

한국정밀공학회지

JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR
PRECISION ENGINEERING

VOLUME 40, NUMBER 3

MARCH 2023

ISSN 1225-9071 (Print)

ISSN 2287-8769 (Online)

Editor-in-Chief

Bo Hyun Kim

Soongsil University
bhkim@ssu.ac.kr

Editors

Jihwan An
Seoul National University of Science & Technology

Baeksuk Chu
Kumoh National Institute of Technology

Won-Shik Chu
Gyeongsang National University

Doo-Man Chun
University of Ulsan

Koo Hyun Chung
University of Ulsan

Duhwan Mun
Korea University

Jihong Hwang
Seoul National University of Science & Technology

Young Hun Jeong
Kyungpook National University

Jonghan Jin
Korea Research Institute of Standards & Science

Dong Sung Kim
POSTECH

Ho-Chan Kim
Andong National University

Yang Jin Kim
Pusan National University

Seung Hwan Ko
Seoul National University

Moonkyu Kwak
Kyungpook National University

Sung-Mook Kang
Daegu Catholic University

Changwoo Lee
Konkuk University

Chang-Whan Lee
Seoul National University of Science & Technology

Hyunseop Lee
Dong-A University

In Hwan Lee
Chungbuk National University

Hyung Wook Park
UNIST

Min Soo Park
Seoul National University of Science & Technology

Sang-Hu Park
Pusan National University

Jung Woo Sohn
Kumoh National Institute of Technology

Members of Editorial Board

Jangho Bae
Kyungsung University

Younghak Cho
Seoul National University of Science & Technology

Dongwhi Choi
Kyung Hee University

Jin-Seung Choi
Konkuk University

Jungwook Choi
Chung-Ang University

Young-Man Choi
Ajou University

Young-Kug Hwang
Chosun College of Science & Technology

Jinah Jang
POSTECH

Yongho Jeon
Ajou University

Jayil Jeong
Kookmin University

Maolin Jin
Korea Institute of Robot & Convergence

Beomjoon Kim
University of Tokyo

Chang-Ju Kim
Korea Institute of Machinery & Materials

Gap-Yong Kim
Iowa State University

Jae-Yeol Kim
Chosun University

Kee Joo Kim
Tongmyong University

Woo Kyun Kim
University of Cincinnati

Patrick Kwon
Michigan State University

Bong-Kee Lee
Chonnam National University

Jongkil Lee
Andong National University

Kwang-II Lee
Kyungil University

Sangkee Min
University of Wisconsin-Madison

June Park
Korea Photonics Technology Institute

Jungjae Park
Korea Research Institute of Standards & Science

Jung Whan Park
Yeungnam University

Simon Park
University of Calgary

Yong Son
Korea Institute of Industrial Technology

Chul Ki Song
Gyeongsang National University

Ki-Sik Tae
Konyang University

Duck Hyun Wang
Kyungnam University

Hae-Sung Yoon
Korea Aerospace University

Sung Ho Yoon
Kumoh National Institute of Technology

JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR PRECISION ENGINEERING

VOLUME 40, NUMBER 3 / March 2023

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

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

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

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

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

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

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

Published on March 1, 2023 (Monthly)

Published by The Korean Society for Precision Engineering

Publisher Seok-Woo Lee (President, KSPE)

Managing Editor Bo Hyun Kim

Manuscript Editor Su-Hyun Kang

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

Printed by Hanrimwon Co., Ltd.

Copyright © The Korean Society for Precision Engineering

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

목차

특 집 주제: 설계 및 재료의 산업계 응용
책임편집인 : 박형욱(UNIST)

- 189 전자빔 표면처리를 통한 $Ti_3C_2T_x$ MXene의 유기물 흡착성능 향상
황윤재, 임민혁, 팽창웅, 박형욱, 김지수
- 197 편심머리 볼트의 강도향상을 위한 단조성형
조영태
- 203 소형펀치시험에 의한 인코넬617용접부의 크리프거동 평가
김범준
- 211 정밀 패턴 신발금형 신속제조를 위한 적층 제조 특화설계
이석록, 김은아, 김예림, 김달균, 김선주, 원순호, 이학성
- 217 표면자동추종 적층기술을 이용한 DED방식 적층제조
하태호, 허세곤, 이창우, 정민교, 최장욱
- 223 파라메트릭 스터디를 통한 전동식 기어시스템의 소음 및 PPTE 분석
김남용, 백진욱, 박기명, 류성기

일 반

- 229 공간형 위치 결정 스테이지를 위한 타원형 및 포물선형 2 자유도 플렉서 힌지에 대한 해석
신현표, 문준희
- 237 헬리컬 초경 드릴과 서멧 드릴의 성능 비교 및 분석
하정호, 김동규, 사민우
- 245 마이크로플루이드 채널 시스템 제작을 위한 LCoS 마이크로디스플레이 기반의 광 경화 방식 3D 프린터 연구
강현우, 이동근
- 253 자동변속기 ISG용 EOP 이상진동 개선에 관한 실험적 연구
오종민

JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR PRECISION ENGINEERING

VOLUME 40, NUMBER 3 / March 2023

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

CONTENTS

SPECIAL **Title: Industrial applications of the design and materials**

Guest Editor: Hyung Wook Park(UNIST)

- 189 Enhanced Adsorption Performance for Organic Materials by Electron Beam-Treated $Ti_3C_2T_x$ MXene
Yun Jae Hwang, Min Hyeok Lim, Changung Paeng, Hyung Wook Park, and Jisoo Kim
- 197 Forged Molding for Strength Improvement of Eccentric Head Bolts
Young Tae Cho
- 203 Assessment of Creep Behavior of Inconel 617 Alloy Weldment by Small Punch Test
Bum Joon Kim
- 211 Additive Manufacturing for Rapid and Precise Pattern Formation in Shoes Mold
Seok-Rok Lee, Eun-Ah Kim, Ye-Rim Kim, Dalgyun Kim, Sunjoo Kim, Soonho Won, and Hak-Sung Lee
- 217 DED Additive Manufacturing Using Auto-Surface Tracking Technology
Taeho Ha, Segon Heo, Changwoo Lee, Min-Kyo Jung, and Jang-Wook Choi
- 223 Noise and PPTE Analysis of Electric Gear System with Parametric Study
Nam Yong Kim, Jin-Uk Baek, Gi-Myung Gwak, and Sung Ki Lyu

REGULAR

- 229 Analysis on Elliptic and Parabolic 2-DOF Flexure Hinges for Spatial Positioning Stages
Hyun-Pyo Shin and Jun-Hee Moon
- 237 Performance Comparison and Analysis of Helical Tungsten Carbide and Cermet Welded Drills
Jeong Ho Ha, Dong Gyu Kim, and Min-Woo Sa
- 245 A Study on Photocurable Liquid-Crystal-on-Silicon (LCoS) Microdisplay Based Stereolithography Type 3D Printer for Fabrication of Microfluidic Channel Systems
Hyeon Woo Kang and Dong Keun Lee
- 253 An Experimental Study for Improvement of EOP Abnormal Vibration on Automatic Transmission
Jongmin Oh



설계 및 재료의 산업계 응용

Industrial applications of the design and materials

- (1) 전자빔 표면처리를 통한 Ti3C2Tx MXene의 유기물 흡착성능 향상
- (2) 편심머리 볼트의 강도향상을 위한 단조성형
- (3) 소형편치시험에 의한 인코넬 617 용접부의 크리프거동 평가
- (4) 정밀 패턴 신발금형 신속제조를 위한 적층 제조 특화설계
- (5) 표면자동추종 적층기술을 이용한 DED 방식 적층제조
- (6) 파라메트릭 스테디를 통한 전동식 기어시스템의 소음 및 PPTE 분석

최근 기계 재료 및 설계관련 연구들의 경우 산업계의 응용성을 향상시키는 연구가 주로 이루어지고 있다. 특히, 주요 연구 그룹들을 중심으로 재료 및 설계를 융합시키는 연구가 이루어지고 있으며 기계 소재의 산업계 응용 연구 시 설계 분야의 새로운 방법론들의 적용을 통해서 개발 시간의 단축 및 최적화를 통해서 제품들의 고부가가치화를 위해서 연구자들이 정진하고 있다.

본 특집 논문에서는 설계 및 재료의 산업계 응용관련 최신 연구를 소개하고 하고자 한다. 설계 분야는 정밀 패턴 신발금형 신속제조를 위한 적층 제조 특화설계, 표면자동추종 적층기술을 이용한 DED방식 적층제조, 파라메트릭 스테디를 통한 전동식 기어시스템의 소음 및 PPTE 분석 관련 연구가 소개되었고, 재료 분야에서는 전자빔 표면처리를 통한 Ti3C2Tx MXene의 유기물 흡착성능 향상, 편심머리 볼트의 강도향상을 위한 단조성형, 소형편치시험에 의한 인코넬 617용접부의 크리프거동 평가 등의 연구가 소개되었다.

본 특집 논문을 통해서 재료 및 설계 분야의 연구 동향은 다음과 같다. 우선 소재 설계 및 산업계 응용 연구 시 최신 설계 방법론의 접목 및 해석 기반 최적화가 활발이 진행되고 있으며 특히, 수치 해석 기반 소재 물성 최적화 및 응용 기술 개발은 기존의 연구 시간 및 비용 절감에 크게 기여할 것으로 판단되면 향후, 산업계 응용 시 해당 산업계의 경쟁력 향상에 크게 이바지 할 것으로 판단됩니다.

• 특집 • 설계 및 재료의 산업계 응용

전자빔 표면처리를 통한 $Ti_3C_2T_x$ MXene의 유기물 흡착성능 향상

Enhanced Adsorption Performance for Organic Materials by Electron Beam-Treated $Ti_3C_2T_x$ MXene

황윤재¹, 임민혁², 팽창웅², 박형욱¹, 김지수^{3,4,#}

Yun Jae Hwang¹, Min Hyeok Lim², Changung Paeng², Hyung Wook Park¹, and Jisoo Kim^{3,4,#}

¹ 울산과학기술원 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Ulsan National Institute of Science & Technology)

² 경북대학교 에너지 신소재·화학공학부 (School of Advanced Materials Science and Engineering, Kyungpook National University)

³ 경북대학교 정밀기계공학과 (Department of Precision Mechanical Engineering, Kyungpook National University)

⁴ 경북대학교 미래과학기술융합학과 (Department of Advanced Science and Technology Convergence, Kyungpook National University)

Corresponding Author / E-mail: js.kim@knu.ac.kr, TEL: +82-53-950-1279

ORCID: 0000-0001-9540-2800

KEYWORDS: MXene (맥신), $Ti_3C_2T_x$, 2D nanomaterials (2차원 나노물질), Organic materials adsorption (유기물 흡착), Electron beam (전자빔)

MXene is one of the most fascinating 2D materials owing to its great electrical properties and unique performance. Among various application areas, the performance of organic material adsorption has been highlighted with the growing interest in the biocompatible applications of MXene. Although previous research revealed that the huge surface area of this 2D nanomaterial could lead to superior organic material adsorption performance, surface functional groups were usually controlled by changing the pH, and the MXene was generally produced by HF etchant. In this study, a surface modification method of $Ti_3C_2T_x$ MXene film was proposed to enhance organic material adsorption by irradiating the pulsed plasma electron beam (EB). Methylene blue (MB)-dispersed DI water was prepared, and pristine MXene was prepared at pH 7. The MB concentration was only reduced by 20% by pristine MXene. However, EB-treated MXene adsorbed about 75% of the MB within 20 min and over 90% within 80 min when the MXene film was ground to powder form. The results showed that the increased surface area and formation of hydrophilic functional groups successfully modified MB adsorption following EB irradiation under optimal processing conditions.

Manuscript received: December 20, 2022 / Revised: January 10, 2023 / Accepted: January 17, 2023

1. 서론

최근 세계적으로 산업과 경제의 발전에 따라 발생하는 환경 오염에 대한 관심이 증가하는 추세이며 특히 수자원 오염에 관한 문제가 급격히 대두되고 있다[1,2]. 수자원 오염에는 다양한 원인이 있지만 가죽, 종이 등을 생산하는 과정 중 공장에서 발생하는 염료에 의한 오염이 높은 비중을 차지하고 있으며[3], 다양한 연구자 및 산업계 종사자들은 메틸렌 블루(Methylene Blue, MB)와 같은 색상 변화를 유발하는 유기물의 제거를 위한

많은 노력을 기울여 왔다[4-6].

오수에서 유기물을 제거할 수 있는 방법은 광분해 방법을 활용한 유기물 분해[7], 필터를 활용한 유기물 제거[8], 화학 반응을 활용한 유기물 침전물 생성법[9], 생화학적 방법을 활용한 유기물 분해[10] 등 다양한 방법이 시도되어 왔다. 특히 유기물을 제거하는 방식 중 용매, 계면 활성제, 가스 등을 활용한 습식 제거 방식은 비용이 저렴하고 제거 효율이 높아[11-13] 활발히 연구된 분야 중 하나이다. 그러나 최근 이러한 유기물 제거에 활용되는 용매 및 계면 활성제가 2차적인 오염을 유발할 수 있다는

연구 결과들이 보고되면서 친환경적인 방법을 활용한 유기물 제거 방법에 관한 수요는 꾸준히 증가하는 추세이다[14].

이러한 수요에 맞추어 환경에 영향을 주지 않으며 높은 효율로 유기물을 제거할 수 있는 물질 중 하나로 최근 맥신(MXene)이 주목받고 있다[15,16]. MXene은 전이금속에 탄소(C) 또는 질소(N)가 결합된 2차원 판상구조의 물질로 알루미늄(Al)과 같이 중간 층을 형성하고 있는 MAX Phase에서 중간층만을 선택적으로 식각하는 방법을 통해 제작이 가능하다[17]. 특히 판상구조의 특성을 활용해 높은 표면적과 전기전도도, 높은 화학적 안정성을 바탕으로 차세대 그래핀(Graphene)으로 불리며 배터리, 에너지 저장소재, 촉매 재료 등의 다양한 활용이 가능하다고 보고되고 있다[18,19]. 수처리 분야에서는 MXene을 활용한 해수의 담수화[20] 등의 연구가 수행되었고 최근에는 유기물 흡착 성능에 관한 보고가 증가하고 있는 추세이다[15,21].

하지만 기존의 MXene을 활용한 유기물 흡착 성능을 보고하는 논문의 대부분은 MXene을 용매에 분산한 상태에서 식각 과정 중 발생하는 플루오린(F) 이온과 관련된 작용기를 활용한 흡착 성능 향상을 목표로 하고 있다[15]. 특히 다른 이온으로 Termination된 특수한 작용기를 가지는 MXene을 활용한 유기물 흡착 성능 연구에서는 2차적인 화학물질 활용이 필수적이기 때문에 낮은 pH와 2차 오염 물질의 발생이 불가피하여 실제 수정화 공정에 적용이 어려운 실정이다[15].

본 연구에서는 전자빔 표면처리 공정을 MXene의 후처리 공정으로 도입하여 중성에서도 높은 유기물 흡착 성능을 가질 수 있는 MXene의 합성 방법을 소개하고자 한다. 가장 일반적으로 활용되는 $Ti_3C_2T_x$ MXene을 MILD Etching Method를 활용해 제작하고 진공 여과를 통해 필름화하였으며, 제작된 필름에 대면적 펄스형 플라즈마 전자빔(Large-Area Pulsed Electron Beam, LPEB)을 조사하여 표면적의 향상 및 유기물 흡착 작용기 생성을 유도하였다. 유기물 흡착 성능을 대표적으로 분석하기 위해 MB 수용액에 MXene을 침지 혹은 혼합하여 농도변화를 분석하였다. 전자빔 조사를 통해 MXene의 표면적이 증가하는 것으로 분석되었으며 표면에서 생성되는 친수성 작용기 및 높은 표면에너지로 인해 유기물 흡착 성능이 향상되는 것으로 분석되었다. 본 연구를 통해 제안된 EB-Treated MXene은 2차 오염물의 발생이 없는 청정한 유기물 흡착재료의 산업적 활용이 가능할 것으로 생각되어 향후 수자원 오염 문제 해결에 적극 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

2. 실험구성 및 방법

2.1 $Ti_3C_2T_x$ MXene의 합성

MXene은 일반적으로 플루오르화 수소산(Hydrofluoric Acid, HF)을 직접 활용하는 합성 방법과 간접적으로 HF 생성 반응을 유도하여 합성하는 방법으로 구분할 수 있다. 본 연구에서는 염산(Hydrochloric Acid, HCl, Sigma-Aldrich, 37%)과 플루오르화

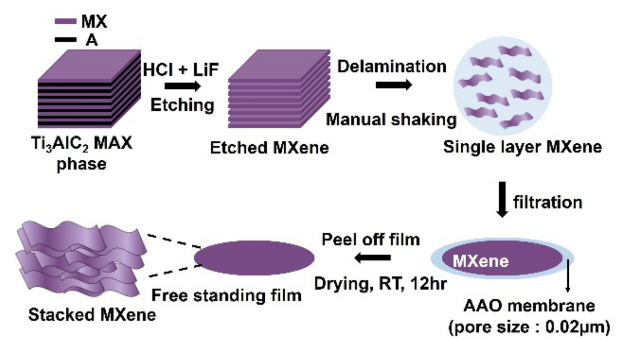


Fig. 1 Schematic diagram of the fabrication process of free standing $Ti_3C_2T_x$ MXene film

리튬(Lithium Fluoride, LiF, Sigma-Aldrich, ~300 mesh)을 이용한 In-Situ MILD Etching 방법을 이용해 Ti_3AlC_2 MAX Phase 물질(MAX Powder, 99%, ~325 mesh)에서 알루미늄(Al)을 선택적으로 식각해 $Ti_3C_2T_x$ MXene을 합성하였다. 식각 용액을 제조하기 위해 테플론 튜브에 탈이온수(Deionized (DI) Water) 5 ml와 37% HCl 15 ml를 투입한 후 플루오르화 리튬 1 g을 첨가했다. 테플론 튜브는 오일조에 고정시킨 뒤 35°C로 유지되는 가열 교반기 위에서 30분간 300 rpm의 속도로 교반을 유지했다. 그 다음 MAX 가루를 식각 용액에 30분에 걸쳐 조금씩 첨가한 후 24시간 동안 300 rpm을 유지하며 연속적으로 교반하여 Al 층을 식각했다. 식각 반응이 끝난 용액은 세척과 박리를 위해 50 ml 코니칼 튜브(Conical Tube)로 옮겨져 3,500 rpm에서 3분간 원심 분리 했다. 이후 투명한 상등액을 제거하고 탈이온수를 추가해 재분산 시켰다. 상기 과정을 9,000 rpm까지 서서히 높여가며 pH가 6-7에 도달할 때까지 약 7회 반복했다. 모든 세척 과정에서 분산액을 5분 이상 충분히 흔들어 다층의 MXene을 단층의 MXene으로 박리시켰다. 마지막으로 세척이 완료된 분산액을 3,500 rpm에서 20분간 원심분리한 후 검은색 상등액만 사용했다. 이 검은색 상등액은 순수한 단층 $Ti_3C_2T_x$ MXene을 포함하고 있다.

제작된 단층 $Ti_3C_2T_x$ MXene은 진공 여과장치를 이용해 Free Standing Film으로 제조할 수 있다. 필터는 Anodic Aluminum Oxide (AAO) Membrane (WHATMAN, Pore size: 0.02 μ m)를 사용했으며 150 ml의 DI Water에 7 mg의 MXene을 첨가해 진공 여과한 후 상온에서 12시간 동안 건조하였다. 마지막으로 필터에서 떼어낸 Free Standing Film을 실험에 사용했다. 이러한 과정은 Fig. 1에서 상세히 확인할 수 있다.

2.2 전자빔 기반 표면처리 공정

본 연구에서는 기존에 금속의 표면처리에 활용되는 대면적 펄스형 전자빔을 활용한 표면처리 공정을 수행하였다[22]. 대면적 펄스형 전자빔은 약 60 mm의 직경을 가지는 플라즈마 전자빔을 활용한 표면처리 방식으로 2 μ s의 매우 짧은 시간에 약 0-10 J/cm²의 에너지를 순간적으로 전달할 수 있는 표면처리 공정이다. 이 과정에서 발생한 폭발적인 에너지 전달을 활용해 소재의 용융 및 재결정화를 유도할 수 있으며, 금속의 경우 상 변화를

활용한 성능 향상을 기대할 수 있다. 금속 외의 폴리머, 세라믹 등의 소재는 표면에서 작용기(Functional Groups) 변화를 통해 표면에너지 조절할 수 있으며 소재의 성분 변화를 통해 내식성 및 반응성 향상을 기대할 수 있다. 본 연구에서는 제작된 $Ti_3C_2T_x$ 필름에 2-5 J/cm²의 에너지 밀도를 가지는 전자빔 표면처리를 적용하였으며, 사용된 $Ti_3C_2T_x$ 필름의 두께가 매우 얇기 때문에 손상을 최소화하여 표면처리를 완료하기 위해서 1회의 조사 횟수만을 활용하였다. 1회를 초과하는 조사횟수를 적용할 경우, 필름이 손상되어 완전히 탄화되거나 찢어진 형태로 공정의 결과가 도출되었다. 전자빔 조사 공정에서의 진공 챔버는 10⁻⁶ Pa의 진공도를 유지하고 약 0.05 Pa까지 Ar을 플라즈마용 가스로 주입하여 조사가 진행되었으며, 양극 전압은 5 kV, 전자의 가속을 위한 슬레노이드 전압은 1.0-1.2 kV로 활용하였다. 전자빔의 에너지 밀도는 주로 가속전압인 음극 전압에 의해 결정되며, 2-5 J/cm²의 에너지 밀도를 형성하기 위해 전자빔의 가속전압은 10-12 kV로 활용하였다.

2.3 표면 및 구조분석

$Ti_3C_2T_x$ MXene은 2차원의 판상구조를 가지고 있다. MXene의 합성 품질을 분석하기 위하여 표면과 단면에서 전계 방사형 주사 현미경(Field-Emission Scanning Electron Microscope; FE-SEM, HITACHI Regulus 8220, Japan)을 활용한 형상 분석을 수행하였다. 단면 분석을 위해 필름을 액화 질소에 넣어 급속냉각시킨 후 절단하는 전처리 과정을 거쳐 단면 분석이 수행되었다.

합성된 $Ti_3C_2T_x$ 의 성분 및 구조 분석을 위해 X-ray 회절 분석법(X-ray Diffraction Spectroscopy; XRD, RIGAKU SmartLab, Japan)이 활용되었다. 해당 분석을 통해 합성된 $Ti_3C_2T_x$ 필름에 섞여 있는 불순물의 종류와 양에 대한 분석을 수행할 수 있어 합성된 필름의 품질을 분석할 수 있다. XRD 분석은 2θ의 범위를 5-65° 범위로 설정하고 0.05°의 Step Size로 Cu Kα Source를 이용해 진행되었다.

소재 표면에서의 작용기 변화에 따른 표면에너지 분석은 접촉각 측정(Contact Angle Measurement, FEMTOBIOMED Smart Drop, South Korea)을 통해 진행되었다. 본 연구에서는 Sessile Drop Method를 활용한 정접촉각 분석을 수행하였으며, 접촉각 분석은 3 μl의 DI Water를 사용해 진행되었다.

2.4 유기물 흡착성능 분석

$Ti_3C_2T_x$ 의 유기물 흡착성능 분석을 위해 메틸렌블루 수용액을 활용한 유기물 흡착성능 분석을 수행하였다. MB의 흡착성능 분석은 표면적 변화에 의한 영향 분석을 함께 수행하기 위해 필름 및 분말 형태의 분석을 함께 수행하였다. MB 수용액은 5 mg의 MB와 증류수 1 L를 교반하여 제작하였으며, 총 9 mg의 $Ti_3C_2T_x$ 를 필름과 분말형태로 제작하여 상온 및 암실 상태에서 흡착성능평가를 수행하였다. 국부적으로 변화하는 MB의 농도 변화에 의한 흡착성능의 변화를 균일하게 유지하기 위해 흡착성능을 평가하는 동안 수용액은 자성 막대(Magnetic Bar)를 활

용해 300 rpm의 균일한 속도로 교반하였다.

기존 논문에서 언급했다시피 MXene의 유기물 흡착 성능은 pH에 따라 급격히 변화한다[15]. 하지만 본 논문에서는 중성에서의 흡착성능 향상을 목표로 하고 있기 때문에 $Ti_3C_2T_x$ 가 침지 혹은 혼합된 MB 수용액의 pH를 중성(pH = 7)로 유지하는 것이 중요하다. 따라서 pH의 측정은 pH 측정기(pH Meter, EcoTestr pH 1, Eutech, Singapore)를 사용하여 측정하였다. 정량적인 흡착도의 평가를 위해 흡착제와 교반 중인 MB 수용액에서 20분 간격으로 1 mL의 샘플을 채취하여 자외선-가시광선분광광도계(UV-vis Spectrophotometer, Flame VIS-NIR Miniature Spectrometer, Ocean Insight, United States)를 통해 UV Spectrum (500-800 nm)을 측정하였고, 664 nm 파장에서 메틸렌블루의 농도를 측정하여 교반 시간에 따른 흡착도를 분석하였다.

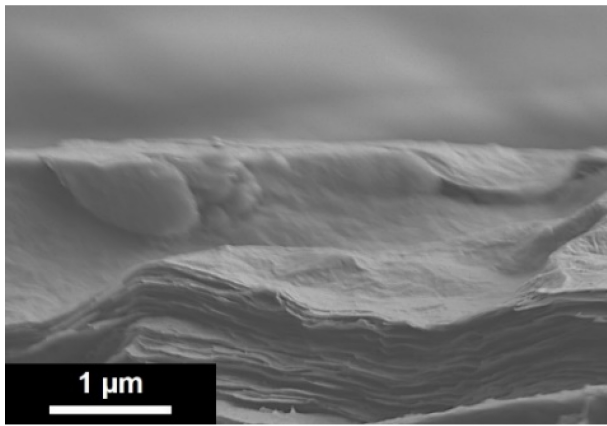
3. 실험결과 및 고찰

3.1 소재 특성 및 전자빔 조사에 따른 변화

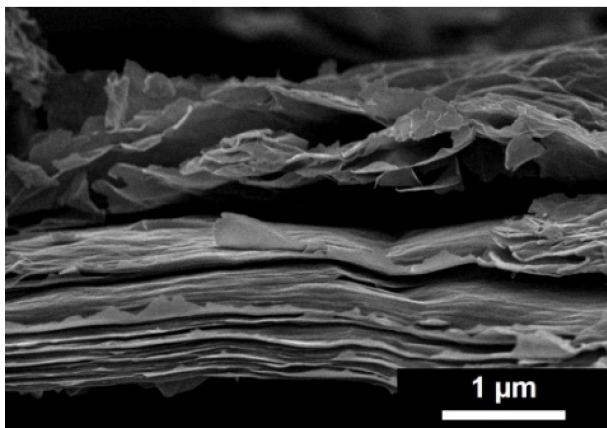
Fig. 2는 합성된 $Ti_3C_2T_x$ 의 전자빔 표면처리 전후 단면의 SEM 사진을 보여준다. 사진에서 볼 수 있듯이, 합성과정을 통해 매우 균일한 판상구조의 MXene 형태가 합성된 것을 확인할 수 있으며, 표면에서의 형상을 통해 각 층이 매우 견고하게 흡착되어 있는 형태를 확인할 수 있다. 10 kV의 가속전압을 활용한 전자빔 조사 후에는 표면에서 약간의 층간 박리 현상을 볼 수 있으며 일부 표면이 손상을 거쳐 표면적이 약간 증가한 형태를 나타내는 것으로 확인되었다. 12 kV의 전자빔 가속전압을 이용한 조사 이후에는 Fig. 3(c)에서 볼 수 있듯이 표면이 매우 거칠게 꽃잎 모양의 표면을 형성한 것을 확인할 수 있으며, 기공이 다수 발생하는 다공성 구조를 형성한 것을 확인할 수 있다. 이러한 현상은 표면적을 증가시키는 매우 중요한 요인으로 작용하며 유기물 흡착성능의 향상에 영향을 주었을 것이라고 추측할 수 있다.

Fig. 3은 합성된 $Ti_3C_2T_x$ 필름의 전자빔 표면처리 전후 XRD 분석 결과를 보여준다. 해당 그래프의 6.5° 부근에서 확인할 수 있는 (002) Main Peak를 통해 $Ti_3C_2T_x$ MXene의 합성이 적절히 이루어진 것을 확인할 수 있으며, 전자빔 조사 후 해당 Peak의 증가를 통해 불순물이 제거된 것을 확인할 수 있다. 또한, (004), (006), (008) Plane의 고차원 Peak도 전자빔 조사 후 일괄적으로 증가한 것을 확인할 수 있다. 과도한 에너지가 조사되는 경우, TiC_x 형태의 유기물 흡착과 관련이 없는 상이 부분적으로 형성된 것도 확인할 수 있어 5 Shots 이상의 높은 조사 횟수가 적용되는 경우, 과도한 에너지 전달로 인해 기존의 $Ti_3C_2T_x$ MXene의 구조가 파괴되어 유기물 흡착 성능의 저하를 예상할 수 있다[23].

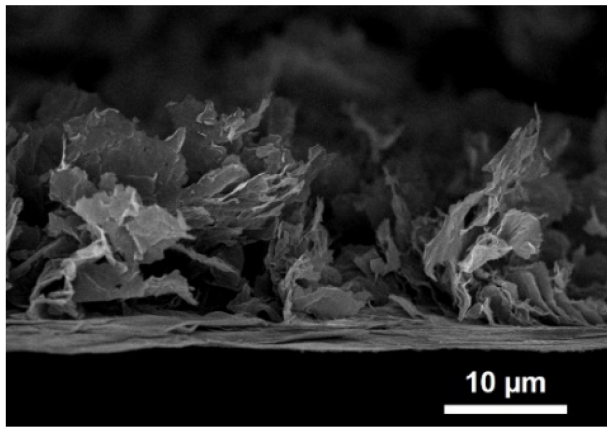
Fig. 4는 전자빔 조사 전후 MXene 필름 표면에서 접촉각의 변화를 보여준다. 그림에서 볼 수 있듯이 기본적으로 Pristine MXene의 경우, 필름 제작 후 건조 조건에 따라 표면에너지가 크게 변화하는 것으로 나타났다. Fig. 4(a)에서 볼 수 있듯이, 고



(a) Pristine $Ti_3C_2T_x$ MXene



(b) $Ti_3C_2T_x$ MXene treated by EB (10 kV)



(c) $Ti_3C_2T_x$ MXene treated by EB (12 kV)

Fig. 2 Cross-sectional SEM images of $Ti_3C_2T_x$ MXene films before and after the electron beam irradiations

온 및 진공환경에서 건조를 통해 제작된 MXene 필름의 경우 약 130° 내외의 접촉각을 보인 반면 상온 및 대기중 건조를 거친 MXene 필름의 경우, 대략적으로 약 66° 내외의 친수성을 나타내는 것으로 확인되었다. 진공 및 고온 건조의 경우 제조된 MXene 필름의 표면에서 친수성 작용기를 형성하기 위해 필수적으로 필요한 산소와 같은 원소가 접촉하기 어려운 환경이기 때문에 상대적으로 소수성 특성을 가지며, 대기 중에서 건조된

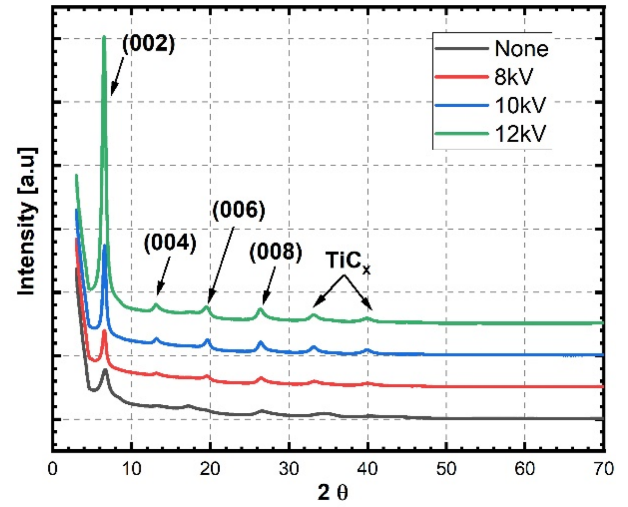
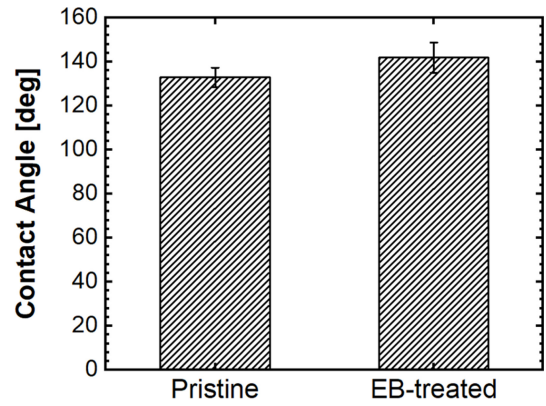
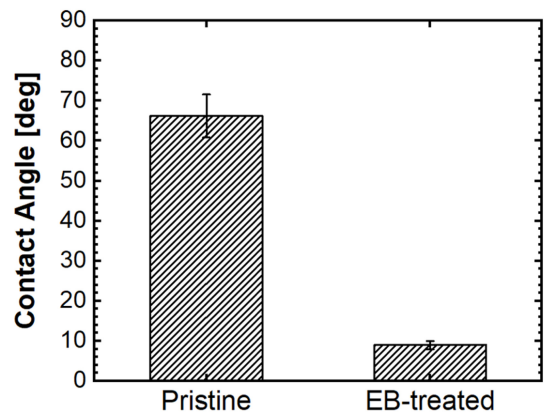


Fig. 3 XRD spectra of $Ti_3C_2T_x$ MXene before and after the electron beam irradiation in terms of the acceleration voltages



(a) MXene dried under higher temperature and vacuum



(b) MXene dried under ambient conditions

Fig. 4 Static contact angles of DI water on MXene films depending on the drying condition of the films before and after the EB irradiations

MXene 필름의 경우 건조 과정에서 산소와의 접촉이 다량 발생하기 때문에 산소를 포함하는 친수성 작용기가 다수 발생한 것으로 분석할 수 있다. 이러한 특성은 전자빔 조사 후 변화하

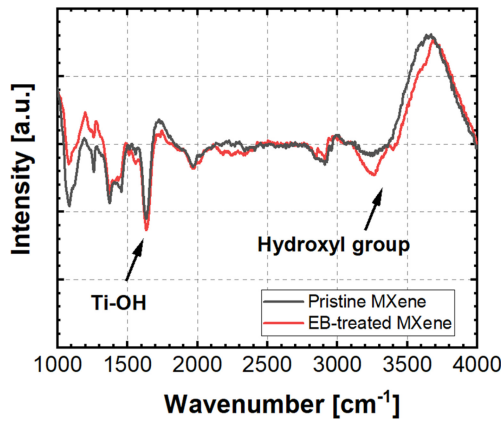


Fig. 5 FT-IR Spectra of MXene films before and after the EB irradiations

는 표면 거칠기에 따라 표면에너지에 큰 영향을 미치는 것으로 분석되었다.

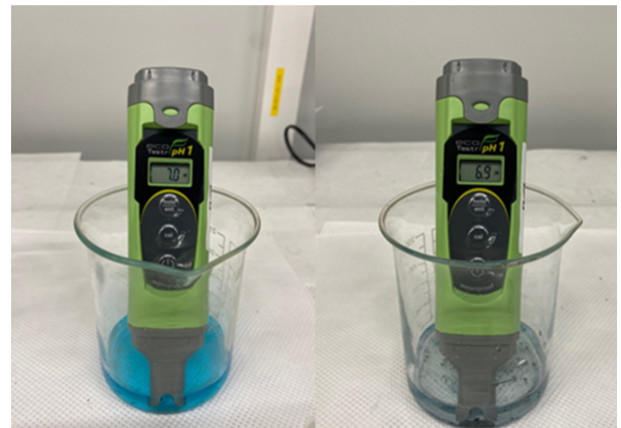
Fig. 2에서 볼 수 있듯이 전자빔 표면처리는 표면에 Flower-Like Defects 형성을 통해 표면 거칠기를 증대시키는 효과를 가진다.

$$\cos \theta_r^{CB} = r(\cos \theta_e + f - 1) \tag{1}$$

$$\cos \theta_r^W = r \cos \theta_e \tag{2}$$

이러한 표면적의 증가는 접촉각에 영향을 미친다. 식(1)과 식(2)는 표면 거칠기에 따라 변화하는 접촉각의 경향성을 설명하고 있다. 식에서 θ_e 는 완전히 편평한 곳에서의 접촉각을, r 은 표면 거칠기 상수(Roughness Factor)를, θ_r 은 접촉 형태에 따른 접촉각을 나타낸다. 두 식에서 볼 수 있듯이, Cassie State와 Wenzel State 모두에서 친수성과 소수성이 구분되는 90°의 접촉각을 기준으로 표면이 거칠수로 친수성 물질의 표면은 더욱 친수성으로 변화하며, 소수성 물질의 표면은 더욱 소수성으로 변화한다. 따라서, 초기에 소수성 특성을 가지던 고온/진공 건조된 MXene 필름의 경우 전자빔 조사 후 더욱 소수성이 되는 것을 Fig. 4에서도 확인할 수 있다. 이와 반대로 상온/대기 중에서 건조된 MXene 필름의 경우 전자빔 조사를 거치면서 더욱 친수성이 되는 것을 확인할 수 있다. 이러한 접촉각은 결국 표면에너지를 대표하는 물성이기 때문에 낮은 표면에너지를 가지는 MXene의 경우 유기물 흡착능이 낮을 것으로 예상할 수 있으며, 초친수성을 나타내는 MXene의 경우에는 전자빔 조사에 따라 유기물의 흡착 성능이 증대될 것으로 기대할 수 있다.

Fig. 5는 상온 및 대기 중에서 건조된 MXene의 전자빔 표면처리 후 표면에서의 푸리에변환적외선분광(Fourier-Transform Infrared Spectroscopy; FT-IR, VARIAN 670, United States) 분석 결과를 보여준다. 그래프에서 확인할 수 있듯이 상온 및 대기 중 건조 과정에서 생성되는 Ti-OH (1,639 cm⁻¹) 외에도 전자빔 조사 과정에서 높은 온도 및 표면 반응으로 인해 하이드록실



(a) (b)

Fig. 6 pH of MB-dispersed solutions mixed with (a) pristine and (b) EB-treated Ti₃C₂T_x MXene

(Hydroxyl Group) 작용기가 형성된 것을 확인할 수 있다. 해당 작용기는 친수성 작용기로서의 역할을 수행하기 때문에 전자빔 표면처리가 표면적을 넓히는 것 외에도 친수성 작용기를 추가로 생성하여 표면에너지를 높임으로써 유기물 흡착성능 향상에 영향을 줄 수 있는 것으로 예상할 수 있다.

3.2 유기물 흡착성능 분석 및 고찰

본 연구에서는 MXene의 제작에 활용되는 산에서 발생한 이온에 의한 흡착 성능을 배제하고 산업 적용이 불가능한 산성 MXene의 한계점을 극복하기 위해 중성(pH = 7)에서 MXene의 유기물 흡착 성능을 평가하였다. Fig. 6에서 확인할 수 있듯이 전자빔 표면처리 전후 모두 pH가 약 6.9-7 수준을 유지하여 MXene의 합성에 사용한 산이 충분히 씻겨 나간 것을 확인할 수 있었으며, 중성 흡착재료의 활용이 가능한 것으로 판단하였다.

Fig. 7은 전자빔 에너지 조건에 따른 유기물 흡착성능을 평가하기 위해 10 kV와 12 kV의 가속전압을 이용해 표면처리 공정을 적용하기 전후의 MXene 필름의 MB 흡착 성능을 분석한 결과를 보여준다. 필름 형태의 Pristine MXene의 경우, 약 10% 내외의 가장 낮은 흡착 성능을 보였다. 필름 형태를 직접 활용한 경우 MB 수용액과 접촉하는 면적이 상대적으로 적기 때문에 흡착 성능이 매우 낮은 것을 확인할 수 있다. 전자빔 표면처리를 거쳐 표면적을 증가시키고 표면에 친수성 작용기를 추가적으로 생성한 MXene의 경우 상대적으로 우수한 수준의 유기물 흡착 성능을 보여주었다. Fig. 7에서 확인할 수 있듯이 2시간 이내에 약 30% 내외의 흡착 성능을 보였으며 10 kV의 가속전압을 활용한 전자빔 표면처리가 가장 우수한 성능을 나타냈다. 그러나 12 kV의 가속전압을 활용한 경우에는 표면에서 흡착과 관련없는 물질인 TiC_x 형성의 영향으로 흡착 성능이 다시 저하된 것을 확인할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 10 kV의 가속전압을 최적화된 공정 조건으로 선정하고 접촉 면적을 극대화시키기 위해 전자빔으로 표면처리된 MXene 필름을 가루 형태로 분

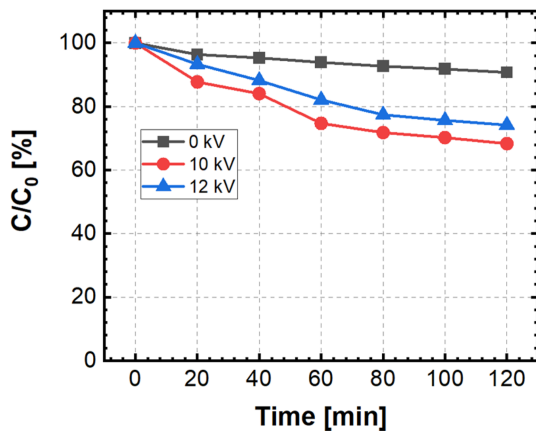


Fig. 7 Variations of relative concentration of MB adsorbed by Ti₃C₂T_x MXene films before and after the EB irradiations

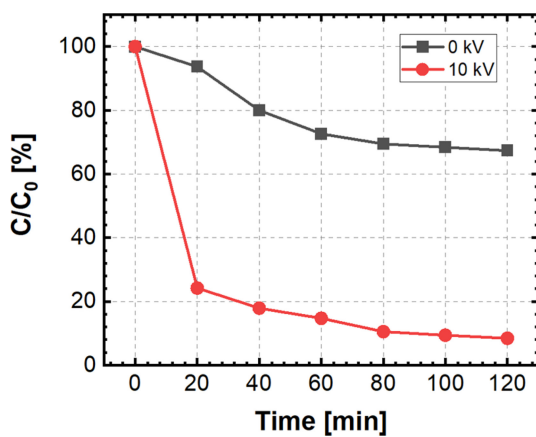


Fig. 8 Variations of relative concentration of MB adsorbed by Ti₃C₂T_x MXene powder before and after the EB irradiations

왜하여 MB의 흡착 성능을 평가하였다.

Fig. 8에서 볼 수 있듯이, 가루 형태로 분쇄한 MXene의 경우 접촉 면적이 증가하면서 전자빔 표면처리를 하지 않은 경우에도 필름 형태보다 상대적으로 높은 흡착 성능을 보였지만, 2시간 동안 약 20-25% 내외의 최대 흡착 성능을 보여 유기물 흡착 재료 활용이 어려운 수준의 흡착 성능을 나타냈다. 10 kV의 가속전압을 활용해 표면처리된 MXene을 가루로 분쇄한 경우에는 나노 물질의 높은 표면적과 표면에 형성된 친수성 작용기의 효과로 인해 월등히 향상된 흡착 성능을 보였다. Fig. 8에서 볼 수 있듯이, 10분 이내에 약 60%, 60분 이내에 약 95% 이상의 MB가 흡착된 것으로 나타났다. 이러한 흡착 성능은 색상 변화를 통해서도 뚜렷이 관찰할 수 있었다.

Fig. 9는 10 kV의 가속전압으로 표면처리 된 MXene을 가루로 분쇄하여 MB 수용액에 혼합한 뒤 경과한 시간에 따라 변화하는 색상을 보여주고 있다. 그림에서 보이듯 약 20분 이내에 명확한 색상 변화를 관찰할 수 있었으며, 60분이 경과한 후에는 투명에 가까운 색상을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 따라서 플라즈마 전자빔을 이용한 MXene의 표면처리를 통해 표면적의

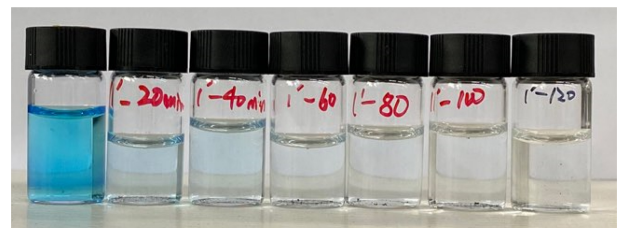


Fig. 9 A color change of the MB solution mixed with Ti₃C₂T_x MXene powder irradiated by the electron beam with 10 kV of acceleration voltage

향상과 표면 작용기의 효과적인 조절을 통해 유기물 흡착 성능을 극대화할 수 있다고 결론 내릴 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 Ti₃C₂T_x MXene의 유기물 흡착 성능 향상을 위해 대면적 플라즈마 기반의 전자빔 표면처리 공정을 소개하였다. 전자빔 가속전압에 따른 MXene 표면에서의 형상 및 물질 상태의 변화를 분석하였으며, 표면적의 변화 및 친수성 작용기의 형성 유무에 따른 유기물 흡착 성능을 MB를 이용해 평가하였다. MB 수용액을 이용한 MXene의 흡착 성능 평가를 통해 표면적이 넓은 가루 형태의 MXene에서 전자빔 표면처리 후 월등히 향상된 MB 흡착 성능을 확인할 수 있었으며, 10 kV의 가속전압을 활용한 최적화된 공정조건을 도출할 수 있었다. 본 연구를 통해 합성된 전자빔 표면처리 MXene은 산성을 가지고 있어 흡착 성능은 우수하지만 산업적 활용성이 떨어지던 기존 연구결과의 한계점을 극복할 수 있는 기술로 판단되며 향후 유기물의 흡착 성능 평가결과를 추가로 분석하여 다양한 유기물 제거 관련 산업 활용 가능성이 매우 높을 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 논문은 2022년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업이며(No. 2021R111A3045191), 2017년 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었습니다(NRF-2017R1A5A1015311).

