

# 한국정밀공학회지

JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR  
PRECISION ENGINEERING

VOLUME 41, NUMBER 2  
FEBRUARY 2024

---

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

## Editor-in-Chief

**Bo Hyun Kim**

Soongsil University  
bhkim@ssu.ac.kr

## Editors

**Jihwan An**  
POSTECH

**Baeksuk Chu**  
Kumoh National Institute of Technology

**Won-Shik Chu**  
Gyeongsang National University

**Doo-Man Chun**  
University of Ulsan

**Koo Hyun Chung**  
University of Ulsan

**Duhwan Mun**  
Korea University

**Jihong Hwang**  
Seoul National University of Science & Technology

**Jonghan Jin**  
Korea Research Institute of Standards & Science

**Maolin Jin**  
Korea Institute of Robotics & Technology Convergence

**Dong Sung Kim**  
POSTECH

**Yang Jin Kim**  
Pusan National University

**Seung Hwan Ko**  
Seoul National University

**Moonkyu Kwak**  
Kyungpook National University

**Sung-Mook Kang**  
Daegu Catholic University

**Changwoo Lee**  
Konkuk University

**Chang-Whan Lee**  
Seoul National University of Science & Technology

**Hyunseop Lee**  
Dong-A University

**Jongkil Lee**  
Andong National University

**Hyung Wook Park**  
UNIST

**Min Soo Park**  
Seoul National University of Science & Technology

**Jung Woo Sohn**  
Kumoh National Institute of Technology

**Chul Ki Song**  
Gyeongsang National University

**Duck Hyun Wang**  
Kyungnam University

**Sung Ho Yoon**  
Kumoh National Institute of Technology

## Members of Editorial Board

**Jangho Bae**  
Kyungsung University

**Younghak Cho**  
Seoul National University of Science & Technology

**Dongwhi Choi**  
Kyung Hee University

**Jin-Seung Choi**  
Konkuk University

**Jungwook Choi**  
Chung-Ang University

**Young-Man Choi**  
Ajou University

**Jinah Jang**  
POSTECH

**Yongho Jeon**  
Ajou University

**Bongchul Kang**  
Kookmin University

**Hyun-Wook Kang**  
UNIST

**Beomjoon Kim**  
University of Tokyo

**Chang-Ju Kim**  
Korea Institute of Machinery & Materials

**Gap-Yong Kim**  
Iowa State University

**Jae-Yeol Kim**  
Chosun University

**Kee Joo Kim**  
Tongmyong University

**Woo Kyun Kim**  
University of Cincinnati

**Patrick Kwon**  
Michigan State University

**Bong-Kee Lee**  
Chonnam National University

**Donghun Lee**  
Soongsil University

**Howun Lee**  
Seoul National University

**Kwang-II Lee**  
Kyungil University

**Sangkee Min**  
University of Wisconsin-Madison

**Jungjae Park**  
Korea Research Institute of Standards & Science

**Jung Whan Park**  
Yeungnam University

**Simon Park**  
University of Calgary

**Hae-Sung Yoon**  
Korea Aerospace University

JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR PRECISION ENGINEERING

**VOLUME 41, NUMBER 2 / February 2024**

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

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

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

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

**Full Text Available** at <http://kspe.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 January 1, 2024 (Monthly)

**Published by** The Korean Society for Precision Engineering

**Publisher** Byung-Kwon Min (President, KSPE)

**Managing Editor** Bo Hyun Kim

**Manuscript Editor** Su-Hyun Kang

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

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

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

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

## 목차

특	집	주제: 초정밀가공공정기술 책임편집인 : 김건희(한밭대학교)
89	터널링 효과를 이용한 초정밀 공작기계에서 공구 좌표계 설정 유한들, 맹상진	
95	취성 파괴 분석기법을 통한 황화아연 소재의 광학적 특성 분석 여우중, 최환진, 전민우, 김민철, 김이중, 김건희, 이원균	
101	Fabrication and Characterization of Automotive Aspheric Camera Lens Mold based on Ultra-precision Diamond Turning Process 정지영, 최환진, 박종성, 심종근, 김영재, 곽은지, 최두선, 제태진, 한준세	
111	그루빙 가공공정을 활용한 저마늄 소재의 패턴가공기술 연구 함중규, 강종균, 맹환호, 박성현, 허진용, 박영덕, 김건희	
117	3D Printing 기술을 활용한 위성 광학계 제작 기술 박성현, 맹환호, 허진용, 함중규, 강종균, 김건희	
123	디스크 공구를 이용한 초경합금의 미세 홈 가공에 대한 연구 김민기, 양찬영, 심대보, 이지효, 김보현	
131	실리콘 카바이드의 미세 방전 가공 특성 이주현, 양찬영, 김보현	
139	비정질 탄소 분말 첨가에 따른 푸란 전구체 탄화 공정의 열분해 수축 저감 연구 김영규, 홍동인, 김홍민, 안수호, 김석민	
145	무윤활 상태에서 3D 프린팅용 PLA 및 PETG 소재의 마모 현상에 관한 연구 조연상, 이현섭	
일	반	
153	링 전극 변수에 따른 정전 분무 코팅법의 액적 특성연구 김지엽, 이문희, 김준엽, 홍정구	

# JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR PRECISION ENGINEERING

VOLUME 41, NUMBER 2 / February 2024

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

## CONTENTS

### SPECIAL **Title: Ultra-precision Machining Process Technology**

Guest Editor: Geon Hee Kim (Hanbat University)

- 89 Work Coordinate Setup in Ultra-precision Machine Tool Using Tunneling Effect  
**Handeul You, and Sangjin Maeng**
- 95 Quantitative Analysis of Brittle Fracture for Evaluating Optical Properties in Zinc Sulfide Materials  
**Woo-Jong Yeo, Hwan-Jin Choi, Minwoo Jeon, Mincheol Kim, I Jong Kim, Geon-Hee Kim, and Wonkyun Lee**
- 101 Fabrication and Characterization of Automotive Aspheric Camera Lens Mold based on Ultra-precision Diamond Turning Process  
**Ji-Young Jeong, Hwan-Jin Choi, Jong Sung Park, Jong-Keun Sim, Young-Jae Kim, Eun-Ji Gwak, Doo-Sun Choi, Tae-Jin Je, and Jun Sae Han**
- 111 A Study on Pattern Machining Technology for Germanium Materials Using Grooving Machining Process  
**Joong Kyu Ham, Jong Gyun Kang, Hwan Ho Maeng, Seong Hyeon Park, Jin Yong Heo, Young Durk Park, and Geon Hee Kim**
- 117 Satellite Optical System Manufacturing Technology Using 3D Printing Technology  
**Seong Hyeon Park, Hwan Ho Maeng, Jin Yong Heo, Joong Kyu Ham, Jong Gyun Kang, and Geon Hee Kim**
- 123 Study on Micro Grooving of Tungsten Carbide Using Disk Tool  
**Min Ki Kim, Chan Young Yang, Dae Bo Sim, Ji Hyo Lee, and Bo Hyun Kim**
- 131 Machining Characteristics of Micro EDM of Silicon Carbide  
**Ju Hyeon Lee, Chan Young Yang, and Bo Hyun Kim**
- 139 Study on Reduction of Pyrolysis Shrinkage in the Carbonization of Furan Precursor by Addition of Vitreous Carbon Powder  
**Young Kyu Kim, Dong-in Hong, Hongmin Kim, Suho Ahn, and Seok-Min Kim**
- 145 A Study on the Wear Phenomena of PLA and PETG Materials for 3D Printing in Non-lubricated Condition  
**Yonsang Cho, and Hyunseop Lee**

### REGULAR

- 153 Study of Droplet Characteristics of Electrospray Coating Method as a Function of Ring Electrode Parameters  
**Ji Yeop Kim, Mun Hee Lee, Jun Yeop Kim, and Jung Goo Hong**

책임편집인  
김건희  
한밭대학교



## 초정밀가공공정기술

### Ultra-precision Machining Process Technology

- (1) 터널링 효과를 이용한 초정밀 공작기계에서 공구 좌표계 설정
- (2) 취성 파괴 분석기법을 통한 황화아연 소재의 광학적 특성 분석
- (3) Fabrication and Characterization of Automotive Aspheric Camera Lens Mold based on Ultra-precision Diamond Turning Process
- (4) 그루빙 가공공정을 활용한 저마늄 소재의 패턴가공기술 연구
- (5) 3D Printing 기술을 활용한 위성 광학계 제작 기술
- (6) 디스크 공구를 이용한 초경합금의 미세 홈 가공에 대한 연구
- (7) 실리콘 카바이드의 미세 방전 가공 특성
- (8) 비정질 탄소 분말 첨가에 따른 플란 전구체 탄화 공정의 열분해 수축 저감 연구
- (9) 무윤활 상태에서 3D 프린팅용 PLA 및 PETG 소재의 마모 현상에 관한 연구

초정밀가공공정기술은 제조업에서 품질 향상과 생산성을 높이는 데 큰 기여를 하고 있으며, 부품 제조의 정확성과 신속성을 보장하여 제품의 품질을 향상시키고 생산 시간과 비용을 줄일 수 있다. 또한, 이 기술은 혁신적인 제품을 개발하고 디자인하는 데 있어서도 중요한 역할을 하고 있다. 그러나, 초정밀가공기술은 고가의 장비와 전문 기술을 요구하기 때문에 초기 투자 비용이 높고, 또한, 기술의 빠른 발전으로 인해 지속적인 기술 업그레이드와 꾸준한 투자가 필요하다.

특히, 반도체, 항공우주, 광학 등의 다양한 분야에서 미세 형상 가공에 대한 요구가 증가하고 있으며 그에 따라 절삭, 연삭, 레이저, 방전, 전해 가공 등 다양한 초정밀 가공 공정에 대한 많은 연구가 수행되고 있다. 본 특집 논문은 ‘초정밀가공공정기술’이라는 주제로 위성 광부품 등 첨단 부품의 초정밀가공에 활용되는 다양한 초정밀가공공정기술과 적용 기술을 소개한다.

우주, 항공, 반도체, 자동차 등 제조 현장의 다양성만큼이나 다양한 분야의 논문을 특집논문으로 구성하였다. 초정밀 공작 기계에서 공구 좌표계 설정을 통한 가공 정밀도 향상기술과 자동차 야간 주행 시 안개, 비, 눈과 같은 시인성 저하 문제를 해결하기 위해 고해상도 이미지를 얻을 수 있는 다파장 카메라 기술에 적용되는 적외선 광학소자인 황화아연의 초정밀가공 공정 특성에 관한 연구, 자동차용 이미지 센서 카메라 렌즈 금형의 초정밀가공기술, 우주탐사 및 지구관측 등 우주공간에 대한 많은 연구에 활용되는 분광소자의 초정밀가공기술에 적용되는 그루빙 가공공정을 활용한 저마늄 소재의 패턴가공기술 연구와 최근 시장에 활성화되고 있는 3D Printing 기술을 활용한 위성 광학계 제작 기술에 관한 연구 결과를 소개하였다.

그리고 높은 경도와 압축 강도를 갖고 뛰어난 기계적 특성을 갖는 초경합금에 대하여 디스크 공구를 적용한 미세 홈 가공에 대한 연구와 고경도 세라믹 재료 가공 수요증대에 따른 실리콘 카바이드의 미세 방전 가공 특성에 관한 연구와 높은 열적 우수성을 가지며, 유리소재와 이형특성이 우수하여 유리형성을 위한 최적의 몰드 소재 개발에 관한 비정질 탄소 분말 첨가에 따른 플란 전구체 탄화 공정의 열분해 수축 저감 연구, 그리고 복잡한 구조를 가진 제품의 생산 시에도 금형을 사용하지 않고 시제품 생산에 적용할 수 있는 적층제조에서의 소재 마모 현상에 대한 연구도 소개되었다.

본 특집논문이 한국정밀공학회 회원에게 초정밀가공공정기술에 관련한 다양한 시각을 제공할 수 있기를 바란다. 끝으로, 특집논문 발간에 좋은 내용으로 논문을 준비해주신 저자분들께 감사드린다.



• 특집 • 초정밀가공공정기술(Ultra-precision Machining Process Technology)  
**터널링 효과를 이용한 초정밀 공작기계에서 공구 좌표계 설정**  
**Work Coordinate Setup in Ultra-precision Machine Tool Using Tunneling Effect**

유한들<sup>1</sup>, 맹상진<sup>1,#</sup>  
Handeul You<sup>1</sup>, and Sangjin Maeng<sup>1,#</sup>

<sup>1</sup> 홍익대학교 기계시스템디자인공학과 (Department of Mechanical and System Design Engineering, Hongik University)  
# Corresponding Author / E-mail: sjmaeng@hongik.ac.kr, TEL: +82-2-320-3058  
ORCID: 0000-0001-9166-7297

KEYWORDS: Tunneling effect (터널링 현상), Work coordinate setup (공구 좌표계 설정), Measurement (측정), Machine tool (공작기계)

*Work coordinate setup is a time-consuming and difficult task in ultraprecision machining. The setup process determines the precision and tolerance of the machined parts. In ultraprecision machining, the table can be moved in the nanometer range, but the accuracy of the measuring device has not reached the nanometer accuracy range. Although several measurement methods have been proposed, the attained precision is still insufficient. Some methods also lose the precision when the sensor is changed with the tool after the work coordinate setup is completed. A work coordinate setup method proposed in this study could improve the precision and the measurement process using electron tunneling. Since the method can use the tool as a sensor probe, the changing process does not degrade the measurement precision. In addition, the proposed method can theoretically detect the distance between the tool and the workpiece in sub-nanometers like a scanning tunneling microscope. The simple system requires a precision current amplifier capable of measuring electron tunneling current in the picoampere to nanoampere range and a power supply. The method, installed on an ultra-precision machine tool, was tested on WC and aluminum material. The accuracy of the method was evaluated for applied voltage.*

Manuscript received: November 1, 2023 / Accepted: December 12, 2023

### NOMENCLATURE

$I$	= Tunneling Current
$\bar{\phi}$	= Average Barrier Height (Work Function)
$V$	= Bias Potential between Two Electrodes
$d$	= Gap Width between Two Materials
$A$	= Tunneling Material Constant, 1 at $\bar{\phi}$ in eV and $d$ in Å

## 1. 서론

광학 부품과 정밀 부품을 사용하는 제품의 수요가 증가하면서

초정밀 가공 기술의 수요 또한 증가하고 있다[1,2]. 수습에서 수백 나노미터 수준의 정밀도를 요구하는 부품을 가공하기 위해 공작기계의 정밀도는 발전하고 있지만, 공작기계의 부가 장치들의 정밀도는 공작기계의 정밀도에 미치지 못하는 상황이다[3]. 부가장치 중 공구와 공작물 사이의 거리를 측정하여 공구 좌표계를 설정하는 시스템은 가공 정밀도에 영향을 미치는 중요한 장치이다[4]. 터치 프로브 타입의 공구 좌표계 설정 시스템은 공작기계에서 산업에서 널리 사용되고 있지만, 측정 시스템의 정밀도는 초정밀 공작기계의 정밀도에 미치지 못하는 상황이다. 이러한 간극을 좁히기 위하여 여러 연구팀에서 공구 좌표계를 설정하기 위한 여러 센서를 이용한 측정 방법을 개발하였다.

공구와 공작물 사이의 거리를 측정하는 센서의 방식은 접촉 방식과 비접촉 방식으로 나뉜다. 접촉 측정 방식은 공구와 공작물이

접촉하면서 발생하는 물리적 혹은 전기적 반응을 관측하여 접촉 여부를 판단하는 방식이다. 가속도 센서, 음파 센서, 전류 센서, 공구 동력계와 같이 공구와 공작물이 접촉하면서 발생하는 진동이나 반발력, 전기 저항의 변화를 측정하여 접촉 여부를 판단한다. Roy et al.은 가속도 센서를 머시닝 센터의 스핀들에 장착하여 공구와 공작물이 접촉할 때 발생하는 스핀들의 떨림을 관측하여 공구와 공작물 사이의 접촉여부를 판단하였다[5]. Min et al.은 공구와 공작물이 접촉할 때 공작물을 통해 전달되는 진동을 감지하여 공구와 공작물의 접촉을 감지하였다[6]. Chen et al.은 선반에서 공구동력계를 이용하고 공구가 공작물을 누를 때 반발력을 측정하여 접촉 위치를 측정하였다[7]. Castano et al.은 전도체인 공구와 재료가 밀링 중에 접하는 순간 저항을 측정하여 접촉 여부를 판단하였다[8]. 접촉방식은 기본적으로 접촉을 기반으로 하는 측정이기 때문에 공구와 공작물의 접촉으로 인해 공구나 공작물 표면에 상처를 입힐 가능성이 높다.

반면 비접촉 측정 방식은 공구와 공작물이 접촉하지 않고 측정하기 때문에 두 재료의 표면에 상처를 입힐 가능성이 낮다. 비접촉 측정 방식은 카메라, 레이저 센서, 방전, 전기용량과 같이 빛이나 전자를 매개체로 이용하여 공구와 공작물 사이의 거리를 측정한다. Clark et al.은 비전을 이용하여 공구와 공작물 사이의 거리를 5  $\mu\text{m}$  수준의 정밀도로 관측하였다[9]. Yoshioka et al.이 제안한 방법은 투명한 다이아몬드 공구를 사용할 경우 레이저를 이용하여 공구와 공작물 사이의 거리를 측정하였다[10]. Maeng et al.은 공구와 공작물 사이에 방전이 일어나는 것을 관측하여 두 재료 사이의 거리를 측정하였다[11]. Wang et al.은 캐패시터 센서를 이용하여 마이크로미터 단위에서 두 물체 사이의 거리를 측정하는 방법을 제안하였다[12]. 비접촉 방식은 접촉이 일어나지 않기 때문에 두 물체 표면에 상처를 입히는 가능성은 낮지만 상대적으로 접촉식 방식에 비하여 정밀도와 신뢰도가 떨어진다.

두 물체 사이의 거리를 측정하는 방법은 직접적이거나 간접적인 방법으로 분류할 수 있다. 대표적인 간접 측정 방법은 터치 프로브를 이용한 공구 좌표계 설정 시스템이다[13]. 터치 프로브 센서는 동작기계 내의 공구 홀더에 장착되어 공작물과 거리를 측정 후 공구와 교체된다. 프로브 센서와 교체한 공구 사이의 거리는 외부에 장착된 거리 측정 센서를 이용하여 측정한다. 공구와 센서 사이의 거리와 센서와 공작물 사이의 거리 정보를 바탕으로 간접적으로 공구와 공작물 사이의 거리를 계산한다. 직접적인 측정방법은 공구나 공작물을 센서와 교체하지 않고 동작기계에 장착한 상태로 외부 센서를 이용하거나 공구 자체를 센서 프로브로 사용하여 두 물체 사이의 거리를 측정한다. 접촉 방식 센서 중 음파 센서나 가속도 센서는 센서 프로브 없이 공구와 공작물의 접촉을 감지한다. 비접촉 방식 중 레이저 센서는 외부에 센서가 설치되어 공구와 공작물 사이의 거리를 직접 측정한다. 일반적으로 간접적인 측정 방법은 센서와 공구가 교체되는 과정에서 오차가 발생하는 문제가 있다. 따라서 정밀 측정에는 직접 측정방법을 선호한다.

본 연구에서는 양자역학 중 터널링 효과를 이용하여 공구와 공작물 사이의 거리를 비접촉 상태에서 직접적으로 측정하고 이를 바탕으로 공구 좌표계를 설정하는 방법을 제안한다. 전도체 재료 사이에서 발생하는 터널링으로 거리를 측정하는 연구는 수행되었지만 동작기계에서 공구와 공작물 사이의 거리를 측정하는 연구는 미미하다. 제안하는 방법으로 전도체인 공구와 공작물 사이의 거리를 나노 미터 수준으로 이동하면서 공구와 공작물 사이에 발생하는 터널링 전류를 측정하고 이를 바탕으로 두 전도체 사이의 거리를 측정하였다. 초경 공구와 알루미늄 공작물에서 터널링 전류를 측정하며 재료에 따른 차이를 관찰하였다. 그리고 동작기계의 불확실성 분석을 통해 측정 방법의 정밀도에 미치는 요인들의 영향도를 확인하였다.

## 2. 터널링

양자역학 현상 중 하나인 터널링 현상은 전위차가 있는 두 원자 사이에 비전도체가 나노미터 정도 간격으로 존재할 때 전자가 비전도체를 통과하여 두 원자 사이에 미세한 전류가 흐르는 현상을 말한다[14]. 이러한 미세한 전류를 터널링 전류라 하고 전류의 크기를 식(1)과 같이 두 원자 사이의 거리에 대한 함수로 표현할 수 있다.

$$I \propto f(V) \exp(-A\sqrt{\phi}d) \quad (1)$$

여기서  $I$ 는 터널링 전류,  $V$ 는 두 전도체 사이의 인가전압,  $d$ 는 두 전극 사이의 거리이다.  $A$ 와  $\phi$ 는 두 전도체와 전도체 사이의 절연체의 전기적 특성을 나타내는 상수이다[15]. 터널링 이론에 따르면 터널링 전류는 전압에 비례하고 두 전극 재료의 거리에 반비례한다. Fig. 1과 같이 두 전극 사이의 거리가 멀어지면 터널링 전류 크기는 지수비율로 감소한다. 터널링 전류와 두 전도체 사이 거리에 대한 관계를 이용하여 원자 단위로 거리 측정이 가능한 Scanning Tunneling Microscopy (STM)가 개발되었다. 이론적으로 STM을 이용하여 측정 가능한 깊이 방향의 해상도는 0.01 nm이다[16]. 폭 방향의 해상도는 사용하는 프로브의 날카로움으로 결정되고 프로브 끝단이 날카로워 끝단에 존재하는 원자의 개수가 작아질수록 폭 방향의 해상도가 높다.

터널링 현상을 관측하기 위해서는 두 전도체 사이의 거리를 수 나노미터 이하로 제어할 수 있고 10-100 pA 수준의 미세한 전류를 측정할 수 있어야 한다. STM은 나노미터 수준으로 두 전도체의 상대 위치를 제어하고 미세한 터널링 전류를 측정할 수 있는 정밀 전류계를 탑재하고 있다. 또한 외부의 진동을 차폐하고 산화막 형성을 늦추며, 열수축/팽창을 최소화하기 위한 시스템을 갖추고 있다. STM과 비슷하게 초정밀 동작기계는 나노미터급으로 이송축을 제어하기 위하여 외부와 진동을 차폐하는 시스템과 동작기계 주변의 온도를 일정하게 유지할 수 있는 시스템이 존재한다. 이러한 환경은 터널링 현상을 측정하기에 적합한 환경이다. 공구와 공작물에 전위차를 발생시키며 두 전도체



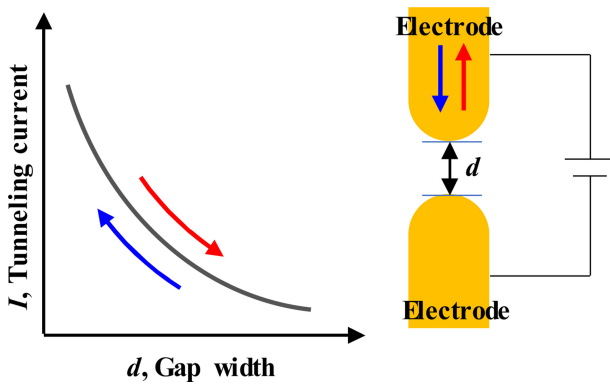


Fig. 1 Theoretical curve for tunneling current-gap between two conductive materials

사이의 거리를 나노미터로 제어하면 정밀 전류계를 이용하여 공작기계 상에서 터널링 전류를 관측할 수 있다.

### 3. 실험

초정밀 공작기계에서 터널링 현상을 이용하여 공구 좌표계를 설정하는 방법을 검증하기 위하여 실험을 수행하였다. 피에조 정밀 이송장치를 이용하여 절삭 공구와 공작물 사이의 거리를 제어하며 재료와 인가 전압에 따라 터널링 전류를 측정하는 거리-전류 실험을 수행하였다. 그리고 초정밀 공작기계에 절삭 공구와 공작물 사이의 거리를 이동하며 터널링 전류를 측정하여 터널링 측정 기반 공구 좌표계 설정 방법의 정밀도를 검증하는 불확실성 분석 실험을 하였다.

거리-전류 실험은 피에조 정밀 이송장치를 초정밀 공작기계 위에 Fig. 2와 같이 설치하여 수행되었다. 0.1 nm의 이송분해능을 갖는 2축 피에조 스테이지(P-620, PI, 독일)위에 공구를 설치하고 공작물은 그 반대쪽에 설치하였다. 공구와 공작물에는 Analog Output 모듈(NI-9260, NI, 미국)을 이용하여 전압을 인가하였고 공구와 공작물 사이에 흐르는 터널링 전류는 정밀전류증폭기(DLPCA-200, FEMTO, 독일)을 이용하여 증폭한 뒤 디지털라이저(NI-9775, NI, 미국)에서 전압을 측정하였다. 터널링 전류의 값이 매우 작기 때문에 외부에서 발생하는 노이즈를 차폐해야 하므로 공구와 공작물을 고정하는 부분은 비전도체인 세라믹으로 격리하였다. 또한 동축 전선을 이용하여 외부의 노이즈를 최소화하고자 하였다. 실험장치는 4축 초정밀 공작기계(DTM-150, JS Precision, 한국) 상에서 실험하여 외부에서 발생하는 진동 영향을 최소화하고자 하였다.

거리-전류 실험은 Table 1과 같은 조건으로 수행하였다. 인가 전압은 0.2-1 V까지 0.2 V 간격으로 변경하며 수행하였다. 공구는 텅스텐카바이드(WC)를 이용하였고 공작물 재료는 알루미늄을 사용하였다. 공구와 공작물 사이의 접촉 위치는 공구를 움직이면서 측정되는 전류값이 급격하게 커지는 것을 관측하여 정의하였다. 공구와 공작물 사이의 거리가 가까워지면 터널링

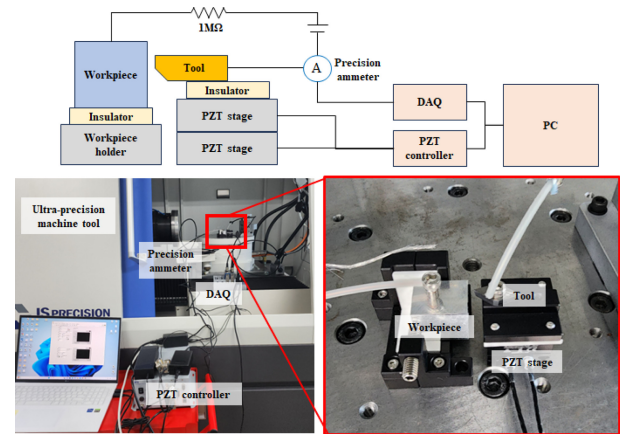


Fig. 2 Experiment setup and circuit diagram for tunneling current measurement in piezo stages

Table 1 Experiment conditions

Conditions	Value
Tool material	WC
Work materials	Al6061
Applied voltage [V]	0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0
Stage speed [nm/s]	1
Nose radius of tool [μm]	300

효과에 의해서 10 pA-10 nA 사이의 전류가 측정된다. 공구와 공작물이 가까워지다 접촉하게 되는 순간 공작물과 공구는 통전이 되고 전류는 저항과 인가전압을 고려하여 0.1-1 μA이 된다. 이렇게 완전히 통전되는 위치를 접촉점이라 가정하였다. 이 과정을 10번 반복하여 전류값이 급격하게 커지는 접촉점의 평균 위치를 구하여 공구와 공작물의 기준점으로 정의하였다. 나노미터 단위에서 기준점을 설정하기 어렵기 때문에 접촉하였을 때 발생하는 급격한 전류를 관측하여 기준점을 정의하고 그 후 그 기준점을 바탕으로 떨어진 거리를 측정하였다. 제안한 방법은 비접촉한 상태로 거리를 측정하는 방식이지만 기준점 정의를 위해서 접촉하였을 때 발생하는 신호를 사용하였다. 기준점으로부터 멀어지는 방향으로 공구를 1 nm/s의 속도로 기준점에서 서부터 30 nm까지 이송하며 전류 변화를 측정하였다. 각 조건 별로 10회 수행 실험을 수행하였다.

공작기계상에서 적용 가능성을 확인하기 위하여 초정밀 공작기계 상에서 실험을 수행하였다. 실험에 사용한 4축 공작기계는 x축과 z축 방향으로 1 nm, B축과 C축으로 1 μm 단위로 제어가 가능하다. 초정밀 공작기계의 x축 위에 공구, z축 위에 공작물을 부착한 후 터널링 전류 측정 실험을 수행하였다. 인가 전압은 0.6 V, 공구는 WC, 공작물은 알루미늄으로 수행하였다. Fig. 3와 같이 x축 위에 피에조 정밀 이송장치를 설치하고 나머지 전류 측정 장치는 이전 정밀 이송 측정 실험과 동일하게 구성하였다. 피에조 정밀 이송장치를 이용하여 공구와 공작물의 접촉위치를 정의한 후 공작기계의 z축을 이동하며 터널링 전류를

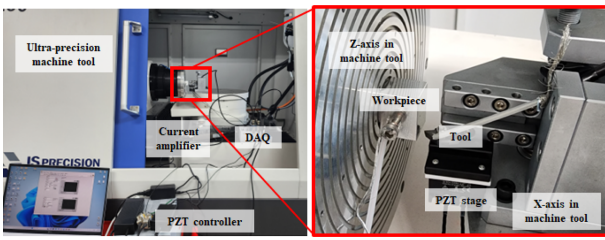


Fig. 3 Experiment setup in an ultra-precision machine tool

측정하였다. 공작기계의 이송축을 1 nm/s로 같은 조건으로 이송하며 60 nm 떨어진 부분까지 이동하였다. 위 실험은 20회 반복하며 반복성을 평가하였다. 또한 공작기계의 불확실성을 평가하기 위하여 공작기계의 반복성과 진동을 측정하였다.

4. 실험 결과

거리-전류 실험에서 피에조 정밀 이송장치를 이용하여 공구와 공작물 사이를 떨어지게 하면서 터널링 전류를 측정하였다. Fig. 4와 같이 공구와 공작물의 거리가 멀어질수록 전류의 크기는 급격하게 낮아지는 것을 관찰할 수 있다. 측정된 전류의 크기는 10 nA 수준이며 일반적인 STM 장치에서 측정되는 터널링 전류의 크기에 비하여 10-100배 크다. 이는 STM 장치에 사용하는 프로브와 공구 끝단 형상에 의해 발생한 것으로 예상된다. 일반적인 STM 프로브의 끝단은 날카롭게 제작되지만 일반 절삭 공구의 끝단은 나노미터 단위에서는 뾰족하다. 이는 공구의 끝단과 공작물 사이에 터널링 현상을 일으키는 원자의 개수에 영향을 미친다. 뾰족한 공구는 일반적인 STM의 프로브에 비하여 공작물과 터널링 효과를 만드는 원자의 개수가 많아 일반적인 STM에서 관측되는 터널링 전류보다 공구와 공작물 사이에서 관측되는 터널링 전류가 10-100배 정도 높을 것으로 예상된다. 10-100배 정도 높은 전류인 1-10 nA는 공구와 공작물이 통전할 경우 발생하는 전류인 1 μA에 비하여 100배 이하로 낮은 수치이기 때문에 공작물과 공구 사이의 터널링 효과로 나타나는 효과로 판단된다.

Fig. 4(a)에서 일부 구간에서 터널링 전류가 급격하게 감소하지 않고 크게 변동이 생기는 영역이 존재한다. 이는 측정 중 외부에서 발생하는 진동이나 재료의 열변형 등 외란 요소에 의해서 공구와 공작물 사이의 거리가 변하게 되고 이 변동이 터널링 전류 변화에 영향을 미쳤을 것으로 예상된다. 또한 Fig. 4(b)에서 관찰할 수 있는 터널링 전류 측정 구간의 변화는 피에조 정밀 이송장치의 반복정밀도에 영향을 받은 것으로 예상된다.

터널링 전류의 이론적 모델에서도 확인할 수 있듯이 인가전압의 크기에 따라 터널링 전류의 크기도 비례하여 커진다. 인가전압이 클수록 전류의 크기가 커지기 때문에 전류를 바탕으로 거리를 측정할 때 거리에 따른 전류의 변화를 민감하게 측정할 수 있다. 그러나 인가 전압이 일정 수준 이상일 경우 공구와

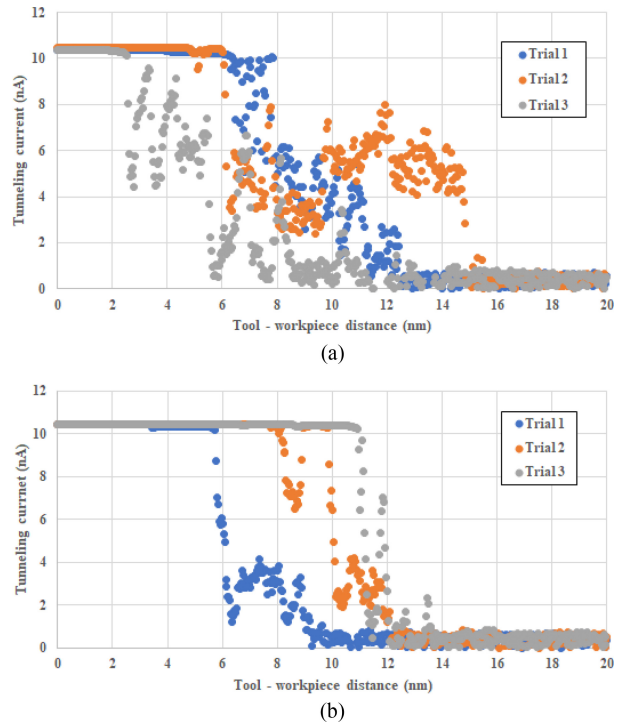


Fig. 4 Tunneling current for tool – workpiece distance at applied voltage: (a) 0.2 V and (b) 1 V

공작물 사이에 터널링 현상이 일어나지 않고 방전이 일어나게 된다. 기존 연구에서 2-3 V 이상의 인가전압이 가해지면 공구와 공작물 사이에 방전이 일어나고 재료 표면에 손상이 일어나는 것을 확인하였다[11]. 따라서, 터널링 현상을 일으키는 적절한 인가전압 범위는 1 V 이하로 설정해야 한다.

터널링 전류를 바탕으로 공구와 공작물 사이의 거리를 측정하는 방식의 정밀도를 평가하기 위하여 같은 터널링 전류값이 발생하는 거리를 측정하고 편차를 계산하였다. 임계값으로 설정한 터널링 전류는 4 nA로 하였고 전류증폭기에서 4 nA 이하의 전류값을 측정할 때 공구와 공작물 사이의 거리를 기록하였다. 10회 반복하며 인가 전압과 공작물 재료에 따른 거리의 평균과 표준편차를 Fig. 5와 같이 정리하였다. 표준편차는 1 V일 경우 약 3.1 nm이고 0.2 V에서는 4.2 nm이다. 표준편차는 인가전압이 클수록 낮아지고 작을수록 커지는 모습을 보인다. 이는 인가전압이 높을수록 측정정밀도가 높음을 시사한다. Fig. 4에서 볼 수 있듯이 전압이 높은 경우에 터널링 전류 변화 민감도가 높아 거리 정밀도가 높아졌을 것으로 예상된다. 터널링이 관측된 위치의 평균값은 약 10-12 nm 수준에 위치하며 인가전압에는 영향을 받지 않는 것으로 보인다.

초정밀 공작기계 상에서 제안한 터널링 측정 방법으로 공구와 공작물 거리를 측정 가능한지 실험을 통해 검증하였다. Fig. 6은 초정밀 공작기계의 이송축을 이송하며 터널링 전류를 측정 한 결과이다. 피에조 스테이지를 움직이면서 실험한 결과에 비하여 전류의 변동이 큰 것을 확인할 수 있다. 이는 초정밀 공작기계 이송축의 진동에 의해 발생하는 것으로 예상된다. 이송축의

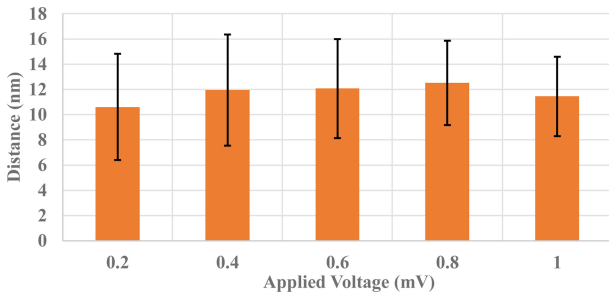


Fig. 5 Averaged distance where the tunneling current is detected; error bars indicate the standard deviation

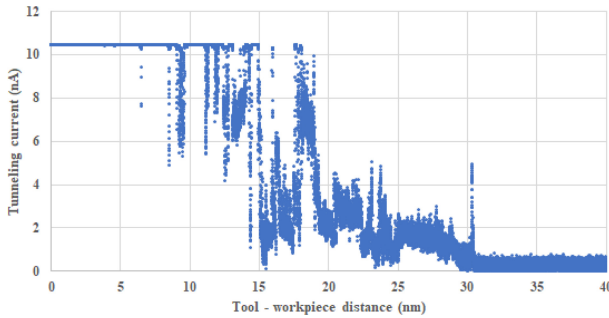


Fig. 6 Tunneling current for tool – workpiece distance in an ultra-precision machine tool at applied voltage of 0.6 V

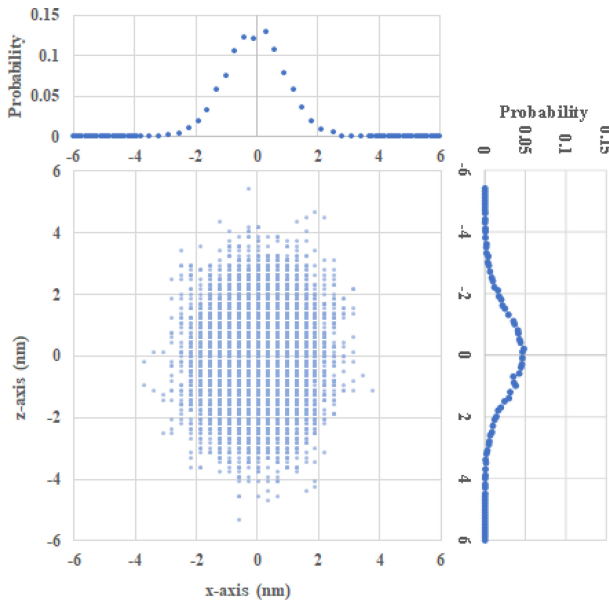


Fig. 7 Position distribution of x-and z-axis stage in the ultra-precision machine tool

레이저 인코더에서 측정하는 각 축의 위치를 측정하면 Fig. 7과 같다. 이송축의 진동은 x축의 경우 6 nm, z축의 경우 7 nm로 터널링 현상이 일어나는 간격에서는 큰 영향이 미친다.

공작기계의 z축을 움직여 기준점으로부터 공작물을 공구로 멀어질 때 터널링 전류가 4 nA 이하로 측정될 경우 공작물의 위치를 기록하였다. 20회 실험에서 공작물의 위치의 평균은

16.5 nm이고 표준편차는 각각 9.8 nm로 측정되었다. 피에조 정밀 이송장치에서 수행한 실험결과에 비하여 초정밀 공작기계에서 큰 표준편차를 보인다. 편차가 더 커지는 이유는 공작기계의 진동과 이송반복도로 판단된다. 공작기계의 이송축 정밀도가 높아지면 제안한 방법을 이용한 측정 방법의 정밀도도 향상될 것으로 예상된다.

### 5. 결론

본 연구에서는 터널링 현상을 이용하여 초정밀 공작기계에서 공구 좌표계를 설정하는 방법에 대해 제안하였다. 나노 단위의 거리에서 발생하는 터널링 전류를 관측하여 공구와 공작물 사이의 거리를 예상하고 이를 바탕으로 공구 좌표계를 설정하였다. 제안한 방법의 측정 정밀도를 확인하기 위하여 피에조 정밀 이송장치 위에서 거리-전류 실험을 수행하였다. 인가전압을 변경하며 터널링 전류를 측정하고 조건별 터널링 전류 변화를 관찰하였다. 터널링 전류의 변화를 감지하여 표준편차 4.2 nm 수준을 갖는 정밀도로 공구와 공작물의 거리를 예측할 수 있음을 보였다. 인가전압이 높아질수록 측정거리 표준편차는 감소하였다. 이는 높은 인가전압에서 터널링 전류가 공구와 공작물 사이 거리에 민감하게 반응하기 때문으로 예측한다.

터널링 현상을 이용하여 거리를 측정하는 방법을 초정밀 공작기에 적용하여 공구와 공작물 사이의 거리를 예측하였다. 초정밀 공작기계 이송축의 진동과 반복도는 제안한 방법의 측정 정밀도를 낮추는 주요한 요인이었다. 제안하는 방법은 높은 정밀도를 갖는 이송축에서 효과적으로 사용할 수 있는 것으로 보인다.

향후 연구에서는 CBN, HSS로 이루어진 공구와 여러 전도체 공작물의 조합에서 터널링 현상을 관찰하고자 한다. 또한, 전도체 재료에서만 사용할 수 있는 한계를 극복하기 위하여 비전도체인 재료에 정전기를 관측하거나 비전도체 위에 금속 증착을 하여 제안한 방법을 적용할 예정이다.

### ACKNOWLEDGEMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2022R1F1A1074622).

### REFERENCES

1. Abdulkadir, L. N., Abou-El-Hossein, K., Jumare, A. I., Odeyeyi, P. B., Liman, M. M., Olaniyan, T. A., (2018), Ultra-precision diamond turning of optical silicon—A review, The International

- Journal of Advanced Manufacturing Technology, 96(1), 173-208.
2. Binnig, G., Rohrer, H., (1983), Scanning tunneling microscopy, *Surface Science*, 126(1-3), 236-244.
  3. Brinksmeier, E., Gläbe, R., Osmer, J., (2006), Ultra-precision diamond cutting of steel molds, *CIRP Annals*, 55(1), 551-554.
  4. Castaño, F., del Toro, R. M., Haber, R. E., Beruvides, G., (2015), Conductance sensing for monitoring micromechanical machining of conductive materials, *Sensors and Actuators A: Physical*, 232, 163-171.
  5. Chen, Y.-L., Shimizu, Y., Cai, Y., Wang, S., Ito, S., Ju, B.-F., Gao, W., (2015), Self-evaluation of the cutting edge contour of a microdiamond tool with a force sensor integrated fast tool servo on an ultra-precision lathe, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 77, 2257-2267.
  6. Clark, L., Shirinzadeh, B., Bhagat, U., Smith, J., (2013), A vision-based measurement algorithm for micro/nano manipulation, *Proceedings of the 2013 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, 100-105.
  7. Kane, E. O., (1961), Theory of tunneling, *Journal of Applied Physics*, 32(1), 83-91.
  8. Kuk, Y., Silverman, P., (1989), Scanning tunneling microscope instrumentation, *Review of Scientific Instruments*, 60(2), 165-180.
  9. Küng, A., Meli, F., Thalmann, R., (2007), Ultraprecision micro-CMM using a low force 3D touch probe, *Measurement Science and Technology*, 18(2), 319.
  10. Maeng, S., Min, S., (2023), Work coordinate setup in the ultra-precision machine tool using electrical breakdown, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 24(5), 745-753.
  11. Min, S., Lidde, J., Raue, N., Dornfeld, D., (2011), Acoustic emission based tool contact detection for ultra-precision machining, *CIRP Annals*, 60(1), 141-144.
  12. Roy, S., Mandal, S., Nagahanumaiah, N., (2016), Tool-workpiece contact detection in micro-milling using wireless-aided accelerometer sensor, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 230(1), 182-187.
  13. Schneider, F., Das, J., Kirsch, B., Linke, B., Aurich, J. C., (2019), Sustainability in ultra precision and micro machining: A review, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 6(3), 601-610.
  14. Trapet, E., Wäldele, F., (1991), A reference object based method to determine the parametric error components of coordinate measuring machines and machine tools, *Measurement*, 9(1), 17-22.
  15. Wang, D.-C., Chou, J.-C., Wang, S.-M., Lu, P.-L., Liao, L.-P., (2003), Application of a fringe capacitive sensor to small-distance measurement, *Japanese Journal of Applied Physics*, 42(9R), 5816.
  16. Yoshioka, H., Shinno, H., Sawano, H., Tanigawa, R., (2014), Monitoring of distance between diamond tool edge and workpiece surface in ultraprecision cutting using evanescent light, *CIRP Annals*, 63(1), 341-344.



#### **Handeul You**

B.S. student in the Department of Mechanical and System Design Engineering, Hongik University. His research interest is precision measurement.

E-mail: gksemf7@gmail.com



#### **Sangjin Maeng**

Assistant Professor in the Department of Mechanical and System Design Engineering, Hongik University. His research interests are precision manufacturing, machine tool, and precision measurement.

E-mail: sjmaeng@hongik.ac.kr

• 특집 • 초정밀가공공정기술(Ultra-precision Machining Process Technology)

취성 파괴 분석기법을 통한 황화아연 소재의 광학적 특성 분석

Quantitative Analysis of Brittle Fracture for Evaluating Optical Properties in Zinc Sulfide Materials

여우종<sup>1,2</sup>, 최환진<sup>1,2</sup>, 전민우<sup>1,2</sup>, 김민철<sup>1</sup>, 김이종<sup>1</sup>, 김건희<sup>3</sup>, 이원균<sup>2,#</sup>  
Woo-Jong Yeo<sup>1,2</sup>, Hwan-Jin Choi<sup>1,2</sup>, Minwoo Jeon<sup>1,2</sup>, Mincheol Kim<sup>1</sup>, I Jong Kim<sup>1</sup>, Geon-Hee Kim<sup>3</sup>, and Wonkyun Lee<sup>2,#</sup>

<sup>1</sup> 한국기초과학지원연구원 연구장비산업본부 (Division of R&D Equipment Industry, Korea Basic Science Institute)

<sup>2</sup> 충남대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Chungnam National University)

<sup>3</sup> 한밭대학교 국방우주공학과 (Department of Defense Space engineering, Hanbat National University)

# Corresponding Author / E-mail: [wklee@cnu.ac.kr](mailto:wklee@cnu.ac.kr), TEL: +82-42-821-6575

ORCID: 0000-0002-3207-5336

KEYWORDS: Brittle fracture (취성 파괴), Ductile cutting (연성 가공), Zinc sulfide (황화아연), Diamond turning (다이아몬드 선삭), Binarization algorithm (이진화 알고리즘)

Zinc sulfide (ZnS) is a widely used material in far-infrared and near-infrared imaging systems due to its exceptional optical transmittance properties. Through a hot isostatic compression process, during manufacturing, ZnS undergoes crystal structure modifications, resulting in increased transmittance across the visible and infrared spectra. However, ZnS exhibits low fracture toughness and irregular crystal orientations, making it prone to brittle fracture during the conventional cutting processes. Such brittleness often leads to surface defects that scatter light, diminishing optical transmittance. Therefore, understanding the conditions conducive to ductile processing is critical and necessitates a thorough brittle fracture analysis. This study introduces a novel quantitative analysis method to determine the occurrence of ductile processing and brittle fracture in ZnS materials after the turning process. To validate the efficacy of this approach, experimental machining was conducted through diamond turning and magnetorheological fluid polishing processes. Subsequently, a comprehensive quantitative assessment of brittle fracture was performed. Additionally, the relationship between brittle fracture and optical transmittance was explored using the proposed analysis method.

