

브레이징 접합에 의해 제조된 다결정 다이아몬드(PCD) 건드릴 및 트위스트 드릴의 가공 특성 비교

Comparison of Machining Characteristics of PCD Gun Drill and PCD Twist Drill Manufactured by Brazing

손호민¹, 박경환¹, 김동규², 사민우^{1, #}

Ho Min Son¹, Kyung Hwan Park¹, Dong Gyu Kim², and Min-Woo Sa^{1, #}

¹ 에스제이엔텍 기업부설연구소 (R&D Center, SJNTEC)

² (재)대구기계부품연구원 정밀가공 종합기술지원센터 (Center for Advanced Cutting Tool and Machining, Daegu Mechatronics & Materials Institute)

Corresponding Author / E-mail: 79smw42@gmail.com, TEL: +82-53-586-6210

ORCID: 0000-0003-0979-8736

KEYWORDS: Future mobility (미래 이동수단), Lightweight material (경량소재), PCD gun drill (PCD 건드릴), PCD twist drill (PCD 트위스트 드릴), Brazing (브레이징 접합)

Recently, lightweight materials centered on the future mobility industry are used in various parts such as battery housings and EV platform frames to improve fuel efficiency of automobile engines. Polycrystalline Diamond (PCD) tools are in demand by parts processing companies to improve productivity for machining lightweight parts. PCD drills have excellent cutting performance and wear resistance in high-speed machining. They are expected to grow in the global cutting tool market in the future. Research is needed to improve their performance. In this study, PCD gun drill and twist drill were respectively manufactured using brazing technology. Comparative machining experiments were then conducted. The PCD gun drill is a straight-shaped tool with a PCD tip brazed to a tool body groove for the tip to enter the cutting edge. The PCD twist drill is a spiral-shaped tool with a PCD drill blank brazed to a V-shaped butt joint with the tool body and an internal groove. Both PCD drills were successfully manufactured and evaluated for dimensional accuracy and surface quality by machining aluminum alloy materials with MCT equipment. In the future, we will evaluate not only aluminum materials, but also various machining materials.

Manuscript received: January 20, 2025 / Revised: March 4, 2025 / Accepted: March 18, 2025
This paper was presented at KSPE Autumn Conference in 2024

1. 서론

최근 다양한 산업군 중 미래모빌리티 산업에서 에너지 소비 효율을 증대하고자 경량화 및 소형화에 대한 노력을 지속적으로 하고 있으며, 이에 대한 노력은 구조의 경량화, 공정의 경량화, 소재의 경량화 등 3가지로 구분된다. 이 중 가장 효율적인 기술은 경량화 소재를 적용하는 것으로 인해 비철금속인 경량소재 부품들에 대한 수요가 많아지고 있다[1,2]. 경량소재 중 알루미늄 합금은 기존 철강 소재 대비 35-40%의 경량화 효과를 얻을 수 있어 자동차 엔진의 연비 향상에 영향을 주며, 동시에 재활용성이 우수하여 사용량은 급격히 증가하고 있다[3]. 이로

인해 알루미늄 합금 가공 기술 개발의 필요성이 추구하고 있고, 생산성 향상을 위한 고속가공에서 절삭성과 내마모성이 좋은 다결정 다이아몬드(Polycrystalline Diamond, PCD) 드릴 공구가 적합하다[4,5].

PCD 드릴은 PCD 소재 형상에 따라 건드릴 형식과 트위스트 드릴 형식으로 접합할 수 있다. 먼저, PCD 건드릴은 절삭 날 부분에 팁이 들어가기 위한 포켓에 PCD 팁 소재를 접합시킨 것으로 직선형 플루트 형상의 공구이다. PCD 트위스트 드릴은 PCD 드릴 블랭크 소재를 내부 홈이 파여진 공구 바디와의 V형 홈 접합을 시킨 것으로 나선형 플루트 형상의 공구이다. 공구 내부에 절삭유를 분사할 수 있는 오일 홀에서 PCD 건드릴은 제작이

가능하여 형성되어 있지만 PCD 트위스트 드릴은 솔리드 형태의 접합성과 비교적 작은 직경으로 인해 오일 홀이 없어 외부급유만 가능하다. 2가지 PCD 드릴의 제작 방식에서 PCD 건드릴은 비용이 높은 PCD 소재를 팁 형식으로 사용되어 비교적 비용이 낮게 발생하는 반면, PCD 트위스트 드릴은 PCD 소재가 솔리드 형식으로 사용되어 비용이 좀 더 발생된다. 하지만, 미세 가공 및 공구 형상에 다변화가 가능한 초소형 PCD 드릴 제작에 있어서 PCD 건드릴은 크기가 작은 PCD 팁 소재를 절삭 날 개수마다 접합해야 하는 어려움이 있다. 그러나, PCD 트위스트 드릴은 비교적 큰 PCD 솔리드 소재의 접합을 단 한번으로 이루어지기 때문에 훨씬 더 수월하다. 또한, 용도 및 성능 측면에서 살펴보면 PCD 건드릴은 다이아몬드의 특성을 잘 활용할 수 있는 소재 가공에서 높은 효율을 지니고 있지만 내구성이 공구 바디에 의존되어 일부 고강도 소재 가공에서는 제한이 될 수 있다. 반면, PCD 트위스트 드릴은 절삭 날이 PCD 소재로 형성되어 내구성이 비교적 좋아 고강도 소재 가공에 유리하다. 하지만 가공 중 마모 시 팁만 교체하면 되는 PCD 건드릴과 달리, PCD 트위스트 드릴은 절삭 날 전체가 PCD로 이루어져 있기 때문에 유지 보수 비용이 상대적으로 높다.

PCD 소재를 접합시키기 위해 브레이징과 레이저 용접 기술이 널리 사용되고 있다. 레이저 용접 기술은 이종재료 접합력의 저하(높은 기공율, 균열 발생)와 비용이 많이 발생하는 문제점이 있지만 브레이징은 적절한 용가재를 사용함으로써 이종재료 접합력에 대한 적절한 강도를 조절할 수 있고 비용절감이 가능하다[6]. 이로 인해 PCD 드릴 제작에서는 브레이징 접합 기술을 채택하였다.

PCD 건드릴은 냉각 기능, 칩 제거, 공구의 마모 감소 역할이 있는 오일 홀이 있고 PCD 트위스트 드릴은 높은 절삭 효율과 진동을 줄여줄 수 있는 나선형 형상을 지니고 있다. 이러한 2가지 접합 형상에 따른 PCD 드릴은 서로 다른 가공 정밀도 및 품질성이 나타날 것이며, PCD 공구의 성능향상을 위해 비교 실험에 대한 평가 및 분석이 필요할 것으로 판단된다. 따라서, 본 연구에서는 이종재료 접합에서 효율이 좋은 브레이징 접합기술을 이용하여 2가지 접합 형상에 따른 PCD 드릴을 각각 제작하였다. 그리고 MCT 장비를 통해 알루미늄 합금 소재를 가공하여 치수 정밀도와 표면 품질에 대해 평가 및 분석하였다.

2. 실험 및 방법

2.1 PCD 접합 드릴 공구 설계

PCD 접합 형상에 따라 접합된 드릴 공구를 제작하기 위해 다음과 같이 설계하였다. Fig. 1은 각 접합 형상에 따른 PCD 드릴을 설계한 제작도면이다. Figs. 1(a)는 PCD 건드릴, 1(b)는 PCD 트위스트 드릴을 보여주고 있다. 설계된 PCD 건드릴은 날 직경 및 Shank 직경을 $\phi 6$ mm으로 하였고, 선단각은 140° 이며, 전장 치수는 82.5 mm이다. 또한, 가공 중 공구 내부에도 절삭유가

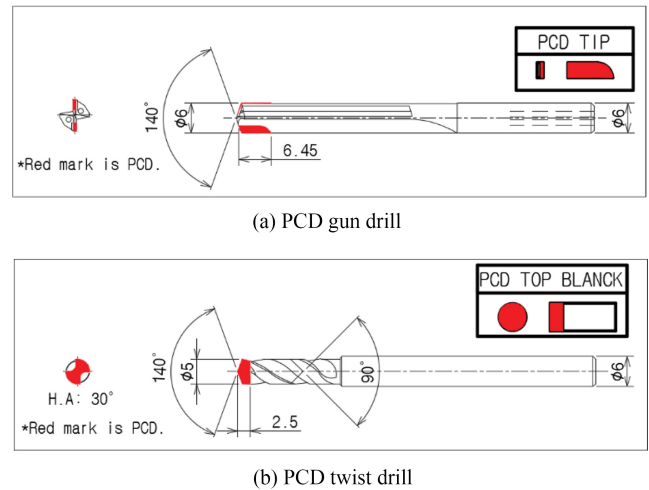


Fig. 1 2D CAD of PCD drill

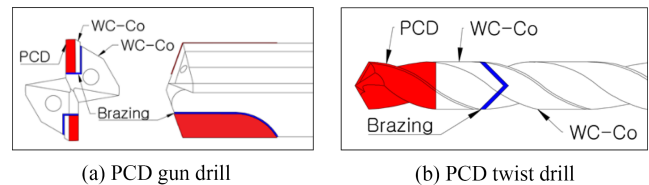


Fig. 2 Brazed schematic of PCD drill

공급될 수 있도록 하기 위해 오일 홀을 Two Straight Hole 형태로 설계하였다. PCD 트위스트 드릴은 날 직경 $\phi 5$ mm, Shank (Shank) 직경은 $\phi 6$ mm으로 하였고 선단각은 140° 이며, 전장 치수는 71.2 mm이다. PCD 트위스트 드릴은 V형 홈 접합으로 인해 접합면 틈에 오일 홀이 새어 나올 수 있고, 비교적 작은 직경으로 인해 오일 홀 설계를 하지 않았다.

2.2 PCD 접합 드릴 공구 제작

설계된 제작 도면을 토대로 PCD 공구 제작을 다음과 같이 진행하였다. 초경합금과 소결된 PCD 소재를 초경합금 소재의 공구 홀더와 접합시키기 위해 고주파 브레이징 작업을 하였다. Figs. 2는 각 PCD 드릴을 브레이징 접합에 대한 개략도로 2(a)는 PCD 건드릴의 브레이징 접합에 대한 개략도이고, 2(b)는 PCD 트위스트 드릴의 브레이징 접합에 대한 개략도를 보여준다. 브레이징 접합을 한 결과, 각 PCD 드릴 모두 브레이징 접합이 성공적으로 이루어졌음을 볼 수 있었다.

브레이징 접합된 PCD 공구를 날 형상으로 가공시키기 위해 PCD 소재 가공에 적합한 가공 방식 선정이 필요하였다.

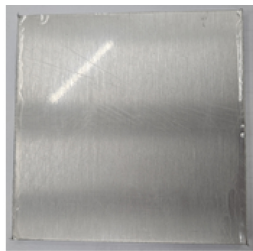
방전가공은 미세 전극을 사용하여 정밀하고 복잡하거나 미세한 형상을 가진 부품들 가공에 쉬우며, 열에너지에 기반한 가공방식으로 인해 전도체 물질의 경우 경도에 상관없이 가공이 가능하다. PCD 소재는 비전도성 물질인 다이아몬드와 전도성 물질인 코발트 바인더가 결합되어 소결된 재료로 형성되어 있어 전도성 물질로 인해 방전가공이 가능하다[7,8]. 따라서 본



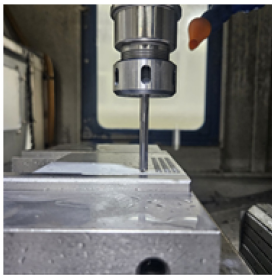
Fig. 3 CNC erosion grinder



(a) MCT equipment



(b) AL6061 workpiece



(c) PCD gun drill set up



(d) PCD twist drill set up

Fig. 4 Photos of the experimental set up on the MCT equipment

연구에서는 PCD 소재 가공을 방전가공으로 선정하였다. Fig. 3은 PCD 드릴 제작에 사용된 방전가공 장비(EDG3, ANCA, Australia)를 나타낸다.

3. 실험 및 결과

3.1 제작된 PCD 드릴의 비교 가공 실험 준비

제작된 PCD 접합 형상에 따른 드릴의 가공 특성을 분석하기 위해 알루미늄 합금 소재를 통해 비교 가공 실험을 실시하였다. Fig. 4는 MCT 장비의 실험 세팅 사진을 보여준다. Figs. 4(a)는 4(a)는 MCT 장비(DST-36D, Daesung HITEC, Korea), 4(b)는 실험에 사용된 알루미늄 합금(AL6061) 피삭재, 그리고 4(c)와 4(d)는 MCT 장비에 장착된 PCD 건드릴 및 트위스트 드릴의 모습을 나타낸다. Figs. 5는 실험에 사용된 PCD 드릴의 모습으로 5(a)는 PCD 건드릴, 5(b)는 PCD 트위스트 드릴을 보여준다. 절삭 유 가공방식은 PCD 건드릴은 내부 및 외부 급유 가공을 하였고,



(a) PCD gun drill



(b) PCD twist drill

Fig. 5 Photos of the fabricated PCD drill

Table 1 Machining conditions for PCD drill

Spindle speed [RPM]	5000, 7500, 10000
Feed rate [mm/rev]	0.1, 0.14, 0.18
Cutting depth [mm]	Feed depth: 6
Workpiece size [mm]	100Wx100Lx6T

Table 2 The main dimensions of drilling

Parameter	PCD gun drill	PCD twist drill
Lipheight [mm]	0.005	0.001
Runout [mm]	0.000	0.003
Blade diameter of tool [mm]	6.010	5.000

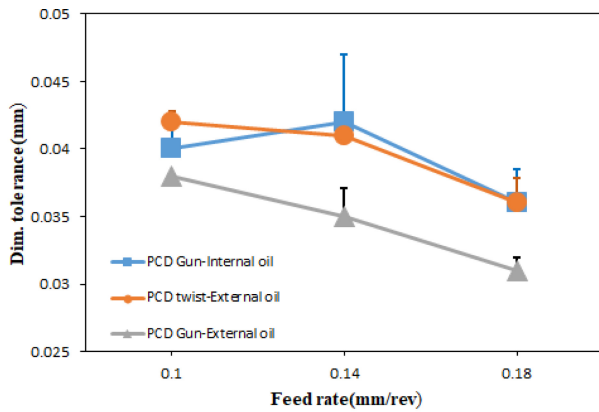
PCD 트위스트 드릴은 오일 홀이 없어 외부 급유 가공으로만 실시하였다. Table 1은 실험을 진행한 가공조건 및 알루미늄 합금 피삭재에 대한 치수를 나타낸 것으로 총 9가지의 동일한 가공조건 및 피삭재로 진행하였다. Table 2는 제작된 2가지 PCD 드릴 가공의 주요 치수인 동심도 및 런아웃을 공구 측정장비(Genius3, Zoller, Germany)를 통해 측정한 값을 나타냈고, 2가지 PCD 드릴에 대해 서로 차이가 나타나지 않는 것을 확인할 수 있었다.

3.2 실험 결과에 대한 평가 및 분석

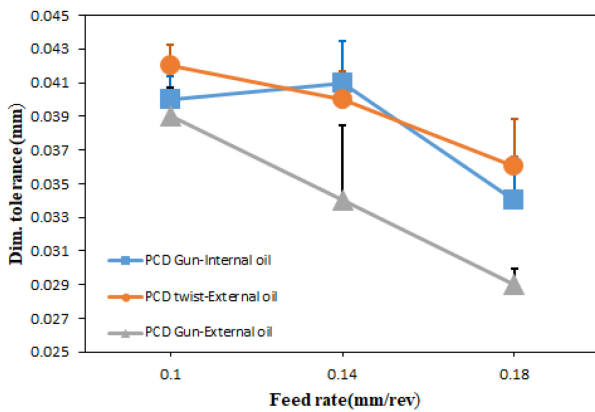
총 9개의 가공조건에서 1조건당 3홀씩 가공을 각각 진행하여 가공된 홀의 내경 치수 및 표면 거칠기를 측정하였다. 이후, 측정된 값들에서 3홀씩 1조건에 대해 평균값으로 계산하여 나온 결과 값들에 대해 그래프로 나타냈다.

Figs. 6은 각 PCD 드릴의 날 직경 대비 가공 내경 치수의 오차 값에 대한 그래프이며, 6(a)-6(c)는 3가지 회전수에 대해 그래프를 각각 나타냈다. 가공 내경 치수는 3차원 측정 장비(Axiom too CMM, Aberlink, UK)를 통해 측정되었다. 급유 가공 형태 및 2가지 PCD 드릴 모두 1회전당 이송량이 증가함에 따라 가공 내경 치수의 오차 값이 점점 감소하는 경향이 동일하게 나타났다. 가공 내경 치수의 오차 값을 전체 평균으로 나타낸 결과, PCD 건드릴의 내부 급유 가공은 0.0392 mm, PCD 트위스트 드릴의 외부 급유 가공은 0.0372 mm, 그리고 PCD 건드릴의 외부 급유 가공은 0.0342 mm가 나와 서로 차이가 나타나지 않는 것을 볼 수 있다.