REFERENCES

- Gusain, R., Gupta, K., Joshi, P., Khatri, O. P., (2019), Adsorptive removal and photocatalytic degradation of organic pollutants using metal oxides and their composites: A comprehensive review, *Advances in Colloid and Interface Science*, 272, 102009. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2019.102009>

2. Tatarchuk, T., Bououdina, M., Al-Najar, B., Bitra, R. B., (2019), Green and ecofriendly materials for the remediation of inorganic and organic pollutants in water, *A New Generation Material Graphene: Applications in Water Technology*, 69-110.
3. Khatri, A., Peerzada, M. H., Mohsin, M., White, M., (2015), A review on developments in dyeing cotton fabrics with reactive dyes for reducing effluent pollution, *Journal of Cleaner Production*, 87, 50-57. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.09.017>
4. Gómez-Ortíz, N., Vázquez-Maldonado, I., Pérez-Espadas, A., Mena-Rejón, G., Azamar-Barrios, J., Oskam, G., (2010), Dye-sensitized solar cells with natural dyes extracted from achiote seeds, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 94(1), 40-44. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2009.05.013>
5. Kumar, N., Mittal, H., Alhassan, S. M., Ray, S. S., (2018), Bionanocomposite hydrogel for the adsorption of dye and reusability of generated waste for the photodegradation of ciprofloxacin: A demonstration of the circularity concept for water purification, *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 6(12), 17011-17025. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b04347>
6. Jiang, J., Wu, D., Tian, N., Wang, M., Huang, J., Li, R., Wu, M., Ni, H., Ye, P., (2022), Preparation of GO/GOH/MOFs ternary blend membrane and its application for enhanced dye wastewater purification, *Journal of Solid State Chemistry*, 310, 123028. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2022.123028>
7. Afzal, S., Daoud, W. A., Langford, S. J., (2013), Photostable self-cleaning cotton by a copper (II) porphyrin/TiO₂ visible-light photocatalytic system, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 5(11), 4753-4759. <https://doi.org/10.1021/am400002k>
8. Xiao, Z., Zhou, J., Fan, L., Li, Y., He, Y., Wang, Y., Li, L., (2021), Controllable preparation of Cu-MOF-coated Carboxyl filter paper for simultaneous removal of organic dye and metal ions, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 60(19), 7311-7319. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.1c00140>
9. Liu, X., Lu, J., Fang, X., Zhou, J., Chen, Q., (2022), Complexation modelling and oxidation mechanism of organic pollutants in cotton pulp black liquor during iron salt precipitation and electrochemical treatment, *Chemosphere*, 308, 136374. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136374>
10. Bediako, J. K., Sarkar, A. K., Lin, S., Zhao, Y., Song, M.-H., Choi, J.-W., Cho, C.-W., Yun, Y.-S., (2019), Characterization of the residual biochemical components of sequentially extracted banana peel biomasses and their environmental remediation applications, *Waste Management*, 89, 141-153. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.04.009>
11. Lee, D. W., Hong, W. H., Hwang, K. Y., (2000), Removal of an organic dye from water using a predispersed solvent extraction, *Separation Science and Technology*, 35(12), 1951-1962. <https://doi.org/10.1081/SS-100100629>
12. Grover, A., Mohiuddin, I., Malik, A. K., Aulakh, J. S., Kim, K.-H., (2019), Zn-Al layered double hydroxides intercalated with surfactant: Synthesis and applications for efficient removal of organic dyes, *Journal of Cleaner Production*, 240, 118090. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118090>
13. Li, J., Wang, T., Lu, N., Zhang, D., Wu, Y., Wang, T., Sato, M., (2011), Degradation of dyes by active species injected from a gas phase surface discharge, *Plasma Sources Science and Technology*, 20(3), 034019. <https://doi.org/10.1088/0963-0252/20/3/034019>
14. Li, Y., Hu, X., Liu, X., Zhang, Y., Zhao, Q., Ning, P., Tian, S., (2018), Adsorption behavior of phenol by reversible surfactant-modified montmorillonite: Mechanism, thermodynamics, and regeneration, *Chemical Engineering Journal*, 334, 1214-1221. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.09.140>
15. Tran, N. M., Ta, Q. T. H., Sreedhar, A., Noh, J.-S., (2021), Ti₃C₂T_x MXene playing as a strong methylene blue adsorbent in wastewater, *Applied Surface Science*, 537, 148006. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.148006>
16. Zhang, Z.-H., Xu, J.-Y., Yang, X.-L., (2021), MXene/sodium alginate gel beads for adsorption of methylene blue, *Materials Chemistry and Physics*, 260, 124123. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.124123>
17. Naguib, M., Mashtalir, O., Carle, J., Presser, V., Lu, J., Hultman, L., Gogotsi, Y., Barsoum, M. W., (2012), Two-dimensional transition metal carbides, *ACS Nano*, 6(2), 1322-1331. <https://doi.org/10.1021/nn204153h>
18. Lei, J.-C., Zhang, X., Zhou, Z., (2015), Recent advances in MXene: Preparation, properties, and applications, *Frontiers of Physics*, 10, 276-286. <https://doi.org/10.1007/s11467-015-0493-x>
19. Kuang, P., Low, J., Cheng, B., Yu, J., Fan, J., (2020), MXene-based photocatalysts, *Journal of Materials Science & Technology*, 56, 18-44. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.02.037>
20. Ihsanullah, I., (2020), Potential of MXenes in Water Desalination: Current Status and Perspectives, *Nano-Micro Letters*, 12, 72. <https://doi.org/10.1007/s40820-020-0411-9>
21. Mashtalir, O., Cook, K. M., Mochalin, V. N., Crowe, M., Barsoum, M. W., Gogotsi, Y., (2014), Dye adsorption and decomposition on two-dimensional titanium carbide in aqueous media, *Journal of Materials Chemistry A*, 2(35), 14334-14338. <https://doi.org/10.1039/C4TA02638A>
22. Okada, A., Uno, Y., McGeough, J., Fujiwara, K., Doi, K., Uemura, K., Sano, S., (2008), Surface finishing of stainless steels for orthopedic surgical tools by large-area electron beam irradiation, *CIRP Annals*, 57(1), 223-226. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.03.062>
23. Seredych, M., Shuck, C. E., Pinto, D., Alhabeab, M., Precetti, E., Deysher, G., Anasori, B., Kurra, N., Gogotsi, Y., (2019), High-temperature behavior and surface chemistry of carbide MXenes studied by thermal analysis, *Chemistry of Materials*, 31(9), 3324-3332.

**Yun Jae Hwang**

Ph.D. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology. His research interest is hybrid manufacturing.

E-mail: i7770syv@unist.ac.kr

**Min Hyeok Lim**

B.Sc. candidate in the Department of Department of Advanced Materials Science & Engineering, Kyungpook National University. His research interest is organic materials adsorption.

E-mail: preudpreed0@gamil.com

**Changung Paeng**

B.Sc. candidate in the Department of Department of Advanced Materials Science & Engineering, Kyungpook National University. His research interest is materials fabrication

E-mail: ckd0362@naver.com

**Hyung Wook Park**

Professor in the Department of Mechanical Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology. His research interest is manufacturing.

E-mail: hwpark@unist.ac.kr

**Jisoo Kim**

Assistant Professor in the Department of Precision Mechanical Engineering, Kyungpook National University. His research interest is energy beam manufacturing.

E-mail: js.kim@knu.ac.kr

• 특집 • 설계 및 재료의 산업계 응용

편심머리 볼트의 강도향상을 위한 단조성형

Forged Molding for Strength Improvement of Eccentric Head Bolts

조영태^{1,#}
Young Tae Cho^{1,#}

¹ 전주대학교 기초과학과 (Department of Basic Science, Jeonju University)
Corresponding Author / E-mail: choyt@jj.ac.kr, TEL: +82-63-220-2981
ORCID: 0000-0002-0831-1212

KEYWORDS: Eccentric head (편심 머리), High strength eccentric bolt (고장력 편심볼트), Cold forging (냉간 단조), Strength improvement (강도 향상), Metal flow (단류선), Forging analysis (단조 해석)

In this study, the production process of eccentric head bolts that fasten flanges for water supply pipe connections, which can only be achieved through the cold forging process, was improved. For axial forging, forming analysis was performed for a 200-ton header machine to check the raw material specifications, forming load, and metal flow improvements suitable for forming. The analysis found that the forging of high-strength bolts of M14×65 mm with eccentric heads was possible under the maximum load condition of 137.2 tons with low carbon boron steel of $\phi 13.8 \times 89.7$ mm and 105.2 g. By mounting the prototype mold on the header machine, it was possible to prevent metal flow breakage, as shown by the trial mass production test. It was possible to improve the strength of the eccentric head bolt and reduce the weight of the input material through the cutting process. Therefore, manufacturing costs could be reduced.

Manuscript received: December 28, 2022 / Revised: January 25, 2023 / Accepted: January 27, 2023

1. 서론

나사를 체결하는 나사 축심에서 편심된 편심 머리(Eccentric Head)를 갖는 특수한 볼트는 편심된 머리부가 워크를 강력하게 클램프할 수 있도록 설계된 볼트로서 특수한 경우에 많이 사용되고 있다. 또한 썸기 효과에 의해 작은 체결 토크로도 큰 체결력을 얻을 수 있다. 이러한 편심볼트는 리니어 가이드 레일의 고정, 워크 또는 지그의 고정 볼트 클램프로 쓰이거나, 자동차의 현가장치의 체결용 플랜지볼트 외에 캠버 각을 정렬하기 위한 캠버볼트로 사용되며, 다양한 사업분야에 활용되고 있다. 자동차산업을 비롯해 생산제조 분야에서 이런 부품의 생산성 및 품질 향상과 원가절감을 위한 많은 연구들이 진행되고 있다[1-3].

본 연구는 지하에 매설되는 상수도관의 연결에 사용되는 고장력 편심볼트(High Strength Eccentric Bolt)의 강도 및 생산성

향상과 소재 손실을 줄여 원가절감을 위한 방안에 관한 연구이다. 상수관은 연결 시 이형관을 삽입하고 압력에 편심볼트를 체결하여 조립하게 된다. 이때 체결 구조상 조립되는 부분의 간섭을 방지하고 볼트 머리의 한쪽방향에서 상대물과 조립하기 위해서 비대칭으로 디자인된 편심머리 볼트로 생산하여 사용한다. 상수관연결을 위한 플랜지의 체결에 사용되는 체결용 편심볼트의 생산은 기존에는 단조 후 머리부 형상을 절삭가공하는 공정으로 생산되고 있었다.

기타 산업용 편심머리 볼트들도 축대칭 단조와 절삭가공 또는 축대칭 단조와 트리밍 공정에 의해 대부분 생산되고 있었다. 이때 편심 볼트는 머리부분의 성형 면적이 커지면서 단조시 하중이 급격하게 증가함으로써 대용량 설비가 필요하다. 절삭가공 및 트리밍 공정으로 재료 손실이 증가하고, 동시에 공정 추가에 따른 생산 시간 과다 소요 및 공구 마모가 심하고, 이로 인해

양산공정에서 불량률이 5% 이상으로 양산성이 낮고 제품원가 비중이 높아지는 단점이 있다. 또한, 절삭가공 정에서 치수 정밀도가 저하되어 체결 불량을 유발하게 된다. 기존에 양산된 상수관 연결을 위해 편심볼트 체결시 편심머리 부분이 체결방향으로 회전(밀립)하여 이형관 단차면과의 접촉면적이 줄어들어 체결력이 감소하게 되는 문제점을 가지고 있으므로 단조 금형의 수명과 단조공정에서의 문제점들을 보완하고, 품질 및 양산성 향상을 위한 새로운 편심 단조 공정이 필요하다[4-9].

따라서 본 연구에서는 현장에서 실제 생산되고 있는 상수관 연결용 편심 볼트(M14×65 mm)에 대해서 양산시 재료손실을 줄이고, 불량률 감소로 생산성을 향상시키며, 가공에 따른 단류선(Metal Flow)의 끊김을 방지함으로써 볼트 머리부의 강도를 향상되도록 단조 공정만으로 생산할 수 있는 공정을 개발하고자 한다. 편심볼트 단조 금형 개발의 시행오차를 줄이기 위해서 MFRC AFDEX를 이용한 단조 성형 해석을 통한 금형 개발 최적의 소재 치수를 설정함으로써 금형 및 냉간 단조(Cold Forging) 공정을 개발하고자 한다.

2. 편심볼트 단조 성형 공정

2.1 상수관 플랜지 체결 편심볼트

Fig. 1은 본 연구의 대상인 고장력 편심 볼트를 사용하여 상수관 연결 부품인 플랜지와 신축링(Spike Ring)에 의해 상수관을 연결하는 조립 구조를 나타내었다. 연구 대상 편심볼트는 상수관 연결 공사에서 가장 많이 사용되는 M14×65 mm로 소기업에서 보유하고 있는 200 ton급 헷더머신으로 생산이 가능한 단조성형 공정을 개발하고자 한다. 기존에 편심 머리볼트의 생산 공정은 Fig. 2와 같고, 소재절단 후 5단계의 공정으로 단조 3공정과 절삭 2공정을 거쳐 생산되고 있었다. 먼저 롤 형태 선재를 물러를 거쳐 직선화하고, 소재를 절단(Stage 0)하여 압출(Stage 1)하고, Stage 2, 3단계에서 볼트 머리부 예비 성형을 거쳐 원형의 머리부 성형을 완성한다. 이후 도면처럼 4, 5단계에서 머리부를 나사축에 편심한 형태로 가공한 후 머리 하단부를 절삭하는 공정을 거쳐 편심 볼트 제품을 완성하게 된다.

Fig. 2에서 알 수 있듯이 4, 5 단계 공정은 절삭가공을 거쳐 완성하게 됨으로 3단계의 편심 머리부에 맞춰 큰 원형의 머리부를 성형한 후 절삭 과정을 거치므로 소재의 손실이 발생하게 된다. 또한 5단계에서 머리 하단부를 절삭함으로써 단류선의 끊김이 발생하게 된다. 절삭에 의해 단류선이 끊김으로써 머리부의 강도가 감소하여 고압 충격에 취약하게 됨으로써 Fig. 3과 같이 머리부가 파손되는 원인이 된다[10].

2.2 단조 공정설계 및 성형 해석

연구의 주목적은 상수관 연결용 고장력 편심 체결 볼트의 생산공정을 개선하여 기존에 단조 3단계 공정과 절삭 2단계 공정에서 절삭 공정을 생략하고, 단조 3단계 공정만으로 편심머리

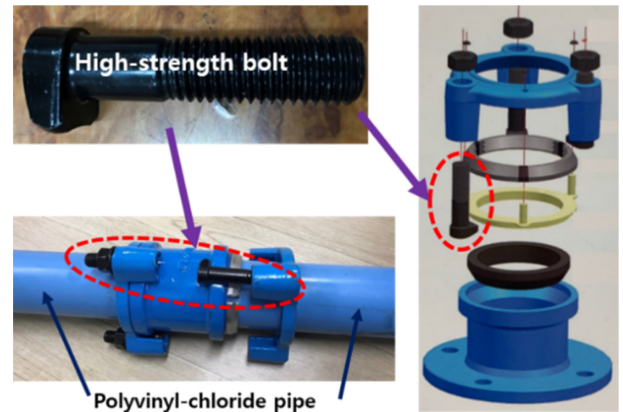


Fig. 1 High-strength eccentric bolt for water pipe connection assembly

| Forging process | | | | Cutting process | |
|-----------------|---------|---------|---------|-----------------|---------|
| Stage 0 | Stage 1 | Stage 2 | Stage 3 | Stage 4 | Stage 5 |
| | | | | | |

Fig. 2 Previous exiting manufacturing process of eccentric bolt



Fig. 3 Broken high-strength bolt head

볼트를 양산할 수 있는 단조 공정을 개발하는 것이다. 이는 절삭공정으로 인한 소재 머리부의 단류선 끊김을 방지하여 볼트 머리부의 인장강도를 향상시킴으로써 체결에 따른 고장력을 유지할 수 있도록 하는데 있다. 또한 기업에서 보유한 200 ton급

Table 1 Specifications for each input material for forging

| Material | Size [mm] | Weight [g] |
|----------|-------------|------------|
| A | Ø12.0*118.5 | 105.2 |
| B | Ø12.6*107.5 | |
| C | Ø13.8* 89.7 | |

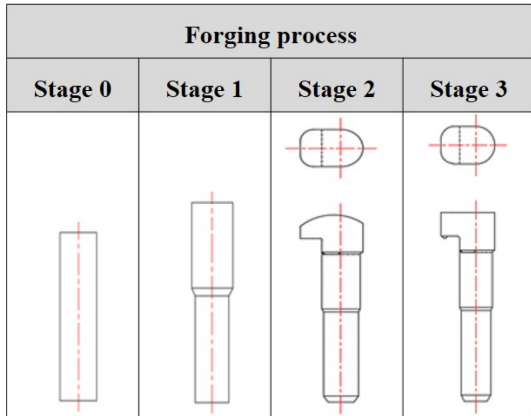


Fig. 4 New forging process design for high-strength bolts

헷터머신을 이용하여 단조 성형이 가능하고, 절삭 공정을 없애 소재 손실을 줄임으로써 원가절감 및 생산성을 향상하고자 한다. 기존에는 400 ton급의 고가 장비로 단조 공정을 수행해야만 하였다.

기존 절삭공정을 제거하기 위해서 5단계 공정인 1단계 1차 압출, 2단계 2차 압출, 3단계 1차 헤딩공정, 4단계 2차 헤딩공정 및 5단계 트리밍 공정으로 설계하여 예비 성형해석을 실시한 결과, 금형의 구조로 인해 플래쉬(Flash)부 발생과 2차 헤딩공정으로 인한 단류선 이상이 발생하는 등의 문제점이 발생하였으며, 5단 공정에 추가 트리밍 공정 필요 및 단류선 결함 등 본래 취지와 다른 결과로 근본적으로 헤딩 공정을 개선하는 금형 설계가 필요하였다[10].

따라서 Fig. 4와 같이 절삭 공정을 없애고 3단계의 단조 공정으로만 편심볼트를 성형할 수 있는 새로운 단조성형 공정 개발을 위한 편심 볼트 성형공정을 설계하였다. 이를 바탕으로 M14×65 mm 규격의 편심머리 볼트를 성형하기 위해서 1-3단계 최적의 압출, Upset, Sliding 등의 공법 및 금형 개발과 공정 설계를 위하여 단조성형 해석을 실시하고, 1단계의 소재 규격 설정 및 금형 설계를 실시하였다. 성형해석을 위해서 투입되는 소재의 규격 및 중량에 대해서 Table 1에 나타내었다. 소재는 보론강(Boron Steel)으로 Table 1과 같이 소재 중량 105.2 g에 직경 및 길이를 달리한 A, B 및 C 규격의 3종 소재에 대해 금형 설계를 수정하여 성형해석을 수행하였다.

이는 단조공정 및 금형개발 시간을 단축하고, 단조공정만으로도 편심볼트 성형이 가능한 최적 조건들을 확인하고자 한다. 해석에 사용한 S/W는 MFRC Afdex ver. 20R01을 사용하여 3D 성형해석을 실시하였다. 해석을 위한 초기 온도 25°C, 다이

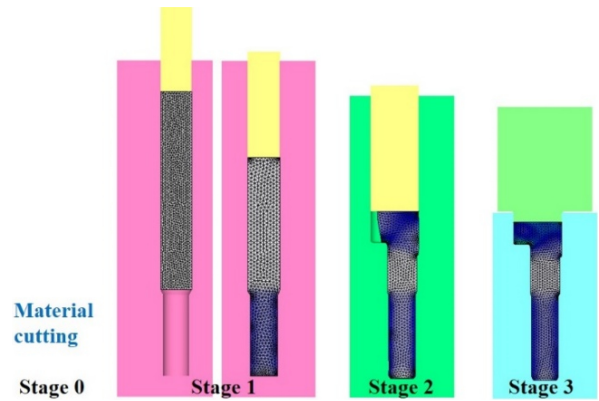


Fig. 5 New 4 stages forging process

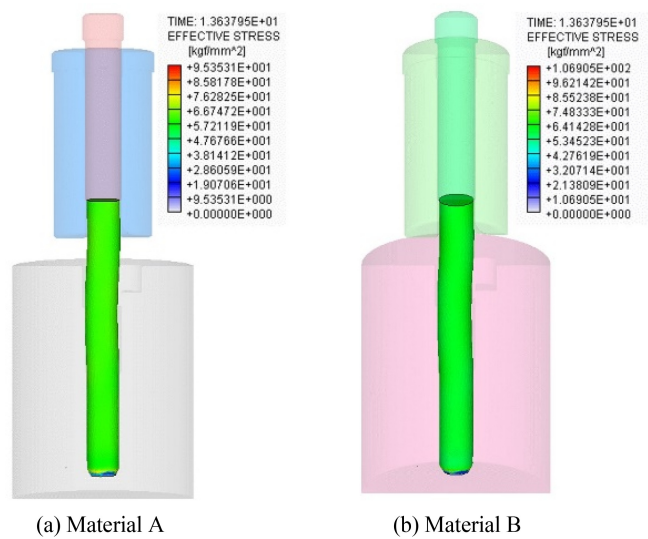


Fig. 6 Material bending in stage 2 of forging analysis

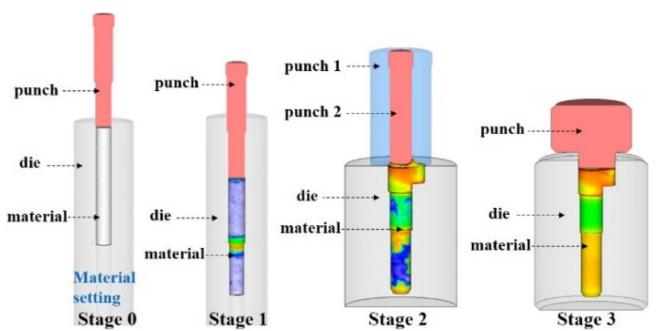


Fig. 7 New 4-step forging analysis of standard C materials

속도 -1.0 mm/s, 쿨롱 마찰 계수(Coulomb Friction Rate) $\mu = 0.02$ 의 경계조건으로 소재 절단 후 1단계 압출, 2단계 볼트 머리부 예비 성형 및 3단계 머리부가 완성되는 공정에 대해서 탄소 성 유한요소 해석을 실시하였다. 성형 조건은 소재를 상하 금형에 안착시킨 후 상부 금형을 75초간 서서히 하강시키면서 Fig. 5의 금형을 Fig. 7과 같이 수정한 공정에 대해 성형 해석을 수행하였다.

3. 해석 및 공정 설계 고찰

해석결과 A규격 Ø12와 B규격 Ø12.6 mm는 2단계 공정에서 Fig. 6과 같이 소재의 휨이 발생하였다. 이는 소재의 규격이 길어 소재가 휘어져서 Up-Setting 공정이 이루어지지 못하거나, 수행 전에 소재의 휨이 발생하는 현상이 일어났다. C규격 Ø13.8 mm의 경우 소재 휨이 거의 발생하지 않았고, Up-Setting 과정 및 모든 공정이 잘 진행되는 것을 알 수 있었다. Fig. 7에 단조 성형이 가능한 C규격의 소재에 대한 성형 공정의 해석 결과를 나타내었다. 소재를 절단하는 공정 후 1단계 압출 공정과 2단계 머리부 예비 성형 후 3단계 최종성형으로 완성하게 된다. 소재 C규격의 각 단계별 성형 해석 결과로 유효 응력과 변형을 및 단류선 형상에 대한 각각의 결과는 Fig. 8과 같다. 소재는 저탄소강에 우수한 경화 능력을 발휘하는 소량(0.002 wt%)의 보론을 첨가한 보론 첨가강(51B20)으로 내마모 부품이나 체결용 고장력 볼트로 많이 사용된다[11-12]. 이 소재가 선재인 경우 인장하중(Tensile Strength)이 541 MPa, 연신율(Elongation) 22.5, 경도(Hardness)가 HrB 78.2 기계적 특성을 가지고 있는 선재를 이용하여 냉간 단조를 수행하여 상수관 연결용 고장력 볼트를 제작한다. 이 소재의 기계적 특성과 Fig. 8의 연속된 단류선 및 해석결과를 바탕으로 냉간 단조시 가장 중요한 항목인 유효응력을 확인한 결과 최대 1,029.6 MPa를 나타내고 있어 소재의 인장 강도의 2.5배를 넘지않아야 하는 조건을 충족하여 냉간 단조가 가능할 것으로 판단되었다.

이 결과를 바탕으로 금형의 설계 수정을 실시하여 최종적으로 편심머리 볼트의 단조성형 금형 설계 및 공정 개발을 완료하였다. 볼트 단조성형 공정은 헷더머신을 사용하여 단조공정 1 및 2단계, 2 및 3단계를 동시에 반복적으로 수행하여 단조성형이 완료된다. 이때 단조에 필요한 하중에 대한 시뮬레이션 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 실제로 헷더머신에 의한 단조공정은 2번 반복운동에 의해서 절단된 소재가 공급되면 1회 왕복 시 압출과 헤드부 예비성형이 이루어지고, 2회째는 머리부 예비 성형과 완료성형으로 공정이 완료되는 구조로 금형이 설계 조립되어 있다. 따라서, Figs. 9(a), 9(b)의 시간 및 하중 그래프를 보면 머리부 예비 성형시 63.8 ton, 머리부 완료 성형시 73.4 ton의 하중이 소요됨으로 최대 하중 137.2 ton으로 예상되어 보유한 200 ton 장비로도 M14×65 mm의 고장력 편심 볼트의 냉간 단조가 가능함을 확인하였다. 위와 같은 성형해석 결과를 바탕으로 시생산 금형을 제작하였고, Fig. 10에 실제 단조 공정별 금형 설계를 나타내었다. 금형 구조는 3중 열박음 형태로 내구성을 보강하여 제작되었으며, 외측은 SKD-61 열처리 경도 HrC 30, 중간 소재는 SKD-61 HrC 40-50, 내측은 초경합금 Grade No. 4를 사용하였고, 편치용 핀은 하이강 SKH-51로 제작하였다. 그리고 Fig. 11은 현장에 투입하여 시생산 테스트를 위해서 제작된 금형을 200 ton급 헷더 머신에 실제 설치한 사진이다. 또한 Fig. 12는 시금형에 의해 소재의 절단에서 단조 성형 과정의 공정별 소재 형상 사진이다. 사진에서처럼 단조 3단계의 완성품은

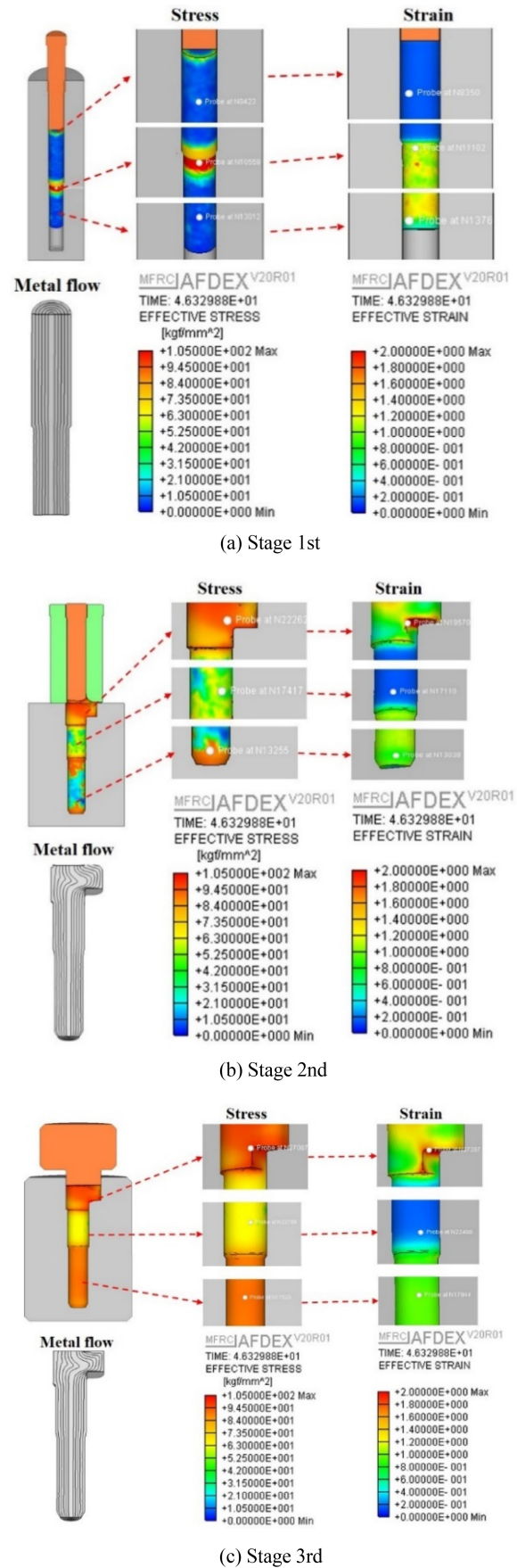
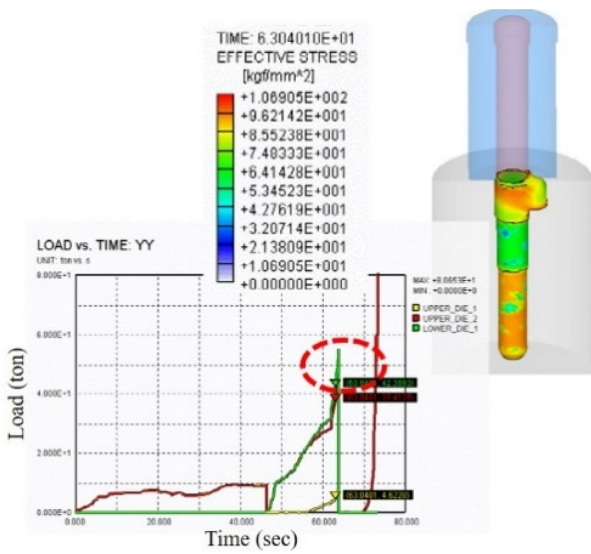
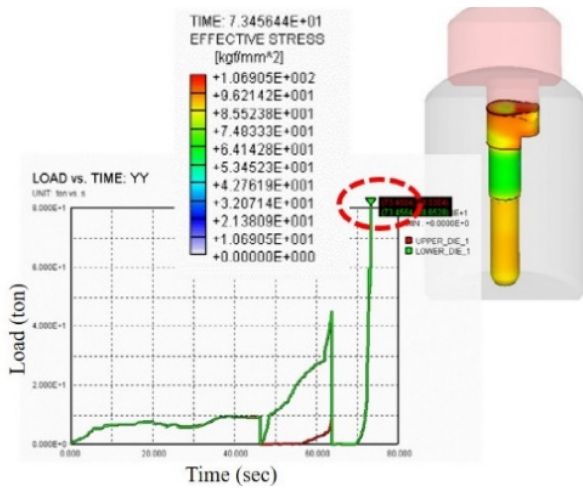


Fig. 8 Stress and strain distribution of forging process



(a) Preform of head bolt



(b) Complicated preform of bolt head

Fig. 9 Effective stress distribution and load of forging

공정설계에 적합하게 냉간 단조가 잘 이루어짐을 알 수 있었다. 3단계의 단조 완료 후 외관검사와 오차범위 내의 치수 검사를 통해 제품의 불량여부를 검사한 다음 나사산 전조 후 최종 제품을 완성하게 된다. 보론강 선재를 사용하여 상수관 고장력 편심 볼트 단조를 시제작 금형을 활용한 시양산 테스트 결과, 기존 공정은 볼트 1개를 생산하는데 60 sec가 소요되고, 1,000개 생산 기준으로 5개 정도의 불량으로 불량률이 5% 정도 발생하였으나, 개발된 본 금형에 의한 단조 공정만으로 생산할 경우 1개 생산에 2 sec 정도 소요되고, 불량 발생은 1.5개로 불량률이 0.033%로 개선되어 생산성 향상과 불량률 감소효과가 확인되었다. 또한 볼트 머리부를 편심형상으로 밀링 가공과 하단부 절삭 공정에 의한 재료 손실을 줄임으로써 소재 절감이 가능하였다.

최적 조건으로 단조한 상수관 편심볼트의 내부 유동을 확인하기 위해 단류선도를 Fig. 8에 나타내었으며, 기존 가공법은 Fig. 3과 같이 단류선이 절단되었으나, 단조공정의 경우 단류선의

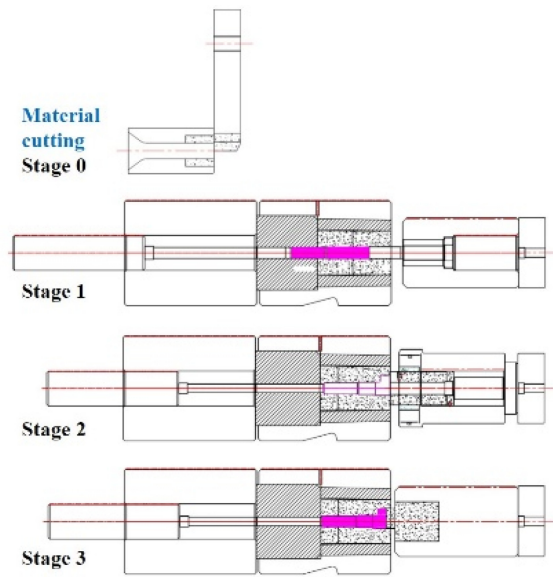


Fig. 10 Eccentric bolt forging process mold design



Fig. 11 Eccentric bolt forging process mold mounted on a heading machine

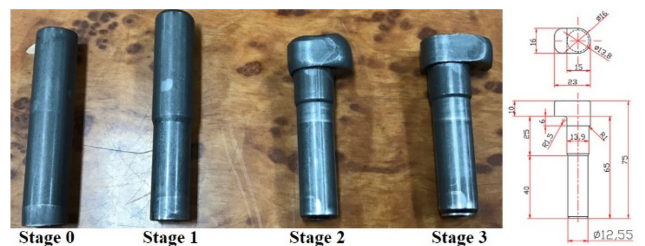


Fig. 12 Eccentric bolt cold forging process and final product specifications by new process

파열 및 접힘(Folding) 등의 결함은 없었다. 이는 편심 구조를 갖는 상수관 연결 플랜지 체결용 고장력 편심볼트를 편심 냉간 단조 공정만으로도 성형이 가능하고, 높은 정밀도와 인장 하중 및 경도 등의 기계적 성질이 향상될 것으로 판단되었다.

4. 결론

본 연구는 상수관 연결을 위한 플랜지를 체결하는 편심머리 고장력 볼트 생산시 기존의 절삭가공이 포함된 생산공정을 개선하여 냉간 단조 공정만으로 생산이 가능한 공정을 개발하였다.

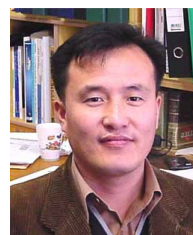
고장력볼트의 축방향 단조 성형을 위해서 기업이 보유한 하중 200 ton급 헷더머신으로 성형에 적합한 원소재 규격, 성형 하중, 단류선 개선 등의 확인을 위한 성형 해석을 실시하였다.

성형 해석 결과 소재 규격은 $\phi 13.8 \times 89.7$ mm, 105.2 g을 사용하였을 때 M14×65 mm의 편심 머리 볼트의 단조성형이 가능함을 알 수 있었고, 실제 단조시 2개의 공정이 동시에 수행되는 조건에서 최대 약 137.2 ton의 하중 조건이 도출되어 실제 단조시 하중은 200 ton 장비로 성형이 가능함을 알 수 있었다.

이 결과를 바탕으로 금형을 시제작하였고, 헷더머신에 장착하여 시양산 테스트를 실시하였다. 시양산 결과 기존 생산시에는 절삭가공에 의해서 편심머리부의 단류선이 끊어져 볼트 머리부의 내구성이 떨어졌으나, 축방향 냉간 단조에 의한 성형 시 단류선 끊김을 방지할 수 있음을 해석 및 시생산 결과를 통해 알 수 있었다. 이는 편심머리 볼트의 강도를 향상시킬 수 있을 것이며, 또한 절삭 가공에 의한 투입 소재의 중량을 감소시킬 수 있어 원가 절감이 가능할 것이다.

REFERENCES

1. Song, S.-E., Kwon, H.-H., (2012), A study on the cold forging development of guide valve for the fuel pressure regulator, *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, 21(2), 331-336.
2. Kim, J.-H., Chae, S.-W., Han, S.-S., Son, Y.-H., (2010), Manufacturing process design of aluminum alloy bolt, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 27(5), 63-68.
3. Jang, S., Lee, M., Shim, S., Son, Y., Yoon, D., Joun, M., (2010), Finite element analysis of manufacturing process of a 12 point flange head bolt with emphasis on thread rolling process, *Transactions of Materials Processing*, 19(4), 248-252.
4. Kim, K.-W., Qiu, Y.-G., Cho, H.-Y., (2016), Design of eccentric forging process for camber bolts using finite element method, *Journal of Advanced Marine Engineering and Technology*, 40(4), 320-324.
5. Schongen, F., Klocke, F., Mattfeld, P., Rjasanow, S., Grzhibovskis, R., (2014), FEM/BEM simulation of cold forging process considering press-tool-workpiece interaction, *Procedia Engineering*, 81, 2403-2408.
6. Lee, H., Shin, K., Park, Y., (2013), A study on process design of cold forging for cost-saving of asymmetric pinch yoke for automobile steering system, *Proceedings of the Korean Society of Precision Engineering Spring Conference*, 1115-1116.
7. Jung, U.-J., Lee, J.-J., Park, G.-J., (2011), A preliminary study on the optimal shape design of the axisymmetric forging component using equivalent static loads, *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, 35(1), 1-10.
8. Kim, K.-W., Kim, Y.-T., Kim, W.-J., Cho, H.-Y., (2008), Finite element analysis for multi-stage forging process design of bolt with nonaxisymmetric washer cam, *Journal of Advanced Marine Engineering and Technology*, 32(4), 585-595.
9. Weroński, W., Gontarz, A., Pater, Z., (2006), The research of forging process of eccentric part on three slide forging press, *Journal of Materials Processing Technology*, 177(1-3), 214-217.
10. Cho, Y. T., Park, H. J., Im, K. H., (2020), Forging analysis of high tension eccentric bolts, *Proceedings of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers Spring Conference*, 118.
11. Kim, H.-J., (2011), Effect of austenitizing and quenching tempering temperatures on tensile and impact properties of AISI 51B20, *Journal of the Korean Society for Heat Treatment*, 24(6), 327-337.
12. Lee, J.-H., Lee, G.-M., Yun, S.-H., (2001), A study on the fatigue properties of boron steel (AISI 51B20), *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 18(11), 174-178.



Young Tae Cho

An Associate Professor in the Department of Basic Science, College of Engineering, Jeonju University. His research interests are mechanical design, FEM analysis and non-destructive testing.

E-mail: choyt@jj.ac.kr

• 특집 • 설계 및 재료의 산업계 응용

소형펀치시험에 의한 인코넬617용접부의 크리프거동 평가

Assessment of Creep Behavior of Inconel 617 Alloy Weldment by Small Punch Test

김범준^{1,#}
Bum Joon Kim^{1,#}

¹ 오산대학교 기계공학과 (Department of Precision Engineering, Osan University)
Corresponding Author / E-mail: kultra@osan.ac.kr, TEL: +82-31-370-2652
ORCID: 0000-0002-8078-9595

KEYWORDS: Small punch test (소형펀치시험), Cross weld (용접횡단부), Weldment (용접부), Fusion line (용융선), Heat affected zone (열영향부)

In this research, the small punch (SP) test was applied to examine the local creep characteristics of a narrow gap weldment. To find the local creep property, an Ni-based 617 alloy and its narrow gap weldment, which is one of candidates for advanced fossil power plants, were employed. Thin square specimens were machined at three different locations: weld metal, base metal, and HAZ near the base metal from the Inconel 617 alloy narrow gap weldment. The results of the SPC test were evaluated. The microstructure of narrow gap weldment was observed by scanning electron microscopy and optical microscopy to investigate the effect of the microstructure on the creep properties of the weld zone. The creep rupture part of the weldment was observed by scanning electron microscopy. Finally, four different creep characteristics of the narrow gap weldment were obtained by the SPC test with good validity.

Manuscript received: January 24, 2023 / Revised: January 31, 2023 / Accepted: January 31, 2023

NOMENCLATURE

δ = Minimum Displacement Rate
P = Strip Applied Load
n = Load Exponent
m = Exponent of Displacement Rate
 t_f = Time to Rupture

1. 서론

재료의 물성 측정에 있어서 시편의 경제적 활용은 실험을 수행하는데 있어서 다양한 이점을 가지고 있다. 소형화된 시험편은

가공공정의 경제성, 가공비용 및 시간, 대형 벌크에 비해 많은 수의 시험편 획득 등 다양한 활용성을 제공한다. 이러한 이점은 대형 설비부품의 기계적 물성이나 건전성평가를 위한 시편샘플링에 있어서 통상적인 시편의 크기와 달리 작은 크기의 시편채취는 비파괴 시험에 견줄만한 매우 좋은 효과를 가져온다.

이러한 측면에서 소형 펀치(Small Punch) 시험 방법은 기존의 인장 크리프 시편과 비교하여, 매우 작은 크기(10 × 10 × 0.5 mm)와 경량의 시편만 필요하기 때문에 운전중인 설비기기의 건전성에 아무 영향도 끼치지 않고 고온 크리프수명 예측에 있어서 비파괴적 방식으로 시편샘플을 채취할 수 있는 매우 유익한 잠재적 효용성을 가지고 있다[1-9]. 특히, 소형펀치 크리프(Small Punch Creep, SPC) 시험기는 직경 2.4 mm의 세라믹(Si₃N₄) 볼을 장착하여 시편의 표면에 반구(Half of a Sphere) 형태로 집중하중이 가해지기 때문에 다양한 미세구조의 협궤

용접부의 국부적인 크리프 특성 평가가 가능하다[10-13]. 본 연구에서는 협궤 용접부의 국부적인 크리프 특성을 조사하기 위해 SPC 시험을 적용하였다. 용접부의 미세조직 별 SPC 시험가능성을 찾기 위해 Inconel 617 합금의 협궤 용접부를 사용했으며, SPC 시편을 용접재(Weldmetal), 모재(Basemetal) 및 열영향부(Heat Affected Zone)의 세 가지 미세 구조 영역별로 SPC 시편의 형태로 제작하였다. 추가적으로, 용접부 미세조직이 크리프 거동에 미치는 영향을 조사하기 위하여 광학 및 주사전자현미경으로 협궤 용접부의 미세조직 및 파단부를 관찰하였다. 본 연구에 사용된 Inconel Inconel® 합금 617(UNS N06617/W.Nr. 2.4663a)은 고온 강도와 내산화성이 뛰어난 고용체 강화 니켈-크롬-코발트-몰리브덴 합금이며 광범위한 부식 환경에 대한 저항성이 우수하며 기존 기술에 의해 쉽게 용접되는 특성을 가지고 있다[14-17].

2. 실험방법

2.1 재료 및 경도시험

본 연구에는 상업용 Ni 기반 617 합금을 Thyssen 617(용가재)를 이용하여 동중용접을 수행한 협궤용접부를 실험 재료로 사용하였다. 이 합금은 첨단 화력 발전소와 원자력발전소 및 항공기 및 지상 기반 가스 터빈설비기기의 고온용 덕트, 초고온 원자로의 1차 냉각수 관로와 2차 냉각수 관로 사이의 중간 열교환기 등의 설비요소에 대한 매력적인 재료로 사용된다. Table 1은 HAYNES의 Inconel 617 합금(모재)과 Thyssen 617(용가재)의 화학 조성을 보여준다[18]. Fig. 1은 Inconel 617 합금의 협궤 용접 블록을 나타낸다. 용접 절차는 TIG (Tungsten Inert Gas arc Welding)에 의해 7 패스로 수행되었으며, 용접 후 열처리(Post Weld Heat Treatment, PWHT)는 미세조직의 고유특성을 조사하기 위해 수행하지 않았다. 용접부의 국부 강도를 조사하기 위해 AKASHI 미세 경도 시험기를 사용하여 용접재, 열영향부 및 용접부의 모재에서 경도 프로파일을 얻기 위해 용접부 전체에 걸쳐 횡방향으로 미세 경도 측정을 수행하였다. 미세경도 시험의 시험하중과 하중시간은 각각 500 g과 5s의 조건으로 실시하였다.

2.2 소형펀치 크리프 시험

협궤 용접부의 국부 크리프 특성 평가가 가능한지를 알아보기 위해 SPC 시험을 적용하였다. Fig. 2는 본 연구에 사용된 SPC 시험기 및 지그를 보여준다. SPC 테스트 지그는 펀치, 볼, 상부다이, 하부다이로 구성된다. 시편은 먼저 하부 다이에 배치된 후 상부 다이가 하부 다이에 조립된다. 이 어셈블리는 최종적으로 4개의 클램핑 나사로 고정되고 직경 2.4 mm의 세라믹(Si3N4) 볼이 펀치를 통해 SPC 시편에 탄성한도 이내의 일정한 하중을 가하게 된다. SPC 시편의 준비는 Fig. 3과 같이 SPC 시편의 가공 위치를 결정하기 위해 용접부를 식각(Etching)하고

Table 1 Chemical composition of Inconel 617 alloy (Base metal) and Tissen 617 (Filler metal)

| Material | Ni | Cr | Co | Mo | Al | C | Fe |
|------------|------|---------------|---------------|--------------|-------------|---------------|-----|
| Alloy 617 | 44.5 | 20.0 -24.0 | 10.0 -15.0 | 8.0 -10.0 | 0.8 -1.5 | 0.05 -0.15 | 3.0 |
| Tissen 617 | Bal. | 21.5 | 11.0 | 9.0 | 1.0 | 0.05 | 1.0 |
| Material | Mg | Si | S | Ti | Co | B | Mn |
| Alloy 617 | 1.0 | 1.0 | 0.015 | 0.6 | 0.5 | 0.006 | |
| Tissen 617 | | 0.1 | | 0.5 | | | 0.1 |



Fig. 1 Inconel 617 alloy welded block

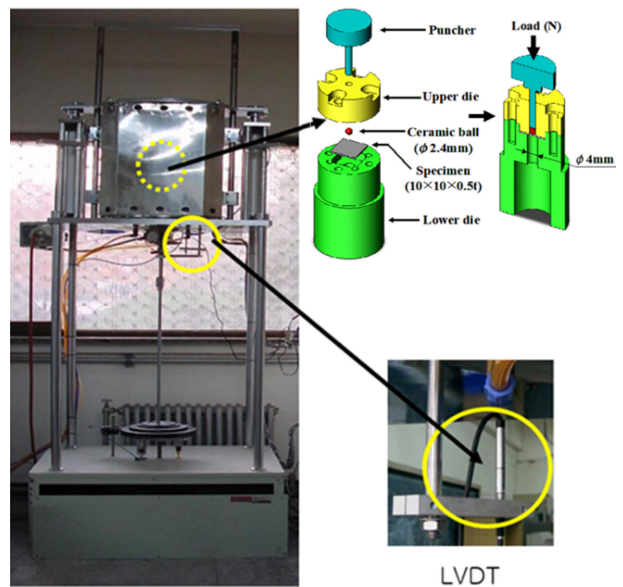


Fig. 2 SPC test machine and jig apparatus

박판의 사각(10 × 10 × 0.5 mm) 시편을 용접부에서 3개의 서로 다른 위치, 즉 용접재, 모재 및 용접부의 열영향부에서 와이어커팅(Wire Cutting)으로 가공하였다. 특히 열영향부(Cross Weld) 시편은 용융선(Fusionline)이 시편 중앙에 위치하도록 가공하였다. 모든 SPC 시편은 표준 금속조직 샘플 준비방법에 따라 연마하였다. 가공 스크래치에 의한 응력 집중을 방지하기 위해 0.1 μm Al₂O₃ 분말을 사용하여 최종 연마 공정을 진행하였으며, 최종 두께는 디지털 마이크로미터로 0.5 mm±10 μm 이내로 조절하였다. Table 2는 세 가지 시편에 대한 SPC 하중 조건을 나타낸다. 시편의 변위는 선형 가변 변위 변환기(LVDT)로 10⁻³ m의 정밀도로 측정하였다. 모든 SPC 시험은 시험중 산화를

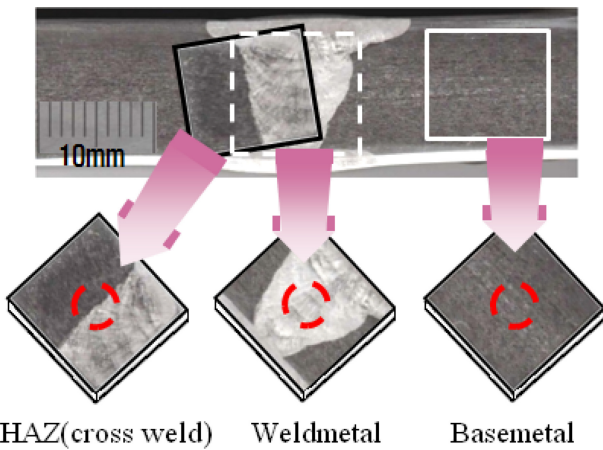


Fig. 3 Inconel 617 alloy weldment block and SP creep specimens

Table 2 SP creep loading condition

| Specimen type | Base metal | Weld metal | HAZ |
|---------------|------------|------------|-----|
| Load [N] | 392 | 392 | 392 |
| | 422 | 540 | 422 |
| | 491 | 589 | 461 |
| | 540 | - | 491 |
| | - | - | 540 |

방지하기 위해 아르곤가스 조건에서 700°C에서 수행되었다. SPC 시험기 고온챔버의 온도는 ±1°C의 정확도로 제어하였다.

