

한국정밀공학회지

JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR
PRECISION ENGINEERING

VOLUME 40, NUMBER 10

OCTOBER 2023

ISSN 1225-9071 (Print)

ISSN 2287-8769 (Online)

Editor-in-Chief

Bo Hyun Kim
Soongsil University
bhkim@ssu.ac.kr

Editors

Jihwan An
POSTECH

Baeksuk Chu
Kumoh National Institute of Technology

Won-Shik Chu
Gyeongsang National University

Doo-Man Chun
University of Ulsan

Koo Hyun Chung
University of Ulsan

Duhwan Mun
Korea University

Jihong Hwang
Seoul National University of Science & Technology

Young Hun Jeong
Kyungpook National University

Jonghan Jin
Korea Research Institute of Standards & Science

Dong Sung Kim
POSTECH

Ho-Chan Kim
Andong National University

Yang Jin Kim
Pusan National University

Seung Hwan Ko
Seoul National University

Moonkyu Kwak
Kyungpook National University

Sung-Mook Kang
Daegu Catholic University

Changwoo Lee
Konkuk University

Chang-Whan Lee
Seoul National University of Science & Technology

Hyunseop Lee
Dong-A University

In Hwan Lee
Chungbuk National University

Hyung Wook Park
UNIST

Min Soo Park
Seoul National University of Science & Technology

Sang-Hu Park
Pusan National University

Jung Woo Sohn
Kumoh National Institute of Technology

Members of Editorial Board

Jangho Bae
Kyungsung University

Younghak Cho
Seoul National University of Science & Technology

Dongwhi Choi
Kyung Hee University

Jin-Seung Choi
Konkuk University

Jungwook Choi
Chung-Ang University

Young-Man Choi
Ajou University

Young-Kug Hwang
Chosun College of Science & Technology

Jinah Jang
POSTECH

Yongho Jeon
Ajou University

Jayil Jeong
Kookmin University

Maolin Jin
Korea Institute of Robot & Convergence

Beomjoon Kim
The University of Tokyo

Chang-Ju Kim
Korea Institute of Machinery & Materials

Gap-Yong Kim
Iowa State University

Jae-Yeol Kim
Chosun University

Kee Joo Kim
Tongmyong University

Woo Kyun Kim
University of Cincinnati

Patrick Kwon
Michigan State University

Bong-Kee Lee
Chonnam National University

Jongkil Lee
Andong National University

Kwang-II Lee
Kyungil University

Sangkee Min
University of Wisconsin-Madison

June Park
Korea Photonics Technology Institute

Jungjae Park
Korea Research Institute of Standards & Science

Jung Whan Park
Yeungnam University

Simon Park
University of Calgary

Yong Son
Korea Institute of Industrial Technology

Chul Ki Song
Gyeongsang National University

Ki-Sik Tae
Konyang University

Duck Hyun Wang
Kyungnam University

Hae-Sung Yoon
Korea Aerospace University

Sung Ho Yoon
Kumoh National Institute of Technology

JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR PRECISION ENGINEERING

VOLUME 40, NUMBER 10 / October 2023

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

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

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

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

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

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

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

Published on October 1, 2023 (Monthly)

Published by The Korean Society for Precision Engineering

Publisher Seok-Woo Lee (President, KSPE)

Managing Editor Bo Hyun Kim

Manuscript Editor Su-Hyun Kang

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

Printed by Hanrimwon Co., Ltd.

Copyright © The Korean Society for Precision Engineering

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

목차

특 집 주제: DX시대의 제조기술, 적층제조!
책임편집인 : 김호찬(안동대학교)

771 고온 하이브리드 클래딩 공정을 이용한 금속 적층품의 물성제어 특성 연구
조영관, 박상후

781 적층제조 공정으로 제작된 소프트 그리퍼의 성능특성
정우진, 박채영, 신종호, 이인환

787 직접에너지적층 공정을 이용한 폐쇄형 알루미늄 폼 제작에 관한 연구
김화정, 심도식

797 형상기억 고분자의 회전형 적층제조를 통한 이중 변형 혈관 스텐트 제작
김유석, 이승문, 박석희

805 적층제조를 통해 제작된 다양한 격자구조의 실험적 결과와 AEH (Asymptotic Expansion Homogenization) 해석
결과의 비교
리고베르토, 김민수, 조영삼

813 복합 열처리 공정을 통한 금속 나노 섬유 네트워크 기반의 투명 전극 제작
김나경, 김소은, 임도연, 홍승미, 안태창, 김건휘

일 반

821 18650 리튬이온 배터리의 열남용 조건으로 유도된 열폭주 특성
김정명, 박희성

829 강관의 고주파 저항용접에서 내로우갭 주위의 전자기장 및 온도분포 해석
양영수, 배강열

839 표면 코팅을 통한 소다라임 유리의 가공성 향상
김지환, 윤병호, 권석범, 민상기, 윤해성

847 전압 범위에 따른 활성화 영향성 평가
김정수, 유효준, 전지웅, 송동근, 권예림, 이영조, 홍승혁, 이수민, 금다혜, 조구영

JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR PRECISION ENGINEERING

VOLUME 40, NUMBER 10 / October 2023

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

CONTENTS

SPECIAL **Title: Additive Manufacturing, The Technology of the DX era!**
Guest Editor: Hochan Kim (Andong University)

- 771 Study on Controlling Material Properties of Cladded Layers Using High Temperature and Hybrid Cladding Process
Yeong Kwan Jo and Sang Hu Park
- 781 Performance Characteristics of a Soft Gripper Fabricated by Additive Manufacturing Process
Woojin Jeong, Chae Young Park, Jongho Shin, and In Hwan Lee
- 787 Study on Fabrication of Closed-cell Aluminum Foam Using Directed Energy Deposition
Hwa-Jeong Kim and Do-Sik Shim
- 797 Fabrication of Dual-morphing Vascular Stents Using Additive-lathe Printing of Shape Memory Polymers
Yuseok Kim, Seung Mun Lee, and Suk-Hee Park
- 805 A Comparative Analysis of AEH (Asymptotic Expansion Homogenization) Results and Experimental Findings of Various Additive Manufactured Lattice Structures
Rigoberto Lopez Reyes, Min-Soo Ghim, and Young-Sam Cho
- 813 Fabrication of Transparent Electrode based on Metallic Nanofiber Network via Combined Heat Treatment
Na Kyoung Kim, So Eun Kim, Doyeon Im, Seung Mi Hong, Taechang An, and Geon Hwee Kim

REGULAR

- 821 Thermal Runaway Characteristics Induced by Heat Abuse Conditions in 18650 Li-ion Batteries
Jungmyung Kim and Heesung Park
- 829 Analysis of Electromagnetic Field and Temperature Distribution around Narrow Gap in High-frequency Resistance Welding of Steel Pipe
Young Soo Yang and Kang Yul Bae
- 839 Machinability Improvements of Soda-lime Glass Using Various Surface Coatings
Ji Hwan Kim, Byoung Ho Yun, Suk Bum Kwon, Sangkee Min, and Hae-Sung Yoon
- 847 Evaluate the Activation Effect according to the Voltage Range
Jung Soo Kim, Ho Jun Yoo, Ji Woong Jeon, Dong Kun Song, Ye Rim Kwon, Young Jo Lee, Seung Hyeok Hong, Su Min Lee, Da Hye Geum, and Gu Young Cho

책임편집인
김호찬
안동대학교



DX시대의 제조기술, 적층제조!

Additive Manufacturing, The Technology of the DX era!

- (1) 고온 하이브리드 클래딩 공정을 이용한 금속 적층제조제품의 물성제어 연구
- (2) 적층제조 공정으로 제작된 소프트 그리퍼의 성능특성
- (3) 직접에너지적층 공정을 이용한 폐쇄형 알루미늄 폼 제작에 관한 연구
- (4) 형상기억 고분자의 회전형 적층제조를 통한 이중 변형 혈관 스텐트 제작
- (5) 여러 셀룰러 구조에 대한 AEH (Asymptotic Expansion Homogenization) 분석 및 적층 제조를 통한 제작
- (6) 복합 열처리 공정을 통한 금속 나노 섬유 네트워크 기반의 투명 전극 제작

디지털 변혁(DX; Digital Transformation, 이하 DX)은 연구소나 기업 등의 산업 주체가 디지털 기술을 적극적으로 도입하여 비즈니스 모델, 프로세스, 제품 및 서비스를 혁신하고 개선하는 전략적인 노력을 뜻한다. 이것은 단순히 디지털 기술을 도입하는 것을 넘어, 조직 전체의 기술적 문화적 체계의 변화를 포함하는 개념이다. 이러한 DX는 디지털 데이터를 이용해 고객의 요구를 중심으로 연결성을 확장하고 조직을 변화하여 경쟁력을 강화하고자 하는 비즈니스 모델의 혁신을 이루는 산업의 생존과 발전을 위한 필수적 전략이 되어 가고 있다. DX의 핵심 기술요소는 데이터, 자동화, 로봇, 적층제조, IOT, AI 등이 거론된다. 이들 가운데 적층제조 기술은 디지털 데이터를 실제 세상의 제품으로 전환해주는 역할을 하고 있는 매우 핵심적인 역할이다.

적층제조 기술은 디지털화된 제품의 외형정보를 담고 있는 CAD 데이터를 참조하여 재료를 소량씩 쌓아 마침내 실제 물체를 생성하는 디지털 정보의 실물화(Digital to Real)를 이룰 수 있는 기술로 DX 기술이 산업적 효용을 갖추게 하는 핵심적인 기술이다. 이는 생산에 있어서 완전 자동화가 가능하면서도 디지털 데이터를 이용하므로 개인화 및 맞춤화가 디지털 데이터의 조작을 통해서 가능하며, 기존의 기술들에 비해 매우 고속의 실물화가 가능하며, 다양한 소재를 활용할 수 있고, 자재의 낭비를 줄이고 생산프로세스를 효율화함으로써 지속가능한 제조가 가능하게 하는 기술이다.

이번 특집에서는 DX의 시대에 적층제조 기술의 연구진들이 디지털 데이터를 적용하고 활용하는 다양한 사례를 살펴보아, 이러한 노력들이 미래의 산업과 기술의 발전에 어떻게 작용할지 유추해 볼 수 있는 기회를 제공하고자 한다. 특집호가 다루는 적층제조에 있어서의 DX의 사례는 하이브리드 클래딩 공정에서의 물성제어 기술, 소프트그리퍼의 제조와 성능 특성 향상, 적층에 의한 알루미늄 폼의 제조를 통한 경량화와 강성개선, 이중 변형이 가능한 혈관 스텐트의 제작, 셀룰러 구조에 대한 분석 기술 및 금속나노 기반의 투명전극의 제작에 대한 연구이다. 이들 기술들은 적층제조 분야의 연구에 있어서 실험이나 증명에 필요한 정보를 디지털화하고 이들을 생성하거나 수집 및 처리하고 있으며, 이를 바탕으로 하여 제품의 성능이나 효율 또는 품질을 향상하고 있다. 또한 이러한 기술적 발전의 근간에 디지털화된 자료의 생성, 수집, 처리가 동반되고 있으며, 결과적으로는 디지털화된 제품의 형상, 품질, 성능 데이터를 바탕으로 고품위의 실물을 제작해내는 DX의 핵심기술로 활용되고 있음을 보이고 있으므로 독자들에게 DX와 적층제조에 관한 인사이트를 제공하기 바란다. 끝으로, 특집논문 발간에 도움을 주신 적층제조시스템 부문의 이인환 전 부문의장님과 좋은 내용으로 논문을 준비해 주신 저자분께 감사드린다.

• 특집 • DX시대의 제조기술, 적층제조!

고온 하이브리드 클래딩 공정을 이용한 금속 적층품의 물성제어 특성 연구

Study on Controlling Material Properties of Cladded Layers Using High Temperature and Hybrid Cladding Process

조영관¹, 박상후^{2,#}
Yeong Kwan Jo¹ and Sang Hu Park^{2,#}

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

² 부산대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Pusan University)

Corresponding Author / E-mail: sanghu@pusan.ac.kr, TEL: +82-51-510-1011

ORCID: 0000-0002-7053-1515

KEYWORDS: High temperature hybrid cladding (고온 하이브리드 클래딩), Cladding (클래딩), Direct energy deposition (직접 에너지 적층), Ultrasonic nanocrystal surface modification (초음파 나노표면개질), Internal mechanical properties (내부 기계적 특성)

A hybrid cladding technology was developed by combining direct energy deposition (DED) and ultrasonic nanocrystal surface modification (UNSM). This is an effective process to control the mechanical properties inside the metal-clad layer, but the scope to improve the internal properties is low. Therefore, in this study, the UNSM process was applied while heating at 300 and 600°C to increase the effectiveness of this hybrid additive process. To validate the characteristics of this method, a study on the cross-sectional properties upon application of heating was conducted. Hybrid cladding at 300 degrees produced improvements- over a 40% larger area than the results at room temperature. At 600 degrees, the hybrid cladding improved mechanical properties over a larger area by nearly 2 times. In this study, the characteristics of the room-temperature and the high-temperature hybrid cladding process were analyzed. The proposed method shows a high improvement effect and is a promising method to improve the internal mechanical properties of the cladded layer.

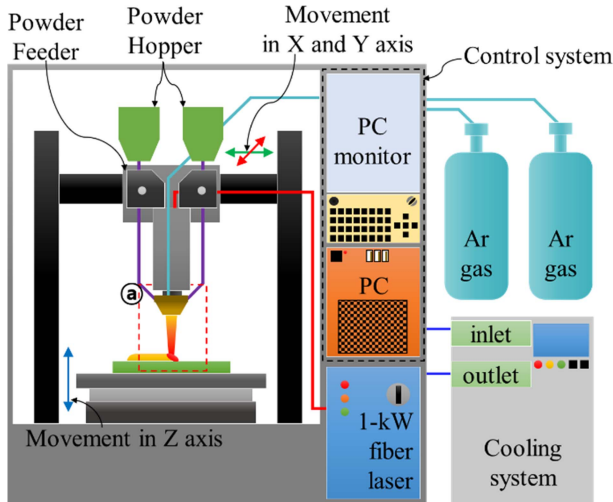
Manuscript received: June 22, 2023 / Revised: July 29, 2023 / Accepted: July 31, 2023

1. 서론

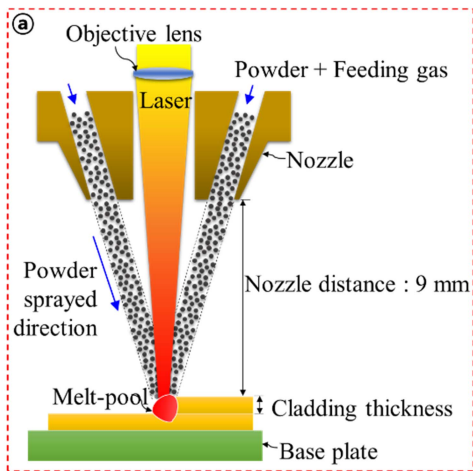
금속 제품의 마모 특성의 개선은 냉간 및 열간 프레스 금형 [1] 또는 가스 터빈[2] 및 연소 엔진[3]과 같은 에너지 장비를 사용하는 수많은 분야에서 주요 관심사이다. 고온 열화는 소재의 기계적 및 물리적 특성을 저하시켜 다양한 시스템 문제를 야기한다. 따라서 인코넬 합금 또는 세라믹 기반 소재로 제품을 만들거나 클래딩 방식을 사용하여 고온 마모 특성을 개선하기 위한 연구가 진행되고 있다[4]. 선행 연구에 따르면, 인코넬 소재는 다른 금속에 비해 내열성과 내마모성이 우수하여 고온 기계 부품에 많이 활용되고 있다. 최근에는 직접 에너지 적층(Direct

Energy Deposition, DED) [4-6]과 같은 적층 기술을 활용하여 복잡한 형상을 가진 표면에도 클래딩 공정을 적용할 수 있게 되었다.

고온 마모 특성을 향상시키기 위해 하이브리드 클래딩 공법이 지속적으로 연구되고 있다. 레이저 기반 클래딩 및 표면 처리 공정과 결합된 하이브리드 클래딩 공정은 항공우주, 자동차, 조선, 중장비 등 다양한 산업 분야에서 더 높은 효율, 향상된 표면 품질, 비용 절감을 필요로 한다[7-9]. 또한 고출력 레이저와 같은 첨단 레이저 기술의 발전으로 다양한 응용 분야와 산업에서 레이저 기반 클래딩 및 표면 처리 공정을 사용할 수 있게 되었다[10-12]. 전반적으로 레이저 기반 클래딩 및 표면 처리 공정의



(a)



(b)

Fig. 1 (a) Schematic diagram of laser cladding process, (b) a is schematic diagram of the cladding mechanism

혼합 공정 시장의 추세는 더 높은 효율성, 향상된 표면 품질 및 비용 절감에 대한 요구로 인해 통합 및 다기능 표면을 증가시키는 방향으로 나아가고 있다.

이전 연구에서는 기계적 특성을 개선하기 위한 하이브리드 클래딩 공정의 후처리 기술로 가공[13-15], 재용융[16-18], 피닝 [19-21], 초음파 나노결정 표면 개질(Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification, UNSM) [22-28]을 포함한 물리적 표면 처리 작업이 활용되었다. 이 물리적 표면 처리 방법은 환경 친화적이며 다른 방법보다 빠릅니다. 하이브리드 클래딩 공정에 적용된 UNSM 공정에 대한 선행 연구에는 다음과 같은 후처리 공정이 포함된다[25]. Kim 등은 적층된 M4 소재에 UNSM 공정을 적용하여 표면 거칠기가 88.3%, 내마모성이 85.7% 개선되었다[22]. Yu 등은 회주철 소재를 DED 공정으로 복원한 후 UNSM 공정으로 표면 내마모성을 개선했다. 그 결과 마모율이 거의 0%에 가까웠다[23]. 그 외에도 다양한 피닝 공정과 혼합하여

기계적 특성 개선을 한 많은 연구가 있다. 그러나 대부분의 조사는 클래딩 층의 기계적 경도 또는 강도를 증가시켜 표면 마모를 방지하기 위해 UNSM 및 레이저 샷 피닝과 같은 표면 처리 기술을 포함했다[24-28].

따라서 우리는 고온 마모 특성을 극대화하기 위해 내부 및 외부 내마모성을 높이기 위해 UNSM과 클래딩 공정을 결합한 하이브리드 클래딩 공정이라는 새로운 적층 접근법을 제안한다. 이러한 기본 개념을 바탕으로 깊이에 상관없이 내부 기계적 물성을 향상시킬 수 있는 적층 방법을 개발하고자 했다. 특히 고온에서의 내마모성을 향상시키기 위한 하이브리드 클래딩 방식의 타당성을 조사했다.

2. 소재 및 실험방법

2.1 실험 소재 및 하이브리드 클래딩 장비

본 연구에서는 $100 \times 50 \times 10$ mm SUS316 기판을 사용했으며, 표면을 에탄올로 초음파 세척하여 남아있는 불순물을 제거했다. 클래딩 공정에 사용된 시중에서 판매되는 인코넬 718 분말 입자는 구형이며 크기는 50-150 μm 이다. 파우더는 산화를 방지하기 위해 사용하지 않는 동안 진공 건조기에 보관했다.

DED 장비 기반 클래딩 모듈의 모식도를 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1(a)에 나타내었듯이 1 kW 디스크 레이저(RFL-C1000, Raycus, China)를 사용하며 3축 CNC로 구성된다. 분말 공급 가스로는 산화를 방지하기 위해 Ar 가스를 사용했다. 또한 제어 시스템이 탑재된 PC, 레이저에서 발생하는 열을 줄이기 위한 냉각 시스템, 분말을 저장하는 분말 호퍼, 분말을 이송하는 분말 공급기 등이 포함되어 있다. Figs. 1(b)는 1(a)의 a 부분을 확대하여 DED 공정의 메커니즘을 나타낸 모식도이다. 4개의 파우더 분사 장치를 통해 파우더가 사방으로 분사되고, 대물렌즈를 통해 파이버 레이저가 집속되어 조사된다. 그 다음 집속된 레이저에 의해 모재와 파우더가 녹아 상온에서 급속 냉각되어 평균 0.25mm의 클래딩 두께가 생성된다.

초음파 나노 결정 표면 개질법(UNSM, Design Mecha, South Korea)의 개략도를 Fig. 2(a)에 나타냈다. UNSM 공정은 최대 20 kHz의 초음파 진동에 기반한 동적 하중과 무게 추를 이용한 정적 하중을 받는 금속 혼으로 대상 표면을 1,000-10,000회/ mm^2 로 타격하여 국부적인 소성 및 탄성 변형을 일으킨다. 또한 결정립 미세화 과정에서 상당한 잔류 압축 응력이 발생한다. 이 처리 후에는 처리된 표면의 강도와 경도가 크게 증가한다. UNSM 공정은 초음파 발생기, 정하중을 가하는 무게 추, 진폭을 증폭하는 증폭기 등으로 구성되어 있다. 그리고 고온 하이브리드 클래딩 공정을 위해 가열 베드, 온도 컨트롤러, 열전대를 통합했다. 본 장비의 온도 컨트롤러를 통하여 열전대가 감지한 온도를 이용하여 가열 베드의 온도를 일정하게 유지할 수 있다. 그리고 Figs. 2(b)는 2(a)의 b 부분을 확대하여 UNSM 메커니즘을 나타낸 모식도이다. 초음파 진동 에너지로 증폭된 초음파를

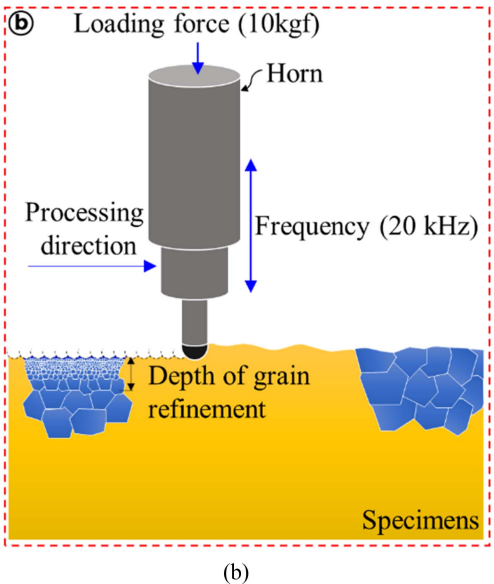
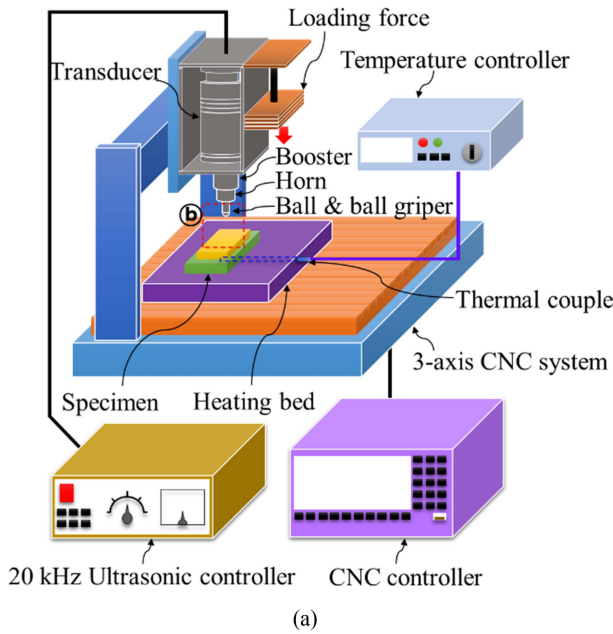


Fig. 2 (a) Schematic diagram of ultrasonic nanocrystal surface modification (UNSM) for surface treatment, (b) schematic diagram of the UNSM process mechanism

손실 없이 전달하는 혼과 직경 2.4 mm의 텅스텐 카바이드 볼 팁이 타겟 표면을 타격한다. 타격을 입은 부분은 결정립 미세화를 나타내게 되어 강도 및 경도 향상, 압축잔류응력 발생 등의 효과를 확보할 수 있다.

2.2 실험 방법

하이브리드 클래딩 공정을 위한 클래딩 공정과 UNSM 공정의 공정조건을 선정했다. 클래딩 공정은 기본적으로 UNSM 처리 후 클래딩 공정을 적용하였을 때, 표면처리 효과가 남아있는 공정조건을 선정했다. 레이저 출력 350 W, 파우더 공급 속도 10 g/min, 가스 유량 3 L/min, 스캔 속도 800 mm/min으로 선정했다.

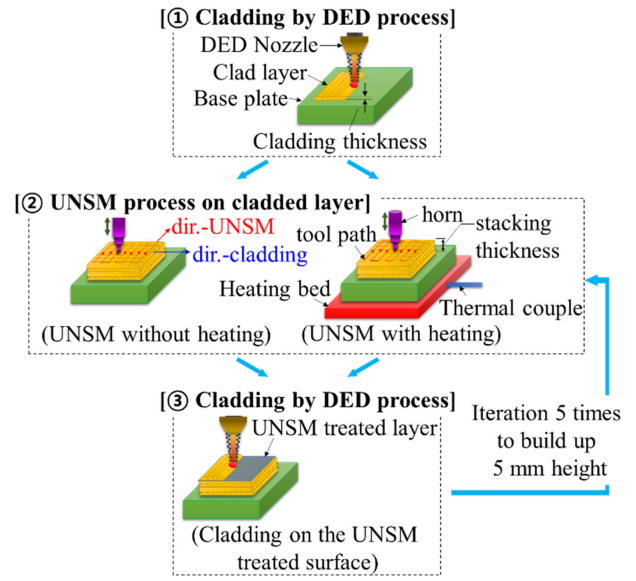


Fig. 3 Schematic diagram of the cladding method for the hybrid cladding process. Repeat the process in step 3 to create specimens of the desired thickness

그리고 UNSM 공정의 공정 조건은 하중 15 kgf, 이송 속도 800 mm/min, 주파수 20 kHz, 간격 0.05 mm로 결정했다[29].

하이브리드 클래딩 공정 절차는 Fig. 3에 나타났다. 이 공정은 기본적으로 DED 공정과 UNSM 공정의 반복으로 구성된다. 먼저 Fig. 3의 1과 같이 DED 공정을 통해 1.0 mm 두께의 클래딩부를 형성했다. 이후 2와 같이 클래딩부의 표면에 클래딩 방향과 수직 방향으로 UNSM 표면 처리를 수행했다. 가열 베드의 적용에 따라 하이브리드 클래딩 공정을 적용했으며, 이 공정으로 약 1.0 mm의 두께로 만들었다. 그리고 가열 베드를 통하여 시험편을 가열한 온도는 300과 600°C의 온도를 적용했다. 그리고 3과 같이 UNSM 처리된 표면에 다시 한번 DED 공정을 이용한 클래딩부를 1.0 mm로 제작했다. 위의 2와 3을 반복하여 제조를 했으며, 이 반복과정을 통하여 하이브리드 클래딩부를 5.0 mm의 두께를 가질 때까지 반복하여 제작했다.

3. 결과 및 토의

3.1 경도 측정 결과

하이브리드 클래딩 공법 후 경도 시험 결과를 Fig. 4에 나타났다. 경도 측정은 마이크로 경도 측정 장비(HM-112, Mituyoto, Japan)를 사용하여 하이브리드 클래딩 공정으로 제작된 시험편의 경도를 0.1 kgf의 힘을 가하여 A-A' 단면에서 테스트했다. Fig. 4(a)는 상온에서 하이브리드 클래딩의 경도 테스트 결과를, Fig. 4(b)는 300°C에서 가열한 하이브리드 클래딩의 경도 테스트 결과를 나타낸다. 그리고 Fig. 4(c)는 600°C에서 가열한 하이브리드 클래딩의 경도 시험 결과를 나타냅니다.

Fig. 4(a)에 표시된 상온에서의 하이브리드 클래딩의 경우,

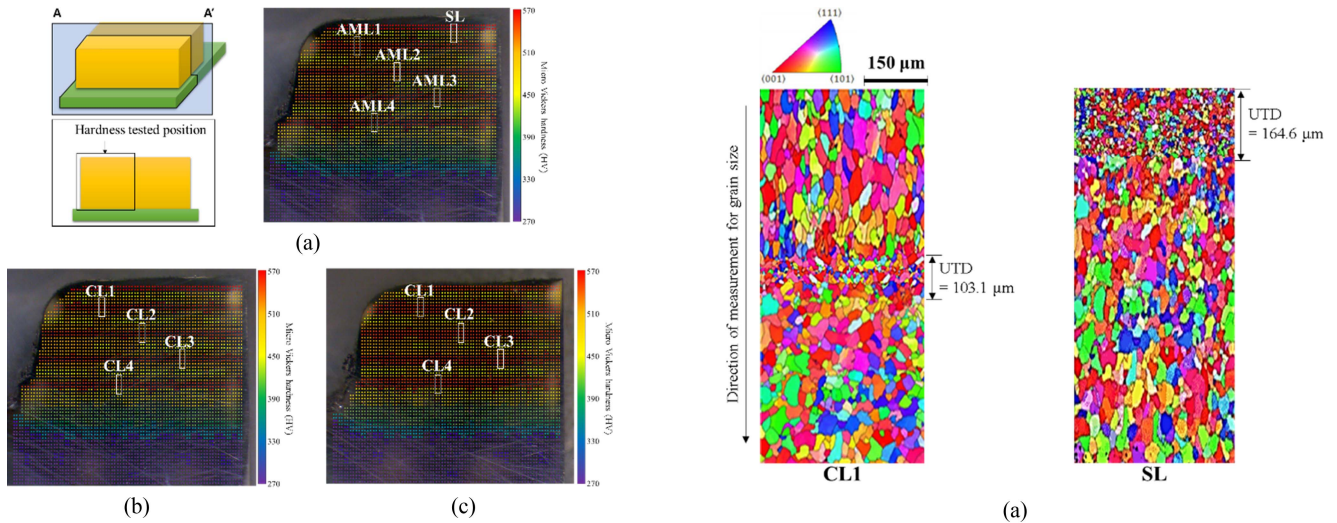


Fig. 4 Mapping of hardness data for hybrid cladding process under (a) Room temperature (RT), (b) 300°C and (c) 600°C

클래딩 된 전체 섹션의 평균 경도는 518 Hv인 반면, UNSM 처리된 층의 평균 경도는 565.75 Hv였다. 또한 Fig. 4(b)와 같이 300°C에서 가열한 하이브리드 클래딩 공정의 경우, 전체 하이브리드 클래딩 영역의 평균 경도는 568.0 Hv입니다. 600°C에서 가열된 하이브리드 클래딩의 경우, Fig. 4(c)와 같이 전체 하이브리드 클래딩 영역의 평균 경도는 523 Hv이고, UNSM 처리된 층의 평균 경도는 570.50 Hv이다.

일반적으로 제조품의 내부에서 경도의 급격한 변화가 있는 경우에는 응력집중이 발생할 수 있으며, 이는 클래딩 공정을 수행하는데 박리현상이나 내부 결함의 발생으로 연결될 수 있다. 본 연구에서는 이러한 결함의 발생을 줄일 수 있는 공정조건의 선정으로 문제 발생을 최소화했다.

이러한 경도 테스트 결과를 통해 몇 가지 중요한 점을 확인할 수 있다. 첫째, 하이브리드 클래딩 공정이 수행된 두 공정 모두에서 UNSM 공정으로 인해 경도가 증가된 층이 생성된 것으로 확인되었다. 이는 상위 층의 클래딩 부분이 클래딩된 후에도 UNSM 공정의 결정립 미세화 부분이 지속된다는 것을 나타낸다. 또한, 이러한 이유로 내마모성 시험을 수행하면 UNSM으로 처리된 영역이 향상된 내마모성을 나타낼 것으로 예상된다. 또한 하이브리드 클래딩을 적용하면 클래딩만을 사용하여 클래딩한 시험편보다 경도가 더욱 우수하다. 이는 UNSM 공정이 적용된 층의 입자가 미세화되면서 경도와 내마모성이 향상되기 때문으로 판단된다. 마지막으로 가열한 하이브리드 클래딩은 다른 두 가지 방법보다 더 높은 경도를 나타냈다. 이러한 효과는 금속이 열을 받으면 부드러워지는 성질에 기인할 것으로 판단된다[30]. 따라서 가열 공정을 적용한 하이브리드 클래딩 공정이 내마모성을 가장 크게 향상시킬 수 있을 것으로 예상된다.

3.2 조직학적 분석

조직학적 분석을 위하여 후방산란전자 회절패턴 분석

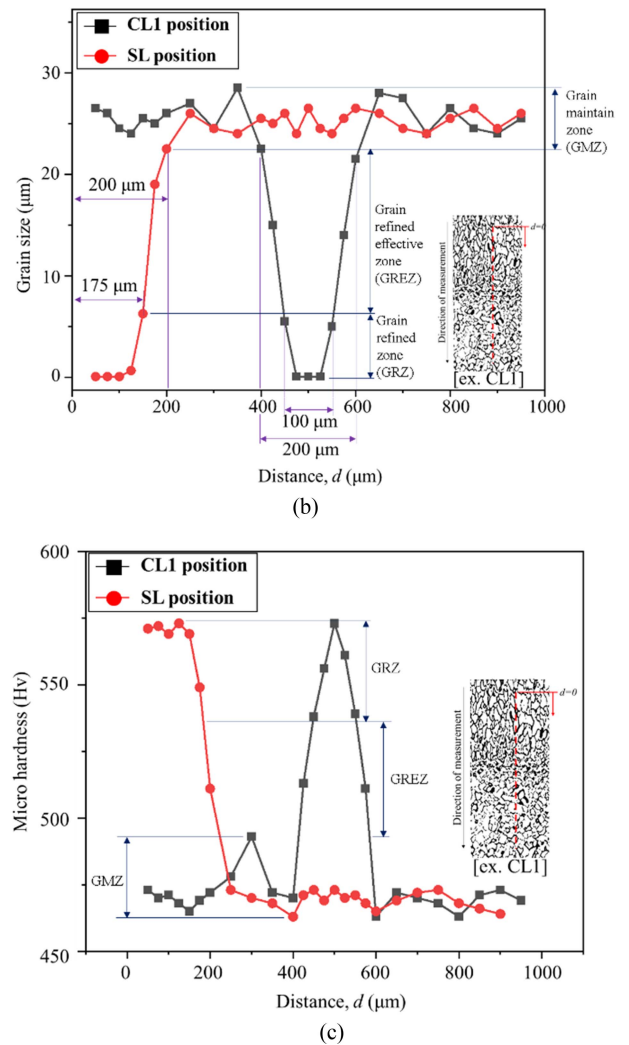


Fig. 5 Comparison of (a) EBSD image; (b) distribution of grain size; and (c) distribution of hardness; of surface layer (SL) and inner clad layer (CL) by hybrid cladding under RT

(Electron Backscatter Diffraction, EBSD)을 사용했으며, EBSD 측정을 위하여 측정을 위한 5 × 5 × 10 mm의 크기로 제작했으며,

측정 정밀도 확보를 위해 마운팅 및 폴리싱을 수행하여 매끄러운 표면으로 만들었다. 본 연구에서는 EBSD 측정을 위하여 실시간 방출형 주사현미경 장비(JSM7200F, JEOL Ltd., Japan)를 사용하여 측정을 했다.

가장 먼저 상온에서의 내부 및 표면 처리가 다른 UNSM의 특성을 비교하기 위해 EBSD 이미지, 입자 크기 분포 및 경도 분포 그래프를 Fig. 5에 표시했다. Fig. 5(a)에서는 EBSD 측정 결과를 나타냈다. Fig. 4(a)에도 표시된 클래딩 후 가장 표면에 UNSM 처리가 된 표면층(Surface Layer, SL)은 약 164.6 μm 의 UTD가 관찰되었고, 하이브리드 클래딩 된 내부에 UNSM을 처리한 클래딩 층(Cladded Layer, CL)의 경우 103.1 μm 의 UTD가 관찰되었다. Fig. 5(b)에 나타난 입자 크기 분포를 나타냈다. 이 분포에서 10 μm 이하의 크기를 가지는 영역을 결정립 미세화 영역(Grain Refined Zone, GRZ)으로 확인되었으며, 결정립 크기가 10 μm 이상이면서 미세화 되지 않은 결정립보다 작은 크기를 가지는 영역을 결정립 미세화 유효 영역(Grain Refined Effected Zone, GREZ)으로 구분했다. 이를 통하여 CL과 SL의 각 영역의 깊이를 확인했으며, CL의 경우 GRZ의 깊이가 약 100 μm , GREZ의 깊이가 약 200 μm 을 나타냈다. 그리고 SL의 경우 GRZ의 깊이가 175 μm , GREZ의 깊이가 200 μm 로 나타났다. 이 두 결과를 통하여 SL의 GRZ의 깊이가 CL보다 깊게 나타난다는 것을 알 수 있다. 마지막으로 Fig. 5(c)는 깊이방향의 경도 측정 결과를 나타낸 것으로, SL의 경우 약 175 μm 깊이에서 경도가 급격히 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한 최대 경도는 두 위치에서 유사한 값을 나타냈다. 이러한 결과를 통해 CL에서 UNSM 처리 후 결정립 미세화 된 표면 위에 클래딩 공정을 적용하면서 재용융으로 인해 열영향을 받아 결정립 미세화 깊이가 감소한 것으로 판단된다.

Figure 6에는 상온 하이브리드 클래딩에 따른 CL1부터 CL4까지의 EBSD 이미지, 결정립 크기 분포 및 경도 분포 결과를 나타냈다. Fig. 6(a)는 EBSD 이미지 측정 결과이며, CL의 평균 깊이는 약 98.5 μm 로 나타났다. CL1은 103.1 μm , CL2는 103.7 μm , CL3은 98.5 μm , CL4는 88.5 μm 의 UTD를 나타냈다. CL1에서 CL4로 깊어질수록 UTD가 감소하는 것을 볼 수 있는데, 하이브리드 클래딩을 적용할수록 지속적인 열로 인해 결정립 미세화 효과가 줄어들기 때문으로 볼 수 있다. Fig. 6(b)에서 볼 수 있듯이 모든 층(CL1-CL4)의 GRZ에서 약 100 μm 의 깊이로 결정립 미세화가 관찰되었다. GREZ의 깊이 또한 약 200 μm 로 확인되었다. Figs. 6(c)는 경도 분포를 나타낸 것으로, 6(b)와 유사한 결과를 보였다. 최대 경도는 565.75 Hv로 확인되었다.

Fig. 7에는 300°C에서 하이브리드 클래딩 공정에 대한 EBSD 측정 결과, 결정립 크기 분포 및 경도 분포가 나타났다. Fig. 7(a)에서는 EBSD 측정 결과를 기반으로 각 층의 UTD 값을 비교했다. CL1은 156.2 μm , CL2는 142.3 μm , CL3은 135.4 μm , CL4는 128.5 μm 의 UTD를 나타내었으며 평균 결정립 크기는 약 140 μm 였다. 이 결과는 모재와 가까운 위치일수록 UTD가 작아진다는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 Fig. 7(b)에서 볼 수

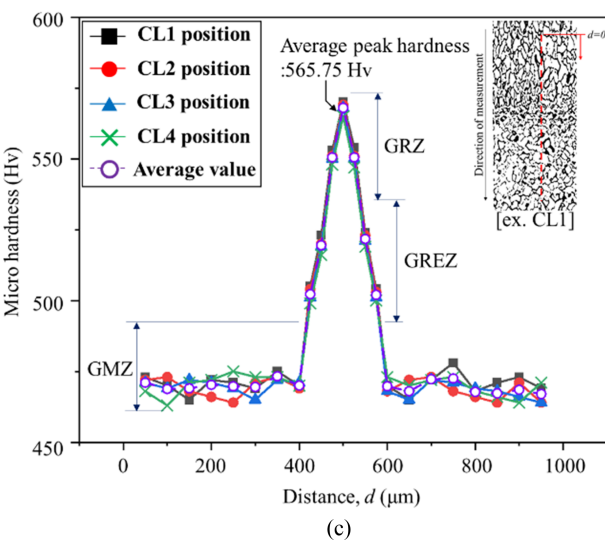
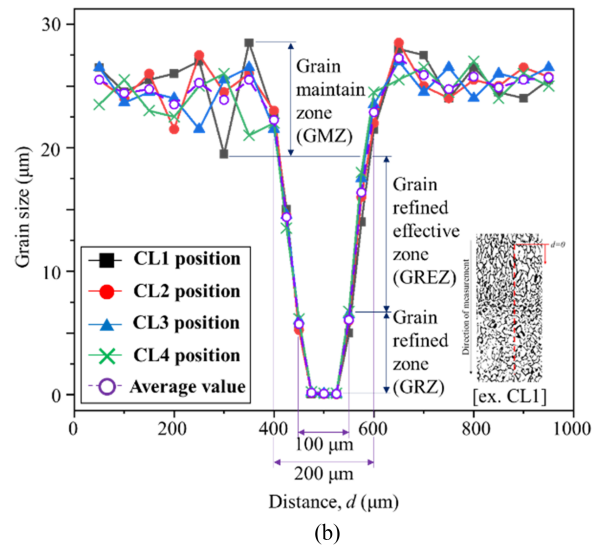
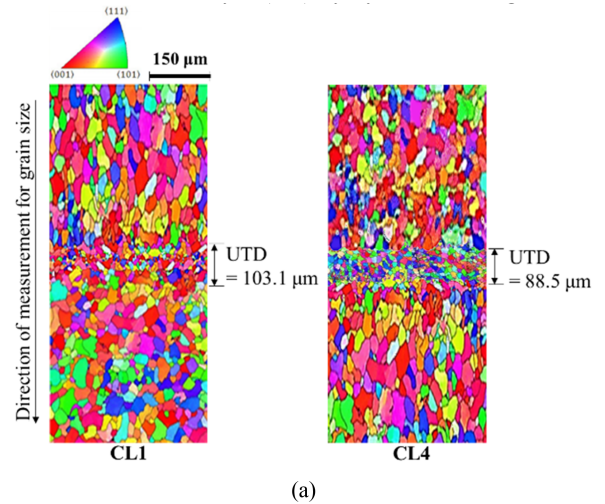
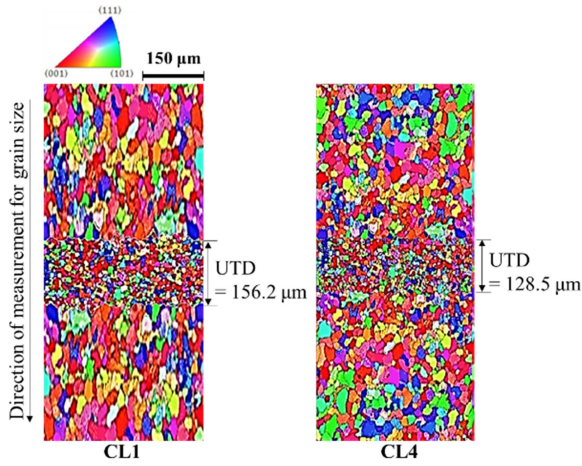
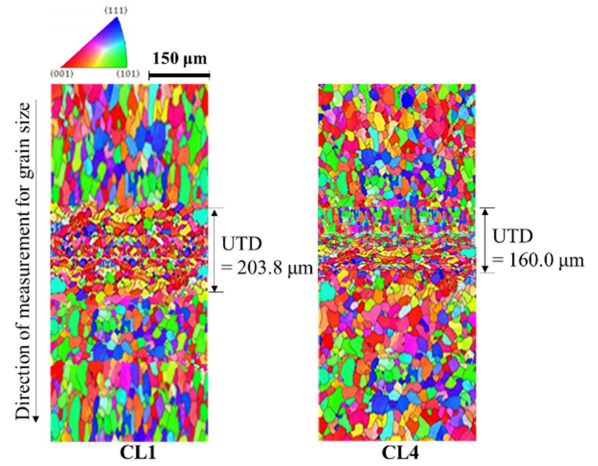


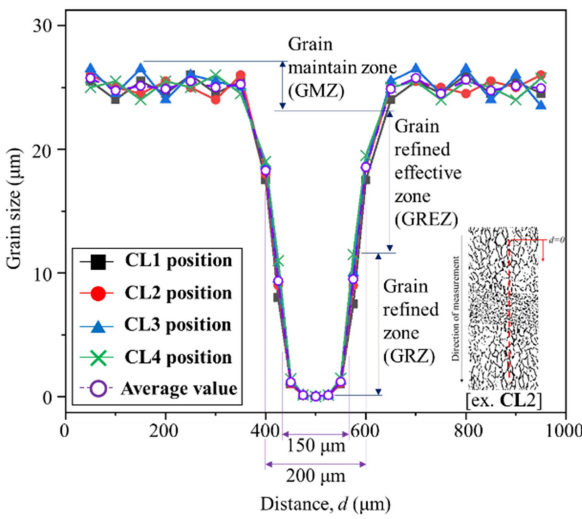
Fig. 6 Comparison of (a) EBSD images, (b) grain size distribution, and (c) hardness distribution of cladded layer (CL1-CL4) by hybrid cladding under RT. The UNSM treated depth (UTD) of the cladded layers was found to be around 98.45 μm on average



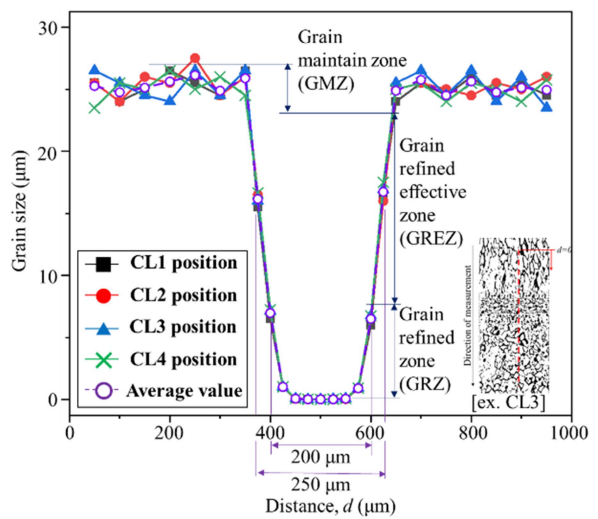
(a)



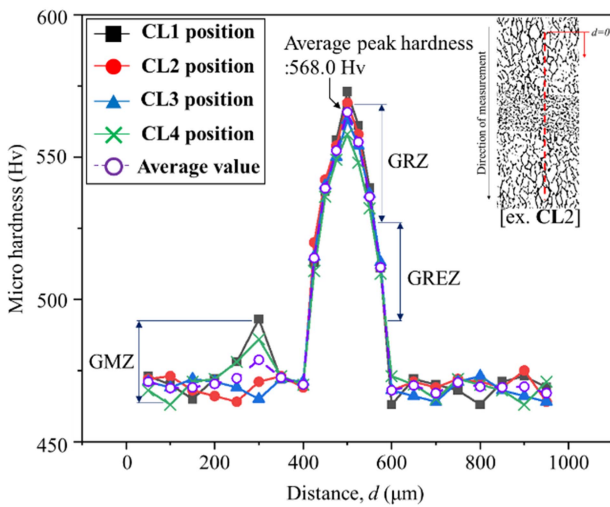
(a)



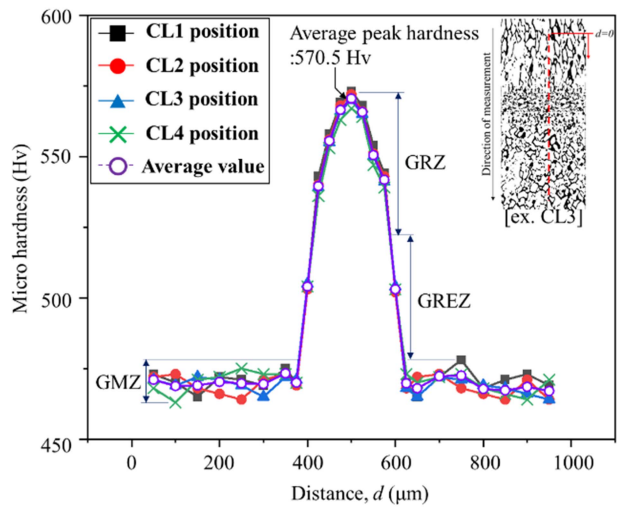
(b)



(b)



(c)



(c)

Fig. 7 Analysis of (a) EBSD images, (b) grain size distribution, and (c) hardness distribution of cladded layer (CL1-CL4) by hybrid cladding under 300°C. The UTD of the cladded layers was found to be approximately 140 μm on average

Fig. 8 Analysis of (a) EBSD images, (b) grain size distribution, and (c) hardness distribution of cladded layer (CL1-CL4) by hybrid cladding at 600°C. The UTD of the cladded layers was found to be about 182 μm on average

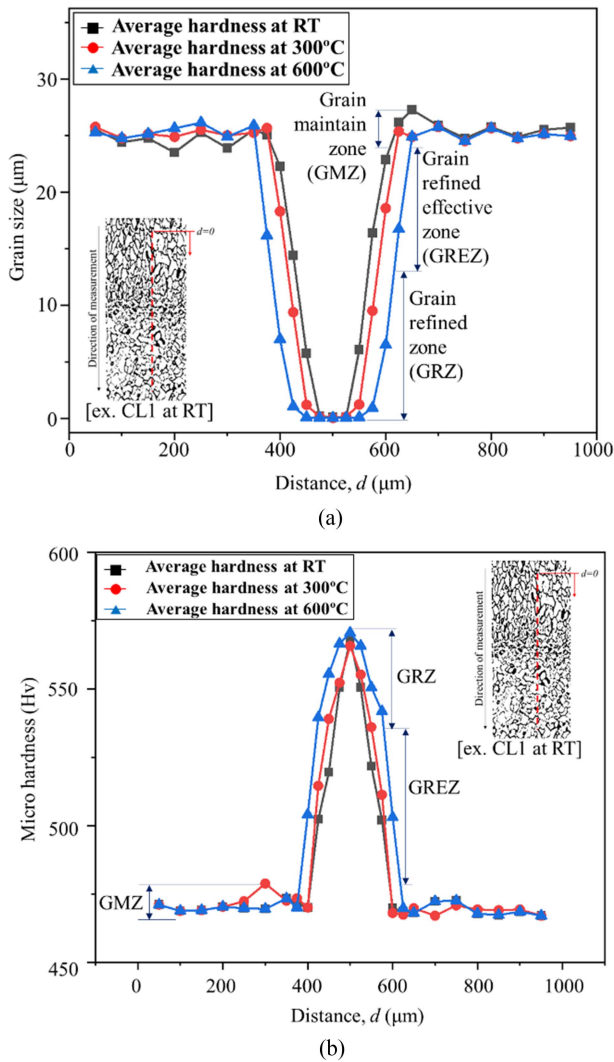


Fig. 9 Graph comparing the average values of (a) grain size, (b) microhardness as a function of heating for the hybrid cladding process

있듯이, 모든 위치에서 GRZ는 약 150 μm로 결정립 미세화가 관찰되었으며, GREZ의 깊이는 약 200 μm로 확인되었다. 또한 Fig. 7(c)에 경도 분포를 나타내었는데, 가장 평균 결정립 크기가 가장 작은 위치에서 568.0 Hv의 최대 경도를 나타냈다.

마지막으로 Fig. 8은 600°C에서 하이브리드 클래딩 공정에 대한 EBSD 측정 결과, 결정립 크기 분포, 경도 분포를 나타낸 것이다. Fig. 8(a)은 EBSD 측정 결과를 나타내었으며, 각 층의 UTD를 비교했다. CL1부터 CL4까지의 UTD는 각각 203.8 μm, 187.7 μm, 176.2 μm, 그리고 160.0 μm로 나타났으며, 전체 평균 결정립 크기는 약 180 μm였다. 그리고 Fig. 8(b)는 결정립 크기 분포를 나타낸 것으로, 모든 CL의 위치에서 GRZ는 약 200 μm의 결정립 미세화가 관찰되었으며, GREZ의 깊이는 250 μm로 확인되었다. 또한, Fig. 8(c)는 경도 분포를 나타내었으며, 가장 결정립 미세화 효과가 큰 위치에서 570.5 Hv의 최대 경도를 나타냈다.

또한, Fig. 8(c)는 경도 분포를 나타냈으며, 가장 결정립 미세

화 효과가 큰 위치에서 570.5 Hv의 최대 경도를 나타냈다. 각 결과에서 UTD는 CL1에서 CL4로 감소하는데, 이는 열누적에 의한 것으로 판단된다. CL4가 가장 깊은 위치에 있고 기본 재료에 가장 가깝기 때문에 그 위에 클래딩 공정을 적용하면서 열을 지속적으로 받기 때문이다. 이 결과를 통하여 고온 UNSM 공정의 적용을 통하여 더 깊은 효과를 확보할 수 있기 때문에 하이브리드 클래딩 공정에서 고온 UNSM 공정을 통해 내마모성의 높은 개선 효과를 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

공정에 따른 결정립 크기 분포와 경도 분포를 비교한 그래프는 Fig. 9에 나와 있다. Fig. 9(a)에는 결정립 크기를 나타내었으며, 300°C의 온도에서는 입자 미세화 효과가 크지 않았으나, 600°C의 온도에서 하이브리드 클래딩을 수행하면 그 효과가 급격히 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한 공정에 따른 경도의 변화는 Fig. 9(b)에 나타났다. 그리고 GRZ의 경도 분포 차이는 600°C에서 다른 두 공정보다 훨씬 더 넓게 분포되어 있다. 이러한 결과를 통해 하이브리드 클래딩 공정은 600°C의 온도에서 효과적인 공정이라는 결론을 내릴 수 있다.

4. 결론

금속 제품의 내마모성을 극대화하기 위해 금속 클래딩과 UNSM 처리를 반복하여 내부 기계적 특성을 향상시킬 수 있는 하이브리드 클래딩 공정을 설명한다. 300°C와 600°C에서 하이브리드 클래딩 공정의 효과를 평가하기 위해 EBSD 이미지를 사용하여 미세 구조 변화를 연구하고 단면의 경도를 측정했다. 그 결과 상온과 300°C에서 하이브리드 클래딩 공정의 적용은 미약한 개선이 나타났고, 600°C에서 하이브리드 클래딩 공정에서 급격한 개선이 관찰됐다.

또한 하이브리드 클래딩 공정을 사용하여 결정립 미세화가 발생한 깊이를 측정하였을 때, 그 깊이는 상온에서 표면처리를 적용한 경우보다 600°C에서 수행한 경우에 약 2배 가까이 나타났다. 이는 내마모성의 향상에 직접적인 영향을 미칠 수 있다는 것을 의미한다. 또한 이러한 결과는 고온 환경에서 UNSM 처리를 하면서 연해진 금속표면에 타격을 주어 그 효과가 더 크게 나타난 것으로 판단된다. 하이브리드 클래딩 공정의 적용과 기초 연구를 통해 UNSM 표면 처리 층의 존재를 입증했으며, 이를 통하여 기계적 특성의 향상에 큰 도움이 될 것이라고 판단했다.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (No. 2019R1A5A808320112) and Korea Basic Science Institute (National Research Facilities and Equipment Center) grant funded by the Ministry of Education (No. 2021R1A6C101A449).

