

# 한국정밀공학회지

JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR  
PRECISION ENGINEERING

VOLUME 40, NUMBER 8

AUGUST 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 8 / August 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 August 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

### 일 반

- 593 폴리머 클립 혈관결찰기의 결찰부 구조 개선에 관한 연구  
한성호, 최복록
- 599 효율적인 유수분리를 위한 폴리프로필렌 심층 필터의 극친수성 개질에 관한 연구  
박홍렬, 이정원, 김성민, 김기환, 김영건, 황운봉
- 607 우산형 마이크로 덤플을 적용한 웨어링의 발열저감 특성  
윤영찬, 이택성
- 617 Fuzzy AHP-TOPSIS 기법을 이용한 최적 미세 가공 공정의 다기준 의사 결정  
강성구, 황지홍
- 625 전조 가공을 통해 제작된 볼트에 대한 초음파나노표면개질 효과에 관한 연구  
하형진, 박한별, 정태형, 심도식
- 633 3D 프린터로 제작된 정제 알약의 격자구조 형태에 따른 붕해 특성 연구  
이상훈, 오승민, 박서림, 김 석, 조영태
- 639 사출성형제품 이형 후 상온 냉각 중 크립 현상에 관한 연구  
김유정, 방희선
- 647 연속식 하역기 L-홀더의 잔존 수명 예측  
이승훈, 이동우, 송정일
- 655 순환 신경망을 이용한 착용형 관성센서기반 하지 관절 역학 추정  
최지석, 이창준, 이정근
- 665 Design, Fabrication, and Control of a Rotary Manipulator driven by Twisted Shape Memory Alloy (SMA) Wires  
이길용, 이수연

# JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR PRECISION ENGINEERING

VOLUME 40, NUMBER 8 / August 2023

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

## CONTENTS

### REGULAR

- 593 A Study on the Structural Improvement of Ligation Parts of a Polymer Clip Blood Vessel Ligator  
**Sung Ho Han and Bok Lok Choi**
- 599 Superhydrophilic Modification of a Polypropylene Depth Filter for Efficient Oil–water Separation  
**Hong Ryul Park, Jeong-Won Lee, Seongmin Kim, Kihwan Kim, Yeonggeun Kim, and Woonbong Hwang**
- 607 Heat Reduction Characteristics of Wear Ring with Umbrella-type Micro-dimple  
**Young Chan Yoon and Taek Sung Lee**
- 617 Multi-criteria Decision Making of the Optimal Micromachining Process Using Fuzzy AHP-TOPSIS  
**Seong-Gu Kang and Jihong Hwang**
- 625 Study on Effect of Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification in Bolt Manufactured by Screw Rolling  
**Hyeong-Jin Ha, Han-Byeol Park, Tae Hyung Jung, and Do-Sik Shim**
- 633 A Study on the Dissolution Characteristics of 3D Printed Tablet with Lattice Structures  
**Sang Hoon Lee, Seung Min Oh, Seo Rim Park, Seok Kim, and Young Tae Cho**
- 639 A Study on Creep Phenomenon after the Releasing of Injection Molded Articles  
**Yu Jung Kim and Hee-Seon Bang**
- 647 Prediction of the Remaining Useful Life of L-holder for Continuous Ship Unloader  
**Seung-Hun Lee, Dong-Woo Lee, and Jung-Il Song**
- 655 Wearable Inertial Sensors-based Joint Kinetics Estimation of Lower Extremity Using a Recurrent Neural Network  
**Ji Seok Choi, Chang June Lee, and Jung Keun Lee**
- 665 Design, Fabrication, and Control of a Rotary Manipulator driven by Twisted Shape Memory Alloy (SMA) Wires  
**Gil-Yong Lee and Su-Yeon Lee**

## 폴리머 클립 혈관결찰기의 결찰부 구조 개선에 관한 연구

# A Study on the Structural Improvement of Ligation Parts of a Polymer Clip Blood Vessel Ligator

한성호<sup>1</sup>, 최복록<sup>2,#</sup>  
Sung Ho Han<sup>1</sup> and Bok Lok Choi<sup>2,#</sup>

<sup>1</sup> 유원메디텍 기술연구소 (Technology Lab., Yuwon Meditech)  
<sup>2</sup> 강릉원주대학교 자동차공학과 (Department of Automotive Engineering, Gangneung-Wonju National University)  
# Corresponding Author / E-mail: blchoi@gwnu.ac.kr, TEL: +82-33-760-8765  
ORCID: 0000-0001-9984-4569

KEYWORDS: Laparoscopy instrument (복강경 수술기구), Blood vessel ligator (혈관 결찰기), Polymer clip (폴리머 클립), Shaft tip (샤프트 선단), Finite element analysis (유한요소해석)

When laparoscopic surgery is performed, polymer clip blood vessel ligators are widely used to prevent bleeding and secure surgical vision. However, long-term use of such ligators can cause many structural problems, especially in the jaw part where the clip is mounted directly to the blood vessel. For example, jaws of the ligation device might be opened above the design value and upper and lower jaws might be twisted against each other. In addition, buckling or bending deformation can easily occur at the tip of the inner shaft. Due to these problems, the ligation machine cannot ligate the clip properly, which might lead to a medical accident. Therefore, in this study, the design was changed to improve these problems by increasing the pin diameter and contact surface, applying a double pin structure, and changing the structure of the shaft tip. As a result, the modified model showed 12.5% and 10.2% improvements in opening and twisting stiffness compared to the initial model with 7.2% and 58% improvements in critical buckling load and bending stiffness, respectively.

Manuscript received: March 9, 2023 / Revised: April 19, 2023 / Accepted: May 3, 2023

### NOMENCLATURE

$P_{cr}$  = Critical Buckling Load  
 $E$  = Elastic Modulus  
 $I$  = Section Moment of Inertia  
 $KL$  = Effective Buckling Length  
 $A$  = Area  
 $\sigma_y$  = Yield Stress

## 1. 서론

복강경 수술은 흉부나 복부를 절개하는 대신에 0.5-1.5 cm 정도

크기의 작은 구멍을 뚫고 복강경을 넣어서 수술하는 방식이므로, 개복 수술에 비해 환자의 수술부위 상처를 크게 줄일 수 있는 ‘최소 침습 수술’ 방법 중의 하나이다. 또한 최근에는 CCD 카메라와 로봇 수술 등 복강 내를 수술하기 위한 기구와 장비의 기술적 발전에 따라 복강경 수술 보급이 점차 가속화되고 있다[1].

한편, 복강경 수술에 많이 사용되는 폴리머 클립 혈관 결찰기는 수술 진행 시 클립을 장착한 후 혈관 및 조직을 묶어서 혈액 손실을 방지할 뿐만 아니라 수술 시야를 확보하기 위해서 많이 사용하는 수술 기구이다.

그러나 현재 폴리머 클립 혈관 결찰기의 기성 제품들에서 클립 결찰 시 공통적으로 많이 발생하는 현상은 다음과 같다.

먼저 클립을 장착해서 체결하는 조(Jaw) 부위가 시간에 따라 점차 초기 형상에서 벌어지는 변형과 뒤틀림 현상이 나타날 수

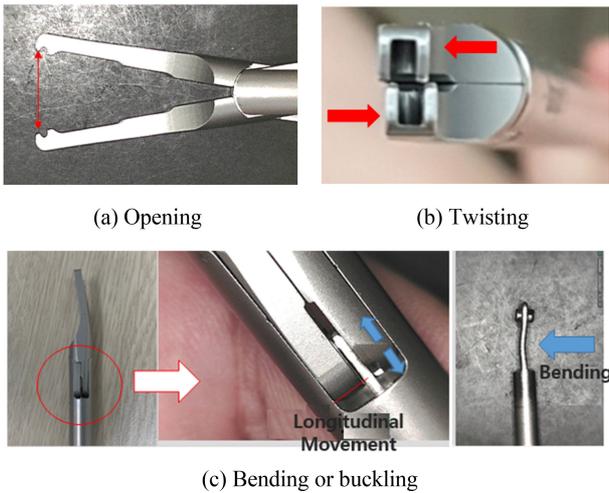


Fig. 1 Several problems in the blood vessel ligation

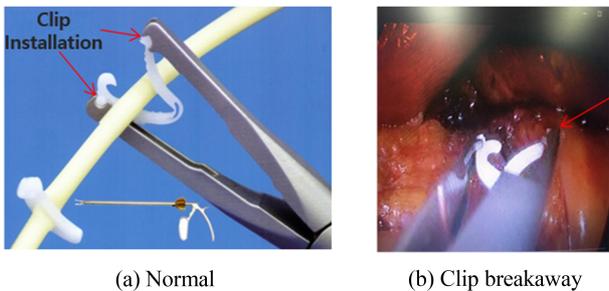


Fig. 2 Normal ligation and clip breakaway due to the excessive clip opening

있다. 또한 클립을 안정적으로 장착하기 위해서 받치고 있는 샤프트 선단부에서의 굽힘 또는 좌굴 변형도 발생할 수 있으며, 이 같은 구조적 문제점들은 수술 시간을 증대시킬 뿐만 아니라 심한 경우 의료 사고로 이어질 수 있는 심각한 문제이기 때문에 개발과정에서 충분히 강건하게 설계되어야 한다.

Figs. 1(a)부터 1(c)는 이 같은 현상의 대표적 사례를 나타낸 것이다. 먼저 Fig. 1(a)는 사용 시간이 경과됨에 따라 조의 폭이 점점 벌어져 클립이 제대로 장착되지 않거나 이탈해 버리는 문제가 발생할 수 있다. 그리고 Fig. 1(b)는 상·하측 조가 좌우로 뒤틀어지는 문제로 조직이나 혈관에 클립을 결찰 시 심한 경우 클립이 제대로 결찰되지 않거나 파손되는 문제가 발생할 수 있다. 그리고 마지막으로 Fig. 1(c)와 같은 굽힘 또는 좌굴 현상은 조와 접촉하는 내측 샤프트의 선단부가 변형되는 문제이므로 트리거를 당겨도 조가 움직이지 않거나 뒤틀리고 벌어지는 등 앞의 두가지 문제들을 복합적으로 발생시키기도 한다[2,3].

Fig. 2는 정상적 체결시와 체결기 조의 벌어짐 현상 때문에 클립이 정상적으로 체결되지 않고 이탈된 상태를 보여주고 있다.

본 연구에서는 앞에서 언급한 3가지 구조적 문제들에 대해서 현재 개발된 혈관 결찰기에서의 문제점들을 개선할 수 있도록 설계변경을 하였으며, 유한요소 해석을 통해 개선 효과를 분석하였다.

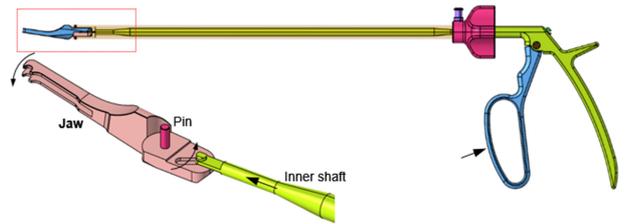


Fig. 3 Geometric shape of the blood vessel ligator and detail view of the shaft tip

## 2. 혈관 결찰기 조(Jaw) 부분의 구조해석

폴리머 클립으로 혈관 체결 시 많이 사용하고 있는 결찰기의 구조를 Fig. 3에 나타내었다. 전체적인 작동 메카니즘은 오른쪽 손잡이 부위 트리거를 당기면 그림의 하단부에서 나타낸 내부 샤프트가 전진하면서 조의 홈을 따라 움직이게 되며, 이때 클립을 체결하는 조 부위는 핀을 중심으로 회전운동 하면서 맞음핀 조와 짝을 이루어 서로 체결하는 구조이다. Fig. 3의 아래에 있는 그림은 체결기 선단부의 상세 내부 구조를 나타낸 것이다.

### 2.1 유한요소 모델 구성

폴리머 클립 체결기의 선단부에 대한 구조적 특성을 계산하기 위해서 유한요소 모델을 구성하였다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 클립을 장착해서 체결하는 조는 내부의 내측 샤프트가 전진함에 따라 상하로 분리된 조가 핀을 기준으로 회전한다.

그리고 외측 샤프트의 음영 부분은 조와의 접촉부위를 나타낸 것이며, 조의 뒤틀림 변형을 줄이기 위해서 개선 모델에서는 접촉부 면적을 증대하였다.

따라서 본 연구에서는 기존 결찰기 구조물의 조 부분 변형을 최소화 하기 위해서 스톱퍼 설치 등 여러 구조들을 검토하였으나 제작의 어려움 등으로 다음과 같이 몇가지 설계 변경을 통해서 효과를 증대시켰다.

먼저 핀의 굽힘 강성을 높이기 위해서 직경을 증대하였으며, 또한 조 부분의 벌어짐을 방지 또는 최소화 하기 위해서 이중핀 구조를 적용하였다. 즉, 기존 핀 외에 또 하나의 핀을 설치함으로써, 이것은 원하는 크기의 거동만 허용하도록 움직임을 구속하는 역할을 하게 된다. 그러나 이것은 좁은 공간에서 또 하나의 핀을 추가하는 구조이므로 제작상의 어려움은 뒤따를 것으로 사료되지만 설계 검토 결과 충분히 설치할 수 있는 여유는 있음을 확인하였다. 그리고 뒤틀림을 줄이기 위해서 비틀림 강성을 향상 할 수 있도록 외측 샤프트와 조 부분의 접촉부 면적을 증대하였다. 한편, 내측 샤프트의 굽힘 변형 또는 좌굴을 방지하기 위해서는 끝부분의 유효길이 축소와 단면적을 증대함으로써 굽힘 강성을 향상하였다.

Fig. 5는 앞에서 문제점으로 나타났던 현상들을 개선하기 위해서 구상한 설계 개념도를 나타낸 것이다.

기존 혈관결찰기는 조가 힌지 핀(제 1핀)을 축으로 벌어지고

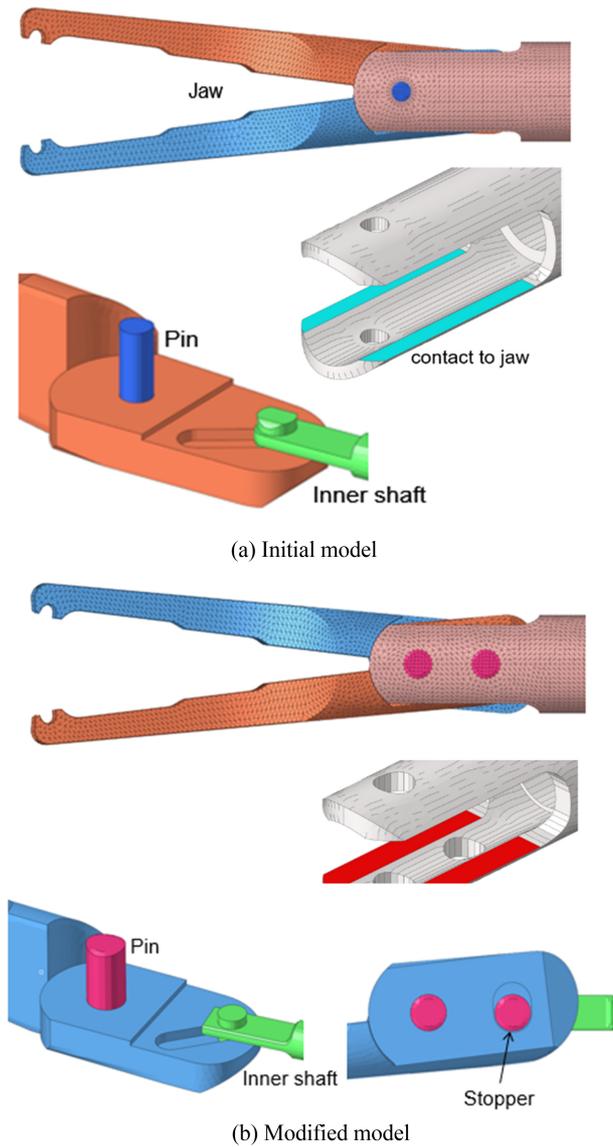


Fig. 4 Finite element model of the jaw part for initial and modified ligator

달히는 구조이므로, 반복 작동에 의해 내측 샤프트 피복과 조흔이 마모될 경우 조가 벌어지거나 틀어지는 현상이 발생할 수 있다. 이러한 현상을 방지하기 위해서 제 1핀의 하단에 조의 열림과 닫힘 폭을 제한하여 더이상 벌어지거나 과도한 힘에 의해 손상이 일어나지 않도록 제 2핀을 추가하였다.

한편, 앞에서 나타난 기존 형상과 설계 변경된 구조물의 유한요소 모델은 대부분 사면체 2차(Parabolic Tetrahedron) 요소를 사용하였으며, 모델 크기는 요소수가 약 169,400개, 그리고 절점수가 약 259,000개이다.

Figs. 4(a)와 같은 초기 모델과 이중 핀 구조를 적용한 개선 모델 4(b)에 대해서 조 벌어짐과 틀어짐, 그리고 내측 샤프트의 좌굴에 관한 비교 해석을 수행하였으며, 해석 모델 구성은 HyperMesh로 하였으며, 구조해석은 ABAQUS 소프트웨어를 이용하였다[4,5].

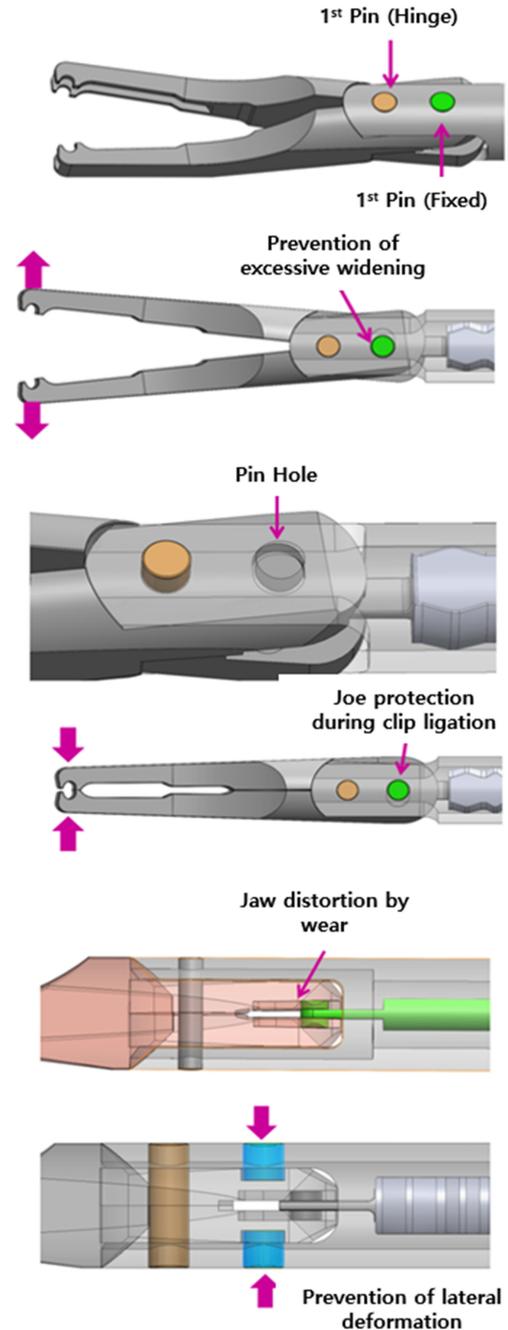


Fig. 5 Design concept of the modified ligator

2.2 유한요소 해석 결과

폴리머 클립 혈관결찰기의 클립 체결 시 가장 중요한 조에서의 여러가지 결합 강성들을 계산하였다.

먼저, 사용 빈도가 많아짐에 따라 점점 폭이 커져서 클립이 제대로 장착되지 않거나 이탈되는 현상이 발생하므로 이를 최소화하기 위해 적용한 이중 핀 모델의 효과를 분석하였다.

Fig. 6은 초기 모델과 개선 모델의 결과값을 보여주고 있다. 그림에서 나타난 강성의 크기는 설계 변경에 따른 Jaw 전체 구조물의 횡강성(Global Lateral Stiffness)를 의미하며, 아래

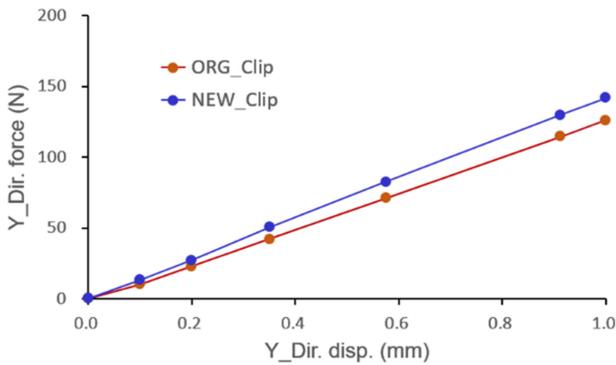
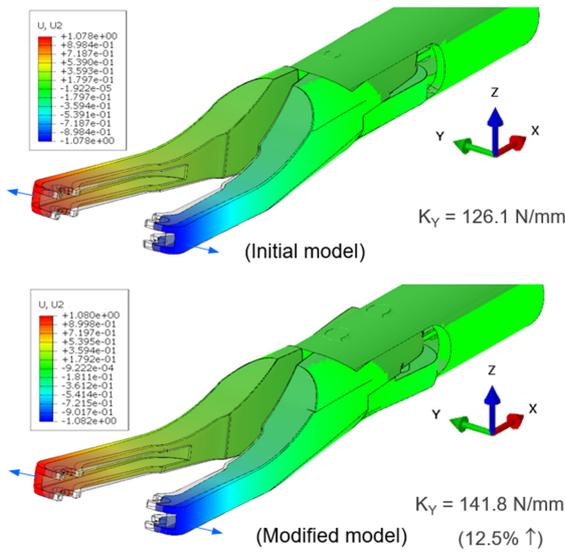


Fig. 6 Lateral stiffness of the initial and modified jaw parts of the blood vessel ligator

그래프에서 보는 바와 같이 횡방향 벌어짐 결합강성은 이중핀의 적용으로 약 12.5% 개선된 결과를 나타낸다.

다음은 조가 상하로 비틀어지는 현상으로 이를 개선하기 위해서 이중핀 구조뿐만 아니라 접촉면의 증대를 하였으며, Fig. 7은 상하 비틀림 강성의 크기를 나타낸 것이다. 설계변경 모델이 초기 모델 대비 약 10.2%의 개선된 효과를 나타내고 있다.

마지막으로 설계변경 전후의 샤프트 선단부 굽힘과 좌굴력 크기를 비교하였다.

Fig. 8은 내측 샤프트의 선단부 구조를 비교한 것이다. 단면적의 크기는 비슷하지만 샤프트 피벗과의 거리를 줄임으로써 굽힘 강성을 증대하였다.

먼저, 좌굴 하중은 탄성과 소성변형을 고려해서 구하였으며, Merchant-Rankine 관계식은 아래와 같다.

$$P_{cr} = \left[ \left( \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2} \right) + (A\sigma_y)^{-1} \right]^{-1} = \left[ \frac{1}{P_{cr}^{(e)}} + \frac{1}{P_{cr}^{(p)}} \right]^{-1} \quad (1)$$

여기서, E는 재료의 탄성계수, I는 단면 2차모멘트, L은 선단부 길이, 그리고  $\sigma_y$ 는 재료의 항복강도를 나타낸다.

Fig. 9는 좌굴해석 결과를 나타낸 것이다. 초기모델 대비

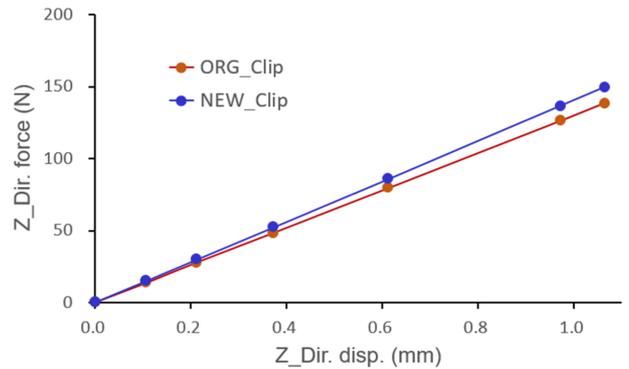
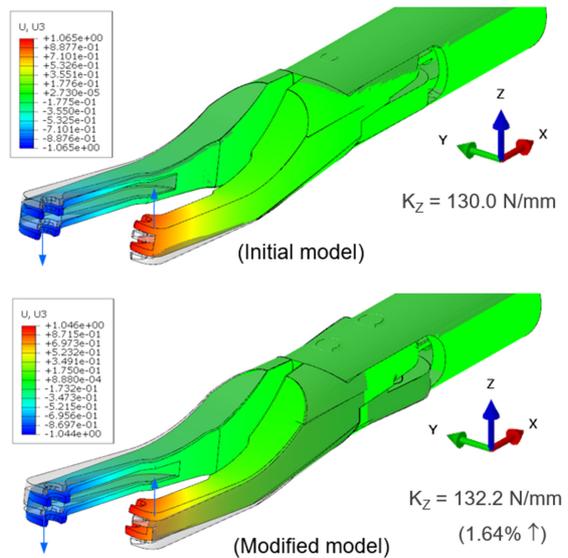


Fig. 7 Twisting stiffness of the initial and modified jaw parts of the blood vessel ligator

개선모델의 경우 임계 좌굴하중의 크기가 약 7.2% 개선된 크기를 나타내고 있다.

마지막으로 내측 샤프트 선단부의 굽힘 강성의 크기를 비교하였다.

Fig. 10은 횡방향 단위 하중 작용 시의 변형 및 응력크기를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 응력 크기도 개선모델의 경우 초기모델 대비 약 25% 감소하고 있으며, 굽힘강성은 선단부 피벗까지의 길이 감소로 인해서 약 58% 증가한다. 이것은 단면적이 균일할 경우 굽힘 강성이 길이의 세제곱에 반비례한다는 것으로부터 쉽게 유추할 수 있을 것이다.

### 3. 결론

본 연구에서는 클립 혈관결찰기에서 쉽게 발생할 수 있는 구조적 문제점과 설계변경에 따른 개선효과를 구조해석을 통해 분석하였으며, 다음과 같다.

- 현재 사용 중인 결찰기 조(Jaw) 부분의 문제점들을 개선하기

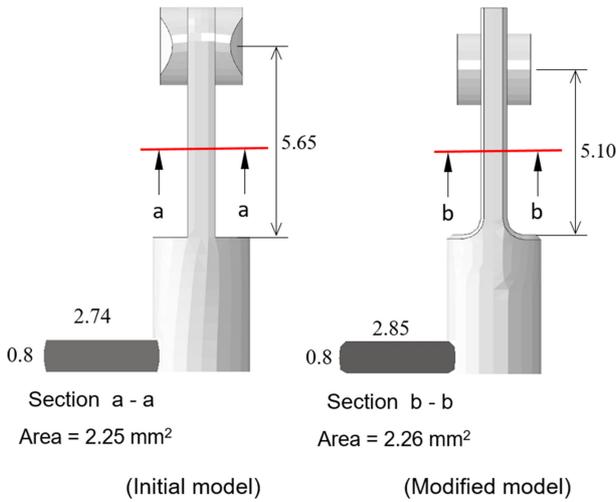


Fig. 8 Inner shaft tip of the initial and modified model

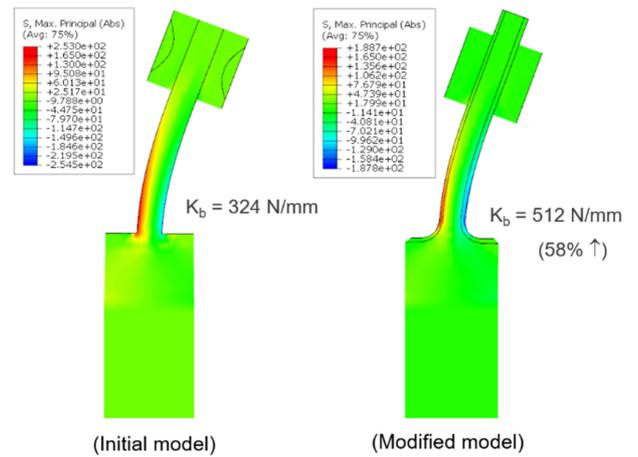


Fig. 10 Bending stiffness of the initial and modified inner shaft tip

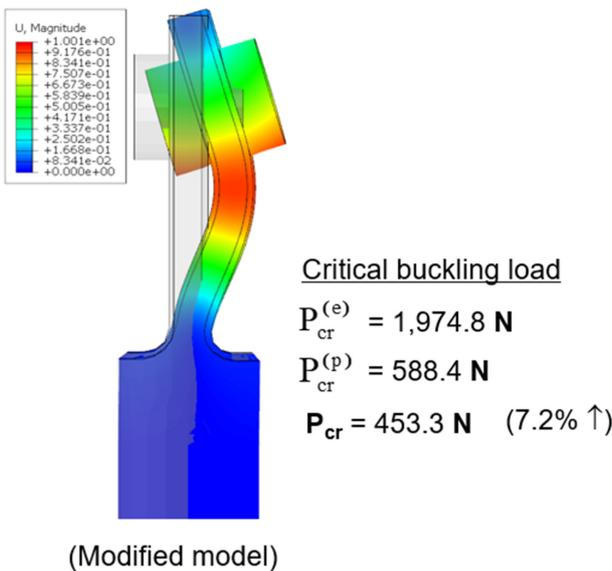
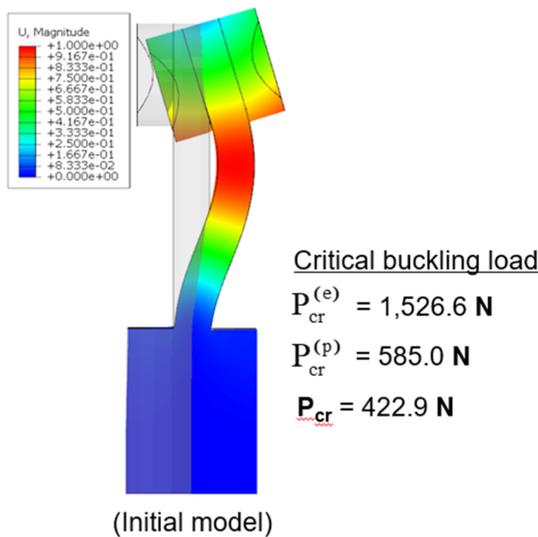


Fig. 9 Critical buckling load of the initial and modified

위해서 핀의 직경 증대와 이중핀 적용, 그리고 접촉면 증대 및 내측 샤프트 (Inner Shaft) 선단부의 구조 변경을 하였다.

- 결찰기 조에서의 횡방향 벌어진 강성은 2중핀의 적용으로 상당히 개선된 결과를 얻었다. 이것은 2중핀에 의해 조 부분의 벌어진 정도가 일정 구간 이상의 방지 또는 최소화 할 수 있는 효과를 나타내기 때문이다.

- 구조 개선에 따른 상하 조의 비틀림 강성은 접촉면의 증대에 따라 초기 모델 대비 많이 개선된 효과를 얻을 수 있었다.

- 내측 샤프트 선단부의 좌굴 현상과 굽힘 변형을 향상하기 위해서 구조를 변경한 결과, 각각 초기모델 대비 많이 크게 개선된 효과를 얻을 수 있었으며, 이것은 샤프트의 선단부 길이 감소와 면적의 증대에 따른 결과이다.

**ACKNOWLEDGEMENT**

본 연구는 2022년도 중소벤처기업부의 기술개발사업 지원에 의한 연구임[S3056199].

**REFERENCES**

- Hsu, J. L., Korndorffer Jr, J. R., Brown, K. M., (2015), Design of vessel ligation simulator for deliberate practice, Journal of Surgical Research, 197(2), 231-235.
- Kang, B. R., Park, A. R., Kim, K. T., Kim, S. T., Lee, D. H., (2020), A study on the usability of the vascular bursting pressure test as a method of performance evaluation of vessel sealing, Journal of Biomedical Engineering Research, 41(5), 210-218.
- Harold, K., Pollinger, H., Matthews, B., Kercher, K., Sing, R., Heniford, B., (2003), Comparison of ultrasonic energy, bipolar thermal energy, and vascular clips for the hemostasis of small-, medium-, and large-sized arteries, Surgical Endoscopy and Other

Interventional Techniques, 17(8), 1228-1230.

4. Altair Engineering, Inc., (2021), Altair Hyperworks 2021. <https://altair.com/resource/hyperworks-2021>
5. ABAQUS, Inc., (2022), ABAQUS analysis user's manual.



**Sung Ho Han**

Researcher at Yuwon Meditech R&D Center.

He received his bachelor's degree in mechanical engineering from Kanazawa University, Japan.

His research interests are in the development of laparoscopic surgical instruments.

E-mail: [shhan@yuwonmeditech.com](mailto:shhan@yuwonmeditech.com)



**Bok Lok Choi**

Professor in the Department of Automotive Engineering, Gangneung-Wonju National University. His research areas are structural analysis and design, TME, and composite materials.

E-mail: [blchoi@gwnu.ac.kr](mailto:blchoi@gwnu.ac.kr)

# 효율적인 유수분리를 위한 폴리프로필렌 심층 필터의 극친수성 개질에 관한 연구

## Superhydrophilic Modification of a Polypropylene Depth Filter for Efficient Oil–water Separation

박홍렬<sup>1</sup>, 이정원<sup>2</sup>, 김성민<sup>1</sup>, 김기환<sup>1</sup>, 김영건<sup>3</sup>, 황운봉<sup>1,#</sup>  
Hong Ryul Park<sup>1</sup>, Jeong-Won Lee<sup>2</sup>, Seongmin Kim<sup>1</sup>, Kihwan Kim<sup>1</sup>, Yeonggeun Kim<sup>3</sup>, and Woonbong Hwang<sup>1,#</sup>

<sup>1</sup> 포항공과대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Pohang University of Science and Technology)

<sup>2</sup> 조선대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Chosun University)

<sup>3</sup> 포항공과대학교 창의IT융합공학과 (Department of Convergence IT Engineering, Pohang University of Science and Technology)

# Corresponding Author / E-mail: [whwang@postech.ac.kr](mailto:whwang@postech.ac.kr), TEL: +82-54-279-2174

ORCID: 0000-0001-9072-9732

KEYWORDS: Superhydrophilic (극친수성), Polypropylene (폴리프로필렌), Depth filter (심층 필터), Plasma treatment (플라스마 처리), Dip coating (딤 코팅), Oil–water separation (유수분리)

*Purification of water through oil–water separation is essential for preserving the ecosystem and protecting human health. Although a conventional polypropylene depth filter can effectively purify water, modifying the wettability of a filter for oil–water separation is difficult owing to its low reactivity. In this study, we developed a superhydrophilic polypropylene filter with a hydrogel layer that could enable effective oil–water separation by using plasma treatment and dip coating, which enabled an even distribution of the coating solution across the filter. The fabricated filter was superhydrophilic with a water contact angle of 0°. It showed a high repulsive force with oil in water with an underwater oil contact angle of 142.9°. When such filter was applied to an oil–water separation device, it effectively purified water with low oil content (< 15 ppm) at a flow rate of 300 mL/min. These results demonstrate potential applications of such filters in areas such as wastewater treatment and oil spill cleanup.*

Manuscript received: March 17, 2023 / Revised: May 5, 2023 / Accepted: May 10, 2023

### 1. Introduction

Oil–water separation is a crucial process in several industrial and environmental applications. The mixing of oil and water in industrial processes can lead to severe issues, such as equipment corrosion, contamination, and reduced efficiency, resulting in increased operational costs and environmental hazards. Furthermore, industrial and domestic wastewater, and marine oil spills can severely pollute the environment and adversely affect human health and ecosystems [1-5]. Therefore, efficient and sustainable oil–water separation technologies must be developed to meet the growing demand for clean water and protect the

environment.

In recent years, superhydrophilic and superhydrophobic surfaces have gained significant attention in the field of oil–water separation [6-14]. Superhydrophilic surfaces have a high affinity for water, allowing the water to spread and form a thin film while repelling oil. In contrast, hydrophobic surfaces have a low affinity for water and a high affinity for oil, forming an oil layer on the surface to repel water. Various methods can be used to produce extremely hydrophilic and hydrophobic surfaces, such as changing the surface roughness of a substrate or applying a wettability modification coating.

Depth filters, which are commercially used to remove impurities

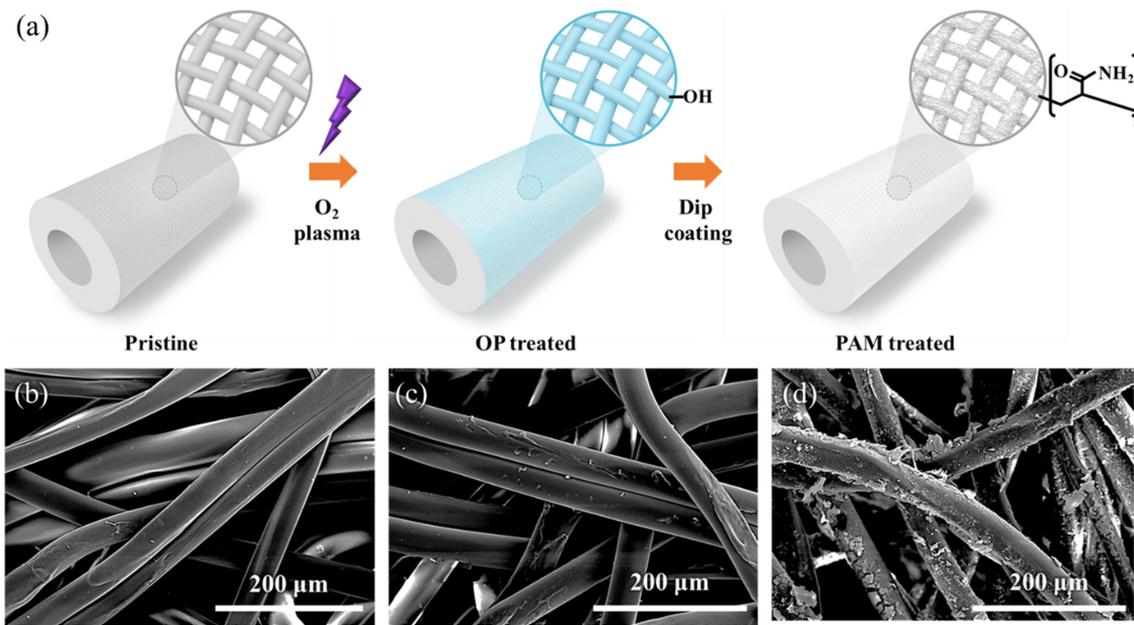


Fig. 1 (a) Schematic of the PAM-coated filter fabrication process (b), (c), and (d) SEM images

from wastewater, comprise tens to hundreds of porous layers. Depth filters are more resistant to impurity penetration and show superior filtering performance at higher pressures than single-membrane filters [15]. However, they are usually made of polypropylene or polyethylene, which have low surface energy and reactivity [16]. Consequently, modifying their surface wettability is difficult. Recently, an extremely hydrophilic depth filter with a polyacrylamide (PAM) hydrogel coating was fabricated by physically coating polyimide (PI) on the depth filter and chemically bonding it with 1-methyl-2-pyrrolidone (NMP)/N'-dicyclohexylcarbodiimide (DCC) and acrylamide (Am) [17]. However, PI and NMP/DCC have harmful effects on the human body and require several hours to fabricate.

This study presents a superhydrophilic filter that can be quickly fabricated without the use of harmful chemicals. Plasma treatment was used to increase the surface energy of the polypropylene-based depth filter. Subsequently, a hydrogel layer was formed through PAM polymerization to produce an extremely hydrophilic depth filter. The fabricated filter had a contact angle of  $0^\circ$  with water and showed a high repulsive force with oil in water with an underwater oil contact angle of  $142.9^\circ$ . By applying this filter to a continuous oil-water separation device, an oil-water separation device that can continuously separate water and oil was manufactured; the amount of oil in the water was less than 15 ppm up to a flow rate of 300 mL/min. These results show that the developed filter has a high economic and environmental value and can quickly separate clean water in various industries and environments where oil-water separation is necessary.

## 2. Experimental Section

### 2.1 Materials

The polypropylene depth filter (with a nominal pore size of 10  $\mu\text{m}$ ) used in this study was obtained from CS Technofil Co. Ltd. (Korea). N,N'-methylenebisacrylamide (BIS) and ammonium persulfate (APS) were purchased from Samchun Chemical (Korea), while Oil Red O was obtained from Sigma-Aldrich (USA). Diesel was purchased from SK Energy (Seoul, South Korea).

### 2.2 Fabrication of the Superhydrophilic Filter

To increase the surface energy of the hydrophobic polypropylene filter, plasma treatment was performed before coating a PAM hydrogel layer onto the depth filter. The AP-300 Plasma System (Nordson, U.S.) was used for plasma treatment; the reactor's internal pressure and discharge power set to 80 mTorr and 150 W, respectively. The treatment time was 6 min, and the oxygen supply rate was set to 20 sccm. After the plasma treatment, the polypropylene filter was immersed in a  $65^\circ\text{C}$  coating solution (with 60 mM BIS and 90 mM APS) for 1 h. Finally, the treated filter was washed three times with deionized water and dried in an oven at  $65^\circ\text{C}$ .

### 2.3 Characterization

The surface morphologies were observed using field-emission scanning electron microscopy (SEM; SU6600, Hitachi, Japan), and the surface chemical compositions were analyzed using Fourier

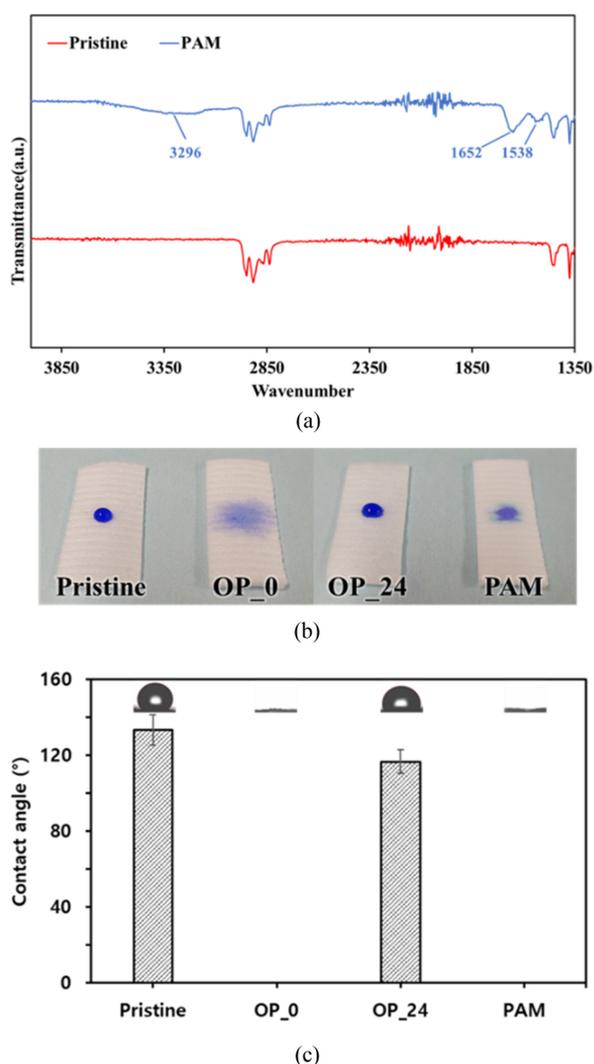


Fig. 2 (a) FT-IR spectra of the pristine- and PAM-treated surfaces. (b) Photograph of water droplets during the coating process. (c) Changes in the water contact angle of the filter surface during the coating process

transform infrared spectroscopy (FT-IR; Nicolet iS50, Thermo Fisher Scientific Co., USA). The water contact angles and underwater oil contact angles were measured using a contact angle analysis device (SmartDrop, Femtofab Co., Korea), and the reported water and oil contact angles were the average values of five experimental points. Diesel was used as the oil layer in all the experiments. Each filter was treated with 2 L of an oil–water mixture (at a ratio of 1:4 v/v) at various flow rates. An oil–water separation device consisting of a peristaltic pump (WT600-1F, Dongbang Hitech Inc., Korea), pressure controller (PCR series, Alicat Scientific, USA), differential pressure transmitters (HN35, Nuritech, Korea), pressure indicators (PD1, Nuritech, Korea), and flow control valves (HF 400S, Tokimec, Korea) was constructed to treat large amounts of oil–water mixtures. The flow rate of the oil–

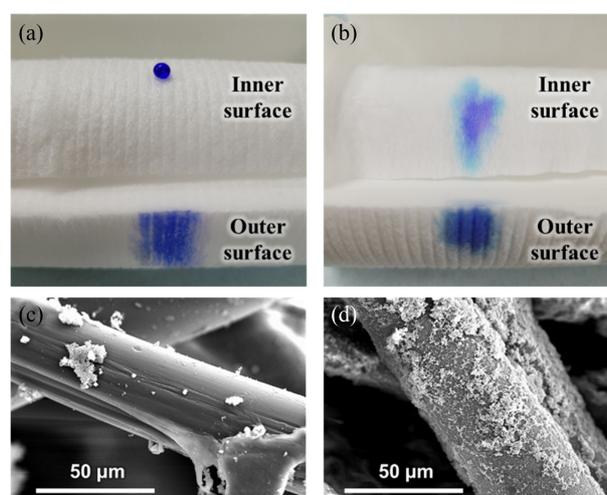


Fig. 3 Photograph of water droplets on inner and outer surfaces of PAM-treated depth filters (a) without plasma treatment and (b) with plasma treatment. SEM images of the inner surface of PAM-treated depth filters (c) without plasma treatment and (d) with plasma treatment

water mixture was regulated using a peristaltic pump (100 mL/min). The oil content of the samples was determined using a total organic carbon analyzer (TOC-L, Shimadzu, Japan), whereas the water content was measured using a coulometric KF titrator (C10S, Mettler Toledo, Switzerland).

### 3. Results and Discussion

#### 3.1 Fabrication of the Superhydrophilic Depth Filter

Figure 1(a) illustrates the fabrication method of the polypropylene filter with the polyacrylamide-based hydrogel layer. First, the polypropylene depth filter was treated with plasma to increase its wettability for deep coating. Figures 1b and 1c show the SEM images of the filters treated with pristine and O<sub>2</sub> plasma (OP), respectively. The surface of the filter fiber does not significantly change after plasma treatment. Subsequently, the OP-treated filter was dip-coated in a solution containing APS (a radical source) and BIS (a crosslinker). The alkene moieties of BIS are radical initiators, and radical polymerization occurs via APS. During polymerization, hydrophilic polymer groups surrounded and coated the filter fibers, resulting in a well-coated hydrophilic on the filter surface, as shown in Figure 1(d).

#### 3.2 Wetting Characteristics of a Superhydrophilic Depth Filter

The surface components of the substrate were analyzed using FTIR before and after coating with PAM. New peaks at 1538 (C =

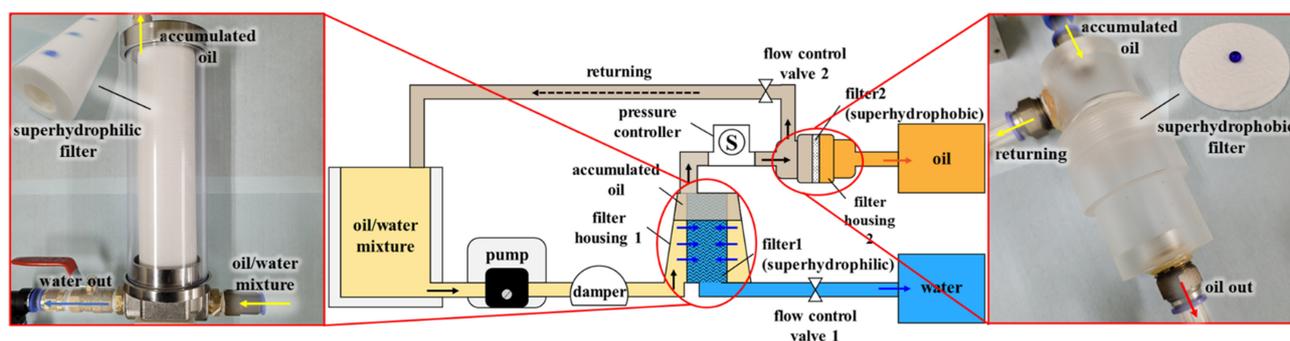


Fig. 4 Schematic of the oil-water separation device composed of a superhydrophilic and superhydrophobic filter

O), 1652 (C = O), and 3296  $\text{cm}^{-1}$  (N-H) were observed after PAM coating, in contrast to the pristine state, indicating the successful coating of hydrophilic groups on the filter surface (Fig. 2(a)).

Water contact angles were measured on the filter surface at various fabrication stages. The pristine filter showed high hydrophobicity with a contact angle of  $133.4 \pm 8.0^\circ$  owing to the hydrophobic nature of polypropylene and the micro-sized filter fibers. After OP treatment, the contact angle of the filter (OP\_0) was measured to be  $0^\circ$  owing to the formation of temporary OH groups on the filter surface, which can be attributed to the plasma. However, the hydrophilic property imparted to the filter by plasma treatment was unstable, and the contact angle after 24 h of plasma treatment was  $116.6 \pm 6.3^\circ$ , indicating a partial restoration of the hydrophobicity observed before plasma treatment [18,19]. In the case of the filter with the PAM hydrogel layer formed after plasma treatment, superhydrophilicity with a contact angle of  $0^\circ$  was observed, possibly because of the hydrophilic nature of the microstructured fibers and PAM-modified filter. Furthermore, the PAM-modified filter had an underwater oil contact angle of  $142.9 \pm 7.0^\circ$  and exhibited a high repulsive force with oil in water.

### 3.3 Importance of Plasma Treatment

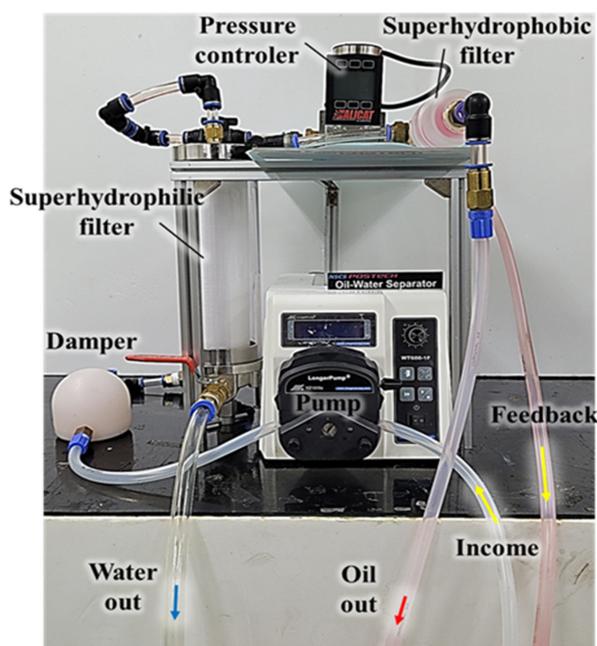
To investigate the effect of plasma treatment on hydrogel coating, we compared filters that were deep-coated with and without plasma treatment. Figures 3(a), 3(b) water droplets on the filters without and with plasma treatment, respectively. We compared their wettability by dropping blue dye on the outside and inside of the filter surfaces. Both filters showed a good hydrophilic coating on the outer surface. However, the filter without plasma treatment showed hydrophobicity on the inside because of the inability of the coating solution to penetrate the filter fibers owing to the hydrophobic nature of polypropylene. Moreover, the SEM image of the filter without plasma treatment suggest that the PAM hydrogel material was barely coated (Figure 3(c)). In contrast, the

filter with plasma treatment showed an evenly distributed hydrogel coating on the filter fibers, thereby confirming the necessity of plasma treatment for an evenly coated hydrophilic depth filter.

