

한국정밀공학회지

JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR
PRECISION ENGINEERING

VOLUME 41, NUMBER 7
JULY 2024

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

Editor-in-Chief

Bo Hyun Kim

Soongsil University
bhkim@ssu.ac.kr

Editors

Jihwan An
POSTECH

Baeksuk Chu
Kumoh National Institute of Technology

Won-Shik Chu
Gyeongsang National University

Doo-Man Chun
University of Ulsan

Koo Hyun Chung
University of Ulsan

Duhwan Mun
Korea University

Jihong Hwang
Seoul National University of Science & Technology

Jonghan Jin
Korea Research Institute of Standards & Science

Maolin Jin
Korea Institute of Robotics & Technology Convergence

Dong Sung Kim
POSTECH

Yang Jin Kim
Pusan National University

Seung Hwan Ko
Seoul National University

Moonkyu Kwak
Kyungpook National University

Sung-Mook Kang
Daegu Catholic University

Changwoo Lee
Konkuk University

Chang-Whan Lee
Seoul National University of Science & Technology

Hyunseop Lee
Dong-A University

Jongkil Lee
Andong National University

Hyung Wook Park
UNIST

Min Soo Park
Seoul National University of Science & Technology

Jung Woo Sohn
Kumoh National Institute of Technology

Chul Ki Song
Gyeongsang National University

Duck Hyun Wang
Kyungnam University

Sung Ho Yoon
Kumoh National Institute of Technology

Members of Editorial Board

Jangho Bae
Kyungsung University

Younghak Cho
Seoul National University of Science & Technology

Dongwhi Choi
Kyung Hee University

Jin-Seung Choi
Konkuk University

Jungwook Choi
Chung-Ang University

Young-Man Choi
Ajou University

Jinah Jang
POSTECH

Yongho Jeon
Ajou University

Bongchul Kang
Kookmin University

Hyun-Wook Kang
UNIST

Beomjoon Kim
University of Tokyo

Chang-Ju Kim
Korea Institute of Machinery & Materials

Gap-Yong Kim
Iowa State University

Jae-Yeol Kim
Chosun University

Kee Joo Kim
Tongmyong University

Woo Kyun Kim
University of Cincinnati

Patrick Kwon
Michigan State University

Bong-Kee Lee
Chonnam National University

Donghun Lee
Soongsil University

Howon Lee
Seoul National University

Kwang-II Lee
Kyungil University

Sangkee Min
University of Wisconsin-Madison

Jungjae Park
Korea Research Institute of Standards & Science

Jung Whan Park
Yeungnam University

Simon Park
University of Calgary

Hae-Sung Yoon
Korea Aerospace University

JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR PRECISION ENGINEERING

VOLUME 41, NUMBER 7 / July 2024

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

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

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

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

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

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

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

Published on July 1, 2024 (Monthly)

Published by The Korean Society for Precision Engineering

Publisher Byung-Kwon Min (President, KSPE)

Manuscript Editor Eunhee Park

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

Printed by Hanrimwon Co., Ltd.

Copyright © The Korean Society for Precision Engineering

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

목차

특 집 주제: 가공된 기능성 재료 기술
책임편집인 : 곽문규(경북대학교)

- 501 잔류층 제거를 통한 자기력제어 기능성표면 제작
이성호
- 507 소독제를 탑재한 키토산 마이크로 비드 정밀 제조공정과 살 바이러스 효능평가
강봉수, 최성학, 곽문규, 정호섭
- 515 향상된 파지특성을 위한 소프트 그리퍼 개발 동향: 다양한 구동 및 파지 메커니즘
송현석, 강동관, 박성진, 이희진, 정훈의
- 527 나노패턴 필름 및 압전물질 스펀지 적층구조 기반 마찰전기-압전 하이브리드 에너지 하베스터
백현민, 이재은, 정호철, 옥종걸
- 533 마이크로 홀 배열 세리아 기능층을 포함하는 고내구 고분자 전해질막 연료전지
설창욱, 장세근, 김상문

일 반

- 541 수학적 필터링 기반 TPMS 열교환기 유동 특성 개선 연구
오서현, 김정은, 윤지성, 김도륜, 김정우, 박창용, 박 근
- 551 스테인리스강 316 L 적층 제조 시편의 열처리 후 기계적 성질 시험 결과
장경남, 양승한, 박대승
- 561 혈관치료용 카테터 회전 및 풀백 구동 시스템 개발
설재호, 서명재, 전종혁, 김성민, 임홍석
- 569 오일젯 윤활 조건에서의 고속 각접촉 볼베어링의 열탄성 모델링 및 해석에 관한 연구
리베라 길버트, 박신향, 강찬식, 김동주, 홍성욱
- 581 반사형 항공우주 광학계 환경변화에 따른 이미지 품질 예측
김기수, 배지훈, 박종복

JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR PRECISION ENGINEERING

VOLUME 41, NUMBER 7 / July 2024

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

CONTENTS

SPECIAL **Title: Engineered Functional Materials**

Guest Editor: Moon Kyu Kwak (Kyungpook University)

- 501 Fabrication of Magneto-responsive Functional Surface through Removal of Residual Layer
Sungho Lee
- 507 Evaluation of the Manufacturing and Viral Killing Efficacy of Chitosan Microbeads Loaded with Disinfectants
Bong Su Kang, Sung Hak Choi, Moon Kyu Kwak, and Ho-Sup Jung
- 515 Advancements in Soft Grippers for Versatile Grasping: Exploring Diverse Actuation and Grasping Mechanisms
Hyeonseok Song, Dong Kwan Kang, Seongjin Park, Hee Jin Lee, and Hoon Eui Jeong
- 527 Hybrid Triboelectric-piezoelectric Energy Harvester Utilizing Nanopatterned Film and Piezoelectric Elastomeric Sponge Layers
Hyunmin Baek, Chaeun Lee, Hocheol Jeong, and Jong G. Ok
- 533 Micro-hole Array Ceria Functional Layer Embedded Membrane for Durable Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell
Changwook Seol, Segeun Jang, and Sang Moon Kim

REGULAR

- 541 A Study on Improvement of Flow Characteristics of TPMS Heat Exchanger based on Mathematical Filtering
Seo-Hyeon Oh, Jeong Eun Kim, Ji Seong Yun, Do Ryun Kim, Jungwoo Kim, Chang Yong Park, and Keun Park
- 551 Mechanical Property Test Results for Additive Manufactured Specimens of Stainless Steel 316 L after Heat Treatment
Kyungham Jang, Seunghan Yang, and Dae Seung Park
- 561 Development of Rotation and Pull-back Drive System of Catheter for Vascular Treatment
Jaeho Sul, Myoung Jae Seo, Jong Hyeok Jeon, Sung Min Kim, and Hong Seok Lim
- 569 Study on Thermo-mechanical Modeling and Analysis of High-speed Angular Contact Ball Bearings Under Oil-jet Lubrication
Gilbert Rivera, Shinhyang Park, Chan-sik Kang, Dongjoo Kim, and Seong-Wook Hong
- 581 Prediction of Image Quality according to Environmental Changes in a Reflective Aerospace Optical System
Kisoo Kim, Ji-Hun Bae, and Jongbok Park



책임편집인
곽문규
경북대학교

가공된 기능성 재료 기술 Engineered Functional Materials

- (1) 잔류층 제거를 통한 자기력제어 기능성표면 제작
- (2) 소독제를 탑재한 키토산 마이크로 비드 정밀 제조공정과 살 바이러스 효능평가
- (3) 향상된 파지특성을 위한 소프트 그리퍼 개발 동향: 다양한 구동 및 파지 메커니즘
- (4) 나노패턴 필름 및 압전물질 스펀지 적층구조 기반 마찰전기-압전 하이브리드 에너지 하베스터
- (5) 마이크로 홀 배열 세리아 기능층을 포함하는 고내구 고분자 전해질막 연료전지

기능성 재료는 기존의 재료가 가지고 있는 본래의 물성치를 표면 처리나 미세 구조 제작 등을 통해 개선한 것으로 이를 구현하기 위해 다양한 공학적 기술이 사용된다. 두 물질의 화학적, 물리적 혼합으로 복합 기능성을 부여하거나 마이크로/나노구조를 형성하여 표면의 특성을 변화시키는 연구는 그간 많이 진행되어 왔고 현재는 실제 응용 분야에 적용하기 위한 노력이 이어지고 있다. 표면에너지와 점착 특성을 조절하여 제작할 수 있는 방오기술, 발수기술, 방빙기술 등이 대표적으로 개발되었고 광학적 투과도 등을 조절하기 위한 미세구조나 약물전달 효율을 향상시키기 위한 복합재료 등에 관한 연구 결과도 발표되고 있다. 지금까지의 연구가 특이한 성질의 재료를 개발하고 그 적용 가능성을 제언하는 형태로 이루어졌다면 최근에는 특정 분야에서 필요한 기능성 재료를 Top-down 형태로 개발하는 방식으로 접근법이 바뀌고 있다.

본 특집호는 정밀공학적 관점에서 재료에 특정 기능을 부여하는 기술에 관한 논문을 수록하고 있다. 이 논문들은 실제 응용 분야에 적용하기 위한 미세구조의 형성과 재료의 혼합 및 표면 특성 활용 등을 개발한 구체적인 사례를 포함하고 있다. 기능성 재료의 개발 뿐만 아니라 실용화에 무게를 둔 연구 결과로서 해당 분야에 널리 적용될 수 있으리라 예상된다. 본 특집 논문이 미세 구조 제작과 관련한 생산 분야의 회원들 뿐만아니라 다양한 적용분야의 한국정밀공학회 회원께 최근 재료가공에 관한 트렌드를 소개하는 좋은 기회가 되길 바라며, 끝으로 좋은 논문을 준비해주신 저자 분께 감사드린다.

• Topical Issue • 가공된 기능성 재료 기술(Engineered Functional Materials)

잔류층 제거를 통한 자기력제어 기능성표면 제작

Fabrication of Magneto-responsive Functional Surface through Removal of Residual Layer

이성호^{1,#}
Sungho Lee^{1,#}

¹ 동아대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Dong-A University)
Corresponding Author / E-mail: sunghol@dau.ac.kr, TEL: +82-51-200-7644
ORCID: 0000-0003-4751-7093

KEYWORDS: Composite (복합재료), Magneto-responsive (자기반응), Iron particle (철가루), Residual layer (잔류층)

With the advancement of microstructure manufacturing technology, an array of functional surfaces based on micro/nano structures have been developed. Recently, there has been active research in the development of functional surfaces using composite materials that combine the properties of two different materials. One notable area of research is the creation of functional surfaces that utilize magnetic force to actuate microstructures. Typically, these surfaces are produced using a composite material that blends a flexible, easily deformable material with iron particles that respond to magnetic force. However, the inclusion of iron particles in the flexible material can increase its Young's modulus, making it more challenging to effectively actuate the microstructures. To address this issue, our paper presents a fabrication method that allows for the effective actuation of microstructures by removing the residual layer of the composite material. This method enables the arrangement of iron particles at the end of the microstructure, maximizing the bending of the microstructure when magnetic force is applied. Furthermore, we conducted experiments to actuate microstructures with varying ratios of iron particles, confirming the effectiveness of this fabrication method.

Manuscript received: March 31, 2024 / Revised: May 19, 2024 / Accepted: May 20, 2024

1. 서론

미세구조 제작기술의 발달로 다양한 형태의 마이크로/나노 구조 제작이 가능해졌고, 이를 바탕으로 하는 많은 기능성표면이 개발되었다. 기존의 미세구조 기반 기능성표면 개발에 관한 연구는 구조의 특성을 이용하여 하나의 특성을 보이는 기능성 재료 개발이 주로 진행되었다[1-4]. 이후 다양한 재료 및 미세구조 제작기술이 개발되면서, 기존에 개발된 구조에 재료적 특징을 더한 다기능성 기능성 표면에 관한 연구들이 활발히 진행되었다[5-7]. 최근에는 이종재료간 혼합을 통해 마이크로/나노 구조를 제작하거나 새로운 기능성소재를 제작하는 연구들이 활발히

진행되고 있는데, 대표적인 예로 자석가루 및 철가루를 이용하여 자기력 제어가 가능한 기능성표면을 개발하는 연구가 있다[8-13]. 일반적으로 부드럽고 유연한 특성을 가지는 유연소재에 자력에 반응할 수 있는 자석가루 혹은 철가루를 혼합한 형태의 복합재료를 사용하게 되는데, 기존 유연소재의 유연함을 통해 쉬운 변형을 나타냄과 동시에 자기력을 이용하여 샘플을 제어할 수 있는 특징이 있다. 자기력을 이용해 샘플제어를 용이하기 위해서는, 높은 비율의 철가루 함량이 필요하게 되는데, 이는 유연소재의 Young's Modulus를 높이는 현상을 발생시켜 자기력을 이용한 미세구조 제어를 어렵게 한다[14,15]. 본 연구에서는 대표적인 유연소재인 PDMS (Polydimethylsiloxane)와 철가루를

혼합한 복합재료를 이용하여 외부 자기력에 대해 큰 변형량을 나타낼 수 있는 샘플 제작방법을 제시한다. 복합재료를 이용한 미세구조 제작 시 잔류층을 제거하여 철가루를 미세구조의 끝단으로 배열하였으며,

자기력에 대해 높은 변형량을 나타냄을 역학적 관점에서 해석하였다. 이러한 실험을 바탕으로 낮은 철가루의 함량(10 wt%)에서도 미세구조 액츄에이팅이 잘 진행되는 것을 확인하였다. 본 제작방법은 자기력 제어 샘플 제작 시 유용하게 활용될 수 있을 것이라 기대된다.

2. 실험결과 및 고찰

본 연구에서는 약 2 MPa의 Young’s Modulus를 가지는 유연 소재인 PDMS (Polydimethylsiloxane)와 철가루(지름: 1 μm)를 섞은 복합재료를 사용하였다[16,17]. Fig. 1(a)에 나타난 것처럼 PDMS와 철가루를 5 : 1의 무게비율로 섞은 복합재료를 준비하였으며, 잘 혼합한 후 지름 10 μm, 높이 20 μm를 갖는 몰드에 복합재료를 부었다. 이후 탈기과정을 거쳐 경화를 진행하게 되는데, Fig. 2(b)는 두 가지 경화상태를 나타내고 있다. Fig. 1(b-i)의 경우, 탈기 후 상온에서 경화를 진행한 경우를 나타내고 있으며, 본 경우에는 소재의 유연성이 유지되고, 철가루가 고루 분포되어 있지만, 미세구조 내 철가루 함량이 적게 되어, 자력에 의한 액츄에이팅이 어렵게 된다. Fig. 1(b-ii)는 탈기 후 샘플의 아래쪽에 자석을 두어 복합재료 내 철가루의 이동을 유도하며 경화시킨 샘플을 나타내고 있다. 본 경우에는 자력에 의해 복합재료 내 철가루가 아래쪽으로 이동하면서 미세구조 내 철가루의 함량이 높은 샘플이 제작되게 된다. 하지만, Fig. 1(b-ii)에 나타내었듯, 연속된 자속선(Magnetic Flux)의 영향으로 미세구조 전체 및 미세구조 사이가 연결된 형태(빨간색 원)로 철가루가 수직 및 수평 형태로 배열되게 된다. 이처럼, 미세구조 전체에 철가루가 높게 배열된 형태는 미세구조의 Young’s Modulus 증가를 발생시키고, 따라서 자력을 가했을 시 미세구조의 액츄에이팅이 어렵게 된다.

이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 Fig. 1(c)에 나타난 제작방법을 이용하여 샘플을 제작하였다. Fig. 1(c-i)에 나타난 것처럼, Fig. 1(b-ii)처럼 자석을 이용하여 철가루의 이동을 유도한 후, 잔류층을 제거하였다. 참고문헌에 따르면, 잔류층을 제거한 후 자력을 가하면 Fig. 1(b-ii)에서 발생하였던 자속선에 의해 철가루가 연속으로 배열되는 현상을 방지할 수 있어 미세구조 내 철가루 함량을 높일 수 있다[12]. 이에 더해 본 논문에서는 샘플과 자석사이의 거리를 점차적으로 조절하여 철가루를 미세구조의 끝에 배열하고자 하였다(Fig. 1(c-ii)). 자속선은 N극에서 S극으로 향하는데, 자석에서 멀어질수록 자속선은 수평이 되고, 자속선의 밀도는 적어지기 때문에 자석의 힘은 약해진다. 이러한 자속선의 특징을 샘플 제작에 활용하였다. 샘플과 자석사이의 거리 d를 0, 10, 20, 30, 40 mm로 점차적으로 늘리는

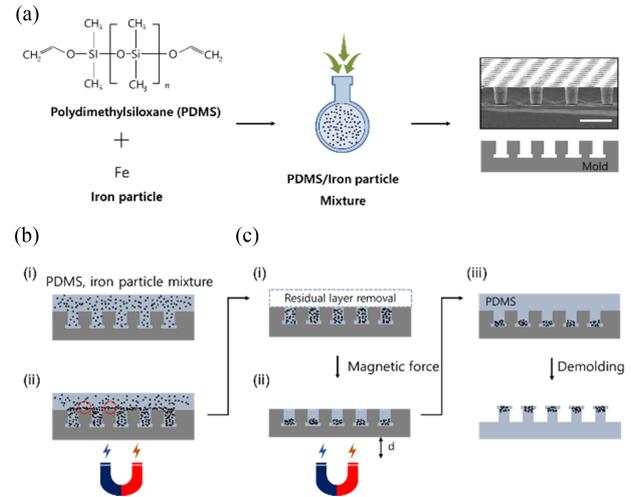


Fig. 1 Schematics for the fabrication method (a) preparing the composite with PDMS/Iron particles, Scale bar is 30 μm (b) fabrication of magneto-responsive sample (i) without magnetic force (ii) with magnetic force, and (c) fabrication of magneto-responsive sample with removal of residual layer

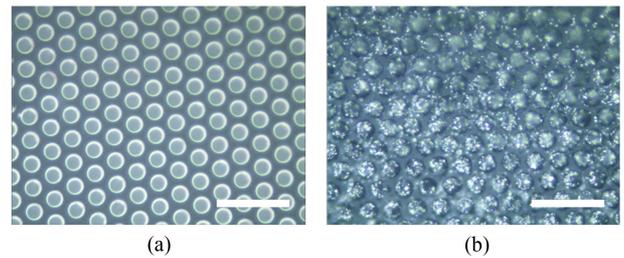


Fig. 2 Microscopic images of (a) control and (b) magneto-responsive sample by Fig. 1(b-ii) fabrication method. Scale bar is 50 μm

방법으로 샘플을 제작하였다. d가 가까운 경우에는 자석의 힘이 강해 철가루가 미세구조의 끝으로 향하지만, 배열은 수직하게 된다.

d를 점차적으로 늘리면, 자석가루를 미세구조의 끝으로 유도하면서, 배열은 수평 방향으로 유도하여, 결과적으로 자석가루가 미세구조의 표면에 뭉쳐진 형태로 제작되게 된다(Fig. 1(c-iii)). 본 연구에서는 이러한 제작 방법을 이용하여, 자력을 이용한 효과적인 미세구조 액츄에이팅을 유도하고자 하였다.

Figs. 2(a)는 1에서 사용한 몰드에서 일반 PDMS로 복제한 샘플의 현미경 이미지를 나타내고, Fig. 2(b)는 PDMS/철가루 복합재를 Fig. 1(b-ii)에서 나타난 방식으로 복제한 현미경 이미지를 나타내고 있다. Fig. 2(b)의 현미경 이미지를 Fig. 2(a) 현미경 이미지와 비교해보면, 미세구조에 철가루가 배열되어 있어, 철가루로 인해 반짝이는 형태의 이미지를 볼 수 있다. 하지만, 본 샘플의 경우 미세구조 내 철가루가 잘 배열되었지만, 높은 Young’s Modulus로 인해 자력에 의한 액츄에이팅이 거의 발생하지 않음을 확인하였다.

현미경을 이용하여 Fig. 1(c)에서 제시하였던 철가루의 배열

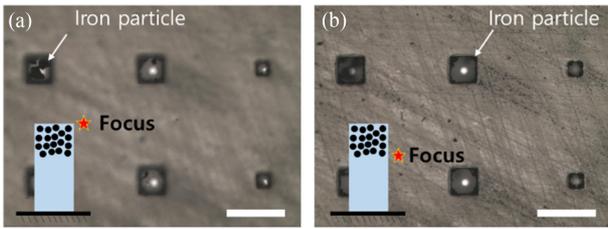


Fig. 3 Microscopic images with focus of (a) end of microstructures and (b) middle of microstructures. Scale bars are 500 μm

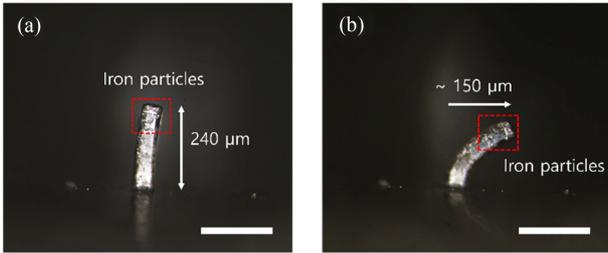


Fig. 4 Microscopic images of side of microstructure. Scale bars are 200 μm

형태 및 자력에 대한 반응을 보다 자세히 관찰하기 위해, Fig. 1에서 제시한 구조보다 치수가 큰 사각기둥 형태의 구조를 이용하여 실험을 진행하였다. Fig. 3은 본 연구에서 제시한 제작방법을 통해 제작된 사각기둥의 표면의 현미경 이미지이다. Figs. 3(a)와 3(b)는 각각 기둥의 표면, 중간 부분에 초점을 맞춘 현미경 이미지로, Fig. 3에 나타난 것처럼, 철가루가 미세구조의 표면에 잘 위치한 것을 알 수 있다.

Fig. 4는 사각기둥의 단면 현미경 이미지를 나타낸다. Fig. 4(a)의 미세구조 끝 부분에 철가루가 집중적으로 배열된 것을 알 수 있으며, Fig. 4(b)에서 나타난 것처럼 자력을 가했을 때, 본 철가루의 배열로 인해 큰 휨을 나타냄을 알 수 있다.

이러한 큰 휨을 나타내는 이유는 Fig. 5에서 나타난 것처럼 자력이 가해졌을 때, 철가루의 배열과 벤딩모멘트를 이용하여 설명이 가능하다.

먼저 철가루의 배열에 따른 영향을 알아보면, 참고문헌에 따르면, Fig. 5(a)에서는 철가루가 미세구조 전체에 배열되어 미세구조의 Elastic Modulus가 증가하지만, Fig. 5(b)에서는 미세구조의 아랫부분은 철가루의 함량이 낮아 Elastic Modulus의 증가는 미미한 것을 알 수 있다[14,15].

큰 휨을 나타내는 또 다른 이유는 벤딩모멘트를 이용하여 설명할 수 있다. 미세구조 내 철가루의 질량이 동일하다고 가정하고, 자력을 하나의 합력으로 나타내었을 때, 힘의 작용점은 Fig. 5와 같이 표현될 수 있다. 철가루가 미세구조 전체에 배열된 경우 (Fig. 5(a))는 미세구조의 중간부분에서 힘이 가해지고, 철가루가 미세구조 끝부분에 배열된 경우 (Fig. 5(b))는 미세구조의 끝부분에서 힘이 가해지게 된다. 이때, 미세구조를 하나의 외팔보로 가정한다면, 벤딩모멘트(M)에 의한 휨은 식(1)으로 나타낼 수 있는데

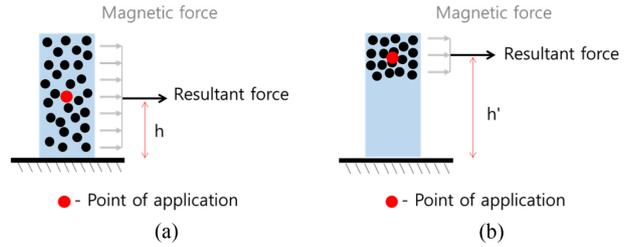


Fig. 5 Schematic for mechanism of bending of microstructures

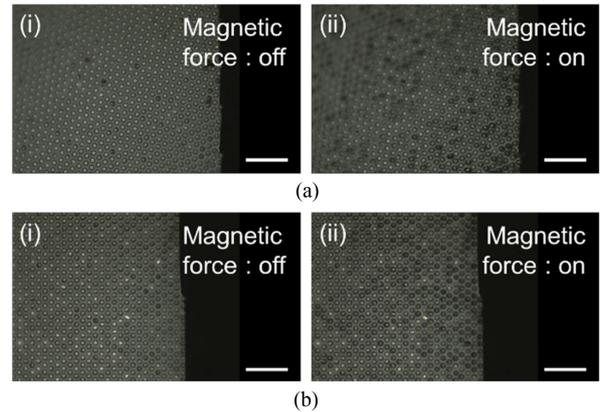


Fig. 6 Microscopic images depicting microstructures being actuated by a magnet. (a) magneto-responsive sample with a ratio of 10 wt% iron particles and (b) magneto-responsive sample with a ratio of 20 wt% iron particles. Scale bars are 100 μm

$$\delta = \frac{ML^2}{2EI} \quad (1)$$

여기서 δ 는 미세구조 끝단의 처짐, L 은 미세구조의 길이, E 는 Young's Modulus, I 는 2차 단면모멘트이다. 위 식에서 벤딩모멘트를 제외한 모든 변수는 같기 때문에 미세구조 끝단에서의 처짐 δ 는 벤딩모멘트에 비례하게 된다[18].

Fig. 5에서 나타내었듯, 표면으로부터 힘이 작용하는 지점까지의 높이를 h 라 하였을 때, Figs. 5(a)의 h 보다 5(b)의 h' 이 더 크기 때문에 Fig. 5(b)의 경우 더 큰 벤딩모멘트를 가짐을 알 수 있고, 따라서 미세구조는 더 큰 휨을 나타낼 수 있다.

위 실험을 통해 본 제작 방법을 자세히 알아보았다. Fig. 6에서는 Fig. 1에서 제시하였던 마이크로 구조 및 Fig. 1(c)의 방법으로 제작한 샘플을 제작하여 자력에 의한 액츄에이팅 실험을 진행하였다. PDMS와 철가루의 무게 비율을 10:1 (Fig. 6(a)), 5:1 (Fig. 6(b))로 샘플을 제작하였다. Fig. 6(a)의 경우, 소재의 유연함은 유지되지만 철가루 무게 비율이 낮아, Fig. 1(b-i)의 제작 방법으로 샘플을 제작하게 되면 미세구조 액츄에이팅에 어려움이 있지만, Fig. 1(c)의 방법으로 제작한 샘플은 미세구조 액츄에이팅이 잘 이루어짐을 확인하였다(Fig. 6(a)). 또한 Fig. 6(a)에 나타난 것처럼, PDMS와 철가루의 무게비율이 10:1인 경우에도 액츄에이팅이 잘 이루어짐을 확인하였다. 이는 Fig. 1(b-ii)의 방법으로 제작하였을 때는, 높은 Young's Modulus로 인해 미세구조

액츄에이팅이 잘되지 않았지만, 본 경우에는 대부분의 미세구조의 액츄에이팅이 가능함을 확인하였다. 이처럼 Fig. 6에서 진행한 미세구조 액츄에이팅 실험을 통해, 본 연구에서 제안한 제작 방법이 소재의 유연함을 유지하면서 효과적인 힘을 발생시킴을 확인하였다.

3. 결론

본 연구에서는 마이크로 구조를 기반으로 하는 PDMS/철가루 복합재를 이용한 자력 제어 기능성 표면 제작 시, 잔류층을 제거하는 방식으로 샘플을 제작하였다. 본 방식을 활용하면, 미세구조 내 철가루를 효과적으로 배열할 수 있으며, 철가루를 미세구조의 끝에 형성시킬 수 있어, 자력에 의한 미세구조의 힘을 최대화할 수 있다. 단면 관찰 및 이론적 해석을 통해 미세구조의 힘을 분석하였고, 무게비율별 테스트를 통해 본 제작 방법의 효과를 검증하였다.

4. 실험 방법

4.1 샘플 제작방법

유연 재료로 사용된 PDMS는 엘라스토머 베이스와 경화제 (Sylgard 184 kit, Dow Corning Corp)를 10 : 1 무게 비율로 섞은 후, 철가루(지름: 1 μm)를 PDMS와 40%의 무게 비율로 혼합하였다. 적절한 양의 PDMS/철가루 복합재를 마이크로 구조를 갖는 마스터 몰드에 붓고 탈기공정을 진행하였다. 탈기공정 시 네오디뮴 자석을 샘플의 아래에 위치시켰고, 이후 철가루가 함유된 잔류층을 제거한 후 철가루가 함유되지 않은 PDMS를 추가로 부여하였다. 자석과 몰드의 거리를 점차 늘리는 방식으로 철가루를 배열하였으며, 상온에서 24시간 경화 후 70°C 오븐에서 1시간 추가 경화 후 샘플을 제작하였다.

4.2 측정방법

미세구조의 표면을 측정하기 위해 광학현미경(LV150L, Nikon)과 주사전자현미경(SEM, S-4800, Hitachi)을 이용하였다. 자석에 대한 미세구조의 반응 특성을 알아보기 위해, 네오디뮴 자석과 광학현미경을 통하여 미세구조의 반응성을 관찰하였다. SEM 측정 시 작동전압 범위(10-25 kV)에서 Electric Charging을 방지하기 위하여 샘플 표면에 얇은 Pt층(~5 nm)을 형성하였다.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (No. RS-2023-00249545).

REFERENCES

1. Lee, S. H., Lee, J. H., Park, C. W., Lee, C. Y., Kim, K., Tahk, D., Kwak, M. K., (2014), Continuous fabrication of bio-inspired water collecting surface via roll-type photolithography, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 1, 119-124.
2. Kwak, M. K., Jeong, H.-E., Kim, T.-i., Yoon, H., Suh, K. Y., (2010), Bio-inspired slanted polymer nanohairs for anisotropic wetting and directional dry adhesion, *Soft Matter*, 6(9), 1849-1857.
3. Murphy, M. P., Aksak, B., Sitti, M., (2009), Gecko-inspired directional and controllable adhesion, *Small*, 5(2), 170-175.
4. Jeong, H. E., Kwak, R., Khademhosseini, A., Suh, K. Y., (2009), UV-assisted capillary force lithography for engineering biomimetic multiscale hierarchical structures: from lotus leaf to gecko foot hairs, *Nanoscale*, 1(3), 331-338.
5. Kyeong, D., Kim, M., Kwak, M., (2023), Thermally triggered multilevel diffractive optical elements tailored by shape-memory polymers for temperature history sensors, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 15(7), 9813-9819.
6. Yi, H., Lee, S. H., Seong, M., Kwak, M. K., Jeong, H. E., (2018), Bioinspired reversible hydrogel adhesives for wet and underwater surfaces, *Journal of Materials Chemistry B*, 6(48), 8064-8070.
7. Lee, S. H., Song, H. W., Park, H. J., Kwak, M. K., (2022), Surface adaptable and adhesion controllable dry adhesive with shape memory polymer, *Macromolecular Rapid Communications*, 43(8), 2200012.
8. Joyee, E. B., Pan, Y., (2019), A fully three-dimensional printed inchworm-inspired soft robot with magnetic actuation, *Soft Robotics*, 6(3), 333-345.
9. Kim, Y., Zhao, X., (2022), Magnetic soft materials and robots, *Chemical Reviews*, 122(5), 5317-5364.
10. Zhu, Y., Antao, D. S., Xiao, R., Wang, E. N., (2014), Real-time manipulation with magnetically tunable structures, *Advanced Materials*, 37(26), 6442-6446.
11. Drotlef, D.-M., Blümmler, P., Del Campo, A., (2014), Magnetically actuated patterns for bioinspired reversible adhesion (dry and wet), *Advanced Materials*, 26(5), 775-779.
12. Lee, S. H., Kang, B. S., Kwak, M. K., (2022), Magneto-responsive actuating surfaces with controlled wettability and optical transmittance, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 14(12), 14721-14728.
13. Zhao, J., Lu, T., Zhang, Y., Zhang, C., Pan, C., Tan, Y., Zhu, J., Li, B., Zhang, L., Shi, M., Li, X., (2022), Magnetically actuated adhesives with switchable adhesion, *Advanced Functional Materials*, 33(52), 2305484.
14. Al-Azawi, A., Hörenz, C., Tupasela, T., Ikkala, O., Jokinen, V., Franssila, S., Ras, R. H. A., (2020), Slippery and magnetically responsive micropillared surfaces for manipulation of droplets and beads, *AIP Advances*, 10(8).

15. Drotlef, D.-M., Blümner, P., Papadopoulos, P., Del Campo, A., (2014), Magnetically actuated micropatterns for switchable wettability, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 6(11), 8702-8707.
16. Xia, Y., Whitesides, G. M., (1998), Soft lithography, *Annual Review of Materials Science*, 28(1), 153-184.
17. Lee, S. H., Song, H. W., Kang, B. S., Kwak, M. K., (2019), Remora-inspired reversible adhesive for underwater applications, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 11(50), 47571-47576.
18. Gere, J. M., Timoshenko, S. P., (2001), *Mechanics of materials*, Brooks/Cole Publishing Company.



Sungho Lee

Assistant Professor in the Department of Mechanical Engineering, Dong-A University. His research interest is fabrication of functional surfaces based on the micro/nano structures.

E-mail: sunghol@dau.ac.kr

• Topical Issue • 가공된 기능성 재료 기술(Engineered Functional Materials)

소독제를 탑재한 키토산 마이크로 비드 정밀 제조공정과 살 바이러스 효능평가

Evaluation of the Manufacturing and Viral Killing Efficacy of Chitosan Microbeads Loaded with Disinfectants

강봉수¹, 최성학¹, 광문규^{2,#}, 정호섭^{3,4,#}
Bong Su Kang¹, Sung Hak Choi¹, Moon Kyu Kwak^{2,#}, and Ho-Sup Jung^{3,4,#}

¹ 서울대학교 신소재공동연구소 (Research Institute of Advanced Materials, College of Engineering, Seoul National University)

² 경북대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Kyungpook National University)

³ 서울대학교 식품바이오통합연구소 (Center for Food and Bioconvergence, Department of Food Science and Biotechnology, Seoul National University)

⁴ 엔바이오셀 (Nbiocelle, Inc.)

Corresponding Authors / E-mails: mkkwak@knu.ac.kr, TEL: +82-53-950-5573, ORCID: 0000-0002-8902-7685
jhs@snu.ac.kr, TEL: +82-2-884-3009, ORCID: 0000-0001-5591-2256

KEYWORDS: Disinfectant (소독제), Viral killing efficacy (살 바이러스 효능), Chitosan (키토산), Microbead (마이크로 비드), Solvent assisted extraction process (용매 추출 공정)

This study examines the efficiency of chitosan microbeads in manufacturing and their effectiveness as a disinfectant. The microbeads are developed using a solvent-assisted extraction process. The manufacturing process involves crosslinking chitosan through an emulsion-based method, with the help of a crosslinker. This leads to an increase in particle size while maintaining homogeneity and dispersion. The solvent-assisted method, which utilizes acetone, effectively extracts the crosslinked beads into the aqueous phase. This extraction process ensures the structural stability of the beads, with an average particle size of $40\pm 3.94\ \mu\text{m}$. By incorporating the disinfectant agent into the chitosan beads, antiviral effects against the Porcine Reproductive and Respiratory Syndrome Virus (PRRSV) were observed. These effects were found to be effective at dilutions estimated to be between 1 : 1 and 1 : 100. The findings of this study demonstrate the inherent antiviral capabilities of chitosan beads and the enhanced impact when combined with the disinfectant. This suggests a synergistic approach to managing viral infections in livestock environments.

Manuscript received: April 3, 2024 // Accepted: April 22, 2024

1. 서론

전 세계적으로 기후 위기로 인한 농경지의 감소로 식량안보의 중요성이 크게 대두되고 있으며 그중에서도 축산업은 지속 가능한 식량 공급원으로서 중요한 역할을 하고 있다. 우리나라도 닭, 돼지와 달리 소고기의 경우 식량자급률이 40% 미만으로 식량안보 차원에서 첨단 축산업 육성이 시급함에 따라 축사 내부의 위생 상태 악화로 발생하는 가축 질병의 관리는 매우 중요한

국가적 과제이다. 한번 전염성 가축 질병이 발생하면, 확산을 막기 위해 가축들의 살 처분 및 이동제한으로 인해, 육류와 계란 등 공급 부족으로 인한 가격 폭등과 급격한 소비위축으로 인해 상당한 경제적 손실이 발생하기도 한다.

대표적인 전염성 가축질병으로 돼지 생식기 호흡기 증후군 바이러스(Porcine Reproductive and Respiratory Syndrome Virus, PRRSV), 조류 인플루엔자(Avian Influenza, AI), 구제역(Foot-and-Mouth Disease, FMD), 그리고 살모넬라(Salmonella)와 같은

다양한 바이러스 및 세균성 전염병은 축산업에 심각한 경제적 손실을 초래하며, 이를 방지하기 위한 다양한 방법 중 효과적인 소독제의 개발이 지속적으로 요구되고 있다[1,2].

현재 축사에 기본적으로 사용되는 소독제는 대부분 액상 형태로 분무기를 이용 분사를 통해 축사 내부를 소독하거나, 이동하는 차량 바퀴가 잠기는 액상 방식으로 소독을 하고 있다. 이러한 방법은 단기적인 효과는 뛰어나지만 지속적인 효과를 얻기 위해서는 1주일에 1번 이상은 방역 활동이 필요하기 때문에 과도한 소독제 사용으로 인한 수질 및 토양 환경오염, 근로자의 안전성 문제와 경제적인 부담도 크게 발생한다[3,4]. 따라서 소독 효능을 1회성이 아닌 장기적으로 지속할 수 있는 약물 방출 시간을 조절할 수 있는 다양한 전달체 제조 방법의 연구가 활발히 이루어지고 있다[5].

이 중에, 키토산 생분해성 폴리머를 이용한 필름이나 입자들은 환경 친화성과 함께 서서히 분해되는 서방형 성질과 함께 항바이러스 및 항균 효능이 보고됨에 따라 소독제로서 활용가능성을 주목받고 있다[6]. 키토산, 알지네이트, 전분, 셀룰로오스 같은 천연물 유래 생분해성 고분자 소재들은 친환경 소재로 서서히 분해되는 특성으로 인해 많은 산업분야에 활용되고 있으며, 특히 키토산은 양이온성 물질로 미생물 세포표면의 음이온과 강력한 반응을 하여 세포내 물질을 파괴하는 항균, 살균 효능으로 주목을 받으면서 다양한 산업 분야에서 널리 활용되고 있다[7].

본 연구는 키토산을 이용 마이크로 비드를 제조하고 이들 내부에 상용화된 소독제를 탑재하여, 소독성분이 마이크로 비드내에서 방출되면서 바이러스를 죽이는 효능을 기존 액상 소독제와 비교 평가를 하고자 한다. 특히, 소독제를 탑재하기 위한 키토산 마이크로비드를 균일한 크기로 대량 생산을 위한 공정을 개선하기 위해 W/O 에멀전 키토산 용액을 다양한 가교제를 이용 가교 결합을 유도하고, 가교제에 따라 입자의 크기와 분산성에 미치는 영향에 대해 조사하였다. 또한 제조된 입자를 빠르게 유기상으로부터 분리하기 위해 아세톤을 사용한 Solvent-assisted 추출 공정을 통해 구조적으로 안정된 키토산 마이크로 비드를 효과적으로 분리, 추출하는 방법을 제시하였다. 마지막으로 소독제 탑재 키토산 마이크로 비드가 친환경 소독제로써 사용 가능성을 평가하기 위해 이들의 살 바이러스 특성과 소독제 원액과의 비교를 통해 효능을 확인하였다. 본 결과는 향후 스마트 축사 개발에 있어서 전염성 질병 관리를 위한 친환경 지속형 소독제로 활용 가능할 것으로 기대된다.

2. 실험방법

2.1 키토산 에멀전 용액을 이용한 마이크로 비드 제조

마이크로 비드를 제조하기 전 단계로 키토산 에멀전 제조를 위하여 2% (w/w) 키토산 (1.250 kDa)을 1% 아세트산 수용액에 녹인 후 8시간 동안 교반 하였다. 그리고 미네랄 오일에 계면활성제인 5% (w/w) Span80을 첨가한 후 균일하게 혼합하였다. 제조한 키토산 용액과 미네랄 오일을 1:10 부피비율로 혼합한 다음

1h 동안 1,000 RPM 속도로 교반 하면서 균일한 W/O 에멀전 용액을 제조하였다. 다음은 가교제로 1% (w/v) GLU (Glutaraldehyde) 용액과 키토산 에멀전 용액을 동일한 부피로 혼합하고 30분간 교반반응을 통해 키토산 에멀전 용액의 가교결합을 유도 마이크로 비드를 제조하였다.

소독액을 탑재한 키토산 마이크로 비드는 키토산 에멀전 제조공정에서 소독원액 (SILLIS SHIELD DK, (주)엘브스케미칼) 용액과 D.W를 1:1 부피비율로 혼합한 용매에 키토산을 같은 농도로 녹여서 제조하였으며, 위와 동일한 공정조건으로 키토산 에멀전 용액을 제조하고, 가교결합을 통해 소독제 원료를 탑재한 키토산 마이크로 비드를 제조하였다.

2.2 키토산 마이크로 비드 추출 및 건조 공정

솔벤트를 이용한 비드의 추출 공정은 다음과 같이 진행되었다. 가교결합 반응을 시킨 키토산 W/O 에멀전 용액에 미네랄 오일과 동량의 30% 아세톤 용매를 첨가한 후 1h 동안 1,000 RPM에서 교반하여 첨가된 아세톤 용매가 수상과 유기상 양쪽에 균일하게 분산되도록 유도하였다. 충분한 교반을 거친 후 상온에 20-30분간 정치한 다음 상분리를 유도하고, 최종적으로 대부분의 키토산 마이크로 비드가 수상으로 이동한 다음 상층부의 유기상 용매를 제거하였다. 유기상 용매를 제거 후 남아있는 수상을 추가로 제거하고, 20% 에탄올을 이용 추출한 키토산 마이크로 비드를 3회 이상 세척한 다음 마이크로 비드를 상온에서 건조하였다. 소독액을 탑재한 키토산 마이크로 비드 역시 동일 공정으로 추출 및 건조하였다.

2.3 키토산 마이크로 비드 소독제 효능 시험

키토산 마이크로 비드의 효능 시험을 위해 PRRSV를 MARC-145 세포주를 활용 배양하였으며, 바이러스 배양 과정에서 활성이 높은 바이러스를 선별하였으며, 적정 증식 시점에서 채취한 다음 얼음물에 단기간 보관한 다음 효능평가를 위해 4°C에서 보관된 바이러스와 희석용액과 10분 간격으로 희석배율별 혼합한 후 30분 동안 반응을 진행시켰다. 그리고 중화반응 단계에서는 소독제의 효능을 중화하기 위해 혼합액을 37°C의 중화배지에 접촉하여 바이러스 함량을 측정하였다. 바이러스 감염력 상실 정도는 Microplate Titration과 Plaque Assay 를 이용하여 확인하였으며, 발육관을 이용한 시험에서는 5일간 37°C에서 배양하여 바이러스의 증식을 검사하였다. 바이러스 함유량은 Kaerber Method를 사용하여 계산하였으며, 소독제가 없는 키토산 마이크로 비드를 대조군으로 설정 실험을 진행 바이러스의 역가가 적정 수준인지 확인하였다[8,9]. 바이러스 감소율은 아래의 방법으로 계산하였다.

$$Reduction = \frac{(A-B)}{A} \times 100 (\%) \quad (1)$$

A : Number of Viable Virus before Treatment

B : Number of Viable Virus after Treatment

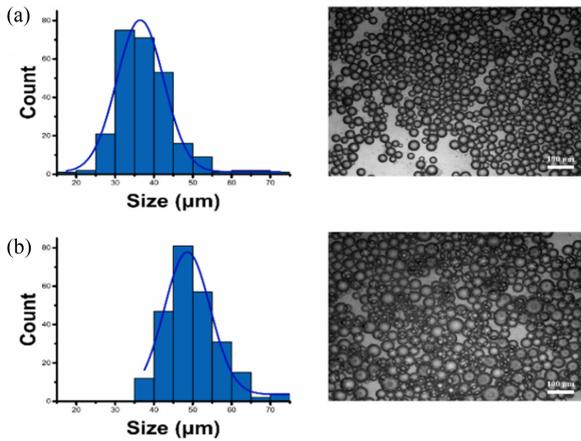


Fig. 1 (a) The size of the CS emulsion and (b) the change in size of the emulsion after the injection of the crosslinking agent (Scale bar = 100 μm)

3. 결과 및 고찰

3.1 키토산 마이크로 비드의 가교 결합

Solvent-assisted 공정을 이용한 키토산 마이크로 비드의 대량 추출 과정은 유기상(Oil Phase) 내 W/O 에멀전에서 키토산 액적의 가교 결합 유도 공정으로부터 시작된다. 기계적 교반을 통해 W/O 키토산 에멀전을 제조한 후, 유기상 내에서 가교제인 GLU의 첨가로 키토산 에멀전 크기변화와 균일하게 에멀전 용액으로부터 가교결합 반응이 일어나는지를 확인하였다. 제조된 키토산 에멀전 입자는 $38.08 \pm 7.48 \mu\text{m}$ 크기로, 균일한 입자분포를 보여주고 있다(Fig. 1 (a)). GLU 첨가 후 충분한 시간동안 기계적 교반을 한 다음 생성된 입자의 크기를 측정한 결과, $50.58 \pm 7.73 \mu\text{m}$ 로 입자의 크기가 증가하였고, Fig. 1(b)의 히스토그램을 통해 입자의 분포가 GLU첨가 전 후 수평적으로 이동하였음을 확인할 수 있다.

이를 통해 교반 과정을 거치면서 가교결합 용액이 일정한 비율로 키토산 에멀전 입자들과 효과적으로 결합했다고 유추할 수 있다.

3.2 Solvent-assisted 키토산 비드 추출 공정

기존 연구들은 가교결합 비드를 유기상에서 분리하기 위한 다양한 연구를 수행하였다. 대표적인 예로는 원심분리를 이용한 추출 방법이 있으며[10,11], 미세유체 소자를 활용 오일과 비드를 추출하는 방법들이 보고되고 있다[12]. 이들 방식의 단점은 대량으로 오일과 비드를 분리하기가 어려운 산업적으로 활용할 수 있는 양산성이 떨어진다는 것이다. 여기서는 이런 단점을 극복하고 추출 효율을 향상시키기 위하여 유기용매를 활용한 추출 공정을 수행하였다. 유기용매를 활용하면 수상과 유상의 계면에서 작용하는 표면 장력을 최소화시켜[13], 수상과 유기상 계면으로 이동하는 가교결합 된 키토산 마이크로 비드가 수상으로 이동을 유도하게 된다. 다양한 유기용매를 활용한 실험을

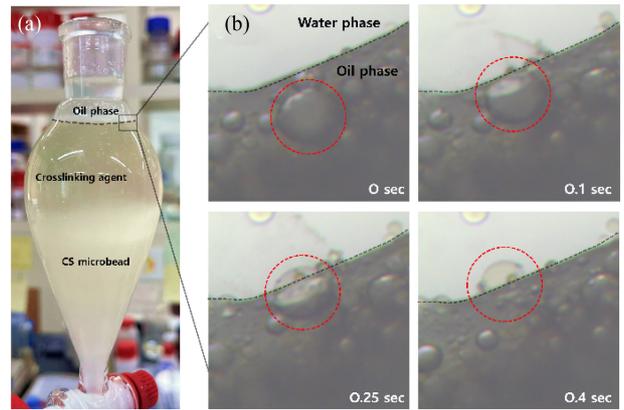


Fig. 2 Process of the Solvent-driven CS microbead extraction. (a) The image of fully extracted CS microbead and (b) The image of detailed process of CS microbead extraction (Scale bar = 100 μm, Black dotted line = Oil-water interface, Red dotted line = Crosslinked CS microbead)

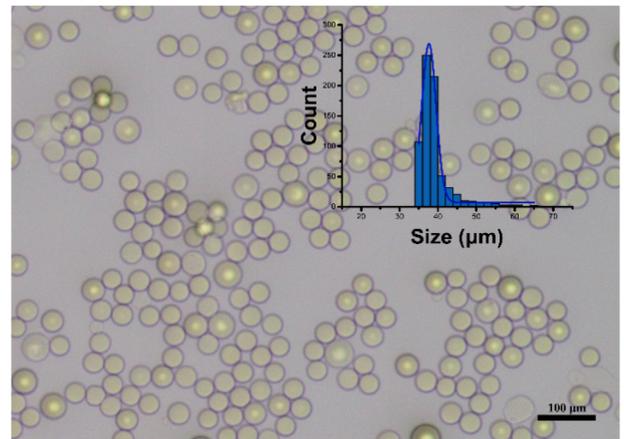


Fig. 3 Optical image of extracted chitosan microbeads and their size distribution (insert)

진행한 결과, 추출 효율이 가장 높은 유기용매로 아세톤을 사용하였으며, Fig. 2에서 확인할 수 있듯, 마이크로 비드가 하부에 있는 수상으로 대부분 침전되면서 성공적으로 추출이 가능함을 확인할 수 있었다.

좀 더 자세하게 계면에서 일어나는 현상을 살펴보면 Fig. 2(b)에서 시간에 따라 유기상에서 수상으로 마이크로 비드가 이동하는 모습을 명확히 관찰할 수 있었다. 현미경 이미지를 통해 비드가 유기상에서 수상으로 완전히 이동하기까지의 계면의 변화를 상세히 관찰하였다. 이미지들은 마이크로 비드가 유기상에서 수상으로 이동하는 과정을 시간순으로 보여주고 있으며, 표면 장력이 감소함에 따라 마이크로 비드가 유기상-수상 계면을 통과하는 모습을 단계적으로 보여준다. 이때 이동에 걸리는 시간은 1.0 s 미만으로 매우 빠른 속도로 계면을 통해 이동하는 것을 알 수 있었다.

Fig. 3은 추출 및 세척 후 키토산 마이크로 비드의 사이즈와 균일도를 분석한 결과를 보여준다. 추출 과정을 거친 후, 현미경으로

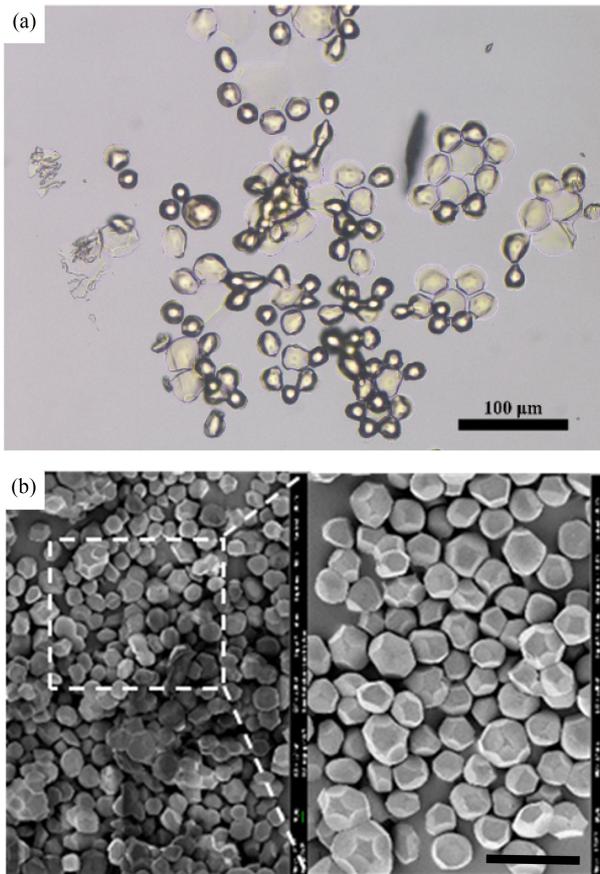


Fig. 4 The (a) optical image (Scale bar = 100 μm) and (b) SEM image (Scale bar = 40 μm) of dried CS microbead

관찰한 결과, 키토산 마이크로 비드는 키토산 에멀전과 마찬가지로 구형 형태를 유지하고 있는 것을 확인하였다. 이 결과는 추출 공정과정이 키토산 마이크로 비드의 구조적 안정성에 영향을 미치지 않음을 보여준다. 최종적으로 제조된 마이크로 비드의 평균 사이즈는 기존 키토산 에멀전과 비교해서 $40 \pm 3.94 \mu\text{m}$ 로 약간 줄어든 것을 확인하였다(Fig. 3). 이 결과는, 키토산 폴리머와 가교제가 결합하여 키토산 하이드로겔 매트릭스를 형성하면서 내부에 있는 물 분자가 방출되면서 겔이 수축 되었기 때문이다[14-16].

3.3 소독제 탑재 키토산 마이크로 비드 특성

액상 소독제가 장시간 동안 서서히 방출할 수 있는 효능을 가지는 분말형 소독제를 제조하기 위해, 주로 축사의 바이러스 감염예방에 사용되는 소독 원액 용액을 키토산 에멀전 제조공정에 함께 혼합한 다음, 가교 공정 및 아세톤을 이용한 Solvent-assisted 추출 공정을 통해 소독제 탑재 키토산 마이크로 비드를 제조하였고, 분말화는 상온에서 자연 건조를 실시하였다. 광학 및 SEM 이미지는 건조 과정에서 수분이 증발하면서 제조된 키토산 마이크로 비드가 수축되면서 크기가 줄어드는 현상을 확인하였으며, 이때 입자의 균일도는 SEM 이미지에서 보는 것 처럼 큰 영향을 미치지 않는 것을 확인하였다(Figs. 4(a) 및 4(b)).

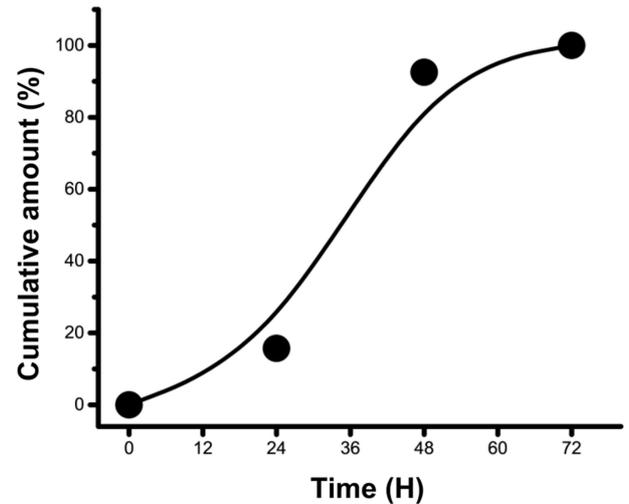


Fig. 5 Sustained release profile of citric acid from chitosan microbeads

한편, 소독제가 탑재된 키토산 마이크로 비드에서 소독제의 방출 특성을 관찰하기 위해 분말화된 소독제 탑재 마이크로 비드를 D.W 에 분산시킨 다음 시간에 따른 소독제 성분의 방출거동을 측정하였다. 방출 특성은 소독제 원액의 주요 성분인 구연산(Citric Acid)을 HPLC로 표준 검량 곡선을 구한 다음 D.W 수용액에서 시간에 따른 방출되는 구연산을 HPLC를 이용 정량적으로 측정하였다. Fig. 5는 소독제가 탑재 된 키토산 마이크로 비드로부터 구연산 성분이 초기 24시간 동안 서서히 방출되다가, 48시간까지 방출 속도가 빨라지면서 방출량이 거의 90% 정도가 되며, 다음 72시간까지는 서서히 방출 속도가 느려지면서 탑재된 소독제 성분이 거의 대부분 방출되는 것을 알 수 있었다. 이런 결과는 소독제 탑재 키토산 마이크로 비드 분말이 일정 수준의 서방성을 보여주었음을 시사한다.

3.4 소독제 탑재 키토산 마이크로 비드의 살 바이러스 효능 평가

소독제 탑재 키토산 마이크로 비드를 이용한 살 바이러스 능력을 평가하기 위해, 돼지 생식기 호흡기 증후군 바이러스 (PRRSV)를 대상으로 실험을 진행하였다. 본 연구에 사용한 바이러스는 북미 유전형(Genotype 1)에 속하며, GenBank에 등록 번호 JN315685로 등록된 바이러스를 사용하였다. 세포의 감염 여부를 확인하기 위해 배양에 사용된 세포주는 MARC-145를 사용하였다. 살 바이러스 효과실험에 적용할 바이러스의 농도는 TCID₅₀/mL 단위로 2.84×10^5 로 설정되었으며, 이는 배양된 세포의 50%가 바이러스에 의해 감염되는 농도를 나타낸다. 국립수의과학검역 검사본부가 제시하는 소독제 효능 평가 표준 방법에 따르면, 소독제의 효능을 인정받기 위해서는 처리 후 바이러스가 최소 1.00×10^4 단위 이상 감소해야 하며, 이는 소독제 처리 후 바이러스의 농도가 기준치인 2.84×10^5 이하로 확인될 때 소독제가 살 바이러스 효능이 있다는 것을 의미한다. 본 실험은 소독제를 탑재한 키토산 마이크로 비드 분말을 물에 수화 시킨 용액과 소독제 원액을 일정 농도로 희석한 용액을 이용하였다.