2.3 미세조직 및 파괴

Inconel 617협궤 용접부의 크리프 거동에 미치는 미세조직의 영향을 알아보기 위해 용접부를 광학현미경(OM)과 주사전자현미경(SEM)으로 관찰하고 각 미세조직을 비교하였다. 또한 Inconel 617협궤 용접부의 석출물을 분석하기 위해 EDS (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy)를 사용하였다. 특히, SPC 시험 후 협궤 용접부의 국부 적 미세조직특성이 크리프의 파단 양상에 미치는 영향을 조사하기 위해 용접재, 모재 및 열영향부 시편의 크리프 파단 부위를 주사전자현미경(SEM)으로 조사하였다.

3. 결론 및 고찰

3.1 금속 조직 및 미세경도

Inconel 617협궤 용접부의 주사전자 현미경과 광학현미경에 의한 미세조직 관찰결과는 각각 Figs. 5와 7에 제시되어 있다. Fig. 6은 Inconel 617협궤 용접부의 석출물에 대한 EDS 스팟 및 라인 스캔 분석 결과를 나타낸다. Fig. 4는 미세경도 시험 결과를 나타낸다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 용접재에서 모재로 갈수록 경도가 급격하게 떨어지는 것으로 나타났다. 이러한 경도

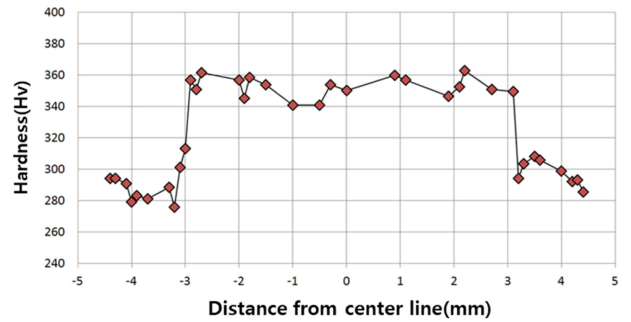


Fig. 4 Microhardness profile of Inconel 617 alloy weldment

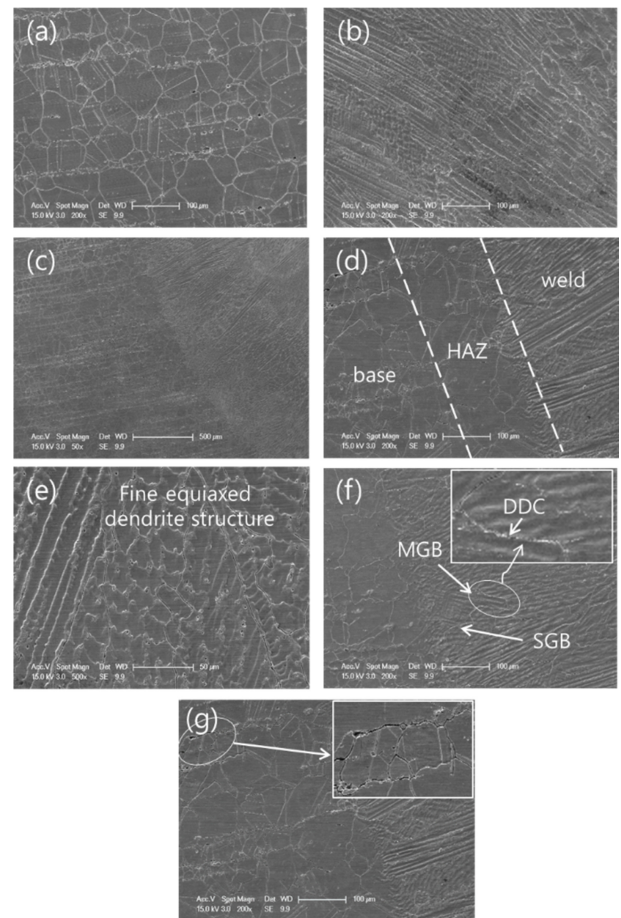


Fig. 5 Microstructure of Inconel 617 alloy weldment by SEM

분포는 열영향부에 형성된 용접계면 미세조직에서 멀어짐에 따라 냉각이 급격히 감소함을 나타내며, 미세조직의 불균일성은 경도 변화와 향후 크리프 시험에도 영향을 미칠 것이 예상된다.

Fig. 5는 (a) 모재, (b) 용접재 및 (c), (d) HAZ에 대한 주사전자 현미경 관찰결과를 보여준다. 모재와 용접 재의 미세조직은 용융선을 경계로 서로 다른 조직을 나타내었다. Figs. 5(d)와 7(f)는 Thyssen 617 Filler 용접재와 Inconel 617 모재의 계면 영역에 대한 미세조직을 나타내며, 서로 간에 혼합되지 않은 영역은 크게 관찰되지 않았다. 이러한 미세조직의 특성은 용융온도와 화학조성의 관점에서 617 Filler와 모재의 유사성에 기인할

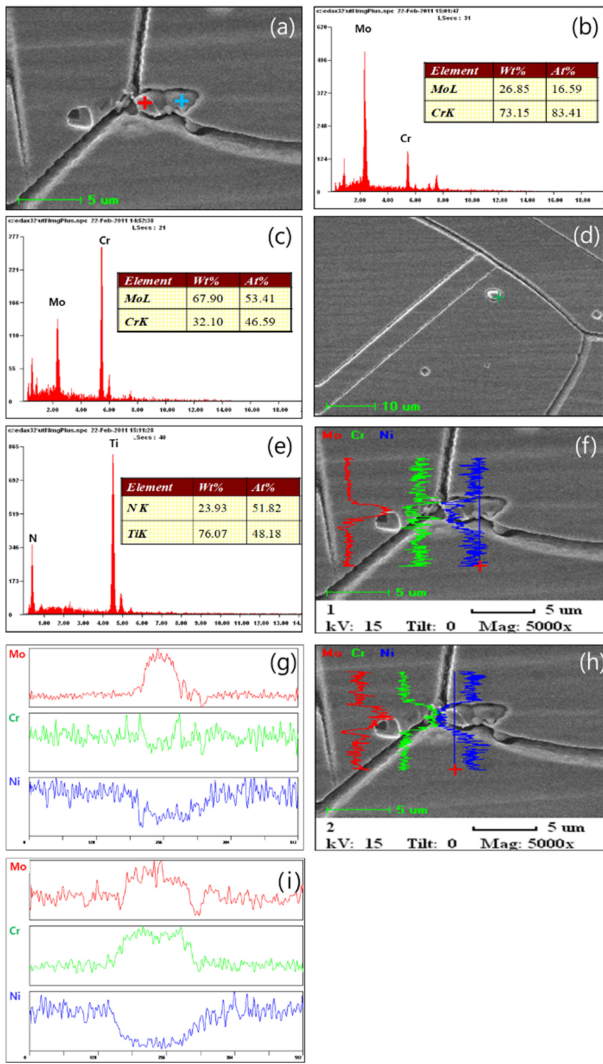


Fig. 6 Result of EDS analysis for the precipitate of 617 alloy

수 있다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 (a) 모재의 미세조직은 평균 입도가 50 μm인 오스테나이트계(γ) 기지와 일부 입계 및 입계 석출물을 보이는 반면, 용접재는 주상정(Dendrite) 조직을 가진 기지내에 분산된 석출물을 포함한 완전한 오스테나이트 조직을 나타낸다. Figs. 6(b)와 6(c)는 각각 6(a)에 표시된 석출물을 표적으로 삼은 빨간색 기호와 파란색 기호의 EDS Spot에 의한 성분분석 결과를 보여준다. Figs. 6(a), 6(b), 6(c)에 나타난 바와 같이, 일부 입계에서 약 5 μm의 평균 크기를 갖는 탄화물 석출물은 Cr-rich (M₂₃C₆), Mo-rich (M₆C) Carbides로 사료되며 결정립 내의 밝은 입자는 Figs. 6(d), 6(e)에 표시된 Ti(N)으로 판단된다 [14,15].

또한 입계를 가로지르는 EDS 라인스캔에 의한 성분 분석에서 스캔 프로파일의 결과는 Figs. 6(b) 및 6(c)와 유사하였다. 용접재에서 대부분의 미세 구조는 Figs. 5(b), 5(e) 및 7(d)와 같이 미세한 등축의 주상정으로 조사되었다. Thyssen 617 Filler 용접재는 다른 용접재에 비해 최대 극한 인장 강도와 총 연신율을 나타내는 것으로 보고되어있다[18]. 이는 Thyssen 617 Filler

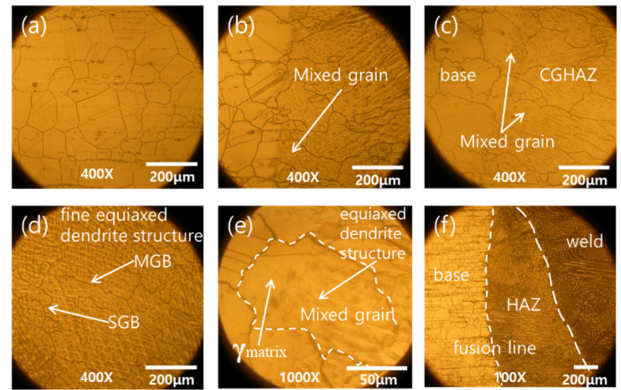


Fig. 7 Microstructure of Inconel 617 alloy weldment by OM

용접재의 미세한 주상정(Dendrite) 미세조직과 관련이 깊은 것으로 사료된다. 따라서 이러한 등축 주상정 미세조직은 크리프 저항에 기여하고 모재와는 다른 크리프 파단 거동을 나타낼 것으로 예상된다. 일반적으로 이러한 미세조직은 용접 공정 중 응고 균열을 줄이는 더 낮은 Mo의 편석 비율을 가지고 있는 것으로 보고되어있다[19,20].

Figs. 5(f)와 7(e)에서 볼 수 있듯이 MGB (Migrated Grain Boundary)가 적게 관찰되었으며 이는 SGB (Solidification Grain Boundary)와 Subgrain Boundary를 따라 석출물이 형성되었기 때문일 수 있다. 이러한 석출물과 SGB는 크리프 파괴 거동에 있어서 전위의 이동에 대한 피닝(Pinning) 효과를 불러올 수 있는 중요한 역할을 한 것으로 사료된다[21].

Figs. 7(b), 7(c)와 같이 용융선으로부터 약 0.2 mm까지는 모재와 용접재의 결정립이 혼합된 결정립조직과 조대한 결정립이 관찰되었다. Fig. 5(g)에 도시된 바와 같이, 기계적 성질에 악영향을 미칠 수 있는 균열 및 미세공극이 관찰되었다. 이러한 균열은 응고균열에 의해 발생하는 것으로 여겨진다[19]. Fig. 7(e)는 열영향부 지역의 혼합된 결정립을 고배율로 관찰한 결과를 나타낸다. 혼합된 결정립은 오스테나이트 매트릭스와 미세한 등축 덴드라이트 미세 구조로 나타나며. 이러한 미세조직의 천이 영역은 크리프 강도 불일치를 초래할 수는 원인이 될 수가 있다. 또한 균열, 미세공극과 같은 결함은 Fig. 3에서 기술한 SPC 열영향부(Cross Weld) 시편의 포함 여부에 관계없이 크리프 시험결과의 데이터의 산포에 영향을 미칠 것으로 판단된다.

3.2 Inconel 617용접부의 크리프거동

Fig. 8은 다양한 하중 조건에서 Inconel 617용접부의 모재, 용접재 및 열영향부 시편의 SPC 시험에서 얻은 변위-파단 시간 곡선을 나타낸다. SPC 곡선은 단축 크리프 곡선과 유사한 결과를 나타냈으며 Fig. 9는 모재, 용접재 및 열영향부에 대한 SPC 곡선의 비교 결과를 나타낸다. Figs. 9(a)와 9(b)와 같이 동일한 하중 조건에서 용접재에서 가장 긴 크리프 파단 수명이 나타났지만 열영향부는 가장 짧은 파단 수명과 가장 가파른 변위 기울기를 나타내었다. 용접재의 크리프 속도가 가장 느리게

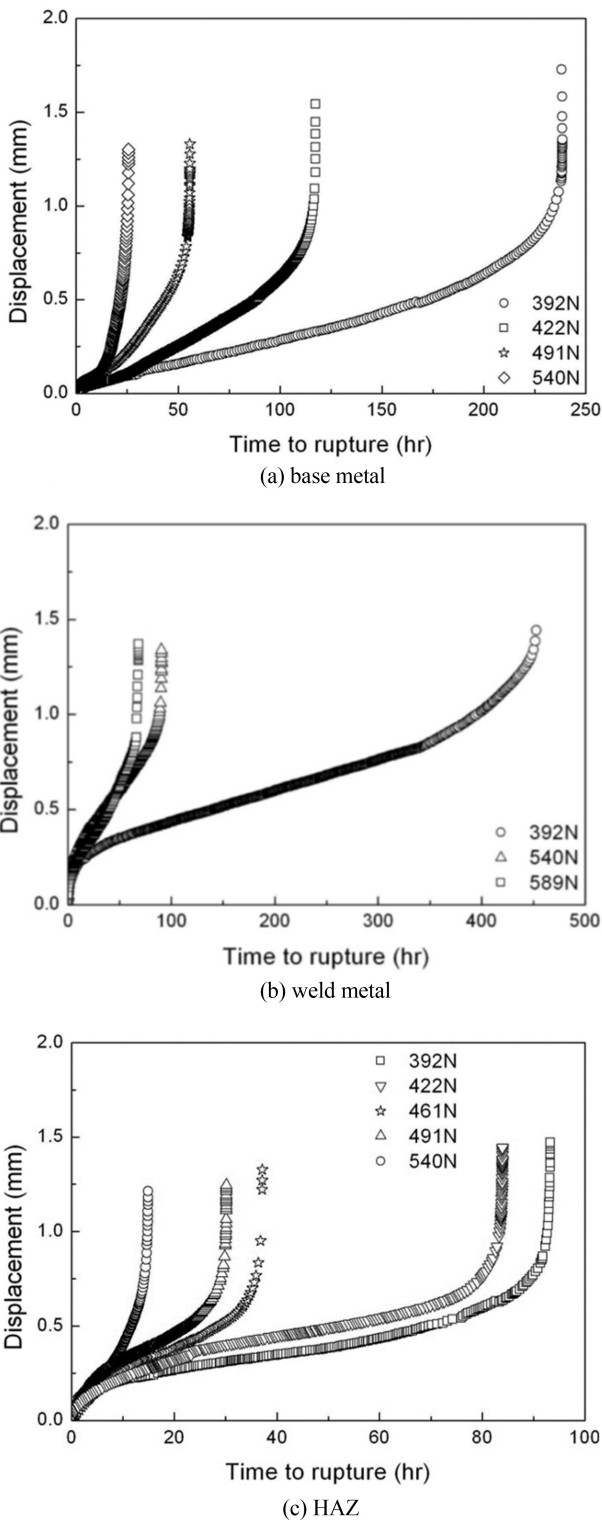


Fig. 8 SP creep curves of (a) Base metal (b) Weld metal (c) HAZ (Cross weld) at 700°C

나타나는 원인은 위에서 언급한 바와 같이, 용접재의 미세한 등축 주상정 미세조직이 크리프 강도와 파단 수명의 증가에 기여하였기 때문인 것으로 사료된다. 열영향부 시편의 파단 시간은 모재 및 용접재의 파단 시간보다 낮았으며 이러한 크리프 시험

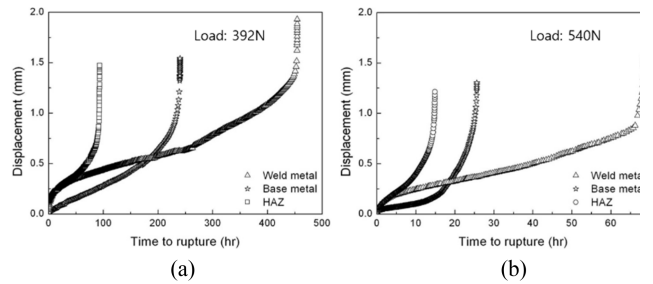


Fig. 9 Comparison results of SP creep curves of (a) Base metal (b) Weld metal (c) HAZ (cross weld) of Fig. 8 at same load condition

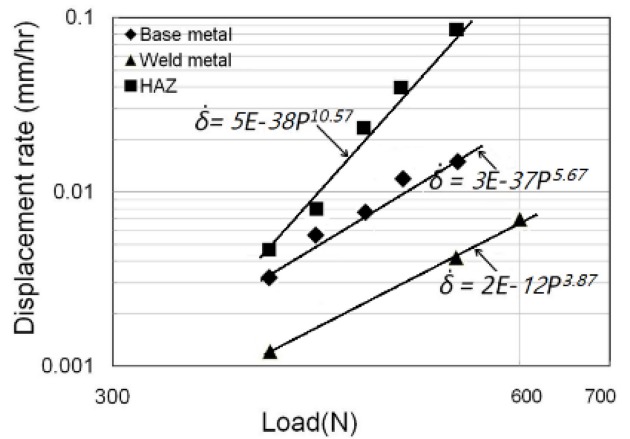


Fig. 10 Comparison results of SP minimum displacement rate of (a) Base metal (b) Weld metal (c) HAZ (Cross weld) at 700°C

결과는 시험 하중이 감소함에 따라 더욱 중요하게 나타났다. 이는 열영향부의 크리프 강도가 모재 및 용접재의 크리프 강도보다 낮음을 나타내는 결과이다. 폭이 0.2 mm인 열영향부의 크리프 변형에 주변 재료의 일부 기여가 있었음에 틀림없으며, 이러한 영향은 2.4 mm 볼 압입자에 의한 균열 시작 및 전파가 모두 열영향부지역 내에서 발생하는 것으로 관찰되었기 때문인 것으로 고려해볼 수 있다. 보고서에 따르면 열영향부에는 크리프 강도를 낮추는 3축 응력 상태가 존재하는 것으로 알려져 있다 [10].

일반적으로 열영향부의 크리프 변형은 상대적으로 크리프 강도가 높은 용접재와 모재에 의해 기계적으로 구속되며 열영향부에서 3축 응력 조건을 생성하게 된다. 선행 연구에서 우리는 일련의 단속된 크립 파단 시험을 통해 상대적으로 많은 수의 크리프 캐비티(Cavity)가 발견된 Type IV 영역에서 크립 파단의 넥킹이 발생했음을 입증한 바가 있다[5]. 크리프 공동(Voids)은 Prior Austenite Grain Boundaries에서 큰 $M_{23}C_6$ 탄화물의 계면에서 자주 관찰되었으며, 이 자리가 크리프 공동생성에 기여한 것으로 판단된다.

Fig. 10은 SPC 시험으로부터 얻은 617 Alloy 용접부의 각각의 재질별 시편의 최소 변위속도와 적용 하중 사이의 관계를 나타낸다. SPC 시험에서 최소변위속도 $\dot{\delta}$ (mm/hr)과 하중 P (N)

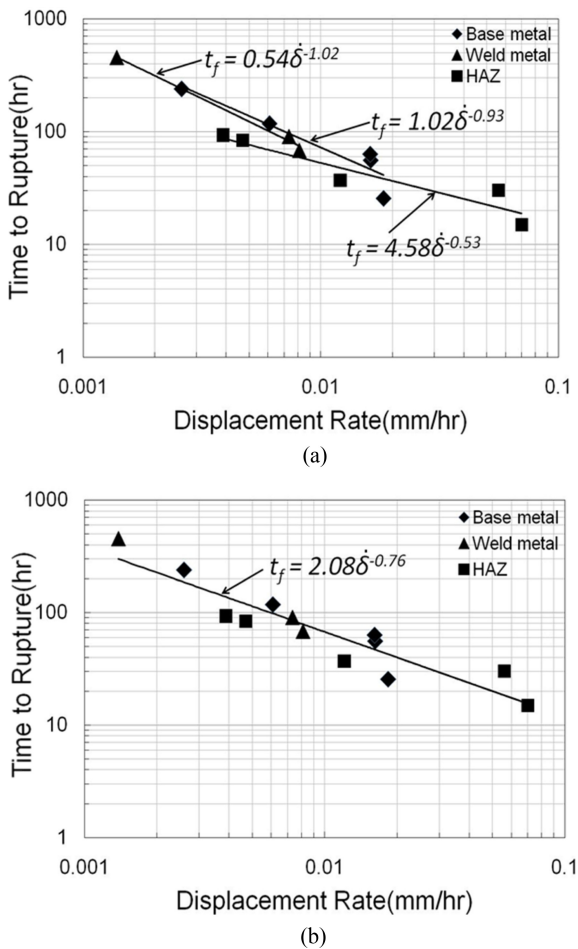


Fig. 11 Comparison results of relationship between displacement rate and rupture time at 700°C

사이의 관계는 방정식(1)로 설정할 수 있다.

$$\dot{\delta} = AP^n \tag{1}$$

여기서 A는 상수이고 n은 하중지수이다.

용접재와 모재의 하중 지수는 각각 3.87과 5.67인 반면, HAZ의 하중 지수는 10.57로 나타났다. 용접재와 모재의 변위속도는 매우 유사한 경향을 보였다.

용접재 시편은 최소 변위속도가 가장 낮았고, 열영향부는 가장 높은 최소 변위속도를 나타내었다. 열영향부 시편의 최소 변위속도는 모재 및 용접재보다 높게 나타났다. 이러한 결과는 더 높은 하중 조건에서 더 중요해지는데, 이는 비균질한 미세조직을 갖는 열영향부가 상대적으로 균일한 미세구조를 갖는 모재 및 용접재에 비해 하중조건에 매우 민감함을 의미한다. 이 결과는 SPC 시험 중 파괴 거동과 관련이 있는 것으로 판단된다.

용접재, 모재 및 열영향부에 대한 변위 속도와 파단 시간 사이의 관계는 Fig. 11에 나와 있으며 이는 일축 크리프 시험에 대한 Monkman-Grant 방정식의 Power Law 표현방식과 유사하다. 일반적으로 Monkman-Grant 방정식의 지수 값 m은 대부분의 금속 합금에서 1과 같다는 것이 알려져 있으며, 매우 좋은 선형

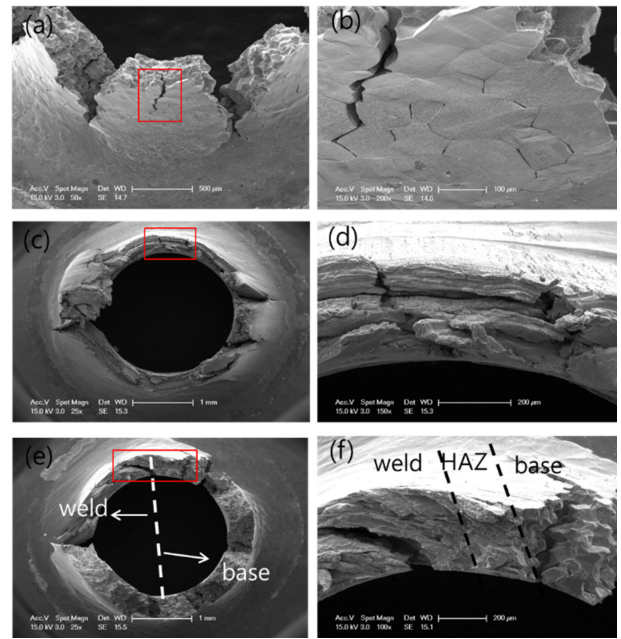


Fig. 12 Bottom fracture surface of SP creep rupture specimen (a) Base metal (c) Weld metal (e) HAZ at 392 N (T = 700°C)

관계를 나타내기 때문에 SPC 수명에 대해 Monkman-Grant 방정식의 형태와 유사한 방정식을 생성하려는 시도가 있어왔다. 그 결과 방정식은 다음 방정식으로 유도된다.

$$t_f = B\dot{\delta}^m \tag{2}$$

여기서 B는 상수이고 m은 속도지수 값을 나타낸다.

Fig. 11(a)에서 보는 바와 같이 모재, 용접재, 열영향부를 개별적으로 비교한 결과 용접재와 모재의 지수값은 각각 1.02와 0.93으로 거의 유사한 반면, 열영향부는 0.53으로 나타났다. 그러나 Fig. 11(a)의 모든 데이터를 포함하는 결과는 Fig. 11(b)와 같이 양호한 선형관계를 보여주며 속도지수값은 0.76으로 나타났다. 따라서 이러한 결과는 국부적인 SPC 시험방법의 타당성과 가능성을 반영한 것으로 사료된다.

3.3 Inconel 617합금 용접부의 크리프 파괴거동

각 SPC 파단 시편의 파단면 관찰을 통해 이에 대한 파괴양상이 밝혀졌다. Fig. 12는 392 N의 하중에서 용접부의 각 미세조직별 SPC 시험시편의 파단면을 보여준다. Fig. 12(a) 모재에서 보는 바와 같이 크리프 취성 입계 파괴 모드가 관찰되었으며 중앙의 파단구멍을 중심으로 방사 방향의 여러 개의 취성 가지 균열이 주로 형성되어있다. Figs. 12(b)는 12(a)의 균열부위를 고배율로 관찰한 것으로, Inconel 617 합금의 크리프 파단부에서 전형적으로 관찰되는 결정립계를 따라서 균열이 전파되는 크리프 균열이 관찰되었으나, 크라프 공동이나 연성 덩어리는 관찰되지 않았다. 그러나 용접재의 경우 파단양상은 Fig. 12(c)와 같이 거의 연성파괴를 보였고 약간의 취성파괴가 나타났다.

그러나 모재와 같이 방사방향의 취성가지균열은 거의 관찰되지

않았다. Figs. 12(d)는 12(c)의 고배율 관찰결과로서 MGB와 SGB에서 파단이 발생한 것을 알 수 있다. Fig. 12(e)는 HAZ 시편의 파단면을 보여준다. Fig. 12(e)와 같이 모재와 용접재의 파단양상이 혼합된 상태로 용접계면부에서 관찰되었다. Figs. 12(f)는 12(e)의 고배율 관찰결과로 용접부에서 국부적으로 가장 약한 부분인 열영향부에서 파단이 발생한 것을 알 수 있다. 이 결과로부터 열영향부의 파단거동이 용접재와 모재의 기계적 강도차이와 불균일한 미세조직으로 인한 금속조직학적 거동에 영향을 받고 있음으로 조사되었다.

4. 결론

SPC 시험에 의한 Inconel 617 합금 용접부의 국부적 크리프 거동으로부터 다음과 같은 결론을 얻었다. 열영향부 지역은 크리프 변위속도가 가장 빠르고 파단수명이 가장 짧아 용접부 전체에서 가장 취약한 부분인것으로 조사되었다. 금속조직학적 조사 및 파괴 양상 관찰 결과에서 용접부 열영향부의 미세조직의 천이영역으로 인하여 크리프 초기 파손으로 이어지는 크리프 강도 불일치를 초래할 수 있음을 알 수가 있었다. 그러나 모재 및 용접재 시편에서는 파단 양상이 취성이기는 하지만 상대적으로 크리프 수명이 길게 나타났다. 최종적으로, Inconel 617 합금 용접부에 대해 제안된 SPC 크리프 시험방법은 용접부의 다양한 미세조직에 대한 크리프 특성을 도출하고 국부적 SPC 시험방법의 타당성과 가능성을 제공할 수 있는 것으로 판단된다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 연구는 오산대학교 2021년 교내학술연구지원에 의하여 이루어졌습니다.

REFERENCES

1. Parker, J. D., (1994), Creep behaviour of miniature disc specimens of low alloy steel, PVP, 279, 167-172.
2. Ule, B., Sustar, T., Rodic, T., Dobes, F., Milicka, K., Bicego, V., Tettamanti, S., Maile, K., Schwarzkopf, C., Whelan, M. P., (1999), Small punch test method assessment for the determination of the residual creep life of service exposed components, Technology, Law and Insurance, 4(3-4), 283-293.
3. Yun, G-B., Park, T-G., Sim, S-H., Jeong, I-S., (2001), Assessment of creep properties of 9Cr steel using small punch creep testing, Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, 25(9), 1493-1500.
4. Kim, B., Lim, B., Ki, D., (2006), Creep behavior and life evaluation of aged P92 steel, International Journal of Modern

- Physics B, 20(25n27), 4231-4236.
5. Kameda, J., Bloomer, T., Sugita, Y., Ito, A., Sakurai, S., (1997), Mechanical properties of aluminized CoCrAlY coatings in advanced gas turbine blades, Materials Science and Engineering: A, 234, 489-492.
6. Tettamanti, S., Crudeli, R., (1998), Small punch creep test: A promising methodology for high temperature plant components life evaluation, BALTICA ? Plant Maintenance for Managing Life & Performance, 501-509.
7. Wachter, O., Zabelt, K., Ennis, P., Helmrich, A., Bohme, A., (1998), The design, manufacture and installation of a P92 header, Forschungszentrum Juelich Schriften Reihe Energietechnik, 5(1), 351-360.
8. Hyde, T., Stoyanov, M., Sun, W., Hyde, C. J., (2010), On the interpretation of results from small punch creep tests, The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 45(3), 141-164.
9. Hyde, T., Sun, W., Williams, J., (2007), Requirements for and use of miniature test specimens to provide mechanical and creep properties of materials: A review, International Materials Reviews, 52(4), 213-255.
10. Sturm, R., Jenko, M., Ule, B., (2004), Accelerated creep tests of all-weldes metals, Materiali in Tehnologije, 38, 295-298.
11. Komazaki, S-I., Sugimoto, T., Hasegawa, Y., Kohno, Y., (2007), Damage evaluation of a welded joint in a long-term service-exposed boiler by using a small punch creep test, ISIJ International, 47(8), 1228-1233.
12. Kim, B., Lim, B., (2008), Local creep evaluation of P92 steel weldment by small punch creep test, Acta Mechanica Solida Sinica, 21(4), 312-317.
13. Podro, T. L. T. V., Bata, I. V. Z. U. M., (2006), Small-punch testing of a weld's heat-affected zones, Materiali in Tehnologije, 40(2), 49-54.
14. Mankins, W., Hosier, J., Bassford, T., (1974), Microstructure and phase stability of Inconel alloy 617, Metallurgical and Materials Transactions B, 5, 2579-2590.
15. Totemeier, T., Tian, H., Clark, D., Simpson, J., (2005), Microstructure and strength characteristics of Alloy 617 welds, (Report No. INL/EXT-05-00488), Idaho National Lab.(INL), Idaho Falls, ID (United States).
16. Hosier, J., Tillack, D., (1972), INCONEL alloy 617: A new high-temperature alloy, Metals Eng. Quart, 12(3), 51-55.
17. Ren, W., Swindeman, R., (2009), A review paper on aging effects in Alloy 617 for Gen IV Nuclear Reactor applications, Journal of Pressure Vessel Technology, 131(2), 024002.
18. Böhler Welding, http://www.boehlerwelding.ru/files/cat/full_catalog.pdf
19. Naffakh, H., Shamanian, M., Ashrafizadeh, F., (2008), Weldability in dissimilar welds between Type 310 austenitic stainless steel and Alloy 657, Journal of Materials Science, 43,

5300-5304.

20. Dehmlaei, R., Shamanian, M., Kermanpur, A., (2008), Microstructural characterization of dissimilar welds between alloy 800 and HP heat-resistant steel, *Materials Characterization*, 59(10), 1447-1454.
21. Lippold, J. C., Kotecki, D. J., (2005), *Welding metallurgy and weldability of stainless steels*, Wiley.



Bumjoon Kim

Professor in the Department of Mechanical Engineering, Osan University. His research interest is mechanical design and fracture mechanic.

E-mail: kultra@osan.ac.kr

• 특집 • 설계 및 재료의 산업계 응용

정밀 패턴 신발금형 신속제조를 위한 적층 제조 특화설계

Additive Manufacturing for Rapid and Precise Pattern Formation in Shoes Mold

이석록¹, 김은아², 김예림², 김달균³, 김선주³, 원순호⁴, 이학성^{2, #}
Seok-Rok Lee¹, Eun-Ah Kim², Ye-Rim Kim², Dalgyun Kim³, Sunjoo Kim³, Soonho Won⁴, and Hak-Sung Lee^{2, #}

¹ 아마드 기술연구소 (Research Center, Amid Inc.)

² 한국재료연구원 3D 프린팅재료연구실 (Department of 3D Printing Materials, Korea Institute of Materials Science)

³ 항도공업 (Hangodo Industry Inc.)

⁴ 한국재료연구원 재료특성평가실 (Department of Materials Testing and Evaluation, Korea Institute of Materials Science)

Corresponding Author / E-mail: hslee@kims.re.kr, TEL: +82-55-280-3353

ORCID: 0000-0002-7741-0812

KEYWORDS: Additive manufacturing (적층 제조), Design for additive manufacturing (적층 제조 특화설계), Shoes mold (신발금형), Non-destructive test (비파괴검사), AM simulation (적층 제조 시뮬레이션)

In this study, the design for additive manufacturing of shoe molds with complex and precise patterns was performed to achieve rapid prototyping. Low alloy steels such as AISI4340 and SAE1524 were selected to make shoe molds to apply to the conventional chemical etching process. A lattice-oriented design and optimization of toolpath was tested to reduce the processing time. A reduction of 60% in processing time and pattern precision of 0.3 mm was been achieved. Moreover, to improve the reliability of pattern formation, single-layer image analysis with computer vision and machine learning was developed and non-destructive analysis by X-ray CT was been performed. It was found that the quality of shoe molds can be decreased with a single defective layer.

Manuscript received: December 31, 2022 / Revised: February 1, 2023 / Accepted: February 8, 2023

1. 서론

금형에 생산성과 제작시간을 단축시키기 위해서 적층 제조 기술을 이용하는 방법은 최근 빠르게 확산되고 있다[1-5]. 특히, 타이어금형, 신발금형과 같이 소비를 예측하여 주기적으로 생산되는 시장에서 적층 제조 방법을 통해서 금형의 제조기간을 획기적으로 단축시켜 수요 맞춤형 제작이 가능한 기술에 대한 요구가 글로벌 브랜드를 중심으로 확산되고 있다. 접지력 향상, 소음 감소, 디자인 요구 등으로 절삭가공, 주조 등 기존 제작 방법으로는 시간과 비용이 많이 들거나 제조가 불가능한 복잡한 패턴 및 형상에 대한 요구가 빠르게 증가하고 있어 신발금형 제조

기술에 고속 정밀 패턴제조를 위한 3D 프린팅 수요가 증가하고 있다.

최근 적층 제조 설계 기술은 격자구조를 통한 경량화 및 제조시간의 단축을 통해서 생산성 및 비용을 개선할 수 있었다[6-9]. 외벽의 두께와 격자의 형상, 크기 등에 대해서는 체계적으로 연구되어 왔다[6]. 또한, 금형과 같은 대형 제작물을 제조함에 있어 적층경로를 제어하면 제작시간 및 표면품질 향상에 도움이 된다[10-11].

기존의 신발금형 제조 방법으로는 한 달 이상의 리드타임이 필요하였으나, 금속 적층 제조 기술을 적용하면 1주일 내에 완성된 금형을 제작할 수 있고 기존 공정 대비 부산물이 작아

제품 디자인 보안의 측면에서도 이점이 크다. 하지만, 높은 제조 가격과 공정 호환성 문제로 인해서 산업확산에 어려움이 있다.

특히, 대표적인 Fe계 적층 제조 소재인 SUS316L은 부식이 되지 않아 금형 제조 시 정밀한 패턴이식이 불가능하여 미세한 수리 및 변경이 잦은 신발 제조 환경에 적용하기 어렵다. 따라서, 기존 공정과 호환될 수 있는 소재를 선정하고 이에 대한 적층 제조 데이터 공정 변수 검토 및 정밀 패턴에서 발생할 수 있는 결함에 대한 신뢰성 확보가 중요하다. 또한, 제조시간과 비용을 최소화하기 위해서 결함을 사전에 예측할 수 있는 시뮬레이션 기술의 도입과 X-ray CT 등을 이용해서 금형 내의 결함을 조기에 발견하는 기술을 살펴보고자 한다.

이러한 기술을 바탕으로 제작된 신발금형에 대해서 현장에서 정밀 패턴 아웃솔 제품의 출력 테스트를 진행하였다.

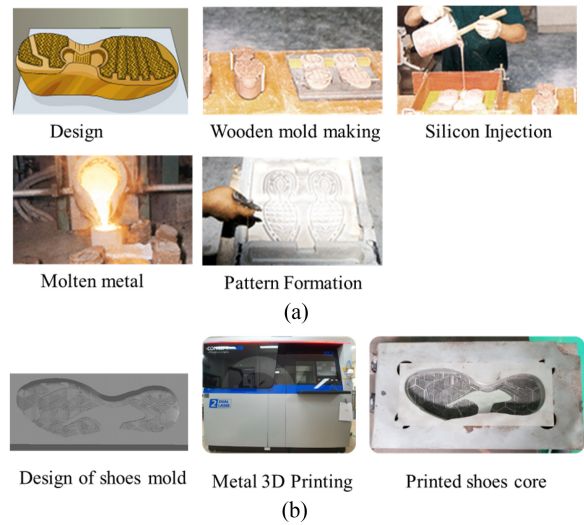


Fig. 1 Conventional and additive manufacturing of outsole shoes mold

2. 적층 제조 특화 신발금형 코어 설계 및 제작

2.1 신발금형의 제작 방법의 변화

신발금형은 제품의 형태와 용도에 따라서 다양한 방법으로 제작되고 있다. 기존의 신발 아웃솔 금형 제조 공정을 Fig. 1(a)에 요약하여 표시하였다. 기존 주조를 통한 신발금형 제조 공정은 4-6주가 소요되었고, 제품 디자인 보안을 위해 목형, 석고상 주물 등을 별도로 보관해야 하는 등 제조 시간 및 관리에 어려움이 있다. 하지만, 금속 적층 제조 방법을 이용하면 모델링을 바로 출력할 수 있어 제작 기간을 획기적으로 단축할 수 있다. 265 mm의 성인용 일반적인 신발금형의 경우에 적층 제조 시 3일 이내에 완성할 수 있다.

특히, 주조로 구현하기 힘든 Fig 2와 같이 복잡한 형태의 패턴을 금속 3D 프린팅을 이용하면 출력할 수 있고, 디지털 패턴 기술의 발달에 따라 종래의 설계 파일에서는 2 GB 이상의 대용량으로 처리하여야 했으나, 패턴 전용 소프트웨어를 사용할 경우에는 작은 용량으로 복잡한 형상 구현이 가능하여 소프트웨어의 발전이 3D프린팅 복잡형상 패턴 제조 기술 혁신을 주도하고 있다[12].

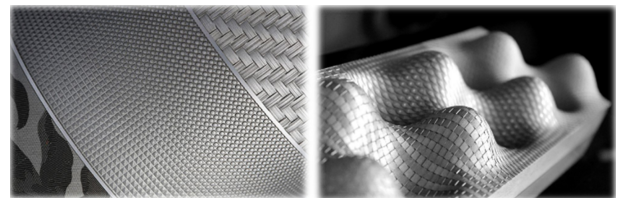


Fig. 2 Examples of digital patterns in metal 3D printing

2.2 신발금형의 적층 제조 특화 설계

신발금형은 금속을 가공하는 고강도 금형 대비 하중이 크지 않아 외각부분에 벽을 쌓고, 내부를 격자 구조를 통해서 경량화를 진행하여 제조 시간 및 재료 절감을 할 수 있다. 신발금형의 격자구조를 적용할 경우 설계 원본에 있는 복잡한 패턴으로 인해서 원본을 그대로 처리할 경우 어려움이 있어, 재구조화 기법 등을 통해서 격자구조화에 불필요한 패턴을 간소화하면, 격자구조 설계를 용이하게 수행할 수 있다. Fig. 3에 신발금형을 격자구조화하기 위한 방법을 Autodesk사의 Netfabb Ultimate를 통해서 활용한 방법을 소개하였다.

격자 구조를 통한 경량화를 50% 이상 달성할 수 있으며, 외벽의 두께와 프레스 하중의 관계를 Autodesk Netfabb Ultimate을

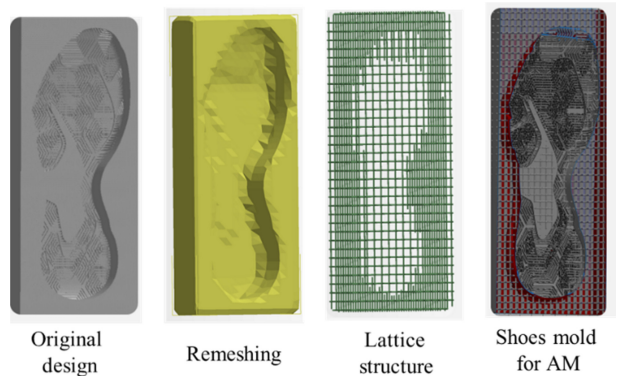


Fig. 3 The process of design for additive manufacturing in making shoes mold

통해서 시뮬레이션해 본 결과 5 mm 정도의 외벽 두께 및 격자 크기를 최적화할 수 있었다. 5 mm 두께, X형 타입의 격자구조(5 mm 넓이로 배치, 1 mm 격자 두께)를 이용하여 56% 경량화한 신발금형 코어를 설계하였다. 격자의 배치 및 두께에 대해서는 적층 제조 가능성과 품질 확인을 통해서 최적화하였으며, 분말 제거를 위한 홀 제작 등을 고려해서 적층 제조 결함이 발생하지 않도록 설계하였다.

2.3 부식 공정 호환 가능 적층 제조 소재 공정 개발

복잡 패턴을 형성하기 위해서는 선택적인 화학 부식을 통해

Table 1 Chemical compositions of AISI4340 and SAE1524 powder

| | Val | Mn | Ni | C | Cr | Mo | Si | O |
|----------|-----|------|------|------|------|------|------|------|
| AISI4340 | Fe | 0.77 | 1.95 | 0.41 | 0.81 | 0.24 | 0.27 | 0.06 |
| SAE1524 | Fe | 1.38 | - | 0.21 | 0.01 | - | - | 0.08 |

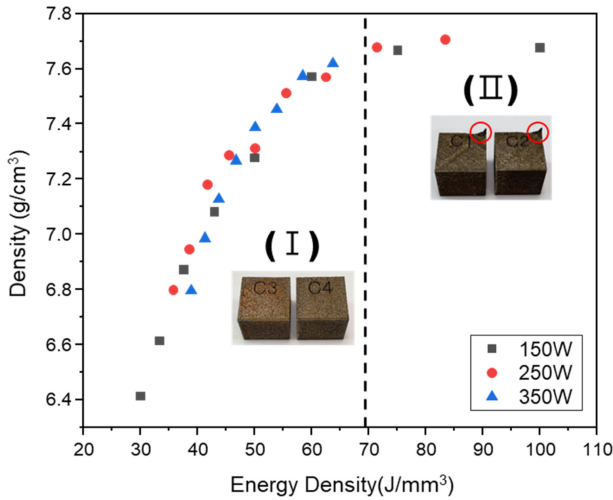


Fig. 4 Density of specimens according to energy density in AISI4340

서 패션 제조 산업에서 필요한 패턴을 이식할 수 있다. 하지만, 적층 제조 공정에 많이 활용되고 있는 SUS316L, 마레이징강 등은 내부식성이 높아 기존의 신발 제조 산업에서 사용하던 부식액으로는 패턴을 형성할 수 없어, 신발 금형 제조 분야에서 신기술 적용에 어려움이 있다. 이를 위해서 본 연구에서는 부식이 될 수 있는 Low Alloy Steel을 중심으로 검토하여 분말 제조가 가능한 AISI4340, SAE1524 소재를 선정하였다. 두 소재의 화학조성은 Table 1에 정리하였다.

신발금형을 요구조건인 밀도 95% 이상, 경도 HRC 35 이상인 점을 고려하여 공정 조건별로 밀도와 경도를 측정하여 두 소재에 대한 적층 제조 데이터 베이스를 구축하였다. Fig. 4와 같이 AISI4340의 경우에는 에너지 밀도가 낮은 경우에는 직육면체 형상이 정상적으로 조형이 되지만, 과도한 에너지를 주입한 경우에는 열변형으로 인해서 육면체에서 변형이 발생하였다. 금형 제조 시간을 단축하기 위해서는 높은 파워에서 빠른 속도로 조형할 필요가 있으며, 350 W, 2,300 mm/sec의 공정 조건의 경우 97.2%의 상대밀도, 46.2 HRC 경도로 우수한 물성을 보였다. 동일한 방법으로 SAE1524 소재에 대해서도 공정조건 연구를 수행하였으며, 350 W, 1,200 mm/sec의 경우 99.3%의 상대밀도, 35.6 HRC 경도를 나타내었다. 탄소함량 및 합금원소의 함량이 상대적으로 적은 SAE1524가 AISI4340 대비 낮은 경도를 가지지만, 99% 이상의 고밀도 적층 제조가 가능하므로, 정밀한 패턴의 신발금형을 조형할 때는 SAE1524 소재를 사용하고, 고경도의 신발금형을 빠르게 제작하기 위해서는 AISI4340이 추천될 수 있다. 이처럼 신발금형의 형상 및 요구조건에 따라서 소재를 선정할 수 있다.

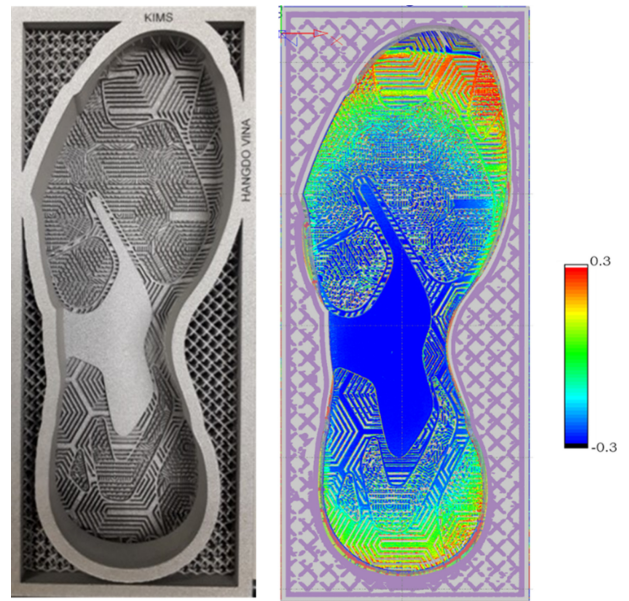


Fig. 5 Additive manufactured shoes mold core and distortion map of 3D scanned image

2.4 신발금형의 제작과 평가

설계한 신발금형을 PBF 방식 3D프린터(Concept Laser 사, M2 장비)를 이용하여 제작하였다. 제작된 금형에서 치수 및 패턴이 잘 형성되었는지를 확인하기 위해서 3차원 스캐너를 이용하여 비교한 결과 하부 평면 부위의 패턴에 대해서는 0.1 mm 이내의 정밀도를 가지고 신발 앞쪽 부위에서는 0.3 mm 이내의 위치 정밀도를 가진다는 것으로 Fig. 5에서 확인하였다. 종래 신발금형 제조의 패턴 허용 공차가 0.5 mm 이내이므로 제조된 신발금형의 치수 정밀도를 확인하였다. 추가로 고무를 이용하여 아웃솔 시제품을 제작하여 제작된 제품의 치수 및 품질 검사를 진행한 결과, 제품 정밀도는 만족하였으나, 기존 금형 대비 표면 조도가 저하되는 등 적층 제조된 금형의 후처리 공정은 추가로 개선할 필요가 있다.