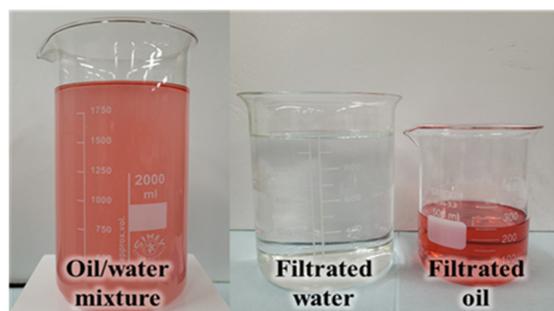
### 3.4 Oil-water Separation Using a Superhydrophilic Filter

To evaluate the performance of oil-water separation in a continuous oil-water separation system, the system was designed as depicted in Figure 4. The oil-water mixture is pumped into filter housing 1, and purified water is discharged through a superhydrophilic depth filter. The pressure controller maintains pressure on the hydrophilic filter and discharges the accumulated oil to the top. The oil is purified by the superhydrophobic glass fiber (GF) filter in filter housing 2. To fabricate the superhydrophobic GF filter, GF filter was plasma-treated and coated with octadecyltrichlorosilane using a previously reported method [20]. The mixture that is not filtered by the superhydrophilic PAM and GF filters returns to the original oil-water mixture via the return pipe. The fluid undergoes a circulation process in the system, and returns to the original oil-water mixture through the return pipe, thereby continuously separating water and oil.

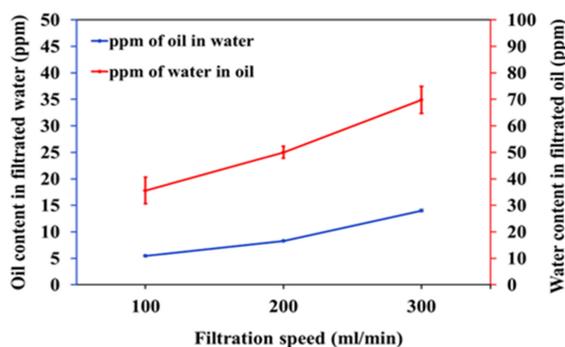
An actual photograph of the oil-water separation system is presented in Figure 5(a). In this experiment, the oil-water mixture was separated into water and oil at various flow rates, and the purities of water and oil were measured when 1 L of water and 250 mL of oil were produced. The oil-water mixture before separation and the separated water and oil are shown in Figure 5(b). The purified water had a purity of 5.46 ppm at 100 mL/min, 8.27 ppm at 200 mL/min, and 14.02 ppm at 300 mL/min, demonstrating an excellent separation performance of less than 15 ppm. Additionally, the oil was continuously separated with high purity, with 35.60 ppm at 100 mL/min, 50.04 ppm at 200 mL/min, and 69.82 ppm at 300 mL/min. Therefore, the proposed system based on a superhydrophilic depth filter is suitable for oil-water separation in various applications.



(a)



(b)



(c)

Fig. 5 Photographs of (a) the oil-water separation device used in the study and (b) oil and water before and after filtering. (c) oil content of the filtrated water and water content of the filtrated oil

#### 4. Conclusions

In this study, we successfully developed a superhydrophilic

depth filter based on PAM hydrogel coating treated with O<sub>2</sub> plasma (OP) and applied it to an oil-water separation system to obtain high-purity water and oil. Plasma treatment and hydrogel coating showed excellent performances in modifying the wettability of the polymer surface; however, the plasma treatment yielded a temporary coating, while hydrogel coating was not adequately deep. However, when plasma treatment and dip coating were simultaneously performed, excellent hydrophilic properties were imparted to both the inside and outside of the hydrophobic depth filter; thus, an oil-water separation system was developed using this filter. Because the mixture before separation in this study had more water than oil, a large amount of water was primarily removed by the superhydrophilic depth filter. However, if the proportion of oil is greater than that of water, the separation rate may decrease or the content of oil in the separated water may increase. Therefore, if a superhydrophobic depth filter is developed and an oil-water separation system employing the superhydrophilic depth filter is formed, a system capable of selectively and quickly separating high-purity water and oil regardless of the ratio of water to oil can be developed. We expect this oil-water separation system based on wettability-modified depth filters to be applied in various industrial and environmental fields, such as wastewater treatment and marine oil spills.

#### ACKNOWLEDGEMENT

This work was financially supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (NRF-2021R1A2C2008600).

#### REFERENCES

- Adham, S., Hussain, A., Minier-Matar, J., Janson, A., Sharma, R., (2018), Membrane applications and opportunities for water management in the oil & gas industry, *Desalination*, 440, 2-17.
- Joye, S. B., (2015), Deepwater horizon, 5 years on, *Science*, 349(6248), 592-593.
- Atlas, R. M., Hazen, T. C., (2011), Oil biodegradation and bioremediation: A tale of the two worst spills in US history, *Environmental Science & Technology*, 45, 6709-6715.
- Ji, Z.-G., Johnson, W. R., Wikel, G. L., (2014), Statistics of extremes in oil spill risk analysis, *Environmental Science & Technology*, 48(17), 10505-10510.
- Wang, L. K., Hung, Y. T., Shammass, N. K., (2006), *Advanced physicochemical treatment processes*, Humana Press.

6. Gupta, R. K., Dunderdale, G. J., England, M. W., Hozumi, A., (2017), Oil/water separation techniques: A review of recent progresses and future directions, *Journal of Materials Chemistry A*, 5(31), 16025-16058.
7. Yu, J., Cao, C., Pan, Y., (2021), Advances of adsorption and filtration techniques in separating highly viscous crude oil/water mixtures, *Advanced Materials Interfaces*, 8(16), 2100061.
8. Yu, Z., Ni, J., Fang, L., Wu, D., Zhu, H., (2015), Multilayer three-dimensional structure made of modified stainless steel mesh for in situ continuous separation of spilled oil, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 54(47), 11838-11843.
9. Rasouli, S., Rezaei, N., Hamed, H., Zendehboudi, S., Duan, X., (2021), Superhydrophobic and superoleophilic membranes for oil-water separation application: A comprehensive review, *Materials & Design*, 204, 109599.
10. Chen, C., Weng, D., Mahmood, A., Chen, S., Wang, J., (2019), Separation mechanism and construction of surfaces with special wettability for oil/water separation, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 11(11), 11006-11027.
11. Cho, H., Liu, G., Zhang, Z., Qiao, P., Shan, Z., Hwang, W., (2015), An effective method for separation of oil and water using superhydrophobic/superoleophilic aluminum mesh, *Science of Advanced Materials*, 7(12), 2623-2627.
12. Hong, S. K., Bae, S., Jeon, H., Kim, M., Cho, S. J., Lim, G., (2018), An underwater superoleophobic nanofibrous cellulosic membrane for oil/water separation with high separation flux and high chemical stability, *Nanoscale*, 10(6), 3037-3045.
13. Woo, S., Cho, H., Park, J., Shin, Y., Hwang, W., (2020), A novel approach to designing a biomimetic wettable patterned surface for highly efficient and continuous surfactant-free oil emulsion separation, *Separation and Purification Technology*, 248, 116864.
14. Kim, S., Woo, S., Park, H. R., Hwang, W., (2021), One-step versatile fabrication of superhydrophilic filters for the efficient purification of oily water, *ACS Omega*, 6(4), 3345-3353.
15. Purchas, D., Sutherland, K., (2002), *Handbook of filter media*. Elsevier.
16. Pieracci, J. P., Armando, J. W., Westoby, M., Thommes, J., (2018), Industry review of cell separation and product harvesting methods, *Biopharmaceutical Processing*, 165-206.
17. Kim, S., Cho, H., Hwang, W., (2021), Robust superhydrophilic depth filter and oil/water separation device with pressure control system for continuous oily water treatment on a large scale, *Separation and Purification Technology*, 256, 117779.
18. Han, Y. R., Andisetiawan, A., Kim, J. H., Yoon, J. S., Choi, D. S., Yoo, Y. E., (2015), An experiment investigation on the duration of the hydrophilic effects of the plasma treatment, *Proceedings of the Korean Society for Precision Engineering 2015 Spring Conference*, 830-831. <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE06364577>
19. Vesel, A., Junkar, I., Cvelbar, U., Kovac, J., Mozetic, M., (2008), Surface modification of polyester by oxygen-and nitrogen-plasma treatment, *Surface and Interface Analysis*, 40(11), 1444-1453.
20. Woo, S., Park, H. R., Park, J., Yi, J., Hwang, W., (2020), Robust and continuous oil/water separation with superhydrophobic glass microfiber membrane by vertical polymerization under harsh conditions, *Scientific Reports*, 10(1), 21413.

**Hong Ryul Park**

Ph.D. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Pohang University of Science and Technology. His research interest is nanostructured system and wettability modification.

E-mail: rseabc@postech.ac.kr

**Jeong-Won Lee**

Professor in the Department of Mechanical Engineering, Chosun University. His research interest is surface engineering.

E-mail: jwlee07@chosun.ac.kr

**Seongmin Kim**

Now postdoctoral research associate in the Department of Aerospace and Mechanical Engineering, University of Notre Dame, U.S. His research interest is the design of functional nanostructures and their applications.

E-mail: skim53@nd.edu

**Kihwan Kim**

Ph.D. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Pohang University of Science and Technology. His research interest is nanostructured system and wettability modification.

E-mail: kihwan@postech.ac.kr

**Yeongeun Kim**

Ph.D. candidate in the Department of Convergence IT Engineering, Pohang University of Science and Technology. His research interest is ultrasound scattering analysis based on the high frequency imaging.

E-mail: gun9509@postech.ac.kr

**Woonbong Hwang**

Professor in the Department of Mechanical Engineering, Pohang University of Science and Technology. His research interest is nanostructure application.

E-mail: whwang@postech.ac.kr



# 우산형 마이크로 딴플을 적용한 웨어링의 발열저감 특성

## Heat Reduction Characteristics of Wear Ring with Umbrella-type Micro-dimple

윤영찬<sup>1</sup>, 이택성<sup>2,#</sup>  
Young Chan Yoon<sup>1</sup> and Taek Sung Lee<sup>2,#</sup>

<sup>1</sup> (주)에스제이테크 기술연구소 (Institute of Technology, SJ Tech Co., Ltd.)  
<sup>2</sup> 한국공학대학교 기계설계공학부 (School of Mechanical Design Engineering, Tech University of Korea)  
# Corresponding Author / E-mail: [Its724@tukorea.ac.kr](mailto:Its724@tukorea.ac.kr), TEL: +82-31-8041-0423  
ORCID: 0000-0002-8682-2018

KEYWORDS: Wear ring (웨어링), Reduction of friction heat (마찰열 저감), Umbrella shaped dimple (우산형 딴플), Pin on disc experiment (핀 온 디스크 실험), Polyamide (폴리아미드), Glass fiber (유리 섬유)

*For the hydraulic cylinder system of construction equipment to function normally, the hydraulic oil should not leak under high pressure, and the leakage begins with various seals of damage. The frictional heat caused by the reciprocating motion inside the cylinder increases the temperature of the oil, which affects the aging of the seal materials inside the cylinder, thereby accelerating seal damage. The purpose of this study is to confirm the effect of reducing heat generation by applying umbrella-type micro-dimples on the surface of a wear ring, and to find out the performance according to changes in shape and density of the dimples. Dimples were manufactured by injection molding and the core for injection was made by profile grinding processing. The structural safety of the wearing with dimples was examined by structural analysis, and the temperature changes of the dimple were measured during pin-on-disc friction experiments. It was confirmed that the dimple was effective in reducing the amount of heat generated, and the heat generation decreased as the size and density of the dimple increased.*

Manuscript received: April 16, 2023 / Revised: June 5, 2023 / Accepted: June 14, 2023

### NOMENCLATURE

$D_s$	=	Dimple Size
$\rho$	=	Density of Dimpled Area
$D_p$	=	Dimple Pitch
N	=	Dimple Number
$A_t$	=	Area of Total Friction Surface
$A_d$	=	Dimpled Area among Friction Surface

### 1. 서론

고압유체를 사용하는 산업설비와 건설 중장비 등에 사용되는

유압 시스템의 경우, 유압 액추에이터는 작동유(Oil)에 의하여 압력을 전달하는데 작동유의 밀봉 역할을 하는 시일(Seal)이 장치의 성능을 좌우한다. 시일의 기밀 유지가 안될 경우 장비의 떨림과 운전 조정에 문제가 발생하게 되어 사고로 이어지며, 시일 누유의 주요 원인은 고온/고압 조건에서 지속적인 피스톤의 왕복작동으로 인해 발생하는 마찰열의 영향에 의한 시일재료의 노화 현상이며 이는 시일의 팽윤현상, 크랙발생, 마멸현상을 가속화시켜서 액추에이터의 손상을 일으킨다.

유압 실린더의 밀봉 및 왕복운동 구조는 Fig. 1과 같으며 피스톤의 직선왕복 운동을 안내하는 실린더 튜브, 유입된 오일을 이용하여 피스톤에서 발생된 힘을 외부로 전달하여 외부의 기계적 일을 하는 피스톤 로드, 실린더와 피스톤 사이에서 내부누설을 방지하는 피스톤 시일, 실린더 외부로 기름이 누설되는 것을

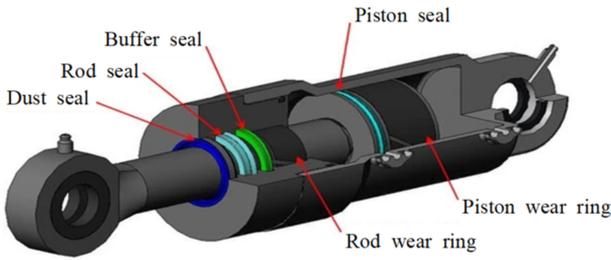


Fig. 1 Wear ring and seal position in hydraulic cylinder

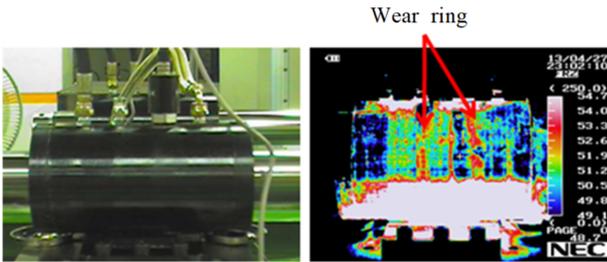


Fig. 2 Temperature distribution measured during hydraulic cylinder operation

방지하는 로드 시일, 외부에서 이물질의 유입을 막는 더스트 시일, 피스톤과 실린더 튜브의 금속면이 접촉하여 마모되는 것을 방지하고 시일에 작용하는 과부하나 편마모를 방지하기 위한 웨어링(Wear Ring)으로 구성되어 있다.

유압 실린더 작동 시에 발생하는 열에 의한 온도 분포를 촬영한 사진(Fig. 2)에서 보듯이 웨어링에서 온도가 높은 것이 관찰되었다. 웨어링에서 발생하는 마찰열을 줄이기 위하여 실린더 표면을 매끈하게 하는 램핑 또는 슈퍼피니싱 가공을 하며, 표면에 딤플을 가공하는 연구는 마찰열에 대한 것보다 주로 베어링의 하중 지지 성능을 개선하고 마찰력을 줄이는 연구가 발표되고 있다.

국외 연구로는 Etsion [1-4]이 기계적 시일(Mechanical Seal)과 스러스트 베어링(Thrust Bearing)에 레이저 가공을 사용하여 반구 형태의 미세 딤플을 가공하면 표면에 작용하는 마찰력을 감소시키고 수명은 증가된다고 하였다. Rahmani [5]는 딤플의 수와 깊이, 딤플의 길이비, 높이비에 따른 최적화 조건을 도출하였다. Sahlin [6]은 반구 형태의 딤플의 효과 및 레이놀즈(Reynolds)수에 따른 베어링 하중에 미치는 영향을 분석하여 레이놀즈수 및 딤플 폭이 커질수록 하중이 커지며 미세 딤플의 깊이와 폭이 커질수록 마찰력이 감소함을 확인하였다. Mitidieri 등[7]은 딤플의 크기 및 위치에 따른 딤플의 효과를 분석하였고 두 마찰면이 평행에 가까울수록 딤플 내의 압력저하가 크게 발생하고 이로 인한 캐비테이션 현상의 발생을 수치해석적으로 확인하였다. Fowell 등[8]은 딤플 내의 압력이 입구 압력보다 낮아질 경우 두 구역의 압력 차에 의해 딤플의 윤활액 흡입 효과가 발생하며, 이로 인해 윤활액의 유량이 증가하여 지지압력이 발생하는 것으로 딤플의 효과를 설명하였다.

국내에서는 Lee 등[9]이 텍스처링(Texturing)한 미끄럼 베어링의 열유체 윤활특성을 연구하여 미세딤플에 의해 점성 마찰이

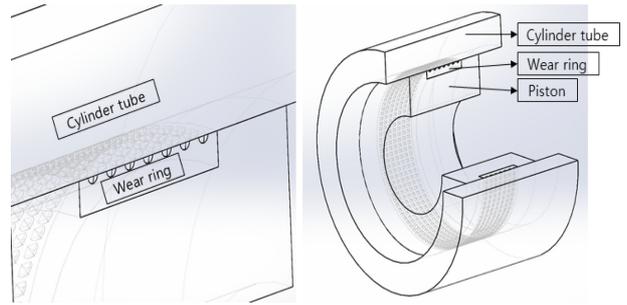


Fig. 3 Surface with dimples on the wear ring in cylinder

감소하여 베어링의 온도발생이 감소하였다고 하였다. Chae 등 [10]은 혼합 윤활조건 및 수력학적 영역에서의 마이크로 딤플 패턴의 밀도에 따른 마찰거동을 연구하였고, 하중 범위에 따라 딤플의 최적 밀도가 존재하는 것을 증명하였다. 또한 Kim 등[11]은 그리스를 유막으로 사용하는 경우에 대해 미세 딤플의 영향을 분석하여 하중이 높고 회전속도가 느릴 때 딤플 효과가 크다는 것을 측정결과를 통해 발표하였다. Kim 등[12]은 탄성 중합체 표면의 마이크로 딤플에 의한 발열 저감효과에 대한 연구에서 단면이 다각형인 딤플 형상에 따라 딤플의 효과가 달라짐을 실험을 통해 발표하였다.

본 연구에서는 웨어링 마찰면에서 발생하는 마찰열을 줄이기 위하여 웨어링 재료의 마찰표면에 비교적 미세딤플 가공이 쉬운 우산형 마이크로 딤플(Umbrella Shape Micro-dimple)을 성형하여 발열특성을 실험을 통하여 고찰하였다. 또한 웨어링은 축과 실린더 사이의 편심을 막는 역할을 하므로 딤플이 생성된 웨어링의 구조 안전성을 검토하였고 딤플의 발열저감 성능을 평가하기 위하여 형상과 밀도가 다른 딤플 시험편을 제작하여 핀 온 디스크(Pin-on-disc) 시험을 수행하고 설계 인자를 다르게 한 딤플 샘플들의 발열 온도를 측정하고 분석하여 발열특성을 찾고자 하였다.

## 2. 마이크로 딤플 형상 및 구조 안전성

### 2.1 딤플 형상 및 밀도

본 연구에서 사용한 웨어링의 재료는 폴리아미드66(Polyamide 66)에 유리섬유(Glass Fiber)를 보강한 복합 소재[13]이다. Fig. 3과 같이 웨어링과 실린더의 마찰면에 마이크로 딤플을 성형하였을 때 마찰에 의한 발열저감 효과를 관찰하기 위하여 우산형태의 딤플 형상을 성형하였다. 우산형태의 딤플은 웨어링의 마찰면에 음각으로 만들며 마찰할 때 오일이 딤플 안에 채워져서 마찰력이 낮은 유체마찰 부위가 넓어지는 효과가 있다. 사출에 의하여 복합소재 표면에 딤플을 만들기 위해서 양각의 우산형 딤플이 가공된 코어를 반원형 단면의 봉처럼 직각으로 교차하도록 가공하여 만들며, 딤플이 성형된 마찰 시험편은 Fig. 4와 같이 딤플의 크기( $D_s$ )와 피치( $D_p$ )를 각각 3 가지로 변화를 주어

Table 1 Models of dimpled specimen for experiment

Model No.	Dimensions of dimpled specimen		
	Dimple size (D <sub>s</sub> ) [μm]	Density of dimpled area (ρ) [%]	Dimple pitch (D <sub>p</sub> ) [μm]
1	200	20	447
2	200	30	365
3	200	40	316
4	300	20	671
5	300	30	548
6	300	40	474
7	400	20	894
8	400	30	730
9	400	40	632

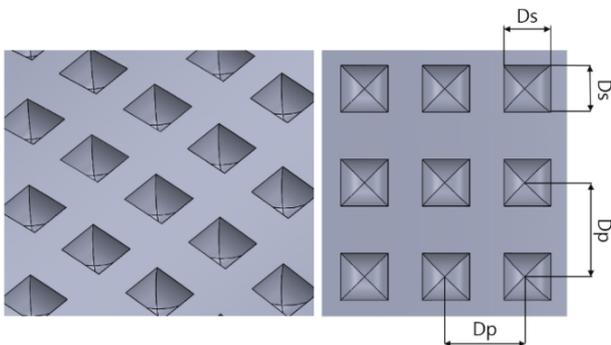


Fig. 4 Design variables of dimple

Table 1과 같이 9종류로 제작하였다.

마이크로 덤플의 면적 밀도 ρ는 마찰면의 총면적 A<sub>t</sub> 중에서 덤플이 차지하는 면적 A<sub>d</sub>의 비로 정의하며 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

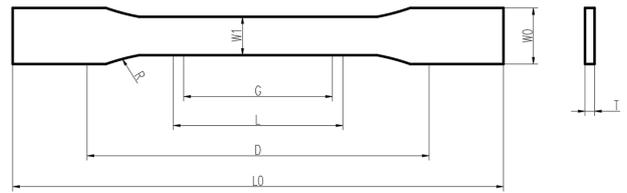
$$\rho = \frac{A_d}{A_t} = \frac{ND_s^2}{ND_p^2} = \frac{D_s^2}{D_p^2} \quad (1)$$

여기서, D<sub>s</sub>는 덤플의 크기, D<sub>p</sub>는 덤플의 피치, N은 덤플의 총 개수이다.

2.2 구조 안전성

웨어링의 표면에 덤플을 성형할 때 덤플로 인한 강도의 영향을 평가하기 위하여 ANSYS 19.0[14]를 사용하여 구조해석을 수행하였다. 웨어링 소재의 기계적 물성을 측정하기 위해 Fig. 5와 같은 인장시편을 제작하였고 10 kN 용량의 재료시험기를 사용하여 ASTM D 638 규격[15]에 따라 재료 물성을 측정하였다. 시편의 표점거리는 50 mm이며, 인장 속도는 50 mm/min으로 설정하여 3개의 시험편으로 재료물성을 얻었으며, 응력-변형률 선도는 Fig. 6과 같으며 기계적 물성은 Table 2로 정리하였다.

시험조건은 유압 왕복동 시스템에 사용하는 시일의 성능평가 방법 KS B ISO 7986 [16]을 적용하였으며 경계조건은 Fig. 7과



L0 = 165±6.5, D = 115±4.5, L = 57±2.25, G = 50±2, R = 76±3, W1 = 13±0.5, W0 = 19±0.75, T = 3.2±0.4

Fig. 5 Specimen for tensile test

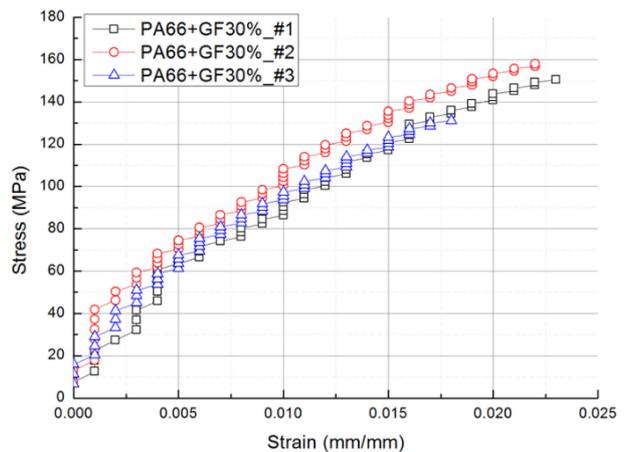


Fig. 6 Stress-strain curves of PA66+GF30 composite

Table 2 Material properties of PA66+GF30 composite

Items	Values
Tensile strength [MPa]	155
Elongation at brake [%]	2.3
Young's modulus [MPa]	8,848
Poisson's ratio	0.38

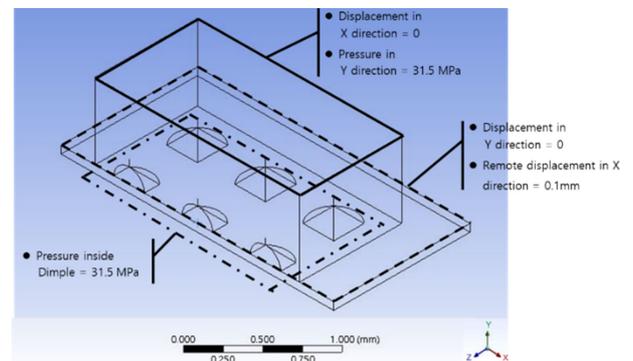


Fig. 7 Boundary condition of FE model

같이 웨어링 상면에 31.5 MPa의 압력을 가하였고 덤플 내부에 채워진 오일로부터 웨어링이 31.5 MPa의 유압을 받으며 웨어링과 디스크 사이의 마찰력을 고려하기 위해 강판을 0.1 mm 이동시켰다. 해석 모델은 해석 모델의 요소수를 고려하여 9개의

Table 3 Structural analysis results for various models

Model No.	Max. von Mises stress [MPa]	Max. deformation of dimple [ $\mu\text{m}$ ] (X-Direction)	Max. deformation of dimple [ $\mu\text{m}$ ] (Total)
1	61.77	0.041	0.503
2	82.38	0.033	0.910
3	104.11	0.022	1.403
4	61.82	0.203	0.460
5	73.82	0.111	0.863
6	105.28	0.118	1.378
7	62.11	0.386	0.483
8	73.31	0.260	0.883
9	132.11	0.348	1.447

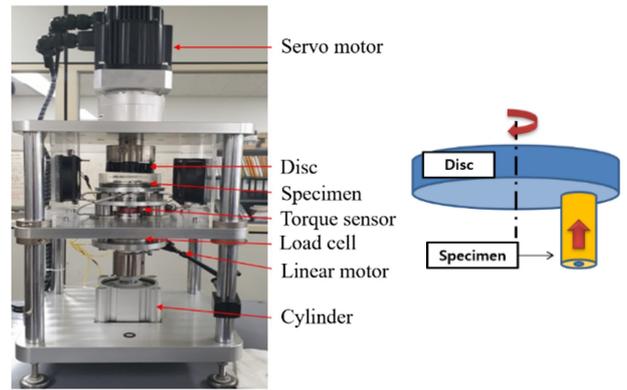
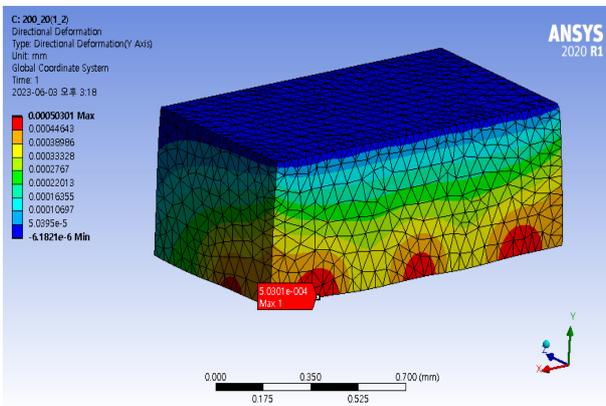


Fig. 9 Structure of pin-on-disc wear tester

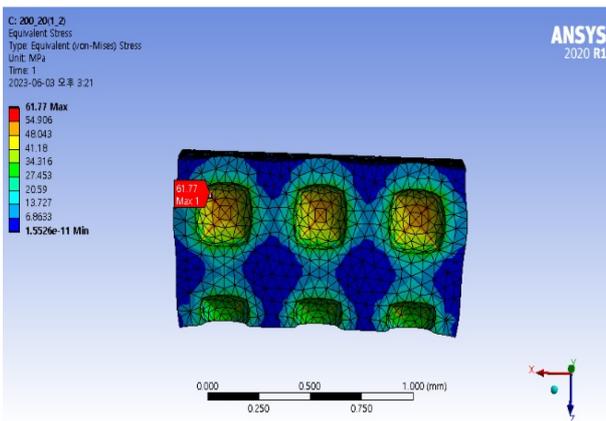
응력의 계산결과는 Table 3과 같으며 딬플의 크기 및 밀도가 커질수록 등가응력(von Mises Stress) 값이 커지는 결과를 보였다.

최소응력은 딬플 사이즈 200  $\mu\text{m}$ , 밀도 20%인 모델에서 61.77 MPa이 발생하였고 최대응력은 사이즈 400  $\mu\text{m}$ , 밀도 40%인 모델에서 132.11 MPa 값을 보였다. 발생한 최대 등가응력은 소재의 인장강도인 155 MPa과 비교할 때 약 85%에 해당하며, 딬플 크기와 밀도에 따라 발생응력의 크기는 2.1배의 차이를 보이므로 설계조건에 따라 웨어링의 구조 안전성이 약 2.1배의 차이를 보이는 것으로 나타났다.

Fig. 8은 응력이 가장 적게 발생한 1 모델에 대한 계산 결과를 보인 것이다.



(a) Distribution of Y-directional deformation



(b) Distribution of von Mises stress

Fig. 8 The points where the maximum stress and deformation occur (200  $\mu\text{m}$ / 20%)

딬플이 있는 평판 모델로 하였고 1/2 대칭조건을 적용하였다. 마찰면의 접촉조건은 마찰계수를 반영하는 마찰 형식(Frictional Type)으로 지정하였으며 마찰계수는 웨어링 소재와 S45C의 윤활상태에서 정마찰계수인 0.034을 적용하였다.

### 3. 마찰 실험

#### 3.1 실험장치와 시험편

마이크로 딬플을 적용한 웨어링의 발열 특성을 평가하기 위하여 면대면(Flat-on-flat) 접촉형태인 핀 온 디스크 시험 장치를 ASTM G99의 시험방법[17]에 따라 제작하였다(Fig. 9).

핀 온 디스크 시험 진행 시 가하는 수직 하중에 의하여 시험편이 변형되는 것을 최소화하기 위하여 시험편 지그를 제작하여 시험편을 장착하였으며, 시험편과 디스크에서 마찰로 발생하는 열량의 정도를 측정하기 위해 시험편 내부에 온도센서(Thermocouple) 삽입구를 가공하였다(Fig. 10).

#### 3.2 설계 인자별 마찰 실험

성능시험기는 금속에 대한 시험조건만 규정되어 있고 고분자 소재에 대해서는 규정되어 있지 않아 유압 왕복동 시스템에 사용하는 시일의 성능평가 방법인 KS B ISO 7986을 적용하여 Table 4의 시험조건에 만족하도록 접촉면압은 6.3 MPa로 설정하였으며 이 면압이 발생하도록 950 N을 접촉력을 가하였고 마찰 속도는 0.5 m/s로 설정하였다.

시험편과 디스크는 오일 속에 잠긴 상태에서 실제 조건과 같이 시험을 하였으며, 오일은 동점도 46의 오일인 ISO VG 46을

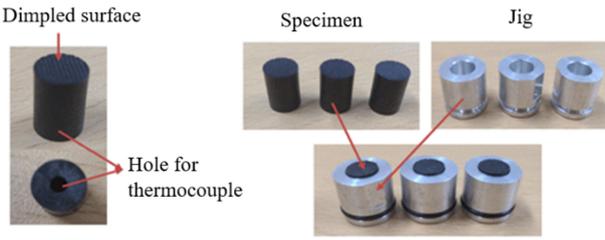


Fig. 10 Dimpled specimen and holder

Table 4 Specification for pin-on-disc experiment

Section	Parameters	Condition
Specimen	Material	PA66+GF30
	Specific gravity [g/cm <sup>3</sup> ]	1.36
	Hardness [Shore D]	84
	Diameter [mm]	8
	Quantity [EA]	3
Disc	Material	SM45C
	Surface roughness [μm]	Ra 0.1
	Sliding track diameter [mm]	50
Test condition	Contact pressure [MPa]	6.3
	Sliding velocity [m/s]	0.5
	Lubricant	ISO VG 46

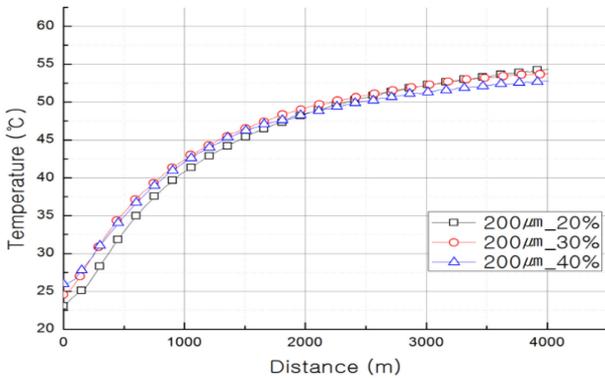


Fig. 11 Comparison of temperatures according to dimple density (size = 200 μm)

사용하였고, 새로운 시험을 진행할 때마다 100 cc의 새로운 오일로 교체하여 사용하였다. 시험편별로 100 m의 시운전을 진행한 후 온도를 측정하였으며 실험거리는 예비실험에서 온도가 수렴하는 구간인 4,000 m로 하였고 1회 실험시간은 약 2.22시간이 소요되었다.

3.2.1 댄플 밀도의 변화

댄플의 설계 변수인 크기와 밀도 중 밀도의 영향을 보기 위하여 9종의 시편에 대하여 성능시험을 진행하였으며, Figs. 11부터 13은 댄플의 밀도에 따른 오일의 온도 측정의 결과를

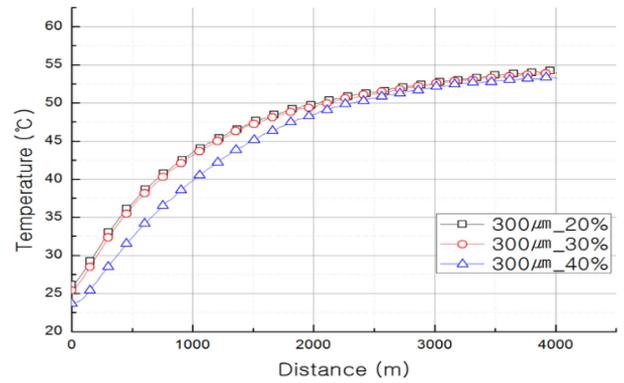


Fig. 12 Comparison of temperatures according to dimple density (size = 300 μm)

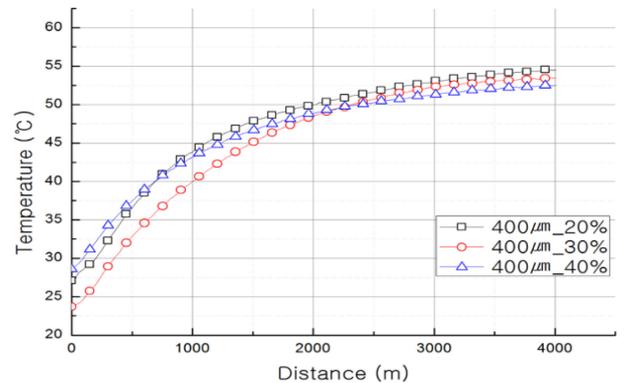


Fig. 13 Comparison of temperatures according to dimple density (size = 400 μm)

보인다.

같은 댄플 크기이면서 밀도만 다른 시편의 발열 경향을 보기 위하여, Fig. 11에서 댄플크기는 200 μm로 같고 밀도만 3가지 (20, 30, 40%)로 달리한 마찰 발열 시험 결과를 보았다. 밀도 20%일 때 최종 온도는 54.4°C이고 밀도 40%일 때는 52.8°C로 밀도 변화에 따라 최종온도가 1.6°C의 차를 보였다.

Fig. 12는 댄플의 크기 300 μm인 시편에서 밀도만 20, 30, 40%로 변화시켰을 때 발열시험을 진행한 결과이다. 밀도 20%일 때 최종 온도는 54.3°C이며, 밀도 40%일 때는 53.3°C로 밀도 변화에 따라 1°C의 차이를 보였다.

Fig. 13은 댄플의 크기 400 μm, 밀도만을 20, 30, 40%로 성능시험을 진행한 결과이다. 밀도 20%일 때 최종 온도는 54.5°C이며, 밀도 40%일 때는 52.5°C로 밀도 차이에 따라 2°C의 차이를 보였다.

Fig. 14는 댄플의 밀도 20, 30, 40%에 따른 댄플의 온도 결과값을 하나의 밀도에서 3개 댄플 크기(200, 300, 400 μm)에서 얻은 온도들의 평균값을 계산하여 얻은 그래프이다. 최종 온도는 20%일 때 54.4°C, 30%일 때 53.8°C, 40%일 때 52.9°C의 결과를 보였다. 밀도별로 시험한 결과 약 1.6°C의 차이로 밀도가 커질수록 발열 온도값이 낮았으며 댄플의 밀도는 발열온도 값에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

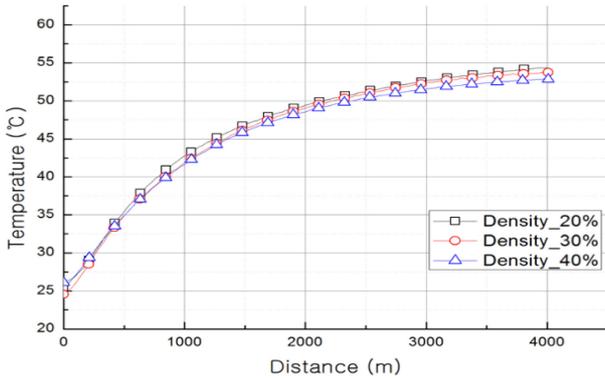


Fig. 14 Comparison of the average temperature for specimens with 3-dimple size at the same density according to dimple density

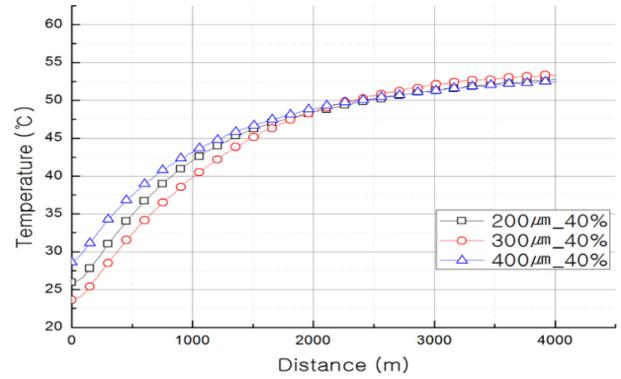


Fig. 17 Comparison of temperatures according to dimple size (density = 40%)

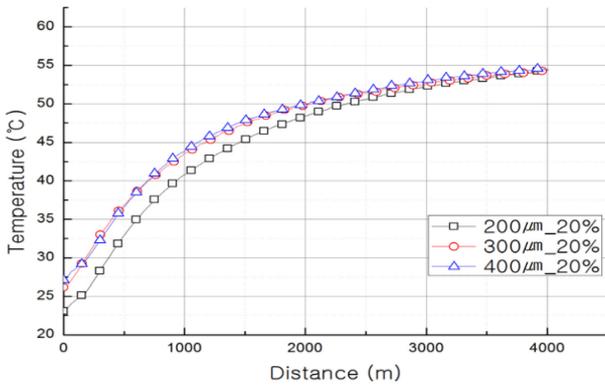


Fig. 15 Comparison of temperatures according to dimple size (density = 20%)

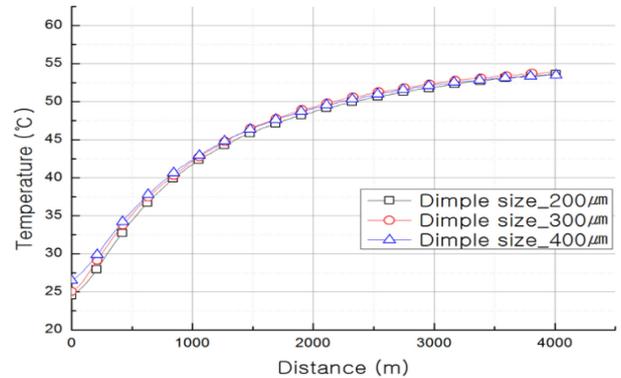


Fig. 18 Comparison of the average temperature for specimens with 3-dimple density at the same size according to dimple size

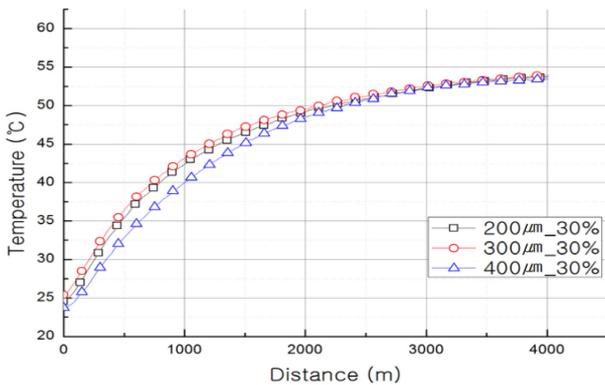


Fig. 16 Comparison of temperatures according to dimple size (density = 30%)

3.2.2 댄플 크기의 변화

댄플 크기의 영향을 보기 위하여 댄플의 크기와 밀도를 변수로 한 9가지 댄플 시편에 대한 성능시험을 진행하였으며, Figs. 15부터 17에서 댄플의 크기에 따라서 마찰 발열량으로 인한 오일의 온도의 상승을 측정하는 결과를 보인다.

Fig. 15는 댄플의 밀도 20%인 시편에서, 댄플의 크기만 200, 300, 400 μm로 다르게 하여 마찰시험을 진행한 결과이다.

댄플의 크기가 200 μm일 때 최종 온도는 54.4°C이며, 크기가 300 μm일 때는 54.3°C, 크기가 400 μm일 때는 54.5°C로 온도 비교 결과 약 0.2°C의 차를 보였으며, 마찰거리가 증가함에 따라 댄플 크기에 따른 온도차가 같아지는 경향을 보였고 크기의 변화는 밀도의 변화에 비하여 발열량에 미치는 영향이 작았다.

Fig. 16은 댄플의 밀도 30%인 시편에서 댄플의 크기를 200, 300, 400 μm로 달리하여 발열시험을 진행한 결과이다. 댄플의 크기가 200 μm일 때 최종온도는 53.8°C이며, 크기가 300 μm일 때 54.0°C, 크기가 400 μm일 때 53.5°C가 되었고 시편 간 온도차는 0.5°C이다. 마찰거리가 증가함에 따라 오일의 온도가 수렴하다가 역전되는 경향을 보인다.

Fig. 17은 댄플의 밀도 40%, 댄플의 크기 200, 300, 400 μm 로 발열시험을 진행한 결과이다. 댄플의 크기가 200 μm 일 때 최종 온도는 52.8°C이며, 크기가 300 μm 일 때 53.4°C, 크기가 400 μm 일 때 52.5°C가 되었고 시편 간의 온도차는 0.9°C를 보였다.

Fig. 18은 댄플의 크기 200, 300, 400 μm에 대해 밀도 20, 30, 40%인 시험편에 대한 발열 실험에서, 크기를 고정하고 밀도만을 3개로 변화시킨 시편에서 얻은 온도들의 평균값으로 나타낸 그래프이다. 최종 온도는 200 μm일 때 53.7°C이고, 300 μm일 때 53.9°C, 400 μm일 때 53.5°C의 결과를 보였다.

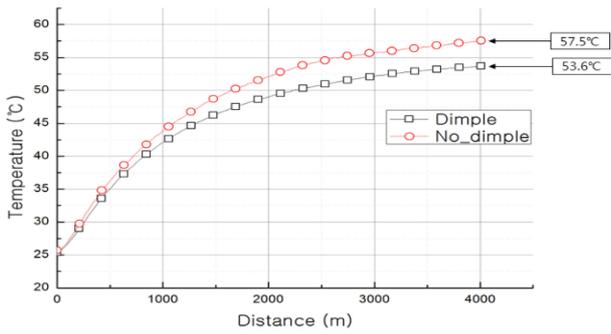


Fig. 19 Comparison of specimen temperatures on presence and absence of dimples

Table 5 Final temperature according to dimple shape and density (unit: °C)

Dimple size [μm]	Dimple density [%]			Average
	20	30	40	
200	54.4	53.8	52.8	53.7
300	54.3	54.0	53.4	53.9
400	54.5	53.5	52.5	53.5
Average	54.4	53.8	52.9	

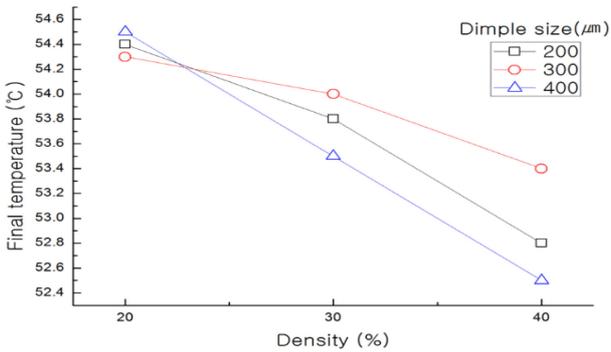


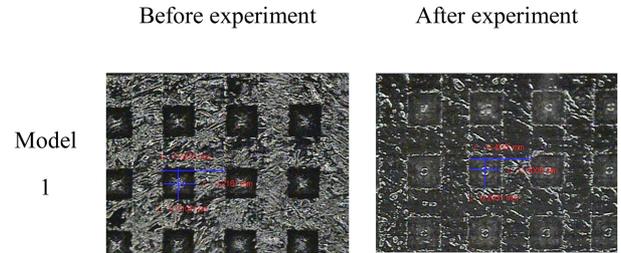
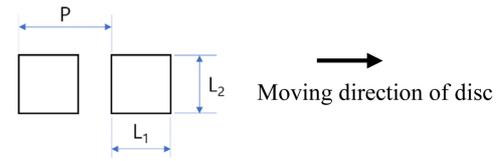
Fig. 20 Final temperatures according to dimple size and density

크기별로 최종온도의 차는 0.4°C이며, 댄플의 크기는 밀도에 비하여 발열온도에 작은 영향을 미치는 것으로 나타났다.

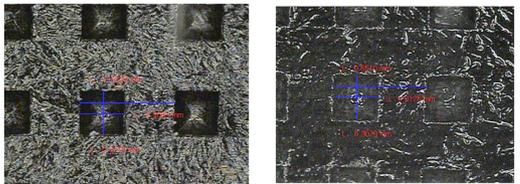
3.2.3 댄플 유무의 영향

마찰면에 마이크로 댄플을 성형했을 때의 발열 저감효과를 보기 위한 실험으로 무댄플과 댄플에 대하여 핀 온 디스크 실험을 수행하였다. 댄플의 크기, 밀도가 다른 9가지 형태의 댄플 모델에 대한 온도는 전체 모델의 온도의 평균값으로 하였고 무댄플 시편의 발열 온도와 비교하였다.

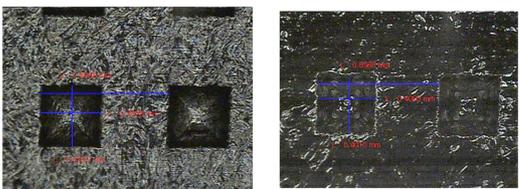
Fig. 19와 같이 댄플이 있는 9개 시험편의 온도의 평균을 구한 결과는 최종온도가 약 53.6°C였으며, 무댄플의 경우 약 57.5°C의 결과를 보여 댄플이 있는 시험편이 무댄플 시편에 비해서 최종 온도가 약 7% 낮았고 댄플이 마찰 발열량을 낮추는 것으로 나타났다.



L <sub>1</sub> [μm]	210	203
L <sub>2</sub> [μm]	216	201
P [μm]	438	425



L <sub>1</sub> [μm]	307	307
L <sub>2</sub> [μm]	310	313
P [μm]	654	651



L <sub>1</sub> [μm]	417	401
L <sub>2</sub> [μm]	409	406
P [μm]	870	857

Fig. 21 Dimensions of micro-dimple measured before and after experiment

3.2.4 실험 결과 분석

웨어링 소재에 대한 핀 온 디스크 마찰실험에서 4 km의 마찰 거리에 도달한 후 댄플 온도의 최종값은 Table 5와 Fig. 20과 같다. 400 μm 중 밀도가 20%일 때 가장 높은 온도값을 보였으며, 400 μm 중 밀도가 40%일 때 가장 낮은 온도 값을 보였다. 밀도가 클수록 발열량이 적었으며, 같은 밀도에서는 댄플의 크기가 클수록 발열량이 적음을 볼 수 있다.

9개 댄플모델에 대한 마찰실험 후 댄플이 마모되기 전과 후의 형상 변화를 보기 위하여 촬영한 초심도 현미경 사진을 비교

Table 6 Change of dimple shapes before and after experiment

Model No.	Before experiment [ $\mu\text{m}$ ]		After experiment [ $\mu\text{m}$ ]	
	Size (L)	Pitch (P)	Size	Pitch
1	213	438	202(-5.2%)	425(-3.0%)
2	217	349	202(-6.9%)	339(-2.9%)
3	212	302	211(-0.5%)	300(-0.7%)
4	308	654	310(+0.6%)	651(-0.5%)
5	311	534	304(-2.3%)	531(-0.6%)
6	310	456	309(-0.3%)	461(+1.1%)
7	413	870	404(-2.2%)	857(-1.5%)
8	405	711	415(+2.5%)	706(-0.7%)
9	403	617	412(+2.2%)	609(-1.3%)

하였다. Fig. 21은 대표적인 3개 모델에 대해서 마찰 전후의 사진이며 댄플 형상의 치수변화를 측정하였다.

Table 6은 9개 모델에 대한 마찰실험 전후의 댄플크기와 피치를 비교한 표이다. 실험 후 댄플의 크기 변화를 보면 댄플의 크기 200  $\mu\text{m}$ 인 경우 평균 -4.2%, 300  $\mu\text{m}$ 인 경우 평균 -0.7%, 400  $\mu\text{m}$ 인 경우 평균 +0.8%의 변화를 보이며, 피치 변화는 200  $\mu\text{m}$ 인 경우 평균 -2.2%, 300  $\mu\text{m}$ 인 경우 평균 0.0%, 400  $\mu\text{m}$ 인 경우 평균 -1.2%로 변화하였다. 일반적으로는 마찰실험 중에 마찰면이 마모되어 댄플의 크기는 작아져야 하고 피치는 일정해야 할 것으로 보이나, 댄플의 크기는 실험 전의 크기가 클수록 실험 후 작아지는 정도가 줄다가 가장 큰 400  $\mu\text{m}$ 에서는 오히려 실험 후 크기가 커지는 경향을 보였다. 크기가 커지는 현상은 마찰면 간에 작용하는 압축력에 의하여 댄플이 눌렸기 때문인 것으로 보이며 댄플의 밀도를 높여서 마찰열 감소에도 약간의 영향을 줄 것으로 보인다. 피치는 300  $\mu\text{m}$ 인 경우 변화가 없고 그 피치 이상(400  $\mu\text{m}$ )과 이하(200  $\mu\text{m}$ )에서 미세하게 작아졌다.

#### 4. 결론

유압 실린더에서 웨어링과 실린더 사이의 마찰에 의한 발열량을 줄이기 위하여 우산형 마이크로 댄플이 성형된 시험편을 제작하여 마찰실험을 수행하였고 구조해석에 의한 강도의 변화를 계산하였다. 핀 온 디스크 마찰실험 실험에서 9개의 댄플 모델에 대한 온도를 측정하여 설계 인자별로 발열량에 미치는 영향을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

① 마찰면에 댄플을 성형한 시험편의 최종 온도가 무댄플 시험편 온도보다 7% 낮았다.

② 댄플의 크기 및 밀도가 클수록 발열 저감 효과가 크며 밀도가 크기에 비해 영향이 크다.

③ 마찰실험 후 댄플 형상의 변화는 실험 전의 크기가 클수록 실험 후의 댄플 크기가 커지며 이는 댄플 밀도가 클수록 발열 저감 효과가 커지므로 발열량 저감에도 영향을 미칠 것으로 보인다.

④ 댄플의 성형으로 인한 웨어링의 강도의 변화가 있으며 최대 2.1배의 발생응력의 차이를 보인다.

