehabilitation of the aged.

E-mail: hwpark@kangwon.ac.kr



**Young Jun Cho**

M.S. Student in the Department of Mechanical Convergence Engineering, Kangwon National University. His research interest is 3D LIDAR.

E-mail: rusk@kangwon.ac.kr



**Hyun-Ouk Kim**

Professor in the Department of Smart Health Science and Technology, Kangwon National University. His research interest is Nanobio Engineering.

E-mail: kimhoman@kangwon.ac.kr



**In-Sik Choi**

Ph.D Student in the Department of Smart Health Science and Technology, Kangwon National University. His research interest is digital twin of machine tool.

E-mail: insik1908@kangwon.ac.kr



**Suk-Jin Ha**

Professor in the Department of Smart Health Science and Technology, Kangwon National University. His research interest is genetic and metabolic engineering.

E-mail: sjha@kangwon.ac.kr



**Chi-Yeon Song**

Master of Engineering in the Department of Smart Health Science and Technology, Kangwon National University. Her research interest is Nanobio Engineering.

E-mail: abc@dfg.ac.kr



**Byeong Hee Kim**

Professor in the Department of Smart Health Science and Technology, Kangwon National University. His research interest is micro and Nano system design and precision control of machine tools the design of medical device and AI application system design.

E-mail: kbh@kangwon.ac.kr



**Seong-Hwan Yeom**

Master of Engineering in the Department of Smart Health Science and Technology, Kangwon National University. His research interest is biotechnology.

E-mail: 202116281@kangwon.ac.kr



**Yong-Jai Park**

Associate professor in the Department of Smart Health Science and Technology, Kangwon National University. His research interest is soft robots and mechanism design.

E-mail: yjpark@kangwon.ac.kr



**Woong Ki Jang**

Ph.D in the Department of Smart Health Science and Technology, Kangwon National University. His research interest is micro/nanoscale surface texturing technologies and the design of medical devices and AI application system design.

E-mail: wkddndrl@kangwon.ac.kr

## • 특집 • 스마트/디지털 헬스케어 기술(Smart/Digital Healthcare Technology)

# 딥러닝 기반 발가락 근력 및 힘 안정성을 이용한 낙상 위험도 예측: 예비실험

## Prediction of Falls Risk Using Toe Strength and Force Steadiness based on Deep Learning: A Preliminary Study

김진선<sup>1</sup>, 최성운<sup>1</sup>, 금창엽<sup>1</sup>, 이재희<sup>1</sup>, 장웅기<sup>1</sup>, 임광석<sup>1</sup>, 이형석<sup>1</sup>, 김병희<sup>1,#</sup>, 윤태진<sup>1,#</sup>  
Jin Seon Kim<sup>1</sup>, Seong Un Choi<sup>1</sup>, Chang Yeop Keum<sup>1</sup>, Jaehee Lee<sup>1</sup>, Woong Ki Jang<sup>1</sup>,  
Kwang Suk Lim<sup>1</sup>, Hyungseok Lee<sup>1</sup>, Byeong Hee Kim<sup>1,#</sup>, and Tejin Yoon<sup>1,#</sup>

<sup>1</sup> 강원대학교 스마트헬스과학기술융합학과 (Department of Smart Health Science and Technology, Graduate School, Kangwon University)  
# Corresponding Authors / E-mail: kbh@kangwon.ac.kr, TEL: +82-033-250-6374 ORCID: 0000-0001-6806-4201  
E-mail: tyoon@kangwon.ac.kr, TEL: +82-033-250-6787 ORCID: 0000-0001-7248-2342

KEYWORDS: Active seniors (액티브시니어), Toe strength (발 근력), Force steadiness (힘 안정성), Accelerometer (가속도), Deep learning (딥러닝), LSTM (장단기 메모리)

*Falls are common among older people. Age-related changes in toe strength and force steadiness may increase fall risk. This study aimed to evaluate the performance of a fall risk prediction model using toe strength and force steadiness data as input variables. Participants were four healthy adults (25.5±1.7 yrs). To indirectly reproduce physical conditions of older adults, an experiment was conducted by adding conditions for weight and fatigue increase. The maximal strength (MVIC) was measured for 5 s using a custom toe dynamometer. For force steadiness, toe flexion was measured for 10 s according to the target line, which was 40% of the MVIC. A one-leg-standing test was performed for 10 s with eyes-opened using a force plate. Deep learning experiments were performed with seven conditions using long short-term memory (LSTM) algorithms. Results of the deep learning model were randomly mixed and expressed through a confusion matrix. Results showed potential of the model's fall risk prediction with force steadiness data as input variables. However, experiments were conducted on young adults. Additional experiments should be conducted on older adults to evaluate the predictive model.*

Manuscript received: March 2, 2023 / Revised: May 5, 2023 / Accepted: May 23, 2023

### 1. Introduction

With aging, physical functions such as muscle strength and sense of balance may decrease, and various problems may occur [1,2]. In particular, falls are the most common problem in older adults, and it is reported worldwide that about 28-35% of older adults aged 65 or older experience falls every year [3]. Moreover, post-falls physical dysfunction and complications are social and economic factors that threaten the lives of older adults [4], and falls are one of the severe

problems reported as the sixth cause of death for older adults [5,6].

Older adults tend to have an increased fear of falling after experiencing their first falls, and an increase in fear of falling may further increase the incidence of falls in the future [7]. Therefore, there is a need for a method that can prevent and safely manage falls of older adults by classifying risk groups before experiencing falls. Accordingly, various tools for evaluating falls or quantifying the falls risk have been developed and used in clinical settings. However, the tools used to date lack consistency in validity and

reliability [8] and have several limitations. For example, the PPA (Physiological Profile Approach) questionnaire, which evaluates the multidimensional risk factors of falls, is highly reliable for assessing falls risk, but requires a lot of time [9]. In addition, although falls history is used as an indicator of falls risk in clinical practice, there is also a limitation in relying on the participant's memory [10]. The Tinetti scale and Berg test are mainly used in clinical practice as a way to assess an individual's falls risk [6,11]. However, this evaluation method must be done by experts, and can be affected by floor-ceiling effects [12]. In addition, some evaluation methods rely on simple functional measurements and are less sensitive so that they can be applied only to older adults with visually detectable variations in falls-related physical functions [13]. To overcome these limitations, studies have been conducted to prediction of falls by learning the results of collecting and analyzing biological data using wearable IMU (Inertial Measurement Unit) sensors through machine learning and deep learning [14]. The sensitivity of falls prediction studies using data from inertial sensors was 0.43-0.93, the specificity was 0.545-1, and the accuracy was 0.57-0.90 [14]. These studies conducted models by including variables that change with aging, such as stride, gait speed, total gait time, and maximum angular velocity. However, there needed to be a consensus on the variables used in the prediction model [14].

The risk factors of falls are divided into external and intrinsic factors. Intrinsic factors include an increase in age, a decrease in balance ability, a decrease in muscle strength, a falls experience, a decrease in vision, and a decrease in cognitive function [15]. In particular, the decrease in muscle strength and force steadiness caused by aging can lead to significant problems [2,16,17]. Muscle loss and muscle function decline due to aging appear more severe and faster in the lower body muscles responsible for walking than the upper body muscles [2]. In particular, a strong association exists between toe flexion strength and gait and balance ability in older adults [18]. Previous studies have shown that the older adults have about 35% lower toe strength than young adults, and older adults with falls experience have about 20% lower toe strength than older adults without falls experience [19]. Furthermore, it has been reported that force steadiness is associated with functional performance in older women [20], and low force steadiness is found in people with falls experience [21].

Despite the strong association of toe strength and force steadiness with the falls risk [22], studies have yet to be conducted using toe strength and force steadiness in deep learning modeling to predict of falls risk. Therefore, the purpose of this study is to evaluate a falls risk prediction model using toe strength and force steadiness data as input variables.

## 2. Methods

### 2.1 Participants

The participants were four healthy adult men (Mean±SD; age: 25.5±1.7 yrs; mass: 77.6±17.3 kg; height: 174.5±7.3 cm; body fat: 23.9±4.7%) who had never experienced falls before. In addition, those with a history that can affect balance ability and those who have undergone neurosurgical surgery on the lower extremities over the past six months were excluded. Before participating, all participants received sufficient explanations and training on the experimental goals and processes.

### 2.2 Experimental Setup

In order to indirectly reproduce the physical condition of older adults with a high falls risk, two conditions were added to the experiment. Weight increase conditions to reproduce the increase in fat accumulation due to aging and fatigue increase condition to reproduce the decline in muscle strength and nervous system function [16,23,24]. As for the weight increase conditions, the experiment was conducted by adding 10% and 20% of the participants' weight using a weight vest (weighted best heavyweight vest, body X, and China). As for the fatigue increase condition, the fatigue protocol was performed using a toe dynamometer custom-made device. The fatigue protocol maintained toe flexion at 50% of the MVIC (maximal voluntary isometric contraction) for 6 seconds and repeated rest for 4 seconds [25]. If the toe strength during toe flexion did not reach a threshold corresponding to 50% of the MVIC, the fatigue protocol was discontinued based on the assessment of increased fatigue.

### 2.3 Toe MVIC and Force Steadiness

MVIC and force steadiness were measured using the dominant foot, and the foot used to kick the ball far was selected as the dominant foot. MVIC was measured in a chair posture using a custom-made toe dynamometer. The toe dynamometer and measurement posture are shown in Fig. 1. Participants placed the dominant foot on the toe dynamometer while sitting comfortably in a chair with both feet shoulder-width apart, and the right foot was placed on a scale of similar height to match the height of the right foot. The first and second phalanges were hung on the toe dynamometer ring to adjust the ankle-fixing device's position, and the ankle was fixed with a strap so that the foot's position did not change. After getting up from the chair and supporting the weight evenly with both feet, the toe flexion was maintained for 5 seconds with maximum effort according to the inspector's signal and rested for 1 minute. Force steadiness was measured similarly to MVIC



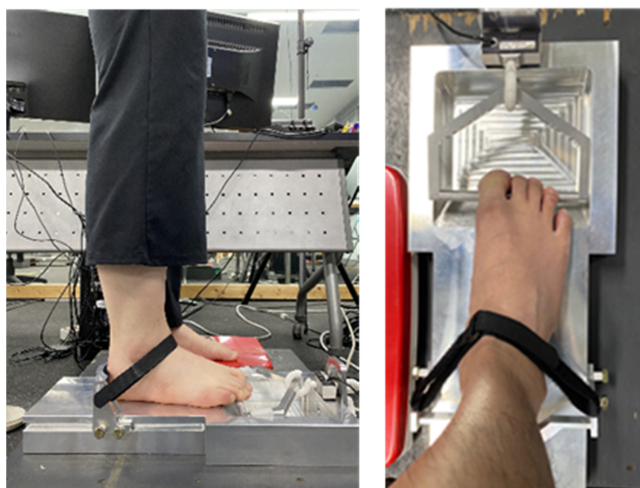


Fig. 1 Toe strength measurement posture

measurement. The toe flexion was maintained for 10 seconds by aligning it as close as possible to the target line corresponding to 40% of the MVIC. The force value of the load cell attached to the toe dynamometer was sampled at 1000 Hz.

#### 2.4 One-leg Standing Test

Static balance ability was used as a variable to prediction of falls risk. One-leg standing test was used to prediction falls among the items performed in the BBT (berg balance test) [26]. Participants prepared for the experiment on a force plate (OR6-7-2000, AMTI, USA) to flexion the hip and knee joints of the non-dominant legs by 90° and stood on the dominant legs with both hands crossed and fixed in front of the chest to maintain balance. The balance was maintained for 10 seconds while staring at the display point of the monitor 3 m ahead with the eyes open [27]. The one-leg standing test posture is presented in Fig. 2. The force and moment data of the force measuring plate in the three-axis direction were sampled at 1000 Hz during the one-leg standing test.

#### 2.5 Timed Up and Go Test (TUG)

Before TUG (timed up to go) test, the belt with the inertial sensor (MetamotionRL, Mbientlab Inc, USA) was fixed to the thinnest part of the waist. The location of the inertial sensor attachment is shown in Fig. 2. Participants stood up from the chair according to the instructions, turned around the cone in front of 6 m, and sat back on the chair. While standing up and walking, the acceleration value of the inertial sensor in the tri-axial direction was sampled at 100 Hz.

#### 2.6 Data Analysis

The MVIC of the toe was normalized by dividing it by weight



Fig. 2 One-leg standing test (left) and IMU sensor position (right)

among the data collected for 5 seconds from the load cell of the toe dynamometer. Force steadiness used intermediate 6-second data from 10-second data. The TCOP (total distance center of pressure) was calculated using the middle 6 seconds data among the 10 seconds data collected by force plate during the one-leg standing test, and the foot length was standardized. The representative data of one participant are presented in Fig. 3. The ACC (acceleration) value obtained with the IMU was a linear acceleration value that eliminated the influence of gravity, and data collected during the TUG test were used from the time of rise to the time of re-sitting in the chair.

#### 2.7 Deep Learning Algorithm

This study used a deep learning technique to prediction of falls risk using MVIC data, Force steadiness and ACC data. Various algorithms exist depending on the purpose of deep learning, and this study used LSTM (long short-term memory) algorithms to prediction of falls risk using signal data. LSTM algorithm, one of the RNN (recurrent neural network) techniques, was used as a deep learning method. LSTM algorithms have a circular structure and are advantageous for continuous and repetitive signal data by passing the values of previous state data to the current state [28].

Based on 16 existing data (4 participants  $\times$  four conditions), we multiplied by nine values (0.95-1.04) per data to compensate for the insufficient data. The total of 160 data were conducted under seven conditions. Seven deep learning conditions are presented in Table 1.

The TCOP data, which is a falls risk variable used as the label value, was organized in ascending order and labeled as 0 = Low and 1 = High, and 0 and 1 were classified based on the TCOP value 25 by 80 each to equalize the number of labels [29]. The data were divided into learning, verification, and test data at a ratio of

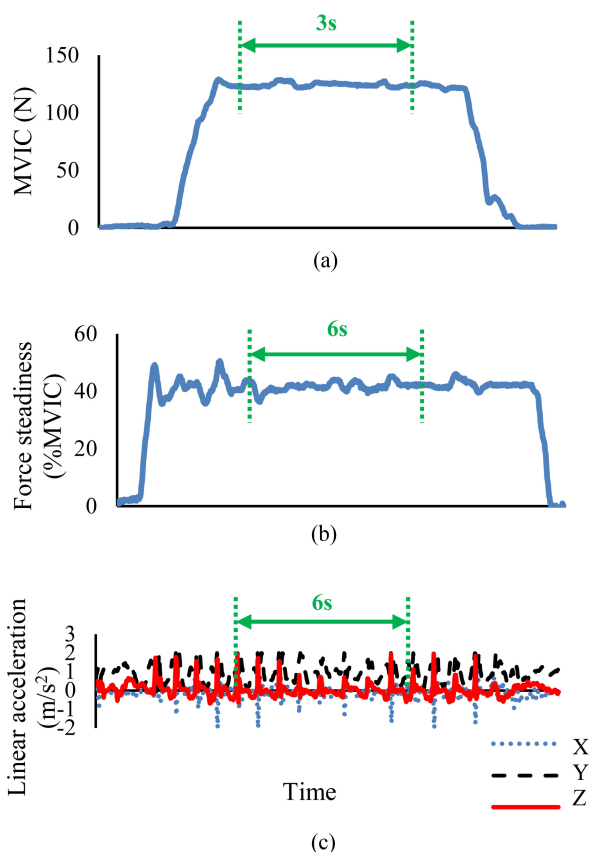


Fig. 3 Raw data post-analysis for deep learning A: MVIC, B: Force steadiness, C: ACC; MVIC: maximal voluntary isometric contraction, ACC: accelerometer

Table 1 Input data conditions of deep learning experiment

Conditions	Input data
A	MVIC
B	Force steadiness
C	ACC
D	MVIC + Force steadiness
E	Force steadiness + ACC
F	MVIC + ACC
G	MVIC + Force steadiness + ACC

MVIC, maximal voluntary isometric contraction; ACC accelerometer

64 : 16 : 20 and trained in a deep learning model. The results of the deep learning model were randomly mixed with data to evaluate reliability, and the average value of the results was expressed through a confusion matrix. Formulas from previous papers were used to calculate sensitivity, specificity, and accuracy [30]. In formulas, TP (true positives) and TN (true negatives) denote the prediction of falls risk classified correctly by the algorithm as positive and negative, respectively. While FP (false positives) and FN (false negatives) denote the prediction of falls risk misclassified

positive and negative, respectively.

$$\text{Sensitivity} = \text{TP}/(\text{TP}+\text{FN}) \tag{1}$$

$$\text{Specificity} = \text{TN}/(\text{TN}+\text{FP}) \tag{2}$$

$$\text{Accuracy} = (\text{TN}+\text{TP})/(\text{TN}+\text{TP}+\text{FN}+\text{FP}) \tag{3}$$

In addition, additional deep learning experiments were conducted by classifying data labeling into three categories to provide information on the degree of falls risk rather than the dichotomy of classifying the falls risk as ‘there is’ or ‘no.’ 0 = Low, 1 = Moderate, and 2 = High were labeled, and 0, 1, 2 were designated according to the TCOP values of 50, 60, and 50 each to make the number of labels uniform. Additional deep-learning experiments were also conducted under the same conditions as previous experiments.

### 3. Results

In this study, we used paired t-test to compare the variables by aging condition before deep learning algorithm. Force and balance was significantly decreased in the fatigue condition compared to the baseline ( $p < 0.01$ ,  $p < 0.05$ ). And to perform a falls risk prediction using toe strength and force steadiness, we built a deep learning model consisting of LSTM. Then, we trained, validated and tested it using signal data.

The sensitivity, specificity and accuracy of validation algorithms with two-labels is shown in Table 2. And Table 3 shows the performance in terms of sensitivity, specificity and overall accuracy of the algorithm with three-labels.

### 4. Discussion

This preliminary study used toe strength and force steadiness data as input variables to create a prediction of falls risk model through deep learning and evaluate the model’s performance. As a result of t-test, force and balance significantly decreased in the fatigue condition. But, there is no significant in other conditions. This could be considered that the increase of fatigue indirectly affected the aging condition. While, deep learning algorithm with force steadiness achieved 86% accuracy in two-labeling conditions. This study showed the possibility of prediction of falls risk using force steadiness. However, there are limitations in optimizing the algorithm used in this study. We considered that further research should complement the algorithm using in this study.

Table 2 Classification performance (two-labels)

Falls risk	Conditions	Sensitivity	Specificity	Accuracy
High	A	0.56	0.61	0.58
	B	0.80	0.94	0.86
	C	0.75	0.77	0.76
	D	0.71	0.68	0.69
	E	0.67	0.73	0.70
	F	0.68	0.71	0.69
	G	0.74	0.74	0.74

A: MVIC, B: Force steadiness, C: ACC, D: MVIC + Force steadiness, E: Force steadiness + ACC, F: MVIC + ACC, G: MVIC + Force steadiness + ACC; MVIC: maximal voluntary isometric contraction, ACC: accelerometer

Table 3 Classification performance (three-labels)

Falls risk	Conditions	Sensitivity	Specificity	Accuracy
Moderate	A	0.55	0.83	0.74
	B	0.90	0.65	0.73
	C	0.70	0.62	0.65
	D	0.68	0.93	0.85
	E	0.77	0.67	0.70
	F	0.65	0.64	0.64
	G	0.68	0.76	0.73
High	A	0.74	0.81	0.61
	B	0.76	0.85	0.71
	C	0.56	0.78	0.72
	D	0.76	0.82	0.61
	E	0.72	0.85	0.78
	F	0.78	0.87	0.77
	G	0.72	0.85	0.75

A: MVIC, B: Force steadiness, C: ACC, D: MVIC + Force steadiness, E: Force steadiness + ACC, F: MVIC + ACC, G: MVIC + Force steadiness + ACC; MVIC: maximal voluntary isometric contraction, ACC: accelerometer

The sensitivity, specificity, and accuracy of the model using force steadiness as input variables showed the potential of falls risk prediction than other models. Force steadiness is an important aspect of muscle strength control, because accurate force control ability is essential in performing physical movements [17,31]. Aging can affect force steadiness, and the ability of older adults in force steadiness is impaired [32], and force steadiness is associated with falls in older adults [17,21]. Therefore, the results of this study are considered to reflect the results of previous studies that force steadiness affect falls due to aging. However, it should be noted that the one-leg stand test and force steadiness test used similar contraction mode, and which may have exaggerated the sensitivity

of the model. In addition, the results of this study are the results of conducting experiments on young adults, not the older adults. Therefore, the model should be re-verified through experiments on older adults in the future.

Unlike force steadiness, the model with MVIC showed low accuracy in overall experiments with two labels. These results are contrary to the results of previous studies which found that [33] impaired balance ability and falls in older adults are associated with decreased toe flexion muscles [18,19,34]. Toes play an important function during walking and balancing, especially in activities such as walking on unstable or uneven terrain [22]. However, in this study, a one-leg standing test was performed on a flat ground force plate to label the falls risk, it is a static balance ability rather than a dynamic balance ability. Therefore, the results of this study could be interpreted that the MVIC of the lower limb muscles did play a minimal role while maintaining static balance [35], which is partially consistent with previous studies. However, a previous study found that the older adults use more tremendous toe pressure than young adults when maintaining static balance [36]. Considering the previous study results, we assume that further investigation would lead to much better results if actual older people were tested.

To provide more detailed information about falls risk, additional models were created and evaluated by labeling falls risk as ‘low, moderate, and high.’ There was no significant difference compared to the model results made by two labeling. Previous studies that predicted falls risks through modeling for older adults reported that the sensitivity was 0.43-0.93, the specificity was 0.545-1, and the accuracy was 0.57-0.9 [14]. Therefore, it seems likely that the model’s predictive ability shown through this study is comparable to the results of previous papers studied in various ways regardless of the labeling method. Our future work will build on current experiment, but we will experiment with actual older people.

### 5. Conclusion

This study evaluated a prediction of falls risk model through deep learning using toe strength and force steadiness data as input variables. The deep learning algorithm with force steadiness have a potential for prediction of falls risk prediction. However, this study is an experimental study that reproduces the physical ability of older adults by adding weight and inducing fatigue in healthy young people with a relatively low falls risk. Therefore, further experiments should be conducted on the older adults in the future research to improve the model’s predictive ability.

## ACKNOWLEDGEMENT

This research was supported by “Regional Innovation Strategy (RIS)” through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education (MOE) (2022RIS-005).

## REFERENCES

- Um, S., Jang, S., Park, M., Lee, S., (2022), Impact of wearing functional supporters that prevent seniors from falling on muscle function, Sense of Balance, and Overcoming Fatigue, *Fashion & Textile Research Journal*, 24(1), 156-163.
- Lee, Y.-S., Chang, L.-Y., Chung, W.-H., Lin, T.-C., Shiang, T.-Y., (2015), Does functional fitness decline in accordance with our expectation?—A pilot study in healthy female, *BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation*, 7(1), 1-6.
- Annese, V. F., De Venuto, D., (2015), Gait analysis for fall prediction using EMG triggered movement related potentials, *Proceedings of the 2015 10th International Conference on Design & Technology of Integrated Systems in Nanoscale Era (DTIS)*, 1-6.
- Rubenstein, L. Z., (2006), Falls in older people: Epidemiology, risk factors and strategies for prevention, *Age and Ageing*, 35(suppl\_2), ii37-ii41.
- Yamashita, K., Umezawa, J., Nomoto, Y., Ino, S., Ifukube, T., Koyama, H., Kawasumi, M., (2007), The role of toe-gap force for the evaluation of falling risk on the elderly, *Proceedings of the World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering 2006: August 27–September 1, 2006 COEX Seoul, Korea “Imaging the Future Medicine”*, 405-408.
- Senden, R., Savelberg, H., Grimm, B., Heyligers, I., Meijer, K., (2012), Accelerometry-based gait analysis, an additional objective approach to screen subjects at risk for falling, *Gait & Posture*, 36(2), 296-300.
- Pajala, S., Era, P., Koskenvuo, M., Kaprio, J., Törmäkangas, T., Rantanen, T., (2008), Force platform balance measures as predictors of indoor and outdoor falls in community-dwelling women aged 63–76 years, *The Journals of Gerontology Series A: Biological Sciences and Medical Sciences*, 63(2), 171-178.
- Tiedemann, A., Shimada, H., Sherrington, C., Murray, S., Lord, S., (2008), The comparative ability of eight functional mobility tests for predicting falls in community-dwelling older people, *Age and Ageing*, 37(4), 430-435.
- Lord, S. R., Menz, H. B., Tiedemann, A., (2003), A physiological profile approach to falls risk assessment and prevention, *Physical Therapy*, 83(3), 237-252.
- Ganz, D. A., Higashi, T., Rubenstein, L. Z., (2005), Monitoring falls in cohort studies of community-dwelling older people: Effect of the recall interval, *Journal of the American Geriatrics Society*, 53(12), 2190-2194.
- Bogle Thorbahn, L. D., Newton, R. A., (1996), Use of the berg balance test to predict falls in elderly persons, *Physical Therapy*, 76(6), 576-583.
- Panella, L., Lombardi, R., Buizza, A., Gandolfi, R., Pizzagalli, P., (2002), Towards objective quantification of the Tinetti test, *Functional Neurology*, 17(1), 25-30.
- Podsiadlo, D., Richardson, S., (1991), The timed “Up & Go”: A test of basic functional mobility for frail elderly persons, *Journal of the American Geriatrics Society*, 39(2), 142-148.
- Chen, M., Wang, H., Yu, L., Yeung, E. H. K., Luo, J., Tsui, K.-L., Zhao, Y., (2022), A systematic review of wearable sensor-based technologies for fall risk assessment in older adults, *Sensors*, 22(18), 6752.
- Kim, E.-K., Lee, J. C., Eom, M.-R., (2008), Falls risk factors of inpatients, *Journal of Korean Academy of Nursing*, 38(5), 676-684.
- Yeung, S. S., Reijnierse, E. M., Pham, V. K., Trappenburg, M. C., Lim, W. K., Meskers, C. G., Maier, A. B., (2019), Sarcopenia and its association with falls and fractures in older adults: A systematic review and meta-analysis, *Journal of Cachexia, Sarcopenia and Muscle*, 10(3), 485-500.
- Tajitsu, H., Fukumoto, Y., Asai, T., Monjo, H., Kubo, H., Oshima, K., Koyama, S., (2022), Association between knee extensor force steadiness and postural stability against mechanical perturbation in patients with Parkinson’s disease, *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 64, 102660.
- Menz, H. B., Morris, M. E., Lord, S. R., (2005), Foot and ankle characteristics associated with impaired balance and functional ability in older people, *The Journals of Gerontology Series A: Biological Sciences and Medical Sciences*, 60(12), 1546-1552.
- Endo, M., Ashton-Miller, J. A., Alexander, N. B., (2002), Effects of age and gender on toe flexor muscle strength, *The Journals of Gerontology Series A: Biological Sciences and Medical Sciences*, 57(6), M392-M397.
- Seynnes, O., Hue, O. A., Garrandes, F., Colson, S. S., Bernard, P. L., Legros, P., Singh, M. A. F., (2005), Force steadiness in the lower extremities as an independent predictor of functional performance in older women, *Journal of Aging and Physical Activity*, 13(4), 395-408.
- Carville, S. F., Perry, M. C., Rutherford, O. M., Smith, I. C. H., Newham, D. J., (2007), Steadiness of quadriceps contractions in young and older adults with and without a history of falling, *European Journal of Applied Physiology*, 100(5), 527-533.
- Mickle, K. J., Munro, B. J., Lord, S. R., Menz, H. B., Steele, J. R., (2009), ISB clinical biomechanics award 2009: Toe weakness and deformity increase the risk of falls in older people, *Clinical Biomechanics*, 24(10), 787-791.
- Choi, S. J., (2014), Sports Health Medicine: Getting to know fat, about fat between muscles in korean, *SPORT it*, 128, 66-71.

- <https://kiss.kstudy.com/Detail/Ar?key=3281553>
24. Vuillerme, N., Boigontier, M., (2008), Muscle fatigue degrades force sense at the ankle joint, *Gait & Posture*, 28(3), 521-524.
  25. Bigland-Ritchie, B., Furbush, F., Woods, J., (1986), Fatigue of intermittent submaximal voluntary contractions: Central and peripheral factors, *Journal of Applied Physiology*, 61(2), 421-429.
  26. Hong, S., Kim, Y.-W., Cho, W., Joa, K.-L., Jung, H.-Y., Kim, K., Lee, S., (2017), Berg balance scale score classification study using inertial sensor, *Journal of Rehabilitation Welfare Engineering & Assistive Technology*, 11(1), 53-62.
  27. Kim, J., Lee, J., Kim, D., Islomjon, B., Lee, K., Yoon, T., (2021), Acute response of toe-spread-out exercise on medial longitudinal arch height and balance, *The Asian Journal of Kinesiology*, 23(1), 27-33.
  28. Yu, Y., Si, X., Hu, C., Zhang, J., (2019), A review of recurrent neural networks: LSTM cells and network architectures, *Neural Computation*, 31(7), 1235-1270.
  29. Doheny, E. P., McGrath, D., Greene, B. R., Walsh, L., McKeown, D., Cunningham, C., Crosby, L., Kenny, R. A., Caulfield, B., (2012), Displacement of centre of mass during quiet standing assessed using accelerometry in older fallers and non-fallers, *Proceedings of the 2012 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 3300-3303.
  30. Zhu, W., Zeng, N., Wang, N., (2010), Sensitivity, specificity, accuracy, associated confidence interval and roc analysis with practical sas implementations, *NESUG proceedings: Health care and life sciences*, Baltimore, Maryland, 19, 67.
  31. Hirono, T., Ikezoe, T., Taniguchi, M., Yamagata, M., Miyakoshi, K., Umehara, J., Ichihashi, N., (2020), Relationship between ankle plantar flexor force steadiness and postural stability on stable and unstable platforms, *European Journal of Applied Physiology*, 120(5), 1075-1082.
  32. Tracy, B. L., (2007), Force control is impaired in the ankle plantarflexors of elderly adults, *European Journal of Applied Physiology*, 101(5), 629-636.
  33. Maki, B. E., Holliday, P. J., Topper, A. K., (1994), A prospective study of postural balance and risk of falling in an ambulatory and independent elderly population, *Journal of Gerontology*, 49(2), M72-M84.
  34. Lynn, S. K., Padilla, R. A., Tsang, K. K., (2012), Differences in static-and dynamic-balance task performance after 4 weeks of intrinsic-foot-muscle training: the short-foot exercise versus the towel-curl exercise, *Journal of Sport Rehabilitation*, 21(4), 327-333.
  35. Ema, R., Saito, M., Ohki, S., Takayama, H., Yamada, Y., Akagi, R., (2016), Association between rapid force production by the plantar flexors and balance performance in elderly men and women, *Age*, 38(5), 475-483.
  36. Tanaka, T., Noriyasu, S., Ino, S., Ifukube, T., Nakata, M., (1996), Objective method to determine the contribution of the great toe to standing balance and preliminary observations of age-related effects, *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering*, 4(2), 84-90.



**Jin Seon Kim**

Ph.D. student in the Department of Smart Health Science and Technology, Kangwon National University. Her research interest is toe strength and fall risk, development of smart device.

E-mail: yuw9184@gmail.com



**Hyungseok Lee**

Professor in the Department of Mechanical and Biomedical Engineering, Kangwon National University. His research interest is 3D bioprinting.

E-mail: ahl@kangwon.ac.kr



**Seong Un Choi**

M.r. degree graduate in the Department of Smart Health Science and Technology, Kangwon National University. His research interest is fault detection and diagnosis.

E-mail: cotur1215@kangwon.ac.kr



**Byeong Hee Kim**

Professor in the Department of Smart Health Science and Technology, Kangwon National University. His research interest is micro and nano system design and precision control of machine tools he design of medical device and AI application system design.

E-mail: kbh@kangwon.ac.kr



**Chang Yeop Keum**

M.r. degree graduate in the Department of Smart Health Science and Technology, Kangwon National University. His research interest is drug delivery and protein engineering.

E-mail: sr7692@kangwon.ac.kr



**Tejin Yoon**

Professor in the Department of Physical Education, Kangwon National University. His research interest is neuromuscular fatigue and development of smart device.

E-mail: tyoon@kangwon.ac.kr



**Jaehee Lee**

M.r. degree graduate in the Department of Smart Health Science and Technology, Kangwon National University. His research interest is glucose biosensor.

E-mail: worry234@gmail.com



**Woong Ki Jang**

Post-Doctorate researcher candidate in the Department of Smart Health Science and Technology, Kangwon National University. His research interest is micro/nanoscale surface texturing technologies and the design of medical devices and AI application system design.

E-mail: wkddndrl@kangwon.ac.kr



**Kwang Suk Lim**

Professor in the Department of Biotechnology and Bioengineering, Kangwon National University. His research interest is drug delivery and protein engineering.

E-mail: kslim@kangwon.ac.kr

## • 특집 • 스마트/디지털 헬스케어 기술(Smart/Digital Healthcare Technology)

# 랜덤포레스트를 활용한 필드하키 포지션 분류 가능성 분석

## Analysis of the Possibility of Classifying Field Hockey Positions Using Random-forest

김지웅<sup>1</sup>, 이승훈<sup>2,#</sup>, 정희덕<sup>1</sup>  
Ji Eung Kim<sup>1</sup>, Seung Hun Lee<sup>2,#</sup>, and Hoi Deok Jeong<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 한국스포츠정책과학원 국가대표스포츠과학지원센터 (Sports Science Center for National Team, Korea Institute of Sports Science)

<sup>2</sup> 가톨릭관동대학교 스포츠지도학과 (Department of Sports Coaching, Catholic Kwandong University)

# Corresponding Author / E-mail: [shlee8283@cku.ac.kr](mailto:shlee8283@cku.ac.kr), TEL: +82-10-4364-8282

ORCID: 0000-0002-7936-2164

KEYWORDS: Random forest (랜덤포레스트), GPS (위성항법장치), IMU (관성센서), Prediction rate (예측률), Position classification (포지션 분류), Field hockey (필드하키)

*Abstract* The purpose of this study was to check the position classification prediction rate based on the movement data of field hockey players using the random forest algorithm. In order to achieve the purpose of this study, movement data were collected using wearable devices in 15 practice matches. The collected information was then analyzed using the Random Forest algorithm, one of the ensemble techniques, with Python, a high-level, general-purpose programming language. As a result of this study, first, the position classification prediction rate was  $52.4 \pm 3.3\%$  when data measured by GPS sensors were used. Second, when using the data measured by an inertial measurement unit (IMU) sensor, the position classification prediction rate was  $50.8 \pm 2.4\%$ . Third, when both Global Positioning System (GPS) and IMU data were used, the position classification prediction rate was  $55.6 \pm 2.0\%$ . As a result of the study, it showed that the prediction rate was the highest when both GPS and IMU data were used.

Manuscript received: April 30, 2023 / Revised: May 25, 2023 / Accepted: June 3, 2023

### 1. 서론

스포츠에서 경기력을 정확하게 예측하기 위해서는 다양한 변인들을 고려해야 되며, 기술적, 심리적, 생리학적 데이터가 요구된다[1]. 다양한 데이터는 엘리트 스포츠에서 팀 전략수립 및 마케팅, 스카우트를 위한 중요한 자료로 활용되고 있다[2]. 특히 구기 종목에서는 데이터를 활용하여 최적의 포지션 및 대체선수를 찾는 객관적인 자료로 활용하고 있기 때문에[3], 정확한 예측을 위해서는 종목별로 방대한 양의 데이터가 필요하며 다각적인 연구들이 필요하다.

정보통신기술의 발달로 인하여 컴퓨터, IT센서들을 활용하여 방대한 양의 데이터를 수집하고 분석이 용이해졌다[4]. 이로 인하여

다양한 분야에서 머신러닝(Machine Learning)을 활용하여 자동적으로 통계적 규칙이나 패턴, 예측모델 개발을 위한 연구들이 진행되고 있다[5]. 특히 머신러닝은 컴퓨터가 데이터를 기반으로 자동으로 학습하여 의사결정을 내리도록 훈련시키는 과정이다. 주로 활용되고 있는 알고리즘으로는 퍼셉트론(Perceptron), 로지스틱 회귀분석, 지지벡터기계(SVM), K-최근접 이웃(k-NN) 등을 활용하여 종속변수와 상관성이 높은 변수 위주로 다양한 분야에서 결과를 예측하는 연구가 진행되어 왔다[6].

머신러닝의 장점은 의사결정의 우선순위를 지정하고 자동화하며, 실시간으로 입력되는 대량의 데이터를 처리하고 의사결정에 반영할 수 있다는 점이다. 이러한 특징은 1초당 약 1,000개의 데이터를 수집할 수 있고, 군집화와 패턴을 확인하여 경기력

향상을 위한 정보로 활용되는 스포츠분야에서 필요한 기술이다. 때문에 변수가 많아 경기력을 일반화하기 어려우며 경기결과를 쉽게 예측하기 어려운 스포츠에서 많은 연구가 필요하다.

이처럼 스포츠를 보다 정확히 예측하기 위해서는 다양한 변인과 대량의 데이터가 요구되며 머신러닝을 진행하기 위해서는 단일 알고리즘 보다는 앙상블 기법을 활용하고 있다[7]. 랜덤 포레스트는 앙상블 학습방법의 일종으로 분류와 회귀분석을 위한 알고리즘으로 의사결정나무 알고리즘의 단점인 과적합 가능성을 극복하고 높고 안정적인 예측력을 갖는 것으로 알려져 있다[8]. 스포츠에서 머신러닝을 활용한 연구들은 경기력 향상, 결과예측, 부상예방에 대한 연구들이 진행되고 있다. 선행연구들을 살펴보면 신경망분석을 활용하여 2006 독일월드컵 대회의 승패예측 모형을 개발하여 87.5%의 예측률을 확인하였으며[9], 국내 남자 프로농구경기의 승패예측 모형에서 인공신경망과 로지스틱 회귀분석을 통하여 85% 이상의 예측률을 확인하였다[10]. 또한, 의사결정나무, 베이즈넷, 인공신경망, 앙상블 모델을 활용하여 승패예측을 하였는데 앙상블 기법 중 배깅 기법에서 85.18%의 예측률을 확인하였다[11].

스포츠에서 선수들의 움직임을 정량화하는 방법은 크게 3가지가 있다. 첫 번째로 인공위성을 활용한 GPS (Global Positioning System), 자이로스코프(Gyroscope) 가속도계 지자계를 활용한 IMU (Inertial Measurement Unit) 센서, 카메라 영상을 통한 영상추적기술 등을 통해 선수들의 경기 중 움직임 정보를 실시간으로 수집하며 경기력분석 및 부상예방 등 다양한 분야에서 연구가 진행되고 있다[12]. 이처럼 움직임 정보는 스포츠에서 선수들의 경기력을 평가하는 중요한 데이터로 활용되고 있기 때문에 선수들의 특성을 반영할 수 있다.

따라서 본 연구는 앙상블 기법 중 하나인 랜덤포레스트 알고리즘을 활용하여 필드하키 선수들의 움직임 데이터를 기반으로 포지션 분류 예측률을 확인하고자 한다. 이를 통하여 향후 움직임 정보를 기반으로 포지션을 선정할 수 있는 기초자료를 제공하고 자 한다.

## 2. 연구방법

### 2.1 연구대상

본 연구는 29명의 여자 하키 선수들을 대상으로 15번의 연습경기에서의 움직임 정보를 수집하였다. 실험 전 선수들에게 연구의 목적과 실험 절차 등에 대한 설명을 하였다.

### 2.2 자료수집

본 연구는 15번의 필드하키 경기에서 선수들의 움직임을 정보를 획득하였으며, 자료의 획득은 IMU 센서가 내장된 웨어러블 디바이스 기기(Vector, Catapult) 모델을 활용하였다. Fig. 1과 같이 경기시작 30분 전 주머니가 있는 조끼를 착용하고 웨어러블 디바이스를 넣어 고정하였으며, 경기가 끝난 후 디바이스를 수거하고 자료를 수집하였다.



Fig. 1 Catapult wearable device

Table 1 Wearable device measurement variables

Sensor	Factor
GPS	Zone 1 distance [m, %]
	Zone 2 distance [m, %]
	Zone 3 distance [m, %]
	Zone 4 distance [m, %]
	Zone 5 distance [m, %]
	Zone 6 distance [m, %]
IMU	Velocity [km/h]
	Meter per min [m]
	Playerload
	Playerload per min
	IMA Acc low [n]
	IMA Acc med [n]
	IMA Acc high [n]
	IMA Dec low [n]
	IMA Dec med [n]
	IMA Dec high [n]

### 2.3 연구변인

본 연구의 변인은 Table 1과 같다. 먼저 GPS센서로 측정되는 변인으로는 6개 구간별 이동거리와 구간별 이동비율, 최고속도 (Velocity, km/h), 1분당 이동거리(Meter per min)를 활용하였으며, IMU센서로 측정되는 변인은 3축 가속도 움직임 값 (Playerload)과 1분당 3축 가속도 움직임 값(Playerload per min), 강도별 가속과 감속 횟수를 활용하였다.

### 2.4 자료처리 및 통계분석

15번의 연습경기에서 나타난 움직임을 정량화하기 위하여 Microsoft Excel (Microsoft, Redmond, WA, USA) 소프트웨어에서 쿼터별, 포지션별로 분류하여 총 949개의 움직임 데이터를 추출하였다. 정확한 분류를 위해 파이썬 버전 3.7 (Python Software Foundation, NED)을 사용하여 다중공선성의 문제가 없는 VIF (Variance Inflation Factor) 값은 10 이하인 22개의 요인만을 사용하였다.

데이터를 정규화하기 위해 Z값(z-score)으로 변화시키고,



학습데이터와 검증데이터의 비율은 80 : 20으로 설정하였으며, 정확성을 검증하기 위하여 K-fold 교차검증을 10회 실시하여 최종 예측률을 확인하였다.

Hyperparameter는 성능을 최적화하거나 편향(Bias) 과 분산(Variance) 사이의 균형을 맞출 때 알고리즘을 조절하기 위해 사용하며, 학습 전에 미리 사용자에게 의하여 조정되어야 하며, 본 연구에서는 2-10까지 넣어 가장 높은 예측률을 확인하였다.

정확도(Accuracy)는 전체 데이터 중에서 실제로 A or B를 정확하게 예측한 비율을 설명하는 값이며, F1-score는 예측모델의 성능을 평가할 수 있는 지표이다. 정밀도(Precision)는 모델에서 A로 분류한 데이터 중 실제로 A분류된 비율이며, 재현율은 실제 A인 데이터에 대하여 모델에서 A로 정확하게 예측한 비율이다.

### 3. 연구결과

#### 3.1 GPS데이터

Table 3은 GPS로 측정된 데이터를 활용하여 예측한 결과이다. 전체 949개의 데이터 중에서 테스트를 위하여 20%인 190개의 데이터를 활용하였다. 이 중 포지션이 Forward인 데이터 48개, Midfield 90개, Defender 52개가 활용되었다.

먼저 Forward의 예측결과를 보면 Precision 50%, Recall 2%, F1-score 4%로 나타났으며, Midfield의 예측결과를 보면 Precision 51%, Recall 91%, F1-score 66%로 나타났다. Defender는 Precision 75%, Recall 35%, F1-score 47%로 나타났으며, 알고리즘의 예측 정확성은 정확도는 54%로 확인되었다.

Fig. 1은 GPS데이터의 적합성을 판단하기 위한 그림으로 훈련 데이터의 샘플 수에 따른 정확성을 나타낸 그림이다. 학습데이터와 검증데이터의 일치율을 확인한 결과 500개 이상의 데이터에서 훈련 데이터와 검증 데이터의 과대적합은 피하나 정확성은 60% 이하로 나타났다.

Table 4는 K-fold 교차검증으로 모든 데이터가 최소 1 번은 테스트셋으로 쓰이도록 하여 10번의 테스트 결과 평균 정확도는 0.524±0.033으로 나타나 52.4±3.3%의 예측률로 확인되었다.

#### 3.2 IMU 데이터 예측률

Table 5은 IMU로 측정된 데이터를 활용하여 예측한 결과이다. 전체 949개의 데이터 중에서 테스트를 위하여 20%인 190개의 데이터를 활용하였다. 이 중 포지션이 Forward인 데이터 48개, Midfield 90개, Defender 52개가 활용되었다.

먼저 Forward의 예측결과를 보면 Precision 35%, Recall 15%, F1-score 21%로 나타났으며, Midfield의 예측결과를 보면 Precision 50%, Recall 84%, F1-score 63%로 나타났다. Defender는 Precision 47%, Recall 15%, F1-score 23%로 나타났으며, 알고리즘의 예측 정확성은 정확도는 48%로 확인되었다.

Fig. 2은 IMU데이터의 적합성을 판단하기 위한 그림으로 훈련 데이터의 샘플 수에 따른 정확성을 나타낸 그림이다.

Table 3 GPS data prediction results

	Precision [%]	Recall [%]	F1-score [%]	Support
Forward	50	2	4	48
Midfield	51	93	66	90
Defender	75	35	47	52
Accuracy			54	190
Weight avg.	57	54	45	190

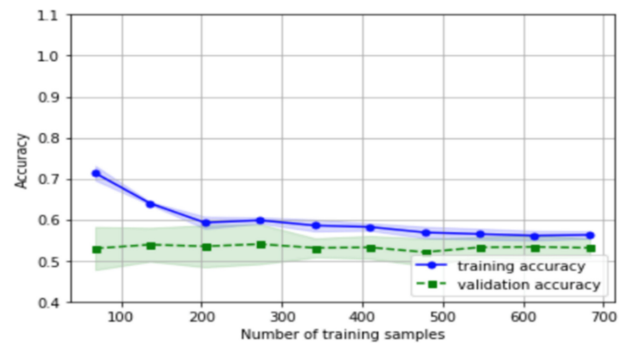


Fig. 1 GPS data conformity test

Table 4 GPS data K-fold cross-validation

Fold 1	Class Distribution: [0 216 404 234]	accuracy: 0.505
Fold 2	Class Distribution: [0 216 404 234]	accuracy: 0.558
Fold 3	Class Distribution: [0 216 404 234]	accuracy: 0.526
Fold 4	Class Distribution: [0 216 404 234]	accuracy: 0.537
Fold 5	Class Distribution: [0 216 404 234]	accuracy: 0.526
Fold 6	Class Distribution: [0 216 404 234]	accuracy: 0.516
Fold 7	Class Distribution: [0 216 404 234]	accuracy: 0.463
Fold 8	Class Distribution: [0 216 404 234]	accuracy: 0.484
Fold 9	Class Distribution: [0 216 404 234]	accuracy: 0.537
Fold 10	Class Distribution: [0 216 404 234]	accuracy: 0.585
Fold CV accuracy : 0.524±0.033		

Table 5 IMU data prediction results

	Precision [%]	Recall [%]	F1-score [%]	Support
Forward	35	15	21	48
Midfield	50	84	63	90
Defender	47	15	23	52
Accuracy			48	190
Weight avg.	45	48	41	190

학습데이터와 검증데이터의 일치율을 확인한결과 300개 이상의 데이터에서 훈련 데이터의 정확성과 검증 데이터의 과대적합은 피하나 훈련데이터와 검증데이터의 정확성은 60% 이하로 낮아지는 경향을 보였다.