3. 적층 제조 시뮬레이션 및 평가 기술 개발

3.1 신발금형 적층 제조 실패 사례 및 시뮬레이션

신발금형의 적층 제조 중 외곽부분에서 Fig. 6(a)와 같이 균열이 발생하는 것을 확인하였다. 적층 제조 중에 생긴 응력으로 인해서 외벽에 균열이 생긴 것으로 판단된다. 균열의 원인을 파악하고, 이를 해결하기 위해서 Autodesk Netfabb 시뮬레이션 소프트웨어를 이용하여 응력 및 변형해석을 수행하였다. 적층 제조 과정 중 외벽 부분에 응력이 누적되며 빌드 플레이트로부터 3 mm 되는 지점에 열응력이 가장 크게 발생하는 것을 확인하였으며, 제조 중 발생한 위치(3.8 mm)와 연관성이 있음을 확인하였다. 본 연구에서는 외곽 부위에 응력이 집중되지 않도록 라운드 처리하여 외곽 크랙이 없는 금형을 제작할 수 있었다. 적층

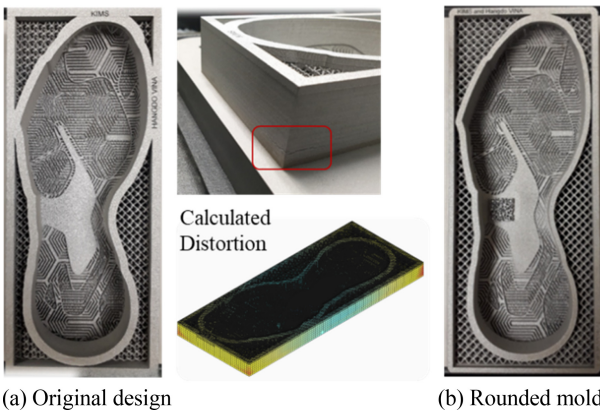


Fig. 6 A crack in the side wall in (a) Original mold and (b) Design manipulation for avoid stress concentration

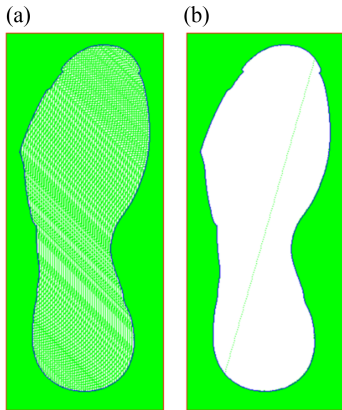


Fig. 7 Toolpath optimization of shoes mold which significantly shorten laser moving time

제조 중 발생할 수 있는 결함을 시뮬레이션을 통해서 예측할 수 있으며, 향후 제조 성공률을 높이고 신뢰성 확보에 기여할 것이다.

3.2 적층경로 최적화를 통한 제조 속도 향상

금형 제작 속도 및 품질을 향상시킬 수 있는 적층경로 최적화를 고려했다. 절삭가공 공정에서 가공경로 최적화에 대해서는 최적화 알고리즘이 정립되어 있지만, 적층 제조 분야에 있어서는 장비에서 단순히 레이저 방향과 Island 패턴 등의 기본 적층경로 정책을 지원하고 있지만, 최적화를 위해서 Advanced Toolpath Utility (ATU)를 이용하여 금형 상부의 적층경로 최적화를 고려했다. Fig. 7에는 최적화 수행전에는 비어 있는 공간에도 레이저 이동경로가 생성되어 208초의 조형 시간이 필요한 반면, 최적화 후에는 94초로 50% 이상 단면 제조 시간을 단축할 수 있다.

3.3 비파괴 검사를 통한 신발금형 품질 관리 기술

제조된 신발금형의 내부 결함 등을 살펴보기 위하여 X-ray CT를 통해 내부 검사를 수행하였다. Fig. 8과 같이 복잡한 내부 격자구조를 포함한 3차원 적층 제조물을 검사할 수 있다. X-ray

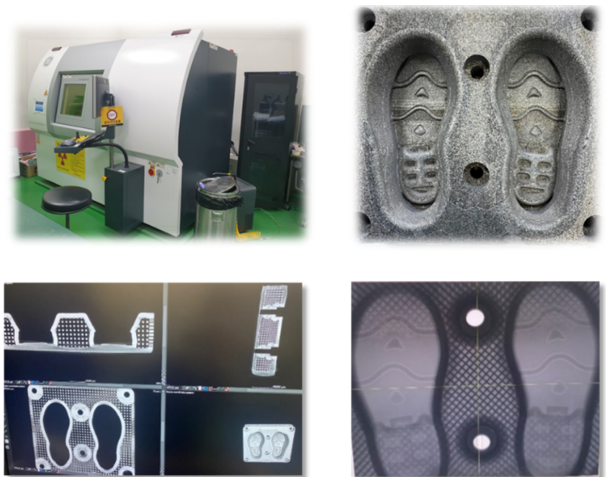


Fig. 8 X-ray CT analysis for additive manufactured shoes mold to find defects inside

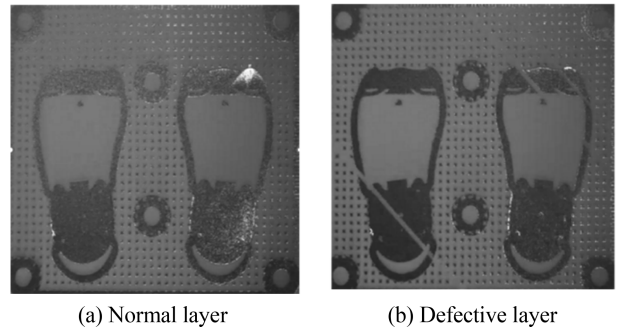


Fig. 9 Single layer image obtained by QM powder: (a) Normal and (b) Defective layer

금속 투과능의 한계로 인해 Fe계 소재에는 10 mm 이상의 두께를 투과할 수 없어, 기존의 절삭가공으로 제작된 금형을 검사하는 것은 어렵지만, 격자구조로 경량화 된 금형의 검사는 가능하다. 격자구조 및 패턴이 정상적으로 제조된 것이 확인되었으며, 신발 외벽의 일부분에서 표면저하를 유발하는 미세한 결함이 관찰되었다. 하지만, 이러한 결함의 원인을 확인할 수 없어 적층 제조 중의 단층 이미지를 수집하고 분석하는 방법을 통해서 미세결함의 원인을 살펴보고자 한다.

3.4 기계학습 기반 단면 이미지 분석 기술

단면 이미지 도포 검사 모듈(GE 사의 QM Powder)을 이용하여 적층 제조 단층 이미지를 실시간으로 수집하고 설계 파일과 비교 분석할 수 있는 소프트웨어를 개발하였다. 레이저 조형 이미지에 대해서 위치를 보정한 후 설계파일 비교하여 오류 출력 여부에 대한 검사를 수행한 결과 대부분 정상 출력되었으나 Fig. 9와 같이 연속된 층에서 정상적인 조형이 되는 층과 사선 방향으로 레이저가 조형되지 않은 부분 층이 제조 중 9회 발생한 것을 확인하였다. 이처럼 적층 제조 공정 중에는 특정 층이 조형이 되지 않으면, 표면 결함이 발생할 수 있으며, X-ray CT

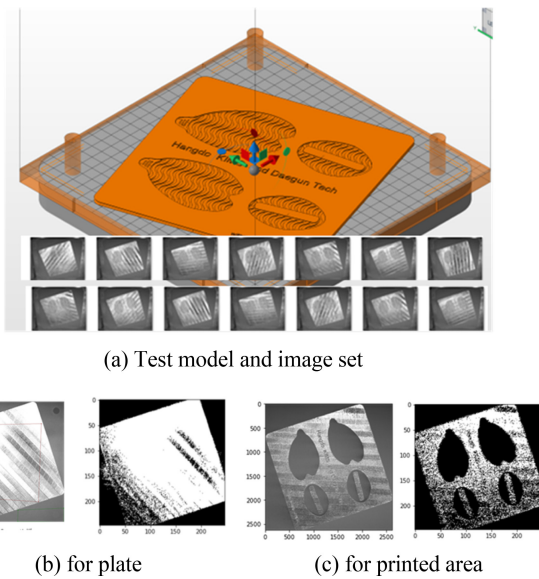


Fig. 10 Machine learning software development to classify pristine and printed area

검사 중 발견한 결함의 위치와 비교한 결과 연관성이 있음을 확인하였다.

적층 제조 품질 신뢰성을 향상시키기 위해서는 최종 결과물의 비교 뿐만 아니라 수집되는 단층 이미지에서 자동으로 오류를 검출할 수 있는 기술 개발이 필요하다. 신발금형 제품에 대해서 플레이트와 금형부위로 구분하여 플레이트 부위 정보를 기준으로 조형된 부분과 분말 도포 부위를 자동 분류하는 것에 성공하였다. 본 프로그램 제작을 위해서 Tensorflow에 32 × 32 이미지 단위로 CNN 모델을 통해서 기초로 학습시킨 후 수집된 금형 이미지에 적용하여 신발조형 부분과 설계도면을 검사하는 소프트웨어를 개발하였다. 주요 개발 내용을 Fig. 10에 표시하였다.

신발금형 산업에의 적층 제조 기술 확산을 위해서는 제조 속도 및 품질 신뢰성을 향상시켜야 한다. 본 연구에서는 기존의 신발제조의 부식을 통한 패턴 제조 공정과 호환될 수 있는 AISI4340, SAE1524 소재에 대해서 적층 제조 공정 조건을 확보하고, 신발금형 3종에 대해서 제작 테스트하였다. 금형 외벽에 응력집중으로 인해 발생하는 결함을 해결하기 위해서 설계를 개선하고, 적층경로 최적화를 통해 제조 시간 단축할 수 있었다. 금형 제조 시 단층 이미지 수집과 비파괴 검사를 통해서 발견된 표면 조도 결함과 연관성을 살펴보았다.

기존 방법으로 제작까지 평균 한 달 이상의 시간이 걸리는 신발금형을 금속 3D 프린팅 기술을 활용하여 3일 이내로 제작할 수 있고, 기계 가공이 불가능한 금형 설계 수요가 확산되고 있어 향후 신발금형 생산 현장에 보급될 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 적층 제조 특화 설계기법을 이용하여 신발금형

코어의 경량화 설계하여 기존 대비 고속으로 0.3 mm 이내의 정밀한 패턴을 제작할 수 있음을 확인하였다. 주요 내용을 요약하면 다음과 같다.

1. 기존 부식 공정과의 호환성을 위해서 AISI4340과 SAE1524에 대한 신발금형 품질 조건(상대 밀도 95% 이상, 경도 HRC 35 이상)을 만족하는 공정조건을 도출하였다.

2. 고속제작을 위해 격자구조 활용 56% 이상 경량화한 신발금형을 제작하여 0.3 mm 이내의 복잡한 정밀패턴 아웃솔 제품 제작에 성공하였다.

3. 적층 제조 중 정밀도 및 품질 저하의 원인이 되는 결함 검사를 위해 X-ray CT를 이용한 비파괴 검사와 적층 단면 이미지 수집 및 분석 기술을 적용하였다.

본 연구결과로부터 경량화 및 적층경로 최적화 등의 적층 제조 특화설계를 이용하여 기존 제작 방법 대비 80% 이상 신발금형 납기를 단축할 수 있었다. 또한, 단층 이미지 수집 및 검사를 통해서 정밀 패턴의 형성 여부를 확인할 수 있으며, 기존의 제작 방법으로 만들 수 없는 복잡 자유 형상의 제품의 출시 등이 예정되어 있어, 적층 제조 공정은 신발금형 생산 현장에 필수적인 기술이 될 것이다.

ACKNOWLEDGEMENT

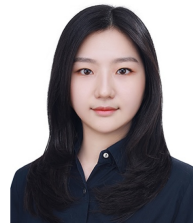
본 논문은 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국재료연구원(PNK8720, PNK7940)의 지원을 받아 수행한 연구의 결과입니다.

REFERENCES

1. Kumke, M., Watschke, H., Vietor, T., (2016), A new methodological framework for design for additive manufacturing, *Virtual and Physical Prototyping*, 11(1), 3-19.
2. Morrow, W., Qi, H., Kim, I., Mazumder, J., Skerlos, S., (2007), Environmental aspects of laser-based and conventional tool and die manufacturing, *Journal of Cleaner Production*, 15(10), 932-943.
3. Wohlers Report 2020, 3D printing and additive manufacturing. <https://wohlersassociates.com/product/wohlers-report-2020/>
4. Gao, W., Zhang, Y., Ramanujan, D., Ramani, K., Chen, Y., Williams, C. B., Wang, C. C., Shin, Y. C., Zhang, S., Zavattieri, P. D., (2015), The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering, *Computer-Aided Design*, 69, 65-89.
5. Modern Machine Shop Magazine, Trade-offs with AM. <https://www.mmsonline.com/columns/trade-offs-with-am>
6. Lee, H., Jung, M., Kim, E., Won, S., Chun, D., Ha, H., (2021), Additive manufacturing of a release agent injection manifold for

hot forging, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 38(9), 675-682.

7. Hussein, A., Hao, L., Yan, C., Everson, R., Young, P., (2013), Advanced lattice support structures for metal additive manufacturing, Journal of Materials Processing Technology, 213(7), 1019-1026.
8. Nagesha, B., Dhinakaran, V., Shree, M. V., Kumar, K. M., Chalawadi, D., Sathish, T., (2020), Review on characterization and impacts of the lattice structure in additive manufacturing, Materials Today: Proceedings, 21, 916-919.
9. Seharng, A., Azman, A. H., Abdullah, S., (2020), A review on integration of lightweight gradient lattice structures in additive manufacturing parts, Advances in Mechanical Engineering, 12(6), 1687814020916951.
10. Liu, W., Chen, L., Mai, G., Song, L., (2020), Toolpath planning for additive manufacturing using sliced model decomposition and metaheuristic algorithms, Advances in Engineering Software, 149, 102906.
11. Bernhard, R., Neef, P., Wiche, H., Hoff, C., Hermsdorf, J., Kaierle, S., Wesling, V., (2020), Defect detection in additive manufacturing via a toolpath overlaid melt-pool-temperature tomography, Journal of Laser Applications, 32, 022055.
12. Materialise, Materialise 3-matic. <https://www.materialise.com/ko/industrial/software/3-matic>



Ye-Rim Kim

Researcher in the Department. 3D Printing Materials, Korea Institute of Materials Science (KIMS). Her current research interest is design for additive manufacturing.
E-mail: 1585201@kims.re.kr



Dalgyun Kim

Director of Hangdo Mold Inc.. His current research interest is digital transformation of mold manufacturing.
E-mail: crese@hangdomold.com



Sunjoo Kim

Chief Executive Officer of Hangdo Mold Inc.. His current research interest is digital transformation of mold manufacturing.
E-mail: account@hangdomold.com



Seok-Rok Lee

Senior researcher in Amid Inc.. His current research interest is design for additive manufacturing for shoes mold.
E-mail: srlee0412@amidltd.com



Soonho Won

Principal researcher in the Department. Corporation Support, Korea Institute of Materials Science (KIMS). His current research interest is evaluation for additive manufacturing with nondestructive method.
E-mail: wsh@kims.re.kr



Eun-Ah Kim

Researcher in the Department. 3D Printing Materials, Korea Institute of Materials Science (KIMS). Her research interest is additive manufacturing using 3D imaging analysis system.
E-mail: kea0420@kims.re.kr



Hak-Sung Lee

Senior researcher in the Department. 3D Printing Materials, Korea Institute of Materials Science (KIMS). His current research interest is design for additive manufacturing with software engineering.
E-mail: hslee@kims.re.kr

• 특집 • 설계 및 재료의 산업계 응용

표면자동추종 적층기술을 이용한 DED방식 적층제조

DED Additive Manufacturing Using Auto-Surface Tracking Technology

하태호^{1,#}, 허세곤¹, 이창우², 정민교¹, 최장욱³
Taeho Ha^{1,#}, Segon Heo¹, Changwoo Lee², Min-Kyo Jung¹, and Jang-Wook Choi³

1 한국기계연구원 3D프린팅장비연구실 (Department of 3D Printing, Korea Institute of Machinery & Materials)
2 한국기계연구원 첨단생산장비연구부 (Advanced Manufacturing Systems Research Division, Korea Institute of Machinery & Materials)
3 아진산업(주) 기술연구소 바다선행개발팀 (Advanced Body Development Team, Ajin Industrial Co., Ltd.)
Corresponding Author / E-mail: taehoha@kimm.re.kr, TEL: +82-42-868-7946
ORCID: 0000-0001-9957-3826

KEYWORDS: Additive manufacturing (적층제조), 3D printing (3D 프린팅), Auto-surface tracking (표면자동추종), Stand-off distance (스탠드 오프 거리), Melt pool (용융풀), DED

Directed energy deposition (DED) additive manufacturing technology enhances the functionality of existing or damaged parts by adding metallic materials to the surfaces. Blown-powder DED technology utilizes a focused, high-energy source to fuse the part's surface with the supplied metal powder. Maintaining a constant stand-off distance (SOD), the distance between the deposition head and the workpiece, is a key factor in ensuring deposition quality, as variations in SOD will change the powder focus position and the laser spot size on the surface. Therefore, traditional additive manufacturing systems require CAD or pre-scanned surface data. In this study, we proposed auto-surface tracking technology. No workpiece CAD data or pre-scanned surface data are required, and in-situ measurement and feedback control can automatically consider the deposition height differences that cause a change in SOD when depositing the next layer. The accuracy of the SOD measurements and feedback control error was verified using a step height sample. The mean SOD measurement error was 4.7 μm with a standard deviation of 42 μm (reference SOD, 14 mm). The feasibility of the auto-surface tracking technology was confirmed through the additive manufacturing processes of the gear and an actual blanking mold applied in the defense and industrial fields.

Manuscript received: December 30, 2022 / Revised: January 19, 2023 / Accepted: January 27, 2023

1. 서론

적층제조기술 중 DED (Directed Energy Deposition) 방식은 집중된 고출력 열에너지로 모재와 금속적층소재를 용융시켜 반복적으로 레이어를 형성하여 3차원 형상을 제조하는 방식이다 [1,2]. 레이저를 열원으로 사용하는 DED 방식이 상대적으로 작은 열영향부를 가지며 최종제품형상에 가깝게 제조가능하여 손상된 부품의 보수 및 이종소재 적층을 통한 표면 성능향상 등에 주로 활용되고 있다[3-5].

DED 공정에서 SOD (Stand-Off Distance)는 적층 프로세싱

헤드와 적층 대상물 사이의 거리로 정의된다. SOD의 변화는 적층 대상물 표면에서의 레이저 빔 크기 및 파우더 포커싱 위치 변화로 이어지고 결국 용융풀 크기, 용융풀으로의 파우더 공급량이 달라져 적층량 변화는 물론 궁극적으로 적층품질 저하를 유발한다.

3차원 형상을 만들기 위해서는 일반적으로 CAD 데이터 또는 표면 스캐닝을 통해 형상정보를 취득하고 이를 기준으로 적층량이 일정하다는 전제로 적층용 프로세싱 헤드를 매 층마다 정해진 높이만큼 이송시킨다. 하지만, 적층 대상물의 크기, 형상에 따라 열용량이 달라지기 때문에 각 층에서의 적층량이 바뀌게 된다.

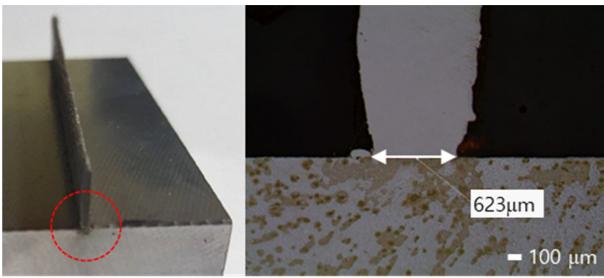


Fig. 1 Thickness variation during thin wall deposition

Fig. 1은 박벽(Thin Wall) 형태의 적층결과를 나타낸다. 그림과 같이 적층물 하단부의 두께가 상부에 비해 얇음을 알 수 있는데, 이는 처음 적층이 시작될 때 모재로의 급속한 열확산으로 용융풀의 크기가 작아지기 때문이다. 이러한 경향 또한 모재의 크기 및 형상에 따라 다른 양상을 보여 실제 원하는 적층높이를 얻지 못하고 결국은 반복적인 시행착오를 통하여 공정을 도출하게 된다. 기존의 연구들은 표면형상 정보를 획득한 후 각 층별로 정해진 적층높이에 도달하도록 공정 중 적층높이를 측정하여 파우더 공급량, 레이저 파워 등의 공정조건을 제어하는 방식의 연구가 주로 진행되었다[6-10]. 하지만 표면 형상정보를 얻기 위해 스캐닝 작업이 필요하며, 실제 적층 대상물과 적층제조 장비와의 상대좌표 정렬이 필요한 등 생산성 저하의 원인이 된다.

본 연구에서는 CAD 데이터나 표면 스캐닝을 통한 표면 형상정보 취득작업 없이 SOD 측정 및 피드백 제어로 실시간으로 적층물 표면을 추종하여 항상 일정한 SOD를 유지하는 표면자동추종 적층기술을 개발하였다. 2가지 타입의 SOD 측정 모듈을 개발하였으며 성능검증을 물론 표면자동추종 적층기술을 이용하여 실제 자동차용 블랭킹금형 제작 및 국방용 기어부품 보수 등 산업계 및 국방분야에의 실제 적용을 통한 유용성을 확인하였다.

2. DED 방식 적층제조시스템

2.1 적층제조시스템 구성

Fig. 2는 자체 개발한 DED 방식 적층제조시스템을 나타낸다 [11-12]. 이 시스템은 1,700 × 1,100 × 1,000 mm³ (X × Y × Z)의 넓은 적층영역을 가지고 있으며, 최대출력 5 kW의 고출력 파이버 레이저(YLS-5000, IPT Photonics)와 자체 개발한 프로세싱 헤드, 정밀 파우더 피더, SOD (Stand-Off Distance) 측정 및 제어 모듈 등을 탑재하고 있다.

2.2 SOD 측정모듈 및 표면자동추종 적층 특성

2.2.1 PSD 타입 SOD 측정모듈 및 표면자동추종 적층 특성

표면자동추종 적층을 위한 센서로 각각 PSD (Position Sensitive Detector)와 열화상 카메라로 구성된 서로 다른 두가지 타입의 SOD 측정모듈을 개발하였다.

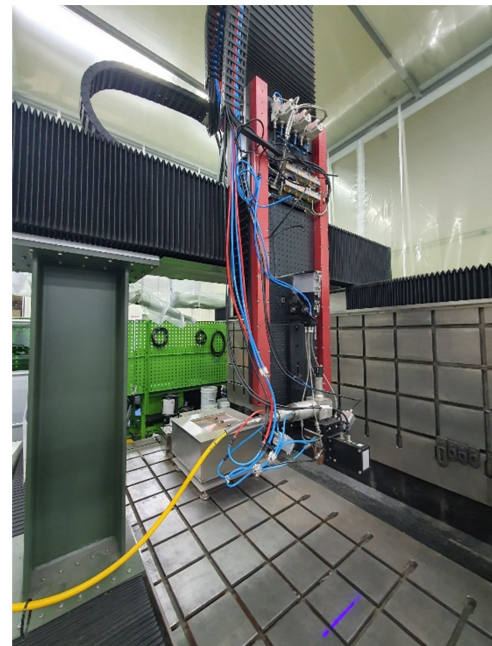


Fig. 2 DED additive manufacturing system

Table 1 Process parameters

| Parameter | Value |
|---------------------|-------|
| Laser power [W] | 250 |
| Scan speed [m/s] | 10 |
| Hatch distance [mm] | 0.5 |

첫 번째 모듈은 크게 광학계와 PSD로 구성되어 있으며, 별도의 측정광원을 사용하지 않고 프로세싱 헤드 측면에 설치되어 PSD로 측정한 프로세싱 레이저 빔의 위치변화를 광삼각법을 이용하여 높이로 변환한다. PSD 표면에 있는 광점의 위치에 비례하는 출력전류가 발생하게 되며 전류의 비로부터 위치를 간단하게 계산할 수 있다. ND (Neutral Density) 필터로 측정광량 조절, 레이저 라인 필터(1070 ± 5 nm)를 사용하여 외부광의 영향을 제거하였으며, 2.5 × 34 mm²의 측정영역 및 프로세싱 레이저 파장(1070 nm)에서 높은 감도를 가지고 있는 1차원 PSD (S1352, Hamamatsu Photonics)를 장착하였다. PSD 타입의 SOD 측정모듈은 복잡한 연산이 필요 없기 때문에 1 kHz 수준의 빠른 측정이 가능하다.

성능 검증을 위하여 Table 1과 같은 공정조건으로 평판시편에서 표면자동추종 적층을 수행하였다. Fig. 3은 목표 SOD 14 mm일 때 평면에 지그재그로 30 × 10 mm² 영역을 적층하였을 때의 피드백 결과를 보여준다. 목표 SOD에 아주 가까운 14.03 mm를 유지하였으며 표준편차도 0.1 mm 수준으로 양호한 표면추종 적층이 가능함을 확인하였다.

Fig. 4는 피라미드 형태로 단차가 형성된 표면에 표면자동추종 적층한 결과이며, 그림과 같이 표면 데이터없이 단순한 영역지정만으로 표면단차를 반영한 적층이 가능함을 확인하였다.

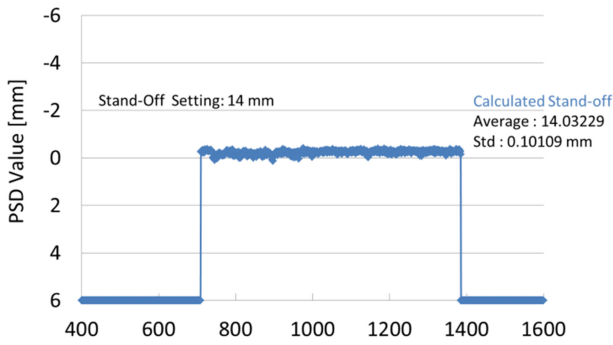


Fig. 3 Auto-surface tracking deposition results of flat surface using PSD type SOD measurement module

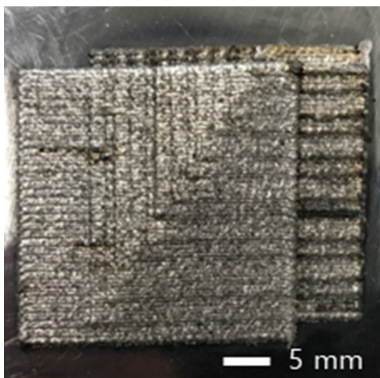


Fig. 4 Auto-surface tracking deposition results of step surfaces using PSD type SOD measurement module

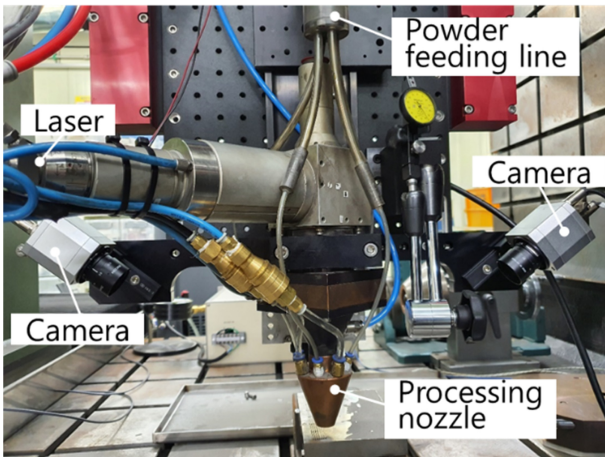


Fig. 5 Thermal imaging camera type SOD measurement module

2.2.2 열화상 카메라 타입 SOD 측정모듈 및 표면 자동추종 적층 특성

PSD 타입 SOD 측정모듈의 경우 위치변화가 전류 값으로 출력되어 측정속도가 빠른 장점이 있으나, 적층소재 및 공정조건에 따라 설정 레이저 출력이 변경될 경우, ND 필터의 교체가 필요하며 공정 모니터링을 위한 용융풀의 온도 정보를 획득하지 못하는 단점이 있다. 이와 같은 단점을 보완하기 위하여 고온 열화상 카메라를 센서로 사용한 SOD 측정모듈을 개발하였다(Fig. 5).

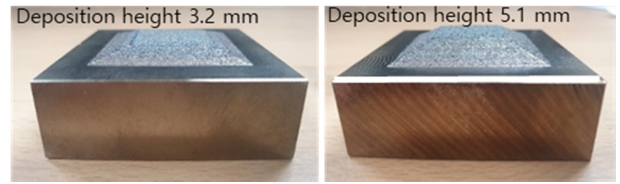


Fig. 6 Deposited samples (a) without and (b) with auto-surface tracking deposition function

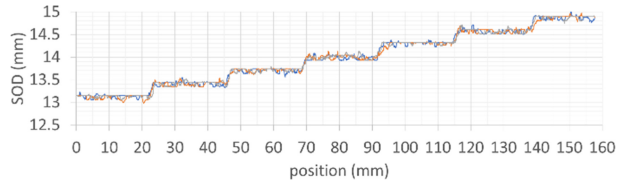


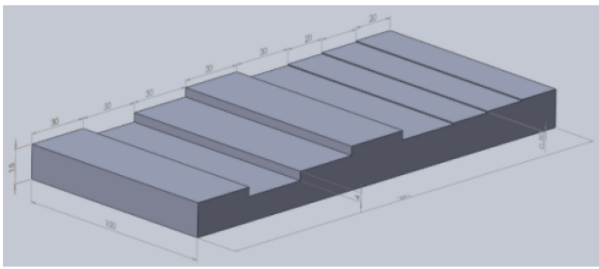
Fig. 7 Step movement (300 μm) of z-axis stage and corresponding SOD measurement results

PSD를 대신하여 2대의 열화상 카메라를 프로세싱 헤드 중심으로 좌우대칭으로 설치하여 측정사각지대를 줄이고, 이미지 프로세싱을 통하여 용융풀 중심점 도출 및 이에 따른 SOD를 계산한다. 열화상 카메라(PI05M, Optris)는 온도측정 범위 900-2,000°C, 최대 프레임률 1 kHz를 가지고 있어 고속측정이 가능하며 SOD 측정은 물론 공정관리를 위한 용융풀 모니터링용으로도 사용된다. 표면자동추종 적층을 위한 SOD 측정의 개략적인 프로세스는, 먼저 ROI 정의를 통하여 스패터(Spatter)에 의한 노이즈 영향을 줄이고, 사전 정의된 한계강도 이상 영역으로부터 용융풀 윤곽선을 추출한다. 다음으로 2차원 포인트 세트를 둘러싸는 최소 원을 찾아낸 다음 마지막으로 이를 통해 용융풀 중심을 찾아 SOD의 변화량을 도출하게 된다. 프로세싱 헤드는 SOD 14 mm일 경우 최적의 적층효율을 가지도록 설계 및 제작되었으며, SOD 측정모듈은 이를 기준으로 Z축 방향으로 ±6 mm의 높이변화를 800 Hz 수준으로 측정 가능하도록 설계되었다.

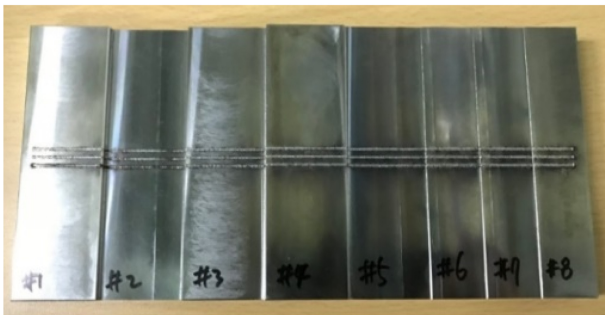
Fig. 6은 개발한 표면자동추종 적층기술 적용 전(a)과 후(b)의 적층결과를 나타낸다. 표면자동추종 적층을 적용하였을 경우 피드백 제어를 통하여 목표 적층높이 5 mm에 달하는 결과를 얻을 수 있었으나, 이를 적용하지 않고 정해진 동일 레이어 두께를 기준으로 적층한 경우 적층높이는 목표 적층량에 미치지 못하는 3.2 mm에 그쳤다.

스테이지와의 상대이동 거리비교 및 단차시편을 이용하여 열화상 카메라 타입 SOD 측정모듈의 성능검증을 수행하였다. Fig. 7은 레이저 파워 300 W, 파우더 공급량 7.4 g/min 조건으로 프로세싱 헤드가 장착되어 있는 Z축 스테이지를 300 μm 스텝으로 순차적으로 상승 시 측정된 SOD 측정값을 나타낸다. 설정 SOD 14 mm 위치에서의 평균 오차 4.7 μm, 표준편차 42 μm가 확인되었으며, 300 μm 단차변화를 명확하게 구분 가능함을 확인할 수 있었다.

Figs. 8(a)와 8(b)는 각각 표면자동추종 적층 기능의 유용성 검증을 위한 0.5, 1.5, 3 mm의 단차로 구성된 시편의 디자인 및



(a) Step height sample design for auto-surface tracking deposition verification



(b) Auto-surface tracking deposition test results using step height sample

Fig. 8 Step height sample design (a) and auto-surface tracking deposition test results (b)

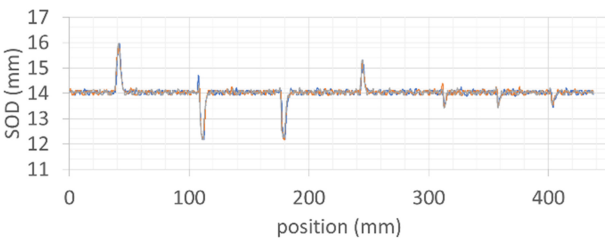


Fig. 9 Real-time SOD feedback control results for the step height sample using auto-surface tracking deposition function

실제 표면자동추종 적층결과를 나타낸다. 또한, 이때의 SOD 실시간 피드백 제어 결과를 Fig. 9에 도시하였다. Fig. 9의 X축과 Y축은 각각 단차 시편의 위치와 그 위치에서의 SOD 값을 나타낸다. 단차변화에도 피드백 제어를 통해 목표 SOD 14 mm를 일정하게 유지하고 있음을 알 수 있다. 그래프 내의 스파이크 형태의 SOD 변화는 단차 시편의 급격한 높이 변화에 따른 것이나 실제 표면자동추종 적층 시에는 필터링을 통해 제거하였다. 일반적으로 실제 적층공정에서는 준비과정에서 이와 같은 급격한 단차가 있는 표면은 적층시 품질에 영향을 미칠 수 있어 그대로 사용하지 않고 완만한 표면을 형성하도록 가공하여 사용한다.

표면 프로파일 추종 정밀도 검증을 위하여 레이저 거리 센서 (Conopoint-10, Optimet, Accuracy 6 μm)로 측정된 단차 프로파일과 표면자동추종 적층 시 피드백 제어에 따른 Z축 이송결과를 각각 Fig. 10에 나타내었다. X축은 단차 시편에서의 위치,

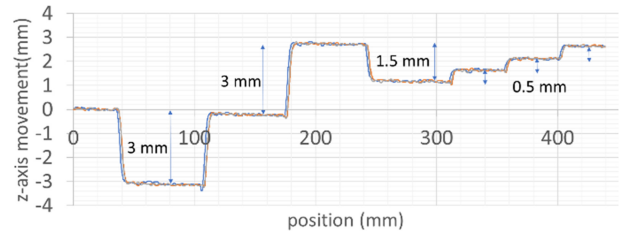


Fig. 10 Step height sample profile and corresponding feedback-controlled z-axis movement with auto-surface tracking deposition

Y축은 피드백 제어 후의 Z방향 스테이지 이송량을 나타낸다. 갑작스런 높이변화(±3 mm)에도 SOD 측정 및 실시간 피드백 제어를 통하여 표면을 정밀하게 추종하고 있음을 확인할 수 있다. 단차 시편 가공면이 가지고 있는 공차(±0.05 mm), 레이저 거리센서의 오차는 물론 적층공정에서의 고출력 레이저 조사, 파우더 비산 및 스파터 발생 등 열악한 조건에서도 각 단차에서의 평균 오차 최소 4.6 μm, 최대 34 μm으로 우수한 표면자동추종 적층성능을 가지고 있음을 확인하였다.

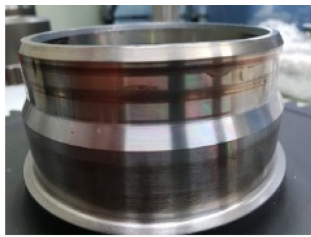
3. 표면자동추종 적층실증 실험

3.1 국방부품 적층제조 보수

Fig. 11은 국방 장비에 사용되는 기어로 가혹한 작동환경 하의 작동으로 손상된 부위(a)와 표면자동추종 적층을 통해 이를 보수한 부품(b)을 나타낸다. 기어 부품은 수천 RPM의 고속회전으로 인하여 시일(Seal) 조립부의 마모가 발생하나 기존방법으로는 수리가 불가능하여 폐기되는 부품이다. 마모로 인한 결함을 기계가공으로 제거한 후 개발한 표면자동추종 적층기술을 이용한 보수 및 후가공을 통해 요구되는 최종형상을 확보하였다. 기존 부품의 경우, 단조금형강 소재로 제작되어 HRC 50 이상의 경도가 요구되나, 내마모성 강화를 위하여 기존 소재보다 경도가 높은 폴리브덴-텅스텐 합금 고속도 공구강 소재인 AISI M2 금속분말을 적층소재로 선정하였다. CAD 데이터 및 번거로운 정렬작업 없이, 요구되는 적층 높이의 확보는 물론 포어(Pore) 없는 건전한 표면 및 HRC 61.2의 경도 확보로 기존 소재보다 더 우수한 내마모성을 가지는 기능향상 보수가 가능하게 되었다. 육군종합정비창에서 요구하는 물성, 치수 및 성능 테스트를 통과하였으며, 국방장비에 장착 후 현재 실전 배치되어 정상 운용되고 있다.

3.2 블랭킹 금형 적층제조

개발 기술의 산업계 적용 예로, 자동차부품 제작용 블랭킹(Blanking) 금형을 적층제조 기법으로 제작하였다. Fig. 12는 표면자동추종 적층기능을 이용해 프린팅한 적층부(a)와 후가공을 통해 최종 완성한 자동차 ECU 브라켓(Bracket) 제작용 블랭킹(Blanking) 금형사진(b)을 나타낸다.



(a) Worn part of the gear



(b) Repaired gear

Fig. 11 Worn gear and repaired gear using auto-surface tracking deposition



(a) Deposition of M2 material on the base of mold



(b) Final 3D printed blanking mold

Fig. 12 3D printed blanking mold for automobile part using auto-surface tracking deposition

전산해석을 통해 실제 프레스 공정에서 금형의 응력 분포를 계산하여 적층영역을 최소화하면서도 블랭킹 성능의 확보가 가능한 최적 적층영역을 도출하였다. 소재는 내마모성 강화를 위하여 AISI M2 금속분말을 이용하여 내마모성을 향상시켰다. 표면자동추종 적층 기능을 통하여 번거로운 작업없이 적층품질 및 목표 적층량 확보가 가능하였다. 제작된 블랭킹 금형은 실제 자동차 부품 양산에 적용되어 기존 대비 내마모성 향상으로 금형수명 증가를 확인하였다.

4. 결론

실시간 SOD (Stand-Off Distance) 측정 및 피드백 제어를 통한 표면자동추종 적층기술을 개발하여, 국방 및 산업부품 제작에 적용을 통한 유용성을 검증하였다. 각각 PSD (Position Sensitive Detector) 및 열화상 카메라를 센서로 이용하는 2가지 종류의 SOD 측정모듈을 개발하여 성능을 확인하였다. PSD 타입 SOD 측정모듈은 1 kHz 이상의 고속측정이 가능하며, 열화상 카메라 타입 SOD 측정모듈은 800 Hz의 샘플링이 가능하고 SOD뿐만 아니라 용융풀 온도 측정이 가능하여 공정 모니터링으로도 사용 가능한 장점이 있다. SOD 측정모듈의 성능검증 결과 SOD 14 mm 위치에서 측정 평균 오차 4.7 μm, 표준편차 42 μm를 가지며 300 μm 단차변화를 명확하게 구분 가능하였다. 단차시편을 이용한 표면자동추종 적층 성능평가의 결과, 가공면의 공차, 공정 시 발생하는 파우더 비산, 스패터 등의 열악한 조건에도 각 단차에서의 평균 오차는 최소 4.6 μm, 최대 34 μm로 우수한 표면자동추종 적층 성능을 보여주었다. 개발된 표면자동추종 적층기술을 적용하여 국방부품용 기어 보수 및 실제 자동차부품 제작용 블랭킹 금형을 제작하였으며, 부품의 실전 배치 및 양산 적용을 통해 기술의 유용성을 검증하였다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 논문은 정부의 재원으로 한국기계연구원 기본사업(NK242J)의 지원을 받아 수행된 연구입니다. 실증에 도움을 주신 육군종합정비창 관계자분께 감사드립니다.

REFERENCES

1. Monzón, M., Ortega, Z., Martínez, A., Ortega, F., (2015), Standardization in additive manufacturing: Activities carried out by international organizations and projects, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 76, 1111-1121. <http://doi.org/10.1007/s00170-014-6334-1>
2. Frazier, W. E., (2014), Metal additive manufacturing: A review, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23, 1917-1928. <http://doi.org/10.1007/s11665-014-0958-z>
3. Arias-González, F., Del Val, J., Comesaña, R., Penide, J., Lusquiños, F., Quintero, F., Riveiro, A., Boutinguiza, M., Pou, J., (2017), Laser cladding of phosphor bronze, *Surface and Coatings Technology*, 313, 248-254. <http://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.01.097>
4. Zuback, J., DebRoy, T., (2018), The hardness of additively manufactured alloys, *Materials*, 11(11), 2070. <https://doi.org/10.3390/ma11112070>
5. Liu, Q., Djugum, R., Sun, S., Walker, K., Choi, J., Brandt, M.,

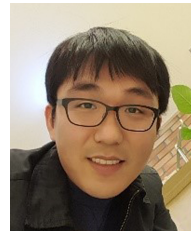
- (2017), Repair and manufacturing of military aircraft components by additive manufacturing technology, Proceedings of the Australian Aerospace Congress (AIAC 2017), 363-368.
6. Iravani-Tabrizipour, M., Toyserkani, E., (2007), An image-based feature tracking algorithm for real-time measurement of clad height, Machine Vision and Applications, 18, 343-354. <http://doi.org/10.1007/s00138-006-0066-7>
 7. Davis, T. A., Shin, Y. C., (2011), Vision-based clad height measurement, Machine Vision and Applications, 22, 129-136. <http://doi.org/10.1007/s00138-009-0240-9>
 8. Song, L., Bagavath-Singh, V., Dutta, B., Mazumder, J., (2012), Control of melt pool temperature and deposition height during direct metal deposition process, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 58, 247-256. <http://doi.org/10.1007/s00170-011-3395-2>
 9. Fathi, A., Khajepour, A., Toyserkani, E., Durali, M., (2007), Clad height control in laser solid freeform fabrication using a feedforward PID controller, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 35(3-4), 280-292.
 10. Mazumder, J., Dutta, D., Kikuchi, N., Ghosh, A., (2000), Closed loop direct metal deposition: Art to part, Optics and Lasers in Engineering, 34(4-6), 397-414. [http://doi.org/10.1016/S0143-8166\(00\)00072-5](http://doi.org/10.1016/S0143-8166(00)00072-5)
 11. Ha, T., Shin, H., Lee, C., Heo, S., (2017), Auto tracking module for DED type metal 3D printing system, Proceedings of the Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology, 1237-1239.
 12. Ha, T., Lee, C., Shin, H., Heo, S., (2018), Fabrication of Ti-6Al-4V thin cylinder by DED metal 3D printing process. Proceedings of the International Symposium on Precision Engineering and Sustainable Manufacturing, PP007.



Taeho Ha

Head of the Department 3D Printing, Korea Institute of Machinery & Materials (KIMM). His research area includes 3D printing process and equipment development.

E-mail: taehoha@kimm.re.kr



Segon Heo

Principal researcher in the Department 3D Printing, Korea Institute of Machinery & Materials (KIMM). His research interest is process simulation and additive manufacturing.

E-mail: heo@kimm.re.kr



Changwoo Lee

Director in the Advanced Manufacturing System Research Division, Korea Institute of Machinery and Materials (KIMM). His research interest is metal 3D printer.

E-mail: lcwlej@kimm.re.kr



Min-Kyo Jung

Senior Researcher in the Department 3D Printing, Korea Institute of Machinery & Materials (KIMM). His research interest is design for additive manufacturing by using optimization methods.

E-mail: mkjung@kimm.re.kr



Jang-Wook Choi

Team Manager. Advanced Body Research in the R&D Center, AJIN Industrial Co., Ltd.. His research interest is industrial application of additive manufacturing.

E-mail: cjw@wamc.co.kr

• 특집 • 설계 및 재료의 산업계 응용

파라메트릭 스터디를 통한 전동식 기어시스템의 소음 및 PPTTE 분석 Noise and PPTTE Analysis of Electric Gear System with Parametric Study

김남용¹, 백진욱¹, 곽기명¹, 류성기^{1,#}

Nam Yong Kim¹, Jin-Uk Baek¹, Gi-Myung Gwak¹, and Sung Ki Lyu^{1,#}

¹ 경상국립대학교 대학원 기계항공공학부 (School of Mechanical and Aerospace Engineering, Graduate School, Gyeongsang National University)

Corresponding Author / E-mail: sklyu@gnu.ac.kr, TEL: +82-55-772-1632

ORCID: 0000-0001-9803-0272

KEYWORDS: Profile shift coefficient (전위계수), Transmission error (전달오차), Overlap ratio (중첩 물림율), Parametric study (파라메트릭 스터디), Contact analysis (접촉해석), Gear (기어)

The gear overlap ratio shows the characteristics of the spur gear and the helical gear and varies according to the torsional angle. The gear ratio, tooth width, and center distance, which are restricted in a space of performance and manufacturing and design in the gearbox, are fixed. A parametric study on modules, the number of teeth, and torsion angles was conducted to analyze the relationship between the overlap ratio and PPTTE. Then, contact analysis was performed by correcting the tooth profile to improve the transmission error. Contact analysis was performed through correction of the tooth modification to improve transmission error, and the noise was analyzed according to the overlap ratio by applying a noise prediction equation.

Manuscript received: December 20, 2022 / Revised: January 26, 2023 / Accepted: January 30, 2023

NOMENCLATURE

| | | |
|---------|---|----------------------|
| m | = | Module |
| b | = | Face Width |
| T.E. | = | Transmission Error |
| dB(A) | = | Sound Pressure Level |
| β | = | Helix Angle |
| T | = | Torque |
| W | = | Power Loss |

1. 서론

동력전달장치는 기계장비, 자동차, 항공 분야 등 모든 산업에

걸쳐 널리 사용되어 왔다. 동력전달장치 중에서도 두 개 이상의 서로 다른 톱니가 맞물려 회전하면서 동력을 전달하는데, 이 장치를 기어라고 한다. 일반 평기어에 비해 헬리컬 기어는 기어열에 대한 중첩 물림율(Overlap Ratio)이 높아 동력전달 측면이나 소음에 있어서 유리한 측면이 있다. 최근 친환경적인 문제가 대두되면서 동력전달계 산업에 있어서 전동식 시스템의 수요가 증가하고 있으며, 이에 따라 구동 소음이 전동식 동력전달장치의 품질을 결정하는 중요한 요소로 자리잡고 있다[1-6].

소음 및 진동 문제를 발생시키는 주요 원인으로 전달오차(Transmission Error, T.E.)가 있다. 설계적인 이론과 실제 제작에서 오는 오차로 인해 발생하는 요인으로 기어의 치형수정(Tooth Modification) 등으로 소음 및 진동 문제를 개선할 수 있다[7,8].

본 연구에서는 전동식 동력전달장치에 대해 헬리컬 기어열에 대한 중첩 물림율(Overlap Ratio)에 따른 파라메트릭 스터디(Parametric Study)를 통해 PPTTE (Peak to Peak Transmission

Error)의 변화를 분석하고, 비틀림 각에 따른 음압레벨(Sound Pressure Level)을 분석하였다. 이후 기어 치형수정(Tooth Modification)을 통해 Micro-Geometry를 설계 및 적용하여 전달 오차(T.E.)를 개선하였다.

적용한 모델에 대해 접촉해석(Contact Analysis)을 실시하여 하중을 받는 상태에 대해 기어의 물림을 및 접촉, 굽힘 응력을 평가 및 분석하였다.