Manuscript received: September 30, 2023 / Revised: October 26, 2023 / Accepted: October 30, 2023

1. 서론

황화아연(ZnS) 소재는 높은 광학 투과율을 바탕으로 원적외선 및 근적외선 이미징 시스템에 활용된다. 황화아연의 특징 중 제조과정 시 열간 등압 압축 공정(Hot Isostatic Pressing)을 거치게 되면 결정구조의 변화가 일어나 적외선뿐만 아니라 가시광 영역의 투과율이 높아진다. 이에 따라 다파장 광학 기술을 필요로 하는 다양한 응용분야에서 폭넓게 사용되고 있다[1]. 특히, 자동차 야간 주행 시 안개, 비, 눈과 같은 시인성 저하 문제를 해결하기 위해 고대조비, 고해상도 이미지를 얻을 수 있는 다파장

카메라 기술에 황화아연 소재가 각광받고 있다[2]. 일반적으로 취성 소재의 마무리 공정으로 연마 공정을 채택하지만 절삭 공정에 비해 제조 생산성이 낮은 단점이 있다. 다이아몬드 선삭 공정(Diamond Turning)은 절삭 가공을 기반으로 하여 나노미터 수준의 표면거칠기로 표면을 마무리할 수 있고, 재료 제거율이 높아 광학 부품의 가공 공정으로 사용된다. 하지만 절삭 공정의 특성상 황화아연과 같이 파괴 인성이 낮은 소재의 경우 취성 파괴(Brittle Fracture)가 발생한다. 최종 광학 면에 취성 파괴에 의한 표면 결함이 존재할 경우 빛을 산란시켜 광학 투과율을 감소시킬 수 있다. 따라서 취성 파괴 분석을 통하여 연성 가공

(Ductile Cutting)이 가능한 조건을 탐색하는 것이 중요하다.

취성 파괴 분석을 위해 임계칩 두께는 중요한 요소들 중 하나이다. 취성 소재의 연성 가공에 대한 연구들에 따르면 임계칩 두께를 기준으로 취성 파괴에서 연성 가공으로 전환된다고 알려져 있다[3-7]. 칩두께가 임계값 미만에서는 취성 파괴가 발생하지 않고 연성 가공이 가능하다. Yan 등은 취성 소재를 가공함에 있어 절삭 깊이가 충분히 작으면 칩 형성이 공구 절삭날 앞에서 연성 방식으로 거동함을 보고하였다[3]. 소재마다 임계칩 두께는 다르며, 일반적으로 서브미크론 수준으로 형성된다. Lawn 등은 유리나 세라믹과 같은 취성 소재는 임계 칩 두께가 서브미크론 수준에서 소성 변형이 나타난다고 밝혔다[4]. 이처럼 다양한 소재의 선행연구들과 함께 취성 파괴에 대한 연구들이 수행되었다[5-7]. 앞선 연구들의 취성 파괴 분석 방법은 평삭 공정(Grooving)을 통해 이루어지며, 최초 취성 파괴 지점의 칩 두께를 임계값으로 정의한다[8]. 선삭 공정(Turning)의 취성 파괴 분석의 경우 평삭 공정에서 얻은 임계값을 공구의 반경, 회전 당 이송 간격, 절삭 깊이를 바탕으로 칩 두께로 변환하여 예측한다. 이러한 방법은 가공 중 발생하는 예상하지 못한 표면 결함을 분석하기에 한계가 있다. 또한, 이전 연구의 대부분은 단결정소재에 대한 연구로 다결정소재에 대한 연구는 부족하다. 황화아연의 경우 고온 고압 공정을 거친 후 결정 구조의 방향이 표면에 무작위로 배향되는데, 이러한 다결정 구조의 성질 때문에 결정 방향별 가공 특성이 다르게 나타나게 된다. 이에 따라 평삭 공정을 통하여 최초 취성 파괴 지점을 추적하기에 어려움이 있다.

다결정 구조를 가진 소재의 최초 취성 파괴 지점을 추적하는데 기존 연구의 한계점을 보완하기 위해 본 연구에서는 선삭 공정 후 황화아연 소재에서 발생한 취성 파괴를 분석하기 위해 이진화 알고리즘을 적용한 분석 방법을 제안한다. 이는 광학현미경의 측정만으로 취성 파괴를 분석할 수 있다는 장점이 있다. 제안한 방법의 타당성을 검증하기 위해 다이아몬드 선삭 공정과 자기유변유체 연마 공정을 통하여 가공 실험을 수행한 후, 취성 파괴에 대한 정량적인 분석을 수행하였다. 선삭 공정의 경우 절삭 공정 특성상 취성 소재 가공 시 공구가 지나간 흔적 보다는 취성 파괴가 표면 특성을 대표한다. 반면, 연마 공정의 경우 연마재가 재료 제거한 후 남은 흔적들이 표면 특성을 대표한다. 따라서 취성 파괴를 분석하는데 있어 두 공정의 가공 결과를 비교하여 취성 파괴를 분석하기에 용이하다. 또한, 취성 파괴와 같은 표면 결함이 투과율에 영향을 미치기 때문에 제안한 취성 파괴 분석 방법을 통하여 얻은 표면 결함의 정량적 수치를 투과율과 비교하여 분석하였다.

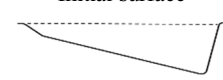
2. 실험 방법

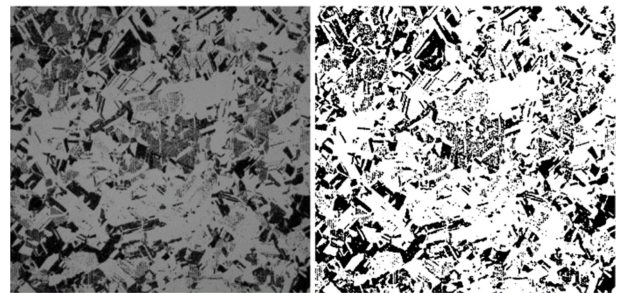
본 연구를 위해 다이아몬드 선삭 가공기(Moore, Nanotech 450 UPL)와 자기유변유체 연마기(QED, Q-flex 300)를 활용하여 가공을 수행하였으며, 직경 50 mm, 두께 10 mm 평면의 황화아연

Table 1 Diamond turning condition

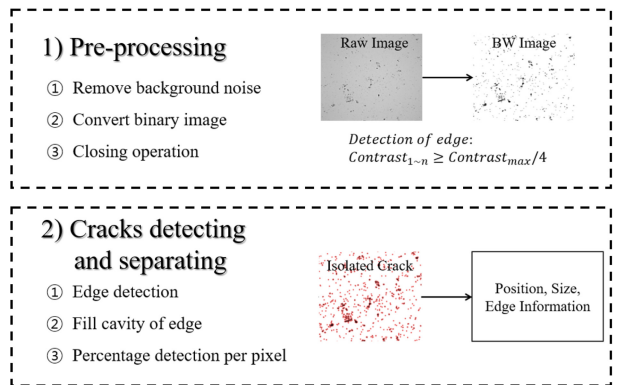
Workpiece	Multispectral ZnS
Tool	Single crystal
Feed rate [ $\mu\text{m}/\text{rev}$ ]	0.1, 0.5, 1, 5, 10
Spindle speed [RPM]	1,000, 3,000, 5,000
Tool rake angle [deg]	0, -10, -20
Tool radius [mm]	1
Depth of cut [ $\mu\text{m}$ ]	1

Table 2 Magnetorheological polishing condition

Workpiece	Multispectral ZnS
Abrasive	Cerium oxide, Diamond
Removal method	Initial surface  Wedged surface
Removal amount [ $\mu\text{m}$ ]	0-2



(a) Raw image (b) Black and white image



(c) Schematic representation of the binarization algorithm

Fig. 1 Convert from a raw image to a black-and-white image through the binarization algorithm

소재에 대하여 가공 후 백색광 간섭계와 광학현미경을 통하여 가공면을 관찰하였다. 다이아몬드 선삭 공정의 경우, Table 1과 같이 표면 특성의 차이를 확인할 수 있는 가공 인자인 이송 속도, 스핀들 회전속도, 공구 경사각, 공구 반경, 가공 깊이를 선정하여 가공하였다. 자기유변유체 연마 공정의 경우, 세리아 슬러리와

Table 3 Surface analysis after diamond turning

Cutting condition	Feed rate [ $\mu\text{m}/\text{rev}$ ]	0.1	1	5	5	10
	Spindle speed [RPM]	3,000	1,000	5,000	1,000	3,000
	Rake angle [deg]	0	-20	-10	-10	0
Raw image						
Black and white image						
Roughness sa [nm]	1.0	4.1	11.9	18.3	46.3	
Defect ratio [%]	0.6	4.4	22.0	31.1	52.5	

다이아몬드 슬러리를 사용하여 Table 2와 같이 Wedge가공 방법을 이용하여 연마량에 따른 표면 특성을 분석하였다. 측정은 백색광 간섭계를 통해 표면거칠기 인자인 산술 평균 거칠기와 광학현미경을 활용하여 표면 상태를 측정 후 이진화 알고리즘으로 정량화한 값을 비교분석 하였다.

취성 파괴 분석 방법은 Fig. 1과 같이 광학현미경을 통해 얻은 이미지 데이터를 픽셀별로 분류하고, 이진화를 통해 각 픽셀의 대비 값을 0과 1로 나누었다. 일반적으로 이진화를 할 때 픽셀값을 특정 값과 비교하여 특정 값보다 크면 1, 작으면 0으로 설정하는데, 비교대상이 되는 이 특정값은 이미지 대조비를 통해 결정된다. 여기서, 이미지 대조비는  $contrast_{1-n} \geq Contrast_{max}/4$ 로 정의된다. 즉, 대조비를 0에서 1 사이의 값으로 구분하여 픽셀 값이 0.25보다 크면 1로 정의한다. 상대적으로 어두운 취성 파괴 부분은 검은색으로, 연성 가공 부분은 흰색으로 설정한다. 0으로 분류된 부분은 취성 파괴가 발생한 부분으로 정의한다. 이미지 속 취성 파괴된 부분의 픽셀을 백분율로 분석하여 취성 파괴 정도를 정량화하였다.

제안한 취성 파괴 분석 방법을 검증하기 위해 절삭 공정과 가공 특성이 다른 자기유변유체 연마 공정을 통해 상대적으로 취성 파괴가 없는 표면을 얻었다. 취성 파괴에 대한 데이터만 얻기 위해 각 공정이 끝난 후 에틸알코올(Ethyl Alcohol)과 초음파 진동 세척기를 이용하여 가공 이후 발생한 칩, 연마재 및 잔여물을 깨끗하게 세척하였다. 공정에 따른 표면 특성을 바탕으로 가시광 및 근적외선 영역의 광 투과율을 분광 광도계(PerkinElmer, LAMBDA 1050+)를 이용하여 측정함으로써 취성 파괴와의 관계를 분석하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 이진화 알고리즘을 통한 취성 파괴 분석

다이아몬드 선삭 공정의 가공 인자들을 통해 가공한 결과를

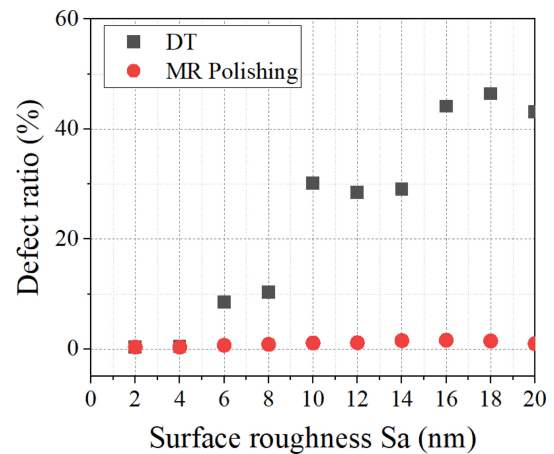
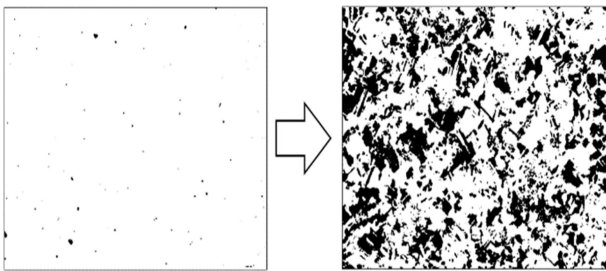


Fig. 2 Defect ratio according to surface roughness (Sa) by diamond turning and magnetorheological fluid polishing

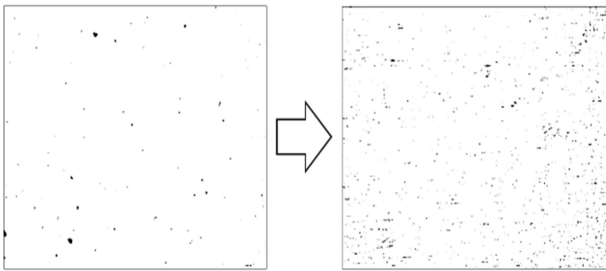
분석하였다. Table 3는 공구 경사각 0도, 스피들 회전속도 3,000 RPM 일 때, 회전 당 이송 간격에 따른 결과이다. 실험한 가공 인자에 한하여 회전당 이송 간격이  $1 \mu\text{m}/\text{rev}$  이하에서는 연성 가공이 일어나고,  $5 \mu\text{m}/\text{rev}$  이상에서는 취성 파괴에 따른 표면 결함이 발생하는 것을 알 수 있다. 이때, 표면 거칠기와 표면 결함 비율이 함께 증가하는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 선삭 공정만으로는 제안한 취성 파괴에 대한 분석이 유의미한지 판단하는데 한계가 있다.

#### 3.2 공정에 따른 취성 파괴 분석 비교

본 연구에서 제안한 취성 파괴에 대한 분석 방법을 검증하기 위해 상대적으로 취성 파괴가 일어나지 않는 자기유변유체 연마 공정에 대한 가공을 수행하였다. Fig. 2는 공정별 표면 거칠기에 따른 표면 결함 비율을 나타낸 것이다. 다이아몬드 선삭 공정의 경우, 앞선 결과를 바탕으로 표면 거칠기가 커짐에 따라 표면 결함 비율도 커짐을 확인하였다. 하지만 자기유변유체 연마 공정의 경우 거칠기가 늘어남에도 표면 결함 비율은 낮게 유지됨을 알 수 있다. Fig. 3에서도 볼 수 있듯이 다이아몬드 선삭



(a) Black and white image of machined surface after diamond turning (surface roughness (Sa) 2 nm to 20 nm & brittle fracture 0.35% to 43.09%)



(b) Black and white image of machined surface after magnetorheological polishing (surface roughness (Sa) 2 nm to 20 nm & brittle fracture 0.35% to 0.98%)

Fig. 3 Brittle fracture analysis after the process

공정의 경우 표면 거칠기가 2 nm일 때 표면 결함 비율이 0.35% 이고, 표면 거칠기가 20 nm로 늘어남에 따라 표면 결함 비율이 43.09%로 비례함을 알 수 있다. 반면 자기유변유체 연마 공정은 표면 거칠기가 20 nm로 커지더라도 표면 결함 비율이 0.98%로 낮은 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 연마 공정 특성상 절삭 공정에 비해 취성 파괴가 일어나지 않는 특징때문에 표면 결함 비율이 낮게 유지되는 것으로 판단된다.

결과적으로, 다이아몬드 선삭 공정과 자기유변유체 연마 공정을 비교함으로써 취성 파괴를 분석할 때 표면 결함 비율로 분석하는 것이 기존 분석 방법을 보완할 수 있는 방법임을 알 수 있다. 추가로 취성 파괴가 발생한 렌즈와 취성 파괴가 발생하지 않은 렌즈의 투과율을 비교함으로써 제안한 취성 파괴 분석 방법의 타당성을 검증할 필요가 있다.

### 3.3 가시광 및 근적외선 투과율 분석

투과율은 빛이 렌즈를 통과할 때 손실 없이 효율적으로 전달 되는지를 나타내는 지표이다. 투과율이 높을수록 렌즈는 빛을 효율적으로 전달하고 최종 이미지의 품질이 높아진다. 렌즈로 빛이 투과할 때 표면 결함이 있을 경우 빛이 산란되어 광학 투과율을 감소시킬 수 있다. 따라서 광학 투과율은 취성 파괴의 영향을 확인할 수 있는 중요한 요소이다. 황화아연의 경우 가시광 및 근적외선 파장에서 투과율이 높은 특징이 있기 때문에 취성 파괴와의 관계를 확인하기 위해 350-2,500 nm에서의 투과율을 측정하였다.

Table 4 Comparison of the surface analysis by diamond turning and magnetorheological fluid polishing

Process	DT	MR polishing
Roughness Sa [nm]	19.4	21.3
Defect ratio [%]	43.09	0.98
Experimental condition	Spindle speed: 1,000 rev/min Rake angle: 0° Feed rate: 5 μm/rev Uniform removal: 1 μm	

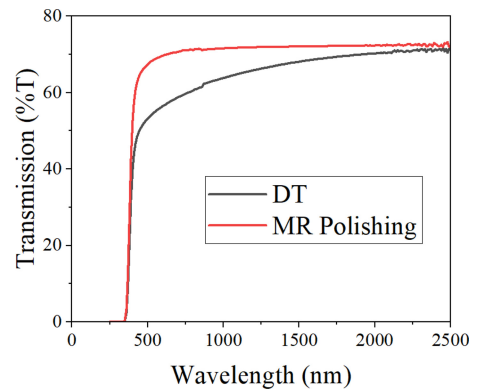


Fig. 4 Comparison of the transmittance by diamond turning and magnetorheological fluid polishing

Table 4는 다이아몬드 선삭 공정과 자기유변유체 연마 공정을 거친 후 특정 표면의 상태이다. 연마 공정의 경우 렌즈에 빛이 모두 입사되도록 전체 영역을 균일하게 1 μm 가공하였다. 표면 거칠기의 경우 두 공정 모두 20 nm로 동일함을 알 수 있다. 하지만 표면 결함 비율의 경우 다이아몬드 선삭 공정은 43.09%, 자기유변유체 연마 공정은 0.98%로 차이가 있음을 확인할 수 있다. Fig. 4와 같이 두 조건에 대하여 투과율을 측정하여 비교분석하였다. 측정된 파장대 전 영역에서 다이아몬드 선삭 공정의 투과율보다 자기유변유체 연마 공정의 투과율이 높게 측정되었고, 가시광 영역 약 500 nm 부근에서 가장 큰 차이를 보였다. 표면 거칠기가 20 nm로 동일하지만 투과율에 차이가 있다는 것은 확인하였고, 결과적으로 가시광 및 근적외선 영역의 광학 투과율은 표면 거칠기보다는 본 연구에서 제안한 취성 파괴 분석 방법인 표면 결함 비율과 관계 있음을 확인하였다.

### 4. 결론

본 연구에서는 황화아연 소재에 대하여 선삭 공정 후 발생한



취성 파괴를 정량적으로 분석하기 위해 이진화 알고리즘을 제안하였다. 다이아몬드 선삭 공정과 자기유변유체 연마 공정을 통해 표면 특성을 분석하여 제안한 취성 파괴 분석에 대한 접근법의 타당성을 검증하였다. 최종적으로 가시광 및 근적외선 파장대의 투과율을 비교하여 제안한 표면 결함 비율 분석방법이 취성 파괴를 분석하는데 유의미함을 확인하였다. 결과적으로, 황화아연 표면의 취성 파괴 정도를 분석하는데 광학 현미경 측정과 이미지 분석 방법을 적용할 수 있다는 결론을 내릴 수 있다.

## ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported in part by the development of smart sensing-based lighting optical parts and module technology (20017383) funded by the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE, Korea). Also this work was supported in part by the National Research Foundation of Korea (NRF2021M3D1A204645813).

## REFERENCES

- Harris, D. C., Baronowski, M., Henneman, L., LaCroix, L., Wilson, C., Kurzius, S., Burns, B., Kitagawa, K., Gembarovic, J., Goodrich, S. M., (2008), Thermal, structural, and optical properties of Cleartran® multispectral zinc sulfide, *Optical Engineering*, 47(11), 114001.
- Bréhault, A., Calvez, L., Adam, P., Rollin, J., Cathelinaud, M., Fan, B., Merdrignac-Conanec, O., Pain, T., Zhang, X.-H., (2016), Moldable multispectral glasses in GeS<sub>2</sub>-Ga<sub>2</sub>S<sub>3</sub>-CsCl system transparent from the visible up to the thermal infrared regions, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 431, 25-30.
- Yan, J., Yoshino, M., Kuriagawa, T., Shirakashi, T., Syoji, K., Komanduri, R., (2001), On the ductile machining of silicon for micro electro-mechanical systems (MEMS), opto-electronic and optical applications, *Materials Science and Engineering: A*, 297(1-2), 230-234.
- Lawn, B., Evans, A., (1977), A model for crack initiation in elastic/plastic indentation fields, *Journal of Materials Science*, 12, 2195-2199.
- Blake, P. N., Scattergood, R. O., (1990), Ductile-regime machining of germanium and silicon, *Journal of the American Ceramic Society*, 73(4), 949-957.
- Fang, F., Wu, H., Liu, Y., (2005), Modelling and experimental investigation on nanometric cutting of monocrystalline silicon, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45(15), 1681-1686.
- Venkatachalam, S., Li, X., Liang, S. Y., (2009), Predictive modeling of transition undeformed chip thickness in ductile-regime micro-machining of single crystal brittle materials, *Journal of Materials Processing Technology*, 209(7), 3306-3319.
- Liu, K., Li, X., (2001), Ductile cutting of tungsten carbide, *Journal of Materials Processing Technology*, 113(1-3), 348-354.



**Woo-Jong Yeo**

Ph.D. candidate in the School of Mechanical Engineering, Chungnam National University. His research interests include ultra-precision engineering and optical components machining.

E-mail: woojong0330@kbsi.re.kr



**Geon-Hee Kim**

Professor in Department of Defense Space Engineering, Hanbat National University. His research interests include optical devices and ultra-precision manufacturing.

E-mail: ghkim@hanbat.ac.kr



**Hwan-Jin Choi**

Research Engineer in Division of R&D Equipment Industry, Korea Basic Science Institute. His research interests include ultra-precision freeform surface machining and large optical components machining.

E-mail: chj1212@kbsi.re.kr



**Wonkyun Lee**

Associate Professor in the School of Mechanical Engineering, Chungnam National University. His research interests include smart machine tool, robotic machining systems and digital twin.

E-mail: wklee@cnu.ac.kr



**Minwoo Jeon**

Research Engineer in Division of R&D Equipment Industry, Korea Basic Science Institute. His research interests include the ultra-precision manufacturing technology and the material removal mechanism.

E-mail: mwjeon@kbsi.re.kr



**Mincheol Kim**

Senior Researcher in Division of R&D Equipment Industry, Korea Basic Science Institute. His research interests include fabrication of sub-nanometer scale ultra-precision optical components.

E-mail: mk1m@kbsi.re.kr



**I Jong Kim**

Principal Researcher in Division of R&D Equipment Industry, Korea Basic Science Institute. His research interests include the Bragg scattering on the complicated optical elements.

E-mail: ijkim@kbsi.re.kr

• 특집 • 초정밀가공공정기술(Ultra-precision Machining Process Technology)

# Fabrication and Characterization of Automotive Aspheric Camera Lens Mold based on Ultra-precision Diamond Turning Process

정지영<sup>1,2</sup>, 최환진<sup>3</sup>, 박종성<sup>4</sup>, 심종근<sup>2</sup>, 김영재<sup>3</sup>, 곽은지<sup>2</sup>, 최두선<sup>2</sup>, 제태진<sup>2,#</sup>, 한준세<sup>1,2,#</sup>  
Ji-Young Jeong<sup>1,2</sup>, Hwan-Jin Choi<sup>3</sup>, Jong Sung Park<sup>4</sup>, Jong-Keun Sim<sup>2</sup>, Young-Jae Kim<sup>3</sup>, Eun-Ji Gwak<sup>2</sup>,  
Doo-Sun Choi<sup>2</sup>, Tae-Jin Je<sup>2,#</sup>, and Jun Sae Han<sup>1,2,#</sup>

1 과학기술연합대학원대학교 나노메카트로닉스공학부 (School of Nano Mechatronics Engineering, University of Science & Technology)  
2 한국기계연구원 나노공정장비연구실 (Department of Nano Manufacturing Technology, Korea Institute of Machinery & Materials)  
3 한국기초과학지원연구원 연구장비산업본부 (Division of R&D Equipment Industry, Korea Basic Science Institute)  
4 디지털옵틱 전장개발팀 (Department of Automotive Electric Parts Development, Digital Optics Co., Ltd.)  
# Corresponding Authors / E-mail: jtj@kimm.re.kr, TEL: +82-42-868-7142, ORCID: 0000-0002-5945-9284  
E-mail: jshan@kimm.re.kr, TEL: +82-42-868-7747, ORCID: 0000-0001-9026-3418

KEYWORDS: Ultra-precision diamond turning, Aspheric lens, Automotive camera module, Injection mold, Compensation machining

Here in, a high-quality automotive camera lens was developed based on an ultra-precision diamond turning core and cyclic olefin polymer (COP) injection molding process. To improve surface roughness and achieve the accuracy of plastic injection molding lens, systematic mold core machining process was developed and demonstrated using the diamond turning machine. The cutting tool path was generated by using NanoCAM 2D, and it was partly revised to prevent interference between the cutting tool and the workpiece. After the initial machining using the generated tool path, the compensation-cutting process was conducted based on the measured surface profile of an initially machined surface. After two times of compensation machining, the fabricated core mold showed a shape error of 100 nm between peak to valley (PV) and Arithmetic mean roughness ( $R_a$ ) of 3.9 nm. The performance of the fabricated core was evaluated using an injection molding test. Injection molded aspheric plastic lens showed contrasts that were higher than 55% at 0.0 F, 30% at 0.3 F, and 20% at 0.7 F without any moiré phenomenon that meets the specification for automotive vision module with 1MP and 140° field of view.

Manuscript received: September 27, 2023 / Revised: October 19, 2023 / Accepted: October 27, 2023

## NOMENCLATURE

$z(r)$  = Height of Aspheric Surface Profile  
 $c$  = Curvature  
 $A_n$  = Aspheric Coefficient  
 $k$  = Conic Constant  
 $r$  = Distance from Center of Lens  
 $R$  = Radius of Lens

## 1. Introduction

The optical lens is a key component of a camera module that concentrates or diffuses light onto the image sensor. The lens can be classified into spherical, aspherical, free-form, etc. according to the shape of the surface profile [1-3]. Typically, in the case of a spherical lens, there is spherical aberration between the focused light beam from the centre and the outside of the lens, which degrades the quality of the image. To reduce the aberration, the lens module is composed of a large number of concave and convex

lenses. However, there are problems such as increased thickness and weight, and reduced optical efficiency. In contrast, aspherical lenses have the shape of a surface profile rather than a part of a sphere or cylinder. Therefore, problems such as spherical aberration and shape distortion can be improved. Aspherical lenses also have the advantage of being thinner than spherical lenses [4]. Due to these advantages, ultra-precision aspherical lens modules are widely used for high integration and high functionality of advanced devices in high technology industries such as smartphones, automobiles, augmented reality (AR) and virtual reality (VR), and medicine [5-7].

In the mass production of ultra-precision aspherical plastic lenses, the multi-cavity injection process using multiple mould cores is used. The shape error and surface roughness of the mould core play a major role in the quality of the aspherical plastic lens produced in each cavity and the quality of uniformity between cavities. In addition, the difference in the quality of manufactured lenses between cavities requires additional processing costs for optical axis alignment and performance evaluation [8,9]. Therefore, there is a need for research into the manufacturing technology of aspherical mould cores with high shape accuracy and ultra-smooth surface as close as possible to the optically designed shape.

Typically, polishing, grinding and diamond turning processes have been widely studied as manufacturing methods for ultra-precision aspherical lens shape mold cores [10,11]. The polishing process has the advantages of a shallow deformed layer, no cutting tool marks on the machined surface, and superior surface roughness and shape accuracy [12]. However, since the polishing process requires a larger contact area between the polishing tool and the workpiece compared to the ultra-precision cutting process, it is difficult to apply when the mold core with small effective diameter has steep curvature, such as an automotive device lens. The grinding process is widely used to machine the aspherical lens molds made of high-hardness materials with high precision [13,14]. However, in the case of soft material, such as electroless nickel plating, which is mainly used in the injection molding process, the machining efficiency is reduced by the load of the grinding tool. In addition, a post-treatment process is required to remove the many scratches on the machined surface after the grinding process [15].

The diamond turning process has the advantage that it is easier to machine small aspherical lenses with steep curvature compared to the polishing process by using a designed tool shape with micro to millimeter scale size considered with the shape of the aspherical lens [16-18]. In addition, the DTM process has the advantage that the process can produce a mold core with a surface roughness of a

polishing level. However, since the shape accuracy and surface quality of the mold core are greatly affected by the accuracy of the tool position, the setting state of the workpiece, the machining conditions and the accuracy of the cutting tool path, process optimization studies are required.

Lee et al. conducted a study on the correction of residual form error in ultra-precision aspherical surface machining [19]. The shape error of the machined surface according to the decentering type of the cutting tool was investigated, and the effect on the shape accuracy according to the number of correction operations was analyzed. Pun et al. conducted research on diamond turning and injection molding technology using a uniquely structured fixture as an efficient process cost approach for manufacturing micro-aspherical lenses [20]. As a result, an aspheric lens with a form error of 230 nm was produced. However, these studies were insufficient in terms of process optimization to reduce shape error and evaluation of optical performance via the injection molded lenses for high quality industrial automotive vision application.

In this study, in order to improve the shape accuracy and surface quality of the aspheric lens core, the diamond turning process was broken down and optimized in detail. Through these processes, the ultra-precision aspheric lens core was obtained with a shape error of less than 100 nm and a surface roughness of less than 5 nm. In addition, the injection-molded aspherical plastic lens showed a modulation transfer function (MTF) value of about 55% at 75 lp/mm, which meets the requirements of automotive vision application. Through this process, an optical lens required for a high-performance automotive camera module was developed.

## 2. Experiment

### 2.1 Ultra-precision Diamond Turning

Figure 1 is a schematic diagram of an ultra-precision machining system (Nanotech 350FG, Moore Nanotechnology) used in this study. This machining system consisted of X, Y and Z axes with a resolution of 1 nm and the C axis of an ultra-precision air bearing spindle with a maximum speed of 10,000 RPM. Figure 2 shows the SCD cutting tool used to machine the aspheric lens mold core. To prevent interference between the cutting tool and the workpiece, it was designed with a nose radius of 105.08  $\mu\text{m}$ , a window angle of 150° and a clearance angle of 15°. The cutting tool path was designed using NanoCAM 2D, developed by Moore Nanotechnology. The material of the mold core was electroless Ni plated, which was widely used for injection mold for optical component. The machining of the aspherical lens mold was

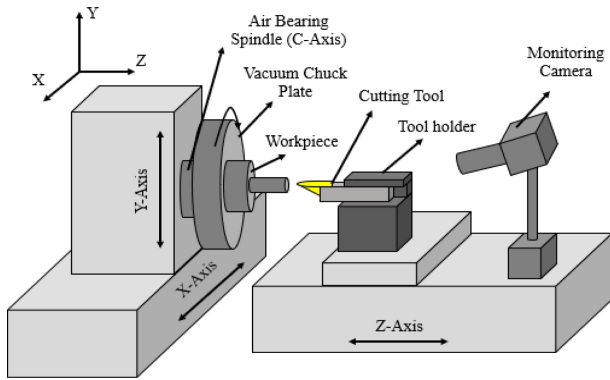


Fig. 1 Schematic of diamond turning to fabricate the core mold for the aspherical lens

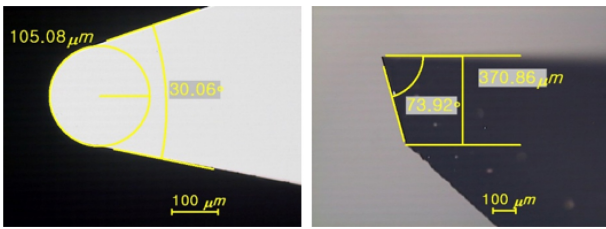


Fig. 2 Single crystal diamond cutting tool with nose radius of 105.08 μm, window angle of 150° and clearance angle of 16.08°

Table 1 Machining conditions for machining of the aspheric lens core mold

Machine tools	Nanotech 350 KFG
Cutting tool	Single crystal diamond (nose radius of 105.08 μm, window angle of 150° and clearance angle of 16.08°)
Workpiece	Electroless Ni-plated on the STAVAX
Spindle speed	1,200 RPM
Feed rate	Rough 10 mm/min, Fine 1 mm/min
Depth of cut	Rough 5 μm, Fine 1 μm

divided into rough machining and fine machining. In both machining steps, the spindle speed was the same at 1,200 RPM. The cutting depth and feed were set to 10 mm/min and 5 μm for rough cutting and 1 mm/min and 1 μm for fine cutting, respectively.

**2.2 Surface Profile Measurement**

The shape of the machined core molds was measured using a FORMTALY SURF (PGI-1240, Taylor Hobson), which is a contact-type surface shape measuring system. The shape error of the machined surface was evaluated as the PV profile, which was the difference between the designed shape and the measured shape. The surface roughness of the machined mold was also evaluated



Fig. 3 Surface profile measurement systems (Left is PGI-1240 of Taylor Hobson, right is UA3P of PANASONIC)



Fig. 4 Experimental set-up for plastic injection molding (SE50D, sumitomo)

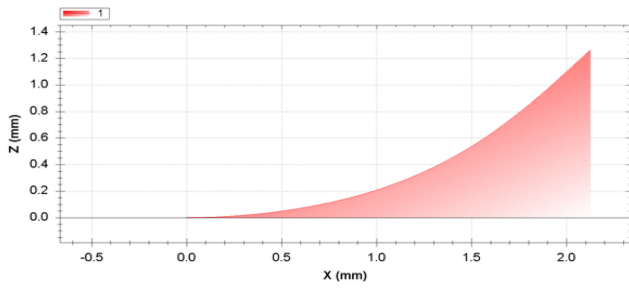
Table 2 Injection molding conditions for plastic aspheric lens

Injection molding machine	SE50D, sumitomo
Injection material	Cyclic Olefin Polymer (COP)
Molding temperature	135°C
Pressure rate	Filling 1,000 kgf/cm <sup>2</sup> Packing 850 kgf/cm <sup>2</sup>
Process time	Filling 2.82 sec Packing 8 sec

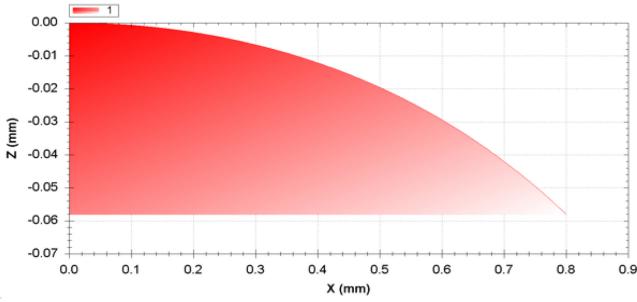
by Ra. After the final correction machining, an ultra-precision three-dimensional measurement (UA3P, Panasonic) was used to prevent scratches on the surface of the lens core. The measuring systems used are shown in Fig. 3.

**2.3 Precision Plastic Injection Molding**

Figure 4 shows the electric injection machine (SE50D, Sumitomo) used to manufacture the aspherical lens. The maximum clamping force of this system is 50 t, the maximum filling and packing pressure is 223 MPa. And the maximum injection speed is 500 mm/sec. The conditions of the injection molding process for plastic aspherical lens are summarized in Table 2. The temperature of the upper and lower mold cores was set to 135°C. The filling and packing pressures were set to 1,000 and 850 kgf/c, respectively. The filling time was set to 2.82 seconds and the cooling time was set to 30 seconds.



(a) Profile of the upper mold core



(b) Profile of the lower mold core

Fig. 5 Surface profile of the aspherical mold core considering shrink rate after injection molding (a) profile of the upper mold core, (b) profile of the lower mold core

### 3. Results and Discussion

#### 3.1 Tool Path Generation

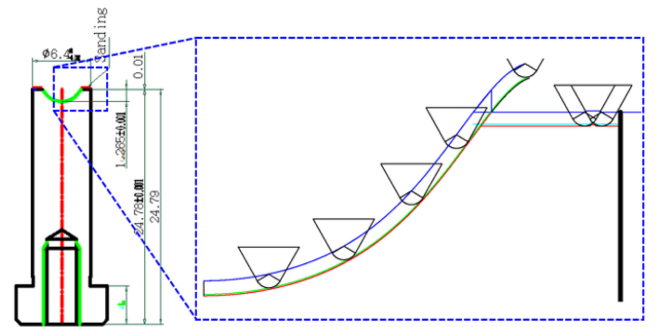
An ultra-precision diamond turning process was used and optimized to produce a high quality automotive lens mold core. Before machining the lens core, the tool and workpiece were precisely positioned to improve the shape accuracy and surface roughness of the core. Although there has been a lot of research related to the ultra-precision lens core machining process and conditions, ultra-precision setting was another key process to produce high-quality lens. The ultra-precision setting process was optimized and developed for single crystal diamond cutting tool and lens core workpiece. The first step of ultra-precision adjustment was to construct the tool path and check the interference. Typically, the profile height of the aspheric surface can be calculated by equation 1 [21-23].

$$z(r) = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2R^2}} + A_2r^2 + A_4r^6 + \dots + A_{20}r^{20} \quad (1)$$

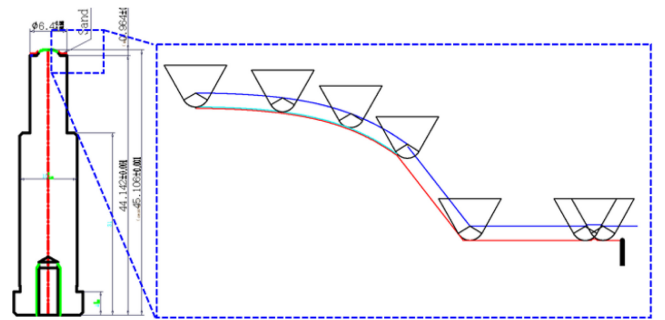
$c$  is the curvature of the aspheric surface,  $r$  is the distance from the center of the lens,  $k$  is the conic constant, and  $A_n$  is the aspheric coefficient. Figures 5(a) and 5(b) show the designed surface profiles for 1 megapixel (MP), 140° field of view (FOV) high quality automotive lens core. To take into account the shrinkage of injection molding, the shape of the lens core was redesigned by

Table 3 Surface coefficients of upper core and lower core

Coefficients	Upper core	Lower core
Radius	2.64605554	6.98293792
Curvature	0.38095043	0.14435414
Conic constant	-1.12766389	0
$A_4$	0.0141425127	0.02496966373
$A_6$	0.00621282889	0.00811382560
$A_8$	-0.00104574955	-0.00180384594



(a) Cutting tool path for upper core



(b) Cutting tool path for upper core

Fig. 6 Simulated cutting tool path considering interfaces between core mold and cutting edge (a) upper core mold, (b) lower core mold

multiplying the original aspheric coefficient by 1.004, as shown in Table 3. Especially for the 1 MP, 140° FOV automotive lens core, a flat land structure is required to form an etched surface region by grinding for scattering the incident light. Considering the tool diameter, the tool path was generated and simulated while checking the interference in the rib and flat land region as shown in Figs. 6(a) and 6(b).

#### 3.2 Compensation Machining

Automotive lens core was machined based on precisely positioned diamond turning process setting. To achieve ultra-high quality core surface without polishing process, compensation machining process is required. Considering the machining

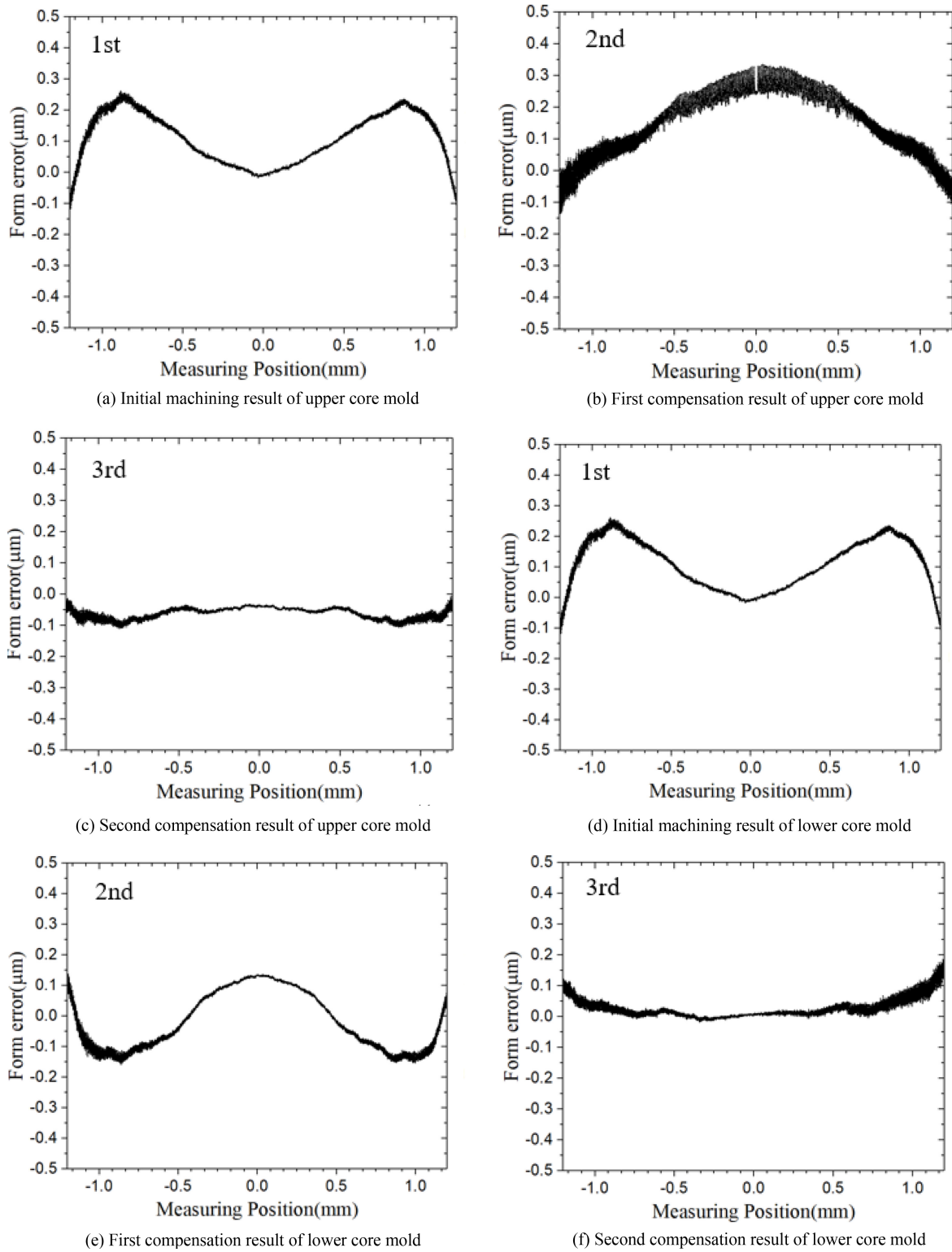


Fig. 7 Form accuracy of machined surface by compensation machining (a), (b) and (c) are the initial machining, first and second compensation results of the upper core, (d), (e) and (f) are the initial machining, first and second compensation results of the lower core

circumstances and equipment characteristics, the compensation machining toolpath was regenerated using the Form Talysurf measurement results. Figure 7 shows the trends of upper and lower

core form accuracy with respect to the number of compensation operations.

Initial machining results showed symmetrical convex shape

accuracy error trends. Due to the ultra-precision setting, the maximum peak-to-valley form accuracy was about 500 nm at the center position. Considering the machining results, the second compensation machining toolpath was redesigned in the reverse shape of the first machining shape accuracy results.

After applying concave compensation machining, the trend of shape accuracy was reversed. Although the maximum peak-to-valley was reduced to about 300 nm, the trend of shape accuracy was reversed due to excessive concave type compensation machining. Reverse trend was also observed in lower core. The maximum peak-to-valley region observed at 0.5 mm length becomes a negative peak-to-valley region, even though the maximum error was reduced.

It can be assumed that the reverse trend was caused by excessive compensation machining at outside of core mold. The maximum peak-to-valley value change, 80% of the gain was applied to the second compensation machining toolpath generation. After the machining, the shape accuracy was reduced to about 150 nm and 100 nm in the upper and lower cores, respectively.

In this study, the number of two compensation machining were performed to reduce the shape error. This is because the optimization of the compensation amount was not performed in advance in consideration of the cutting characteristics (such as the change of cutting force due to the change of cutting surface area) caused by the change of the contact position of the cutting tool according to the slope of the aspherical surface. If this is improved, it is thought that it can contribute to reducing the number of compensation operations and improving machining accuracy. In addition, it is expected that the results of this experiment can be further improved by applying on-machine measurement technology to match the machining environment and the measurement environment, and by continuously stabilizing the machining environment.

In order to protect the core surface quality for the injection molding test, the workpiece was finally machined, and the quality of the ultra-precision machined core was characterized using a non-contact ultra-high accuracy 3D profilometer (UA-3P). Figure 8 shows the measured shape accuracy and surface roughness for the upper and lower cores after four times of compensation machining. The PV value of the shape accuracy of the upper core was 99 nm, and the PV value of the shape accuracy of the lower core was 93 nm. The roughness of the upper and lower cores was 3.9 nm and 3.1 nm respectively.

