

한국정밀공학회지

JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR
PRECISION ENGINEERING

VOLUME 40, NUMBER 1

JANUARY 2023

ISSN 1225-9071 (Print)

ISSN 2287-8769 (Online)

취임사



이석우
한국생산기술연구원

2023 계묘년 새해를 맞이하여 회원 여러분들의 건강과 행복, 열정적인 연구와 평화로운 일상을 동시에 즐길 수 있는 한 해가 되시기를 기원합니다. 2023년 사단법인 한국정밀공학회 회장을 맡게 된 한국생산기술연구원 이석우입니다.

올해 40주년을 맞이하는 우리 학회는 정밀공학 분야 최고의 전문가이신 전임회장님들과 회원분들 그리고 임직원들의 헌신적인 노력으로 눈부시게 발전하였습니다. 이렇게 우수한 학회의 회장직을 맡게 되어 큰 영광으로 생각함과 동시에 막중한 책임감을 느낍니다.

COVID-19 팬데믹 사태로 인해 사상 유례가 없는 어려움 속에서도 회원님들의 관심과 참여로 2022년 춘·추계학술대회와 국제학술대회 PRESM은 사상 최대의 인원이 참가하는 등 성공적인 학술교류를 이뤄내었습니다. 우리 학회는 약 4천여 명의 회원과 10개의 부문위원회로 구성된 전문가 그룹으로 구성되어, 국내외 전문가와 교류하면서 정밀공학 분야를 선도하고 있습니다. 이러한 성장에 만족하지 않고 한 단계 더 발전한 학회가 되기 위하여 다각도로 노력해 왔으며, 그 일환으로 2020년에 학회의 중장기 발전계획과 그 바탕이 되는 Vision 2030을 수립하여 그 첫걸음을 힘차게 시작했습니다. 2023년은 힘들었던 COVID-19 시기가 안정화되면서 학회 활동이 COVID-19 이전으로 회복이 될 것으로 예상되어 Vision 2030과 그 실천안을 본격적으로 추진하는 것을 목표로 노력을 집중해 보고자 합니다.

첫째, 학술지의 발전에 집중하도록 하겠습니다. 우리 학회는 정밀공학분야 국내 대표적인 학술지 3종에 더하여, 2023년 1월에 IJPEM-Smart Technology (IJPEM-ST)를 Open Access로 창간할 예정입니다. 궁극적으로 학술지는 지속 가능하고 풍요로운 미래를 선도할 수 있는 기술의 공유를 위해 Open Access로 발간하여야 하는 당위성이 있습니다. IJPEM-ST를 통하여 향후 우리 학회에서 발간하는 학술지의 미래 지향성을 확인하고 이를 바탕으로 확대 발전시켜 나가고자 합니다. 이를 위하여 다양한 편집위원회의 활동을 강화하고 지원하여 우리 학회 학술지의 위상을 더욱더 높이겠습니다.

둘째, 학회 운영시스템을 체계화하고 정보화하겠습니다. 수년 전부터 회원들의 활동 내역을 조회하고 다양한 형태로 확인하기 위한 정보화 구축 작업이 궤도에 오르기 시작하였습니다. 2023년에는 개인 DB의 신뢰도를 높이는 작업을 통해 연구활동과 관련한 양질의 서비스를 제공하도록 하겠습니다. 또한 회장단, 총무, 재무, 부문회장 및 사무국의 업무를 체계화하고 이를 기반으로 학회 운영 프로세스를 체계화하여 정보화 시스템에 반영하고 결재 시스템도 도입하여 전체적인 업무 부담을 줄여서 회원들에게 제공되는 서비스가 지속적으로 향상될 수 있도록 하겠습니다.

셋째, 수익사업을 위한 기반을 구축하도록 하겠습니다. 학회가 학술활동을 위한 교류의 장일 뿐 아니라 새로운 용역, 연구개발, 교육 사업 등을 통해 학술활동을 확장하기 위한 수익사업 준비를 진행하겠습니다. 학회에서 정부 연구용역사업과 교육사업 등을 수행하여 향후 학회 회원들의 미래 연구 분야를 발굴하고 연구를 수행하기 위한 수익사업 모델을 학회 차원에서 준비하도록 하겠습니다. 이러한 수익 모델은 향후 학회의 발전과 회원들의 유대감을 강화할 수 있으리라 봅니다.

2023년도에도 전임회장님과 선배 회원분들의 전통을 이어서 학회가 더욱 미래지향적으로 발전하고 동시에 양질의 서비스를 제공하여, 동료 회원분들과 더욱 협력하는 교류의 장이 될 뿐만 아니라 미래를 이끌어갈 젊은 회원분들께 희망과 꿈을 키워줄 수 있는 학회가 되도록 최선을 다하겠습니다. 회원 여러분들께서도 이전보다 더 활발한 활동을 부탁드립니다 더 많은 의견도 부탁드립니다. 저와 학회 임직원들은 학회 발전과 회원 여러분의 학술활동을 위해 작게라도 보탬이 될 수 있는 일들부터 정밀공학과 미래 사회의 비전을 제시할 수 있는 학술활동이라는 목표를 가지고 힘차고 꾸준하게 2023년을 나아갈 수 있도록 노력하겠습니다. 감사합니다.

2023년 1월

사단법인 한국정밀공학회 2022년 회장 이석우

K-Precision, Smart & Green!!

이 임 사



양승한
경북대학교

안녕하십니까? 2023년도 한국정밀공학회 회원 및 관련 연구자분들의 건강을 기원합니다. 2022년도 회장으로 활동한 경북대학교 양승한입니다. 무엇보다 2022년을 여러분들과 함께 즐겁고 보람찬 한 해를 보내고 회장으로서의 임기를 마무리하게 되어 기쁨과 안도의 마음이 듭니다. 학회 임직원 여러분들의 헌신적인 활동과 회원 여러분의 적극적인 참여에 힘입어 한해를 잘 수행하고 마무리하게 되었다고 생각합니다.

1983년에 창립모임으로 시작하여 1984년에 창립한 우리 학회는 어느덧 40주년을 맞이하게 되었고, 그간 정밀공학 분야에서 가장 열정적이면서도 선도적인 연구 활동을 수행해 왔습니다. 이러한 과정을 거쳐 우수한 학술 저널과 많은 연구자가 참여하는 학술대회 등을 적극적으로 개최하여 학회 회원들에게 다양한 학술 활동 무대를 만들어 드리고자 노력해 왔습니다. 특히 2022년은 COVID-19를 극복하고 New Normal의 시대가 열리면서, 그간 다소 위축되었던 학술 활동이 다시 다양하고 열정적인 모습으로 이뤄지기 시작했습니다. 우리 학회는 새로운 미래의 지속가능한 발전을 위해 다양한 활동을 하였으며, 학회 본연의 모습에 충실해지도록 기반을 다지는 데 올 한해 노력을 경주하였습니다.

우리 학회는 KCI, SCIE, SCOPUS 등 국내외 저널 학술 DB에 등재된 3종의 학술지를 발간해 오고 있습니다. 여기에 Smart Technology에 특화된 국제저널 1종을 추가로 창간을 준비, 1권 1호가 2023년 1월 새롭게 출간됩니다. IJPEM-Smart Technology는 기존의 생산, 가공 등의 전통 정밀공학 분야와 'Green'으로 대표되는 미래 정밀공학 기술을 연결하고 지속가능한 시스템을 구축하여 인류의 미래를 준비하는 저널로서 자리매김할 것입니다. 또한 누구나 연구성과를 접하고 활용할 수 있도록 Open Access 출판을 시행하여 공공재로서의 저널의 역할도 더욱 충실하게 할 예정입니다.

또한, 2022년 학회의 시스템을 공고하게 안정시키도록 하였습니다. 회계관리의 안정화, 전자결제 및 문서관리 도입, 그리고 무엇보다도 상당 기간 준비한 학회 회원 활동의 DB구축이 1차 마무리가 되었습니다. 2차 DB구축과 전자결제의 본격적인 가동을 통해 학회 회원들에게 더욱 효율적이고 신속한 서비스를 제공하여 미래지향적 연구활동에 도움을 드리게 될 것입니다.

우리 학회가 매년 주최하는 국제학술대회인 PRESM도 2년여 간의 체질 개선을 통해 더욱 활발하고 집중적인 학술대회로 거듭나게 되었습니다. Single Track으로 시간표를 구성하고, 초청발표 및 Focus Session 등을 통해 더욱 수준 높은 발표와 토론이 이뤄지도록 준비를 하였습니다. 2023년 약 4년 만에 해외에서 열리는 PRESM 2023에는 더욱 수준 높은 발표가 이뤄지리라 기대합니다.

30여 년 전 평회원으로 학회 활동을 시작하였고, 20여 년 동안 지속적으로 이사로서 활동해 왔습니다. 한국정밀공학회 통해 저의 연구 활동을 발전시켜 올 수 있었고, 수많은 선후배 및 동료들과 치열하면서도 즐거운 연구 활동을 해 올 수 있었습니다. 많은 선배님들과 함께 해왔던 모든 활동을 모토 삼아 2022년 회장직을 성심껏 수행하려고 노력하였습니다. 제 임기 동안 한 해를 잘 마무리할 수 있었던 것은 저 한 사람 회장의 힘이 아니라 임직원들과 회원분들의 열정과 도움 덕분이라고 생각합니다. 진심으로 깊은 감사의 마음을 전합니다. 우리 학회는 이제 정밀공학을 선도적으로 이끌어가고 한편으로는 폭넓게 확대해 나가면서 가장 내실 있는 학회로 지속적인 발전을 해 나갈 것이라고 믿습니다. 저도 이제 한 사람의 평회원으로 여러분들과 함께 열심히 학회 및 연구 활동에 참여하도록 하겠습니다.

모든 회원 여러분, 그간의 응원과 격려에 다시 한번 깊은 감사의 말씀을 드립니다.

감사합니다.

2023년 1월
사단법인 한국정밀공학회 2022년 회장 양승한

K-Precision, Smart & Green!!

사단법인 한국정밀공학회 2023년 임원



회장 이석우
한국생산기술연구원



수석부회장 민병권
연세대학교



부회장 안성훈
서울대학교



부회장 이상원
성균관대학교



부회장 배규호
DN솔루션즈



부회장 김정
KAIST



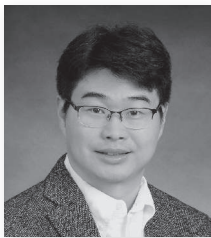
감사 김재환
인하대학교



감사 송창규
한국기계연구원



총무이사 김동성
POSTECH



총무이사 김보현
송실대학교



총무이사 신현정
KAIST



재무이사 김창주
한국기계연구원



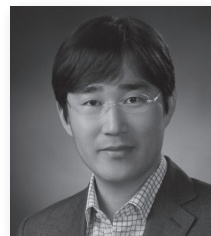
재무이사 송용남
고려대학교



재무이사 정영훈
경북대학교



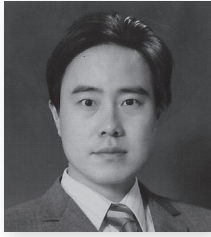
편집이사 강현욱
UNIST



편집이사 고승환
서울대학교



편집이사 곽문규
경북대학교



편집이사 **김규만**
경북대학교



편집이사 **김남근**
서강대학교



편집이사 **김동립**
한양대학교



편집이사 **김석민**
중앙대학교



편집이사 **김양진**
부산대학교



편집이사 **김영진**
KAIST



편집이사 **문두환**
고려대학교



편집이사 **박근**
서울과학기술대학교



편집이사 **박영빈**
UNIST



편집이사 **손정우**
금오공과대학교



편집이사 **안지환**
서울과학기술대학교



편집이사 **안형준**
송실대학교



편집이사 **이광일**
경일대학교



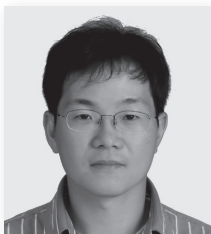
편집이사 **이창우**
건국대학교



편집이사 **이현섭**
동아대학교



편집이사 **장진아**
POSTECH



편집이사 **정구현**
울산대학교



편집이사 **정훈익**
UNIST



편집이사 **주백석**
금오공과대학교



편집이사 **천두만**
울산대학교



편집이사 **추원식**
경상국립대학교



편집이사 **황지홍**
서울과학기술대학교



사업이사 **강태준**
인하대학교



사업이사 **권지연**
동국대학교



사업이사 **김무림**
한국로봇융합연구원



사업이사 **김승중**
고려대학교



사업이사 **김진호**
영남대학교



사업이사 **김태곤**
한국생산기술연구원



사업이사 **박상후**
부산대학교



사업이사 **박용재**
강원대학교



사업이사 **손용**
한국생산기술연구원



사업이사 **이경창**
부경대학교



사업이사 **이동원**
전남대학교



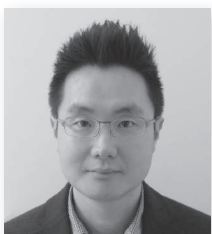
사업이사 **이영수**
삼성전자



사업이사 **이인환**
충북대학교



사업이사 **이지혜**
한국기계연구원



사업이사 **임지식**
영남대학교



사업이사 **전용호**
아주대학교



사업이사 **주기남**
조선대학교



사업이사 **현승민**
한국기계연구원



사업이사 **홍성태**
울산대학교



기획홍보이사 **노유정**
부산대학교



기획홍보이사 **류시형**
전북대학교



기획홍보이사 **이주연**
서울과학기술대학교



기획홍보이사 **이현욱**
한국철도기술연구원



기획홍보이사 **장원석**
한국기계연구원



기획홍보이사 **최영재**
한국생산기술연구원



국제이사 **Martin B. Jun**
Purdue Univ.



국제이사 **Simon Park**
Univ. of Calgary



국제이사 **김대욱**
Univ. of Arizona



국제이사 **김범준**
The Univ. of Tokyo



국제이사 **문승기**
Nanyang Technological Univ.



국제이사 **민상기**
Univ. of Wisconsin, Madison



국제이사 **여운홍**
Georgia Tech.



국제이사 **이동진**
건국대학교



국제이사 **이지현**
Univ. of Calgary



국제이사 **이차범**
Texas A&M Univ.



국제이사 **정용국**
KTH Royal Institute of Tech.



국제이사 **정하승**
Michigan State Univ.



국제이사 **조영태**
창원대학교



국제이사 **차석원**
서울대학교



국제이사 **최재원**
The Univ. of Akron



대외협력이사 **권석진**
한국철도기술연구원



대외협력이사 **김경동**
한국공작기계산업협회



대외협력이사 **김종혁**
현대위아



대외협력이사 **서진호**
부경대학교



대외협력이사 **이강재**
DN솔루션즈



대외협력이사 **조영환**
LIG넥스원(주)



대외협력이사 **조정대**
한국기계연구원



정밀가공부문
회장 **김건희**
한밭대학교



정밀측정부문
회장 **진종한**
한국표준과학연구원



로봇제어자동화부문
회장 **정재일**
국민대학교



스마트생산시스템부문
회장 **이동윤**
한국생산기술연구원



설계및재료부문
회장 **박형욱**
UNIST



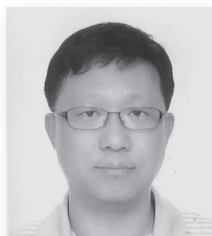
공작기계부문
회장 **오정석**
한국기계연구원



나노마이크로기술부문
회장 **김종백**
연세대학교



생체공학부문
회장 **엄광문**
건국대학교



적층제조시스템부문
회장 **김호찬**
안동대학교



녹색생산기술부문
회장 **김영범**
한양대학교

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

Moonyu Kwak
Kyungpook National University

Sung-Mook Kang
Daegu Catholic University

Changwoo Lee
Konkuk University

Chang-Whan Lee
Seoul National University of Science & Technology

Hyunseop Lee
Dong-A University

In Hwan Lee
Chungbuk National University

Hyung Wook Park
UNIST

Min Soo Park
Seoul National University of Science & Technology

Sang-Hu Park
Pusan National University

Jung Woo Sohn
Kumoh National Institute of Technology

Members of Editorial Board

Jangho Bae
Kyungsoong University

Younghak Cho
Seoul National University of Science & Technology

Dongwhi Choi
Kyung Hee University

Jin-Seung Choi
Konkuk University

Jungwook Choi
Chung-Ang University

Young-Man Choi
Ajou University

Young-Kug Hwang
Chosun College of Science & Technology

Jinah Jang
POSTECH

Yongho Jeon
Ajou University

Jayil Jeong
Kookmin University

Maolin Jin
Korea Institute of Robot & Convergence

Beomjoon Kim
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 1 / January 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 January 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

기 고

- 11 Micro와 Macro를 묶어 매는 이야기
이봉진

일 반

- 13 실험계획법을 이용한 마이크로파 차폐용 개폐도어부의 최적설계
이가희, 김광
- 21 심층 신경망을 이용한 패드 표면 거칠기 기반 CMP 재료 제거율 예측
정종민, 정선호, 신영일, 박영욱, 정해도
- 31 차량용 크래쉬패드 스티치 불량 검출을 위한 실시간 머신비전 검사 방법
윤현중, 김진곤
- 39 마그네슘 합금 판재(AZ31B)의 인장 변형에서 AE 신호 발생 특성 분석
송용호, 안소찬, 유제형, 정완진, 이창환
- 49 자동차용 판재의 Subtle Feature의 성형 조건에 따른 곡률 반경 예측 모델에 대한 연구
유제형, 정규석, 정연찬, 이창환
- 57 Development of Steering Stop Parts for Automobile Suspension Using Former Cold Forging Complex Forming Technology
박동환, 한성철, 한승호, 권혁홍
- 65 케이블 구동 마스터 디바이스의 왜곡 보상 알고리즘
박진수, 이경준, 심예리, 진상록
- 71 탄소나노튜브 보강 여부에 따른 자가치료용 마이크로캡슐의 박막 특성 평가
장정근, 김현지, 윤성호
- 79 가스절단 과정의 역학 분석 및 수학적 모델링
이재인, 고병수, 이준엽, 유인근, 문일우, 문도영, 박민원
- 87 십자형 교정체를 이용한 5축 공작기계 회전축의 기하학적 오차 추정에 관한 연구
강정모, 김다영, 지성철

JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR PRECISION ENGINEERING

VOLUME 40, NUMBER 1 / January 2023

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

CONTENTS

SPECIAL COLUMN

- 11 View on Connecting Micro and Macro Dynamics
Bongjin Lee

REGULAR

- 13 Optimal Design of Microwave Shielding Door by Using of Design of Experiments
Ka Hee Lee and Kwang Kim
- 21 Prediction of CMP Material Removal Rate based on Pad Surface Roughness Using Deep Neural Network
Jong Min Jeong, Seon Ho Jeong, Yeong Il Shin, Young Wook Park, and Hae Do Jeong
- 31 Real-Time Machine Vision-Based Inspection Method for Automotive Crash-Pad's Stitch
Hyun Joong Yoon and Jin Gon Kim
- 39 Analysis of Acoustic Emission (AE) Signal Characteristics of the Magnesium Alloy Sheet (AZ31B) in the Tensile Deformation
Yong Ho Song, So Chan An, Jae Hyeong Yu, Wan-Jin Chung, and Chang-Whan Lee
- 49 A Study on the Prediction Model of the Radius of Curvature of the Subtle Feature of the Automotive Parts for Different Forming Conditions
Jae-Hyeong Yu, Kyu-Seok Jung, Yunchan Chung, and Chang-Whan Lee
- 57 Development of Steering Stop Parts for Automobile Suspension Using Former Cold Forging Complex Forming Technology
Dong-Hwan Park, Seong-Chul Han, Seung-Ho Han, and Hyuk-Hong Kwon
- 65 Distortion Compensation Algorithm for a Cable-Driven Master Device
Jinsu Park, Gyoungjun Lee, Yeri Sim, and Sangrok Jin
- 71 Evaluation of Thin-Shell Properties of Self-Healing Microcapsules by Reinforcement of Carbon Nanotubes
Jeong Keun Jang, Hyeon Ji Kim, and Sung Ho Yoon
- 79 Dynamic Analysis and Mathematical Modeling of a Gas Cutting Process
Jae-In Lee, Byeong-Soo Go, Jun-Yeop Lee, In-Keun Yu, Il-Woo Moon, Do-Young Moon, and Minwon Park
- 87 A Study on the Estimation of Geometric Errors for Rotary Axes of a Five-Axis Machine Tool Using a Cross-Shaped Calibration Artifact
Jeongmo Kang, Dayoung Kim, and Sungchul Jee

• 기고 •

Micro와 Macro를 묶어 매는 이야기

View on Connecting Micro and Macro Dynamics

이봉진^{1,#}
Bongjin Lee^{1,#}

1 한국정밀공학회 초대회장, Fellow
Corresponding Author / E-mail: bjlee1288@naver.com

원자 분자의 운동을 지배하는 미크로 역학과, 열 현상을 지배하는 매크로 법칙과는 전혀 다른 이질적인 자연 현상으로 보일 것입니다.

그래서 종종 이 분야의 자연 현상을 공부하는 이는 종종 이 두 법칙을 이질적으로 보기 쉽습니다. 상대성 이론으로 유명한 아인슈타인도 원자 분자의 운동을 지배하는 미크로 역학, 즉 양자 역학의 원리를 인정하지 않았습니다.

제대로 자연을 알려면 미크로와 매크로의 현상 연계를 이해해야 합니다.

자연 과학은 무엇보다도 인간이 살고 있는 환경의 자연 현상을 이해해야 한다는 목적으로 출발한 학문입니다. 이 법칙을 이용해 인류를 보다 운택하고 행복해질 수 있게 해 주는 생필품을 만들어 내는 것이 엔지니어의 사명일 것입니다.

그러나 인류의 지식이 늘어나면서, 지혜로운 인간은 보이지 않는 자연 원리의 실존의 이해를 통해 보다 새롭고 좋은 것을 만들어 내려고 끊임없이 노력합니다.

우리가 갖고 다니는 핸드폰은 미크로 세계의 자연법칙을 이용하여 낮은 곳에서 길을 안내해 주는 기능을 제공합니다.

1930년에 거의 완성된 양자 역학은 오늘에 와서는 거의 미크로의 세계가 알게 되어 이 두 이질적이라는 자연 현상이 하나였음을 알게 되고 이를 증명해 낸 오랜 기간 연구활동을 해온 70대의 학자들이 올해 노벨 물리학상을 탔습니다. '양자 역학' 분야의 양자정보과학을 개척한 공로를 인정받은 것으로서 수상자는 '알랭 아스페(Alain Aspect, 프랑스, 75세)', '존 F. 클라우저(John F. Clauser, 미국, 80세)', '안톤 차일링거(Anton Zeilinger, 오스트리아, 77세)' 3명입니다.

원자핵(原子核)과 전자와 전자장(電磁場) 광의 기본적인 실체를

이해하고, 양자 역학의 법칙을 연계 이해하면 생명 현상을 이해할 수 있습니다.

즉 우리의 세계가 보이지 않는 미크로 세계가 어떻게 묶여 매어져 있는지 알게 됩니다. 현재 이 두 세계를 하나로 알려주는 역학은 통계 역학(統計力學)입니다. 이는 현재, 양자(兩者)의 나뉠배 역할을 하고 있는 유일한 이론이라 할 수 있습니다.

매크로 물질을 구성하고 있는 원자 분자의 수는 팽대(膨大)합니다. 물질의 미크로 성질은 극히 소수의 상태량으로 기술되고 있습니다. 이것은 미크로 기술에서 매크로 기술로 이행할 때의 엄청난 정보량의 압축을 의미합니다.

실제로 압축되지 않은 매크로 세계는 정보가 없는 것입니다. 미크로와 매크로를 이해한다는 것은 이 정보의 압축 방법을 이해하는 데에 있습니다.

앞서 생명 현상이 미크로와 매크로 2개 층 관계를 이해함에 통계 역학을 소개했는데 아직도 미개척 분야가 있음을 이야기 하고 싶습니다. 생명 현상은 구조적으로나 기능적으로도 그간에 여러 계층이 있어 쉽게 이해되는 일이 아닙니다.

신비스런 곳으로 아마도 창조주만의 영역일지도 모릅니다. 생명은 물리학에서 보는 카오스와 난류(亂流)와 같은 복잡한 운동으로, 이는 사회 현상과 경제 현상이 복잡한 것같이 이런 현상이 원자 분자에만 있는 것이 아니라는 것을 지적하고 싶습니다.

실험계획법을 이용한 마이크로파 차폐용 개폐도어부의 최적설계

Optimal Design of Microwave Shielding Door by Using of Design of Experiments

이가희¹, 김광^{1,#}
Ka Hee Lee¹ and Kwang Kim^{1,#}

¹ 한국공학대학교 기계설계공학과 (Department of Mechanical Design Engineering, Tech University of Korea)
Corresponding Author / E-mail: kimkwang@tukorea.ac.kr, TEL: +82-31-8041-0428
ORCID: 0000-0001-9734-3605

KEYWORDS: High-frequency electromagnetic field simulation (고주파 전자기장 해석), Microwave drying and heating system (전자기파 가열건조기), Design of experiments (실험계획법), Microwave shielding (전자기파 차폐), Optimal design (최적설계)

In the heating and drying system using microwaves, an optimal design method was presented to effectively shield microwaves leakage between the door and the cylindrical applicator. In order to protect the human body from leaking microwaves, it is necessary to keep the intensity of microwaves below 5 mW/cm². The door part adopts a choke structure and includes a number of design factors, such as, fin shape, slit shape, and a gap between the applicator and the door. The geometry was optimized by design of experiments, applying full factorial design and response surface method in a 4-factor, 2-level design. The results obtained by ANSYS HFSS analysis were applied to the intensity of microwave leakage according to the change of the design factors. The shape of the choke structure was optimized using Minitab, a statistical program. The microwave heating and drying system was manufactured based on optimal design value and the leakage of microwaves between the door and the applicator was measured. We confirmed that the experimental values were consistent with the simulation values.

Manuscript received: August 23, 2022 / Revised: October 19, 2022 / Accepted: October 31, 2022
This paper was presented at KSPE Spring Conference 2022

NOMENCLATURE

L	=	Length of Microwave Transmission Path
L ₁	=	Length of Inner Choke Wall
L ₂	=	Length of Fin
L ₃	=	Overlapped Length between Door Base and Applicator
G ₁	=	Gap Distance between Door Base and Applicator
G ₂	=	Gap Distance between Fin and Door Base
S	=	Height of Slit Wall
λ	=	Wave Length of Microwave

1. 서론

마이크로파를 이용한 가열건조시스템은 일반적으로 가정에서 널리 사용되는 전자레인지 이외에도 의료분야에서는 치과용 지르코니아의 소결 등에 활용되고 있다[1,2]. 그 외에도 3 kW 이상의 고출력 마그네트론 적용하는 사례[3]와 좁은 영역에 마이크로파를 집중시켜 바이오매스 가열용[4,5]으로도 활용하고 있으며 최근에는 폴리머의 용융에도 건조용[6,7]으로도 연구가 활발하게 진행되고 있다. 마이크로파 건조기는 2.45 GHz의 고주파 발진에 의해 피건조물에 포함된 물 분자 간 회전 충돌로 발생된 열에너지를 사용하여 가열 건조하는 장치이다.

마이크로파를 활용한 장치의 경우 발생할 수 있는 마이크로파의 누설은 통신기기의 전파를 교란시키며 특히 인체에 미치는

영향으로 인해 전자레인지의 경우 피폭기준을 5 (mW/cm²) 또는 138 (V/m) 이하로 제한하고 있다[8]. 따라서 마이크로파 누설을 안전하게 차폐하기 위해 피건조물의 투입과 배출에 필요한 개방부를 나사 체결방식으로 설계한 경우 나사를 체결하고 푸는데 많은 시간이 소요되어 작업성이 저하된다. 이와는 달리 건조 대상물의 투입과 배출 시간을 단축하기 위해 마이크로파 차폐 특성이 우수한 재료를 사용하거나[9] 누설부의 형상을 변형시키는 방법을 도입하였다[10]. 특히, 건조 대상물의 투입과 배출을 간단하게 실행하기 위한 도어(Door)로 대체하고 초크(Choke) 형상을 적용한 방식[11]은 마이크로파 누설을 차폐할 수 있으나 초크 형상 설계에 필요한 다수의 설계인자가 존재하므로 최적의 차폐 도어를 설계하는 것이 곤란하다.

본 연구에서는 마이크로파의 누설을 방지하기 위한 차폐 도어 설계에 있어서 도어 구조를 결정하는 핀(Fin), 슬릿(Slit), 초크(Choke) 형상과 본체와의 갭(Gap) 및 중첩 길이 등 다수의 설계 인자들을 최적화하기 위해 실험계획법을 활용하고 해석과 실험을 통해 설계의 유효성을 확인하였다. 마이크로파 누설량은 ANSYS HFSS를 사용한 해석을 통해 파악하였으며 통계 해석을 위해 Minitab을 활용하여 최적 설계 값을 도출하였다.

2. 마이크로파 가열건조기 해석

2.1 마이크로파 가열건조기 모델링

폴리머 또는 음식물의 가열건조 등에 활용하기 위해 자체 제작한 원통형의 가열건조기는 Fig. 1과 같다. 1 kW 출력을 갖는 마그네트론 2개를 사용하고 있으며 도파관(Wave Guide)을 통해 건조기 본체(Applicator)로 마이크로파가 전달되며 마그네트론 작동 시 출력량과 반사량은 방향성정합기(Directional Coupler)를 통해 상시 모니터링함으로써 과도한 반사에 의해 마그네트론의 손상이 발생하지 않도록 구성하였다. 마이크로파 가열건조기의 본체는 원통 형태를 갖고 있으며 제원을 Table 1에 나타내었으며 Fig. 2에는 가열건조기의 초크(Choke) 구조의 차폐 도어 부에서 누설되는 전자기장을 파악하기 위한 전자기장 해석모델을 나타내었다. Fig. 3에는 차폐 도어부의 세부 명칭을 나타내었다. 건조통 본체(Applicator)와 차폐 도어의 경계면에서 마이크로파가 누설되며 G_1, G_2, L_1, L_2, S 는 설계 인자로 크기 변화에 따라 누설량이 변화하게 된다. G_1 은 건조통 본체와 차폐 도어 간 틈새(Gap)이며 평탄도 문제로 인해 발생한다. 나사 체결방식에서 체결력에 의해 거의 영에 가까웠으나 원터치 록킹 방식에서는 필연적으로 틈새가 발생하며 건조과정 중 발생한 수증기가 틈새(G_1)로 누출되며 이를 방지하기 위해 일정한 두께 이상의 실링고무(Sealing Rubber) 또는 가스켓(Gasket)의 적용이 요구된다. G_2 는 차폐 도어 베이스(Door Base)에서 핀(Fin)까지의 거리이며 독립변수로서 G_1 의 영역과는 중복되지 않는다. 개폐 도어부의 차폐 성능을 높이기 위해서는 초크 구조를 복수의 슬릿으로 분할하여 개방된 전송 경로를 형성해야 한다. 이와 함께

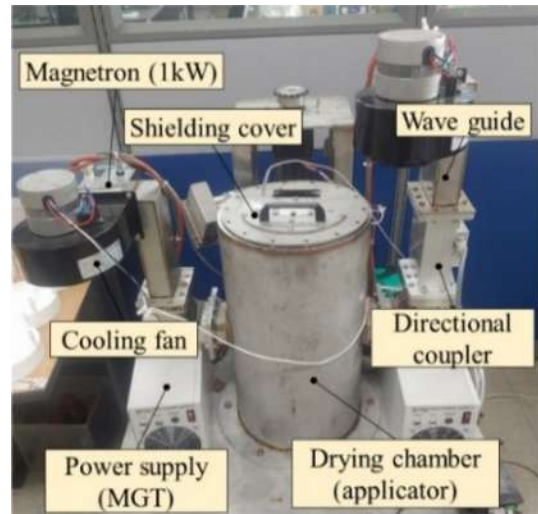


Fig. 1 Microwave heating and drying system

Table 1 Specification of system

Components	Specification
Magnetron	1 kW, 2.45 GHz (2M246, LG)
Directional coupler	3kW (BPM 112, National)
Applicator (SM45C) [mm]	∅280 × H510, t = 1.0
Wave guide	□86 × 43 mm (WR-340, Power supply Inc.)
Power supply	1.1 kW (MDT-1100S, Power Supply Inc.)

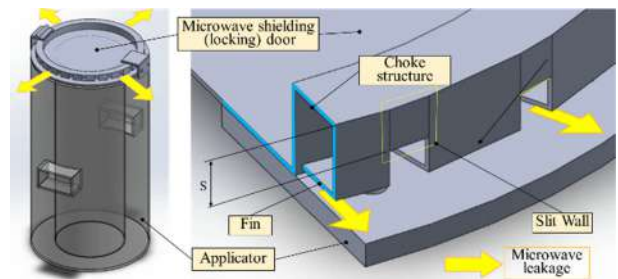


Fig. 2 Model for electromagnetic field analysis

Fig. 2에서와 같이 슬릿이 형성되고 슬릿의 높이 S 가 증가할수록 전기장의 전파를 억제하는 전기장의 임피던스를 증가시키는 효과가 있으며[11] 결과적으로 마이크로파 누설량을 감소시킬 수 있다[10]. 또한 슬릿의 높이 S 는 내측 초크 벽(Inner Choke Wall, L_1)보다는 낮게 설정해야 한다. 초크 구조를 갖는 차폐 도어 설계에 있어 식(1)과 같이 내측 초크 벽 길이(L_1)와 외측 초크 벽 길이(L_2)의 합이 마그네트론의 파장(λ)의 4분의 1을 유지하여 설계되어야 한다[10]. 이때 λ 는 12.24 cm이다.

$$L_1 + L_2 = \lambda/4 \tag{1}$$

도어록킹방식에 있어서 완전 밀봉을 실현하기는 어렵지만 G_1 을 줄일수록 차폐에 효과가 있다. L_3 는 차폐 도어 베이스와

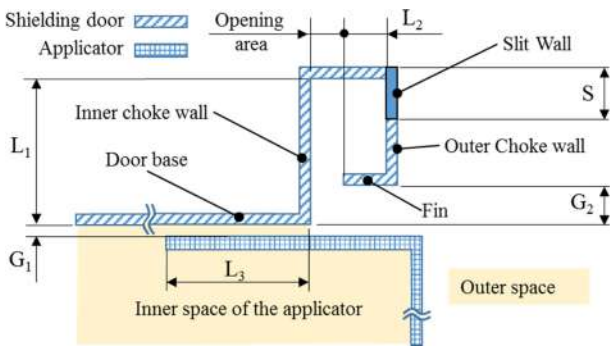


Fig. 3 Cross section of door with choke structure

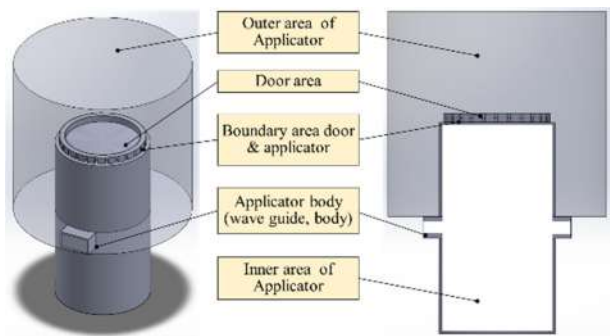


Fig. 4 Boundary area for electromagnetic field analysis

건조통 본체가 중첩된 영역으로써 실링 고무를 설치하기 적당한 길이(폭)를 유지하면 된다.

가열건조기의 해석을 위한 3D 모델링은 SOLIDWORKS를 활용하고 여섯 개의 파트로 구성하여 ANSYS HFSS로 전자기장 해석을 진행하였다. 전자기장의 분포를 파악하기 위한 해석 영역은 Fig. 4와 같다. 건조통 본체 일부와 차폐 도어를 감싸고 있는 외부 영역, 개폐용 차폐 도어 영역, 도어와 본체의 경계 영역, 본체(Applicator)와 도파관의 외벽 즉 건조통 외벽 영역, 가열건조기의 본체 내부 영역으로 구성되어 있다.

2.2 전자기장 해석을 위한 경계조건

두 개의 마그네트론 출력은 1 kW 그리고 주파수는 2.45 GHz로 설정하여 해석을 진행하였다. 해석에 있어 비유전율(ϵ_r)이 1인 공기를 제외한 건조통 본체, 웨이브가이드 그리고 차폐용 도어는 도체인 구조용 강판(SM45C, $\epsilon_r = 10^{10}$)으로 경계면에서 전계는 완전히 반사하는 성질을 갖게 된다. 본 해석에서는 차폐 도어 외부로 누설되는 것을 확인하기 위해 Fig. 4와 같이 외부 공기층(Outer Area of Applicator), 본체 내부, 도어와 본체의 경계 영역에서 전기장의 세기(V/m)를 파악하는 것으로 마이크로파의 누설을 확인한다.

2.3 요인선정과 전자기장 해석결과

차폐 도어 모델링 단계에서 마이크로파 누설에 영향을 미치는 설계인자는 $G_1, G_2, L_1, L_2, L_3, S$ 로 파악되었다. 식(1)에서

Table 2 Set of factor

Factor	Minimum [mm]	Median [mm]	Maximum [mm]
G_1	0.6	1.3	2
G_2	0	1.5	3
L_2	7.6	9.8	12
S	0	5	10

L_2 를 설계인자로 선택하면 L_1 은 자동적으로 결정되므로 L_1 을 제외하고 L_3 는 10 mm로 확정하고 설계인자에서 제외하였다. 실험계획법에서 결정해야 할 4개의 설계인자로서 G_1, G_2, L_2, S 를 선정하였다. 가열건조기의 크기, 가스켓(Gasket)의 설치 용이성 및 초크 형상의 제작성을 고려하여 설계인자들의 최댓값 및 최솟값을 결정한 후 Table 2에 나타내었다. 슬릿의 높이 S 는 내측 초크 벽 길이 L_1 보다 작게 설정되어야 하므로 0-10 mm로 정의하였다.

마이크로파는 중첩부 L_3 를 통과하여 초크 형상 내부로 전파되는데 이때 핀(Fin)의 제작성을 고려하여 L_2 의 범위를 7.6-12.0 mm로 설정하였다. G_1 은 가스켓의 두께를 고려해 0.6-2 mm로 설정하고 G_2 는 최솟값인 0 mm에서 3 mm로 정의하였다.

4인자 2수준의 완전요인배치법으로 실시한 해석결과는 Table 3과 같으며 반응값(E-Field)은 차폐 도어로부터 5 cm 떨어진 거리에서의 전기장의 최댓값이다. Run5에서 누설된 전기장의 세기는 19.28 (V/m)로 피폭기준 137 (V/m)을 초과하지 않으나 Run14의 경우 598.23 (V/m)으로 피폭기준을 초과한다. Fig. 5는 Run5와 Run14에서의 전기장 분포를 나타낸 것으로 Run14는 Run5와 달리 건조통과 차폐 도어 외부로 전기장이 누설됨을 알 수 있다. Run17은 최솟값과 최댓값의 중앙점이다.

3. 실험계획법 및 마이크로파 차폐 도어 최적화

3.1 마이크로파 누설량에 대한 분산분석

각 설계인자가 누설량에 미치는 영향(주효과)과 2개 이상의 설계인자 조합에 의해 미치는 영향(교호효과)을 파악하고자 Table 3의 누설량에 대한 분산분석을 진행하여 Table 4에 결과를 나타내었다. Effect는 설계인자가 누설량에 미치는 실질적인 영향 정도이며, coefficient는 회귀식의 상수로 Effect의 절반이다. 그 값이 음수인 경우 설계 변수가 최솟값에서 최댓값으로 증가할수록 반응값인 누설량이 감소함을 의미한다. T-value가 클수록 또한 p-value가 작을수록 누설량에 미치는 영향이 크다고 판단한다. 다만 p-value가 .05를 초과하는 L_2 및 S 의 경우에도 설계인자로서 미치는 영향은 유의하다고 판단한다. Table 4로부터 누설량(Y)과 설계 변수들 간의 관계를 나타내는 회귀방정식을 다음의 식(2)와 같이 얻을 수 있다.

$$Y = 234.3 + 120.6G_1 + 130.4G_2 - 48.2L_2 - 21.8S \quad (2)$$

Table 3 Full factorial design

Run	G ₁	G ₂	L ₂	S	E-field [V/m]
1	0.6	0	7.6	0	25.75
2	0.6	3	7.6	0	462.7
3	0.6	0	12	0	33.90
4	0.6	3	12	0	76.90
5	0.6	0	7.6	10	19.28
6	0.6	3	7.6	10	241.7
7	0.6	0	12	10	30.43
8	0.6	3	12	10	19.69
9	2	0	7.6	0	210.6
10	2	3	7.6	0	491.7
11	2	0	12	0	178.2
12	2	3	12	0	569.4
13	2	0	7.6	10	210.1
14	2	3	7.6	10	598.2
15	2	0	12	10	123.1
16	2	3	12	10	457.9
17	1.3	1.5	9.8	5	25.76

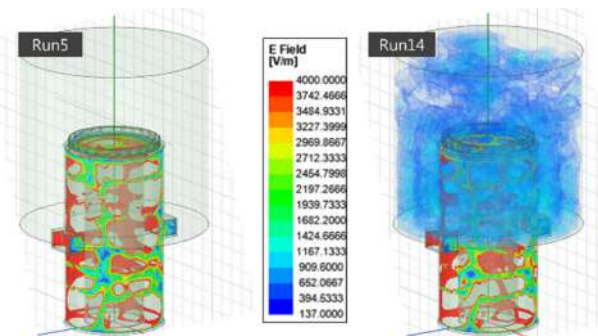


Fig. 5 Results of electromagnetic wave analysis of run 5 & 14

Table 4 Analysis of variance for E-field

Term	Effect	Coefficient	T-value	P-value
Constant		234.3	8.87	.000
G ₁	241.1	120.6	4.57	.001
G ₂	260.9	130.4	4.94	.000
L ₂	-96.3	-48.2	-1.82	.095
S	-43.6	-21.8	-0.83	.427

누설량에 대한 주효과도와 교호작용도는 Figs. 6과 7과 같다. x축은 각 인자의 수준이며, y축은 반응값인 누설량의 크기(E-field)이다. 주효과도에서 기울기를 통해 설계인자인 G₂, G₁, L₂, S 순으로 반응값에 큰 영향을 미친다고 판단할 수 있다. 중심점 (Center Point, Run17)이 주효과도의 직선상에서 크게 벗어난

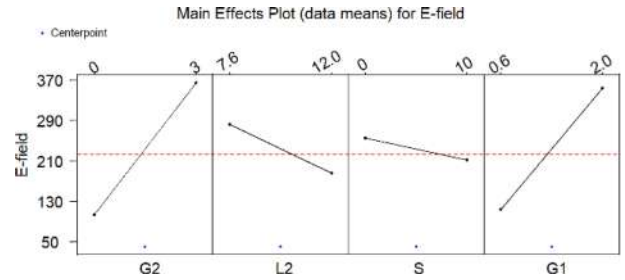


Fig. 6 Main effect plot for E-field

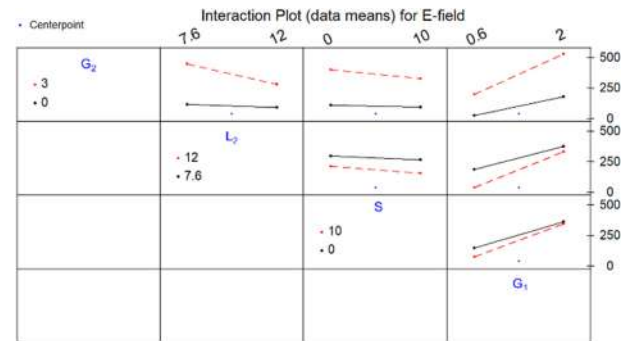


Fig. 7 Interaction plot for E-field

비선형성을 보이므로 식(2)의 회귀방정식을 보완해야 할 필요가 있다. 또한 교호작용도에서 설계인자의 변화에 따라 반응값이 기울기를 갖고 있어 상호작용도 존재하고 있어 보다 높은 차수의 추가 실험을 필요로 한다. 이에 고차의 실험으로서 반응표면분석법을 실시하였다.

3.2 반응표면분석법

반응표면분석법 중 보다 적은 실험으로 곡면을 추정할 수 있도록 중심합성계획법을 활용하였다. 중심합성계획법은 요인 실험을 기반으로 축점과 중심점을 추가한다. 설계인자 4개를 실험 인자로 설정하면 꼭짓점 블록 2⁴개, 축점 블록 2 × 4개, 중심점 7개로 총 31번의 실험을 수행한다.

Run25에서 Run31까지는 중심점으로 7개가 동일한 조건에서의 해석으로 동일한 반응값(누설량, E-field)을 보여준다. 최적 조건은 인자의 수준 사이에서 결정되어야 하므로 축점이 수준을 벗어나지 않도록 하는 면중심중심합성법으로 진행하여 해석 결과를 Table 5에 나타내었다. 반응표면분석법의 분산분석 결과는 Table 6과 같다. 인자 간에 종속되는 효과가 있을 수 있어 완전요인배치법과 다르게 한 번에 하나씩 인자를 제외하는 절차로 진행한다. 블록, 교호작용, 제곱항 순으로 차례대로 제외하면서 풀링하고 P-value 값이 높은 순으로 제거한다. 분산분석을 통해 도출한 반응값(E-field)의 회귀방정식은 식(3)과 같다.

$$Y = 63.7 + 113.4G_1 + 124.1G_2 - 46.5L_2 - 17.0S + 170.9L_2 * L_2 - 35.6G_2 * L_2 + 44.0G_1 * G_2 \quad (3)$$

식(3)에 대한 결정 계수(R²)는 89.5%로 모형을 잘 설명해

Table 5 Response surface methodology

Run	G ₁	G ₂	L ₂	S	E-field [V/m]
1	0.6	0	7.6	0	25.76
2	0.6	3	7.6	0	462.7
3	0.6	0	12	0	33.90
4	0.6	3	12	0	76.89
5	0.6	0	7.6	10	19.28
6	0.6	3	7.6	10	241.7
7	0.6	0	12	10	30.43
8	0.6	3	12	10	19.69
9	2	0	7.6	0	210.6
10	2	3	7.6	0	491.7
11	2	0	12	0	178.2
12	2	3	12	0	569.4
13	2	0	7.6	10	210.1
14	2	3	7.6	10	598.2
15	2	0	12	10	123.1
16	2	3	12	10	457.9
17	1.3	0	9.8	5	23.46
18	1.3	3	9.8	5	170.4
19	1.3	1.5	7.6	5	268.8
20	1.3	1.5	12	5	202.9
21	1.3	1.5	9.8	0	64.66
22	1.3	1.5	9.8	10	107.0
23	0.6	1.5	9.8	5	31.57
24	2	1.5	9.8	5	144.5
25	1.3	1.5	9.8	5	40.82
26	1.3	1.5	9.8	5	40.82
27	1.3	1.5	9.8	5	40.82
28	1.3	1.5	9.8	5	40.82
29	1.3	1.5	9.8	5	40.82
30	1.3	1.5	9.8	5	40.82
31	1.3	1.5	9.8	5	40.82

Table 6 Analysis of variance for E-field

Term	Coefficient	T	P
Constant	63.65	3.547	.002
G ₁	113.44	7.440	.000
G ₂	124.11	8.140	.000
L ₂	-46.48	-3.048	.006
S	-17.02	-1.116	.276
L ₂ * L ₂	170.87	7.257	.000
G ₂ * L ₂	-35.64	-2.204	.038
G ₂ * G ₁	43.98	2.720	.012

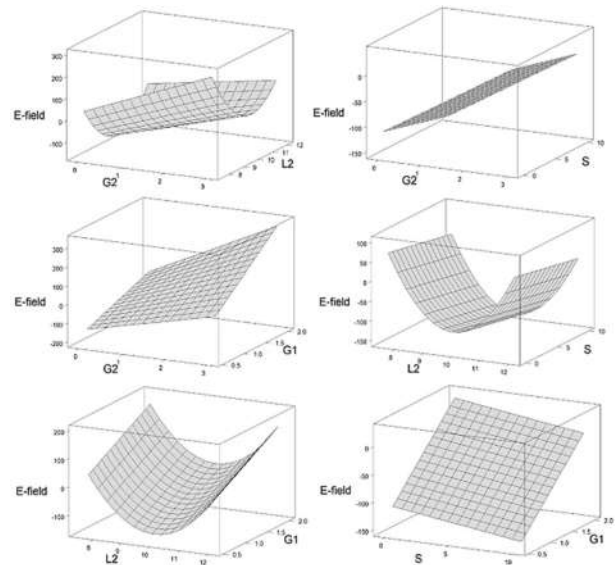


Fig. 8 Surface plot for all factor pairs

주고 있다. Table 6에서 보듯이 요인 S는 p-value가 0.276으로 반응값에 적은 영향을 미치지만 4개의 설계인자 중 하나의 인자로서 회귀방정식에 포함되어야 한다. Fig. 8은 모든 요인 쌍 (Factor Pairs)에 대한 표면도(Surface Plot)이며 G₁과 G₂는 값이 작을수록 즉 최소값에 가까울수록 E-field 값도 작아지는 것을 확인할 수 있다. 교호작용이 존재하는 인자 간의 그래프 양상이 비선형적인 곡면인 것을 확인할 수 있다.

3.3 반응 최적화(차폐 도어의 형상 최적화)

식(3)의 회귀방정식을 통해서 누설량(E-field)를 최소화하기 위해 인자들의 최적 조합을 찾는 반응 최적화를 실시하여 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 인체안전기준인 허용 전력 밀도[8]인 5 [mW/cm²]를 전기장 강도로 환산하면 137 [V/m]로 나타낼 수 있다. 차폐 도어의 최적 형상은 G₁ = 0.6 mm, G₂ = 0 mm, L₂ = 9.9 mm, S = 10 mm이며, 최적 형상을 기준으로 쇼크 구조를 갖는 마이크로파 차폐 도어를 제작하였다.

4. 최적 형상 해석결과 및 실험 결과 비교

4.1 최적화 형상 해석결과

Fig. 10은 3.3절에서 얻어진 최적 형상을 적용한 전자기장 해석 결과이다. 건조통 본체 내부에 피 건조물로서 물($\epsilon_r = 81.0$) 1 l를 Fig. 11과 같이 테프론 트레이($\epsilon_r = 2.1$)에 채우고 양쪽의 마그네트론은 각각 500 W로 발진시켜 해석을 진행하였다. Fig. 10(a)는 인체안전기준 이상의 전기장을 표시한 것으로 마이크로파 차폐 도어 외부로는 기준 이상의 전기장 누설은 발생하지 않았다. 차폐 도어에서 5 cm 떨어진 곳에서의 전기장 강도를 확인한 결과를 Fig. 10(b)에 나타내었다. 횡축은 측정위치이며 종축은 각 측정위치에서의 누설량(E-field)이다. Fig. 11과 같이 원형인

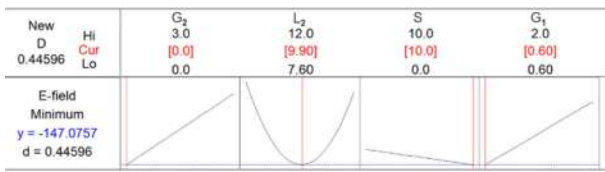
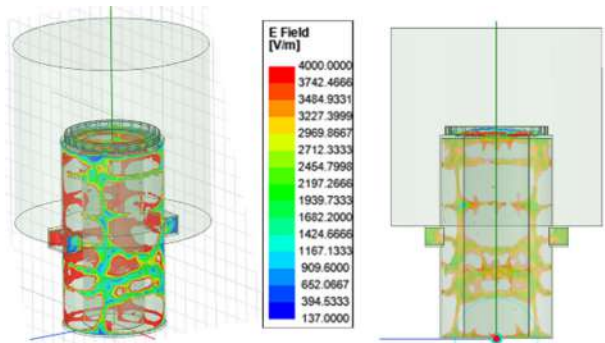
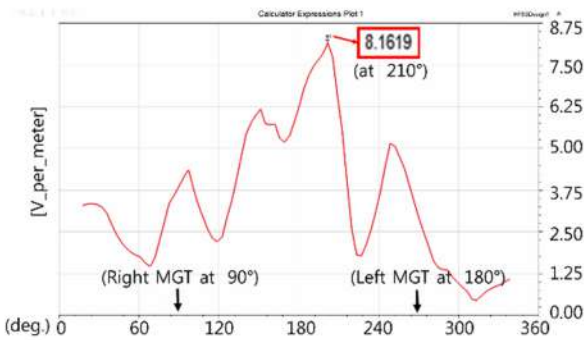


Fig. 9 Shape optimization of microwave shielding door



(a) Simulation results of optimized condition



(b) Maximum E-field strength at a distance of 5 cm from the door

Fig. 10 Electromagnetic field analysis of optimization conditions

차폐 도어의 원주방향으로 0°에서 360°까지 해석결과를 나타낸 것이다. 그 결과 210°에서 8.1619 [V/m]로 최대값을 갖는다. 전력밀도값으로 환산하면 0.0177 [mW/cm²]로 차폐 도어는 마이크로파를 이상적으로 차폐하고 있음을 알 수 있다.