REFERENCES

1. Stott, F., (2002), High-temperature sliding wear of metals, *Tribology International*, 35(8), 489-495.
2. Pauzi, A. A., Ghazali, M. J., W. Zamri, W. F. H., Rajabi, A., (2020), Wear characteristics of superalloy and hardface coatings in gas turbine applications—a review, *Metals*, 10(9), 1171.
3. Dudás, A., Laki, G., Nagy, A. L., Zsoldos, I., Hanula, B., Bartel, D., (2022), Wear behaviour of ceramic particle reinforced atmospheric plasma spray coatings on the cylinder running surface of internal combustion engines, *Wear*, 502, 204373.
4. Evangeline, A., Sathiya, P., (2019), Structure–property relationships of Inconel 625 cladding on AISI 316L substrate produced by hot wire (HW) TIG metal deposition technique, *Materials Research Express*, 6(10), 106539.
5. Torres, H., Rojacz, H., Čoga, L., Kalin, M., Ripoll, M. R., (2020), Local mechanical and frictional properties of Ag/MoS₂-doped self-lubricating Ni-based laser claddings and resulting high temperature vacuum performance, *Materials & Design*, 186, 108296.
6. Zhang, T., Jiang, F., Huang, H., Lu, J., Wu, Y., Jiang, Z., Xu, X., (2021), Towards understanding the brittle–ductile transition in the extreme manufacturing, *International Journal of Extreme Manufacturing*, 3(2), 022001.
7. Liu, H., Liu, J., Chen, P., Yang, H., (2019), Microstructure and high temperature wear behaviour of in-situ TiC reinforced AlCoCrFeNi-based high-entropy alloy composite coatings fabricated by laser cladding, *Optics & Laser Technology*, 118, 140-150.
8. Pole, M., Sadeghilaridjani, M., Shittu, J., Ayyagari, A., Mukherjee, S., (2020), High temperature wear behavior of refractory high entropy alloys based on 4-5-6 elemental palette, *Journal of Alloys and Compounds*, 843, 156004.
9. Wang, G., Zhang, J., Shu, R., Yang, S., (2019), High temperature wear resistance and thermal fatigue behavior of Stellite-6/WC coatings produced by laser cladding with Co-coated WC powder, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 81, 63-70.
10. Teixeira, M. F., Pacheco, J. T., da Silva, L. J., Rabelo, A., Pereira, M., Niño, C. E., (2021), Wear resistance of a Metco 1030A hard coating deposited on Hadfield steel by laser cladding for ore comminution application, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 112, 1873-1884.
11. Wei, C., Zhang, Z., Cheng, D., Sun, Z., Zhu, M., Li, L., (2020), An overview of laser-based multiple metallic material additive manufacturing: From macro-to micro-scales, *International Journal of Extreme Manufacturing*, 3(1), 012003.
12. Wang, R., Xu, S., Yue, Y., Wang, X., (2020), Thermal behavior of materials in laser-assisted extreme manufacturing: Raman-based novel characterization, *International Journal of Extreme Manufacturing*, 2(3), 032004.
13. Wang, J., Liu, S., Xu, B., Zhang, J., Sun, M., Li, D., (2021), Research progress on preparation technology of oxide dispersion strengthened steel for nuclear energy, *International Journal of Extreme Manufacturing*, 3(3), 032001.
14. Kranz, J., Herzog, D., Emmelmann, C., (2015), Design guidelines for laser additive manufacturing of lightweight structures in TiAl6V4, *Journal of Laser Applications*, 27(S1), S14001.
15. Careri, F., Imbrogno, S., Umbrello, D., Attallah, M. M., Outeiro, J., Batista, A. C., (2021), Machining and heat treatment as post-processing strategies for Ni-superalloys structures fabricated using direct energy deposition, *Journal of Manufacturing Processes*, 61, 236-244.
16. Kapil, S., Legesse, F., Negi, S., Karunakaran, K., Bag, S., (2020), Hybrid layered manufacturing of a bimetallic injection mold of P20 tool steel and mild steel with conformal cooling channels, *Progress in Additive Manufacturing*, 5, 183-198.
17. dos Santos Paes, L. E., Pereira, M., Xavier, F. A., Weingaertner, W. L., Vilarinho, L. O., (2022), Lack of fusion mitigation in directed energy deposition with laser (DED-L) additive manufacturing through laser remelting, *Journal of Manufacturing Processes*, 73, 67-77.
18. Cho, S. Y., Shin, G. Y., Shim, D. S., (2021), Effect of laser remelting on the surface characteristics of 316L stainless steel fabricated via directed energy deposition, *Journal of Materials Research and Technology*, 15, 5814-5832.
19. Meng, L., Zeng, X., Hou, K., Hu, Q., Wang, D., (2019), Effect of laser cladding and laser-induction hybrid cladding coatings on the bending properties and fracture behavior of rails, *Surface and Coatings Technology*, 374, 1038-1050.
20. Lu, H., Xue, K., Xu, X., Luo, K., Xing, F., Yao, J., Lu, J., (2021), Effects of laser shock peening on microstructural evolution and wear property of laser hybrid remanufactured Ni25/Fe104 coating on H13 tool steel, *Journal of Materials Processing Technology*, 291, 117016.
21. Wang, Y., Shi, J., (2019), Microstructure and properties of Inconel 718 fabricated by directed energy deposition with in-situ ultrasonic impact peening, *Metallurgical and Materials Transactions B*, 50, 2815-2827.
22. Zhang, X., Li, D., Geng, J., (2021), An approach to reduce stress and defects: a hybrid process of laser cladding deposition and shot peening, *Rapid Prototyping Journal*, 27(9), 1609-1616.
23. Yu, J.-H., Lee, K. Y., Shim, D.-S., Park, S.-H., (2019), Metal embedding and ultrasonic nanocrystal surface modification technology for super wear-resistant mechanical parts, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 101, 951-962.
24. Kim, M.-S., Jo, Y.-K., Park, S.-H., Shim, D.-S., (2019), Application of ultrasonic nanocrystal surface modification for improving surface profile of DEDed AISI 316L, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 33, 5659-5667.

25. Kim, C., Park, S., Pyoun, Y., Shim, D., (2021), Effects of ultrasonic nanocrystal surface modification on mechanical properties of AISI D2 steel, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 22(7), 1271-1284.
26. Jo, Y.-K., Gil, Y.-W., Shim, D.-S., Pyun, Y.-S., Park, S.-H., (2021), Control of Local Hardness Gradient of Metal Surface by Inclined Surface Treatment Using Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 8, 533-546.
27. Chang, S., Pyun, Y.-S., Amanov, A., (2015), Wear and chattering characteristics of rail materials by ultrasonic nanocrystal surface modification, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 16, 2403-2410.
28. Yeo, I., Bae, S., Amanov, A., Jeong, S., (2021), Effect of laser shock peening on properties of heat-treated Ti-6Al-4V manufactured by laser powder bed fusion, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 8, 1137-1150.
29. Jo, Y.-K., Song, D.-B., Choi, J.-S., Suh, J., Kahhal, P., Park, S.-H., (2023), Higher wear-resistant surfacing at high temperatures using a hybrid cladding process, *Materials & Design*, 225, 111553.
30. Sui, S., Li, Z., Zhong, C., Zhang, Q., Gasser, A., Chen, J., Chew, Y., Bi, G., (2021), Laves phase tuning for enhancing high temperature mechanical property improvement in laser directed energy deposited Inconel 718, *Composites Part B: Engineering*, 215, 108819.

**Yeong Kwan Jo**

He is a Ph.D. candidate in the School of Mechanical Engineering at Pusan National University. His research topics are development of cladding process and its application to surface mechanical characteristics.

E-mail: a01056057898@pusan.ac.kr

**Sang Hu Park**

He is a Professor in the School of Mechanical Engineering at Pusan National University. His research fields are additive manufacturing, sheet metal forming, and nanofabrication.

E-mail: sanghu@pusan.ac.kr

• 특집 • DX시대의 제조기술, 적층제조!

적층제조 공정으로 제작된 소프트 그리퍼의 성능특성

Performance Characteristics of a Soft Gripper Fabricated by Additive Manufacturing Process

정우진¹, 박채영², 신종호², 이인환^{2,#}

Woojin Jeong¹, Chae Young Park², Jongho Shin², and In Hwan Lee^{2,#}

¹ 충북대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Chungbuk National University)

² 충북대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Chungbuk National University)

Corresponding Author / E-mail: anxanx@chungbuk.ac.kr, TEL: +82-43-261-3161

ORCID: 0000-0001-9381-4908

KEYWORDS: Additive manufacturing (적층제조), Soft gripper (소프트 그리퍼), Thermoplastic polyurethane (열가소성 폴리우레탄)

Soft robots, known for their flexible and gentle movements, have gained prominence in precision tasks and handling delicate objects. Most soft grippers developed thus far have relied on molding processes using high-elasticity rubber, which requires additional molds to produce new shapes, limiting design flexibility. To address this constraint, we present a novel approach of fabricating pneumatic soft grippers using thermoplastic polyurethanes (TPU) through the Fused Filament Fabrication (FFF) technique. The FFF technique enables the creation of various gripper shapes without the need for additional molds, allowing for enhanced design freedom. The soft grippers were designed to respond to applied air pressure, enabling controlled bending actions. To evaluate their performance, we conducted quantitative measurements of the gripper's shape deformation under different air pressure conditions. Moreover, force measurements were performed during gripper operation by varying the applied air pressure and adjusting the mounting angle. The results of this study provide valuable insights into the design and control of soft grippers fabricated using TPU and the FFF process. This approach offers promising opportunities for employing soft robots in various fields and paves the way for further advancements in robotics technology.

Manuscript received: July 28, 2023 / Revised: August 11, 2023 / Accepted: August 23, 2023

1. 서론

로봇기술은 여러 분야에서 사용되고 있으며, 최근에는 하드 로봇과 소프트 로봇으로 세분화되어 발전하고 있다. 일반적으로 산업용 로봇은 하드 로봇으로 분류되며 금속과 같은 단단한 소재로 된 구조물을 모터 등으로 구동시킨다. 이러한 특성에 하드 로봇은 강성이 강하거나 딱딱한 물체를 잡거나 이송하기 쉽다. 하지만 깨지기 쉽거나 부드러운 물체를 잡거나 이송시킬 수 있도록 제어하기 위해서는 복잡한 제어가 필요하다.

한편, 깨지기 쉽거나 부드러운 물체에 대해서는 부드러운

재료로 구조물이 만들어지는 소프트 로봇을 적용하고자 하는 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 소프트 로봇은 하드 로봇과 달리 고무나 폴리머같은 소재로 이루어져 있기 때문에 유연하고 부드러운 움직임이 가능하다. 높은 정밀도뿐만 아니라 복잡한 작업이 요구되는 로봇에 그 수요가 증가하고 있다[1].

한편, 물체를 잡는 동작을 구현하기 위해 현재까지 개발된 소프트 로봇의 대부분은 탄성이 높은 고무 등의 재료를 금형을 이용하여 형상을 만드는 것이 대부분이다[2,3]. 따라서 동일한 형상의 대량생산이 요구되는 경우에는 매우 경제적이지만 새로운 형상을 제작하기 위해서는 각각에 따른 금형이 별도로 제작되어야

한다. 하지만 이를 적층제조[4] 공정으로 제작한다면 별도의 금형이 필요없이 다양한 형상의 소프트 그리퍼를 제작할 수 있을 것으로 기대된다.

소프트 그리퍼가 대상물을 잡는 힘이나 변형량을 제어하는 데에는 와이어나 공압이 많이 사용된다[1,5]. 그 중 공압을 이용하는 소프트 그리퍼는 공기의 압력이 전달되는 통로가 있고 여기에 압력을 인가하면 형상의 일부가 팽창하여 전체 형상이 변형되기 때문에 비교적 낮은 공기 압력과 재료의 작은 변형으로도 빠른 형상 변경이 가능하다. 특히 소프트 로봇을 이용하여 크기가 작거나 높은 취성을 갖는 대상을 다루기 위해서는 가해지는 공압에 따른 소프트 그리퍼의 형상 변형 및 물체에 가해지는 힘을 알고 있을 필요가 있다.

이에 본 연구에서는 적층제조 공정 중 열 가소성 플라스틱을 재료로 하는 재료압출 공정에 해당하는 FFF (Fused filament Fabrication) 기술을 이용하여 상대적으로 부드러운 저렴한 재료인 TPU (Thermoplastic Polyurethanes)로 소프트 그리퍼를 설계 및 제작하였다. 제작된 소프트 그리퍼는 공압에 의해서 구부러지는 동작을 하도록 설계되었으며 이의 성능 평가를 위해 가해지는 공압에 따른 소프트 그리퍼의 형상 변화를 정량적으로 측정하였다. 또한 소프트 가해지는 공압에 따라 소프트 그리퍼가 발휘할 수 있는 힘을 정량적으로 측정하였다.

2. 소프트 그리퍼의 제작

기존 연구를 통해서 적층 공정을 이용해 쉽게 형상을 제작할 수 있으면서 적층 공정에서 지지대가 필요 없는 소프트 그리퍼의 구조를 제안한 바 있다[6]. 또한 기존에 제안한 소프트 그리퍼보다 안정적으로 성형이 가능하면서 제작시간이 단축된 개선된 소프트 그리퍼를 설계하고 이를 TPU를 재료로 제작하는 것을 제시하였다[7].

본 연구에서는 이상과 같은 기존 연구를 바탕으로 제작된 소프트 그리퍼의 성능평가를 수행하였다. 즉, 기존 연구에서 개발된 것과 동일한 소프트 그리퍼를 FFF 방식의 적층제조 장치 (Fine Bot Co., FB-9600)을 이용하여 TPU (Cubicon Co.)로 제작하였다. 그리고 제작된 소프트 그리퍼에 가해지는 공압 변화에 따른 형상 변화뿐만 아니라 이 때 소프트 그리퍼가 대상물에 가해주는 힘 또한 측정하였다. Fig. 1은 본 연구에 사용된 소프트 그리퍼의 구조를 및 단면을 나타낸 개략도이다.

3. 압력에 따른 소프트 그리퍼의 형상 변화

본 연구에서는 소프트 그리퍼에 가해지는 공압의 변화에 따른 형상 변화를 측정하기 위해 Fig. 2와 같은 소프트 그리퍼 형상 변화 측정 시스템을 구성하고 이를 이용하였다. 즉, 시스템의 상단에 고정된 머신 비전 카메라(HIKROBOT Co., MV-CA050-

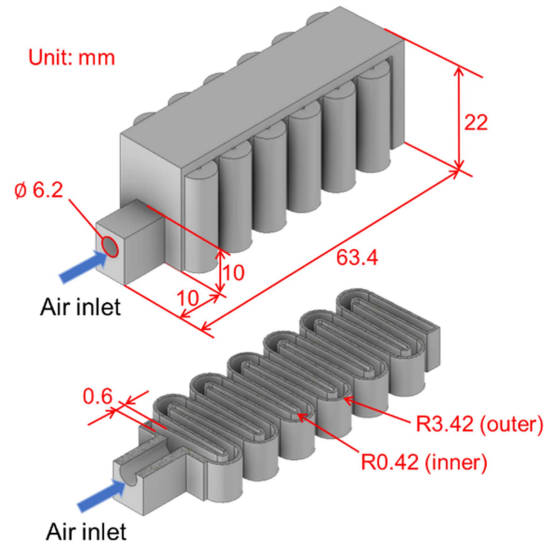


Fig. 1 Schematic drawing of developed soft gripper

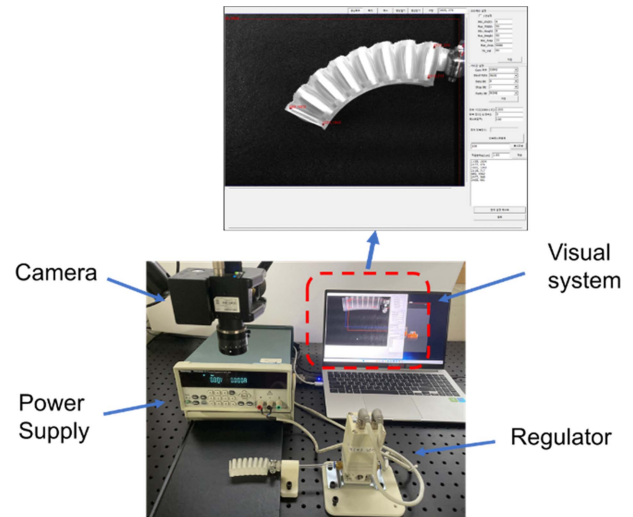


Fig. 2 Experimental set-up for deformation inspection under applied air pressure

20GM)로 그 아래에 놓인 소프트 그리퍼의 형상을 촬영하였다. 그리고 공압을 레귤레이터(SMC Co., ITV2050-RC28L)를 통해서 일정한 압력이 유지되도록 한 후 소프트 그리퍼에 가해지도록 하였다. 소프트 그리퍼의 고정부와 머신 비전 시스템은 광학 테이블 위에 설치하였다. 한편, 머신 비전 카메라에서 측정된 소프트 그리퍼의 형상은 자체적으로 개발한 측정 소프트웨어를 통해서 실시간으로 관측 및 측정이 가능하도록 하였다.

본 연구에 사용된 측정 소프트웨어는 머신 비전 카메라에서 촬영된 특정 위치의 색 차이를 이용하여 소프트 그리퍼의 형상 좌표를 얻을 수 있도록 되어 있다. 따라서 공압에 따른 소프트 그리퍼의 형상 변화 측정을 위해 동일한 크기의 점을 소프트 그리퍼의 특정 위치에 표기한 후 실시간으로 그 위치를 기록하였고 이를 이용해서 소프트 그리퍼가 구부러지는 각도를 측정하였다. 즉, 그림 3과 같이 소프트 그리퍼에 점 A, B, C, D를 각각

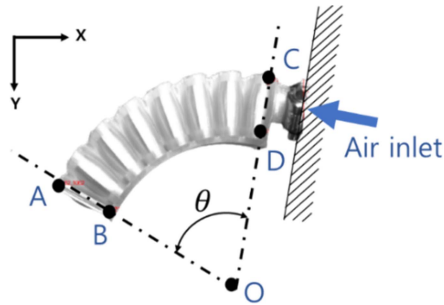


Fig. 3 Definition of deflection angle θ

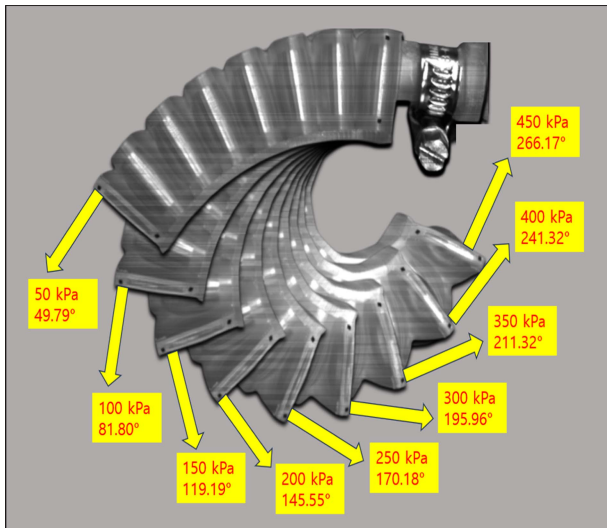


Fig. 4 Overlapped photograph of soft gripper deflection by applied pressure

표기하였다. 이 때 점 C와 D 고정되어 있기 때문에 공압에 의해서 소프트 그리퍼가 변형되면 점 A와 B의 좌표가 변하게 된다. 각 측정 위치에서 점 AB를 잇는 직선과 고정된 점 CD를 잇는 직선의 사이각 θ 를 구하여 이를 굽힘 각도로 정의하였다. 따라서 공압에 의해 소프트 그리퍼가 변형되면 굽힘 각도가 점 점 커지게 된다.

이상의 방법으로 가해지는 공압에 따른 소프트 그리퍼의 변형을 측정하였다. 즉, 예비실험 결과 소프트 그리퍼가 손상되지 않고 변형되는 범위인 0 kPa에서 450 kPa까지 압력을 50 kPa씩 증가시키면서 각 공압에 따른 굽힘 각도를 측정하였다. Fig. 4는 각 공압에 따른 소프트 그리퍼의 변형을 촬영한 후 이를 중첩한 것으로서, 개발된 소프트 그리퍼는 가해지는 공압이 증가함에 따라서 굽힘 각도가 점차 증가함을 알 수 있다.

Fig. 5는 소프트 그리퍼에 가해지는 각 공압에 따른 굽힘 각도 3회 측정 후 그 평균값들을 그래프로 나타낸 것이다. 공압 변화에 따라 소프트 그리퍼의 굽힘 각도는 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 따라서 소프트 그리퍼에 가해지는 공압을 통해서 변형을 예측하는 것이 가능하다. 한편 최대 공압 450 kPa 일 때 굽힘 각도는 266.17°로 매우 큰 값을 보인다.

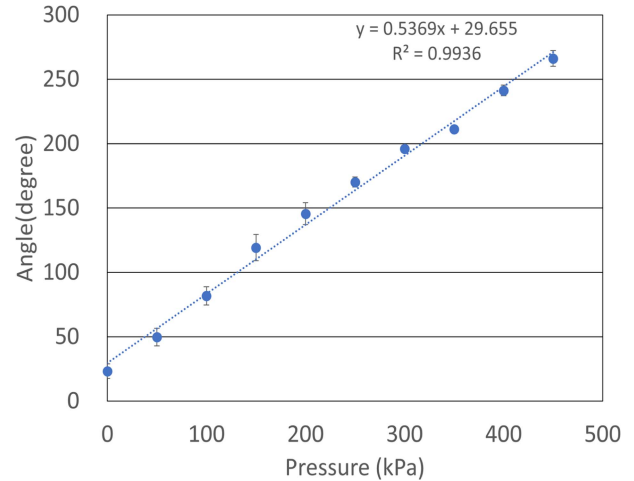


Fig. 5 Measurement results of soft gripper deflection angle for applied pressure

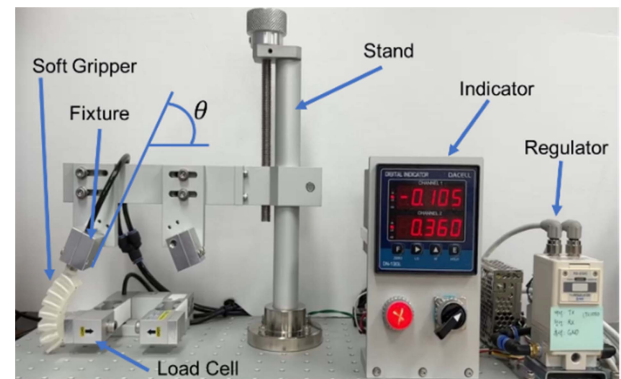


Fig. 6 Experimental set-up for force measurement of soft gripper

따라서 본 연구에서 적층제조 공정으로 제작된 소프트 그리퍼는 매우 큰 굽힘 각도 범위에서 동작이 가능하기 때문에 다양한 형상과 크기를 가진 물체를 다루는 것이 가능할 것으로 기대된다.

4. 소프트 그리퍼 형상 변화에 따른 작동력

제작된 소프트 그리퍼는 공압에 의해서 변형되며, 이 때 소프트 그리퍼가 다루게 되는 물체에 가해지는 힘인 작동력이 서로 다를 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이를 측정하기 위한 시스템을 Fig. 6과 같이 구성하였다. 소프트 그리퍼의 고정부를 지지할 수 있으면서 입구 부분에서 공기누출이 일어나지 않게 제작된 고정구에 소프트 그리퍼를 부착하고 이를 길이와 각도를 변화시킬 수 있는 스탠드에 고정하였다. 소프트 그리퍼가 부착된 스탠드 및 일정한 공압을 유지하기 위한 레귤레이터는 광학테이블에 고정하였다. 공압이 가해짐에 따라 소프트 그리퍼가 물체에 가해지게 되는 작동력은 로드셀(DACLELL Co., CB1-K15)에 의해서 측정되게 된다. 이 때 소프트 그리퍼가 장착되는 각도에 따라

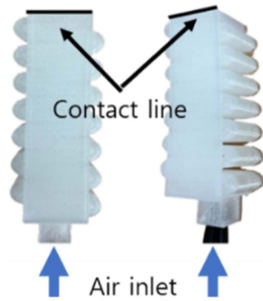


Fig. 7 Initial contact position for force measurement

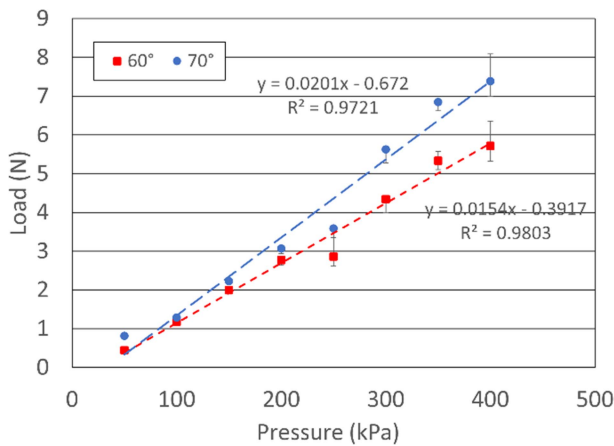


Fig. 8 Measured activation force for applied pressure

측정되는 힘이 달라질 수 있으므로 장착각 θ 를 변화시키면서 압력에 따른 힘을 측정하였다. 한편, 소프트 그리퍼가 로드셀에 접촉하는 위치에 따라서 측정된 작동력이 달라질 수 있다. 이에 본 연구에서는 소프트 그리퍼의 동일한 위치에서 힘을 측정하기 위해 Fig. 7과 같이 소프트 그리퍼의 끝단이 로드셀에 선접촉을 하도록 초기 설정을 하고 공압을 증가시키면서 힘을 측정하였다.

소프트 그리퍼에 가해지는 압력에 따른 작동력을 측정하기 위해서 가해지는 압력을 50 kPa부터 450 kPa까지 변경하면서 실험을 수행하였다. 이 때 10번씩 반복하여 동일한 공압을 인가하면서 로드셀에 측정된 값을 평균하였다. Fig. 8은 장착각이 각각 60°와 70°일 때 압력 변화에 따라 측정된 작동력을 각각 나타낸 그래프이다. Fig. 8에서 알 수 있듯이 가해지는 공압이 증가함에 따라 소프트 그리퍼에 의한 작동력이 선형적으로 점차 증가한다. 그리고 최대 공압 450 kPa에서 장착각이 60°와 70°일 때 최대 작동력은 각각 5.721 N과 7.390 N이다. 따라서 동일한 형상의 소프트 그리퍼에 동일한 압력을 가하는 경우에도 초기에 대상물에 접촉하는 각도에 따라서 최대 작동력이 다르게 발생함을 알 수 있다. 향후 연구를 통해서 제작된 소프트 그리퍼의 다양한 장착각 및 측정위치에 따른 작동력에 대한 평가가 수행될 예정이다.

한편, Fig. 8의 두 경우 모두 가해지는 압력이 250 kPa인 지점에서 작동력이 일정하게 증가하지 않다가 더 큰 압력이 가해지면 다시 일정하게 증가하는 경향을 보인다. 이는 Fig. 9와

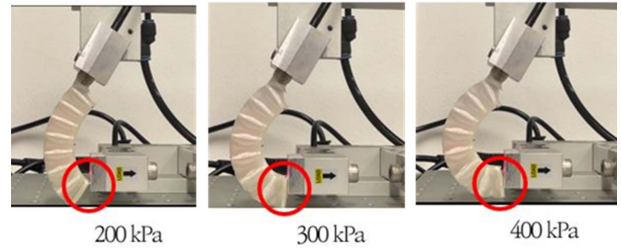


Fig. 9 Change in contact location according to applied pressure

같이 낮은 압력에서는 초기에 설정된 선 접촉에 의한 하중이 로드셀에 가해지다가 압력이 증가하여 250 kPa가 되어 일정 각도 이상으로 변형되게 되면 소프트 그리퍼의 끝단 면에 의한 면접촉으로 접촉 양상이 변화하기 때문이다. 따라서 소프트 그리퍼가 대상 물체에 접촉하여 다루기 위해서는 가해지는 공압에 따른 굽힘각뿐만 아니라 작동력과 접촉위치도 함께 고려해야 함을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 재료압출 공정 중 열 가소성 플라스틱을 재료로 하는 FFF 기술을 이용하여 TPU로 제작된 공압에 의해 구부러지는 동작을 수행할 수 있도록 설계된 소프트 그리퍼의 성능 평가를 수행하였다. 가해지는 공압에 따른 소프트 그리퍼의 형상 변화를 측정하였으며, 그 결과, 가해지는 공압이 증가할수록 소프트 그리퍼의 변형량이 선형적으로 점차 증가하였다. 또한, 본 연구에서 적층제조 공정으로 제작된 소프트 그리퍼는 매우 작은 각도부터 매우 큰 각도까지 변형이 가능하며, 이로 인해 다양한 형상과 크기의 물체를 다룰 수 있는 장점이 있다. 또한, 가해지는 공압에 따른 소프트 그리퍼의 작동력을 측정하였으며 가해지는 압력이 증가함에 따라 작동력이 선형적으로 증가하였다. 한편, 초기 접촉 각도 및 접촉 위치에 따라 최대 작동력이 달라진다. 따라서 소프트 그리퍼가 대상 물체를 다루기 위해서는 가해지는 공압뿐만 아니라 작동력과 접촉 위치도 고려되어야 한다. 본 연구 결과는 FFF 기술과 TPU 재료를 이용한 소프트 그리퍼의 효과적인 설계와 제어를 위한 기반을 제공하며, 로봇 기술의 발전과 다양한 응용 분야에서의 활용이 가능할 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 논문은 2021년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No. 2021R1A4A1033141)과 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2022R1A2C1091587).

REFERENCES

1. Hirose, S., Umetani, Y., (1978), The development of soft gripper for the versatile robot hand, Mechanism and Machine Theory, 13(3), 351-359.
2. Yoon, J., Yun, D., (2021), Design of low pressure driven soft actuators for soft gripper, The Journal of Korea Robotics Society, 16(1), 23-28.
3. Udupa, G., Sreedharan, P., Sai Dinesh, P., Kim, D., (2014), Asymmetric bellow flexible pneumatic actuator for miniature robotic soft gripper, Journal of Robotics, 902625.
4. Lee, I. H., Kim, H.-C., Ahn, D.-G., (2020), Korean terminologies for additive manufacturing according to the ISO/ASTM 52900 standard, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 37(12), 929-936.
5. Zhang, Z., Ni, X., Wu, H., Sun, M., Bao, G., Wu, H., Jiang, S., (2022), Pneumatically actuated soft gripper with bistable structures, Soft Robotics, 9(1), 57-71.
6. Park, C. Y., Kim, H. E., Lee, I. H., (2022), Design of support-free soft gripper structure for additive manufacturing, Proceedings of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers Spring Conference, 198. <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE11063997>
7. Baek, S. R., Park, C. Y., Lee, I. H., (2023), Development of a soft gripper using additive manufacturing, Proceedings of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers Conference, 272. <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE11444706>



Woojin Jeong

B.Sc. candidate in the School of Mechanical Engineering, Chungbuk National University. His research interest is additive manufacturing.
E-mail: woojin2791@naver.com



Chae Young Park

M.Sc. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Chungbuk National University. Her research interest is multi-material additive manufacturing.
E-mail: pcd0118@naver.com



Jongho Shin

Professor in the Department of Mechanical Engineering, Chungbuk National University. His research interest is autonomous system.
E-mail: jshin@chungbuk.ac.kr



In Hwan Lee

Professor in the Department of Mechanical Engineering, Chungbuk National University. His research interest is multi-material additive manufacturing.
E-mail: anxanx@chungbuk.ac.kr

• 특집 • DX시대의 제조기술, 적층제조!

직접에너지적층 공정을 이용한 폐쇄형 알루미늄 폼 제작에 관한 연구

Study on Fabrication of Closed-cell Aluminum Foam Using Directed Energy Deposition

김화정¹, 심도식^{1,2,#}
Hwa-Jeong Kim¹ and Do-Sik Shim^{1,2,#}

¹ 한국해양대학교 대학원 신소재융합공학과 (Department of Ocean Advanced Materials Convergence Engineering, Graduate School, Korea Maritime and Ocean University)

² 한국해양대학교 해양신재생에너지융합전공 (Interdisciplinary Major of Ocean Renewable Energy Engineering, Korea Maritime and Ocean University)

Corresponding Author / E-mail: think@kmou.ac.kr, TEL: +82-10-4844-4455

ORCID: 0000-0002-5133-1585

KEYWORDS: Directed energy deposition (직접에너지적층), Aluminum foam (알루미늄 폼), Closed-cell (폐쇄형), Foam characterization (발포 특성), Compression test (압축시험)

In this study, based on directed energy deposition (DED) technology, one of the additive manufacturing technologies, a porous material fabricated by mixing various aluminum alloys and foaming agent was manufactured. First, the foaming agent formed pores inside the deposited materials and differences in foaming characteristics were observed depending on the type of aluminum. Also, the foaming characteristics according to the laser power, which is a representative process variable, were analyzed. As a result, a closed-cell porous material with a maximum porosity at a laser power of 1,100 W was manufactured. Results of the compression test showed that the porous material made by the pores generated therein collapses to absorb energy, and the internal pores disappear to become high density. Therefore, Young's modulus and yield stress were reduced by the pores inside the sample of pure aluminum and Al6063. However, it was found that the specific energy absorption, which is an advantage of the foamed materials, increased compared to non-porous materials. The findings of this study confirmed that it was possible to manufacture DED-applied foam materials using aluminum powder and a foaming agent.

Manuscript received: July 4, 2023 / Revised: August 1, 2023 / Accepted: August 3, 2023

1. 서론

금속적층제조(Additive Manufacturing)은 열에너지를 이용하여 금속 분말 또는 와이어를 용융 및 응고시켜, 2차원 단면의 층들을 높이 방향으로 적층하여 3차원 형상으로 제조하는 방식이다. 적층제조 기술은 재료 효율성을 높이면서 복잡한 형상의 부품을 적층할 수 있는 잠재력을 가진 제조 기술로 평가받고 있다[1]. 또한, 적층가공은 유연한 설계 자유, 짧은 리드 타임, 낮은 구매 비율(Buy-to-fly)과 같은 이점으로 인해 고성능 구조 부품을 생산하기 위한 새로운 패러다임으로 간주되고 있다[2]. 금

속 소재를 이용한 적층제조 기술은 분말베드융합(Powder Bed Fusion, PBF)과 직접에너지적층(Directed Energy Deposition, DED) 방식으로 구별된다. DED 공정은 자유도가 높아 구리/철강, 구리/알루미늄, 그리고 철강/알루미늄과 같은 다양한 합금 및 이종 소재를 사용할 수 있어 부품 제조에 많은 유연성을 제공한다[3,4]. 아울러 DED 공정은 레이저 조사에 의해 생성된 용융풀의 빠른 냉각 속도로 인해 치밀한 조직을 생성시키기 때문에 우수한 기계적 특성을 가진다[5].

한편, 알루미늄은 경량 및 내부식성과 같은 우수한 특성으로 인해 적층제조기술의 초기 채택 산업인 항공 우주 산업에서

중요한 역할을 하였다[6]. 특히, 이러한 알루미늄 소재를 이용한 다공성(Porous) 구조 재료는 우수한 구조적 특성으로 인해 최근에 큰 주목을 받고 있다. 다공성 소재란 내부에 기공을 포함하고 있는 재료로, 높은 비표면적, 가벼운 무게, 높은 비강도 및 에너지 흡수, 내화학성과 같은 우수한 특성을 가지고 있다[7]. 특히, 다공성 알루미늄은 높은 비강도와 우수한 기계적 그리고 물리적 특성으로 인해 흡음, 단열 및 에너지 흡수 등 많은 분야에서 널리 활용되고 있다[8].

기존의 다공성 소재의 제조 방법은 조작성이 간편하고 비용이 저렴하지만, 복잡한 형상을 제작하는 데 어려움이 있고 영역별 기공의 크기와 분포를 조절하는 것이 불가능하기 때문에 부품 설계의 유연성에 한계가 있다[9]. 반면, 금속적층제조기술을 이용한 다공성 소재 제작은 기공의 밀도, 분포 및 크기를 제어할 수 있기 때문에 최근 연구가 활발히 이루어지고 있다. 다공성 소재는 내부의 기공의 형태에 따라 폐쇄형 구조(Closed Cell)와 개방형 구조(Open Cell)로 구분할 수 있다. 폐쇄형 구조는 내부의 기공들이 연결되지 않고 독립적으로 존재하는 구조이며, 내부의 기공들이 서로 연결된 구조는 개방형 구조를 뜻한다. Wang 등은 적층제조를 이용하여 격자 구조를 가지는 다공성 금속 소재를 제작하였고, 격자 구조의 유효 열전도도에 관한 연구를 하였다[10]. Dong 등은 PBF 공정을 이용하여 Al_2O_3 개방형 구조의 세라믹 소재를 제작하여 미세 구조 설계와 관련된 연구를 하였다[11].

현재까지 수행된 적층제조기술을 활용한 다공성 소재와 관련된 연구는 대부분 PBF 공정을 이용한 개방형 구조 설계 및 제작에만 국한되어 있다.

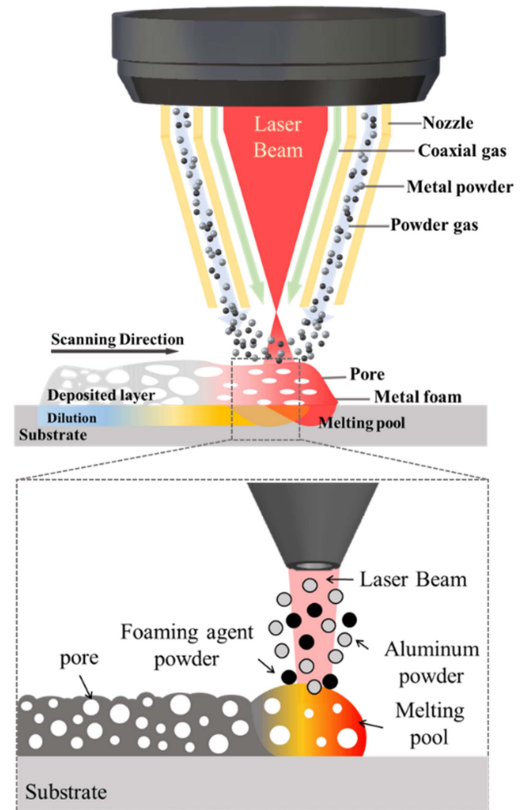
한편, Shim 등은 최초로 DED 공정과 발포제를 이용하여 티타늄 발포 소재 제작을 시도하였으며, 티타늄 내부에 기공을 생성시켜 다공성 구조 제작을 성공하였다[7,12]. 이는 약 30%의 기공률을 가지는 폐쇄형 구조의 다공성 소재로 DED 변수를 조절하여 제조가 가능함을 밝혔다. Koike 등은 DED 공정을 통해 SUS 316L 분말과 발포제를 이용하여 다공성 구조를 만들었다[13].

따라서, 최근에는 DED 공정을 이용한 다공성 소재의 제작 그리고 폐쇄형 구조를 가지는 경량 소재 제작을 위한 적층제조 기술의 활용에 관한 연구가 점차 이루어지고 있다. 하지만, 위치별로 기공률과 기공 크기를 제어하는 기술과 원하는 위치에만 국부적으로 기공을 형성하는 기술은 아직까지 연구가 부족하다. 따라서 본 연구에서는 알루미늄과 발포제를 혼합하여 폐쇄형 구조의 다공성 알루미늄 폼(Aluminum Foam)을 제작하고, 발포-적층된 소재에 대한 특성을 평가 및 분석해보고자 한다.

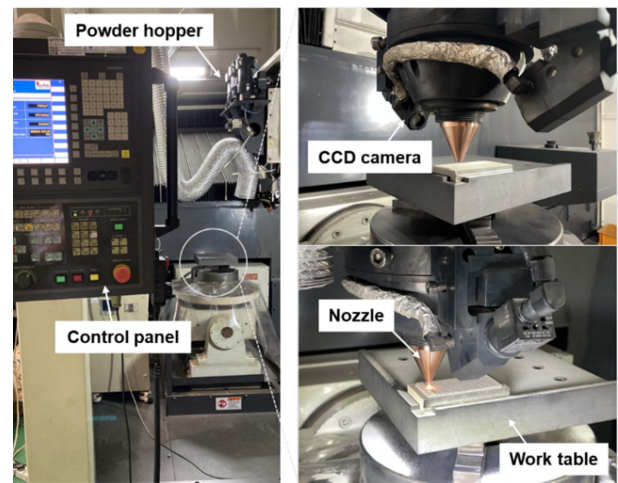
2. 실험 방법

2.1 DED 공정 원리와 사용 장비

Fig. 1(a)는 DED 공정의 발포 적층 원리 및 방법을 나타낸다. DED 공정은 모재 표면에 금속 분말이 공급되면서 동시에 고출력



(a)



(b)

Fig. 1 (a) Schematic of the principle of DED process and (b) equipment of DED process

레이저 빔(Beam)을 조사하여 용융풀(Melting Pool)을 형성한다. 분말은 보호 가스(Shielding Gas)에 의해 용융풀로 전달되고 레이저 빔에 의해 용융된다. 용융된 분말은 빠르게 응고되어 비드(Bead)를 형성하고 그 결과, 적층 트랙이 형성되고 가장자리(Contour)에서 내부(Pocket)를 채워 나가는 방식으로 하나의 레이어(Layer)가 형성된다. 이 과정을 Layer-by-layer 방식으로 반복 적층하여 3차원 형상이 제작된다.

DED 공정을 이용한 발포 적층 원리는 혼합 분말이 고출력 레이저에 의해서 용융점까지 가열 및 용융된다. 동시에 발포제는 500-700°C에서 연소 및 분해되기 시작한다. 분해된 발포제는 가스를 발생시키며, 금속의 용융과 응고는 짧은 시간에 이루어 지는 반면에 발포제가 분해하는 시간은 상대적으로 느리다. 따라서, 외부로 배출되지 못한 가스는 용융된 금속 안에 갇히게 되어, 결국 적층 소재 내부에 기공으로 존재하게 된다.

본 연구에서는 DMT (Direct Metal Tooling) 장치(MX3, Insstek Co., Korea)가 사용되었다(Fig. 1(b)). 이 장치에는 4 kW CO₂ 레이저 시스템, 수치 제어 시스템, MX-CAM 소프트웨어, 5축 NC 공작 기계, 3개의 호퍼(Hopper)와 파우더 공급 시스템으로 이루어져 있다. 실험 과정 중 산화를 방지하고 작업물을 보호하기 위한 보호 가스이자, 공급되는 분말을 운반하기 위한 가스로 아르곤(Argon)을 사용하였다. 분말 공급 장치가 장착된 헤드는 광학 비전 시스템을 포함하고, 모재 표면으로부터 9 mm 떨어진 노즐에서 직경 1 mm의 레이저 빔이 조사된다.

2.2 재료

본 연구에서 사용된 분말은 3종류이며, 순수 알루미늄 1종과 알루미늄 합금 2종(Al6063과 AlSi10Mg)을 사용하였다. 이 분말들은 가스 분무법(Gas Atomization)을 통해 분말화되었다. DED 장비에서 원활한 분말 공급을 위해 Figs. 2(a)-2(c)와 같이 구형의 분말을 사용하였으며, 직경은 45-145 μm (HANA AMT, Korea)이다. 적층소재 내부에 기공을 형성하기 위해 기존의 알루미늄 발포 공정에 사용되는 발포제 분말을 사용하였으며(Fig. 2(d)), 이는 직경 50-120 μm (GOODFELLOW, United Kingdom)의 비정형 분말이다. 알루미늄 분말과 발포제 분말을 미리 혼합하여 분말 공급 호퍼에 주입한다. 사용된 분말에 대한 화학적 조성비는 Table 1에 나타난 바와 같다. 모재는 AlMg1SiCu를 사용하였으며, 길이 100 mm, 너비 50 mm, 그리고 두께 10 mm를 가지는 직육면체이다.

2.3 시편 제작 및 방법

본 연구에서는 발포 적층 실험을 하기에 앞서 DED 공정 변수에 따른 각 알루미늄 분말의 적층 특성을 관찰하기 위해 주요 공정 변수에 따라 기초 실험을 진행하였다. 이러한 기초 실험을 바탕으로 안정적인 적층 비드 및 레이어 형성이 가능한 조건을 최종 선정하였다. 선정된 공정조건을 기반으로 발포 적층 실험을 진행하였고, 기계적 물성을 분석하기 위해 각 알루미늄 분말을 이용하여 비다공성(Non-porous) 소재와 다공성 소재의 경도 및 압축 시험을 진행하였다. Fig. 3과 같이 가로, 세로, 그리고 높이를 각각 30, 30, 10 mm로 적층한 사각형 다공성 샘플을 직경 7 mm, 높이 7 mm인 원통형으로 절단하여 압축 시험편을 제작하였다.

2.4 시편 전처리 및 분석 조건

시편 분석을 위해 시편을 절단하여 마운팅하였다. 그리고

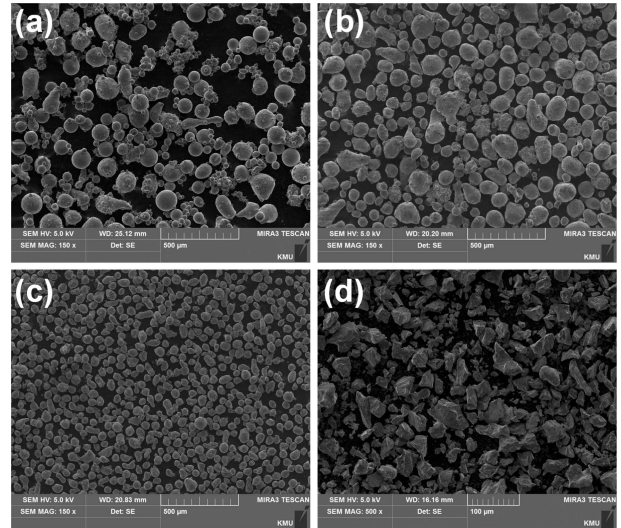


Fig. 2 SEM images of powders: (a) pure aluminum, (b) Al6063, (c) AlSi10Mg, and (d) foaming agent

Table 1 Chemical compositions of the powders [wt%]

Element	Pure Aluminum	Al6063	AlSi10Mg
Al	Bal.	Bal.	Bal.
Mg	-	0.62	0.339
Si	0.0435	0.23	9.654
Fe	0.1034	0.32	0.122
Cu	0.0013	0.03	-
Zn	-	0.01	0.053
Mn	-	-	0.041
O	< 0.1	-	-
Others	-	0.27	0.102

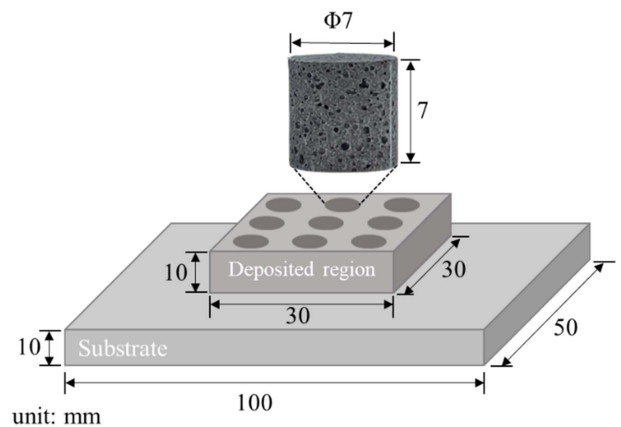


Fig. 3 Preparation of specimen for compressive test

실리콘 카바이드(SiC) 사포(Sandpaper)로 #2400 grit까지 연마한 후, 다이아몬드 서스펜션(Diamond Suspension) 용액으로 0.1 μm grade까지 연마하였다. 이후 켈러(Keller) 용액을 이용하여

에칭(Etching)하였다. 경도 시험은 ASTM E384에 준하여 마이크로 비커스 경도계(Akashi, HM-122)를 사용하여 미세 경도(Microhardness)를 측정하였으며, 하중 0.1 kgf로 10초간 압입하여 생긴 압흔의 면적을 측정하였다. 압축시험은 만능 재료 시험기(KDMT-158, South Korea)를 사용하였으며, 0.5 mm/min의 속도로 압축 시험을 수행하였다. 시험은 시편 당 3회 반복 시험하였다. 또한, 응력-변형을 곡선으로부터 선형 기울기에 대한 탄성계수를 계산하였으며, 항복 응력은 0.2% 오프셋(Offset) 방법을 기초하여 추출하였다.

3. 발포 적층 실험 결과

3.1 발포 특성

상기 언급된 분말들과 발포제, 그리고 공정조건을 이용하여 발포 적층 실험을 수행하였다. Fig. 4는 혼합 분말들을 이용하여 적층된 샘플의 사진들을 나타내고 있다. 일반적인 분말 적층 소재와는 달리 발포 반응에 의해서 구름 형상의 표면을 형성하고 있으며, 표면에서는 분말들의 뭉침도 관찰되고 있다.

한편, 발포 적층 과정에서 발포량에 따라 발포 적층재의 최종 높이가 달라지게 된다. 따라서, 적층 높이를 통해 간접적으로 발포량을 평가할 수 있다. 발포 적층된 순수 알루미늄(As-foamed Pure Aluminum)의 실제 적층 높이는 8.7 mm이며, 설계 높이(3 mm)보다 5.7 mm 높게 적층된 것을 확인할 수 있다. 발포 적층된 Al6063 (As-foamed Al6063)의 실제 적층 높이는 5.1 mm로, 설계 높이보다 2.1 mm 더 높게 적층되었으며, 발포 적층된 AlSi10Mg (As-foamed AlSi10Mg)에서도 5.1 mm 더 높게 적층되었음을 관찰할 수 있다. 따라서, 동일한 공정 조건에서 순수 알루미늄의 발포량이 가장 많다는 것을 간접적으로 추정할 수 있다.

Fig. 5는 발포 적층된 샘플의 단면 사진을 보여준다. 발포제를 첨가하여 적층된 소재의 내부에는 다수의 기공이 형성된 것을 볼 수 있다. 우선, 적층 내면에 생성된 기공은 구형의 형상을 나타내고 있다. 발포제가 분해되면서 H₂ 가스가 내부에 갇혀 기공을 형성하게 되는데, Hauser 등의 연구에 의하면 이러한 수소에 의한 기공은 다른 기공보다 균질하게 분포한다고 보고하였 습니다[14]. 또한, 수소는 산화막으로 존재하기 때문에 기공의 형성하는데 있어 안정에 도움이 된다고 보고하였다. 따라서, 발포에 의해 생성된 기공은 균질하고 구형의 형상을 나타내고 있다. 세 가지 샘플들을 비교하면, As-foamed Pure Aluminum은 As-foamed Al6063과 As-foamed AlSi10Mg에 비해 기공의 개수와 크기가 큰 것으로 관찰된다. 또한 As-foamed Al6063에서는 적층 위치별로 기공 크기에 차이가 있음을 알 수 있다. 이는 Al6063에 포함되어 있는 Mg의 함량에 따른 것으로 분석된다. Kim 등에 따르면, 0.45-0.9 wt% 정도의 Mg 함유량은 용융된 알루미늄 합금의 표면장력을 낮추는데 적합하다고 보고하였다 [15]. 즉, Al6063에 함유되어 있는 Mg은 표면장력을 낮추어

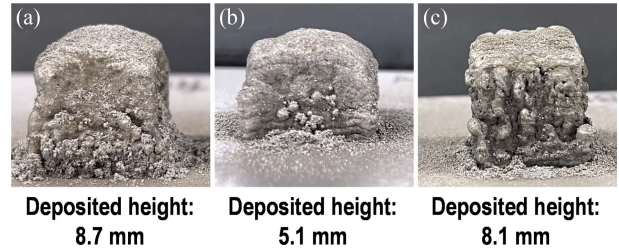


Fig. 4 Deposited-foams and deposited heights: (a) as-foamed pure aluminum, (b) as-foamed Al6063, and (c) as-foamed AlSi10Mg

기공과 용융풀 사이의 계면 에너지를 줄이는 역할을 한다. 이로 인해 기공이 서로 결합되지 않고, 기공의 크기가 감소되는 것이다. 반면, As-foamed AlSi10Mg에서도 다수의 기공이 형성된 것을 확인할 수 있다. Hastie 등에 의하면, 적층제로 제작한 AlSi10Mg에서 형성된 기공 중 96%가 수소에 의한 기공으로 보고하였다[16]. 알루미늄 합금에서 수소는 Al 입자와 Al₂O₃ 입자 표면의 산화막 형태로 존재한다. 표면 산화막은 진공상태에서도 알루미늄 입자에 형성될 수 있다. 분말에 포함되어 있던 수분이 알루미늄과 반응해 산화막을 형성하게 되고, 이 과정에서 방출된 수소가 빠져나가지 못하고 기공을 형성하게 된다. 수소는 다공성을 유발하고, 이는 적층 과정에서 온도가 증가함에 따라 기공의 크기는 더욱 커지게 된다.

한편, As-foamed Pure Aluminum과 As-foamed Al6063의 적층부 일부 레이어에서 계면 결함(Inter-layer Defect)을 확인할 수 있다. 우선, Al6063은 열팽창계수가 높고, 냉각 범위가 넓어서 열팽창으로 인해 용접 시에 고온 크랙(Hot Cracking)이 발생하기 쉬운 합금으로 알려져 있다[17]. Louvis 등의 연구에 의하면, 결정립계(Grain Boundary)에서 산화막이 형성되고, 이것이 균열의 주요 원인으로 밝혀졌다[18]. 용융풀의 표면에는 습윤에 영향을 미치는 산화막이 있으며, 적층 시 공급되는 분말은 이러한 산화막이 파괴되어야 용융풀에 잘 융합된다. Al6063 분말이 레이어에 의해서 용융되고, 곧바로 냉각되면서 적층된 레이어 표면에는 산화막으로 뒤덮이게 된다. 산화막은 용융점이 높고 레이어 에너지 흡수를 방해하는 요소로 작용하기 때문에 공급된 Al6063 분말에 흡수되는 에너지가 부족하기 때문에 레이어 계면 결함이 유발되는 것으로 판단된다. 즉, 적층 시 생성되는 산화막에 의해서 공급되는 에너지 밀도가 낮아지게 되고, 이는 공급된 분말을 완전히 녹이지 못하기 때문에 레이어와 레이어 사이에 분말 미용융(Lack of Fusion)과 같은 결함이 발생하게 된다. 이러한 결함은 레이어 간 계면에서 국부적으로 존재하지만, 취약부로 작용할 수 있기 때문에 기계적 특성 저하를 야기할 수도 있다.

한편, As-foamed AlSi10Mg는 레이어 계면 결함이 현저히 적은 것을 확인할 수 있다. AlSi10Mg에 함유된 실리콘(Si)은 공정(Eutectic)에 가까운 성분을 만들어 고체화 균열을 억제한다[16]. 또한 실리콘은 용융된 알루미늄의 유동성을 개선시키며, 실리콘의

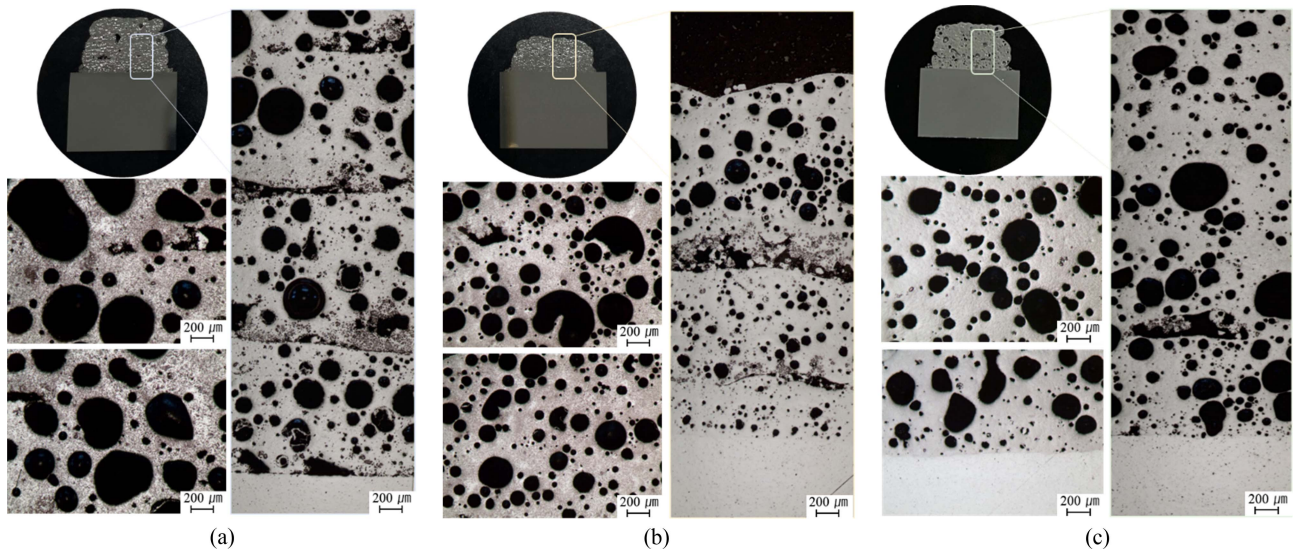


Fig. 5 Optical images of cross sections of deposited-foam samples: (a) as-foamed pure aluminum, (b) as-foamed Al6063, and (c) as-foamed AlSi10Mg

응고 범위가 좁고 레이저를 잘 흡수하는 특성 때문에 계면에서의 결합이 적은 것으로 추측된다. Gupta 등은 Ti과 12.6 wt%의 Si를 포함하는 공정(Eutectic) Al-Si 합금 사이의 금속간 화합물 형성을 조사했으며, Al_3Ti 와 더불어 Ti_5Si_3 도 함께 형성되는 것을 밝혔다[19]. 즉, Ti과 Si의 금속간 화합물의 반응열에 의해 As-foamed AlSi10Mg에서는 레이어 계면 결합이 적은 것으로 추측된다.

3.2 레이저 출력에 따른 발포 특성

Fig. 6은 레이저 출력에 따른 적층부 내 기공 분포를 나타낸다. As-built Pure Aluminum의 기공률이 가장 높은 것을 알 수 있다. Sasikumar 등에 의하면, 순수 알루미늄에서 산화물 입자(알루미나) 형성으로 인한 점도 증가가 발포 안정화에 기인한다고 보고했다[20]. 적층 과정 중 공기에 노출된 순수 알루미늄의 용융풀은 쉽게 산화된다. 이러한 산화물은 발포 안정화에 기여하는 이중막 및 산화물의 형태로 존재한다. 순수 알루미늄의 용융풀에서 산화물 입자를 형성함과 동시에 기공벽에 산화물 층 및 클러스터로 존재하는데, 이는 기공 안정화를 가져온다. 한편, As-foamed Al6063은 다른 시편에 비해 기공률이 현저히 작은 것을 확인할 수 있다. 발포 초기 기공의 성장은 점성력(점도 및 표면 장력)에 의해 결정되며, 점성력이 높을수록 기공의 성장을 막아 기공의 크기를 감소시킨다. Al6063에 첨가되어 있는 Mg은 표면장력을 낮추어 기공이 합쳐지는 것을 방지한다. Al6063은 우수한 표면처리를 목적으로 Mg과 Si 등의 합금 원소 첨가량이 적기 때문에 생성되는 산화물의 양이 적다. 따라서, 증금속 원소들의 양이 적어 용융풀의 점성은 증가하게 된다. 용융풀의 점성 증가는 용융풀이 기공 벽내의 흐름을 적게 하고 이는 기공벽의 두께를 두꺼워지게 한다[21]. 즉, As-foamed Pure Aluminum과 As-foamed AlSi10Mg에 비해 높은 점성으로 인해

기공벽의 두께가 두꺼워졌으며, 이로 인해 시편 내부의 밀도는 높아지고 최종적으로 기공률은 감소한다.