Based on optimized ultra-precision machining setting and compensation machining procedure, high-quality aspheric lens mold core for automotive vision module was successfully produced without showing any scratches, as shown in Fig. 9. In

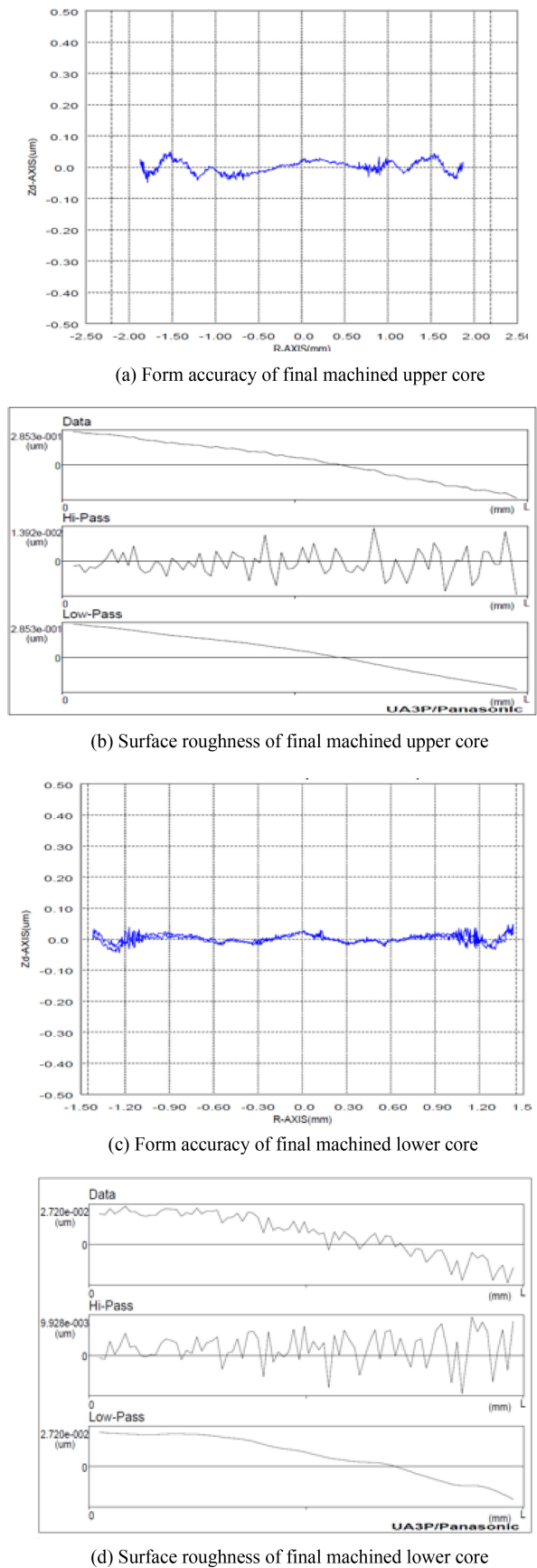


Fig. 8 Shape accuracy and surface roughness of final machined upper and lower molds measured by UA3P



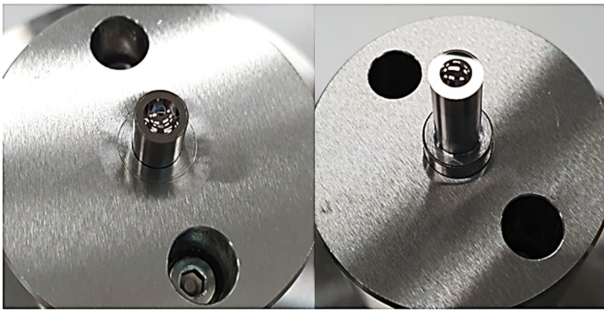


Fig. 9 Ultra-precisely machined core molds for aspheric lens (left is upper core and right is lower core) with shape accuracy of 100 nm, and surface roughness of 5 nm

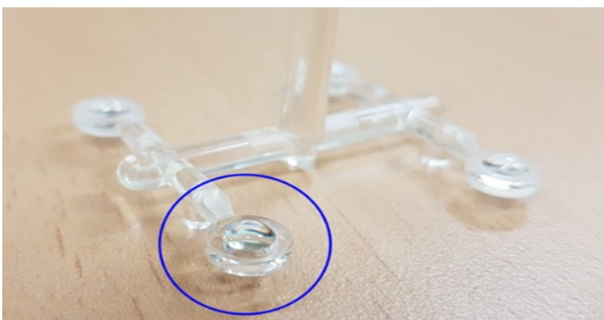


Fig. 10 Ultra-precision plastic injection molded automotive lens

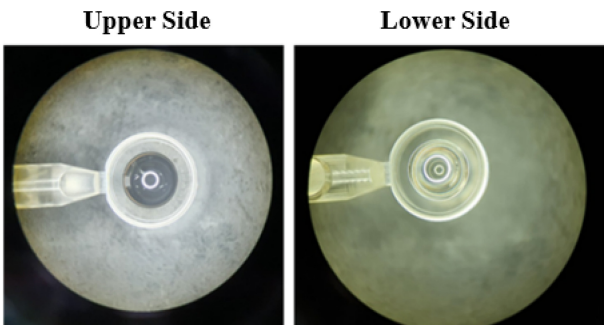
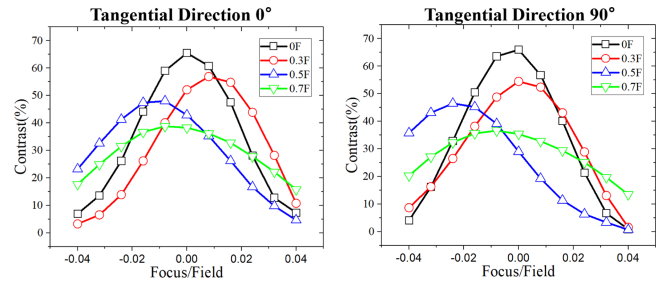


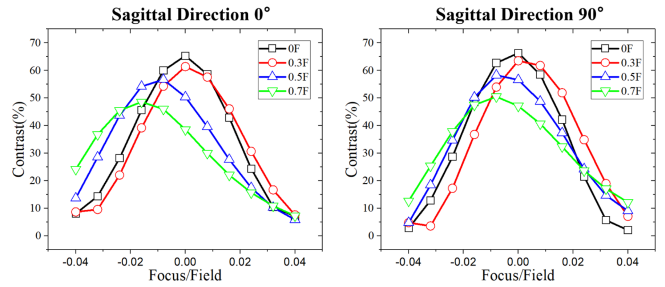
Fig. 11 Microscope image of upper and lower side automotive lens



Fig. 12 The assembled lens modules for automotive vision applications



(a) MTF performance in tangential direction 0° and 90°



(b) MTF performance in sagittal direction 0° and 90°

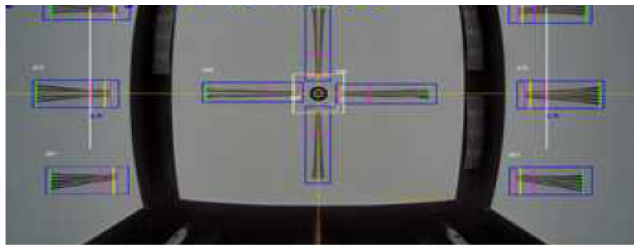
Fig. 13 MTF performance of the injection molded aspheric lens (a) MTF performance in tangential direction, (b) MTF performance in sagittal direction

particular, the designed land structure and aspheric lens structure were precisely machined in a combined single-path. Any heavy tool marks and scratches on the machined surface were not observed in the lens mold core from an optical point of view. The performance of the fabricated ultra-precision lens core was characterized after the injection molding process.

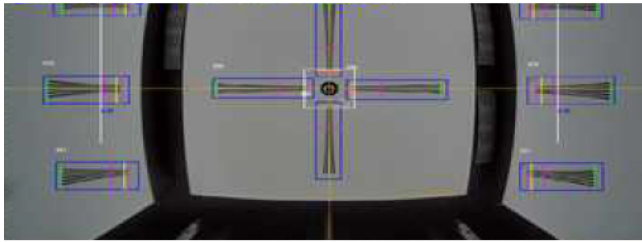
### 3.3 Performance Evaluation with Injection Molding

The validity of fabricated ultra-precision mold core was evaluated by injection molding process. COP resin was used to produce injection molded plastic lens. Due to the high-quality surface of the molded core, no defects such as tool marks, scratches, light scattering, moiré interference were observed after molding test. Figure 10 shows the injection molded lens, and Figure 11 shows the microscope surface image of the top and bottom sides. To measure the optical performance of the injection-molded aspherical plastic lens, it was assembled into a micro-lens module for automotive vision applications with specifications of 1Mega and H140, as shown in Figure 12.

The MTF in tangential and sagittal directions were higher than 55% at 0.0F, 30% at 0.3F and 20% at 0.7F. These results meet the design specifications required by the company that wants to apply the developed lens module to automotive vision. Also, Fig. 14 shows the results of CTF (Contrast Transfer Function)



(a) CTF measurement results at 0°



(b) CTF measurement results at 90°

Fig. 14 CTF performance of the injection molded aspheric lens (a) CTF measured at 0°, (b) CTF measured at 90°

evaluation, and the resolution performance at the center and outside of 0.7F in the direction of 0 and 90 were satisfied, respectively. Therefore, it was confirmed that injection-molded aspherical lenses can be applied to high quality automotive cameras.

#### 4. Conclusion

In this study, an ultra-precision aspheric lens manufacturing process was developed and optimized to fabricate a camera module with a performance of 1MP and 140° FOV for high quality automotive vision applications. Through these optimizations, a high-quality aspheric mold core with no scratches on the machined surface, a form error of less than 100 nm PV, and a surface roughness of less than 5 nm Ra was successfully produced. The ultra-precisely machined mold core was used in the COP plastic injection molding process to produce a microlens module. The optical characteristics of the fabricated lens showed contrasts higher than 55% at 0.0F, 30% at 0.3F, and 20% at 0.7F, which meets the requirements of 1MP and 140° FOV performance automotive vision application.

#### ACKNOWLEDGEMENT

This work was funded by the Technology Innovation Program (20003945, Development of core manufacturing technology of 4-

axes ultra-precision machining system and lens module for next-generation mobile lens having about 100 nm shape accuracy) and (20007244, A practical study of ultra-precision 5-axis machine for lens & grooving machine) funded by the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE, Korea). Also, this work was funded by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korean Government (MSIT) (No. RS-2023-00210764).

#### REFERENCES

1. Kingslake, R., Johnson, R. B., (2009), *Lens design fundamentals*, Academic Press.
2. Sun, H. Y., Choi, D. S., Je, T. J., Choi, K. B., (2002), Analysis and comparison of the performance of optical collimator by lenses, *Proceeding of the 2022 Autumn Conference on the Korean Society for Precision Engineering*, 132-136.
3. Lee, J. H., Yum, S. H., Kim, S. M., (2018), Analysis of thermal reflow process for polymer microlens fabrication, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 35(3), 319-325.
4. Junqi, L., Qing, L., Nakamura, F., Nakagawa, T., (2007), Development of ultra-precision machining system for small lens mould, *International Journal of Manufacturing Technology and Management*, 12(1-3), 127-138.
5. Roeder, M., Guenther, T., Zimmermann, A., (2019), Review on fabrication technologies for optical mold inserts, *Micromachines*, 10(4), 233.
6. Chung, C.-Y., (2019), Integrated optimum layout of conformal cooling channels and optimal injection molding process parameters for optical lenses, *Applied Sciences*, 9(20), 4341.
7. Peixoto, C., Valentim, P. T., Sousa, P. C., Dias, D., Araújo, C., Pereira, D., Machado, C. F., Pontes, A. J., Santos, H., Cruz, S., (2022), Injection molding of high-precision optical lenses: A review, *Precision Engineering*, 76, 29-51.
8. Lee, S., Lee, H., (2021), Developed an in-line system of measuring MTF for automating the assembly process of lens-module in a smartphone camera, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 38(5), 359-363.
9. Sahin, F. E., (2017), Lens design for active alignment of mobile phone cameras, *Optical Engineering*, 56(6), 065102.
10. Hwang, Y., Cha, D.-H., Kim, J.-H., Kim, H.-J., (2012), Ultraprecision grinding of glassy carbon core for mold press lens, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 29(3), 261-265.
11. Kim, Y. J., Choi, H. J., Lee, K. H., Yeo, W. J., Jeong, J. Y., Kim, Y. S., Kim, G. H., (2020), A study on the characteristics of ultra-precision surface cutting of the mold material (STAVAX) for the development of large satellite lens, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 37(11), 819-825.

12. Kim, H.-T., Yang, H.-J., Kim, S.-C., (2006), A study on the control method for the tool path of aspherical surface grinding and polishing, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 23(1), 113-120.
13. Ando, M., Negishi, M., Takimoto, M., Deguchi, A., Nakamura, N., (1995), Super-smooth polishing on aspherical surfaces, *Nanotechnology*, 6(4), 111.
14. Yan, G., You, K., Fang, F., (2020), Three-linear-axis grinding of small aperture aspheric surfaces, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 7, 997-1008.
15. Yin, S., Jia, H., Zhang, G., Chen, F., Zhu, K., (2017), Review of small aspheric glass lens molding technologies, *Frontiers of Mechanical Engineering*, 12, 66-76.
16. Ham, J. K., Kang, J. K., Park, S. H., Maeng, H. H., Jeon, M. W., Han, J. S., et al., (2023), Analysis of surface characteristics and spoke-shaped removal through ultra-precision machining of germanium materials, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 40(6), 441-448.
17. Yu, D. P., Gan, S. W., Wong, Y. S., Hong, G. S., Rahman, M., Yao, J., (2012), Optimized tool path generation for fast tool servo diamond turning of micro-structured surfaces, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 63, 1137-1152.
18. Li, Y., Zhang, Y., Lin, J., Yi, A., Zhou, X., (2020), Effects of machining errors on optical performance of optical aspheric components in ultra-precision diamond turning, *Micromachines*, 11(3), 331.
19. Lee, W. B., Cheung, C. F., Chiu, W., Leung, T., (2000), An investigation of residual form error compensation in the ultra-precision machining of aspheric surfaces, *Journal of Materials Processing Technology*, 99(1-3), 129-134.
20. Pun, A. M.-H., Wong, C.-C., Chan, N. S.-W., Louie, D. C.-H., Li, L.-M., (2004), Unique cost-effective approach for multisurfaced micro-aspheric lens prototyping and fabrication by single-point diamond turning and micro-injection molding technology, *Optical Fabrication, Testing, and Metrology*, 217-224.
21. Liu, Y.-T., Chang, W.-C., Yamagata, Y., (2010), A study on optimal compensation cutting for an aspheric surface using the Taguchi method, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 3(1), 40-48.
22. Hatefi, S., Abou-El-Hossein, K., (2020), Review of single-point diamond turning process in terms of ultra-precision optical surface roughness, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 106, 2167-2187.
23. Wilson, R. H., Brost, R. C., Strip, D. R., Sudol, R. J., Youngworth, R. N., McLaughlin, P. O., (2004), Considerations for tolerancing aspheric optical components, *Applied Optics*, 43(1), 57-66.



#### Ji-Young Jeong

He was a researcher in the Korea Institute of Machinery & Materials (KIMM) and Hanhwasystems. Currently working in Blanket Shield Block Technology Team, Korea Institute of Fusion Energy. His research interest is ultra-precision cutting process for advanced key components.

E-mail: jyjeong@kfe.re.kr



#### Doo-Sun Choi

Principal Researcher in the Department of Nano Manufacturing Technology, Korea Institute Machinery & Materials (KIMM). His research interest is ultra-precision micro/nano machining and forming technologies.

E-mail: choids@kimm.re.kr



#### Hwan-Jin Choi

Researcher in the Division of R&D Equipment Industry, Korea Basic Science Institute. His research interests include ultra-precision freeform surface machining and large area optical components machining.

E-mail: chj1212@kbsi.re.kr



#### Tae-Jin Je

Principal Researcher in the Department of Nano Manufacturing Technology, Korea Institute Machinery & Materials (KIMM). His research interest is ultra-precision micro/nano patterned mold machining technologies.

E-mail: jtj@kimm.re.kr



#### Jong Sung Park

He was a Director in the Department of Automotive Lens Development, Digital Optics. Now he works in CLAROPTIC. His research interest is manufacturing technology for optical lens modules.

E-mail: nueta34@naver.com



#### Jun-Sae Han

Senior Researcher in the Department of Nano Manufacturing Technology, Korea Institute Machinery & Materials (KIMM). His research interest is micro/nano manufacturing.

E-mail: jshan@kimm.re.kr



#### Jong-Keun Sim

He was a researcher in the Department of Nano Manufacturing Technology, Korea Institute Machinery & Materials (KIMM). His research interest is ultra-precision machining of functional materials and ultrasonic applications.

E-mail: shimjg95@gmail.com



#### Young-Jae Kim

He was a researcher in the Division of R&D Equipment Industry, Korea Basic Science Institute. His research interests include ultra-precision freeform surface machining and large area optical components machining.

E-mail: kimyj0912@kbsi.re.kr



#### Eun-Ji Gwak

Senior Researcher in the Department of Nano Manufacturing Technology, Korea Institute Machinery & Materials (KIMM). Her research interest is nano-structured materials synthesis and manufacturing and ultra-precision machining technologies

E-mail: ejgwak@kimm.re.kr

• 특집 • 초정밀가공공정기술(Ultra-precision Machining Process Technology)

그루빙 가공공정을 활용한 저마늄 소재의 패턴가공기술 연구

A Study on Pattern Machining Technology for Germanium Materials Using Grooving Machining Process

함중규<sup>1</sup>, 강종균<sup>1</sup>, 맹환호<sup>1</sup>, 박성현<sup>2</sup>, 허진용<sup>3</sup>, 박영덕<sup>3</sup>, 김건희<sup>3,#</sup>

Joong Kyu Ham<sup>1</sup>, Jong Gyun Kang<sup>1</sup>, Hwan Ho Maeng<sup>1</sup>, Seong Hyeon Park<sup>2</sup>, Jin Yong Heo<sup>3</sup>, Young Durk Park<sup>3</sup>, and Geon Hee Kim<sup>3,#</sup>

<sup>1</sup> 충남대학교 대학원 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Graduate School, Chungnam University)

<sup>2</sup> 한밭대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Hanbat University)

<sup>3</sup> 한밭대학교 기계소재융합시스템공학과 (Department of Mechanical Materials Convergence System Engineering, Hanbat University)

# Corresponding Author / E-mail: ghkim@hanbat.ac.kr, TEL+82-42-828-8531

ORCID: 0000-0002-0724-3561

KEYWORDS: Ultra-precision machining (초정밀가공), Germanium (저마늄), Grooving machining (그루빙가공), Diamond turning machining (다이아몬드 터닝 가공), Blaze angle (삐기 기울기), Brittle material (취성재료)

*In the optical systems field, key components such as spectroscopic elements often require the use of optical materials with high-refractive indices to achieve miniaturization and lightweight characteristics. However, high-refractive index optical materials have low machinability due to their brittle characteristic. In this study, we investigated the changes in surface characteristics during precision pattern machining of high-refractive index materials; specifically, a low fracture toughness, for use in grating spectroscopic elements. The experiment involved diamond turning for the primary machining, and for the secondary pattern machining, the tool rake angle, tool feed rate, and depth of cut were set as variable conditions. Surface roughness measurements and surface quality analyses were carried out using a white-light interferometer and tool microscopy. The results provide insights into the influence of conditions on the surface properties during the machining of high-refractive index materials for grating spectroscopic components. Under the machining conditions with a tool rake angle of  $-65^\circ$ , tool feed rate of 5,000 mm/min, and a depth of cut 10 nm, the surface roughness of  $R_a$  8.0 nm was achieved. Based on these findings, we plan to conduct further research on the mechanical fabrication of the blaze angle for grating spectroscopic components.*

Manuscript received: October 30, 2023 / Accepted: November 30, 2023

1. 서론

2021년 크리스마스에 발사되어 임무를 수행중인 제임스 웹 망원경(James Webb Space Telescope, JWST)과 2023년 국내에서 독자 개발한 한국형발사체를 통해 최초로 민간위성을 탑재하여 발사된 누리호(KSLV-II)를 통해 국내뿐 아니라 전 세계적으로 우주탐사 및 지구관측 등 우주공간에 대한 많은 연구를 진행하고 있다. 발사되어 임무를 수행하는 망원경과 위성의 핵심 부품은 탑재체인 광학계(Optical System)로 관측 스펙트럼에

따라 측정대상의 특성분석을 목적으로 빛을 집광시켜주는 반사경과 빛을 세분화하는 분광소자 등으로 구성되어 있다. 천문·우주 관련 기술의 발전으로 인하여 측정대상의 특성을 정확하고 세부적으로 분석하기 위해서는 위와 같은 핵심부품을 고품질로 제작하는 기술이 필수적이다. 광학계의 정량적인 성능지표인 분광분해능은 장비의 크기에 비례하기 때문에, 다양한 초정밀가공 기술을 활용한 대구경 반사경 및 분광소자를 제작하는 많은 연구가 진행되고 있다[1-3].

분광소자의 경우, 굴절률이 높은 광학소재를 사용하여 소형/

Table 1 Material properties of germanium

Material properties	Value
Hardness [Hv, GPa]	7.6-8.1
Flexural strength [GPa]	0.067-0.11
Fracture toughness [MPa]	0.67
Tensile strength (Ultimate) [MPa]	135
Yield strength [MPa]	135
Modulus of elasticity [GPa]	103
Thermal conductivity [W/m·K]	59.9

경량화 시키는 것이 중요하지만 굴절률이 높은 광학소재의 경우 일반적으로 취성특성이 강하여 가공성이 낮다는 문제점이 있다[4,5,8].

본 연구에서는 낮은 파괴인성과 높은 경도로 인한 취성특성의 저마늄(Ge) 소재를 그레이팅 형태의 분광소자로 활용하기 위해 초정밀 패턴 가공 시 공구 경사각, 공구 이송속도, 절삭깊이의 가공조건에 따른 표면거칠기 및 표면품질 특성 변화에 대해 분석하였다.

## 2. 실험대상 및 방법

### 2.1 실험시편 및 장비

#### 2.1.1 실험시편 및 가공지그

실험시편은 저마늄 소재를 Fig. 1과 같이 Ø20, 10 t의 실린더 형태로 가공하였고, 가공용 지그는 Al6061-T6 소재로 제작하여 시편 및 가공지그를 UV 경화 접착제를 활용하여 결합하였다.

#### 2.1.2 가공장비

저마늄 시편을 광학소자로 활용하기 위해 1차 가공으로 활용한 장비는 Fig. 2의 Moore Nanotechnology Systems 사의 650FG v2 장비를 활용하였다. 해당 장비는 5축 초정밀 절삭가공장비로 다이아몬드 공구를 이용해 자유곡면 광학부품과 같은 피삭재를 초정밀로 가공하는 DT (Diamond Turning) 장비이다.

1차 가공된 시편의 가공면에 패턴가공을 목적으로 Fig. 3인 Nagase Integrex 사의 NIC-300PS5-N5 장비를 활용하여 2차 가공인 그루빙가공을 진행하였다. 해당 장비는 X, Y, Z 직선축의 최소 분해능 1 nm급의 5축 초정밀가공기로 수 µm-수백 nm급 초미세 패턴가공과 동시 5축 제어가 가능하여 비축 비대칭 자유형상 가공에 주로 활용된다.

#### 2.1.3 측정장비

본 실험에서 설정한 가공조건에 따른 표면거칠기의 정량적인 측정을 위해 Fig. 4인 Bruker 사의 NPFLEX 백색광 간섭계를



Fig. 1 Germanium (Ge) sample with machining jig

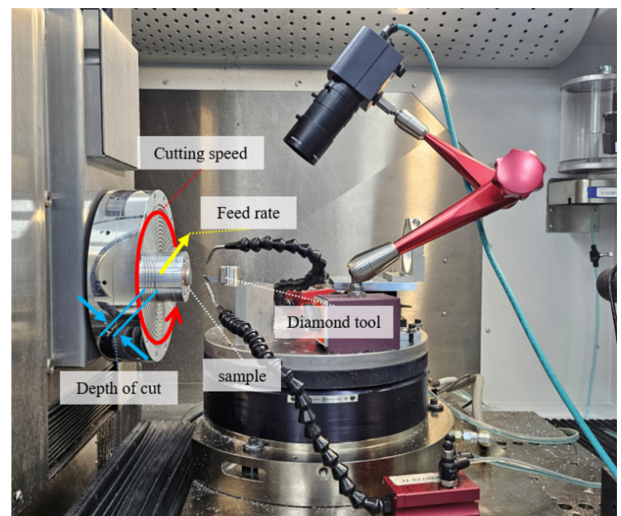


Fig. 2 Diamond turning machine

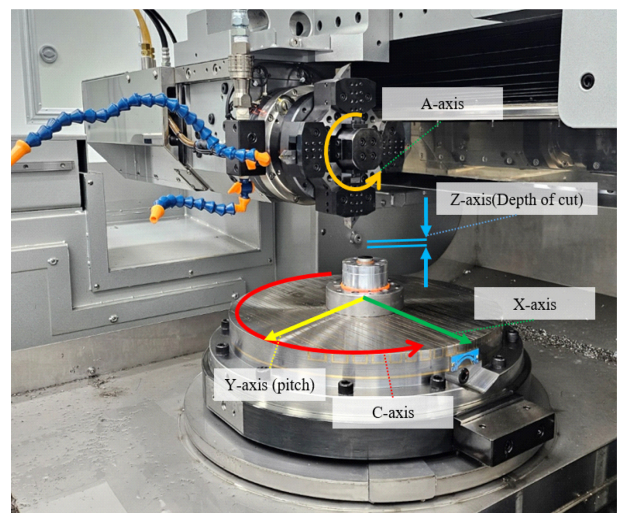


Fig. 3 Ultra-precision grooving machine

활용하였다. 백색광 간섭계는 다양한 파장의 백색광을 통해 발생하는 간섭패턴을 이용하여 측정대상과 파동의 위상차이를 통해 3차원 높이를 구하는 원리이다.

Table 2 Specification of 650FG v2

Specifications	Value
Linear axis travel range (X, Y, Z) [mm]	350, 150, 300
Workpiece (C-axis) [RPM]	10,000
Workpiece swing capacity [mm]	Ø 750
Workpiece loading capacity [kg]	102
Linear axis programming resolution [nm]	0.01
Linear axis position feedback resolution [nm]	0.01

Table 3 Specification of NIC-300PS5-N5

Specifications	Value
Linear axis (X, Y, Z) [mm]	400, 650, 180
Linear axis feedrate (X, Y, Z) [mm/min]	20,000, 20,000, 1,000
Table diameter [mm]	350
Table loading capacity [kg]	300
Programming resolution [nm]	1
Scale feedback resolution [nm]	0.1

Table 4 Specification of NPFLEX

Specifications	Value
Stage range (X, Y) [mm]	300, 300
Lateral resolution [µm]	0.069
Vertical resolution [nm]	≤ 0.1
RMS repeatability [nm]	0.0041
Light source	LED (Green, White)

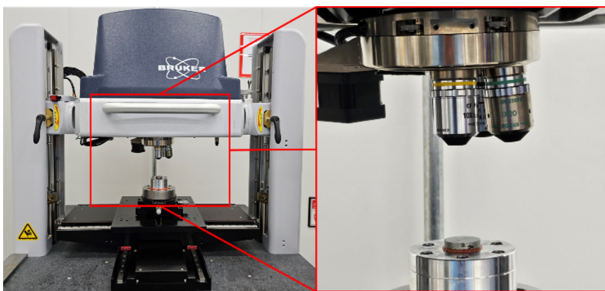


Fig. 4 White light scanning interferometer

2.2 실험방법

$$R_{max} = R - \frac{1}{2}\sqrt{4R^2 - f^2} \approx R_2 \left( 2R - \frac{f^2}{4R} \right) = \frac{f^2}{8R} \quad (1)$$

$$R = \frac{2 \times \Delta abc}{f} = \frac{2}{f} \times \frac{1}{2} \left( \frac{f}{2} \cdot \frac{R_{max}}{2} \right) = \frac{R_{max}}{4} \quad (2)$$

f: feed rate (mm) , R: tool nose radius (mm)

시편의 경면으로 활용하기 위해 수 나노미터영역의 표면거칠기를 확보할 수 있는 DT 가공에 관한 많은 연구가 이전부터

Table 5 Experimental conditions (DT)

Parameters	Conditions
Tool rake angle [deg(°)]	-35
Spindle speed [RPM]	3,500
Feed rate [mm/min]	2
Depth of cut [µm]	2

Table 6 Experimental conditions (Grooving)

Parameters	Conditions
Tool rake angle [deg(°)]	-15, -40, -65
Feed rate [mm/min]	5,000, 7,500, 10,000
Depth of cut [nm]	10, 50, 100

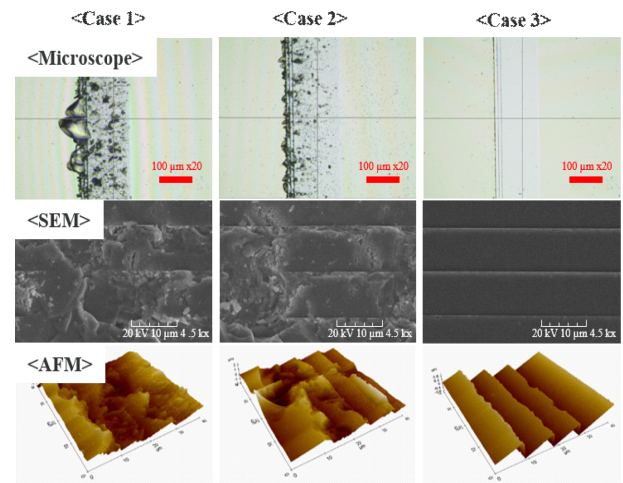


Fig. 5 Basic experiment measurement data (after grooving machining)

진행되고 있으며[4-6], 가공조건에 관한 연구내용을 활용하여 가공조건을 Table 5와 같이 설정하였다.

이 과정에서 활용한 공구의 인선부와 표면거칠기 산의 형상은 원호로, 선삭가공의 표면거칠기 이론식은 공구 이송속도와 노즈반경을 활용하여 최대높이 거칠기와 산술평균 거칠기로 식 (1), 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

다이아몬드러닝 1차가공 후 2차가공인 그루빙가공 시 표면거칠기 변화에 영향을 미치는 가공변수는 Table 6의 공구의 경사각, 공구 이송속도, 절삭깊이로 설정하였고, 가공변수의 범위는 Fig. 5의 패턴가공 및 SEM, AFM 측정을 활용한 기초실험을 통해 가공진행 방향에 수직한 pitch (Y-axis)와 절삭깊이에 대한 검증과정을 통해 설정하였다.

저마늄 단일 시편에 총 27회의 가공조건을 동일하게 적용하기 위해 Fig. 6과 같이 시편의 가공면에 수평방향으로 6°씩 C축 회전하였고, 모든 가공면의 총 가공깊이는 1 µm로 설정하여 인선부가 일자 형태인 공구로 각 조건에서 하나의 그루브 일자 패턴을 가공하였다.

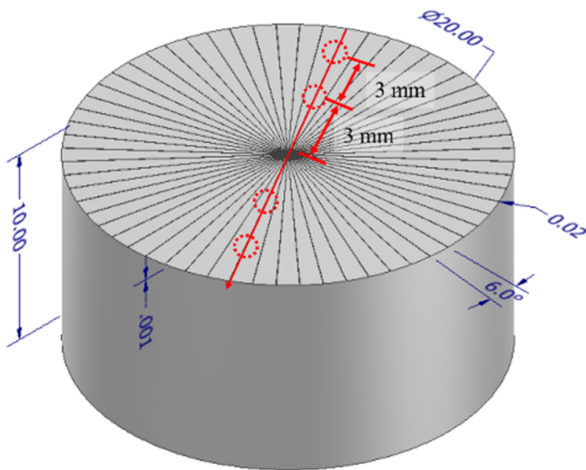


Fig. 6 Sample machining & measurement point image

표면거칠기의 측정영역은 Fig. 6과 같이 시편의 중심부를 대칭으로 가공경로 상 진입부와 이탈부에서 존재할 수 있는 오차를 고려하여 각 2-point씩 총 4-point로 설정하여 반복측정 후 평균값으로 나타내었다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 공구 이송속도에 따른 표면거칠기

Fig. 7은 가공조건 변수 중 공구 이송속도에 따른 표면거칠기 값을 나타내었다. 공구 이송속도는 10,000 mm/min 초과 시 급속이동 모드로 전환되어 공구의 가동범위 끝 지점에서 브레이크 제어로 인하여 발생하는 진동의 영향으로 최대 범위를 10,000 mm/min로 5,000, 7,500, 10,000 (mm/min)로 설정하였다. 그 결과, 공구 경사각  $-15^\circ$ , 절삭깊이 10 nm를 고정으로 5,000 mm/min의 조건에서 가장 좋은 표면거칠기를 얻었고, 공구의 이송속도가 감소할수록 좋은 표면거칠기의 경향을 확인하였다. 이 과정에서 공구 이송속도의 설정 범위를 기존보다 낮은 속도로 재설정하여 표면거칠기에 대한 심층적인 경향성 분석과 가공경로 상 가공되지 않는 가속구간의 길이에 따른 표면특성분석에 대한 추가 실험 필요성을 확인하였다.

#### 3.2 공구 경사각도에 따른 표면거칠기

Fig. 8은 공구의 경사각에 따른 표면거칠기 값을 나타내었다. 선삭가공의 경우 취성특성 소재의 초정밀가공 시 공구의 경사각을 음의 방향으로 조절하여 칩의 형태나 배출을 제어하고 공구에 가해지는 부하를 줄여 가공성을 개선시킨다고 연구되어 왔다[6,7].

이를, 본 실험인 직교절삭가공에 적용하여 공구 경사각이  $-15, -40, -65^\circ$ 의 다이아몬드 공구로 설정하였다. 공구 이송속도 5,000 mm/min, 절삭깊이 10 nm를 고정으로 가공 시  $-65^\circ$ 의 공구를 사용하였을 때 가장 좋은 표면거칠기 값을 얻었으며,

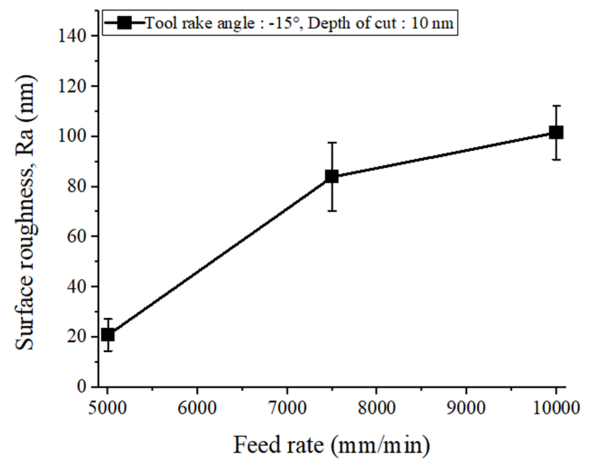


Fig. 7 Surface roughness versus feed rate

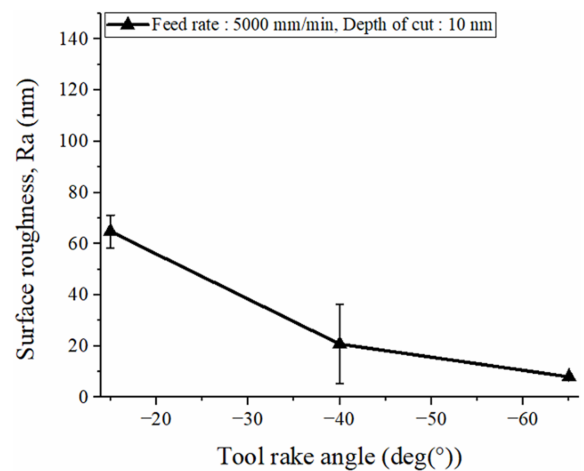


Fig. 8 Surface roughness versus tool rake angle

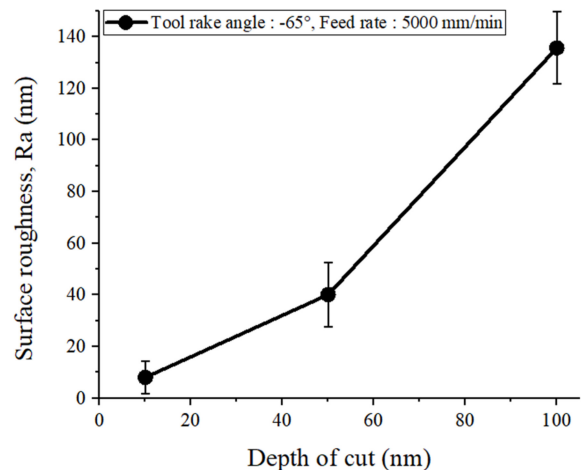


Fig. 9 Surface roughness versus depth of cut

공구 경사각이 음의 방향으로 커질수록 좋은 거칠기 값을 확인하였다. 이러한 결과를 통해 가공 시 공구가 받는 부하를 정량적으로 분석하기 위해 공구동력계를 활용한 추가 연구 필요성을 확인하였다.



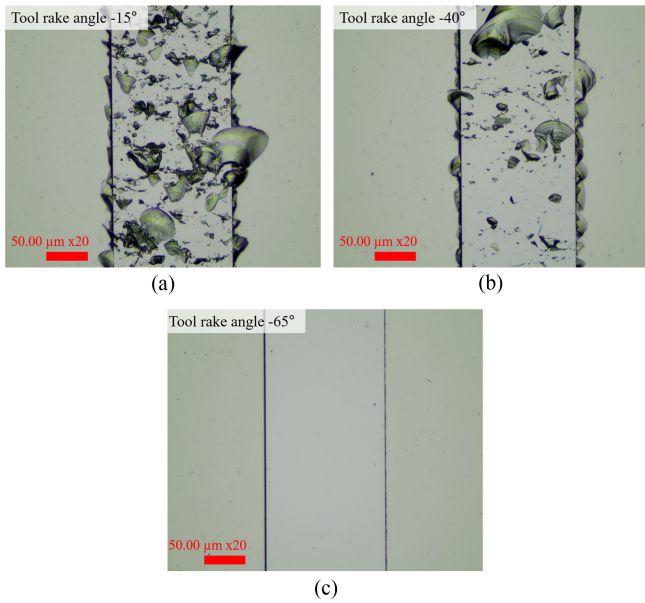


Fig. 10 Surface image (microscopy objective\_x20)

### 3.3 절삭깊이에 따른 표면거칠기

Fig. 9는 가공조건 변수 중 절삭깊이에 따른 표면거칠기 값을 나타내었다. 절삭깊이의 범위는 기초실험을 통해 확인한 표면품질의 변화가 존재하는 최소단위인 10 nm를 최소로 하여, 10, 50, 100 (nm)로 설정하였고, 10 nm의 경우 100회, 50 nm는 20회, 100 nm 10회로 모든 조건의 가공깊이는 1 μm로 동일하게 가공하였다. 공구 경사각 -65°, 공구 이송속도 5,000 mm/min를 고정으로 가공 시 10 nm의 절삭깊이로 1 μm를 가공하였을 때 가장 좋은 표면거칠기 값을 얻었으며, 절삭깊이가 적을수록 좋은 표면거칠기의 경향을 확인하였다.

하지만, 이러한 결과는 절삭가공의 예측가능한 일반적인 원리로 판단하여 공구의 마모를 고려한 최적 절삭깊이 조건 도출에 대한 연구의 필요성을 확인하였다.

### 3.4 공구 경사각에 따른 표면품질분석

Fig. 10은 Fig. 8의 가공조건인 공구 이송속도 5,000 mm/min, 절삭깊이 10 nm를 고정으로 공구 경사각에 따른 표면측정 이미지로, Figs. 10(a)의 경우 공구 경사각 -15° 공구를 사용하였고, 10(b)는 -40°의 공구, 10(c)는 -65°의 공구를 사용하였다. 그 결과, -15°와 -40°에서는 공구의 인선부와 인선부에 수직인 측면부에 Chipping 발생과 소재가 깨지는 문제로 인해 광학소자로 사용하기에는 어렵다고 판단하였고, -65°의 공구를 사용한 가공면이 -15° 공구와 -40° 공구에 비해 표면품질이 개선됨을 확인하였다.

## 4. 결론

본 연구에서는 낮은 파괴인성과 높은 경도로 인한 취성특성

의 저마늄 소재를 그레이팅 분광소자로 활용하기 위해 초정밀 패턴 가공 시 가공조건에 따른 표면특성 변화에 대한 실험을 진행하였다.

실험은 저마늄 소재에 대해 1차가공으로 초정밀 DT 가공과 공구 경사각, 공구 이송속도, 절삭깊이를 변수로 2차가공인 그루빙가공을 진행하였고, 백색광간섭계와 공구현미경을 활용하여 표면거칠기 측정과 표면품질에 대한 분석을 진행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

저마늄 소재의 그루빙가공 시 공구의 이송속도와 절삭깊이는 작을수록, 공구의 경사각은 음의 방향으로 클수록 좋은 표면거칠기 경향성을 확인하였고, 추가적으로 공구의 수명을 고려한 최적가공조건 도출 연구가 필요하다고 판단하였다.

가공조건 중 공구 경사각 -65°, 공구 이송속도 5,000 mm/min, 절삭깊이 10 nm의 조건에서 가장 좋은 표면거칠기인  $R_a$  8.0 nm와 공구현미경을 활용한 표면이미지에서 다른 실험조건에 비해 좋은 가공면의 품질을 확보하였다.

기존 연구 대비 취성특성의 저마늄 소재에 대해 그루빙가공을 활용하여 가공변수에 따른 표면품질 및 정량적인 표면거칠기의 경향에 대해 분석하였다.

추후 췌기 기울기(Blaze Angle)가 존재하는 그레이팅 분광소자를 가공하기 위해 공구인선에 수직인 측면각을 패턴가공기의 축 제어 및 공구형상 변화를 통해 가공성을 검증하는 추가 연구의 필요성을 확인하였다.

## ACKNOWLEDGEMENT

이 논문은 2023년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2023M3C1C1A01098410, 무인이동체 원천기술개발사업).

## REFERENCES

1. Sukegawa, T., Suzuki, T., Kitamura, T., (2016), Astronomical large Ge immersion grating by CANON, *Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation II*, 914-924.
2. Agócs, T., Elswijk, E., Zaalberg, D., Peterzon, J. R., Tromp, N., Lloro, I., Lynn, J., Navarro, R., Sukegawa, T., Okura, Y., (2020), Ge immersed grating manufacturing and optical verification for the METIS high-resolution spectrograph, *Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation IV*, 306-317.
3. Je, T. J., Lee, J. C., Choi, H., Lee, E. S., (2003), Studies of micro groove mold machining using by diamond cutting tool, *Proceedings of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers Conference*, 125-129.

4. Ham, J. K., Jong, G. K., Park, S. H., Maeng, H. H., Jeon, M. W., Han, J. S., Sim, J. K., Myung, T. S., Park, Y. D., Kim, G. H., (2023), Analysis of surface characteristics and spoke-shaped removal through ultra-precision machining of germanium materials, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 40(6), 441-448.
5. Ham, J. K., (2023), Process optimization for ultra precision machining of germanium using a laser assisted module and magnetorheological finishing, M.S. Thesis, Hanbat University.
6. Jeong, B., Kim, G.-H., Myung, T. S., Chung, E.-S., Choi, H.-J., Yeo, I. J., Jeon, M., (2016), Micro-crack analysis from ultra-precision diamond turning of IR optic material, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 33(11), 905-910.
7. Won, J. H., Park, S. J., Ahn, B. M., Do, C. J., Hong, K. H., Kim, G. H., Rui, B. J., (2000), The characteristics of ultra precision machining of Si and Ge, Proceedings of the Korean Society for Precision Engineering, 775-778.
8. Jeon, E. C., (2016), Study on nano patterning by ultra precision cutting on materials for energy, M.S. Thesis, University of Science and Technology.



#### Seong Hyeon Park

M.S. course in the Department of Mechanical Engineering, Hanbat National University. His research interest is ultra-precision machining.

E-mail: 20161014@o365.hanbat.ac.kr



#### Jin Yong Heo

B.S. course in Department of Mechanical Materials Convergence System Engineering, Hanbat National University. His research interest is ultra-precision machining.

E-mail: gjwlsdyd12@naver.com



#### Young Durk Park

Professor in Department of Mechanical Materials Convergence System Engineering, Hanbat National University. His research interest is ultra-precision machining.

E-mail: parkyd@hanbat.ac.kr



#### Joong Kyu Ham

Ph. D course in the School of Mechanical Engineering, Chungnam National University. His research interest is ultra-precision machining.

E-mail: jkham@hanbat.ac.kr



#### Jong Gyun Kang

Ph.D. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Chungnam National University. His research interest is ultra-precision machining.

E-mail: kangjong1008@naver.com



#### Geon Hee Kim

Professor in Department of Mechanical Materials Convergence System Engineering, Hanbat National University. His research interest is ultra-Precision machining.

E-mail: ghkim@hanbat.ac.kr



#### Hwan Ho Maeng

Ph. D course in the School of Mechanical Engineering, Chungnam National University. His research interest is ultra-precision machining.

E-mail: mhh95@hanbat.ac.kr

• 특집 • 초정밀가공공정기술(Ultra-precision Machining Process Technology)

## 3D Printing 기술을 활용한 위성 광학계 제작 기술

# Satellite Optical System Manufacturing Technology Using 3D Printing Technology

박성현<sup>1</sup>, 맹환호<sup>3</sup>, 허진용<sup>2</sup>, 함중규<sup>3</sup>, 강종균<sup>3</sup>, 김건희<sup>2,#</sup>  
Seong Hyeon Park<sup>1</sup>, Hwan Ho Maeng<sup>3</sup>, Jin Yong Heo<sup>2</sup>, Joong Kyu Ham<sup>3</sup>, Jong Gyun Kang<sup>3</sup>, and Geon Hee Kim<sup>2,#</sup>

<sup>1</sup> 한밭대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Hanbat University)

<sup>2</sup> 한밭대학교 기계소재융합시스템공학과 (Department of Mechanical Materials Convergence System Engineering, Hanbat University)

<sup>3</sup> 충남대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Chungnam University)

# Corresponding Author / E-mail: [ghkim@hanbat.ac.kr](mailto:ghkim@hanbat.ac.kr); TEL: +82-42-828-8531

ORCID: 0000-0002-0724-3561

KEYWORDS: 3D printing (3D 프린팅), Diamond turning machine (다이아몬드 터닝 머신), Reflector (반사경), Aluminium alloy (알루미늄 합금), Hot isostatic pressing (등방 가압 열처리), Micro-satellite (초소형 위성)

*The demand for satellite production and utilization has been increasing with the rapid space industry development; especially, the performance of optical satellites for Earth and space observation is closely related to opto-mechanical component manufacturing technology. Depending on the shape of the optical parts, limitations may arise during mechanical cutting processing. To solve this problem, research is being conducted on the use of 3D printing technology manufacturing. Therefore, in this study, to confirm the feasibility of manufacturing and utilizing opto-mechanical parts for microsatellites, we performed an analysis of the optical surface void defect rate, surface roughness measurement, and reflectance measurement according to the densification of 3D printed specimens before and after the HIP process. An average roughness of 6 nmRa was obtained and it was confirmed that the reflector can be used in the infrared optical system of the microsatellite currently in operation. The reflector after ultra-precision processing achieved a form accuracy of 32.39 nmRMS, which is the target value range for optical design. In conclusion, the possibility of manufacturing ultra-precision reflectors using 3D printing technology was confirmed, and further research will be conducted on the development of processing technology to improve surface roughness.*

Manuscript received: October 30, 2023 / Revised: December 31, 2023 / Accepted: January 4, 2024

### 1. 서론

우주산업이 빠르게 발전함에 따라 위성제작 및 활용에 대한 수요가 증가하고 있다. 특히 위성체 무게에 비례하여 발사가격이 높아지는 산업 특성상 성능은 우수하고 고집적 고가치의 기술들이 접목된 초소형 위성들에 대한 연구가 빠르게 이루어지고 있다. 초소형 위성은 임무 목적에 따라 다양한 탑재체가 장착되며, 기존 상용위성에 비해 사용수명이 짧아 요구성능에 맞는 지속적인 제품 공급체계가 필요하다[1].