Table 6은 K-fold 교차검증으로 모든 데이터가 최소 1 번은 테스트셋으로 쓰이도록 하여 10번의 테스트 결과 평균 정확도는

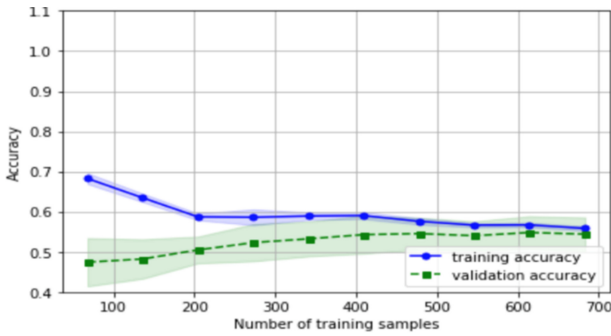


Fig. 2 IMU data conformity test

Table 6 IMU data K-fold cross-validation

Fold 1	Class Distribution: [0 216 404 234]	accuracy: 0.526
Fold 2	Class Distribution: [0 216 404 234]	accuracy: 0.516
Fold 3	Class Distribution: [0 216 404 234]	accuracy: 0.474
Fold 4	Class Distribution: [0 216 404 234]	accuracy: 0.484
Fold 5	Class Distribution: [0 216 404 234]	accuracy: 0.516
Fold 6	Class Distribution: [0 216 404 234]	accuracy: 0.558
Fold 7	Class Distribution: [0 216 404 234]	accuracy: 0.516
Fold 8	Class Distribution: [0 216 404 234]	accuracy: 0.516
Fold 9	Class Distribution: [0 216 404 234]	accuracy: 0.495
Fold 10	Class Distribution: [0 216 404 234]	accuracy: 0.479
Fold CV accuracy :		0.508±0.024

Table 7 GPS+IMU data prediction results

	Precision [%]	Recall [%]	F1-score [%]	Support
Forward	67	4	8	48
Midfield	51	97	67	90
Defender	83	29	43	52
Accuracy			55	190
Weight avg.	64	55	46	190

0.508±0.024으로 나타나 50.8±2.4%의 예측률로 확인되었다.

### 3.3 GPS+IMU 데이터

Table 7은 GPS로 측정된 데이터를 활용하여 예측한 결과이다. 전체 949개의 데이터 중에서 테스트를 위하여 20%인 190개의 데이터를 활용하였다. 이 중 포지션이 Forward인 데이터 48개, Midfield 90개, Defender 52개가 활용되었다.

먼저 Forward의 예측결과를 보면 Precision 67%, Recall 4%, F1-score 8%로 나타났으며, Midfield의 예측결과를 보면 Precision 51%, Recall 97%, F1-score 67%로 나타났다. Defender는 Precision 83%, Recall 29%, F1-score 43%로 나타났으며, 알고리즘의 예측 정확성은 정확도는 55%로 확인되었다.

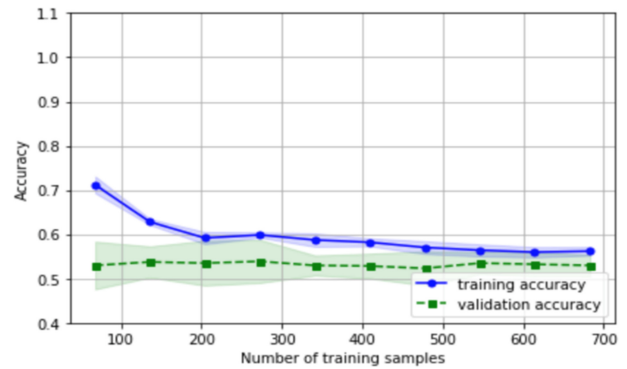


Fig. 3 GPS+IMU data conformity test

Table 8 GPS+IMU data K-fold cross-validation

Fold 1	Class Distribution: [0 216 404 234]	accuracy: 0.537
Fold 2	Class Distribution: [0 216 404 234]	accuracy: 0.547
Fold 3	Class Distribution: [0 216 404 234]	accuracy: 0.589
Fold 4	Class Distribution: [0 216 404 234]	accuracy: 0.558
Fold 5	Class Distribution: [0 216 404 234]	accuracy: 0.537
Fold 6	Class Distribution: [0 216 404 234]	accuracy: 0.558
Fold 7	Class Distribution: [0 216 404 234]	accuracy: 0.537
Fold 8	Class Distribution: [0 216 404 234]	accuracy: 0.558
Fold 9	Class Distribution: [0 216 404 234]	accuracy: 0.547
Fold 10	Class Distribution: [0 216 404 234]	accuracy: 0.596
Fold CV accuracy :		0.556±0.020

Fig. 3은 GPS+IMU 데이터의 적합성을 판단하기 위한 그래프로 훈련 데이터의 샘플 수에 따른 정확성을 나타낸 그래프이다. 학습데이터와 검증데이터의 일치율을 확인한 결과 550개 이상의 데이터에서 훈련 데이터의 정확성과 검증 데이터의 과대적합은 피하나 훈련데이터와 검증데이터의 정확성은 60% 이하로 낮아지는 경향을 보였다.

Table 8은 K-fold 교차검증으로 모든 데이터가 최소 1번은 테스트셋으로 쓰이도록 하여 10번의 테스트 결과 평균 정확도는 0.556±0.020으로 나타나 55.6±2.0%의 예측률로 확인되었다.

## 4. 고찰

스포츠분야에서 데이터를 활용한 머신러닝 적용은 승패예측, 부상예측과 같은 연구들이 시도되고 있지만, 최적의 결과를 얻지 못하고 있다[13]. 이는 스포츠는 각각의 종목마다 특성이 있으며, 경기결과에 영향을 미치는 요인이 많다. 이에 정확한 예측을 위해서는 방대한 양의 데이터가 뒷받침되어야 한다. 이에 본 연구는 스포츠경기 중 웨어러블 디바이스로 측정되는 움직임

데이터를 기반으로 포지션분류를 연구한 결과에 대한 고찰은 다음과 같다.

**4.1. 분류 예측률**

팀 스포츠경기에서 포지션은 경기장에서 자신의 위치이며, 위치에 따른 행동능력이 요구된다. 필드하키는 11명이 경기에 들어가서 각자의 포지션에 맞게 경기를 하지만, 축구와 달리 오프사이드가 없어 공격수와 미드필드 선수들은 상대 수비수의 위치에 관계없이 빈공간을 찾아서 움직인다. 이러한 특성 때문에 데이터에서 Forward와 Midfield의 데이터 차이가 분류되지 못했기 때문에 Forward의 Recall 값이 낮게 나온 것으로 사료된다.

포지션을 분류하기 위한 연구들을 보면 선수들의 기술적인 요인들을 기반으로 분류되었지만, 본 연구에서는 GPS와 IMU 센서로 측정되는 움직임 정보를 기반으로 포지션의 특성을 분류했기 때문에 뚜렷한 특성이 분류되지 못한 것으로 보인다. 이는 스포츠에서 선수들의 움직임에 대한 차이가 크게 없으며 변수의 특성이 이동거리와 속력에 대한 값이기 때문으로 사료된다. 따라서 경기전체에 대한 움직임 보다는 상황에 따른 움직임 정보를 수집해서 분류한다면 보다 포지션별 특성 차이가 나타날 것으로 사료된다.

**4.2. 학습데이터의 양**

머신러닝을 진행할 때 일반적으로 데이터셋의 크기는 다양하지만 일반적으로 10,000개의 데이터셋이 요구된다[14]. 하지만 스포츠에서 10,000개 이상의 데이터를 수집하기에는 어렵다. 특히, 필드하키 종목은 한국에서 비인기 종목이며, 데이터를 수집하기 위한 경기의 수도 한정적이기 때문에 선수들의 움직임 데이터를 수집하기에는 한계가 있다. 또한, 골키퍼 포지션은 큰 움직임이 없기 때문에 골키퍼를 제외한 필드선수만을 대상으로 진행했기 때문에 더욱 데이터의 양이 부족하였다. 때문에 본 연구 결과에서 포지션 예측률을 60% 이하로 나타난 것으로 보인다.

**5. 결론**

본 연구는 필드하키 경기에서 발생하는 움직임 정보를 두가지 센서로 측정된 데이터를 기반으로 포지션 분류 예측률을 비교하고, 활용가능성을 목적으로 연구되었다.

15번의 연습경기에서 측정된 949개의 데이터를 바탕으로 앙상블 모델 중 하나인 랜덤 포레스트를 활용하여 예측률을 확인하였으며, 연구결과를 토대로 도출한 결론은 다음과 같다.

첫째, GPS센서로 측정된 데이터를 활용하였을 때 포지션 분류 예측률은 52.4±3.3%로 나타났다.

둘째, IMU센서로 측정된 데이터를 활용하였을 때 포지션 분류 예측률은 50.8±2.4%로 나타났다.

셋째, GPS와 IMU 데이터를 모두 활용하였을 때 포지션 분류 예측률은 55.6±2.0%로 나타났다.

스포츠에서 움직임 데이터를 측정할 수 있는 센서 중 GPS와 IMU센서 두 가지 모두 활용하였을 때 높은 예측률을 확인하였지만 결론적으로 예측률이 낮아 향후 연구에서는 더 많은 사례 수를 5000개 이상으로 추가하고 기술적인 변인도 함께 고려하여 연구된다면 보다 높은 예측률이 기대된다.

**ACKNOWLEDGEMENT**

본 과제(결과물)는 2022년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업의 결과입니다(2022RIS-005).

**REFERENCES**

1. Yun, Y., Lee, Y., (2006), Hierarchical importance and structure of factors in football performance, Korean Journal of Sport Psychology, 17(4), 87-100.
2. Cho, J. H., (2012), Utilization and prospect of sport big data, The Korean Journal of Measurement and Evaluation in Physical Education and Sports Science, 14(3), 1-11.
3. Hong, J., Park, J., (2016), Analysis athletic performance assessment factors and importance based on handball players' Position, Korean Journal of Sports Science, 25(4), 1443-1454.
4. Sung, J. H., Cho, Y. S., (2019), Machine learning approach for pattern analysis of energy consumption in factory, Korea Information Processing Society, 8(4), 87-92.
5. Jeong, D., Jeong, W., (2019), Prediction of rolling noise based on machine learning technique using rail surface roughness data, Journal of the Korean Society for Railway, 22(3), 209-217.
6. Yi, J. H., Lee, S. W., (2020), Prediction of english premier league game using an ensemble technique, KIPS Transactions on Software and Data Engineering, 9(5), 161-168.
7. Buyrukoğlu, S., Savaş, S., (2023), Stacked-based ensemble machine learning model for positioning footballer, Arabian Journal for Science and Engineering, 48(2), 1371-1383.
8. Ko, T., Yang, H., Syed., Kim, M., Choo, H., (2020). Prediction of change in network traffic with random forest. Proceedings of the Korean Institute of Information Scientists and Engineers, Collection of Academic Presentations, 637-639.
9. Kim, J. H., Ro, G. T., Park, J. S., Lee, W. H., (2007), The development of soccer game win-lost prediction model using neural network analysis: FIFA world cup 2006 Germany, Korean Journal of Sport Science, 18(4), 54-63.
10. Gu, S. H., Kim, H. S., Jang, S. Y., (2009), A comparison study on the prediction models for the professional basketball games, Korean Journal of Sport Science, 20(4), 704-711.

11. Kim, W., Choi, Y., Yoo, D., (2018), Development of win-loss prediction models and strategies for improving winning rate of the Korean professional baseball teams using data mining techniques, Korea Journal of Sport Management, 23(3), 88-104.
12. Lee, H., Kim, J., (2019), Application of electronic performance tracking system (EPTS) for dance evaluation of dancers and prediction model of injury prevention, The Journal of Sport, 17(4), 1597-1607.
13. Kim, J., Cho, S., Kang, J., (2022), A study on optimization of convolutional neural network (CNN) for win-loss prediction of baseball game, Korean Society of Measurement and Evaluation for Physical Education and Sports Science, 24(4), 153-165.
14. Benkendorf, D. J., Hawkins, C. P., (2020), Effects of sample size and network depth on a deep learning approach to species distribution modeling, Ecological Informatics, 60, 101137.

**Ji-Eung Kim**

Sports Science Center for National Team, Korea Institute of Sports Science, Researcher. His research interest is sports performance analysis.

E-mail: amdykje@naver.com

**Seung-Hun Lee**

Professor in the Department of Sports Coaching, Catholic Kwandong University. His research interest is measurement and evaluation for physical education and sports science.

E-mail: shlee8283@cku.ac.kr

**Hoi-Deok Jeong**

Sports Science Center for National Team, Korea Institute of Sports Science, Researcher. His research interest is sports data analysis.

E-mail: jeonghd@sportsmatics.co.kr

# • 특집 • 스마트/디지털 헬스케어 기술(Smart/Digital Healthcare Technology) OpenCV를 이용한 부위별 안면마비 등급 측정 시스템 설계 Design of Facial Paralysis Class Measurement System Using OpenCV

기범근<sup>1</sup>, 장웅기<sup>1</sup>, 박용재<sup>1,\*</sup>  
Beom Geun Ki<sup>1</sup>, Woong Ki Jang<sup>1</sup>, and Yong-Jai Park<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> 강원대학교 대학원 스마트헬스과학기술융합학과 (Department of Smart Health Science and Technology, Graduate School, Kangwon National University)  
\*Corresponding Author / E-mail: yjpark@kangwon.ac.kr, TEL: +82-033-250-6371  
ORCID: 0000-0002-8830-3270

KEYWORDS: Facial palsy (안면 마비), Asymmetric face (안면 비대칭), Deep learning (딥 러닝), Image processing (영상 처리), Health care (헬스케어)

*Bell's palsy is a disease that occurs primarily between ages of 15 and 60, especially in middle-aged individuals. Although this disease gradually recovers within weeks to months, recurrence and permanent sequelae are possible. Its causes are diverse and unclear. Appropriate treatment is unknown, threatening lives of patients with this condition. In this study, we measured the degree of facial paralysis in a model of Bell's palsy patients using OpenCV and the H.B grade measurement method and classified measured values according to H.B grade classification. This enabled prediction of the type and risk of diseases that might occur depending on the degree of facial paralysis. Additionally, we utilized more coordinate data to confirm movement of facial muscles by region to address limitations of the Nottingham system measurement method. We graded the level of this movement to enable intuitive confirmation and confirmed differences between existing Nottingham system and the H.B grade. This simple system could determine the level of paralysis in patients with Bell's palsy and their corresponding risk level for related diseases. It enables information on causative disease of patients with Bell's palsy to be quickly obtained, enabling prompt treatment and support.*

Manuscript received: April 28, 2023 / Accepted: June 8, 2023

## NOMENCLATURE

HBGS = House-Brackmann Grading System  
NS = Nottingham System  
Rb = Raise Eyebrow  
Ce = Close Eye Tightly  
SO = Supraorbital  
IO = Infraorbital  
LC = Lateral Canthus  
M = Mouth

## 1. 서론

전 세계적으로 인구는 고령화가 진행 중이다. 선진국만 아니라 개발도상국 또한 최근 고령화가 시작함으로써 인구고령화는 세계적인 현상으로 나아가고 있다. 세계 보건기구(WHO)는 활동적인 노화(Active Aging)를 사람들이 나이가 들어감에 따라 건강과 관계, 안전, 삶의 질을 향상시키기 위한 과정이라고 정의한다[1]. 또한 유엔(UN)은 고령화 및 국가 발전, 가족의 지속 가능성, 고령화 인구를 부양할 수 있는 국가 및 지역 사회의 능력에 관한 문제에 대해 집중하고 있으며, 세계적으로 능동적인 고령화(Active Senior)에 대한 관심이 높아지고 있어 국가만이 아니라 사회의 개개인도 사회적으로 “성공적인 노화”를 위해

노력하고 있다[2]. 하지만 인간의 활동은 나이가 들면서 점진적으로 감소하며, 노화에 따른 다양한 질병들은 성공적인 노화를 위한 사회적인 노력을 방해할 수 있다[3].

본 연구진은 노인의 삶을 위협하는 질병 중 안면마비, 구안와사라고도 불리는 Bell's Palsy(벨 마비)에 대해 집중한다. 벨 마비는 여러 연령대와 성별에 걸쳐 발생한다고 보고되고 있다[4]. 환자 816명을 조사하였을 때의 평균 연령은 42.9세라고 보고된 사례를 보면 벨 마비는 중년층 이상부터 위협적인 질병이며 일생에 약 65명 중 1명이 경험할 정도로 잦은 빈도수를 나타낸다[5]. 벨 마비의 주요 원인은 제7뇌신경(안면 신경)의 급성 동측 마비로 발생한다[6]. 벨 마비는 일반적으로 몇 주에서 몇 달 안에 해결되지만 점진적으로 회복되며, 재발 위험과 심각한 경우에는 영구적인 후유증으로 인해 환자의 삶의 질까지 영향을 줄 수 있다. 벨 마비는 정확한 병인이 아직 불분명하며, 적절한 치료법 또한 알려지지 않고 있다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해 벨 마비에 대한 해부학적, 바이러스 감염, 허혈, 염증, 냉자극 등 다양한 원인에 대해 조사가 진행되고 있으며, 현재 병태생리학적 주요 가설은 HSV-1바이러스의 재활성화 또는 세포 매개 자가면역 염증 반응으로 제시되고 있다[7,8]. 벨 마비에 의해 나타나는 증상적 특징은 한쪽 얼굴이 처지는 것이 특징이며, 눈 깜박임, 미소 짓기, 인상 찡그리기 및 눈썹 올리기 등과 같은 안면 근육 운동에 대한 제어에 영향을 준다고 알려져 있다[9]. House-Brackmann Grading System (HBGS)는 벨 마비로 인하여 나타나는 증상들을 기반으로 안면 신경 마비의 신경 손상도를 등급화 하였다[10,11]. 이 등급 척도는 환자의 안면 기능을 정확히 설명하고 임상에서 빠르게 안면 신경도를 판단할 수 있는 척도로 사용된다. 이 질병은 너무 많은 불분명한 원인으로 인해 정확한 진단법과 치료법이 제시되지 않고 있으며 안면 마비 등급에 따른 벨 마비의 원인 질병에 대해서도 많이 조사되지 않았다.

본 연구에서는 먼저 벨 마비의 임상적 등급을 판별하기 위한 도구인 Nottingham System (NS)을 딥 러닝을 통한 이미지 프로세싱 라이브러리인 OpenCV를 사용하여, 벨 마비 환자와 정상인의 마비 정도를 수치화했다. 이후 기존 NS의 단점인 전부위 합에 대한 측정 계산방법으로 좌우의 대칭 정도 차이만을 비교하여 특정 상황에서 큰 오류가 나타날 수 있고 중추성 안면 마비의 평가가 어려운 점을 보완하였다. 안면 근육의 주요 거동 부위인 눈썹과 입꼬리 주위에 대한 변위를 전반적으로 확인하고 표정변화에 따른 부위별 안면 근육의 동작 정도와 좌우 차이를 수치적으로 확인했다. 그 중에서도 눈썹과 입꼬리에서 각각 3곳의 위치를 선택해 각 위치별 움직임의 수준을 등급화하여 기존의 NS 및 HBGS 등급과 비교하였다. 이를 통해 간단한 사진 입력으로 보다 정확한 안면의 각 부위별 움직임의 수준과 비대칭 정도를 실시간으로 확인하고 좌우 안면 근육의 움직임에 대한 등급과 안면 HBGS 등급을 함께 나타내는 시스템을 설계하였다. 나아가 안면 마비 환자의 진단 정보를 신속하게 얻을 수 있고 신속한 치료를 위한 지원을 목표로 한다.

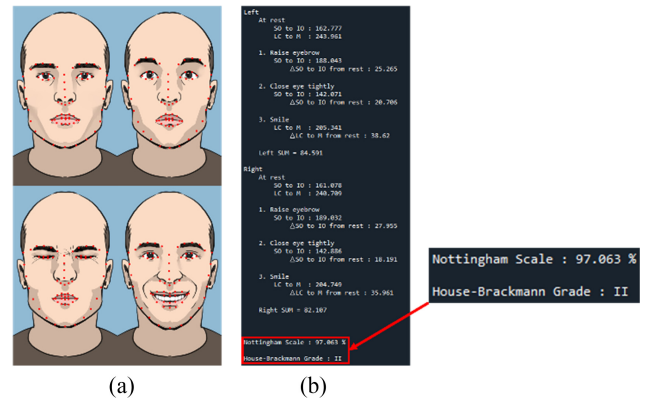


Fig. 1 Output results for Nottingham System scale and House-Brackmann grade. (a) Inserted Pictures, (b) System output results

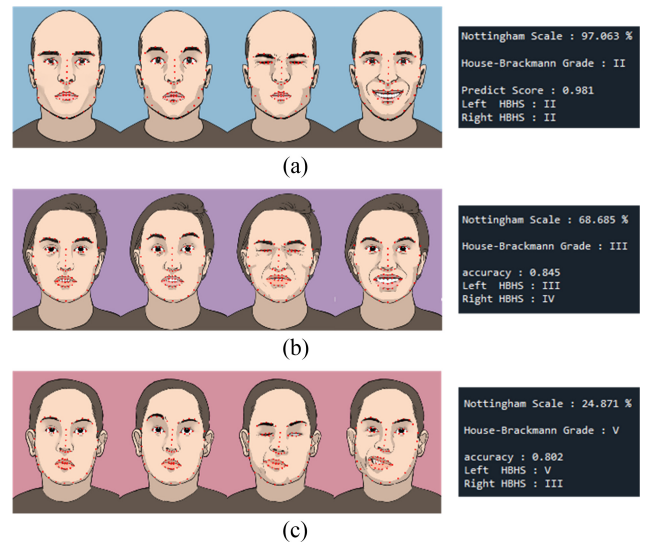


Fig. 2 Example of displaying face landmarks for virtual models using the OpenCV system. (a) Normal, (b) Mild facial asymmetry, (c) Severe facial asymmetry

## 2. OpenCV를 통한 안면 비대칭 측정 및 등급 분류

### 2.1 Nottingham System (NS) 기반 안면 비대칭 측정

NS는 안면 신경 기능 임상 평가를 위한 HBGS 분류를 위한 객관적인 시스템으로 안면 신경 기능의 신속한 평가를 위한 정확하고 객관적인 연속 등급 시스템으로 권장되어오고 있다. NS 스케일 백분율이 100에 가까울 수록 정상 범주에 속하며, 낮을 수록 안면 마비의 높은 수준에 대한 판별이 가능하다. NS 스케일 백분율에 따라 안면 신경 기능 임상 평가를 위해 가장 기준이 되는 HBGS로 분류될 수 있다. HBGS는 I-VI로 분류되며 등급이 높을수록 중증을 나타낸다. NS는 평상시의 얼굴 표정에서 Raise Eyebrow (Rb), Close Eye Tightly (Ce), Smile의 3가지 표정에 대한 각 부위에 따른 기준 좌표 사이의 거리를 측정한다. Fig. 3의 위치와 같이 좌우 안면에 대해 각 표정의 Supraorbital

Table 1 Measurement results for the Nottingham System and HBGS grade

No.	Side	Raise eyebrow	Close eye tightly	Smile	Sum	Nottingham Scale [%]	House-Brackmann grade
		$\Delta$ SO to IO from rest [pixel]	$\Delta$ SO to IO from rest [pixel]	$\Delta$ LC to M from rest [pixel]			
1	Left	25.3	20.7	38.6	84.6	97.1	2
	Right	28	18.2	36	82.1		
2	Left	29.8	6.3	15.9	52.1	99.4	2
	Right	24.7	9.5	17.6	51.8		
3	Left	19.9	22.6	19.6	62.1	97.9	2
	Right	22	18	23.4	63.4		
4	Left	27.6	16.5	16.5	60.6	68.7	3
	Right	22	10	9.6	41.6		
5	Left	1.5	12	23	37.1	64.8	3
	Right	4.5	4.9	14.5	24		
6	Left	1.4	5.9	15.7	23	84.8	2
	Right	1.9	7.4	17.8	27.1		
7	Left	20.5	1.5	26	48.5	54.4	3
	Right	36.5	22	30.6	89		
8	Left	0.6	15.6	0.7	17	26.4	4
	Right	17.4	15.6	31.5	64.4		
9	Left	5	5.6	2.8	13.4	24.9	5
	Right	1.4	17	35.4	53.7		

(SO)에서 Infraorbital (IO)까지의 거리 및 Lateral Canthus (LC)에서 Corner of Mouth (M)까지의 거리를 측정하여 비대칭 수준의 백분율이 HBGS 등급 체계로 적용될 수 있다. 우리는 더 정확하고 객관적인 안면마비 정도를 확인하고 환자의 마비 등급의 객관적인 분류를 위해 NS를 영상 처리 방법으로 적용하여 정상인, 경증 안면마비 환자 및 중증 안면마비 환자를 대상으로 4가지 표정 사진의 안면 마비 정도를 검증했다.

NS를 OpenCV를 통해 안면 경계의 좌표를 추출하여 안면마비 정도를 측정하고 등급을 분류하기 위해 4가지 표정 모델을 대상으로 얼굴 각 부위의 Landmark에 대한 정보를 직관적으로 사진에 표시했다. 이후 경계좌표를 이용해 각각의 사진에서 NS 스케일 측정에 필요한 좌표를 추출하여 SO에서 IO까지의 거리 및 LC에서 M까지의 거리를 계산하였다. 이를 정상인, 경증 안면마비 환자 및 중증 안면마비 환자 가상의 모델 9명을 대상으로 좌우 각각에 대한 거리를 합한 값의 비율을 통해 안면 마비 정도를 측정하는 NS 스케일 값이 나타나며 이어서 이 값을 안면마비 등급 HBGS로 출력했다. 가상의 안면마비 환자 모델 9명은 말초성 안면마비(편마비) 및 중추성 안면마비 환자 등 다양한 안면마비 정도를 나타내도록 구성하였다.

모델의 좌우 각각 좌표에 대한 거리를 합한 비율로 나타내어 안면 마비의 척도인 NS와 안면마비 등급 HBGS를 Fig. 1의 결과로 출력하였다. 결과적으로, 안면마비 환자 모델인 정상, 경증 및 중증 안면마비 환자 가상의 모델 사진을 시스템에 입력하여

Face Landmark의 Point Cloud가 안면 마비에 대한 비대칭 좌표가 정상적으로 표시됨을 Fig. 2와 같이 확인하였고 이후 가상의 모델 9명에 대한 NS 스케일 백분율과 이에 따른 HBGS 값이 매칭됨을 Table 1에서와 같이 확인하였다. 그러나 6번 환자 모델의 경우 중추성 안면마비 환자 모델이지만 NS 스케일이 높게 측정되어 HBGS 또한 높게 나타나는 오류가 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

2.2 NS의 단점을 보완하는 시스템 설계 및 지표 제시

NS에서 눈썹 변위가 비슷하여 오차가 커지는 중추성 안면마비 환자 및 눈썹과 입꼬리의 비대칭 정도를 한 번에 계산하는 과정에서 발생하는 오류를 보완하고자 평상시 표정에서 눈썹을 위로 올린 표정(Rb)과 눈을 세계 감았을 때(Ce) 눈썹의 위치 변화와 웃었을 때(S) 입꼬리의 위치 변화를 전반적으로 측정했다. NS의 측정 방법에 맞춰 Rb와 Ce 표정에서 눈썹의 모든 경계좌표로부터 IO까지의 거리를 측정하고 입꼬리는 웃는 표정에서 좌우로 나눈 입 전체의 경계좌표에서 LC까지의 거리를 측정한다. 이후 각 부위에서 특징적인 3곳(Fig. 4)의 경계좌표를 선택하여 더 넓은 범위의 안면 근육의 변화를 확인하고 좌우 비대칭 수준을 측정한다. 비대칭 평가에 특화된 NS와 추가로 부위별 변위의 수준에 대한 등급을 제시하여 보다 직관적인 안면 근육의 상태를 확인할 수 있도록 설계했다. 각 경계좌표에서 안면의 변위와 비대칭 수준은

Table 2 Improved eyebrow and mouth corner muscle measurement results for each of the three points, and grade of facial muscle movement

No.	Side	Raise eyebrow+Close eye tightly			Smile			Grade of facial muscle movement	
		ΔEyebrow to IO [pixel]			ΔMouth to LC [pixel]			Eyebrow	Mouth
		Point 1	Point 2	Point 3	Point 1	Point 2	Point 3		
1	Left	37.09	44.94	44.55	38.62	27.24	34.55	1	1
	Right	38.54	47.41	46.31	35.96	26.36	31.80	1	1
2	Left	28.31	33.57	35.80	15.93	18.83	15.87	3	3
	Right	31.80	36.14	35.10	14.86	17.58	14.54	3	4
3	Left	36.41	44.88	43.88	19.59	23.98	17.65	2	3
	Right	27.46	37.01	38.78	23.42	26.82	20.75	2	2
4	Left	37.53	38.57	37.84	16.51	16.15	17.12	2	3
	Right	31.88	36.26	38.15	9.60	6.97	9.67	2	4
5	Left	14.23	12.89	11.80	23.60	15.35	21.58	4	3
	Right	10.90	12.54	12.50	14.55	7.41	11.54	4	4
6	Left	8.21	15.27	7.58	17.81	15.53	16.09	4	3
	Right	7.88	12.70	7.43	15.70	10.83	9.78	4	4
7	Left	20.53	28.37	32.68	26.43	26.30	26.36	3	2
	Right	40.38	51.15	48.44	30.58	27.87	27.55	1	2
8	Left	14.88	5.85	1.80	0.75	5.87	1.14	5	5
	Right	41.48	46.64	43.40	31.45	28.21	30.06	1	1
9	Left	5.13	5.60	3.17	2.85	5.77	1.41	5	5
	Right	27.16	31.59	28.92	35.38	33.38	35.37	3	1

다음 식과 같이 나타냈다.

$$\Delta Eyebrow = \sqrt{(x_{rb} - x_{10_{rb}})^2 + (y_{rb} - y_{10_{rb}})^2} + \sqrt{(x_{ce} - x_{10_{ce}})^2 + (y_{ce} - y_{10_{ce}})^2} \quad (1)$$

$$- 2\sqrt{(x_{rest} - x_{10_{rest}})^2 + (y_{rest} - y_{10_{rest}})^2}$$

$$\Delta Mouth = \sqrt{(x_s - x_{LC_s})^2 + (y_s - y_{LC_s})^2} \quad (2)$$

$$- \sqrt{(x_{rest} - x_{LC_{rest}})^2 + (y_{rest} - y_{LC_{rest}})^2}$$

식(1)은 눈썹을 올리는 표정 Rb의 눈썹과 IO까지의 거리에서 평상시 표정(Rest)에 대한 거리의 차이와 눈썹을 내리는 동작인 Ce에서 Rest에 대한 차이를 합한 값으로 눈썹의 전체 움직인 거리를 계산했다. 식(2)는 웃는 표정에 대해 입꼬리의 움직임을 Rest와 비교하여 거리를 확인하였다.

### 3. OpenCV를 이용한 안면근육의 움직임 측정 결과

#### 3.1 부위별 안면 근육의 움직임 등급 제시 및 안면 비대칭 수준 개선 설계한 OpenCV를 기반으로 하는 안면 마비 측정 시스템을

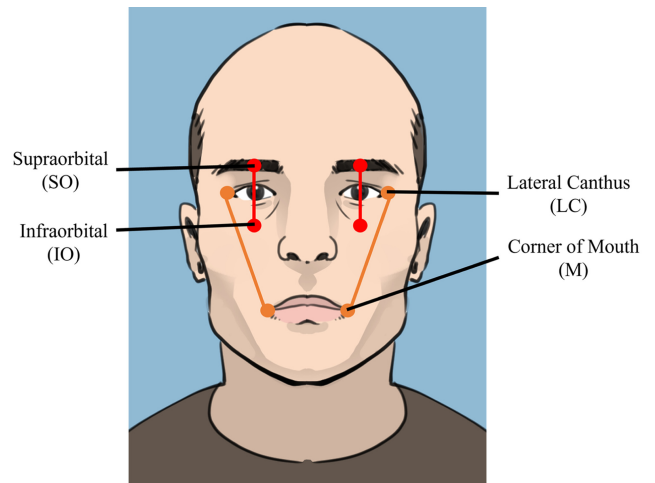


Fig. 3 Measurement locations for the Nottingham System (NS)

이용해 Fig. 4에서 보이는 위치의 안면 근육의 움직임을 측정 하였으며, 측정 결과는 Table 2에서 확인할 수 있다. 안면 근육의 움직임에 따른 눈썹과 입꼬리의 변화에 대한 거리를 이용해 안면근육의 움직임에 대한 등급을 표시했다. 등급은 측정된 전체 모델의 변위를 기준으로 부위별 거동에 대한 순위를 측정하고 각 포인트의 순위에 대한 평균값을 기준으로 선정하였다. 또한, Table 3에서 눈썹과 입의 비대칭 정도를 비율로 나타



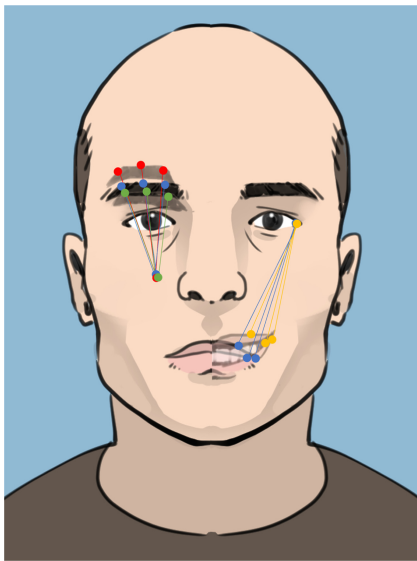


Fig. 4 Additional measurement locations for facial muscles

Table 3 Newly measured facial asymmetry scale

No.	Eyebrow [%]			Mouth [%]			Total [%]
	Point 1	Point 2	Point 3	Point 1	Point 2	Point 3	
1	96.2	94.8	96.2	93.1	96.8	92.1	93.5
2	89.0	92.9	98.0	93.3	93.3	91.6	90.3
3	75.4	82.5	88.4	83.6	89.4	85.1	79.5
4	84.9	94.0	99.2	58.1	43.1	56.5	64
5	76.6	97.3	94.4	61.6	48.3	53.5	62.5
6	96.0	83.1	97.9	88.2	69.7	60.7	71.9
7	50.8	55.5	67.5	86.4	94.4	95.7	68.6
8	35.9	12.5	4.2	2.4	20.8	3.8	3.3
9	18.9	17.7	11.0	8.0	17.3	4.0	7.5

Table 4 Comparison of measurement results between the previous system and our system

No.	Our system			The previous system		
	Grade of facial muscle movement		Facial asymmetry scale [%]	HBGS	NS scale [%]	HBGS
	Left	Right				
1	1	1	93.5	2	97.1	2
2	3	4	90.3	2	99.4	2
3	3	2	79.5	2	97.9	2
4	3	3	64	3	68.7	3
5	4	4	62.5	3	64.8	3
6	4	4	71.9	3	84.8	2
7	3	2	68.6	3	54.4	3
8	5	1	3.3	5	26.4	4
9	5	2	7.5	5	24.9	5

내 결과를 확인하였다. 사람마다 표정 변화 시 눈썹이 크게 움직이는 위치가 다르기 때문에 눈썹에서 기존 NS 스케일 대비 변화된 안면 비대칭 비율을 보여주었으며, 더 많은 포인트를 측정함으로써 보다 정확한 안면 근육의 움직임 변화를 확인할 수 있었다. Table 2에서 중추성 안면마비 모델인 6번 모델은 눈썹은 비교적 균등하게 움직일 수 있지만 입 부위에서 비대칭성이 나타나며 좌우 모두 운동 변위의 합이 작은 것을 관찰할 수 있다.

그러나 Fig. 3과 같이 눈썹에서 Point 2(SO), 입꼬리에서 Point 1(M)의 위치만을 측정하는 기존의 NS 스케일은 Table 1에서 보이는 것과 같이 6번 모델에 대해 84.8%의 높은 대칭 비율과 2등급의 HBGS를 나타내었다. 측정 포인트를 추가함으로써 입꼬리 부위에 대한 비대칭성을 확인하였으며 향상된 안면 비대칭 정도에 대한 스케일 또한 보정할 수 있었다. 결과적으로 Table 4와 같이 좌우 각각에 대한 움직임 등급, 안면 대칭 정도와 그에 따른 HBGS 등급을 표시하고 기존 NS 스케일과 비교하여 그 차이를 확인했다.

#### 4. 결론

안면 마비 인식을 위한 객관적인 평가는 관련된 질병에 대한 매핑을 위해 필수적이다. 안면 마비는 단순히 안면에 나타나는 이상 징후와 다양한 원인 및 원인 불명으로 인한 질병과 연관되어 있다. 이는 환자의 건강만이 아니라 삶의 질에도 연관되어 있다. 따라서 안면 마비의 빠른 진단과 신속한 치료가 이루어져야 한다. 원인이 되는 질병을 추적하기 전 필수적으로 안면 마비 정도의 수준을 우리는 먼저 이미지 프로세싱으로 NS 측정방법을 이용해 주요 부위의 거리 측정을 통해 빠르게 확인하였다. NS는 간단한 좌표 계산으로 이미지 프로세싱을 적용하기 편리하지만, 좌우 전체 안면 근육의 거리변화의 합을 통해 측정하기 때문에 이마와 눈썹 운동이 가능한 중추성 안면 마비에 대한 측정이 어려웠고, 각 부위별 증상정도를 파악하거나 비교하기 어려운 단점이 있었다. 중추성 안면마비 환자의 경우 좌우 안면 모두 거동이 불편하여 작은 변위를 나타내지만, 좌우 NS 요소의 합의 차이가 적기 때문에 NS와 HBGS가 높게 나타나는 오류가 발생한다. 이를 개선하기 위해 부위별 안면 근육 움직임의 측정을 위해 좌우 안면의 주요 부위에 대한 거동 변화를 등급별로 분류하여 기존의 NS 및 HBGS와 함께 비교할 수 있도록 시스템을 구성하였다. 이 시스템은 간단하게 4장의 사진을 입력하는 것으로 안면마비의 평가를 빠르게 수행할 수 있고 이미지 프로세싱을 통해 측정이 매우 간편하며 부위별 안면마비의 수준과 HBGS 체계에 잘 적용될 수 있다. 좌우 얼굴의 부위별 안면 마비 등급을 판별하고 NS를 통해 측정된 HBGS와 비교하여 오류를 보완하고 측정 결과를 보충할 수 있다. 또한 환자의 안면 마비 정도를 쉽고 빠르게 진단하고, 추후 치료에 참고할 수 있을 것으로 기대한다.

## ACKNOWLEDGEMENT

본 논문은 2023년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업의 결과이며(2022RIS-005), 2020년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업으로 수행된 연구임(No. 2020R111A3073575).

## REFERENCES

1. Paúl, C., Ribeiro, O., Teixeira, L., (2012), Active ageing: An empirical approach to the WHO model, *Current Gerontology and Geriatrics Research*, 2012, 382972.
2. Fernández-Ballesteros, R., Robine, J. M., Walker, A., Kalache, A., Active aging: A global goal, 2013, 298012.
3. Canhao, H., Branco, J. C., Liotta, G., (2018), Editorial: Active aging and disease management, *Front Med (Lausanne)*, 5. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmed.2018.00278>
4. Narci, H., Horasanlı, B., Uğur, M., (2012), Seasonal effects on Bell's palsy: Four-year study and review of the literature, *Iranian Red Crescent Medical Journal*, 14(8), 505-506.
5. Vakharia, K., (2016), Bell's palsy, *Facial Plastic Surgery Clinics of North America*, 24(1), 1-10. <https://www.clinicalkey.com/#!/content/playContent/1-s2.0-S106474061500084X>
6. Zhang, W., Xu, L., Luo, T., Wu, F., Zhao, B., Li, X., (2020), The etiology of Bell's palsy: A review, *Journal of Neurology*, 267(7), 1896-1905.
7. Schirm, J., Mulken, P. S., (1997), Bell's palsy and herpes simplex virus, *APMIS*, 105(7-12), 815-823.
8. Prud'hon, S., Kubis, N., (2018), Bell's palsy, *La Revue de Médecine Interne*, 40(1), 28-37.
9. Balakrishnan, A., (2015), Bell's palsy: Causes, symptoms, diagnosis and treatment, *Journal of Pharmaceutical Sciences and Research*, 7(11), 1004.
10. House, J. W., Brackmann, D. E., (1985), Facial nerve grading system, *Otolaryngology—Head and Neck Surgery*, 93(2), 146-147.
11. Song, I., Yen, N. Y., Vong, J., Diederich, J., Yellowlees, P., (2013), Profiling bell's palsy based on House-Brackmann score, *Proceedings of the 2013 IEEE Symposium on Computational Intelligence in Healthcare and e-health (CICARE)*, 1-6.



### Beom Geun Ki

M.S Student in the Department of Smart Health Science and Technology, Kangwon National University. His research interest is soft robotics and 3D printing technology.  
E-mail: [sjr02060@kangwon.ac.kr](mailto:sjr02060@kangwon.ac.kr)



### Woong Ki Jang

Ph.D in the Department of Smart Health Science and Technology, Kangwon National University. His research interest is micro/nanoscale surface texturing technologies and the design of medical devices and AI application system design.  
E-mail: [wkddndrl@kangwon.ac.kr](mailto:wkddndrl@kangwon.ac.kr)



### Yong-Jai Park

Associate professor in the Department of Smart Health Science and Technology, Kangwon National University. His research interest is soft robots and mechanism design.  
E-mail: [yjpark@kangwon.ac.kr](mailto:yjpark@kangwon.ac.kr)

# PEMFC용 MEA의 가압 공정을 통한 전기화학적 저항 변화 연구

## A Study on Electrochemical Resistance Change through the Pressurization Process of MEA for PEMFC

권예림<sup>1</sup>, 송동근<sup>1</sup>, 유호준<sup>1</sup>, 장계은<sup>1</sup>, 이영조<sup>1</sup>, 김정수<sup>1</sup>, 전지웅<sup>1</sup>, 금다혜<sup>1</sup>, 조구영<sup>1,#</sup>  
Ye Rim Kwon<sup>1</sup>, Dong Kun Song<sup>1</sup>, Ho Jun Yoo<sup>1</sup>, Gye Eun Jang<sup>1</sup>, Young Jo Lee<sup>1</sup>,  
Jung Soo Kim<sup>1</sup>, Ji Woong Jeon<sup>1</sup>, Da hae Guem<sup>1</sup>, and Gu Young Cho<sup>1,#</sup>

<sup>1</sup> 단국대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Dankook University)  
# Corresponding Author / E-mail: [guyoungcho@dankook.ac.kr](mailto:guyoungcho@dankook.ac.kr), TEL: +82-31-8005-3520  
ORCID: 0000-0002-7263-8172

KEYWORDS : Polymer electrolyte membrane fuel cell (고분자 전해질 막 연료전지), Membrane electrode assembly (막 전극 접합체), Mechanical pressure (기계적 압력), Electrochemical impedance spectroscopy (전기화학 임피던스 분광법), Active area (활성화 면적)

*In this study, the electrochemical characteristics of fuel cell were evaluated after applying a compressive load to the activation area of membrane electrode assembly (MEA) in polymer electrolyte membrane fuel cells. The effects of the pressed area under the compressive load were systematically investigated using polarization curves and electrochemical impedance spectroscopies (EIS) of the fuel cell. Interestingly, the performance of the fuel cell was improved as the pressed area of the MEA was increased from 25.2% to 100% of the active area. In addition, the increased pressed area led to a decrease in the ohmic resistance and the activation resistance of fuel cells.*

Manuscript received: December 23, 2023 / Revised: February 22, 2023 / Accepted: April 4, 2023  
This paper was presented at KSPE Autumn Conference 2022

### 1. 서론

연료전지(Fuel Cells)는 수소와 산소의 전기화학 반응을 이용하여 연료의 화학에너지를 전기에너지로 직접 전환하는 차세대 에너지 변환 장치이다[1,2]. 다양한 연료전지 중에서도 고분자 전해질 막 연료전지(Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells, PEMFCs)는 고분자로 이루어진 막을 전해질로 사용하고 백금/탄소(Pt/C) 촉매를 사용한다[2]. PEMFC는 작동온도가 낮고, 에너지 밀도가 높아서 가정용, 차량용 등 다양한 분야에서 사용되고 있다[3].

이렇게 다양한 분야에서 사용하기 위해서는 장시간 운전할 수 있는 내구성이 중요하다. PEMFC의 내구성을 결정하는 요인에는 여러 가지가 있다[4]. 그 중에 특히 심각한 원인으로는 막 전극 접합체(Membrane Electrode Assembly, MEA) 결함이 있으며, 그 원인에 따라서 기계적, 열적, 화학적-전기화학적 3 가지 범주로 분류할 수 있다[4]. 그 중 기계적 열화는 천공이나

찢어짐으로 연료전지의 고장을 유발한다. 이러한 기계적 열화는 막 전극 접합체의 조립 및 제조공정 또는 하중에 의해서 발생할 수 있다[5]. 선행연구에서는 PEMFC에 압축을 가해 특성을 측정하거나 Gasket의 두께를 다르게 하여 PEMFC 조립 시 MEA에 압축을 가하는 방법으로 연구를 진행했다[6-10]. 선행연구에서는 PEMFC에 압축을 가하기 위해서 연료전지를 조립할 때 볼트 체결력을 증가시키거나 유압 프레스기계를 이용하였고, 또한 그에 따른 PEMFC의 전기화학적 특성을 분석하는 연구도 수행되었다[6,9]. 연료전지에 압축하중이 가해진 경우로 유한요소해석법을 이용하여 압축하중의 영향을 평가하는 연구도 수행되었다[7,8]. 유한요소해석법은 촉매층(Catalyst Layer, CL)에 압축을 가한 연구도 수행되었는데 압축이 증가함에 따라 전기화학적 촉매 활용이 증가했다고 보고했다[11]. 선행연구에서 PEMFC에 과도한 압축을 가하는 경우 가스확산층(Gas Diffusion Layer, GDL)의 기공 구조 붕괴로 인해서 연료전지의 성능이 감소한

것이 보고되었다[6,9]. 또한 Cha et al.은 볼트 체결력의 증가로 인해 GDL의 다공성 감소로 역확산이 발생했다고 보고했다[9]. 반면에, Uzundurukan et al.은 압축으로 인해서 PEMFC 구성요소 간의 접촉저항이 감소하여 연료전지의 성능이 증가했다고 보고하였고, Sassin et al.은 압축응력이 증가할수록 셀 저항이 감소하였다고 보고했다[6,10]. 또한, 선행 연구에서 전해질막의 기계적 특성에 대한 연구와 촉매층(Catalyst Layer, CL)의 기계적 특성에 대한 연구가 진행되었다[12,13]. 하지만, MEA에 직접적인 하중을 가하여 연료전지의 전기화학적 특성을 분석한 연구는 진행되지 않았다. 또한 MEA의 활성화 면적의 일부분에 하중이 가해지는 경우에 대한 연구도 미비하다.