4.2 실험 및 해석결과와의 비교

3.3절에서 얻어진 최적 형상을 기준으로 제작된 마이크로파 차폐 도어를 Fig. 11과 같이 마이크로파 건조기에 설치하였다. 4.1절에 적용한 해석조건과 동일하게 물 1 l를 테프론 트레이에 채우고 양쪽의 마그네트론은 각각 500 W로 발진시켜 이때 차폐도어 주위로 누설되는 전자기파를 측정하였다. 개폐도어로부터 5 cm 떨어진 거리에서 원주 방향을 따라 마이크로파 누설량을 측정하였다. 피건조물이 없는 상태에서 마그네트론을 동작시키는 경우 많은 양의 마이크로파가 반사되어 마그네트론을 손상시킬 수 있으므로 물 1 l를 테프론 트레이에 담은 채로 마그네트론을 동작시켰다. 8곳에서 전자기장시험기(Lutron 사, EMF-810)로 측정할 결과 225°에서 0.015 mW/cm²로 최대 누설량을

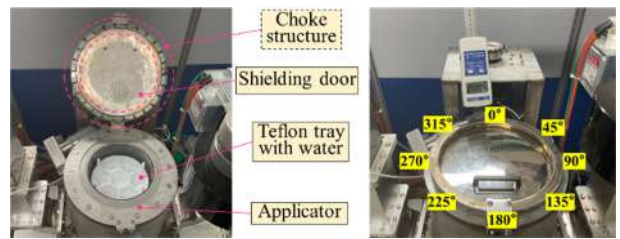


Fig. 11 Microwave leak experiment with an optimized shielding door

나타내었으며 해석값보다 15% 정도 적게 측정되었다. 이는 마이크로파의 에너지가 피건조물인 물에 흡수된 정도에서 약간의 차이가 발생한 것으로 사료된다. 해석결과와 동일하게 실험결과에서도 차폐 도어의 마이크로파 차폐 특성은 충분함을 알 수 있다.

5. 결론

마이크로파를 이용한 가열건조시스템에서 피건조물의 효율적인 투입과 배출을 위해 나사 체결방식의 투입구를 원터치 록킹구조의 도어로 변경하였다. 이때 도어 경계에서 발생하는 마이크로파 누설을 차단하기 위해 초크구조를 개폐도어에 적용하고 도어 형상의 최적화를 수행하였다. 마이크로파 누설량은 ANSYS HFSS 활용한 전자기장 해석결과를 적용하였고 완전요인배치법과 반응표면분석법 적용을 통해 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- (1) 마이크로파 누설을 최소화하기 위해 Minitab을 활용하여 초크구조의 도어 형상 최적화를 진행하였다. 그 결과, 최적의 형상 및 건조통 본체와의 접촉조건으로 G₁ = 0.6 mm, G₂ = 0 mm, L₂ = 9.9 mm, S = 10 mm를 얻을 수 있었다. 특히, 건조통 본체와 차폐 도어 사이 거리(틈새)인 G₁ 및 G₂가 적을수록 누설량이 적어지는 것을 파악하였다.
- (2) 최적화된 형상 조건을 적용하여 해석한 결과, 차폐 도어에서 5 cm 떨어진 곳에서의 최대 전력 밀도는 0.0177 [mW/cm²]로 보여줌으로써 마이크로파는 이상적으로 차폐되었음을 알 수 있었다.
- (3) 최적화한 인자를 적용하여 차폐 도어를 제작한 후 마이크로파 누설량을 측정할 결과는 0.015 [mW/cm²]로 해석값 0.0177 [mW/cm²]보다 15% 정도 작게 측정되었으며 인체에는 충분한 안정성을 확보하였다.

실험계획법을 통한 마이크로파 차폐용 개폐도어 최적화 설계의 유효성을 확인할 수 있었다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 논문은 경기도지역협력연구센터(GRRC) 사업[GRRC TU

Korea 2020-B01, 다중소재가공기술 혁신연구센터]의 지원과 2022년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구이며(P0008458, 2022년 산업혁신인재성장지원사업), 건조장치 제작에 있어 아인텍(주)의 도움을 받았으며, 이에 감사드립니다.



Ka Hee Lee

B.Sc. candidate in the Department of Mechanical Design Engineering, Tech University of Korea. Her research interest is mechanical elements and system design.
E-mail: kahee0825@tukorea.ac.kr

REFERENCES

1. Jeon, B., Lee, G., (2017), Effect of microwave sintering on flexural strength of dental zirconia, *Korean Journal of Dent Mater*, 44(2), 163-169.
2. 3M Innovative Properties Company, (2018), A microwave furnace and a method of sintering, KR1020187018286.
3. Ahn S. H., Jeong C. H., Kim S. Y., Kwon N. R., Lee W. S., (2020), Improving heating uniformity of high power microwave dryer with multiple slotted-waveguide, *Proceedings of the Korean Institute of Electrical Engineers Summer Conference*, 1684-1685.
4. Ke, C., Shi, C., Zhang, Y., Guang, M., Li, B., (2022), Energy conversion performances during biomass air gasification process under microwave irradiation, *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(74), 31833-31842.
5. Motasemi, F., Gerber, A., (2018), Multicomponent conjugate heat and mass transfer in biomass materials during microwave pyrolysis for biofuel production, *Fuel*, 211, 649-660.
6. Hosseini, M., Kaasinen, A., Link, G., Shoorehdeli, M. A., Lähivaara, T., Vauhkonen, M., (2022), Tomography-assisted control for the microwave drying process of polymer foams, *Journal of Process Control*, 114, 16-28.
7. Jung, U.-S., Lee, W.-K., Lim, K.-T., (2011), Vulcanization efficiency of non-polar rubber compounds by microwave, *Polymer (Korea)*, 35(3), 228-231.
8. FDA, Radiation-Emitting Products. <https://www.fda.gov/radiation-emitting-products/>
9. Han, G.-Y., Song, D.-H., Ahn, D.-G., (2010), Electromagnetic interference shielding effect of fiber reinforced composites with stainless fiber conductive filler, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 27(7), 71-78.
10. Jan A. C. G., (1987), Sealing arrangement for microwave ovens, US4645892.
11. Kim, B.-J., Jun, W.-K., Hong, W.-P., Kim, S.-J., Lim, B.-K., Kang, H.-D., Cho, J.-W., Shin, Y.-S., (1997), Microwave oven door having a microwave shielding structure, EP0763964A2.



Kwang Kim

Professor in the Department of Mechanical Design Engineering, Tech University of Korea. His research interest is nano/micro system design, digital manufacturing and creation of mechanical elements.
E-mail: kimkwang@tukorea.ac.kr

심층 신경망을 이용한 패드 표면 거칠기 기반 CMP 재료 제거율 예측

Prediction of CMP Material Removal Rate based on Pad Surface Roughness Using Deep Neural Network

정종민¹, 정선호¹, 신영일¹, 박영욱¹, 정해도^{1,#}
Jong Min Jeong¹, Seon Ho Jeong¹, Yeong Il Shin¹, Young Wook Park¹, and Hae Do Jeong^{1,#}

¹ 부산대학교 대학원 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Graduate School, Pusan National University)
Corresponding Author / E-mail: hdjeong@pusan.ac.kr, TEL: +82-51-510-3210
ORCID: 0000-0003-2959-8379

KEYWORDS: Chemical mechanical polishing (화학 기계적 연마), Surface roughness (표면 거칠기), Material removal rate (재료 제거율), Machine learning (기계 학습), Deep neural network (심층 신경망)

As the digitization of the manufacturing process is accelerating, various data-driven approaches using machine learning are being developed in chemical mechanical polishing (CMP). For a more accurate prediction in contact-based CMP, it is necessary to consider the real-time changing pad surface roughness during polishing. Changes in pad surface roughness result in non-uniformity of the real contact pressure and friction applied to the wafer, which are the main causes of material removal rate variation. In this paper, we predicted the material removal rate based on pressure and surface roughness using a deep neural network (DNN). Reduced peak height (Rpk) and real contact area (RCA) were chosen as the key parameters indicative of the surface roughness of the pad, and 220 data were collected along with the process pressure. The collected data were normalized and separated in a 3 : 1 : 1 ratio to improve the predictive performance of the DNN model. The hyperparameters of the DNN model were optimized through random search techniques and 5 cross-validations. The optimized DNN model predicted the material removal rate with high accuracy in ex-situ CMP. This study is expected to be utilized in data-driven machine learning decision making for cyber-physical CMP systems in the future.

Manuscript received: October 4, 2022 / Revised: November 1, 2022 / Accepted: November 1, 2022
This paper was presented at KSPE Autumn Conference 2022

1. 서론

화학 기계적 연마(Chemical Mechanical Polishing, CMP)는 디바이스 제조 산업에서 화학적 반응과 기계적 재료 제거를 결합한 하이브리드 연마를 통해 목적에 따른 표면의 단차를 제거하는 광역 평탄화 공정이다[1]. CMP 공정에서 단차의 재료 제거율 정도에 따라 디바이스의 특성과 성능이 달라지기 때문에 연마 목표량을 정확하게 달성하는 것이 중요하다[2]. 이러한 이유로 차세대 디바이스 패턴의 초미세화와 고집적화에 따라 재료 제거율의 제어 및 안정화 기술의 요구가 고도화되고 있다[3].

CMP는 Fig. 1과 같이 연마 대상에 따라 다양한 종류의 슬러리와 패드, 컨디셔너가 사용되며, 연마 목표에 따른 압력, 상대

회전 속도 등 가해지는 공정 변수 또한 적절하게 적용해야 하는 매우 복잡한 공정이다[4]. CMP에서 재료 제거율을 예측하기 위해 사용된 기존의 물리적 기반 접근 방식은 예측 과정 단순화에 의해 정확한 예측에 한계가 있다.

최근 제조 공정의 디지털화가 가속화됨에 따라 물리적 기반 접근 방식의 한계를 극복하기 위해 CMP 공정에도 인공지능과 기계학습을 적용한 데이터 기반의 접근 시도가 이루어지고 있다. Ahn은 기계학습 기반의 모델을 사용하여 재료 제거율 예측 모델의 성능을 비교 분석하였으며, XGBoost 모델을 통해 높은 정확도로 데이터 기반의 예측이 가능함을 검증하였다[5]. Li는 RF, GBT, ERT의 세 가지 트리 기반의 기계학습 알고리즘을 결합한 앙상블 학습 기법을 사용하여 재료 제거율을 예측하였다[6].

Wang은 DBN (Deep Belief Network)을 기반으로 재료 제거율과 공정 매개변수의 상관관계를 도출하였으며, 입자 군집 최적화 방식을 적용하여 재료 제거율을 예측하였다[7]. Lee는 CMP 공정 결과의 시간 의존성을 반영하는 LSTM-RNN 모델과 CNN 모델을 결합하여 웨이퍼의 두께를 예측하는 가상 계측 네트워크 모델을 제안하였으며, 신경망을 이용한 모델에서 기존 기계학습 모델에 비해 더 높은 정확도의 예측 성능을 검증하였다[8]. 언급된 선행 연구들은 다양한 기계학습 기법을 사용하여 데이터 기반의 재료 제거율 예측 모델을 제시하였지만, 접촉을 기반으로 하는 CMP 공정에서 결과에 가장 큰 영향을 미치는 패드 표면 거칠기를 고려하지 않았기 때문에 다양한 공정 상황에 따른 결과를 예측하는 데 한계가 있다. 또한, 공정 진행에 따른 패드 표면의 열화는 웨이퍼와 연마 입자의 접촉 상태와 그에 따른 재료 제거율 편차의 주원인이 된다. 따라서 재료 제거율을 예측하기 위해 각 공정 조건과 시간에 따른 패드의 표면 거칠기 변화를 충분히 고려한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 트라이볼로지(Tribology) 관점에서 CMP 공정의 패드 표면 상태 정보 인식을 통한 인공지능 기반의 재료 제거율 예측을 목표로 한다. 이를 위해 패드 표면 거칠기를 기반으로 기계학습에 사용될 독립변수로 CMP 공정 결과와 높은 상관관계를 가지는 핵심 파라미터를 선정하였다. 이후, 실험을 통해 공정 시간에 따른 데이터 셋을 확보하여 심층 신경망을 적용하였다. 구현한 심층 신경망은 하이퍼 파라미터 최적화와 교차 검증을 통해 예측 성능을 평가하였다.

2. 재료 제거 특성

2.1 재료 제거 메커니즘

CMP 공정은 슬러리에 의해 화학 반응층을 형성한 웨이퍼 표면이 연마 입자와 기계적 운동에 의한 마찰을 통해 연마가 진행된다. CMP 재료 제거의 지배 방정식인 프레스톤 방정식(Preston's Equation)에서 프레스톤 상수는 화학 및 기계적 요소와 여러 공정 조건에 의해 결정된다. 특히, 웨이퍼와 접촉하여 기계적 마모를 유발하는 패드 돌기는 연마 입자에 수직력과 접선력을 부여하기 때문에 재료 제거율을 결정하는 핵심 매개 변수로 사용된다. 하지만, 연마 패드는 공정 진행과 동시에 폴리우레탄 고유의 성질인 점탄성 거동과 기계적 마멸 현상이 발생하기 때문에 타 변수와 달리 값을 특정화하는 것이 어렵다. 따라서 돌기의 크기와 분포를 포함한 패드의 지형학적 특성은 CMP에서 균일한 재료 제거율을 얻기 위해 가장 우선적으로 고려해야 하는 요인이다[9].

2.2 공정 진행에 따른 패드 표면 열화

최근, 웨이퍼에 형성되는 미세 스크래치 방지를 위해 Ex-Situ Conditioning 방식의 CMP 공정을 주로 채택하고 있다[10]. 하지만, Fig. 2에서 보는 것과 같이 Ex-Situ 조건에서 패드 표면은 공정 압력과 시간에 따라 접촉 하중에 의한 기계적 변형과 연마 입자

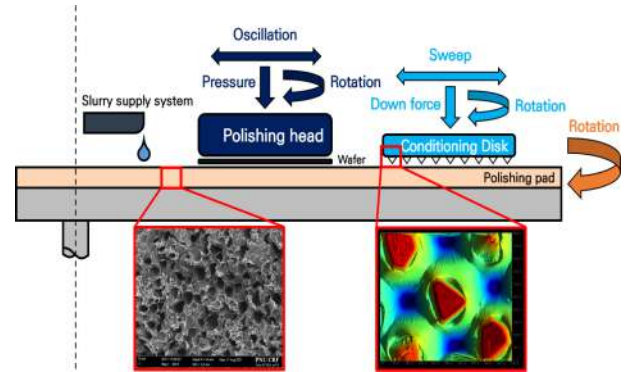


Fig. 1 Schematic of CMP experiment set up

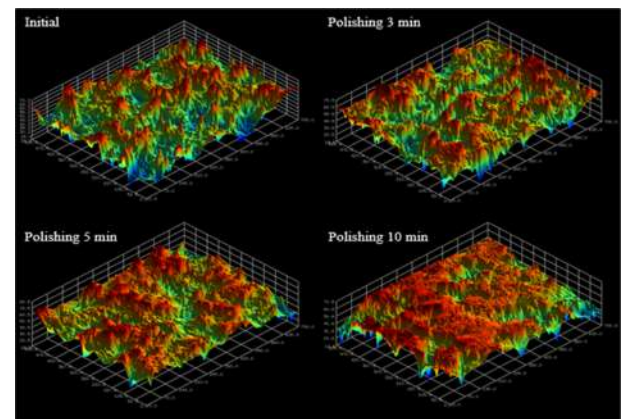


Fig. 2 Three-dimensional confocal image of pad surface deformation over time

의 축적으로 인해 열화가 발생한다. 패드 표면의 열화는 웨이퍼와의 실 접촉 면적을 증가시키고 패드의 표면 거칠기를 감소시킨다. 이는 실제 연마에 작용하는 실 접촉 압력과 마찰의 감소로 이어져 결과적으로 재료 제거율의 감소를 야기한다[11]. 이러한 지형학적 변화는 불균일한 재료 제거율과 그에 따른 공정의 안정성을 저하시키는 주원인이 된다[12]. 따라서 각 패드 표면 상황에 따른 정확한 재료 제거율 예측을 위해 패드의 지형학적 특성을 대변할 핵심 파라미터를 선정할 필요가 있다.

2.3 패드의 지형학적 특성을 반영하는 핵심 파라미터

앞 2.1과 2.2를 고려하여 패드의 지형학적 특성을 반영하는 핵심 파라미터를 3가지 조건을 통해 선정하였다.

(1) CMP의 트라이보 시스템(Tribo-System)은 웨이퍼-패드-연마 입자의 3 Body System으로 구성된다.

(2) 핵심 파라미터는 CMP 재료 제거율과 높은 상관성을 가져야 한다.

(3) 핵심 파라미터는 연마와 동시에 발생하는 패드 표면의 열화를 충분히 반영해야 한다.

Rpk (Reduced Peak Height)는 표면의 마멸 특성을 반영하는 Bearing Area Curve (BAC)를 통해 얻어지는 파라미터이다[13].

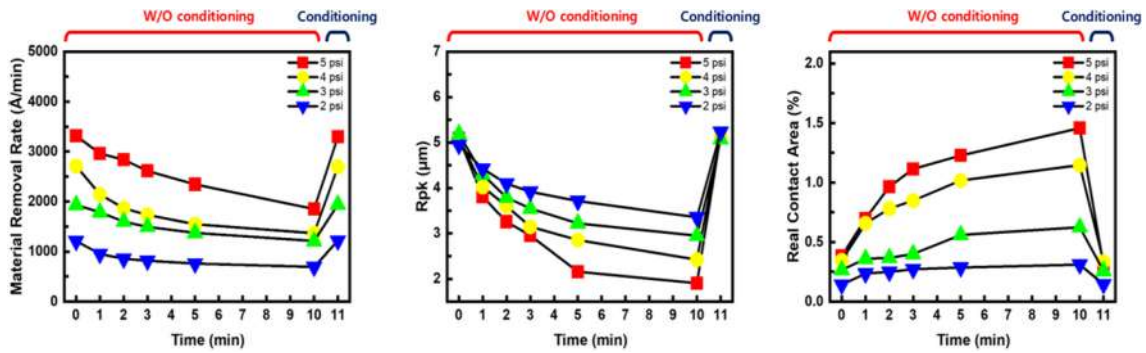


Fig. 3 Comparison of CMP results in parameters over time by pressure

이는 연마 공정 시 초기에 접촉하여 응력이 집중되며 가장 빠르게 마모가 발생하는 영역이다. CMP 공정은 패드 표면의 산 정상에 위치한 돌기들이 마멸되며 진행되므로 돌기의 높이인 Ry 값을 Rpk 값과 같다고 설명할 수 있다[14]. 즉, Rpk 값에 해당하는 영역에서 실제 3 Body System이 구현되기 때문에 실질적인 재료 제거가 발생한다.

연마 입자의 실질적 참여는 패드와 웨이퍼의 접촉 계면에서 이루어진다. 이때 패드의 점탄성 특성에 의해 가해지는 접촉 압력에 따라 실제 접촉하는 면적이 달라지게 되며, 이를 RCA (Real Contact Area)로 정의한다[15]. 이처럼 실 접촉 면적이 변화함에 따라 재료 제거에 참여하는 연마 입자의 비중이 달라지게 되며, 실 접촉 계면의 단위 면적당 접촉 압력 또한 달라지기 때문에 재료 제거율 예측에 있어 실 접촉 면적을 충분히 고려해야 한다[16].

위 두 가지 핵심 파라미터는 패드의 지형학적 특성과 위 3가지 조건을 잘 반영하지만, 각각의 특성만으로 패드의 표면 상태를 완전하게 설명할 수 없다. 탈이온수와 슬러리를 이용한 비교 기초 실험을 통해 같은 실 접촉 면적이라도 표면 열화 요인의 차이로 인한 재료 제거율의 차이를 확인하였다. 따라서 패드의 지형학적 특성을 보다 정확하게 반영하기 위해 공정 압력 및 시간에 따른 Rpk와 RCA를 함께 핵심 파라미터로 반영하였다. 다음 3장의 실험을 통해 Rpk, RCA와 재료 제거율의 높은 상관성을 Fig. 3과 같이 검증하였으며, 공정이 진행됨에 따라 마멸에 의한 Rpk의 감소와 연마 입자 축적에 따른 RCA의 증가를 통해 패드 표면의 열화를 충분히 반영함을 확인하였다.

3. 패드 표면 거칠기 및 공정 압력에 따른 실험

3.1 표면 거칠기 측정

표면 거칠기 데이터를 수집하기 위해 연마 헤드의 Oscillation 기준 위치인 패드 반경 126 mm 거리에서 Fig. 4와 같이 측정 샘플을 직경 22 mm의 크기로 펀칭(Punching)하였다. 한 샘플 내에서 각 파라미터는 총 5구간으로 나누어 측정하였으며, 신경망 학습에 사용된 하나에 데이터 셋에는 5구간 측정값의 평균을 사용하였다.

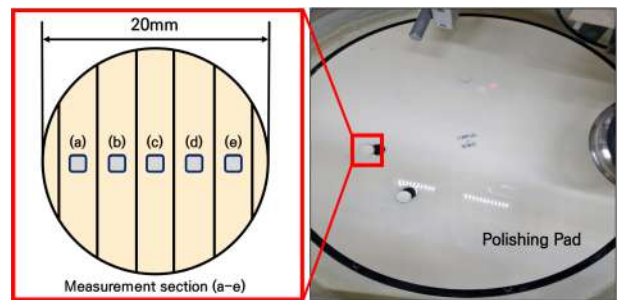


Fig. 4 Schematic of pad measurement process

3.1.1 Rpk 측정

공정 압력 및 시간에 따른 Rpk의 변화를 측정하기 위해 Mitutoyo 사의 접촉식 표면 조도 측정기인 SJ-310을 사용하였다. 측정된 Rpk의 파형 데이터는 가우시안 필터(Gaussian Filter)를 거쳐 장파장 성분을 제거하였다. 스타일러스의 팁 반경과 각도, 측정력은 각각 5 µm, 90°, 5 mN이며, 측정된 표면 거칠기 파형 데이터는 ISO 측정 규정에 따라 8.8 mm의 스캔 길이에서 단파장 성분을 차단하는 2.5 µm의 컷 오프 값으로 10구간을 나누어 측정하였다.

3.1.2 RCA 측정

패드 표면 상태에 따른 접촉 상태를 측정하기 위해 Fig. 5와 같이 광학을 이용한 RCA 측정 장치를 제작하였다. 패드 표면과 웨이퍼의 접촉 계면 확인을 위해 두께 1t, 크기 22×22 mm²의 다이스(Dicing)한 유리 쿠펜을 사용하였다. 접촉 계면의 광학 촬영은 Nikon 사의 JP/TU Plan Fluor 렌즈를 사용하여 가로 1.6 mm, 세로 1.2 mm의 이미지를 측정하였다. Fig. 6은 전체적인 이미지 프로세싱 과정을 설명한다. 측정한 이미지는 Adobe 사의 Photoshop을 통해 노이즈와 대비를 조정하여 접촉 면적을 도출하는 이미지 프로세싱을 거친 후, 이미지 분석 소프트웨어인 Motic 사의 Motic Image Plus를 통해 돌기 접촉 면적을 계산하였다.

3.2 연마 및 데이터 수집 방법

연마 실험은 G&P Technology 사의 POLI-500 장비와 KPX 사의 KONI 패드를 사용하였다. Tables 1과 2에 브레이크 인과

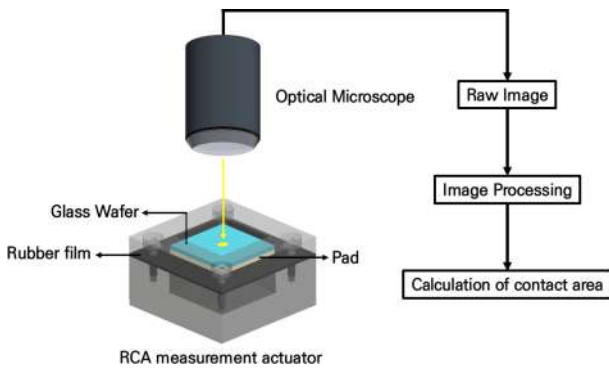


Fig. 5 Schematic of RCA measurement system

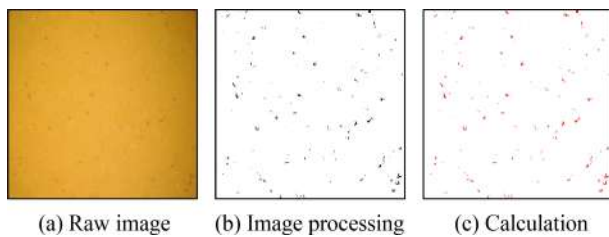


Fig. 6 RCA image processing and analysis

Table 1 Break-in conditions

Polishing machine		POLI-500 (G&P Technology)
Wafer		200 mm Oxide blanket
Pressure	Head [g/cm ²]	210
	Retainer ring [g/cm ²]	
Velocity	Head [RPM]	87
	Platen [RPM]	93
Slurry/DIW flow rate [ml/min]		150
Polishing time with DIW [min]		20
Polishing time with slurry [min]		10
Conditioning		Ex-situ
Conditioning	Sweep cyc [cyc/min]	9
	Rotation speed [RPM]	101
	Down force [kgf]	4
	Time [min]	5

실제 연마 조건을 상세히 기술하였다.

공정 중 발생하는 열에 의해 패드 표면의 온도가 증가하면, 패드 돌기의 경도가 감소하여 연마재의 압입 깊이에 영향을 미친다[17]. 이는 연마 입자의 실제 참여율을 변화시키므로, 균일한 재료 제거율 도출의 반복 재현성을 위해 충분한 브레이크 인 과정이 요구된다. 따라서 브레이크 인은 온도의 영향을 최소화하기 위해 DI water로 20분, Slurry로 10분씩 연마하였으며, 이후

Table 2 Experimental conditions

Polishing machine		POLI-500 (G&P Technology)
Wafer		200 mm Oxide blanket
Pressure	Head [g/cm ²]	140, 210, 280, 350
	Retainer ring [g/cm ²]	210, 280, 350, 420
Velocity	Head [RPM]	87
	Platen [RPM]	93
Slurry flow rate [ml/min]		150
Polishing time [min]		1
Conditioning		Ex-situ
Conditioning	Sweep cycle [cyc/min]	9
	Rotation speed [RPM]	101
	Down force [kgf]	4
	Time [sec]	10, 30, 60, 180, 300

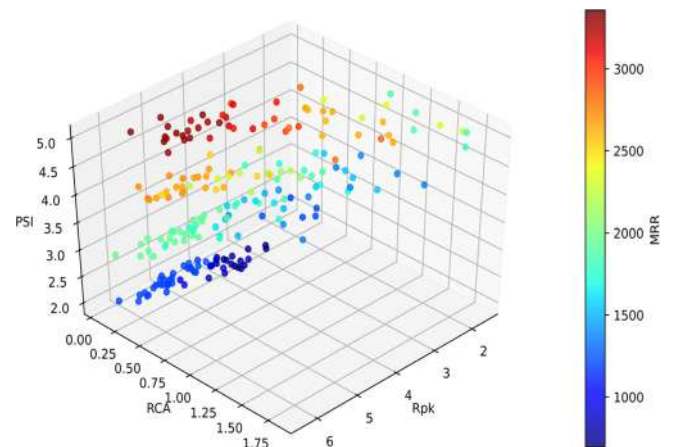


Fig. 7 Actual parametric data scatterplots for deep learning-based modeling

패드 표면 회복을 위해 5분의 충분한 컨디셔닝을 진행하였다.

공정 변수에 따른 패드 표면의 열화를 학습 데이터에 반영하기 위해 웨이퍼에 가해지는 압력을 140 g/cm²에서 350 g/cm²까지 70 g/cm² 간격으로 증가시켰고, 웨이퍼 이탈 방지를 위해 리테이너 링의 압력은 210 g/cm²에서 420 g/cm²까지 70 g/cm² 간격으로 가압하여 1분씩 연마하였다. 재료 제거율은 K-MAC 사의 박막 두께 측정기인 ST5030-SL 장비를 사용하여 웨이퍼의 연마 전후 막 두께를 비교하여 측정하였다. 1, 2, 3, 5, 10분의 연마 시간과 10분의 연마로 패드 표면을 충분히 열화 시킨 후 10, 30, 60, 180, 300초의 각각 다른 컨디셔닝 공정을 수행하여 패드 표면의 회복을 다르게 한 후 표면 거칠기와 재료 제거율을 측정하였다. 실험을 통해 Fig. 7과 같이 각각 다른 조건에서 패드 표면 거칠기와 공정

Table 3 Range of experiment result value for data construction

Data feature	Value	
	Minimum	Maximum
Pressure [g/cm ²]	140	350
Reduced peak height [μm]	1.643	6.308
Real contact area [%]	0.065	1.834
Material removal rate [Å/min]	694	3356

압력에 따른 재료 제거율 데이터 220세트를 확보하였으며 각 데이터의 범위는 Table 3에 나타내었다.

4. 심층 신경망 예측 모델 개발

4.1 신경망 이론

인공 신경망은 인간의 뇌 속 뉴런의 생물학적 작용을 모방하여 데이터 기반의 비선형 패턴을 학습하는 기계학습 기법이다. 신경망은 데이터의 입력을 담당하는 입력층(Input Layer)과 은닉층(Hidden Layer), 학습의 타겟 데이터인 출력층(Output Layer)로 구성된다. 은닉층의 뉴런들은 입력층으로부터 제공받은 데이터를 활성화 함수(Activation Function)에 따라 가중치와 편향을 계산하고, 다음 뉴런으로 신호를 전달하는 과정을 반복하여 비선형 문제를 지속적으로 학습한다. 심층 신경망(Deep Neural Network, DNN)은 다층의 은닉층으로 구성된 인공 신경망을 의미하며 오차 역전파의 알고리즘을 통해 학습을 수행한다. 본 연구에서는 Fig. 8과 같이 입력층에 공정 압력과 Rpk, RCA가 변수로 입력되고 출력층에 재료 제거율이 출력되도록 구성하였다. 본 연구의 심층 신경망 모델은 구글 코랩(Colaboratory)을 통해 클라우드 환경을 기반으로 제작하였으며, 오픈 소스 라이브러리인 Tensorflow와 Scikit-Learn을 사용해 구현하였다. 활성화 함수 및 최적화 함수, 가중치 초기화 방법은 각각 Leaky ReLU, Adam Optimizer, He Initialization을 사용하였다.

4.2 데이터 전처리

학습에 사용된 데이터의 특성들은 값의 범위와 단위가 모두 다르기 때문에 전처리 과정을 거치지 않고 학습을 진행하면 가중치가 큰 값을 기준으로 신경망의 결과가 편향된다. 따라서 모든 특성들이 동일한 수준의 중요도를 반영하도록 값의 범위를 정규화하는 데이터 스케일링(Data Scaling) 작업이 필요하다. 본 연구에서는 회귀에서 주로 사용되는 최소 최대 정규화(Min-Max Normalization)를 사용하였다. 최소 최대 정규화의 변환 식 (1)은 아래와 같은 식으로 표현 가능하다.

$$x'_{i,j} = \frac{x_{i,j} - x_j^{min}}{x_j^{max} - x_j^{min}} \quad (1)$$

식(1)에서 x 와 x' 은 각각 스케일링 전, 후의 데이터를, i 와

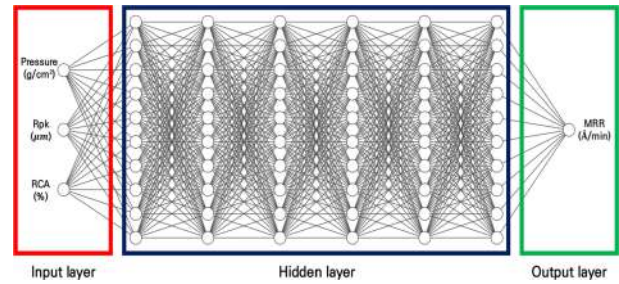


Fig. 8 Deep Neural Network structure diagram

Table 4 Number of partitioned data set

Data set	Value
Train	132
Validation	44
Test	44

j 는 데이터의 행, 열을 의미한다. 최소 최대 정규화는 Raw 데이터에 대해 선형 변환을 수행하여 최솟값 0, 최댓값 1의 범위로 크기를 조정하며, 이 경계 범위 내에서 더 작은 표준편차와 이상치의 영향을 최소화한다. 정규화된 데이터는 신경망을 통해 학습되는 과정에서 학습 데이터의 패턴에 지나치게 훈련되는 과적합(Over Fitting)이 발생할 수 있다. 과적합이 발생하면 학습 데이터에 대한 오차는 감소하지만, 패턴이 조금 다른 새로운 값을 예측할 경우 성능이 저하된다. 따라서 데이터 전처리 과정에서 과적합을 방지하고 편향을 제거하기 위해 데이터 셋을 훈련 데이터와 검증 데이터, 테스트 데이터로 분할하였다. 훈련 데이터는 신경망을 훈련하는 데 사용되며, 검증 데이터는 하이퍼 파라미터 최적화와 학습 시점의 조기 종료에 사용된다. 테스트 데이터는 신경망 성능의 최종 평가에 사용되며 데이터의 분할 비율은 Table 4와 같이 3 : 1 : 1로 설정하였다.

4.3 하이퍼 파라미터 최적화

손실 함수(Loss Function)는 식(2)와 같이 지도학습(Supervised Learning)에서 예측한 결과값과 실제 데이터의 오차를 비교하는 함수이다.

$$Loss = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - y'_i) \quad (2)$$

여기서 N , y_i , y'_i 은 각각 전체 샘플의 수, 실제 값, 예측값을 의미한다. 기계 학습은 이러한 손실 함수를 최소화하는 방향으로 조정 주기(Epoch)마다 가중치와 편향을 지속적으로 조정하며 데이터 기반의 훈련을 진행한다. 이때, 최적의 훈련 모델을 구현하기 위해 사용자가 직접 학습 파라미터를 세팅하게 되는데, 이러한 파라미터를 하이퍼 파라미터라고 한다. 하이퍼 파라미터는 설정 값에 따라 심층 신경망의 구조와 모델의 예측 결과에 큰 영향을 미친다. 따라서 정규화된 데이터를 심층 신경망을 통해 훈련시키는 과정에서 가장 높은 학습 효율을 내기 위해 하이퍼 파라미터를

Table 5 Range of hyperparameter tuning

Hyper parameter	Value		
	Minimum	Maximum	Step size
Hidden layer	0	10	1
Number of neurons	1	150	1
Batch size	2	64	2
Learning rate	3e-4	3e-1	1e-18
Epochs	1,000	10,000	500
Drop out	0.1	0.9	0.1

Table 6 Result of random search

Hyper parameter	Value
Hidden layer	6
Number of neurons	57
Batch size	8
Learning rate	0.000319
Epochs	5,500
Drop out	0.1

최적화하는 과정이 필요하다. 본 연구에서는 하이퍼 파라미터를 최적화하기 위해 가능한 모든 조합 공간에서 각 반복 횟수마다 랜덤으로 대입하는 랜덤 서치(Random Search) 기법을 사용하였다. 최적화 과정은 Table 5와 같이 각 하이퍼 파라미터의 최소, 최대 범위와 일정한 학습 간격을 구분하였다. 학습의 과적합과 과소적합(Under Fitting)을 방지하기 위해 5개의 검증 데이터 그룹으로 나누어 교차 검증을 진행하였다. 최적화 결과는 Table 6의 조건에서 Loss 값이 최소가 되었으며, 최종적으로 최적화된 파라미터를 적용하여 6개의 은닉층을 가진 DNN 모델을 구현하였다.

4.4 재료 제거율 예측 평가

DNN의 예측 성능 평가 지표로 R^2 (R-Squared), RMSE (Root Mean Square Error), MAE (Mean Absolute Error), MAPE (Mean Absolute Percentage Error)의 네 가지 회귀 척도를 식(3)부터 식(6)과 같이 계산하여 분석하였다.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - y'_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - y'_i)^2} \quad (4)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y_i - y'_i| \quad (5)$$

$$MAPE = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{y_i - y'_i}{y_i} \right| \quad (6)$$

여기서 y_i , y'_i , \bar{y} 는 각각 데이터 입력 값, y_i 의 평균, DNN 모델의 예측값을 의미한다. 결과적으로 R^2 은 높을수록, RMSE, MAE, MAPE는 낮을수록 회귀 모델의 우수한 예측 성능을 의미한다. Fig. 9는 실제 값과 예측 값에 대한 산점도(Scatter Plot)이며 본 모델의 설명력을 시각적으로 판단할 수 있다. 테스트 데이터 그룹의 재료 제거율 예측 결과를 Fig. 10에 나타내었으며, 이를 통해 패드 표면 거칠기 데이터를 기반으로 R^2 0.9637, RMSE 170.2414, MAE 115.2621, MAPE 7.2481 수준의 높은 예측 정확도를 도출할 수 있음을 확인하였다. Fig. 11은 학습 데이터와 검증 데이터의 학습에 따른 Loss 값의 감소를 나타낸다. 그래프에서 보는 것과 같이 본 연구에서 도출한 모델은 전체 가중치 조정 주기인 5,500 Epoch 내에서 Loss 값이 균일하게 감소하여 수렴하는 것을 통해 과적합이나 과소적합 등의 오류 없이 적절하게 학습된 것을 확인하였다. Table 7은 테스트 데이터로 사용된 총 44개 중 수렴된 MAPE 값을 기준으로 예측 오차율의 편차가 큰 14개 데이터를 나타낸다. 이 경우, 충분한 컨디셔닝이 진행된 패드의 표면 거칠기 평균값이 Rpk가 5.259 μ m, RCA가 140, 210, 280, 350 g/cm^2 의 압력 조건에서 각 0.142, 0.257, 0.346, 0.383%인 점을 통해 어느 정도 공정이 진행된 상태의 패드 표면에서 비교적 오차가 큰 이상치가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이는 실제 재료 제거에 있어, 패드 표면 거칠기와 함께 실시간으로 변화하는 패드 온도와 그루브의 깊이와 같은 독립변수를 신경망 학습에 고려하지 않은 것에 의한 차이로 판단된다. 패드 온도의 경우 동일한 초기 온도 상태에서도 공정 압력과 시간에 따라 발생하는 열에너지가 달라지게 된다[18]. 특히, 그루브의 경우 동일한 형상에서 깊이가 줄어들수록 패드의 유효 강성이 감소하지만, 슬러리의 와동(Vortex)에 의해 더 높은 전달응력을 전달하기 때문에 독립변수로서 충분히 고려하여 재료 제거율과의 비선형적 패턴을 학습해야 한다[19,20]. 따라서 이러한 시간 종속적인 변수를 추가로 고려한다면 더 높은 성능의 예측 정확도를 구현하는 모델로 활용될 수 있을 것이다.

5. 결론

본 연구는 딥러닝 기법인 심층 신경망을 사용하여 패드 표면 거칠기와 공정 압력에 따른 CMP 공정의 재료 제거율 예측 모델을 구축하였다. Ex-Situ CMP 공정에서 10분간의 연마와 각 다른 컨디셔닝 시간을 통해 이상적인 패드 표면 상태와 연마로 인해 열화가 진행된 상태, 그리고 충분히 회복되지 못한 상태를 데이터에 모두 고려하였다. 결과적으로 4가지 공정 압력과 패드 표면 상태에 대한 재료 제거율 데이터 220세트를 구축하였으며, 3 : 1 : 1 비율로 학습, 검증, 테스트 데이터로 분리하여 신경망을 학습시켰다. 데이터 전처리와 하이퍼 파라미터 최적화, 교차 검증을 통해 6개의 은닉층을 가지는 심층 신경망 모델을 도출하였으며, 회귀 지표인 R^2 , RMSE, MAE,

Table 7 Test data with a prediction error rate above MAPE

No.	Pressure [g/cm ²]	RCA [%]	Rpk [μm]	Real MRR [Å/min]	Predicted MRR [Å/min]	Prediction error rate [%]
1	210	0.4766235	4.543	1,624	1,785.6068	9.951158
2	280	1.1841390	3.180	1,731	1,602.0144	7.451508
3	140	0.1846151	5.175	1,226	1,038.1718	15.320412
4	210	0.4943034	4.586	1,793	1,657.3381	7.566194
5	210	0.4660441	2.709	1,191	1,375.7162	15.509336
6	280	0.8840373	3.013	1,866	1,666.5496	10.688662
7	280	0.6425659	3.729	2,107	2,308.8945	9.582085
8	140	0.1851733	3.928	864	936.416	8.381483
9	280	1.1594971	3.056	1,340	1,571.9052	17.306355
10	140	0.3186116	4.454	843	951.67255	12.891168
11	210	0.3302002	3.946	1,396	1,759.6122	26.046718
12	210	0.4329015	3.048	1,624	1,473.16	9.288175
13	350	1.5340251	2.086	1,821	2,112.963	16.033108
14	350	1.4431559	2.282	1,877	2,339.1433	24.621380

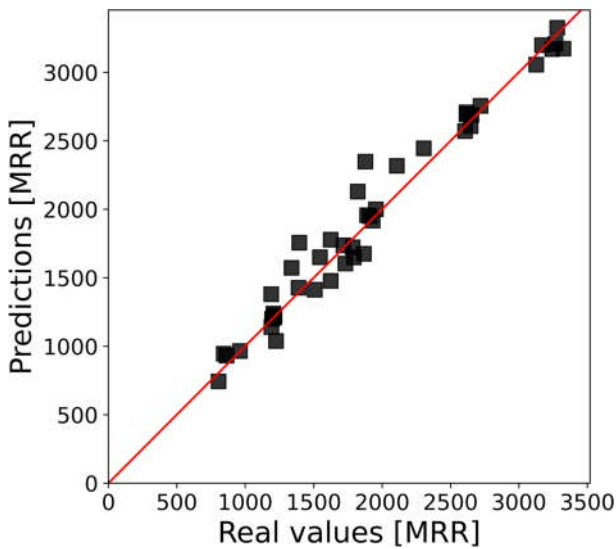


Fig. 9 Result of R^2 according to optimized DNN training

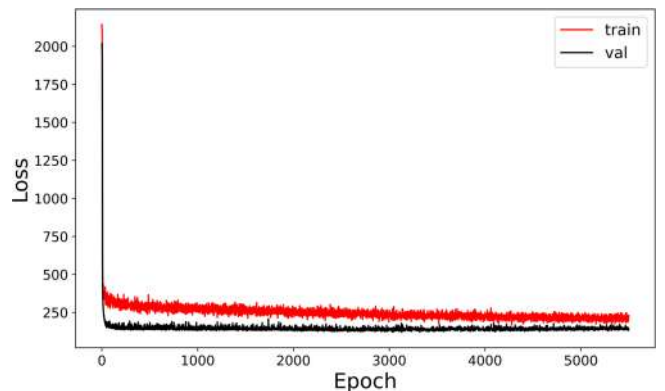


Fig. 11 Evaluation loss function according to epoch of optimized DNN

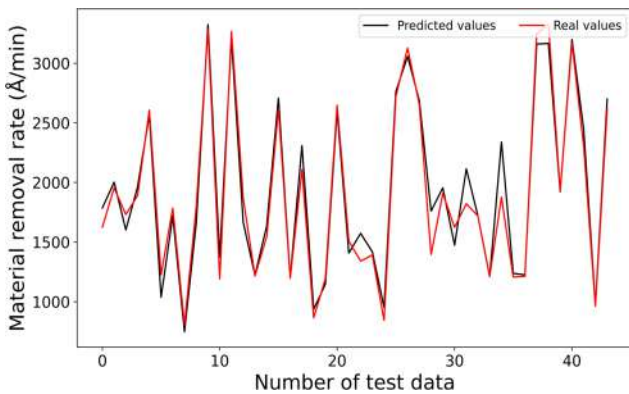


Fig. 10 Validation of DNN with test data set

MAPE를 통해 높은 성능의 정확도와 신뢰성을 정량적으로 확인하였다.

그러나, 본 논문의 예측 결과에서 충분한 컨디셔닝이 수행된 이상적인 패드 표면 상태에 비해 어느 정도 열화가 진행된 상태의 재료 제거율의 예측 정확도가 미비하다. 이는 연속적인 CMP 공정에서 더 높은 정확도를 달성하기 위해 공정과 함께 실시간으로 변화하는 데이터 특성들을 추가적으로 고려해야 한다는 것을 의미한다. 따라서 본 연구에 사용된 특성들과 함께 패드 온도 및 그루브의 변화 등 시간에 따른 공정 파라미터들을 추가적으로 고려한다면 보다 높은 정확도의 예측이 가능할 것이다. 추가적인 연구 진행을 통해 이러한 한계를 극복한다면 보다 정확한 예측과 정밀한 공정 제어가 가능할 것으로 기대된다. 이러한 개선된 연구 결과를 통해 향후 사이버 물리 시스템을 기반으로 CMP 공정의 디지털화와 함께 데이터 기반의 자동 공정 제어가 구현될 것이다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 성과는 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2021R1A2C1095017).

REFERENCES

- Lee, H., Jeong, H., Dornfeld, D., (2013), Semi-empirical material removal rate distribution model for SiO₂ chemical mechanical polishing (CMP) processes, *Precision Engineering*, 37(2), 483-490.
- Jeon, B. J., Ha, J. M., Lee, J. M., Park, C. H., Kim, S. J., and Yoon, B. D., (2016), Chemical mechanical planarization removal rate estimation with ensemble model, *Proceedings of the Korean Society of Mechanical Engineers 2016 Autumn Conference*, 1398-402.
- Lee, H., Kim, H., Jeong, H., (2021), Approaches to sustainability in chemical mechanical polishing (CMP): A review, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 9, 349-367.
- Yu, H.-M., Lin, C.-C., Hsu, M.-H., Chen, Y.-T., Chen, K.-W., Luoh, T., Yang, L.-W., Yang, T., Chen, K.-C., (2021), CMP process optimization engineering by machine learning, *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 34(3), 280-285.
- Ahn, J.-E., Jung, J.-Y., (2019), Predicting and interpreting quality of CMP process for semiconductor wafers using machine learning, *The Journal of Bigdata*, 4(2), 61-71.
- Li, Z., Wu, D., Yu, T., (2019), Prediction of material removal rate for chemical mechanical planarization using decision tree-based ensemble learning, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 141(3), 031003.
- Wang, P., Gao, R. X., Yan, R., (2017), A deep learning-based approach to material removal rate prediction in polishing, *Cirp Annals*, 66(1), 429-432.
- Lee, K. B., Kim, C. O., (2020), Recurrent feature-incorporated convolutional neural network for virtual metrology of the chemical mechanical planarization process, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 31(1), 73-86.
- Zhang, L., Biddut, A., Ali, Y., (2010), Dependence of pad performance on its texture in polishing mono-crystalline silicon wafers, *International Journal of Mechanical Sciences*, 52(5), 657-662.
- Prasad, Y. N., Kwon, T.-Y., Kim, I.-K., Kim, I.-G., Park, J.-G., (2011), Generation of pad debris during oxide CMP process and its role in scratch formation, *Journal of the Electrochemical Society*, 158(4), H394.
- Jeong, H., Lee, H., Choi, S., Lee, Y., Jeong, H., (2012), Prediction of real contact area from microtopography on CMP pad, *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, 6(1), 113-120.
- Kim, S., Saka, N., Chun, J.-H., (2014), The effect of pad-asperity curvature on material removal rate in chemical-mechanical polishing, *Procedia Cirp*, 14, 42-47.
- Park, K., Jeong, H., (2008), Investigation of pad surface topography distribution for material removal uniformity in CMP process, *Journal of the Electrochemical Society*, 155(8), H595.
- Park, B., Lee, H., Park, K., Kim, H., Jeong, H., (2008), Pad roughness variation and its effect on material removal profile in ceria-based CMP slurry, *Journal of Materials Processing Technology*, 203(1-3), 287-292.
- Lee, C., Lee, H., Jeong, M., Jeong, H., (2011), A study on the correlation between pad property and material removal rate in CMP, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 12(5), 917-920.
- Park, K., Kim, H., Chang, O., Jeong, H., (2007), Effects of pad properties on material removal in chemical mechanical polishing, *Journal of Materials Processing Technology*, 187, 73-76.
- Kim, H., Kim, H., Jeong, H., Lee, E., Shin, Y., (2002), Friction and thermal phenomena in chemical mechanical polishing, *Journal of Materials Processing Technology*, 130, 334-338.
- Kim, H., Kwon, D., Jeong, H., Lee, E., Shin, Y., (2003), A study on the distribution of friction heat generated by CMP process, *Journal-Korean Society of Precision Engineering*, 20(3), 42-49.
- Park, K.-H., Kim, H.-J., Choi, J.-Y., Seo, H.-D., Jeong, H.-D., (2005), The effects of groove dimensions of pad on CMP characteristics, *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, 29(3), 432-438.
- Jang, J.-H., Lee, D.-H., (2004), Optimization of groove sizing in CMP using CFD, *Proceedings of the Korean Society of Mechanical Engineers Conference*, 1522-1527.



Jong Min Jeong

M.Sc. candidate in the School of Mechanical Engineering, Pusan National University. His research interest is artificial intelligence CMP system.

E-mail: jmjeong@pusan.ac.kr



Seon Ho Jeong

Ph.D candidate in the School of Mechanical Engineering, Pusan National University. His research interest is planarization profile modeling of pattern device.

E-mail: shjeong@pusan.ac.kr



Yeong Il Shin

M.Sc. candidate in the School of Mechanical Engineering, Pusan National University. His research interest is planarization modeling of copper pattern.

E-mail: oil5108@pusan.ac.kr



Young Wook Park

M.Sc. candidate in the School of Mechanical Engineering, Pusan National University. His research interest is designed CMP pad.

E-mail: pyu0131@pusan.ac.kr



Hae Do Jeong

Professor in the School of Mechanical Engineering, Pusan National University. His research fields include chemical mechanical polishing (CMP), grinding, polisher and consumable design, and post-CMP cleaning.