현재 초소형 위성은 지구 및 우주 관측을 위한 광학 위성이 주를 이루며, 이러한 광학 위성의 성능은 광기계 부품 제작 기술과 밀접하게 관련이 있다[2].

초소형 위성에 활용되는 광부품은 후면 형상과 광부품을 지지하는 구조물의 형태에 따라 강성과 무게가 크게 변화하며, 기존의 기계절삭 가공을 활용하여 이러한 형상을 구현함에 있어 제한점이 발생할 수 있다. 이 문제를 해결하기 위해 3D 프린팅 기술을 활용하여 일체형으로 광부품을 제작하는 연구가 이루어지고 있으며, 관련 기술연구를 통해 디자인에 제약없이 경량화된

형태로 다품종 소량생산 광학계 제작에 활용가능 할 것으로 기대된다.

따라서 본 연구에서는 3D 프린팅 기술을 이용한 광학계 제조 수요에 대응하기위해, 초소형위성의 광기계 부품 제작 및 활용 가능성을 확인 하였다. 우선 3D 프린팅 소재에 대해 선행 기초 실험을 진행하였으며, 광부품으로 활용하기위한 평가 지표로 3D 프린팅 시편의 HIP (Hot Isostatic Pressing) 공정 전/후 치밀화에 따른 광학면 공극 결함률 분석, 표면 거칠기 측정 및 반사율 측정을 수행하였다. 이후 기초실험 결과를 기반으로 초소형 위성에 활용 가능한 반사경을 설계 제작하였다.

## 2. 실험방법

3D 프린팅 기술을 활용한 광기계 부품 제작 순서는 아래의 Fig. 1과 같다. 순서는 크게 공정설계 단계, 적층제조 단계, 초정밀가공 단계, 성능평가 단계로 이루어져 있다. 본 연구에서는 공정설계 단계에서 제작목표를 고려한 출력조건 및 HIP 공정 조건을 설정하고 적층제조 단계에서 실험 시편을 제작하였으며, 3D 프린팅 출력 및 소재 열처리, 소재 치밀화를 진행하였다. 이후 초정밀가공 단계에서 선삭 다이아몬드 터닝가공을 진행하였으며, 성능평가 단계에서는 표면 이미지, 표면 거칠기 및 표면 반사율 분석을 통해 성능 검증을 진행하였다.

### 2.1 3D 프린팅 시편 제작

광부품인 반사경 제작에 앞서 3D 프린팅시편에 대해 HIP 공정 전/후와 Al6061-T6 소재에 대하여 기초실험을 진행하기 위해 Fig. 2와 같은 Ø25, 8 t 실린더 형태의 실험 시편을 각각 제작하였다.

3D 프린팅 기술은 소재와 목적에 따라 다양한 출력방법이 있으나, 본 연구에서는 여러가지 3D 프린팅 기법 중 알루미늄 합금소재를 사용하며, 비교적 높은 형상정밀도 보장되는 PBF (Powder Bed Fusion) 방식의 3D 프린팅 시스템을 활용하였다 [3,4]. 3D 프린팅 장비는 독일 GE (General Electric) 사의 M2 S3 SL-6617G03127 장비를 사용하여 소재를 출력하였으며, 3D 프린팅의 분말은 AlSi10Mg 알루미늄 합금 소재를 선정하였다. 이 합금은 경량화 및 적외선 광학계 반사경 제작 측면에서 활용 가치가 높으며, 주로 반사경 제작에 사용되는 알루미늄 합금 소재인 Al6061-T6와 유사한 기계적 특성을 갖고 있어, 본 연구의 활용소재로 선정하였다[5,6]. AlSi10Mg 파우더에 대한 프린팅 출력 조건은 Table 1과 같다.

### 2.2 3D 프린터 출력물 HIP 공정 열처리

소재 치밀화를 위한 열처리 방식은 기존의 일축 방향으로만 가압하는 핫프레스 방식에서 개선된 HIP 방식을 선정하였으며, HIP 방식은 가스압을 이용하여 피처리체에 등방압을 가할 수 있는 장점이 있다. HIP 공정의 경우 모든 방향으로부터 동등한

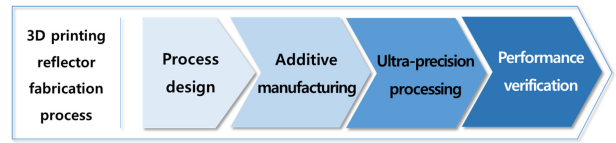


Fig. 1 3D printing metal mirror process



Fig. 2 Materials for basic experiments

Table 1 3D printing conditions

Powder size [μm]	15-63
Laser power [W]	370
Laser speed [m/s]	1,200
Spot size [μm]	140
Hatching distance [μm]	130
Layer thickness [μm]	60

Table 2 HIP conditions

Pressure [MPa]	100
Temperature [°C]	510
Running time [min]	180
Cooling type [°C gas]	93

압력이 재료에 가해지기 때문에 재료내부의 공극이 소멸할 때까지 서로 비슷하게 수축하며 확산현상에 의해 접합된다[7,8]. HIP의 경우 피처리체에 균일하게 압력이 작용하여 가압후의 형상은 초기 피처리체의 형상과 큰 변형이 생기지 않아 제품 처리상의 제약이 비교적 적은 것이 큰 특징이다. HIP 열처리 공정에는 QUINYTUS 사의 QIH 32 장비를 활용하였으며, HIP 공정 조건은 Table 2와 같다.

### 2.3 초정밀 DT 가공

광부품 표면을 가공하는 방법은 고정도의 다이아몬드 툴을 이용하여 나노 단위의 형상 정밀도와 표면거칠기를 구현 가능한 DT (Diamond Turning) 가공법을 선정하였다. DT 장비는 고성능 광부품의 광학적 성능을 만족시킬 수 있고, 비교적 가공자유도 및 가공속도가 우수하여 비철금속의 초정밀 반사경 제작을 위한 장비로 산업에 널리 활용되고 있다[9].

DT 공정은 Table 3의 조건으로 수행하였으며, Fig. 3과 같이 경면제작을 위해 초정밀 선삭 가공기인 Nanotech 650 F6 v2 장비 Spindle의 진공척에 소재를 직접 결합하여 가공을 진행하였다.

Table 3 Experimental condition (DT)

Parameters	Conditions
Spindle speed [RPM]	1,500
Feed rate [mm/min]	2
Depth of cut [ $\mu\text{m}$ ]	2



Fig. 3 Diamond turning machine setting

### 2.4 3D 프린팅 소재 시편 성능평가

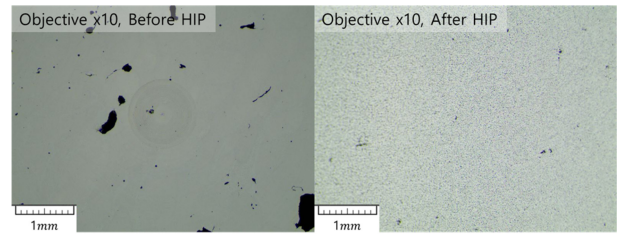
본 실험에서 비교하고자 하는 초정밀 DT 가공된 광학면의 표면 공극 결함률을 분석하기 위해 TESCAN 사 주사전자현미경을 활용하였다. 공극의 명확한 구분을 위하여 소재에 백금 코팅 후 측정을 실시하였으며, HIP 공정 전/후 공극 분포를 중심으로 분석하였다. 소재에 따른 표면 거칠기의 정량적인 측정을 위해 Bruker 사의 NPFLEX 백색광 간섭계를 활용하였다. HIP 공정 전/후 및 Al6061-T6 시편 임의의 다섯 영역에 대해 평균적인 거칠기와 면적을 측정하기 위해 10배율로 측정하였다.

적외선 영역에서의 반사율을 분석하기 위해 적분구(Integrating Sphere) 방식의 PerkinElmer 사의 LAMBDA 1050 + 반사율 측정기를 활용하였다. HIP 공정 전/후 및 Al6061-T6 시편의 중심 25.4 mm<sup>2</sup> 면적에서 적외선 1,000-2,300 (nm) 파장 영역에 대해 측정하였다.

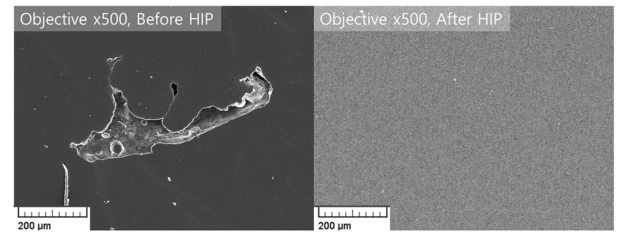
## 3. 실험결과

### 3.1 DTM 가공 표면 공극 분석 결과

Fig. 4는 HIP 공정 전/후의 소재에 대하여 초정밀 가공된 광표면을



(a) Optical microscopy image before/after HIP



(b) SEM image before/after HIP

Fig. 4 Surface of AlSi10Mg part before and after HIP

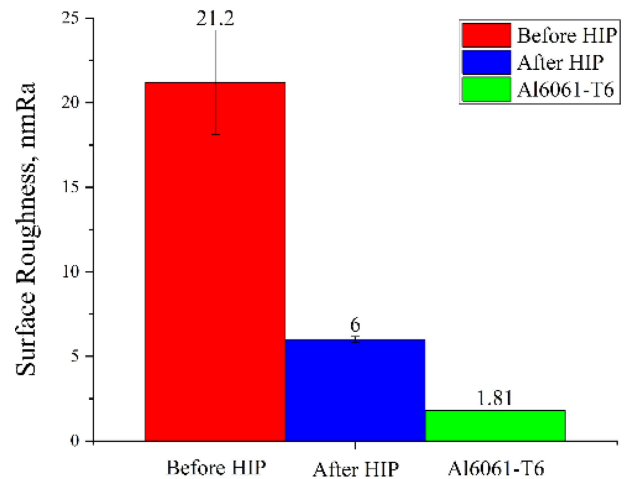


Fig. 5 After DT processing roughness measurement

광학현미경과 SEM 이미지를 확인한 결과이다. Fig. 4(a)는 HIP 공정 전/후 표면 공극 분포에 대한 광학 현미경 이미지이며, HIP 공정 전의 표면에 비해 공극 결함의 분포 감소를 확인하였다. Fig. 4(b)는 표면상 존재하는 공극 크기에 대한 주사현미경 이미지이며, HIP 공정 전 표면은 수백  $\mu\text{m}$  단위 사이즈의 공극이 다수 보이는 반면 HIP 공정 이후 표면에서는 공극의 분포도 적으며 수  $\mu\text{m}$  단위로 크기가 줄어든 것을 확인하였다.

### 3.2 DTM 가공 표면 거칠기 측정 결과

Fig. 5와 Table 4는 HIP 공정의 전/후 및 기존 Al6061-T6 알루미늄 합금소재를 백색광 간섭계로 표면 거칠기를 측정한 결과이다. HIP 공정 전 초정밀 가공한 시편의 경우 가공으로 인해 소재의 공극부가 드러나 표면 거칠기가 평균 21.20 nm  $R_a$ 로 측정되었으며, 초소형 위성용 광학계에 활용하기에는 어려운 것으로 분석되었다. 반면 HIP 공정 후 초정밀가공한 시편의 경우 Al6061-T6 소재에 비해 높은 표면 거칠기를 보였으나, 적외선

Table 4 3D printing mirror roughness data

	Before HIP	After HIP	Al6061-T6
#1 $R_a$ [nm]	14.45	6.01	1.86
#2 $R_a$ [nm]	22.53	5.78	1.77
#3 $R_a$ [nm]	14.23	6.41	1.85
#4 $R_a$ [nm]	24.39	6.38	1.79
#5 $R_a$ [nm]	30.42	5.42	1.80
Aver $R_a$ [nm]	21.20	6	1.81

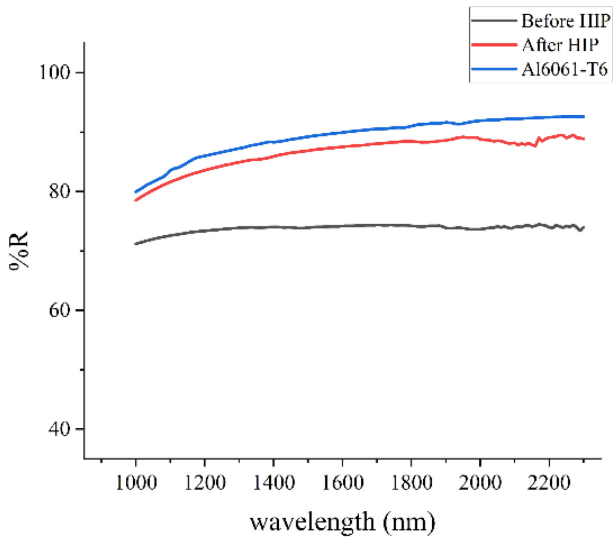


Fig. 6 IR(1,000-2,300 nm) band reflectance measurement

광학계에는 적용 가능한 평균 6 nm  $R_a$ 의 표면거칠기를 확인할 수 있었다.

3.3 DTM 가공 표면 반사율 측정 결과

Fig. 6은 HIP 공정 전/후 소재 및 Al6061-T6 알루미늄 합금소재의 초정밀 가공한 표면을 반사율 측정기로 분석한 그래프이다. IR(1,000-2,300 nm) 영역대의 반사율을 측정한 결과 HIP 공정으로 인해 표면상의 공극들의 분포도가 줄어 HIP 공정 후 소재는 HIP 공정 전에 비해 약 14%의 증가한 반사율로 측정되었다. 이는 기존 Al6061-T6과 비슷한 수준이며, 일부 적외선 영역에서의 활용가능성을 확인하였다

4. 3D 프린팅 기술 적용 사례

4.1 초소형위성용 알루미늄 합금 반사경 설계

앞선 실험들의 결과를 바탕으로 3D 프린팅 기술을 활용한 광부품 제작 가능성을 확인하고자, 경량화 설계 해석된 반사경에 본 기술을 적용하였다. 제작하고자 하는 부품은 Fig. 7과 같은 밀도법 최적화 방법을 이용하여 초기형상에서 45회 반복 경량화 과정을 거쳐 기존 형상대비 60% 무게 절감을 확인하였다.

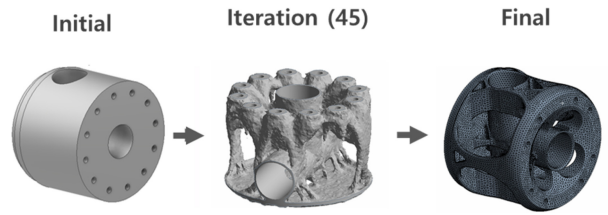


Fig. 7 Topology optimization history



Fig. 8 3D printing mirror

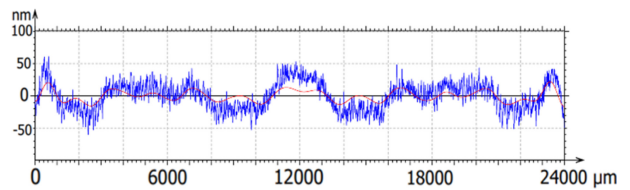


Fig. 9 3D printing mirror form accuracy measurement

Table 5 3D printing mirror shape accuracy data

Pvt [ $\mu$ m]	0.15
Smn [min]	0.84
Xp [mm]	-10.99
RMS [nm]	32.39
Slope rms [sec]	4.05

4.2 초소형위성용 알루미늄 합금 반사경 가공결과

3D 프린팅 기술을 활용하여 Fig. 8의 제작된 반사경 형상 정밀도는 접촉식 방식의 측정기로 측정하였으며, 32.39 nmRMS의 형상정밀도를 얻었다. 상세 측정결과는 Fig. 9와 Table 5와 같다.

5. 결론

점차 소형화가 요구되는 초소형위성 광학계의 광부품 제작 수요에 대응하기 위해 3D 프린팅 기술을 활용한 초소형위성용 광부품 제작가능성에 대해 연구를 수행하였다. HIP 공정 전/후 3D 프린팅 시편에 대해 공극 분포도와 크기, 표면 거칠기, 반사율측정 기초실험 과정을 거쳐 초정밀 가공된 3D 프린팅 소재에

대해 백색광 간섭계를 활용한 표면 거칠기를 측정된 결과 평균적으로 6 nm  $R_a$ 의 거칠기를 얻었다. 현재 임무수행중인 초소형 위성 적외선 광학계의 경우 5 nm  $R_a$ 대의 표면 거칠기의 반사경을 활용하는 것으로, 본 연구에서 제작한 반사경의 경우 해당 파장영역대에서 활용 가능한 것으로 확인하였다. 3D 프린팅 기술을 적용하여 제작된 반사경은 ANSYS 해석 과정을 통해 기존 설계 대비 60%의 무게 절감이 이루어졌으며, 본 연구를 통해 3D 프린팅 기술과 HIP 공정과 초정밀 가공 공정을 적용한 초정밀 광부품 제작가능성을 확인하였다. 이후 추가적인 표면 거칠기를 향상시키기 위한 최적가공공정 개발연구와 광학 성능 검증에 대한 추가 연구를 진행할 예정이다.

## ACKNOWLEDGEMENT

이 논문은 2023년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국 산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(No. P0023691, 우주 소재·부품·장비 전문인력양성사업).

## REFERENCES

1. Lee, K., Oh, K., Chae, T., (2019), Development and application status of microsattellites, *Current Industrial and Technological Trends in Aerospace*, 17(2), 113-124.
2. Hilpert, E., Hartung, J., Risse, S., Eberhardt, R., Tünnermann, A., (2018), Precision manufacturing of a lightweight mirror body made by selective laser melting, *Precision Engineering*, 53, 310-317.
3. Kim, M. K., Lee, D. H., Choi, H. J., Kim, D. H., Son, J. W., Park, W. S., Suhr, J., (2021), Design of powder bed fusion process and heat treatment of as-built 17-4PH stainless steel for high qualities and properties, *Proceedings of the Korean Society for Precision Engineering Autumn Conference*, 106-106.
4. Jeong, H. Y., Ahn, D. G., Cheon, Y. I., Kim, K. S., Jeon, B. G., Park, T. H., Kim, H. I., (2020), Strength evaluation of 3D printing products, *Transactions of the Korean Society Mechanical Engineers C Industrial Technology and Innovation*, 8(1), 1-7.
5. Kempen, K., Thijs, L., Van Humbeeck, J., Kruth, J.-P., (2012), Mechanical properties of AlSi10Mg produced by selective laser melting, *Physics Procedia*, 39, 439-446.
6. Wu, J., Wang, X., Wang, W., Attallah, M., Loretto, M., (2016), Microstructure and strength of selectively laser melted AlSi10Mg, *Acta Materialia*, 117, 311-320.
7. Choi, B., Yang, J., Lee, M., Jeon, Y., (2021), Defect analysis of metal 3D printing process, *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, 30(1), 92-98.
8. Park, S.-Y., Yang, S.-H., Kim, M.-Y., (2006), Properties variation according to heat treatment for gas turbine blade (bucket) material of GTD-111DS, *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, 30(3), 349-355.
9. Ko, M. J., Park, S. S., (2021), A study on the three-axis precision machining technology for the primary mirror of the ground observation camera for satellites, *Proceedings of the Korean Society for Precision Engineering Spring Conference*, 161.

**Seong Hyeon Park**

M.S. course in the Department of Mechanical Engineering, Hanbat National University. His research interest is ultra-precision machining.

E-mail: 20161014@o365.hanbat.ac.kr

**Hwan Ho Maeng**

Ph.D. course in the Department of Mechanical Engineering, Chungnam National University. His research interest is ultra-precision machining.

E-mail: mhh95@hanbat.ac.kr

**Jin Yong Heo**

B.S. course in the Department of Materials Convergence System Engineering, Hanbat National University. His research interest is ultra-precision machining.

E-mail: gjwlsdyd12@naver.com

**Joong Kyu Ham**

Ph.D. course in the Department of Mechanical Engineering, Chungnam National University. His research interest is ultra-precision machining.

E-mail: jkham@hanbat.ac.kr

**Jong Gyun Kang**

Ph.D. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Chungnam National University. His research interest is ultra-precision machining.

E-mail: kangjong1008@hanbat.ac.kr

**Geon Hee Kim**

Professor in Department of Mechanical Materials Convergence System Engineering, Hanbat National University. His research interest is ultra-precision machining.

E-mail: ghkim@hanbat.ac.kr



# • 특집 • 초정밀가공공정기술(Ultra-precision Machining Process Technology) 디스크 공구를 이용한 초경합금의 미세 홈 가공에 대한 연구 Study on Micro Grooving of Tungsten Carbide Using Disk Tool

김민기<sup>1</sup>, 양찬영<sup>2</sup>, 심대보<sup>2</sup>, 이지효<sup>2</sup>, 김보현<sup>1,#</sup>  
Min Ki Kim<sup>1</sup>, Chan Young Yang<sup>2</sup>, Dae Bo Sim<sup>2</sup>, Ji Hyo Lee<sup>2</sup>, and Bo Hyun Kim<sup>1,#</sup>

<sup>1</sup> 숭실대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Soongsil University)  
<sup>2</sup> 숭실대학교 대학원 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Soongsil University)  
# Corresponding Author / E-mail: bhkim@ssu.ac.kr, TEL: +82-2-820-0653  
ORCID: 0000-0002-1546-5420

KEYWORDS: Micro groove (미세 홈), Micro disk tool (미세 디스크 공구), Electrical discharge machining (방전 가공), Tungsten carbide (텅스텐 카바이드), Polycrystalline diamond (다결정 다이아몬드)

Recently, the demand for micromachining of hard materials has been increasing. Machining microholes, grooves, and structures in hard materials such as tungsten carbide is very difficult. In this study, the machining characteristics of a microdisk tool for microgroove machining of tungsten carbide were studied. Microtools made of polycrystalline diamond (PCD) were fabricated using wire electrical discharge grinding (WEDG) to machine high-hardness tungsten carbide. Rectangular and V-shaped disk tools were fabricated by WEDG with controlled wire paths. In the micro grooving of tungsten carbide, the effects of capacitance and feedrate on the surface roughness of microgrooves and the wear of disk tools were studied. As the capacitance and feed rate decreased, the surface roughness decreased and no significant wear was observed in the PCD tool. However, an increase in tool edge radius of several micrometers was observed.

Manuscript received: November 13, 2023 / Revised: January 2, 2024 / Accepted: January 4, 2024

## 1. 서론

초경합금(Tungsten Carbide, WC-Co)은 높은 경도와 압축강도 등 뛰어난 기계적 특성을 가지고 있어, 절삭 공구나 금형 등 내마모성이 중요한 제품 및 부품에 널리 사용되고 있다[1-3]. 그러나 높은 경도로 인해 기계적 가공이 매우 어려운 단점이 있다. 이를 해결하기 위해 고경도 금속 소재에 대한 레이저 가공, 전해 가공, 방전 가공 등 많은 특수 가공법에 대한 연구가 있었으며, 그와 더불어 다이아몬드 소재의 공구를 이용한 절삭, 연삭 가공에 대한 연구도 많이 수행되었다[4-11]. 특히 반도체, 광학 및 정밀 기계 산업에서 초정밀 마이크로 부품의 소재로 초경합금을 선호하고 있으나 형상 크기가 수백에서 수십  $\mu\text{m}$ 로 작아지면서 형상 정밀도, 공구의 마모 등의 문제가 대두되면서 이에

대응할 수 있는 가공 기술이 제한되고 있다.

본 연구에서는 초경합금 소재에 마이크로 미터 크기의 미세 요철 또는 미세 홈 어레이 제작을 위하여 마이크로 디스크 공구를 이용한 연삭 가공에 대해 연구하였다. 공구 재료로는 다결정 다이아몬드(Polycrystalline Diamond, PCD)를 사용하였다. PCD는 초경합금보다 더 높은 경도를 갖고 있으며 기본적으로 도전체이기 때문에 경도와 무관하게 소재를 가공할 수 있는 방전 가공을 이용하여 50  $\mu\text{m}$ 의 두께를 갖는 디스크 형상의 PCD 공구를 제작하였다.

방전 가공으로 제작된 디스크 공구를 높은 속도로 회전시켜, 초경합금 판재에 다수의 홈을 기계적으로 가공하였으며, 이 과정에서 공구의 거칠기, 이송 속도 등에 따른 가공 표면 품질, 공구 마모 등을 관찰하였다.

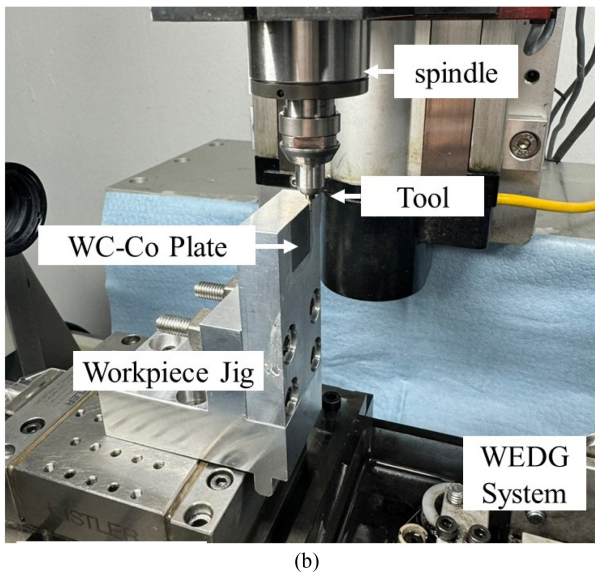
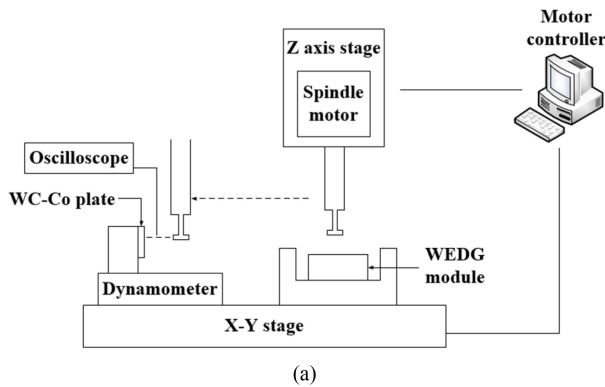


Fig. 1 (a) Schematic diagram and (b) photo of the experimental system

2. 실험장치 및 방법

Figs. 1(a)는 실험에 사용된 가공 시스템의 개략도이며, 1(b)는 실제 사용된 시스템의 사진이다. 전체 시스템은 크게 미세 디스크 형상 공구를 제작하기 위한 와이어 방전 연삭(Wire Electrical Discharge Grinding, WEDG) 장치와 제작된 디스크 공구를 이용하여 초경합금에 미세 홈을 연삭 가공할 수 있는 실험 장치로 나눌 수 있다. 수직방향으로 설치되어 있는 스피들 특성상, 초경합금 가공물은 수직 방향으로 설치하여 미세 홈을 가공하였다. 최대 회전 속도 60,000 RPM의 스피들과 0.1 μm 분해능의 X-Y-Z축 이송 장치를 사용하였다.

기존 연삭 방법은 고경도 PCD 재료를 미세 공구 형상으로 가공하는데 쉽지 않기 때문에 Fig. 2(a)와 같이 WEDG를 이용하여 디스크 공구를 제작하였다. WEDG는 와이어 방전 가공(Wire Electrical Discharge Machining, WEDM)의 일종이며 와이어가 와이어 가이드(Wire Guide)를 따라서 이송되므로 흔들림이 비교적 적고 방전 에너지도 극히 작아 기존 와이어 방전 가공법 보다 미세 공구를 제작하는데 유리하다[12-14]. 디스크

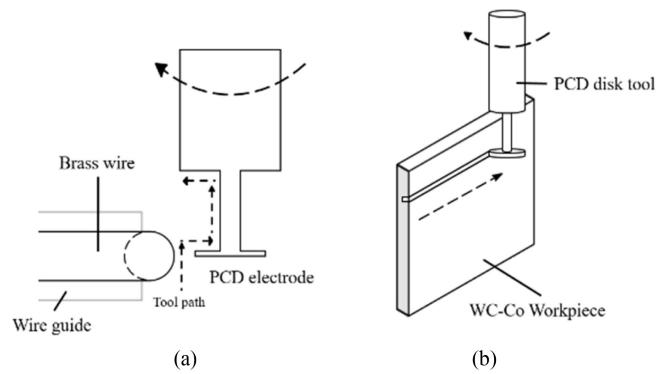


Fig. 2 Schematic diagram of (a) disk tool fabrication by WEDG and (b) micro grooving process

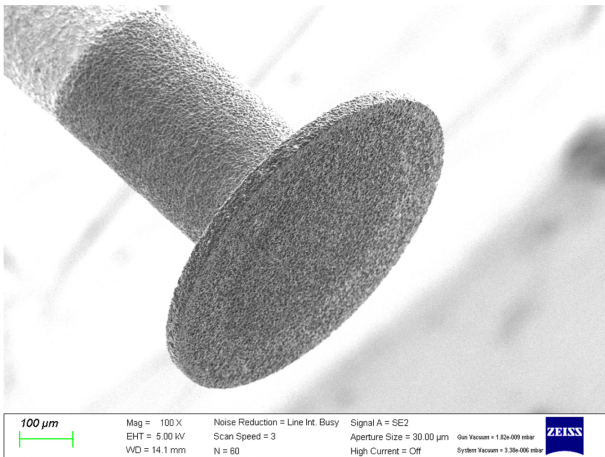
공구를 제작하기 위해, 스피들에 지름 1 mm의 PCD 환봉을 장착하고 회전시킨 후 공구와 와이어 사이에 100 V의 전압을 인가하여 방전 가공을 수행하였다. 그림에 표시된 경로를 따라 와이어를 이송시켜 디스크 형상의 공구를 가공하였다.

Fig. 2(b)는 제작된 디스크 공구를 이용하여 미세 홈을 가공하는 공정을 나타낸다. 초정밀 가공에서 가공물과 이송축의 정렬(Alignment)은 매우 중요한 이슈이며, 본 실험과 같은 미세 가공에서 가공물이 부착되어 있는 X-Y 이송축과 가공물의 표면이 평행하지 않으면 실제 가공에서 가공 깊이가 수십 μm 단위로 달라질 수 있기 때문에 공구가 쉽게 부러지는 문제가 발생할 수 있다. 본 실험에서는 가공물과 이송축 정렬을 위해 가공물의 접촉 여부나 접촉력 측정이 가능한 공구동력계(9256C, Kistler)와 오실로스코프(MDO34, Tektronix)를 설치하였다. 이 방법으로 가공 경로(Toolpath)의 시작점과 끝점에서 가공물의 기울기를 측정하였고, 그 기울기가 최소가 되도록 가공물 지그를 조절하였다. 본 실험에서는 길이 15 mm 당 높이 편차가 10 μm 이내의 수준으로 정렬하였다.

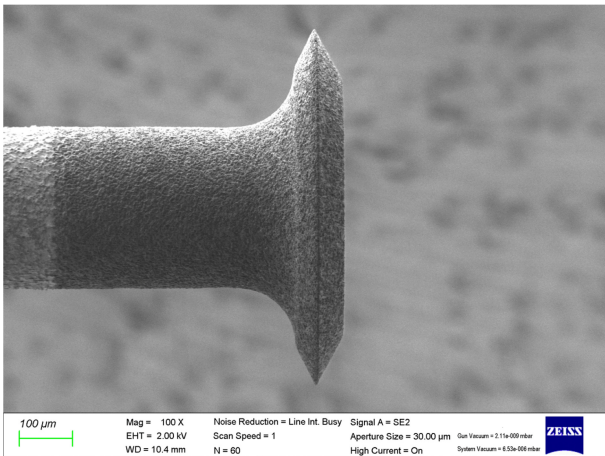
가공물 재료는 폭 15 × 15 mm<sup>2</sup>, 두께 1 mm의 초경합금 판재를 사용하였다. 공구 회전 속도는 20,000 RPM, 공구 이송속도는 10-40 μm/sec으로 설정하였으며, 가공 깊이는 사각 디스크 공구의 경우 30 μm, V형 디스크 공구는 60 μm으로 설정하여 가공하였다. 가공 과정에서 마찰로 인한 저항을 줄이고 칩의 배출을 위해 절삭유를 사용하였다. 자세한 가공 조건은 Table 1에 나타내었다.

본 실험에서는 가공된 홈의 표면 거칠기와 형상 정밀도, 그리고 공구의 마모에 대해 연구하였다. 초경합금에 가공된 홈의 표면 거칠기의 경우, WEDG로 공구를 제작할 때 방전 에너지에 따라 공구 표면 거칠기가 달라지고, 그에 따라 가공된 홈의 표면 거칠기도 달라지게 된다. 또한 공구의 이송 속도에 따라 달라질 수 있으므로 그 특성을 관찰하였다. 가공된 홈의 형상과 표면 거칠기는 레이저 공초점 현미경(OLS-5100, Olympus)를 이용하여 총 5개의 샘플을 측정하여 구하였다. 또한 공구의 마모도 매우 중요하므로 가공 전후의 공구 날끝 반경을 전자현미경(GeminiSEM 300, Carl Zeiss)를 통해 측정하였다.

Fig. 3은 WEDG로 가공된 PCD 공구의 예이며, 와이어 가공



(a)



(b)

Fig. 3 SEM images of (a) micro disk tool (b) V-shape disk tool

Table 1 Parameter for grooving

Spindle speed [RPM]	20,000
Feedrate [ $\mu\text{m/s}$ ]	10, 20, 30, 40
Depth of cut [ $\mu\text{m}$ ]	30 (Flat edge) 60 (V-shape edge)
Groove length [mm]	15
Workpiece	WC-Co plate Size: 15 × 15 mm × 500 $\mu\text{m}$ thickness Co 17 wt%, grain size: 0.2 $\mu\text{m}$ , HK: 1165 kg/mm <sup>2</sup>

경로에 따라 사각 디스크 형상이나 모서리가 V형 디스크 형상을 가공할 수 있다. Fig. 3(a)는 지름 500  $\mu\text{m}$ , 두께 50  $\mu\text{m}$ 의 사각 디스크 형상 공구이며, Fig. 3(b)는 모서리가 V형인 디스크 공구이다. V형 공구는 삼각 홈이나 피라미드 형상의 패턴을 가공하는데 쓰일 수 있으며 V자형 단면을 갖는 특수 미세 유로 (Micro Fluidic Channel), 미세 부품 간 조립을 위한 톱니 형상의 가이드 등에서의 활용이 가능하다.

WEDG에서의 축전 용량, 회전 속도 등의 가공 조건들은 Table 2에 표기하였다.

Table 2 Parameter for WEDG

Voltage [V]	100
Capacitance [pF]	5,600 10,000 22,000
Spindle speed [RPM]	19,000
Feedrate [ $\mu\text{m/s}$ ]	1
Tool electrode	Brass wire ( $\varnothing$ 200 $\mu\text{m}$ )
Workpiece electrode	PCD grain size 10 $\mu\text{m}$ binder: W-Co EHWA Diamond
Disk diameter [ $\mu\text{m}$ ]	500
Disk thickness [ $\mu\text{m}$ ]	50
Dielectric fluid	Kerosene

### 3. 실험결과

Figs. 4(a)와 4(b)는 디스크 공구를 이용하여 초경합금 판재에 가공한 미세 홈과 그 바닥면을 나타내고 있다. 방전 가공에서의 방전 에너지를 결정하는 축전용량과 디스크 공구 이송속도에 따라 미세 홈 바닥면의 표면 거칠기와 공구의 마모를 관찰하였다.

#### 3.1 축전용량에 따른 미세 홈의 표면 조도 변화

공구를 제작할 때 사용한 축전용량에 따른 초경합금 미세 홈 표면의 조도 변화를 관찰하였다. WEDG를 이용한 공구 가공에서 방전 에너지는 인가전압과 축전용량에 의해 결정된다[11,14-17]. 축전용량을 크게 하면 단발 방전 에너지가 증가하여 방전 흔(Crater)의 크기가 증가하게 되고 방전흔의 돌기 또한 커지므로 PCD 공구의 표면 거칠기가 증가하게 된다[13]. PCD 공구의 표면 거칠기는 초경합금을 가공할 때 가공면의 거칠기에 영향을 미치기 때문에 결국 축전용량에 따라 미세 홈의 표면 조도가 달라질 수 있다.

Fig. 5는 5,600, 10,000, 22,000 pF의 축전용량으로 방전가공한 디스크 공구를 사용했을 때 초경합금 미세 홈의 표면 조도를 측정한 결과이다. 공구 회전 속도 20,000 RPM, 가공 깊이 30  $\mu\text{m}$ , 이송 속도 30  $\mu\text{m/s}$ 로 가공 조건을 설정하였다. 그래프에서 볼 수 있듯이 축전용량이 증가함에 따라 가공 표면 조도 (Average Roughness, Ra)가 0.2  $\mu\text{m}$ 에서 0.33  $\mu\text{m}$ 로 증가하는 것을 보였으며, 이는 높은 방전에너지로 인해 생성된 공구의 거친 돌기로 인해 초경합금이 가공되고, 결과적으로 미세 홈의 표면 거칠기에도 영향을 미치는 것으로 판단된다.

#### 3.2 이송속도에 따른 표면 조도 변화

초경합금의 미세 홈 가공에서 공구 이송속도에 따른 표면 조도 변화를 관찰하였다. Fig. 6은 축전 용량 10,000 pF로 제작한 공구를 회전속도 20,000 RPM의 조건에서 이송 속도를 10  $\mu\text{m/s}$

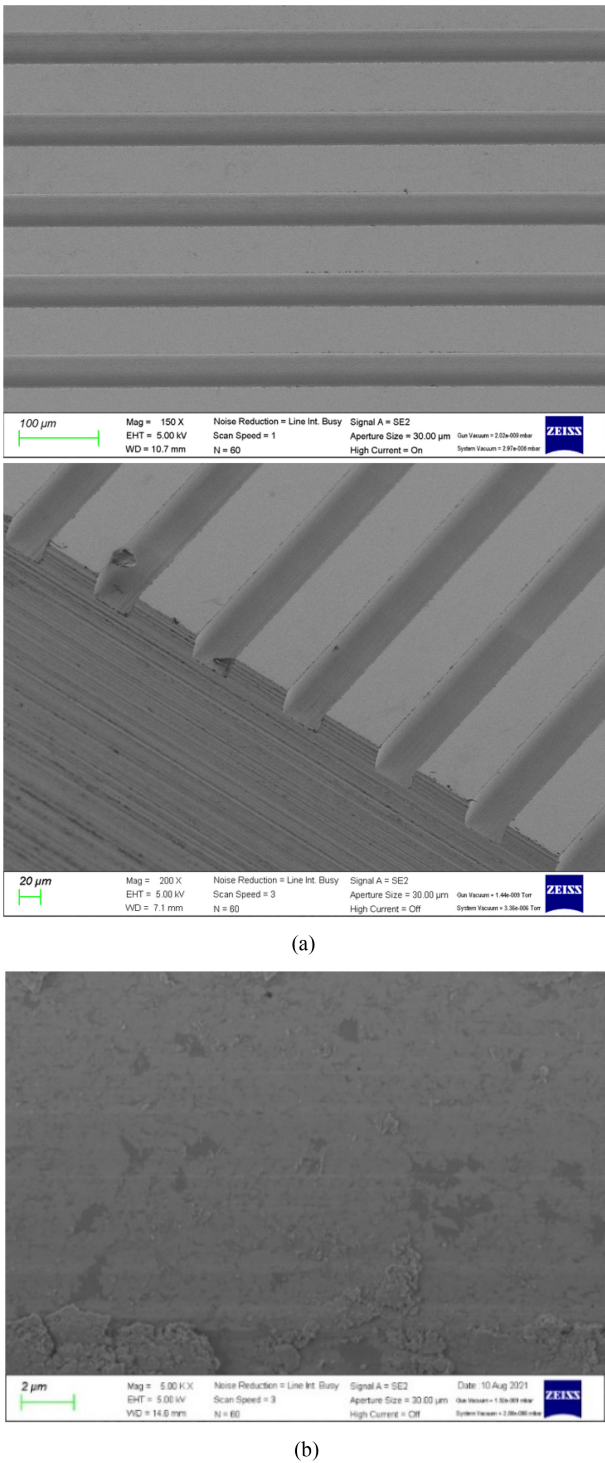


Fig. 4 SEM image of (a) surface and (b) bottom of micro grooves

부터 40  $\mu\text{m/s}$ 까지 증가시킬 때의 표면 조도를 나타낸다. 이송 속도가 증가함에 따라, 표면 조도(Ra)가 0.17  $\mu\text{m}$ 에서 0.26  $\mu\text{m}$ 로 증가하였다.

전체적으로 0.1-0.2  $\mu\text{m}$  Ra의 표면 거칠기를 얻을 수 있었으나 일반적인 연삭 가공에 비해 상대적으로 높은 수치이다. 낮은 이송 속도(5  $\mu\text{m/s}$ )와 낮은 연삭 깊이(3  $\mu\text{m}$ )로 실험하였지만 표면 거칠기

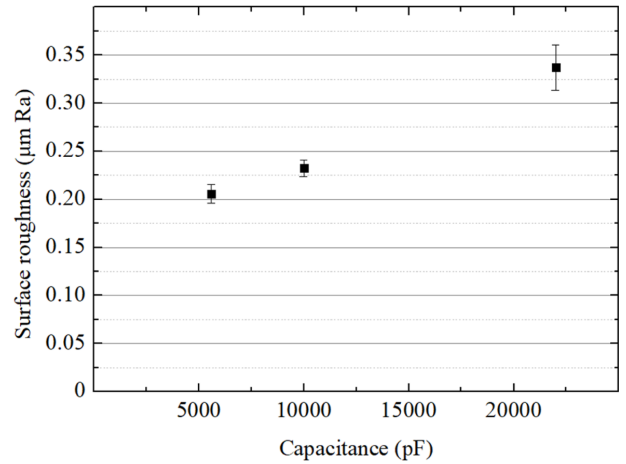


Fig. 5 Surface roughness according to capacitances

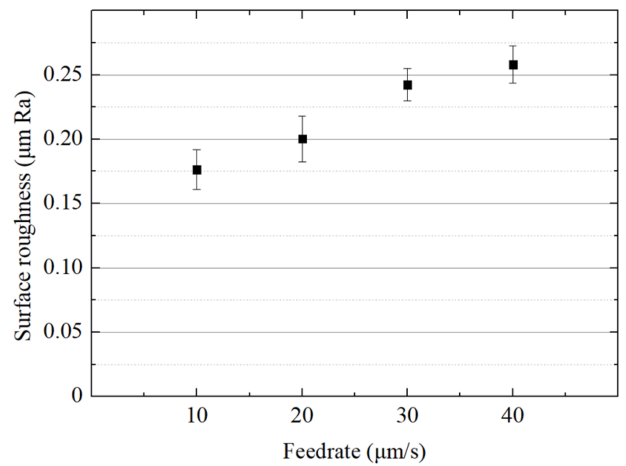


Fig. 6 Surface roughness according to tool feedrates

값은 크게 달라지지 않았다. 이는 가공 조건보다 공구 표면의 형상이 가공물 표면 품질에 더 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

### 3.3 공구 마모

일반 금속 소재와 달리 초경합금과 같은 고경도 소재를 가공할 때 공구의 마모량 평가는 매우 중요하다. 특히 본 연구와 같은 미세 형상 가공에서 공구의 마모량은 가공 형상 정밀도에 큰 영향을 미칠 수 있다. 따라서 본 연구에서는 디스크 공구를 사용하여 초경합금을 일정 길이를 가공하여 가공 전과 가공 후의 공구 형상과 표면을 관찰하였다.

공구 마모를 관찰하기 위해 22,000 pF의 축전 용량으로 공구를 가공하고, 20,000 RPM, 30  $\mu\text{m/s}$ 의 조건으로 깊이 30  $\mu\text{m}$ 의 홈을 총 길이 105 mm로 가공하였다. 가공 후 디스크 공구의 지름을 전자 현미경이나 공초점 현미경으로 측정하였으나 디스크 초기 지름 500  $\mu\text{m}$ 에 비해 유의미한 변화를 측정하기가 매우 어려웠다. 대신 공구 표면에 약간의 스크래치 흔적과 공구 모서리에서 작은 변화를 발견할 수 있었다. 마모는 공구의 모서리 부분에 집중되므로 사각형상과 V형 디스크 공구의 모서리 반경

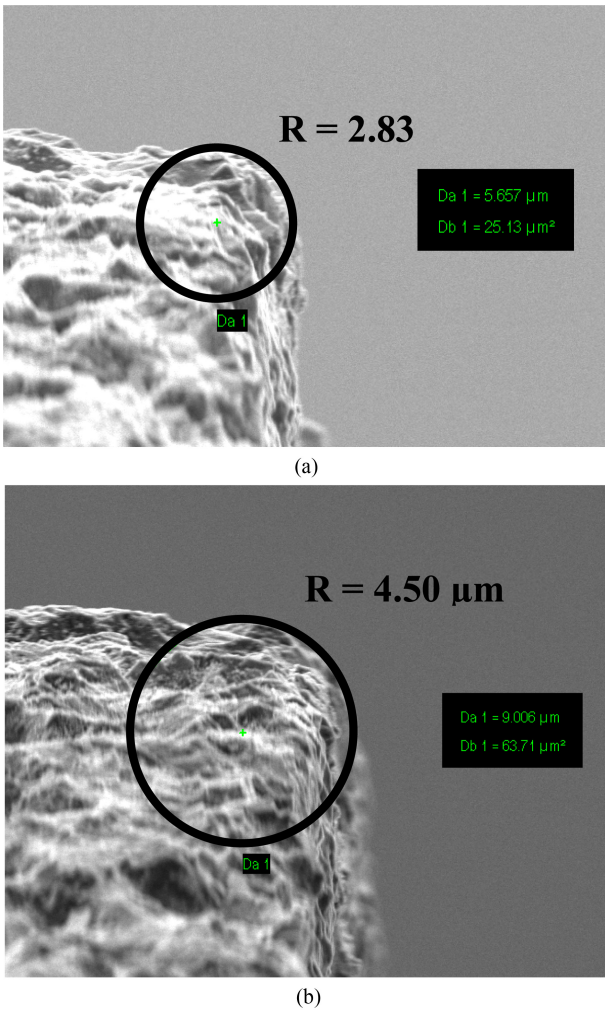


Fig. 7 Edge radius of disk tool (a) before machining and (b) after machining

(Edge Radius)의 가공 전후의 변화를 관찰하였다. 모서리 반경은 여유면(Flank Face), 경사면(Rake Face) 그리고 모서리의 중심을 지나는 원을 삽입하여 측정하였다.