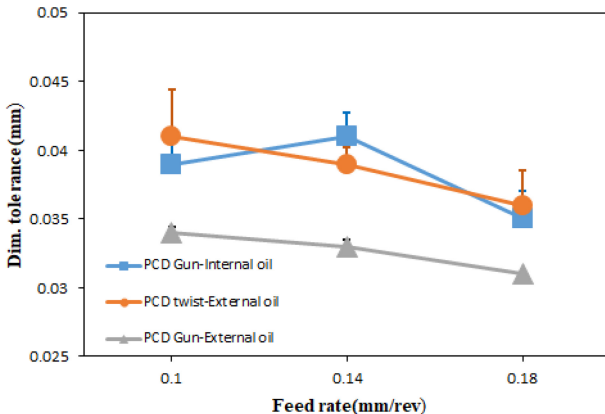
Figs. 7은 가공된 홀의 표면 거칠기에 대한 그래프이며, 7(a)-7(c)는 3가지 회전수에 대해 그래프를 각각 나타내었다. 표면



(a) 5,000 RPM



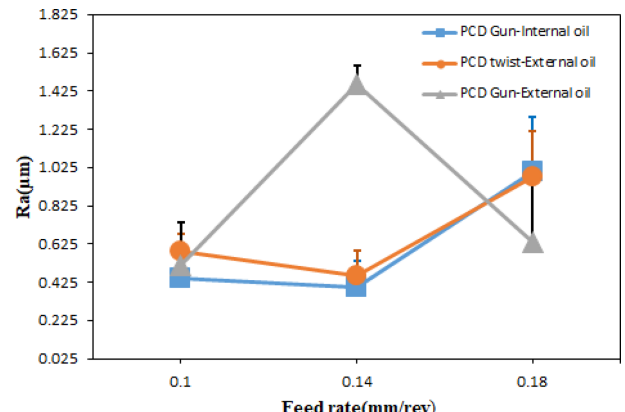
(b) 7,500 RPM



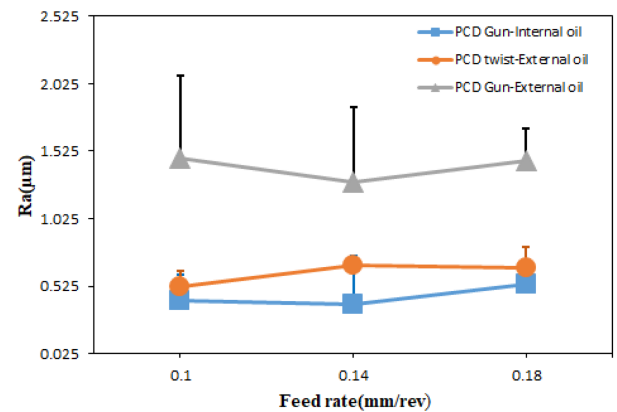
(c) 10,000 RPM

Fig. 6 Result graph of inner diameter dimensional accuracy

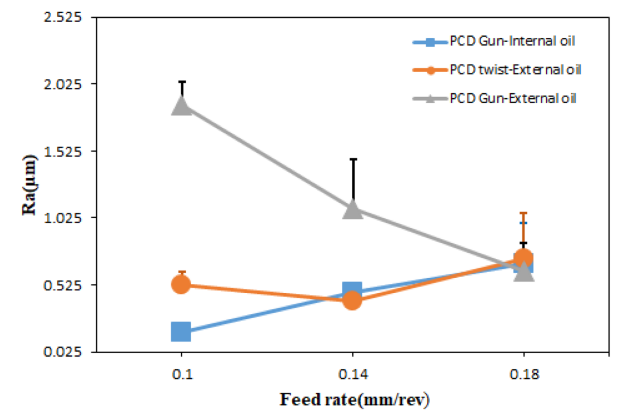
거칠기는 Ra 값으로 표면 조도 측정기(SJ-210, Mitutoyo, Japan)를 통해 측정되었다. PCD 건드릴의 내부 급유 가공과 PCD 트위스트 드릴은 1회전당 이송량이 커질수록 표면 거칠기 값이 안 좋게 나타나는 경향이 나타나지만 PCD 건드릴의 외부 급유 가공은 불규칙적으로 확인된다. 각 급유 가공 형태 및 드릴의 전체 가공 표면 거칠기 값을 평균으로 나타난 결과, PCD 건드릴의 내부 급유 가공은 $0.502\ \mu\text{m}$, PCD 트위스트 드릴의 외부 급유 가공은 $0.614\ \mu\text{m}$, 그리고 PCD 건드릴의 외부 급유 가공은 $1.159\ \mu\text{m}$ 가 나와 PCD 건드릴의 내부 급유 가공 품질이 비교적 우수함을 확인할



(a) 5,000 RPM



(b) 7,500 RPM



(c) 10,000 RPM

Fig. 7 Result graph of surface roughness

수 있다. 다른 급유 가공 및 공구보다 PCD 건드릴의 외부 급유 가공에 대한 표면 거칠기 값이 안 좋게 나타난 것은 외부 급유 가공 및 드릴의 플루트 버니싱 형상으로 인해 가공 중 칩이 많이 감기게 되어 이러한 실험적 변수가 발생된 것으로 추측된다.

또한, 가공된 알루미늄 합금 표면에 대한 심층적인 분석을 위해 Fig. 8과 같이 표면 형상 측정기(3D Surface Measurement System, Alicona, Austria)를 통해 3D 표면 형상을 측정하였다. Figs. 8(a)는 PCD 건드릴의 내부 급유 가공, 8(b)는 PCD 트위스트 드릴의 외부 급유 가공에 대한 3D 표면 형상이다. 분석

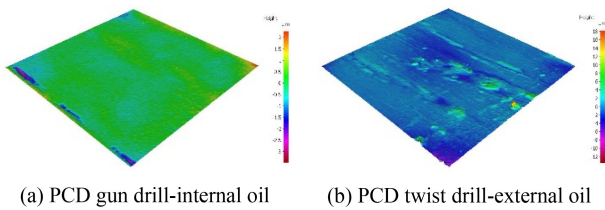


Fig. 8 3D geometry of machined AL6061 surface

결과, PCD 건드릴의 내부 급유 가공 표면이 비교적 더 균질하게 나타났고, 이에 대한 결과는 내부 및 외부 급유 가공에 대한 차이로 인해 나타난 것으로 유추해볼 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 PCD 접합 형상에 따라 공구의 가공 특성을 분석하기 위해 각각의 PCD 접합 드릴을 제작하였고, 알루미늄 합금 소재에서 가공 실험을 동일한 가공 조건 및 장비를 통해 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

PCD 접합 형상별로 드릴을 브레이징 접합 및 방전 가공을 통해 제작한 결과, 2가지 공구 모두 접합과 가공이 원활하게 잘 제작되었다. 또한, 오일 홀 제작에서는 PCD 건드릴은 접합부 쪽 플루트가 공구 홀더로 이루어져 있어 오일 홀 제작이 가능하였다. 하지만 PCD 트위스트 드릴은 플루트를 포함한 접합부 전체가 PCD 소재로 이루어져 있으며, 비교적 작은 직경으로 인해 오일 홀 제작이 불가능하였다.

제작된 2가지 PCD 드릴 및 급유 가공에 대한 비교 실험에서 측정된 가공 홀의 내경과 Table 2의 가공에 대한 주요 치수들을 토대로 분석한 결과, 2가지 PCD 드릴의 가공 정밀도가 서로 차이가 나타나지 않음을 확인할 수 있었다.

가공된 홀 표면의 거칠기를 측정한 결과, PCD 건드릴 외부 급유 가공의 표면 거칠기 값이 PCD 건드릴의 내부 급유 가공 및 PCD 트위스트 드릴의 외부 급유 가공에 비해 높게 측정되었으며, 1회전당 이송량이 커질수록 불규칙적으로 크게 변동하는 것으로 나타났다. 이러한 결과가 나타난 것은 PCD 건드릴의 버니싱 형상의 플루트와 외부 급유 가공으로 인해 칩 배출이 용이하지 않아 이와 같은 실험적 변수가 발생된 것으로 해석된다.

추후, PCD 접합 형상에 따라 접합된 공구를 드릴뿐만 아니라 다른 형태의 절삭공구들로 제작하여 다양한 피삭재 가공에 대한 비교 연구를 지속적으로 수행할 계획이다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 연구는 2023년도 중소벤처기업부의 ‘중소기업기술혁신 개발사업 소부장전략’의 지원을 받아 연구되었음(No. RS-2023-00218350).

REFERENCES

1. Ju, Y. J., (2020), A Study on the materials selection method for the lightweighting of automobile and improvement of fuel-conditioning performance, M.Sc. Thesis, Hongik University.
2. Ju, Y. J., Kwon, Y.-C., Choi, H. S., (2019), Study on the suitability of composite materials for enhancement of automotive fuel economy, Journal of the Korean Society for Composite Materials, 32(5), 284-289.
3. Han, B.-S., Kim, S.-H., Sin, J.-H., Kim, J.-P., Kim, D. -O., Seong, S. -Y., (2022), Automotive technology trends and lightweight technology, Journal of Korea Foundry Society, 42(2), 97-104.
4. Lee, S.-W., Lee, D.-J., Choi, H. S., (2012), Prediction of surface roughness on the PCD tool turned aluminum alloys by using regression analysis, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, 11(3), 41-47.
5. Kim, H.-C., Ham, S.-D., Hong, U.-P., Park, Y.-U., Kim, G.-S., (2000), The comparison of cutting characteristics of PCD and MCD tools in the ultraprecision turning of aluminum alloy, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 17(12), 68-75.
6. Lee, J. H., Lee, C. H., (1999), Characteristics of brazed joint of sintered bronze/steel using Ag-Cu-Zn type filler materials, Journal of the Korean Welding and Joining Society, 17(3), 79-89.
7. Kim, C. H., Kang, J. W., Oh, J. U., Seo, J. B., (2008), The Study on the WEDM of Polycrystalline Diamond, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, 7(3), 67-74.
8. Moon, I. Y., Kim, B. H., (2013), Micro machining of titanium alloy using polycrystalline diamond tools, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 30(3), 284-291.

**Ho Min Son**

Received his bachelor degree in 2021 from the Department of Mechanical Engineering, Keimyung University, Daegu, Korea. He is currently a researcher in R&D Center, SJN-TEC company, Daegu, Korea. His research interest is cutting tool.

E-mail: shm0091@naver.com

**Kyung Hwan Park**

Received his associate degree in 2021 from the Department of Mechanical Engineering, Keimyung College University, Daegu, Korea. He is currently a researcher in R&D Center, SJNTEC company, Daegu, Korea. His research interest is cutting tool.

E-mail: picker159@naver.com

**Dong Gyu Kim**

Received his Ph.D. degree in 2024 from the Department of Mechanical Engineering, Kyungpook National University, Daegu, Korea. He is currently a senior researcher in Daegu Mechatronics & Materials Institute (DMI), Daegu, Korea. His research interest is advanced manufacturing technology.

E-mail: kdg0830@dmi.re.kr

**Min-Woo Sa**

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

E-mail: 79smw42@gmail.com

나노스케일 멤브레인에서 레이저 초음파로 여기된 램파의 전파 특성

Characteristics of Lamb Wave Propagation on a Nanoscale Membrane Induced by a Laser Ultrasonic Technique

김윤영^{1,#}
Yun Young Kim^{1,#}

¹ 충남대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Chungnam National University)
Corresponding Author / E-mail: y.kim@cnu.ac.kr, TEL: +82-42-821-6648
ORCID: 0000-0001-8945-9843

KEYWORDS: Lamb wave (램파), Laser ultrasonics (레이저 초음파), Nanoscale membrane (마이크로 멤브레인), Wave propagation (파동 전파)

A lamb wave propagation behavior on a freestanding nanoscale membrane was investigated using a laser ultrasonic technique in the present study. A 110-nm thick aluminum (Al) layer was deposited on a rectangular 200-nm thick silicon nitride (SiN) membrane and the Lamb wave was launched using a pulsed laser. The transfer matrix technique was employed to obtain a theoretical dispersion curve so that material properties of the SiN membrane could be estimated through curve-fitting. In addition, picosecond ultrasonic measurement was used to characterize the Al film. Results showed that the dispersive behavior of Lamb wave in the fundamental antisymmetric mode could be clearly observed on the membrane. However, comparison of dispersion curves indicated that the effect of residual stress of the film became more influential at a low dimensional scale.

Manuscript received: January 20, 2025 / Revised: April 3, 2025 / Accepted: April 11, 2025

NOMENCLATURE

A = Amplitude
B = Product of Effective Elastic Modulus and Thermal Expansion Coefficient
 C_p = Specific Heat
c = Effective Elastic Modulus
D = Field Matrix
 $\mathcal{D}$ = Flexural Rigidity
d = Film Thickness
f = Frequency
 I_0 = Laser Intensity
i = Interface
k = Wavenumber
L = Longitudinal Wave Component

$\mathcal{L}$ = Layer Matrix
l = Layer
R = Reflectance
S = Shear Wave Component
 $\mathcal{S}$ = System Matrix
t = Time
u = Displacement
v = Velocity
W = Laser Heating Function
w = Angular Frequency
 Φ = Phase
 β = Absorption Depth
 κ = Thermal Conductivity
 λ = The 1st Lamé's Constant

μ	= The 2 nd Lamé's Constant
ρ	= Density
σ	= Stress
τ	= Laser Pulse Width
ϕ	= Scalar Function
ψ	= Vector Function

1. 서론

램파(Lamb Wave)를 활용한 기술은 구조물의 비파괴 검사와 건전성 모니터링 분야에서 다양하게 활용되고 있다. 램파는 판재 형태의 고체 매질 내에서 전파되는 유도초음파로, 진동 특성에 따라 대칭모드(Symmetric Mode, S)와 반대칭모드(Antisymmetric Mode, A)가 있으며, S_0 과 A_0 두 가지 기본 모드 이외에도 주파수의 증가에 따라 S_1 , A_1 , S_2 , A_2 등으로 지칭되는 다양한 고차 모드가 존재한다[1]. 램파는 에너지 손실이 적고 전파거리가 길기 때문에 항공기, 선박, 압력용기 등 많은 산업 분야에서 부식, 균열, 계면박리, 잡손상 등의 검출을 위한 필수적인 기술로 자리잡고 있다[2-4].

램파를 여기 혹은 검출하기 위하여 접촉식 초음파 탐촉자나 전자기음향 트랜스듀서(Electromagnetic Acoustic Transducer)를 활용하는 것이 일반적이지만, 레이저 초음파 기법을 이용하면 커플러(Couplant) 없이도 고온, 방사선 등 가혹환경에서도 측정이 가능하고, 높은 시공간적 분해능으로 검출 정밀도를 높일 수 있으며, 빠른 스캐닝으로 검사속도를 단축시켜 대형 구조물의 결함 탐지를 효율적으로 할 수 있으므로 최근에는 레이저를 이용한 비접촉식 계측에 관한 연구가 활발히 이루어져 왔다[5]. 특히, 수 나노초에서 수 백 펨토초에 이르는 짧은 레이저 펄스폭과 메가헤르츠에 이르는 높은 반복률, 그리고 광학계를 사용하여 레이저 광을 수 마이크로미터 이하의 크기로 집속할 수 있는 분해능은 반도체, 디스플레이 등 전기전자 제조산업에 활용되는 마이크로/나노스케일 소재와 구조물의 특성평가에 적합하다[6,7].

따라서 본 연구에서는 레이저 초음파 기법이 갖는 장점을 활용하여 나노스케일 멤브레인 구조에서 전파하는 램파의 특성을 분석하고자 한다. 펄스 레이저를 사용하여 램파를 여기시켰으며, 레이저 간섭계를 사용하여 표면변위를 측정함으로써 매질 내에서 전파하는 파동을 검출하였다. 아울러 전단행렬법을 이용하여 이론해를 구함으로써 실험결과와 비교 분석하였으며, 해석 시 입력값으로 필요한 박막의 물성을 구하기 위하여 피코초 초음파 기법을 병행하였다.

2. 이론

2.1 전달행렬법을 이용한 분산곡선 계산

램파의 이론적 분산곡선을 계산하기 위하여 전달행렬법[8]을

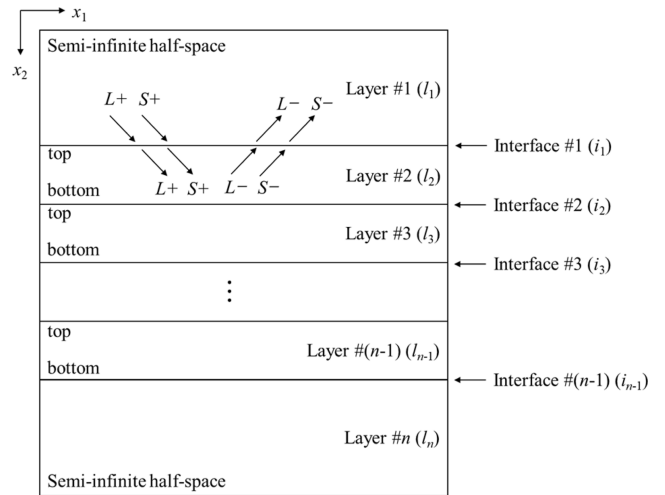


Fig. 1 A schematic of the multilayered structure for the transfer matrix analysis

사용하였으며, 그 내용을 간략히 정리하면 다음과 같다: 3차원 직교좌표계에서 무한 탄성체 내의 평면파에 대한 방정식은 식(1)과 같이 기술된다.