E-mail: hdjeong@pusan.ac.kr

차량용 크래쉬패드 스티치 불량 검출을 위한 실시간 머신비전 검사 방법

Real-Time Machine Vision-Based Inspection Method for Automotive Crash-Pad's Stitch

윤현중^{1,#}, 김진곤¹

Hyun Joong Yoon^{1,#} and Jin Gon Kim¹

¹ 대구가톨릭대학교 기계자동차공학부 (School of Mechanical and Automotive Engineering, Daegu Catholic University)
Corresponding Author / E-mail: yoony@cu.ac.kr, TEL: +82-53-850-2721
ORCID: 0000-0001-5409-9366

KEYWORDS: Machine vision (머신비전), Automotive (자동차), Crash pad (크래쉬패드), Stitch (스티치)

In response to the market's need for luxurious automobile interiors, automotive parts makers are developing various types of crash pads to give drivers a sense of emotional luxury. In particular, a low-cost and high-quality crash pad manufacturing technology is being developed for mid- to low-priced vehicles, namely, the IMG-S (In Mold Grain-pre Stitch) technology. High defect rate of stitching is a critical problem during the manufacture of crash pad using the IMG-S technology. In order to solve this problem, this paper proposes a method of real-time machine vision inspection of stitches on the automotive crash pad. This paper presents the real-time machine vision inspection system configuration, proposes stitch and reference line detection methods, and method for calculating the distance between stitches and the reference line. According to the distance between the stitch and the reference line, the status of the stitch was judged as normal, warning, or erroneous, and the final result was displayed on the user interface. The applicability of the proposed real-time machine vision inspection method was verified by stitching the test line.

Manuscript received: July 20, 2022 / Revised: August 24, 2022 / Accepted: September 1, 2022

1. 서론

차량용 크래쉬패드(Crash Pad)는 대시보드(Dash Board)라고도 하며, 운전석과 조수석 정면에 각종 계기판, 보관함, 기타 부속물들이 설치되어 있는 내장 부품을 의미한다[1,2]. 소프트타입(Soft Type)의 크래쉬패드는 폼(Form)이 들어있는 스킨과 코어로 구성되어 있어 하드타입(Hard Type)의 크래쉬패드에 비하여 부드러운 쿠션감을 느낄 수 있다. 일부 고급 차종의 경우 스킨으로 가죽을 사용하며 감성적 고급감을 주기 위하여 가죽에 스티치(Stitch)를 넣기도 한다. 그러나 가죽에 스티치를 넣는 작업과 가죽을 코어에 감싸는 작업은 수작업으로 이루어져 많은 작업시간과 비용이 소요된다.

저비용으로 고감성의 소프트타입 크래쉬패드를 만들기 위하여

많은 기술들이 개발되고 있는데[3-5], 이 중 대표적인 신규기술로는 IMG (In Mold Grain) 성형공법이 있다[6,7]. IMG 공법은 진공성형 공법의 한 종류로서 사출로 제작된 코어에 폼이 들어있는 스킨을 압착하는 기술로 원가 절감에 유리한 공법이다. 최근 국내 D 사에서는 소프트타입의 크래쉬패드에 고급감을 한 단계 높이기 위하여 IMG-S (In Mold Grain-Pre Stitch) 공법을 개발하였다. IMG-S 공법으로 개발되는 크래쉬패드는 인조가죽 스킨, 폼, 코어로 구성되며, 코어는 사출 성형으로 제작하고 스킨과 폼을 진공 흡착하여 표피재를 제작한 후 코어와 표피재를 압착하여 최종적으로 크래쉬패드를 만든다. 코어와 표피재를 압착하기 전 스킨과 폼으로 구성된 표피재에 스티치를 넣어 제품의 고급감을 증대한다. 기존의 IMG 공법과 IMG-S 공법의 공정의 차이는 Fig. 1에서와 같다.

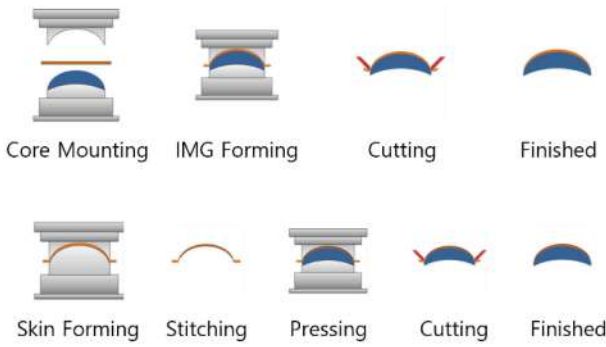


Fig. 1 The IMG process of producing a crash pad (up) and the IMG-S based process of producing a crash pad with stitches (down)

앞에서 기술한 바와 같이 IMG-S 공법은 비교적 적은 비용과 시간으로 고감성의 크래쉬패드를 제작할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 평면의 가죽에 스티치를 넣는 작업을 하는 것이 아니고 크래쉬패드 형상으로 성형된 표피재에 스티치 작업을 해야 하기 때문에 일반적으로 5년 이상의 숙련공에 의해 스티치 작업이 진행되며 불량률이 높다는 문제가 있다. 본 논문은 IMG-S 공법으로 개발되는 차량용 크래쉬패드 제작 공정에서 이와 같은 문제점을 극복하기 위하여 머신비전을 이용한 크래쉬패드의 스티치 검사 시스템을 개발하는 것을 목적으로 한다.

제조 라인에서 중간제품 또는 최종제품의 불량 여부를 머신비전으로 검사할 때는 해당 공정 진행 후 별도의 검사 시스템을 두는 경우가 대부분이다. 이와 같이 별도의 머신비전 검사시스템을 둘 경우, 암막 속에서 조명 등의 환경을 머신비전 검사에 효과적으로 구성할 수 있으며 비전 검사에 소요되는 시간도 비교적 유연하게 운영될 수 있다[8-11].

그러나 본 과제는 스티치 공정 중 스티치 상태를 실시간으로 모니터링하면서 스티치 작업 상태를 정상, 경고, 불량 of 세 단계로 구분하고 불량인 경우 스티치 공정을 중단하고 폐기할 수 있도록 함으로써 공정 시간의 비효율성을 제거하는 것을 목표로 하고 있다. 이와 같이 스티치를 실시간으로 머신비전 검사할 경우 스티치 공정 중 스티치 장비의 진동에 따른 영상 떨림 문제, 외부 조명 변화에 따른 문제, 실시간 영상처리 문제 등을 해결해야 한다[12-14].

본 논문의 2장에서는 스티치 공정의 실시간 검사를 위한 머신비전 검사시스템의 개요를 설명하고, 3장에서는 머신비전 검사방법을 제시한다. 4장에서는 사용자 인터페이스 환경과 실제 적용 사례를 보이고 5장에서는 본 논문의 결론을 제시한다.

2. 머신비전 검사 시스템 개요

본 논문에서 대상으로 하는 크래쉬패드는 IMG-S 신공법이 적용된 제품으로, Fig. 2와 같이 진공 흡착 공정으로 인조가죽 스킨과 폼이 결합된 표피재 위 스티치의 불량을 검출하는 것을



Fig. 2 A crash pad and stitches on it



Fig. 3 The camera and dual LED lights for inspecting stitches

목적으로 한다. 이때 스티치 공정은 스티치 전용 장비에서 수작업으로 진행되는데, 스티치 작업 중 실시간으로 스티치의 불량을 검출하기 위하여 Fig. 3과 같이 스티치 장비에 카메라와 LED 조명을 설치하였다. 카메라 및 렌즈는 해상도, 프레임 속도, FOV (Field of View), 피검사 제품까지의 거리 및 피검사 제품의 이송 속도 등을 고려하여 BASLER acA1600-20um과 CHIOIPT FA1602D로 각각 선정하였다. 조명은 두 개의 LED 면조명을 설계하여 설치하였으며, 카메라 및 조명 설치 시 스티치 장비와의 간섭과 작업자의 눈부심 등이 고려되어 설치 위치가 결정되었다. 특히, 카메라의 경우 스티치 장비와의 물리적인 간섭 때문에 수직 방향에서 35도 기울어져 설치되어 취득 영상에 원근 왜곡이 발생하여, 취득된 원본 영상의 전처리 과정에서 왜곡 영상의 원근 보정 후 스티치 불량 검출을 수행하도록 하였다.

본 연구에서 불량 검출 대상 스티치는 Fig. 4와 같다. 실제 여러 조각으로 나뉘어 있는 가죽 원단들을 이어 붙여 제작한 크래쉬패드와 유사한 느낌을 주기 위하여, 표피재를 성형할 때 가죽 원단의 이어 붙인 자국을 일부러 만드는데 이를 기준선(Reference Line)이라 한다. 스티치 공정은 이 기준선을 따라 작업이 이루어지며, 한 번의 스티치 공정을 통하여 기준선 좌우에 두 줄의 좌/우 스티치(Left/Right Stitches)가 동시에 생성된다. 스티치의 불량 여부는 좌/우 스티치와 기준선까지의 거리(좌/우 스티치 오프셋, Left/Right Stitch Offsets)가 사전에 정의된 기준 범위 내에 들어오는지 여부에 따라 결정된다. Figs. 4(a)는 정상적인 스티치 예를 보여주며, 4(b)는 불량 스티치 예를 보여준다. 수요기업인 완성자동차 업체의 요구사항에 따라 좌/우 스티치 사이 거리는 0.70 mm로, 좌/우 스티치 오프셋의 기준값은 0.35(= 0.70/2) mm로 설정되어 있다. 스티치 오프셋의 기준값에서 ±0.5, ±1.0 mm 이상 벗어날 경우 각각 ‘경고(Warning)’, ‘불량

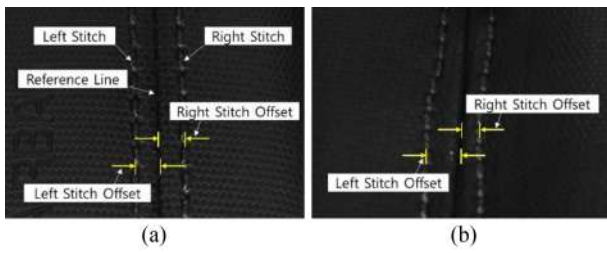


Fig. 4 Left/right stitches, reference line, and left/right offsets: (a) The case of good stitches and (b) The case of fault stitches

(Error)’ 메시지를 화면에 출력하며 작업자가 화면을 보지 않고도 인지할 수 있도록 경고음을 송출한다.

3. 머신비전 검사 방법

스티치 불량 검출을 위한 실시간 머신비전 검사 시스템은 스티치 공정 중 취득된 영상을 실시간으로 처리하여 모니터 화면에 결과를 출력한다. 머신비전 검사는 Fig. 5와 같은 프로세스를 거친다. 영상처리 및 검사 알고리즘의 속도를 고려하여 카메라를 통해 0.2초 간격으로 영상이 취득되며, 취득된 영상은 먼저 원근 보정, 검사 영역 설정 등의 전처리(Pre-Processing) 과정을 거치게 된다. 전처리된 영상으로부터 좌/우 스티치와 기준선을 검출한 후, 좌/우 스티치 및 기준선 정보를 이용하여 검출된 스티치의 정합성을 검증하여 잘못 검출된 스티치 및 기준선을 보정하거나 제외한다. 최종적으로 검출된 좌/우 스티치 및 기준선 정보로부터 스티치의 불량 여부를 판단하고 머신비전 검사 시스템 모니터에 결과를 출력한다. 주요 스티치 검사 과정을 영상으로 보이면 Fig. 6과 같다. Figs. 6(a)는 검사 영역 설정이 된 원본 이미지, 6(b)는 좌/우 스티치 검출 결과, 6(c)는 기준선 검출 결과, 6(d)는 검출된 좌/우 스티치 및 기준선으로부터 불량 여부 판단 후 출력 영상을 보여준다.

카메라로부터 취득된 원본 영상은 먼저 전처리 단계를 거치게 된다. 전처리에서는 영상의 원근 보정 및 관심영역(Region of Interest, ROI) 설정만 수행하며, 영상의 명암 및 대비 보정 등의 처리는 각 스티치, 기준선 검출 단계에 적합하게 적용되어야 하므로 스티치 검출 단계 및 기준선 검출 단계에서 수행된다. 카메라 설치 시 스티치 장비와의 간섭 문제로 수직 아래 방향으로 설치되지 못하고 35도 기울어져 설치되어 취득 영상에 원근 왜곡이 발생한다. Fig. 7(a)는 원본 영상으로, 원근 왜곡 때문에 ㉠ 지점과 ㉡ 지점의 좌/우 스티치 사이 간격이 다를 수 있다. 원본 영상은 가로 134.6 mm, 세로 101.6 mm의 영역에서 영상 이미지가 취득되며, Fig. 7(b)에서 보이듯이 원근 보정 후 관심영역은 가로 50.8 mm, 세로 50.8 mm의 크기로 설정된다. 관심영역은 스티치 검사 시스템의 사용자 인터페이스 화면에 보여지는 이미지이며, 실제 스티치 불량 여부를 판단하게 되는 영역은 가로 40.6 mm, 세로 25.4 mm로 Fig. 7(b)에서 노란색으로

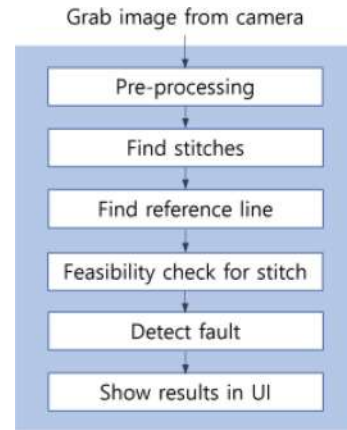


Fig. 5 Fault detection process for stitches

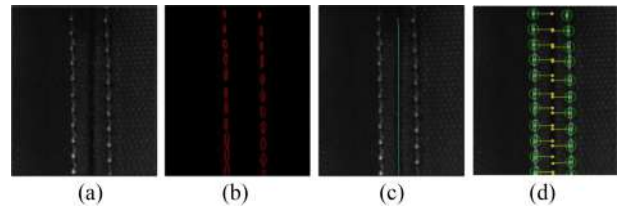


Fig. 6 Fault detection process for stitches: (a) Original image, (b) The image of left/right stitches, (c) The image of reference line, and (d) The result image of stitch inspection

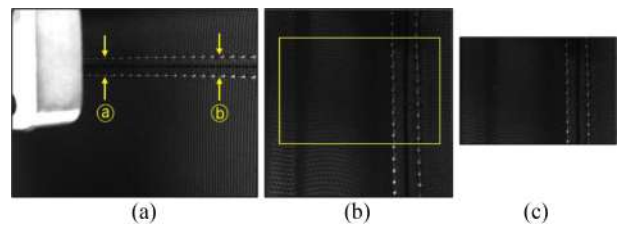


Fig. 7 Perspective calibration of a camera image: (a) The original image before the perspective calibration, (b) The image after the perspective calibration, and (c) The image within ROI for stitch inspection

표시된 사각형의 내부이다. Fig. 7(c)는 원근 왜곡 보정 후 40.6 × 25.4 mm 관심영역이 설정된 이미지를 보여준다.

카메라 취득 영상의 전처리 후 스티치 검출 프로세스는 Fig. 8과 같이 전처리, 스티치 영역 마스크 생성, 마스크 내 좌/우 스티치 검출, 스티치의 킨투어(Contour) 및 모멘트(Moment) 생성의 네 단계로 이루어진다. 전처리 단계에서는 스티치 검출에 적합한 이미지로 변환을 위하여 명암 및 대비 자동 변환 등의 세부 절차를 거친다. 또한 스티치 검출 시 스티치 영역 외에서 스티치로 오인되어 잘못 검출되는 것을 최소화하기 위하여 먼저 스티치 영역을 찾은 후 스티치 영역 마스크를 생성한다. 스티치 영역 마스크 내 이미지에서 좌/우 스티치를 찾은 후 검출 스티치의 오류를 최소화하기 위하여 정합성을 체크하면서 스티치로 잘못 검출된 부분들을 제거한다. 마지막으로 검출된 스티치의

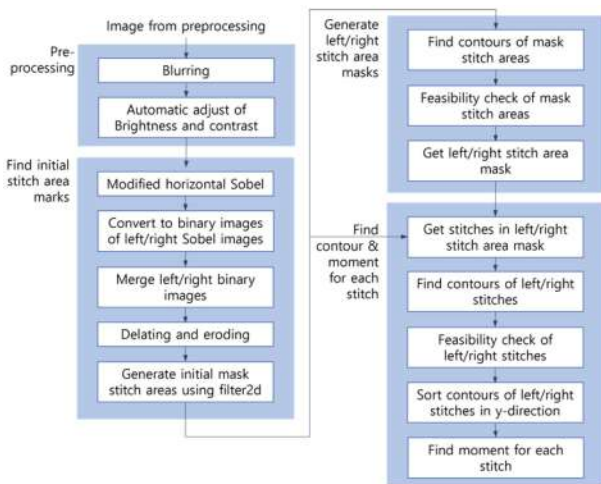


Fig. 8 The process for detecting left and right stitch contours and moments

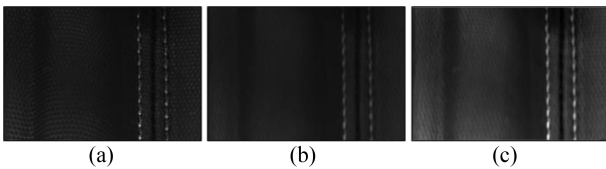


Fig. 9 The pre-processing for stitch inspection: (a) Original image, (b) The blurred image, and (c) The image after automatic brightness and contrast calibration

형상을 추출하기 위하여 스티치의 컨투어를 찾은 후 컨투어의 모멘트를 계산하여 구한다. 스티치의 모멘트는 향후 기준선과의 거리를 구할 때 이용된다.

Fig. 9는 스티치 검출 프로세스의 전처리 과정을 보여준다. 스티치 검출에 앞서 스티치 장비의 진동으로 인한 아웃포킹싱 문제에 강인하게(Robust) 적응하기 위하여 번짐 효과를 적용하며, 외부 조명의 변동 문제에 강인하게 적응하기 위하여 명암 및 대비 자동 보정을 한다. 번짐 효과와 명암 및 대비 자동 보정과 관련된 세부 내용 및 성능은 다음 장에서 자세히 설명하도록 한다. Figs 9(a)는 원본 이미지며, 9(b)는 번짐 효과를 적용했을 때, 9(c)는 명암 및 대비 자동 보정을 한 이미지를 보여주고 있다.

스티치를 정밀하게 검출하는 데 있어, 먼저 이미지에서 스티치가 있는 영역을 찾은 후 스티치 영역 내에서 스티치를 검출하는 것이 효과적임을 많은 시행착오를 거쳐 밝혔다. 스티치 영역을 먼저 찾으면 빛 반사 등의 이유로 스티치가 아닌 부분을 스티치로 오인하는 경우를 확연히 줄일 수 있다. 스티치 영역을 마스크 이미지로 생성한 후 스티치 영역 마스크 내에서 스티치만을 검출하게 된다. 스티치 영역을 찾기 위해서는, 먼저 좌에서 우방향, 우에서 좌방향으로 수평방향 소벨 미분하고(Figs. 10(a), 10(b)), 이를 이진화하여 스티치의 좌/우 엣지를 검출한다(Figs. 10(c), 10(d)). 검출된 좌/우 엣지를 OR 비트연산을 통하여 합성한 후(Fig. 10(e)), 팽창연산자와 침식연산자를 사용하여 노이즈를

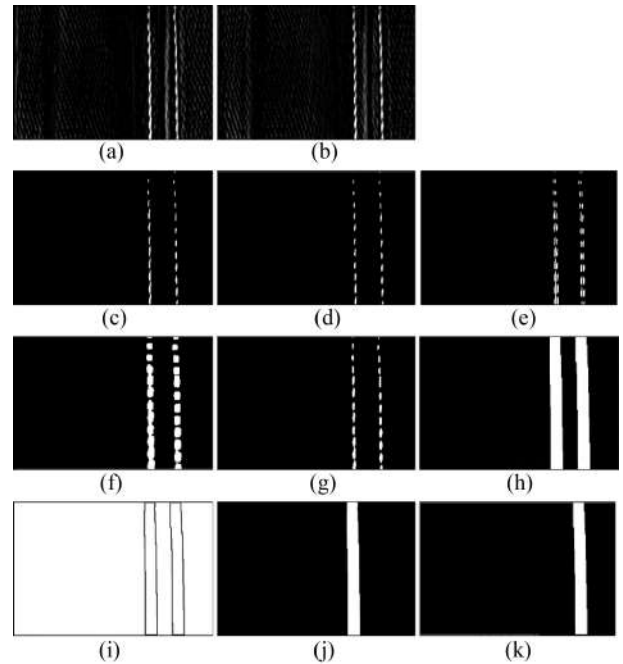


Fig. 10 Generation of initial stitch area mask through (a) The horizontal Sobel derivatives from right to left, (b) The horizontal Sobel derivatives from left to right, (c) The binarization of image (a), (d) The binarization of image (b), and (e) The OR bitwise operation of images (c) and (d), (f) Delating of image (e), (g) Eroding of image (f), (h) Filter 2d with a kernel, (i) Generation of left and right stitch area masks through finding contours from the initial stitch area mask followed by finding left and right stitch area masks by removing outliers, (j) The left stitch area mask, and (k) The right stitch area mask

제거한다(Figs. 10(f), 10(g)). 스티치의 길이 및 넓이를 고려하여 윈도우 커널을 설정한 후 2D 필터링을 통하여 스티치 영역을 검출한다(Fig. 10(h)). 본 논문에서는 스티치 길이의 1.5배, 스티치 넓이의 3.0배의 윈도우 커널을 설정하였다. Fig. 10(h)에서 구해진 좌/우 스티치 영역에는 여전히 스티치 영역이 아닌 아웃라이어가 존재할 수 있으며 이와 같은 아웃라이어를 완전히 제거한 좌/우 스티치 영역을 검출하기 위해서는 다음의 추가적인 프로세스가 요구된다. 먼저 Fig. 10(h)에서 구해진 이미지에서 스티치 영역과 아웃라이어를 포함한 흰색 부분의 컨투어를 찾은 후, 좌/우 스티치 영역은 서로 평행하게 위치해 있다는 특성을 활용하여 아웃라이어를 완전히 제거한다(Fig. 10(i)). 아웃라이어가 제거된 스티치 영역으로부터 좌 스티치 영역 마스크(Fig. 10(j))와 우 스티치 영역 마스크(Fig. 10(k))를 생성한다.

스티치 영역 마스크를 찾는 프로세스에서 아웃라이어가 제거되는 과정은 Fig. 11에서 보여 진다. 원본 이미지(Fig. 11(a))를 대상으로 스티치 영역 마스크를 생성할 때 좌/우 스티치 영역 외에 Fig. 11(b)와 같이 아웃라이어가 존재할 수 있으며, 좌/우 스티치 영역이 서로 평행하게 위치한다는 특성을 이용하여 아웃라이어를 찾을 수 있다. Fig. 11(c)는 아웃라이어를 제거하고

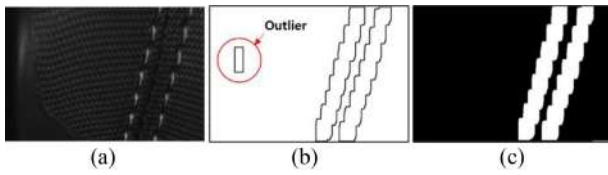


Fig. 11 Generation of left and right stitch area masks in case of involving outliers: (a) The original image, (b) Finding contours from the initial stitch area mask, and (c) Finding the left and right stitch area mask by eliminating the outlier contour

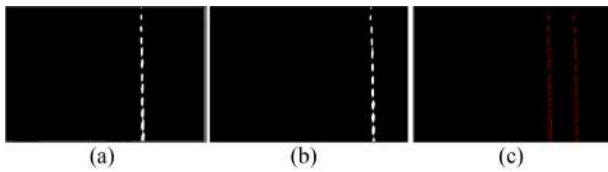


Fig. 12 Finding the left/right stitch contours and their moments: (a) The stitches in the left stitch area mask, (b) The stitches in the right stitch area mask, and (c) The contours and moments of the left and right stitches

좌/우 스티치 영역 마스크를 생성한 예를 보여준다.

좌/우 스티치 영역 마스크(Figs. 10(j), 10(k)) 내에서 스티치의 침식연산 이미지(Fig. 10(g))를 이용하여 좌/우 스티치를 각각 검출하고(Figs. 12(a), 12(b)), 좌/우 스티치의 컨투어를 생성한다(Fig. 12(c)). 마지막으로 각 스티치 컨투어의 모멘트를 계산하여 추후 기준선과의 거리를 계산할 수 있도록 한다.

카메라 취득 영상의 전처리 후 좌/우 스티치 사이의 기준선을 검출하기 위한 프로세스는 Fig. 13과 같이 전처리, 기준선 영역 마스크 생성, 기준선 검출의 세 단계로 이루어진다. 전처리 단계에서는 기준선 검출에 적합한 이미지로 변환을 위하여 명암 및 대비 자동 변환 등의 세부 절차를 거친다. 또한 기준선이 잘못 검출되는 것을 최소화하기 위하여 먼저 기준선 영역을 찾은 후 기준선 영역 마스크를 생성한다. 기준선 영역 마스크 내 이미지에서 기준선을 찾은 후 검출 기준선의 오류를 최소화하기 위하여 기준선의 정확성을 체크하면서 기준선으로 잘못 검출된 부분들을 제거한다. 마지막으로 평탄화 과정을 통하여 부드러운 기준선을 검출한다.

Fig. 14는 기준선 검출 프로세스의 전처리 과정을 보여준다. 스티치 검출과 마찬가지로 외부 환경의 효과를 최소화하고 기준선을 효과적으로 검출하기 위하여 번짐 효과와 명암 및 대비 자동 보정을 한다.

기준선 영역 마스크는 스티치 영역 마스크로부터 간단히 구할 수 있다. 좌 스티치 영역 마스크의 오른쪽 경계와 우 스티치 영역 마스크의 왼쪽 경계를 이용하여 기준선의 초기 영역을 생성한 후(Fig. 15(a)), 팽창연산을 적용하여 기준선 영역이 확장된 기준선 영역 마스크를 생성한다(Fig. 15(b)). Fig. 15(c)는 전처리 보정된 이미지에 기준선 영역 마스크를 적용한 이미지를 보여준다.

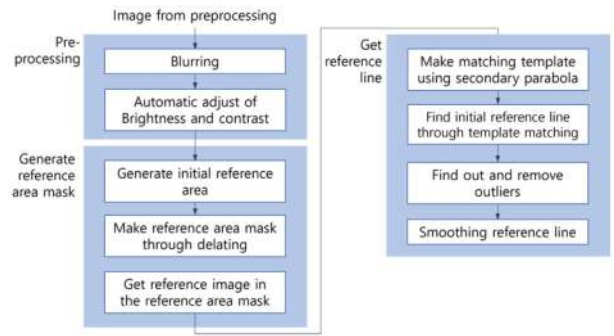


Fig. 13 The process for detecting reference line

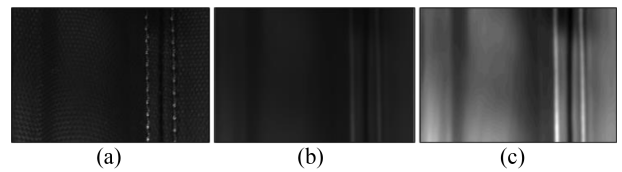


Fig. 14 The pre-processing for reference line inspection: (a) Original image, (b) The blurred image, and (c) The image after automatic brightness and contrast calibration

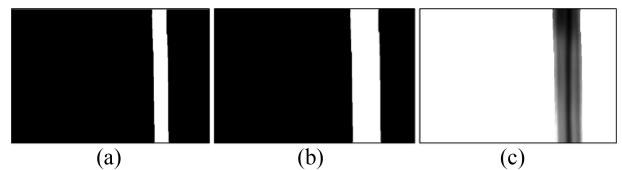


Fig. 15 Generation of reference line area mask and the image contained inside the mask: (a) The initial reference line area, (b) The reference line area mask obtained by delating, and (c) The image contained inside the reference line area mask

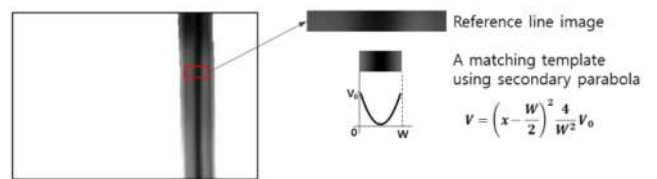


Fig. 16 Finding the initial reference line using template matching

기준선 영역 마스크 내에서 기준선은 템플릿 매칭을 이용하여 검출한다. Fig. 16과 같이 2차 포물선 곡선을 이용하여 그레이 스케일의 매칭 템플릿을 생성한 후, 기준선 이미지의 위에서 아래 방향으로 윈도우를 옮겨가며 템플릿 매칭을 적용하여 초기 기준선을 검출한다. 템플릿 매칭을 이용하여 초기 기준선을 검출한 후, Fig. 17과 같이 아웃라이어 제거하고 평탄화하여 부드러운 기준선을 최종적으로 검출한다.

스티치 머신비전 검사 마지막 단계로, 검출된 좌/우 스티치와 기준선 사이의 거리를 계산하고 스티치의 불량 여부를

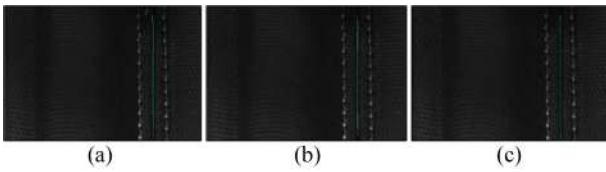


Fig. 17 Finding the reference line: (a) The initial reference line obtained using template matching, (b) Removal of outlier, and (c) The reference line after smoothing

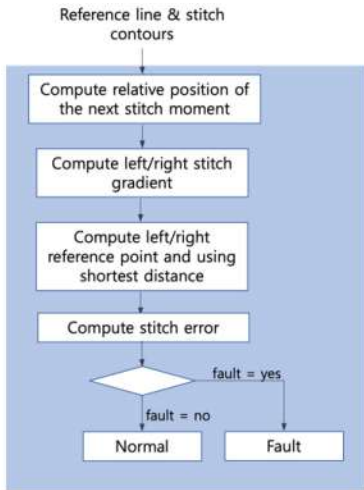


Fig. 18 The process for fault detection for stitches

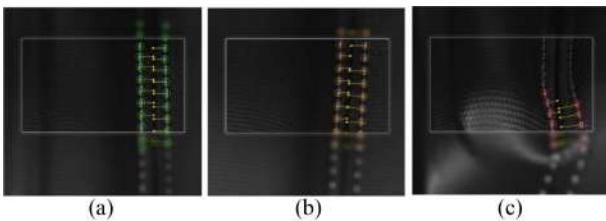


Fig. 19 Results of inspection: (a) Good, (b) Warning, and (c) Fault

결정한다. Fig. 18은 스티치 불량 판별 프로세스를 보여준다. 먼저 기준선까지 거리를 계산하기 위한 각 스티치를 중심으로 상, 하에 위치한 스티치들의 위치를 고려하여 스티치의 기울기 (Gradient)를 구한 후 기울기의 수직 방향으로 해당 스티치에서 기준선까지 거리를 계산한다. 만약 기울기 수직 방향에 기준선이 검출되지 않아서 거리 계산이 안 되는 경우 해당 스티치의 기준선까지 거리는 건너뛴다.

스티치와 기준선 사이의 거리를 계산한 후, 거리 오차에 따라 정상, 경고, 불량의 세 단계로 구분하여 사용자 인터페이스에 표시하고 경고, 불량인 경우에는 작업자가 실시간으로 인지할 수 있도록 경고음 또는 불량을 발생시킨다. Fig. 19(a)는 스티치가 정상 상태인 경우로 좌/우 스티치 위치는 초록색으로 표시되고 기준선까지 거리가 노란색 선분으로 표시된다. Figs. 19(b)와 19(c)는 각각 경고 및 불량 상태인 경우로 좌/우 스티치 위치가 주황색 및 빨간색으로 표시된다. Fig. 19(c)는 크래쉬패드가

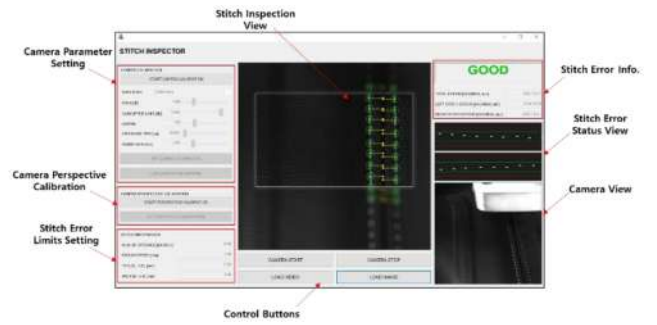


Fig. 20 GUI for real-time stitch inspection of a crash pad

심하게 구겨져 스티치와 기준선의 검출이 안 된 경우로, 스티치와 기준선이 명확히 검출된 경우에 대해서만 스티치 품질 검사 결과를 보여준다.

4. 사용자 인터페이스 및 실증

스티치 공정을 진행하면서 실시간으로 스티치의 품질을 검사하고 작업자에게 결과를 보여줄 수 있도록 스티치 장비에 디스플레이 장치를 설치하고 Fig. 20과 같은 화면을 출력하도록 사용자 인터페이스를 설계하였다. 사용자 인터페이스 중앙에 스티치 품질 검사 결과를 보여줄 수 있는 커다란 창이 위치하고 왼쪽에는 카메라 파라미터 설정 및 스티치의 양품, 경고, 불량 기준을 설정할 수 있는 창이 위치한다. 사용자 인터페이스 오른쪽에는 스티치 품질검사 결과를 자세히 볼 수 있도록 스티치와 기준선과의 거리 정보와 카메라 취득 원본 이미지를 보여주는 창을 위치하였다.

실시간 스티치 품질 검사에 있어 문제점 중 하나는 스티치 공정으로 인한 스티치 장비의 진동에 의해 취득 영상의 흔들림 또는 초점이 맞지 않는 경우가 있다는 점이다. 이를 해결하기 위하여 스티치 및 기준선 검출의 전처리 과정에서 원본 이미지에 번짐 효과를 고의로 주어 스티치 장비 진동에 영향을 덜 받도록 하였다. Figs. 21(a)는 초점이 잘 맞은 원본 이미지로 번짐 효과를 준 이미지는 21(b)와 같다. 또한 Figs. 21(c)는 초점이 맞지 않은 원본 이미지로 번짐 효과를 준 이미지는 21(d)와 같다. 번짐 효과를 적용한 이미지를 사용하여 스티치 및 기준선 검출이 가능한 알고리즘을 개발함으로써 스티치 장비의 진동 문제를 해결하였다.

실시간 스티치 품질 검사에 있어서 또 다른 문제점은 외부 조명의 변동에 의한 간섭이다. 스티치 공정 작업 중 실시간으로 스티치의 품질을 검사하기 위해서는 스티치 장비에 검사 시스템을 설치해야 하는데, 작업자에게 방해로 최소로 하기 위해서는 암막 등 머신비전 검사에 특화된 환경 조성이 어렵다. 스티치 장비는 공장의 일반 작업장에 설치되어 외부 조명이 지속적으로 변하기 때문에 외부 조명의 영향을 최소화하기 위한 방안이 요구된다. 이를 위하여 1차적으로 스티치 장비에 2개의 면 조명을

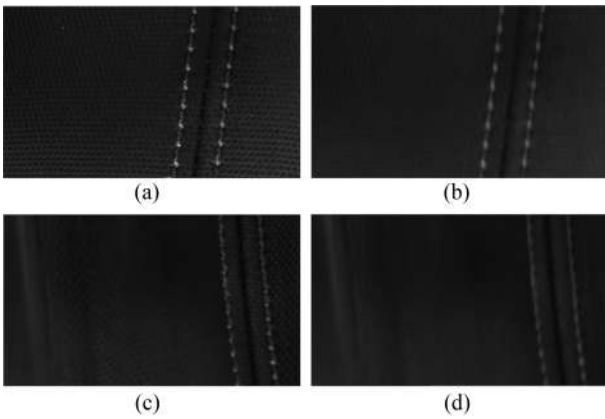


Fig. 21 Processing of the out-of-focus image due to vibration of a stitch machine: (a) Well-focused image, (b) The blurred image of image (a), (c) Out-of-focus image, and (d) The blurred image of image (c)

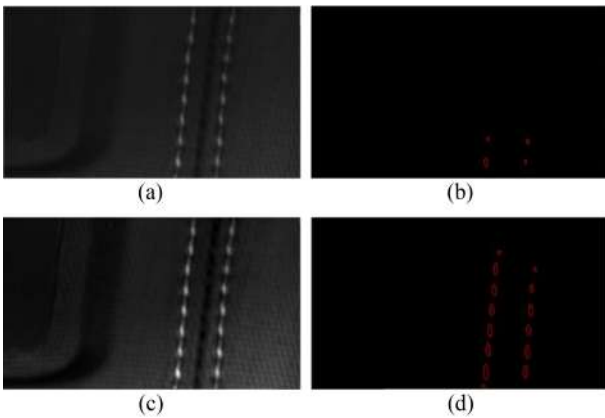


Fig. 22 Process to minimize the effect of external lighting: (a) The original image extracted from a dart external environment, (b) Stitches are not detected properly in image (a), (c) The image with auto-adjusted brightness and contrast of image (a), and (d) Stitches are well detected properly in image (c)

설치하였으나 작업자의 눈부심 문제로 조명 밝기 조절에 제약이 따른다. 이와 같은 외부 조명의 간섭 문제를 최소화하기 위하여 스티치 및 기준선 검출의 전처리 과정에 자동으로 명암 및 대비를 자동으로 조정하는 단계를 추가하였다. Figs. 22(a)는 어두운 외부 환경 때문에 원본 이미지가 어둡게 취득된 사례를 보여주며, 명암 및 대비의 자동조정 단계가 없는 경우 22(b)와 같이 스티치가 제대로 검출되지 않는다. Figs. 22(c)는 원본 이미지의 명암 및 대비를 자동조정한 것으로, 이 경우 22(d)와 같이 스티치가 정상적으로 검출되는 것을 볼 수 있다.

본 논문에서 개발된 스티치 공정의 실시간 머신비전 검사 시스템은 Fig. 3과 같이 차량용 크래쉬패드 스티치 전용 장비에 설치된 후, 총 44개 크래쉬패드 제품에 대하여 테스트되었다. 한 개 크래쉬패드에 스티치 작업을 하는데 소요되는 시간은 약 80-100초로 작업자의 숙련도에 따라 상이하다. 머신비전 검사

Table 1 Computation time

Average time [s]	Minimum time [s]	Maximum time [s]
0.0983	0.0951	0.1012

Table 2 Average precision, recall, F1-score, and accuracy

Precision	Recall	F1-score	Accuracy
0.987	0.975	0.980	0.970

시스템은 초당 5회 스티치 영상을 취득하여 검사를 진행하게 되기 때문에 영상의 전처리 및 검사 알고리즘은 200 ms 이내에 수행되도록 개발되었다. 영상 처리를 위해서는 Intel Core i7-8700 CPU @ 3.20 GHz, 32.0 GB Memory를 탑재한 컴퓨터를 사용하였으며, 영상 취득 후 전처리 및 검사알고리즘 수행에 소요되는 시간은 Table 1과 같다. 본 논문에서 제안된 검사 알고리즘의 정상 및 불량 판정과 관련된 성능을 검증하기 위하여 스티치 영상에서 샘플링 한 총 500개의 정상 및 불량 스티치 이미지를 대상으로 정확도(Accuracy), 정밀도(Precision), 재현도(Recall), F1 Score를 Table 2와 같이 분석하였다.

5. 결론

본 논문은 IMG-S 공법으로 제조되는 차량용 크래쉬패드의 스티치 공정 모니터링 및 불량 검출을 위한 실시간 머신비전 검사 방법을 제안한다. 스티치 검사를 위한 머신비전 시스템을 제시하고 카메라에서 취득한 영상으로부터 스티치 검출 및 기준선 검출 방법을 제안하였으며, 스티치 작업 상태에 따라 정상, 경고, 불량으로 판정한 후 작업자에게 결과를 보여주기 위한 사용자 인터페이스 화면을 개발하였다. 개발된 실시간 머신비전 시스템은 테스트 라인에서 적용성이 검토되었다. 본 논문 개발된 검사 알고리즘은 주로 크래쉬패드 직선 부분에 작업된 스티치를 대상으로 개발되어 크래쉬패드의 굴곡이 심한 부분에 위치한 스티치의 경우 검출이 제대로 되지 않는 한계가 있어 향후 보완이 필요하다. 또한 작업자별 스티치 숙련정도를 관리할 수 있는 기능의 추가도 요구된다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 논문은 2020년도 대구가톨릭대학교 교내연구비 지원에 의한 것임.

REFERENCES

1. Oda, T., Honjo, K., Ohyama, M., (1995), Solvent-free adhesive

- technology for vacuum forming of instrument crash pad, Japan Society of Automotive Engineering Review, 16(3), 317.
2. Kwak, S. B., Lee, H. Y., Byun, Y. T., Kang, B. S., Koh, J. S., Jeoung, S. K., Nam, J. D., (2007), The study of manufacturing crash pad using multi-layer micro cellular foaming sheet, Proceedings of the 2007 Korea Society of Automotive Engineers Fall Conference, 1724-1729.
 3. Ban, S.-U., Yun, M.-H., Lee, C., Lee, J.-H., (2006), Development of luxuriousness models for automobile crash pad based on subjective and objective material characteristics, Journal of the Ergonomics Society of Korea, 25(2), 187-196.
 4. Cho, Y.-H., Kim, J.-H., Lee, M.-G., Kim, B.-M., (2019), Prevent weld line defects on an automotive crash pad by local heating and cooling with 3D printed insert core, Journal of Mechanical Science and Technology, 33(5), 2353-2361.
 5. Choi, I. K., Lee, M. K., Park, D. S., Choi, J. S., You, Y. J., Lee, H. H., Choi, W. J., Hong, J. S., Lee, J. J., (2021), A study on the advancement of crash pad using real materials, Proceedings of the 2021 Korea Society of Automotive Engineers Fall Conference, 805-810.
 6. Ha, W., Son, C. W., Choi, Y. H., (2019), The development of in-mold grain laminated driver airbag cover, Proceedings of the 2019 Korea Society of Automotive Engineers Spring Conference, 1054.
 7. Choi, S.-S., Kong, B.-S., Park, D.-K., (2019), The development of IMG integral foaming crashpad, Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, 20(7), 607-612.
 8. Kumar, A., (2008), Computer-vision-based fabric defect detection: A survey, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 55(1), 348-363.
 9. Nizam, M. S. H., Marizan, S., Zaki, S. A., (2016), Vision based identification and classification of weld defects in welding environments: A review, Indian Journal of Science and Technology, 9(20), 1-15.
 10. Rasheed, A., Zafar, B., Rasheed, A., Ali, N., Sajid, M., Dar, S. H., Habib, U., Shehryar, T., Mahmood, M. T., (2020), Fabric defect detection using computer vision techniques: A comprehensive review, Mathematical Problems in Engineering, 2020, 8189403.
 11. Ren, Z., Fang, F., Yan, N., Wu, Y., (2021), State of the art in defect detection based on machine vision, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 9, 661-691.
 12. Jia, H., Murphey, Y. L., Shi, J., Chang, T.-S., (2004), An intelligent real-time vision system for surface defect detection, Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition, 2004, 3, 239-242.
 13. Li, Y., Li, Y. F., Wang, Q. L., Xu, D., Tan, M., (2009), Measurement and defect detection of the weld bead based on online vision inspection, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 59(7), 1841-1849.
 14. Zheng, X. B., Park, H. B., Yoon, H. J., (2019), Machine vision inspection of the stitches' qualities on the crash pad of a vehicle, Proceedings of the 34th Institute of Control, Robotics and Systems Annual Conference, 267-268.



Hyun Joong Yoon

Professor in the Department of Mechanical Engineering, Daegu Catholic University. His research interest is intelligent manufacturing systems and robotics.
E-mail: yoon@cu.ac.kr



Jin Gon Kim

Professor in the Department of Mechanical Engineering, Daegu Catholic University. His research interest is CAE/FEM and optimum design.
E-mail: kimjg1@cu.ac.kr

마그네슘 합금 판재(AZ31B)의 인장 변형에서 AE 신호 발생 특성 분석

Analysis of Acoustic Emission (AE) Signal Characteristics of the Magnesium Alloy Sheet (AZ31B) in the Tensile Deformation

송용호¹, 안소찬¹, 유제형², 정완진^{1,2}, 이창환^{1,2,#}
Yong Ho Song¹, So Chan An¹, Jae Hyeong Yu², Wan-Jin Chung^{1,2}, and Chang-Whan Lee^{1,2,#}

¹ 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과 (Department of Mechanical System Design and Engineering, Seoul National University of Science and Technology)
² 서울과학기술대학교 기계정보공학과 (Department of Mechanical Information Engineering, Seoul National University of Science and Technology)
Corresponding Author / E-mail: cwlee@seoultech.ac.kr, TEL: +82-2-970-6371
ORCID: 0000-0002-7848-280X

KEYWORDS: AZ31B (마그네슘 합금), Acoustic emission (음향방출), Plastic deformation (소성변형), AE signal (AE 신호)

In this study, acoustic emission (AE) signals associated with the behavior of materials in the magnesium alloy (Mg AZ31B) tensile test were analyzed. The AE sensor was attached with the material to measure the AE signals. During the tensile experiment, the AE sensor measured the elastic waves generated inside the specimen. The AE parameters, such as, the signal energy, duration, and frequency centroid, were studied. We also analyzed the effect of the materials size and tensile speed on the AE signals. As a result, the lowest frequency centroid value occurred at the yield and fracture points. As the width and length of the specimen increased, the number of hit counts increased and the peak frequency occurred. Other AE parameters, such as, the duration and frequency centroid, were not affected. As the tensile speed increased, the hit decreased and the frequency centroid decreased in the elastic region. It was found that in the detection of the yield and fracture deformation, the number of counts, and frequency centroid were appropriate.

Manuscript received: July 20, 2022 / Revised: September 26, 2022 / Accepted: September 28, 2022

1. 서론

마그네슘 합금(Mg AZ31B)은 밀도가 1.74 g/cm³로, 알루미늄 합금의 2/3, 철의 1/4에 해당하며 일반적으로 쓰이는 금속 재료 중에서 비교적 가벼운 재료이다. 우수한 비강도 및 기계 가공성, 전자파 차폐 특성을 가지고 있어 항공우주 및 자동차 부품 등 다양한 분야에서 사용되고 있다[1]. 이러한 마그네슘 합금 재료는 재료의 항복점을 넘어가면 소성변형이 발생하여 본래의 역할을 수행하기 어렵다. 따라서 금속 소재의 초기 결함에 관한 검출과 파괴 거동을 파악하는 것은 매우 중요한 문제이다.

이에 따라 소성변형 및 파단점을 검출하기 위해 다양한 방법이 동원되고 있다. 그중에서 가공 공정으로 인한 재료의 거시적인 변형부터 미세한 결함까지 실시간으로 진단할 수 있는 음향 방출(Acoustic Emission) 기법이 널리 사용되고 있다[2]. 음향

방출은 고체 내부의 탄성에너지가 급격히 방출될 때 발생하는 탄성파를 의미한다. 이러한 음향 방출의 발생 원인으로는 재료에서 전위의 이동 및 균열의 진전 및 전파 등 다양하게 존재하기 때문이다. 따라서 금속 재료의 소성변형 및 파단 측정이 용이하다[3].

AE 신호는 내부 발생 신호이기 때문에 실시간 측정이 가능해 소성변형 및 균열 검출에 널리 쓰이고 있다[4]. 이에 따라 고압 탄소강배관의 인장시험에서 AE 신호 분석에 관한 연구가 진행되었다. 실험 결과 탄성영역에서 항복 영역까지는 저주파수 대역(250-350 kHz)이 주로 나타났으며 소성영역에서는 저주파수부터 고주파수까지 다양하게 나타남을 확인하였다. 또한 이러한 원인을 전위의 이동, 집적 그리고 전위가 재재물이나 결정입계를 통과했을 때 나타난다고 판단하였다[5].

하지만 실제 하중은 인장 변형뿐만 아니라 압축 변형도

작용하므로 압축시험에서의 AE 신호 분석도 필요하다. 따라서 알루미늄 합금의 압축 변형 거동 분석 또한 진행되었다. 위의 연구에서는 항복 시에 가장 큰 AE 진폭 및 에너지 값이 발생하였고, 소성영역에서는 비교적 적은 값이 발생하였다[6].

더 나아가, 평직 CFRP 복합재료의 3점 굽힘 시험에서 AE 특성 분석이 진행되었다. 재료의 초기 균열이 성장하기 전에는 비교적 적은 양의 AE 신호가 발생하였고, 초기 균열이 성장하는 지점에서는 많은 양의 AE 신호가 발생하였다. 이후 하중이 감소하여 균열이 급격히 성장하는 지점에서는 누적 AE 신호 발생률이 급상승하였다[7].

구조용 재료로 쓰이고 있는 마그네슘 합금에 대해서는 연구가 미흡하다. 따라서, 본 연구는 마그네슘 합금의 탄소성변형 및 파단에서의 AE 신호 발생 특성을 분석하였다. 또한, 시편의 크기 및 인장 속도가 AE 신호에 미치는 영향을 파악하고자 마그네슘 합금 인장 실험을 진행하였다.

2. 실험 방법

2.1 장치 구성 및 시편

본 연구에서는 마그네슘 합금 판재의 기계적 거동 특성을 분석하기 위해 인장 시험을 진행하였다. 인장시험은 만능재료시험기(MINOS-020, MTDI, 대한민국)를 사용하였으며 크로스헤드 속도는 5 mm/min로 하였다. 또한, 기계적 물성을 측정하기 위해 3D-DIC (ATOS Core Optical 3D Scanner)를 사용하였고 촬영 시 DIC의 프레임의 속도는 3 Hz로 설정하여 실험을 진행하였다.

인장 시편의 규격은 Fig. 1과 같다. 시편은 ASTM E8M Subsize의 Gage Length와 폭을 참고하였으며 두께는 1 mm로 제작하였다. 추가적으로 시편의 어깨부(Grip Section)는 AE 센서 부착 위치와 지름을 고려하여 폭(W)은 20 mm, 길이(L)는 45 mm로 설정하여 제작하였다.

2.2 측정 방법

소재가 변형 및 파괴 시에 발생한 탄성파는 음향 방출 시스템에 의해 검출되며, 검출된 하나의 AE 신호는 Fig. 2와 같다. AE Hit는 임계 전압값(Threshold Voltage), HDT (Hit Definition Time), HLT (Hit Lockout Time) 등을 이용하여 정의한다. 일반적으로 AE 센서를 통해 수집된 신호는 재료의 거동에 따라 다르다고 알려져 있다[8]. 본 연구에서는 재료의 기계적 거동에 따른 신호 발생 특성 분석을 위해 Fig. 2와 같이 측정된 신호의 파형을 수집하였다. 또한 수집한 신호에서 주변 잡음을 구분하기 위해 임계 전압값 통해 하나의 Hit를 정의하고 분석하였다.