Fig. 7은 가공 전과 후의 사각 디스크 공구의 모서리 반경을 전자 현미경으로 측정한 사진이며 모서리 반경이 가공 전 2.8 μm에서 가공 후 4.5 μm로 증가하는 것을 볼 수 있다. 공구 표면은 마모가 발생한 뒤에도 거친 표면을 유지하고 있는 것으로 보아, 다이아몬드 입자가 닳는 것(Abrasive Wear)보다는 입자가 깨지면서 마모가 일어나는 것으로 판단된다. 입자가 닳지 않고 깨지면서 마모가 진행되면 공구의 거친 면을 유지할 수 있으므로 가공에 유리하다. 초경합금의 가공 칩(탄화텅스텐 또는 코발트)이 공구에 부착되는 눈매움>Loading)도 관찰할 수 있었으나 가공에 큰 영향을 미치지 않았다. 이는 전반적으로 가공 길이가 100 mm 수준으로 크지 않았으므로 가공량이 훨씬 많은 경우 공구의 마모나 눈매움 등이 가공에 영향을 미칠 수 있다. Fig. 8에 공초점 현미경으로 측정한 미세 홈의 프로파일을 나타내었다. 미세 홈의 가공 깊이가 32-33 μm로 측정되어 설정한

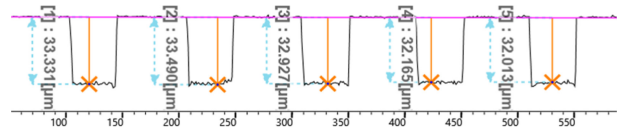


Fig. 8 Surface profile of micro grooves machined on tungsten carbide

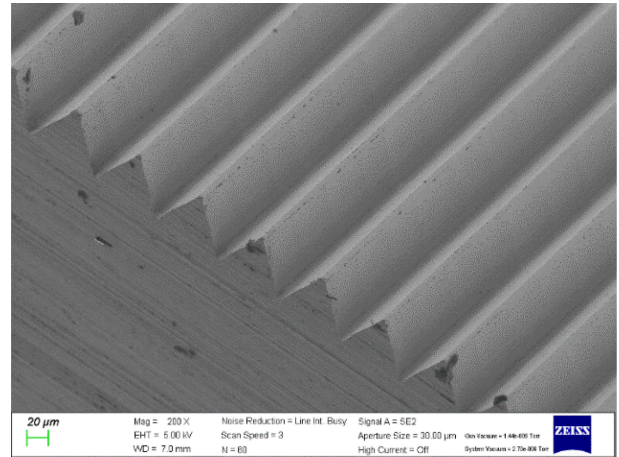


Fig. 9 SEM image of V-shape grooves

가공 깊이 30 μm보다 깊게 측정되었다. 이는 공구의 초기 위치를 설정할 때 공구와 가공물 표면의 접촉을 공구동력계나 전기적 접촉으로 판단하므로 이 때 발생하는 오차(1-3 μm)가 이유일 수 있다. 또한 가공물을 고정할 때 이송축과의 정렬에서 최대 10 μm의 오차가 발생할 수 있어 가공 깊이가 커질 수 있다. 가공 깊이가 줄어드는 다른 원인으로 공구의 마모를 들 수 있으나 공구의 초기 위치 설정 오차나 가공물 정렬 오차가 공구 모서리 반경 변화와 비슷한 수준(Order)이므로 명확한 결론을 얻기 위해선 더 높은 정밀도의 실험이 필요하다.

사각 디스크 공구와 달리, V형 디스크 공구는 수 마이크로(μm)의 모서리 부분이 주된 날(edge) 역할을 한다. 이는 초경합금 가공 시 공구가 마모되거나 파손될 가능성이 높기 때문에 V형 디스크 공구의 마모량 평가는 보다 중요하다. Fig. 9와 같이 60의 각도를 갖는 삼각형 단면의 홈을 가공하기 위해 V형 디스크 공구를 제작하였으며 그 마모 특성을 관찰하였다. 22,000 pF의 축전 용량으로 공구를 방전 가공하고, 20,000 RPM, 30 μm/s의 조건으로 깊이 60 μm, 길이 150 mm의 홈을 가공하였다.

Fig 10은 가공 전후의 공구 모서리의 사진이며 공구 모서리 반경은 가공 전 2.31 μm에서 가공 후 3.87 μm으로 증가하였으며, 모서리 부분에서 약간의 굽힘의 흔적을 발견할 수 있었다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 WEDG를 이용한 미세 디스크 공구 제작을 제안하였다. 와이어 이송 경로에 따라 사각 디스크, V형 디스크

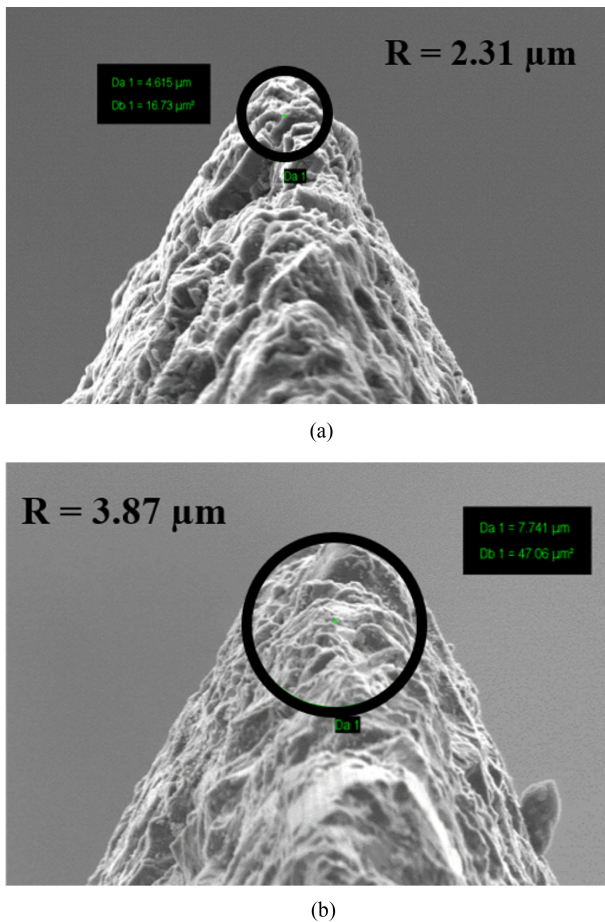


Fig. 10 SEM image of V-shape disk tool (a) before machining and (b) after machining

등 다양한 형태의 공구를 제작할 수 있음을 보였으며 목적에 따라 다양한 단면의 미세 홈을 가공할 수 있다.

고경도 난삭재인 초경합금에 미세 홈을 가공하기 위해 초경합금 보다 높은 경도의 다결정 다이아몬드 소재의 디스크 공구를 방전 가공으로 제작하여 미세 홈을 가공할 수 있음을 보였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

방전 가공으로 공구를 제작할 때 사용된 축전 용량이 낮을수록 홈의 표면 조도가 감소하였다.

미세 홈 가공에서 디스크 공구의 이송 속도가 낮을수록 표면 조도가 감소하였다. 축전용량 5,000-20,000 pF, 이송 속도 10-40  $\mu\text{m/s}$ 에서 0.1-0.2  $\mu\text{m Ra}$ 를 얻을 수 있었다.

가공 깊이 30-60  $\mu\text{m}$ , 길이 100 mm의 미세 홈 가공 후에도 디스크 공구의 마모는 크지 않았으며 모서리 반경이 2  $\mu\text{m}$ 에서 4  $\mu\text{m}$ 로 증가하는 변화를 보였다.

## ACKNOWLEDGEMENT

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2022R1F1A1067961).

## REFERENCES

- Park, J. A., Lee, U. S., Kim, B. H., (2020), Micro pin fabrication of tungsten carbide using polycrystalline diamond, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 37(11), 791-796.
- Sim, D. B., Yang, C. Y., Kim, B. H., (2022), Machining of V-shaped microchannel on cemented carbide using PCD tools, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 39(10), 747-752.
- Jahan, M., Rahman, M., Wong, Y., (2011), A review on the conventional and micro-electrodischarge machining of tungsten carbide, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 51(12), 837-858.
- Lee, P. A., Nam, E., Kim, B. H., (2018), The state of the art in electrochemical micro machining technologies, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 35(3), 229-239.
- Lee, C. J., Choi, H. K., Sohn, I. B., Ha, J. S., (2023), Laser micro-structuring of super-hydrophobic surface for lotus effect, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 40(4), 291-299.
- Jo, M., Ji, S. Y., Cho, J., Chang, W. S., (2023), Micro-patterning of liquid metal on flexible substrate using laser induced-forward transfer, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 40(2), 157-162.
- Oliaei, S., Karpat, Y., Davim, J. P., Perveen, A., (2018), Micro tool design and fabrication: A review, *Journal of Manufacturing Processes*, 36, 496-519.
- Hourmand, M., Sarhan, A., Noordin, M., Sayuti, M., (2016), 1.10 micro-EDM drilling of tungsten carbide using microelectrode with high aspect ratio to improve MRR, EWR, and hole quality, *Comprehensive Materials Finishing*, 267-321. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.09155-4>
- Park, J. W., Chu, C. N., (2015), Shape control of micro-pin using electrochemical etching and its analysis, *Proceedings of the Korean Society for Precision Engineering 2015 Spring Conference*, 277.
- Kim, S. H., Song, J. Y., Lee, P. A., Kim, B. H., Oh, Y. T., Cho, Y. H., (2013), Surface polishing of polymer microlens with solvent vapor, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 30(6), 644-649.
- Kim, S.-H., Chung, D.-K., Kim, B.-H., Oh, K.-H., Jeong, S.-H., Chu, C.-N., (2009), Micromachining using hybrid of laser beam and electrical discharge machining, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 26(10), 108-115.
- Masuzawa, T., Fujino, M., Kobayashi, K., Suzuki, T., Kinoshita, N., (1985), Wire electro-discharge grinding for micro-machining, *CIRP Annals*, 34(1), 431-434.
- Lee, U. S., Yang, C. Y., Lee, J. H., Kim, B. H., (2021), Micro drilling of single crystal SiC using polycrystalline diamond tool, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 38(7),

471-478.

14. Shin, H.-S., Kim, B.-H., Kim, G.-M., Chung, D.-K., Chu, C.-N., (2009), Micro electrochemical machining using a multi-function electrode, Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, 33(5), 496-501.
15. Lee, P. A., Kim, S. K., Kim, B. H., (2018), Fabrication of micro column array by micro EDM using eccentric tool electrodes, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 35(3), 305-310.
16. Na, Y., Kim, B. H., (2019), Effect of vibration and machining area in the fabrication of micro tool by reverse EDM, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 36(2), 169-175.
17. Park, J. W., Chung, D. K., Kim, B. H., Ok, J. G., Kim, W. J., Kim, Y. H., Chu, C. N., (2012), Wire electrical discharge machining of carbon nanofiber mats for field emission, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 13(4), 593-599.

**Min Ki Kim**

Undergraduate student in the School of Mechanical Engineering, Soongsil University. His research interest is micro machining.

E-mail: kimminki22@soongsil.ac.kr

**Chan Young Yang**

M.S. student in the Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Soongsil University, Korea. His research interest is micro machining.

E-mail: cyyangmech@soongsil.ac.kr

**Dae Bo Sim**

M.S. student in the Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Soongsil University, Korea. His research interest is micro machining.

E-mail: daebosim@soongsil.ac.kr

**Ji Hyo Lee**

M.S. student in the Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Soongsil University, Korea. Her research interest is micro machining.

E-mail: jihyolee@soongsil.ac.kr

**Bo Hyun Kim**

Professor in the School of Mechanical engineering, Soongsil University. His research topics are micro mechanical and non-conventional machining processes.

E-mail: bhkim@ssu.ac.kr





## • 특집 • 초정밀가공공정기술(Ultra-precision Machining Process Technology)

# 실리콘 카바이드의 미세 방전 가공 특성

## Machining Characteristics of Micro EDM of Silicon Carbide

이주현<sup>1</sup>, 양찬영<sup>2</sup>, 김보현<sup>1,#</sup>

Ju Hyeon Lee<sup>1</sup>, Chan Young Yang<sup>2</sup>, and Bo Hyun Kim<sup>1,#</sup>

<sup>1</sup> 숭실대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Soongsil University)

<sup>2</sup> 숭실대학교 대학원 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Soongsil University)

# Corresponding Author / E-mail: bhkim@ssu.ac.kr, TEL: +82-2-820-0653

ORCID: 0000-0002-1546-5420

KEYWORDS: Silicon carbide (탄화규소), EDM (방전가공), PCD (다결정 다이아몬드), Hole (구멍), Groove (홈)

*Silicon carbide (SiC) is chemically stable, highly heat-resistant, and resistant to thermal shock. SiC having excellent characteristics in a high temperature and high voltage environment is used in high-power semiconductors, high-precision mechanical devices, optical components, etc. As it is used in various industries, there is a growing demand for processing fine holes or grooves in silicon carbide. In this study, micro holes and grooves were machined on 4H-SiC and sintered SiC using electrical discharge machining (EDM). Silicon carbide which has very high hardness can be easily processed by EDM as compared with mechanical processes. As a tool material, a polycrystalline diamond (PCD) which has high wear resistance was used and a micro tool of a diameter of 100 μm was fabricated by wire electrical discharge grinding (WEDG). In the EDM of SiC, the machining characteristics such as surface roughness, discharge gap, and tool wear were investigated.*

Manuscript received: November 13, 2023 / Revised: January 2, 2024 / Accepted: January 4, 2024

### 1. 서론

최근, 반도체, 항공우주, 광학 등의 다양한 분야에서 미세 형상 가공에 대한 요구가 증가하고 있으며 그에 따라 절삭, 연삭, 레이저, 방전, 전해 가공 등 다양한 초정밀 가공 공정에 대한 많은 연구가 수행되고 있다[1-8]. 그 중 실리콘 카바이드(Silicon Carbide, SiC), 지르코니아, 알루미늄과 같은 고경도 세라믹 재료에 대한 정밀 가공 수요가 높아지고 있다[1]. 특히 미세 형상의 크기는 수백 μm에서 수 μm까지 다양하게 요구되고 있으며 미세 형상에는 다양한 형상이 있을 수 있지만 구멍과 홈 가공이 가장 많이 요구되고 있다.

실리콘 카바이드는 화학적으로 안정적이고 고온 환경에서 열 충격에 강하다는 특성을 가지고 있으며 우수한 기계적 특성을 가지고 있어 고출력 전력반도체, 반도체 공정 부품, 우주 항공

및 광학 부품의 소재로 주목을 받고 있다. 하지만 높은 경도와 취성 성질로 인해 가공이 어려운 문제점이 있다[1].

Suzuki 등은 레이저를 이용하여 미세 다이아몬드 밀링 공구를 제작한 뒤 이를 이용하여 SiC를 가공하였으며 우수한 표면 품질의 미세 렌즈 어레이 몰드를 제작하였다[9]. Yan 등은 SiC에 방전으로 미세 구멍 형상을 가공한 뒤 가공 표면에서 SiC의 성분 변화 및 열변형층에 대해 연구하였으며 방전 가공 후 실리콘 카바이드가 실리콘과 탄소로 분해되는 것을 밝혔다[10]. Kliuev 등은 탈이온수를 이용한 방전 가공을 수행하였으며 인가전압과 펄스 폭 등의 가공 조건에 따른 가공 특성에 대해 연구하였다[11].

본 연구에서는 단결정 실리콘 카바이드인 4H-SiC와 Sintered SiC(소결 SiC)의 미세 방전 가공 특성에 대해 연구하였다. SiC는 대략 13-25 mΩ·cm의 비저항값을 갖고 있으며

이는 방전 가공을 적용할 수 있는 최대 저항값이라고 할 수 있다[11-15]. 4H-SiC는 고전력 반도체소자나 광학부품의 소재로 주로 사용되며 소결 SiC는 고경도 기계 부품 등에 사용된다. 방전 가공에서 공구 전극의 재료로 방전 마모에 대해 높은 저항을 갖는 다결정 다이아몬드(Polycrystalline Diamond, PCD)를 사용하였으며, 와이어 방전 가공의 일종인 와이어 방전 연삭(Wire Electrical Discharge Grinding, WEDG)으로 지름 100  $\mu\text{m}$ 의 원통형 공구 전극을 제작하여 실험을 진행하였다[16-19]. 제작한 공구를 이용해 실리콘 카바이드에 방전 가공으로 구멍과 홈을 가공하였다. 방전 가공 시, 사용하는 축전 용량에 따라 방전 에너지 크기가 달라지므로 축전 용량의 변화에 따른 구멍과 홈의 거칠기, 방전흔의 크기, 방전 겹, 가공 시간, 그리고 공구의 마모 정도의 차이를 측정하여 비교하였다.

2. SiC 재료와 실험 장치

실험에서 사용한 SiC는 Fig. 1과 같은 4H-SiC Wafer와 Sintered SiC이며, 각 SiC에서 같은 조건으로 구멍과 홈을 가공하여 SiC 종류에 따른 가공 특성의 차이를 비교하였다.

Fig. 2는 본 실험에서 사용한 가공 장치의 개략도이다. 약 3  $\mu\text{m}$  오차의 정밀도를 갖는 X-Y-Z 3축 이송 스테이지(300AT, Parker Hannafin Corp.)로 구성되어 있으며, Z축에는 PCD 공구 전극을 장착할 수 있는 만드렐이 있고 X, Y축에는 와이어 방전 연삭을 위한 와이어 장치가 설치되어 있다. 공구 제작 장치 바로 옆에 가공물을 장착하여 방전 가공을 할 수 있도록 수조를 장착하였다. 실험에서 쓰인 방전 회로는 저항(Resistor)과 축전기(Capacitor)로 이루어진 RC 타입의 회로이다.

3. 실험 방법

3.1 PCD 공구 전극 가공

공구 전극 재료로 PCD를 사용하였다. PCD는 높은 온도에서도 높은 경도와 내마모성을 갖고 있으며 열전도성이 우수하여 기계적 가공이나 방전 가공에서 공구 마모가 낮은 특성이 있다. PCD는 높은 경도를 갖고 있기 때문에 미세 공구 제작할 때 연삭과 같은 기계적 가공보다 방전 가공으로 제작하는 것이 보다 수월하다. 따라서 본 실험에서는 Fig. 3과 같이 와이어 방전 연삭(WEDG)으로 PCD 공구를 제작하였다. 공구를 제작할 때 사용한 가공 조건은 Table 1과 같다.

본 실험에서는 결정립 크기가 10  $\mu\text{m}$ 인 지름 1 mm의 PCD 소재를 방전 가공하여 Fig. 4와 같이 지름 100  $\mu\text{m}$ , 총 길이 1,000  $\mu\text{m}$ 의 원통형 공구로 가공하였다. Fig. 4는 주사전자현미경(GeminiSEM300, Carl Zeiss Corp.)으로 촬영한 사진이다.

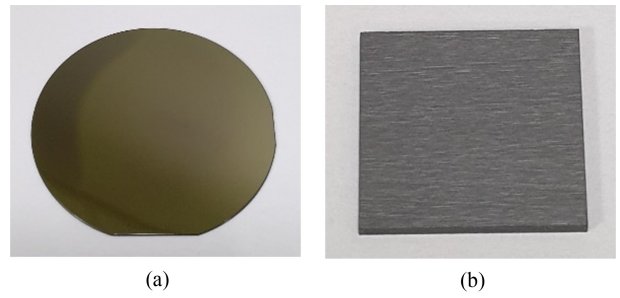


Fig. 1 (a) 4H-SiC wafer, (b) Sintered SiC

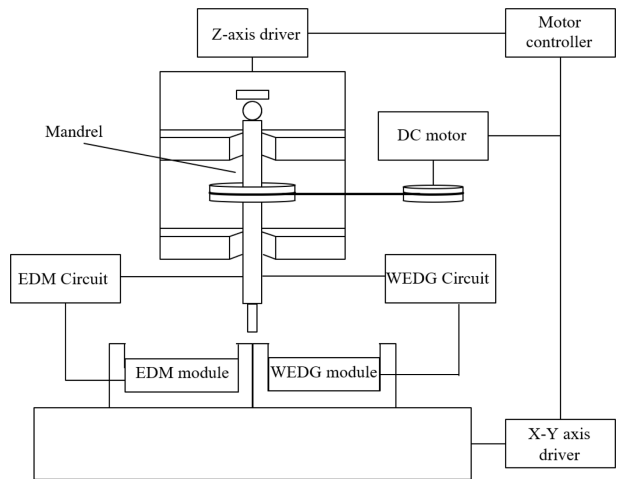


Fig. 2 Schematic of experimental system

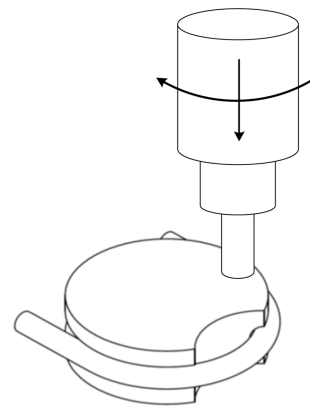


Fig. 3 Schematic of tool fabrication by WEDG

3.2 방전 구멍과 홈 가공

Fig. 2의 실험 장치의 개략도와 같이 공구 제작을 위한 WEDG 모듈 옆에 SiC 방전 가공을 할 수 있도록 방전액을 채우기 위한 수조를 설치하고 그 위에 시편을 고정하여 방전 가공을 진행하였다. 시편으로는 각각 두께 500  $\mu\text{m}$ 와 1 mm의 4H-SiC 웨이퍼와 Sintered SiC의 판재를 사용하였다.

구멍 가공 방법으로 Fig. 5(a)와 같이 시편을 고정한 후 제작한 공구를 수직 방향으로 내리면서 방전 가공하였으며 구멍

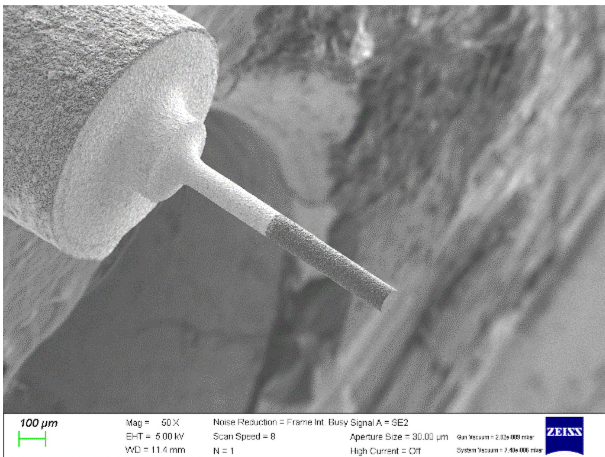


Fig. 4 PCD tool fabricated by WEDG

Table 1 Tool machining conditions

Tool machining condition	
Rotational speed [RPM]	2,250
Feed rate [ $\mu\text{m/s}$ ]	1
Capacitance [pF]	20,000 (rough) 5,600 (finish)
Materials	PCD rod $\varnothing$ 1 mm (Grain size 10 $\mu\text{m}$ , Binder: W-Co) Brass wire $\varnothing$ 200 $\mu\text{m}$

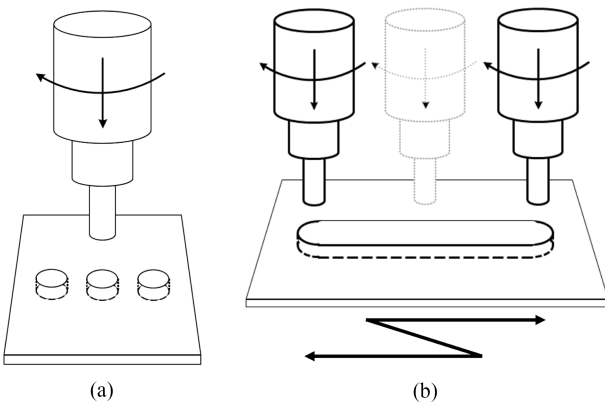


Fig. 5 Schematics of (a) drilling and (b) grooving

방전 가공 조건은 Table 2와 같다. 공구를 수직방향(z축 방향)으로 1  $\mu\text{m/s}$ 의 속도로 이송하여 총 200  $\mu\text{m}$  깊이의 구멍을 가공하였다.

Fig. 5(b)는 미세 홈을 가공하는 과정을 나타낸 것이다. 구멍 가공과의 차이점은 시편이 고정된 이송 스테이지가 X축 방향으로 좌우로 반복 운동 하는 상태에서 공구를 Z축 방향으로 이송하여 홈을 가공하였다는 것이다. 시편이 고정된 스테이지를 X축 방향으로 5,000  $\mu\text{m/s}$ 의 속도로 400  $\mu\text{m}$  길이를 반복 운동하도록 한 상태에서 공구를 Z축 방향으로 3  $\mu\text{m/s}$ 의 속도로 이송하였다. 미세 홈의 가공 조건은 Table 3과 같다.

Table 2 Hole machining conditions

Hole machining condition	
Rotational speed [RPM]	3,000
Feed rate [ $\mu\text{m/s}$ ]	1
Capacitance [pF]	5,600 / 10,000 / 100,000
Hole depth [ $\mu\text{m}$ ]	200
Materials	4H-SiC wafer Sintered SiC

Table 3 Groove machining conditions

Groove machining condition	
Rotational speed [RPM]	3,000
X-axis feed rate [ $\mu\text{m/s}$ ]	5,000
Z-axis feed rate [ $\mu\text{m/s}$ ]	3
Capacitance [pF]	5,600 / 10,000 / 100,000
Groove depth [ $\mu\text{m}$ ]	100
Groove length [ $\mu\text{m}$ ]	400
Materials	4H-SiC wafer Sintered SiC

방전 가공에서는 축전 용량의 크기에 따라 방전 에너지 크기가 달라진다[19-21]. 축전 용량의 크기에 따라 방전 가공 표면이 어떻게 달라지는지 알아보기 위해 구멍과 홈 방전 가공에서 5,600, 10,000, 100,000 pF의 3가지의 축전 용량을 사용하였다.

#### 4. 실험 결과

##### 4.1 방전 구멍과 홈 가공

4H-SiC에 방전 가공으로 구멍과 홈을 가공할 때 사용한 축전 용량(Capacitance)의 크기에 따른 표면 거칠기와 공구의 마모 정도를 알아보았다. RC 형태의 방전 회로에서 방전에너지는 축전기의 축전 용량에 비례하며, 방전 에너지가 클수록 방전에 의한 재료 제거량이 커지게 된다.

Fig. 6는 각각 5,600, 10,000, 100,000 pF의 축전 용량에 따라 방전 가공된 구멍 입구부와 가공 표면의 사진이다. 방전으로 구멍을 가공하면 방전 에너지에 의해 재료가 녹고 재응고되면서 구멍 주변에 버(Burr)가 발생하는데, 축전 용량이 커질수록 구멍 입구에 발생하는 버가 더 많아지는 것으로 나타났다. 구멍의 입구 지름 또한 축전 용량에 따라 달라지는 경향을 보였다. 축전 용량이 커짐에 따라 구멍의 지름이 133, 140, 147  $\mu\text{m}$ 으로 점점 커지는 것을 확인할 수 있었다. 이는 방전 에너지가 커짐에 따라 방전 갭(Gap)이 커지기 때문이다. 동일한 이유로 구멍 표면의 방전흔도 커지는 것을 볼 수 있다.

Fig. 7은 축전 용량에 따른 방전 가공된 미세 홈과 홈 바닥의 표면 사진이다. 구멍 가공과 동일하게 5,600, 10,000, 100,000 pF의 축전 용량을 사용하였다. 구멍 가공 결과와 마찬가지로

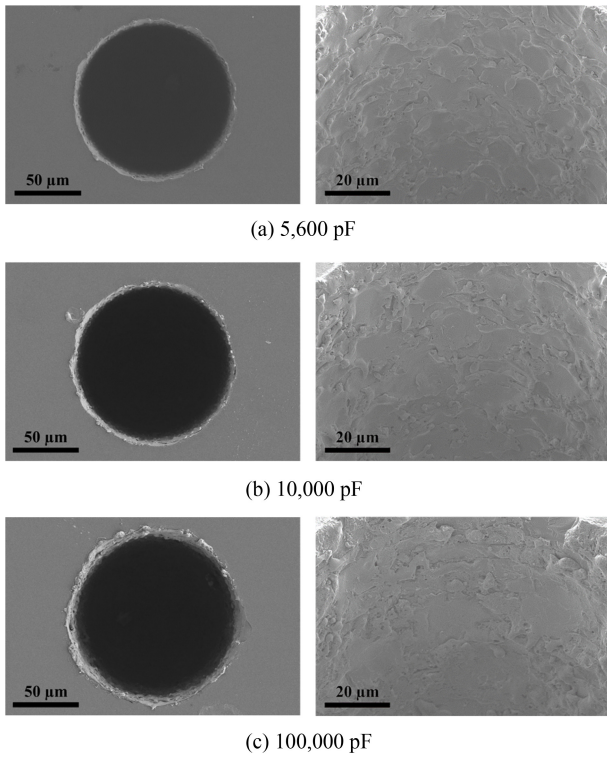


Fig. 6 SEM images of micro holes machined on 4H-SiC wafer

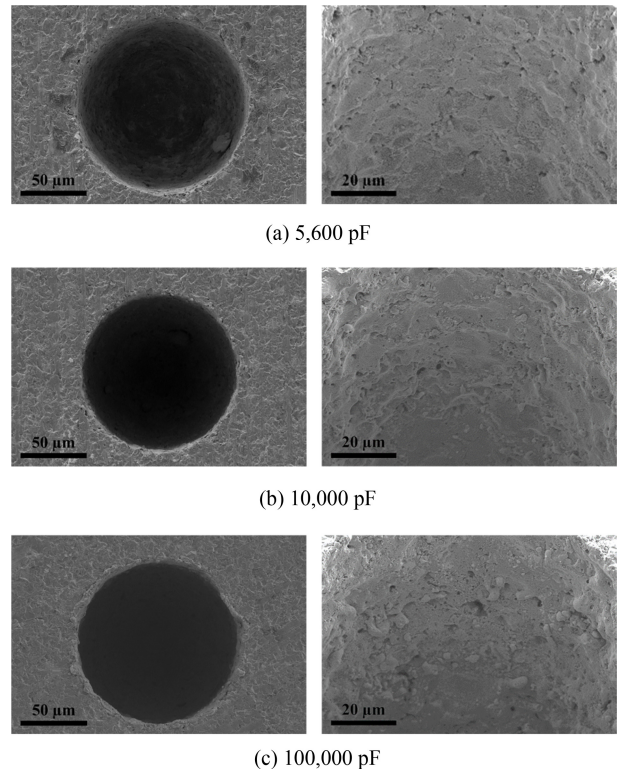


Fig. 8 SEM images of micro holes machined on Sintered SiC

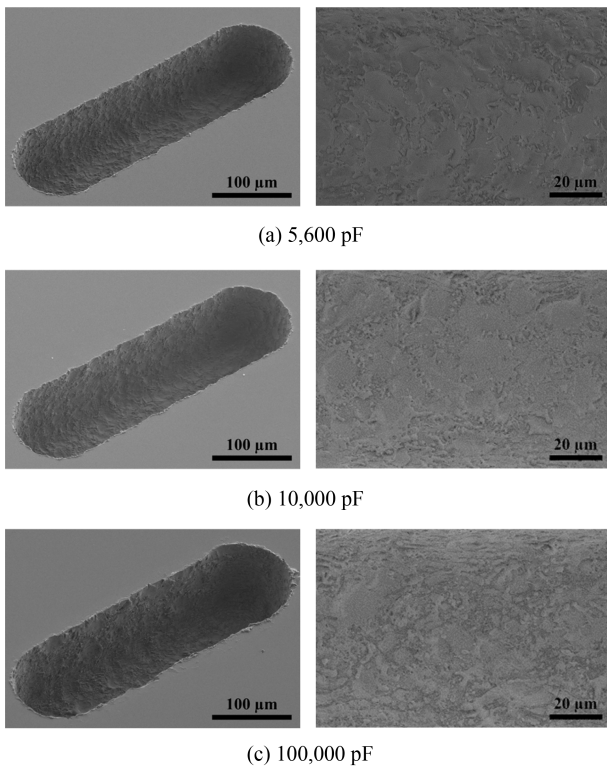


Fig. 7 SEM images of micro grooves machined on 4H-SiC wafer

축전 용량이 커질수록 홈의 입구 부분에서의 버가 더 많아지는 경향을 보였다. 바닥 면도 마찬가지로 축전 용량이 커질수록

방전흔의 크기가 더 커지는 것을 확인할 수 있다. 이에 따라 거칠기 또한 더 커지는 경향을 보였다.

#### 4.2 Sintered SiC 가공 결과

4H-SiC Wafer를 가공할 때와 동일한 조건으로 Sintered SiC를 가공하였다. Figs. 8과 9는 각 축전 용량에 따른 구멍과 홈의 입구 부분과 가공 표면을 보여준다. 축전 용량이 커질수록 입구에서 발생하는 버가 더 많아지고 구멍의 입구 주변에 치핑(Chipping)이 더 많이 발생함을 확인할 수 있다. 방전흔도 4H-SiC와 마찬가지로 축전 용량이 더욱 커짐에 따라 같이 커지는 것으로 확인되었다.

#### 4.3 SiC 종류에 따른 가공 결과 비교

4H-SiC와 Sintered SiC 방전 가공 결과 축전 용량에 따른 변화는 동일한 경향성을 보였다. 축전 용량이 커질수록 입구의 품질이 나빠지며, 방전흔의 크기가 커지고 가공면의 표면 거칠기가 커지는 경향이 나타났다.

Fig. 10은 두 종류의 SiC에서 홈 가공 시 축전 용량에 따른 표면 거칠기(Ra)와 공구의 마모 정도를 비교한 그래프이다. 4H-SiC와 Sintered SiC에서 모두 축전 용량이 커짐에 따라 거칠기도 커지는 경향을 보이고 있다. 4H-SiC의 표면거칠기는 0.197  $\mu\text{m}$  Ra에서 0.285  $\mu\text{m}$  Ra로 증가하였으며, Sintered SiC는 0.154  $\mu\text{m}$  Ra에서 0.175  $\mu\text{m}$  Ra로 증가하였다. 전체적으로 Sintered SiC의 거칠기가 4H-SiC보다 더 작게 나타나는 경향을 보인다.

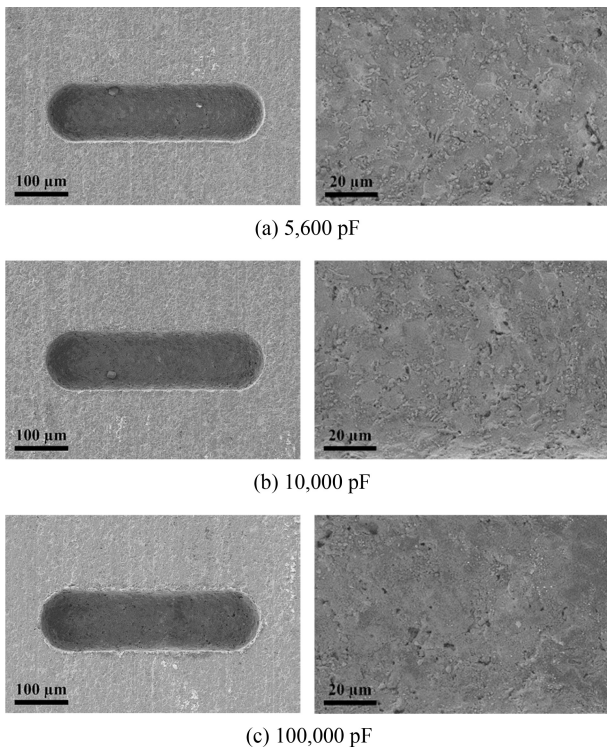


Fig. 9 SEM images of micro grooves machined on Sintered SiC

공구의 마모는 방전 가공 이전과 이후의 공구의 길이 차이를 측정하여 비교하였다. Fig. 10(b)는 방전 가공 전후의 공구의 길이 차이를 축전 용량에 따라 나타낸 그래프이다. Sintered SiC 가공보다 4H-SiC 가공에서 공구 마모가 작게 측정되었으며 축전 용량이 커질수록 공구 마모가 더 작게 발생하는 경향을 보인다. 축전 용량이 커질수록 Sintered SiC 가공에서의 공구 마모는 29 μm 에서 6 μm로 줄었으며 4H-SiC 가공에서는 8 μm에서 거의 0 μm 수준으로 줄어들었다. 폭 100 μm, 깊이 100 μm, 길이 400 μm의 홈 크기를 고려했을 때 공구 마모가 매우 작게 발생하였다. 이송 스테이지의 정밀도와 전기 접촉 등의 오차를 고려하더라도 수 마이크로 미터 수준의 길이 방향 마모는 매우 적은 수치이며 이에 대한 더 정밀한 실험이 필요하다. Tables 4와 5에 축전 용량에 따른 미세 홈의 표면 조도와 공구 마모량을 나타내었다.

4H-SiC와 Sintered SiC 가공 시 표면 거칠기와 공구 마모의 변화 경향성은 비슷하지만 크기에 차이가 발생하였다. 4H-SiC 가공 시 Sintered SiC보다 표면 거칠기가 더 크고 공구 마모는 더 작은 결과를 보였으며, 이는 Sintered SiC의 바인더 성분에 의해 차이가 발생한 것으로 추정된다. 본 연구에서 사용한 Sintered SiC는 바인더로 Al을 사용한 것이며, 바인더 재료에 따라 SiC 특성이 달라진다고 알려져 있다[15,22]. 해당 바인더로 인해 전기 저항(Electrical Resistivity)이 낮아지므로 방전 가공 시 방전 전류 강도(Current Intensity)가 더 커져 공구의 마모가 많이 발생한 것으로 판단된다[22-24]. 또한 소결 조건에 따라 파괴 인성(Fracture Toughness)에도 영향을 준다[25-28]. 이러한

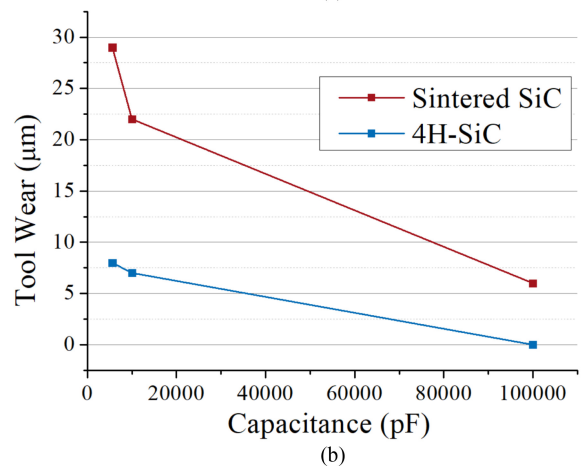
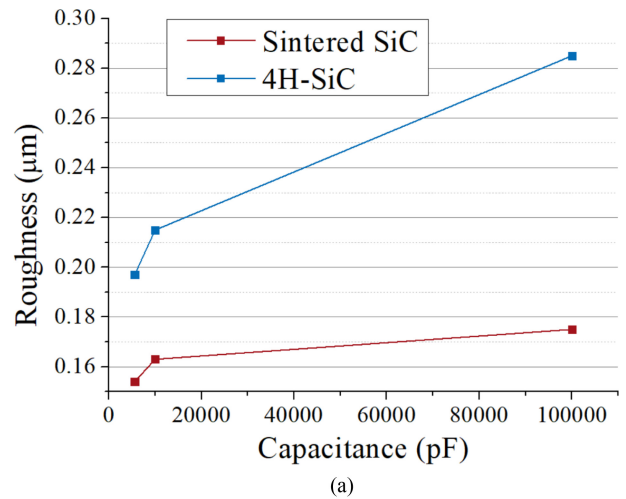


Fig. 10 (a) Average surface roughness of the groove surface, (b) tool wear in the machining of groove on 4H-SiC and Sintered SiC according to capacitance

Table 4 Roughness of EDMed groove surface

Capacitance [pF]	Roughness [μm]	
	4H-SiC	Sintered SiC
5,600	0.197	0.154
10,000	0.215	0.163
100,000	0.285	0.175

Table 5 Tool wear in groove machining

Capacitance [pF]	Tool wear [μm]	
	4H-SiC	Sintered SiC
5,600	8	29
10,000	7	22
100,000	0	6

이유로 4H-SiC와 Sintered SiC 가공 시 표면 거칠기와 공구 마모의 크기에 차이가 발생한 것으로 추정되며 추후 이에 대한 더 많은 연구가 필요하다.

## 5. 결론

본 연구에서는 PCD 공구를 이용하여 4H-SiC와 Sintered SiC에 구멍과 홈을 방전 가공하여 축전 용량에 따른 가공 표면, 공구 마모 등의 가공 특성을 연구하였다. 축전 용량은 5,600, 10,000, 100,000 pF를 사용하였고 두 종류의 SiC에서 모두 축전 용량이 커짐에 따라 구멍과 홈의 입구에 버가 많아지며 가공면에 발생하는 방전흔의 크기가 커지고 표면 거칠기가 커지는 경향을 보였다. 표면 거칠기는 Ra 0.2  $\mu\text{m}$  수준으로 측정되었다. 지름 100  $\mu\text{m}$ 의 공구로 길이 400  $\mu\text{m}$ , 깊이 100  $\mu\text{m}$ 의 미세 홈을 가공하였을 때 길이 방향의 공구 마모를 관찰하였으며, Sintered SiC의 경우 6-29  $\mu\text{m}$ , 4H-SiC의 경우 10  $\mu\text{m}$  이내의 공구 마모가 측정되었다. 이는 다른 재료의 방전 가공에 비해 매우 작은 공구 마모량이며, 이에 대해 더 많은 연구가 필요하다.

## ACKNOWLEDGEMENT

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2022R1F1A1067961).

## REFERENCES

1. Cho, Y., Hwang, J., Park, M.-S., Kim, B. H., (2022), Fabrication methods for microscale 3D structures on silicon carbide, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 23(12), 1477-1502.
2. Shin, H.-S., Kim, B.-H., Kim, G.-M., Chung, D.-K., Chu, C.-N., (2009), Micro electrochemical machining using a multi-function electrode, *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, 33(5), 496-501.
3. Moon, I. Y., Chung, D. K., Kim, B. H., (2018), Fabrication of micro tool electrode by micro EDM using wear ratio, *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, 27(1), 1-6. 10.7735/ksmte.2018.27.1.1
4. Jo, C.-H., Kim, B.-H., Chu, C.-N., (2008), Electrochemical machining using a disk electrode for micro internal features, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 25(7), 139-144.
5. Lee, P. A., Nam, E., Kim, B. H., (2018), The state of the art in electrochemical micro machining technologies, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 35(3), 229-239.
6. Kim, S.-H., Chung, D.-K., Kim, B.-H., Oh, K.-H., Jeong, S.-H., Chu, C.-N., (2009), Micromachining using hybrid of laser beam and electrical discharge machining, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 26(10), 108-115.
7. Park, J. W., Chung, D. K., Kim, B. H., Ok, J. G., Kim, W. J., Kim, Y. H., Chu, C. N., (2012), Wire electrical discharge machining of carbon nanofiber mats for field emission, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 13(4), 593-599.
8. Chung, D. K., Shin, H. S., Kim, B. H., Chu, C. N., (2011), High frequency micro wire EDM for electrolytic corrosion prevention, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 12(6), 1125-1128.
9. Suzuki, H., Okada, M., Asai, W., Sumiya, H., Harano, K., Yamagata, Y., Miura, K., (2017), Micro milling tool made of nano-polycrystalline diamond for precision cutting of SiC, *CIRP Annals*, 66(1), 93-96.
10. Tan, T.-H., Yan, J., (2017), Atomic-scale characterization of subsurface damage and structural changes of single-crystal silicon carbide subjected to electrical discharge machining, *Acta Materialia*, 123, 362-372.
11. Kliuev, M., Maradia, U., Boccadoro, M., Perez, R., Stirnimann, J., Wegener, K., (2016), Experimental study of EDM-drilling and shaping of SiSiC and SiC, *Procedia CIRP*, 42, 191-196.
12. Bilal, A., Jahan, M. P., Talamona, D., Perveen, A., (2018), Electro-discharge machining of ceramics: A review, *Micromachines*, 10(1), 10.
13. Schubert, A., Zeidler, H., Kühn, R., Hackert-Oschätzchen, M., (2015), Microelectrical discharge machining: A suitable process for machining ceramics, *Journal of Ceramics*, 2015, 470801.
14. Ji, R., Liu, Y., Zhang, Y., Cai, B., Ma, J., Li, X., (2012), Influence of dielectric and machining parameters on the process performance for electric discharge milling of SiC ceramic, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 59(1), 127-136.
15. Zeller, F., Ojha, N., Müller, C., Reinecke, H., (2014), Electrical discharge milling of silicon carbide with different electrical conductivity, *Key Engineering Materials*, 611-612, 677-684.
16. Sim, D. B., Yang, C. Y., Kim, B. H., (2022), Machining of V-shaped microchannel on cemented carbide using PCD tools, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 39(10), 747-752.
17. Moon, I. Y., Kim, B. H., (2013), Micro machining of titanium alloy using polycrystalline diamond tools, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 30(3), 284-291.
18. Lee, U. S., Yang, C. Y., Lee, J. H., Kim, B. H., (2021), Micro drilling of single crystal SiC using polycrystalline diamond tool, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 38(7), 471-478.
19. 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.
20. Park, J. A., Lee, U. S., Kim, B. H., (2020), Micro pin fabrication of tungsten carbide using polycrystalline diamond, *Journal of the*

Korean Society for Precision Engineering, 37(11), 791-796.

21. Na, Y., Kim, B. H., (2019), Effect of vibration and machining area in the fabrication of micro tool by reverse EDM, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 36(2), 169-175.
22. Hong, S., Kao, P., (1991), Mechanical properties of Al-SiC composites made by resistance sintering of mechanically alloyed powders, Materials Science and Engineering: A, 148(2), 189-195.
23. Luis, C., Puertas, I., Villa, G., (2005), Material removal rate and electrode wear study on the EDM of silicon carbide, Journal of Materials Processing Technology, 164-165, 889-896.
24. Sharma, D., Hiremath, S. S., (2021), Review on tools and tool wear in EDM, Machining Science and Technology, 25(5), 802-873.
25. Zhao, Y., Kunieda, M., Abe, K., (2016), EDM mechanism of single crystal SiC with respect to thermal, mechanical and chemical aspects, Journal of Materials Processing Technology, 236, 138-147.
26. Kaur, S., Cutler, R. A., Shetty, D. K., (2009), Short?crack fracture toughness of silicon carbide, Journal of the American Ceramic Society, 92(1), 179-185.
27. Magnani, G., Brentari, A., Burrese, E., Raiteri, G., (2014), Pressureless sintered silicon carbide with enhanced mechanical properties obtained by the two-step sintering method, Ceramics International, 40(1), 1759-1763.
28. Barak, Y., Srivastava, A., Osovski, S., (2019), Correlating fracture toughness and fracture surface roughness via correlation length scale, International Journal of Fracture, 219(1), 19-30.