#### REFERENCES

- Etsion, I., Kligerman, Y., Halperin, G., (1999), Analytical and experimental investigation of laser-textured mechanical seal faces, *Tribology Transactions*, 42(3), 511-516.
- Etsion, I., Halperin, G., Brizmer, V., Kligerman, Y., (2004), Experimental investigation of laser surface textured parallel thrust bearings, *Tribology Letters*, 17(2), 295-300.
- Etsion, I., (2004), Improving tribological performance of mechanical components by laser surface texturing, *Tribology Letters*, 17, 733-737.
- Etsion, I., (2005), State of the art in laser surface texturing, *Journal of Tribology*, 127(1), 248-253.
- Rahmani, R., Shirvani, A., Shirvani, H., (2007), Optimization of partially textured parallel thrust bearings with square-shaped micro-dimples, *Tribology Transactions*, 50(3), 401-406.
- Sahlin, F., Glavatskih, S. B., Almqvist, T. r., Larsson, R., (2005), Two-dimensional CFD-analysis of micro-patterned surfaces in hydrodynamic lubrication, *Journal of Tribology*, 127(1), 96-102.
- Brajdic-Mitidieri, P., Gosman, A., Ioannides, E., Spikes, H., (2005), CFD analysis of a low friction pocketed pad bearing, *Journal of Tribology*, 127(4), 803-812.
- Fowell, M., Olver, A., Gosman, A., Spikes, H., Pegg, I., (2007), Entrainment and inlet suction: Two mechanisms of hydrodynamic lubrication in textured bearings, *Journal of Tribology*, 129(2), 336-347.
- Lee, J. O., Jeong, Y. H., Park, T. J., Kim, H. S., Yang, S. H., (2013), Thermohydrodynamic lubrication characteristics of a textured slider bearing: Effect of dimple number, *Proceedings of the Korean Society Automotive Engineers*, 109-110.
- Chae, Y.-H., Kim, S.-S., (2005), Friction characteristics of micro-scale dimple pattern under mixed and hydrodynamic lubrication condition, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 22(2), 188-193.
- Kim, S.-G., Song, K.-C., Kim, S.-B., Chae, Y.-H., (2008), Effects of surface texturing under grease lubrication, *Tribology and Lubricants*, 24(5), 234-240.
- Kim, G. W., Yoo, M. H., Lee, T. S., (2013), The effect of reduction of friction heat by micro dimple on the sliding surface of elastomer, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 30(8), 847-853.
- Jung, W.-Y., Weon, J.-I., (2012), Characterization of thermal degradation of polyimide 66 composite: Relationship between lifetime prediction and activation energy, *Polymer (Korea)*, 36(6), 712-720.

14. ANSYS, Inc. Release Notes v19.
15. ASTM D638-03, (2012), Standard test method for tensile properties of plastic.
16. ISO 7986, (1997), Standard test methods to assess the performance of seals used in oil hydraulic reciprocating applications. <https://www.iso.org/standard/14983.html>
17. ASTM G99-05, (2010), Standard test method for wear testing with a pin-on-disk apparatus.



**Young Chan Yoon**

Director of the institute of Technology, SJ Tech Co., Ltd.. His research interest is a mechanical design including hydraulic and pneumatic seals.

E-mail: [sjyc@naver.com](mailto:sjyc@naver.com)



**Taek Sung Lee**

Professor of the School of Mechanical Design Engineering, Tech University of Korea. His research interest is an applied mechanics including machine design and FEA.

E-mail: [lts724@tukorea.ac.kr](mailto:lts724@tukorea.ac.kr)



# Fuzzy AHP-TOPSIS 기법을 이용한 최적 미세 가공 공정의 다기준 의사 결정

## Multi-criteria Decision Making of the Optimal Micromachining Process Using Fuzzy AHP-TOPSIS

강성구<sup>1</sup>, 황지홍<sup>1,#</sup>  
Seong-Gu Kang<sup>1</sup> and Jihong Hwang<sup>1,#</sup>

<sup>1</sup> 서울과학기술대학교 대학원 기계정보공학과 (Department of Mechanical Information Engineering, Graduate School, Seoul National University of Science and Technology)  
# Corresponding Author / E-mail: [hwangjh@seoultech.ac.kr](mailto:hwangjh@seoultech.ac.kr), TEL: +82-2-970-6396  
ORCID: 0000-0002-0758-3590

KEYWORDS: Micromachining (미세 가공), Fuzzy (퍼지), AHP (분석적 계층화 기법), TOPSIS (Technique for order performance by similarity to ideal solution), Multi-criteria decision making (다기준 의사 결정)

*There are various micromachining processes available for manufacturing highly integrated and precise parts, each having its own characteristics and limitations. The degree to which micromachining processes meet the requirements depends on characteristics of parts that are different, making it difficult to determine the most appropriate process. In this context, the present study presents an algorithm for determining the optimal micromachining process by applying the Fuzzy AHP-TOPSIS technique frequently used for multi-criteria decision-making. Fuzzy AHP was employed for calculating weights of requirements for a given part. Fuzzy TOPSIS was employed for determining ranks of candidate processes based on weights of requirements and evaluation of processes. Fuzzy logic was applied to handle ambiguous and inaccurate information encountered in evaluating the relative importance of requirements and performances of processes. The case study in which the optimal process for micro-hole drilling of a fuel injection nozzle was determined showed that the proposed method was effective. It could be extended to micromachining of various shapes.*

Manuscript received: March 3, 2023 / Revised: April 27, 2023 / Accepted: April 28, 2023

### NOMENCLATURE

$M_{n,n}$	=	Pairwise Comparison Matrix
$S_i$	=	Fuzzy Synthetic Extent Value
$\mu_s(x)$	=	Fuzzy Membership Function
$W$	=	Weight Vector
$\hat{p}_{ij}$	=	Normalized Micro Drilling Evaluation Matrix
$d_i^+$	=	Distance from Fuzzy Positive Ideal Solution
$d_i^-$	=	Distance from Fuzzy Negative Ideal Solution
$CC_i$	=	Closeness Coefficient

### 1. 서론

최근 전자, 통신, 광학, 의료, 자동차, 항공 등의 산업에서 부품의 고집적화와 고정밀화로 인한 초소형 부품 및 제품에 대한 수요가 급격히 증가하고 있다[1]. 이러한 부품 및 제품의 예로는 마이크로 센서 및 구동 장치, 마이크로 엔진 및 열교환기, 의료용 임플란트 및 진단 장치 등이 있는데, 이의 제작을 위해서는 미세 가공 기술이 요구된다. 따라서 미세 가공 기술의 발전도 비약적으로 이루어져 왔는데, 그 결과로서 가공 가능한 최소 크기, 치수 정밀도, 표면 품질, 소재 종류, 그리고 경제성 및 생산성 등에서의 제한이 점차 줄어들고 있다.

하지만 이러한 미세 가공에 대한 수요 증가와 기술 발전에도

불구하고 공정 개발자가 아닌 공정 수요자 측면에서의 미세 가공에 대한 접근은 쉽지 않다고 할 수 있다. 예를 들어 CNC 가공, 사출 성형, 3D 프린팅과 같은 일반 가공의 경우에는 해당 공정에 대한 전문 지식이 없는 사람도 개방형 제조 플랫폼(Fig. 1 참조)을 통해 최적의 가공 방법 및 서비스를 제공받을 수 있지만 [2,3], 미세 가공의 경우에는 전문가를 통한 문제 해결은 물론 관련 기술에 대한 정보 탐색마저도 쉽지 않은 것이 현실이라고 할 수 있다. 이는 미세 가공을 활용한 제품 또는 부품 개발을 저해하는 요소로서 작용할 수 있으므로 이에 대한 보완이 요구된다고 할 수 있다.

지금까지 개발된 미세 가공 공정에는 많은 종류가 있다. 전통적인 방식의 기계 가공 공정부터 전기적, 화학적, 열적 반응 등을 활용한 다양한 종류의 특수 가공 공정들이 존재한다. 미세 가공 공정들은 각기 나름대로의 장점과 단점을 가지고 있기 때문에, 제품 또는 부품 개발 시 이러한 가공법들의 특징들을 최대한 활용하는 것이 요구된다. 하지만 부품 또는 제품의 특성에 따라 다수의 요구 조건이 존재하고, 이러한 요구 조건에 대해 각각의 미세 가공 공정들이 부합하는 정도가 다르기 때문에 모든 요구 조건을 고려한 가장 적절한 가공법을 선택하는 것은 매우 어려운 일이다.

이처럼 많은 선택지와 요구 조건이 존재하는 환경에서 최적의 선택지를 결정하는 것을 다기준 의사결정이라 한다[4]. 지금까지 다기준 의사결정을 위한 많은 기법들이 개발되었는데, 본 연구에서는 그 중에서도 AHP-TOPSIS 기법에 Fuzzy 논리를 적용한 Fuzzy AHP-TOPSIS 기법을 활용하여 최적의 미세 가공 공정을 찾는 방법을 제시한다[5]. 보다 구체적으로는 미세 가공과 관련된 제품 또는 부품의 요구 조건 각각에 대한 중요도를 AHP (Analytic Hierarchy Process) 기법을 이용하여 계산한 후, 이를 TOPSIS (Technique for Order Performance by Similarity to Ideal Solution) 기법에 연계하여 최적의 미세 가공 공정을 결정하는 방법을 제시한다. 이때 주어진 요구 조건에 대한 평가와 미세 가공 공정에 대한 평가에 Fuzzy 논리를 적용함으로써 참, 거짓의 이분법적 평가나 절대적 수치에 의한 정량적인 평가가 아니라 언어로 표현되는 정성적 평가가 가능토록 한다[6]. Fuzzy 논리의 이러한 장점은 로봇이나 자율 주행 등 다양한 분야에서 널리 활용되고 있다[7,8].

Fuzzy AHP-TOPSIS 기법을 활용하여 제조 환경의 다양한 분야에서 다기준 의사결정 문제를 해결한 사례들이 많이 있다 [9,10]. 그 중에서 가공과 관련된 사례들을 살펴보면 적층제조 (Additive Manufacturing)에서 최적의 가공 방법을 선택하기 위해 Fuzzy AHP-TOPSIS 기법을 활용한 경우가 있다[11]. 또한, 방전가공(Electro Discharge Machining)에서 가공 조건의 최적화를 위해 Fuzzy AHP-TOPSIS 기법을 활용한 경우도 있다 [12]. 하지만, 주어진 부품 또는 제품의 다수 요구 조건에 맞는 최적의 미세 가공 방법을 선택하기 위해 다기준 의사결정 기법을 적용한 사례는 찾기가 쉽지 않다. 따라서 이에 대한 해법을 제시하는 본 연구가 충분한 의미를 갖는다고 할 수 있다.

본 논문의 순서는 다음과 같다. 먼저, 1장에서는 본 연구의

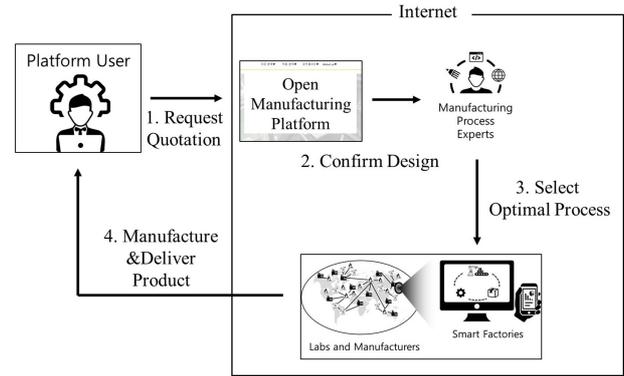


Fig. 1 Concept of open manufacturing platform

배경과 목적을 소개한다. 2장에서는 본 연구 방법의 토대가 되는 Fuzzy AHP, Fuzzy TOPSIS 기법을 보다 구체적으로 설명한다. 3장에서는 주어진 부품의 최적 미세 가공 방법 결정 사례를 통해 제안된 방법의 유효성을 검증한다. 마지막으로 4장에서는 본 연구가 갖는 의미를 정리한다.

## 2. 제안된 방법

Fig. 2는 본 논문에서 제안한 Fuzzy AHP-TOPSIS 기법을 활용한 미세 가공 공정의 다기준 의사결정 과정을 보여 주는 흐름도이다. 흐름도는 크게 세 단계로 구성되어 있는데, 첫 번째 단계에서는 주어진 제품 및 다양한 미세 가공 공정들에 대한 정보가 수집되어 정리된다. 두번째 단계에서는 제품 가공을 위해 고려되는 요구 조건들의 가중치가 Fuzzy AHP 기법을 이용하여 구해진다. 마지막 세번째 단계에서는 전 단계에서 얻어진 가중치를 토대로 Fuzzy TOPSIS 기법을 사용하여 미세 가공 공정들의 최종 순위가 결정된다. 이 과정에서 Fuzzy AHP 기법 및 Fuzzy TOPSIS 기법이 어떻게 적용되는지는 다음에 보다 구체적으로 기술된다.

### 2.1 제품 및 미세 가공 공정에 대한 정보 수집

Fuzzy AHP-TOPSIS 기법을 활용하기 위해서는 먼저 미세 가공이 요구되는 제품에 대한 분석이 선행되어야 한다. 보다 구체적으로는 미세 가공이 요구되는 부품의 형상을 보고 요구되는 조건들을 확인할 필요가 있다. 예를 들어, 구멍 형상의 경우에는 소재, 가공 직경, 가공 깊이, 표면 거칠기 등을 확인할 필요가 있다. 더불어 납기, 예산 등도 추가적으로 확인해야 할 가공 외적인 조건이라 할 수 있다. 또한, 요구되는 제품의 미세 가공에 활용 가능한 공정들의 평가표를 작성할 필요가 있다. 이를 위해서는 사전에 수집된 미세 가공 공정들에 대한 평가표에서 주어진 제품의 가공에 활용 불가능한 미세 가공 공정들을 제외시키는 것이 필요하다.

다음 단계에서는 앞 단계에서 파악된 다양한 조건들 중 비교하고 싶은 조건을 선택하고 이들 사이의 우선순위를 구하기

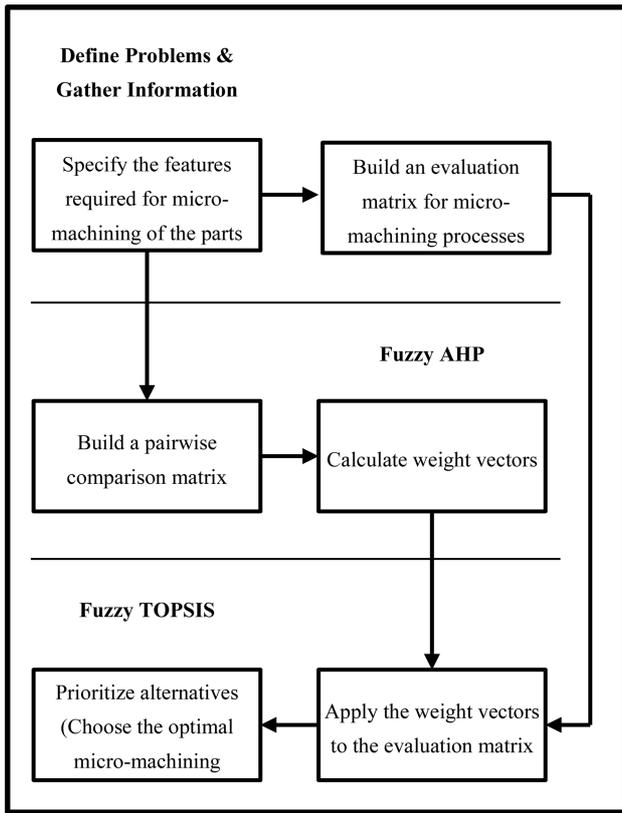


Fig. 2 Proposed methodology for prioritizing a micro machining process by Fuzzy AHP-TOPSIS

위해 쌍대 비교 질문표를 작성한다. 이렇게 작성된 쌍대 비교 질문표는 Fuzzy AHP 기법을 사용하여 각 조건들의 가중치를 계산하는데 사용된다. 마지막 단계에서는 Fuzzy TOPSIS 기법을 사용하여 앞 단계에서 계산된 가중치를 첫 단계에서 작성된 공정 평가표에 적용시키고, 그 결과를 토대로 요구되는 제품의 미세 가공을 위한 최적의 공정을 결정하게 된다. 이 과정에 사용된 Fuzzy AHP와 Fuzzy TOPSIS 기법은 다음에서 보다 자세히 기술된다.

2.2 Fuzzy AHP

AHP는 Saaty가 고안한 다기준 의사결정 기법이다[13]. 여기에 Fuzzy 논리를 접목한 Fuzzy AHP는 Table 1에서와 같이 고려 항목들에 대한 언어적 평가를 삼각 Fuzzy 수로 나타내어 고려 항목의 정량적인 비교가 가능하도록 한 것이다. 이 경우 삼각 Fuzzy 수는 하한값, 중앙값, 상한값 ( $l, m, u$ )으로 이루어지는데, 두 삼각 Fuzzy 수  $A_1 = (l_1, m_1, u_1)$ ,  $A_2 = (l_2, m_2, u_2)$  가 있을 때 이들 사이의 연산은 다음과 같이 정의된다.

$$A_1 \otimes A_2 = (l_1, m_1, u_1) \otimes (l_2, m_2, u_2) = (l_1 * l_2, m_1 * m_2, u_1 * u_2) \tag{1}$$

$$a \otimes A_1 = (a * u_1, a * m_1, a * l_1) \tag{2}$$

Table 1 Triangular fuzzy number for pairwise comparison

Linguistic variables	Triangular fuzzy number
Equal	(1, 1, 1)
Very slightly	(1, 2, 3)
Slightly	(2, 3, 4)
Moderately	(3, 4, 5)
Highly	(4, 5, 6)
Very highly	(5, 6, 7)

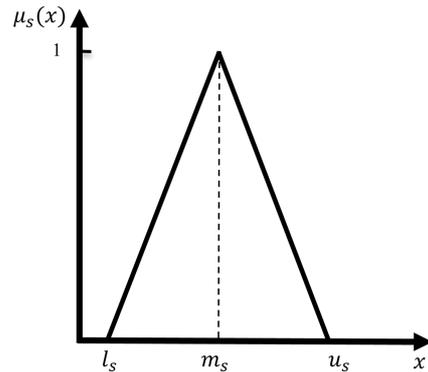


Fig. 3 Triangular fuzzy membership function

$$A_1^{-1} = (l_1, m_1, u_1)^{-1} = \left(\frac{1}{u_1}, \frac{1}{m_1}, \frac{1}{l_1}\right) \tag{3}$$

한편 삼각 Fuzzy 수  $A_s = (l_s, m_s, u_s)$ 가 있을 때 임의의 값을 갖는 변수  $x$ 가 Fuzzy 집합에 소속되는 정도를 나타내는 Fuzzy 멤버십 함수(Fuzzy Membership Function)  $\mu_s(x)$ 는 식(4)와 같이 정의되는데, 이를 도식으로 나타내면 Fig. 3과 같이 중앙값 ( $m_s$ )에서는 1을 가지면서 하한값( $l_s$ )과 상한값( $u_s$ )에서는 0을 갖는 이등변삼각형의 형태가 된다.

$$\mu_s(x) = \max\left(\min\left(\frac{x-l_s}{m_s-l_s}, \frac{u_s-x}{u_s-m_s}\right), 0\right) \tag{4}$$

본 연구에서는 부품 또는 제품의 미세 가공을 위해 요구되는 조건들의 상대적인 중요도를 평가하기 위해 Fuzzy-AHP를 적용하여 요구 조건들의 가중치를 계산한다. 이 경우,  $n$ 개의 요구 조건들에 대한 상대적 중요도는 Table 2에 주어진 것과 같은 쌍대 비교 설문문을 통해 수요자로부터 얻게 된다. 즉,  $j$ 번째 요구 조건에 대한  $i$ 번째 요구 조건의 상대적 중요도는 Table 1을 통해 언어적 평가의 삼각 Fuzzy 수  $M_{i,j}(i = 1, 2, \dots, n)$ 로 변환된다. 반대로  $i$ 번째 요구 조건에 대한  $j$ 번째 요구 조건의 상대적 중요도를 나타내는 삼각 Fuzzy 수  $M_{j,i}$ 는 식(3)을 사용하여  $M_{j,i} = M_{i,j}^{-1}$ 의 관계를 이용하여 구할 수 있다.

$n \times n$  크기의 삼각 Fuzzy 수  $M_{i,j}$ 에서  $n$ 개의 요구 조건에 대한 가중치를 계산하기 위해서는 Chang이 고안한 범위 분석법(Extent Analysis Method)을 적용한다[14].  $i$ 번째 요구 조건에 대한

Table 2 Pairwise comparison survey for Fuzzy AHP

Which is more important?		Equal	How much more important?
<input type="checkbox"/> Min diameter	or <input type="checkbox"/> Max aspect ratio	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Very Slightly <input type="checkbox"/> Slightly <input type="checkbox"/> Moderately <input type="checkbox"/> Highly <input type="checkbox"/> Very Highly
<input type="checkbox"/> Min diameter	or <input type="checkbox"/> Feed Rate	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Very Slightly <input type="checkbox"/> Slightly <input type="checkbox"/> Moderately <input type="checkbox"/> Highly <input type="checkbox"/> Very Highly
... ..			
<input type="checkbox"/> Surface roughness	or <input type="checkbox"/> Commercial availability	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> Very Slightly <input type="checkbox"/> Slightly <input type="checkbox"/> Moderately <input type="checkbox"/> Highly <input type="checkbox"/> Very Highly

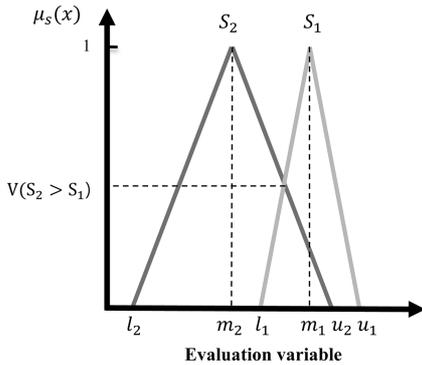


Fig. 4 The intersection of fuzzy numbers

Fuzzy 합성 범위 값(Synthetic Extent Value),  $S_i$ 는 다음과 같이 삼각 Fuzzy 수  $M_{ij}$ 을 정규화하여 구한다.

$$S_i = \sum_{j=1}^n M_{ij} \otimes \left[ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{ij} \right]^{-1}$$

$$\sum_{j=1}^m M_{ij} = \left( \sum_{j=1}^m l_{ij}, \sum_{j=1}^m m_{ij}, \sum_{j=1}^m u_{ij} \right) \quad (5)$$

$$\left[ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{ij} \right]^{-1} = \left( \frac{1}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m u_{ij}}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m m_{ij}}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m l_{ij}} \right)$$

한편, 범위 분석법에서 정의된 Fuzzy 합성 범위 값  $S_2$ 가  $S_1$  값보다 높을 확률  $V(S_2 \geq S_1)$ 은 다음과 같다.

$$V(S_2 \geq S_1) = \begin{cases} 1 & \text{if } m_2 \geq m_1 \\ 0 & \text{if } l_1 \geq u_2 \\ \frac{l_1 - u_2}{(m_2 - u_2) - (m_1 - l_1)} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

이렇게 구한 확률  $V(S_2 \geq S_1)$ 은 Fig. 4에서처럼 두 삼각 Fuzzy 수의 교차점에서의 y값에 해당한다. 한편, 합성 범위 값  $S_i$ 가 다른 모든 합성 범위 값  $S_k$ 보다 클 확률,  $d'(A_i)$ 은 다음과 같다.

$$d'(A_i) = V(S_i \geq S_1, S_2, \dots, S_n) = V[(S_i \geq S_1), (S_i \geq S_2), \dots, (S_i \geq S_{i-1}), (S_i \geq S_{i+1}), \dots, (S_i \geq S_n)] = \min V(S_i \geq S_k), \quad (7)$$

$$k = 1, 2, \dots, n; k \neq i,$$

이를 이용하여  $n$ 가지 요구 조건에 대한 가중치 벡터  $W'$ 를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$W' = (d'(A_1), d'(A_2), \dots, d'(A_n)) \quad (8)$$

정규화된 가중치 벡터  $W$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$W = (d(A_1), d(A_2), \dots, d(A_n)); d(A_i) = \frac{d'(A_i)}{\sum_i^n d'(A_i)} \quad (9)$$

### 2.3 Fuzzy TOPSIS

TOPSIS는 Hwang과 Yoon에 의해 제시된 다기준 의사 결정방법 중의 하나이다[15]. TOPSIS의 기본 원리는 최선의 선택지는 긍정적인 해결책(Positive Ideal Solution, PIS)과는 최대한 가깝게 있어야 하는데 반해 부정적인 해결책(Negative Ideal Solution, NIS)과는 최대한 멀리 떨어져 있어야 한다는 것이다. Fuzzy TOPSIS는 해결책의 평가에 있어 모호성과 부정확함이 존재할 때 활용하는 것이 보다 바람직하다. 본 연구에서는 여러 미세 가공 공정 중 주어진 부품 또는 제품의 가공에 최적의 공정을 선택하기 위해 Fuzzy TOPSIS 방법을 적용하였다. 구체적인 적용 방법은 다음과 같다.

앞서 Fuzzy AHP에서 정의된  $n$ 개의 요구 조건에 대해  $m$ 개의 선택 가능한 미세 가공 공정이 존재할 때, 이에 대한 평가표는 Table 3에 제시된 정량적 언어 평가를 이용하여 작성할 수 있다. 이 때 주의할 점은 각각의 요구 조건을 정량적으로 큰 것이 선호되는 혜택 기준(Benefit Criteria) 또는 정량적으로 작은 것이 선호되는 비용 기준(Cost Criteria)으로 나누고, 이를 Table 3에 제시된 언어를 이용하여 정량적으로 평가하여야 한다는 것이다. 그다음에는 선택지 평가표를 삼각 Fuzzy 수  $p_{ij} = (l_{ij}, m_{ij}, u_{ij})$ 로 변환한 후 정규화 과정을 거친다. 정규화 시,  $i$ 번째 요구 조건이 혜택 기준일 경우 식(10), 비용 기준일 경우 식(11)을 각각 사용한다.

$$\hat{p}_{ij} = \left( \frac{l_{ij}}{u_j^+}, \frac{m_{ij}}{u_j^+}, \frac{u_{ij}}{u_j^+} \right) \text{ and } u_j^+ = \max u_{ij}(\text{benefit criteria}) \quad (10)$$

$$\hat{p}_{ij} = \left( \frac{l_j^-}{l_j^-}, \frac{l_j^-}{m_{ij}^-}, \frac{l_j^-}{l_{ij}^-} \right) \text{ and } l_j^- = \min l_{ij}(\text{cost criteria}) \quad (11)$$

다음으로는 Fuzzy AHP에서 구한 가중치 벡터를 정규화된 Fuzzy 수 행렬에 식(12)와 같이 적용한다.

$$v_{ij} = \hat{p}_{ij} \otimes (W)^T \quad (12)$$

이후 모든 개별 요구 조건에 대한 이상적 해결책(PIS)과 부정적

Table 3 Triangular fuzzy number for linguistic ratings

Linguistic variables	Triangular fuzzy number
Very low	(1, 2, 3)
Low	(2, 3, 4)
Medium	(3, 4, 5)
High	(4, 5, 6)
Very high	(5, 6, 7)

해결책(NIS)을 식(13), 식(14)를 적용하여 찾는다. 식(13), 식(14)에서 알 수 있듯이, 이상적 해결책과 부정적 해결책은 요구 조건이 혜택 기준일 때는 정규화된 Fuzzy 수 행렬 행값의 최대값과 최소값이 되나 비용 기준일 때는 반대로 행값의 최소값과 최대값이 된다.

$$v_i^+ = \left\{ \left\{ \begin{array}{l} (\max v_{i,j} | i \in \text{benefit criteria}) \\ (\min v_{i,j} | i \in \text{cost criteria}) \end{array} \right\} \right\} i = 1, 2, \dots, n \quad (13)$$

$$v_i^- = \left\{ \left\{ \begin{array}{l} (\min v_{i,j} | i \in \text{benefit criteria}) \\ (\max v_{i,j} | i \in \text{cost criteria}) \end{array} \right\} \right\} i = 1, 2, \dots, n \quad (14)$$

그 다음으로는 j번째 선택지와 PIS, NIS의 거리( $d_j^+$ ,  $d_j^-$ )를 아래의 식(15), 식(16)을 이용하여 각각 구한다.

$$d_j^+ = \sum_{i=1}^n (v_{ij} - v_i^+) \quad (15)$$

$$= \sum_{i=1}^n \sqrt{\{(a_{ij} - a_j^+)^2 + (b_{ij} - b_j^+)^2 + (c_{ij} - c_j^+)^2\}} \quad j = 1, 2, \dots, m$$

$$d_j^- = \sum_{i=1}^n (v_{ij} - v_i^-) \quad (16)$$

$$= \sum_{i=1}^n \sqrt{\{(a_{ij} - a_j^-)^2 + (b_{ij} - b_j^-)^2 + (c_{ij} - c_j^-)^2\}} \quad j = 1, 2, \dots, m$$

마지막으로 각 선택지의 근접도 계수(Closeness Coefficient)를 다음 식을 이용하여 구하게 되며, 계산된 근접도 계수를 내림차순하여 최종 순위를 결정하게 된다.

$$CC_j = \frac{d_j^-}{d_j^- + d_j^+}, j = 1, 2, \dots, m \quad (17)$$

### 3. 연구 사례

#### 3.1 미세 가공 및 제품 정보 수집

본 연구에서는 최적의 미세 가공법 선정을 위한 Fuzzy-AHP-TOPSIS 방법의 활용 예로 Fig. 5에 보이는 것과 같은 가솔린

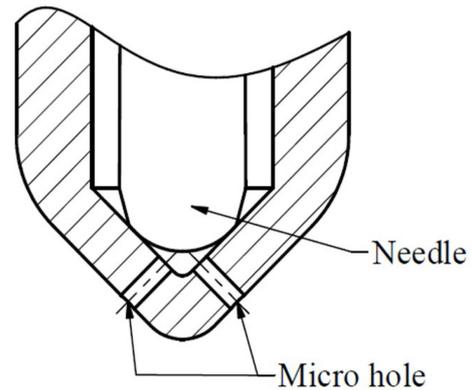


Fig. 5 Fuel injection nozzle

직접 분사(Gasoline Direct Injection, GDI) 엔진의 연료 주입 노즐을 선정하였다. GDI 엔진은 연료와 공기를 혼합하여 엔진 실린더에 넣는 방식이 아니라 연료와 공기를 분리하여 공급하는 방식이다. GDI 엔진 성능을 유지하기 위해서는 연료 주입 노즐에서 분사되는 연료 압력을 일정하게 유지해야 한다. 이때 연료 주입 노즐의 구멍은 이 분사 압력에 직접적인 영향을 주게 되므로 높은 품질의 구멍 가공이 요구된다[16].

미세 가공법 선정 시 고려해야 할 요구 조건으로는 최소 직경, 최대 중형비, 표면 거칠기, 가공 속도, 경제성 총 5가지를 선정하였다. Fuzzy AHP를 활용하여 선정된 5가지 요구 조건의 중요도를 계산하기 위해서는 먼저 수요자로부터 Table 2의 쌍대 비교 설문문을 받아야 한다. 일단 설문문이 완성되면 그 결과를 토대로 5가지 요구 조건을 2개씩 짝지은 모든 조합에 대해 중요도를 평가하게 된다. 이때 중요도 평가는 Table 1의 언어적 평가를 토대로 수행된다.

연료 주입 노즐의 적절한 연료 분사 압력 조절을 위해서는 작은 구멍 직경과 작은 표면 거칠기가 요구된다. 따라서 쌍대 비교 설문문에서 다른 요구 조건보다 가공 가능한 최소 구멍 직경과 표면 거칠기에 대한 중요도가 더 높게 평가될 거라고 예상할 수 있다. 또한, 연료 분사 노즐의 구멍 깊이가 상대적으로 작기 때문에 최대 중형비에 대한 중요도는 다른 항목에 비해 보다 낮게 평가될 거라고 예상할 수 있다. 위와 같은 각 요구 조건들의 상대적 중요도를 고려하여 Table 2의 쌍대 비교 설문문을 진행한다.

연료 주입 노즐을 가공할 미세 가공법 후보로서는 전통적인 방식의 드릴 가공, 레이저 가공, 방전 가공(EDM), 전해 가공(ECM), 전해 방전 가공(ECDM), 전자빔 가공(EBM), 초음파 가공을 선정하였다. 여기서 전통적인 방식의 드릴 가공은 보통 크기의 가공에 흔히 사용하는, 공구를 척에 끼워 돌리는 절삭 가공을 의미한다. 여기에는 Twist 드릴, Spade 드릴, D-shaped 드릴, Single 드릴과 같이 드릴 공구의 형태에 따라 세부 분류된 미세 가공법들이 포함된다.

#### 3.2 Fuzzy AHP

요구 조건의 가중치를 구하기 위해 Table 2의 쌍대 비교 설문문

Table 4 Pairwise comparison survey

	Min. diameter	Max. aspect ratio	Surface roughness	Production rate	Economic feasibility
Min. diameter	Equal	Highly		Very slightly	Moderately
Max. aspect ratio		Equal		Very slightly	Highly
Surface roughness	Very slightly	Highly	Equal		Moderately
Production rate			Very slightly	Equal	
Economic Feasibility				Moderately	Equal

Table 5 Pairwise comparison table

	Min. diameter	Max. aspect ratio	Surface roughness	Production rate	Economic feasibility
Min. diameter	(1, 1, 1)	(4, 5, 6)	(1/3, 1/2, 1/1)	(1, 2, 3)	(3, 4, 5)
Max. aspect ratio	(1/6, 1/5, 1/4)	(1, 1, 1)	(1/6, 1/5, 1/4)	(1, 2, 3)	(4, 5, 6)
Surface roughness	(1, 2, 3)	(4, 5, 6)	(1, 1, 1)	(1/3, 1/2, 1/1)	(3, 4, 5)
Production rate	(1/3, 1/2, 1/1)	(1/3, 1/2, 1/1)	(1, 2, 3)	(1, 1, 1)	(1/5, 1/4, 1/3)
Economic Feasibility	(1/5, 1/4, 1/3)	(1/6, 1/5, 1/4)	(1/5, 1/4, 1/3)	(3, 4, 5)	(1, 1, 1)

Table 6 Fuzzy AHP result

	Min. diameter	Max. aspect ratio	Feed rate	Surface roughness	Commercial availability
Si	(0.167,0.265,0.415)	(0.089,0.151,0.248)	(0.092,0.137,0.207)	(0.141,0.218,0.346)	(0.153,0.229,0.344)
W	0.305	0.127	0.073	0.242	0.253

Table 7 Evaluation of Micro drilling

	Twist	Spade	D-shaped	Single	Laser	EDM	ECM	ECDM	EBM	Ultrasonic
Min. diameter	Medium	Low	Low	Medium	Medium	High	Medium	Very High	High	High
Max. aspect ratio	Medium	Medium	Very Low	Low	Very High	High	High	Very Low	Medium	High
Feed rate	Very High	Low	Low	High	High	Very low	Medium	Low	Very High	Low
Surface roughness	Medium	Medium	Medium	Medium	Very High	High	Medium	Medium	High	Very Low
Commercial availability	High	Medium	Medium	Low	High	Medium	Medium	Low	Very Low	Medium

받아 쌍대 비교표를 작성해야 한다. Table 4와 같은 쌍대 비교표  $M_{n,m}$ 를 작성할 때,  $i$ 행의 요구 조건이  $j$ 열의 요구 조건보다 중요할 경우에는  $M_{ij}$ 에 Table 3의 언어적 평가를 입력하고  $M_{ji}$ 에는 빈칸을 입력한다. 반대로  $j$ 열의 요구 조건이  $i$ 행의 요구 조건보다 중요할 경우에는  $M_{ji}$ 에 언어적 평가를 입력하고  $M_{ij}$ 에는 빈칸을 입력한다. 이후 언어적 평가를 Table 3의 삼각 퍼지수로 변환한 후, 빈칸에는 대각선 대칭 원소의 역수값을 식 (3)을 이용하여 기입한다. 이렇게 완성된 쌍대 비교표는 Table 5와 같다.

이후 각 요구 조건의 Fuzzy 합성 범위 값을 식(5)를 사용하여 구하고, 범위 분석법을 통해 각 Fuzzy 합성 범위 값을 비교하여 각 요구 조건의 가중치를 식(6)부터 식(9)를 통해 구한다. 이렇게 구한 Fuzzy 합성 범위 값과 가중치는 Table 6과 같다.

### 3.3 Fuzzy TOPSIS

Fuzzy TOPSIS에 사용될 미세 가공법에 대한 요구 조건 별 평가표는 Table 7과 같다. 미세 가공법들에 대한 평가표를 삼각 퍼지

수로 변환한 후, 식(10), 식(11)을 이용하여 정규화한다. 다음으로는 Fuzzy AHP에서 구한 가중치를 식(12)을 통해 가공법 평가표에 적용한다. 이렇게 정규화와 가중치가 적용된 가공법들에 대한 평가표는 Table 8과 같다. 가공법 평가표에서 식(13), 식(14)에 따라 각 요구 조건의 긍정적인 해결책(PIS)과 부정적인 해결책(NIS)를 찾는다. 최소 직경의 경우 그 값이 작을수록 좋기 때문에 ECDM이 PIS(0.096, 0.112, 0.134), Spade, D-shaped가 NIS(0.168, 0.224, 0.336)이다. 모든 요구 조건에 대해 PIS와 NIS를 구한 후, 식(15), 식(16), 식(17)을 적용하여 근접도 계수  $CC_i$ 를 구한 결과는 Table 9와 같다. 본 예시에서는, 근접도 계수가 0.854로 가장 큰 레이저 가공이 요구 조건을 충족시키는 최적 가공 방법이라 할 수 있다.

### 4. 결론

본 연구에서는 최적의 미세 가공 방법 선택을 위해 Fuzzy

Table 8 Normalized weighted evaluation table

	Twist	Spade	D-shaped	Single	Laser	ECDM	EBM	Ultrasonic
Min. diameter	(0.134, 0.168, 0.224)	(0.168, 0.224, 0.336)	(0.168, 0.224, 0.336)	(0.134, 0.168, 0.224)	(0.134, 0.168, 0.224)	(0.096, 0.112, 0.134)	(0.112, 0.134, 0.168)	(0.112, 0.134, 0.168)
Max. aspect ratio	(0.09, 0.12, 0.149)	(0.09, 0.12, 0.149)	(0.03, 0.06, 0.09)	(0.06, 0.09, 0.12)	(0.149, 0.179, 0.209)	(0.03, 0.06, 0.09)	(0.09, 0.12, 0.149)	(0.12, 0.149, 0.179)
Feed rate	(0.031, 0.037, 0.043)	(0.012, 0.018, 0.025)	(0.012, 0.018, 0.025)	(0.025, 0.031, 0.037)	(0.025, 0.031, 0.037)	(0.012, 0.018, 0.025)	(0.031, 0.037, 0.043)	(0.012, 0.018, 0.025)
Surface roughness	(0.067, 0.084, 0.112)	(0.067, 0.084, 0.112)	(0.067, 0.084, 0.112)	(0.067, 0.084, 0.112)	(0.048, 0.056, 0.067)	(0.067, 0.084, 0.112)	(0.056, 0.067, 0.084)	(0.112, 0.168, 0.336)
Commercial availability	(0.051, 0.063, 0.076)	(0.038, 0.051, 0.063)	(0.038, 0.051, 0.063)	(0.025, 0.038, 0.051)	(0.051, 0.063, 0.076)	(0.025, 0.038, 0.051)	(0.013, 0.025, 0.038)	(0.038, 0.051, 0.063)

Table 9 Fuzzy TOPSIS result

	Twist	Spade	D-shaped	Single	Laser	ECDM	EBM	Ultrasonic
$d_i^+$	0.272	0.455	0.559	0.378	0.123	0.339	0.235	0.447
$d_i^-$	0.574	0.391	0.287	0.468	0.722	0.507	0.611	0.398
$CC_i$	0.678	0.462	0.34	0.553	0.854	0.599	0.723	0.471

AHP-TOPSIS 기법을 활용하는 방법을 제시하였다. 보다 구체적으로는 미세 가공과 관련된 제품 또는 부품의 요구 조건 각각에 대한 중요도를 AHP (Analytic Hierarchy Process) 기법을 이용하여 계산한 후, 이를 TOPSIS (Technique for Order Performance by Similarity to Ideal Solution) 기법에 연계하여 최적의 미세 가공 공정을 결정하는 방법을 제시하였다. 이 과정에서 요구 조건의 중요도 평가와 미세 가공 공정의 적합도 평가에 Fuzzy 논리를 적용함으로써 참, 거짓의 이분법적 평가나 절대적 수치에 의한 평가가 아니라 언어로서 표현되는 평가가 가능토록 하였다. 제안된 방법의 실효성은 엔진의 연료 주입 노즐 사례를 통해 확인할 수 있었다.

본 논문에서 제시한 Fuzzy AHP TOPSIS 기법은 요구 조건이나 선택지들을 임의로 늘려도 적용할 수 있다는 장점이 있다. 예를 들어, 연료 주입 노즐 사례에서 요구 조건으로 치수 정밀도나 기하 공차를 추가하거나 미세 가공 방법으로 AJM (Abrasive Jet Machining)을 추가해도 동일한 방법을 적용하여 문제를 해결할 수 있다. 또한, 이 방법은 확장성이 좋아 구멍 가공뿐만 아니라 형상 가공 등 다른 분야에도 쉽게 적용할 수 있다는 장점이 있다. 더불어 요구 조건의 중요도 평가나 가공 공정의 적합도 평가에 언어적 평가를 활용함으로써 평가의 수월성이 높다는 장점이 있다.

따라서 본 연구에서 제시된 방법을 보다 적극적으로 활용할 필요성이 있다고 판단된다. 이를 위해서는 추후 미세 가공과 관련된 다양한 데이터베이스 및 사례 구축, 그리고 미세 가공

공정에 대한 보다 정확한 이해와 평가가 필요하다고 할 수 있다. 그 결과로서 미세 가공과 관련된 다양한 요구 조건으로 인해 최적의 결정이 어려운 설계 및 제조 문제에서 보다 적합한 해결 방법을 보다 손쉽게 찾을 수 있으리라 기대된다. 또한 미세 가공을 위한 개방형 제조 플랫폼에서 최적 공정 선정을 위한 엔진으로서 활용될 수 있으리라 기대된다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Gao, S., Huang, H., (2017), Recent advances in micro-and nanomachining technologies, *Frontiers of Mechanical Engineering*, 12(1), 18-32.
- Son, J., Kang, H., Bae, H., Lee, E., Han, H., Park, J., Kim, H., (2015), IoT-based open manufacturing service platform for mass personalization, *The Journal of the Korean Institute of Communication Sciences*, 33(1), 42-47.
- Kang, H. S., Do Noh, S., Son, J. Y., Kim, H., Park, J. H., Lee, J.

- Y., (2018), The FaaS system using additive manufacturing for personalized production, *Rapid Prototyping Journal*, 24(9), 1486-1499.
4. Jahan, A., Edwards, K. L., Bahraminasab, M., (2016). Multi-criteria decision analysis for supporting the selection of engineering materials in product design. Butterworth-Heinemann.
  5. Ishak, A., (2020), Analysis of fuzzy AHP-TOPSIS methods in multi criteria decision making: Literature review, *Proceedings of the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 012147.
  6. Zadeh, L. A., (1988), Fuzzy logic, *Computer*, 21(4), 83-93. doi:10.1109/2.53
  7. Ko, J. H., Bae, J. H., Hong, D., (2016), Variable impedance control and fuzzy inference based identification of user intension for direct teaching of a mobile robot, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 33(8), 647-654.
  8. Ahn, K. K., Yoon, J. I., Khoa, L. D., (2011), A study on the path-tracking of electric wheelchair robot, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 28(11), 1265-1271.
  9. Camero, M. C., (2014), Multicriteria model for maintenance benchmarking, *Journal of Manufacturing Systems*, 33(2), 303-321.
  10. Prakash, C., Barua, M. K., (2015), Integration of AHP-TOPSIS method for prioritizing the solutions of reverse logistics adoption to overcome its barriers under fuzzy environment, *Journal of Manufacturing Systems*, 37, 599-615.
  11. Anand, M., Vinodh, S., (2018), Application of fuzzy AHP-TOPSIS for ranking additive manufacturing processes for microfabrication, *Rapid Prototyping Journal*, 24(2), 424-435.
  12. Roy, T., Dutta, R. K., (2019), Integrated fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS methods for multi-objective optimization of electro discharge machining process, *Soft Computing*, 23(13), 5053-5063.
  13. Saaty, T. L., (1990), How to make a decision: The analytic hierarchy process, *European Journal of Operational Research*, 48(1), 9-26.
  14. Chang, D.-Y., (1996), Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP, *European Journal of Operational Research*, 95(3), 649-655.
  15. Hwang, C.-L., Yoon, K., Hwang, C.-L., Yoon, K., (1981), Methods for multiple attribute decision making, *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications a State-of-the-art Survey*, 58-191.
  16. Jadhav, P. D., Mallikarjuna, J., (2018), Effect of fuel injector hole diameter and injection timing on the mixture formation in a GDI engine-a cfd study, *Computational and Experimental Studies*, 6(4), 737-748.



#### **Seong-Gu Kang**

M.Sc. candidate in the Department of Mechanical Information Engineering, Seoul National University of Science & Technology. His research interest is control systems and instrumentation.

E-mail: rkdtd905@naver.com



#### **Jihong Hwang**

Professor in the Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science & Technology. His research interest is machining and grinding processes.

E-mail: hwangjh@seoultech.ac.kr

# 전조 가공을 통해 제작된 볼트에 대한 초음파나노표면개질 효과에 관한 연구

## Study on Effect of Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification in Bolt Manufactured by Screw Rolling

하형진<sup>1</sup>, 박한별<sup>1</sup>, 정태형<sup>2</sup>, 심도식<sup>1,3,#</sup>

Hyeong-Jin Ha<sup>1</sup>, Han-Byeol Park<sup>1</sup>, Tae Hyung Jung<sup>2</sup>, and Do-Sik Shim<sup>1,3,#</sup>

<sup>1</sup> 한국해양대학교 해양신재생에너지융합전공 (Interdisciplinary Major of Ocean Renewable Energy Engineering, Korea Maritime & Ocean University)

<sup>2</sup> (주)화신하이테크 (Hwashin-Hitech Co., Ltd.)

<sup>3</sup> 한국해양대학교 해양신소재융합공학과 (Department of Ocean Advanced Materials Convergence Engineering, Korea Maritime and Ocean University)

# Corresponding Author / E-mail: think@kmou.ac.kr, TEL: +82-51-410-4354

ORCID: 0000-0002-5133-1585

KEYWORDS: Screw rolling (나사 전조), Ultrasonic nanocrystal surface modification (초음파나노표면개질), Stainless steel (스테인레스강), Microstructure (미세조직), Microhardness (미세경도)

*This study aimed to determine effects of ultrasonic nanocrystal surface modification (UNSM) as a surface pre-process on performance and surface characteristics of bolts manufactured through a screw rolling process. Surface roughness, hardness, and microstructural changes after UNSM treatment were examined. Results showed no significant defects such as cracks in all fabricated samples after screw rolling of bolt pre-processed by UNSM treatment. In addition, material flow was continuously maintained without disconnection. After UNSM treatment, surface roughness was improved for both body and screw parts. The surface roughness of the UNSM treated screw part was improved the most at 43%. Hardness test showed the greatest increase in hardness on the surface hit by the UNSM ball tip, with hardness improved to about 500  $\mu\text{m}$  deep from the surface. The hardness at the screw part was the highest at 471 HV, which was attributed to the fact that grains near the surface were deformed and refined by UNSM treatment followed by screw rolling. Near the surface of the screw, refined grains and high dislocation density were clearly observed by EBSD mapping. These results confirm that UNSM treatment before screw rolling is effective in improving mechanical properties of screw rolled bolts.*

Manuscript received: March 3, 2023 / Revised: March 23, 2023 / Accepted: March 31, 2023

### 1. 서론

볼트(Bolt)는 다양한 기계 부품 산업에 쓰이는 중요한 체결 요소 중의 하나이다. 최근 발전, 해양 시추, 항공 산업에 사용되는 볼트는 높은 압력과 온도 그리고 부식 환경 등에 견딜 수 있어야 하며, 따라서 고부가가치 기계 요소 부품으로 인식되고 있다. 볼트의 나사선을 만드는 공정은 크게 절삭가공을 통한 방법과 소성가공(Plastic Working)의 일종인 나사전조가공으로 나뉜다[1]. 절삭가공을 통한 방법에서는 절삭 공구를 통해 나사산을

깎아서 만드는 비교적 간단한 방식이다. 하지만, 가공 속도가 낮으며 나사부 절삭 표면이 거칠고, 나사부 강도가 낮은 단점을 지닌다. 반면, 전조 가공은 나사산이 형성된 전조 다이스(Dies)로 가압하여 소재의 소성가공을 통해 제작하는 방법으로 결함 없는 매끄러운 나사 표면을 만들 수 있고, 강도와 표면 경도가 원소재에 비해 상승하며, 피로특성은 약 30% 이상 상승하는 것으로 알려져 있다[2]. 전조가공으로 나사산을 만들기 위해서는 역나사산을 가진 회전하는 다이스 사이에 윤활유와 함께 원소재를 넣고 고압을 부가하기 때문에, 원소재가 충분히 소성변형이

될 수 있도록 높은 경도와 강도를 가지는 다이스 제작 기술과 가압 설비 기술을 필요로 한다.

최근에는 가혹한 환경에서의 내구성 높은 볼트에 대한 요구가 증가하고 있다. 특히, 발전소 터빈 하우징에 사용되는 볼트류는 소모품임에도 불구하고 고온 내식성, 고온 경도 및 강도가 우수해야 한다. 이를 위해 초합금(Super-alloy)과 같은 특수 소재를 사용하거나 다양한 표면 처리를 통해 기계적 특성을 개선하려는 시도가 진행되고 있다.

본 연구에서는 전조가공되는 볼트의 표면처리를 통해 제품의 성능을 향상시키고자 하며, 이를 위해 초음파 나노표면개질(Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification, UNSM) 기술을 응용해보고자 한다. UNSM 기술은 이전의 연구를 통해 금속 재료의 내마모성[3]과 피로강도[4], 내식성[5] 등을 향상시킬 수 있음이 증명된 표면 처리 기술이다. 또한, 재료 표면에 마찰 특성 향상을 위한 마이크로 덩플 형상(Micro-dimple Topology)을 동시에 구현할 수 있다[6]. 또한, UNSM은 공정 변수를 정밀하게 제어할 수 있기 때문에, 기존의 기계적 표면처리 기법보다 더 정밀하고 깊은 영역까지 소성 변형시킬 수 있어 효과적으로 제품의 표면 특성을 향상시킬 수 있다고 보고된 기술이다[7-9]. 한편, 마모 환경에서 사용되는 부품은 표면으로부터 얇은 층(0.5-1 mm)만이 가혹한 조건에 노출된다[10]. 이러한 경우에는 부품의 표면에만 기계적 표면처리를 통해 성능을 향상시킬 수 있다.