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \nabla (\nabla \cdot \mathbf{u}) + \mu \nabla^2 \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

여기서 ρ 는 밀도를, $\mathbf{u}$ 는 변위를, t 는 시간을, 그리고 λ 와 μ 는 각각 라메의 제1계수와 제2계수를 뜻한다. Helmholtz의 분산 정리[9]를 적용하여 파동을 종파성분(L)과 횡파성분(S)의 합으로 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_L + \mathbf{u}_S \quad (2)$$

$$\mathbf{u}_L = \nabla \phi = \begin{Bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ 0 \end{Bmatrix} A_{(L)} e^{i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{x} - \omega t)} \quad (3)$$

$$\mathbf{u}_S = \nabla \times \boldsymbol{\psi} = \begin{Bmatrix} k_2 \\ -k_1 \\ 0 \end{Bmatrix} A_{(S)} e^{i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{x} - \omega t)} \quad (4)$$

여기서 $\mathbf{k}$ 는 파수를, 그리고 ω 는 각주파수를 뜻한다. 또한, $A_{(L)}$ 과 $A_{(S)}$ 는 각각 종파와 횡파변위의 진폭을 뜻한다. Fig. 1과 같이 반무한 매질 내에 존재하는 다층판 구조를 생각해 보면 스넬(Snell)의 법칙에 따라 식(5)와 같은 공통변수가 도출된다.

$$F = e^{i(k_1 x_1 - \omega t)} \quad (5)$$

각 계면을 중심으로 상부에서 입사하여 하부로 전파하는 종파와 횡파를 각각 (L+), (S+)로 나타내고, 하부에서 입사하여 상부로 전파하는 종파와 횡파를 (L-), (S-)로 나타낸다면, 변위 및 응력과 진폭의 관계는 식(6)과 같이 행렬 형태로 기술된다.

$$\begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{21} \end{Bmatrix} = [D] \begin{Bmatrix} A_{(L+)} \\ A_{(L-)} \\ A_{(S+)} \\ A_{(S-)} \end{Bmatrix} \quad (6)$$

여기서 $[D]$ 는 각속도와 파수, 밀도, 그리고 종파와 횡파의 속도로 결정되는 4×4 크기의 장(Field) 행렬이다. 각 층에서 윗면과 아랫면의 변위와 응력 관계는 아랫면의 장행렬과 윗면의 장행렬의 역행렬의 곱으로 표현할 수 있으며, 이를 층(Layer)행렬 $[\mathcal{L}]$ 로 지칭한다. 예를 들어, Fig. 1의 l_2 에 대하여 식(7)의 관계를 갖는다.

$$[\mathcal{L}]_{l_2} = [D]_{l_2, bottom} [D]_{l_2, top}^{-1} \quad (7)$$

같은 방법으로 모든 층에 대하여 식을 도출하면 식(8)과 같다.

$$\begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{21} \end{Bmatrix}_{l_n, top} = [\mathcal{S}] \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{21} \end{Bmatrix}_{l_2, top} \quad (8)$$

그리고 $[\mathcal{S}]$ 는 시스템행렬이다:

$$[\mathcal{S}] = [\mathcal{L}]_{l_2} [\mathcal{L}]_{l_2} \dots [\mathcal{L}]_{l(n-1)} \quad (9)$$

본 연구에서는 고려하는 고체매질은 판재 형태의 멤브레인이므로 Layer #1과 Layer #n은 진공으로 고려할 수 있으며, 경계면 i_1 과 $i_{(n-1)}$ 은 무응력(Traction-free) 상태이다. 따라서 식(8)은 식(10)과 같이 기술된다.

$$\begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}_{l_n, top} = [\mathcal{S}] \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}_{l_2, top} \quad (10)$$

식(10) 좌변의 $\sigma_{22} = 0$ 과 $\sigma_{21} = 0$ 에 대하여 $[\mathcal{S}]$ 의 부분행렬로 나타내면 식(11)과 같다.

$$\begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathcal{S}_{31} & \mathcal{S}_{32} \\ \mathcal{S}_{41} & \mathcal{S}_{42} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix}_{l_2, top} = [\mathcal{S}'] \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix}_{l_2, top} \quad (11)$$

최종적으로 $\det[\mathcal{S}'] = 0$ 인 해를 찾으면 관심 주파수 구간에서 위상속도를 구할 수 있다.

2.2 피코초 초음파 기법

박막 내에서 전파하는 체적종파를 계산하기 위하여 식(12)의 파동방정식을 고려한다[10].

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - B \frac{\partial T}{\partial t} \quad (12)$$

여기서 c 는 유효탄성계수를, B 는 c 와 열팽창계수를 곱한 값을 뜻한다. T 는 온도를 뜻하며, 식(13)과 같이 1차원 과도 열전도 방정식으로부터 구할 수 있다.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + W \quad (13)$$

이때, C_p 는 비열을, κ 는 열전도도를, W 는 레이저 가열함수를 뜻한다.

$$W(z, t) = \begin{cases} \frac{I_0(1-R)\beta}{2} \exp(-\beta z) \sin^2\left(\frac{\pi t}{2\tau}\right) & 0 \leq t \leq 2\tau \\ 0 & t \geq 2\tau, t < 0 \end{cases} \quad (14)$$

여기서 I_0 는 레이저 강도를, R 은 반사율을, β 는 흡수깊이를, τ 는 펄스폭이다. 알루미늄(Al)과 질화규소(SiN)의 계면에서 경계조건은 식(15) 및 식(16)과 같다.

$$u_{Al}|_{z=d} = u_{SiN}|_{z=d} \quad (15)$$

$$c_{Al} \frac{\partial u_{Al}}{\partial z} - B_{Al} T_{Al}|_{z=d} = c_{SiN} \frac{\partial u_{SiN}}{\partial z} - B_{SiN} T_{SiN}|_{z=d} \quad (16)$$

d 는 알루미늄 박막의 두께이다. 박막은 초기 휴지(Initially Rest) 상태이므로 식(17) 및 식(18)과 같다.

$$u|_{t=0} = 0 \quad (17)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t}|_{t=0} = 0 \quad (18)$$

이로부터 얻은 이론해를 실험결과와 곡선맞춤 하면 박막의 기계적 물성을 구할 수 있다.

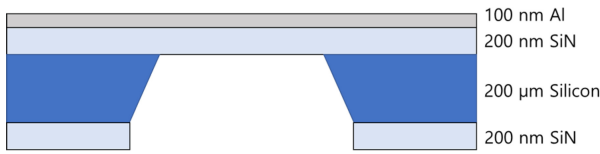
3. 실험

3.1 시료제작

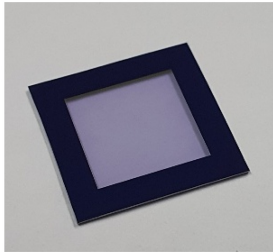
본 실험에서 사용된 마이크로 멤브레인은 Norcada社의 QX151000D 모델로, 한 변이 10 mm 길이의 정사각형 모양이며, 200 nm 두께의 질화규소 재질로 제작되었다. 다만, 질화규소는 가시광선-자외선 파장대역에서 투과도가 높으므로 레이저 광의 흡수와 반사를 위해 전자빔 증착기를 사용하여 멤브레인 표면에 110 nm 두께의 알루미늄 박막층을 형성하였다. Fig. 2에 시료의 단면을 도식적으로 나타내었다.

3.2 피코초 초음파 실험

알루미늄 박막의 물성을 측정하기 위하여 피코초 초음파 실험을 실시하였다. 나노미터 두께를 갖는 박막은 증착법이나 조건에 따라 물성이 달라질 수 있기 때문에 실험을 통하여 직접 측정값을 계산에 활용하였다. 광원은 펄스폭 75 fs, 반복률 80 MHz, 파장 780 nm, 평균 2.5 W 출력의 펄스 레이저 시스템이며, 레이저 광을 10 : 1의 강도비로 분할하여 펌프(Pump) 펄스와 프로브(Probe) 펄스를 시료 표면에 조사하였다. 전동 선행 스테이지를 사용하여 광경로차를 발생시켰으며, 광검출기에서 전기적 신호로



(a) A schematic picture of the cross-section of the membrane



(b) A photo of the 10 mm × 10 mm silicon nitride membrane before the aluminum deposition

Fig. 2 The nanoscale membrane specimen

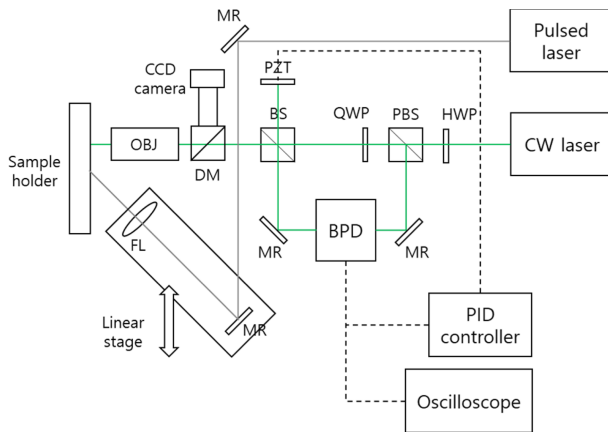


Fig. 3 A schematic picture of the laser optical setup. BPD: balanced photodetector, BS: beamsplitter, CCD: charge-coupled device, CW: continuous wave, DM: dichroic mirror, FL: focusing lens, HWP: half-wave plate, MR: mirror, OBJ: objective lens, PBS: polarizing beamsplitter, PID: proportional-integral-differential, PZT: piezostack, QWP: quarter-wave plate

변화된 반사를 변화는 락-인 증폭기를 통하여 컴퓨터의 랩뷰 (LabVIEW) 인터페이스에서 기록되었다.

3.3 램파 실험

Fig. 3은 램파 측정 실험장치의 개략도를 나타낸다. 램파를 여기 시키기 위하여 파장 1,030 nm, 펄스폭 1.5 ns, 반복률 2 kHz의 펄스레이저를 사용하였으며, 가진점과 수신점 사이의 거리를 조절할 수 있도록 거울과 집속렌즈를 선형 스테이지에 장착하였다. 초음파의 전파에 따른 표면변위를 측정하기 위하여 532 nm 파장, 150 mW 출력의 연속파 레이저를 광원으로 하는 마이켈슨 간섭계를 사용하였다. 펄스 레이저를 집속조사할 때에 시료 표면에서 광삭마가 일어나지 않는지 관찰하기 위하여 CCD 카메라가 장착된 이미징

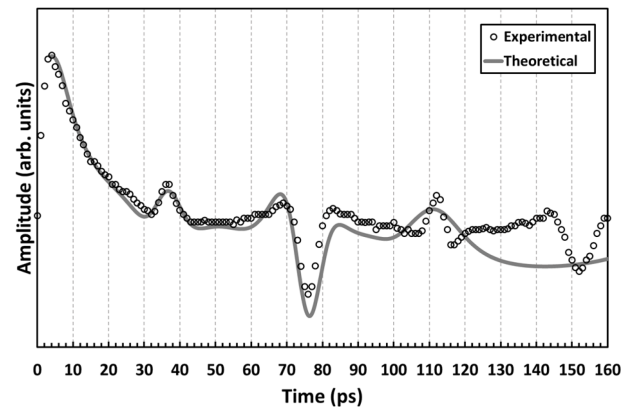


Fig. 4 The picosecond ultrasonics experiment result

시스템을 구축하였다. 광경로차에 따른 간섭무늬의 밝기 변화는 균형광검출기에 입력되어 오실로스코프에서 시간영역의 파형으로 기록되었다. 이때, 간섭계에 미치는 외란의 영향을 줄이기 위하여 PID (Proportional-integral-differential) 제어기를 사용하여 기준거울에 부착된 피에조스택(Piezo Stack)에 전압 신호를 가하였다.

수집된 램파의 분산속도 (v)는 식(19)로 계산된다.

$$v(f) = \frac{(x_2 - x_1)2\pi f}{[\Phi_2(f) - \Phi_1(f)]} \quad (19)$$

여기서 f 는 주파수를, Φ 는 시간영역 파형을 고속 푸리에 변환하여 얻는 위상값을 뜻한다.

4. 결과 및 토의

4.1 피코초 초음파 실험

Fig. 4는 피코초 초음파 실험으로부터 얻은 파형이다. $t = 0$ ps 시점에서 펄스 레이저가 시료의 표면에 입사할 때에 일어나는 국소적 열팽창으로 인하여 체적종파가 발생되며, 적층박막의 각 계면에서 반향되는 파동이 피크 형태의 신호로 관찰된다: Al/SiN 계면에서 반사되는 종파에 의해 37 ps 부근에서 첫 번째 피크가 관찰되며, 자유지지된 SiN의 바닥면으로부터 반사된 종파에 의해 76 ps 지점에서 두 번째 피크가 관찰된다. Al과 SiN 종파 속도의 문헌값은 각각 6,420 m/s와 10.9 km/s 내외로 알려져 있으며[11], 종파속도(v_L)는 식(20)으로 계산된다.

$$v_L = 2d/t \quad (20)$$

110 nm 두께의 Al과 200 nm의 SiN에 대하여 각각 5,945 m/s와 10,256 m/s의 종파속도가 계산되며, 이는 문헌값과 각각 7.4%와 6.0% 오차 값을 갖는다. 이로부터 Fig. 4의 76 ps 지점에서는 Al/SiN 계면에서 표면으로 도달한 종파가 다시 계면으로 반향되어 재도달하는 2차 피크 신호와, SiN 바닥면에서 표면으로 도달한 신호가 중첩된 것을 유추할 수 있다. 실험결과와 이론해의 곡선 맞춤을 통하여 70 GPa의 Al 탄성계수 값을 얻었다. 계산시 SiN의

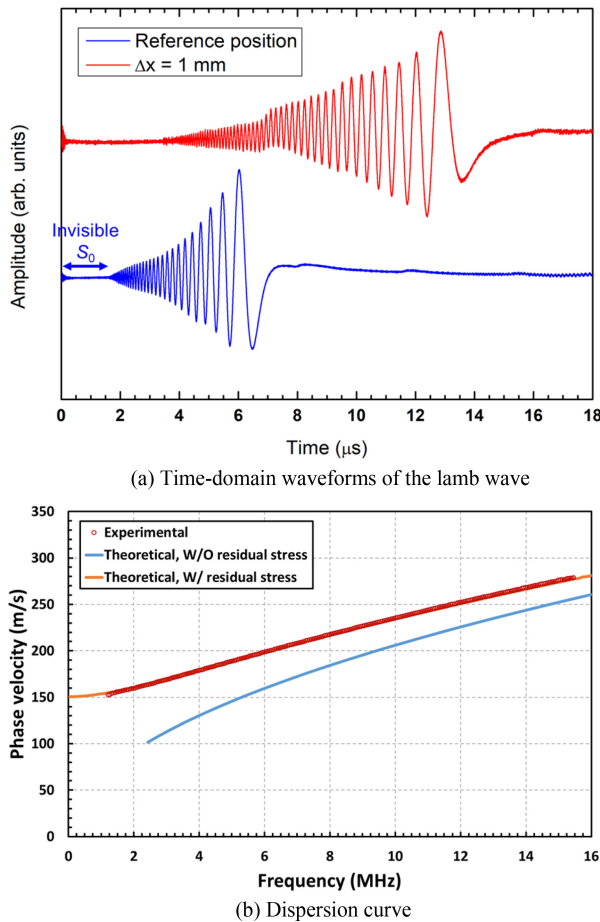


Fig. 5 The lamb wave experiment results

탄성계수(270 GPa)와 밀도(3,100 kg/m³)는 제조사의 사양값을, Al의 밀도는 2,700 kg/m³를 사용하였으며, 푸아송비는 문헌값(각각 0.27과 0.33)을 사용하였다.

4.2 램파 실험

Fig. 5(a)는 오실로스코프에서 수집된 시간영역의 램파 신호를 보여준다. 두 지점간의 거리차(Δx)는 1 mm이며, 전파거리가 길어질수록 분산특성이 더욱 강해지는 것을 확인할 수 있다. 또한, A_0 모드의 파형은 명확하게 나타나는 반면 S_0 모드는 보이지 않는데, 이는 낮은 신호 대 잡음비로 인하여 초기 잡음 신호와 구분되지 않거나, 레이저의 국소가열 및 탄성적으로 비대칭적인 멤브레인 적층구조 형태에 기인하는 것으로 판단된다. 레이저 펄스 에너지를 증가시키면 신호가 보다 강해지지만 광삭마가 발생하면 안되기 때문에 본 연구에서는 임계점 이하로 에너지를 유지하였다.

Fig. 5(b)는 식(19)를 사용하여 실험결과로부터 얻은 분산곡선과 전달행렬법을 사용하여 구한 이론해를 비교한 결과이다. 주파수가 감소함에 따라 위상속도값의 차이가 22.4에서 61.4 m/s로 증가하였는데, 이처럼 낮은 주파수에서 차이가 나는 원인으로 Rogers와 Nelson [12]이 관찰한 잔류응력 효과를 생각해볼 수 있다: 밀리미터 두께의 평판과는 달리 박막에서는 잔류응력에 의한 영향성이 더욱 크며, 파수벡터의 크기가 0에 가까울수록 S_0 모드와

A_0 모드는 잔류응력과 밀도의 비에 따라 분산곡선의 편차가 증가한다. A_0 모드의 위상속도는 식(21)로 표현된다[12].

$$v_{A_0} = \sqrt{\frac{\mathcal{D}}{\rho d} k^2 + \frac{\sigma_{res}}{\rho}} \quad (21)$$

여기서 $\mathcal{D}$ 는 멤브레인의 굽힘강성을, σ_{res} 는 잔류응력을 뜻한다. 이로부터 $\sigma_{res} = 64$ MPa의 값에 대하여 위상속도 값의 차이를 보정하였을 때에 본 실험결과와 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 일반적으로 유도초음파의 주파수 대역이 낮으면 산란 및 감쇠가 상대적으로 작은 장점이 있으나 미세결함을 검출하기는 어려운 특징이 있다. 반대로, 주파수 대역이 높으면 전파거리는 짧아지지만 국소물성 평가나 미세결함 검출에는 보다 적합하다. 따라서, 밀리미터 두께의 박판을 검사평가하기 위해서는 kHz 대역의 초음파를, 나노스케일 멤브레인 구조에서는 MHz 대역을 사용하는 것이 통상적이다. 다만, 본 연구에서 사용한 레이저 초음파 가진 기법은 광대역(Broadband)적인 특징을 가지므로 여러 주파수 성분과 모드가 동시에 발생할 수 있어 검사와 해석을 어렵게 만든다. 이를 보완하려면 간섭법[13], 표면 나노패턴[14] 등의 방법을 사용하여 주파수를 제어하는 것이 필요하다.

5. 결론

본 연구에서는 나노스케일 박막으로 제작된 멤브레인에서 전파하는 램파의 거동을 레이저 초음파 기법으로 관찰하였다. 펄스 레이저로 파동을 생성하고 마이켈슨 간섭계로 검출하였으며, 피코초 실험을 통하여 얻은 100 nm 두께의 Al과 200 nm SiN의 물성을 대입하여 분산곡선을 분석하였다. 나노스케일 멤브레인에서도 램파가 확연하게 관찰된 반면, 벌크(Bulk) 재료와는 달리 잔류응력의 영향성이 더 큰 것을 확인하였다. 다만, 본 연구에서는 관찰되지 않았던 S_0 모드의 파형을 검출하기 위해서는 RIE (Reactive Ion Etching) 등의 반도체 식각 공정을 사용하여 멤브레인의 SiN 층을 제거할 필요가 있으며, 이는 후속 연구에서 다루고자 한다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 연구는 충남대학교 학술연구비에 의해 지원되었음.

REFERENCES

1. Rose, J. L., (2014), Ultrasonic guided waves in solid media, Cambridge University Press.
2. Choi, H., Lee, J., Cho, Y., (2016), Experimental study on corrosion detection of aluminum alloy using Lamb wave mixing technique, Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, 40(11), 919-925.