Table 1 Virus inhibition of the control group according to the dilution factor

Dilution factor	TCID50/mL	Inhibition rate(%)	Disinfectant efficacy
1 : 1	0	100	Effective
1 : 50	0	100	Effective
1 : 100	5.28×10	99.97	Ineffective

Table 2 Virus inhibition of the test group according to the dilution factor

Dilution factor	TCID50/mL	Inhibition rate(%)	Disinfectant efficacy
1 : 1	0	100	Effective
1 : 50	0	100	Effective
1 : 100	0	100	Effective
1 : 300	7.34×10	99.96	Ineffective

소독제 원액 및 희석 용액과 소독제 탑재 키토산 마이크로 비드 분말을 D.W에 20%(w/v)으로 수화 시킨 샘플 용액을 제조하였다. 바이러스 감소율 기준으로 소독제를 탑재한 키토산 마이크로 비드가 PRRSV에 효과를 보이기 위해서는 바이러스 감소율이 99.99% 즉 거의 대부분 소멸 되어야 한다.

소독제 원액 용액의 경우 희석배수 1 : 1, 1 : 50까지 바이러스가 사멸되는 효능을 보였지만, 1 : 100으로 희석한 경우 바이러스 사멸되기는 하지만, 99.99% 까지 사멸 효과는 없었다. 따라서 소독제 원액의 경우 살 바이러스 유효 농도는 1 : 50과 1 : 100 사이 희석배수에서 사용할 수 있다(Table 1).

반면 소독제를 탑재한 키토산 마이크로 비드의 경우 희석배수 1 : 100까지 100%의 살 바이러스 효과를 보여주고 있으며 소독제로서 기준치를 충족하는 것으로 나타났다(Table 2). 하지만, 희석배수 1 : 300에서는 바이러스 사멸 효과가 99.97%로 관찰되고 소독제로서 효능 기준치에는 도달하지 못함을 확인하였다. 이 결과는 소독제 탑재 키토산 마이크로 비드의 최적 유효농도는 희석배수 1 : 100과 1 : 300 사이임을 확인할 수 있었다. Fig. 6은 배양된 세포가 소독제 처리로 인해, 바이러스로부터 얼마나 보호 될 수 있는지를 보여주고 있다. Fig. 6(a)는 정상적인 MARC-145세포가 잘 성장함을 보여주고 있으면, Fig. 6(b)는 PRRSV를 처리하면 이 이미지에서 볼 수 있는 것처럼 세포들이 사멸되어 멍쳐있는 것을 알 수 있었다. 또한 소독제가 탑재된 키토산 마이크로 비드용액을 각각의 희석배수(1 : 100, 1 : 300)로 처리했을 때 1 : 300에서 세포가 사멸된 것은 소독제의 효과가 없다고 볼 수 있다. 하지만, 원액보다 살 바이러스 효능이 향상된 것은 소독제 원료뿐만 아니라 키토산 자체가 가지는 항균, 살바이러스 특성 때문에 이를 마이크로 비드로 제조함으로써 소독효능을 증가시킬 수 있었다고 보인다. 또한 소독제가 서서히 방출함으로써 장기간 소독제의 효과를 극대화 시키는 데 있어서 큰 장점이 있을 것으로 판단된다.

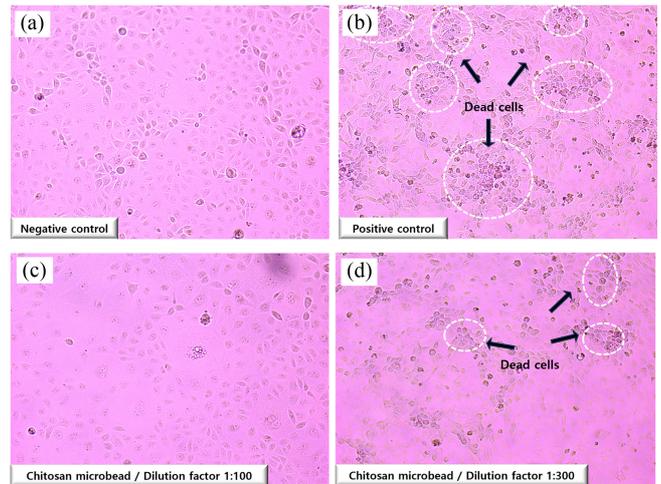


Fig. 6 Microscopic observations of MARC-145 cells under different experimental conditions: (a) Negative control group with untreated MARC-145 cells showing normal morphology, (b) Positive control group with MARC-145 cells exposed to PRRSV showing cytopathic effects, (c) MARC-145 cells treated with the chitosan microbead encapsulation with disinfectant at a 1 : 100 dilution demonstrating reduced viral cytopathic effects, and (d) MARC-145 cells treated with the chitosan microbead encapsulation with disinfectant at a 1 : 300 dilution showing intermediate levels of viral cytopathic effects

4. 결론

본 연구는 유기상과 수상에서 상 이동 현상을 이용한 Solvent-assisted 추출 공정이 효율적으로 소독제가 탑재된 키토산 마이크로 비드를 빠른 속도로 분리 가능함을 보여주고 있다.

키토산 하이드로겔을 제조하기 위해 첨가한 가교제는 에멀전 입자의 크기를 증가시켰으나, 마이크로 비드의 균일도는 크게 변함이 없었다. 또한, 최종 마이크로 비드를 대량으로 생산하기 위해 아세톤을 이용한 Solvent-assisted 추출 공정을 통해 마이크로 비드의 구조를 유지함과 동시에 빠른 시간 안에 소독제 탑재 마이크로 비드와 계면에 잔존하는 미네랄오일을 제거할 수 있었다. 이 방법으로 제조된 소독제 탑재 키토산 마이크로 비드의 살 바이러스 효과와 지속성을 확인하였다. 소독 효과는 원액 희석농도 50배 대비 100배로 희석하여도 충분한 살 바이러스 효능을 보여주며, 72시간까지 소독제가 방출하는 지속성도 확인하였다. 향후 추가적 연구를 통해 키토산 분자량에 따른 매트릭스의 구성밀도 조절, 가교제 농도에 따른 치밀도 조절, 마이크로 비드의 크기 등 조절을 통해 소독 효과를 보다 지속시킨 개선된 서방형 소독제 개발이 가능할 것으로 기대한다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 결과물은 농림축산식품부의 재원으로 농림식품기술기획평가원의 기술사업화지원사업의 지원을 받아 연구되었음(No. 821033-3).

REFERENCES

1. Yadav, M., Singhal, C., Babbar, S., Tanwar, S., Awasthi, S., Pandey, S., Dhyani, S., Joshi, P., Kumar, D., Chauhan, A., Gupta, S., Kumar, N., Dwivedi, R., Chaudhuri, S., (2023), Antibiotics and surface disinfectant induce VBNC and emergence of resistance in hospital-associated pathogens, *International Journal of Infectious Diseases* 130, S98.
2. Davies, R., Wales, A., (2019), Antimicrobial resistance on farms: a review including biosecurity and the potential role of disinfectants in resistance selection, *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 18(3), 753-774.
3. Wang, Y., Zhao, H., Huang, L., Chen, G., Wei, Z., Mo, Q., Li, Y., Wang, X., Huang, C., Chen, Q., (2023), Development of chlorine dioxide sustained-release device using carboxymethyl cellulose-polyvinyl alcohol- β -cyclodextrin ternary hydrogel and a new sustained-release kinetic model, *Cellulose*, 30(5), 3073-3082.
4. Wang, J., Ding, H., Tao, X., Chen, J., (2007), Storage and sustained release of volatile substances from a hollow silica matrix, *Nanotechnology*, 18(24), 245705.
5. Myung, N., Kang, H.-W., (2018), Construction of programmable drug delivery system with additive manufacturing, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering* 35(9), 835-840
6. Motshekga, S. C., Ray, S. S., Maity, A., (2018), Synthesis and characterization of alginate beads encapsulated zinc oxide nanoparticles for bacteria disinfection in water, *Journal of Colloid and Interface Science*, 512, 686-692.
7. Chandrasekaran, M., Kim, K. D., Chun, S. C., Antibacterial activity of chitosan nanoparticles: A review, *Processes*, 8(9), 1173.
8. Cafruny, W. A., Duman, R. G., Rowland, R. R., Nelson, E. A., Wong, G. H., (2008), Antibiotic-mediated inhibition of porcine reproductive and respiratory syndrome virus (PRRSV) infection: a novel quinolone function which potentiates the antiviral cytokine response in MARC-145 cells and pig macrophages, *Virology: Research and Treatment*, 1, 17-28.
9. Yim-im, W., Huang, H., Zheng, Y., Li, G., Rawal, G., Gauger, P., Krueger, K., Main, R., Zhang, J., (2022), Characterization of PRRSV in clinical samples and the corresponding cell culture isolates, *Transboundary and Emerging Diseases*, 69(5), e3045-e3059.
10. Zhang, C., Grossier, R., Candoni, N., Veessler, S., (2021), Preparation of alginate hydrogel microparticles by gelation introducing cross-linkers using droplet-based microfluidics: A review of methods, *Biomaterials Research*, 25(1), 41.
11. Zhang, H., Tumarkin, E., Sullan, R. M. A., Walker, G. C., Kumacheva, E., (2007), Exploring microfluidic routes to microgels of biological polymers, *Macromolecular Rapid Communications*, 28(5), 527-538.
12. Yang, C.-H., Huang, K.-S., Lin, P.-W., Lin, Y.-C., (2007), Using a cross-flow microfluidic chip and external crosslinking reaction for monodisperse TPP-chitosan microparticles, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 124(2), 510-516.
13. Nazemi, T., Sadeghi, R., (2014), Effect of polar organic solvents on the surface adsorption and micelle formation of surface active ionic liquid 1-dodecyl-3-methylimidazolium bromide in aqueous solutions and comparison with the traditional cationic surfactant dodecyltrimethylammonium bromide, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 462, 271-279.
14. Biernat, M., Woźniak, A., Chraniuk, M., Panasiuk, M., Tymowicz-Grzyb, P., Pagacz, J., Antosik, A., Ciołek, L., Gromadzka, B., Jaegermann, Z., (2023), Effect of selected crosslinking and stabilization methods on the properties of porous chitosan composites dedicated for medical applications, *Polymers*, 15(11), 2507.
15. Gong, J., Schuurmans, C. C. L., van Genderen, A. M., Cao, X., Li, W., Cheng, F., He, J. J., López, A., Huerta, V., Manríquez, J., Li, R., Li, H., Delavaux, C., Sebastian, S., Capendale, P. E., Wang, H., Xie, J., Yu, M., Masereeuw, R., Vermonden, T., Zhang, Y. S., (2020), Complexation-induced resolution enhancement of 3D-printed hydrogel constructs, *Nature Communications*, 11(1), 1267.
16. Neto, C. D. T., Giacometti, J. A., Job, A. E., Ferreira, F. C., Fonseca, J. L. C., Pereira, M. R., (2005), Thermal analysis of chitosan based networks, *Carbohydrate Polymers*, 62(2), 97-103.



Bong Su Kang

Senior Research in the Research Inst. of Advanced. Materials, Collage of Engineering, Seoul National University. His research interest is nano/microparticles include synthesis of nano/microparticle through microfluidics systems

E-mail: kkbbs748@snu.ac.kr



Sung Hak Choi

Senior Research in the Research Inst. of Advanced. Materials, Collage of Engineering, Seoul National University. His research focuses on nano/microparticles for biomedical applications, numerical analysis in microfluidics, and MEMS processes

E-mail: chsh1123@snu.ac.kr



Moon Kyu Kwak

Professor of Mechanical Engineering at the Kyungpook National University. His group's research includes Biomimetics, soft robotics, continuous micro/nano manufacturing technologies, and applications of micro/nano structures based functional surfaces.

E-mail: mkkwak@knu.ac.kr



Ho-Sup Jung

Research Professor of of Center for Food and Bioconvergence, Department of Food Science and Biotechnology at Seoul National University. His current research interests are in developing a functional supramolecular structures such as bicelle vesicles and polymeric particle for drug delivery system.

E-mail: jhs@snu.ac.kr

• Topical Issue • 가공된 기능성 재료 기술(Engineered Functional Materials)

향상된 파지특성을 위한 소프트 그리퍼 개발 동향: 다양한 구동 및 파지 메커니즘

Advancements in Soft Grippers for Versatile Grasping: Exploring Diverse Actuation and Grasping Mechanisms

송현석^{1,*}, 강동관^{1,*}, 박성진¹, 이희진¹, 정훈의^{1,#}

Hyeonseok Song^{1,*}, Dong Kwan Kang^{1,*}, Seongjin Park¹, Hee Jin Lee¹, and Hoon Eui Jeong^{1,#}

¹ UNIST 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology)

Corresponding Author / E-mail: hoonejeong@unist.ac.kr; TEL: +82-52-217-2339

ORCID: 0000-0002-1413-3774

*These authors contributed equally to this work.

KEYWORDS: Soft gripper (소프트 그리퍼), Actuation mechanism (구동 메커니즘), Grasping mechanism (파지 메커니즘)

In recent years, significant progress has been made in functional soft materials, alongside advances in nano/micro-manufacturing techniques, driving the evolution of soft grippers to the forefront of robotics innovation. Compared to their traditional rigid counterparts, soft grippers offer unparalleled adaptability, effortlessly conforming to objects of varying sizes and shapes. This comprehensive review explores the latest trends shaping the landscape of soft robotic grippers, providing insights into their diverse functionalities and applications. The exploration begins with an examination of the various actuation mechanisms utilized by soft grippers, including cable or tendon-driven, pneumatic, electroactive, and thermoactive systems. Additionally, the review delves into the intricacies of grasping and manipulating mechanisms, spanning from multi-finger configurations to innovative approaches, such as jamming, suction, and adhesion grasping. Notably, hybrid grippers, which integrate multiple actuation and grasping mechanisms, are of particular interest, thereby enhancing the range of functionalities offered by these grippers. Finally, the review briefly addresses current limitations and future directions in the field.

Manuscript received: April 4, 2024 / Revised: May 23, 2024 / Accepted: May 27, 2024

NOMENCLATURE

Ω	=	Motor Angle
L_0	=	Length of the Finger
L_i	=	Target Finger Length
R_m	=	Radius of the Cable is Wound or Unwound
R_c	=	Curvature Radius of the Finger
P	=	Pneumatic Pressure
A_c	=	Cross Section Area of Inside the Chamber
e	=	Eccentricity

E_f	=	Elastic Modulus of the Finger
I	=	Area Moment of Inertia
$\sigma_{Maxwell}$	=	Maxwell Pressure
ϵ_0	=	Absolute Permittivity
ϵ_r	=	Relative Permittivity
V	=	Applied Voltage
d_m	=	Membrane Thickness
F_h	=	Holding Force
R	=	Radius of the Grippped Object
d	=	Width of the Contact Area

μ_s	=	Static Coefficient of Friction
σ	=	Stress Applied by the End Effector
θ	=	Contact Angle between the End Effector and the Object
F_c	=	Suction Force of the Suction Cup
P_a	=	Atmospheric Pressure
P_{in}	=	Pressure Inside the Suction Cup
A_s	=	Contact Area of the Suction Cup
P_{normal}	=	Normal Adhesion Force
P_{shear}	=	Shear Adhesion Force
A	=	Contact Area
W_{12}	=	Work of Adhesion between the Contacting Surfaces
E	=	Elastic Modulus of the Microstructure Material
a	=	Radius of Microstructures with Protruding Tip
ν	=	Poisson's Ratio
μ	=	Friction Coefficient

1. 서론

최근 제한된 종류의 물체만 파지가 가능한 강체 기반의 로봇 그리퍼(Gripper)에서 벗어나, 다양한 크기와 형상의 물체를 파지할 수 있는 소프트 그리퍼에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다[1-4]. 소프트 그리퍼는 실리콘(Silicone)과 같은 유연 소재를 기반으로 제작이 되어 대상물의 다양한 형상에 맞춰 높은 변형성과 적응성을 발휘할 수 있으며, 이에 따라 복잡한 알고리즘의 사용 없이도 우수한 파지 성능을 발휘할 수 있다는 장점이 있다. 이러한 소프트 그리퍼는 Figs. 1(a-i) 및 1(a-ii)와 같이 케이블/공압 등의 기계시스템으로부터 직접적으로 동력을 얻어서 구동하는 방식과, Figs. 1(a-iii) 및 1(a-iv)와 같이 전기/열 감응형 소재의 특성으로부터 동력을 얻는 방식으로 구분될 수 있다(Fig. 1(a))[5-8]. 한편 물체를 파지하는 방식은 Fig. 1b-1과 같이 사람의 손처럼 여러 개의 손가락을 가지는 다중 손가락형 그리퍼[9,10]와, Figs. 1(b-ii), 1(b-iii) 및 1(b-iv)와 같이 손가락 말단부의 재밍(Jamming), 접착(Adhesion) 또는 흡착(Suction) 구조를 가지는 그리퍼 등으로도 구분이 가능하다. 하지만 많은 연구에도 불구하고 소프트 그리퍼는 기존 강체 기반 그리퍼에 비해 한계점 역시 지니고 있는데, 예를 들어 낮은 동력 전달 효율, 정밀 제어의 어려움, 느린 구동 속도 등을 들 수 있다. 따라서 실제 산업현장에 적용되기에는 추가적인 연구개발이 필요한 실정이다[11].

최근에는 이러한 한계점들을 극복하기 위하여 다양한 파지방식을 결합한 하이브리드 소프트 그리퍼가 개발되고 있다[12-14]. 하이브리드 소프트 그리퍼는 높은 동력 전달 효율과 동작 제어의 정밀성을 위해 부드러운 소재와 강성이 높은 소재가 혼합된 복합 구조를 가지거나, 여러 개의 파지 메커니즘을 결합하여 파지성능을 향상시키는 방식으로 개발되고 있다. 본 논문에서는

이처럼 최근 많은 관심을 끌고 있는 소프트 그리퍼 기술에 대해서 소개하고자 한다. 이를 위해 먼저 소프트 그리퍼의 다양한 구동 방식들을 소개하고(Chapter 2), 다음으로는 소프트 그리퍼의 다양한 파지 방식들을 소개하고자 한다(Chapter 3). 다음으로는 하이브리드 그리퍼에 대해 소개하고(Chapter 4), 마지막으로 소프트 그리퍼 기술 개발의 미래 방향과 전망에 대하여 간단히 기술하고자 한다(Chapter 5).

2. 소프트 그리퍼 구동 메커니즘

2.1 케이블 구동 메커니즘

케이블 구동 기반의 소프트 그리퍼는 모터(Motor), 케이블(Cable or Tendon), 풀리(Pulley) 등으로 이루어져 있다. 유연한 소재의 손가락 내부에 풀리가 배치되어 있으며, 각 풀리는 모터에 의해 제어되는 케이블로 연결되어 있다. 모터가 케이블을 당기거나, 풀어주는 움직임에 따라 케이블이 장력을 받게 되고, 부드러운 손가락에 이와 같은 장력이 전달되어 손가락에서 굽힘이 발생하게 된다(Fig. 2(a))[15,16]. 장력에 의한 손가락 굽힘은 케이블이 연결된 모터의 회전 각도에 영향을 받으며, 식(1)과 같이 표기된다[17].

$$\Omega = \frac{(L_0 - L_i)}{R} \quad (1)$$

해당 수식에서 Ω 은 모터의 회전 각도, R_m 은 감기거나 풀린 케이블 반지름, L_0 는 손가락의 초기 길이, L_i 는 손가락의 목표 길이, $L_0 - L_i$ 는 손가락의 굽힘 길이를 의미한다. 따라서 모터의 회전 각도가 커질수록 손가락의 굽힘 길이는 늘어난다. 케이블 구동 기반의 소프트 그리퍼는 사용하는 모터의 성능에 따라 그리퍼의 성능이 결정되며, 빠른 응답속도와 우수한 모션 정확도를 가지는 장점이 있다.

Changyong Cao 교수 연구진은 케이블 구동 액추에이터와 접촉 압력 및 굽힘 감지를 위한 마찰전기 나노발전기(Triboelectric Nanogenerator, TENG)센서를 결합한 소프트 그리퍼를 개발하였다[18]. DC 모터로 구동되는 액추에이터는 연속적인 삼각형 절단 패턴(Triangular Cut Pattern) 구조를 가지고 있으며, 이러한 절단 구조에 케이블이 내장되어 있다. 이러한 삼각형 절단 패턴 덕분에 액추에이터에서 굽힘 강성에 대한 차이가 발생하게 되고, 결과적으로 케이블의 장력을 이용하여 손쉽게 굽힘을 발생시킬 수 있다. 추가로, 해당 연구진은 TENG 센서를 이용하여 물체의 접촉력, 그리퍼의 굽힘 각도, 물체의 무게와 윤곽까지 모니터링할 수 있음을 실험을 통해 보여주었고 해당 그리퍼를 이용하여 최대 500 g의 물체를 파지할 수 있음을 확인하였다.

Cecilia Laschi 교수 연구진은 문어 다리의 움직임을 모사하여 최소 침습 수술을 위한 케이블 구동 소프트 그리퍼를 개발하였다[19]. 문어는 다리의 세로 방향 근육을 선택적으로 수축시킴으로써 비대칭적인 압축력을 통해 굽힘을 발생시킨다. 이러한

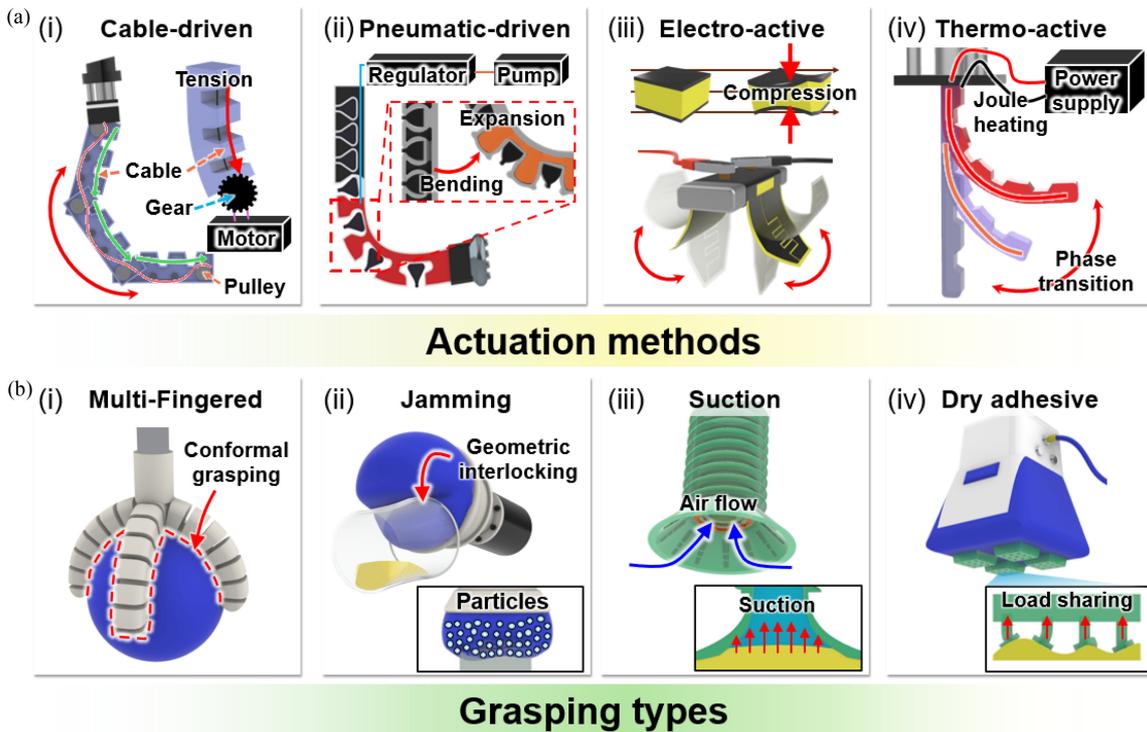


Fig. 1 Various types of actuation and grasping mechanisms in soft robotic grippers. (a) Actuation mechanisms: (i) cable-driven, (ii) pneumatic, (iii) electroactive polymer-based, and (iv) thermoactive polymer-based gripper and (b) Grasping mechanisms: (i) multi-fingered, (ii) jamming, (iii) suction, and (iv) dry adhesion

원리를 이용하여 해당 연구진은 연속적인 삼각형 절단 패턴을 가지는 손가락 내부에 케이블을 내장시킨 소프트 그리퍼를 제작하였다. 제작된 그리퍼는 문어의 다리 굽힘 원리와 같이 케이블을 당기는 방향으로 수축이 발생하여 손가락에 굽힘이 발생하고, 이러한 굽힘 동작을 이용하여 물체를 파지할 수 있다. 힘 측정 센서를 파지하고, 들어 올리는 실험을 수행한 결과 평균 파지력은 최대 1.02 N으로 측정되었다.

2.2. 공압 구동 메커니즘

대표적인 공압 구동 시스템은 DAQ (Data Acquisition System) 와 레귤레이터(Regulator), 진공펌프(Vacuum Pump), 호스(Hose) 등으로 이루어져 있다. 진공펌프와 이어진 레귤레이터가 DAQ로부터 신호를 받아들이고, 이러한 신호에 따라 공기의 세기와 방향을 정밀하게 제어할 수 있다. 호스는 공압 제어 시스템을 전체적으로 연결하며 공기가 지나가는 통로 역할을 한다. 제어된 공압은 소프트 그리퍼 내부의 챔버(Chamber)에 전달되어 팽창 또는 수축을 일으킨다. 공압 구동 방식의 그리퍼는 팽창층(Extensible Layer)과 비팽창층(Inextensible Layer)로 나뉘며, 공압이 가해졌을 때 팽창에 따른 길이 변화가 발생하며 굽힘이 발생하게 된다. 공압에 의해 그리퍼가 굽혀질 때 압력과 굽힘 반경(Radius of Curvature)의 관계는 다음과 같은 식(2)으로 표기 가능하다[20].

$$\frac{1}{R_c} = \frac{PA_c e}{EJ} \tag{2}$$

여기서 R_c 은 손가락의 굽힘 반경, P 는 공기의 압력, A_c 는 내부 챔버의 단면적, E 는 그리퍼 소재의 탄성 계수, J 는 관성 모멘트, e 는 이격 거리이다. 이에 따라 공압이 강하게 적용될수록 단면적의 크기가 증가하며, 손가락의 곡률이 증가하게 된다.

Kyujin Cho 교수 연구진은 다양한 형상의 물체에 대한 안정적인 파지 자세를 구현하기 위해 비팽창층의 강성을 조절할 수 있는 공압 구동 방식의 소프트 그리퍼를 개발하였다(Fig. 2(b))[21]. 일반적으로 공압 구동 그리퍼 손가락의 굽힘 각도는 손가락이 물체와 접촉할 때 발생하는 접촉 모멘트의 차이만큼 감소하게 된다. 이로 인하여 손가락이 물체의 형상을 잘 따라가지 못하고, 결과적으로 파지력이 감소하게 된다. 반면 강성이 높은 비팽창층을 사용할 경우, 강성이 높은 소재는 접촉 모멘트에 의한 영향을 적게 받기 때문에 손가락의 굽힘 각도를 최소화할 수 있다. 비팽창층의 강성이 높아질수록 파지력이 증가하여 더욱 무거운 물체의 파지가 가능하지만, 강성이 높아질수록 굽힘에 필요한 공압이 커지기 때문에 공압과 비팽창층의 강성은 트레이드오프(Trade-off) 관계에 있다. 해당 연구진은 비팽창층의 강성을 조절하기 위하여 다양한 소재와 특수한 패턴을 활용한 강성 변화 패턴층을 개발하였다. 추가로, 강성 변화 패턴층을 가지는 소프트 그리퍼의 파지 성능을 확인하기 위한 실험을 진행하였으며, 구형 물체와 별 모양 물체에 대한 그리퍼의 당기는 힘과 접촉력을 측정된 결과 구형 물체의

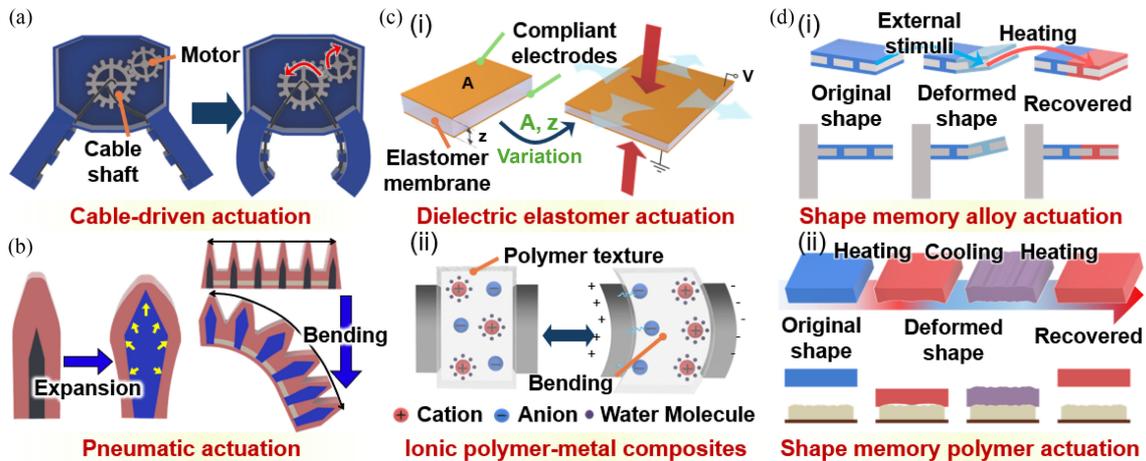


Fig. 2 Different actuation mechanisms in soft grippers: (a) Cable-driven actuation, (b) Pneumatic-driven actuation, (c) Electro-active actuation featuring dielectric elastomer actuators (DEA) and ionic polymer-metal composites (IPMC), and (d) Thermo-active actuation using shape memory alloys (SMA) and shape memory polymers (SMP)

경우 최대 당기는 힘이 3배, 별 모양 물체의 경우 1.3배 높아짐을 확인하여 성능을 입증하였다.

2.3. 전기활성 구동 메커니즘

전기활성 구동 방식은 전기 자극에 의해 가역적으로 부피가 변하는 탄성체(Elastomer)를 이용하는 방식으로, DEA (Dielectric Elastomer Actuators)와 IPMC (Ionic Polymer-metal Composites)를 활용하는 방식이 있다. DEA 방식은 2개의 전극 사이에 유전 탄성체(Dielectric Elastomer)가 결합된 구조로 이루어지며, 전극에 인가되는 전압이 없을 때는 전극과 유전 탄성체 소재 간의 탄성 차이에 의해 내부 응력과 굽힘 모멘트가 발생하여 구부러진 형상을 가진다. 유전 탄성체를 샌드위치처럼 덮고 있는 전극에 수 kV의 전압을 인가하면 전극 사이에 발생한 정전기 인력으로 인해 전극이 유전 탄성체에 압력을 가하여 내부 응력이 제거되면서 박막이 펼쳐진다. 이때 발생하는 정전기 인력은 맥스웰 압력이라 불리며 식(3)과 같이 표기된다[22].

$$\sigma_{Maxwell} = \epsilon_0 \epsilon_r \left(\frac{V}{d_m}\right)^2 \quad (3)$$

해당 식에서 ϵ_0 는 절대 유전율, ϵ_r 는 상대 유전율, V 는 전압, d_m 는 박막의 두께이다. 해당 식으로 인해 인가하는 전압이 높을수록, 박막의 두께가 얇을수록 맥스웰 압력이 커져 더 강한 파지력을 구현할 수 있다. IPMC 방식은 2개의 얇은 금속층 사이에 고분자 전해질이 결합된 박막으로 구성되어 있다. 전극에 전압이 인가되면 음극 성질을 띠는 전극으로 전해질의 양이온과 물분자가 이동하게 되면서 부피의 팽창으로 인해 굽힘이 발생한다. DEA 방식은 고전압이 필요하지만 강한 파지력을 구현할 수 있으며 IPMC 방식은 저전압으로 구동 가능하지만 파지력이 약하고 건조한 환경에서 적용하기 어려운 단점이 있어 대체적으로 DEA 방식을 사용한다. DEA 방식은 짧은 응답 시간과 에너지 효율이 높다는 장점이 있다.

Zhongbin Xu 교수 연구진은 3D 프린터로 제작된 유연 프레임에 DEA를 결합한 소프트 그리퍼를 제작하였다(Fig. 2(c)) [23]. 그리퍼 손가락의 DEA를 사전 스트레칭(Pre-stretched) 시킨 후 전극을 코팅하고, 3D 프린터로 제작된 유연 프레임과 결합하여 사전 스트레칭에 의한 수축 에너지를 통해 손가락의 굽힘을 발생시켰다. 제작된 DEA 구동 방식 그리퍼는 전압이 인가되지 않은 상태에서 사전 스트레칭 된 유전 탄성 박막과 3D 프린터 프레임 소재 간의 탄성 차이로 인해 수축하는 에너지 일부가 프레임에 굽힘 에너지로 전환되어 손가락은 굽힌 상태를 유지하며, 전압이 인가되면 맥스웰 압력에 의해 굽힌 손가락이 펼쳐지게 된다. 이러한 특성을 이용하여 손가락이 물체에 접촉할 때 전압을 인가하여 손가락을 펼치고 물체에 접촉할 때 전압 인가를 중지하여 발생한 손가락의 굽힘으로 물체를 파지하고 다시 전압을 인가하여 파지된 물체를 내려놓을 수 있다. 그리퍼 최적화를 위해 그리퍼 손가락 길이에 따른 굽힘 각도와 차단력(Blocked Force)을 측정하였고 길이가 90 mm일 때 128°의 굽힘 각도와 25 mN의 차단력이 측정되었으며 이를 이용해 2 g의 폴리폼 큐브(Polyfoam Cube)를 파지하고 내려놓을 수 있음을 확인하였다.

2.4. 열 구동 메커니즘

열에 의해 구동되는 그리퍼는 대표적으로 열에 반응하는 형상 기억 물질(Shape Memory Materials) 소재가 있다. 형상 기억 물질은 크게 형상 기억 합금(Shape Memory Alloy, SMA)과 형상 기억 폴리머(Shape Memory Polymer, SMP)로 나누어진다. 형상 기억 합금의 결정 구조는 열에 의해 마텐자이트(Martensite)나 오스테나이트(Austenite) 구조로 변화하게 되며, 구조의 변화에 따라 합금의 강성이 변하며 길이가 수축/인장 된다. 구체적으로, 형상 기억 합금은 온도가 낮을 때 마텐자이트라는 덜 정렬된 결정 구조를 가지며, 이 상태에서는 합금이 비교적 쉽게 변형될 수 있다. 합금에 열을 가하게 되면 마텐자이트 구조가 오스테나이트

구조로 바뀌면서 결정이 정렬되고, 변형된 상태에서 초기의 형태로 형상이 회복된다. 형상 기억 합금을 기반으로 한 그리퍼는 이러한 원리를 이용하여 합금의 수축/팽창을 통해 굽힘을 발생시켜 물체를 파지하고 전이 온도 이상으로 가열하여 초기 형상으로 회복한다. 형상 기억 고분자를 이용하는 방식은 전이 온도에 따른 고분자 네트워크의 강성 변화를 이용하여 파지하는 방식이다. 형상 기억 고분자는 유리 전이온도보다 높은 온도에서 강성이 낮아지고, 유리 전이온도보다 낮은 온도에서는 강성이 높아지는 성질을 가진다. 따라서 형상 기억 고분자를 활용하는 그리퍼는 이러한 소재의 특징을 활용하여 대상 물체의 표면에 따라 형태가 변화하며 물체를 파지할 수 있다.

Yeong-Jin Kim 교수 연구진은 SMA 스프링 액추에이터와 케이블을 활용한 소프트 그리퍼를 개발하였다(Fig. 2(d-i))[24]. 상온 상태에서는 SMA 스프링의 낮은 강성으로 인해 손가락이 축 늘어져 있지만, 열을 가하면 늘어진 스프링이 원래의 상태로 돌아가려는 성질 때문에 케이블에 장력이 발생하여 파지 동작을 제어할 수 있다. 손가락 내부의 스프링의 강성이 변화되면서 케이블에 장력이 발생함에 따라 그리퍼의 손가락을 제어한다. 추가로, SMA 스프링의 동작 속도를 개선하기 위하여 스프링 주변에 냉각 튜브를 결합하여 빠른 온도 전환 속도를 가능하게 하였고, 온도 센서의 피드백 제어가 가능한 시스템을 개발했다. 개발된 그리퍼는 최대 500 gf의 축력을 가지고 있으며 알과 같은 표면이 매끄러운 물체도 안정적으로 파지할 수 있음을 확인하였다.

Jizhou Song 교수 연구진은 다양한 크기, 형상, 질감의 물체를 파지하기 위하여 열에 의해 강성 변화가 일어나는 SMP 블록을 이용한 그리퍼를 개발했다(Fig. 2(d-ii))[25]. 상온에서 대상 물체에 SMP 블록을 밀착시킨 후, 열을 가하게 되면 SMP 블록은 전이 온도보다 높은 온도에서 강성이 낮아지게 된다. 이때 SMP에 추가적인 압력을 가하면 그리퍼가 물체의 표면을 밀접하게 따라갈 수 있다. 이후에 SMP 블록을 냉각시키면 물체의 표면을 밀접하게 따라간 상태에서 딱딱하게 변하며 물체를 들어 올릴 수 있다. SMP를 재가열하면 강성이 낮아지게 되면서, 원래의 형상을 회복하려는 성질 때문에 물체의 표면을 따라 변형된 SMP의 형상이 회복되면서 물체를 내려놓을 수 있다. 해당 연구진은 SMP 블록 그리퍼를 이용하여 다양한 크기와 형상을 가진 물체를 파지했으며, 미세 패터닝된 SMP 블록을 이용하여 마이크로 LED 칩을 특정 형상으로 배치할 수 있음을 실험을 통해 증명함으로써 그리퍼 뿐만 아니라 전사 인쇄(Transfer Printing) 애플리케이션으로 이용 가능성을 보여주었다.

3. 소프트 그리퍼의 파지 메커니즘

3.1. 다중 손가락 기반 파지 메커니즘

소프트 그리퍼가 사람의 손과 같은 정밀한 동작 제어와 안정적인 파지를 수행하기 위해서는 다중 손가락이 필요하다. 다중 손가락 소프트 그리퍼는 비연속 굽힘형(Non-continuum Type)과

연속 굽힘형(Continuum Type)으로 나누어지며, 굽힘 및 비틀림 동작을 이용하여 핀치 파지(Pinch Grasping)와 인벨로핑 파지(Enveloping Grasping) 동작을 수행할 수 있다[26].

비연속 굽힘형 손가락은 인대와 힘줄로 구성된 사람의 손의 굽힘 동작을 모사한 방식으로, 단단한 프레임과 부드러운 조인트로 구성되어 있다. 부드러운 조인트의 순응도(Compliance)를 활용하여 복잡한 형상을 가진 물체에 대한 높은 적응성을 가지고 있으며, 단단한 프레임을 활용하여 동력 전달 성능 또한 우수하다. 인간의 손가락과 가장 유사한 비연속 굽힘형 손가락의 경우, 손 끝으로 물체를 집어서 들어 올리는 핀치 파지와 손가락 전체로 물체를 감싸서 들어 올리는 인벨로핑 파지가 모두 가능하다. 비연속 굽힘형 파지는 연속 굽힘형 파지와 연속 비틀림형 파지에 비해 동작 안정성과 정확도가 높지만, 단단한 프레임으로 인해 상대적으로 유연성과 순응도가 낮은 특징을 가진다.

연속 굽힘형 손가락은 끈끈이귀개속(Drosera)과 같은 식물을 모사한 형태로, 부드러운 몸체를 활용한 연속적인 굽힘 동작을 구현할 수 있다. 이와 같은 형태를 가지는 손가락은 높은 자유도의 손가락 굽힘을 활용한 핀치 파지와 인벨로핑 파지가 모두 가능하다. 하지만 단단한 구조의 부재로 인해 동력 전달 효율이 떨어지고, 물체의 하중을 지탱하기 어렵다는 특징이 있다. 따라서 연속 굽힘형 손가락을 사용하여 물체를 안정적으로 파지하기 위해서는 높은 자유도를 바탕으로 한 인벨로핑 파지가 유리하다. 최근에는 높은 적응력을 가지는 부드러운 소재와 동력 전달이 가능한 단단한 소재를 모두 활용하여 물체의 하중을 지탱할 수 있는 연속 굽힘형 손가락에 대한 연구가 이루어지고 있다.

연속 비틀림형 손가락은 꼬끼리의 코나, 덩굴손 식물과 같이 비대칭 수축으로 인한 굽힘 및 비틀림 동작을 수행할 수 있다. 연속 비틀림형 손가락은 비연속 굽힘형 손가락과 연속 굽힘형 손가락에 비해 유연성과 순응성이 높고, 복잡한 형상을 가진 물체에 대한 적응성이 뛰어나 안정적인 파지가 가능하다. 하지만 비틀림 동작을 구현하기 위해서 복잡한 구조나 제어 알고리즘이 필요하다. 또한 물체의 형상을 전체적으로 휘어 감는 손가락의 움직임 특성상 핀치 파지가 불가능하며, 인벨로핑 파지만 가능하다. 하지만 비틀림에 의한 인벨로핑 가능한 물체에 대하여 매우 높은 안정성을 지니기 때문에, 최근에는 비대칭 구조를 통해 비틀림 동작을 구현하면서도 물체의 하중을 지탱할 수 있는 스마트 소재에 대한 연구가 진행되고 있다.

3.2. 재밍 기술을 활용한 파지방식

재밍 기술을 활용하는 소프트 그리퍼는 Fig. 3(a-i)과 같이 말단부에 장착된 작은 입자로 채워진 유연한 재밍백(Jamming Bag)을 사용하여 물체를 파지한다. 평상시에는 재밍백 내부의 작은 입자들이 자유롭게 움직일 수 있어서 유연하고, 대상 물체의 형태를 잘 따라갈 수 있다. 이러한 특성으로 물체를 감싼 뒤, 음압으로 내부의 공기를 빨아들이면 내부의 입자들이 서로 밀접하게 압축되며 재료의 강성이 높아진다. 결과적으로 말단 장치와 물체가 인터로킹(Interlocking) 되면서 물체를 단단하게

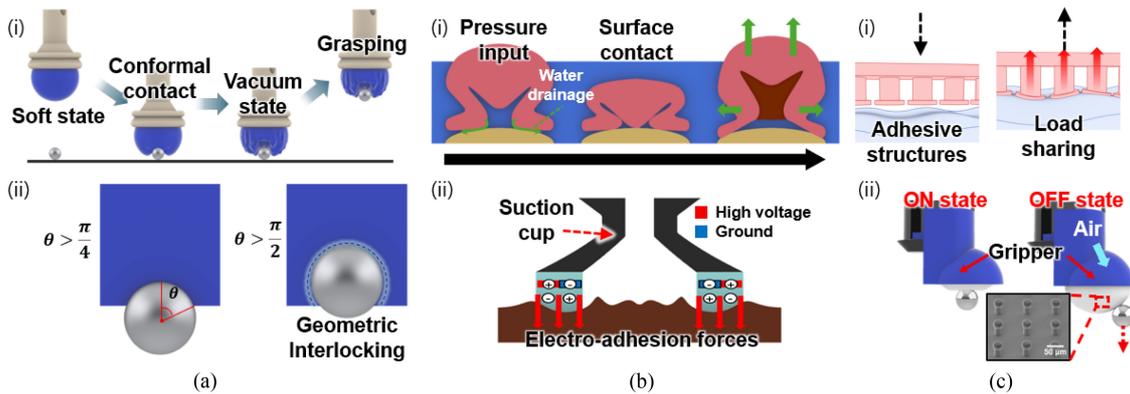


Fig. 3 Different grasping mechanisms in soft grippers: (a) Jamming type: (i) Schematic illustration of the jamming-type grasping mechanism, (ii) Influence of contact angle on geometric interlocking, (b) Suction type: (i) Schematic illustration of the suction-type grasping mechanism, (ii) Suction type gripper integrated with an electro-adhesion layer, and (c) Dry adhesive type: (i) Schematic illustration of the dry adhesive-type grasping process, (ii) Dry adhesive type gripper integrated with microscale adhesive structures

잡을 수 있다. 물체를 놓을 때에는 재밍백 내부로 다시 공기를 주입하여 입자들 사이의 압력을 줄여야 한다. 이로 인해 입자들이 다시 이동 가능한 상태로 돌아가면서 재밍백이 유연해지고, 물체를 내려놓을 수 있다. 이와 같은 과정을 ‘재밍 전이’라고 부르며, 재밍 기술을 활용한 파지방식은 재밍백 보다 작은 물체들을 빠르고, 단단하게 잡는 데에 유리하다.

Heinrich M. Jaeger 교수 연구진은 이러한 재밍 기술을 활용한 말단 장치를 개발하여 물체의 크기와 표면 상태에 따른 파지 성능 변화를 관찰하고, 물체를 효과적으로 파지할 수 있는 원리를 분석하였다(Fig. 3(a-ii))[27]. 물체 사이의 마찰에 의해 발생하는 파지력 F_h 는 다음 식(4)으로 표현될 수 있다.

$$F_h = 2\pi R d \sigma (\mu_s \sin \theta - \cos \theta) \sin^2 \theta \quad (4)$$

여기서, R 은 파지 대상 물체의 반경, d 는 재밍백과 대상 물체가 실제로 접촉한 너비, μ_s 는 재밍백과 대상 물체의 마찰계수, σ 는 재밍백 가해지는 응력, θ 는 재밍백과 대상 물체 사이의 접촉 각도를 나타낸다. 접촉 각도 θ 가 $\text{Arctan}(1/\mu)$ 보다 작을 경우 $F_h = 0$ 이 되며, 이는 재밍백이 물체를 잡지 못하고 미끄러지게 됨을 의미한다. 추가로, 마찰계수가 고무와 같이 $\mu \approx 1$ 일 때에는 접촉 각도가 최소 $\pi/4$ 보다 커야 하며, 마찰 각도가 $\pi/2$ 를 초과하는 경우에 재밍백과 대상 물체 사이에 기하학적 맞물림 (Geometrical Interlocking)이 발생하여 파지력을 더욱 강화할 수 있다(Fig. 3(a-ii)).

물체가 엔드이펙터에 완전히 밀착될 경우에는 진공상태에 의한 흡입력이 발생하며, 이는 물체와 엔드이펙터 사이의 마찰력 뿐만 아니라 추가적인 파지력을 제공한다. 마찰력과 흡입력이 모두 작용하는 엔드이펙터의 파지력은 식(5)와 같이 표현할 수 있다.

$$F_h = \pi R^2 \sigma (\mu \sin \theta - \cos \theta) \sin^3 \theta \left(1 + \frac{R}{2d \sin \theta} \right) \quad (5)$$

이러한 마찰력과 흡입력, 기하학적 맞물림의 조합은 재밍백이

물체를 파지하고, 이동시키는 등의 동작을 수행할 수 있게 해준다.

3.3. 흡착 기술을 활용한 파지 메커니즘

흡착 컵(Suction Cup)을 이용하는 그리퍼는 문어의 빨판과 같은 돔(Dome) 구조의 흡착 컵을 사용하여 물체를 파지한다. 돔 구조의 흡착 컵을 물체에 밀착시키고, 컵 내부의 공기를 빨아들여 내부압력을 외부 압력보다 낮추어 발생하는 압력차를 이용하여 물체를 단단하게 흡착하는 방식이다. 이때 발생하는 압력차는 흡착 컵이 물체와 밀접하게 접촉하고 있는 면적에 비례하며, 흡입력 F_c 는 식(6)과 같다.

$$F_c = (P_a - P_{in}) A_s \quad (6)$$

여기서 P_a 는 대기압, P_{in} 은 흡착 컵 내부의 압력, A_s 는 흡착 컵이 대상 물체와 접촉하는 면적이다[28]. 물체를 놓을 때에는 진공 상태를 해제하고 공기를 흡입 컵 내부로 다시 주입하여 내부의 압력을 외부의 압력과 동일하게 조절해야 한다.

Shingo Maeda 교수 연구진은 Fig. 3(b-i)과 같이 흡착 컵과 유연 전극을 결합하여 공압과 정전기력을 모두 사용하는 흡착 컵을 제시하였다[28]. 기존의 흡착 컵은 거친 표면을 가지는 물체를 파지할 때 흡착 컵이 물체의 표면을 밀접하게 따라가지 못하여 외부의 공기가 유입되고, 이에 따라 흡착 컵 내부와 외부의 압력차가 유지되지 않아서 파지에 실패하게 된다. 연구진은 이러한 문제를 해결하기 위하여 흡착 컵에 유연 전극을 결합하고, 전압을 가하여 물체 표면에 유전체 분극을 발생시킴으로써 전극과 거친 표면 사이에 정전기적 인력을 발생시켜 거친 표면에도 잘 밀착할 수 있는 말단 장치를 개발하였다. 실험 결과, 유연 전극을 결합한 흡착 컵은 기존의 흡착 컵 대비 매끄러운 표면에서 12%, 거친 표면에서 25% 향상된 성능을 보였다.

Barbara Mazzolai 교수 연구진은 문어의 빨판 구조를 모사하여 건조 및 수중 환경에서도 효과적으로 물체를 파지할 수 있는 흡착 컵을 제시하였다[29]. 이러한 흡착 컵에 Fig. 3(b-i)와 같이

압력을 가하면 내부에 있던 공기들이 빠져나오며, 주변의 물을 밀어낸다. 흡착 컵의 내부를 압축시킨 뒤에 들어올리면 물체의 하중에 의해 흡착 컵의 부피가 증가하게 되고, 이때 발생하는 부피의 변화에 따라 흡착 컵 내부가 진공 상태가 되며 물체를 파지할 수 있다(Fig. 3(b-ii))[30]. 특히, Mazzolai 교수 연구진은 PDMS로 제작한 흡착 컵에 홍합 접착 단백질인 Mussel Foot Proteins-1 (MFP-1)을 코팅하여 수중 환경에서의 높은 접착력 및 생체 친화성을 달성하였다. 추가적으로, 실험을 통하여 알루미늄 블록 및 실리콘 웨이퍼를 흡착 컵으로 들 수 있었으며, 수중에서의 흡착력은 건조한 환경 대비 절반의 성능을 가지는 것을 보여주었다.

흡착 원리를 사용하는 소프트 그리퍼는 압력의 크기에 따라 크고, 무거운 물체를 들어올릴 수 있다는 장점이 있지만, 강한 흡착력으로 인해 물체에 손상이 가해질 수 있고, 큰 굴곡이 있거나 다공성 물체 등 밀접한 접촉을 통한 압력 차이가 발생하기 어려운 형상의 물체는 흡입하기 어렵다는 한계가 존재한다.

3.4 건식 접착 기술을 활용한 파지 메커니즘

건식 접착 원리를 이용하는 그리퍼는 게코도마뱀의 접착 구조를 모사한 미세 섬모구조를 가지는 것이 특징이다. 마이크로 스케일의 미세한 접착구조는 필러(Pillar)와 팁(Tip)으로 이루어진 계층 구조를 가지며, 대상 물체와의 접촉 면적을 최대로 확보함으로써 반데르발스 힘에 의한 인력을 극대화하여 높은 접착력을 가진다(Fig. 3(c-i))[31-33]. 건식 접착 기술을 활용하는 파지방식은 높은 접착력을 가질 뿐만 아니라, 접착 과정에서 잔여물 없이 반복적으로 사용할 수 있으며, 복잡한 작동 과정 없이 말단 장치를 수직 방향으로 누르는 것만으로 물체를 파지할 수 있다는 장점을 가진다. 계층 구조로 이루어진 미세 접착구조의 수직 방향과 전단 방향에 대한 접착력은 식(7) 및 식(8)과 같다[34].

$$P_{normal} = A \sqrt{\frac{\pi w_{12} E}{2a(1 - \nu^2)}} \quad (7)$$

$$P_{shear} = \mu A \sqrt{\frac{\pi w_{12} E}{2a(1 - \nu^2)}} \quad (8)$$

여기서, P_{normal} 은 수직 접착력, P_{shear} 는 전단 접착력, A 는 접촉 면적, w_{12} 는 접촉 표면 간의 접착성(Work of Adhesion), E 는 미세 구조 소재의 탄성 계수, a 는 미세 접착구조 팁의 반경 ν 는 소재의 포아송비(Poisson's Ratio), μ 는 마찰계수이다. 해당 식을 통하여 미세 접착 구조를 이용한 건식 접착은 대상 물체와 접촉 면적이 높을수록 접착력이 강해지며, 전단 접착력의 경우 물체의 표면 거칠기에 따른 마찰 계수의 영향을 추가적으로 받는 것을 확인할 수 있다.

Metin Sitti 교수 연구진은 Fig. 3(c)와 같이 게코 도마뱀을 모사한 마이크로 스케일의 접착 구조물을 활용하여 공압 구동 방식의 말단 장치를 개발하였다(Fig. 3(c-ii))[35]. 이러한 말단 장치는 물체를 파지할 때 단순한 가압만으로 접착 구조물의

반데르발스 힘을 통하여 물체를 들어 올릴 수 있다. 기존의 건식 접착 기술을 활용하는 파지방식은 강한 접착력을 기반으로 안정적인 파지가 가능하지만, 물체를 떼어낼 때 추가적인 외력을 가해줘야 한다는 한계가 있었다. 반면 Metin Sitti 교수 연구진이 개발한 소프트 그리퍼는 말단 장치에 공기압을 가하면 건식 접착 필름이 팽창하게 되고, 이 과정에서 마이크로 구조물이 물체의 가장자리에서부터 박리가 일어나게 되며 그리퍼와 물체 사이의 접촉 면적을 점차 감소시키며 자연스럽게 물체를 떼어낼 수 있다. 실험 결과, 해당 연구진이 개발한 말단 장치는 유리 표면에서 최대 0.41 N의 접착력을 발휘할 수 있으며, 공기압을 가하여 물체를 떼어낼 때 필요한 힘은 2 mN으로, 손쉬운 탈착이 가능함을 보여주었다.

4. 하이브리드 그리퍼

4.1 다중 손가락과 재밍 원리를 활용한 하이브리드 그리퍼

다중 손가락에 재밍 방식의 말단 장치를 통합하면 재밍 백의 우수한 강성 변화 특성을 활용하여 다중 손가락의 구동범위에 따라 인터로킹 가능한 물체의 범위를 확대하고, 높은 동력 전달 효율을 통하여 더욱 안정적인 자세로 물체의 파지가 가능하다[36].

Michael Yu Wang 교수 연구진은 실리콘 고무(Silicone Rubber)와 파티클이 혼합된 하이브리드 재밍층(Hybrid Jamming Substrate)을 기반으로 다중 손가락과 재밍 원리를 융합하여, 손가락 마디와 관절을 모방한 소프트 그리퍼를 제작하였다(Fig. 4(a))[13]. 하이브리드 재밍 그리퍼는 공압이 가해지지 않은 상태에서는 곡선 형태를 유지하나, 손가락 내부의 챔버에 공압이 가해지면, 챔버의 부피가 증가함에 따라 손가락에서 굽힘이 발생한다. 추가로, 손가락의 하단에 있는 재밍층에 진공을 가하게 되면, 재밍층의 강성이 증가하게 되며 동력 전달 효율이 증가하여 정밀한 동작제어가 가능해진다. 따라서 다중 손가락과 재밍 챔버에 개별적으로 공압을 제어함으로써 인간의 손가락과 같이 다양한 움직임을 기반으로 안정적인 물체의 파지가 가능하다. 해당 그리퍼의 성능을 확인하기 위해 진공을 통해 강성을 강화한 경우와 강화하지 않은 경우에 물체 파지 실험을 진행하였으며, 그 결과, 강성을 증가시키지 않았을 때는 최대 334 g의 물체를 파지할 수 있었으나, 강성을 증가시킨 경우에는 최대 540 g의 물체를 파지할 수 있음을 확인하였다.

4.2 다중 손가락과 흡착 원리를 활용한 하이브리드 그리퍼

다중 손가락에 흡착 원리를 활용하는 말단장치를 장착하면 인벨로핑, 클램핑(Clamping), 후킹(Hooking), 흡착과 같은 다중 파지 모드가 가능하여 다양한 크기나 형태, 무게를 가진 물체를 파지할 수 있다. 뿐만 아니라, 손가락의 구동을 통하여 흡착 컵의 파지 정밀도를 높이고, 물체 표면의 곡률/거칠기에 의한 공기의 유입을 방지할 수 있다[12,37].