본 연구에서는 전조가공되는 볼트의 성능 향상 시도를 목적으로 스테인레스강 원소재를 볼트 형상으로 1차 가공한 후에 UNSM 처리하고자 한다. UNSM 처리 후에는 전조가공을 통해 나사산을 가지는 볼트를 제작한다. 이 과정에서, 전조가공 직전 UNSM 처리가 전조가공에 어떠한 영향을 미치는지 그리고 전조가공 전 UNSM 처리에 의해 나타난 특성 변화가 어떻게 유지하는지에 대해서 알아보하고자 한다. 또한, UNSM에 따른 미세조직 및 결정립 변화는 이미 많은 실험 논문들에서 검증되었기 때문에, UNSM에 따른 미세조직적 변화가 전조 후에는 어떻게 변화하는지도 관찰하고자 한다. 이를 위해, 경도, 표면거칠기, 그리고 미세조직 및 결정립 변화 등을 시험 분석하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 초음파나노표면개질

Figs. 1(a)는 UNSM 장치의 개략도를, 1(b)는 소재표면에 UNSM 기술을 적용하는 모습을 나타낸 것이다. 무게 추(Weight)로 정적 하중(Static Load)을 조절하고, 초음파 발전기(Oscillator)에서 특정 주파수의 초음파를 발생시킨다. 그리고 발생한 초음파는 트랜스듀서(Transducer)와 부스터(Booster) 장치를 통해, 텅스텐 카바이드 재질(경도 1700 HV)의 볼 팁(Ball Tip)이 부착된 압입자(Indenter)에 하중을 전달하게 된다. 이 때 전달되는 하중의 크기는 무게 추의 정적 하중과 초음파의 진동

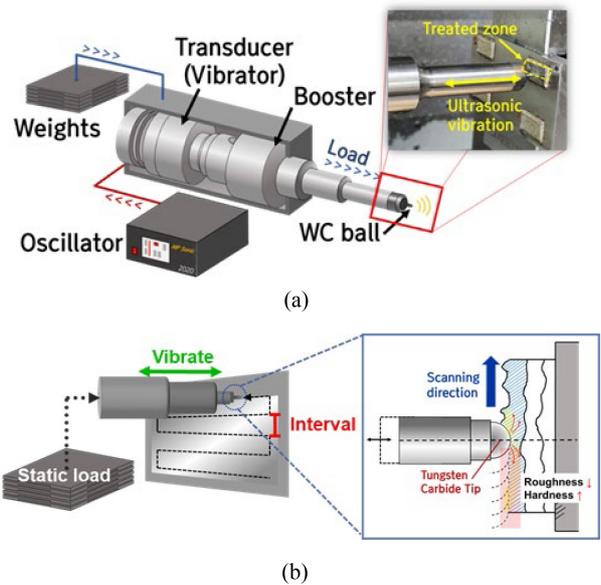


Fig. 1 Schematics of (a) UNSM principle and (b) application of UNSM on material surface

에너지로 인한 동적 하중(Dynamic Load)이 결합된 양이다. UNSM 장치는 NC/CNC 공작기계에 설치되기 때문에 표면에 대한 정밀한 가공이 가능하다. 본 연구에서는 CNC 선반 공작기계에 DesignMecha 社의 UNSM 장치를 설치해 실험에 적용하였다.

### 2.2 시편 제작 및 방법

본 연구에서 사용된 오스테나이트계 스테인리스강인 STS 316L은 우수한 내식성과 용접성 그리고 내열성을 가지기 때문에 화학, 해양, 원자력과 같은 분야에 널리 사용되고 있다. 따라서, 위와 같은 산업 분야에 체결용 요소 소재로도 많이 활용되고 있다.

한편, 전조 방식에는 평금형을 이용한 방식과 롤금형을 이용한 방식이 있다. 본 연구에서는 아래 그림에서와 같이 롤금형을 이용한 방식을 사용하였으며, 역나사산을 가진 회전하는 롤금형 사이에 윤활유 공급과 함께 원소재를 넣고 높은 압력으로 가압하여 회전시킴으로써 원소재의 표면을 소성가공시켜 볼트에 나사산을 만들게 된다. 롤금형의 회전을 이용한 전조 방식이기 때문에 전조 롤링(Screw Rolling)으로 불려진다.

UNSM 처리 후 전조가공을 통해 제작되는 볼트의 나사부의 치수를 Fig. 3에 나타내었다. 원소재를 볼트의 외형으로 1차 가공한 뒤, Fig. 4에서와 같이 UNSM 처리를 하게 된다. 피가공물을 UNSM-L520 지그에 고정하여 회전시킴과 동시에, UNSM 혼(Horn)에 부착된 볼팁이 회전하는 피가공물 표면을 따라 일정한 속도로 타격하면서 이송하게 된다. 이 때, 회전하는 공작물의 진동 발생 최소화 및 UNSM 효과를 극대화시키기 위하여 UNSM 주요 변수인 공작물 회전 속도, 볼팁 이송속도, 타격 하중 등이 최적화되어야 한다. 주요 변수들에 대한 조건들은 예비

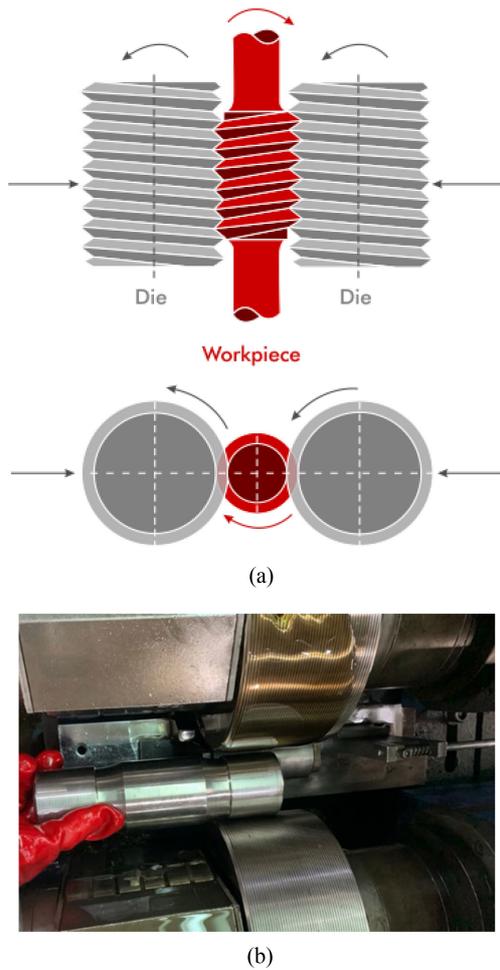


Fig. 2 (a) Schematics of the principle of screw rolling and (b) roll dies and materials

Table 1 Conditions for UNSM treatment

Process parameters	Value
Ball tip diameter [mm]	2.38
Amplitude [ $\mu\text{m}$ ]	20
Ultrasonic frequency [kHz]	20
Feed rate [mm/min]	2,000
Static load [N]	30
Rotating speed [RPM]	30

연구를 통해 탐색되었으며, 그 결과 본 실험에 사용된 UNSM 처리 조건을 Table 1에 제시하였다.

Fig. 4에 나타난 바와 같이 나사부(Thread)와 평탄부(Body)에 각각 UNSM 처리하였으며, 이후에는 나사부에만 전조 공정을 통해 나사를 형성하게 된다. UNSM의 효과를 알아보기 위해 UNSM 처리 후 전조가공한 시편과 UNSM 처리없이 전조가공한 시편을 각각 제작하였다. 각각의 시편에 대해서 나사부와 평탄부에서의 경도, 표면거칠기, 미세조직 변화 등을 관찰하였다.

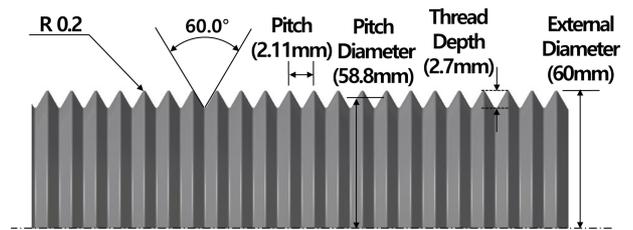


Fig. 3 Dimensions of thread of bolt for experiment

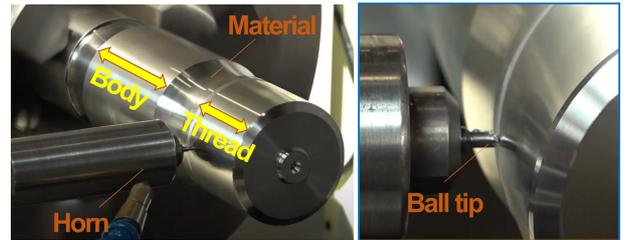


Fig. 4 UNSM treatment for pre-machined material before screw rolling

### 2.3 시편 전처리 및 시험 조건

시편의 전처리를 위해 시편을 절단하여 마운팅하였다. 그리고 실리콘카바이드(SiC) 사포(Sandpaper)로 #2400 Grit까지 연마한 후, 다이아몬드 서스펜션(Diamond Suspension) 용액으로 0.1  $\mu\text{m}$  Grade까지 연마하였다. 이후 10%의 나이탈(Nital) 용액을 이용하여 30초간 에칭(Etching)하였다. 미세조직은 주사전자현미경(Field Emission Scanning Electron Microscope, FE-SEM, MIRA3, TESCAN)을 이용하여 가속 전압 15 kV에서 관찰하였다. 결정립은 후방 산란 전자 회절패턴 분석기(Electron Back Scatter Diffraction, EBSD, CLARA, TESCAN)를 이용하여 Step Size 1.5  $\mu\text{m}$ 로 분석하였다.

적층 표면의 거칠기 측정을 위해서 접촉식 표면 조도 측정기(Mitutoyo, SJ-410)를 사용하였다. 표면 거칠기는 각 실험 표본에 대하여 10번 측정하였고, 평균값을 산출하였다.

UNSM 처리에 따른 경도 변화를 관찰하기 위해 ASTM E384에 준하여 마이크로 비커스 경도계(Akashi, HM-122)를 사용하여 미세 경도를 측정하였으며, 하중 0.1 kgf으로 10초간 압입하여 생긴 압흔의 면적을 측정하였다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 UNSM 처리 및 전조 가공 제품 검사

전조가공 전 UNSM 처리가 전조가공 후에 어떠한 효과를 미치는지 확인하기 위해, 1차 가공된 원소재에 대하여 나사부에 UNSM 처리 후 전조가공을 진행하였다. Fig. 5에는 이러한 과정을 거쳐 제작된 각 단계별 제품 모식도를 나타내고 있다. 최종 제품의 치수를 만족하기 위해 정밀 연삭을 통해 1차 가공하였으며, 중앙의 평탄부와 전조를 통해 생성될 나사부에 UNSM

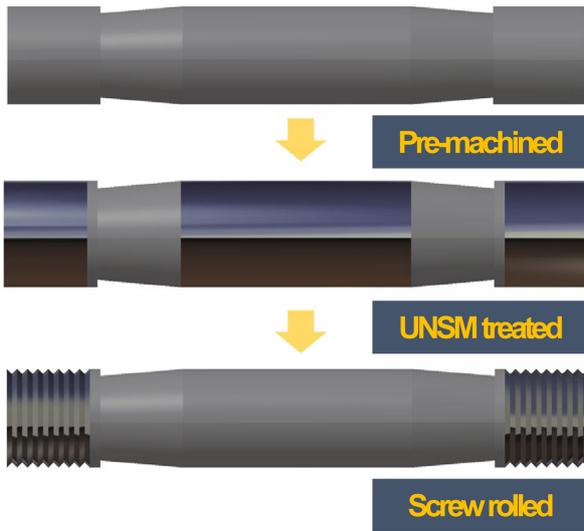


Fig. 5 Schematic of procedure of fabrication of UNSM treated and screw rolled bolt

Table 2 Dimensions of fabricated product

Unit: mm	Pitch diameter	External diameter	Pitch	Angle
Design	58.8	60	2.11	60
Product	58.84	60.20	2.11	60.04°

처리하였다. Fig. 4에서와 같이 UNSM 처리에 의한 표면 특성 변화를 표면에 생긴 광택을 통해 육안으로도 관찰할 수 있다. 이후 나사부에는 제작된 전조 금형과 정해진 가압 조건을 통해 최종 제품을 제작하였다.

전조가공 전 UNSM 처리에 따른 나사부 치수 만족도를 확인하기 위해 나사부를 정밀 측정하였으며, 그 결과를 Table 2에 나타내었다. 주요 측정 항목인 피치직경(Pitch Diameter) 외경(External Diameter), 피치(Pitch) 그리고 나사산 각(Angle) 모두 설계 치수와 비교했을 때 허용 범위 이내를 만족하는 것으로 확인되었다. 이는 전조 가공 전에 UNSM 처리하더라도 전조 가공을 통한 나사부 생성 시 나사부 치수에는 크게 영향을 미치지 않음을 확인할 수 있었다.

3.2 미세조직

UNSM 처리와 전조가공에 따른 미세조직(Microstructure)의 변화를 관찰하기 위한 SEM 사진들을 Fig. 6에 나타내었다. 우선, 평탄부에서 UNSM 처리에 의한 미세조직을 비교하였을 때 UNSM 처리 후 시편의 표면 부근에서 균열과 같은 결함은 관찰되지 않았다. 하지만, UNSM 처리 후에는 결정립이 미세화되었고, 소성변형에 의해 결정립에 쌍정변형(Twin Deformation)이 일어난 것을 확인할 수 있다. 평탄부는 전조가공되지 않는 영역이므로, 이러한 변화는 UNSM 처리에 따른 변화라고 볼 수 있다.

나사부에서도 UNSM 처리와 전조가공 후의 표면 결함은 관찰되지 않았다. UNSM 처리 후 전조가공된 샘플의 표면 역시

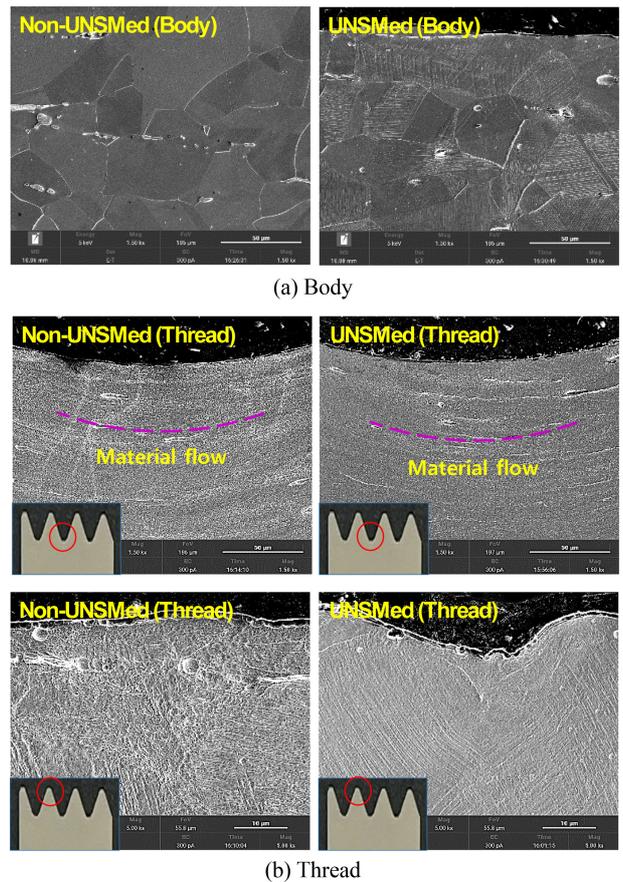


Fig. 6 Comparison of microstructures in body and thread for fabricated bolt

결정립은 미세화되었고, 재료 유동선(Material Flow)이 끊기지 않고 이어져 있는 것을 확인할 수 있다. Material Flow는 전조가공된 볼트에서 나타나는 특징으로 볼트의 강도 및 피로 수명을 향상시키는 요인이 된다. 나사산(Bottom Images in Fig. 6(b))에 비하여 나사골(Top Images in Fig. 6(b)) 영역의 결정립이 더 크게 변형되었는데, 이는 전조 다이스에 의한 나사산부의 압축에 의해서 소재가 더 많이 변형되기 때문이다. 나사산 또한 UNSM 처리에 의해 결정립에 쌍정변형이 일어난 것으로 확인되며, 이는 전위의 기동성을 감소시킴으로써 기계적 강도의 향상을 기대할 수 있다.

3.3 결정립 분석

UNSM 및 전조가공에 의한 결정립과 전위 밀도에 대한 변화를 EBSD를 통해 확인하였으며, Fig. 7에 결과를 나타내었다. EBSD 분석 결과, 평탄부에서 UNSM 처리 시편 표면 부근(이미지 상단)이 검은색으로 나타났다. 이는 UNSM 처리로 인하여 시편 표면 부근의 결정립이 매우 미세화되었기 때문이다. 나사부에서는 평탄부 샘플에 비해 결정립 변형과 쌍정변형, 그리고 높은 전위밀도가 더욱 뚜렷하게 관찰된다. 이러한 변화는 전조가공에 의한 것으로 볼 수 있다.

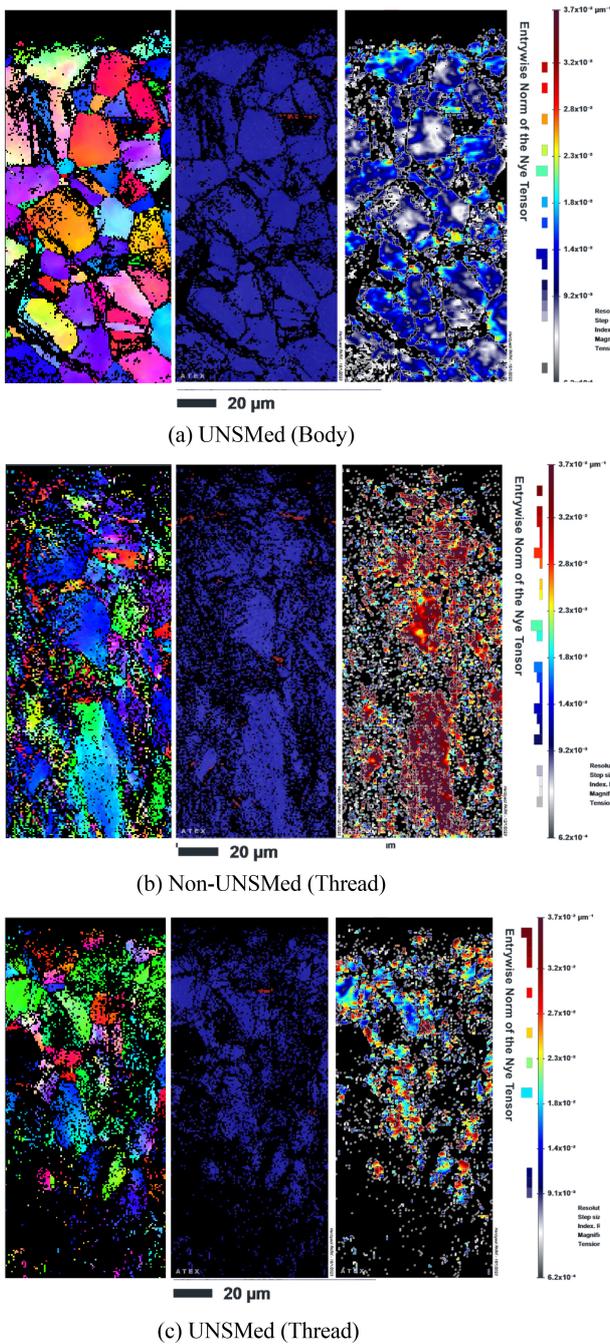


Fig. 7 Comparison of IPF map and phase map of specimens fabricated by each process

UNSM 처리 샘플과 그렇지 않은 샘플의 나사부를 비교하면 (Figs. 7(b) and 7(c)), UNSM 처리 후 전조된 샘플의 하부 넓은 영역이 EBSD Mapping되지 않고 검은색으로 나타난다. 이는 UNSM 처리 샘플이 UNSM과 전조가공의 영향을 동시에 받아 결정립이 매우 심하게 미세화되었기 때문이다. UNSM 처리와 전조 가공에 의해 미세화된 결정립이 더 많이 그리고 더 넓은 영역에 분포하고 있다. 이는 UNSM와 전조 가공에 따른 미세조직적 개선 효과를 볼트에서 검증할 수 있었으며, 이는 표면경도, 강도 및 피로 성능 향상의 주요 원인이 된다.

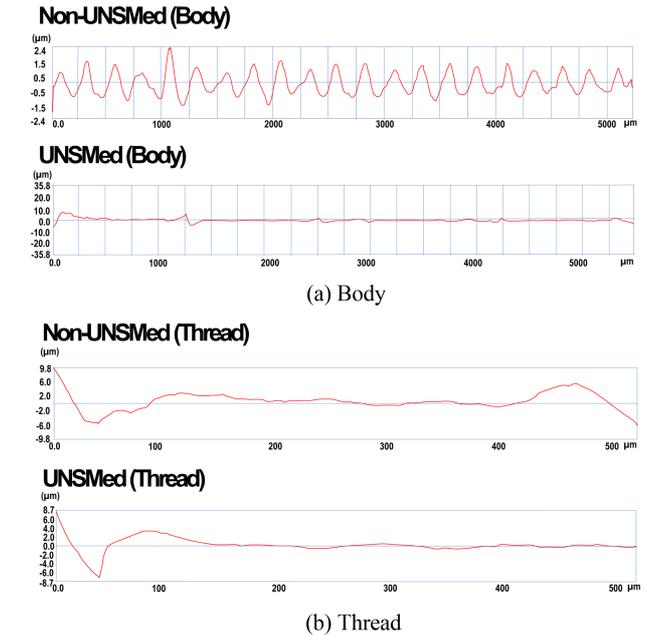


Fig. 8 Surface profiles of the fabricated product with and without UNSM treatment before screw rolling

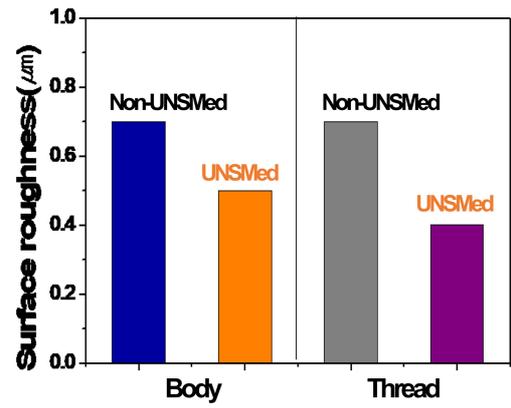


Fig. 9 Comparison of surface roughness (Ra) of the fabricated product with and without UNSM treatment before screw rolling

### 3.4 표면 거칠기 변화

Fig. 8은 UNSM 처리 전후의 전조가공된 볼트의 표면을 표면조도 측정기를 통해 측정된 표면 프로파일을 나타낸 것이다. 측정 프로파일을 통해 계산된 Ra 표면거칠기를 Fig. 9에 나타내었다. 평탄부에서의 UNSM 처리 전과 후의 표면거칠기는 각각 0.7, 0.5 μm이며, 나사부의 UNSM 처리 전후 시편의 표면거칠기는 각각 0.7, 0.4 μm이다. UNSM 처리에 의해 평탄부의 표면 거칠기는 29% 감소되었으며, 나사부에서는 43% 개선되었다. 1차 가공 후 다소 거친 표면이 UNSM 처리에 의해서 깨끗하게 개질되었음을 의미한다. 한편, 평탄부에 비하여 나사부에서의 거칠기가 더 크게 개선되었는데, 이는 UNSM 처리에 의한 1차적 거칠기 개선 후에 전조가공을 통한 2차 개선으로 결함이

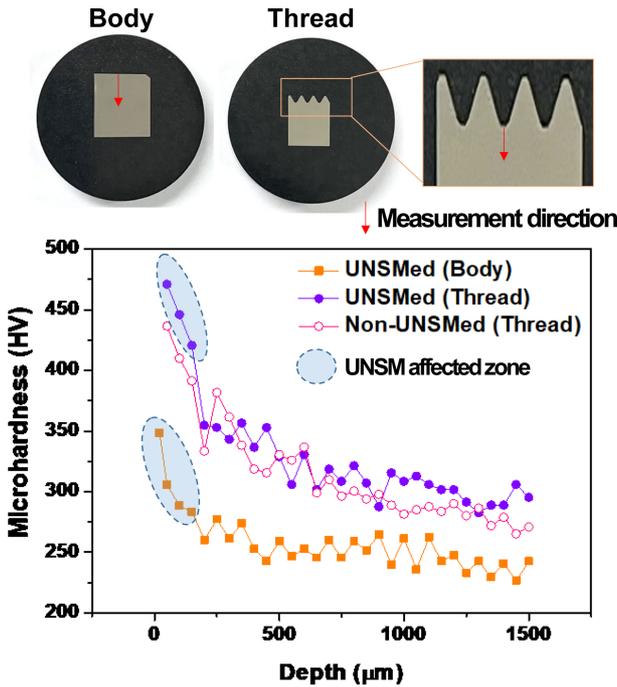


Fig. 10 Vickers hardness distribution of cross-section in height direction of each specimen

없는 매끄러운 표면으로 개질되었기 때문이다. 따라서, 표면 거칠기의 추가적 개선을 위해 전조가공 전 UNSM 처리가 효과적임을 확인할 수 있었다.

3.5 경도 변화

UNSM과 전조가공 전후의 경도 변화를 알아보기 위해 처리된 시편 단면에서의 깊이별 경도를 측정하였으며, 그 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 사진에 나타난 바와 같이 표면으로부터 시작하여 아래 방향(시편 내부를 향하는 방향)으로 측정된 결과이다. 이러한 방식으로 측정된 이유는, UNSM과 전조 가공에 따른 표면 개질 및 소성변형은 표면 부근에 집중되기 때문이다. 한편, Fig. 11은 평탄부와 나사부의 UNSM 처리 전후 최대 경도를 비교한 그래프를 나타낸다.

평탄부 샘플 내부는 전조가공뿐만 아니라 UNSM 처리에 의한 영향도 받지 않았기 때문에 원소재의 경도를 가지며, 측정 결과 약 250 HV임을 알 수 있다. 하지만, UNSM의 영향을 받은 표면 부근에서의 경도가 상승하였음을 확인할 수 있다(점선 원 표시 영역). 이는 앞서 3.3절에서 확인된 바와 같이 UNSM 볼팁의 타격에 의해 결정립이 미세화되었으며, 이 과정에서 발생된 소성변형에 의해 전위 밀도가 증가한 결과라고 할 수 있다. 볼팁에 의한 직접 접촉으로 타격되는 표면에서의 경도 상승이 가장 크게 나타나며, 하부로 내려 갈수록 경도가 감소하는 것을 알 수 있다. UNSM 처리에 의해 표면으로부터 깊이 약 500 μm 까지 경도가 향상되었으며, 그 이상의 영역에서는 더 이상 UNSM 효과는 나타나지 않으며 원소재의 경도로 나타난다. UNSM 효과가 나타나는 깊이는 소재의 특성에 따라 다르게

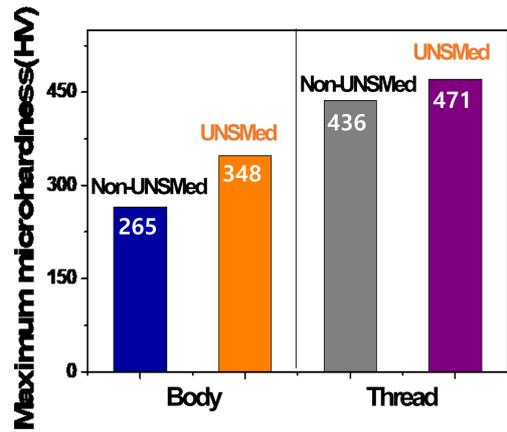


Fig. 11 Comparison of maximum surface hardness of the fabricated product with and without UNSM treatment

나타나며, 연질 특성이 큰 소재의 경우에는 UNSM에 의한 변형 에너지가 더 깊은 영역까지 전달된다[11]. 본 연구에서 사용된 STS 316L 소재의 경우에도 상대적으로 연성이 크기 때문에 평균 유효 깊이(200-300 μm)보다는 다소 깊은 영역까지 UNSM 효과가 나타나고 있다.

한편, UNSM 효과 영역과 그렇지 않은 영역 모두 평탄부에 비해 나사부에서의 경도가 높게 나타났다. 이는 나사부에서는 전조의 영향을 받았기 때문이다. UNSM 처리 후 평탄부와 나사부의 경도 최대값을 비교하면(Fig. 11), UNSM 처리된 평탄부에 비하여 UNSM 처리와 전조 가공된 나사부의 최대 경도가 더 높게 나타났다. 이는 UNSM의 타격 하중에 비하여 전조 시 적용 하중이 더 높기 때문에 나사부의 결정립이 평탄부에 비해 더 많이 변형되었기 때문이다. 하지만, 나사부에서도 UNSM 효과는 여전히 나타나고 있으며, UNSM 처리되지 않은 샘플에 비해 UNSM 처리 후 전조 가공된 나사부의 최대 경도는 약 40 HV 정도 상승한 것으로 확인되었다. 이러한 결과는 앞서 표면거칠기에서와 마찬가지로 경도의 추가적 상승을 위해 전조 가공 전 UNSM 처리가 효과적임을 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 UNSM 후 전조 가공에 따른 볼트 제작에 있어서 UNSM 효과를 알아보기 위해 UNSM 처리 유무에 따른 표면 특성, 경도 및 미세조직 변화를 살펴보았다. STS 316L 소재에 대한 UNSM 조건을 선정하였으며, 전조 전 UNSM 처리하여 전조된 볼트 샘플을 제작하였다. UNSM 처리 후 볼트 전조한 모든 샘플에서 균열 같은 큰 결함은 없었으며, Material Flow가 끊기지 않고 이어져 있는 것을 확인할 수 있었다.

UNSM 처리 후 평탄부와 나사부 모두 표면 거칠기가 개선되었고, 특히 나사부에서는 43%로 가장 크게 개선되었다. UNSM 처리로 표면 거칠기가 1차적으로 개선된 후 전조가공을 통하여

결함이 없는 매끄러운 나사 표면이 제작되었다. 경도는 볼트에 의한 직접 접촉으로 타격되는 표면에서의 경도 상승이 가장 크게 나타났으며, 표면으로부터 깊이 약 500 μm까지 경도가 향상되었다. 나사부의 나사골에서 경도가 471 HV로 가장 높았는데, 이는 나사골에서 UNSM과 전조에 의해 결정립이 가장 크게 변형되었기 때문이다. 나사골 부근의 영역에서는 EBSD Mapping 되지 않을 정도로 미세화된 결정립들이 뚜렷하게 관찰되었다. 이상에서와 같이 전조 가공 전 원소재에 UNSM 처리하였을 때 볼트의 표면 및 경도 특성이 향상된다는 것을 확인할 수 있었다.

본 연구에서는 검증되진 않았지만, UNSM 및 전조가공에 의한 결정립 및 전위밀도 등의 변화에 따른 피로 수명 향상을 기대할 수 있을 것이다. 향후에는 피로시험을 통해 UNSM 및 전조가공된 볼트에 대한 피로수명 향상을 검증할 계획이다.

**ACKNOWLEDGEMENT**

본 연구는 중소벤처기업부(No. G21S325381401)과 한국연구재단 개인기초연구사업(No. 2021R1A2C101197311)의 지원을 받아 수행되었음. 또한, 친환경건설박해심연구지원센터의 장비 지원을 받았음.

**REFERENCES**

1. Jang, S., Lee, M., Shim, S., Son, Y., Yoon, D., Joun, M., (2010), Finite element analysis of manufacturing process of a 12 point flange head bolt with emphasis on thread rolling process, *Transactions of Materials Processing*, 19(4), 248-252.
2. Ifergane, S., Eliaz, N., Stern, N., Kogan, E., Shemesh, G., Sheinkopf, H., Eliezer, D., (2001), The effect of manufacturing processes on the fatigue lifetime of aeronautical bolts, *Engineering Failure Analysis*, 8(3), 227-235.
3. Sun, Y., Hebert, R. J., Aindow, M., (2020), Effect of laser scan length on the microstructure of additively manufactured 17-4PH stainless steel thin-walled parts, *Additive Manufacturing*, 35, 101302.
4. Sridharan, N., Cakmak, E., Dehoff, R. R., (2019), Microstructure evolution during laser direct energy deposition of a novel Fe-Cr-Ni-WB hardfacing coating, *Surface and Coatings Technology*, 358, 362-370.
5. Baek, G. Y., Shin, G. Y., Lee, E. M., Shim, D. S., Lee, K. Y., Yoon, H.-S., Kim, M. H., (2017), Mechanical characteristics of a tool steel layer deposited by using direct energy deposition, *Metals and Materials International*, 23(4), 770-777.
6. Saboori, A., Aversa, A., Marchese, G., Biamino, S., Lombardi, M., Fino, P., (2019), Application of directed energy deposition-based additive manufacturing in repair, *Applied Sciences*, 9(16), 3316.

7. Wilson, J. M., Piya, C., Shin, Y. C., Zhao, F., Ramani, K., (2014), Remanufacturing of turbine blades by laser direct deposition with its energy and environmental impact analysis, *Journal of Cleaner Production*, 80, 170-178.
8. Schneider, J., Seidel, A., Gumpinger, J., Riede, M., López, E., Brückner, F., Leyens, C., (2019), Advanced manufacturing approach via the combination of selective laser melting and laser metal deposition, *Journal of Laser Applications*, 31(2), 022317.
9. Kumaran, M., Senthilkumar, V., (2021), Experimental characterization of stainless steel 316L alloy fabricated with combined powder bed fusion and directed energy deposition, *Welding in the World*, 65(7), 1373-1388. <https://link.springer.com/article/10.1007/s40194-021-01117-z>
10. Kumaran, M., Senthilkumar, V., Panicker, C. J., Shishir, R., (2021), Investigating the residual stress in additive manufacturing of combined process in powder bed fusion and directed energy deposition, *Materials Today: Proceedings*, 47, 4387-4390.
11. Cho, S. Y., Shim, D. S., (2022), Method of ultrasonic nano-crystal surface modification for improvement of surface characteristics of AISI D2 heat-treated with different tempering conditions, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 119(3-4), 2669-2689.

**Hyeung-Jin Ha**

Master candidate in Department of Ocean Advanced Materials Convergence Engineering, Korea Maritime and Ocean University. His research interest is metal additive manufacturing.

E-mail: taegun0902@naver.com

**Han-Byeol Park**

Master in Department of Ocean Advanced Materials Convergence Engineering, Korea Maritime and Ocean University. Her research interest is metal additive manufacturing.

E-mail: hanbyul9812@naver.com

**Tae Hyung Jung**

CEO of Hwashin-Hitech Co., Ltd.. His research interest is special bolt manufacturing for energy and ocean plant.

E-mail: th.jung@hwashinbolt.co.kr

**Do-Sik Shim**

Associate Professor in Department of Ocean Advanced Materials Convergence Engineering, Korea Maritime and Ocean University. His research interests include incremental and roll forming for sheet metal, direct energy deposition (DED) and structural analysis as well as optimal design.

E-mail: think@kmou.ac.kr

# 3D 프린터로 제작된 정제 알약의 격자구조 형태에 따른 붕해 특성 연구

## A Study on the Dissolution Characteristics of 3D Printed Tablet with Lattice Structures

이상훈<sup>1</sup>, 오승민<sup>1</sup>, 박서림<sup>1</sup>, 김 석<sup>1,2</sup>, 조영태<sup>1,2,#</sup>  
Sang Hoon Lee<sup>1</sup>, Seung Min Oh<sup>1</sup>, Seo Rim Park<sup>1</sup>, Seok Kim<sup>1,2</sup>, and Young Tae Cho<sup>1,2,#</sup>

<sup>1</sup> 창원대학교 대학원 스마트제조융합협동과정 (Department of Smart Manufacturing Engineering, Graduate School, Changwon National University)  
<sup>2</sup> 창원대학교 기계공학부 (Department of Mechanical Engineering, Changwon National University)  
# Corresponding Author / E-mail: ytcho@changwon.ac.kr, TEL: +82-10-5228-8912  
ORCID: 0000-0001-7545-4646

KEYWORDS: Fused deposition modeling (열용융적층모델링), Lattice (격자), PVA filament (PVA 필라멘트), Tablet (정제), Dissolution (붕해)

*With recent development of 3D printing technology, its applications to the bio-industry are increasing. Many research studies are being done for manufacturing personalized tablets through this technology in the pharmaceutical process. In this study, to control the dissolution rate of tablets, a lattice structure was inserted into the tablet and the dissolution rate was compared. The tablet proposed in this study can be manufactured by the FDM method, adopting a lattice structure with a large surface area-to-volume ratio. Tablets containing various lattice structures were fabricated using water-soluble PVA filaments and dissolution experiments were conducted in water at 37°C. As a result, it was confirmed that the specific surface area and the mass loss rate were proportional to both the 3D lattice structure and the monolith structure. Among different structures, the diamond structure had the most active dissolution.*

Manuscript received: December 30, 2022 / Revised: April 21, 2023 / Accepted: June 16, 2023

### 1. 서론

최근 3D 프린팅 공정이 바이오산업에 적용되는 사례가 늘고 있다[1]. 제약 분야에서 미국 FDA 승인을 받은 Aprelia 사의 발작 치료제 스프리탐이 대표적인데, 이 약은 Powder-bed Inkjet 프린팅 공법으로 제작하였으나, 3D 프린팅 공정의 장점인 개인 맞춤형 생산 능력에 집중하기보다는 대량 생산 능력을 강조하여 제작하였다[2]. 스프리탐 제작 이후, 개인 맞춤형 의약품 제 공을 위한 3D 프린팅을 이용한 정제 제조에 관련된 많은 연구가 이루어지고 있다[3]. 최근 관련 연구로는 물에 녹는 PVA (Polyvinyl Alcohol) 필라멘트와 약물을 FDM (Fused Deposition Modeling) 방식에 의해 다양한 기하학적 형태(구, 정육면체, 도넛, 원기둥, 사각뿔)의 정제를 제작하였으며, 정제의 붕해 속도가 정제의 표면적이 아닌 부피 대비 표면적에 따라 달라지는 것을 알아냈다[4,5]. 또한, FDM 방식으로 제작한 정제에 경우

기존의 압축하는 방식으로 제작한 정제와 비교했을 때, 약물의 방출 속도를 늘리거나 줄여주는데 영향을 끼치는 것으로 조사되었다[6-8].

한편, 격자구조를 적용하게 되면 표면적의 비율을 넓힘과 동시에 유동의 흐름을 제어할 수 있어 열전달 과정 및 물질의 용해 과정을 최적화할 수 있어 3D 프린팅의 효과를 더 높일 수가 있다[9,10].

정제는 붕해 속도에 따라서 속효제와 서방제로 나누어진다. 속효제는 붕해 속도가 빨라 즉각적인 조치가 필요한 경우에 사용이 된다. 또는 항고혈압에 사용되는 Telmisartan과 같이 약물 자체의 성분이 물에 녹지 않는 성분이라면 속효 성분을 첨가하여 붕해 속도를 증가시킨다[11,12]. 반면에 서방제는 붕해 속도를 느리게 하여 지속적인 조치가 필요한 경우에 사용된다. 예를 들어, 골관절염에 사용되는 Tramadol은 6시간 동안 만성 통증을 완화시키고, 일일 투여 횟수를 제어하기 위해 서방성을 띤다.

또한, 적절하게 정제의 봉해속도를 제어하지 못할 시, 독성 농도가 상승하여 인체에 안 좋은 영향을 끼칠 수 있다[13,14].

그래서 본 연구에서는 정제의 녹는 속도를 제어하기 위해 격자구조를 정제의 내부에 삽입하였을 때 변화하는 봉해 속도에 대한 분석을 수행하였다. 본 연구에서 제안한 격자구조는 FDM 방식으로 제작 가능하며 부피 대비 표면적을 넓힐 수 있는 구조로서 이러한 격자구조를 내부에 포함한 정제의 형상을 설계하고 3D 프린팅 방식으로 제작한 후 봉해 실험을 통해 더 빠른 봉해 속도를 가질 수 있는 구조를 찾는 연구를 수행하였다.

2. 정제의 적층 제조

2.1 격자구조 모델링

3D 모델링 프로그램과 nTop Platform (nTopology Inc., USA)을 이용하여 정제의 전체 형태와 내부구조를 설계하였다. 일상적으로 자주 복용 되는 진통제 크기와 동일한 사이즈인 반지름 5 mm, 길이 18 mm의 정제 형태를 Fig. 1과 같이 설계하였다. FDM 3D 프린터 특성상 오버행 각도 및 브릿지 길이에 의한 서포트가 생성되는데 서포트의 생성을 최소화하기 위하여 정제약의 하단 부분은 0.8 mm 두께로 겉표면을 설계하였다. 내부의 다양한 격자구조는 nTop Platform의 슬라이싱 기능을 이용하여 삽입하였는데 격자 구조에 따른 정제의 봉해 속도를 측정하는 실험이 필요하므로 각 정제의 질량, 부피, 격자의 두께를 동일하게 설계하였다.

Fig. 2에서는 다양한 격자 구조의 단위 셀 설계를 보여주고 있다. 격자의 종류는 TPMS (Triply Periodic Minimal Surface) 구조의 자이로이드(Gyroid) 구조, 3D 격자 구조의 다이아몬드(Diamond) 구조, 면심 입방 격자 폼(Face Centered Cubic Foam) 구조, 모노리스(Monolith) 구조의 삼각(Triangle) 구조, 육각(Hexagonal) 구조, 사각(Square) 구조 등 총 6가지이다. TPMS 구조는 한 공간을 서로 겹치지 않는 분리된 두 공간으로 나눈 곡면으로, 극대화된 표면적 및 유체 교환 특징을 갖고 있다[15]. 다이아몬드 구조는 표면적이 넓고, 오버행 각도가 높아 서포트 형성을 방지할 수 있으며, 단위 부피당 질량이 높다[16]. 면심 입방 격자 폼 구조는 높은 노드 연결성으로 인해 향상된 열교환 및 열전달 특성을 갖는다[17]. 모노리스 구조는 제작이 용이하며, 서로 겹치지 않고 빈틈없이 평면을 채우는 타일링이 가능한 정삼각형, 정사각형, 정육각형으로 선정했다[18]. 선정된 모델은 모두 FDM 방식으로 제작하는 과정에서 서포트가 발생하지 않는 구조이다.

2.2 적층

여러 종류의 3D 프린팅 공정 중 FDM 방식의 제조공정은 단순하고 접근이 쉬우며, 내부 구조를 바꿀 수 있는 장점이 있어 폭넓은 분야에 사용되고 있다[19]. FDM 방식을 제약 공정에 적용하면 정제의 내부에 격자구조를 설계할 수 있으며, 구조에 따라 흡수에 소요되는 시간을 조절할 수 있어 개인별 맞춤 의학에

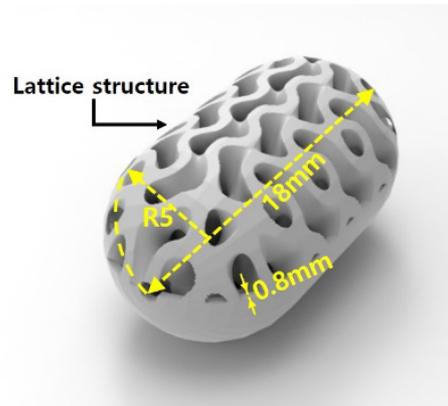
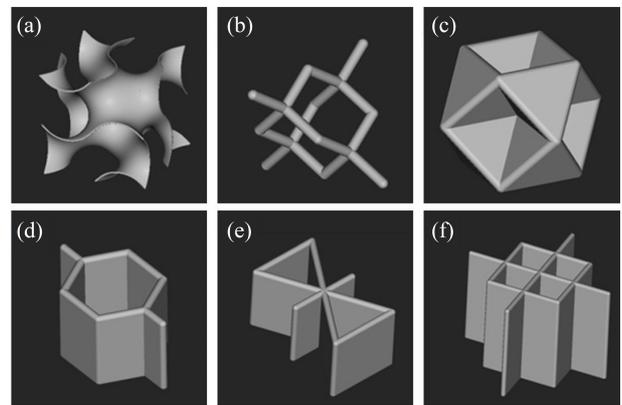


Fig. 1 Modeling of 3D printed tablet with lattice structure



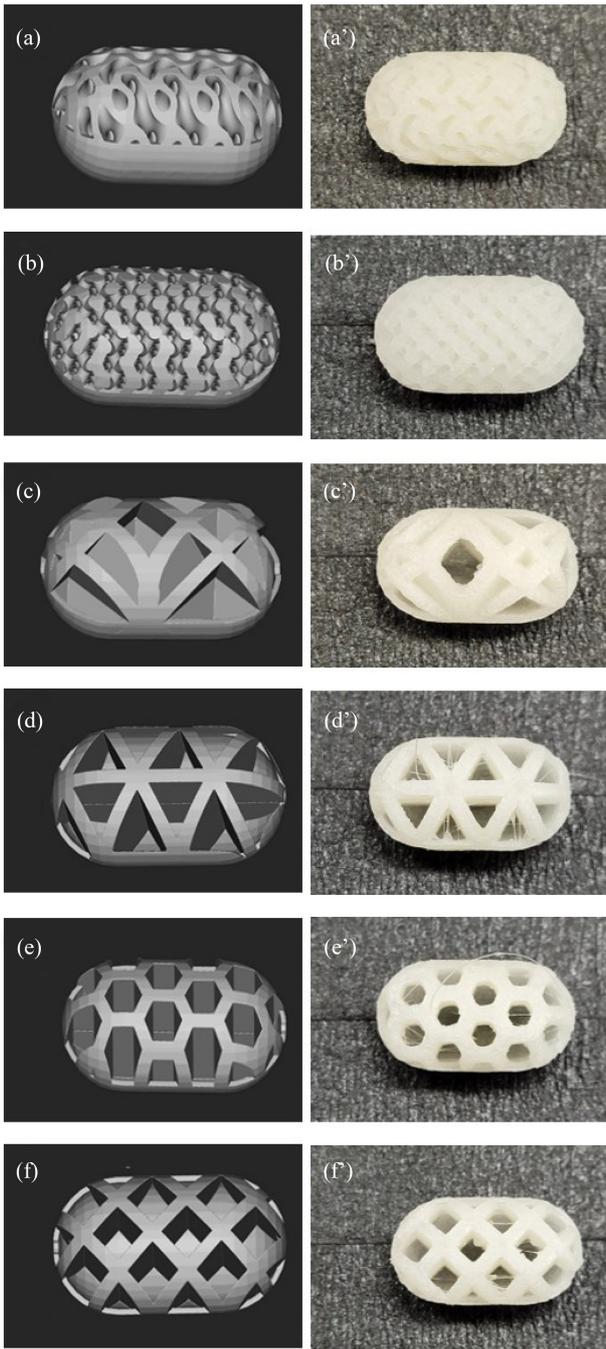
(a) Gyroid (b) Diamond (c) FCC foam (d) Hexagonal (e) Triangle (f) Square

Fig. 2 3D modeling unit cell

적합하다[20]. 또한 정제를 제작하는데 있어서 물에 녹는 필라멘트가 필요하기 때문에 PVA 필라멘트(e-SUN, China)를 사용하였다. PVA 필라멘트의 3D 프린팅을 위한 최적의 조건을 결정하기 위해 다양한 프린팅 조건을 조사하였다. 3D 프린팅 조건은 Table 1과 같다. 정제를 정밀하게 프린팅하여야 정제 내부의 격자 구조를 프린팅 할 수 있으므로 각 층의 높이는 가장 낮은 0.07 mm로 설정하였다. 또한, 정제가 플레이트에 원활하게 접촉되기 위하여 브림(Brim)을 설정하여 첫 층을 프린트하기 전에 얇은 층을 형성하였다. PVA 필라멘트 프린팅에 적절한 노즐 온도는 190-210°C이므로 노즐 온도는 195°C, 베드 온도는 65°C로 설정하였다. 프린트 속도는 50 mm/s, 노즐 이동속도는 150 mm/s로 설정하였다. Fig. 3에서는 격자구조를 포함한 정제 형태의 설계와 FDM 3D 프린터(Creable D3, Korea)를 이용하여 위에 조건에 맞게 제작한 프린팅 결과를 보여준다.

3. 봉해 실험

Fig. 4에서는 37°C 정수 300 ml를 비커에 부어 교반 기능이



(a) Gyroid (b) Diamond (c) FCC foam  
(d) Hexagonal (e) Triangle (f) Square

Fig. 3 3D modeling tablet & 3D printing tablet

있는 핫플레이트에서 정제를 실로 고정하여 1시간 동안 붕해하는 실험을 진행한 후 시간에 따라 변화하는 비커의 모습을 보여주고 있다. 붕해 실험이 끝난 후 정제만의 무게를 확인하고자 고정된 정제를 건어내어 정제가 흡수한 수분을 증발시키기 위해서 80°C 오븐에 3시간 동안 건조를 시키고 정제의 질량을 측정하였다. 건조를 마친 이후 정제의 형태는 Fig. 5와 같다.

Table 1 Tablet 3D printing conditions

Properties	Conditions
Substrate	PVA filament
Layer height [mm]	0.07
Nozzle temperature [°C]	195
Bed temperature [°C]	65
Print speed [mm/s]	50
Travel speed [mm/s]	150
Build plate adhesion type	Brim

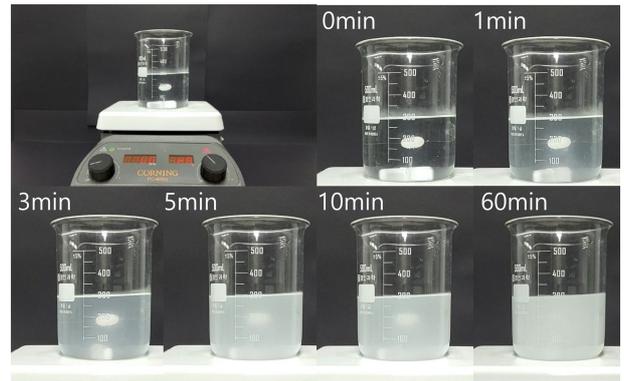


Fig. 4 Disintegration experiment from magnetic stirrer

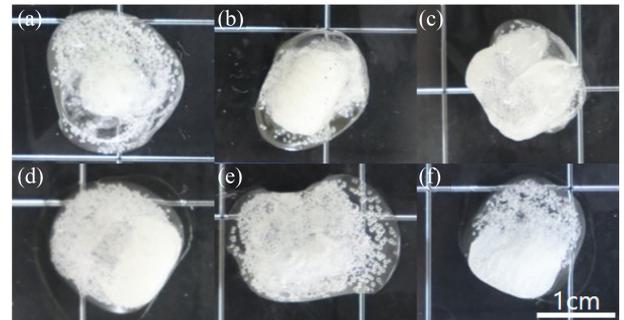


Fig. 5 Tablets after disintegration experiment

#### 4. 결과

붕해가 얼마나 일어났는지 확인하기 위해 붕해 실험을 5회 반복 실험하였으며 정제의 붕해 속도를 정량화하여 비교하기 위해 붕해실험 전후 정제의 질량을 측정하여 평균값 및 표준편차를 비교하여 시간에 따른 질량감소율을 구하였다. 실험 결과는 3D 격자 구조와 모노리스 구조로 나누어서 각각 Tables 2와 3에 나타내었다. TPMS 구조는 유체의 흐름이 3차원적으로 진행되는 특성을 갖고 있기 때문에 3D 격자 구조와 함께 묶어서 비교하였다[21]. 정제의 기본 표면적은 nTop Platform 프로그램의 계산 결과를 이용하여 구하였다.

Table 2 3D lattice structure disintegration experiment result

Model	Before mass [g]	After mass [g]	Mass loss rate [%/h]	Specific surface area [m <sup>2</sup> /kg]
Gyroid	0.644±0.011	0.410±0.037	36.4±4.7	3.144
Diamond	0.622±0.004	0.330±0.038	46.9±3.2	3.305
FCC foam	0.642±0.004	0.470±0.038	26.8±6.3	1.944

Table 3 Monolith lattice structure disintegration experiment result

Model	Before mass [g]	After mass [g]	Mass loss rate [%/h]	Specific surface area [m <sup>2</sup> /kg]
Triangle	0.610±0.010	0.332±0.019	45.6±2.8	2.382
Hexagonal	0.628±0.018	0.382±0.022	39.1±4.2	2.178
Square	0.624±0.009	0.398±0.024	36.2±3.3	2.173

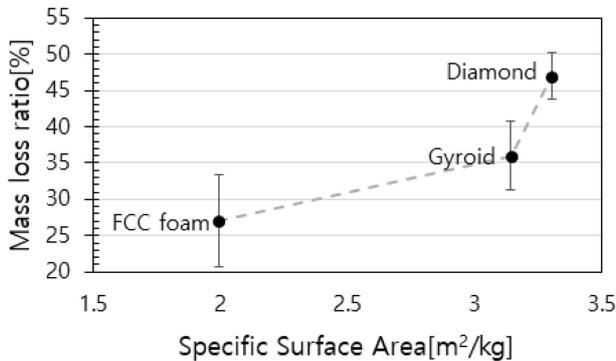


Fig. 6 Disintegration experiment result graph of 3D lattice structure

4.1 3D 격자 구조 붕해 실험 결과

Fig. 6은 3D 격자 구조의 붕해 실험 결과, 비표면적에 따른 질량감소율을 나타낸 그래프이다. 비표면적과 질량감소율이 비례하는 것을 볼 수 있는데 다이아몬드 구조의 경우 비표면적의 증가대비 질량감소율이 급격하게 커진 것을 알 수 있다. 이는 면심 입방 격자 폼 구조와 자이로이드 구조는 면으로 구성된 구조인 반면에 다이아몬드 구조는 스트럿으로 구성된 구조이기 때문에 유체가 구조 내부로 쉽게 침투하여 붕해가 활발하게 발생하였다고 판단된다[22].