한편, As-foamed Al6063에서는 병합된 기공들에 의해 불규칙한 형태의 기공들이 분포하는 것을 관찰할 수 있다. 적층 과정 중 지속적인 레이저 조사에 의해 용융풀의 온도는 증가한다. 온도가 증가할수록 용융풀의 유동성 증가로 병합된 기공의 숫자는 증가하게 된다[22]. 따라서, 합금 원소의 양이 비교적 적고, 열전도도가 높은 Al6063은 적은 온도 변화에도 빠른 속도로 응고와 냉각이 일어나게 된다. 기공 안정화 요소인 산화물의 양도 적고 기공이 안정하게 성장하기 위한 시간도 충분하지 못하여 불규칙한 기공이 많이 분포하고 있는 것으로 판단된다.

As-foamed AlSi10Mg는 레이저 출력이 높아질수록 기공의 크기가 커지는 것을 알 수 있다. 레이저 출력이 높아질수록 더 큰 용융풀이 생성되고, 이로 인해 더 많은 양의 가스를 발생시킨다. 더 많은 양의 가스를 발생시킬수록 병합된 기공으로 인해 큰 기공이 형성된다. 또한, 모세관 현상에 의한 유동과 중력에 의한 유동의 영향을 받아 기공의 벽 두께가 얇아지면서 기공의 병합을 일으키기도 한다[23]. 따라서 발포 온도가 높아질수록 과도하게 큰 기공과 불균일한 기공 분포가 발생하는 것을 확인할 수 있다.

4. 기계적 특성

4.1 미세 경도

Fig. 7(a)는 각 시편의 적층부에서의 경도 분포를 나타내고 있으며, Fig. 7(b)는 각 시편의 적층부의 평균 경도를 나타낸다. As-built Pure Aluminum의 경도는 주조된(Cast) 순수 알루미늄과 비슷하다. 하지만, 나머지 두 합금 분말의 적층재(As-built)는

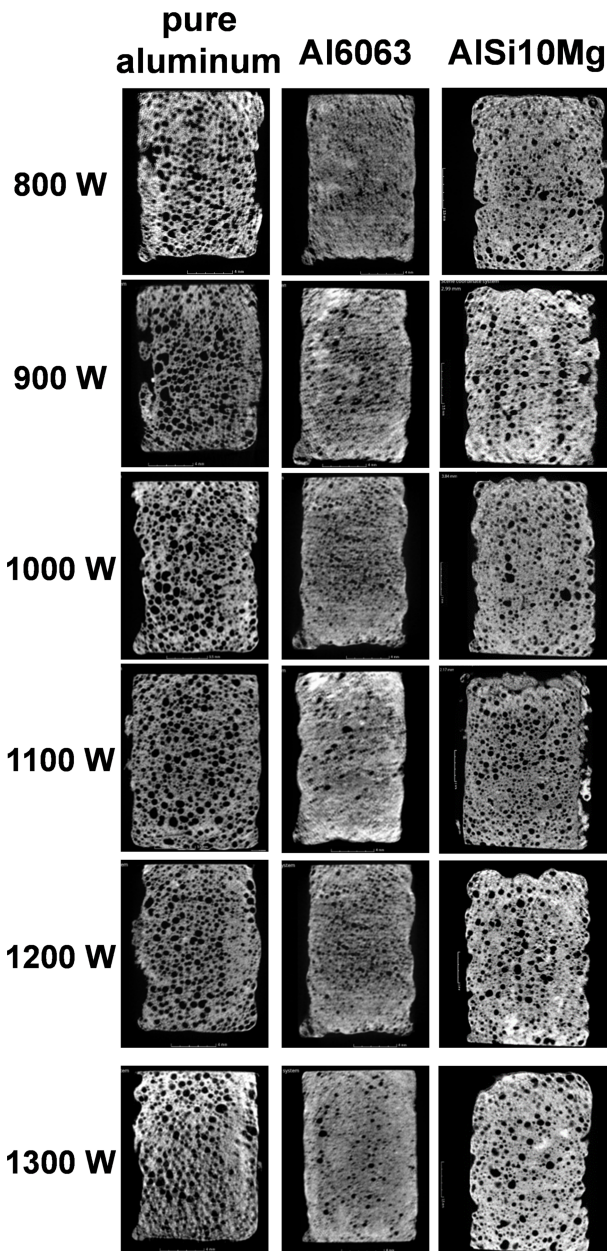
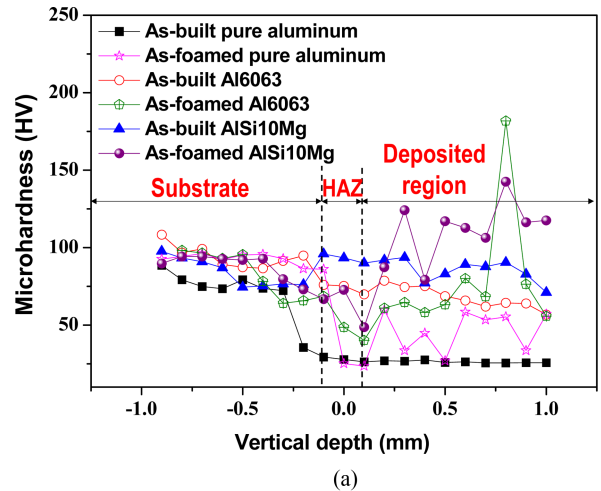


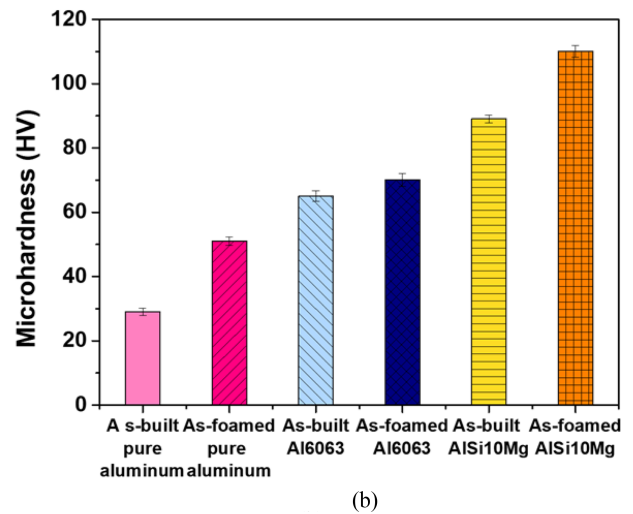
Fig. 6 3D CT images of cross sections of foamed-deposit samples at different laser powers

주조된 합금에 비해서 경도가 상승하였다. 한편, 모든 소재에 대해서 발포 적층된 소재(As-foamed)가 발포되지 않은 비다공성 소재(As-built)에 비해서 경도가 상승하였음을 알 수 있다.

본 연구에서 사용된 적층 조건에서는 발포제가 완전 분해되지 않음이 선행 연구[24]에서 이미 밝혀져 있다. 따라서, 세 시편의 적층부에서는 발포제에 함유된 Ti 입자가 분해되지 못하고 잔류하고 있다(Fig. 8). Ti 입자는 잔여 불순물 그리고 입자 크기 등에 의해서 영향을 받는다. Ti 입자에는 C, N, O와 같은 다른 불순물들이 있고, 이는 입자의 경도를 증가시킨다[25]. 또한 적층부 내부에는 알루미늄과 발포제의 반응으로 Al_3Ti 와 같은 금속간 화합물이 존재한다. Al_3Ti 와 같은 보강 미립자는 알루미늄



(a)



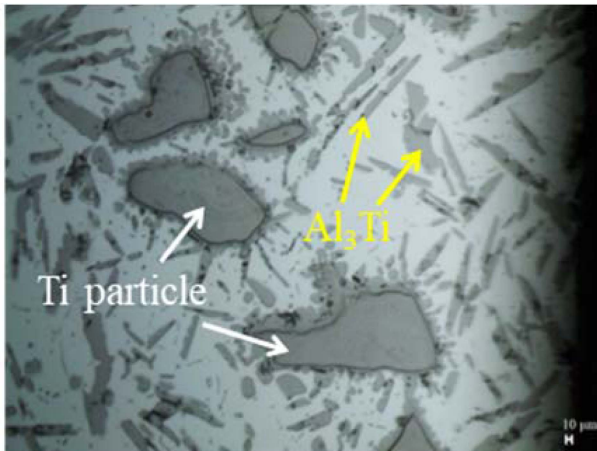
(b)

Fig. 7 (a) Distribution of micro-hardness along height direction and (b) average micro-hardness of deposited part for each sample

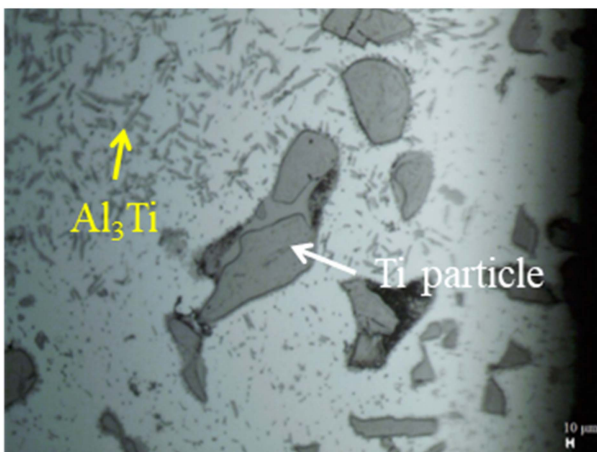
매트릭스 복합재(Aluminum-matrix Composite)를 생산하기 위해 알루미늄 합금에 첨가해 기계적 특성을 효과적으로 개선할 수 있다[26]. 결과적으로, 발포 적층된 소재는 발포제를 첨가함에 따라 완전히 분해되지 못하고 잔류하고 있는 입자와 금속간 화합물에 의해 기공이 있음에도 불구하고 경도가 상승함을 확인할 수 있었다.

4.2 압축 시험

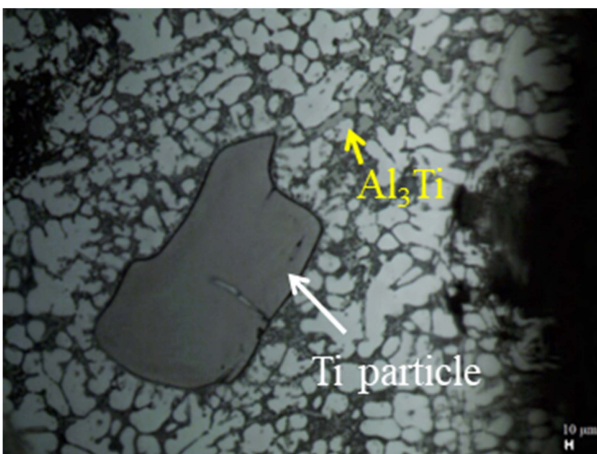
Fig. 9는 압축 시험 결과로 나온 응력-변형률 곡선이다. As-foamed Pure Aluminum과 As-foamed Al6063은 연성거동을 나타내고 있다. 반면에, As-foamed AlSi10Mg의 곡선에서는 특이 점이 관찰되고 있다. Hu 등에 의하면 불규칙한 기공 분포는 응력 집중을 유발하는데, 큰 기공의 존재는 낮은 국부 상대 밀도로 이어질 수 있고, 이는 인근 영역의 저하된 하중 지지 능력을 유발한다고 보고하였다[27]. 따라서, As-foamed AlSi10Mg의 불규칙한 기공 분포는 응력 집중을 유발해 곡선 상 특이 거동이 나타난 것으로 추측된다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 8 Optical microscope images showing residual particles in (a) pure aluminum, (b) Al6063, and (c) AlSi10Mg fabricated with foaming agents

Figs. 10(a)-10(d)는 각 시험편에 대한 압축 시험에 따른 특성 값들을 나타내었다. As-built Pure Aluminum과 As-built Al6063 은 발포제없이 적층된 샘플에 비해 탄성계수와 항복응력이

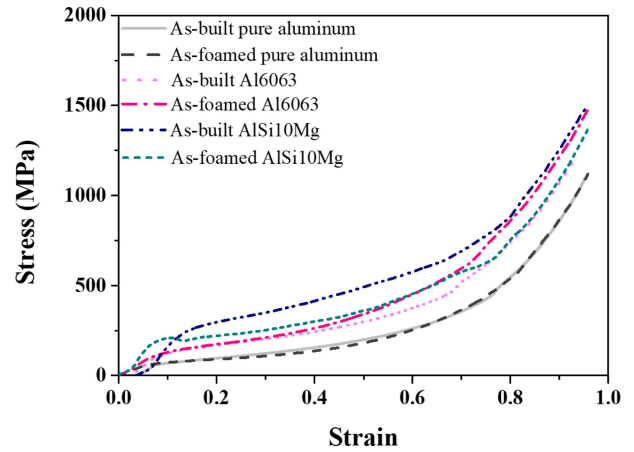


Fig. 9 Compressive stress-strain curves of fabricated porous material samples obtained from compressive test

감소한 것을 확인할 수 있다. 이는 내부가 비어 있는 다공성 및 저밀도 때문인 것으로 판단된다. As-foamed AlSi10Mg는 As-built AlSi10Mg에 비해 항복 응력이 감소하였다. 이는 다공성으로 인한 저밀도 때문이다. 시편 내부에는 잔류 Ti 입자가 존재하였다. 따라서, 이러한 입자의 존재는 큰 압축 응력을 필요로 하기 때문에 As-foamed AlSi10Mg의 탄성 계수가 증가한 것으로 판단된다. 하지만, 발포-적층 소재는 비다공 적층 소재에 비해, 내부 기공이 압축 하중에 의해 붕괴되면서 에너지를 흡수하고 고밀도화 되는 변형의 크기인, 고밀도화 변형률(Densification Strain)이 증가한 것을 알 수 있다. 이는 다공성으로 인해 고밀도화되는 변형 구간이 길어진 것이며, 이는 에너지 흡수능(Energy Absorption)이 증가하였음을 의미한다. As-foamed Pure Aluminum과 As-foamed Al6063은 발포-적층 샘플이 우수한 에너지 흡수능을 가진다는 것을 확인할 수 있었다. 하지만, As-foamed AlSi10Mg는 고밀도화되는 변형량은 커지지만, 전체 에너지 흡수능은 감소한다. 이는 As-foamed AlSi10Mg 내 불규칙한 기공 분포로 인한 낮은 압축강도 때문인 것으로 판단된다.

앞서 설명한대로 발포제 첨가에 의해 발포-적층 소재 내부에는 금속간 화합물들이 형성되었다. Suzuki 등에 의하면, α -Al 및 α -Ti 상으로부터 Al_3Ti 상의 형성 및 성장은 부피 수축으로 이어진다[28]. 즉, 알루미늄과 발포제의 반응으로 부피가 5.4% 감소하게 되고, Al_3Ti 의 형성은 기공과 균열을 발생시킨다. 따라서, 발포제의 분해는 육안상으로 확인할 수 있는 큰 기공의 형성뿐만 아니라, 금속 간의 반응으로 인한 Al_3Ti 형성이 부피 수축을 유발해 미세 기공을 형성하기도 한다. 이러한 크고 작은 기공에 의해 무게가 감소되며, 결국 As-foamed Pure Aluminum과 As-foamed Al6063에서 비에너지 흡수능(Specific Energy Absorption)이 증가하였음을 볼 수 있다. 여기서, 비에너지 흡수능은 전체 흡수 에너지(응력 변형률 곡선에서 적분값)를 무게로 나누어 계산된다. 발포-적층된 Pure Aluminum과 Al6063은 비다공 적층 소재 대비 비에너지 흡수능이 각각 35.8, 24.6% 향상되었다. 이러한 결과들로부터 DED 공정과 발포제를 이용해 비에너지

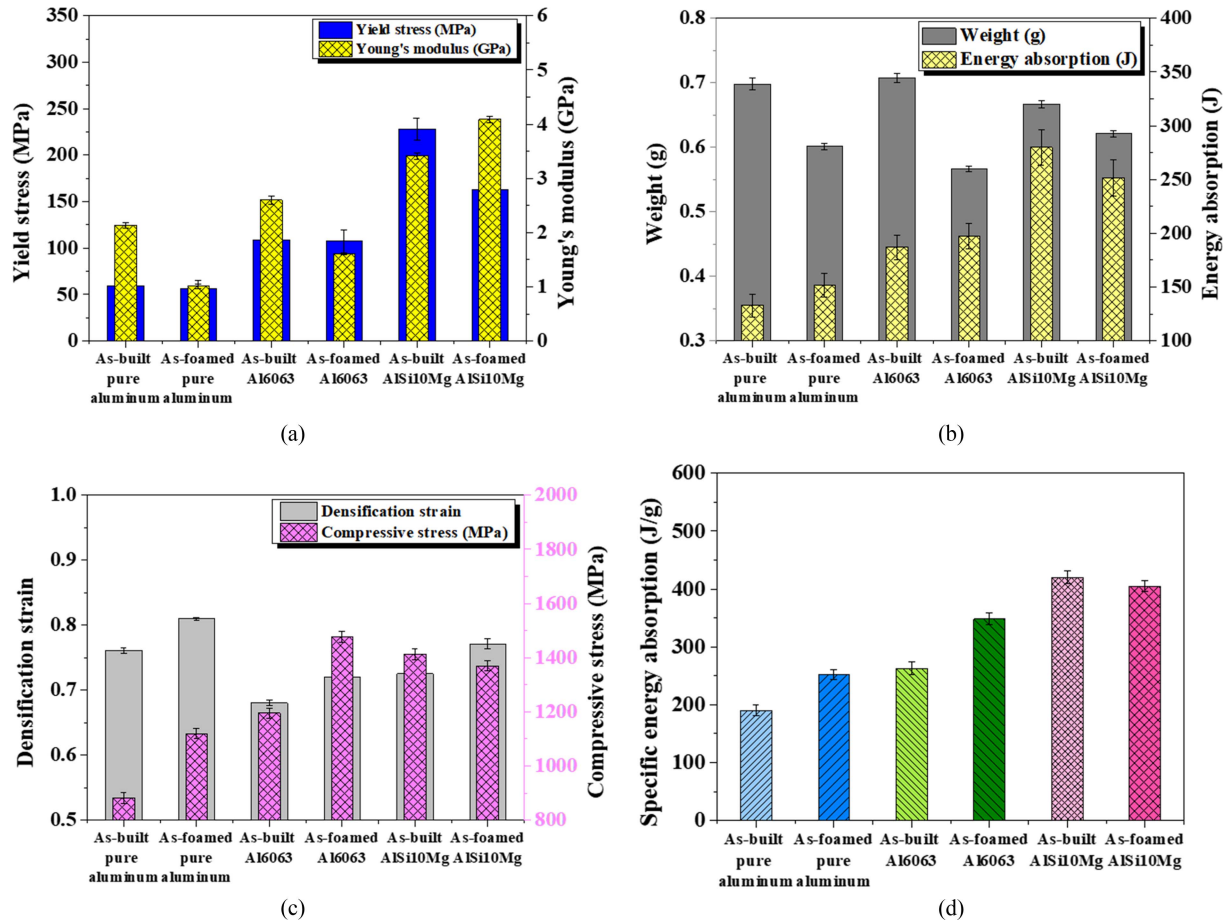


Fig. 10 (a) Yield stress and Young's modulus, (b) densification strain and compressive stress, (c) weight and compressive energy absorption, and (d) resulting specific energy absorption obtained from compression test for each sample

흡수능이 향상된 폐쇄형 다공 소재(Pure Aluminum과 Al6063) 제작이 가능함을 확인할 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 Pure Aluminum, Al6063, 그리고 AlSi10Mg 분말에 발포제를 혼합하여 DED 공정으로 폐쇄형 다공성 소재를 적층 제조하였다. DED에서의 주요 공정 변수인 레이저 출력에 따른 발포-적층 특성을 비교 관찰하였다. 이로부터 도출된 결과는 다음과 같다.

발포 적층 소재의 높이는 적층 내부 발생된 기공으로 인해 설계 높이(3 mm)보다 더 높게 적층 되었으며, 소재별로 서로 다른 발포 특성이 나타났다. 한편 Pure Aluminum과 Al6063에서는 발포 과정 중에 생성된 산화물이 레이저 흡수를 방해하여 레이어 계면 결함이 발생하였다.

레이저 출력 1,100 W에서 발포 적층될 경우, 최대 기공률을 가지는 폐쇄형 구조의 다공성 소재를 제조할 수 있었다. Al6063은 Mg의 함유량과 산화물로 인해서 기공이 크게 성장하지 못해 다른 소재에 비해 기공률이 낮았다.

알루미늄과 발포제의 반응으로 금속간 화합물이 형성되었다. 또한, 용융풀의 빠른 응고로 인해 완전히 용융되지 못한 Ti 입자들이 잔류하였고, 이러한 잔류 입자와 불순물에 의해 경도가 상승되었다. 따라서, 적층부 내부에 기공이 있음에도 불구하고 발포-적층된 소재의 경도는 감소하지 않았다.

압축 시험 결과, 응력-변형률 곡선은 전형적인 다공성 소재의 압축 특성을 보였다. 내부에 생성된 기공에 의해 만들어진 다공성 구조가 붕괴되면서 에너지를 흡수하고, 기공이 없어지면서 시편은 고밀도화가 진행되는 것으로 관찰되었다. Pure Aluminum과 Al6063에서는 발포 적층된 소재의 비에너지 흡수능이 증가한 것으로 확인되었다.

이러한 결과를 바탕으로, 향후에는 다양한 공정 변수에 따른 발포 및 적층 특성을 관찰할 계획이다. 또한, 발포 적층된 폐쇄형 다공성 소재에 대해서 진동 및 충격 하중에 대한 거동, 그리고 열전달 성능에 대해서도 연구해보고자 한다.

ACKNOWLEDGEMENT

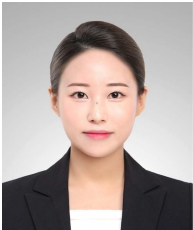
본 연구는 한국산업기술평가관리원(KEIT) 산업기술혁신사업

(No. K-G012000875302)과 한국연구재단 개인기초연구사업(No. 2021R1A2C101197311)의 지원을 받아 수행되었음. 또한, 2022년도 교육부의 재원으로 한국기초과학지원연구원 국가연구시설 장비진흥센터의 지원을 받았음.

REFERENCES

1. DebRoy, T., Wei, H., Zuback, J., Mukherjee, T., Elmer, J., Milewski, J., Beese, A. M., Wilson-Heid, A. d., De, A., Zhang, W., (2018), Additive manufacturing of metallic components—process, structure and properties, *Progress in Materials Science*, 92, 112-224.
2. Zhu, Z., Hu, Z., Seet, H. L., Liu, T., Liao, W., Ramamurty, U., Nai, S. M. L., (2023), Recent progress on the additive manufacturing of aluminum alloys and aluminum matrix composites: Microstructure, properties, and applications, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 104047.
3. Shinjo, J., Panwisawas, C., (2022), Chemical species mixing during direct energy deposition of bimetallic systems using titanium and dissimilar refractory metals for repair and biomedical applications, *Additive Manufacturing*, 51, 102654.
4. Li, B., Han, C., Lim, C. W. J., Zhou, K., (2022), Interface formation and deformation behaviors of an additively manufactured nickel-aluminum-bronze/15-5 PH multimaterial via laser-powder directed energy deposition, *Materials Science and Engineering: A*, 829, 142101.
5. Dinda, G. P., Dasgupta, A. K., Mazumder, J., (2009), Laser aided direct metal deposition of Inconel 625 superalloy: Microstructural evolution and thermal stability, *Materials Science and Engineering: A*, 509(1-2), 98-104.
6. Davis, J. R., (1993), *Aluminum and aluminum alloys*, ASM International.
7. Seo, J.-Y., Shim, D.-S., (2018), Effect of track spacing on porosity of metallic foam fabricated by laser melting deposition of Ti6Al4V/TiH2 powder mixture, *Vacuum*, 154, 200-207.
8. Ren, X., Han, D., Sun, L., Zhang, X. G., Jiang, W., Tao, Z., Lu, G. X. (2023). Experimental and numerical investigations of aluminum foam-filled auxetic circular tubular metamaterials with elliptical cells. *Construction and Building Materials*, 374, 130900.
9. Feng, X., Zhang, Z., Cui, X., Jin, G., Zheng, W., Liu, H., (2018), Additive manufactured closed-cell aluminum alloy foams via laser melting deposition process, *Materials Letters*, 233, 126-129.
10. Wang, N., Kaur, I., Singh, P., Li, L., (2021), Prediction of effective thermal conductivity of porous lattice structures and validation with additively manufactured metal foams, *Applied Thermal Engineering*, 187, 116558.
11. Dong, Y., Chen, A., Yang, T., Gao, S., Liu, S., Guo, B., Jiang, H., Shi, Y., Yan, C., (2023), Microstructure evolution and mechanical properties of Al₂O₃ foams via laser powder bed fusion from Al particles, *Advanced Powder Materials*, 2(4), 100135.
12. Shim, D.-S., Seo, J.-Y., Yoon, H.-S., Lee, K.-Y., Oh, W.-J., (2018), Additive manufacturing of porous metals using laser melting of Ti6Al4V powder with a foaming agent, *Materials Research Express*, 5(8), 086518.
13. Koike, R., Matsumoto, T., Aoyama, T., Kondo, M., (2020), Fabrication method for stainless steel foam block in directed energy deposition, *CIRP Annals*, 69(1), 173-176.
14. Hauser, T., Reisch, R. T., Breese, P. P., Lutz, B. S., Pantano, M., Nalam, Y., Bela, K., Kamps, T., Volpp, J., Kaplan, A. F., (2021), Porosity in wire arc additive manufacturing of aluminium alloys, *Additive Manufacturing*, 41, 101993.
15. Kim, J.-D., Lee, J.-H., Kim, J.-S., (2009), Characteristics of butt welded AZ31 magnesium alloy with laser welding conditions, *Journal of Advanced Marine Engineering and Technology*, 33(4), 517-523.
16. Hastie, J. C., Koelblin, J., Kartal, M. E., Attallah, M. M., Martinez, R., (2021), Evolution of internal pores within AlSi10Mg manufactured by laser powder bed fusion under tension: As-built and heat treated conditions, *Materials & Design*, 204, 109645.
17. Kotadia, H. R., Gibbons, G., Das, A., Howes, P. D., (2021), A review of Laser Powder Bed Fusion Additive Manufacturing of aluminium alloys: Microstructure and properties, *Additive Manufacturing*, 46(102155), 102155.
18. Louvis, E., Fox, P., Sutcliffe, C. J., (2011), Selective laser melting of aluminium components, *Journal of Materials Processing Technology*, 211(2), 275-284.
19. Gupta, S. P., (2002), Intermetallic compounds in diffusion couples of Ti with an Al-Si eutectic alloy, *Materials Characterization*, 49(4), 321-330.
20. Sasikumar, S., Georgy, K., Mukherjee, M., Kumar, G. V., (2020), Foam stabilization by aluminum powder, *Materials Letters*, 262, 127142.
21. Song, Y.-H., Park, S.-H., Jeong, M.-J., Kang, K.-J., Hur, B.-Y., (2008), Effect of foaming temperature on cell structure of 606X series aluminum alloy metallic foams, *Journal of Korea Foundry Society*, 28(2), 79-84.
22. Tak, B.-S., Kim, B.-G., Jeong, S.-R., Hur, B.-Y., (2010), The effect of thickening agent on foaming and mechanical properties of A356 alloy, *Journal of Korea Foundry Society*, 30(6), 241-246.
23. Seo, J.-Y., Lee, K.-Y., Shim, D.-S., (2018), Effects of process parameters on properties of porous foams formed by laser-assisted melting of steel powder (AISI P21)/foaming agent (ZrH₂) mixture, *Optics & Laser Technology*, 98, 326-338.
24. Zhou, X., Li, Y., Chen, X., (2020), Development of AlMg35-

- TiH₂ composite foaming agent and fabrication of small pore size aluminium foams, *Journal of Materials Processing Technology*, 283, 116698.
25. Schumann, E., Silvain, J.-F., Bobet, J.-L., Bardet, M., Lu, Y., Kotousov, A., Lamirand-Majimel, M., (2016), The effects of ball milling and the addition of blended elemental aluminium on the densification of TiH₂ powder, *Materials Chemistry and Physics*, 173, 106-116.
26. Gong, Y., Ma, S., Hei, H., Ma, Y., Zhou, B., Wang, Y., Yu, S., Wang, X., Wu, Y., (2020), Tailoring microstructure and its effect on wear behavior of an Al-7Si alloy reinforced with in situ formed Al₃Ti particulates, *Journal of Materials Research and Technology*, 9(4), 7136-7148.
27. Hu, L., Li, Y., Zhou, X., Yuan, G., (2022), Characterization of as-cast microstructure of aluminum foams by melt foaming method, *Materials Letters*, 308, 131112.
28. Suzuki, A., Kosugi, N., Takata, N., Kobashi, M., (2020), Microstructure and compressive properties of porous hybrid materials consisting of ductile Al/Ti and brittle Al₃Ti phases fabricated by reaction sintering with space holder, *Materials Science and Engineering: A*, 776, 139000.

**Hwa-Jeong Kim**

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

E-mail: khj0104185@naver.com

**Do-Sik Shim**

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

E-mail: think@kmou.ac.kr

• 특집 • DX시대의 제조기술, 적층제조!

형상기억 고분자의 회전형 적층제조를 통한 이중 변형 혈관 스텐트 제작

Fabrication of Dual-morphing Vascular Stents Using Additive-lathe Printing of Shape Memory Polymers

김유석¹, 이승문¹, 박석희^{1,#}
Yuseok Kim¹, Seung Mun Lee¹, and Suk-Hee Park^{1,#}

¹ 부산대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Pusan National University)
Corresponding Author / E-mail: selome815@pusan.ac.kr, TEL: +82-51-510-2894
ORCID: 0000-0002-5515-8660

KEYWORDS: Additive manufacturing (적층 제조), Shape memory polymer (형상기억 폴리머), Vascular stent (혈관 스텐트), 4D printing (4D 프린팅)

In this study, we present the fabrication of dual-morphing vascular stents using an additive-lathe printing method and two different shape-memory polymers. Traditional additive manufacturing techniques confront significant challenges in producing vascular stents with complex, hollow, mesh-like structures due to limitations such as a flat printing bed and the placement of supports. To overcome these obstacles, we employed a lathe-type additive manufacturing system with a rotatable base substrate, enabling precise fabrication of cylindrical-shaped stents. To achieve shape transformability, we used shape-memory polymers as the stent materials, offering the advantage of minimally invasive surgery. Two distinct shape-memory polymers, with different transition temperatures (35 and 55°C), were printed using the additive-lathe method. The printed stents consisted of two distinct parts that underwent dual-stage morphological changes at the different temperatures. By manipulating the printing paths, the dual-morphing properties of the stents could be adjusted in both longitudinal and circumferential directions. This innovative approach could be a solution to several limitations associated with the application of stents in diseased vascular tissues with complex shapes, facilitating minimal invasion during surgical procedures.

Manuscript received: July 7, 2023 / Revised: August 18, 2023 / Accepted: August 23, 2023

1. 서론

적층제조 공정은 1990년대에 들어 급형없이 다양한 3차원 형상을 빠르고 효율적으로 제조할 수 있는 이점을 살려 시제품 제작을 위한 패속조형기술로서 널리 활용되어 왔다[1]. 최근에는 폴리머, 세라믹, 금속 및 복합재료와 같은 다양한 소재를 사용하여 자동차, 항공우주, 의료분야 등에 직접적으로 활용될 수 있는 제품을 제작할 수 있는 수준으로 발전되어 왔다. 적층제조 공정 중 하나인 재료압출(Material Extrusion, MEX) 공정은 폴리머 기반 적층제조 공정의 대표적 방식으로서 폭넓은 재료 선택의

장점이 있다[1,2]. 재료의 선택이 자유롭기 때문에 생체적합성, 전기전도성, 연/경질 기계적 물성 등을 갖는 기능성 재료를 활용한 많은 연구가 이루어지고 있다[3-6].

이러한 기능성 재료로서 최근 형상기억 폴리머(Shape Memory Polymer, SMP)에 대한 관심이 높아지고 있다. SMP는 특정 온도 및 습도와 같은 환경 변화에 의해 물리적으로 변형된 형상이 원래의 형상으로 복원되는 기능을 가진 폴리머로, 의료, 우주, 소프트 로봇분야 등 다양한 응용 분야에서 연구가 이루어지고 있다. 이러한 SMP 소재를 적층제조 공정에 활용함으로써 환경 요인 변화 및 시간 경과에 따라 변형하는 구조를 제작하는 '4D

프린팅' 기술이 관심을 받고있다[7-9].

의료분야의 혈관 스텐트 제작에 있어 4D 프린팅 기술을 활용한 많은 연구가 진행되고 있다[10,11]. 혈관 스텐트는 혈관 내부에 삽입되어 혈관을 확장시키는 의료기기로, 혈관 폐색이나 협착을 치료하기 위해 사용된다[12]. 일반적으로 사용되는 금속 스텐트는 물리적인 힘으로 형상변화를 일으켜 혈관을 확장하지만, SMP로 제작된 스텐트는 삽입 이후 자가적으로 형상변화를 일으키기 때문에 보조 장비의 사용 및 침습 수술 부위를 최소화할 수 있는 장점이 있다[13]. 따라서 SMP를 사용한 혈관 스텐트는 기존의 금속 스텐트와 비교해 더 나은 회복 속도 및 치료 효과를 기대할 수 있다[14]. 현재까지는 대부분 단일 재료의 SMP로 제작한 혈관 스텐트가 주로 연구되어 왔다[10]. 하나의 SMP 소재만을 사용할 경우, 형상복원이 단조롭게 한가지 형태로만 일어나게 된다. 이는 복잡한 혈관 네트워크 내에서 스텐트의 침습이 단계적으로 이뤄져야 할 경우 시술의 공간적 제약이 따를 수 있다[15].

본 연구에서는 두 가지 서로 다른 SMP 소재를 복합 프린팅하여 스텐트를 제작하고, 제작된 스텐트의 두 단계에 걸친 형상 변화 특성을 검증함으로써 기존 단일재료 SMP 스텐트의 한계점 극복 가능성을 확인하고자 한다. 두 종류의 SMP는 각각 35°C와 55°C에서 반응하여 변형회복이 일어난다. 따라서 제작된 스텐트는 온도변화에 따라 각 온도에서 두 단계의 형상변화를 하게 된다. 일반적으로 혈관 스텐트의 경우 적절한 변형성 및 강성을 갖기 위해 메쉬(Mesh) 패턴을 가진 중공 원통(Hollow Cylinder)의 형태로 제작된다. 기존 상향 적층 3D 프린팅 방식으로 이러한 형태를 제작할 경우, 용융 폴리머의 불안정한 유변학적 특성과 지지대(Support) 배치의 어려움으로 인해 제조 형상의 정밀도가 떨어지게 된다. 따라서 본 연구에서는 회전형 적층제조 시스템을 통해 SMP 소재를 프린팅하여 메쉬형 혈관 스텐트를 제작한다. 회전형 3D 프린팅 공정 방식을 채택함으로써 복잡한 메쉬 패턴 형상의 혈관 스텐트를 효율적으로 제작할 수 있었으며, 이를 통해 혈관 스텐트의 형상 정밀도 향상 및 이중 변형성을 확보할 수 있었다.

2. 재료 및 방법

2.1 회전형 3D 프린터

기본 프린팅 시스템은 필라멘트 형태의 열가소성 폴리머를 용융하여 노즐을 통해 분사하는 FFF (Fused Filament Fabrication) 방식으로 구성하였다. 회전형 3D 프린터(Lathe-type 3D Printer)는 제작 플랫폼(Build Platform)을 보편적인 카테시안 좌표계(Cartesian Coordinate System) 기반의 평판 프린팅 베드(Flat Printing Bed)에서 원통 형태의 맨드릴(Mandrel)로 대체한 것이다[16]. 회전형 3D 프린터의 펌웨어(Firmware)는 오픈소스인 Marlin을 사용하였으며 G-code는 오픈소스 슬라이싱 소프트웨어인 Cura를 사용했다. 본 연구에서 사용된 맨드릴은 직경

8 mm, 길이 200 mm이다. PVA (Poly-vinylalcohol) 필라멘트(PVA 필라멘트, 1.75 mm, eSUN Ltd., 중국)를 스텐트가 제작될 영역에 사전에 프린트하여 안정적인 적층이 이루어지도록 하였다. PVA 프린팅에 사용된 노즐의 직경은 0.4 mm, 압출온도 210°C, 압출 속도는 15 mm/s 이다.

2.2 형상기억 폴리머(SMP)

35°C와 55°C의 두 가지 서로 다른 유리전이온도(T_g)를 갖는 열가소성 폴리우레탄(Thermoplastic Polyurethan, TPU) 기반의 SMP 원재료를 사용하였다(NGM3520, NGM5520, Ether Type, Nanografi, Turkey). NGM3520과 NGM5520은 각각 35°C와 55°C 이상에서 이전 변형상태로 형상복원이 일어나는 특징을 갖는다. 원재료는 펠릿(Pellet) 형태로 주어지며 이를 압출기(필리봇 H400, 포던테크, 한국)를 사용하여 필라멘트 형태로 가공하였다. NGM3520과 NGM5520 재료는 각각 180°C와 210°C에서 압출 하였으며 필라멘트 압출기의 노즐 직경은 1.2 mm, 압출 속도 10 mm/s이다. 최종적으로 프린팅용으로 제작한 NGM3520 및 NGM5520 필라멘트는 직경 1.75 mm에 맞추어 압출하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 SMP의 프린팅 특성

회전형 적층제조 기반 SMP 스텐트를 제작하기에 앞서, SMP의 최적 프린팅 공정변수를 찾는 사전 테스트를 수행하였다. 일반적으로 권장되는 TPU의 프린팅 속도인 10 mm/s와 온도 210°C 조건을 초기설정으로 두고 스텐트 메쉬 패턴을 2차원 평면으로 제작한 결과, 패턴 형상이 불명확하며 재료의 압출이 과하게 이루어졌다(Fig. 1(a)). 프린팅 속도를 20 mm/s로 제작한 결과 적절한 메쉬 패턴이 제작되었으며 과도한 압출 또는 미형성된 패턴 부위가 관찰되지 않았다(Fig. 1(b)). 40 mm/s의 속도로 제작한 경우, 과도한 프린팅 속도로 인해 노즐에서 새어나온 용융된 폴리머가 패턴 내부에서 실처럼 늘어지는 결함(Stringing)과 패턴의 두께가 얇아지는 현상이 발견되었다(Fig. 1(c)). 이와 같이 메쉬 패턴이 적절한 형태로 형성되는 조건을 NGM3520 그리고 NGM5520 두 가지 재료에 대해 실험적 시행착오를 통해 찾았다. 그 결과 두 재료 공통적으로 20 mm/s의 프린팅 속도로 제작하였으며, NGM3520은 210°C, NGM5520은 235°C의 노즐 온도로 각각 설정하였다.

3.2 회전형 3D 프린터

전술한 바와 같이 일반적인 평판형 베드 프린팅 방식과 비교해 회전형 3D 프린팅 방식은 중공형태의 구조물을 제작하는데 장점이 있다[16]. 특히, 복잡한 메쉬패턴을 갖는 원통형 혈관 스텐트와 같은 구조물을 제작하는 데에 특화시킬 수 있다(Fig. 2(a-i)). 스텐트는 회전형 3D 프린팅을 통해 20 mm/s의 속도로 제작되었으며, 결함 없이 제작된 것을 확인할 수 있다. 이는 용

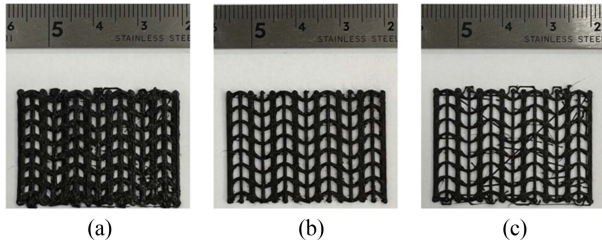


Fig. 1 Mesh patterns printed with different printing speeds: (a) 10 mm/s, (b) 20 mm/s, and (c) 40 mm/s

용된 폴리머가 불안정한 유변학적 특성을 갖더라도 맨드릴 표면에 적층하기 때문에 지지대가 필요하지 않기 때문이며, 용융된 폴리머가 실처럼 늘어지는 결함과 형상이 무너지는 결함 (Collapsing)이 발생하지 않았다. Fig. 2(a-ii)에서 보는 바와 같이 평판 프린팅 베드를 사용하는 전통 방식의 3D 프린터에서 같은 형상을 제작할 경우 매우 불안정한 형태로 적층된다. 또한 제작된 메쉬패턴에서 수많은 Stringing 결함이 발생함을 확인하였다.

또한 스텐트 형상을 이중 재료의 복합된 형태로 제작하는 경우, 회전형 3D 프린팅 방식이 더욱 장점을 보인다. 기존 평판형 프린팅 방식은 공정 중 적층방향(z축)에서 다른 재료의 사용을 위해 재료 변경 과정이 필요하며 이를 위해 이중 노즐(Dual Nozzle) 방식의 3D 프린터를 사용한다[17]. 이러한 경우 같은 적층면이 바뀔 때마다 잦은 노즐 교체로 인해 제작물의 품질이 저하될 수 있다. 반면, 회전형 3D 프린터에서는 맨드릴의 둘레 방향 및 길이방향으로 같은 반경면에서 적층이 이루어지기 때문에 재료 변경 과정을 상대적으로 줄일 수 있는 이점이 있다.

Fig. 2(b)는 제작한 회전형 3D 프린터이다. 알루미늄 프로파일과 베어링을 기본 틀로 사용하였고 부수적인 부품들은 PLA 필라멘트 (Moment 사, 한국)를 통해 별도로 3D 프린팅하여 제작하였다. 기존의 회전형 3D 프린터의 경우, 베어링이나 커플러로 맨드릴을 고정하여 사용하기 때문에 다양한 지름의 맨드릴을 사용할 수 없는 단점이 있다. 이 문제를 해결하기 위해 Fig. 2(c)와 같이 맨드릴 고정 부위를 선반의 척(Chuck) 형태로 제작하여 다른 지름을 갖는 맨드릴을 자유롭게 교체하여 사용할 수 있도록 했다. 맨드릴은 고정부 척의 조우(Jaw)를 통해 고정되며 회전부와 함께 회전하며 표면에 프린팅이 이루어질 수 있도록 제작하였다. 그리고 오픈소스로 제공되는 선반 척 모델에서 기어 부분을 추가하여 모터와 연결된 타이밍 벨트에 의해 회전할 수 있도록 설계하였으며 3D 프린팅을 통해 척과 기어를 제작하였다.

3.3 PVA 코팅 맨드릴을 사용한 스텐트 제작

회전형 3D프린터를 통하여 제작된 적층 구조물은 맨드릴의 표면과 구조물의 내측면이 전체적으로 부착되어 있으며, 이러한 부착력은 안정적인 회전 적층을 위해 필수적이다. 반면 적층이 완료된 후에는 이 부착력으로 인해 구조물과 맨드릴을 분리하기 매우 어려우며, 분리과정 중에 적층 구조물의 손상이 일어날 수 있다.

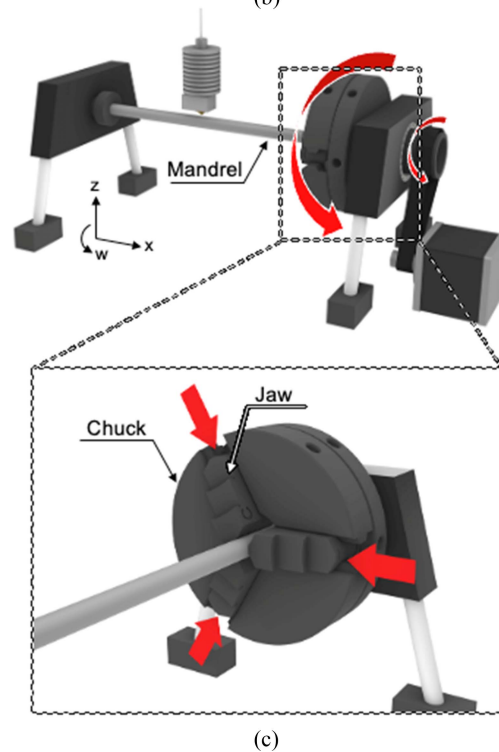
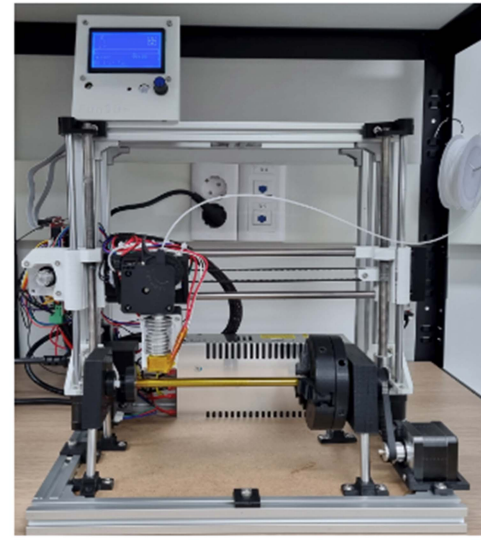
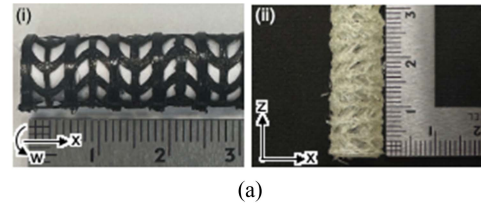


Fig. 2 (a) Mesh-form stents printed by (i) additive-lathe 3D printing system and (ii) conventional 3D printer with flat bed. (b) Lab-made additive-lathe machine. (c) Schematic illustration of working parts in the additive-lathe machine

따라서 제작한 중공 형태의 혈관 스텐트와 맨드릴을 분리하는 과정 중 발생가능한 스텐트의 손상을 최소화하기 위해, 프린팅

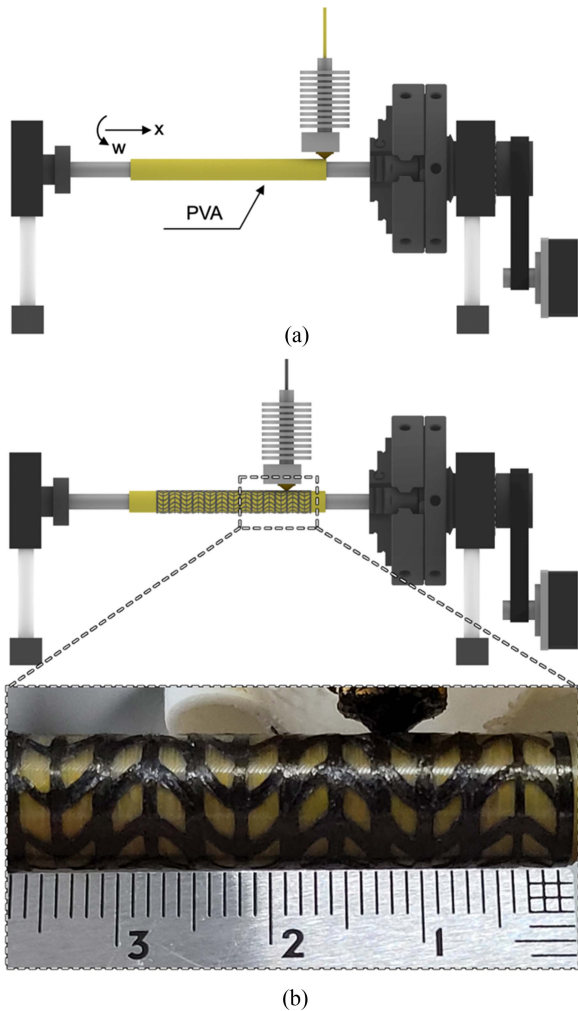


Fig. 3 (a) PVA coating on mandrel surface. (b) Additive-lathe printing of stent on PVA-coated mandrel

만드릴에 수용성 재료인 PVA 재료를 한 층 프린팅함으로써 표면 코팅을 하였다(Fig. 3(a)). 이후 PVA 코팅 맨드릴 표면에 스텐트 구조물을 적층제조하여 완성하고, PVA 코팅층을 물에 녹여 제거함으로써 제조된 혈관 스텐트와 맨드릴 사이에 공간적 여유를 발생시킬 수 있다. 이러한 공간적 여유에 의해 제조된 스텐트를 쉽게 분리할 수 있으며, 강제적인 물리적 힘이 가해지지 않기 때문에 스텐트 구조물의 손상이 최소화될 수 있다.

3.4 이중 변형 혈관 스텐트 설계 및 제작

변형회복 온도가 서로 다른 두 종류의 SMP를 이용하여 혈관 스텐트의 형상 변화가 두 단계에 걸쳐 일어날 수 있도록 메쉬 패턴을 제작하였다(Figs. 3(b) 및 4(a)). 메쉬 패턴의 설계는 상용 스텐트에서 많이 사용하는 벌집(Honey Comb) 및 오그제틱(Auxetic) 구조 디자인을 참조하였다[18,19].

원주방향의 뼈대와 이를 각각 연결하는 물결 무늬의 메쉬를 폭 0.1 mm 및 두께 0.4 mm로 프린팅 제작하였다. 각 뼈대와 메쉬 부분에 다른 재료를 배치함으로써 변형 형태가 다른 두 가지

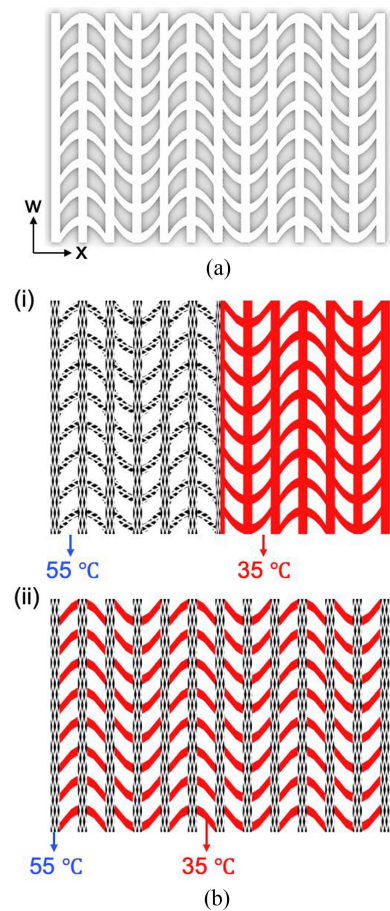


Fig. 4 (a) Mesh pattern of stent. (b) Dual composition of two different SMP materials for dual-morphing transformation in (i) longitudinal and (ii) longitudinal/circumferential ways

설계를 제안하였다. 첫 번째로 55°C와 35°C에 형상회복이 일어나는 SMP (NGM5520와 NGM3520)를 길이방향으로 이어 배치하여 길이방향의 이중 형상복원이 일어날 수 있게끔 설계하였다. 이 설계안은 사용자의 판단에 따라 길이방향으로 팽창되는 길이 조절이 가능하다. Fig. 4(b-i)의 파란색 영역은 NGM5520을 사용하였으며 빨간색 영역은 NGM3520을 사용하였다. 회전형 적층제조 공정을 통해 NGM5520의 파란색 영역 제작완료 이후, 재료를 NGM3520으로 변경하여 빨간색 영역을 제작하였다. 또한 서로 다른 재료가 맞닿는 부위를 뼈대 폭의 절반(0.5 mm)만큼 중첩 프린팅함으로써 각 부위를 연결하였다. 길이방향으로 배치된 서로 다른 SMP에 의해 온도가 상승함에 따라 형상복원 온도가 낮은 재료인 NGM3520부터 변형이 시작되며, 이후 추가 온도 상승에 의해 NGM5520 부위의 변형이 이루어진다.

두 번째 설계안으로는 스텐트가 길이방향과 원주방향으로 형상의 단계적 복원이 가능하도록 디자인하였다(Fig. 4(b-ii)). 이는 압축된 스텐트를 길이 방향으로 먼저 확장시켜 병변으로 좁아진 혈관에 적절하게 위치시킨 후, 원주방향으로 팽창하여 병변 혈관 부위를 확장시키는 기능을 가진다. NGM3520을 사용해

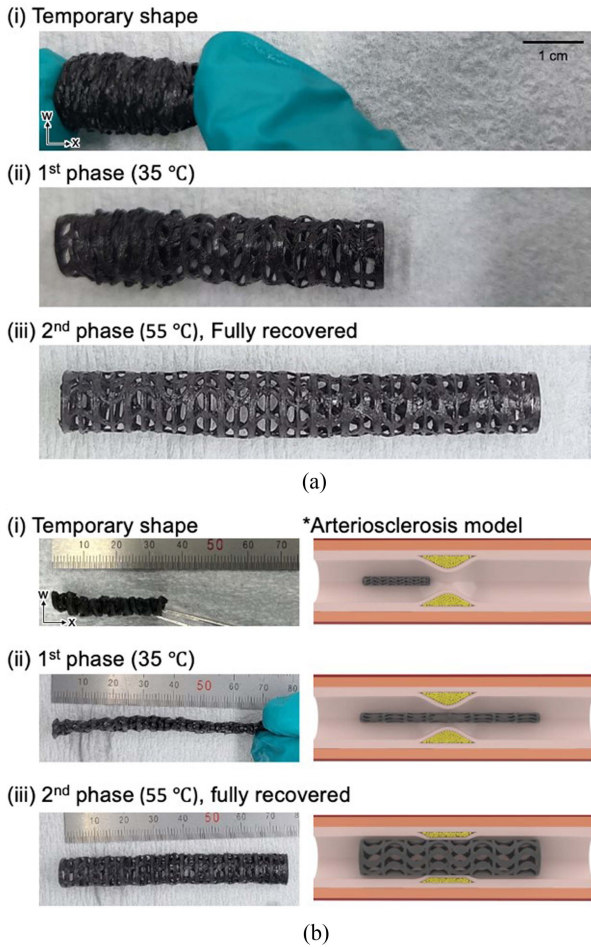


Fig. 5 Shape recovery of dual-morphing vascular stents in (a) longitudinal and (b) longitudinal/circumferential directions

뼈대(파란색)를 제외한 빨간색 영역을 제작한 뒤, NGM5520를 사용해 파란색 영역의 뼈대를 제작함으로써, 35°C에서의 길이 방향 확장 및 55°C에서의 원주방향으로 팽창이 순차적으로 일어난다.

3.5 이중 변형 혈관 스텐트의 형상복원 과정

혈관 스텐트는 일시적으로 형상이 압축된 상태로 환자의 몸에 삽입되며, 표적 위치에서 팽창하여 심혈관계 질환으로 좁혀진 혈관의 개존율(Patency Rate)을 회복한다[12]. 따라서 혈관 스텐트는 수축된 상태와 팽창된 상태로 그 형태와 구분되고, 표적 위치에 도달하기 전까지는 수축시킨 형태를 유지하게 된다. SMP기반의 스텐트는 먼저 팽창된 형상을 기준으로 제작하고 이를 압축상태로 고정한다. SMP는 유리전이온도 이상에서 물리적인 힘으로 압축이 가능하며, 압축을 유지시킨 상태에서 온도를 유리전이온도 이하로 떨어뜨릴 경우 압축력을 제거하여도 변형상태의 형상이 고정된다[20,21]. 제작된 스텐트를 두 SMP의 유리전이온도 이상의 온도인 60°C의 온수에 담가 물리적인 힘을 가해 길이 및 원주 방향으로 압축시켰다. 압축을 유지한

상태로 얼음물에 담가 온도를 0°C 이하로 떨어뜨려 형태를 일시적으로 고정시켰다(Figs. 5(a-i) 및 5(b-i)).

첫 번째 설계안으로 제작된 스텐트는 Fig. 5(a)에서 볼 수 있듯이 길이방향으로 두 단계에 걸쳐 형상이 복원되었다. 압축 고정된 스텐트를 35°C 이상 55°C 이하의 온수에 담가 NGM3520으로 제작된 부분의 1차 형상복원을 유도하였다(Fig. 5(a-ii)). 다음으로 NGM5520으로 제작된 부분의 2차 형상복원을 위해 스텐트를 55°C 이상의 따뜻한 물에 담가 수축 전 원래의 형태로 복원이 됨을 확인하였다(Fig. 5(a-iii)). 이 스텐트는 길이방향으로의 형상 변형이 가능하도록 설계된 것으로, 스텐트 시술 환경에서 주어진 병변 부위의 범위에 맞추어 길이를 조절할 수 있다.