본 연구에서는 MEA의 활성화 면적에 직접 작용한 하중이 연료전지의 전기화학적 특성에 미치는 영향을 평가하였다. 10 kg 무게추를 이용하여 MEA에 직접 압력을 가하였다. 또한 압력이 작용한 활성화 면적의 크기에 따른 영향을 평가하기 위하여 아크릴 조각을 이용하여 압력이 작용하는 면적을 제어하였다.

2. 실험

본 연구의 개략도를 연구의 개략도는 Fig. 1에 나타내었다. 실험은 4.96 cm<sup>2</sup>의 활성화 면적을 갖는 상용 MEA (CNL MEA C Type)와 상용 GDL (SGL GDL 39BB)을 사용하였다. MEA의 Nafion 은 NR211 (Chemours)로 제작되었고, Ionomer는 D521 (Chemours)로 제작되었다. MEA 전극의 Pt Loading은 모두 0.4 mg/cm<sup>2</sup>이다.

연료전지 특성 평가는 상온(25°C)에서 진행하였다. Fuel Cell Test Station (CNL-Station, CNL, Korea)을 사용하여 PEMFC의 연료극에는 H<sub>2</sub>를 공급하였고, 공기극에는 버블러를 이용하여 가습한 공기를 공급하였다. 두 기체의 온도는 25°C로 유지되었다. 수소는 150 kPa의 압력으로 0.1 lpm의 유량으로 공급하였다. 공기는 150 kPa의 압력으로 0.5 lpm의 유량으로 공급하였다. 가습은 버블러에서 탈이온수로 진행하였으며, 버블러의 온도는 25°C로 유지되었다. 연료전지의 전기화학적 특성을 측정하기 위하여 상용 Potentiostat (HCP-803, BioLogic, France)을 사용하였다. 연료전지의 전기화학적 거동을 분석하기 위하여 j-V-P(전류밀도-전압-출력밀도) 곡선과 전기화학 임피던스 분광법(Electrochemical Impedance Spectroscopy, EIS)를 측정하였다. EIS는 0.5 V에서 측정하였다. Fig. 2(a)에는 MEA의 개략적인 단면도와 치수를 나타내었다. Fig. 2(b)에는 MEA의 정면도를 나타내었다. 촉매층의 두께는 5 μm이며, 35-40 μm 정도 보조가스켓이 있다.

Fig. 3(a)에는 활성화 면적에 압력을 가하기 위해 사용한 아크릴 조각의 개략도와 각 치수를 나타내었다. 아크릴 조각의 크기를 변형시켜 MEA의 활성화 면적의 일정 부분에 압력을 가할 수 있도록 제작하였다. 각 아크릴 조각은 MEA 활성화 면적의 25.2 % (1.24 cm<sup>2</sup>), 50.4 % (2.48 cm<sup>2</sup>), 100% (4.96 cm<sup>2</sup>) 면적을 갖도록 제작하였다. 이때 아크릴 면적이 1.24 cm<sup>2</sup>일 때 가해지는

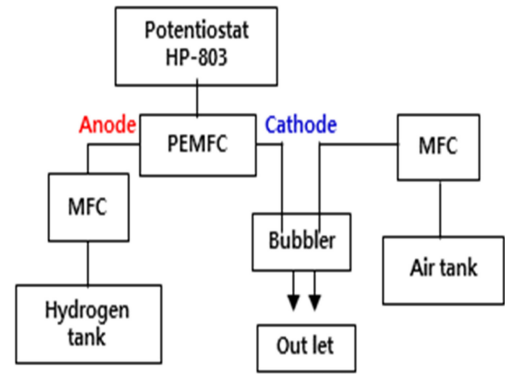


Fig. 1 Experimental schematic diagram

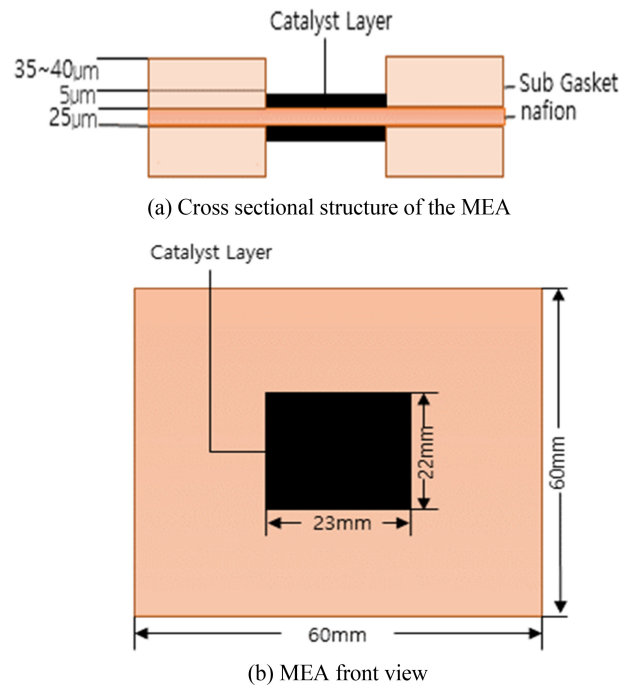


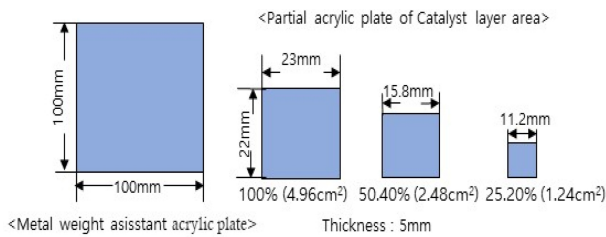
Fig. 2 Schematics of MEA

압력이 0.79 MPa이며, 2.48 cm<sup>2</sup>일 때는 0.39 MPa이고, 4.96 cm<sup>2</sup>일 때는 0.19 MPa이다. Fig. 3(b)에는 MEA의 활성화 면적에 압력을 가하고 있는 개략도를 나타내었으며, Fig. 3(c)에는 실제 압력을 가하고 있는 이미지를 나타내었다.

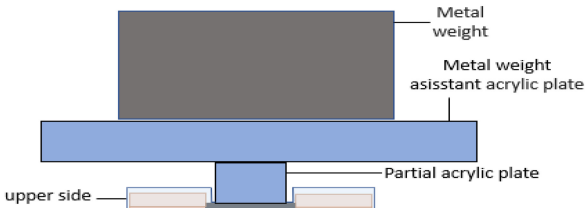
MEA의 활성화 면적에 압력을 가하기 위하여 MEA를 Storage Bag 안에 넣은 후, 서로 다른 면적을 갖는 아크릴 조각을 MEA의 활성화 면적 위에 올렸다. 그 후, 무게추를 지지해 주기 위한 대면적 아크릴 판을 올린다. 아크릴 판 위에 10 kg 금속 무게추를 올려 5시간 동안 압력을 가했다.

3. 결과 및 고찰

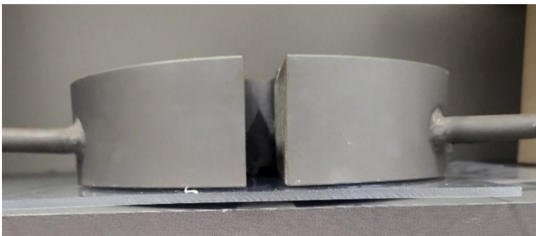
5시간 동안 MEA의 활성화 면적에 압력을 가한 후 연료전지의



(a) Schematics of acrylic plate



(b) Schematics of press experiments

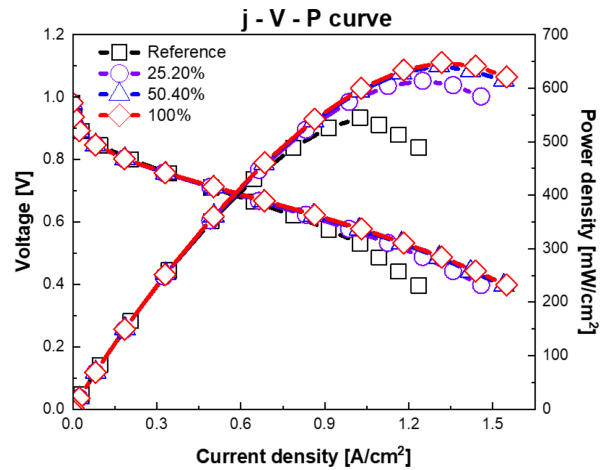


(c) Actual press experiments

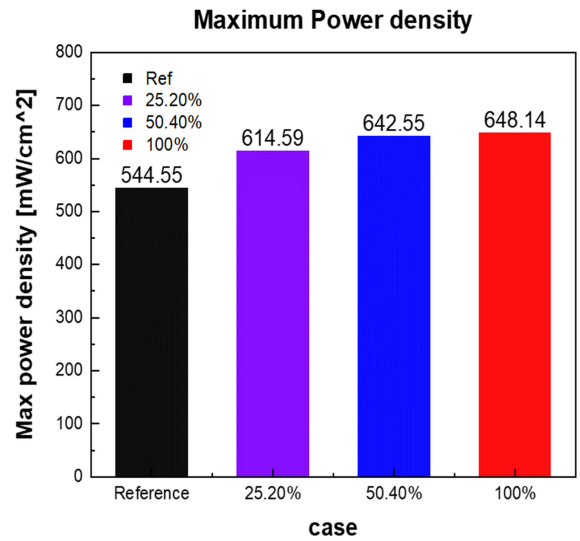
Fig. 3 Images of acrylic plates and actual experimental image

전기화학 특성을 평가하였다. Fig. 4(a)에 연료전지의 j-V-P 곡선을 나타내었다. MEA의 활성화 면적에 직접 압력을 가한 아크릴 조각의 크기가 커질수록 PEMFC 성능이 증가하였다. 즉, MEA의 활성화 면적과 비교하여 압력을 받는 면적이 25.2% (1.24 cm<sup>2</sup>)에서 50.4%(2.48 cm<sup>2</sup>) 100%(4.96 cm<sup>2</sup>)로 점차 증가할수록 연료전지의 성능이 증가하였다 연료전지의 성능을 Fig. 4(b)에 요약하여 나타내었다. 아무런 압축을 받지 않은 기준 연료전지의 성능은 544.55 mW/cm<sup>2</sup>로 측정되었다. 하지만, MEA 활성화 면적의 25.2%(1.24 cm<sup>2</sup>)의 크기를 가진 아크릴 조각으로 활성화 면적에 압축하중을 가했을 때는 성능이 614.59 mW/cm<sup>2</sup>로 측정되어 12.86% 성능이 증가하였다. MEA 활성화 면적의 50.4%(2.48 cm<sup>2</sup>) 면적에 압축하중을 가한 경우 연료전지의 성능은 642.55 mW/cm<sup>2</sup>로 17.99% 증가하였고, 100%(4.96 cm<sup>2</sup>) 면적에 하중을 가했을 때는 648.14 mW/cm<sup>2</sup>로 19.02% 증가하였다.

연료전지의 전기화학적 거동을 더 자세히 분석하기 위하여 EIS 분석을 실시하였다. Fig. 5에 PEMFC의 Nyquist Plot을 나타내었다. 일반적으로 연료전지의 저항은 활성화 저항, 오믹 저항, 물질전달 수송 저항으로 구성되어있다[2]. 그 중 오믹 저항은 주로 원점에서 연료전지의 Nyquist Plot 그래프가 시작하는 지점이자 고주파수 영역에 해당하는 X절편에 해당하는 점까지의 거리로 나타난다. 활성화저항은 주로 오믹 저항 이후 나타나는 반원의 크기로 나타난다[14,15]. EIS 분석을 통해서 각 연료전



(a) j-V-P curves of PEMFCs



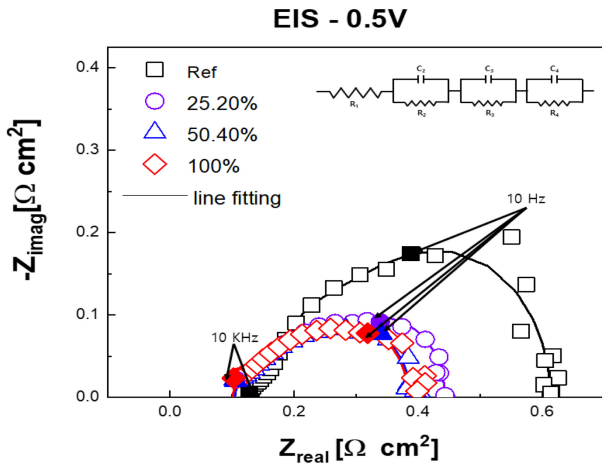
(b) The performance of fuel cells

Fig. 4 j-V-P curves of fuel cells weight with separately other area acrylic plate for 5hours and maximum power densities graph

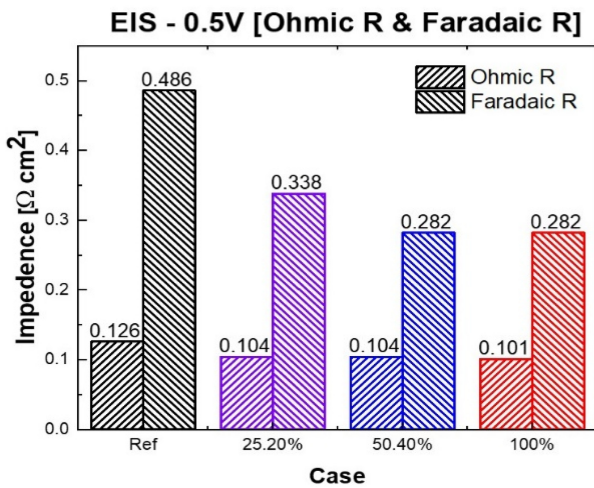
지의 저항성분들을 구하였다.

아무런 하중을 가하지 않은 연료전지의 오믹 저항은 0.126 Ω·cm<sup>2</sup>이며 활성화 저항은 0.486 Ω·cm<sup>2</sup>이다. 활성화 면적의 25.2%(1.24 cm<sup>2</sup>)에 압축하중을 가한 연료전지의 오믹 저항은 0.104 Ω·cm<sup>2</sup>로 17.46% 감소하였고, 활성화 저항은 0.338 Ω·cm<sup>2</sup> 30.45% 프로 감소하였다. 50.4%(2.48 cm<sup>2</sup>) 면적에 압축 하중을 가한 연료전지의 오믹 저항은 0.104 Ω·cm<sup>2</sup>로 17.46% 감소하였고, 활성화 저항은 0.282 Ω·cm<sup>2</sup>로 41.97%가 감소하였다. MEA활성 면적의 100%(4.96 cm<sup>2</sup>) 면적에 압축을 가한 연료 전지의 오믹 저항은 0.101 Ω·cm<sup>2</sup>로 19.84% 감소하였고, 활성화 저항은 0.282 Ω·cm<sup>2</sup>로 41.97% 감소하였다.

볼트체결력으로 PEMFC에 압력을 가했을 때 유한요소해석을 통해 전극층의 전기화학적 촉매작용에 대한 연구를 진행한 Akbar의 연구에 따르면 전자와 양성자의 전도도가 증가하고 잠재적으로 추가 반응 사이트가 제공되어 전기화학적 촉매 활용



(a) Nyquist plots of fuel cells measured at 0.5 V



(b) Ohmic resistance and Faradaic resistance graph

Fig. 5 Nyquist plots of fuel cells measured at 0.5 V and ohmic resistance, Faradaic resistance graph

이 증가한다고 보고하였다[11]. 또한 Gasket의 두께를 바꾸어 MEA에 압축응력을 가한 Sassin et al.의 연구에 따르면 최적의 성능을 내는 압축응력이 있으며 압축 응력이 증가할수록 셀 저항 또한 감소하였다고 보고하였다[10].

본 연구에서는 Fig. 5에서 나온 것과 같이 MEA의 활성화 면적 대비 압축하중을 받는 면적이 증가할수록 연료전지의 오믹 저항과 활성화 저항이 감소하였다.

이는 선행연구에서 MEA에 압축응력을 가했을 때 나타난 셀 저항의 감소와 전류밀도 및 성능 증가 그리고, 볼트체결력의 영향으로 전극층에 압력이 가해져서 전기화학적 촉매활동의 증가로 성능증가가 나타난 결과와 유사한 것으로 생각된다[10,11].

4. 결론

본 연구에서는 MEA 활성화 면적에 아크릴 조각과 10 kg 무게추를 이용하여 압축 하중을 5시간 동안 가한 뒤 연료전지

의 전기화학적 특성을 평가하였다.

연료전지의 j-V-P 곡선과 EIS를 이용하여 압축하중이 MEA 활성화 면적의 일부분에 작용했을 때 그 영향을 분석했다. 실험결과 아크릴 조각의 면적이 25.2%부터 100%까지 증가할수록 연료전지의 성능이 향상되었다. EIS 분석 결과, 하중이 직접 가해진 아크릴 조각이 차지하는 면적이 증가할수록 전체 연료전지의 오믹 저항과 활성화 저항이 감소하였다.

압축하중에 따른 연료전지의 전기화학적특성을 연구한 선행연구처럼, 셀 저항이 감소하였고, 성능의 증가가 관찰되었다[10]. 이는 선행연구에서 MEA 촉매층이 일부 압축되면서 전자와 양성자의 전도도가 증가하고 잠재적으로 추가 반응 사이트가 제공되어 전기화학적 촉매 활용이 증가한 것과 같은 이유로 판단된다[11].

본 연구에서는 금속추의 무게가 동일하고 아크릴 면적을 다르게 하여 무게를 가했기 때문에 MEA에 가해지는 압력이 달라졌다. 아크릴면적이 1.24 cm<sup>2</sup>인 경우 가해지는 압력이 0.79 MPa이며, 2.48 cm<sup>2</sup>일 때는 0.39 MPa이고, 4.96 cm<sup>2</sup>에서는 0.19 MPa이다.

선행연구에서는 셀에 가해지는 압력이 증가할수록 성능이 증가했다[10]. 따라서, 4.96 cm<sup>2</sup> 아크릴 면적에서 압축력이 증가하여 압력이 증가한다면 PEMFC의 성능이 본 연구결과보다 증가할 가능성이 있다. 따라서 PEMFC에 가해지는 압력과 MEA의 늘리는 면적에 관한 추가적인 연구가 필요하다.

본 연구 결과는 고분자 전해질 연료전지 생산, 운반, 보관, 사용 등의 응용연구에 널리 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 논문은 산업통상자원부 ‘산업전문인력역량강화 사업’의 재원으로 한국산업기술진흥원(KIAT)의 지원을 받아 수행된 연구임(No. P0017120, 2022년 친환경자동차(xEV) 부품개발 R&D 전문인력양성사업). 또한, 이 논문은 2021년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 20213030030260, 항공용 모빌리티를 위한 연료전지 경량화 기술 개발).

REFERENCES

1. Li, Y., Wang, H., Priest, C., Li, S., Xu, P., Wu, G., (2021), Advanced electrocatalysis for energy and environmental sustainability via water and nitrogen reactions, *Advanced Materials*, 33(6), 2000381.
2. O'hayre, R., Cha, S.-W., Colella, W., Prinz, F. B., (2016). *Fuel cell fundamentals*. John Wiley & Sons.
3. Qiao, Z., Wang, C., Zeng, Y., Spendelow, J. S., Wu, G., (2021),

- Advanced nanocarbons for enhanced performance and durability of platinum catalysts in proton exchange membrane fuel cells, *Small*, 17(48), 2006805.
4. Collier, A., Wang, H., Yuan, X. Z., Zhang, J., Wilkinson, D. P., (2006), Degradation of polymer electrolyte membranes, *International Journal of Hydrogen Energy*, 31(13), 1838-1854.
  5. Wu, J., Yuan, X. Z., Martin, J. J., Wang, H., Zhang, J., Shen, J., Wu, S., Merida, W., (2008), A review of PEM fuel cell durability: Degradation mechanisms and mitigation strategies, *Journal of Power Sources*, 184(1), 104-119.
  6. Uzundurukan, A., Bilgili, M., Devrim, Y., (2020), Examination of compression effects on PEMFC performance by numerical and experimental analyses, *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(60), 35085-35096.
  7. Hu, G., Wu, X., Suo, Y., Xia, Y., Xu, Y., Zhang, Z., (2018), Finite element analysis of PEMFC assembling based on ANSYS, *International Journal of Electrochemical Science*, 13, 2080-2089.
  8. Lee, S.-J., Hsu, C.-D., Huang, C.-H., (2005), Analyses of the fuel cell stack assembly pressure, *Journal of Power Sources*, 145(2), 353-361.
  9. Cha, D., Ahn, J. H., Kim, H. S., Kim, Y., (2015), Effects of clamping force on the water transport and performance of a PEM (proton electrolyte membrane) fuel cell with relative humidity and current density, *Energy*, 93, 1338-1344.
  10. Sassin, M., Garsany, Y., Gould, B., Swider-Lyons, K., (2016), Impact of compressive stress on MEA pore structure and its consequence on PEMFC performance, *Journal of The Electrochemical Society*, 163(8), F808.
  11. Akbar, A., Um, S., (2022), Influence of external clamping pressure on nanoscopic mechanical deformation and catalyst utilization of quaternion PtC catalyst layers for PEMFCs, *Renewable Energy*, 194, 195-210.
  12. El Kaddouri, A., Perrin, J.-C., Colinar, T., Moyne, C., Leclerc, S., Guendouz, L., Lottin, O., (2016), Impact of a compressive stress on water sorption and diffusion in ionomer membranes for fuel cells. A <sup>1</sup>H NMR study in vapor-equilibrated Nafion, *Macromolecules*, 49(19), 7296-7307.
  13. Goulet, M.-A., Khorasany, R. M., De Torres, C., Lauritzen, M., Kjeang, E., Wang, G. G., Rajapakse, N., (2013), Mechanical properties of catalyst coated membranes for fuel cells, *Journal of Power Sources*, 234, 38-47.
  14. 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.
  15. Jang, G. E., Lee, Y. J., Cho, G. Y., (2022), Effects of current collecting methods for polymer bipolar plate of ultra-light polymer electrolyte membrane fuel cells, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 39(2), 109-114.



**Ye Rim Kwon**

Under graduated student in the Department of Mechanical Engineering, Dankook University. Her research interests are fabrication and characterization of polymer electrolyte membrane fuel cells..

E-mail: dpfla1262@dankook.ac.kr



**Jung Soo Kim**

Under graduated student in the Department of Mechanical Engineering, Dankook University. His research interests are fabrication and characterization of polymer electrolyte membrane fuel cells.

E-mail: 32170943@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 solid oxide fuel cells.

E-mail: d72220125@dankook.ac.kr



**Ji Woong Jeon**

Under graduated student 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



**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



**Da hae Guem**

Under graduated student in the Department of Mechanical Engineering, Dankook University. Her research interests are fabrication and characterization of polymer electrolyte membrane fuel cells.

E-mail: 32205079@dankook.ac.kr



**Gye Eun Jang**

M.S. degree graduation in the Department of Mechanical Engineering, Dankook University. Her research interests are fabrication and characterization of ultra light polymer electrolyte fuel cells.

E-mail: wkdrpms12@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 interests are fuel cells, thin films, and semiconducting processes.

E-mail: guyoungcho@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



## 유화 분석을 위한 현미경 이미지의 다중 초점 기법 연구

# A Study on the Multi-focus Method of Microscopic Images for Oil-painting Analysis

김형태<sup>1,#</sup>, 이덕연<sup>2</sup>, 최동운<sup>2</sup>, 강재현<sup>2</sup>, 이동욱<sup>2</sup>  
Hyung Tae Kim<sup>1,#</sup>, Duk-Yeon Lee<sup>2</sup>, Dongwoon Choi<sup>2</sup>, Jaehyeon Kang<sup>2</sup>, and Dong-Wook Lee<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 한국생산기술연구원 디지털전환연구부 (Department of Digital Transformation Research, Korea Institute of Industrial Technology)

<sup>2</sup> 한국생산기술연구원 AI로봇연구부 (AI Robot R&D Department, Korea Institute of Industrial Technology)

# Corresponding Author / E-mail: [htkim@kitech.re.kr](mailto:htkim@kitech.re.kr), TEL: +82-31-8040-6878

ORCID: 0000-0001-5711-551X

KEYWORDS: Multi-focus (다중 초점), Image fusion (영상 합성), Microscopy (현미경 검사), Digital focus index (디지털 초점 지수), Lens depth (렌즈 심도)

*During digital microscopy of an oil painting surface it is inconvenient to analyze an entire image due to multiple defocused areas. The defocusing is usually caused by the small depth of the lens and the rough surface curve. Thus, these microscopic images in an oil painting have multiple focal points, which indicates multi-focus images. We present a multi-focus fusion synthesizing a focused image from scans based on focal direction and selection of focused places. Based on microscopic characteristics, a common scanned area of the images was defined to unify the lens multiplication. A focus index was applied to each pixel to identify well-focused pixels and generate a mapping image in the focal direction. Subsequently, a median filter was applied to the mapping image and a multifocal image was acquired based on actual pixel values obtained from the mapping image. The proposed method was utilized in analyzing oil painting samples carrying rough surface curves. The multifocal image facilitated the analysis of the oil painting surface and resulted in enhanced quality compared with other methods. The proposed method can be used to generate useful images in scientific and industrial microscopy.*

Manuscript received: December 26, 2022 / Revised: March 3, 2023 / Accepted: March 13, 2023  
This paper was presented at KSPE Autumn Conference 2022

### NOMENCLATURE

$\alpha$  = Image Resize Ratio  
 $\alpha^*$  = Specified Image Resize Ratio  
 $F$  = Focus Index of Source Images  
 $F''_z$  = Focus Index of Images of Common Area  
 $I_c$  = Local Image of Common Area  
 $I_f$  = Well-focused Image in Source Images  
 $I_m$  = Multi-focus Image after Image Fusion  
 $I_z$  = Source Images  
 $I'_z$  = Resized Images  
 $I''_z$  = Images of Common Area in Source Images

$n$  = The Number of Images  
 $S_x$  = Image after Horizontal Sobel Operation  
 $S_y$  = Image after Vertical Sobel Operation  
 $S''_x$  = Images of Common Area in Source Images after Sobel Operation  
 $S''_y$  = Images of Common Area in Source Images after Sobel Operation  
 $x$  = Horizontal Position in an Image  
 $x^*$  = Specified Horizontal Position in an Image  
 $y$  = Vertical Position in an Image  
 $y^*$  = Specified Horizontal Position in an Image  
 $z$  = Camera Position in Focal Direction

---

$\hat{z}$	=	Position of Maximum Image Index in Source Images
$\hat{z}'$	=	Filtered Position of Maximum Image Index in Source Images

---

**1. 서론**

미국과 유럽 등 서구권에서는 미술품 분석에 첨단 정밀 장비를 활용하고 있으며, 일부 국가에서는 미술품 거래 시 진위 여부를 판별하는 증명이 필요한 경우도 있다[1]. 최근에는 미술품에 대한 가상 자산 시장의 활성화에 따라 미술품의 과학적 분석과 정밀 측정의 중요성이 높아지고 있다[2]. 서구권의 미술품 중에서도 유화의 비중은 매우 높은 편이며, 대중적 인지도가 높은 명화들도 과학적인 방법으로 분석한 사례도 많다. 네델란드의 대표적 화가 베르메르의 작품에 X선 회절 분석 기법을 적용하여 성분 분석을 수행하였고, 단면 영상을 획득한 사례가 있다[3]. 노르웨이의 화가 뭉크의 작품을 초분광 이미징 기법으로 분석하여 복원의 기초 자료로 활용한 사례도 있다[4]. 피카소의 작품을 중적외선 분광법으로 분석하여 물감의 분포를 가시화한 사례도 있다[5]. 이와 같이 유화의 경우 분석에는 X선, 적외선 및 가시광 등을 활용한 광학적 비파괴 방식이 선호된다.

유화의 분석 및 진위 감정에서는 현재까지도 현미경 영상을 대부분 활용하고 있다. 주로 유화 작품에서 나온 물감 시편에 다양한 조명을 조사하여 획득한 현미경 영상으로부터 안료의 종류를 판별한다[6]. 또한, 현미경 영상은 작품의 수정 여부, 작가의 특성, 재료의 발명 시기 및 색상의 변화 등의 관찰에도 사용된다[7]. 보다 정확한 관찰을 위하여 자외선, 편광 및 FTIR 등을 사용하기도 하고, 시편을 가열하여 용해 특성을 관찰하기도 한다[8]. 한편, 유화 시편의 현미경 영상에서는 초점에서 벗어난 영역이 다수 관찰되므로, 분석 작업이 다소 불편해지게 된다. 원인으로서는 유화 시편의 굴곡 대비 현미경 렌즈의 심도가 작기 때문이다. 따라서, 유화 감정에서는 현미경 영상 전체가 초점이 맞는 기술에 대한 필요성이 제기되어 왔다.

서로 다른 초점이 생성되는 다수의 영상을 하나의 초점 영상으로 합성하는 다중 초점 영상 합성(Multi-focus Image Fusion)은 변환법(Transform), 공간법(Spatial Domain), 연합법 및 인공지능법 등이 제안되었다[9]. 변환법은 웨이블릿(Wavelet) 및 이산 코사인 변환 등 수학적 변환을 이용하여 초점이 형성되는 부분을 선택한다[10,11]. 공간법은 이미지를 분할하고, 각 분할 공간마다 초점 지수를 평가하여 초점 가능성이 높은 부분들로 이미지를 구성하는 방법이다[12]. 연합법은 변환법과 공간법을 같이 적용하는 방법이다[13]. 인공지능법은 심층학습(Deep Learning)을 이용하여 초점이 형성되는 부분을 선택 및 합성하는 방법이다[14,15]. 기존의 방법들은 피사체로부터 멀리 떨어진 2-4장의 이미지를 합성하여 하나의 초점 영상을 합성하는 방법이 대다수이다. 반면에 현미경의 경우 초점 거리 조절에 따라 촬영되는

영역(Field of View, FOV)이 변하고, 렌즈의 심도(Depth of Field, DOF)도 매우 작아 촬영하는 영상의 수도 훨씬 많다. 따라서, 기존의 방법을 그대로 적용하기 어렵고 이미지 수의 증가에 따른 연산량도 고려해야 한다. 본 연구에서는 유화 등의 굴곡있는 표면을 관찰하는 경우 현미경 이미지를 활용하는 다중 초점 영상 합성 방법에 대하여 논하고자 한다.

본 연구에서는 다중 초점 영상 합성 방법은 기존 공간법을 기반으로 FOV의 변화와 민감한 DOF의 영향을 고려한 방법을 제안하였다. 연산량을 줄이기 위하여 비교적 연산량이 적은 구배(Gradient) 기반의 변환법을 적용하였다[12,16]. 변환법 적용 시 영상을 분할하지 않고, 구배 연산자의 크기를 조정하였다. 그리고, 3D 표면의 연속성을 고려하여 합성된 3차원 구성도(Map)에 저주파 필터링을 적용하였다. 제안 방법은 초점 방향 영상 스캔, 영상 배율 조정, 초점 지수 연산, 최대 초점 지수로 구성도 작성, 저주파 필터링 및 구성도-픽셀 조합에 의한 초점 영상 합성으로 구성되어 있다. 본 연구는 2장에서는 이론, 3장에서는 실험, 4장에서는 결과 및 분석, 그리고 5장 결론으로 구성되어 있다.

**2. 이론**

**2.1 현미경 영상 스캐닝**

현미경 영상 획득 시스템은 Fig. 1과 같이 카메라, 현미경, 동축 조명 및 XYZ 스테이지로 구성하였다. 유화는 XY 스테이지에 적재하고 현미경 관찰 위치로 이동한다. 조명 광원은 할로겐을 사용하였으며, 발생하는 광량을 카메라 영상의 밝기와 비교하여 적절하게 조정할 수 있다. 광원에서 발생하는 백색광을 광섬유를 이용하여 현미경 측면으로 입력한 후, 전면에 퍼지도록 동축 조명 구조를 적용하였다. 렌즈는 전동 줌(Zoom) 타입으로 관측 영역의 사이즈를 고려하여 PC에서 배율을 조정할 수 있다. Z축 스테이지는 카메라를 유화에 대한 초점 방향으로 이송한다. 스캐닝 시 영상의 일부에서 초점이 형성되기 시작하는 위치까지 초점 방향으로 카메라를 이송한다. 초점이 형성되는 마지막 위치까지 이동하며 일정 간격으로 영상을 촬영하면 Fig. 1의 우측과 같이 여러 장의 원본 영상( $I_1, \dots, I_n$ )을 얻을 수 있다. 원본 영상을 관찰하면 유화의 굴곡에 따라 초점이 서로 다르게 형성되고, 관측 영역도 변함을 알 수 있다.

한편, 현미경 스캐닝 영상의 경우 렌즈와 관측 부위의 거리 변화로 인하여 FOV가 변하게 되므로, 다중 초점 연산을 위하여 보정을 해야 한다. 획득된 영상들에서 공통된 부분들을 추출하고, 크기를 조정함으로써 광학적인 원인으로 인한 변화를 보정할 수 있다. 그리고, 섬세한 이미지를 얻기 위하여 영상을 분할하지 않고, 각 픽셀에 대하여 구배 연산 필터 사이즈를 조정한다. 일반적인 3차원 표면의 연속성을 가정하여 3차원 구성도에 저주파 필터(Low Pass Filter)를 적용하고, 다중 초점 영상을 획득한다. 기존 변환 기반의 다중 초점 연산과 제안 방법을 Fig. 2에 비교하여 도시하였다.

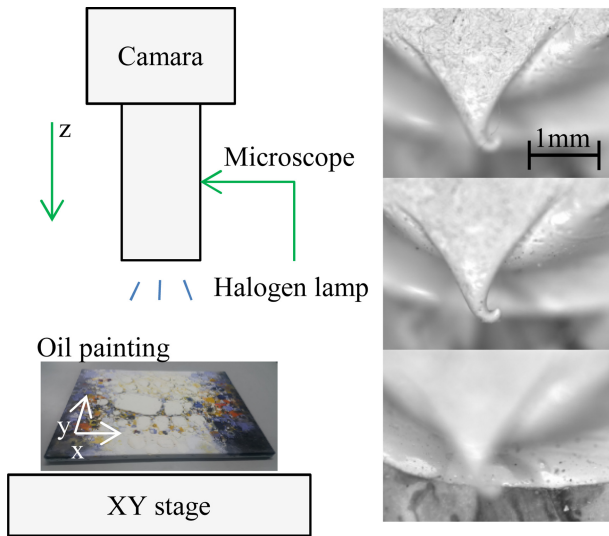


Fig. 1 Multi-focus image scanning system and scanning images of oil painting

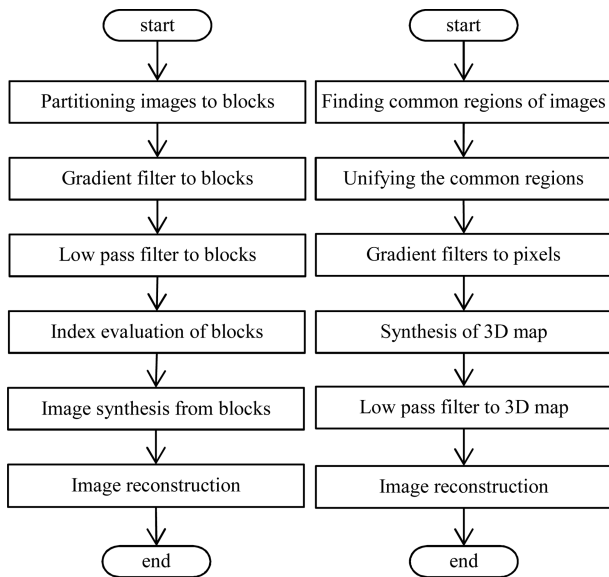


Fig. 2 Processing flows of conventional transform method (left) and proposed method (right)

영상의 초점 지수 F는 여러 방법으로 연산할 수 있으나, 본 연구에서는 다음과 같이 소벨(Sobel) 기반의 Tenenbaum 연산자를 적용하였다[17-19].

$$(S_x, S_y) = \left( \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \right) * I(x, y) \quad (1)$$

$$F(I) = \Sigma\Sigma[S_x^2(x, y) + S_y^2(x, y)] \quad (2)$$

$(I_1, \dots, I_n)$  의 원본 영상에서 전체적으로 가장 초점이 잘 맞는 영상  $I_f$  는 초점 지수 F가 가장 큰 것을 선택한다.

$$f = \max_z F(I_z) \quad (3)$$

### 2.2 원본 영상 배율 균일화

스캐닝 시 카메라가 높은 곳에서 낮은 곳으로 이동한다면 원본 영상 중에서 가장 먼  $I_1$  이 관측 영역이 가장 넓고, 가장 가까운  $I_n$  은 가장 좁다. 따라서, 스캐닝 영상에서 공통 영역  $I_c$  는  $I_n$  을 적절하게 Size 조절을 하여  $I_f$  내에서 검색하여  $I_f$  의 부분 영상으로 결정한다. 검색은  $\alpha$  배율로 Resize된  $I'_n$  영상과  $I_f$  내의 부분 영상의 상관 함수로 구할 수 있다.

$$I'_n = \text{resize}(I_n, \alpha) \quad (4)$$

$$(x^*, y^*, \alpha^*) = \max_{(x, y, \alpha)} \text{corr}(I_f, I'_n) \quad (5)$$

공통 영역  $I_c$  는  $I_f$  의 부분 이미지로, 식(5)에서 구해진 시작점과 배율로 관심영역 ROI를 설정하여 구한다. 그리고,  $I_c$  를 스캐닝 이미지에 적용하여 배율과 상관없는 공통 영역에 대한 영상을 추출할 수 있다.

$$I'_z = \text{resize}(I_z, \alpha_z) \quad (6)$$

$$(x^*, y^*, \alpha_z) = \max_{(x, y, \alpha_z)} \text{corr}(I_c, I'_z) \quad (7)$$

식(6) 및 식(7)에 의하여 각 영상에서 공통 영역  $I''_z$  는  $I'_z$  에 ROI를 설정하여 구하며, 배율과 관측 영역이 균일화된 영상이다.

### 2.3 다중 초점 영상 합성

관측 영역이 균일화된 영상에서 개별  $(x, y)$  픽셀마다 식(8)과 식(9)의 초점 인덱스를 구하며, 개별 이미지의 z방향 획득 위치를 고려하면 전체 이미지 픽셀 데이터는  $(x, y, z)$  좌표계를 형성한다.

$$(S''_x, S''_y) = \left( \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \right) * I''_z(x, y) \quad (8)$$

$$F''(x, y, z) = S''_x{}^2(x, y) + S''_y{}^2(x, y) \quad (9)$$

초점 인덱스 연산 시 Sobel 연산자의 크기는 기본적으로  $3 \times 3$  이나, 실질적으로는 보다 큰 연산자를 적용하며, 이 경우 각 계수는 제안된 Sobel 연산 이론에 의하여 결정한다. Fig. 3은 Fig. 1의 현미경 영상에 Tenenbaum 연산자 적용 후 얻어진 이미지이다.

각  $(x, y)$  픽셀별로 z방향으로 초점 지수를 비교하면 최댓값을 알 수 있다. 최대 초점 지수의 위치를  $\hat{z}$  로 정의하고  $(x, y)$  픽셀 값으로 대응하면, Fig. 4와 같이 3차원 배치도 형태의 높이를 얻을 수 있다.

$$\hat{z}(x, y) = \max_z F''(x, y, z) \quad (10)$$

일반적으로 Fig. 4의 왼쪽 이미지 같이 노이즈 패턴이 자주 관찰되나, 현실적으로 3차원 형상에서 나타날 확률은 낮다. 따라서, 저주파 필터나 중앙값 연산(Median Filter)을 적용하면 오른쪽 이미지같이 노이즈가 감소되는 것을 알 수 있다[20].

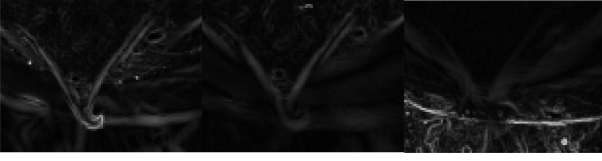


Fig. 3 Images of common area after applying Tenenbaum gradient to individual pixels

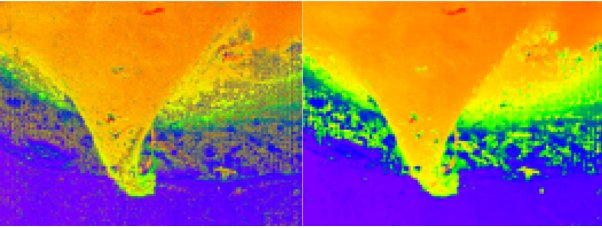


Fig. 4 Mapping images of origin and median filter after applying Tenenbaum gradient individual pixels

$$\hat{z}'(x,y) = \text{median}(\hat{z}) \quad (11)$$

여기서 중앙값 연산자 크기는 기본적으로  $3 \times 3$ 이나, 실질적으로는 보다 연산자의 크기를 확장하여 적용한다.

상기 수식을  $(x,y,\hat{z}')$ 으로 좌표화하고, 해당 위치의  $I'_z$  영상에서 대응되는 픽셀값을 가져오면 전체적으로 초점이 맞는 영상  $I_m$ 이 구성된다.

$$I_m = I'_z(x,y) \quad (12)$$

### 3. 실험

실험 장치는 광대역(UV-Vis-NIR) 카메라, 전동 줌 렌즈, 할로겐 동축 조명, 4축 전동 스테이지로 구성되어 있으며 암실에 설치하였다. 실험 장치는 제어 컴퓨터(PC)로 연결하여 각 구성품들이 연동하여 동작할 수 있도록 제어 소프트웨어를 제작하였다. 유화는 XY 스테이지 상에 장착하여 카메라로 관찰하고자 하는 영역으로 이동한다. 카메라는 Z스테이지에 고정되어 있으며, 이미지 센서 전면에 현미경을 부착하였다. 현미경은 전동으로 구동되는 줌 타입으로 제어 컴퓨터(PC)에서 배율을 조절할 수 있다. 실험에서 사용한 배율과 심도는 각각 2.16X 및 0.25 mm이다. 할로겐 램프에서 발생한 빛은 광섬유를 통과하여 현미경 측면으로 투입되어 카메라와 동축으로 조사되었다. 장비를 구동하는 소프트웨어는 C++ 기반의 Visual Studio로 제작하였다. 다중 초점 영상 합성 알고리즘은 오픈 소스인 OpenCV를 활용하여 C++ 기반으로 개발하였다. Fig. 5는 스캐닝 시스템을 보여주고 있으며, 사양은 Table 1과 같다.

다중 초점 영상 합성 방법을 테스트하기 위하여 Fig. 6과 같이 유화 샘플에서 굴곡이 심한 부분 2곳을 선택하였다. 좌측은 물감이 화산 형상으로 형성되어 있고, 끝 부분에 물감이 예리하게

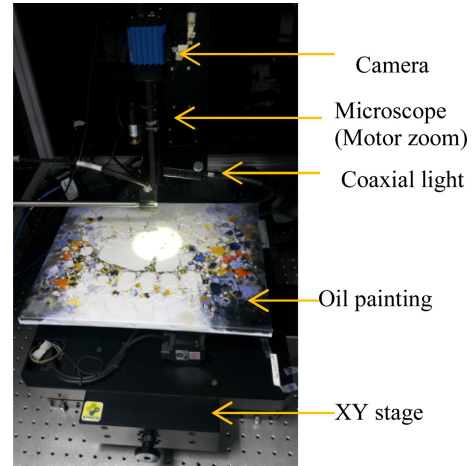


Fig. 5 Scanning apparatus to acquire multi-focus images from oil painting

Table 1 Specification of scanning apparatus

Components	Contents	Specification
Camera	Resolution	1392 x 1040
	Pixel bits	12 bit
	Frame rates	7.3 Hz
	Spectral range	190-1100 nm
Microscope	Magnification	0.58X-7.5X
	Working distance	84±2 mm
	Depth of field	0.05-2.75mm
XYZ stage	Accuracy	±5 μm
Light source	Type	Halogen
	Power	150 W

떨어져 있어서 3차원 측정이 어려운 형상을 보여주고 있다. 우측은 물감이 벌레 모양으로 길게 형성되어 있으며, 복잡한 형상으로 요철이 형성되어 있다. 이러한 두 가지 형상에 대하여 스캐닝하고 이미지를 2.1절 및 2.2절과 같이 보정한 후, 기존 방법과 제안 방법을 적용해 보았다.

일반적으로 영상 평가하는 방법은 침투 신호대 잡음비(PSNR), 평균 절대 오차(MAE) 및 구조적 유사도(SSIM) 등 원본 영상과 비교하여 지수를 산출한다[21,22]. 그러나, 본 연구에서는 기준이 되는 원본 영상이 존재하지 않으므로, 영상 자체에서 산출할 수 있는 지수를 선택하였다. 영상 품질 평가 관련 연구에서 초점 지수와 영상 품질을 공유하여 측정할 수 있는 지수를 적용하였다[23,24]. 다음 수식과 같이 분산(Variance) 및 엔트로피(Entropy)를 영상 품질 평가에 적용하였다[25,26]. 엔트로피의 경우 이미지 히스토그램의 상대 분포값을 정규화하여 입력으로 사용한다.

$$\sigma_v = \frac{10^{-8}}{wh} \sum_y^h \sum_x^w [I_m(x,y) - \mu]^2 \quad (13)$$

$$\sigma_e = \sum_i^{255} p_i \log_2 p_i \quad (14)$$



Fig. 6 Scanning targets to test multi-focus fusion algorithm

### 4. 결과 및 고찰

Fig. 6의 좌측 형상을 z방향으로 스캔하여 105개의 영상을 획득하였다. 물감이 늘어나 떨어지는 부분이며, 상하 단차가 있어서 중간에 절벽이 형성되어 있다. 3차원 구성도를 얻기 위하여 각 픽셀에 적용한 Sobel 연산자 크기는  $3 \times 3$ 였다. 3차원 구성도를 매끈하게 다듬을 중앙값 필터 크기는  $6 \times 6$ 을 적용하였다. Fig. 7은 현미경에서 얻어진 영상들의 일부인데, 초점은 일부에서 형성되고, 초점이 맞지 않는 영역의 비중이 높음을 알 수 있다. 획득한 영상들에 제안 방법을 적용한 3차원 구성도는 Fig. 8과 같다. 중간을 가로지르는 벨트 모양의 노이즈 패턴을 제외하면 전체적인 형태는 실제 형상과 유사하다. 3차원 구성도를 기반으로 다중 초점 영상을 합성한 결과는 Fig. 9와 같다. Fig. 8의 3차원 구성도에서 관찰되는 노이즈 패턴에도 불구하고 선명한 영상이 얻어졌다. Fig. 6 좌측 이미지와 비교하면 영상이 일치함을 알 수 있다. Fig. 7에서 보면 심한 초점 이탈이 발생하는 부분들이 각 영상 별로 높은 비중으로 발생하였다. 그러나, 합성된 영상에서는 모두 초점이 형성되어 있다. 또한, 물감이 떨어지는 끝 부분은 예리하긴 하지만 합성된 영상에서 부드럽게 관찰되었고, 끝 부분에 달려있는 섬유질 형상도 선명하게 보여주고 있다.