사용된 AE 센서(IDK-AES-H500-W, (주)IDK)는 일정 주파수 대역(150 kHz)을 높은 감도로 감지하는 직경 16 mm인 공진형 센서와 넓은 주파수 대역(50-500 kHz)을 감지하는 광대역형 센서이다. 센서에 진공 그리스(MOLYKOTE 1000)를 도포하여 시편 상단 어깨부에 광대역형 센서, 시편 하단 어깨부에 공진형

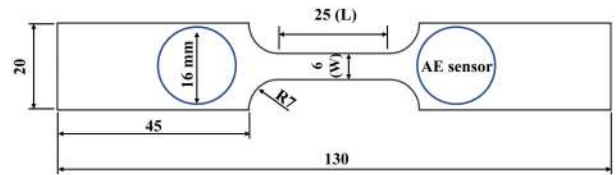


Fig. 1 Specimen specification of tensile test specimen (unit: mm)

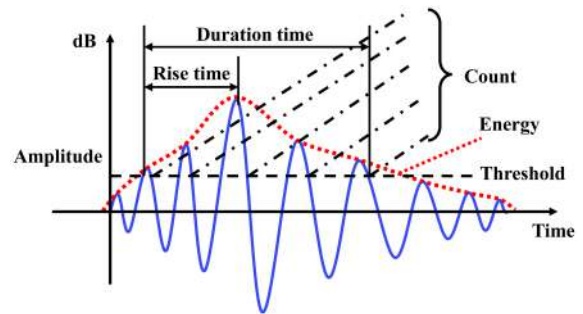


Fig. 2 Schematic figure showing the main AE parameters

센서를 부착하였다.

2.3 데이터 수집 방법

AE 신호 측정은 (주)IDK의 일체형 측정 시스템 IDK-AET-SU8을 사용하였다. AE 센서에 의해 수집된 신호는 아주 미약하기 때문에 분석하기에 난해하다. 따라서 Pre-Amplifier에서 100배(40 dB)로 증폭하여 음향 방출 시스템으로 전송되고 DAQ Board로 수집된다. DAQ Board에서는 5 MS/s의 Sampling Rate 값을 가지고 데이터를 수집하였다. 측정된 데이터는 (주)IDK의 AE Studio 프로그램을 사용하여 데이터를 추출하였다.

본 연구에서는 잡음을 고려하여 보다 정확한 데이터를 획득하기 위해 임계 전압은 40 dB, High Pass Filter와 Low Pass Filter는 각각 100, 1,000 kHz로 설정하였다. 신호의 해석은 크기 및 빈도수와 관계가 있는 활성도와 신호의 모양과 관련된 파형 분석에 의한 방법으로 분류된다[9]. 이에 따라 음향방출 활성도에 의한 AE 파라미터는 Hit 및 Count 수, Peak Amplitude(최대 진폭)와 Hit의 면적에 해당하는 Signal Energy로 선정하였다. 또한 파형 분석에 의한 방법은 Frequency(주파수), Rise Time, Duration 등과 같은 AE 파라미터가 발생하고, 이와 같은 파라미터들로 분석을 진행하였다. 만능재료시험기에 설치된 시편과 센서는 Fig. 3과 같다.

2.4 실험 조건

본 연구에서는 먼저, 마그네슘 합금 판재의 재료 거동에서 발생하는 변형 특성을 AE 센서를 사용하여 분석하였다. 또한 시편의 크기에 따른 AE 신호 발생 특성 차이점 분석을 위해 측정 길이 25, 50 mm와 폭 6, 12.5 mm의 조합으로 제작할 수 있는 4가지의 시편에 대한 AE 신호의 특성을 비교 분석하였다. 또한 인장 속도에 따라 AE 신호의 파라미터는 대체로 다른 경향을

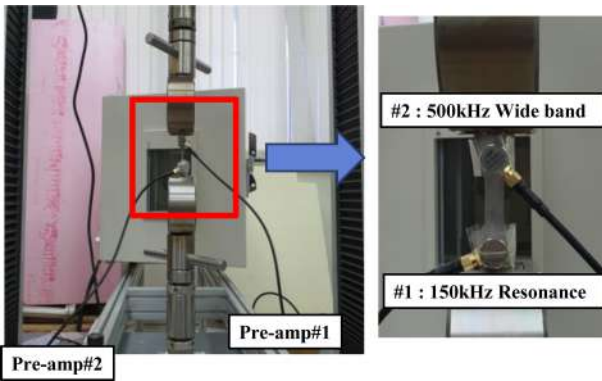


Fig. 3 Experimental set-up for the tensile test for measuring AE signals

Table 1 Experimental conditions

Case No.	Gage length [mm]	Gage width [mm]	Cross head speed [mm/min]
1	25	6	5
2	25	12.5	5
3	50	6	5
4	50	12.5	5
5	25	12.5	0.5
6	25	12.5	50

보인다고 알려져 있다[10]. 따라서 변형률 속도에 따른 단축 인장 시험 중의 음향 방출 신호의 특성을 분석하고자 크로스헤드의 속도를 0.5, 5, 50 mm/min로 결정하였다. 기준이 되는 속도로 5 mm/min로 정하였으며 비교적 느린 속도 0.5 mm/min(기존 속도의 1/10배), 빠른 속도 5 mm/min(기존 속도의 10배)를 추가하여 총 3가지의 속도에 따라 실험을 진행하였다. 따라서 위의 시편의 크기와 크로스 헤드 속도의 조합으로 총 6가지의 Case로 실험을 진행하였다. Table 1은 각각의 실험 조건에 관한 표이다.

3. 실험 결과

3.1 재료 거동에 따른 AE 발생 특성 분석

마그네슘 합금의 기계적인 거동 특성과 이에 따른 AE 센서 신호 결과 분석을 위해 인장 시험을 진행하였다. 마그네슘 합금 판재의 응력-변형률 선도에 따른 Hit 수(Number of Hit)는 Fig. 4와 같다.

Hit 수는 일정 시간 동안 발생하는 AE 신호의 개수이다. Fig. 4에서와 같이 탄성영역 및 항복점에서 가장 뚜렷한 Hit 수가 발생하며 소성영역에서는 Hit 수가 급격하게 줄어드는 경향을 보이고 있다. 이후의 극한 인장강도에서부터 파단점까지의 Hit 수는 거의 발생하지 않는 것으로 나타났다. 이는 탄성영역에서 항복점까지 전위의 이동에 의한 음향 방출 신호가 가장

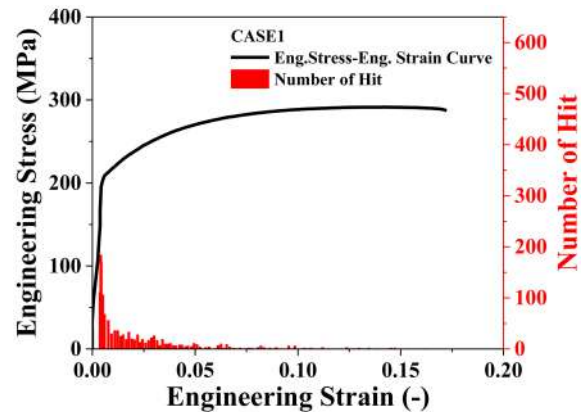


Fig. 4 Number of hit according to the stress-strain diagram of Case 1

많이 발생하기 때문에 위와 같은 현상이 발생하는 것으로 판단된다.

Fig. 5는 마그네슘 합금의 기계적 거동에 따른 AE 파라미터 중 Signal Energy, Peak Amplitude와 Duration을 분석한 결과이다. Signal Energy($1 eu = 10^{-14} V^2 sec$)는 한 개의 AE 신호를 시간으로 적분한 값이며, Peak Amplitude (V)는 한 개의 AE 신호에서의 최대 진폭을 의미한다. Duration은 한 개의 AE 신호가 지속되는 시간을 의미하며, 진폭이 임계전압으로 상승한 시점부터 다시 감소하는데 소요된 시간이다. Signal Energy의 값이 크면 AE 신호가 높은 에너지를 갖는 것을 의미한다. Duration이 길수록 AE 신호가 오래 지속되는 것을 의미한다.

Signal Energy와 Peak Amplitude 같은 경우 값의 차이가 크므로 Log Scale로 그래프를 표현하였다. 또한, 변화 양상을 확인하기 위해 각각의 AE 파라미터 데이터를 이동평균으로 계산하여 빨간 실선으로 나타내었다. 그 결과 모든 파라미터가 탄성 변형 구간에서 항복점까지 가장 뚜렷한 변화를 보였다. 소성 변형 구간에서는 반대되는 변화 양상을 보이다가 파단점에서 가장 높은 값이 발생했다. 파단점에서는 파단과 동시에 AE 신호가 발생하였다. 이 지점에서 가장 높은 변화 양상과 밀집도를 보였다. 이 결과로부터, 재료의 항복과 파단이 발생하는 시점에서 높은 AE 에너지가 발생하고, 가장 높은 AE 신호가 파단 시점에서 발생하는 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 마그네슘 합금의 기계적 거동에 따른 AE 파라미터 중 Frequency Centroid를 분석한 결과이다. Frequency Centroid는 AE 신호 진폭과 주파수(Frequency)를 곱한 값의 합을 진폭의 합으로 나눈 값이다. 앞서 언급한 두 파라미터와 같이 항복점에서 가장 뚜렷한 변화 양상과 밀집도를 보였다. 그러나 두 파라미터는 항복점에서 높은 값을 가지지만, Frequency Centroid 같은 경우는 낮은 값이 발생하였다. 다음과 같은 AE 파라미터의 특징을 활용하여 항복점을 예측할 수 있을 것이라 판단된다. 이는 항복점을 넘어가면 소성변형이 발생하여 본래의 역할을 수행하기 어려운 재료를 실시간으로 진단하여 소성변형을 사전에 막을 수 있다.

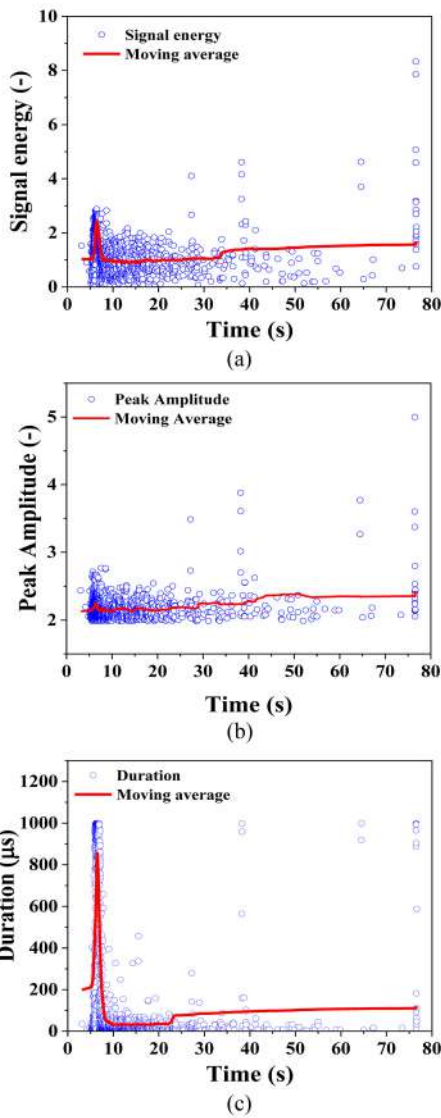


Fig. 5 AE parameters according to time of Case 1: (a) Signal Energy, (b) Peak Amplitude, and (c) Duration

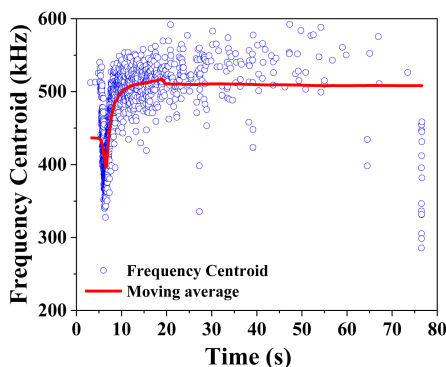


Fig. 6 Frequency centroid according to time of Case 1

가장 큰 변화 양상을 보인 항복점과 파단점의 주파수 분석을 하기 위해 두 지점의 FFT (Fast Fourier Transform) 이동평균을

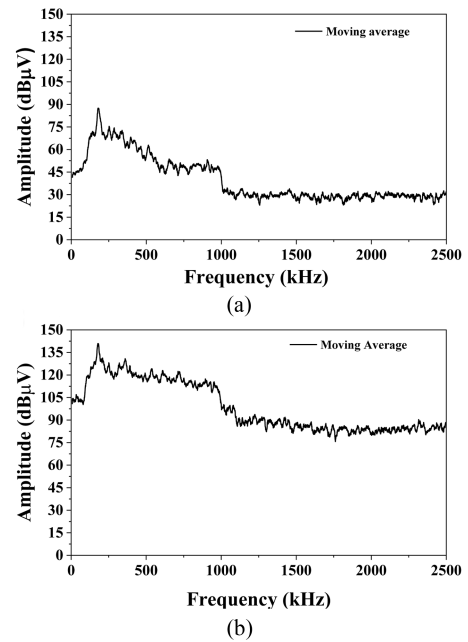


Fig. 7 Fast fourier transform (FFT) spectrum of the AE signal of Case 1: (a) At the yield point, and (b) At the fracture point

Fig. 7에 나타냈다. 항복점의 경우 200 kHz에서 90 dBμV로 최대값을 보이고 이후 고주파로 갈수록 점점 감소하는 경향을 보인다. 파단점에서도 200 kHz에서 최대값을 보이는데, 그 값이 140 dBμV로 상대적으로 큰 값을 가진다. 또한, 주파수가 높은 영역에서 1,000 kHz까지 120 dBμV 값이 발생했다. 파단에서의 AE 신호는 파단과 동시에 발생한다. 이때, 재료는 2개로 나뉘어진 상태이다. 파단 시점에는 AE 신호가 높은 주파수 영역까지 신호가 분포하는 것을 알 수 있다.

3.2 시편 크기에 따른 AE 신호 발생 특성 분석

AE 센서는 다양한 인자에 영향을 받기 때문에 게이지의 크기에 따라 결과 양상이 달라질 수 있다. 이에 따라 게이지의 크기에 따른 AE 신호 결과를 분석하기 위해 4가지의 시편을 이용한 인장 시험을 진행했다. 시편의 크기 변화(폭 및 Gage Length)에 의한 AE 신호 발생 특성 결과는 Fig. 8과 같다. 게이지 길이가 증가하면 Hit 수는 약 2배 증가하는 경향을 보였다. 또한 게이지 폭이 증가하면 약 3배의 Hit 수가 증가하였다. 이는 시편의 크기가 증가함에 따라 변형 면적이 넓어져 전위의 이동이 더 많이 일어난 결과라고 판단된다.

Fig. 9는 시편의 크기에 따라 차이를 보이는 AE 신호 발생 특성 중 Peak Frequency를 분석한 결과이다. Case별 비교를 용이하게 하기 위해 x축은 각각의 Case의 시간에 따른 정규화를 진행하였다. 또한, y 축 같은 경우는 4 가지의 Case 중 가장 큰 파라미터값을 나타내는 Case 4를 기준으로 정규화를 진행하였다. 각각 정규화를 거친 데이터들을 이동평균으로 나타내었다. 그 결과, 게이지 길이와 폭이 증가할수록 높은 Peak Frequency가 발생하였고, 모든 Case에서 재료 거동에 따른 변화 양상은

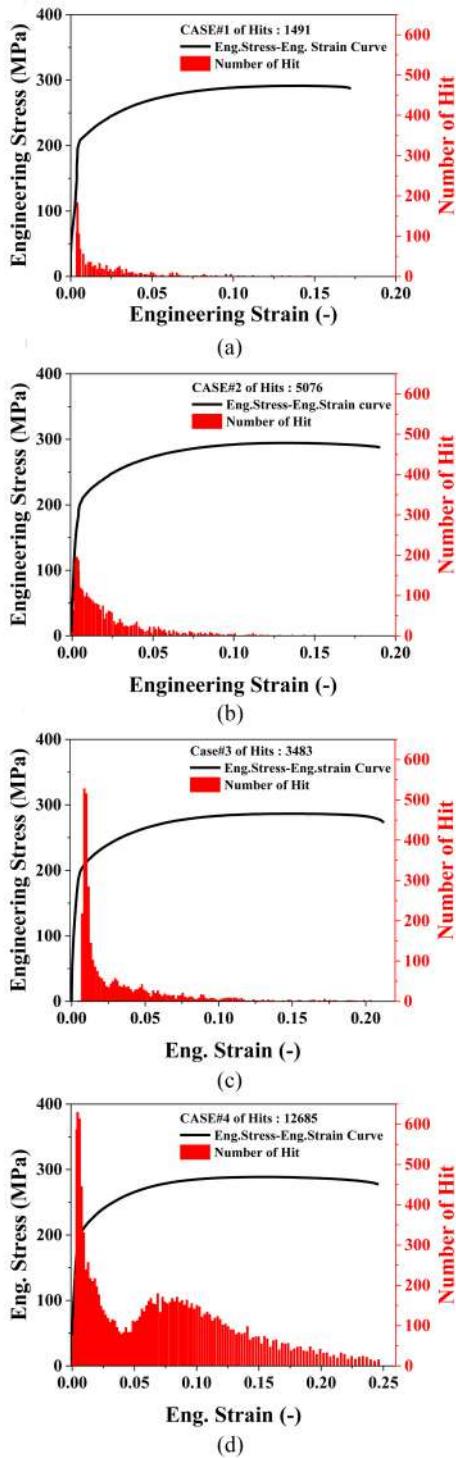


Fig. 8 Number of hit distribution according to the material size: (a) Case 1, (b) Case 2, (c) Case 3, and (d) Case 4

유사하였다. 이후 시편 크기에 대해 비교한 결과는 모두 시간에 대해 정규화한 데이터를 기준으로 비교하였다.

Fig. 10은 AE 신호 발생 특성 중 Signal Energy, Duration, Peak Amplitude를 분석한 결과이다. 3가지 파라미터 모두 시편 크기에 따른 차이는 보이지 않았다. 또한, 마그네슘 합금의 기계적

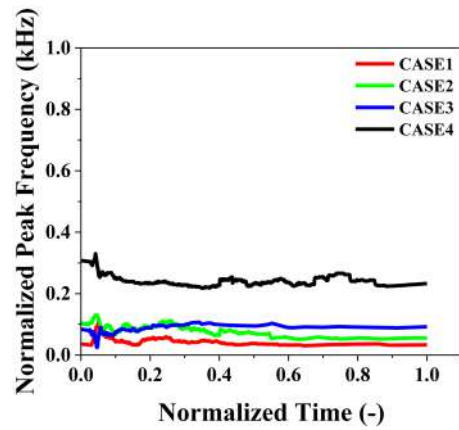


Fig. 9 Peak frequency distribution according to the material size

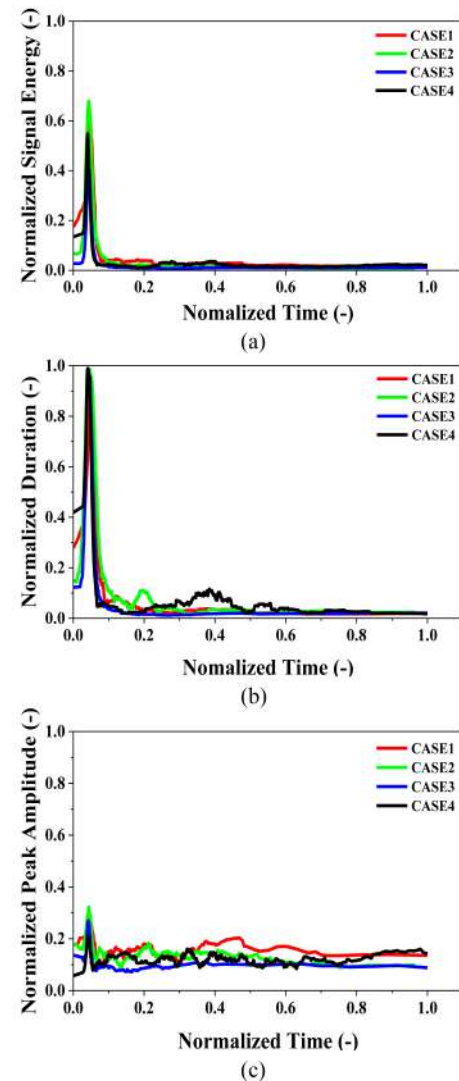


Fig. 10 AE parameter according to the material size: (a) Signal energy, (b) Duration, and (c) Peak amplitude

거동에 따라 유사한 변화 양상을 보였다. 3가지 파라미터 모두 탄성영역 및 항복점에서 가장 큰 AE 파라미터가 발생하며,

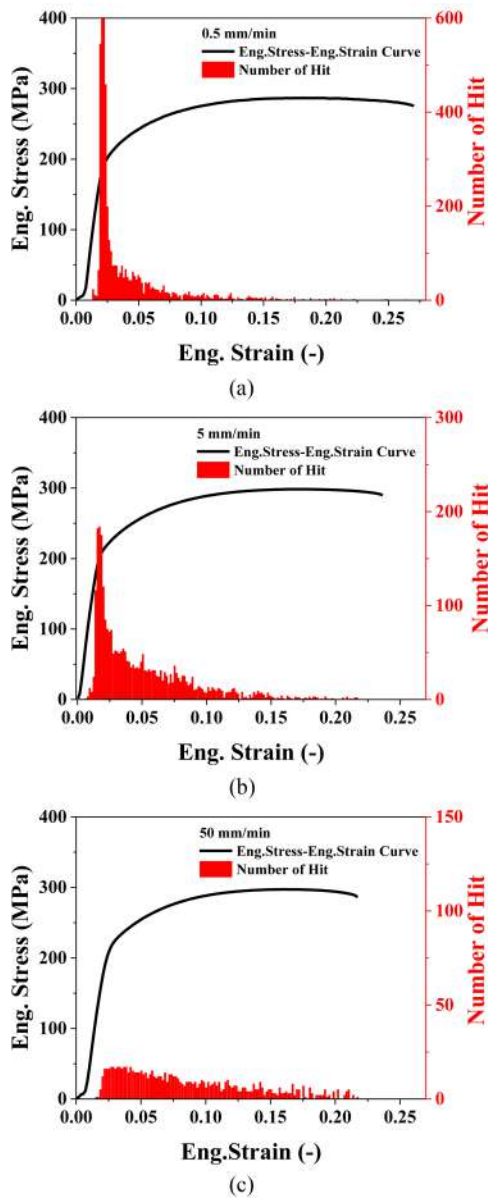


Fig. 11 Number of hit according to the tensile speed of (a) 0.5 mm/min, (b) 5 mm/min, and (c) 50 mm/min

소성영역에서는 AE 파라미터가 급격하게 줄어드는 경향을 보였다. 이후의 극한 인장강도에서부터 파단점까지의 AE 파라미터는 거의 발생하지 않는 것으로 나타났다. 위 결과를 통해 시편의 크기는 대부분의 AE 파라미터 결과에 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

3.3 인장 속도별 AE 신호 발생 특성 분석

인장 시험은 인장 속도가 빨라지면 재료의 물성이 달라지기 때문에 AE 신호는 인장 속도에 따라 결과 양상이 달라질 수 있다. 이에 인장 속도에 따른 AE 센서 신호 결과를 분석하기 위해 Case 1 시편을 이용하여 3가지(0.5, 5, 50 mm/min)의 속도로 인장 시험을 진행하였다. 인장 속도에 의한 AE 신호 발생 특성은

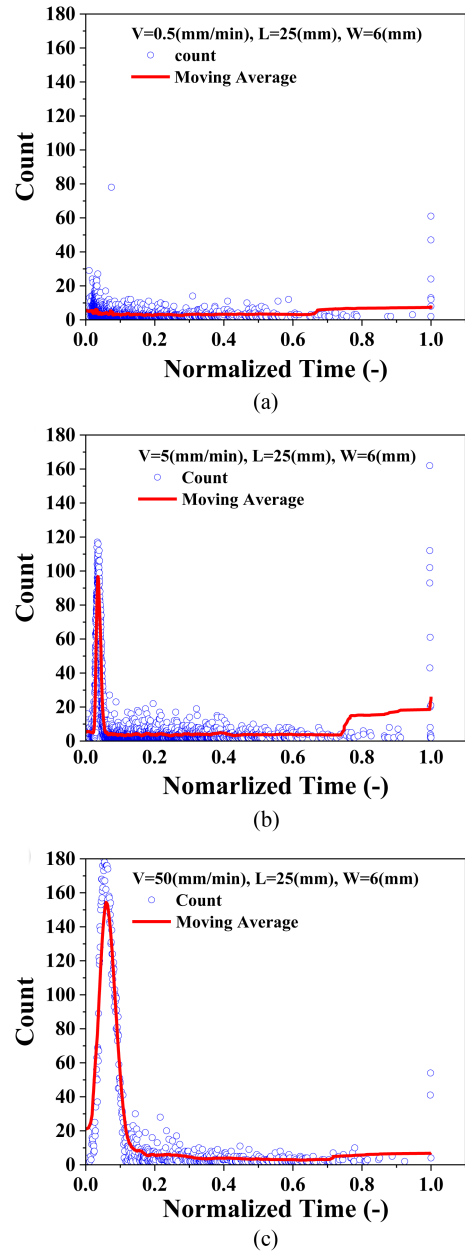


Fig. 12 Count according to the tensile speed of (a) 0.5 mm/min, (b) 5 mm/min, and (c) 50 mm/min

Fig. 11과 같다. Fig. 11(a)의 총 Hit 수는 5,181개이며 항복점에서 가장 많은 Hit 수가 발생했다. 이후 소성영역에서 감소하는 경향을 보였다. Fig. 11(b)의 경우, 동일하게 항복점에서 가장 많은 Hit 수가 발생했으며 이후 소성영역에서 감소하는 경향을 보였다. 하지만 총 Hit 수는 2,843개로 Fig. 11(a)의 경우보다 더 적은 Hit 수가 검출되었다. Fig. 11(c)의 경우, 항복점에서 가장 많은 Hit 수가 발생했지만 그 분포도가 다른 2가지 경우보다 더 넓게 나타났다. 또한 총 Hit 수는 921개로 5 mm/min보다도 더 적게 검출됐다. Hit 수는 인장 속도가 빠를수록 감소하는 것을 알 수 있다.

Count는 한 개의 AE 신호에서 임계 전압을 넘는 파형의 숫자이다. Fig. 12는 인장 속도에 따른 AE 신호 발생 특성 중

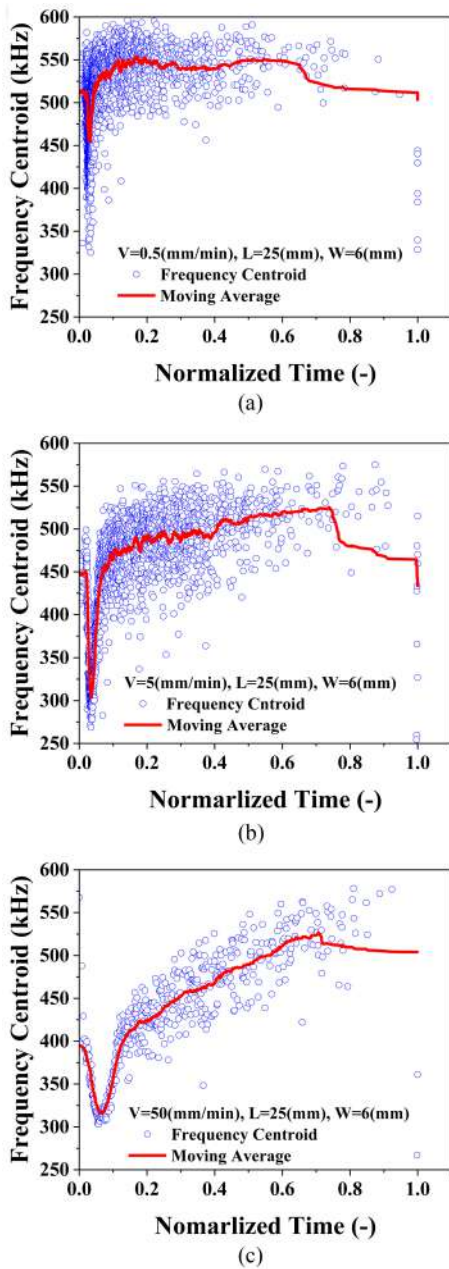


Fig. 13 Frequency centroid according to the tensile speed of (a) 0.5 mm/min, (b) 5 mm/min, and (c) 50 mm/min

Count를 분석한 결과이다. 3가지 속도 모두 마그네슘 합금의 기계적 거동에 따른 경향은 유사하다. 탄성구간에서 항복점까지 가장 뚜렷한 변화가 나타났다. 소성구간에서는 감소하는 경향을 보이다가 파단점에서 가장 높은 Count가 발생했다. 차이점으로는 인장 속도가 증가할수록 신호가 집중되어 발생한다. Fig. 12(c)에서와 같이 발생하는 Hit 수는 감소하지만, 1개의 AE 신호 내의 Count가 증가한다.

Fig. 13은 인장 속도에 따른 AE 신호 발생 특성 중 Frequency Centroid를 분석한 결과이다. 3가지 속도 모두 마그네슘 합금의 기계적 거동에 따른 경향은 유사하다. 탄성구간에서

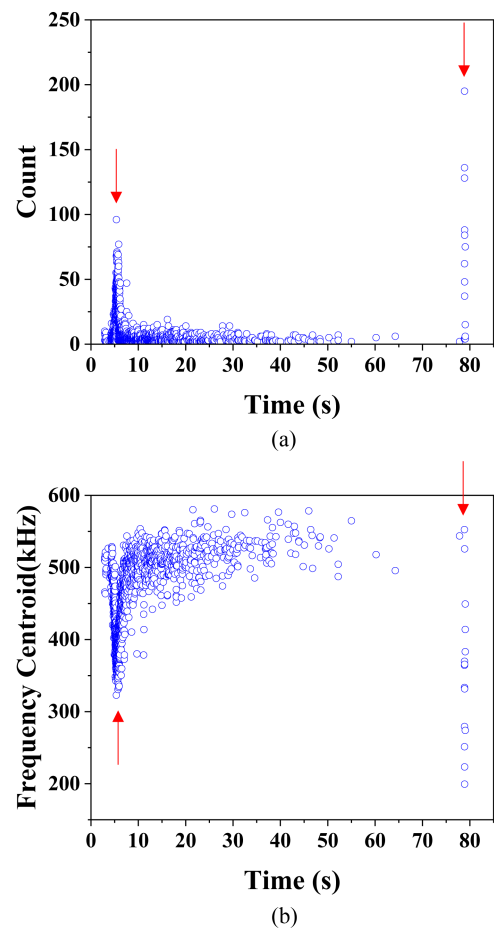


Fig. 14 Frequency centroid of any AE signal of (a) Count, and (b) Frequency centroid

항복점까지 가장 뚜렷한 변화가 나타났지만 Count와 반대되는 경향을 보였다. 항복점에서 최솟값이 발생하고 소성구간에서 증가하는 경향을 보인다. 속도가 빠를수록 탄성구간에서의 Frequency Centroid 값은 더 낮은 값이 발생하는 것을 알 수 있다.

3.4 AE 신호를 활용한 항복점 예측

실제 현장에서 AE 신호가 재료의 변형 거동을 확인하는 경우, 재료의 변형에 영향을 미치는 외부 요인이 달라질 수 있다. 따라서 다양한 외부의 요인과는 무관하게 재료의 변형을 실시간으로 감지를 할 수 있는 AE 신호 분석 방법이 요구된다. 본 연구에서는, 임의의 시편 크기와 인장 속도로 진행된 인장시험에서 발생한 AE 신호를 분석하여 항복 및 파단점 예측을 진행하였다. 이를 위해 시편 크기 및 인장 속도에 관계없이 항복점에서 동일한 특성을 보여줬던 Count 및 Frequency Centroid로 분석을 진행하였다. 그 결과는 Fig. 14와 같다.

5.36 s에서 높은 Count와 낮은 Frequency Centroid가 발생하였고, 이후 각 파라미터는 반대되는 경향을 보였다. 78.9 s에서는 가장 높은 Count와 낮은 Frequency Centroid가 발생하였다. 따라서 5.36 s는 해당 시편의 항복, 78.9 s는 파단이 발생한

것이라고 예측하였다. 실제 항복과 파단점을 확인하기 위해 탄성구간에서 0.2% Off-Set하여 계산한 결과 5.38 s에서 항복, 79.5 s에서 파단이 발생하였다. 이는 AE 신호로 예측한 시간과 유사했다. 이처럼 항복 및 파단점에서 뚜렷한 변화를 보이는 AE 파라미터를 이용하여 재료의 크기와 인장 속도에 관계없이 예측이 가능한 것을 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 마그네슘 인장실험에서 발생하는 AE 발생 특성을 분석하는 연구를 수행하였다. 기계적 거동, 시편의 형상과 인장 속도별로 AE 파라미터 비교 분석하였다. 얻어진 결론은 다음과 같다.

재료 거동에 따른 AE 발생 특성 분석한 결과, 항복 시에 Hit, Signal Energy, Duration 및 Frequency Centroid가 피크점을 보였다. 소성변형이 진행됨에 따라 점차 반대되는 경향을 보였지만 파단 시에 Signal Energy와 Duration 같은 경우 가장 높은 값을 보였다.

시편 크기별 AE 신호 발생 특성은 게이지 폭과 길이가 증가할수록 Hit와 Peak Frequency는 게이지 길이가 증가하면 약 2배, 폭이 증가하면 3배가 증가하는 경향을 보였다. Signal Energy, Duration과 Peak Amplitude 같은 경우는 시편 크기에 따른 차이 없이 유사한 변화양상을 보였다. 이는 대부분의 AE 파라미터들은 재료의 크기에 영향을 받지 않는 것이라고 판단된다.

인장 속도별 AE 발생 특성은 속도가 빨라지면 Hit는 전체적으로, Frequency Centroid 같은 경우는 탄성영역에서의 값이 감소하는 경향을 보였다. 이와 반대로 count는 인장 속도가 빨라지면 증가하는 경향을 보였다. 하지만 인장 속도가 빨라져도 재료 거동에 따라 유사한 경향을 보임을 확인하였다. 이는 인장 속도를 증가시키더라도 항복 및 파단시점의 검출이 가능하다는 것을 의미한다.

본 연구에서는 AE 센서를 이용한 항복 및 파단 시점의 예측이 가능함을 확인하였다. 이에 따라 구조물의 항복점 예측이 가능하며, 성형 공정 시 소재의 파단 예측이 가능하다고 판단된다. 또한 철 재료인 스테인리스나 합금재료인 알루미늄 합금 등에서도 본 결과와 비슷한 경향을 보인다고 알려져 있다. 따라서 추가적으로 튜브, 파이프 등의 구조용 소재와 판재 성형 공정에서 발생하는 AE 신호에 대한 연구가 진행될 필요가 있다고 생각된다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행하였습니다.

REFERENCES

1. Park, J., Kuwabara, T., You, B., Kim, Y., (2005), Plastic deformation characteristic of AZ31 magnesium alloy sheet, Transactions of Materials Processing, 14(6), 520-526.
2. Kim, H. Y., Ahn, J. H., Kim, S. R., (2005), Development of acoustic emission monitoring system for fine machining-application to cutting state monitoring in a fine fixed-abrasive machining, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 22(6), 109-117.
3. Jeong, S.-M., Kim, J., Jeon, K. H., Hong, S., Oh, J.-S., (2020), A new method of health monitoring for press processing using AE sensor, Journal of the Korea Convergence Society, 11(11), 249-255.
4. Kwon, O. Y., (1995), A study and application of acoustic emission, Journal of the Korea Institute of Electronics Engineers, 22(5), 72-82. <https://scienceon.kisti.re.kr/commons/util/originalView.do?cn=JAKO199511920667477&oCn=JAKO199511920667477&dbt=JAKO&journal=NJOU00290673>
5. Nam, K., Lee, S., (2003), AE characteristic under tensile of carbon steel for high-pressure pipe, Journal of the Korean Institute of Gas, 7(2), 48-53.
6. Kim, J.-T., Woo, S.-C., Sakong, J., Kim, J.-Y., Kim, T.-W., (2013), Analysis of compressive deformation behaviors of aluminum alloy using a split hopkinson pressure bar test with an acoustic emission technique, Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, 37(7), 891-897.
7. Yun, Y. S., Kwak, J. H., Kwon, O. H., (2006), The evaluation of interlaminar fracture toughness and AE characteristics in a plain woven CFRP composite for 3 point bending test, Proceedings of the Spring Conference on The Korean Society for Power System Engineering, 182-186.
8. Joo, Y., Im, S., Um, H., Kim, J., (2004), Generation characteristics of acoustic emission during tensile test of SA508 and SS304 materials, Proceedings of the Spring Conference on the Korean Nuclear Society. https://www.kns.org/files/pre_paper/19/472%EC%A3%BC%EC%98%81%EC%83%81.pdf
9. Lee, J.-O., Ji, H.-S., Ju, N.-H., (2009), A principle and application of acoustic emission, Machine Element, 21(2), 156-164.
10. Woo, C.-K., Rhee, Z.-K., (2008), Case study on the load-deflection and acoustic emission analysis of SM45C coupons with a circular hole defect under tensile loading, Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers, 17(1), 50-58.

**Yong Ho Song**

Undergraduate student in the School of Mechanical System and Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology. His research interest in material properties and plastic processing.

E-mail: songyh9988@seoultech.ac.kr

**So Chan An**

Undergraduate student in the School of Mechanical System and Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology. His research interest in machine fault analysis and plastic processing.

E-mail: aammss7@seoultech.ac.kr

**Jae Hyeong Yu**

Received M.E degree in Department of Mechanical Design and Manufacturing Engineering in Seoul National University of Science and Technology. His research interests include simulation and development of the metal forming process and lightweight materials.

E-mail: jhyu9190@seoultech.ac.kr

**Wan-Jin Chung**

Professor in the Department of Mechanical System and Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology. His research interests include simulation (FEM) and sheet metal forming.

E-mail: wjchung@seoultech.ac.kr

**Chang-Whan Lee**

Assistant Professor in the Department of Mechanical System and Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology. His research interests include simulation and development of the metal forming process and lightweight materials.

E-mail: cwlee@seoultech.ac.kr

자동차용 판재의 Subtle Feature의 성형 조건에 따른 곡률 반경 예측 모델에 대한 연구

A Study on the Prediction Model of the Radius of Curvature of the Subtle Feature of the Automotive Parts for Different Forming Conditions

유제형¹, 정규석¹, 정연찬^{1,2}, 이창환^{1,2,#}
Jae-Hyeong Yu¹, Kyu-Seok Jung¹, Yunchan Chung^{1,2}, and Chang-Whan Lee^{1,2,#}

¹ 서울과학기술대학교 기계정보공학과 (Department of Mechanical Information Engineering, Seoul National University of Science and Technology)
² 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과 (Department of Mechanical Design and Engineering, Seoul National University of Science and Technology)
Corresponding Author / E-mail: cwlee@seoultech.ac.kr, TEL: +82-2-970-6371
ORCID: 0000-0002-7848-280X

KEYWORDS: Automotive panels (자동차용 부품), Stamping (스탬핑), Prediction model (예측 모델), Subtle feature (특징 형상)

The subtle feature is one of the characteristic lines and represents the most noticeable line in the automotive panel. In this study, we proposed a method to predict the radius of curvature of products according to the material, its thickness, its punch angle, and its punch radius. The radius of curvature was divided into three regions, namely, the non-linear, transition, and linear regions. In the non-linear region, the prediction model for the radius of curvature with different forming conditions was derived using the finite element analysis. In the linear region, the radius of curvature was assumed to be the sum of the punch radius and the thickness of the material. In the transition region, a model connecting two regions (Non-linear and linear region) was developed based on the continuity condition. The prediction model presented a very small RMSE with the value of 0.314 mm. Using the prediction model, the radius of curvature with various forming variables could be predicted and the required radius of punch, to obtain a certain value of the radius of curvature, could be precisely predicted.

Manuscript received: August 10, 2022 / Revised: October 4, 2022 / Accepted: October 7, 2022

NOMENCLATURE

κ	=	Radius of Curvature
P_R	=	Punch Radius
θ	=	Angle of the Punch
t	=	Thickness of the Material

1. 서론

최근 자동차 외형 판재에서 형상에 대한 특징을 표현할 수 있는 특징선(Characteristic Line)의 설계의 중요성이 증대되고

있다[1]. 이와 같은 특징선 중 Subtle Feature Line은 제품의 각도가 155° 이상이며, 외측 곡률 반경이 48 mm 이하의 특징선을 의미한다. Subtle Feature Line의 개략도는 Fig. 1과 같다. 자동차용 외판재에서 이와 같은 특징선은 자동차의 외형을 평가하는데 주요 요소 중 하나이다[2].

이와 같은 최소 성형 가능 곡률 반경은 금형의 설계에 있어서 중요한 부분이다. 보통 낮은 곡률 반경의 제품을 얻기 위해 펀치의 반경을 0 mm에 가깝도록 날카로운 형상으로 가공하는 경우가 많다[3,4]. Lee et al. [1]은 비드를 사용하여 인장과 굽힘이 동시에 발생할 수 있는 Subtle Feature Line 성형 공정을 제안하였다. 해당 연구에서 펀치 반경이 0 mm로 수렴하여도 제품 곡률 반경은 일정 값으로 수렴하였고, 이를 최소 성형 가능 곡률 반경으로 정의하였다. 이 결과는 자동차용 외판재의 성형

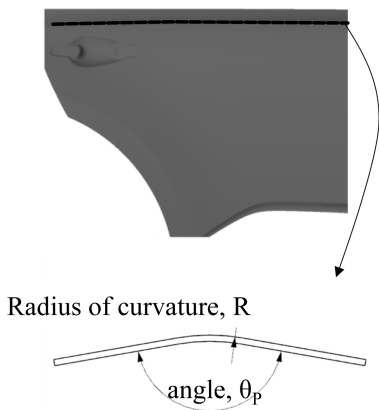


Fig. 1 Geometric characteristics of the subtle feature line

금형을 설계하는 과정에서 펀치 및 다이를 일정 곡률 반경 이하로 설계 및 가공이 불필요하다는 것을 의미한다. 또한 펀치를 매우 날카롭게 제작하는 경우, 성형 공정 중 응력 집중으로 재료의 마모 및 파손이 발생할 수 있다. 따라서 금형 설계 과정에서 제작 가능한 제품 곡률 반경과 해당하는 펀치 반경을 정확히 예측하여 설계하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 재료 종류, 두께, 펀치 각도, 펀치 반경에 따른 제품 외측에서의 곡률 반경을 예측하는 방법을 제안하고자 한다. 일정 펀치 반경 이하에서는 해석 결과를 사용하여 다항식으로 반응 표면 모델(Response Surface Model) [5,6]을 구성하고 제품 곡률 반경을 예측하였다. 특정 펀치 반경 이상에서는 일반적인 재료의 변형 특성을 고려하여 제품 곡률 반경이 재료 두께와 펀치 곡률 반경의 합이라는 가정으로 결과를 예측하였다. 성형 후 제품의 곡률 반경이 최소 성형 가능 곡률 반경으로 수렴하는 영역과 제품 곡률 반경이 펀치 반경과 비례하는 영역 사이에서는 3차식을 구성하여, 모든 영역에서 해석 모델의 결과가 연속성을 유지할 수 있도록 하였다.

2. Subtle Feature Line의 성형 공정 및 해석 모델

본 연구에서는 Subtle Feature Line의 성형 공정을 단순화하였다. 제품을 성형하기 위한 펀치의 제작은 CNC 밀링 절삭 가공 후 표면조도계(Surface Profiler)로 가공된 펀치의 곡률반경을 측정하여 정확도를 확인하였다. 이후 일반적인 만능 성형 시험기(Universal Tensile Machine)에서 실험 가능하도록 비드를 먼저 성형하고, 제품의 최종 형상을 성형하였다. 이와 같이 비드를 먼저 성형한 후 비드 형상을 통해 재료를 고정하면 제품의 중심부에서 인장과 굽힘 성형이 동시에 발생한다. 성형된 소재의 외측 반경을 표면조도계를 통해 표면에 대한 데이터를 얻은 후 Lee et al. [7]에서 제안한 알고리즘을 이용하여 제품의 각도와 곡률 외측 반경을 측정하였다.

위 알고리즘은 다음과 같다. 첫 번째로 입력된 데이터를 총

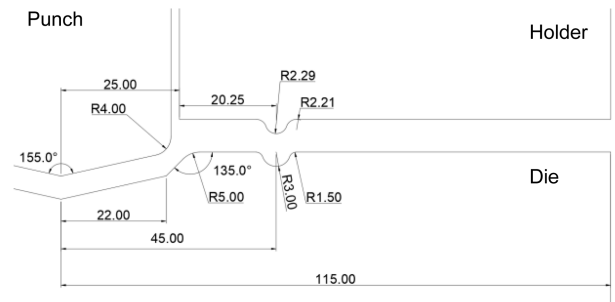


Fig. 2 Geometry of the punch, holder and die

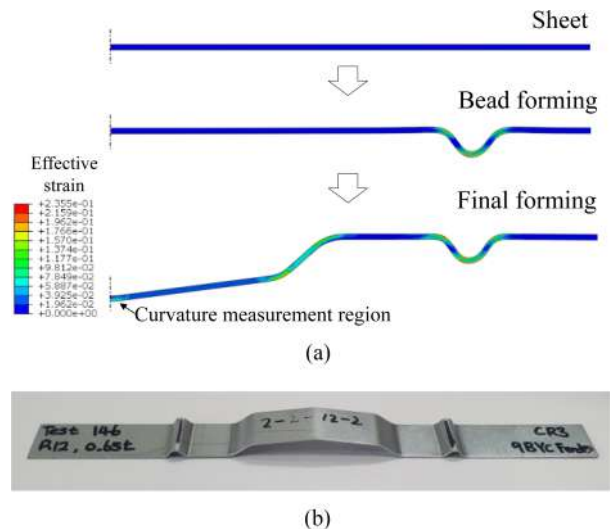


Fig. 3 (a) Simulation results and (b) Experimental result of the subtle feature line with the punch angle of 165°, punch radius of 12 mm and CR3 material with the thickness of 0.65 mm

3개의 그룹으로 구분한다. 두 번째로 구분된 그룹 중 중간 그룹을 원으로 근사시킨 후 호의 양쪽에 있는 두 개의 접선이 추정되는 방법이다.

해석에서 펀치 및 다이의 치수는 실험에서와 동일하다. 펀치, 다이, 홀더 형상은 Fig. 2와 같다. 홀더는 스프링을 통해 재료와 먼저 접촉하며 이후 홀더에 스프링에 의해 압축력이 가해지고 펀치가 소재와 접촉한다. 이때, 소재는 비드 형상으로 고정되어 있으며 펀치가 하강하여 중심부의 인장과 굽힘을 발생시킨다.

Fig. 3은 펀치 각도 165°, 펀치 반경 12 mm, 두께 0.65 mm CR3 재료의 해석 결과 및 실험 결과이다. 성형 실험 및 해석 결과에서 중심부의 굽힘 각도와 곡률 반경(Radius of Curvature)을 측정하였다.

실험은 펀치각도 155, 165, 175°에 대해 진행하였다. 또한 재료는 자동차용 외판재 재료로 사용하고 있는 CR2, CR3, CR4, 180B2, 210B2에 대해 진행하였으며, 해당 재료의 유동 응력 선도는 Fig. 4와 같다. 재료 두께는 0.6, 0.65, 0.7 mm를 사용하였다.

해석은 상용 프로그램인 ABAQUS 6.14v의 Static/Implicit 코드를 사용하였다. 소재는 평면 변형률 조건을 사용하였으며

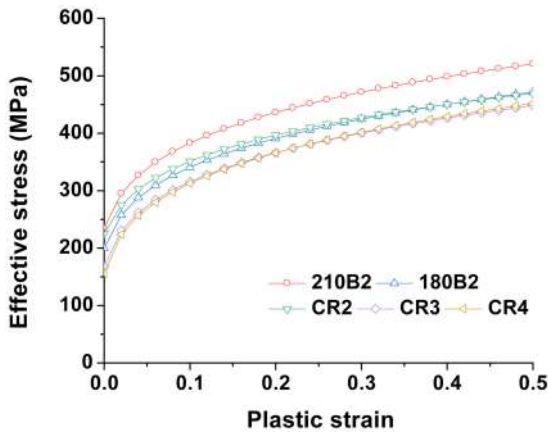


Fig. 4 Flow stress curves of 210B2, 180B2, CR2, CR3, CR4

요소는 CPE4R을 사용하였다. 펀치의 경우 강체 조건으로 가정하여 Analytical Rigid를 사용하였다. 모든 재료의 탄성 계수는 207 GPa, 밀도는 7,650 kg/m³, 푸아송 비는 0.33, 등방성 경화 모델로 해석을 진행하였다.

3. 제품 곡률 반경과 펀치 곡률 반경의 관계 및 예측 방법

3.1 실험 및 시뮬레이션 결과 비교

두께 0.6 mm의 210B2 재료의 펀치각도 155°에서 펀치 반경과 제품의 곡률 반경에 대한 해석 결과, 펀치 반경이 0 mm로 감소하여도 성형 가능한 최소 제품 곡률 반경은 4.37 mm로 수렴하였다. 일반적으로 펀치 곡률 반경이 감소함에 따라 제품 곡률 반경이 감소한다. 하지만 실험 및 해석에서 확인 가능하듯이 펀치 반경이 0 mm로 감소하여도 성형 가능한 제품의 곡률 반경 값이 발생한다. 해석과 실험에서 모두 특정 곡률 반경 이하로 성형이 불가능하였다. 이와 같이 성형 가능한 최소 곡률 반경을 최소 성형 가능 곡률 반경으로 정의하였다.

두께 0.7 mm의 210B2 재료를 펀치 각도 155°로 성형할 시 펀치 반경에 따른 실험 결과와 해석 결과를 Fig. 5에 비교하였다. 두께 0.7 mm의 210B2 재료를 펀치 반경 0 mm, 펀치각도 155°로 성형할 시 제품의 곡률 반경 실험 및 해석 결과는 각각 4.28, 5.18 mm이다. 실험 및 해석에서 얻을 수 있는 최소의 제품 곡률 반경을 최소 성형 가능 곡률 반경으로 정의하였다. 또한 같은 155°에서 펀치 곡률 반경에 따른 실험 결과와 해석 결과, 평균 제곱근 오차(Root Mean Square Error, RMSE)는 0.466 mm의 값을 보였다. 게다가 같은 두께에서 펀치각도에 따른 해석 결과와 실험 결과의 비교에서도 RMSE는 2 이하의 값을 확인하였다. 이를 통해 해석 결과가 실험 결과를 정확히 예측할 수 있음을 확인할 수 있었다[8].

3.2 펀치 반경과 제품 곡률 반경의 관계의 예측 모델

본 연구에서는 Fig. 5의 펀치 반경과 제품 곡률 반경의 관계에서

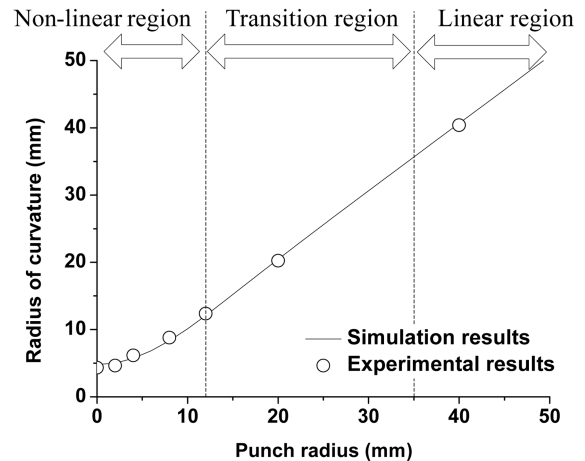


Fig. 5 The relationship between the punch radius and the radius of curvature (210B2, 0.7 t, punch angle of 155°)

펀치 반경과 성형 후 발생하는 제품 곡률 반경의 관계를 펀치 반경과 제품 곡률 반경이 비례하는 영역(Linear Region), 비선형 영역(Non-Linear Region), 중간 영역(Transition Region)의 3개 영역으로 구분하였다.