두 번째 설계안은 동맥경화(Arteriosclerosis)와 같은 질환의 시술에 특화된 형상으로서 병변으로 좁혀진 공간을 통과하고 팽창시킴으로써 해당 부위를 확대하는 기능을 갖는다(Fig. 5(b)). 길이방향과 원주방향으로 압축 고정된 스텐트는 35°C 이상 55°C 이하의 온도에서 NGM3520으로 제작된 부분이 길이방향으로 1차 형상복원 되어 좁은 병변 부위를 통과할 수 있다(Fig. 5(b-ii)). 둘레의 뼈대에 사용된 NGM5520은 55°C 이상의 온도에서 반응하며, 원주방향으로 2차 형상복원되어 좁은 병변 부위를 확대하는 기능을 한다(Fig. 5(b-iii)).

4. 결론

본 연구에서는 회전형 3D 프린팅 시스템을 제작하고 이를 활용하여 SMP 기반의 혈관 스텐트를 제작하였다. 스텐트는 메쉬 패턴을 갖는 중공 형태의 구조물로서, 일반적인 카테시안 좌표계 평판 적층제조 방식에서는 용융 폴리머의 불안정한 유변학적 특성 및 지지대 배치의 어려움으로 인해 제작 안정성이 매우 떨어진다. 따라서 본 연구에서는 회전형 3D 프린팅 방식을 채택하였으며, 이를 통해 일반적인 평판방식 3D 프린팅 공정에 비해 안정적으로 메쉬 패턴 중공 구조물을 제작할 수 있음을 확인하였다. 회전 프린팅을 위한 맨드릴 표면에 PVA 층을 프린팅하여 형성함으로써 스텐트 구조물 제작 이후 맨드릴과의 분리를 용이하게 하였다. 또한 형상복원 온도가 다른 두 종류의 SMP를 복합적으로 회전 3D 프린팅함으로써 이중 변형이 가능한 스텐트를 제작하였다. 본 연구에서는 35°C와 55°C로 형상 복원온도가 다른 SMP를 활용함으로써 시술 후 온도 상승에 따라 두 단계에 걸쳐 형상 변형이 이루어질 수 있도록 하였다. SMP 재료의 배치 구성에 따라 길이 방향으로 두 단계의 변형이 이루어지거나 길이방향 및 원주방향의 두 단계로 변형이 이루어질 수 있도록 구현하였다. 이러한 3D 프린팅 기반의 형상변형 특성을 갖는 스텐트는 심혈관계 질환의 스텐트 시술에 있어 최소침습형으로 활용할 수 있으며 병변 부위 접근 방식 및 치료 방식을 다변화하여 환자맞춤형 치료에 다양하게 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 연구는 2022년도 부산대학교 기계기술연구원의 연구회 지원사업 연구비 지원으로 이루어졌음(No. PNU RIMT2022-01(CMIT2022-19)).

REFERENCES

- Gibson, I., Rosen, D. W., Stucker, B., Khorasani, M., Rosen, D., Stucker, B., Khorasani, M., (2021), Additive manufacturing technologies, Springer.
- Wohlers, T., Caffrey, T., (2010), Wohlers report 2010, Wohlers Associates. <https://wohlersassociates.com/product/wohlers-report-2010/>
- Zhou, L. Y., Fu, J., He, Y., (2020), A review of 3D printing technologies for soft polymer materials, *Advanced Functional Materials*, 30(28), 2000187.
- Goh, G. D., Yap, Y. L., Tan, H., Sing, S. L., Goh, G. L., Yeong, W. Y., (2020), Process–structure–properties in polymer additive manufacturing via material extrusion: A review, *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 45(2), 113-133.
- Tang, K., Ma, H., Tian, Y., Liu, Z., Jin, H., Hou, S., Zhou, K., Tian, X., (2020), 3D printed hybrid-dimensional electrodes for flexible micro-supercapacitors with superior electrochemical behaviours, *Virtual and Physical Prototyping*, 15(sup1), 511-519.
- Liu, H., Zhou, H., Lan, H., Liu, T., (2017), Organ regeneration: Integration application of cell encapsulation and 3D bioprinting, *Virtual and Physical Prototyping*, 12(4), 279-289.
- Zhao, Q., Qi, H. J., Xie, T., (2015), Recent progress in shape memory polymer: New behavior, enabling materials, and mechanistic understanding, *Progress in Polymer Science*, 49, 79-120.
- Liu, C., Qin, H., Mather, P., (2007), Review of progress in shape-memory polymers, *Journal of Materials Chemistry*, 17(16), 1543-1558.
- Hager, M. D., Bode, S., Weber, C., Schubert, U. S., (2015), Shape memory polymers: Past, present and future developments, *Progress in Polymer Science*, 49, 3-33.
- Sokolowski, W., Metcalfe, A., Hayashi, S., Raymond, J., (2007), Medical applications of shape memory polymers, *Biomedical Materials*, 2(1), S23.
- Holman, H., Kavarana, M. N., Rajab, T. K., (2021), Smart materials in cardiovascular implants: Shape memory alloys and shape memory polymers, *Artificial Organs*, 45(5), 454-463.
- Brancati, M. F., Burzotta, F., Trani, C., Leonzi, O., Cuccia, C., Crea, F., (2017), Coronary stents and vascular response to implantation: Literature review, *Pragmatic and Observational Research*, 137-148.
- Jeewantha, L. H. J., Epaarachchi, J. A., Forster, E., Islam, M., Leng, J., (2022), Early research of shape memory polymer vascular stents, *Express Polymer Letters*, 16(9), 902-923.
- Ang, H. Y., Huang, Y. Y., Lim, S. T., Wong, P., Joner, M., Foin, N., (2017), Mechanical behavior of polymer-based vs. metallic-based bioresorbable stents, *Journal of Thoracic Disease*, 9(Suppl 9), S923.
- Lin, C., Zhang, L., Liu, Y., Liu, L., Leng, J., (2020), 4D printing of personalized shape memory polymer vascular stents with negative Poisson's ratio structure: A preliminary study, *Science China Technological Sciences*, 63(4), 578-588.
- Reeser, K., Doiron, A. L., (2019), Three-dimensional printing on a rotating cylindrical mandrel: A review of additive-lathe 3D printing technology, *3D Printing and Additive Manufacturing*, 6(6), 293-307.
- Smith, M. L., Jones, J. F., (2018), Dual-extrusion 3D printing of anatomical models for education, *Anatomical Sciences Education*, 11(1), 65-72.
- Bhullar, S., Ko, J., Ahmed, F., Jun, M., (2014), Design and fabrication of stent with negative Poisson's ratio, *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering*, 8(2), 448-454.
- Raamachandran, J., Jayavenkateshwaran, K., (2007), Modeling of stents exhibiting negative Poisson's ratio effect, *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 10(4), 245-255.
- Zhao, W., Zhang, F., Leng, J., Liu, Y., (2019), Personalized 4D printing of bioinspired tracheal scaffold concept based on magnetic stimulated shape memory composites, *Composites Science and Technology*, 184, 107866.
- Omid, S. O., Goudarzi, Z., Kangarshahi, L. M., Mokhtarzade, A., Bahrami, F., (2020), Self-expanding stents based on shape memory alloys and shape memory polymers, *Journal of Composites and Compounds*, 2(3), 92-98.



Yuseok Kim

M.S. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Pusan National University. His research interest is additive manufacturing and artificial intelligence.
E-mail: yuseok@pusan.ac.kr



Seung Mun Lee

M.S. student in the Department of Mechanical Engineering, Pusan National University. His research interest is additive manufacturing and artificial intelligence.
E-mail: ch273404@pusan.ac.kr



Suk-Hee Park

Associate Professor in School of Mechanical Engineering, Pusan National University. His research interest is manufacturing of biomedical system and AI-based additive manufacturing.
E-mail: selome815@pusan.ac.kr

• 특집 • DX시대의 제조기술, 적층제조!

적층제조를 통해 제작된 다양한 격자구조의 실험적 결과와 AEH (Asymptotic Expansion Homogenization) 해석 결과의 비교

A Comparative Analysis of AEH (Asymptotic Expansion Homogenization) Results and Experimental Findings of Various Additive Manufactured Lattice Structures

리고베르토¹, 김민수², 조영삼^{1,3,#}

Rigoberto Lopez Reyes¹, Min-Soo Ghim², and Young-Sam Cho^{1,3,#}

¹ 원광대학교 메카바이오연구소 (MECHABIO Group, Wonkwang University)

² 원광대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Wonkwang University)

³ 원광대학교 기계공학부 (Division of Mechanical Engineering, Wonkwang University)

Corresponding Author / E-mail: youngsamcho@wku.ac.kr, TEL: +82-063-850-6694

ORCID: 0000-0002-0545-1586

KEYWORDS: Lattice structure (격자 구조), Asymptotic expansion homogenization (정합점근전개법), Effective stiffness (유효강성), SLA 3D printer (SLA 3D 프린터)

Recently, the demand for lightweight open-pore lattice structures with specific stiffness is increasing in many fields, such as the aeronautical, automotive, mechanical and bone tissue engineering sectors. For each concrete application, there is a need to predict its mechanical properties precisely and efficiently. There are several methods used to analyze the mechanical properties of lattice structures. Among them, the asymptotic expansion homogenization method is a more advantageous approach over the experimental, theoretical, and finite element methods, because it handles some of their limitations such as the time-consuming process, size effect, and the high amount of computational resources needed. Therefore, in this work, we use the asymptotic expansion homogenization method to perform a systematic parametric study to calculate the effective stiffness of different open-pore lattice structures. In addition, the designed models were fabricated using an SLA 3D printer, and the effective stiffness of the fabricated specimens was tested via UTM experiment to validate the numerical results computed by the asymptotic expansion homogenization method. Consequently, it was proved that this method is precise and effective for predicting the mechanical properties of lattice structures.

Manuscript received: June 19, 2023 / Revised: July 24, 2023 / Accepted: July 27, 2023

NOMENCLATURE

AEH = Asymptotic Expansion Homogenization Method
AM = Additive Manufacturing
BCC = Body Centered Cubic
FCC = Faced Centered Cubic

RVE = Representative Volume Element
SC = Simple Cubic
SC-BCC = Simple Cubic-Body Centered Cubic
SC-FCC = Simple Cubic-Faced Centered Cubic
SLA = Stereolithography
UTM = Universal Testing Machine

1. Introduction

Lattice structures are concerning in different fields such as biomedical engineering, automotive or aerospace industry, and light weight design as they often exhibit versatile physical properties. Lattice structures provide great strength-to-weight ratio, significant permeability, and outstanding impact-absorption [1,2]. Several lattice cell compositions have been discovered in the past few decades and the most widely studied are the simple-cubic, body-centered cubic (BCC), face-centered cubic (FCC), and their combination such as the simple-cubic body-centered and simple-cubic face-centered structures, in which their mechanical properties has been investigated [3-8].

To determine the effective mechanical properties of those lattice structures, there are several available methods such as: experimental approaches, analytical modeling, and finite element method [9-20]. However, each of the above approaches has its limitations. For example, the experimental approach is a time-consuming process, budgetary expensive and the results are highly subjective due to the possibility of human error. In the theoretical modeling, assumptions affect the solution, and it is difficult to use for complex problems. In the case of finite element method approach, the computational cost for complex problems is expensive and the results can have some error if the periodic boundary conditions cannot be implemented in the case of unit-cell analysis.

On the other hand, the AEH method is an alternative approach that can handle the time-consuming process, the size effect problem, and the high computational cost inconveniences that the traditional methods possess [21,22]. This advantage comes from the fact that AEH method establishes a relationship between the macroscopic and microscopic field to predict the effective mechanical properties of structures by analyzing the representative volume element (RVE) which is the smallest volume or unit that captures the microstructural features and behaviors of a whole structure or material. More specifically, RVE is a unit volume within a heterogeneous material that is selected to be statistically representative of the entire composite structure [23,24].

AEH method has been successfully applied to a wide range of different configurations and composition of composite materials [25-27] and in contemporary engineering applications including nanotechnologies [28,29], smart composite modeling [30,31], modeling of thin network structures [32] thanks to its effectiveness to predict mechanical properties precisely without high computational cost.

Meanwhile, additive manufacturing (AM) has gained attention for the fabrication of lattice structures after appearance of rapid prototyping. AM is a manufacturing process that involves creating

objects layer by layer from 3D model data. This layer-by-layer manufacturing approach is very thankful because it is possible to manufacture complex structures which could not be fabricated by conventional manufacturing process. AM processes are categorized as: binder jetting, direct energy deposition, material extrusion, material jetting, power bed fusion, sheet lamination, and vat photopolymerization [33]. Within the category of vat photopolymerization process, the utilization of stereolithographic (SLA) 3D printing is now becoming more accessible to end users with the appearance of affordable printers on the market. SLA printing technology allows the fabrication of prototypes and final products with the main advantage to fabricate products precisely with high resolution [34].

Therefore, the models in this study were manufactured using an SLA 3D printer and we performed compressive experiments using a universal testing machine (UTM) on the fabricates specimens to validate the result obtained by the numerical model based on AEH method and it was confirmed that this method is an advantageous approach to calculate the effective mechanical properties of lattice structures.

2. Design and Fabrication of Unit-cell

2.1 Design of Unit-cell

The unit-cells were designed using the software SolidWorks2020 (CAD software, Dassault Systèmes SolidWorks Corp., Waltham, MA, USA). The lattice structures analyzed in this study are the SC (Simple Cubic) truss, BCC (Body Centered Cubic) truss, FCC (Face Centered Cubic) truss, SC-BCC (Simple Cubic-Body Centered Cubic) truss, and SC-FCC (Simple Cubic-Face Centered Cubic) truss. For the clear numerical comparison, every characteristic dimension of specimens is set as dimensionless value of 1.0 and the important proportions are depicted in Fig. 1 and Table 1. Furthermore, in order that the porosity has no influence on the effective stiffness of the structures, all the structures were designed to have same porosity of 50%.

2.2 Fabrication of Unit-cell Using an SLA 3D Printer

The designed unit-cell were manufactured using an SLA 3D printer (Form 3+, Formlabs Inc., Somerville, MA, USA) with a laser power 250 mW and layer thickness 50 μm . By the software PreForm (version 3.28.0), the models were sliced. The designed unit-cell models were fabricated with clear resin for general purpose and to minimize the influence of printing orientation, the models were printed at 45-degree orientation [35]. The fabricated unit-cells were washed in ethyl alcohol for 20 min in an ultrasonic

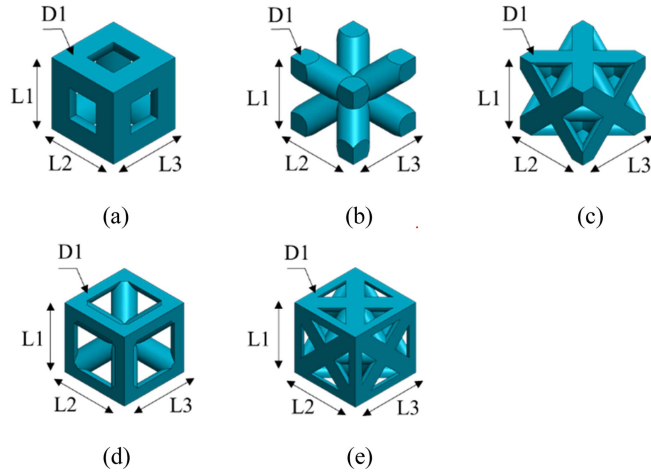


Fig. 1 Structural schematics and parameters of unit-cells: (a) SC truss, (b) BCC truss, (c) FCC truss, (d) SC-BCC truss, (e) SC-FCC truss (L: length of strand, D: diameter of strand)

Table 1 Dimensionless value for the parameters of unit-cells

Unit-Cell	Dimensionless value for the parameters			
	L1	L2	L3	D1
SC truss	1.00	1.00	1.00	0.57
BCC truss	1.00	1.00	1.00	0.37
FCC truss	1.00	1.00	1.00	0.24
SC-BCC truss	1.00	1.00	1.00	0.31
SC-FCC truss	1.00	1.00	1.00	0.22

cleaner and post-cured for 60 min with 1.25 mW/cm² of 405 nm LED light at 60°C.

2.3 Prediction of Effective Stiffness by AEH Method

The AEH (Asymptotic Expansion Homogenization method) [21,22] considers that the micro-mechanical behavior of a heterogeneous material can be expressed by considering periodicity within a unit-cell over the entire material as illustrated in Fig. 2. The macroscopy model Ω , which represents the overall structure is described by coordinates x_i . On the other hand, the repetitive unit-cell, which is the microscale model Y , is defined by coordinates y_i .

The parameter ϵ establishes a relationship between the characteristic dimensions of the microscale and macroscale. Since there is a significant difference in size between these two scales, the value of ϵ needs to be relatively small ($\epsilon \ll 1$)

$$y = \frac{x}{\epsilon} \tag{1}$$

The Y-periodicity of the microstructural heterogeneities refers to

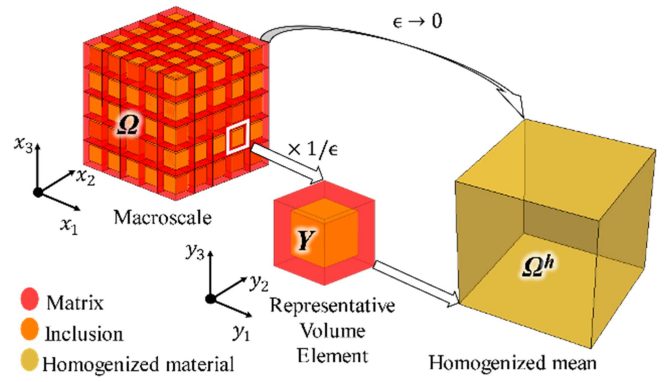


Fig. 2 Schematic of asymptotic homogenization method

the functional dependence on y , which repeats itself periodically within the Y -period. This property is reflected in the elasticity tensor D , where its components are Y -periodic in y . On the other hand, at the macroscale level, the material is considered homogeneous. Thus, the components of the elasticity tensor can be represented as:

$$D_{ijkl} = D_{ijkl}(y) \tag{2}$$

Nevertheless, in terms of the macroscale system of coordinates x , the microstructural heterogeneity manifests itself in periods ϵ^{-1} that are less than the characteristic dimension of the domain Y . Following expression (1), the relationship is represented as:

$$D_{ijkl}^\epsilon(x) = D_{ijkl} \frac{x}{\epsilon} \tag{3}$$

in which D_{ijkl} denotes the elastic properties corresponding to the microscale model Y . Once the tensor D_{ijkl} is calculated, we can use it to determine the elasticity tensor $D_{ijkl}^\epsilon(x)$ in coordinates x_i for the macroscale model.

Then, the linear-elasticity problem can be mathematical stated as:

$$\frac{\partial \sigma_{ij}^\epsilon}{\partial x_j^\epsilon} + f_i = 0 \text{ in } \Omega \tag{4}$$

$$\epsilon_{ij}^\epsilon = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i^\epsilon}{\partial x_j^\epsilon} + \frac{\partial u_j^\epsilon}{\partial x_i^\epsilon} \right) \text{ in } \Omega \tag{5}$$

$$\sigma_{ij}^\epsilon = D_{ijkl}^\epsilon \epsilon_{kl}^\epsilon \text{ in } \Omega \tag{6}$$

$$u_i^\epsilon = \bar{u}_i \text{ in } \Gamma_u \tag{7}$$

$$\sigma_{ij}^\epsilon n_j = \bar{t}_i \text{ in } \Gamma_t \tag{8}$$

the components of the Cauchy stress tensor are denoted by σ_{ij} while the strain tensor's components in the macroscale coordinates x_i are denoted by ϵ_{ij} . The presence of repeated indices in the

preceding equations signifies that we are performing a summation over the three coordinates.

Taking into account the presence of two different scales that characterize the material behavior at the macroscale Ω and microscale Y , the displacement field is approached employing the following asymptotic expansion with respect to the parameter ε :

$$u_i^\varepsilon(x) = u_i^{(0)}(x, y) + \varepsilon u_i^{(1)}(x, y) + \varepsilon^2 u_i^{(2)}(x, y) + \dots \quad (9)$$

Since we are dealing with two different coordinate systems, x_i and y_i , in the derivation equations, we can consider the following chain rule expansion:

$$\frac{\partial}{\partial x_i^\varepsilon} = \frac{\partial}{\partial x_i} + \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial}{\partial y_i} \quad (10)$$

The chain rule of the precedent Eq. (10) can be implemented into Eq. (9), consequently, we determine the components of strain and stress:

$$\varepsilon_{ij}^\varepsilon = \varepsilon^{-1} \varepsilon_{ij}^{(0)} + \varepsilon^0 \varepsilon_{ij}^{(1)} + \varepsilon^1 \varepsilon_{ij}^{(2)} \dots \quad (11)$$

$$\sigma_{ij}^\varepsilon = \varepsilon^{-1} \sigma_{ij}^{(0)} + \varepsilon^0 \sigma_{ij}^{(1)} + \varepsilon^1 \sigma_{ij}^{(2)} \dots \quad (12)$$

Where:

$$\varepsilon_{ij}^{(0)} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i^{(0)}}{\partial y_j} + \frac{\partial u_j^{(0)}}{\partial y_i} \right) \quad (13)$$

Then, replacing Eq. (9) within Eq. (5) which is the strain-displacement relationship and implementing the result in Eq. (6), we obtain an equation that relies on ε :

$$\varepsilon^{-2} \frac{\partial \sigma_{ij}^{(0)}}{\partial y_j} + \varepsilon^{-1} \left(\frac{\partial \sigma_{ij}^{(0)}}{\partial x_j} + \frac{\partial \sigma_{ij}^{(1)}}{\partial y_j} \right) + \varepsilon^0 \left(\frac{\partial \sigma_{ij}^{(1)}}{\partial x_j} + \frac{\partial \sigma_{ij}^{(2)}}{\partial y_j} + f_i \right) + \dots = 0 \quad (14)$$

As Eq. (14) is applicable for every given $\varepsilon \rightarrow 0$, every coefficient of the powers of ε is zero. Therefore, we can express the problem as:

$$\frac{\partial \sigma_{ij}^{(0)}}{\partial y_j} = 0 \quad (15)$$

$$\frac{\partial \sigma_{ij}^{(0)}}{\partial x_j} + \frac{\partial \sigma_{ij}^{(1)}}{\partial y_j} = 0 \quad (16)$$

$$\frac{\partial \sigma_{ij}^{(1)}}{\partial x_j} + \frac{\partial \sigma_{ij}^{(2)}}{\partial y_j} + f_i = 0 \quad (17)$$

If we consider the Dirichlet and Neumann boundary conditions in Eq. (7) along with Eq. (8), boundary conditions can be expressed as follow:

$$\varepsilon^0 u_i^{(0)} + \varepsilon^1 u_i^{(1)} + \varepsilon^2 u_i^{(2)} + \dots = \bar{u}_i \text{ in } \Gamma_u \quad (18)$$

$$(\varepsilon^{-1} \sigma_{ij}^{(0)} + \varepsilon^0 \sigma_{ij}^{(1)} + \varepsilon^1 \sigma_{ij}^{(2)} + \dots) n_j = \bar{t}_i \text{ in } \Gamma_t \quad (19)$$

As Eq. (16) establishes the relationship between microscale and macroscale stresses, the perturbation displacement $u_i^{(1)}$ in the microscale could be represented as follow:

$$u_i^1(x, y) = -\chi_i^{kl}(y) \frac{\partial u_k^{(0)}}{\partial x_l}(x) + \tilde{u}_i^{(1)}(x) \quad (20)$$

where integration constants are represented by $\tilde{u}_i^{(1)}(x)$ in y_i , typically assumed to be zero, and χ_i^{kl} denotes the Y-periodic components of the field tensor χ . Then, the field tensor χ is determined by solving the variational problem:

$$\int_Y D_{ijkl} \frac{\partial \chi_k^{mn}}{\partial y_i} \frac{\partial v_i}{\partial y_j} dy = \int_Y D_{ijmn} \frac{\partial v_i}{\partial y_j} dy \quad \forall v_i \in V_Y \quad (21)$$

Where V_Y represents every Y-periodic continuous and enough regular functions with zero average value in Y .

Replacing Eq. (20) using relation (17) and taking into account the Y periodicity of u_i^2 in y , $\partial \sigma_{ij}^{(2)} / \partial y_i$ can be exclusively equal to zero as follow:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} D_{ijmn}^h \frac{\partial u_m^{(0)}}{\partial x_n} + f_i = 0 \quad (22)$$

The mean value of a Y-periodic function $\phi(x, y)$ within the domain Y can be described as:

$$\phi_Y = \frac{1}{|Y|} \int_Y \phi(x, y) dY \quad (23)$$

The homogenized effective elastic properties are attained taking into account the suitable boundary conditions described by the macroscale mathematical statement and adopting the averaging operator as:

$$D_{ijmn}^h = \frac{1}{|Y|} \int_Y D_{ijkl} \left[\delta_{km} \delta_{ln} - \frac{\partial \chi_k^{mn}}{\partial y_l} \right] dY \quad (24)$$

After solving the macroscale problem, the stress and strain fields at the microscale level can be determined through a localization process. This process for stress and strain fields can be written as:

$$\sigma_{ij}^{(1)}(x, y) = D_{ijkl}(y) \left(\delta_{km} \delta_{ln} - \frac{\partial \chi_k^{mn}}{\partial y_l} \right) \frac{\partial u_m^{(0)}}{\partial x_n} \quad (25)$$

$$\varepsilon_{ij}^{(1)}(x, y) = \frac{1}{2} (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}) \left(\delta_{km} \delta_{ln} - \frac{\partial \chi_k^{mn}}{\partial y_l} \right) \frac{\partial u_m^{(0)}}{\partial x_n} \quad (26)$$

These equations enable the calculation of stress and strain values at any specified point the macroscale model for a heterogeneous sample. More details are given by Pinho-da-Cruz et al. [21].

Then, it is possible to determine the effective elasticity properties of the scaffolds from the constitutive matrix's inverse, which refers to the homogenized compliance matrix S^h .

$$S^h = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_{11}} & \frac{-\nu_{12}}{E_{11}} & \frac{-\nu_{12}}{E_{11}} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{12}}{E_{11}} & \frac{1}{E_{22}} & \frac{-\nu_{23}}{E_{22}} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{12}}{E_{11}} & \frac{-\nu_{23}}{E_{22}} & \frac{1}{E_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \quad (27)$$

where E_{11} and E_{22} and E_{33} are the elastic modulus along the orthogonal directions. G_{12} and G_{23} are the shear modulus and the Poisson's ratios associated with $-\nu_{12}$, $-\nu_{23}$.

3. Results

3.1 Fabrication of Structures Using an SLA 3D Printer

To validate the numerical result calculated by AEH method, all the structures were fabricated using an SLA 3D printer as shown in Fig. 3. The unit-cells were fabricated to possess external length of 10 mm, width of 10 mm in and height of 10 mm following the ratio depicted in Table 1.

The porosity of each fabricated unit-cell was measured and averaged from 5 samples, and it was confirmed that all the unit-cells had similar porosity of 50% as depicted in Fig. 4.

3.2 Effective Stiffness Calculated by AEH Method and Using UTM Equipment

The effective elastic modulus calculated by AEH method of the unit-cell SC truss, BCC truss, SC-BCC truss, FCC truss, and SC-FCC truss is depicted in Fig. 5 and Table 2.

The fabricated unit-cells were tested using the universal testing machine equipment (MTS-E42) under a compression load of 5 kN using 10% strain at a constant strain rate of 1 mm/min. The compressive stiffness results of the unit-cell obtained from the UTM were calculated as the average of five specimens and results are depicted in Fig. 5 and in Table 3.

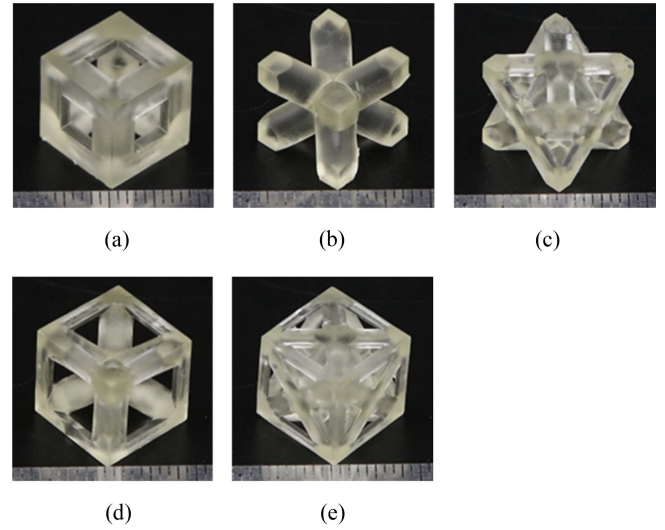


Fig. 3 Optical images of fabricated unit-cells by SLA 3D printer: (a) SC truss, (b) BCC truss, (c) FCC truss, (d) SC-BCC truss, (e) SC-FCC truss

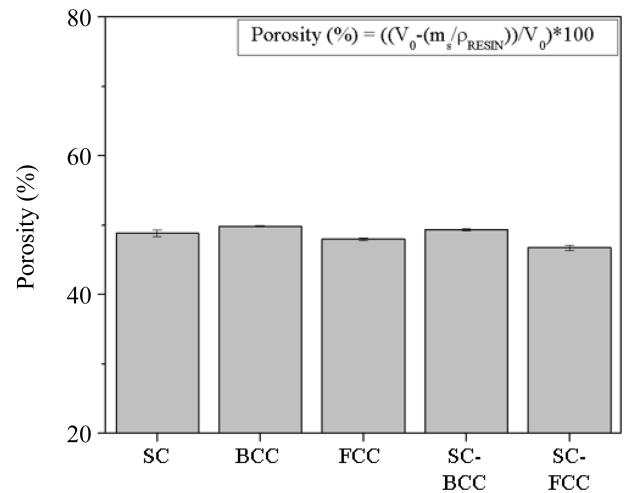


Fig. 4 Measured porosity of fabricated unit-cells

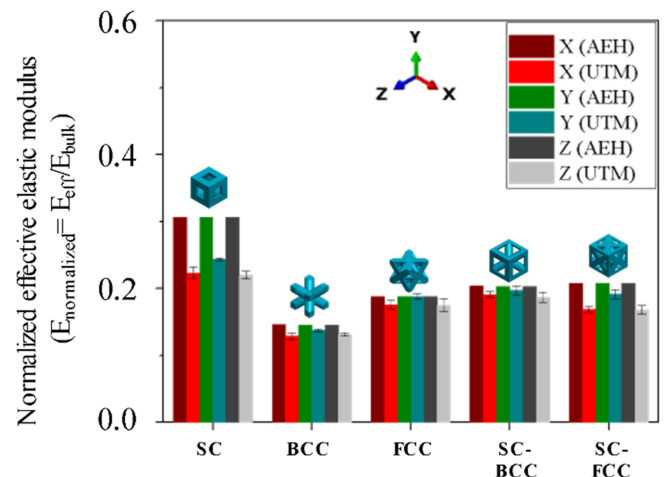


Fig. 5 Normalized effective elastic modulus results of the different types of unit-cells by AEH method and UTM experiment

Table 2 Normalized effective stiffness of unit-cell by AEH method

Unit-Cell	Direction		
	X	Y	Z
SC truss	0.307	0.307	0.307
BCC truss	0.146	0.145	0.145
FCC truss	0.188	0.188	0.188
SC-BCC truss	0.203	0.203	0.203
SC-FCC truss	0.208	0.208	0.208

Table 3 Normalized effective stiffness of open-pore unit-cell by UTM experiment

Unit-Cell	Direction		
	X	Y	Z
SC truss	0.223±0.009	0.244±0.002	0.220±0.006
BCC truss	0.129±0.005	0.138±0.002	0.131±0.002
FCC truss	0.175±0.007	0.188±0.004	0.175±0.010
SC-BCC truss	0.191±0.005	0.197±0.008	0.187±0.007
SC-FCC truss	0.169±0.004	0.191±0.007	0.168±0.007

4. Discussion

This study aimed to evaluate the effective stiffness of different lattice structures using a numerical model based in asymptotic homogenization method.

To get rid of the influence of the porosity in the effective stiffness, we first confirmed that the porosity of the SC truss, BCC truss, SC-BCC truss, FCC truss, and SC-FCC specimens were fabricated very similar to that of the designed models as depicted in Fig. 4. The porosity relative error of the SC truss, BCC truss, SC-BCC truss, FCC truss, and SC-FCC truss specimens were calculated to be 2.29, 0.26, 3.96, 1.30, and 6.49% respectively. This porosity error could result from material residual between the strand and the residual of material used to support the specimens when they were printed.

With regard to effective stiffness calculated by AEH method, the results agree with previous reported studies where the mechanical properties of the SC truss, BCC truss, SC-BCC truss, FCC truss, and SC-FCC truss structures were studied using different methods such as analytical, experimental and FEM analysis [3-8]. In addition, to validate the numerical results based on AEH method in this study, the UTM experiment was carried out.

To clearly compare the results obtained by AEH method and UTM experiment, the results were characterized in term of normalized elastic modulus. The normalized elastic modulus was determined in function of the bulk material elastic modulus and the elastic modulus calculated by AEH method and UTM experiment,

and it can be expressed as:

$$E_{normalized} = E_{eff}/E_{bulk} \quad (28)$$

where $E_{normalized}$ is the normalized elastic modulus, E_{eff} is the effective elastic modulus calculated by AEH method and UTM experiment and E_{bulk} is the elastic modulus of the bulk material. Fig. 5 summarizes the numerical results calculated by AEH method and experiments expressed as normalized effective elastic modulus and it is observed that the results attained by experiments exhibit similar trend as the numerical results based on AEH method.

The numerical elastic modulus of the SC truss unit-cell in X direction was analyzed to have 1.38 times greater stiffness than that of the experiment result, superior to 1.26 times in Y direction and 1.39 in Z direction. The BCC truss unit-cell in X direction was analyzed to have 1.13 times greater stiffness than that of the experiment result, 1.06 time higher in Y direction and 1.11 in Z direction. The FCC truss unit-cell in X direction was analyzed to have 1.07 times higher stiffness than that of the experiment result, same stiffness in Y direction and 1.08 higher in Z direction. The SC-BCC truss unit-cell in X direction was analyzed to have 1.07 times higher stiffness than that of the experiment result, over 1.03 times in Y direction and 1.09 in Z direction. The SC-FCC truss unit-cell in X direction was analyzed to have 1.23 times greater stiffness than that of the experiment result, 1.09 time higher in Y direction and 1.24 in Z direction. The average elastic modulus relative error in all directions between the AEH method and UTM experiment of the SC truss, BCC truss, FCC truss, SC-FCC truss and SC-FCC truss unit-cell was calculated to be 25.4, 8.9, 4.6, 5.7, and 15.3% respectively.

The discrepancy observed among experiments and numerical analysis results can be attributed to defects generated during the fabrication process and because in this study the compressive test was performed to a single unit-cell without having periodic arrangement of several unit-cells. Wu et al. investigated the response of material anisotropy and size effect on the mechanical properties of three types of 3D cellular structures and they reported that all the three types of structures exhibit varying levels of size effect dependency [36]. In our study, as shown in Fig. 5, the significant difference in elastic modulus observed in SC truss unit-cell compared to the other structures between simulation and experiment could be attributed primarily to the size effect, which level of size effect dependency is more prominent in the SC truss unit-cell. And in the same way as in the other structures, the structural integrity of the SC unit-cell is susceptible to structural defects or imperfections during fabrication process, which influence its mechanical behavior. Therefore, the combined

influence of these two conditions could lead to bigger discrepancy between SC truss unit-cell numerical results and experimental results compared with the other structures.

5. Conclusion

We confirmed that the asymptotic expansion homogenization method is an accurate and efficient approach to predict the effective mechanical properties of lattice structures. Using this method, we analyzed several lattice structures and combining with additive manufacturing, these structures were fabricated. Moreover, the AEH method results were validated by UTM experiments, and it was found that experimental results are similar to the numerical results based on AEH method.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korean government (MSIT) (Nos. NRF-2021R1A2C2009665 and NRF-2022R1A4A1028747).

REFERENCES

- Liu, Z., Liu, P., Huang, W., Wong, W. H., Comillius, A. L., Zhang, Y.-W., (2018), A nanolattice-plate hybrid structure to achieve a nearly linear relation between stiffness/strength and density, *Materials & Design*, 160, 496-502.
- Hu, Z., Thiyagarajan, K., Bhusal, A., Letcher, T., Fan, Q. H., Liu, Q., Salem, D., (2017), Design of ultra-lightweight and high-strength cellular structural composites inspired by biomimetics, *Composites Part B: Engineering*, 121, 108-121.
- Lei, H., Li, C., Meng, J., Zhou, H., Liu, Y., Zhang, X., Wang, P., Fang, D., (2019), Evaluation of compressive properties of SLM-fabricated multi-layer lattice structures by experimental test and μ -CT-based finite element analysis, *Materials & Design*, 169, 107685.
- Tancogne-Dejean, T., Mohr, D., (2018), Elastically-isotropic elementary cubic lattices composed of tailored hollow beams, *Extreme Mechanics Letters*, 22, 13-18.
- Tancogne-Dejean, T., Mohr, D., (2018), Elastically-isotropic truss lattice materials of reduced plastic anisotropy, *International Journal of Solids and Structures*, 138, 24-39.
- Li, X., Tan, Y. H., Wang, P., Su, X., Willy, H. J., Heng, T. S., Ding, J., (2020), Metallic microlattice and epoxy interpenetrating phase composites: Experimental and simulation studies on superior mechanical properties and their mechanisms, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 135, 105934.
- Song, K., Li, D., Liu, T., Zhang, C., Xie, Y. M., Liao, W., (2022), Crystal-twinning inspired lattice metamaterial for high stiffness, strength, and toughness, *Materials & Design*, 221, 110916.
- Libonati, F., Graziosi, S., Ballo, F., Mognato, M., Sala, G., (2021), 3D-printed architected materials inspired by cubic Bravais lattices, *ACS Biomaterials Science & Engineering*, 3935-3944.
- Gibson, L. J., Ashby, M. F., (1999), *Cellular solids: Structure and Properties*, Cambridge University Press, 28(4), 270-274.
- Masters, I., Evans, K., (1996), Models for the elastic deformation of honeycombs, *Composite Structures*, 35(4), 403-422.
- Christensen, R. M., (2000), Mechanics of cellular and other low-density materials, *International Journal of Solids and Structures*, 37(1-2), 93-104.
- Wang, A.-J., McDowell, D., (2004), In-plane stiffness and yield strength of periodic metal honeycombs, *Journal of Engineering Materials and Technology*, 126(2), 137-156.
- Chen, J., Huang, Y., Ortiz, M., (1998), Fracture analysis of cellular materials: A strain gradient model, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 46(5), 789-828.
- Kumar, R. S., McDowell, D. L., (2004), Generalized continuum modeling of 2-D periodic cellular solids, *International Journal of Solids and Structures*, 41(26), 7399-7422.
- Warren, W. E., Byskov, E., (2002), Three-fold symmetry restrictions on two-dimensional micropolar materials, *European Journal of Mechanics-A/Solids*, 21(5), 779-792.
- Abueidda, D. W., Elhebeary, M., Shiang, C.-S. A., Pang, S., Al-Rub, R. K. A., Jasiuk, I. M., (2019), Mechanical properties of 3D printed polymeric Gyroid cellular structures: Experimental and finite element study, *Materials & Design*, 165, 107597.
- Schipani, R., Nolan, D. R., Lally, C., Kelly, D. J., (2020), Integrating finite element modelling and 3D printing to engineer biomimetic polymeric scaffolds for tissue engineering, *Connective Tissue Research*, 61(2), 174-189.
- Wickeler, A. L., Naguib, H. E., (2020), Novel origami-inspired metamaterials: Design, mechanical testing and finite element modelling, *Materials & Design*, 186, 108242.
- Li, C., Lei, H., Zhang, Z., Zhang, X., Zhou, H., Wang, P., Fang, D., (2020), Architecture design of periodic truss-lattice cells for additive manufacturing, *Additive Manufacturing*, 34, 101172.
- Kumar, A., Collini, L., Daurel, A., Jeng, J.-Y., (2020), Design and additive manufacturing of closed cells from supportless lattice structure, *Additive Manufacturing*, 33, 101168.
- Pinho-da-Cruz, J., Oliveira, J., Teixeira-Dias, F., (2009), Asymptotic homogenisation in linear elasticity. Part I: Mathematical formulation and finite element modelling,

- Computational Materials Science, 45(4), 1073-1080.
22. Oliveira, J., Pinho-da-Cruz, J., Teixeira-Dias, F., (2009), Asymptotic homogenisation in linear elasticity. Part II: Finite element procedures and multiscale applications, Computational Materials Science, 45(4), 1081-1096.
 23. Drugan, W. J., Willis, J. R., (1996), A micromechanics-based nonlocal constitutive equation and estimates of representative volume element size for elastic composites, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 44(4), 497-524.
 24. Kanit, T., Forest, S., Galliet, I., Mounoury, V., Jeulin, D., (2003), Determination of the size of the representative volume element for random composites: Statistical and numerical approach, International Journal of Solids and Structures, 40(13-14), 3647-3679.
 25. Hassani, B., Hinton, E., (1998), A review of homogenization and topology optimization II—analytical and numerical solution of homogenization equations, Computers & Structures, 69(6), 719-738.
 26. de Macedo, R. Q., Ferreira, R. T. L., Guedes, J. M., Donadon, M. V., (2017), Intraply failure criterion for unidirectional fiber reinforced composites by means of asymptotic homogenization, Composite Structures, 159, 335-349.
 27. de Macedo, R. Q., Ferreira, R. T. L., Donadon, M. V., Guedes, J. M., (2018), Elastic properties of unidirectional fiber-reinforced composites using asymptotic homogenization techniques, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 40, 255.
 28. Kalamkarov, A. L., Georgiades, A., Rokkam, S., Veedu, V., Ghasemi-Nejhad, M., (2006), Analytical and numerical techniques to predict carbon nanotubes properties, International journal of Solids and Structures, 43(22-23), 6832-6854.
 29. Song, Y. S., Youn, J. R., (2006), Modeling of effective elastic properties for polymer based carbon nanotube composites, Polymer, 47(5), 1741-1748.
 30. Kalamkarov, A., Georgiades, A., (2004), Asymptotic homogenization models for smart composite plates with rapidly varying thickness: Part I—Theory, International Journal for Multiscale Computational Engineering, 2(1), 133-148.
 31. Georgiades, A., Kalamkarov, A., (2004), Asymptotic homogenization models for smart composite plates with rapidly varying thickness: Part II—Applications, International Journal for Multiscale Computational Engineering, 2(1), 149-172.
 32. Challagulla, K. S., Georgiades, A., Kalamkarov, A., (2007), Asymptotic homogenization modeling of thin composite network structures, Composite Structures, 79(3), 432-444.
 33. Singh, T., Kumar, S., Sehgal, S., (2020), 3D printing of engineering materials: A state of the art review, Materials today: Proceedings, 28(3), 1927-1931.
 34. Cosmi, F., Dal Maso, A., (2020), A mechanical characterization of SLA 3D-printed specimens for low-budget applications, Materials Today: Proceedings, 32, 194-201.
 35. Hada, T., Kanazawa, M., Iwaki, M., Arakida, T., Soeda, Y., Katheng, A., Otake, R., Minakuchi, S., (2020), Effect of printing direction on the accuracy of 3D-printed dentures using stereolithography technology, Materials, 13(15), 3405.
 36. Wu, Y., Yang, L., (2021), Modeling and analysis of material anisotropy-topology effects of 3D cellular structures fabricated by powder bed fusion additive manufacturing, International Journal of Mechanical Sciences, 197, 106325.



Rigoberto Lopez Reyes

Researcher in MECHABIO Group Research Institute, Wonkwang University. His research interest is 3D printing, computational analysis, and development of scaffold for bone tissue engineering.
E-mail: 1992reyes1@gmail.com



Min-Soo Ghim

Ph.D. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Wonkwang University. His research interest is 4D printing, computational analysis, and tissue engineering.
E-mail: msghim5834@naver.com



Young-Sam Cho

Professor in the Department of Mechanical and Design Engineering, Wonkwang University. His research interest is tissue engineering, superhydrophobic and computational solid mechanics.
E-mail: youngsamcho@wku.ac.kr

• 특집 • DX시대의 제조기술, 적층제조!

복합 열처리 공정을 통한 금속 나노 섬유 네트워크 기반의 투명 전극 제작

Fabrication of Transparent Electrode based on Metallic Nanofiber Network via Combined Heat Treatment

김나경^{1,*}, 김소은^{1,*}, 임도연², 홍승미¹, 안태창^{3,#}, 김건희^{1,#}
Na Kyoung Kim^{1,*}, So Eun Kim^{1,*}, Doyeon Im², Seung Mi Hong¹, Taechang An^{3,#}, and Geon Hwee Kim^{1,#}

¹ 충북대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Chungbuk National University)

² 안동대학교 기계설계공학과 (Department of Mechanical Design Engineering, Andong National University)

³ 안동대학교 기계로봇공학과 (Department of Mechanical & Robotics Engineering, Andong National University)

Corresponding Authors / E-mail: tcmerias@andong.ac.kr, TEL: +82-54-820-7767, ORCID: 0000-0002-9668-8385

E-mail: geonhwee.kim@chungbuk.ac.kr, TEL: +82-43-261-2442, ORCID: 0000-0003-3178-4947

*These authors contributed equally to this work

KEYWORDS: Transparent electrode (투명 전극), Electrospinning (전기 방사), Electroless plating (무전해 도금), Heat treatment (열처리)

With the increasing interest in research on the development of next-generation technologies such as flexible smartphones, displays, and wearable devices, interest in the development of materials and processes for transparent electrodes constituting them is also increasing. The most widely used material for manufacturing transparent devices is indium tin oxide (ITO). However, ITO is scarce, expensive, and brittle, making it essential to replace it with new materials. In this study, we successfully fabricated a transparent electrode by electrospinning polyvinylpyrrolidone (PVP) and copper electroless deposition on the polyimide film. Especially, this study suggests a new combined heat treatment that uses both the hot plate and the convection oven. Through the combined heat treatment, the junctions between the nanofibers overlapped removed consequently reducing contact resistance. The mechanical stability of the fabricated electrode was evaluated by using a highly repeated bending test. Also, through the tape-peeling test, we confirmed that the adhesive strength of the electrode was high. This method can be applied to various polymer-based, substrate which are vulnerable to annealing process.

Manuscript received: June 30, 2023 / Revised: August 25, 2023 / Accepted: September 12, 2023

1. 서론

최근, 장소와 시간에 관계없이 사용자가 자유롭게 네트워크에 접속할 수 있는 유비쿼터스 시대가 되고 있음에 따라 휴대가 간편하고 이동성을 갖는 웨어러블 디바이스의 필요성이 대두되고 있다. 또한 의료 및 헬스케어 목적의 웨어러블 디바이스의 관심이 증가하여 관련 시장이 급격히 성장하고 있다. 웨어러블 디바이스 개발 연구가 활발히 이루어지는 가운데 이들을 구성하는

투명 전극의 소재 및 공정 개발에 대한 관심 또한 날이 높아지고 있다. 투명 전극이란 높은 전도도와 가시광선 영역의 높은 투과도 특성을 갖는 전극이다. 현재 상용화된 투명 디스플레이 및 각종 센서의 제작에 현재 가장 활발히 사용되는 물질은 인듐 주석 산화물(ITO)이다. 하지만 ITO는 희소성이 높고 가격이 비싸며, 취성이 높아 유연 소자의 생산에 부적합하다. 이에 따라 ITO를 대체할 수 있는 재료와 그에 상응하는 공정에 대한 개발이 필요한 상황이다.

나노 섬유는 일반적으로 분무법, 플라즈마 강화 화학 기상 증착법, 기판법 등의 방법을 이용하여 제조되어 왔다[1]. 그러나 이러한 방식들은 매우 복잡하고 비용이 많이 들며 생산 속도가 느려 나노 섬유의 대량생산 방식으로는 적합하지 않다. 전기 방사 공정은 정전기력을 이용하여 고분자 용액에 전하를 발생시키고, 표면 장력보다 큰 전기력을 표면에 가할 때 젯(Jet)에서 용액이 분무되며 나노 섬유가 생산되는 원리이다. 기존 방식으로 생산된 섬유보다 전기 방사 공정을 통해 생산된 섬유가 Nano-micro Scale로 더 얇은 직경을 가지며 더 큰 표면적을 갖는다[2]. 또한 적은 양의 폴리머 용액으로도 나노 섬유의 대량 생산이 가능하기 때문에 경제적이며, 간단하고 빠른 공정이다. 전기 방사는 보통 상온, 상압의 조건에서 진행되므로 복잡한 진공 공정이 필요 없다는 장점이 있다. 전기 방사로 생산된 섬유는 센서, 에너지 저장 및 변환, 조직 공학 등 다양한 분야에 적용되고 있다[3-6]. 이처럼 기존 제조 방식의 문제점들을 해결할 수 있는 전기 방사 공정이 투명 전극의 제조 방법으로서 점차 많이 채택되고 있다.

투명 전극은 약 1,000 Ω/sq 이하의 면저항 특성을 나타내야 하는데 적층 방식의 전기 방사 공정 시 발생하는 나노 섬유 사이의 겹침 현상, 다시 말해 Junction의 발생은 전극의 높은 전기적 저항으로 이어진다는 문제가 발생한다[7]. 이러한 나노 섬유 간의 접촉 저항은 일반적으로 가열, 용매, 전류 등을 통해 제거된다[8-10].

본 연구에서는 PI (Polyimide) Film 위에 전기 방사된 팔라듐 (Palladium) 촉매를 함유한 나노 섬유를 핫 플레이트와 대류 오븐을 이용하여 두 차례의 열을 순서대로 가하는 복합 열처리 방식으로 Junction-free 형상을 제작하였다. 기존의 선행 연구에서는, 핫 플레이트를 통해 500-600°C의 열을 직접적으로 가해 전기 방사된 나노 섬유 간 발생하는 접합점(Junction)을 제거하였다. 그러나 열변형 온도가 비교적 낮은 PET (Polyethylene Terephthalate), PU (Polyurethane), PI (Polyimide) 등의 폴리머 필름을 기판 소재로 사용할 경우, 이 과정에서 기판 상에 열이 직접적으로 전도되어 표면 손상 문제가 발생하였다. 따라서 본 연구에서는 핫 플레이트를 사용한 열처리 공정의 온도를 300°C로 낮추었으며, 이후 오븐의 대류 현상을 이용하여 200°C 가량 추가적인 열을 가해줌으로써 고온의 열이 직접 전도되며 발생하던 필름의 표면 손상 문제를 해결함과 동시에 전극의 도금 안정성과 전도성을 높였다. 또한, 무전해 도금은 물체의 크기 및 소재에 제한을 받지 않고 외부 전원 없이 화학 반응을 통해 도금이 가능한 장점을 가지고 있다.

기존 연구에서는 나노 섬유 네트워크의 표면적, 접촉성 및 다공성을 향상시키기 위하여 화학적 활성화, 플라즈마 및 산처리 등 별도의 추가 공정을 사용하였다[11-13]. 높은 표면적은 Intercalation과 Deintercalation이 동시에 이루어짐으로써 층간 간격이 부분적으로 가스화되고 확장되었기 때문에 발생한다[14]. KOH, NaOH와 같은 알칼리 화합물을 이용한 화학적 활성화는

표면적이 큰 탄소 재료를 활성화시키는 잘 알려진 방법이다. 또한, 특정 용매의 사용, 습도 환경의 변화, 폴리머 혼합물을 사용하는 방법 등을 사용하여 방적된 나노 섬유에 기공을 미리 생성한 다음 열을 사용하여 다공성을 높일 수도 있다[15]. 하지만 이 연구에서는 별도의 활성화 장치나 추가 공정 없이, 단순히 두 번의 열처리를 통해 필름 표면의 팔라듐을 활성화하여 비용을 절감하고 시간 손실을 해결할 수 있는 결과를 도출하였다. 금속 네트워크에 기계적 및 열적 응력을 가하지 않고, 단순히 열을 추가로 가해 접합 없는 나노 섬유 네트워크 형태를 만들어 공정을 간소화했으며, 이러한 과정은 금속 구성 요소의 특성에 영향을 미치지 않았다.

본 연구는 열에 취약한 폴리머 기판에 전기적으로 안정적인 특성의 투명 전극의 제작을 목적으로 하였다. 이를 위해, PVP (Polyvinylpyrrolidone) 나노 섬유를 전기 방사 공정을 통해 생산하고, 두 차례의 복합 열처리 공정을 통해 접합을 제거한 후, 이를 구리로 무전해 도금하여 최종적으로 안정성이 높은 금속 전극을 제작하였다. 복합 열처리를 통하여 나노 섬유 간의 Junction을 효과적으로 제거하여 필름 표면 손상 문제를 해결하였으며 접촉 저항 및 투과도를 개선하였다. 복합 열처리를 적용한 금속 전극은 기존 열처리 적용 전극에 비해 약 70% 향상된 투과도와 93% 향상된 면저항을 보였다.

2. 실험 재료 및 실험 과정

2.1 실험 재료

실험에 사용된 Polyimide films, Poly (vinylpyrrolidone) (PVP, AR, molecular weight, 1,300,000) Powder, Copper (II) Sulfate Pentahydrate ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, special grade, 99.5%), N, N-dimethylformamide (DMF, special grade, 99.5%), Sodium hydroxide (NaOH, special grade, 98.0%), Ammonium Tetrachloropalladate (II) ($(\text{NH}_4)_2\text{PdCl}_4$, 99.998% (Metals basis)), Potassium sodium (+) - tartrate tetrahydrate ($\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)는 Sigma-Aldrich (USA)를 통해, Formaldehyde (HCHO) solution (36.0-38.0%) 은 Wako Pure Chemical Industries, Ltd. (Japan)을 통해 구매하였고, 모든 시약은 정제없이 사용되었다.

2.2 실험 장비

Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM)를 이용해 구리 나노 섬유의 형상을 관찰하였다. ImageJ (NIH, USA) 프로그램을 이용해 구리 입자 분포 면적 및 나노 섬유의 두께를 측정하였다. Ultraviolet-visible (UV Vis) Spectrophotometry (OPTIZEN POP-V; JASCO, Japan)를 이용해 투과도를 측정하였으며 기준 투과율은 Bare PI film의 투과율이었다. 금속 전극의 면저항은 4점 프로브(CMTR2000N; AIT Co., Ltd., Korea)를 사용하여 측정되었다.

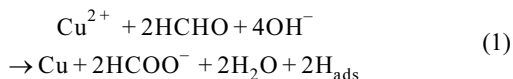
2.3 실험 과정

2.3.1 팔라듐 촉매층 형성

PI film 표면은 소수성을 띄기 때문에, 이로 인해 표면 접착력이 낮다는 성질을 갖는다[16]. 고분자 필름과 금속층 간의 접합성 증대를 위한 산소 플라즈마 처리를 통해 PVP-Pd Solution의 안정적인 전기 방사를 유도하였다. 플라즈마 공정은 100 W로 2분 동안 진행되었다(Fig. 1(A)). 팔라듐 이온이 함유된 PVP 기반의 폴리머 용액을 표면 개질 처리된 PI film 위에 전기 방사하여 섬유를 생산하였다. 10 kV의 전압이 인가되었으며 집전체와 제트 방출원 사이의 거리를 15 cm로 설정하였고, 고분자 용액에 대하여 5 μL/min의 유량으로 기판에 20초 동안 나노 섬유를 증착 하였다. 전기 방사 시 상대습도 및 온도는 각각 40-50 RH%, 22-23°C로 유지하였다(Fig. 1(B)). 전극의 성능을 저해하는 섬유 간의 겹침 현상은 두 차례로 나누어 가해지는 열을 통해 효과적으로 제거된다. 1차적으로 공기 중의 핫 플레이트를 이용하여 PI film 기판에 열을 직접 가한다. 300°C의 온도로 PVP 나노 섬유가 방사된 기판을 30분 동안 열처리하여 무전해 도금을 위한 팔라듐 시드 레이어(Palladium Seed Layer)를 형성하였고 동시에 기판 위의 섬유 안정화가 시작되었다(Fig. 1(C)). 도금 안정성과 전극의 균일한 성능을 위해 대류 오븐을 통해 시편의 표면에 추가로 열을 가한다. 200°C의 온도로 30분 동안 추가적인 열처리가 진행된다. 두 차례의 복합적인 열처리 공정을 통해 섬유 안정화가 완료되었고 금속 도금 환경이 조성되었다(Fig. 1(D)).

2.3.2 구리 무전해 도금

전기 방사 및 열처리 공정을 통해 형성된 팔라듐 시드 레이어를 도금 용액에 침지시켜 구리 무전해 도금 공정을 진행하였다. 이 때, 구리 무전해 도금 용액의 조성은 다음과 같다; DI water를 기준으로 하여 Formaldehyde, Sodium Hydroxide, Potassium Sodium (+) - Tartrate Tetrahydrate, Copper (II) Sulfate Pentahydrate를 각각 0.1, 40, 140, 30 mg/mL를 넣고 Magnetic Stirrer를 사용해 500 RPM으로 1시간 동안 교반한다. 이 때, Formaldehyde는 전자를 공급해주는 환원제로, Sodium Hydroxide pH 조절제, Potassium Sodium (+) - Tartrate Tetrahydrate는 착화제, Copper (II) Sulfate Pentahydrate 구리 금속 이온을 공급해주는 역할을 한다. 구리 무전해 도금의 화학적 반응식은 식(1)과 같다;



팔라듐 촉매에 의한 구리 무전해 도금을 2분 동안 진행한 후 탈이온수로 세척하여 마무리한다(Fig. 1(E)). 별도의 활성화 과정 없이 단순 열을 가해주는 것으로 금속 전극을 제작하는 과정을 단순화하였다(Fig. 1(F)).