Fig. 10은 Fig. 6의 우측 패턴을 스캔한 영상 샘플이며 총 90장을 촬영하였다. 물감을 산맥같이 길게 늘어트린 형상으로 물감 부분이 높고, 주변이 낮게 구성되어 있다. 이전 경우와 같이 Sobel 연산 사이즈는  $3 \times 3$ 이며, 중앙값 필터의 크기는  $6 \times 6$ 을 적용하였다. 돌출부의 변화가 심하여 초점이 벗어나는 부분이 많으며 관찰 시 높낮이로 혼란 발생이 쉬운 형상이다. Fig. 11은 다중 초점 영상 합성 방법을 적용하여 얻어진 3차원 구성도이다. 물감이 지나는 부위가 적색으로 표시되었고, 주변부가 황색, 녹색, 청색, 보라색으로 표시되었다. 우측에 보라색으로 표시된 낮은 부분에는 붉은색으로 표시된 높은 부분과 혼합되어 있다. 연속적인 3차원 형상을 고려하면 현실에서는 발생하기 어려운 형상이다. 그러나, 다중 초점 영상 합성 결과 Fig. 12에서는 선명한 영상이 얻어지므로, 3차원 구성도에서 보이는 노이즈의 영향이 적은 것으로 보인다. Fig. 6 우측 이미지와 비교하면 영상이 일치함을 알 수 있다.

Fig. 9와 Fig. 12를 살펴보면, 본 연구에서 제안한 다중 초점 방법은 육안으로 보기에 편한 영상을 제공한다는 것을 알 수

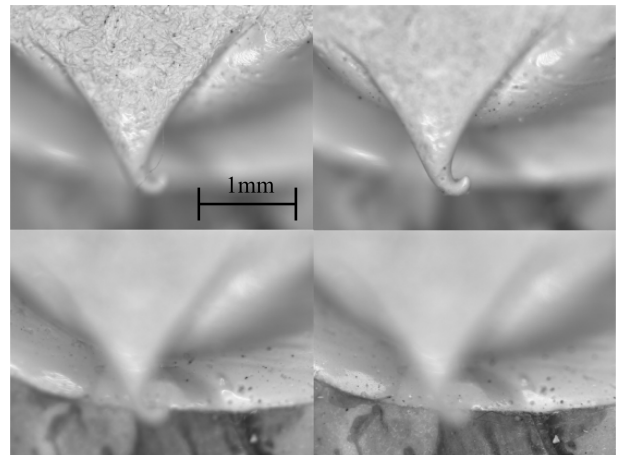


Fig. 7 Scanning images of first target in an oil painting

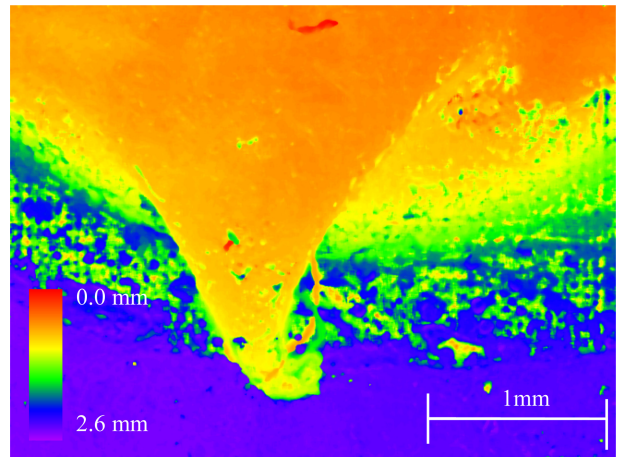


Fig. 8 Mapping image of first target

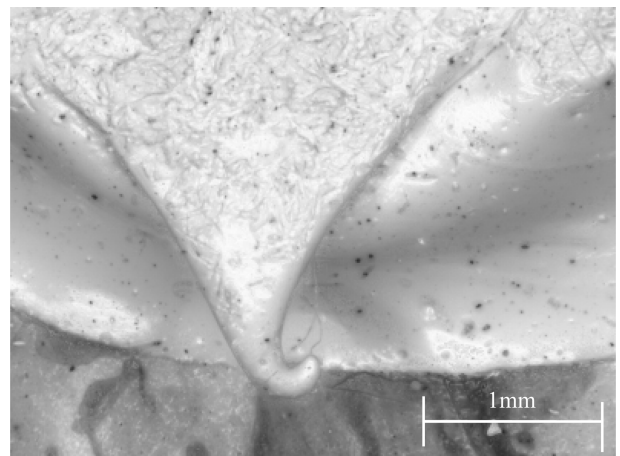


Fig. 9 Multi-focus fusion image of first target

있다. Fig. 7과 Fig. 10의 현미경 원본 영상은 초점이 이탈한 부분이 많아 부분 관찰만 가능하여 불편한 점이 있다. 그러나, 다중 초점 영상은 전체적인 모습을 알 수 있어서 유화 표면 관찰에 매우 유리하다. 그러나, Fig. 8과 Fig. 11을 보면 3차원

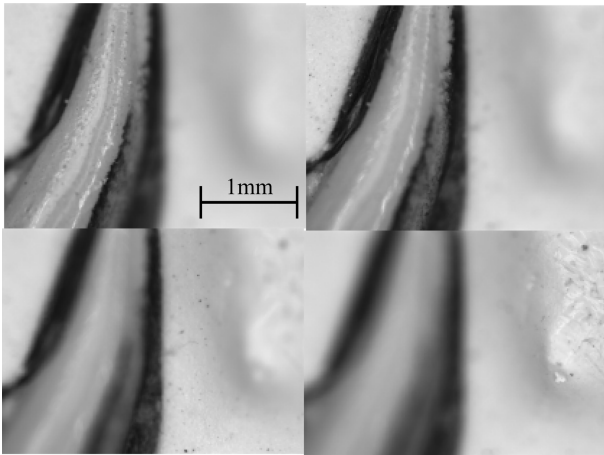


Fig. 10 Scanning images of second target in an oil painting

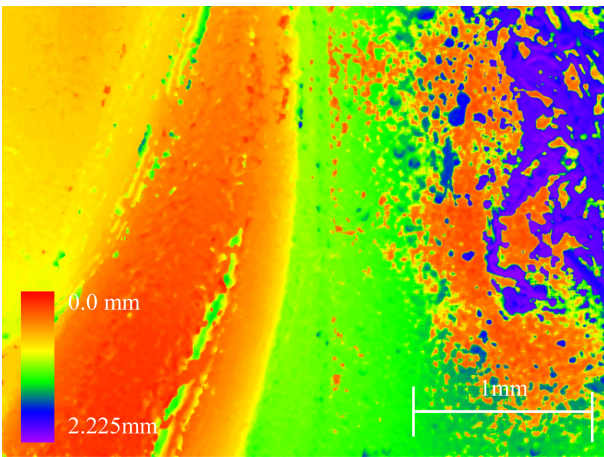


Fig. 11 Mapping image of second target

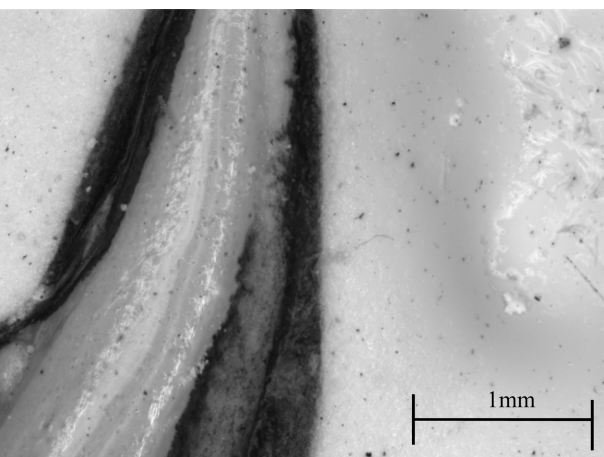
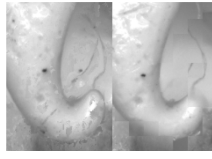
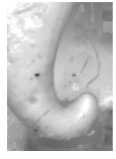
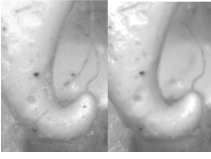
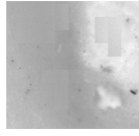
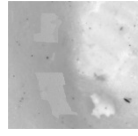


Fig. 12 Multi-focus fusion image of second target

구성도에서 노이즈 패턴과 불연속면이 혼재되어 있다는 사실을 고려하면, 높이 정보는 참고 용도라는 것을 알 수 있다. 원인으로서는 스캐닝 시 현미경이 관측영역에 접근하면서 3차원 표면과 렌즈의 관측 각도가 변하는 것을 들 수 있다. 즉, 특정 3차원

Table 2 Comparing results with other methods

No.	DCT	Hwang	Proposed
1			
	fs = 4, 14	fs = 17	fs = 6, 13
$\sigma_v$	1.15663 1.18845	1.19432	1.19420 1.19684
	$\sigma_e$	15.2420 15.2213	15.2236
2			
	fs = 14	fs = 29	fs = 13
$\sigma_v$	2.26655	2.30024	2.28341
$\sigma_e$	15.2105	15.1648	15.2355

표면 위치가 대응되는 픽셀은 영상마다 미세하게 이동할 수 있다. 그리고, 스캐닝 시 조명이 현미경에 부착되어 있어서 동시에 이동하므로 복잡한 3차원 형상에 의하여 반사각이 예측하기 어렵게 변하는 것도 생각할 수 있다. 변화하는 반사각에 의하여 포착되는 영상에 Tenenbaum 연산을 수행하면 임의의 고주파 성분이 검출되는데, 3차원적인 정확도를 보장하기는 어렵다. 조명의 위치 변화에 따라 유화 표면의 광택에 의하여 영상의 픽셀에 포화(Saturation)가 발생하는 것도 원인으로 들 수 있다. 픽셀에 포화가 발생하면 포화값 이상의 데이터를 얻을 수 없으므로 변별력이 감소하게 된다. 또한, 제안한 방법은 다수의 필터를 적용하고 있으므로 연산에 의한 누적 오차가 발생할 수 있다.

Table 2는 기존에 제안된 이산 코사인 변환 방법[12] 및 영상 인덱스만 사용한 방법[16]과 비교한 결과이다. 영상 품질을 표시하는  $\sigma_v$ 는 영상 분산이며,  $\sigma_e$ 는 영상 엔트로피 이다. 도표에서 각 그림들은 다중 초점 영상으로 합성 시 최적화된 이미지 필터를 적용하여 얻어진 선별된 영상의 부분이다. Sobel 연산자 및 중앙값 필터 크기 fs를 적절하게 조절하여 최적화된 영상을 얻는다. 전반적으로 선명한 이미지가 얻어지나, 각 영상에서 민감하게 반응하는 부분을 확대하여 도표에 첨부하였다.

1번 샘플은 Fig. 6의 좌측의 형상으로 점도가 높은 물감이 늘어나면서 끊어지는 현상을 보여준다. 기존의 방법들은 경계면 상에서 픽셀이 뭉치거나 경계면이 거칠거나 White Noise가 발생하였다. 제안된 방법의 경우 기존보다 자연스러운 영상이 얻어졌다. 영상의 품질을 비교해보면, 제안한 방법이 작은 필터 크기를 적용하고도 전반적으로 우수하게 나타났다. 물감이 끊어지는 부분은 바닥면과 단차가 있어서 일반적인 3차원 측정 방법으로 획득하기 어려운 형상인데, 제안 방법에서는 깨끗한 영상이

합성되었다.

Fig. 6의 우측에 보이는 2번 샘플의 경우는 이산 코사인 변환 방법(DCT)에서는 픽셀의 뭉침이 관찰되었으나, Hwang의 방법과 제안 방법으로 자연스러운 영상이 합성되었다. Table 2의 2번 샘플을 보면 DCT 방법의 경우 사각형의 픽셀 뭉침이 이미 지 전반에 걸쳐 높은 빈도로 나타났다. 그러나, Hwang의 방법의 경우 제시한 이미지 부근만 뭉침이 보이고, 다중 초점 영상이 전반적으로 자연스럽게 보였다. 영상 품질의 경우 제안 방법이 작은 필터 크기로도 다소 우수한 수치를 보이는 것을 확인하였다.

이와 같은 결과를 종합하면, 제안한 방법은 유화 등 굴곡이 있는 3차원 표면을 현미경으로 편리하게 관찰할 수 있는 기능을 제공해 준다는 것을 알 수 있다. 현미경 스캐닝과 렌즈의 특성으로 인하여 관측 영역 변화와 좁은 심도로 발생하는 영상의 변화를 보정하면, 기존의 방법도 활용할 수 있다. 다중 초점 영상의 품질은 기존 방법보다 다소 우수하며, 특히 기존 연구보다 훨씬 많은 이미지를 기반으로 합성할 수 있음을 보였다. 다만, 현미경의 이동에 따른 관측 각도, 조명 각도 및 표면 반사 부위의 변화에 의하여 실제 3차원 형상과 오차가 발생할 수 있다. 합성된 다중 초점 영상은 표면을 관찰 시 편리한 기능이나, 3차원 구조도는 실제 표면과 다소 차이가 있으므로 참고 사항으로 활용하여야 한다.

**5. 결론**

일반적으로 현미경의 심도보다 유화의 3차원 굴곡이 심하므로 영상의 초점이 벗어나 관찰에 불편함이 많다. 따라서, 본 연구에서는 현미경으로 유화를 관찰하는 경우 스캐닝한 다수의 영상을 활용하여 초점이 맞는 다중 초점 영상을 합성하는 방법을 제안하였다. 제안한 다중 초점 영상 합성 방법은 영상 취득과 합성으로 나누어진다. 영상 취득은 초점 방향으로 영상을 스캐닝하고, 영상 간 공통 영역을 균일한 배율로 추출하는 과정이다. 영상 합성은 추출된 영상에서 영상 인덱스가 높은 픽셀을 선별하고, 초점 방향의 3차원 구성도를 작성하고, 저주파 필터를 적용한 후, 대응되는 픽셀 값을 적용하여 최종적으로 초점이 맞는 영상을 얻는 과정이다.

제안한 방법은 기존 방법과 비교하면 픽셀의 뭉침이나 노이즈가 적었고, 보다 자연스러운 영상이 얻어졌다. 제안한 방법은 유화뿐만 아니라 3차원 물체를 현미경으로 관찰하는 과학 장비 및 산업 장비에도 적용할 수 있다.

**ACKNOWLEDGEMENT**

본 연구는 문화체육관광부 및 한국콘텐츠진흥원의 2022년도 문화기술 연구개발 사업으로 수행되었음(No. R2020060004,

근현대 미술품들의 디지털 데이터 확보 및 과학기반 미술품 신뢰도 분석 지원 시스템 개발).

**REFERENCES**

1. Rim, S. R., Byun, S. H., (2020), A study on the new scheme for South Korea's artwork authenticity with a review of the overseas art distribution dispute setting system, *Journal of Arbitration Studies*, 30(1), 199-215.
2. Vasan, K., Janosov, M., Barabási, A.-L., (2022), Quantifying NFT-driven networks in crypto art, *Scientific Reports*, 12(1), 1-11.
3. De Meyer, S., Vanmeert, F., Vertongen, R., van Loon, A., Gonzalez, V., van der Snickt, G., Vandivere, A., Janssens, K., (2019), Imaging secondary reaction products at the surface of Vermeer's girl with the pearl earring by means of macroscopic X-ray powder diffraction scanning, *Heritage Science*, 7, 1-11.
4. Cutajar, J. D., Babini, A., Deborah, H., Hardeberg, J. Y., Joseph, E., Frøysaker, T., (2022), Hyperspectral imaging analyses of cleaning tests on edvard munch's monumental aula paintings, *Studies in Conservation*, 67(1), 59-68.
5. Delaney, J. K., Thoury, M., Zeibel, J. G., Ricciardi, P., Morales, K. M., Dooley, K. A., (2016), Visible and infrared imaging spectroscopy of paintings and improved reflectography, *Heritage Science*, 4, 6.
6. Dredge, P., Wuhrer, R., Phillips, M. R., (2003), Monet's painting under the microscope, *Microscopy and Microanalysis*, 9(2), 139-143.
7. Townsend, J. H., Keune, K., (2006), Microscopical techniques applied to traditional paintings, *Infocus Magazine*, 41(1), 54-65.
8. Macchia, A., Biribicchi, C., Carnazza, P., Montorsi, S., Sangiorgi, N., Demasi, G., Prestileo, F., Cerafogli, E., Colasanti, I. A., Aureli, H., (2022), Multi-analytical investigation of the oil painting "Il Venditore di Cerini" by antonio mancini and definition of the best green cleaning treatment, *Sustainability*, 14(7), 3972.
9. Liu, Y., Wang, L., Cheng, J., Li, C., Chen, X., (2020), Multi-focus image fusion: A survey of the state of the art, *Information Fusion*, 64, 71-91.
10. Aymaz, S., Köse, C., (2019), A novel image decomposition-based hybrid technique with super-resolution method for multi-focus image fusion, *Information Fusion*, 45, 113-127.
11. Cao, L., Jin, L., Tao, H., Li, G., Zhuang, Z., Zhang, Y., (2014), Multi-focus image fusion based on spatial frequency in discrete cosine transform domain, *IEEE Signal Processing Letters*, 22(2), 220-224.
12. Huang, W., Jing, Z., (2007), Evaluation of focus measures in multi-focus image fusion, *Pattern Recognition Letters*, 28(4), 493-500.

13. Yang, Y., Zhang, Y., Wu, J., Li, L., Huang, S., (2019), Multi-focus image fusion based on a non-fixed-base dictionary and multi-measure optimization, *IEEE Access*, 7, 46376-46388.
14. Liu, Y., Chen, X., Peng, H., Wang, Z., (2017), Multi-focus image fusion with a deep convolutional neural network, *Information Fusion*, 36, 191-207.
15. Guo, X., Nie, R., Cao, J., Zhou, D., Mei, L., He, K., (2019), FuseGAN: Learning to fuse multi-focus image via conditional generative adversarial network, *IEEE Transactions on Multimedia*, 21(8), 1982-1996.
16. Haghghat, M. B. A., Aghagolzadeh, A., Seyedarabi, H., (2011), Multi-focus image fusion for visual sensor networks in DCT domain, *Computers & Electrical Engineering*, 37(5), 789-797.
17. Azouz, A. A. E., Li, Z., (2015), Improved phase gradient autofocus algorithm based on segments of variable lengths and minimum-entropy phase correction, *IET Radar, Sonar & Navigation*, 9(4), 467-479.
18. Lee, H., Jung, C.-S., Kim, K.-W., (2021), Feature preserving autofocus algorithm for phase error correction of SAR images, *Sensors*, 21(7), 2370.
19. Kim, H., Moon, Y. J., Kang, H., Hwang, J. Y., (2020), On-machine measurement for surface flatness of transparent and thin film in laser ablation process, *Coatings*, 10(9), 885.
20. Lee, Y., (2022), Performance analysis of improved hybrid median filter applied to X-ray computed tomography images obtained with high-resolution photon-counting CZT detector: A pilot study, *Nuclear Engineering and Technology*, 54(9), 3380-3389.
21. Yadav, G., Yadav, D. K., Mouli, P. C., (2022), Statistical measures for palmprint image enhancement, *Machine Learning for Biometrics*, 65-85.
22. Bull, D., Zhang, F., (2021), Measuring and managing picture quality, *Intelligent Image and Video Compression*, 335-384.
23. Gabarda, S., Cristóbal, G., (2007), Blind image quality assessment through anisotropy, *JOSA A*, 24(12), B42-B51.
24. Ferzli, R., Karam, L. J., (2009), A no-reference objective image sharpness metric based on the notion of just noticeable blur (JNB), *IEEE Transactions on Image Processing*, 18(4), 717-728.
25. Sun, Y., Duthaler, S., Nelson, B. J., (2004), Autofocusing in computer microscopy: Selecting the optimal focus algorithm, *Microscopy Research and Technique*, 65(3), 139-149.
26. Chen, X., Zhang, Q., Lin, M., Yang, G., He, C., (2019), No-reference color image quality assessment: From entropy to perceptual quality, *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, 2019(1), 1-14.



#### Hyung Tae Kim

Principal researcher in the Department of Digital Transformation of Korea Institute of Industrial Technology. His research interest is machine vision and image processing.

E-mail: htkim@kitech.re.kr



#### Duk-Yeon Lee

Senior researcher in the AI Robot R&D Department of Korea Institute of Industrial Technology. His research interest is android robots and deep learning.

E-mail: proldy@kitech.re.kr



#### Dongwoon Choi

Senior researcher in the AI Robot R&D Department of Korea Institute of Industrial Technology. His research interest is mechanical design and android robots.

E-mail: cdw@kitech.re.kr



#### Jaehyeon Kang

Senior researcher in the AI Robot R&D Department of Korea Institute of Industrial Technology. His research interest is sensor calibration and robot localization.

E-mail: jkang@kitech.re.kr



#### Dong-Wook Lee

Principal researcher the AI Robot R&D Department of Korea Institute of Industrial Technology. His research interest is android robot and social human-robot interaction.

E-mail: dwlee@kitech.re.kr



# 파킨슨병 환자의 임상평가척도와 관성신호 특성 간 상관성 분석

## Correlation Analysis between Clinical Rating Scales and Inertial Signal Features in Parkinson's Disease Patients

김태희<sup>1</sup>, 조하은<sup>1</sup>, 최희우<sup>1</sup>, 최평화<sup>1</sup>, 이원재<sup>2</sup>, 양희승<sup>2</sup>, 심우섭<sup>1, #</sup>  
Tae Hee Kim<sup>1</sup>, Ha Eun Jo<sup>1</sup>, Hui Woo Choi<sup>1</sup>, Pyoung-Hwa Choi<sup>1</sup>, Won Jae Lee<sup>2</sup>, Hee Seung Yang<sup>2</sup>, and Woo Sub Sim<sup>1, #</sup>

<sup>1</sup> 중앙보훈병원 보장구센터 (Prosthetics & Orthotics Center, VHS Medical Center)  
<sup>2</sup> 중앙보훈병원 재활의학과 (Rehabilitation Medicine, VHS Medical Center)  
# Corresponding Author / E-mail: s2ellove@bohun.or.kr, TEL: +82-2-2225-1855  
ORCID: 0000-0002-0760-3918

KEYWORDS: Parkinson's disease (파킨슨병), Freezing of gait (동결 보행), Inertial measurement unit (관성 센서), Rating scale (평가 지표), Correlation (상관성)

*In this study, the Inertial Measurement Unit (IMU) signals and clinical evaluation scales for Parkinson's disease were correlated. The study included 16 patients diagnosed with Parkinson's disease. Each subject was evaluated based on Korean Mini-Mental State Examination (KMMSE), Unified Parkinson's Disease Rating Scale (UPDRS) part 3, New Freezing of Gait Questionnaire (NFOGQ) parts 2 & 3, and Hoehn & Yahr Scale (H&Y). All subjects performed the Time Up and Go test by attaching IMU sensors to both ankles and torso. Based on the tilting angle of torso and the time of first step, the freezing and non-freezing windows were determined. Seven IMU features involving the ankle signals were calculated in the specific window. Spearman's correlation analysis of clinical evaluation scales was performed. As a result, the freezing index and power of locomotion band (0.3-3 Hz) were recommended to determine UPDRS part 3. Also, the intensity of the locomotion band facilitated evaluation of NFOGQ part 3 regardless of freezing of gait.*

Manuscript received: December 21, 2022 / Revised: May 8, 2023 / Accepted: May 9, 2023

### 1. 서론

관성 센서(Inertial Measurement Unit, IMU)는 일반적으로 의 부로부터 발생하는 가속도 및 각속도를 측정하며 비교적 작은 크기로 로봇 및 운행 제어, 위치추적 등 다양한 분야에 사용되고 있다[1]. 최근 반도체 기술의 발달로 인하여 소형화 제작이 가능해졌기에 모바일 또는 웨어러블 장비에 탑재되어 일상생활을 평가하는 자료로서 활용된다. 그 중, 관성 센서를 활용한 운동역학적 분석은 신체 분절의 기울기 또는 각도 등을 측정하는데 이루어지며 그 범위는 보행 평가[2]로부터 의도 인식 및 제어[3]까지 다양한 분야에 걸쳐있다.

특히, 인체에 착용 가능한 관성 센서의 특성은 보행에서 발생하는 여러 변인들과의 관계를 탐구할 수 있다. 대표적으로는 측정된 신호로부터 역치 값을 이용하여 보행의 단계 및 유무를

검출하는 사례[4]와 알고리즘을 바탕으로 낙상의 위험도를 검출하는 사례[5], 신호의 특성을 바탕으로 일상생활의 수행능력을 분석하는 연구[6]들이 활발히 이루어지고 있다. 게다가 최근 인공지능경망과 같은 머신러닝을 활용한 방법들이 다양하게 소개[7]되면서 이를 활용한 연구는 활발히 진행되는 추세이다.

한편, 국내 파킨슨병 환자의 수는 2017년 약 10만 명으로 이후 꾸준히 증가하여 2021년 기준 약 11만 7천명으로 지속적인 증가추세를 보이고 있다[8]. 파킨슨병은 뇌의 신경세포에 영향을 미쳐 근육운동을 조절하는 뇌의 기능을 저하시킨다[9]. 파킨슨병의 대표적인 병적 증상인 동결 보행은 초기 보행에서 떨림이 발생하거나 경직이 되는 등 자세 불안정을 야기해 낙상의 위험을 일으킬 가능성이 있다[10].

이러한 동결보행으로 인한 문제 해소를 위해 여러 연구들이 이루어져 오고 있으며, 이 중 관성 센서를 활용한 연구의 경우

Table 1 Patients' information

No.	Age [yr]	Height [cm]	Weight [kg]	Duration [yr]	KMMSE	UPDRS Part 3	H&Y	NFOGQ	
								Part 2	Part 3
1	70	170	64	7	26	74	4	15	7
2	80	166	66	9	21	48	3	17	7
3	77	165	57	11	24	41	3	16	6
4	75	164	79	7	28	41	2	11	5
5	76	162	58	9	21	85	2	19	9
6	81	160	56	21	20	81	4	19	9
7	75	165	58	16	26	55	2	10	7
8	74	166	68	4	13	68	3	16	8
9	76	168	74	7	27	74	3	17	9
10	75	170	67	2	28	63	3	17	8
11	68	147	48	6	23	81	3	11	8
12	76	155	62	2	27	50	2	9	3
13	77	167	67	5	24	57	2	19	7
14	75	169	73	1	25	58	2	12	8
15	74	169	76	3	25	72	2	9	4
16	76	170	73	2	22	86	4	10	6
Mean	75.31	164.71	65.58	7.44	23.75	64.63	2.75	14.19	6.94
Std.	3.04	6.20	8.43	5.33	3.70	14.69	0.75	3.66	1.71

동결 보행 검출을 위한 연구들이 주를 이루고 있다[11]. 이는 파킨슨병 환자의 동결 보행 발현 시, 적절한 시점에 외부 자극을 가해 주어 동결 보행을 완화 또는 해소시키고자 하는 것을 목적으로 한다. 그 뿐 아니라 낙상의 위험 지표와 연관지어 보행 시의 운동 수행능력을 확인하고 이를 바탕으로 동결 보행이 주로 나타나는 환경과 시점을 예측[12]하는 데에 활용되기도 한다.

이 또한 다른 분야와 유사하게, 머신 러닝을 활용한 사례들이 활발히 연구되고 있다. 이러한 연구들은 측정된 관성 신호들을 바탕으로 다양한 특성 값의 연산을 통해 시작한다[13,14]. 이 특성 값들은 평균값과 표준편차 등의 시간도메인뿐 아니라 주파수 도메인에서의 특정 스펙트럼과 같은 값들도 포함한다. 특성 값의 선정은 분류기의 성능에 영향을 미치기 때문에 그 선택은 매우 중요하다[14,15]. 그러나, 파킨슨병 환자를 대상으로 관성 센서를 활용한 연구들은 주로 운동 수행을 통해 역학적으로 나타나는 결과들을 탐구하였지만, 실제 임상에서 사용되고 있는 평가 도구로서 활용한 사례는 크게 발견되지 않는다.

파킨슨병의 질병 척도는 환자의 중증도를 파악하는 지표이면서, 환자의 운동 능력을 투영한다. 파킨슨병의 중증 정도를 가늠하는 임상적 지표들은 주로 보행이나 손뾰족기 등의 운동을 수행하거나 설문조사를 통해 진행된다. Roller 등[16]은 임상 지표 중 하나인 Hoehn-Yahr (H&Y) 지표와 낙상과의 상관성을 분석하였으며, Sufuwa 등[17]은 3차원 동작 분석을 통해 파킨슨병 환자 대상의 하지 분절의 힘과 보행속도와의 상관성에 관한 연구를 발표하였다. Zampieri 등[18]은 Unified Parkinson's Disease

Rating Scale (UPDRS)과 보행속도와의 상관성을 분석하였으며, Plotnik 등[19]은 파킨슨병 환자 보행에서 집중수행능력에 따른 보행 파라미터의 변화를 평가하였다. 그러나 이러한 임상 지표와의 상관성 연구는 3차원 동작 분석 및 보행 파라미터를 통해 환자의 운동수행 능력과 비교하였을 뿐 관성 신호의 특성에 초점을 맞춘 분석은 언급되지 않았다. 또한, 관성 센서를 활용한 파킨슨병 환자 대상의 연구에서는 모집된 피험자에 대한 임상 지표를 제시하고 있으나, 이는 피험자의 정보로만 제시되었을 뿐 두 값 사이의 연관성은 분석되지 않았다. 따라서, 본 연구에서는 파킨슨병 환자를 대상으로 진단에 사용되는 임상 지표와 관성 센서의 특성 값들을 연산하여 그 상관관계를 확인하고자 한다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 환자 모집 및 임상 데이터 취득

본 연구를 위하여 총 16명의 피험자가 참여하였다. 각 피험자는 실험에 참여하기 전, 중앙보훈병원 윤리심의위원회로부터 승인을 받은 내용을 바탕으로 동의서를 취득하였으며, 이후 전문가 참여 하에 파킨슨병의 임상 평가지표(인지정서상태, 전체적인 운동수행 능력, 신체장애정도, 동결 보행 발생빈도, 동결 보행에 대한 인식)에 대한 조사를 수행하였다(승인번호: BOHUN 2021-03-018-008).

본 연구에 참여한 피험자는 실험 참여 이전 24시간 동안 약물 복용하지 않았으며, 본 연구에서 취득한 임상 평가지표는

한국판 간이정신상태(Korean Mini Mental State Examination, KMMSE), UPDRS part 3, H&Y, New Freezing of Gait Questionnaire (NFOGQ)의 part 2와 part 3로 총 5가지 항목에 조사하였으며 각 피험자의 정보는 Table 1에 기술하였다.

KMMSE [20,21]은 환자의 인지정서상태를 검사하는 항목으로 총 30점 문항의 질문을 통해 평가를 진행하였다. KMMSE는 시간(5), 장소(5), 기억 등록 및 회상(6), 계산(5), 언어(8), 시공간 구성(1)의 평가를 통하여 계산되었다.

UPDRS [22]는 International Parkinson and Movement Disorder Society로부터 파킨슨병의 환자에 대해 질병 정도를 측정하기 위한 척도로서 1987년에 제시되었다.

UPDRS는 4가지 파트(part 1: 일상생활에서의 비운동성 증상 경험, part 2: 일상에서의 운동 경험, part 3: 운동성 검사, part 4: 운동성 합병증)로 구성되어 있으나, 본 연구에서는 UPDRS part 3를 통해 파킨슨병 환자의 운동성을 확인하였다. 18가지의 말하기, 박수치기, 걷기 등 행동에 대하여 각각 Normal(0), Slight(1), Mild(2), Moderate(3), Severe(4)로 평가하였으며, 그 총합을 통해 전체적인 운동수행능력을 평가하였다.

H&Y [23]는 신체의 장애 정도를 1가지 지표로 통해 0에서 5 점의 상태를 기재하였다: 증상이 없음(0), 한쪽만 문제됨(1), 두 쪽 다 문제지만 균형을 일지는 않음(2), 약간 문제가 되며 안정성이 부족하나 독립적으로 움직임(3), 심각한 장애이지만 도움 없이 걷거나 서있을 수 있음(4), 도움이 없이는 휠체어를 사용하거나 침대에서 지냄(5).

NFOGQ [24]은 3가지 파트로 구성되어 있으나, 첫 파트에서는 동결 보행의 경험 유무만을 조사하였으며 모든 환자에게서 동결 보행의 경험이 존재하였다. NFOGQ part 2에서는 동결 보행을 경험했던 횟수와 발생빈도를 측정하는 6가지 질문을 통해 각 0-3점의 점수를 기록하였으며, NFOGQ part 3에서는 동결 보행 발현 시 방해하는 정도 및 불안감 등의 3가지 항목을 0-3점으로 평가하여 일상생활에 미치는 동결 보행에 대한 인식을 평가하였다.

2.2 보행 데이터 및 관성 신호 특성 연산

보행 실험은 파킨슨병 환자의 시각적 부담을 완화하기 위해 바닥에 무늬가 없는 장판을 설치한 환경에서 진행하였다. 각 피험자는 양 발목과 체간(T7)에 3개의 관성 센서(MTw Awinda, Xsens, Netherlands)를 부착하였으며(Fig. 1), 의자에서 기립 후 약 3 m 구간의 보행을 각 3회씩 진행하였다. 실험이 진행되는 동안 환자의 체간과 양측 발목으로부터 100 Hz의 3축 가속도 및 각속도를 측정하였다.

본 연구에서는 16명 파킨슨병 환자의 보행 데이터로부터 다음과 같은 기준 하에 정상 보행을 판별하였다: 1) 기립 후 5초 이내 출발; 2) 첫걸음의 주기는 0.3 s 이상(Locomotion Band, 0.3 Hz) [25]; 3) 양 발의 4 Steps 이상 보행 진행. 위의 3가지 기준에 부적합한 보행은 동결 보행이 발현된 환자군으로 선정하였다. 동결 보행의 발현 유무는 실험 영상 및 전문의의 판단을 통해 검토를 진행하였다. 동결 보행의 증상은 정지 또는 떨림

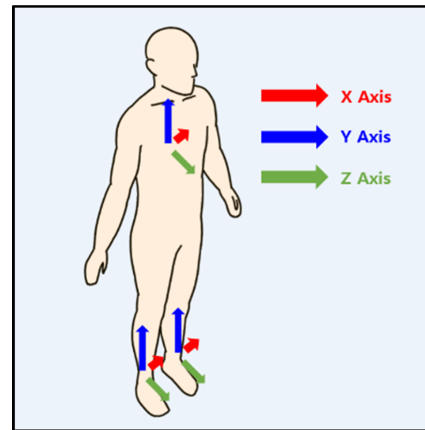


Fig. 1 IMU sensor attachment

등 세부적으로 분류 가능하나 본 연구에서는 동결 보행의 유무만을 기준으로 구분하였다.

관성 신호의 특성 값은 피험자를 세 가지 집단으로 분류하여 연산을 진행하였으며 별도의 주파수 필터링은 진행되지 않았다: 1) 피험자 전체 집단, 2) 동결 보행 발현 집단(Freezing of Gait, FoG), 3) 동결 보행 미발현 집단(Non-freezing of Gait, nFoG). 체간의 관성 신호로부터 기울기 연산을 통해 기립 시점을 기록하였고 그로부터 발목 가속도의 Peak 시점을 통해 첫 번째 초기접지기가 일어나는 순간을 판별하였다. 특성 값은 발목에서 측정된 관성신호로부터 연산을 진행하였다. 연산을 위한 윈도우는 피험자의 전체 집단과 nFoG 집단에 대해 첫 초기접지 이후 4초간의 윈도우에서 연산을 진행하였으며, FoG 집단의 경우 기립 시간부터 첫 초기 접지기까지의 시간을 윈도우로 설정하였다(Fig. 2). 특성 값들은 선형 논문 및 보행분석에서 주로 사용되는 값들로 중력 방향의 가속도와 시상면의 각속도로부터 시간 영역에서 4개, 주파수 영역에서 3개를 선정하였으며 다음과 같이 기술된다(Table 2).

2.3 상관 분석

신호들은 7개의 특성 값으로 연산되어, 각 임상 지표와 상관 계수의 연산을 진행하였다. 상관계수의 연산은 크게 선형 관계를 의미하는 Pearson 계수와 단조 관계를 의미하는 Spearman 계수가 있다. 본 연구에서는 임상 스케일의 특성상 비연속적인 데이터와의 관계를 확인하고자 Spearman 계수를 이용하여 두 변수 간의 단조 관계를 확인하였으며 그 수식은 식(1)과 같다( $\rho$  = Spearman 상관 계수,  $D$  = 두 관측 값의 등급 차이,  $n$  = 관측 값의 수). 상관성 분석은 피험자 전체 집단과, FoG 집단 및 nFoG 집단으로 나누어 총 3개의 집단에 대해 분석을 진행하였으며,  $p$ -value < 0.05를 기준으로 유의한 상관관계를 분류하였다. 관성 신호의 특성과 임상 지표 간의 상관관계와 관련된 모든 연산은 MATLAB 2018b (Mathworks, USA)를 통해 진행하였다.

$$\rho = 1 - \frac{6\sum D^2}{n(n^2 - 1)} \tag{1}$$

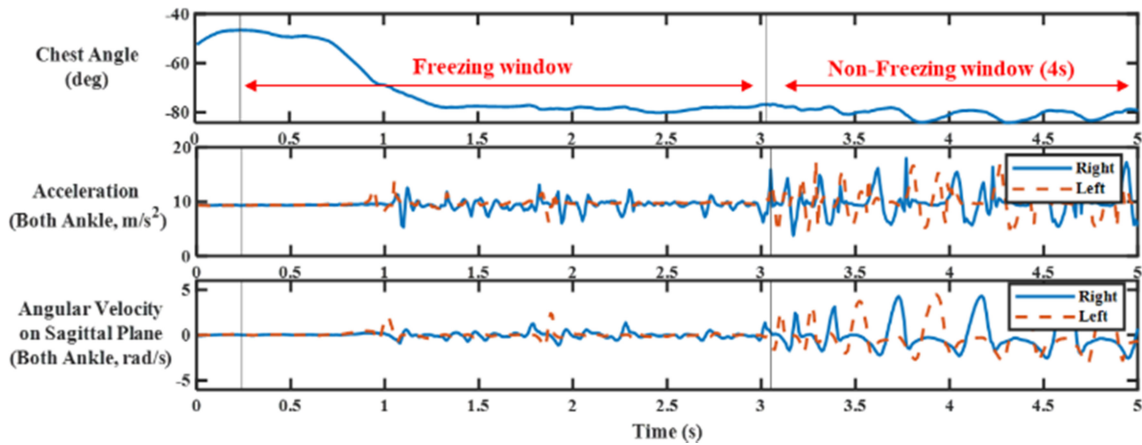


Fig. 2 Window segmentation in IMU signals

Table 2 Features of IMU signal

Mean of acceleration within given window in gravity axis	
Mean Acc	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Acc\_y_i$
Mean of angular velocity within given window in sagittal plane	
Mean Ang	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Ang\_x_i$
Standard deviation of acceleration in given window in gravity axis	
Std. Acc	$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Acc\_y_i - Acc\_y)^2}{n}}$
Standard deviation of angular velocity in given window in sagittal plane	
Std. Ang	$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Ang\_x_i - Ang\_x)^2}{n}}$
LBP	Ratio of signal power in locomotion band (0.3-3 Hz)
FBP	Ratio of signal power in freeze band (3-8 Hz)
FI	$\frac{\text{Area under the PSD curve in freeze band}}{\text{Area under the PSD curve in locomotion band}}$

Notes: Acc = Acceleration; Ang = Angular velocity; LBP = Locomotion band power; FBP = Freezing band power; FI = Freezing index; PSD = Power spectral density

Table 3 Spearman's correlation coefficient between IMU features and clinical rating scale (p-values < 0.05)

Patient group	IMU feature	KMMSE	UPDRS part 3	H&Y	NFOGQ part 2	NFOGQ part 3
All	Mean Acc	.450	-.542	-.407	-	-.487
	Mean Gyro	-	-	-	-	-
	Std. Acc	.390	-.538	-	-	-.427
	Std. Gyro	.499	-.470	-	-	-.441
	LBP	.334	-.646	-	-	-.601
	FBP	-	-	-	-	-.295
FoG	FI	-	.642	-	-	.355
	Mean Acc	-	-	-	-	-
	Mean Gyro	-	-	-	-	-
	Std. Acc	-	-	-	-.471	-.409
	Std. Gyro	-	-	-	-	-.484
	LBP	-	-.658	-	-	-.626
nFoG	FBP	-	-	-	-.642	-
	FI	-	.707	.500	-	.480
	Mean Acc	.532	-.654	-.396	-	-.521
	Mean Gyro	-	-	-	-	-
	Std. Acc	.624	-.570	-.424	-	-.421
	Std. Gyro	.696	-.505	-	-	-.415
	LBP	.385	-.614	-	-	-.589
	FBP	.470	-	-.595	-	-.378
	FI	-	.605	-	-	-

### 3. 연구 결과

본 연구에서는 임상에서 사용하는 파킨슨병의 중증도를 평가하는 임상 지표와 관성 센서의 특성 값 간의 Spearman 상관 계수를 통해 상관성을 확인하였으며, p-value < 0.05를 기준으로, 유의한 결과를 Table 3에 나타내었다.

#### 3.1 피험자 전체 집단

전체 피험자 대상의 관성 신호와 임상 평가척도와의 상관 계수를 통해 시간 영역의 특성 값들과 10개 쌍의 유의한 상관관계를 확인하였으며, 주파수 영역의 특성 값들과는 6개 쌍의 유의한 상관관계를 확인하였다.

시간 영역의 특성에서 Mean Acc는 NFOGQ part 2를 제외한 모든 지표들과 상관성이 나타났으며, Mean Ang는 어떠한 지표와도 상관성이 드러나지 않았다. Std. Acc와 Std. Ang는 KMMSE, UPDRS part3, NFOGQ part 3와 상관성이 드러났다. 그 중  $|\rho| > 0.5$ 의 강한 상관관계는 Mean Acc와 UPDRS part 3( $\rho = -0.542$ ), Std. Acc와 UPDRS part 3( $\rho = -0.538$ )에서 나타났다.

주파수 영역의 특성에서 LBP는 KMMSE, UPDRS part3, NFOGQ part 3와 상관성이 나타났으며, FBP는 NFOGQ part 3와 상관성이 드러났다. FI는 UPDRS part 3와 NFOGQ part 3와 상관성이 드러났다. 그 중  $|\rho| > 0.5$ 의 강한 상관관계는 LBP와 UPDRS part3( $\rho = -0.646$ ), LBP와 NFOGQ part 3( $\rho = -0.601$ ) 및 FI와 UPDRS part 3( $\rho = 0.642$ )에서 확인되었다.

**3.2 동결 보행 발현 집단**

16명의 피험자대상의 총 48번의 실험 중에서 18번(10명)의 동결 보행이 관찰되었다. FoG 집단에서 시간 영역의 특성 값들은 3개 쌍의 유의한 상관관계를 나타내었으며, 주파수 영역에서는 6개 쌍의 유의한 상관관계를 나타내었다.

시간 영역의 특성 값들 중 Mean Acc와 Mean Ang는 어떠한 임상 평가 지표와 상관성을 보이지 않았다. 반면, Std. Acc는 NFOGQ part 2와 part 3에서 상관성을 보였으며, Std. Ang는 NFOGQ part 3와 상관성을 보였다.

주파수 영역의 특성 값들 중 LBP는 UPDRS part 3( $\rho = -0.658$ )와 NFOGQ part 3( $\rho = -0.626$ )에서 강한 상관관계를 나타내었으며, FBP는 NFOGQ part2( $\rho = -0.642$ )와 강한 상관관계를 나타내었다. FI는 UPDRS part 3( $\rho = 0.707$ ) 및 H&Y ( $\rho = 0.500$ )와 강한 상관관계를 나타내었으며, NFOGQ part 3와 유의한 상관성을 보였다.

**3.3 동결 보행 미발현 집단**

nFoG 집단에서 관성 신호의 특성과 임상 평가 지표 간의 상관성은 다음과 같다. 시간영역에서는 11개 쌍의 유의한 상관관계를 보였으며, 주파수 영역에서는 7개 쌍의 유의한 상관관계를 나타내었다.

Mean Acc과 Std. Acc는 NFOGQ part 2를 제외한 모든 지표와 상관관계를 나타내었다. Mean Ang의 경우 어떠한 지표와도 상관성이 드러나지 않았으나, Std. Ang에서 KMMSE, UPDRS part 3, NFOGQ part 3와 유의한 상관관계를 나타내었다. 그중 KMMSE와 UPDRS part 3는 3가지 관성 신호의 시간 영역 특성과  $|\rho| > 0.5$ 의 강한 상관관계를 나타내었으며, NFOGQ part 3는 Mean Acc ( $\rho = -0.521$ )와 강한 상관관계를 나타내었다.

주파수 영역의 특성에서 LBP는 KMMSE, UPDRS part 3( $\rho = -0.614$ ), NFOGQ part 3( $\rho = -0.589$ )와 상관성을 드러내었다. FBP는 KMMSE, H&Y ( $\rho = -0.595$ ), NFOGQ part 3와 유의한 상관관계를 나타내었으나, FI는 UPDRS part 3( $\rho = 0.605$ )와 강한 상관관계를 나타내었다.

**4. 고찰**

**4.1 임상 평가 척도**

본 연구에서 사용한 임상 평가 항목 및 내용으로는 KMMSE, UPDRS part 3, H&Y, NFOGQ part 2, NFOGQ part 3으로 구성되었다. 이중 KMMSE를 제외한 모든 임상 지표는 환자의 중증도 및 장애가 심할수록 기록되는 점수가 높게 평가되기에 관성 신호의 특성들과 음의 상관관계를 나타낸다. 반면, KMMSE는 환자의 인지력이 건강할수록 높은 점수를 획득하기에 다른 임상 평가 지표와 반대되는 양의 부호를 가진 상관계수를 나타낸다.

전체 집단 및 nFoG 집단에서의 임상 지표 중, KMMSE, UPDRS part 3, NFOGQ part 3는 비교적 많은 관성 신호의 특성과 유의한 상관성이 많이 나타났으나, H&Y와 NFOGQ part 2에서는 비교적 적은 상관관계가 나타났다. H&Y의 경우 0-5 점의 단계로 장애를 판단하였기 때문에 세밀한 평가가 이루어지지 않았다. 또한, 본 연구에서 모집한 환자들은 대부분 H&Y 점수 2-4점으로 그 분포가 넓지 않다. 이는 향후 더 넓은 분포에 속한 파킨슨병 환자를 대상으로 범위를 넓혀 탐색할 필요가 있다. 한편, NFOGQ part 2에서 조사한 동결 보행 경험 횟수와 관성 신호 특성 값 사이에 상관 계수가 적게 나타난 것은 실험을 조성하는 과정에서 일상생활속의 상황 변수(화장실, 좁은 문 등)를 반영하지 못했기 때문으로 판단된다.