3. Kim, B.-S., Kwon, H.-S., Kim, J.-W., Roh, Y.-R., (2009), Local/global structural health monitoring system using piezoelectric sensors, *Journal of the Acoustical Society of Korea*, 28(4), 308-317.
4. Jhang, K.-Y., Kim, H.-J., Ceringlia, D., Djordjevic, B., (2001), Non-contact ultrasonic testing of aircraft joints using laser generated Lamb wave, *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, 21(2), 163-168.
5. Zheng, S., Luo, Y., Xu, C., Xu, G., (2023), A review of laser ultrasonic Lamb wave damage detection methods for thin-walled structures, *Sensors*, 23(6), 3183.
6. Murray, T. W., Krishnaswamy, S., Achenbach, J. D., (1999), Laser generation of ultrasound in films and coatings, *Applied Physics Letters*, 74(23), 3561-3563.
7. Kim, Y. Y., Krishnaswamy, S., (2012), Non-destructive evaluation of material properties of nanoscale thin-films using ultrafast optical pump-probe methods, *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, 32(2), 115-121.
8. Lowe, M., (1995), Matrix techniques for modeling ultrasonic waves in multilayered media, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 42(4), 525-542.
9. Malvern, L., (1969), *Introduction to the mechanics of a continuous medium*, Prentice-Hall.
10. Kim, Y. Y., (2017), Thermomechanical characterization of a nanoscale thin-film using picosecond ultrasonics, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 18(9), 1245-1251.
11. Prakash, V., Nathenson, D., Yuan, F., (2011), Spall strength of AS800 silicon nitride under combined compression and shear impact loading, in: Proulx, T. (ed.), *Dynamic behavior of materials*, Volume 1, *Proceedings of the 2010 Annual Conference on Experimental and Applied Mechanics*, 339-347.
12. Rogers, J. A., Nelson, K. A., (1995), Photoacoustic determination of the residual stress and transverse isotropic elastic moduli in thin films of the polyimide PDMA/ODA, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 42(4), 555-566.
13. Ye, T.-M., Xu, Y.-F., Hu, W.-X., (2018), Generation of narrowband Lamb waves based on the Michelson interference technique, *Chinese Physics B*, 27(5), 054301.
14. Malfanti, I., Taschin, A., Bartolini, P., Bonello, B., Torre, R., (2011), Propagation of acoustic surface waves on a phononic surface investigated by transient reflecting grating spectroscopy, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 59(11), 2370-2381.



Yun Young Kim

Associate professor in the School of Mechanical Engineering, Chungnam National University. His research interest is laser ultrasonics for thin-films.

E-mail: y.kim@cnu.ac.kr

LSC/YSZ 계면 부반응이 억제된 고성능 고체산화물 연료전지용 LSC 공기극 제작

Fabrication of LSC Cathode for High-performance Solid Oxide Fuel Cell with Suppressed LSC/YSZ Interface Side Reactions

윤지성¹, 구미주¹, 안효준², 정훈훈², 김영범^{1,2,#}

Jisung Yoon¹, Miju Ku¹, Hyojun Ahn², Hunhun Jung², and Young-Beom Kim^{1,2,#}

¹ 한양대학교 융합기계공학과 (Department of Mechanical Convergence Engineering, Hanyang University)

² 한양대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Hanyang University)

Corresponding Author / E-mail: ybkim@hanyang.ac.kr, TEL: +82-2-2220-4544

ORCID:0000-0002-0307-0595

KEYWORDS: Solid oxide fuel cell (고체산화물연료전지), Chemical side reaction (화학적 부반응), Flash light sintering (광소결), Lanthanum strontium cobalt air electrode (LSC 공기극), Alternative sintering method (대체소결법)

In this study, we introduce a novel flash light sintering (FLS) method to address the issue of secondary phase formation in conventional high-temperature thermal sintering processes. The microstructure and cross section of the Lanthanum strontium cobalt (LSC) air electrode were analyzed using field emission scanning electron microscopy (FE-SEM). The presence of secondary phases was evaluated using X-ray diffraction (XRD) and energy-dispersive spectroscopy (EDS) in SEM. Electrochemical performance was assessed using NiO-YSZ anode-supported LSC cathode cells at 750°C. The maximum power density of the thermally sintered LSC cathode at 900°C was 272.4 mW/cm², while the flash light sintered LSC cathode by 18.5 J/cm² achieved 2,222 mW/cm². These results demonstrate that the flash light sintering process can effectively prevent secondary phase formation and successfully sinter the electrode, thereby enhancing the performance and reliability of SOFCs.

Manuscript received: January 22, 2025 / Revised: March 13, 2025 / Accepted: April 4, 2025

1. 서론

현재 화석연료 기반의 에너지 공급 구조는 심각한 환경오염을 초래하고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위한 고체 산화물 연료전지(Solid Oxide Fuel Cell, SOFC)는 친환경적이고 효율적인 에너지원으로 주목받고 있다. SOFC는 낮은 오염물질 배출, 높은 에너지 효율, 그리고 연료와 구동 시간의 유연성 등의 장점들을 가지고 있는 차세대 청정 에너지 발생 장치로 각광받고 있다[1,2].

SOFC의 작동 원리는 연료극에서 수소의 산화반응이, 공기극에서는 산소의 환원반응(Oxygen Reduction Reaction, ORR)이 일어나면서 공기극으로 주입된 산소를 산소 이온으로 변환한

후, 전해질에서의 전하 운반자로 사용해서 전기를 생산하는 장치이다. 고체산화물 소재의 전해질로 구성된 SOFC는 산소 이온을 전하 운반체로 사용하기 때문에 구동 시 산소 이온의 전도도를 확보하기 위해 고온의 작동환경(800-1,000°C)이 요구된다. 하지만 고온 작동환경은 전극의 열화 및 스택 내구성의 저하를 초래하기 때문에 물질 선택에 제한이 있고, 고온에서도 견딜 수 있는 제작 공정을 수립해야 하는 문제가 있다[3,4]. 따라서 이를 해결하기 위해 고온의 작동온도를 중저온의 작동온도(450-750°C)로 낮추려는 선행연구들이 활발하게 진행되고 있다[5-7]. 중온 영역(600-750°C)의 SOFC에서는 전해질로 이트리아 안정화 지르코니아(Yttria Stabilized Zirconia, YSZ)가, 공기극으로는 전도성 세라믹(Mixed Ionic and Electronic Conducting, MIEC)

물질이 사용된다[8,9]. 대표적인 MIEC 물질로는 $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{CoO}_{3-\delta}$ (LSC)와 $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{Co}_{0.2}\text{Fe}_{0.8}\text{O}_{3-\delta}$ (LSCF) 등이 있으며, 이들은 코발타이트 기반의 페로브스카이트 계열의 물질이다.

세라믹 소재는 결정성과 계면 접합력의 확보를 위해 SOFC 제작 공정상에서 고온의 소결과정이 필요하다. 그런데 고온의 환경에서 YSZ 내의 지르코늄(Zirconium, Zr)은 코발트(Cobalt, Co)의 높은 반응성으로 인해 900°C 이상에서 LSC 내의 스트론튬(Strontium, Sr)과 화학적 부반응을 일으켜 SrZrO_3 (Strontium Zirconate, SZO) 또는 $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ (Lanthanum Zirconate)와 같은 절연 부산물을 생성한다[10]. 생성된 부산물은 전해질과 전극 계면에 이차상 층을 형성하여 계면에서의 산소 이온 전도도를 크게 저하시키는 문제를 야기시킨다. 이를 방지하기 위해 가돌리늄 첨가 세리아(Gd-doped Ceria, GDC)와 같은 버퍼 레이어(Buffer Layer)를 전해질과 전극 사이에 첨가하여 Sr의 확산을 억제하는 것이 일반적인 공정 방법이다[11]. 그러나 버퍼 레이어 막의 불충분한 치밀도는 Sr의 확산과 SZO의 생성을 완전히 막지는 못한다. 막의 치밀도 향상을 위해서는 1,200°C 이상의 고온 열처리가 필요하나, 이 과정에서 YSZ와 GDC 사이 부반응이 발생하여 이를 대체하기 위한 소결법이 필요한 실정이다[12].

본 연구에서는 광소결(Flash Light Sintering, FLS)이라는 새로운 소결법을 도입해 열소결 공정의 지속적인 문제인 이차상 생성을 억제할 수 있음을 보여주었고 있다. FLS는 상온-상압 조건에서 가시광선 영역대의 빛을 조사해 매우 짧은 시간 안에 막을 소결시키는 방법이다. 광소결 공정은 수초 내로 소결 시간 단축이 가능하여 기존의 고온 장시간이 요구되는 열소결 공정의 문제점을 효과적으로 개선할 수 있으므로 생산성과 경제성 측면에서 긍정적인 결과를 기대할 수 있다. 본 연구팀은 광소결 공정으로 제작된 LSC 공기극 셀의 미세구조, 결정성 그리고 전기 화학적 특성을 분석하였다. 기존 장시간 고온 열처리 공정 대비 광소결 공정을 통해 제작된 셀에서 이차상 생성이 억제되어 높은 성능을 갖는 LSC 공기극 셀을 제작하였다.

2. 재료 및 실험 방법

2.1 연료전지 셀 제작 방법

LSC 공기극 페이스트는 용매(α -terpineol; Tokyo Chemical Industry, Japan)와 분산제(Hypermer KD-6; Croda, UK)를 밀링기(Pulverisette 5, Fritsch, Germany)에서 24시간 혼합한 후, LSC 분말($\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{CoO}_{3-\delta}$; K-Ceracell, South Korea)을 첨가하여 추가로 24시간 동안 혼합하고, 결합제(BH-3; Sekisui Chemical, Japan)와 가소제(Dibutyl Phthalate; Sigma-Aldrich, USA)를 첨가하여 24시간 동안 밀링하여 제작하였다. 연료극 지지형 SOFC는 NiO-YSZ 연료극 지지체($\text{NiO:8YSZ} = 60 : 40$, 두께 700 μm)와 YSZ 전해질(8YSZ, 두께 12 μm)로 구성된 상용 연료극 반전지(Kceracell, South Korea)를 사용하였다. 제작된 LSC 페이스트는 스크린 프린팅을 이용하여 연료극 반전지에

두께 10 μm , 면적 0.2826 cm^2 의 원형으로 도포한 뒤 80°C에서 건조 후 600°C 에서 유기물을 제거하는 디바인딩 과정을 진행하였다.

2.2 연료전지 특성 및 성능 분석 방법

LSC 소결 공정 및 조건에 따른 소결도 차이, 이차상 생성 여부, 전기 화학적 성능 등의 차이를 비교하기 위해 열소결 공정과 광소결 공정을 이용하여 LSC 공기극 소결을 진행하였다. 열소결 공정은 박스형 전기로를 이용하였으며, 900과 1,000°C에서 2 시간 소결을 진행하였다. 광소결은 광소결 장치(myPET-LM200; Semisysco, South Korea)를 사용하였으며, 해당 장치는 제논 램프(First Light Lamps Ltd., U.K.)와 알루미늄 리플렉터, 빔 가이드, 전원 공급 장치, 그리고 펄스 제어기로 구성된다. 광소결 공정의 변수는 인가 전압, On Time(인가 시간), Off Time(인가 시간 사이의 간격), 펄스 수 등이 있다. LSC 공기극을 제작하기 위한 광소결 총 에너지는 12.0과 18.5 J/cm^2 이며, 인가 전압은 585 V, On Time은 각각 2와 3 ms 이고, Off Time은 500 ms, 펄스 수는 5이다.

제작된 LSC 전극 연료전지 단위 셀은 FE-SEM (Field Emission Scanning Electron Microscope, S-4800, Hitachi)을 통해 표면 미세구조와 단면 분석을 진행하였고, 결정성 및 전극/전해질 계면에서의 이차상 생성 여부를 확인하기 위해 상용 연료극 반전지에 소결된 LSC 공기극에 XRD (X-ray Diffraction) 분석과 EDS (Energy Dispersive Spectrometry) 분석을 진행하였다. 추가적으로 750°C 구동 조건에서 I-V-P 측정과 EIS (Electrochemical Impedance Spectroscopy) 분석을 수행하여 연료전지 전극으로써의 성능을 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 미세구조 분석

FE-SEM을 이용하여 열소결 및 광소결 공정을 통해 제작된 LSC 전극의 미세구조와 단면을 분석하였다. Figs. 1(a)와 1(b)는 열소결 공정으로, 1(c)와 1(d)는 광소결 공정으로 제작된 LSC 전극의 미세구조를 나타낸다.

Figs. 1(a)와 1(b)를 보면 열소결된 전극에서는 다공성 구조를 유지하고 있는 것을 알 수 있으며, 소결 온도 900에서 1,000°C로 증가함에 따라 입자 성장(Particle Growth)이 뚜렷하게 관찰된다. Figs. 1(c)와 1(d)를 보면 광소결 공정으로 제작된 전극은 열소결된 전극과 마찬가지로 다공성 구조를 유지한 것을 확인할 수 있다. On Time이 3 ms로 광소결 시간이 더 길었던 Figs. 1(d)는 18.5 J/cm^2 의 에너지가 조사되었으며, 1(c)에서는 On Time이 2 ms로 12.0 J/cm^2 의 에너지가 조사되었다. Figs. 1(d)를 보면 1(c)에서보다 입자가 성장한 것으로 보였지만, 전체적으로 입자의 크기가 1(a)와 1(b)에 비해 작으므로 입자 성장 정도가 열소결된 전극보다 억제된 것으로 보여진다.

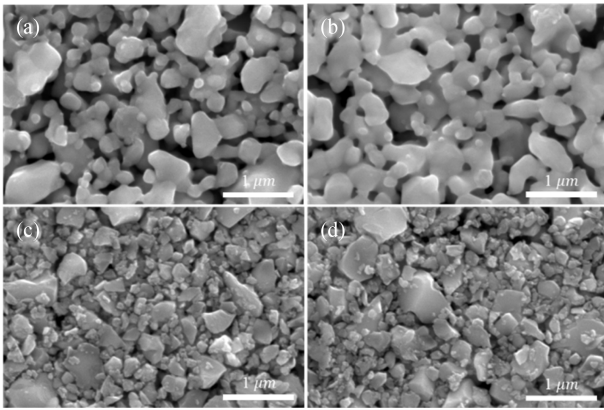


Fig. 1 FE-SEM top-view images of thermally sintered LSC at 900 and 1,000°C for 2 hours each of (a) and (b), and flash light sintered by 12.0 and 18.5 J/cm² irradiation energy each of (c) and (d)

입자의 성장 정도는 소결 시간과 소결 온도에 따라 결정되므로[13], 위의 결과는 열소결 공정과 광소결 공정 간의 소결 시간 차이로부터 기인한다고 볼 수 있다. 900°C 이상의 온도에서 2시간 진행된 열소결 결과는 다르게, 광소결은 수 초 이내의 짧은 시간 동안 진행되었기 때문에 광소결 전극에서의 입자의 성장이 억제된 것으로 분석된다. 하지만 짧은 광소결 시간임에도 불구하고 입자의 성장이 일어난 것은 Figs. 1(c)와 1(d)를 통해 확인할 수 있었다.

3.2 전극/전해질 계면 분석

900°C 이상의 소결 공정 중 발생할 수 있는 LSC 내의 Sr과 YSZ 내의 Zr의 상호 확산에 의한 전극/전해질 계면에서의 SZO 이차상 생성 여부를 분석하기 위해 XRD 분석을 진행했다. Fig. 2를 보면 열소결 공정의 경우 900°C 이상의 조건에서 SZO 이차상이 검출되는 것을 확인할 수 있으며, 온도가 증가함에 따라 이차상의 발현 정도가 증가하는 것을 알 수 있다. 이에 반해 광소결 공정으로 제작된 전극에서는 SZO 이차상 픽이 검출되지 않은 것으로 확인된다. 이는 광소결로 제작된 셀에서는 부반응이 발생하지 않았기 때문이다. XRD 결과를 검증하기 위해 추가적으로 SEM-EDS 분석을 진행하였다. Fig. 3을 보면 Sr이 전면적에서 나타나는 것처럼 보이는데 이는 SEM-EDX 분석 해상도에 의해 발생하는 노이즈에 해당하며, 상대적인 색의 선명도로 이차상 생성 여부를 판단할 수 있다.

Figs. 3(a)와 3(b)에서 열소결 공정의 경우 모두 이차상이 나타나는 것을 알 수 있으며, 1,000°C에서 SZO 경계층이 더 선명한 것으로 보아 900°C에 비해 이차상의 발현 정도가 더 큰 것을 알 수 있다. 반면, Figs. 3(c)와 3(d)에서 보이는 광소결 공정 전극에서는 모두 이차상이 나타나지 않았다. 이는 광소결 공정의 짧은 소결 시간이 Sr 양이온의 확산과 YSZ/LSC 부반응을 억제한 결과로 해석된다[14,15]. 즉, 광소결 공정의 짧은 소결 시간은 Sr 양이온이 확산하여 YSZ와 부반응을 일으켜 이차상을

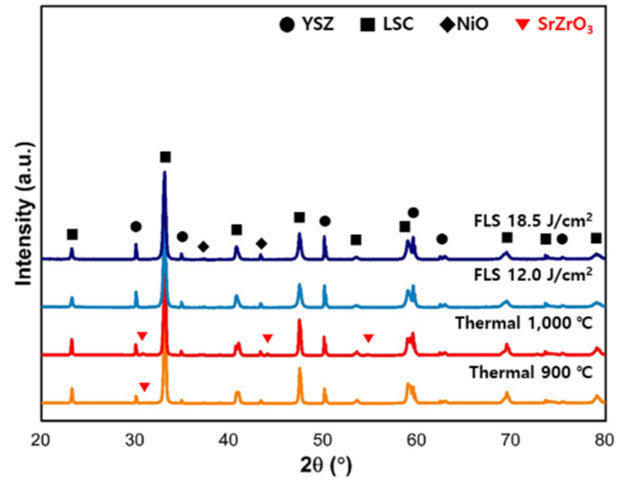


Fig. 2 XRD patterns for thermal sintered LSC at 900 and 1,000°C for 2 hours and flash light sintered at 18.5 and 12 J/cm² irradiation energy

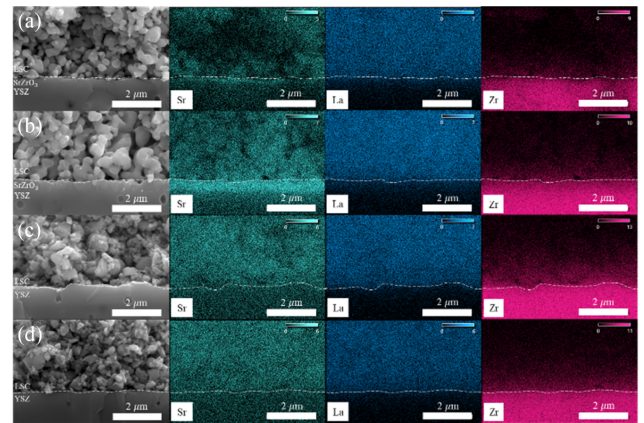


Fig. 3 SEM-EDS elemental mapping results of LSC cathode/YSZ electrolyte interfaces thermally sintered at 900 and 1,000°C for 2 hours each of (a) and (b), and flash light sintered by 12 and 18.5 J/cm² each of (c) and (d)

형성하기에 부족한 시간이었던 것으로 판단되며, 이에 반해 열소결 공정의 소결 시간은 이차상을 형성하기에 충분한 시간이었던 것으로 판단된다.