**Ju Hyeon Lee**

Undergraduate student in the School of Mechanical Engineering, Soongsil University. Her research interest is micro machining.

E-mail: jhlee23@soongsil.ac.kr

**Chan Young Yang**

M.S. student in the department of Mechanical Engineering, Graduate School, Soongsil University, Korea. His research interest is micro machining.

E-mail: cyyangmech@soongsil.ac.kr

**Bo Hyun Kim**

Professor in the School of Mechanical Engineering, Soongsil University. His research topics are micro mechanical and non-conventional machining processes.

E-mail: bhkim@ssu.ac.kr





• 특집 • 초정밀가공공정기술(Ultra-precision Machining Process Technology)

## 비정질 탄소 분말 첨가에 따른 퓨란 전구체 탄화 공정의 열분해 수축 저감 연구

## Study on Reduction of Pyrolysis Shrinkage in the Carbonization of Furan Precursor by Addition of Vitreous Carbon Powder

김영규<sup>1,2</sup>, 홍동인<sup>3</sup>, 김홍민<sup>4</sup>, 안수호<sup>4</sup>, 김석민<sup>1,2,3,#</sup>  
Young Kyu Kim<sup>1,2</sup>, Dong-in Hong<sup>3</sup>, Hongmin Kim<sup>4</sup>, Suho Ahn<sup>4</sup>, and Seok-Min Kim<sup>1,2,3,#</sup>

<sup>1</sup> 중앙대학교 컴퓨터공학과 (Department of Computer Science and Engineering, Chung-Ang University)

<sup>2</sup> 중앙대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Chung-Ang University)

<sup>3</sup> 중앙대학교 기계시스템엔지니어링학과 (Department of Mechanical System Engineering, Chung-Ang University)

<sup>4</sup> (주)굿피앤씨 (Goodpnc Co., Ltd.)

# Corresponding Author / E-mail: smkim@cau.ac.kr, TEL: +82-2-820-5877

ORCID: 0000-0002-1609-6786

KEYWORDS: Vitreous carbon (비정질 탄소), Pyrolysis shrinkage (열분해 수축), Carbonization (탄화), Vitreous carbon mold (비정질 탄소 몰드), Glass molding (유리성형)

Vitreous carbon (VC) is an excellent material for glass molding due to its high hot hardness and low adhesion to glass materials. As a low-cost VC micro/nano mold fabrication method, carbonization of replicated Furan precursor has been investigated for various glass molded micro/nano optical and fluidic devices. One of the critical issues identified in the method is the substantial pyrolysis shrinkage (~22%) during the carbonization process. In this study, a method of minimizing pyrolysis shrinkage by adding VC powder to the initial Furan resin mixture was investigated. The mixing ratio of Furan resin, initiator, and ethanol was experimentally optimized for each VC powder mixing ratio, and the effects of the VC powder mixing ratio on the pyrolysis shrinkage of VC mold were examined. As the VC powder mixing ratio increased from 0% to 40%, we observed a reduction in the shrinkage ratio from 22.18% to 12.89% aligning closely with theoretical expectations.

Manuscript received: November 1, 2023 / Revised: December 11, 2023 / Accepted: January 3, 2024

### NOMENCLATURE

VC	=	Vitreous Carbon
PDMS	=	Polydimethylsiloxane
p-TSA	=	p-Toluenesulfonic Acid
S	=	Shrinkage Ratio of VC Mold
S <sub>0</sub>	=	Shrinkage Ratio of VC Mold without VC Powder
R	=	Mixing Ratio of VC Powder

### 1. 서론

기계적/광학적 성능이 우수한 유리소재를 이용한 마이크로/나노 구조물의 저가 제작기술로서 유리소재와 몰드를 소재의 유리전이온도 이상으로 가열하여 압축하는 마이크로/나노 유리 성형 기술이 연구되고 있다. 유리성형 공정의 몰드 소재는 높은 고온 경도, 낮은 열팽창 계수, 낮은 표면에너지 등의 특성을 가져야 하며, 마이크로/나노 유리성형을 위해 실리콘, 실리콘 카바이드, 텅스텐카바이드, 비정질 탄소(Vitreous Carbon, VC) 등을

이용한 몰드 제작 기술이 연구되었다[1-3]. 다양한 몰드 소재중 VC는 높은 열적 우수성을 가지며, 유리소재와 이형특성이 우수하여 유리성형을 위한 최적의 몰드 소재로 알려져 있다.

마이크로/나노 VC 몰드의 제작을 위해 열적, 기계적, 화학적 에너지를 이용한 직접가공방법이 시도되었다. Youn 등은 VC 평판상에 Focused Ion Beam (FIB) 밀링 및 Laser Machining, Mechanical Machining 공정을 통해 마이크로/나노 VC 몰드를 제작하고, Pyrex Glass 및 Quartz 소재의 유리성형을 보고하였다[4]. Prater 등은 Reactive Ion Etching 공정을 통해 VC 평판상에 마이크로 패턴을 형성하고 저 용점 유리소재를 이용한 유리성형을 통해 회절광학소자를 제작하였다[5]. 직접가공을 통한 VC 몰드 제작공정은 VC 소재의 높은 열적, 기계적, 화학적 내구성으로 인해 높은 에너지가 요구되며, 가공속도가 느린 단점을 갖는다. 이에 본 연구팀은 VC 소재가 고탄소 고분자의 탄화과정으로 제작되는 특성을 이용하여, 고탄소 고분자인 Furan 수지의 복제공정을 통해 마이크로/나노 구조를 갖는 Furan 전구체를 제작하고 이의 탄화 공정을 통해 VC 몰드를 제작하는 공정을 개발하고[6], 이를 이용하여 마이크로유체칩[7], 마이크로렌즈어레이[8], 마이크로프레넬 렌즈[9], 나노 그레이팅[10], 반사방지 나노패턴[11], 플라즈모닉 나노닷 어레이[12] 등 다양한 유리 마이크로/나노 구조를 제작하였다. Furan 수지의 복제 및 탄화 공정으로 제작되는 VC 몰드는 탄화과정에서 약 22%의 열분해 수축이 발생하며, 이러한 수축은 수지의 표면과 내부의 수축량 차이에 의해 비 선형적인 특성을 가진다[13].

복제 및 탄화 공정을 이용한 VC 몰드 제작과정에서 발생하는 큰 수축은, 수축을 고려한 마스터 패턴의 설계를 통해 보정될 수 있으나[9], 큰 수축량은 마스터 제작 가공비용 상승 및 VC 몰드 제작 공정에서 결함 발생 가능성을 증가시키는 문제점이 있다. 또한 수축예측의 오차값은 전체 수축량 값에 비례하므로 탄화과정에서의 수축량을 최소화할 수 있다면 보다 정확한 수축 보정이 가능하다. 본 연구에서는 Furan 수지의 복제 및 탄화공정으로 제작되는 비정질 탄소 몰드 제작공정시 발생하는 수축량을 저감하기 위해, Fig. 1과 같이 초기 Furan 수지에 VC 분말을 혼합하고, Polydimethylsiloxane (PDMS) 몰드를 이용한 복제 및 탄화공정을 수행함으로써 수축율이 저감된 비정질 탄소 몰드 제작공정을 개발한다. 수축을 평가를 위해 등간격의 라인 형상의 Photoresist 마스터를 이용하여 PDMS 몰드를 제작하고 Furan 수지 VC 분말의 혼합비에 따른 VC 몰드 제작과정에서의 수축을 변화를 분석하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 Ball Milling 공정을 통한 VC 분말의 제작

Furan 수지와 혼합할 VC 분말의 제작을 위해 단순 직육면체 형상의 VC 블록을 제작하고 이를 파쇄한 뒤, Ball Milling 공정을 수행하였다. VC 블록을 제작하기 위한 Furan 전구체 성형을 위해 내부 부피가  $30 \times 30 \times 10 \text{ mm}^3$  인 PDMS 용기를 제작하였다.

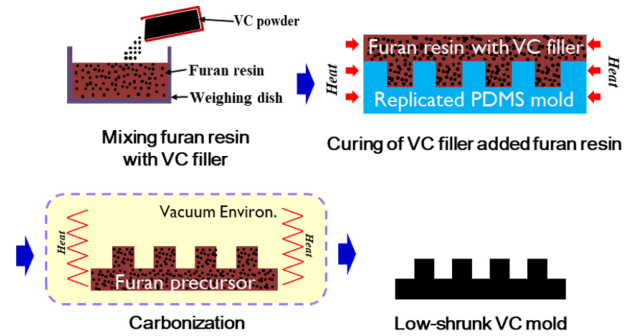


Fig. 1 Schematics of fabrication process for low-shrunk VC mold using VC powder added Furan mixture

3D 프린터를 이용하여 PDMS 용기의 역상 형태의 마스터를 출력하고, 마스터 상에 Sylgard 184 (Dow Corning Co., Ltd., USA)와 경화제가 10 : 1의 무게비로 혼합된 수지를 붓고 Hot Plate를 이용하여  $80^\circ\text{C}$ 에서 약 3시간 동안 경화하였다. 제작된 PDMS 용기에 Furan 수지(Phenol-Formalin, Kangnam Chemical Co., Ltd., Republic of Korea)와 p-Toluenesulfonic Acid (p-TSA), 에탄올을 500 : 1 : 50의 무게비로 혼합하여 부은 뒤,  $100^\circ\text{C}$ 의 대류오븐에서 약 3시간 동안 열경화 공정을 진행하였다. 경화된 Furan 전구체를 PDMS 용기에서 이형 한 뒤 진공 퍼니스를 이용하여, 진공 분위기에서  $1,000^\circ\text{C}$ 까지 빠르게 승온하고 10시간 유지한 뒤 냉각하는 공정으로 탄화하였다.

VC 블록의 제작을 위한 경화 및 탄화 공정은 VC 몰드 제작을 위한 경화 및 탄화 공정 대비 매우 빠른 속도로 진행되었으며, 빠른 경화 및 탄화 공정에서 Furan 수지 내부에서 발생하는 가스의 급격한 분출에 의해, 다수의 크랙 및 버블 결함이 발생하였다. 그러나 제작된 VC 블록은 파쇄한 뒤 Ball Milling을 통해 VC 분말을 제작하기 위한 것으로, 크랙 및 버블 결함은 후속 VC 블록의 파쇄 및 Ball Milling 공정에서 긍정적인 효과로 작용하므로, 결함여부와 관계없이 빠른 VC 블록의 제작 및 충분한 탄화공정이 완료될 수 있도록 공정 조건이 선정되었다. 제작된 VC 블록을 망치로 1차 파쇄하여 평균 약 1-2 mm의 VC 입자를 제작하였으며, 이후 Plantary Ball Mill PM 100 (Youwantech, Korea)에 직경 10 mm의 Zirconia Ball과 함께 3시간 동안 Ball Milling을 진행하여 직경 약  $1.5 \mu\text{m}$  크기의 VC 분말을 제작하였다.

### 2.2 실리콘 마스터 및 PDMS 몰드 제작

VC 분말 첨가에 따른 수축율 변화 특성을 분석하기 위해 등간격의 라인 형상을 갖는 마스터 패턴을 실리콘 기판상에 제작하였다. 4인치 실리콘 웨이퍼 상에 SU-8 3050 (Microchem, Co., USA)을 도포하고 3,000 RPM에서 30초간 Spin Coating하여 높이  $50 \mu\text{m}$ 의 PR 코팅층을 형성하였다. Hot Plate를 이용하여  $110^\circ\text{C}$ 에서 15분간 Soft Baking을 진행하였으며, 선폭  $50 \mu\text{m}$ 의 라인 패턴이  $100 \mu\text{m}$  간격으로 형성된 필름 마스크를 이용하여 노광공정을 진행하였다. 노광기의 Exposure Intensity는  $250 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ 이며 노광시간은 15초로 설정되었다. Hot Plate를 이

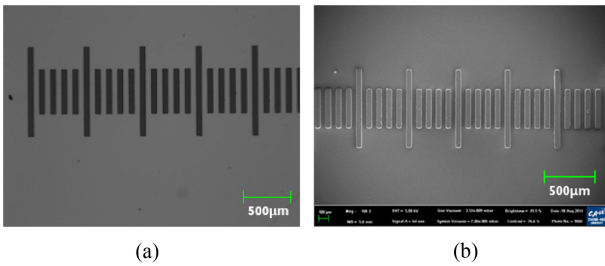


Fig. 2 (a) Microscope image of photoresist master and (b) SEM image of replicated PDMS mold from the master; line width: 50 µm, pitch: 100 µm

Table 1 Weight mixing ratios of components in the VC powder added Furan mixture; The ratio (%) for Furan resin, VC powder and Ethanol were determined based on the combined weight of Furan resin and VC power, and the ratio (%) for p-TSA was determined based on the weight of Furan resin.

Powder mixing ratio	Furan resin (ratio)	VC power (ratio)	p-TSA (ratio)	Ethanol (ratio)
0%	500 (100%)	0 (0%)	1 (0.2%)	50 (10%)
10%	450 (90%)	50 (10%)	0.9 (0.2%)	50 (10%)
20%	400 (80%)	100 (20%)	0.8 (0.2%)	50 (10%)
30%	350 (70%)	150 (30%)	0.7 (0.2%)	150 (30%)
40%	300 (60%)	200 (40%)	0.6 (0.2%)	200 (40%)

용하여 110°C에서 5분간 Post Exposure Bake를 진행한 뒤, SU-8 Developer 용액에 6분간 Developing을 진행하였다. Post Baking 공정은 Hot Plate에서 150°C에서 5분간 진행하였으며, 최종적으로 Ethanol을 이용하여 세척을 진행하여, Fig. 2(a)와 같이 선폭 50 µm, 간격 100 µm의 라인패턴이 50 µm 깊이의 음각 형태로 형성된 PR 마스터 패턴을 제작하였다. 제작된 마스터상에 Sylgard 184와 경화제를 무게비 10 : 1로 혼합하여 붓고 경화하여 Fig. 2(b)와 같이 양각의 라인 패턴 형상이 형성된 PDMS 몰드를 제작하였다. PDMS 경화 과정에서 발생하는 수축을 방지하기 위해 PDMS 몰드 제작을 위한 경화 공정은 상온에서 48시간 동안 진행되었다[14].

2.3 액상 Furan 수지와 VC 분말 혼합물 배합 최적화

액상의 Furan 수지는 p-TSA 경화제와 혼합되며 열경화반응이 시작된다. 경화제 혼합 과정에서 발생하는 기포와 경화반응의 부산물로 산출되는 기체는 경화과정 중에 외부로 배출되어야 하나 초기 Furan 수지의 높은 점도는 내부 기포 및 가스의 배출을 어렵게 하여 내부 결함을 발생시키는 원인이 된다. 이에

Furan 수지와 p-TSA 경화제 혼합과정에서 Furan 수지 대비 10% 무게비 수준의 에탄올을 첨가하여 혼합물의 점도를 제어한다. Furan 수지에 VC 분말을 혼합하는 경우 혼합물의 점도가 추가적으로 증가하므로, VC 분말 혼합 비율에 따라 안정적인 성형 공정이 가능한 수준의 점도를 확보하기 위해 추가적인 에탄올 첨가가 요구된다. 혼합물에 추가되는 에탄올은 성형과정에서 모두 증발하여 Furan 전구체의 탄화과정에서 발생하는 열분해 수축에는 영향을 주지 않으나[6], 과도한 에탄올 첨가는 Furan 수지 혼합물의 경화를 지연시키거나, 혼합물 내 Furan 수지 함유량을 감소시켜 PDMS 몰드의 마이크로캐비티를 Furan 수지가 충전하지 못하는 현상을 야기하므로, 성형 공정에서 크랙 및 기포 결함이 발생하지 않고, 원활한 마이크로패턴 복제 공정이 가능한 최적 에탄올 첨가 무게비를 Table 1과 같이 실험적으로 선정하였다. VC 분말 혼합비(0-40%)에 따라 Furan 수지와 VC 분말 혼합 무게비를 선정하였으며, p-TSA의 경우 Furan 수지 무게 대비 0.2% 무게로 선정하고, 에탄올의 경우 Furan 수지와 VC 분말 혼합 무게 대비 10-40%로 선정되었다. 선행 연구를 통해 Furan 수지, p-TSA, 에탄올의 무게비 500 : 1 : 50에서(VC 분말 혼합비 0%) 결함이 없는 Furan 전구체를 제작할 수 있음을 확인하였으며, VC 분말 혼합비 10-20%에서는 추가적인 에탄올 첨가 없이도 안정적인 성형공정이 가능함을 확인하였다. 30%의 VC 분말을 혼합하는 경우 점도 증가로 인해 Furan 수지와 VC 분말의 혼합 무게 대비 30%의 에탄올 첨가 시 안정적인 공정이 가능함을 확인하였고, VC 분말 40% 혼합비의 경우 혼합 무게 대비 40%의 에탄올 첨가가 필요함을 확인하였다. 50% 이상의 VC 분말 혼합비에서는 혼합물에서 Furan 수지의 비율이 감소하여 에탄올 첨가량과 관계없이 안정적인 공정이 불가능함을 실험적으로 확인하였다.

2.4 Furan 수지 혼합물 경화 및 탄화공정

각각의 VC 분말 혼합비율에 따라 최적 비율의 에탄올이 첨가된 Furan 수지 혼합물을 복제된 PDMS 몰드에 도포하고, 상온에서 3일간 1차 경화를 진행한 뒤, 대류오븐에서 0.5°C/min의 승온 속도로 100°C까지 가열하고 2시간 동안 온도를 유지하는 2차 경화 공정을 진행하였다. PDMS 몰드에서 이형된 VC 분말 첨가 Furan 전구체는 Back Polishing을 통해 두께를 2 mm 내외로 가공한 뒤, 진공 퍼니스를 이용하여 탄화 하였다. 탄화공정은 10<sup>-3</sup>Torr의 진공분위기에서 0.2°C/min의 속도로 600°C까지 승온한 뒤 1°C/min의 속도로 1,000°C까지 승온하였고, 1,000°C에서 10시간 동안 온도를 유지하고 자연 냉각하는 순서로 진행되었다. 매우 느린 경화 및 탄화 공정은 Furan 수지의 경화 및 탄화 공정에서 발생하는 기체의 배출에 의해 발생하는 결함을 방지하기 위해 선정되었다. Fig. 3은 30%의 VC 분말이 첨가된 혼합물을 이용하여 제작된 Furan 전구체 및 탄화된 VC 몰드의 SEM 사진을 보여준다. 경화 및 탄화과정에서 표면에 노출된 VC 분말에 의해 일부 거친 표면을 확인할 수 있으나 라인패턴이 정확히 복제된 것을 확인할 수 있다.

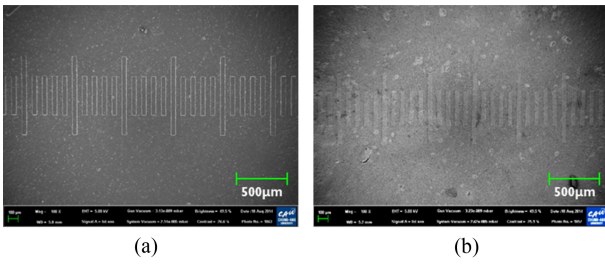


Fig. 3 SEM images of fabricated (a) furan precursor and (b) VC mold using 30% VC powder added Furan mixture

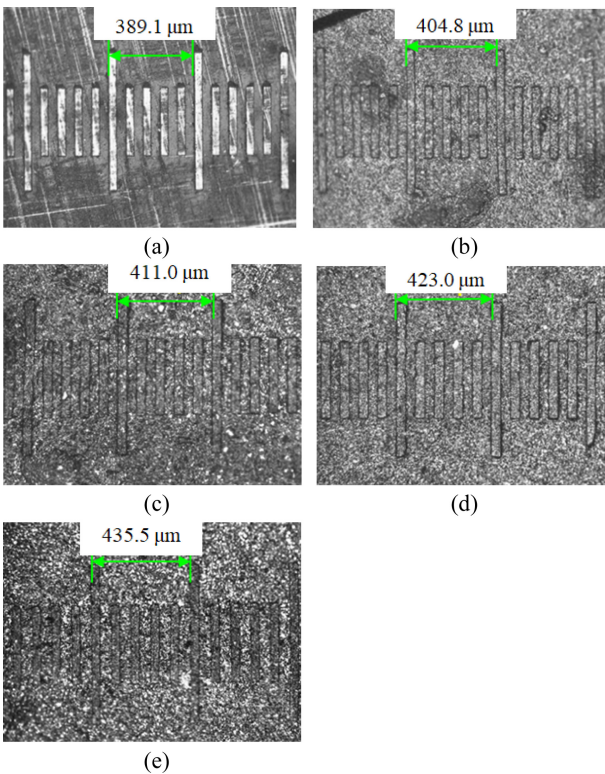


Fig. 4 Optical microscope images of fabricated VC mold with VC powder addition ratio of (a) 0, (b) 10, (c) 20, (d) 30 and (e) 40%

2.5 수축율 및 표면거칠기 측정

제작된 VC 몰드 표면에 형성된 라인패턴 Pitch를 광학현미경을 이용하여 측정하여 VC Powder 첨가량에 따른 VC 몰드의 수축율을 분석하였다. 설계된 라인패턴의 Pitch는 100 µm이며, 5개 라인마다 존재하는 긴 라인패턴의 간격은 500 µm로 설계되었다. Fig. 4는 각각의 VC 분말 혼합비에 따라 제작된 VC 몰드의 현미경 사진에서 긴 라인패턴의 간격을 측정한 결과이다. VC 분말의 첨가량이 증가함에 따라 긴 라인 패턴간 거리가 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 이는 VC 분말의 첨가에 따라 탄화과정에서 발생하는 열분해 수축률이 감소함을 직관적으로 보여준다. 한편 VC 분말이 첨가된 Furan 수지 혼합물을 이용하여 제작된 VC 몰드의 경우(Figs. 4(b)-4(e)) VC 분말이 포함되지 않은 VC 몰드(Fig. 4(a))와 비교할 때 매우 거친 표면을 갖는

Table 2 Summary of the measured length between long line pattern, shrinkage ratio, and surface roughness ( $R_a$ ) of master, PDMS mold, VC-powder added furan precursors, and VC mold with different VC-filler addition ratio

Sample	Measured length (mean) [ $\mu\text{m}$ ]	Shrinkage ratio [%]	Surface roughness [ $\text{nm}$ ]
PR master	499.57±0.00	0.09±0.00	12
PDMS mold	499.52±0.00	0.10±0.00	28
Furan precursor (mixing ratio 0%)	491.64±0.25	1.67±0.05	28
Furan precursor (mixing ratio 10%)	491.85±0.23	1.63±0.05	1,468
Furan precursor (mixing ratio 20%)	491.91±0.24	1.62±0.05	1,533
Furan precursor (mixing ratio 30%)	491.70±0.22	1.66±0.04	1,448
Furan precursor (mixing ratio 40%)	491.48±0.24	1.70±0.05	2,643
VC mold (mixing ratio 0%)	389.10±1.94	22.18±0.50	19
VC mold (mixing ratio 10%)	404.79±2.73	19.04±0.67	1,478
VC mold (mixing ratio 20%)	411.03±2.05	17.79±0.50	1,568
VC mold (mixing ratio 30%)	423.03±2.08	15.39±0.49	1,454
VC mold (mixing ratio 40%)	435.54±2.24	12.89±0.51	2,697

것을 확인할 수 있으며, 이는 1-5 µm 크기를 갖는 VC 분말이 경화 및 복제 공정에서 표면에 노출되었기 때문이다. VC 분말 첨가에 따른 표면거칠기 영향을 확인하기 위해 Confocal Microscopy (OLS4100-SWF, Olympus Co. Ltd., Japan)를 이용하여 제작된 시편의 평면 위치에서 표면 거칠기를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

제작된 마스터, PDMS 몰드, Furan 전구체, VC 몰드의 긴 라인 패턴간의 거리(5개 위치에서의 평균값), 설계치(500 µm) 대비 수축율, 표면거칠기를 측정하여 Table 2에 정리하였다. 초기 PR 마스터 패턴의 긴 라인 패턴간 거리는 측정오차를 고려할 때 설계치(500 µm)와 동일값으로 간주될 수 있는 499.57 µm이며, PDMS 몰드 역시 499.52 µm으로 장시간 상온 경화로 제작된 PDMS 몰드의 경우 수축이 발생하지 않음을 확인하였다.

서로 다른 VC 분말 혼합비를 가진 Furan 전구체의 수축율은 모두 약 1.7% 수준으로 VC분말 첨가에 따른 Furan 전구체 제작 공정에서의 수축율 차이는 확인되지 않았다. 이는 VC 분말이 첨가된 Furan 수지 혼합물의 경화과정에서 Furan 수지간

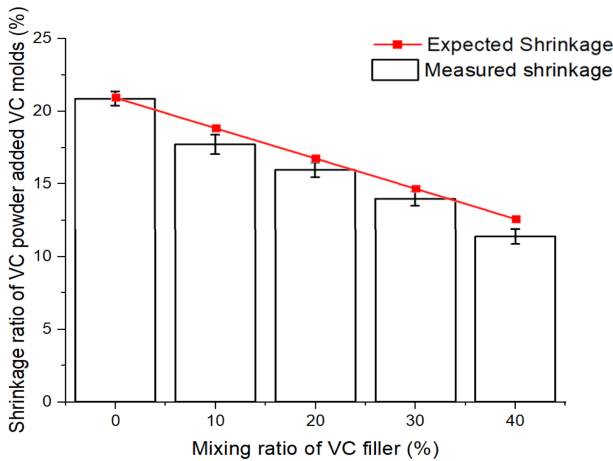


Fig. 5 Comparison of measured shrinkage of VC mold and expected shrinkage for the mixing ratio of VC powder

Cross Linking에 의한 수축은 VC 분말에 의해 방해받지 않고 VC 분말간 거리의 감소로 나타나기 때문이다.

최종 제작된 VC 몰드의 수축율은 VC 분말의 혼합비에 따라 선형적으로 감소하는 경향을 보여준다. 이는 VC 분말의 혼합비가 증가함에 따라 전체 질량에서 Furan 수지가 차지하는 비율이 감소하고, VC 분말의 경우 탄화 공정에서 열분해가 발생하지 않으므로 탄화과정에서 열분해에 의한 수축은 Furan 수지의 질량비율에 비례하기 때문이다. VC 분말 첨가 공정에서 VC 몰드의 수축율 S는 VC 분말이 첨가되지 않은 Furan 전구체의 탄화에 의한 수축율을 S<sub>0</sub>라고 하고, VC 분말의 혼합비(%)을 R이라고 할 때 식(1)과 같이 표현될 수 있다.

$$S = S_0 (1-R) \tag{1}$$

Fig. 5는 VC 분말 첨가량에 따른 VC 몰드의 수축량 측정값과 식(1)에 의한 예측값을 비교한 것으로 두 값이 거의 일치함을 알 수 있다.

한편 표면 거칠기값은 VC 분말을 혼합하는 경우 Furan 전구체 단계에서부터 그 값이 Ra 기준 약 1.5-2.5 μm으로 증가하며 탄화 공정이후에도 유사한 표면거칠기 값을 보여준다. 이는 경화 및 탄화 과정에서 표면에 노출된 VC 분말(입자 크기 1-5 μm)에 의한 것이다.

#### 4. 결론

Furan 수지의 복제 및 탄화 공정으로 제작되는 마이크로/나노 VC 몰드는 유리 마이크로/나노 구조물을 유리성형 공정으로 제작함에 있어 많은 장점을 가지나, Furan 전구체의 탄화과정에서 필연적으로 발생하는 약 22%의 수축은 기술의 활용에 여러 걸림돌로 작용하고 있다. 본 연구에서는 VC 분말을 초기 Furan 수지 혼합물에 첨가함으로써 탄화과정에서 발생하는 수축을 저감할 수 있는지 그 가능성을 확인하였다. VC 분말의 혼합에

따른 점도 상승 문제는 혼합비에 따라 에탄올을 추가함으로써 최대 40% VC 분말 혼합비의 VC 몰드를 제작할 수 있었다. 전구체 성형 단계에서 발생하는 미량의 수축은 VC 분말의 첨가에 영향을 받지 않았으나, 탄화 공정에서 발생하는 대량의 수축은 VC 분말의 혼합비에 따라 이론값과 같이 선형적으로 감소함을 확인하였다. VC 분말 미첨가 시 VC 몰드 제작공정의 수축율은 22.18% 였으나 40%의 VC 분말 혼합비에서 12.89%의 수축율을 달성하였다.

본 연구에 사용한 VC 분말의 크기는 1-5 μm인 관계로 VC 분말 첨가 시 표면 거칠기가 급격히 증가하는 문제가 있으나, 이는 향후 나노스케일 크기의 VC 분말을 적용함으로써 개선될 수 있으리라 예상된다.

#### ACKNOWLEDGEMENT

본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 소재융합사업(No. 2020M3D1A2101795) 및 이공분야 기초연구사업(No. 2021R1A2C200445811)의 지원으로 수행되었으며, 2021년도 중앙대학교 연구년 결과물로 제출됨

#### REFERENCES

1. Asgar, M. A., Kim, J., Haq, M. R., Kim, T., Kim, S.-M., (2021), A comprehensive review of micro/nano precision glass molding molds and their fabrication methods, *Micromachines*, 12(7), 812.
2. Hwang, Y., Cha, D.-H., Kim, J.-H., Kim, H.-J., (2012), Ultraprecision grinding of glassy carbon core for mold press lens, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 29(3), 261-265.
3. Kim, Y.-J., Choi, H.-J., Yeo, W.-J., Jeong, J.-Y., Kim, Y.-S., Kim, G.-H., (2020), A study on the characteristics of ultra-precision surface cutting of the mold material (STAVAX) for the development of large satellite lens, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 37(11), 819-825.
4. Youn, S., Takahashi, M., Goto, H., Maeda, R., (2006), Microstructuring of glassy carbon mold for glass embossing—Comparison of focused ion beam, nano/femtosecond-pulsed laser and mechanical machining, *Microelectronic Engineering*, 83(11-12), 2482-2492.
5. Prater, K., Dukwen, J., Scharf, T., Herzig, H. P., Plöger, S., Hermerschmidt, A., (2016), Micro-structuring of glassy carbon for precision glass molding of binary diffractive optical elements, *Optical Materials Express*, 6(11), 3407-3416.
6. Ju, J., Lim, S., Seok, J., Kim, S.-M., (2015), A method to fabricate low-cost and large area vitreous carbon mold for glass molded microstructures, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 16, 287-291.

7. Haq, M. R., Kim, Y. K., Kim, J., Ju, J., Kim, S.-M., (2019), Fabrication of all glass microfluidic device with superior chemical and mechanical resistances by glass molding with vitreous carbon mold, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 29(7), 075010.
8. Kim, Y. K., Ju, J. H., Kim, S.-M., (2018), Replication of a glass microlens array using a vitreous carbon mold, *Optics express*, 26(12), 14936-14944.
9. Kim, Y. K., Haq, M. R., Kim, S.-M., (2019), Glass molding of all glass Fresnel lens with vitreous carbon micromold, *Optics Express*, 27(2), 1553-1562.
10. Kim, J., Kim, Y. K., Ju, J., Asgar, M. A., Kim, T., Kim, S.-M., (2022), Nanoimprinting of soda-lime glass using vitreous carbon nanomold for high-temperature stable nanophotonic crystal filter, *Optics & Laser Technology*, 150, 107970.
11. Haq, M. R., Kim, J., Yeom, J.-W., Ryu, S., Asgar, M. A., Kim, Y. K., Kim, S.-M., (2020), Fabrication of cross-sinusoidal anti-reflection nanostructure on a glass substrate using imperfect glass imprinting with a nano-pin array vitreous carbon stamp, *Micromachines*, 11(2), 136.
12. Badshah, M. A., Kim, J., Yeom, J., Abbas, N., Haq, M. R., Kim, Y., Lu, X., Kim, S.-M., (2021), Glass nanoimprinted plasmonic nanostructure for high power laser stable surface-enhanced Raman spectroscopy substrate, *Applied Surface Science*, 542, 148587.
13. Haq, M. R., Kim, J., Ju, J., Kim, Y. K., Chang, W.-J., Kim, S.-M., (2019), Development of shrinkage model of micro structured vitreous carbon mold for glass molding, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 33, 5747-5752.
14. Badshah, M. A., Jang, H., Kim, Y. K., Kim, T.-H., Kim, S.-M., (2014), Development of a rapid cure polydimethylsiloxane replication process with near-zero shrinkage, *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 13(3), 033006-033006.



#### Young Kyu Kim

Research Professor in Chung-Ang University. His research interest is fabrication of glass molded optical components using vitreous carbon mold  
E-mail: kykdes@cau.ac.kr



#### Dongin Hong

Master in Mechanical System Engineering, Chung-Ang University. His research interest was micro metal forming using vitreous carbon mold.  
E-mail: hdi2305@naver.com



#### Hongmin Kim

Chief Technical Officer in Goodpnc Co., Ltd.. His research interest was design and fabrication of optical components and systems.  
E-mail: hmkim@goodpnc.com



#### Suho Ahn

Chief Executive Officer in Goodpnc Co., Ltd.. His research interest was design and fabrication of optical components and systems.  
E-mail: shahn@goodpnc.com



#### Seok-Min Kim

Professor in Department of Computer Science and Engineering, Mechanical System Engineering, Chung-Ang University. His research interest is glass optical components, functional surface, and biosensors.  
E-mail: smkim@cau.ac.kr

• 특집 • 초정밀가공공정기술(Ultra-precision Machining Process Technology)

무윤활 상태에서 3D 프린팅용 PLA 및 PETG 소재의  
마모 현상에 관한 연구

A Study on the Wear Phenomena of PLA and PETG Materials  
for 3D Printing in Non-lubricated Condition

조연상<sup>1</sup>, 이현섭<sup>1,#</sup>  
Yonsang Cho<sup>1</sup>, and Hyunseop Lee<sup>1,#</sup>

<sup>1</sup> 동아대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Dong-A University)  
# Corresponding Author / E-mail: [hyunseop@dau.ac.kr](mailto:hyunseop@dau.ac.kr), TEL: +82-51-200-7648  
ORCID: 0000-0003-4717-3147

KEYWORDS: 3D printing material (3D 프린팅 소재), Dry friction (건식 마찰), Adhesive wear (응착 마멸), Polylactic acid (폴리젯산), Polyethylene terephthalate glycol (폴리에틸렌 테레프탈레이트 글리콜)

*With the recent development of 3D printing technology, various 3D printing materials have been developed and used. To utilize 3D-printed products with mechanical parts, studies on friction and wear characteristics according to relative motion between materials are required. However, tribology studies on 3D-printed materials are limited compared to those of the existing materials for mechanical parts. In this study, the frictional and wear characteristics are identified through a reciprocating wear test in non lubricated conditions between the Polylactic Acid (PLA) and Polyethylene Terephthalate Glycol (PETG) printed in the Fused Deposition Modeling (FDM) method. In the wear test between the same materials, the friction coefficient and wear rate were higher in the PLA than in the PETG, and PLA was deposited on the block due to high frictional heat. In the wear test of the PLA block and PETG bump, the wear of the PLA block decreased compared to the wear test between the same materials, but the wear of the PETG bump tended to increase. Therefore, it seems that the 3D-printed PETG may be more advantageous in terms of friction and wear than 3D-printed PLA during relative movement in a non lubricating condition.*

Manuscript received: October 2, 2023 / Accepted: November 27, 2023

1. 서론

기계산업에 있어 부품의 다양화와 복잡화 추세에 따라 전통적인 기계 가공으로 구현하기 힘든 부품 생산을 위해 적층 제조(Additive Manufacturing, AM)에 관한 관심이 증가하고 있다[1]. 특히, 적층 제조 기술은 복잡한 구조를 가진 제품의 생산 시 금형을 필요로 하지 않기 시제품 생산에 있어 큰 장점을 가진다. 기존에는 주로 연구자들과 산업계 위주로 적층 제조 기술의 연구와 활용이 이루어졌으나, 3D 프린팅이라는 명칭으로 대중에게

알려지고 보급된 후 교육용이나 개인용으로 활용하는 경우도 많아지고 있다[2,3].

적층 제조용 소재는 플라스틱, 금속, 왁스, 고무, 세라믹 등 다양하며 현재도 많은 연구자들이 지속적으로 개발 중에 있다[4]. 그러나, 3D 프린팅과 그 소재들의 대중화에도 불구하고 활용되고 있는 소재들의 트라이볼로지(Tribology) 특성에 관한 연구는 많이 이루어지지 않고 있다.

Sim 등[5]은 폴리젯산(Polylactic Acid, PLA)을 이용한 FDM(Fused Deposition Modeling) 방식의 3D 프린팅에서 미끄럼

방향에 따른 트라이볼로지 특성을 조사하였다. 그들의 연구에서는 볼(Ball)을 이용한 왕복동 마모시험기(Reciprocating Wear Tester)를 이용하였으며 볼 소재로는 SUJ2 베어링 볼을 활용하였다. 실험결과, 출력된 패턴의 방향과 45° 방향으로 미끄럼 운동이 발생하는 경우 가장 낮은 마찰계수를 보임을 확인하였으나, 그들의 연구에서는 동일한 PLA 소재들 간의 마찰 및 마모에 관해서는 고려하지 않았다.

Jo 등[6]은 볼온디스크(Ball-on Disk)와 핀온디스크(Pin-on-disk) 마모 시험을 통해 무운할 상태에서 SLA (Stereo Lithography Apparatus) 방식의 3D 프린팅용 유사 ABS 레진(Acrylonitrile Butadiene Styrene-like Resin, ABS-like Resin) 소재의 트라이볼로지 특성에 관해 조사하였다. 그들의 연구에서는 SUS304과 SLA 방식으로 출력된 볼 및 핀(Pin)을 이용하였으며, 무운할 상태에서는 유사 ABS 레진 간의 상대운동 조건보다 SUS304와 유사 ABS 레진 소재 간의 상대운동 조건이 마찰 및 마모 측면에서 유리함을 보여주었다.

Park 등[7]은 앞선 Jo 등의 연구를 바탕으로 서로 다른 동점도를 지닌 디메틸 실리콘 오일(Dimethyl Silicon Oil)을 활용한 볼온디스크 마모시험을 실시하였다. 그들은 동점도가 높은 실리콘 오일을 사용하여 유사 ABS 레진 간의 마찰 및 마모를 줄일 수 있음을 실험적으로 보여주었다.

Portoacă 등[8]은 핀온디스크 마모시험기를 활용하여 FDM 3D 프린팅 시 충전밀도(Infill Density)와 층 두께(Layer Thickness) 조건에 따른 PLA와 ABS의 마찰계수(Coefficient of Friction, COF)와 표면 거칠기(Surface Roughness)를 조사하였다. 그들의 연구에서는 마찰계수가 충전밀도와 층 두께에 따라 경향성을 보이지는 않았지만, 전반적으로 PLA는 얇은 층 두께(0.1 mm) 조건에서 높은 마찰계수를 보인 반면, ABS는 높은 두꺼운 층 두께에서 높은 마찰계수를 보였다. 마모 후 표면 거칠기의 경우, 높은 충전밀도와 두꺼운 층 두께 조건에서 높은 값을 보였다.

본 연구에서는 무운할 상태에서 왕복동 마모 시험(Reciprocating Wear Test)을 통해 교육용 및 개인용으로 많이 활용되고 있는 FDM 방식의 3D 프린팅용 소재 중 PLA와 폴리에틸렌 테레프탈레이트 글리콜(Polyethylene Terephthalate Glycol, PETG)의 트라이볼로지 특성에 관한 기초연구를 수행하고자 한다.

2. 연구방법 및 내용

2.1 3D 프린팅

본 연구에서는 PLA 및 PETG 소재의 마찰 및 마모 시험을 위해 연구실에서 자체 제작한 FDM 방식의 3D 프린터를 활용하였다. 3D 프린터는 Fig. 1과 같이 CoreXY 방식으로 구동이 되며, 최대 500 × 500 × 450 mm<sup>3</sup>의 출력 사이즈를 가지고 있다. 그리고 소재의 출력은 구멍 직경  $\phi 0.4$  mm인 노즐을 사용하였다. 3D 프린팅 시 조건은 소재에 따라 아래 Table 1과 같으며 Figs. 2와 3과 같이 돌기형상(Bump)과 블록(Block)의 형태로 출력되었다.

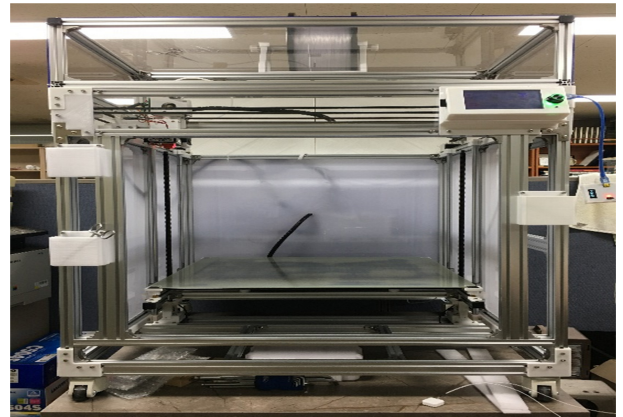


Fig. 1 FDM 3D printer with 500 × 500 × 450 printing size

Table 1 Printing condition for bump and block

Material	Parameters	Conditions
PLA	Layer thickness [mm]	0.2
	Infill density [%]	100
	Nozzle temperature [°C]	200
	Bed temperature [°C]	65
	Printing speed [mm/s]	80
PETG	Layer thickness [mm]	0.2
	Infill density [%]	100
	Nozzle temperature [°C]	235
	Bed temperature [°C]	85
	Printing speed [mm/s]	80

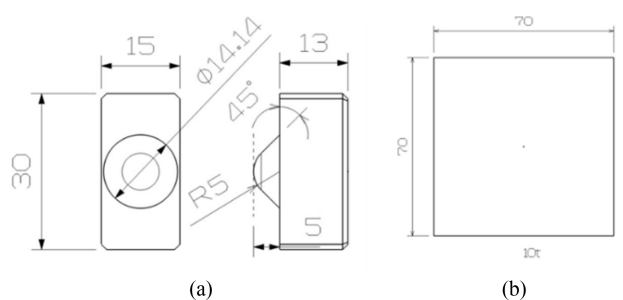


Fig. 2 Geometry of printed parts; (a) Bump and (b) Block

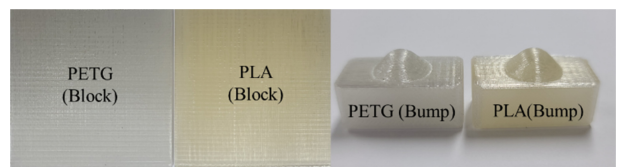


Fig. 3 3D printed blocks and bumps used for wear test

2.2 마찰 및 마모 시험

FDM 3D 프린팅 소재의 마찰 및 마모 시험을 위해 자체 제작한 왕복동 마모 시험기를 활용하였다. 마모 시험기에는 Fig. 4와 같이 로드셀(Load Cell)을 장착하여 마모 시험 중 마찰력을



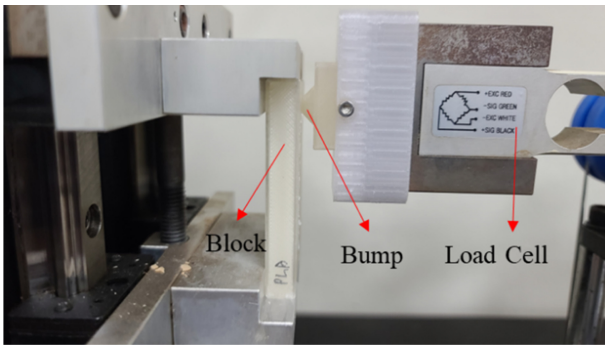


Fig. 4 Reciprocating wear tester

측정하였으며 무게 추를 이용하여 하중을 부가한다. 블록의 상하 왕복 길이는 50 mm이다.

왕복동 마모시험 시 하중은 9.81 N으로 고정하였으며, 미끄럼 속도(Sliding Velocity)를 0.1, 0.2, 0.3 m/s로 변화시키며 마모 과정 중 마찰계수와 시험 후 돌기와 블록의 마모량을 측정하였다. 실험은 동일 소재의 블록과 돌기의 마모 현상을 관찰 후 이종 소재들 간의 마모시험을 통해 낮은 마모 수준을 가지는 조합을 선정하고, 선정된 조합을 바탕으로 미끄럼 속도 변화에 따른 마찰 및 마모 특성을 파악하는 순서로 진행되었다. 3D 프린팅된 소재들 간의 미끄럼 운동 방향은 출력된 층의 방향을 기준으로 90°로 교차되도록 하였다. 마모시험 직후 시편의 온도는 열화상카메라(TiS20, Fluke Corp.)를 이용하여 측정하였다.

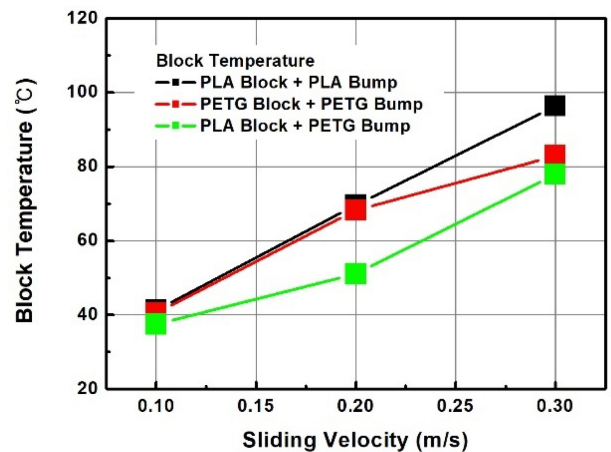
소재의 마모율 측정에 있어 마모흔(Wear Mark)이 대칭적이지 않아 소재의 마모된 부피보다는 마모로 인한 소재 높이의 변화를 관찰하였다. 따라서 돌기의 마모 높이는 광학현미경(DVM6, Leica Microsystems)을 이용하여 마모흔의 직경을 측정 후 3D 모델링 데이터를 이용하여 마모량(마모된 높이)을 계산하였으며, 블록의 마모는 마모흔의 표면 형상 측정을 통해 마모 깊이를 측정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

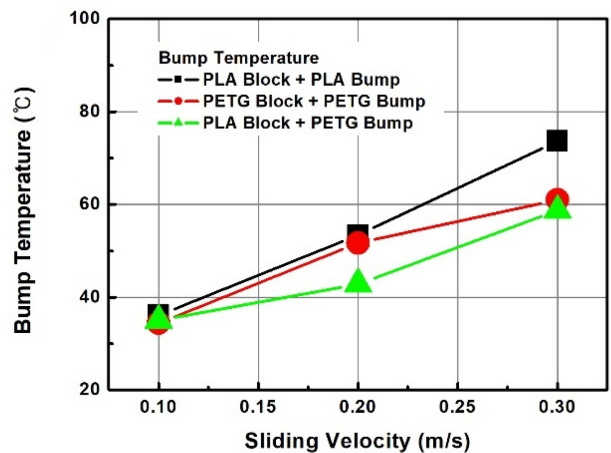
#### 3.1 온도특성

동일한 소재로 출력된 블록과 돌기의 상대운동을 통한 마찰 및 마모 현상을 측정하기 위해 PLA 블록-PLA 돌기, PETG 블록-PETG 돌기를 이용한 시험을 실시하였다. 하중은 앞서 언급한 바와 같이 9.81 N으로 고정하였으며, 미끄럼 속도를 0.1, 0.2, 0.3 m/s로 변화시켰다. 실험에서는 미끄럼 거리를 동일하게 하기 위하여 시험 시간을 조절하여 각 실험 별 총 미끄럼 거리가 60 m가 되도록 하였다. Fig. 5는 마모 시험 후 시편의 표면온도를 보여준다.