한편, 본 연구에서는 CR2, CR3, CR4, 180B2, 210B2의 총 5가지 재료를 사용하였다. 5개의 재료에 대해 재료는 비선형 모델의 변수로 사용하지 않았다. 재료의 특징은 탄성계수, 항복 강도, 가공경화지수 등으로 표현 가능하지만 이 모든 특성을 한 개의 비선형 영역의 모델 식에 포함하기에는 해석 결과가 부족하므로, 재료마다 다른 다항식 모델을 사용하였다. 따라서 비선형 영역의 입력 변수는 재료 두께(t), 펀치 각도(θ), 펀치 반경(P_R)만으로 다항식 모델을 구성하였다.

(1) 비선형 영역에서의 예측 모델

먼저 펀치 반경이 작은 경우, 펀치 반경이 감소함에 따라 제품 곡률 반경은 일정 값으로 수렴하였다. 이 영역에서는 제품 곡률 반경을 3차식의 관계로 구성하였다. 또한 재료 종류, 각도, 두께에 대한 영향은 2차식으로 모사하여 3차식과 2차식 조합의 다항식을 구하였다. 재료 종류, 두께, 각도에 대한 식은 2차식을 사용하여도 충분히 모사할 수 있어 이를 2차식으로 모사하였다. 하지만 펀치 반경에 대한 관계를 2차식으로 모사하는 경우, 펀치 반경이 0에 가까운 경우에 곡률 반경의 변화를 모사하기 어렵다. 따라서, 펀치 반경은 3차식을 사용하였고, 재료 두께와 펀치 각도는 2차식을 사용하였다.

제품 곡률 반경 예측 식은 다음과 같으며, 각각의 비선형 모델은 11개의 변수를 갖는다. 각 경우의 해석 결과는 펀치 곡률 반경(P_R) 0 mm에서 20 mm까지, 두께 0.6, 0.65, 0.7 mm, 펀치 각도 155, 165, 170, 175°의 값을 사용하였다. 해석 결과는 기존 연구 논문의 결과[7]에 정리되어 있다. 다항식을 활용한 반응 표면 모델 식은 식(1)과 같다. 해당 다항식은 펀치 반경, 펀치 각도, 재료 두께에 대한 식이다. 여기서, 펀치 반경(PR)은 3차식을

Table 1 Coefficients of response surface model for each material

	180B2	210B2	CR2	CR3	CR4
a	-0.001	-0.002	-0.002	-0.002	-0.001
b	0.625	11.875	82.500	-88.500	49.000
c	0.033	0.034	0.036	0.032	0.034
d	0.067	0.073	0.071	0.077	0.063
e	0.854	1.196	0.508	0.904	1.150
f	-0.382	-0.722	-0.694	-0.468	-0.395
g	-0.022	-0.024	-0.025	-0.021	-0.021
h	-129.067	-193.874	-177.631	-21.354	-239.114
i	-10.961	-11.339	-11.479	-10.673	-11.499
j	3.641	4.158	4.315	3.548	3.578
k	897.002	945.044	951.664	840.514	976.649

사용하였다. 이는 2차식으로는 펀치 반경 0인 영역을 정확하게 묘사하기 어렵기 때문이다[7]. MATLAB 2020R을 사용하여 계수를 찾았다. 계수는 Table 1과 같다.

$$\kappa = aP_R^3 + bt^2 + c\theta + dP_R^2 + e\theta \cdot t + fP_R \cdot t + gP_R \cdot \theta + ht + i\theta + jP_R + k \quad (1)$$

비선형 영역의 범위는 재료 두께에 대해 0.6-0.7mm, 펀치 각도 155-175°이다. 펀치 반경은 0mm 에서 20mm의 값을 사용하여 RSM 모델을 제작하였다. 각 재료에 따른 식(1)의 변수는 Table 1과 같다.

(2) 선형 영역에서의 예측 모델

일반적인 굽힘 공정에서 제품 외측의 곡률 반경은 제품의 두께와 펀치 곡률 반경의 합으로 표현된다. 본 연구에서는 펀치 반경이 35 mm 이상인 경우, 펀치 곡률 반경과 제품 곡률 반경은 비례 관계를 보인다고 가정하였다. 보통 굽힘 공정에서 재료가 펀치와 접촉한 이후 펀치의 표면을 따라 변형하는 경우, 재료의 내측이 펀치의 외측 반경과 동일하게 성형된다. 이 경우, 펀치 반경과 제품 곡률 반경은 서로 비례한다. 따라서 재료는 펀치 형상에 적합하도록 변형하며, 재료의 두께 감소를 제외하면 다른 영향을 크게 받지 않는다.

본 연구에서는 선형 관계가 시작되는 시점을 펀치 반경 35 mm 이상으로 가정하였다. 선형 영역에서 제품의 곡률 반경은 재료 두께와 펀치 반경의 합이다. 이전 연구에서, 성형 공정 중 재료 두께는 약 4% 감소하였다[1]. 따라서 선형 영역에서도 두께가 4% 감소한다고 가정하였고, 이때 선형 영역에서 $dk/dP_R = 1$ 이기 때문에 선형 영역에서는 식(2)와 같이 펀치 반경과 제품 곡률 반경의 관계를 정의할 수 있다.

$$\kappa = P_R + 0.96 \times t \quad (2)$$

(3) 중간 영역에서의 예측 모델

비선형 영역과 선형 영역 사이의 영역에서의 예측 모델을

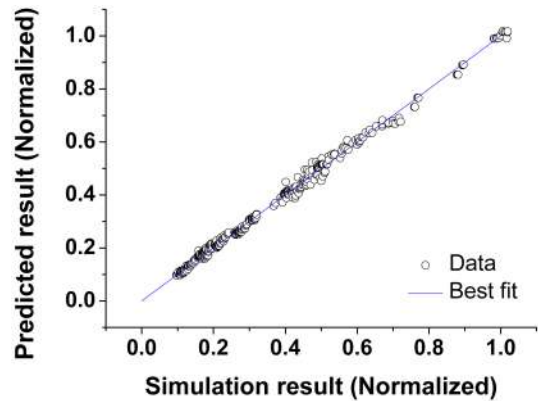


Fig. 6 The relationship between the normalized simulation results and the predicted results

활용하여 중간 영역에서의 근사식을 만들어 제품 곡률 반경을 예측하였다. 비선형 영역에서의 끝 지점에서 변수값과 제품 곡률 반경을 알고 있고, 선형 영역에서 선형 모델의 시작 지점에서 변수값과 제품 곡률 반경을 알고 있으므로 이 4개의 데이터를 사용하여 근사식을 만들 수 있다. 근사식을 펀치 반경에 대해 3차식으로 만들어 주면 4개의 초기값으로부터 3차식을 구성할 수 있다.

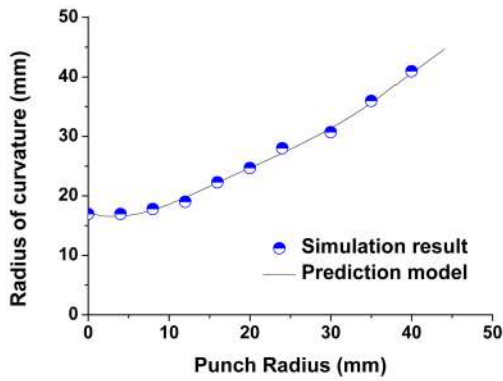
비선형 영역의 곡률 반경 예측 식을 $\kappa = f(P_R, t, \theta)$ 라고 하였을 때, $dk/dP_R = 1$ 이 되면 선형 모델을 적용할 수 있다. 따라서, 비선형 모델에서 dk/dP_R 이 증가하여 1이 되면 선형 모델을 적용할 수 있다. 하지만 펀치 각도가 증가함에 따라 dk/dP_R 의 최댓값이 1이 아닌 경우가 있다. 이 때는 dk/dP_R 이 최댓값을 갖는 P_R 을 찾는다. 이는 $d^2\kappa/dP_R^2 = 0$ 을 만족하는 P_R 을 찾는다. 이때의 P_R 이 비선형 모델의 끝점이 된다.

이로부터, 다음 2가지 경우를 나눌 수 있으며, dk/dP_R 은 다음과 같은 조건으로 구분할 수 있다.

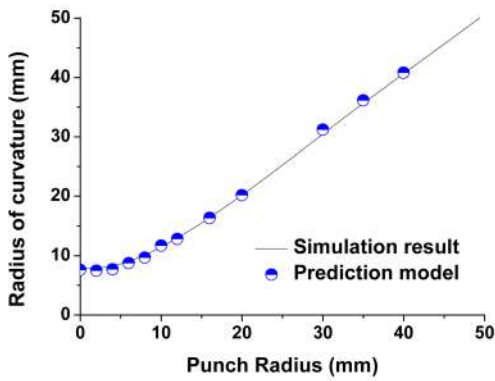
1) $\max(dk/dP_R) \geq 1$ 인 경우: $dk/dP_R = 1$ 이 되면, 이 지점부터 선형 모델을 사용한 제품 곡률 반경 예측을 진행한다. 이와 같은 경우 중간 영역은 발생하지 않는다.

2) $\max(dk/dP_R) < 1$ 인 경우: dk/dP_R 가 1을 넘지 않기 때문에, $d^2\kappa/dP_R^2 = 0$ 을 만족하는 P_R 를 구한다. $d^2\kappa/dP_R^2 = 0$ 에서 κ 가 최댓값을 갖기 때문이다. 중간 영역의 시작점이 바로 $d^2\kappa/dP_R^2 = 0$ 인 지점이다.

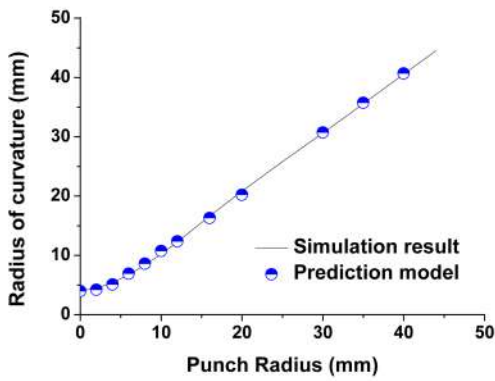
$\max(dk/dP_R) < 1$ 인 경우, $dk^2/dP_R^2 = 0$ 인 지점에서부터 P_R 이 35 mm인 지점이 중간 영역이 된다. $dk^2/dP_R^2 = 0$ 을 만족하는 P_R 을 찾고, 이 점에서의 dk/dP_R 을 구한다. 그리고 선형 영역이 시작되는 지점(펀치 반경 35 mm)과 그 지점에서의 제품 곡률반경, 기울기를 알고 있고, 비선형 모델의 끝점과 해당 지점에서의 기울기를 구하였다. 4개의 조건을 사용하여, 중간 영역에서의 식을 만들 수 있다. 2점에서의 함수값과 그 점에서의 기울기를 알고



(a) 180B2, 0.65 mm, punch angle of 175°



(b) 180B2, 0.7 mm, punch angle of 165°



(c) CR4, 0.6 mm, punch angle of 155°

Fig. 7 Comparison of the simulation result and the prediction model with different forming conditions

있기 때문에 펀치 반경에 대한 3차식을 구성할 수 있다. 일반 3차식에, 비선형 모델이 종료되는 지점의 좌표의 끝점 좌표 P_{R1} , κ_1 을 대입하면 아래 식이 된다. 식(3)에 나머지 경계 조건을 대입하면 각 재료, 두께, 펀치 각도에 대한 식(3)을 구할 수 있다.

$$\kappa - \kappa_1 = A(P_R - P_{R1})^3 + B(P_R - P_{R1})^2 + C(P_R - P_{R1}) \quad (3)$$

본 연구에서는 입력한 펀치 반경, 펀치 각도, 재료 두께, 재료 종류에 따라 식(3)을 계산하여, 중간 영역의 예측식을 도출하였다. 재료에 대해서는 분기 문(if 문)을 사용하여 계산하였고,

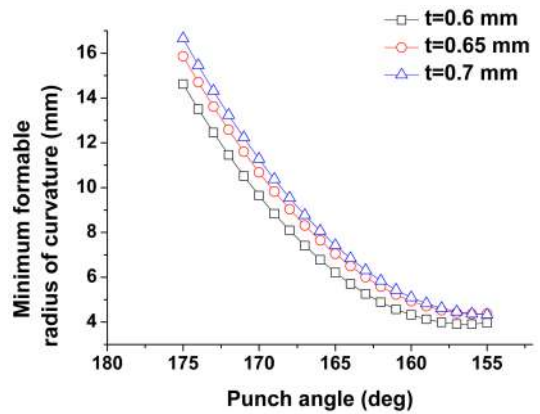


Fig. 8 The relationship between the punch angle and the minimum formable radius with different thickness (CR3)

나머지는 입력 조건에 따라 실시간으로 계산하였다. 전체 해석은 Microsoft Excel 2016의 매크로를 통해 작업하였다. 또한 모든 작업이 Excel을 통해 가능하도록 프로그래밍하였다.

전체 결과에 대해 해석 결과와 본 연구를 통해 개발한 예측 모델의 결과를 비교한 그래프는 Fig. 6과 같다. 또한 전체 결과에 대한 RMSE는 0.314 mm로, 전체 영역에 대해 예측 모델이 결과를 잘 예측할 수 있음을 확인할 수 있었다.

4. 예측 모델을 사용한 예측 결과 및 고찰

앞서 설명한 피팅 모델을 사용하여 다양한 경우에 대해 제품 곡률 반경 예측 결과를 해석 결과와 비교한 결과는 Fig. 7과 같다. 먼저 180B2, 두께 0.65 mm 재료에 대해 펀치 각도 175°에서 펀치 반경에 따른 제품 곡률 반경을 비교하였다. 또한 180B2, 두께 0.7 mm, 펀치 각도 165°인 경우, CR4, 두께 0.6 mm, 펀치 각도 155°인 경우에 대해 예측 결과와 해석 결과를 비교하였다. 그림에서 확인 가능하듯이 매우 정확히 예측 가능한 것을 볼 수 있다.

또한 식(1) 피팅 모델을 사용하는 경우, 해당 조건에서 펀치 반경에 따른 제작 가능한 최소 성형 가능 곡률 반경을 계산할 수 있다. Fig. 8은 CR3 소재의 재료 두께와 펀치 각도에 따른 최소 성형 가능 곡률 반경을 나타낸 그래프이다. 최소 성형 가능 곡률 반경은 재료의 두께가 감소함에 따라 낮아진다. 또한 펀치 각도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보인다.

본 연구에서는 유한요소해석 결과와 일반적으로 알려진 재료 변형 특성을 사용하여, 펀치 반경에 대해 연속한 제품 곡률 반경 예측 모델을 개발하였다. 식(1)을 사용하여 전체 영역을 피팅하는 경우, 선형 영역에서 예측 정확도가 떨어진다. 이 부분에서의 정확도를 향상시키기 위해 선형 영역을 정하고 일반적인 재료 변형 특성을 적용하여 식(2)의 예측 모델을 구성하였다. 그리고 중간 영역은 식(3)과 같이 예측 모델의 연속을 유지할 수

있도록 3차식을 사용하였다. 이와 같은 다양한 모델의 조합을 통해 만들어진 예측 모델은 연속성을 유지할 수 있으며, 다양한 범위에서 정확히 예측할 수 있는 장점이 있다.

그리고 개발한 예측 모델을 활용해, 자동차 외판 성형 공정에서 성형 가능한 최소 굽힘 반경을 구하여 설계에 적용할 수 있다. 게다가 제작하고자 하는 제품의 굽힘 반경에 대해 필요한 펀치 각도 역시 도출할 수 있다. 해당 연구에서의 결과를 금형 설계에 적용하는 경우, 성형 가능한 제품 반경을 구할 수 있어, 무리하게 펀치 반경을 날카롭게 가공할 필요가 없다. 그러므로 적절한 펀치 반경으로 금형을 설계할 수 있어, 응력 집중, 마모에 의한 금형 파손을 방지할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 자동차용 외판재에서 각도가 높고 곡률 반경이 작은 Subtle Feature Line의 성형 공정 예측에 대한 연구를 진행하였다. 자동차용 외판재로 사용되는 180B2, 210B2, CR2, CR3, CR4 소재에 대해 실험 결과를 기반으로 하여, 펀치의 반경과 제품의 곡률 반경을 3개의 영역으로 구분하였다.

3개의 영역은 펀치 반경과 제품 곡률 반경이 비례하는 선형 영역, 펀치 반경이 감소함에 따라 일정 값으로 수렴하는 비선형 영역, 그리고 두 개의 영역을 연결하는 중간 영역으로 구분하였다. 또한 곡률 반경 예측 모델은 재료의 종류에 따라 다르며, 실시간으로 재료 두께, 펀치 각도를 입력받아 펀치 반경에 따른 제품 곡률 반경을 계산할 수 있도록 하였다. 해석 결과와 예측 결과를 전체 영역에서 비교하였을 때, 평균 제공근 오차는 0.314 mm로 제품 곡률 반경에 비해 매우 낮아, 본 연구에서 제안한 해석 모델을 통해, 다양한 성형 조건에서 제품의 곡률 반경을 정확히 예측할 수 있음을 확인하였다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 연구는 정부의 재원으로 한국연구재단(NRF)의 지원(No. NRF-2020R1C1C1014412)을 받아 수행되었습니다. 또한 실험에 도움을 주신 GM Korea에 감사드립니다.

REFERENCES

1. Lee, C.-W., Yu, J., Youn, H. W., Chung, Y., (2021), The minimum formable radius of subtle feature lines in automotive outer panel stamping, *International Journal of Automotive Technology*, 22(4), 993-1001.
2. Nam, S., Patil, A. K., Patil, S., Chintalapalli, H. R., Park, K., Chai, Y., (2013), Hybrid interface of a two-dimensional cubic

Hermite curve oversketch and a three-dimensional spatial oversketch for the conceptual body design of a car, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 227(12), 1687-1697.

3. Yoshida, M., Yoshida, F., Konishi, H., Fukumoto, K., (2005), Fracture limits of sheet metals under stretch bending, *International Journal of Mechanical Sciences*, 47(12), 1885-1896.
4. Huang, Y.-M., (2007), Finite element analysis on the V-die coining bend process of steel metal, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 34(3), 287-294.
5. Hu, W., Enying, L., Yao, L. G., (2008), Optimization of drawbead design in sheet metal forming based on intelligent sampling by using response surface methodology, *Journal of Materials Processing Technology*, 206(1-3), 45-55.
6. Mosbah, H., Attyaoui, S., Nasri, R., (2021), Optimization of the countersinking parameters based on the response surface method, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 117(1), 501-510.
7. Lee, C.-W., Chung, Y.-C., (2022), Curve-fitting algorithm for the inspection of subtle feature lines on automotive outer panels, *Materials*, 15(18), 6323.
8. Chung, Y.-C., Yu, J.-H., Jung, K.-S., Song, Y.-H., Jeon, Y.-B., Kim, Y.-J., Jun, S.-M., Kwon, S.-O., Lee, C.-W., (2022), Effects of the material properties and thickness on the minimum formable radius in the subtle feature forming process. <https://assets.researchsquare.com/files/rs-1825545/v1/8a87db1f-c6f4-49b6-bbec-57b893e15c40.pdf?c=1663875919>



Jae-Hyeong Yu

Received M.E degree in Department of Mechanical Design and Manufacturing Engineering in Seoul National University of Science and Technology.
E-mail: jhyu9190@seoultech.ac.kr



Kyu-Seok Jung

Received M.E. degree in Department of Mechanical Design and Manufacturing Engineering in Seoul National University of Science and Technology.
E-mail: ksjung@seoultech.ac.kr



Yunchan Chung

Professor in the Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology. His research interests are developing tools to design and realize shapes. He has developed tool-path generation algorithms and systems for die and mold making, and has studied the automatic design processes for automotive stamping dies. His current research interests are algorithms for additive manufacturing and digital manufacturing.
E-mail: ychung@seoultech.ac.kr



Chang-Whan Lee

Assistant professor in the Department of Product Design And Manufacturing Engineering, Seoul National University of Science and Technology. His research interests include simulation and development of the metal forming process and lightweight materials.
E-mail: cwlee@seoultech.ac.kr

Development of Steering Stop Parts for Automobile Suspension Using Former Cold Forging Complex Forming Technology

박동환¹, 한성철², 한승호¹, 권혁홍^{3,#}

Dong-Hwan Park¹, Seong-Chul Han², Seung-Ho Han², and Hyuk-Hong Kwon^{3,#}

¹ 경북하이브리드부품연구원 (Gyeongbuk Hybrid Technology Institute)

² 한성 산업 (Hanseong Industry Co., Ltd.)

³ 대진대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Daejin University)

Corresponding Author / E-mail: hkhwon@daejin.ac.kr, TEL: +82-31-539-1972, FAX: +82-31-539-2030

ORCID: 0000-0002-4249-4868

KEYWORDS: Steering Stop parts, Automobile suspension, Former forging, Cold forging, Complex forming technology

Steering Stop parts constituting the suspension system of automobiles are located inside an automobile suspension. They are used to fix upper and lower suspension arm parts by welding. The purpose of this study was to develop Steering Stop parts for automobile suspension. Cost increase due to problem of existing tool life is a challenging issue. This study tries to solve the tool life problem and reduce the cost using a former cold forging complex forming technology. We developed a long-life complex forming technology between multistage former forging and cold forging for producing Steering Stop parts of automobile suspension.

Manuscript received: June 25, 2022 / Revised: August 30, 2022 / Accepted: September 6, 2022

1. Introduction

Automobile suspension is a device that prevents damage to the automobile body or lower body and improves riding comfort by preventing the axle from directly transmitting vibrations or shocks received from the road surface to the automobile body when driving by connecting the axle to the automobile body. It is composed of a chassis spring that relieves the shock from the road surface, a shock absorber that improves riding comfort by suppressing the free vibration of the chassis spring, and a stabilizer that prevents the automobile from twisting sideways. In addition, the suspension transmits the driving force generated to the driving wheels or the braking force of each wheel to the automobile body when braking, and at the same time withstands the centrifugal force when turning, and supports each wheel in the correct position with respect to the automobile body. Steering Stop parts are located inside the automobile chassis suspension and are used to fix the upper and lower suspension arm parts by welding. In order to

precisely weld the upper and lower parts, gap management is important. It is a part that requires precision because it has to be welded with a constant gap [1].

Springs used for suspension are largely divided into steel springs, rubber springs, and gas springs, and steel springs are further divided into leaf springs, coil springs, and torsion bars. Among them, the coil spring is the most used independent type, and it has the advantage of not occupying much space and not causing an uncertain friction action. Steering Stop parts of automobile suspension are processed by the existing former cold forging, which causes tool life to become a problem, resulting in cost increase and quality problems. As a part, there should be no shape precision and no deformation of the product. Existing complex forging technology is currently being applied to hot forging and cold forging process. However, since hot forging process has poor dimensional precision of the product, it must be formed by a cold process after a hot process to reduce cost and obtain a product with excellent precision [2-5]. Complex forging

parts frequently have problems of cost increase and quality deterioration due to tool breakage when working only with the cold process, and cold and hot complex forging technology is applied to solve these problems [6-8].

This study is to develop a Steering Stop parts for a vehicle suspension that applies a long-life former cold forging complex forming technology. As the existing tool life problem persists, quality problems are emerging due to tool replacement and cost increase. This was improved to the 2nd former forging process, the 1st cold forging process, and the 1st trimming process to solve the tool life problem and reduce costs. In the Steering Stop parts, directional work due to symmetry is required for the existing tool, and tool breakage occurs frequently during the cold forging process, and cracks occur in the product exterior. To improve this, the existing former forging of 5 processes and cold forging of 1 process were improved to the former forging of 2 processes, the cold forging process, and the trimming process to improve the life of the tool and reduce the cost. Therefore, comparing the technology development of Steering Stop parts before and after the technology development of the Steering Stop parts, in the past, the former forging of 5 processes and the cold forging process were performed, and tool damage occurred frequently. The process was improved to remove by trimming process. As a result, the tool life was more than doubled compared to the previous one [9-11].

2. Tool Experiment

2.1 Material Property Test

For forming analysis of the Steering Stop parts, a compression test was performed to confirm the mechanical properties. The material used for the test was SWRCH18A, and the test piece was manufactured by wire cutting with a diameter of 10 mm and a height of 15 mm in a cylindrical shape as shown in Fig. 1. The compression test was performed in a 100-ton universal testing machine (UTM) at a test speed of 2 mm/min and a material reduction rate of 60% (9 mm). Fig. 2 shows the compression test equipment, and Fig. 3 shows the specimens before and after the compression test. Fig. 4 shows the compression process of SWRCH18A material as a curve of nominal stress and nominal strain, and a curve of true stress and strain, and the obtained data was applied as material properties for forming analysis.

2.2 Steering Stop Tool Design and Making

The characteristic of the former forging process is that it is formed by giving a large deformation step by step in the former

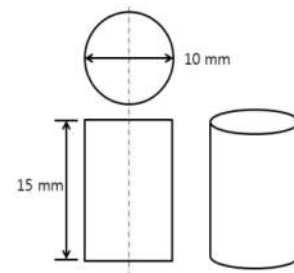


Fig. 1 Test specimen size



Fig. 2 Experimental equipment for compression test



Fig. 3 Test specimens of before and after compression test

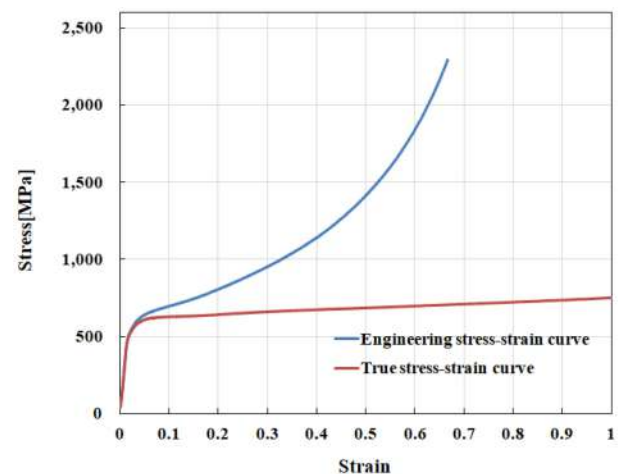


Fig. 4 Stress-strain curve of the compression test for SWRCH18A

forging machine. The feature of the cold forging process is that it is formed by giving a large deformation like the former forging process in the forging press, and the processing surface is smooth and the material recovery rate is good because there

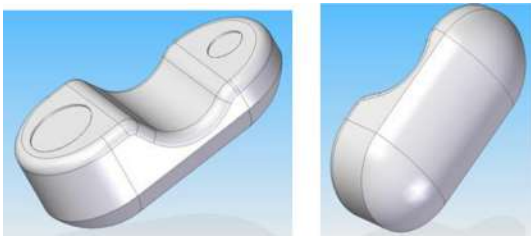


Fig. 5 3D model of Steering Stop product













Fig. 6 Cold forging tool breakage of Steering Stop product before improvement

is no need for post-processing. In addition, the dimensional accuracy of the product is excellent and the mechanical properties by work hardening are improved. The optimal process was designed to develop the Steering Stop parts for automobile suspension by applying the former cold forging complex forming technology that fused former forging and cold forging. The number of forging steps is determined according to the shape of the forging product and the degree of cross-sectional change. Even if the shape is complex and the cross-sectional change is severe, it is better to design as few steps as possible. Fig. 5 shows the Steering Stop model product. Existing Steering Stop parts cause tool breakage and exterior defects due to operator error by directional work, and product defects due to tool breakage in the former and cold forging process. Fig. 6 shows the broken part of the cold forging tool of the Steering Stop parts. The die breakage occurred at the bottom of the die subjected to concentrated stress. In order to improve this, the optimal process was designed and manufactured by applying the former cold forging complex forming technology that combines former forging and cold forging.

This Steering Stop parts process consists of a total of 4 processes, designed in the order of 1st step former forging, 2nd step former forging, 3rd step cold forging, and 4th step trimming process. Table 1 shows the process sequence of the Steering Stop tools.

The whole process before improvement consists of a total of 6 processes, the fifth performing former forging, and the final closed cold forging process. In this case, punch and tool breakage due to

Table 1 Process sequence of Steering Stop tools

Process	Before improvement	After improvement
1	1 st Former forging 	1 st Former forging 
	2 nd Former forging 	2 nd Former forging 
3	3 rd Former forging 	Cold forging 
	4 th Former forging 	Trimming 
5	5 th Former forging 	-
	Cold forging 	-

concentrated load occurred frequently in the 5th process of former forging and the final closed cold forging process. To improve this, the former forging process was simplified to two processes, the closed cold forging process was improved to an open cold forging process, and a final trimming process was added to remove flash. In other words, in order to improve the damage of punches and dies due to concentrated load in the 5th process of the existing former forging process and the final closed cold forging process, edge processing is performed in the former forging process, and a trimming process is added after open cold forging in the cold forging process. Therefore, it was improved to distribute stress concentration between processes.

2nd forging process is shown in Fig. 7, the preform was designed to be $\varnothing 14.2 \times 22$ mm. Fig. 8 shows the assembly diagram of the cold forging die, and Fig. 9 shows the trimming tool

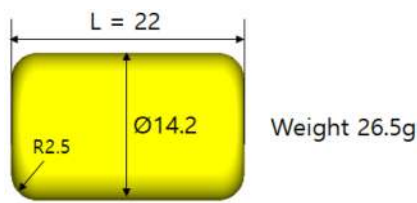


Fig. 7 Preform shape of Steering Stop

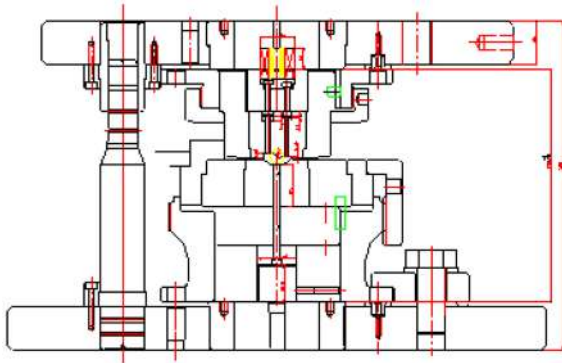


Fig. 8 Cold forging tool design of Steering Stop

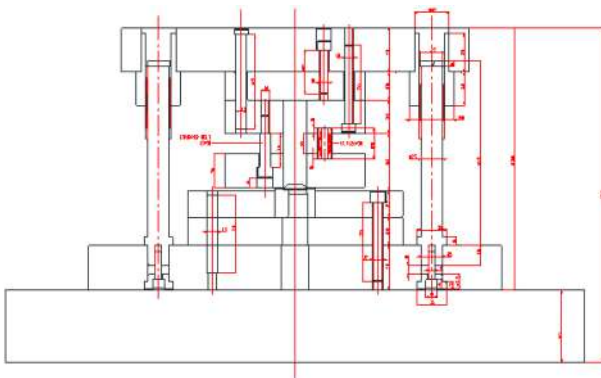


Fig. 9 Trimming tool design of Steering Stop

assembly diagram. Cemented carbide was used for the punch material of the 3-step cold forging tool, and SKH55 high-speed tool steel was used for the tool material. The 4-step trimming process was designed to cut the flash generated in the 3-step cold forging process, and STD11 alloy tool steel was used for the punch and tool of the 4-step trimming tool.

3. Forming Analysis

The process design was carried out for the production of Steering Stop parts, and after cutting the raw material, the product was designed to be completed by 1st step former forging, 2nd step former forging, 3rd step cold forging, and 4th step trimming. It is

Table 2 Simulation conditions of cold forging

Plastic material	SWRCH18A
Preform size [mm]	Ø 14.2 × 22
Material temperature [°C]	20
Die temperature [°C]	20
Friction coefficient	0.05, 0.1, 0.15, 0.2
Velocity [SPM]	20

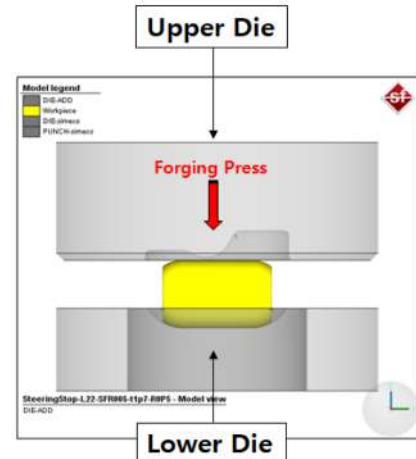


Fig. 10 3D model of Steering Stop tool

designed to carry out 3-step cold forging through annealing, shot peening, and lubrication treatment after 2-step former forging. Forming analysis was not performed in the 1-step former primary forging and 2-step former secondary forging process as it was a process of making a preform, but in the 3-step cold forging process, forging analysis was performed. Steering Stop parts and tools were modeled in 3D using 3D CAD s/w, and forging analysis of Steering Stop tools were performed using simufact forming software. For the forging analysis, the compression test data of SWRCH18A material were input as mechanical properties. Table 2 shows the conditions for forging forming analysis. Forging analysis was performed by dividing the friction coefficients for each process into 0.05, 0.1, 0.15, and 0.2 during cold forging. The forming speed of the forging press was applied at 20 SPM. Fig. 10 shows the part model of the cold forging tool. As a process of making a preform in the former forging process, the preform formed in the former secondary forging process is placed on the lower die and open-type cold forging is performed. Fig. 11 shows the effective plastic strain rate when the friction coefficient is 0.1 in the cold forging process, and Fig. 12 shows the equivalent stress. Fig. 13 shows the maximum load according to the friction coefficient as a result of cold forging analysis. As a result of checking the change in the maximum load according to the change

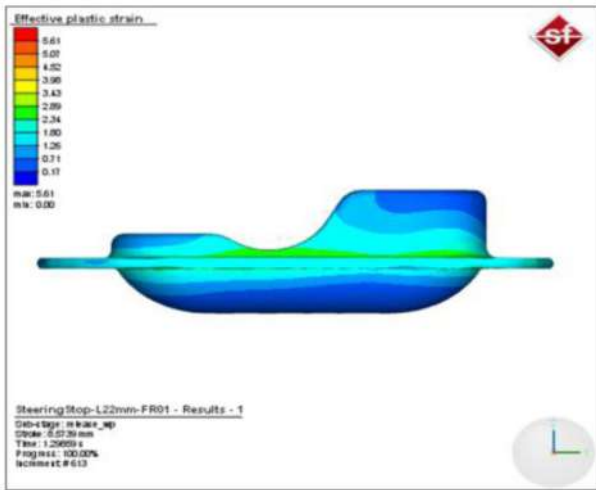


Fig. 11 Effective plastic strain of Steering Stop at friction coefficient 0.1

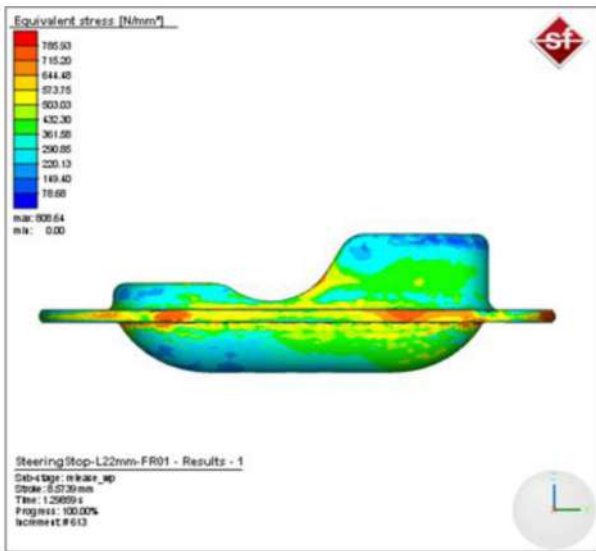


Fig. 12 Equivalent stress of Steering Stop at friction coefficient 0.1

in the friction coefficient, it was found that the friction coefficient was 107 tons at 0.05, 110 tons at 0.1, 115 tons at 0.15, and 118 tons at 0.2. In general, the friction coefficient was performed in four cases from 0.05 to 0.2 based on 0.12 applied during cold forging. According to the friction coefficient, there was little difference in the shape of the cold forging process product, and it was judged to be applicable based on the 250-ton press actually used. In order to prevent tool breakage, the 3-step cold forging tool is an open forging tool, as shown in Fig. 8. Fig. 14 shows the analysis results according to the length of the preform in cold forging. When the length of the preform is 17 mm and 19 mm, the occurrence of pitting is predicted, but when the length of the preform is 22 mm, it does not occur. Fig. 15 shows the defect occurrence site when the

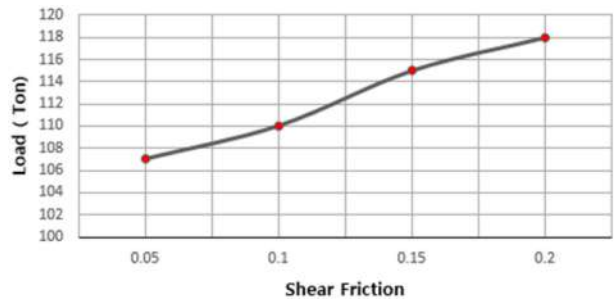


Fig. 13 Load change according to friction coefficient

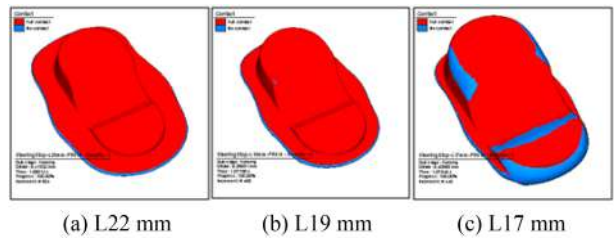


Fig. 14 Underfill occurrence according to preform length

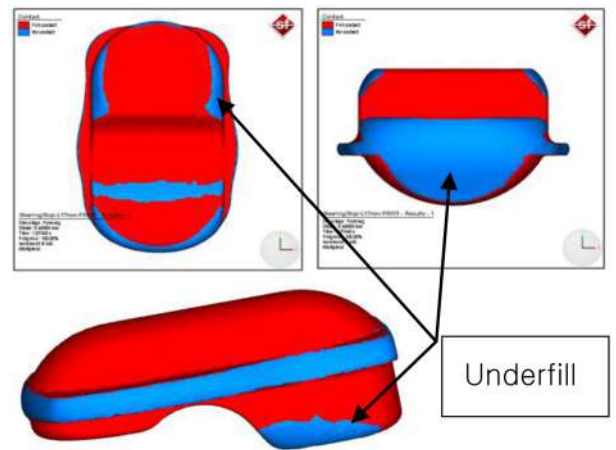


Fig. 15 Simulation results of underfill defect of Steering Stop product at preform length 17 mm

length of the preform is 17 mm. The pitting area is predicted at both edges of the Steering Stop parts. It is important to avoid stress concentration in cold forging punches and dies to improve tool life. In the forming analysis result, when the length of the preform is 22 mm, no cracking occurs. Therefore, the preform length was determined to be 22 mm.

4. Experimental Results and Discussion

In order to improve the mold life of the Steering Stop parts for automobile suspension, the SWRCH18A round bar material is cut



Fig. 16 Underfill defect of Steering Stop product at preform length 17 mm

and the former primary forging and former secondary forging are performed to produce a preform, designing the process in the order of cold forging and trimming, and designing and manufacturing the mold. Thus, a prototype was produced. Fig. 16 shows the areas where the formation of pitting occurs in the cold forging product. The 3-step cold forging tool is designed as an open forging tool to prevent tool breakage, so it is easy to cause cracking. In consideration of this, the length of the preform was manufactured to 22 mm by referring to the analysis results according to the length of the preform. In particular, since cracks appear at both corners of the product, it is necessary to prevent the occurrence of cracks while improving the life of the tool. Therefore, the length of the preform was determined to be 22 mm in the direction of improving the tool life rather than reducing the material. In order to trim the Steering Stop parts produced in the 3-step cold forging process, the final prototype was obtained from the 4-step trimming tool. That is, by inserting the 3-step cold forging product into the trimming tool installed in the press, the flash generated on the outside was removed. Fig. 17 shows the process product produced in the cold forging tool, and Fig. 18 shows the final prototype produced in the trimming tool. In the actual cold forging test, cracks occurred near both corners of the product as in the forming analysis results. In general, the coefficient of friction in cold forging is evaluated to be about 0.1 to 0.2, but the shape difference in the cold forging process is hardly shown according to the friction coefficient in the forming analysis results. Compared with the analysis results in the actual forming test, the friction coefficient is judged to be about 0.1 to 0.2. A tooled product that satisfies the final dimensional accuracy was manufactured by trimming the Steering Stop process parts secured by the cold forging tool. That is, the trimming tool was able to obtain the final product by inserting the cold forging process product after installing the tool on the 55 ton press. Fig. 19 shows a scene of measuring the outer diameter of a Steering Stop parts for a vehicle suspension. The outer diameter of the Steering Stop product for automobile suspension was measured using a three-dimensional measuring machine. As a result of measuring the outer diameter of

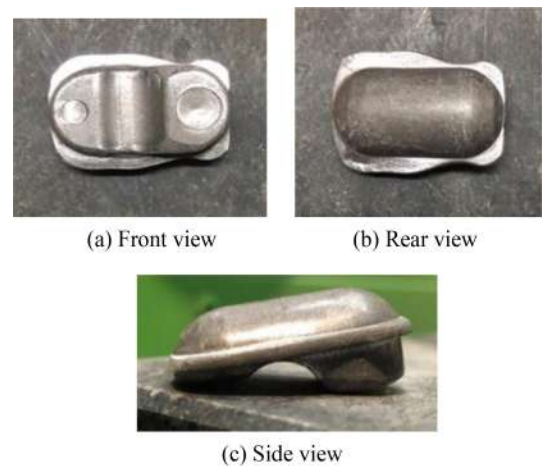


Fig. 17 Cold forging product of Steering Stop



Fig. 18 Final trimming product of Steering Stop



Fig. 19 Outside diameter measurement of Steering Stop product

10 prototype samples, the dimensional accuracy was satisfied as 0.168 mm. Table 3 shows the tool life of experimentally produced Steering Stop parts. During product production, it was found that the tool life was improved from about 5,000 pieces using the existing high-speed steel material to about 400,000 pieces by applying the cemented carbide material. In other words, in the cold forging process, the tool life of the existing punch was about 5,000, so cemented carbide was applied to produce about 400,000 products at HRA85 hardness. In the trimming process, more than 400,000 products were produced by applying the punch and tool materials with STD11 alloy tool steel.

Table 3 Tool lifespan of Steering Stop product

Shot No.	Existing punches	Improved punches
1	4,921	421,232
2	5,210	402,365
3	6,011	412,351

5. Conclusion

In this study, an improvement process was suggested to improve the tool life by developing a Steering Stop parts for automobile suspension using the former cold forging composite forming technology. In order to apply the former cold forging composite forming method of the Steering Stop parts, material properties evaluation, forging analysis, prototype tool design and production, and prototype performance evaluation were performed. The results of this study are summarized as follows.

(1) In order to understand the mechanical properties of SWRCH18A, the raw material of the Steering Stop parts, a stress-strain curve could be obtained through a compression test, and more accurate analysis results could be obtained by applying it to the forging analysis.

(2) In the cold forging analysis results, it was confirmed that the maximum load increased as the friction coefficient increased, and cold forging was possible with little difference in shape by friction. The degree of cracking was predicted according to the length of the preform. In the forming test, it was confirmed that the Steering Stop cold forging is possible.

(3) For the production of Steering Stop parts, it was designed in 4 processes including former primary forging, former secondary forging, cold forging, and trimming from the existing 6 processes, and the final prototype with excellent dimensional accuracy was secured during the trimming process.

(4) It was confirmed that tool life could be improved by securing cold forging technology for Steering Stop parts for automobile suspension.

REFERENCES

1. Park, D. H., Yun, J. J., Kim, K. Y., (2014), A study on laser welding application of the cowl cross member for ultra-high strength steel, *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, 23(5), 525-531.
2. Yoon, J., Lee, S., Jeon, H., Lee, J., (2013), Study on the lubrication characteristics at the elevated temperature in hot forging test with extruded AZ80 Mg alloy, *Transactions of Materials Processing*, 22(2), 108-113.
3. 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.
4. Kang, B., Ku, T., (2014), Process modification and numerical simulation for an outer race of a CV joint using multi-stage cold forging, *Transactions of Materials Processing*, 23(4), 211-220.
5. Jeon, H., Yoon, J., Lee, J., Kim, B., (2014), Plate forging process design for an under-drive brake piston in automatic transmission, *Transactions of Materials Processing*, 23(2), 88-94.
6. Park, D.-H., Kwon, H.-H., (2016), Development of automobile engine mounting parts using hot-cold complex forging technology, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 3(2), 179-184.
7. Park, D.-H., Han, S.-C., (2015), Integration forming technology based on cold hot forging of clutch jaw parts for farm machinery, *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, 24(5), 489-495.
8. Park, D.-H., Kwon, H.-D., Kwon, H.-H., (2019), Development of cam ring gear parts of large diameter for truck clutch using hot-cold complex forging technology of small bar, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 20(5), 827-836.
9. Jo, A., Jeong, M., Lee, S., Cho, Y., Hwang, S., (2019), Development of hot and cold forging process for manufacturing a hub of dual clutch transmission, *Transactions of Materials Processing*, 28(6), 321-327.
10. Ju, W. H., Park, S.-Y., (2017), Development of outer support ring using complex forging processes, *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, 18(4), 653-659.
11. Nahrman, M., Matzenmiller, A., (2021), A critical review and assessment of different thermoviscoplastic material models for simultaneous hot/cold forging analysis, *International Journal of Material Forming*, 14(4), 641-662.

**Dong-Hwan Park**

Head researcher in Gyeongbuk Hybrid Technology Institute. His research interests are plastic working, sheet metal forming, hot and cold complex forging for automobile parts.

E-mail: pdh@ghi.re.kr

**Seong-Chul Han**

President in Hansung Industry Co., Ltd.. His research interests are cold forging and metal forming for automobile parts.

E-mail: sungcher40@hanmail.net

**Seung-Ho Han**

Researcher in Gyeongbuk Hybrid Technology Institute. His research interest is metal forming technologies for automobile parts.

E-mail: stag875@google.com

**Hyuk-Hong Kwon**

Professor in the Department of Mechanical Engineering, Daejin University. His research interest is metal forming technologies for automobile parts.

E-mail: hhkwon@daejin.ac.kr

케이블 구동 마스터 디바이스의 왜곡 보상 알고리즘

Distortion Compensation Algorithm for a Cable-Driven Master Device

박진수¹, 이경준¹, 심예리¹, 진상록^{1,#}
Jinsu Park¹, Gyoungjun Lee¹, Yeri Sim¹, and Sangrok Jin^{1,#}

¹ 부산대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Pusan National University)
Corresponding Author / E-mail: rokjin17@pusan.ac.kr, TEL: +82-51-510-2984
ORCID: 0000-0002-5594-4231

KEYWORDS: Haptic master device (햅틱 마스터 장치), Cable-driven parallel manipulator (케이블 구동 병렬 조작기), Positioning distortion (위치 추정 왜곡), Distortion compensation algorithm (왜곡 보상 알고리즘), Optimization (최적화)

This paper presents a distortion compensation algorithm for cable-driven master devices. Such device has four string pots at four corners of a frame. Four cables are tied from the four corners to the center holder. When the central holder, which is a haptic grip, moves, lengths of the four cables will change. From the four cable lengths, the spatial position of the haptic grip can be estimated using triangulation. In this case, distortion such as barrel image of the image field occurs when estimating a position with an offset parallel to the plane in which the four string pots are located. The closer to the corner, the smaller the position estimate value is than the true value. After distortion phenomenon is modeled by projecting onto the ellipsoid, the position in the vertical direction of the cable plane is compensated by the corresponding value and flattened. The mean error in the x-direction position was improved by 91% from 0.7833 ± 0.8381 mm to -0.0709 ± 0.4341 mm. This cable-driven master device can be used as a haptic device for operating a surgical robot.

Manuscript received: July 13, 2022 / Revised: August 3, 2022 / Accepted: August 10, 2022

NOMENCLATURE

x_e, y_e, z_e	= Estimated Position in x, y, z -axes
a	= Half Distance between Cable Starting Points in y -direction
b	= Half Distance between Cable Starting Points in z -direction
m	= Length of Center Cable Holder
R_i	= Length of i -th Cable
x_c	= Amount of Compensation in x -position
x_0	= Reference Value of x -position in Experiments
L, M, N	= Coefficients of Ellipsoidal Equation

1. 서론

케이블 구동 병렬 조작기(Cable-Driven Parallel Manipulator: CDPM)는 가벼운 구조와 빠른 조작 성능으로 인해 큰 힘을 요구하지 않고 넓은 작업 공간을 이동해야 하는 기구에 사용되어 왔다[1]. 케이블을 사용하여 주행하는 동안 발생하는 강성 문제 및 위치 정밀도 문제가 연구되었다[2]. 페루프를 이루며 연결된 병렬 기구로 여유자유도를 지니고 있기 때문에 강성해석과 강성제어에 대한 연구도 진행되고 있다[3]. CDPM은 가벼운 구조, 작은 관성 및 민감도 때문에 종종 햅틱 장치에 적용된다[4-5]. 최근에는 케이블 구동의 유연성을 활용하여 보다 고기능의 햅틱 장치가 개발되고 있다[6]. CDPM을 햅틱 장치로 활용하려면 공간에서의 정확한 위치를 실시간으로 추정하는 것이 중요하다[7]. 그 일환으로 케이블의 변형에도 정밀도를 유지하기 위해 형상 보정하는 알고리즘에 대한 연구가 있었다[8-9]. 레이저

트래커를 이용해 블랙박스 모델로 왜곡을 보정하는 연구[10]와 Aruco 마커와 비전을 이용해 위치를 제어하는 연구[11]도 있었다. 기존의 연구들은 보정을 위해 기구의 형상에 기반한 오차 보정 함수를 정의하고 특정점의 위치를 시뮬레이션이나 실험에 의해 측정된 후 추정 위치와 비교하여 오차를 최소화하는 방향으로 최적화 알고리즘을 통해 보정 함수의 파라미터를 갱신한다. 모든 형상변수를 고려하다 보니 함수가 복잡하고 연산량이 많아 소수의 특정점들로부터 측정값을 얻어 보정하는 경우가 많다. 본 연구는 시제품 성능 실험에서 평면의 수직방향 위치 추정값에 발생하는 왜곡의 형상이 배럴 이미지와 유사하다는 것을 발견하고 타원체로 모델링할 수 있다는 가정하에 시작된다. 오차 함수를 타원체로 단순화하여 연산 부하를 줄이고, 몇 개의 특정점이 아닌 동작범위 전체를 격자 탐색하고 최적화하여 보정의 효율을 높인다.

본 연구는 수술용 로봇을 제어할 목적으로 CDPM을 활용한 마스터 디바이스를 개발하였다. 개발된 마스터 디바이스는 4개의 스트링 포트에 구성되며, 그립에 연결된 4개의 케이블 길이로부터 삼각 측량을 통해 위치를 추정한다. 참값을 알 수 있는 실험 장치로 반복 실험을 통해 각 위치에서 왜곡된 값을 수집하고 최적화 알고리즘을 사용하여 타원체를 모델링한다. 모델링된 왜곡값만큼 추정값으로부터 보상하여 왜곡을 제거한다. 보상된 결과를 실험 도구에서 알 수 있는 참값과 비교하여 제안된 왜곡 보상 알고리즘의 타당성을 입증한다.