Kim 등[26]이 발표한 논문에서는 보행이 느려지거나 걸음이 짧아지는 것은 H&Y보다는 KMMSE와 관련이 있다고 밝힌 바 있다. 파킨슨병 환자의 보행은 인지장애와 관련이 있으며, 주의력 결핍으로 인해 보행 변동성과 안정성에 변화를 가져온다. 특히 인지정신상태 및 동결 보행에 대한 인식을 나타내는 KMMSE 및 NFOGQ part3가 관성 신호 특성 값과 많은 상관관계를 나타내는 것은 파킨슨병 환자의 정신적 상태가 실제 운동수행능력에 반영되어 나타난 것이다.

UPDRS의 경우 운동을 수행해가며 평가하는 지표로서, 환자의 실제 보행 능력을 기반으로 평가했기 때문에 많은 상관관계가 나타났다. Vieregge 등[27]은 UPDRS와 파킨슨병 환자의 보행 간의 상관성을 조사하는 연구에서, UPDRS가 보행 속도와 관련이 있고 운동완화증(Bradykinesia)과도 관련이 있다는 것을 확인하였다. 따라서 UPDRS part 3가 증가함에 따라 몸이 둔해지므로 관성 신호의 특성들과 많은 상관관계가 도출되었다.

**4.2 시간 영역의 관성 신호 특성**

시간 영역의 특성에서 각 집단별 개수로 본 연구의 결과 전체 집단에서의 유의한 상관계수는 총 10개 쌍이었으나, FoG 집단에서는 3개의 쌍으로 감소하였으며, nFoG 집단에서는 11개로 나타났다. FoG 집단에서 각 임상 지표와 시간 영역의 특성 값 사이에 유의한 상관성을 보이지 않은 이유는 동결 보행이 일어나는 구간에서 중증 정도와 무관하게 멈추거나 떨리는 현상으로 인하여 특성 값들이 일정하게 변화하지 않았기 때문이다.

따라서, 시간 영역의 특성 값으로 임상 평가지표에 활용할 시 동결 보행이 일어나는 동안에는 유의한 상관관계를 확인하기 어렵다.

그러나, 전체 집단에서 시간 영역의 특성이 임상 평가 지표와 유의한 상관관계를 나타내는 것은 동결 보행 발현되었더라도 그 이후 보행이 진행된다면 임상 평가 지표와 상관관계가 나타나는 것을 의미한다. 동결 보행이 발생하였을 때에는 시간 영역에서의 정보가 큰 의미를 전달하지 못하나, 보행이 시작되었을 때에는 유의한 정보를 제공할 수 있다. 따라서 만약 파킨슨병 환자를 대상으로 평가하였을 때에 동결 보행이 발현된다면, 동결 보행이 종료된 이후, 정상 보행이 시작된 시점으로부터의 신호를 통해 임상 평가 척도를 추론하기에 좋은 특성으로 활용될 수 있다.

시간 영역의 특성 중 Mean Acc와 Std. Acc, Std. Ang는 비슷한 양상을 보였다. Mean Acc 보행 중 발생하는 충격력 및 추진력과 비례하며, Std. Acc 및 Std. Ang는 정해진 윈도우 내에서 발생한 걸음 횟수와 연관이 있다. 발목에서 더 큰 힘이 작용할수록, 더 큰 Mean Acc와 분당 걸음 수 및 Std. Acc, Std. Ang의 증가로 나타난다. 이로 인해 세 가지 특성 값에서 유사한 결과가 나타났다.

반면, 각속도의 평균은 어떠한 지표와도 유의한 상관관계가 나타나지 않았다. 이는 유각기 동안 나타나는 장딴지의 회전 속도 및 보장의 길이와 관련이 있다. Hausdorff 등[28]에 따르면 파킨슨병의 중증도에 따라 발생하는 보행 속도의 차이는 분당 걸음 수의 증가이나 보행 사이클 내 유각기의 속도와는 무관한 것으로 언급한 바 있다.

#### 4.3 주파수 영역의 관성 신호 특성

전체 집단에서 주파수영역의 특성 값은 6개의 쌍을 보였으나 FoG 집단에서는 6개 쌍, nFoG 집단에서는 7개 쌍으로 동결 보행의 발현 유무에 따라 상관계수의 개수는 큰 차이를 보이지 않는다. 이는 FoG 집단에서는 시간 영역의 특성보다는 주파수영역의 특성이 임상 척도의 정보를 더욱 크게 반영한다.

LBP는 동결 보행의 발현과 상관없이 UPDRS part 3와 NFOGQ part 3와 유의한 상관성을 나타내었다. 이는 LBP가 UPDRS part 3 및 NFOGQ part 3의 값을 대변할 수 있을 것으로 예상된다. 특히 동결 보행 발현 시에도 LBP의 상관성이 드러난 것은 동결 보행 시의 파워스펙트럼 범위와 관련이 있다. Palmerini 등[29]과 MacDougall [30]에 따르면 동결 보행 발현 시에도 3 Hz 이하의 주파수 파워가 포함되어 있다고 밝혔다. 따라서 본 연구의 결과는 동결 보행이 발현 시에도 Locomotion Band의 범위를 포함한 떨림이 관찰되었기 때문에 LBP와의 상관성이 유지되었다.

FBP는 전체 집단의 분석에서 강한 상관계수가 드러나지 않았으나, 동결 보행 발현 시 NFOGQ part 2에서 강한 상관성이 드러났다. 또한, 파킨슨병의 중증도가 심할수록 신체의 떨림 정도가 심하여 양의 부호가 나타날 것으로 예측하였으나, 본 연구에서는 반대되는 음의 부호를 가진 상관계수를 획득하였다.

이는 동결 보행의 경험이 많은 환자일수록 동결 보행의 발현 시 그 떨림의 정도가 더욱 심해지는 것이 아닌 거의 움직이지 않았기 때문이다.

FBP는 nFoG 집단에서 KMMSE 및 UPDRS part 3와 유의한 결과를 나타내었다. 이는 파킨슨병의 정상 보행 시 발생하는 주파수 범위에 3 Hz 이상의 정보가 포함되었기 때문이다. Palmerini [29]과 MacDougall 등[30]에 따르면 이러한 결과는 Locomotion Band의 조화 주파수(Harmonic)으로 인한 경향으로 해석 가능하다. 정상 보행의 주파수 스펙트럼에서 3 Hz 이상 대역의 조화 주파수는 거의 존재하지 않거나, 측정되더라도 동결 보행 발현 시의 파워에 비해 월등히 작다고 언급하였다.

본 연구에서 사용한 FI는 전체 집단에서 UPDRS part 3, NOFGQ part 3와 유의한 상관관계를 보이거나 동결 보행이 발현될 때에는 그 상관성이 더 강한 값으로 도출되었다. 특히 동결 보행의 검출을 위해 자주 상용되었던 FI는 운동수행능력과 관련된 UPDRS part 3와 0.7 이상의 강한 상관계수가 나타나, 동결 보행을 경험하는 환자의 경우 FI를 통해 UPDRS part 3와 NFOGQ part 3의 정보를 유추할 수 있다. 그러나, nFoG 집단에서 NFOGQ part3와의 상관성은 나타나지 않은 반면, UPDRS part 3와는 강한 상관관계를 나타내었다. 이는 FI가 파킨슨병 환자의 UPDRS part 3 정보를 매우 많이 포함하고 있는 것으로 보인다. 따라서 FI를 사용한다면, 환자의 전체적인 운동수행능력을 예측하는 데에 활용 가능하다.

#### 4.4 한계

본 연구에서는 동결 보행 구간을 선정하는 과정에서 떨리는 구간과 정지해있는 구간을 구분하지 않았다. 보행 시작 전 동결 보행은 떨리는 현상과 경직되는 현상 두 가지로 구분된다. 특히 본 실험에서 떨리는 동결 보행 발현 시 첫걸음의 기준은 Locomotion Band(0.3-3 Hz)를 바탕으로 보행 주기가 0.3초 이상인 구간을 보행 시작으로 판별하였다. 본 내용의 결과를 바탕으로 확인하였을 때에는 각 지표들 간의 상관성을 조사할 때에 두 가지 동결 보행 현상을 나누어 분석을 할 필요가 있다. 특히, 임상적으로 파킨슨병 환자의 동결 보행을 확인하고자 할 때에는 떨림이나 멈추는 것을 관찰함과 동시에 환자의 보행하고자 하는 의지가 언제부터 가해졌는가를 함께 관찰해야 하지만, 이는 관성 신호만으로는 확인하기 어려운 문제로 존재한다[31,32].

본 연구의 목적으로 관성 신호의 특성과 임상지표 간의 상관성을 탐색하였으나, 본 연구의 결과에서는 각 임상 지표 간 미치는 영향을 고려하지 않았다. 본 연구에서 사용한 5가지 임상 지표는 각각 내용은 상이하지만 모두 파킨슨병의 중증도를 고려한다는 점에서 같은 목적을 가지며 이에 따른 영향이 존재할 것이다. 예를 들어, 인지능력에 따라서 신체 능력과 관성 신호 특성 간 상관성이 달라질 수 있으며, 반대로 신체 능력에 따라 인지 능력과 관성 신호의 특성 간 상관성이 달라질 수 있다. 이러한 변인들을 고려한다면, 각 평가지표의 운동 수행에 대한 생체역학적 분석과 일상생활에서의 심층 조사 등을 통해 본 연구의

결과를 더욱 상세히 분석 가능할 것으로 예상된다. 따라서, 본 연구에서 유의한 상관관계를 보인 관성 신호의 특성들은 임상 지표의 정보를 어느정도 포함하지만 완전히 대변하기에는 한계가 존재한다. 이와 관련된 연구는 추후 피험자의 수를 늘려 조사해야 할 과제이다.

본 연구에서는 관성 신호의 상관성을 이용하여 임상지표와의 상관관계를 확인하였으나, 실제로 머신 러닝과 같은 알고리즘을 이용하여 실제 임상 지표의 척도로서 평가하지 못하였다. 이러한 임상지표들은 전문의의 주관적 평가를 통해 정량적으로 판별되어지나, 각 지표들 간의 경계가 뚜렷하게 구분되어 있지 않다. 또한, 이러한 지표들은 평가하는 환경에 따라 개인의 의견이 반영되므로 머신 러닝의 학습을 위한 타겟을 임상 지표로 선정하기에는 어려움이 있다. 이는 추후 머신러닝의 학습 타겟에 대한 논의를 진행해야 할 것으로 예상된다.

**5. 결론**

본 연구에서는 관성센서에서 측정된 신호의 특성 값들과 임상에서 평가되었던 지표 간 상관관계를 탐색하였다. 머신러닝의 특성으로 주로 활용되는 시간 영역의 특성 4개와 주파수 영역의 특성 3개의 평가를 통해 임상 지표를 대변할 수 있는 특성 값을 제안하고자 하였다.

그 결과 시간 영역의 특성 중 Mean Acc와 Std. Acc는 UPDRS part 3의 상관성을 통해 전체적인 운동수행능력에 대한 정보를 포함할 수 있으나, 이는 동걸보행이 발현하지 않았을 시에만 한정된다. 반면 주파수 영역에서 LBP와 FI는 동걸 보행 발현 시에도 UPDRS part 3의 정보를 포함할 수 있으며, 특히 LBP는 NFOGQ3의 정보를 포함한다.

환자의 중증도를 표현하는 임상 지표는 대체로 주관적으로 평가되는데, 이를 객관화할 수 있다는 점에서 본 연구에 의의가 있다. 추후 본 연구의 한계점들을 보완하여 관성 신호 및 특성 값의 머신 러닝 학습을 통해 파킨슨병의 여러 임상 지표를 제시할 수 있다면, 임상에서의 시간적 부담을 감소시키는 데에 기여할 수 있을 것으로 예상된다.

**ACKNOWLEDGEMENT**

본 연구는 2022년 범부처전주기의료기기연구개발 사업단(KMDFKD0002003G0100252)의 지원으로 이루어진 연구임.

**REFERENCES**

1. Ahmad, N., Ghazilla, R. A. R., Khairi, N. M., Kasi, V., (2013), Reviews on various inertial measurement unit (IMU) sensor

applications, *International Journal of Signal Processing Systems*, 1(2), 256-262.

2. Antunes, R., Jacob, P., Meyer, A., Conditt, M. A., Roche, M. W., Verstraete, M. A., (2021), Accuracy of measuring knee flexion after TKA through wearable IMU sensors, *Journal of Functional Morphology and Kinesiology*, 6(3), 60.

3. Abdullah, A., Abdul-Kadir, N., Harun, F. C., (2017), Research and development of IMU sensors-based approach for sign language gesture recognition, *Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering (JTEC)*, 9(3-9), 33-39.

4. Caldas, R., Mundt, M., Potthast, W., de Lima Neto, F. B., Markert, B., (2017), A systematic review of gait analysis methods based on inertial sensors and adaptive algorithms, *Gait & Posture*, 57, 204-210.

5. Ferreira, R. N., Ribeiro, N. F., Santos, C. P., (2022), Fall risk assessment using wearable sensors: A narrative review, *Sensors*, 22(3), 984.

6. Ruiz-Ruiz, L., Jimenez, A. R., Garcia-Villamil, G., Seco, F., (2021), Detecting fall risk and frailty in elders with inertial motion sensors: A survey of significant gait parameters, *Sensors*, 21(20), 6918.

7. Sánchez Manchola, M. D., Bernal, M. J. P., Munera, M., Cifuentes, C. A., (2019), Gait phase detection for lower-limb exoskeletons using foot motion data from a single inertial measurement unit in hemiparetic individuals, *Sensors*, 19(13), 2988.

8. Healthcare Bigdata Hub, Health Insurance Review & Assessment Service. <http://opendata.hira.or.kr/op/opc/olap3thDsInfo.do>

9. Braak, H., Ghebremedhin, E., Rüb, U., Bratzke, H., Del Tredici, K., (2004), Stages in the development of Parkinson’s disease-related pathology, *Cell and Tissue Research*, 318, 121-134.

10. Prateek, G., Skog, I., McNeely, M. E., Duncan, R. P., Earhart, G. M., Nehorai, A., (2017), Modeling, detecting, and tracking freezing of gait in Parkinson disease using inertial sensors, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 65(10), 2152-2161.

11. Hutabarat, Y., Owaki, D., Hayashibe, M., (2020), Quantitative gait assessment with feature-rich diversity using two IMU sensors, *IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics*, 2(4), 639-648.

12. Abou, L., Peters, J., Wong, E., Akers, R., Dossou, M. S., Sosnoff, J. J., Rice, L. A., (2021), Gait and balance assessments using smartphone applications in Parkinson’s disease: A systematic review, *Journal of Medical Systems*, 45(9), 1-20.

13. Mannini, A., Trojaniello, D., Cereatti, A., Sabatini, A. M., (2016), A machine learning framework for gait classification using inertial sensors: Application to elderly, post-stroke and huntington’s disease patients, *Sensors*, 16(1), 134.

14. Pardoel, S., Kofman, J., Nantel, J., Lemaire, E. D., (2019), Wearable-sensor-based detection and prediction of freezing of gait in Parkinson’s disease: A review, *Sensors*, 19(23), 5141.

15. Borzi, L., Mazzetta, I., Zampogna, A., Suppa, A., Irrera, F., Olmo, G., (2022), Predicting axial impairment in Parkinson's disease through a single inertial sensor, *Sensors*, 22(2), 412.
16. Roller, W. C., Glatt, S., Vetere-Overfield, B., Hassanein, R., (1989), Falls and Parkinson's disease, *Clinical Neuropharmacology*, 12(2), 98-105.
17. Sofuwa, O., Nieuwboer, A., Desloovere, K., Willems, A.-M., Chavret, F., Jonkers, I., (2005), Quantitative gait analysis in Parkinson's disease: Comparison with a healthy control group, *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 86(5), 1007-1013.
18. Zampieri, C., Salarian, A., Carlson-Kuhta, P., Aminian, K., Nutt, J. G., Horak, F. B., (2010), The instrumented timed up and go test: Potential outcome measure for disease modifying therapies in Parkinson's disease, *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*, 81(2), 171-176.
19. Plotnik, M., Giladi, N., Dagan, Y., Hausdorff, J. M., (2011), Postural instability and fall risk in Parkinson's disease: Impaired dual tasking, pacing, and bilateral coordination of gait during the "ON" medication state, *Experimental Brain Research*, 210(3-4), 529-538.
20. Folstein, M. F., Robins, L. N., Helzer, J. E., (1983), The mini-mental state examination, *Archives of General Psychiatry*, 40(7), 812.
21. Kang, Y., NA, D.-L., Hahn, S., (1997), A validity study on the Korean Mini-Mental State Examination (K-MMSE) in dementia patients, *Journal of the Korean Neurological Association*, 300-308.
22. Movement disorder society task force on rating scales for Parkinson's disease, (2003), The unified Parkinson's disease rating scale (UPDRS): Status and recommendations, *Movement Disorders*, 18(7), 738-750.
23. Hoehn, M. M., Yahr, M. D., (1998), Parkinsonism: Onset, progression, and mortality, *Neurology*, 50(2), 318-318.
24. Nieuwboer, A., Rochester, L., Herman, T., Vandenberghe, W., Emil, G. E., Thomaes, T., Giladi, N., (2009), Reliability of the new freezing of gait questionnaire: Agreement between patients with Parkinson's disease and their carers, *Gait & Posture*, 30(4), 459-463.
25. Moore, S. T., MacDougall, H. G., Ondo, W. G., (2008), Ambulatory monitoring of freezing of gait in Parkinson's disease, *Journal of Neuroscience Methods*, 167(2), 340-348.
26. Kim, S. M., Kim, D. H., Yang, Y., Ha, S. W., Han, J. H., (2018), Gait patterns in Parkinson's disease with or without cognitive impairment, *Dementia and Neurocognitive Disorders*, 17(2), 57-65.
27. Vieregge, P., Stolze, H., Klein, C., Heberlein, I., (1997), Gait quantitation in Parkinson's disease—locomotor disability and correlation to clinical rating scales, *Journal of Neural Transmission*, 104(2), 237-248.
28. Hausdorff, J. M., Cudkovicz, M. E., Firtion, R., Wei, J. Y., Goldberger, A. L., (1998), Gait variability and basal ganglia disorders: Stride-to-stride variations of gait cycle timing in Parkinson's disease and Huntington's disease, *Movement Disorders*, 13(3), 428-437.
29. Palmerini, L., Rocchi, L., Mazilu, S., Gazit, E., Hausdorff, J. M., Chiari, L., (2017), Identification of characteristic motor patterns preceding freezing of gait in Parkinson's disease using wearable sensors, *Frontiers in Neurology*, 8, 394.
30. MacDougall, H. G., Moore, S. T., (2005), Marching to the beat of the same drummer: The spontaneous tempo of human locomotion, *Journal of Applied Physiology*, 99(3), 1164-1173.
31. Bachlin, M., Plotnik, M., Roggen, D., Maidan, I., Hausdorff, J. M., Giladi, N., Troster, G., (2009), Wearable assistant for Parkinson's disease patients with the freezing of gait symptom, *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, 14(2), 436-446.
32. Mancini, M., Priest, K. C., Nutt, J. G., Horak, F. B., (2012), Quantifying freezing of gait in Parkinson's disease during the instrumented timed up and go test, *Proceedings of the 2012 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 1198-1201.





**Tae Hee Kim**

Researcher in Prosthetics and Orthotics Center, KVHS. His research interest is bio-mechanics and rehabilitation engineering.  
E-mail: xogml0923@gmail.com



**Hee Seung Yang**

M.D. in the Department of Physical Medicine and Rehabilitation, KVHS. Her research interest is prosthetics and orthotics.  
E-mail: yang7310@naver.com



**Ha Eun Jo**

Researcher in Prosthetics and Orthotics Center, KVHS. Her research interest is rehabilitation engineering.  
E-mail: gkdms76@naver.com



**Woo Sub Sim**

Research director in Prosthetics and Orthotics Center, KVHS. His research interest is prosthetics and orthotics.  
E-mail: cpo111@naver.com



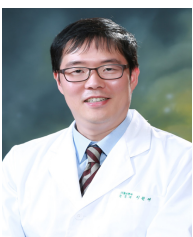
**Hui Woo Choi**

Researcher in Prosthetics and Orthotics Center, KVHS. Her research interest is rehabilitation engineering.  
E-mail: chwoo0213@gmail.com



**Pyoung-Hwa Choi**

Researcher in Prosthetics and Orthotics Center, KVHS. Her research interest is bio-mechanics and physical therapy.  
E-mail: peace8422@naver.com



**Won Jae Lee**

M.D. in the Department of Rehabilitation Medicine, KVHS. His research interest is physical medicine.  
E-mail: braddom@nate.com



# 고속 조건에서 테이퍼 롤러 베어링에 적용되는 리테이너의 특성에 관한 연구

## A Study on the Characteristics of the Retainer applied to Taped Roller Bearings under High Speed Operating Condition

김강석<sup>1</sup>, 이경구<sup>2</sup>, 이득우<sup>1,#</sup>  
Kang Seok Kim<sup>1</sup>, Kyoung Ku Lee<sup>2</sup>, and Deug Woo Lee<sup>1,#</sup>

<sup>1</sup> 부산대학교 나노에너지공학과 (Department of Nano Energy Engineering, Pusan National University)

<sup>2</sup> 셉플러코리아 유한회사 (Schaeffler Korea Corp.)

# Corresponding Author / E-mail: [dwoolee@pusan.ac.kr](mailto:dwoolee@pusan.ac.kr), TEL: +82-51-510-3129

ORCID: 0000-0001-7462-8341

KEYWORDS: Rolling bearing (구름베어링), Retainer (리테이너), High speed operating (고속운전), Simulation (시뮬레이션), Tapered roller bearing (테이퍼롤러베어링)

*Factors such as weight reduction and improved fuel efficiency of vehicles interfere with the efficiency of roller bearings in automobiles under harsh conditions. In particular, studies are ongoing to increase the load capacity and rigidity under high-speed conditions. The development of tapered roller bearings that can be used under high-speed conditions is accelerating. In the case of high-speed bearings, factors such as centrifugal force, gyroscopic moment, and slippage have a greater influence on the performance of the bearing, unlike the traditional operating mechanisms. The resulting lubrication characteristics have a profound impact on the failure mode of the bearing. In particular, unlike traditional roller bearings, system failure due to damage to the retainer frequently occurs, suggesting the need for prompt investigation. In this study, the rotational characteristics and strength of three models, a steel cage and two plastic cages for tapered roller bearings with the same internal structure, were examined. A comparative analysis of retainers with different shapes and materials can reveal the factors contributing to optimal performance under high-speed operating conditions and the optimal design of bearings.*

Manuscript received: January 18, 2023 / Revised: February 9, 2023 / Accepted: February 10, 2023

### NOMENCLATURE

nk	=	Rotational Speed of Retainer
$\alpha$	=	Contact Angle
Dpw	=	Pitch Circle Diameter
Dw	=	Rolling Element Diameter
n	=	Rotational Speed of Inner Ring

### 1. 서론

테이퍼 롤러 베어링(Tapered Roller Bearing, TRB)은 롤러 베

어링의 일종으로 경사진 외륜 궤도와 전동체인 테이퍼 롤러, 그리고 테이퍼 롤러의 대단부와 접촉하는 내륜 큰 턱의 구조로 인해 볼 베어링 보다 더 큰 반경방향 및 축방향 하중을 지지할 수 있다. 따라서 기계 산업 중, 회전 기계 영역에서 특히 광범위하게 고려되어 왔다. TRB의 특성은 다양한 작동 조건에 의해 크게 영향을 받는다. 테이퍼 롤러 베어링의 주요 구성요소는 회전 축과 끼워지는 내륜, 하우징과 체결되는 외륜, 내외륜 사이에 하중 전달 매개체인 롤러, 그리고 이웃하는 롤러와의 접촉을 방지하고 롤러를 등 간격으로 유지시키기 위한 리테이너(Retainer, 케이지)로 구성되어 있다.

현재 고속, 고정밀 공작기계를 위한 주축 시스템에 가장 일반적으로 사용되는 구름 베어링은 앵글러 콘택트 볼 베어링

(Angular Contact Ball Bearing, ACBB)이다. 앵귤러 콘택트 볼 베어링은 고속에 적합하고 반경방향 및 축방향 하중을 동시에 지지할 수 있다. 그러나 하중 전달 매개체인 전동체가 볼이기 때문에 유발되는 전동체와 궤도 사이의 점 접촉은 베어링의 하중 전달 능력과 강성을 제한한다. 그 외에도 비교적 큰 접촉각으로 인해 속도가 증가함에 따라 강성이 크게 감소한다[1,2]. 정격 하중과 강성과 관련하여 TRB는 ACBB보다 우수하다. 그러나 대부분의 경우 고속 조건에서 주축 시스템에 충분하지 않으며, 대부분의 TRB 개발은 정격 하중, 수명 및 베어링 마찰에 중점을 두고 있다.

최근 차량의 경량화, 연비 개선 등의 이유로 자동차용 구름 베어링은 더 가혹한 조건에서 다양한 요구 조건을 만족해야 하는 도전에 직면하고 있다. 특히 고속 조건에서 하중 부하 능력 및 강성을 높이기 위해서 다양한 연구가 진행이 되고 있으며, 고속 조건에서 사용할 수 있는 TRB의 개발이 가속화되고 있다[3-5]. 고속용 베어링의 경우에는 전통적인 베어링의 작동 기구와는 달리 원심력과 자이로스코픽 모멘트, 미끄럼(Slippage) 등의 인자들이 베어링의 성능에 더 큰 영향을 미치게 되며, 베어링 내부에서의 전동체와 리테이너의 거동, 그리고 그에 따른 윤활 특성이 베어링의 파손 모드에도 큰 영향을 미치게 된다. 특히 전통적인 구름 베어링과는 달리 리테이너의 파손으로 인한 시스템 고장이 빈번하게 발생하여, 이에 대한 연구가 더욱 절실한 상황이다[6,7].

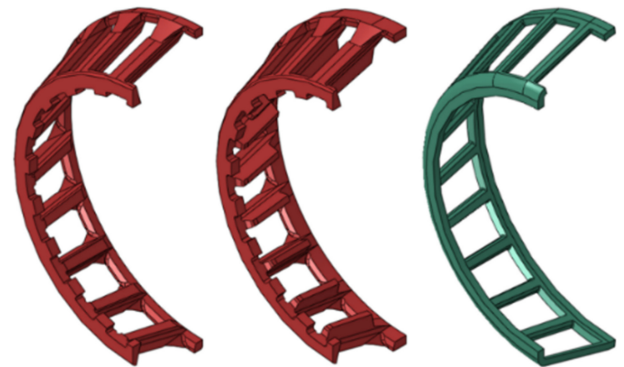
리테이너 소재의 경우, 과거에는 고속 회전 시의 원심력에 의한 강도 및 강성 부족 문제로 금속 재질(탄소강 및 황동 등)을 주로 사용하였다. 하지만 저소음, 저 마찰 및 경량 특성의 이유로, 현재는 강도 및 내열성이 향상된 폴리머 재질이 적용되는 추세에 있다. 폴리머 리테이너의 경우, 소음 및 마찰 특성이 금속 재질의 리테이너보다 뛰어나지만, 고속 회전 시 원심력에 의한 대변형, 강도 및 강성 부족의 문제를 가지고 있다.

본 연구에서는 동일한 내부구조를 가진 TRB에 대해 강재 리테이너와 플라스틱 리테이너의 두 가지 모델에 대한 회전 특성 및 강도를 검토하였다. 서로 다른 형상 및 재질을 가진 리테이너에 대한 비교 해석을 수행하여 결과를 검토함으로써, 고속 작동조건에서 최적의 성능 특성을 구현하는 인자를 찾아서 베어링의 최적 설계에 적용하고자 한다.

## 2. 리테이너 설계

### 2.1 폴리머 리테이너

폴리머 소재로 만든 테이퍼 롤러 베어링용 리테이너는 그리이스가 삽입된 밀봉형 타입의 설계에 주로 사용된다. 가장 일반적으로 사용되는 폴리머 재료는 유리섬유 강화 나일론 열가소성수지이다[8]. 폴리머 리테이너는 대량으로 생산할 수 있으며 강재 리테이너보다 설계 유연성이 뛰어나다. 또한 폴리머 리테이너는 무게가 가볍고 조립이 쉽다. 경우에 따라 하나 또는 두 개의 추가 물리를 허용하여 베어링 용량을 높일 수 있다. 최근에



(a) Polymer retainer (b) Advanced polymer retainer (c) Steel retainer

Fig. 1 Retainer designs of tapered roller bearing

는 재료 기술 및 사출성형 기술의 발달로 인해 폴리머 재질의 강도와 강성이 향상되었으며, 금속 재질을 대체할 수 있는 대안으로 여겨지고 있다. 일반적인 사용 조건과는 달리 고속 조건에서는 원심력에 의한 대변형이 발생하므로 설계 사양에 대한 강도 및 강성의 검토가 필수적이다.

고속 조건에서 리테이너의 회전 특성 및 강도를 비교하기 위해 동일한 내부구조를 가진 베어링에 대해 저속 일반용 폴리머 리테이너(표준 폴리머 리테이너)와 베어링 내부의 유동 특성을 향상시킨 토크 저감형 폴리머 리테이너를 설계하여 모델링하였다. Figs. 1(a)와 1(b)에서 두 가지 폴리머 리테이너의 형상을 보여주고 있다. 두 가지 모두 전동체 안내형 리테이너이며, 토크 저감형 폴리머 리테이너의 경우에는 적은 윤활제로도 효과적인 윤활특성을 가질 수 있도록 전동체가 삽입되는 창과 창 사이 리테이너 살의 두께와 형상을 기존 리테이너 대비 개선하였다. 토크 저감형 폴리머 리테이너의 경우 표준 폴리머 리테이너에 비해 전동체 포켓 내부의 전동체와 접촉하는 접촉면이 넓어지면서 리테이너 살의 두께가 두꺼워졌기 때문에 고속에서의 강성 및 동적 특성을 확인할 필요가 있다.

### 2.2 강재 리테이너

강재 리테이너는 일반적인 조건에서 가장 많이 사용되는 테이퍼 롤러 베어링용 리테이너이다. 강재 리테이너는 일련의 절단, 성형 및 펀칭 작업을 사용하여 저탄소 강판으로 대량 생산된다. 강재 리테이너는 폴리머 리테이너 보다 가공성을 고려한 형상에 대한 제약으로 인해 설계 유연성은 떨어지지만, 고온 및 열악한 윤활유 환경에서 사용할 수 있는 강점이 있다. 최근에는 폴리머 재질의 강도와 강성이 향상되면서 마찰 특성 및 소음 특성이 뛰어난 폴리머 재질의 리테이너에 의해 수요가 줄어들고 있다. 일반적인 사용 조건과는 달리 고속 조건에서는 원심력의 영향이 크고 가감속 등의 운전 조건이 다르기 때문에 설계 사양에 대한 강성 및 동적 특성의 검토가 필요하다.

고속 조건에서 리테이너의 회전 특성 및 강도를 폴리머 리테이너와 비교하기 위해 동일한 내부구조를 가진 베어링에 대해

강재 리테이너를 설계하여 모델링하였다. Fig. 1(c)에서 강재 리테이너의 형상을 보여주고 있다. 전동체 안내형 리테이너이며, 재질 및 가공 특성에 의해 폴리머 리테이너보다 구조가 간단하고 두께가 얇다.

### 3. 리테이너 강성 해석

#### 3.1 해석 모델 및 해석 조건

고속 조건에서 테이퍼 롤러 베어링 리테이너의 강도를 검토하기 위해 상용 유한요소 해석 프로그램인 Abaqus를 통해 강성 해석을 수행하였다. 표준 폴리머 리테이너와 베어링 내부의 유동 특성을 향상시킨 토크 저감형 폴리머 리테이너에 대해 해석을 수행하여 특성을 비교하였으며, 강재 리테이너에 대한 강성 해석을 수행하여 폴리머와 강재 재질에 대한 결과를 비교하였다. Fig. 2에서 해석에 적용된 각각의 베어링 형상과 리테이너의 형상을 나타내었다.

해석에 적용한 베어링의 사양은 Table 1에 정리하였으며, 플라스틱과 강재에 대한 물성치는 Table 2에서 보여 준다.

고속 조건을 부여하기 위해서 내륜이 20,000 RPM으로 회전하는 경우를 기준으로 리테이너의 회전 속도를 계산하였으며 [4], 이 회전 속도를 원심력으로 환산하여 리테이너에 Rotational Body Force로 부과하였다[9]. 내륜 회전의 경우 식(1)과 같이 리테이너의 회전 속도를 구할 수 있다[10].

$$n_k = \left(1 + \frac{\cos\alpha}{D_{pw}/D_w}\right) \frac{n}{2} \tag{1}$$

Fig. 3에서 유한요소 해석을 위한 경계조건 및 하중 조건을 보여주고 있다. 해석의 효율을 높이기 위해 전동체 1개에 상당하는 리테이너의 부분 모델을 적용했으며, 베어링 회전 축에 대해 1/20의 순환대칭조건을 적용하였다. 또한 리테이너 회전 속도에 따른 원심력을 고려하기 위해 리테이너에 Rotational Body Force를 부과하였다

#### 3.2 유한요소 해석 결과

세 가지 다른 타입의 테이퍼 롤러 베어링 리테이너에 대해 유한요소 해석을 수행하였으며, Figs. 4와 5에서 그 결과를 보여주고 있다. Fig. 4는 고속 조건에서 리테이너의 변위, Fig. 5는 리테이너의 등가 응력 분포를 보여준다.

Fig. 6은 토크 저감형 폴리머 리테이너와 강재 리테이너에서 최대 등가 응력이 발생한 위치를 보여주고 있다. Table 3에서 각각의 리테이너 모델에 대한 최대 변위, 최대 등가 응력, 그리고 인장강도 대비 최대 등가 응력을 비교하였다.

유한 요소 해석 결과 리테이너에 작용하는 원심력에 의해 포켓 사이의 창살 부에 변형이 크게 발생하는 것을 알 수 있었으며, 포켓의 내부 모서리부에서 최대 응력이 발생하는 것을 볼 수 있었다. 표준 폴리머 리테이너의 경우 0.009 mm의 최소

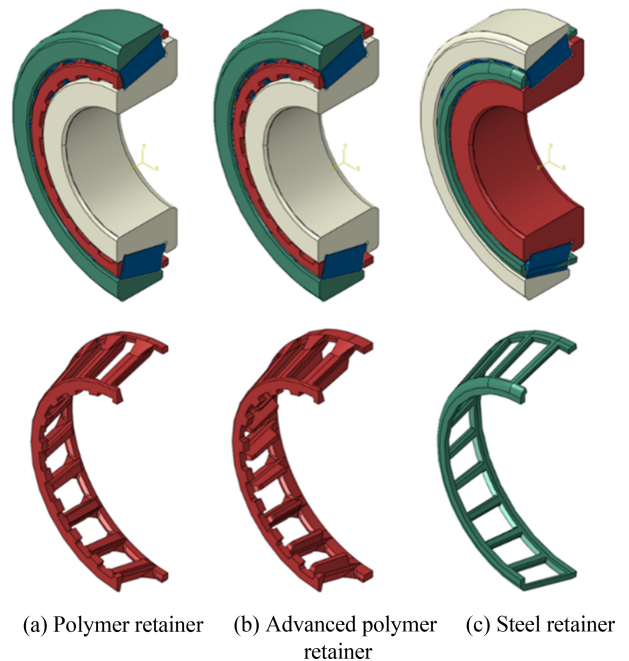


Fig. 2 3D-model of tapered roller bearings and retainers

Table 1 Bearing data

Classification	Reference TRB
Inner diameter [mm]	29.98
Outer diameter [mm]	62.0
Pitch circle diameter [mm]	51.721
No. of rolling element [EA]	20
Rolling element diameter [mm]	6.16
Rolling element length [mm]	12.0

Table 2 Material properties

Material	Young's modulus [MPa]	Poisson's ratio
Steel	210,000	0.3
Engineering plastic	9,951	0.36

변위와 7.5 MPa의 최소 응력이 발생했으며, 토크 저감형 폴리머 리테이너는 0.039 mm의 상대적으로 큰 변형을 보였으며, 38.7 MPa의 응력이 발생했다. 토크 저감형 폴리머 리테이너에서 상대적으로 큰 변형이 발생했지만 이는 윤활 특성을 향상시키기 위한 구조 변경으로 인한 살두께 변화에 기인한 것으로 인장강도 대비 20% 수준의 응력이 발생하였으므로 강도와 강성은 충분하다고 판단할 수 있다. 반면 강재 리테이너는 0.022 mm의 변형이 발생하였으나, 인장강도 대비 73%의 응력이 발생하였으므로 원심력에 의해 과도한 응력을 받을 수 있으며 강도 측면에서는 형상의 변경을 통한 보강이 필요함을 알 수 있었다.

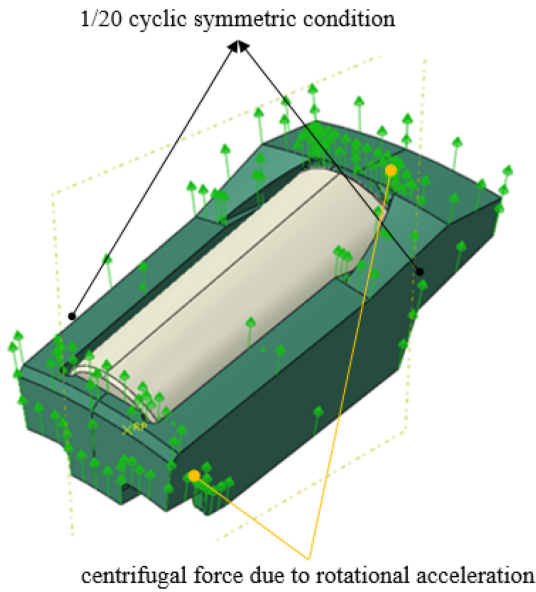


Fig. 3 FE analysis model - Boundary and load conditions

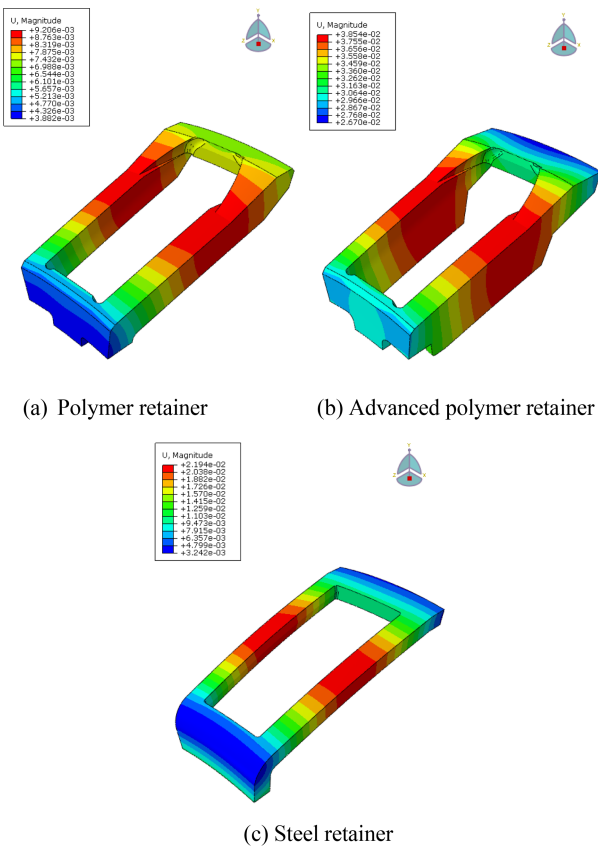


Fig. 4 Results – Displacement distribution

4. 동적 해석

4.1 해석 모델 및 해석 조건

베어링 리테이너의 거동을 살펴보기 위해 Schaeffler 그룹의 동역학 해석 프로그램인 CABA3D를 이용하여 일반적인 운전

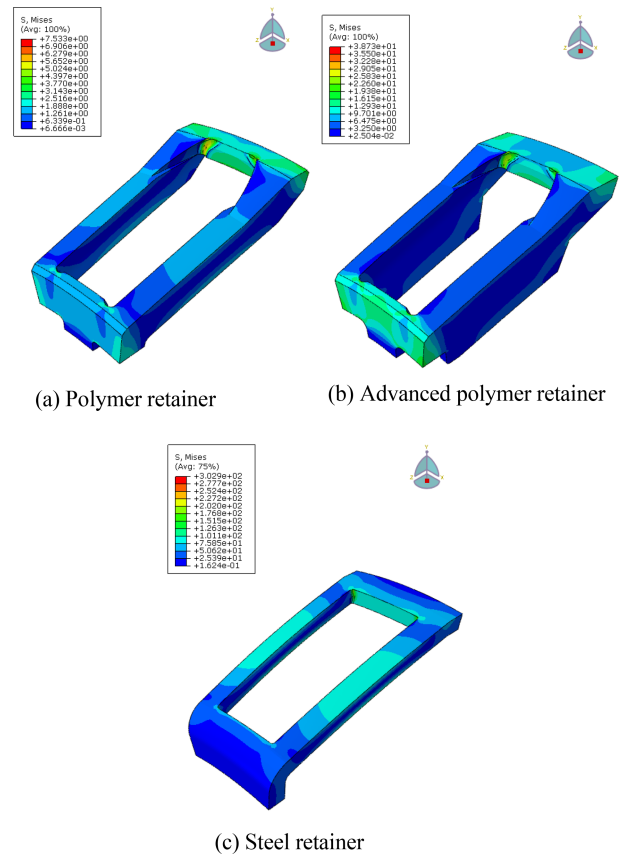


Fig. 5 Results – Equivalent stress distribution

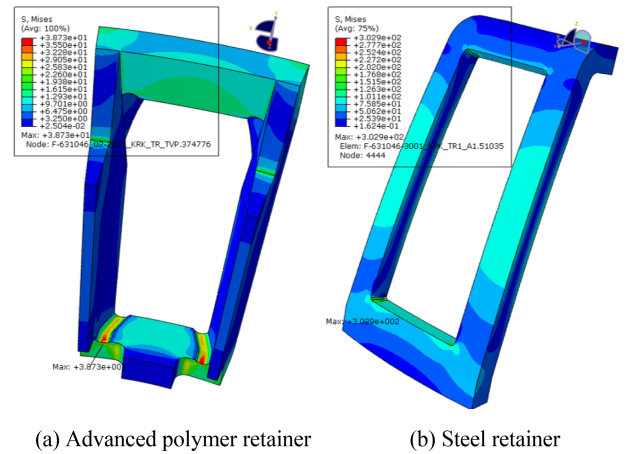


Fig. 6 Results – Max. equivalent stress

Table 3 Results – Displacement and equivalent stress

Classification	Reference polymer retainer	Advanced polymer retainer	Steel retainer
Max. displacement [mm]	0.009	0.039	0.022
Max. Equivalent stress [MPa]	7.5	38.7	302.9
Max. Equivalent stress / Tensile strength [%]	3.9	20.4	73.9

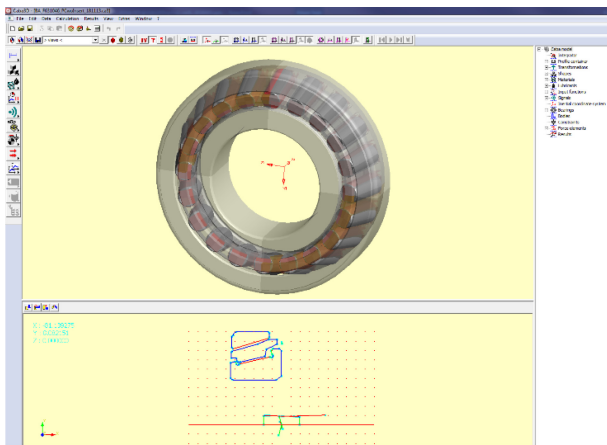


Fig. 7 Dynamic simulation model

속도 및 고속 조건에 대해 동적 해석을 수행하였다[11]. Fig. 7에서 CABA3D의 동역학 해석을 위한 베어링 모델을 보여주고 있다. 내, 외륜과 전동체는 강체로 모델링이 되었고, 리테이너는 유연체로 모델링이 되었다.

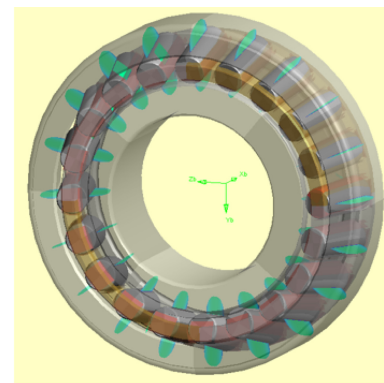
유한요소 해석을 수행하였던 3가지 다른 타입의 케이지에 대해 일반적인 운전 속도 및 고속 조건에서 베어링의 회전에 따른 전동체와 리테이너의 거동을 검토하였다. 일반적인 운전 조건은 내륜회전으로 3,500 RPM을 적용하였고, 고속 조건은 유한요소 해석과 동일한 내륜회전 20,000 RPM을 적용하였다. 테이퍼 롤러 베어링의 특성상 회전시 내륜, 외륜 및 전동체가 분리되는 현상을 방지하기 위해 축방향으로 1,000 N의 하중을 부과하여 동역학 해석을 수행하였다.

4.2 해석 결과

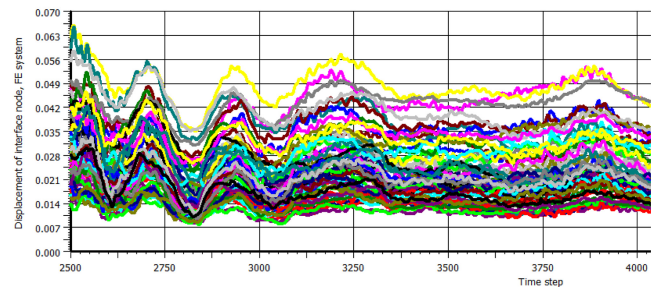
Fig. 8에서 일반적인 운전 속도(3,500 RPM)에서 동역학 해석을 수행한 결과를 보여주고 있다. 위에서부터 (a) 베어링의 동적 거동, (b) 표준 폴리머 리테이너의 변위, (c) 베어링 토크 및 (d) 리테이너 궤적 변화의 결과를 보여주고 있다. (a)에서는 축방향 하중에 의해 모든 전동체에 대해 동일한 접촉면압을 발생하는 것을 볼 수 있다. (b) 그래프는 유연체로 모델링된 리테이너의 노드별 변위를 보여주고 있다. (c)는 베어링 운전 중 토크의 변화를 보여주고 있으며, (d)는 리테이너 궤적의 변화를 보여주고 있다.

Fig. 9에서 고속 조건(20,000 RPM)에 대한 베어링의 동적 거동, 표준 폴리머 리테이너의 변위, 베어링 토크 및 리테이너 궤적 변화의 결과를 보여주며, Figs. 10과 11에서 각각 고속 조건에 대한 베어링의 동적 거동, 저토크 베어링용 폴리머 리테이너 및 강재 리테이너의 변위, 베어링 토크, 리테이너 궤적 변화의 결과를 보여주고 있다.