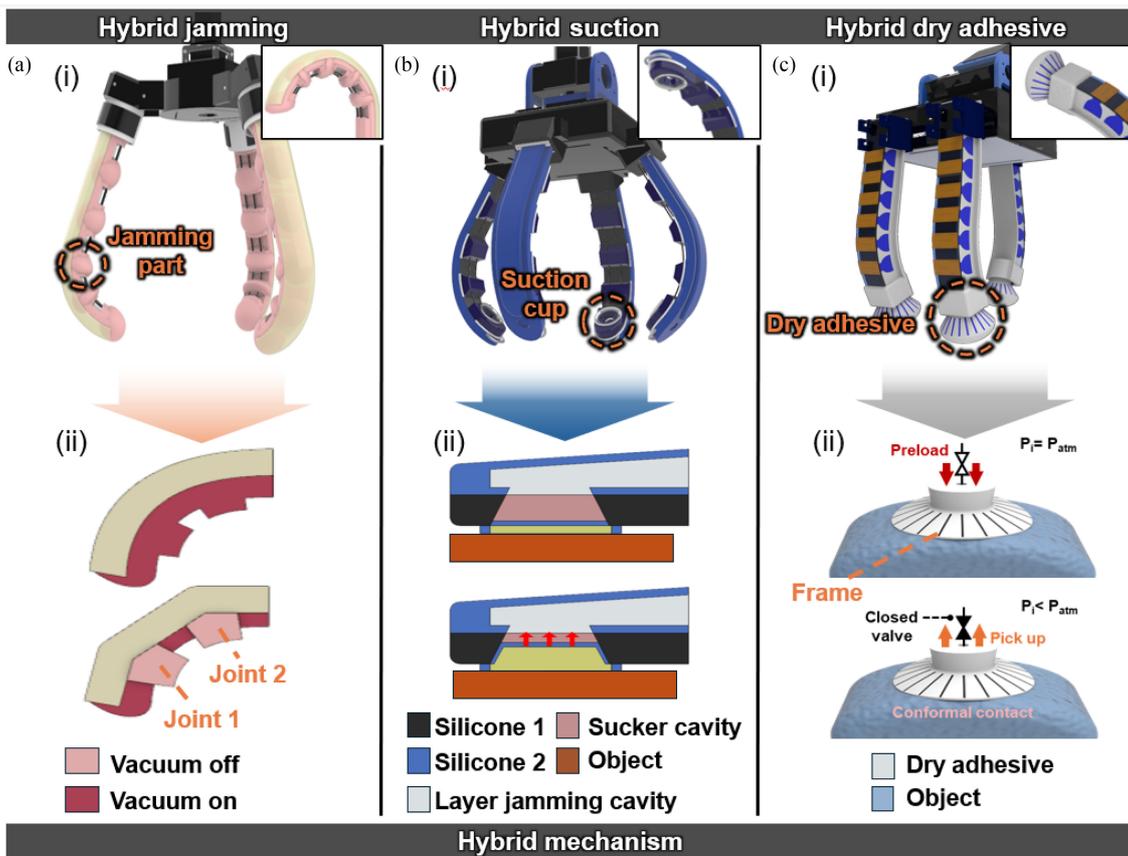


Fig. 4 Hybrid grippers combining various actuation methods and grasping types: Schematic illustrations of (a) a hybrid jamming gripper, (b) a hybrid suction gripper, and (c) a hybrid dry adhesive gripper

Li Wen 교수 연구진은 케이블 구동 방식으로 작동하는 다중 손가락에 물체의 파지를 도와줄 수 있는 재밍 구조와 흡착 컵을 결합함으로써 다양한 파지 모드를 구현할 수 있는 하이브리드 소프트 그리퍼를 제작하였다 (Fig. 4(b))[12]. 이러한 그리퍼는 재밍 방식의 강성변화와 케이블 구동을 통한 굽힘 제어를 동시에 수행할 수 있으며, 손 끝의 흡착 컵을 이용하여 물체를 더욱 안정적으로 파지할 수 있다. 케이블 구동과 재밍 강성변화를 통한 손가락 제어는 2.1 N의 힘에도 굽힘 없이 안정적인 자세의 제어가 가능하였고, 흡착 컵을 이용하여 물체를 들어 올리는 실험에서는 40 N의 파지력 성능을 보였다.

4.3 다중 손가락과 건식 접착 원리를 활용한 하이브리드 그리퍼

다중 손가락에 건식 접착 방식의 말단장치를 장착하면 손가락과 접착구조를 통하여 다양한 파지 모드가 가능하다. 특히, 건식 접착 방식의 말단장치는 수직 방향으로 정확하게 압력을 가하고, 들어올려야 접촉 면적이 넓게 형성되고, 하중이 균일하게 분산되어 안정적인 파지가 가능하다. 이에 따라 다중 손가락을 정밀한 제어를 통하여 건식 접착 원리를 활용한 말단 장치의 성능을 극대화할 수 있다[38,39].

Hoon Eui Jeong 교수 연구진은 공압 구동 방식의 다중 조인트

손가락과, 생체 모방 접착구조를 가지는 말단장치를 통합하여 하이브리드 건식 접착 소프트 그리퍼를 개발하였다(Fig. 4(c))[39]. 구체적으로, 공압 구동 방식의 다중 손가락은 근위부(Proximal)와 원위부(Distal)로 나뉘며, 각 부위는 공압을 통하여 개별적으로 굽힘 조절이 가능하다. 챔버의 측면에는 단단한 PLA (Polyactic Acid) 소재의 프레임이 내장되어 있으며, 손가락의 관절과 같은 역할을 하여 빠른 굽힘 속도와 높은 파지력을 가질 수 있게 한다. 다중 손가락의 끝에 장착된 건식 접착 말단장치는 물체와 접촉할 때 물체의 형상에 맞게 형태가 변형되며 더욱 높은 접착력으로 물체를 파지할 수 있다. 이때, 건식 접착 말단 장치에 내장되어 있는 PLA 소재의 프레임이 대상 표면의 접촉면으로 효율적으로 압력을 전달한다. 물체를 들어 올릴 때는 고르게 분산된 프레임이 하중을 균일하게 분산시킴으로써 안정적으로 물체를 파지하고, 옮기는 동작을 수행할 수 있다. 해당 그리퍼는 자유로운 손가락의 움직임과 건식 접착 말단장치를 활용하여 다양한 크기, 형상, 무게를 가진 물체에 대한 파지 실험을 진행하였으며, 특히 한 손가락으로 600 g의 물체를 들어 올리며 총 1.8 kg의 물체를 파지하며 높은 접착 성능을 보여주었다. 마지막으로, 사람과 협력하여 라면을 끓이는 실험을 보여주며 사람과 소프트 로봇이 상호작용하는 결과를 보여주었다.

5. 결론

소프트 그리퍼는 기존의 강성 소재 기반 그리퍼에 비해 유연한 소재의 특성을 활용하여 변화하는 환경 속에서도 능동적으로 적응할 수 있다는 장점이 있다. 이러한 소프트 로봇의 특성을 효율적으로 활용하기 위하여 케이블 구동, 공압, 전기활성, 열 구동 등의 다양한 구동 방식이 연구되어 왔으며, 파지 방식 역시 다중손가락형, 재밍, 접착, 흡착 방식 등 앞서 소개한 바와 같이 각각의 뚜렷한 장단점이 존재한다. 이에 따라 응용처에 따른 성능 요구사항과 환경 조건 등을 고려하여 적절한 방식의 선택이 필요하다.

하지만 여전히 소프트 그리퍼는 강체 기반의 그리퍼에 비해 낮은 효율의 동력 전달, 정밀 제어의 어려움, 느린 구동 속도 등의 한계가 존재한다. 이를 극복하기 위하여 최근에는 다양한 구동 메커니즘과 파지 메커니즘을 결합한 하이브리드 그리퍼에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 이를 통해 더욱 향상된 그리퍼 개발이 이루어지고 있다.

한편, 최근 전 세계적으로 활발한 연구가 진행되고 있는 인공지능 알고리즘과의 결합은 로봇 그리퍼를 더욱더 진일보시키고 있다. 소프트 그리퍼에 대한 다양한 구동 메커니즘, 파지 메커니즘, 센싱 및 피드백 알고리즘, 인공지능 알고리즘의 결합은 가까운 시일 내에 사람만이 할 수 있다고 여겨졌던 정교한 작업을 로봇이 하거나, 심지어는 사람의 조작 능력을 뛰어넘는 로봇 그리퍼의 발전으로 이어질 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the Technology Innovation Program (No. 001444157, Development of Heterogeneous Multi-Sensor Micro-System Platform) funded by the Ministry of Trade, Industry & Energy (MITIE, Korea) and National Research Foundation of Korea (No. NRF-2021R1A2C3006297).

REFERENCES

- 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.
- Li, L., Xie, F., Wang, T., Wang, G., Tian, Y., Jin, T., Zhang, Q., (2022), Stiffness-Tunable soft gripper with soft-rigid hybrid actuation for versatile manipulations, *Soft Robotics*, 9(6), 1108-1119.
- Roh, Y., Kim, M., Won, S. M., Lim, D., Hong, I., Lee, S., Kim, T., Kim, C., Lee, D., Im, S., Lee, G., Kim, D., Shin, D., Gong, D., Kim, B., Kim, S., Kim, S., Kim, H. K., Koo, B.-K., Seo, S., Koh, J.-S., Kang, D., Han, S., (2021), Vital signal sensing and manipulation of a microscale organ with a multifunctional soft gripper, *Science Robotics*, 6(59), DOI: 10.1126/scirobotics.abi6774.
- Yang, Y., Vella, K., Holmes, D. P., (2021), Grasping with kirigami shells, *Science Robotics*, 6(54), DOI: 10.1126/scirobotics.abd6426.
- Li, H., Xie, D., Xie, Y., (2022), A soft pneumatic gripper with endoskeletons resisting out-of-plane bending, *Actuators*, 11(9), 246.
- Sun, T., Chen, Y., Han, T., Jiao, C., Lian, B., Song, Y., (2020), A soft gripper with variable stiffness inspired by pangolin scales, toothed pneumatic actuator and autonomous controller, *Robotics and Computer-integrated Manufacturing*, 61, 101848.
- Wu, Q., Yi, Z., Wang, H., Yuan, H., (2021), Design and experiment of a soft gripper based on cable-driven continuum structures, *Proceedings of the 2021 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, 637-642.
- Shintake, J., Cacucciolo, V., Floreano, D., Shea, H., (2018), Soft robotic grippers, *Advanced Materials*, 30(29), 1707035.
- Hao, Y., Gong, Z., Xie, Z., Guan, S., Yang, X., Ren, Z., Wang, T., Wen, L., (2016), Universal soft pneumatic robotic gripper with variable effective length, *Proceedings of the 2016 35th Chinese Control Conference*, 6109-6114.
- Mizushima, K., Oku, T., Suzuki, Y., Tsuji, T., Watanabe, T., (2018), Multi-fingered robotic hand based on hybrid mechanism of tendon-driven and jamming transition, *Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Soft Robotics (Robosoft)*, 376-381.
- Hughes, J., Culha, U., Giardina, F., Guenther, F., Rosendo, A., Iida, F., (2016), Soft manipulators and grippers: a review, *Frontiers in Robotics and AI*, 3, 69.
- Fang, B., Sun, F., Wu, L., Liu, F., Wang, X., Huang, H., Huang, W., Liu, H., Wen, L., (2022), Multimode grasping soft gripper achieved by layer jamming structure and tendon-driven mechanism, *Soft Robotics*, 9(2), 233-249.
- Yang, Y., Zhang, Y., Kan, Z., Zeng, J., Wang, M. Y., (2020), Hybrid jamming for bioinspired soft robotic fingers, *Soft Robotics*, 7(3), 292-308.
- Zhang, Y., Zhang, W., Gao, P., Zhong, X., Pu, W., (2022), Finger-palm synergistic soft gripper for dynamic capture via energy harvesting and dissipation, *Nature Communications*, 13(1), 7700.
- Li, C., Gu, X., Ren, H., (2017), A cable-driven flexible robotic grasper with lego-like modular and reconfigurable joints, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 22(6), 2757-2767.
- Zaidi, S. S. Z., Maselli, M., Laschi, C., Cianchetti, M., (2021), Actuation technologies for soft robot grippers and manipulators: a review, *Current Robotics Reports*, 2(3), 355-369.
- Nagua, L., Relañó, C., Monje, C. A., Balaguer, C., (2021), A new approach of soft joint based on a cable-driven parallel mechanism for robotic applications, *Mathematics*, 9(13), 1468.
- Chen, S., Pang, Y., Yuan, H., Tan, X., Cao, C., (2020), Smart soft actuators and grippers enabled by self-powered tribo-skins, *Advanced Materials Technologies*, 5(4), 1901075.

19. Hussain, I., Al-Ketan, O., Renda, F., Malvezzi, M., Prattichizzo, D., Seneviratne, L., Abu Al-Rub, R. K., Gan, D., (2020), Design and prototyping soft-rigid tendon-driven modular grippers using interpenetrating phase composites materials, *The International Journal of Robotics Research*, 39(14), 1635-1646.
20. Hu, W., Mutlu, R., Li, W., Alici, G., (2018), A structural optimisation method for a soft pneumatic actuator, *Robotics*, 7(2), 24.
21. Lee, J.-Y., Eom, J., Yu, S. Y., Cho, K., (2020), Customization methodology for conformable grasping posture of soft grippers by stiffness patterning, *Frontiers in Robotics and AI*, 7, 114.
22. Zhou, F., Zhang, M., Cao, X., Zhang, Z., Chen, X., Xiao, Y., Liang, Y., Wong, T.-W., Li, T., Xu, Z., (2019), Fabrication and modeling of dielectric elastomer soft actuator with 3D printed thermoplastic frame, *Sensors and Actuators A: Physical*, 292, 112-120.
23. Bar-Cohen, Y., Anderson, I. A., (2019), Electroactive polymer (EAP) actuators-background review, *Mechanics of Soft Materials*, 1(1), 5.
24. Do, P. T., Le, Q. N., Luong, Q. V., Kim, H.-H., Park, H.-M., Kim, Y.-J., (2023), Tendon-Driven gripper with variable stiffness joint and water-cooled SMA springs, *Actuators*, 12(4), 160.
25. Linghu, C., Zhang, S., Wang, C., Yu, K., Li, C., Zeng, Y., Zhu, H., Jin, X., You, Z., Song, J., (2020), Universal SMP gripper with massive and selective capabilities for multiscaled, arbitrarily shaped objects, *Science Advances*, 6(7), DOI: 10.1126/sciadv.aay5120.
26. Zhou, L., Ren, L., Chen, Y., Niu, S., Han, Z., Ren, L., (2021), Bio-inspired soft grippers based on impactive gripping, *Advanced Science*, 8(9), 2002017.
27. Brown, E., Rodenberg, N., Amend, J., Mozeika, A., Steltz, E., Zakin, M. R., Lipson, H., Jaeger, H. M., (2010), Universal robotic gripper based on the jamming of granular material, *Proceeding of the National Academy of Sciences*, 107(44), 18809-18814.
28. Okuno, Y., Shigemune, H., Kuwajima, Y., Maeda, S., (2019), Stretchable suction cup with electroadhesion, *Advanced Materials Technologies*, 4(1), 1800304.
29. Meloni, G., Tricinci, O., Degl'Innocenti, A., Mazzolai, B., (2020), A protein-coated micro-sucker patch inspired by octopus for adhesion in wet conditions, *Scientific Reports*, 10(1), 15480.
30. Wang, Y., Sun, G., He, Y., Zhou, K., Zhu, L., (2022), Octopus-inspired sucker to absorb soft tissues: Stiffness gradient and acetabular protuberance improve the adsorption effect, *Bioinspiration & Biomimetics*, 17(3), 036005.
31. Jeong, H. E., Lee, J.-K., Kim, H. N., Moon, S. H., Suh, K. Y., (2009), A nontransferring dry adhesive with hierarchical polymer nanohairs, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(14), 5639-5644.
32. Mengüç, Y., Yang, S. Y., Kim, S., Rogers, J. A., Sitti, M., (2012), Gecko-inspired controllable adhesive structures applied to micromanipulation, *Advanced Functional Materials*, 22(6), 1246-1254.
33. Boesel, L. F., Greiner, C., Arzt, E., Del Campo, A., (2010), Gecko-inspired surfaces: a path to strong and reversible dry adhesives, *Advanced Materials*, 22(19), 2125-2137.
34. Yi, H., Lee, S. H., Seong, M., Kwak, M. K., Jeong, H. E., (2018), Bioinspired reversible hydrogel adhesives for wet and underwater surfaces, *Journal of Materials Chemistry B*, 6(48), 8064-8070.
35. Song, S., Sitti, M., (2014), Soft Grippers using micro-fibrillar adhesives for transfer printing, *Advanced Materials*, 26(28), 4901-4906.
36. Amano, K., Iwasaki, Y., Nakabayashi, K., Iwata, H., (2019), Development of a three-fingered jamming gripper for corresponding to the position error and shape difference, *Proceedings of the IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft)*, 137-142.
37. Chin, L., Barscevicus, F., Lipton, J., Rus, D., (2020), Multiplexed manipulation: versatile multimodal grasping via a hybrid soft gripper, *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 8949-8955.
38. Ruotolo, W., Brouwer, D., Cutkosky, M. R., (2021), From grasping to manipulation with gecko-inspired adhesives on a multifinger gripper, *Science Robotics*, 6(61), DOI: 10.1126/scirobotics.abi9773.
39. Park, W., Park, S., An, H., Seong, M., Bae, J., Jeong, H. E., (2024), A sensorized soft robotic hand with adhesive fingertips for multimode grasping and manipulation, *Soft Robotics*, <https://doi.org/10.1089/soro.2023.0099>.



Hyeonseok Song

is a Ph.D. student in the School of Mechanical Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST) under the guidance of Prof. Hoon Eui Jeong. His research interests include soft electronics and bioinspired adhesives.

E-mail: hsong@unist.ac.kr



Dong Kwan Kang

is a Ph.D. student in the School of Mechanical Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST) under the guidance of Prof. Hoon Eui Jeong. His research interests include nanoelectronics and soft robotics.

E-mail: austc101@unist.ac.kr

**Seongjin Park**

is a Ph.D. candidate in the School of Mechanical Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST) under the guidance of Prof. Hoon Eui Jeong. His research interests include soft robotics and bioinspired adhesives.

E-mail: qkrtjdwls918@unist.ac.kr

**Hee Jin Lee**

is a Ph.D. student in the School of Mechanical Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST) under the guidance of Prof. Hoon Eui Jeong. His research interests include smart materials and bioinspired adhesive based energy harvesting.

E-mail: l.heejin@unist.ac.kr

**Hoon Eui Jeong**

earned his Ph.D. from the School of Mechanical and Aerospace Engineering at Seoul National University in 2009. Following this, he undertook postdoctoral research at the University of California, Berkeley, under the guidance of Prof. Peidong Yang. He embarked on his independent academic career in 2012 as an assistant professor in the Department of Mechanical Engineering at Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST). His research currently focuses on bioinspired soft materials, wearables, and soft robotics..

E-mail: hoonejeong@unist.ac.kr

• Topical Issue • 가공된 기능성 재료 기술(Engineered Functional Materials)

나노패턴 필름 및 압전물질 스펀지 적층구조 기반 마찰전기-압전 하이브리드 에너지 하베스터

Hybrid Triboelectric-piezoelectric Energy Harvester Utilizing Nanopatterned Film and Piezoelectric Elastomeric Sponge Layers

백현민^{1,*}, 이채은^{1,*}, 정호철¹, 옥종걸^{1,#}

Hyunmin Baek^{1,*}, Chaeun Lee^{1,*}, Hocheol Jeong¹, and Jong G. Ok^{1,#}

¹ 서울과학기술대학교 기계·자동차공학과 (Department of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology)
Corresponding Author / E-mail: jgokr@seoultech.ac.kr, TEL: +82-2-970-9012
ORCID: 0000-0002-8703-2915

*These authors contributed equally to this work.

KEYWORDS: Hybrid energy harvester (하이브리드 에너지 하베스터), Triboelectric nanogenerator (마찰전기 나노발전기), Piezoelectric nanogenerator (압전 나노발전기), Nanopattern (나노패턴), Piezoelectric sponge (압전 스펀지)

We demonstrate a practical and efficient hybrid triboelectric-piezoelectric energy harvesting structure that consists of a nanopatterned and/or metal-deposited polymer film and a piezoelectric elastomeric sponge. When a polymer (here, polycarbonate (PC)) and an elastomer (here, polydimethylsiloxane (PDMS)) make contact with and detach from each other, triboelectric energy can be harvested. In this case, the PC surface can be nanopatterned by continuous dynamic nanoinscribing and/or coated by a metal (here, Cu) layer for enhanced performance. When a piezoelectric material (here, lead zirconate titanate (PZT)) and sugar powder are mixed with PDMS, and the sugar is later dissolved, a porous piezoelectric elastomeric sponge (PES) can be fabricated. When a PC film and a PES make contact with and detach from each other, both triboelectric and piezoelectric energies can be simultaneously harvested. We systematically study the effect of PES and Cu thicknesses and dynamic nanoinscribed nanopattern on the energy harvesting performance of the hybrid triboelectric-piezoelectric nanogenerator (HTPENNG). The performance of the HTPENNG can be improved by using the PES of optimal thickness, and by applying the nanopattern and Cu layer. The HTPENNG can be utilized in many systems where wireless self-powering is desired, such as wearable devices, flexible sensors, and skin electronics.

Manuscript received: May 15, 2024 / Revised: May 21, 2024 / Accepted: May 22, 2024

1. 서론

최근 전자 피부, 웨어러블 디바이스, 환경 모니터링 시스템 및 사물인터넷(IoT) 네트워크를 포함한 다양한 유연 전자장치에 대한 기술 개발이 활발히 지속되고 있다. 이러한 소자 및 시스템들은 각각 독립적으로 구동되며 상호 연결된 네트워크로 동작하는 특성상, 외부전원 공급이 아닌 독립된 소자 수준의 객체화된 에너지원을 요구하는 경우가 대부분이다[1-3]. 이에 소형 및 모바일

소자의 동력원으로서, 소자 사용 중 자연스레 가해지는 여러 외부 자극, 예컨대 반복적인 마찰 및 진동, 눌림 등의 현상을 전기 에너지로 변환하는 에너지 하베스팅(Energy Harvesting)이 중요한 연구 분야로 대두되고 있다[4,5]. 마찰전기 나노발전기(Triboelectric Nanogenerator, TENG)는 간단한 설계 및 제작 과정을 거쳐 높은 유연성을 갖는 경량 소자 제작이 용이함과 동시에 그 높은 성능으로 인해 더욱 주목받고 있다[6-8]. 하지만 경우에 따라 중소형 전자 시스템을 효율적으로 구동하기에는 TENG의

발전 성능만으로 충분하지 않은 상황이 발생할 수 있다[9,10].

이에 본 연구에서는 기존 TENG 소자 구조에 마찰 시의 접촉에 따른 소자의 변형을 에너지 하베스팅에 아울러 활용할 수 있는 압전 나노발전기(Piezoelectric Nanogenerator, PENG) 기능 [11-13]을 추가하여, PENG과 TENG 성능을 모두 가진 유연한 하이브리드 에너지 하베스팅 소자(Hybrid TENG-PENG, HTPENG) 제작을 통한 발전 성능 향상 방법을 제시한다. TENG 전극으로써 사용되는 폴리머 필름에 나노패터닝을 적용하여 높은 표면거칠기(표면적)를 가지게 함으로써 TENG 성능을 향상시키고, 금속(Cu 등)을 증착하여 대전열 특성을 개선시킨다. 그리고 다른 쪽 전극으로서 이와 대전열 차이가 큰 탄성소재(예컨대 Polydimethylsiloxane, PDMS)에 압전물질(예컨대 Lead Zirconate Titanate, PZT)을 섞어 기계적 자극에 탄성 변형이 용이한 스펀지 형태로 제작함으로써 PENG 기능을 부여한다. 이들을 적층하여 제작하는 HTPENG 소자의 성능을 평가함에 있어 스펀지의 조성 및 두께, 필름의 표면거칠기 및 금속증착 두께 등 주요 공정인자들의 영향 분석을 통해 소자 성능을 최적화한다. 이와 같이 나노 패턴 된 필름과 탄성 스펀지를 적층 조합한 HTPENG 구조는 TENG과 PENG 기능을 함께 가짐과 동시에, 높은 유연성과 우수한 충격완화 특성을 두루 갖춘 에너지 하베스터로서 다양한 소자에 활용될 수 있음을 보인다.

2. HTPENG 소자 개발 및 측정시스템 설계·구축

2.1 폴리머 TENG 전극: 나노패터닝 및 금속증착 공정

TENG 구동 시 접촉하는 두 전극 소재의 대전열 차이가 중요한 요소로 작용한다[6,7]. 대전열이란 종류가 다른 두 물질이 마찰 또는 압력에 의해 접촉할 때, 양의 전하로 대전되기 쉬운 물질 순서로 나열한 것으로 정의된다[6]. 실제로는 전자들이 빠져나가서 양의 전하로 대전되는 것이므로, 대전열은 전자를 잃어 버리기 쉬운 물질 순서와 같다.

$$I \approx A \sigma_T \frac{dH}{dt} \frac{d_1 \epsilon_0 / \epsilon_1 + d_2 \epsilon_0 / \epsilon_2}{(d_1 \epsilon_0 / \epsilon_1 + d_2 \epsilon_0 / \epsilon_2 + z)^2} \quad (1)$$

또한, 식(1)과 같이 통상적으로 알려진 마찰전기 전류방정식 [6]을 통해 알 수 있듯이, 전극 간의 접촉 면적(A), 전극 층의 두께(d_1 , d_2), 전극 사이 간격(z) 등이 주요 성능변수로 작용한다. 즉, 일반적으로 두 전극 간 대전열 차가 클수록, 그리고 전극의 두께가 얇고 접촉 면적이 클수록 TENG 성능이 향상될 수 있다.

이상의 고려 사항들을 토대로, 본 연구에서는 얇고 유연하면서 패터닝과 금속 증착이 용이한 폴리머 소재로서 폴리카보네이트(Polycarbonate, PC) 필름을 HTPENG 소자 내의 TENG 전극 소재로 사용하였다. 전극 간 접촉면적을 높이고 대전열 차를 증대시키기 위해 전극 표면에 나노패터닝 및 금속 증착을 실시할 수 있다. Fig. 1에 대표적 공정결과들을 제시하였다. PC 필름의 나노패터닝을 위해서는 화학적 식각이 필요한 간결한

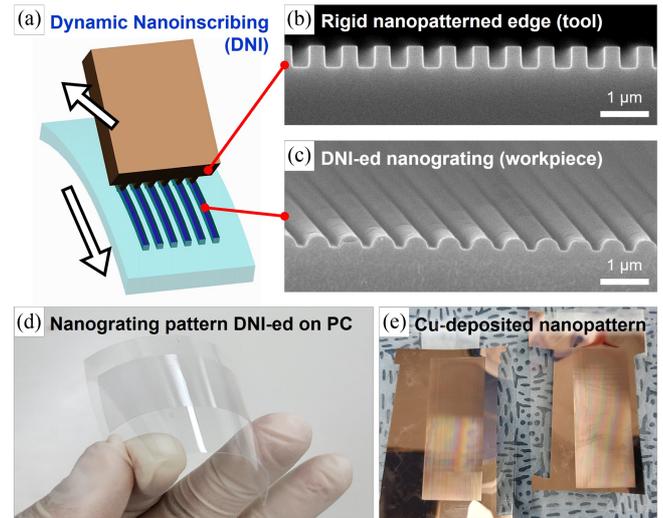


Fig. 1 (a) Schematic illustration of the dynamic nanoinscribing (DNI) process where a rigid nanopatterned edge slides over a polymer substrate to continuously create nanograting structure, SEM images of (b) a well-cleaved nanopatterned Si edge used as a DNI tool, (c) the nanograting structure DNI-ed on a PC substrate, Optical images of (d) a PC film having the DNI-ed nanograting pattern, and (e) its Cu-coated samples

소성가공 원리 기반의 나노각인(Dynamic Nanoinscribing, DNI) 공정[14-16]을 이용하여 Sinusoidal Profile을 갖는 700 nm 주기의 나노그레이팅 구조를 성형하였다. PC 필름상 금속 증착은 RF Sputtering (Deposition Rate of ~50 nm/min)을 통해 Cu 박막을 성형하였다.

2.2 탄성 PENG 전극: Piezoelectric Elastomeric Sponge (PES) 제작

반복적인 접촉 기반의 HTPENG 소자의 한쪽 전극으로서의 PENG 전극은 기계적 변형에 압전 발전효과를 달성함과 동시에 빠른 탄성회복이 가능하도록 제작되어야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 우수한 탄성체인 PDMS를 주요 재료로 이를 스펀지와 같이 다공구조화 하여 순간적 접촉에 따른 기계적 변형 및 접촉 해제 시의 탄성회복을 극대화하고[17], 이때 동시에 압전 발전이 이루어지도록 압전물질인 PZT를 PDMS에 혼합하였다.

이러한 Piezoelectric Elastomeric Sponge (PES) 제작 과정 및 결과물을 Fig. 2에 도시하였다. Sylgard 184 PDMS의 모노머와 경화제를 10:1 비율로 배합하고, 설탕 파우더를 5:1, 4:1, 3:1, 2:1 등의 다양한 질량비로 이와 섞어 완전히 교반한 후, 이 혼합물을 3D 프린팅으로 제작한 몰드에 넣고 롤러로 눌러 표면을 평평하게 다진다. 85°C에서 4시간 경화 후 몰드에서 PDMS/설탕 용고체를 분리한다. 이를 85°C의 물에 3일간 담가 설탕을 용해시킨 후 65°C의 핫플레이트에서 하루 건조한다[18,19].

본 실험에서는 설탕:PDMS가 약 4:1 비율일 때 적절한 탄성과 강성을 갖는 스펀지가 완성되는 것을 확인할 수 있었다. 설탕의

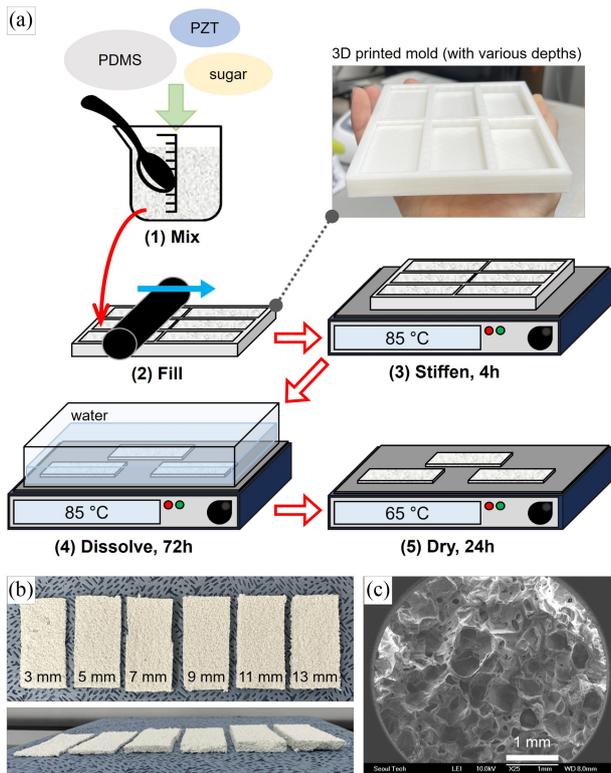


Fig. 2 (a) Fabrication procedure for piezoelectric sponge (PES) structures, (b) PESs fabricated with various thicknesses, and (c) SEM image of the PES, showing its porous microstructure

양이 너무 많아지면(5 : 1 이상) 최종 스펀지의 강성이 낮아져 모양을 유지하기 힘들었으며, 설탕의 함량이 너무 적으면(3 : 1 이하) PDMS 내의 설탕구조를 구현하는 것이 어려워졌다.

설탕:PDMS = 4 : 1의 혼합비를 유지하면서 교반 과정에 PZT 파우더(Sunnytec S-54, without PVA)를 다양한 질량비로 배합해보며 PES 구조 제작 레시피를 최적화하였다. PZT를 많이 첨가할수록 압전 성능이 좋아지지만 동시에 PES가 딱딱해지는 경향으로 인해 PENG으로서 기계적 변형에 원활하게 대응하기 어려움임을 확인할 수 있었다. 최종적으로 본 연구에서는 최적의 PES 레시피로서 설탕 : 모노머 : 경화제 : PZP의 혼합질량비를 45 : 10 : 1 : 3으로 확정하였다.

2.3 측정시스템 설계-구축 및 측정

Fig. 3은 HTPENG 소자의 성능을 측정 평가하기 위한 시스템의 설계 및 구축 결과를 나타낸다. 속도조절 기능이 탑재된 리니어 모터(DMC-LM-GM35D-3657)의 회전운동을 캠 구동을 통한 상하 왕복운동(최대유격 25 mm) 변환을 해주고, 이 왕복운동 구간 내에 HTPENG의 전극들이 부착되는 절연 소재의 상판과 하판이 위치하여 서로 간에 주기적인 접촉 및 이격이 이루어지도록 설계·구축하였다. 이때 진동을 최소화한 정밀 상하운동을 통해 정확한 TENG 측정이 이루어지도록 상하 왕복구간을 감싸듯이 알루미늄 소재의 가이드를 설치하였다. 한편으로 상·하판

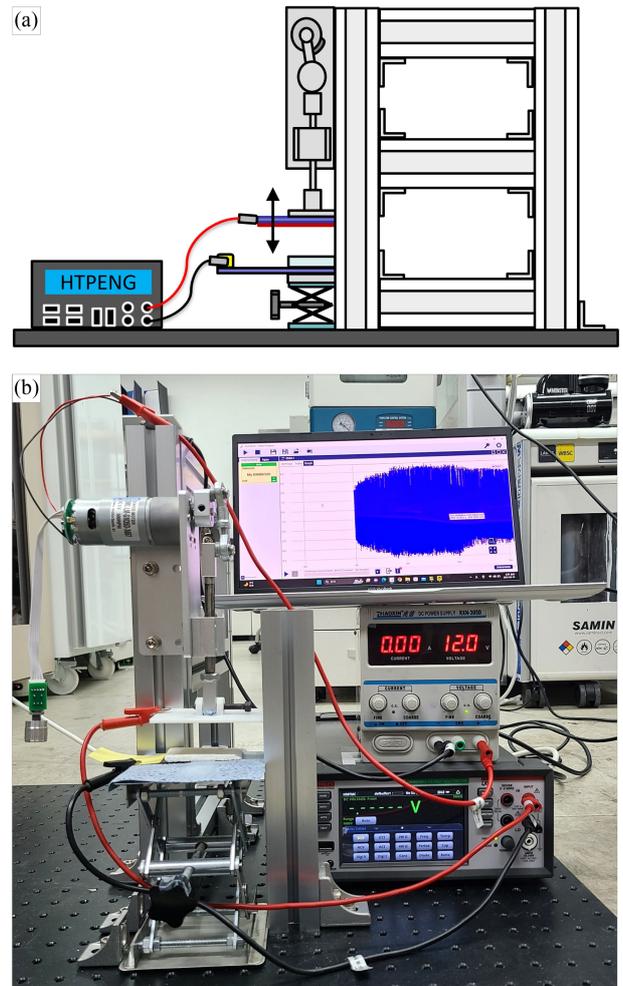


Fig. 3 (a) Conceptual design of the HTPENG measurement system and (b) Actual prototype system for HTPENG measurement

접촉 시 PES가 충분히 눌러 PENG 성능을 정확히 측정할 수 있도록 모터로부터 충분한 크기의 토크(정격토크 ~4.6 kg·cm, 25 mm 토크 ~0.92 kg·cm)가 전달되도록 하였다.

HTPENG 소자의 성능평가를 위해 상판에는 PC 필름을, 하판에는 PES를 부착하고, 각 전극에 점착테이프 타입의 전극을 붙인 후 충분한 안정 시간을 부여하였다. 이후 모터 구동을 통하여 3 Hz로 상·하판을 반복 접촉시키며 이때 발생하는 전압을 디지털 멀티미터(Keithley DMM 6500)를 이용하여 측정 및 기록하였다.

3. HTPENG 소자의 성능평가 및 고찰

3.1 PES의 두께에 따른 HTPENG 성능변화 및 최적화

HTPENG 소자는 상부의 나노패턴되거나 Cu 증착된(또는 둘 다 적용된) PC 필름과 하부의 PES가 반복 접촉함에 따라 PC와 PDMS 간의 대면적 차에 의한 TENG 효과, 그리고 PES의 압축 및 원상회복에 따른 PENG 효과가 동시에 발생하는 형태로

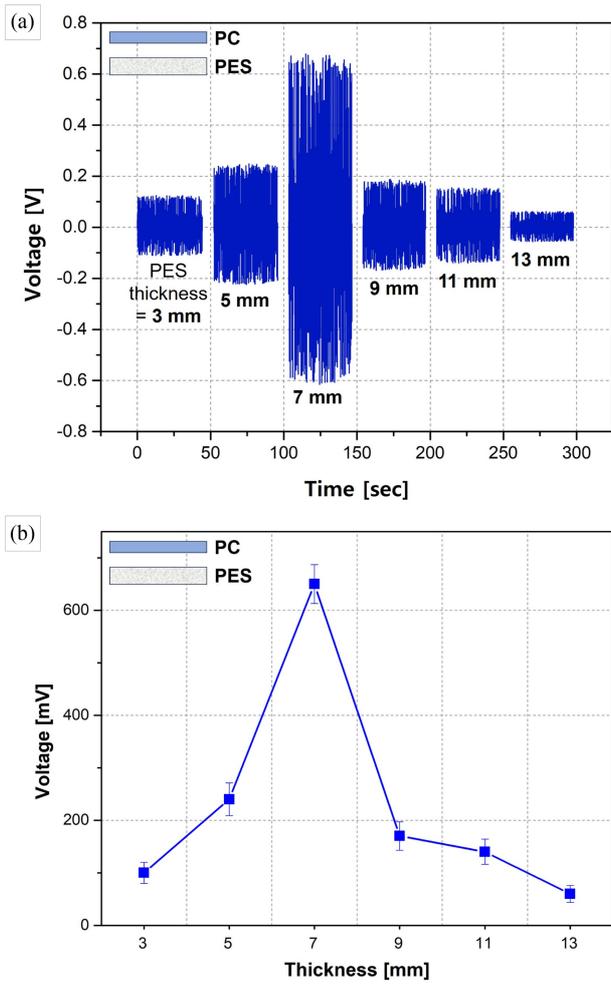


Fig. 4 (a) Performance evaluation of the PC/PES devices with various PES thicknesses and (b) Averaged maximum voltages reachable for each device with the corresponding PES thickness

에너지 하베스팅이 이루어진다. 일반적으로 TENG은 PC 필름 및 PES 등 소자 전극들의 두께가 전체적으로 얇을수록 성능이 향상되나(식(1) 참조), PES의 경우 그 두께가 두꺼울수록 같은 접촉조건 하에 더 큰 기계적 변형량을 발생하기 수월하여 PENG 기반의 에너지 하베스팅에 보다 유리하다. 따라서 HTPENG의 성능 최적화를 위해서는 PES의 두께 최적화가 필요하다.

이에 PES의 두께별로 HTPENG 소자의 성능을 비교하기 위해 3, 5, 7, 9, 11, 13 mm의 두께로 각각 PES를 제작하고 이를 나노패턴-금속 증착 되지 않은 PC 필름과 적층하여 HTPENG 성능을 평가하였다. Fig. 4(a)는 각 두께의 PES에 대해 약 40-45초간의 구간으로 발취하여 모은 HTPENG 발전 기전력 그래프이고, Fig. 4(b)는 각 두께의 PES가 달성 가능한 평균 기전력 값을 나타낸 그래프이다. Fig. 4를 통해 알 수 있듯이, 본 연구에서는 PES의 두께가 7 mm일 때 가장 높은 기전력을 얻을 수 있었다. 이는 전술한 바와 같이, 두께가 너무 두꺼우면 TENG 효과가, 두께가 너무 얇으면 PENG 효과가 감소하기 때문으로 해석할 수 있다.

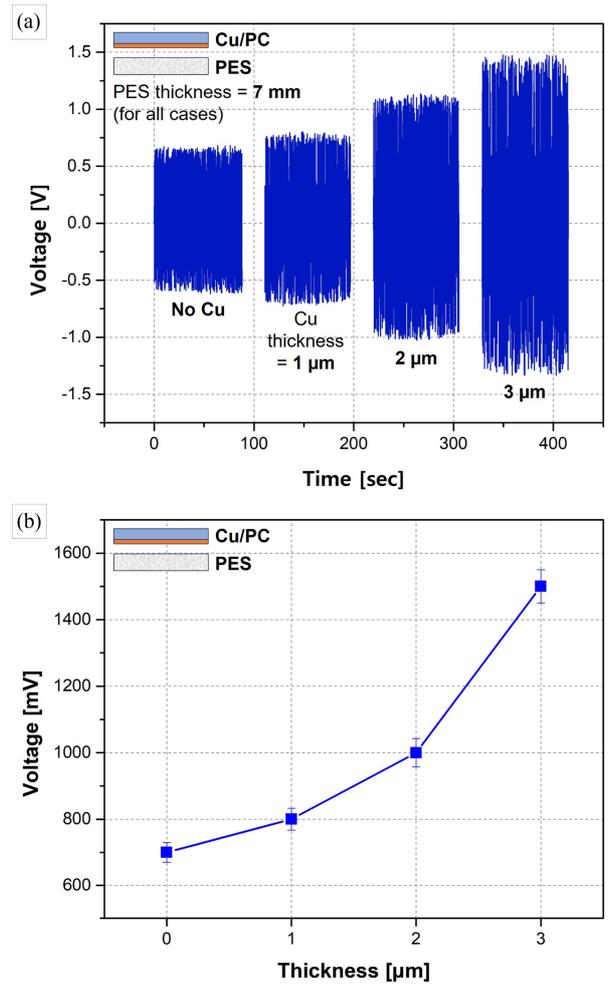


Fig. 5 (a) Performance evaluation of the Cu-coated PC/PES devices with various Cu thicknesses and (b) Averaged maximum voltages reachable for each device with the corresponding Cu thickness

3.2 금속증착 두께에 따른 HTPENG 성능변화 평가

앞서 살펴본 바와 같이, Cu 등 금속은 일반적으로 PDMS와 더 큰 대전열을 가짐으로써 TENG 성능을 제고할 수 있다. Fig. 5는 PC 필름상에 1, 2, 3 μm 등 3가지의 다른 두께로 Cu 박막을 증착하고(이때 Cu를 증착하지 않은 경우를 대조군으로 하여), 이를 7 mm 두께의 PES와 적층하여 HTPENG 성능을 평가한 결과(약 80-90초 구간 및 달성가능평균 기전력)를 나타낸다. 이를 통해 Cu 증착 시 PC 필름만을 사용할 때보다 HTPENG 소자의 성능을 높일 수 있으며, Cu 박막의 두께가 증가할수록 대전열의 차이로 인한 HTPENG 성능향상 효과가 더 커지는 것을 확인할 수 있다. 그러나 Cu 박막이 너무 두꺼워지면 유연한 PC 필름 상에서 반복되는 접촉에 따라 박리 및 균열이 발생할 가능성이 늘어날 수 있다.

3.3 나노패턴 적용을 통한 HTPENG 성능 고도화

TENG 전극에 나노패턴 구조를 성형함으로써 접촉 면적 증대 효과를 기대할 수 있다. Fig. 6은 나노각인으로 가공한 나노

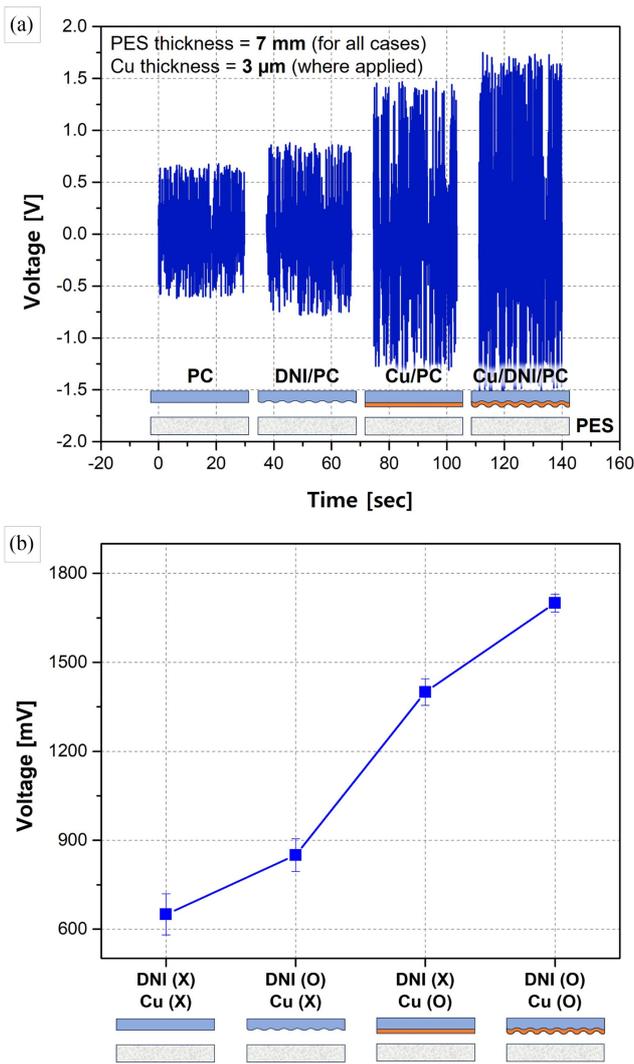


Fig. 6 (a) Performance evaluation of the PC/PES devices with or without the Cu layer and the DNI-ed nanopattern and (b) Averaged maximum voltages reachable for each device with the corresponding Cu and DNI combination

패턴의 적용 유무, 그리고 3 μm 두께의 Cu 박막 증착 유무 등 총 4가지 경우에 대하여 HTPENG 성능을 평가한 결과(약 30초 구간 및 달성가능평균 기전력)를 나타낸다. Cu가 증착되지 않은 두 경우의 비교를 통하여 나노패턴 적용을 통한 발전 성능 향상 효과를 거둘 수 있으며, 이에 Cu 박막을 증착함으로써 추가적인 성능 향상을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다.

이와 같이, 본 연구를 통하여 개발한 HTPENG 소자는 나노패턴 구조 활용 및 금속증착을 통한 우수한 TENG 효과, 그리고 PES 적용을 통한 건설한 PENG 효과를 동시에 얻음으로써 종래 TENG 또는 PENG 단독으로 에너지 하베스팅을 추구하는 소자 대비 보다 우수한 성능을 얻을 수 있다. 연속적인 소생각인 기반의 나노패터닝 공정원리 및 저가 소재를 활용한 고탄성 다공성 압전 스펀지 기반의 HTPENG 소자는 고생산성 대면적형 에너지 하베스팅에 활용될 수 있다.

3.4 향후 보완 및 심화연구 사항

본 논문에서 제시한 내용에 후속하여, 보다 다양한 조건의 추가 개발 및 응용을 수행할 수 있을 것이다. 그 구체적인 몇 가지 사항으로서 HTPENG 구동 시 TENG과 PENG의 보다 정확한 ‘지분’을 규명하고자 추가 실험을 진행 중인 가운데, 700 nm 주기의 1차원 나노패턴, 3 Hz의 접촉 주기 등 본 연구에서는 고정 하였던 공정인자들 및 PC, PDMS 등 전극소재들을 다변화하며 성능을 고도화하는 연구가 함께 진행 중이다. 또한, 단순 사각평면 형상의 전극구조에서 나아가 신발 깔창 형상이나 곡면 형태의 소자들을 만듦으로써 보다 실용적이고 광범위한 적용을 꾀하는 응용연구도 아울러 추진 중이다.

4. 결론

본 연구에서는 나노패턴·금속 증착 된 필름과 PES 간의 적층 및 주기적 접촉을 통하여 TENG과 PENG을 동시에 달성할 수 있는 HTPENG 소자를 개발하고 성능평가 및 최적화 결과를 제시하였다. 폴리머 필름 표면에 금속박막을 증착하고 나노패턴을 성형함으로써 전극 간 접촉 면적 및 대전열 차이를 높여 TENG 성능을 제고할 수 있음을 보였다. 또한, PES의 제작 시 압전물질의 조성 및 두께 조절을 통하여 전극 간 접촉에 따른 기계적 변형 및 탄성회복 와중에 획득 가능한 PENG 성능을 최적화하였다. HTPENG 소자는 유사한 공정조건으로 제작된 일반적인 TENG 또는 PENG 소자 대비 잠재적으로 더 높은 에너지 하베스팅 성능을 보일 수 있음으로써, 반복적인 접촉 및 변형 등의 사용 환경에 특화된, 예컨대 신체 부착형 센서 및 액추에이터, 웨어러블 디바이스 등의 와이어리스 전원공급·구동에 긴요하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 연구는 정부(교육부) 재원 한국연구재단 보호연구(No. NRF-2022R111A2073224) 및 정부(과학기술정보통신부) 재원 한국연구재단 STEAM연구사업(No. NRF-2022M3C1A3081178)의 지원으로 수행됨.

REFERENCES

1. Shaikh, F. K., Zeadally, S., (2016), Energy harvesting in wireless sensor networks: a comprehensive review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 1041-1054.
2. Sudevalayam, S., Kulkarni, P., (2010), Energy harvesting sensor nodes: survey and implications, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 13(3), 443-461.

3. Ku, M.-L., Li, W., Chen, Y., Liu, K. J. R., (2015), Advances in energy harvesting communications: past, present, and future challenges, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 18(2), 1384-1412.
4. Tian, S., Wei, X., Lai, L., Li, B., Wu, Z., Dai, Y., (2022), Frequency modulated hybrid nanogenerator for efficient water wave energy harvesting, *Nano Energy*, 102, 107669.
5. Khalid, S., Raouf, I., Khan, A., Kim, N., Kim, H. S., (2019), A review of human-powered energy harvesting for smart electronics: recent progress and challenges, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 6, 821-851.
6. Zhang, R., Olin, H., Material choices for triboelectric nanogenerators: a critical review, *EcoMat*, 2(44), DOI:10.1002/eom2.12062.
7. Li, G.-Z., Wang, G.-G., Ye, D.-M., Zhang, X.-W., Lin, Z.-Q., Zhou, H.-L., Li, F., Wang, B.-L., Han, J.-C., (2019), High-performance transparent and flexible triboelectric nanogenerators based on PDMS-PTFE composite films, *Advanced Electronic Materials*, 5(4), 1800846.
8. Davoudi, M., An, C.-Y., Kim, D.-E., (2023), A review on triboelectric nanogenerators, recent applications, and challenges, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 11(4), 1317-1340.
9. Kwon, Y. H., Shin, S.-H., Kim, Y.-H., Jung, J.-Y., Lee, M. H., Nah, J., (2016), Triboelectric contact surface charge modulation and piezoelectric using inducement using polarized composite thin film for performance enhancement of triboelectric generators, *Nano Energy*, 25, 225-231.
10. Kim, W. J., (2020), Development of hybrid generator using triboelectric-electromagnetic components for scavenging wind and water wave energy, M.Sc. Thesis, Jeju National University.
11. Kim, H. S., Kim, J.-H., Kim, J., (2011), A review of piezoelectric energy harvesting based on vibration, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 12, 1129-1141.
12. Sappati, K. K., Bhadra, S., (2020), Flexible piezoelectric 0-3 PZT-PDMS thin film for tactile sensing, *IEEE Sensors*, 20(9), 4610-4617.
13. Lee, J., Hajra, S., Panda, S., Oh, W., Oh, Y., Shin, H., Mishra, Y. K., Kim, H. J., (2024), Accelerate the shift to green energy with PVDF based piezoelectric nanogenerator, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 11(1), 233-241.
14. Oh, D. K., Lee, S., Lee, S. H., Lee, W., Yeon, G., Lee, N., Han, K.-S., Jung, S., Kim, D. H., Lee, D.-Y., Lee, S. H., Park, H. J., Ok, J. G., (2019), Tailored nanopatterning by controlled continuous nanoinscribing with tunable shape, depth, and dimension, *ACS Nano*, 13(10), 11194-11202.
15. Oh, D. K., Lee, W., Chae, H., Chun, H., Lee, M., Kim, D. H., Kim, J., Choi, J., Hwang, S., Park, M., Yeon, G., Jung, S., Rho, J., Ok, J. G., (2022), Burr- and etch-free direct machining of shape-controlled micro- and nanopatterns on polyimide films by continuous nanoinscribing for durable flexible devices, *Microelectronic Engineering*, 257, 111740.
16. Lee, U., Kim, H., Oh, D. K., Lee, N., Park, J., Park, J., Son, H., Noh, H., Rho, J., Ok, J. G., (2024), Azimuthal rotation-controlled nanoinscribing for continuous patterning of period- and shape-tunable asymmetric nanogratings, *Microsystems & Nanoengineering*, 10(1), 60.
17. So, S.-Y., Park, S.-H., Park, S.-H., Gwak, G.-M., Lyu, S.-K., (2023), Additive-manufactured flexible triboelectric sensor based on porous PDMS sponge for highly detecting joint movements, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 10(1), 97-107.
18. Song, Y., Chen, H., Su, Z., Chen, X., Miao, L., Zhang, J., Cheng, X., Zhang, H., (2017), Highly compressible integrated supercapacitor-piezoresistance-sensor system with CNT-PDMS sponge for health monitoring, *Small*, 13(39), 1702091.
19. Tan, X., Zheng, J., (2022), A novel porous PDMS-AgNWs-PDMS (PAP)-sponge-based capacitive pressure sensor, *Polymers*, 14(8), 1495.



Hyunmin Baek

B.S. in the Department of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology. His research interest is nanostructure-based energy harvesting and energy conversion.
E-mail: 18100296@seoultech.ac.kr



Chaeun Lee

B.S. in the Department of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology. Her research interest is piezoelectric energy harvesting structures and materials.
E-mail: 20100791@seoultech.ac.kr



Hocheol Jeong

B.S. in the Department of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology. His research interest is nanopatterning processes and their applications.
E-mail: sacddr@seoultech.ac.kr



Jong G. Ok

Professor in the Department of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology. His research interest is smart multiscale manufacturing utilizing nanoscale materials and structures in a scalable and macroscale fashion.
E-mail: jgok@seoultech.ac.kr

• Topical Issue • 가공된 기능성 재료 기술(Engineered Functional Materials)

마이크로 홀 배열 세리아 기능층을 포함하는 고내구 고분자 전해질막 연료전지

Micro-hole Array Ceria Functional Layer Embedded Membrane for Durable Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell

설창욱¹, 장세근^{2,#}, 김상문^{1,#}
Changwook Seol¹, Segeun Jang^{2,#}, and Sang Moon Kim^{1,#}

¹ 인천대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Incheon National University)

² 국민대학교 기계공학과 (School of Mechanical Engineering, Kookmin University)

Corresponding Authors / E-mails: ksm7852@inu.ac.kr, TEL: +82-32-835-8096, ORCID: 0000-0002-2311-2211
sjang@kookmin.ac.kr, TEL: +82-2-910-4815, ORCID: 0000-0001-8319-8400

KEYWORDS: Polymer electrolyte membrane fuel cell (고분자 전해질막 연료전지), Membrane durability (전해질막 내구성), micro-pattern (마이크로 패턴), Plasma etching (플라즈마 식각), Radical scavenger (라디칼 제거제)

For the commercialization of polymer electrolyte membrane fuel cells (PEMFCs), it is essential to achieve high performance while improving the durability of the membrane electrode assembly. In particular, the durability of PEMFCs can be improved by adding radical scavengers, such as CeO₂ (ceria), to the membrane. Though it is desirable to insert the ceria at the interface between the membrane and electrode, where the generated radical attack initiates, this increases interfacial resistance and ionic resistance, thereby inducing a probable reduction in initial performance, compared to that of a conventional membrane. Here, we developed modified Nafion electrolyte membranes with a spatially located patterned ceria containing Nafion ionomer to improve durability while minimizing performance degradation. The fabrication process includes an etching process to pattern the electrolyte membrane, and the ceria nanoparticle layer is selectively deposited by spray coating onto the membrane. The synergetic effect of the structural modification of the electrolyte membranes and the introduction of the functional ceria layer exhibited improved chemical durability, while maintaining the initial performance of the PEMFC.

Manuscript received: March 19, 2024 / Revised: May 24, 2024 / Accepted: May 30, 2024

NOMENCLATURE

PEMFC	=	Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell
MEA	=	Membrane Electrode Assembly
HFR	=	High Frequency Resistance
PFSA	=	Perfluorosulfonic Acid

1. 서론

고분자 전해질막 연료전지(PEMFC)는 높은 에너지 변환 효율과 이산화탄소, 질소산화물, 황산화물, 탄화수소 등의 오염 물질을 배출하지 않는 친환경 에너지 장치로 널리 인정받고 있다[1,2]. 이러한 여러 장점 덕분에 PEMFC는 수소 자동차, 휴대용 기기,

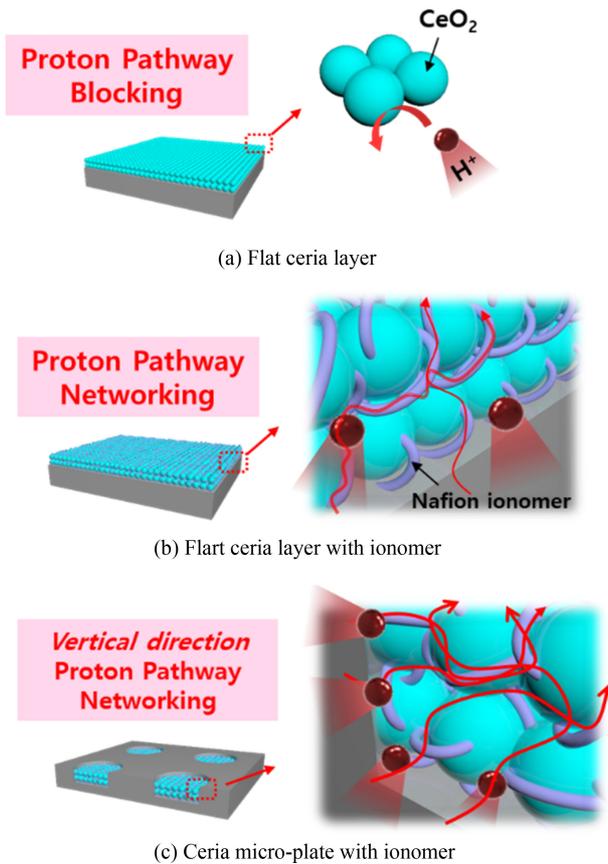


Fig. 1 Schematic illustration of ceria-embedded Nafion membrane: (a) Flat ceria layer, (b) Flat ceria layer with ionomer, and (c) Ceria micro-plate with ionomer

무인 항공기, 지게차, 굴삭기 또는 건물용 발전기 등 다양한 모빌리티 응용에서 주요 동력원으로 사용될 수 있다[3,4]. PEMFC의 핵심 구성 요소인 막-전극접합체(MEA)는 전기화학 반응이 일어나는 장소로, 산화극과 환원극의 촉매층 및 양성자 교환막으로 구성되어 있다. 나피온(Nafion) 전해질막과 같은 퍼플루오로술폰산(PFSA) 기반 전해질막은 높은 이온전도도, 유연한 기계적 특성, 구조적 안정성 덕분에 PEMFC의 전해질로 널리 사용되고 있다[5,6]. 그럼에도 불구하고, 높은 비용, 높은 가스 투과성, 그리고 가혹한 연료전지 작동 조건에서의 화학적 열화는 PEMFC의 상용화를 저해하는 주요 요소이다. 특히, 높은 전류 밀도에서 작동할 때 환원극에서 불완전한 산소 환원 반응이나 전해질막을 통한 수소 가스의 크로스오버(Crossover)로 인해 생성되는 라디칼들이 전해질막의 과불화탄소 백본과 촉매층의 사이드 체인 이온기를 공격, 이로 인해 멤브레인이 얇아지고, 이온기가 용해되며, 표면에 결함이 형성될 수 있다. 이 문제를 해결하기 위해, 라디칼의 화학적 공격을 완화하고 멤브레인을 강화하기 위해 멤브레인에 라디칼 제거제 또는 기능성 첨가제를 삽입하는 연구가 진행되어 오고 있는데, 이러한 첨가제 중에서 세리아(Ceria, CeO_2)는 산성 환경에서 라디칼을 효과적으로 제거하고 재생할 수 있는 능력 덕분에 주목받고 있다. 세리아의 활용은 라디칼 공격을 효과적으로 제거하여 PEMFC의 내구성을

향상시킬 수 있다[7-9]. 그러나, 세리아 층의 삽입은 전해질막과 전극층 계면 저항 증가 및 막-전극접합체의 이온전도도 능력을 떨어뜨려, 초기 성능이 기존 막-전극접합체보다 좋지 않다는 단점을 지니고 있다[10,11].