2. 전동식 기어시스템의 설계 및 이론

2.1 전동식 기어시스템 설계

전동식 동력전달장치에 적용하는 기어시스템은 Fig. 1과 같다. Helical Gear Train 2단과 Planetary Gear Train 1단으로 구성하였다. 모터에서 들어오는 Input에 대해 고속 회전을 하는 1 Stage의 헬리컬기어 1 Stage가 주요 소음원이다. 1 Stage의 Gear Ratio는 1.75이고 Macro-Geometry 상의 주요 제원인 중심거리, 압력각, 이콥이 기어박스의 성능과 공간에 제약이 되기 때문에 고정하고 Module과 Helical Gear의 특성인 Helix Angle 변화에 따라 기어 이와 Profile Shift Coefficient를 조정하였다. Profile Shift Coefficient 및 Helix Angle을 결정하기 위하여 Specific Sliding이 최소가 되도록 하는 설계를 진행하였다.

Helix Angle 변화에 대한 중첩 물림율(Overlap Ratio)의 분석을 위한 Gear Specification은 Table 1과 같다.

2.2 기어 스터디 분석 이론

전동식 기어에 있어서 가장 중요한 핵심은 소음 및 진동이다. 소음 예측 식에 의해 소음분석이 가능하며 식(1)과 같다.

소음 및 진동은 전달오차(T.E.)가 주요 원인이며 기어 제조에 의한 오차 및 동하중에 의한 오차로 인해 기어의 물림에서 발생하는 피니언과 기어 사이의 속도차이로 정의된다. 따라서 전달 오차(T.E.) 단순히 최대값과 최소값의 절대크기보다는 실제 두 값의 차이가 물림상의 내부 가진을 일으킨다고 할 수 있으며, 식(2)와 같다.

$$L = \frac{20 \left(1 - \tan\left(\frac{\beta}{2}\right) \right)^{8\sqrt{u}}}{4\sqrt{\epsilon_a}} \sqrt{\frac{5.56 + \sqrt{v}}{5.56}} \quad (1)$$

$$+ 20 \log W + 20 \log \bar{X} + 20$$

$$TE = \theta_2 - \theta_1 \times \frac{z_2}{z_1} [rad] \quad (2)$$

기어 물림에 대한 접촉해석은 Gear Body Deformation, Bending, Hertzian Flattening을 고려하여 해석하였다. 또한, 하중에 따른 각각의 변형을 고려하기 위하여 Single Contact Stiffness를 스프링 방정식 $F = dxC$ 로 적용하였다.

Gear Micro-Geometry에서 기어의 물림과 하중에 따른 기어의

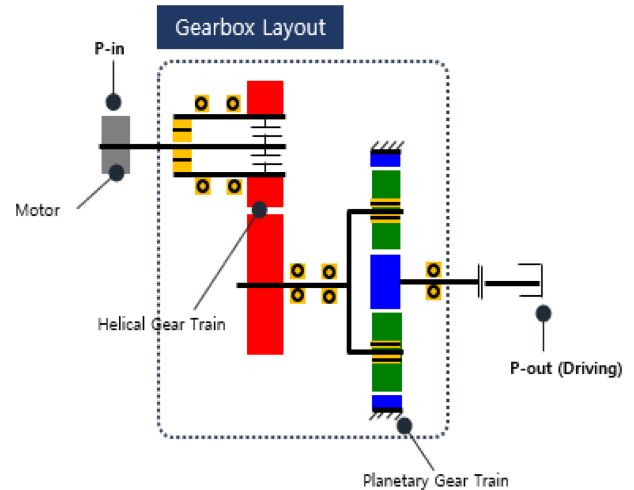


Fig. 1 Layout for gearbox structure

Table 1 Gear specification of helical gear train

| Description | Unit | Gear | Pinion |
|---------------------------|------|---------------------------|--------|
| Module | Mm | 1.25/1.5/2.0 | |
| Pressure angle | Deg. | 20 | |
| No. of teeth | - | 56-65 | 32-37 |
| Helix angle | Deg. | 0-20 | |
| Face width | Mm | 36 | |
| Profile shift coefficient | - | Applied (-) Profile shift | |
| Gear ratio | | 1.75±3% | |

접촉면을 최적화하는 설계를 하기 위해 치형 수정(Tooth Modification)을 실시한다.

3. 기어의 파라메트릭 분석

3.1 모듈 및 중첩 물림율에 따른 PPTE 및 소음 분석

Parametric Study를 위한 조건으로 Input Speed로 1,800 rpm, Input Torque로 300 Nm을 적용하였다.

기어박스의 성능과 공간에 제약이 있는 Gear Ratio, Face Width, Center Distance를 고정하였다. Module은 일반적으로 많이 사용하는 1.25/1.5/2.0의 경우에서 비틀림 각을 0-30° 설정하여 Study를 진행하였다.

Parametric Study 결과, Module 및 Overlap Ratio에 따른 PPTE의 변화는 Fig. 2에서 확인할 수 있듯이 Overlap Ratio가 1.2의 구간에서 PPTE가 최저가 되고 이후 값이 증가할수록 PPTE 또한 증가하는 것을 확인할 수 있다. 각각의 Module에 대해서도 값의 차이만 있을 뿐 그래프의 경향은 동일한 것으로 확인하였다.

Module 2.0과 1.25에서 Overlap Ratio가 1.0으로 동일할 때 Module에 따른 최대값의 차이는 1.5 정도이다. Module 중에서

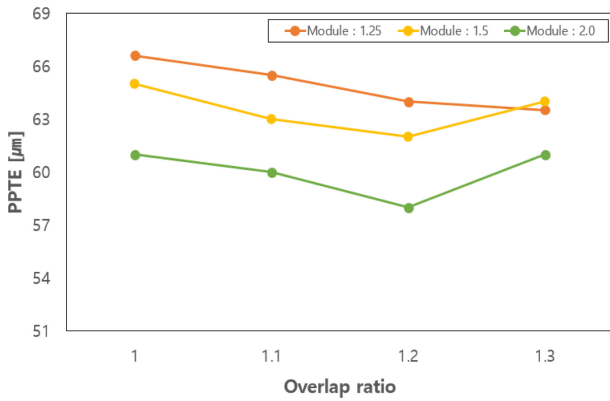


Fig. 2 PPTE graphs for modules and overlap ratio

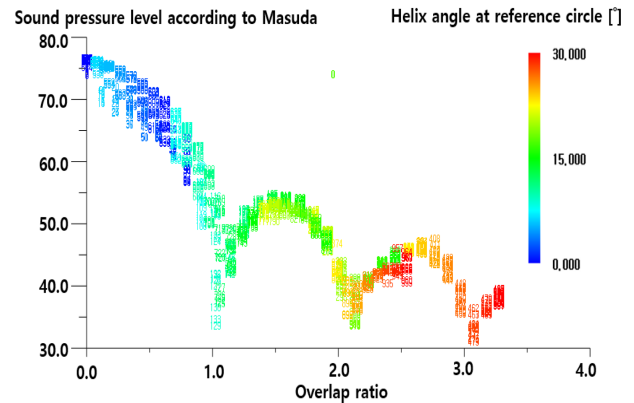


Fig. 4 dB analysis results for overlap ratio on parametric study

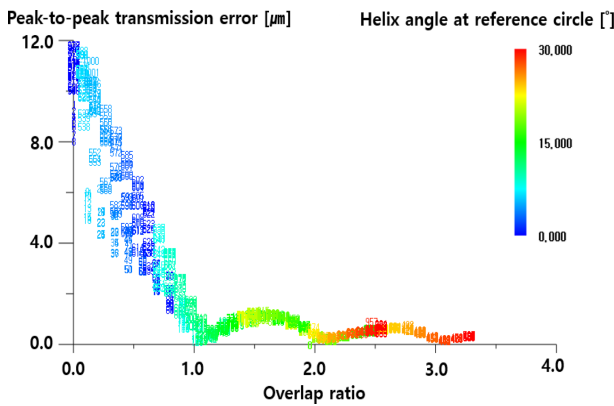


Fig. 3 PPTE analysis results for overlap ratio on parametric study

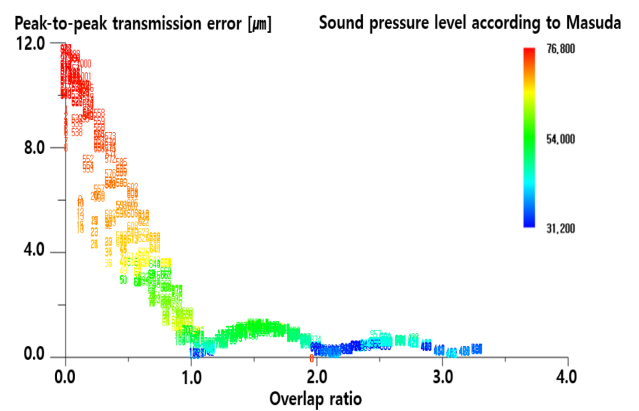


Fig. 5 PPTE analysis results for overlap ratio on sound pressure

변화 폭이 가장 큰 1.5의 경우 최대값과 최소값의 차이가 약 2 정도 나는 것을 확인할 수 있다.

따라서 Module 값보다는 Overlap Ratio가 PPTE에 미치는 영향이 비교적 더 크다는 것을 알 수 있다.

Fig. 3에서 Overlap Ratio가 1.0, 2.0, 3.0의 정수가 되는 값보다 1-5% 높은 값에서 각각 PPTE가 최저값이 되는 것을 확인할 수 있다. 비틀림 각이 0인 평기어의 경우 PPTE가 12 μm으로 가장 높고 Overlap Ratio가 1.1, 2.3, 3.3이 되는 구간에서 PPTE가 거의 0에 수렴하였다. 정수값이 아닌 특정 구간에서 반복적으로 PPTE가 0에 가깝게 수렴하는 부분에 대해 앞으로의 추가적인 연구를 통해 분석해볼 것이다.

Fig. 4에서 Overlap Ratio에 따른 Sound Pressure Level을 분석하였다. Fig. 3에서와 마찬가지로 Overlap Ratio가 정수값보다 1-3% 높은 부분에서 가장 낮게 음압 레벨이 형성되었다. 식(1)에 의해 Overlap Ratio 및 Helix Angle이 0으로 나타나는 평기어의 경우 예측 소음이 76.8 dB(A)이고, Overlap Ratio가 정수값에 근접할수록 예측 소음이 감소하는 하는 경향을 보였다.

이에 따라 Fig. 5에서와 같이 Overlap Ratio에 따른 PPTE와 Sound Pressure Level의 관계를 분석하였다. Figs. 3과 4에서와 같이 Overlap Ratio가 정수값에 근접할수록 PPTE와 Sound Pressure Level이 감소가 되는 경향을 보였고 특히 Overlap

Ratio가 2.0 이상일 경우 PPTE와 Sound Pressure Level이 최소가 되는 값으로 수렴하는 경향을 보였다.

3.2 기어 치형 수정에 따른 PPTE 분석

Gear의 물림과 하중에 따른 기어 접촉면을 최적화 하기 위해 치형수정을 실시하였다. 치형수정은 Figs. 6과 7에서와 같이 Profile 방향으로 수정하는 Profile Modification의 Tip Relief와 Profile Crowning의 방법으로 수정하였다. 기어 Sizing은 3-7 μm를 5단계로 나누어 Parametric Study를 실시하였다.

Modification Sizing의 결과는 Fig. 8과 같다. 그래프의 결과에 따라 3 μm이 PPTE가 최소가 되는 최적의 값으로 확인하고, 이에 따라 Pinion에서 Tip Relief에서 3 μm, Crowning에서 3 μm으로 수정하고 Gear에서는 Tip Relief에서 3 μm, Crowning에서 3 μm으로 수정하였다.

3.3 치형 수정을 적용한 기어의 접촉 해석 및 비교

치형수정결과에 따라 Micro-Geometry 수정을 적용한 모델과 수정 전의 모델에 대해서 Contacts Analysis를 진행하고, 비교 및 분석하였다.

Table 2는 치형수정 이전 해석 결과로 Figs. 9와 10, Table 3은 치형수정을 적용한 해석 결과로 Figs. 11과 12를 도식화하여

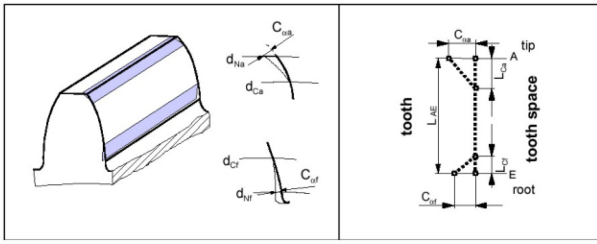


Fig. 6 Definition of tip and root relief

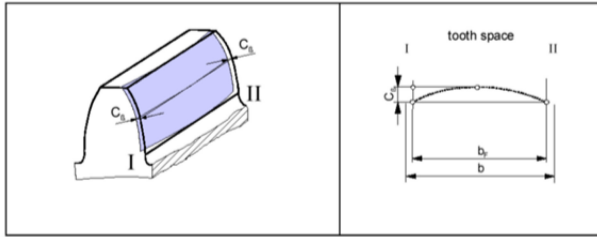


Fig. 7 Definition of profile crowning

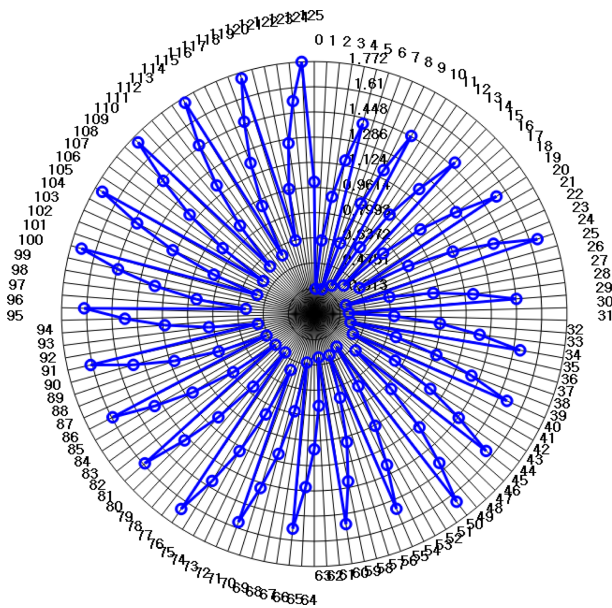


Fig. 8 Modification sizing results on Parametric study

표로 나타낸 결과값이다. 각각의 그래프는 전달오차(T.E.)는 최대값과 최소값의 크기를 비교하는 것보다 식(2)에 의해서 치형 수정 전과 후의 최대값과 최소값의 크기의 차이라고 할 수 있는 절대값으로 비교하고 수정 전에서 0.2 μm , 수정 후에서 0.13 μm 이다. 따라서 전달오차(T.E.)가 감소하였다는 것을 확인할 수 있다. Power Loss에서도 최대값과 최소값에서 전체적인 Loss가 줄어들었음을 확인할 수 있다.

Figs. 9, 10에서는 Pinion의 치의 표면에 작용하는 응력분포도를 나타낸다. 그림에서 확인할 수 있듯이 특정 부분의 응력집중현상은 나타나지 않으나 기어의 물림을 나타내는 LPSTC와 HPSTC 사이의 구간에 물림이 작용함으로서 나타나는 응력분포도가

Table 2 Gear contact analysis on tooth modification (Before)

| Description | Unit | Value |
|------------------------------|------------------------|---------------|
| Transmission ERROR | μm | -18.54/-18.74 |
| Power loss | W | 558.0/531.0 |
| Stress curve (Max.) | N/mm^2 | 1,477.08 |
| Stress distribution on tooth | N/mm^2 | 1,500.0 |

Table 3 Gear contact analysis on tooth modification (After)

| Description | Unit | Value |
|------------------------------|------------------------|---------------|
| Transmission error | μm | -15.90/-16.03 |
| Power loss | W | 520.0/504.0 |
| Stress curve (Max.) | N/mm^2 | 1,200.42 |
| Stress distribution on tooth | N/mm^2 | 1,200.0 |

Stress distribution on tooth [N/mm²]
0.0 750.0 1500.0



Fig. 9 Stress distribution on tooth modification before

Stress distribution on tooth [N/mm²]
0.0 750.0 1200.0



Fig. 10 Stress distribution on tooth modification after

형성되어 있지 않는 것을 확인하였다.

따라서 Profile 방향으로 수정값을 추가적으로 더하고, Crowning 방향으로 추가적으로 수정값을 가하여 적절한 Contact 지점에 응력분포가 형성될 수 있도록 추가적인 연구를 진행하여야 할 것이다.

Figs. 11과 12는 기어의 Stress Curve를 나타내는 그래프이다. 치면에는 응력 집중현상으로 인해 간혹 Pitting이 발생하여 파손이

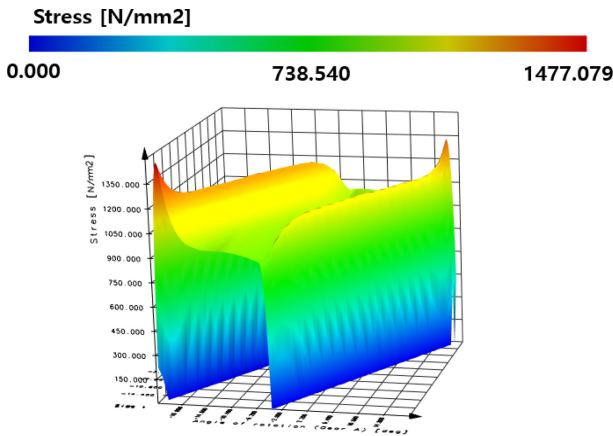


Fig. 11 Stress curve graphs on tooth modification before

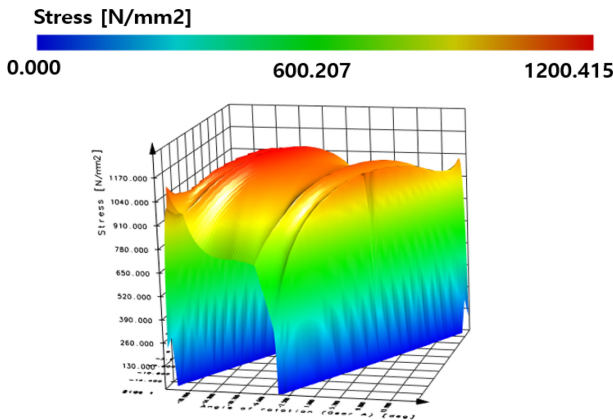


Fig. 12 Stress curve graphs on tooth modification after

일어나 제품의 수명에 문제가 생기는 경우가 생긴다. 이를 해결하기 위한 방안으로 치형수정을 통해 치면의 형태를 완만하게 하여 응력의 집중현상을 완화함으로써 개선할 수 있다.

4. 결론

본 연구는 전동식 기어시스템에 있어 가장 핵심적인 요인이 라고 할 수 있는 소음에 대해서 KISSsoft의 Parametric Study를 활용하여 Overlap Ratio에 대해 PPTE와 예측소음에 대한 관계를 분석하고 연구하였다.

1. Overlap Ratio의 정수값의 오차범위 5% 이내에서 PPTE와 Sound Pressure Level이 최소가 되었다.

2. PPTE와 Sound Pressure Level 비례관계에 있으며 Overlap Ratio가 증가함에 따라 그 값이 줄어드는 방향으로 수렴하는 경향을 보였다.

3. Tooth Modification을 통해 전달오차(T.E.)가 감소하고 이에 따라 Power의 Loss도 줄어들었음을 확인하였고, 이와 같은 방법을 통해 경제적인 효과를 기대할 수 있으며 기어 시스템에서의 동력전달효율도 같이 증가하므로 산업 분야에서 긍정적인

효과를 기대할 수 있다.

4. 치형 수정을 통한 Stress Distributions이 감소하는 효과를 확인하였다. 따라서 소음 및 PPTE를 감소하는 설계 시 발생할 수 있는 Pitting 및 파손 현상을 감소시킬 수 있으므로, 산업에서 발생하는 기어 파손 문제를 개선시킬 수 있다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 논문은 과학기술정보통신부 선도연구센터 기초연구사업(NRF-2019R1A5A 8083201)의 지원에 의해 연구되었으며 이에 감사드립니다.

REFERENCES

1. Kim, N. Y., Kim, D. S., Park, S. B., Lyu, S. K., (2022), Effect of gear tooth wear on noise of single-stage meteor gear, Proceedings of the Korean Society for Precision Engineering 2022 Spring Conference, 401.
2. Lee, Y. S., Park, Y. W., Kim, N. Y., Baek, S. H., Park, S. H., Lyu, S. K., (2022), A study on the design of the driving part and gear module for power train, Proceedings of the Korean Society for Precision Engineering 2022 Autumn Conference, 563.
3. Kim, N. Y., Kim, D. S., Moon, S. M., Park, S. B., Lyu, S. K., (2022), A study on the contact analysis of single-stage planetary gears by center distance, Proceedings of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers 2022 Spring Conference, 87.
4. Kim, N. Y., Lee, K. H., Jeong, Y. S., Park, S. B., Lyu, S. K., (2022), Design of helical gear geometry considering noise and strength, Proceedings of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers 2022 Spring Conference, 92.
5. Lee, K. H., Jeong, Y. S., Kim, N. Y., (2021), A study on the gear profile shift coefficient design considering power loss and noise, Proceedings of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers 2021 Autumn Conference, 176.
6. Lee, K. H., Jeong, Y. S., Kim, N. Y., (2021), An analysis on effect of bending strength for gear dimension, Proceedings of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers 2021 Spring Conference, 43.
7. Cho, S.-J., Kim, J.-G., Park, J.-S., Kim, Y.-S., Lee, D., (2022), Development of the 80-kW test tractor for load measurement of agricultural operations, Journal of Drive and Control, 19(4), 46-53.
8. Kim, J.-G., Cho, S.-J., Lee, D.-K., Oh, J.-Y., Shin, M. S., Park, Y.-J., (2021), Gear rating and contact pattern analysis for rotavator gearbox using actual working load, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, 20(6), 92-99.

**Nam Yong Kim**

Ph.D. candidate in School of Mechanical & Aerospace Engineering, Gyeongsang National University. His research interest is gearbox optimal design.

E-mail: kny10109@gnu.ac.kr

**Jin-Uk Baek**

Master's degree candidate in School of Mechanical & Aerospace Engineering, Gyeongsang National University. His research interest is gearbox optimal design and gear system NVH analysis.

E-mail: tony3176@naver.com

**Gi-Myung Gwak**

Master's degree candidate in School of Mechanical & Aerospace Engineering, Gyeongsang National University. His research interest is additive manufacturing including design, gear, gearbox, mechanical system design, hydrogen refueling nozzle.

E-mail: kkm6431@naver.com

**Sung Ki Lyu**

Professor in the School of Mechanical Engineering of Gyeongsang National University. His research fields are mechanical parts design, gear, gearbox, mechanical system design, power transmission system, and so on.

E-mail: sklyu@gnu.ac.kr

공간형 위치 결정 스테이지를 위한 타원형 및 포물선형 2 자유도 플렉서 힌지에 대한 해석

Analysis on Elliptic and Parabolic 2-DOF Flexure Hinges for Spatial Positioning Stages

신현표¹, 문준희^{2,#}
Hyun-Pyo Shin¹ and Jun-Hee Moon^{2,#}

¹ 동양미래대학교 로봇자동화공학부 (School of Robot and Automation Engineering, Dongyang Mirae University)

² 유한대학교 자동화공학과 (Department of Automation Engineering, Yuhan University)

Corresponding Author / E-mail: jhmoon@yuhan.ac.kr; TEL: +82-2-2610-0752

ORCID: 0000-0002-4874-7862

KEYWORDS: Axial stiffness (축방향 강성), Bending stiffness (굽힘방향 강성), Finite element analysis (유한요소해석), Elliptic flexure hinge (타원형 플렉서 힌지), Parabolic flexure hinge (포물선형 플렉서 힌지)

With advancements in semiconductor manufacturing processes and the development of precision processing technology, flexure hinge-based ultra-precision positioning stages are widely used. In the flexure hinge, axial and bending stiffness properties greatly influence positioning performance. This study examined the stiffness properties of elliptic and parabolic 2-degrees-of-freedom (DOF) hinges, which have not been extensively discussed. The Timoshenko beam theory was applied to derive the stiffness equations for the axial and bending directions of each hinge. The stiffness properties were examined in several design conditions by comparing theoretical and finite element analyses. Based on the results of the analyses, an empirical formula in exponential form for the design of an elliptic hinge was constructed through surface-fitting. The elliptic hinge was found to be a better alternative to a circular hinge under certain design conditions by adjusting two design parameters. In the future, we will develop sophisticatedly designed hinges with improved axial and bending stiffness properties compared to the existing circular and elliptic hinges.

Manuscript received: October 7, 2022 / Revised: December 10, 2022 / Accepted: December 12, 2022

1. 서론

구동기에 의해 발생된 움직임을 링크 간의 상대운동을 통해 전달하여 최종적인 운동을 만들어 내는 기존 방식의 위치 결정 스테이지에서는 유격, 마찰, 마모, 비산물 발생 등의 문제점이 존재한다. 반도체 공정, 나노 공학에서의 나노 구조물 측정, 나노 가공 등의 분야에서는 서브 나노급의 분해능과 높은 정밀도, 비산물 없는 클린룸 호환 가능성 등의 필요가 있어서 새로운 방식의 위치 결정 스테이지를 필요로 한다. 링크 간의 조립 및 상대운동 없이 힌지의 변형만으로 구동기의 움직임을 전달하는 위치 결정 스테이지가 이러한 분야에서의 대안으로 개발되어

널리 활용되고 있다[1,2].

플렉서 힌지 기반의 위치 결정 스테이지에 대한 연구가 다수 진행되어 왔으나, 주로 운동을 전달 및 증폭하기 위한 구조와 성능 최적화, 제어 내용에 대한 것이다. 플렉서 힌지 자체의 설계 및 해석에 대해 다룬 연구도 존재하지만 대부분 1 자유도 운동을 구현하기 위한 원형 단방향 플렉서 힌지에 대한 것이다. 평면상의 운동은 1 자유도 힌지로 구현이 가능하지만, 공간상의 운동은 2 자유도 힌지를 필요로 한다[3,4]. 또한, 원형 플렉서 힌지가 설계, 가공, 넓은 영역에 걸친 활용성 등의 측면에서 유리하지만 위치 결정 스테이지의 사용 목적에 따라 다른 형태의 플렉서 힌지를 고려하는 것도 필요하다. 효율적으로 위치

결정 성능을 구현하기 위해서는 먼저 적합한 형태의 플렉서 힌지를 선택하고 관련 설계 변수에 따른 축방향(Axial Stiffness) 및 굽힘방향(Bending Stiffness) 강성의 변화를 예측할 수 있어야 한다[5,6].

본 연구를 통해 공간적 움직임 구현에 활용할 수 있는 2 자유도 타원형, 포물선형 플렉서 힌지에 대한 이론식 수립 및 강성 계산, 유한요소해석을 통한 성능 비교, 설계 변수에 따른 강성 특성에 대해 고찰한다. 특히, 원형 플렉서 힌지 적용을 제한하는 설계 조건에서의 타원형, 포물선형 플렉서 힌지의 활용 가능성에 대해 살펴보고자 한다. 또한, 유한요소해석 결과를 기초로 강성 실험식을 도출하여 타원형 및 포물선형 플렉서 힌지 설계에 활용할 수 있도록 제시하고자 한다.

본 논문은 다음과 같이 구성 되어 있다. 1장에서는 연구의 배경 및 필요성을 기술한다. 2장에서는 티모센코 빔 이론을 바탕으로 타원형 플렉서 힌지와 포물선형 플렉서 힌지의 강성에 대한 이론식을 수립한다. 3장에서는 이론식과 유한요소해석 결과를 비교하고 설계 변수 변화에 따른 각 힌지의 특성을 고찰한다. 또한, 타원형 플렉서 힌지와 포물선형 플렉서 힌지의 설계 및 적용상의 유의점에 대해 논의한다. 4장에서는 플렉서 힌지 설계 과정에서 강성 예측에 활용할 수 있도록 이론식과 유한요소해석 결과를 바탕으로 지수함수 형태의 실험식을 고안한다. 5장에서는 연구의 결론을 제시한다.

2. 2 자유도 타원형, 포물선형 플렉서 힌지의 강성 해석

서브 마이크로미터 단위의 구동을 하는 초정밀 위치 결정 스테이지에서 플렉서 힌지는 필수 구성요소이다. 위치 결정 스테이지에서 사용되고 있는 단방향 플렉서 힌지는 낮은 강성을 갖는 1개의 회전 자유도와 높은 강성을 갖는 5개의 자유도로 인해 조인트와 같은 역할을 하게 된다.

2 자유도 플렉서 힌지가 필요한 이유는 1개의 힌지가 2개의 회전 자유도가 가져야, 3자유도를 초과하는 이송 자유도를 갖는 위치 결정 스테이지에서 평면을 벗어난 공간적 움직임의 구현이 가능하기 때문이다. 이와 같은 플렉서 힌지를 2 자유도 플렉서 힌지(2-DOF Flexure Hinge)라고 하며 그 중 타원형 노치(Notch)와 포물선형 노치를 갖는 2 자유도 플렉서 힌지의 형상을 Fig. 1에 나타내었다[7].

2 자유도 플렉서 힌지는 대칭적인 구조를 가지고 있으며, 축방향은 강성이 높고 굽힘에 의한 회전방향은 강성이 낮아야 조인트와 같은 기능을 적절히 수행할 수 있다. 따라서 2 자유도 플렉서 힌지는 응력이 허락하는 한도 내에서 2개의 회전자유도의 강성은 낮게, 축방향의 강성은 높게 설계하는 것이 바람직하다.

2 자유도 플렉서 힌지의 대칭성으로 인해 축방향과 굽힘방향으로 성질이 분리가 된다. Fig. 2와 같이 축방향을 z축이라고 할 때 x축과 y축 방향의 특성은 같고 z축 방향은 다르다. 따라서 x축과 y축 방향의 회전 강성을 굽힘방향 강성 K_b 라고 하고, z축

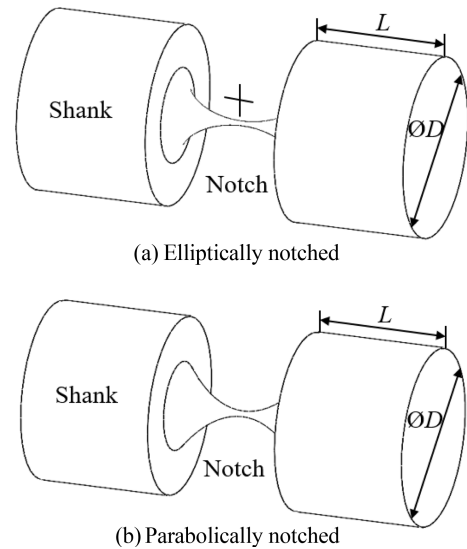


Fig. 1 Cylindrical flexure hinges

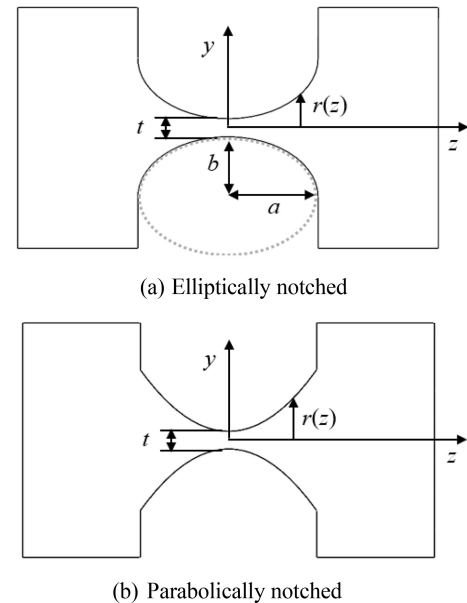


Fig. 2 Cutaway views of the cylindrical flexure hinges

방향의 강성을 축방향 강성 K_a 라고 한다. 이를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$K_a = K_z \tag{1}$$

$$K_b = K_{\theta_x} = K_{\theta_y} \tag{2}$$

위와 같은 강성은 다음의 두 식을 기본으로 한다.

$$K_i = F_i / \delta_i \tag{3}$$

$$K_{\theta_i} = M_i / \theta_i \tag{4}$$

여기에서 i 는 x, y, z 와 같은 좌표축이고, δ 와 θ 는 각각 변형 길이와 변형각을 의미하며, F 와 M 은 각각 힘과 모멘트를 의미한다. 2 자유도 플렉서 힌지의 단면 형상이 타원과 포물선 형태

각각에 대해 Fig. 2에 나타나 있다.

티모셴코 빔 이론에 따라 응력-변형률 공식과 인장 및 굽힘에 관한 공식들을 활용하여 플렉서 힌지 설계에 가장 중요한 역할을 하는 축방향 강성 K_a 와 굽힘방향 강성 K_b 를 다음과 같이 계산할 수 있다[8-10].

$$K_a = E \int \frac{dz}{A} \tag{5}$$

$$K_b = E \int \frac{dz}{I} \tag{6}$$

여기에서 E 는 탄성계수, G 는 전단탄성계수, A 는 단면적, I 는 관성모멘트, I_z 는 극관성모멘트를 각각 의미한다. z 축에 직각인 단면의 단면적과 관성 모멘트와 극관성 모멘트는 각각 다음과 같다.

$$A = \pi r^2 \tag{7}$$

$$I = \frac{\pi}{4} r^4 \tag{8}$$

$$I_z = \frac{\pi}{2} r^4 \tag{9}$$

힌지의 축방향인 z 축에 직각인 단면의 반경 r 은, 노치의 형상이 타원과 포물선일 경우에 각각 다음과 같다(Fig. 2 참조).

$$r(z) = \frac{t}{2} + b \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{z}{a} \right)^2} \right) \tag{10}$$

$$r(z) = \frac{t}{2} + pz^2 \tag{11}$$

여기에서 a 는 타원형 플렉서 힌지의 횡반경(Transverse Radius)을, b 는 종반경(Longitudinal Radius)을 나타내고 p 는 포물선형 플렉서 힌지의 이차항 계수를 나타낸다. 식(7)부터 식(11)을 식(5)와 식(6)에 대입하여 축방향 강성 K_a 와 굽힘방향 강성 K_b 를 계산하였으며, 그 결과는 지면의 한계가 있어서 부록에 수록하였다.

3. 유한요소해석과 이론식 결과 비교

3.1 설계변수와 하중 및 경계 조건

2 자유도 플렉서 힌지의 설계변수는 노치에서 가장 가는 부분의 지름 t 와 타원형의 경우 장반경, 단반경(여기에서는 알기 쉽게 횡반경 a , 종반경 b 라고 함)이며 포물선형의 경우 이차항의 계수 p 이다. 해석을 위해 설계한 힌지는 노치를 포함하여 전체 길이가 120 mm이다. 자루의 지름(D)은 41 mm로 선정하여 자루의 변형이 전체 해석 결과에 영향을 주지 않도록 노치 지름 대비 충분히 큰 값으로 정하였다. 노치 지름 t 는 1 mm로 고정하였고 노치 길이의 경우 타원형 플렉서 힌지에서는 횡반경($a =$

10 mm) 또는 종반경($b = 10$ mm)을 고정하고 나머지 변수를 2.5, 5, 10, 20, 40 mm로 정했다. 그러므로 종반경을 고정할 경우의 노치 길이는 횡반경의 2배(5, 10, 20, 40, 80 mm)가 된다. 포물선형 플렉서 힌지의 이차항 계수 p 는 0.025, 0.05, 0.1, 0.2, 0.4로 정했으며, 이에 따라 노치 길이는 10, 14.1, 40, 56.6, 80 mm가 된다.

하중 조건(F, M)은 힌지의 중심 곧 노치의 가장 가는 부분의 허용응력이 재료의 항복응력에 안전계수 2를 적용한 값을 만족하도록 정했다. 재료는 위치 결정 스테이지의 플렉서 힌지로 널리 사용되고 있는 AL7075-T6 를 적용했으므로 허용응력은 재료 항복응력(493.8 MPa)의 절반인 246.9 MPa이다.

유한요소해석을 위해 자루(Shank) 끝 부분을 고정시키고 반대편 끝 부분에 모멘트($M = 24.24$ Nmm)를 추가하였다. 격자는 힌지 중심의 격자가 t 대비 작게 생성하였고, 타원형 플렉서 힌지의 한 가지 설계조건($a = 10$ mm, $b = 20$ mm인 경우)에 대해 격자수는 29,703개, 노드수는 48,657 개가 생성됨을 확인하였다.

3.2 이론식과 유한요소해석 결과

타원형 플렉서 힌지의 주된 설계 변수인 횡반경 a 와 종반경 b 에 따른 축방향 강성 K_a 와 굽힘방향 강성 K_b 의 변화를 Fig. 3에 그래프로 나타내었다. Fig. 3은 횡반경을 고정하고 종반경을 변화시킨 결과를 축방향 강성과 굽힘방향 강성으로 나누어 표현한 것이다. 유한요소해석과 이론식 결과값은 구간에 따라 오차가 존재하지만 전체적으로 유사한 경향을 나타내었다. 유한요소해석 결과가 이론식에 비해 낮은 이유는 티모셴코 빔 이론에서 힌지 각 단면에서의 응력 분포가 동일하다는 가정이 있지만, 실제로는 힌지 중심부와 표면의 응력 분포가 불균일하기 때문인 것으로 판단된다. 특히, 노치부의 형상 변화가 급격할수록 힌지 내부 응력 분포가 불균일해져서 오차가 크게 발생하게 된다.

모든 설계 조건에서 노치부 중심 지름인 t 가 동일함에도 불구하고 중심부 주변의 지름 변화가 전체 힌지 강성에 영향을 주고 있음을 확인할 수 있다. 이 사실은 동일한 t 값이라 하더라도 힌지의 형태를 원형, 타원형, 포물선형 등으로 변화시킬 때에 플렉서 힌지의 강성을 변화시키는 설계가 가능함을 의미한다. Fig. 4에서는 종반경을 고정하고 횡반경을 변화시켰을 때의 강성 변화를 보여준다. Fig. 3과 반대로 횡반경이 커짐에 따라 축방향 및 굽힘 강성값이 모두 낮아지는 것을 확인할 수 있다.

포물선형 플렉서 힌지의 이차항의 계수인 p 값의 변화에 따른 축방향 강성과 굽힘방향 강성값의 변화는 Fig. 5에 나타나 있다. 포물선형 플렉서 힌지는 타원형 플렉서 힌지와 달리 설계변수가 1개이므로 설계상으로는 원형 플렉서 힌지와 차이점이 존재하지 않는다. 플렉서 힌지는 일정한 축방향의 하중을 지지하면서도 조인트의 역할을 잘 수행하기 위해 굽힘방향 강성은 낮게, 축방향 강성은 크게 설계하는 것이 유리한데, Fig. 5를 보면 포물선형 플렉서 힌지는 원형 플렉서 힌지($K_a = 11.02$ N/um, $K_b = 1.19$ Nm/rad)에 비해 굽힘방향 강성이 낮은 설계 구간이 좁은 편이어서 원형 플렉서 힌지 대비 설계상의 이점이 크게 보이지 않는다.

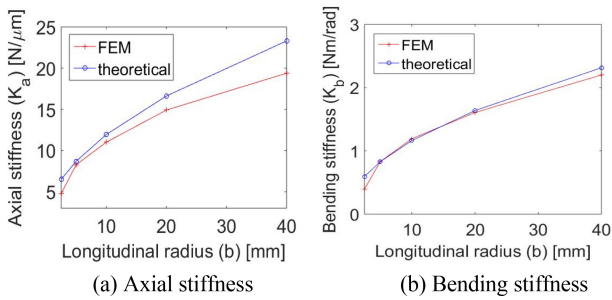


Fig. 3 Stiffness comparison between FEM and theoretical analyses for elliptic hinge with fixed transverse radius $a (= 10 \text{ mm})$

Table 1 Stiffnesses resulted from theoretical calculation and finite element analysis for elliptic hinge with fixed transverse radius $a (= 10 \text{ mm})$

| | | b [mm] | 2.5 | 5 | 10 | 20 | 40 |
|-------------|----------------|----------|-----|------|------|------|----|
| Theoretical | K_a [N/um] | 6.5 | 8.7 | 11.9 | 16.6 | 23.3 | |
| | K_b [Nm/rad] | 0.6 | 0.8 | 1.2 | 1.6 | 2.3 | |
| | | | | | | | |
| FEM | K_a [N/um] | 4.7 | 8.3 | 11.0 | 14.9 | 19.4 | |
| | K_b [Nm/rad] | 0.4 | 0.8 | 1.2 | 1.6 | 2.2 | |

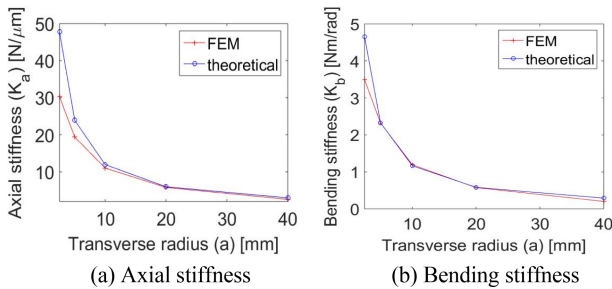


Fig. 4 Stiffness comparison between FEM and theoretical analyses for elliptic hinge with fixed longitudinal radius $b (= 10 \text{ mm})$

Table 2 Stiffnesses resulted from theoretical calculation and finite element analysis for elliptic hinge with fixed longitudinal radius $b (= 10 \text{ mm})$

| | | a [mm] | 2.5 | 5 | 10 | 20 | 40 |
|-------------|----------------|----------|------|------|-----|-----|----|
| Theoretical | K_a [N/um] | 47.8 | 23.9 | 11.9 | 6.0 | 3.0 | |
| | K_b [Nm/rad] | 4.7 | 2.3 | 1.2 | 0.6 | 0.3 | |
| FEM | K_a [N/um] | 30.3 | 19.4 | 11.0 | 5.8 | 2.6 | |
| | K_b [Nm/rad] | 3.5 | 2.3 | 1.2 | 0.6 | 0.2 | |

타원형 플렉서 힌지의 활용에 있어서 주목할 점은 노치 부분과 자루가 접하는 부분에서 노치의 표면 기울기와 자루의 기울기를 일치시켜서 서로 접하게 설계함으로써 불필요한 응력 집중을 줄일 수 있다는 점이다. 원형 플렉서 힌지의 경우 설계 변수가 1개이므로 노치 길이가 정해져 있는 경우 필요로 하는 반경을 지니면서도 노치와 자루가 서로 접하도록 설계하기가 불가능한 경우가 발생한다. 그러나 타원형 플렉서 힌지는 2개의

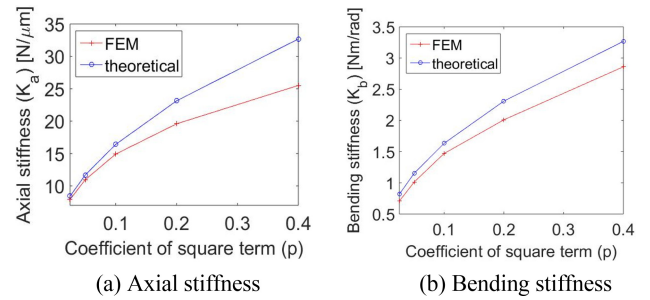


Fig. 5 Stiffness comparison between FEM and theoretical analyses for parabolic hinge

Table 3 Stiffnesses resulted from theoretical calculation finite element analysis for parabolic hinge

| | | p | 0.025 | 0.05 | 0.1 | 0.2 | 0.4 |
|-------------|----------------|-----|-------|------|------|------|-----|
| Theoretical | K_a [N/um] | 8.4 | 11.7 | 16.4 | 23.1 | 32.7 | |
| | K_b [Nm/rad] | 0.8 | 1.2 | 1.6 | 2.3 | 3.3 | |
| FEM | K_a [N/um] | 7.9 | 11.0 | 14.9 | 19.6 | 25.5 | |
| | K_b [Nm/rad] | 0.7 | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 2.9 | |

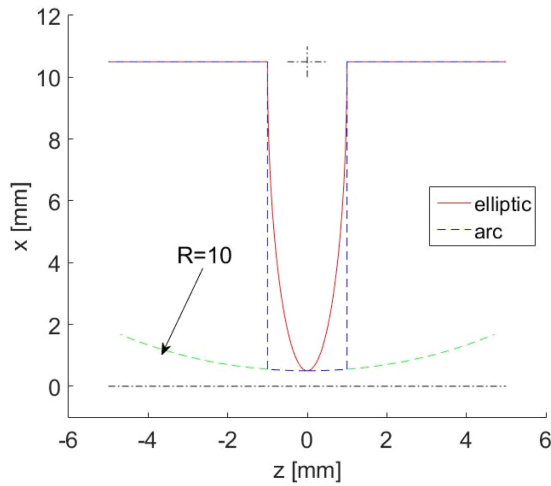
설계 변수를 독립적으로 선정하여 설계할 수 있다. 그러므로 노치의 중심부에서 곡률반경은 원형 플렉서 힌지와 동일하면서도 노치와 자루가 만나는 부분이 급격하게 형상이 변하지 않는 설계가 가능하다.

이는 노치와 자루가 만나는 부분의 응력이 과도하게 발생하지 않게 설계할 수 있도록 대안을 제시해 주는 것이다. 선행 연구[11]에서 완전한 원이 아닌 호 형태의 노치일 때($e = 1 \text{ mm}$, $R = 10 \text{ mm}$) 응력집중이 해당 논문의 Fig. 9에 나타나 있는 것과 같이 노치와 자루의 연결부위에서 발생하며 계산된 응력집중계수는 1.483이다. 하지만 이번 연구에서 노치의 길이가 같은 경우에 타원형($a = 1 \text{ mm}$, $b = 10 \text{ mm}$)으로 적용하면 응력집중이 노치의 중앙부에서 발생하며 계산된 응력집중계수는 1.214이다. 단면 형상의 비교는 Fig. 6에 표시하였다.

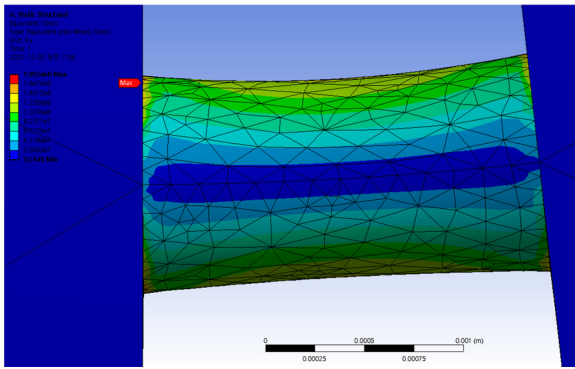
4. 곡선 보간 및 곡면 보간을 통한 실험식 구성

먼저 앞에서 수행한 이론 및 유한요소해석 결과를 바탕으로 곡선 보간을 수행하여 Fig. 7에 나타내었다. 타원형 플렉서 힌지의 경우 한 가지 설계 변수를 고정한 상태에서 나머지 설계 변수가 변화함에 따라 축방향 및 굽힘방향 강성이 어떻게 변화하는지 예측하기에 용이하다. 또한 포물선형 플렉서 힌지는 설계 변수가 한 개이므로 곡선 보간을 통해서 각 강성값의 변화 경향을 예측할 수 있다.