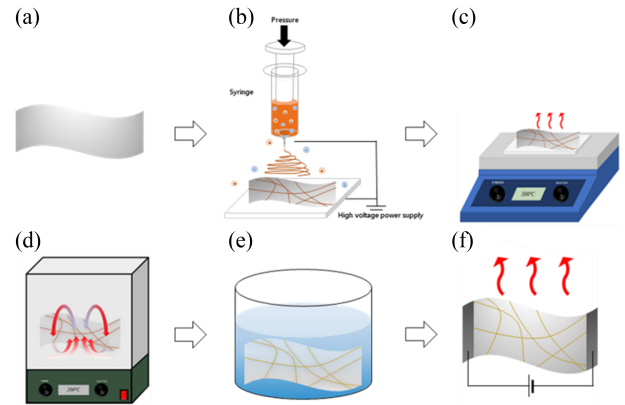


Fig. 1 The schematic of fabrication process for a metallic network (A) Preparation of polyimide film after oxygen plasma treated (B) Electrospinning PVP nanofiber onto PI film (C) First heat treatment using hotplate (D) Second heat treatment using convection oven (E) Copper electroless deposition (F) Wiring

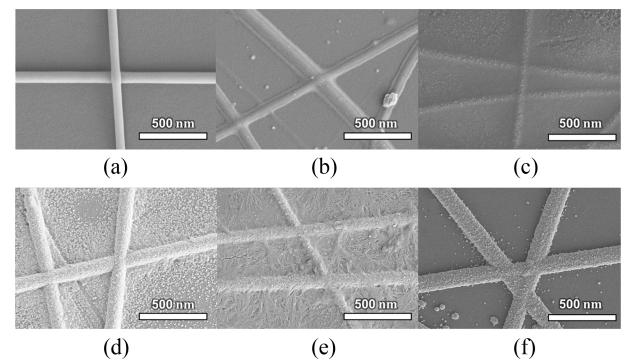


Fig. 2 FE-SEM images of metallic network depending on the time and conditions of heat treatment (A) Electrospun nanofibers (B-E) Single heat-treated metallic network for 15, 30, 45, 60 min, respectively (F) Combined heat-treated metallic network

3. 실험 결과 및 분석

3.1 열처리 방식에 따른 나노 섬유 형성 분석

Fig. 2는 FE-SEM을 통해 단일 열처리, 복합 열처리 공정을 거쳐 제조된 금속 전극의 나노 섬유를 고배율(30,000배)로 관찰한 것이다. PVP가 함유된 고분자 용액을 PI film 기판 위에 직접 전기 방사하여 시드층을 생산하였고 그 후 열처리 과정과 무전해 도금을 통해 방적된 섬유를 금속화하였다. 시드층 내에 포함된 팔라듐 이온은 촉매로 사용되며, 구리 무전해 도금을 통해 구리 이온이 침전되어 구리 나노 섬유를 형성한다. Fig. 2(A)는 전기 방사 직후의 나노 섬유 형상을 나타낸다. Figs. 2(B)-2(F)는 PI film의 용융점을 고려해 기존 연구에서 진행하던 단일 열처리 공정의 시간을 변수로, 15분 간격으로 구리 나노 섬유의

형태적 변화를 관찰한 사진이다. 300°C의 온도로 핫 플레이트를 이용하여 기판에 직접적으로 열처리를 가하는 단일 열처리 진행 시간이 30분 미만인 경우에는 열이 충분한 시간동안 가해지지 않아 섬유가 활성화되지 못하였으며 그 결과로 섬유의 금속화가 실패하였음을 Fig. 2(B)를 통해 확인할 수 있다. 열처리 시간이 증가함에 따라 섬유의 활성화 정도 또한 증가하는 추세를 보였으나, 열처리 공정을 30분 동안 진행했던 Fig. 2(C)는 PVP 나노 섬유의 일부분만이 무전해 도금 진행되어 비교적 낮은 균일성을 보였다. 45분의 단일 열처리 및 무전해 도금 결과, 금속 전극의 도금 안정성은 Figs. 2(C)와 2(D)의 섬유에 비해 확연히 증가하였음을 Fig. 2(E)를 통해 확인할 수 있다. 그러나 무전해 도금 전 열처리 공정의 진행 목적 중 하나였던 나노 섬유 접합부의 중첩이 제거되지 않았음이 확인되었다. 따라서 단일 열처리 공정을 통해 Junction-free 형상을 제작함과 동시에 높은 전기 전도성 및 균일성을 갖는 금속 전극을 제조하기 위해서는 60분 이상의 장시간의 열처리 시간이 필연적임을 알 수 있다. 그러나 필름의 표면에 고온의 열이 직접적으로 가해지는 기존 열처리 방식 특성상 이는 전극의 손상을 유발한다는 문제가 발생한다. 이는 전극의 저항 증가와 전도성 저하로 이어지며 기판의 소재 또한 제한된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 핫 플레이트를 사용하여 표면에 직접 열을 가하는 시간을 단축하고, 그 후에는 대류 오븐을 이용하여 고온 바람을 추가로 가하는 방식을 적용하여 열처리 방법을 복합적으로 진행하였다. 그 결과, 단일 열처리를 60분 실시한 시편(Fig. 2(E))에서 발생한 나노 섬유의 용융 현상이 복합 열처리 시편(Fig. 2(F))에서는 사라졌음을 확인할 수 있다. 또한, 무전해 도금 과정에서 발생하는 나노 섬유 주변의 구리 입자들도 효과적으로 제거되었다.

Fig. 3는 FE-SEM을 통해 단일 열처리, 복합 열처리 공정을 거쳐 제조된 금속 전극의 나노 섬유를 고배율(20,000배)로 관찰한 것이다. Figs. 3(A)와 3(B)는 각각 단일 열처리 30분과 복합 열처리를 거친 시료의 구리 금속화 결과이며, Figs. 3(C)와 3(D)는 각각의 조건의 나노 섬유에 기계적 힘을 가한 뒤 생긴 Crack(균열) 형상을 나타낸다. 이 때, 기계적 힘은 5 kg의 무게 추를 통해 1분간 인가되었으며 가해진 압력은 약 49.05 kPa이다. 나노 섬유 네트워크 위의 균열 정도와 형태를 확인하였을 때 복합 열처리를 거친 섬유 보다 단일 열처리를 거친 섬유에서 섬유의 끊김 현상이 더 빈번하게 발생하였으며 이는 열처리 방식의 변화로 균열 저항성이 높아졌음을 의미한다. 또한 무전해 도금을 통한 금속화가 더 높은 수준으로 진행되었음을 의미한다. 기계적 힘 인가를 통한 균열 형상 비교를 통해 복합 열처리 공정이 기판과 나노 섬유 사이의 접합 강도가 높아질 수 있음을 확인하였다[17].

본 연구에서는 금속 나노 섬유의 안정적인 생산과 재현성 향상을 위해 30 wt% 농도의 폴리머 용액을 사용하여 전기 방사를 수행하였으며, 폴리머 나노 섬유의 안정화를 위하여 열처리 방법을 적용하였다[18]. 열처리는 폴리머의 열분해를 통해 분자 구조의 변화와 결정화를 유도하여 나노 섬유의 안정성을 증가시킨다[19].

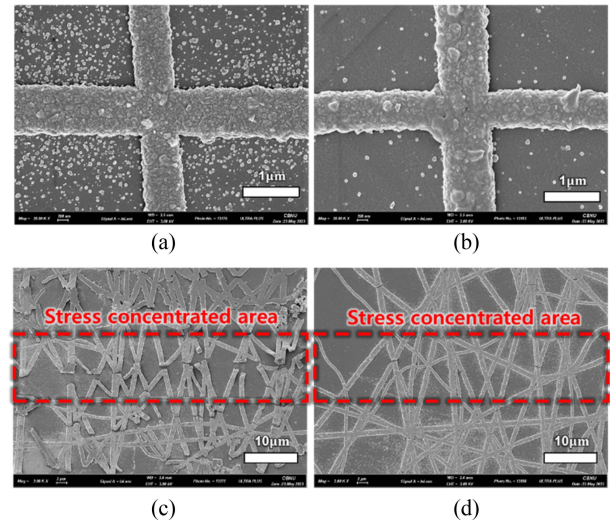


Fig. 3 Comparison of single heat and combined heat-treated metallic network with FE-SEM images (A) Single heat-treated for 30 min metallic network (B) Combined heat-treated metallic network (C) Crack image of single heat-treated metallic network after applying stress (D) Crack image of combined heat-treated metallic network after applying mechanical stress

공기 중의 핫 플레이트에서 1차적으로 섬유의 안정화를 시작했다. 섬유 간의 겹침 구조에 가해진 열은 구조의 열 변성을 일으키며 최종적으로 대류 오븐에서 기판을 완전히 안정화 및 팔라듐 촉매층을 활성화하였다. 고정된 온도 및 습도 환경에서 시료 전면에 걸쳐 고르게 열이 가해지는 과정은 금속 전극이 비교적 균일한 성능을 갖게 한다. 또한 열처리된 촉매층에 금속이 도금되기 때문에 기판과 전도성 네트워크 사이의 접착 강도는 우수하다[20].

3.2 열처리 방식에 따른 나노 섬유의 전기적, 광학적, 기계적 특성 분석

Fig. 4는 전기 방사 및 무전해 도금 공정을 통해 제작한 금속 전극의 전기적, 광학적 및 기계적 특성을 나타낸 것이다. Fig. 4(A)에서는 1차 열처리 시간 및 열처리 방식에 따른 구리 나노 섬유의 두께 차이를 확인할 수 있다. 나노 섬유 두께의 측정을 위해 SEM 이미지를 사용하였으며 섬유 두께의 분포는 각 조건에 대해 무작위로 5번 측정 후 그들의 평균값을 통해 결정되었다. 단일 열처리가 적용된 구리 나노 섬유의 두께는 열처리 시간에 반비례하였으며 평균 두께는 128.75 nm이었고 각 15분씩 열을 추가로 가할 시 평균 0.2 nm/min의 속도로 점진적으로 나노 섬유의 두께가 감소함을 보인다. 복합 열처리의 나노 섬유 두께는 127.9 nm로 이는 열처리 방식이 나노 섬유의 두께 변화에 큰 영향을 미치지 않음을 나타낸다.

Fig. 4(B)는 핫플레이트를 사용한 단일 열처리 시간에 따른 면저항의 변화와, 핫플레이트와 대류 오븐을 사용한 복합 열처리 방식의 면저항을 측정된 결과를 보여준다. 단일 열처리 전극은

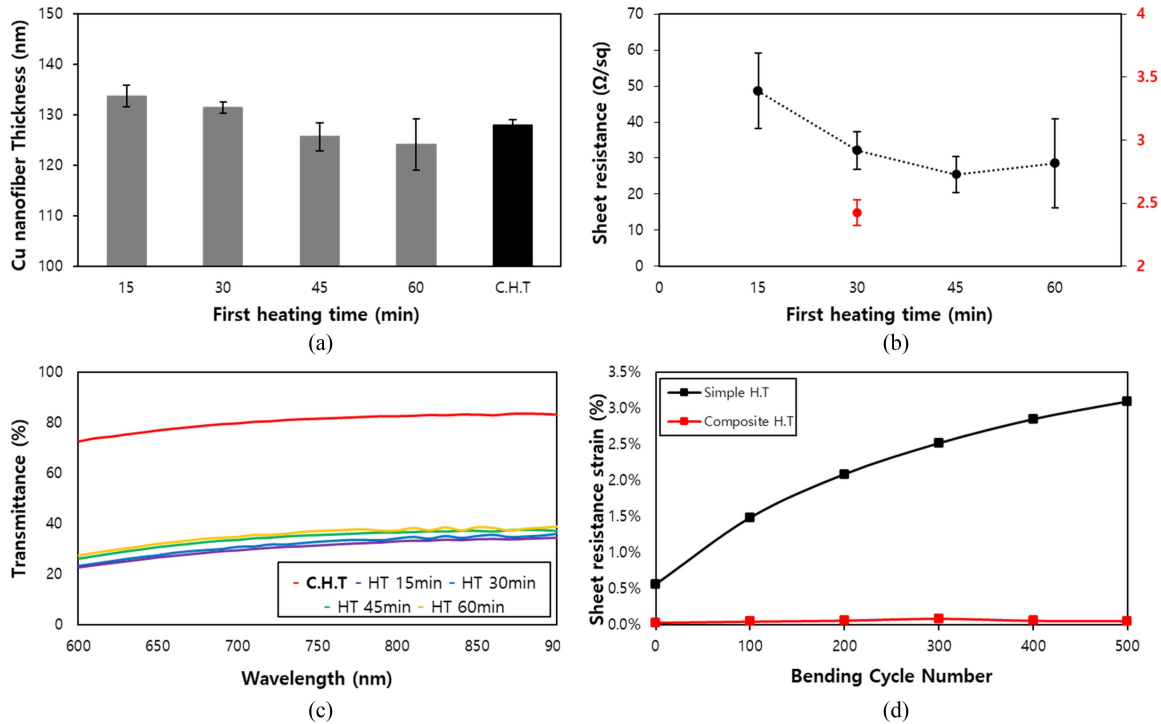


Fig. 4 Electrical, optical, and mechanical analysis of fabricated metallic nanofiber network (A) Graph about Cu nanofiber thickness depending on the heat treatment time and method (B) Graph about heat treatment time and sheet resistance (C) Graph about transmittance for each heat treatment process (visible range: 600 to 900 nm) (D) Graph about sheet resistance strain depending on bending cycle number

열처리 시간이 길어질수록 점차적으로 낮은 면저항을 나타내며, 이는 나노 섬유 간의 중첩이 제거되어 박막의 전도성이 점차적으로 증가하고 있음을 의미한다. 그러나, 일정 시간 동안의 열처리가 진행된 이후에는, 나노 섬유에 손상이 발생하기 시작하여 면저항은 다시 증가하였고 도금의 균일성 또한 감소함을 오차막대를 통해 확인하였다. 단일 열처리 전극과 복합 열처리 전극의 평균 면저항은 각각 36.015, 2.425 Ω/sq로 별도의 공정 없이 시료에 열을 가하는 방식을 변화함으로써 약 93% 개선됨을 확인하였다. 금속 나노 섬유 네트워크의 면저항은 구리 나노 섬유에 가해지는 열의 시간 및 방식을 변화시킴으로써 용이하게 제어할 수 있다.

Fig. 4(C)는 600-900 nm 파장 범위의 필름 기판 상에서 구리 나노 섬유의 투과 스펙트럼을 나타낸다. 열처리 방식에 무관하게 점차 증가하는 투과율을 보이나, 측정되는 수치는 열처리 방식에 따라 눈에 띄는 차이를 보였다. 단일 열처리 전극의 투과율은 평균 약 30%이었으나, 기존의 열처리에 오븐에 의한 추가 대류열을 가한 복합 열처리 전극의 투과율은 70%로 효과적으로 개선되었다. 이러한 결과는 무전해 도금 후 기판상의 구리 입자의 면적 계산을 통해 확인할 수 있었다. 단일 열처리 공정을 통한 기판의 구리 입자 면적은 평균 46.1%로 나노 섬유주위로 넓게 분포되어 있었으나, 두 차례의 복합적인 열처리 방식을 통해 구리 입자의 면적을 18.5%로 감소시킴과 동시에 전극의 투과율 또한 증대시켰다.

Fig. 4(D)는 금속 전극의 Bending Cycle 수에 따른 면저항의

변화를 열처리 방식별로 나타낸 그래프다. 외부면에 위치한 구리 나노 섬유 네트워크에 하중을 가하여 금속 전극을 500회 구부림으로써 측정하였다. Bending Cycle의 횟수가 증가함에 따라 단일 열처리 공정을 거친 전극의 면저항 변형률은 계속해서 증가하였으며, 0.506 %/cycle의 평균 증가율을 보였다. 이와 대비되게 복합 열처리 전극에 동일한 Bending Test를 진행한 경우에는 0.049 %/cycle로 단일 열처리 전극에 비해 약 10배 가량 낮은 면저항 증가율을 보였다. Cycle 내에서의 최대 변형률 값은 각각 11.45%와 3.413%로 약 70%의 저항 안정성을 확인할 수 있었다. 안정적인 금속 전극의 제작이 본 연구의 최종 목적이기에, 기존 열처리 후 진행되는 추가 열처리 공정은 유의미함을 나타낸다.

3.3 테이프 필링 시험에 따른 특성 분석

Figs. 5(A)와 5(B)는 Tape-peeling Test를 통해 PI film 위에 형성된 구리 금속층의 접착 성능을 테스트하는 과정을 나타낸 것이다. 성능을 효과적으로 확인하기 위하여 투명한 상용 3M Scotch Tape를 사용해 총 3차례의 Peeling Test를 시도하였다(테이프 시험에 의한 부착력 측정을 위한 표준시험방법, ASTM D3359-97). 열처리 30분과 60분 시료의 면저항은 3번의 박리 사이클 동안 면저항이 증가하였고, 각각 초기값 대비 테스트 전과 후 최대 34, 25%의 변화율을 보였다. 반면, 복합 열처리 공정을 거친 시료는 3회의 Tape-peeling 후에도 면저항에 거의 변화가 없었다. 이를 통해 열처리 방식에 따라 PI film과 구리

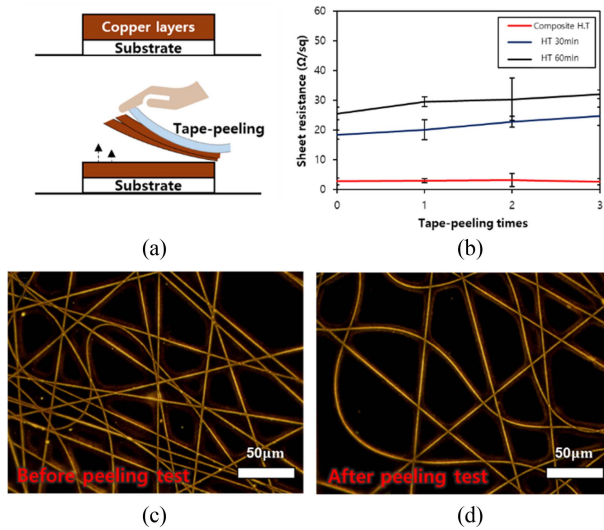


Fig. 5 (A)The schematic of tape peeling test (B) Graph about the sheet resistance depending on the times of tape-peeling test (C) Optical image of metallic network before tape-peeling test (D) Optical image of metallic network after tape-peeling test

나노 섬유 간의 접합 강도 차이가 존재함을 확인하였다. 이전 연구에서 제기된 전도성 필름 장치와 기판 간의 낮은 접착 한계는 별도의 다른 공정 없이 열처리 방식을 변경함으로써 해결되었으며 PI 기판과 구리 금속층 사이의 기계적 접착 강도를 향상시켰다[21]. Figs. 5(C)와 5(D)는 각각 복합 열처리를 거친 구리 금속층의 Tape-peeling 이전과 이후의 형상 변화를 광학 현미경으로 관찰한 사진이다. Tape-peeling 이후에도 박리된 나노 섬유를 발견할 수 없으며, 금속 나노 섬유의 형상의 변화도 나타나지 않았다. 이는 나노 섬유와 기판 사이의 접합력이 견고함을 나타낸다.

4. 결론

본 연구에서는 두 차례의 복합적인 열처리 공정을 통한 금속 전극 제작 방법을 제시하였다. 무전해 도금 공정에서 별도로 진행되던 활성화 과정을 생략하고 기존 공정 내에서 나노 섬유의 활성화를 이끌어냄으로써 공정을 단순화하였다. 오븐을 통한 복합 열처리 공정을 사용함으로써, 제작 공정 변화를 최소화하면서 전극의 전기적, 기계적 성능을 향상시켰다. 스트레인에 따른 균열의 발생과 Tape-peeling Test를 통해 기판과 전극사이의 접합력 증가를 확인할 수 있었으며, Bending Test를 통해 전극의 우수한 기계적 강도를 확인할 수 있었다. 특히, 본 제작 방법은 열에 매우 취약한 특성을 갖는 PU (Polyurethane), PET (Polyethylene Terephthalate), PDMS (Polydimethylsiloxane) 등의 고분자 기반에 적용 시 유연 소자 및 웨어러블 디바이스 등 그 응용 분야가 더욱 확장될 수 있을 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2022R1G1A1007757).

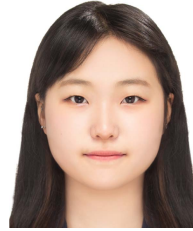
이 논문은 2021년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2021R1A4A1033141).

REFERENCES

- Alghoraibi, I., Alomari, S., (2018), Different methods for nanofiber design and fabrication, Handbook of Nanofibers, 1-46.
- Leijten, J., Rouwkema, J., Zhang, Y. S., Nasajpour, A., Dokmeci, M. R., Khademhosseini, A., (2016), Advancing tissue engineering: a tale of nano-, micro-, and macroscale integration, Small, 12(16), 2130-2145.
- Wang, X., Drew, C., Lee, S.-H., Senecal, K. J., Kumar, J., Samuelson, L. A., (2002), Electrospun nanofibrous membranes for highly sensitive optical sensors, Nano Letters, 2(11), 1273-1275.
- Li, X., Zhi, L., (2018), Graphene hybridization for energy storage applications, Chemical Society Reviews, 47(9), 3189-3216.
- Bhardwaj, N., Kundu, S. C., (2010), Electrospinning: A fascinating fiber fabrication technique, Biotechnology Advances, 28(3), 325-347.
- Zhang, X., Lu, Y., (2014), Centrifugal spinning: An alternative approach to fabricate nanofibers at high speed and low cost, Polymer Reviews, 54(4), 677-701.
- Song, R., Li, X., Gu, F., Fei, L., Ma, Q., Chai, Y., (2016), An ultra-long and low junction-resistance Ag transparent electrode by electrospun nanofibers, RSC Advances, 6(94), 91641-91648.
- Saito, T., Yamada, T., Fabris, D., Kitsuki, H., Wilhite, P., Suzuki, M., Yang, C. Y., (2008), Improved contact for thermal and electrical transport in carbon nanofiber interconnects, Applied Physics Letters, 93(10), 102108.
- Li, G., Martinez, C., Janata, J., Smith, J. A., Josowicz, M., Semancik, S., (2004), Effect of morphology on the response of polyaniline-based conductometric gas sensors: Nanofibers vs. thin films, Electrochemical and Solid-state Letters, 7(10), H44.
- Kim, B.-H., Yang, K. S., Kim, Y. A., Kim, Y. J., An, B., Oshida, K., (2011), Solvent-induced porosity control of carbon nanofiber webs for supercapacitor, Journal of Power Sources, 196(23), 10496-10501.
- Chen, Q., Dai, L., Gao, M., Huang, S., Mau, A., (2001), Plasma activation of carbon nanotubes for chemical modification, The Journal of Physical Chemistry B, 105(3), 618-622.
- Wang, D., Liu, Z., Yue, Y., Xu, X., Cai, D., Han, C., Song, J., Xiao, J., Wu, H., (2021), Blow spinning of pre-acid-activated

polyamidoxime nanofibers for efficient uranium adsorption from seawater, *Materials Today Energy*, 21, 100735.

13. Barranco, V., Lillo-Rodenas, M., Linares-Solano, A., Oya, A., Pico, F., Ibañez, J., Agullo-Rueda, F., Amarilla, J. M., Rojo, J., (2010), Amorphous carbon nanofibers and their activated carbon nanofibers as supercapacitor electrodes, *The Journal of Physical Chemistry C*, 114(22), 10302-10307.
14. Moon, S., Gil, M., Lee, K. J., (2017), Syringeless electrospinning toward versatile fabrication of nanofiber web, *Scientific Reports*, 7(1), 41424.
15. Park, S.-J., Lee, H.-Y., (2005), Effect of atmospheric-pressure plasma on adhesion characteristics of polyimide film, *Journal of Colloid and Interface Science*, 285(1), 267-272.
16. Jiu, J., Nogi, M., Sugahara, T., Tokuno, T., Araki, T., Komoda, N., Sukanuma, K., Uchida, H., Shinozaki, K., (2012), Strongly adhesive and flexible transparent silver nanowire conductive films fabricated with a high-intensity pulsed light technique, *Journal of Materials Chemistry*, 22(44), 23561-23567.
17. Wiklund, U., Hedenqvist, P., Hogmark, S., (1997), Multilayer cracking resistance in bending, *Surface and Coatings Technology*, 97(1-3), 773-778.
18. Yousefzadeh, M., (2017), 12 - Modeling and simulation of the electrospinning process, *Electrospun Nanofibers*, Elsevier, 277-301. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100907-9.00012-X>
19. Enayati, M. S., Behzad, T., Sajkiewicz, P., Bagheri, R., Ghasemi-Mobarakeh, L., Łojkowski, W., Pahlevanneshan, Z., Ahmadi, M., (2016), Crystallinity study of electrospun poly (vinyl alcohol) nanofibers: Effect of electrospinning, filler incorporation, and heat treatment, *Iranian Polymer Journal*, 25(7), 647-659.
20. Woo, H., Kim, S., Yoon, S., Kim, K., Kim, G. H., An, T., Lim, G., (2021), Highly flexible and transparent film heater with electrospun copper conductive network via junction-free structure, *Journal of Alloys and Compounds*, 886, 161191.
21. Lasprilla-Botero, J., Alvarez-Lainez, M., Lagaron, J., (2018), The influence of electrospinning parameters and solvent selection on the morphology and diameter of polyimide nanofibers, *Materials Today Communications*, 14, 1-9.



Na Kyoung Kim

M.Sc. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Chungbuk National University. Her research interest is micro/nano technology.
E-mail: jussy1822@gmail.com



So Eun Kim

B.Sc. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Chungbuk National University. Her research interest is metallization of polymers.
E-mail: ssoo_92@naver.com



Doyeon Im

M.Sc. candidate in the Mechanical Design Engineering, Andong National University. Her research interest is nanoscience, nano fabrication, and MEMS.
E-mail: doyeon980302@naver.com



Seung Mi Hong

B.Sc. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Chungbuk National University. Her research interest is materials of metallization process.
E-mail: 090807alal@naver.com



Taechang An

Professor in the Department of Mechanical Robotics Engineering, Andong National University. His research interest is nanoscience, nano fabrication, microfluidics, and MEMS.
E-mail: tcmerias@andong.ac.kr



Geon Hwee Kim

Professor in the Department of Mechanical Engineering, Chungbuk National University. His research interest is wearable device, MEMS, biosensor, and nano fabrication.
E-mail: geonhwee.kim@chungbuk.ac.kr

18650 리튬이온 배터리의 열남용 조건으로 유도된 열폭주 특성

Thermal Runaway Characteristics Induced by Heat Abuse Conditions in 18650 Li-ion Batteries

김정명^{1,2}, 박희성^{1,#}
Jungmyung Kim^{1,2} and Heesung Park^{1,#}

¹ 창원대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Changwon National University)
² School of Engineering & Physical Sciences, Heriot-Watt University
Corresponding Author / E-mail: heesungpark@changwon.ac.kr, TEL: +82-55-213-3609
ORCID:0000-0003-4586-7794

KEYWORDS: Lithium ion battery (리튬이온 배터리), Thermal runaway (열폭주), Optical diagnosis (광학진단), State of charge (충전률)

This study aimed to characterize the mechanism of thermal runaway phenomenon in lithium-ion batteries, which represent secondary cells among energy storage devices. Thermal runaway reaction was induced by heating 18650 cells with 5%, 40%, and 80% state of charge (SOC). We divided the thermal runaway of the battery into three stages and discussed the physical measurements that distinguish each stage. We also provided a visual comparison and thermal image of the characterized exhaust gases in all stages. The state of charge and the amount of heat generated by thermal runaway were proportional, and in the third stage of thermal runaway, where the highest mass transfer occurred, 40% of SOC released gas for 13 seconds and 80% of SOC emitted gas and flame for 3 seconds. In addition, a temperature and voltage measurement method that can predict the thermal runaway phenomenon of a battery is presented.

Manuscript received: December 7, 2022 / Revised: June 14, 2023 / Accepted: August 2, 2023

1. 서론

리튬 이온 배터리는 전기 에너지를 관리하기 위한 장치로서 현재까지 가장 광범위하게 사용되는 충/방전 전지의 한 종류이다. 에너지 저장 장치(Energy Storage System, ESS)는 전력 × 시간 단위로 표현되는 전력량에 따라 3가지로 구분할 수 있다. 우선 MWh 단위의 전력량을 가지는 대용량 에너지 저장 장치는 전력망에서 비상용 전기 공급원으로 사용되거나, 전력 공급과 수요의 불일치에 따른 잉여 전력을 처리하는 전기 에너지의 임시 저장소 역할을 수행한다. 또한 태양광, 풍력과 같은 재생에너지원에서 발전되는 전기의 효율적인 관리를 위해 대용량 에너지 저장 장치가 사용된다. kWh 단위의 전력량을 가지는 에너지 저장 장치는 가정이나 개인의 전력 소비량에 적합한 수준으로서, 전기차 또는 가정용 에너지 저장 장치에서 사용된다. Wh 단위의 전력량을 가지는 에너지 저장 장치는 스마트폰, 노트북과

같은 휴대용 전자기기 수준에서 오랜 기간 사용된 에너지 저장 장치이다. Wh에서부터 MWh, 나아가 GWh 수준의 높은 전력량을 담당하는 에너지 저장 장치는 다양한 활성 이온에 따른 이차전지를 통해 구성된다.

여기서 리튬 이온을 활성 이온으로 사용하는 리튬 이온 배터리는 높은 에너지 밀도와 경제성에 의해 가장 보편적으로 사용되는 에너지 저장 장치이다. 그러나 리튬이온 배터리 셀이 외력에 의해 손상을 입거나 가혹한 환경에서 작동, 설계/제작상 결함과 같은 다양한 이유로 인해 양극과 음극이 단락 되었을 때 발생하는 폭발적인 산화 반응은 리튬이온 배터리가 극복해야 할 주요한 과제 중 하나이다. 리튬이온 배터리의 안전성을 저해하는 열폭주 반응은 아주 드물게 발생하지만, 그 반응의 특성과 에너지 저장장치의 설계에 의해 상당한 피해로 발전하는 양상을 보인다. 이렇듯 단일 셀 단위에서 열폭주 위험은 상당히 낮지만, 수천(kWh), 수만(MWh)개의 배터리 셀이 집적된 시스템에서

단 하나의 셀이라도 열폭주 반응이 발생할 때 발생한 높은 발열 반응은 주변 셀의 연쇄적인 열폭주로 전파되고, 이러한 연쇄적인 반응은 전체 시스템의 붕괴를 야기할 수 있다.

리튬이온 배터리의 열폭주 현상을 관찰하고 정량적으로 분석하기 위한 다양한 연구가 수행되었다. Finegan et al. [1]은 4가지 제조 업체에서 제작된 5가지의 18650 리튬 이온 배터리 셀에 대한 열폭주 현상을 고속 X선 방사선 촬영과 컴퓨터 단층촬영을 통해 가시화하였다. 그들은 열폭주 과정 초기에서 발생하는 산화 가스의 배출 과정을 배기 설계에 따라 시각적으로 비교하였다. 18650 배터리의 셀 내부 압력을 향상시키는 산화 가스의 적절한 배출은 양극 전극에 위치한 배출 밸브와 셀의 하단에 위치하는 음극 전극 위치에 설계된 배출구에 의해 달성되며, 이러한 적절한 압력 감소 설계는 열폭주 과정에서 셀 내부 압력 증가에 따른 셀 파열을 방지할 수 있다. Garcia et al. [2]은 18650 리튬이온 배터리 셀을 일정한 열유속으로 가열시켜 온도 별로 셀의 열폭주 현상을 현상학적으로 연구하였다. 그들의 일정한 열유속 조건에서 산화 가스의 배출과 자연발화가 일어나는 최대 온도까지의 시간은 약 3분으로 나타났으며, 각각의 열폭주 현상에 대한 발생 온도를 제시하였다. Zou et al. [3]은 가열로 유도된 열폭주의 1차 산화가스 배출 시 발생하는 제트 유동의 온도, 속도를 분석하였다. 그들은 제트 유동을 4단계로 나누었으며, 3단계에서 제트 틸트, 스파크 버스트, 제트 화재와 같은 열폭주로 대표되는 산화 반응이 발생하였다고 보고하였다.

현재까지 리튬이온 배터리의 열폭주와 관련된 연구들은 열, 물리적 충격을 통해 유도된 열폭주 과정에서 발생하는 물리적 변화에 대한 연구가 수행되었다. 리튬이온 배터리를 에너지 저장 장치로 사용하는 다양한 기기에서 열폭주의 피해를 최소화하는 방법은 열폭주 메커니즘의 정립에서부터 시작되어야 한다. 나아가 열폭주 현상을 예측하는 기술은 안전한 리튬이온 배터리 팩/스택을 설계하는데 있어서 필수적이다. 따라서 본 연구에서는 3가지 충전 상태를 가지는 INR18650-20R 셀을 가열시켜 열폭주 반응을 유도하고 각각의 단계에서 셀 표면 온도, 전압, 배출가스 가시화를 통해 열폭주 현상의 메커니즘을 제시한다. 이러한 열폭주 메커니즘 분석을 통해 리튬이온 배터리를 사용하는 에너지 저장장치의 열폭주 전파에 따른 피해를 최소화할 수 있는 예측법을 결론 부분에서 제시하였다. 결과적으로 가시화된 배출 가스의 거동은 충전률과 독립적이었으며, 표면 온도는 측정 위치에 따라 열폭주 단계를 구분하는 지표로 사용할 수 있을 것으로 나타났다. 열폭주 마지막 단계에서 발생하는 발화 과정에서 온도는 충전률에 비례하였다.

2. 실험

2.1 리튬이온 배터리

열폭주 실험에 사용된 리튬이온 배터리의 화학종은 LiNiMnCo/Graphite이며 18650 규격의 원통형 셀이다. 공칭용량 2,000 mAh,

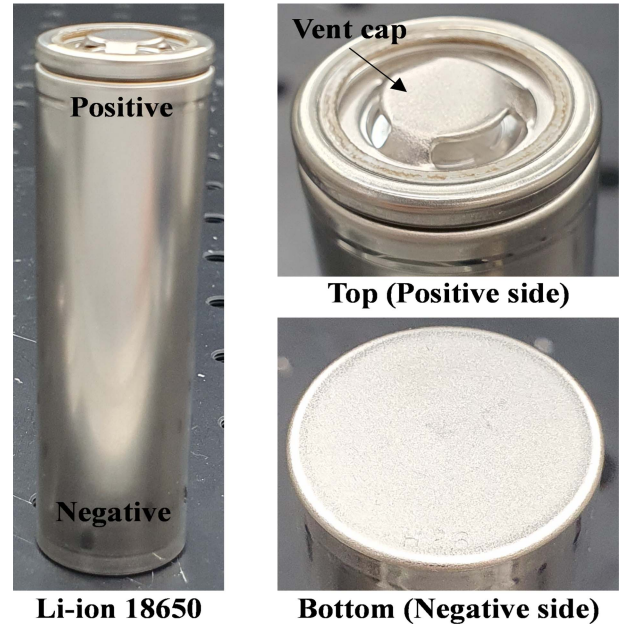


Fig. 1 Photo of 18650 cell used for induced thermal runaway experiment

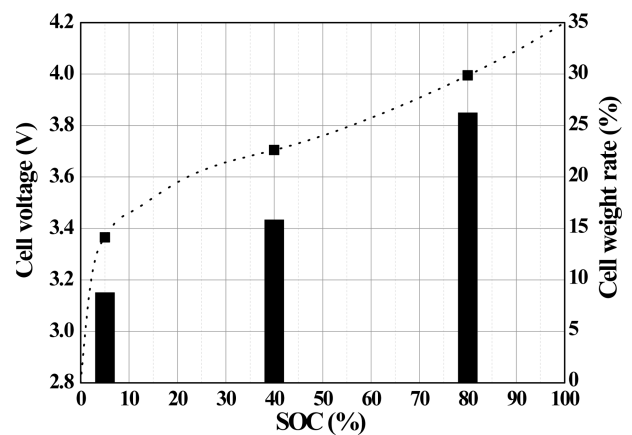


Fig. 2 Lithium-ion battery open circuit voltage and weight loss ratio after thermal runaway

공칭 전압 3.6 V, Cut-off 전압 2.5 V, 작동 온도 0-50°C이며, 초기 중량은 약 42.2 g이다. 배터리의 열폭주는 5, 40, 80% 충전 상태(State of Charge, SOC)에 대하여 수행하였다. 본 연구에 사용된 리튬이온 배터리 셀의 형상을 Fig. 1에 도시하였다. 원통형 셀의 제조사, 셀 종류에 따라 각기 다른 형태의 안전장치를 적용하지만 열폭주 반응 시 발생하는 대량의 산화 가스와 화염의 피해를 최소화를 목표로 한다. 가장 주요한 안전 설계는 열폭주 중 발생하는 산화 가스의 적절한 배출을 위해 양극이나 바닥 면 음극에 압력 릴리프 밸브와 유사한 구조의 적용이다[1,4]. 이러한 셀 내부 압력 릴리프 안전장치는 열폭주 발생 시 셀의 폭발을 방지한다. Fig. 1의 양극 전극 역할을 하는 벤트 캡은 3개의 벤트 구멍을 가진다. 실험에 사용된 배터리의 개방회로 전압과 셀 초기 무게 대비 열폭주 후 무게의 감소율을 Fig. 2에 도시하였다.

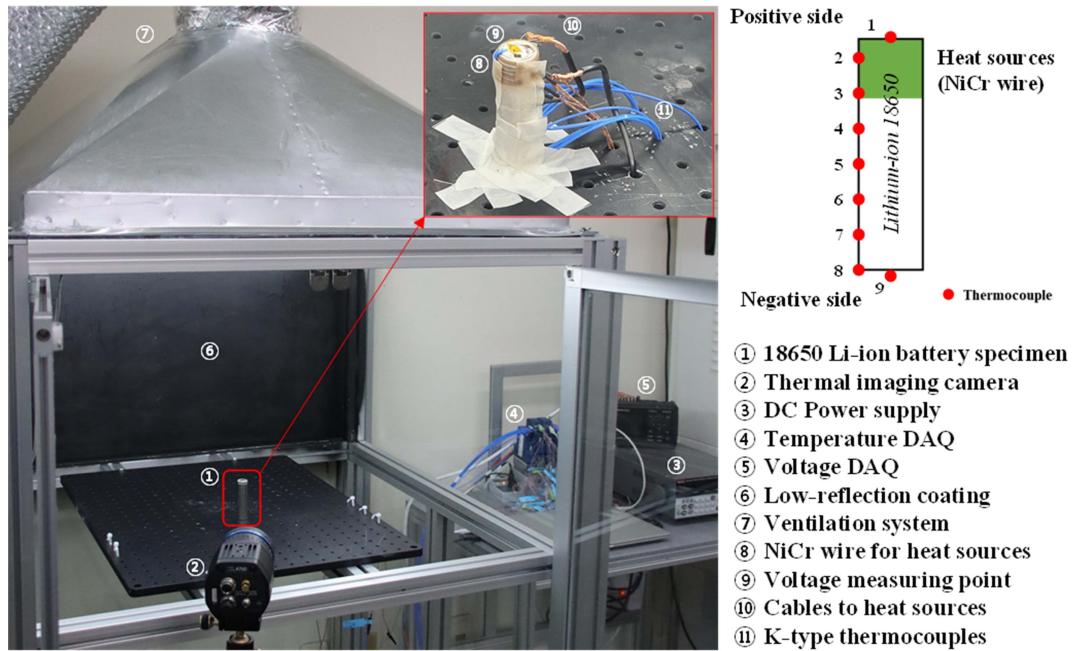


Fig. 3 (a) The structure and dimensions of the test section, (b) the flow field of the heat sink shown in volume, (c) an overview of numbering by location of thermocouples located on the bottom of the microchannel

2.2 열폭주 평가 장치

열폭주 현상을 평가하기 위한 실험 장치의 구성을 Fig. 3에 도시하였다. 18650셀에 높은 온도 조건을 인가하기 위해 고저항 NiCr 와이어를 30 cm 길이로 셀의 상단에서 15 mm 위치까지 권선하였다. NiCr 와이어는 전원공급장치를 통해 45 W의 발열 조건으로 셀의 열폭주를 유발시켰다. 대류에 의한 열손실을 줄이고 셀과 단락을 방지하기 위해 유리섬유 테이프를 사용하였다. 본 연구에 사용된 셀의 경우 음극 벤트홀이 없기 때문에 셀의 고정을 위해 유리섬유 테이프를 사용하였다. 셀 표면의 온도 측정을 위해 셀 음극 바닥면에서부터 1 cm 간격으로 7개의 K타입 열전대를 부착하였으며, 셀 바닥면 중간과 양극 벤트 홀 안쪽으로 열전대를 각각 1개씩 부착하였다. 여기서 셀 표면과 열전대의 열손실을 줄이고 온도 측정의 정확성 확보를 위해 열전도 패드 테이프(3M 8805)를 사용하였다. 또한 열폭주 중 셀 전압의 변화를 관찰하기 위해 실린더 표면과 양극 벤트 홀 사이에서 전압을 측정하였다. 전압과 온도는 1 Hz로 수집되었으며, 열화상카메라(FLIR A700, FLIR Wide Angle Lens f = 10 mm)와 가시광선카메라(Canon EOS 90D, SIGMA DC 18-250 mm, 1:3.5-6.3 MACRO HSM)는 30 Hz로 촬영되었다. 열화상카메라는 0-600°C 온도 범위에서 작동하였기 때문에 측정 범위를 초과하는 온도는 600°C로 기록되었다. 반사되는 적외선의 영향을 최소화하기 위해 저반사 코팅된 유리를 배치하였다. 모든 데이터는 전기저항 히터의 작동과 함께 동기화될 수 있도록 저항선의 전압 데이터도 기록되었다. 실험은 상온에서 수행되었으며, 열폭주 산화 가스의 배출을 위해 지속적으로 환풍기를 작동시켰다.

3. 결과 및 토의

18650 리튬이온 배터리의 열폭주를 유도하기 위해 일정한 열 유속을 셀 외부에서 인가한 결과를 Fig. 4에 도시하였다. Fig. 4(a)에 도시된 5% SOC 셀에 대한 열폭주 유도시 표면 온도 분포는 1,086초에 최대 온도 437°C를 열전대 2번 위치에서 달성하였으며, 약 20분 동안의 실험 동안 대류 열전달에 의해 더 이상의 온도 상승은 없었으며, 화학적 반응 또한 발생하지 않았다. Fig. 4(b)에 도시된 40% SOC 셀에 대한 열폭주 유도 시 표면 온도 분포는 410초에 최대 온도 593°C를 열전대 1번 위치에서 달성하였으며, 이는 양극 벤트 구멍으로 배출되는 고온의 산화 가스에 의한 온도 상승이었다. 또한 Point 1에서 벤트 과정 후 측정된 온도의 결과가 상대적으로 편차가 크게 측정되었다. 이는 해당 과정에서 셀 내부의 화학반응으로 생성된 기체의 배출이 다른 충전상태를 가지는 셀에 비해 많은 물질을 배출하였기 때문이며, 이러한 산화가스 배출 과정에서 주변의 공기를 밀어내며 기체의 순환에 따라 발생한 것으로 판단된다. Fig. 4(c)에 도시된 80% SOC 셀에 대한 열폭주 유도시 표면 온도 분포는 349초에 최대 온도 1,047°C를 열전대 1번 위치에서 달성하였으며, 이는 양극 벤트 구멍으로 배출되는 고온의 산화 가스 및 스파크, 자연발화된 화염에 의한 온도 상승이었다. 3가지 SOC에서 열폭주 최종 단계에 이르기 전 단계까지 전기저항 발열체가 위치하는 영역에서 가장 높은 온도를 보였으며, 열폭주 최종 단계에 이르면 양극 벤트 구멍에 위치한 열전대 1번 위치에서 가장 높은 온도가 측정되었다. 급격한 온도 상승은 배터리 내부에 와인딩된 양쪽 전극의 단락으로 유발된다. 이러한 내부 전극의

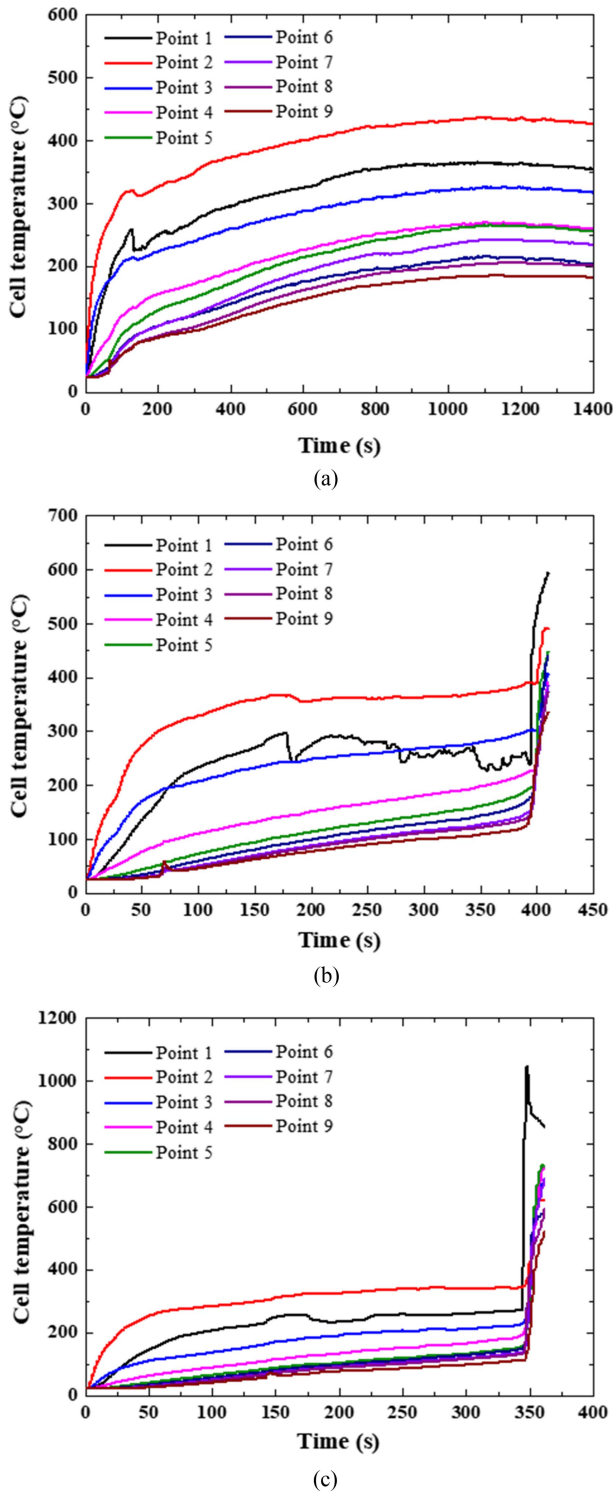


Fig. 4 Temperature of the cell surface during heating-induced thermal runaway, (a) 5% SOC, (b) 40% SOC, (c) 80% SOC

단락은 셀 수준에서 가장 높은 단계의 물질전달을 동반하며, 이에 따라 급격한 온도 상승이 발생한다. SOC는 양쪽 전극의 에너지 차이를 수치화한 것으로, SOC에 비례하여 물질전달이 발생하기 때문에 최대온도는 SOC에 비례하며, 최대온도 도달 시간은 SOC에 반비례한다. 9개의 열전대에서 취득된 표면온도

데이터 중 3가지 단계 각각의 열폭주 현상을 높은 정확도로 추종하는 위치는 셀 바닥면이었으며, 본 연구에서는 열전대 9번 위치에 해당한다. 가장 대표적으로 열폭주 1단계에서 시간변화에 대한 온도 변화율의 비율 증가는 SOC 5% = 60초, SOC 40% = 68초, SOC 80% = 141초에서 각각 관찰되었으며, 이 때 셀 전극으로 전류가 차단되었다. 해당 열전대 위치는 열폭주 감지를 위한 주요한 온도 측정 위치로 판단된다.

18650 셀의 외부 가열에 따른 열폭주 과정을 Fig. 5에서 현상학적 단계로 구분하였다. 본 연구에서 사용된 셀의 열폭주 과정은 3단계로 구분되었으며, 각 단계별 정의와 특징은 다음과 같다. 전류 차단(1단계), 벤트 개방(2단계), 내부 단락(3단계). 우선 전류 차단 단계에서는 셀로 인가된 충격 또는 결함에 의해 셀 내부 재료들이 각각 다양한 온도 조건에서 비가역적 변화를 발생시킨다. 특히 열폭주 과정에서 가장 선행되어 열화되는 재료인 고체 전해질 인터페이스(Solid Electrolyte Interface, SEI)는 80-100°C에서 분해되며[2,5], H₂, CH₄, C₂H₆, C₂H₄와 같은 기체 상태의 산화 가스를 생성한다[6]. 이러한 가스 생성은 셀 내부의 압력을 상승시키고, 적정 수준의 압력에 도달하면 배터리의 Top Disk가 변형된다. Top Disk의 변형은 셀 표면의 양극 전극과 셀 내부의 양극 전극을 물리적으로 분리시키며, 이때 셀 전압이 0 V로 측정된다. 본 연구에 사용된 셀은 압력 반응형 전류 차단 장치가 사용된 것으로 예상된다. 1단계 전류 차단 과정은 외부의 기존 전극에서 전압 측정을 불가능하게 한 것이며, 실제 셀 내부의 양극/음극은 전위차를 가지고 있다.

2단계 벤트 개방 단계에서는 셀 내부에서 발생한 산화 가스가 셀 외부로 배출된다. 1단계 열폭주 과정에서 지속적으로 높아진 셀 내부 압력은 Top Disk의 특정 부분을 통해 배출된다. Top Disk에는 셀 폭발을 방지하기 위한 노치 가공된 영역이 있으며, 셀 내부 압력이 일정수준 이상으로 높아지면 노치 부분에 집중된 응력에 의해 파손된다. 이러한 파손은 셀 내부 압력을 낮춰서 폭발 가능성을 제거하지만 벤트 구멍으로 빠른 속도의 산화 가스가 배출되게 된다. 예를 들어 셀 내부 전극의 단락, 과도한 전류 조건, 물리적 압착, 열 누적, 제조 결함과 같은 주요한 열폭주 유발 인자에 의해 셀 내부 압력이 일정 수준(약 1 MPa [7])까지 상승하면 양극전극 중 셀의 밀봉을 담당하는 구조물이 파손되며 셀 내부 압력을 완화시킨다. 2단계에서 배출되는 산화 가스는 육안으로 관찰 가능하며, 열전대 일부에서도 표면 온도가 낮아지는 현상으로 특정된다. 지속적인 외부가열과 활성종의 산화는 발열 반응으로 온도를 높이지만 2단계 열폭주 과정이 시작되는 순간에 관찰된 흡열 현상은 줄-톰슨 효과에 의한 것이다.

3단계 열폭주 과정에서는 지속적으로 인가된 외부 열원에 의해 분리막이 두께방향으로 모두 분해되어 양극과 음극이 단락되는 단계이다. 이 단계에서는 양극과 음극의 전위차에 의한 산화 반응이 주요한 발열원으로 작용하며, 상당한 스파크와 자연 발화된 불꽃이 관찰되었다. 3단계 열폭주 과정에서 온도와 발현 시간은 충전률이 높을수록 높고 빠르게 나타났다. 이 단계에서

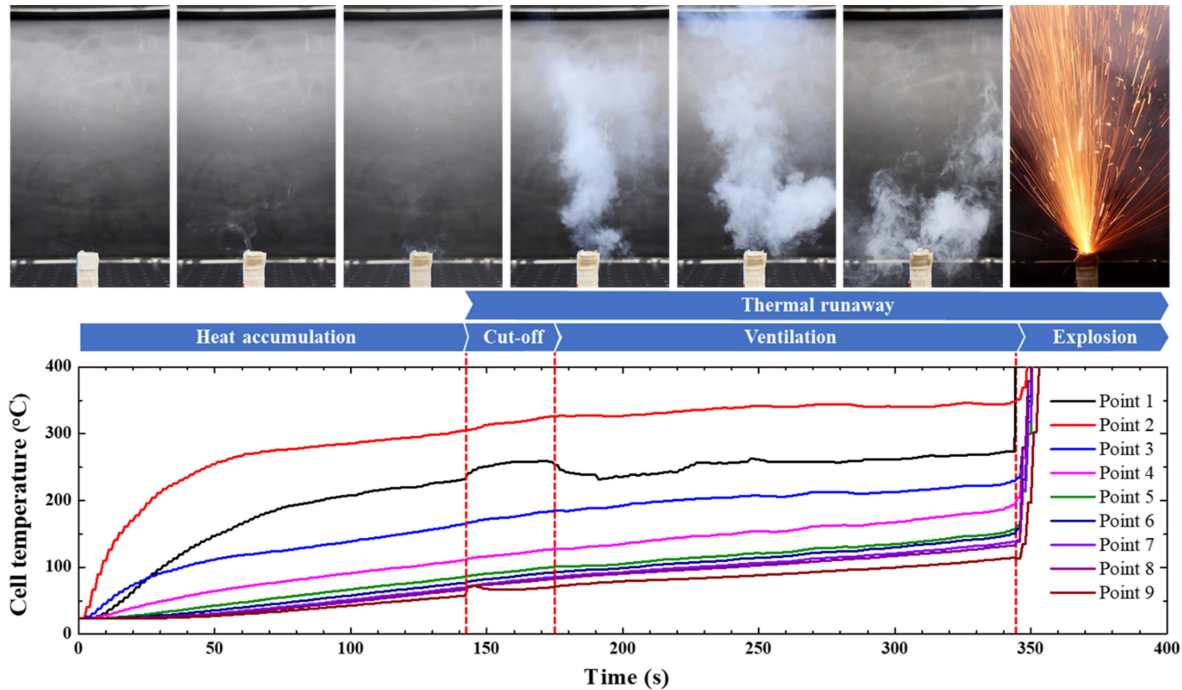


Fig. 5 Description of the phenomenological stages of battery thermal runaway for 80% SOC 18650 cell

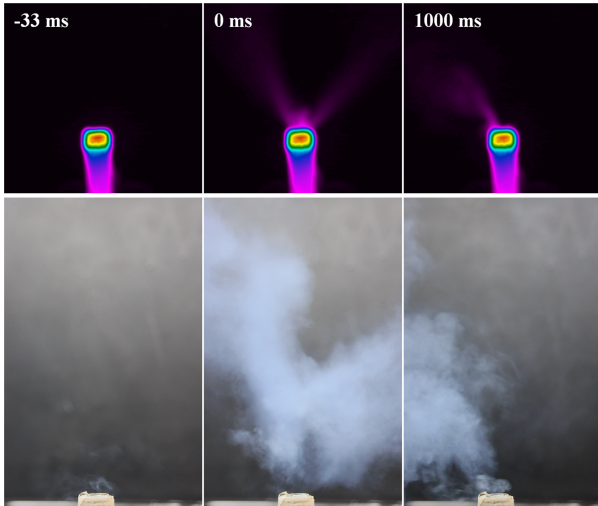
1번 열전대 위치에서 측정된 온도가 가장 빠르게 현상을 측정할 수 있었다. 이는 가장 직접적으로 배출되는 가스와 화염의 영향을 받기 때문이며, 나머지 열전대 영역에서도 급격한 온도 상승이 측정되었다. 화염을 포함하는 열폭주 마지막 단계에서는 내부 전극의 단락으로 가장 급격한 물질전달 특성에 의해 짧은 시간에 급격한 온도 상승이 발생한다.

Fig. 6에는 SOC별로 벤트 개방에 해당하는 2단계 열폭주 과정의 시작을 기준으로 1단계 종료 33 ms 전의 상태와 2단계 시작 후 1,000 ms 경과한 상태를 비교하였다. 2단계 벤트 개방까지 경과된 시간은 SOC 5% = 130초, SOC 40% = 179초, SOC 80% = 173초였으며, 3가지 충전상태 모두에서 산화 가스의 배출이 확인되었다. 이러한 배출은 Fig. 4에 도시된 열전대 1번 위치의 줄-뜸순 효과에 의한 온도 감소구간에서도 확인 가능하다. 압축된 가스의 배출시 셀 표면 온도가 감소하는 지점에서 실제 셀은 Fig. 6의 -33, 0 ms 순서로 발생한다. 가시광선과 열화상 이미지 모두 30 Hz로 촬영되었지만 벤트 단계에서 대표되는 사진을 사용하였다. 2단계 열폭주가 시작될 때 Top Disk의 노치 부분이 파열되는 소리와 함께 가스 배출이 시작된다. 배출되는 가스의 온도는 배터리 외부 온도보다 낮게 측정되었다. 실험에 사용된 셀의 양극 전극 캡의 벤트 구멍은 3개이며 그중 하나의 구멍에서 대부분의 산화 가스 배출이 이루어졌다. SOC 5% 셀은 2단계 열폭주 현상이 시작되고 실험이 종료될 때까지 셀 내부 소재들의 산화 가스가 배출되었다.