4.2 모노리스 구조 붕해 실험 결과

Fig. 7은 모노리스 구조에 있어 비표면적과 질량감소율의 변화를 보여주는 그래프이다. 3D 격자구조와 마찬가지로 비표면적이 넓어지면서 질량감소율이 커지는 것을 알 수 있다. Triangle의 단면을 가진 모노리스 구조의 비표면적이 2.382 m<sup>2</sup>/kg으로써 가장 큰 값을 가지며 이에 따라 45.6%의 질량감소율이 발생함을 확인하였다. Hexagonal 구조와 Square 구조는 비표면적의 차이가 거의 없지만 질량감소율의 차이가 급격하게 증가하였다. 이는 모노리스 구조에서 Hexagonal 구조와 Square 구조에 유체를

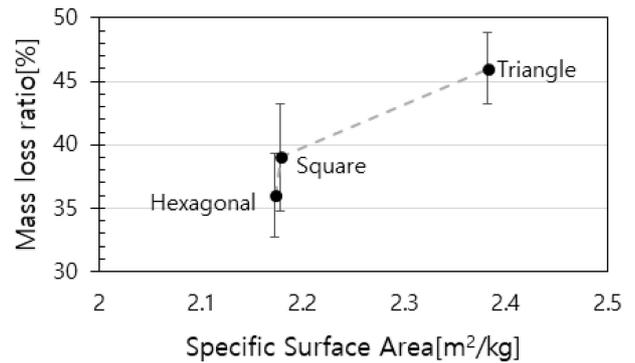


Fig. 7 Disintegration experiment result graph of monolith lattice structure

흘려 줬을 때 압력 손실이 Square 구조에서 매우 크기 때문에 Square 구조에서 유체의 압력이 더 크게 가해지면서 구조체 내부에서 구조와 충돌하는 유체의 흐름이 커지고 이로 인해 더 높은 붕해율을 갖는 것으로 판단된다[23].

같은 시간, 같은 방법으로 붕해 실험을 진행한 결과 가장 질량감소율이 높은 구조는 46.9%의 질량감소율이 발생한 Diamond 구조였으며 비표면적이 상대적으로 적으면서 높은 붕해 속도를 가지는 것은 Triangle 구조라는 것을 확인할 수 있다. 또한, 가장 느린 붕해 속도를 갖는 구조는 낮은 비표면적 및 면으로 이루어진 구조를 갖는 FCC Foam 구조이며 26.8%의 질량감소율이 발생함을 확인하였다.

5. 결론

본 연구에서는 FDM 3D 프린팅을 통해 제작된 3D 격자 구조와 모노리스 구조를 포함한 다공성 정체를 제작하는 공정을 제안하고, 붕해율을 비교하였다. 붕해 실험을 진행하기 위해서 수용성 PVA 필라멘트를 사용하였으며, 실제 정체를 모사하여 모델링 및 제작하였다. 또한, 실제 사람의 온도와 유사한 37°C의 물에서 붕해 실험을 진행하고, 붕해 실험 전, 후 질량을 비교하였다. 연구 결과, 3D 격자구조와 모노리스 구조에서 모두 질량감소율과 비표면적이 비례함을 확인하였고, 다이아몬드 구조에서 붕해가 가장 잘 일어났는데 그 원인은 비표면적이 가장 크고, 선으로 구성된 구조이기 때문으로 판단된다. 가장 느린 붕해 속도를 가진 구조는 면심 입방 격자 폼 구조였으며 이렇게 마이크로 격자구조에 따라 붕해 속도의 변화가 크게 달라짐을 확인하였다. 전반적으로 비표면적이 넓은 격자 구조가 포함된 정체는 붕해 속도가 빠른 것을 확인하였으며 따라서 비표면적이 넓은 격자로 제작된 정체는 속효제로 활용될 수 있다. 향후 본 연구의 결과를 이용하여 정체를 제조할 때 3D 격자 구조를 활용하게 되면 붕해 속도의 변화를 가져올 수 있으며 이를 통해 약의 흡수 효과를 제어할 수 있을 것으로 기대된다.

## ACKNOWLEDGEMENT

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2019R1A5A8083201).

본 과제(결과물)는 2023년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업의 결과입니다(2023RIS-003).

## REFERENCES

- Park, S.-H., Park, J. H., Lee, H. J., Lee, N. K., (2014), Current status of biomedical applications using 3D printing technology, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 31(12), 1067-1076.
- Elbadawi, M., McCoubrey, L. E., Gavins, F. K., Ong, J. J., Goyanes, A., Gaisford, S., Basit, A. W., (2021), Disrupting 3D printing of medicines with machine learning, *Trends in Pharmacological Sciences*, 42(9), 745-757.
- Siamidi, A., Tsintavi, M., Rekkas, D., Vlachou, M., (2020), 3D-printed modified-release tablets: A review of the recent advances, *Mol. Pharmacol*, 1-13.
- Goyanes, A., Martinez, P. R., Buanz, A., Basit, A. W., Gaisford, S., (2015), Effect of geometry on drug release from 3D printed tablets, *International Journal of Pharmaceutics*, 494(2), 657-663.
- Xu, X., Zhao, J., Wang, M., Wang, L., Yang, J., (2019), 3D printed polyvinyl alcohol tablets with multiple release profiles, *Scientific Reports*, 9(1), 12487.
- Zhang, J., Feng, X., Patil, H., Tiwari, R. V., Repka, M. A., (2017), Coupling 3D printing with hot-melt extrusion to produce controlled-release tablets, *International Journal of Pharmaceutics*, 519(1-2), 186-197.
- S Skowrya, J., Pietrzak, K., Alhnan, M. A., (2015), Fabrication of extended-release patient-tailored prednisolone tablets via fused deposition modelling (FDM) 3D printing, *European Journal of Pharmaceutical Sciences*, 68, 11-17.
- Goyanes, A., Buanz, A. B., Basit, A. W., Gaisford, S., (2014), Fused-filament 3D printing (3DP) for fabrication of tablets, *International Journal of Pharmaceutics*, 476(1-2), 88-92.
- Liang, D., Bai, W., Chen, W., Chyu, M. K., (2020), Investigating the effect of element shape of the face-centered cubic lattice structure on the flow and endwall heat transfer characteristics in a rectangular channel, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 153, 119579.
- Liang, D., He, G., Chen, W., Chen, Y., Chyu, M. K., (2022), Fluid flow and heat transfer performance for micro-lattice structures fabricated by Selective Laser Melting, *International Journal of Thermal Sciences*, 172, 107312.
- Shah, V. P., Gurbarg, M., Noory, A., Dighe, S., Skelly, J. P., (1992), Influence of higher rates of agitation on release patterns of immediate-release drug products, *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 81(6), 500-503.
- Sekar, V., Chellan, V. R., (2008), Immediate release tablets of telmisartan using superdisintegrant-formulation, evaluation and stability studies, *Chemical and Pharmaceutical Bulletin*, 56(4), 575-577.
- Varshosaz, J., Tavakoli, N., Kheirollahi, F., (2006), Use of hydrophilic natural gums in formulation of sustained-release matrix tablets of tramadol hydrochloride, *Aaps Pharmscitech*, 7(1), 24.
- Maderuelo, C., Zarzuelo, A., Lanao, J. M., (2011), Critical factors in the release of drugs from sustained release hydrophilic matrices, *Journal of Controlled Release*, 154(1), 2-19.
- Kim, J., Yoo, D. J., (2020), A design and fabrication method of new compact heat exchangers using triply periodic minimal surface, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 37(7), 509-518.
- Muthusamy, M., Safaei, S., Chen, R. K., (2018), Additive manufacturing of overhang structures using moisture-cured silicone with support material, *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2(2), 24.
- Krishnan, S., Garimella, S. V., Murthy, J. Y., (2008), Simulation of thermal transport in open-cell metal foams: Effect of periodic unit-cell structure, *ASME Journal of Heat and Mass Transfer*, 130(2), 024503.
- Hayes, R. E., Rojas, A., Mmbaga, J., (2009), The effective thermal conductivity of monolith honeycomb structures, *Catalysis Today*, 147, S113-S119.
- Mazzanti, V., Malagutti, L., Mollica, F., (2019), FDM 3D printing of polymers containing natural fillers: A review of their mechanical properties, *Polymers*, 11(7), 1094.
- Nukala, P. K., Palekar, S., Solanki, N., Fu, Y., Patki, M., Shohatee, A. A., Trombetta, L., Patel, K., (2019), Investigating the application of FDM 3D printing pattern in preparation of patient-tailored dosage forms, *Journal of 3D Printing in Medicine*, 3(1), 23-37.
- Lee, J. W., (2021), A study on filtering method for design of functional TPMS structures, M. Sc. Thesis, Seoul National University of Science & Technology.
- Suneetha, L., Randive, P., Pandey, K., (2019), Numerical investigation on influence of diamond shaped strut on the performance of a scramjet combustor, *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(13), 6949-6964.
- Cornejo, I., Nikrityuk, P., Hayes, R. E., (2020), The influence of channel geometry on the pressure drop in automotive catalytic converters: Model development and validation, *Chemical Engineering Science*, 212, 115317.

**Sang Hoon Lee**

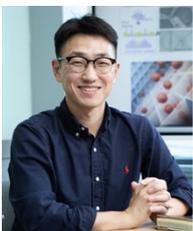
M.Sc. candidate in the Department of Smart Manufacturing Engineering, Changwon National University. His research interests are 3D printing and nano-micro technology.  
E-mail: netsh2@changwon.ac.kr

**Seung Min Oh**

M.Sc. in the Department of Smart Manufacturing Engineering, Changwon National University. His research interests are lithography and nano-micro technology.  
E-mail: osm6658@changwon.ac.kr

**Seo Rim Park**

Ph.D. candidate in the Department of Smart Manufacturing Engineering, Changwon National University. Her research interests are 3D printing and nano-micro technology.  
E-mail: qkrtjflakr@changwon.ac.kr

**Seok Kim**

He is an Assistant Professor in the Department of Smart Manufacturing and Department of Mechanical Engineering, Changwon National University. His research focuses on the development of a variety of advanced manufacturing with functional materials for energy, environmental, and biological applications.

E-mail: kimseok@changwon.ac.kr

**Young Tae Cho**

He is a Professor in the Department of Mechanical Engineering, Changwon National University. Research interests are imprint process, super-hydrophobic and precision manufacturing system.

E-mail: ytcho@changwon.ac.kr

## 사출성형제품 이형 후 상온 냉각 중 크립 현상에 관한 연구

# A Study on Creep Phenomenon after the Releasing of Injection Molded Articles

김유정<sup>1</sup>, 방희선<sup>2,#</sup>  
Yu Jung Kim<sup>1</sup> and Hee-Seon Bang<sup>2,#</sup>

<sup>1</sup> 조선대학교 대학원 용접-접합과학공학과 (Department of Welding and Joining Science Engineering, Graduate School, Chosun University)  
<sup>2</sup> 조선대학교 용접-접합과학공학과 (Department of Welding and Joining Science Engineering, Chosun University)  
# Corresponding Author / E-mail: banghs@chosun.ac.kr, TEL: +82-62-230-7215  
ORCID: 0000-0003-4891-5712

KEYWORDS: Fiber-reinforced polymer (섬유강화플라스틱), Composite materials (복합재료), Injection molding (사출성형), Viscoelasticity (점탄성)

Recently, with the expansion of application of polymer composite materials, high levels of deformation compensation actions have been developed. However, there is a problem of high-temperature viscoelasticity that occurs over time after completing the injection molding process. In this study, changes of mechanical properties of the Moldflow program for injection molding were analyzed to verify the viscoelasticity phenomenon through deformation analysis. In addition, deformation analysis of plastic injection molded products according to arrangement of three ribs was conducted and two products with different geometric shapes of the same function were compared. As a result, it was possible to reflect the viscoelastic effect by reducing the elastic modulus and shear modulus of the material. It was confirmed that the geometric shape with thick ribs formed in multiple longitudinal directions was mainly responsible. On the surface of the product where the rib arrangement was parallel and perpendicular to the flow direction, the orientation was orthogonal to the linear direction and the maximum residual stress was 81.17 MPa, which showed the largest value. It was judged that viscoelastic phenomena could be predicted and that an arrangement of parallel and perpendicular ribs that might intersect should be avoided.

Manuscript received: February 1, 2023 / Revised: May 6, 2023 / Accepted: May 29, 2023  
This paper was presented at KSPE Autumn Conference 2022

### 1. 서론

최근 FRP (Fiber Reinforced Plastics)와 같은 고분자 복합재료가 사출성형 공법을 통하여 복잡한 형태의 제품을 대량생산하는 방식으로 기존 다이 캐스팅 공법 등으로 생산되던 제품을 대체하며 그 적용 분야가 확대 및 기대되고 있다. 우수한 기계적 성능과 유리한 용적중량(Volumetric Weight)을 가진 고분자 복합재료는 고강도 및 경량화가 요구되는 분야에 주로 사용되고 있지만 이러한 장점에도 불구하고 비교적 성형공정이 까다로워 종래에는 다이 캐스팅을 통한 단순한 형상의 부품에 일부 소량생산 방식으로 생산되어왔다. 특히 높은 비강도와 비탄성계수

등의 우수한 기계적 특성을 가진 FRP와 같은 고분자 복합재료는 성형공정 및 대량생산에 불리하여 그 한계가 명확하다[1-5].

하지만 앞서 언급한 사출성형 공법을 통한 적용 분야의 확대에 의해 적용제품에 대한 다양한 강도, 성능, 기능적 조건들이 새롭게 요구되고 있다. 특히 사출성형제품에 대한 정밀기하공차 요구는 제품 내 수축편차 발생이 불가피한 사출성형 공법 특성상 기술적 어려움이 매우 많은 과제로, 지난 수년간 CAE (Computer-aided Engineering), 모핑(Morphing) 및 역공학 (Reverse Engineering) 기술 등을 활용한 일정 수준의 변형 보완 대책들이 개발되었다[6-8].

이러한 진보에도 불구하고 사출성형 공정 완료 후에 상온에

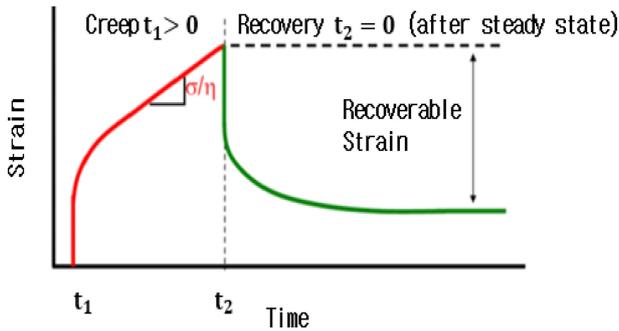


Fig. 1 Strain variation with time by creep compliance phenomenon

서 냉각 중인 제품에서 변형 해석 결과와 달리 매우 큰 변형이 시간이 경과함에 따라 나타나는 경우가 있다. 이는 고분자 재료의 대표적 특성인 시간에 따른 고온 점탄성 효과가 두드러짐에 의한 것이다. 플라스틱은 일정한 하중을 가했을 때, 탄성변형을 일으키고 하중을 계속 유지하면 점탄성 변형이 시간에 따라 증가하게 된다. 이후 하중을 제거하면 플라스틱은 바로 탄성 회복을 하고, 서서히 점탄성 회복을 하게 되는데 이러한 현상을 Creep Compliance라 한다. Fig. 1은 일정한 Stress를 받는 플라스틱 재료의 Creep 현상의 시간이 경과함에 따른 Strain 변형률을 나타낸 것이다. 본 연구에서는 이러한 사출성형제품 이형 후상은 냉각 중 크립 현상을 고려한 변형 해석을 체계적으로 고찰하고자 한다[9-11].

2. 연구 방법

2.1 고온 크립의 점탄성 효과 반영

본 연구에서 사용된 소재는 섬유강화 고분자 복합 재료 CTS P6635이며, 모재는 폴리프로필렌(Polypropylene)이고, 강화제인 유리섬유 함유율은 35%이다. 추천되는 성형 온도 조건은 금형온도 95°C, 제품 이형 온도 206°C, 용융점은 220°C이며, 유리전이온도는 50°C이다. 재료의 기계적 물성은 Table 1에 나타내었다.

제품 이형 후 발생하는 점탄성 변형에 대해서는 섬유 강화제의 기계적 물성이 지배적인 섬유 배향 방향(Fiber Orientation Direction)에 대해서는 극히 미소할 것으로 판단되며, 주로 섬유 배향 방향에 수직인 방향에 대해서 발생한다고 볼 수 있다.

3차원 섬유 배향 계산은 동일한 유한 요소 메쉬에서 금형 충전 해석과 동시에 수행된다. 각 요소에 대한 3차원 배향 솔루션은 2차 텐서로 설명된다. 그래픽 표현을 위해 배향 텐서의 고유값과 고유 벡터가 생성되며 고유 벡터는 섬유 정렬의 기본 방향을 나타내고 고유 값은 해당 방향을 기준으로 정렬된 섬유의 통계 비율(0-1)을 제공한다. Fig. 2는 각 요소에 대한 섬유의 정렬 분포를 설명하는 배향 타원체를 정의한다. 횡단등방성물성치(Transversely Isotropic Material Data)의 2차 기본방향(2nd Principal Direction)은 섬유 배향 방향에 수직인 방향으로 응력

Table 1 Mechanical properties of CTS P6635

Elastic modulus, 1st principal direction [MPa]	9120
Elastic modulus, 2nd principal direction [MPa]	6870
Poisson's ratio (ν12)	0.4
Poisson's ratio (ν23)	0.71
Shear modulus (G12) [MPa]	2750

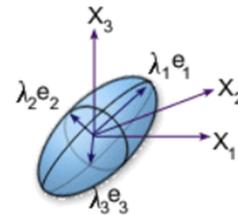


Fig. 2 Orientation ellipsoid

변형률 선도에서 기울기 즉, 탄성계수 및 전단탄성계수를 줄이는 방법으로 항복 및 점탄성 변형효과를 반영하고자 한다.

점탄성 효과를 고려하기 위해 2차 기본방향의 탄성계수 및 1, 2차 기본방향의 전단탄성계수를 기본값을 기준으로 50-100%로 적용시켜 고온 크립 해석을 수행하였다.

2.2 기하학적 형상에 따른 해석

섬유강화 고분자 복합재료 사출성형시 필연적으로 휨(Warp)이 발생하게 된다. 이는 제품 내부의 수축 편차에 의해 발생하며, 제품 내부 수축 편차는 금형 내부에서 제품이 고화 되는 순간 밀도차와 재료 이방성에 의한 수축 편차에 의해 주로 발생된다. 재료가 이방성을 가지는 경우에는 방향성 첨가제가 포함되지 않았을 때와 비교하여 미소하지만, 섬유 강화제와 같은 방향성 첨가제가 포함된 경우는 수축 편차의 주원인이 될 수 있다.

본 연구에서는 섬유 배향 텐서로부터 2, 3차 기본방향을 판단하고, Mises-Hencky 응력 값을 고찰하여 과도한 편향응력(Deviatoric Stress)을 유발하는 기하학적 형상을 규명하였다.

또한 섬유 강화 고분자 복합재료의 사출성형 시 기하학적 형상에 따른 고온 크립 특성을 고찰하고자 동일 기능의 제품 중 변형 해석 값과 제품 이형 후 실제 변형 결과 값의 오차가 약 30%인 Sample "A"와 약 300% 수준인 Sample "B"에 대해 기하학적 형상에 따른 평균 섬유 배향 텐서와 잔류응력 값을 비교 평가하고자 한다.

2.3 리브 배치에 따른 해석

과도한 편향응력은 섬유 배향 방향의 급작스러운 변화에 의해 발생하는 것으로 판단되며, 주로 리브 배치의 배열과 상관관계가 있는 것으로 판단된다. 따라서 이러한 영향을 고찰하기 위해, 본 연구에서는 다음 세 가지 경우의 리브 배치에 따른 평균 섬유 배향 텐서와 잔류응력 해석 비교를 통해 고온 크립 특성을 고찰하고자 하였다.

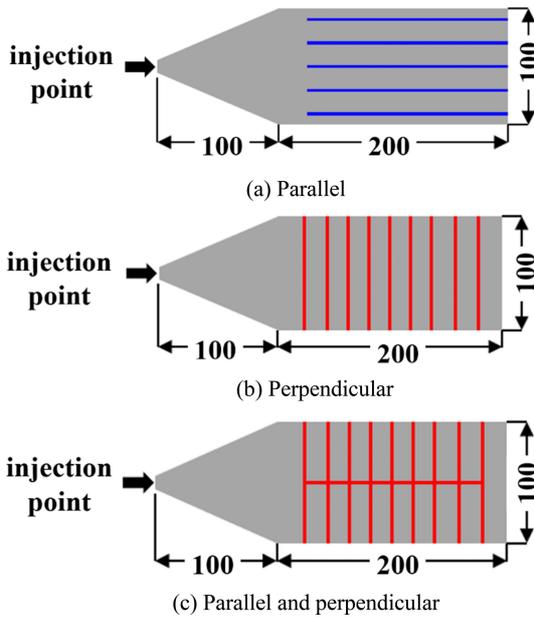


Fig. 3 Placement of the ribs to flow direction

Table 2 Comparison of products A and B of the same function with different geometries

Content	A	B
Sample		
Size [mm]	476 × 278 × 103	489 × 309 × 85
Thickness [mm]	2.5	2.2
Volume [mm <sup>3</sup> ]	729,965	1,100,433
Deformation analysis error rate [%]	30	300

Fig. 3(a)는 유동 방향에 평행인 리브 배치를 나타낸 것이다. 사출 주입점의 효과를 최소화하기 위해 리브를 사출 주입점으로부터 100 mm 이상에 위치시켰으며, 기본 두께 3 mm, 리브 두께 2 mm, 리브 높이는 10 mm로 적용하였다.

Fig. 3(b)는 유동 방향에 수직인 리브 배치를 나타낸 것이다. Fig. 3(a) 유동 방향에 평행인 리브 배치의 해석 모델과 동일하게 리브 배치를 사출 주입점으로부터 100 mm 이상에 위치시켰으며, 기본 두께 3 mm, 리브 두께 2 mm, 리브 높이 10 mm로 적용하였다.

Fig. 3(c)는 유동 방향에 평행 및 수직인 리브 배치를 나타낸 것이다. 유동 방향에 평행인 리브 배치의 플로우 리더(Flow Leader) 역할을 통해 점탄성 효과 검증을 위하여 Table 2 Sample “B”를 기준으로 해석 모델에 플로우 리더 역할을 하는 유동 방향에 평행 및 수직인 리브 배치를 적용하여, 기본 두께 2.2 mm, 유동 방향에 평행인 리브 두께 3 mm, 수직인 리브 두께 2.5 mm, 리브 높이 10 mm로 적용하였다.

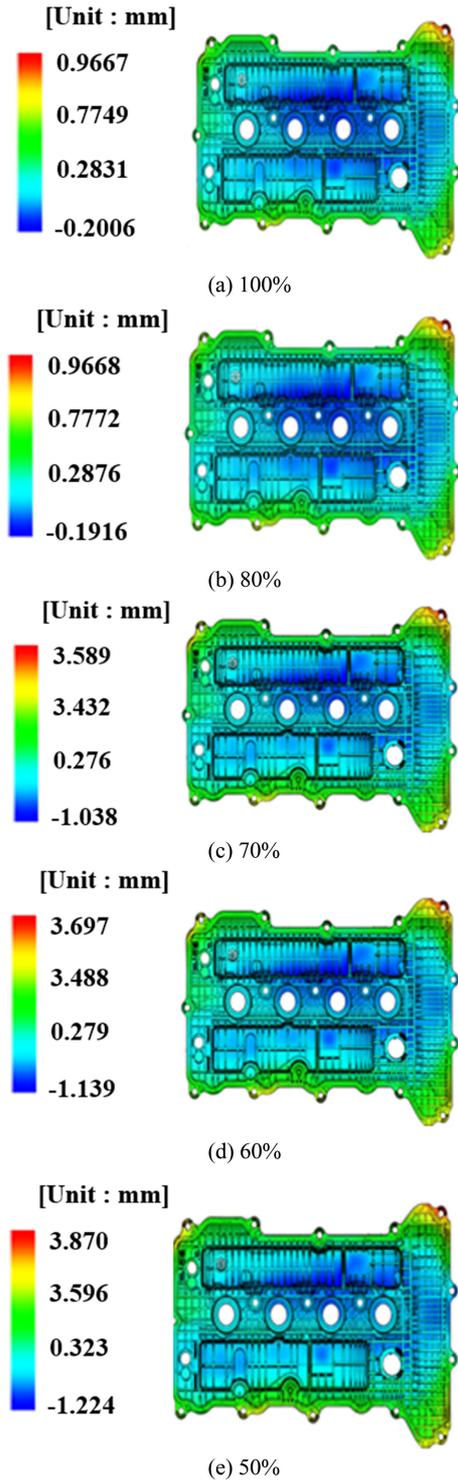


Fig. 4 Deformation distribution of the product with elastic modulus and shear modulus

### 3. 연구 결과 및 고찰

#### 3.1 고온 크립의 점탄성 효과 검증

본 연구에서는 섬유 강화 고분자 복합 재료의 사출성형 시 발생하는 고온 크립 현상을 반영하기 위해 2차 기본방향의

탄성계수 및 1, 2차 기본방향의 전단계수를 기본값을 기준으로 50-100%로 적용시켜 변형해석을 수행하여 해당 제품의 점탄성 변형 이후 나타난 변형과 재현되었는지 검토하였다.

Fig. 4는 횡단등방성물성치를 2차 기본방향에 대한 탄성계수와 1차, 2차 기본방향의 전단탄성계수를 기본값을 기준으로 (a) 100%, (b) 80%, (c) 70%, (d) 60% 및 (e) 50%로 적용하여 변형 해석을 한 결과를 나타낸 것이다.

2차 기본방향에 대한 탄성계수 및 1, 2차 기본방향의 전단계수를 Figs. 4(b)로 적용시켰을 경우에는 최대변형량이 0.0001 mm로 큰 영향이 없었고, 4(c), 4(d), 4(e)로 적용시켰을 경우에는 각각 3.589, 3.697, 3.870 mm로 증가하였다. 이는 해당 제품의 점탄성 변형 이후 나타난 변형과 유사한 결과를 나타냈다.

이는 폴리머 기지(Polymer Matrix)의 강성이 제품 강성에 기여하는 효과가 감소함으로써 나타나는 결과로 보이며, 폴리머 기지에서 점탄성 및 소성변형이 일어난 결과로 판단된다. 따라서, 섬유강화 고분자 복합 재료의 2차 기본방향 탄성계수 및 1, 2차 기본방향 전단계수의 수정을 통한 변형 특성을 고찰한 결과, 해당 제품의 점탄성 변형 이후와 유사한 결과를 통해 점탄성 효과를 검증할 수 있었다[12].

### 3.2 기하학적 형상에 따른 특성

#### 3.2.1 섬유 배향 텐서

Fig. 5는 제품 외측의 평균 섬유 배향 텐서를 나타낸 것이다. Fig. 5(a)는 Sample A의 결과에 해당하며, Fig. 5(b)는 Sample B의 결과에 해당한다. Figs. 5(a), 5(b) 모두 게이트 주변에서 배향 방향의 변화가 있으나, 전체적으로 직사각형 형상의 길이 방향으로 1차 기본방향이 배향되었다.

Fig. 6은 제품 내측의 평균 섬유 배향 텐서를 나타낸 것이다. Fig. 6(a)는 외측과 동일하게 게이트 주변에서 배향 방향의 변화가 있으나 전체적으로 길이 방향으로 1차 기본방향이 배향되는 결과가 나타났다. Fig. 6(b)는 다수의 길이 방향으로 배치된 두꺼운 리브 형상에서 레이스트랙 효과(Racetrack Effect)에 의해 플로우 리더 역할이 수행되는 것으로 보이며, 그에 따라 유동 방향에 수직인 리브 배치에서 직사각형 형상의 짧은 변 방향으로 배향성이 나타남을 확인할 수 있다.

#### 3.2.2 잔류응력

사출 성형품에 변형이 생기는 원인 중 하나는 잔류응력이다. 수지가 고온과 고압으로 금형에 채워지고 냉각되는 과정에서 성형품에 잔류응력이 형성된다. 잔류응력은 시간이 지나면서 스스로 이완되면서 제품에 변형을 일으킨다[13].

Fig. 7은 섬유강화 고분자 복합재료의 사출성형시 기하학적 형상에 따른 고온 크립 특성을 고찰하기 위한 제품 내측의 잔류응력 결과를 나타낸 것이다. Figs. 7(a)에서는 배향 방향의 급작스러운 변화가 발생하는 일부 구간에서 비교적 큰 값이 나타났으며, 7(b)에서는 대부분의 유동 방향과 수직으로 배치된 리브 형상에서 큰 값이 나타남을 확인할 수 있었다. 이는 급격한

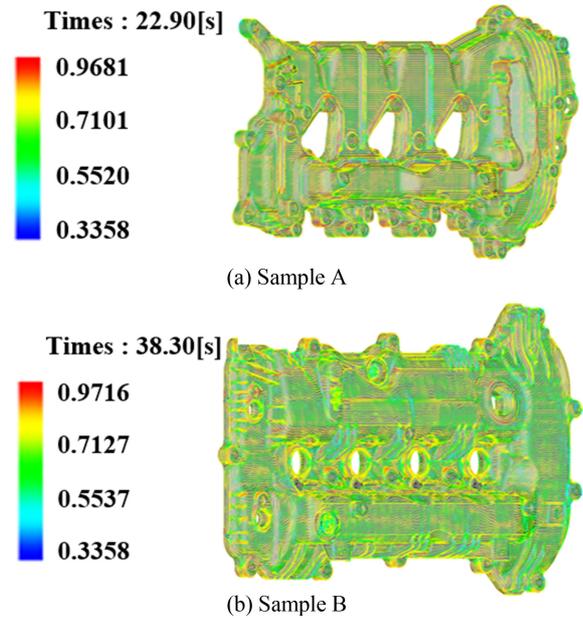


Fig. 5 Average fiber orientation tensor outside the products with different geometries

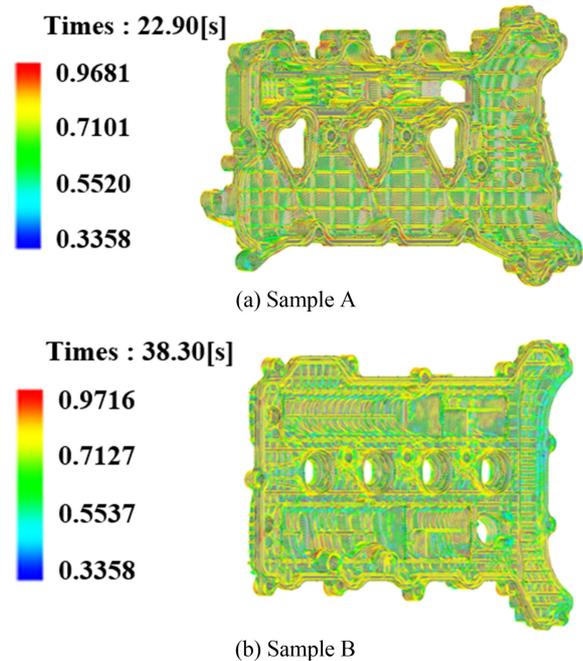


Fig. 6 Average fiber orientation tensor inside the products with different geometries

배향 방향의 변화로 인한 것으로 판단된다. 이를 통해 Fig. 7(b)의 기하학적 형상이 다소 문제됨을 알 수 있었다.

### 3.3 리브 배치에 따른 특성

#### 3.3.1 섬유 배향 텐서

Fig. 8(a)는 유동 방향에 평행인 리브 배치의 평균 섬유 배향 텐서 결과를 나타낸 것이다. 섬유 배향 텐서를 고찰해본 결과,

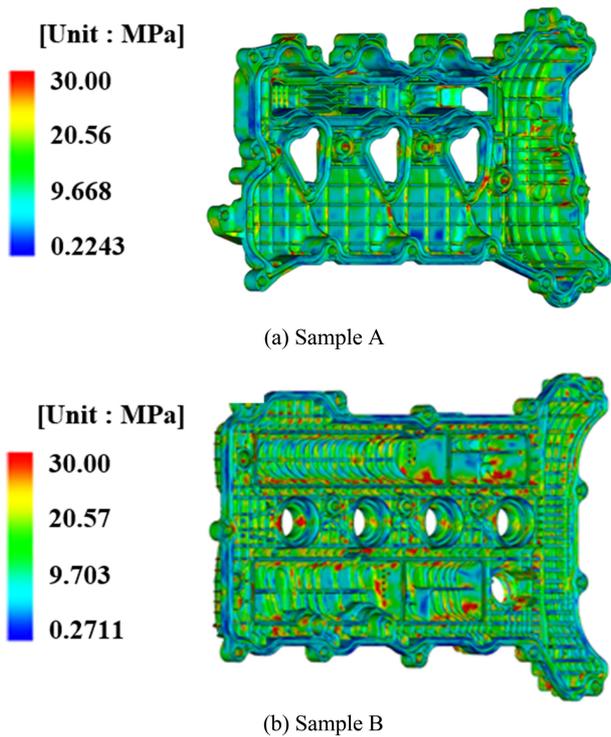


Fig. 7 Mises-hencky stress inside the products with different geometries

해석 모델의 상하면 모두에서 1차 기본방향은 X축 방향으로 배향되었으며, 2차 기본방향은 바닥 면에서는 Y축 방향으로 균일하게 정렬되었다. 그러나 리브 구간에서는 제품의 두께 방향으로 정렬되는 3차 기본방향 특성에 의해, Y축 방향으로 2차 기본방향과 리브 구간에서 3차 기본방향이 교대로 나타났다.

Fig. 8(b)는 유동 방향에 수직인 리브 배치의 평균 섬유 배향 텐서 결과를 나타낸 것이다. 해석 모델의 제품 표면에서 1차 기본방향은 X축 방향으로 배향되었으며, 리브 구간에서는 말단 면에서 말단 효과에 의한 배향 효과가 나타났으나 짧은 구간에서 나타나 영향이 크지 않은 것으로 보인다. 대부분의 리브 구간에서 3차 기본방향이 배향되어 1차와 3차 기본방향이 교대로 나타남을 확인할 수 있다.

Fig. 8(c)는 유동 방향에 평행 및 수직인 리브 배치의 평균 섬유 배향 텐서 결과를 나타낸 것이다. 해석 모델의 제품 표면에서 유동 방향에 평행인 리브에서 플로우 리더 역할을 하여 유속이 빨라짐을 알 수 있다. 또한 바닥 면에서는 느린 유속을 나타내어 바닥 면과 유동 방향에 수직인 리브에서 제품 표면에서 1차 기본방향에 직교배향 양상을 보였다.

3.3.2 잔류응력

Fig. 9(a)는 유동 방향에 평행인 리브 배치의 잔류응력 해석 결과를 나타낸 것이다. 최대값은 67.06 MPa로 나타났으며, 일부 배향 방향이 급격히 변화하는 부분에서 값이 크게 나타났지만 전체적으로 균일한 1차 기본방향에 의해 낮은 값을

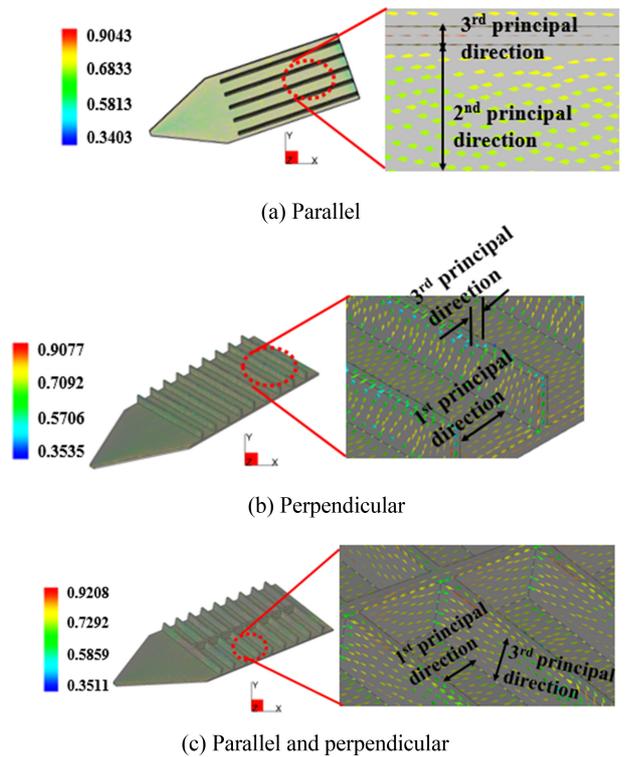


Fig. 8 Fiber orientation tensor of rib placement to flow direction

나타낸다.

Fig. 9(b)는 유동 방향에 수직인 리브 배치의 잔류응력 해석 결과를 나타낸 것이다. 최대값은 50.33 MPa로 나타났으며, 제품 표면에서 배향 방향은 유지됐지만, 리브 진입 구간에서 수직으로 급격히 꺾여, 리브와 제품 접합 구간에서 비교적 큰 값을 나타낸다. 이 경우 제품 표면에서의 배향은 균일하게 유지되었으므로 제품 표면을 따라 항복이나 점탄성 변형을 일으킬 정도의 인장 또는 전단응력은 발생하지 않은 것으로 보인다.

Fig. 9(c)는 유동 방향에 평행 및 수직인 리브 배치의 잔류응력 해석 결과를 나타낸 것이다. 최대값은 81.17 MPa로 나타났으며, 제품 표면에서 1차 기본방향에 직교 배향 양상을 보였으며 큰 값이 나타나 이 경우 소성변형 및 점탄성 효과가 예상된다.

따라서, 섬유강화 고분자 복합재료의 사출성형 시 리브 배치에 따른 고온 크립 특성을 고찰하기 위해 세 가지 경우의 리브 배치에 따른 잔류응력 값을 비교한 결과, Fig. 9(c)와 같이 유동 방향에 평행 및 수직인 리브 배치에서 최대값이 81.17 MPa으로 세 가지 리브 배치 중 가장 큰 값을 나타내었다. Fig. 10은 변형 해석 결과를 나타낸 것이다. Fig. 10(c)의 리브가 교차되는 배치의 경우 변형량이 비교적 적은 값을 보이는 것을 확인할 수 있다. 이 경우 변형량은 다소 작지만 잔류응력이 가장 큰 값을 나타내므로 소성변형 및 점탄성 효과가 가장 클 것으로 예상되기 때문에, 리브가 교차되는 배치를 지양해야 할 것으로 판단된다.

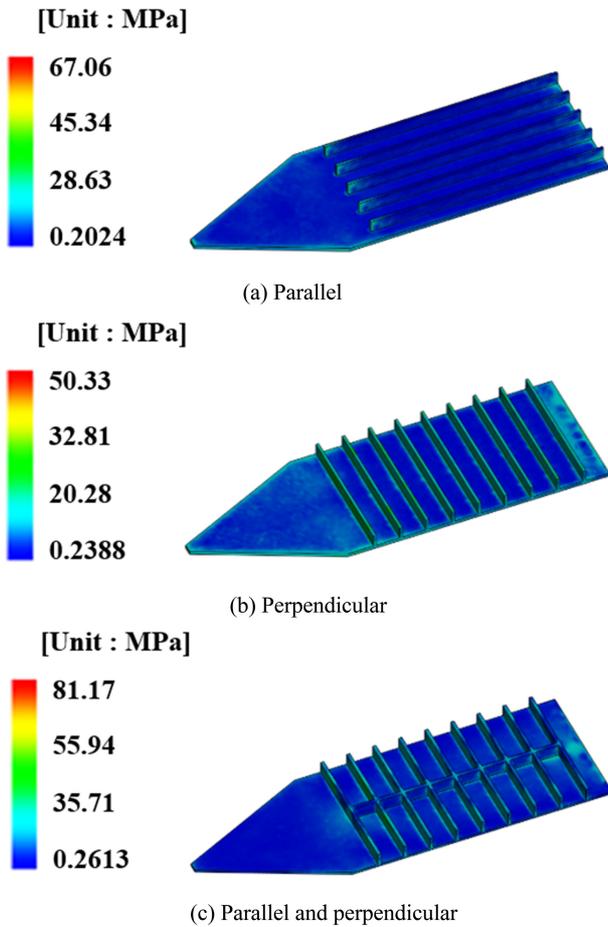


Fig. 9 Mises-hencky stress of rib placement to flow direction

4. 결론

본 연구에서는 사출성형공정 해석을 통하여, 섬유강화 고분자 복합재료의 이형 후 상온 냉각 중인 사출성형제품의 기하학적 형상 및 리브 배치에 따른 크립 현상의 특성을 규명하고자 하였다.

1) 고온 점탄성 효과는 결정형 수지 종류의 엔지니어링 플라스틱(Engineering Plastic) 경우도 제품 이형 온도가 유리 전이온도보다 상당히 높을 시, 제품 이형 후 점탄성 변형은 비결정형 구간에서 충분히 발생함을 확인할 수 있었다.

2) 기하학적 형상에 따른 특성으로는 외곽 형상이 비대칭인 Sample A 해석 모델의 경우 부분적으로 배향 방향의 급격한 변화가 발생하는 구간에서 잔류응력이 비교적 큰 값이 나타났다.

다수의 리브 형상을 가진 Sample B 해석 모델의 경우 대부분의 유동 방향과 수직인 리브 구간에서 급격한 배향 방향 변화로 인해 잔류응력이 큰 값이 나타남을 통해 Sample B의 기하학적 형상이 다소 문제됨을 알 수 있었다.

3) 세 가지 경우의 리브 배치에 따른 섬유 배향 텐서 및 효과 해석 결과, 유동 방향에 평행 및 수직인 리브 배치에서 제품 표

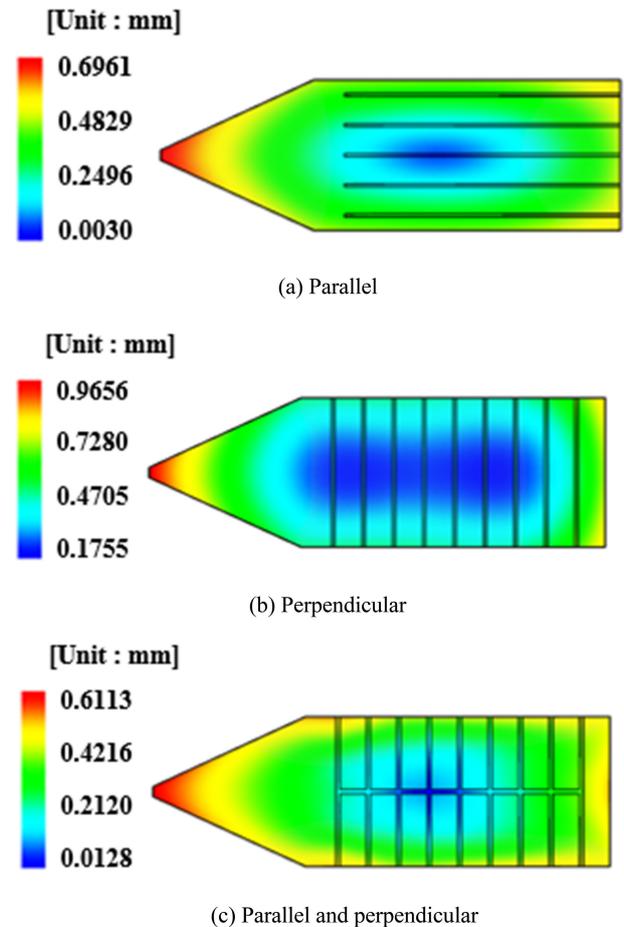


Fig. 10 Deformation distribution for rib placement to flow direction

면의 유동 방향에 평행인 리브에서 Flow Leader의 영향을 받아 1차 기본방향에 직교 배향 양상을 보였다.

또한, 유동 방향에 평행 및 수직인 리브 배치에서 잔류응력이 가장 큰 값을 나타내므로, 이 경우 소성변형 및 점탄성 효과가 가장 클 것으로 예상되기 때문에 리브가 교차되는 배치를 지양해야 할 것으로 판단된다.

특히 리브설계 시 잔류응력, 구조적 강성, 변형 등의 관계가 복잡하므로 본 연구에서는 리브 설계에 따른 대략적인 경향성을 살펴보았다. 명확한 결론 도출을 위해서는 향후 이에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

REFERENCES

1. Cho, D.-H., Kim, H.-J., (2009), Naturally cyclable biocomposites, *Elastomers and Composites*, 44(1), 13-21.
2. Strong, A. B., (2008), *Fundamentals of composites manufacturing: Materials, methods and applications*, Society of Manufacturing Engineers.
3. Schwartz, M. M., (1984), *Composite materials handbook*,

Second Edition, McGraw-Hill. <https://archive.org/details/compositemateria0000schw/mode/2up>

4. Jang, B., (1994), Advanced polymer composites: Principles and applications. ASM International.
5. Lee, J., (2016), Research on the residual fiber length in injection molding process for glass fiber reinforced polypropylene, M.Sc. Thesis, Ajou University.
6. Lee, H. K., Kim, H. C., Yang, G. E., (2002), A study on process of injection mold in reverse engineering, Journal of the Korean Society of Precision Engineering, 19(6), 160-165.
7. Hwang, S., Han, S.-R., Lee, H., (2021), A study on the improvement of injection molding process using CAE and decision-tree, Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, 22(4), 580-586.
8. Wu, Z., (2018), Analytical study on various process conditions for improving quality of injection molding, M.Sc. Thesis, Hannam University.
9. Moon, H., Kim, H., Choi, C., Jeong, K., (2008), Thermal viscoelastic analysis of plastic part considering residual stress, Transactions of Materials Processing, 17(7), 496-500.
10. Kim, J. S., Han, J. W., (2022), Enhanced first-order shear deformation theory for thermo-mechanical-viscoelastic analysis of laminated composite structures, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, 21(4), 53-59.
11. Reissner, E., (1945), The effect of transverse shear deformation on the bending of elastic plates, Journal of Applied Mechanics, 12(2), A69-A77.
12. Xie, X.-L., Mai, Y.-W., Zhou, X.-P., (2005), Dispersion and alignment of carbon nanotubes in polymer matrix: A review, Materials Science and Engineering: R: Reports, 49(4), 89-112.
13. Lee, M., Kim, H., Lyu, M.-Y., (2012), A study on the warpage of glass fiber reinforced plastics for part design and operation condition: Part 1. Amorphous Plastics, Polymer (Korea), 36(5), 555-563.



#### **Yu-Jung Kim**

Master student under the supervisor of Professor Hee-Seon Bang in Department of Welding and Joining Science Engineering, Chosun University. Her research interests include the smart welding process and design.

E-mail: yujung4171@naver.com



#### **Hee Seon Bang**

A Professor in the Department of Welding and Joining Science Engineering, Chosun University. Her research interests include the smart welding process and design.

E-mail: banghs@chosun.ac.kr



## 연속식 하역기 L-홀더의 잔존 수명 예측

# Prediction of the Remaining Useful Life of L-holder for Continuous Ship Unloader

이승훈<sup>1</sup>, 이동우<sup>2</sup>, 송정일<sup>3,#</sup>  
Seung-Hun Lee<sup>1</sup>, Dong-Woo Lee<sup>2</sup>, and Jung-Il Song<sup>3,#</sup>

<sup>1</sup> 창원대학교 스마트제조융합학과 (Department of Smart Manufacturing Engineering, Graduate School, Changwon National University)  
<sup>2</sup> 창원대학교 메카트로닉스연구원 (The Research Institute of Mechatronics, Changwon National University)  
<sup>3</sup> 창원대학교 기계공학부 (Department of Mechanical Engineering, Changwon National University)  
# Corresponding Author / E-mail: jisong@changwon.ac.kr, TEL: +82-10-4775-7370  
ORCID: 0000-0003-2595-1067

KEYWORDS: Continuous ship unloader (연속식 하역기), L-holder (L-홀더), Remaining useful life (잔존수명), Fracture toughness (파괴인성), Fatigue crack growth (피로균열진전)

*A Continuous Ship Unloader (CSU) is a facility in which multiple buckets rotate to excavate cargo from a ship to land. It is typically designed to have a lifespan of 20 years. However, fatigue damage is likely to occur before the end of its designated lifespan. This study aims to examine the possibility of extending the component's lifespan by evaluating the remaining useful life of L-holder, a part of CSU, that has been in use for 20 years. Fatigue load history was predicted by measuring the strain with or without strain at the L-holder part requiring periodic replacement. Through tensile and fatigue tests, the remaining life was evaluated when cracks were not present. In addition, the remaining life in the presence of cracks was evaluated through destructive toughness test and fatigue crack propagation test. Life prediction results based on test cycles were obtained. The proposed guidelines are expected to be helpful for preventing CSU accidents.*

Manuscript received: February 8, 2023 / Revised: May 14, 2023 / Accepted: May 29, 2023

### NOMENCLATURE

$\sigma_a$  = Stress Amplitude  
 $\sigma_m$  = Mean Stress  
 $S_e$  = Endurance Limit, Fatigue Limit  
 $S_u$  = Ultimate Strength  
 $a_f$  = Critical Crack Length  
 $N_f$  = Remaining Useful Life

### 1. 서론

연속식 하역기(Continuous Ship Unloader, CSU)는 선박을

통하여 수송된 철광석이나 석탄 등을 회전하는 엘리베이터 방식의 버킷을 이용하여 빠르게 하역할 수 있는 대형 구조물이다 [1]. 연속적으로 하역되는 철광석이나 석탄은 발전소까지 연결된 컨베이어까지 연속적으로 이송되며, 이송경로가 모두 밀폐되어 있어 먼지나 낙탄이 적게 발생하므로 친환경적이다[2]. 그러나 하역 과정에서 고하중이 지속적으로 구조물에 작용하기 때문에 장기간 사용 시 피로파괴에 대한 위험성이 있다[3-7]. 본 연구에 사용된 연속식 하역기의 설계수명은 20년이지만, 환경규제의 강화에 따라 신규장비의 제작에 어려움이 있어 기존장비의 잔존수명 평가를 수행함으로써 문제가 되는 부분의 발견 및 부분적 교체를 통한 수명 연장이 요구되고 있다.

연속식 하역기는 다양한 요소로 구성되어 있으며, 주로 텐션바(Tension Bar)와 L-홀더(L-holder)에 많은 하중이 집중된다.



Fig. 1 Continuous ship unloader

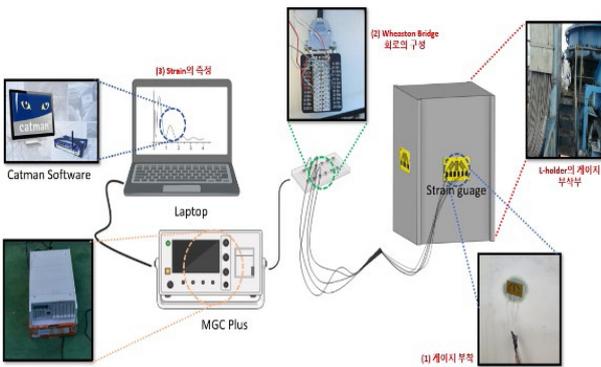


Fig. 2 Experimental setup for strain measurement from L-holder vertical bar

본 연구에서는 20년간 사용된 연속식 하역기의 L-홀더 부위에 대해 운전 중 발생하는 하중이력을 분석하고, 이를 근거로 균열이 존재하지 않는 경우와 균열이 존재하는 경우에 대하여 잔존수명 평가를 실시하였다.