따라서, 본 논문에서는 패틴화된 전해질막에 나피온 이오노머 체인이 포함된 세리아 층을 부분적으로 삽입하는 공정을 제안하고자 한다. Fig. 1과 같이, 전면적에 세리아 층만 삽입되어있는 전해질막을 사용할 경우, 전해질막과 전극층 간의 이오노머 체인 네트워크가 세리아 층에 의해 연결되지 못해 막-전극접합체의 이온전도도가 감소 및 옴 저항 증가를 유발할 수 있다. 전해질막과 전극층 간 이오노머 네트워크 형성을 하기 위해, 삽입된 기능성 세리아 층에 나피온 이오노머를 추가하여 막-전극접합체 이온전도도 감소를 최소화할 수 있다. 더 나아가, 국부적으로 식각이 된 전해질막의 마이크로 패턴 속에 세리아/이오노머 층을 삽입하여 성능 감소 최소화 및 내구성 향상을 기대할 수 있다. 본 논문에서 제안하는 공정은 전해질막 패틴화를 위한 식각 공정을 포함하며, 세리아 층은 스프레이 코팅 공정을 통해 고분자 스텐실 마스크 내 마이크로 홀패턴에 노출된 전해질막 표면에 부분적으로 삽입된다. 부분적으로 삽입된 세리아 층이 삽입된 나피온 막이 기존 막 대비 우수한 화학적 안정성을 보일 수 있으며, 성능 저하를 최소화하면서 향상된 내구성을 동시에 제공할 수 있다.

2. 실험방법

2.1 세리아 기능층이 삽입된 전해질막 제조법

Fig. 2와 같이 마이크로 홀패턴을 갖는 고분자 스텐실을 에칭 마스크로 사용되어 기존의 나피온 막(NRE-211, Dupont, USA) 표면에 부착시킨다. 폴리머 스텐실과 폴리이미드 필름을 순차적으로 유리 기판에 부착된 나피온 막 상에 배치해 접촉을 유지하였다. 결합된 어셈블리를 플라즈마 챔버(Femto Science, Korea) 안에 배치시키고, 진공 펌핑과 공기 가스 공급 사이의 균형을 맞추어 3.0×10^{-1} Torr의 압력을 유지시켰다. 50 W의 Capacitive 플라즈마 전력으로 이온, 전자 및 자유 라디칼로 구성된 산소 플라즈마가 생성되었으며, 고분자 스텐실 마스크로 덮인 나피온 막은 식각 시간 약 2시간 동안 산소 플라즈마에 노출시켰다. 고분자 스텐실과 나피온 막 사이의 완전한 접촉으로 인해 스텐실과 막 사이의 접촉 부위는 식각되지 않았으며, 스텐실의 마이크로 홀패턴이 배치된 노출 영역의 막이 선택적으로 식각되었다. 본 실험에서 사용된 세리아 나노입자의 크기와 관련하여, 세리아 입자의 활성 표면적은 입자 크기에 반비례하며, 작은 크기의 입자를 사용할 때 라디칼 소거 효과가 향상될 수 있다. 그러나 크기가 10 nm 이하인 매우 미세한 입자는 입자 간의 약한 반발력과 고유의 불안정성 때문에 강하게 응집되는 경향이 있다[12]. 게다가, 세리아 나노입자의 화학적 안정성은 결정립 크기가 커지고 단위 질량당 표면적이 감소함에 따라 증가하는 것으로 보고되었다[11]. 따라서, 라디칼 소거 효과와 적절한 안정성을

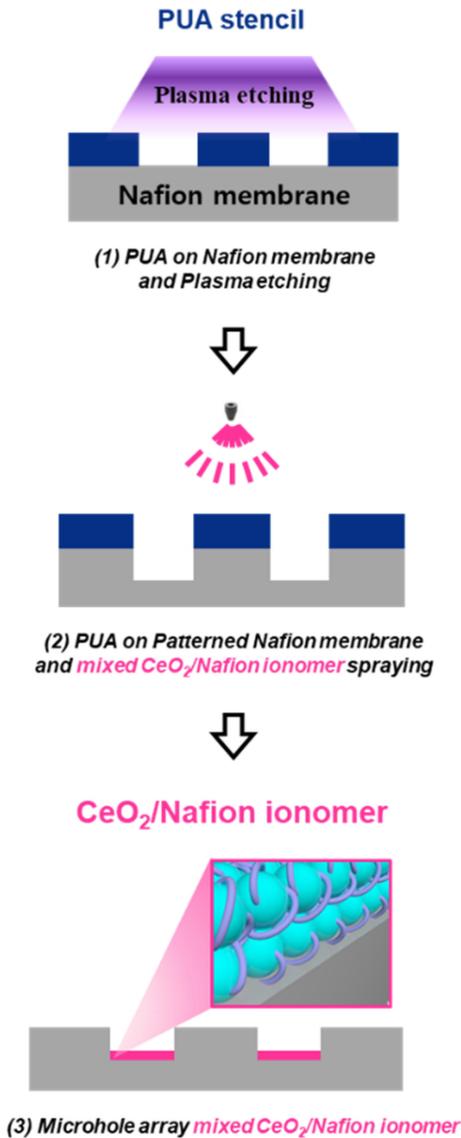


Fig. 2 Schematic illustration of fabrication of ceria micro-plate ceria on Nafion membrane

달성하기 위해 적절히 큰 크기의 입자를 사용해야 한다. 다시 말해, 라디칼의 소거 효과는 응집 문제가 두드러지는 작은 크기의 나노입자(4-6 nm)보다 큰 나노입자에서 더 효과적이기에 25 nm 크기의 세리아 입자를 사용하였다. 세리아/이오노머 용액은 0.5 wt% 로 희석된 세리아 용액과 5 wt% 나피온 이오노머를 5:1 부피비로 섞어 준비하였다. 식각된 부위에 준비된 세리아/이오노머 용액을 스프레이 방식으로 도포하여 부분적으로 세리아 기능층이 삽입된 나피온 전해질막을 제작하였다.

2.2 막-전극접합체 제작

전극층은 Pt/C 촉매 용액을 스프레이 공정을 통해 제조되었으며, 준비된 촉매 용액은 40 wt% Pt/C 촉매(Johnson Matthey Co., UK)와 5 wt% 나피온 이오노머 용액(Sigma-aldrich, USA)을 균일하게 혼합하여 제조되었다. 나피온 이오노머와 백금 촉매의

비율은 건조 혼합물(Pt/C+Nafion Ionomer)의 총 중량에 대한 Nafion의 중량 비율로 정의되었으며, 이를 23 wt%로 설정하였다. 또한, 촉매 잉크의 점도를 조절하기 위해 증류수와 이소프로필 알코올을 첨가하고 초음파발생장치를 통해 균일하게 혼합하였다. 그 후, 촉매 잉크를 순수한 나피온 전해질막 표면에 직접 분사하여 산화극과 환원극 각각 약 0.2 mg·cm⁻²의 동일한 Pt 로딩으로 구성하였고, 활성 면적은 각각 5.0 cm²으로 제작되었다. 이후 상온에서 12시간 이상 건조하여 막-전극접합체를 준비하였다.

2.3 연료전지 단위전지 구성 및 평가

준비된 막-전극접합체를 가스화산층 사이에 배치하고 (Sigracet 39BC, SGL Carbon, Germany), 양쪽에 테프론 개스킷을 삽입하였다. 연료전지 단위전지에 사용된 유동장은 채널과 리브(Rib) 폭은 각각 1 mm로, Serpentine 형태 채널이 있는 흑연 소재의 판이 사용되었다. End Plate를 양쪽에 배치시킨 뒤, 8개의 볼트를 80 in·lb의 토크로 조여 단단히 조립하였다. 준비된 단위전지의 성능 평가는 완전 습도 작동 조건에서 모두 평가되었으며, 완전 가습 조건에서는 단위전지 온도를 60°C로 유지하고, 산화극과 환원극에 각각 완전 가습된 수소와 공기 가스를 각각 150, 800 SCCM의 유량으로 주입하였다. 같은 작동 환경에서, 고주파 저항(High Frequency Resistance, HFR)은 Potentiostat (HCP-803, BioLogic, France) 장비로 평가되었으며, 4.0 kHz의 고정 주파수를 갖는 1.0 A의 정전류 신호에서 측정되었다. 본 실험에서 사용한 전해질 막의 화학적 내구성을 평가하기 위해, 일정한 전압을 유지시키는 개방 회로 전압(OCV) 테스트를 수행하였다. OCV 테스트에서는 단위전지 온도를 90°C로 유지시키고, 25%의 상대 습도(Relative Humidity, RH)로 부분 가습된 수소 가스와 산소 가스를 각각 200 SCCM 유량으로 공급하여 48시간 동안 OCV 변화를 기록하였다.

2.4 형태학적 분석

각 샘플의 형태학적 특성을 관찰하기 위해 가속 전압 10.0 kV의 전계 방출 주사 전자 현미경(JEOL, JSM-7800F, JAPAN)을 사용하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 세리아 층 삽입 및 저항 특성 평가

세리아 층에 첨가된 이오노머가 전해질막과 전극층 간의 네트워크 형성 효과를 확인하기 위해, 세리아 로딩별로 정전류 1.0 A에서의 High Frequency Resistance를 측정 및 비교를 하였다(Fig. 3). 세리아 층이 삽입되지 않은 Pristine한 MEA는 약 0.273 ohm·cm²의 값을 나타내었다. 전면적에 세리아 층이 삽입된 MEA는 세리아 로딩량이 증가함에 따라 저항값이 지속적으로 증가하였고, 특히 0.22 mg·cm⁻²에서 급격한 저항 증가가 나타났다. 이에 반해, 이오노머가 섞인 세리아층이 삽입된 MEA의

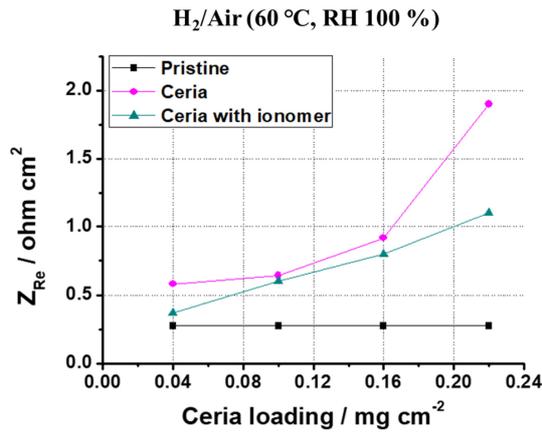


Fig. 3 The HFR plot of pristine, flat ceria without ionomer, and ceria with ionomer deposited on Nafion membrane 211

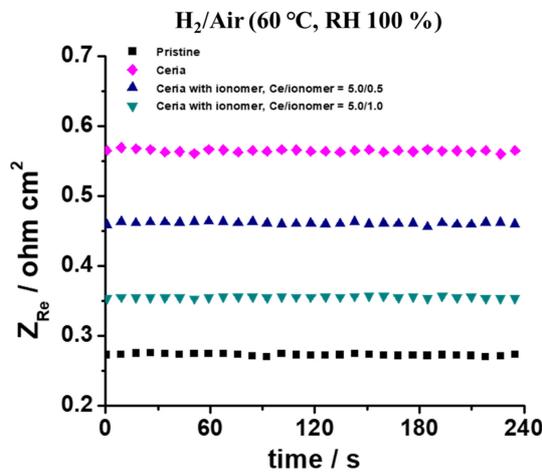


Fig. 4 The HFR plot of pristine, ceria without ionomer, ceria with ionomer (ceria solution/ionomer solution = 5.0/0.5 v/v), and ceria with ionomer (ceria solution/ionomer solution = 5.0/1.0 v/v) deposited on Nafion membrane 211

경우 전체적으로 선형적으로 저항값이 증가되었고, 같은 세리아 로딩양인 0.22 mg·cm⁻²에서 상대적으로 확연히 낮은 저항값을 나타내었다. 이는 나피온 이오노머가 전해질막으로부터 전달된 수소 이온이 전극층으로의 전도를 위한 이오노머 체인 네트워크 역할을 할 수 있음을 의미하며, 나피온 이오노머가 혼합되어 있는 경우, 높은 로딩량의 세리아를 MEA 내에 삽입할 수 있음을 나타낸다.

세리아 기능층의 이오노머 양에 따른 효과를 조사하기 위해, 0.04 mg·cm⁻²의 동일한 세리아 로딩량으로 도포된 전해질막의 HFR 측정을 해보았다. 먼저, 이오노머 없이 세리아 층만 도입된 전해질막의 오믹 저항은 순수한 나피온 전해질막 대비하여 약 106% 증가하였다. 다음으로, 상대적으로 적은 양의 이오노머를 포함한 세리아 층을 가진 전해질막(Ceria with Ionomer, Ceria Solution/Ionomer Solution = 5.0/0.5 v/v)의 경우, 순수한 나피온 전해질막 대비하여 32.5% 높은 오믹 저항이 측정되었으며, 오믹 저항 감소 효과를 보였다. 이오노머 양을 증가를

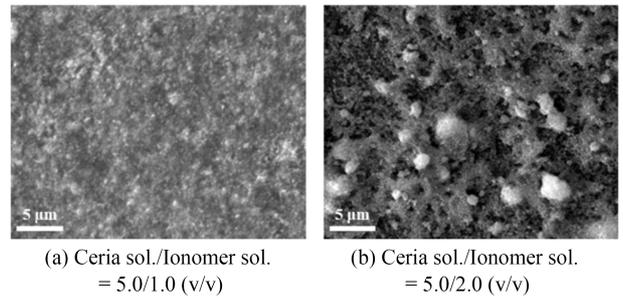
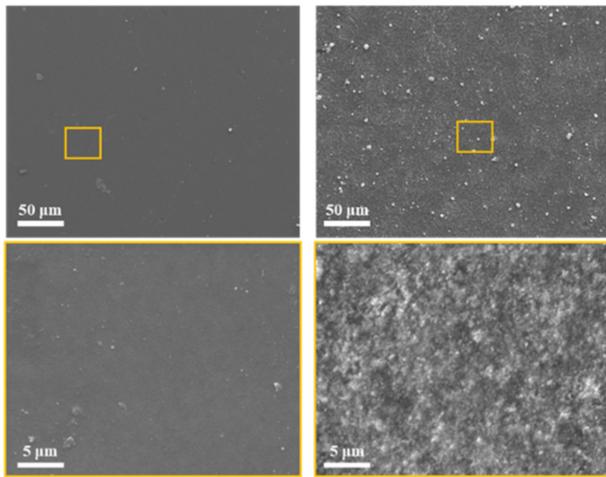


Fig. 5 The SEM images of flat ceria with ionomer (ceria solution/ionomer solution = 5.0/1.0 v/v), and ceria with ionomer (ceria solution/ionomer solution = 5.0/2.0 v/v) deposited on Nafion membrane 211

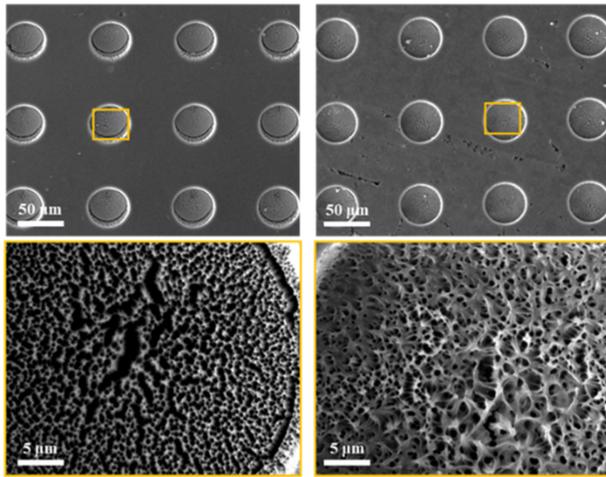
시켰을 때의 전해질막(Ceria with Ionomer, Ceria Solution/Ionomer Solution = 5.0/1.0 v/v)의 경우, 순수한 나피온 전해질막 대비하여 17.6% 높은 오믹 저항이 측정되었으며, 이오노머 함량이 높을수록 오믹 저항 감소 효과가 커지는 것을 확인할 수 있었다. 그러나, 세리아 나노입자 대비 나피온 이오노머의 비율을 계속해서 높였을 때, Fig. 5와 같이 세리아 입자가 뭉치는 현상(Aggregation)이 나타났다. 이는 세리아 입자의 단위 질량당 표면적이 줄어들어, 라디칼 스캐빈저 역할 능력 저하를 유도할 수 있기 때문에, 본 실험에서는 오믹 저항 감소 효과와 더불어 입자 뭉침 현상을 고려하여 Ceria with Ionomer, Ceria Solution/Ionomer Solution = 5.0/1.0 v/v를 선정하여 실험을 수행하였다.

3.2 단위전지 성능 및 내구도 평가

나피온 이오노머가 전해질막과 전극층의 이온 전도 네트워크를 형성할 수 있음을 확인한 후, 본 논문에서 제안하는 공정법으로 세리아 기능층이 고르게 도포가 되는지 확인하기 위해, Fig. 6과 같이 나피온 전해질막(Pristine Nafion Membrane 211), 전면적으로 세리아 층이 도포된 전해질막(Nafion Membrane with Flat Ceria Layer), 패턴화된 전해질막(Micro-pattern Etched Membrane) 그리고 부분적으로 세리아 나노입자가 삽입된 전해질막(Nafion Membrane with Patterned Ceria Micro-plates)의 주사전자현미경의 이미지를 얻었다. 본 논문에서는 50 μm 크기의 홀 패턴을 사용하였다. 패턴 크기 선정과 관련하여, 세리아 층은 내구도를 높이지만 동시에 양성자 전도도를 낮추기 때문에 적절한 패턴 형상을 찾는 것이 중요하다. 이는 앞서 연구된 저가 습 환경에서 성능 향상을 위해 사용된 TiO₂ 입자 패턴 어레이가 도포된 복합 전해질막 연구를 바탕으로 선정하였다[13]. 세리아 나노입자는 전반적으로 고르게 분포될 수 있었으며, 특히 부분적으로 삽입된 세리아 나노입자는 홀 패턴에만 선택적으로 도포된 것을 확인할 수 있었다. 식각된 홀 패턴 부분에 선택적으로 삽입된 세리아 입자와 도포되지 않은 나피온 전해질막의 구분을 명확하게 하기 위해, 에너지분산형 분광분석법(Energy Dispersive Spectrometer, EDS)을 사용하였다. Fig. 7과 같이 제작된 세리아 나노입자가 삽입된 홀 패턴의 전해질 막은 전해질막

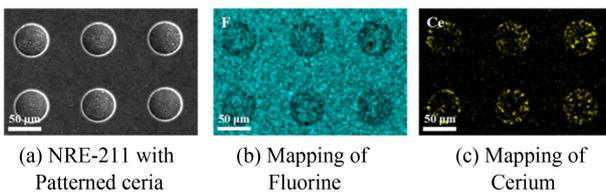


(a) Pristine NRE-211 (b) NRE-211 with flat ceria



(c) Patterned NRE-211 (d) NRE-211 with Patterned ceria

Fig. 6 Scanning electron microscope (SEM) images of the pristine Nafion membrane 211 (a), Nafion membrane with flat ceria layer (b), micro-pattern etched membrane (c), and Nafion membrane with patterned ceria micro-plates (d)



(a) NRE-211 with Patterned ceria (b) Mapping of Fluorine (c) Mapping of Cerium

Fig. 7 Morphological features of NRE-211 with Patterned ceria: (a) The SEM images of NRE-211 with Patterned ceria, (b) The corresponding EDS elemental mapping images of Fluorine (F), and (c) The corresponding EDS elemental mapping images of Cerium (Ce)

및 나피온 이오노머 구성 성분인 플루오린(F) 이온으로 확인이 되었다. 세리아 나노입자층의 경우, 전해질막의 홀 패턴 부분에 만 선택적으로 도포된 것을 Ce 원자 맵핑을 통해 확인하였으며, 이는 기능성 세리아 나노입자층이 부분적으로 홀 패턴 형상으로 삽입이 되었음을 시사한다.

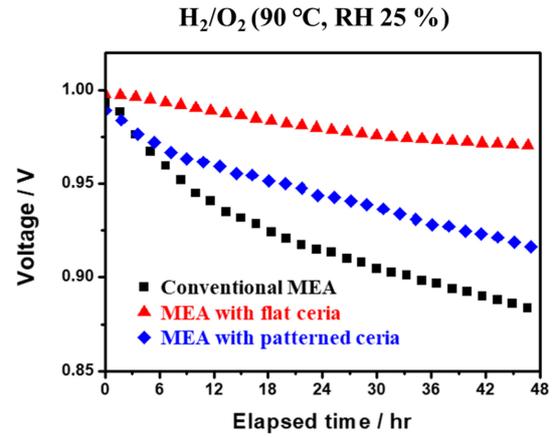


Fig. 8 OCV profiles of MEAs with flat ceria and patterned ceria and conventional MEA with OCV retention for 48 hours

나피온 전해질막에 삽입된 세리아 층의 효과를 확인하기 위해 나피온 전해질막, 전면적에 걸쳐서 세리아 나노입자 층이 있는 나피온 막과 부분적으로 세리아 나노입자 층이 삽입되어 있는 나피온 막을 사용하여 단위 전지를 구성하여, 각 전해질막의 화학적 내구도를 파악하기 위한 OCV 테스트를 48시간 동안 Fig. 8과 같이 실시하였다. 시험 전에 모든 샘플의 OCV는 약 0.95 V 이상의 값을 나타내었으며, 이는 PEMFC가 나피온 막에 의해 효과적으로 분극될 수 있음을 나타낸다. 그러나 OCV 환경에서의 유지가 지속됨에 따라 PEMFC의 OCV는 나피온 막의 손상으로 인해 점차 감소하였다. 순수 나피온 막과 세리아 층이 있는 나피온 막의 단위 전지의 경향을 비교한 결과, 후자가 OCV 감소량은 약 29 mV로 더 적었으며(전자는 111 mV), 이는 세리아 나노입자 층이 전해질 막의 화학적 내구성을 향상시킬 수 있음을 나타낸다. 부분적으로 삽입된 세리아 층 역시, 순수한 나피온 막을 사용했을 때보다 더 낮은 OCV 변화량을 나타냈으나(74 mV), 전면적에 걸쳐 삽입된 세리아 나노입자층의 전해질 막보다는 높은 감소량을 나타내었다. OCV 테스트 결과, 세리아 층이 깔린 나피온 막의 면적과 화학적 내구성 향상과는 비례 관계에 있음을 확인하였다. 제조된 전해질 막을 사용한 단위전지의 성능의 유지도를 파악하기 위해, PEMFC의 성능을 OCV 테스트 전후로 비교하였다(Fig. 9). PEMFC의 양극/음극에 완전히 가습된 수소/공기 가스를 공급하고 단위전지 작동 온도를 60 °C로 고정하였다. OCV 테스트 이전에 세리아 나노입자가 전면적으로 삽입된 전해질막의 단위전지의 최대 전력 밀도는 748 mW·cm²로 기준 PEMFC의 최대 전력 밀도 값(872 mW·cm²)에 비해 약 14.22% 감소하였다.

이는 수소 이온 전달이 전면적에 걸쳐 형성된 세리아 나노입자층에 막혀 원활하지 못하여 이온전도도 감소, 옴 저항의 증가로 인한 것으로 사료된다. 반면, 부분적으로 삽입된 세리아 층의 성능은 기존의 것에 비해 약 2.98% 감소된 846 mW·cm²의 최대전력밀도를 나타내었으며, 이는 약 20% 세리아 층을 제외한 나머지 면적의 높은 이온전도도, 낮은 계면 저항에 기인하여, 높은 성능을 나타낸 것으로 보인다. OCV 테스트 후에는 PEMFC의 성능 순서가 뒤바뀌었는데, 기준 막-전극접합체의 최대 전류

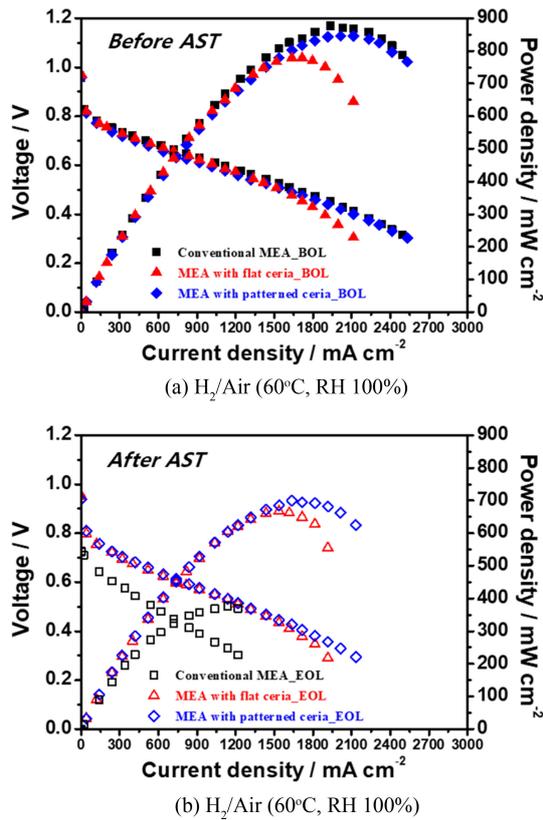


Fig. 9 Polarization curves of MEAs with flat ceria and patterned ceria and conventional MEA before OCV test (a) and after OCV test (b)

밀도값은 $370 \text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ 로 약 57.6% 감소된 성능을 보여주었다. 반면, 전면적에 걸쳐 삽입된 세리아 나노입자층의 전해질 막을 포함하는 단위전지는 OCV 테스트 전후에 성능은 약 $687 \text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ 로 약 8.16%의 가장 낮은 변화량을 보여주었다. 특히, 패턴화된 세리아/나피온 이오노머 기능층이 삽입된 막-전극접합체는 약 16.8% 감소된 최대 전류 밀도값 $704 \text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ 를 나타내었으며, 이는 패턴화된 기능성 금속층이 라디칼 스캐빈저 역할을 전해질 막에 일부 작용하여 기존 막-전극접합체보다 더욱 우수한 내구도를 나타낼 수 있음을 보여준다. 비록 전면적에 도포된 세리아 층을 포함하는 전해질막을 활용한 단위전지의 내구도보다 뛰어난 것은 아니지만, 3차원 형상의 막-전극접합체의 구조적 장점 즉, 반응성이 가장 활발한 막/전극 계면의 확장에 따른 촉매활용률 향상 및 이온전도경로 추가 확보를 통해[14], 초기 성능 확보와 함께 내구성 향상을 동시에 가질 수 있다는 것을 보여준다.

4. 결론

본 연구에서는 세리아/나피온 이오노머 기능층을 공간적으로 패턴화된 전해질막 표면에 삽입함으로써, 기존의 막-전극접합체와 유사한 초기 성능을 유지하면서도 뛰어난 내구성을 확보할

수 있음을 보여주었다. 세리아 층을 단독으로 도포하였을 때에는 세리아 층 두께에 따라 지수적으로 HFR 저항이 증가하는 반면, 세리아/나피온 이오노머를 혼합하여 도포한 기능층은 두께에 따라 선형적으로 HFR 저항이 증가하는 특성을 확인하였다. 마이크로 홀패턴을 지니는 고분자 스텐실을 이용하여 나피온 전해질막 상에 패턴화 및 세리아 기능층을 스프레이 방식으로 도포할 수 있었으며, 부분적으로 삽입된 세리아/나피온 이오노머 기능층이 라디칼 제거제 역할을 수행하여 개선된 화학적 내구성을 보여주었다. 또한, 전해질막의 3차원 구조화를 통해 전면적에 도포된 세리아 기능층을 갖는 전해질막보다 우수한 초기 성능을 확보할 수 있었으며, 48시간 OCV 테스트 이후에도 더 나은 성능을 유지하는 것을 확인하였다. 향후 패턴 및 세리아/나피온 이오노머 로딩양 최적화를 통해 성능과 내구성 측면에서 더욱 향상된 연료전지 시스템 구현이 가능할 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the National Research Foundation (NRF) of Korea (No. RS-2023-00277319).

REFERENCES

- Gasteiger, H. A., Marković, N. M., (2009), Just a dream-or future reality?, *Science*, 324(5923), 48-49.
- O'hayre, R., Cha, S.-W., Colella, W., Prinz, F. B., (2016), *Fuel cell fundamentals*, John Wiley & Sons.
- Dyer, C. K., (2002), Fuel cells for portable applications, *Journal of Power Sources*, 106(1-2), 31-34.
- Paulson, L. D., (2003), Will fuel cells replace batteries in mobile devices?, *Computer*, 36(11), 10-12.
- Kusoglu, A., Weber, A. Z., (2017), New insights into perfluorinated sulfonic-acid ionomers, *Chemical Reviews*, 117(3), 987-1104.
- Spiegel, C., (2007), *Designing and building fuel cells*, Mcgraw-hill.
- Pearman, B. P., Mohajeri, N., Brooker, R. P., Rodgers, M. P., Slattery, D. K., Hampton, M. D., Cullen, D. A., Seal, S., (2013), The degradation mitigation effect of cerium oxide in polymer electrolyte membranes in extended fuel cell durability tests, *Journal of Power Sources*, 225, 75-83.
- Baker, A. M., Wang, L., Johnson, W. B., Prasad, A. K., Advani, S. G., (2014), Nafion membranes reinforced with ceria-coated multiwall carbon nanotubes for improved mechanical and chemical durability in polymer electrolyte membrane fuel cells, *The Journal of Physical Chemistry C*, 118(46), 26796-26802.

9. Kang, Y. S., Jang, S., Choi, E., Jo, S., Kim, S. M., Yoo, S. J., (2022), Sandwich-like nafion composite membrane with ultrathin ceria barriers for durable fuel cells, *International Journal of Energy Research*, 46(5), 6457-6470.
10. Baker, A. M., Mukundan, R., Spornjak, D., Judge, E. J., Advani, S. G., Prasad, A. K., Borup, R. L., (2016), Cerium migration during PEM fuel cell accelerated stress testing, *Journal of The Electrochemical Society*, 163(9), F1023-F1031.
11. Banham, D., Ye, S., Cheng, T., Knights, S., Stewart, S. M., Wilson, M., Garzon, F., (2014), Effect of CeOx crystallite size on the chemical stability of CeOx nanoparticles, *Journal of the Electrochemical Society*, 161(10), F1075-F1080.
12. Munusamy, P., Sanghavi, S., Varga, T., Suntharampillai, T., (2014), Silica supported ceria nanoparticles: a hybrid nanostructure to increase stability and surface reactivity of nanocrystalline ceria, *RSC Advances*, 4(17), 8421-8430.
13. Nam, L. V., Choi, E., Jang, S., Kim, S. M., (2021), Patterned mesoporous TiO₂ microplates embedded in Nafion® membrane for high temperature/low relative humidity polymer electrolyte membrane fuel cell operation, *Renewable Energy*, 180, 203-212.
14. Seol, C., Jang, S., Lee, J., Nam, L. V., Pham, T. A., Koo, S., Kim, K., Jang, J.-H., Kim, S. M., Yoo, S. J., (2021), High-performance fuel cells with a plasma-etched polymer electrolyte membrane with microhole arrays, *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 9(17), 5884-5894.

**Changwook Seol**

Ph.D. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Incheon National University. His research interest is micro-patterning and polymer electrolyte membrane fuel cell.

E-mail: scw1111@inu.ac.kr

**Segeun Jang**

Assistant Professor in the School of Mechanical Engineering, Kookmin University. His research interest is developing interface engineering and energy devices, including polymer electrolyte membrane fuel cells.

E-mail: sjang@kookmin.ac.kr

**Sang Moon Kim**

Associate Professor in the Department of Mechanical Engineering, Incheon National University. His research interest is multi-scale design and fabrication of membrane and electrode architectures for fuel cell.

E-mail: ksm7852@inu.ac.kr

수학적 필터링 기반 TPMS 열교환기 유동 특성 개선 연구

A Study on Improvement of Flow Characteristics of TPMS Heat Exchanger based on Mathematical Filtering

오서현¹, 김정은¹, 윤지성², 김도륜², 김정우^{1,2}, 박창용^{1,2}, 박근^{1,2,#}
Seo-Hyeon Oh¹, Jeong Eun Kim¹, Ji Seong Yun², Do Ryun Kim², Jungwoo Kim^{1,2}, Chang Yong Park^{1,2}, and Keun Park^{1,2,#}

¹ 서울과학기술대학교 기계설계로봇공학과 (Department of Mechanical Design and Robot Engineering, Seoul National University of Science and Technology)
² 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과 (Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology)
Corresponding Author / E-mail: kpark@seoultech.ac.kr, TEL: +82-2-970-6358
ORCID: 0000-0003-3823-0672

KEYWORDS: Triply period minimal surface (삼중주기적 최소곡면), Heat exchanger (열교환기), Mathematical filtering (수학적 필터링), Additive manufacturing (적층 제조), Computational fluid dynamics (전산 유체 해석)

Recent advancements in additive manufacturing (AM) have made it possible to create compact heat exchangers (HXs) with complex geometries. This study introduces a new approach that uses Triply Periodic Minimal Surface (TPMS)-based designs for HXs. Mathematical filtering techniques are incorporated to optimize the local morphology changes. The goal of the proposed mathematical filtering method is to improve the flow characteristics and heat exchange capability of TPMS HXs by modifying the structure's morphology at the inlet and outlet regions. This modification facilitates flow selection and reduces pressure drop. The HX design includes cylindrical flow domains at the inlet and outlet regions. Three different HX designs with varying inlet/outlet domains (through-hole, half-hole, and taper-hole) were fabricated using polymer AM and DLP 3D printing. These designs were then tested for pressure drop. Among the three designs, the taper-hole configuration showed the best flow characteristics, with a 50% reduction in pressure drop compared to previous studies. The taper-hole design was then replicated using metal AM technology, resulting in a 70-125% improvement in heat exchange capacity compared to previous studies.

Manuscript received: February 29, 2024 / Revised: May 14, 2024 / Accepted: May 16, 2024
This paper was presented at KSPE Autumn Conference in 2023

NOMENCLATURE

ϕ_G = Gyroid-type TPMS Surface Function
 ϕ'_G = Filtered Gyroid-type TPMS Function
 C = Level-set Constant for TPMS Structure
 $F(x, y, z)$ = Sigmoid-based Filtering Function
 $G(x, y, z)$ = Filtering Function for Inlet and Outlet Domains
 k_x, k_y, k_z = Directional Sigmoid Coefficients
 β = Magnitude of Sigmoid Function
 (x_p, y_p, z_p) = Threshold Position of Sigmoid Function

(x_c, y_c) = Center Position of Cylindrical Filtering Domain
 (X_c, Y_c) = Center Position of Tapered Filtering Domain
 $R(z)$ = Radius Function of Tapered Filtering Domain
 D_h = Hydraulic Diameter of TPMS Channels

1. 서론

열교환기(Heat Exchanger, HX)는 서로 다른 온도의 2개 이상의 유체 간에 열에너지를 교환하기 위한 목적으로 사용되는 열전달 장치이다. 열교환기는 전자, 자동차 및 전력 시스템을 포함하는

다양한 산업 분야에서 열에너지 관리에 중요한 역할을 한다. 고집적(Compact) 열교환기는 면적 대 부피 비율(Area Density)이 높은 열교환기를 의미하는데, 액체 간의 열교환의 경우 200-400 m²/m³의 전열 면적 비율을 갖는 것으로 알려져 있다[1,2]. 고집적 열교환기는 단위 부피당 열교환 능력이 높은 장점이 있으며, 판형(Plate Type)[3], 판형-핀[4] 및 회로[5] 유형을 포함하여 낮은 유동 저항으로 열교환 능력을 향상시키기 위해 다양한 고집적 열교환기가 제안되었다[6]. 판형 고집적 열교환기는 일반적으로 다수의 미세 요철부를 포함하는 금속 박판을 적층하고 결합해서 제조하며, 이는 여러 단계의 제조 및 조립 공정을 필요로 한다[7].

최근 적층 제조(Additive Manufacture) 기술을 활용하여 고집적 열교환기를 개발하기 위한 연구가 수행되고 있다. 적층 제조는 2차원 단면을 적층하여 원하는 3차원 형상을 제조하는 방법으로 기존 기계가공으로 제조가 어려운 복잡한 형상을 제작할 수 있다[8]. 최근 적층 제조의 높은 설계 자유도를 활용하여 설계 최적화 및 맞춤형 부품생산에 널리 적용되고 있으며[9-11], 복잡한 열-유체 응용 부품의 설계 및 제작에 사용되고 있다[12]. 적층 제조를 통해 제작된 부품은 일체형으로 제작되기 때문에 향상된 열전달 능력을 제공하는 새로운 열교환기를 설계하기 위한 목적으로 사용되고 있다[13-15]. 또한 적층 제조를 사용하여 미세 반복(Micro-cellular) 구조의 용이한 제작이 가능하며[16-18], 다양한 미세 반복 구조를 적용하여 열교환기의 효율을 향상시키기 위한 목적으로 활용되고 있다[19].

상기 미세 반복 구조 중에서 삼중 주기 최소 곡면(Triply Periodic Minimal Surface, TPMS) 구조가 열교환기를 개발하기 위한 목적으로 널리 활용되고 있다[20-22]. TPMS 구조는 3차원 공간을 두 개의 연속적인 공간으로 구분할 수 있어 고온-저온 유체가 분리된 공간에서 열교환에 유리한 장점이 있다. 또한 설계 공간에 따라 단위 셀의 특성을 변화시킬 수 있어 열교환기의 기능성을 제고하기 위한 설계가 가능하다[23]. TPMS는 삼각함수 수식을 기반으로 3차원으로 특정 주기를 가지며 동일한 구조가 무한히 확장되는 미세 반복 구조이며[24], 삼각함수의 조합에 따라 Primitive, Gyroid, Diamond 등 다양한 단위 셀(Unit Cell)의 반복 구조로 표현된다[25]. TPMS 곡면은 평균 곡률을 0으로 유지하여 채널 내부에서 적은 압력 손실로 유체의 유동이 가능하며, 이러한 장점으로 인해 유체 혼합기(Fluid Mixer)[26], 방열부품(Heat Sink)[27], 금형 냉각 모듈[28]을 포함한 다양한 열-유체 응용 분야에 사용되어 왔다.

본 연구는 TPMS 열교환기의 유동 특성 및 열교환 성능을 제고하기 위해 수학적 필터링(Mathematical Filtering) 기반 TPMS 설계안을 제시하였다. TPMS 구조의 수학적 필터링 기법은 복잡한 TPMS 구조의 국부적 형상 변화를 위한 방법으로 유동 채널의 유동 특성 개선[29], 열교환기의 유동 선별 기능 부여[30] 등의 목적으로 본 연구자의 선행 연구로 수행되었다. 본 연구에서는 TPMS 열교환기 입출구 영역의 유동 선별 및 압력강하 저감을 목적으로 다양한 형태의 TPMS 열교환기 입출구 설계를

위한 수학적 필터링 기법을 제안하였다. 특히 수직으로 주입되는 유동 특성을 고려하여 유체가 열교환기 내부로 빠르게 주입되도록 TPMS 열교환기 입출구 하단에 원통형 유동 선별 영역을 설계하였다. 상기 열교환기 설계안의 유동 특성을 전산 유체 해석을 통해 고찰하였고, 적층 제조를 통해 시제품을 제작하여 실험적으로 검증하였다.

본 논문은 다음과 같은 순서로 구성된다. 2장에서 TPMS의 수학적 수식을 기반으로 원통형 입출구 영역에서의 유동 선별이 가능한 필터링 함수를 수식화하여 TPMS 열교환기 내부로 주입될 때 유동 저항을 줄일 수 있는 3가지의 설계안을 제시하였다. 3장에서 실험과 전산 유체 해석을 통해 압력강하와 내부 유체 거동을 비교하여 설계안을 선정하였다. 4장에서는 금속 적층 제조를 사용하여 TPMS 열교환기를 제작하고, 열교환 실험을 통해 본 연구에서 제시된 열교환기의 성능을 검증하였다.

2. TPMS 열교환기 설계

2.1 TPMS 열교환기 설계 개요

Fig. 1(a)에 TPMS 열교환기의 모식도를 도시하였다. TPMS 열교환기는 본 연구자의 선행 연구를 기반으로 판형 열교환기를 기초로 설계하였으며, 내부 TPMS 영역의 크기는 98×60×44 mm이다. 열교환기 상층에 각각 2개의 입/출구가 교차하여 위치하도록 설계하였으며, 각 입출구의 내경은 12 mm로 설계하였다.

본 연구의 Gyroid 형태의 TPMS 수식을 사용하여 열교환기를 설계하였다. 식(1)에 Gyroid 형태 TPMS 곡면의 음함수 수식을 도시하였으며, 이를 기반으로 식(2)와 같이 레벨 셋(Level-set) 수식화를 통해 TPMS 내벽(Solid Wall)을 정의할 수 있다.

$$\phi_G = \sin(x)\cos(y) + \sin(y)\cos(z) + \sin(z)\cos(x) \quad (1)$$

$$\phi_G : \begin{cases} \phi_G > C, (\text{Hot fluid}) \\ |\phi_G| < C, (\text{Solid}) \\ \phi_G < -C, (\text{Cold fluid}) \end{cases} \quad (2)$$

여기서 양수 C 는 레벨 셋 상수(Level-set Constant)로 TPMS 내벽의 두께와 비례한다. 즉 Gyroid 함수의 절대값이 C 보다 작은 영역이 TPMS 내벽에 해당되며, Fig. 1(b)에 C 를 0.235로 설정한 경우 내벽 두께 0.5 mm로 형성된 Gyroid 구조물을 도시하였다. 반면 함숫값이 C 이상일 경우 고온의 유체 영역, $-C$ 이하일 경우 저온의 유체 영역에 해당되며, Fig. 1(c)에 고온/저온 유체영역을 각각 적색과 청색으로 표시하여 도시하였다.

상기 레벨 셋 구분은 부호거리장(Signed Distance Field, SDF)을 통해 표현될 수 있다. Fig. 1(d)에 단위 셀 크기를 10 mm로 설정한 경우 TPMS 열교환기 내부의 부호거리장 분포도를 도시하였다. 여기서 녹색 영역이 TPMS 내벽을 의미하며, 적색 영역과 청색 영역이 각각 고온 유체와 저온 유체 영역을 의미한다.

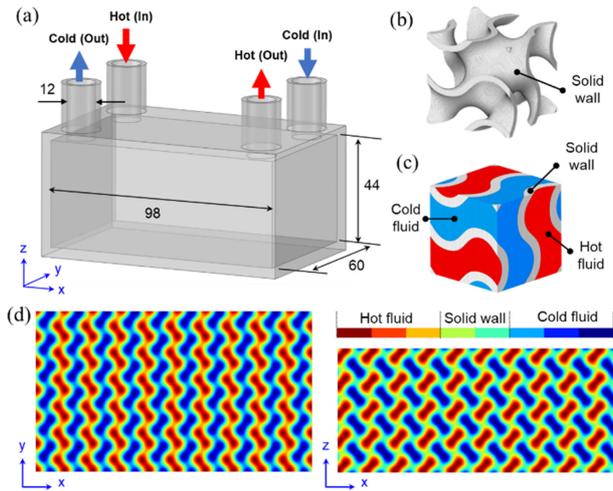


Fig. 1 Description of TPMS heat exchanger (HX): (a) design configuration (unit: mm), (b) gyroid unit cell, (c) gyroid unit cell with colored fluids, and (d) signed distance fields (SDF) for the top view (XY-plane) and side view (XZ-plane)

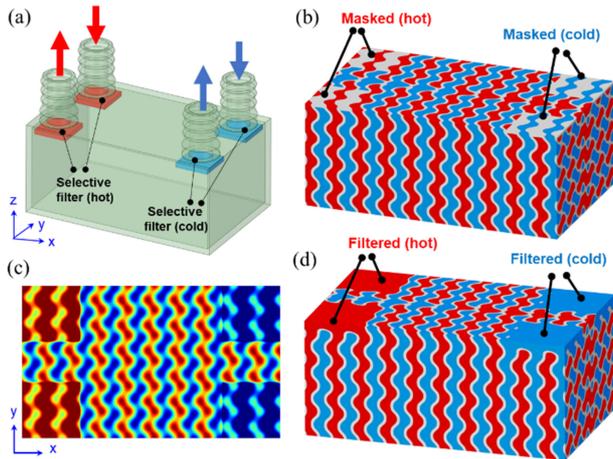


Fig. 2 Mathematical filtering of a TPMS HX for fluid selection: (a) definition of the filtering domain (b) masked model for fluid selection, (c) SDF distribution for selection filtering, and (d) filtered model for fluid selection

2.2 입출구 유동선별을 위한 수학적 필터링

상기 TPMS 구조는 내벽을 경계로 고온유체 채널과 저온유체 채널이 번갈아가며 배열되는 형태를 갖는다. 따라서 입출구에서 고온/저온 유체를 해당 채널로만 선택적으로 분배하기 위해 Fig. 2(a)에 도시한 바와 같이 마스킹(Masking) 영역을 인위적으로 생성하는 방법이 일반적으로 사용된다[28]. 그러나 상기 방법은 채널 단면적의 국부적인 감소를 야기하여 유동저항이 증가하고 결과적으로 입출구에서의 압력강하가 급증하게 된다[30].

이러한 문제점을 극복하기 위해 본 연구자의 선행연구에서 수학적 필터링 기법을 적용하여 입출구 영역에 대해 국부적으로 부호거리장을 수정하는 방법을 제안하였다. 수학적 필터링 기법은 식(3)과 같이 TPMS 음함수에 특정 영역에서만 유효한

값을 가지는 필터링 함수(Filtering Function)를 더하여 부호거리장을 변화시키는 방법이다[29].

$$\phi'_G(x, y, z) = \phi_G(x, y, z) + F(x, y, z) \tag{3}$$

여기서 필터링 함수 $F(x, y, z)$ 는 Fig. 2(b)에 도시한 4개의 필터링 영역에 대해 전체적으로 양수 혹은 음수 영역으로 만들어 고온/저온 유체만 포함될 수 있도록 정의하였다. 이를 위해 3차원 공간에서의 필터링 함수는 시그모이드 함수(Sigmoid Function)를 기반으로 식(4)와 같이 정의된다.

$$F(x, y, z) = \sum_{i=1}^4 \frac{\beta^i}{\left[1 + e^{-k_x^i(x-x_p^i)}\right] \left[1 + e^{-k_y^i(y-y_p^i)}\right] \left[1 + e^{-k_z^i(z-z_p^i)}\right]} \tag{4}$$

여기서 x_p, y_p, z_p 는 필터링 영역의 좌표이며, k_x, k_y, k_z 는 방향별 시그모이드 계수를 의미한다. β 는 시그모이드 함수의 크기를 결정하는 계수로 양수로 설정할 경우 양의 부호거리장을, 음수로 설정할 경우 음의 부호거리장을 부여하는 효과를 갖는다.

상기 필터링 함수를 적용하여 도출된 TPMS 상면의 부호거리장 분포를 Fig. 2(c)에 도시하였다. 좌측 고온 유체 입출구 영역의 부호거리장이 적색 계열로 변화되어 고온 유체의 유동만이 허용되고, 우측 저온 유체 입출구 영역의 부호거리장은 청색 계열로 변화되어 저온 유체의 유동만이 허용됨을 알 수 있다. Fig. 2(d)에 상기 부호거리장을 적용하여 생성된 TPMS 구조를 도시하였으며, 입출구 영역에 해당 유체만 존재하여 유동 면적이 증가되고 결과적으로 압력강하를 감소시킬 수 있다[30].

2.3 원통형 영역에 대한 입출구 유동선별 필터링

본 연구에서는 입출구 유동 특성의 추가적인 향상을 위해 입출구 하단에 원통형의 채널 공간을 만들어 유동 선별과 동시에 열교환기 내부까지 유동저항 없이 주입되도록 필터링 영역을 설계하였다. 상기 목적의 달성을 위해 식(5)와 같이 기존의 필터링 함수 $F(x, y, z)$ 내부에 특정 영역을 정의하는 영역함수 $G(x, y, z)$ 를 합성시켜 유효한 값을 가지는 공간을 정의할 수 있도록 하였다.

$$F(x, y, z) = \sum_{i=1}^4 \frac{\beta^i}{1 + e^{-k^i G^i(x, y, z)}} \tag{5}$$

본 연구에서는 관통형(Through-hole), 부분 관통형(Half-hole), 경사형(Taper-hole)의 3가지 형태의 원통형 영역을 정의하여 필터링 함수를 정의하였으며, 각각에 대한 수학적 표현은 다음과 같이 정의된다.

2.3.1 관통형 입출구 필터링

Fig. 3(a)에 관통형 입출구 필터링 영역을 정의하였으며, 유체 주입 시 열교환기의 하단까지 장애물 없이 흐르도록 하기 위해 원통형의 관통부를 설계하였다. 각 입출구 원통의 직경은 주입구의 내경과 동일하게 12 mm로 설계하였다. 상기 관통부 영역에

Table 1 Design parameters for the through-hole type filtering

i	Description	x_c [mm]	y_c [mm]	β
1	Hot inlet	-40	21	2.2
2	Hot outlet	40	-21	2.2
3	Cold inlet	40	21	-2.2
4	Cold outlet	-40	-21	-2.2

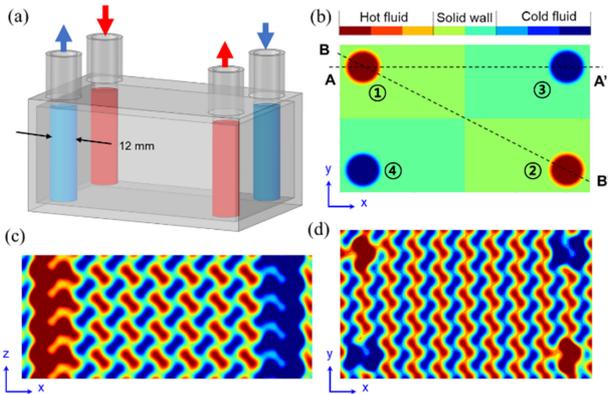


Fig. 3 Design modification of a TPMS HX with the through-hole selection filtering: (a) definition of the filtering domain, (b) SDF distribution for selection filter (Top View), (c) SDF distribution after filtering (Section A-A'), and (d) SDF distribution after filtering (Top View)

대한 필터링 함수는 식(6)과 같이 표현된다.

$$G(x,y) = \{(x-x_c)^2 + (y-y_c)^2\} - r^2 \quad (6)$$

여기서 x_c, y_c 는 원통형 영역의 중심점을, r 은 원통형 영역의 반경을 의미한다. 4개의 입출구 영역에 대한 중심점 좌표 및 계수를 Table 1에 요약하였다.

Fig. 3(b)에 상기 4개의 영역에 대한 필터링 함수로부터 도출된 부호거리장 분포를 도시하였다. 고온유체 입출구 영역은 양의 부호거리장이 부여되어 고온유체만 통과할 수 있도록 하였고, 마찬가지로 저온유체 입출구 영역은 음의 부호거리장이 부여되어 저온유체만 통과할 수 있도록 설정하였다. 상기 필터링 함수를 적용하여 도출된 부호거리장을 Figs. 3(c)와 3(d)에 도시하였다. Fig. 3(c)는 A-A' 단면에서의 부호거리장으로 좌측에서는 고온유체가, 우측에서는 저온유체가 유입되도록 부호거리장이 변화되었음을 알 수 있다. Fig. 3(d)에 상측면의 부호거리장을 도시하였으며, 고온/저온 유체의 입출구가 구분됨을 확인할 수 있다.

2.3.2 부분 관통형 입출구 필터링

Fig. 3에 도시한 관통형 입출구 설계안의 경우 입구로 유입된 유체가 바닥 면까지 수직으로 흐르게 되어 수평방향의 유동이 상대적으로 저하될 가능성이 있다. 이러한 문제점을 개선하기 위해 Fig. 4(a)에 도시한 바와 같이 원통형 영역이 TPMS 내부의

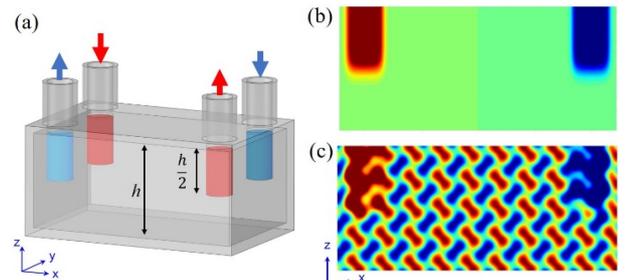


Fig. 4 Design modification of a TPMS HX with the half-hole selection filtering: (a) definition of the filtering domain, (b) SDF distribution of half-hole filtering, and (c) SDF distribution after filtering (Section A-A')

중간에 위치하는 부분 관통형(Half-hole) 필터링 영역을 정의하였다. 각 입출구 원통의 직경은 주입구의 내경과 동일하게 12 mm로 설계하였으며, 원통의 높이는 TPMS 영역 높이의 절반인 22 mm로 설계하였다. 상기 부분 관통부 영역에 대한 필터링 함수는 식(7)과 같이 표현된다.

$$F(x,y,z) = \sum_{i=1}^4 \frac{\beta^i}{\left[1 + e^{-k^i G(x,y)}\right] \left[1 + e^{-k_z(z-z_p)}\right]} \quad (7)$$

여기서 영역함수 $G(x,y)$ 는 식(6)의 관통형 영역함수와 동일하게 설정하였고, z_p 좌표를 지정하여 원통부의 높이를 조절할 수 있도록 하였다. 본 연구에서는 Fig. 4(a)에 도시한 바와 같이 관통 깊이를 전체 TPMS 높이의 절반($h/2$)으로 설계하기 위해 z_p 좌표를 0으로, 시그모이드 계수 k_z 를 0.5로 설정하였다.

Fig. 4(b)에 식(7)로 정의된 필터링 함수의 부호거리장 분포를 Fig. 3(b)의 A-A' 단면에서 도시하였다. 좌측 상단 영역에 양의 부호거리장이 부여되어 고온 유체가 주입될 수 있도록 하였고, 마찬가지로 우측 상단 영역에 음의 부호거리장이 부여되어 저온 유체가 주입될 수 있도록 하였다. Fig. 4(c)에 상기 필터링 함수를 적용하여 계산된 A-A' 단면에서의 TPMS 부호거리장 분포를 도시하였으며, 의도한 바와 같이 좌측 상단 원통부는 양의 부호거리장이, 우측 원통부는 음의 부호거리장이 부여됨을 알 수 있다.