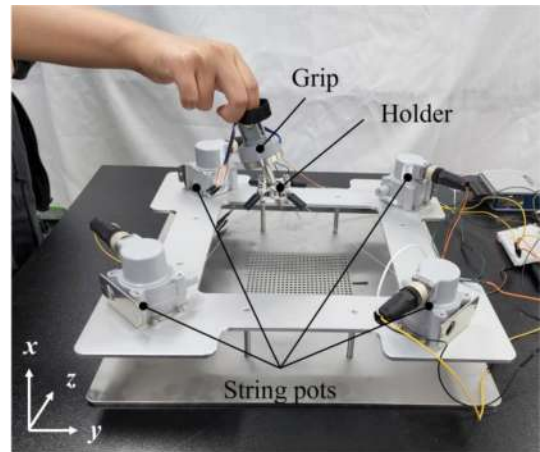
2. 케이블 구동 마스터 디바이스

2.1 케이블 구동 마스터 디바이스의 설계

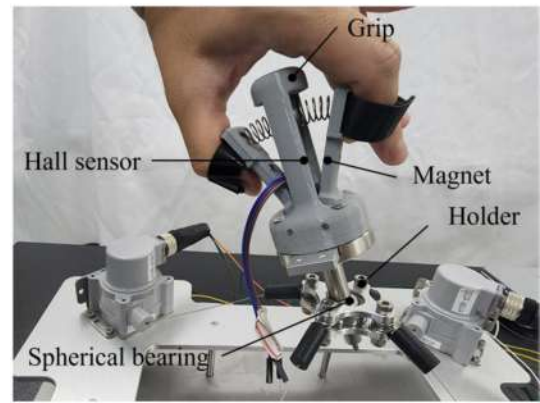
본 연구의 케이블 구동 마스터 디바이스는 수술용 로봇 조작을 목적으로 제작되었다. Fig. 1과 같이 프레임의 네 모서리에 스트링 포트가 위치하며, 구형 베어링이 장착된 홀더에 케이블 4개가 묶여 있다. 그립은 구형 베어링에 장착되어 있어 그립을 잡고 움직이면 홀더가 케이블 연결면의 수평을 유지하면서 자유롭게 움직일 수 있다. 스트링 포트로는 뽑아낸 케이블 길이만큼 저항이 변화하면서 비례적으로 전압이 높아지는 아날로그 센서다. 스트링 포트는 비틀림 스프링과 전위계가 장착된 축에 케이블이 감기는 장치로, 그립이 달린 홀더가 움직이면 케이블 길이가 변하면서 항상 팽팽한 장력을 유지한다. 각 스트링 포트는 사용 길이 범위 안에서 선형적인 신호 특성을 보이며 실제 길이와 신호 전압 간의 캘리브레이션이 되어있다.

부가적으로 그립에 관성센서가 부착되어 있어 구형 베어링으로 연결된 홀더가 수평인 상태에서 그립을 기울이면 그립의 자세를 추정할 수 있다. 또한 그립에는 수술로봇의 경자를 조작할 수 있도록 스프링과 링크 구조를 지니고 있고 내부에 영구자석과 홀센서가 장착되어 있어 경자를 조작하는 신호를 생성할 수 있다.

프레임의 평면을 $y-z$ 평면으로 정의하고 그의 수직방향을 x 축으로 정의한 것은 추후 이 장비를 세워서 수술로봇을 조작하는



(a) Structure of the device



(b) Holder and grip

Fig. 1 Prototype of the cable-driven master device

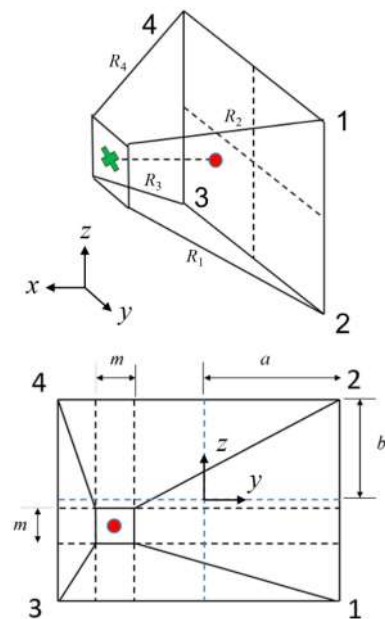


Fig. 2 Position estimation model with triangulation

마스터 디바이스로 사용할 것이기 때문이다. 그립부의 끝단이 수술로봇의 엔드이펙터와 좌표계를 일치하게 하여 축 방향 회

전이 x 축 회전인 Roll 회전이 되고 양방향 기울임이 Pitch와 Yaw 회전이 되도록 한다.

2.2 케이블 구동 마스터 디바이스의 위치 추정 모델

마스터 디바이스 그림의 공간상 위치 추정은 Fig. 2와 같이 삼각측량을 기반으로 계산된다. 4개의 케이블이 연결된 홀더의 중심인 초록색 십자표시가 추정하는 위치의 기준점이다. 케이블이 한 점에 모여 연결된 것이 아니라 길이가 m 인 사각형 홀더의 꼭지점에 각각 묶여 있기 때문에 보정된 삼각측량법으로 추정할 수 있다. y, z 축 위치는 4개의 케이블 시작점으로 이루어진 평면에 정사영한 붉은점의 위치를 식(1), 식(2)와 같이 계산한다. 사다리꼴 기둥의 옆면을 2개의 직각삼각형과 1개의 직사각형으로 나누고, 빗변의 길이가 변하더라도 두 직각삼각형의 높이는 서로 같고 아랫변의 길이의 합은 일정하다는 조건하에 피타고라스 정리를 이용하면 식(1)과 식(2)를 얻을 수 있다. x 축 위치는 식(3)과 같이 앞서 추정된 y, z 축 위치를 바탕으로 피타고라스 정리로 구한 4개의 높이를 평균 내어 보다 안정적인 추정치를 계산한다.

R 는 각 케이블의 길이이고, a 와 b 는 케이블의 시작점 사이의 수평과 수직 길이의 절반이다.

$$y_e = \frac{(R_3^2 - R_1^2) + (R_4^2 - R_2^2)}{4(2a - m)} \tag{1}$$

$$z_e = \frac{(R_1^2 - R_2^2) + (R_3^2 - R_4^2)}{4(2b - m)} \tag{2}$$

$$x_e = \frac{\sum_{i=1}^4 \sqrt{R_i^2 - (y_e a - m/2)^2 - (z_e + b - m/2)^2}}{4} \tag{3}$$

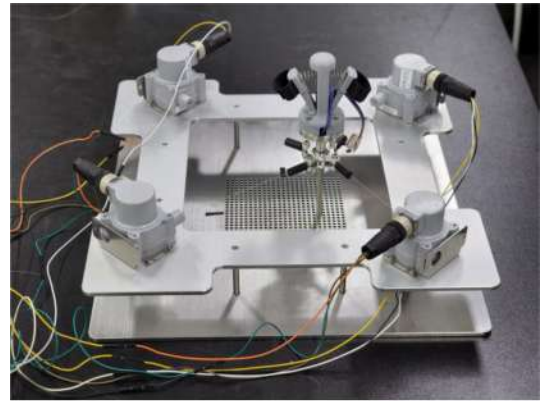
3. 왜곡 보상 알고리즘

3.1 왜곡 측정 실험

케이블 구동 마스터 디바이스의 위치 추정 정확도를 검증하기 위한 실험을 수행하였다. 디바이스의 프레임에 Fig. 3(a)와 같이 5 mm 간격으로 총 625개의 구멍이 있는 플레이트를 장착한다. 기준면으로부터 측정점까지의 거리를 30, 40, 50, 60, 70 mm로 고정할 수 있는 Figs. 3(b)와 같은 치구를 각 구멍에 삽입하고, 3(a)와 같이 치구에 디바이스의 그림부를 삽입하여 위치를 측정하는 실험을 구멍의 개수만큼 반복한다. 각 위치에서 100개의 데이터를 수집하고 이를 선도로 도시하면 Fig. 4의 붉은색 실선과 같다. $y-z$ 평면에 대하여 x 축 방향 위치에 왜곡이 발생한 것을 확인할 수 있다.

3.2 왜곡 모델 추출 및 보상

위치 측정값의 왜곡 크기는 그림부가 중심에서 멀어지고 프레임에 가까워질수록 증가한다. 왜곡 형태는 영상 분야에서 흔히 발생하는 배럴 이미지와 유사하다. 또한 x 의 값 변화에 따



(a) Experimental process



(b) Experimental tools

Fig. 3 Experiments of positioning performance

른 곡률의 변화가 거의 없이 평행으로 왜곡이 발생한다. 따라서, 왜곡량을 $y-z$ 평면의 위치만을 변수로 갖는 타원체로 식(4)와 같이 모델링할 수 있다. 이때 L, M, N 은 모델의 파라미터이고 이 파라미터를 찾기 위해 식(5)와 같은 최적화 문제를 정의한다. 치구에 의해 결정되어 알고 있는 x 축 방향 위치값의 참값에 왜곡 모델을 더한 값과 실제 왜곡이 발생한 실험

측정값과의 차이가 최소화되는 모델 파라미터를 수치적으로 도출한다.

$$x_c = L \left(1 - \sqrt{1 + \frac{y_e^2}{M^2} + \frac{z_e^2}{N^2}} \right) \tag{4}$$

$$\min_{L, M, N} |x_e - (x_0 + x_c)| \tag{5}$$

본 실험 장치에 대한 모델링 결과 각 파라미터 값이 $L = 5,989.1, M = 2,950.2, N = 3,092.8$ 과 같이 도출되었다. 실험 결과 Table 1과 같이, y, z 축 위치 평균 오차는 각각 0.5609 ± 0.99140 mm, -0.1175 ± 0.9156 mm임에 반면, x 축 위치 평균 오차는 왜곡에 의해 0.7833 ± 0.8381 mm로 상대적으로 크고 한 방향으로 오차가 발생한다. 도출된 모델 파라미터를 적용한 보상함수 x_c 는 $y-z$ 평면의 위치 추정값을 변수로 갖는 함수이며, 이로부터 보상값을 계산하고 추정된 x 축 위치에 보상한다. 보상 결과 x 축 위치 오차

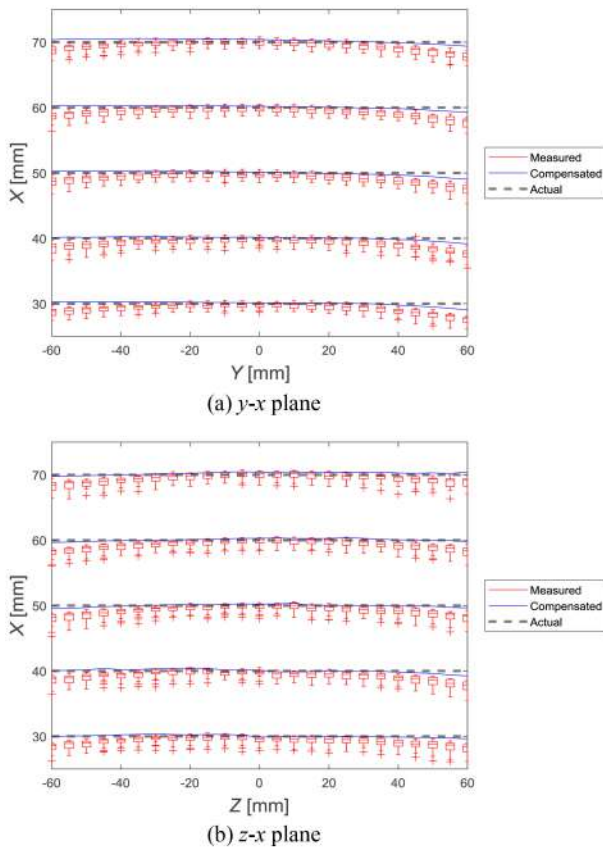


Fig. 4 Comparison between experimental results and compensated results in 2D-plane

Table 1 Comparison of position error data

y-Error [mm]		z-Error [mm]
0.5609±0.9914		-0.1175±0.9156
x-Error- [mm]		
Without compensation	With compensation	Improvement [%]
0.7833±0.8381	-0.0709±0.4341	91

는 -0.0709 ± 0.4341 mm로 91% 개선되고, Figs. 4, 5와 같이 왜곡이 평탄화된 결과를 보인다. 보상을 하지 않을 경우 y-z 평면의 원점을 기준으로 원점에서는 오차가 거의 발생하지 않고 경계로 갈수록 오차가 증가하는 배럴 이미지 형태의 왜곡이 발생하다 보니 오차의 평균값이 크게 계산된다. 그러나 보상을 하면 평탄화가 되어 기준값을 중심으로 오차가 고르게 분포되고 오차의 평균이 뚜렷하게 감소하는 결과를 보인다.

4. 결론

본 연구는 케이블 구동 병렬 조작기로 위치 추정을 할 경우 발생할 수 있는 왜곡 현상을 분석하여 보상 알고리즘을 제시했

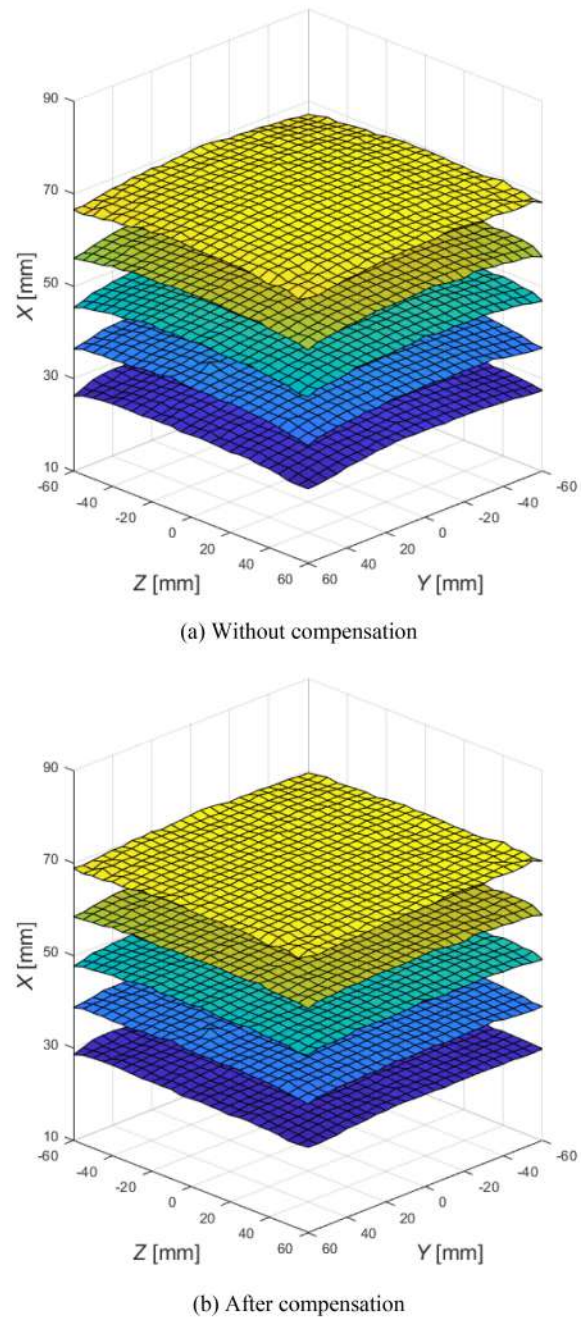


Fig. 5 Comparison between experimental results and compensated results in 3D-space

다. 케이블이 연결되어 있는 평면을 기준으로 수직방향인 x축 위치에 왜곡이 있고, 케이블이 연결된 평면에 정의된 동작영역의 구석으로 갈수록 왜곡이 심해져 배럴 이미지와 유사한 현상이 발생한다. 왜곡의 형상은 타원체에 가깝고, 왜곡량은 평면의 수직방향 위치와는 상관없이 투영된 2차원 평면상의 y, z축 위치에 의해 결정된다. 따라서 전체 실험 데이터에 대해 최적화 알고리즘을 활용하여 하나의 타원체로 왜곡을 모델링했다. 도출한 왜곡 모델을 바탕으로 보상하여 곡면으로 도시되던 결과가 평탄화되며 x축 위치 오차를 0.7833 ± 0.8381 mm에서 $-0.0709 \pm$

0.4341 mm로 91% 개선했다.

향후 수술용 로봇과 연계해 로봇 조작 실험을 진행할 계획이다. 수술 로봇 끝단의 위치 및 자세를 조작할 수 있을 뿐만 아니라, 그림에 장착된 집게 모양의 기구 유닛과 홀 센서를 이용해 수술도구의 집게를 여닫는 수술용 로봇의 움직임을 조작할 수 있게 된다. 케이블 구동 마스터 디바이스를 왜곡 보상 없이 수술로봇 조작에 사용할 경우 동작범위의 경계로 갈수록 수 mm의 오차가 발생하여 사용자의 의도와는 다른 위치에 로봇 엔드이펙터가 위치할 수 있다. 화면을 보며 실시간 원격조작하면 사용자의 손 움직임과 실제 로봇의 움직임이 일치하지 않아 어색함을 느끼게 될 것이다. 본 연구에서 제안한 왜곡 보상 알고리즘은 이런 문제를 해결할 수 있는 중요한 도구가 될 수 있다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

REFERENCES

- Piao, J., Jung, J., Jin, X., Park, S., Park, J.-O., Ko, S. Y., (2016), Vibration analysis of planar cable-driven parallel robot configurations, The Journal of Korea Robotics Society, 11(2), 73-82.
- Roberts, R. G., Graham, T., Lippitt, T., (1998), On the inverse kinematics, statics, and fault tolerance of cable-suspended robots, Journal of Robotic Systems, 15(10), 581-597.
- Pham, C. B., Yeo, S. H., Yang, G., Kurbanhusen, M. S., Chen, I.-M., (2006), Force-closure workspace analysis of cable-driven parallel mechanisms, Mechanism and Machine Theory, 41(1), 53-69.
- Williams, R. L., (1998), Cable-suspended haptic interface, International Journal of Virtual Reality, 3(3), 13-21. <https://www.ohio.edu/mechanical-faculty/williams/html/PDF/CSHI.pdf>
- Fang, S., Franitza, D., Torlo, M., Bekes, F., Hiller, M., (2004), Motion control of a tendon-based parallel manipulator using optimal tension distribution, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 9(3), 561-568.
- Lambert, P., Da Cruz, L., Bergeles, C., (2020), Design, modeling, and implementation of a 7-dof cable-driven haptic device with a configurable cable platform, IEEE Robotics and Automation Letters, 5(4), 5764-5771.
- Ottaviano, E., Arena, A., Gattulli, V., (2021), Geometrically exact three-dimensional modeling of cable-driven parallel manipulators for end-effector positioning, Mechanism and Machine Theory, 155, 104102.
- Borgstrom, P. H., Jordan, B. L., Borgstrom, B. J., Stealey, M. J., Sukhatme, G. S., Batalin, M. A., Kaiser, W. J., (2009), Nims-pl: A cable-driven robot with self-calibration capabilities, IEEE Transactions on Robotics, 25(5), 1005-1015.
- Jin, X., Jung, J., Jun, J. P., Park, S., Park, J.-O., Ko, S. Y., (2015), Calibration for a planar cable-driven parallel robot, Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, 21(11), 1070-1075.
- Schmidt, V., Kraus, W., Martin, C., Jin, X., Pott, A., (2017), Black-box accuracy compensation for a cable-driven parallel robot, Proceedings of the 17th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS), 428-431.
- Shengxu, J., Kim, M.-C., Kim, E.-S., Kim, C.-S., (2020), Position control for a cable-driven planar robot by using an aruco marker vision, Proceedings of the 17th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS), 1260-1261.



Jinsu Park

B.S. candidate in the School of Mechanical Engineering, Pusan National University. His research interest is design and control of robots.

E-mail: my036123@pusan.ac.kr



Gyoungjun Lee

M.S. candidate in the School of Mechanical Engineering, Pusan National University. His research interest is design and control of robots.

E-mail: 1308rudwns@naver.com



Yeri Sim

M.S. candidate in the School of Mechanical Engineering, Pusan National University. Her research interest is design and control of robots.

E-mail: sws1039@naver.com



Sangrok Jin

Associate Professor in the School of Mechanical Engineering, Pusan National University. His research interest is design and control of robots.

E-mail: rokjin17@pusan.ac.kr

탄소나노튜브 보강 여부에 따른 자가치료용 마이크로캡슐의 박막 특성 평가

Evaluation of Thin-Shell Properties of Self-Healing Microcapsules by Reinforcement of Carbon Nanotubes

장정근¹, 김현지², 윤성호^{2,#}
Jeong Keun Jang¹, Hyeon Ji Kim², and Sung Ho Yoon^{2,#}

¹ 금오공과대학교 대학원 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Kumoh National Institute of Technology)

² 금오공과대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology)

Corresponding Author / E-mail: shyoon@kumoh.ac.kr; TEL: +82-54-478-7299

ORCID: 0000-0003-3430-1381

KEYWORDS: Self-healing microcapsules (자기치료용 마이크로캡슐), Carbon nanotubes (탄소나노튜브), Storage capability test (보관성능시험), Micro-compressive test (미소압축시험)

In this study, thin-shell surface observation, storage capability test, and micro-compressive test were performed for self-healing microcapsules using a field emission scanning electron microscope (FE-SEM) and a micro-compressive testing machine. A microcapsule having a melamine-urea-formaldehyde thin-shell and a microcapsule having a melamine-urea-formaldehyde thin-shell reinforced with carbon nanotubes were used. Two carbon nanotube contents were considered: 0.17 wt% and 0.50 wt%. Thin-wall shell state was relatively smooth when microcapsules were not reinforced with carbon nanotubes. It was uneven when microcapsules were reinforced with carbon nanotubes. Prepared microcapsules showed little decreases of weights even when the exposure time was increased regardless of whether they were reinforced with carbon nanotubes. Thus, their storage capability was good. When carbon nanotube content was the same, the fracture load was almost constant without being affected by the diameter of the microcapsule. However, fracture displacement increased with increasing diameter of the microcapsule. When diameters of microcapsules were similar, fracture load and fracture displacement increased when carbon nanotube content increased. It was found that self-healing microcapsules had good storage capability and mechanical properties. Thus, they could be applied to repair damage to composite materials if thin-shell formation mechanism for adding carbon nanotubes is supplemented.

Manuscript received: July 17, 2022 / Revised: September 8, 2022 / Accepted: September 15, 2022

1. 서론

섬유강화 복합재는 금속재에 비해 비강성과 비강도가 높고 내부식성도 우수하여 경량화가 요구되는 구조재의 제작에 널리 적용되고 있다. 그러나 복합재 구조재는 외부에서 작용하는 하중 및 충격 등에 의해 내부에 미세 균열이 발생되기도 한다. 이러한 미세 균열은 C-스캔 등의 비파괴 검사를 통해 탐지할 수 있지만 비파괴 검사를 통해서도 탐지가 쉽지 않은 경우가 많으며 설령 미세 균열이 탐지되었더라도 보수가 불가능한 경우가

많다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위해 복합재 구조재 내에 발생하는 미세 균열을 빠르게 탐지하고 스스로 보수하는 자가치유 기법이 제시된 바 있다[1,2]. 자가치유 기법은 자가치료용 마이크로캡슐과 촉매가 분산되어 있는 복합재 구조재에 과도한 외부하중이 가해져 복합재 구조재 내부에 손상이 발생하면 자가치료용 마이크로캡슐이 손상을 인지하고 마이크로캡슐 내부에 저장된 자가치료제를 손상 부위로 방출하여 주위에 분산된 촉매와 중합반응을 일으켜 손상을 스스로 치유하는 방법이다.

White 등[1]은 Eshelby-Mura Equivalent Inclusion Method를

이용하여 복합재 내의 미세 균열과 마이크로캡슐의 상호작용에 대한 연구를 수행하였다. 이들에 따르면 마이크로캡슐의 박막 탄성계수가 복합재의 기지 탄성계수보다 높으면 균열 진전이 마이크로캡슐로 향하지 못하도록 하는 응력장이 미세 균열 부위에 형성되고, 마이크로캡슐의 박막 탄성계수가 복합재의 기지 탄성계수보다 낮으면 균열 진전이 마이크로캡슐로 향하게 하는 응력장이 미세균열 부위에 형성된다고 하였다.

자가 치유 기법을 성공적으로 적용하기 위해서는 자가치료제를 안정적으로 저장하고, 미세 균열을 인지한 경우 자가치료제를 스스로 방출할 수 있는 마이크로캡슐의 제조가 필수적이다 [3,4]. 기존에는 우레아-포름알데히드 박막을 가진 마이크로캡슐의 제조에 대한 연구가 제시된 바 있지만 마이크로캡슐의 박막 두께가 얇고 강성이 낮아 복합재를 성형하는 과정에서 복합재 내부에 삽입되는 마이크로캡슐이 파손될 우려가 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 멜라민-우레아-포름알데히드 박막을 가진 마이크로캡슐의 제조에 대한 연구가 수행되어 왔다[5-8]. 최근에는 탄소나노튜브가 보강된 멜라민-우레아-포름알데히드 박막을 가진 마이크로캡슐의 제조에 대한 연구도 시도되고 있다. Along 등[9]은 LBL (Layer-By-Layer) 공정을 적용하여 탄소나노튜브를 증착시킨 마이크로캡슐을 제조하고 마이크로캡슐에 보강된 탄소나노튜브의 보강 효과를 확인하였다. Ahangari 등 [10]은 탄소나노튜브와 알루미늄으로 보강된 마이크로캡슐을 제조하고 이들 마이크로캡슐에 대해 나노압입시험을 수행하여 마이크로캡슐의 기계적 특성을 평가하였다. Jagtap 등[11]은 탄소나노튜브가 적용된 마이크로캡슐의 제조에 대한 연구를 통해 마이크로캡슐의 박막 강성을 증가시키고 수율을 높일 수 있는 방안을 제시하였다. Caruso 등[12]은 이중 구조의 폴리우레탄/폴리우레아-포름알데히드 박막을 갖는 마이크로캡슐을 제조하고 이들 마이크로캡슐에 대해 미소압축시험 및 TGA 시험을 수행하여 마이크로캡슐의 박막 특성을 조사하였다. Sun 등[13]은 멜라민-포름알데히드 박막을 갖는 마이크로캡슐을 제조하고 이들 마이크로캡슐에 대해 미소압축시험을 수행하여 파단하중은 마이크로캡슐의 직경에 비례하는 양상을 갖는다고 하였다. Ghaemi 등[14]은 멜라민-포름알데히드 박막을 갖는 마이크로캡슐을 제조하고 이들 마이크로캡슐에 대해 압축시험을 수행하였으며 마이크로캡슐의 탄성계수는 직경에 무관하지만 파단하중은 직경에 영향을 받는다고 하였다. Keller 등[15]은 우레아-포름알데히드 박막을 갖는 마이크로캡슐을 제조하고 이들 마이크로캡슐에 대해 미소압축시험을 수행하여 건조 상태와 침지 상태에서의 마이크로캡슐의 탄성계수를 평가하였다.

본 연구에서는 멜라민-우레아-포름알데히드 박막을 갖는 마이크로캡슐과 탄소나노튜브가 보강된 멜라민-우레아-포름알데히드 박막을 갖는 마이크로캡슐을 제조하고 이들 마이크로캡슐에 대해 전계방출형주사현미경(FE-SEM)을 이용하여 박막 상태를 관찰하고 자가치료제 보관 성능을 조사하였다. 또한 미소압축시험을 수행하여 마이크로캡슐의 직경에 따른 파단하중과 파단변형을 평가하였다.

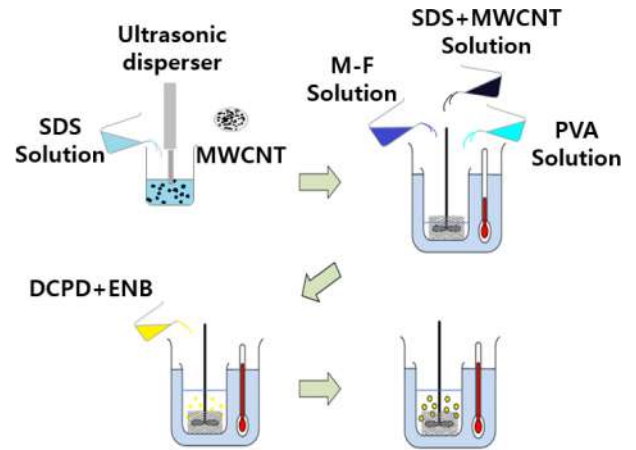


Fig. 1 Schematic diagram of the manufacturing process

2. 마이크로캡슐 제조 및 시험 방법

2.1 마이크로캡슐 제조 방법

탄소나노튜브 함유량을 달리한 마이크로캡슐들을 제작하였다. 이때 탄소나노튜브 함유량은 0.00, 0.17, 0.50 wt%의 3 종류를 고려하였다. 제조 방법은 탄소나노튜브를 첨가하는 절차를 제외하고는 모두 동일하게 적용하였다.

Fig. 1에는 탄소나노튜브가 보강된 마이크로캡슐의 제조 과정이 나타나 있다. 첫째, 100 ml의 초순수에 SDS (Sodium Dodecyl Sulfate, Junsei, Japan)을 넣고 SDS 수용액을 만든다. 둘째, SDS 수용액에 탄소나노튜브를 넣고 초음파 분산기(VC505, Sonics and Materials, USA)를 이용하여 탄소나노튜브-SDS 용액을 만든다. 셋째, 100 ml의 초순수에 PVA (Polyvinyl Alcohol, Sigma-Aldrich, USA)를 용해시켜 안정화제 역할을 하는 PVA 수용액을 만든다. 넷째, 100 ml의 초순수에 멜라민(Melamine, Sigma-Aldrich, USA)과 포름알데히드(Formaldehyde, Sigma-Aldrich, USA)를 혼합하여 박막 구성재인 멜라민-우레아-포름알데히드 수용액을 만든다. 다섯째, 탄소나노튜브-SDS 용액, PVA 수용액, 자가치료제를 혼합하고 HCl (Hydrochloric Acid, Daejung, Korea) 수용액을 이용하여 수소이온농도를 6.2로 유지시킨다. 여섯째, 80°C에서 교반 과정을 통해 만든 자가치료제가 저장된 마이크로캡슐들이 형성되며 이들 마이크로캡슐을 필터링하여 건조시키면 탄소나노튜브가 보강된 마이크로캡슐이 얻어진다.

2.2 마이크로캡슐의 박막 관찰

마이크로캡슐의 박막 상태를 관찰하기 위한 시료 준비과정은 다음과 같다. 첫째, 아크릴판에 순간접착제를 뿌린 다음 마이크로캡슐을 분산시킨다. 둘째, 면도날을 이용하여 마이크로캡슐을 깨뜨린 다음 마이크로캡슐에 저장된 자가치료제를 제거한다. 셋째, 백금코팅기(JP/E-1010, Hitachi Technology, Japan)를 이용하여 코팅한 다음 전계방출형주사현미경을 통해 마이크로캡슐 박막을 관찰한다.

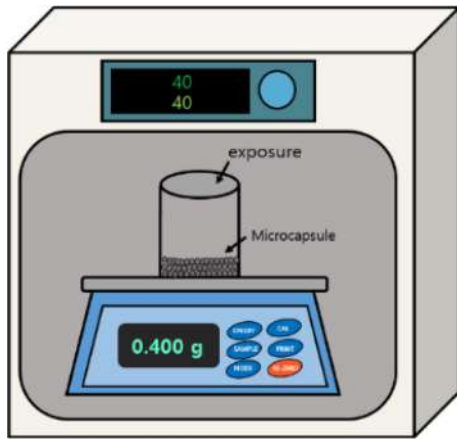


Fig. 2 Schematic diagram of the storage capability test

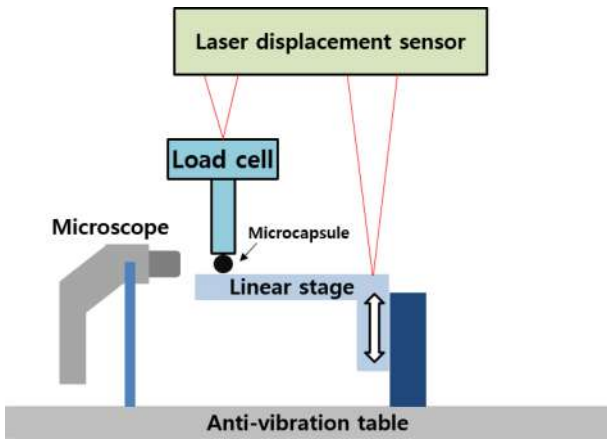


Fig. 3 Schematic diagram of the micro-compressive test

2.3 마이크로캡슐의 보관 성능 평가

Fig. 2에는 마이크로캡슐의 자가치료제 보관 성능을 평가하기 위해 규정된 온도 조건에서 마이크로캡슐의 무게를 측정하는 장치가 나타나 있다. 시험장치는 온도를 제어하는 오븐(SH-DO-149FG, SH_Scientific, Korea), 무게를 측정하는 정밀전자저울(AR2140, OHAUS, USA), 데이터수집장치로 구성되었다. 자가 치료제 보관 성능 평가를 위해 100-200 μm 직경의 마이크로캡슐들을 바이알 병에 넣은 다음 50°C 오븐에서 14일 동안 무게를 측정하였다.

2.4 마이크로캡슐의 기계적 특성 평가

Fig. 3에는 마이크로캡슐의 기계적 특성을 평가하기 위한 미소압축시험기가 나타나 있다. 미소압축시험기는 로드셀(LVS-5GA, Kyowa, Japan), 리니어 스테이지(TD-102, Technohands, Japan), 두 개의 레이저 변위 센서(ZS-LD20 & ZS-HLDC, Omron, Japan)로 구성되어 있다. 마이크로캡슐의 압축 양상은 실체현미경(Icanscope, Sometech, Korea)을 통해 관찰하였으며 하중과 변위는 마이크로캡슐에 하중이 가해지는 순간부터 로드셀과 레이저 변위 센서에서 수집하였다.

Table 1. Diameter distributions of three types of microcapsules

Type	μm			
	>100	100-150	150-200	<200
MWCNT_0.00	3.2	28.5	51.8	16.6
MWCNT_0.17	6.3	47.5	34.3	12.0
MWCNT_0.50	0.3	53.7	38.3	7.8

3. 시험결과

3.1 마이크로캡슐의 크기 분석

탄소나노튜브의 함유량을 달리하여 제조된 마이크로캡슐의 수율과 직경을 조사하였다. 탄소나노튜브의 함유량은 0.00, 0.17, 0.50 wt%의 3종류로 MWCNT_0.00, MWCNT_0.17, MWCNT_0.50으로 각각 표기하였다. 제조된 마이크로캡슐은 100, 150, 200 μm의 테스트 시브(Testing Sieve, Chunggyesanggongsa, Korea)를 사용하여 4종류로 분류하였다.

Table 1에는 탄소나노튜브의 함유량에 따른 마이크로캡슐의 직경별 수율이 나타나 있다. 마이크로캡슐의 직경별 수율은 마이크로캡슐의 전체 무게에 대한 직경별 무게 비로 정의하였다. MWCNT_0.00인 경우 100-150 μm는 28.5%, 150-200 μm는 51.8%, MWCNT_0.17인 경우 100-150 μm는 47.5%, 150-200 μm는 34.3%, 그리고 MWCNT_0.50인 경우 100-150 μm는 53.7%, 150-200 μm는 38.3%로서 제조된 마이크로캡슐의 80-90%가 100-200 μm 범위에 있음을 알 수 있다.

3.2 마이크로캡슐의 박막 분석

Fig. 4에는 탄소나노튜브의 함유량을 달리한 마이크로캡슐의 박막 상태가 나타나 있다. 여기에서 보면 MWCNT_0.00의 박막은 비교적 매끄러운 표면으로 되어 있지만 탄소나노튜브가 보강된 박막은 요철 상태의 표면을 가지며 박막 표면에서는 비교적 균일하게 분산되어 있는 탄소나노튜브들이 관찰된다.

Fig. 5와 Table 2에는 탄소나노튜브의 함유량을 달리하여 제조된 마이크로캡슐의 박막 상태와 박막 두께 측정 결과가 나타나 있다. 이때 박막 두께는 각 범주별 10개의 시편에 대한 시험 결과이다. 여기에서 보면 탄소나노튜브의 함유량이 동일한 경우 박막 두께는 마이크로캡슐의 직경에 무관하고 두께 변화는 5% 이내이다. 그러나 탄소나노튜브의 함유량은 박막 두께에 영향을 미치며 박막 두께는 MWCNT_0.00에 비해 MWCNT_0.17인 경우 21-24%, MWCNT_0.50인 경우 36-37% 감소한다. 이는 탄소나노튜브가 박막 구성재의 중합반응에 영향을 미치지 않으므로 판단되며 박막 형성 메커니즘에 대한 체계적인 연구가 필요하다.

3.3 마이크로캡슐의 보관 성능 평가 결과

마이크로캡슐의 자가치료제 보관 성능이 양호하면 내부에 저장된 자가치료제가 안정적으로 저장되지만, 마이크로캡슐의 자가치료제 보관 성능이 떨어지면 내부에 저장된 자가치료제가

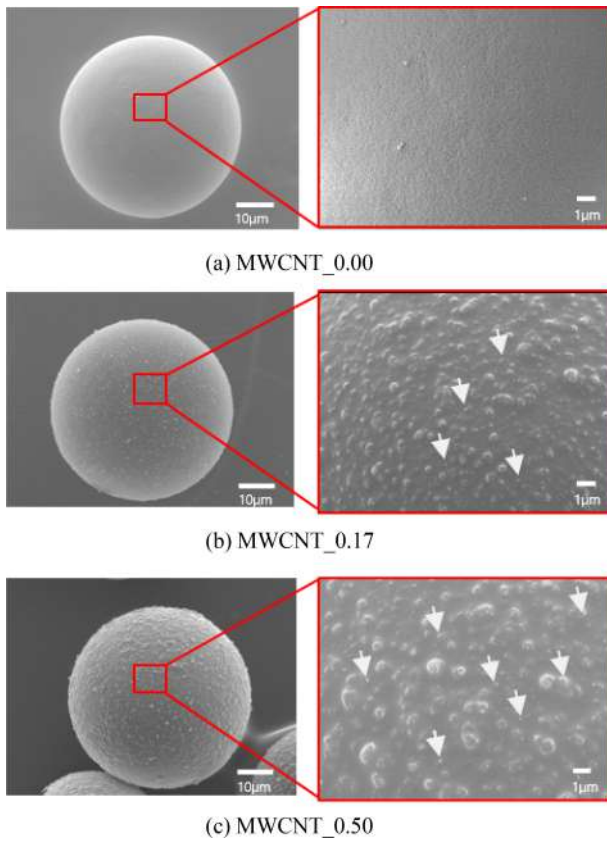


Fig. 4 Thin-shell surface of microcapsules observed by FE-SEM

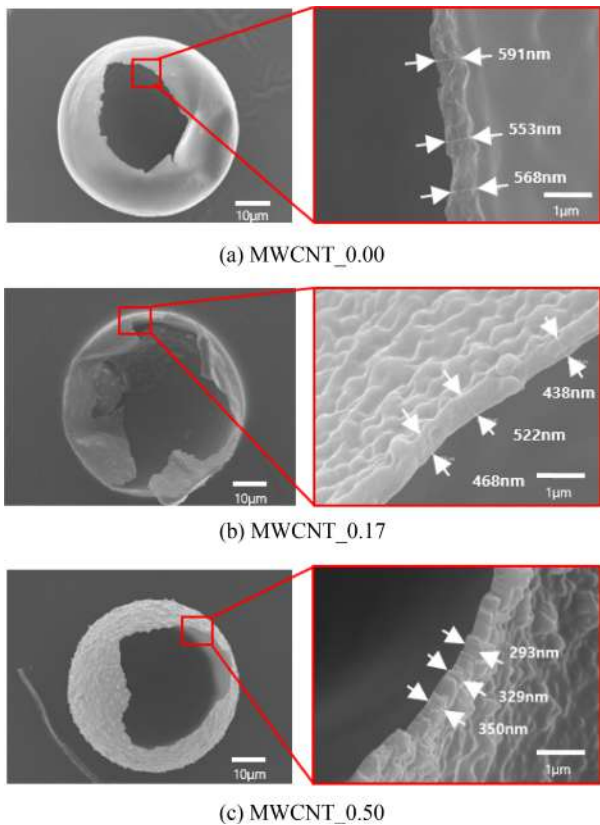


Fig. 5 Measurement of thin-shell thickness of microcapsules

Table 2 Thin-shell thicknesses of microcapsules

Type \ μm	>100	>100-150	>150-200
MWCNT_0.00	589 (39.8)	607 (37.1)	619 (28.7)
MWCNT_0.17	463 (21.9)	460 (25.3)	477 (26.8)
MWCNT_0.50	376 (18.5)	385 (17.9)	389 (13.1)

() : standard deviation, unit : nm

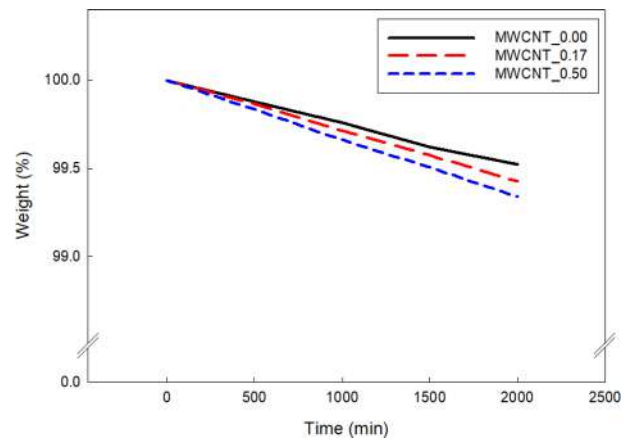


Fig. 6 Storage capability test results of microcapsules

쉽게 방출된다. 마이크로캡슐의 자가치료제 보관 성능을 평가하기 위해 50°C 오븐에서 15일 동안 100-200 μm 직경의 마이크로캡슐에 대해 노출시간에 따른 무게를 측정하였다.

Fig. 6에는 노출시간에 따른 마이크로캡슐의 무게 측정 결과가 나타나 있다. 마이크로캡슐의 노출시간이 15일 경과되면 MWCNT_0.00인 경우 초기 무게의 0.5%, MWCNT_0.17인 경우 초기 무게의 0.6%, MWCNT_0.50인 경우 초기 무게의 0.7% 무게 감소가 나타난다. 이로 미루어 보면 탄소나노튜브의 보강 여부에 무관하게 제조된 마이크로캡슐의 보관 성능은 양호한 것으로 판단된다.

3.4 미소압축시험 결과 분석

Fig. 7에는 탄소나노튜브의 함유량을 달리하여 제조한 마이크로캡슐에 대한 전형적인 하중-변위 선도가 나타나 있다. 이때 시험에는 125 μm 직경을 갖는 마이크로캡슐을 적용하였다. MWCNT_0.00인 경우 파단하중은 7.8 mN, 파단변형은 28.3 μm , MWCNT_0.17인 경우 파단하중은 9.0 mN, 파단변형은 31.9 μm , MWCNT_0.50인 경우 파단하중은 10.9 mN, 파단변형은 33.5 μm 이다.

Fig. 8에는 MWCNT_0.50인 마이크로캡슐에 대해 얻은 하중-변위 선도와 미소압축시험이 진행되는 동안 실제현미경을 통해 관찰한 변형 양상이 나타나 있다. 이때 마이크로캡슐의 상부는 로드셀 팁에 접촉되어 있고 마이크로캡슐의 하부는 리니어

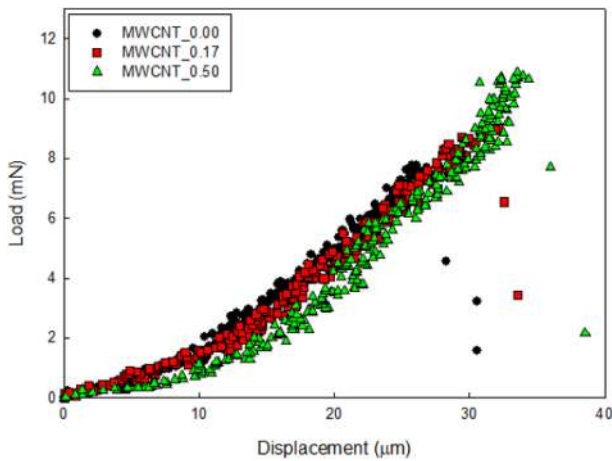


Fig. 7 Typical load-displacement curves conducted by micro-compressive test

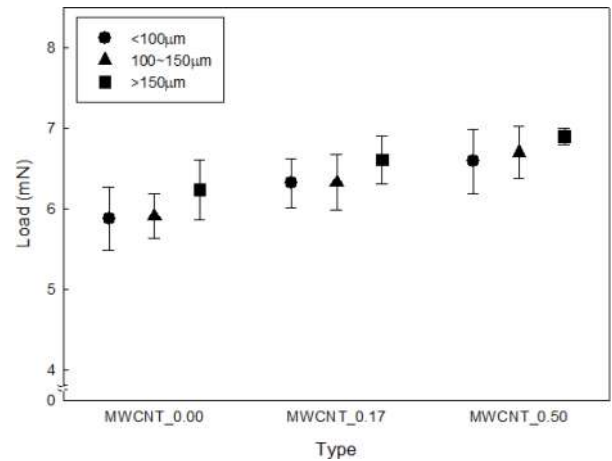


Fig. 9 Test results obtained by micro-compressive test

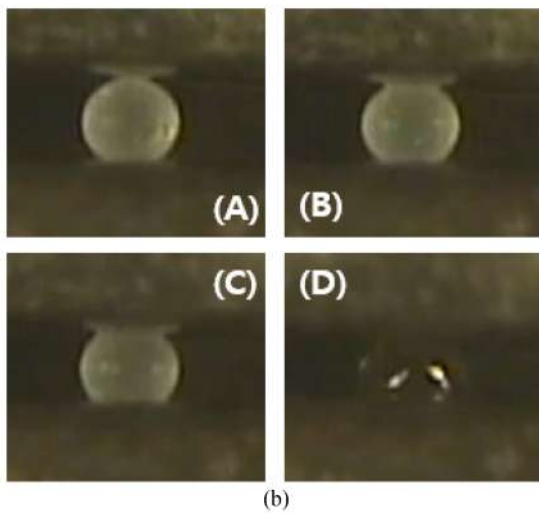
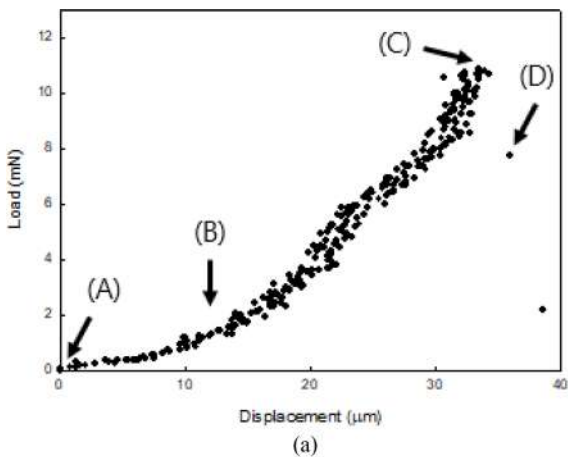


Fig. 8 Deformation of microcapsules observed in micro-compressive test

스테이지와 접촉되어 있다. 총 4단계에 따라 마이크로캡슐의 변화를 나타내었는데, Figs. 8(A)는 마이크로캡슐이 로드셀 팁과

접촉되기 시작하는 단계, 8(B)는 마이크로캡슐이 로드셀 팁에 의해 압축하중을 받는 단계, 8(C)는 마이크로캡슐이 파손되기 직전 단계, 그리고 8(D)는 마이크로캡슐이 파손되어 하중이 급격히 감소되는 단계로서 마이크로캡슐이 파손되면 내부에 저장된 자가치료제가 외부로 방출되는 양상이 관찰된다.

Fig. 9에는 마이크로캡슐의 직경과 탄소나노튜브의 함유량에 따른 미소압축시험 결과가 나타나 있다. 이때 미소압축시험은 각 시험조건 별 10개씩의 시료에 대해 수행하였다. 여기에서 보면 MWCNT_0.00인 경우 파단하중과 파단변위는 100 μm 이하에 비해 100-150 μm에서는 0.5%와 53.1%, 150-200 μm에서는 6.1%와 138.4% 증가한다. MWCNT_0.17인 경우 파단하중과 파단변위는, 100-150 μm에서는 0.2%와 54.3%, 150-200 μm에서는 4.6%와 122.9% 증가한다. MWCNT_0.50인 경우 파단하중과 파단변위는 100-150 μm에서는 1.7%와 67.7%, 150-200 μm에서는 4.7%와 140.8% 증가한다. 이와 같이 탄소나노튜브의 함유량이 동일한 경우 파단하중은 마이크로캡슐의 직경에 영향을 받지 않지만 파단 변위는 마이크로캡슐의 직경에 영향을 받는다. 또한 100 μm 이하인 경우 파단하중과 파단변위는 MWCNT_0.00에 비해 MWCNT_0.17에서는 7.5%와 6.4%, MWCNT_0.50에서는 12.1%와 7.4% 증가한다. 100-150 μm인 경우 MWCNT_0.17에서는 7.1%와 7.2%, MWCNT_0.50에서는 13.4%와 17.7% 증가한다. 150-200 μm인 경우 MWCNT_0.17에서는 파단하중은 5.9% 증가 하지만 파단변위는 변화가 거의 나타나지 않는다. MWCNT_0.50에서는 파단하중과 파단변위는 10.6%와 8.5% 증가한다. 이로 미루어 보면 마이크로캡슐의 직경이 유사한 경우 탄소나노튜브의 함유량이 높아지면 파단하중과 파단변위는 증가함을 알 수 있다.

4. 결론

멜라민-우레아-포름알데히드 박막을 갖는 마이크로캡슐과 탄소나노튜브가 보강된 멜라민-우레아-포름알데히드 박막을 갖는

마이크로캡슐에 대한 전계방출형주사현미경 관찰, 보관 성능 시험, 그리고 미소압축시험을 통해 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 본 연구에서 제시된 마이크로캡슐의 제조공법을 적용하면 100-200 μm 직경을 갖는 마이크로캡슐을 전체 무게 대비 80-90 wt% 얻을 수 있었다.

(2) 탄소나노튜브가 보강되지 않은 마이크로캡슐의 박막 상태는 비교적 매끄럽게 나타났지만, 탄소나노튜브가 보강된 마이크로캡슐의 박막 상태는 요철 상태로 나타나며 박막 표면에 비교적 균일하게 분산된 탄소나노튜브가 관찰되었다.

(3) 제조된 마이크로캡슐은 탄소나노튜브의 보강 여부에 무관하게 자가치료제 보관 성능이 양호함을 알 수 있었다.

(4) 탄소나노튜브의 함유량이 동일한 경우 박막 두께는 마이크로캡슐의 직경에 영향을 받지 않지만, 탄소나노튜브의 함유량이 증가하면 박막 두께는 감소하였다. 이는 탄소나노튜브가 박막 구성재의 중합반응에 영향을 미치지 않으므로 탄소나노튜브가 첨가된 경우에 대한 박막 형성 메커니즘에 대한 연구가 체계적으로 수행될 필요가 있을 것으로 판단된다.

(5) 탄소나노튜브의 함유량이 동일한 경우 파단하중은 마이크로캡슐의 직경에 영향을 받지 않지만, 파단변위는 마이크로캡슐의 직경에 영향을 받는 것으로 나타났다. 또한 마이크로캡슐의 직경이 유사한 경우 탄소나노튜브의 함유량이 증가하면 파단하중과 파단변위는 증가하는 양상이 나타났다.