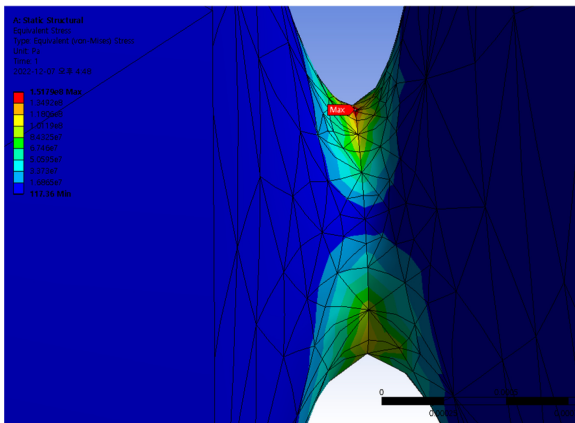
타원형 플렉서 힌지의 강성값 변화를 예측하기 위한 실험식 구성을 위해서는 2가지 설계 변수의 동시 변화에 따른 결과를 곡면 보간할 필요가 있다. 이를 위해 기존의 해석에 사용된 설계 조건 외에 Fig. 8과 같이 8가지 조건을 추가하여 총 17가지



(a) Cross-section comparison



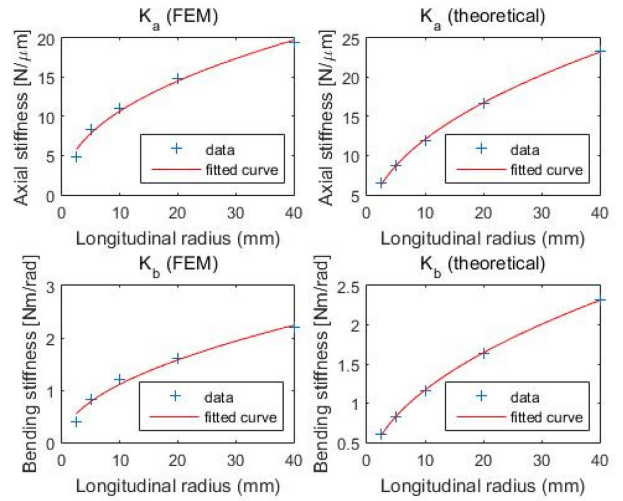
(b) Stress concentration with arc (partially circular) notch ($e = 1 \text{ mm}, R = 10 \text{ mm}$) [11] Adapted from Ref. 11 on the basis of OA



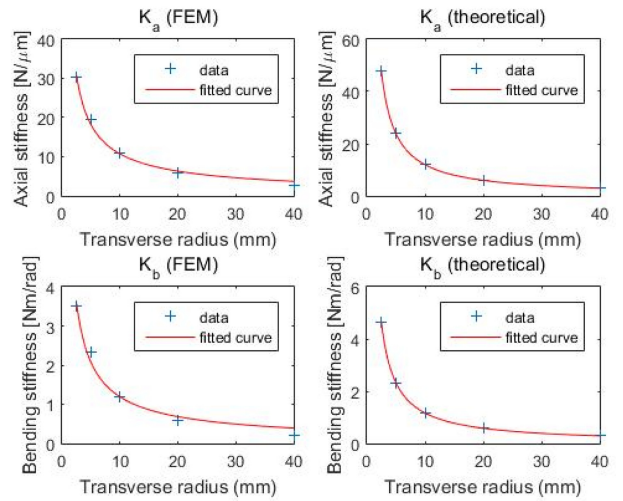
(c) Stress concentration with elliptic notch ($a = 1 \text{ mm}, b = 10 \text{ mm}$)

Fig. 6 Comparison between circular and elliptic notches

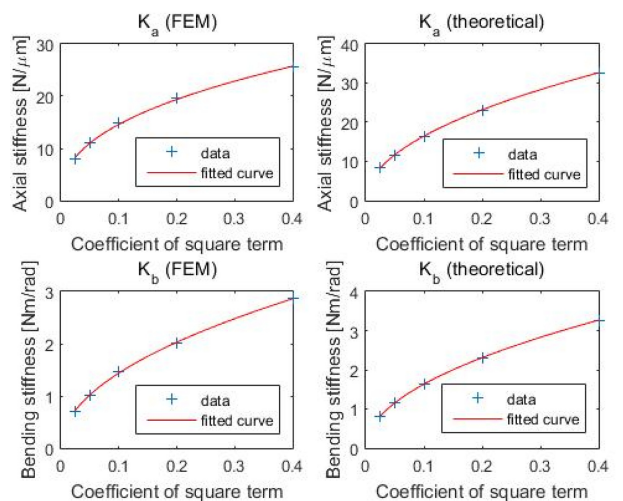
조건에 대한 이론해석 및 유한요소해석 결과를 활용함으로써 곡면 보강을 수행하였다. 선행 연구[11]에서 곡선 회귀식이 지수 형태일 때 가장 효과적임을 발견하였으므로, 설계변수가 지수적으로 증감하는 것이 적합하다는 것에 착안하여 10 mm를 중심으로 2배씩 증감하여 5개의 변수를 선택하였다. 효과적인 계산과 시뮬레이션을 위하여 평면도 측정에 많이 활용되는



(a) Elliptic hinge (Fixed transverse radius = 10 mm)



(b) Elliptic hinge (Fixed longitudinal radius = 10 mm)



(c) Parabolic hinge

Fig. 7 Curve fitting for FEM and theoretical calculation

Union Jack 측정법을 선택하였으며 사용된 설계변수의 조합을 Fig. 8에 도시하였다.

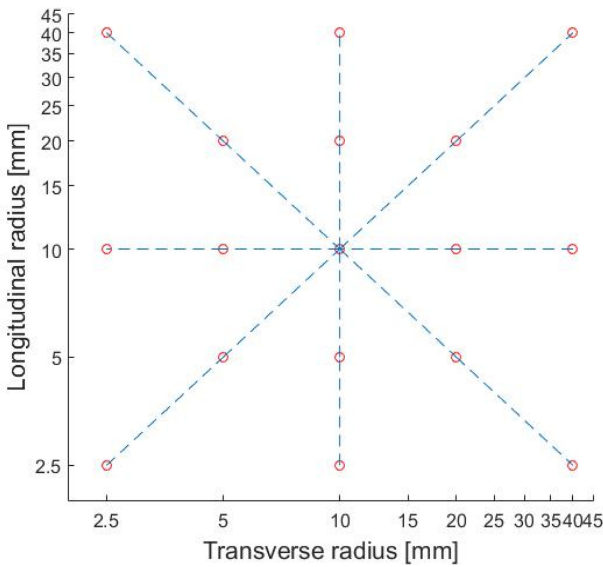
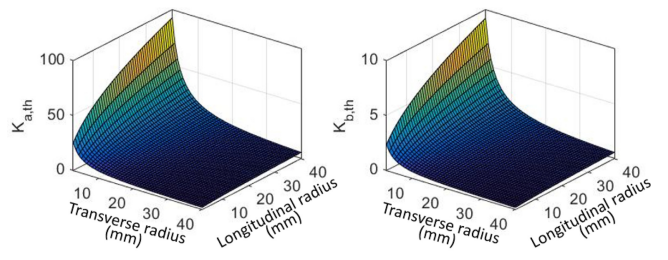
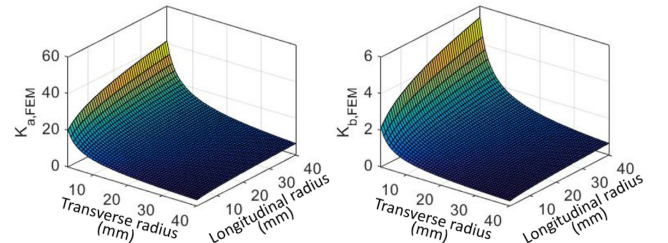


Fig. 8 Analysis conditions for surface fitting



(a) Surface fitting based on theoretical analysis results



(b) Surface fitting based on finite element analysis results

Fig. 9 Surface fitting for FEM and theoretical calculation

Table 4 Coefficients of the surface-fitted equations

| | | Theoretical | FEM |
|-------------------|------------|-------------|--------|
| Axial stiffness | α_1 | 0.564 | 0.401 |
| | β_1 | -1.005 | -0.671 |
| | γ_1 | 0.471 | 0.259 |
| Bending stiffness | α_2 | 0.0515 | 0.0431 |
| | β_2 | -1.001 | -0.766 |
| | γ_2 | 0.493 | 0.337 |

실험실 구성을 위해서는 물리적 의미가 없는 다항식 회귀가 아닌 Paros-Weisbord의 간략식 형태인 지수함수 형태의 식으로 회귀를 수행하였다. 결과적으로 축방향 강성과 굽힘방향 강성 각각에 대해 식(12)와 식(13) 형태로 실험식을 도출하였다. 아래 식에서 a 와 b 는 타원형 플렉서 힌지에서 타원의 횡반경과 종반경을 의미하며, α , β , γ 는 계수 및 지수이다.

$$K_a = \alpha_1 E t \left(\frac{a}{t}\right)^{\beta_1} \left(\frac{b}{t}\right)^{\gamma_1} \quad (12)$$

$$K_b = \alpha_2 E t^3 \left(\frac{a}{t}\right)^{\beta_2} \left(\frac{b}{t}\right)^{\gamma_2} \quad (13)$$

회귀를 수행하여 얻은 곡면 맞춤의 결과는 Fig. 9와 Table 4에 나타나 있다. 이론식을 활용한 결과와 유한요소해석을 활용한 결과를 모두 제시하였으나 실질적인 힌지의 거동에 가까운 유한요소해석 결과를 통해 얻은 실험식을 활용하는 것을 권장한다. 이러한 실험식은 위치 결정 스테이지 설계 시 간단하게 플렉서 힌지의 설계 변수를 대입하여 축방향 및 굽힘방향 강성 값을 예측함으로써 변화의 경향을 파악하는 데에 유용하게 사용할 수 있다.

5. 결론

본 연구를 통해 얻은 결론은 아래와 같이 제시될 수 있다.

(1) 반도체 가공 공정의 고도화와 특수 정밀 가공 기술의 발달로 최대의 위치 결정 성능을 내기 위해 원형 플렉서 힌지뿐 아니라 보다 적합한 강성 특성을 지닌 힌지 형태를 고려하여 선정할 필요가 있다.

(2) 2 자유도 타원형 및 포물선형 플렉서 힌지는 그동안 연구가 많이 이루어지지 않았으며 본 연구를 통해 타원의 장단반경, 포물선의 2차항 계수를 설계변수로 두고 축방향 및 굽힘방향 강성의 변화를 고찰하였다.

(3) 축방향 및 굽힘방향 강성 K_a 와 K_b 를 a 또는 b , 그리고 p 의 함수로 두고 이론식과 유한요소해석 결과로 제시하여 설계 변수에 따른 변화 경향을 파악하였다.

(4) 지수형태를 지닌 식으로 곡면맞춤을 수행하여 실험식을 유도함으로써, 타원형 플렉서 힌지를 적용함에 있어서 임의의 설계 변수에 대한 축방향 및 굽힘방향 강성 값을 예측할 수 있도록 하여 위치 결정 스테이지 설계에 활용할 수 있도록 하였다.

(5) 타원형 플렉서 힌지는 원형 플렉서 힌지와 달리 항상 노치와 자루가 수평하도록 설계가 가능하므로 설계 변수 선정의 제약이 있을 때 원형 플렉서 힌지를 대신하여 사용 가능성을 제시하였다.

(6) 포물선형 플렉서 힌지는 축방향 및 굽힘방향 강성에 있어서 원형 플렉서 힌지에 비해 주목할 만한 장점이 발견되지 않아 활용을 권하지 않는다.

(7) 향후 보다 정교한 제어가 가능한 수학적 표현을 바탕으로 플렉서 힌지의 형태를 다양한 방향의 강성 특성에 맞게 맞춤형 설계할 수 있도록 연구할 예정이다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 논문은 2020년도 동양미래대학교 교내 학술 연구 과제의 연구 지원을 받아 수행된 것임.

REFERENCES

1. Kim, H. S., Cho, Y. M., Moon, J. H., (2010), Active vibration control using a novel three-DOF precision micro-stage, *Smart Materials and Structures*, 19(5), 055001.
2. Li, C.-X., Gu, G.-Y., Yang, M.-J., Zhu, L.-M., (2013), Design, analysis and testing of a parallel-kinematic high-bandwidth XY nanopositioning stage, *Review of Scientific Instruments*, 84(12), 125111.
3. Moon, J.-H., Park, J.-H., Park, H.-J., (2009), Design and modeling of a 6-DOF stage for ultra-precision positioning, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 26(6), 106-113.
4. Shin, H., Moon, J.-H., (2013), Design of a double triangular parallel mechanism for precision positioning and large force generation, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 19(3), 862-871.
5. Roy, N. K., Cullinan, M. A., (2018), Design and characterization of a two-axis, flexure-based nanopositioning stage with 50 mm travel and reduced higher order modes, *Precision Engineering*, 53, 236-247.
6. Cai, K., Tian, Y., Liu, X., Zhang, D., Shang, J., Shirinzadeh, B., (2019), Development and control methodologies for 2-DOF micro/nano positioning stage with high out-of-plane payload capacity, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 56, 95-105.
7. Lobontiu, N., (2002). *Compliant mechanisms: Design of flexure hinges*, CRC Press.
8. Paros, J., (1965), How to design flexure hinges, *Machine Design*, 37, 151-156.
9. Lobontiu, N., Paine, J. S., Garcia, E., Goldfarb, M., (2001), Corner- filleted flexure hinges, *Journal of Mechanical Design*, 123(3), 346-352.
10. Smith, S. T., (2000), *Flexures: Elements of elastic mechanisms*, CRC Press.
11. Moon, J.-H., (2022), Analysis of the cylindrical flexure hinges with circular notches, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 39(2), 151-157.

APPENDIX

A1. 축방향 강성

다음 식들에서 a 는 z 방향 축반경, b 는 x 방향 축반경, t 는 힌지 목 두께, E 는 탄성계수이다.

A1.1 타원형 노치

$$K_a = \frac{\pi E t^{\frac{3}{2}} (4b+t)^{\frac{3}{2}}}{8a\sqrt{t} + \sqrt{4b+t} + 32ab \arctan\left(\frac{\sqrt{4b+t}}{\sqrt{t}}\right)}$$

A1.2 포물선형 노치

$$K_b = \frac{E}{\frac{128a(120b^4 + 176b^3t + 92b^2t^2 + 24bt^3 + 3t^4)}{3\pi t^3(2b+t)^2(4b+t)^3} + \frac{1024ab \arctan\left(\frac{\sqrt{4b+t}}{\sqrt{t}}\right)(5b^2 + 4bt + t^2)}{\pi t^{\frac{7}{2}}(4b+t)^{\frac{7}{2}}}}$$

A2. 굽힘방향 강성

다음 식들에서 p 는 포물선 2차 함수의 계수이고, t 는 힌지 목 두께, E 는 탄성계수이다.

A2.1 타원형 노치

$$K_a = \frac{E}{\frac{200}{\pi t(p+5000t)} + \frac{2\sqrt{2}\arctan\left(\frac{\sqrt{2}\sqrt{p}}{100\sqrt{t}}\right)}{\pi\sqrt{p}t^{\frac{3}{2}}}}$$

A2.2 포물선형 노치

$$K_b = \frac{E}{\frac{10000000000\left(\frac{3p^2}{5000000} + \frac{pt}{125} + 33t^2\right)}{3\pi t^3(p+5000t)^3} + \frac{20\sqrt{2}\arctan\left(\frac{\sqrt{2}\sqrt{p}}{100\sqrt{t}}\right)}{\pi\sqrt{p}t^{\frac{7}{2}}}}$$

**Hyun-Pyo Shin**

Associate Professor in the School of Robot and Automation Engineering, Dongyang Mirae University. His current research interests include the design of ultra-precision positioning stages based on flexure hinges and redundantly actuated parallel mechanisms.
E-mail: hpshin@dongyang.ac.kr

**Jun-Hee Moon**

Associate Professor in the Department of Automation Engineering, Yuhan University. His research interests include the design and control of flexure linkages and micro-positioning stages.
E-mail: jhmoon@yuhan.ac.kr

헬리컬 초경 드릴과 서멧 드릴의 성능 비교 및 분석

Performance Comparison and Analysis of Helical Tungsten Carbide and Cermet Welded Drills

하정호¹, 김동규², 사민우^{1,#}
Jeong Ho Ha¹, Dong Gyu Kim², and Min-Woo Sa^{1,#}

¹ 에스제이앤티텍 기업부설연구소 (R&D Center, SJNTEC)
² 대구기계부품연구원 (Daegu Mechatronics & Materials Institute)
Corresponding Author / E-mail: 79smw42@gmail.com, TEL: +82-53-586-6210
ORCID:0000-0003-0979-8736

KEYWORDS: Helical drill (헬리컬 드릴), Spindle load (주축부하), Surface roughness (표면 거칠기), Inner diameter (내경), Feed rate (이송속도), Revolutions per minute (분당 회전수)

Drill processing is essential in various industries, such as automobiles and aviation. Carbide is mainly used for drilling, but cermet is also one of the most used materials. Since cermet has low reactivity with iron and low reactivity at high temperatures, excellent surface roughness can be obtained. However, experimental research comparing the performance of carbide and cermet drills is lacking. The purpose of this study was to investigate the difference in the cutting characteristics of cermet and carbide tools. The experimental conditions were feed rates of 150, 200, 250, and 300 mm/min and 1,000, 1,500, and 2,000 revolutions per minute. S45C was used as the workpieces. In this study, surface roughness, inner diameter, and spindle load were derived as experimental results and used as indicators to evaluate the performance of carbide and cermet drills. The results showed that the performance of the cermet drill was superior to that of the carbide drill.

Manuscript received: August 5, 2022 / Revised: November 16, 2022 / Accepted: December 13, 2022
This paper was presented at KSPE Spring Conference 2022

1. 서론

최근 수입품을 대체하기 위해 원천기술을 확보하고 수입품을 국산화하려는 노력을 통해 중소기업 기술 역량 강화를 시키려는 사회적인 분위기가 고조되고 있다. 절삭 공구 기업에서도 마찬가지로 이러한 흐름이 지속되고 있다. 절삭 가공 중에서 드릴 가공은 30%를 차지할 만큼 비중이 크고 중요한 공정이므로 경제적인 가치도 높다. 앞으로도 드릴 가공 시장은 성장하여 더 커질 것으로 판단된다. 이에 맞게 드릴 가공의 기술은 계속해서 발전하고 있는 실정이다. 현재 기업에서는 기존의 드릴의 수명을 향상시키고 부서지기 쉬운 공구를 안정화시키는 등의 개발을 통해 새로운 드릴을 개발해 나가고 있다. 절삭공구가 갖추어야 할 기본적인 특성에는 경도와 강도가 있다. 절삭공구가 피삭재

금속과 접촉하는 순간 큰 충격을 받게 된다. 이때 절삭공구의 날이 치핑 되어 버린다. 따라서 절삭공구는 경도뿐만 아니라 큰 충격에도 견딜 수 있는 강도가 필요하다. 절삭공구 중에 경도와 강도를 균형 있게 가지고 있는 것이 초경합금이다. 초경합금의 주성분은 텅스텐 카바이드(WC)와 코발트(Co) 입자로 구성되어 있어 이들의 입자 크기의 조절을 통해 초경합금의 특성을 강화할 수 있다. 초경합금은 경도와 인성이 높고 내마모성이 우수하여 일반적으로 초경합금의 소재가 드릴의 재질로 많이 사용된다. 일반적으로 서멧은 세라믹과 금속의 적절한 조합으로 만들어지는 재료다. 서멧은 TiCN을 주성분으로 하고 있기 때문에 내열특성이 뛰어나고 철과의 친화성이 낮아 우수한 표면 거칠기와 높은 치수 정밀도를 요구하는 가공에서는 서멧의 사용 요구도가 높다[1-5]. 하지만 초경합금에 비해 상대적으로 인성이

낮아 황삭 가공이나 단속가공에서는 서멧의 사용이 단점이 될 수 있다[6]. 이러한 장, 단점을 실제 실험에서 확인하기 위한 연구는 거의 보고되지 않고 있다. 따라서, 본 연구에서는 실험을 수행하기 전에 먼저 유한요소해석을 수행하여 헬리컬 드릴의 선단각과 여유각의 영향 등을 살펴 본 후 실제로 서멧 드릴과 초경 드릴의 제작 후 성능을 평가하는 실험을 수행하였다. 성능을 평가하기 위한 지표로 주축부하, 홀의 내경, 홀의 표면 거칠기를 사용하였다. 특히, 표면 거칠기의 측정에서 서멧 공구를 사용했을 때 초경 공구를 사용했을 때보다 성능이 확연하게 뛰어났다는 것을 확인할 수 있었다. 모든 가공 조건에서 서멧 공구를 사용했을 때의 표면 거칠기가 초경 공구를 사용했을 때의 표면 거칠기보다 우수하게 측정되었다.

2. 유한요소해석

2.1 유한요소해석 조건

헬리컬 드릴의 제작에 앞서 드릴의 형상에 따른 절삭력 및 온도 추이를 살펴보기 위해서 절삭가공 전용 해석 프로그램인 AdvantEdge FEM을 사용하였다. Table 1은 해석에 사용된 드릴의 조건을 보여준다. 드릴 가공 시 발생하는 절삭력에 영향을 미치는 Point Angle을 100, 120, 140°, Clearance Angle은 7, 10, 13°로 각각 적용하여 9개의 조건으로 해석을 수행하였다. 공통적으로 헬릭스 각도는 30°, Web 두께는 4.5 mm로 적용하였고 플루트 반경은 5.0 mm, 엣지 반경은 0.04 mm로 적용하였다. 또한, 드릴의 직경은 14 mm로 적용하였고 치즐 에지 각도는 118.5°로 적용하였다. Table 2는 해석을 하기 위해 사용된 격자의 크기와 공구의 재질 등을 보여준다. 해석에 적용된 피삭재는 S45C이고, 공구 소재는 텅스텐 카바이드로 적용하였다. 격자가 조밀하게 들어가는 부분의 격자크기가 급격하게 커져 해석의 오류가 발생하는 것을 막기 위해 격자 크기가 점진적으로 증가하도록 격자를 생성하였다. 피삭재의 격자 크기는 0.03-2.0 mm이고, 공구의 격자 크기는 0.03-0.3 mm로 적용하였다. 공구의 회전수는 4,500 rpm이고 회전당 이송량은 0.3 mm/rev로 적용하였다. 공구와 피삭재의 초기 상태 온도는 20°C로 가정하였다. Fig. 1은 해석에 사용된 드릴과 피삭재의 격자를 보여준다. 여유각과 선단각의 종류에 따라 나타내었고 격자의 형태는 크게 다르지 않음을 보여준다. 격자는 비정렬 격자를 적용하여 헬리컬 드릴과 피삭재의 해석을 수행하였다.

2.2 유한요소해석 결과

Fig. 2(a)는 치즐부의 온도 분포를 보여준다. 최고 온도는 대략 700°C 정도로 측정되었으며 선단각과 여유각의 변화에 따라 온도 분포가 거의 유사하게 나타났다. 각 각의 선단각 100, 120, 140°에서 여유각에 따른 온도 분포의 경향성은 불규칙적으로 나타났고 선단각이 높을수록 고온의 온도 분포가 더

Table 1 Information of helical drill shape

| Parameter | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|------------------------------|-------|----|----|-----|----|----|-----|----|----|
| Point angle [°] | 100 | | | 120 | | | 140 | | |
| Clearance angle [°] | 7 | 10 | 13 | 7 | 10 | 13 | 7 | 10 | 13 |
| Helix angle [°] | 30 | | | | | | | | |
| Web thickness [mm] | 4.5 | | | | | | | | |
| Flute radius [mm] | 5 | | | | | | | | |
| Edge radius [mm] | 0.04 | | | | | | | | |
| Diameter [mm] | 14 | | | | | | | | |
| Body diameter clearance [mm] | 0.6 | | | | | | | | |
| Chisel edge angle [°] | 118.5 | | | | | | | | |

Table 2 Conditions of simulation

| | |
|---------------------------------|----------|
| Workpiece material | S45C |
| Min workpiece element size [mm] | 0.03 |
| Max workpiece element size [mm] | 2.0 |
| Tool material | Tungsten |
| Min tool element size [mm] | 0.03 |
| Max tool element size [mm] | 0.3 |
| Spindle speed [rpm] | 4,500 |
| Feed per revolution [mm/rev] | 0.3 |
| Initial temperature [°C] | 20 |
| Angle of rotation [°] | 360 |

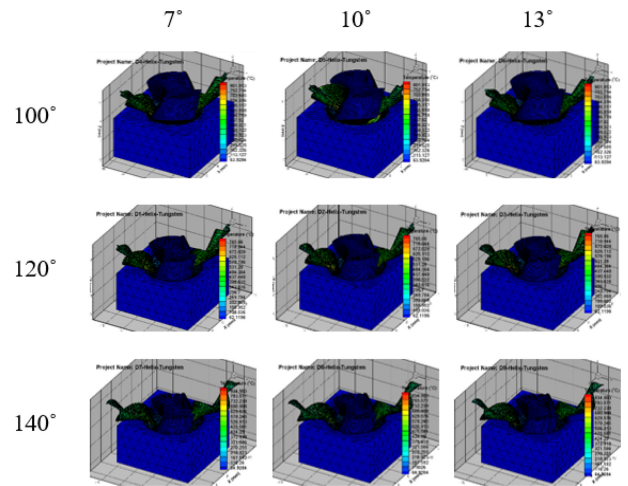
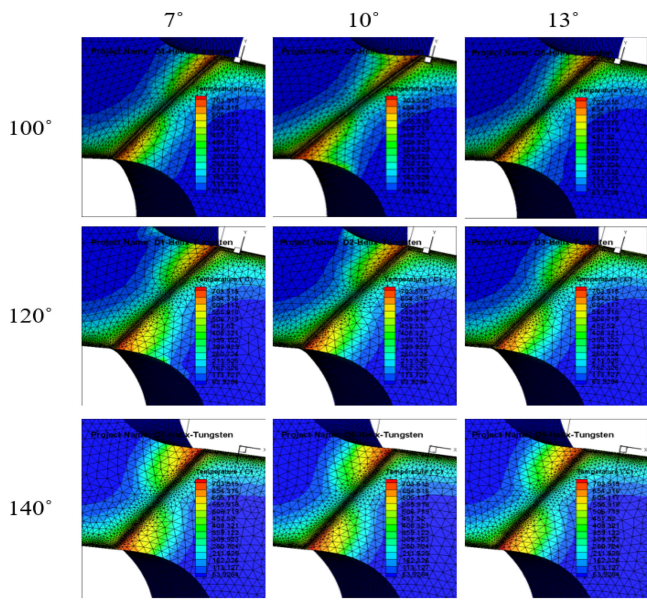


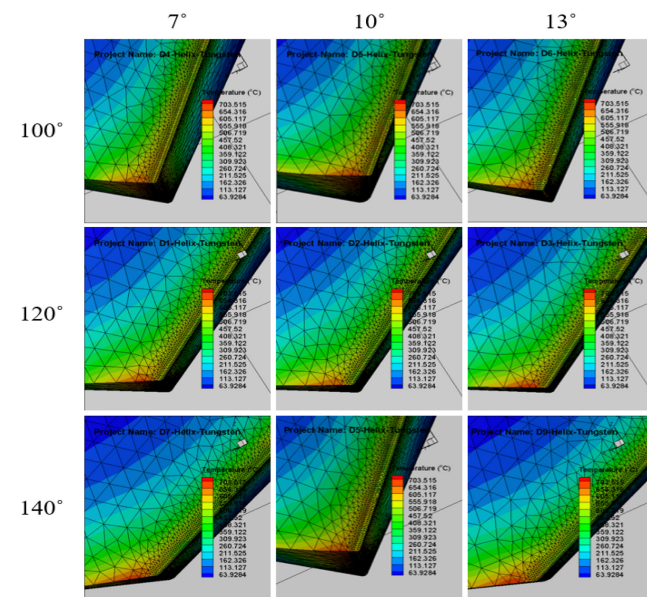
Fig. 1 Mesh generation of helical drill

넓어지는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 2(b)에서의 인선부 온도 분포와 경향은 거의 유사했다. 그리고 선단각이 낮을수록 접촉 면적이 넓어져서 고온의 온도분포가 넓어지는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 3은 절삭력을 시간에 따라 그래프로 나타낸 것을 보여준다. 이때 절삭력은 드릴의 축방향으로 발생하는 추력(Thrust Force)을 나타낸 것이다. 그래프에서 확인할 수 있듯이 선단각이



(a) Cutting edge



(b) Cutting edge 2

Fig. 2 Temperature distribution of cutting edge

증가할수록 절삭력이 증가하였다. 그리고 여유각이 작을수록 절삭력이 증가하는 경향을 보였다. 선단각이 증가할수록 절삭력이 증가해 가공 시 더 원활한 진행을 이끌어 준다. 또한 여유각이 증가할수록 절삭력이 감소하지만 인선부의 강도에 영향을 미치게 되므로 너무 큰 여유각은 절삭 가공에 부정적인 영향을 미치게 된다. 반면 여유각이 너무 작으면 절삭 시 접촉 면적이 증가하게 되어 열이 많이 발생하기 때문에 너무 작은 여유각을 선정하는 것도 좋지 못한 선택이 될 수 있다. Figs. 3과 5에서 확인할 수 있듯이 초기에 온도와 절삭력이 급격하게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이것은 해석을 수행할 때 드릴이 피삭재를 가공하는 초기 진입 상황까지 해석을 수행하게 되면 너무 큰 비용이

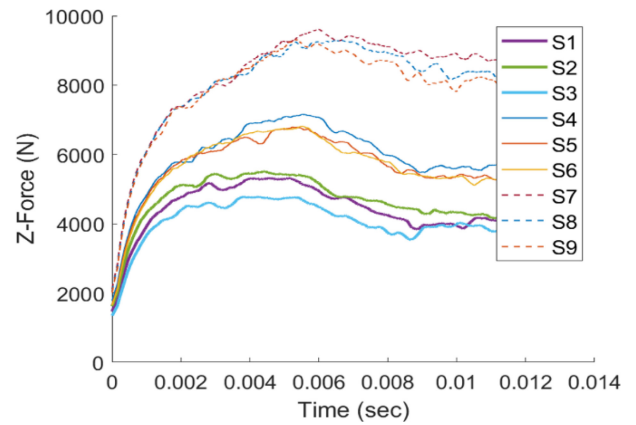


Fig. 3 Variation of cutting force along the time

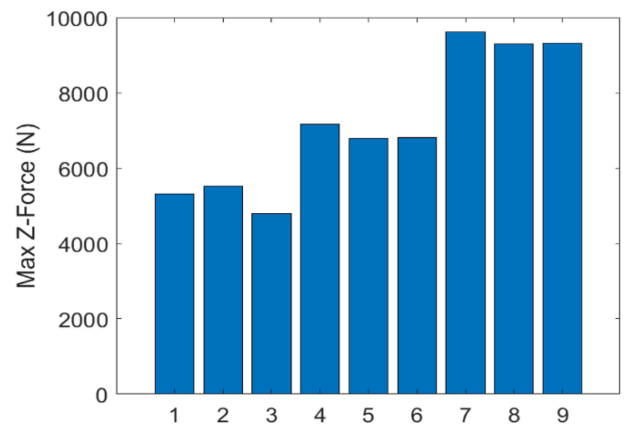


Fig. 4 Max cutting force at different clearance and point angle

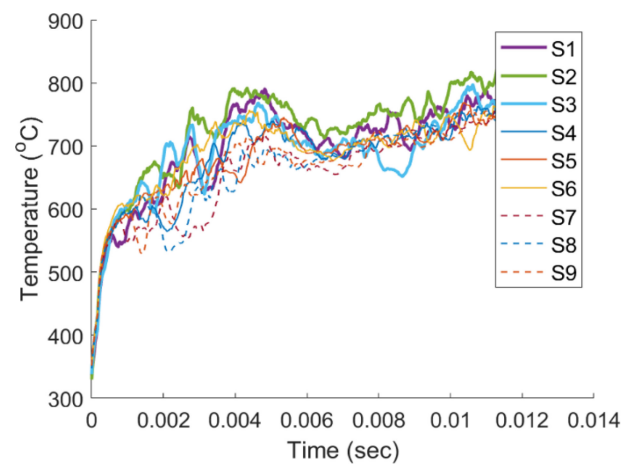


Fig. 5 Variation of temperature along the time

들기 때문에 초기 상태에 드릴이 피삭재의 일정 깊이에 있다고 가정하고 해석을 진행해서 시작하자마자 절삭력과 온도가 급격하게 증가하는 것이다. Figs. 4와 6은 최대 절삭력과 온도에 대한 그래프를 나타내고 있다. 최대 절삭력은 선단각의 차이에 의해서 다르게 측정이 되고 있지만 최대 온도는 가공 조건의 영향이 미미함을 확인할 수 있었다.

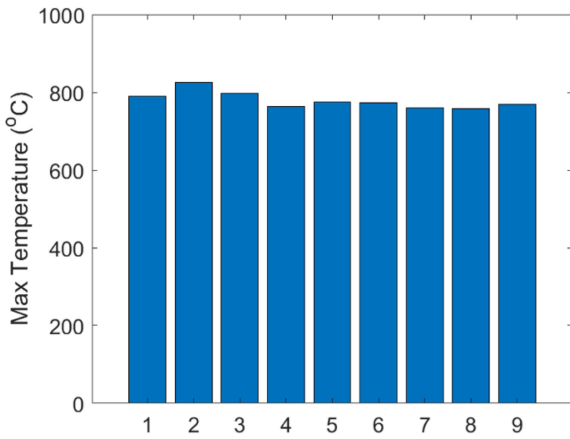


Fig. 6 Max temperature at different clearance and point angle

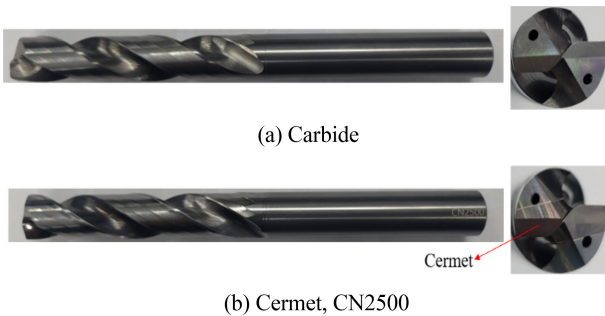


Fig. 7 Carbide and cermet drills

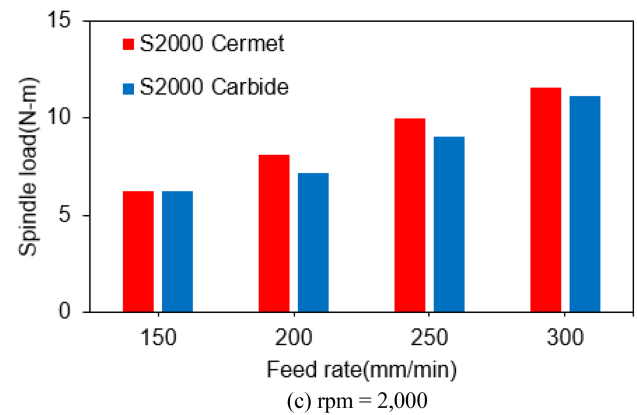
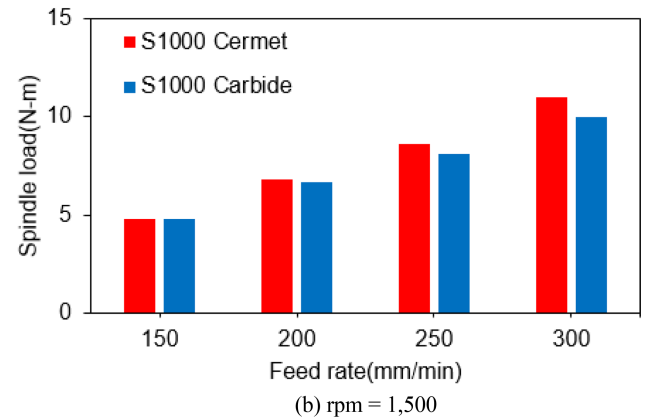
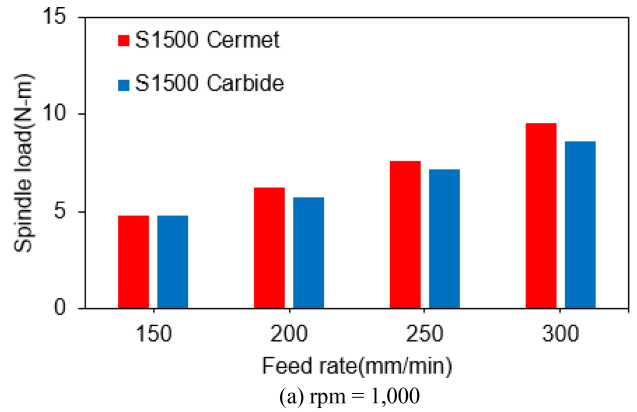


Fig. 9 Comparison of the spindle load

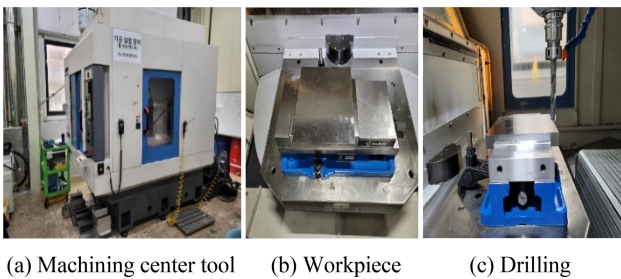


Fig. 8 Machining center tool equipment setting up

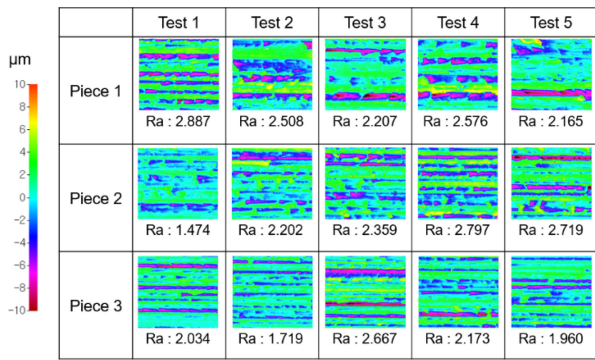
3. 재료 및 방법

해석을 통해 얻어진 절삭력과 인선의 온도 분포에 대한 결과를 참고하여 강재를 가공할 시 선단각 140°, 여유각 10°일 때가 적합한 것으로 판단되었다. Fig. 7은 초경 드릴과 서멧 드릴의 실물 사진을 보여준다. 드릴의 성능을 더 높이기 위하여 호닝을 0.04-0.06 mm만큼 하였고 드래그 피니싱도 수행하였다. 드래그 피니싱은 서멧 툴과 초경 툴 모두 동일하게 옛지를 부드럽게 표면처리하는 공정으로서 6분 동안 작업하였고, 정회전 3분, 역회전 3분 수행하였다. Fig. 8은 머시닝 센터 장비 셋업 사진을 보여준다. Fig. 8(a)는 머시닝 센터 장비인 DST-36D, Daesung HITEC을 보여주고 있다. Fig. 8(b)는 S45C(20*200*200) 피삭재를 머시닝 센터 장비에 셋팅한 사진을 보여주고 있다.

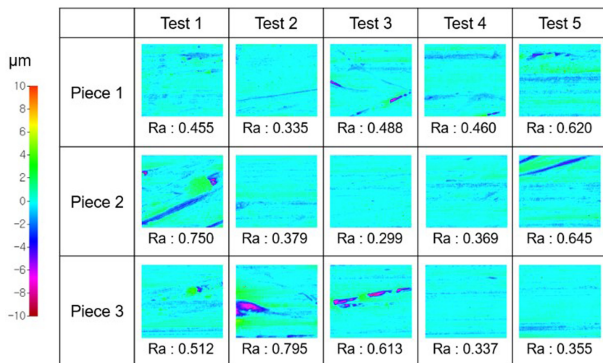
4. 실험 결과 및 고찰

4.1 주축 부하 측정 데이터

Fig. 9는 드릴 가공 시 발생하는 주축 부하를 측정한 그래프이다. 모든 조건에서 이송속도를 증가시키면 주축부하도 같이 증가했다. 하지만 회전수에 따른 주축부하의 변화는 거의 없었다. 회전수 1,000 rpm에서 1,500 rpm까지는 주축부하의 변화가 거의 없다가 회전수 2,000 rpm에서 주축부하가 1.0-1.5 N-m정도 상승한 것을 확인할 수 있었다. 이송속도 150 mm/min을 제외한 모든 가공조건에서 초경과 서멧을 비교하면 서멧 공구를 사용했을 때의 주축부하가 더 크게 측정이 되었다.



(a) Carbide



(b) Cermet

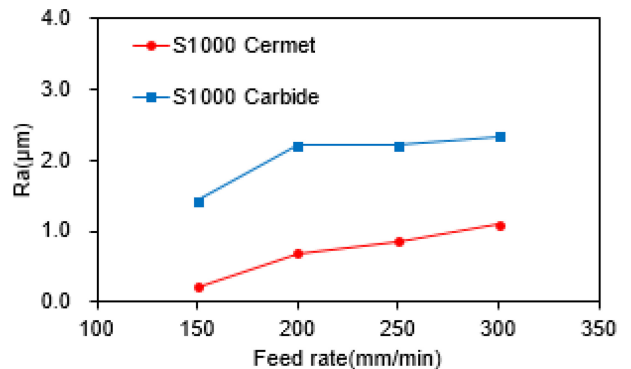
Fig. 10 Surface roughness on the hole surface after drilling

4.2 드릴 가공 후 표면 거칠기 분석

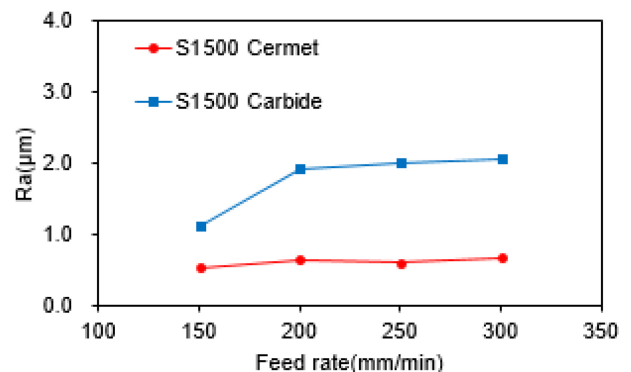
Fig. 10은 드릴 가공한 표면을 스캔해서 표면 거칠기를 분석한 데이터를 보여주는 그림이다. 초경 드릴을 사용한 피삭재 표면의 표면 거칠기는 대부분 Ra 2.0 μm 을 넘어서는 값이 측정되었다. 반면에 서멧 드릴을 사용한 피삭재 표면의 거칠기는 Ra 1.0 μm 을 넘어서지 않는 수준으로 표면 거칠기 값이 측정되었다. 이와 같은 현상을 보이는 것은 초경 소재와 서멧 소재의 특성과 관련이 깊다. 초경합금과 서멧을 비교했을 때, 초경합금은 텅스텐을 주성분으로 하여 만들어지는 반면 서멧은 텅스텐을 거의 함유하고 있지 않다. 텅스텐은 철과의 친화성이 높아 초경 드릴을 사용하면 구성인선이 발생할 가능성이 높아지고 이는 표면 거칠기에 영향을 미칠 수 있다[7]. 따라서 서멧의 표면 거칠기가 초경의 표면 거칠기보다 더 우수하게 측정되는 것이라고 사료 된다[8].

4.3 표면 거칠기 측정 데이터

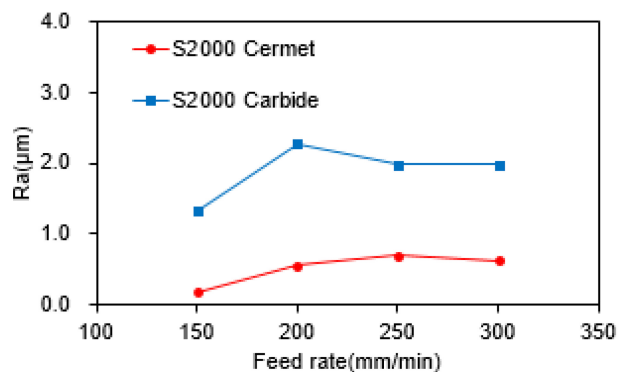
Fig. 11은 초경 드릴과 서멧 드릴을 사용했을 때의 표면 거칠기 값을 비교한 그래프이다. 모든 경우에서 서멧의 표면 거칠기가 초경의 표면 거칠기보다 우수하게 측정되었다. 이것은 TiCN을 주체로 한 서멧 특성 상 철과의 용착 현상이 거의 발생하지 않고 내열 특성이 우수한 반면 초경합금은 철과의 친화성이 높기 때문에 실험 결과와 같이 표면 거칠기의 큰 차이를 보인다. 또한, 공통적으로 이송속도 150 mm/min의 조건에서 표면 거칠기 값이 상대적으로 낮게 측정되었다. 회전수 1,000 rpm의 조건으로 서멧 공구를



(a) rpm=1,000



(b) rpm=1,500



(c) rpm=2,000

Fig. 11 Comparison of the surface roughness

사용하였을 때 이송속도에 따라 표면 거칠기 값이 서서히 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 반면에 회전수 1,500 rpm과 2,000 rpm에서는 이송속도가 증가함에도 이송속도가 거의 일정하게 유지되는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 초경 드릴을 사용했을 경우에는 회전수에 상관없이 이송속도 150 mm/min에서는 표면 거칠기가 Ra 1.0 μm 에 가까운 값이 측정되었다가 이송속도가 200 mm/min 이상이 되면 표면 거칠기가 Ra 2.0 μm 를 유지하였다.

4.4 홀의 내경 측정 데이터

Fig. 12는 초경 드릴과 서멧 드릴을 사용했을 때 홀의 내경을 비교한 그래프이다. 거의 모든 가공 조건에서 초경 드릴의 내경이 서멧 드릴의 내경보다 크게 측정이 되었지만 이 차이는 미미하여 거의 비슷하다고 할 수 있다. 그리고 이송속도와 회전수의 변화에

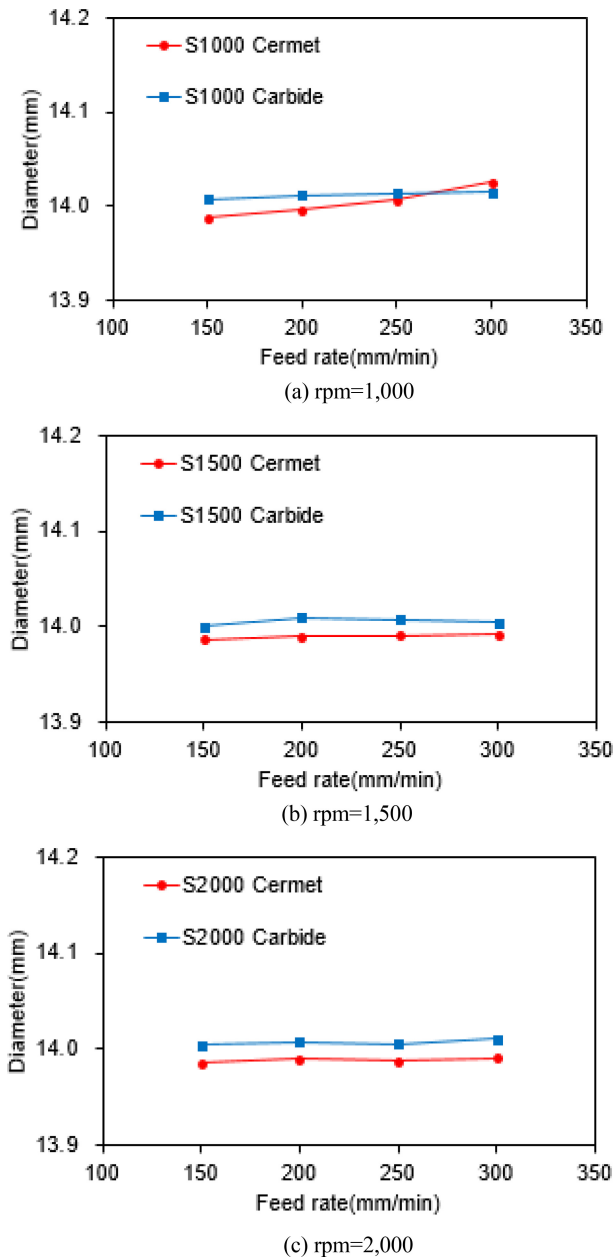


Fig. 12 Comparison of the inner diameter

따라 홀의 내경의 크기 변화는 거의 없었다. 서멧의 경우에는 이송속도의 변화에 따른 내경의 크기가 거의 일정하게 유지되었지만 이송속도 300 mm/min에서 내경의 크기가 증가하였다. 하지만 다른 회전수인 가공조건 1,500 rpm과 2,000 rpm에서 이송속도의 변화에 따라 내경이 일정하게 유지되는 것으로 보았을 때 내경이 증가한 것은 1,000 rpm에서 300 mm/min의 이송속도는 비교적 빠른 이송속도라 내경이 증가했을 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 헬리컬 초경 드릴과 서멧 드릴의 성능을 비교하는

실험을 하였으며 주축부하, 표면 거칠기 그리고 내경을 실험 결과로 보여준다. 결과를 통해 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 초경 드릴을 사용했을 때 발생하는 주축부하보다 서멧 드릴을 사용했을 때 발생하는 주축부하가 더 크게 측정이 되었다. 주축부하가 높다는 것은 드릴 공구를 사용해 피삭재를 가공할 때 공구가 받는 부하가 커진다는 것이다. 공구가 받는 부하가 증가하게 되면 피삭재 가공 시 공구가 파손될 가능성이 더 높아진다는 것을 의미한다.