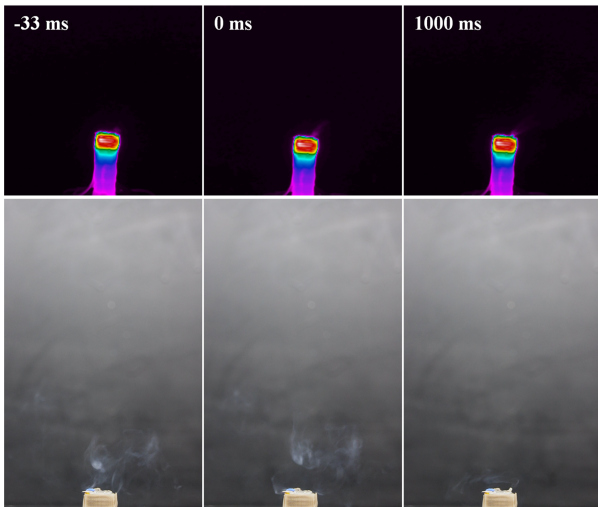
SOC 40% 셀은 3단계 열폭주 현상 시작 시점까지 약 214초 동안 산화 가스의 배출이 발생하였으며, 2단계 과정에서 시간이 경과할수록 더욱 많은 가스가 배출되었다. SOC 80% 셀 또한

3단계 열폭주 현상 시작 시점까지 약 170초 동안 산화 가스 벤트 구멍을 통해 배출되었으며, 2단계 열폭주 과정이 끝나갈수록 더욱 많은 가스가 배출되었다. 모든 충전상태에서 2단계 열폭주 현상은 흰색 연기 형태의 가스를 분출하였다.

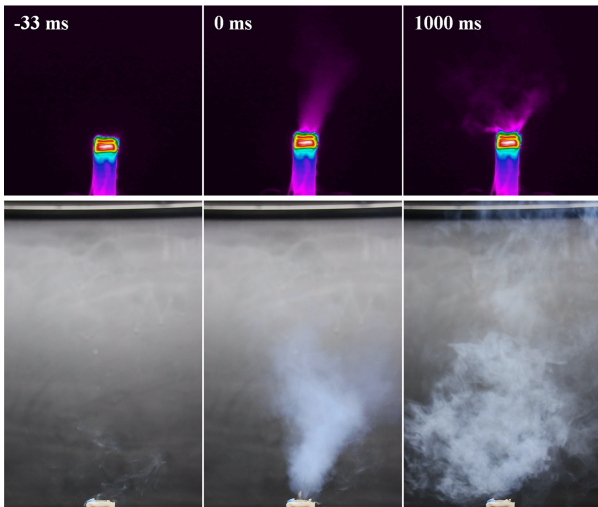
가장 많은 가스와 화염이 관찰된 열폭주 3번째 단계는 내부 전극의 단락에 의해 유발된다. SOC 5% 셀의 경우 벤트 개방, 즉 2단계 열폭주에서 더 이상 산화 반응이 관찰되지 않았으며, SOC 40%, 80%에서는 벤트 개방 이후 내부 전극 단락에 의한 높은 수준의 물질전달이 관찰되었다. Figs. 7과 8에 각각 SOC 40%, 80% 셀의 열폭주 3단계 진행 과정을 도시하였다. 결과적으로 열전대 1번 위치에서 측정된 최대 온도는 SOC 40%의 경우 593°C이며, SOC 80%의 경우 1,046°C이다. 또한 내부 단락에 의한 물질 배출은 SOC 40% 셀에서 약 14초 동안 지속되었으며, SOC 80% 셀에서 약 3초 동안 발생하였다. 즉, 상대적으로 많은 전기화학적 에너지를 가지는 SOC 80% 셀이 보다 많은 질량 전달을 발생시키며, 급격한 산화 반응을 동반한다. 시간에 따른 높은 수준의 에너지 변화는 셀 내부 재료의 발화점 이상의 온도 환경을 만들고, 이에 따라 배출되는 가스에도 점화가 이루어졌다. 상대적으로 작은 물질전달이 발생한 SOC 40% 셀은 배터리 재료의 산화가 점진적으로 발생하였으며, 이는 14초간 지속된 온도 상승의 이유로 작용하였다. 리튬이온 배터리의 열폭주에서 가장 높은 온도를 보인 SOC 80% 3단계 열폭주 시작 후 3,000 ms 지점에서는 셀 내부에서 반응하는 활성물질에 의해 셀 표면 온도 또한 400°C 이상의 표면 온도를 보였다. 나아가 Fig. 8에 도시된 3,000 ms 이후 발생한 화염은 벤트 구멍 주위의 높은 온도에 의해 자연 발화된 화염이다.



(a) SOC 5% Ventilation



(b) SOC 40% Ventilation



(c) SOC 80% Ventilation



Fig. 6 Visualization of gases emitted from the ventilation phase during thermal runaway by SOC (a) 5%, (b) 40% and (c) 80%

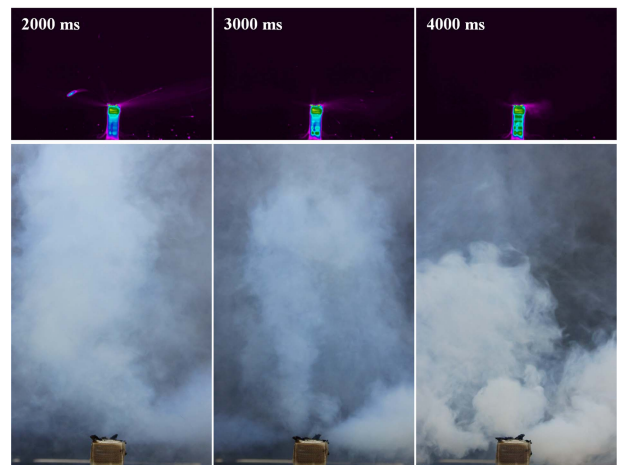
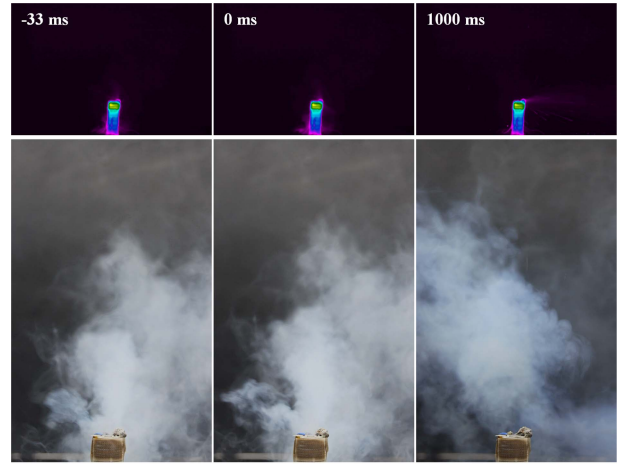


Fig. 7 Visualization of gas emitted during internal short circuit during thermal runaway step of SOC 40% 18650 cell

4. 결론

본 연구에서는 에너지 저장 장치 중 2차전지를 대표하는 리튬이온 배터리의 3가지 충전 상태에 따른 열폭주 현상을 실험적으로 분석하고 열폭주에 대한 현상적 메커니즘을 제시하였다. 본 연구에서 배터리 열폭주는 셀 표면에 전기저항 히터를 통해 유도되었으며, 셀 표면 온도와 광학측정을 통해 각각의 열폭주 현상을 구분하였다. 결과적으로 리튬이온 배터리의 열폭주는 3 단계 과정으로 구분되었으며, 각각 단계는 상대적으로 측정하기 쉬운 전압 또는 셀 표면온도로 열폭주를 예측 및 감지할 수 있다. 따라서 열폭주 예측을 통해 피해를 최소화할 수 있는 메커니즘을 각 단계별로 아래와 같이 제시한다.

1단계: 전압과 셀 표면 온도 측정을 통해 열폭주 예측. 해당 단계에서는 배터리 전극으로 전류의 흐름이 차단되어 셀 전압이 0 V로 측정됨과 동시에 셀 바닥면에서 시간에 따른 온도 증가율이 급격히 증가하는 현상을 통해 열폭주를 예측할 수 있다. 2단계: 셀 표면 온도 측정을 통해 열폭주 예측.

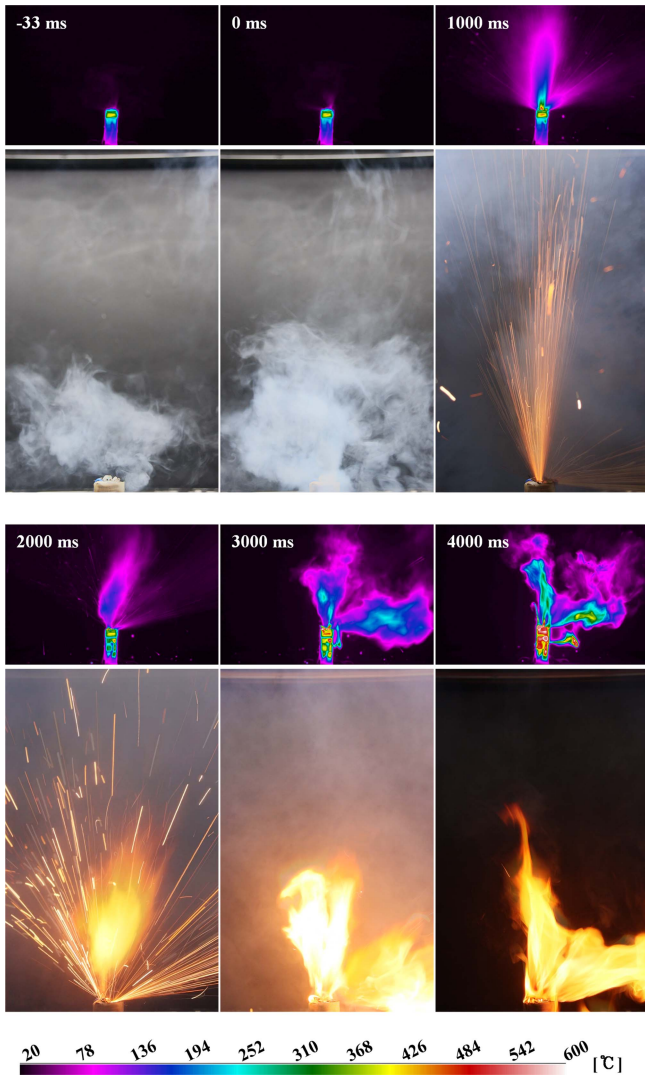


Fig. 8 Visualization of gas and flame emitted during internal short circuit during thermal runaway step of SOC 80% 18650 cell

해당 단계에서는 배출되는 산화 가스에 의해 시간에 따른 온도 증가율이 급격히 감소되거나 증가하는 것을 통해 열폭주를 예측할 수 있다. 또한 열폭주 과정에서 배출되는 가스, 화염의 시각화 결과는 열폭주 수치 모델 개발에 정성적 결과로 유용하다. 해당 연구는 한가지 종류의 셀에 대하여 조사되었지만, 향후 다양한 리튬이온 배터리의 열폭주 특성을 규명할 수 있을 것으로 기대한다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(No. 2022RIC1C2011192)이며, 산업통상자원부에서 시행하는 공정혁신 시뮬레이션 센터 구축 사업의 지원을 받아 수행되었음.

REFERENCES

1. Finegan, D. P., Darcy, E., Keyser, M., Tjaden, B., Heenan, T. M., Jarvis, R., Bailey, J. J., Vo, N. T., Magdysyuk, O. V., Drakopoulos, M., (2018), Identifying the cause of rupture of Li-Ion batteries during thermal runaway, *Advanced Science*, 5(1), 1700369. <https://doi.org/10.1002/advs.201700369>
2. García, A., Monsalve-Serrano, J., Sari, R. L., Martinez-Boggio, S., (2021), An optical investigation of thermal runaway phenomenon under thermal abuse conditions, *Energy Conversion and Management*, 246, 114663. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114663>
3. Ould Ely, T., Kamzabek, D., Chakraborty, D., (2019), Batteries safety: Recent progress and current challenges, *Frontiers in Energy Research*, 7, 71.
4. Spinner, N. S., Field, C. R., Hammond, M. H., Williams, B. A., Myers, K. M., Lubrano, A. L., Rose-Pehrsson, S. L., Tuttle, S. G., (2015), Physical and chemical analysis of lithium-ion battery cell-to-cell failure events inside custom fire chamber, *Journal of Power Sources*, 279, 713-721. <https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2015.01.068>
5. Spotnitz, R., Franklin, J., (2003), Abuse behavior of high-power, lithium-ion cells, *Journal of Power Sources*, 113(1), 81-100. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(02\)00488-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(02)00488-3)
6. Xu, B., Lee, J., Kwon, D., Kong, L., Pecht, M., (2021), Mitigation strategies for Li-ion battery thermal runaway: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 150, 111437. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111437>
7. Zou, K., Chen, X., Ding, Z., Gu, J., Lu, S., (2020), Jet behavior of prismatic lithium-ion batteries during thermal runaway, *Applied Thermal Engineering*, 179, 115745. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115745>



Jungmyung Kim

Research associate in School of Engineering & Physical Sciences, Heriot-Watt University, Research interest is heat & mass transfer and fluid dynamics.
E-mail: Jungmyung.kim@hw.ac.uk



Heesung Park

Professor in the Department of Industrial and Mechanical Engineering, Changwon National University. His research interest is thermos fluidic devices for sustainable energy systems.
E-mail: heesungpark@changwon.ac.kr

강관의 고주파 저항용접에서 내로우갭 주위의 전자기장 및 온도분포 해석

Analysis of Electromagnetic Field and Temperature Distribution around Narrow Gap in High-frequency Resistance Welding of Steel Pipe

양영수¹, 배강열^{2,#}

Young Soo Yang¹ and Kang Yul Bae^{2,#}

¹ 전남대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Chonnam National University)

² 경상국립대학교 메카트로닉스공학부 (School of Mechatronics Engineering, Gyeongsang National University)

Corresponding Author / E-mail: kybae9@gnu.ac.kr, TEL: +82-55-772-3384

ORCID: 0000-0002-2316-4230

KEYWORDS: High frequency resistance welding (고주파 저항용접), Finite element analysis (유한요소해석), Temperature distribution (온도분포), Electromagnetic field (전자기장), Narrow gap (내로우갭)

When a narrow gap was formed under appropriate welding conditions in the steel pipe manufacturing process using high-frequency resistance welding, temperature distribution was analyzed to predict the length of the gap. Assuming the length of the gap from the apex point to the welding point at an applied voltage, and calculating the temperature distribution around the gap, the length of the gap with an appropriate fusion width at the welding point could be estimated. Along with this, the current density and magnetic flux density distributions that appeared in the narrow gap were obtained according to the change in the applied voltage, and the distribution shape and size of the electromagnetic force acting on the gap were also predicted. The current density, magnetic flux density, and electromagnetic force gradually increased along the narrow gap, showing the maximum value at the welding point. In the temperature distribution in the narrow gap, the surface of the front end began to melt at an appropriate applied voltage, and the melting width was the largest at the welding point. As the applied voltage increased, the narrow gap became longer, and the appropriate gap length appeared in proportion to the applied voltage.

Manuscript received: April 29, 2023 / Revised: July 11, 2023 / Accepted: July 12, 2023

1. 서론

송유, 보일러, 기계 시스템 등 열악한 환경에 사용되면서 내압을 받게 되는 강관(Steel Pipe)은 고강도를 포함하여 높은 품질과 신뢰성이 요구되고 있다[1]. 이들 강관은 주로 단순하면서도 생산성이 높은 고주파 저항용접(High Frequency Resistance Welding, HFRW) 공정으로 제작되고 있다. 이 공정에서는 강 스트립(Steel Strip)이 환형으로 성형되면서 용접 위치로 이송되고, 스트립의 양 가장자리(Edge)에 위치한 전극에 고주파 전압이 인가된다. 이때 소재에 흐르는 고주파 전류는 스트립 가장자리

표면(Edge Surface)에 집중하게 된다. 전류에 의한 저항열로 접합부 표면이 용융되고, 용융부가 압축롤(Pressure Roll)에 의해 가압되어, 압접된 접합부가 형성된다[2]. HFRW 공정으로 제작되는 강관에서는 용접에 의한 결함을 저감하는 것이 매우 중요한데, 공정이 단순함에도 불구하고 공정변수 간의 높은 상관성으로 인하여 각 공정변수와 결함과의 관계를 규명하기가 어렵다. 그럼에도, HFRW 공정의 향상을 위한 여러 연구가 수행되어 왔다. 특히 입열량의 변화에 따른 실험에서, 입열량이 작으면 용융의 발생이 없는 냉접점이 나타나고, 입열량이 많아지면 침입결함이 발생하는 현상을 보였다[3-5]. 입열량이 작으면

스트립 가장자리의 기하학적 수렴 위치와 용접 위치가 일치하게 되며, 양 가장자리 표면이 충분히 용융되지 않는다. 입열량이 적정하면 두 가장자리 접촉부 표면에 용융이 발생되고, 전자기력(Electromagnetic Force)이 용융부를 소재 표면(Strip Surface)으로 밀어냄으로써, 일정 폭의 내로우갭(Narrow Gap)이 발생하면서 갭 종단부에 용접 위치가 형성된다[4]. 이때 가장자리 표면에 작용하는 전자기력이 용융부뿐만 아니라 산화물을 밀어내는 정화(Cleaning) 작용을 하게 된다. 입열량이 더 커지면 갭의 길이가 매우 길어지고 갭 내부에 브리지(Bridge)가 발생하게 된다. 이때 용접부 주위에서의 전자기력이 감소하고 밀려났던 용융부가 표면장력에 의해 갭으로 재유입되는 현상이 발생하여, 침입결함의 원인이 된다[4-6]. 내로우갭의 길이가 길면 침입결함의 가능성이 높게 되므로, 길이를 최소화하는 용접조건을 선택하는 것이 필요하다[5]. 고입열의 경우에 전자기력은 용접 위치 근처에서 폭이 넓은 내로우갭을 형성하게 되고, 내로우갭 내에 발생하는 브리지의 이동을 야기하게 된다. 갭에 나타나는 이와 같은 현상을 규명하기 위한 목적으로, 내로우갭을 일정 길이로 가정하여 갭 주변의 전자기력에 대한 수치해석을 수행하였다[7]. 한편으로는, 입열량을 주요 공정변수의 하나로 판단하고, 용접품질과의 관계를 기계적 시험과 금속학적 분석으로써 규명하였다[2]. 또한 용접 중에 용접부의 온도와 전기적 매개변수 등을 계측하여, 용접결함이 발생하지 않는 적정 온도 범위를 유지하는, 최적의 공정변수를 실시간으로 설정하는 방법을 제시하고자 하였다[1]. 따라서 내로우갭 발생과 결함발생 기구를 규명하기 위해서는 먼저 입열량 등 공정변수에 따른 용접부 주위의 온도분포를 파악할 필요가 있다. 그럼에도 온도분포 해석 등 공정변수에 따른 용접 현상을 효과적으로 규명한 해석적 연구가 미흡한 실정이다[8]. 선행한 연구에서는 두 가장자리가 기하학적으로 수렴하는 위치에서 용접이 수행되는 경우에 용접부 주변에 대한 전자기장과 온도분포 해석을 수행하였다[9]. 이로써 공정변수에 따른 용접 위치와 주위 소재에서의 온도분포를 비교적 정확히 예측할 수 있었다. 이와 같은 결과는 용접 중에 내로우갭이 존재하지 않는 경우의 해석 결과이다. 적정 용접조건에서는 스트립 수렴 위치와 용접 위치는 차이가 발생하고, 두 위치 사이에는 일정 폭의 내로우갭이 존재하게 된다[3-5]. 따라서 내로우갭의 발생을 고려한 모델링과 해석이 필요하다. 용접 중 발생하는 내로우갭 길이는 입열량과 상관성을 갖고 있어 예측하기 어렵기 때문에 시행착오와 같은 형태의 해석이 필요하게 된다. 적정한 입열량에 대응되는 갭 길이는, 용접 위치에서 용융폭이 일정 크기가 될 때, 스트립 수렴 위치와 용접 위치까지로 설정할 수 있다.

본 연구에서는 용접 공정변수의 설정이나 변동에 따라 용접 위치가 변화되는 현상을 모사하여, 주어진 용접조건에서 내로우갭의 길이를 가정하고, 스트립 수렴 위치에서 실제 용접 위치까지의 갭 형성을 고려한 온도분포 해석을 수행하였다. 이로써 용접 위치에서 적정한 용융부 크기를 갖는 갭의 길이를 선택하여, 적합한 길이의 내로우갭을 형성하는 적정한 용접 공정변수의

산출이 가능함을 보이고자 하였다. 또한 갭 표면에 작용하여 용융부를 밀착하게 되는 전자기력의 분포형태와 크기를 예측하고자 하였다. 온도분포 해석을 위해서는 전류밀도분포, 파워분포 등에 대한 해석이 필요하고, 전자기력분포 해석을 위해서는 전류밀도분포와 자속밀도분포의 해석이 선행되어야 하는 바, 갭 주변에 나타나는 전자기장 해석과 온도분포 해석을 유한요소해석 기법을 이용하여 차례로 수행하였다.

2. 강관 용접 공정의 전자기장 및 온도분포 해석

2.1 공정 및 모델링

Fig. 1은 강관을 고주파 저항용접(HFRW) 공정으로써 제작하는 과정을 보여주고 있다. 관의 형태로 성형된 강 스트립의 두 가장자리(Strip Edge)는 V 형상으로 이송하게 되고, 맞대어지는 스트립의 두 가장자리(Edge) 근방에 미끄럼 전극(Sliding Contactor)을 설치하여 고주파 전압을 가하게 된다. 이로써 전류는 V 형상의 선단에 위치하는 수렴 위치(V-convergence Point, 또는 Apex Point)를 통해 두 전극 사이를 흐르게 된다. 이때 고주파의 특성으로 전류가 전도체 표면을 따라 흐르게 되는 표피효과(Skin Effect)가 나타나고, 또한 한 전극에서 용접 위치로의 전류 흐름과 용접 위치에서 다른 전극으로의 전류 흐름은 서로 반대 방향이고 그 간격이 좁아 근접효과(Proximity Effect)가 발생하여[4,7], 전류는 더욱 소재 표면에 집중하여 흐르게 된다. 이때의 전기저항에 의한 발열로써 가장자리의 표면을 가열하게 되면, 스트립 가장자리 표면의 온도가 상승하고, 표면에 산화막이 형성되기 시작한다. 입열량이 낮은 경우는 두 가장자리의 수렴 위치인 에이펙스점(Apex Point)과 용접 위치인 용접점(Welding Point)이 중첩되고, 해당 위치에서 가장 크게 가열된다. 용융 상태에 이르면 용융부와 산화막은 전자기력에 의해 상하로 밀려 스트립 표면(Strip Surface)으로 흘러가게 된다. 입열량이 더 증가함에 따라 에이펙스점과 용접점은 분리가 되고, 두 위치 사이에는 일정 길이의 내로우갭이 형성된다. 실제 용접부의 위치는 공정변수에 따라 에이펙스점과 가압 위치 사이에서 변화되고[4-6], 내로우갭의 길이는 에이펙스점과 용접점 사이의 거리로 나타낼 수 있다. 용접은 일정한 폭의 갭을 유지하면서 수행되는 것이 바람직하다[5]. 입열량이 커지면 용융량이 많아지고 전자기력이 커지게 되어, 내로우갭의 길이가 길어지게 될 것으로 예상되는 바, 용접조건에 따라 내로우갭의 길이 예측이 필요하게 된다.

강관의 HFRW 공정에서 내로우갭의 길이와 갭 내의 전자기력을 예측하기 위해서는 전자기장과 온도분포 해석이 필요하다. 이 공정에서는 스트립 소재에 고주파 전류가 인가되면 이로 인해 자기장과 소재 내에 다시 와전류가 생성되는 전자기장 현상이 발생하게 된다. 이와 같은 전자기장 현상은 맥스웰방정식으로부터 유도하여 다음과 같은 방정식으로 묘사할 수 있다[10].

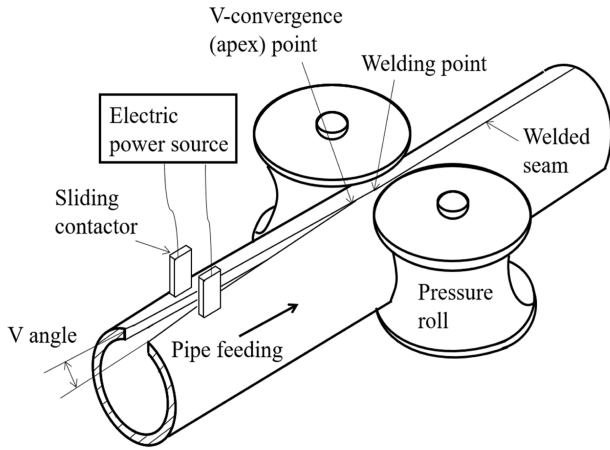


Fig. 1 Schematic drawing of high frequency resistance welding process of steel pipe [4] (Adapted from Ref. 4 on the basis of OA)

$$-\frac{1}{\mu} \nabla^2 \vec{A} + \sigma \left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) = \vec{J}_s \tag{1}$$

$$\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \tag{2}$$

$$\vec{J}_e = \sigma \vec{E} \tag{3}$$

여기서 μ 는 투자율, \vec{A} 는 자기벡터포텐셜, σ 는 전기전도도, \vec{J}_s 는 전류밀도, \vec{J}_e 는 와전류밀도, \vec{E} 는 전기장세기이다. 식 (1)에서 자기벡터포텐셜을 구하고, 이를 이용하여 식(2)와 (3)에서 와전류를 구할 수 있다. 따라서 소재에 인가된 전압에 의한 전류와 이로 인한 자기장으로 생성된 와전류에 의해 전도체에 발생하는 줄열(Joule Heat), q 는 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$q = |\vec{J}_s + \vec{J}_e|^2 / \sigma \tag{4}$$

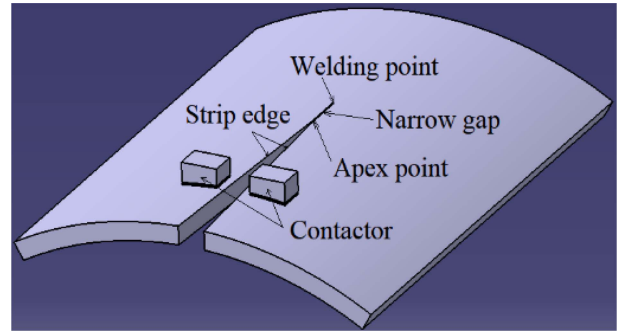
식(1)-(4)에 대한 해는 수치해석적 방법으로 구할 수 있고, 식 (4)에서 같이 줄열이 산출되면, 온도분포 해석에서의 열원으로 이용할 수 있다.

한편, 접촉전극과 용접점 사이에 분포하는 전자기력은 전류와 자속밀도의 작용으로 발생하게 되고, 균일한 자기장에서 선형 도체에 가해지는 전자기력으로 가정하면, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

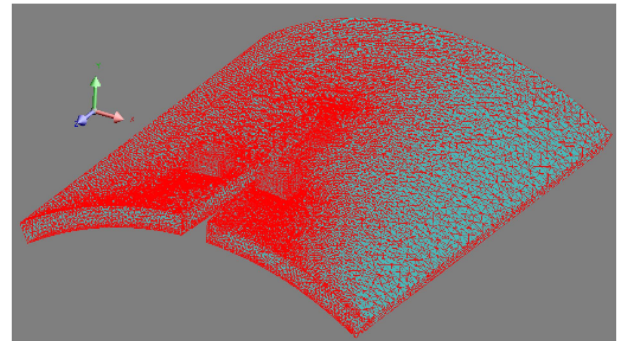
$$\vec{F} = I \vec{L} \times \vec{B} \tag{5}$$

여기서 \vec{F} 는 전자기력 벡터, I 는 전류, \vec{L} 은 전류 방향벡터, \vec{B} 는 자속밀도 벡터이다.

선행한 연구에서 동일한 강관 형상의 적정한 용접부는 두께 중앙의 용융부 폭이 0.4 mm일 때 형성되는 것으로 조사되었다 [9]. 본 연구에서는 설정된 전압으로 용접을 수행하는 경우, 1.0 mm의 일정한 폭을 갖는 임의 길이의 내로우갭이 발생한다고 가정하고 온도분포를 해석하여, 갭의 끝 위치한 용접점에서



(a) Geometric model



(b) Solution domain

Fig. 2 Geometric model and solution domain for electromagnetic FEM analysis

적정 용접부 폭인 0.4 mm를 나타내게 될 때의 갭 길이를, 실제 용접 시에 나타나는 갭 길이로 판단하고자 하였다. 또한, 이때 얻어진 갭 내부의 전자기장, 특히 전자기력의 분포와 세기 등을 해석하여 스트립 표면의 용융부에 가해지는 힘의 크기를 가능하고자 하였다.

2.2 전자기장 해석 모델

HFRW의 해석에 사용한 소재는 API 표준 X65급 스트립이고, 성형된 강관의 형상은 외경 609.6 mm, 내경 578.8 mm, 두께 15.4 mm이다. 스트립이 강관 형상으로 성형되어 용접 위치로 진입하는 V 형상의 각도는 6°로 일정하게 두었다. 전극에는 320 kHz의 고주파 전압이 인가된다.

Fig. 2는 전자기장 해석에 사용된 기하학적 형상과 유한요소 해석 모델로서, 관으로 성형된 형상에서 용접부를 중심으로 하는 관의 일부와 전원을 공급하는 두전극(Contactor)을 보이고 있다. 이는 사전 해석을 통해, 전류밀도분포, 자속밀도분포 등을 고려하여, 스트립 가장자리가 서로 근접되는 V 형상 주위와 접합부를 제외하면 그 크기가 매우 낮아 해석결과에 영향을 미치지 않는 것으로 판단하여 선정한 형상이다. Fig. 2(a)에서는 스트립의 두 모서리(Strip Edge) 두께 방향 표면(Edge Surface)이 서로 만나는 에이펙스점과 용접점 그리고 두 위치 사이에 형성되는 내로우갭을 보이고 있다. V 영역(V 형상 구역), 전극 그리고 내로우갭을 포함한 길이 400 mm와 관 도심의 수직 상향선에서 ±30° 이내를 해석영역으로 설정하였다. V 영역이 시작되는

관의 끝에서 전극 중심까지는 80 mm, 전극에서 에이펙스점까지는 130 mm로 일정하게 설정하였다. 전극은 가로 22 mm, 세로 30 mm의 단면을 가진 사각 기둥 형태이며, 전극 사이 거리는 58 mm, 전극 표면과 스트립 표면과의 간극은 0.1 mm로 각각 설정하였다. Fig. 2(b)는 유한요소해석을 위한 모델로, 요소의 크기와 분포를 보이고 있다. 특히 에이펙스점에서 용접점까지의 내로우갭 주위에서 0.01 mm 크기로 분할하는 등, 해석영역을 약 450,000개의 사면체 요소로 분할하였다. 해석영역에는 전극, 전극과 스트립 표면 사이의 공극, 스트립 등이 포함되고, 스트립 상하 표면으로부터 200 mm 이격된 위치까지의 공기층은 해석영역에 포함하였다. 전극에 주파수 320 kHz의 전압이 인가되는 경우, 적용된 소재의 침투깊이는 0.0065 mm 이하 크기로 예측된다[11]. 전도체 표면을 따라 전류가 흐르는 경우에는 표면임피던스경계조건(Surface Impedance Boundary Condition)을 적용하여 해석할 수 있으므로[11], HFRW에서의 고주파수 특성으로 소재 내부로의 전류 흐름은 없다고 가정하여, 전자기장 해석에서는 표면임피던스경계 해석기법을 적용하였다.

전극에 인가되는 전압의 범위가 240-270 V까지 5 V 간격으로 변화하고, 각 전압에서 임의로 설정된 갭의 길이는 0-40 mm 까지 5 mm 간격으로 변화된다고 가정하여, 내로우갭 주변에서 발생하는 전류밀도, 자속밀도, 전자기력, 파워밀도 등을 계산하였다. 이와 같은 전자기장분포의 계산은 전자기장 해석이 가능한 유한요소법 기반의 상용소프트웨어인 FLUX3D 프로그램 [12]을 활용하여, 3D 교류 정상상태 해석으로 수행하였다. 소재의 비투자율은 300, 전기저항은 $0.5 \times 10^{-6} \Omega$, 전극의 비투자율은 1, 전기저항은 $1.72 \times 10^{-8} \Omega$ 으로 각각 일정하고, 전극이 스트립 소재와 접촉되는 공극에서의 접촉 저항은 $10^4 \Omega$ 으로 가정하였다. 전자기장 해석에서 확보한 파워밀도는 온도분포 해석을 위한 열원으로 활용하였다.

2.3 온도분포 해석 모델

전자기장 해석에서 계산된 파워를 외부 열원으로 하는 열전달 해석을 수행하여 스트립 소재 내의 온도분포를 구하였다. 온도분포 계산을 위한 열전달 해석(온도분포 해석)에서는 강관의 길이 방향 단면에 대한 2차원 해석을 시간변화에 따라 수행하여 정상상태 3차원 해석과 유사한 결과를 얻고자 하였다. Fig. 3에 나타낸 바와 같이 시간의 변화(t_1, t_2, \dots, t_n)에 따라 단면 형상이 변화하므로, 공정의 열전달 현상은 강관의 이송에 따라 변화하는 2차원 단면에 이송방향 해당 위치의 발열량이 열원으로 작용되는 과도상태로 모델링하고 해석하였다. 이로써 강관 길이 방향 각 단면의 온도분포를 계산할 수 있게 된다. 2차원 해석영역에서 시간변화에 따른 과도상태의 열전달 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + Q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (6)$$

여기서 x, y 는 위치, T 는 온도, k 는 열전도도, Q 는 입열량,

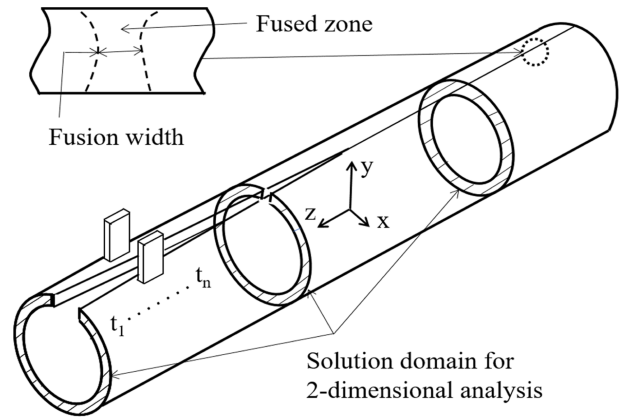


Fig. 3 Changes of solution domain for heat transfer analysis of steel pipe during HFRW process

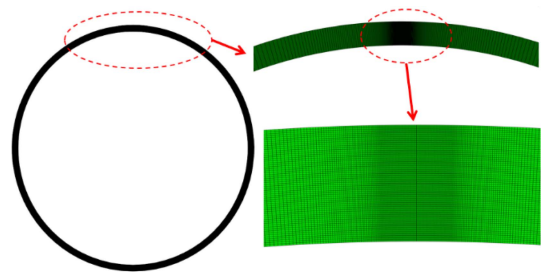


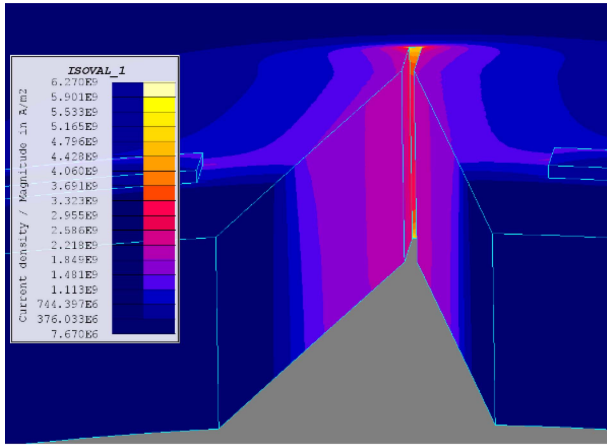
Fig. 4 Solution domain and mesh division in FEM analysis for temperature distribution of steel strip

ρ 는 밀도, c 는 비열, t 는 시간이며, 초기조건은 상온으로 설정하였고, 경계조건은 표면에서의 대류 조건을 사용하였다. 온도분포 해석에서는 전자기장 해석과 동일한 기하학적 형상을 대상으로 하였고, 용접속력은 강관의 성형 이송속력인 220 mm/sec로 설정하였다. 스트립 소재의 밀도, 비열, 열전도도 등 열적 성질은 온도변화에 따라 변화하는 특성을 고려하였다[13].

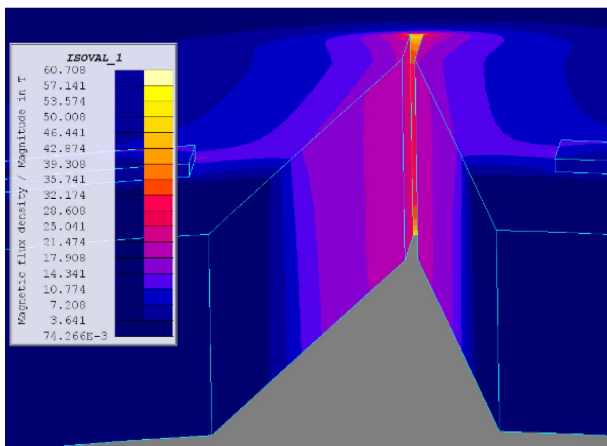
온도분포 해석에서 해는 유한요소법 기반의 상용소프트웨어 ABAQUS를 활용하여 구하였고[14], 유한요소해석을 위한 해석영역과 메시는 Fig. 4와 같다. 해석영역에서는 Fig. 3에서 보인 시간에 따른 갭 간격의 변화를 고려할 수 있게 하였고, 사각형 요소를 사용하여 분할하되, 내로우갭 부근에는 조밀하게 하여 약 30,000개 요소로 분할하였다. 온도분포 해석결과 분석을 위해, 갭이 완전히 닫히는 용접점에서 용융 온도 이상에 도달하는 크기를 추출하였으며, 두께 중앙부의 용융폭을 용접점에서의 용융폭(Fusion Width)으로 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 5는 HFRW 공정에서 해석영역을 대상으로 한 전자기장 해석의 결과로, 스트립 가장자리에 나타나는 전류밀도 분포와 자속밀도 분포를 보이고 있다. Fig. 5(a)는 전류밀도 분포로, 대부분의 크기가 전극과 전극 사이인 스트립 가장자리의 V 영역과



(a) Current density

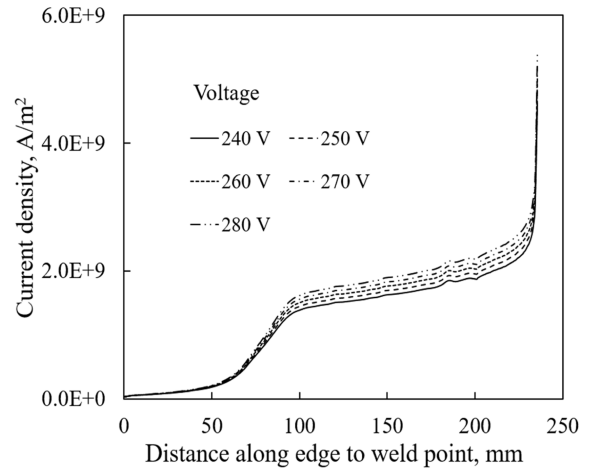


(b) Magnetic flux density

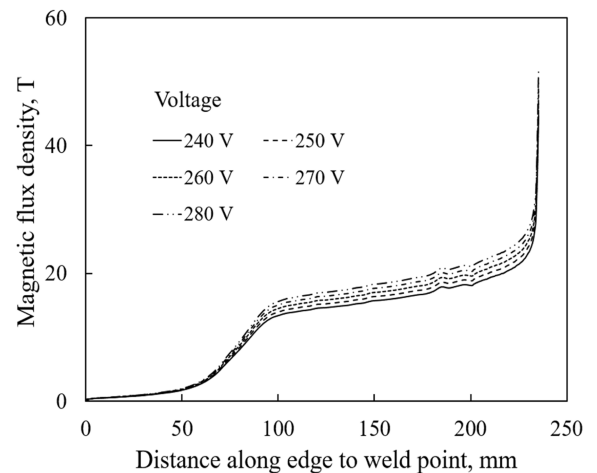
Fig. 5 Distributions of current density and magnetic flux density at strip edge

내로우갭 영역에 나타나며, 특히 가장자리 표면에 집중되고, V 영역 중앙을 기준으로 좌우 대칭으로 또 상하에서 유사하게 분포하고 있음을 알 수 있다. 내로우갭 내에서는 용접 위치로 갈수록 크기가 증가되고, 내로우갭의 종단부인 용접점에서는 가장자리 표면에 더 밀집되고 상하부에서 가장 크게 나타나고 있다. 이는 고주파 전류로 인한 표피효과와 근접효과가 중첩하여 나타난 결과로 분석할 수 있고, 이 위치에서 입열량이 가장 높을 것으로 예측할 수 있다. Fig. 5(b)는 자속밀도 분포로, 전류밀도 분포와 유사한 형태로 스트립 가장자리에 나타나고 있다.

Fig. 6은 내로우갭 길이를 25 mm로 일정한 크기로 가정하고 인가전압을 240-280 V로 변화할 때, V 영역의 시작 위치에서 스트립의 상부 가장자리를 따라 내로우갭 종단부까지의 전류밀도와 자속밀도의 크기 변화를 보여주고 있다. 관의 끝에서 전극 중심까지는 80 mm, 전극에서 에이펙스점까지는 130 mm인 길이를 감안하면, 약 210 mm 이후는 내로우갭에서의 크기인 것을 알 수 있다. 따라서 두 크기가 전극부를 지나면서 내로우갭까지는 점진적으로 증가하고 내로우갭의 종단부인 용접점에서는 급격하게 증가하는 것을 알 수 있다. 용접점에서 표피효과와



(a) Current density



(b) Magnetic flux density

Fig. 6 Current density and magnetic flux density from V-area to weld point along end of strip edge with change of input voltage

근접효과의 중첩이 최대로 나타나고 있다. 이는 Fig. 5에서 보인 현상과 동일한 결과를 나타내고, 인가전압의 증가에 따라 전류밀도와 자속밀도의 크기가 증가하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 7은 인가전압을 260 V로 일정하게 두고 내로우갭 길이를 5-40 mm로 변화한 경우, V 영역의 시작 위치에서 스트립 가장자리의 가장자리를 따라 내로우갭 종단부까지의 전류밀도와 자속밀도의 크기 변화를 보여 주고 있다. 전류밀도와 자속밀도는 전극에서 내로우갭을 따라 점진적으로 증가하고, 내로우갭의 종단부에서 급격히 증가하고 있다. 용접점 주위에서의 근접효과로 약 2배 정도 크게 나타나고 있다. 내로우갭에서는 전류밀도와 자속밀도의 증가로 전자기력이 증가할 것으로 예상된다. 한편, Fig. 7(a)에서 보인 갭의 길이 변화에 따른 전류밀도의 변화에서, 갭의 길이가 길어질수록 전류밀도가 낮아지고 있다. 이는 전류가 흐르는 경로가 내로우갭을 따라 길어져, 임피던스(Impedance)의 증가로 인하여 전류가 감소된 결과임을 알 수 있다. 높은 전류밀도에 의해 발열이 커지고 이로 인한 용융량의

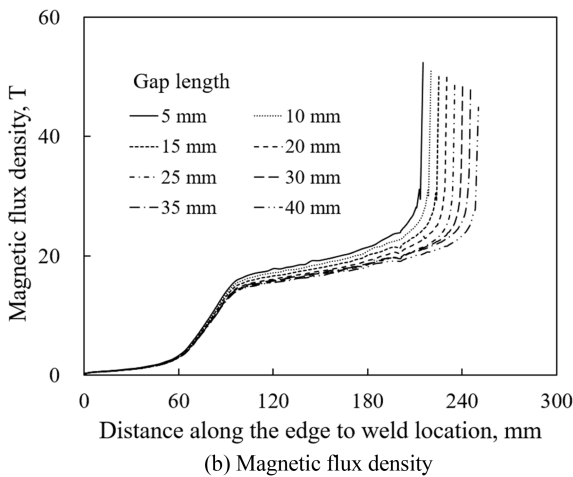
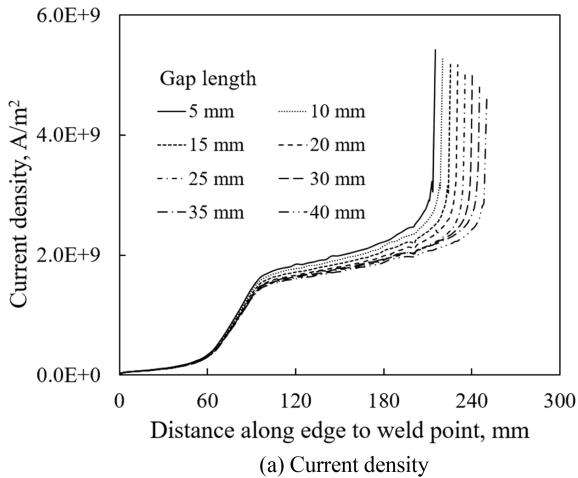


Fig. 7 Current density and magnetic flux density from V-area to weld point along end of strip edge with change of narrow-gap length

증대로 결국 갭의 길이가 길어지게 되는 것이다. 이로 인해 전류밀도는 낮아지고 적정 길이의 갭이 형성되면, 더 이상 갭 길이의 증가는 없이 용접점이 형성되는 것으로 판단할 수 있다. 따라서 적절한 전류밀도가 형성되는 갭의 길이가 존재하게 된다. Fig. 7(b)는 갭의 길이에 따른 자속밀도의 변화를 보이고 있다. 자속밀도는 갭의 길이가 길어질수록 낮아지고 전류밀도에 비례함을 알 수 있다.

Fig. 8은 인가전압의 변화에 따른 가장자리 표면의 전자기력 분포를 보이고 있다. 이는 갭의 길이를 30 mm로 일정하게 두고 인가전압의 변화에 따라 해석한 결과로, V 영역과 내로우갭 영역에서 스트립 가장자리 단면에 분포하는 원주방향 전자기력의 크기이다. 단면을 반대방향으로 미는 힘을 양의 크기로 나타낸 바, 단면을 누르는 압력으로 작용되고 있다. 이와 같은 힘에 의해 가장자리 표면으로부터 스트립 가장자리로 유동하는 플래쉬(Flash)가 발생하게 될 것으로 예측할 수 있다.

전자기력은 V 영역을 중심으로 하는 두 가장자리 표면에 대칭적으로 분포하였다. Fig. 8(a)에서, 인가전압이 250 V인 경우, 전자기력은 내로우갭에서 2×10^5 에서 3×10^5 N/m²의 크기로

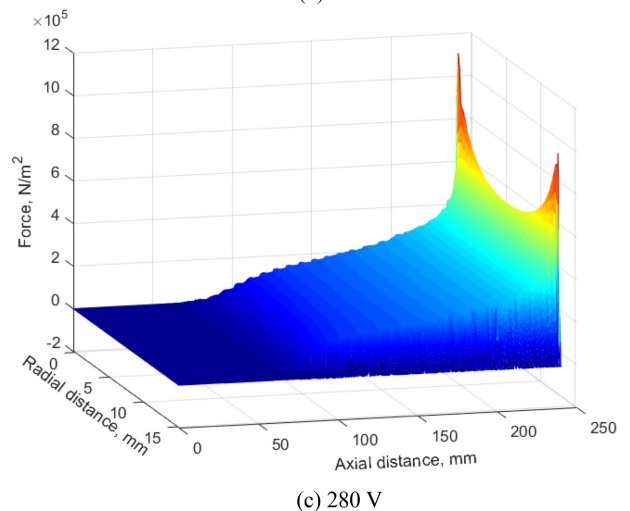
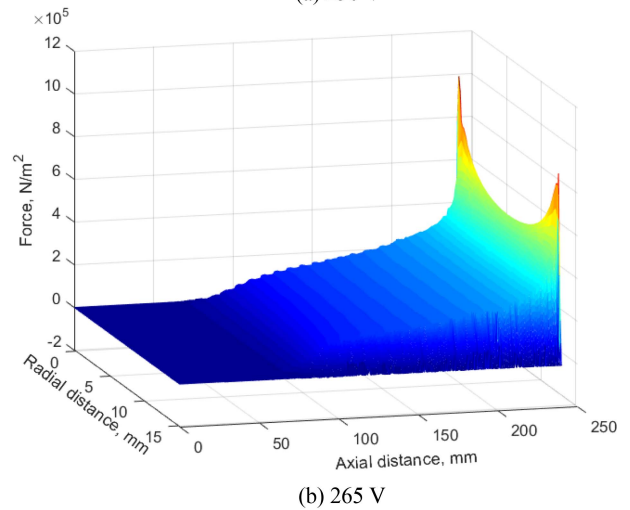
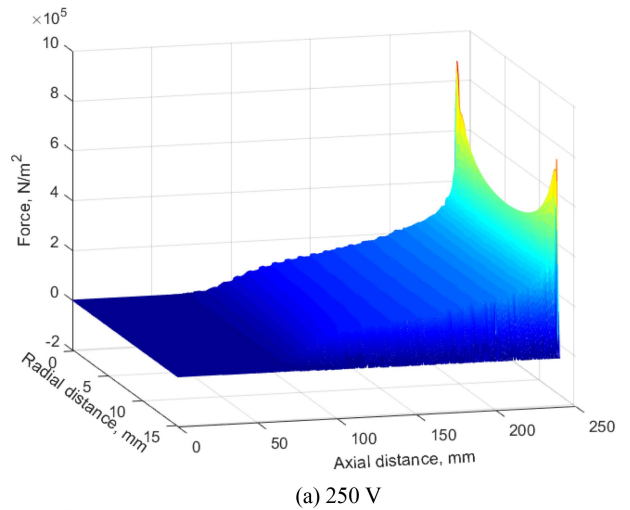


Fig. 8 Electromagnetic force in circumferential direction acting on surface of narrow gap

점진적으로 증가하여, 용접 위치 근방에서 2배 이상으로 급격히 커지고 있다. 이는 전류밀도와 자속밀도의 분포에서 예상된 현상이다. 특히 소재 상하 표면부가 두께 중앙부보다 더 큰 힘이 작용하는 것을 보이고 있다. 역시 Fig. 5에서 보인 두 위치에서의

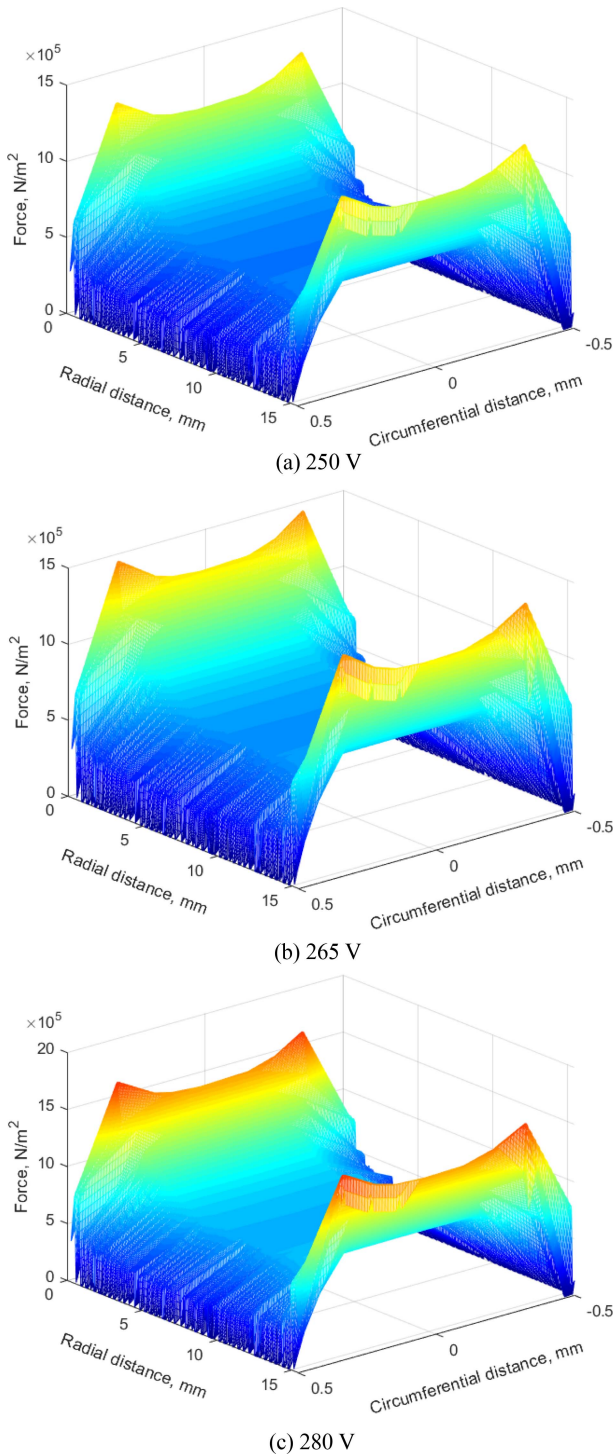


Fig. 9 Electromagnetic force in axial direction acting on surface of narrow gap at welding point

전류밀도와 자속밀도의 차이에서 예상될 수 있다. Figs. 8(a), 8(b), 8(c)에서 보인 바와 같이 인가전압이 250에서 280 V로 높아질수록 용접점에서 전자기력은 최대 9×10^5 에서 11×10^5 N/m²로 증가되고 있다.

Fig. 9는 갭의 길이를 30 mm로 일정하게 두고 인가전압의

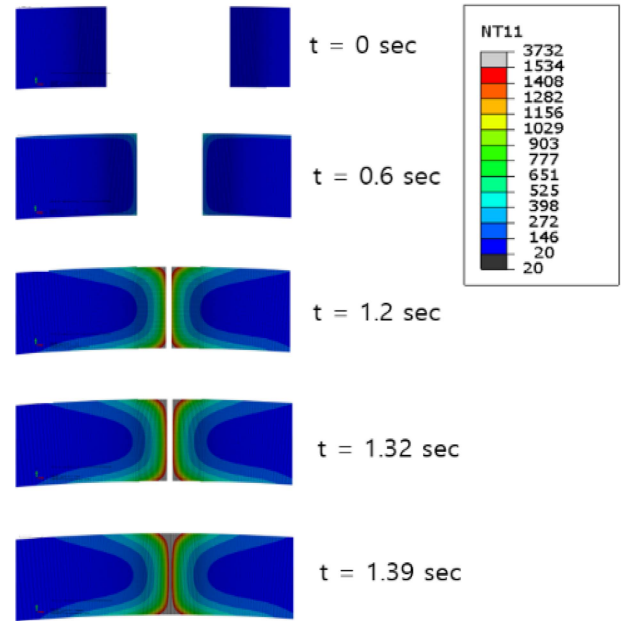


Fig. 10 Temperature distribution in surface of steel strip during HFRW with elapsed time

변화에 따라 해석한 전자기력의 분포로, 1 mm 폭을 가진 내로우갭의 중단부인 용접점에서 강관의 축방향 표면에 작용하는, 즉 관의 이송방향으로 폭 1 mm와 깊이 15.4 mm인 두께 벽면을 미는 축방향 전자기력의 분포 형태를 보이고 있다. Fig. 9(a)에서, 인가전압이 250 V인 경우, 두께의 중앙부에는 약 6×10^5 N/m²의 크기, 두께의 상하부에서는 최대 13×10^5 N/m²의 크기를 보이고 있다. Figs. 9(a), 9(b), 9(c)는, 인가전압이 250에서 280 V로 높아지면, 벽면에 작용하는 최대 전자기력이 13×10^5 에서 16.5×10^5 N/m²로 증가되는 것을 보이고 있다. 축방향으로 작용하는 힘이 Fig. 8에서 보인 원주방향으로 벽면을 미는 힘보다 더 크게 나타나고 있어, 내로우갭 내에 용융금속에 의한 브리지가 발생하면 이를 축방향으로 미는 힘의 정도를 가늠할 수 있다. 깊이 방향으로 상하 가장자리가 중앙보다 전자기력이 훨씬 더 크게 작용하고 있고, 상하의 폭 방향으로도 가장자리가 다소 더 크게 나타나고 있다.