2.3.3 경사형 입출구 필터링

Fig. 5(a)에 경사형 입출구 필터링 영역을 정의하였다. 경사형 입출구는 하단으로 갈수록 원형 단면의 중심이 옆교환기의 모서리 부분으로 이동하며 유동 진행 방향으로 감소하도록 설계하였다. 상기 경사형 영역에 대한 필터링 함수는 식(7)과 동일한 형태를 가지며, 경사형 영역함수 $G(x,y,z)$ 를 식(8)과 같이 정의하였다.

$$G(x,y,z) = \{x-X_c(z)\}^2 + \{y-Y_c(z)\}^2 - R(z)^2 \quad (8)$$

여기서 X_c, Y_c 는 원통형 영역의 중심점을, R 은 원통형 영역의

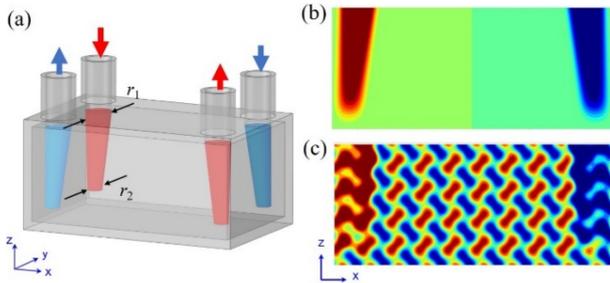


Fig. 5 Design modification of a TPMS HX with the taper-hole selection filtering: (a) definition of the filtering domain, (b) SDF distribution of taper-hole filtering, and (c) SDF distribution after filtering (Section A-A')

Table 2 Center positions of the taper-hole type filtering domains

i	Description	(x_1, y_1, z_1)	(x_2, y_2, z_2)
1	Hot inlet	(-40, 21, 22)	(-43, 24, -16)
2	Hot outlet	(40, -21, 22)	(43, -24, -16)
3	Cold inlet	(40, 21, 22)	(43, 24, -16)
4	Cold outlet	(-40, -21, 22)	(-43, -24, -16)

반경을 의미하며, 높이에 따라 선형적으로 변화하도록 z 의 함수로 설정하였다. 각각의 선형 함수는 식(9)부터 식(11)과 같이 정의된다.

$$X_c(z) = \frac{(z-z_1)(x_2-x_1)}{(z_2-z_1)} + x_1 \tag{9}$$

$$Y_c(z) = \frac{(z-z_1)(y_2-y_1)}{(z_2-z_1)} + y_1 \tag{10}$$

$$R(z) = \frac{r_2}{h}z + r_1 \tag{11}$$

여기서 r_1, r_2 는 경사면 상측과 하측 단면에서의 반경으로 각각 12, 6 mm로 설정하였다. 또한 상기 경사형 영역의 부피가 2.3.2절의 부분 관통형 영역과 동일하도록 경사형 영역의 높이를 38 mm로 설계하였고, 그에 따른 상/하측 단면의 중심점 좌표를 Table 2에 요약하였다.

Fig. 5(b)에 경사형 필터링 함수의 A-A' 단면(Fig. 3(b) 참조) 부호 거리장 분포를 도시하였다. 역시 좌측 상단 영역에 양의 부호거리장이, 우측 상단 영역에 음의 부호거리장이 부여됨을 알 수 있으며, 내측으로 경사면이 형성되어 수직 방향으로 주입되는 유체가 수평 방향으로도 분배될 수 있도록 설계하였다. Fig. 5(c)에 상기 필터링 함수를 적용하여 계산된 TPMS 부호거리장 분포를 도시하였으며, 좌측에 형성된 고온 유체 영역과 우측에 형성된 저온 유체영역에 경사면이 형성된 상태로 부호거리장이 형성되었음을 알 수 있다.

3. 입출구 설계안에 따른 유동 특성 고찰

3.1 입력강하 실험 결과

각 입출구 설계안이 유동 특성에 미치는 영향을 확인하기

Table 3 Comparison of hydraulic diameters for three HX designs

Description	ε [%]	A [mm^{-1}]	D_h [mm]
Through-hole	43.2	0.272	6.34
Half-hole	42.7	0.290	5.89
Taper-hole	42.8	0.287	5.96

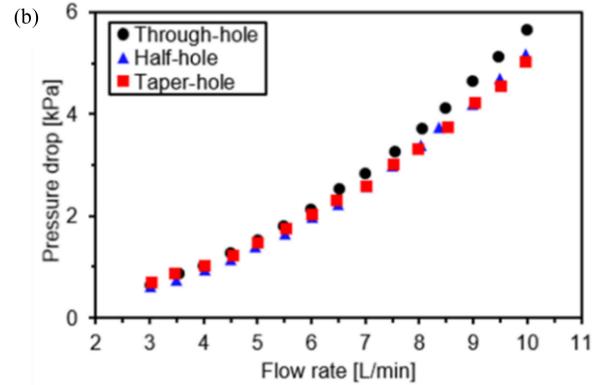
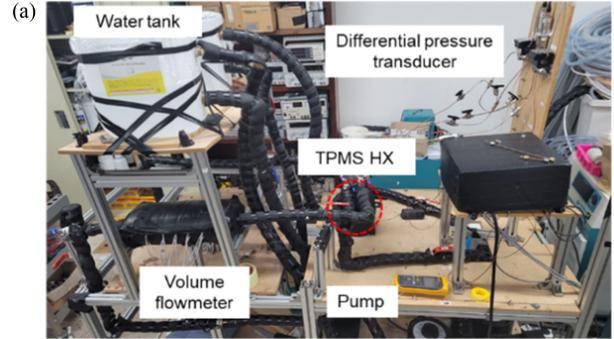


Fig. 6 Pressure drop tests for various HX designs: (a) experimental setup, and (b) comparison of pressure drops

위해 압력강하 실험을 실시하였다. 압력강하 실험을 위한 TPMS 열교환기 시제품은 DLP 방식의 3차원 프린터(IMD, Carima, Republic of Korea)를 사용하여 제작하였다. 적층 두께는 50 μm 로 설정하였으며 UV광량은 6.4 W/cm로 설정하였다. 재료는 아크릴 계열 광경화성 플라스틱(CUKC06G, Carima, Republic of Korea)을 사용하였고, 후경화 처리는 UV 경화기(CL300, Carima, Republic of Korea)를 사용하여 60초 동안 진행하였다.

TPMS열교환기의 수력 직경(Hydraulic Diameter, D_h)은 다공성 물질의 수력 직경 계산 수식인 식(12)을 기반으로 도출하였다.

$$D_h = \frac{4\varepsilon}{A} \tag{12}$$

여기서 ε 은 전체 열교환기 부피에 대한 유체의 부피 비율(Void Fraction)이고, A 는 전체 열교환기 부피에 대한 전열면적 비율(Area Density)이다. Table 3에 본 실험에 사용된 3가지의 TPMS 열교환기의 형상 정보 및 계산된 수력 직경 결과를 비교하였으며, 관통형 설계안에 비해 부분 관통형 및 경사형 설계안이 상대적으로 수력 직경이 작게 계산됨을 알 수 있다.

Fig. 6(a)에 압력강하 측정 실험을 위한 실험 장치 구성도를 도시하였다. 펌프를 통해 25°C의 물을 순환시켰으며, 유량계 (Volume Flowmeter)를 사용하여 3-10 L/min 범위 내에서 유량을 조절하였다. 또한 TPMS 열교환기의 입출구에 차압계 (Differential Pressure Transducer)를 설치하여 압력강하(Pressure Drop)를 측정하였다.

Fig. 6(b)에 유량변화에 따른 3가지 열교환기의 압력강하 측정 결과를 도시하였다. 낮은 유량(3-5 L/min)에서는 3가지 설계안의 압력강하가 비슷한 수준으로 나타남을 알 수 있다. 반면 유량이 6 L/min일 경우 압력강하가 1.96-2.13 kPa 수준으로 측정되어 선행연구의 결과(3.99 kPa)[30]의 절반 수준으로 압력강하를 줄일 수 있음을 확인하였다. 한편 유량이 6 L/min 이상으로 커질수록 관통형의 압력강하가 증가함을 알 수 있다. 이러한 차이는 유량이 증가할수록 더 두드러지게 나타나며, 10 L/min에서 관통형 설계안의 압력강하가 5.67 kPa로 측정되어 부분 관통형(5.17 kPa) 및 경사형(5.02 kPa)의 결과에 비해 10% 이상 크게 나타남을 알 수 있다.

3.2 CFD 시뮬레이션 결과

상기 열교환기 내부 채널에서 유동 특성을 고찰하기 위해 전산 유체 해석(Computational Fluid Dynamics, CFD)을 실시하였다. 해석은 상용 CFD 해석 S/W인 Simerics MP+를 사용하였다. 격자 조건은 Conformal Adaptive Binary Tree 방식으로 각 해석 모델당 약 1억 6천만개의 격자로 구성하였다. 해석 조건은 k-ε 난류 모델을 사용하였고, 작동 유체로 25°C의 물 6 L/min가 흐르도록 하였다.

Fig. 7에 B-B' 단면(Fig. 3(b) 참조)에서 유체의 유선(Streamline)을 도시하였으며, 해당 위치에서의 유속을 색깔로 도시하였다. Fig. 7(a)는 관통형 설계안의 유선 분포이며, 입구부터 원기둥 하단으로 수직에 가까운 유동이 발생하여 결과적으로 열교환기 좌측 하단에 와류(Vortex)가 발생함을 알 수 있다. 반면 부분 관통형 및 경사형 설계안의 경우 해당 위치에서 와류가 발생하지 않아 상기 와류의 발생이 압력강하 증가에 영향을 미침을 알 수 있다. 또한 부분 관통형 설계안의 경우 Fig. 7(b)에 도시한 바와 같이 원통형 영역이 끝나는 중간 지점에서부터 수평방향 유동이 발생하여 하단부에서 수평방향 유동이 발생하는 관통형 설계안에 비해 유동 특성이 개선됨을 알 수 있다. 반면 출구 측 하단에서는 유동 밀도가 상대적으로 낮음을 알 수 있는데, 이는 부분 관통 영역 하단에서 국부적인 유동 정체가 발생하기 때문으로 판단된다. 한편 Fig. 7(c)에 도시한 경사형 설계안의 경우 입구 영역의 경사면에 의해 수평방향 유동 발생 위치가 상측으로 이동하여 상단과 하단에서 고르게 유동 분배가 이루어짐을 확인할 수 있다.

Fig. 8에 B-B' 단면(Fig. 3(b) 참조)에서의 수평방향 유속 크기를 정량적으로 비교하였다. 특히 유동 진행 방향으로의 속도 분포를 비교하기 위해 유동 진행 방향 단면의 법선 벡터와 속도 벡터를 내적하여 수평방향 속도 성분의 크기를 계산하여 가시화하였다. Fig. 8(a)에 관통형 입출구 설계안의 유속 분포를

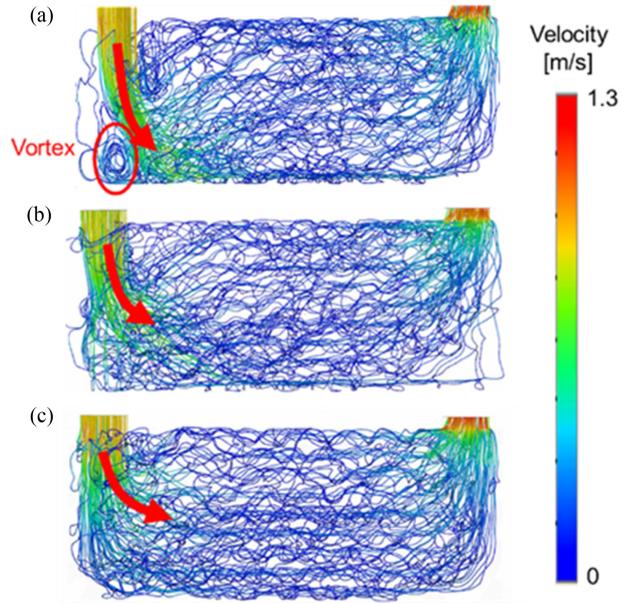


Fig. 7 Comparison of streamlines across section B-B' for various inlet/outlet designs: (a) through-hole filtering, (b) half-hole filtering, and (c) taper-hole filtering

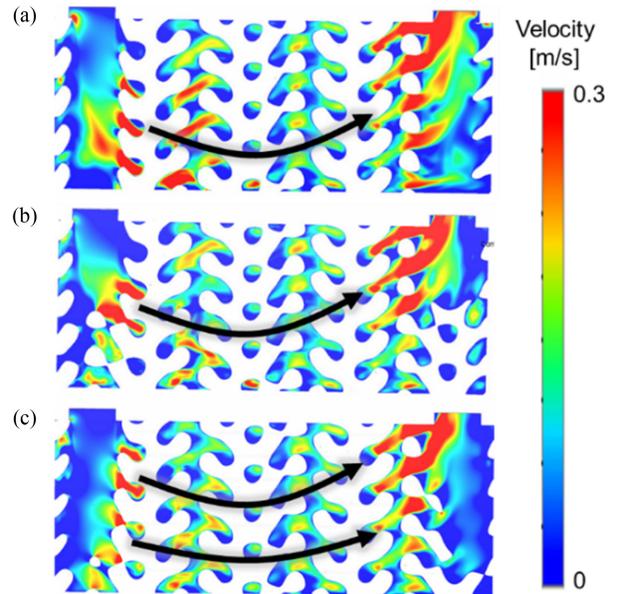


Fig. 8 Comparison of sectional velocity distributions for various inlet/outlet designs (Section B-B'): (a) through-hole filtering, (b) half-hole filtering, and (c) taper-hole filtering

도시하였으며 열교환기 하단에서 수평방향 유동이 발생함을 알 수 있다. 반면 Fig. 8(b)에 도시한 부분 관통형 설계안의 경우 수평방향 유동이 열교환기 중앙부에서 지배적으로 발생하는 것으로 나타나 유동 분배 특성이 개선됨을 확인할 수 있다. 반면 경사형 설계안의 경우는 Fig. 8(c)에 도시한 바와 같이 상단에서부터 수평방향 유동이 발생하여 상단과 하단에서 전체적으로 균일하게 유량이 분배됨을 알 수 있다. 상기 결과로부터 경사형

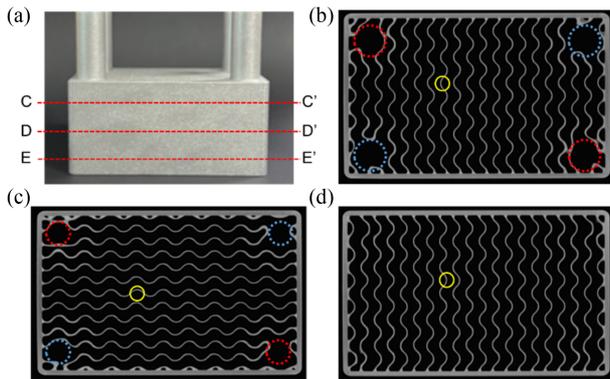


Fig. 9 Micro-CT images of additively manufactured TPMS HX at different cross sections: (a) Section C-C', (b) Section D-D', and (c) Section E-E'

입출구 설계안이 가장 좋은 유동 분배 특성을 보여 압력강하를 감소시킬 수 있는 설계안으로 판단된다.

4. TPMS 열교환기의 열교환 성능 고찰

4.1 금속 적층 제조를 사용한 열교환기 제작

TPMS 열교환기의 열교환 성능을 확인하기 위해 진술한 3가지 설계안 중 가장 우수한 유동 특성을 보인 경사형 입출구 설계안을 금속 적층 제조를 사용하여 제작하였다. 열교환기의 적층 제조는 분말 용융 적층(Powder Bed Fusion, PBF) 방식의 금속 3D 프린터(CL M2 Cusing, GE Additive, USA)와 알루미늄 합금 분말재(AlSi7Mg, Tekna Advanced Materials, Canada)를 사용하여 수행하였다. 적층 제조를 위한 레이저 출력은 370 W, 이송 속도는 1,600 m/s로 설정하였고, 적층 두께, 레이저빔 직경, 해칭 간격은 각각 40, 110, 120 μm 로 설정하였다. 적층 제조된 열교환기는 마이크로 블라스팅 장비를 사용하여 표면처리를 수행하였고, 280°C의 온도로 90분 동안 진공 열처리를 수행하였다.

금속 적층 제조로 제작된 TPMS 형상의 내부 형상정밀도를 확인하기 위해 X선 단층촬영을 실시하였다. X선 단층촬영은 마이크로-CT 스캐너(Phoenix VTOMEX S240, Waygate Technologies, Germany)를 사용하여 실시하였다. 상기 장비의 촬영 해상도는 100 μm 이며 약 13억개 이상의 복셀로 내부 구조를 표현할 수 있다. Figs. 9(b)부터 9(d)에 3개 단면(C-C', D-D', E-E')에서의 CT사진을 도시하였으며, 각각의 단면 위치는 Fig. 9(a)에 표시하였다. 각 단면에서 표시한 영역의 두께는 각 0.53, 0.52, 0.53 mm로 측정되어 설계 치수인 0.5 mm와 6% 정도 오차가 있었고 내부 기공과 누출 영역 없이 제작된 것을 확인하였다. 또한 입출구 영역의 크기가 하단으로 내려갈수록 점차적으로 감소하며 E-E' 단면에서는 존재하지 않아 경사형 입출구가 적절하게 구현되었음을 알 수 있다.

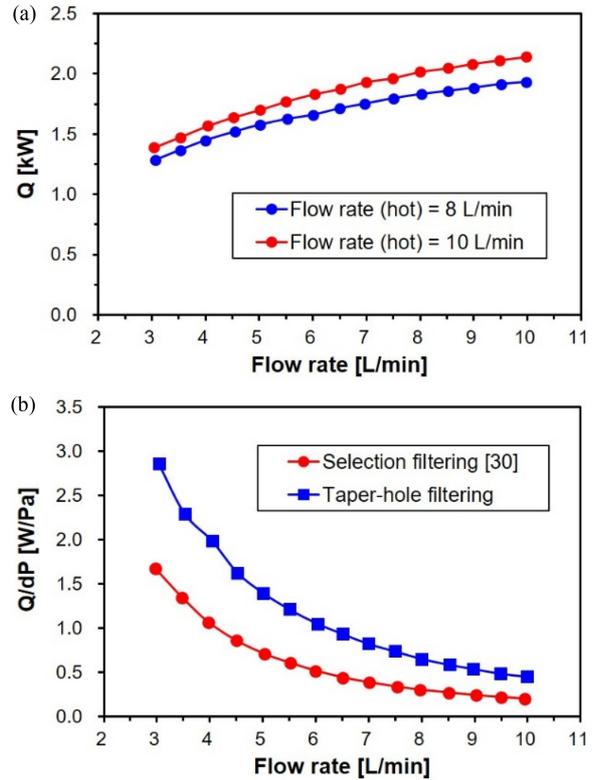


Fig. 10 Results of heat exchange tests: (a) comparison of heat transfer rate (Q), and (b) comparison of heat transfer rate per pressure drop (Q/dP)

4.2 열교환 실험을 통한 성능 분석

적층 제조로 제작된 금속 TPMS 열교환기의 열교환 성능을 확인하기 위해 단상 유동 열전달 실험을 진행하였다. 고온측 유체는 에틸렌 글리콜과 물을 동일 부피로 섞어 25°C로 유지시켰다. 저온측 유체는 냉각기(Chiller)를 사용하여 10°C의 물이 흐르도록 하였고 고온측과 저온측의 열교환율의 차이를 $\pm 5\%$ 이하로 유지하여 실험을 진행하였다. 고온측 유량을 8-10 L/min으로 변화시킨 상태에서 저온측 유량을 3-10 L/min 범위에서 0.5 L/min 간격으로 변경시키며 열교환기의 열전달 및 압력강하를 측정하였다.

Fig. 10(a)에 유량별 열교환 용량(Heat Capacity, Q)을 그래프로 도시하였다. 고온측 유량을 8 L/min로 고정한 경우 열교환 용량은 저온측 유량이 10 L/min일 때 최대 1.93 kW까지 증가하였으며, 고온측 유량을 10 L/min로 고정한 경우 열교환 용량은 저온측 유량이 10 L/min 일 때 최대 2.14 kW까지 증가하였다. 상기 결과는 고온측 유량이 8 L/min에서 10 L/min으로 20% 증가하였을 때, 동일한 저온측 유량 조건에서 최대 11%까지 열교환 용량이 증가함을 의미한다.

상기 결과를 바탕으로 본 연구에서 개발한 TPMS 열교환기(경사형 입출구 적용)의 열교환 성능을 선행연구 결과[30]와 종합적으로 비교하기 위해 2가지 열교환기의 압력강하 대비 열교환 용량(Q/dP)을 비교하였다. 전반적으로 유량이 증가할수록

압력강하 대비 열교환 용량이 감소함을 알 수 있으며, 본 연구에서 개발한 경사형 입출구 적용 열교환기의 경우 선행 연구의 열교환기와 비교했을 때 2배 이상의 높은 열교환 성능(70.1-125.1%)을 보임을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 TPMS 구조를 활용하여 고집적 열교환기 설계에 관한 연구를 수행하였다. 열교환기 입출구의 유동 특성 향상을 위해 원통형 영역에 대한 시그모이드 합성함수를 적용한 수학적 필터링 기법을 활용하여 유동 선별 기능이 포함된 3가지 입출구 형상(관통형, 부분 관통형, 경사형)을 설계하였다. 실험과 전산 유체 해석을 통해 유동 성능을 확인하는 연구를 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) DLP 적층 제조를 사용하여 플라스틱 열교환기 시제품을 제작하고 압력강하 실험을 수행하였다. 유량 6 L/min에서는 부분 관통형에서 압력강하 값이 1.96 kPa로 가장 작게 나타나 선행연구의 절반 수준으로 감소됨을 확인하였다. 또한 유량 10 L/min에서는 경사형 입출구에서 압력강하 값이 5.02 kPa로 가장 작게 나타났다.

(2) CFD 해석 수행 결과 관통형의 경우 유체가 바다 면과 충돌하여 와류가 발생한 것이 압력강하의 증가를 유발함을 확인하였다. 또한 경사형 입출구가 유동 가이드 역할을 수행하며 상단과 하단에서 균일한 유동 분배가 이루어지고 결과적으로 압력강하가 감소됨을 확인하였다.

(3) 경사형 입출구를 적용하여 금속 적층 제조를 통해 열교환기를 제작하여 열교환 성능(압력강하 대비 열교환 용량)을 측정할 결과 선행연구 대비 2배 이상의 높은 열교환 성능(70.1-125.1%)을 보임을 알 수 있었다.

상기 결과로부터 본 연구에서 제안된 경사형 TPMS 열교환기는 기존 연구결과 대비 낮은 압력강하와 유동 분배 측면에서 장점이 보임을 알 수 있다. 향후 보다 복잡하고 유동에 최적화된 TPMS 열교환기에 대한 추가 연구를 수행하여 기술의 완성도를 높일 전망이다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 논문은 산업통상자원부 전자시스템 전문기술개발사업(No. 20016840) 및 과학기술정보통신부(한국연구재단)의 기초연구실사업(No. 2022R1A4A1032030)의 지원으로 수행된 결과임.

REFERENCES

1. Kays, W. M., London, A. L., (1984), Compact heat exchangers, Krieger Publishing Company.

2. Zohuri, B., (2015), Application of compact heat exchangers for combined cycle driven efficiency in next generation nuclear power plants, Springer.

3. Kan, M., Ipek, O., Gurel, B., (2015), Plate heat exchangers as a compact design and optimization of different channel angles, Acta Physica Polonica A, 128(2B).

4. Lin, Z.-M., Liu, C.-P., Lin, M., Wang, L.-B., (2015), Numerical study of flow and heat transfer enhancement of circular tube bank fin heat exchanger with curved delta-winglet vortex generators, Applied Thermal Engineering, 88, 198-210.

5. Mortean, M. V. V., Cisterna, L. H. R., Paiva, K. V., Mantelli, M. B. H., (2019), Thermal and hydrodynamic analysis of a cross-flow compact heat exchanger, Applied Thermal Engineering, 150, 750-761.

6. Song, Y., Asadi, M., Xie, G., Rocha, L. A. O., (2015), Constructal wavy-fin channels of a compact heat exchanger with heat transfer rate maximization and pressure losses minimization, Applied Thermal Engineering, 75, 24-32.

7. Kaur, I., Singh, P., (2021), State-of-the-art in heat exchanger additive manufacturing, International Journal of Heat and Mass Transfer, 178, 121600.

8. Guo, N., Leu, M. C., (2013), Additive manufacturing: technology, applications and research needs, Frontiers of Mechanical Engineering, 8, 215-243.

9. Park, J.-H., Goo, B., Park, K., (2019), Topology optimization and additive manufacturing of customized sports item considering orthotropic anisotropy, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 20, 1443-1450.

10. Oh, E.-J., Lee, J.-H., Kim, J.-E., Park, K., (2020), Lightweight design of a sledge frame for para ice hockey using design for additive manufacturing, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 37(6), 407-414.

11. Cha, E., Kim, T.-Y., Ha, T., Park, K., (2021), Lightweight design of a vacuum gripper for inspection equipment using topology optimization, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 38(9), 683-690.

12. McGlen, R. J., (2021), An introduction to additive manufactured heat pipe technology and advanced thermal management products, Thermal Science and Engineering Progress, 25, 100941.

13. Da Silva, R. P. P., Mortean, M. V. V., De Paiva, K. V., Beckedorff, L. E., Oliveira, J. L. G., Brandão, F. G., Monteiro, A. S., Carvalho, C. S., Oliveira, H. R., Borges, D. G., Chastinet, V. L., (2021), Thermal and hydrodynamic analysis of a compact heat exchanger produced by additive manufacturing, Applied Thermal Engineering, 193, 116973.

14. Sabau, A. S., Bejan, A., Brownell, D., Gluesenkamp, K., Murphy, B., List III, F., Carver, K., Schaich, C. R., Klett, J. W., (2020), Design, additive manufacturing, and performance of heat exchanger with a novel flow-path architecture, Applied Thermal Engineering, 180, 115775.

15. Chekurov, S., Kajaste, J., Saari, K., Kauranne, H., Pietola, M., Partanen, J., (2019), Additively manufactured high-performance counterflow heat exchanger, *Progress in Additive Manufacturing*, 4, 55-61.
16. You, J.-H., Lee, J.-W., Oh, S.-H., Park, K., (2022), Conformal mold heating and cooling using a carbon nanotube film heater and additively manufactured cellular metamaterial, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 9(6), 1463-1476.
17. You, J.-H., Park, K., (2021), Design and additive manufacturing of thermal metamaterial with high thermal resistance and cooling capability, *Additive Manufacturing*, 41, 101947.
18. Yang, L., Li, Y., Wu, S., Chen, P., Wu, H., Su, J., Wang, H., Liu, J., Yan, C., Shi, Y., (2022), Tailorable and predictable mechanical responses of additive manufactured TPMS lattices with graded structures, *Materials Science and Engineering: A*, 843, 143109.
19. Kaur, I., Singh, P., (2021), Critical evaluation of additively manufactured metal lattices for viability in advanced heat exchangers, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 168, 120858.
20. Kaur, I., Singh, P., (2021), Flow and thermal transport characteristics of triply-periodic minimal surface (TPMS)-based gyroid and schwarz-P cellular materials, *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 79(8), 553-569.
21. Li, W., Yu, G., Yu, Z., (2020), Bioinspired heat exchangers based on triply periodic minimal surfaces for supercritical CO₂ cycles, *Applied Thermal Engineering*, 179, 115686.
22. Yan, K., Wang, J., Liu, L., Deng, H., (2023), Numerical investigation into thermo-hydraulic characteristics and mixing performance of triply periodic minimal surface-structured heat exchangers, *Applied Thermal Engineering*, 230, 120748.
23. Kim, J., Yoo, D. J., (2020), 3D printed compact heat exchangers with mathematically defined core structures, *Journal of Computational Design and Engineering*, 7(4), 527-550.
24. Yoo, D. J., (2011), Porous scaffold design using the distance field and triply periodic minimal surface models, *Biomaterials*, 32(31), 7741-7754.
25. Yoo, D. J., (2011), Computer-aided porous scaffold design for tissue engineering using triply periodic minimal surfaces, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 12, 61-71.
26. Ouda, M., Al-Ketan, O., Sreedhar, N., Ali, M. I. H., Al-Rub, R. K. A., Hong, S., Arafat, H. A., (2020), Novel static mixers based on triply periodic minimal surface (TPMS) architectures, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(5), 104289.
27. Khalil, M., Ali, M. I. H., Khan, K. A., Al-Rub, R. A., (2022), Forced convection heat transfer in heat sinks with topologies based on triply periodic minimal surfaces, *Case Studies in Thermal Engineering*, 38, 102313.
28. Oh, S.-H., Ha, J.-W., Park, K., (2022), Adaptive conformal cooling of injection molds using additively manufactured TPMS structures, *Polymers*, 14(1), 181.
29. Lee, J.-W., Oh, S.-H., Jeon, E., Kim, J., Park, K., (2022), Functional gradation of the morphological properties of TPMS channel for enhanced flow performance, *Materials and Design*, 224, 111413.
30. Oh, S.-H., An, C.-H., Seo, B., Kim, J., Park, C. Y., Park, K., (2023), Functional morphology change of TPMS structures for design and additive manufacturing of compact heat exchangers, *Additive Manufacturing*, 76, 103778.

**Seo-Hyeon Oh**

M.Sc. candidate in Department Mechanical System Design Engineer-ing, Seoul National University of Science and Technology. Her research interest is DfAM (Design for Additive Manufacturing).
E-mail: osh516406@seoultech.ac.kr

**Jeong Eun Kim**

M.Sc. candidate in the Dept. Mechanical Design and Robot Engineer-ing, Seoul National University of Science and Technology. Her research area is experimental and numerical heat transfer.
E-mail: 421_kim@naver.com

**Ji Seong Yun**

B.Sc. candidate in the Dept. Mechanical System Design Engineer-ing, Seoul National University of Science and Technology. His research area is experimental and numerical heat transfer.
E-mail: wltjd4664@naver.com

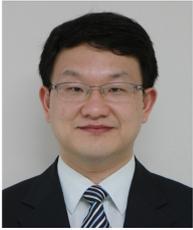
**Do Ryun Kim**

B.Sc. in the Dept. of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology. His research area is computational fluid dynamics and HX Simulation (Thermal Fluid Analysis)
E-mail: kdr0527@seoultech.ac.kr

**Jungwoo Kim**

Professor in the Dept. Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology. His research area is computational fluid dynamics and its application to thermo-fluidic parts, including heat exchangers.

E-mail: kimjw@seoultech.ac.kr

**Chang Yong Park**

Professor in the Dept. Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology. His research area is phase change phenomena, heat transfer, heat exchangers, energy systems, and HVAC&R systems.

E-mail: cypark@seoultech.ac.kr

**Keun Park**

Professor in the Dept. Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology. His research area is multi-physics numerical simulation and its application to DfAM (Design for Additive Manufacturing).

E-mail: kpark@seoultech.ac.kr

스테인리스강 316 L 적층 제조 시편의 열처리 후 기계적 성질 시험 결과

Mechanical Property Test Results for Additive Manufactured Specimens of Stainless Steel 316 L after Heat Treatment

장경남^{1,#}, 양승한¹, 박대승¹
Kyungnam Jang^{1,#}, Seunghan Yang¹, and Dae Seung Park¹

¹ 한국수력원자력 중앙연구원 (Central Research Institute, Korea Hydro & Nuclear Power Co., Ltd.)
Corresponding Author / E-mail: knamjang@khnp.co.kr, TEL: +82-42-870-5659
ORCID: 0009-0005-6015-5754

KEYWORDS: Additive manufacturing (적층 제조), Powder bed fusion (분말베드융해), Directed energy deposition (에너지제어용착), Mechanical property (기계적 성질)

Additive manufacturing (AM) technology, also known as 3D printing, is a highly promising technology that can drive innovation in various industrial areas, including the nuclear industry. Although the nuclear industry is traditionally conservative when it comes to adopting new technologies, it is crucial that AM technology is eventually applied for a variety of reasons. To overcome the barriers that currently hinder the adoption of AM in the nuclear industry, it is essential to ensure the reliability of AM products. One key factor is ensuring that AM products have mechanical properties equivalent to those of traditionally manufactured products. This paper presents the results of mechanical property tests conducted on additive manufactured specimens of stainless steel 316 L after heat treatment. We performed tensile tests, hardness tests, and microstructure analysis on specimens produced using two types of metal AM technologies: powder bed fusion (PBF) and directed energy deposition (DED). The results of the tests indicate that certain weaknesses, such as anisotropy and brittleness, in AM products can be improved through three types of heat treatments. In particular, AM products produced using the PBF method and subjected to heat treatments show potential for application in the nuclear industry in terms of materials.

Manuscript received: February 29, 2024 / Revised: May 14, 2024 / Accepted: May 21, 2024
This paper was presented at KSPE Autumn Conference in 2023

1. 서론

적층 제조(Additive Manufacturing, AM) 기술은 3D 프린팅 기술이라고도 하며, 제조공정의 혁신을 주도하는 제4차 산업혁명 기술 중 하나로 많은 주목을 받았다. 지금까지 많은 연구와 투자가 이루어져 국방, 항공, 의료 분야 등에서 일부 활용되고 있지만 일반 산업현장에 활용된 사례는 극히 드물다. 특히 신기술을 적용하는 데 있어 보수적인 원전 산업계에서 적층 제조 제품을 현장에 적용하는 사례는 거의 찾아보기 힘들다[1-3].

원자력발전소에 신기술을 적용하기 위해서는 여러 절차가 필요하다. 이는 신기술을 원자력발전소에 적용 가능한지 검증하는

품질 및 신뢰도를 보증하기 위한 절차이다. 국내 원자력발전소의 안전 등급이라 불리는 중요 기기는 전력산업 기술기준(Korea Electric Power Industry Code, KEPIC)에 따라 설계 및 제작되고 있으며, 기본적인 내용은 ASME (American Society of Mechanical Engineers) BPVC (Boiler & Pressure Vessel Code)를 따르고 있다. 특히 위 기술기준에 새롭게 등재된 신기술의 사용 승인은 원자력 규제기관에서 한번 더 기술적인 검토를 거친 후 이루어진다[4]. 현재 ASTM (American Society for Testing and Materials), ISO (International Organization for Standardization)를 중심으로 적층 제조 방법, 절차에 대한 많은 기술 기준을 발행하고 있지만, 아직 ASME에 등재된 기술 기준은

부재한 상황이다[5]. 이는 적층 제조품에 대한 품질 및 신뢰도가 아직 확보되지 않았다는 의미이며, 추가적인 연구가 더 필요하다고 볼 수 있다.

적층 제조품의 신뢰도 확보를 위해 가장 중요한 항목은 재료의 기계적 성질이다. 특히 원전에 납품되는 중요 부품의 재료성적서는 필수 제출 서류이며, 적층 제조품 재료의 기계적 성질요건 만족 여부는 원전 적용 가능 여부를 결정하는 중요한 사항이다. 또한 적층 제조 시 발생하는 잔류 응력 제거 및 기공의 최소화, 그리고 미세결정조직의 최적화를 위해 열처리도 꼭 필요하다.

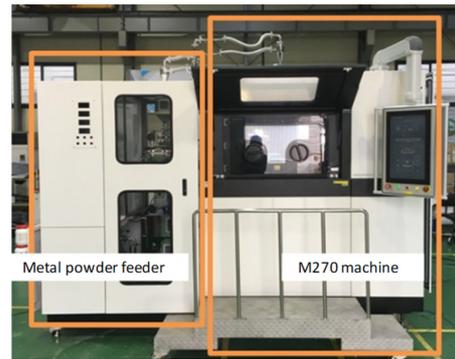
본 논문에서는 원전에서 적용 가능성이 가장 높은 스테인리스강 316 L 금속 분말로 금속 적층 제조 방법 중 가장 대표적인 PBF (Powder Bed Fusion) 및 DED (Directed Energy Deposition) 방법으로 제작한 시편의 열처리 전후 기계적성질 시험(인장시험, 경도시험, 미세조직분석) 결과를 기술하고, 적층 제조 방법, 적층 방향 및 열처리 방법에 따른 기계적 성질의 변화를 분석하여 원전 적용 가능성을 고찰하고자 한다.

2. 적층 제조 시편 제작 및 열처리

2.1 적층 제조 시편 제작

PBF 방식은 열에너지가 분말 베드의 영역들을 선택적으로 용해시키는 적층 제조 공정으로, 공급재료는 열경화성 고분자, 순수 금속 또는 금속 합금, 구조용 세라믹 또는 산업용 세라믹을 사용한다[6]. DED 방식은 재료가 적층될 때 적층 재료를 용융에 의하여 용해시키기 위해 집중된 열에너지를 사용하는 적층 제조 공정으로 공급재료로는 금속 분말 또는 선재를 사용한다[6]. 본 논문에서 사용된 PBF 장비는 국내 대건테크에서 자체 개발한 M270 장비이며 400 W 레이저 2개가 설치되었으며, 출력 사이즈는 최대 270 × 270 × 300 mm이다. DED 장비는 독일 DMG MORI 사의 Lasertec 65 3D Hybrid이며, 본 DED장비는 금속 적층 제조뿐만 아니라 5축 기계가공도 동시에 수행할 수 있는 장비이다. 최대 레이저 출력은 2,500 W이며, 적층가능 크기는 φ500 × 400 mm이다. PBF 및 DED 장비는 각각 Figs. 1(a) 및 (b)와 같다.

인장 시험을 위한 시편은 ASTM E8 6.4장 Round 시편 형상에 따라 제작하였다[7]. 시편의 적층 제조는 위 형상보다 약간 크게 제작하였고, 인장 시험을 위해 정밀가공 하였다. 인장 시험 시편은 적층 방향별로 비교하기 위해 X, Y, Z 방향만으로 적층한 3종류로 5개씩 제작하였다. X 방향 시편은 적층 시 인장 방향으로만 스캐닝하여 85 × 12 × 12 mm로 제작하였고, Y 방향 시편은 적층 시 인장방향의 수직방향으로만 스캐닝하여 12 × 85 × 12 mm 크기로 제작하였다. Z 방향 시편은 격자형태로 X, Y 방향을 교차로 스캐닝하여 φ12 × 85 mm 크기로 제작하였다. 인장 시험 시편은 Figs. 2(a) 및 2(b)와 같이 PBF 시편, DED 시편 각 60개씩 총 120개를 제작하였다. PBF 및 DED 방식 적층 제조 시 사용된

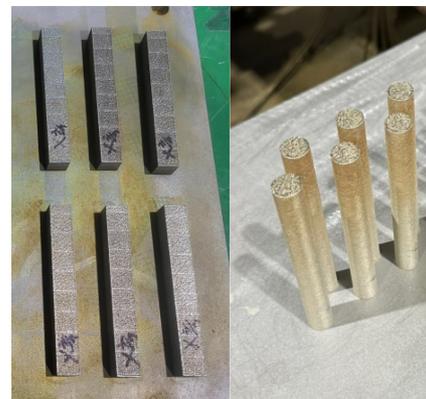


(a) PBF machine (provided by daeguntech)



(b) DED machine

Fig. 1 Additive manufacturing machines



(a) PBF specimens



(b) DED specimens

Fig. 2 Additive manufactured specimens

Table 1 Process parameters of PBF additive manufacturing

Parameter	Value
Laser power	240 W
Beam spot size	50 μm
Layer thickness	50 μm
Beam travel speed	1,100 mm/s
Hatch distance	70 μm

Table 2 Process parameters of DED additive manufacturing

Parameter	Value
Laser power	Initial 1,800 W, 100 W reduction after every layer until 1,600 W
Beam spot size	3 mm
Powder feed rate	12 g/min
Layer thickness	0.9 mm
Beam travel speed	1,000 mm/min
Hatch distance	1.6 mm

주요 공정 변수는 Tables 1 과 2와 같으며, 장비 제조사가 제공한 최적 공정변수이다. 적층 제조에 사용된 분말은 적층 제조 방식에 따라 차이가 있다. PBF 방식에 사용된 분말은 50 μm 이하의 작은 구 형태의 스테인리스강 316 L 분말이며, DED 방식에 사용된 분말은 45-104 μm 의 PBF 방식에 사용되는 분말보다 약간 큰 분말이다. 본 시험에 사용된 분말은 금속 분말 제조사의 성적서를 통해 스테인리스강 316 L 화학적 성분 요건표에 만족하는 것을 확인하였다.

2.2 적층 제조 시편의 열처리

금속 재료의 열처리 방법 및 조건은 여러 가지가 있다. 금속 적층 제조 시편에 최적화된 열처리 방법을 찾기 위해서는 모든 열처리 방법 및 조건을 수행한 시편으로 기계적 성질 시험을 수행하여야 하나, 과정의 효율성을 위해 ASTM F3184-16 및 미국 전력연구소(Electric Power Research Institute, EPRI)에서 ASME위원회에 제출한 Draft Code Case를 참고하여 열처리 방법 및 조건을 선정하였다[8,9].

우선 ASTM F3184에서는 3가지 열처리 방법으로 5가지 조건의 열처리 방법에 따른 기계적 성질 시험 허용 기준을 설정하였다. 3가지 열처리 방법은 응력제거(Stress Relieving), 용체화 풀림(Solution Anneal), 열간등압성형(Hot Isostatic Pressing, HIP)이다. EPRI에서 제출한 ASTM F3184-16의 요건을 만족하는 PBF 방식으로 제작된 UNS S31603 재질의 ASME BPVC Section III의 안전등급 1, 2, 3 등급 적용을 위한 Draft Code Case 인 Record 20-254에서는 ASTM F3184-16의 C조건(HIP 열처리) 후 B조건(용체화 풀림 열처리)으로 열처리하도록 권고하였다. Data Package 자료에 따르면 HIP 열처리는 1,120°C (2,050°F)에서 2시간동안 수행하였고, 용체화 풀림은 1,120°C

Table 3 The conditions of the heat treatment

No.	Heat treatment	Temp. [°C]	Press. [MPa]	Time [hour]
1	HIP	1,120	100	4
2	Solution annealing	1,120		2
3	HIP+SA	1,120	100	4+2

(2,050°F)에서 2시간동안 수행한 것으로 기술하였다. 본 논문에서는 각 열처리의 효과를 분석하고자 ASTM F3184-16 및 Draft Code Case Record 20-254를 최대한 조합하여 Table 3과 같이 3가지로 열처리 조건을 확정하였다.

3가지 열처리 조건을 확정한 후 1번 시편과 3번 시편을 대상으로 HIP 처리를 먼저 수행하였고, 2번 및 3번 시편을 대상으로 용체화 풀림 열처리를 수행하는 방식으로 두 번의 열처리를 수행하였다. 용체화 풀림 열처리 시 급냉 방법은 아르곤 가스를 이용한 Gas-quenching 방법을 사용하였다.

3. 기계적 성질 시험 결과

3.1 인장 시험 결과

인장시험 전 Fig. 3의 Specimen 3 크기에 따라 Fig. 4(a)과 같이 정밀가공 하였다. 열처리 전 상태(As-built)의 인장강도와 항복강도는 Figs. 5와 6과 같이 PBF 시편이 DED 시편보다 높게 측정되었다. 특히 항복강도의 차이가 심했는데 최대 220 MPa 이상 높은 것으로 나타났다. PBF 시편의 경우 항복강도는 인장강도의 80% 이상으로 측정되었고, DED 시편의 경우 그 비율이 50-60% 정도 수준이었다. 보통 인장강도 대비 항복강도의 비율이 높으면 취성이 있다고 판단할 수 있지만, PBF 및 DED 시편의 연신율(Elongation)은 크게 차이 나지 않았다. 연신율의 경우 X, Z 방향 시편은 DED 시편이 약간 높고, Y축 방향의 시편만 PBF 시편이 약간 높게 측정되어, 약간의 편차는 있었지만 PBF 시편과 DED 시편의 유의미한 차이는 없었다. 단면수축률(Reduction of Area)도 마찬가지로 약간의 편차는 있었지만 PBF 및 DED 시편 모두 60-75%로 비슷하게 측정 되었고, DED Y 방향 시편만 50% 정도로 약간 낮게 측정되었다. ASTM F3184-16 기술기준에는 인장시험 요건을 기술하고 있으며, 인장강도는 515 MPa, 항복강도는 205 MPa, 연신율은 30%, 단면수축률은 열처리 조건에 따라 30-40% 이상이 되도록 요구하고 있으며, As-built 상태의 인장 시험 결과는 모두 만족하는 것으로 확인되었다.

열처리 후 적층 제조 시편의 인장강도와 항복강도는 열처리 종류와 상관없이 전체적으로 낮아졌고, 반면 연신율은 열처리 후 높아졌다. 단면수축률은 열처리 후 대체적으로 낮아졌다. 인장강도는 적층 방법 및 방향에 따라 차이는 있지만 30-47 MPa 정도 낮아졌다. DED 및 PBF 시편 모두 X, Y 적층 방향의 인장강도는 눈에 띄게 낮아졌지만, 특히 PBF 시편의 Z 적층 방향

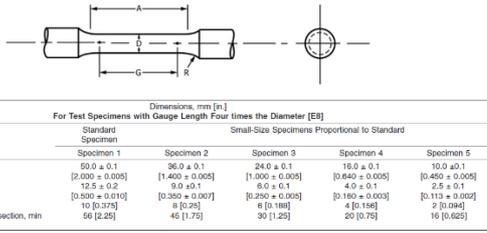


Fig. 3 The size of the tensile test specimens



(a) Before tensile test specimens (Z-direction)

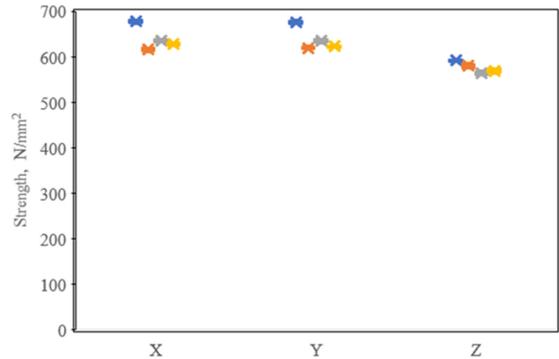


(b) After tensile test specimens (Z-direction)

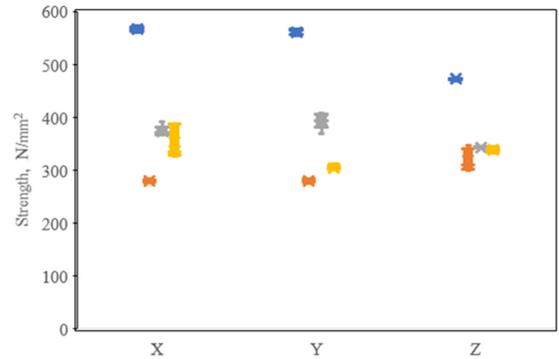
Fig. 4 Before and after tensile test specimens of as-built

인장강도 변화폭은 상대적으로 크지 않았다.

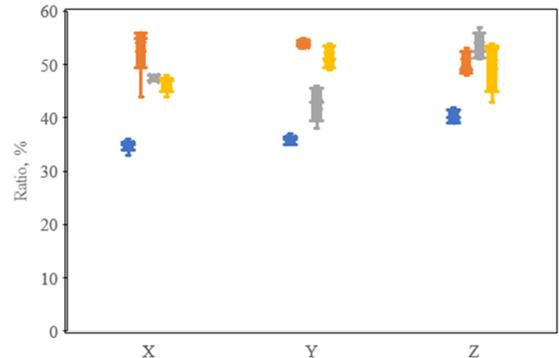
열처리 종류에 따른 인장강도의 변화폭은 의미 있는 경향을 보이지는 않았다. 항복강도는 시편 종류 및 적층 방향의 차이는 있지만, 인장강도 변화율보다 훨씬 큰 10-280 MPa 정도 낮아졌다. 항복강도도 마찬가지로 DED 및 PBF 제작 시편 모두 X, Y 적층 방향의 항복 강도는 눈에 띄게 낮아졌지만, Z 방향 시편의 변화폭은 그에 비해 적었다. 특히 DED 보다 PBF 제작 시편의 항복강도 변화폭이 약 2배정도 차이가 났으며, 이는 As-built 상태의 항복강도가 PBF 시편이 약 200 MPa 정도 높았기 때문으로, 열처리 후 항복강도도 PBF 시편이 10-110 MPa 정도가 높았다. DED 시편의 경우 열처리 종류에 따라 항복강도의 변화폭이 크게 차이 나지 않았지만, PBF 시편의 경우 HIP 처리 후 항복강도의 변화폭이 컸다. 모든 열처리 후 항복강도가 낮아졌지만,



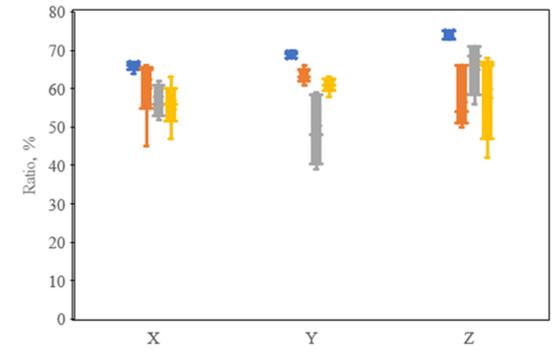
(a) Tensile strength of PBF specimens



(b) Yield strength of PBF specimens



(c) Elongation of PBF specimens



(d) Reduction of area of PBF specimens

Fig. 5 Tensile test results of PBF specimens

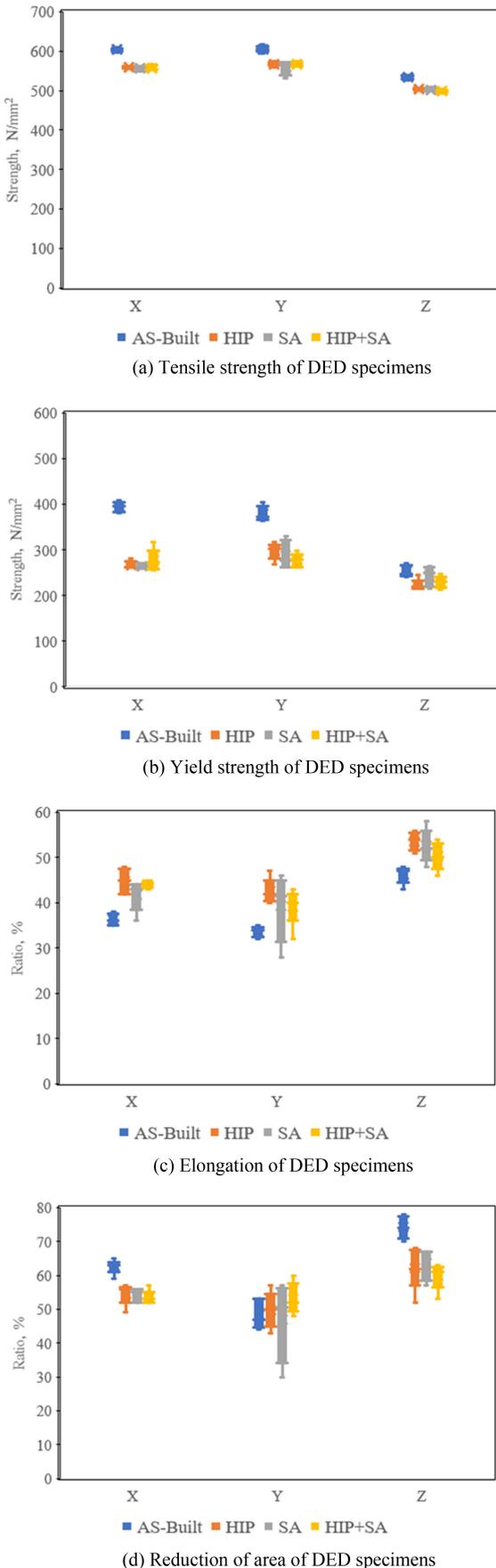


Fig. 6 Tensile test results of DED specimens

용체화 풀림 처리 후 보다 HIP 처리 후 항복강도가 더 낮아졌고, 용체화 풀림 처리 후 HIP 처리한 시편의 경우도 HIP 처리만 시편과 비슷하게 낮아졌다. 하지만 Z 방향의 시편은 HIP 처리나 용체화 풀림 처리 후 항복강도는 비슷했다. 즉, PBF 시편의 경우 Z 방향 보다 X, Y 방향의 열처리 후 항복강도 변화가 심하며, 이는 열처리 후 적층 방향별 항복강도가 비슷해졌다고 볼 수 있다.

연신율은 시편 종류 및 적층 방향의 차이는 있지만 0-15% 정도 높아졌다. 연신율도 마찬가지로 DED 및 PBF 제작 시편 모두 X, Y 적층 방향의 연신율이 Z 방향의 연신율보다 변화폭이 많았다. 또한 DED 시편 보다 PBF 시편의 연신율의 변화폭이 많았다. 열처리 종류별 연신율의 변화는 일정한 경향성을 보이지 않았다. 하지만 HIP 처리 후 연신율의 변화폭이 적층 방향에 따라 일정하게 높아지는 경향을 보였지만, 용체화 풀림 처리 시 DED 및 PBF 시편 모두 적층 방향별로 변화폭이 상이하고, 동일 시편별 분산도 큰 경향을 보였다.

단면수축률은 시편 종류 및 적층 방향의 차이는 있지만 0-16% 정도 낮아졌다. 단면수축률의 각 시편(5개 시편) 분산이 커서 적층 방향별 뿐만 아니라 열처리 종류별로도 특별한 경향은 보이지 않는다.

3.2 경도 시험 결과

ASTM F3184-16에서는 Supplementary Requirements S4 장에서 경도 시험을 요구한다. 경도 시험은 ASTM E10 또는 ASTM E18에 따라 수행하도록 하였다. 본 보고서에서는 ASTM E18-22에 따른 로크웰(Rockwell) 경도시험으로 KOLAS 공인 시험기관에서 진행하였다.

시험 시편은 인장강도 시험 시편 제작 후 가공 시 남은 여유분을 적층 방식별(2종류: DED, PBF), 적층 방향별(3종류: X, Y, Z), 열처리 종류별(4종류: As-built, HIP, SA, HIP+SA)로 분류하여 총 24개를 사용하였다. 경도시험 결과 Fig. 7과 같이 As-built 상태 PBF 시편의 경도는 90-94 HRBW로 측정되었고, DED 시편의 경도는 80-86 HRBW 정도로 측정되었다. PBF 및 DED 시편 모두 X, Y 적층 방향의 경도 값이 Z 적층 방향 시편보다 약간 높게 측정되었다. 열처리를 하면 경도는 감소하는 것으로 측정되었다. 하지만 열처리 방법에 따른 경도값의 유의미한 변화는 발견되지 않았고, PBF 시편의 경우 열처리 후 적층 방향별 경도값의 편차가 줄어들음을 확인하였다. 하지만 DED 시편의 경우, X, Y 적층 방향 경도가 Z 적층 방향 경도보다 높은 경향은 유지 되었다.

3.3 미세조직 분석 시험 결과

3.3.1 미세조직 분석 시험 기준 및 시편

미세조직 분석 시험은 EPRI에서 제출한 ASTM 3184-16의 요건을 만족하는 PBF 방식으로 제작된 UNS S31603 재질의 ASME BPVC Section III의 안전 등급 1, 2, 3 등급 적용을 위한 Draft Code Case인 Record 20-254를 참조하여 수행하였다.

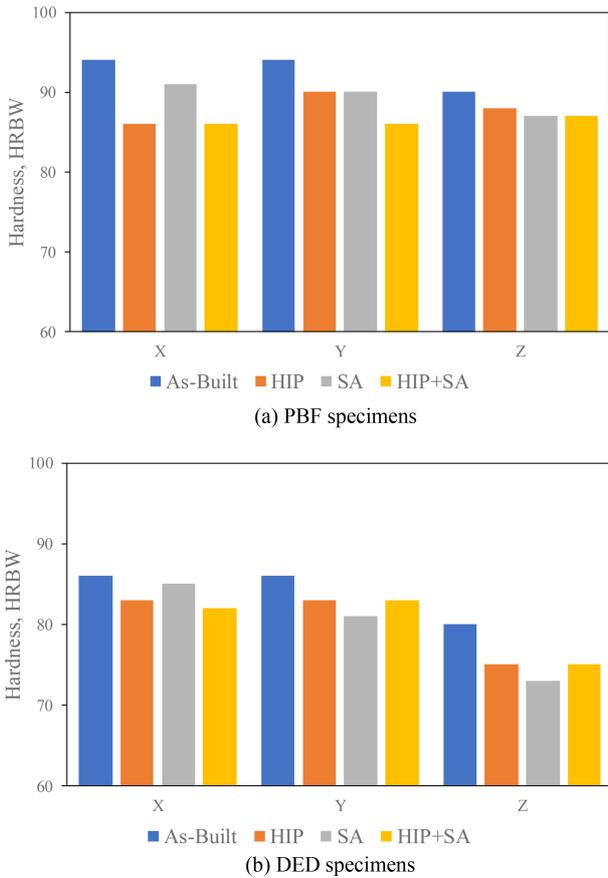


Fig. 7 Hardness test results

해당 보고서에서는 미세조직 분석은 100, 500배 광학현미경 사진을 확인하는 것을 권장하였고, 같은 배율의 광학현미경 사진을 확인하였다. 시험 시편은 인장강도 시험 시편 제작 후 가공 시 남은 여유분을 적층 방식별(2종류: DED, PBF), 적층 방향별(2종류: XY평면, Z평면), 열처리 종류별(4종류: As-built, HIP, SA, HIP+SA)로 분류하여 총 16개를 사용하였다. 또한 같은 시편을 활용하여 EBSD (Electron Backscatter Diffraction) 분석도 수행하였다.

3.3.2 미세조직 분석 결과

PBF 시편의 경우, Figs 8(a) 및 9(a)에서 보는 바와 같이 As-built 시편의 방향성 및 비드 존재함을 확인할 수 있다. Figs. 10 및 11에서 보는 바와 같이 EBSD 결과에서는 위아래 방향성을 관찰할 수 있고, 광학현미경 결과에서는 비드 형상이 관찰된다. 열처리를 하면 결정립의 크기가 줄어들고, 방향성도 없어지는 것으로 판단된다. 특히 Z 평면 시편의 경우 As-built 상태에서 HIP, SA, HIP+SA 열처리를 거치면서 결정립의 크기(~60 μm)가 확연하게 줄어들고, 결정립 간 크기의 편차(70 → ~38 μm)도 줄어들음을 확인할 수 있어, 균질한 결정립 구조가 되는 것으로 판단된다. 한편, XY 평면에 대한 결정립 크기 분포는 열처리 공정에 따라 큰 차이를 보이지는 않는다.