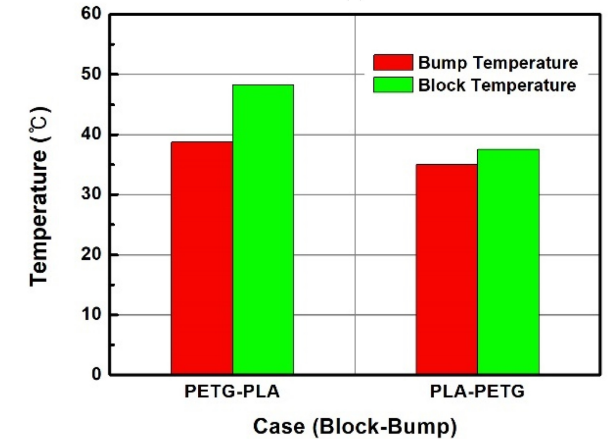
PLA 블록-PLA 돌기, PETG 블록-PETG 돌기를 이용한 실험에서 마모 시험 후 온도는 미끄럼 속도 증가에 따라 증가하는 경향을 보이며, PLA 소재가 PETG보다 상대운동 시 높은



(a)



(b)



(c)

Fig. 5 Temperature after wear test; (a) block, (b) bump, and (c) comparison of temperature between different 3D printed materials under 9.81 N and 0.1 m/s conditions

마찰열이 발생하는 것으로 보이고 그 차이는 미끄럼 속도가 빠를수록 커지는 것이 확인되었다. 이러한 현상은 소재 사이의 마찰력(혹은 마찰계수)와 관련 있을 것으로 판단된다.

PLA 소재 간의 마모 시험의 경우 0.2 m/s 조건에서 돌기와 블록의 최고 온도가 각각 53.4, 69.6°C이며, 0.3 m/s 조건에서는

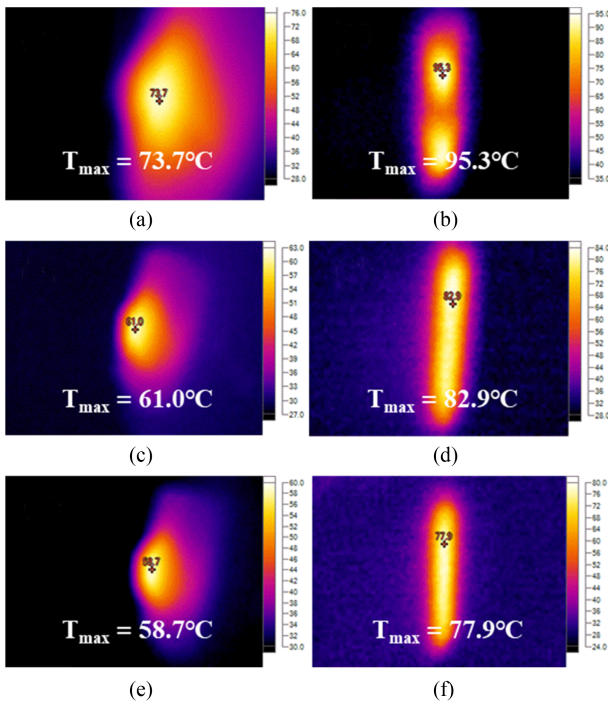


Fig. 6 Examples of measured temperature after wear test; (a) PLA bump (PLA block-PLA bump), (b) PLA block (PLA block-PLA bump), (c) PETG bump (PETG block-PETG bump), (d) PETG block (PETG block-PETG bump), (e) PETG bump (PLA block-PETG bump), and (f) PLA block (PLA block-PETG bump)

각각 73.7, 95.3°C였다. PLA 소재의 유리전이온도(Glass Transition Temperature)가 56.9°C임을 고려했을 때, 0.2 m/s 이상의 미끄럼 조건에서는 마찰열에 의해 PLA의 유리전이온도 이상에서 소재 간의 용착이 발생할 것으로 보인다. 반면 PETG의 경우, 유리전이온도가 85.0°C이며 0.3 m/s 조건에서 돌기와 블록의 최고 온도가 각각 61.0, 82.9°C로 유리전이온도 이하에서 마모됨을 알 수 있다.

이중 소재 간의 마모 특성 확인을 위해 PETG 블록-PLA 돌기, PLA 블록-PETG 돌기를 대상으로 0.1 m/s의 미끄럼 속도에서 비교 실험을 실시한 결과(Fig. 5(c)), PETG 블록-PLA 돌기의 접촉 조건에서 블록 온도 48.3°C, 돌기 온도 38.7°C로 블록 온도 37.5°C, 돌기 온도 35.0°C인 PLA 블록-PETG 돌기 접촉 조건보다 높은 온도 특성을 보였다.

이중 소재 간의 비교 결과에서 온도 특성이 낮은 PLA 블록-PETG 돌기 조건을 대상으로 한 미끄럼 속도의 증가 실험 결과를 Figs. 5(a)와 5(b)에 나타내었으며, 전반적으로 동일 소재 간의 시험 결과보다 낮은 온도 특성을 보이며 소재들의 유리전이온도 이하에서 마모가 발생함을 알 수 있다. Fig. 6은 0.3 m/s 조건에서 마모 시험 후 돌기와 블록의 온도 측정의 예를 보여준다.

3.2 마찰특성

Fig. 7은 PLA 블록-PLA 돌기와의 상대운동에서 미끄럼 거리에

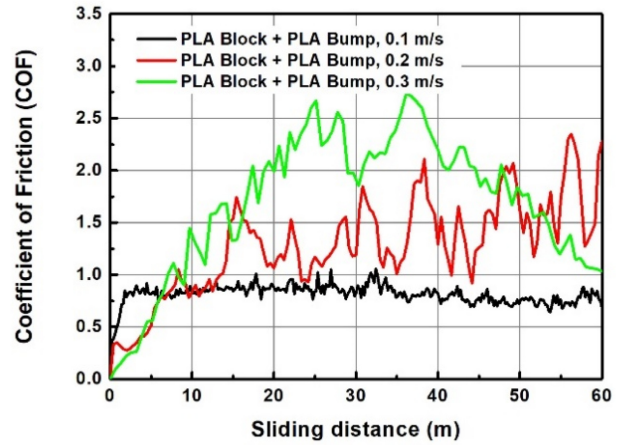


Fig. 7 Coefficient of friction between PLA block and PLA bump

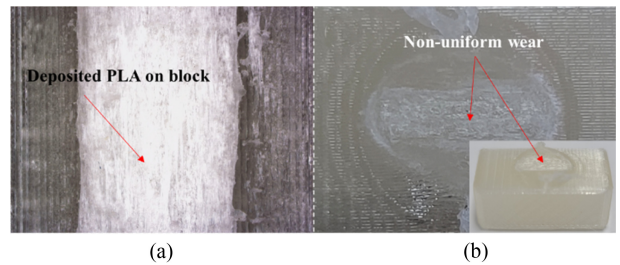


Fig. 8 Images of PLA block and bump after wear test under 0.1 m/s condition; (a) deposited PLA on block and (b) non-uniform wear of bump

다른 마찰계수의 변화를 보여준다. 0.1, 0.2, 0.3 m/s의 미끄럼 속도에서 평균 마찰계수는 각각 0.813, 1.277, 1.685로 측정되었다. 0.1 m/s 조건의 경우 마찰계수의 변화가 크지 않은 반면, 0.2 m/s의 조건에서는 마찰계수가 1.0 이상으로 증가한 이후 크게 변동하는 것을 확인할 수 있다. 0.3 m/s 조건에서는 마찰계수가 2.5 이상으로 크게 증가하다가 감소하는 경향을 보였다. 이러한 현상은 마찰과정에서 발생하는 마찰열과 관련 있을 것으로 보인다. 앞선 온도 측정 결과에 따르면 0.2 m/s 조건 이상에서 PLA 소재 간의 마찰에서의 온도는 유리전이온도 이상으로 증가하게 되어 소재의 용착이 발생할 가능성이 높아지기 때문으로 생각된다. 0.3 m/s의 조건에서는 Fig. 8과 같이 시험 후 블록의 마모가 발생하는 것이 아니라 용융된 돌기가 녹아 적층되며 블록 위 용착부가 다시 돌기의 형상을 불균일하게 마모시키는 현상이 관찰된다. 따라서 0.3 m/s 조건에서 실험 후반의 마찰계수 감소는 용착부에 의한 돌기의 불균일한 마모에 의한 것으로 판단된다.

PETG 소재 간의 마모시험에서는 전반적으로 PLA 소재 간의 마모 시험보다 마찰계수가 낮은 것으로 확인되었다. Fig. 9는 PETG 블록-PETG 돌기와의 상대운동에서 미끄럼 거리에 따른 마찰계수의 변화를 보여준다. 0.1, 0.2, 0.3 m/s의 미끄럼 속도에서 평균 마찰계수는 각각 0.554, 1.227, 1.532로 측정되었다. 0.1 m/s 조건에서는 미끄럼이 진행됨에 따라 균일한 마찰계수를

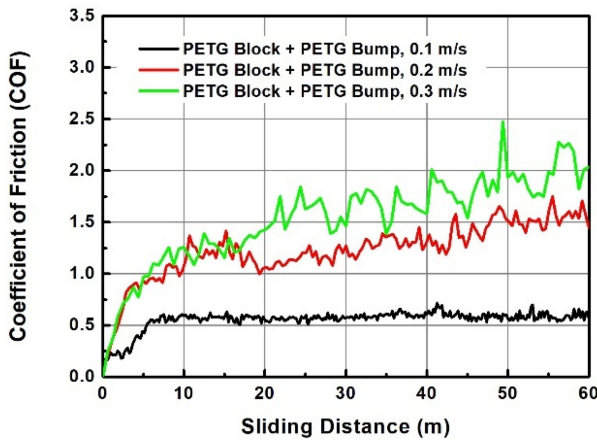


Fig. 9 Coefficient of friction between PETG block and PETG bump

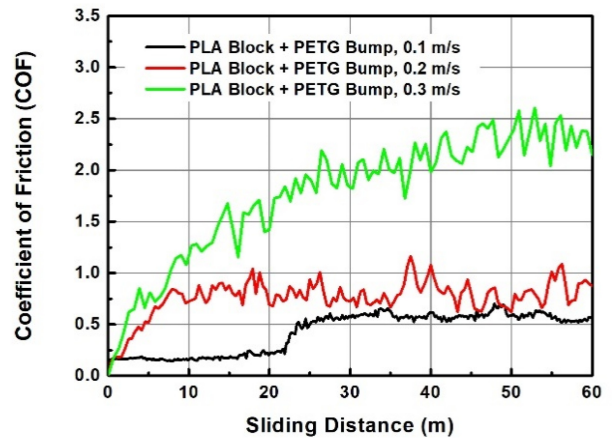


Fig. 11 Coefficient of wear between PLA block and PETG bump

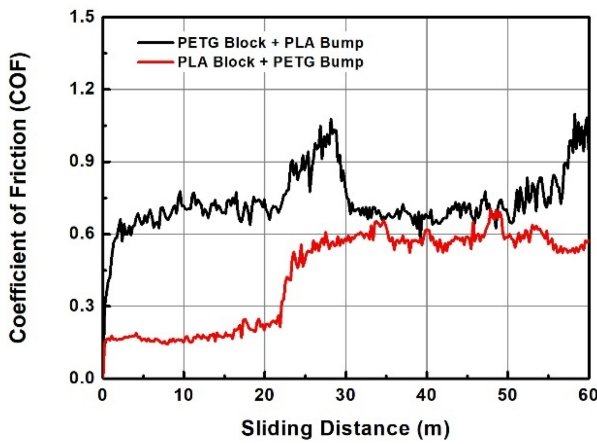


Fig. 10 Coefficient of friction between different 3D printed materials under 9.81 N and 0.1 m/s conditions

보이는 반면, 0.2, 0.3 m/s 조건에서는 미끄럼이 진행됨에 따라 마찰계수가 다소 상승하는 경향을 보인다. 이는 미끄럼 거리의 증가에 따른 온도 상승과 마모에 따른 접촉면적 증가의 영향으로 판단된다.

Fig. 10은 PETG 블록-PLA 돌기와 PLA 블록-PETG 돌기의 상대운동에 따른 마찰계수를 보여주고 있으며, 마모시험 시 하중은 9.81 N, 미끄럼 속도는 0.1 m/s이다. 이종 소재 간의 상대운동에서 마찰계수는 PLA 블록-PETG 돌기의 경우가 PETG 블록-PLA 돌기의 경우보다 낮은 것을 확인할 수 있다. 따라서 Fig. 5(c)에서 제시한 이종 소재 간의 마모 시 온도 특성은 마찰계수의 차이에 기인한다고 볼 수 있다.

Fig. 11은 PLA 블록-PETG 돌기의 상대운동에 따른 마찰계수를 보여주고 있다. 평균 마찰계수는 0.1, 0.2, 0.3 m/s 조건에서 각각 0.427, 0.762, 1.770이었다. 0.1 m/s 조건에서 마찰계수는 초기 0.155-0.230로 낮게 형성되다가 급격히 증가하기 시작한다. 이러한 현상은 0.1 m/s 조건의 PETG 소재 간의 마찰계수 변화에서도 마모 시험 초기에 짧게 나타나는 것으로 보아 PETG의 마모 특성에 따른 것으로 보인다. 0.3 m/s의 조건에서는 PLA와

PETG 동일 소재 간의 마모 시험에서 보다 높은 마찰계수를 보인다. 0.3 m/s 조건에서 PLA 블록의 온도는 유리전이온도보다 높은 반면, PETG 돌기는 유리전이온도 이하의 온도(Fig. 5)를 보이고 있기 때문에 0.3 m/s 조건에서의 높은 마찰계수는 블록 소재인 PLA가 일종의 고무 상태(Rubbery State)가 되기 때문으로 판단된다.

3.3 마모특성

Fig. 12는 마모시험에 따른 소재의 마모율을 보여주고 있다. 동일 소재들 간의 마모시험에서 PLA 소재의 경우 0.3 m/s의 조건에서 PLA 블록 표면에 용착부가 형성되어 PLA 돌기의 불균일 마모(Fig. 8)가 발생해 마모율 측정이 불가능하였다. PLA 블록 표면의 용착부 평균 높이는 1.05 mm로 단위 거리당 용착 높이는 17.50  $\mu\text{m}/\text{m}$ 였다(Fig. 12(b)에서 음의 값으로 표시). Fig. 13는 용착부의 형상을 보여주고 있다. 0.1, 0.2 m/s 조건에서의 PLA 돌기와 블록의 마모율은 각각 9.67, 6.67  $\mu\text{m}/\text{m}$ 과 23.50, 9.83  $\mu\text{m}/\text{m}$ 였다. PETG 소재들 간의 마모시험에서는 미끄럼 속도가 증가함에 따라 마모율이 증가하는 경향을 보였으며, 0.1, 0.2, 0.3 m/s 조건에서 PETG 돌기의 마모율은 7.50, 18.66, 42.17  $\mu\text{m}/\text{m}$ 이고, PETG 블록의 마모율은 4.67, 6.33, 15.17  $\mu\text{m}/\text{m}$ 였다.

전반적으로 동일 소재들 간의 마모시험에서 PETG 소재가 PLA 소재보다 낮은 마모율을 보임을 알 수 있다. 이러한 특성은 3.2절의 마찰특성과 동일하며 소재의 성질에 따른 마찰계수와 관련 있는 것으로 보인다.

Fig. 12(C)는 PETG 블록-PLA 돌기와 PLA 블록-PETG 돌기의 상대운동에 따른 마모율을 보여주고 있으며, 마모시험 시 하중은 9.81 N, 미끄럼 속도는 0.1 m/s였다. PLA 블록-PETG 돌기에 비하여 PETG 블록-PLA 돌기에서 더 높은 마모율을 확인할 수 있으며 이는 Fig. 10에서와 같이 마찰특성에 따른 결과로 사료된다.

이종 소재의 마모시험 중 상대적으로 낮은 마모율을 보이는 PLA 블록-PETG 돌기의 상대운동 조건에서 미끄럼 속도에

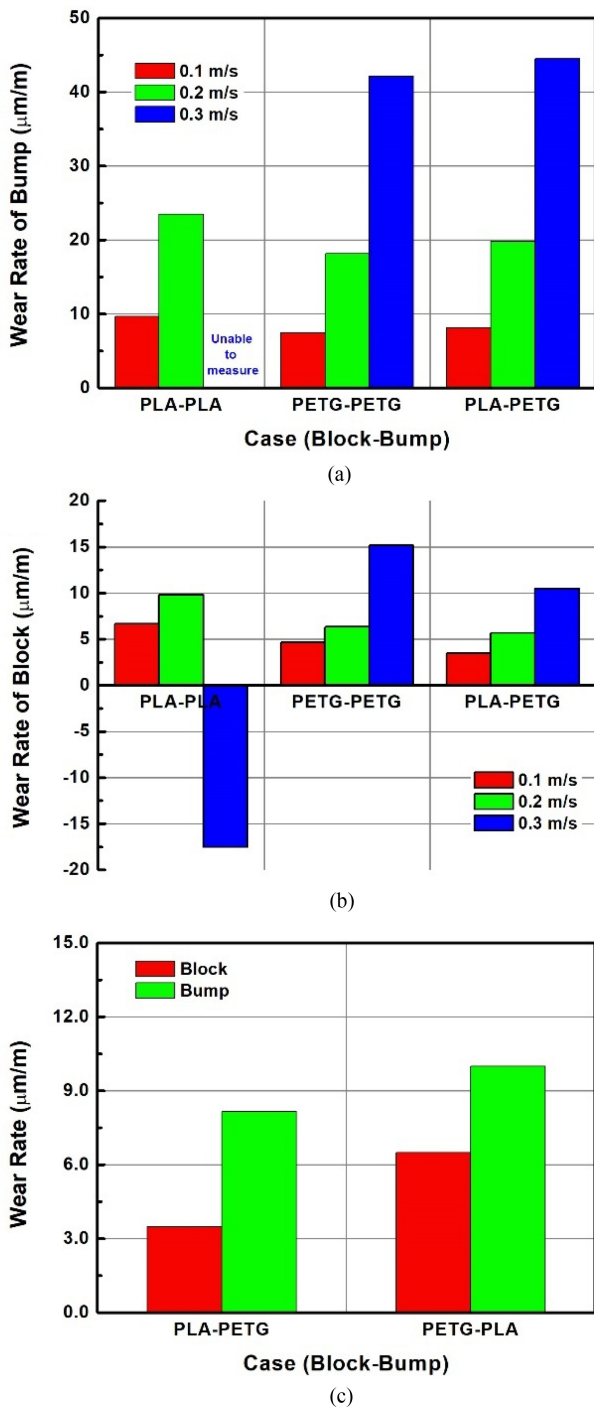


Fig. 12 Wear rate; (a) block, (b) bump, and (c) comparison of wear rate between different 3D printed materials under 9.81 N and 0.1 m/s conditions

따른 돌기와 블록의 마모율은 Figs. 12(a), 12(b)와 같이 속도에 따라 증가하는 경향을 보인다. PLA 블록-PETG 돌기의 마모시험에서의 돌기 마모율은 0.1, 0.2, 0.3 m/s의 조건에서 8.17, 19.83, 44.50  $\mu\text{m/m}$ 였으며, 블록의 마모율은 3.50, 5.67, 10.50  $\mu\text{m/m}$ 였다. 동일 소재 간의 실험과 비교했을 때, PETG 돌기

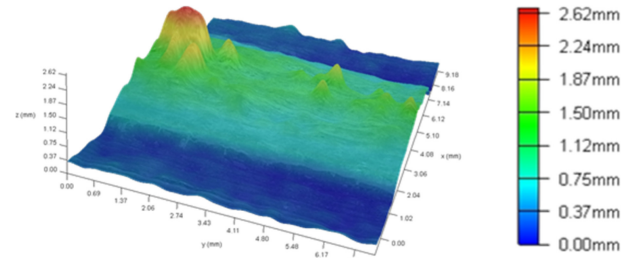


Fig. 13 3D image of deposited PLA on PLA block

마모율은 PLA 블록-PETG 돌기의 조건에서 조금 더 크게 나타나지만, PLA 블록 마모율은 낮아지는 결과를 얻었다. 이러한 현상은 마모시험 중 마찰과 온도에 따른 소재의 상태변화에 기인한 것으로 생각된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 3D 프린팅용 PLA와 PETG 소재의 마찰 및 마모 특성에 관한 연구를 수행하였다. 실험에서는 블록과 돌기 형상으로 FDM 방식으로 3D 프린팅된 소재를 사용하여 건식 마찰상태에서의 왕복동 마모시험을 통해 소재들의 트라이볼로지 특성을 확인하였다. PLA 블록-PLA 돌기, PETG 블록-PETG 돌기의 상대운동에서 PLA 블록-PLA 돌기와의 마모 시험에서 가장 높은 마찰계수와 마모율을 확인할 수 있었으며, 0.3 m/s의 미끄럼 속도 조건에서 마모 시험에 따른 온도가 유리전이온도 이상으로 상승하면서 돌기가 블록 위로 융착되는 현상이 발생하는 것으로 보인다. 반면, PETG 블록-PETG 돌기의 경우 유리전이온도 이하에서 마모되었다. PLA 블록-PETG 돌기의 이종 재료 간의 상대운동 조건의 경우, 미끄럼 속도 증가 시 PLA 블록의 마모는 PLA 블록-PLA 돌기 조건보다 크게 감소하고 소재의 융착 현상이 발생하지 않았으나, PETG 돌기의 경우 PETG 블록-PETG 돌기의 경우보다 다소 높은 마모율을 보였다. 따라서, 본 연구에서 활용한 PLA와 PETG 중 PETG로 출력된 소재가 무윤활 상태에서 상대운동 시 마찰 및 마모의 관점에서 보다 유리할 것으로 판단된다. 향후 3D 프린팅 소재를 이용한 시제품의 제작에 활용되는 다양한 소재에 관한 트라이볼로지 연구와 적합한 조합의 이종소재를 찾는 연구와 마찰 감소를 위한 윤활유에 관한 연구가 필요할 것으로 보인다.

#### ACKNOWLEDGEMENT

본 연구는 한국연구재단 이공분야 기초연구사업(NRF-2021R1F1A1063060)과 부산광역시 및 (재)부산테크노파크의 BB21plus 사업으로 지원된 연구임.

## REFERENCES

1. Choi, S. J., Bae, Y. H., Lee, I. H., Kim, H., (2018), Latest research trends of 3D printing in Korea, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 35(9), 829-834.
2. Choi, J.-W., Kim, H.-C., (2015), 3D printing technologies-A review, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, 14(3), 1-8.
3. Ford, S., Minshall, T., (2019), Invited review article: Where and how 3D printing is used in teaching and education, Additive Manufacturing, 25, 131-150.
4. Iftekar, S. F., Aabid, A., Amir, A., Baig, M., (2023), Advancements and limitations in 3D printing materials and technologies: A critical review, Polymers, 15(11), 2519.
5. Sim, J. W., Caro, C. N. D., Seo, K.-J., Kim, D.-E., (2019), A study on tribological properties of 3D-printed surface with respect to sliding orientation, Tribology and Lubricants, 35(6), 337-342.
6. Jo, Y. S., Lee, H. S., (2019), Friction and wear characteristics of ABS-like resin for 3D printing under non-lubricated condition, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 36(12), 1117-1124.
7. Park, S., Son, J., Woo, S., Ryu, E., Lee, H., (2020), Tribological characteristics of ABS-like resin according to silicon oil viscosity, Tribology and Lubricants, 36(6), 365-370.
8. Portoacă, A. I., Ripeanu, R. G., Diniță, A., Tănase, M., (2023), Optimization of 3D printing parameters for enhanced surface quality and wear resistance, Polymers, 15(16), 3419.

**Yonsang Cho**

Assisted Professor in the Department of Mechanical Engineering, Dong-A University. His research interests are tribology and additive manufacturing.

E-mail: bluecys@dau.ac.kr

**Hyunseop Lee**

Associate Professor in the Department of Mechanical Engineering, Dong-A University. His research interests are CMP, abrasive machining, and tribology.

E-mail: hyunseop@dau.ac.kr



# 링 전극 변수에 따른 정전 분무 코팅법의 액적 특성연구

## Study of Droplet Characteristics of Electrospray Coating Method as a Function of Ring Electrode Parameters

김지엽<sup>1</sup>, 이문희<sup>1</sup>, 김준엽<sup>2</sup>, 홍정구<sup>2, #</sup>  
Ji Yeop Kim<sup>1</sup>, Mun Hee Lee<sup>1</sup>, Jun Yeop Kim<sup>2</sup>, and Jung Goo Hong<sup>2, #</sup>

<sup>1</sup> 경북대학교 대학원 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Kyungpook National University)  
<sup>2</sup> 경북대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Kyungpook National University)  
# Corresponding Author / E-mail: jghong70@knu.ac.kr, TEL: +82-53-950-6570  
ORCID: 0000-0002-1286-5728

KEYWORDS: Electrospray (정전 분무), Ring electrode (링 전극), Sauter mean diameter (SMD), SMD standard deviation (SMD 표준편차), Ansys maxwell (엔시스 맥스웰)

*Among chemical coating methods, deposition using electrostatic spraying is commonly employed in coating processes to control the deposition rate, thickness, and properties of the formed materials. In this study, we considered the following variables: ring electrode, ring diameter (RD), ring voltage (RV), and nozzle-ring distance (NTR). Through experiments, we determined the atomization mode applied voltage, Sauter mean diameter (SMD), and SMD standard deviation of the nozzle. Additionally, we derived the voltage intensity and electric field along the axial direction using ANSYS maxwell to identify the optimal ring electrode atomization conditions.*

Manuscript received: November 17, 2023 / Revised: December 12, 2023 / Accepted: December 14, 2023

### 1. 서론

대면 코팅이란 재료의 표면에 다른 금속, 세라믹, 고분자 등을 이용하여 얇은 막을 형성하여 표면의 질을 향상시키는 것을 말한다. 이 필름 형성을 통해 기계적, 화학적, 전기적, 광학적, 열적, 표면 특성 등을 조절할 수 있다. 코팅은 기능 부여, 표면 처리, 도장 등 다양한 분야에 적용할 수 있다[1,2].

코팅은 크게 화학적 방법, 전기 증착, 진공 증착, 열 분무, 용접, 피복 시스템으로 나누어진다[3]. 화학적 방법의 경우, 졸-겔[4], 아노다이징[5], 정전 분무[6] 등이 있으며, 전기증착의 경우, 무전해도금[7], 전기 펄스 도금[8] 등이 있으며, 진공 증착의 경우, 물리적 증기 증착법[9]과 화학적 증기 증착법[10]이 있고 열 분무의 경우, HVOF [11], 와이어 분무[12] 등이 있고 용접의 경우, TIG 용접과 MIG 용접이 있고[13] 피복의 경우, 레이저 피복[14]과, 방폭 피복[15]이 있다. 그 중 화학적 방법의 정전 분무의 경우 다른 공정에 비해서 간단한 설비 구조와 일반적인 대기

환경에서 이용 가능하고, 나노미터 규모의 고순도 물질을 생성할 수 있으며, 유체 물성치 및 실험변수를 통해 결정성, 질감, 막 두께, 증착 속도를 제어할 수 있다는 장점이 있다[16]. 정전 분무의 단점으로는 저유량 문제가 존재한다[17]. 코팅의 생산성 확대를 위해서는 저유량 문제를 해결해야 된다는 한계를 가지고 있다. 저유량 문제를 해결하기 위해서는 노즐 형상 변화, 다중 노즐 구조 및 링 전극 방법이 존재한다[18,19]. 링 전극의 경우 외부 환경을 조절하여 액적의 크기, 속도, 분포도 및 증착 위치 등을 조절할 수 있으며, 국부적 분무가 가능하여 분무 시 수 농도를 높일 수 있는 특성이 존재한다. 링전극에 대한 기존 연구의 경우 Véliz 등[20]은 링전극이 노 링에 비해 상대적으로 작은 액적이 생성된다고 하였다. Kuwahata 등[21]은 링전극이 노 링에 비해 분무 면적이 줄어들었다고 하였고, Gan 등[22]은 링전극이 노 링에 비해 액적의 크기가 줄어들지만 속도도 줄어든다고 보고하였다. Xie 등[23]은 링전극이 노 링에 비해 작은 액적 사이즈와 좁은 분포도를 가진다고 하였다. 기존의 링 전극의 관련

실험의 경우 링 유무에 따른 액적 크기, 속도 및 분포 면적에 대한 내용이 대부분이며, 링 전극의 실험 매개 변수에 따른 액적 특성에 대한 연구는 기초데이터가 상대적으로 부족한 것으로 판단된다. 또한, 다중 노즐 구조[18]의 경우 장치가 구조적으로 복잡하므로 링전극의 매개변수에 의한 최적의 실험조건을 찾을 필요성이 있다.

정전 분무의 코팅 공정에 이용되는 증류수의 경우 가장 대표적인 무기용매로서, 바이오 공정, 치환 공정 등 산업 전반에 필수적으로 이용되는 용매이다[24]. 그러나, 증류수의 경우 다른 용매들에 비해 콘 제트 모드 발현이 어렵다. 콘 제트 모드의 발현 조건은 표면장력과 유체표면의 법선 방향으로 작용하는 전압이 평행이 되고, 충분한 전하이완 시간이 유지되며, 등 전하 분포가 형성될 때 콘 제트 모드가 안정적으로 발현된다[25]. 증류수의 경우 표면장력이 다른 용매 기준으로 약 3배 정도 높고, 전도도 또한 상대적으로 높아 정전 분무의 가장 많이 이용되는 콘 제트 모드가 안정적으로 형성되기 어렵다[26]. 이에 물에 대한 분무모드 및 액적 관련한 선행 연구로는 Lastow 등[27]과 Kim 등[28]은 증류수의 분무모드가 불안정하다고 하였고, Kim 등[29]은 증류수의 높은 표면장력 때문에 콘 제트 모드 인가전압에서 코로나 방전이 일어난다고 하였다. Le 등[30]은 다양한 분무 모드가 생기며 증류수의 혼합용액의 경우 실험 변수에 따른 액적분포도 및 액적 크기 편차가 크다고 하였고, Agostinho 등[31]은  $We < 4$ 인 한정적 조건에서 안정적으로 콘 제트 모드가 형성된다고 하였다. 선행 연구의 경우 대부분 증류수의 경우 분무 모드가 연속적이지 못하며, 안정적인 콘 제트가 생성되지 않고, 제한적인 분무 모드 및 액적 특성을 확인하였다.

본 연구는 물의 안정적인 콘 제트 모드의 조건 및 액적 특성을 파악하고자 한다. 이를 위해 실험적 연구를 통해 링 전극을 이용해서 증류수의 안정적인 콘 제트 모드 조건을 확인하고자 하며, 콘 제트 모드 내의 실험 매개 변수에 따른 액적 크기 및 분포도를 파악하고자 한다. 또한 계산을 통한 축 방향에 따른 전압 및 전기장 결과와의 비교를 통해 링전극의 최적의 실험조건을 찾고자 한다. 이후 링 전극과 매개 변수에 따른 분무 모드, 액적 크기, 액적 분포도 데이터를 비교 분석할 것이다. 이는 링 전극을 이용한 정전 분무 분야에 기초자료로 활용할 것으로 기대한다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험 장치

Fig. 1은 본 실험의 실험장치도이다. 실험장치도는 유체공급부, 전압공급부, 계측부로 크게 세 부분으로 나누어진다. 유체 공급부의 경우, 시린지 펌프(Syringe Pump, NE-1000)를 이용하여 유체를 공급하였으며, 홀더(Holder)를 이용하여 분무 하단 방향으로 분무되도록 설치하였다. 시린지(Syringe, HSW Norm-ject)는 상용 제품 중 가장 부피가 작은 모델을 이용하였으며, 노즐(Nozzle)은 Single Metal Nozzle을 사용하였다. 전압 공급부는

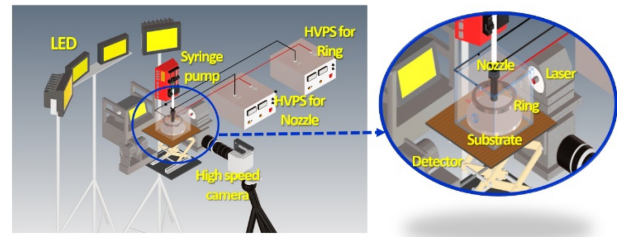


Fig. 1 Ring electrode experimental apparatus for electrospray

최대 전압 30 kV까지 인가 가능한 HVPS (High Voltage Power Supply, 한국 스위칭)를 이용하여, 노즐과 링에 음극(-), 기판에 양극(+)을 인가하였다. 또한 HVPS의 내부 컨트롤러(Controller)를 이용하여 콘 제트 모드(Cone-jet Mode)가 형성될 수 있는 인가 전압까지 전압을 상승시키며 실험하였으며, 인가 전압에 의해 발생하는 이력 현상(Hysteresis)를 최소화하였다. 계측부는 평균 액적 크기(Sauter Mean Diameter, SMD)와 액적 분포도(SMD Standard Deviation)를 파악하기 위해 레이저 회절 원리(Laser Diffraction)를 이용한 맬번(Malvern) 타입의 액적 측정 장치(MLXA-A12-635-5)를 사용하였다. 액적 측정 장치의 경우, 기존의 에어로사이저(Aerosizer)와 주사현미경(Scanning Electron Microscope, SEM)으로 측정하는 방법이 아닌 Line of Sight 방법을 이용하여 측정하였다[32]. 초고속 카메라(Phantom VEO E310L)를 이용해 이미지 촬영을 통한 분무 가시화를 진행하였다. 분무 이미지는 인가 전압에 의해 형성된 분무 형상이 충분히 정적인 상태에 도달한 상태임을 확인한 후 촬영하였으며, 실험조건 당 최소 300개 이상 샘플을 촬영하고 분석하는 방식으로 가시화를 진행하였다[33]. 분무 가시화를 위한 광원은 5개의 LED (Light Emitting Diode)를 노즐을 중심으로 후면 2개, 아래 1개, 45° 2개로 설치하였다. 후면의 조명은 액적 모양의 세부사항을 위해 설치하였고, 45°의 조명은 액막 및 액적의 특성을 확인하기 위해 설치하였다. 아래 조명은 분무 각을 확인하기 위해 설치하였다. 링과 기판의 경우 알루미늄으로 직접 가공하였다. 링의 경우, 두께를 일정하게 조절하고 내경을 크기를 변경하여 가공하였고, 기판의 경우(H: 10 mm, D: 50 mm) 분무 시, 분포되는 면적 및 분무각을 확인하기 위한 용도로 제작하였다. 링과 기판의 높이 조절은 서포트 잭(Support-jack)을 이용해 조절하였다. 기타 외부 대기 환경 영향을 최소화하기 위해 아크릴 커버(Cover)와 온-습도계(온도: 25°C, 상대습도: 40%)를 사용하여 외부환경을 통제된 상태로 실험을 진행하였다.

### 2.2 작동 유체

Table 1은 본 실험의 작동 유체인 증류수의 유체 물성치를 나타낸다. 증류수는 일반적으로 가장 많이 이용되는 무기 용매 중 하나이며, 바이오 공정 및 치환공정이 필요한 분야에 필수적으로 이용된다. 증류수는 다른 용매에 비해 표면장력이 약 2배 이상 높기 때문에 안정적인 콘 제트가 형성되지 않는다는 문제를 안고 있다. 이를 해결하기 위하여 본 실험에서는 증류수 이용하여 실험을 진행하였다. 증류수의 전기 전도도는 휴대용 전도도



Table 1 Working fluid properties (25°C)

Solution	Density [kg/m <sup>3</sup> ]	Conductivity [μs/cm]	Viscosity [mPa·s]	Surface tension [mN/m]	Dielectric constant
Distilled water	997	0.554	1.52	72	80.4

Table 2 Experimental conditions based on ring variables

Condition	Value
Ring diameter (RD) [mm]	15, 20, 30, 40
Ring voltage (RV) [kV]	0, 1, 3, 5, 7
Nozzle to ring (NTR) [mm]	-20, -10, 0, 10, 20
Nozzle out diameter (ND) [mm]	1.47
Nozzle to substrate (NTR) [mm]	45
Flowrate [ml/h]	1.5
Ambient temperature [°C]	25
Relative humidity [%]	40±10

측정기(CON 150)을 이용하여 측정한 후, 보정용액(111.8 mS/cm)를 이용하여 보정하였다. 점도는 동점도계(SV-10)를 이용하여 측정하였으며, 동적 접촉각 분석기(DCA-200)을 이용하여 표면장력을 측정하였다. 상대 유전율은 경우 유체 유전율 측정기(Model 871)을 이용하여 측정하였다.

2.3 실험 조건

Table 2는 링 전극에서 실험적 매개변수에 따른 정전 분무의 액적 특성을 확인하기 위한 실험 조건을 나타낸 표이다. 실험에 사용된 링 직경은 15, 20, 30, 40 mm이다. 직경 15 mm 이하의 경우, 낮은 인가 전압 조건에서도 코로나 방전이 발생하므로 분무 모드를 확인하기 힘들기에 제외되었다. 링 인가 전압은 0, 1, 3, 5, 7 kV로 설정하였으며, 링의 인가 전압에 의한 분무 모드 및 액적 특성 영향을 확인하였다. 노즐과 링의 거리(Nozzle to Ring, NTR)의 경우, 링 설치 위치에 대한 분무 모드와 액적 특성을 파악하기 위해 -20~20 mm까지 10 mm씩 증가시키면서 실험을 진행하였다. 노즐 외경의 경우 외경 1.47 mm (Single Metal Nozzle, 17 gage)을 이용하였으며, 노즐과 기관의 거리(Nozzle to Substrate, NTS)의 경우 링에 대한 영향을 확인 하기 위해 45 mm에서 고정된 채 실험을 진행하였다. 유량의 경우 1.5 ml/h에서 고정하여 모든 실험을 진행하였다.

2.4 전압 및 전기장 계산

전압 및 전기장에 대한 계산은 각 실험 조건에서의 전기장, 전압의 세기와 위치 별 분포를 확인하기 위해 수행되었으며, 계산은 Ansys Maxwell을 사용하여 진행하였다. Ansys Maxwell은 유한요소해석을 사용하여 공간 상의 맥스웰 방정식을 계산하여 전자기장을 해결할 수 있는 프로그램이며, Electrostatic Solver를

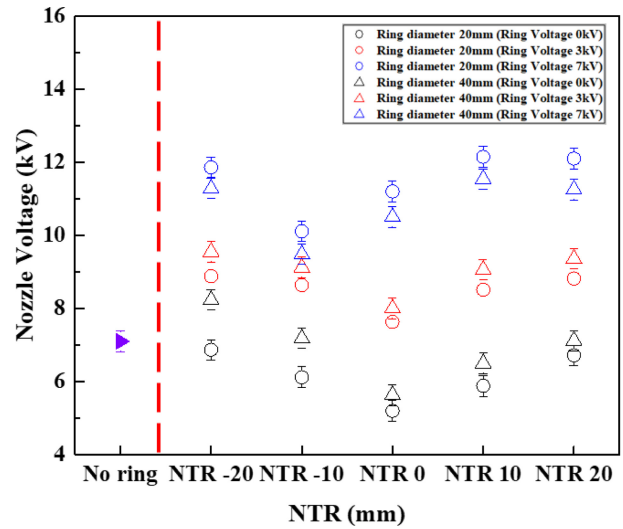


Fig. 2 Spray mode based on ring variable conditions

사용하여 실험 구조에서 정전기장(Static Electric Filed)를 해석 하였다. 해석한 결과를 통해 축 방향에 따른 전압, 전기장 세기와 3차원 구조에서의 Contour를 얻었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 링 변수 조건에 따른 분무모드

Fig. 2는 서로 다른 링 직경과 인가 전압 조건에서 NTR에 따른 노즐 인가 전압을 나타낸 그래프이다. 노즐 인가 전압에 따른 각 지점은 콘 제트 모드 형성 지점이다. 콘 제트의 기준은 Kim 등[32]이 제시한 노즐 팁(Tip)에서의 형성된 콘(Cone) 형상이 분무 반각 49.3° 로 안정적이며 연속적인 분무가 이루어지는 경우를 말한다. 본 실험은 유량 1.5 ml/h, NTS 45 mm, 노즐 외경 1.47 mm로 고정한 조건에서 진행하였다. 실험 결과 노 링(No Ring)에 비해 링(Ring)이 있는 경우, 노즐에 상대적으로 낮은 전압을 인가하여도 콘 제트 모드가 형성됨을 확인하였다. 링 인가 전압(Ring Voltage, RV) 증가만큼 노즐의 인가 전압도 비례하여 증가하였으며, 링 인가 전압(RV)이 낮은 조건에서, NTR이 가까울수록 노즐에 인가된 전압이 낮게 형성되었다. 링 인가 전압이 높은 경우, NTR이 멀어짐에 따라 노즐의 인가 전압이 낮아지는 역전 현상이 발생하였다. 링 직경(Ring Diameter, RD)은 증가함에 따라 콘 제트 모드 형성을 위한 노즐 인가 전압이 미비하게 증가하였다. 한편, NTR -20 mm 조건에서 노즐에 가장 높은 인가 전압이 형성되었는데 이는 Single Metal Nozzle의 길이보다 NTR -20 mm 조건이 축 방향으로부터 위쪽에 위치하므로 전기장이 상대적으로 약하게 작용하는 것으로 판단된다.

3.2 링 변수조건에 따른 액적 크기와 액적 분포도

3.2.1 노즐과 링의 거리에 따른 액적 크기 및 분포도

Fig. 3은 NTR에 따른 SMD 및 SMD Standard Deviation을

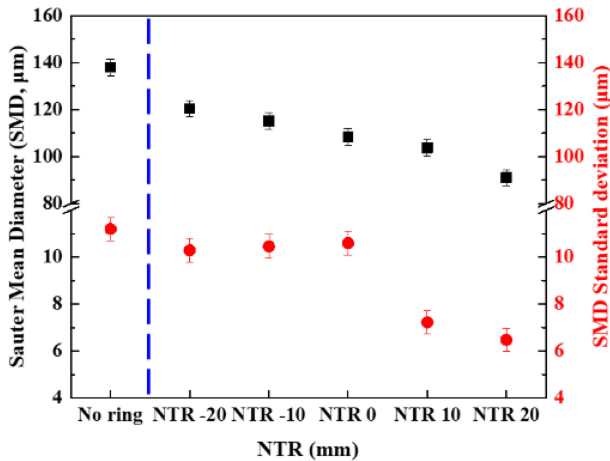


Fig. 3 SMD (Sauter Mean Diameter) and SMD standard deviation as a function of the NTR (Nozzle to Ring) from the experiment

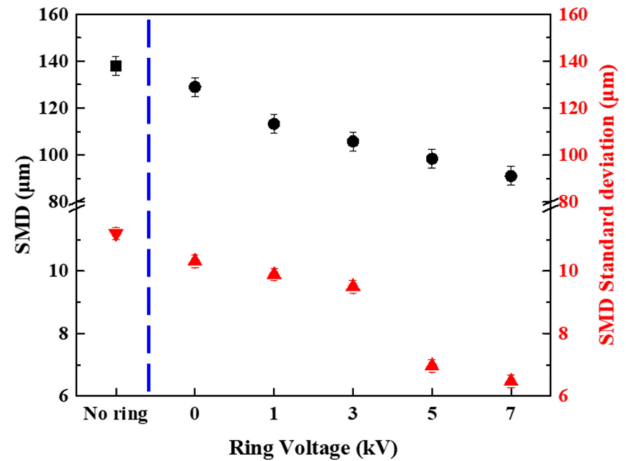


Fig. 5 SMD and SMD standard deviation as a function of the Ring Voltage (RV) from the experiment

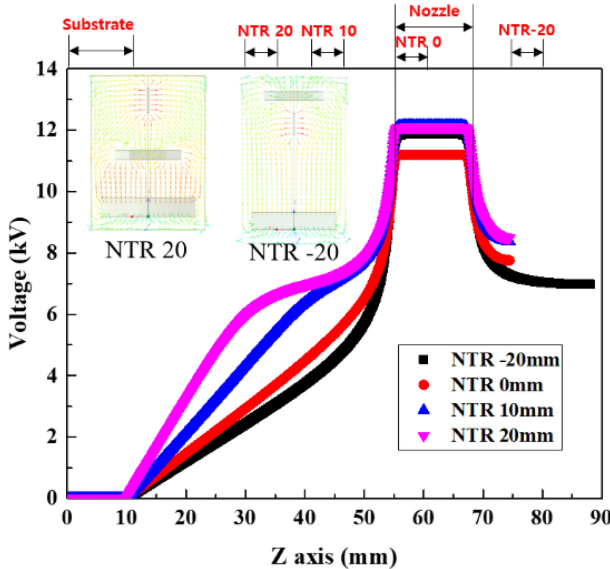


Fig. 4 SMD and SMD standard deviation as a function of the NTR (Nozzle to Ring) from the calculation

나타낸 실험 결과다. 실험 조건은 유량 1.5 ml/h, NTS 45 mm, 노즐 외경 1.47 mm, 링 직경 20 mm, 링 인가전압 7 kV에서 실험을 진행하였다. 노 링에 비해 링이 있는 조건에서 상대적으로 SMD와 SMD Standard Deviation이 작게 나타났다. NTR이 -20~20 mm까지 증가함에 따라 SMD는 감소하는 경향을 확인하였다. 또한, NTR -20~0 mm 범위에서 NTR이 증가할수록 SMD Standard Deviation이 증가하며, NTR 0-20 mm 범위의 경우, NTR 증가에 따라 SMD Standard Deviation이 작아지는 현상을 확인하였다.

Fig. 4은 NTR에 따른 축 방향 전압을 나타낸 계산 결과이다. NTR -20, 0, 10, 20 mm 조건에서 노즐 중심으로부터 축 방향 전압의 세기를 해석하였으며, 그 외 실험 조건은 Fig. 3과 동일하다. 노즐 인가 전압은 콘 제트 모드가 형성되는 인가 전압

조건에서 계산을 진행하였다. 계산 결과 노즐의 팁에서 가장 강한 전기장이 형성되며, 기판의 경우, 전기장이 형성되지 않았다. NTR이 클수록 Z축에 따라 상대적으로 전압이 높게 형성되는 것을 확인하였다. NTR 10, 20 mm의 경우, 링에서도 강한 전기장이 형성됨에 따라 분무 하단 방향으로 가속되는 것을 확인할 수 있다. 이로 인해 링에 의해 강하게 형성된 전기장에 의해 분열된 액적 간의 중합 및 착합이 이뤄지지 않아 SMD Standard Deviation이 작게 형성되며, 이는 앞선 Fig. 3의 SMD Standard Deviation 결과와 일치한다. 마찬가지로 NTR -10, -20 mm의 경우 또한 노즐 위쪽에 링이 설치되어 있어 전기장이 기판보다 링에 더 크게 작용하므로 노즐과 기판 사이의 전기장은 상대적으로 약해지며, 액적이 링에 들러붙는 현상까지도 발생하게 된다.