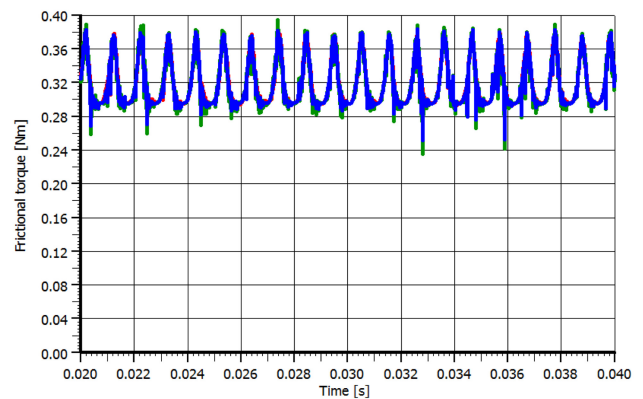
각각의 해석 모델에 대한 최대 변위 및 평균 토크 값들은 Table 4에 정리하였다. 시간에 따라 변위값과 토크값이 변하기 때문에 토크값이 안정화된 이후 값들 중에서 최대 변위값을 찾고 평균 토크값을 계산하였다.



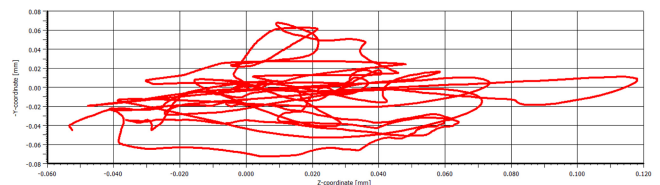
(a) Dynamic behaviour of bearing



(b) Displace on nodes in flexible model of retainer



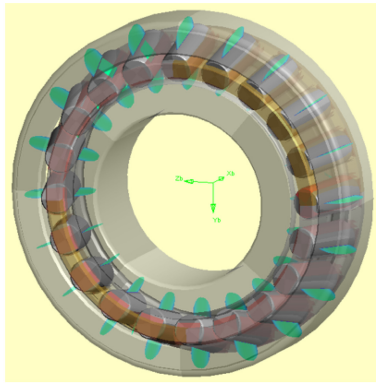
(c) Frictional torque



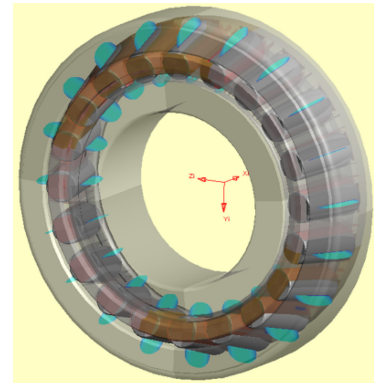
(d) Retainer movement

Fig. 8 Simulation result - Normal polymer retainer (3,500 RPM)

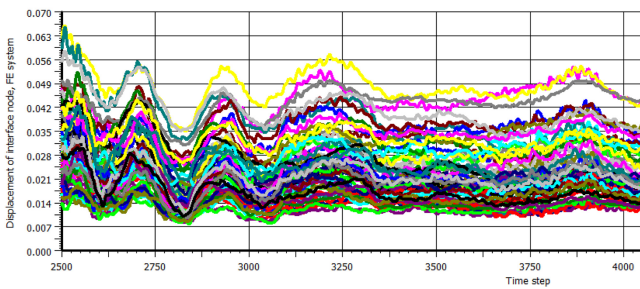
동역학 해석 결과에서는 표준 폴리머 리테이너의 경우 일반적인 운전 조건에 비해 고속 조건에서 리테이너의 변위가 0.072 mm로 매우 크게 나타났으며, 토크 저감형 폴리머 리테이너의 경우에는 0.055 mm로 표준 폴리머 리테이너 보다 변위가 작게 나타났다. 고속 조건에서 강재 리테이너의 변위는 0.007 mm로 폴리머 리테이너에 비해 상대적으로 작음을 알 수 있었다. 유한



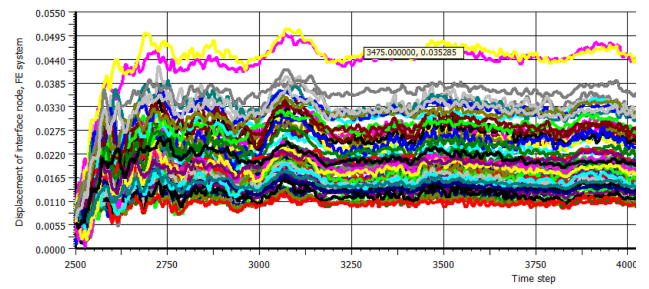
(a) Dynamic behaviour of bearing



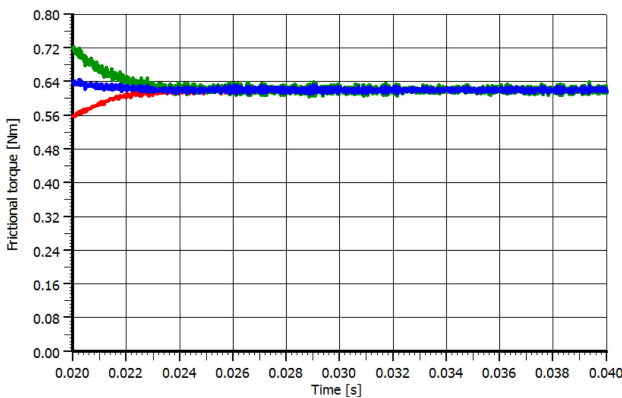
(a) Dynamic behaviour of bearing



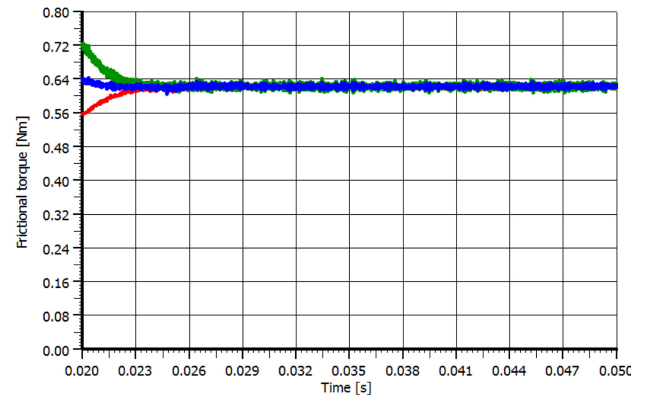
(b) Displace on nodes in flexible model of retainer



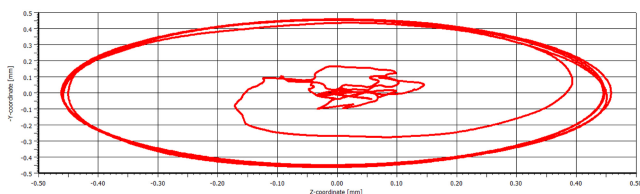
(b) Displace on nodes in flexible model of retainer



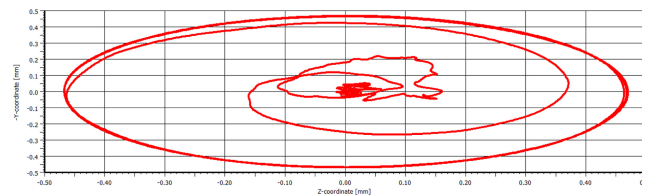
(c) Frictional torque



(c) Frictional torque



(d) Retainer movement



(d) Retainer movement

Fig. 9 Simulation result - Normal polymer retainer (20,000 RPM)

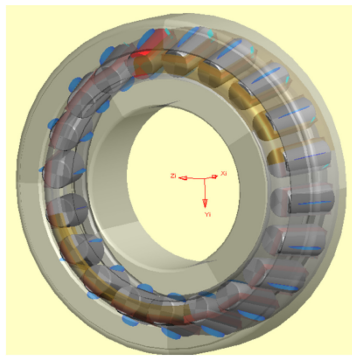
Fig. 10 Simulation result - Advanced polymer retainer (20,000 RPM)

요소해석과 동역학 해석 결과를 복합적으로 고려할 때 고속조건에서 폴리머 리테이너의 변위가 상대적으로 크게 나타남으로써 동적 안정성 문제가 발생할 가능성이 있다. 따라서 폴리머 리테이너의 적용을 위해서는 강성의 보강이 필요하며, 강재 리테이너의 경우에는 원심력에 의한 응력값이 매우 크게 나타났으므로 리테이너의 형상에 대한 보완이 필요할 것으로 생각된다.

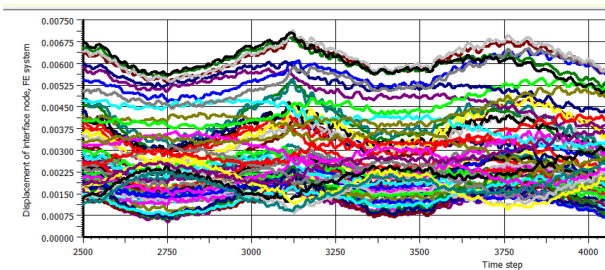
### 5. 결론

본 논문에서는 고부하하중을 지지할 수 있는 테이퍼 롤러 베어링을 고속 조건에 적용할 때 발생할 수 있는 리테이너의 강성 및 동적 특성을 살펴보기 위해 유한요소 해석 및 동역학 해석을

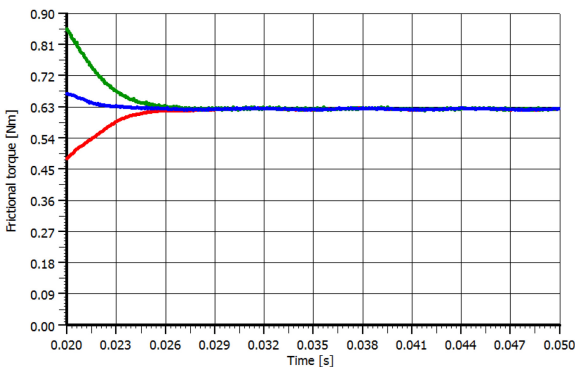




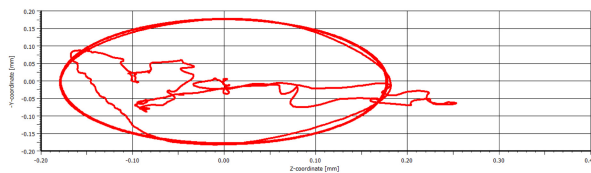
(a) Dynamic behaviour of bearing



(b) Displace on nodes in flexible model of retainer



(c) Frictional torque



(d) Retainer movement

Fig. 11 Simulation result - Steel retainer (20,000 RPM)

Table 4 Results – Max. displacement and torque

Classification	Max. displacement [mm]	Average bearing torque [Nm]
Reference polymer retainer (3,500 RPM)	0.006	0.317
Reference polymer retainer	0.072	0.621
Low torque polymer retainer	0.055	0.626
Steel retainer	0.007	0.622

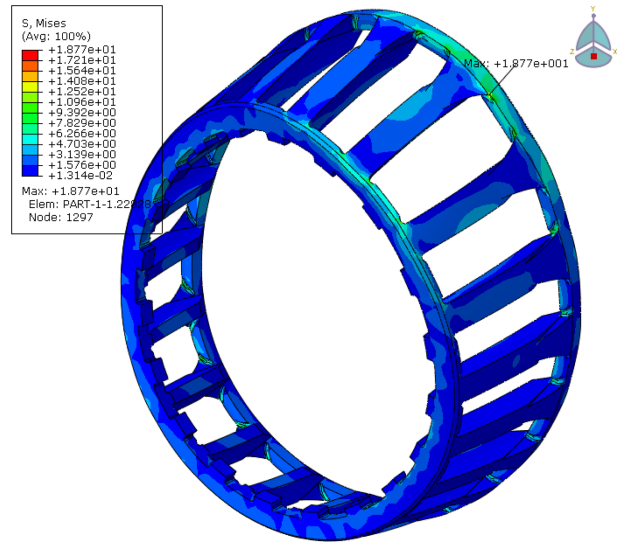


Fig. 12 Equivalent stress under Max. displacement on retainer

수행하였다. 재료 및 형상에 대한 특성을 비교하기 위해 세가지 다른 타입의 테이퍼 롤러 베어링 리테이너에 대해 해석을 수행하였으며, 각각의 리테이너에 대한 강성 및 동적 특성을 분석하였다. 유한요소 해석에서는 고속 회전 조건을 원심력으로 환산하여 리테이너에 적용하여 강성해석을 수행하였으며, 동역학 해석에서는 고속 회전에 따른 리테이너의 동적 특성에 대한 해석을 수행하였다. 유한 요소 해석 결과 표준 폴리머 리테이너의 경우 0.009 mm의 최소 변위와 7.5 Mpa의 최소 응력이 발생했으며, 강재 리테이너는 인장강도 대비 73%의 응력이 발생하였으므로 원심력에 의해 과도한 응력을 받을 수 있음을 알 수 있었다. 따라서 고속조건에서는 강성측면에서 강재 리테이너보다 폴리머 리테이너가 우수하다는 것을 알 수 있었다. 반면에 동역학 해석 결과에서는 폴리머 리테이너의 경우 고속 조건에서 리테이너의 변위는 표준 폴리머 리테이너의 경우 0.072 m, 토크 저감형 폴리머 리테이너의 경우 0.055 mm로 매우 크게 나타났으며, 강재 리테이너의 변위는 0.007 mm로 폴리머 리테이너에 비해 상대적으로 작음을 알 수 있었다. 따라서 리테이너의 동적 안정성측면에서 폴리머 리테이너보다 강재 리테이너가 더 우수하다는 것을 알 수 있었다. 따라서 고속조건에서 폴리머 리테이너를 적용하기 위해서는 보강재를 삽입하거나 강도가 높은 폴리머 재질을 적용하는 등 강성의 보강이 필요하며, 강재 리테이너의 경우에는 원심력에 의해 취약 부위에 응력이 집중될 수 있으므로 형상에 대한 보완이 필요할 것으로 생각된다. 고속용 테이퍼 롤러 베어링의 설계를 진행할 때 이와 같은 리테이너 소재의 동적 특성을 고려하여 적용 부위 및 작동 조건에 따른 적절한 소재와 형상의 선정이 필요할 것으로 생각된다. 향후 동역학 해석 결과 중 리테이너의 최대 변위가 나타나는 조건에 대해 Fig. 12에서 보여주는 것처럼 응력 해석을 수행하여[12], 리테이너의 동적 강성을 비교 분석함으로써 각각의 재료에 따른 고속에서의 리테이너 작동 특성을 분석하여 고속 작동조건에서 최적의 성능

특성을 구현하는 인자를 찾아서 고속용 테이퍼 롤러 베어링 리 테이너의 최적 설계에 적용할 수 있을 것으로 생각된다.

## ACKNOWLEDGEMENT

본 논문은 산업통상자원부의 기계장비산업기술개발사업인 “기계장비 예지보전을 위한 센서 내장형 기계 부품 개발” 사업의 지원으로 수행 되었습니다(No. 20024029).

## REFERENCES

- Harris, T. A., Kotzalas, M. N., (2006), Essential concepts of bearing technology. CRC press.
- Harris, T. A., Kotzalas, M. N., (2006), Advanced concepts of bearing technology, CRC Press.
- Brecher, C., Fey, M., Bartelt, A., Hassis, A., (2016), Design and test rig experiments of a high speed tapered roller bearing for main spindle applications, Procedia CIRP, 46, 533-536.
- Parker, R. J., Pinel, S. I., Signer, H. R., (1980), Lubrication of optimized-design tapered-roller bearings to 2.4 million DN, NASA Technical Reports Server.
- Timken, Super precision bearings for machine tool applications catalog. <https://www.timken.com/resources/timken-super-precision-bearings-for-machine-tool-applications/>
- Sakaguchi, T., Harada, K., (2006), Dynamic analysis of cage behavior in a tapered roller bearing, Journal of Tribology, 128(3), 604-611.
- Ashtekar, A., Sadeghi, F., (2012), A new approach for including cage flexibility in dynamic bearing models by using combined explicit finite and discrete element methods, Journal of Tribology, 134(4), 1-12.
- Timken, Tapered roller bearing catalogue. <https://www.timken.com/resources/tapered-roller-bearing-catalog/>
- Defining a rotational body force. <https://abaqus-docs.mit.edu/2017/English/SIMACAECAERefMap/simacae-t-lbloadeditorsrotate.htm>
- Brändlein, J., Eschmann, P., Hasbargen, L., Weigand, K., (1999). Ball and roller bearings: Theory, design and application, John Wiley & Sons.
- Bakolas, V., Koch, O., (2009), Bearing optimization using a 3D-dynamic simulation tool, Proceedings of STLE Annual Meeting & Exhibition.
- Vlasenko, D., Hahn, B., (2020), Modeling of elastic cages in the rolling bearing multi-body tool CABA3D, Multibody Dynamics 2019: Proceedings of the 9th ECCOMAS Thematic Conference on Multibody Dynamics, 96-103.



**Kang Seok Kim**

Ph.D. in the Department of Nano Energy Engineering, Pusan National University. His/Her research interest is precision engineering.  
E-mail: kimkng@pusan.ac.kr



**Kyoung Ku Lee**

M.Sc. Schaeffler Korea Corp.. His/Her research interest is precision engineering.  
E-mail: leekyo@schaeffler.com



**Deug Woo Lee**

Professor in the Department of Nano Energy Engineering, Pusan National University. His/Her research interest is machine.  
E-mail: dwoolee@pusan.ac.kr

## 생체모방형 UAM 블레이드의 공력 소음 특성에 관한 연구

# A Study on Aerodynamic and Acoustic Characteristics of Blades by Biomimetic Design for UAM

손창호<sup>1</sup>, 김상현<sup>1</sup>, 송지훈<sup>2</sup>, 이동렬<sup>3,#</sup>

Chang Ho Son<sup>1</sup>, Sang Hyun Kim<sup>1</sup>, Jihun Song<sup>2</sup>, and Dong-Ryul Lee<sup>3,#</sup>

<sup>1</sup> 대구가톨릭대학교 기계자동차공학부 (School of Mechanical and Automotive Engineering, Catholic University of Daegu)

<sup>2</sup> 한국항공우주산업(주) 헬기비행역학팀 (Rotorcraft Flight Dynamics Team, Korea Aerospace Industries)

<sup>3</sup> 대구가톨릭대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Catholic University of Daegu)

# Corresponding Author / E-mail: [dlee@cu.ac.kr](mailto:dlee@cu.ac.kr), TEL: +82-53-850-2717

ORCID: 0000-0002-7555-2745

KEYWORDS: Biomimetic design (생체모방 설계), Virtual fluid dynamics (가상 유체역학), Aerodynamic noise (공력소음), Vertical take-off and landing (수직이착륙기), UAM blade design (UAM 블레이드 설계)

Urban air mobility (UAM) is rapidly growing as a new means of transportation. As a result, noise pollution is emerging as a new technical challenge. Therefore, the sawtooth-shaped biomimetic designs were incorporated on the trailing edge of the blade to reduce flow-induced noise. The biomimetic virtual design was analyzed using the CFD software, ANSYS FLUENT V20.2. Based on the steady-state RANS flow solution, the acoustic power was calculated using the broadband noise source model to evaluate acoustic radiation. Four different cases with cutting lengths of 3.1 mm, 3.7 mm, 4.3 mm, and 4.9 mm of blades were compared with the base model at the rotational blade speed of 6,000 RPM. The maximum acoustic power level of the biomimetic blades ranged from 37.24 dB to 39.88 dB, resulting in a 10% reduction compared to the original blade (42.02 dB). The novel design affected the blade area, which inevitably reduced the slight thrust performance. However, the thrust was reduced to approximately less than 5% compared with the base blade in case 1. The biomimetic blade reduced the thrust due to its aerodynamic characteristics. However, the design of a blade with an appropriate cutting length has a greater effect in reducing noise rather than thrust.

Manuscript received: February 19, 2023 / Revised: March 19, 2023 / Accepted: March 21, 2023

### 1. 서론

최근 급격한 교통량의 증가로 인하여 발생하는 환경 문제와 심각한 교통 체증의 해결책으로 제시되는 도심형 항공 모빌리티(Urban Air Mobility, UAM) 시장은 전 세계적으로 주목받고 있다. UAM은 도심의 협소한 이착륙 환경에서도 수직 이착륙(Vertical Take-off and Landing, VTOL)이 가능하다는 장점과 2차원으로 국한되었던 교통 인프라의 3차원 확장 방안으로 새롭게 제시되며 급격한 성장의 시대에 직면하고 있다.

e-VTOL UAM은 수직 이착륙으로 별도의 활주로가 필요 없고 지상이 아닌 상공에서 운영함으로써 도심 내 빠른 이동이

가능한 것은 물론이고, 전기 배터리를 사용해 배기가스의 배출이 없다는 이점이 있다. 이로 인하여 수많은 기업의 연구와 투자로 비약적인 발전을 이루고 있다. 하지만 도심 상공에서 비행하는 e-VTOL UAM은 이착륙 및 비행 시 발생하는 공력 소음이 미치는 범위가 광범위하고, 비행 시간에 따라 주간 및 야간에 지속적으로 공력 소음이 발생한다는 문제점이 있다. 그러므로 효과적인 소음 저감 설계가 요구된다.

e-VTOL은 모터를 활용한 전기 추진으로 기존의 항공기에서 발생하는 엔진 소음으로부터 자유로워 저소음이 요구되는 UAM에 적용되고 있는 방법이다. 각종 기계음의 저감과 전기 모터 등의 사용에 따라 UAM에서는 블레이드(Blade)의 소음이

지배적이다[1]. 블레이드의 회전 운동으로 발생하는 소음은 대표적인 유동 유발 소음의 종류 중 하나로 공기역학적 접근이 요구되며, 해결을 위해 다양한 방법론이 제시되고 있다.

일반적으로 UAM에서는 소음과 비행 안정성 및 추력 방지 등의 다양한 이유로 분산 추진 방식이 요구된다. 이러한 방법은 단일 블레이드의 소음을 저감할 수 있다는 장점이 있지만, 블레이드-와류 간섭(Blade-vortex Interaction, BVI) 소음 등의 또 다른 문제를 야기한다. 이에 덕트 등을 활용한 다양한 소음 저감 연구가 수행되고 있다. Guo 등[2]은 강체 덕트와 다공성 덕트 내의 소음을 비교하는 실험적 연구를 수행하여 다공성 재료의 흡음성으로 발생하는 소음 저감 효과를 입증하였다. 또한 Shroud를 활용하여 블레이드 끝 와류(Tip Vortex)를 제어하여 소음을 저감한 연구도 수행되었다[3].

하지만 덕트와 Shroud를 활용한 소음 저감 설계는 추가적인 구조물로 인한 무게 증가 등의 한계가 있어 블레이드 배치의 개선 설계로 소음을 저감하려는 연구도 수행되었다. Dobrzynski [4]는 쌍엽 블레이드 각도를 변수로 소음을 저감하고자 하였다. Pascioni 등[5]은 블레이드 상호 위상에 따른 소음 저감 효과를 분석하였다. 단일 블레이드의 소음을 저감하기 위해 Leslie 등[6]은 전연에 Trip Strip을 부착함으로써 층류 경계층(Laminar Boundary Layer, LBL) 및 광대역(Broadband) 소음을 저감하였다.

현재는 혁신적인 방법을 활용하여 전형적인 블레이드를 재설계하여 공력 성능 향상 및 소음 저감을 기대하는 연구들이 수행되고 있다. Yuliang 등[7]은 블레이드의 전연(Leading Edge)에 톱니(Sawtooth) 형태의 생체모방 형상을 추가하여 유속의 변동폭을 감소시키고, 표면 난류의 천이 및 분포를 개선하여 소음을 저감하였고, Noda 등[8]은 전연에 생체모방형 톱니 형상, 블레이드 팁에 윙릿(Winglet), 후연(Trailing Edge)에 박판을 설계함으로써 공력 특성 및 소음을 비교하고 후연 박판의 위치를 옮겨가며 양력과 소음에 미치는 영향을 연구하였다. Chekab 등[9]은 Skew Angle, 블레이드의 면적, 피치(Pitch), 후연 형상 등을 변수로 블레이드 소음 저감을 위한 보편적 방법을 찾고자 하였다. 또한 블레이드에 강성 다공질 재료를 사용하여 자유 유동 상태의 팬(Fan) 소음 저감 연구도 수행되었다[10].

블레이드의 항력은 급격한 압력 변화를 야기시켜 공기역학적 소음을 야기한다. 이에 블레이드의 항력 저감을 목적으로 회전 속도를 줄이고, 분산 추진의 방향으로 e-VTOL UAM이 개발되고 있다[11]. 본 연구에서는 적극적인 공력 소음 저감의 방안으로 어떠한 방식의 UAM에서도 적용 가능한 단일 블레이드 자체에서 발생하는 소음 저감을 기반으로 생체모방형 가상 설계 연구를 수행하는데 목표를 두었다.

다양한 활용과 함께 다분야에서 사용되고 있는 대표적인 블레이드 중 하나인 D(社) [12]의 9450 모델이 연구에 사용되었다. 회전하는 블레이드 표면의 유동 박리(Flow Separation)를 제어하여 공기역학적 성능과 공력 소음 특성을 분석하기 위해 상용 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD) 코드인 ANSYS FLUENT를 활용하여 수치적 연구를 수행하였다. 또한

유동해(Flow Solution)에 기반하여 생체모방형 블레이드 커팅 형상에 따른 유동 소음의 크기를 효율적으로 예측할 수 있도록 국소 압력 변화를 활용하여 음향 파워 레벨 결과를 수치적으로 해석하는데 연구 목표를 두었다.

## 2. UAM Blade 모델 및 설계

### 2.1 9450 Blade

본 연구에 활용된 D(社)의 9450 블레이드는 67.7 g의 상대적으로 가벼운 중량과 240 mm의 직경으로 탄성체 운동과 변형을 무시하였다. 상세한 제원은 Table 1에 정리하였다. 블레이드는 상용 CAD 소프트웨어인 CATIA V5를 활용하여 역설계하였고, 유동장 생성 및 계산에 불필요한 부분을 ANSYS Design Modeler를 활용하여 단순화(CAD Repair)하였다. 계산 자원을 고려한 효율적인 유동해 도출을 위하여 고정된 직육면체의 외부 유동장을 설계하였고, 회전 영역은 블레이드 직경을 고려하여 246 mm의 직경을 가진 유동장을 별도로 생성하였다.

### 2.2 생체모방형 설계

기존 연구[7,8]를 통해 저소음 비행을 하는 것으로 알려져 있는 올빼미의 날개 형상을 모방하여 블레이드의 소음 저감을 위하여 전연에 생체모방 형상을 설계하고, 톱니(Sawtooth) 형상의 설계가 공기역학적 성능과 공력 음향 성능에 이점이 있다는 것을 알 수 있다. 하지만 해당 기존 연구[7,8]는 전연에 생체모방형 구조를 추가함으로써 구조적인 문제와 중량의 증가 등의 문제점이 있다. 따라서 본 연구에서는 기존의 연구들과는 달리 블레이드 후연에 톱니 형상의 생체모방형 커팅 설계를 진행하여, 유동 박리 지연으로 발생하는 UAM의 블레이드 내 커팅 깊이에 따른 공력 및 소음 특성의 변화를 정량적으로 예측하는 것을 목표로 연구를 수행하였다. 과도한 길이의 블레이드 커팅은 공기역학적 성능 저하가 예상되며, 반대의 경우에는 소음 저감 효과가 미미할 수 있기 때문에 커팅된 길이를 변수로 공기역학적 추력 특성과 소음 특성을 비교하였다. 유체의 선속도가 빠른 블레이드 팁 주변 후연에서의 과도한 커팅은 구조적인 문제를 발생시킬 수 있다. 따라서 블레이드 팁 현(Chord)의 길이인 9.4 mm의 1/3을 기준으로 0.6 mm씩 등 간격으로 커팅을 수행하였다. 가장 짧은 길이인 3.1 mm를 Case 1로, 가장 긴 커팅 길이인 4.9 mm를 Case 4로 설정하여 커팅되지 않은 기준 모델과 비교하였다. 기준 및 생체모방형 블레이드의 형상은 Fig. 1에 표시하였다.

## 3. 수치해석

블레이드의 회전 운동을 계산하기 위해 회전하는 다중 좌표계(Multiple Reference Frame, MRF)를 도입하여 계산에 사용하였다. 회전체 주위의 난류를 모사하기 위해 Reynolds-averaged Navier-

Table 1 Detailed specifications of the UAM blade

Number of blades	2	EA
Diameter	0.24	m
Rotational speeds	1,000-6,000	RPM
Weight	67.7	g



(a) Base model



(b) Case 1



(c) Case 2



(d) Case 3



(e) Case 4

Fig. 1 Base model and four different blade cases of biomimetic design

stokes (RANS)에 기반한 모델 중 벽면 근처의 유동과 상류에서 자유 난류의 현상 설명에 적합한  $k-\omega$  Shear Stress Transport (SST) 모델을 사용하였다. 벽면 경계층 유동 해석에 적합한  $k-\omega$  모델과 상류 등방성 자유 난류 예측에 적합한  $k-\epsilon$ 의 장점이 결합된  $k-\omega$  SST 모델은 자유 유동과 벽면 박리가 동시에 고려되어야 하는 연구에 주로 사용된다.

수치적 방법으로 공력 음향해를 계산하기 위해서는 일반적으로 Lighthill [13]의 음향 유사법(Analogy)에 기반한 Ffowcs Williams

and Hawkings (FW-H) 모델[14]이 사용된다. 하지만 FW-H 모델은 특성상 비정상 유동해를 다루기 때문에 수치적 계산 시간이 비약적으로 증가하는 단점이 있다. 따라서 유동해에 기반하여 효율적인 소음원을 파악하고, 유동 소음을 예측 및 분석하기에는 다른 방법이 요구된다. 따라서 본 연구에서는 정상상태 RANS 유동에 기반하여 경험적 상관관계에 따라 평균 유동해를 활용하여 음향 방사(Radiation)를 평가하는 Broadband Noise Source (BNS) 모델을 사용하였다. BNS 모델은 정상 유동해를 활용하여 음향 파워 레벨(Acoustic Power Level, APL)을 계산하여 소음을 예측하는 방법이다. 음향 파워 레벨은 다음과 같이 계산된다.

$$APL = 10 \log_{10} \left( \frac{P}{P_{ref}} \right) \tag{1}$$

$$P_{ref} = 10^{-12} W = 1 pW \tag{2}$$

여기서  $P[W]$ 는 소리의 강도를 나타내는 물리량인 음향 파워 (Acoustic Power)를 의미한다.  $P_{ref}$ 는 기준 음향 파워  $[W]$ 를 의미하며,  $APL[dB]$ 은 물리량의 비를 로그 규모로 표기한 값이다.

### 3.1 격자 생성

본 연구에서는 효과적으로 회전 운동을 계산하기 위해 MRF 기법을 사용하여, 블레이드 주변 유동장에 대한 격자를 독립적으로 생성하였다.  $k-\omega$  SST 모델은 별도의 벽 함수(Wall Function)를 사용하지 않기 때문에 벽 근처에서의 유동 현상을 모사하고 경계층에서의 급속한 속도 변화를 확인하기 위해서는 조밀한 벽면 격자가 요구된다. 따라서 블레이드 표면에 약 15층의 경계층을 구성하였다. 경계층에 대한  $k-\omega$  SST 모델의 특성상 벽면 격자에서 적절한 값의  $Y+$ 가 요구되기 때문에 이를 고려한 격자를 생성하였다. 무차원 반경( $r/R$ )에 따라 유속의 증가를 고려하여 조밀하고 낮은 높이의 격자를 생성하여 Fig. 2에 표시된 1 이하의  $Y+$ 를 갖도록 하였다. 복잡한 익형 구조를 반영하기 위해 사면체(Tetrahedron) 격자를 생성하였다. 수치해의 격자에 의한 오류를 검증하기 위해 약 200만으로부터 약 1,000만 개의 격자를 비교하며 추력을 비교하였다. 9450 블레이드는 6,000 RPM보다 높은 회전 속도에서 운행 시 심각한 소음 문제가 발생하며 구조적 문제가 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 블레이드 팁 부근의 높은 선속도로 인하여 소음 및 공기역학적 특성의 변화가 가장 뚜렷하리라 예측되는 제원상 최대 회전 속도인 6,000 RPM을 기준으로 격자 의존도 테스트를 수행하였으며 Fig. 3에 나타내었다. 해석 시간과 수렴성을 고려하여 약 800만개의 격자를 생성 후 해석에 사용하였다.

### 3.2 지배 방정식

생체모방형으로 설계된 블레이드의 공기역학적인 제자리 비행(Hovering) 특성을 수치적으로 비교하기 위해 연속 방정식과 운동량 방정식을 고려하였다. 고정된 외부 유동장에는 직교

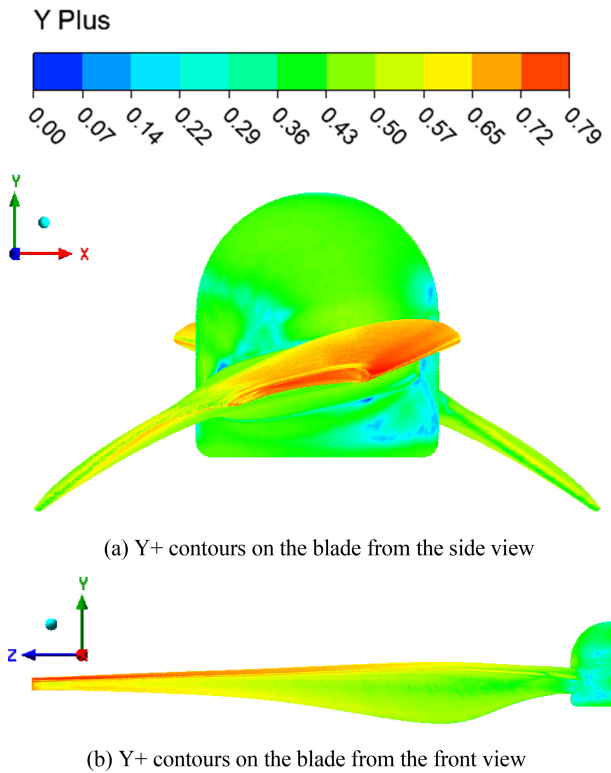


Fig. 2 Y+ contours on the blade

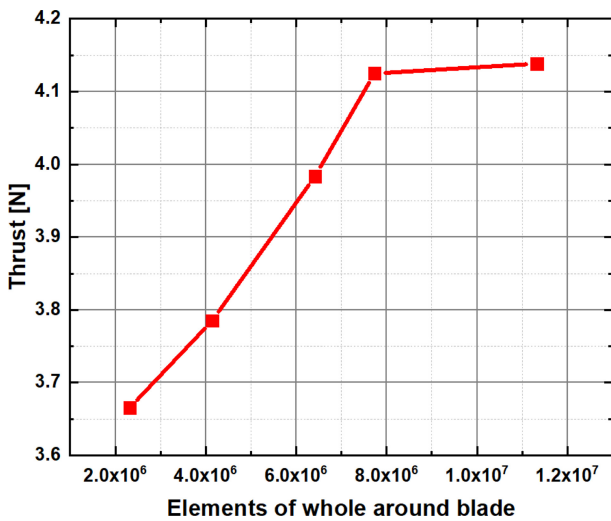


Fig. 3 Element dependency test for thrust value

좌표(Cartesian Coordinate)를 기준으로 아래 식(3)의 운동량 방정식을 계산하였다.

$$\rho \frac{\partial v_j}{\partial t} + \rho U_i \frac{\partial v_j}{\partial x_i} = -\frac{\partial p}{\partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i} \quad (3)$$

여기서  $\tau_{ij}$ 는 응력 텐서,  $p$ 는 유체의 요소에 작용하는 압력을 의미한다.

블레이드의 회전을 구현하기 위해 기준 좌표계에 회전 좌표를 추가하여 회전 유동장에 대해서는 아래 식(4)의 MRF 운동량

Table 2 Boundary conditions for the virtual analysis

Inlet boundary	Total pressure [Pa]	101,325
Outlet boundary	Static pressure [Pa]	101,325
Blade	Rotational speeds for validation [RPM]	1,000-6,000
	Target speed for analysis [RPM]	6,000

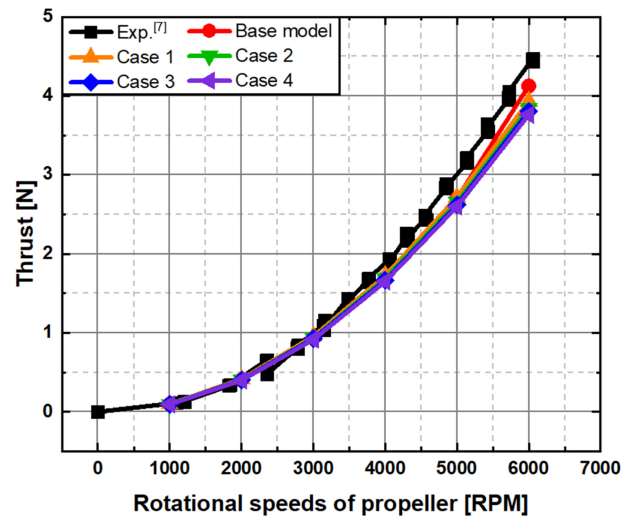


Fig. 4 Comparison of RPM and thrust with the experimental and numerical data for five different blades

방정식을 계산하였고 아래와 같이 식(3)에 4개의 항을 추가하여 유동장 내 회전 운동을 수치적으로 구현하였다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v_r) + \nabla \cdot (\rho v_r v_r) + \rho(2\omega \times v_r + \omega \times \omega \times r + \alpha \times r + \alpha) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau \quad (4)$$

여기서  $2\omega \times v_r$ 은 Coriolis항,  $\omega \times \omega \times r$ 은 구심 가속도,  $\alpha \times r$ 와  $\alpha$ 는 선형 가속도,  $\alpha$ 는 시간에 따른  $v_r$ 의 변화를 의미한다.

### 3.3 경계 조건 및 수치적 타당성 검증

본 연구의 유동해석에서 활용된 경계 조건을 Table 2에 정리하였다. 저고도 비행체인 e-VTOL UAM의 비행 조건을 고려하고, 지상에서 수행된 시험 결과와 비교를 위하여 입·출구 경계 조건(Boundary Conditions)을 대기압인 101,325 Pa로 가정하였다. 블레이드 직경이 크지 않기 때문에 압축성 효과가 미미할 것이라 예상하여 주변 유체는 비압축성 공기로 설정하였다. 블레이드의 운전 영역 중 블레이드 팁 부근의 높은 선속도로 인하여 소음 및 공기역학적 특성의 변화가 가장 뚜렷하리라 예측되는 최대 회전 속도인 6,000 RPM을 목표 회전속도로 연구에서 비교하였다.

수치적 연구의 타당성을 검증하기 위해 지상에서 단일 블레이드의 회전속도를 최대 약 7,000 RPM까지 증가시켜가며 추력 및 출력의 변화를 측정된 기존 연구[7]의 실험 결과와 비교하였다.

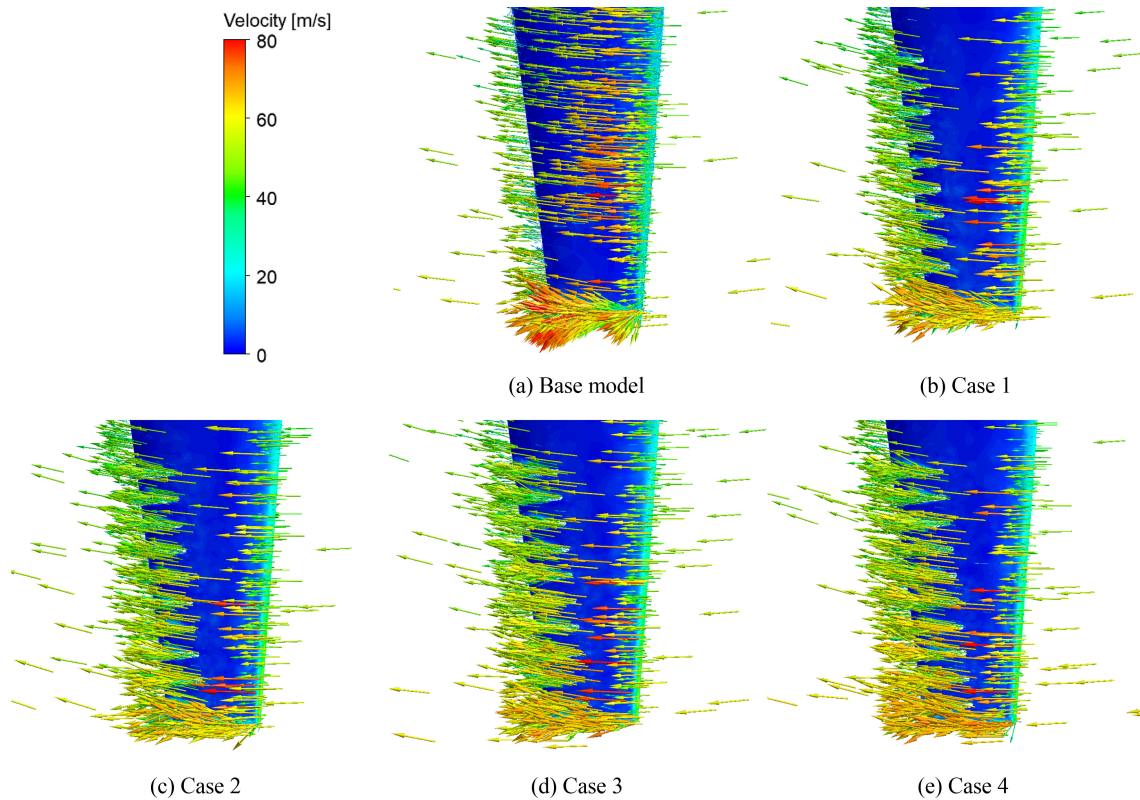


Fig. 5 Velocity vectors on the blade tips at 6,000 RPM

본 연구에서는 주로 사용되는 회전 속도 중 가장 높은 속도인 약 6,000 RPM까지의 데이터를 추출하여 비교하였다. 기존 연구에서 수행된 실험적 연구와 본 연구에서 수치적으로 계산된 회전 속도에 따른 추력의 변화를 Fig. 4에 정리하였다. 모든 회전 속도에서 시험 데이터와 유사한 경향성의 추력이 계산되어 수치적 결과를 블레이드 소음 저감 설계에 활용하였다.

#### 4. 결과 및 고찰

블레이드 상단의 유동 박리점을 지연시켜 공력 및 소음 특성을 변화시키기 위해 톱니 형상을 후연에 설계하였다. 경험적 상관관계에 따라 음향 방사를 평가하는 BNS 모델을 활용하여 APL을 해석하였다. BNS 모델을 활용하여 소음원과 크기를 효율적으로 예측하였고 블레이드에서 발생하는 공력 소음을 예측하기 위해 유동장 내의 속도와 압력 분포를 수치적으로 계산하였다. 3차원 해석을 수행하여 블레이드의 추력과 토크가 집중적으로 발생하는 반경 ( $r/R = 0.75$ ) [15]인 90 mm에서 와도 분포와 APL 수치를 비교하였다. 설계된 4가지의 생체모방 모델을 기존 블레이드와 비교하여 컷팅 깊이에 따른 추력 및 소음 특성을 분석하였다.

##### 4.1 속도 및 와도 분포

생체모방형 컷팅 형상에 따른 블레이드 주위 유동을 비교하기 위해 Fig. 5의 속도 벡터를 비교 및 해석하였다. 기존 블레이드인

Fig. 5(a)는 높은 속도가 발생하는 팁에서 뚜렷한 유동 박리 현상이 발생한다. 이 부분에 대부분의 유동이 국소적으로 집중되어 박리됨을 속도 벡터를 통해 알 수 있다. 또한 블레이드 전연에서 후연 방향으로 유체가 흐르며 발생하는 박리는 Fig. 5(a)의 기준 모델에서 활발히 발생한다. 하지만 블레이드 후연에 생체모방형 컷팅 형상을 설계한 Figs. 5(b)부터 5(e)의 경우 전연 인근에서의 박리가 크게 감소되었고, 유동은 톱니 모양의 후연에서 활발하게 박리됨을 확인하였다. 이를 통해 톱니 형상의 설계가 유동 박리점을 지연시킴을 확인하였다.

블레이드 주변의 와도 분포를 해석하여 Fig. 6에 나타내었다. 와도는 국소적인 일부 위치에서만 매우 높게 계산되기 때문에 원활한 비교를 위해 0-80,000의 범위로 설정하여 비교하였다. 수치적 결과는 기준 모델과 가장 얇은 컷팅 깊이로 인하여 추력 감소 대비 공력 소음 저감 측면에서 가장 효율이 좋을 것이라고 판단되는 Case 1을 비교하였다. Fig. 6(a)의 기준 모델의 경우 전형적인 공기역학적 익형 설계에 기반하여 안정적인 흐름 분포가 보이지만 익형을 따라 흐르는 공기가 블레이드의 후연에서 집중적으로 박리되기 때문에 후반에 극심한 와류가 발생하였다. 이러한 와류는 회전으로 인하여 뒤따르는 전연 혹은 다른 블레이드에 영향을 미쳐 BVI 현상 등 불안정한 유동으로 인하여 소음 문제가 발생할 수 있다. 하지만 Figs. 6(b)에서 후연에서의 와도가 6(a)와 비교해 감소한 것을 볼 수 있다. 따라서 본 연구의 생체모방형 컷팅 형상이 유동 박리점을 지연시켜 후연에서 발생하는 와류를 줄일 수 있음을 확인하였다.