## 2. 시험방법

### 2.1 하중이력의 측정

연속식 하역기의 L-홀더에 대한 잔존수명 예측을 위해 L-홀더에서의 하중이력을 측정하였다. 본 연구에서 하중이력 측정 대상이 된 연속식 하역기는 H 발전소에 설치된 하역기로, 용량은 1,500 T/H (Coal)이며 레일 간격은 20 m이다. 연속식 하역기에서 버킷 엘리베이터를 고정하고 있는 L-홀더의 구성요소 중 하나인 수직 바(Bar)의 표면에서 하중이력을 측정하였다. 하중이력의 측정은 석탄을 하역하지 않고 움직이기만 하는 무부하와 석탄을 하역하는 부하 동작으로 나누어 측정하였으며, 측정된 하중이력과 1년간의 운전 통계를 비교함으로써 1년 동안 연속식 하역기에 작용한 하중이력을 추정하고자 하였다.

하중이력 측정에 사용된 구체적인 방법은 다음과 같다. 먼저 L-홀더의 수직 바 표면 3군데를 선정 후 표면을 연마하고 3축 스트레인게이지(Strain Gauge)를 부착한다. 3축 스트레인게이지 사용시 부착부위에서 발생하는 주변형률 및 주응력을 측정하는 것이 가능하다. 설치한 스트레인게이지는 브릿지 박스 및 Data

Acquisition (DAQ) 장치(MGC Plus, HBM, 독일)에 연결하여 데이터를 받았으며, 측정된 데이터는 20년간 L-홀더에 가해진 피로하중을 예측하는데 사용되었다. 하중이력 측정을 위한 시험 장치의 개략도는 Fig. 2와 같다.

무부하 운전 시에는 연속식 하역기의 주요 모션(Motion)별로 구분하여 하중이력을 측정함으로써 어느 모션이 가장 큰 응력을 발생시키는지 확인하고자 하였으며, 모션의 종류는 다음과 같다.

- (1) Bucket elevator (B/E) operating
- (2) B/E Slewing
- (3) Boom Slewing
- (4) Boom Luffing
- (5) Gantry Traveling
- (6) Digging

부하운전은 실제 석탄을 하역하는 운전방식이다. 한가지 모션으로만 석탄을 하역하는 것이 불가능하므로 앞서 소개한 6개의 모션이 랜덤하게 조합되어 있다. 부하운전에서는 석탄이 담겨있는 해치(Hatch)의 3분의 1정도 깊이에서부터 약 3,300 ton의 석탄을 187분간 하역하면서 변형률을 측정하였다. 이후 부하 운전중 측정된 데이터를 이용하여 1년간 L-홀더에 가해진 피로하중을 추정하였다.

시험을 통하여 얻어지는 데이터는 응력의 상승과 하락이 반복되는 진동 및 피로하중의 형태이기 때문에 Rainflow Counting 기법을 이용하여 가해진 응력의 크기와 횟수를 분류하고, 이를 수명예측식에 적용하여 L-홀더에 균열이 존재하지 않을 때의 잔존수명을 예측하고자 하였으며, 알려진 예측방법 중 굿맨(Goodman) 방정식과 마이너 법칙(Miner's Rule)을 사용하였다. 실제 구조물의 경우 균열이 존재할 가능성이 높으므로 균열 존재를 고려하여 잔존수명을 계산해야 한다. 따라서 본 연구에서는 인장시험, 피로시험, 파괴인성치 시험, 피로균열 진전시험을 수행하고, 균열이 존재하는 경우에 대한 잔존수명 예측도 수행하였다.

### 2.2 사용재료 및 시험방법

L-홀더의 수명예측에 사용되는 이론식에 필요한 데이터를 얻기 위하여 다양한 시험을 수행하였다. 기계적 물성평가에 사용된 재료는 연속식 하역기의 L-홀더에 사용된 재료와 동일한 SM490YB를 사용하였다.

인장시험에는 UTM 만능시험기(RB 301, R&B Korea, 대한민국)를 사용하였으며, 인장속도는 2 mm/min를 사용하였다. 인장시험을 통하여 얻은 SM490YB의 인장강도를 기준으로 피로 시험 조건을 선정 후 고주기 피로시험(High Cycle Fatigue, HCF)을 수행하였다. 피로시험은 재료시험기(MTS 810, MTS, 미국)를 사용하였으며, 시험조건으로는 하중비 R = 0.1, 주파수는 6-8 Hz의 조건을 사용하였다.

파괴인성시험과 피로균열진전시험 또한 동일한 재료시험기를

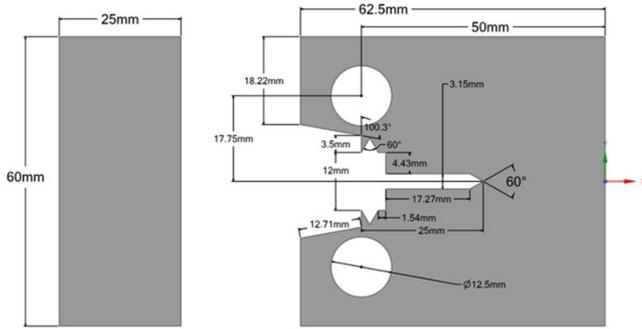


Fig. 3 Compact tension (CT) specimen for fracture toughness test

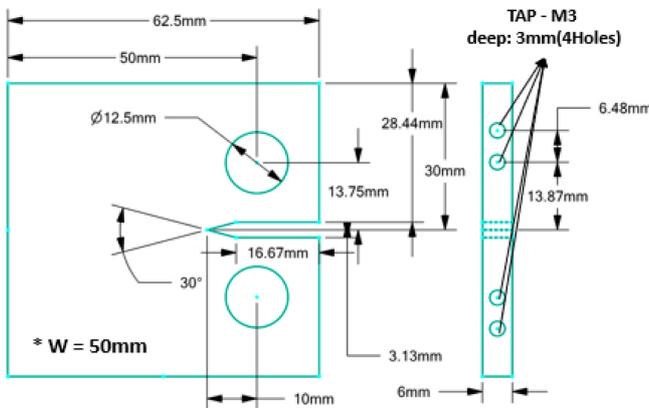


Fig. 4 CT specimen for fatigue crack growth test

이용하여 진행하였다. 파괴인성시험은 ASTM E1820 시험규격에 따라 수행하였으며, 사용된 시험편의 치수는 Fig. 3과 같다. 시험편에 COD 게이지를 장착하여 시험을 수행하였으며, 소프트웨어를 통하여 균열진전길이 데이터를 얻었다. 피로균열 진전시험은 ASTM E6478에 따라 수행하였으며, 시험편의 치수는 Fig. 4에 나타내었다. 피로시험중 일정 Cycle 수마다 균열진전 거리를 측정하고 이를 기록 후 분석에 사용하였다.

2.3 균열이 존재하지 않을 시 잔존수명의 예측방법

부재에 균열이 존재하지 않을 시 잔존수명의 예측에는 굿맨 방정식과 마이너 법칙을 모두 사용하여 교차검증을 하였다. 마이너 법칙은 구조 재료에 불규칙한 무게가 반복되어 가해지면 해당 재료에 눈에 보이지 않는 피로 손상이 누적되어 결국에는 파괴되는 과정을 설명하는 법칙이다. 굿맨 방정식과 달리 받는 전체의 하중에 대하여 피로수명을 예측하는데 사용된다. 각각의 수식은 다음과 같다.

$$\text{Goodman equation } \frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_u} = 1 \quad (1)$$

$$\text{Miner's rule } \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots = \sum \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad (2)$$

여기서 굿맨 방정식의  $\sigma_a$ ,  $\sigma_m$ ,  $S_e$ ,  $S_u$ 는 각각 응력의 진폭,

평균응력, 피로한도, 인장강도를 의미한다. 마이너 법칙의 n과 N은 각각 특정 응력에 의해서 재료에 가해진 피로하중의 반복횟수와 피로파손에 필요한 피로하중의 반복횟수이다. 여기서 특정 응력은 Rainflow Counting을 통하여 도출한 값을 사용한다.

SM490YB 재료의 시험을 통하여 얻은 값을 각각의 수식에 대입 후 계산한 값이 1과 같거나 초과할 경우 재료가 파손되며, 1보다 작을 경우 가해진 피로하중에 대하여 재료가 안전하다고 판단할 수 있다.

2.4 균열 존재 시 잔존수명의 예측방법

균열 존재 시 부재의 잔존수명은 파괴인성시험을 통하여 얻은 SM490YB의 파괴인성치와 피로균열진전 시험을 통하여 얻은 SM490YB에서의 균열진전 속도를 바탕으로 예측하였다. 실험을 통하여 재료에서 발생하는 균열의 형상, 크기를 알 수 있을 경우 소재의 파괴인성 및 부재의 형상계수를 통해 한계 균열 길이를 계산할 수 있으며, 균열진전속도를 이용하면 한계 균열 길이까지 균열이 진전하는데 필요한 피로하중의 반복횟수, 즉 수명을 계산할 수 있다. 잔존수명 계산에 사용된 주요 수식은 아래와 같으며, 상세한 수식은 ASTM 규격[7,8]과 핸드북[9]을 참고하였다.

$$\text{J-Integral } J = J_{el} + J_{pl} \quad (3)$$

$$\text{Critical crack length } a_f = \frac{1}{\pi} \left( \frac{K_{Ic}}{\sigma_{max} F} \right)^2 \quad (4)$$

$$\text{Remaining fatigue life } N_f = \int_{a_0}^{a_f} \frac{da}{C(\Delta K)^m} = \int_{a_0}^{a_f} \frac{da}{C(\Delta \sigma \sqrt{\pi a} F)^m} \quad (5)$$

$$\text{If } m \neq 2, N_f = \frac{2}{(m-2)C(\Delta \sigma F)^m \pi^{\frac{m}{2}}} \left[ \frac{1}{a_0^{(m-2)/2}} - \frac{1}{a_f^{(m-2)/2}} \right]$$

3. 시험 결과

3.1 측정된 하중이력 및 분석

무부하시 측정된 주변형률 및 이를 이용하여 계산한 주응력은 Figs. 5, 6과 같다. 버킷이 엘리베이터 축을 따라서 회전하는 B/E Slewing 모션에서 가장 높은 응력이 발생하는 것을 확인할 수 있었으며, 나머지 모션들은 B/E Slewing 모션에 비하여 상대적으로 낮은 응력을 발생시키는 것을 확인할 수 있었다. B/E Slewing 모션 중 게이지 부착위치별 발생응력을 비교하였을 때는 연속식 하역기의 중심축에 해당하는 센터 포스트에 가장 가까운 면(그림의 Section 1)에서 가장 높은 응력이 발생하였다. 이러한 정보는 L-홀더의 교체 시 새로운 L-홀더의 설계에 적용이 가능하다.

석탄을 실제로 하역하는 동작인 부하 시 측정된 주변형률 및

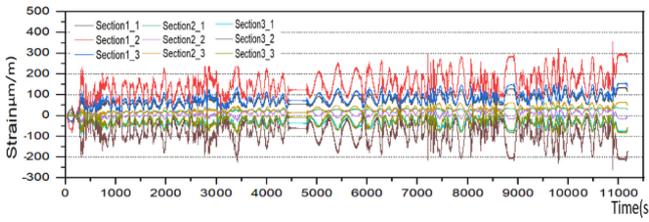


Fig. 5 Measured principal strain under the no-load operation

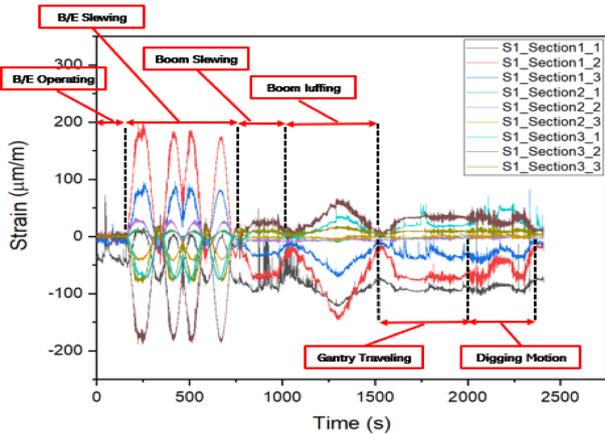


Fig. 6 Calculated principal stress using no-load strain history

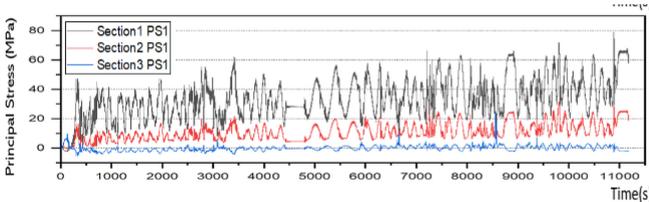


Fig. 7 Measured principal strain under the load operation

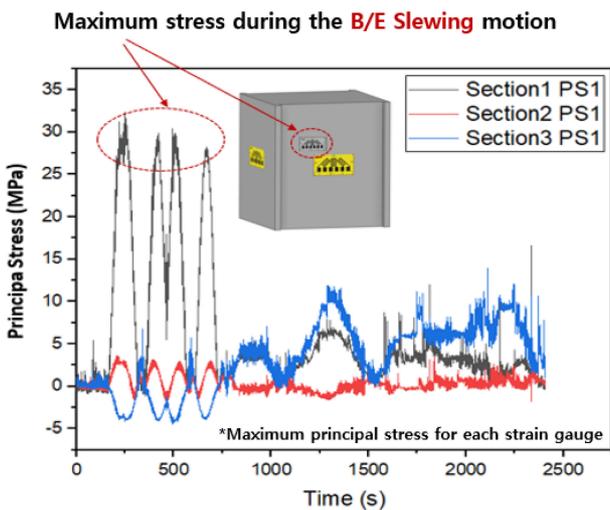


Fig. 8 Calculated principal stress using load strain history

이를 이용하여 계산한 주응력은 Figs. 7, 8과 같다. 배에서 석탄을 하역할때는 석탄이 점점 줄어들에 따라 버킷을 해치속에

Table 1 Load history cycle counting for 20 years

Range [MPa]	N <sub>j</sub> [Cycle]	Range [MPa]	N <sub>j</sub> [Cycle]
210	6,683	136	3,481,843
190	6,683	135	4,203,607
185	6,683	134	6,395,631
180	13,366	133	10,305,186
175	3,562,039	132	17,482,728
170	2,780,128	131	49,160,148
165	1,517,041	130.9	13,439,513
160	3,635,552	130.8	15,618,171
155	2,011,583	130.7	17,629,754
150	1,664,067	130.6	19,079,965
145	3,201,157	130.5	17,382,483
140	4,009,800	130.4	15,591,439
139	2,339,050	130.3	13,366,000
138	1,590,554	130.2	7,391,398
137	2,546,223	130.1	4,470,927

더욱 깊이 집어넣어야 한다. 이때 Boom Luffing 모션이 일어나며, 석탄을 하역 할수록 수평선을 기준으로 Luffing 각도가 점점 작아진다. Fig. 8의 시간에 따른 주응력 변화 거동을 보면 석탄을 하역 할수록 점점 측정된 응력이 증가하는 것을 알 수 있는데, 다른 모션은 여러 방향으로 반복되는 반면에 Luffing 각도는 점점 줄어들기만 하기 때문에 Luffing 각도가 줄어드는 만큼 응력이 줄어드는 것으로 생각할 수 있다. 부하 시에 측정된 하중이력도 무부하시와 동일하게 Section 1에 가장 높은 응력이 발생함을 알 수 있었다.

측정한 하중이력은 상용 소프트웨어인 MATLAB을 이용하여 분석하였다. Rainflow Counting 기법을 측정된 하중이력에 적용하여 하중을 크기순으로 재정렬하고, 그 값에 다시 1년 동안의 운전조건을 반영 후 사용한 기간인 20년을 곱하여 L-홀더에 가해진 피로하중의 크기와 반복횟수를 Table 1과 같이 계산하였다. 여기서 Table 1에 나타난 응력은 측정된 응력에 L-홀더의 자중을 고려하여 환산한 값이다. 이렇게 얻어진 시험결과는 L-홀더에 사용된 SM490YB의 수명예측에 사용되었다.

### 3.2 균열이 존재하지 않을 시 잔존수명

잔존수명의 계산에 사용하기 위하여 수행한 인장 및 피로시험을 수행하였으며, 인장시험 결과는 Fig. 9와 같다. 시험결과가 두개의 그룹으로 나뉘는 것을 알 수 있는데, 이는 CSU에서 직접 채취한 시험편도 함께 시험에 사용하였기 때문이다. CSU에서 채취한 시험편의 데이터(Fig. 9(2))는 사용하지 않은 시험편(Fig. 9(1))에 비하여 낮은 강도를 가지는 것을 확인할 수 있었으며, 이는 20년 동안의 사용하면서 받은 누적된 손상과 연속식 하역기가 해양 부근에서 사용되는 특성상 가혹한 환경조건(수분, 염분)에 노출되었기 때문인 것으로 생각된다.

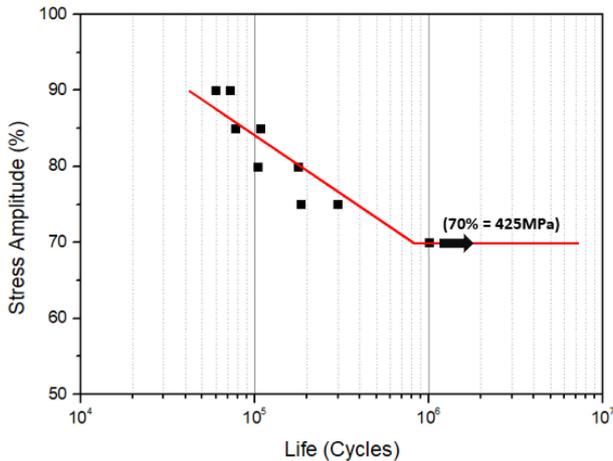


Fig. 9 Stress-Strain curve for SM490YB and CT specimens

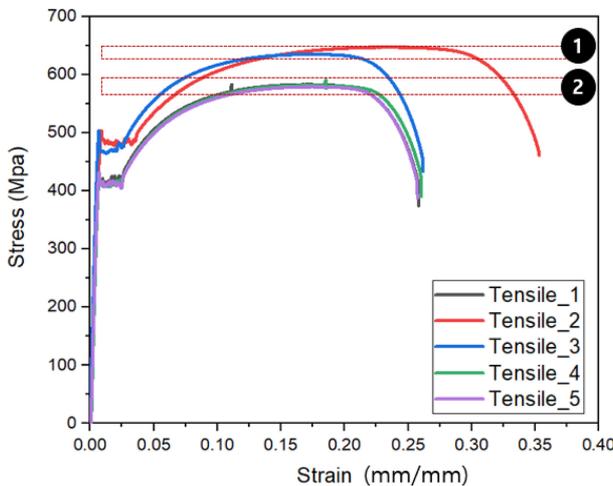


Fig. 10 Stress-Life curve for SM490YB and CT specimens

인장시험 결과를 바탕으로 피로시험 조건을 설정하였다. 선형연구에서 항복강도를 최대값으로 사용할 경우 고주기 피로시험 시 무한수명으로 나타났기 때문에 인장강도를 기준값으로 하여 응력수준(Stress Level)별 피로시험을 수행하였으며, 피로시험을 통하여 얻은 시험결과는 Fig. 10과 같다. 100만 사이클 초과 시 무한수명으로 판단하였으며, 피로한도는 SM490YB 인장강도의 약 70% 부근에서 나타나 피로한도가 항복점보다 높은 매우 높은 값을 가지는 것을 알 수 있었다.

굿맨 방정식을 이용하여 계산한 L-홀더의 수명 계산방법은 아래와 같다. 먼저 고주기 피로시험을 통하여 얻은 S-N 선도의 기울어진 직선구간을 이용하여 피로수명 예측식을 아래와 같이 도출하였다.

$$\sigma_{max} = 951.08 - 90.38 \times \log N_f \quad (6)$$

실험을 통하여 얻은 하중이력이 잔존수명에 미친 영향을 계산하였다. 먼저 Table 1의 가장 높은 응력범위인 210 MPa에 대하여 하중비를 0.1로 가정하여 계산해보면 최대응력과 최소응력은

각각 116.7, 11.7 MPa, 응력 진폭과 평균응력은 각각 105, 64.2 MPa이 된다. 이를 굿맨 방정식에 대입하면  $S_n$ 은 134.6 MPa이 된다. 여기서 다른 값들을 모두 대입하고 남은 항인  $S_e$ 는  $S_n$ 이 된다(식(7)). 계산결과를 다시 피로수명 예측식에 대입하면 식(8)과 같다. 계산된 수명인 1,082,181,668 cycles는 백만 사이클을 초과하기 때문에 무한수명이며, 가장 높은 응력에 대하여 무한수명 이므로, L-홀더는 전체 하중이력에 대하여 무한수명인 것으로 판단된다. 계산된 수명이 매우 높은 것을 알 수 있는데, 이는 측정된 하중이력의 최대값이 재료의 피로한도보다 현저히 낮기 때문이다.

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_u} = 1, \quad \frac{105}{S_n} + \frac{128.3}{584} = 1 \quad \therefore S_n = 134.56 \quad (7)$$

$$134.56 = 951.08 \times \log N_f \quad \therefore N_f = 1,082,181,668 \quad (8)$$

또다른 수명예측 방법인 마이너 법칙을 이용하여 예측한 L-홀더의 수명은 식(9)와 같다. Table 1의 측정된 하중이력 범위(Range)가 SM490YB의 피로한도보다 낮으므로 식(9)의 모든 분모가 각각의 하중에 대하여 무한수명임을 의미하는 무한대가 된다. 따라서 누적손상의 합계도 0이 되며, 이는 1보다 낮은 값이므로 L-홀더는 무한수명을 가지는 것으로 판단된다.

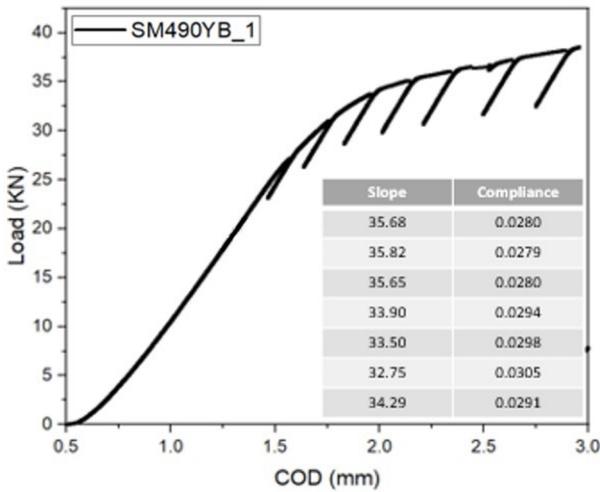
$$\sum \frac{n_i}{N_f} = \frac{6683}{\infty} + \frac{6683}{\infty} + \frac{6683}{\infty} + \frac{13366}{\infty} + \frac{3562039}{\infty} + \dots + \frac{4470927}{\infty} = 0 < 1 \quad (9)$$

이와 같이 두 가지 방법으로 SM490YB로 제조된 L-홀더의 특정 부위에 대하여 균열이 존재하지 않는 경우에 대한 수명평가를 수행한 결과 두 방법 모두 무한수명임을 나타내었다. 이는 L-홀더에 대하여 균열검사를 수행하였을 때 균열이 검출되지 않을 경우 20년 동안 사용하였음에도 불구하고 안전할 뿐만 아니라 잔존수명이 무한이기 때문에 앞으로도 계속 사용할 수 있음을 의미한다.

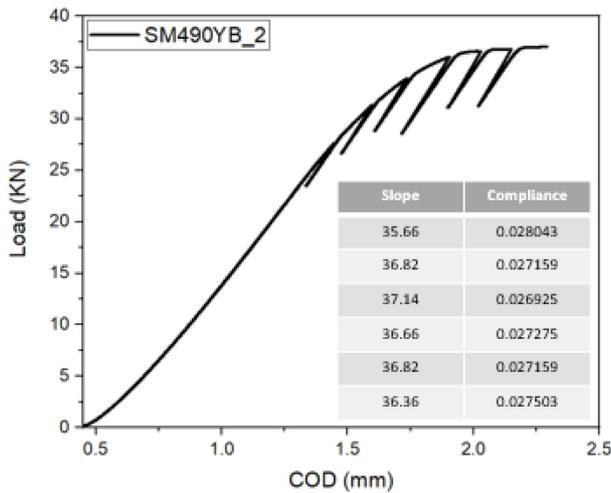
### 3.3 균열 존재 시 잔존수명 예측을 위한 시험결과

ASTM E1820에 따라 수행한 파괴인성시험 결과를 Fig. 11에 나타내었다. 컴플라이언스법(Compliance Method)과 정규화법을 이용하여 파괴인성 시험을 진행하였으며, 컴플라이언스를 계산하여 Fig. 11에 함께 나타내었다.

컴플라이언스와 시편의 정보, 탄성계수 등을 이용하여 J값과 Crack Extension 값을 획득하였다. 수식을 통해 얻은 값들을 이용하여 J-R선도를 작성하였으며 Fig. 12와 같이 나타내었다. 파괴인성치를 계산하기 위하여, J-R선도의 작도선(Construction Line)을 각각 0.15, 1.5 mm 오프셋 한 배제선 사이의 데이터를 이용하여 곡선접합을 수행하고, 이 곡선접합한 회귀선(Regression Line)이 작도선을 0.2 mm 오프셋한 선과 만나는 지점을 도출하였다. 이 값이 ASTM E1820의 A9.9항(식(10))을 만족하면  $J_{IC}$ 이며, 이를 만족하지 못할 경우  $J_Q$ 로 남게된다. 파괴인성시험에



(a) Sample 1



(B) Sample 2

Fig. 11 Load-COD curve for SM490YB and CT specimens

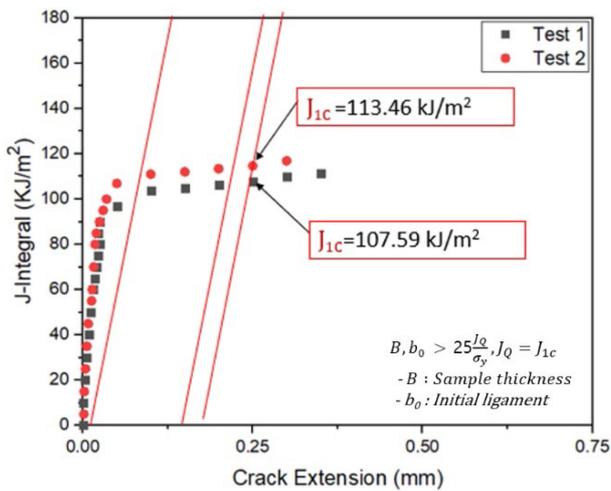


Fig. 12 Experimental J-R Curves for SM490YB and CT specimens

사용한 두 시편 모두 A9.9항을 만족하였으며,  $J_{1c}$ 는 Fig. 12에 나타내었다.

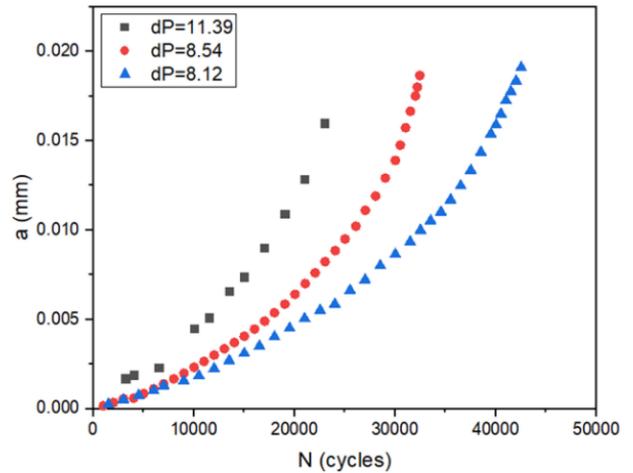


Fig. 13 a-N curve for SM490YB and CT specimens

$$J_{1c} \text{ 판별식 Thickness } B > \frac{25J_Q}{\sigma_Y} \tag{10}$$

$$B = 25 > \frac{25 \times 124.9}{433.43} = 7.2 \therefore J_Q = J_{1c}$$

피로균열진전시험은 ASTM E647에 따라 8 Hz의 속도로 정현파 형태의 피로하중을 가하여 수행하였으며 하중비는 0.1로 설정하였다. 진폭은 11.39, 8.54, 8.12 kN 3가지를 선정하였다. 진전된 균열 길이를 측정하기 위하여 이동식 현미경(Traveling Microscope)을 사용하였으며 정확한 측정을 위하여 침투액과 도포액을 균열부에 적용하였다. 실험을 통해 얻은 균열길이-Cycle 수 선도는 Fig. 13과 같으며, 식(11)과 식(12)로 계산한 값을 이용하여 Paris 선도를 Fig. 14와 같이 나타내었다. 균열 전파 특성을 나타내는 재료상수인 C와 m은 각각  $3.86 \times 10^{-11}$ 과 2.34로 계산되었다.

$$\frac{da}{dN} = C\Delta K^m \tag{11}$$

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B\sqrt{W}(1-\alpha)^{3/2}} \times (0.886 + 4.64\alpha - 13.32\alpha^2 - 14.72\alpha^3 + 5.6\alpha^4) \text{ where } \alpha = a/W \tag{12}$$

Fig. 14에서 세 개의 하중에 대한 데이터 포인트들을 비교해 보면 거의 동일한 선상에 위치하는 것을 확인할 수 있으며, 직선 형태이기 때문에 균열이 안정적인 속도로 성장하는 Paris 법칙의 Region II에 해당한다고 할 수 있다.

### 3.4 검출 균열길이별 한계균열길이 예측

연속식하역기의 L-홀더 부위에 대한 비파괴검사 결과 검출된 균열이 없었지만 설계수명에 도달하였기 때문에 향후 균열이 발생하는 상황도 고려해야한다. 본 연구에서는 균열길이 5-200 mm에 대하여 L-홀더 부재가 견딜 수 있는 한계균열길이를 식 (5)를 통하여 계산하고, 한계 균열 길이와 검출균열길이의 관계를 Fig. 15에 나타내었다. 계산 결과 SM490YB 소재의 경우

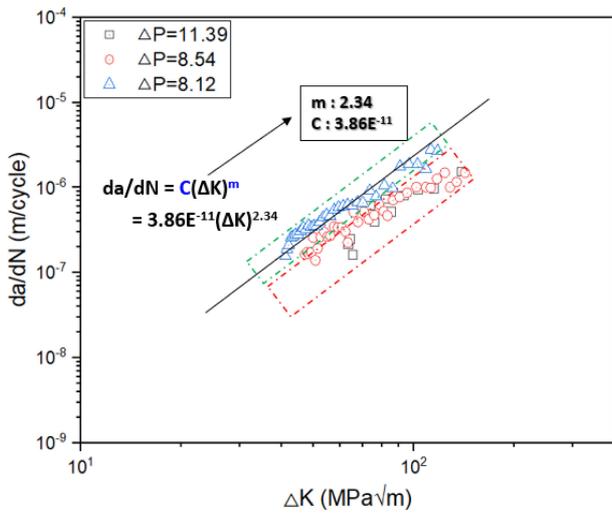


Fig. 14 da/dN-ΔK curve of SM490YB A

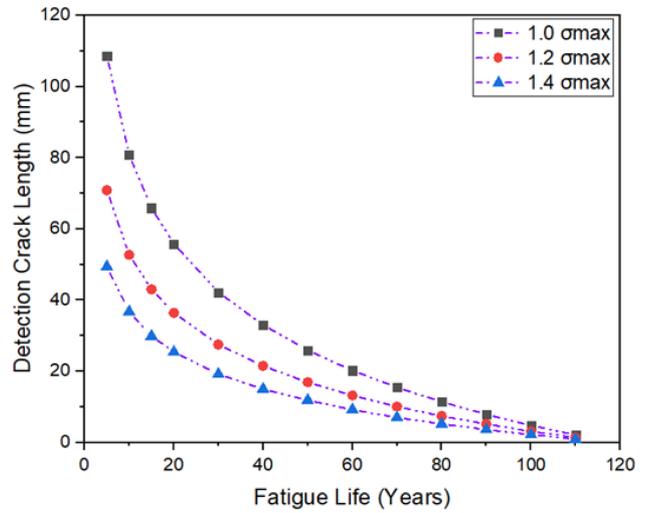


Fig. 16 Detection crack length-Remaining useful life relationship

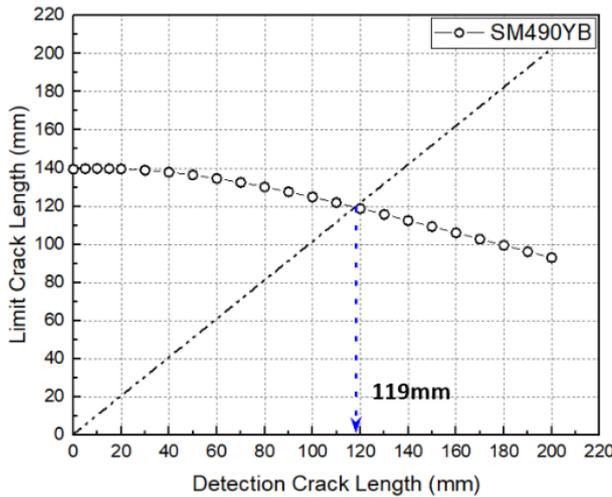


Fig. 15 Limit crack length-Detection crack length relationship

119 mm 이상 균열이 진전될 경우 순간 판단이 발생하는 것으로 평가되었다.

3.5 검출 균열길이별 잔존수명 예측

L-홀더 부재에 작용한 응력에 대해 동적하중을 고려한 1.0-1.4배의 안전계수를 적용하여 환산한 Δσ를 식(5)에 적용하였다. 검출 균열길이는 5-200 mm 범위로 설정하였으며, 한계균열길이는 Fig. 15에서 확인하였다. 재료상수 C와 m은 Paris 선도로부터 계산한 값을 사용하였다. 여기서 W는 L-홀더의 대략적인 폭인 1 m로 가정하여 계산하였다. 앞의 연구내용을 참고하여 1년간 석탄을 하역하는 동안 L-홀더 부재가 받는 피로하중의 사이클 수를 고려하여 전체 손상정도를 계산하였으며, 최종적으로 검출 균열길이별 잔존 수명을 Fig. 16과 같이 나타내었다.

Fig. 16의 활용 예는 다음과 같다. L-홀더 부재에 대한 비파괴검사를 통하여 측정된 검출균열길이가 5 mm 이하 시 안전계수 1.4배를 적용하였을 때 49.4년 정도로 충분한 잔존 수명을

Table 2 Inspection period for each grade

Grade (Remaining useful life)	Inspection interval
1 <sup>st</sup> (10 years or more)	Crack inspection/3 years
2 <sup>nd</sup> (6 years or more)	Crack inspection/1 years
3 <sup>rd</sup> (5 years or less)	1) Crack inspection for one ship during cargo operations 2) Inspect immediately when abnormal load is detected

가지고 있는 것으로 평가된다. 하지만 초기균열을 방지하여 균열이 진전되어 80 mm 이상 진전이 되면 잔존수명이 5년 이하로 급격히 감소하기 때문에 연장 사용을 위해서는 보수가 필요하다.

3.6 잔존수명 예측결과 기반 검사주기 선정

부재가 받는 응력조건과 피로균열진전시험 결과를 종합 분석하여 도출한 잔존수명-검출균열길이 관계로부터 유지보수 등급을 세 개의 등급으로 분류하였다. 연속식 하역기의 붕괴사고가 발생할 경우 치명적인 손실이 발생하므로 안전 측면에서 안전계수 1.4를 기준으로 하여 등급을 결정하였다. 비파괴검사를 통하여 도출된 수명이 10년 이상인 경우 1등급, 수명이 5년에서 10년 사이는 2등급, 5년 이하는 3등급으로 구분하여 각 단계에서의 검사주기를 선정하였다.

등급에 따른 대처방안은 Table 2와 같다. 1등급일 경우, 매 3년마다 1회 균열 검사를 실시하며, 2등급은 기존 유지보수 절차를 준수하며, 연 1회 균열검사를 실시해야 한다. 가장 심각한 3등급의 경우에는 선박1대 하역시마다 균열검사를 진행하는 것이 권장되며, 이상하중 감지 시 즉시 검사를 하는 것으로 계획을 수립하였다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 20년간 사용하여 설계수명에 도달한 연속식 하역기의 구성요소 중 하나인 L-홀더의 잔존수명을 예측하기 위한 연구를 수행하였으며 결론은 다음과 같다.

L-홀더에 균열이 존재하지 않는 경우, 정상적인 조업 중 발생하는 최대응력이 SM490YB 소재의 피로한도에 비하여 현저히 낮은 값을 지니기 때문에 무한수명을 가지는 것으로 분석되었다. 그러나 조업중 충돌 등에 의한 과대하중이 발생할 수 있으며, 이로 인하여 균열이 발생할 수 있으므로, 균열이 발생한 경우를 가정하여 잔존수명 평가를 수행하였다.

L-홀더에 균열이 존재하는 경우, 비파괴 검사를 통하여 측정 한 검출균열길이가 5 mm 이내라면 잔존수명이 40년 이상이기 때문에 안전하다. 그러나 검출균열길이가 80 mm를 초과할 경우 잔존수명이 5년 이하가 되며, 이때부터는 예상치 못한 과대하중에 의하여 조기에 파손될 가능성이 높기 때문에 주의가 필요하다.

검출 균열길이에 대하여 체계적으로 대응하기 위하여 균열검사 주기를 선정하였다. 선정된 균열검사 주기는 안전계수 1.4를 기준으로 하였다. 활용예는 다음과 같다. 설계수명에 도달한 연속식 하역기에 대하여 비파괴검사를 수행하고, 이를 바탕으로 잔존수명 평가를 실시하여 등급을 선정한다. 그 후 선정된 유지보수 계획을 활용하여 정기적으로 비파괴검사를 수행한다면 대형사고를 예방하는 데 도움이 될 것으로 기대된다.

#### ACKNOWLEDGEMENT

이 논문은 2021년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2018R1A6A1A03024509).

#### REFERENCES

1. Park, G. T., Chung, G. Y., Seok, C. S., Song, J. I., (2018), Evaluation of critical crack length of tension bar for continuous ship unloader, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 35(12), 1169-1177.
2. Kobayashi, T., (1985), Mitsubishi continuous ship unloader, *Bulk Solids Handl.*, 5(3), 529-533.
3. Wasy, A., Rehman, A. U., Kim, H.-S., Ha, S.-H., Song, J.-I., (2012), Structural analysis of continuous ship unloader, *Proceedings of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers 2021 Autumn Conference*, 2075-2078.
4. Kim, C. U., Lee, D. W., Park, S. B., Song, J. I., (2017), Dynamic characteristic evaluation of the bucket elevator chain pin and plate, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 34(3), 211-215.
5. Park, J., Kim, C., Song, J., (2015), Study on the dynamic behavior of heavy-duty roller chain systems, *Proceedings of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers Conference*, 138.
6. Nam, G. B., Ku, H. K., Wang, Y. Q., Hahm, C. H., Song, J. I., (2010), Structural analysis for portal girder of 2000ton CSU using finite element method, *Proceedings of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers 2010 Conference*, 159-160.
7. ASTM E1820-18, (2013), Standard test method for measurement of fracture toughness.
8. ASTM E647-15, (2015), Standard test method for measurement of fatigue crack growth rates.
9. Kumar, V., German, M., Shih, C. F., (1981), Engineering approach for elastic-plastic fracture analysis, *Electric Power Research Institute*, 1-234.



**Seung-Hun Lee**

Master candidate in the Department of Smart Manufacturing Engineering, Changwon National University. His research interest is finite element analysis.

E-mail: tmdgns5791@naver.com



**Dong-Woo Lee**

Research Professor in the Research Institute of Mechatronics Changwon National University. His research interest is reliability assessment of machine and composite materials.

E-mail: ldwgl128@changwon.ac.kr



**Jung-II Song**

Professor in the Department of Mechanical Engineering, Changwon National University. His research interest is reliability assessment of machine and composite materials.

E-mail: jjsong@changwon.ac.kr

## 순환 신경망을 이용한 착용형 관성센서기반 하지 관절 역학 추정

# Wearable Inertial Sensors-based Joint Kinetics Estimation of Lower Extremity Using a Recurrent Neural Network

최지석<sup>1</sup>, 이창준<sup>2</sup>, 이정근<sup>1, #</sup>  
Ji Seok Choi<sup>1</sup>, Chang June Lee<sup>2</sup>, and Jung Keun Lee<sup>1, #</sup>

<sup>1</sup> 한경국립대학교 ICT로봇기계공학부 (School of ICT, Robotics & Mechanical Engineering, Hankyong National University)

<sup>2</sup> 한경국립대학교 융합시스템공학과 (Department of Integrated Systems Engineering, Hankyong National University)

# Corresponding Author / E-mail: jklee@hknu.ac.kr, TEL: +82-31-670-5112

ORCID: 0000-0003-0288-157X

KEYWORDS: Joint moment (관절 모멘트), Inertial sensor (관성 센서), Inverse dynamics (역동역학), Recurrent neural network (순환신경망), Deep learning (심층 학습)

Recently, the estimation of joint kinetics such as joint force and moment using wearable inertial sensors has received great attention in biomechanics. Generally, the joint force and moment are calculated through inverse dynamics using segment kinematic data, ground reaction force, and moment. However, this approach has problems such as estimation error of kinematic data and soft tissue artifacts, which can lead to inaccuracy of joint forces and moments in inverse dynamics. This study aimed to apply a recurrent neural network (RNN) instead of inverse dynamics to joint force and moment estimation. The proposed RNN could receive signals from inertial sensors and force plate as input vector and output lower extremity joints forces and moments. As the proposed method does not depend on inverse dynamics, it is independent of the inaccuracy problem of the conventional method. Experimental results showed that the estimation performance of hip joint moment of the proposed RNN was improved by 66.4% compared to that of the inverse dynamics-based method.

Manuscript received: April 14, 2023 / Revised: May 31, 2023 / Accepted: June 2, 2023

### 1. 서론

스포츠, 외골격 시스템 그리고 재활과 같은 생체역학분야에서 착용형 관성센서(Inertial Sensor)를 통한 인간 동작추적 기술이 널리 활용되고 있다[1-5]. 관성센서는 3축 가속도계, 3축 자이로스코프, 그리고 3축 지자기센서로 이루어진 소형 및 경량의 센서 모듈로 실험실에서 벗어난 야외 환경에서 인간의 동작을 추적할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 최근에는 관절각, 그리고 분절의 자세(Orientation)와 같은 신체의 운동학적(Kinematics) 정보뿐만 아니라, 신체에 작용하는 역학(Kinetics) 정보를 추정하는 연구가 진행되고 있다[6-11]. 특히, 사람의 관절에 가해지는 힘과 모멘트는 신체 기능 평가의 중요한 지표로서 사용된다. 따라서 관성센서 신호를 통해 관절 힘 및 모멘트를 추정하는 기술은 다양한 분야에서 효과적으로 사용될 수 있다.

가장 널리 활용되는 관절 힘과 모멘트의 계산 방법은 뉴턴-오일러(Newton-Euler) 방정식을 기반으로 하는 역동역학(Inverse Dynamics)을 수행하여 계산하는 방법이다[12-15]. 이 방법은 가장 몸통에서 멀리 위치한 원위부(Distal) 분절부터 상대적으로 몸통 중심부에 가까운 근위부(Proximal) 분절로 순차적으로 전파해가며 뉴턴-오일러 방정식을 적용해 분절을 연결하는 각 관절의 힘과 모멘트를 계산하는 방법이다. 이를 위해 필요한 물리량은 분절 및 관절의 운동학 데이터, 가장 원위부 분절에 작용하는 외력, 그리고 분절의 관성 매개변수이다. 분절 및 관절의 운동학 데이터는 분절의 자세, 선형 가속도, 그리고 각속도 등이 포함되며 이는 일반적으로 광학식 모션캡처 시스템을 통해 측정된다. 가장 원위부 분절에 작용하는 외력은 지면 반력(Ground Reaction Force, GRF) 및 모멘트(Ground Reaction Moment, GRM), 그리고 압력 중심점을 포함하며 일반적으로 힘판(Force

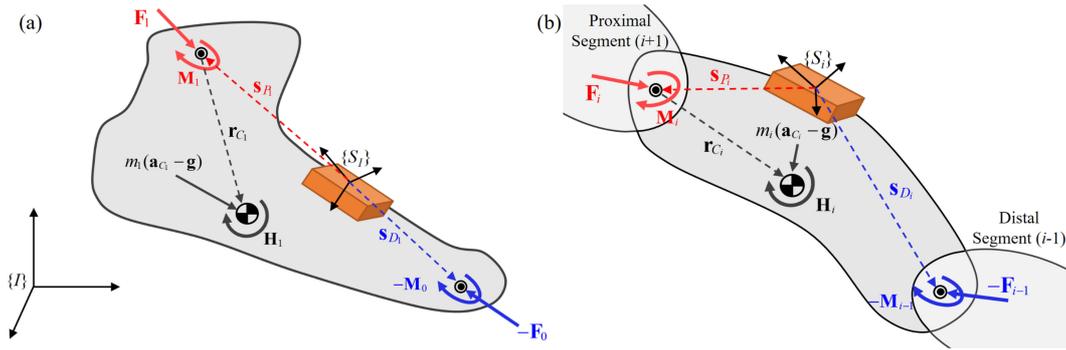


Fig. 1 Free-body diagrams of (a) foot segment and (b) arbitrary segment *i*

Plate)을 통해 측정 가능하다. 또한, 관성 매개변수는 분절의 무게 및 질량 중심의 위치, 분절의 관성모멘트 등으로, 피험자의 신체 정보를 통해 회귀식으로 결정된다[16,17].

이 중 일반적으로 광학식 모션캡처 시스템을 통해 측정되는 운동학 데이터는 관성센서기반의 분절 운동학 데이터를 통해 대체될 수 있다. 관성센서를 사용할 경우, 공간의 제약없이 실험실 외부 환경에서 분절의 운동학 데이터를 제공할 수 있다는 이점을 가지고 있어 활용성이 크다. 하지만 관성센서는 광학식 모션 캡처와 다르게 운동학 데이터를 정밀하게 측정하는 것이 아닌 분절에 부착된 센서 신호를 통해 추정된 센서 자세와 분절에 대한 관절 중심점의 상대적 위치를 나타내는 분절-관절(Segment-to-joint) 벡터를 통해 추정해야 한다는 단점을 가지고 있다. 즉, 추정 오차가 포함된다. 또한 연조직 변형(Soft Tissue Artifacts)으로 인해 분절-관절 벡터와 같은 미리 상수로 결정된 물리량과 실제 물리량 간의 오차가 발생해 운동학 데이터의 추정 오차가 증가한다. 이러한 관성센서를 통한 운동학 데이터의 추정 오차는 부정확한 관절 힘 및 모멘트 추정으로 이어지게 된다[18].

최근 관성센서기반 동작분석에서 연조직 변형을 고려하는 연구가 이루어지고 있다. 이창준과 이정근[18,19]은 분절-관절 벡터를 시변화하여 관성센서기반의 상대위치 추정을 진행하였으며, 분절-관절 벡터의 시변화가 관성센서기반 역동역학에 미치는 영향성을 살펴보았다. 최근 인공신경망(Artificial Neural Network)을 활용하여 시스템의 상태를 추정하거나 분류하는 연구가 성공적으로 이루지고 있다[20-22]. 이러한 연구들에 영향을 받아, 본 논문의 저자인 최지석과 이정근[23]은 신경망을 활용하여 분절-관절 벡터를 시변화하여 관성센서 기반 상대위치를 추정하는 방법을 제안하였다. 이와 같이 이전에는 분절-관절 벡터와 같은 운동학 데이터를 추정하는 영역에서 신경망을 활용하여 그 성능을 확인하였다.

본 논문의 목적은 이전 연구에서의 신경망의 활용을 역학 영역으로 확장하여 관성센서기반 역동역학에서 운동학 데이터로 인해 발생하는 관절 힘 및 모멘트 추정 오차를 보정하기 위해 신경망을 활용하는 것이다. 신경망은 관성센서 신호와 참조 관절 힘 및 모멘트 간의 관계를 학습하여, 연조직 변형 또는 관성센서 기반 운동학 데이터 추정 오차로 인한 관절 힘 및 모멘트

추정 오차를 최소화할 수 있다. 따라서 제안된 신경망은 관성센서 그리고 힘판의 신호만을 입력으로 받아 하지 관절에 작용하는 힘과 모멘트를 출력한다. 즉, 제안된 신경망은 관성센서 신호를 통한 운동학 데이터 추정과 역동역학을 대체하는 것이다. 제안된 신경망의 성능을 검증하기 위해, 칼만필터를 통해 추정된 관성센서의 자세를 사용하여 역동역학을 수행한 방법, 그리고 광학식 모션 캡처 시스템을 통해 측정된 참조 관성센서의 자세를 사용하여 역동역학을 수행한 방법과 비교하였다.

## 2. 방법

### 2.1 관성센서기반 역동역학

본 연구에서는 관성센서기반의 역동역학을 대신하여 하지 관절(발목, 무릎, 그리고 고관절)에 작용하는 힘과 모멘트를 추정하기 위해 신경망을 학습시킨다. 먼저 이를 위해, 관성센서기반의 역동역학에 대해 설명한다. 발(*i* = 1), 종아리(*i* = 2), 허벅지(*i* = 3), 골반(*i* = 4)으로 구성된 하지 모델에 대해 역동역학을 수행한다. 이 방법은 가장 몸통에서 멀리 위치한 원위부 분절(즉, 발)부터 상대적으로 몸통 중심부에 가까운 근위부 분절(즉, 골반)로 순차적으로 전파해가며 뉴턴-오일러 방정식을 적용해 각 관절의 힘과 토크를 계산하는 방법이다. 따라서 하지의 경우 가장 말단부인 발에서부터 근위부 분절로 전파해가며 관절 힘과 모멘트를 계산한다.

Figs. 1(a)와 1(b)는 각각 발 분절과 임의의 분절 *i*의 자유물체도이다. 임의의 분절 *i*의 근위부 관절 *P<sub>i</sub>*에 작용하는 힘 **F<sub>i</sub>**는 다음과 같은 운동 방정식을 통해 결정할 수 있다 (Fig. 1(b) 참조).

$${}^I \mathbf{F}_i = {}^I \mathbf{F}_{i-1} + m_i ({}^I \mathbf{a}_{C_i} - \mathbf{g}) \tag{1}$$

여기서 **F<sub>i-1</sub>**는 원위부 분절 *i-1*로부터 전달되는 힘 (즉, 원위부 관절 *D<sub>i</sub>*에 작용하는 힘), **a<sub>C<sub>i</sub></sub>**는 분절 *i*의 질량중심점의 선형 가속도, **g**는 중력가속도 벡터, 그리고 *m<sub>i</sub>*는 *i* 분절의 질량이며, 윗첨자 *I*는 해당 벡터가 관성 좌표계 {*I*}에 대해 표현됨을 나타낸다. 여기서 관성좌표계의 각 축은 AP (Anterior-posterior), SI (Superior-inferior), 그리고 ML (Medial-lateral) 축으로 구성되며 각 축은 피험자의 전후방향, 상하방향, 그리고 좌우방향 성

분에 해당한다. 선형 가속도의 경우,  $i$  분절에 부착된 관성센서의 가속도를 분절 질량 중심점으로 전파하여 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$\mathbf{a}_{Ci} = {}^I \mathbf{R}_{Si} ({}^S \mathbf{a}_{Si} + ({}^S \dot{\boldsymbol{\omega}}_{Si} \times) + [{}^S \boldsymbol{\omega}_{Si} \times] [{}^S \boldsymbol{\omega}_{Si} \times] {}^S \mathbf{s}_{Ci}) \quad (2)$$

여기서  ${}^I \mathbf{R}_{Si}$ 는 센서의 자세 행렬,  $\mathbf{a}_{Si}$ 는 센서 가속도 벡터  $\boldsymbol{\omega}_{Si}$ 는 각속도 벡터,  $\mathbf{s}_{Ci}$ 는 센서 좌표계의 원점부터 분절 질량중심점까지의 위치벡터로  $\mathbf{s}_{Ci} = \mathbf{s}_{Pi} + \mathbf{r}_{Ci}$ 이다.  $\mathbf{s}_{Pi}$ 와  $\mathbf{r}_{Ci}$ 는 각각 센서부터 근위부 관절 중심점까지 벡터(즉, 분절-관절 벡터) 그리고 근위부 관절 중심점부터 분절 질량 중심점까지의 벡터이다. 센서 가속도 그리고 각속도 벡터는 각각 관성센서의 가속도계 신호  $\mathbf{y}_A$  그리고 자이로스코프 신호  $\mathbf{y}_G$ 로부터 제공되며, 자세 행렬은 칼만필터 또는 상보필터와 같은 센서 융합 알고리즘을 통해 추정된다[24,25].