DED의 경우, Figs. 13(a) 및 14(a)에서 보는 바와 같이 As-built

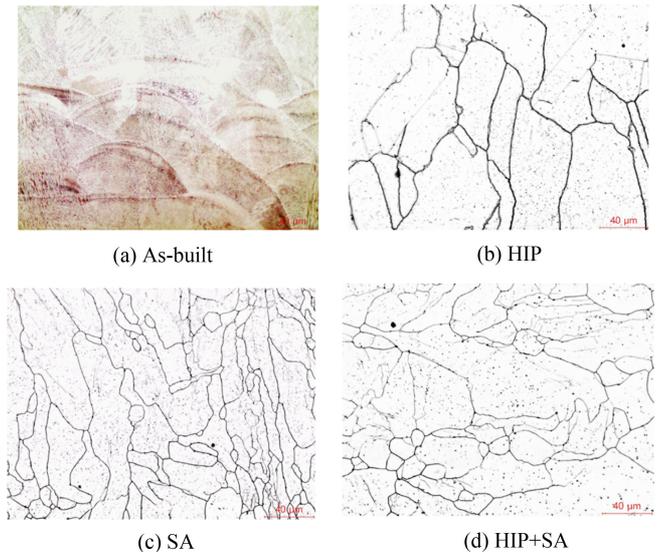


Fig. 8 Microstructures of PBF specimens (Z-plane, × 500)

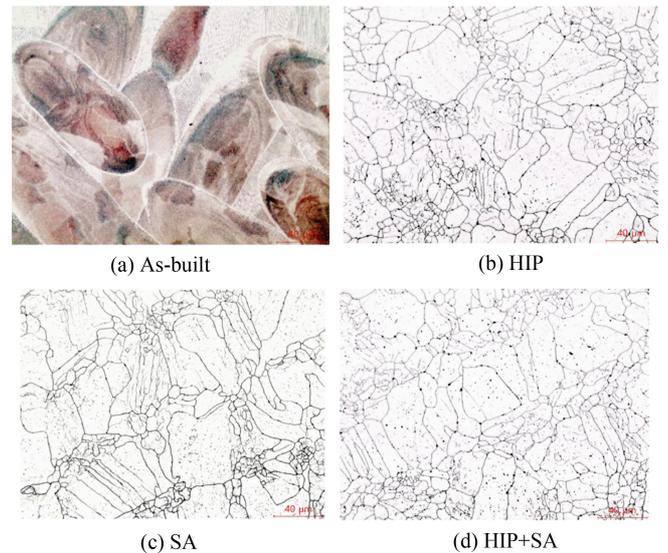


Fig. 9 Microstructures of PBF specimens (XY-plane, × 500)

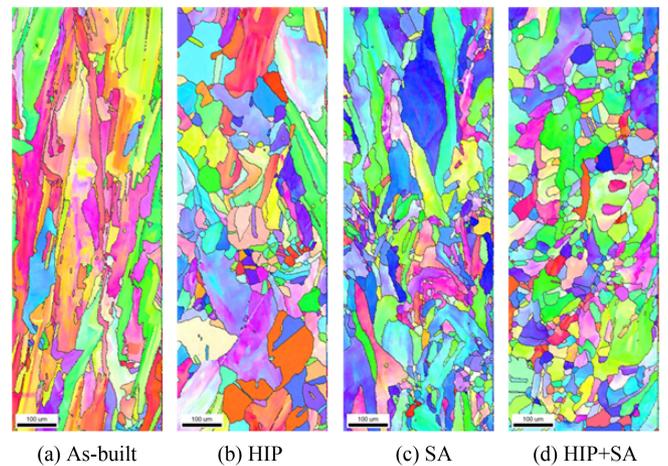


Fig. 10 EBSD picture of PBF specimens (Z-plane)

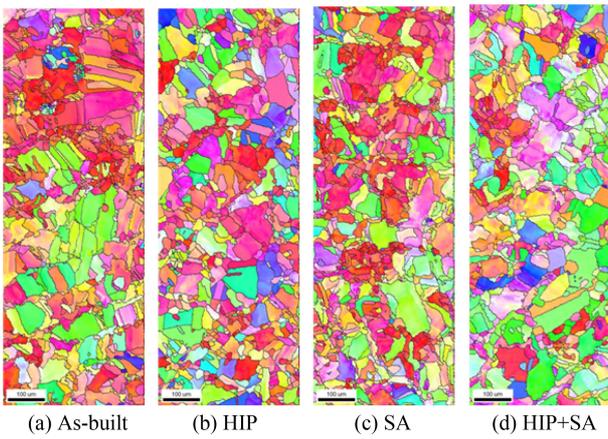


Fig. 11 EBSD picture of PBF specimens (XY-plane)

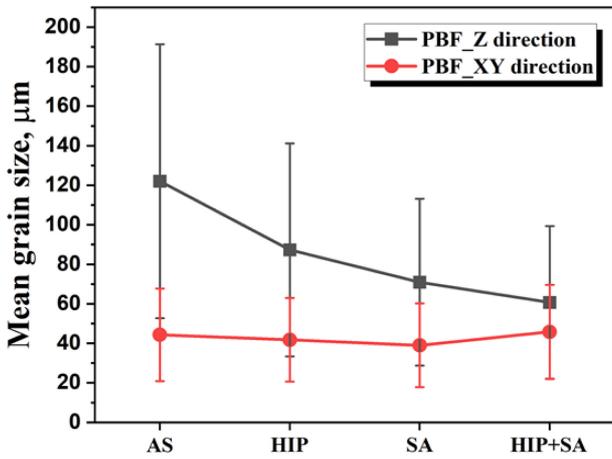


Fig. 12 Variation of grain size of PBF specimens by heat treatment

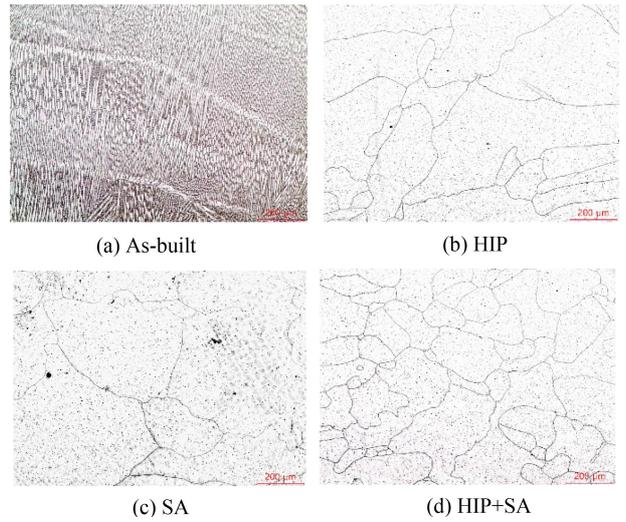


Fig. 14 Microstructures of DED specimens (XY-plane, × 100)

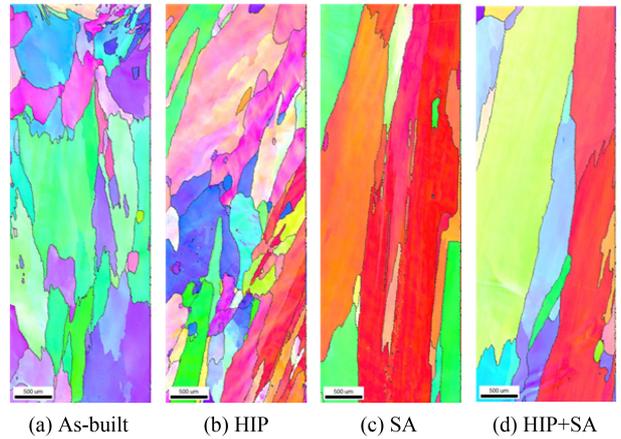


Fig. 15 EBSD picture of DED specimens (Z-plane)

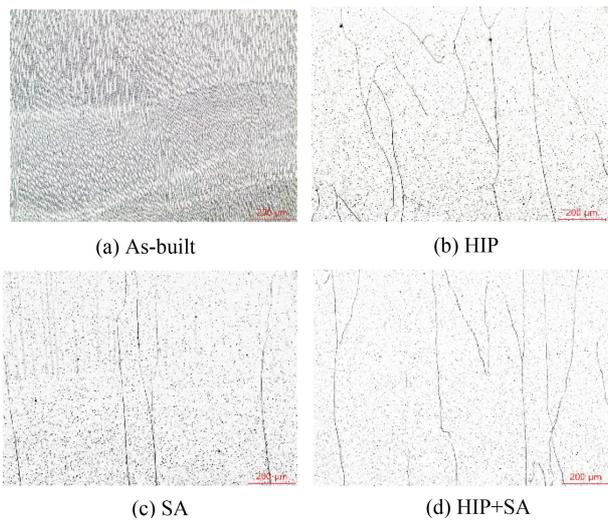


Fig. 13 Microstructures of DED specimens (Z-plane, × 100)

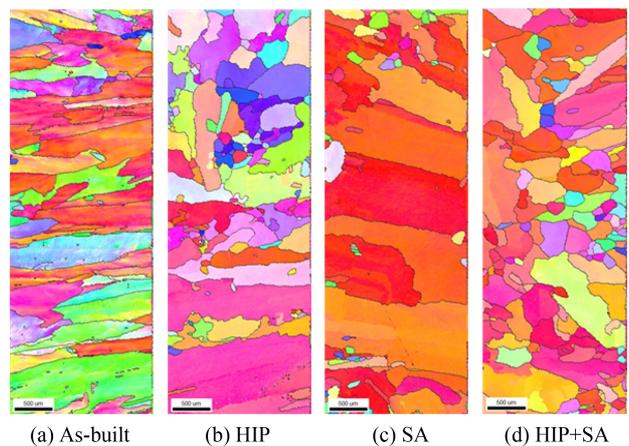


Fig. 16 EBSD picture of DED specimens (XY-plane)

시편의 방향성 및 용접조직이 존재함을 확인할 수 있다. Figs. 15 및 16에서 보는 바와 같이 EBSD 결과에서는 위아래 방향성, 좌우 방향성을 모두 확인할 수 있고, 광학현미경 결과에서는

전 영역에 걸쳐 전형적인 용접조직인 수지상(Dendrite) 형상이 관찰된다. DED 시편의 경우 As-built 시편의 결정립은 일반적인 스테인리스강의 결정립(수십 μm)보다 조대한 결정립 크기

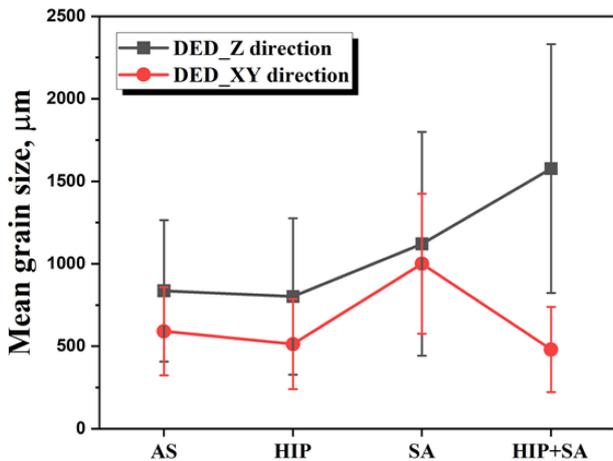


Fig. 17 Variation of grain size of DED specimens by heat treatment

(Z평면 836 μm, XY평면 591 μm)를 나타내며, 열처리를 하면 결정립의 크기가 오히려 커지고, 편차도 커짐을 알 수 있다. 또한 열처리 공정에 따라 이방성이 없어지지 않는 것으로 보인다. 결정립이 큰 것은 DED 시편 제작 시 높은 열량 때문일 수 있으므로 향후 DED 공정 중 레이저 파워를 낮춰서 제작한 다음 미세조직을 추가로 분석할 필요가 있다.

4. 결론

본 논문에서는 금속 적층 제조 방법인 PBF 및 DED 방법으로 제작한 시편을 대상으로 열처리 전후의 기계적 성질 시험 결과를 비교하였다. 열처리 조건은 HIP, SA, HIP+SA 등 3가지 조건으로 수행하였고, 적층 방향도 X, Y, Z 등 3가지 방향으로 설정하여 시편을 제작하였다. 열처리 전의 PBF 시편은 DED 시편보다 인장강도와 항복강도가 좀 더 높은 것으로 측정되었으며, 이러한 경향은 열처리를 하여도 유지 되었지만, 항복강도의 경우 그 차이가 줄어들었다. 특히 PBF 시편의 경우 열처리 후 적층 방향별 항복강도의 편차가 확연히 줄어들었다. 적층 시편의 경도는 PBF 및 DED 시편 모두 열처리를 하면 감소하는 것으로 측정되었다. 경도 또한 PBF 시편의 경우 열처리 후 적층 방향별 편차가 줄어들음을 확인하였다. 미세조직 분석 결과 PBF 시편의 경우 열처리를 하면 결정립의 크기가 가장 확연하게 줄어들며, 특히 Z 평면의 경우 HIP+SA 열처리를 하면 결정립의 크기 및 편차가 줄어들며 이방성이 없어져, 균질한 결정립 구조가 되는 것으로 판단된다. DED 시편의 경우 계획한 열처리 공정을 거친 후에도 결정립 구조나 이방성의 뚜렷한 변화가 보이지 않았다. 열처리를 수행한 PBF 방식 적층 제조품은 인장시험 결과, 결정립의 크기 및 결정의 균질성을 분석해 보면 일반 부품 뿐 아니라 원전 중요부품, 특히 압력 유지 재료로 활용할 가능성이 충분해 보이며, DED 방식의 적층 제조품은 인장시험 결과만 보면 일반 부품 적용은 가능할 것으로 보이거나 압력 유지 재료로

활용하기 위해서는 적층 공정 변수의 보정을 통해 결정립 크기 조정 및 이방성 해결을 위한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

REFERENCES

1. Choi, J.-W., Kim, H.-C., (2015), 3D printing technologies-a review, Journal of Korean Society of Manufacturing Process Engineers, 14(3), 1-8.
2. Choi, S. J., Bae, Y. H., Lee, I. H., Kim, H., (2018), Latest research trends of 3D printing in korea, Journal of Korean Society of Precision Engineering, 35(9), 829-834.
3. National IT Industry Promotion Agency, (2018), 2017 3D printer industry survey. <https://www.nipa.kr/home/2-7-1-2/5145>
4. Jang, K. N., Choi, S. N., Lee, S. H., (2020), Consideration for application of 3D printing technology to nuclear power plant, Transactions of the Korean Society of Pressure Vessels and Piping, 16(1), 117-124.
5. Jang, K., Yang, S., (2023), Tensile test results for metal 3D printed specimens of stainless steel 316L manufactured by PBF and DED, Journal of the Korean Society of Pressure Vessels and Piping, 19(1), 11-19.
6. ISO 17296-2, (2015), Additive manufacturing-general principles-Part 2: overview of process categories and feedstock.
7. ASTM E8/E8M, (2021), Standard test methods for tension testing of metallic materials.
8. Gandy, D. W., Tate, S., List, F., Dinwiddie, R., Carver, K., Hensley, C., Sisco, K., Godfrey, A., BeauChamp, S., Rezayat, H., Chandrasekar, S., Foster, S., Raplee, J., McFalls, T., Galicki, D., Babu, S., (2020), ICME and in-situ process monitoring for rapid qualification of components made by laser-based powder bed additive manufacturing processes for nuclear structural applications, (Report No. 3002018273), <https://www.osti.gov/biblio/1817902>
9. ASTM F3184-16, (2016), Standard specification for additive manufacturing stainless steel alloy UNS S31603 with powder bed fusion.



Kyungnam Jang

Senior Researcher in Central Research Institute, Korea Hydro Nuclear Power Co., LTD. His research interest is additive manufacturing. E-mail: knamjang@khnpp.co.kr



Seunghan Yang

Principal Researcher in Central Research Institute, Korea Hydro Nuclear Power Co., LTD. His research interest is additive manufacturing.

E-mail: seunghan.yang@khnp.co.kr



Dae Seung Park

Senior Researcher in Central Research Institute, Korea Hydro Nuclear Power Co., LTD. His research interest is additive manufacturing.

E-mail: daeseungpark@khnp.co.kr

혈관치료용 카테터 회전 및 풀백 구동 시스템 개발

Development of Rotation and Pull-back Drive System of Catheter for Vascular Treatment

설재호¹, 서명재¹, 전종혁^{1,2}, 김성민³, 임흥석^{4,#}
Jaeho Sul¹, Myoung Jae Seo¹, Jong Hyeok Jeon^{1,2}, Sung Min Kim³, and Hong Seok Lim^{4,#}

¹ 동국대학교 대학원 바이오헬스의료기기규제과학과 (Department of Regulatory Science for Medical Device, Graduate School, Dongguk University)

² 주바이오유닛 기업부설연구소 (R&BD Laboratory, Biounit Co., Ltd)

³ 동국대학교 의생명공학과 (Department of Biomedical Engineering, Dongguk University)

⁴ 동국대학교 의료융합기술실용화연구원 (Research Institute for Commercialization of Biomedical Convergence Technology, Dongguk University)

Corresponding Author / E-mail: limit75@naver.com, TEL: +82-10-2984-3728

ORCID: 0000-0003-1331-8635

KEYWORDS: Pull-back (풀백), Catheter (카테터), Varicose vein (하지정맥류), Minimal invasive surgery (최소침습술), Hand piece (핸드피스)

Varicose vein treatments range from conventional surgical ligation and sclerotherapy to venous closure using biological adhesives. However, considering ease of procedure, recovery time, and cosmetic outcomes like minimal scarring, minimally invasive techniques employing lasers or radiofrequency are preferred. The efficacy of these methods heavily relies on clinician expertise and ultrasound imaging, with manual catheter retraction during cauterization presenting challenges, such as overlapping or untreated areas, especially in long vessels exceeding 1 meter, leading to increased procedure time and operator fatigue. To address these issues, we propose an automated catheter procedure for varicose veins. This system features a handpiece for energy generation control (laser, radiofrequency) operated near the clinician for convenience. We designed a pullback system that enables constant speed rotation and forward/backward movements of the catheter without moving the handpiece. Through handpiece operation, the catheter rotates at a set speed, and a roller-driven pullback action occurs as it winds on a reel, expanding the diameter of the reel for retraction while remaining stationary. Conversely, reducing the diameter of the reel facilitates forward movement. The length adjustment of the catheter based on winding turns on the reel makes it adaptable for various vascular procedures, enhancing the procedural accuracy and operator convenience.

Manuscript received: March 7, 2024 / Revised: May 28, 2024 / Accepted: May 29, 2024
This paper was presented at KSPE Autumn Conference in 2023

NOMENCLATURE

R	=	Radius
l	=	Length of a Link
C	=	Distance Center to Axis of an External Gear
ω	=	Angular Velocity
P.C.D	=	Pitch Circle Diameter
A.D	=	Addendum Circle Diameter
D.D	=	Dedendum Circle Diameter
m	=	Module of Gear
Z	=	Number of Teeth

1. 서론

하지정맥류는 다리 정맥 판막의 기능 이상으로 발생하는 질환으로, 심장으로 가야 하는 혈액이 다리 방향으로 역류하여 발생한다[1]. 그 결과 다리가 붓고 정맥 혈관이 확장되거나 늘어나면서 구불구불해지고 부풀어 오르는 증상이 유발된다. 이러한 하지정맥류의 치료 방법은 피부 절개를 통해 해당 정맥을 결찰하는 기존 외과적 수술 방법부터 혈관 내 경화제를 주사하는 주사 경화 치료법, 생체용 접착제를 활용하여 정맥을 막아 폐쇄시키는 방법, 레이저나 고주파를 이용한 최소침습술 등 다양하게

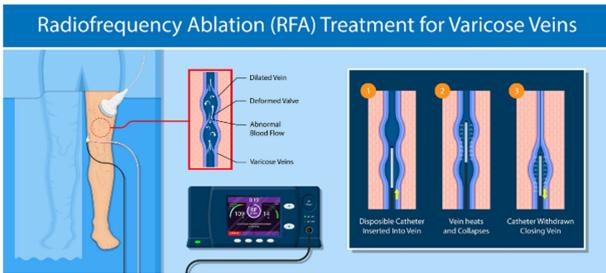


Fig. 1 Radiofrequency ablation (RFA) treatment for varicose veins [2] (Adapted from Ref. 2 on the basis of OA)

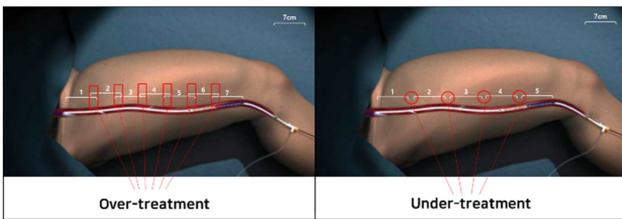


Fig. 2 Radiofrequency irradiation overlap and non-contact parts [3] (Adapted from Ref. 3 on the basis of OA)

존재한다[4]. 이 중, 시술의 용이성, 회복 기간의 단축, 그리고 수술 흉터 최소화 등을 고려하였을 때 레이저나 고주파를 이용한 최소침습술이 가장 우선되는 치료 방법으로 여겨지고 있으며, 최소침습술의 발달로 하지정맥류 치료에 대해서도 혈관 내 고주파 및 레이저 열 폐쇄술 기법 및 관련 의료기기의 발달이 증점적으로 이루어지고 있다[5].

Fig. 1은 최소침습적 치료 방법 중 고주파 열 치료술(Radiofrequency Ablation, RFA)의 과정을 설명하는 모식도이다. 우선 카테터를 정맥에 삽입한 후 열을 가해 정맥을 수축시킨다. 이후 일정한 길이로 표시된 다음 구간으로 카테터를 이동시켜 열을 가하는 과정을 반복한다. 마지막으로 카테터를 제거하고 혈관을 폐쇄시키는 것으로 시술이 마무리된다. 최소침습적 열 폐쇄술인 레이저 치료(Endovenous Laser Ablation)와 고주파 열 치료는 현재 가장 많이 사용되고 있는 치료 방법이지만, 아직 시술 과정에서 보완이 필요한 문제가 남아있다[6,7]. 첫 번째로, 현재 하지정맥류 고주파 열 치료술에 사용 중인 카테터는 정맥의 직경이 작은 경우 진입이 어려우며, 정맥이 지나치게 굴곡진 경우 정맥 내에서 전진이 어려울 수 있다[8].

두 번째로, 최소침습적 열 치료술은 초음파 영상을 기반으로 카테터의 위치를 조절하면서 시행되므로, 정맥 내 열이 조사되는 부위가 중첩되거나 열이 충분히 도달하지 않아 소작되지 않는 영역이 생길 수 있다[9]. Fig. 2에서 보이는 바와 같이 중첩부 혹은 고주파 미접촉부가 발생할 수 있기 때문에, 열 치료술의 효과와 질은 의료진의 경험 및 숙련도에 크게 의존하게 된다[10]. 이러한 상황은 병원 간 치료 결과의 차이를 초래할 수 있으며, 특정 병원의 성공률이 높다는 인식이 형성되어 환자들이 특정 병원으로 집중되는 현상을 유발할 수 있다. 세 번째로, 고주파 열

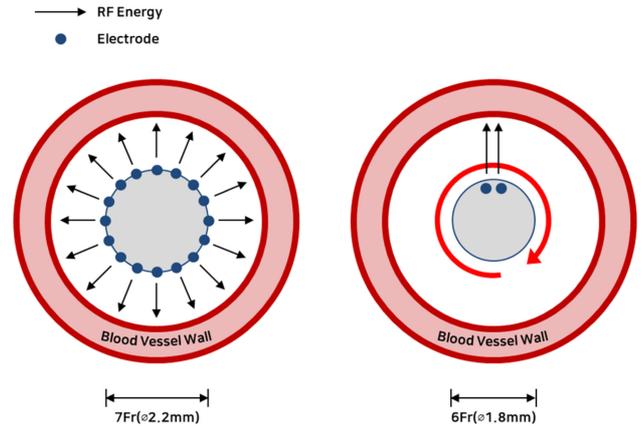


Fig. 3 Cross section of the non-rotational and rotational catheters

치료술은 시술자가 수동으로 카테터를 조작하여 혈관을 폐쇄하는 과정이므로, 폐쇄해야 할 혈관의 길이가 1 m 이상으로 긴 경우 시술 시간이 길어지고 시술자의 피로도가 증가할 수 있다. 이는 시술의 정확성에 영향을 미칠 수 있는 중요한 요소이기에, 긴 혈관을 대상으로 하는 고주파 열 치료술 시에는 시술 정확도를 보장하기 위해서 개선이 필요한 부분이 존재한다[11]. 이러한 문제에 대한 해결 방안으로, 본 연구는 하지정맥류 카테터 시술 과정을 자동화하는 새로운 방식을 제안한다. 제안하는 카테터 회전 및 폴백 구동 시스템을 통해 앞서 언급된 문제들을 효과적으로 해결할 수 있을 것으로 기대한다. 카테터를 회전시키는 방식을 채택함으로써, 더 작은 직경의 카테터 사용이 가능해져, 구조가 복잡하거나 좁은 혈관에서의 시술이 용이해질 것이다. Fig. 3은 기존 비회전 방식의 카테터와 회전 방식의 카테터를 비교한 그림이다. 비회전 방식의 카테터는 혈관 벽 전체에 열을 균일하게 조사하기 위해 다수의 전극으로 구성되어 있지만, 회전 방식의 경우 카테터를 회전시킴으로써 바이폴라 전극의 수를 줄이고 카테터의 직경을 최소화할 수 있다. 또한 본 연구에서 제안하는 시스템의 폴백 모듈은 핸드피스의 위치 변화 없이 시술자와 가까운 곳에서 카테터의 회전, 에너지 발생, 폴백 동작을 안정적이고 정교하게 조작될 수 있도록 한다. 자동화된 폴백 동작을 통해 열 조사가 중첩되거나 고주파 미접촉부 발생 문제를 해결하여 균일한 열 치료술이 가능하며, 임상상의 의도에 따라 더욱 세밀한 시술이 가능해질 것으로 판단된다.

이와 비슷하게 심혈관 초음파(Intravascular Ultrasound, IVUS) 영상 진단 기술이 존재한다. 초음파 프로브가 달린 카테터를 혈관에 삽입하여 회전과 폴백 동작을 통해 생성된 영상을 통해 관상동맥의 상태를 확인하는 기술이다[12,13]. 이미지 생성이 필요한 영역이 15 cm 이내의 수준이기 때문에 긴 폴백 거리가 요구되지 않으며, 카테터의 회전은 단일 속도로 이루어진다[14,15]. 반면 본 연구에서 제안하는 시스템은 1 m 이상의 긴 폴백 거리에 적용 가능하며, 폴백 속도와 회전 속도를 상황에 따라 조절할 수 있다는 차이점을 갖는다. 이는 카테터의 회전과 폴백 속도를 서로 조절함으로써, 혈관 내 모든 영역에 에너지가 균일하게

조사되어 균일한 열 치료술을 가능하게 한다. 이러한 기능은 시술자의 경험과 숙련도에 따라 발생할 수 있는 치료 결과의 차이를 줄이고, 시술 정확도를 보장하는 데 기여할 것으로 생각된다. 나아가 본 연구에서 제안하는 카테터 회전 및 풀백 구동 시스템은 다양한 혈관 시술에 적용될 수 있으며, 이를 통해 관련 시술의 단점들을 보완할 수 있을 것으로 기대한다.

2. 설계 요구사항 분석 및 적용 메커니즘 개발

카테터 회전 및 풀백 구동 시스템에서 요구되는 사항을 분석하고, 이를 구현하기 위한 메커니즘을 개발했다.

2.1 회전 동작 설계 요구사항 및 적용 메커니즘

복잡한 구조의 혈관이나 좁은 혈관에서의 시술 용이성을 제고하기 위하여, 카테터의 직경을 최소화하는 회전 방식의 카테터를 고려해볼 수 있다. 이를 구현하기 위해, 카테터의 회전은 핸드피스에 위치한 모터에 의해 제어되는 방식으로 설계될 수 있다. 굴곡진 정맥을 따라 정확하게 카테터를 위치시키고, 카테터의 끝까지 회전 모터의 동력을 전달할 수 있도록 카테터 양 끝에서의 회전 추종성과 축의 굽힘 유연성이 동시에 확보되어야 한다. 이와 같은 요구 사항을 충족하기 위해, 플렉시블 샤프트와 같은 구조가 적용될 수 있다. 플렉시블 샤프트는 가요성을 지닌 축으로, 축 방향의 변화가 가능하며, 휘어진 구조에서도 축을 따라 회전 동력을 효과적으로 전달하는 특징을 가진다. 이러한 구조적 특징을 지닐 수 있도록, 카테터의 회전축은 다중 와이어 감김 방식으로 제작되어야 한다. Fig. 4 는 본 연구에서 제안하는 카테터 회전 및 풀백 구동 시스템에 적용된 카테터의 구조이다. 다중의 와이어를 동시에 감는 방식으로 제작되어 굽힘 강성을 낮추고, 반대 방향의 나선 구조가 겹치도록 와이어를 여러 겹으로 감는 방식으로 제작되어 높은 비틀림 강성을 확보할 수 있다. 카테터의 회전은 핸드피스 내 회전 모터를 통해 제어되며, 이 과정에서 케이블의 꼬임이 발생할 수 있다. 따라서 카테터 내부에 위치한 전선들의 꼬임 현상을 방지하기 위한 해결책이 필요하며, 전선의 꼬임 없이 전원 또는 신호라인 공급에 사용되는 회전형 커넥터인 슬립링을 적용할 수 있다. 또한 시술자가 필요에 따라 카테터의 회전 속도를 조절할 수 있도록, 다양한 속도 설정이 가능한 회전 모터와 이를 제어하는 제어 보드가 필요하다.

2.2 풀백 동작 설계 요구사항 및 적용 메커니즘

풀백 동작이 이루어질 때, 핸드피스는 시술자와 인접한 위치에서 유지되며 정확히 제어되어야 한다. 또한 풀백 동작은 카테터의 끝까지 회전 모터의 동력이 전달될 수 있도록 회전에 영향을 주지 않는 방식으로 수행될 수 있어야 한다. 단순히 카테터가 구동 롤러 사이에 위치하고, 구동 롤러와 밀착된 상태로 마찰을 이용하여 전 후진하는 경우, 카테터 회전축이 외부 보호 튜브와 구동 롤러 사이에 압착되어 가해지는 압력으로 인해



Fig. 4 Catheters rotation shaft manufactured in multiple wire winding structure

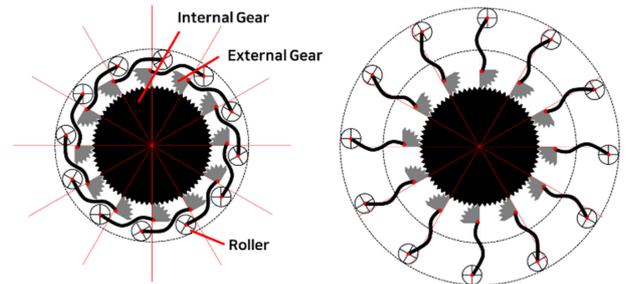


Fig. 5 Mechanism of the catheter reel extension

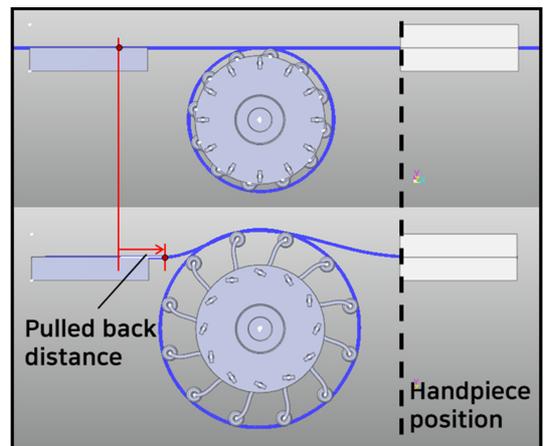


Fig. 6 Analysis of catheter reel multibody dynamics in diameter expansion

회전 모터의 동력이 카테터의 말단부까지 전달되지 않을 수 있다. 이러한 요구사항을 충족시키는 풀백 동작 메커니즘으로 Fig. 5와 같이 카테터가 릴에 감겨 있는 상태에서부터 릴의 직경을 확장시키는 방식으로 구현하였다. 내부 기어가 모터에 의해 회전하면서 내부 기어와 맞물린 외부 기어가 회전하고, 이 외부 기어에 고정된 연결부의 각도 변화를 통해 직경이 확장되는 구조이다. 이 구조는 카테터 릴의 전체 둘레 길이가 증가함에 따라 카테터가 풀백되며, 풀백 된 길이만큼 카테터 릴에 수납될 수 있게 한다. 카테터에 대한 압력은 릴과 접촉된 영역 전체에 균등하게 분배되어, 카테터 회전 모듈의 회전력이 말단부까지 효과적으로 전달될 수 있으며, 핸드피스의 위치 변화 없이 풀백 동작을 정교하게 수행되어야 하는 요구조건을 만족할 수 있다.

Table 1 Catheter properties and contact conditions used in the multibody dynamics analysis

Catheter properties	
Young's modulus	100,000 [MPa]
Density	1.85e-006 [kg/mm ³]
Damping ratio	8.e-002
Contact conditions	
Stiffness coefficient	20
Damping coefficient	2.e-004
Dynamics friction coefficient	0.9

Fig. 6는 제안된 메커니즘을 다물체 동역학 (Multibody Dynamics) 해석 소프트웨어인 RecurDyn (FunctionBay, Korea) 을 사용하여 모델링하고 분석한 결과를 나타낸다. 내부 기어가 회전함에 따라 카테터 릴의 직경이 확장되고, 핸드피스의 위치가 변경되지 않으면서 늘어난 둘레 길이만큼 카테터가 풀백되어 릴에 수납되는 결과를 확인할 수 있다. 해석에 사용한 물성 값 및 접촉 조건은 Table 1과 같다.

3. 시스템 구성 및 설계

설계 요구사항을 만족하는 카테터 회전 및 풀백 구동 시스템을 구현하기 위해, 카테터의 전후진 구동을 담당하는 풀백 모듈과 카테터 회전 및 에너지 발생을 제어하는 핸드피스로 시스템을 구성하였다. 각 모듈의 기능 구현 가능성을 확인하기 위해 SolidWorks (Dassault Systems SolidWorks Corp., 2022)를 활용하여 설계를 진행하였으며, 이후 설계된 시스템의 실제 기능 검증을 위해 3D 프린터(J35, Stratasys, USA)로 프로토타입을 제작했다. 이 과정을 통해 모듈간의 상호작용 및 동작의 정확성을 평가하고 시스템의 통합적 기능의 가능성을 확인하고자 하였다.

3.1 핸드피스 구성 및 설계

핸드피스는 카테터의 회전, 에너지 발생, 풀백 동작이 안정적이고 정밀하게 제어될 수 있도록 설계되어야 하며, 회전 과정에서 핸드피스 내부 전선의 꼬임이 발생하지 않아야 한다. 이러한 설계 요구사항을 만족하기 위해 개발된 핸드피스 모델의 단면은 Fig. 7에 보여지는 바와 같다. 회전속도를 다양하게 조절할 수 있는 버튼 조작부를 통해, 사용자가 회전 속도와 동작을 직관적으로 조절할 수 있게 하였다. 카테터와 회전 모터는 카테터 회전축 커넥터를 통해 연결되며, 카테터 내부의 전선은 회전에 따른 꼬임 없이 전력을 공급받을 수 있도록 슬립링에 연결되어 있다. 또한 열선부의 길이를 조절할 수 있는 구동부가 설계되어 있으며, 랙기어를 통해 열선부 길이의 조절이 가능하다.

이 설계를 바탕으로, Fig. 8에서 보여지듯이, 3D 프린터를 사용하여 프로토타입을 제작하고 기능을 실제로 확인해 볼 수

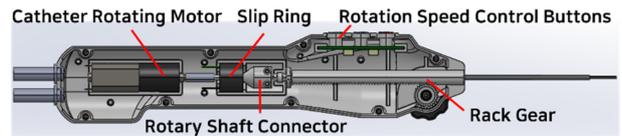


Fig. 7 Cross section of hand piece design

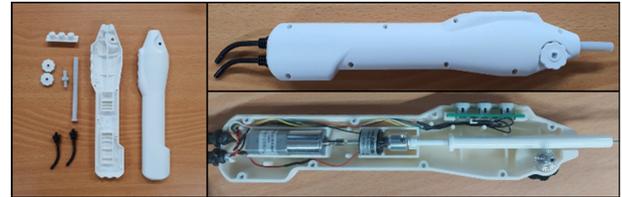


Fig. 8 Hand piece 3D printer output

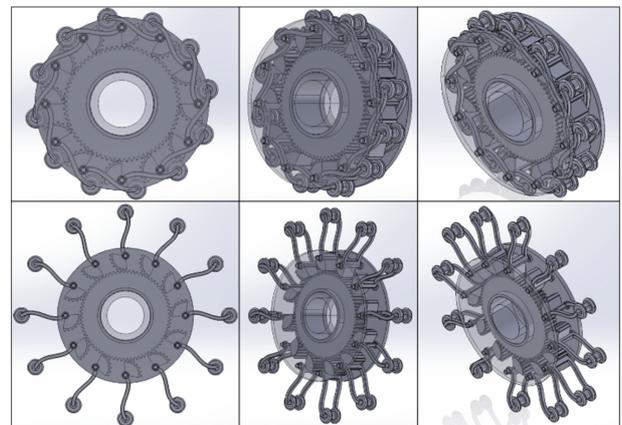


Fig. 9 Design model of catheter reel in diameter expansion

있었다. 적합한 스펙의 모터와 슬립링을 장착하여 시험 구동을 수행했으며, 이를 통해 핸드피스 조작을 통해 카테터의 회전을 다양한 속도로 성공적으로 구현할 수 있음을 확인했다.

3.2 풀백 모듈 구성 및 설계

카테터 릴의 직경 확장 메커니즘의 실제 구현 가능성을 확인하기 위해 설계한 모델은 Fig. 9에서 보이는 바와 같다. 기어 회전을 통해 카테터 릴의 직경이 확장되고, 이에 따라 늘어난 둘레의 길이만큼 카테터가 풀백되어 수납된다. 이 과정에서 카테터 릴 둘레 길이와 설계 파라미터 간의 관계식을 도출했다.

Fig. 10은 내부 기어 회전에 의한 직경 확장 구조에서의 설계 파라미터를 보여준다. 늘어난 카테터 릴의 둘레 길이 L은 식(1)로 정의되며, 내부 기어가 시간에 따라 일정한 각속도로 회전하는

$$L = 2\pi(R_t - R_0) \tag{1}$$

$$R_t = \sqrt{C^2 + l^2 - 2Cl\cos(\epsilon_0 + \omega t)} \tag{2}$$

$$\frac{dR}{dt} = \frac{Cl\omega\sin(\epsilon_0 + \omega t)}{\sqrt{C^2 + l^2 - Cl\cos(\epsilon_0 + \omega t)}} \tag{3}$$

상황에서 카테터 릴 반지름은 식(2)로 표현된다. 수식(3)은

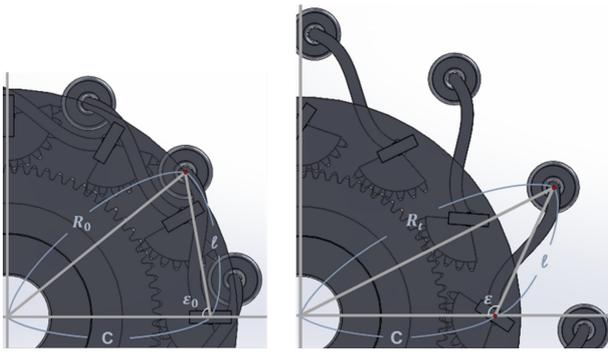


Fig. 10 Catheter reel design parameters in diameter expansion

Table 2 Catheter reel design parameter values

	Internal gear	External gear
P.C.D [mm]	72	24
A.D [mm]	74	26
D.D [mm]	69.5	21.5
Module	1	1
Z	72	24
L [mm]	35.45	

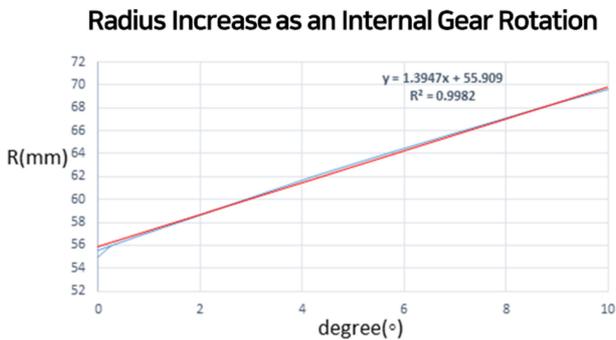


Fig. 11 Graph of radius increase as an internal gear rotation

시간에 따른 카테터 릴의 반지름의 변화를 나타내며, L이 선형적으로 증가하기 위해서 각속도 ω 는 시간 t에 따른 함수의 형태로 제어되어야 한다. Figs. 11은 6의 다물체 동역학 모델의 내부기어 회전에 따른 반지름 변화를 나타내는 그래프이며, 적용된 설계 파라미터 값은 Table 2와 같다. 초기 반지름 55 mm에서 최대 69.67 mm까지 확장 가능하며, 이는 약 26%의 변화율을 보인다. 식(1)에 따라 이 확장을 통해 최대 92.17 mm 풀백된 카테터 수납이 가능하며, 이는 카테터를 릴에 한 번 감았을 때의 수납 가능한 길이이다. 따라서 카테터를 릴에 감는 횟수에 따라 수납 길이를 그 배수로 증가시킬 수 있다 또한 L의 선형성을 위하여 각속도 ω 는 시간 t에 따른 함수의 형태로 제어되어야 하지만 Fig. 11에서 보여지는 바와 같이 비선형성이 허용 가능한 범위 내에 존재할 수 있기에, 일정 범위 내에서 설계 파라미터 값을 조정할 수 있음을 의미한다.

Fig. 12는 풀백 모듈과 핸드피스로 구성된 카테터 회전 및 풀백

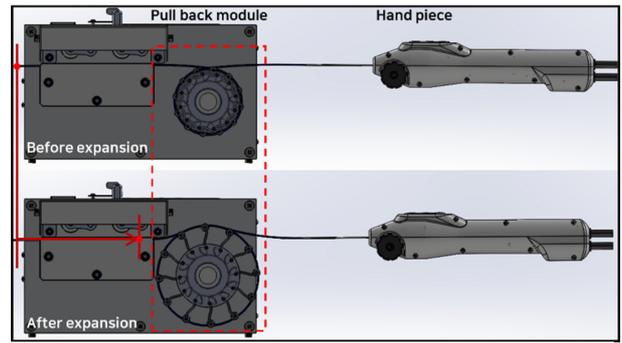


Fig. 12 Pulled back catheters as catheter reel diameter is extended



Fig. 13 Diameter-expanding catheter reel 3D printer output

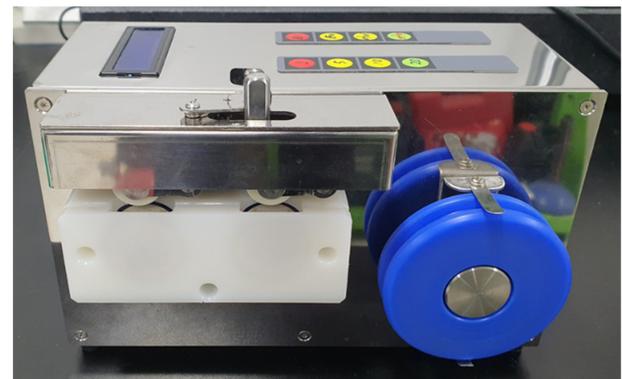


Fig. 14 Control unit of the pull-back module that controls the pull-back operation and speed

구동 시스템의 설계 모델을 나타내며, 핸드피스의 위치 변화 없이 카테터 릴의 직경이 확장되어 풀백된 카테터가 수납되는 모습을 확인할 수 있다. 카테터 릴의 직경 확장 기전 구현 가능성을 확인하기 위하여 설계된 모델을 바탕으로 3D 프린터를 사용하여 프로토타입을 제작하였고, 그 결과는 Fig. 13에서 보이는 바와 같다. Fig. 14는 풀백 동작 및 속도 조절이 가능한 풀백 모듈의 제어부 프로토타입이며, 파란 원통 형상 부위에 카테터 릴 직경 확장 메커니즘을 적용하여 풀백 모듈을 완성시킬 수 있다. 풀백 속도는 5, 10, 15 mm/s 로 조절할 수 있으며 풀백 가능 거리는 최대 1 m이다.

최종적으로, Fig. 15는 제작된 프로토타입, 풀백 모듈과 핸드피스, 그리고 고주파 출력을 조절하는 제너레이터를 포함한 전체 시스템의 모습을 보여준다. 제너레이터는 핸드피스와 연결되어 고주파 출력을 제어할 수 있으며, 핸드피스 상에서는 카테터의 회전 동작 제어가 가능하다. 이를 위한 제어보드가 존재하고, 카테터

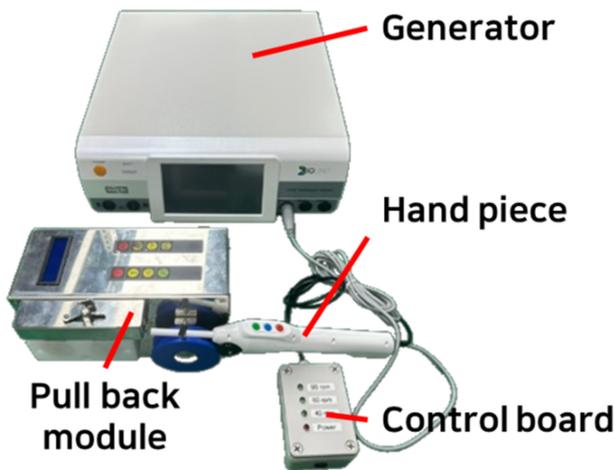


Fig. 15 System configuration including prototype of a pull-back module, the hand piece, and a generator that controls radiofrequency output

회전축 속도는 40, 60, 80 RPM으로 설정할 수 있다. 회전 방식의 카테터는 폴백 모듈의 카테터 릴에 감긴 상태에서 카테터 릴의 직경 확장에 따라 폴백 동작이 정교하게 수행될 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 하지정맥류 치료 시 고주파 열 치료술의 과정에서 존재하는 여러 문제점을 해결할 수 있는 카테터 회전 및 폴백 구동 시스템을 개발하고 제안한다. 기존의 비회전 방식 카테터는 혈관 벽 전체에 열을 균일하게 조사하기 위해 다수의 전극을 포함하고 있으나, 큰 직경으로 인해 구불구불한 정맥을 따라 삽입하는 데 어려움이 있었다. 이에 비해 회전 방식의 카테터는 바이폴라 전극의 수를 줄임으로써 카테터의 직경을 최소화할 수 있어, 삽입 난이도를 현저히 감소시킬 수 있다.

또한 기존의 치료 방식에서 시술자는 수동으로 카테터를 후진시켜야 했으며, 이로 인해 균일한 열 치료술이 시행되기 어렵고, 특히 혈관의 길이가 긴 경우에는 시술 시간이 증가하고 시술자의 피로도가 높아져 시술 정확도가 저하될 수 있는 문제가 있었다. 본 연구에서 제안하는 시스템은 카테터의 후진을 자동화함으로써 열 치료술을 보다 균일하게 시행할 수 있으며, 핸드 피스의 위치 조정 없이도 시술을 진행할 수 있어 시술자의 피로도를 크게 줄일 수 있다.

기존 시술 방식에서 시술 결과가 대체로 임상적 경험에 의존하였던 한계를, 본 연구에서 개발한 새로운 시스템을 통해 극복할 수 있을 것으로 기대된다. 이는 환자에게는 의료 서비스의 질적 향상을 체감할 수 있는 기회를 제공하며, 시술자에게도 시술 부담을 감소시켜 줄 것으로 예상된다. 이러한 카테터 회전 및 폴백 구동 시스템은 하지정맥류 치료에 국한되지 않고 다양한 혈관 시술에 적용될 수 있는 가능성을 지니고 있어, 다양한 혈관 치료 분야에 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 연구는 2022년도 식품의약품안전처 연구개발비(No. 22183MFDS367)로 수행되었으며 이에 감사드립니다. 본 연구는 2021년도 중소벤처기업부의 기술개발사업 지원에 의한 연구임(No. S3173937).

REFERENCES

- Lurie, F., Creton, D., Eklof, B., Kabnick, L. S., Kistner, R. L., Pichot, O., Schuller-Petrovic, S., Sessa, C., (2003), Prospective randomized study of endovenous radiofrequency obliteration (closure procedure) versus ligation and stripping in a selected patient population (EVOLVE Study), *Journal of Vascular Surgery*, 38(2), 207-214.
- Vein Treatment Forum, Procedure spotlight: radiofrequency ablation. <https://www.veintreatmentforum.com/procedure-spotlight-radiofrequency-ablation/>
- San Francisco Vein Center - Melinda L Aquino MD, (2016), radiofrequency ablation - treatment of varicose veins. <https://www.youtube.com/watch?v=vSE9YQLWVDY>
- Raetz, J., Wilson, M., Collins, K., (2019), Varicose veins: diagnosis and treatment, *American family physician*, 99(11), 682-688.
- NECA (2023), Ultrasound-guided foam sclerotherapy (UGFS), NECA-R-22-001-24, https://www.neca.re.kr/lay1/program/S1T11C216/tech_report/view.do?seq=175
- Hingorani, A. P., Ascher, E., Markevich, N., Schutzer, R. W., Kallakuri, S., Hou, A., Nahata, S., Yorkovich, W., Jacob, T., (2004), Deep venous thrombosis after radiofrequency ablation of greater saphenous vein: a word of caution, *Journal of Vascular Surgery*, 40(3), 500-504.
- Gao, R.-D., Qian, S.-Y., Wang, H.-H., Liu, Y.-S., Ren, S.-Y., (2022), Strategies and challenges in treatment of varicose veins and venous insufficiency, *World Journal of Clinical Cases*, 10(18), 5946-5956.
- Nijsten, T., van den Bos, R. R., Goldman, M. P., Kockaert, M. A., Proebstle, T. M., Rabe, E., Sadick, N. S., Weiss, R. A., Neumann, M. H. A., (2009), Minimally invasive techniques in the treatment of saphenous varicose veins, *Journal of the American Academy of Dermatology*, 60(1), 110-119.
- Onida, S, Lane, T. R. A., Davies, A. H., (2013), Varicose veins and their management, *Surgery (Oxford)*, 31(5), 211-217.
- Merchant, R. F., Pichot, O., Group, C. S., (2005), Long-term outcomes of endovenous radiofrequency obliteration of saphenous reflux as a treatment for superficial venous insufficiency, *Journal of Vascular Surgery*, 42(3), 502-510.

11. Zikorus, A. W., Mirizzi, M. S., (2004), Evaluation of setpoint temperature and pullback speed on vein adventitial temperature during endovenous radiofrequency energy delivery in an in-vitro model, *Vascular and Endovascular Surgery*, 38(2), 167-174.
12. Honda, Y., Fitzgerald P. J., Yock, P. G., (2020), Intravascular ultrasound, in: *Textbook of Interventional Cardiology*, 8th Edition, Topol, E. J., Teirtein, Q. S., (Eds.), Elsevier.
13. Yammine, H., Ballast, J. K., Arko, F. R., (2023), Intravascular ultrasound, in: *Rutherford's Vascular Surgery and Endovascular Therapy*, 10th Edition, Sidawy, A. N., Perler, B. A., (Eds.), Elsevier.
14. Katouzian, A., Angelini, E. D., Carlier, S. G., Suri, J. S., Navab, N., Laine, A. F., (2012), A state-of-the-art review on segmentation algorithms in intravascular ultrasound (IVUS) images, *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, 16(5), 823-834.
15. Peng, C., Wu, H., Kim, S., Dai, X., Jiang, X., (2021), Recent advances in transducers for intravascular ultrasound (IVUS) imaging, *Sensors*, 21(10), 3540.



Sung Min Kim

Professor in the Department of Biomedical Engineering, Dongguk University. His research interest is Medical Device Development and Medical Device Regulatory Science.
E-mail: smkim@dongguk.edu



Hong Seok Lim

Research Professor in Research Institute for Commercialization of Biomedical Convergence Technology, Dongguk University. His research interest is Development of Surgical Instruments and Surgical Robots.
E-mail: limit75@dongguk.edu



Jaeho Sul

M.S. candidate in the Department of Regulatory Science for Medical Device, Graduate School, Dongguk University. His research interest is Computer Modeling and Simulation.
E-mail: tjfwogh990715@gmail.com



Myoung Jae Seo

M.S. candidate in the Department of Regulatory Science for Medical Device, Graduate School, Dongguk University. His research interest is Computer Modeling and Simulation.
E-mail: tjaudwo45@naver.com



Jong Hyeok Jeon

Senior Researcher in the Biounit Co., Ltd. Ph.D. candidate in the Department of Regulatory Science for Medical Device, Graduate School, Dongguk University. His research interest is Medical Device.
E-mail: jhjeon3459@biounit.co.kr

오일젯 윤활 조건에서의 고속 각접촉 볼베어링의 열탄성 모델링 및 해석에 관한 연구

Study on Thermo-mechanical Modeling and Analysis of High-speed Angular Contact Ball Bearings Under Oil-jet Lubrication

리베라 길버트¹, 박신향², 강찬식³, 김동주², 홍성욱^{4,#}
Gilbert Rivera¹, Shinyang Park², Chan-sik Kang³, Dongjoo Kim², and Seong-Wook Hong^{4,#}

¹ 금오공과대학교 생산기술연구소 (Institute of Production Engineering, Kumoh National Institute of Technology)
² 금오공과대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology)
³ 브이앤씨테크 연구소장 (Director of Research Center, VNC Technologies)
⁴ 금오공과대학교 기계시스템공학부 (School of Mechanical System Engineering, Kumoh National Institute of Technology)
Corresponding Author / E-mail: swhong@kumoh.ac.kr, TEL: +82-54-478-7344
ORCID: 0000-0003-4948-292X

KEYWORDS: Angular contact ball bearings (각접촉 볼베어링), Quasi-static model (준정적모델), Internal diametral clearance (내부직경틈새), Thermal network model (열네트워크 모델), Oil-jet lubrication (오일젯 윤활)

This paper presents an integrated thermo-mechanical model for analyzing angular contact ball bearings (ACBBs) operating under oil-jet lubrication. The proposed approach enables a comprehensive analysis of both the mechanical and thermal behavior of the ACBB system. The proposed formulation employs a quasi-static approach to accurately calculate contact loads and heat generation, taking into careful consideration variations in internal clearance resulting from factors such as surface pressure, centrifugal forces, and thermal expansion. For the thermal analysis, a refined thermal network model is utilized. The proposed thermal model incorporates a newly derived correlation for the drag coefficient under oil-jet lubrication, which is obtained through high-fidelity computational fluid dynamics simulations. The validity of the proposed model is confirmed through comparison with experimental data. Furthermore, extensive simulations are conducted to investigate the impact of bearing fit-up and thermal variations on the performance of ACBBs.

Manuscript received: April 9, 2024 / Revised: May 3, 2024 / Accepted: May 17, 2024

NOMENCLATURE

d = Bearing Bore Diameter, mm
 d_m = Bearing Pitch Diameter, mm
 D = Bearing Outer Diameter, mm
 D_a = Ball Diameter, mm
 F = External/Equivalent Force, N
 F_c = Centrifugal Force, N
 $\{F\}$ = External Load Vector, N, Nmm
 M = External/Equivalent Moment, Nmm
 M_g = Gyroscopic Moment, Nmm

M_{rr} = Rolling Friction Torque, Nmm
 M_{sl} = Sliding Friction Torque, Nmm
 M_v = Viscous Drag Friction Torque, Nmm
 n = Shaft/Inner Ring Rotational Speed, RPM
 P_d = Internal Diametral Clearance, mm
 Q = Ball Contact Load, N
 \dot{Q} = Heat Generation, W
 $\{Q_i\}$ = Inner Ring Contact Load Vector, N, Nmm
 R = Thermal Resistance
 $[R\phi]$ = Transformation Matrix

T	=	Temperature, °C
Z	=	Number of Balls
α_0	=	Nominal Contact Angle, rad
α	=	Operating Contact Angle, rad
γ	=	Misalignment Angle, rad
δ	=	Bearing Displacement, mm
$\{\delta\}$	=	Displacement Vector, mm, rad
λ	=	Traction Coefficient for Gyroscopic Moment, mm
u_{SP}	=	Total Displacement due to Surface Pressure, mm
u_{TC}	=	Total Displacement due to Temperature Change, mm
u_{TOT}	=	Total Displacement of a Bearing Component, mm
u_{CE}	=	Total Displacement due to Centrifugal Expansion, mm
$\{u\}$	=	Inner Ring Displacement Vector, mm, rad
$\{v\}$	=	Ball Displacement Vector, mm, rad

SUBSCRIPTS FOR ACBB QUASI-STATIC MODEL

e	=	Outer Race
i	=	Inner Race
j	=	Rolling Element Index

SUBSCRIPTS FOR THERMAL NETWORK MODEL

i, j	=	Node Location
j	=	Node Location Adjacent to Node i
air	=	Node Location for Air
oil	=	Node Location for Lubricant

1. Introduction

High-speed rotating machines are versatile components in numerous critical industries, spanning power generation and oil and gas to process plants and aviation [1-3]. Angular contact ball bearings (ACBBs) are found in diverse high-speed rotating machines. In gas turbine engines, high-speed ACBBs and roller bearings are prevalent in the shaft and gearbox pinion shafts. Notably, the axial load-carrying ball bearing plays a critical role within an aircraft gas turbine [4-6]. Due to the combined loadings, each ball in ACBBs has a unique loading and speed. Moreover, it is common for the shaft to rotate at a very high speed where the centrifugal forces and gyroscopic moments are significantly large relative to the loads applied to the balls. The dynamic characteristics of the high-speed machines can also be affected by several important factors, including the fitting between the shaft and inner ring, the fitting between the housing and outer ring, and changes in temperature caused by the heat generated in an ACBB.