다음으로는 이차상 생성 유무 및 LSC 공기극 소결도의 차이가 연료전지 단위 셀에 미치는 영향을 확인하기 위해 전기화학적 분석을 진행했다.

3.3 LSC 전극 전기화학 분석

전기화학 분석 연료극에 수소를 주입하고, 공기극에 공기를 주입하여 집전을 해줄 수 있는 두 개의 지그와 고온 작동 환경을 만들어 전기화학 분석 장비인 EnergyLab XM Potentiostat Galvanostat (Solartron 1287 A, Solartron Analytical, UK)을 이용하여 LSC 전극 셀의 성능(I-V-P)과 EIS 측정을 수행하였다. 연료전지 셀의 작동온도는 부반응이 일어나지 않는 750°C에서

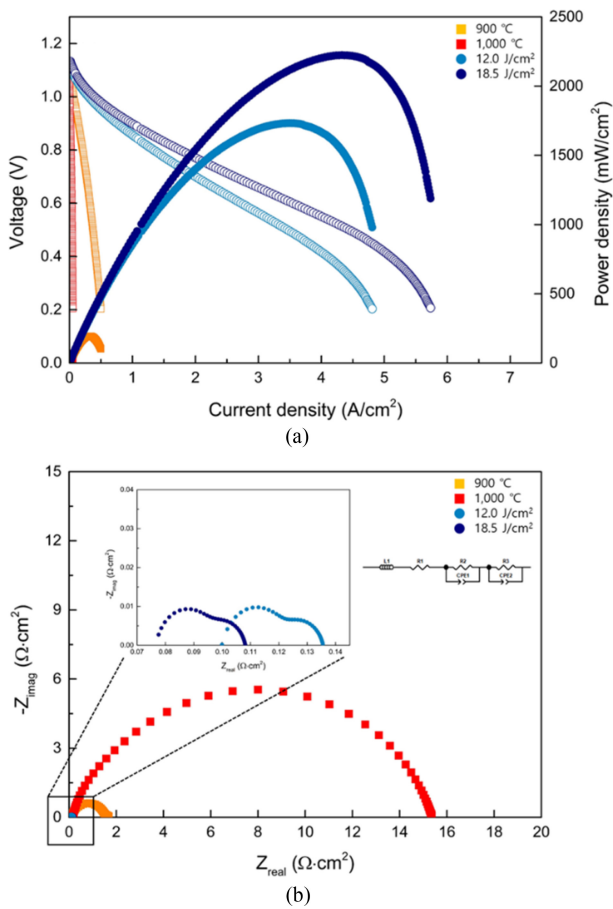


Fig. 4 (a) Current density-voltage curves of thermally sintered LSC cathodes at 900 and 1,000°C and flash light sintered by 12.0 and 18.5 J/cm², (b) Impedance spectra of thermally sintered LSC cathodes, FLS LSC cathodes at 750°C under 0.6 V bias voltage

측정하였다.

Fig. 4(a)를 보면, 각 소결 공정으로 제작된 LSC 전극의 성능이 I-V-P 곡선으로 나타나 있는 것을 볼 수 있다.

열소결 공정에서 900°C의 소결 온도로 제작된 LSC 전극 셀은 272.4 mW/cm²의 최대전력밀도를 나타냈으며, 1,000°C 열소결 공정 셀은 이에 비해 10.3배 정도 낮은 26.5 mW/cm²의 성능을 나타냈다. 이는 앞선 XRD 분석과 SEM-EDS 분석에서 확인된 것과 유사한 결과로 소결 온도가 증가함에 따라 LSC/YSZ 계면에서 형성된 SZO층이 산소 이온 전도를 방해하여 성능 저하를 유발했기 때문으로 판단된다. 광소결 공정을 통해 제작된 LSC 전극의 경우 12.0 J/cm²의 공정 조건에서 최대전력밀도가 1,733 mW/cm², 18.5 J/cm²의 공정 조건에서는 2,222 mW/cm²의 성능을 나타냈다. 이는 위 900°C 열소결 공정 셀의 성능보다 최소 6.36배에서 최대 83.8배 정도 더 높은 성능을 확보했다.

광소결 공정으로 제작된 셀이 높은 성능을 보인 이유는 짧은 소결 시간 동안 물질 간의 반응과 입자 성장이 제한되었기 때문에 실질적인 전기화학적 반응면적인 TPB (Triple Phase Boundary)의 면적이 열소결 공정 결과 대비 넓게 유지되었기

때문으로 볼 수 있다. 또한 18.5 J/cm² 공정 조건이 12.0 J/cm² 공정 조건보다 더 높은 성능을 보인 이유는 더 높은 에너지로 인해 LSC/YSZ 계면에서 접합도가 향상되어 낮은 접촉 저항을 가졌기 때문이다. Fig. 4(b)에서는 LSC/YSZ 계면에서의 전기화학적 반응에 의한 영향을 고려하기 위해 EIS 분석을 진행하였다. 전기화학 분석 장비로 측정된 Nyquist Plot은 750°C, 0.6 V 조건에서 측정되었다. EIS 그래프는 Z-view (Scribner Associates Inc., USA)를 사용하여 등가회로를 통해 보정되었다. 그래프에서 x절편은 옴 저항(R_Ω)을 의미하며 이는 전극과 전해질 그리고 경계면에서 발생하는 전기적 저항으로, 이온과 전자의 전도 과정 중에 발생하는 저항이다. 그리고 낮은 주파수 영역대의 반원의 호에 해당하는 부분은 분극 저항(RP)을 의미하며, 이는 LSC/YSZ 계면에서의 ORR 반응속도와 관련된 저항이다. 즉, RP가 크면 LSC/YSZ 계면에서의 전기화학적 반응속도가 느리다는 의미가 되므로 이온의 이동 속도 또한 느리다는 의미이다. 이는 LSC/YSZ 계면에서의 이차상 생성으로 인해 반응할 수 있는 구역이 줄어들고 이온의 이동이 방해되기 때문으로 볼 수 있다. 1,000°C에서 열소결로 제작된 셀은 앞서 I-V-P 결과를 토대로 낮은 성능을 보였으며, 이에 따라 R_Ω과 RP는 각각 0.16과 15.12 Ω·cm²으로 측정되었다. 900°C에서 열소결로 제작된 셀의 R_Ω과 RP는 각각 0.12와 1.58 Ω·cm²으로 측정되었다. 광소결로 제작된 셀은 I-V-P 결과를 토대로 위의 두 열소결 셀들에 비해 높은 성능을 보였다. 12.0 J/cm²로 광소결된 셀은 R_Ω과 RP이 각각 0.10과 0.035 Ω·cm²으로 측정되었고, 18.5 J/cm²로 광소결된 셀은 R_Ω과 RP는 각각 0.077과 0.029 Ω·cm²으로 측정되었다.

광소결 셀 대비 열소결 셀에서 옴 저항이 크게 발생하였는데, 이는 열소결 셀에서 산소 이온 전도도가 매우 낮은 SZO 이차상이 생성됨에 따라 산소이온전도를 방해하였기 때문이다. 또한 R_p의 크기를 확인해보면 900과 1,000°C 열소결 셀들 간 9.57배 정도 차이가 나는 것을 알 수 있다. 이는 소결 온도가 높을수록 LSC/YSZ 계면에서의 산소 이온의 속도가 느리다는 것을 의미한다. 이온의 속도가 느려지는 이유는 앞서 SEM-EDS, XRD 분석들을 토대로 열소결 시에 LSC/YSZ 계면에서의 이차상이 생성되었기 때문이다.

반면, 광소결 셀들은 열소결 셀들에 비해 R_p의 크기가 최소 45.1배에서 최대 521.4배 정도까지 작게 측정되었다. 즉, 소결 공정 간 분극 저항의 큰 차이를 토대로 열소결에서 나타난 이차상이 광소결 결과에서는 유의미하게 나타나지 않았음을 알 수 있다. 또한 입자 성장을 억제함에 따라 높은 반응면적을 확보할 수 있었고, 이는 분극 저항을 낮춰 높은 성능을 확보할 수 있었다. 18.5 J/cm² 공정 조건과 12.0 J/cm² 공정 조건의 저항 차이를 보면 분극저항 보다는 옴 저항의 차이가 더 크게 발생하였는데, 이는 전극/전해질 접촉 저항의 차이로 옴 저항의 차이가 발생한다고 볼 수 있다. 결과적으로 광소결을 적용한 셀에서 이차상 형성이 억제된 것은 물론 높은 반응 면적을 확보할 수 있었고, 추가적으로 광소결 에너지 조절을 통해 계면 접합력을 향상시켜 낮은 옴 저항값을 확보할 수 있었다. 이를 통해 기존

열소결 공정에서 발생하는 부반응을 광소결 공정 수립을 통해 효과적으로 억제할 수 있었으며, 추가적인 광소결 공정 최적화를 통해 추가 성능 향상이 가능할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 기존 고온의 열소결 과정 중 전극과 전해질 계면에서 형성되는 이차상인 SZO가 광소결로 제작된 셀에서는 효과적으로 억제된 것을 확인하였고, 이는 연료전지 셀의 성능 향상으로 이어짐을 전기화학적 분석을 통해 확인할 수 있었다. 광소결 공정은 종래의 열소결 공정에 비해 공정 시간이 짧으며, GDC와 같은 버퍼레이어를 첨가한 후 소결해야 하는 과정을 생략할 수 있는 장점이 있기 때문에 공정 시간과 공정의 복잡성에서 열소결 공정에 비해 우위에 있음을 시사한다. 이는 기존의 고체산화물 연료전지 제작 공정에 있어서 수십 내지는 수일이 소요되는 공정 시간을 획기적으로 단축시킬 수 있음을 보여주며, 또한 추가적인 제작 공정 단계를 생략할 수 있음을 보여주기 때문에 새로운 소결 방법인 광소결 공정을 통해서 공정상의 효율성과 경제성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다. 추가적으로, 광소결 기법은 기존의 열소결에 비해 소결 시간이 매우 짧으므로 열소결에서 긴 소결 시간으로 일어나는 부반응을 억제할 수 있기 때문에, SOFC 공정 뿐만 아니라 소결 공정으로 인한 계면에서의 부반응 문제를 겪고 있는 다른 에너지 디바이스에서도 적용이 가능할 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) and the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE) of the Republic of Korea (No. 20213030030190).

REFERENCES

- Wang, S., Jiang, S. P., (2017), Prospects of fuel cell technologies, *National Science Review*, 4(2), 163-166.
- Stambouli, A. B., Traversa, E., (2002), Solid oxide fuel cells (SOFCs): A review of an environmentally clean and efficient source of energy, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6(5), 433-455.
- Badwal, S. P., (2001), Stability of solid oxide fuel cell components, *Solid State Ionics*, 143(1), 39-46.
- Hsiao, Y. C., Selman, J. R., (1997), The degradation of SOFC electrodes, *Solid State Ionics*, 98(1-2), 33-38.
- Patakangas, J., Ma, Y., Jing, Y., Lund, P., (2014), Review and analysis of characterization methods and ionic conductivities for low-temperature solid oxide fuel cells (LT-SOFC), *Journal of Power Sources*, 263, 315-331.
- Wachsman, E., Ishihara, T., Kilner, J., (2014), Low-temperature solid-oxide fuel cells, *MRS Bulletin*, 39, 773-779.
- Wachsman, E. D., Lee, K. T., (2011), Lowering the temperature of solid oxide fuel cells, *Science*, 334, 935-939.
- Schrödl, N., Bucher, E., Gspan, C., Egger, A., Ganser, C., Teichert, C., Hofer, F., Sitte, W., (2016), Phase decomposition in the chromium-and silicon-poisoned IT-SOFC cathode materials $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{CoO}_{3-\delta}$ and $\text{La}_2\text{NiO}_4+\delta$, *Solid State Ionics*, 287, 14-21.
- Liu, Y., Wang, F., Chi, B., Pu, J., Jian, L., Jiang, S. P., (2013), A stability study of impregnated LSCF-GDC composite cathodes of solid oxide fuel cells, *Journal of Alloys and Compounds*, 578, 37-43.
- Wang, F., Brito, M.E., Yamaji, K., Cho, D.-H., Nishi, M., Kishimoto, H., Horita, T., Yokokawa, H., (2014), Effect of polarization on Sr and Zr diffusion behavior in LSCF/GDC/YSZ system, *Solid State Ionics*, 262, 454-459.
- Song, J.-H., Jung, M.G., Park, H.W., Lim, H.-T., (2013), The effect of fabrication conditions for GDC buffer layer on electrochemical performance of solid oxide fuel cells, *Nano-MICRO Letters*, 5(3), 151-158.
- Sındıraç, C., Çakırlar, S., Büyükkaksoy, A., Akkurt, S., (2019), Lowering the sintering temperature of solid oxide fuel cell electrolytes by infiltration, *Journal of the European Ceramic Society*, 39, 409-417.
- German, R. M., (2016), Sintering trajectories: description on how density, surface area, and grain size change, *JOM*, 68(4), 878-884.
- Skinner, S. J., (2019), Recent advances in the understanding of the evolution of surfaces and interfaces in solid oxide cells, *Advanced Materials Interfaces*, 6(15), 1900580.
- Kubicek, M., Rupp, G. M., Huber, S., Penn, A., Opitz, A. K., Bernardi, J., Stöger-Pollach, M., Hutter, H., Fleig, J., (2014), Cation diffusion in $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{CoO}_{3-\delta}$ below 800 °C and its relevance for Sr segregation, *Physical Chemistry Chemical Physics*, 16, 2715-2726.

**Jisung Yoon**

Ph.D. candidate in the Department of Mechanical Convergence Engineering, Hanyang University. Her research interests support/electrode/electrolyte fabrication and characterization of metal supported solid oxide fuel cells.

E-mail: jisung97@hanyang.ac.kr

**Miju Ku**

Ph.D. candidate in the Department of Mechanical Convergence Engineering, Hanyang University. Her research interests electrode/electrolyte fabrication and interfacial interaction of solid oxide cells.

E-mail: jmk1995@hanyang.ac.kr

**Hyojun Ahn**

Undergraduate Research Intern in the Department of Mechanical Engineering, Hanyang University. His research interest is solid oxide fuel cells, all solid state batteries.

E-mail: dksgywns0301@hanyang.ac.kr

**Hunhun Jung**

Undergraduate Research Intern in the Department of Mechanical Engineering, Hanyang University. His research interest is solid oxide fuel cells.

E-mail: doe06108@hanyang.ac.kr

**Young-Beom Kim**

Professor in the Department of Mechanical Convergence Engineering, Hanyang University. His research interests include development of various solid-state energy conversion devices including solid oxide fuel cells, all-solid-state batteries etc.

E-mail: ybkim@hanyang.ac.kr

이온성 고분자-금속 복합재 센서의 최신 기술 동향

Recent Advances in Ionic Polymer-Metal Composite Sensors

김권민¹, 조성준¹, 김재환^{1,#}
Gwon Min Kim¹, Seong-Jun Jo¹, and Jaehwan Kim^{1,#}

¹ 국립금오공과대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology)
Corresponding Author / E-mail: kimjh8729@kumoh.ac.kr; TEL: +82-54-478-7342
ORCID: 0000-0002-2215-2289

KEYWORDS: Ionic polymer-metal composites (이온성 고분자-금속 복합재), Electroactive polymer (전기활성 고분자), Sensors (센서), Electrodes (전극), Smart materials (스마트 재료)

This paper extensively explores and analyzes the latest research trends in Ionic Polymer-Metal Composites (IPMC) sensors. IPMC sensors are known for their flexibility, lightness, and high responsiveness. They show great promise across different fields. They can respond sensitively to various stimuli such as mechanical deformation, humidity, and pressure, making them ideal for bio-responsive detection, health monitoring, and energy harvesting. This paper introduces actuation and sensing mechanisms of IPMCs, discusses their manufacturing processes, and explores how these processes can influence the responsiveness and stability of sensors. Moreover, through case studies of IPMC-based research that can perform self-sensing functions, it presents possibilities brought by the integration of sensors and actuators. This paper emphasizes the potential for research and development of IPMC sensors to expand into various industrial fields and explores ways to continuously improve the accuracy and reliability of sensors. IPMC-based sensors are expected to play a significant role in advancing medical devices and wearable technologies, thereby facilitating innovation in the field.