REFERENCES

- White, S. R., Sottos, N. R., Geubelle, P. H., Moore, J. S., Kessler, M. R., Sriram, S., Brown, E. N., Viswanathan, S., (2001), Autonomic healing of polymer composites, *Nature*, 409, 794-797.
- Yoon, S. H., Kim, M. S., Jang, S. Y., (2015), Effects of microcapsules on mechanical properties and thermal stability of microcapsule embedded polymeric resins, *Composites Research*, 28(5), 316-321.
- Nam, J.-O., Choi, C.-H., Kim, J., Kang, S.-M., Lee, C.-S., (2013), Fabrication of polymeric microcapsules in a microchannel using formation of double emulsion, *Korean Chemical Engineering Research*, 51(5), 597-601.
- Thakur, V. K., Kessler, M. R., (2015), Self-healing polymer nanocomposite materials: A review, *Polymer*, 69, 369-383.
- Ahangari, M. G., Fereidoon, A., Jahanshahi, M., Sharifi, N., (2014), Effect of nanoparticles on the micromechanical and surface properties of poly (urea-formaldehyde) composite microcapsules, *Composites part B: Engineering*, 56, 450-455.
- Guang, Y., Lee, J. K., (2013), Microcapsules containing self-healing agent with red dye, *Polymer (Korea)*, 37(3), 356-361.
- Ihm, D., Kwon, W. H., (2015), Preparation and characterization of functional microcapsules containing suspensions of conducting materials, *Applied Chemistry for Engineering*, 26(1), 40-46.
- Kim, D.-M., Lee, J.-S., Ryu, B.-C., Chung, C.-M., (2020), A study on remaining formaldehyde concentration in the synthesis of self-healing microcapsules, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, 8(1), 129-133.
- Xiong, A., Lu, X., Ma, Y., Qin, Y., Zhang, P., Shi, J., Guo, Z.-X., (2013), Cross-linked multilayer composite films and microcapsules embedded carbon nanotubes, *Materials Letters*, 105, 132-135.
- Ahangari, M. G., Fereidoon, A., Jahanshahi, M., Sharifi, N., (2014), Effect of nanoparticles on the micromechanical and surface properties of poly (urea-formaldehyde) composite microcapsules, *Composites Part B: Engineering*, 56, 450-455.
- Jagtap, S. B., Patil, V. D., Suresh, K., Ram, F., Mohan, M. S., Rajput, S. S., Patil, S., Shukla, P. G., Shanmuganathan, K., (2018), Functionalized carbon nanotube reinforced polymer nanocomposite microcapsules with enhanced stiffness, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 550, 82-89.
- Caruso, M. M., Blaiszik, B. J., Jin, H., Schelkopf, S. R., Stradley, D. S., Sottos, N. R., White, S. R., Moore, J. S., (2010), Robust, double-walled microcapsules for self-healing polymeric materials, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2(4), 1195-1199.
- Sun, G., Zhang, Z., (2002), Mechanical strength of microcapsules made of different wall materials, *International Journal of Pharmaceutics*, 242(1-2), 307-311.
- Ghaemi, A., Philipp, A., Bauer, A., Last, K., Fery, A., Gekle, S., (2016), Mechanical behaviour of micro-capsules and their rupture under compression, *Chemical Engineering Science*, 142, 236-243.
- Keller, M. W., Sottos, N. R., (2006), Mechanical properties of microcapsules used in a self-healing polymer, *Experimental Mechanics*, 46(6), 725-733.



Jeong Keun Jang

Ph.D. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology. Research interests are structural analysis and advanced composite materials.

E-mail: jjjjunk@kumoh.ac.kr



Hyeon Ji Kim

B.Sc. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology. Research interests are structural analysis and advanced composite materials.

E-mail: rlagusw10389@kumoh.ac.kr



Sung Ho Yoon

Professor in the Department of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology. Research interests are design, analysis, testing, evaluation, and life prediction of advanced composite structures.

E-mail: shyoon@kumoh.ac.kr

가스절단 과정의 역학 분석 및 수학적 모델링

Dynamic Analysis and Mathematical Modeling of a Gas Cutting Process

이재인¹, 고병수¹, 이준엽¹, 유인근¹, 문일우², 문도영², 박민원¹,#
Jae-In Lee¹, Byeong-Soo Go¹, Jun-Yeop Lee¹, In-Keun Yu¹, Il-Woo Moon², Do-Young Moon², and Minwon Park¹,#

¹ 창원대학교 전기공학과 (Department of Electrical Engineering, Changwon National University)

² 한토커팅시스템 (Hanto Cutting System)

Corresponding Author / E-mail: capta.paper@gmail.com, TEL: +82-55-213-3638

ORCID: 0000-0002-2113-3721

KEYWORDS: Gas cutting dynamics analysis (가스절단 역학 분석), Mathematical modeling of a gas cutting (가스절단 수학적 모델링), High-temperature oxidation of iron (철의 고온 산화), Oxygen cutting dynamics analysis (산소절단 역학 분석)

In this paper, the relationship between various physical and chemical dynamics included in a gas cutting process was analyzed and a mathematical model was presented. To express the gas cutting process in a formula that could reflect the physics and chemical reaction dynamics, the entire process was classified into three stages: flame spurt, metal oxidation, and metal oxide melting. Flame spurt is caused by combustion of fuel gas and oxygen. It was modeled through fluid dynamics, chemical species transport, and reaction kinetics. Metal oxidation was modeled as a chemical reaction of surface oxidation and oxide growth based on temperature and concentration of species of the metal surface obtained through flame and cutting oxygen spurt results. Finally, the melting of metal oxide was expressed as a rate equation based on melting conditions, heat flux obtained in the previous two stages, and changed properties of the metal. The presented mathematical model could analyze dynamic relationships for each stage of a gas cutting process and connect them into one process. Results of this study can be used as basic data for future finite element analysis and simulations.

Manuscript received: July 19, 2022 / Revised: September 13, 2022 / Accepted: September 19, 2022
This paper was presented at KSPE Autumn Conference 2022

1. Introduction

The gas cutting is one of the most frequently used cutting methods in the industrial field. After preheating a steel to 700-900°C with a flame, pure high-pressure oxygen is sprayed to oxidize the surface to cut metal oxide with a lower melting point. Since the gas cutting has a low technical difficulty, any special prior research is not required if an operator cuts the steel manually. However, in the case of using a robot or an automatic equipment in a special environment where access is difficult (nuclear decommissioning waste cutting, underwater cutting, etc.), a sufficient review is required in advance. In this stage, a preliminary review is generally performed through a finite element method

(FEM) analysis, but the studies necessary for FEM analysis of gas cutting have not yet been sufficiently conducted.

There have been attempts by researchers to study some phenomena during the gas cutting process or to simplify the entire process and analyze it through simulation. Refs. [1,2] analyzed the characteristics of high-temperature oxidation of thin metal films placed in tubes under controlled experimental conditions. In Ref. [3], a numerical modeling was performed on the combustion reaction of oxygen and fuel gas. In addition, Ref. [4] studied on the characteristics of impinging jet flame. Refs. [5-7] tried to numerically analyze similar processes such as laser cutting, plasma cutting, and welding, respectively, but they are different from the gas cutting process. In Refs. [8,9], attempts were made to simulate the

entire gas cutting process, but factors such as the heat source model and metal oxidation were simplified. Although these studies are easy to understand and apply to the simulation process, they can only be applied under certain conditions due to the limitations of simplified elements. For the general application of simulation studies, it is important to design more principle-based mathematical models.

This paper presents a mathematical model for the overall process of gas cutting. Modeling targets include heating by fuel gas, cutting oxygen injection, metal oxidation, and metal shape change (melting). Modeling analyzes the relationship between physical mechanics and chemical reaction mechanics for each process of gas cutting and is performed centered on the governing equations expressing the process. We analyzed the relationship between physical mechanics and chemical reaction mechanics for each process of gas cutting, and presented a mathematical model including the entire gas cutting process with a focus on the governing equation.

Prior to the mathematical modeling of the gas cutting process, the gas cutting process was organized and detailed steps were classified. The classified dynamic steps are the spurt of preheating flame and cutting oxygen, the surface oxidation of metal (iron) and the growth of the oxide film (scale), and melting including the change in the properties of metal oxide. For each process, a mathematical modeling was performed by analyzing the physical and chemical dynamics. In addition, in order to connect each process as one process, the correlation between processes was analyzed. The mathematical model presented in this paper can express the entire process of gas cutting. The presented model can be used as basic data for performing a FEM analysis-based simulation in the future.

2. Gas Cutting Process

The process of gas cutting was established prior to the analysis of the dynamic relationships. The detail principles and process of a gas cutting are as follows, and it is schematically shown in Fig. 1.

1. Select an object to be cut (base material). The base material that can be cut through the gas cutting should not form a film that inhibits oxidation during oxidation and the melting point of oxide should be lower than that of the base material.

2. The injected fuel (propane, hydrogen, acetylene, etc.) generates a flame to preheat the base material to about 700°C or higher.

3. When the iron is preheated, high-pressure pure oxygen is sprayed to the heated base material from the center of the gas cutting tip.

4. The iron heated above a certain temperature causes various

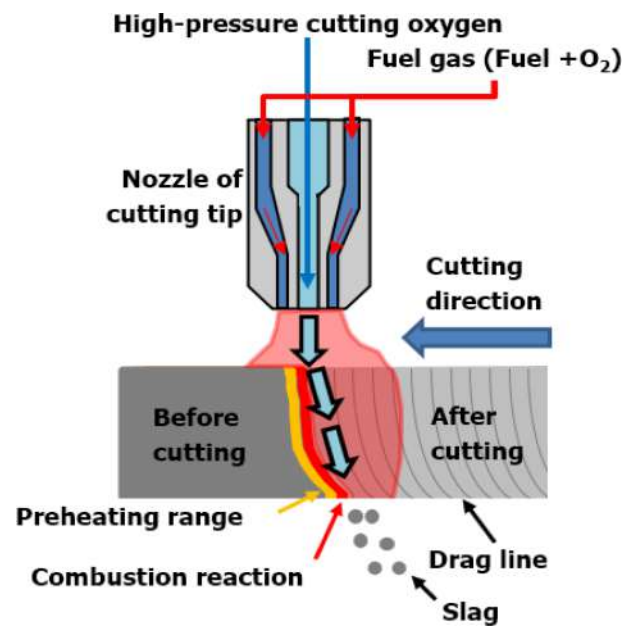


Fig. 1 Schematic diagram of a gas cutting

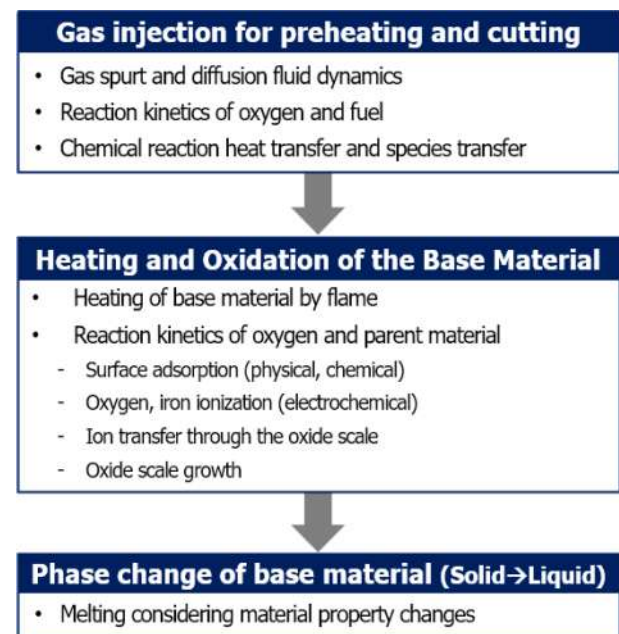


Fig. 2 Dynamics associated with the gas cutting process

oxidation reactions, which produce iron oxides (FeO , Fe_2O_3 , Fe_3O_4).

5. Since oxidation is a reaction that releases heat, the base material is heated more and more by the heat of oxidation reaction, and high-temperature conditions promote the reaction.

6. Due to the continuously ejected high-pressure oxygen, the iron melts and flies into the state of FeO and Fe at the same time. At this time, in the case of iron oxide, the lower melting point makes it easier to cut.

A summary of the dynamics involved in a series of processes

for gas cutting is shown in Fig. 2. As shown in Fig. 2, the gas cutting is explained by a very complex dynamic relationships compared to the easy accessibility of industrial fields. In Chapter 3, dynamic analysis and mathematical modeling are performed based on the process of gas cutting summarized and classified in Chapter 2. Chapter 4 organizes the connectivity between the processes described in Chapter 3 and combines them to become a single process.

3. Mathematical Modeling of the Gas Cutting

This paper aims to represent the entire process of gas cutting in one integrated mathematical modeling. As mentioned in the introduction, a gas cutting is easy to handle in the industrial field, whereas in the research area, understanding of various fields such as machinery, chemistry, and materials is required. Therefore, in this paper, according to the process described in Chapter 2, only the most essential contents are covered, and modeling was performed based on the well-known governing equations in the overall process of gas cutting. Accordingly, it expresses the phenomenon and deals only with formulas applicable to numerical analysis. The mathematical model considers only the variables that have a dominant influence on the entire gas cutting process and general factors such as temperature, pressure, concentration, and reactivity. On the other hand, parts such as detailed material properties expressed by specific constants such as iron lattice shape, oxygen solubility, and surface roughness were excluded. Other considerations or limitations on ideal conditions are described in each chapter.

3.1 Preheating Flame and Cutting Oxygen Modeling

When the cutting material is ready, the first step in a gas cutting is the spurt of a preheating flame. The preheating flame spurts the compressed fuel gas and oxygen through a narrow tipped nozzle. This paper deals with a premixed gas that is premixed with oxygen and sprayed together.

The premixed gas spurts in the gaseous state generates heat through a chemical reaction process. The spurts fluid collides with the base material and transfers heat. In general, when creating a mathematical model for combustion, it should be modeled considering six factors: Flow modeling, Turbulence modeling, Turbulence chemistry interaction, Chemical kinetics, Radiant heat transfer, Pollutant formation. In the case of general flame heat transfer, the effect of radiant heat transfer is very large, but in the case of wall collision flames, heat transfer by forced convection has a dominant effect (70-90%) [3]. Therefore, for a gas cutting,

reliable results can be obtained without considering the effect of radiant heat transfer. Also, the pollutant formation is excluded because it is a factor that affects radiant heat.

Before creating a mathematical model for the preheating flame and cutting oxygen, the following assumptions were made for the convenience of interpretation. The assumptions below are high-reliability assumptions that have already been verified in relation to the flame combustion modeling [4].

1. All gases behave like ideal gases.
2. In the gaseous state, the binary diffusion coefficient is the same, and it diffuses along Fick's law.
3. Diffusion preference ratio, Lewis number equals 1.
4. The chemical reaction of combustion is premised on an irreversible reaction.

The dynamic model of the preheating flame starts from the continuity equation of the general fluid. Mathematical modeling of the fluid behavior and heat flux is described with reference to the theorem of Ananth Sharma and Sreenivas Jayanti based on the representative fluid equations and species transport equations [3]. The general conservation equation for a gas mixture consisting of n components that accompanies a chemical reaction is:

$$\frac{\delta \rho}{\delta t} + \Delta \cdot (\rho v) = 0 \quad (1)$$

where ρ is the density of the fluid (constant in the case of incompressible fluid), t is the time, and v is the velocity of the fluid. The above equation leads to the Navier-Stokes momentum conservation equation.

$$\rho \left(\frac{\delta u}{\delta t} + v \cdot \nabla v \right) = -\nabla P + \nabla \cdot T + f \quad (2)$$

where P is the pressure, T is the stress, and f is the volume force. This means that the acceleration of the fluid is determined according to the pressure, stress, and volume force acting on the fluid, and the shear stress is proportional to the shear strain. In this case, the species conservation equation for fluid flow can be written as

$$\frac{\delta \rho_i}{\delta t} + \nabla \cdot (\rho_i v_i) = S_i \quad (3)$$

where S_i [kg/m^3] represents the rate of formation of species i by chemical reaction. By applying Fick's diffusion law to Equation (3), we can derive a more useful form of the species balance equation in terms of mixture properties.

$$\frac{\delta \rho_i}{\delta t} + \nabla \cdot (\rho_i v_i) = \nabla \cdot (\Gamma \nabla Y_i) + S_i \quad (4)$$

where Γ is the mass diffusion rate, Y_i is the mass fraction and $-\Gamma \nabla Y_i$ is the diffusion flux.

Equation (4) can be used to derive a species balance equation considering the properties of the mixture. Based on the equation, the momentum and energy conservation equations can be expressed as Equations (5) and (6).

$$\frac{\delta \rho v}{\delta t} + \nabla \cdot (\rho v v) = -\nabla P + \mu[\nabla v + (\nabla v)^T] \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\delta(\rho H)}{\delta t} + \nabla \cdot (\rho v H) &= \frac{\delta \rho}{\delta t} + \nabla \cdot (\lambda \nabla T) \\ &+ \nabla \cdot \mu[\nabla v + (\nabla v)^T]v + Q_R \end{aligned} \quad (6)$$

where μ and λ are the viscosity and thermal conductivity of the fluid, respectively, and mean the heat release due to the chemical reaction. The total enthalpy H is defined as

$$H = h + \frac{1}{2}v^2 \quad (7)$$

where h is the static enthalpy and is calculated as the specific heat as

$$\Delta H = \int_0^T [Cp(T')]dT' - \int_0^{T_{ref}} [Cp(T')]dT' \quad (8)$$

where Cp is the heat capacity and T_{ref} is the reference temperature at which the static enthalpy becomes zero. The reaction occurring in Equation 4 causes a change in enthalpy. The enthalpy change caused by a chemical reaction is as follows.

$$\Delta H_{reaction}^0 = \sum \Delta H_f^0(\text{product}) - \sum \Delta H_f^0(\text{reactants}) \quad (9)$$

The change in enthalpy due to a chemical reaction can be obtained by calculating the change in standard enthalpy or dissociation and bond energy of molecules. The method of calculating the enthalpy change due to a chemical reaction is to derive the difference by obtaining the dissociation energy and the bond energy in the process of separating all the species participating in the reaction into each element and molecular binding into the final reactants. As a result of the calculation, if the final enthalpy change is negative, it is an exothermic reaction, and if it is positive, it is an endothermic reaction. Fig. 3 shows the enthalpy change for the first order combustion reaction of propane gas and oxygen.

The change in enthalpy obtained through the chemical reaction is organized as follows by Danckwerts boundary condition.

$$k\nabla T \cdot \bar{n} = \rho \Delta H v \cdot \bar{n} \quad (10)$$

where \bar{n} is the boundary direction vector. The final heat flux Q_{flame} by the flame is

$$Q_{flame} = -(k + k_T)\nabla T \quad (11)$$

where k is the intrinsic thermal conductivity and the turbulent thermal conductivity k_T is defined as

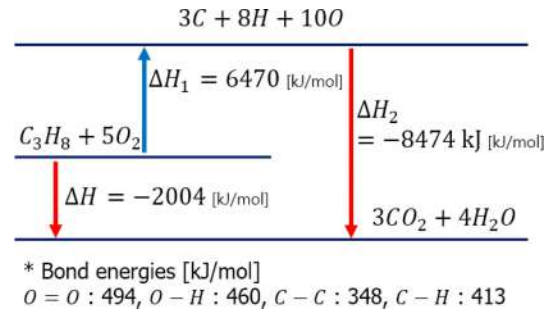


Fig. 3 Example of change in enthalpy of combustion reaction (propane gas)

$$k_T = \frac{\mu_T c_p}{Pr_T} \quad (12)$$

where μ_T is the fluid viscosity as a function of temperature, and Pr_T is the Prandti number as a function of temperature.

In this section, the dynamics of the reaction fluid including the preheating flame and cutting oxygen was summarized through Equations (1) to (10). Afterwards, the heat flux transferred to the base material was summarized through Equations (11) and (12). Through the mathematical model, the results of the temperature change of the base material over time and the distribution of each species on the surface of the base material can be obtained.

3.2 Surface Oxidation and Scale Growth of the Metal

We summarized the mathematical model for the temperature change of the base material and the distribution of species through Section 3.1. As in the gas cutting process outlined in Section 2, the temperature rises by the preheating flame, and the surface of the base material forms an oxide film and the oxide film layer (hereafter scale) grows. Oxidation of metals is also carried out at low temperatures, but oxidation carried out at temperatures below 570°C has a very insignificant effect on the cutting process, so the gas cutting mathematical model only considers the effect of high-temperature oxidation [1,10,11].

Oxidation of metals is based on the process in Fig. 4 as described in Wagner's theory. The key to prior research is that an oxide growth is most affected by oxidation temperature and oxygen pressure. After the publication of Wagner's theory, studies related to mathematical modeling of the growth rate of the oxide scale continued. These studies can only be applied under specific conditions or have not been fully verified through experiments [12,13]. In this paper, the mathematical modeling of metal oxidation is based on the already verified parabolic equation of Wagner's theory and assumes the same ideal conditions.

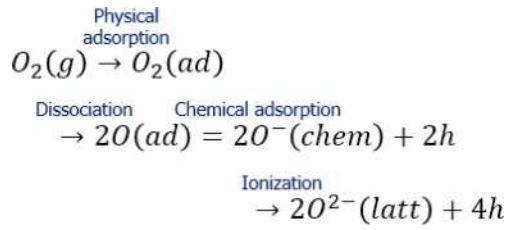


Fig. 4 Oxygen adsorption process on metal surface

The oxidation stage of metal can be divided into two stages: oxygen adsorption, surface oxidation, and scale growth. The adsorption and ionization processes are described by the chemical formulas presented in Fig. 4.

Oxygen in gaseous state diffuses as the fluid moves, as described in Equations (4) and (5). Physical adsorption occurs when oxygen approaches the surface of the metal. On the surface of the metal, oxygen molecules dissociate, chemically bond with the metal, ionize, and create cation vacancies. In this process, the valence electrons of metals and gases are rearranged to form chemical bonds. In order for oxygen to be chemically adsorbed on the metal surface, the oxygen pressure must be greater than the dissociation pressure of the oxide in equilibrium with the metal [14].

$$P_{dis} = \exp\left(\frac{\Delta G}{RT}\right) \quad (13)$$

where ΔG is the gibbs energy for oxide formation and R is the gas constant. The reaction rate for the generation of surface species A including adsorption conditions can be expressed as follows.

$$k_A = k_{fA} \prod_{i=1}^n c_i^{v_{f,iA}} - k_{rA} \prod_{i=1}^n c_i^{v_{r,iA}} \quad (14)$$

$$k_{fA} = \left(\frac{\gamma_A}{1 - \gamma_A} \right) \frac{\prod \sigma_j^{v_{jA}}}{\Gamma_{tot}^m} \left(\frac{1}{4} \right) \sqrt{\frac{8RT}{\pi M_i}} \quad (15)$$

In Equation (14), c_i is the molar concentration of species i , and k_f and k_r are the ratio constants for forward and reverse reactions, respectively. In Equation (15), Γ_{tot}^m is the concentration of all surface species, m is the reaction order, M_i is the molecular weight of the species i , and γ_A is the sticking coefficient. The chemical adsorption reaction rate of the gas on the metal surface can be summarized through the above equation, and the site volumic concentration (Z_i) change and the site surface species concentration (c_i) for each surface species i are as follows.

$$\frac{dZ_i}{dt} = \frac{R_{surf,i}}{\Gamma_{tot}} \quad (16)$$

$$c_i = \frac{Z_i \Gamma_{tot}}{\sigma_i} \quad (17)$$

The surface reaction accompanies an enthalpy change of the same value as the bulk reaction, and the heat flux due to the enthalpy change is as follows.

$$n \cdot k \nabla T = \sum_{A=1}^n k_A \Delta H_A \quad (18)$$

After the oxide layer is formed on the metal surface, the metal and oxygen are separated by the scale and the reaction is carried out through diffusion through the scale. The growth rate of the scale is controlled by the movement of ions or electrons. This process was first outlined by [15]. The growth rate of the scale thickness (X) in the high-temperature oxidation of metal is expressed as a parabolic function in Equation (19).

$$\frac{dX}{dt} = \frac{k_p}{X} \quad (19)$$

$$X^2 = 2k_p t \quad (20)$$

where k_p is the rate constant.

In one-dimension, the rate of diffusion is described by Fick's law.

$$J = -D \frac{\delta C_i}{\delta X} \quad (21)$$

$$J = -D \frac{\Delta c}{\Delta X} = \frac{-D(c_2 - c_1)}{X} \quad (22)$$

In Equation (21), J is the flux through a unit area with respect to a plane orthogonal to the diffusion direction, D is the diffusion coefficient, and C_i is the concentration of the species. The partial differential result of Equation (21) is Equation (22), c_1 and c_2 are the concentrations of diffusion components at the oxygen-oxide and oxide-metal interfaces, respectively. According to Fick's law, the diffusion of a species flows from a region of high concentration to a region of low concentration. When the rate is controlled by diffusion, the interface creation process is performed very quickly and it can be assumed that it is in a local thermal equilibrium state. That is, the $c_1 - c_2$ is time invariant. As a result, the growth rate coefficient can be summarized as follows.

$$k_p = \Omega D (c_1 - c_2) \quad (23)$$

where Ω is the volume of oxide formed per unit quantity of diffusing species.

3.3 Characteristic Changes and Melting of Metal Oxide

Section 3.3 deals with boundary conditions to be applied to

Table 1 Properties of iron oxide

Item	Wüstite	Magnetite	Hematite
Formula	FeO	Fe ₃ O ₄	Fe ₂ O ₃
Cation	Fe ²⁺	Fe ²⁺ /Fe ³⁺	Fe ³⁺
Melting point [°C]	1,377	1,583	1,350
Heat of formation [kJ/mol]	-251	-1,012	-742
Specific latent heat of fusion [kJ/mol]	24.06	138.07	-

numerical analysis for phase change (melting) of metals. Practically, the metal is in a liquid state after melting and is scattered by high pressure oxygen to become sludge. However, in this paper, in order to focus on the cutting base material itself, only the shape change of the base material is considered, and the molten and scattered metal is not dealt with (assuming it has been removed).

In a metal, the temperature rises and the oxidation proceeds together by the preheating flame and oxidation reaction. Compared to the state before oxidation, the metal oxide changes various material properties, and the melting point also changes. In particular, Wüstite (FeO), which accounts for about 95% of iron oxide in the high-temperature oxidation process, has a melting point that is about 160°C lower than that of conventional iron, and thus melts faster than Fe [16]. The material properties of iron oxide are presented in Table 1.

When the oxidation of the metal is completed and the temperature rises to the melting point, the temperature of the metal does not increase instantaneously. This is a phenomenon in which an object absorbs the latent heat of fusion required before a phase change, and the latent heat of fusion can be expressed as follows.

$$Q_{melt} = m \times L [J] \quad (24)$$

where m is the mass of the solid and L is the intrinsic latent heat of fusion of the material. Finally, the amount of heat absorbed or released by the material until melting is given as follows:

$$Q_{total} = Q_{melt} \times m C_p \Delta T \quad (25)$$

where C_p is the iron (or iron oxide) heat capacity and ΔT is the temperature change.

The boundary condition for the melting phenomenon of an object can be written as a function of velocity.

$$V = \frac{Q_{total}}{\rho_m Q_{melt}} \quad (26)$$

where ρ_m is the density of the metal.

Through the above formula, the melting of the metal is expressed, and the molten metal is scattered by high-pressure oxygen.

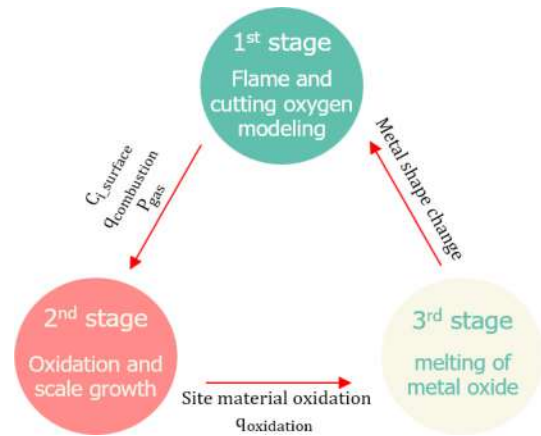


Fig. 5 Interrelations of a simplified gas cutting process

4. Interrelationship of the Gas Cutting Mathematical Model

In Chapter 3, the mechanical analysis and mathematical modeling of gas cutting were performed. The mathematical model of each stage is not expressed independently, but mutually influences the mathematical model of the previous or later stage. According to the sequence of the cutting steps, the distribution of species according to the location of the preheating flame and cutting oxygen is calculated by Equations (3) and (4), through Equations (6), (9), (10), (11), and (12), the values for the transfer of heat generated by the combustion reaction and the local oxygen partial pressure can be obtained.

The species distribution, thermal energy (temperature increase of base material), and oxygen partial pressure summarized in Section 3.1 are the main variables in Section 3.2. First, in the case of oxygen partial pressure and temperature, the conditions for the generation of oxides are determined in Equation (13). And the surface concentration, which is the most important variable in Equation (14), is determined based on the distribution of each gas species, and since the other coefficients are functions having temperature as a variable, the temperature also becomes a major variable. In addition, the concentration and temperature (diffusion is a function of temperature) are important variables in determining the growth rate of oxide.

The main results of the process in Section 3.2 are the growth of oxides (oxidation of metal Fe to Fe_xO_y) and the heat of reaction arising from the oxidation process. The result also affects the model in Section 3.3. The result of oxide growth determines the material properties of the surface. And the heat of reaction (flame combustion, metal oxidation) calculated in the previous two steps increases the temperature of the metal. After the temperature of the base material reaches the melting point, if the amount of heat

accumulates more than the latent heat of fusion, the metal is melted. The melting of the metal causes a shape change, which in turn affects the fluid flow of the 1st stage. Fig. 5 briefly shows what was described above.

5. Conclusion

The gas cutting has been widely used in the existing cutting industry, but unlike the ease of industrial access, analysis from a mechanical point of view has not been performed. In this paper, we organized the gas cutting process based on the relevant dynamics and performed the mathematical modeling for each step. The gas cutting process was divided into three stages: preheating and cutting oxygen spraying, metal oxidation, and metal melting. The thermal energy and partial pressure of metal surface oxygen obtained in the first step affects the growth rate of metal oxides in the second step. In the second step, the oxidation of the metal generates heat of reaction and defines the chemical state of the metal. The temperature increase and property change in the second stage have a decisive effect on the melting phenomenon in the third stage. Finally, the shape of the molten metal affects the first stage flame and oxygen flow. As a result, the antecedent variables occurring in the entire process of gas cutting were summarized so that the coupling between each mathematical model could be finally achieved as a single process. The constructed mathematical model can represent the entire process of a gas cutting. The results of this paper can be used as a basis for building a numerical analysis model in the future.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) grant funded by the Korean government (MOTIE) (20201510300320, 방사화된 금속 구조물 해체를 위한 겐트리형 레이저절단-수소연료산소절단을 적용한 하이브리드 고속 절단시스템 개발).

REFERENCES

1. Birks, N., Meier, G. H., Pettit, F. S., (2006), Introduction to the high temperature oxidation of metals, Cambridge University Press.
2. Khanna, A. S., (2002), Introduction to high temperature oxidation and corrosion, ASM International.
3. Baukal Jr., C. E., (2010), Oxygen-enhanced combustion, CRC Press.
4. Kim, H. Y., (1994), Study on the characteristics of impinging jet flame. <https://scienceon.kisti.re.kr/commons/util/originalView.do?cn=TRKO200200014695&dbt=TRKO&rn=>
5. Niziev, V., Nesterov, A., (1999), Influence of beam polarization on laser cutting efficiency, Journal of Physics D: Applied Physics, 32(13), 1455.
6. Schnick, M., Füssel, U., Zschetzsche, J., (2006), Simulation of plasma and shielding gas flows in welding and cutting arcs with ansys CFX. <http://www.modlab.lv/publications/mmp2006/pdfs/143-148.pdf>
7. Dal, M., Fabbro, R., (2016), An overview of the state of art in laser welding simulation, Optics & Laser Technology, 78, 2-14.
8. Arenas, M. J., Hömberg, D., Lasarzik, R., Mikkonen, P., Petzold, T., (2020), Modelling and simulation of flame cutting for steel plates with solid phases and melting, Journal of Mathematics in Industry, 10(1), 1-16.
9. Thiébaud, R., Drezet, J.-M., Lebet, J.-P., (2014), Experimental and numerical characterisation of heat flow during flame cutting of thick steel plates, Journal of Materials Processing Technology, 214(2), 304-310.
10. Uhlig, H. H., (1956), Initial oxidation rate of metals and the logarithmic equation, Acta Metallurgica, 4(5), 541-554.
11. Chen, R., Yeun, W., (2003), Review of the high-temperature oxidation of iron and carbon steels in air or oxygen, Oxidation of Metals, 59(5), 433-468.
12. Fontijn, A., Kurzius, S. C., Houghton, J. J., (1973), High-temperature fast-flow reactor studies of metal-atom oxidation kinetics, Proceedings of the Symposium (International) on Combustion, 14(1), 167-174.
13. Lawless, K. R., (1974), The oxidation of metals, Reports on Progress in Physics, 37(2), 231.
14. Smentkowski, V., Yates Jr, J., (1990), The adsorption of oxygen on Fe (110) in the temperature range of 90 to 920 K, Surface Science, 232(1-2), 113-128.
15. Wagner, C., (1933), Beitrag zur theorie des anlaufvorgangs, Zeitschrift für physikalische Chemie, 21(1), 25-41.
16. Dieckmann, R., (1982), Defects and cation diffusion in magnetite (IV): Nonstoichiometry and point defect structure of magnetite (Fe_{3-δ}O₄), Berichte der Bunsengesellschaft für physikalische Chemie, 86(2), 112-118.

**Jae-In Lee**

Ph.D. candidate in the Department of Electrical Engineering, Changwon National University. His research interest is cutting material engineering.
E-mail: kikigod1039@gmail.com

**Do-Young Moon**

Researcher of Hanto Cutting System. His research interest is cutting material engineering.
E-mail: hantocut@cncut.com

**Byeong-Soo Go**

Ph.D. in the Department of Electrical Engineering, Changwon National University. His research interest is cutting material engineering.
E-mail: iopewq1@gmail.com

**Minwon Park**

Professor in the Department of Electrical Engineering, Changwon National University. His research interest is cutting material engineering.
E-mail: paku@changwon.ac.kr

**Jun-Yeop Lee**

Ph.D. course in the Department of Electrical Engineering, Changwon National University. His research interest is cutting material engineering.
E-mail: eell7803@naver.com

**In-Keun Yu**

Professor in the Department of Electrical Engineering, Changwon National University. His research interest is cutting material engineering.
E-mail: yuik@changwon.ac.kr

**Il-Woo Moon**

CEO of Hanto Cutting System. His research interest is cutting material engineering.
E-mail: hantocut@cncut.com

십자형 교정체를 이용한 5축 공작기계 회전축의 기하학적 오차 추정에 관한 연구

A Study on the Estimation of Geometric Errors for Rotary Axes of a Five-Axis Machine Tool Using a Cross-Shaped Calibration Artifact

강정모¹, 김다영¹, 지성철^{1,#}
Jeongmo Kang¹, Dayoung Kim¹, and Sungchul Jee^{1,#}

¹ 단국대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Dankook University)
Corresponding Author / E-mail: scjee@dku.edu, TEL: +82-31-8005-3504
ORCID: 0000-0003-0610-0590

KEYWORDS: Five-axis machine tool (5축 공작기계), Rotary axes (회전축), Geometric error (기하학적 오차), Touch trigger probe (터치 프로브), Cross-shaped calibration artifact (십자형 교정체)

Estimation and compensation of geometric errors for rotary axes are among methods to improve machining accuracy of five-axis machine tools. Studies have been conducted on various methodologies for estimating geometric errors for rotary axes, which are essential for improving machining accuracies of five-axis CNC machine tools. This paper presents a method for estimating geometric errors of a rotating/tilting table using a cross-shaped calibration artifact with a touch trigger probe. The proposed method includes rotary axes error estimation equations for angles of each rotary and tilt axis based on locations of probing points. Computer simulations were performed based on a MATLAB/Simulink and ADAMS co-simulation system using the probing cycle process to verify the proposed method. Computer simulation results confirmed the usefulness of the proposed method in terms of volumetric errors.

Manuscript received: August 14, 2022 / Revised: September 23, 2022 / Accepted: October 7, 2022

NOMENCLATURE

L, h, w [mm]	= Length, Height, Width of Cross-Shaped Calibration Artifact
r [mm]	= Radius of a Touch Trigger Probe
φ_A, φ_C [arcsec]	= Unit Rotation Angles of Rotary Axes A, C, Respectively
\mathbf{P}_n^i [mm]	= i -th Position Vector of n -th Touch Point
X_n^i, Y_n^i, Z_n^i [mm]	= i -th Position of n -th Touch Point along with the X, Y and Z-Axes, Respectively
λ_{LR} [mm]	= Resolution of Linear Axes
λ_{RR} [arcsec]	= Resolution of Rotary Axes
E_{CRS} [arcsec]	= Set-Up Error of Cross-Shaped Calibration Artifact on a Workpiece Table

\mathbf{n}_{CRS}	= Normal Vector of Upper-Side of Cross-Shaped Calibration Artifact
ϕ, θ, φ [arcsec]	= Rotation Angles along with the X, Y and Z-Directions, Respectively
A_{Comp}, C_{Comp} [rad]	= Compensation Angles of Rotary Axes A, C, Respectively

1. 서론

초정밀가공 및 자유곡면과 같은 복잡한 형상의 가공을 요하는 항공, 의료, IT 산업 등의 수요 증가로 5축 공작기계의 초정밀화가 진행되고 있다. 현재에도 높은 해상도의 엔코더를 이용한

기계 구동부의 정밀도 향상, CNC (Computerized Numerical Controller)의 보정 기능 도입 등 상용 5축 공작기계의 초정밀화를 위한 다양한 방법들이 적용되고 있다.

기계장비의 제작 과정에서 발생 가능한 조립 오차나 장시간 사용에 따른 구성 요소들의 변형 등과 같은 여러 이유로 5축 공작기계의 회전축에서 오차가 발생할 수 있다. 특히, TCP (Tool Center Point) 제어를 위하여 기계장비 회전축 조합에 따른 역기구학을 활용하는 동시 5축 가공 시, 회전축에서 발생하는 기하학적 오차는 회전축의 중심과 공구 선단의 위치에 따라 더 큰 공간오차(Volumetric Error)를 유발할 수 있으므로, 이는 5축 가공에서 가공정밀도를 저하시킬 수 있는 주요한 요인 중 하나로 볼 수 있다.

상용 5축 공작기계의 경우 회전축에 교정체를 설치한 후 CMM (Coordinate Measuring Machine)에 주로 사용되는 터치 프로브(Touch Trigger Probe) 등을 기계장비에 장착하고 CNC의 사이클 지령을 활용하여 회전축의 오차를 측정하는 것이 일반적이며, 이는 사용자의 편의성 향상과 측정시간 단축에 있어 큰 장점을 갖는다. 다양한 형상의 교정체와 측정장비를 활용하여 회전축의 오차를 추정하기 위한 연구[1-9]가 진행되어 왔으며, 교정체로는 주로 교정구체(Calibration Sphere) 또는 다면체 형상 등의 정밀 교정체를 활용하고 회전축의 기하학적 오차 추정을 위한 측정장비로는 터치 프로브나 R-test 측정기, 볼바(Ball-Bar) 시스템 등을 활용한다.

회전축의 오차를 추정하기 위하여 다양한 교정체가 활용되었다. Lei 등[1,2]은 교정구체 형상을 기반으로 5축 공작기계의 회전축 오차 예측모델을 제시하였으나 회전축의 중심오차 성분과 방향오차 성분을 분리하여 추정하기 어려운 한계가 있다. Ibaraki 등[3,4]은 직육면체 형상의 교정체를 사용하였으나 많은 측정점을 필요로 하며, 일부 측정 과정에서 두 회전축을 모두 구동하므로 측정 시 각 회전축 구동에 따른 오차 영향을 각각 반영하기 어렵다. Khan 등[5]은 반구와 계단 형상으로 구성된 교정체를 사용하였으나, 정밀한 가공이 쉽지 않고 오차 추정을 위하여 요구되는 측정점의 개수가 많아 소요되는 시간이 다른 교정체의 형상에 비하여 길다는 측면이 있다.

교정체를 이용한 회전축 오차 추정에 주로 사용되는 측정장비로는 터치 프로브가 있으며, 공작기계 주축의 공구 홀더에 장착하고 교정체와 접촉했을 때의 좌표를 측정한다. 볼바 시스템은 테이블과 공구 홀더를 두 개의 볼바 형태의 구조물로 연결하고, 두 볼바 사이에 위치한 변위 센서를 이용하여 지령 좌표와 실제 좌표 사이의 오차를 측정한다[6-9]. 볼바 시스템의 경우 회전축의 오차 측정을 위하여 회전축과 직선 이송축이 움직이는 과정에서 회전축의 위치 추종오차가 발생함에 따라 회전축의 기하학적 오차 추정 정확도가 저하될 수 있으며, 터치 프로브를 사용하는 방식과 대비하여 회전축의 기하학적 오차 추정을 위하여 많은 접촉점이 필요하다는 단점이 있다.

본 논문에서는 십자형 형상의 교정체를 활용하여 측정점의

개수를 감소시킴과 동시에 임의의 각도에서 각 회전축의 오차를 추정하고, 공간오차를 보정하는 방법을 제안하였다. 십자형 교정체와 터치 프로브를 이용하여 교정체 상에서 특정한 위치 좌표들을 순서대로 측정하고, 측정된 좌표와 회전축 오차 사이의 기하학적 관계식을 기반으로 5축 공작기계 회전축의 기하학적 오차를 추정하는 방법을 제시하였다. 제시된 방법의 검증을 위하여 ADAMS (Advanced Dynamic Analysis of Mechanical Systems)와 MATLAB/Simulink 간의 연동해석(Co-Simulation)을 기반으로 시뮬레이터를 구성하였다. 또한, 유효성 평가를 위하여 사전에 임의의 회전축 오차를 시뮬레이터 상에 부여하고, 사전에 부여된 회전축 오차와 제시된 방법을 통하여 추정된 회전축의 기하학적 오차 간의 비교 평가를 수행하였다. 마지막으로, 임의의 가공영역을 정의하고 회전축 오차 보정을 수행하여 최대 공간오차의 감소 가능성을 평가하였다.

2. 십자형 교정체를 이용한 회전축 오차 추정 방법

2.1 회전축 오차와 십자형 교정체 정의

본 논문에서는 Fig. 1에 도시된 것과 같이 A축과 C축 방향으로 회전이 가능한 로터리 테이블이 장착된 TRT (Table-Rotating/Tilting)-CA 타입의 수직형 5축 공작기계를 대상으로 하였다. 5축 공작기계 회전축 오차는 ISO 230-1, 2, 7 [10-12]에 정의되어 있으며, 로터리 및 틸트 각 축 원점의 위치 오차를 나타내는 회전축 중심 오차와 각 직선 이송축 방향으로 회전된 각도 오차를 나타내는 회전축 방향 오차로 구성된다.

Ibaraki [3]와 Abbaszadeh-Mir [7]은 5축 공작기계에서 직선 이송축과 회전축, 공작물, 공구에 의하여 발생하는 42개의 오차 중 회전축의 기하학적 오차를 추정하기 위한 8개의 오차를 제안하였다. 본 논문에서는 회전축의 기하학적 오차를 추정하기 위하여 42개의 오차 중 로터리 및 틸트 축의 오프셋 및 직각도 오차 등으로 구성된 8개의 오차를 결정하였으며, 이를 Table 1에 제시하였다. 결정된 오차는 ISO 230-7 [12]에 제시된 축 평균선의 위치오차(Location Errors (Axis Shift) of Axis Average Line)를 의미한다.

본 논문에서는 Fig. 2와 같은 형상의 십자형 교정체를 활용하여 회전축 오차를 추정하고자 하였다. 교정체의 형상을 활용하여 임의의 회전각에서 회전축 오차 추정이 가능한 일반화된 관계식을 구성함과 동시에 측정점의 개수를 감소시키고자 하였다. 제안된 십자형 교정체는 직육면체 형상의 교정체[3]와 대비하여 단순한 형상은 아니나, 틸트 축의 오차 측정 시 로터리 축을 추가적으로 회전시킬 필요가 없으므로, 측정좌표 사이의 기하학적 관계식을 이용한 회전축 오차 추정에 용이하다. 마지막으로, 단일 교정체를 활용한다는 측면에서 복수개의 교정체를 설치하는 방법[4]과 대비하여 셋업 오차에 따른 회전축 오차 예측 정확도에 대한 영향을 감소시킬 수 있다.

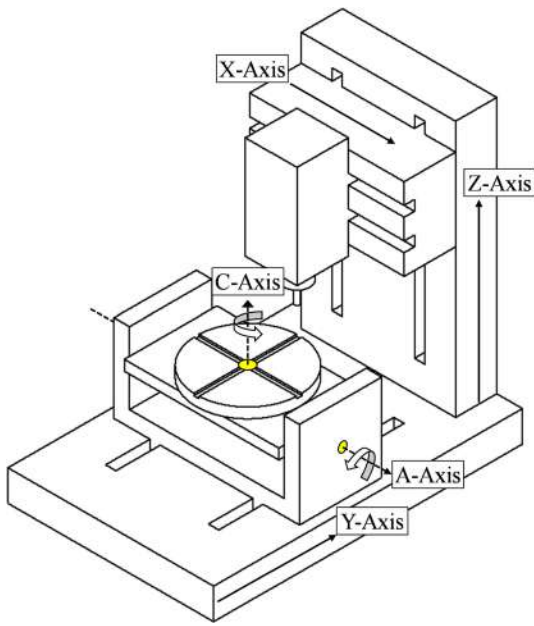


Fig. 1 Schematic of a rotating/tilting table of a TRT-CA type machine tool

Table 1 Errors of associated with a rotating/tilting table

Symbol	Description
E_{AOA}	Angular positioning error of A-axis at $A = 0^\circ$
E_{BOA}	Squareness error of A-axis to Z-axis
E_{COA}	Squareness error of A-axis to Y-axis
$E_{BOC} - E_{BOA}$	Squareness error of C-axis to A-axis
E_{XOC}	Error of the position of C-axis in X-dir.
E_{YOA}	Error of the position of A-axis in Y-dir.
E_{ZOA}	Error of the position of A-axis in Z-dir.
$E_{YOC} - E_{YOA}$	Error of the position of C-axis from A-axis in Y-dir.

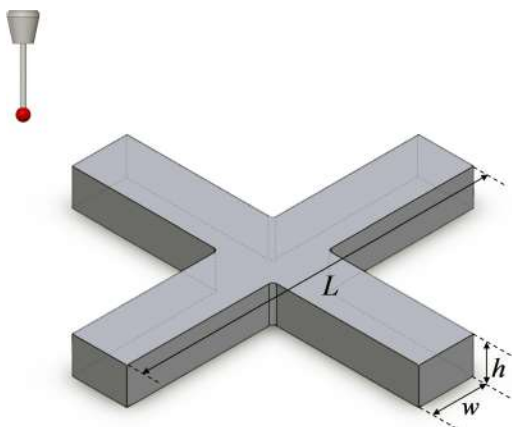


Fig. 2 Schematic of the proposed cross-shaped calibration artifact

2.2 회전축의 기하학적 오차 추정 방법

회전축의 기하학적 오차를 추정하기 위하여 아래와 같이 크게

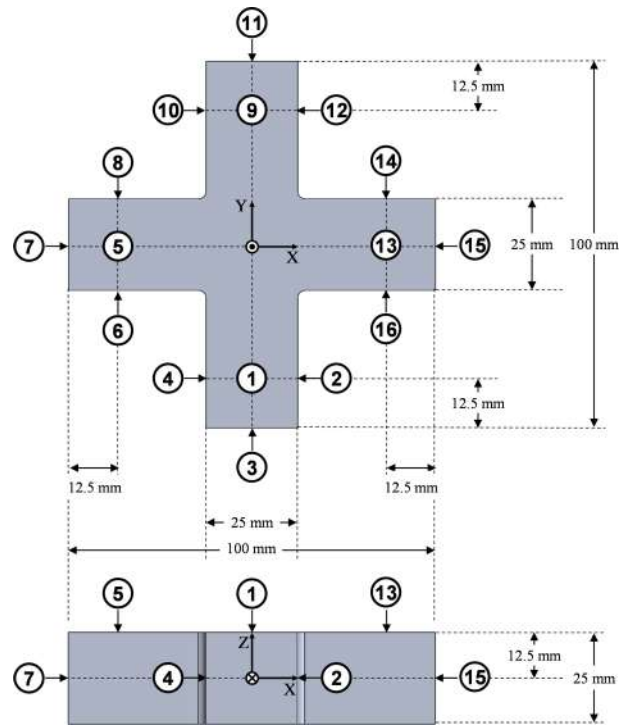


Fig. 3 Probing points on the calibration artifact in the first and second probing cycles

3단계의 과정으로 측정점들의 위치를 취득하였다.

(1) 틸트(A-Axis) 및 로터리 축(C-Axis)의 각도를 모두 0°로 설정한 상태에서 터치 프로브로 Fig. 3에 제시된 측정점의 위치 좌표들을 취득한다.

(2) 틸트 축을 0°로 유지한 상태로, 로터리 축의 단위 회전각 ϕ_C 을 고려하여 90°씩 회전하며 360°까지 1단계와 동일한 측정점의 위치 좌표를 취득한다.

(3) 로터리 축의 각도를 0°로 유지한 상태로 틸트 축의 단위 회전각 ϕ_A 을 고려하여 틸트 축의 회전각을 +90° 및 -90°로 각각 설정하고, Fig. 4에 제시된 4개의 측정점의 위치 좌표들을 추가적으로 취득한다.

P_n^i 은 i 번째 회전각 n 번 측정점에서 취득된 위치 좌표를 의미한다. θ_C, θ_A 은 각각 로터리 및 틸트 축의 회전각이며, 식(1)과 식(2)에 의하여 정의된다.

$$\theta_C = (i-1)\phi_C \tag{1}$$

$$\theta_A = (i-1)\phi_A \tag{2}$$

제시된 교정체의 형상과 측정점의 위치 좌표 간의 기하학적 관계를 기반으로 회전축 오차를 추정하기 위한 관계식을 식(3)부터 식(10)과 같이 구성하였다. α 축 방향에 대한 오차 성분을 E_α 로 표기하며, Table 1에 제시된 회전축의 기하학적 오차 중 B축 및 Y축 방향 오차 성분의 경우 로터리 및 틸트 회전축의 회전각에 따른 측정점 정보가 모두 필요하다. 따라서, B축 및 Y축 방향 오차 성분은 각 회전축에 따라 $E_B^C, E_B^A, E_Y^C, E_Y^A$ 로

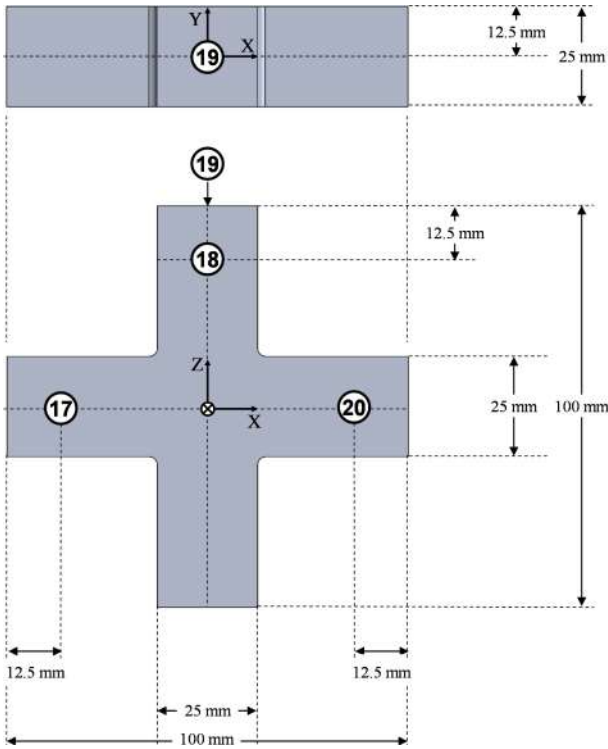


Fig. 4 Probing points on the calibration artifact in the third probing cycle

표기한다.