3.2.2 링의 인가전압(RV) 따른 액적 크기 및 분포도

Fig. 5는 링 인가전압에 따른 SMD와 SMD Standard Deviation의 실험 결과다. 실험 조건은 유량 1.5 ml/h, NTS 45 mm, 노즐 외경 1.47 mm, 링 직경 20 mm, NTR 20 mm이다. 인가 전압에 증가에 따라 SMD와 SMD Standard Deviation 감소하는 경향을 확인하였다. 링 인가 전압 5 kV 이상 조건에서는 Fig. 2 결과에서 확인한 바와 같이 역전현상으로 인해 감소폭이 커진 것으로 판단된다. 또한, 링이 있는 경우, 노 링 조건에 비해 SMD가 작은 것을 확인하였다. 0 kV 조건의 경우 노 링의 조건보다 SMD가 작은 것을 확인하였으며, 이는 Fig. 2에서 확인한 바와 같이 노즐에 인가된 전압이 링으로 대전되어 노 링에 비해 SMD가 작게 형성되기 때문이다.

Fig. 6는 링 인가전압에 따른 축 방향 전압 계산 및 해석 결과를 나타낸다. 계산 조건은 Fig. 5의 실험 조건과 동일하며, 링 인가 전압 0, 1, 3, 5, 7 kV로 설정하여 Z축의 전압 세기에 대해 해석하였다. 노즐의 인가 전압의 경우 콘 제트 모드가 형성되는 인가 전압 조건에서 계산 및 해석을 진행하였다. 링 전압의 세기가 세짐에 따라 상대적으로 노즐과 기판 사이에 강한 전기장이 형성됨을 확인하였다. 노즐을 중심으로 축 방향으로 강하게

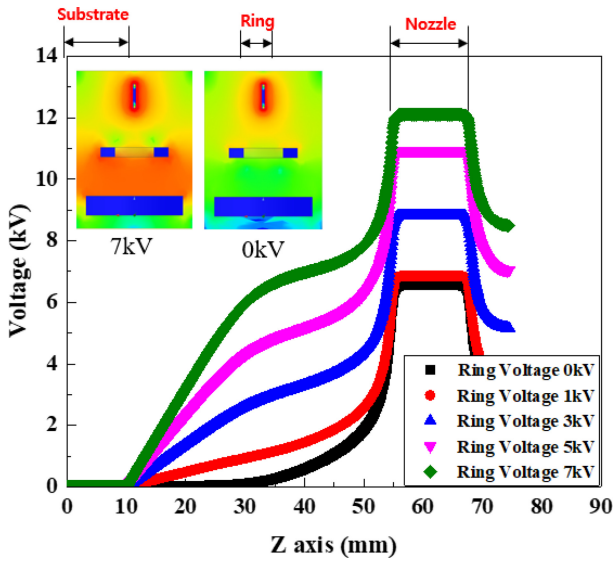


Fig. 6 SMD and SMD standard deviation as a function of the Ring Voltage (RV) from the calculation

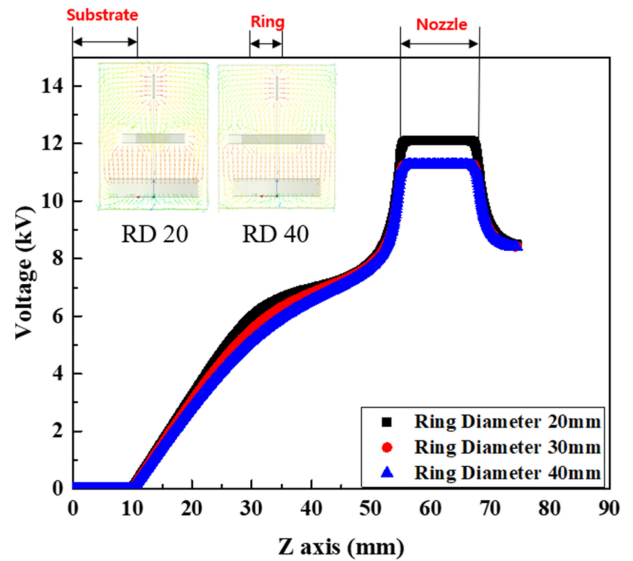


Fig. 8 SMD and SMD standard deviation as a function of the Ring Diameter (RD) from the calculation

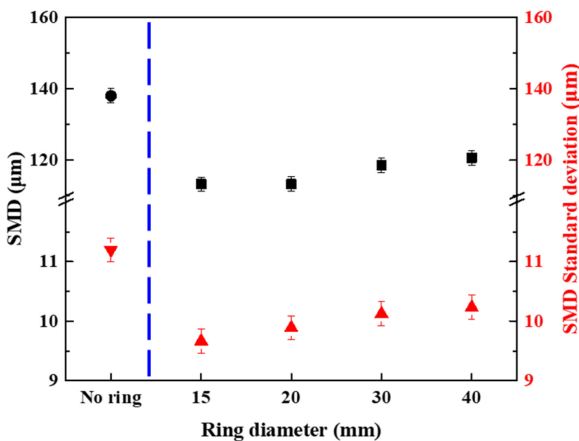


Fig. 7 SMD and SMD standard deviation as a function of the Ring Diameter (RD) from the experiment

형성된 전기장은 SMD와 SMD Standard Deviation에 영향을 미치며 이는 Fig. 5의 결과와 일치함을 보여준다.

3.2.3 링 직경(RD)에 따른 액적 크기 및 분포도

Fig. 7은 7 kV로 인가되는 링 직경에 따른 SMD와 SMD Standard Deviation을 나타낸 실험 결과이다. 실험 조건은 앞선 Fig. 5와 동일하다. 링 직경의 경우, 직경 15 mm 이하 조건에서는 링과 노즐이 가까워 코로나 방전 및 히싱(Hissing) 현상이 나타나는 것을 확인하여, 링 직경은 15, 20, 30, 40 mm로 선정하여 실험을 진행하였다. 실험결과 노 링 조건에 비해 링이 있는 조건에서 SMD와 SMD Standard Deviation이 크며, 링 직경이 작을수록 SMD와 SMD Standard Deviation이 작게 나타나나 미비한 차이임을 확인하였다.

Fig. 8는 링 직경 변화에 따른 축 방향 전압 계산 및 해석 결과를 나타낸다. 계산 조건은 Fig. 7과 동일하며, 링 직경은 20,

30, 40 mm이다. 노즐 부근에서의 전압은 링 직경 40 mm일 때 가장 낮게 형성되며, 노즐을 중심으로 Z축 방향으로의 전압 차이는 미비한 것을 확인하였다. 이는 링 직경에 따른 SMD, SMD Standard Deviation이 미비한 것으로 확인된 앞선 Fig. 7의 결과와 일치함을 보여준다.

4. 결론

본 연구는 증류수를 활용한 습식 코팅 방법 중 하나인 정전 분무 링 전극 시스템에서 진행된 연구로, 다양한 실험 매개 변수가 정전 분무의 분무 특성(SMD 및 SMD Standard Deviation)에 미치는 영향에 대해 살펴보았다. 특히 노즐과 기관 사이의 전기장 세기를 계산 및 해석하여 분무 실험에서의 결과를 비교 분석하였다. 구체적인 결과로 첫째, 분무 모드의 경우 링 전극이 있는 조건이 없는 조건보다 노즐에 낮은 인가 전압을 대전해도 큰 제트가 형성됨을 확인하였다.

둘째, 콘 제트 모드의 경우, 링 인가 전압에 따라 노즐의 인가 전압이 비례하여 증가하며, 링 인가 전압이 낮은 3 kV 이하는 NTR이 가까울수록, 링 인가 전압 5 kV 이상의 조건에서는 NTR이 멀수록, 노즐에 낮은 전압이 인가됨을 확인하였다. 셋째, 링 인가 전압이 증가하고 링 직경이 작아지는 조건에서 SMD와 SMD Standard Deviation이 작아지는 것을 확인하였다. NTR이 (-)에서 (+) 방향으로 이동함에 따라 SMD가 작아지며, SMD Standard Deviation의 경우 (-)~0 mm까지는 증가, 0~(+)는 감소하는 경향을 확인하였다.

넷째, 본 실험에서 가장 작고 균일한 액적 크기 조건은 NTR 20 mm, 링 인가전압이 7 kV로서, 인가전압이 높을수록 노즐과 링거리가 멀수록 균일한 액적을 생성할 수 있다.

## ACKNOWLEDGEMENT

본 연구는 2020년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(No. 20204010600060).

## REFERENCES

- Fotovvati, B., Namdari, N., Dehghanghadikolaei, A., (2019), On coating techniques for surface protection: A review, *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 3(1), 28.
- Kang, D. K., Lee, S. M., (2022), Periodicity of droplet impact behavior by liquid viscosity on PDMS surface, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 39(11), 857-862.
- Miranda, R. M., Gandra, J. P., Vilaca, P., Quintino, L., Santos, T. G., (2013). Surface modification by solid state processing. Woodhead Publishing.
- Zhang, J., Guan, R., Zhang, X., (2011), Synthesis and characterization of sol-gel hydroxyapatite coatings deposited on porous NiTi alloys, *Journal of Alloys and Compounds*, 509(13), 4643-4648.
- Cotell, C. M., Sprague, J. A., Smidt, F. A. J., (1994), Surface engineering, ASM International. <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v05.9781627081702>
- Jaworek, A., Sobczyk, A., Krupa, A., (2018), Electro spray application to powder production and surface coating, *Journal of Aerosol Science*, 125, 57-92.
- Mallory, G. O., Hajdu, J. B., (1990), Electroless plating: Fundamentals and applications. <https://www.nmfr.org/pdf/10693022.pdf>
- Chandrasekar, M., Pushpavanam, M., (2008), Pulse and pulse reverse plating—Conceptual, advantages and applications, *Electrochimica Acta*, 53(8), 3313-3322.
- Mathew, M., Ariza, E., Rocha, L., Fernandes, A. C., Vaz, F., (2008), TiCxOy thin films for decorative applications: Tribocorrosion mechanisms and synergism, *Tribology International*, 41(7), 603-615.
- Maruyama, T., Arai, S., (1993), Electrochromic properties of niobium oxide thin films prepared by radio-frequency magnetron sputtering method, *Applied Physics Letters*, 63(7), 869-870.
- Nascimento, M. P., Souza, R. C., Miguel, I. M., Pigatin, W. L., Voorwald, H. J., (2001), Effects of tungsten carbide thermal spray coating by HP/HVOF and hard chromium electroplating on AISI 4340 high strength steel, *Surface and Coatings Technology*, 138(2-3), 113-124.
- Watanabe, T., Sato, T., Nezu, A., (2002), Electrode phenomena investigation of wire arc spraying for preparation of Ti-Al intermetallic compounds, *Thin Solid Films*, 407(1-2), 98-103.
- Weman, K., (2011), *Welding processes handbook 2nd edition*, Elsevier. <https://www.sciencedirect.com/book/9780857095107/welding-processes-handbook#book-info>
- Katalinić, B., Tekic, Z., (2013), DAAAM International Scientific Book 2013, DAAAM International Publishing. <https://daaam.info/sc-book-2013>
- Li, Y., Hashimoto, H., Suke dai, E., Zhang, Y., Zhang, Z., (2000), Morphology and structure of various phases at the bonding interface of Al/steel formed by explosive welding, *Journal of Electron Microscopy*, 49(1), 5-16.
- Jaworek, A., (2007), Electro spray droplet sources for thin film deposition, *Journal of Materials Science*, 42(1), 266-297.
- Almekinders, J., Jones, C., (1999), Multiple jet electrohydrodynamic spraying and applications, *Journal of Aerosol Science*, 30(7), 969-971.
- Tatemoto, Y., Ishikawa, R., Takeuchi, M., Takeshita, T., Noda, K., Okazaki, T., (2007), An electro spray method using a multi-capillary nozzle emitter, *Chemical Engineering & Technology*, 30(9), 1274-1279.
- Ueda, H., Takeuchi, K., Kikuchi, A., (2017), Effect of the nozzle tip's geometrical shape on electro spray deposition of organic thin films, *Japanese Journal of Applied Physics*, 56(4S), 04CL05.
- Véliz, B., Bermejo, S., Castañer, L., (2017), Improving a nozzle tip with a guard ring for an Electro spray system, *Proceedings of the 2017 Spanish Conference on Electron Devices (CDE)*, 1-4.
- Kuwahata, Y., Takehara, H., Ichiki, T., (2020), Comprehensive study on electro spray deposition in the single Taylor cone-jet mode by changing the spatial electric potential using a ring-shaped ternary electrode, *AIP Advances*, 10(4), 045107.
- Gan, Y., Jiang, Z., Li, H., Luo, Y., Chen, X., Shi, Y., Yan, Y., Yan, Y., (2019), A comparative study on droplet characteristics and specific charge of ethanol in two small-scale electro spray systems, *Scientific Reports*, 9(1), 18791.
- Xie, J., Wang, C. H., (2007), Electro spray in the dripping mode for cell microencapsulation, *Journal of Colloid and Interface Science*, 312(2), 247-255.
- Faccini, M., Bautista, L., Soldi, L., Escobar, A. M., Altavilla, M., Calvet, M., Domènech, A., Domínguez, E., (2021), Environmentally friendly anticorrosive polymeric coatings, *Applied Sciences*, 11(8), 3446.
- Wilm, M., (2011), Principles of electro spray ionization, *Molecular & Cellular Proteomics*, 10(7). <https://doi.org/10.1074/mcp.M111.009407>
- Tang, K., Gomez, A., (1994), Generation by electro spray of monodisperse water droplets for targeted drug delivery by inhalation, *Journal of Aerosol Science*, 25(6), 1237-1249.
- Lastow, O., Balachandran, W., (2007), Novel low voltage EHD spray nozzle for atomization of water in the cone jet mode, *Journal of Electrostatics*, 65(8), 490-499.

28. Kim, H. H., Kim, J. H., Ogata, A., (2011), Time-resolved high-speed camera observation of electro-spray, *Journal of Aerosol Science*, 42(4), 249-263.
29. Kim, S. Y., Jung, M. K., Choi, S. M., Lee, J. W., Lim, J. H., Kim, M. S., (2020), Discharge current of water electro-spray with electrical conductivity under high-voltage and high-flow-rate conditions, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 118, 110151.
30. Le, N. T., Myrick, J. M., Seigle, T., Huynh, P. T., Krishnan, S., (2018), Mapping electro-spray modes and droplet size distributions for chitosan solutions in unentangled and entangled concentration regimes, *Advanced Powder Technology*, 29(12), 3007-3021.
31. Agostinho, L., Bos, B., Kamau, A., Brouwer, S., Fuchs, E., Marijnissen, J., (2018), Simple-jet mode electro-sprays with water. Description, characterization and application in a single effect evaporation chamber, *Journal of Aerosol Science*, 125, 237-250.
32. Kim, J. Y., Lee, S. J., Baik, G. Y., Hong, J. G., (2021), Effects of working fluids on spray modes and atomization characteristics in electro-spray, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 38(1), 61-68.
33. Kim, J. Y., Lee, S. J., Hong, J. G., (2022), Spray mode and monodisperse droplet properties of an electro-spray, *ACS Omega*, 7(32), 28667-28674.

**Ji Yeop Kim**

Ph.D. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Kyungpook National University. His research interest is electro-spray.

E-mail: monst91@knu.ac.kr

**Mun Hee Lee**

Ph.D. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Kyungpook National University. His research interest is optimization of nozzle design.

E-mail : lmhlkh1322@knu.ac.kr

**Jun Yeop Kim**

B.Sc. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Kyungpook National University. His research interest is electro-spray.

E-mail: kjoy002871@naver.com

**Jung Goo Hong**

Professor in the Department of Mechanical Engineering, Kyungpook National University. His research interest is combustion engineering & atomization and spray system.

E-mail: jghong70@knu.ac.kr



## 창간

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

## 목적 및 연구 범위

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

## 금액

### 구독료

이 논문집은 우리학회 회원에 한하여 무료로 제공됩니다.

### 게재료

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

## 연락처

[04508] 서울 중구 중림로 50-1, SKY1004빌딩 12층

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

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

한국정밀공학회지 저널: http://jkspe.kspe.or.kr

# 한국정밀공학회지 논문투고 및 게재규정 · 논문집필요령

## 논문투고 및 게재규정

### 제1조 (목적)

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

### 제2조 (투고자)

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

### 제3조 (책임 및 윤리규정 준수)

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

### 제4조 (연구범위)

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

### 제5조 (투고 구분)

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

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

### 제6조 (접수)

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

### 제7조 (심사 및 게재 결정)

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

### 제8조 (저작권)

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

### 제9조 (자료공개)

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

### 제10조 (원고작성요령)

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

### 제11조(게재료)

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



# 한국정밀공학회지 논문투고 및 게재규정 · 논문집필요령

## 논문집필요령

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

# 한국정밀공학회지 논문심사규정

## 제1조 (목적)

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

## 제2조 (투고 및 접수)

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

## 제3조 (심사위원 선정)

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

## 제4조 (심사 방법)

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

## 제5조 (심사 기간)

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

## 제6조 (저자수정기한)

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

## 제7조 (게재 판정)

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

## 제8조 (특집논문심사)

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

# 한국정밀공학회지 논문심사규정

## 제9조 (비밀유지)

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

## 제10조 (이의제기)

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

## 제11조 (심사료)

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

# (사)한국정밀공학회 학술활동 윤리규정

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

## 제 1 장 총칙

### 제1조 (목적)

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

### 제2조 (윤리규정 적용범위)

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

### 제3조 (부정행위의 범위)

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

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

## 제 2 장 저자

### 제4조 (저자의 정직성)

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

### 제5조 (저자의 기준)

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

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

### 제6조 (저자의 준수사항)

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

## (사)한국정밀공학회 학술활동 윤리규정

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

### 제 3 장 학회 구성원의 역할과 책임

#### 제7조 (편집위원 준수사항)

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

#### 제8조 (심사위원 준수사항)

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

### 제 4 장 검증 절차와 기준

#### 제9조 (윤리위원회)

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

#### 제10조 (윤리위원회 기능)

위원회는 다음의 내용으로 활동한다.

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

# (사)한국정밀공학회 학술활동 윤리규정

## 제11조 (윤리위원회 소집 및 의결)

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

## 제12조 (연구 부정행위의 제보)

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

## 제13조 (연구 부정행위에 대한 제재 및 사후조치)

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

## 제14조 (피조사자 권리 보호)

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

## 제15조 (조사의 기록과 정보의 공개)

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

## 제16조 (조사결과의 보고)

- ① 위원회는 조사의 결과와 내용을 조사의 종료 및 판정 후, 접수일 기준 6개월 경과 이전에 심의 내용을 확정하여 이사회에 보고한다.
- ② 결과보고서에는 다음 각 호의 사항이 반드시 포함되어야 한다.
  1. 제보의 내용
  2. 조사의 대상이 된 부정행위
  3. 조사위원회의 조사위원 명단
  4. 해당 연구에서의 피조사자의 역할과 부정행위의 사실 여부
  5. 관련 증거 및 증인
  6. 제보자와 피조사자의 이익제기 또는 변론 내용과 그에 대한 처리결과
- ③ 연구 부정행위에 대한 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](http://jkspe.kspe.or.kr/files/KSPE_학술활동_윤리규정.pdf))
7. 책임저자는 위 논문의 공동저자들이 1항-6항의 사실들을 인식하고 있으며, 위 6가지 사항들에 대하여 동의합니다.
8. 한국정밀공학회는 저자(들)가 위 7가지 사항에 동의하지 않았을 경우, 위 논문의 출판을 지연시키거나 중지시킬 수 있는 권리를 가집니다.
9. 전체 저자들은 위 논문의 저작권과 일체 권리 양도에 관한 권한을 책임저자에게 일임하며, 책임저자는 전체 저자들을 대표하여 저작권을 양도합니다.

20    년        월        일

책임저자명:

서    명:

## 책임 저자

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

# (사)한국정밀공학회 소개 및 활동현황

## 설립목적

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

## 회원(사) 구성

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

## 관련정부기관과의 관계

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

## 주요활동현황

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

## 발간자료

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

## 발행규정

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

## 부문위원회 활동

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

## 특별회원사 가입

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



# (사)한국정밀공학회 소개 및 활동현황

## 한국정밀공학회상

### 정밀공학대상

- 학회 발전에 현저하게 공헌한 자

### 학술상

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

### 생산기술상, 정밀기술상

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

### 공로상

- 학회 발전과 운영에 지대하게 기여한 자

### Best Editor Award

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

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

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

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

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

### KSPE Young Researcher Award

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

## 특별상

### 가헌학술상

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

### 현송공학상

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

### 유정백합학술상

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

### 백암논문상

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

## Year of Launching

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

## Aims and Scope

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

## Fee

### Subscription Fee:

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

### Publication Fee:

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

## Contact Us

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

# Rules for Submitting and Publishing Papers

## Article 1 Purpose

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

## Article 2 Submitter

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

## Article 3 Responsibilities and Compliance with Code of Ethics

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

## Article 4 Scope of Research

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

## Article 5 Categorization of Submissions

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

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

## Article 6 Submission

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

## Article 7 Review and Decision to Publish Paper

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

## Article 8 Copyright

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

## Article 9 Disclosure of Materials

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

## Article 10 Manual of Style

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

## Article 11 Publication Fees

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

## Guidelines for Manuscript Writing

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

## Author's Check List

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

# Rules for Reviewing Papers

## Article 1 Purpose

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

## Article 2 Submission and Reception

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

## Article 3 Selection of Reviewers

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

## Article 4 Review Procedure

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

## Article 5 Review Period

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

## Article 6 Deadline for Author's Revision

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

# Rules for Reviewing Papers

## **Article 7 Decision over Publication**

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

## **Article 8 Review of Special Papers**

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

## **Article 9 Confidentiality**

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

## **Article 10 Objection**

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

## **Article 11 Review Fee**

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

# Code of Ethics for Academic Activities

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

## Chapter 1

### Overall Rules

#### Article 1 Purpose

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

#### Article 2 Application Area of Code of Ethics

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

#### Article 3 Scope of Misconduct

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

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

## Chapter 2

### Author

#### Article 4 Honesty of Author

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

#### Article 5 Authorship

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

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

# Code of Ethics for Academic Activities

## Article 6 Compliance of Authors

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

## Chapter 3 Roles and Responsibilities of Members of Society

### Article 7 Compliance of Editorial Board Member (EBM)

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

### Article 8 Compliance of Reviewers

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



## Code of Ethics for Academic Activities

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

### Chapter 4 Verification Process and Standard

#### Article 9 Ethics Committee

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

#### Article 10 Function of Ethics Committee

The Committee shall act in the following manners:

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

#### Article 11 Convocation and Voting of Ethics Committee

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

#### Article 12 Reporting Research Misconduct

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

# Code of Ethics for Academic Activities

## **Article 13 Sanctions on Research Misconduct and Follow-up Actions**

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

## **Article 14 Protection of Rights of Examinee**

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

## **Article 15 Disclosure of Record and Information of Investigation**

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

## **Article 16 Report of Investigation Result**

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

# Research Ethics and Copyright Transfer Agreement

To the Korean Society for Precision Engineering (KSPE)

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

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

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

**Corresponding  
Author’s  
Signature**

- Corresponding author (name): \_\_\_\_\_
- Position: \_\_\_\_\_
- Affiliation: \_\_\_\_\_
- Date: \_\_\_\_ / \_\_\_\_ / \_\_\_\_

**Corresponding  
Author**

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

# International Journal of Precision Engineering and Manufacturing

Volume 25 · Number 2 · February 2024

## REGULAR PAPERS

**Thermal Performance Evaluation of Micro Pin–Fin Heat Exchangers: Part I—Geometrical Design Parameters Optimization**

H. Kishore · M. Pal · C.K. Nirala · A. Agrawal 245

**Thermal Performance Evaluation of Micro Pin–Fin Heat Exchangers: Part II—Numerical Simulation and Fabrication Demonstration**

H. Kishore · M. Pal · C.K. Nirala · A. Agrawal 255

**257 nm Deep UV Femtosecond Laser Ablation with Minimized Crack and Chipping on Display Ultra-Thin Glass**

K. Cho · J. Choi · C. Ko · M. Kim · J. Lee · E. Eom · S.-H. Cho 271

**Electrochemical Curved Hole Drilling by Magnetic Manipulation of a Steel Ball Electrode**

S. Ryu · Y.F. Tang · K. Iman 285

**SPIRA: Screw Wheel-Based Mobile Robot for Switching Primitives**

C. Seo · D. Son · K. Lee · K. Ko · J. Lee · T. Seo 295

**Contact System Method for the Precise Interaction Between Cobots and Mobile Robots in Smart Manufacturing**

I. Sánchez-Calleja · A. Martínez-Gutiérrez · R. Ferrero-Guillén · J. Díez-González · H. Perez 303

**Hole Diameter Deviation Control Method for Robotic Hole-Making System Based on Presser Foot Action**

X. Zheng · G. Zhang · C. Zhou · G. Guo 319

**Fabrication and Optimal Design of a Mechanical Piezoelectric Energy Harvester with Re-entrant Honeycomb Substrate for Maximizing Voltage Output**

M.H. Fatahi · M. Hamed · M. Safarabadi 335

**Research on Tolerance Design of 2K-V Reducer with Beveloid Gear Considering the Effect of Anti-Backlash**

Z. Cui · C. Song · F. Zhu · C. Zhu 349

**Investigation of the Performance of a V-shaped Inner Plate Array Armor System Against 7.62 mm Caliber Bullets**

E. Camcı · M. Calışkan · İ.B. Tural · Ö. Ergü · F. Findik 363

**Material-Adaptive Anomaly Detection Using Property-Concatenated Transfer Learning in Wire Arc Additive Manufacturing**

S.-J. Shin · J.-H. Lee · S. Jadhav · D.B. Kim 383

## REVIEWS

**The Vision-Based Target Recognition, Localization, and Control for Harvesting Robots: A Review**

J. Liu · Z. Liu 409

**A Critical Review of Machine Learning Methods Used in Metal Powder Bed Fusion Process to Predict Part Properties**

C.B. Toprak · C.U. Dogruer 429

**Advanced Surface Engineering Approaches for Exotic Applications**

S. Mohanty · S. Basak · D. Saran · K. Chatterjee · T. Datta · A. Kumar · C. Prakash · D.-M. Chun · S.-T. Hong · K.K. Sahu 453

**Recent Developments in Finite Element Analysis of the Lumbar Spine**

B. Khuyagbaatar · K. Kim · Y.H. Kim 487

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

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

Instructions for authors for *Int. J. Precis. Eng. Manuf.* are available at [www.springer.com/12541](http://www.springer.com/12541)

# International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology

Volume 11 · Number 1 · January 2024

## REGULAR PAPERS

### Novel Use of Cellulose Based Biodegradable Nano Crystals in the Machining of PPS Composites: An Approach Towards Green Machining

S. Şap · Ü.A. Usca · Y.S. Tarih · A. Yar · M. Kuntoğlu · M.K. Gupta 1

### A Cleaner Milling Process Replacing Emulsion Coolant by Cryogenics CO<sub>2</sub>

O.M.P. Neto · A. Calleja-Ochoa · I. Ayesta · A. Rodríguez · H. González-Barrio · L.N.L. de Lacalle 21

### Machining and Energy Aspect Assessment with Sustainable Cutting Fluid Strategies of Al-12Si Based Hybrid Composites

S. Şap 33

### Storage of High-Strength Steel Flux-Cored Welding Wires in Urbanized Areas

A. Wolski · A. Świerczyńska · G. Lentka · D. Fydrych 55

### Comparison and Identification of Optimal Machine Learning Model for Rapid Optimization of Printed Line Characteristics of Aerosol Jet Printing Technology

M. Li · Z. Liu · S. Yin · J.P. Choi · H. Zhang 71

### Investigation on Bonding Strength and Tribological Performances of Ceramic Laminated AA6063 Composite Developed by Friction Stir Additive Manufacturing

R. Prajapati · S. Dwivedi · D. Kumar · A.K. Srivastava · A.R. Dixit 89

### Plastic Deformation Mechanism of the Ti6Al4V Micro-gear Formed Under an Electrical Field

B. Zeng · X. Yan · Z. Xie · J. Liu · J. Wang · K. Huang · Y. Yang 107

### Optimal Parametric Design of Fuel Cell Hybrid Electric Vehicles by Balancing Composite Motion Optimization

T. Huynh · A.T. Pham · J. Lee · H. Nguyen-Xuan 123

### Effect of Baffle Pattern Applied to Cathode Parallel Channel on PEMFC Performance

J. Son · S. Um · Y.-B. Kim 145

### Comparison of Various Cathode Materials Fabricated by Pulsed Laser Deposition for Low-Temperature Ceramic Fuel Cells

D.H. Kim · S. Yang · D.-H. Kwon · H.-I. Ji · K.J. Yoon · J.-H. Lee · J.H. Shim · J.-W. Son 161

### Triboelectric Nanogenerator for Collecting Particulate Matter Using Multiple Energy Sources

H. Park · S. Ji · J. Shin · J. Yoon · D.H. Kim · J. Park 171

### An Improved Soft Actor-Critic-Based Energy Management Strategy of Fuel Cell Hybrid Vehicles with a Nonlinear Fuel Cell Degradation Model

D. Zhang · Y. Cui · Y. Xiao · S. Fu · S.W. Cha · N. Kim · H. Mao · C. Zheng 183

### Intense Pulsed Light Welding Process with Mechanical Roll-Pressing for Highly Conductive Silver Nanowire Transparent Electrode

Y.-M. Ju · J.-W. Park · Y.-R. Jang · S.S. Park · H.-S. Kim 203

### Temperature Sensors Manufactured from Edible Materials Intended for Oral Cavity Operation

G.M. Stojanović · M. Radovanović · S. Kojić · L. Milić · M. Simić · T. Kojić · R.G. Duval · J. Vukmirović · B. Petrović 221

### Accelerate the Shift to Green Energy with PVDF Based Piezoelectric Nanogenerator

J. Lee · S. Hajra · S. Panda · W. Oh · Y. Oh · H. Shin · Y.K. Mishra · H.J. Kim 233

### Multi-parallel Disassembly Line Balancing Problem and Improved Ant Lion Optimizer for Mixed-Waste Electrical and Electronic Equipment

W. Liang · Z. Zhang · T. Yin · Y. Zeng · Y. Zhang 243

## REVIEWS

### A Review on Energy Consumption and Efficiency of Selective Laser Melting Considering Support: Advances and Prospects

Q. Wang · M. Gao · Q. Li · C. Liu · L. Li · X. Li · Z. Liu 259

**A Review and Comparison of Linear Pneumatic Artificial Muscles**

B. Jamil · N. Oh · J.-G. Lee · H. Lee · H. Rodrigue 277

**Mechanical Metamaterials for Sensor and Actuator Applications**

S. Pyo · K. Park 291

**The Promise of 3D Printed Solid Polymer Electrolytes for Developing Sustainable Batteries:**

**A Techno-Commercial Perspective**

B.R. Alandur Ramesh · B. Basnet · R. Huang · J. Jeong · H. Lee · T. Kyu · J.-W. Choi 321

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

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

**Instructions for authors** for *Int. J. of Precis. Eng. and Manuf.-Green Tech.* are available at [www.springer.com/40684](http://www.springer.com/40684)

# International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Smart Technology

Volume 2 · Number 1 · January 2024

## REGULAR PAPERS

### **The Current Design for Additive Manufacturing Research Frontier**

D. W. Rosen 1

### **Bayesian Hyper-parameter Optimization in One-dimensional Convolutional Autoencoder for Monitoring Bearing Health Status**

S. Chae · S. J. Bae 15

### **Designable Data Augmentation-based Domain-adaptive Design of Electric Vehicle Considering Dynamic Responses**

Y. Yoo · J. Lee 23

### **Directed Graph-based Refinement of Three-dimensional Human Motion Data Using Spatial-temporal Information**

C. Choi · J. Lee · H.-J. Chung · J. Park · B. Park ·

S. Sohn · S. Lee 33

### **A Finite Element Model of an Electric Motor with an Unbalanced Rotor for Vibration Data Generation**

H. Lee · S. Son · D. Jeong · K. H. Sun ·

B. C. Jeon · K.-Y. Oh 47

### **Development of 1D-convolutional Neural Network-based Height Profile Prediction Model in Directed Energy Deposition Process Using Melt-pool Image Data**

H. Shin · J. Ahn · S. W. Beak · S. W. Lee 57

## REVIEW

### **Recent Progress in Self-Powered Sensors for Structural and Human Monitoring Systems Using Thermoelectric Energy Harvesters**

I.-S. Jo · S.-K. Chung · K. Choi 67

# 2024년 사단법인 한국정밀공학회 임원

## 회장

민병권(연세대학교)

## 수석부회장

안성훈(서울대학교)

## 부회장

이상원(성균관대학교)

오정석(한국기계연구원)

류상문(DN솔루션즈)

김정(KAIST)

이인환(충북대학교)

박상후(부산대학교)

최영재(한국생산기술연구원)

## 감사

송창규(한국기계연구원)

이경창(부경대학교)

## 총무이사

김동성(POSTECH)

김보현(숭실대학교)

신현정(KAIST)

## 재무이사

김창주(한국기계연구원)

송용남(고려대학교)

정영훈(경북대학교)

## 편집이사

강봉철(국민대학교)

강현욱(UNIST)

고승환(서울대학교)

곽문규(경북대학교)

김규만(경북대학교)

김남근(서강대학교)

김동립(한양대학교)

김산하(KAIST)

김석민(중앙대학교)

김양진(부산대학교)

김영진(KAIST)

김종백(연세대학교)

김효영(한국공학대학교)

문두환(고려대학교)

박근(서울과학기술대학교)

박영빈(UNIST)

손정우(금오공과대학교)

안지환(POSTECH)

안형준(숭실대학교)

윤준영(연세대학교)

이광일(경일대학교)

이동원(전남대학교)

이동훈(숭실대학교)

이창우(건국대학교)

이호원(서울대학교)

장진아(POSTECH)

정구현(울산대학교)

정훈의(UNIST)

주백석(금오공과대학교)

진종한(한국표준과학연구원)

천두만(울산대학교)

추원식(경상국립대학교)

황지홍(서울과학기술대학교)

## 사업이사

강태준(인하대학교)

권지연(동국대학교)

김무림(한국로봇융합연구원)

김승종(고려대학교)

김진호(영남대학교)

김충수(한국생산기술연구원)

김태곤(한국생산기술연구원)

김현준(경북대학교)

박석희(부산대학교)

박용재(강원대학교)

서진호(부경대학교)

안상훈(한국기계연구원)

오기용(한양대학교)

윤주성(경남대학교)

이문구(아주대학교)

이봉기(전남대학교)

이원균(충남대학교)

이지혜(한국기계연구원)

이현섭(동아대학교)

임지석(영남대학교)

조영삼(원광대학교)

주기남(조선대학교)

최정욱(중앙대학교)

현승민(한국기계연구원)

## 기획홍보이사

노유정(부산대학교)

류시형(전북대학교)

이주연(서울과학기술대학교)

허세곤(한국기계연구원)

## 국제이사

남정수(한국생산기술연구원)

이동진(건국대학교)

전용호(아주대학교)

조영태(창원대학교)

차석원(서울대학교)

허윤정(경희대학교)

홍성태(울산대학교)

## 대외협력이사

권석진(한국철도기술연구원)

김경동(한국공작기계산업협회)

김종혁(㈜현대위아)

장원석(한국기계연구원)

조영환(LIG넥스원(주))

## 부문회장

김건희(한밭대학교)

이현욱(한국철도기술연구원)

정재일(국민대학교)

이동윤(한국생산기술연구원)

박형욱(UNIST)

이강재(DN솔루션즈)

조정대(한국기계연구원)

엄광문(건국대학교)

김호찬(안동대학교)

김영범(한양대학교)

## 특별회원사

### 다이아몬드

DN솔루션즈  
(주)케이씨텍  
화천기공(주)

LIG넥스원(주)  
(주)키슬러코리아

(주)스맥  
한국화낙(주)

신도리코(주)  
현대위아(주)

(주)이수페타시스  
(주)화신정공

### 골드

(주)마리알로  
지앤피테크놀로지(주)

(주)에비던트코리아  
(주)프로토텍

(주)어드벤처코리아  
핵사곤

(주)에이스나노켄

(주)엔도로보틱스

### 패밀리

(주)웨이퍼펍

한국공작기계산업협회



## Editor-in-Chief

김보현

송실대학교

bhkim@ssu.ac.kr

## Editors

강성목  
대구카톨릭대학교

고승환  
서울대학교

곽문규  
경북대학교

김동성  
POSTECH

김무림  
한국로봇융합연구원

김양진  
부산대학교

문두환  
고려대학교

박민수  
서울과학기술대학교

박형욱  
UNIST

손정우  
금오공과대학교

송철기  
경상국립대학교

안지환  
POSTECH

왕덕현  
경남대학교

윤성호  
금오공과대학교

이종길  
안동대학교

이창우  
건국대학교

이창환  
서울과학기술대학교

이현섭  
동아대학교

정구현  
울산대학교

주백석  
금오공과대학교

진중환  
한국표준과학연구원

천두만  
울산대학교

추원식  
경상국립대학교

황지홍  
서울과학기술대학교

## Members of Editorial Board

강봉철  
국민대학교

강현욱  
UNIST

김기주  
동명대학교

김재열  
조선대학교

김창주  
한국기계연구원

박정재  
한국표준과학연구원

박정환  
영남대학교

배장호  
경성대학교

윤해성  
한국항공대학교

이광일  
경일대학교

이동훈  
송실대학교

이봉기  
전남대학교

이호원  
서울대학교

장진아  
POSTECH

전용호  
아주대학교

조영학  
서울과학기술대학교

최동휘  
경희대학교

최영만  
아주대학교

최정욱  
중앙대학교

최진승  
건국대학교

김갑용  
Iowa State Univ.

김범준  
Univ. of Tokyo

김우균  
Univ. of Cincinnati

민상기  
Univ. of Wisconsin-Madison

Simon Park  
Univ. of Calgary

Patrick Kwon  
Michigan State Univ.

JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR PRECISION ENGINEERING

**VOLUME 41, NUMBER 2/ February 2024**

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

월간 • 제41권 제2호 [통권 제395호] • 비매품

등록일자 1987년 4월 25일

등록번호 서울 라 07037

인쇄일 2024년 1월 25일

발행일 2024년 2월 1일

발행인 민병권

편집인 김보현

인쇄 한림원

편집 한림원

발행소 사단법인 한국정밀공학회

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

사무국장 김영심 / (02)518-0722 / [kspe@kspe.or.kr](mailto:kspe@kspe.or.kr)

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

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

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

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

# INTERNATIONAL JOURNAL OF PRECISION ENGINEERING AND MANUFACTURING



## About IJPEM-CFP

IJPEM is published by the Korean Society for Precision Engineering with Springer. The journal has a history of 24 years and aims to disseminate relevant fundamental and applied research works of high quality to the international precision and manufacturing engineering community. The journal is indexed in SCIE (Impact factor 1.9) and downloaded more than 148,000 times a year around the world.

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

## Semiconductor Manufacturing Systems and Process

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

- Lithography systems
- Etching and/or deposition systems
- Probing and test systems
- Inspection and measurement
- Advanced packaging and assembly
- Manufacturing of multi-layer structures
- Chemical-mechanical planarization (CMP)
- Air conditioning and contamination control
- Automation & robot
- Control algorithm and/or AI application
- Key components for equipment and process

## Guest editors

**Martin Cech**

*University of West Bohemia Pilsen, Czech Republic*

**Jun Young Yoon**

*Yonsei University, Korea*

**Hakjun Lee**

*Korea Institute of Industrial Technology, Korea*

## Submission Procedures

Deadline for Submission Date  
**January 1, 2024**

Publication Date  
**June 1, 2024**

Volume, Number  
**Vol. 25, No. 6**

# INTERNATIONAL JOURNAL OF PRECISION ENGINEERING AND MANUFACTURING GREEN TECHNOLOGY



Impact Factor  
**4.660** by JCR in 2021

## About IJPEM-GT

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

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

## Advanced Manufacturing for ESG

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

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

## Guest Editors

Professor Beomjoon Kim  
*The University of Tokyo, Japan*

Professor Sung-Tae Hong  
*University of Ulsan, Korea*

Professor Hoon-Eui Jeong  
*UNIST, Korea*

## Submission Procedures

Deadline for Submission Date  
**November 30, 2023**

Publication Date  
**May 1, 2024**

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

# International Journal of Precision Engineering and Manufacturing

## SMART TECHNOLOGY



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

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

## Aims and Scope

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

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

### IJPEM-ST covers various kinds of papers:

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

#### • Publication Date (Scheduled)

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

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

#### • Publication and Distribution

by the Korean Society for Precision Engineering with Open-Access

## Editorial Board

### Editor-in-Chief

**Sang Won Lee** / Sungkyunkwan University, Korea

### Co-Editors-in-Chief

**Jay Lee** / University of Maryland, USA

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

### Editors

**Hyeong-Joon Ahn** / Soongsil University, Korea

**Hae-Jin Choi** / Chung-Ang University, Korea

**Chih-Hsing Chu** / National Tsing Hua University, Taiwan

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

**Dong Yoon Lee** / Korea Institute of Industrial Technology, Korea

**Seungchul Lee** / POSTECH, Korea

**Sangkee Min** / University of Wisconsin-Madison, USA

**Seung-Ki Moon** / Nanyang Technological University, Singapore

**Duhwan Mun** / Korea University, Korea

**Simon Park** / University of Calgary, Canada

### Editorial Board

**Seung-Kyum Choi** / Georgia Institute of Technology, USA

**Haseung Chung** / Michigan State University, USA

**Youngkuk Jeong** / KTH Royal Institute of Technology, Sweden

**Yongho Jeon** / Ajou University, Korea

**Jay-I. Jeong** / Kookmin University, Korea

**Hyungjung Kim** / Seoul National University, Korea

**Yangjin Kim** / Pusan National University, Korea

**Jihyun Lee** / University of Calgary, Canada

**Wonkyun Lee** / Chungnam National University, Korea

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

**Joo-Sung Yoon** / Kyungnam University, Korea

# 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)

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

\*문의처: 한국정밀공학회 사무국 (paper@kspe.or.kr, (02) 518-2928)

© Copyright 2001 by KSPE. All Rights Reserved



두산공작기계의 새이름

**DN SOLUTIONS**의

위대한 여정은 계속됩니다.

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

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

Manufacturing Solutions Leader, DN 솔루션즈



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

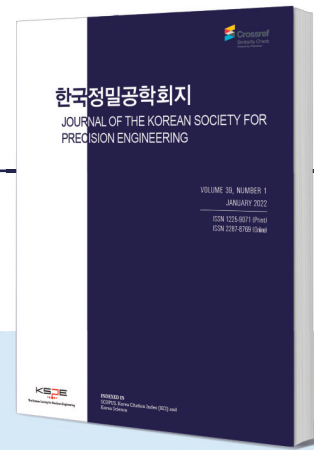
# Start New Sindoh

2D를 넘어 3D 전문 기업으로  
신도리코가 새로운 미래를 열어갑니다



# 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

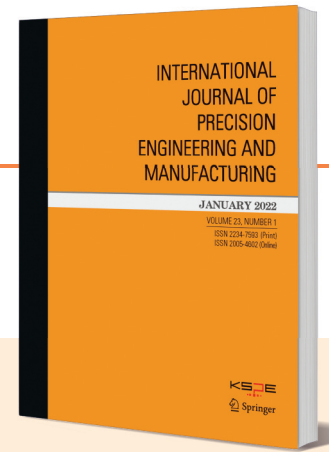
## WEBSITE

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

# PRESM 2024

July 7<sup>Sun</sup> – 12<sup>Fri</sup>, 2024

Paradise Hotel Busan, Busan, Korea

## Important Dates

Deadline for Abstract Submission:  
**February 22** (Thu), 2024

Date for Acceptance Notification:  
(Mail from the PRESM Secretariat)  
**March 15** (Fri), 2024

Deadline for Early Registration/  
Presenter Registration:  
**May 1** (Wed), 2024

Full Paper Submission (Optional):  
**May 15** (Wed), 2024

## Participating Journals

1 International Journal of Precision  
Engineering and Manufacturing (IJPEM)  
\*SCIE, SCOPUS

2 International Journal of Precision  
Engineering and Manufacturing-Green  
Technology (IJPEM-GT)  
\*SCIE, SCOPUS

3 International Journal of Precision  
Engineering and Manufacturing-Smart  
Technology (IJPEM-ST)

4 Journal of the Korean Society for  
Precision Engineering (JKSPE)  
\*SCOPUS

## Awards & Honors

- Best Paper Awards
- Young Researcher Awards
- Outstanding Presentation Awards

### Organizer

 Korean Society for  
Precision Engineering (KSPE, Korea)

### Secretariat

Homepage [www.presm.org](http://www.presm.org) | Email [presm@kspe.or.kr](mailto:presm@kspe.or.kr)  
Tel +82-2-393-0725 | Fax +82-2-518-2937

# 2024년 국내 / 국제학술대회 일정 안내

한국정밀공학회

## 2024

KSPE 2024  
Spring  
Conference

### 춘계학술대회

KSPE 한국정밀공학회  
Korean Society for Precision Engineering

2024  
5. 8(수) - 10(금)

라마다프라자제주호텔  
(제주도 제주시)

International Conference on  
*PR*recision Engineering and *S*ustainable Manufacturing

## PRESM 2024

2024. 7. 7(일) - 12(금)

Paradise Busan Hotel  
Busan, Korea

KSPE 한국정밀공학회  
Korean Society for Precision Engineering

한국정밀공학회

## 2024

KSPE 2024  
Autumn  
Conference

### 추계학술대회

KSPE 한국정밀공학회  
Korean Society for Precision Engineering

2024. 11. 13(수) - 15(금)

경주화백컨벤션센터(HICO)  
(경상북도 경주시)

# PIFOC Objectives Scanner



- 피에조 액추에이터를 사용하여 빠른 응답 시간 및 긴 수명
  - Z축으로 100, 400, 800 $\mu$ m의 이동 범위
  - 서브나노미터 분해능으로 정밀한 스캐닝 가능
  - Zero-play flexure guides로 높은 가이드 정확도 보장
  - Capacitive sensors로 직접 위치 측정: 높은 선형성
  - $\varnothing$  29 mm의 넓은 애퍼처
- >> 현미경, 3-D 이미징, 반도체 테스트, 생명공학, 오토포커스 시스템 등

## 적용분야



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