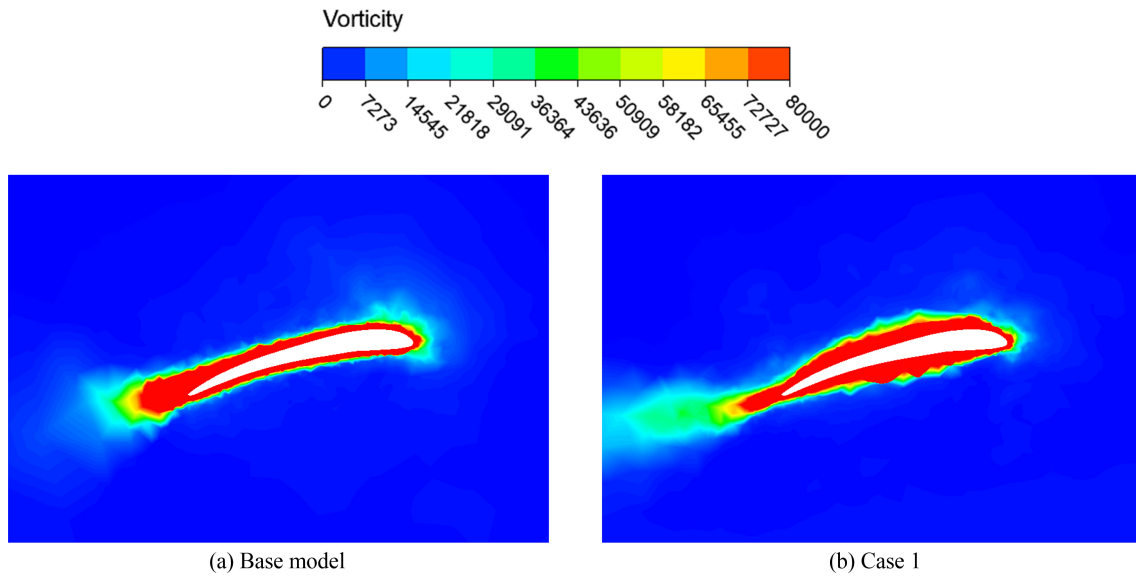


Fig. 6 Vorticity contours around the airfoil cross-sections at the base model and Case 1

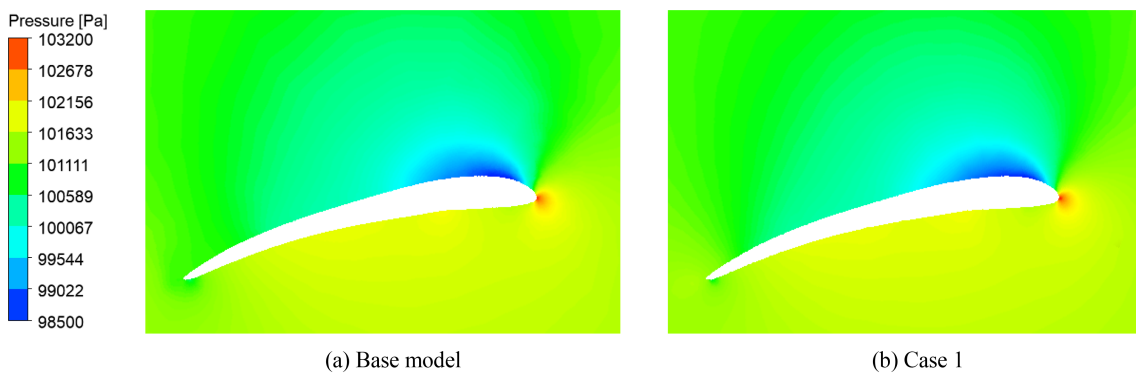


Fig. 7 Pressure contours around the airfoil cross-sections at the base model and Case 1

4.2 입력 및 음향 파워 레벨 분포

Fig. 7은 6,000 RPM으로 제자리 비행하는 블레이드의 익형 주위 압력 분포이다. 대기의 압력에 비해 블레이드의 회전으로 발생하는 압력의 차이가 크지 않기 때문에 확연하게 차이가 보이지는 않는다. 압력의 수치와 분포를 비교하였을 때 기준 모델인 Figs. 7(a)에 비해 생체모방형 설계의 7(b)의 경우 후연 인근에서 압력이 완만하게 변화함을 알 수 있었다. 이는 후연에서의 급격한 압력 변화를 생체모방 컷팅 형상으로 개선하였음을 의미하는데, 대기압에 비해 미세한 압력 변화를 확인하기 위하여 Fig. 8의 음향 파워 레벨을 해석하였다. 블레이드 후연의 생체모방 컷팅 형상으로 인하여 에어 포일 상부의 국소적인 위치에서 음향 파워 레벨이 미미하게 증가하여 이러한 변화로 인하여 블레이드 후연과 전연의 음향 파워 레벨이 감소하는 경향을 확인할 수 있었다. 이를 정량적으로 확인하기 위하여 에어 포일 상부의 후연으로부터 전연까지의 거리를 R로 하여 r/R에 따른 기준 모델과 Case 1의 음향 파워 레벨을 Fig. 9에 나타내었다. 기준 모델과 Case 1 모두 r/R이 0.8의 위치에서 음향 파워 레벨이

가장 높았으며, 에어 포일의 상부에서 Case 1이 기준 모델보다 음향 파워 레벨이 14.29-35.14% 높게 나타났다. 하지만 후연에서의 음향 파워 레벨은 Case 1이 기준 모델에 비해 53.54%, 전연에서 18.19% 낮게 나타났다. 따라서 기준 모델의 후연에서 발생하는 높은 음향 파워 레벨은 개선된 생체모방형 설계로 인하여 크게 감소하는 것을 Figs. 8과 9를 통해 확인할 수 있었다. Figs. 8(a)의 후연에 위치하는 높은 음향 파워 레벨은 생체모방형 설계로 압력 변동이 감소하여 8(c)에서 크게 감소하였으며, 후연에서 발생하는 와류의 감소로 인하여 전연의 음향 파워 레벨이 감소한 것을 Figs. 8(b)와 8(d)를 비교하여 확인할 수 있었다. 이는 블레이드 전연과 후연에서 발생하는 소음을 저감할 수 있다고 판단된다.

4.3 추력 성능 및 소음 예측

BNS 모델을 활용하여 계산된 APL과 공력 성능을 나타내는 대표적인 지표 중 하나인 추력을 해석하였다. 각 모델별 블레이드 표면의 음향 파워 레벨의 분포와 최대값 발생 위치(적색



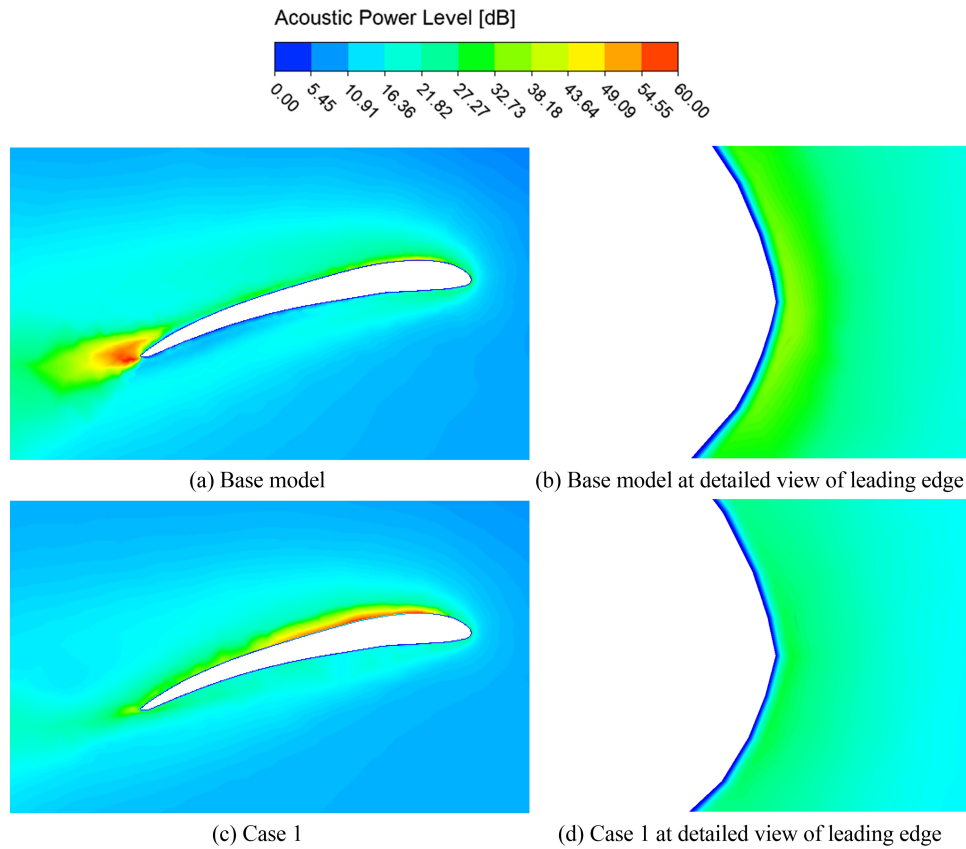


Fig. 8 APL contours around the airfoil cross-sections of the base model and Case 1

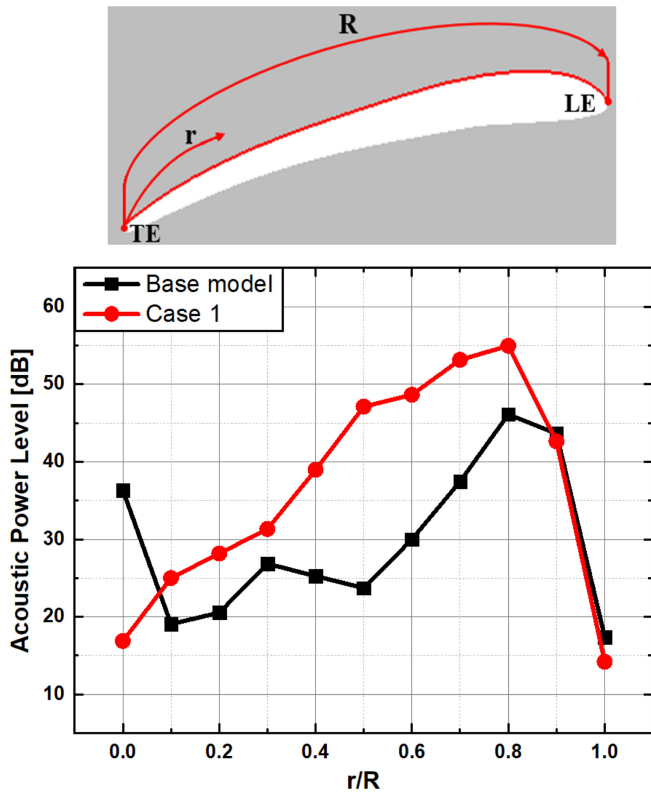


Fig. 9 APL around the airfoil cross-section at the blade

표시 원)를 Fig. 10에 표시하였다. 최대 음향 파워 레벨의 발생 지점은 생체모방형 설계로 인하여 후연의 컷팅이 시작하는 지점으로 이동하였으며, 생체모방형 컷팅 설계로 인하여 압력 구배가 급격히 변화하여 박리점 위치가 달라지기 때문에 발생하는 현상으로 판단된다.

r/R 비에 따른 블레이드 회전 영역 유동장의 단면에서 평균 음향 파워 레벨을 계산하여 Fig. 11에 나타내었다. 평균 음향 파워 레벨은 5가지 모델 모두 블레이드 팁으로 갈수록 증가하는 경향을 보였다. 기준 블레이드의 최대 평균 APL은 49.97 dB로 계산되었으며 Cases 1-4는 각각 36.51, 37.5, 32.17, 35.42 dB로 24.95-35.62% 감소한 것으로 나타났다. r/R이 0.7인 부분까지는 기준 모델과 4가지 생체모방형 모델에서 큰 차이가 없었지만 블레이드 후연에 컷팅을 시작한 지점(r/R = 0.7)부터 생체모방형 블레이드에서 평균 음향 파워 레벨이 감소한 것으로 나타났다. 이는 블레이드 후연에서의 생체모방형 설계가 소음 저감 효과가 있음을 나타낸다.

수치적으로 계산된 추력 성능과 음향 파워 레벨을 Table 3에 정리하였다. 기준 모델의 추력은 약 4.12 N으로 계산되었으며, Cases 1-4는 각각 약 3.93, 3.84, 3.80, 3.76 N으로 계산되었다. 추가적인 형상을 부착하지 않고, 컷팅하였기 때문에 블레이드의 단면적이 감소함에 따라 추력이 약 4.6-8.8% 감소하였다. 이에 반해서 소음 측면에서는 생체모방형 설계로 인한 공력 소음

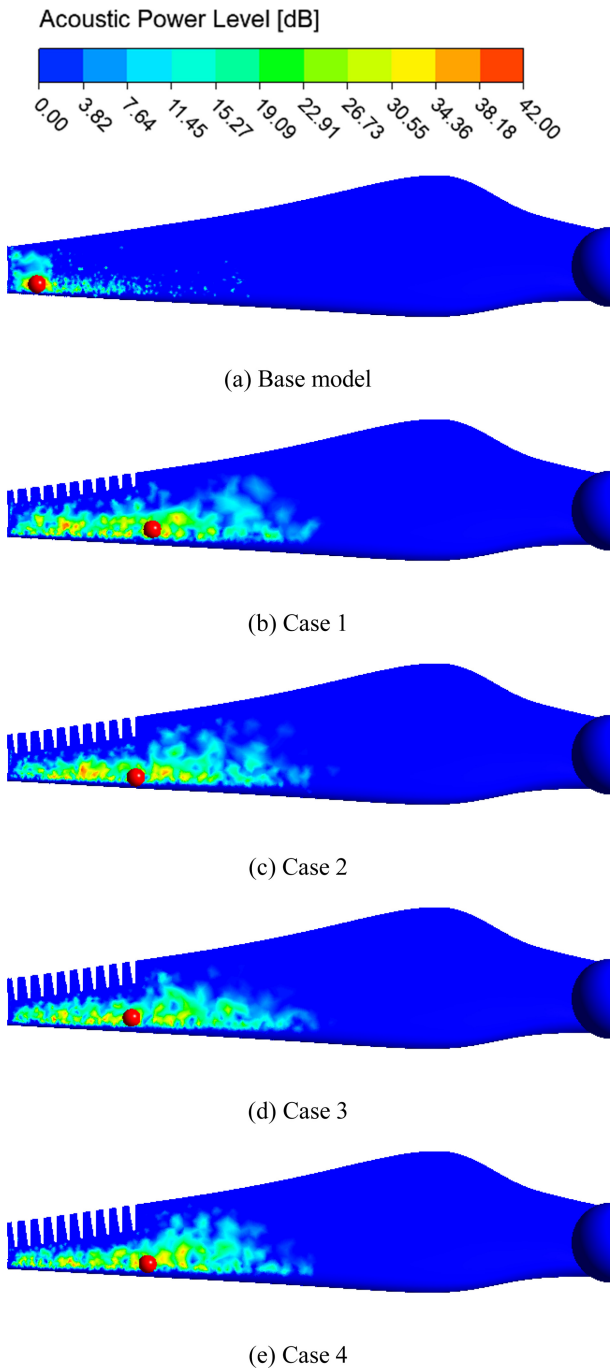


Fig. 10 APL contours with different cutting depth on the blade

감소의 효과를 보여주었다. 기준 모델의 음향 파워 레벨은 각각 약 42.02 dB로 측정되었으며, Cases 1-4의 음향 파워 레벨은 각각 약 37.24, 39.88, 39.78, 37.30 dB로 약 5.3-11.4% 감소하였다. 비교에 사용된 네 가지 개선 모델 중 Case 1이 가장 큰 약 11.4%의 음향 파워 레벨의 저감과 미미한 추력의 저감으로 가장 이상적인 공력 소음 저감 효과를 보여주었다. 이에 반해 컷팅 깊이가 가장 깊은 Case 4는 약 11.4%의 음향 파워 레벨의 감소에도 불구하고 약 8.8%의 다소 큰 추력 감소로 인하여 비효율적인 설계가 수행되었음을 보여준다. 따라서 블레이드 후연의

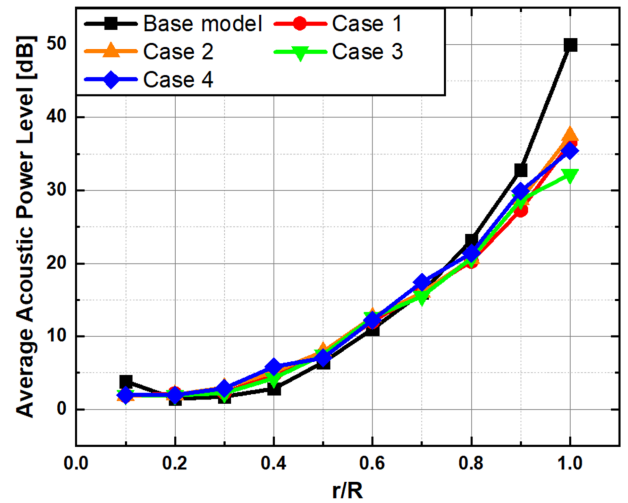


Fig. 11 Average APL at the cross sections of the rotating blade neighboring flow field according to  $r/R$

Table 3 Aerodynamic and aeroacoustic performances of the blade at the 6,000 RPM

	MAX. APL [dB]	Thrust [N]
Base model	42.0187	4.125
Case 1	37.2402	3.9318
Case 2	39.875	3.8432
Case 3	39.7792	3.8035
Case 4	37.2997	3.7616

생체모방형 설계는 소음 저감 측면에서 효과가 있음을 알 수 있지만, 추력 성능을 저감할 수 있기 때문에 적절한 깊이와 추가 형상 변경 설계가 요구됨을 알 수 있었다. 또한 공력 및 유동 소음 특성들을 반영한 다양한 설계 인자들을 고려하여 최적의 형상을 개선 설계하는 작업이 요구된다.

### 5. 결론

최근 e-VTOL UAM이 각광받고 있음에 따라 저소음 블레이드에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 따라서 본 연구는 소음을 저감하기 위한 방법으로 후연에 생체모방형 컷팅 설계를 진행하였고, 컷팅 깊이 길이에 따라 공력 및 소음 특성을 수치적으로 계산 후 비교하였다. 컷팅에 따라 추력 성능의 감소가 예상됨으로, 예측된 소음과 대표적인 공력 성능 지표인 추력을 동시에 비교하였다. 기준 모델을 포함하여 개선 설계된 네 가지 형상에 대한 결론은 다음과 같다.

(1) 정상상태 RANS 유동해에 기반한 BNS 모델은 효율적인 소음 예측이 가능하다. 특히 본 연구와 같이 블레이드 형상 변화 등으로 인하여 압력 변동과 유동장 내 공기역학적 특성의

변화가 존재하는 경우 효율적인 소음 예측법으로 고려될 수 있다.

(2) 유동 박리를 제어하여 소음을 저감하기 위해서 블레이드 후연에 생체모방 형상을 설계하였으며, 현(Chord) 길이의 1/3을 기준으로 균일한 간격의 네 가지 형상을 설계하였다. 회전 속도는 6,000 RPM으로 고정하여 결과 비교에 사용하였으며, 기존 실험적 연구 결과와의 비교를 통해 수치적 연구의 타당성을 검증하였고, 수치적 오차가 미미한 것을 확인 후 연구에 해당 데이터를 활용하였다.

(3) 기존 블레이드에서는 반경이 증가할수록 높은 선속도로 인하여 활발한 유동의 박리가 발생하고, 이로 인하여 큰 와류가 생성된다. Case별 에어 포일과 유동장의 비교는 블레이드의 추력과 토크가 집중적으로 발생하는 반경( $r/R = 0.75$ )에서 진행하였으며, 개선된 생체모방형 블레이드는 박리점 위치를 다르게 함으로써 후연 이후 발생하는 와류를 크게 감소시켰다. 이는 생체모방형 설계가 BVI 소음 등 복잡한 와류로 인하여 발생하는 소음을 저감하는데 명백한 영향을 미친 것으로 판단된다.

(4) 동일한 반경 위치( $r/R = 0.7$ )에서 압력과 음향 파워 레벨의 분포를 비교하였고, 생체모방 형상의 블레이드 상부 국소 압력이 기존 블레이드와 비교하였을 때 완만하게 변화하는 경향을 보여주었다. 이는 음향 파워 레벨에 직접적 영향을 미쳐 후연 이후 음향 파워 레벨이 크게 감소하는 경향으로 나타났다.

(5) 생체모방형 블레이드에서 계산된 최대 음향 파워 레벨은 약 37.24 dB에서 약 39.88 dB의 값으로 기존 블레이드(약 42.02 dB) 대비 10% 이상의 큰 폭으로 감소되었다. 본 연구에서 설계된 컷팅 형상은 블레이드 단면적에 영향을 미쳐 추력 성능의 저하가 불가피하지만 기존 블레이드(약 4.12 N)의 추력과 비교하였을 때 Case 1의 경우 약 3.93 N으로 개선 모델 중 5% 미만의 가장 적은 추력 감소가 계산되었다. 따라서 적절한 컷팅 길이를 선정할 경우 공력 소음 저감을 위한 블레이드 개선 설계에 활용될 수 있다고 판단된다.

(6) 본 연구에서 제안한 생체모방형 블레이드 설계는 특성상 아주 미미한 추력 감소가 불가피하나, 적절한 길이의 컷팅이 설계될 경우 추력 감소 대비 소음 저감 효과가 커지는 이점이 있으며 비행 환경 및 목적 등에 따라 최적의 개선 설계가 요구될 것이라 판단된다.

추후 최신 UAM의 추세인 분산 추진 방식의 멀티콥터(Multi-copter)를 활용하여, 메인 블레이드의 위치 및 배치에 따른 공력 소음에 대한 연구를 수행할 계획이다. 분산 추진으로 인하여 여러 개의 블레이드를 사용하는 UAM에서 블레이드 팁에서의 와류가 인접한 블레이드에 영향을 끼치며 BVI 소음이 발생할 것으로 예상된다. 이를 통해 다수의 블레이드를 사용할 경우 배치 및 거리에 따라 소음 및 공력 특성이 어떻게 나타나는지 분석할 예정이다. 이는 소음 특성에 대한 이해와 더불어 다수의 블레이드를 활용한 UAM에서 적용 가능한 공력 소음 저감 기법을 고안하는데 크게 기여하리라 예상된다.

## ACKNOWLEDGEMENT

본 과제(결과물)는 2022년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학협력기반 지역혁신사업의 결과입니다(재단과제관리번호: 2022RIS-006).

## REFERENCES

1. Chung, K. H., Kim, D. H., Kim, D. K., Song, K. W., Kim, S. H., Hwang, C. J., (2010), Introduction to international research trends and domestic research plans for the noise reduction of helicopter rotor blade, Proceedings of the Korean Society for Noise and Vibration 2010 Autumn Conference, 56-57.
2. Guo, J., Zhou, T., Fang, Y., Zhang, X., (2021), Experimental study on a compact lined circular duct for small-scale propeller noise reduction, Applied Acoustics, 179, 108062.
3. Jang, C.-M., Furukawa, M., Inoue, M., (2001), Noise reduction by controlling tip vortex in a propeller fan, Japan Society of Mechanical Engineers International Journal Series B Fluids and Thermal Engineering, 44(4), 748-755.
4. Dobrzynski, W., (1993), Propeller noise reduction by means of unsymmetrical blade-spacing, Journal of Sound and Vibration, 163(1), 123-126.
5. Pascioni, K. A., Rizzi, S. A., Schiller, N., (2019), Noise reduction potential of phase control for distributed propulsion vehicles, Forum of the American Institute of Aeronautics and Astronautics Scitech, 1069, 1-16.
6. Leslie, A., Wong, K. C., Auld, D., (2008), Broadband noise reduction on a mini-UAV propeller, Proceedings of the AIAA/CEAS 14th Aeroacoustics Conference, 3069, 1-16.
7. Wei, Y., Xu, F., Bian, S., Kong, D., (2020), Noise reduction of UAV using biomimetic propellers with varied morphologies leading-edge serration, Journal of Bionic Engineering, 17(4), 767-779.
8. Noda, R., Nakata, T., Ikeda, T., Chen, D., Yoshinaga, Y., Ishibashi, K., Rao, C., Liu, H., (2018), Development of bio-inspired low-noise propeller for a drone, Journal of Robotics and Mechatronics, 30(3), 337-343.
9. Chekab, M. A. F., Ghadimi, P., Djeddi, S. R., Soroushan, M., (2013), Investigation of different methods of noise reduction for submerged marine propellers and their classification, American Journal of Mechanical Engineering, 1(2), 34-42.
10. Chanaud, R. C., (1972), Noise reduction in propeller fans using porous blades at free-flow conditions, The Journal of the Acoustical Society of America, 51(1A), 15-18.
11. Marzouk, O. A., (2022), Urban air mobility and flying cars: Overview, examples, prospects, drawbacks, and solutions, Open Engineering, 12(1), 662-679.

12. Deters, R. W., Kleinke, S., Selig, M. S., (2017), Static testing of propulsion elements for small multirotor unmanned aerial vehicles, Proceedings of the American Institute of Aeronautics and Astronautics 35th Aviation Forum Conference, 3743.
13. Lighthill, M. J., (1952), On sound generated aerodynamically I. General theory, Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, 211(1107), 564-587.
14. Ffowcs Williams, J. E., Hawkins, D. L., (1969), Sound generation by turbulence and surfaces in arbitrary motion, Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, 264(1151), 321-342.
15. Lee, K. H., Kim, K. H., Lee, K. T., Ahn, J., (2002), Design and analysis for the propeller of MAVs in low Reynolds number flows, Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences, 30(5), 1-8.



**Chang Ho Son**

B.Sc. candidate in the School of Mechanical and Automotive Engineering, Catholic University of Daegu. His research interest is urban air mobility, electric vehicle, and aerodynamics.

E-mail: juu9336@cu.ac.kr



**Sang Hyun Kim**

B.Sc. candidate in the School of Mechanical and Automotive Engineering, Catholic University of Daegu. His research interest is electric vehicle and urban air mobility.

E-mail: shwyou99@cu.ac.kr



**Jihun Song**

Engineer in the Rotorcraft Flight Dynamics team, Korea Aerospace Industries (KAI). His research interest is aeroacoustics, aerodynamics, propeller / rotor - craft, optimization, and turbo machinery.

E-mail: jihun.song@koreaaero.com



**Dong-Ryul Lee**

Professor in the Department of Mechanical Engineering, Daegu Catholic University. His research interest is heat transfer, fluid engineering, electric vehicle, and advanced air mobility.

E-mail: dlee@cu.ac.kr

# DED 공정을 이용한 직선형 손상부 보수 시 기저부 끝단 길이와 경사각에 따른 보수부 인근 잔류 응력 및 변형 특성 분석

## A Study on the Effects of Edge Length and Substrate Slope on Residual Stress and Deformation Characteristics in the Vicinity of the Repaired Region for Straight Damaged Region Repair Using a DED Process

임성훈<sup>1</sup>, 이광규<sup>1</sup>, 안동규<sup>1,#</sup>  
Sung Hoon Yim<sup>1</sup>, Kwang Kyu Lee<sup>1</sup>, and Dong-Gyu Ahn<sup>1,#</sup>

<sup>1</sup> 조선대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Chosun University)  
# Corresponding Author / E-mail: smart@chosun.ac.kr; TEL: +82-62-230-7234  
ORCID: 0000-0002-2111-300X

KEYWORDS: Directed energy deposition (에너지 제어형 용착 공정), Edge length (끝단 길이), Slope (경사각), Residual stress characteristics (잔류 응력 특성), Deformation characteristics (변형 특성)

*The design of a substrate greatly affects the residual stress distribution and the deformation behavior of the repaired region by a directed energy deposition (DED) process. The objective of the present study was to investigate effects of edge length and slope of the substrate on residual stress and deformation characteristics in the vicinity of the repaired region for the repair of the straight damaged region using a DED process. Two-dimensional finite element analysis (FEA) was carried out using SYSWELD. Materials of the substrate and deposited powders were AISI 1045. The maximum residual stress during the deposition decreased when the edge length of the substrate increased, but increased when the slope of the substrate increased. The residual stress after a cooling state increased when the edge length and the slope increased. The displacement of the specimen increased when the slope of the substrate augmented. Finally, the methodology to select a proper edge length and slope of the substrate are discussed in this study.*

Manuscript received: March 2, 2023 / Revised: May 5, 2023 / Accepted: May 23, 2023

### NOMENCLATURE

$\theta$	= Slope of Substrate
L	= Edge Length of Substrate
P	= Power of Laser
V	= Scan Speed of Laser
r	= Radius of Heat Flux
r(z)	= Radius of Heat Flux according to Penetration Depth
$\delta$	= Penetration Depth
$\eta$	= Efficiency of Heat Flux

G	= Flowrate of Shielding Gas
F	= Flowrate of Powder Feeding Gas
$\dot{Q}$	= Linear Intensity of Heat Flux
x	= X Coordinate
y	= Y Coordinate
t	= Scan Time of Laser
$\bar{h}_n$	= Natural Convection Coefficient
$\bar{h}_f$	= Forced Convection Coefficient
$\bar{h}_{eq.f}$	= Coefficient of Equivalent Heat Loss Model
Nu	= Nusselt Number

$k$	= Thermal Conductivity
$D$	= Diameter of Nozzle
$\varepsilon$	= Emissivity of AISI 1045
$\rho$	= Stefan-Boltzmann Constant
$T_s$	= Surface Temperature
$T_\infty$	= Environmental Temperature
$\sigma_{1p}$	= First Principal Stress
$\sigma_{1p,m}$	= Maximum Value of First Principal Stress
$D_x$	= Displacement in X Direction
$D_y$	= Displacement in Y Direction
$D_m$	= Magnitude of Displacement

## 1. 서론

21세기 현재 4차 산업 혁명의 기술적 전환기를 맞이하고 있는 가운데 기술의 발전과 함께 환경 문제와 자원 재활용에 대한 관심이 증가하고 있다[1]. 이러한 사회적 경향에 따라 최근 적층 제조(Additive Manufacturing, AM) 공정을 이용한 손상된 기계 부품의 보수 및 개조를 통하여 원형 제품보다 향상된 제품으로 제작하는 재제조(Remanufacturing)를 위한 연구가 전세계적으로 활발하게 진행되고 있다[2,3]. 재제조 공정을 손상 기계 부품에 적용한 경우 부품의 수명을 향상시키고 동시에 재료 소모량을 절감시켜 환경 문제 해결과 자원 재활용이 가능하다[4]. 이로 인하여 금속 적층 제조 공정을 이용한 불규칙한 손상이 포함된 노후화된 산업 기계 부품의 재제조를 위한 연구가 시작되고 있다[5].

적층 제조 공정은 선 대 선(Line-by-line) 또는 면 대 면 Layer-by-layer) 적층 기법을 이용하여 3차원의 형상의 제품을 제작하는 공정이다[6,7]. 에너지 제어형 용착(Directed Energy Deposition, DED) 공정은 산업적으로 활용도가 높은 금속 적층 제조 공정 중 하나이다. DED 공정은 고밀도의 에너지원을 사용하여 금속 기저부에 용융지를 생성한 후 금속 분말을 공급하여 금속 기저부 위에 적층을 하여 제품을 제작하는 방식이다[5,7,8]. DED 공정은 적층을 위한 기저부 형상의 자유도가 높아 기계 부품의 보수 및 수리에 널리 활용되고 있다[5,7-9]. 그러나 DED 공정에서는 고밀도의 에너지원이 금속 이동함으로써 적층부 인근에 금속 가열과 금속 냉각 현상이 발생한다. 반복되는 금속 가열과 금속 냉각 이력으로서 인하여 적층부 인근에 잔류 응력이 발생하며, 이 잔류 응력은 DED 공정으로 제작된 제품에 결함을 발생시키는 주된 원인이 된다[6-9]. 그러므로, DED 공정을 이용한 기계부품 손상부 보수를 위해서는 적층 조건, 적층 전략, 기저부 형상 설계 및 적층부 형상 설계 등에 따른 보수부 인근의 잔류 응력 특성 변화에 대한 분석이 필요하다[7,8,10-17].

Kim 등은 DED 공정으로 탄소강인 AISI 1045 기저부 위에 AISI 1045 분말을 적층하여 보수할 때, 기저부 경사각과 적층부

형상이 보수 인근의 잔류 응력 및 변형 특성에 미치는 영향에 대해서 해석적으로 고찰하였다[7]. Hua 등은 유한 요소 해석(Finite Element Analysis, FEA)을 이용하여 레이저 출력, 빔 직경 및 이송 속도가 단일 비드 적층 시 발생하는 잔류 응력에 미치는 영향성을 분석하였다[10]. Lei 등은 FeCrNiCu 합금 분말을 기저부 위에 레이저 클래딩(Cladding)하여 박벽형 블레이드를 보수하기 위해 3차원 FEA로 보수부 인근의 열전달 및 잔류 응력 특성 변화를 분석하고, 적층 실험을 통하여 보수 제품의 기계적 특성을 고찰하였다[11]. Oh 등은 그루브 형상의 기저부에 DED 공정을 이용한 시편 보수 시 보수부와 기저부의 경계에 발생하는 기계적/재료적 특성을 실험적으로 분석하였다[12]. Zhang 등은 얇은 두께를 가지는 파이프 형상의 제품을 DED 공정으로 적층 시 발생하는 열전달 및 잔류응력 특성을 열-기계 연계 해석으로 고찰하였다[13]. Lee 등은 원형 형상 부품의 키부분을 보수하기 위한 기저부 형상 설계 및 적층 기법에 대해서 실험적으로 고찰하였다[14]. Kim 등은 DED 공정을 이용하여 기저부 경사각 및 기저부 깊이에 따른 얇은 층 적층 수행 시 발생하는 잔류 응력 특성을 FEA를 통하여 분석하였다[15]. Urbánek 등은 DED 공정을 이용하여 제조된 허니컴(Honeycomb) 형상 제품의 변형 특성 변화를 열-기계 연계 해석을 통하여 예측하였다[16]. Fabian 등은 기저부 경사각 45° 형상의 사다리꼴 홈을 가지는 시편에 DMD (Directed Metal Deposition) 공정을 이용하여 보수하였을 때 결합부 인근의 접합 특성을 실험적으로 고찰하였다[17].

선형 연구들의 고찰을 통해서 기저부 설계에 따른 적층부 인근의 열-기계 특성 변화 고찰에 대한 많은 연구들이 시작되고 있는 것을 알 수 있었다. 기저부 설계의 경우 다양한 형상 변수가 있으며, 이들 형상 변수 조합에 의하여 보수 인근의 잔류 응력과 변형 특성이 현저히 달라진다.

이 연구에서는 DED 공정을 이용한 직선형 손상부 보수 시 기저부 끝단 거리와 경사각에 따른 보수부 인근 잔류 응력 및 변형 특성 변화를 2차원 FEA를 통하여 고찰하였다. 4가지 기저부 끝단 길이와 2가지 경사각에 따른 보수 제품의 잔류 응력 및 변형 특성 변화를 분석하였다. 최종적으로 보수 제품의 잔류 응력과 변형 측면에서 적절한 기저부 끝단 길이와 경사각 선정 방법에 대하여 고찰하였다.

## 2. 2차원 유한 요소 해석

### 2.1 기저부 형상 설계 및 해석 모델

DED 공정으로 직선형 손상부 보수 시 기저부 끝단 길이(L)와 경사각( $\theta$ )에 따른 보수 인근의 잔류 응력 특성과 보수 시편의 변형 특성 변화를 분석/고찰하기 위하여 열-기계 연계 해석을 수행하였다. 이 연구에서는 수치 해석 시간과 용량을 감소시키기 위하여 길이 방향 변형이 거의 발생하지 않는 평면 변형 조건으로 가정하여 적층부 중앙 단면만을 해석하는 2차원 FEA

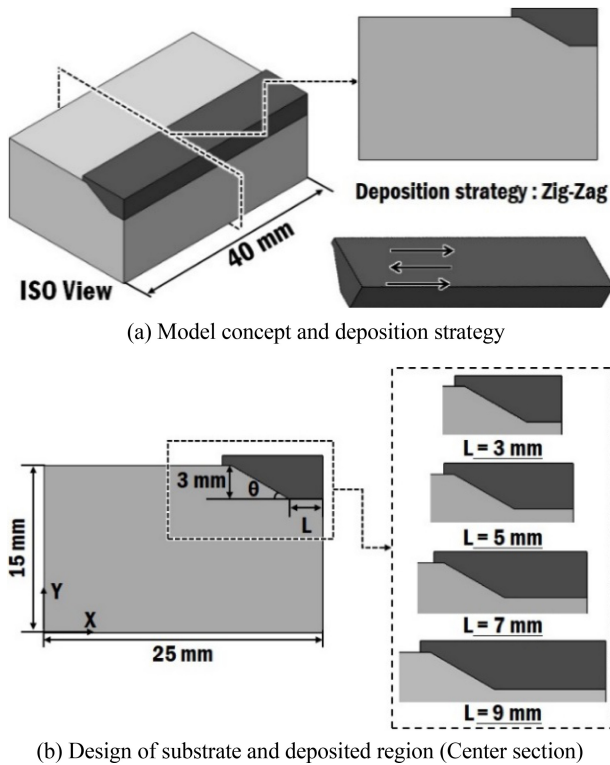


Fig. 1 Schematics of the repairing model

기법을 적용하였다. 이 연구에 적용된 보수 모델의 기저부와 적층부 형상은 Fig. 1과 같다. 기저부 경사각은 30°와 45°로 선정하였다[7,8,14]. Fig. 1의 기저부의 평면부와 경사부 사이 모서리와 기저부 끝단 사이의 거리를 기저부 끝단 길이(L)로 정의하였으며, 기저부 끝단 길이가 증가함에 따라 기저부의 평면부 길이와 적층부의 면적이 증가하도록 설계하였다. 이 연구에서 적용된 기저부 끝단 길이는 Fig. 1과 같이 3-9 mm 범위이며 기저부 끝단 길이와 경사각의 조합에 따라 총 8가지의 기저부 형상이 설계되었다. 이 연구에서 사용된 끝단부 길이와 경사각의 범위는 현업에서 기계부품 직선부 보수 시 사용되는 결합부 제거 후 생성하는 기저부 형상과 크기를 기준으로 선정하였다. Table 1은 기저부 끝단 길이와 경사각의 조합에 따른 적층 면적 (Deposited Area)이다. 적층 면적 계산 시 각 기저부 경사각별로 적층 높이는 일정하고 끝단 길이만 변화하도록 하였으며, CATIA V5에서 면적을 산출하였다. Table 1에서 기저부 경사각이 30°인 경우가 45° 경우보다 적층 면적이 넓게 형성됨을 알 수 있다. 기저부 형상에 관계없이 적층이 완료된 후 후가공으로 최종 형상을 제작하는 것으로 가정하여 적층부 상단에 과적층 영역을 생성하였다. 과적층을 위한 추가 적층 높이는 약 0.9 mm로 선정하였다.

사용 FEA 프로그램인 SYSWELD V16를 이용하여 열-기계 연계 해석을 수행하였다. 기저부 및 적층부 소재는 모두 AISI 1045이다. 이 연구에서는 JMatPro에서 산출된 AISI 1045 재료의 상변화가 고려된 온도 의존 열-기계 물성 데이터를 사용하였다[7,18].

Table 1 Deposited areas for different shapes [mm<sup>2</sup>]

L [mm]	3	5	7	9
θ = 30°	24.9	32.6	40.4	48.3
θ = 45°	19.8	27.6	35.4	43.2

Table 2 Characteristics data for deposited bead [7,18] Adapted from Refs. 7, 18 on the basis of OA

P [W]	V [m/min]	r [mm]	r(z) [mm]	G [l/min]	F [l/min]
500	1,000	0.5	≈ r	≈ 10	≈ 4

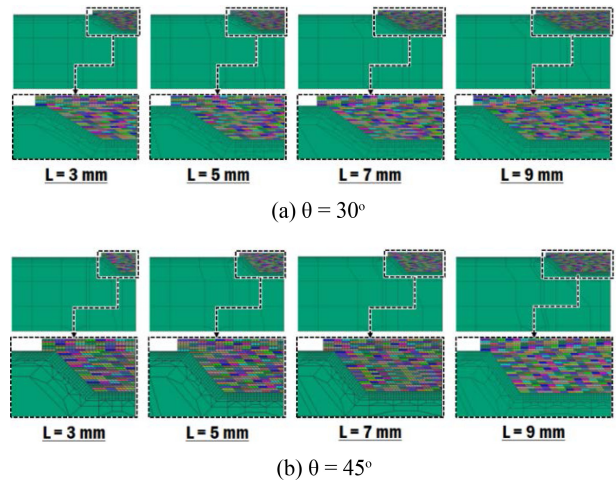


Fig. 2 FE models for different edge lengths and slopes

Table 3 Conditions for 2D FE analysis [7] Adapted from Ref. 7 on the basis of OA

Width of bead [μm]	Thickness of layer [μm]	Hatch distance [μm]
1,000	≈ 150	750

Table 2는 FE 모델에 적용된 적층부 특성 데이터이다. 해석에 적용된 적층 길이 Fig. 1(a)와 같이 40 mm이며, 정상 상태 열전달 현상이 발생하는 중간 단면에서 2차원 열-기계 연계 해석을 수행하였다. 적층 경로는 Fig. 1(a)와 같이 지그-재그(Zig-Zag) 경로를 선정하였다.

$$\dot{Q} = \frac{\eta P}{\pi \delta r^2 V} \text{Exp} \left( -\frac{x^2 + (y - Vt)^2}{0.5 \times r(z)^2} \right) \quad (1)$$

$$\sqrt{x^2 + (y - Vt)^2} \leq r(z) \text{ for } -\delta \leq z \leq 0 \quad (2)$$

총 8가지의 FE 모델을 생성하였으며, 각 모델에 대한 격자 (Mesh) 생성 상태는 Fig. 2와 같다. Table 3은 FEA에 적용된 적층 조건이다. Fig. 3은 적층 공정 중 및 적층 공정이 완료된 후 냉각 공정에 적용되는 적층 경계 조건들이다. FEA에서 레이저 빔은 식(1) 및 식(2)와 같이 침투 깊이(Penetration Depth, δ)와

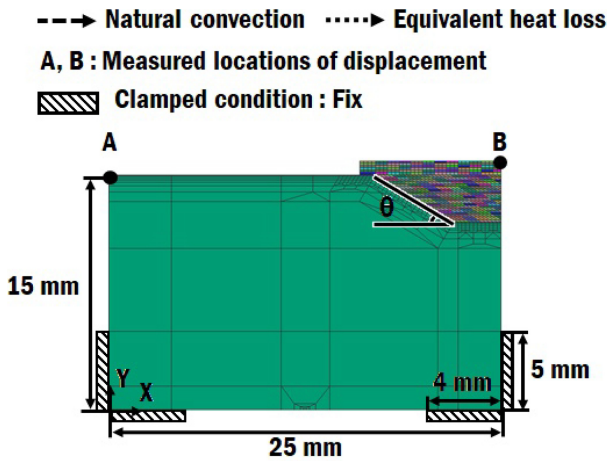


Fig. 3 Boundary conditions of FE model ( $\theta = 30^\circ$  and  $L = 3$  mm)

가우시안(Gaussian) 평면 열원 강도 분포를 가지는 3차원 체적 열원(Volumetric Heat Flux)으로 가정하였다[7,14,18,19]. 해석에 적용된 열원의 효율( $\eta$ )은 0.32이다[7]. 적층 및 탄성 회복(Elastic Recovery)이 고려된 냉각을 포함한 총 공정 시간은 30,000초로 설정하였다. 탄성 회복은 적층이 종료된 후 60초가 지난 시간까지 진행되었다.

적층이 진행되는 시점에서는 기저부 상면을 제외한 모든 기저부 면에 온도 의존 자연 대류(Natural Convection)가 발생한다고 가정하였으며 적층이 완료된 후 기저부와 적층부의 모든 면에서 온도 의존 자연 대류가 발생하는 것으로 가정하였다. 적층이 진행중인 시점에서의 적층부와 기저부 상면에서는 아르곤 가스에 의한 강제 대류 및 복사에 의한 열손실이 고려되어야 하기 때문에 등가 열손실(Equivalent Heat Loss)이 적용되었다 [7,14,18,19]. 해석에 적용된 각 기저부 및 적층부 조건에 맞는 온도 의존 자연 대류 계수는 Fig. 4와 같다. 강제 대류 계수( $\bar{h}_f$ ) 및 등가 열손실 계수( $\bar{h}_{eq.f}$ )는 각각 식(3)과 식(4)에 의하여 산출되었다[18]. 적용된 강제 대류 계수 및 등가 열손실 계수는 각각 Figs. 5 및 6과 같다.

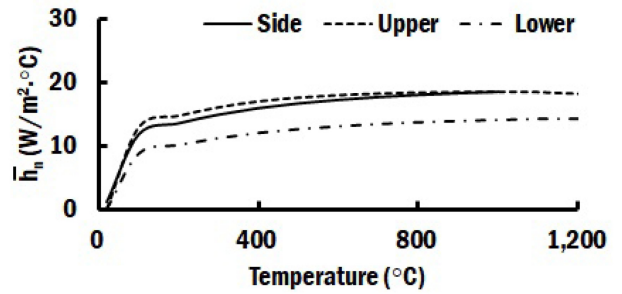
$$\bar{h}_f = \frac{Nu \times k}{D} \tag{3}$$

$$\bar{h}_{eq.f} = \bar{h}_f + \epsilon\sigma(T_s^2 + T_\infty^2)(T_s + T_\infty) \tag{4}$$

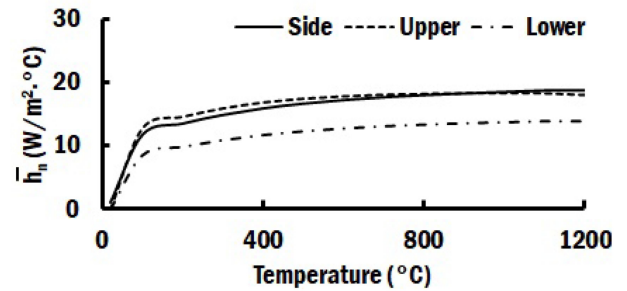
### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 잔류 응력 분포 특성 분석

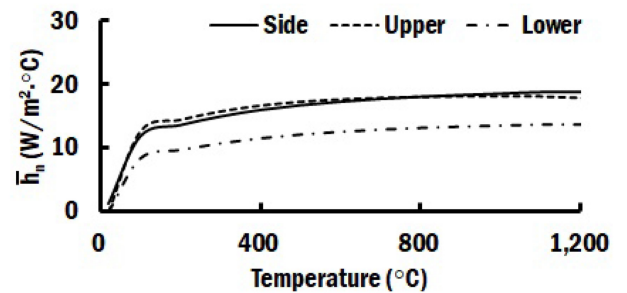
이 연구에서는 잔류 응력 특성 분석을 위하여 척도로 균열 발생의 기준이 되는 최대 주응력(1st Principal Stress,  $\sigma_{1p}$ )을 선정하였다[7]. Fig. 7은 FEA 에서 예측된 기저부 경사각과 끝단 길이에 따른 잔류 응력 분포 변화이다. Fig. 7의 좌측은 적층중



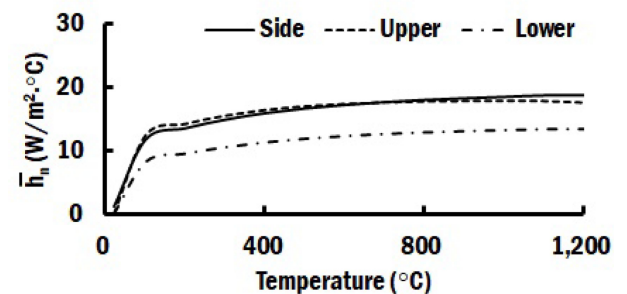
(a)  $L = 3$  mm



(b)  $L = 5$  mm



(c)  $L = 7$  mm



(d)  $L = 9$  mm

Fig. 4 Natural convection coefficients for different edge length

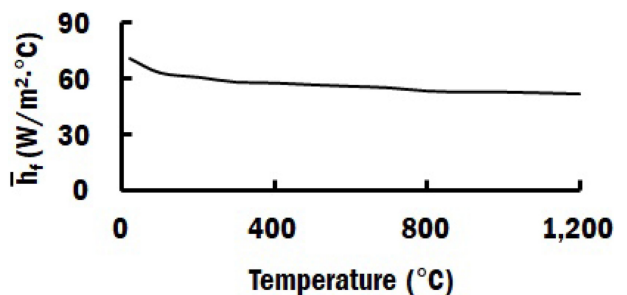


Fig. 5 Forced convection coefficient



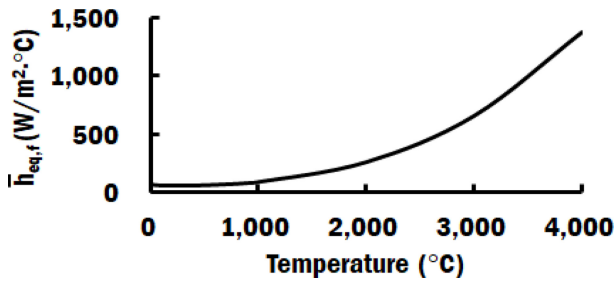
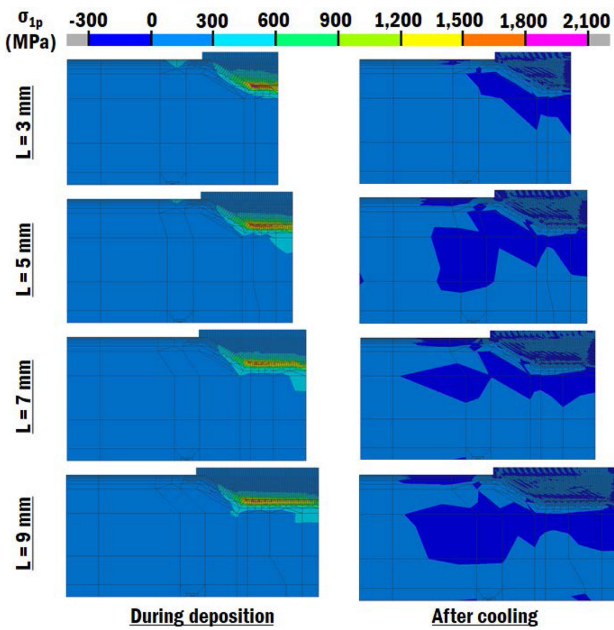
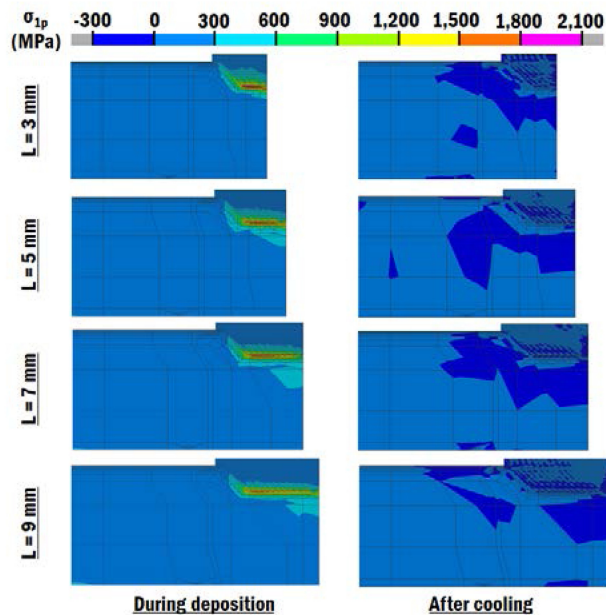


Fig. 6 Equivalent heat loss coefficient



(a)  $\theta = 30^\circ$



(b)  $\theta = 45^\circ$

Fig. 7 1st principal stress distributions for different edge lengths and slopes of the substrate

잔류 응력의 최대값이 나타나는 시간의 잔류 응력 분포이고, 우측은 냉각이 완전히 종료된 시간에 대한 잔류 응력 분포를 나타내었다.