Figs. 3, 4에 제시된 각 측정점의 위치들을 기반으로 Table 1에 제시된 회전축의 기하학적 오차를 추정하였으며, 로터리 및 틸트 축의 회전에 따라 발생할 수 있는 오차 성분들을 추정하기 위한 개념도를 Figs. 5, 6에 제시하였다. 로터리 회전축 회전각 θ_C 에서의 A, B축 방향 오차 성분인 E_A, E_B^C 는 교정체 상면의 측정좌표를 이용하여 구한다. Figs. 5(a)와 5(b)에 나타난 것과 같이 각각 Y-Z, X-Z 평면상에서 4개의 측정좌표를 통해 정의되는 기울기의 가중 합으로 추정하며, 식(3) 및 식(4)와 같이 구성하였다.

$$E_A = \tan^{-1} \left(\frac{Z_9^i - Z_1^i}{P_9^i - P_1^i} \right) \cos \theta_C + \tan^{-1} \left(\frac{Z_{13}^i - Z_5^i}{P_{13}^i - P_5^i} \right) \sin \theta_C \quad (3)$$

$$E_B^C = \tan^{-1} \left(\frac{Z_9^i - Z_1^i}{P_9^i - P_1^i} \right) \sin \theta_C + \tan^{-1} \left(\frac{Z_5^i - Z_{13}^i}{P_5^i - P_{13}^i} \right) \cos \theta_C \quad (4)$$

E_C 는 틸트 회전축의 Y축 방향 직각도를 추정하기 위한 오차 성분으로, Fig. 5(c)와 같이 18, 20번을 제외한 2n번 측정점들의 위치 좌표들을 이용하여 구한다. 2와 12, 4와 10, 6과 16, 8과 14에 의하여 각각 정의되는 직각 삼각형들의 밑변과 높이의 대소관계를 고려하여 구한 C축 방향 오차의 평균으로 추정하며, 식(5)와 같다.

위치 오차 E_X, E_Y^C 의 경우 Fig. 5(d)에 제시된 3, 7, 11, 15번 측정점의 X, Y축 방향 평행이동에 의한 오차와 회전 테이블

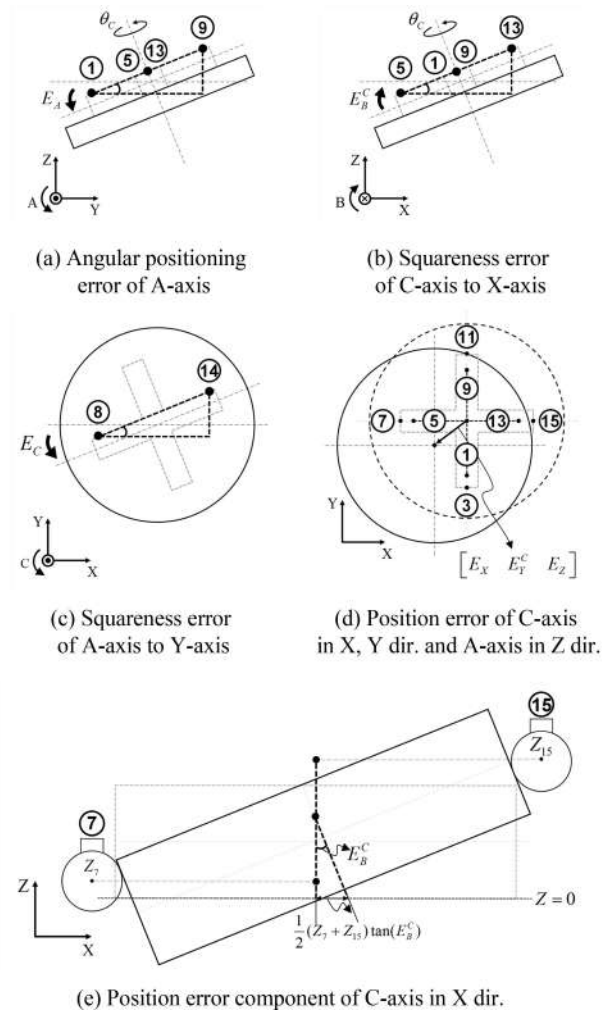


Fig. 5 Schematics for estimating errors by rotating motions

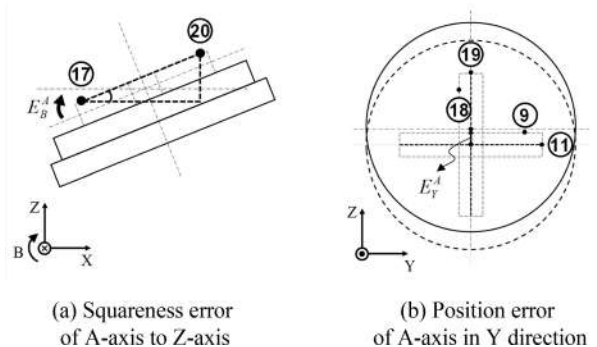


Fig. 6 Schematics for estimating errors by tilting motions

틸팅으로 인한 오차를 함께 고려하였다. 이를 위하여 해당 측정점들의 X, Y 좌표뿐만 아니라 E_A, E_B^C 를 반영하였으며, 최종적인 위치 오차는 X, Y축 방향 오차의 가중 합을 활용하여 식(6) 및 식(7)과 같이 표현하였다. 마지막으로 Z축 방향 오프셋 오차 E_Z 는 교정체 상면에서 측정된 측정점들의 위치 좌표 중 Z 성분의 평균에서 교정체 높이 h 와 터치 프로브의 반경 r 을 뺀 값으로 추정할 수 있으며, 식(8)과 같다.

$$E_C = \frac{1}{4} \left\{ \begin{aligned} &\tan^{-1} \left(\frac{X_2^i - X_{12}^i}{Y_2^i - Y_{12}^i} \right) + \tan^{-1} \left(\frac{X_4^i - X_{10}^i}{Y_{10}^i - Y_4^i} \right) \\ &+ \tan^{-1} \left(\frac{Y_4^i - Y_8^i}{X_{14}^i - X_8^i} \right) + \tan^{-1} \left(\frac{Y_{16}^i - Y_6^i}{X_{16}^i - X_6^i} \right) \end{aligned} \right\} + \theta_C' \quad (5)$$

where

$$\begin{cases} \theta_C' = -\theta_C, & 0 \leq \theta_C < 90^\circ \\ \theta_C' = \pi - \theta_C, & 90^\circ \leq \theta_C < 270^\circ \\ \theta_C' = 2\pi - \theta_C, & 270^\circ \leq \theta_C < 360^\circ \end{cases}$$

$$E_X = \frac{1}{2} \left\{ \begin{aligned} &\sum_{j=0}^1 (X_{8j+7}^i - Z_{8j+7}^i \tan E_B^C) \cos \theta_C \\ &+ \sum_{j=0}^1 (Y_{8j+7}^i + Z_{8j+7}^i \tan E_A) \sin \theta_C \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$E_Y^C = \frac{1}{2} \left\{ \begin{aligned} &\sum_{j=0}^1 (Y_{8j+3}^i + Z_{8j+3}^i \tan E_A) \cos \theta_C \\ &- \sum_{j=0}^1 (X_{8j+3}^i - Z_{8j+3}^i \tan E_B^C) \sin \theta_C \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$E_Z = \frac{1}{4} \sum_{j=0}^3 Z_{4j+1}^i - h - r \quad (8)$$

Table 1에 제시된 회전축 오차 중 로터리 회전축과 틸트 회전축 간에서 발생하는 직각도 및 위치 오차를 추정하기 위하여, 틸트 회전축 회전각 θ_A 에 따른 오차 성분 E_B^A 및 E_Y^A 을 추정한다. 터치 프로브와 교정체 간의 간섭이 발생하는 측정점들을 제외하고, 17번, 20번 측정점 사이의 거리와 X축으로부터 두 측정점까지의 거리 차이를 통해 정의된 직각 삼각형 빗변의 기울기를 활용하여 틸트 축의 회전에 따른 B축 방향 오차 성분 E_B^A 를 추정하기 위한 식(9)를 구성하였다. 틸트 축 회전각에 따른 Y축 방향 위치 오차 E_Y^A 는 Ibaraki가 제안한 틸트 축의 Y축 방향 위치 오차 추정식[3]을 차용하여 틸트 회전각에 대한 일반식의 형태로 식(10)을 유도하였으며, L 은 교정체의 길이를 의미한다.

$$E_B^A = \tan^{-1} \left\{ \frac{\sqrt{(Y_{17}^i)^2 + (Z_{17}^i)^2} - \sqrt{(Y_{20}^i)^2 + (Z_{20}^i)^2}}{|\mathbf{P}_{17}^i - \mathbf{P}_{20}^i|} \right\} \quad (9)$$

$$E_Y^A = \frac{1}{2} \left\{ \begin{aligned} &Z_9^i + Y_{11}^i - \sqrt{(Y_{19}^i)^2 + (Z_{19}^i)^2} - \left(\frac{h}{2}\right)^2 \\ &-\sqrt{\left(Y_{18}^i - \frac{L-h}{2} \cos \theta_A\right)^2 + \left(Z_{18}^i - \frac{L-h}{2} \sin \theta_A\right)^2} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

각 오차 성분들의 평균값을 기반으로 회전축 오차를 추정하는 관계식을 구성하였다. 관계식에서 k_C , k_A 는 로터리 및 틸트 회전축에 대한 각각의 회전각 개수를 의미하며 회전축의 구동 범위를 고려하여 아래의 식(11)과 식(12)로 정의한다.

$$k_C = 360^\circ / |\varphi_C| \quad (11)$$

$$k_A = 180^\circ / |\varphi_A| \quad (12)$$

추정 대상인 회전축 오차 중에서 회전 축방향 오차 성분들에 의하여 정의되는 회전축 오차는 E_{AOA} , E_{BOA} , E_{COA} , E_{BOC} 가 있으며, 이 중 로터리 회전축과 틸트 회전축 간의 직각도는 E_{BOC} 와 E_{BOA} 의 차로 정의된다. 각 회전축 오차를 추정하기 위한 관계식은 식(13)부터 식(16)과 같다.

$$E_{AOA} = \frac{1}{k_C} \sum_{i=1}^{k_C} E_A \quad (13)$$

$$E_{BOA} = \frac{1}{k_A} \sum_{i=1}^{k_A} E_B^A \quad (14)$$

$$E_{COA} = \frac{1}{k_C} \sum_{i=1}^{k_C} E_C \quad (15)$$

$$E_{BOC} - E_{BOA} = \frac{1}{k_C} \sum_{i=1}^{k_C} E_B^C - \frac{1}{k_A} \sum_{i=1}^{k_A} E_B^A \quad (16)$$

회전축 오차 중 위치 오차는 E_{XOC} , E_{YOA} , E_{ZOA} , E_{YOC} 가 있으며, 로터리 회전축과 틸트 회전축 간의 위치오차는 $E_{YOC} - E_{YOA}$ 로 정의된다. 각각의 위치 오차에 대한 관계식은 식(17)부터 식(20)과 같다.

$$E_{XOC} = \frac{1}{k_C} \sum_{i=1}^{k_C} E_X \quad (17)$$

$$E_{YOA} = \frac{1}{k_A} \sum_{i=1}^{k_A} E_Y^A \quad (18)$$

$$E_{ZOA} = \frac{1}{k_C} \sum_{i=1}^{k_C} E_Z \quad (19)$$

$$E_{YOC} - E_{YOA} = \frac{1}{k_C} \sum_{i=1}^{k_C} E_Y^C - \frac{1}{k_A} \sum_{i=1}^{k_A} E_Y^A \quad (20)$$

3. 제시된 회전축 오차 추정 방법의 검증

3.1 측정 시뮬레이션 구성

제시된 회전축 오차 추정 방법의 검증을 위하여 TRT-CA type의 5축 공작기계 구성요소들을 3D CAD S/W를 활용하여 Fig. 7과 같이 모델링하였으며, 다물체 동역학 해석 프로그램인 ADAMS를 이용하여 모델링한 각 구성요소 사이의 구속조건 등을 정의하는 방식으로 5축 공작기계 모델을 구성하였다. 회전축의 구속조건을 이용하여 임의의 회전축 오차를 부여할 수 있도록 하였으며, 직선 이송축의 기하학적 오차는 없는 것으로 가정하였다. 또한, 공작기계에 설정된 공작물 좌표계(Workpiece Coordinates System)의 원점은 로터리 테이블 상면의 중심점에 정의하였다.

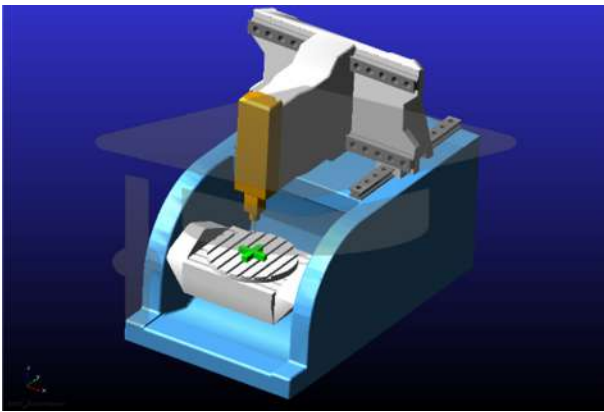


Fig. 7 Five-axis machine tool (TRT-CA type) and the proposed cross-shaped calibration artifact

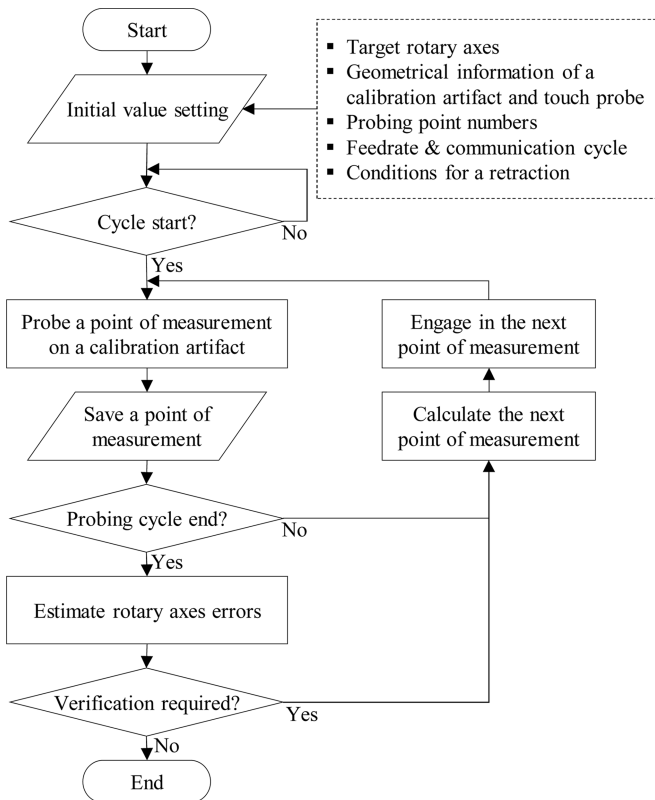


Fig. 8 Flowchart of the proposed probing cycle process

실제 5축 공작기계의 경우 교정체와 터치 프로브 간의 접촉 시 반발력으로 인하여 터치 프로브의 스타일러스가 휘어짐에 따라 측정 오차가 추가적으로 발생할 수 있으나, 본 논문에서는 회전축의 기하학적인 오차를 추정하는 것이 목적이므로 고려하지 않았다. Fig. 8에 제시된 순서도를 기반으로 데이터 통신주기와 이송속도, 십자형 교정체와 터치 프로브의 기하학적 정보 등을 입력변수로 하는 컴퓨터 시뮬레이터를 구성하였다. 구성된 시뮬레이터는 터치 프로브가 십자형 교정체 표면상의 접촉 좌표를 취득할 수 있도록 ADAMS와 MATLAB/Simulink 간의

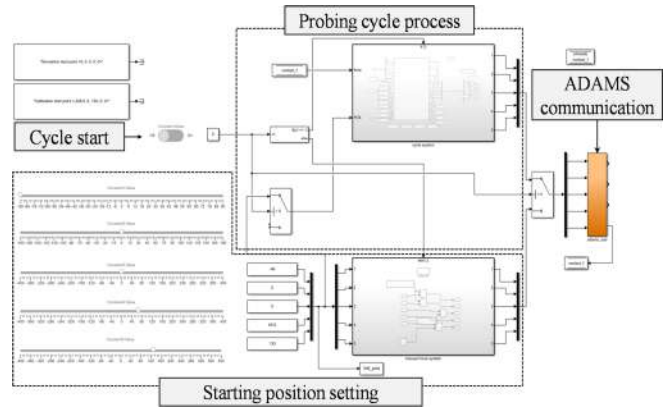


Fig. 9 Co-simulation system (MATLAB/Simulink and ADAMS)

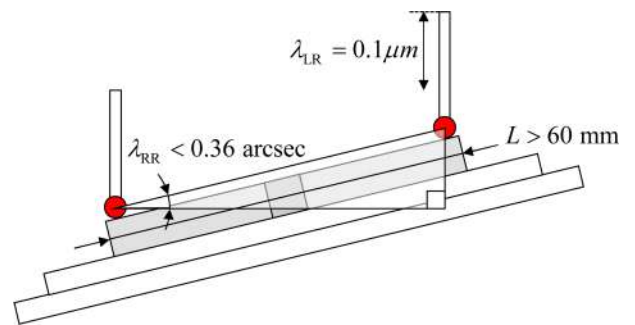


Fig. 10 Schematic for determining the size of a calibration artifact

연동해석을 기반으로 한다.

컴퓨터 시뮬레이션 구동 시 각 축의 위치지령은 측정 사이클 과정에서 5축 공작기계 CAD 모델의 회전축 조합을 고려하여 MATLAB 상에 역기구식을 사전에 구성함으로써, 매 통신주기마다 기계좌표계(Machine Coordinates System)로 변환되어 각 직선 이송축 및 회전축 지령이 ADAMS로 전송되는 구조이다(Fig. 9).

터치 프로브를 활용한 접촉 좌표 측정 기능을 구현하기 위하여 ADAMS의 접촉력(Contact Force) 측정 기능을 사용하였다. 입력한 위치지령에서 터치 프로브와 십자형 교정체 사이의 접촉을 판단하고, 접촉이 발생한 좌표를 MATLAB으로 전송하여 저장하는 형태로 측정 과정을 구현하였다.

3.2 회전축 오차 보정을 통한 제시된 방법의 검증

본 논문에서 사용한 컴퓨터 시뮬레이션 환경으로 MATLAB/Simulink에서 생성한 위치지령을 전송하고 ADAMS에서 해석한 터치 프로브와 교정체 간의 접촉 정보를 송수신하는 통신주기는 0.01 msec로 설정하였다. 터치 프로브 선단의 이송속도는 600 mm/min이며, 이송축과 회전축의 분해능은 상용 CNC의 지령단위를 고려하여 각각 0.1 μm, 0.36 arcsec로 설정하였다. 검증에 사용한 십자형 교정체의 길이 L은 Fig. 10에 제시된 것과 같이 이송축의 분해능 λ_LR의 크기가 0.1 μm일 때, 회전축 분해능 λ_RR을 0.36 arcsec 이하 수준으로 확보하기 위해서 식(21)를 만족하여야 한다.

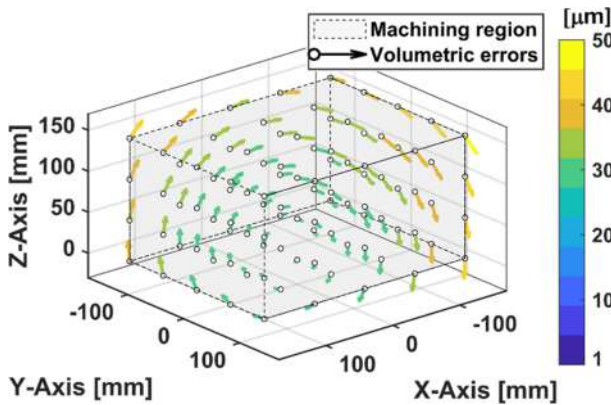


Fig. 11 Volumetric errors before compensating errors of rotary axes

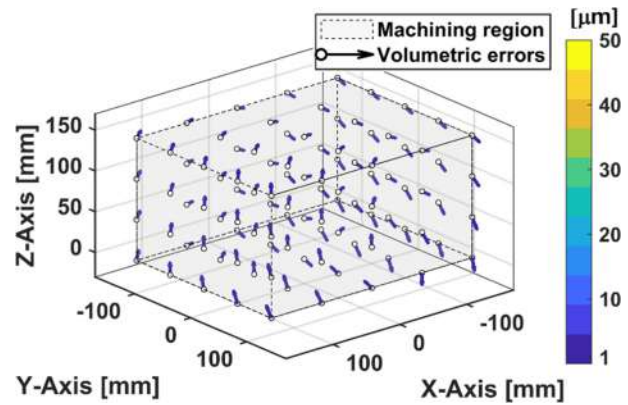


Fig. 12 Volumetric errors after compensating errors of rotary axes using the error map

$$L > \lambda_{LR} \text{csc}(\lambda_{RR}) \quad (21)$$

따라서, 컴퓨터 시뮬레이션에서 활용된 교정체의 길이 L 는 100 mm, 높이 h 는 25 mm, 너비 w 는 25 mm로 설정하였으며, 5축 공작기계 모델링 과정 중에 임의로 부여한 회전축 오차(Random Error)들은 Table 2에 제시된 것과 같다. 전술한 시뮬레이션 조건을 토대로 5축 공작기계에서 회전축 오차를 추정하기 위한 교정체 상의 측정점의 위치 좌표를 도출하였다. 제시된 기하학적 관계식을 적용하여 추정한 회전축 오차와 5축 공작기계 모델링 과정에서 사전에 임의로 부여한 회전축 오차 간의 차이를 비교한 결과를 Table 2에 제시하였으며, 부여된 회전축 오차와 추정된 회전축 오차 간의 차이가 최대 1.7% 이하로 나타나는 것을 확인하였다.

제시된 방법으로 추정한 회전축 오차를 기반으로 공작기계 회전축의 보정을 진행하여, 회전축에 대한 유효한 수준의 기하학적 오차 보정 여부를 확인하고자 하였다. 이를 위하여, 추정된 회전축 오차를 기반으로 가공영역 전반에 대한 에러맵(Error Map)을 구성하고 직선 이송축의 이송명령을 지속적으로 보정하는 방법과 CNC 파라미터로 존재하는 각 회전축의 영점 및 각 회전축 중심의 오프셋과 같이 공작기계의 회전축 설정을 보정하는 방법을 각각 수행하였다. 각 직선 이송축의 위치 및 공구 방향 오차로 인하여 발생하는, 이상적인 공구선단과 실제 공구선단 간의 위치 차이인 공간오차를 계산하기 위하여 가공영역을 300 (가로) × 240 (세로) × 150 (높이) mm의 직육면체 형상으로 가정하였다.

로터리 및 틸트 회전축이 0°일 때, 보정 전 임의로 부여한 회전축 중심 및 방향 오차로 인하여 가공영역 상에 발생하는 회전축 오차를 도식화한 것을 Fig. 11에 제시하였으며, 가공영역에서의 최대 공간오차의 크기는 50.77 μm로 나타났다. 제시된 방법을 기반으로 추정한 회전축 방향 오차를 이용하여 회전변환 행렬을 구성하고, 회전축 중심 오차만큼 이동하는 동차변환 행렬을 구성하였다. 가공영역 내에서 임의의 위치에 대한 공간오차 계산을 수행하여 에러맵을 구성하였다. 이를 이용하여 직선

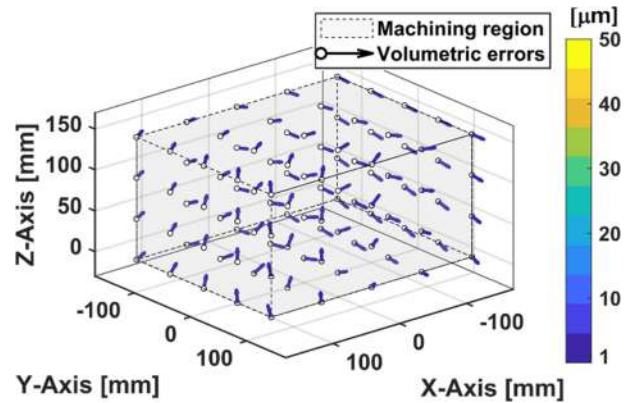


Fig. 13 Volumetric errors after parameter compensation of a rotating/tilting table

이송축의 이송명령을 보정하였을 때, 로터리 및 틸트 회전축 회전각이 0°에서 예측되는 회전축 오차를 도식화한 것은 Fig. 12와 같다. 구성된 에러맵의 최소 단위는 직선 이송축의 분해능과 같은 수준인 0.1 μm이다. 에러맵을 활용한 회전축의 기하학적 오차 보정 결과 가공영역 상의 최대 공간오차의 크기가 0.08 μm로 감소한다.

또 다른 보정 방법으로, 상용 CNC에서 파라미터로 제공하는 각 회전축의 영점 및 회전축 중심의 원점 오프셋을 보정하는 방법을 수행하였다. 추정된 회전축 오차들을 기반으로 예측한 교정체 상면의 법선 벡터 n_{CRS} 를 X-Y-Z 오일러 각의 역행렬을 활용하여 식(22)와 같이 추정할 수 있다. ϕ , θ , φ 는 각각 순서대로 X, Y, Z 축 회전 시의 회전각 크기를 의미한다. 회전축 오차 보정 시 교정체 셋업 오차를 추가적으로 반영하기 위하여, 관련된 기존의 연구[8,9]에서 활용된 관계식을 참고하여 로터리 테이블의 회전축 방향으로의 셋업 오차인 E_{CRS} 를 식(22)에 추가 반영하였다. 회전축 오차 보정을 위하여 각 회전축의 영점을 식(23)과 식(24)를 활용하여 보정하였다. 원점 오프셋 오차는 회전축 및 교정체 셋업 오차의 원점 오프셋 성분들을 공작물 좌표계에 반영하는 형태로 보정할 수 있다.

Table 2 Comparison of errors of a rotating/tilting table based on the computer simulation results

Error	E_{AOA} [arcsec]	E_{BOA} [arcsec]	E_{COA} [arcsec]	$E_{BOC}-E_{BOA}$ [arcsec]	E_{XOC} [μm]	E_{YOA} [μm]	E_{ZOA} [μm]	$E_{YOC}-E_{YOA}$ [μm]
Random error	21.6	18	10.8	7.2	15	17	12	4
Estimated error	21.5784	18.0086	10.8288	7.2194	14.9908	16.9500	12.0000	4.0666
Error rate [%]	0.10	0.05	0.27	0.27	0.06	0.30	0.00	1.67

$$\mathbf{n}_{CRS} = [n_{i,CRS} \quad n_{j,CRS} \quad n_{k,CRS}]^T$$

$$= \begin{bmatrix} \sin \phi \sin \varphi - \cos \phi \cos \varphi \sin \theta \\ \cos \varphi \sin \phi + \cos \phi \sin \varphi \sin \theta \\ \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix} \quad (22)$$

where

$$\begin{cases} \phi = E_{AOA} \\ \theta = E_{BOC} \\ \varphi = E_{COA} + E_{CRS} \end{cases}$$

$$A_{Comp.} = \arctan 2 \left(\pm \sqrt{1 - n_{k,CRS}^2}, n_{k,CRS} \right) \quad (23)$$

$$C_{Comp.} = \arctan 2 \left(n_{i,CRS} \sin(A_{Comp.}), -n_{j,CRS} \sin(A_{Comp.}) \right) \quad (24)$$

회전축 오차 보정 시 입력 파라미터의 단위는 설정한 CNC의 최소 지령단위와 동일하다. Fig. 13은 로터리 및 틸트 축 회전각의 위치가 각각 0°일 때 CNC 파라미터만을 보정한 후의 회전축 오차를 추정한 것이며, 가공영역에서의 최대 공간오차의 크기는 0.06 μm 로 계산되었다.

회전축 오차 보정 전후 및 방식에 따른 최대 공간오차 비교 결과를 Table 3에 제시하였다. 에러맵을 이용한 보정 방법과 CNC 파라미터를 활용한 보정 방법 모두 동등한 수준으로 구현된 것으로 볼 수 있으나, 회전각에 따른 오차 운동(Error Motion) [12]이 회전각의 위치에 따라 비선형적으로 발생한다는 점에서 일반적으로 에러맵 기반의 회전축 오차 보정 방법에 더욱 높은 성능을 기대할 수 있다. 하지만, 본 논문에서 두 보정 방법에 대한 성능 차이가 크지 않게 나타난 이유는 기계장비를 활용한 실험이 아닌 시뮬레이션을 활용한 모의실험 결과를 기반으로 회전축 오차 추정 및 보정을 수행하였기 때문으로 추정된다. 따라서, 제안한 방법을 실제 기계장비에 적용한 결과와 그에 대한 평가는 향후 이어지는 연구에서 다루어질 예정이다. 각각의 보정 방법에 대한 결과와 별개로 5축 CNC 공작기계를 모든 회전축 구동 각도 조합에 따라 독립적인 에러맵을 구성하여 보간하는 방법은 CNC 보간부에 높은 연산부하를 요구할 수 있다는 측면에서 한계가 있다. 이에 반하여 5축 공작기계 회전축에 대한 CNC 파라미터를 활용하여 회전축 오차를 보정하는 방법의 경우, 회전축 오차에 대한 높은 예측 정확도를 확보할 수 있다면 1회의 파라미터 보정으로 에러맵을 활용한 것에 준하는 효과를 기대할 수 있다. 결과적으로, 제안된 방법을 활용하여 두 회전축 오차 보정 시 최대 공간오차의 크기를 모두 99% 이상 감소시켰다는 점에서, 본 논문에 제시된 십자형 교정체를 활용한

Table 3 Comparison of maximum volumetric errors

	Before compensation	After compensation (Error map)	After compensation (CNC parameter)
Maximum volumetric error [μm]	50.77	0.08	0.06

5축 공작기계 회전축 오차 추정 방법에 대한 유효성을 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 논문에서는 십자형 교정체와 터치 프로브를 활용하여 5축 공작기계 회전축의 기하학적 오차를 추정하는 방법을 제시하였다. 제시된 방법은 교정체의 형상과 정의한 측정점을 기반으로 임의의 회전각에서 로터리 및 틸트 축 각각에 대한 회전축 오차를 예측하는 일반식을 수립하여, 회전각의 위치에 관계 없이 회전축 오차를 추정할 수 있다. 따라서, 터치 프로브를 활용하여 동특성의 영향이 최소화된 측정점의 위치 좌표를 취득할 수 있음과 동시에, 임의의 회전각에서의 회전축 오차 추정을 통해 무한정 많은 회전각에서의 회전축 오차를 모두 반영할 수 있으므로 정밀 교정체를 활용한 기존 방법 대비 적은 수의 측정점을 활용하여 비교적 높은 회전축 오차 추정 정확도를 기대할 수 있다. 제안된 방법은 컴퓨터 시뮬레이션을 기반으로 회전축 오차 보정에 따른 최대 공간오차 비교 평가로 검증하였으며, 그 결과 5축 공작기계의 회전축 오차 추정에 기여할 수 있을 것이다.

REFERENCES

1. Lei, W., Hsu, Y., (2002), Accuracy test of five-axis CNC machine tool with 3D probe-ball. Part I: Design and modeling, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 42(10), 1153-1162.
2. Lei, W., Hsu, Y., (2002), Accuracy test of five-axis CNC machine tool with 3D probe-ball. Part II: Errors estimation, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 42(10), 1163-1170.

3. Ibaraki, S., Iritani, T., Matsushita, T., (2012), Calibration of location errors of rotary axes on five-axis machine tools by on-the-machine measurement using a touch-trigger probe, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 58, 44-53.
4. Ibaraki, S., Iritani, T., Matsushita, T., (2013), Error map construction for rotary axes on five-axis machine tools by on-the-machine measurement using a touch-trigger probe, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 68, 21-29.
5. Khan, A. W., Chen, W., (2011), A methodology for systematic geometric error compensation in five-axis machine tools, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 53, 615-628.
6. Chen, J.-X., Lin, S.-W., He, B.-W., (2014), Geometric error measurement and identification for rotary table of multi-axis machine tool using double ballbar, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 77, 47-55.
7. Abbaszadeh-Mir, Y., Mayer, J., Cloutier, G., Fortin, C., (2002), Theory and simulation for the identification of the link geometric errors for a five-axis machine tool using a telescoping magnetic ball-bar, *International Journal of Production Research*, 40(18), 4781-4797.
8. Lee, K.-I., Lee, D.-M., Kweon, S.-H., Yang, S.-H., (2010), Geometric errors estimation of a rotary table using double ballbar, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 27(11), 98-105.
9. Lee, K.-I., Kim, D.-H., Lee, D.-M., Yang, S.-H., (2021), An alignment method for a TCP position of five-axis machine tools for ISO 10791-6, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 38(1), 53-60.
10. ISO 230-1, (2012), Test code for machine tools-Part 1: Geometric accuracy of machines operating under no-load or quasi-static conditions.
11. ISO 230-2, (2006), Test code for machine tools-Part 2: Determination of accuracy and repeatability of positioning of numerically controlled axes.
12. ISO 230-7, (2015), Test code for machine tools-Part 7: Geometric accuracy of axes of rotation.



Jeongmo Kang

Ph.D. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Dankook University. His research interest is CNC machine tool systems and CAD/CAM.
E-mail: jmkang@dankook.ac.kr



Dayoung Kim

Ph.D. student in the Department of Mechanical Engineering, Dankook University. Her research interest is CNC machine tool systems.
E-mail: dy_kim@dankook.ac.kr



Sungchul Jee

Professor in the Department of Mechanical Engineering, Dankook University. His research interest is CNC machine tool systems and CAM.
E-mail: scjee@dku.edu

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)

- 투고논문의 책임은 저자(들)에게 있다.
- 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, 적층제조시스템, 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.

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

제6조 (접수)

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

제7조 (심사 및 게재 결정)

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

제8조 (저작권)

- 논문내용에 대한 책임은 저자(들)에게 있다.
- 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.
- 게재된 논문 및 기타 투고물의 저작권은 학회에 있으며, 학회의 승인 없이 무단으로 복제할 수 없다.
- 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)

- 학회에 투고하는 원고의 작성방법 및 편집은 별도로 규정된 '논문집필요령'에 따른다.
- 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 '이중게재'란 2개 이상의 학술지에 동일한 내용을 게재하는 행위를 말한다.
- ⑥ 본인 또는 타인의 부정행위의 의혹에 대한 조사를 고의로 방해하거나 제보자에게 위해를 가하는 행위
- ⑦ 과학기술계에서 통상적으로 용인되는 범위를 심각하게 벗어난 행위 등
- ⑧ 기타 위 규정된 부정행위 외에도 우리 학회 자체적으로 조사 또는 예방이 필요하다고 판단되는 행위

제 2 장 저자

제4조 (저자의 정직성)

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

제5조 (저자의 기준)

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

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

제6조 (저자의 준수사항)

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

(사)한국정밀공학회 학술활동 윤리규정

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

제 3 장 학회 구성원의 역할과 책임

제7조 (편집위원 준수사항)

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

제8조 (심사위원 준수사항)

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

제 4 장 검증 절차와 기준

제9조 (윤리위원회)

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

제10조 (윤리위원회 기능)

위원회는 다음의 내용으로 활동한다.

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

(사)한국정밀공학회 학술활동 윤리규정

제11조 (윤리위원회 소집 및 의결)

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

제12조 (연구 부정행위의 제보)

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

제13조 (연구 부정행위에 대한 제재 및 사후조치)

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

제14조 (피조사자 권리 보호)

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

제15조 (조사의 기록과 정보의 공개)

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

제16조 (조사결과의 보고)

- ① 위원회는 조사의 결과와 내용을 조사의 종료 및 판정 후, 접수일 기준 6개월 경과 이전에 심의 내용을 확정하여 이사회에 보고한다.
- ② 결과보고서에는 다음 각 호의 사항이 반드시 포함되어야 한다.
 1. 제보의 내용
 2. 조사의 대상이 된 부정행위
 3. 조사위원회의 조사위원 명단
 4. 해당 연구에서의 피조사자의 역할과 부정행위의 사실 여부
 5. 관련 증거 및 증인
 6. 제보자와 피조사자의 이의제기 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://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. 춘추계 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

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

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

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

KSPE Young Researcher Award

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

특별상

가헌학술상

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

현승공학상

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

유정백합학술상

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

백암논문상

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

Year of Launching

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

Aims and Scope

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

Fee

Subscription Fee:

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

Publication Fee:

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

Contact Us

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

Rules for Submitting and Publishing Papers

Article 1 Purpose

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

Article 2 Submitter

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

Article 3 Responsibilities and Compliance with Code of Ethics

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

Article 4 Scope of Research

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

Article 5 Categorization of Submissions

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

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

Article 6 Submission

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

Article 7 Review and Decision to Publish Paper

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

Article 8 Copyright

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

Article 9 Disclosure of Materials

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

Article 10 Manual of Style

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

Article 11 Publication Fees

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

Guidelines for Manuscript Writing

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

Author's Check List

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

Rules for Reviewing Papers

Article 1 Purpose

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

Article 2 Submission and Reception

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

Article 3 Selection of Reviewers

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

Article 4 Review Procedure

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

Article 5 Review Period

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

Article 6 Deadline for Author's Revision

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

Rules for Reviewing Papers

Article 7 Decision over Publication

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

Article 8 Review of Special Papers

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

Article 9 Confidentiality

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

Article 10 Objection

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

Article 11 Review Fee

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

Code of Ethics for Academic Activities

- Full Text of Code of Ethics for Academic Activities of the Korean Society for Precision Engineering: http://jkspe.kspe.or.kr/_common/do.php?a=html&b=16
- 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 1 · January 2023

REGULAR PAPERS

Development of Plasma Arc Spot Welding Process and Finite Element Method Analysis Model for Predicting Fracture Strength: Part 1—Development of Plasma Arc Spot Welding Process

G. Lee · H. Kim · J. Jeon · S. Han · S.-W. Han · J. Cho 1

Development of Plasma Arc Spot Welding Process and Finite Element Method Analysis Model for Predicting Fracture Strength: Part 2—Development of Finite Element Method Analysis Model for Predicting Fracture strength

G. Lee · H. Kim · J. Jeon · S. Han · S. Han · J. Cho 13

X-ray Diffraction Analysis of Damaged Layer During Polishing of Silicon Carbide

H. Jung · S. Jeong · Y. Park · Y. Shin · H. Jeong 25

Improved Convolutional Neural Network for Laser Welding Defect Prediction

W. Huang · X. Gao · Y. Huang · Y. Zhang 33

Fabrication of Short Circuit-Preventing Electrodes with a Self-assembled Monolayer on Flashlight-Sintered Porous Copper Nanofilms

T. Kim · T.H. Yun · C. Yim · J. Kim 43

Acoustic Emission Monitoring of Grinding-Polishing of Extra-Low Dispersion Lens

C.-W. Liu · H.-C. Chen · S.-C. Lin 53

Study on Folding Defect Elimination Method of Track Link Forging Based on Preforming Design

X. Ge · Y. Yu · H. Yu · G. Wang 61

Anomaly Detecting Geometric Transformation Network with Outlier Exposure Defect Inspection of Real Industrial Data

Y.-W. Kwon · D.-J. Kang 73

Learning-Based Discrete Hysteresis Classifier Using Wire Tension and Compensator for Flexible Endoscopic Surgery Robots

D.-G. Lee · D. Baek · H. Kim · J. Kim · D.-S. Kwon 83

Three-Phase Coil Configurations for the Radial Suspension of a Bearingless Slice Motor

H.-J. Ahn · N.V. Vo · S. Jin 95

Stiffness Improvement of Aerostatic Bearing by Separating-Pad-Based Passive Compensation

H. Hu · Y. Rong · H. Wu · Y. Huang 103

Weight Optimization of the Gearbox Using Interior Point Method

M.E. Avcu · H. Gökçe 113

Evaluation of V₂O₅ Film-Based Electrochromic Device with Dry-Deposited Ion Storage Layer

D. Shin · J. Kim · C.S. Lee 119

REVIEW

Design and Analysis of the Directional Transport Device for Bulk Rod Materials in Sand Fixation Equipment

Z. Guo · W. Zheng · L. Zhang · F. Li 129

CORRECTION

Correction to: Influence of Process Parameters on Formation of Al/Cu Dissimilar Weld Using Ultrasonic Welding

B.-S. Go · K.-H. Kim · C.-S. Ro · H.-S. Bang 143

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 1 · January 2023

REGULAR PAPERS

Fabrication System for Large-Area Seamless Nanopatterned Cylinder Mold Using the Spiral Laser Interference Exposure Method

Y.-W. Ma · J.H. Park · S.J. Lee · J. Lee · S. Cho · B.S. Shin 1

Comparison the Effect of MQL, Wet and Dry Turning on Surface Topography, Cylindricity Tolerance and Sustainability

S. Masoudi · M.J. Esfahani · F. Jafarian · S.A. Mirsoleimani 9

Enhancing Solar Radiant Heat Transfer Using Supersonically Sprayed rGO/AgNW Textured Surfaces

T. Kim · C. Park · Y. Kim · A. Aldalbahi · M. El-Newehy · S. An · S.S. Yoon 23

Study on Cutting Force and Tool Wear in Machining of Die Materials with Textured PCD Tools Under Ultrasonic Elliptical Vibration

S. Maeng · H. Ito · Y. Kakinuma · S. Min 35

Hybrid Wire-Arc Additive Manufacturing of Conformal Cooling Channels: A Feasibility Study

J.P.M. Pragana · I.M.F. Bragança · C.M.A. Silva · P.A.F. Martins 45

Intelligent Operation Monitoring of an Ultra-Precision CNC Machine Tool Using Energy Data

V. Selvaraj · Z. Xu · S. Min 59

Waterproof and Wear-Resistant Surface Treatment on Printed Parts of Polyamide 12 (PA12) by Selective Laser Sintering Using a Large Pulsed Electron Beam

J. Kim · D.-M. Chun · H.W. Park · J. Kim 71

One-Step Fabrication of Superhydrophobic Surfaces with Wettability Gradient Using Three-Dimensional Printing

J. Sung · H.M. Lee · G.H. Yoon · S. Bae · H. So 85

Additive-Manufactured Flexible Triboelectric Sensor Based on Porous PDMS Sponge for Highly Detecting Joint Movements

S.-Y. So · S.-H. Park · S.-H. Park · G.-M. Gwak · S.-K. Lyu 97

Accelerated Design of High-Efficiency Lead-Free Tin Perovskite Solar Cells via Machine Learning

T. Bak · K. Kim · E. Seo · J. Han · H. Sung · I. Jeon · I.D. Jung 109

Laser Patterning Technology Based on Nanosecond Pulsed Laser for Manufacturing Bifacial Perovskite Solar Modules

B.-Q. Lin · C.-P. Huang · K.-Y. Tian · P.-H. Lee · W.-F. Su · L. Xu 123

Variable Speed Wind Turbine Control Using the Homotopy Perturbation Method

A. Shalbfavian · S. Ganjefar 141

A Novel Vibration Model for Explanation of the Frequency Features in Multistage Wind Turbine Gearboxes Considering the Effects of Inter-stage Meshing Frequency Modulation

Y. Nie · F. Li · L. Wang · J. Li · Y. Li · M. Sun · M. Wang · G. Li 151

A Hybrid Self-Powered System Based on Wind Energy Harvesting for Low-Power Sensors on Canyon Bridges

H. Cao · X. Wu · H. Wu · Y. Pan · D. Luo · A. Azam · Z. Zhang 167

Fully Self-Powered Electrospray System via Triboelectric High Voltage Generator and Its Use to Control Wettability of Various Surfaces

S.H. Lee · S. Cho · S. Jang · D. Lee · D. Kam · J.H. Choi · Z. Hanif · M. La · S.J. Park · D. Choi 193

Influences of Wire Diameters on Output Power in Electromagnetic Energy Harvester

Y. Peng · L. Zhang · Z. Li · S. Zhong · Y. Liu · S. Xie · J. Luo 205

A Noise-Robust Feature Extraction Method for Rolling Element Bearing Diagnosis: Linear Power-Normalized Cepstral Coefficients (LPNCC)

K. Kim · H. Yoon · B.D. Youn 217

3D Measurement Using a Single Image for Smart Manufacturing of Microscopic Products in a Ceramic Powder Pressing Process

H.S. Kim · Y. Han · J. Kim 233

REVIEWS

Recent Progress in Learning Algorithms Applied in Energy Management of Hybrid Vehicles: A Comprehensive Review

D. Xu · C. Zheng · Y. Cui · S. Fu · N. Kim · S.W. Cha 245

Current Applications and Development of Composite Manufacturing Processes for Future Mobility

J.Y. Choi · J.H. Jeon · J.H. Lyu · J. Park · G.Y. Kim · S.Y. Chey · Y.-J. Quan · B. Bhandari · B.G. Prusty · S.-H. Ahn 269

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 2022년 제10차 이사회 회의록(요약)

◎ 일 자 : 2022년 11월 11일(금) 16:00~16:50

◎ 장 소 : 학회회의실/화상회의

◎ 참석자 : 양승환, 이석우, 민병권, 안성훈, 백주현, 김동성, 신현정, 주백석, 정영훈, 곽문규, 김규만, 김보현, 김영진, 문두환, 박 근, 박영빈, 안지환, 안형준, 이광일, 이창우, 장진아, 정훈의, 추원식, 권지연, 김창주, 박상후, 이경창, 이동원, 주기남, 현승민, 이동윤, 이현욱, 이현욱, 장원석, 김대욱, 문승기, 민상기, 이동진, 조영태, 차석원, 김건희, 서진호, 최영재, 진종한, 정재일, 이상원, 오정석, 이인환
위임 17명 총 65명 참석

1. 주요 보고 및 토의사항

- 1) 2022년 정기총회 개최(10.20(목), 대구 EXCO)
- 2) 한국기계기술단체총연합회 2022년 정기총회 참석(11.16(수), 수석부회장 이석우 참석)
- 3) 장기성예금(고유목적적립금) 수정적립 보고
- 4) 추계학술대회 결과 보고
- 5) 제7회 정밀공학 창의경진대회 결과 보고

2. 주요 승인 및 토의사항

- 1) 신입회원 인준: 정회원 66명, 학생회원 143명 등 총 209명 승인
- 2) JPPEM-GT Member of Editorial Board 위촉(안) 승인
 - ① 문두환(고려대): 2022.11.11.~2023.12.31.
- 3) 제14회 대학생 공작기계 창의아이디어공모전 한국정밀공학회 회장상 시상(안) 승인
 - ① 주최: 한국공작기계협회
 - ② 수상자: 아이리스(서울과기대, 유혜진, 김지영, 임재환, 맹희영)
 - ③ 주제: 스트로우 관의 고속 커팅 기구 개발
- 4) ASPEN 2022 수상자 추천(안) 승인
 - ① Best Paper Award: 원승재(KAIST), 심범식(충남대), J. Dar(GIST), 고종완(KITECH), 주민기(영남대), 곽재원(고려대), 주기남(조선대)
 - ② Young Researcher Award: 이은호(성균관대), 이찬영(KIMM), 배장호(경성대)

신입회원인준명단

• 정회원 •

회원번호	이름	소속
20228793	김봉훈	DGIST

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)

부문회장

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

특별회원사

다이아몬드

DN솔루션즈 한국화낙(주) 신도리코(주) 현대위아(주) (주)이수페타시스 (주)이씨텍
(주)키슬러코리아 (주)화신정공 화천기공(주)

플래티늄

HP Korea(유) SK실트론(주)

골드

(주)마리알로 (주)에이스나노켄 (주)엔도로보틱스 지엔피테크놀로지(주) (주)프로토텍
핵사곤

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 1/ January 2023

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

월간 · 제40권 제1호 [통권 제382호] · 비매품

등록일자 1987년 4월 25일

등록번호 서울 라 07037

인쇄일 2022년 12월 25일

발행일 2023년 1월 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)

January 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 Cincinnati, USA

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

Editors

Hyeong-Joon Ahn / Soongsil University, Korea

Hae-Jin Choi / Chung-Ang University, Korea

Chih-Hsing Chu / National Tsing Hua University, Taiwan

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

Dong Yoon Lee / Korea Institute of Industrial Technology, Korea

Seungchul Lee / POSTECH, Korea

Sangkee Min / University of Wisconsin-Madison, USA

Seung-Ki Moon / Nanyang Technological University, Singapore

Duhwan Mun / Korea University, Korea

Simon Park / University of Calgary, Canada

Editorial Board

Seung-Kyum Choi / Georgia Institute of Technology, USA

Haseung Chung / Michigan State University, USA

Youngkuk Jeong / KTH Royal Institute of Technology, Sweden

Yongho Jeon / Ajou University, Korea

Jay-I. Jeong / Kookmin University, Korea

Hyungjung Kim / Seoul National University, Korea

Yangjin Kim / Pusan National University, Korea

Jihyun Lee / University of Calgary, Canada

Wonkyun Lee / Chungnam National University, Korea

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

Joo-Sung Yoon / Kyungnam University, Korea

한국정밀공학회지(JKSPE) 투고 안내

귀 회원님의 건승을 기원합니다.

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



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

한국정밀공학회지(JKSPE)

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



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
- Biomechanical Engineering
- 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

한국정밀공학회지최우수논문상

– 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

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) - 20(목)

Bankoku Shinryokan
Okinawa, Japan

한국정밀공학회

2023 KSPE 2023
Autumn
Conference

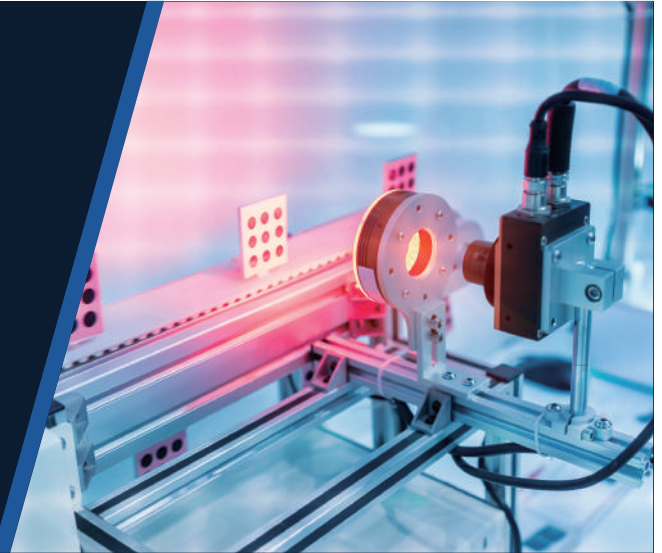
추계학술대회

2023. 11. 15(수) - 17(금)

솔비치삼척 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