Numerous researchers have focused their efforts on shaft-

bearing systems, with particular emphasis on the performance of rolling-element bearings [7-10]. Zaretsky [7] investigated the feasibility of ceramic bearings in gas turbines, while Glockner et al. [8] conducted experimental research on hybrid ceramic and actively cooled ball bearings in the same context. Despite the abundance of studies on shaft-bearing systems, the thermo-mechanical performance of ACBBs under oil-jet lubrication remains largely unexplored. Given that ACBBs operating under oil-jet lubrication typically run at high speeds, significant heat generation and elevated temperatures within the system are expected. Consequently, thermal effects emerge as crucial factors influencing bearing characteristics, as temperature fluctuations alter the interaction between balls and races, as well as their material and fluid properties. Thus, operating temperature plays a pivotal role in the overall performance of the entire spindle-bearing system [11-13].

Besides the excessive heat generated in the high-speed region, the adjustment of internal clearance in ACBBs significantly influences the system's performance. When installing bearings, an appropriate level of interference fit should be applied to prevent any relative motion between the inner ring and the shaft, as well as between the outer ring and the housing. However, excessive interference during installation can lead to detrimental side effects. To accurately assess the change in internal clearance in ACBBs, it is essential to analyze the operational fits between the shaft and housing, the effects of temperature changes, the radial expansion induced by ring rotation, and the radial components of the contact loads between the balls and the races [14-19].

This study aims to develop an integrated thermo-mechanical model for predicting the characteristics of ACBBs operating under oil-jet lubrication. A numerical model is introduced to analyze both the mechanical and thermal characteristics inherent in the system. A quasi-static methodology [20,21] computes the contact loads and heat generation. Additionally, a fit-up model improved from the existing models [14-17] is proposed to consider the impact of inner ring to shaft, and outer ring to housing fittings, contact loads, surface pressures of rings, centrifugal expansion of rings, and temperature gradients, thereby calculating changes in diametral clearance of ACBB. The thermal behavior within the system is accurately captured using an advanced thermal network model (TNM) [22].

The proposed model is enhanced by a newly formulated correlation for the drag coefficient, derived from computational fluid dynamics (CFD) simulations. Heat generation is computed using a running torque-based model [21,23-29], which incorporates friction sources from sliding, rolling, and viscous drag. Moreover, one of the essential parameters for thermal

analysis, the actual flow rate of the oil injected into the bearing cavity [22,30-32], is also included. Validation of the thermo-mechanical model is achieved by comparing the simulated temperature results with experimental data. In addition, rigorous simulations are conducted to investigate expansions of the bearing components, contact loads, stiffness, and heat generation.

2. Thermo-mechanical Model for ACBB

2.1 The Quasi-static Model of Bearing

The ACBB model used in this study is based on the quasi-static model of ball bearings [20,21]. The effects of centrifugal forces and gyroscopic moments are included. Fig. 1(a) shows the five-degrees-of-freedom (DOF) model of an ACBB with external loads and corresponding inner ring displacement, respectively.

$$\{F\} = \{F_x, F_y, F_z, M_x, M_y\}^T \quad (1)$$

$$\{\delta\} = \{\delta_x, \delta_y, \delta_z, \gamma_x, \gamma_y\}^T \quad (2)$$

In the figure, α_0 denotes to the nominal contact angle of the ACBB.

Fig. 1(b) shows the cross-section of ACBB with local coordinates. Here, the inner ring and ball displacements are indicated, respectively, by

$$\{u\} = \{u_r, u_z, \theta\}^T \quad (3)$$

$$\{v\} = \{v_r, v_z, \psi\}^T \quad (4)$$

Fig. 2 shows the free-body diagram of a ball where the ball equilibrium equations can be established [20]. α_i, α_e represent the operating inner and outer contact angles. D_a is the ball diameter. λ_i, λ_e indicate the traction coefficients for the gyroscopic moment which are set to $\lambda_i = 0$, and $\lambda_e = 2$ for outer raceway control [11]. F_c, M_g are the centrifugal force and gyroscopic moment. $\omega_m, \omega_R, \beta$ denote the ball orbital speed, and ball rotational speed in rad/s, and the pitch angle of the ball [21]. By solving the ball equilibrium equations, the ball displacement vector in Eq. (4) can be estimated. The inner ring force equilibrium can be written as

$$\{F\} + \sum_{j=1}^Z [R\phi]^T \{Q_j\} = 0 \quad (5)$$

where the inner ring contact load at the i -th ball is defined as

$$\{Q_i\} = \begin{Bmatrix} -Q_i \cos \alpha_i \\ -Q_i \sin \alpha_i \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (6)$$

and $[R\phi]$ is the transformation matrix from local frame to global frame [15]. The contact loads between the ball and races can be

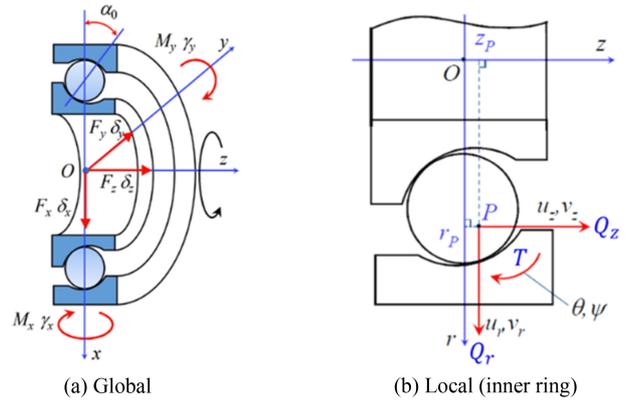


Fig. 1 Global and local loading and displacements

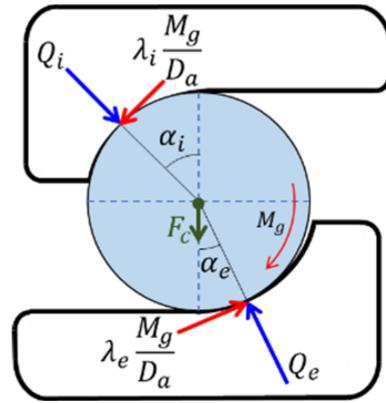


Fig. 2 Contact load, centrifugal force, and gyroscopic moments

calculated using Herzian contact theory as

$$Q = K_i \delta_i^{3/2} \quad (7)$$

$$Q_e = K_e \delta_e^{3/2} \quad (8)$$

where K_i, K_e denote the contact stiffness constants between the ball and inner race, and the ball and outer race, respectively. δ_i, δ_e represent the contact compression between the ball and races. If any one of these compressions becomes negative, the contact compression is assumed to be zero.

This study implements a constant force preloading condition, which treats the external loads as inputs, while the displacement vector of the inner ring is the unknown variable to be determined. To calculate the displacement vector for an ACBB, it is imperative to consider the force equilibrium between the balls and the inner ring. Due to nonlinearity of these equations, an iterative approach is necessary to solve the equilibrium equations. The calculation methodology for the entire model is depicted in Fig. 3, which relies on the iterative Newton-Raphson method. The calculation procedure encompasses iterative loops for the global equilibrium equations of the inner ring and for the equilibrium equations of

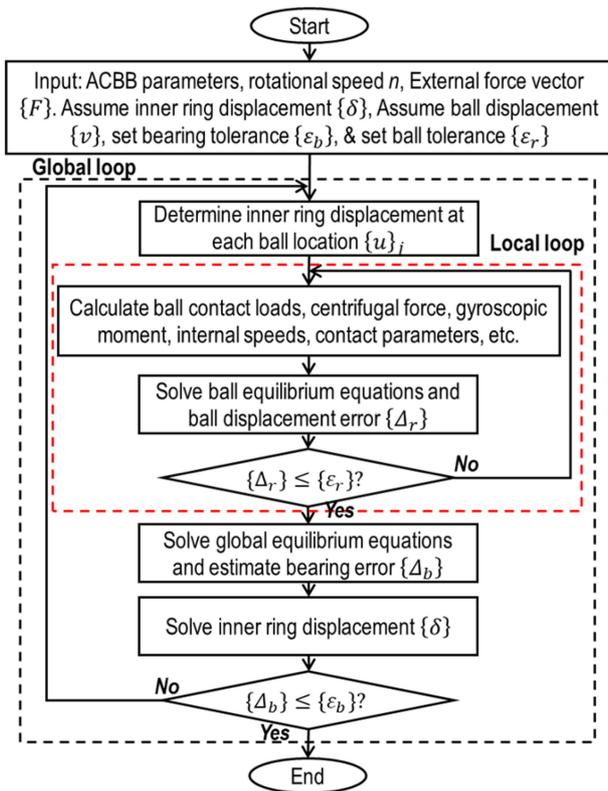


Fig. 3 Calculation procedure for the quasi-static model of ACBB

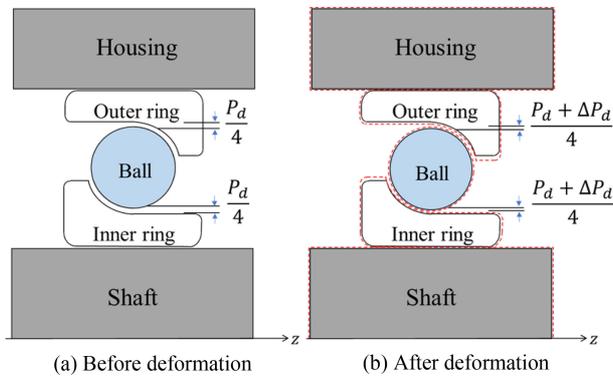


Fig. 4 Definition of diametral clearance change in CRBs

each ball. Upon achieving global equilibrium solution, the contact forces and angles between the balls and races are estimated for subsequent calculations of running torque and heat generation.

2.2 The Fit-up Model

When an ACBB is mounted to a shaft, the internal diametral clearance (P_d) may change due to ball-race contact loads, fit-up condition between the shaft and inner ring and housing and outer ring, centrifugal expansions of rotating rings, and temperature

changes [14-17] as shown conceptually in Fig. 4. The estimation of the change of diametral clearance of an ACBB is performed based on the thick-ring theory [16,19].

The estimation of diametral clearance change comes with estimating the total deformation of the bearing inner ring, outer ring, and the balls. The changes in bearing geometry are calculated by combining the diametral displacements from each race and the change of diametral displacement from the ball. The total diametral deformation (u_{TOT}) is the combination of the deformation due to surface pressures (u_{SP}), centrifugal expansions of rotating rings (u_{CE}), and temperature change (u_{TC}) as outlined in Eq. (9):

$$u_{TOT} = u_{SP} + u_{CE} + u_{TC} \quad (9)$$

Therefore, the change in diametral clearance is given by

$$\Delta P_d = u_{TOT,OR} - u_{TOT,IR} - 2u_{TOT,roller} \quad (10)$$

Here IR , OR denote as the inner ring and outer ring, respectively. With a new diametral clearance, the internal geometry of ACBB will change and causes changes in contact loads and heat generation.

The deformation due to surface pressures (u_{SP}) is observed in cold to hot mounted fittings and from the ball-race contact loads. In a thick-walled cylinder scenario, this deformation manifests when the cylinder with uniform wall thickness is exposed to evenly distributed internal and external pressures. Such deformation is symmetrical along the axis of the cylinder and is presumed not to impact its length [14]. Importantly, this deformation sums up the effect of pressures stemming from ball-race contact loads and the fittings of bearings to shafts and housings.

The deformation due to centrifugal expansion (u_{CE}) is associated with rotating rings originates from the centrifugal expansion effect observed in rotating shaft and ACBB inner ring. This phenomenon is primarily due to the centrifugal force generated as the inner ring and shaft operate at high velocities, which softens some of the compressive stress induced by interference fits. Thus, this reduction in compressive stress leads to a decrease in the inner ring-to-shaft contact stress, with the rate of reduction accelerating as the rotational speed increases [17]. Such a dynamic property can cause the inner ring-to-shaft operating fit to transit from a tight to a loose state, potentially resulting in fretting wear, increased shaft vibration, and rotor eccentricity [15].

The deformation due to temperature variations (u_{TC}) is a result of changes from ambient to operating temperatures within the inner ring, outer ring, and balls. This temperature change induces linear expansion, altering the components' diameter and affecting the diametral clearance of the ACBB. To accurately predict the operating temperatures within ACBBs, a TNM is utilized, as

elaborated in section 2.4. This methodology enables precise estimations of temperature-induced dimensional alterations, critical for evaluating their influence on ACBB performance.

2.3 Heat Generation Model

The heat generation in ACBB is obtained from the ACBBs' running torque-based model on the friction sources presented by SKF [23], in which the friction torque of ACBB with respect to bearing axis comprises three components: sliding friction torque (M_{sl}), rolling friction torque (M_{rr}), and viscous drag friction torque (M_v). In this study, the friction coming from any interactions in cage and seal is not considered.

The distribution of heat generation on the inner race and outer race can be calculated as

$$\dot{Q}_i = (M_{sl,i} + M_{rr,i} + M_{v,i})n \times \frac{\pi}{30} \quad (11)$$

$$\dot{Q}_e = (M_{sl,e} + M_{rr,e} + M_{v,e})n \times \frac{\pi}{30} \quad (12)$$

After calculating the rates of heat due to friction torque, it is possible to determine the bearing temperatures using a TNM. In this analysis, the contact parameters of the most heavily loaded ball are considered, and the heat generations for each race represent the average heat generation of that specific race.

Sliding friction torque (M_{sl}) is characterized by two primary sources: macro sliding and micro-sliding. Macro sliding stems from the conformity of contact influenced by the macro-geometrical features of the components and spinning motion inherent in their operation. Micro-sliding, on the other hand, results from the geometrical distortions that occur due to elastic deformation between the ball and races [23]. The sliding friction torque is defined as the combination of torque from spinning friction [21,25-29] and the differential sliding frictions [25,28,29] that occur within the ball-race contacts of ACBBs. It is noted that under high-speed operational conditions, the sliding friction is prone to increase.

Rolling friction losses are a constant factor in rolling contacts, regardless of whether they are dry or lubricated [23]. The origins of rolling friction torque (M_{rr}) can be traced back to two main factors: the effects of elastohydrodynamic lubrication (EHL) between the balls and races [21,23,25], and elastic hysteresis losses within the materials [23,29]. These factors contribute to the creation of rolling resistance that acts to resist motion between the balls and races. Rolling friction torque has the unique characteristic of potentially decreasing at higher speeds. This decrease is particularly noticeable at very high rotational speeds, where increased temperatures can alter the behavior of the lubricant

within the bearing. These changes may lead to phenomena such as inlet shearing, caused by oil reverse flow, and lubrication starvation [23]. Both conditions can significantly reduce the rolling resistance in ball-race contacts.

This study develops a viscous drag friction torque (M_v) model designed for ACBB under oil-jet lubrication conditions. In such a bearing system, lubricated with a mixture of lubricant and air, balls travel in an orbital path around the bearing's axis, navigating through the lubricant-filled space. This motion necessitates overcoming the viscous drag force (F_v) generated by the lubricant, which becomes significant at very high speeds [25,31]. However, estimating viscous friction for ACBBs under oil-jet lubrication presents analytical challenges, primarily due to the difficulty in precisely determining the lubricant volume within the bearing cavity. Crucial factors such as the oil density and viscous drag coefficient are highly sensitive to variations in this volume. In this study, the effective density of the lubricant is deduced by calculating the lubricant cavity ratio [32], and the viscous drag friction coefficient is derived from a sequence of CFD simulations.

2.4 Thermal Network Model (TNM)

The TNM is a representative method used to analyze the temperature distribution of thermal systems, consisting of a series of nodes and resistances, similar to an electrical circuit network.

Each node represents a specific component of the system, and a node's temperature represents the temperature associated with its component. Nodes are connected to their neighboring nodes through thermal resistances, and heat transfer occurs in proportion to the temperature difference between two adjacent nodes and in inverse proportion to their thermal resistance ($\dot{Q} = \Delta T/R$). In this study, the nodes on the surface as well as the center of system components were defined. Fig. 5 and Table 1 show the locations and the detailed information of the nodes, respectively.

Governing equations need to be established to predict the temperature at each node. This study focuses on the steady-state bearing temperature during normal operation. The governing equation for each node can be determined from the energy balance, as shown in Fig. 6. The following is the energy equation for node i :

$$\sum_{j \neq i}^{N_b} \frac{T_j - T_i}{R_{ij}} + \frac{T_{air} - T_i}{R_{i-air}} + \frac{T_{oil} - T_i}{R_{i-oil}} + \dot{Q}_i = 0 \quad (13)$$

$$\left(\sum_{j \neq i}^{N_b} \frac{1}{R_{ij}} + \frac{1}{R_{i-air}} + \frac{1}{R_{i-oil}} \right) T_i + \sum_{j \neq i}^{N_b} \frac{-T_j}{R_{ij}} = \frac{T_{air}}{R_{i-air}} + \frac{T_{oil}}{R_{i-air}} + \dot{Q}_i \quad (14)$$

Here, the subscripts i and j are node indices, and the subscripts air and oil denote ambient air and lubricant oil, respectively. N_b is the number of neighboring nodes of node i .

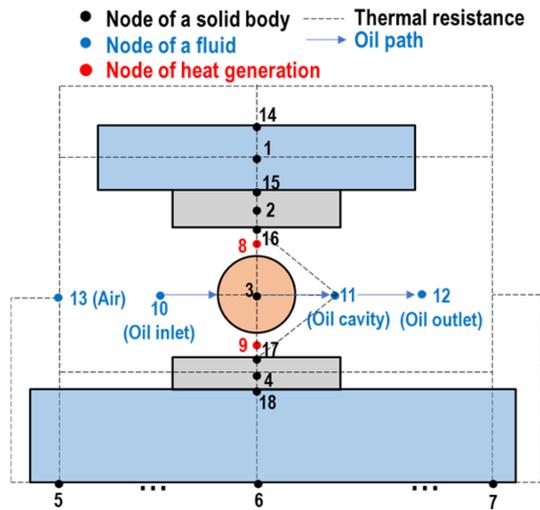


Fig. 5 Node arrangement in TNM

Table 1 Node numbers and locations in TNM

Node no.	Description
1	Central diametral position of housing
2,4	Central diametral position of inner and outer rings
3	Ball center
5,6,7	Center of shaft segments
8	Contact area between ball and outer ring (OR)
9	Contact area between ball and inner ring (IR)
10,12	Oil inlet and oil outlet
11	Oil in cavity
13	Ambient air
14,18	OR-housing and IR-shaft contact surfaces
15	Outer surface of housing
16,17	Outer race and inner race

R_{ij} , R_{i-air} , and R_{i-oil} represent the thermal resistances between node i and node j , between node i and air, and between node i and oil, respectively.

Eq. (13) indicates that the sum of all heat transferred to node i and the heat generated at node i becomes zero when steady state is achieved. Each term represents, in order, heat transfer from node j , heat transfer from air, and heat transfer from oil. Eq. (13) can be rewritten as Eq. (14), where the temperatures T_i and T_j are placed on the left-hand side, and the remaining terms corresponding to source terms are on the right-hand side. By solving these equations, the temperatures of the bearing components can be obtained.

The heat generated in a bearing is transferred to the bearing parts such as ball, inner ring, outer ring, shaft, and housing, and eventually transferred to surrounding air and lubricant oil.

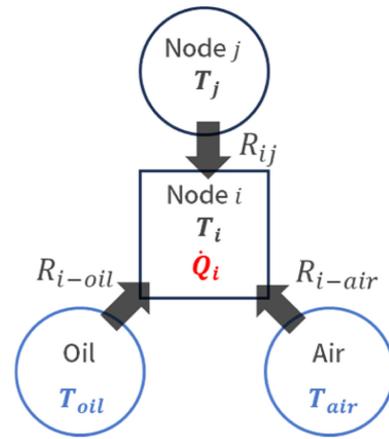


Fig. 6 Energy balance for node i

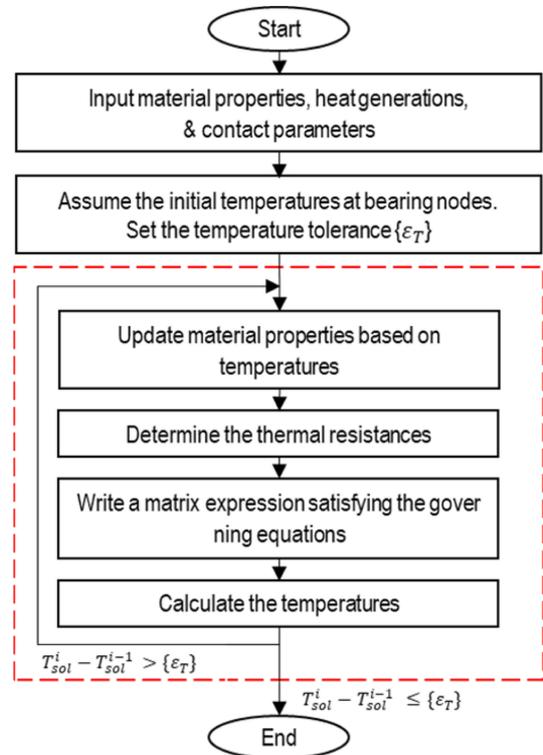


Fig. 7 Calculation procedure of thermal network model

During this process, conductive and convective heat transfer occurs, in the solid structure and at fluid-solid interfaces, respectively. The conductive heat transfer rate is affected by contact conditions. Therefore, thermal resistances can be classified into conductive resistance, convective resistance, and contact resistance, based on the heat transfer mechanism. The formulas for calculating thermal resistances can be found in the literature on thermal network [30,32]. The process of predicting the temperature of a bearing system using a TNM is shown in Fig. 7.

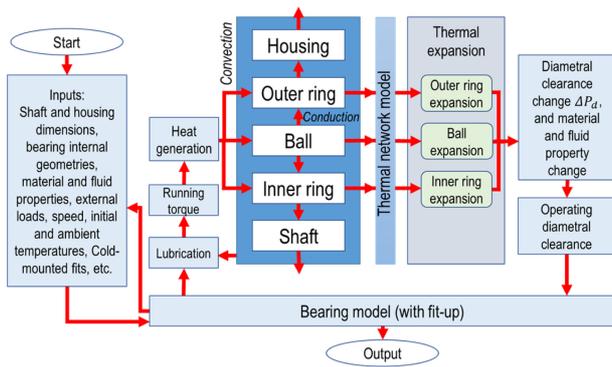


Fig. 8 Block diagram for thermo-mechanical model

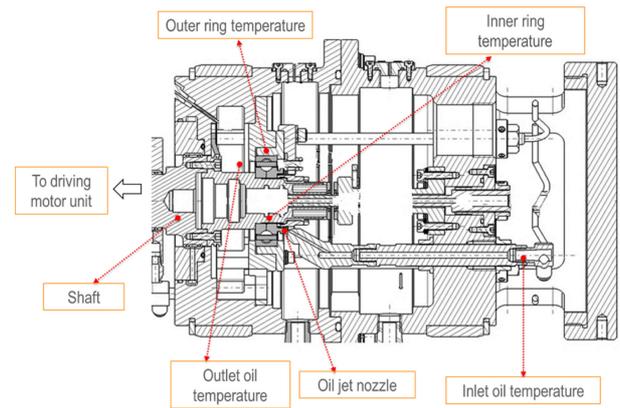


Fig. 9 Schematic drawing of bearing test rig

2.5 Calculation Procedure for Integrated Model

The procedure for integrating the quasi-static model with the TNM is delineated in Fig. 8. It commences with gathering requisite inputs, encompassing dimensions of the bearing, shaft, and housing, external loads, rotational speed, oil properties, oil flow rate for oil jet lubrication, initial temperatures of the bearing and oil, and fit conditions between the shaft-inner ring and housing-outer ring. Subsequently, the bearing model, incorporating fit-up conditions, computes the heat generated by the inner and outer races. Following this, the TNM computes the temperature of system components. As bearings expand, alterations in ACBB clearance, material properties, and fluid properties occur, modifying the ACBB’s characteristics. These modifications are then fed-back into the ACBB model and the TNM for subsequent iterations of results. The process iterates until achieving the desired accuracy in calculations.

3. Experiments and Model Validation

This study considers a rotor-ACBB assembly, comprising a 40-mm bore ACBB with ceramic balls, affixed to a shaft with an outer diameter of 40 mm. The assembly is encased within a housing with an 80-mm inner diameter and a 250-mm outer diameter. The housing, shaft, and bearing ring materials have identical material properties. Lubrication for the ACBB is facilitated through an oil-jet system employing MIL-L-23669 lubricant. The ambient temperature is set at $T_{amb} = 25^{\circ}\text{C}$. A diametral interference fit of 0.02 mm is applied between the shaft and ACBB inner ring, while the fit between the housing and ACBB outer ring is set to 0 mm. Fig. 9 shows the schematic drawing of the bearing test rig, in which the sensor locations are also indicated. Fig. 10 depicts the experimental setup along with its peripherals. The outcomes from simulations are compared with experimental results, under the operating conditions as detailed in Table 2.

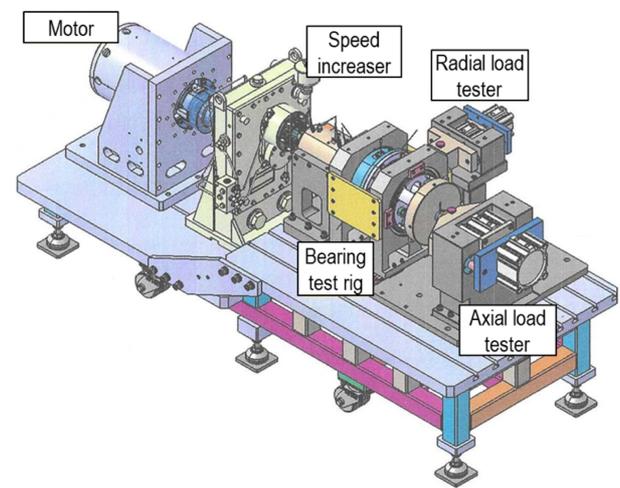


Fig. 10 Experimental system for bearing test

Table 2 Experimental conditions

Condition no.	1	2	3	4
Speed [RPM]	10,084	20,202	30,303	40,000
Axial load [N]	4,441	4,406	4,400	4,411
Radial load [N]	247	250	245	246
Oil temp. [°C]	92.1	91.3	92.2	93.4
Oil flow rate [lpm]	2.5	2.4	2.5	2.4

The drag coefficients for the ACBB were determined through CFD simulation. Fig. 11 illustrates the simulated drag coefficient plotted against Reynolds numbers, exhibiting an asymptotic approach to 0.108 at high Reynolds numbers. Notably, this drag coefficient is small compared to the typical value of approximately 0.45 for an isolated sphere [30]. However, it closely aligns with the value of 0.09 proposed by Pouly et al. [32], derived from measurements of drag on in-line multiple spheres. The reduced drag coefficient can be attributed to the periodic arrangement of

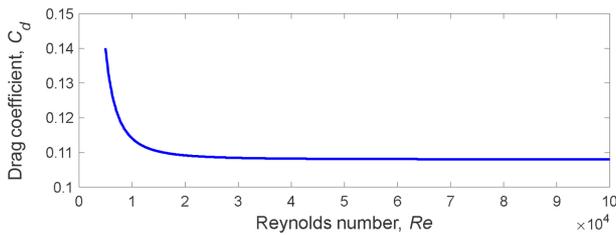


Fig. 11 Drag coefficient as a function of Reynolds number

Table 3 Heat generation results under experimental conditions

Heat generation		Condition no.			
		1	2	3	4
\dot{Q}_{total} [W]		331.1	900.1	1,591.5	3,063.8
$\dot{Q}_{j,max}$ [W]	IR	9.03	25.27	44.92	86.72
	OR	15.02	39.29	68.09	127.28

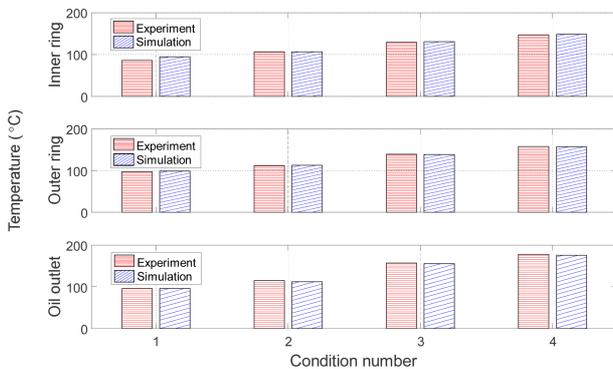


Fig. 12 Comparison of simulated and experimental temperatures

multiple balls in close proximity. This established drag coefficient was then employed in the heat generation analysis within the ACBB, a critical factor for predicting bearing temperature using the TNM. The findings from the heat generation analysis under the specified experimental conditions are succinctly presented in Table 3.

Fig. 12 presents a comparison between bearing temperatures obtained from simulation and experimentation. Notably, the temperatures of the inner ring, outer ring, and outlet oil were specifically chosen for simulation to correspond with the experimental configuration, which employs thermocouples for temperature measurements at the designated locations. Each graph illustrates a temperature increase corresponding to escalating speeds. The simulation data is depicted by blue bars, while the experimental data is represented by red bars. The close agreement between the simulated and experimental data confirms the model's accuracy in predicting behavior at varying speeds. The maximum discrepancy of $|\Delta T| = 8.72^\circ\text{C}$ is observed in the inner ring temperature at 10,084 RPM in Fig. 11. This discrepancy may be

Table 4 Deformations on ACBB components

Component [μm]	a) w/o fit-up, w/o TNM	b) with fit-up, w/o TNM	c) with fit-up, with TNM
IR	0	19.46	79.29
OR	0	2.17	105.86
Ball	0	0	1.90

attributed to factors such as the limited accuracy of thermal resistance models and the limitations of obtaining precise measurements at the designated locations.

4. Simulation and Discussion

This section presents simulation results with experimental condition 4 specified in Table 4. The effect of diametral clearance on contact loads, stiffnesses, and heat generation are rigorously discussed below.

4.1 Change of Diametral Clearance in ACBB

Table 4 displays tabulated results on the changes in the components of the investigated ACBB. Three scenarios are examined: a) without fit-up and TNM, focusing solely on a basic ACBB model that ignores all fit-up conditions and temperature changes. b) with fit-up but without TNM, adding the effects of tightly fitting parts together but keeping temperatures of the bearing parts at ambient level, and oil at given conditions. c) with both fit-up and TNM, integrating all models.

The comparison across these scenarios shows significant variations in diametral clearance of ACBB. Without any fit-up or TNM, the clearance remains unchanged. When fit-up is applied, the clearance tends to decrease because the inner ring is more affected by the combined effects of deformation from surface pressures and centrifugal expansion than the outer ring, which is mainly altered by surface pressure alone. The final scenario, which combines fit-up and TNM, results in greater expansion of all bearing components due to heating. This outcome is believed to reflect real-world behavior more precisely, underscoring the importance of accounting for both fit-up adjustments and operating temperature considerations to estimate ACBB characteristics.

4.2 Change of Contact Loads

Fig. 13 depicts the contact loads on both races of the most heavily loaded ball across various rotational speeds. These contact loads increase as the operating diametral clearance of the ACBB nears a negative value, indicating an interference fit between the

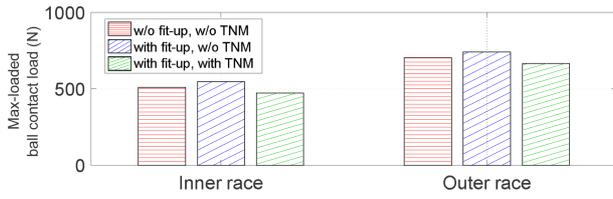


Fig. 13 Max contact loads variation with fit-up and thermal effects

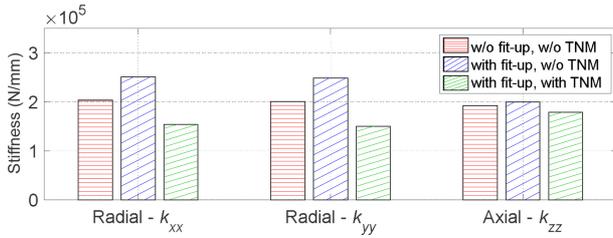


Fig. 14 Stiffness change with fit-up and thermal effects

balls and races. This indicates that without incorporating fit-up and TNM, the contact load outcomes (Q_i : 510.63 N, Q_e : 703.61 N) (red) differ significantly from the scenario where both are applied (Q_i : 472.23 N, Q_e : 665.14 N) (green), highlighting their critical importance for realistic applications.

4.3 Change of Bearing Stiffness

Fig. 14 illustrates how fit-up and thermal changes influence the stiffness of ACBB. When neither fit-up adjustments nor thermal changes from TNM are considered, the results are derived solely from the quasi-static model of ACBB. However, introducing only the fit-up model under cold-mounted conditions leads to a gradual increase in stiffness. This is attributed to the operating clearance of ACBB becoming negative, as discussed in section 4.1, thereby creating higher contact loads. When both fit-up and thermal changes from TNM are considered, an additional notable effect is observed. In this scenario, all factors that deform the ring are considered, resulting in lower stiffness than others.

4.4 Change of Heat Generation

Fig. 15 presents the findings on heat generation at the position of the most heavily loaded ball, showing a pattern different from the discussions in sections 4.2 and 4.3. Upon reviewing the overall results for either the total or the max-loaded ball's heat generation, it becomes apparent that the outcomes do not vary as substantially as the contact loads and stiffness. Contrary to the behaviors observed in contact loads and stiffness, the findings related to the heat generation of ACBB are completely opposite. When the internal clearance turns negative, its orbital speed drops, leading to a decrease in drag friction. This observation highlights the complex

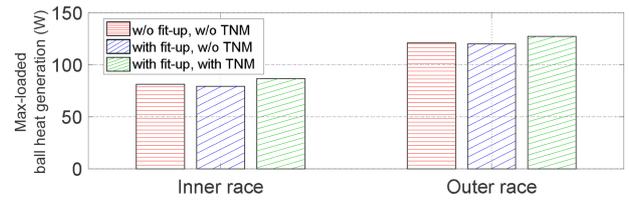


Fig. 15 Effect of fit-up and thermal changes on heat generation

Table 5 Heat generation with different conditions

Heat generation	w/o fit-up, w/o TNM	with fit-up, w/o TNM	with fit-up, with TNM
\dot{Q}_{total} [W]	3,514.2	3,476.8	3,532.6
$\dot{Q}_{j,max}$ [W]	IR	99.33	97.76
	OR	149.71	149.65

interplay between fit-up adjustments, thermal effects, and rotational speed in influencing ACBB's heat generation. Detailed results of the total heat generation and the distribution of heat generation across both races are provided in Table 5.

5. Conclusions

This paper introduced an advanced numerical model developed for the thermo-mechanical analysis of high-speed ACBBs under oil-jet lubrication. The proposed model, comprising a quasi-static model, a fit-up model, and a thermal network model, demonstrates a strong correlation with experimental data, accurately representing temperature variations across different rotational speeds. A simulation result is provided to illustrate the thermo-mechanical behavior of ACBBs. Through simulation and analysis, the following conclusions were drawn:

- 1) The proposed model consistently estimates bearing temperature with a demonstrated error margin maintained within 10%.
- 2) Incorporating both fit-up adjustments and TNM into the modeling of ACBBs leads to increased expansion and reduction of diametral clearance, offering a more precise depiction of real-world operational behaviors.
- 3) The influence of fit-up adjustments and TNM significantly impacts contact loads. Their combined consideration results in reduced internal contact loads compared to scenarios where these factors are omitted.
- 4) The initial introduction of fit-up under cold-mounted conditions increases stiffness in ACBBs, primarily due to the elevation of contact loads from negative operating clearance. However, integrating fit-up with TNM subsequently results in a reduction of stiffness.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by Korea Research Institute for Defense Technology Planning and Advancement (KRIT) - Grant funded by Defense Acquisition Program Administration (DAPA) (No. KRIT-CT-21-006).

REFERENCES

- Schobeiri, M. T., (2019), Gas turbine design, components and system design integration, Springer.
- Soares, C., (2014), Gas turbines: a handbook of air, land, and sea applications, 2nd Edition, Elsevier-Health Sciences Division.
- Boyce, M., (2011), Gas turbine engineering handbook, 4th Edition, Elsevier.
- Hong, S.-W., Tong, V.-C., (2016), Rolling-element bearing modeling: a review, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 17(12), 1729-1749.
- Liu, J. Y., (1971), The effect of misalignment on the life of high-speed cylindrical roller bearings, Journal of Lubrication Technology, 93(1), 60-68.
- Ioannides, E., Harris, T. A., Ragen, M., (1990), Endurance of aircraft gas turbine mainshaft ball bearings-analysis using improved fatigue life theory: part 1 – application to a long-life bearing, Journal of Tribology, 112(2), 304-308.
- Zaretsky, E. V., Chiu, Y., Tallian, T., (1989), Ceramic bearings for use in gas turbine engines, Journal of Materials Engineering, 11(3), 237-253.
- Glockner, P., Martin, M., Flouros, M., (2016), Experimental investigation results of a hybrid ceramic and actively cooled ball bearing for gas turbines, Proceedings of the Future of Gas Turbine Technology 8th International Gas Turbine Conference, 1-10.
- Tong, V.-C., Hong, S.-W., (2018), Vibration analysis of flexible rotor with angular contact ball bearings using a general bearing stiffness model, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 35(12), 1179-1189
- Harris, T. A., Bamsby, R. M., (1998), Tribological performance prediction of aircraft gas turbine mainshaft ball bearings, Tribology Transactions, 41(1), 60-68.
- Harris, T. A., (2001), Rolling bearing analysis, 4th Edition, John Wiley & Sons, New York.
- Pruvot, F. C., Mottu, A., (1980), High speed bearings for machine tool spindles, CIRP Annals, 29(1), 293-297.
- Tong, V. C., (2017), Study on the modeling and analysis of tapered roller bearings, Ph.D. Thesis, Kumoh National Institute of Technology.
- Crecelius, W. J., Milke, D. R., (1973), Dynamic and thermal analysis of high speed tapered roller bearings under combined loading, (Report No. NASA CR-121207), <https://ntrs.nasa.gov/citations/19730017755>
- Hadden, G. B., Kleckner, R. J., Ragen, M. A., Sheynin, L., (1981), Steady state and transient thermal analysis of a shaft bearing system including ball, cylindrical and tapered roller bearings, (Report No. 165365), <https://ntrs.nasa.gov/citations/19820024093>
- Timoshenko, S., (1941), Strength of materials Part II: advanced theory and problems, 2nd Edition, D. Van Nostrand Company.
- Shang, P., Zhan, Y., Feng, S., Zhou, J., Yu, L., (2013), Exact solution of high-speed couplings for interference fits, Advanced Materials Research, 744, 180-184.
- Rivera, G., Po, P. J., Kang, C. S., Hong, S. W., (2024), Analytical formulation for sliding friction torque in cylindrical Roller bearings, Journal of Mechanical Science and Technology. (under review)
- Rivera, G., Ferrer, M. A., Po, P. J., Hong, S. W., (2024), Effect of the operational diametral clearance change on the characteristics of angular contact ball bearings, Proceedings of the KSPE 2024 Spring Conference.
- De Mul, J. M., Vree, J. M., Maas, D. A., (1989), Equilibrium and associated load distribution in ball and roller bearings loaded in five degrees of freedom while neglecting friction-Part I: General theory and application to ball bearings, Journal of Tribology, 111(1), 142-148.
- Tong, V.-C., Hong, S.-W., (2018), Study on the running torque of angular contact ball bearings subjected to angular misalignment, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part J: Journal out Engineering Tribology, 232(7), 890-909.
- Park, S.-H., (2024), Development of bearing temperature prediction program based on thermal network model and CFD simulation, M.Sc Thesis, Kumoh National Institute of Technology.
- SKF, The SKF model for calculating the frictional moment. https://www.skf.com/binaries/pub12/Images/0901d1968065e9e7-The-SKF-model-for-calculating-the-frictional-moment_tcm_12-299767.pdf
- Harris, T. A., Kotzalas, M. N., (2006), Rolling bearing analysis: advanced concepts of bearing technology, 5th Edition, CRC Press.
- Tong, V.-C., Hong, S.-W., (2018), Improved formulation for running torque in angular contact ball bearings, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 19(1), 47-56.
- Popescu, A., Houpert, L., Olaru D. N., (2020), Four approaches for calculating power losses in an angular contact ball bearing, Mechanism and Machine Theory, 144, 103669.

27. Rivera, G., Tong, V.-C., Hong, S.-W., (2021), A study on ball-race contact in angular contact ball bearing during rotation, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 38(11), 851-862.
28. Rivera, G., Tong, V.-C., Hong, S.-W., (2022), Improved formulation for sliding friction torque of deep groove ball bearings, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 39(10), 779-789.
29. Kakuta, K., (1961), Friction moment of radial ball bearing under thrust load, *Proceedings of Mechanical Engineering Congress*, 27(178), 945-956. Japan etc.
30. Brossier, P., Niel, D., Changenet, C., Ville, F., Belmonte, J., (2020), Experimental and numerical investigations on rolling element bearing thermal behaviour, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 235(4), 842-853.
31. Niel, D., Changenet, C., Ville, F., Oetue, M., (2017), Thermomechanical study of high speed rolling element bearing: A simplified approach, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 234(4), 135065011775080.
32. Pouly, F., Changenet, C., Ville, F., Velex, P., Damiens, B., (2010), Power loss predictions in high-speed rolling element bearings using thermal networks, *Tribology Transactions*, 53(6), 957-967.

**Gilbert Rivera**

received his M.E. degree in Mechanical Engineering in 2021 from Kumoh National Institute of Technology (KIT), Korea. Currently, he serves as a Postmaster Researcher at KIT. His current research interests include bearing modeling and analysis.

E-mail: gibsrivera@kumoh.ac.kr

**Shinhyang Park**

received her M.E. degree in Mechanical Engineering from KIT, Korea in 2024. She is currently working as a research engineer at LIG Nex1. Her research interests include computational fluid mechanics and bearing modeling.

E-mail: shinhyang.park@lignex1.com

**Chan-sik Kang**

received his B.S. degree in Mechanical Engineering from Yonsei University, Korea, in 1990. Currently, he is a Director of the R&D Center in V&C Tech Co., Ltd. His current research interests include modeling, analysis, and test of rolling bearings.

E-mail: cskang@vnc-tech.com

**Dongjoo Kim**

received his Ph.D degree in Mechanical Engineering from Seoul National University (SNU), Korea, in 2002. Currently, he is a Professor in the Department of Mechanical Engineering, KIT, Korea. His research interests include computational fluid mechanics, particle dynamics, and bearing modeling and analysis.

E-mail: kdj@kumoh.ac.kr

**Seong-Wook Hong**

received his Ph.D. degree in Mechanical Engineering from KAIST, Korea, in 1989. Currently, he is a Professor in the School of Mechanical System Engineering, KIT. His research interests include spindle and bearings modeling and analysis, command shaping for positioning systems, vibration control, and structural vibration analysis for mechanical systems.

E-mail: swhong@kumoh.ac.kr

반사형 항공우주 광학계 환경변화에 따른 이미지 품질 예측

Prediction of Image Quality according to Environmental Changes in a Reflective Aerospace Optical System

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

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

² 국방과학연구소 (Agency for Defense Development)

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

ORCID: 0009-0009-7033-8959

KEYWORDS: Reflective optical systems (반사형 광학 시스템), Environment simulation (환경 시뮬레이션), Deformation (변형), Image quality (이미지 품질), Optical mirror (광학 거울)

The use of reflective optical systems is essential to acquiring high-resolution image quality in aerospace applications that observe distant objects. The geometric shapes of large-aperture reflective optical systems can be deformed depending on various operating and space environments, which deformation consequently affects optical performance. In this study, we predict the image quality of a reflective aerospace optical system according to various environmental changes. In particular, the shape deformation due to vibration and heat generated from the launch vehicle was mainly observed, and the effect on gravity was also considered. The variations of image quality, such as Modulation Transfer Function (MTF) and wave-front error (WFE), were also observed by importing the deformed shapes into the optical simulation tool. This study is intended to provide approaches to reduce the cost and lead time to develop aerospace optical systems.

Manuscript received: April 11, 2024 / Revised: May 20, 2024 / Accepted: May 22, 2024

1. 서론

항공우주 관측시스템은 원거리에 위치한 물체를 고해상도 이미지로 획득하기 위하여 색수차가 작고 집광력이 높은 대구경 반사형 광학계를 주로 사용한다[1,2]. 대구경 반사형 광학계는 원거리에서 전달되는 빛의 정보를 효율적으로 집광할 수 있다는 장점이 있지만, 큰 형상으로 인해 외부 환경에 의해 변형이 발생할 수 있다. 반사형 광학 부품의 형상 변형은 이미지 품질에 영향을 줄 수 있으며, 각 광학 부품들의 정렬 또한 외부 환경에 의해 변형되어 이미지 품질을 저해시키는 원인이 될 수 있다. 항공우주 관측용 광학계는 지상에서 우주로 이동하는 동안 온도, 발사체의 진동, 중력 및 대기 압력 등의 외부 환경에 의해 변형이 될 수 있으며, 이러한 환경 변화를 극복하기 위하여 다양한 소재와 구조를 적용한 연구들이 진행되었다[3-5]. 반사형

거울로 주로 사용되는 소재에는 탄화규소(Silicon Carbide, SiC), 알루미늄 합금(Aluminum Alloy), 제로듀어(Zerodur), 베릴륨(Beryllium, Be) 등이 있으며, 각 소재의 기계적 특성 및 비용을 고려하여 선정한다[6]. 제임스 웹 우주망원경(James Webb Space Telescope)의 경우 무게 대비 강성이 높고 열 안정성이 뛰어난 베릴륨 소재를 이용하여 반사형 거울을 제작하였다[7]. 최근 제임스 웹 우주망원경 후속으로 개발되고 있는 외계 행성 관측 망원경(Habitable Exoplanet Observatory, HabEx)은 제로듀어 소재를 적용할 것으로 소개되고 있다[8]. 탄화규소는 다른 소재들과 비교하여 매우 뛰어난 열 및 기계적 안정성을 가지고 있으나 비유적인 측면과 치수 안정성을 고려하여 반사형 거울 소재로 적용된다[9,10].

발사체가 우주로 이동하는 동안 다양한 환경변화를 경험하게 되는데, 우주와 동일한 환경을 구현하는 것은 매우 어렵고 많은

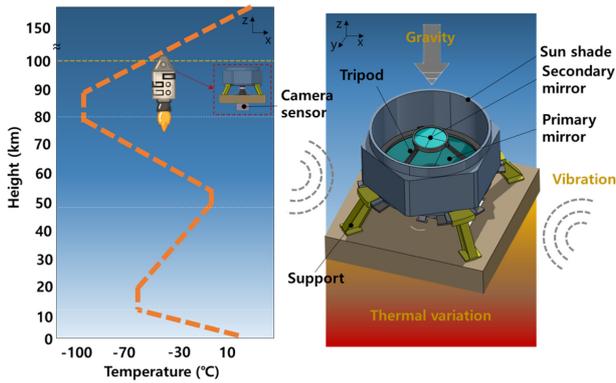


Fig. 1 Schematic illustrations of environmental factors affecting image quality of a reflective aerospace optical system. The variations of temperature and gravity depending on the altitude, and vibrations generated from the launch vehicle can cause deformation of the reflective optical system

비용이 소모되기 때문에 환경 수치 시뮬레이션을 통하여 우주항공 광학 시스템의 변형을 예측한다[11-13]. 헤라(HERA) 탐사선에 적용된 반사형 광학계의 변형을 분석하는 연구가 최근 소개되었으며, 이 연구에서는 제로두어 거울 및 이를 지지 하는 티타늄 소재의 양각대가 온도에 따라서 변화되는 정도를 관측하였다[14]. 열팽창을 최소화하기 위해 거울과 하우징을 동일한 소재로 적용한 광학계의 열 환경 시뮬레이션을 진행한 연구도 소개되었으며, 형상 변화에 따른 광학적 특성 변화도 분석을 하였다[15]. 하지만 대부분의 연구에서 온도에 대한 변형 시뮬레이션에 한정되어 있어, 탑재체가 우주를 이동하는 동안 경험할 수 있는 다양한 외부 환경적 요인에 따른 광학적 특성 변화에 대한 연구들이 부족한 상황이다.

본 논문에서는 다양한 환경 변화에 따른 반사형 항공우주 광학계의 이미지 품질을 예측하는 연구를 소개한다. 반사형 광학계 이미지 품질 예측을 위하여 광학계 형상 및 광학 설계를 수행하고 운용 및 외부 환경 조건에 대하여 정의하였다. 그리고, 발사체에서 발생하는 기계적 진동, 열 및 중력의 환경 변화에 따라서 반사형 광학계가 받는 응력과 변위를 분석하였다(Fig. 1). 광학 수치해석 프로그램(Ansys Zemax)을 통하여 변형된 형상에 따른 변조 전달 함수(MTF) 및 파면 오차(Wavefront Error, WFE)와 같은 광학적 성능 변화를 분석하였다.

2. 반사형 광학계 변형 및 이미지 품질 예측 방법

2.1 운용 우주환경 조건 정의

국제항공연맹(Fédération Aéronautique Internationale, FAI)에 따르면 고도 100 km 상공이 지구의 대기권과 우주 공간을 구분하는 경계로 정의하며, 이를 카르만 선(Kármán Line)이라고 부른다. 카르만 선 이상에서는 대기의 저항이 매우 작은 상태에서 비행이 가능하기 때문에, 본 연구에서는 고도 100 km에서의

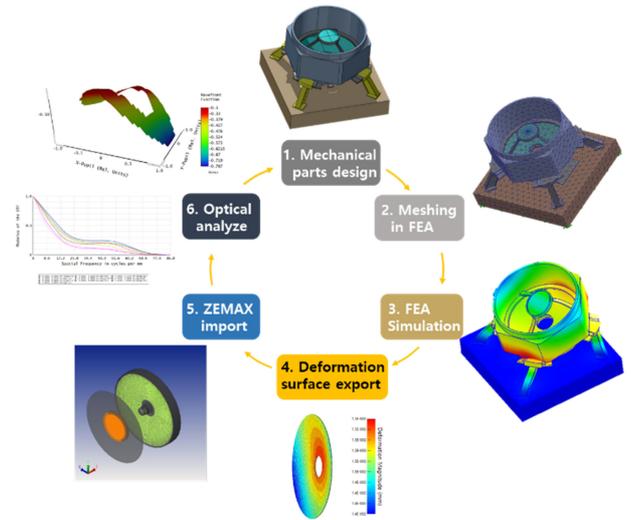


Fig. 2 Diagram for prediction methods of reflective optical system deformation and image quality

반사형 항공우주 광학계 환경변화를 예측하였다. 고도 100 km에서의 중력가속도는 9.499 m/s^2 이며, 온도 $184 \text{ K} (-89.15^\circ\text{C})$, 밀도 $5.08 \times 10^{-07} \text{ kg/m}^3$, 그리고 압력 $2.81 \times 10^{-03} \text{ Pa}$ 의 환경조건을 갖는다[16]. 대부분의 우주비행선은 대기권을 벗어나기 위하여 고도 100 km에서 8 마하 이상의 속도로 움직이나, 높은 고도로 인하여 공기 밀도가 낮아 광학계가 위치한 우주비행선 앞부분의 열유속(Heat Flux)은 0 kW/m^2 에 수렴한다[17]. 고도 100 km에서 공기 저항에 의한 가열은 매우 작기 때문에, 엔진 추진체에서 발생하는 열 및 외부 온도차이에 의한 광학계 열 변형을 분석하였다. 또한, 우주비행선이 비행을 하며 발생할 수 있는 진동 조건에 대하여 분석을 하였으며, 그에 따른 광학계의 변형 및 광학 성능 변화를 시뮬레이션 하였다.

2.2 반사형 광학계 변형 및 광학 성능 예측 방법

우주 환경에서의 반사형 광학계 변형 예측을 수행하기 위하여 다중물리 해석 프로그램 Solidworks Simulation 및 광선 추적 프로그램 Ansys Zemax 를 통하여 물리적 변형과 이미지 품질을 예측하였다(Fig. 2). 해석하고자 하는 반사형 광학계 모델의 크기는 $280 \times 280 \times 313 \text{ mm}^3$ 이며 주경(Primary Mirror), 부경(Secondary Mirror), 빛가림 경통(Sun Shade), 양각대(Tripod), 지지대(Support) 및 카메라 센서로 구성된다. 반사형 광학계의 재료는 SiC, Al6061, Al7075, Ti-6-4 등이 적용되었다(Table 1). 변형 해석을 위하여 생성된 메쉬(Mesh)는 총 절점 수 128,808개, 총 요소 수 69,982개이며, 주로 관측하고자 하는 영역인 미러 광학계 표면의 메쉬는 기타 기구물 보다 더 세밀화하여 구성하였다. 반사형 광학계의 하부 사각 플레이트가 우주비행선 내부에 고정되어있다는 구속조건을 설정하여 광학계의 변형 정도를 분석 하였다. 우주비행선의 엔진 추진체에서 발생하는 열이 열전달을 통하여 광학계 변형에 미치는 영향을 예측하였고, 우주비행선에서 발생할 수 있는 임의 진동을 정의하여 분석을

Table 1 Mechanical and thermal properties of reflective optical systems

	Al6061	Al7075	Ti-6-4	SiC	Germanium
Young's modulus [N/mm ²]	6.89 10 ⁴	7.17 10 ⁴	1.14 10 ⁵	4.2 10 ⁵	1.3 10 ⁵
Poisson's ratio	0.33	0.33	0.34	0.14	0.3
Density [kg/m ³]	2700	2810	4430	3100	5323
Thermal expansion [1/k]	2.36 × 10 ⁻⁵	2.36 × 10 ⁻⁵	8.6 × 10 ⁻⁶	3 × 10 ⁻⁶	6.1 × 10 ⁻⁶
Thermal conductivity [W/(m K)]	16	130	6.7	140	64
Specific heat capacity [J/(kg K)]	890	960	530	670	321.9

진행하였다. 반사형 광학계의 물리적 변형 데이터의 공간 정보는 Zemax STAR Module을 통하여 광학 설계 및 분석소프트웨어에 연동을 시켰다. 미리 광학계의 면의 변형 정보를 광학 설계형상 데이터에 매칭을 시켰으며 광학 소프트웨어를 통하여 MTF 및 WFE와 같은 광학 성능 변화를 분석하였다.

3. 반사형 광학계 변형 및 이미지 품질 예측 결과

3.1 반사형 광학계 변형 예측 결과

관측 환경인 100 km의 고도에서는 중력가속도 9.499 m/s²로 지상보다는 다소 낮지만, 광학계 방향에 따른 자중에 의한 변형이 발생할 수 있어 변형 정도를 관측 하였다(Fig. 3). 발사체가 가속을 위해 수직 방향에서 수평으로 자세를 조정하였을 때를 가정하였으며, 광학계와 수평 방향으로 중력이 작용하였을 때 광학계의 최대 응력 0.58 MPa, 최대 변위는 0.125 μm로 예측되었다. 광학계와 중력이 수직을 이루었을 때는 최대 응력 0.2501 MPa, 최대 변위 0.172 μm의 결과를 보였으며 이는 중력에 의한 변형은 매우 작다는 것을 나타낸다.

열에 의한 광학계 변형은 다양한 온도 조건에서 정상상태를 가정하여 분석을 진행하였다(Fig. 4). 초기 20°C 대비 30-70°C 까지 정상상태에서의 온도에 대한 변형량 및 변위를 분석하였으며 X, Y, Z 각 변위의 합을 통하여 최대 변위를 계산하였다. 정상상태 70°C 가정조건에서는 X축 최대 변위 243 μm, Y축 최대변위 143 μm, 그리고 Z축 최대 변위 164 μm를 나타내었고 총합 변위 270 μm의 변위를 보였다. 최대 변위가 발생하는 부분은 경통에서 주로 변형이 이루어져 광학 면에서의 최대 변위를 관측한 결과 120 μm로 분석되었다. 이 때 최대 변형률은 2.31 × 10⁻³으로 나타났으며, 정상상태 온도가 낮을수록 변위가 감소하는 결과가 나타났다. 열변형 분석 결과 고정되어 있는 면에서 멀어질수록 변위가 크게 나타나는 것을 확인하였으며, 광학 미러보다 경통 부분이 더 크게 변형이 일어나는 것을 확인하였다.