Fig. 10은 HFRW 공정에서 시간변화에 따른 관의 길이방향 단면에서의 온도분포 해석결과를 보여주고 있다. 여기서는 인가전압을 260 V, 내로우갭 길이를 20 mm, 용접속력을 220 mm/sec로 설정하여 해석한 경우로, 전극의 접촉부 전후 V 영역(0 sec, 0.6 sec), 에이펙스점(1.2 sec), 내로우갭 위치(1.32 sec), 용접에 의해 접합된 위치(1.39 sec) 등을 따라 스트립의 두 가장자리가 좁혀지며 만나는 갭 주위 단면에서의 온도분포가 예측되어 있다. 전극 접촉부 주위에서의 가열 정도는 크지 않고, 에이펙스점을 지나 내로우갭 영역에서는 표면 전체가 용융상태에 도달하는 것을 알 수 있다. 용접점에 도달하면 갭은 더 가열되고 표면에서의 용융부 깊이가 더 증가하는 것을 알 수 있다.

Fig. 11는 일정 전압이 인가된 상태에서, 임의로 설정된 갭 길이에 따른 온도분포 해석에서 얻은 용접점의 단면에 나타나는

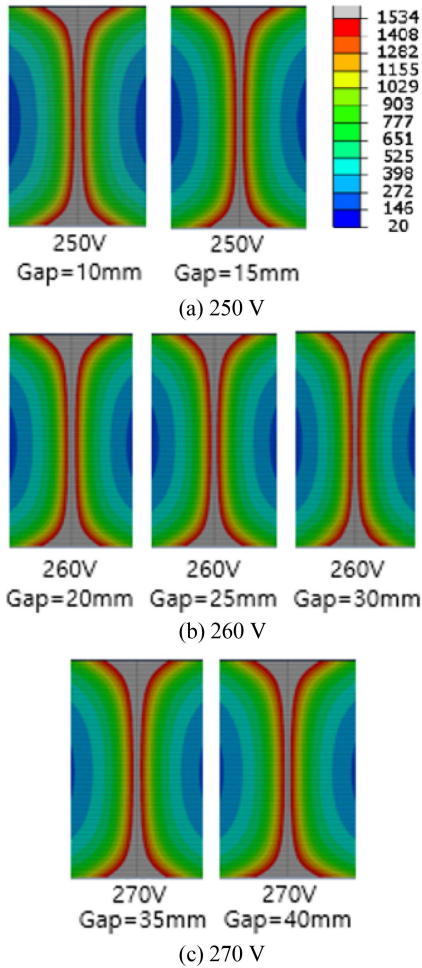


Fig. 11 Temperature distribution at welding point with change of narrow gap length at constant voltage

온도분포를 보이고 있다.

특히 두께 중앙의 용융폭이 0.4 mm 전후가 되는 특정한 갭 길이에 대한 온도분포만을 보이고 있다. 이는 두 스트립 가장자리가 접촉하여 형성된 용접점 주위를 원주방향으로 일부 나타낸 단면으로, 상부는 스트립의 외면, 하부는 스트립의 내면이다. 온도는 상하 표면부에서 높게 나타나며 두께의 중앙 접촉부에서 최소가 됨을 알 수 있다. 갭의 길이가 길게 설정된 경우에서 용융폭이 더 좁게 나타나고 있다. 이는 인가된 동일 전압에 대하여 전류 경로가 길어져 임피던스가 증가하고 전류의 감소로 인한 결과이다. 최적 입열량 여부를 적정 용융폭으로 가능하고 자 한 해석에서, 인가전압이 높아질수록 갭 길이가 더 길어진 위치에서 적절한 용융폭이 나타나는 것을 알 수 있다. 이러한 온도분포 해석으로써 설정한 전압에서 일정 폭을 갖는 내로우갭 길이를 예측할 수 있게 된다.

Table 1은 인가전압 변화에 따라, 임의로 갭 길이를 변화한 경우, 용접점에서 두께방향 중앙에서의 용융부 폭이 적정 용융폭인 0.4 mm에 근접한 결과를 나타낸 갭 길이에서의 계산 결과를 보이고 있다. 전압이 높아질수록 적정 용융폭이 나타나는 갭 길이가 증가함을 알 수 있다.

Table 1 Width of welded zone in mm at the center of thickness

Voltage [V]	Gap length [mm]								
	0	5	10	15	20	25	30	35	40
240	0.40	0.33							
245		0.40	0.35						
250			0.42	0.38					
255				0.47	0.40				
260					0.50	0.41	0.34		
265							0.43	0.35	
270								0.46	0.36

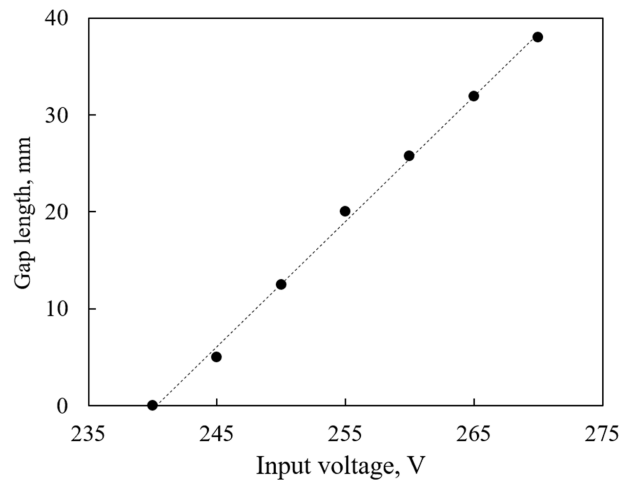


Fig. 12 Predicted narrow-gap length with change of voltage for optimal welding

Fig. 12는 Table 1의 계산 결과를 선형 보간하여, 인가전압에 의해 적정 용융폭이 나타나는 내로우갭 길이를 보여주고 있다. 240 V인 경우에 에이펙스점에서 적정 용접부를 형성한 다음, 전압이 증가하면 갭이 발생하기 시작하여, 270 V인 전압이 인가되면 38 mm의 갭이 발생하는 등 전압의 크기에 비례하여 갭 길이가 증가한 위치에서 용접이 수행되는 것으로 판단할 수 있다. 즉, 인가전압이 커지면 에이펙스점과 용접점 사이에 내로우갭이 길어지면서 용접이 진행되는 것을 알 수 있다. 그럼에도 이상적으로는 내로우갭의 길이가 짧은 경우가 결함의 가능성이 낮기 때문에 최소의 갭 길이가 되는 조건에서 용접하는 것이 더 양호한 용접부를 얻을 것으로 판단된다.

4. 결론

강관 제작을 위한 고주파 저항용접 공정에서 적합한 용접이 이뤄지는 내로우갭의 길이와 갭 내에서의 전자기력을 예측하고자 수치해석기법에 의한 온도분포 해석과 이와 연관된 전자기장

해석을 수행하였다. 해석의 결과, 인가전압의 변화에 따라 용접점의 위치가 변화되는 현상을 모사할 수 있었다. 특히, 적정 용융폭을 형성하는 위치에서 용접이 가능하게 된다는 점을 고려하고 온도분포 해석을 수행하여, 인가전압이 240에서 270 V까지 변화되어 설정될 때 내로우갭 길이는 0에서 38 mm까지 전압에 비례하여 형성되는 것을 예측할 수 있었다. 이와 같은 조건에서는 내로우갭 내면이 용융되기 시작하여 용접점에서 0.4 mm의 용융폭이 나타나게 된다. 이와 함께, 적정 전압 범위에서의 내로우갭에 나타나는 전류밀도와 자속밀도 분포를 얻을 수 있었고, 갭 내면의 용융부에 작용하는 전자기력의 분포형태와 크기를 가늠할 수 있었다. 전류밀도와 자속밀도는 내로우갭 내에서 점진적으로 증가하고, 내로우갭 중단부에서 급격히 증가하여, 용접점에서 최대 크기를 나타내었다. 인가전압이 250 V인 경우, 원주방향 전자기력은 내로우갭에서 2×10^5 에서 3×10^5 N/m²의 크기로 점진적으로 증가하고, 용접 위치 근방에서 2배 이상으로 급격히 증가하였다. 축방향 전자기력은 두께 중앙부에서 약 6×10^5 N/m², 두께 상하부에서 최대 13×10^5 N/m²의 크기로 나타났다. 인가전압이 높아질수록 내로우갭과 용접점에서 전자기력은 비례적으로 증가하였다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 연구는 2023년도 경상국립대학교 연구년제 연구교수 연구지원비에 의하여 수행되었음.

REFERENCES

1. Simion, P., Dia, V., Istrate, B., Munteanu, C., (2014), Controlling and monitoring of welding parameters for micro-alloyed steel pipes produced by high frequency electric welding, *Advanced Materials Research*, 1036, 464-469.
2. Maksuti, R., (2020), Quality evaluation of high frequency electric resistance welded joint, *International Journal of Food Technology and Nutrition*, 3(5-6), 23-29.
3. Kang, D., Choi, J., Jang, Y., Kim, Y., (1998), Analysis of high frequency electric resistance welding phenomena using high speed cinematography, *Journal of Korean Welding Society*, 16(2), 29-36.
4. Haga, H., Aoki, K., Sato, T., (1980), Welding phenomena and welding mechanisms in high-frequency electric resistance welding-1st report, *Welding Journal*, 59(7), 208s-212s.
5. Choi, J., Chang, Y., Kim, C., Oh, J., Kim, Y., (2004), Penetrator formation mechanisms during high-frequency electric resistance welding, *Welding Journal*, 83(1), 27s-31s.
6. Hasegawa, N., Hamatani, H., Fukami, T., Nakaji, T., Takeda, Y., Motoyoshi, T., Tanimoto, M., Ohsawa, T., (2015), Development

- of a new optical monitoring system for HFRW processes, *Nippon Steel & Sumitomo Metal Technical Report*, 107, 114-120. <https://www.nipponsteel.com/en/tech/report/nssmc/pdf/107-19.pdf>
7. Kim, C.-M., Kim, J.-K., (2009), The effect of electromagnetic forces on the penetrator formation during high-frequency electric resistance welding, *Journal of Materials Processing Technology*, 209(2), 838-846.
8. Okada, N., Sakamoto, H., Matsuo, T., Takatani, K., (2012), Numerical analysis model of electric resistance welding pipe, Tetsu to Hagane-Journal of the Iron and Steel Institute of Japan, 98(7), 368-377.
9. Yang, Y. S., Bae, K. Y., (2022), Numerical analysis of high frequency electric resistance welding process of steel pipe, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 39(12), 931-938.
10. Jang, S., Seo, J., Lee, H., Hong, J., Lee, J., (1996), The skin effect and current distribution characteristics of a coil streaming with high frequency, *Proceedings of the Korean Institute of Electrical Engineers Conference*, 222-224.
11. Hwang, S.-R., Shin, P.-S., (2017), A study on the minimization of tie-plate loss of cast resin transformer using surface impedance boundary condition, *Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, 66(9), 1334-1340.
12. Altair, Altair flux™ 2019.1 user guide. https://blog.altair.co.kr/wp-content/uploads/2019/07/AltairFlux2019.1_NewFeatures.pdf
13. Bae, K.-Y., Yang, Y.-S., Yi, M.-S., Park, C.-W., (2018), Numerical analysis of heat flow in oxy-ethylene flame cutting of steel plate, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 232(4), 742-751.
14. Washington University in St.Louis, Abaqus/cae user's manual. <https://classes.engineering.wustl.edu/2009/spring/mase5513/abaqus/docs/v6.5/books/usi/default.htm?startat=pt01ch05s05h1b05.html>



Young Soo Yang

Professor in the Department of Mechanical Engineering, Chonnam National University. His research interests are in manufacturing processes.
E-mail: ysyang@chonnam.ac.kr



Kang Yul Bae

Professor in the School of Mechatronics Engineering, Gyeongsang National University. His research interests are in manufacturing processes and mechatronics.
E-mail: kybae9@gnu.ac.kr

표면 코팅을 통한 소다라임 유리의 가공성 향상

Machinability Improvements of Soda-lime Glass Using Various Surface Coatings

김지환^{1,2}, 윤병호¹, 권석범³, 민상기³, 윤해성^{1,2,#}

Ji Hwan Kim^{1,2}, Byoung Ho Yun¹, Suk Bum Kwon³, Sangkee Min³, and Hae-Sung Yoon^{1,2,#}

¹ 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부 (School of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University)

² 한국항공대학교 스마트항공모빌리티학과 (Department of Smart Air Mobility, Korea Aerospace University)

³ 위스콘신대학교 매디슨 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, University of Wisconsin-Madison)

Corresponding Author / E-mail: hsyoon7@kau.ac.kr, TEL: +82-2-300-0079

ORCID: 0000-0002-9430-3541

KEYWORDS: Soda-lime glass (소다라임 유리), Ductile-brittle transition (연성-취성 전이), Ultra-precision machining (초정밀가공), Coating (코팅), Lubricant (윤활제)

Advanced engineering ceramics have been highlighted mainly owing to their superior hardness, corrosion/wear resistance, and thermal insulation performances. However, they are usually very difficult-to-cut because of their high brittleness. In light of this, ultra-precision machining has been studied to perform ductile-regime cutting in the machining of ceramics. Ductile-regime cutting can feature a smoother surface, and lower subsurface damage as the dominant material response during cutting showed ductile behavior. Researchers have investigated promoting ductile-regime cutting to improve the machinability of ceramics. In this study, various coating materials were applied to the workpiece surface, and their effects on machinability improvements were explored. A total of 6 surface coatings and lubricants were applied to soda-lime glass. The critical depth of cut (CDC), the depth where the ductile-brittle transition (DBT) occurred, was increased in all coatings and lubricants, with an improved ductile cutting regime. Experimental results showed that solid coatings were more effective than liquid lubricants in enhancing the ductile cutting regime. It was thought that solid coatings induced an additional downward force by resisting material deformation and chip evacuation, thus contributing to suppression of crack opening. It is expected that this research can contribute to the machinability improvements of brittle materials.

Manuscript received: April 27, 2023 / Revised: June 20, 2023 / Accepted: June 28, 2023

NOMENCLATURE

μ	=	Friction Coefficient
θ	=	The Angle where the First Slip Occurred
d	=	Depth of Cut
r	=	Tool Nose Radius
W	=	Cutting Width

1. 서론

공학 세라믹 재료는 높은 내열성, 내마모성, 내부식성, 경도 등의 장점으로 첨단 재료로서 주목받아 왔다. 재료의 우수한 기계적 물성 및 안전성으로 자동차 스파크 플러그, 절연재, 절삭공구, 항공우주 부품의 피복 등 다양한 산업 분야에서 활용되고 있다[1].

그러나 이처럼 다양한 장점과 넓은 활용 분야를 가졌음에도, 세라믹은 가공이 어려운 소재로 간주된다. 특히 취성이 매우 높아 수 μm 이하의 절삭 깊이에서도 균열(Cracks)이 크게 발생하여

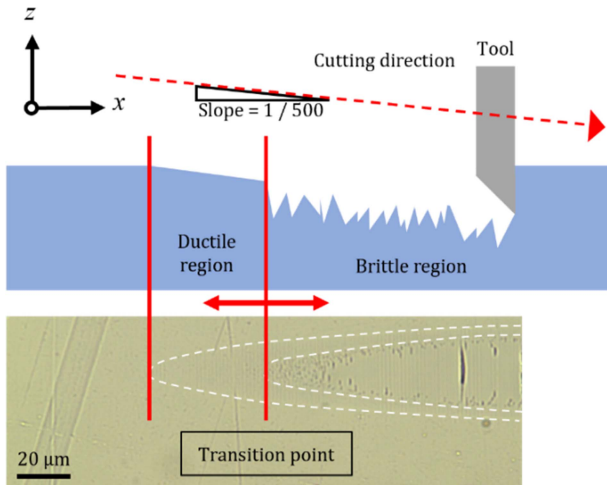


Fig. 1 Ductile and brittle region of orthogonal cutting of soda-lime glass

일반적인 기계가공 수행에 어려움이 있다.

한편 세라믹 가공 시 여러 가공조건에 따라 재료가 연성 거동을 보이기도 한다[2-5]. Fig. 1은 $1\ \mu\text{m}$ 이하 깊이 범위에서 초정밀가공을 수행할 때 절삭 깊이에 따라 재료 거동이 연성 영역(Ductile Region)과 취성 영역(Brittle Region)으로 나뉜 사례를 보여준다. 연성 영역 가공(Ductile Cutting Regime)에서는 재료가 연성 파괴(Ductile Fracture)에 의해 제거되는 것으로 사료되며, 일반적인 취성 영역 가공보다 우수한 표면 품질, 높은 구조적 정밀성, 낮은 표면 손상 등 여러 장점을 갖는다[6]. 또한 취성 영역 가공에서는 균열 발생에 의한 진동 등 절삭 공구에 가해지는 부하가 증가하므로[7], 공구 수명의 관점에서 연성 영역 가공이 유리하다.

이에 보다 다양한 가공 조건에서 연성 가공을 수행하고자 여러 연구가 진행되었으며, 국소 가공 면적을 가열하는 레이저 보조 가공[8,9], 공구에 미세한 진동을 가해 가공성을 향상하는 초음파 보조 가공[10-12], 아크 방전을 이용하는 방전 가공[13,14] 등이 활용되었다.

한편으로는 위와 같이 추가적인 가공 장비를 요구하는 방법과는 다르게 피삭재에 코팅(Coating)을 적용해 연성 영역 가공이 일어나는 절삭 깊이를 증가시켜 가공성을 향상하고자 하는 연구가 이루어진 바 있다[7,15,16]. 피삭재 코팅은 고가의 추가 장비 없이 쉽게 적용할 수 있다는 장점이 있으며 코팅이 세라믹 재료 가공성에 미치는 영향을 분석하고자 여러 시도가 이루어지고 있다.

연구에 따라 코팅의 역할은 다양하게 분석되며, 표면 코팅에 관한 한 연구[15]에서는 고체 코팅이 세라믹 표면에 추가적인 압축력을 가함으로써 연성 가공 영역이 확대됨을 관찰하였다. 단결정 실리콘에 왁스 코팅을 적용한 연구[16]에서는 왁스의 윤활 효과와 칩 브레이커(Chip Breaker)로서의 역할이 연성 영역 가공 확대에 기여하는 바를 분석하였다. 단결정 사파이어에 대한 선행 연구[7]는 다양한 코팅재료가 갖는 역할을 절삭력과

추력 관점에서 분석하였다.

이에 본 연구에서는 특히 다양한 물성을 갖는 코팅 재료의 가공성 향상 효과를 알아보고자 총 6종류의 코팅을 선정, 세라믹 가공에 적용하고 그 영향을 분석하였다. 코팅 재료 및 코팅 방법은 일반적으로 구하기 쉬운 코팅 재료와 적용하기 쉬운 코팅 공정을 선정함으로써 경제적인 가공성 향상 방법을 연구하고자 하였다. 피삭재로는 건물의 창문, 자동차 전면 유리, 유리 병 등 널리 사용되는 세라믹 재료 중 하나인 소다라임 유리(Soda Lime Glass)를 선정하였다. 결정 방향에 따라 성질이 달라지는 사파이어와 달리, 소다라임 유리의 경우 비정질(Amorphous) 재료이다. 또한 사파이어에서의 선행 연구[7]는 절삭력의 관점에서 가공 결과 분석이 이루어진 반면, 본 연구에서는 코팅의 물성, 특히 경도와 마찰계수 관점에서 결과를 분석하고자 하였다.

소다라임 유리의 가공성에 영향을 주는 요인으로 표면 코팅이 절삭력/추력에 미치는 영향, 마찰계수 변화에 따른 윤활 변화 등이 고려되었다. 따라서 표면 코팅의 경도가 높을수록 소재에 가해지는 압축력을 증가시켜 연성 가공 영역 확대에 기여할 것이라는 가설을 세우고, 이를 검증하기 위하여 실험을 수행했다. 한편으로는 마이크로 그라인딩 연구[17]를 참조하여 마찰계수가 낮을수록 연성 가공 영역이 확대될 것으로 추정하였다.

이에 여러 코팅 재료의 마찰계수와 Berkovich 경도를 측정하고 연성 가공 영역 향상 효과와 비교하였다. 마찰계수는 미끄럼 실험을 통해, 경도는 나노인덴테이션 실험을 통해 측정하였다. 그 후 선행 연구[18]와 유사하게 초정밀가공을 수행하고 연성 가공 영역의 깊이 한계를 측정하여 비교하였다.

실험 결과 특히 고체 코팅이 연성 영역 가공이 가능한 절삭 깊이 향상에 효과적이었다. 연구를 통해 다양한 코팅이 소다라임 유리 가공성 향상에 미치는 효과를 확인하였으며, 메커니즘에 대한 분석 및 이해를 통해 연성 영역 가공 향상에 기여할 것을 기대한다.

2. 실험 상세

2.1 코팅 및 코팅의 물성치 측정

코팅 재료로 쉽게 구할 수 있는 액체 코팅 2종과 고체 코팅 4종을 선정하였다. 액체 코팅으로는 서로 다른 마찰계수를 갖는 세제(1:1 비율 수용액)와 초정밀 가공에 사용되는 절삭유(Zubora 77 S Ultra, Zeller+Gmelin Co., Germany)를 선정하였다. 고체 코팅으로는 다양한 경도를 시험해 볼 수 있도록 왁스(Shiftwax 7607, Nikka Seiko Co. Ltd., Japan), 고무코팅제(K-980, Nabakem, Korea), 서로 다른 경화제(Curing Agent): 주체(Base Agent) 비율(5:1, 9:1)을 갖는 PDMS (Sylgard 184, Dow Silicones Co., USA) 2종을 선정하였다. 액체 코팅은 마이크로피펫을 이용하여 피삭재에 도포 하였으며, 왁스와 PDMS는 Flow Coating 공정[19]을 응용하여 코팅재를 피삭재

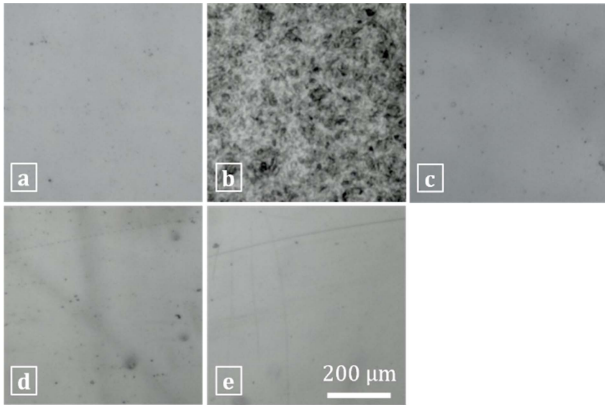


Fig. 2 Optical images of the coatings (a. original, b. wax, c. Rubber spray, d. PDMS (5 : 1), e. PDMS (9 : 1))

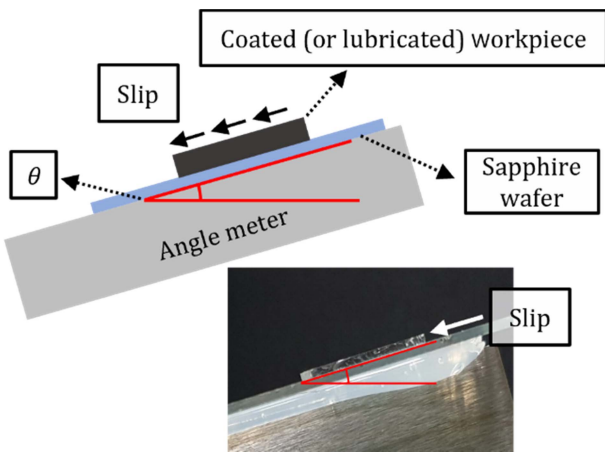


Fig. 3 Slip test for the friction coefficient measurement

에 부은 후 피삭재를 수직으로 1시간 이상 세워놓는 방법으로도 포하였다.

고무코팅제는 스프레이 형태의 제품을 사용하였고 Hydrographic Printing 공정[20]을 이용, 물에 도포한 후 피삭재로 떠내는 방법으로 코팅하였다.

Fig. 2에 코팅된 표면을 나타내었다. 관찰 결과 고체 코팅이 고르게 잘 도포된 것을 확인할 수 있다. PDMS 2종의 경우 약 30 μm의 두께를 보였으며, 왁스 코팅이 약 10 μm의 두께를 보였다. 고무코팅제의 경우 측정 장비 분해능의 한계(10 μm)로 단순히 10 μm 이하의 두께를 갖는 것으로 추정하였다. 각 코팅의 두께는 코팅 위의 임의의 위치에서 10회 측정하였으며 측정 간 큰 편차가 존재하지 않았다.

코팅 간 상대적 마찰계수 비교를 위해 15 × 15 mm 크기의 코팅을 적용한 피삭재를 금속판에 고정된 평평한 사파이어 웨이퍼(2" Monocrystalline Sapphire Wafer (C-plane), Hansol Technics Co., Ltd., Korea) 위에 놓고, 점진적으로 웨이퍼를 기울이며 처음 미끄러짐이 발생한 각도를 측정하였다(Fig. 3). 코팅의 마찰을 제외한 다른 마찰을 최소화하기 위해 R_a 값이 0.019 μm 인 표면이 평탄한 사파이어 웨이퍼를 사용하였다.

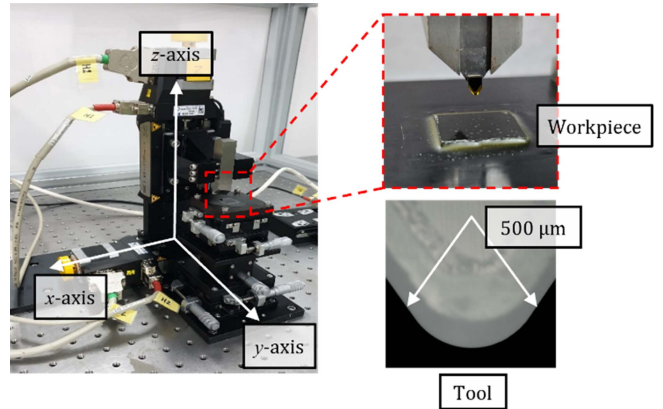


Fig. 4 Ultra-precision machining system

마찰계수의 변환식은 식(1)과 같으며, 10회 측정 후 평균값을 사용하였다. 그 후 나노인덴테이션 실험(UNHT³, Anton Paar, Austria)을 통해 Berkovich 경도를 측정하였다. 매 측정은 3 μm min⁻¹의 속도로 0.7-10 μm 깊이를 압입하여 5회 측정 후 평균값을 사용하였다.

$$\mu = \tan \theta \tag{1}$$

2.2 실험 제원 및 방법

초정밀 직교 절삭을 위해 3축 모터(L-509.1ASD00, PI GmbH & Co. KG, Germany)와 제어기(SMC Hydra CM & C-663.12, PI GmbH & Co. KG, Germany)로 구성된 가공 시스템을 사용하였다(Fig. 4).

실험에 사용된 모터의 최소 이송분해능은 0.02 μm이며, 단방향 이송정밀도(Unidirectional Repeatability)는 0.1 μm이다. 절삭 공구는 인선 반경(Nose Radius) 500 μm의 다이아몬드 공구(Sinjin Diamond Industrial Corp., Korea)를 사용하였다. 피삭재로는 15 × 15 mm 크기로 절단된 소다라임 유리(DSA2-3748, Erie Scientific Corporation, USA)를 사용하였으며 왁스를 사용해 가공 시스템에 고정하였다. 고정된 피삭재의 기울기를 다이얼 게이지(543-561k, Mitutoyo, Japan)로 측정하여 10 × 10 mm 면적 내에서 유리 표면이 1 μm 이하의 높이 차이를 갖도록 조정하였다.

기울기 조정을 완료한 후, 가공 시스템에서 유리 표면 높이를 특정하도록 광학현미경을 통해 공구를 관측하였다. 절삭 가공은 속도 5 mm min⁻¹, 기울기 1/500으로 진행되었고, 최대 절삭 깊이는 1 μm로 선정하였다(Fig. 5). 고체 코팅의 경우 피삭재 표면이 드러나지 않기 때문에 가공 시작 전 코팅 일부를 벗겨내고 코팅이 없는 부분에서 유리의 높이를 특정한 후 코팅 위에서 가공을 수행하였다. 액체 코팅의 경우 매 절삭 시 에탄올로 피삭재를 세척하여 이전 실험의 코팅을 제거하였다. 동일 실험 조건에서 절삭 실험을 4회 반복하였으며 절삭 형상을 관찰하여 계획한 바와 같이 절삭이 정확하게 수행되었음을 확인하였다.

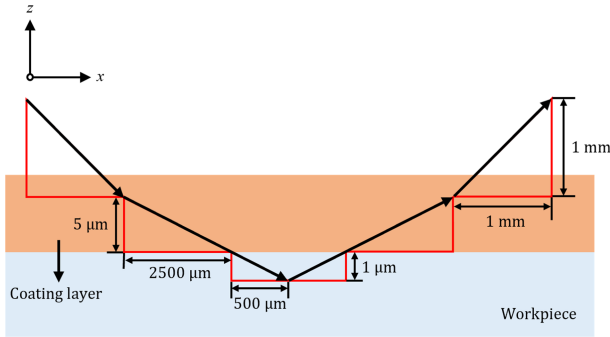
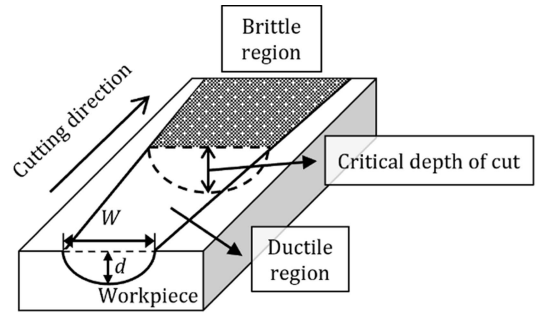


Fig. 5 Tool path configuration



3. 실험 결과

3.1 가공 실험 결과

본 연구에서 가공성 향상의 결과로 연성 가공 영역의 한계 깊이가 증가를 관찰하고자 하였다. 이에 연성 가공 영역과 취성 가공 영역의 구분점이 되는 지점의 가공 깊이인 임계절삭깊이 (Critical Depth of Cut, CDC) [21]를 측정 및 비교하였다.

임계절삭깊이는 균열이 발생하기 시작한 점의 절삭 폭으로부터 식(2)를 이용해 계산하였다. Fig. 6에 임계절삭깊이의 개념과 각 코팅을 사용했을 때의 가공 결과 예시 사진을 함께 나타내었다.

$$d = r - \sqrt{r^2 - (W/2)^2} \tag{2}$$

절삭 깊이가 변화함에 따라 가공 중 주재료 거동이 연성 영역에서 취성 영역으로 전이되는 것을 관찰할 수 있으며 임계절삭깊이는 각 코팅 별로 값이 상이하였다.

아무런 코팅이 적용되지 않은 일반 소다라임 유리(Original)와 코팅 및 윤활 조건이 적용된 소다라임 유리의 임계절삭깊이 측정 결과를 Fig. 7에 비교하였으며, 다른 절삭공정의 절삭깊이 [14]와 직접 비교는 어렵지만 모든 코팅에서 임계절삭깊이가 증가하여 가공성이 크게 향상됨을 확인할 수 있다. 일반적으로 액체 코팅(세제, 절삭유)에 비해 고체 코팅(왁스, 고무코팅제, PDMS (5 : 1), PDMS (9 : 1))에서 우수한 임계절삭깊이가 증가를 관측하였다.

윤활제 중 절삭유가 약 0.101 μm의 임계절삭깊이로 가장 낮은 임계절삭깊이 증가를 보여주었으며, 뒤이어 세제가 보다 높은 임계절삭깊이 증가를 보여주었다. 고체 코팅 중에서는 고무코팅제가 0.158 μm의 임계절삭깊이로 가장 낮은 임계절삭깊이 증가를 보여주었으며 그 후 왁스, PDMS (5 : 1), PDMS (9 : 1) 순으로 높은 임계절삭깊이의 증가를 보인다.

3.2 코팅 물성치 측정 결과 및 임계절삭깊이 비교 분석

Fig. 8에 코팅 6종과 일반 소다라임 유리의 마찰계수의 측정 결과를 정리하였다. 소다라임 유리의 마찰계수 0.22에 비해 액체 코팅은 0.1 이하의 낮은 마찰계수를 보여주었다. 고체 코팅은

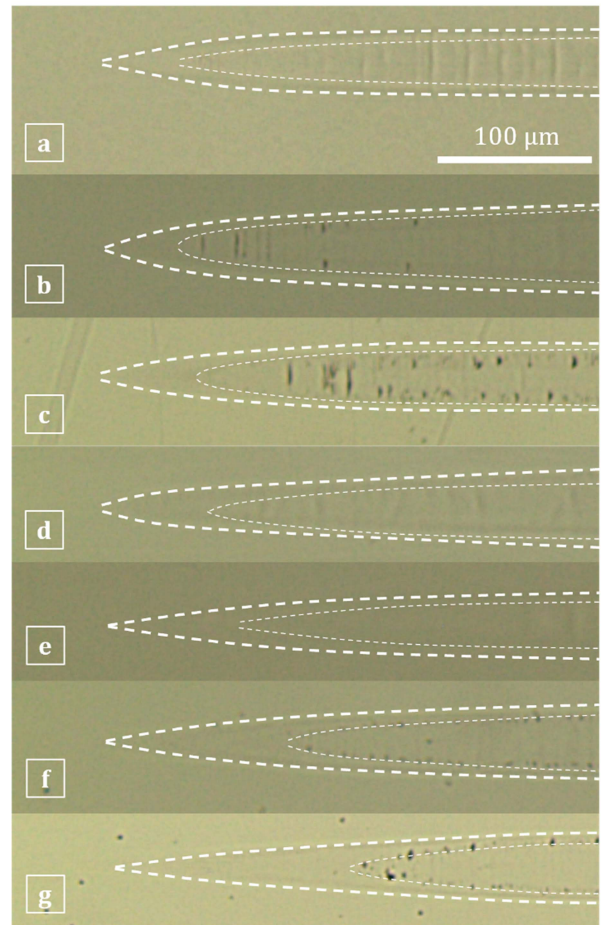


Fig. 6 Schematic and optical images of the cutting experiment (a. original (without any coating), b. cutting fluid, c. detergent, d. rubber spray, e. wax, f. PDMS (5 : 1), g. PDMS (9 : 1))

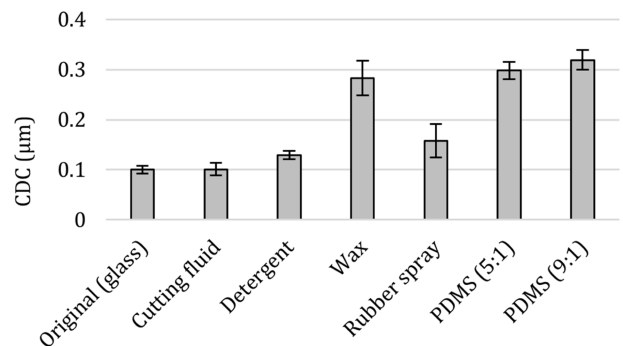


Fig. 7 Critical depth of cut results

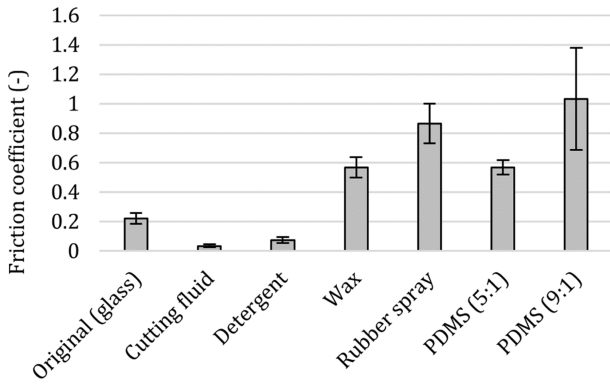


Fig. 8 Friction coefficients of coatings and lubrications

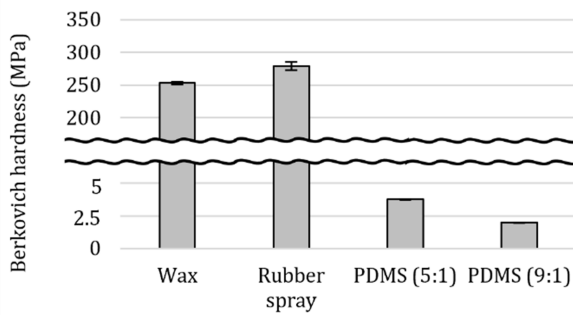


Fig. 9 Berkovich hardness of coatings and lubrications

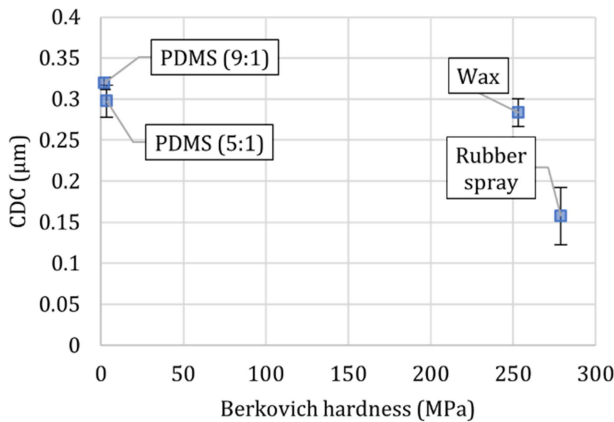


Fig. 10 A comparison of CDCs in terms of hardness of the coatings

일반 소다라임 유리에 비해 높은 마찰계수를 보여주었다.

Berkovich 경도의 경우 PDMS 2종에 비해 왁스와 고무코팅제가 100배 이상 높은 값을 갖는다(Fig. 9). 경도 및 마찰계수 측정 결과는 의도하였던 대로 각 코팅들이 서로 상이한 물성을 가짐을 보여준다.

경도 및 마찰계수에 따른 임계절삭깊이를 각각 Figs. 10과 11에 나타내었다. 경도의 경우 임계절삭깊이 향상에 미치는 영향이 뚜렷하지 않았는데(Fig. 10), PDMS (5 : 1)과 PDMS (9 : 1)의 경우 왁스나 고무코팅제 대비 상당히 적은 경도값을 가졌으나 임계절삭깊이 향상 효과는 왁스와 고무코팅제와 비슷하였다.

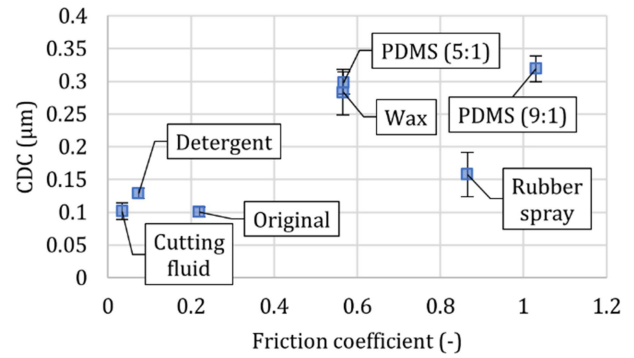


Fig. 11 A comparison of CDCs in terms of friction coefficient of the coatings

마찰계수의 경우(Fig. 11) 마찰계수가 작은 절삭유에서 가장 작은 임계절삭깊이 증가 효과가 관측되었다. 단결정 재료에 코팅을 적용했던 다른 연구 사례[11]와 다르게 큰 마찰계수를 갖는 고체 코팅들이 액체 코팅 대비 큰 임계절삭깊이 향상 효과를 보여주었다.

실험 결과, 특히 고체 코팅이 가공 중 재료에 가하는 압축력이 균열 억제에 효과적이었던 것으로 생각된다. 소다라임 글래스의 압입 실험에서 균열은 내면 결함(Subsurface Defects)에 인장 응력이 가해져 발생(Crack Opening)하는 것으로 알려졌으며[22], 재료에 정수압을 가함으로써 가공 중 균열 전파를 억제한 연구 사례가 있다[23]. 이 실험에서는 고체 코팅이 특히 재료 변형에 저항하며 추가적인 압축력을 재료에 수직 방향으로 가함으로써 임계절삭깊이를 향상한 것으로 사료된다.

또한 고체 코팅은 칩 배출을 방해하는 효과가 있을 것으로 사료된다. 가공 방향을 따라 공구가 이송되면, 절삭이 이루어지며 칩이 형성된다(Fig. 12). 가공 중 사진을 보면 코팅과 유리 재료가 구분되지 않고 하나의 칩으로서 배출되는 것을 확인할 수 있으며, 코팅과 유리가 가공 중 박리되지 않고 코팅이 유지되며 가공에 영향을 미쳤음을 확인할 수 있다. 이 때 고체 코팅은 아무런 코팅이 없는 경우 대비 재료의 칩 배출을 방해하며 수직 방향으로 추력을 증가시켰을 것으로 사료된다.

실험 결과에서 PDMS 코팅이 경도가 매우 낮은 유연 재질임에도 불구하고 훨씬 경도가 높은 왁스나 고무 코팅제와 유사한 임계절삭깊이 향상 효과가 있는 것으로부터 코팅이 단순 변형 저항 효과뿐 아니라 마찰계수의 영향 등 추가적인 공정 간섭을 통해 연성 영역 가공을 증가시켰음을 유추해 볼 수 있다.

다만 실험 결과가 액체 코팅류의 마찰계수가 낮을수록 임계절삭깊이 향상 효과가 클 것이라던 가설과는 상이한데 원인을 분석하기 위해서는 절삭력 측정 및 정교한 시뮬레이션을 통해 추가 연구가 필요하다. 단결정 사파이어 가공에서 결정 방향(Crystal Orientation)에 따른 코팅의 효과를 분석한 선행 연구[8]에 의하면, 코팅이 절삭력(Cutting Force, F_c)과 추력(Thrust Force, F_t)에 다양하게 영향을 미치며 비정질 소다라임 유리의 피삭재 특성 또한 연성 영역 가공 특성과 균열 발생에 영향이 있었으리라 사료된다.

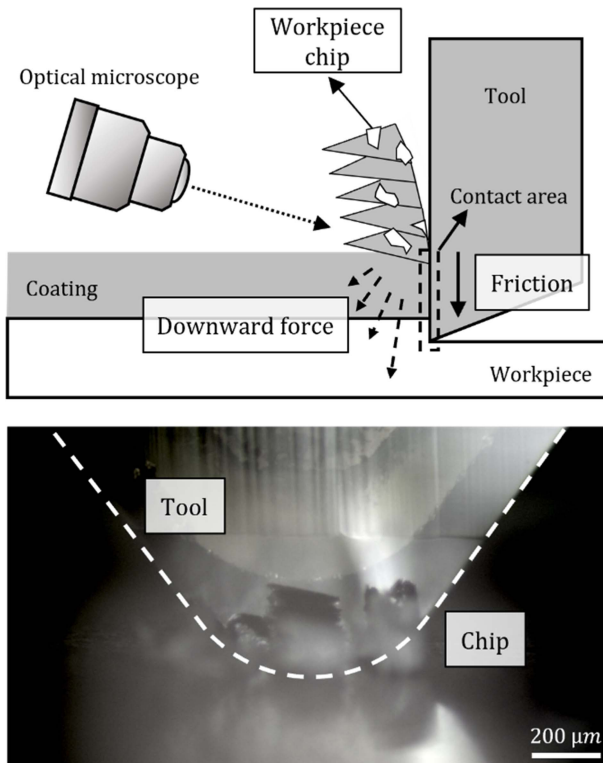


Fig. 12 Schematic and optical images of tool-coating friction

실험 결과는 코팅이 연성 가공 영역 확대에 크게 기여할 수 있음을 보여준다. 아무런 코팅이 없었을 때와 비교하면 가장 효과적인 PDMS (9 : 1) 코팅의 경우 3배 이상의 임계절삭깊이를 보여주었다. 다만 코팅의 임계절삭깊이 향상 효과가 재료별로 상이하고 마찰계수의 영향 등에 대해서는 추가 연구가 필요하다. 여러 가지 가공 조건에서 코팅이 절삭 시 응력 분포에 미치는 영향을 분석한다면 상황에 맞는 코팅 선정에 기여할 수 있을 것으로 생각한다. 지속적인 연구를 통해 임계절삭깊이 향상 효과를 증가시켜 나가고자 하며, 이 연구가 소다라임 유리의 가공성 향상과 활용분야 확대에 기여할 것으로 기대한다.

4. 결론

본 연구에서는 소다라임 유리의 초정밀가공에서 피삭재에 적용된 코팅이 연성 가공 영역 확장에 미치는 영향을 알아보았다. 특히 코팅의 물성에 따른 임계절삭깊이 증가를 관측하였다.

모든 코팅에서 임계절삭깊이 증가를 관측하였으나, 고체 코팅에 비해 액체 코팅의 임계절삭깊이 증가는 미미했다. PDMS 2종과 다른 2종의 코팅(왁스, 고무코팅제)의 경도가 100배 이상으로 큰 차이가 있었으나 가공 결과 분석에서 임계절삭깊이는 고무코팅제 기준 약 2배, 왁스와는 유사한 결과를 보였다.

실험 결과로부터 고체 코팅의 재료 변형 저항과 칩 배출 저항이 임계절삭깊이 향상에 기여하는 것으로 추정하였다. 코팅 재료의 물성치와 임계절삭깊이 향상 효과 간 뚜렷한 경향성은

확인되지 않았으나, 기존 논문과는 다르게 여러 종류의 코팅을 비교하였을 경우 높은 마찰계수를 가진 코팅이 큰 임계절삭깊이 향상 효과를 보여주기도 하였다. 향후 절삭력 측정을 통해 정량적 분석을 수행할 예정이며 이 연구가 소다라임 유리의 가공성 향상에 기여할 것으로 기대한다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 연구는 2022년도 정부(과학기술정보통신부, 교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었으며(Nos. NRF-2022R1F1A1063896 and 5199990714521), 이에 감사드립니다.

REFERENCES

1. Kalpakjian, S., (1984). Manufacturing processes for engineering materials. Pearson.
2. Young, H., Liao, H.-T., Huang, H.-Y., (2007), Novel method to investigate the critical depth of cut of ground silicon wafer, Journal of Materials Processing Technology, 182(1-3), 157-162.
3. Liu, K., Li, X., Liang, S. Y., Liu, X. D., (2005), Nanometer-scale, ductile-mode cutting of soda-lime glass, Journal of Manufacturing Processes, 7(2), 95-101.
4. Yan, B., Wang, A., Huang, C., Huang, F., (2002), Study of precision micro-holes in borosilicate glass using micro EDM combined with micro ultrasonic vibration machining, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 42(10), 1105-1112.
5. Liu, Y., Tong, H., Liu, G., Li, Y., Tan, Q., (2023), Cutting model considering damage layer thickness for ultra-precision turning of quartz glass, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 126(9), 4087-4100.
6. Antwi, E. K., Liu, K., Wang, H., (2018), A review on ductile mode cutting of brittle materials, Frontiers of Mechanical Engineering, 13(2), 251-263.
7. Yoon, H.-S., Kwon, S. B., Kim, J.-H., Ahn, S.-H., Min, S., (2022), Effects of surface coating materials on cutting forces and ductile-to-brittle transition in orthogonal cutting of monocrystalline sapphire, Journal of Manufacturing Processes, 84, 375-382.
8. Chang, C.-W., Kuo, C.-P., (2007), An investigation of laser-assisted machining of Al₂O₃ ceramics planning, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 47(3-4), 452-461.
9. Ito, Y., Ueki, M., Kizaki, T., Sugita, N., Mitsuishi, M., (2017), Precision cutting of glass by laser-assisted machining, Procedia Manufacturing, 7, 240-245.
10. Lee, T., Zhang, J., Lau, W., (1998), Machining of engineering ceramics by ultrasonic vibration assisted EDM method, Material

and Manufacturing Process, 13(1), 133-146.

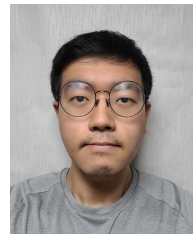
11. Yang, Z., Zhu, L., Zhang, G., Ni, C., Lin, B., (2020), Review of ultrasonic vibration-assisted machining in advanced materials, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 156, 103594.
12. Zhou, M., Wang, X., Ngoi, B., Gan, J., (2002), Brittle-ductile transition in the diamond cutting of glasses with the aid of ultrasonic vibration, *Journal of Materials Processing Technology*, 121(2-3), 243-251.
13. Puertas, I., Luis, C., (2004), A study on the electrical discharge machining of conductive ceramics, *Journal of Materials Processing Technology*, 153-154, 1033-1038.
14. Doan, C. X., Kim, B.-H., Chung, D.-K., Chu, C.-N., (2011), Fabrication of PCD micro tool and its hybrid micro machining, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 28(6), 694-700.
15. Lee, Y. J., Chong, J. Y., Chaudhari, A., Wang, H., (2020), Enhancing ductile-mode cutting of calcium fluoride single crystals with solidified coating, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 7, 1019-1029.
16. Ameli Kalkhoran, S. N., Vahdati, M., Zhang, Z., Yan, J., (2021), Influence of wax lubrication on cutting performance of single-crystal silicon in ultraprecision microgrooving, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 8(2), 611-624.
17. Yang, M., Li, C., Zhang, Y., Jia, D., Zhang, X., Hou, Y., Li, R., Wang, J., (2017), Maximum undeformed equivalent chip thickness for ductile-brittle transition of zirconia ceramics under different lubrication conditions, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 122, 55-65.
18. Yoon, H.-S., Kwon, S. B., Nagaraj, A., Lee, S., Min, S., (2018), Study of stress intensity factor on the anisotropic machining behavior of single crystal sapphire, *CIRP Annals*, 67(1), 125-128.
19. Stafford, C. M., Roskov, K. E., Epps, T. H., Fasolka, M. J., (2006), Generating thickness gradients of thin polymer films via flow coating, *Review of Scientific Instruments*, 77(2), 023908.
20. Yook, K. S., (2019), Hydrographic printing of polymer light-emitting diodes, *KIC News*, 22(3), 6-10. <https://www.cheric.org/PDF/PIC/PC22/PC22-3-0006.pdf>
21. Wang, M., Wang, W., Lu, Z., (2013), Critical cutting thickness in ultra-precision machining of single crystal silicon, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 65(5-8), 843-851.
22. Lawn, B. R., Dabbs, T., Fairbanks, C. J., (1983), Kinetics of shear-activated indentation crack initiation in soda-lime glass, *Journal of Materials Science*, 18(9), 2785-2797.
23. Yoshino, M., Ogawa, Y., Aravindan, S., (2005), Machining of hard-brittle materials by a single point tool under external

hydrostatic pressure, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 127(4), 837-845.



Ji Hwan Kim

He is a M.S. candidate in the School of Aerospace and Mechanical Engineering and Department of Smart Air Mobility, Korea Aerospace University. His research interest is ultra-precision machining.
E-mail: jhkim96@kau.kr



Byoung Ho Yun

He is a B.Sc. in the Department of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University. His research interest is ultra-precision engineering.
E-mail: sg1559@naver.com



Suk Bum Kwon

He is a Postdoctoral researcher in the Department of Mechanical Engineering, University of Wisconsin-Madison, USA. His research interest is ultra-precision machining and modeling ductile-brittle transition.
E-mail: kwon47@wisc.edu



Sangkee Min

He is an Associate Professor in the Department of Mechanical Engineering, University of Wisconsin-Madison, USA. His research expertise are conventional and non-conventional machining processes, manufacturing strategies, and ultra-precision nano-machining.
E-mail: sangkee.min@wisc.edu



Hae-Sung Yoon

He is an Associate Professor in the School of Aerospace and Mechanical Engineering and Department of Smart Air Mobility, Korea Aerospace University. His research interests are in smart/hybrid manufacturing, sustainable manufacturing, ultra-precision machining, micro/nano fabrication, 3D/4D printing, smart materials, and manufacturing for design.
E-mail: hsyoon7@kau.ac.kr

전압 범위에 따른 활성화 영향성 평가

Evaluate the Activation Effect according to the Voltage Range

김정수¹, 유호준¹, 전지웅¹, 송동근¹, 권예림¹, 이영조¹, 홍승혁¹, 이수민¹, 금다혜¹, 조구영^{1,#}
Jung Soo Kim¹, Ho Jun Yoo¹, Ji Woong Jeon¹, Dong Kun Song¹, Ye Rim Kwon¹, Young Jo Lee¹,
Seung Hyeok Hong¹, Su Min Lee¹, Da Hye Geum¹, and Gu Young Cho^{1,#}

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

KEYWORDS: Activation (활성화), Nafion (나피온), Catalyst layer (촉매), Hydration (수화), Electrochemical reaction (전기화학반응)

Polymer electrolyte membrane fuel cells (PEMFC) require activation to maximize their performance. Thus, an appropriate activation process is essential for the performance of the fuel cell. In this study, the performance of the fuel cell was investigated by changing the voltage range during the activation process. There were three voltage ranges: 0.3-0.9 V, 0.3-0.6 V, and 0.6-0.9 V. When the fuel cell was activated in the low voltage region, the highest performance was output. On the other hand, it showed the lowest performance at high voltage. The results suggest that it is advantageous to activate the fuel cell with a high current. On the other hand, if activation is performed while outputting at a low current, the generation of water and the electrochemical reaction are insufficient, resulting in a load on the fuel cell. Through this experiment, it was confirmed that the control method greatly affects fuel cell performance when activated.

Manuscript received: May 5, 2023 / Revised: June 20, 2023 / Accepted: July 10, 2023

1. 서론

과거부터 지금까지 주 에너지원으로 화석 연료를 사용했다. 화석 연료를 사용하면서 많은 양의 탄소 배출로 인해 환경오염을 일으키고 이상기후 현상이 발생하고 있다. 따라서 현재 탄소 배출을 규제하여 화석 연료 사용량을 줄이고 차 선택으로 신재생에너지를 사용하는 것이 대두되고 있다. 수소는 핵융합발전 및 연료전지 등 많은 산업에 적용되고 있다. 특히 수소를 에너지원으로 사용하는 연료전지는 종류가 다양한데 그 중 고분자 전해질 연료전지(Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell, PEMFC)는 얇은 고분자 막을 전해질로 사용하는 연료전지이다 [1-3]. PEMFC는 낮은 온도에서 작동하며 높은 전력 밀도를 갖기 때문에 차량 및 선박과 같은 운송이나 발전기 등 다양한 분야에서 사용할 수 있다[4-7]. PEMFC는 수소와 공기 또는 산소만을 사용하기 때문에 탄소 배출이 없으며 오직 물(H₂O)을 배출한다.

PEMFC는 크게 세 부분으로 수소가 들어가는 연료극(Anode), 수소 이온이 이동하는 전해질(Electrolyte), 공기가 들어가는 공기극(Cathode)으로 이루어져 있다. 이때 전극과 전해질을 합친 것이 막전극접합체(Membran Electrode Assembly, MEA)로 PEMFC에서 가장 핵심적인 부품이다.

PEMFC의 성능을 극대화하기 위해 MEA의 활성화(Activation) 과정이 필요하다. 활성화 과정은 PEMFC의 전해질인 나피온(Nafion)을 수화(Hydration)시켜 양성자전도도를 향상시킨다 [1,8-11]. 또한, 전기화학반응(Electrochemical)을 통해 백금 촉매의 오염물질을 제거하고 전극 구조 변형을 통해 물질의 반응속도를 개선한다[12,13].

활성화 방법에는 다양하다. 전해질인 나피온의 수화 측면에서 살펴보면 Qi et al.은 전극을 물에 끓이거나 가정용 압력솥에서 쪄다[14]. 또한, 전기화학반응 측면에서 살펴보면 Silva et al.은 25°C에서 6개의 부하 사이클을 거친 후 연료전지 성능을 평가했다[15]. Yuan et al.은 정전압 0.6 V에서 활성화 작업을 진행한

후 전기화학적 임피던스 분석과 순환 전압 전류법을 통해 MEA의 성능을 확인했다[16]. Zhiani et al.은 세 가지의 활성화 절차에 대한 영향을 비교했는데 하나는 정전압 0.6 V에서 활성화 영향, 두 번째는 0.7 V와 0.5 V 사이의 전압 순환으로 진행된 활성화 영향, 마지막으로 12시간 동안 정전류 0.25 A/cm²에서 활성화 영향을 살펴보았다[17]. 외에도 전극의 열처리 방법도 있었는데 Bezerra et al.은 열처리를 통해 Pt/C 촉매를 활성화하여 산소환원반응(Oxygen Reduction Reaction, ORR)을 향상할 수 있다고 했다[18].

본 연구의 목적은 연료전지의 활성화 작동전압을 크게 세 가지로 분류하여 활성화 작업을 진행하고 각각의 성능을 비교하여 더 높은 성능을 출력하는 활성화 전압 범위를 찾는 것이다. 이때 작동전압은 전 범위(0.3-0.9 V), 저전압 영역(0.3-0.6 V), 고전압 영역(0.6-0.9 V) 세 가지로 분류했다.

2. 실험

2.1 실험 장비

Fig. 1은 실험 장치의 시스템을 보여주고 있다. Phocos 사의 질량유량계(Mass Flow Controllers, MFC)를 이용하여 수소와 공기를 셀(Cell)에 공급하였다. 이때 질량유량계로 들어가는 기체의 압력은 각각 0.15 MPa로 공급되었다. 유량은 수소 100 sccm, 공기 500 sccm으로 설정했다. 가습(Humidification)은 공기극에만 진행했으며 증류수(De-ionized Water, DI Water)로 막 가습기를 이용하여 진행했다. 셀 온도는 25°C에서 실험이 이루어졌다. 셀에서 발생하는 전기화학적 분석을 위해 BioLogic 사의 포텐시오스텝(SP-150)과 부스터(VMP3B-20)를 이용하여 측정했다.