Manuscript received: February 3, 2025 / Revised: March 31, 2025 / Accepted: April 2, 2025

1. 서론

센서는 빛, 열, 소리, 위치 등 외부 환경의 변화를 감지하여, 물리적 신호를 기계가 해석할 수 있는 신호로 변환하는 장치를 의미한다. 센서를 통해 외부 신호들을 측정함으로써, 고장 예측 및 유지보수를 가능하게 하고 시스템의 효율성과 안정성을 높이는 데 기여한다. 나아가 센서는 시스템이 주변 환경을 인식하고 이에 대응할 수 있도록 해 주므로 지능형 시스템 구현에도 큰 장점을 제공하며, 자동차, 제조, 환경 모니터링 등 다양한 산업 분야에서 필수적인 요소로 자리매김하고 있다[1].

최근 4차 산업혁명의 핵심 기술로서 사물인터넷(IoT)의 구축이 활발히 진행되는 가운데, 센서는 이와 같은 IoT 환경에서 필수 불가결한 요소로 부각되고 있다. 특히, 스마트 의류나 인체에 부착하여 사용자의 건강 상태를 모니터링할 수 있는 센서의 개발이 요구되면서 관련 연구 또한 빠르게 확대되고 있다. 기존

센서들은 물리적 변형이 어려운 소재로 제작되는 경우가 많아, 의류나 인체에 적용할 때 착용감이 떨어진다는 한계가 있었다[2-4]. 이러한 문제를 해결하기 위해서 유연하고 가벼운 소재를 활용한 센서가 필요해졌으며, 그 해답으로 최근 IPMC (Ionic Polymer-Metal Composites)라는 스마트 소재가 주목받고 있다.

IPMC는 유연성, 경량성, 낮은 구동전압 등의 특성을 지닌 복합 스마트 소재로, 의류나 인체에 적용하기에 적합하다는 평가를 받고 있다[5-7]. 특히 IPMC는 외부 환경의 변화에 따라 전기적 신호를 발생시키는 특성이 있어, 이를 센서로 활용하기 위한 다양한 연구가 활발히 진행되고 있다. 또한 IPMC 센서는 굽힘, 압력, 습도 등의 외부 요인 변화에 따라 전압이 출력되므로, 에너지 수확 기술, 미각 감지, 생체 신호 감지, 로봇 제어 등 다양한 시스템에 적용할 수 있는 장점이 있다. Porfiri는 에너지 수확 장치에 활용 가능한 IPMC 센서에 관한 연구를 수행하였으며[8],

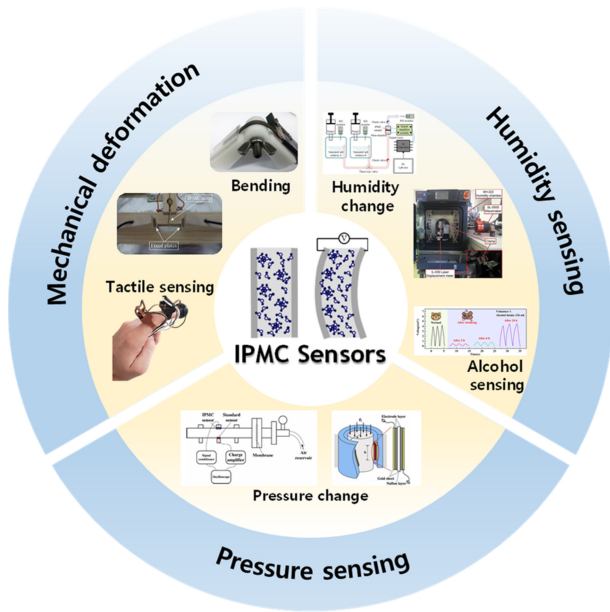


Fig. 1 Schematic illustration for IPMC sensor technologies based on sensing mechanisms [14-20] (Adapted from Ref. 14 on the basis of OA, and from Refs. 15-20 with permission)

Bhattacharya et. al.은 IPMC가 맛 감지 센서로 활용될 수 있는 가능성을 입증하였다[9,10]. 또한 Chen et. al.은 IPMC 센서를 이용해 맥박 측정, 점자 인식, 로봇 손 제어를 수행할 수 있는 다기능 스마트 장갑을 개발하였고[11], Luo et. al.은 센서 신호를 피드백으로 받아 움직이는 뱀 모양 로봇을 구현하였다[12]. 아울러 Oh et. al.은 IPMC 센서와 액추에이터를 결합해, 동작 과정에서 발생하는 휘어짐을 정밀하게 감지할 수 있는 자가 감지 기능을 구현할 수 있음을 보여주었다[13].

이처럼 IPMC 센서는 다양한 시스템의 핵심 장치로서 폭넓게 활용될 수 있는 잠재력이 있으며, 관련 연구들을 통해 IPMC 센서가 스마트 의류, 웨어러블 기술, 생체 모방 기술 등에 특히 적합한 소재라는 점을 알 수 있다. 그럼에도 불구하고 제조 공정의 비효율성, 주변 환경에 대한 민감도 등의 문제로 아직 해결해야 할 과제와 한계점이 많다. 따라서 IPMC 센서를 미래 산업에 성공적으로 적용하기 위해서는 현재 기술 수준을 종합적으로 검토하고, 그 한계와 도전 과제를 분명히 이해해야 한다.

본 논문에서는 IPMC 센서 기술의 전반적인 기술 발전 및 최신 연구 동향을 살펴보고자 한다. 먼저 IPMC 센서의 기본 메커니즘 이해를 위해 구동 원리를 설명한 뒤, IPMC 센서의 준정적 해석 및 동적 해석 연구를 소개한다. 이후 Fig. 1에 나타나 있듯이 IPMC를 활용한 기계적 변형, 습도 및 압력 센서로 구분하여 주요 연구 사례를 조사하고, 각 사례에서의 센서 신호 측정 원리와 제작 방식, 성능 개선 방법 등을 정리한다. 마지막으로 IPMC 센서를 활용해 오감(미각) 센서, 인간의 목 운동 감지 장치, 로봇 물고기, 스마트 장갑, 자가 감지 기능이 있는 액추에이터 등을 구현한 응용 연구 사례들을 소개함으로써, IPMC 센서의 응용 가능성과 미래 방향성을 제시하고자 한다.

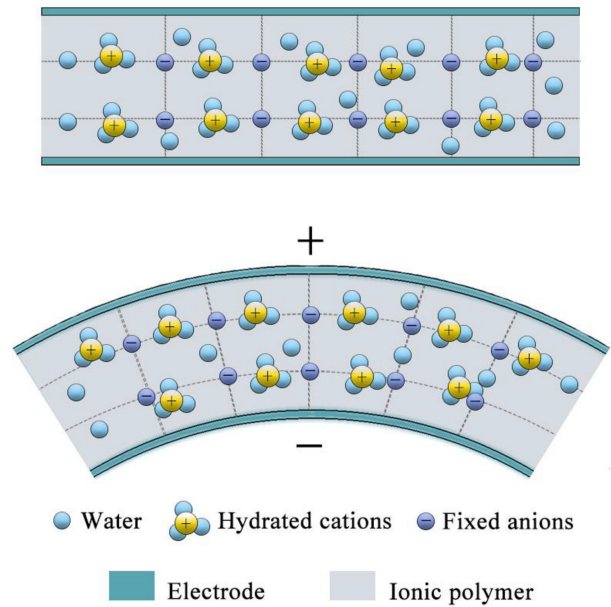


Fig. 2 Mechanism of IPMC sensor [14] (Adapted from Ref. 14 on the basis of OA)

2. 본론

2.1 IPMC 구동/센싱 매커니즘 및 응답 특성 분석 방법

IPMC는 Fig. 2와 같이 일반적으로 세 개의 층으로 구성된 구조이며, 전해질 막 양면에 금속 전극이 샌드위치 형태로 부착되어 있다. 전해질 막에는 주로 Nafion, Flemion, Aciplex와 같이 화학적 구조가 유사한 고분자가 사용된다[21]. 기존 IPMC 제작 방식은 전기도금 또는 무전해 도금을 통해 전해질 막 양면에 금속을 코팅하는 방법이었으나, 이 방법은 귀금속을 사용해야 하고 시간이 오래 걸린다는 단점이 있다. 최근에는 이러한 단점을 보완한 드롭 캐스팅(Drop Casting) 공정을 활용하여 전도성 고분자 전극 기반 IPMC를 제작·연구하는 사례가 늘어나고 있다.

IPMC 센서의 신호 측정 원리는 IPMC 액추에이터의 구동 원리를 통해 이해할 수 있다. IPMC의 양 전극에 전압을 인가하면 고분자 내부의 양이온은 음극 방향으로, 음이온은 양극 방향으로 이동하게 된다. 이때, 양이온이 음이온에 비해 크기가 크므로 음극 쪽 전극에 인접한 면이 팽창하여 IPMC가 굽힘 변형을 일으킨다. 반대로, Fig. 2와 같이 IPMC에 굽힘 변형을 외부에서 가할 경우 팽창한 면에는 양이온이, 수축한 면에는 음이온이 상대적으로 모이게 되어 두 전극 사이에 전위차가 발생하고, 이를 측정함으로써 IPMC를 센서로 사용할 수 있다.

한편, IPMC에 굽힘 변형을 지속적으로 가하면 소재에 특정 응답이나 파손이 발생할 수 있으므로, 이에 따른 물체의 거동이나 파손 메커니즘을 파악하기 위해 정적해석, 준정적해석, 동적해석과 같은 기법이 적용된다[22]. 정적해석은 시간에 따른 변화가 거의 없는 물체의 거동을 분석하는 방식이며, 동적해석은 시간에 따라 변하는 물체의 거동을 분석하는 방식이다. 준정적

해석은 동적 거동의 영향을 무시하고 물체가 정적인 상태에 있다고 가정하여 거동을 단순화해 해석하는 방법이다. IPMC 센서의 응답 특성을 분석할 때는 준정적해석 또는 동적해석 기법이 적합하다고 알려져 있다.

구체적으로, 준정적해석은 IPMC의 끝 단을 기계적으로 움직여 출력 전압을 기록하는 방식으로 진행하며, 이 경우 변형량과 전압 출력이 비교적 선형적인 관계를 보인다. 반면 동적해석은 IPMC에 반복적 충격이나 충격 부하를 가하여 동적 변형을 발생시킨 뒤 전압 변화를 측정하는 방식으로, 감쇠(Damping) 특성을 포함한 동적 응답을 확인할 수 있다.

2.2 IPMC 센서

2.2.1 기계적 변형 측정

IPMC 센서는 굽힘, 변형, 변위 등 기계적 변형을 측정하기 위한 연구가 주를 이루고 있다. IPMC는 유연한 특성을 지녀 다양한 응용 분야에서 사용 가능하며, 구조물의 거동을 모니터링하고 제어하는 데 유용하다. 이에 따라 여러 연구에서 IPMC 기계적 변형 센서의 측정 능력을 개선하고 센서의 신뢰성과 정확성을 높이기 위한 방법들이 계속해서 제안되고 있다.

굽힘에 반응하는 IPMC 센서는 여러 물리적 요소들에 의해 성능이 결정된다. 이를 체계적으로 분석하여 최적의 성능을 발휘하는 IPMC 센서를 제작하기 위한 연구 또한 활발하다. Zhu et. al. 은 IPMC의 크기가 센서 성능에 미치는 영향을 조사하였는데, Fig. 3(a)에 나타난 결과에 따르면 IPMC 두께가 두꺼워질수록 변형 감지 성능이 향상되는 반면, 길이가 길어질수록 민감도는 감소한다고 보고하였다[14]. IPMC의 폭은 감지 성능에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났으며, 굽힘에 의해 발생하는 전류와 전압을 각각 측정했을 때 전압 응답이 전류 응답보다 변위와 더 잘 대응한다는 사실도 확인하였다.

Dominik et. al.은 IPMC의 동적 변형에 대한 감지 성능을 조사하였다[23]. Fig. 3(b)에 각각 높은 주파수(주기 1.7초)와 낮은 주파수(주기 10초)에서의 삼각파 변위에 대한 전압 응답이 시각적으로 표현되어 있는데, 상대적으로 높은 주파수의 변형에서 신뢰성 있는 측정 결과가 도출되었다. 또한 IPMC를 직렬과 병렬로 연결한 상태에서 기계적 변형을 측정할 연구도 진행하였는데, 직렬 연결 시에는 단일 샘플과 비교했을 때 응답 진폭 변화가 거의 없었지만 더 넓은 주파수 대역에서 센싱이 가능하였다. 반면, 병렬 연결 시에는 응답 속도가 다소 지연되었으나 전압 변화 진폭이 거의 두 배로 증가하였다. 직렬 및 병렬 샘플 모두 전반적인 신호 품질이 개선되는 결과를 보였다. IPMC 센서를 단독으로 사용하여 변위를 측정한다면 시간지연, 이력 현상, 동적 출력 변화와 같은 문제가 발생할 수 있으며, 이는 측정 성능에 중대한 영향을 미친다. 따라서 Tan et. al.은 이력 현상과 동적 영향을 줄이기 위해 외부 입력을 고려한 비선형 자기 회귀 이동 평균 모델(NARMAX)을 활용하여 비선형 예측기를 구축하였다[24]. 이들은 시간 지연이 존재하는 경우를 고려해 D-step-ahead 비선형 예측기를 추가로 구성하였으며, 그 결과 신경망

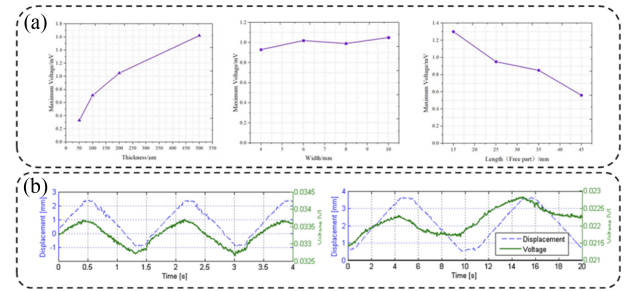


Fig. 3 (a) Voltage signal response of IPMC sensors based on their size [14] and (b) Dynamic and sensing characteristics of IPMC samples [23] (Adapted from Ref. 14 on the basis of OA, and from Ref. 23, with permission)

기반 모델과 비교했을 때 이력 현상 및 동적 보상 측면에서 더 우수한 예측 성능을 보였다. 제안된 모델의 최대 오차 절대값은 4.5×10^{-4} mV로, 신경망 모델의 0.12 mV에 비해 매우 높은 정확도를 확보하였다.

IPMC의 제작 방법을 다르게 하는 방법도 제시되었다. 굽힘 센서의 성능을 향상시킬 수 있는 방법으로 Jho et. al.은 나피온 필름을 두겹게 적층하고 백금 도금 및 파릴렌 코팅을 수행하여 센싱 성능을 개선하였다[25]. 해당 논문에서 제시된 구조는 민감도와 해상도 측면에서 뛰어난 결과를 보였으며, 센서의 출력 전압은 변형 곡률에 선형적으로 비례하였다. 센서를 정적 및 동적 하중하에 부착해 현실적인 상황을 모사한 실험에서도 이러한 비례 관계가 유지되었다. 이외에도 나피온 필름을 표면 처리하여 굽힘에 대한 전압 응답성을 개선하는 다양한 방법이 보고되고 있다. 2021년, Hu et. al.은 표면을 갈대 잎 모양(L)과 미세 침(R)으로 각각 거칠게 제작하거나(N) 전처리를 하지 않는 방식으로 나누어 IPMC를 제작하였다[26]. LN, LR, RN, RR, NN 등 다섯 가지 방식으로 제조된 IPMC 센서의 성능을 비교한 결과, LR 센서가 가장 높은 민감도를 보였다. LR 센서를 볼과 미간에 부착한 채로 옷거나 찡그릴 때의 신호를 측정한 실험에서는 얼굴 표정 인식에 대한 IPMC 센서의 가능성을 입증하였다. 2023년, Leang et. al.은 나피온 필름을 연마제로 표면 처리한 뒤 금속 전극을 입히는 방법으로 IPMC (eIPMC)를 제작하였다[27]. 나피온 표면을 전혀 연마하지 않은 경우, 거칠게 연마한 경우, 미세하게 연마한 경우로 나누어 실험한 결과, 거친 연마로 제작된 IPMC는 굽힘 측정 성능이 가장 높았고, 미세 연마 공정으로 제작된 IPMC는 압축 센싱 성능이 가장 우수하였다. 이는 공학적 공정을 통해 변형시킨 eIPMC 센서가 전통적인 센서보다 더 높은 잠재력을 보유함을 시사한다. 특히 거친 연마 기술로 제작된 IPMC를 손가락 관절에 부착해 자세 정보를 측정하고, 미세 연마 기술로 제작된 IPMC를 손가락 끝에 부착해 촉각 정보를 측정하는 다중 센싱 장치로 개발하였다. 해당 프로토타입은 다양한 크기의 손가락에도 쉽게 부착할 수 있게 설계되었으며, 향후 손 재활 시스템 등에 활용될 것으로 기대된다.

주변 온도 및 습도 변화 역시 굽힘 센서 성능에 영향을 미칠

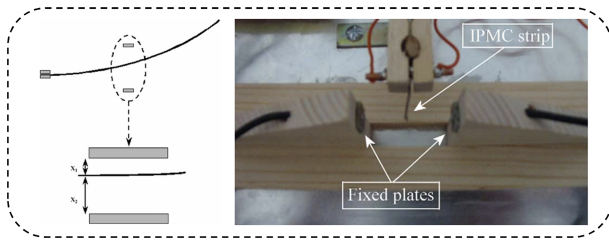


Fig. 4 IPMC motion sensor system based on a different principle from conventional methods [15] (Adapted from Ref. 15 with permission)

수 있다. Graziani et. al.는 온도와 습도를 변화시킨 실험에서, 습도가 높아질수록 신호 진폭과 잡음이 함께 증가하는 반면, 온도 변화에 따른 굽힘 센서의 응답은 상대적으로 큰 변화를 보이지 않았다고 보고하였다[28]. 이는 IPMC 센서가 온도 변화에 민감하지 않을 수 있음을 시사한다. Tan et. al.은 온도 특성을 세밀하게 분석해 변위 예측 모델에 온도 신호를 보정 요소로 포함함으로써 굽힘 센서 특성을 보다 정확히 예측할 수 있음을 보여주었다[29,30].