설계된 반사형 광학계의 고유진동수 해석을 통하여 모드 현상, 공진 및 질량 기여도에 대한 정보를 분석하였다(Fig. 5). 총 20개의 모드 번호에 따른 고유진동수를 분석하였고, 얼마나 많은 질량이 구조 안에서 특정 방향으로 움직이는지를 파악하기

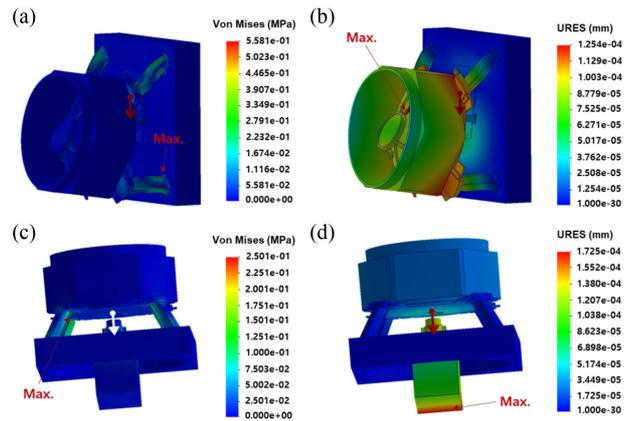


Fig. 3 Deformation results of the reflective optical system due to gravity. (a) Stress, (b) displacement results when the force of gravity is applied in a parallel direction to the mirror, (c) Stress, and (d) displacement when gravity is applied in the direction perpendicular to the mirror

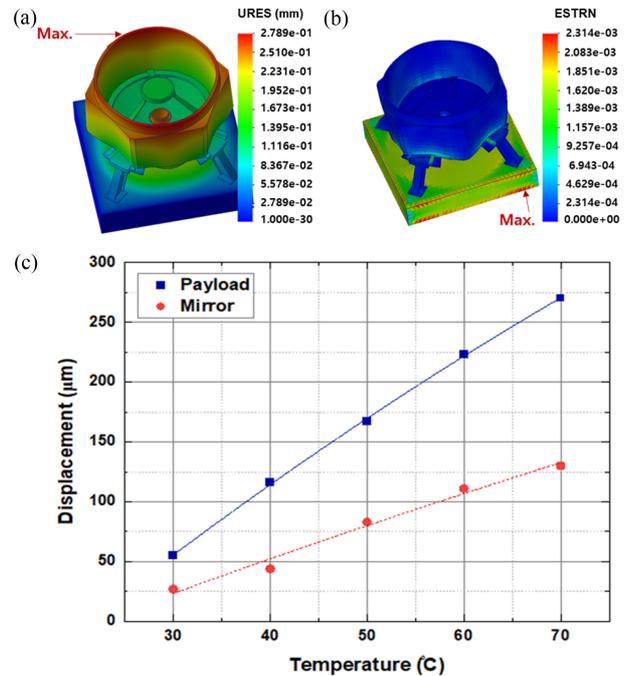


Fig. 4 Thermal deformation results of the reflective optical system. (a) Displacement, (b) strain at 70°C steady-state temperature, and (c) Maximum displacement graph of the reflective optical system according to steady-state temperature

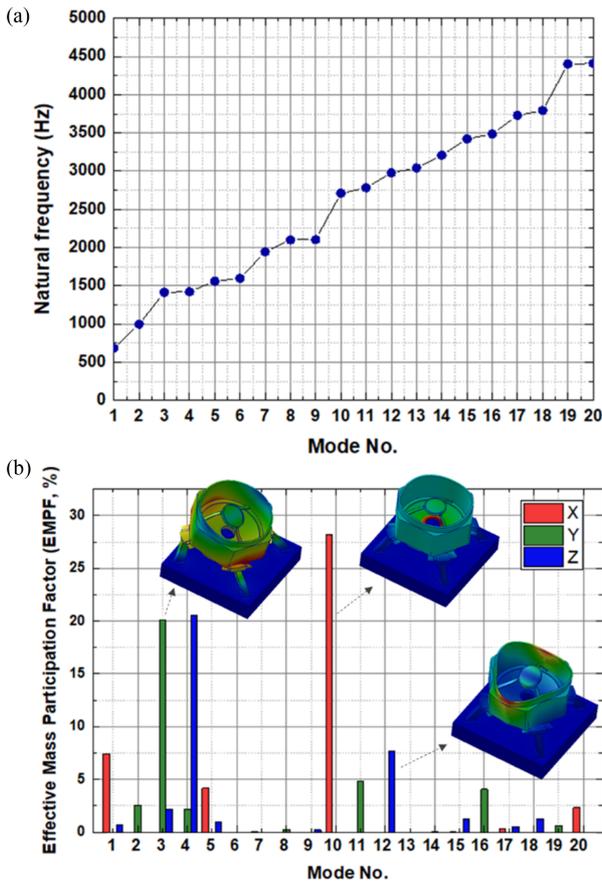


Fig. 5 Natural frequency analysis of the reflective optical system. (a) Natural frequency and (b) Effective mass participation factor results according to different modes

위하여 모드에 따른 질량 분배를 정규화 하여 분석 하였다. 분석 결과 X축에서의 질량 분배가 평균 0.212로 가장 높았으며, Y축 0.0172 및 Z축 0.0176의 질량 분배 결과를 나타내었다. 특히 모드 10번에서의 X축 질량 분배가 가장 높게 분석이 되었으며, 이를 통하여 진동에 지배적인 모드를 식별 가능하다.

발사체 엔진 및 공기 마찰에 의해 불규칙 임의의 진동이 발생할 수 있어, MIL-STD-810F (Method 514.5) 진동 규격을 이용하여 주파수 스펙트럼 분석을 진행하였다(Fig. 6). 불규칙 임의의 진동에 대하여 RMS (Root Mean Square) 정규분포 및 감쇠비(Damping Ratio)에 따른 최대 변위를 관측하였으며, 진동에 의한 변위 최소화를 위하여 주요 변형 위치를 분석하였다. 감쇠비가 0.01의 경우 최대 변위가 31.6 μm 로 분석되었으며, 감쇠비가 0.02로 높아지면 최대 변위가 22.8 μm 까지 감소한다. 또한 감쇠비가 0.04까지 높아지면 최대 변위는 16.1 μm 수준까지 낮아지며, 주로 경통을 지지하는 지지대 부분에서 변형이 발생하는 것을 관측하였다. 지지대 지지 방향에 추가적인 감쇠 장치를 보완하면 감쇠비를 증가시켜 진동에 의한 영향을 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다.

반사형 광학계가 우주로 발사되기 전과 추진체와 분리되는 과정 중에 물리적 충격에 의한 변형이 추가로 발생할 수 있어, MIL-STD-810H 방법을 통하여 충격에 의한 진동 및 변형을

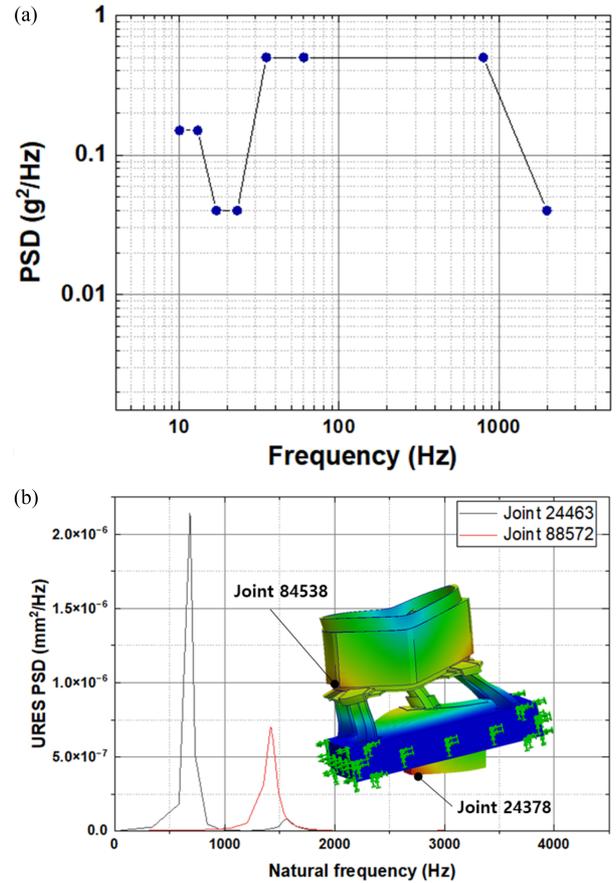


Fig. 6 Deformation results according to random vibration. (a) The Shipboard random vibration exposure (MIL-STD 810F, Method 514.5) and (b) Power spectral density (PSD) frequency displacement response according to natural frequency

분석하였다(Fig. 7). 충격에 대한 조건은 최대 20 g의 힘이 0.011 sec 동안 선형적으로 증가하다가 급격히 힘이 제거되었을 때를 가정하여 해석을 수행하였다. 측면 방향과 평행 방향에서 충격이 발생하였을 때를 분석한 결과, 측면 방향에서 충격이 가해졌을 때는 0.011초에서 미러 광학계 최대 변위 1.5 μm 가 발생하였다. 반면 평행 방향 충격에서는 최대 변위 0.04 μm 로 미러 광학계에서는 변형이 거의 일어나지 않는 것을 확인하였다. 반사형 광학계 변형 예측 결과 열에 의한 형상 변형이 가장 크게 나타난다는 것을 확인 하였으며, 중력이나 충격에 의한 변형은 매우 작다는 것을 확인 하였다.

3.2 반사형 광학계 이미지 품질 예측 결과

반사형 광학계 변형 예측 결과 형상을 Ansys Zemax OpticStudio의 Star Module을 통하여 광학 설계면에 매칭시켜 이미지 품질을 분석하였다. 변형 해석 형상의 포인트들을 텍스트파일로 추출한 후 Zemax에서 형상을 불러들여 축을 정렬시킨 후 해당 거울 면에 매칭시켜 정보를 전달하였다. 이미지 품질을 분석하기 위하여 변형 해석 전/후의 WFE 값과 MTF 두 수치를

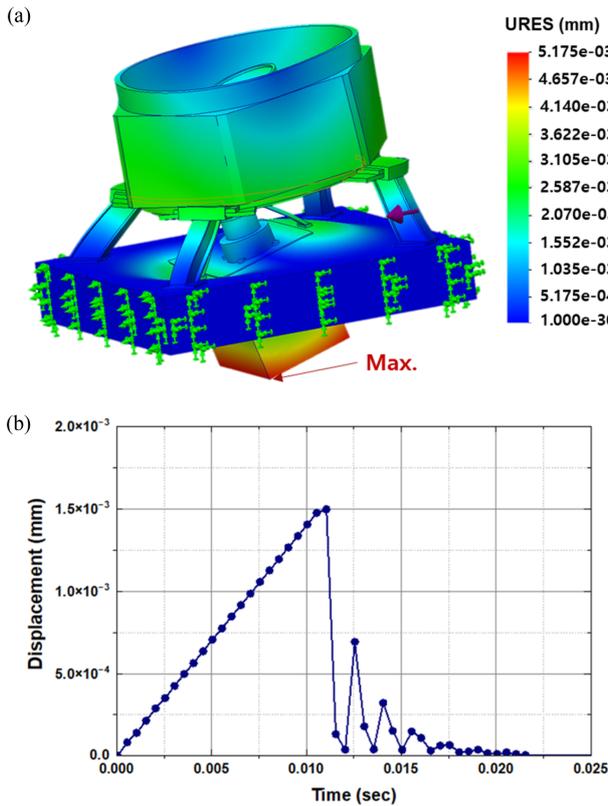


Fig. 7 Deformation results due to explicit impact. (a) 3D simulation rendering and (b) plot data of displacement after explicit impact

비교하였는데, WFE는 형성된 파면의 가장 높은 피크(Peak)와 골(Valley)을 분석하는 Peak to Valley (PV) 값과 전체 오차의 평균을 계산하는 RMS 값을 관측하였다. MTF는 공간 주파수의 샘플 대비(Contrast)를 나타내는 수치로 대비 0.5일 때의 공간 주파수 값인 MTF50 수치를 통하여 분석하였다.

변형 해석 전의 반사형 광학계의 WFE는 PV 0.0138 λ, RMS 0.0035 λ로 매우 형상이 고르고 및 정렬이 잘된 결과를 나타내었다. 하지만 열 변형에 대한 주경 및 부경의 해석 형상을 기존 광학 설계 면에 매칭시켜 분석을 한 결과 PV 5.043 λ, RMS 1.340 λ로 WFE의 수치가 변화하는 것을 확인하였다(Fig. 8). 이미지의 해상도를 평가하는 지표인 MTF결과에서도 변형 해석 전 중심 기준 MTF50은 16.08 lp/mm의 결과를 보였지만, 열 변형 해석 후 중심 기준 MTF50의 수치는 4.97 lp/mm로 저해가 되는 것을 확인하였다(Fig. 9). 진동에 의해 발생한 미러 변형의 이미지 품질 영향을 분석한 결과 PV 0.485 λ, RMS 0.1338 λ로 WFE 수치가 변화되는 것을 확인하였다. 또한 중심 기준 MTF50 수치는 15.91 lp/mm로 변화가 크게 나타나지 않는 것을 확인하였다. 이러한 결과들을 통하여 반사형 광학계는 열 변형에 의한 이미지 품질 저하가 가장 크게 나타나는 것을 확인 할 수 있으며, 이러한 품질 저하를 방지하기 위하여 열 변형을 고려한 최적화 설계가 필요하다는 것을 분석 결과가 나타난다.

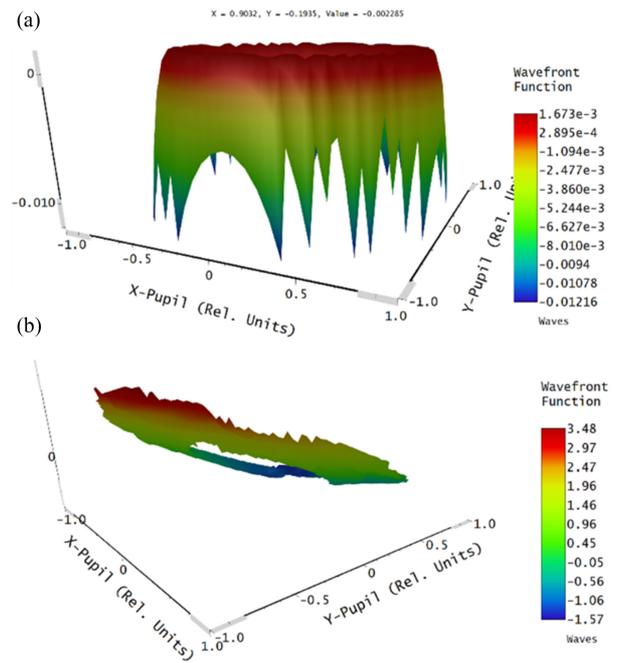


Fig. 8 Wave-front error analysis. Wave-front error analysis results according to (a) before and (b) after the deformation by thermal shock

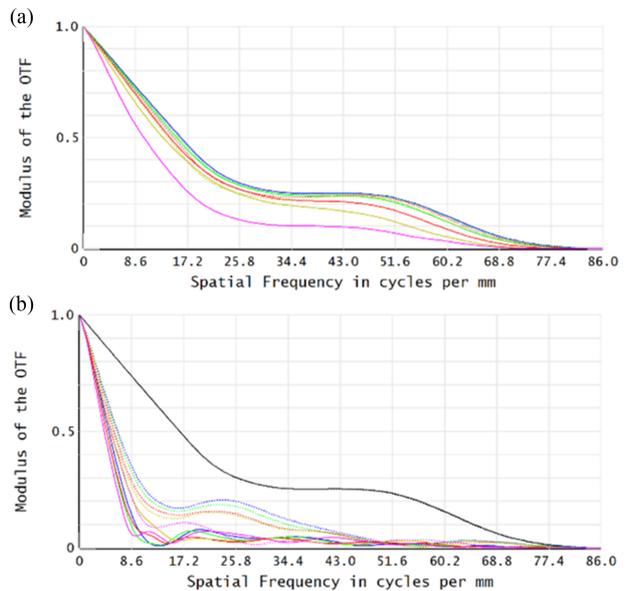


Fig. 9 Modulation Transfer Function(MTF) analysis. MTF results according to (a) before and (b) after the deformation by thermal shock

4. 결론

본 논문에서는 우주 환경변화에 따른 반사형 광학계의 형상 변형과 광학적 성능 변화를 예측하는 연구를 소개하였다. 본 연구에서는 지구의 대기권과 우주 사이의 경계를 정의하는 고도 100 km의 카르만 선의 온도 및 중력 요인을 분석하고, 추진체의

진동 및 충격을 입력시켜 반사형 광학계에 미치는 영향을 분석하였다. 시뮬레이션 결과 자중에 의한 영향은 무시할 정도로 작았으며, 열 전달에 의한 변형이 가장 크게 나타났다. 광학적 성능 변화 또한 열 전달에 의한 변형에 의해 가장 크게 저해되었으며, 파면 오차에 대한 RMS값이 1.340 λ 까지 증가하는 결과를 보였다. 진동에 의한 변형은 열에 의한 영향보다 작게 분석이 되었으며, 진동 따른 파면 오차 RMS 값이 0.1338 λ 로 분석되었고 MTF 수치가 15.91 lp/mm로 크게 변동되지 않는 것을 확인하였다. 이러한 접근 방법을 통하여 광학적 성능 변화를 최소화하는 디자인 설계 연구에 직접적인 기여를 할 수 있으며, 제작 허용오차 범위 설정 및 경제적인 설계에도 도움을 줄 것으로 예상된다.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the Agency for Defense Development Grant Funded by the Korean Government (No. U1230005SD).

REFERENCES

- Kim, K., Bae, J.-H., Park, J., (2023), Reflective optical systems for aerospace applications, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 40(11), 899-906.
- Lightsey, P. A., Atkinson, C. B., Clampin, M. C., Feinberg, L. D., (2012), James webb space telescope: large deployable cryogenic telescope in space, *Optical Engineering*, 51(1), 011003-011003.
- Zhang, C., Li, Z., (2022), A review of lightweight design for space mirror core structure: tradition and future, *Machines*, 10(11), 1066.
- Wu, J., (2020), Design of high-lightweight space mirror component based on automatic optimization, *Journal of Physics: Conference Series*, 012023.
- Jalluri, T. D. P. V., Rao, B. V., Rudraswamy, B., Venkateswaran, R., Sriram, K., (2023), Optical polishing and characterization of chemical vapour deposited silicon carbide mirrors for space applications, *Journal of Optics*, 52(3), 969-983.
- Wu, H.-Y., Chang, W.-C., Huang, P.-H., Huang, Y.-K., (2019), New candidate substrate materials for space mirror optics, *Proceedings of the Material Technologies and Applications to Optics, Structures, Components, and Sub-Systems IV*, 157-161.
- Gardner, J. P., Mather, J. C., Clampin, M., Doyon, R., Greenhouse, M. A., Hammel, H. B., Hutchings, J. B., Jakobsen, P., Lilly, S. J., Long, K. S., Lunine, J. I., Mccaughrean, M. J., Mountain, M., Nella, J., Rieke, G. H., Rieke, M. J., Rix, H.-W., Smith, E. P., Sonneborn, G., Stiavelli, M., Stockman, H. S., Windhorst, R. A., Wright, G. S., (2006), The james webb space telescope, *Space Science Reviews*, 123, 485-606.
- Philip Stahl, H., Kuan, G., Arnold, W. R., Brooks, T., Brent Knight, J., Martin, S., (2020), Habitable-zone exoplanet observatory baseline 4-m telescope: systems-engineering design process and predicted structural thermal optical performance, *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, 6(3), 034004.
- Hull, T., Westerhoff, T., Weidmann, G., (2015), Selection considerations between ZERODUR® and silicon carbide for dimensionally-stable spaceborne optical telescopes in two-earth-orbits, *Proceedings of the SPIE Optical Engineering + Applications 2015*, 108-117.
- Kasunic, K. J., Aikens, D., Szwabowski, D., Ragan, C., Tinker, F., (2017), Technical and cost advantages of silicon carbide telescopes for small-satellite imaging applications, *Proceedings of the Earth Observing Systems XXII*, 10402, 110-126.
- Jeong, S., Nam, J.-H., Ahn, K.-B., Park, I. H., Kim, S. W., Lee, J., Lim, H., Brandt, S., Budtz-Jørgensen, C., Castro-Tirado, A. J., Chen, P., Cho, M. H., Choi, J.-N., Grossan, B., Huang, M.-H. A., Jung, A., Kim, J. E., Kim, M. B., Kim, Y.-W., Linder, E. V., Min, K. W., Na, G., Panasyuk, M. I., Ripa, J., Reglero, V., Smoot, G., Suh, J., Svertilov, S. I., Vedenkin, N., Yashin, I. V., (2013), Slewing mirror telescope optics for the early observation of UV/optical photons from gamma-ray bursts, *Optics Express*, 21(2), 2263-2278.
- Tan, S., Zhang, X., Wang, L., Wu, H., Fu, Q., Yan, L., Hu, M., (2022), Equivalent modeling and verification of a high-steepness and lightweight elliptical aluminum mirror, *Applied Sciences*, 12(18), 9091.
- Lee, J.-H., Lee, C.-W., Kim, Y.-M., Kim, J.-W., (2009), Optomechanical design of a compact imaging spectrometer for a microsatellite STSAT3, *Journal of the Optical Society of Korea*, 13(2), 193-200.
- Dias, N. G., Gordo, P., Onderwater, H., Melicio, R., Amorim, A., (2022), Analysis on the isostatic bipod mounts for the HERA mission LIDAR, *Applied Sciences*, 2022, 12(7), 3497.
- Peschel, T., Damm, C., Beier, M., Gebhardt, A., Risse, S., Walter, I., Sebastian, I., Krutz, D., (2017), Design of an imaging spectrometer for earth observation using freeform mirrors, *Proceedings of the International Conference on Space Optics-ICSO 2016*, 10562.
- National Oceanic and Atmospheric Administration, (1976), US standard atmosphere, (Report No. NOAA-S/T-76-1562), <https://ntrs.nasa.gov/citations/19770009539>
- Laureti, M., Karl, S., (2022), Aerothermal databases and load predictions for retro propulsion-assisted launch vehicles (RETALT), *CEAS Space Journal*, 14(3), 501-515.

**Kiso Kim**

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

E-mail: kisoookim@kopti.re.kr

**Ji-Hun Bae**

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

E-mail: ghunb16@add.re.kr

**Jongbok Park**

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

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

창간

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

목적 및 연구 범위

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

금액

구독료

이 논문집은 우리학회 회원에 한하여 무료로 제공됩니다.

게재료

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

연락처

[04508] 서울 중구 중림로 50-1, SKY1004빌딩 12층

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

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

한국정밀공학회지 저널: http://jkspe.kspe.or.kr

한국정밀공학회지 논문투고 및 게재규정 · 논문집필요령

논문투고 및 게재규정

제1조 (목적)

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

제2조 (투고자)

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

제3조 (책임 및 윤리규정 준수)

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

제4조 (연구범위)

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

제5조 (투고 구분)

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

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

제6조 (접수)

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

제7조 (심사 및 게재 결정)

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

제8조 (저작권)

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

제9조 (자료공개)

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

제10조 (원고작성요령)

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

제11조(게재료)

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

한국정밀공학회지 논문투고 및 게재규정 · 논문집필요령

논문집필요령

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

한국정밀공학회지 논문심사규정

제1조 (목적)

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

제2조 (투고 및 접수)

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

제3조 (심사위원 선정)

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

제4조 (심사 방법)

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

제5조 (심사 기간)

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

제6조 (저자수정기한)

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

제7조 (게재 판정)

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

제8조 (특집논문심사)

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

한국정밀공학회지 논문심사규정

제9조 (비밀유지)

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

제10조 (이의제기)

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

제11조 (심사료)

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

(사)한국정밀공학회 학술활동 윤리규정

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

제 1 장 총칙

제1조 (목적)

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

제2조 (윤리규정 적용범위)

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

제3조 (부정행위의 범위)

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

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

제 2 장 저자

제4조 (저자의 정직성)

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

제5조 (저자의 기준)

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

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

제6조 (저자의 준수사항)

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

(사)한국정밀공학회 학술활동 윤리규정

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

제 3 장 학회 구성원의 역할과 책임

제7조 (편집위원 준수사항)

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

제8조 (심사위원 준수사항)

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

제 4 장 검증 절차와 기준

제9조 (윤리위원회)

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

제10조 (윤리위원회 기능)

위원회는 다음의 내용으로 활동한다.

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

(사)한국정밀공학회 학술활동 윤리규정

제11조 (윤리위원회 소집 및 의결)

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

제12조 (연구 부정행위의 제보)

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

제13조 (연구 부정행위에 대한 제재 및 사후조치)

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

제14조 (피조사자 권리 보호)

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

제15조 (조사의 기록과 정보의 공개)

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

제16조 (조사결과의 보고)

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

한국정밀공학회지 연구윤리 및 저작권 동의서

(사)한국정밀공학회 귀하

논문 제목

국문:

영문:

저자명 (전체):

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

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

20 년 월 일

책임저자명:

서 명:

책임 저자

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

(사)한국정밀공학회 소개 및 활동현황

설립목적

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

회원(사) 구성

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

관련정부기관과의 관계

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

주요활동현황

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

발간자료

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

발행규정

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

부문위원회 활동

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

특별회원사 가입

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

(사)한국정밀공학회 소개 및 활동현황

한국정밀공학회상

정밀공학대상

- 학회 발전에 현저하게 공헌한 자

학술상

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

생산기술상, 정밀기술상

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

공로상

- 학회 발전과 운영에 지대하게 기여한 자

Best Editor Award

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

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

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

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

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

KSPE Young Researcher Award

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

특별상

가헌학술상

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

현송공학상

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

유정백합학술상

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

백암논문상

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

Year of Launching

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

Aims and Scope

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

Fee

Subscription Fee:

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

Publication Fee:

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

Contact Us

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

Rules for Submitting and Publishing Papers

Article 1 Purpose

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

Article 2 Submitter

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

Article 3 Responsibilities and Compliance with Code of Ethics

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

Article 4 Scope of Research

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

Article 5 Categorization of Submissions

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

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

Article 6 Submission

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

Article 7 Review and Decision to Publish Paper

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

Article 8 Copyright

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

Article 9 Disclosure of Materials

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

Article 10 Manual of Style

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

Article 11 Publication Fees

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

Guidelines for Manuscript Writing

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

Author's Check List

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

Rules for Reviewing Papers

Article 1 Purpose

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

Article 2 Submission and Reception

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

Article 3 Selection of Reviewers

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

Article 4 Review Procedure

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

Article 5 Review Period

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

Article 6 Deadline for Author's Revision

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

Rules for Reviewing Papers

Article 7 Decision over Publication

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

Article 8 Review of Special Papers

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

Article 9 Confidentiality

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

Article 10 Objection

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

Article 11 Review Fee

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

Code of Ethics for Academic Activities

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

Chapter 1 Overall Rules

Article 1 Purpose

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

Article 2 Application Area of Code of Ethics

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

Article 3 Scope of Misconduct

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

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

Chapter 2 Author

Article 4 Honesty of Author

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

Article 5 Authorship

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

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

Code of Ethics for Academic Activities

Article 6 Compliance of Authors

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

Chapter 3 Roles and Responsibilities of Members of Society

Article 7 Compliance of Editorial Board Member (EBM)

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

Article 8 Compliance of Reviewers

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

Code of Ethics for Academic Activities

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

Chapter 4 Verification Process and Standard

Article 9 Ethics Committee

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

Article 10 Function of Ethics Committee

The Committee shall act in the following manners:

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

Article 11 Convocation and Voting of Ethics Committee

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

Article 12 Reporting Research Misconduct

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

Code of Ethics for Academic Activities

Article 13 Sanctions on Research Misconduct and Follow-up Actions

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

Article 14 Protection of Rights of Examinee

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

Article 15 Disclosure of Record and Information of Investigation

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

Article 16 Report of Investigation Result

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

Research Ethics and Copyright Transfer Agreement

To the Korean Society for Precision Engineering (KSPE)

Title	Korean
	English
Authors	

I hereby certify that I agreed to submit the manuscript entitled above to the Journal of the Korean Society for Precision Engineering with the following statements.

1. The submitting/corresponding authors (hereafter referred to as "authors") warrant that the copyright shall be transferred to the KSPE when the manuscript is accepted, and the KSPE will own the exclusive rights.
2. Authors certify that they have not impinged upon the rights or copyrights of other researchers, and have attained legal copyright to display items from the original copyright owners.
3. Authors certify that they have indeed contributed to the outcomes and writing of their manuscript and are responsible for the contents therein.
4. Authors may use or reproduce part of the published work in an annual report, magazine or another journal. In this case, they should inform the KSPE of the reproduction and cite the work with proper citation information.
5. Authors have never published the same work in any other journal and are not planning to do so.
6. Authors certify that they will abide by the ethics regulations of the KSPE related to academic activities given in [http://jkspe.kspe.or.kr/files/KSPE_Code of Ethics for Academic Activities \(English\).pdf](http://jkspe.kspe.or.kr/files/KSPE_Code%20of%20Ethics%20for%20Academic%20Activities%20(English).pdf). Authors also agree to CrossCheck verification of the manuscript for prevention of duplicate publication and plagerism.
7. The corresponding author is aware of the items 1-6 and agrees to them.
8. The KSPE will have the right to delay or cancel the publication if authors do not adhere to the above statements.
9. Corresponding author has the full authority to sign the Statement of Copyright Transfer form on behalf of all the co-authors.

**Corresponding
Author's
Signature**

- Corresponding author (name): _____
- Position: _____
- Affiliation: _____
- Date: ____ / ____ / ____

**Corresponding
Author**

The author to whom all correspondence should be addressed from submission to publication process and who is responsible for the published contents and communications with the co-authors.

International Journal of Precision Engineering and Manufacturing

Volume 25 · Number 7 · July 2024

REGULAR PAPERS

Study on Whole Forming Process of Unequal Thickness Inner Liner for High-Pressure Gas Cylinder

C. Wang · B. Zhang · W. Tian · Z. Tian · C. Zhao 1335

Study on the Formation Mechanism of Surface Color of Oxide Film for Ti-6Al-4V in Cutting Process

J. Li · F. Zhang · X. You 1351

Effect of Position of Robotic Gas Metal Arc Welding on Bead Quality and Multi-objective Optimization Through Gray Relational Analysis

C. Chen · B. Tang · Y. Ye · G. Lian · X. Huang 1359

Effect of the Built-Up-Edge on Tool Wear in Machining of STAVAX

S. Maeng · J.H. Ahn · B.-K. Min 1375

Frictional Characteristics of Tilting Pad Bearings According to Pattern Arrangement on Rough Surface Considering Asperity Contact

K.-S. Kim · D.-W. Lee · M.-R. Kim 1385

A Rapid Image Comparison Approach to Automatic Recognition and Assembly of Jigsaw Puzzles

Y.-W. Ke · A.C. Lin 1403

Study on the Arrangement of Roller Sets in the Transition Segment of the Pipe Belt Conveyor

Y. Zhang · C. Yuan · M. Zhang · D. Zhang · Z. Wang · Y. Wang 1415

Design Optimization for Enhancing Microstrip Antenna Performances Using Polylactic Acid (PLA) Biopolymer Substrate in Sub-6 GHz Band

D. Ziani · M. Belkheir · M. Rouissat · A. Mokaddem · I.S. Alsukayti · S.B. Belhouari 1425

Operation and Productivity Monitoring from Sound Signal of Legacy Pipe Bending Machine via Convolutional Neural Network (CNN)

E. Kim · D. Mun · M.B.G. Jun · H. Yun 1437

Biomechanical Evaluation of Modified Ti6Al4V Ligament Anchors with Varied Expansion Directions for Anterior Cruciate Ligament Reconstruction

I.W. Suh · S.R. Jang · S. Chanchamnan · C.H. Park · C.S. Kim 1457

Optimized Clavicle Hook Plate Geometry for Average Korean Clavicle–Acromion Dimensions: A Finite Element Analysis Study

J.H. Kim · K.R. Jeon · H.J. Jun · G.W. Son · Y.S. Ji · J.H. An · H.J. Lee · K.S. Tae 1465

Basic Research of Directed Energy Deposition for Aluminum 4043 Alloys Using Pulsed Variable Polarity Gas Metal Arc Welding

J. Jeon · H. Kim · I. Lee · J. Cho 1475

Bonding-Free Capillary Microfluidics via a 3D-Printed Railed Microchannel

W. Lee · H.J. An · D.B. Kim · H. Kim 1489

REVIEWS

Recent Applications of Fiber Bragg Grating Sensors in Humidity and Water Content Detection in Agriculture: A Comprehensive Review of Development, Challenges, and Future Trends

M.I. Abdurraheem · Y. Xiong · W. Zhang · H. Chen · H. Zhang · J. Hu 1499

A Review of Fabrication and Applications of Confined Microchannels for Cell Migration Assay

M.B. Mazalan · R. Toyohara · T. Ohashi 1525

CORRECTION

Correction: Platform Supporting Intelligent Human–Machine Interface (HMI) Applications for Smart Machine Tools

I.-H. Park · J.S. Yoon · J.H. Sohn · D.Y. Lee 1539

Further articles can be found at link.springer.com

Abstracted/Indexed in *BFI List, Baidu, CLOCKSS, CNKI, CNPIEC, Dimensions, EBSCO Discovery Service, Google Scholar, INSPEC, Japanese Science and Technology Agency (JST), Journal Citation Reports/Science Edition, Korea Citation Index (KCI), Naver, Norwegian Register for Scientific Journals and Series, OCLC WorldCat Discovery Service, Portico, ProQuest-ExLibris Primo, ProQuest-ExLibris Summon, SCImago, SCOPUS, Science Citation Index Expanded (SCIE), TD Net Discovery Service, UGC-CARE List (India), WTI AG, Wanfang*

Instructions for authors for *Int. J. Precis. Eng. Manuf.* are available at www.springer.com/12541

International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology

Volume 11 · Number 4 · July 2024

REGULAR PAPERS

Reinforcement Learning-Based Cutting Parameter Dynamic Decision Method Considering Tool Wear for a Turning Machining Process

X. Zhao · C. Li · Y. Tang · X. Li · X. Chen 1053

Material-Efficient Multimaterial Projection Micro-stereolithography Using Droplet-Based Resin Supply

J. Tobia · C. Yang · J. Kim · D. Han · H. Lee 1071

Sound-Based Depth Estimation of Glass Microchannel in Laser-Induced Backside Wet Etching Using Wavelet Transform

G.Y. Kim · D.-S. Song · K.-K. Kwon · S.-H. Ahn 1081

Physicochemical Aspects of Platinum Nanoparticles (PtNPs) from Biological Synthesis: Influence of Plant Leaf Based Extracts as the Reducing Agent

K. Ponsanti · B. Tangnorawich · S. Natphopsuk · S. Toommee · C. Pechyen 1097

Multi-objective Optimization Strategy for Continuous Drilling Parameters of Superalloys

Q. Wang · X. Chen · Q. An · M. Chen · H. Guo · Y. He 1115

Improving the Industrial Efficiency of Recycling Aluminum Alloy Chips Using Friction Stir Extrusion: Thin Wires Production Process

G. Buffa · D. Campanella · M. Adnan · U. La Commare · G. Ingarao · L. Fratini 1133

A Relationship Between Manufacturing Routes-Microstructure-Biotribology of Selective Laser Melted Stainless Steel 316L Under Dry and Simulated Body Fluid

S. Dwivedi · A.R. Dixit · A.K. Das 1147

Improving mechanical properties of FSWed AA6061-T6 joint by controlling microstructural changes through utilization of stationary shoulder tool in presence of Al₂O₃ nanoparticles and external cooling

A. Hosseini · A. Fallahi Arezoudar 1163

Reduction of Defects by Friction Stir Processing for Additively Manufactured Cast Aluminum Alloys (AlSiMg)

S. Choi · D. Shim · H. Kim 1193

Solvothermal Synthesis of PtNi Nanoparticle Thin Film Cathode with Superior Thermal Stability for Low Temperature Solid Oxide Fuel Cells

J. Shin · K. Kamlungsoa · H.-Y. Li · P.-C. Su 1207

Evaluation of Electrolyte Materials of Gd- and Ce-Doped Scandia-Stabilized Zirconia and Yb- and Bi-Doped Gadolinium-Doped Ceria for Highly Durable Solid Oxide Fuel Cells

S. Lee · K. Lee · J. Lee · J. Lee · T. Kim · J. Bae 1217

Infinity-Horizon Cost-Based Controller for Reducing Fuel Cell Degradation and Hydrogen Consumption in Fuel Cell Hybrid Electric Vehicles

J. Woo · C. Ahn 1229

High Stability in Compressive and Shear Behavior of Airless Tire Using Primitive TPMS-Based Cylindrical Spoke

H.-S. Kim · D.-Y. Kim · J.-W. Choi · S.-H. Park 1247

REVIEWS

Wavelet Packet Transform and Deep Learning-based Fusion of Audio-Visual Signals: A Novel Approach for Enhancing Laser Cleaning Effect Evaluation

H. Huang · L. Li · S. Liu · B. Hao · D. Ye 1263

Review of Laser-Induced Graphene (LIG) Produced on Eco-Friendly Substrates

H. Moon · B. Ryu 1279

Achievement of Green and Sustainable CVD Through Process, Equipment and Systematic Optimization in Semiconductor Fabrication

S.Y. Baek · J. Park · T. Koh · D. Kim · J. Woo · J. Jung · S.J. Park · C. Lee · C. Choi 1295

A Review on Triboelectric Nanogenerators, Recent Applications, and Challenges

M. Davoudi · C.-Y. An · D.-E. Kim 1317

Advancements and Challenges in the Carbon Fiber-Reinforced Polymer (CFRP) Trimming Process

J. Seo · D.C. Kim · H. Park · Y.S. Kang · H.W. Park 1341

Brittle-Ductile Transitions of Rubber Toughened Polypropylene Blends: A Review

J.-W. Wee · A. Chudnovsky · B.-H. Choi 1361

Recent Progress in Strain-Engineered Stretchable Constructs

A. Hanif · D. Yoo · D. Kim · F. Mustafayev · S. Hajiyev · D.S. Kim **1403**

CORRECTION

Correction: Achievement of Green and Sustainable CVD Through Process, Equipment and Systematic Optimization in Semiconductor Fabrication

S.Y. Baek · J. Park · T. Koh · D. Kim · J. Woo · J. Jung · S.J. Park · C. Lee · C. Choi **1435**

(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

Further articles can be found at link.springer.com

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

International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Smart Technology

Volume 2 · Number 2 · July 2024

REGULAR PAPERS

Integrating Entropy-based Data Reduction and Machine Learning in Multidisciplinary Engineering Systems for Enhanced Response Prediction

Sungkun Hwang · Eun-Ho Lee · Seung-Kyum Choi 79

A Digital Approach to via Edge Roughness Characterization and Quantification

Kuan Lu · Pengfei Lin · ChaBum Lee 93

Development of Micro Electrical Discharge Machine and Micro-hole Machining Using Multiple Micro Electrodes

Min Chul Shin · Bo Hyun Kim · Gyu Man Kim 101

Fuzzy Neural Network Control for a Reaction Force Compensation Linear Motor Motion Stage

Kyung Ho Yang · Hyeong-Joon Ahn 109

Development of a Bowden-cable-based Exoskeleton Suit for Assisting Passive Stretching Exercises in Patients with Frozen Shoulder

Haneul Jeon · Taeho Kim · Donghun Lee 115

Development of Situation Awareness Model in Robotic Spot-welding (RSW) System based on Sensor Data Visualization

Inwoong Noh · Jiho Lee · Sang Won Lee 123

Enhancing Inductive IR Thermography by Using FFT-Equalization, Motion Tracking Detection and VDSR Super-resolution Processing

Seungju Lee · Yoonjae Chung · Wontae Kim 133

REVIEW

OPC UA-based Force Control for Deep Rolling with Mechanical Tools

Berend Denkena · Henning Buhl · Jan Berlin · Oliver Maiß 143

Advancements in Energy Harvesting: Piezoelectric, Triboelectric, Pyroelectric, and Magnetolectric Technologies for Self-powered Sensor Systems

Biswajit Mahanty · Dong-Weon Lee 151

INDUSTRY CASE STUDY

Measurement-based Dynamic Modelling in Levitated Active Magnetic Bearing Systems

Brett Wallace · Matthew Nesbitt · Jihyun Lee 169

Case Study of KIMM Universal Gripper: Analysis of Commercial Industrial Gripper and Evaluation of the KIMM Universal Gripper in Industry

Sung-Hyuk Song · Yong-Sin Seo · Jae-Young Lee · Min-jun Kim 179

Hybrid Model Based Autonomous System for Controlling Double Side Grinding Process

Hong-Seok Park · Ngoc-Hien Tran 191

SHORT COMMUNICATION

Introduction of Human-in-the-Loop in Smart Manufacturing (H-SM)

Duck Bong Kim · Mahdi Sadeqi Bajestani · Ju Yeon Lee · Seung-Jun Shin · Sang Do Noh 209

2024년 사단법인 한국정밀공학회 임원

회장

민병권(연세대학교)

수석부회장

안성훈(서울대학교)

부회장

이상원(성균관대학교)

오정석(한국기계연구원)

류상문(DN솔루션즈)

김정(KAIST)

이인환(충북대학교)

박상후(부산대학교)

최영재(한국생산기술연구원)

감사

송창규(한국기계연구원)

이경창(부경대학교)

총무이사

김동성(POSTECH)

김보현(숭실대학교)

신현정(KAIST)

재무이사

김창주(한국기계연구원)

송용남(고려대학교)

정영훈(경북대학교)

편집이사

강봉철(국민대학교)

강현욱(UNIST)

고승환(서울대학교)

곽문규(경북대학교)

김규만(경북대학교)

김남근(서강대학교)

김동립(한양대학교)

김산하(KAIST)

김석민(중앙대학교)

김양진(부산대학교)

김영진(KAIST)

김종백(연세대학교)

김효영(한국공학대학교)

문두환(고려대학교)

박근(서울과학기술대학교)

박영빈(UNIST)

손정우(금오공과대학교)

안지환(POSTECH)

안형준(숭실대학교)

윤준영(연세대학교)

이광일(경일대학교)

이동원(전남대학교)

이동훈(숭실대학교)

이창우(건국대학교)

이호원(서울대학교)

장진아(POSTECH)

정구현(울산대학교)

정훈의(UNIST)

주백석(금오공과대학교)

진종한(한국표준과학연구원)

천두만(울산대학교)

추원식(경상국립대학교)

황지홍(서울과학기술대학교)

사업이사

강태준(인하대학교)

권지연(동국대학교)

김무림(한국로봇융합연구원)

김승종(고려대학교)

김진호(영남대학교)

김충수(한국생산기술연구원)

김태곤(한국생산기술연구원)

김현준(경북대학교)

박석희(부산대학교)

박용재(강원대학교)

서진호(부경대학교)

안상훈(한국기계연구원)

오기용(한양대학교)

윤주성(경남대학교)

이문규(아주대학교)

이봉기(전남대학교)

이원균(충남대학교)

이지혜(한국기계연구원)

이현섭(동아대학교)

임지석(영남대학교)

조영삼(원광대학교)

주기남(조선대학교)

최정욱(중앙대학교)

현승민(한국기계연구원)

기획홍보이사

노유정(부산대학교)

류시형(전북대학교)

이주연(서울과학기술대학교)

허세곤(한국기계연구원)

국제이사

남정수(한국생산기술연구원)

이동진(건국대학교)

전용호(아주대학교)

조영태(창원대학교)

차석원(서울대학교)

허윤정(경희대학교)

홍성태(울산대학교)

대외협력이사

권석진(한국철도기술연구원)

김경동(한국공작기계산업협회)

김종혁(㈜현대위아)

장원석(한국기계연구원)

조영환(LIG넥스원(주))

부문회장

김건희(한밭대학교)

이현욱(한국철도기술연구원)

정재일(국민대학교)

이동윤(한국생산기술연구원)

박형욱(UNIST)

이강재(DN솔루션즈)

조정대(한국기계연구원)

엄광문(건국대학교)

김호찬(안동대학교)

김영범(한양대학교)

특별회원사

다이아몬드

DN솔루션즈
(주)케이씨텍
화천기공(주)

LIG넥스원(주)
(주)키슬러코리아

(주)스맥
한국화낙(주)

신도리코(주)
현대위아(주)

(주)이수페타시스
(주)화신정공

골드

(주)마리알로
지엔피테크놀로지(주)

(주)에비던트코리아
(주)프로토텍

(주)어드밴테크코리아
헥사곤

(주)에이스나노켄

(주)엔도로보틱스

실버

(주)웨이퍼펍

한국공작기계산업협회

패밀리

(주)넥스페이스
(주)미터랩
(주)스포스
(주)이엠엘

(주)디엔디이
BIOPAC Systems KOREA
에이비씨무역
(주)캐리마

디케이에스에이치코리아(주)
(주)비솔
(주)에이엠코리아
(주)케이랩스

리파인(주)
삼성SDI
(주)에임즈
하비스탕스(주)

맥스트레이딩
(주)스팀솔루션
위즈옵틱스
한국데베소프트

Editor-in-Chief

김보현

송실대학교

bhkim@ssu.ac.kr

Editors

강성목
대구카톨릭대학교

고승환
서울대학교

곽문규
경북대학교

김동성
POSTECH

김무림
한국로봇융합연구원

김양진
부산대학교

문두환
고려대학교

박민수
서울과학기술대학교

박형욱
UNIST

손정우
금오공과대학교

송철기
경상국립대학교

안지환
POSTECH

왕덕현
경남대학교

윤성호
금오공과대학교

이종길
안동대학교

이창우
건국대학교

이창환
서울과학기술대학교

이현섭
동아대학교

정구현
울산대학교

주백석
금오공과대학교

진중환
한국표준과학연구원

천두만
울산대학교

추원식
경상국립대학교

황지홍
서울과학기술대학교

Members of Editorial Board

강봉철
국민대학교

강현욱
UNIST

김기주
동명대학교

김재열
조선대학교

김창주
한국기계연구원

박정재
한국표준과학연구원

박정환
영남대학교

배장호
경성대학교

윤해성
한국항공대학교

이광일
경일대학교

이동훈
송실대학교

이봉기
전남대학교

이호원
서울대학교

장진아
POSTECH

전용호
아주대학교

조영학
서울과학기술대학교

최동휘
경희대학교

최영만
아주대학교

최정욱
중앙대학교

최진승
건국대학교

김갑용
Iowa State Univ.

김범준
Univ. of Tokyo

김우균
Univ. of Cincinnati

민상기
Univ. of Wisconsin-Madison

Simon Park
Univ. of Calgary

Patrick Kwon
Michigan State Univ.

JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR PRECISION ENGINEERING

VOLUME 41, NUMBER 7/ July 2024

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

월간 • 제41권 제7호 [통권 제400호] • 비매품

등록일자 1987년 4월 25일

등록번호 서울 라 07037

인쇄일 2024년 6월 25일

발행일 2024년 7월 1일

발행인 민병권

편집인 김보현

인쇄 한림원

편집 한림원

발행소 사단법인 한국정밀공학회

[04508] 서울 중구 종림로 50-1(만리동 1가 51-1 SKY1004빌딩) 12층 / FAX (02)518-2937 / <http://www.kspe.or.kr>

사무국장 김영심 / (02)518-0722 / kspe@kspe.or.kr

JKSPE(한국정밀공학회), IJPEM-ST 박은희 / (02)518-2928 / paper@kspe.or.kr, ijpem.st@kspe.or.kr

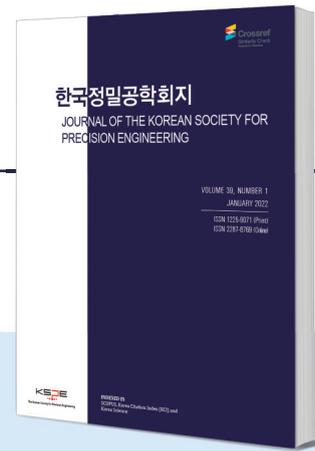
IJPEM(GT) 이성경 / (02)518-0723 / ijpem@kspe.or.kr

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

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

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

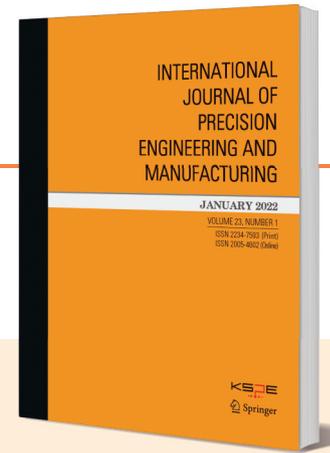
- Big Data Analytics and Informatics
- Sensors, Instrumentation and Process Monitoring
- Prognostics and Health Management (PHM)
- Industrial Internet of Things (IIOT)
- Industrial Artificial Intelligence
- Digital Twin, Cyber-Physical Systems (CPS) and Metaverse
- Augmented, Virtual and Extended Reality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

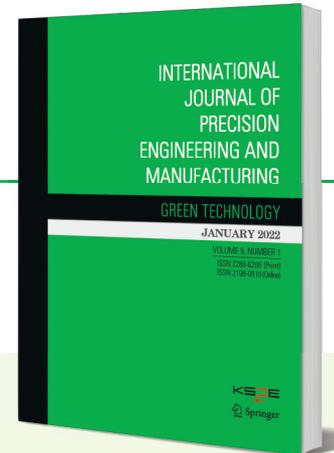
- Precision Manufacturing Processes
- Machine Tools
- Measurements and Control
- Nano/Micro Technology
- Robotics and Automation
- Bio Health
- Manufacturing Systems
- Additive Manufacturing
- Design and Materials

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

INTERNATIONAL JOURNAL OF PRECISION ENGINEERING AND MANUFACTURING GREEN TECHNOLOGY

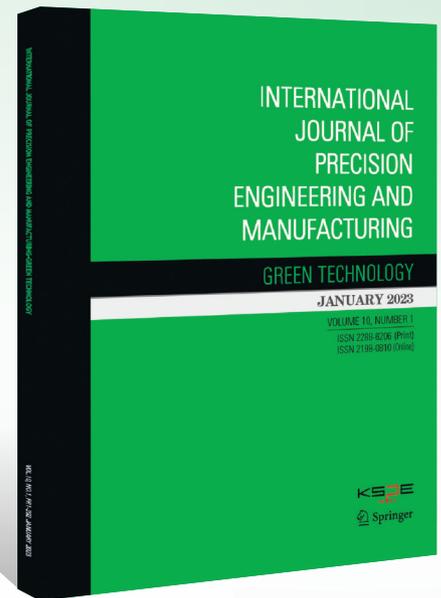
About IJPEM-GT

IJPEM-GT is co-published by the Korean Society for Precision Engineering and Springer Nature.

The journal is published bimonthly, and JCR 2023 impact factor is 5.3, which ranks it top 9.5% (17/180) journal in the category of Engineering-Mechanical and top 23.5% (16/68) journal in the category of Engineering-Manufacturing.

Impact Factor

5.3 by JCR in 2023



Topics of the Special Issue cover novel research contributions of “**Green**” precision engineering and manufacturing - theories and applications in the field of

Autonomous Manufacturing with Green Technology

The potential focus areas to be covered in this Special Issue include, but are not limited to:

- ◆ **AI-driven Process**
- ◆ **Digital Twin**
- ◆ **Automations in Green Manufacturing**
- ◆ **Environment-conscious Intelligent Manufacturing**

Guest Editors

- Professor Martin B.-G. Jun
Purdue University, USA
- Professor Young Tae Cho
Changwon National University, Korea
- Professor Sanha Kim
KAIST, Korea
- Professor Seok Kim
Changwon National University, Korea

Submission Procedures

Deadline for Submission Date:

November 30, 2024

Publication Date: **May 1, 2025**

Volume, Number: **Vol. 12, No. 3**

International Journal of Precision Engineering and Manufacturing

SMART TECHNOLOGY



IJPEM-Smart Technology (hereinafter 'IJPEM-ST') is a new-launched academic journal which will be published by the Korean Society for Precision Engineering (KSPE).

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

Aims and Scope

Under the great wave of the 4th industrial revolution, smart technology is becoming ever more important in the precision engineering and manufacturing fields. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Smart Technology (IJPEM-ST)** is a fully open access, international journal that aims to rapidly disseminate relevant fundamental and applied research works of high quality to international academic and industrial communities. **The journal's specific focus areas in the precision engineering and manufacturing fields include, but are not limited to:**

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

IJPEM-ST covers various kinds of papers:

Research papers, Short communications, Technical briefs, Position papers, Industry case studies

• Publication Date (Scheduled)

Vol. 2 No. 1 January 1, 2024

Vol. 2 No. 2 July 1, 2024

• Publication and Distribution

by the Korean Society for Precision Engineering with Open-Access

Editorial Board

Editor-in-Chief

Sang Won Lee / Sungkyunkwan University, Korea

Co-Editors-in-Chief

Jay Lee / University of Maryland, USA

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

Editors

Hyeong-Joon Ahn / Soongsil University, Korea

Hae-Jin Choi / Chung-Ang University, Korea

Chih-Hsing Chu / National Tsing Hua University, Taiwan

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

Dong Yoon Lee / Korea Institute of Industrial Technology, Korea

Seungchul Lee / POSTECH, Korea

Sangkee Min / University of Wisconsin-Madison, USA

Seung-Ki Moon / Nanyang Technological University, Singapore

Duhwan Mun / Korea University, Korea

Simon Park / University of Calgary, Canada

Editorial Board

Seung-Kyum Choi / Georgia Institute of Technology, USA

Haseung Chung / Michigan State University, USA

Youngkuk Jeong / KTH Royal Institute of Technology, Sweden

Yongho Jeon / Ajou University, Korea

Jay-I. Jeong / Kookmin University, Korea

Hyungjung Kim / Seoul National University, Korea

Yangjin Kim / Pusan National University, Korea

Jihyun Lee / University of Calgary, Canada

Wonkyun Lee / Chungnam National University, Korea

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

Joo-Sung Yoon / Kyungnam University, Korea

한국정밀공학회지(JKSPE) 투고 안내

귀 회원님의 건승을 기원합니다.

한국정밀공학회지(Journal of the Korean Society for Precision Engineering, JKSPE)는 정밀공학과 관련된 우수한 논문을 게재하고 있으며 특히 기계공학뿐만 아니라 다학제적 학문을 바탕으로 정밀공학 분야에서 새롭고 독창적인 연구결과를 소개함으로써 정밀공학의 발전에 기여하는 것을 목표로 합니다. 한국정밀공학회지(JKSPE)에 대한 투고 안내를 드리오니 적극적인 관심과 참여 부탁드립니다.



※ SCOPUS, KCI 등재 학술지
 ※ 학술대회 Full Paper 논문, 영문 논문 제출 시
 게재료 면제

한국정밀공학회지(JKSPE)

- 발행간기** 월간 (매월 1일 발행)
- 등재여부** SCOPUS, KCI 등재지
- 투고방법**
 - 온라인 투고 (<http://article.kspe.or.kr/>)
 - JKSPE 저널 홈페이지 (<http://jkspe.kspe.or.kr/>)
- 투고자격** 학회 회원
- 제출분야** 정밀가공, 정밀측정, 로봇제어자동화, 스마트생산시스템, 설계및재료, 공작기계, 나노마이크로기술, 바이오헬스, 적층제조시스템, 녹색생산기술
- 관련 상훈**
 - JKSPE Award (상장, 상금)
 - 백암논문상 (상장, 상금)
 - 학술상 (상장, 상금)

Start New Sindoh

2D를 넘어 3D 전문 기업으로
신도리코가 새로운 미래를 열어갑니다



오늘을 지키는 기술, 세상을 향한 혁신

G O F O R W A R D

F O R W O R L D

Leading Innovation Group

LIG

*SK실트론 웨이퍼에
회로 패턴이 새겨진 모습입니다

미래 세상의 판, 누가 바꿀까?

지능형 로봇
자율주행 자동차
인공위성까지

미래 세상의 판을 바꾸는 건
웨이퍼 위에서 가능한 이야기-

SK실트론의 웨이퍼에서
세계의 반도체가 태어나고
그 반도체로부터 세상이 바뀌기 때문입니다

세상의 판을 바꿉니다

2024 **KSPE 2024**
AUTUMN CONFERENCE

한국정밀공학회 추계학술대회

2024. 11. 13. Wed. -15. Fri.

경주 화백컨벤션센터(HICO)
(경북 경주시)

주요일정

200단어 초록마감 **2024. 9. 23. Mon**

초록채택통지 **2024. 10. 2. Wed**

사전등록마감 **2024. 10. 7. Mon**

논문모집분야

- 정밀가공 Precision Manufacturing Processes
- 정밀측정 Precision Measurements
- 로봇제어자동화 Robotics, Control and Automation
- 스마트생산시스템 Smart Manufacturing System
- 설계및재료 Design and Materials
- 공작기계 Machine Tools
- 나노마이크로기술 Nano/Micro Technology
- 바이오헬스 Bio Health
- 적층제조시스템 Additive Manufacturing
- 녹색생산기술 Green Manufacturing Technology

2024년 국내 / 국제학술대회 일정 안내

한국정밀공학회

2024

KSPE 2024
Spring
Conference

춘계학술대회

KSPE 한국정밀공학회
Korean Society for Precision Engineering

2024
5. 8(수) - 10(금)

라마다프라자제주호텔
(제주도 제주시)

International Conference on
*PR*recision Engineering and *S*ustainable Manufacturing

PRESM 2024

2024. 7. 7(일) - 12(금)

Paradise Busan Hotel
Busan, Korea

KSPE 한국정밀공학회
Korean Society for Precision Engineering

한국정밀공학회

2024

KSPE 2024
Autumn
Conference

추계학술대회

KSPE 한국정밀공학회
Korean Society for Precision Engineering

2024. 11. 13(수) - 15(금)

경주화백컨벤션센터(HICO)
(경상북도 경주시)



스탠다드 헥사포드 3~4개월! ^{납기}



H-811

변 위: $\pm 17 \text{ mm} / \pm 21^\circ$
 정 밀 도: $\pm 0.06 \mu\text{m}$
 속 도: 10 mm/s
 가 반 하 중: 5 kg



H-840

변 위: $\pm 50 \text{ mm} / \pm 30^\circ$
 정 밀 도: $\pm 0.1 \mu\text{m}$
 속 도: 60 mm/s
 가 반 하 중: 40 kg



H-850

변 위: $\pm 50 \text{ mm} / \pm 30^\circ$
 정 밀 도: $\pm 0.2 \mu\text{m}$
 속 도: 8 mm/s
 가 반 하 중: 250 kg

적용분야

마이크로제조, 의료, 항공 우주, 실리콘 포토닉스, 이미지 안정화, 샘플 포지셔닝, 생명과학 등