위의 식을 통해 분절의 근위부 관절에 작용하는 힘  $\mathbf{F}_i$ 가 결정되고 나면, 근위부 관절에 작용하는 모멘트  $\mathbf{M}_i$ 는 다음과 같은 운동 방정식을 통해 결정된다.

$${}^S \mathbf{M}_i = {}^S \mathbf{H}_i + {}^S \mathbf{M}_{i-1} + {}^S \mathbf{r}_{Ci} \times {}^S \mathbf{F}_i - ({}^S \mathbf{s}_{Ci} - {}^S \mathbf{s}_{Di}) \times {}^S \mathbf{F}_i \quad (3)$$

여기서,  $\mathbf{M}_{i-1}$ 는  $i-1$  분절로부터 가해지는 모멘트(즉, 원위부 관절  $D$ 에 작용하는 모멘트),  $\mathbf{s}_{Di}$ 는 센서부터 원위부 관절 중심점까지의 위치벡터이다. 또한  $\mathbf{H}_i$ 는 분절  $i$ 의 관성 모멘트로 다음과 같이 정의된다.

$${}^S \mathbf{H}_i = {}^S \mathbf{J}_i {}^S \dot{\boldsymbol{\omega}}_{Si} + [{}^S \boldsymbol{\omega}_{Si} \times] {}^S \mathbf{J}_i {}^S \boldsymbol{\omega}_{Si} \quad (4)$$

여기서  $\mathbf{J}_i$ 는 관성 텐서이며,  $[{}^S \boldsymbol{\omega}_{Si} \times]$ 는  ${}^S \boldsymbol{\omega}_{Si}$ 의 외적행렬을 나타낸다. 식(3)을 통해 계산된 관절 모멘트는 자세 행렬  ${}^I \mathbf{R}_{Si}$ 를 통해서 다시 관성 좌표계에 대해 표현된다(즉,  ${}^I \mathbf{M}_i = {}^I \mathbf{R}_{Si} {}^S \mathbf{M}_i$ ).

식(1) 그리고 식(3)으로 해당 분절의 관절 힘과 모멘트가 결정되면, 순차적으로 상대적인 근위부 분절로 전파해가며 관절의 힘과 모멘트를 계산한다. 역동역학이 시작되는 하지 모델의 가장 말단부인 발의 경우, 원위부 관절이 존재하지 않으므로,  $\mathbf{F}_0$  그리고  $\mathbf{M}_0$ 는 지면 반력 및 모멘트에 해당하며,  $\mathbf{s}_{D1}$ 은 발 분절의 센서부터 힘판의 압력중심점(Center of Pressure)이다 (Fig. 1(a) 참조). 본 연구의 목적은 신경망을 통해 관절 힘과 모멘트를 추정하고, 이를 관성 센서기반 역동역학의 추정 정확도와 비교분석 하는 것이다.  $\mathbf{F}_0$ ,  $\mathbf{M}_0$ , 그리고  $\mathbf{s}_{D1}$ 은 힘판으로부터 얻어진 물리량으로 관성센서로 인한 오차에 기인하지 않는다. 따라서 해당 물리량은 관성센서기반 역동역학 계산을 위해 힘판이 제공한 참값을 사용한다. 각 분절의 분절-관절 벡터  $\mathbf{s}_{Pi}$  그리고  $\mathbf{s}_{Di}$ 는 광학식 시스템으로 미리 결정된 상수 벡터를 사용하였다. 또한 역동역학에 사용되는 관성 매개변수  $m_i$ ,  $\mathbf{r}_{Ci}$ , 그리고  $\mathbf{J}_i$ 는 인체 측정 기반의 회귀법에 따라 결정하였다[16].

### 2.2 관절 역학 추정 신경망

본 연구에서는 역동역학을 수행하지 않고 힘판 데이터와 관성센서

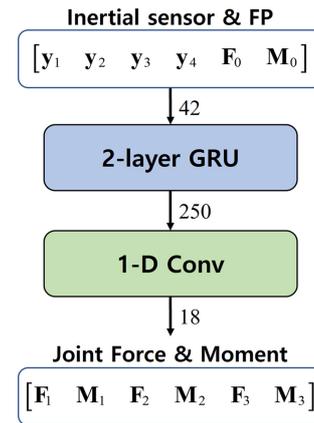


Fig. 2 Architecture of the recurrent neural network for joint kinetics estimation

데이터를 입력으로 받아 관절의 힘과 모멘트를 출력하는 신경망을 학습시킨다. 해당 신경망은 관성 센서신호를 통해 분절의 운동학데이터를 추정하는 과정과 관성센서기반 역동역학을 계산하는 과정을 거치지 않고 하지 관절의 힘과 모멘트를 추정할 수 있다.

제한된 관절 힘 및 모멘트 추정 신경망은 유닛간 연결이 순환적 구조를 갖는 순환신경망(Recurrent Neural Network, RNN)으로 전체적인 구조는 Fig. 2를 통해 알 수 있다. RNN은 과거의 상태 정보를 신경망 내부에 저장할 수 있기 때문에 시계열 데이터를 다루는데 적합하다. 신경망의 입력 벡터는 하지 분절에 부착된 4개의 관성센서의 신호 그리고 힘판 신호로 구성된다. 각 분절에 부착된 관성센서는 9축 신호를 포함하며(즉,  $\mathbf{y}_i = [\mathbf{y}_{Ai}, \mathbf{y}_{Gi}, \mathbf{y}_{Mi}]$ ), 힘판 신호는 3축 지면 반력과 3축 지면 모멘트로 구성된다. 여기서  $\mathbf{y}_M$ 은 지자기센서 신호이다. 따라서 입력벡터는 42차원의 벡터이다. 입력 벡터는 250개의 히든 유닛을 갖는 2계층(Layer) 게이트 순환 유닛(Gated Recurrent Unit, GRU)을 통과해 250차원의 상태벡터로 변환된다. 여기서 GRU는 게이트 매커니즘이 적용된 순환신경망의 한 종류로, 오래된 과거 상태정보를 초기화하거나 현재와 과거 정보의 가중치를 조절할 수 있어 긴 시계열 데이터 처리하는데 강점을 갖는다[26]. 마지막으로 상태벡터를 하지 세 관절(발목, 무릎, 그리고 고관절)의 3차원 관절 힘 및 3차원 관절 모멘트를 나타내는 18차원 벡터로 차원 축소시켜주기 위해, 1차원 합성곱신경망(1-dimensional Convolutional Neural Network)을 사용하였다.

제한된 신경망은 모델을 통해 출력된 관절 힘 및 모멘트와 참조 관절 힘 및 모멘트간 오차를 최소화하도록 가중치를 갱신하며 학습된다. 본 모델 학습에 사용된 손실함수는 다음과 같은 임의의 순간  $t_k$ 에서 시작하는  $N$ 개의 시계열 데이터에 대한 평균제곱오차(Mean Squared Error, MSE)이다.

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N+k-1} (\mathbf{y}(t_k) - \hat{\mathbf{y}}(t_k))^2 \quad (5)$$

여기서  $\mathbf{y}$ 는 참조 벡터이며,  $\hat{\mathbf{y}}$ 는 모델을 통해 출력된 벡터이다.

모델 학습을 위해 다음과 같은 학습 알고리즘을 사용하였다. 학습 안정성을 향상시키고, 입력 데이터의 편향성을 제거하기

위해 입력 벡터를 0의 평균과 1의 표준편차를 갖도록 표준화(Standardization)하였다. RNN은 긴 시간의 시계열 데이터(즉, 많은 샘플링 수를 갖는 데이터)를 역전파를 통해 학습시킬 경우, 기울기 소실 또는 기울기 폭발 문제가 발생한다. 이러한 수치 문제를 해결하기 위해 잘린 시간에 따른 역전파(Truncated Backpropagation through Time)알고리즘을 사용하였다. 해당 알고리즘은 긴 시계열 데이터를 미니배치를 통해 짧은 시계열 데이터의 연결로 나누는 방법으로, 미니 배치간 마지막 은닉 상태를 유지한 채 신경망을 순차적으로 학습시킨다. 모델 학습에 사용된 최적화 알고리즘은 두 최적화 알고리즘 RAdam과 Lookahead를 결합한 Ranger를 사용하였다[27]. 학습 과정 동안 최적의 학습률을 조정하기 위해 두 가지 알고리즘을 사용했다. 하나는 손실함수의 빠른 수렴을 위한 원사이클 학습법이며, 나머지는 최적의 학습률을 적용하기 위한 학습률 발견자 알고리즘이다[28,29]. 네트워크 구현 및 학습은 PyTorch 기반의 fastai v2 API [30]를 사용하여 Google Colab 환경에서 진행되었다.

### 3. 실험 및 데이터 처리

#### 3.1 실험

관성센서기반의 역동역학을 수행하는 대신 신경망을 학습시켜 관절 힘과 모멘트를 추정하는 방법의 성능을 비교분석하기 위해, 6명의 건강한 남성 피험자(나이: 25.0±1.67세, 키: 1.71±0.05 m, 몸무게: 81.17±12.32 kg)를 대상으로 실험을 진행하여 신경망 학습 및 검증에 필요한 데이터를 습득하였다.

오른쪽 하지 분절의 운동학 데이터를 추정하기 위해, 3축 가속도계, 3축 자이로스코프, 그리고 3축 지자기센서로 구성된 관성센서 모듈 MTw (Xsens Technologies B. V., Netherlands)를 벨크로 밴드를 사용해 오른쪽발등, 오른쪽 하지의 정강이 및 허벅지 앞부분, 그리고 골반 뒷부분에 부착하였다(Fig. 3 참조). 또한 역동역학 수행에 필요한 지면반력 및 모멘트 그리고 압력 중심점을 측정하기 위해, 힘판 OR 6-7 (Advanced Mechanical Technology, Inc., USA)을 사용하였다. 신경망 학습에 필요한 참조 관절 힘과 모멘트는 광학식 모션캡처 시스템을 통해 측정된 분절 운동학 데이터와 힘판으로 측정된 외력 데이터를 기반으로 역동역학을 수행해 얻어졌다[12]. 또한 광학식 시스템을 통해 관성센서의 참조 자세를 습득하였다. 이를 위해 광학식 모션캡처 시스템 Optitrack Flex 13 (Natural Point, USA)을 사용하였다. 세 시스템은 모두 100 Hz로 샘플링되었으며, 광학식 모션캡처 시스템으로 측정된 운동학 데이터와 힘판 데이터는 영위상차 4차 Butterworth Low-pass Filter(차단주파수: 6 Hz)를 적용시켰다.

하지 분절의 데이터를 습득하기 위해 다음 동작들을 수행하였다: (i) 첫번째 동작(Test 1)은 하프스쿼트(Half Squat), (ii) 두번째 동작(Test 2)는 풀스쿼트(Full Squat), 그리고 (iii) 세번째 동작(Test 3)은 런지(Lunge) 동작이다. Fig. 4는 세가지 실험 동작의 예시를 보여준다. 각 테스트는 1분간 수행하였으며,

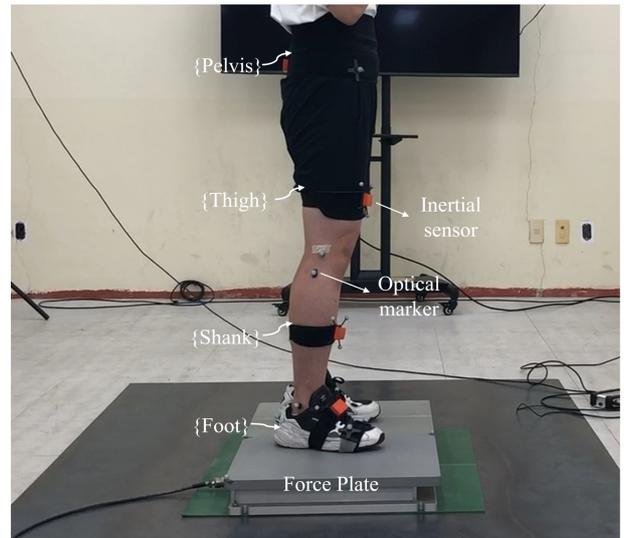


Fig. 3 Experimental setup

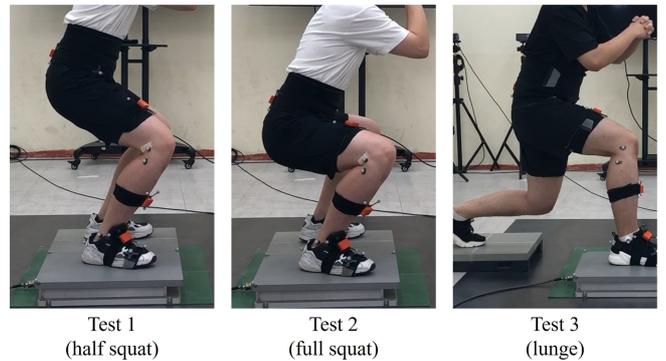


Fig. 4 Experiment motions

	S1	S2	S3	S4	S5	S6
Test 1 (Half squat)	V	V	T	T	T	T
Test 2 (Full squat)	T	T	V	V	T	T
Test 3 (Lunge)	T	T	T	T	V	V

Training
  Validation

Fig. 5 Scheme of splitting into training data and test data

피험자마다 테스트별로 4번씩 시행하였다. 따라서 각 피험자의 시행 데이터는 12개로서 총 시행 데이터수는 72개이다. 각각의 시행 데이터는 약 6,000개의 샘플링을 포함하고 있다.

#### 3.2 데이터 처리

신경망을 학습 및 검증하기 위해, 실험을 통해 습득한 데이터를 학습 데이터와 테스트 데이터로 나누었다. Fig. 5는 실험

Table 1 Averaged RMSE of the (a) joint force and (b) moment estimation

		(a) Joint force [N]								
		Ankle			Knee			Hip		
		M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3
Test1	Subject1	0.13	0.19	2.21	1.14	1.23	2.18	4.00	5.20	2.50
	Subject2	0.11	0.12	2.12	1.19	1.41	2.29	4.35	4.62	3.11
Test2	Subject3	0.17	0.23	2.30	1.23	1.51	2.22	3.90	4.92	3.00
	Subject4	0.17	0.18	1.97	1.26	1.53	2.02	4.51	4.58	2.51
Test3	Subject5	0.23	0.40	2.45	1.23	1.96	2.58	3.06	6.30	3.07
	Subject6	0.20	0.27	4.37	1.54	1.57	3.02	4.49	4.60	3.78
Average		0.17	0.23	2.57	1.26	1.53	2.39	4.05	5.04	3.00
		(b) Joint moment [Nm]								
		Ankle			Knee			Hip		
		M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3
Test1	Subject1	0.98	1.53	1.15	2.72	3.65	1.21	8.06	8.72	1.79
	Subject2	1.80	1.97	4.63	4.09	4.56	4.49	7.14	4.80	2.94
Test2	Subject3	1.37	2.41	1.54	6.21	7.47	1.67	10.94	12.03	2.08
	Subject4	1.13	1.30	3.97	3.62	3.15	3.14	10.50	12.25	2.44
Test3	Subject5	2.19	2.67	1.85	2.48	6.42	3.48	4.28	8.64	4.77
	Subject6	1.74	5.09	2.61	3.01	5.40	3.08	6.60	9.84	4.89
Average		1.54	2.50	2.63	3.69	5.11	2.84	7.92	9.38	3.15

데이터를 학습 및 테스트 데이터로 분할한 그림이다. 그림과 같이 각 테스트별로 2명의 피험자에 대한 데이터는 검증 데이터로, 나머지는 학습 데이터로 사용하여 모델의 검증을 진행하였다.

데이터 증강은 데이터 부족문제를 해결하고 더 강건한 성능의 신경망 모델을 하기 위해, 제한적인 학습 데이터양을 인위적인 방법으로 증가시키는 방법이다. 본 연구에서는 학습 데이터의 양을 증가시키기 위해 두 가지 데이터 증강을 적용하였다. 첫번째는 자이로스코프 신호에 임의의 편향값(Bias)을 추가하는 방법으로, 해당 신경망이 자이로스코프 편향에 강건한 성능을 확보할 수 있다. 따라서, 0의 평균과 0.5 deg/s의 표준편차를 갖는 정규분포에서 임의의 3차원 상수 벡터를 무작위로 생성하여 자이로스코프 신호에 더해주었다. 두번째 증강 기법은 관성센서의 9축 신호에 임의의 노이즈를 추가하는 것이다. 관성센서의 세 가지 센서의 노이즈 수준이 다르기 때문에, 각 센서의 노이즈 수준에 맞는 가상의 노이즈를 데이터마다 무작위로 생성하여 각 센서 신호에 추가하였다. 가속도계, 자이로스코프 그리고 지자기센서의 가상의 노이즈는 각각 평균 0.05 m/s<sup>2</sup>, 0.3 deg/s, 그리고 0.01 a.u (Arbitrary Unit)의 표준편차를 갖는다.

관성센서기반 역동역학 방법과 제안된 신경망의 추정 성능을 비교하기 위해, 세 가지 방법을 비교 분석하였다. 첫번째 방법(M1)은 관성센서의 참조 자세를 사용하여 분절 운동학데이터를 계산하고, 관성센서기반 역동역학을 수행한 방법, 두번째 방법(M2)는 추정된 관성센서의 자세를 사용하여 분절 운동학 데이터를

계산한 후, 역동역학을 수행한 방법, 그리고 세번째 방법(M3)은 관성센서 데이터 그리고 힘판 데이터를 통해 신경망을 학습시켜 관절 힘 및 모멘트를 추정하는 방법이다. M2의 경우 센서의 자세를 추정하기 위해 칼만필터를 사용하였다[24]. 각 방법의 추정 성능을 비교하기 위해 참조 관절 힘 및 모멘트에 대한 추정 값의 평균 제곱근 오차(Root Mean Squared Error, RMSE)를 사용하였다.

#### 4. 결과 및 고찰

Table 1은 세 방법의 관절 힘 및 모멘트의 평균 RMSE를 보여준다. 여기서 Fig. 5와 같이 각 테스트마다 두 명의 피험자에 대한 검증 데이터의 결과가 정리되었다.

관절 힘 결과의 경우, 발목과 무릎에서는 기존방법인 M1과 M2의 성능이 제안방법인 M3에 비해 우세한 반면, 고관절에서는 M3이 우수하게 나타났다. 예로, 무릎에서는 M3의 평균 RMSE가 M2 대비 0.86 N만큼 큰 반면에 고관절에서는 약 2 N만큼 우세하게 나타났다. 다만, 각 관절에 100 N 이상의 힘이 가해진다는 점을 고려하였을 때, 방법에 따른 성능의 차이가 매우 근소한 수준인 것으로 볼 수 있다.

관절 모멘트의 경우, 동작에 따른 차이가 존재하였지만, 무릎과 고관절에 대해서는 M3이 다른 두 방법에 비해 우수한

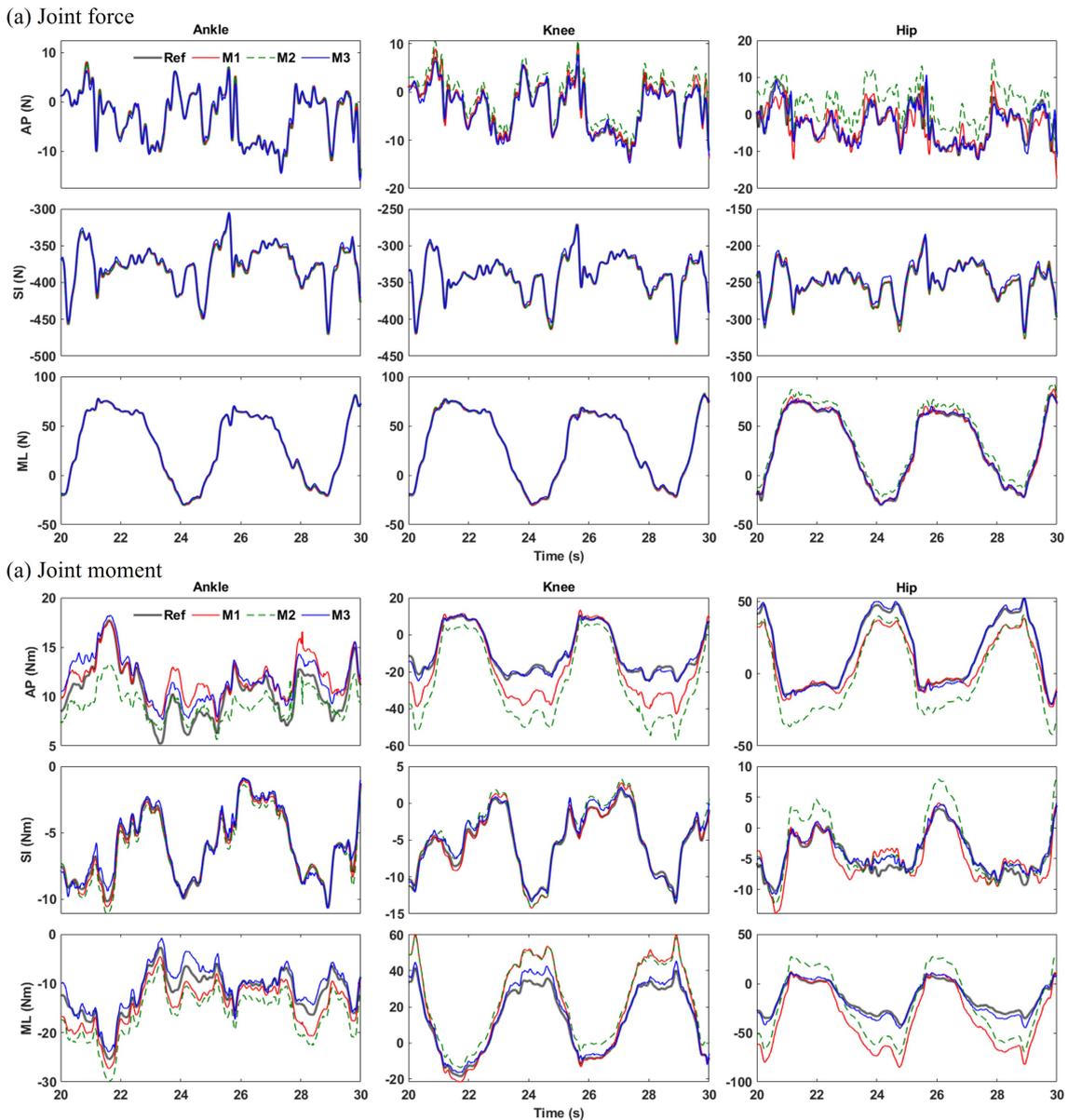


Fig. 6 Estimation results of (a) joint force and (b) moment of Test 2 from Subject 3

정확도를 나타냈다. 특히, 피험자 3의 Test 2에서는 제안방법이 M2 대비 무릎에 대해서 5.80 Nm만큼, 고관절에 대해서는 9.95 Nm만큼 우수한 결과를 보였다. 런지 동작인 Test 3의 결과에서는 M3의 추정 오차가 다른 동작에 비해 큰 것으로 나타났으나, 그럼에도 기존 방법에 비해서 우수하거나 동등한 성능을 보였다.

Figs. 6과 7은 각각 피험자 3의 Test 2와 피험자 6의 Test 3의 관절 힘과 모멘트의 추정 결과 그래프를 각 축별(AP, SI, 그리고 ML)로 보여준다. 관절 힘의 경우, 관절이나 축 성분에 따른 차이가 존재하였으나, 세 가지 방법 모두 유사한 수준의 추정 성능을 보여주었다. 반면에 관절 모멘트의 결과에서는 방법에 따른 차이가 현저하게 드러났다. 예로 Test 2(풀스쿼트)의 무릎과 고관절 모멘트 추정 결과에서, M1과 M2는 동작에 따른 오차가 크게 나타나는 반면에 제안방법은 지속적으로 참값에

근접하게 추정되는 모습을 보였다. 특히, 무릎이 최대로 굽혀져 모멘트가 크게 증가하는 23-25초의 구간에서 방법간 차이가 두드러지게 나타났다. 신체의 변형이 큰 구간에서는 연조직변형이 크게 일어나 상수로 결정된 분절에 부착된 센서와 관절간 상대 위치가 크게 변형되기 때문에 M1과 M2의 오차가 크게 증가함을 나타낸다. Test 3(런지)의 경우, Test 2에 비해서는 제안방법의 오차가 크게 나타났지만, 전체적으로 M2에 비해서는 우수한 결과를 보였다. 특히 무릎과 고관절의 AP와 ML 축 방향의 성분에서 M3이 비교적 우수한 성능을 나타냈다. 다만, 일부 축 성분의 결과에서는 M1의 성능과 동등하거나 약간의 성능 열세를 나타냈다.

하프스쿼트 동작인 Test 1에서 M1 그리고 M2의 고관절 오차 평균 RMSE는 각각 7.60 Nm 그리고 6.76 Nm이다. 반면에

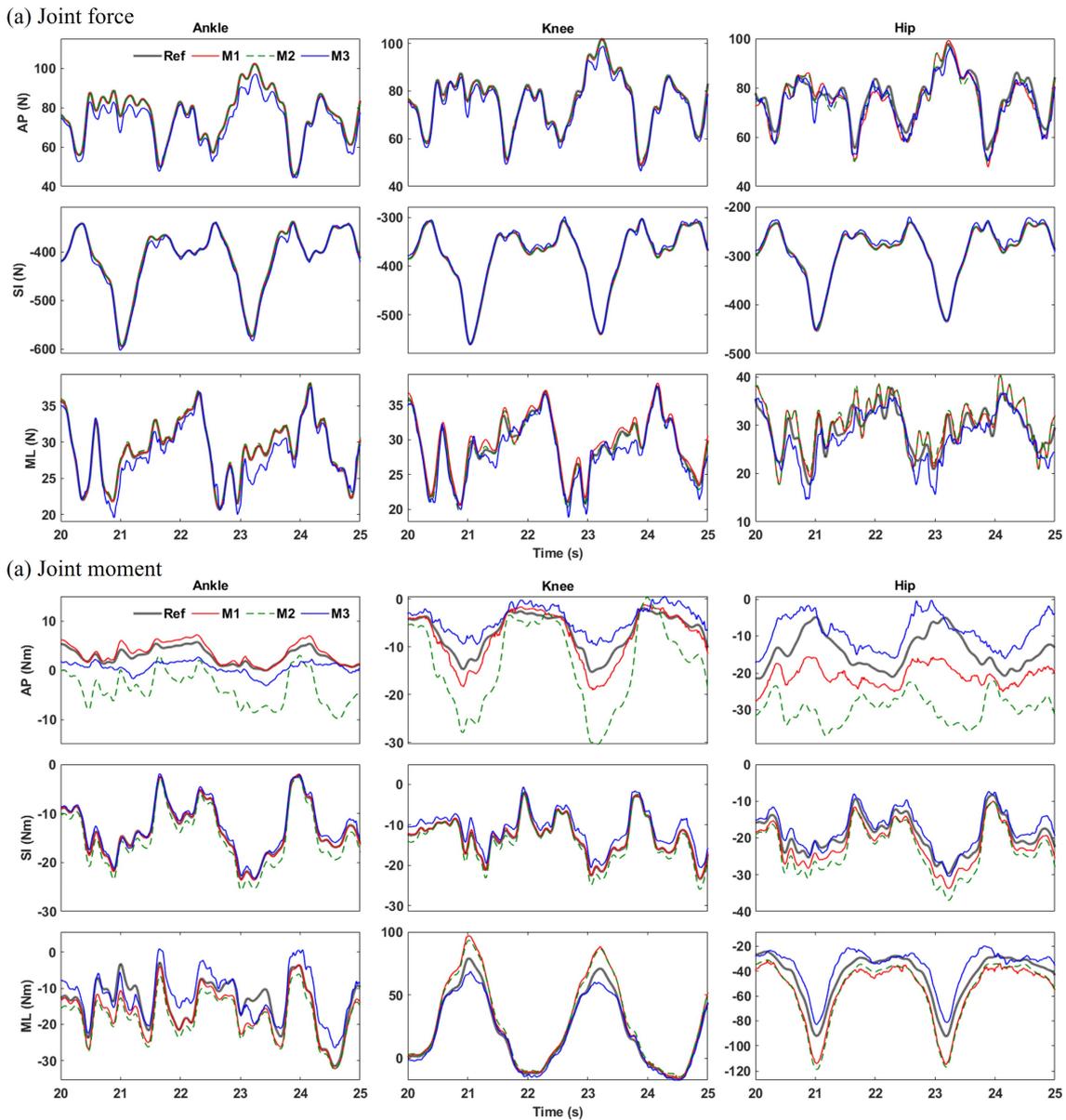


Fig. 7 Estimation results of (a) joint force and (b) moment of Test 3 from Subject 6

폴스쿼트 동작인 Test 2에서의 고관절 오차 평균 RMSE는 각각 10.7 Nm 그리고 12.1 Nm으로 Test 1보다 큰 오차 수준을 보인다. 폴스쿼트는 하프스쿼트보다 더 깊이 앉는 동작인 만큼 신체의 변형 수준이 더 크다. 이를 통해 더욱 큰 연조직 변형이 더욱 큰 관절 힘 그리고 모멘트 오차에 기인한다고 추정할 수 있다.

M1과 M2는 역동역학을 수행하기 위하여 관성센서의 신호와 센서신호로부터 추정된 운동학 데이터, 그리고 분절-관절 벡터와 같은 미리 결정된 신체 정보를 사용하였다. 특히, 이 중 분절-관절 벡터는 참고문헌[18]에서 확인되었듯이 신체 동작 중 발생하는 연조직 변형으로 인해 고정 상수로 유지되지 않고 시간에 따라 변형된다. 즉, 스쿼트나 런지와 같이 큰 수준의 신체 변형이 발생하는 동작들에 대해서는 분절-관절 벡터의 변형 수준이 클 것으로 예측 가능하다. 또한 M2는 참조 자세를 사용하는

M1과 다르게 센서신호로부터 추정된 자세 정보를 사용하였기 때문에, 자세의 오차가 관절 힘과 모멘트 오차의 증가에 기인한 것으로 보인다.

역동역학의 경우, 원위부 관절인 발목에서부터 근위부 관절인 고관절로 힘과 모멘트를 전파시키는 방식으로 관절 힘과 모멘트를 계산한다. 따라서, 근위부 관절의 추정 오차에는 원위부 관절에서 발생한 오차가 누적된다. 이에 따라서 기존방법인 M1과 M2의 경우 오차가 윗방향의 관절로 전파될수록 증가하는 경향이 확인되었다. 특히, 허벅지 분절은 하지 분절 중 지방이나 근육 등 많은 양의 연조직이 분포하여 변형이 가장 큰 수준으로 발생하기 때문에, 고관절의 모멘트 추정 오차가 가장 큰 수준으로 나타난다.

반면에 M3은 참값을 통해 학습되어 연조직 변형을 보상하는

방향으로 학습되고 오차를 누적시키는 자세 등의 운동학 데이터의 추정 과정이나 역동역학 계산 등의 과정을 거치지 않으므로, 기존 방법에서 발생하는 연조직 변형의 영향과 무관하다. 이에 신체 변형이 크게 발생하는 폴스쿼트 등의 동작에서도 비교적 좋은 성능을 유지하였으며, 특히 근위부 관절인 고관절의 결과에서도 기존 방법 대비 우수한 정확도를 나타냈다. 이는 신경망기반의 추정법이 역동역학기반 추정법이 갖는 연조직 변형, 운동학 추정 오차, 그리고 역동역학 전파에 따른 오차 누적 등에 의한 부정확성 문제를 극복할 수 있음을 보여준다.

다만 스쿼트 동작에 비해 런지 동작에서 M3의 추정 성능 오차가 비교적 크게 나타났다. 런지는 다른 두 스쿼트 동작과 유사하지만 한쪽 다리만을 굽힌다는 점에서 차이가 있다. Fig. 5에서 볼 수 있듯 런지에 비해 더 많은 양의 스쿼트 동작에 대한 데이터가 모델 학습에 사용되었기 때문에, 모델이 스쿼트 동작 중의 패턴을 찾아내는 방향으로 학습되었을 것으로 추측된다. 그럼에도 제한하는 신경망이 큰 수준의 모멘트가 가해지는 무릎 그리고 고관절 관절 모멘트 추정에서 기존 방법 대비 동등하거나 우수한 성능을 확보할 수 있다는 점에서 의미가 있다.

## 5. 결론

본 논문에서는 관성센서를 기반으로 관절에 가해지는 힘과 모멘트를 추정하는 순환신경망을 제안한다. 기존 방법에서는 관성센서기반의 역동역학을 통해 관절 힘과 모멘트를 추정하였으며, 이 과정에서 관성센서 신호를 활용한 운동학 데이터의 추정과 역동역학 계산 등의 과정이 수반된다. 이때 운동학 데이터의 추정 오차나 연조직 변형 등은 관절의 힘과 모멘트의 정확도를 저하시키는 요인이다. 이에 본 논문에서는 이러한 역동역학 과정 없이 관성센서와 힘판 신호를 입력으로 받아 관절 힘과 모멘트를 출력하는 신경망 모델을 개발하고, 기존에 사용된 역동역학 방법의 성능과 비교 분석하였다. 검증 실험은 발목, 무릎, 그리고 고관절을 대상으로 진행되었으며, 실험 동작은 하프 스쿼트, 폴 스쿼트, 그리고 런지 동작이 수행되었다.

검증 결과, 관절 힘에 대해서는 제안방법(M3)과 기존방법(M1,2) 모두 우수한 성능을 보였으며, 방법간 성능의 차이가 근소한 수준으로 나타났다. 반면에, 관절 모멘트의 결과에서는 제안하는 신경망의 성능이 비교적 우수하게 나타났다. 특히 폴 스쿼트와 같은 신체 변형이 크게 발생하는 동작에서 기존 방법은 오차가 크게 발생하는 반면에, 제안방법은 비교적 높은 성능을 유지하는 모습을 보였다. 또한 하체의 근위부 관절인 고관절의 모멘트에서 성능 우세폭이 크게 나타났다(평균 오차가 M2 9.38 Nm 대비 M3 3.15 Nm로서 M3의 66.4% 우세).

본 연구에서는 스쿼트와 런지 등 발이 움직이지 않는 동작들에 대해서만 검증이 이뤄졌다. 추후 연구에서는 보행과 주행 등 발의 움직임이 주기적으로 이뤄지는 동작의 실험을 추가적으로 진행하고 검증함으로써, 더욱 다양한 동작과 환경에서 신경망

기반의 추정방법의 효과를 확인하고자 한다. 이에 더하여, 깔창형 압력센서나 또는 관성센서를 통한 지면반력 추정 기술을 적용하여, 완전한 착용형 시스템을 구현하고자 한다.

## ACKNOWLEDGEMENT

본 연구는 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단 기초 연구사업(No. 2018R1D1A1B07042791)의 지원을 받아 수행됨.

## REFERENCES

1. Lee, J. K., Lee, C. J., (2020), Drift reduction in IMU-based joint angle estimation for dynamic motion-involved sports applications, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 37(7), 539-546.
2. Lee, J. K., Park, E. J., (2009), Minimum-order Kalman filter with vector selector for accurate estimation of human body orientation, *IEEE Transactions on Robotics*, 25(5), 1196-1201.
3. Lee, C. J., Lee, J. K., (2021), Inertial sensor-based relative position estimation between upper body segments considering non-rigidity of human bodies, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 38(3), 215-222.
4. Pathirana, P. N., Karunaratne, M. S., Williams, G. L., Nam, P. T., Durrant-Whyte, H., (2018), Robust and accurate capture of human joint pose using an inertial sensor, *IEEE Journal of Translational Engineering in Health and Medicine*, 6, 1-11.
5. Díaz, S., Stephenson, J. B., Labrador, M. A., (2019), Use of wearable sensor technology in gait, balance, and range of motion analysis, *Applied Sciences*, 10(1), 234.
6. Choi, J. S., Lee, C. J., Lee, J. K., (2022), A Kalman filter for inverse dynamics of IMU-based real-time joint torque estimation, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 39(1), 69-77.
7. Hwang, S., Choi, S., Lee, Y.-S., Kim, J., (2021), A novel simplified system to estimate lower-limb joint moments during sit-to-stand, *Sensors*, 21(2), 521.
8. Faber, G. S., Kingma, I., van Dieën, J. H., (2010), Bottom-up estimation of joint moments during manual lifting using orientation sensors instead of position sensors, *Journal of Biomechanics*, 43(7), 1432-1436.
9. Khurelbaatar, T., Kim, K., Lee, S., Kim, Y. H., (2015), Consistent accuracy in whole-body joint kinetics during gait using wearable inertial motion sensors and in-shoe pressure sensors, *Gait & Posture*, 42(1), 65-69.
10. Liu, T., Inoue, Y., Shibata, K., Shiojima, K., Han, M., (2014), Triaxial joint moment estimation using a wearable three-

- dimensional gait analysis system, *Measurement*, 47, 125-129.
11. Logar, G., Munih, M., (2015), Estimation of joint forces and moments for the in-run and take-off in ski jumping based on measurements with wearable inertial sensors, *Sensors*, 15(5), 11258-11276.
  12. Winter, D. A., (2009). *Biomechanics and motor control of human movement*, John Wiley & Sons.
  13. Dumas, R., Chèze, L., (2007), 3D inverse dynamics in non-orthonormal segment coordinate system, *Medical & Biological Engineering & Computing*, 45(3), 315-322.
  14. Doriot, N., Chèze, L., (2004), A three-dimensional kinematic and dynamic study of the lower limb during the stance phase of gait using an homogeneous matrix approach, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 51(1), 21-27.
  15. Apkarian, J., Naumann, S., Cairns, B., (1989), A three-dimensional kinematic and dynamic model of the lower limb, *Journal of Biomechanics*, 22(2), 143-155.
  16. Dumas, R., Cheze, L., Verriest, J.-P., (2007), Adjustments to McConville et al. and Young et al. body segment inertial parameters, *Journal of Biomechanics*, 40(3), 543-553.
  17. De Leva, P., (1996), Adjustments to Zatsiorsky-Seluyanov's segment inertia parameters, *Journal of Biomechanics*, 29(9), 1223-1230.
  18. Lee, C. J., Lee, J. K., (2022), Effects of time-variation of segment-to-joint vectors on accuracy of joint torque in wearable inertial sensor-based inverse dynamics, *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, 28(7), 655-663.
  19. Lee, C. J., Lee, J. K., (2022), Wearable IMMU-based relative position estimation between body segments via time-varying segment-to-joint vectors, *Sensors*, 22(6), 2149.
  20. Dehzangi, O., Taherisadr, M., ChagalVala, R., (2017), IMU-based gait recognition using convolutional neural networks and multi-sensor fusion, *Sensors*, 17(12), 2735.
  21. Weber, D., Gühmann, C., Seel, T., (2021), RIANN—A robust neural network outperforms attitude estimation filters, *Ai*, 2(3), 444-463.
  22. Weber, D., Gühmann, C., and Seel, T., "RIANN—A Robust Neural Network Outperforms Attitude Estimation Filters," *Ai*, Vol. 2, No. 3, pp. 444-463, 2021.
  23. Choi, J. S., Lee, J. K., (2022), Application of artificial neural network for compensation of soft tissue artifacts in inertial sensor-based relative position estimation, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 39(3), 233-241.
  24. Lee, J. K., (2019), A parallel attitude-heading Kalman filter without state-augmentation of model-based disturbance components, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 68(7), 2668-2670.
  25. Sabatini, A. M., (2006), Quaternion-based extended Kalman filter for determining orientation by inertial and magnetic sensing, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 53(7), 1346-1356.
  26. Cho, K., Van Merriënboer, B., Bahdanau, D., Bengio, Y., (2014), On the properties of neural machine translation: Encoder-decoder approaches, *arXiv preprint arXiv:1409.1259*.
  27. Wright, L., Demeure, N., (2021), Ranger21: A synergistic deep learning optimizer, *arXiv preprint arXiv:2106.13731*.
  28. Smith, L. N., Topin, N., (2019), Super-convergence: Very fast training of neural networks using large learning rates, *Artificial Intelligence and Machine Learning for Multi-domain Operations Applications*, 369-386.
  29. Smith, L. N., (2017), Cyclical learning rates for training neural networks, *Proceedings of the 2017 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV)*, 464-472.
  30. Howard, J., Gugger, S., (2020), Fastai: A layered API for deep learning, *Information*, 11(2), 108.



#### Ji Seok Choi

M.Sc. in Mechanical Engineering from the School of ICT, Robotics & Mechanical Engineering, Hankyong National University. His research interests include wearable inertial sensing-based human motion tracking and data-driven motion tracking as well as biomechatronics.

E-mail: 2021585203@hknu.ac.kr



#### Chang June Lee

Ph.D. candidate in the Department of Integrated Systems Engineering, Hankyong National University. His research interests include IMU-based human motion tracking and joint torque estimation as well as wearable robotics.

E-mail: cjlee@hknu.ac.kr



#### Jung Keun Lee

Professor in the School of ICT, Robotics and Mechanical Engineering, Hankyong National University. His research interests include inertial sensing-based human motion tracking, biomechatronics, wearable sensor applications, and data-driven estimation.

E-mail: jklee@hknu.ac.kr



# Design, Fabrication, and Control of a Rotary Manipulator driven by Twisted Shape Memory Alloy (SMA) Wires

이길용<sup>1,2,#</sup>, 이수연<sup>2</sup>  
Gil-Yong Lee<sup>1,2,#</sup> and Su-Yeon Lee<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 금오공과대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology)

<sup>2</sup> 금오공과대학교 대학원 항공기계전자융합전공 (Department of Aeronautics, Mechanical and Electronic Convergence Engineering, Graduate School, Kumoh National Institute of Technology)

# Corresponding Author / E-mail: gylee@kumoh.ac.kr, TEL: +82-54-478-7293

ORCID: 0000-0002-9507-746X

KEYWORDS: Shape memory alloy (형상기억합금), Rotary actuator (회전 구동기), Manipulator (매니퓰레이터), PID control (PID 제어)

*The objective of this study was to present a rotary manipulating system driven by a rotary actuator based on twisted shape memory alloy (SMA) wires. The rotary actuator was composed of two oppositely twisted SMA wires connecting a rotor and a stator through a shaft. Two oppositely twisted SMA wires could generate bidirectional rotary motions upon actuation of each twisted SMA wire corresponding to the direction against the twist direction of each SMA wire. A manipulator was designed and fabricated by integrating manipulating arms, the rotary actuator, and a Hall effect magnetic rotary encoder which could measure the angular position of the rotary motion. We modeled and characterized the manipulator upon application of a ramp current input to each twisted SMA wire. A proportional-integral-derivative (PID) controller was designed and implemented to control the proposed rotary manipulator. Reference angular position tracking performances of the manipulator were evaluated with a series of experiments.*

Manuscript received: April 14, 2023 / Revised: May 23, 2023 / Accepted: June 5, 2023

## 1. Introduction

For decades, shape memory alloy (SMA) has gathered intense research interests for many scientific and engineering applications, for examples, composites [1-3]; robotics [4-7]; biomimetics [5,8]; biomedical [9]; and wearable devices [10,11]. SMA exhibits large deformation with relatively high power density and can be easily integrated into the structures as many available forms (wire, sheet, etc.) [4,6,12-14]. At low temperature, SMA is represented by the twinned Martensite without external stresses or loads [13,14]. And it is deformable to the detwinned Martensite by external loads at low temperature [13,14]. The deformed (detwinned) SMA is restored to its original shape by applying heat, and it is called the shape memory effect (SME) [13,14].

The property enables SMA applicable for the actuators. In many practical applications, actuation mechanism based on the axial

contraction of the SMA wire has been preferred [1,3,4,6,15]. Recently, we proposed a new actuation mechanism for a rotary actuator based on the twisted SMA wires [16], reporting the design and fabrication processes with actuation performances of the rotary actuator.

In the present work, we designed and fabricated a rotary manipulating system driven by a rotary actuator based on the twisted SMA wires. The rotary actuator is composed of two oppositely twisted SMA wires connecting rotor and stator through a shaft. The two oppositely twisted SMA wires generate bidirectional rotary motions upon actuation of each twisted SMA wire corresponding to the direction against the twist direction of each SMA wire. A simple manipulating system was designed and fabricated by integrating the manipulating arms, the rotary actuator, and a Hall effect magnetic rotary encoder which measures the angular position of the rotary motion. We modeled and characterized the transfer function of the

manipulating system upon the application of ramp current input to each twisted SMA wire. A proportional-integral-derivative (PID) controller was designed and implemented for the proposed rotary manipulating system. The reference angular position tracking performances of the manipulating system were evaluated with varying the angular velocity and the maximum angular position of the reference ramp inputs.

## 2. Design and Fabrication of the Rotary Actuator and Manipulating System

### 2.1 Design and Fabrication of the Rotary Actuator using Twisted SMA Wires

In our earlier report, we proposed a rotary actuator prepared by the twisted SMA wires, with presenting its actuation mechanism; design; fabrication processes; and actuation performances [16]. For the present work, we further developed the technique for a rotary manipulator driven by the similar rotary actuator integrated with the sensor and controller. Fig. 1(a) shows the rotary actuator unit designed and used for the present work. The two oppositely twisted SMA wires (200  $\mu\text{m}$  diameter Flexinol® SMA wire with 70°C of phase transition temperature, Dynalloy, Inc.), denoted by twisted SMA wire 1 and 2, respectively, are folded and adhered through the holes in the rotor and the stator. A UV curable resin (JJOMA UV Resin, Jjomanhan – Maeul) was used for the adhesion. We attached a magnet assembly on top of the rotor so that it generates a magnetic field on the rotary encoder, which senses the angular position of the rotary actuator. A shaft connects the rotor and the stator through their center. The fabricated rotary actuator units are presented in Fig. 1(b). Fig. 1(c) shows the actuator units with the magnet assembly attached.

We provide an optical image of the two oppositely twisted SMA wires in Fig. 1(d). Those twisted SMA wires were fabricated by using the same setup and procedures reported in our earlier report [16]. A stepping motor was used to twist the SMA wires (approximately 80 mm long), and the rotating direction of the stepping motor controls the twist direction. The twisted SMA wire generates rotary motion against the twist direction [16]. For the present work, we used the revolutions of the stepping motor as 50, which results in approximately 2 mm of helix pitch within the twisted SMA wires. A UV curable resin is applied surrounding the twisted SMA wires for insulating them during the actuation as shown in Fig. 1(e). Figs. 1(f)-1(g) present optical images of the 3D printed (ABS) rotor/stator, and the magnet assembly, respectively.

Fig. 2(a) presents a schematic of angular position measurement

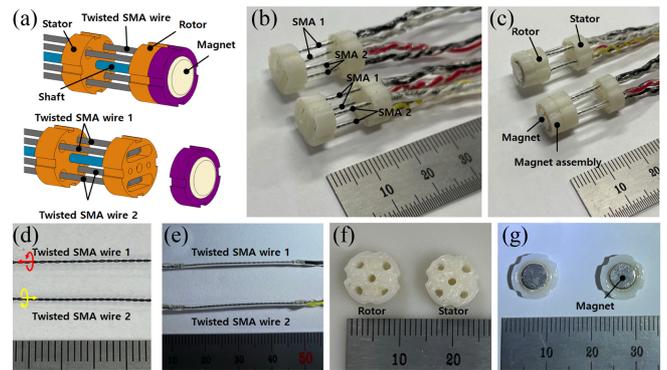


Fig. 1 (a) A 3D model of the designed rotary actuator. (b) Photo of the fabricated rotary actuator. (c) The rotary actuator with the magnet assembly. (d) The oppositely twisted SMA wires. (e) The twisted SMA wires applied with the UV curable resin and the electrical leads. (f) Photo of the rotor and shaft. (g) Photo of the magnet assembly

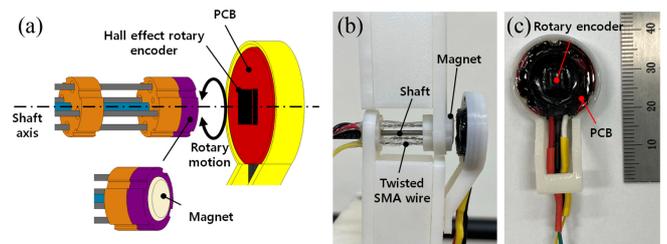


Fig. 2 (a) A schematical illustration of the rotary actuator with the rotary encoder. (b) Photo of the rotary actuator with the rotary encoder. (c) Detailed view of the rotary encoder

for the rotary actuator with a Hall effect magnetic rotary encoder. Upon the application of electric current to one of the twisted SMA wire, it generates rotary motion of the rotor about the shaft axis (against the twist direction). The magnet assembly rotates in the same direction. The rotary encoder detects the change of the magnetic field and measures the angular position of the rotor. Fig. 2(b) presents the rotary actuator assembled with the rotary encoder and Fig. 2(c) shows detailed view of the rotary encoder. We modified a commercially available rotary encoder (SME360CAP, SERA) for the present work.

### 2.2 Design and Fabrication of the Rotary Manipulator

As presented in Figs. 3(a)-3(c), we designed a simple manipulating system composed of two rigid arms (fabricated by a 3D printer using ABS) assembled with the rotary actuator and the rotary encoder. Figs. 3(a)-3(c) schematically show how the upper manipulating arm rotates by the rotary motion of the rotary actuator. We used the sign convention for the rotary motions of the manipulating system as depicted in Figs. 3(b)-3(c).

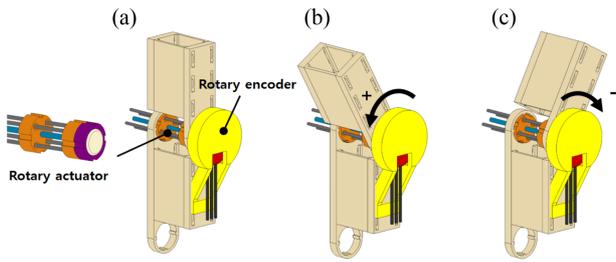


Fig. 3 A schematical illustration of the rotary manipulator with its rotational motions

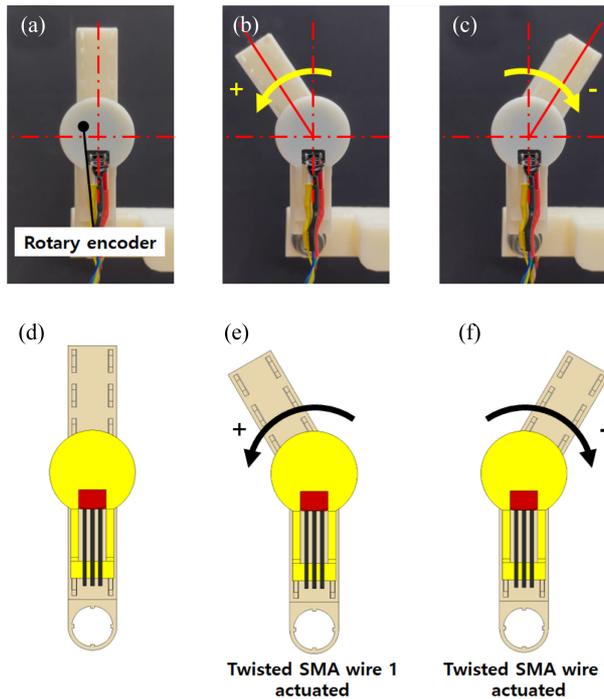


Fig. 4 (a)-(c) The fabricated rotary manipulator and the resulting rotary motions generated by the applied electric current to the twisted SMA wires in the rotary actuator. (d)-(f) Schematic illustrations of the rotary motions of the manipulator

The rotary actuator rotates the manipulator bidirectionally by application of electrical current to each twisted SMA wire. The rotary encoder integrated into the manipulator measures the angular position of the rotor. Figs. 4(a)-4(c) capture the resulting rotary motions of the manipulating system upon sequential application of electrical current (1.5 A) to each twisted SMA wire (denoted by twisted SMA wire 1 and 2, respectively) with schematic representations in Figs. 4(d)-4(f).