일반적으로 IPMC 센서는 주변 환경 변화에 따라 센서에서 발생하는 전압이나 전류를 측정하는 방식을 활용한다. 그러나 Bonomo et. al.은 존과 다른 원리를 적용하여 IPMC를 모션 센서로 특성화하는 시스템을 제안하였다[15]. Fig. 4에서 볼 수 있듯이, 두 개의 고정된 전극 사이에 위치한 IPMC 스트립이 움직이면 각 전극과 IPMC 간의 커패시턴스 불균형이 발생하고, 이 커패시턴스 변화를 측정함으로써 IPMC의 모션을 센싱할 수 있다.

IPMC 굽힘 센서는 다양한 응용 분야에서 활용 가능성을 보여준다. Porfiri는 IPMC를 기반으로 한 에너지 수확 시스템을 구축하였다[8]. IPMC 에너지 수확 장치는 상어 꼬리 프로토타입이 흔들릴 때 진동에 의해 IPMC의 변형이 발생하고, 여기서 발생하는 에너지를 저장하는 과정을 통해 동작한다. 해당 연구에서 IPMC 길이의 약 10-20%에 해당하는 굴절에 대해 수 μA 의 전류가 출력되는 것을 확인하였고, 적은 유체 부하로도 측정 가능한 전기 출력을 생성할 수 있음을 보여주었다. Gonzalez et. al.는 기계적 변형으로 작동되는 센서를 이용하여 외부 센서 없이 일정한 손끝 변위를 달성하는 두 손가락 IPMC 마이크로 그리퍼를 위한 제어 체계를 구축하였다[31]. IPMC 센서의 응답을 스트립 끝 변위의 함수로 모델링하여 IPMC 센서의 실제 출력 신호를 근사화 하는 참조 신호를 얻었다. 참조 신호를 전압 신호로 변환하여 IPMC 출력과 비교함으로써 응용 프로그램에서 피드백 메커니즘으로 일정한 변위를 유지할 수 있도록 구현하였다.

2.2.2 습도 측정

IPMC에 주로 사용되는 고분자인 나피온은 고분자 내 이온 교환이 가능하다는 특성을 가지고 있으며, 황산기로 인해 높은 수분 친화력을 가진다[16]. 이러한 특성은 나피온 고분자가 주변 습도의 변화에 예민하게 반응할 수 있음을 나타낸다. 이에 따라, 나피온 기반 IPMC는 수분 모니터링을 위한 습도 센서로

활용되고 있다. IPMC 습도 센서는 습도에 의해 나피온 고분자 내부의 이온과 수분 분자가 재분포하게 되고, 이때 전기 신호가 발생하게 된다. IPMC 습도 센서의 고분자나 전극 층에 다양한 물질을 첨가하여 수분 흡수 능력을 더욱 높일 수 있기에 센서의 성능은 제작 과정에서의 세부 조건에 크게 영향을 받는다. 센서가 최적의 성능을 내도록 하기 위해, 고분자나 전극층에 다양한 물질을 활용하고 제작 방법을 개선하여 습도 감지 능력을 최적화하는 연구가 진행되고 있다.

층상 이중 수산화물(Layered Double Hydroxide, LDH)은 층 구조로 인해 고수분 흡수 특성을 나타내며, 실험실 및 산업 규모에서 쉽고 저렴하게 합성 가능한 재료이다. Manteghi et. al.은 LDH를 나피온에 다양한 함량으로 도핑하여 습도 감지 능력을 평가하는 연구를 수행하였다[32]. LDH가 1% 도핑된 IPMC가 0.5%, 1.5%, 2%의 다른 도핑 비율에 비해 가장 높은 수분 흡수 능력과 더 높은 반응성 및 민감도를 보였다. 해당 연구에서 습도가 증가함에 따라 발생하는 전압이 증가하는 특성도 확인하였다. 이러한 실험 결과는 LDH의 적절한 첨가가 IPMC 기반 습도 센서의 성능을 개선할 수 있음을 보여준다.

전극과 고분자 간의 부착력이 부족하여 박리가 발생하게 되면, IPMC 센서의 성능에도 악영향을 미치게 되는데, Kolahdouz et. al.는 부착 문제를 해결하기 위해 사포를 사용해 고분자 표면을 거칠게 하고 산소 플라즈마 처리하여 부착력을 높였다[33]. 이와 더불어 Ti를 부착 층으로 사용함으로써 고분자와 금 전극 간의 부착력을 더 강화하였다. 여기서 제작된 IPMC는 굽힘 변형 시 상대 습도 변화를 측정하는 캐패시터로 사용되었으며, 두꺼운 금 전극을 가진 IPMC가 모든 굽힘 정도에서 반복 가능하고 신뢰할 수 있는 출력을 얻었다.

Wang et. al.은 IPMC 전극에 다양한 금속을 증착시켜 각각의 습도 감지 성능 평가를 진행하였다[16,34,35]. 2020년에는 IPMC 전극에 은 나노 와이어 층을 증착시켰고, 2021년에는 무전해 도금 방식으로 팔라듐 이온을 전극에 증착하여 습도 감지 성능을 평가하였다. 2023년에는 나피온 표면에 은 나노 와이어를 분사하는 방법으로 전극을 생성한 후, 전기 도금 방식으로 금을 증착시켜 IPMC 센서를 제작하였다. Fig. 5(a)에 표시된 바와 같이 팔라듐 및 은 나노 와이어 기반 IPMC 센서보다 금-은 나노 와이어 기반 IPMC의 습도 감지 성능이 더 우수함을 확인하였다. 해당 연구팀은 IPMC의 습도 감지 성능 평가를 위해 다양한 습도 조건 하에서 판 형태 IPMC의 전기 용량, 표면 저항 및 이온 전기 응답의 진화를 체계적으로 조사하여, 정적 및 동적 습도 감지 실험을 수행하였다. Fig. 5(b)에 IPMC의 전기 용량과 표면 저항 감지를 위한 실험 환경이 구성되어 있다. IPMC 샘플은 고정 장치에 체결되고 포화염소화물 용액을 담은 습도 병 안에 놓여있으며, 액체와의 접촉이 없도록 병은 PE 필름으로 밀봉하여 변하지 않는 정적 습도에 따른 센싱 성능을 확인하였다. Fig. 5(c)에는 이온 전기 응답을 측정할 수 있는 플랫폼이 나타나 있다. 두 개의 습도 탱크로 다양한 습도 조건을 제어하고, 챔버 내의 시료는 두 탱크로부터의 가스를 통해 다양한 상대습도

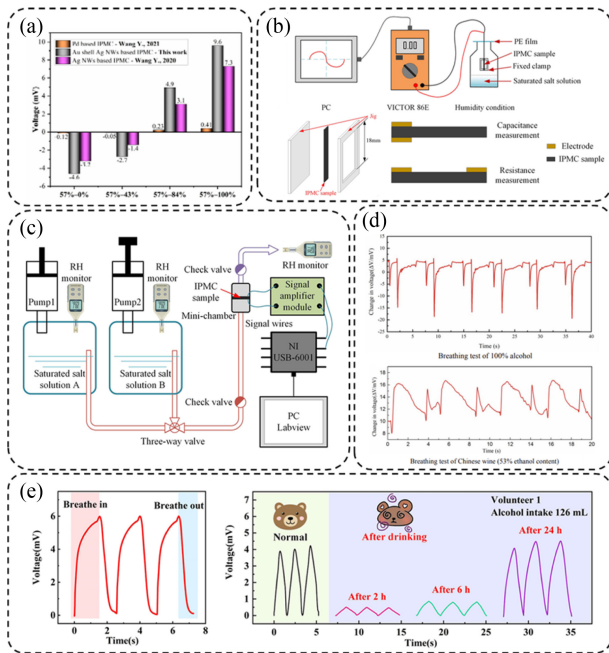


Fig. 5 (a) Voltage response of samples according to various preparation processes [35], (b) Measuring platform for capacitance and resistance, (c) Measuring platform for ionic electrical response [16], (d) Signal characteristics of alcohol detection using IPMC [34], and (e) Respiratory response curve at different times after drinking [17] (Adapted from Ref. 34 on the basis of OA, and from Refs. 16,17,35 with permission)

환경에 노출시켰다. 챔버 내의 IPMC에서는 상대습도의 변화가 관찰될 때 이온-전기 반응이 감지되는데, 이는 IPMC가 물을 흡수하면 고분자 내 이온이 이동함으로써 두 전극 사이에 전기 신호가 발생하게 되는 원리이다. 고정된 습도에서 습도 센서 내부의 물 분자와 주변 습도의 수분이 동적 평형을 이룰 때까지 수분을 교환하고, 완전히 교환된 후에는 내부 이온이 더 이상 이동하지 않으며 두 전극 사이의 전압은 안정화된 전압 값인 0 V에 점차 가까워진다. 해당 연구에서 습도 구배가 클수록 습도 응답 속도가 빠르며 전기 응답이 강화되는 특성을 확인하였다.

2020년, Wang et. al.은 IPMC 습도 센서가 물 분자뿐만 아니라 다른 유기 용매에 대해서도 우수한 전기 응답을 나타내는 것을 입증하였다. IPMC 습도 센서를 활용한 에탄올(100% 에탄올) 및 중국 와인(53% 에탄올)에 대한 음주 감지 그래프가 Fig. 5(d)에 나타나 있다. 일반 호흡 테스트와 비교했을 때 두 그룹은 유사한 추세를 가지지만 곡선의 형상에서 차이가 명확히 나타나는 신호 특성을 보였다. 이는 IPMC가 음주 감지 센서로 활용될 수 있음을 보여준다. 해당 연구팀은 추가적으로 2024년 IPMC의 음주 측정 분야로 적용 가능성에 대해 심층적으로 분석하였다[17]. 먼저, 57% RH 포화 브롬화 나트륨 용액으로 IPMC를 안정화시킨 후 에탄올 가스에 IPMC를 노출시켜 출력되는 전압 응답을 확인하였으며, 에탄올 농도가 증가함에 따라

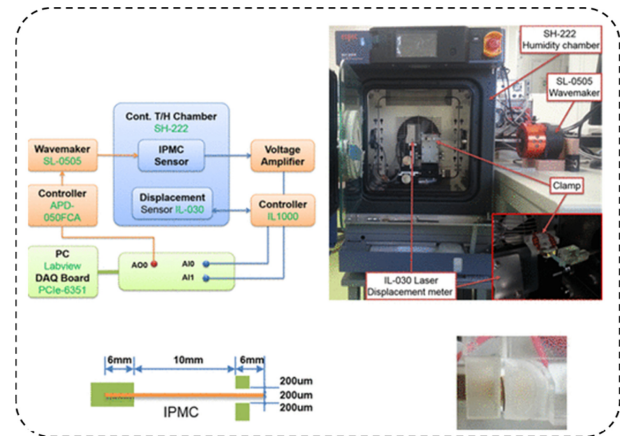


Fig. 6 Dynamic displacement sensing test platform [18] (Adapted from Ref. 18 with permission)

전압 응답 속도가 증가함을 확인하였다. 이를 통해 에탄올의 응답 시간이 물에 비해 짧은 것을 알 수 있다. Fig. 5(e)를 보면, 술을 마신 직후 숨쉴 때 전압 응답은 매우 낮은 것을 확인할 수 있고, 알코올은 응답 전압의 진폭을 억제한다는 것을 알 수 있다. 술을 마시고 24시간이 경과한 후 숨쉴 때 전압 응답은 정상으로 되 돌아온다. 10일 동안 에탄올 감지 시험을 진행하였을 때 첫째 날과 열 번째 날의 응답 진폭의 변화가 미미한 것을 확인함으로써 IPMC의 에탄올 감지 능력이 장기적으로 안정적이라는 것을 입증하였다. 이는 IPMC를 통한 음주 측정 센서가 상업적으로 이용 가능성이 있음을 시사한다.

IPMC 센서의 안정된 전압 응답을 얻기 위해서는 IPMC 센서와 주변 간의 수분 교환량을 엄격히 통제해야 한다. Asaka et. al.은 IPMC의 변형이 없을 때 주변 습도에 따라 발생하는 전압 변화를 조사하였고, IPMC에 정적 및 동적 굴곡 변위가 입력될 때 발생하는 전압 및 전류의 응답이 습도에 따라 어떻게 변화하는지 분석하였다[18,36].

해당 연구팀은 Fig. 6과 같이 습도 조절 챔버 내에 파형 발생기와 레이저 변위계를 배치하여, IPMC의 동적 전압 변화와 영향을 정밀하게 측정할 수 있는 실험 환경을 구축하였다. 본 실험을 통해 굽힘 변형 시 주변 습도가 낮을수록 전압 감소가 줄어든다는 경향성을 발견하였다. 이는 주변 습도가 낮아짐에 따라 IPMC의 응답 속도가 저하되며, 양이온 및 물의 이동이 느려진다는 것을 의미한다. 해당 연구에서 IPMC는 주변 습도가 낮을수록 습도 변화로 인해 발생하는 피크 전류도 감소하며, 습도와 전류의 관계가 선형적임을 확인하였다. 다른 상대 습도에서 IPMC에 동적 변위가 주어질 때 발생하는 전압-그래프를 보면, 상대 습도가 높을 때 전압의 피크 값이 가장 높은 것을 알 수 있고, 주변 습도가 낮을 때와 비교하여 높은 주파수에서 피크 전압이 나타난다 사실을 확인할 수 있다. Asaka et. al.은 전류 진폭과 주파수 간의 좋은 선형성으로 인해, IPMC를 변위 센서로 활용할 때는 전류 측정이 전압 측정보다 더 우수한 방법이라고 소개하였다.

2.2.3 압력 측정

1990년대 이후 많은 전기 활성 고분자(EAP) 기반 압력 센서가 연구되어 왔다[37]. 이러한 배경 속에서, IPMC 기반 압력 센서는 독특한 전기-기계적 특성을 지닌 압력 센서의 새로운 요소 기술로 등장하였다.

IPMC에 압력을 가하면 국소적으로 굽힘 변형이 발생하고, 압축된 전극과 넓은 전극 사이에 압력 구배가 발생함과 동시에 나노 채널의 양 끝에 압력 차이가 발생하게 된다. 두 전극 사이의 응력 차이는 나노 채널 내에서 즉각적인 압력 구배를 유발할 수 있는데, 이러한 IPMC 센싱 예측을 위해 일반적으로 스트리밍 전위 가설 모델이 사용된다[38,39]. 이 가설에서 중요한 점은 센싱 신호가 전극 영역에서만 발생한다는 것이다. 즉, IPMC의 압축으로 인해 발생한 굽힘 변형이 전해질 내의 이온 이동을 유발하여 전극 영역에서 감지 신호가 발생하였다.

2017년 Wang et. al.은 Fig. 7(a)와 같은 실험 환경을 구축하여, 스트리밍 전위 가설을 기반으로 동적 압력 IPMC 센서를 설계하고 이를 표준 충격 압력 관에서 교정하였다[40,41]. 스트리밍 전위 가설은 반전 대칭성이 없는 결정의 압전 효과로 인해 기존의 압전 재료보다 IPMC의 감도가 수십 배 더 높은 것을 설명한다. 연구팀은 스트리밍 포텐셜 가설을 기반으로 외부 압력으로 인한 압축 및 전단 모드에서의 전하 전류 생성 매커니즘을 제시하였다. 압축 및 전단 모드 형태의 동적 압력 센서의 구조는 Figs. 7(b)와 7(c)에 나타나 있다. Figs. 7(d)와 7(e)에는 압력과 전하 생성의 관계가 선형적임을 보이며, 높은 감도 및 일관성을 나타낸다는 것을 보여준다. 이외에도, 전단 모드가 압축 모드에 비해 더 높은 감도를 나타내는 것을 확인하였다.

기존의 접촉 면적 측정 장치는 복잡한 회로와 어려운 데이터 처리를 가진 배열 센서를 사용하는 반면, IPMC를 활용하면 간단한 구조의 센서를 사용해 접촉 면적을 측정할 수 있다. 2022년 Wang et. al.은 IPMC 센서의 압력 감지에 대한 접촉 면적의 영향에 대해 파악하였다[19]. 해당 연구에서는 IPMC 밑에 부드러운 기판을 사용하였으며, 특정 압력 하에서 IPMC 센서에서 나오는 출력 전압의 피크를 사용하여 접촉 면적을 계산하였다. 부드러운 기판을 사용하지 않고 접촉면적을 다르게 하여 센서에 압력을 가하면 접촉 면적이 증가함에 따라 전압 출력 진폭이 감소하였다. 부드러운 기판 위에서 접촉 반지름에 따른 출력 신호 실험에서는 접촉 면적이 증가함에 따라 출력 전압 값이 음에서 양으로 변경될 수 있다는 것을 발견하였다. 이는 IPMC에 압력을 가하면 굽힘 변형 영역과 압축 변형 영역이 나타나게 되는데, 굽힘 변형 영역은 음전압을 생성하고 압축 변형은 양전압 신호를 생성하였다. 따라서 접촉 면적이 작을 때는 굽힘 변형 영역이 상대적으로 많고, 접촉 면적이 클 때는 압축 변형 영역이 상대적으로 많이 차지하기 때문에 위와 같은 경향성이 나타났다. 2023년 Wang et. al.은 점 접촉, 선 접촉, 면 접촉 등의 접촉 면적에 따른 신호특성과 형상에 따라 압력 감지 특성이 달라지는 것을 확인하였다[42]. 주기적인 압력을 가해 출력되는 전압을 측정한 결과, 점 접촉의 경우에는 압력 감지 신호의 진폭과

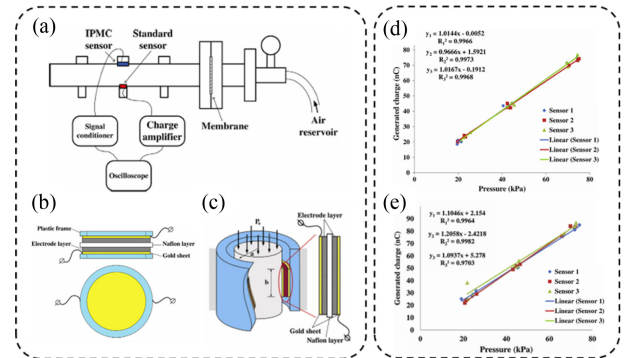


Fig. 7 (a) A standard shock pressure tube setup [19,20], (b) The schematic structure of compression mode sensor (Side view: top and top view: bottom) [19,20], (c) Shear mode sensor [20], (d) Calibration curves of three IPMC compression mode sensors and linear fitting equations [19], and (e) Three shear mode IPMC sensors [20]. (Adapted from Refs. 19, 20 with permission)

테이퍼 간의 관계가 거의 선형적인 결과를 얻었다. 선 접촉의 경우에는 호 형태와 각진 형태로 도구를 제작하여 압력을 가하였으며, 호의 각도에 따른 압력 센서의 진폭 변화는 거의 없으나, 각진 형태로 제작된 도구로 압력을 가하였을 때에는 각도가 줄어들면서 전압 신호의 진폭이 감소하는 결과를 보였다. 면 접촉의 경우에는 IPMC에 인가된 압력에 의해 발생하는 전압 출력의 진폭이 접촉 반지름이 증가함에 따라 감소하였다.