2. 치수정밀도 측면에서는 서멧 드릴을 사용하는 것과 초경 드릴을 사용하는 것의 차이가 미미하고 이송속도가 증가함에도 홀의 직경이 일정한 값을 유지하였으므로 성능은 비슷하다고 할 수 있다. 따라서 초경 드릴을 사용했을 때 홀의 직경과 서멧 드릴을 사용했을 때의 직경이 거의 비슷하여 치수정밀도 측면에서는 어느 것이 더 우수하다고 판단할 수 없다.

3. 초경 드릴을 사용했을 때 홀의 표면 거칠기가 서멧 드릴을 사용했을 때 홀의 표면 거칠기보다 크게 측정이 된다. 이것은 초경 드릴보다 서멧 드릴의 성능이 더 우수함을 의미한다. 초경 합금은 철과의 친화성이 높아 용착 현상이 쉽게 발생하는데 비해 TiCN을 주체로 한 서멧 특성상 철과의 용착 현상이 거의 발생하지 않고 내열특성이 우수하기 때문에 이와 같은 결과가 도출된 것이다.

본 연구에서는 S45C 피삭재를 사용했을 때 초경 드릴의 성능보다 서멧 드릴의 성능이 더 우수하게 결과가 도출되었지만 피삭재의 종류에 따라 결과가 달라질 수 있다고 판단되기 때문에 다른 피삭재를 사용한 경우 어떤 결과가 도출될지에 대한 후속 연구를 할 계획이다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 연구는 2021년도 중소벤처기업부 기술혁신개발 사업에 의해 연구되었음(S3039100).

REFERENCES

- Ahn, D. G., (2000), Comparison of cutting characteristics between cermet, carbide and coated carbide tools in turning, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 17(5), 186-194.
- Peng, Y., Miao, H., Peng, Z., (2013), Development of TiCN-based cermets: Mechanical properties and wear mechanism, International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 39, 78-89.
- Kwon, W. T., Park, J. S., Kim, S.-W., Kang, S., (2004), Effect of WC and group IV carbides on the cutting performance of Ti (C, N) cermet tools, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 44(4), 341-346.

4. Kwon, W. T., Park, J. S., Kang, S., (2005), Effect of group IV elements on the cutting characteristics of Ti (C, N) cermet tools and reliability analysis, *Journal of Materials Processing Technology*, 166(1), 9-14.
5. Yang, W., Xiong, J., Guo, Z., Du, H., Yang, T., Tang, J., Wen, B., (2017), Structure and properties of PVD TiAlN and TiAlN/CrAlN coated Ti (C, N)-based cermets, *Ceramics International*, 43(2), 1911-1915.
6. Ahn, D. G., (2001), Cutting performance of submicron cermet tools and their mechanical properties, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 18(4), 182-189.
7. Umetne, E., ZUOSK, A., Prevleko, K., (2014), Experimental design and artificial neural network model for turning the 50CrV4 (SAE 6150) alloy using coated carbide/cermet cutting tools, *Materiali in Tehnologije*, 48(2), 227-236.
8. Kim, Y.-S., Kwon, W. T., Seo, M., Kang, S., (2012), Tool performance of new wear-resistant cermets, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 13, 941-946.

**Jeong Ho Ha**

Received his master degree in 2018 from the Department of Mechanical Engineering, Andong National University, Andong, Korea. He is currently a researcher in R&D Center, SJT company, Daegu, Korea. His research interest is cutting tool.

E-mail: jeongho0623@naver.com

**Dong Gyu Kim**

Received his master degree in 2015 from the Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon, Korea. He is currently a senior researcher in Daegu Mechatronics & Materials Institute (DMI), Daegu, Korea. His research interest is advanced manufacturing technology.

E-mail: kdg0830@dmi.re.kr

**Min-Woo Sa**

Received his Ph.D. degree in 2018 from the Department of Mechanical Engineering, Andong National University, Andong, Korea. He is currently a director in R&D Center, SJT company, Daegu, Korea. His current research interests are cutting tools and additive manufacturing technology.

E-mail: 79smw42@gmail.com

마이크로플루이드릭 채널 시스템 제작을 위한 LCoS 마이크로디스플레이 기반의 광 경화 방식 3D 프린터 연구

A Study on Photocurable Liquid-Crystal-on-Silicon (LCoS) Microdisplay Based Stereolithography Type 3D Printer for Fabrication of Microfluidic Channel Systems

강현우¹, 이동근^{2,#}

Hyeon Woo Kang¹ and Dong Keun Lee^{2,#}

¹ 경상국립대학교 환경보전학과 (Department of Environmental Protection, Gyeongsang National University)

² 경상국립대학교 화학공학과 (Department of Chemical Engineering, Gyeongsang National University)

Corresponding Author / E-mail: d-lee@gnu.ac.kr, TEL: +82-55-772-1782

ORCID: 0000-0002-1735-0256

KEYWORDS: LCoS, Microdisplay, 3D printer, Microfluidics, Biochip, Stereolithography

A microfluidics chip is a miniature analytical system that injects a small amount of reagent into microchannels formed in the chip. It controls fluid flow to perform pretreatment, detection, reaction, mixing, separation, and analysis in parallel. In this study, polygonal microchannel structures were fabricated using a microstereolithography 3D printer based on an LCoS microdisplay projector. In the experiment, the width of the microchannel structure was changed from 50 μm to 500 μm , and the output and width of the structure were measured. Inspection of the shape of the resulting microchannel structure showed that the tip of the structure was elliptical instead of the expected rectangular shape, and the fabrication width error increased as the channel width decreased to 200 μm or less. Nevertheless, it was possible to fabricate microfluidics chip structures with widths less than 100 μm . The results of this study demonstrate the applicability of an LCoS microdisplay project-based 3D printer for the fabrication of microfluidic channel structures.

Manuscript received: August 8, 2022 / Revised: January 4, 2023 / Accepted: January 6, 2023

1. Introduction

The work and living environment of the entire world's population is undergoing significant changes due to 2020 Covid-19 pandemic. Owing to its high contagiousness at the onset of the infection compared to SARS and MERS outbreaks, newly confirmed cases of COVID-19 is still spreading at a rate of hundreds in Korea and hundreds of thousands daily around the world. Diagnostic methods for determining COVID-19 infection can be largely divided into either RTPCR (Real Time-Polymerase Chain Reaction) test or self-diagnostic test using immunochromatography.

The PCR test takes 6 to 12 hours, and the self-diagnostic test can produce results in a significantly shorter amount of time at the cost of lower accuracy. Thus, DNA biosensor technology is being developed to compensate for this disadvantage. As with DNA biosensor technology, research and development of micro-total analysis systems (μTAS), bio-imaging, and biochips are required to rapidly develop diagnostic, vaccine, and therapeutic technologies in the event of another future pandemic [1,2]. A microfluidics chip is a type of biochip that constitutes a small-scale analysis system that can produce real-time analytical results by enabling the pretreatment, detection, reaction, mixing, and separation of liquid

sample by injecting a small amount of reagent into a microchannel formed on the chip surface to control the flow of fluid [3]. Microfluidics chip is fabricated by techniques such as deposition, photolithography, soft-lithography, etching, and nano-imprinting generally used in semiconductor manufacturing processes. A microchannel is formed on silicon wafer, glass, or polydimethylsiloxane (PDMS). The fabrication process takes 2-3 days, which is disadvantageous for mass production. Moreover, there is another disadvantage of high manufacturing cost due to the requirement of a semiconductor fabrication quality clean room facility and equipment [4]. Micro-stereolithographic 3D printer projects a two-dimensional image made up of micrometersized pixels on the bottom of a clear tank containing a photocurable resin, and the resin layer plane that is exposed to the projected light hardens with exposure to two-dimensional images to form stacked three-dimensional structure. Microfluidics chip manufacturing using this technology is advantageous for cost reduction and mass production compared to existing manufacturing methods and can increase the degree of freedom in the shape of the realizable structure [5]. The semiconductor device density and pixel size of the microdisplay greatly affect the precision of the 3D printed structure because the pixels are enlarged when the twodimensional image created from the screen display device is projected through the projection lens. In the past, LCD (Liquid-Crystal Display) and DMD (Digital Micromirror Device) were mainly used as screen display devices. The light-transmitting LCD is not suitable for structures that require precision due to its large pixel size and low contrast ratio. Although the lightreflecting DMD has a small pixel size and high contrast ratio, the structure is complicated because tiltable micro-mirror structures are integrated on the device surface to reflect light. In addition, since static random access memory (SRAM) composed of 6 transistors (TRs) is used to drive the pixels of the DMD, it is not easy to configure TRs in micrometer-sized pixels and the driving voltage is 5-20 V, limiting the pixel miniaturization. The miniaturization of the TR and micro-mirror can increase the resolution of the screen display device by reducing the size of the pixel. In addition, since resolution is intimately related to the precision of 3D printed structures, the inadequate scalability to ultra-high resolution of DMD technology imposes limitations for production of microfluidics chips which need to be able to handle microscale and nanoscale fluid motions [6,7]. In this study, a micro-stereolithographic 3D printer was constructed using an LCoS (Liquid-Crystal-on-Silicon) microdisplay with a resolution of $1,920 \times 1,080$ pixels as the projector's screen display device. LCoS consists of TR and addressing logic circuitry on a silicon wafer, so it is possible to realize very small pixels due to its high degree of integration. With this advantage, LCoS can

implement pixels that are much smaller than LCD and relatively smaller than DMD. In addition, since the TR can be miniaturized with a driving voltage of 5 V or less, it is better suited for implementation of ultra-high resolution display architecture. Therefore, we studied the performance of a micro-stereolithographic 3D printer that can form microchannels, the primary feature of microfluidics chips, by constructing an LCoS-based projection system.

2. Experimental Method

2.1 Fabrication of LCoS Microdisplay

The semiconductor process is largely divided into a frontend process of forming an integrated circuit on a silicon wafer and a backend process of packaging the silicon wafer into the form of a chip. In this study, a silicon wafer was supplied from a foundry that performs the frontend process and LCoS microdisplay was packaged through the backend process. In order to perform the backend process to form the LCoS, a semiconductor-class clean room facility is required. The structure and role of the facility are as follows:

- 1) FFU (Fan Filter Unit) System: A small fan and HEPA (High Efficiency Particulate Air) filter or ULPA (Ultra-Low Penetration Air) filter are combined and are usually installed on the ceiling. The system removes airborne dust (Particulates) and microorganisms and maintains the room air at positive pressure;
- 2) Thermo-hygrostat: A system that controls the temperature and humidity inside the working environment and ventilates the enclosed environment;
- 3) Air shower: A cleaning facility used by workers before entering the clean room to remove dust and foreign substances.

The class of the cleanroom facility is shown in Table 1, and the semiconductor packaging steps are divided according to the class. By federal standards, cleanroom classification is set according to the number of dust particulates larger than $0.5 \mu\text{m}$ contained within 1 cu. Ft. of volume space.

The backend packaging process of LCoS microdisplay is outlined in Figure 1. The backend process is divided into three major stages. The details of each stage are as follows:

- 1) Stage 1:
 - (1) Clean the inside of the electron-beam coating chamber with a vacuum cleaner, a scrubber, or isopropyl alcohol (IPA). Then, clean the indium tin oxide (ITO) film coated glass surface of the same size as the 8-inch silicon wafer with a filtered air gun and

Table 1 US FED STD 209E clean room standards

| Class | Class maximum particles/ft ³ | | | | | ISO equivalent |
|---------|---|---------|---------|---------|---------|----------------|
| | ≥0.1 μm | ≥0.2 μm | ≥0.3 μm | ≥0.5 μm | ≥5.0 μm | |
| 1 | 35 | 7 | 3 | 1 | | ISO 3 |
| 10 | 350 | 75 | 30 | 10 | | ISO 4 |
| 100 | | 750 | 300 | 100 | | ISO 5 |
| 1,000 | | | | 1,000 | 7 | ISO 6 |
| 10,000 | | | | 10,000 | 70 | ISO 7 |
| 100,000 | | | | 100,000 | 700 | ISO 8 |

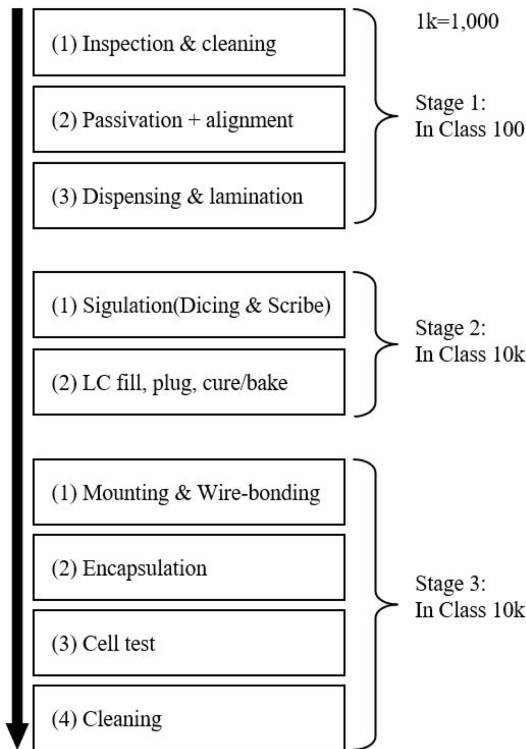


Fig. 1 Wafer-scale LCoS microdisplay packaging process flow

then clean with IPA;

(2) The cleaned silicon wafer and ITO glass are placed at a certain angle, and the silicon dioxide (SiO₂) passivation layer is coated with an electron beam in a high vacuum (about 2 × 10⁻⁶ Torr) state, and then the deposition rate is increased to form an anchoring layer to secure the liquid crystal;

(3) Mix the optical bond (NOA 81, NORLAND, USA) with the 2.5 μm spacer, avoiding spacer agglomeration, and then fill the mixed optical bond into the inner syringe of the dispenser. Place the ITO glass on the stage of the dispenser and apply the optical bond seal line to the ITO glass with the set program along the perimeter of the display surface. Place the silicon wafer on the lamination station and align and fix the ITO glass on it. Figure 2 shows the processes described above.



Fig. 2 Illustration of the process step involving the alignment and lamination of ITO glass onto a CMOS backplane chip

2) Stage 2:

(1) Place the laminated ITO-silicon wafer on the inner stage of the dicing saw and make partial notch cuts along the scribe lanes on the backside of the silicon wafer. After transferring the silicon wafer to the Scribe Station equipment, scribe additional break lines along the lane with a tungsten scribe wheel, and then use a rubber-coated breaker tongs to separate the laminated silicon wafer into singulated chips;

(2) Fill the singulated chips with liquid crystal through the open part of the seal line into the empty space between the silicon wafer and the ITO glass, and plug the opening with the optical bond.

3) Stage 3:

(1) Mix room temperature curable silicone with 15 μm spacer, place it in a syringe, and apply it to the prepared PCB (Printed Circuit Board). Place a completed chip on the PCB, press it with a vacuum press for about 1 minute, and then cure it at room temperature for 1 hour. Then, using a wire bonder, connect the electrode between the unit chip and the PCB;

(2) Apply an optical bond on the exposed lead wire and cure for 10 seconds, then apply a second coat of room temperature curable silicone and cure at room temperature for 3 hours;

(3) Connect the completed LCoS microdisplay and the Control Board with an MCX (Micro Coaxial) cable, and input a test image to the Control Board to check whether the test image is displayed on the LCoS microdisplay and check for defective pixels;

(4) The normal product that has passed the above test is cleaned and packaged.

2.2 LCoS projector operating principle

Figure 3 illustrates the structure of an LCoS microdisplay. LCoS is a reflection-type screen display device in which liquid crystal is applied between a glass coated with electrically conductive indium tin oxide (ITO) and a silicon wafer. The operation of a pixel in the display is as follows:

1) A 2D image signal is inserted into the Control Board that controls the LCoS microdisplay;

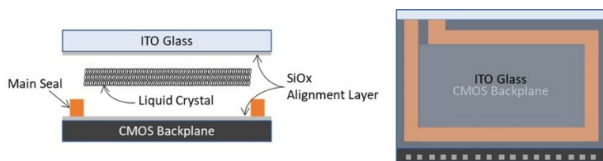


Fig. 3 The basic structure of a completed LCoS microdisplay

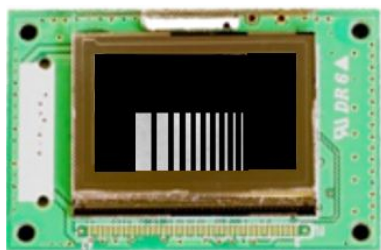


Fig. 4 Two-dimensional test image displayed on LCoS microdisplay

2) Voltage is applied to the integrated circuit of each pixel according to the pixel information of the input image;

3) When TR is on, an electric field is generated between the ITO glass and the silicon wafer to adjust the angle of the liquid crystal. The phase of the normally incident polarized light is modulated through reflection as the refractive index experienced by the incident light varies according to the angle of the liquid crystal.

For example, when a two-dimensional image signal representing 10 rectangles of different widths is input to LCoS, the pixels with TR in ‘on’ state will display rectangles as shown in Figure 4 on the surface.

The operational principle of the LCoS projector is as follows:

1) Since liquid crystal does not emit light on its own, an external illumination source is needed to project an image;

2) When the light from the illumination source passes through the imaging lens and hits the PBS (Polarizing Beam Splitter), the reflected polarized light is directed to the LCoS microdisplay;

3) Pixels in ‘on’ state modulate the phase of the incident polarized light as it is reflected from the top aluminum layer of the silicon backplane through the liquid crystal, changing the angle of the polarization by 90 degrees, to pass through PBS and expand according to the magnification of the projection lens to form a 2-dimensional image on the projection plane.

2.3 Micro Stereolithographic 3D Printer Prototype System

Fig. 5(a) shows the micro stereolithography 3D printer prototype system, and Fig. 5(b) shows the exposure module that implements an LCoS microdisplay. The shown stereolithography 3D printer consists of an LCoS projector, a build plate that can move up and down, and a vat containing ultraviolet (UV) light-

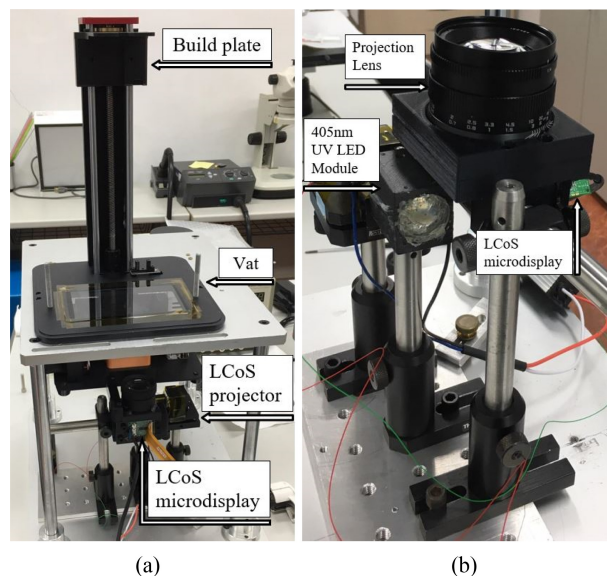


Fig. 5 Photographs of (a) the LCoS 3D printer prototype and (b) LCoS microdisplay-based exposure module used in this study

Table 2 Planned UV radiation time recurring robust 3-dimensional structure of photocurable polymer

| Total number of layers | Each layer Thickness [μm] | The ideal height of Structure [μm] | Fabrication of Initial Bottom | | |
|------------------------|---------------------------|------------------------------------|-------------------------------|------------|----|
| | | | Layers | Time [sec] | |
| 10 | 50 | 500 | 4 | 8 | |
| Exposure time [sec] | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 |

curing resin. In order to produce a solid model using 3D printer, a 3D model of the solid is first drawn using a CAD program and saved as a data file. The saved file is then loaded into a Slicer program and sliced to form a 3-dimensional model consisting of multiple layers of 2-dimensional image in preset thickness increment.

Prior to microchannel printing, stereolithography 3D printers may have deposits in the vat surface or structural overgrowths depending on the exposure (Curing) time. In order to determine the optimal curing time to prevent these phenomena, the exposure time experiment outlined in Table 2 was performed. The first 4 of a total of 10 layers are cured to form a secure adhesion layer on the build plate--the exposure time for the adhesion layers was set to 8 seconds based on prior experimentation.

In order to stack the cross-sectional images of the microchannel, the build plate of the vat containing photo-curable resin is lowered to a single layer height (50 μm) from the bottom of the vat and exposed with the image projected by the LCoS exposure module. Subsequently, the build plate is incrementally raised by the layer

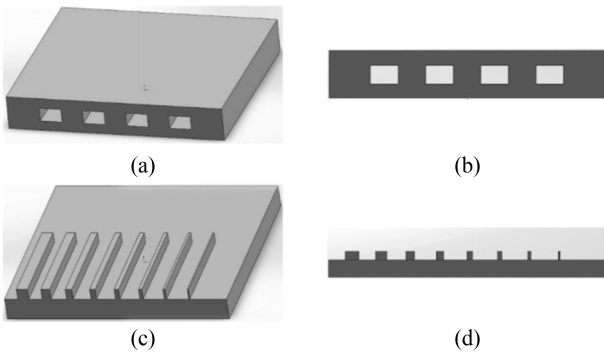


Fig. 6 Perspective and cross-sectional views of an ideal microchannel structure ((a) and (b), respectively) and that of the structure used for microchannel fabrication experiments ((c) and (d), respectively).

thickness, and the structure is created by repeating the operation of exposing and curing the cross-sectional image of corresponding layers to form a 3-dimensional solid [8].

Figures 6(a) and 6(b) illustrates 3D diagrams of an ideal microchannel structure. In the experiment of this study, structures shown in Figures 6(c) and 6(d), although not suitable as microchannels, which allow the observation of the dimension and rigidity of the building blocks of the photocurable resin solution were formed. As embodied in Fig. 6(c), on a rectangular base having a size of $10 \times 10 \times 1$ mm (Width \times Length \times Height), rectangular strips of 5 mm length, 0.5 mm height, and widths of 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 50 [μ m] were drawn and printed using the configured equipment, and the widths of the resulting structure were measured.

3. Result and discussion

In this study, the optimal exposure time of 4 seconds which resulted in the smallest deviation from the target value as shown by Figure 7 was utilized. Excluding the base layer curing time and the translation time of the build plate, a 3-dimensional model can be fabricated at a rate of 12.5 μ m/sec. (Volumetric Height) with the optimal exposure time.

The LCoS microdisplay-based exposure module of the prototype micro-stereolithographic 3D printer consists of a 405 nm wavelength UV LED as the light source and an off-the-shelf F/1.4 camera lens with a 50 mm focal length for image projection. About 22% of the UV LED's maximum output of 5 W is passed by the F/1.4 optical system, and taking into account the LCoS reflectance and polarization loss of about 70%, the LCoS projector will deliver about 6.5% or about 320 mW of the light emitted by the LED onto

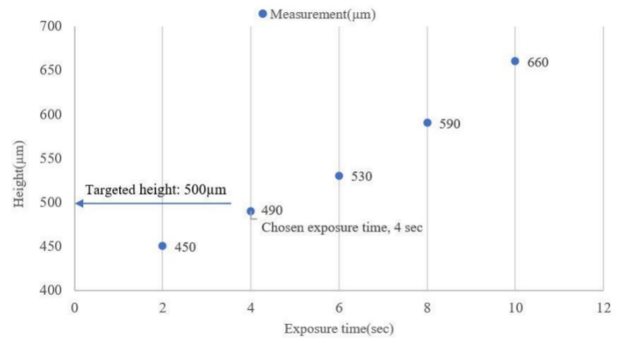


Fig. 7 Result of test performed to determine the optimal exposure time to achieve 500 μ m feature height

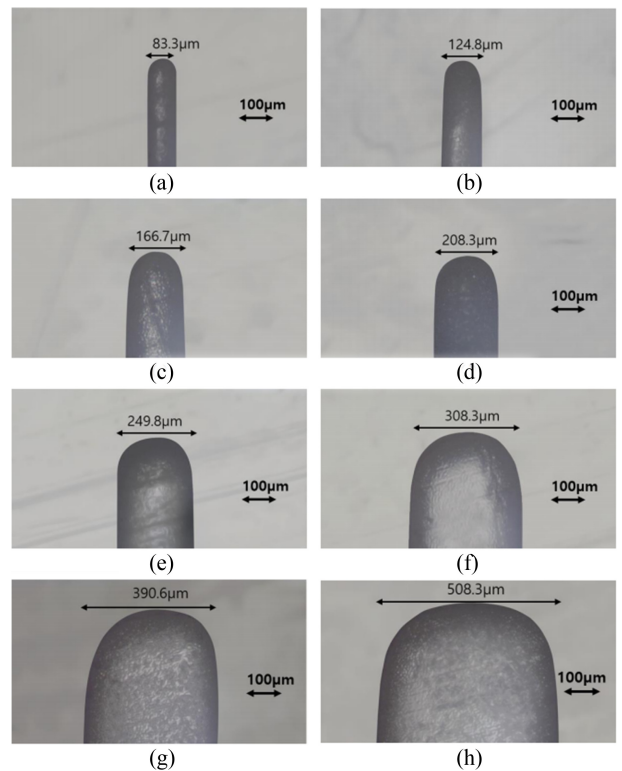


Fig. 8 Cross-sectional micrographs of narrow width strips printed using the prototype 3D printer

the 3D printing area.

The measured optical power density at the bottom of the tank was 0.08 mW/mm² for a projected image of 50 \times 70 mm, which corresponds to a total output of about 280 mW and is within 13% of the expected value of 320 mW. The contrast ratio was about 300 : 1, and by re-adjusting the throw distance and refocusing the projection lens, the diagonal size of the projected image can be adjusted from 0.87" (22.1 mm) to 7" (177.8 mm).

As shown in Figure 8, the cross-section of the resulting microchannel formed an elliptical shape, and the parametric chart in Figure 9 compares the measured widths to the design widths of

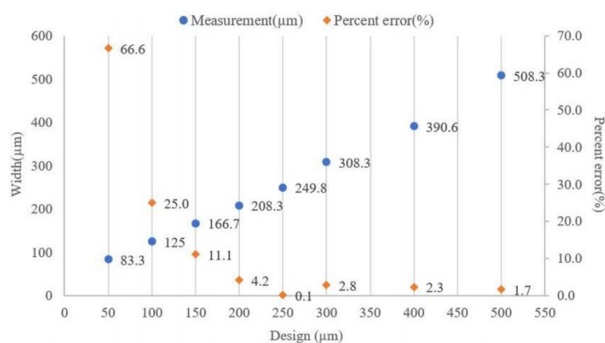


Fig. 9 Measured widths of fabricated microchannels vs. design widths

the microchannel and plots the percent error.

The percent area in the Figure 9 was calculated by following the equation:

$$\text{The percent error (\%)} = \left| \frac{\text{measured width} - \text{designed width}}{\text{designed width}} \right| \times 100$$

The reason that the error increases for feature widths less than 200 μm is likely due the greater the influence of obliquely incident light (about ±21 degrees) of F/1.4 illumination to the area outside of the edge of the feature. That is, ±21 degree oblique incidence light passing through the layer thickness of 51 μm spreads the width of the microchannel implemented on the screen by as much as 19 μm on each side, and likely had an effect of curing up to a total of 38 μm of width outside of the feature. Thus, as the width of the shape to be printed becomes narrower, a significant amount of light that should be projected into the shape leaks out beyond the edge of the shape, and the photopolymer in the region outside the shape is partially hardened. In particular, the results for less than 250 μm wide shapes in Figure 9, clearly follows a linear trend. By applying the linear curve fit to this data, we can establish the relationship $w' = 0.8326 w + 41.73$ (w' = output width; w = design width). In order to reduce the error rate, it will be necessary to reduce the layer thickness, implement a higher F/# optics, and control the exposure time in decimal units. In particular, the dimensional error for 50 μm and 100 μm structures is more than 25%, but nevertheless, this result represents an important achievement by demonstrating the fabrication of structures with less than 100 μm features by Micro-stereolithographic 3D printer with LCoS exposure module for microchannel formation. According to the performance results of the FHD (1,920 × 1,080) resolution LCoS microdisplay used in this study, further research is needed to investigate the applicability of UHD (4,096 × 2,160) resolution LCoS microdisplay for development of more precise 3D printing technology for microfluidics chip fabrication.

4. Conclusion

While the direct use of MFC devices fabricated using conventional photocurable resin may be limited due to its vulnerability to some solvents and reagents, ongoing efforts to expand the range of available materials from nylons to ceramic suspensions and associated post-processing is expected to expand its applicability. Also, 3D printed resin structure can be duplicated into base materials such as glass and silicon substrate using reactive ion etching (RIE), using combinations of gases such as CHF₃ (for glass), SF₆ (for silicon), and O₂ (for resin) in appropriate proportions to control the relative etch rates, or by direct ion beam etching (IBE) or chemically-assisted ion beam etching (CAIBE). It may also be possible to replicate the 3D printed structure directly into PDMS by a method similar to that using complimentary shapes etched into glass [9].

In this study, a two-dimensional image generator was fabricated using an LCoS microdisplay and a method to fabricate micro-channel was studied by prototyping a micro-stereolithographic 3D printer. As a result of the study, it was observed that cured resin deposits were formed in the vat and overgrowths resulted depending on the curing time, and the test structures of narrow microchannel were observed to collapse easily even when the exposure time was optimized. In order to resolve these issues, it is necessary to carry out further research to improve the precision of the studied fabrication method by implementing a higher resolution LCoS microdisplay, control the viscosity of the UV resin, control the vertical movement of the build plate, and improve the curing method.

Micro-stereolithographic 3D printer using LCoS projection module is promising for mass production of microfluidic channel devices as it can harden complex shapes in units of planar surfaces with single exposure for each layer. In the future, we plan to use a UHD resolution LCoS microdisplay that has 4 times actual number of pixels than the available DMD component to increase the precision to control the formation of microchannels more precisely.

REFERENCES

1. Biotech Policy Research Center, (2021), Bio-future promising technology (Report No. 2021-55). <https://www.bioin.or.kr/index.do>
2. Biotech Policy Research Center, (2009), Bio-nano Convergence Technology (Report No. 2008-5). <https://www.bioin.or.kr/index.do>
3. Lee, E. Y., (2010), Principle and application of microfluidics-

- based cell chip, News & Information for Chemical Engineers, 28(6), 678-684. <https://www.cheric.org/PDF/NICE/NI28/NI28-6-0678.pdf>
4. Laser Application Center, Trend report in Microfluidics. https://lac.or.kr/page/board/board.php?bo_id=lac_tech&wr_id=2405
 5. Park, J., Park, H., (2017), Liquid flow characteristics in 3D-printed rectangular microchannel, Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B, 41(1), 69-74.
 6. Joo, J., Kim, S., Jeong, S., (2006), Digital micromirror device based microstereolithography for the fabrication of 3D microstructures, Laser Solutions, 9(1), 1-7.
 7. Hwang, C., Kim, Y., Kim, G., Yang, J., Pi, J., Hwang, C., Choi, J., Kim, J., (2016), Large area spatial light modulator panel for digital holography, Electronics and Telecommunications Trends, 31(6), 48-56.
 8. Shin, D.-H., Park, Y.-M., Park, S.-H., (2018), Correlation between UV-dose and shrinkage amounts of post-curing process for precise fabrication of dental model using DLP 3D printer, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, 17(2), 47-53.
 9. Oyama, T. G., Hinata, T., Nagasawa, N., Oshima, A., Washio, M., Tagawa, S., Taguchi, M., (2013), Micro/nanofabrication of poly (L-lactic acid) using focused ion beam direct etching, Applied Physics Letters, 103(16), 163105.



Hyeon Woo Kang

Ph.D candidate in the Department of Environmental Protection, Gyeongsang National University. His research interest is 3D printer.

E-mail: khw910813@gnu.ac.kr



Dong Keun Lee

Professor in the Department of Environmental Protection, Gyeongsang National University.

E-mail: d-lee@gnu.ac.kr

자동변속기 ISG용 EOP 이상진동 개선에 관한 실험적 연구

An Experimental Study for Improvement of EOP Abnormal Vibration on Automatic Transmission

오종민^{1,#}
Jongmin Oh^{1,#}

¹ 현대트랜시스 P/T 연구개발 NVH개발팀 (NVH Development Team, Hyundai-Transys)
Corresponding Author / E-mail: 3737425@hyundai-transys.com, TEL: +82-031-612-6569
ORCID: 0000-0003-3552-5125

KEYWORDS: Electric oil pump (전동식 오일펌프), Abnormal vibration (이상진동), Noise (소음), Order (차수)

As electrification trends for the automotive industry have accelerated and the demand for high efficiency has increased, hybrid transmissions have been pushed to enlarge the operating range of EOP. And in conventional transmissions, an Idle Stop and Go (ISG) EOP is becoming imperative. The operating conditions of the ISG EOP make it difficult to gain advantages by masking the effects of engine firing or drive noise. Thus, it is necessary to study noise in operating ISG EOPs. Also, the EOP inner components require precise processing and manufacturing because they should be made to a compact size owing to vehicle layout limitations. This paper first describes the results of an experimental study on the abnormal vibration phenomenon, which makes EOP operating noise worse. And secondly it was investigated the cause of abnormal vibration phenomenon which occurs due to processing and manufacturing problems in the process of developing the operating noise of the EOP for ISG on FF type automatic transmission. Finally, the verification results after improvement were described.

Manuscript received: October 13, 2022 / Revised: December 12, 2022 / Accepted: December 14, 2022
This paper was presented at KSPE Autumn Conference 2022

1. 서론

최근 파워트레인 전동화 추세가 가속화되고 연비에 대한 요구가 증대됨에 따라 하이브리드 변속기는 EOP (Electric Oil Pump) 작동 영역을 확대시키고 있으며, 내연기관 자동변속기의 경우, ISG (Idle Stop and Go) EOP의 장착이 필수가 되고 있는 추세이다. ISG란 연비향상을 위하여 차량 정차시 엔진구동을 OFF하는데 이후 차량이 재출발시 변속기 내부에 충분한 유압이 형성되지 않을 경우, 변속기에 충격이 발생한다. 이를 방지하기 위해 ISG용 EOP가 일정 유량을 토출하여 유압반응을 향상시켜준다. 그러나 ISG용 EOP의 경우 작동조건 특성상, 노면이나 엔진연소 소음에 의한 마스킹 효과(Masking Effect)를 볼 수 없고 높아지는 고객의 소음 요구수준을 차량 차폐성능에만 의존할 수 없기 때문에 EOP 작동소음 저감에 관한 연구는

매우 중요하다. 그러나 기존 내연기관 변속기에 장착되는 MOP (Mechanical Oil Pump) 소음에 관한 연구[1,2]는 오랜 기간 이루어진 반면 EOP 소음 개발에 관한 연구는 최근 들어 이루어지고 있으나[3], 정밀가공과 관련한 소음 연구는 부족한 상황이다. 본 논문에서는 전문 자동변속기에 탑재되는 ISG용 EOP의 작동소음을 개발하는 과정 중에 EOP 부품가공의 정밀도 부재 및 EOP 모터 축 조립지그의 치수 관리문제로 작동소음을 악화시키는 이상진동(Abnormal Vibration)의 현상 및 원인에 대한 실험적 연구 결과를 소개하고자 한다.

2. 본론

본 논문에서 다룬 ISG용 EOP는 당사에서 개발중인 전문 8속

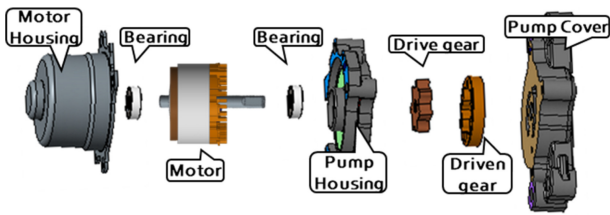


Fig. 1 EOP structure schematic

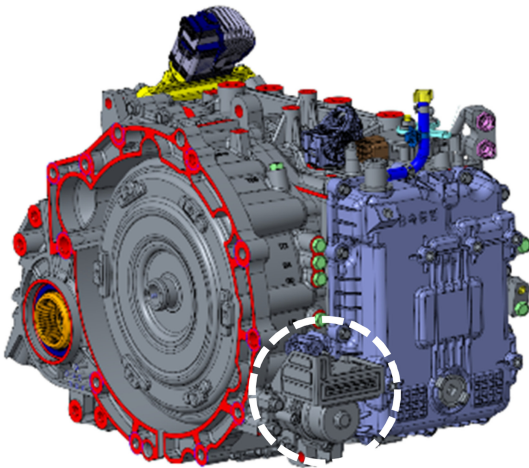


Fig. 2 EOP location on transmission

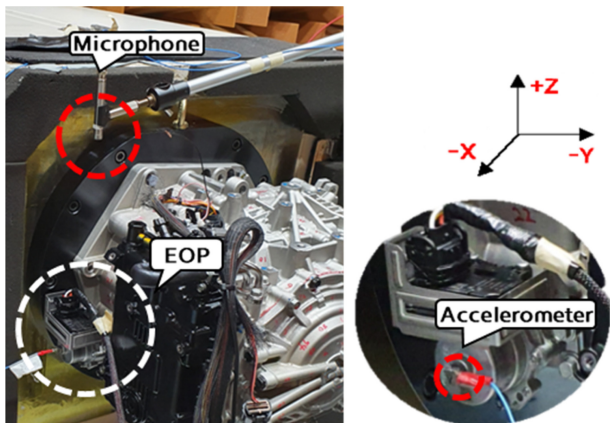


Fig. 3 Noise and vibration measurement point

자동변속기용으로, 오일펌프 구성부는 내접기어 형태로 이루어져 있으며 대략적인 구조는 아래 Fig. 1과 같다.

2.1 EOP 초기 시제품 대상평가

연구대상 EOP의 변속기 장착 위치는 아래 Fig. 2와 같이 차량 전방기준 토크 컨버터 하우징 하단에 장착된다. 이렇게 EOP 시제품을 변속기에 장착하여 외부소음이 통제된 반무향실 (Semi-Anechoic Room)에서 대상평가를 진행하였으며 소음 및 진동 계측 위치는 아래 Fig. 3과 같다.

ATF (Auto Transmission Fluid) 온도에 따라 EOP의 모터구동 RPM을 조절하여 변속기 시스템에 필요한 토출유량을 결정하기

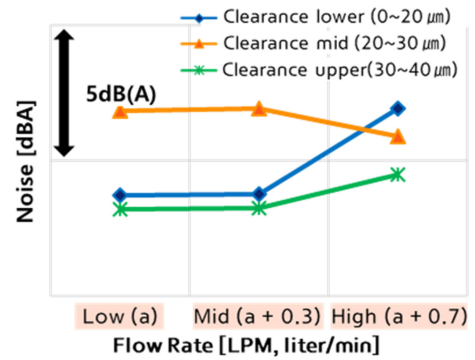
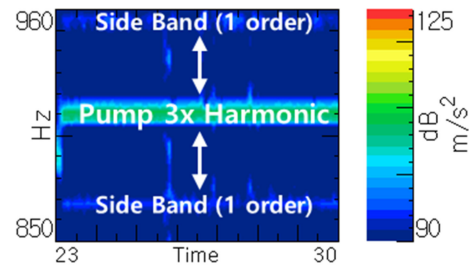
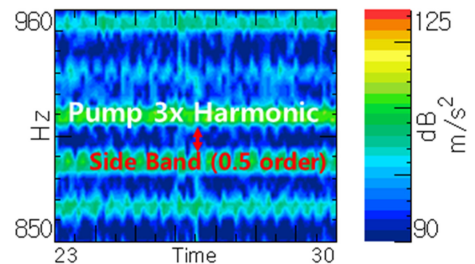


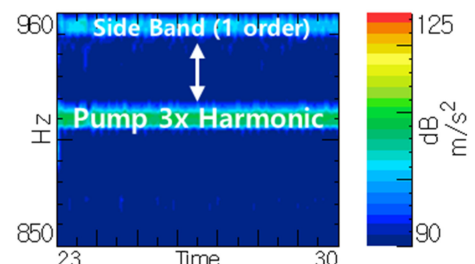
Fig. 4 Noise test results of prototype EOP sample



(a) Side clearance (0-20 μm) sample



(b) Side clearance (20-30 μm) sample



(c) Side clearance (30-40 μm) sample

Fig. 5 EOP vibration color map of Y axis

때문에 시험은 유량별 소음 및 진동을 측정하였으며, EOP 샘플은 0-40 μm 사이의 측간극(Side Clearance)별로 나누어 소음을 평가하였다. 평가 결과, 아래 Fig. 4와 같이 간극 중간값이 다른 샘플 대비하여 소음이 약 4 dBA 이상 높게 나타났다.

아래 Fig. 5는 유량 중간조건(a+0.3)에서 측간극별 샘플의 Y 방향 진동을 나타낸 컬러맵이다. 모든 샘플에서 펌프 치합 3차 하모닉을 중심으로 1차 간격의 사이드 밴드 성분이 나타나며 측간극 중간값 제외, 나머지 샘플들의 1차 간격 사이드밴드 수준을 보았을 때 소음에 영향을 주는 주요한 성분은 아닌 것으로

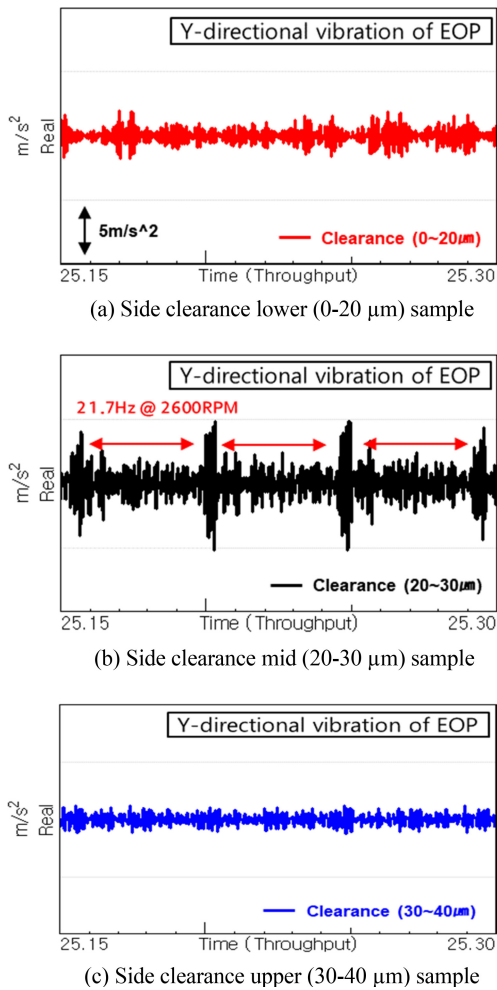


Fig. 6 Y-directional vibration after applied bandpass filter

판단된다.

그러나 소음이 높게 나타난 축간극 중간품에서 오일펌프 치합 하모닉 차수를 중심으로 1차 간격의 사이드 밴드 외에 0.5차 간격의 이상 사이드 밴드가 발견되었다. 킬러맵에서 나타난 바와 같이 0.5차 사이드밴드 이상성분은 그 진동 수준이 높기 때문에 EOP 작동소음 개발을 위해서는 반드시 개선해야 할 성분으로 판단된다. 아래 Fig. 6은 참고문헌[4]의 포락선 검출(Envelope Detection)을 참고하여 계측된 가속도 진동신호에 밴드패스 필터(0.5-1 kHz)를 적용한 결과이다.

아래 그래프 Figs. 6(a) 및 6(c)는 수준이 양호한 반면, 6(b)를 보면 0.5차 사이드밴드 이상진동이 임팩트(Impact)성의 성분으로 나타남을 추가적으로 확인할 수 있었다.

이상진동은 0.5차 주기의 임팩트성 진동임을 고려하여 축과 관련된 부분을 집중적으로 점검하였다. 분해점검 결과, 평가 샘플 모두 아래 Fig. 7에서 표시한 드라이브 기어와 축의 간극, 즉 축 간극부(Shaft-Inner Clearance)가 Fig. 8의 조사결과와 같이 간극 관리치를 초과한 것으로 나타났다. 특히 이상진동이 발생한 축 간극(Side Clearance) 중간품의 경우, 축 간극(Shaft-Inner Clearance) 관리치를 가장 많이 벗어난 것을 확인하였다.

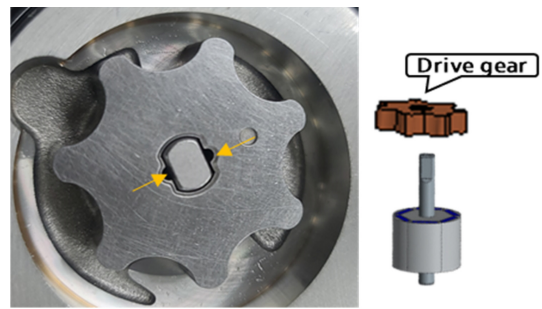


Fig. 7 Shaft-Inner clearance

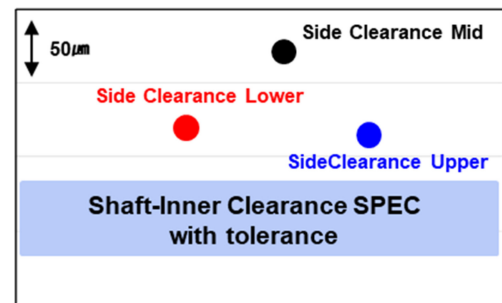


Fig. 8 Shaft-Inner clearance SPEC

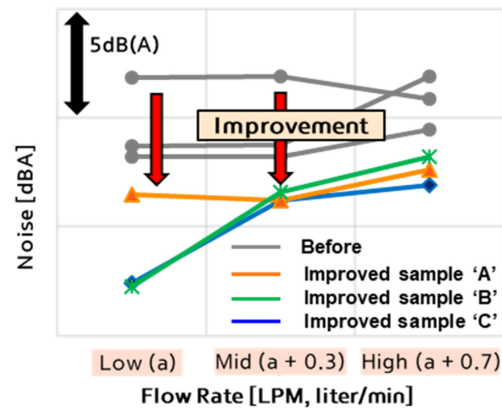


Fig. 9 Noise test results of improved EOP sample

2.2 축 간극 개선품 검증평가

축 부위 가공 관련하여 도면규제를 강화하였으며, 이상진동 개선효과를 검증하기 위하여 개선샘플의 대상소음평가를 수행하였다. 평가 결과, 아래 Fig. 9와 같이 축 간극 강화 이후 소음이 최대 5 dBA 개선되었으며, Figs. 10(a), 10(b), 10(c) 샘플의 Y방향 진동 킬러맵을 보면 0.5차의 사이드밴드 이상진동 성분 역시 개선됨을 알 수 있다.