PEMFC 셀의 분리판(Bipolar Plates)은 사형유로(Serpentine Channels) 구조를 가진 그래파이트(Graphite) 분리판을 이용했으며 유로의 깊이는 0.8 mm, 폭은 1.0 mm이다. 또한, 기체 누설을 방지하는 CNL Energy 사의 가스켓(TF Gaskets), 다공성 구조를 가진 SGL Carbon 사의 기체 확산층(Gas Diffusion Layers, GDL 39 BB), 전극과 전해질로 구성된 CNL Energy 사의 막전극 접합체를 사용했다. 본 연구에서 셀의 활성화 면적은 5 cm²이다.

2.2 실험 방법

우선 엔드 플레이트(End Plate)로 PEMFC 셀의 구성품들을 볼트와 너트를 이용하여 고정했다. 이때 볼트 체결 토크(Torque)는 80 lb·in이다. 셀 조립 후 활성화 과정을 진행하기 전에 셀 조립 상태를 확인하였다. 이는 개방회로전압(Open Circuit Voltage, OCV)을 5분 측정하는 방법으로 이루어졌다. 이후 활성화 과정을 진행했는데 크게 세 가지 방법으로 진행했다. 첫 번째는 전압을 0.3 V부터 0.9 V까지 총 200번 분극 곡선(Polarization Curves)을 그리면서 진행했다. 두 번째는 0.3 V부터 0.6 V까지 200번 분극 곡선을 그렸다. 세 번째는 0.6 V부터 0.9 V까지 마찬가지로 200번 분극 곡선을 그렸다. 활성화 과정

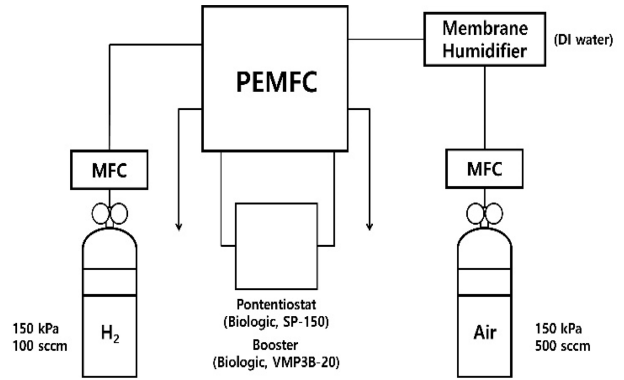


Fig. 1 The pipe and instrument drawing of the experimental set-up

이후 셀의 성능을 확인하기 위해 전압 범위 0.3 V부터 0.9 V까지 연속적으로 제어하면서 전압-전류의 관계를 살펴보았다. 또한, PEMFC에서 발생하는 저항으로 인한 손실(Loss)을 분석하기 위해 0.5 V 전압에서 전기화학적 임피던스 분석(Electrochemical Impedance Spectroscopy, EIS)을 진행했다.

3. 결과 및 고찰

3.1 전압 범위에 따른 활성화된 연료전지 성능

Fig. 2(a)는 각 전압 범위로 제어하면서 활성화 과정을 거친 후 연료전지 셀의 성능을 보여주는 곡선이다. 가장 높은 출력은 활성화 작업 시 0.3-0.6 V 전압 범위에서 진행한 것이며 가장 낮은 성능은 0.6-0.9 V에서 진행한 경우이다. Table 1과 Fig. 2(b)를 살펴보면 0.3-0.6 V에서 활성화 과정을 거친 경우 연료전지가 출력하는 최대 전력 밀도는 648.6 mW/cm²이다. 이는 전 범위 0.3-0.9 V에서 진행한 경우보다 약 8.35% 증가한 것으로 나타났다. 반면 고전압인 0.6-0.9 V에서 활성화 작업을 진행한 셀이 출력하는 최대 전력밀도가 430.4 mW/cm²으로 전 범위로 진행한 경우보다 28.1% 감소한 것을 확인할 수 있다.

Fig. 3(a)는 활성화 과정 동안 연료전지에서 출력되는 전류밀도를 보여주고 있다. 활성화 작업 시간은 같으며 전압 범위가 0.3-0.9 V와 0.3-0.6 V인 경우 활성화 작업을 진행함에 따라 출력되는 전류밀도가 높아지는 것을 확인할 수 있다. 반면 전압 범위가 0.6-0.9 V인 경우 출력되는 전류밀도가 시간이 지남에 따라 오히려 감소하는 모습을 볼 수 있다. Fig. 3(b)와 Table 2는 각 경우에 대해 초기 연료전지가 출력하는 전류밀도에 활성화 마지막 부분에서 연료전지가 출력하는 전류밀도를 비교한 것이다. 0.3-0.9 V에서 활성화 작업을 진행한 경우 최종 전류밀도가 초기 출력되는 전류밀도보다 30.05% 증가한 것을 확인할 수 있다. 또한, 0.3-0.6 V에서 활성화 작업을 진행한 경우 최종 전류밀도가 초기보다 37.42% 증가한 것을 알 수 있다. 반면 0.6-0.9 V에서 활성화 작업이 이루어진 셀은 최종 전류밀도가 초기값보다 18.56% 감소하여 오히려 연료전지에 부하가 걸린 모습을

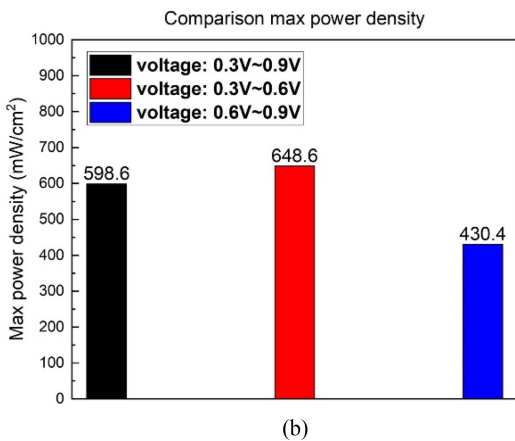
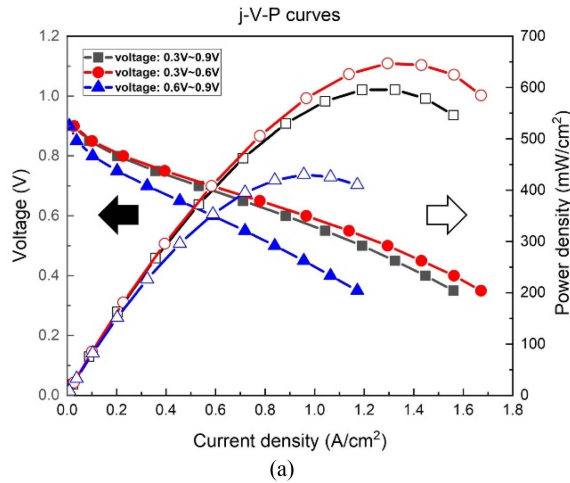


Fig. 2 The PEMFC performance (a) Polarization curves (b) Maximum power density

Table 1 Maximum power density

Voltage range [V]	0.3-0.9	0.3-0.6	0.6-0.9
Maximum power density [mW/cm ²]	598.6	648.6	430.4

확인할 수 있다. 이는 공급되는 수분의 양은 같으나 전기화학 반응 측면에서 살펴보았을 때 저전압에서 활성화 작업을 진행하는 경우 더 많은 전하가 이동하고 이로 인해 충분한 물이 생성되어 나피온에 수화를 일으키고 연료전지의 성능을 개선한 것을 확인할 수 있다. 또한, 더 많은 전기화학 반응을 통해 백금 촉매의 오염도가 감소하여 성능이 개선된 것으로 추정된다[12]. 반면 고전압에서 활성화를 진행한 경우 생성되는 물의 양이 부족하여 충분한 수화가 이루어지지 못하고 동시에 백금 촉매의 오염물질을 충분히 제거할 수 없었기 때문에 고전압에서의 활성화 과정이 오히려 연료전지에 부하로 작용한 것을 살펴볼 수 있다.

3.2 전압 범위에 따른 활성화된 연료전지 임피던스

Fig. 4(a)는 연료전지에서 최대 전력 밀도 영역에서 발생하는 임피던스를 살펴보기 위해 0.5 V 전압에서 EIS를 측정된 결과이다.

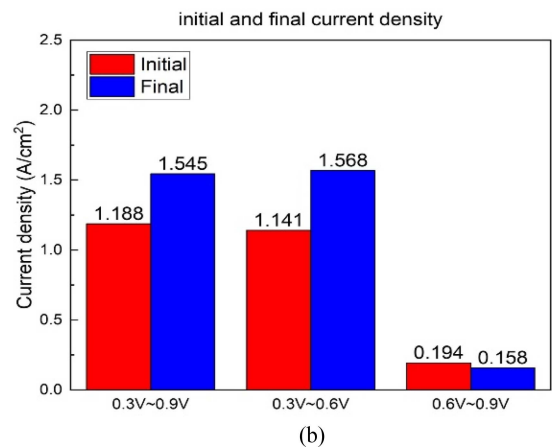
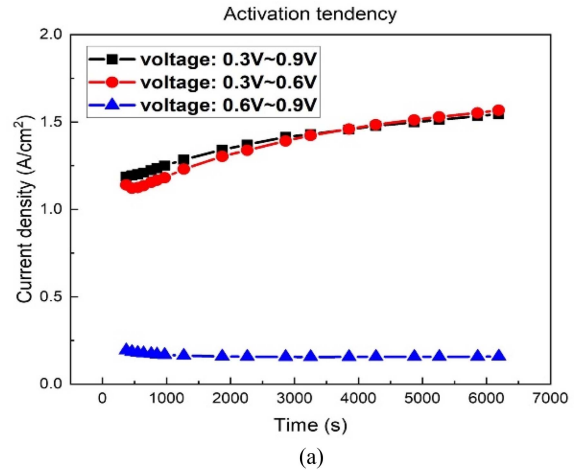


Fig. 3 PEMFC performance during the activation process (a) Current density as a function of the activation time (b) Comparison of current density at the initial and final stages of the activation

Table 2 The result of activation process

Voltage range [V]	Initial current density [A/cm ²]	Final current density [A/cm ²]	Rate of increase and decrease [%]
0.3-0.9	1.188	1.545	+30.05
0.3-0.6	1.141	1.568	+37.42
0.6-0.9	0.194	0.158	-18.56

일반적으로 원점으로부터 반응의 시작점까지의 크기는 Ohmic Resistance이고 반응의 시작점부터 끝나는 지점까지의 크기를 Activation Resistance이다. Activation Resistance는 크게 두 가지로 반응 시작부터 주파수가 1 kHz 부근까지의 반응의 크기는 Anode 전극에서의 Activation Resistance이고 이후 반응의 끝 지점까지의 크기를 Cathode 전극에서의 Activation Resistance이다. 0.6-0.9 V인 경우가 가장 큰 반응을 갖고 동시에 반응의 초기 지점이 원점으로부터 가장 멀리 떨어져 있다. 반면 저전압인 0.3-0.6 V인 경우는 가장 작은 반응의 모습과 반응의 초기 지점과 원점 사이의 거리가 가장 가까운 것을 볼 수 있다. Figs. 4(b)와 4(c)를 통해 각 경우에 대해 자세한 저항 값을 살펴볼 수 있다.

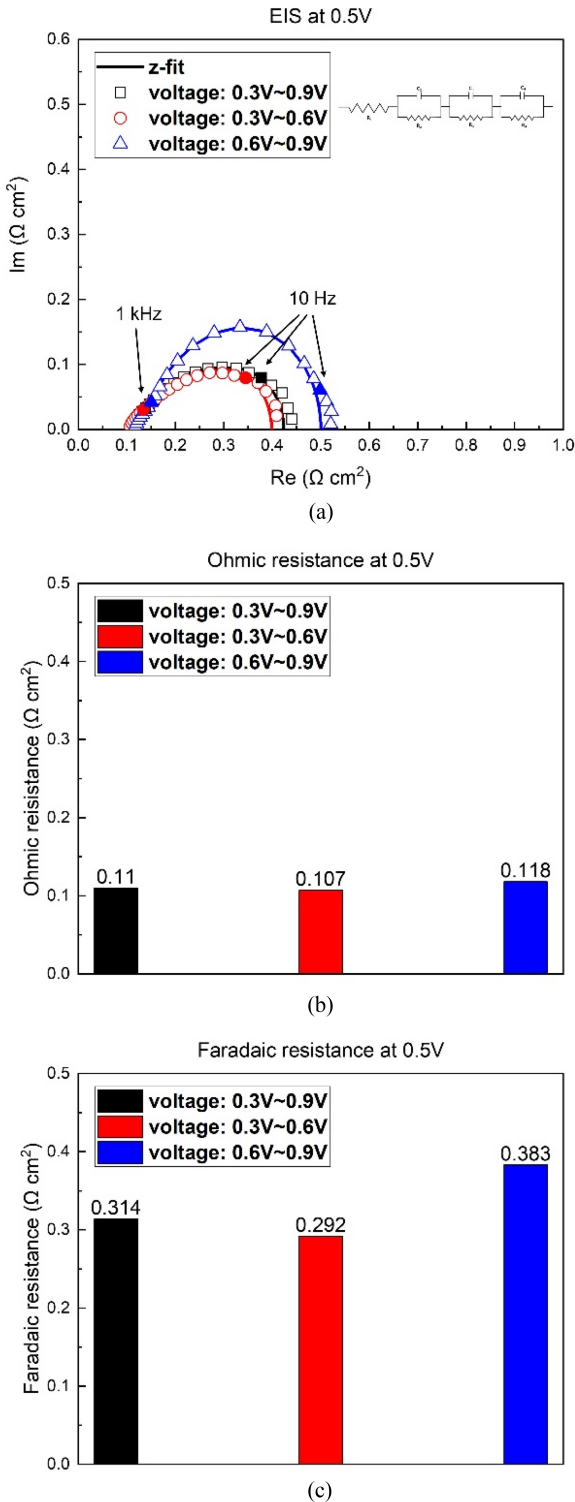


Fig. 4 Comparison of EIS curves, ohmic resistance, activation resistance of fuel cells (a) Nyquist plot at 0.5 V (b) Ohmic resistance at 0.5 V (c) Activation resistance at 0.5 V

Fig. 4(b)를 살펴보면 각 전압 범위에서 활성화한 경우에 따라 Ohmic Resistance를 보여주고 있다. 저전압에서 진행한 경우 전 범위로 활성화 작업을 진행한 것보다 2.73% 감소한 것을

알 수 있다. 반면 고전압에서 진행한 경우 전 범위 경우보다 7.27% 증가한 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 저전압에서 활성화를 진행한 경우 더 많은 물의 생성으로 인해 Ohmic Resistance가 감소한 것을 알 수 있으며 고전압에서 활성화를 진행한 경우 적은 물로 나피온에 충분한 수화가 발생하지 않아 Ohmic Resistance가 전 범위에 비해 급격하게 증가한 것을 알 수 있다.

Fig. 4(c)는 연료전지에서 발생하는 Activation Resistance를 보여주고 있다. 저전압에서 활성화 작업을 진행한 연료전지는 전 범위에서 진행한 것보다 7.01% Activation Resistance가 감소한 것을 알 수 있다. 반면 고전압에서 활성화 작업을 진행한 셀은 전 범위에서 진행한 것보다 21.97% 증가한 것을 알 수 있다. 이는 저전압에서 활성화 과정을 진행한 것이 더 활발한 전기화학 반응으로 인해 백금 촉매의 오염물질을 제거하고 동시에 전극 구조를 다른 경우보다 개선한 것으로 추정할 수 있다[12]. 대조적으로 고전압에서 활성화 과정을 거친 연료전지는 활성화 작업 시 다른 경우에 비해 더 적은 전기화학 반응으로 인해 충분한 촉매 개선과 전극 구조 개선이 이루어지지 않아 Activation Resistance가 가장 높게 측정된 것을 알 수 있다.

또한, Figs. 4(b)와 4(c)를 통해 Activation Resistance의 변화가 Ohmic Resistance보다 더 뚜렷한 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 활성화 과정은 Ohmic Resistance 개선과 Activation Resistance 개선 중 후자가 좀 더 지배적으로 이루어지는 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구의 목적은 고분자 전해질 연료전지의 활성화 작업 시 전압 범위를 제어하면서 해당 활성화 방법의 영향성을 살펴본 것이다. 이를 통해 다음과 같은 사실을 알 수 있었다.

- 1) 전압 범위에 따른 활성화 영향은 0.3-0.6 V에서 진행한 것이 가장 높은 성능을 출력한다.
- 2) 저전압 영역에서는 더 많은 전자가 생성되고 이로 인해 더 많은 물이 생성되어 나피온의 수화와 동시에 전기화학 반응을 통해 촉매의 오염물질과 전극 구조가 개선되어 더 효과적인 활성화 영향을 가져온다.
- 3) 고전압 영역에서는 전기화학 반응이 덜 이루어지고 적은 물로 인해 충분한 나피온의 수화가 이루어지지 않고 전극 환경을 개선하는데 부족하다.
- 4) 고전압 영역에서는 부족한 활성화 과정으로 인해 오히려 연료전지에 부하를 가져온다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 논문은 2023년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(P0017120, 2023년 산업혁신인재성장지원사업). 또한, 이 논문은 2023년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(20213030030260, 항공용 모빌리티를 위한 연료전지 경량화 기술 개발). 또한, 이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2023-00213741).

REFERENCES

- Ryan, O., Cha, S.-W., Colella, W., Prinz, F., (2016), Fuel cell fundamentals, 3rd edition, Wiley.
- Altaf, F., Batoool, R., Gill, R., Rehman, Z. U., Majeed, H., Ahmad, A., Shafiq, M., Dastan, D., Abbas, G., Jacob, K., (2021), Synthesis and electrochemical investigations of ABPBI grafted montmorillonite based polymer electrolyte membranes for PEMFC applications, *Renewable Energy*, 164, 709-728.
- Chu, D., Jiang, R., (1999), Performance of polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC) stacks: Part I. Evaluation and simulation of an air-breathing PEMFC stack, *Journal of Power Sources*, 83(1-2), 128-133.
- Zhang, X., Ni, M., Wang, J., Yang, L., Mao, X., Su, S., Yang, Z., Chen, J., (2020), Configuration design and parametric optimum selection of a self-supporting PEMFC, *Energy Conversion and Management*, 225, 113391.
- Dafalla, A. M., Jiang, F., (2018), Stresses and their impacts on proton exchange membrane fuel cells: A review, *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(4), 2327-2348.
- Santarelli, M., Torchio, M., (2007), Experimental analysis of the effects of the operating variables on the performance of a single PEMFC, *Energy Conversion and Management*, 48(1), 40-51.
- Gencoglu, M. T., Ural, Z., (2009), Design of a PEM fuel cell system for residential application, *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(12), 5242-5248.
- Kuwertz, R., Kirstein, C., Turek, T., Kunz, U., (2016), Influence of acid pretreatment on ionic conductivity of Nafion® membranes, *Journal of Membrane Science*, 500, 225-235.
- Karimi, M. B., Mohammadi, F., Hooshyari, K., (2019), Recent approaches to improve Nafion performance for fuel cell applications: A review, *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(54), 28919-28938.
- Liu, L., Chen, W., Li, Y., (2016), An overview of the proton conductivity of nafion membranes through a statistical analysis, *Journal of Membrane Science*, 504, 1-9.
- Ramani, V., Kunz, H., Fenton, J., (2004), Investigation of Nafion®/HPA composite membranes for high temperature/low relative humidity PEMFC operation, *Journal of Membrane Science*, 232(1-2), 31-44.
- Pei, P., Fu, X., Zhu, Z., Ren, P., Chen, D., (2022), Activation of polymer electrolyte membrane fuel cells: Mechanisms, procedures, and evaluation, *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(59), 24897-24915.
- Zhiani, M., Majidi, S., Silva, V. B., Gharibi, H., (2016), Comparison of the performance and EIS (electrochemical impedance spectroscopy) response of an activated PEMFC (proton exchange membrane fuel cell) under low and high thermal and pressure stresses, *Energy*, 97, 560-567.
- Qi, Z., Kaufman, A., (2002), Enhancement of PEM fuel cell performance by steaming or boiling the electrode, *Journal of Power Sources*, 109(1), 227-229.
- Silva, V. B., Rouboa, A., (2012), Hydrogen-fed PEMFC: Overvoltage analysis during an activation procedure, *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 671, 58-66.
- Yuan, X.-Z., Sun, J. C., Wang, H., Li, H., (2012), Accelerated conditioning for a proton exchange membrane fuel cell, *Journal of Power Sources*, 205, 340-344.
- Zhiani, M., Majidi, S., (2013), Effect of MEA conditioning on PEMFC performance and EIS response under steady state condition, *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(23), 9819-9825.
- Bezerra, C. W., Zhang, L., Liu, H., Lee, K., Marques, A. L., Marques, E. P., Wang, H., Zhang, J., (2007), A review of heat-treatment effects on activity and stability of PEM fuel cell catalysts for oxygen reduction reaction, *Journal of Power Sources*, 173(2), 891-908.

**Jung Soo Kim**

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

E-mail: dexasd916@naver.com

**Young Jo Lee**

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

E-mail: dudwh94@naver.com

**Ho Jun Yoo**

M.S. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Dankook University. His research interest is solid oxide fuel cell and characterization of polymer electrolyte membrane fuel cells.

E-mail: dku72220126@dankook.ac.kr

**Seung Hyeok Hong**

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

E-mail: tmdgur3583@naver.com

**Ji Woong Jeon**

B.S. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Dankook University. His research interests are low-temperature solid oxide fuel cell and characterization of polymer electrolyte membrane fuel cells.

E-mail: 32184031@dankook.ac.kr

**Su Min Lee**

M.S. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Dankook University. Her research interest are plasma-enhanced atomic layer deposition and low-temperature solid oxide fuel cell.

E-mail: shomig28@gmail.com

**Dong Kun Song**

M.S. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Dankook University. His research interest are computational fluid dynamics and characterization of polymer electrolyte membrane fuel cells.

E-mail: d72220125@dankook.ac.kr

**Da Hye Geum**

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

E-mail: rmaekgp99@naver.com

**Ye Rim Kwon**

M.S. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Dankook University. Her research interest is characterization of polymer electrolyte membrane fuel cells.

E-mail: dpfla1262@dankook.ac.kr

**Gu Young Cho**

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

E-mail: guyoungcho@dankook.ac.kr

창간

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

목적 및 연구 범위

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

금액

구독료

이 논문집은 우리학회 회원에 한하여 무료로 제공됩니다.

게재료

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

연락처

[04508] 서울 중구 중림로 50-1, SKY1004빌딩 12층

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

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

한국정밀공학회지 저널: <http://jkspe.kspe.or.kr>

한국정밀공학회지 논문투고 및 게재규정 · 논문집필요령

논문투고 및 게재규정

제1조 (목적)

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

제2조 (투고자)

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

제3조 (책임 및 윤리규정 준수)

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

제4조 (연구범위)

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

제5조 (투고 구분)

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

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

제6조 (접수)

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

제7조 (심사 및 게재 결정)

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

제8조 (저작권)

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

제9조 (자료공개)

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

제10조 (원고작성요령)

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

제11조(게재료)

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

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 최종결과가 확정되기 전에는 외부에 공개되어서는 안 된다.

한국정밀공학회지 연구윤리 및 저작권 동의서

(사)한국정밀공학회 귀하

논문 제목

국문:

영문:

저자명 (전체):

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

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

20 년 월 일

책임저자명:

서 명:

책임 저자

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

(사)한국정밀공학회 소개 및 활동현황

설립목적

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

회원(사) 구성

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

관련정부기관과의 관계

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

주요활동현황

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

발간자료

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

발행규정

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

부문위원회 활동

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

특별회원사 가입

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

(사)한국정밀공학회 소개 및 활동현황

한국정밀공학회상

정밀공학대상

- 학회 발전에 현저하게 공헌한 자

학술상

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

생산기술상, 정밀기술상

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

공로상

- 학회 발전과 운영에 지대하게 기여한 자

Best Editor Award

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

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

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

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

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

KSPE Young Researcher Award

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

특별상

가헌학술상

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

현승공학상

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

유정백합학술상

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

백암논문상

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

Year of Launching

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

Aims and Scope

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

Fee

Subscription Fee:

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

Publication Fee:

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

Contact Us

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

Rules for Submitting and Publishing Papers

Article 1 Purpose

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

Article 2 Submitter

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

Article 3 Responsibilities and Compliance with Code of Ethics

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

Article 4 Scope of Research

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

Article 5 Categorization of Submissions

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

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

Article 6 Submission

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

Article 7 Review and Decision to Publish Paper

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

Article 8 Copyright

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

Article 9 Disclosure of Materials

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

Article 10 Manual of Style

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

Article 11 Publication Fees

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

Guidelines for Manuscript Writing

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

Author's Check List

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

Rules for Reviewing Papers

Article 1 Purpose

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

Article 2 Submission and Reception

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

Article 3 Selection of Reviewers

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

Article 4 Review Procedure

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

Article 5 Review Period

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

Article 6 Deadline for Author's Revision

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

Rules for Reviewing Papers

Article 7 Decision over Publication

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

Article 8 Review of Special Papers

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

Article 9 Confidentiality

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

Article 10 Objection

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

Article 11 Review Fee

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

Code of Ethics for Academic Activities

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

Chapter 1 Overall Rules

Article 1 Purpose

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

Article 2 Application Area of Code of Ethics

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

Article 3 Scope of Misconduct

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

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

Chapter 2 Author

Article 4 Honesty of Author

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

Article 5 Authorship

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

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

Code of Ethics for Academic Activities

Article 6 Compliance of Authors

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

Chapter 3 Roles and Responsibilities of Members of Society

Article 7 Compliance of Editorial Board Member (EBM)

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

Article 8 Compliance of Reviewers

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

Code of Ethics for Academic Activities

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

Chapter 4 Verification Process and Standard

Article 9 Ethics Committee

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

Article 10 Function of Ethics Committee

The Committee shall act in the following manners:

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

Article 11 Convocation and Voting of Ethics Committee

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

Article 12 Reporting Research Misconduct

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

Code of Ethics for Academic Activities

Article 13 Sanctions on Research Misconduct and Follow-up Actions

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

Article 14 Protection of Rights of Examinee

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

Article 15 Disclosure of Record and Information of Investigation

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

Article 16 Report of Investigation Result

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

Research Ethics and Copyright Transfer Agreement

To the Korean Society for Precision Engineering (KSPE)

Title	Korean
	English
Authors	

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

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

**Corresponding
Author's
Signature**

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

**Corresponding
Author**

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

International Journal of Precision Engineering and Manufacturing

Volume 24 · Number 10 · October 2023

REGULAR PAPERS

An Effective Formability Model of Pearlitic Steel Wires in Multi-stage Drawing Process Based on the Stress-Based Forming Limit Criterion
Y.-D. Shim · E.-H. Lee 1723

Prediction of Tool Tip Dynamics Through Machine Learning and Inverse Receptance Coupling
H. Mostaghimi · S.S. Park · D.Y. Lee · S. Nam · E. Nam 1739

Optimization Control Method of Intelligent Cooling and Lubrication for a Geared Spindle
K.-Y. Li · P.-C. Hsieh · J.-J. Wang · S.-J. Wei 1753

Pneumatic Measuring Method for Inclination Angle of the Edge of Inner Ring Groove
X. Zhang · Y. Wang · G. Wang 1771

Using a Novel CNN Model for Predicting the Induction Heating Lines to Obtain a Desired Deformed Shape of Steel Plate
N.T. Thinh · K.-Y. Bae · Y.-S. Yang 1781

Development of a Prediction Model for the Gear Whine Noise of Transmission Using Machine Learning
S.-H. Lee · K.-P. Park 1793

FE Analysis of Forming Limit Diagram of 22MnB5 Sheet Using Fracture Energy Theory
D.Y. Ahn · O.D. Lim · M.S. Lee 1805

Efficient Laser Image Engraving by Work Area Sectioning and Multi-laser Head Cooperation: A Conceptual Study
Y.-W. Kim · S.-H. Song 1813

Iterative Generation Method of Arc Length Parameterized Curve Tool Path for Surface Machining from Short-Line Tool Path
L. Lu · J. Han · L. Xia · C. Fan · H. Liu · S. Chen 1821

Drift Error Calibration Method Based on Multi-MEMS Gyroscope Data Fusion
T. Wang · S. Zhong · H. Luo · N. Kuang 1835

An Investigation on Pressure-Specific Volume–Temperature Behaviors of a Thermoplastic Under Industrial Conditions Using a Hot Runner Manifold
T.K. Nguyen · A.-D. Pham 1845

Influence of Counterpart Material on Fretting Wear of FDM Printed Polylactic Acid Plates
K. Kim · S.Y. Baek 1855

Machining Feature Recognition Using Descriptors with Range Constraints for Mechanical 3D Models
S. Lim · C. Yeo · F. He · J. Lee · D. Mun 1865

Mathematical Model to Analyze Coiling Feasibility at Downcoiler in Hot Strip Mill
M.K. Majumder · P.V. Dilip · P.K. Singh · G. Singh · S. Gaur · R.R. Samantaray · S. Chandra 1889

REVIEW

An On-Line Measurement Method of the Medium Thickness Steel Plate Based on Structured Light Vision Sensor
Z. Li · M. Zhang · B. Zheng · L. Ma 1903

Further articles can be found at link.springer.com

Abstracted/Indexed in *BFI List, Baidu, CLOCKSS, CNKI, CNPIEC, Dimensions, EBSCO Discovery Service, Google Scholar, INSPEC, Japanese Science and Technology Agency (JST), Journal Citation Reports/Science Edition, Korea Citation Index (KCI), Naver, Norwegian Register for Scientific Journals and Series, OCLC WorldCat Discovery Service, Portico, ProQuest-ExLibris Primo, ProQuest-ExLibris Summon, SCImago, SCOPUS, Science Citation Index Expanded (SCIE), TD Net Discovery Service, UGC-CARE List (India), WTI AG, Wanfang*

Instructions for authors for *Int. J. Precis. Eng. Manuf.* are available at www.springer.com/12541

International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology

Volume 10 · Number 5 · September 2023

REGULAR PAPERS

Investigation on Geometrical Morphology of Tooth Surface Finished by Green High-Speed Dry Hobbing for Gear Precision Machining

Y. Chen · X. Liu · X. Yang · Y. Yang 1141

Chatter Detection and Identification in High-Efficient Robotic Milling CFRP Composites Using Acoustic Emission Technique

M. Li · D. Huang · H. Han · X. Yang 1155

Ultra-precision Ductile Grinding of Off-Axis Biconical Free-Form Optics with a Controllable Scallop Height Based on Slow Tool Servo with Diamond Grinding Wheels

S. Wang · Q. Zhao · B. Guo 1169

Formation Mechanism and Adhesion Evaluation of Debris in Ti-6Al-4V Alloy Turning

C. Li · X. Liu · M. Xu · J. Chen · S. Li · P. Li · T.J. Ko 1189

Modeling and Optimization Method of Laser Cladding Based on GA-ACO-RFR and GNSGA-II

G. He · Y. Du · Q. Liang · Z. Zhou · L. Shu 1207

Scalable Production of High Performance Flexible Perovskite Solar Cells via Film-Growth-Megasonic-Spray-Coating System

M. Park · S.C. Hong · Y.-W. Jang · J. Byeon · J. Jang · M. Han · U. Kim · K. Jeong · M. Choi · G. Lee 1223

Influence of Pad Design on Assembly Reliability of Surface Mounted Devices

D.-W. Park · M.-H. Yu · D.-H. Kim · D.-M. Jang · J.-W. Jang · S.-Y. Lee · H.-S. Kim 1235

Conformal Three-Dimensional Platinum Coating Using Rotary-Type Atomic Layer Deposition for a Diesel Oxidation Catalyst Application

S.-H. Yoon · M.J. Kil · J.-H. Jeon · H.-M. Kim · S.-G. Kim · J. Han · E.-S. Lee · Y. An · J.W. Cho · J. An · J.-B. Choi · I. Jeon · H. Kim 1249

Multi-mode Soft Composite Bending Actuators Based on Glass fiber Textiles Interwoven with Shape Memory Alloy Wires: Development and use in the Preparation of Soft Grippers

O.V. Tuyboyov · G.-S. Lee · G.-Y. Lee 1263

Green Fabrication of Anti-friction Slippery Liquid-Infused Metallic Surface with Sub-millimeter-Scale Asymmetric Bump Arrays and Its Application

Z. Lian · Y. Cheng · J. Xu · J. Xu · W. Ren · Y. Tian · H. Yu 1281

REVIEWS

State of the Art of Biodegradable Nanofluids Application in Machining Processes

V. Baldin · L.R.R. da Silva · A.R. Machado · C.F. Houck 1299

Natural Language Processing Techniques for Advancing Materials Discovery: A Short Review

J.H. Lee · M. Lee · K. Min 1337

Further articles can be found at link.springer.com

Abstracted/Indexed in *Baidu*, *CLOCKSS*, *CNKI*, *CNPIEC*, *Dimensions*, *EBSCO Discovery Service*, *EI Compendex*, *Google Scholar*, *INSPEC*, *Japanese Science and Technology Agency (JST)*, *Journal Citation Reports/Science Edition*, *Korea Citation Index (KCI)*, *Naver*, *Norwegian Register for Scientific Journals and Series*, *OCLC WorldCat Discovery Service*, *Portico*, *ProQuest-ExLibris Primo*, *ProQuest-ExLibris Summon*, *SCImago*, *SCOPUS*, *Science Citation Index Expanded (SCIE)*, *TD Net Discovery Service*, *UGC-CARE List (India)*, *WTI AG*, *Wanfang*

Instructions for authors for *Int. J. of Precis. Eng. and Manuf.-Green Tech.* are available at www.springer.com/40684

International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Smart Technology

Volume 1 · Number 2 · July 2023

REGULAR PAPERS

Digital Twin Based Machining Condition Optimization for CNC Machining Center

B. Sim · W. Lee 115

Fiber Optic Sensor for Smart Manufacturing

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

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

J. H. Kong · S. W. Lee 137

A Design Optimization Framework for 3D Printed Lattice Structures

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

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

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

REVIEWS

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

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

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

Y. Jeong 187

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

V. Selvaraj · S. Min 201

Review on Machine Learning Based Welding Quality Improvement

I.-S. Kim · M.-G. Lee · Y. Jeon 219

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

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

INDUSTRY CASE STUDY

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

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

신입회원인준명단

•정회원•

회원 번호	이름	소속
20239270	최수민	경북대학교
20239264	김희준	대구경북과학기술원
20239263	손지원	한국과학기술연구원
20239262	박종복	KOPTI

•학생회원•

회원 번호	이름	소속
20239269	한윤호	명지대학교
20239268	정의정	원광대학교
20239266	이황규	경북대학교
20239265	서상덕	서울시립대학교
20239267	주수수	인하대학교

2023년 사단법인 한국정밀공학회 임원

회장

이석우(한국생산기술연구원)

수석부회장

민병권(연세대학교)

부회장

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

감사

김재환(인하대학교) 송창규(한국기계연구원)

총무이사

김동성(POSTECH) 김보현(송실대학교) 신현정(KAIST)

재무이사

김창주(한국기계연구원) 송용남(고려대학교) 정영훈(경북대학교)

편집이사

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

사업이사

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

기획홍보이사

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

국제이사

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

대의협력이사

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

부문회장

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

특별회원사

다이아몬드

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

골드

(주)마리알로 (주)에비던트코리아 (주)에이스나노캠 (주)엔도로보틱스 지앤피테크놀로지(주)
 (주)프로토텍 헥사곤

패밀리

(주)웨이퍼펍 한국공작기계산업협회

Editor-in-Chief

김보현

송실대학교

bhkim@ssu.ac.kr

Editors

강성목
대구가톨릭대학교

고승환
서울대학교

곽문규
경북대학교

김동성
POSTECH

김양진
부산대학교

김호찬
안동대학교

문두환
고려대학교

손정우
금오공과대학교

박민수
서울과학기술대학교

박상후
부산대학교

박형욱
UNIST

안지환
POSTECH

이인환
충북대학교

이창우
건국대학교

이창환
서울과학기술대학교

이현섭
동아대학교

정구현
울산대학교

정영훈
경북대학교

주백석
금오공과대학교

진중환
한국표준과학연구원

천두만
울산대학교

추원식
경상국립대학교

황지홍
서울과학기술대학교

Members of Editorial Board

김기주
동명대학교

김무림
한국로봇융합연구원

김재열
조선대학교

김창주
한국기계연구원

박정재
한국표준과학연구원

박정환
영남대학교

박준
한국광기술원

배창호
경성대학교

손용
한국생산기술연구원

송철기
경상국립대학교

왕덕현
경남대학교

윤성호
금오공과대학교

윤해성
한국항공대학교

이광일
경일대학교

이봉기
전남대학교

이종길
안동대학교

장진아
POSTECH

전용호
아주대학교

정재일
국민대학교

조영학
서울과학기술대학교

최동휘
경희대학교

최영만
아주대학교

최정욱
중앙대학교

최진승
건국대학교

태기식
건양대학교

황영국
조선이공대학교

김갑용
Iowa State Univ.

김범준
Univ. of Tokyo

김우균
Univ. of Cincinnati

민상기
Univ. of Wisconsin-Madison

Simon Park
Univ. of Calgary

Patrick Kwon
Michigan State Univ.

JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR PRECISION ENGINEERING

VOLUME 40, NUMBER 10/ October 2023

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

월간 · 제40권 제10호 [통권 제391호] · 비매품

등록일자 1987년 4월 25일

등록번호 서울 라 07037

인쇄일 2023년 9월 25일

발행일 2023년 10월 1일

발행인 이석우

편집인 김보현

인쇄 한림원

편집 한림원

발행소 사단법인 한국정밀공학회

[04508] 서울 중구 종림로 50-1(만리동 1가 51-1 SKY1004빌딩) 12층 / FAX (02)518-2937 / <http://www.kspe.or.kr>

사무국장 김영심 / (02)518-0722 / kspe@kspe.or.kr

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

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

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

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

INTERNATIONAL JOURNAL OF PRECISION ENGINEERING AND MANUFACTURING GREEN TECHNOLOGY



Impact Factor
4.660 by JCR in 2021

About IJPEM-GT

IJPEM-GT is co-published by the Korean Society for Precision Engineering and Springer Nature. The journal is published bimonthly, and JCR 2021 impact factor is 4.660, which ranks it top 18% (24/137) journal in the category of Engineering-Mechanical.

Topics of the Special Issue cover novel research contributions of "Green" precision engineering and manufacturing - theories and applications in the field of

Advanced Manufacturing for ESG

The potential focus areas to be covered in this Special Issue include, but are not limited to:

- RE100 (Renewable Electricity 100%)
- Green Manufacturing for Aerospace and Small Modular Reactor
- Smart and Sustainable Manufacturing for Semiconductors
- AI-assisted Manufacturing

Guest Editors

Professor Beomjoon Kim
The University of Tokyo, Japan

Professor Sung-Tae Hong
University of Ulsan, Korea

Professor Hoon-Eui Jeong
UNIST, Korea

Submission Procedures

Deadline for Submission Date
November 30, 2023

Publication Date
May 1, 2024

Vol., No.
Vol. 11, No. 3

International Journal of Precision Engineering and Manufacturing

SMART TECHNOLOGY



IJPEM-Smart Technology (hereinafter 'IJPEM-ST') is a new-launched academic journal which will be published by the Korean Society for Precision Engineering (KSPE).

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

Aims and Scope

Under the great wave of the 4th industrial revolution, smart technology is becoming ever more important in the precision engineering and manufacturing fields. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Smart Technology (IJPEM-ST) is a fully open access, international journal that aims to rapidly disseminate relevant fundamental and applied research works of high quality to international academic and industrial communities. The journal's specific focus areas in the precision engineering and manufacturing fields include, but are not limited to:

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

IJPEM-ST covers various kinds of papers:

Research papers, Short communications, Technical briefs, Position papers, Industry case studies

• Publication Date (Scheduled)

Vol. 2 No. 1 January 1, 2024

Vol. 2 No. 2 July 1, 2024

• Publication and Distribution

by the Korean Society for Precision Engineering with Open-Access

Editorial Board

Editor-in-Chief

Sang Won Lee / Sungkyunkwan University, Korea

Co-Editors-in-Chief

Jay Lee / University of Maryland, USA

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

Editors

Hyeong-Joon Ahn / Soongsil University, Korea

Hae-Jin Choi / Chung-Ang University, Korea

Chih-Hsing Chu / National Tsing Hua University, Taiwan

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

Dong Yoon Lee / Korea Institute of Industrial Technology, Korea

Seungchul Lee / POSTECH, Korea

Sangkee Min / University of Wisconsin-Madison, USA

Seung-Ki Moon / Nanyang Technological University, Singapore

Duhwan Mun / Korea University, Korea

Simon Park / University of Calgary, Canada

Editorial Board

Seung-Kyum Choi / Georgia Institute of Technology, USA

Haseung Chung / Michigan State University, USA

Youngkuk Jeong / KTH Royal Institute of Technology, Sweden

Yongho Jeon / Ajou University, Korea

Jay-I. Jeong / Kookmin University, Korea

Hyungjung Kim / Seoul National University, Korea

Yangjin Kim / Pusan National University, Korea

Jihyun Lee / University of Calgary, Canada

Wonkyun Lee / Chungnam National University, Korea

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

Joo-Sung Yoon / Kyungnam University, Korea



SCOPUS, KCI 등재 학술지

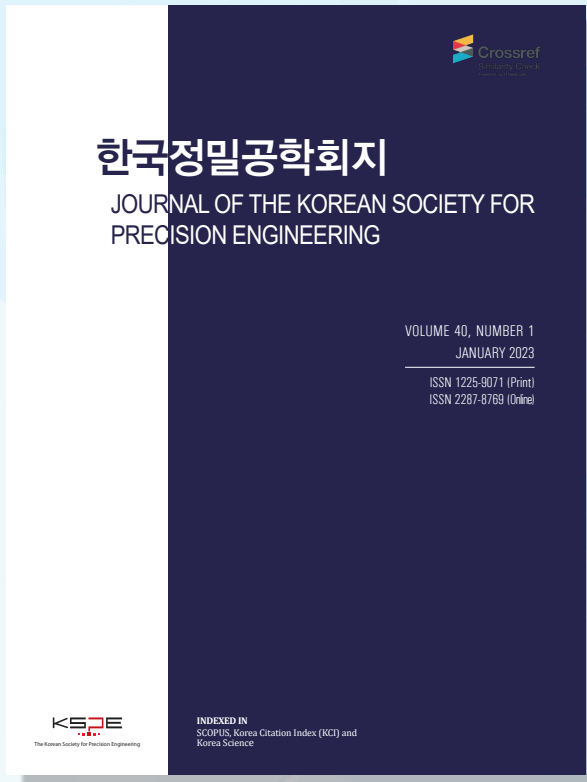
학회 회원님들의 많은 투고와 인용 부탁드립니다.

Scope

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

학술대회 Full Paper
논문을 투고 시 게재료가
면제됩니다.

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



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

Editorial Board

• Editor-in-Chief

Bo Hyun Kim(Soongsil University)

• Editors

Jihwan An (Seoul National University of Science & Technology)

Baeksuk Chu (Kumoh National Institute of Technology)

Won-Shik Chu (Gyeongsang National University)

Doo-Man Chun (University of Ulsan)

Koo Hyun Chung (University of Ulsan)

Duhwan Mun (Korea University)

Jihong Hwang (Seoul National University of Science & Technology)

Young Hun Jeong (Kyungpook National University)

Jonghan Jin (Korea Research Institute of Standards & Science)

Dong Sung Kim (POSTECH)

Ho-Chan Kim (Andong National University)

Yang Jin Kim (Pusan National University)

Seung Hwan Ko (Seoul National University)

Moonkyu Kwak (Kyungpook National University)

Sung-Mook Kang (Daegu Catholic University)

Changwoo Lee (Konkuk University)

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

Hyunseop Lee (Dong-A University)

In Hwan Lee (Chungbuk National University)

Hyung Wook Park (UNIST)

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

Sang-Hu Park (Pusan National University)

Jung Woo Sohn (Kumoh National Institute of Technology)

AWARDS

한국정밀공학회지 최우수논문상

– 한국정밀공학회지에 발표된 논문 중 가장
탁월한 가치의 논문저자에게 포상

INDEXED IN

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

Submission to JKSP Search for JKSP

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



+82-518-2928(T)

+82-518-2937(F)



paper@kspe.or.kr

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



12F, SKY1004 Bldg., 50-1
Jungnim-ro, Jung-gu, Seoul,
04508, Republic of Korea

한국정밀공학회지(JKSPE) 투고 안내

귀 회원님의 건승을 기원합니다.

한국정밀공학회지(Journal of the Korean Society for Precision Engineering, JKSPE)는 정밀공학과 관련된 우수한 논문을 게재하고 있으며 특히 기계공학뿐만 아니라 다학제적 학문을 바탕으로 정밀공학 분야에서 새롭고 독창적인 연구결과를 소개함으로써 정밀공학의 발전에 기여하는 것을 목표로 합니다. 한국정밀공학회지(JKSPE)에 대한 투고 안내를 드리오니 적극적인 관심과 참여 부탁드립니다.



※ SCOPUS, KCI 등재 학술지
 ※ 학술대회 Full Paper 논문, 영문 논문 제출 시
 게재료 면제

한국정밀공학회지(JKSPE)

- | | |
|--------------|---|
| 발행간기 | 월간 (매월 1일 발행) |
| 등재여부 | SCOPUS, KCI 등재지 |
| 투고방법 | <ul style="list-style-type: none"> • 온라인 투고 (http://article.kspe.or.kr/) • JKSPE 저널 홈페이지 (http://jkspe.kspe.or.kr/) |
| 투고자격 | 학회 회원 |
| 제출분야 | 정밀가공, 정밀측정, 로봇제어자동화, 스마트생산시스템, 설계및재료, 공작기계, 나노마이크로기술, 바이오헬스, 적층제조시스템, 녹색생산기술 |
| 관련 상훈 | <ul style="list-style-type: none"> • 한국정밀공학회지 최우수논문상 (상장, 상금) • 백암논문상 (상장, 상금) • 학술상 (상장, 상금) |

제 8 회 정밀공학 창의경진대회

The 8th Precision Engineering Creativity Competition

공모주제

초거대 인공지능과 Smart & Green 정밀공학 기술

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

접수기간

2023. 7. 3. 월 - 28. 금

최종 발표 및 시상

2023. 11. 17. 금 썬비치 삼척 호텔&리조트

주요 일정

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

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

참가자격 및 접수방법

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

제출내용

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

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

시상내역

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

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

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

• 주최 KSP.E 한국정밀공학회
Korean Society for Precision Engineering

• 주관 한국정밀공학회 교육위원회

• 후원 KIMM 한국기계연구원 KITECH 한국생산기술연구원 Komma 한국원격기계산업협회
DN 솔루션즈 Sindoh LIG 넥스원 FANUC 한국최나주제회사

Start New Sindoh

2D를 넘어 3D 전문 기업으로
신도리코가 새로운 미래를 열어갑니다



■ 경제적인 5축 가공 솔루션
뛰어난 생산성 / 설치공간 최소화

■ 뛰어난 접근성
작업자 / 로봇
공작물 자동 교환장치

5-Axis Dynamic Performance



Automatic Workpiece Changer

*본 제품의 설계 및 사양은 제품개선을 위하여 예고 없이 변경 될 수 있습니다.

D2-5AX

자동화 시스템에 최적화된 5축 솔루션



SMEC

스맥공작기계

www.smecmachinetools.com

X/Y/Z 직선축 고강성
Roller Type LM Guide 채택

B/C 회전축
Worm 구동방식 채택

이송계 볼스크류 너트 냉각
표준적용으로 열변위 최소화

작업환경에 따라
5축, 4+1축 중 필요한 사양으로 선택 가능

MVF 5000

대량 생산에 탁월하고
정밀 부품가공이 가능한
5축 머시닝 센터



NS 2100SY

고속, 고생산성
Roller Type LM Guide
Y축 터닝센터
Built-in Type Sub Spindle

가공 성능이 우수한
보상형 Y축 구조 채택

최소화된 비절삭 시간으로
생산성 향상

SMEC 서비스 콜 센터 1899-8238

본사 및 공장 · 경남 김해시 주촌면 골든루트로 157-10 | Tel. 055-340-4800
영남 지사 · 경남 김해시 주촌면 골든루트로 157-10 | Tel. 055-340-4882
경인 지사 · 경기도 화성시 동탄산단9길 23-12, 7층 | Tel. 031-376-7870
경북 지사 · 대구시 달성군 유가면 테크노대로6길 43 | Tel. 053-524-5211
충부 지사 · 대전시 유성구 테크노10로 31, 2층 | Tel. 042-864-8104



주식회사 스맥



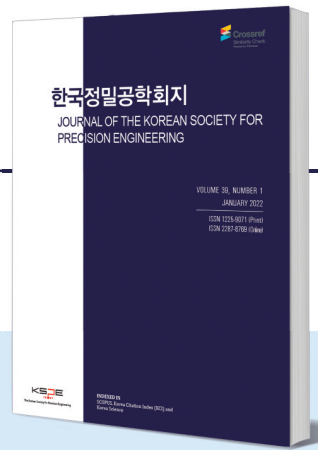
YouTube



TALK

한국정밀공학회지(JKSPE)

JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR PRECISION ENGINEERING



Indexed in SCOPUS, KCI

SCOPUS 등재지(2017~), KCI 등재지(2001~)
1984년 창간, 연간 12회, 매월 1일 발행
ISSN 1225-9071(Print) / 2287-8769(Online)

INTRODUCTION

1. 분기마다 특정 주제에 따른 특집논문 구성
2. 국내·국제 학술대회 발표 논문 중 우수 논문 선정 후 게재
3. 일반 투고 논문

PUBLICATION FEE

	국문 투고	영문 투고
기본 8페이지	200,000원	면제
1페이지 추가	30,000원	면제
후기(사사) 추가	총 금액의 50% 증가	면제

* 국내외 학술대회 발표 논문, 후기(사사)가 없을 경우 게재료 면제

ADVERTISEMENT

관련 기업 및 연구기관의 연구성 또는 제품 홍보, 각 공과대학 도서관·연구소·관련 산업체에 배포

학회지 광고 게재 비용		특별광고료(연 6회 이상)		광고 필름	비고사항
뒷표지	750,000원	6회	정가의 30%	A4(210x297 mm) 제작	* 앞쪽은 광고가 불가능합니다. * 특별화원사: 칼라광고 연간 무료제공 (최대 3회)
칼라광고	500,000원	12회	정가의 50%		
흑백광고	250,000원				
홈페이지 배너	월 100,000원				

TOPICAL ISSUE

TOPIC | 2022: 재료성형 공정에서의 고효율 금형 기술
2023: 스마트/디지털 헬스케어 기술

IJPEM-ST

INTERNATIONAL JOURNAL OF PRECISION ENGINEERING AND MANUFACTURING-SMART TECHNOLOGY

2023 New Journal

2023년 창간, 연간 2회, 1월·7월 1일 발행
ISSN 2951-4614(Print) / 2951-6382(Online)



INTRODUCTION

1. Full Open Access
2. Research papers, Short communications, Technical briefs, Position papers, Industry case studies

AIMS AND SCOPE

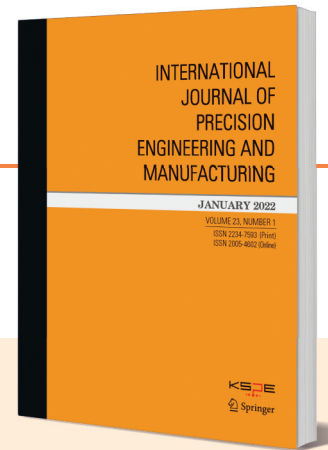
- Big Data Analytics and Informatics
- Sensors, Instrumentation and Process Monitoring
- Prognostics and Health Management (PHM)
- Industrial Internet of Things (IIOT)
- Industrial Artificial Intelligence
- Digital Twin, Cyber-Physical Systems (CPS) and Metaverse
- Augmented, Virtual and Extended Reality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

WEBSITE

www.ijpem-st.org

IJPEM

INTERNATIONAL JOURNAL OF PRECISION ENGINEERING AND MANUFACTURING



2021 Impact Factor: 2.041

SCIE, SCOPUS, KCI 등재지
2000년 창간, 연간 12회, 매월 1일 발행
ISSN 2234-7593(Print) / 2005-4602(Online)

INTRODUCTION

1. Regular paper, Short communication, Review paper
2. 국제 학술대회 발표 논문 중 우수 논문 선정 후 게재
3. 인용, 다운로드 수 높은 논문 시상 및 홍보

AIMS AND SCOPE

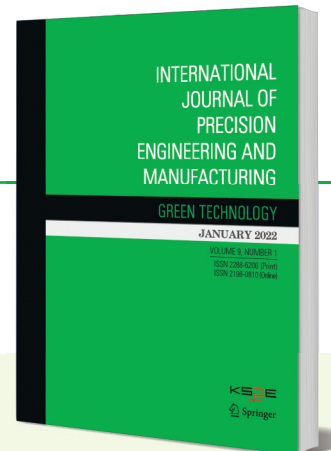
- Precision Manufacturing Processes
- Machine Tools
- Measurements and Control
- Nano/Micro Technology
- Robotics and Automation
- Bio Health
- Manufacturing Systems
- Additive Manufacturing
- Design and Materials

SPECIAL ISSUE

TOPIC | 2023: Robots for Manufacturing Processes and Systems

IJPEM-GT

INTERNATIONAL JOURNAL OF PRECISION ENGINEERING AND MANUFACTURING-GREEN TECHNOLOGY



2021 Impact Factor: 4.660

SCIE, SCOPUS, KCI 등재지
2014년 창간, 연간 6회, 홀수월 1일 발행
ISSN 2288-6206(Print) / 2198-0810(Online)

INTRODUCTION

1. Regular paper, Short communication, Review paper
2. 국제 학술대회 발표 논문 중 우수 논문 선정 후 게재
3. 인용, 다운로드 수 높은 논문 시상 및 홍보

AIMS AND SCOPE

- Energy Saving and Waste Reduction in Manufacturing Processes
- Design and Manufacturing of Green Products
- Manufacturing of New and Renewable Energy Devices
- Materials for Green Manufacturing
- Management and Policy for Sustainable Manufacturing

SPECIAL ISSUE

TOPIC | 2016: Hybrid Manufacturing
2017: 4D Printing
2018: Sustainable Manufacturing in 4th Industrial Revolution
2019: Energy Harvesting
2020: Green Smart Manufacturing
2021: Soft and Green Manufacturing and Applications
2022: Green Manufacturing Coping with Climate Change and Pandemics
2023: NetZero, Achievable by Manufacturing?
2024: Advanced Manufacturing for ESG

한국정밀공학회

KSPE 2023 Autumn Conference

2023 추계학술대회

2023. 11/15 WED - 17 FRI | **썰비치 삼척** (강원도 삼척시)

▶ 주요일정 Important Date

200단어 초록제출 마감 2023. 9. 15 FRI

초록채택 통지 발송 2023. 10. 2 MON

발표자 사전등록 마감 2023. 10. 10 TUE

▶ 논문모집분야

- 정밀가공
Precision Manufacturing Processes
- 정밀측정
Precision Measurements
- 로봇제어자동화
Robotics, Control and Automation
- 스마트생산시스템
Smart Manufacturing System
- 설계및재료
Design and Materials
- 공작기계
Machine Tools
- 나노마이크로기술
Nano/Micro Technology
- 바이오헬스
Bio Health
- 적층제조시스템
Additive Manufacturing
- 녹색생산기술
Green Manufacturing Technology

KSPE 2023 추계학술대회 문의처

한국정밀공학회 사무국 (02)518-0722

프로그램, 논문 발표문의 : conf@kspe.or.kr, (02)393-0725

회원, 회계, 등록문의 : account@kspe.or.kr, (02)393-0724

주최 및 주관 **KSPE** 대한 한국정밀공학회
Korean Society for Precision Engineering

**K-Precision
Smart & Green**

2023년 국내/국제학술대회 일정 안내

한국정밀공학회

2023

KSPE 2023
Spring
Conference

춘계학술대회

2023.
5. 10(수) - 12(금)

라마다프라자제주호텔
(제주도 제주시)

International Conference on
Precision Engineering and Sustainable Manufacturing

PRESM 2023

2023. 7. 16(일) - 21(금)

Bankoku Shinryokan
Okinawa, Japan

한국정밀공학회

2023

KSPE 2023
Autumn
Conference

추계학술대회

2023. 11. 15(수) - 17(금)

썰비치삼척 리조트
(강원도 삼척시)

PIFOC Objectives Scanner



- 피에조 액추에이터를 사용하여 빠른 응답 시간 및 긴 수명
 - Z축으로 100, 400, 800 μ m 의 이동 범위
 - 서브나노미터 분해능으로 정밀한 스캐닝 가능
 - Zero-play flexure guides로 높은 가이드 정확도 보장
 - Capacitive sensors로 직접 위치 측정: 높은 선형성
 - \varnothing 29 mm의 넓은 애퍼처
- >> 현미경, 3-D 이미징, 반도체 테스트, 생명공학, 오토포커스 시스템 등

적용분야



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