Fig. 7에서 기저부 경사각 및 끝단 길이에 관계없이 적층 공정 중 발생하는 최대 잔류 응력이 적층 공정이 완료된 후 냉각 (Cooling)이 끝난 시점의 잔류 응력보다 매우 높게 발생하는 것을 알 수 있었다. 기저부 경사각과 관계없이 기저부 끝단 길이가 3 mm에서 9 mm로 증가됨에 따라 적층 공정 중 보수부 인근에 발생하는 잔류 응력의 크기가 감소하는 것을 알 수 있었다. 기저부 끝단 길이가 3 mm인 경우 기저부 모서리부와 기저부 평면 영역 인근에 잔류 응력이 집중되어 있는 것을 알 수 있었다. 그러나 기저부 끝단 길이가 증가할수록 집중되는 기저부 평면 영역이 넓어져 잔류 응력의 크기는 감소하고 적용 영역은 증가하는 것을 관찰할 수 있었다. 이 결과들로부터 기저부 끝단 길이의 증가시켜 기저부 평면 영역의 면적을 증가시키면, DED 공정을 이용한 보수 공정 중 발생하는 보수부 인근의 잔류 응력 크기 감소 및 잔류 응력 집중 완화가 가능한 것을 알 수 있었다.

3.2 최대 잔류 응력 발생 위치 및 최대값 변화

Fig. 8은 적층 공정 중 과도하게 잔류 응력이 집중되는 영역인 ESR (Excessively Stressed Region) 주위의 잔류 응력 분포이다[7,14]. 적층 공정 중 최대 잔류 응력 발생 지점은 Fig. 8과 같이 모서리에 가까운 기저부에서 발생하며, 그 위치는 기저부와 적층부의 경계에서 기저부 두께 방향으로 조금 아래인 것을 알 수 있었다. 최대 잔류 응력이 발생하는 위치는 기저부 경사면과 평면 영역의 교차 지점인 모서리로부터 0.25-1.75 mm 범위였다.

기저부 경사각이 30°인 경우에는 끝단 길이가 증가할수록 최대 잔류응력 발생위치가 기저부 모서리에서 모서리에서 멀어지는 것을 관찰할 수 있었다. 그러나 기저부 경사각이 45°인 경우에는 기저부 끝단 길이에 관계없이 최대 잔류 응력 발생 위치가 모서리로부터 약 1.25 mm로 거의 변하지 않는 것을 알 수 있었다. 기저부 끝단 길이가 증가할수록 과도한 잔류 응력이 발생하는 ESR의 면적이 감소하는 것을 알 수 있었다. 기저부 경사각이 30°에서 45°로 증가할 경우, ESR도 증가하는 것을 알 수 있었다.

Fig. 9는 기저부 끝단 길이와 경사각에 따른 최대 주응력 값 변화이다. Table 1과 같이 끝단 길이가 3 mm에서 9 mm로 증가하면 적층 면적이 증가하게 된다. 그러나, Fig. 9와 같이 기저부 끝단 길이를 3 mm에서 9 mm로 증가시킬 경우, 기저부 경사각 30°와 45°에 대하여 최대 주응력 최대값이 각각 약 22%와 약 17% 감소하는 것을 알 수 있었다. 끝단 길이가 3 mm인 경우를 제외하고 기저부 경사각 30°인 경우가 기저부 경사각 45°인 경우 보다 최대 주응력의 최대값이 조금 낮게 예측되었다. 기저부 끝단 길이가 증가할수록 최대 주응력의 최대값이 감소하는 경향이 나타났다. 특히, 기저부 경사각이 30°인 경우 끝단 길이가 5 mm 이상이 되면 최대 주응력의 최대값이 매우 감소하는 것을

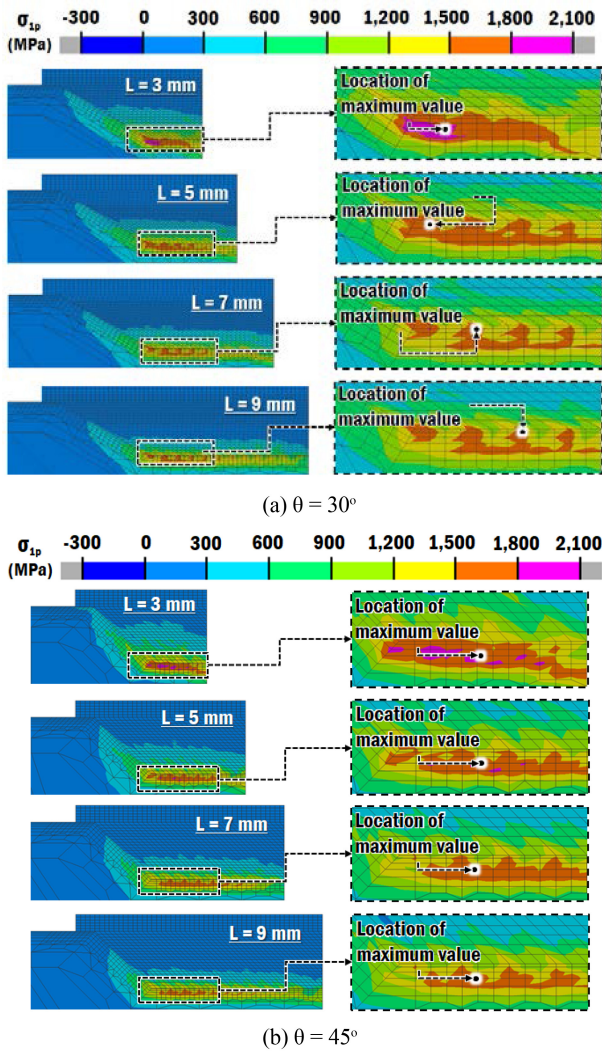


Fig. 8 Excessively stressed regions for different edge lengths and slopes of the substrate

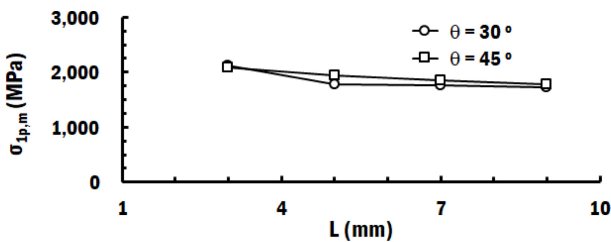


Fig. 9 Effects of the edge length and the slope of the substrate on the maximum value of the 1st principal stress

알 수 있었다. 이 현상들은 기저부 끝단 길이가 증가하고 기저부 경사각이 감소할수록 기저부와 적층부의 온도가 증가하여 기저부와 적층부에 적층 중 예열 및 템퍼링(Tempering) 효과가 발생하기 때문에 사료된다.

위 결과들로부터 적층 공정 중 적층부 인근에 발생하는 잔류 응력을 감소시키기 위해서는 기저부의 끝단 길이를 증가시키고 경사각은 감소시켜야 함을 알 수 있었다.

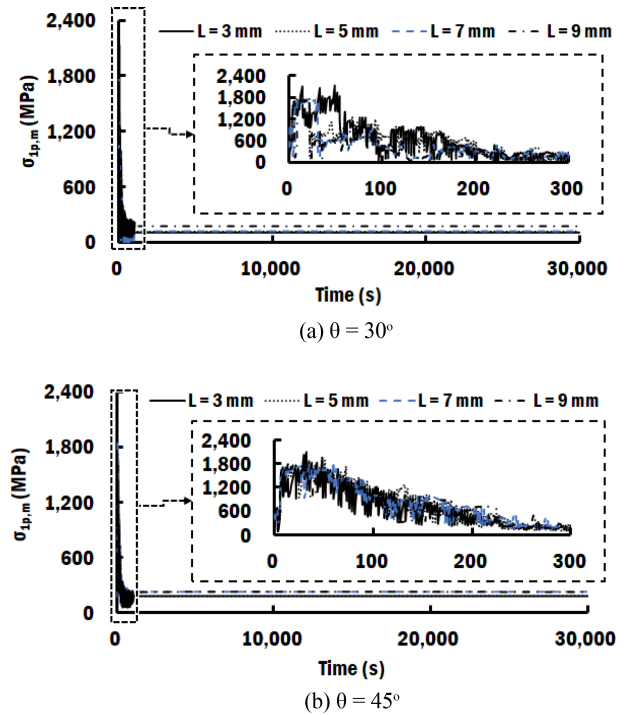


Fig. 10 Time histories of 1st principal stress distributions at the occurrence location of the maximum value for different edge lengths and slopes of the substrate

Table 4 Number of layers for  $s_{1p,m}$  at the occurrence location of the maximum value and maximum residual stress after cooling stage

$\theta$ [°]	L [mm]	Number of layers for $s_{1p,m}$	$s_{1p,m}$ after cooling stage [MPa]
30	3	4	388
	5	2	392
	7	1	397
	9	1	410
45	3	3	425
	5	3	426
	7	3	433
	9	1	436

### 3.3 잔류 응력 발생 이력 특성 분석

Fig. 10은 FEA 결과 예측된 최대 잔류 응력 발생 위치에서의 최대 주응력 이력이다. Fig. 10의 수평축은 시간이다. 각 기저부 끝단 길이와 경사각에 대한 최대 잔류 응력 발생 위치들은 Fig. 8과 같다. Fig. 10에서 기저부 끝단 거리와 경사각 관계없이 적층 공정 초기에 잔류 응력이 급격하게 증가하여 최대 잔류 응력이 발생하는 것을 관찰할 수 있었다. 최대 잔류 응력이 발생한 후, 잔류 응력이 감소하여 적층 완료시점에 잔류 응력의 최소값이 발생하였다. 잔류 응력의 최대값이 발생하는 층수는 Table 4와 같다. 기저부 끝단 길이가 증가할수록 최대 잔류 응력이 발생하는

Table 5 Times of maximum deformation and finishing times of deposition for different edge lengths and slopes

$\theta$ [°]	L [mm]	Time of maximum deformation [s]		Finishing time of deposition
		Point A	Point B	
30	3	328	30,000	629
	5	342	30,000	834
	7	363	30,000	1012
	9	364	30,000	1195
45	3	343	30,000	517
	5	370	30,000	698
	7	372	30,000	906
	9	378	30,000	1,080

층수가 감소하는 경향이 나타났다.

Fig. 10에서 탄성 회복이 이루어지고 순수 냉각 공정이 진행되는 과정에서 잔류 응력이 조금씩 증가하여 최종 잔류 응력 분포가 생성되는 것을 알 수 있었다. Fig. 10과 Table 4에서 기저부 끝단 길이와 경사각이 증가할수록 순수 냉각 공정에서의 잔류 응력이 증가하는 것을 알 수 있었다. 적층 공정 중에 발생하는 잔류 응력 최대값과 냉각 완료 후의 잔류 응력을 비교한 결과, 적층 공정중 발생하는 잔류응력 최대값이 냉각 완료 후의 잔류 응력 최대값보다 4.1-5.2배 정도 높은 것을 알 수 있었다. 적층 공정 중 발생하는 잔류 응력 최대값과 냉각 완료 후의 잔류응력 최대값 차이는 기저부 끝단 길이가 증가할수록 감소하는 것을 알 수 있었다.

### 3.4 변형 특성 분석

Table 5 및 Figs. 11과 12는 FEA로부터 취득된 적층부 인근의 변형 특성 데이터들이다. Fig. 11과 같이 최대 변위는 Fig. 3의 B점에서 발생하였다. B점에서 최대 변위가 발생하는 시간은 Table 5와 냉각이 완료된 시간인 30,000초로 예측되었다. Fig. 3의 A점의 최대 변위는 Table 5와 같이 적층 공정 진행중에 발생하였다. A점의 최대 변위가 발생하는 시점의 변형 형상은 Fig. 11과 같다. Fig. 11에서 보수부 주위에서 적층부와 기저부의 현저한 변형 차이가 발생하는 것을 관찰할 수 있었다. 특히 수평 방향으로 기저부의 끝단에서 기저부와 적층부의 수평방향 변위차가 두드러지게 나타나는 것을 알 수 있었다. 또한, B점의 수직 방향 변위가 다른 위치들에 비해서 상대적으로 매우 높게 나타나는 것을 관찰할 수 있었다. 이 결과들로부터 기저부 끝단에서 기저부와 적층부의 변형을 차이가 상당히 발생하는 것을 알 수 있었다.

A점의 최대 변위는 Figs. 11과 12(a)와 같이 기저부 경사각이 30°와 45°일 때 각각 약 0.20 mm 및 0.21 mm로 예측되었다. 기저부 끝단 길이는 A점 최대 변위 변화에 거의 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있었다. B점의 최대 변위는 Figs. 11과 12(b)와 같이 기저부의 경사각이 30°와 45°일 때 각각 0.48-0.50 mm 및

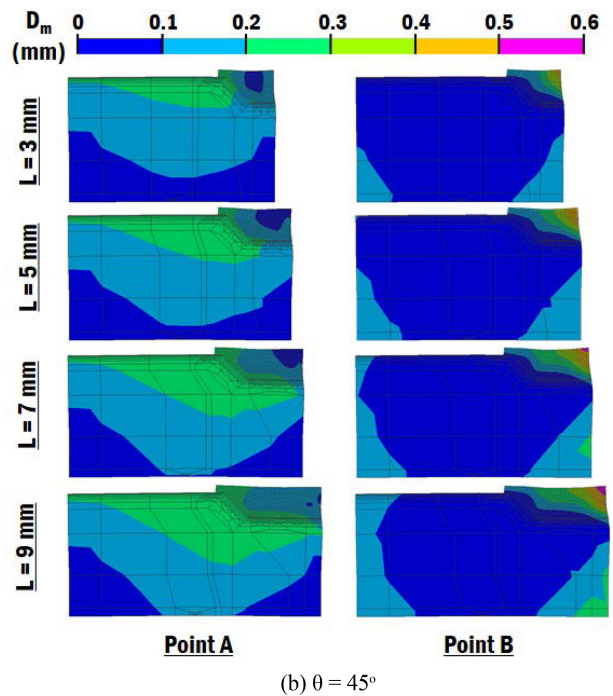
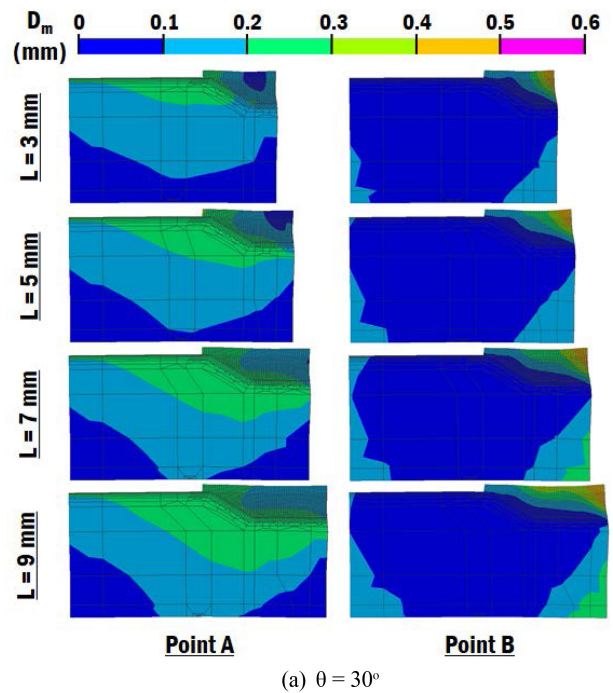


Fig. 11 Displacement distributions at times of maximum displacement for points A and B

0.42-0.55 mm 범위로 산출되었다. 기저부 경사각이 30°인 경우에는 기저부 끝단 길이가 5 mm까지는 끝단 길이가 증가할 경우 B점 최대 변위가 증가하였다. 그러나 기저부 끝단 길이가 5 mm를 초과할 경우, 끝단 길이가 증가할수록 B점의 최대 변위는 조금 감소하였다.

기저부 경사각이 45°일 때에는 기저부 끝단 길이 7 mm까지는

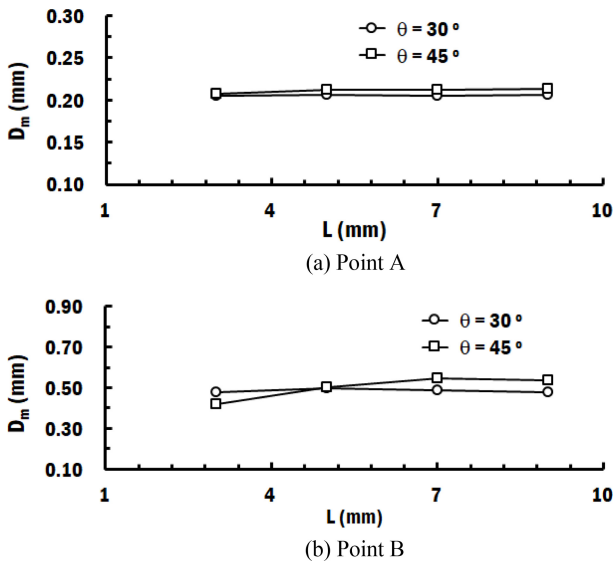


Fig. 12 Maximum displacements at points A and B for different edge lengths and slopes

끝단 길이가 증가할 경우 B점 최대 변위가 증가하였다. 그러나 기저부 끝단 길이가 7 mm를 초과할 경우, 끝단 길이가 증가할 수록 B점의 최대 변위는 조금 감소하였다. 기저부 끝단 길이가 5 mm 이상이 되면, 기저부 경사각이 45°일 때의 최대 변위가 기저부 경사각이 30°일 때의 최대 변위보다 크게 나타나는 것을 알 수 있었다. 이때 기저부 경사각이 45°일 때 A점과 B점의 최대 변위와 기저부 경사각이 30°일 때 A점과 B점의 최대 변위의 차이가 0.06 mm 이하로 매우 작은 것을 알 수 있었다.

4. 결론

이 연구에서는 DED 공정을 이용한 직선형 손상부 보수시 기저부 끝단 거리와 경사각에 따른 보수부 인근 잔류 응력 및 변형 특성 변화를 2차원 FEA로 분석/고찰하여, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 기저부 끝단 길이와 경사각에 관계없이 최대 잔류 응력은 적층 공정 초기에 발생하는 것을 알 수 있었다. 적층 공정 중 발생하는 잔류 응력 최대값은 냉각 완료 후의 잔류 응력 최대값보다 4.1-5.2배 정도 크게 예측되는 것을 알 수 있었다. 기저부 끝단 길이가 증가할수록 보수부 인근의 잔류 응력 크기가 감소되고 잔류 응력 집중 정도는 완화되는 것을 알 수 있었다.

둘째, 최대 잔류 응력은 기저부 모서리 인근에서 발생하며, 그 위치는 기저부와 적층부의 경계에서 기저부 두께 방향으로 조금 아래임을 알 수 있었다. 적층 공정 중 적층부 인근에 발생하는 잔류 응력을 감소시키기 위해서는 기저부의 끝단 길이를 증가시키고 경사각은 감소시켜야 하는 것을 알 수 있었다. 또한, 이 연구에 사용된 기저부 설계 조건에서는 기저부 경사각이 30°이고 끝단 길이가 5 mm 이상인 경우가 잔류 응력 측면에서

적절한 기저부 설계로 사료되었다.

셋째, 최대 변위는 냉각 완료 후 Fig. 3의 B점에서 발생하는 것을 알 수 있었다. 수평 방향으로 기저부의 끝단에서 기저부와 적층부의 변위차가 두드러지게 예측되었다. 이 결과로부터 기저부 끝단에서 기저부와 적층부의 변형을 차이가 상당히 발생하는 것으로 사료되었다. 기저부 끝단 길이가 5 mm 이상이고 경사각이 30°인 경우 최대 변위가 거의 유사하게 나타나는 것을 알 수 있었다. 기저부 경사각이 30°인 경우가 45°인 경우보다 잔류 변위가 작게 발생하는 것을 알 수 있었다.

위 결과들로부터 기저부 경사각이 30°이고 끝단 길이가 5 mm 이상인 경우가 이 해석 모델에서의 기저부 적정 설계로 사료되었다.

향후, 추가적인 실험을 통하여 기저부 끝단 길이와 경사각에 따른 적층부 인근의 잔류 응력 변화를 직/간접적으로 측정하고, 이 결과를 FEA에 반영하여 최적 FE 모델을 개발할 예정이다. 또한, 기저부 끝단 길이와 경사각이 적층 인근에 발생하는 변형을 분포 변화에 미치는 영향에 대해서도 추가적으로 연구를 진행하고자 한다.

ACKNOWLEDGEMENT

“이 논문은 2022년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음(No.2022-202272-01).”

REFERENCES

1. Ko, K.-H., Bae, Y.-J., Moon, J.-Y., Kang, H.-Y., Hwang, Y.-W., (2019), An economic effect analysis on remanufacturing part of automobile, Resources Recycling, 28(4), 37-43.
2. Shamsaei, N., Yadollahi, A., Bian, L., Thompson, S. M., (2015), An overview of direct laser deposition for additive manufacturing; Part II: Mechanical behavior, process parameter optimization and control, Additive Manufacturing, 8, 12-35.
3. Ahn, D.-G., (2016), Direct metal additive manufacturing processes and their sustainable applications for green technology: A review, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 3(4), 381-395.
4. Rahito, S. W., Wahab, D. A., Azman, A. H., (2019), Additive manufacturing for repair and restoration in remanufacturing: An overview from object design and systems perspectives, Processes, 7(11), 802. <https://doi.org/10.3390/pr7110802>
5. Ahn, D.-G., (2021), Directed energy deposition (DED) process: State of the art, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 8(2), 703-742.
6. Lee, I. H., Kim, H. C., Ahn, D.-G., (2020), Korean Terminologies for Additive Manufacturing according to the ISO/

- ASTM 52900 Standard, Journal of Korean Society of Precision Engineering, 37(12), 929-936.
7. Yim, S. H., Lee, K. K. and Ahn, D. G., (2022), Effects of deposited shape and substrate slope on residual stress and deformation characteristics for repairing old parts via a DED process, Journal of Korean Society of Manufacturing Process Engineers, 21(12), 77-87.
  8. Kim, D., Lee, K., Ahn, D., (2021), Investigation into the effects of process parameters of DED process on deposition and residual stress characteristics for remanufacturing of mechanical parts, Transactions of Materials Processing, 30(3), 109-118.
  9. Yang, Y., Gong, Y., Qu, S., Xin, B., Xu, Y., Qi, Y., (2019), Additive/subtractive hybrid manufacturing of 316L stainless steel powder: Densification, microhardness and residual stress, Journal of Mechanical Science and Technology, 33(12), 5797-5807.
  10. Hua, L., Tian, W., Liao, W., Zeng, C., (2014), Numerical simulation of temperature field and residual stress distribution for laser cladding remanufacturing, Advances in Mechanical Engineering, 6, 291615.
  11. Lei, X., Huajun, C., Hailong, L., Yubo, Z., (2017), Study on laser cladding remanufacturing process with FeCrNiCu alloy powder for thin-wall impeller blade, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 90, 1383-1392.
  12. Oh, W. J., Lee, W. J., Kim, M. S., Jeon, J. B., Shim, D. S., (2019), Repairing additive-manufactured 316L stainless steel using direct energy deposition, Optics & Laser Technology, 117, 6-17.
  13. Zhang, Z., Ge, P., Yao, X., Li, T., Liu, W., (2020), Numerical studies of residual states and scaling effects in laser-directed energy deposition additive manufacturing, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 108, 1233-1247.
  14. Lee, K.-K., Chua, B.-L., Ahn, D.-G., (2022), Remanufacturing strategy of engraved part using directed energy deposition process, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 9(6), 1575-1582.
  15. Kim, D. A., Lee, K. K., Ahn, D. G., (2022), A study on the influence of the inclined angle and depth of the substrate on thermal and residual stress characteristics in the vicinity of the repaired region by a directed energy deposition process, Journal of Korean Manufacturing Process Engineers, 21(6), 50-59.
  16. Urbánek, M., Hodek, J., Melzer, D., Koukolíková, M., Prantl, A., Vavřík, J., Brázda, M., Martínek, P., Rzepa, S., Džugan, J., (2022), Prediction of behaviour of thin-walled DED-processed structure: Experimental-numerical approach, Materials, 15(3), 806.
  17. Soffel, F., Lin, Y., Keller, D., Egorov, S., Wegener, K., (2022), Laser remelting process simulation and optimization for additive manufacturing of nickel-based super alloys, Materials, 15(1), 177.
  18. Kim, D. A., (2022), A study on the influence of deposition and substrate shape on residual stress characteristics in the vicinity of the repaired region of parts for machine tools using a DED process, M.Sc. Thesis, Chosun University.
  19. Chua, B., Investigation of development of thermo-mechanical analysis method for a wire feeding type directed energy deposition process, Ph.D Thesis, Chosun University.



#### Sung Hoon Yim

Master course at the Department of Mechanical Engineering, Chosun University. His research interests are development, application and simulation of metal additive manufacturing technology.

E-mail: socrayim3@naver.com



#### Kwang Kyu Lee

Ph.D candidate at the Department of Mechanical Engineering, Chosun University. His research interests include development, application and simulation of metal additive manufacturing technology.

E-mail: otq\_center@naver.com



#### Dong-Gyu Ahn

Professor at the Department of Mechanical Engineering, Chosun University. He received his M.S. and Ph.D. degrees from KAIST, Korea in 1994 and 2002, respectively. His research interests include development and application of additive manufacturing technology, rapid manufacturing, lightweight sandwich, and mold & die.

E-mail: smart@chosun.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 각 종 현상에 대하여, 기계공학적 또는 다학제적 접근방식으로 창의적인 실험, 해석 및 모델링 예측 등 한층 심화된 연구로 궁극적으로는 기계 및 생산공정의 정밀도향상에 기여하는 데 초점을 맞춘다, 연구범위로는 정밀가공, 정밀측정, 로봇제어자동화, 스마트생산시스템, 설계 및 재료, 공작기계, 나노마이크로기술, 바이오헬스, 적층제조시스템, 녹색생산기술 분야 등 정밀공학 관련분야를 포함하며 다른 간행물에 발표되지 않은 논문이어야 한다.

## 금액

### 구독료

이 논문집은 우리학회 회원에 한하여 무료로 제공됩니다.

### 게재료

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

## 연락처

[04508] 서울 중구 중림로 50-1, SKY1004빌딩 12층

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

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

한국정밀공학회지 저널: http://jkspe.kspe.or.kr

# 한국정밀공학회지 논문투고 및 게재규정 · 논문집필요령

## 논문투고 및 게재규정

### 제1조 (목적)

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

### 제2조 (투고자)

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

### 제3조 (책임 및 윤리규정 준수)

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

### 제4조 (연구범위)

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

### 제5조 (투고 구분)

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

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

### 제6조 (접수)

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

### 제7조 (심사 및 게재 결정)

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

### 제8조 (저작권)

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

### 제9조 (자료공개)

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

### 제10조 (원고작성요령)

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

### 제11조(게재료)

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



# 한국정밀공학회지 논문투고 및 게재규정 · 논문집필요령

## 논문집필요령

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

# 한국정밀공학회지 논문심사규정

## 제1조 (목적)

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

## 제2조 (투고 및 접수)

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

## 제3조 (심사위원 선정)

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

## 제4조 (심사 방법)

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

## 제5조 (심사 기간)

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

## 제6조 (저자수정기한)

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

## 제7조 (게재 판정)

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

## 제8조 (특집논문심사)

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

# 한국정밀공학회지 논문심사규정

## 제9조 (비밀유지)

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

## 제10조 (이의제기)

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

## 제11조 (심사료)

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

# (사)한국정밀공학회 학술활동 윤리규정

- (사)한국정밀공학회 학술활동 윤리규정 전문: [http://jkspe.kspe.or.kr/\\_common/do.php?a=html&b=16](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, 연구결과와 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](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](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 7 · July 2023

## REGULAR PAPERS

**Parameter Optimization of WAAM with Pulsed GMAW for Manufacturing Propeller-Shaped Blade**  
S.-W. Han · H. Yoo · S. Shin · H. Kim · G. Lee · J. Jeon · S. Han · J. Cho 1103

**A Topological Mapping Grinding Strategy for Structured Groove Surface with the Wire-Wound Grinding Wheel**  
L. Yushan · W. Guoxun · L. Xingshan · T. Chengzhi 1111

**Optimization of Stamping Process Parameters Based on Improved GA-BP Neural Network Model**  
Y. Xie · W. Li · C. Liu · M. Du · K. Feng 1129

**Clamping Error Calibration Algorithm of Aero-Engine Blade Surface Polishing**  
D. Wu · Z. Wang · J. Liang · H. Wang · K. Zhang · J. Yu 1147

**Modularized Analysis of Kinematic and Mechanical Error for Planar Linkages Composed of Class 3 and Order 3 Assur Groups**  
K.-L. Hsu · C.-H. Chang 1161

**Measurement of Six-Degree-of-Freedom Absolute Postures Using a Phase-Encoded Pattern Target and a Monocular Vision System**  
J.-A. Kim · J.Y. Lee · C.-S. Kang · S.H. Eom 1191

**Parametric Design Optimization of a Tail Mechanism Based on Tri-Wheels for Curved Spoke-Based Stair-Climbing Robots**  
J. Shin · Y. Kim · D.-Y. Kim · G.H. Yoon · T. Seo 1205

**A Computer Vision System for Pallets Verification in Quality Control**  
M.V.B. de Moraes · S.D. dos Santos · R. Pires 1221

**Efficient Analysis of CFRP Cutting Force and Chip Formation Based on Cutting Force Models Under Various Cutting Conditions**  
D.-G. Kim · S.-H. Yang 1235

**Latent Image Sample Processing Using Machining Center**  
T. Yamamoto · R. Kunimune 1253

**Rehabilitation Exercise Using a Smart-Bar Device with Augmented Reality Guide Function**  
Y.-G. Nam · S.Y. Park · B.S. Kwon 1263

**Acoustic Monitoring in the Process of Pulsed Laser Paint Removal**  
H. Huang · B. Hao · D. Ye · Y. Chen 1271

## REVIEW

**Data-Driven Methods for Predicting the State of Health, State of Charge, and Remaining Useful Life of Li-Ion Batteries: A Comprehensive Review**  
E. Kim · M. Kim · J. Kim · J. Kim · J.-H. Park · K.-T. Kim · J.-H. Park · T. Kim · K. Min 1281

## CORRECTION

**Correction: Effect of Support Structures on the Deformation of AlSi10Mg Aircraft Parts Made Using DMLS**  
J. Kim · J.H. Park · S. Jang · H. Jeong · T. Kim · H.G. Kim 1305

Further articles can be found at [link.springer.com](http://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](http://www.springer.com/12541)

# International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology

Volume 10 · Number 4 · July 2023

## REGULAR PAPERS

### **Volatile Lubricants Injected Through Laser Drilled Micro Holes Enable Efficiently Hydrocarbon-Free Lubrication for Deep Drawing Processes**

P. Reichle · G. Reichardt · M. Henn · G. Umlauf · J. Barz · K.R. Riedmüller · M. Liewald · G.E.M. Tovar 875

### **One Step Fabrication of Micro-hole on SiCp/Al Cambered Surface by Micro-EDM and Mechanical-reaming Combined Machining**

S. Gong · H. Wang · X. He · Z. Wang · Y. Wang 891

### **Energy Density Effect on the Interface Zone in Parts Manufactured by Laser Powder Bed Fusion on Machined Bases**

F. Marin · A.F. de Souza · A. Mikowski · L.H.G. Fontanella · P. Soares · L.N.L. de Lacalle 905

### **Real-Time Fault Identification System for a Retrofitted Ultra-Precision CNC Machine from Equipment's Power Consumption Data: A Case Study of an Implementation**

V. Selvaraj · S. Min 925

### **Studies on Geometrical Features of Tool Wear and Other Important Machining Characteristics in Sustainable Turning of Aluminium Alloys**

M.K. Gupta · P. Niesłony · M. Sarikaya · M.E. Korkmaz · M. Kuntoğlu · G.M. Królczyk 943

### **Feasibility and Reliability of Laser Powder Bed Fused AlSi10Mg/Wrought AA6061 Hybrid Aluminium Alloy Component**

C. Zhao · Y. Bai · H. Wang 959

### **Energy Efficiency of the Vulcanization Process of a Bicycle Tyre**

L.K. Pentakota · P. Albertelli · M. Strano 979

### **Stability Enhancement of Reformate-Fueled, Low-Temperature Solid Oxide Fuel Cell with Nickel Thin-Film Anode by Water Bubbling**

S. Ji · W. Kim · S. Han · S. Jeong · T. Park 999

### **Investigation of Gas Diffusion Layers for Flexible Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells**

Y. So · H. Yoo · J. Kim · O. Kwon · S. Jeong · H. Choi · H. Cha · T. Park 1007

### **Role of g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> in Fabrication of BiVO<sub>4</sub>/WO<sub>3</sub> Z-scheme Heterojunction for high Photoelectrochemical Performances with Enhanced Light Harvesting**

P. Sang · J.H. Kim 1015

### **Triboelectric-Based Film-Type Soft Robot Driven via Low-Frequency Mechanical Stimuli**

S. Ji · J. Shin · J. Yoon · J.-H. Youn · J. Ma · K.-U. Kyung · D.H. Kim · H. Cho · J. Park 1027

### **Correlation Between Fiber Orientation and Geometrical Shrinkage of Injected Parts Under the Influence of Flow-Fiber Coupling Effect**

C.-T. Huang · J.-Z. Wang · C.-H. Lai · S.-J. Hwang · P.-W. Huang · H.-S. Peng 1039

## REVIEWS

### **Photocatalyst Engineering for Water-Based CO<sub>2</sub> Reduction Under Visible Light Irradiation to Enhance CO Selectivity: A Review of Recent Advances**

H. Charles · R.C. Pawar · H. Khan · C.S. Lee 1061

### **Stress and Manufacturability in Solid-State Lithium-Ion Batteries**

M.R. Bin Mamtaz · X. Michaud · H. Jo · S.S. Park 1093

CORRECTION

**Correction: Energy Density Effect on the Interface Zone in Parts Manufactured by Laser Powder Bed Fusion on Machined Bases**

F. Marin · A.F. de Souza · A. Mikowski · L.H.G. Fontanella · P. Soares · L.N.L. de Lacalle **1139**

*(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](http://www.springer.com/40684)

**Further articles** can be found at [link.springer.com](http://link.springer.com)

**Abstracted/Indexed** in *Baidu, CLOCKSS, CNKI, CNPIEC, Dimensions, EBSCO Discovery Service, EI Compendex, Google Scholar, INSPEC, Japanese Science and Technology Agency*

# 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

## 신입회원인준명단

• 정회원 •

회원번호	이름	소속	회원번호	이름	소속
20239189	현재상	연세대학교	20239224	김현우	(주)삼우이엔지
20239197	곽정훈	한국로봇융합연구원	20239226	박진수	한국생산기술연구원
20239199	김성열	경북대학교	20239227	정동재	고려정밀공업(주)
20239202	김도현	대구경북첨단의료산업진흥재단	20239228	정희철	경북테크노파크
20239203	백종대	영남대학교	20239230	이지성	한국기초과학지원연구원
20239208	송찬호	대구경북첨단의료산업진흥재단	20239231	안병울	한밭대학교 산학협력단
20239210	이형순	중앙대학교	20239232	손영진	한밭대학교
20239211	박찬용	한국기계연구원	20239233	김용래	한국기계연구원
20239215	최인식	강원대학교	20239234	안태우	DN솔루션즈
20239216	박철수	고려정밀공업(주)	20239235	이장일	디엔솔루션즈
20239218	김중배	공주대학교	20239246	조형진	단국대학교
20239220	최광수	한국생산기술연구원	20239253	김동규	건국대학교
20239221	김선우	한국생산기술연구원	20239259	최영록	LG Display



• 학생회원 •

회원번호	이름	소속	회원번호	이름	소속
20239188	정재현	연세대학교	20239236	강현서	경남대학교
20239191	이강희	연세대학교	20239237	이준현	경남대학교
20239192	김병석	연세대학교	20239239	손동화	경일대학교
20239193	김민성	연세대학교	20239240	신재혁	경일대학교
20239194	홍진호	한국생산기술연구원	20239241	이성현	경일대학교
20239195	홍창호	한국생산기술연구원	20239242	김준규	경일대학교
20239198	장윤성	건양대학교	20239243	한정목	단국대학교
20239200	양다연	한국생산기술연구원	20239244	박정은	단국대학교
20239201	신예린	한국생산기술연구원	20239245	황보선	단국대학교
20239204	이성민	서울과학기술대학교	20239247	이재혁	단국대학교
20239205	이용훈	경북대학교	20239248	곽대원	경남대학교
20239206	송창현	연세대학교	20239249	김상우	경남대학교
20239207	정하림	연세대학교	20239250	전세현	단국대학교
20239209	김태용	경북대학교	20239251	김건협	단국대학교 산학협력단
20239212	안세민	서울대학교	20239252	박범진	단국대학교
20239213	답토로이	울산대학교	20239254	최유진	단국대학교
20239214	송유준	단국대학교	20239255	곽해솔	동국대학교
20239222	이준섭	한양대학교	20239256	썬옥양	University of Ulsan
20239223	김민재	건국대학교	20239257	김동건	단국대학교
20239225	최태원	KITECH, UST	20239258	유준상	단국대학교
20239229	서민지	충남대학교	20239260	문희찬	울산과학기술원

# 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(숭실대학교) 신현정(KAIST)

## 재무이사

김창주(한국기계연구원) 송용남(고려대학교) 정영훈(경북대학교)

## 편집이사

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

## 사업이사

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

## 기획홍보이사

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

## 국제이사

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

## 대외협력이사

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

## 부문회장

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

## 특별회원사

### 다이아몬드

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

### 플래티늄

HP Korea(유) SK실트론(주)

### 골드

(주)마리알로 (주)프로토텍 (주)에비던트코리아 (주)에이스나노켄 (주)엔도로보틱스 지앤피테크놀로지(주) (주)에비던트코리아 (주)에이스나노켄 (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 7/ July 2023**

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

월간 · 제40권 제7호 [통권 제388호] · 비매품

등록일자 1987년 4월 25일

등록번호 서울 라 07037

인쇄일 2023년 6월 25일

발행일 2023년 7월 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 이병권 / (02)518-0722 / [kspe@kspe.or.kr](mailto:kspe@kspe.or.kr)

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

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

학술대회 김영심 / (02)393-0725 / [presm@kspe.or.kr](mailto:presm@kspe.or.kr)

회계 김상원 / (02)393-0724 / [account@kspe.or.kr](mailto: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).

## Aims and Scope

Under the great wave of the 4<sup>th</sup> 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. 1 No. 1 January 1, 2023**  
**Vol. 1 No. 2 July 1, 2023**

#### • 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

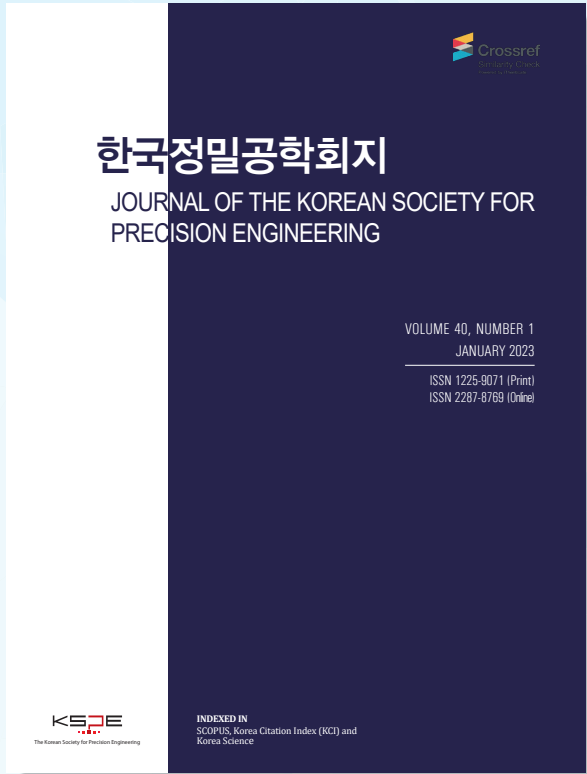
학회 회원님들의 많은 투고와 인용 부탁드립니다.

### 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 JKSPE Search for JKSPE

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



+82-518-2928(T)

+82-518-2937(F)



[paper@kspe.or.kr](mailto:paper@kspe.or.kr)

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



12F, SKY1004 Bldg., 50-1

Jungnim-ro, Jung-gu, Seoul,

04508, Republic of Korea

# Start New Sindoh

2D를 넘어 3D 전문 기업으로  
신도리코가 새로운 미래를 열어갑니다





The 높게  
The 빠르게  
The 정확하게

LIG넥스원이 대한민국을 넘어 세계로 나아갑니다



\*SK실트론 웨이퍼에  
회로 패턴이 새겨진 모습입니다

## 미래 세상의 판, 누가 바꿀까?

지능형 로봇  
자율주행 자동차  
인공위성까지

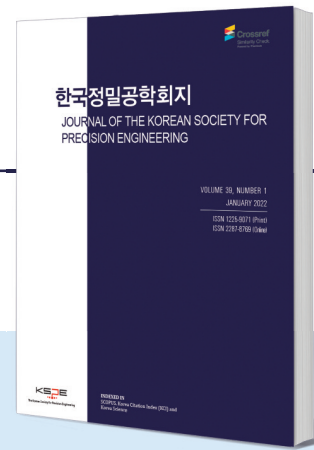
미래 세상의 판을 바꾸는 건  
웨이퍼 위에서 가능한 이야기-

SK실트론의 웨이퍼에서  
세계의 반도체가 태어나고  
그 반도체로부터 세상이 바뀌기 때문입니다

세상의 판을 바꿉니다

# 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

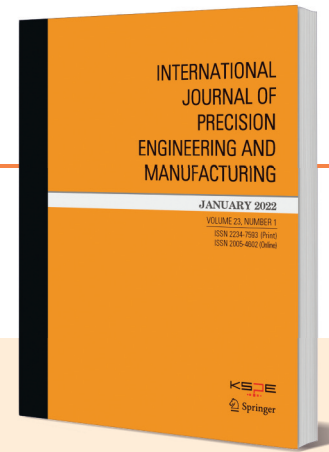
- Big Data Analytics and Informatics
- Sensors, Instrumentation and Process Monitoring
- Prognostics and Health Management (PHM)
- Industrial Internet of Things (IIOT)
- Industrial Artificial Intelligence
- Digital Twin, Cyber-Physical Systems (CPS) and Metaverse
- Augmented, Virtual and Extended Reality
- 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 | 쓸비치 삼척 호텔&리조트  
(강원도 삼척시)

## ▶ 주요일정 Important Date

200단어 초록제출 마감 2023. 9. 15 FRI 24시

초록채택 통지 발송 2023. 10. 2 MON

발표자 사전등록 마감 2023. 10. 10 TUE 24시

## ▶ 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, (02)393-0724, (02)393-0725

프로그램, 논문 발표문의 : [conf@kspe.or.kr](mailto:conf@kspe.or.kr)

회원, 회계, 등록문의 : [account@kspe.or.kr](mailto:account@kspe.or.kr)

주최 및 주관 KSPE 대한 한국정밀공학회  
Korean Society for Precision Engineering

K-Precision  
Smart & Green

# 2023년 국내/국제학술대회 일정 안내

KSPE 신원 한국정밀공학회  
Korean Society for Precision Engineering

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

KSPE 신원 한국정밀공학회  
Korean Society for Precision Engineering

KSPE 신원 한국정밀공학회  
Korean Society for Precision Engineering

한국정밀공학회

2023

KSPE 2023  
Autumn  
Conference

추계학술대회

2023. 11. 15(수) - 17(금)

썰비치삼척 리조트  
(강원도 삼척시)

# PIFOC Objectives Scanner



- 피에조 액추에이터를 사용하여 빠른 응답 시간 및 긴 수명
  - Z축으로 100, 400, 800 $\mu$ m의 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

## 적용분야



+ AFM, SEM, TEM, LSFM 등 현미경의 고정밀 Z-focus 포지셔닝에 적합!