2.3 EOP 양산공법적용 생산품 대상소음평가

앞서 시제품(Prototype)에 대한 검증, 즉 DV (Design Validation) 단계의 EOP의 대상 소음 검증 및 개선과정을 논의하였으며, 제품개발과정 측면에서 보면 DV 단계에서 검증 및 개발이 완료된 이후에는 정식으로 생산설비를 통해 양산공구와 공법이 적용된 PV (Product Verification) 단계로 넘어가게

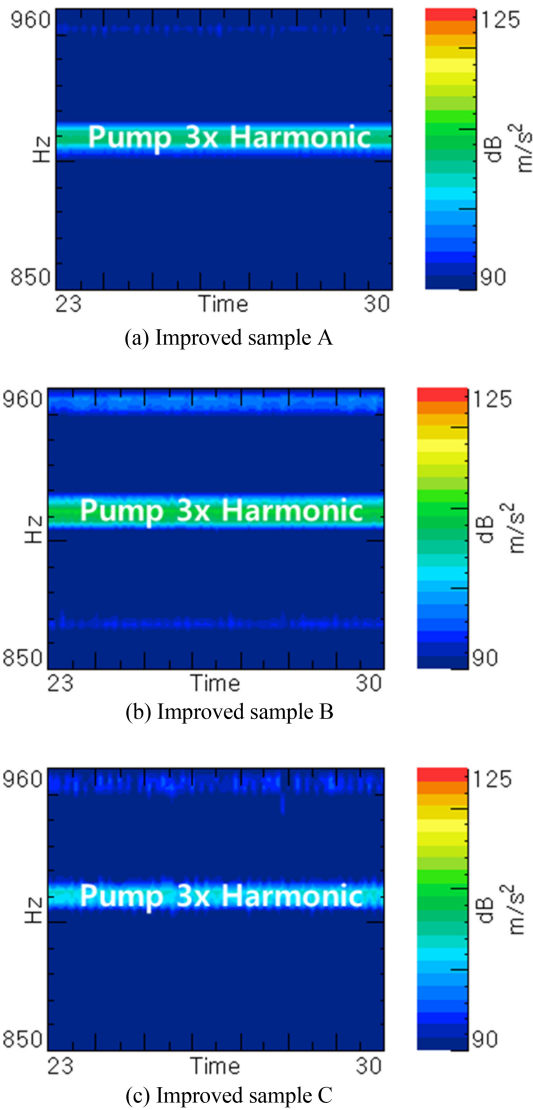


Fig. 10 Color map of Y-directional vibration

된다. 제품개발단계가 넘어가는 과정에서 제품의 제작공법간 차이로 인해 소음이 발생할 수 있으므로 이를 검증하기 위하여 PV 단계에서 생산된 EOP에 대하여 대상소음 평가를 수행하였다. 평가 결과, 아래 Fig. 11에서 나타난 바와 같이 소음 수준이 이전 DV단계에서 검증이 완료된 시제작품 대비 전반적으로 다시 악화됨을 확인하였다.

아래 Fig. 12(b) 그래프는 소음이 가장 높게 나타난 PV Sample 'C'의 Y방향 가속도 진동이다. 이를 Fig. 12(a) 그래프에서 나타난 시제작품(DV Sample)과 비교 시 PV Sample 'C'에서 0.125차 주기의 이상진동이 높은 수준으로 발생함을 알 수 있다.

나머지 PV Sample에서도 0.125차 주기의 이상진동이 발생하였으며 진동수준은 소음에 비례하여 나타났다. 0.125차 주기의 진동은 펌프 드라이브(잇수: 7개)에 대한 드리븐 기어(잇수: 8개)의 상대 회전 속도와 일치한다. 따라서 시제작공법에서 양산공법으로 바뀐 사항 중 회전에 영향을 줄 수 있는 인자를 집중적으로

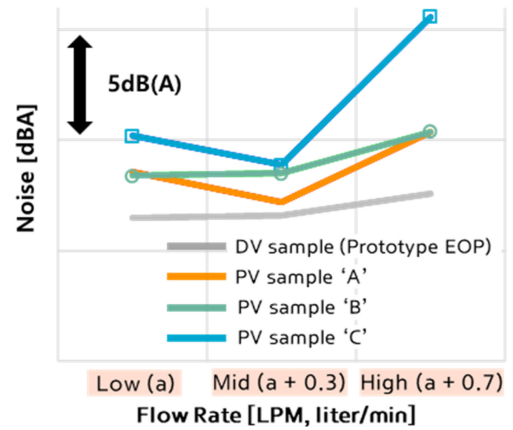
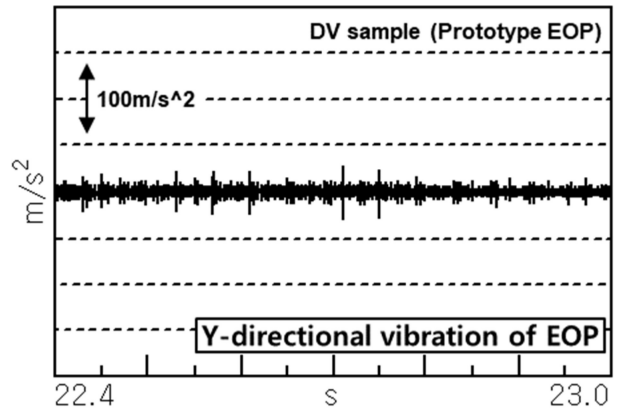
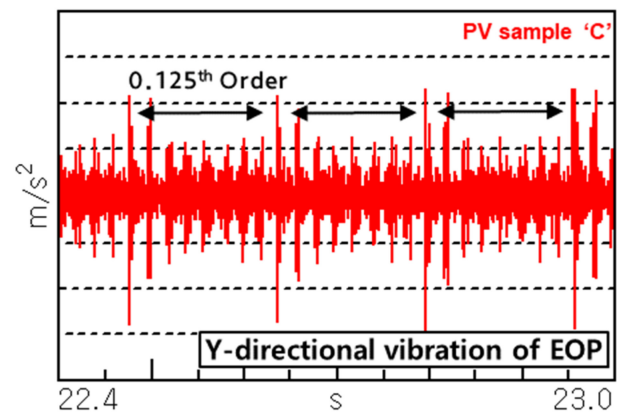


Fig. 11 Noise test results of EOP PV sample



(a) DV Sample (Prototype EOP)



(b) PV Sample 'C'

Fig. 12 Vibration comparison with DV sample and PV sample 'C'

검토하였고, 그 결과 모터 축(Motor Rotor) 조립 과정에서 축 외경과 이를 고정하는 지그 내경의 상대공차가 기존 양산품 조립 지그 대비 50 μm 이상 큰 것을 확인하였다. 이는 Fig. 13에서 나타난 것과 같이 지그 내경이 과도하게 클 경우, 축의 불안정한 거동으로 인한 이상진동을 유발할 가능성이 있을 것이라고 판단하였다.

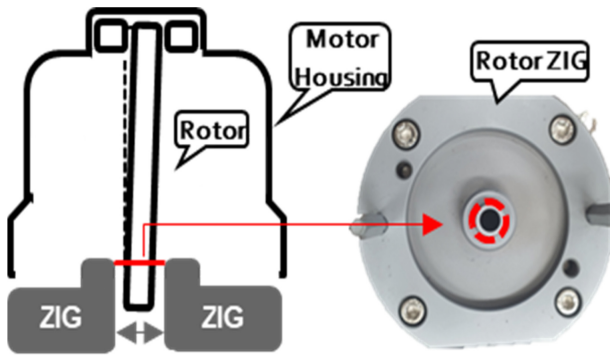


Fig. 13 Diagram of rotor misalignment problem

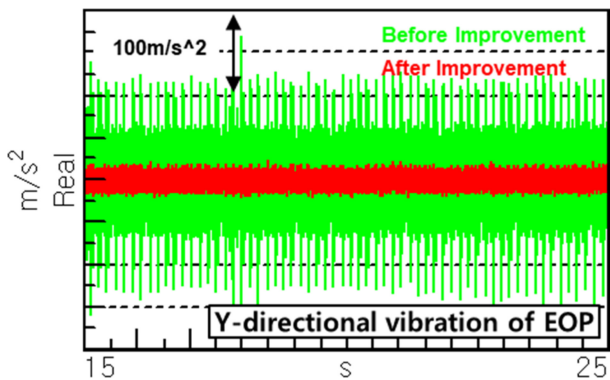


Fig. 14 Vibration comparison with before and after improvement

2.4 모터 축 조립지그 개선검증 평가

앞서 Fig. 13에서 기술한 축 고정 지그의 내경부분을 축소하여 축의 불안정한 거동이 개선되는지, 즉 0.125차의 이상진동 성분이 개선되는지 검증하기 위한 대상평가를 수행하였다. 위 Fig. 14 그래프는 축 고정 지그의 내경 축소 전과 후를 비교한 결과이다. 비교 결과, Fig. 14와 같이 0.125차 주기의 이상진동이 확연히 개선됨을 확인하였다.

3. 결론

내연기관 자동변속기에 탑재되는 ISG용 EOP는 작동영역 특성상 엔진의 연소소음이나 주행소음에 의한 마스킹 효과 (Masking Effect)를 볼 수 없고 차량의 소음 차폐성능에만 의존하기엔 높아지는 고객의 소음 요구수준을 만족하기 역부족이므로 EOP의 작동소음 개발은 필수적이다. 본 연구논문에서는 ISG용 EOP 소음개발 과정 중에 정밀한 가공과 관리의 부재로 인해 EOP 작동소음을 악화시키는 이상진동에 대하여 다음과 같은 실험적 연구 결론을 도출할 수 있었다.

EOP 모터 축(Rotor)과 펌프 드라이브 기어의 축 간극(Shaft-Inner Clearance)의 크기에 따라 펌프 치합 하모닉 성분을 중심으로 0.5차 간격의 사이드 밴드 성분으로 인해 소음이 악화될 수 있다. 따라서 모터 축과 드라이브 기어간 축 간극이 적절한

값을 가질 수 있도록 정밀한 가공이 필요하다.

EOP 조립 과정에서 모터 축 조립지그의 축 고정부위 내경이 모터 축 대비 과다할 경우, 축의 불안정한 거동을 야기할 수 있으며 이는 펌프 드라이브와 드라이브 기어의 상대회전 주기의 이상진동으로 나타날 수 있다. 따라서 조립지그 치수에 대한 면밀한 관리가 요구된다.

REFERENCES

1. Lee, H. K., Hong, S. M., Kim, M. S., Hur, J. W., Yoo, D. K., (2016), A research for the noise development of the FF 8th speed automatic transmission, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, 26(5), 559-566.
2. Jung, B., Jung, W., Shin, D., (2012), An experimental study on identification of noise generation mechanism and its improvement in gerotor oil pump, Proceedings of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering Autumn Conference, 121-127. <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE02456802>
3. Choi, C. C., Kim, H. S., Lee, W. T., (2020), Noise analysis of transmission electric oil pump with uneven pitch-simulated control, Transaction of the Korean Society of Automotive Engineers, 28(11), 781-787.
4. Park, K.-H., Jung, S.-J., Wee, H., Kim, J.-S., Han, K.-S., Kim, M.-H., (2008), A study on the fault detection of auto-transmission according to gear damage, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, 18(1), 47-56.



Jongmin Oh

Senior Engineer in Hyundai-Transys, Power Train R&D Center, His research interest is NVH of transmission.
E-mail: 3737425@hyundai-transys.com

창간

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

목적 및 연구 범위

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

금액

구독료

이 논문집은 우리학회 회원에 한하여 무료로 제공됩니다.

게재료

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

연락처

[04508] 서울 중구 중림로 50-1, SKY1004빌딩 12층

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

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

한국정밀공학회지 저널: http://jkspe.kspe.or.kr

한국정밀공학회지 논문투고 및 게재규정 · 논문집필요령

논문투고 및 게재규정

제1조 (목적)

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

제2조 (투고자)

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

제3조 (책임 및 윤리규정 준수)

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

제4조 (연구범위)

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

제5조 (투고 구분)

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

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

제6조 (접수)

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

제7조 (심사 및 게재 결정)

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

제8조 (저작권)

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

제9조 (자료공개)

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

제10조 (원고작성요령)

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

제11조(게재료)

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

한국정밀공학회지 논문투고 및 게재규정 · 논문집필요령

논문집필요령

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

한국정밀공학회지 논문심사규정

제1조 (목적)

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

제2조 (투고 및 접수)

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

제3조 (심사위원 선정)

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

제4조 (심사 방법)

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

제5조 (심사 기간)

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

제6조 (저자수정기한)

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

제7조 (게재 판정)

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

제8조 (특집논문심사)

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

한국정밀공학회지 논문심사규정

제9조 (비밀유지)

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

제10조 (이의제기)

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

제11조 (심사료)

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

(사)한국정밀공학회 학술활동 윤리규정

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

제 1 장 총칙

제1조 (목적)

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

제2조 (윤리규정 적용범위)

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

제3조 (부정행위의 범위)

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

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

제 2 장 저자

제4조 (저자의 정직성)

- ① 저자는 각자가 수행하는 연구에 있어서 정직하여야 한다. 여기서 정직은 아이디어의 도출, 실험에 대한 설계, 실험과 결과의 분석, 연구비 지원, 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 부정행위가 확인된 저자에게는 위원회 결정에 따라 부정행위의 경중을 고려하여 다음의 제재를 선택하여 가할 수 있다.
 1. 해당 발표연구물에 대한 학회 간행물에 게재취소
 2. 5년간 학회 발행 학술지에 투고금지
 3. 5년간 학회 학술대회 발표금지
 4. 해당 논문이 이미 출판된 경우에는 해당 학술지에 게재 취소를 공지하고, 부정행위자 소속기관에 부정행위 내용 통보
 5. 학회 회원자격 박탈
- ② 제보자가 고의로 허위제보를 하였을 경우 위원회의 결정에 따라 연구 부정행위자 수준과 동일한 제재를 가할 수 있다.

제14조 (피조사자 권리 보호)

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

제15조 (조사의 기록과 정보의 공개)

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

제16조 (조사결과의 보고)

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

한국정밀공학회지 연구윤리 및 저작권 동의서

(사)한국정밀공학회 귀하

논문 제목

국문:

영문:

저자명 (전체):

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

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

20 년 월 일

책임저자명:

서 명:

책임 저자

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

(사)한국정밀공학회 소개 및 활동현황

설립목적

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

회원(사) 구성

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

관련정부기관과의 관계

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

주요활동현황

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

발간자료

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

발행규정

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

부문위원회 활동

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

특별회원사 가입

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

(사)한국정밀공학회 소개 및 활동현황

한국정밀공학회상

정밀공학대상

- 학회 발전에 현저하게 공헌한 자

학술상

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

생산기술상, 정밀기술상

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

공로상

- 학회 발전과 운영에 지대하게 기여한 자

Best Editor Award

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

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

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

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

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

KSPE Young Researcher Award

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

특별상

가헌학술상

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

현송공학상

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

유정백합학술상

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

백암논문상

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

Year of Launching

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

Aims and Scope

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

Fee

Subscription Fee:

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

Publication Fee:

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

Contact Us

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

Rules for Submitting and Publishing Papers

Article 1 Purpose

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

Article 2 Submitter

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

Article 3 Responsibilities and Compliance with Code of Ethics

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

Article 4 Scope of Research

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

Article 5 Categorization of Submissions

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

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

Article 6 Submission

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

Article 7 Review and Decision to Publish Paper

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

Article 8 Copyright

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

Article 9 Disclosure of Materials

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

Article 10 Manual of Style

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

Article 11 Publication Fees

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

Guidelines for Manuscript Writing

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

Author's Check List

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

Rules for Reviewing Papers

Article 1 Purpose

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

Article 2 Submission and Reception

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

Article 3 Selection of Reviewers

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

Article 4 Review Procedure

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

Article 5 Review Period

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

Article 6 Deadline for Author's Revision

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

Rules for Reviewing Papers

Article 7 Decision over Publication

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

Article 8 Review of Special Papers

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

Article 9 Confidentiality

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

Article 10 Objection

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

Article 11 Review Fee

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

Code of Ethics for Academic Activities

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

Chapter 1 Overall Rules

Article 1 Purpose

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

Article 2 Application Area of Code of Ethics

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

Article 3 Scope of Misconduct

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

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

Chapter 2 Author

Article 4 Honesty of Author

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

Article 5 Authorship

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

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

Code of Ethics for Academic Activities

Article 6 Compliance of Authors

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

Chapter 3 Roles and Responsibilities of Members of Society

Article 7 Compliance of Editorial Board Member (EBM)

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

Article 8 Compliance of Reviewers

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

Code of Ethics for Academic Activities

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

Chapter 4 Verification Process and Standard

Article 9 Ethics Committee

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

Article 10 Function of Ethics Committee

The Committee shall act in the following manners:

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

Article 11 Convocation and Voting of Ethics Committee

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

Article 12 Reporting Research Misconduct

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

Code of Ethics for Academic Activities

Article 13 Sanctions on Research Misconduct and Follow-up Actions

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

Article 14 Protection of Rights of Examinee

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

Article 15 Disclosure of Record and Information of Investigation

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

Article 16 Report of Investigation Result

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

Research Ethics and Copyright Transfer Agreement

To the Korean Society for Precision Engineering (KSPE)

| | |
|---------|---------|
| Title | Korean |
| | English |
| Authors | |

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

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

**Corresponding
Author's
Signature**

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

**Corresponding
Author**

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

International Journal of Precision Engineering and Manufacturing

Volume 24 · Number 3 · March 2023

REGULAR PAPERS

Non-coupled Finite Element Modelling of Electromagnetic Radial Compaction of Pure Aluminium Powder

N. Thirupathi · R. Kumar · S.D. Kore 325

Study on the Formation of the Crater and Modified Layer in EDM Titanium Alloys Based on Fluid–Solid Coupled Temperature Field Model

Y. Chen · C. Li · S. Li · M. Xu · L. Huang · S. Li · P. Li · X. Qiu · T.J. Ko 337

Disturbance Suppression and Contour Following Accuracy Improvement: An Adaptive PI-Type Sliding Mode Nonlinear Extended State Observer Approach

Y.-C. Chen · Y.-R. Cai · M.-Y. Cheng · K.-H. Su 353

The Prediction of the Angular Transmission Error of a Harmonic Drive by Measuring Noncontact Tooth Profile and Considering Three-dimensional Tooth Engagement

B.-S. Kim · S.-T. Jeong · H.-J. Ahn 371

High-Precision Position Tracking Control of Giant Magnetostrictive Actuators Using Fractional-Order Sliding Mode Control with Inverse Prandtl-Ishlinskii Compensator

Z. Liu · W. Liu · P. Wang · Z. Li · Y. Xu · X. Yang · F. Shu 379

LQR Pendulation Reduction Control of Ship-Mounted Crane Based on Improved Grey Wolf Optimization Algorithm

M. Sun · C. Ji · T. Luan · N. Wang 395

High Precision Machining of a Displacement Sensor for Helicoidal Motions

Z. Elrawashdeh · P. Revel · C. Prella · F. Lamarque 409

Autonomous System of TMR (Total Mixed Ration) Feed Feeding Robot for Smart Cattle Farm

J. Bae · S. Park · K. Jeon · J.Y. Choi 423

Improved Informed-RRT* Based Path Planning and Trajectory Optimization for Mobile Robots

L. Yuan · J. Zhao · W. Li · J. Hou 435

Real-Time In Situ Microscopic Observation of Dynamic Contact and Friction Between a Wire Rope and Friction Lining

Y. Guo · Z. Zhu · D. Zhang · K. Chen · S. Wang 447

Numerical Frequency-Interval Modal Analysis of Structural Dynamic Systems with Frequency-Dependent Mounts

S.-H. Bae · J.-R. Cho 461

Proposal of a Short-Body Hydrogen Pressure Vessel to Assess the Burst Performance of Long-Body/Large-Capacity Vessels

J.-S. Hwang · K.-H. Ko · G.-S. Jung 471

Rapid Predictions for Lower-Order Dynamics of Machine Tools Based on the Rigid Multipoint Constraints

Y. Ma · Y. Tian · X. Liu 485

Investigation of Surface Integrity Up-Milling Magnesium Oxide Particle Reinforced Wood-Based Composite

J. Wang · R. Jiang · Z. Wu · Z. Zhu · L. Yang · P. Cao 501

REVIEW

Review: Scaffold Characteristics, Fabrication Methods, and Biomaterials for the Bone Tissue Engineering

J.-W. Jang · K.-E. Min · C. Kim · J. Shin · J. Lee · S. Yi 511

Further articles can be found at link.springer.com

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

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

International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology

Volume 10 · Number 2 · March 2023

REGULAR PAPERS

On-Line Prediction of Impulse Spark and Arc Discharge Removals of Metal Bond in Dry Electrical Discharge Dressing of Diamond Grinding Wheel
Y. Lu · J. Sun · X. Wu · F. Chen 293

An Octree-Based Two-Step Method of Surface Defects Detection for Remanufacture
Y. He · W. Ma · Y. Li · C. Hao · Y. Wang · Y. Wang 311

Effect of Friction Stir Welding Parameters on Microstructure and Corrosion Behavior of 2101 Duplex Stainless Steel in Simulated Body Fluid
A.S. Hammood · M. Esmailzadeh · S.N. Hosseini · S. Karimi · I. Calliari · L. Pezzato · R. Brittain 327

AI-Aided Printed Line Smearing Analysis of the Roll-to-Roll Screen Printing Process for Printed Electronics
A.N. Gafurov · T.H. Phung · B.-H. Ryu · I. Kim · T.-M. Lee 339

Metal Micro-forming of AA5052 Using High-durable Glassy Carbon Mold for Efficient Boiling Heat Transfer
J. Kim · S. Lee · Md. Ali Asgar · M. Refatul Haq · S. Kim 353

Effects of Intermetallic Evolution by Electrically Assisted Rapid Heat Treatment on the Mechanical Performance and Formability of Aluminum Clad Steel
S. Zhang · L. Cai · T.A.N. Nguyen · M. Geng · K. Gao · S.-T. Hong · M.-J. Kim 367

Comprehensive Study on the Cutting Force Modeling and Machinability of High Frequency Electrical Discharge Assisted Milling Process Using a Novel Tool
M. Xu · R. Wei · C. Li · R. Kurniawan · J. Chen · T.J. Ko 381

Toward Optimizing Resonance for Enhanced Triboelectrification of Oscillating Triboelectric Nanogenerators
J. Yu · W. Kim · S. Oh · D. Bhatia · J.-G. Kim · D. Choi 409

Comprehensive Control Strategy and Verification for PEM Fuel Cell/Battery/Supercapacitor Hybrid Power Source
H.-A. Trinh · H.V.A. Truong · M.D. Pham · T.C. Do · H.-H. Lee · K.K. Ahn 421

Biomechanical Regenerative Braking Energy Harvester: A Systematic Analysis
K.-T. Yoon · Y.-M. Choi 437

Corrosion Properties of Dissimilar AA6082/AA6060 Friction Stir Welded Butt Joints in Different NaCl Concentrations
A. Laska · M. Szkodo · Ł. Pawłowski · G. Gajowiec 457

Principle Component Analysis and Social Network Analysis for Decision Support of Ultra-Precision Machining
W.S. Yip · S. To 479

Development of Coating Removing from GFRP Surface by Abrasive Air Jet Using Amino Thermoset Plastic Abrasive
Y.S. Zhu · D. Sun · W.Z. Lu · T.J. Ko 495

Research on Scanning Induction Heating Process of Wind Turbine Gear: Dynamic Evolution of End Temperature
H. Wen · Y. Xiao · Y. Han · Y. Zhao · S. Wang 509

Improvement of Energy Saving for Hybrid Hydraulic Excavator with Novel Powertrain
Y. Yu · T.C. Do · B. Yin · K.K. Ahn 521

Lifetime Prediction of Silicone and Direct Ink Writing-Based Soft Sensors Under Cyclic Strain
K. Kim · J. Bae 535

REVIEWS

Analysis of Contribution of Full Summation Hydrodynamic Load to Dynamic Response of Floating Offshore Wind Turbine Structure Operating in Extreme Environments
T.-W. Kang · J.-H. Yun · H.-J. Noh · E. Kim · H.-I. Yang 547

Systematic Literature Review on Augmented Reality-Based Maintenance Applications in Manufacturing Centered on Operator Needs

J.M. Runji · Y.-J. Lee · C.-H. Chu 567

Producing Micro-Power with Microfluidic Enzymatic Biofuel Cells: A Comprehensive Review

H. Khan · M. Tanveer · C.W. Park · G.M. Kim 587

Design and Assessment of Phase-Shifting Algorithms in Optical Interferometer

S. Kim · J. Jeon · Y. Kim · N. Sugita · M. Mitsuishi 611

Further articles can be found at link.springer.com

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

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

한국정밀공학회 2023년 제1차 이사회 회의록(요약)

◎ 일 자 : 2023년 1월 13일(금) 16:00~16:50

◎ 장 소 : 학회회의실

◎ 참석자 : 이석우, 민병권, 안성훈, 이상원, 김동성, 김보현, 김창주, 정영훈, 김규만, 김영진, 박 근, 안형준, 이광일, 장진아, 주백석, 황지홍, 김무림, 김태곤, 박용재, 이동원, 이지혜, 주기남, 현승만, 노유정, 이주연, 이현욱, 장원석, 최영재, 김대욱, 문승기, 이동진, 정하승, 차석원, 김종혁, 조정대, 김건희, 정재일, 이동윤, 오정석, 엄광문, 김영범
위임 32명 등 총 73명 참석

1. 주요 보고 및 토의사항

- 1) 2023-2024 평의원선거 실시 계획 보고
- 2) 사무국 전자결재 시스템 준비 현황 보고
- 3) 과총 2022년도 학술사업 지원금 정산 보고 완료
- 4) 기단연 실무위원 추천 보고: 대외협력이사 조정대(KIMM)
- 5) IJPEM-Smart Technology (IJPEM-ST) 창간호 보고
- 6) 춘계학술대회 및 PRESM 2023 준비현황 보고
- 7) 제6회 정밀측정 워크숍 진행사항 보고

2. 주요 승인 및 토의사항

- 1) 신입회원 인준(안)을 원안대로 승인
(1) 심우섭(중앙보훈병원) 등 정회원 4명 인준
- 2) 임원직 해촉(안)을 원안대로 승인
(1) 백주현(부회장, 국방기술진흥연구소) 의원 해촉
- 3) 학회 연간 위원회 및 위원장 구성(안)을 원안대로 승인
(1) 포상위원회(위원장 민병권, 안성훈 등 위원 5명)
(2) 인사위원회(위원장 민병권, 안성훈 등 위원 9명)
(3) 학술대회 조직위원회(위원장 안성훈, 위원 사업이사, 대외협력이사, 부문회장)
(4) 윤리위원회(위원장 이상원, 민병권 등 위원 5명)
- 4) 회계항목 정비(안)을 원안대로 승인
(1) 회계항목 정비: 각 항목의 가시성, 직관성 제고 목표
(2) 원안대로 승인하고 2023년 1월 회계부터 적용
- 5) JKSP 저작권 계약 연장(안)을 원안대로 승인
(1) 2023.5.21부터 3년 계약연장, 저작권료 25%로 상향 조정
- 6) 대한민국 최고과학기술인상 추천(안)을 원안대로 승인
(1) 추천안: 김승우(KAIST 기계공학과 교수)
- 7) (가칭)반도체 제조 공정장비 위원회 설립 및 운영(안)을 원안대로 승인
(1) 스마트생산부문위원회 산하 [반도체 제조 공정장비 위원회]로 설립 및 운영
(2) 세부위원회 구성 및 운영계획 추후 보고

2023년 사단법인 한국정밀공학회 임원

회장

이석우(한국생산기술연구원)

수석부회장

민병권(연세대학교)

부회장

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

감사

김재환(인하대학교) 송창규(한국기계연구원)

총무이사

김동성(POSTECH) 김보현(숭실대학교) 신현정(KAIST)

재무이사

김창주(한국기계연구원) 송용남(고려대학교) 정영훈(경북대학교)

편집이사

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

사업이사

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

기획홍보이사

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

국제이사

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

대외협력이사

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

부문화장

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

특별회원사

다이아몬드

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

플래티늄

HP Korea(유) SK실트론(주)

골드

(주)마리알로 (주)에비던트코리아 (주)에이스나노켄 (주)엔도로보틱스 지앤피테크놀로지(주)

(주)프로토텍 헥사곤

패밀리

(주)웨이퍼펍 한국공작기계산업협회

Editor-in-Chief

김보현

송실대학교

bhkim@ssu.ac.kr

Editors

강성목
대구가톨릭대학교

고승환
서울대학교

곽문규
경북대학교

김동성
POSTECH

김양진
부산대학교

김호찬
안동대학교

문두환
고려대학교

손정우
금오공과대학교

박민수
서울과학기술대학교

박상후
부산대학교

박형욱
UNIST

안지환
서울과학기술대학교

이인환
충북대학교

이창우
건국대학교

이창환
서울과학기술대학교

이현섭
동아대학교

정구현
울산대학교

정영훈
경북대학교

주백석
금오공과대학교

진중환
한국표준과학연구원

천두만
울산대학교

추원식
경상국립대학교

황지홍
서울과학기술대학교

Members of Editorial Board

김기주
동명대학교

김무림
한국로봇융합연구원

김재열
조선대학교

김창주
한국기계연구원

박정재
한국표준과학연구원

박정환
영남대학교

박준
한국광기술원

배창호
경성대학교

손용
한국생산기술연구원

송철기
경상국립대학교

왕덕현
경남대학교

윤성호
금오공과대학교

윤해성
한국항공대학교

이광일
경일대학교

이봉기
전남대학교

이종길
안동대학교

장진아
POSTECH

전용호
아주대학교

정재일
국민대학교

조영학
서울과학기술대학교

최동휘
경희대학교

최영만
아주대학교

최정욱
중앙대학교

최진승
건국대학교

태기식
건양대학교

황영국
조선이공대학교

김갑용
Iowa State Univ.

김범준
Univ. of Tokyo

김우균
Univ. of Cincinnati

민상기
Univ. of Wisconsin-Madison

Simon Park
Univ. of Calgary

Patrick Kwon
Michigan State Univ.

JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR PRECISION ENGINEERING

VOLUME 40, NUMBER 3/ March 2023

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

월간 · 제40권 제3호 [통권 제384호] · 비매품

등록일자 1987년 4월 25일

등록번호 서울 라 07037

인쇄일 2023년 2월 25일

발행일 2023년 3월 1일

발행인 이석우

편집인 김보현

인쇄 한림원

편집 한림원

발행소 사단법인 한국정밀공학회

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

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

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

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

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

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

INTERNATIONAL JOURNAL OF PRECISION ENGINEERING AND MANUFACTURING



IJPEM Special Issue

Special Issue on Robots for Manufacturing Processes and Systems

IJPEM is published by the Korean Society for Precision Engineering with Springer. The journal has a history of 23 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 2.041**) 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.

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

- CAD/CAM for manufacturing robots
- Robotic machining
- Robot and machine tool integration
- Mobile robots for factory floor
- Next generation collaborative robots for advanced manufacturing
- Robotic material handling and assembly automation

Guest Editors

- **Prof. Michael Zäh**
Technische Universität München,
Germany
- **Prof. Martin Byung-Guk Jun**
Purdue University, USA
- **Prof. Jihyun Lee**
University of Calgary, Canada

Publication Schedule

- Deadline for Submission Date

March 1, 2023

- Publication Date

September 1, 2023

- Volume, Number

Vol. 24, No. 9

- Impact Factor

2.041

International Journal of Precision Engineering and Manufacturing **SMART TECHNOLOGY**



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

Aims and Scope

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

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

IJPEM-ST covers various kinds of papers:

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

• Publication Date (Scheduled)

Vol. 1 No. 1 January 1, 2023
Vol. 1 No. 2 July 1, 2023

• Publication and Distribution

by the Korean Society for Precision Engineering with Open-Access

Editorial Board

Editor-in-Chief

Sang Won Lee / Sungkyunkwan University, Korea

Co-Editors-in-Chief

Jay Lee / University of Maryland, USA

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

Editors

Hyeong-Joon Ahn / Soongsil University, Korea

Hae-Jin Choi / Chung-Ang University, Korea

Chih-Hsing Chu / National Tsing Hua University, Taiwan

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

Dong Yoon Lee / Korea Institute of Industrial Technology, Korea

Seungchul Lee / POSTECH, Korea

Sangkee Min / University of Wisconsin-Madison, USA

Seung-Ki Moon / Nanyang Technological University, Singapore

Duhwan Mun / Korea University, Korea

Simon Park / University of Calgary, Canada

Editorial Board

Seung-Kyum Choi / Georgia Institute of Technology, USA

Haseung Chung / Michigan State University, USA

Youngkuk Jeong / KTH Royal Institute of Technology, Sweden

Yongho Jeon / Ajou University, Korea

Jay-I. Jeong / Kookmin University, Korea

Hyungjung Kim / Seoul National University, Korea

Yangjin Kim / Pusan National University, Korea

Jihyun Lee / University of Calgary, Canada

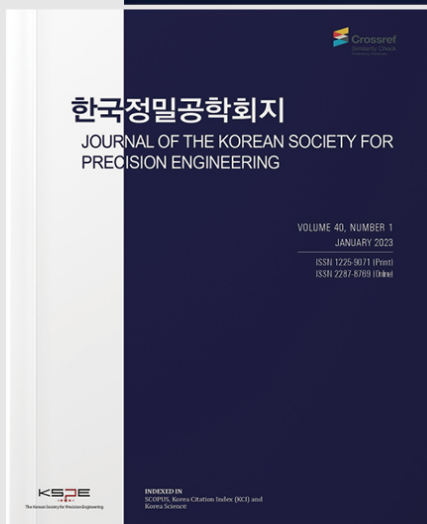
Wonkyun Lee / Chungnam National University, Korea

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

Joo-Sung Yoon / Kyungnam University, Korea

한국정밀공학회지

JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR PRECISION ENGINEERING



JKSPE Special Issue

article.kspe.or.kr
jkspe.kspe.or.kr


Scopus, KCI
등재지



JKSPE
투고시스템



JKSPE
Homepage

스마트/디지털 헬스케어 기술

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

Smart/Digital Healthcare Technology

Smart healthcare or digital healthcare technology deals with precision medical services that combine personal health and medical information, devices, systems, platforms, IoT, data analysis technology, and cloud. A term that collectively refers to technologies that create new knowledge and information by collecting and monitoring human lifestyle, biometric information, medical information, and genome information in real time through technologies such as big data technology, artificial intelligence technology, and virtual reality technology. In this special issue, we would like to recruit papers on smart healthcare and digital healthcare technology based on precision engineering and big data.

제출 기한

2023년 4월 30일

출판 날짜

2023년 7월 1일

권호수

Vol. 40, No. 7

책임편집인

김병희 (강원대학교)



SCOPUS, KCI 등재 학술지

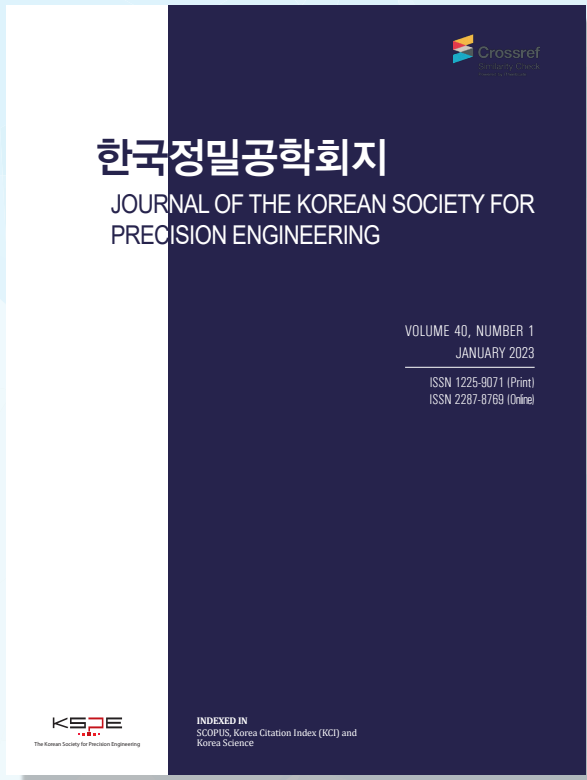
학회 회원님들의 많은 투고와 인용 부탁드립니다.

Scope

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

학술대회 Full Paper
논문을 투고 시 게재료가
면제됩니다.

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



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

Editorial Board

• Editor-in-Chief

Bo Hyun Kim (Soongsil University)

• Editors

Jihwan An (Seoul National University of Science & Technology)

Baeksuk Chu (Kumoh National Institute of Technology)

Won-Shik Chu (Gyeongsang National University)

Doo-Man Chun (University of Ulsan)

Koo Hyun Chung (University of Ulsan)

Duhwan Mun (Korea University)

Jihong Hwang (Seoul National University of Science & Technology)

Young Hun Jeong (Kyungpook National University)

Jonghan Jin (Korea Research Institute of Standards & Science)

Dong Sung Kim (POSTECH)

Ho-Chan Kim (Andong National University)

Yang Jin Kim (Pusan National University)

Seung Hwan Ko (Seoul National University)

Moonkyu Kwak (Kyungpook National University)

Sung-Mook Kang (Daegu Catholic University)

Changwoo Lee (Konkuk University)

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

Hyunseop Lee (Dong-A University)

In Hwan Lee (Chungbuk National University)

Hyung Wook Park (UNIST)

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

Sang-Hu Park (Pusan National University)

Jung Woo Sohn (Kumoh National Institute of Technology)

AWARDS

한국정밀공학회지 최우수논문상

– 한국정밀공학회지에 발표된 논문 중 가장
탁월한 가치의 논문저자에게 포상

INDEXED IN

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

Submission to JKSP Search for JKSP

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



+82-518-2928(T)

+82-518-2937(F)



paper@kspe.or.kr

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



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

Start New Sindoh

2D를 넘어 3D 전문 기업으로
신도리코가 새로운 미래를 열어갑니다



ENDO ROBOTICS

A compatible platform
for commercial diagnostic endoscopy.



ENDOROBOTICS CO., LTD



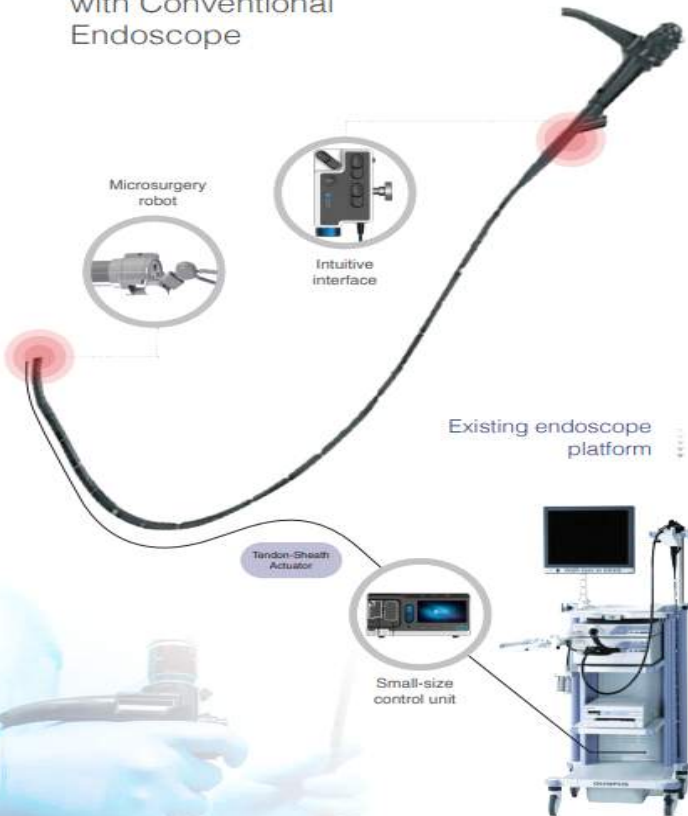
- A Controller A for main operator
- B Controller B for assistant operator
- C Slot to insert the cartridge
- D 8-inch touchscreen displaying information on the product and the procedure and enabling manipulation of the control unit



RoSE Platform

Endoscopic
Surgical Robot
Interoperable
with Conventional
Endoscope

Conventional
diagnostic endoscope



RoSE Platform

Components

Prototype



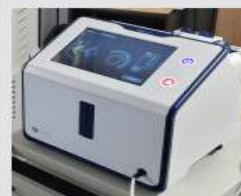
01 Forceps unit

- Attachable and removable on conventional endoscope
- Expected manufacturing cost: approx. KWD 100,000(\$85)
- Disposable after each operation
- World's smallest in diameter



02 Connecting unit

- Replaceable cartridge type
- Disposable for single-use
- Easily attachable and removable on control unit
- World's best flexibility



03 Actuation console

- Low acquisition cost
- Replaceable cartridge type
- Easily movable structure
- Manufacturing cost estimated at KWD 15 mil(\$12,700)
- Minimum space requirement



04 Controller

- Attachable and removable on conventional endoscope
- Intuitive manipulation device
- Allowing single-person handling (same as before)
- Same degree of freedom as end effector



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

현대위아 초정밀 소형 5축 머시닝 센터

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

XF2000/XF2000i



MM어워드 밀링부분
최우수상 (국내 최초)



FAST & DYNAMICS & ACCURACY

FAST

글로벌 최고 수준, 이송축 가속속 2G

DYNAMICS

고속, 고성능 빌트인 주축 적용

ACCURACY

리니어 스케일 & 로터리 엔코더 표준 적용

K-Precision,
Smart & Green

KSPE 2023 Spring Conference 한국정밀공학회

2023 춘계학술대회

2023. 5. 10 Wed - 5. 12 Fri

라마다프라자제주호텔

제주도 제주시

200단어 초록마감

2023. 3. 13 Mon

초록채택통지

2023. 3. 20 Mon

사전등록마감

2023. 3. 27 Mon

논문모집분야

- 정밀가공 Precision Manufacturing Processes
- 정밀측정 Precision Measurements
- 로봇제어자동화 Robotics, Control and Automation
- 스마트생산시스템 Smart Manufacturing System
- 설계및재료 Design and Materials
- 공작기계 Machine Tools
- 나노/마이크로기술 Nano/Micro Technology
- 바이오헬스 Bio Health
- 적층제조시스템 Additive Manufacturing
- 녹색생산기술 Green Manufacturing Technology

문의 | 한국정밀공학회 사무국 Tel. (02) 518-0722 E-mail. conf@kspe.or.kr
Homepage. <http://www.kspe.or.kr/event/>

주최 | KSPE 대한민국정밀공학회
Korean Society for Precision Engineering

후원 | KOFST 한국과학기술단체총연합회 제주특별자치도 (사)제주컨벤션뷰로

International Conference on
PRrecision Engineering and **S**ustainable **M**anufacturing

PRESM 2023

July 16 Sun – **21** Fri, 2023

Bankoku Shinryokan,
Okinawa, Japan

Important Dates

Deadline for Abstract Submission
of Regular Session:

February 15 (Wed), 2023

Date for Acceptance Notification:
(Mail from the PRESM Secretariat)

March 15 (Wed), 2023

Deadline for Early Registration/
Presenter Registration:

April 15 (Sat), 2023

Full Paper Submission (Optional):

May 1 (Mon), 2023

Awards & Honors

Best Paper Awards

Young Researcher Awards

Outstanding Presentation Awards

Organizer

 Korean Society for
Precision Engineering (KSPE, Korea)

Co-Organizers

 The Japan Society for
Precision Engineering (JSPE, Japan)

 Taiwan Society for
Precision Engineering (TSPE, Taiwan)

Secretariat

Homepage www.presm.org | Email presm@kspe.or.kr |
Tel +82-2-393-0725 | Fax +82-2-518-2937

Participating Journals

- 1** International Journal of Precision
Engineering and Manufacturing (IJPEM)
*SCIE, SCOPUS / IF 2.041 (2021)
- 2** International Journal of Precision
Engineering and Manufacturing-Green
Technology (IJPEM-GT)
*SCIE, SCOPUS / IF 4.660 (2021)
- 3** Journal of the Korean Society for
Precision Engineering (JKSPE)
*SCOPUS



2023년 국내/국제학술대회 일정 안내

한국정밀공학회

2023 KSPE 2023
Spring
Conference

춘계학술대회

2023.
5. 10(수) - 12(금)

라마다프라자제주호텔
(제주도 제주시)

International Conference on
Precision Engineering and Sustainable Manufacturing

PRESM 2023

2023. 7. 16(일) - 21(금)

Bankoku Shinryokan
Okinawa, Japan

한국정밀공학회

2023 KSPE 2023
Autumn
Conference

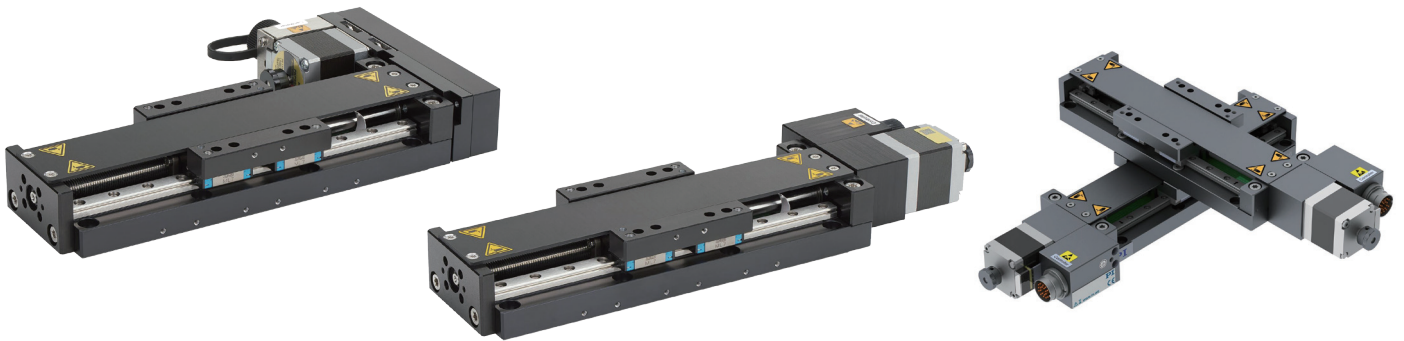
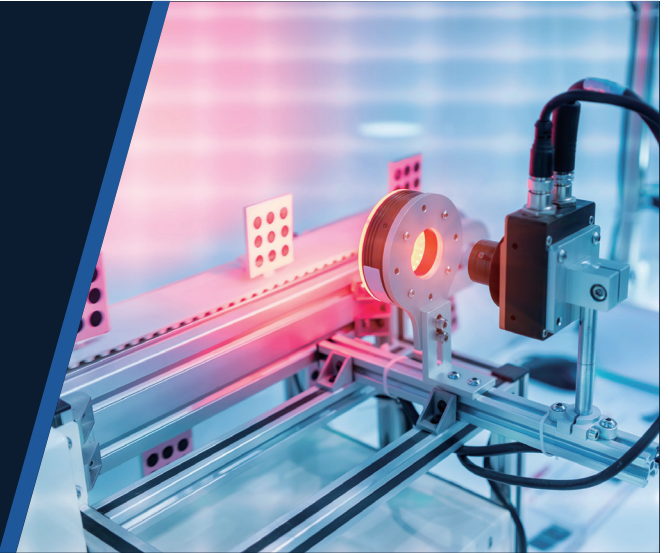
추계학술대회

2023. 11. 15(수) - 17(금)

썰비치삼척 리조트
(강원도 삼척시)

L-836 Linear Stage

Stackable · Compact
Cost Effective



상세 페이지 및
사양 다운로드

| | L-836 | Units |
|-----------------------------|-------------------|-------|
| Active axes | X | |
| Travel range | 25 ~ 200 | mm |
| Design resolution | 5 | μm |
| Min. incremental motion | 0.24 ~ 0.75 | μm |
| Bidirectional repeatability | ±0.4 ~ 3 | μm |
| Straightness / flatness | ±2 ~ 3 | μm |
| Max. velocity | 40 ~ 80 | mm/s |
| Load capacity | 150 | N |
| Overall mass | 0.7 ~ 1.2 | kg |
| Recommended controllers | C-663, G-901, ACS | |

- 폭 60 mm, 낮은 프로파일
- 이동 범위 25 ~ 200 mm
- 가반하중 최대 150 N
- Folded drivetrain 옵션
- 리니어 엔코더 옵션
- 수직마운팅용 홀딩 브레이크 모델

레이저 가공, 테스트&검사, 전자 제조,
광 어셈블리, 포토닉스, 적층 제조 등