### 3. Experimental Setup

An experimental setup composed of the rotary manipulator, a

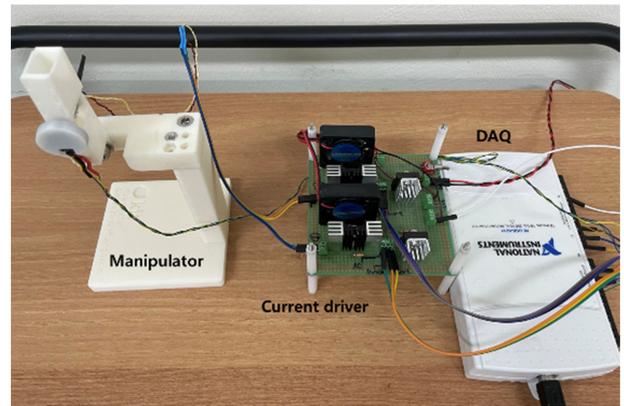


Fig. 5 Experimental setup composed of the manipulator, current driver, and DAQ system

custom-made current driver, and a DAQ board (NI-USB6211) was built and used for the experiments; Fig. 5 presents the experimental setup. We built and used a custom software to drive and control the rotary manipulator by using LabView.

## 4. Results and Discussions

### 4.1 Characterization of the Rotary Manipulator

To characterize the response of the manipulator driven by the proposed rotary actuator, we applied a ramp current input to each twisted SMA wire (denoted by  $i_{SMA1}$  and  $i_{SMA2}$ , respectively). We defined the positive rotating direction of the actuator as the rotating direction corresponds to the twisted SMA wire 1; denoted by SMA1. For the positive rotary motion, we applied the ramp current input to the SMA1 as  $i_{SMA1}(t) = 0.1t$  A for 18 sec, while the current to the SMA2 was zero.

Fig. 6(a) plots the applied currents ( $i_{SMA1}$  and  $i_{SMA2}$ ) to the twisted SMA wires. Fig. 6(b) provides the resulting angular position of the manipulating arm in the positive direction, measured by the rotary encoder. For the negative rotary motion, we applied the same ramp current input to the SMA2 as  $i_{SMA2}(t) = 0.1t$  A for 18 sec, while the current to the SMA1 was zero as shown in Fig. 6(c). Fig. 6(d) captures the resulting angular position of the manipulating arm in the negative direction, measured by the rotary encoder. As shown in Figs. 6(b) and 6(d), there exists the minimum current level from which the angular position starts to be recognizable (approximately 0.5 A and 0.3 A for the positive and negative directions, respectively). In other words, the rotary motions of the SMA wires are not initiated at the input current smaller than those values. It is expected that the temperature-induced phase transformation of the SMA wire is not sufficiently initiated at the electrical current smaller than those values.

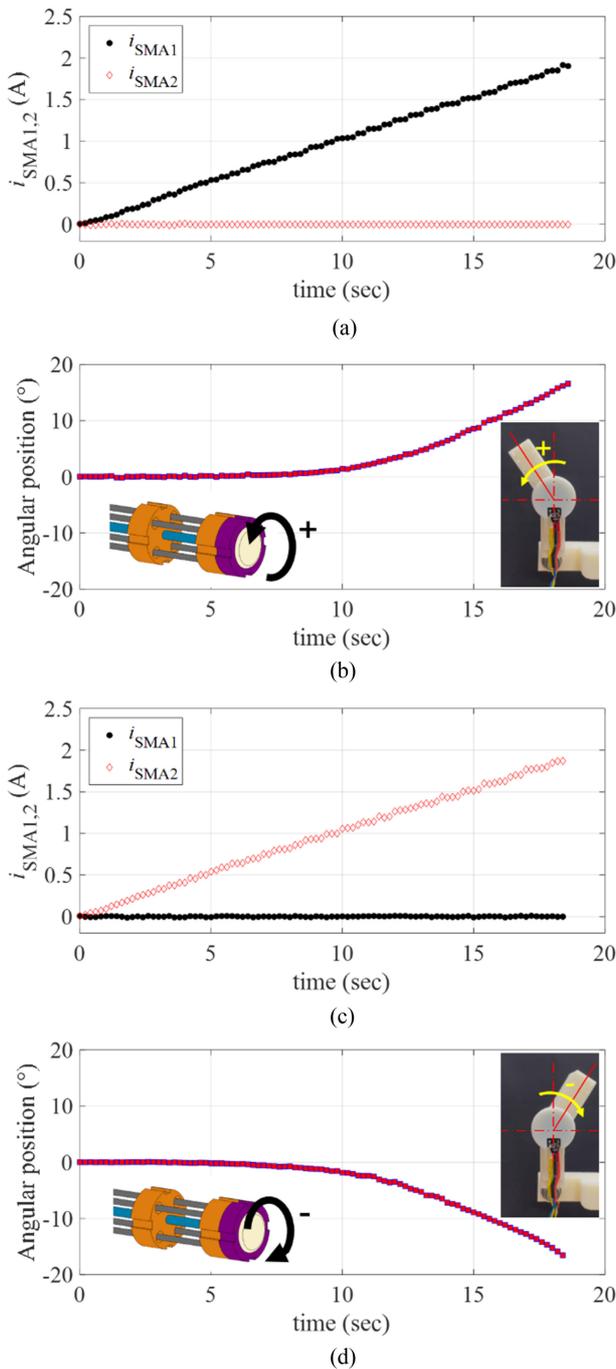


Fig. 6 (a), (c) The current input to the twisted SMA wires, and (b), (d) the resulting angular position of the manipulator; (b) motion in the positive direction, (c) motion in the negative direction

We also plotted the measured angular position of the rotary actuator with respect to the amplitude of the input current in Figs. 7(a)-7(b). As the input current had values from zero to specific values (approximately, 0.45 A and 0.3 A for the positive and negative rotating directions, respectively), the rotary actuator showed nearly zero angular motions. The rotary actuator started to

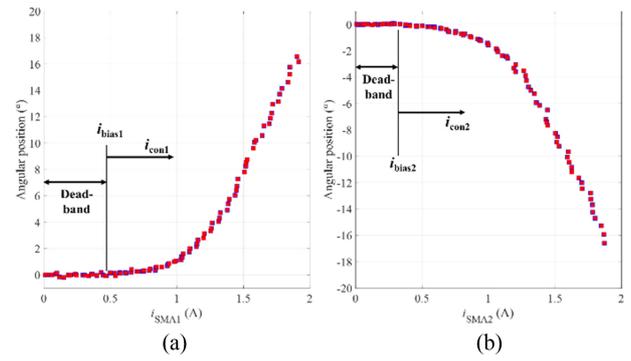


Fig. 7 Angular position of the rotary actuator with respect to the amplitude of the input current (a) in the positive, (b) in the negative directions

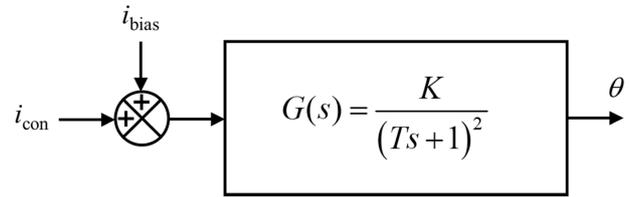


Fig. 8 Block diagram representation of the rotary manipulating system

rotate the manipulating arm at the input currents larger than those values. We define the dead-band of the rotary actuator at which it does not respond (or its response is negligible) to the input current. The upper bounds of the dead-band are defined as the bias currents (denoted by  $i_{bias1}$  and  $i_{bias2}$  for the SMA1 and SMA2, respectively). And the control inputs to each twisted SMA wire (denoted by  $i_{con1}$  and  $i_{con2}$  for the SMA1 and SMA2, respectively in Fig. 7) are used to model the system response upon the ramp input was applied.

The resulting block diagram of the rotary manipulating system is presented in Fig. 8. We modeled the rotary manipulator as a critically damped second order system with the gain  $K$  and the time constant  $T$ . The response of the system upon the application of the ramp input  $i_{con}(t) = 0.1t$  is obtained as in Equation (1) [17].

$$\theta(t) = 0.1K[t - 2T + (t + 2T)e^{-t/T}] \quad (1)$$

We plotted the ramp responses of the rotary actuator in the positive and negative directions in terms of the control inputs  $i_{con1}$  and  $i_{con2}$  in Fig. 9, where  $i_{con1}(t) = i_{con2}(t) = 0.1t$  A. The model fitted responses following Equation (1) are plotted together in Figs. 9(b) and 9(d) with the experimental data. Table 1 summarizes the fitting coefficients  $K$  and  $T$  of the model obtained by nonlinear least square curve fits, with the coefficient of determination  $R^2$ .

The system parameters ( $K$  and  $T$ ) obtained from the ramp responses showed small variations between the positive and

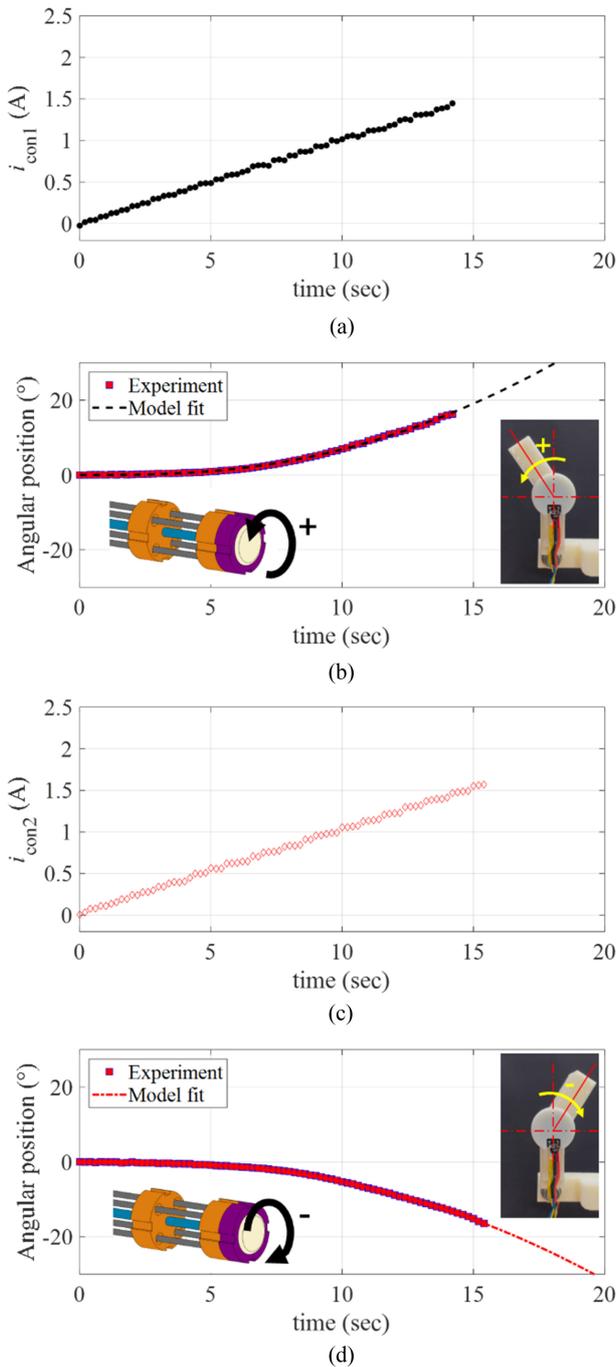


Fig. 9 (a), (c) The ramp inputs to the rotary manipulator  $i_{con1}$  and  $i_{con2}$ , and (b), (d) the ramp responses of the rotary actuator in the (b) positive and (d) negative directions with the model fits

negative directions. We expect those variations are mainly caused by the quality variations in the manufacturing processes of each twisted SMA wire, and the manipulator assembly.

**4.2 Controller Design and Performance Evaluations**

We implemented a PID controller to the rotary manipulator and

Table 1 The system parameters obtained from the model fits of the ramp responses

	Positive direction	Negative direction
$K$	83.4797	105.3464
$T$	11.5931	15.6548
$R^2$	0.9986	0.9989

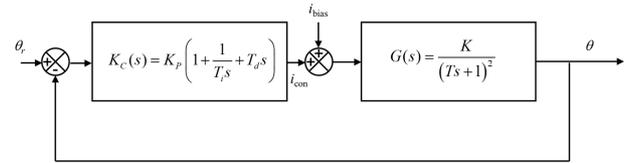


Fig. 10 Block diagram representation of the feedback control system

evaluated the reference angular position tracking performances. The block diagram of the feedback control system with the PID controller is shown in Fig. 10.

We first designed a PI controller with the controller gain  $K_p$  and the integral time  $T_i$  based on the Ziegler-Nichols tuning rules [17]. And a small derivative action with the derivative time  $T_d$  was added to the controller. For the gain tuning, the average values of the system parameters ( $K$  and  $T$ ) in the positive and negative directions obtained from the ramp responses were used. The resulting controller gain  $K_b$ , integral time  $T_i$ , and derivative time  $T_d$  are summarized in Table 2.

To evaluate the performance of the control system, we considered the ramp reference angular position  $\theta_r(t)$  as shown in Fig. 11. The slope of the ramp reference input is defined by the angular velocity  $\omega = \theta_{max}/t$ , and we varied the angular velocity  $\omega$  and the maximum angular position  $\theta_{max}$  for the experiments.

We implemented the designed PID controller with a custom-made control software using LabView and captured the angular position of the manipulator upon the applications of ramp reference inputs. The maximum current input to the twisted SMA wires was limited by 2 A to prevent overheating and failures of the SMA wires. Fig. 12(a) plots the response of the manipulator obtained from the reference angular position tracking experiments by setting the angular velocity and the maximum angular position of the ramp reference input as  $\omega = 0.1^\circ/\text{sec}$  and  $\theta_{max} = 1^\circ$ , respectively. The inset in Fig. 12(a) shows the magnified image of the data. We conducted numerical simulations of the response using MATLAB and the simulated response is plotted together in Fig. 12(a). The control system follows the reference angular position well with small position error as shown in Fig. 12(b). Fig. 12(c) presents the control input currents to each twisted SMA wire during the

Table 2 The gain, integral time, and derivative time of the PID controller

Controller parameter	Value
$K_p$	0.90
$T_i$ [sec]	45.41
$T_d$ [sec]	0.60

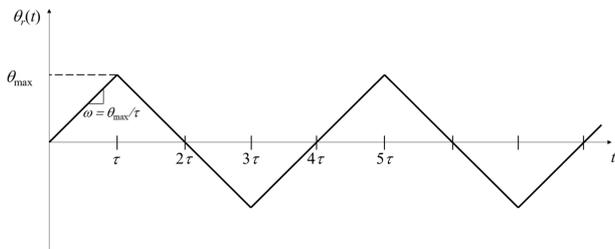


Fig. 11 Schematic representation of the ramp reference angular position

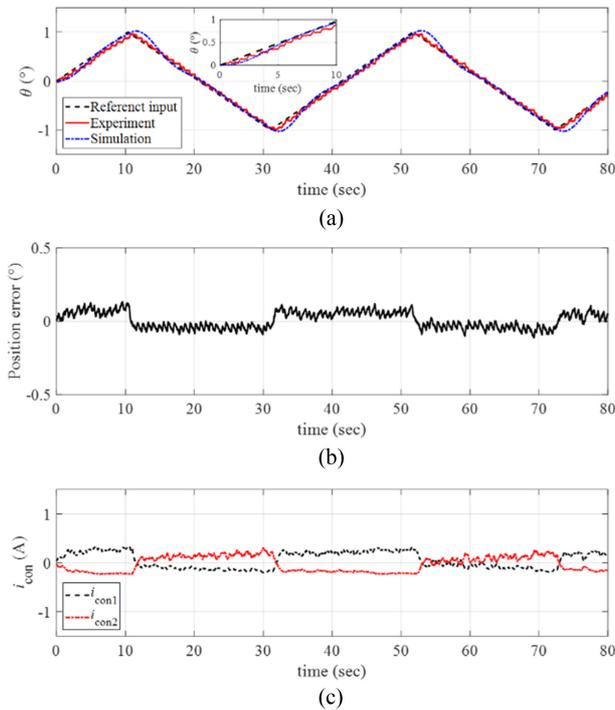


Fig. 12 (a) Response of the manipulator with the reference input and the simulated signals ( $\omega = 0.1^\circ/\text{sec}$  and  $\theta_{\max} = 1^\circ$ ). (b) Position error. (c) The control inputs to each twisted SMA wire. Inset in (a) magnified image of the data

experiments.

We increased the maximum angular position of the ramp reference input  $\theta_{\max} = 10^\circ$  with the same angular velocity  $\omega = 0.1^\circ/\text{sec}$ . The results are plotted in Fig. 13(a) along with the simulated signals. As the magnitude of the reference input increased to  $10^\circ$ , the response of the control system still follows the reference input

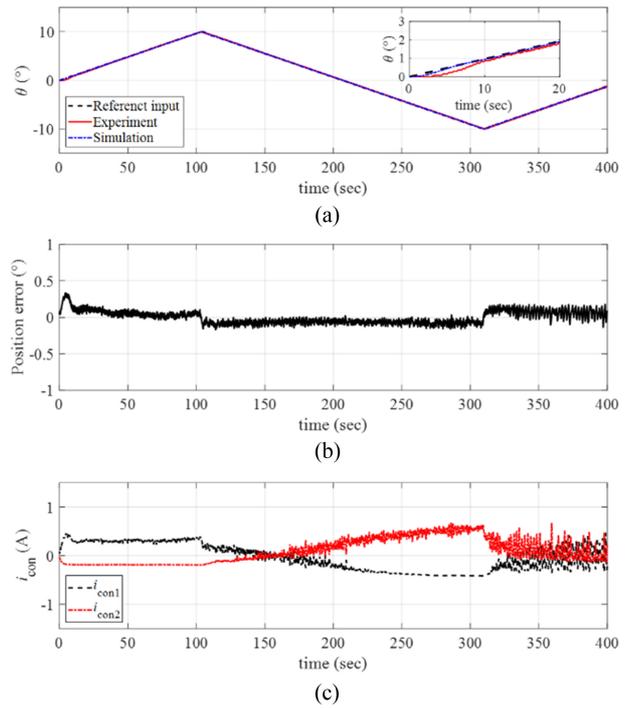


Fig. 13 (a) Response of the manipulator with the reference input and the simulated signals ( $\omega = 0.1^\circ/\text{sec}$  and  $\theta_{\max} = 10^\circ$ ). (b) Position error. (c) The control inputs to each twisted SMA wire. Inset in (a) magnified image of the data

well; see position error presented in Fig. 13(b). Fig. 13(c) plots the control input currents to each twisted SMA wire during the experiments, and we observe the increases in the control inputs for the manipulator to follow larger reference inputs.

We conducted experiments with faster angular velocity of the ramp reference input as  $\omega = 1^\circ/\text{sec}$ . Fig. 14(a) captures the angular position of the manipulator with the reference ramp input (where  $\theta_{\max} = 10^\circ$ ) and the simulated signals. As presented in Fig. 14(b), the response of the manipulator exhibits relatively larger position error compared to the results with slower angular velocity. Fig. 14(c) plots the control input currents during the experiments. Referring to Fig. 14(c), larger control inputs are required for tracking faster angular velocity of the reference input.

The maximum angular position of the ramp input was further increased to  $\theta_{\max} = 30^\circ$  with the same angular velocity ( $\omega = 1^\circ/\text{sec}$ ), and the experimental results are plotted in Fig. 15(a) with the position error in Fig. 15(b) and the control inputs in Fig. 15(c). The manipulator followed the reference position with position error smaller than  $2^\circ$  as shown in Fig. 15(b). The control currents required higher values for tracking larger magnitude of the reference input.

Finally, much faster reference input was considered with the

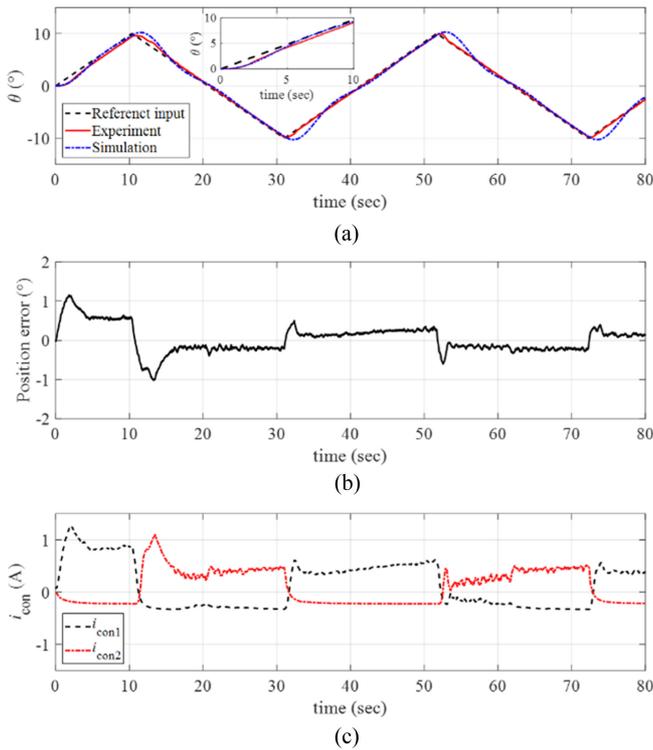


Fig. 14 (a) Response of the manipulator with the reference input and the simulated signals ( $\omega = 1^\circ/\text{sec}$  and  $\theta_{\max} = 10^\circ$ ). (b) Position error. (c) The control inputs to each twisted SMA wire. Inset in (a) magnified image of the data

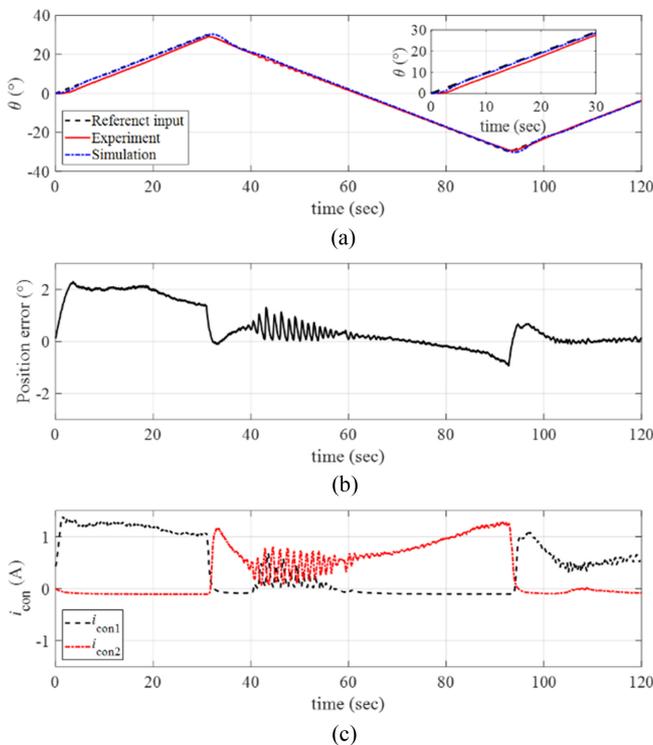


Fig. 15 (a) Response of the manipulator with the reference input and the simulated signals ( $\omega = 1^\circ/\text{sec}$  and  $\theta_{\max} = 30^\circ$ ). (b) Position error. (c) The control inputs to each twisted SMA wire. Inset in (a) magnified image of the data

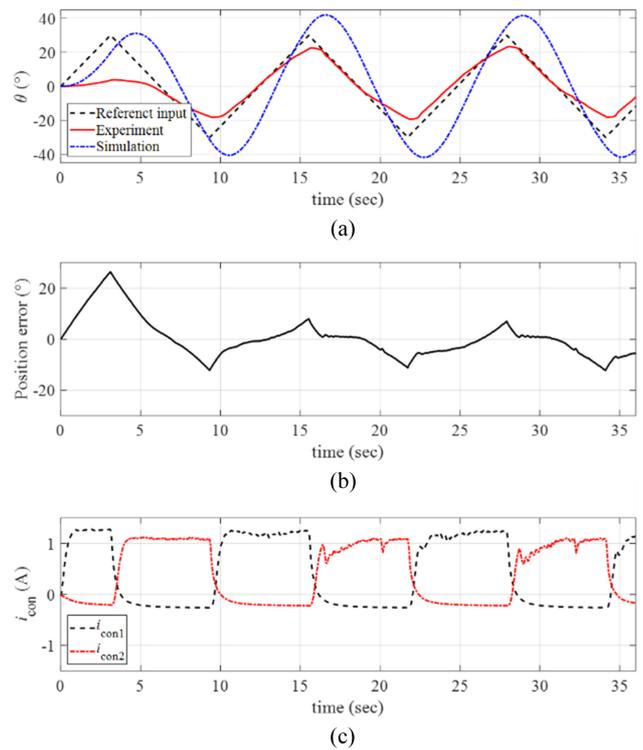


Fig. 16 (a) Response of the manipulator with the reference input and the simulated signals ( $\omega = 10^\circ/\text{sec}$  and  $\theta_{\max} = 30^\circ$ ). (b) Position error. (c) The control inputs to each twisted SMA wire

angular velocity  $\omega = 10^\circ/\text{sec}$ . We applied the maximum angular position of the ramp reference input as  $\theta_{\max} = 30^\circ$ . The resulting response of the rotary manipulator is presented in Fig 16(a) with the position error and the control inputs in Figs. 16(b) and 16(c), respectively. Referring to Figs. 16(a)-16(b), the manipulator could not sufficiently follow the faster reference input and large position error was observed during the motions. Since we limited the current input to the SMA wire ( $i_{SMA} = i_{bias} + i_{con}$ ) as  $i_{SMA,max} = 2 \text{ A}$ , we observed almost saturated control input currents during the motions.

It is noted that further tunes of the controller gains with considering advanced controllers will improve the reference tracking performance of the system. We remain the related studies for our future works.

### 5. Conclusions

In this study, we presented design and fabrication of a rotary manipulator driven by a rotary actuator based on the twisted SMA wires. The dynamic response of the manipulator was characterized by ramp response, and a PID controller was implemented for the

position control of the manipulator. The reference angular position tracking performances of the manipulating system were evaluated upon the ramp reference inputs applied with varying the angular velocity and the maximum angular position of the ramp input. The proposed manipulator reliably followed the reference input with position error smaller than  $2^\circ$  up to  $30^\circ$  of the maximum angular position under  $1/s$  of the angular velocity. While the proposed rotary actuator has benefits for miniaturization; integration into the assembly; with its relatively easy control of the bidirectional motion, it has limited operating range and has difficulties for achieving continuous rotary motion with the present form, when it is compared to conventional electric motors. Further studies for overcoming the limitations with the improvements of the performance by re-designing and improving the manipulator with the controller will be followed as our future works.

## ACKNOWLEDGEMENT

This research was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MEST) (No. NRF-2020R1A2C4001731) and Kumoh National Institute of Technology (No. 202001090001).

## REFERENCES

- Rodrigue, H., Wang, W., Bhandari, B., Han, M.-W., Ahn, S.-H., (2015), SMA-based smart soft composite structure capable of multiple modes of actuation, *Composites Part B: Engineering*, 82, 152-158.
- Ashir, M., Cherif, C., (2020), Development of shape memory alloy-based adaptive fiber-reinforced plastics by means of open reed weaving technology, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 39(15-16), 563-571.
- Han, M.-W., Kim, M.-S., Ahn, S.-H., (2020), Shape memory textile composites with multi-mode actuations for soft morphing skins, *Composites Part B: Engineering*, 198, 108170.
- Lee, J.-H., Chung, Y. S., Rodrigue, H., (2019), Long shape memory alloy tendon-based soft robotic actuators and implementation as a soft gripper, *Scientific Reports*, 9(1), 11251.
- Koh, J.-S., Cho, K.-J., (2012), Omega-shaped inchworm-inspired crawling robot with large-index-and-pitch (LIP) SMA spring actuators, *IEEE/ASME Transactions On Mechatronics*, 18(2), 419-429.
- Song, S.-H., Lee, J.-Y., Rodrigue, H., Choi, I.-S., Kang, Y. J., Ahn, S.-H., (2016), 35 Hz shape memory alloy actuator with bending-twisting mode, *Scientific reports*, 6(1), 21118.
- Li, J., Zu, L., Zhong, G., He, M., Yin, H., Tan, Y., (2017), Stiffness characteristics of soft finger with embedded SMA fibers, *Composite Structures*, 160, 758-764.
- Hwang, J., Wang, W. D., (2022), Shape memory alloy-based soft amphibious robot capable of seal-inspired locomotion, *Advanced Materials Technologies*, 7(6), 2101153.
- Zainal, M. A., Sahlan, S., Mohamed Ali, M. S., (2015), Micromachined shape-memory-alloy microactuators and their application in biomedical devices, *Micromachines*, 6(7), 879-901.
- Jeong, J., Yasir, I. B., Han, J., Park, C. H., Bok, S.-K., Kyung, K.-U., (2019), Design of shape memory alloy-based soft wearable robot for assisting wrist motion, *Applied Sciences*, 9(19), 4025.
- Park, S. J., Park, C. H., (2019), Suit-type wearable robot powered by shape-memory-alloy-based fabric muscle, *Scientific Reports*, 9(1), 9157.
- Nespoli, A., Besseghini, S., Pittaccio, S., Villa, E., Viscuso, S., (2010), The high potential of shape memory alloys in developing miniature mechanical devices: A review on shape memory alloy mini-actuators, *Sensors and Actuators A: Physical*, 158(1), 149-160.
- Jani, J. M., Leary, M., Subic, A., Gibson, M. A., (2014), A review of shape memory alloy research, applications and opportunities, *Materials & Design* (1980-2015), 56, 1078-1113.
- Soother, D. K., Daudpoto, J., Chowdhry, B. S., (2020), Challenges for practical applications of shape memory alloy actuators, *Materials Research Express*, 7(7), 073001.
- Akbari, S., Sakhaei, A. H., Panjwani, S., Kowsari, K., Serjouei, A., Ge, Q., (2019), Multimaterial 3D printed soft actuators powered by shape memory alloy wires, *Sensors and Actuators A: Physical*, 290, 177-189.
- Jang, E.-J., Lee, S.-Y., Kim, K.-H., Lee, G.-Y., (2022), Design and fabrication of a millimeter-scale rotary actuator based on the twisted shape memory alloy (SMA) wires, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 39(6), 403-410.
- Ogata, K., (2010), *Modern control engineering fifth edition*, Prentice Hall.



**Gil-Yong Lee**

Associate Professor in the Department of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology. His research interests are integrated manufacturing system, sensors/actuators, composites, vibration, control, and additive manufacturing.

E-mail: gylee@kumoh.ac.kr



**Su-Yeon Lee**

M.S. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology. Her research interests are soft robotics, shape memory alloy, smart materials and structures.

E-mail: were132@kumoh.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, 연구결과의 출판, 연구 참여자들에 대한 공정한 보상 등 연구과정의 전반에 관한 정직을 말한다.
- ② 연구자는 연구에 있어서의 표절, 사기, 조작, 위조 및 변조 등을 심각한 범죄행위로 간주하고, 이러한 부정이 발생하지 않도록 최선을 다하여야 한다.
- ③ 저자는 자신의 이익과 타인 또는 타 기관의 이익이 상충하거나, 상충할 가능성이 있을 경우 이를 공표하고 적절히 대응하여야 한다.

### 제5조 (저자의 기준)

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

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

### 제6조 (저자의 준수사항)

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

## (사)한국정밀공학회 학술활동 윤리규정

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

### 제 3 장 학회 구성원의 역할과 책임

#### 제7조 (편집위원 준수사항)

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

#### 제8조 (심사위원 준수사항)

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

### 제 4 장 검증 절차와 기준

#### 제9조 (윤리위원회)

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

#### 제10조 (윤리위원회 기능)

위원회는 다음의 내용으로 활동한다.

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

## (사)한국정밀공학회 학술활동 윤리규정

### 제11조 (윤리위원회 소집 및 의결)

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

### 제12조 (연구 부정행위의 제보)

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

### 제13조 (연구 부정행위에 대한 제재 및 사후조치)

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

### 제14조 (피조사자 권리 보호)

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

### 제15조 (조사의 기록과 정보의 공개)

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

### 제16조 (조사결과의 보고)

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

# 한국정밀공학회지 연구윤리 및 저작권 동의서

(사)한국정밀공학회 귀하

논문 제목

국문:

영문:

저자명 (전체):

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

1. 저자(들)는 상기 제목의 논문이 한국정밀공학회지에 게재될 경우 저작권을 한국정밀공학회에 양도하며, 한국정밀공학회는 위 논문에 대한 포괄적이고 독점적인 권리를 가집니다.
2. 저자(들)는 위 논문이 다른 연구자들의 저작권 및 어떠한 권리들도 침해하지 않았으며, 이 논문에 포함된 다른 인쇄 및 전자출판물의 내용/표/그림들에 대한 합법적인 저작권 소유주(자, 기관)로부터 사용허가를 받았습니다.
3. 저자(들)는 위 논문의 작성과 연구에 실질적인 기여를 하였으며, 위 논문의 작성과 내용에 대한 책임이 있습니다.
4. 저자(들)는 위 논문에 대한 인쇄 및 전자 출판물의 일부를 저자(들)의 연구결과 보고 및 논문게재/발표에 수정 후 재사용/출간하고자 할 때에는 무료로 사용할 수 있습니다. 이 경우 이 같은 사실과 타당한 이유를 한국정밀공학회에 알려야 하고, 위 논문을 해당 연구결과 보고 및 논문/발표자료에 정확히 인용하며 적절한 저작권을 명시하여야 합니다.
5. 저자(들)는 위 논문이 과거에 어떠한 학술지에도 출판된 적이 없으며, 현재 다른 학술지에 게재를 목적으로 제출되었거나 제출할 계획이 없습니다.
6. 저자(들)는 한국정밀공학회의 윤리규정에 있는 학술활동 윤리규정을 준수합니다.  
또한, 중복 출판이나 표절 예방을 위해 CrossCheck 확인에 동의합니다.  
(\*)(사)한국정밀공학회 학술활동 윤리규정 전문: [http://jkspe.kspe.or.kr/files/KSPE\\_학술활동\\_윤리규정.pdf](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)

<b>Title</b>	<b>Korean</b>
	<b>English</b>
<b>Authors</b>	

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 8 · August 2023

## REGULAR PAPERS

**Inlet Hole Shape Analysis Depending on the Focus Conditions for Electron Beam Micro-hole Drilling**  
J.-G. Kang · J. Kim · B.-K. Min · E.G. Kang 1307

**Study on the Cold Atmospheric Plasma Process via Oxygen (O<sub>2</sub>) Fluid Flow Fabrication RB-SiC Ceramic**  
J. Xu · Q. Zhang · R. Gu · X. Zhang · Q. He · X. Liu · X. Rao · L. Zhang · F. Zhang 1319

**Application of Computationally Advanced 3D Finite Element Simulation for Stress and Strain Analysis of Single and Multi-pass Spinning Processes with Experimental Validation**  
S. Izadpanah · M. Amini 1335

**A Geometric Errors Identification Method for the Rotating Axis of Five-Axis Welding Equipment**  
X. Tang · H. Zhou · T. Xu 1355

**Precise Measurement of Dynamic Ink Spreadability Using High-Speed Camera and Nonlinear Regression**  
H. Kim · J. Kim · M. Kwon 1369

**Fuzzy Sliding Mode Control on Positioning and Anti-swing for Overhead Crane**  
Q. Zhang · B. Fan · L. Wang · Z. Liao 1381

**Study on Ultrasonic Testing of Interface Bonding State of Aluminum Matrix Composites**  
D. Zou · J. Huang · Y. Zhang · Z. Fan · X. Zeng · X. Zhang 1391

**BCI-VR-Based Hand Soft Rehabilitation System with Its Applications in Hand Rehabilitation After Stroke**  
N. Gao · P. Chen · L. Liang 1403

**Process Variable Optimization for Hot-Profiled Rolling of SAE 52100 Steel**  
G. Singh · P.K. Singh 1425

**The Effect of NCO Content in Polyurethane Foam for Automotive Instrument Panel**  
J.-G. Min · W.-B. Lim · J.-H. Lee · J.-H. Bae · P. Huh 1435

**Simulation-Based Characterization of Tube-Cap Resistance Butt Welding of Nuclear Fuel for Light Water Reactors and Development of Melted-Volume Prediction Models**  
T.-H. Na 1443

**Digital Twin Data-Driven Multi-Disciplinary and Multi-Objective Optimization Framework for Automatic Design of Negative Stiffness Honeycomb**  
J. Choi · H. Kim · T. Noh · Y.-J. Kang · Y. Noh 1453

**Level-Set Optimization of Si-Nanowires Constituting New LIB Anodes Considering Electrochemical Diffusion and Large Volume Expansion**  
K. Park · S. Nam · C. Kim 1473

**Investigations on Deposition Geometry and Mechanical Properties of Wire Arc Additive Manufactured Inconel 625**  
A. Kumar · K. Maji · A. Shrivastava 1483

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

## 한국정밀공학회 PRESM 2023

◎ 일 자 : 2023.7.16.(일) ~ 7.21.(금)

◎ 장 소 : 일본 오키나와 Bankoku Shinryokan

PRESM 2023(International Symposium on Precision Engineering and Sustainable Manufacturing)이 7월 16일(일)부터 21일(금)까지 일본 오키나와 Bankoku Shinryokan에서 성황리에 개최되었습니다.

COVID-19의 영향으로 전면 온라인(2020년), 하이브리드 비대면(2021년), 현장 중심 하이브리드(2022년) 개최를 통하여 현장 교류가 힘들었지만, 올해는 전면 대면으로 진행되면서, 11개국에서 총 540편, 750명의 참석 규모로 개최되어 국내?의 다양한 연구성과 발표, 최신 연구 동향 교류의 장이 되었습니다.

총 3편의 Plenary Speech와 20편의 Keynote Speech는 정밀공학 분야의 다양한 최신 연구 이슈에 대하여 발표되었습니다. 13개의 Focus Session을 구성, 각급 초청발표와 함께 프로그램을 구성, 6일간 알차고 열띤 학술교류가 진행되었습니다. 이전 학술대회보다 더 긴 일정에 더욱 활발한 학술교류가 이어졌으며, 앞으로 더 효율적이고 알찬 학술대회가 될 수 있도록 계속 개선해 나아갈 예정입니다.

PRESM 2024는 2024년 7월 7일(일)부터 12일(금)의 기간에 부산 파라다이스 호텔에서 개최될 예정으로, 기존 대회 일정을 더욱 학술과 교류에 중점을 두어 개선하여 양질의 프로그램을 구성할 것입니다. 회원 및 정밀공학 관련자분들의 많은 관심과 참석을 바랍니다. 한국정밀공학회 2023 추계학술대회는 11월 15일(수)부터 17일(금)까지 '썬비치 삼척 호텔&리조트'에서 개최됩니다.



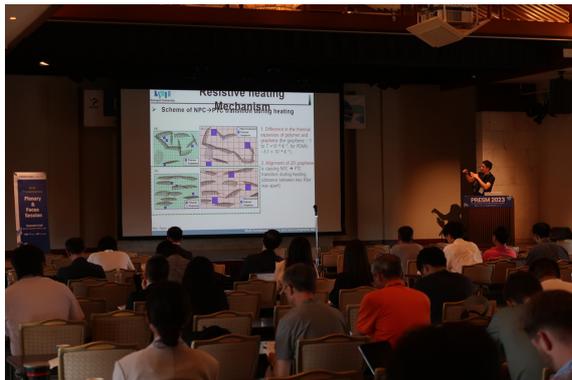
| Banquet |



| Opening |



| 포스터세션 |



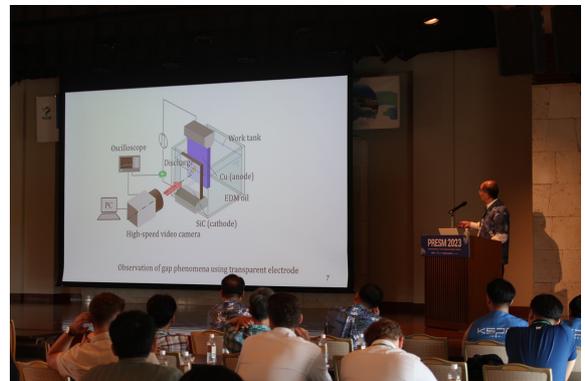
| 구두발표 |



| Plenary 1 |



| Plenary 2 |



| Plenary 3 |



| Best Paper Award |



| Young Researcher Award |

## © PRESM 2023 수상자 명단

### 1. Best Paper Award

Chung Woo Lee (Korea Institute of Industrial Technology, Korea)

발표논문: Piezoelectric Stretchable Sensor with a Vertical-wavy Structure Fabricated by Combining Dip Coating and Micro-corrugation process

Michitaka Yamamoto (The University of Tokyo, Japan)

발표논문: Determination of Joint Defects in Copper Tube Induction Heating Brazing Area Using Infrared Thermal Image based on CNN Algorithm

### 2. Young Researcher Award

Prof. Yingjun Quan (Seoul National University, Korea)

Prof. Naoji Matsuhisa (The University of Tokyo, Japan)

Prof. Yuta Kurashina (Tokyo University of Agriculture and Technology, Japan)

Dr. Jungsoo Nam (Korea Institute of Industrial Technology, Korea)

Prof. Jisoo Kim (Kyungpook National University, Korea)

Dr. Jhao-Yu Guo (National Taiwan University of Science and Technology, Taiwan)

# 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 8/ August 2023**

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

월간 · 제40권 제8호 [통권 제389호] · 비매품

등록일자 1987년 4월 25일

등록번호 서울 라 07037

인쇄일 2023년 7월 25일

발행일 2023년 8월 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(한국정밀공학회), 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).

Submit an IJPEM-ST  
<http://submit.ijpem-st.org>

## 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. 2 No. 1 January 1, 2024**

**Vol. 2 No. 2 July 1, 2024**

#### • Publication and Distribution

by the Korean Society for Precision Engineering with Open-Access

## Editorial Board

### Editor-in-Chief

Sang Won Lee / Sungkyunkwan University, Korea

### Co-Editors-in-Chief

Jay Lee / University of Maryland, USA

Jun Ni / University of Michigan, USA / Shanghai Jiao Tong University, China

### Editors

Hyeong-Joon Ahn / Soongsil University, Korea

Hae-Jin Choi / Chung-Ang University, Korea

Chih-Hsing Chu / National Tsing Hua University, Taiwan

Martin B.-G. Jun / Purdue University, USA

Dong Yoon Lee / Korea Institute of Industrial Technology, Korea

Seungchul Lee / POSTECH, Korea

Sangkee Min / University of Wisconsin-Madison, USA

Seung-Ki Moon / Nanyang Technological University, Singapore

Duhwan Mun / Korea University, Korea

Simon Park / University of Calgary, Canada

### Editorial Board

Seung-Kyum Choi / Georgia Institute of Technology, USA

Haseung Chung / Michigan State University, USA

Youngkuk Jeong / KTH Royal Institute of Technology, Sweden

Yongho Jeon / Ajou University, Korea

Jay-I. Jeong / Kookmin University, Korea

Hyungjung Kim / Seoul National University, Korea

Yangjin Kim / Pusan National University, Korea

Jihyun Lee / University of Calgary, Canada

Wonkyun Lee / Chungnam National University, Korea

David Rosen / Agency for Science, Technology and Research, Singapore

Joo-Sung Yoon / Kyungnam University, Korea



## SCOPUS, KCI 등재 학술지

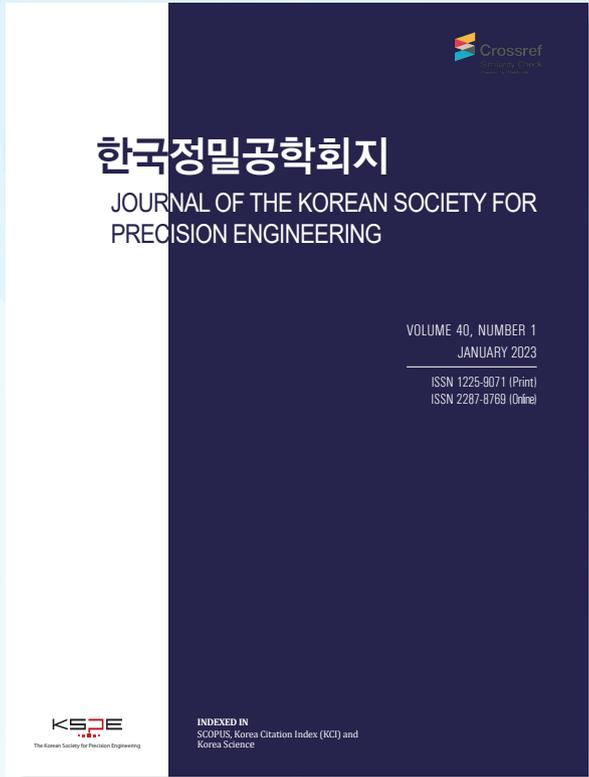
학회 회원님들의 많은 투고와 인용 부탁드립니다.

### Scope

- Precision Manufacturing Processes
- Precision Measurements
- Robotics, Control and Automation
- Smart Manufacturing System
- Design and Materials
- Machine Tools
- Nano/Micro Technology
- Bio Health
- Additive Manufacturing
- Green Manufacturing Technology

학술대회 Full Paper  
논문을 투고 시 게재료가  
면제됩니다.

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



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

## Editorial Board

### • Editor-in-Chief

Bo Hyun Kim(Soongsil University)

### • Editors

Jihwan An (Seoul National University of Science & Technology)

Baeksuk Chu (Kumoh National Institute of Technology)

Won-Shik Chu (Gyeongsang National University)

Doo-Man Chun (University of Ulsan)

Koo Hyun Chung (University of Ulsan)

Duhwan Mun (Korea University)

Jihong Hwang (Seoul National University of Science & Technology)

Young Hun Jeong (Kyungpook National University)

Jonghan Jin (Korea Research Institute of Standards & Science)

Dong Sung Kim (POSTECH)

Ho-Chan Kim (Andong National University)

Yang Jin Kim (Pusan National University)

Seung Hwan Ko (Seoul National University)

Moonkyu Kwak (Kyungpook National University)

Sung-Mook Kang (Daegu Catholic University)

Changwoo Lee (Konkuk University)

Chang-Whan Lee (Seoul National University of Science & Technology)

Hyunseop Lee (Dong-A University)

In Hwan Lee (Chungbuk National University)

Hyung Wook Park (UNIST)

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

Sang-Hu Park (Pusan National University)

Jung Woo Sohn (Kumoh National Institute of Technology)

## AWARDS

### 한국정밀공학회지 최우수논문상

– 한국정밀공학회지에 발표된 논문 중 가장  
탁월한 가치의 논문저자에게 포상

## INDEXED IN

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

## Submission to JKSP Search for JKSP

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



+82-518-2928(T)

+82-518-2937(F)



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

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



12F, SKY1004 Bldg., 50-1

Jungnim-ro, Jung-gu, Seoul,

04508, Republic of Korea



글로벌 최고 수준의 정밀함과 생산성으로  
소형 정밀/복합 가공에 최적의 솔루션을 찾다.

## 현대위아 초정밀 소형 5축 머시닝 센터

- > XF2000 (임펠러 가공 전용)
- > XF2000i (소형 정밀 부품 가공용)

## XF2000/XF2000i



MM어워드 밀링부분  
최우수상 (국내 최초)



### FAST & DYNAMICS & ACCURACY

#### FAST

글로벌 최고 수준, 이송축 가감속 2G

#### DYNAMICS

고속, 고성능 빌트인 주축 적용

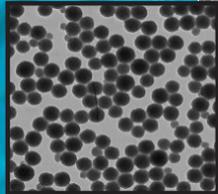
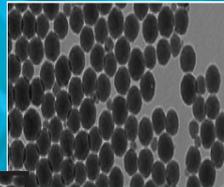
#### ACCURACY

리니어 스케일 & 로터리 엔코더 표준 적용

Your Partner in  
Success  
Since 1999

ACE  
nanochem

(주)에이스나노켄



让我们做到最好!

LET'S BE

THE BEST!

## Colloidal silica ( $\text{SiO}_2$ 나노 입자) 연구 & 제조

- 반도체 CMP Slurry 국산화, 상용화 성공, 연마입자 제조
- 콜로이달 실리카 입자 제어 Nano technology
- 반도체 CMP Slurry & Si-Wafer CMP Slurry
- 기업부설 CMP 연구소, 정밀 연마 입자 개발

## CMP & Polishing Service

- MEMS Structure
- Coupon Wafer ~ 12 inch Wafer
- Sapphire / LCD / PCB / Quartz / Glass
- Rectangular, Thin and Flexible Substrate
- CMP Process : Si, Oxide, Metal, STI, etc.



### PRINCIPLE BUSINESS

#### CMP EQUIPMENT FOR R&D

##### Polisher

- POLI - 762 for Coupon, up to 12" wafer
- POLI - 610 for Compound wafers
- POLI - 500 for Coupon, up to 8" wafer
- POLI - 400/400L for Coupon, up to 6" wafer
- POLI - 300 for Coupon, up to 4" wafer

##### Monitoring System

Friction force and Temperature

##### Post - CMP Cleaner

Cleaner - 412S, Cleaner - 812L, Cleaner - 412R, Cleaner - 326L

##### Pad Measuring System

VMS (Viscoelasticity), PMS (Profile), TMS (Thickness)

#### CMP EVALUATION & SERVICE

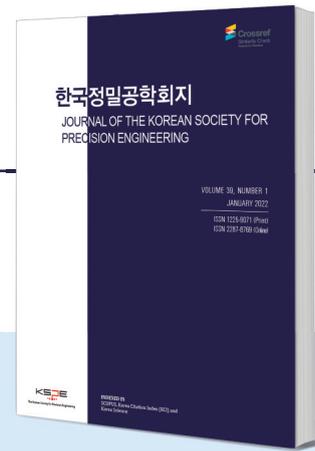
##### CMP Consumables Evaluation

Pad, Slurry, Conditioner, Retainer ring, etc.

##### CMP Process Service

# 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

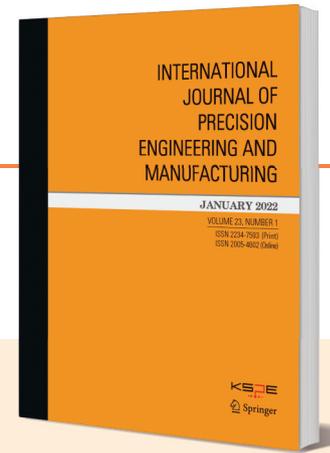
- Big Data Analytics and Informatics
- Sensors, Instrumentation and Process Monitoring
- Prognostics and Health Management (PHM)
- Industrial Internet of Things (IIOT)
- Industrial Artificial Intelligence
- Digital Twin, Cyber-Physical Systems (CPS) and Metaverse
- Augmented, Virtual and Extended Reality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

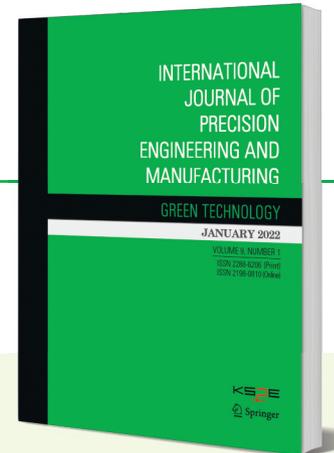
- Precision Manufacturing Processes
- Machine Tools
- Measurements and Control
- Nano/Micro Technology
- Robotics and Automation
- Bio Health
- Manufacturing Systems
- Additive Manufacturing
- Design and Materials

## 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

한국정밀공학회

2023 KSPE 2023  
Spring  
Conference

## 춘계학술대회

2023.  
5. 10(수) - 12(금)

라마다프라자제주호텔  
(제주도 제주시)

International Conference on  
Precision Engineering and Sustainable Manufacturing

## PRESM 2023

2023. 7. 16(일) - 21(금)

Bankoku Shinryokan  
Okinawa, Japan

한국정밀공학회

2023 KSPE 2023  
Autumn  
Conference

## 추계학술대회

2023. 11. 15(수) - 17(금)

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!