몇몇 연구에서는 IPMC를 다양한 분야에서 활용하기 위하여 압력 감지 센서의 개발에 새로운 시도를 하고 있다. Giannone et. al.은 공진 주파수를 활용하는 압전 외팔보 방식을 IPMC 센서에 적용하여, 외력을 DC 전압으로 감지하는 센서 방식을 발표하였다[43]. 이는 IPMC를 기반으로 한 플라스틱 마이크로 전기 기계 시스템(PMEMS) 힘 센서로 나아가는 첫 걸음을 나타낸다는 점에서 큰 의미가 있다. Bardella et. al.은 IPMC의 압축 감지에 대한 예측 모델을 수립하였다[44]. 해당 연구에서, 물질의 불균일성이 기계 및 화학에 미치는 역할에 중점을 두어 감지를 모델링하는 기초를 마련하였다. Aureli et. al.은 고감도 센서 응용을 위한 eIPMC 센서 개발을 위해 3D 구조의 폴리머-금속 인터페이스를 보고하였다[45]. 해당 연구는 IPMC의 다중 물리 특성을 혁신적으로 향상시키기 위한 방법을 제시하고 있는데, 잉크젯, 3D 프린팅, 스텐실 방식으로 고분자의 구조를 변경하였고 이를 통해 제작된 IPMC는 외부 압력이 가해지면 물질 내에서 비균일한 변형을 촉진할 수 있어 압축 감지 성능이 개선된다고 보고하였다. 변경된 각 구조에 대한 설명으로, 잉크젯 프린팅 방식은 폴리머-전극 인터페이스의 모양을 조절하기 위한 혁신적인 첨가 제조 접근법으로, 압력이 증가함에 따라 발생하는 전압이 증가하는 모습을 볼 수 있다. 3D 프린팅 방식으로 제작된 고분자를 사용한 eIPMC의 경우, 압력과 감지 전압의 관계가 거의 선형적으로 나타났으며, 스텐실 방식이 최대 적용 압력에 대해 정규화된 전압 출력을 나타내는 것을 보여주었다. Low et. al.은

IPMC가 압축에 반응해 일정한 전압을 생성한다는 특성을 활용하여, 점자를 입력하면 점자에 해당하는 문자가 보내지는 장치를 개발하였다[20]. 해당 장치는 키리가미 구조의 점자 센서이며, 키리가미 구조는 센서의 크기를 증가시키지 않고도 전압 출력을 향상시키고, 반대 전극으로 더 많은 이온의 이동이 가능하게 한다. 나피온은 130°C에서 변형이 일어나며, 형상 기억 고분자로 사용되기도 한다. 나피온을 130°C에서 변형시킨 후, KOH 수용액에 담구어 두면 160°C의 더 높은 변형 온도를 가지게 되어 변형된 구조를 안정적으로 유지할 수 있다. 해당 연구팀은 이 방법을 활용하여 키리가미 구조가 블록하게 올라오도록 형상을 변형시켜 IPMC가 압력 센서로 사용될 수 있도록 하였다. 이는 2 mm 압축 하에서 최대 70 mV의 전압을 생성하며, 기존의 IPMC에 비해 3배 향상된 성능을 나타내도록 하였다. 또한 2,000회의 연속 압축 사이클 동안 우수한 안정성을 관찰하였으며, KOH 처리된 키리가미 패턴이 구조적으로 안정하다는 것을 확인하였다.

2.3 IPMC 센서용 소재 및 공정

IPMC 센서의 연구가 지속적으로 진행됨에 따라 센서용 소재 및 공정의 발전 경향을 Table 1에 정리하였다. 대부분의 연구에서는 이온성 고분자로 상용화된 Nafion을 개질 없이 그대로 사용하며, 센서 성능 향상을 위한 접근은 주로 전극 소재와 그 구조의 변화를 통해 이루어지고 있다. 이는 개질하기 어려운 상용 고분자 박막을 변화 없이 유지하고, 전극층의 전기적·기계적 특성 향상을 중심으로 연구가 진행되고 있음을 보여준다. 일반적으로 백금, 금, 또는 팔라듐 기반 금속 소재가 전극으로 사용되고 있으며, 무전해 도금(Electroless Plating)이나 스퍼터링(Sputtering) 등의 기법을 활용하여 전극으로 제작되고 있다. 일부 연구에서는 두 가지 이상의 금속을 복합적으로 전극에 활용하여 IPMC 센서의 성능을 향상시키는 시도도 보고된 바 있다.

전극 구성이나 신호 측정 방식에는 일부 차이가 있으나, 전체적인 IPMC 센서의 구성 요소와 제작 공정은 대체로 유사하게 유지되고 있다. 적용 분야에 따라 변위, 굽힘, 압력, 습도 변화 등을 감지하는 방식에서 신호 분석 접근이 달라지기는 하지만, 기본적인 재료 체계에는 큰 차이가 없다. 이는 현재의 연구 흐름이 소재 개질을 통한 센서의 성능 향상보다는, IPMC 센서의 다양한 응용에 집중되고 있음을 나타낸다. IPMC 센서의 근본적인 성능 향상을 위해서는 고분자 매트릭스 자체의 개질이나 새로운 형상 설계 등의 접근이 필요하며, 향후에는 이러한 소재 개질이나 구조 최적화를 통해 센서의 분해능, 감도, 선형성 등의 센싱 성능을 개선하고 활용 가능성을 더욱 넓힐 수 있을 것으로 기대된다.

3. IPMC 센서의 적용

3.1 응용 분야

습도, 압력, 기계적 변형 등의 기본 감지 요소 외에도 다양한 요소를 감지할 수 있도록 IPMC에 대한 연구가 진행되고 있다.

Table 1 Summary of materials and fabrication techniques employed in IPMC sensors.

Type of sensors	Materials	Fabrication technique	Ref.
Mechanical deformation	Nafion w. Au elec.	Batch preparation using a fluid-bed-like reactor	[11]
		Electroless plating	[12,46]
		Electroplating	[23]
	Graphene mesh incorporated Nafion w. PEDOT: PSS elec.	Sequential drying of Nafion, Dip coating of PEDOT: PSS	[13]
	Nafion w. Au-Pd elec.	Sequential electroless-electroplating process	[26]
	Nafion w. Pt elec.	Electroless plating	[47-49]
Humidity	Nafion w. Au-Pt elec.	Electroless plating	[50]
	Nafion w. Pd elec.	Impregnation-reduction plating	[16,17]
	LDH doped Nafion w. Pt elec.	Electroless plating	[32]
	Nafion w. Ti/Au elec.	Sputtering	[33]
	Nafion w. AgNW elec.	Spray coating	[35]
	Nafion w. Au-AgNW elec.	Integrated spray coating and electrodeposition	[34]
Pressure	Nafion w. Au elec.	Impregnation-reduction plating	[18]
	Nafion w. Au-Ru elec.	Sequential mixture painting and melt pressing	[19,20]
	Nafion w. Au-Pd elec.	Sequential electroless-electroplating process	[19]
	Nafion w. Pt elec.	Electroless plating	[51]

(Adapted from Refs. 12,13,26,35,46,50,51 on the basis of OA, and from Refs. 11,16,17,18,19,20,23,32,33,34,48,49 with permission)

최근 연구에서는 IPMC를 활용한 생체 반응 감지에 대한 내용도 발표되고 있다. Bhattacharya et. al.는 IPMC를 맛 감지 센서로 활용할 수 있음을 밝혔다[6,7]. 해당 연구에서 짠맛, 신맛, 매운맛, 쓴맛, 단맛에 해당하는 용액을 각각 만들어 실험을 진행하였으며, 용액에 함유된 양이온은 IPMC 센서가 변형될 때 전압에 영향을 미친다는 점을 통해 IPMC가 맛 감지 센서의 새로운 선택지가 될 수 있음을 제시하였다. 2021년에는 IPMC를 각각의 맛에 해당하는 용액에 15분 동안 넣어둔 후, 강제로 굽힘 작용을 가해 생성되는 전압 신호의 경향을 파악하였다. 짠맛, 쓴맛, 단맛 용액에 넣어둔 IPMC가 다른 용액에 비해 높은 전압 응답을 보였다. 해당 실험은 굽힘 방향에 관계없이(시계 방향인지 반시계 방향인지), 같은 경향성이 측정되어 신뢰성 있는 결과를 입증하였다. 이후, 2023년에는 RapidMiner 소프트웨어를 통해 서로 다른 농도의 다양한 맛 샘플에 대한 IPMC 두 전극 간의 출력 전압 패턴을 확인하였다. 이를 활용하여 머신러닝의

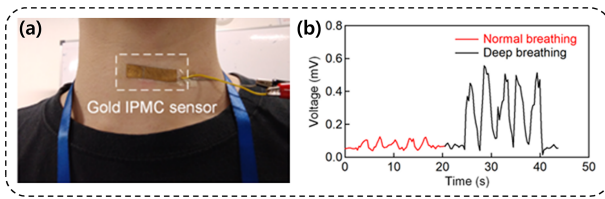


Fig. 8 (a) Photograph and illustration of how the throat sensor is attached to the throat, and (b) Output voltages from the IPMC sensor for normal breathing and deep breathing [46] (Adapted from 46 on the basis of OA)

분류 알고리즘인 KNN (K-nearest Neighbor Classification Approach)을 통해 평균 93.45%의 정확도로 맛을 예측하였다.

Chee et. al.는 IPMC를 활용하여 목 운동 패턴을 인식할 수 있는 센서를 개발하였다[46]. 일상 호흡에 비해 깊은 호흡이 더 많은 공기를 흡입하여 목이 더 많이 팽창되므로 Figs. 8(a)와 8(b)와 같이 일상 호흡과 깊은 호흡은 각각 다른 전압 신호 특성이 나타난다. 이러한 특성을 바탕으로 SVM (Support Vector Machine) 모델을 사용한 목 운동의 진폭과 속도를 분석할 수 있는 알고리즘을 개발하여 기침, 허밍, 삼키기 및 끄덕임 행동을 95%의 높은 정확도로 인식하였다.

습도 센서에서 언급한 바와 같이, IPMC는 수분 함량에 따라 신호 감지 특성이 달라지기 때문에, 일관된 센서 출력을 획득하기 위해서는 주변 습도를 조절하는 것이 중요하다. 하지만, 센서를 사용하는 동안 주변 환경을 항상 일정하게 유지하는 것은 매우 번거로운 작업이다. 이러한 문제를 해결하기 위해 Hu et. al.는 외부 환경을 제어하지 않고, IPMC 센서를 최적의 수분함량으로 유지할 수 있도록 캡슐화하는 기술을 최초로 제안하였다[52]. 해당 방법은 센서의 민감성과 안정성을 보장해주어 다양한 응용 분야에 활용될 가능성을 높여주었다. 물에 닿으면 색이 변하는 종이에 Nake, POF, PE, PVC 필름으로 덮어 방수 실험을 진행하였고, POF (Polyolefin)로 덮인 라벨이 7일 동안 색 변화가 없는 것을 확인하였다. 이후, POF 필름을 사용하여 IPMC 센서를 캡슐화 하였으며, 생체모방 로봇 물고기 및 UUV (Unmanned Underwater Vehicle)의 수중 감지 장치를 개발하였다. 뿐만 아니라 손목 맥박, 호흡, 손가락 구부리기 등을 감지하는 것을 시연하며 IPMC 센서가 다양한 장치로 활용될 가능성이 있음을 보여주었다.

생체 신호 감지는 의료 분야에서 중요한 역할을 하며, IPMC는 그 뛰어난 유연성과 민감도로 인해 생체 신호를 감지하는데 적합한 센서로 주목받고 있다. 이러한 특성 덕분에 Hu et. al.의 연구 외에도 생체 신호를 감지하는 데 적용하기 위한 연구가 많이 지속적으로 발표되고 있다. 2018년, Chen et. al.은 균일한 제작방식을 통해 다양한 기능을 수행할 수 있는 스마트 장갑을 개발하였다. 기존의 IPMC 제작 방식인 전기 도금 방식은 제작하는데 오랜 시간이 걸리며, 제작된 제품의 품질이 일정하지 않다는 단점이 있다. 본 연구에서는 Fig. 9(a)에 나타난 바와 같이 유동층 형태의 반응기를 사용하여 IPMC를 제작하는 방법을 통

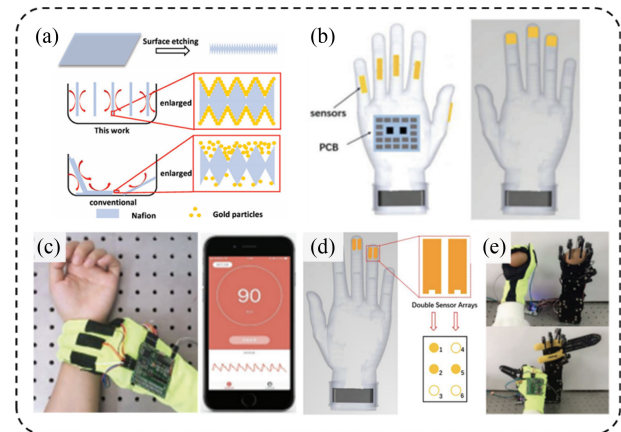


Fig. 9 (a) Comparison of IPMC sensor preparation processes of conventional electroless plating and a kind of fluid-bed-like reactor [11]. And microscopic changes in the surface of the films during reduction, (b) Design of smart glove system, (c) Photograph of sensors integrated on glove finger tips to diagnose pulse, (d) An enlarged view of double-sensing arrays and how it perceive the International Braille, and (e) Smart glove control robot hand to grasp the egg and the tool plier (Adapted from Ref. 11 with permission)

해 고분자 막과 환원 용액 사이의 접촉이 균일할 수 있도록 하였다[11]. 유동층 방식은 액체나 가스를 이용하여 물체를 이동시키는 방법으로, 반응 용액이나 용매를 균일하게 분포시킬 수 있다. 이 방식은 한 번의 제조 과정으로도 많은 수의 센서를 매우 짧은 시간 안에 생산할 수 있으며, 센서의 안정성도 개선하는 효과를 가진다. 해당 연구팀은 개선된 IPMC를 사용하여 맥박 진단, 점자 인식, 로봇 손 제어 기능을 수행할 수 있는 다기능 스마트 장갑을 개발하였다. 스마트 장갑은 Fig. 9(b)와 같이 센서와 회로가 부착되었고 스마트폰의 어플리케이션과 연동하여 다양한 기능을 수행할 수 있도록 제작되었다. 기존의 맥박 감지 센서는 손목에 부착하거나 묶는 방식으로 센서의 위치를 정확하게 맞추기 어렵다는 단점이 있다. 해당 연구에서는 $1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ 크기의 센서를 세 손가락에 부착하여 기존 센서의 단점을 개선하였고, 이를 통해 실제 맥박을 감지하는 모습이 Fig. 9(c)에 나타나 있다. 또한, Fig. 9(d)와 같이 센서를 2줄로 부착하여 손가락 끝이 점자 위를 움직일 때 전압 변화를 실시간으로 기록하였으며, 손가락 끝이 돌출된 점을 통과할 때 신호에서 피크가 나타나고 평평한 부분이 통과할 때 전압 신호의 변화가 없는 것을 확인하였다. 이 신호 특성은 스마트 장갑이 점자를 정확하게 구분할 수 있는 능력을 갖추고 있다는 것을 의미한다. Fig. 9(e)에는 스마트 장갑이 움직임을 인식하여 로봇손을 제어하는 모습이 나타나 있다. 개발된 스마트 장갑은 사회적 약자를 위한 스마트 의류의 미래에 무궁한 발전 가능성을 보여준다.

2018년과 2021년, IPMC 센서 기반 심박수 모니터 설계 및 개발에 관한 연구가 각각 보고되었다[48,49]. 손목에 IPMC를 부착하여 심박수를 측정하였고, 신호 형태가 동맥 맥파 곡선과

유사한 것을 확인하였다. 이를 통해 IPMC가 심박수 측정 센서로 활용될 수 있음을 입증하였다. 2013년에는 위팔두갈래근에 IPMC를 부착하여 근육의 움직임을 센싱하는 연구가 진행되었고, 근전도(EMG) 결과와 비교하였다. 결론적으로, IPMC를 활용하였을 때 EMG의 신호보다 더 높은 신호 대 잡음비의 결과를 얻을 수 있었다[48]. 2022년, 표준 근전도 전극과 IPMC를 비교하여 인간 팔꿈치에서 표준 근전도 신호를 추출하는 실험적 연구가 진행되었다[53]. IPMC와 EMG 센서를 동시에 부착하여 다양한 동작을 수행하였으며, 두 센서가 같은 간에 신호를 생성하여 유사한 신호 특성을 가지는 것을 확인하였다. IPMC의 신장 및 구부림에 따라 발생하는 출력 반응을 관찰하였고, 주먹 쥐기, 컵 잡기, 연필 잡기 등 다양한 물체를 잡을 때 각 동작마다 독특한 신호 특성이 나타나는 것을 확인하였다. 또한, IPMC 센서를 활용하여 호흡 패턴을 감지하는 연구가 최근 진행되었다. 유로 사이에 IPMC를 배치하여 들숨과 날숨에서 자유롭게 굽힘 변형될 수 있도록 한 후, 실제 사람의 호흡 패턴을 측정하고 평가하였다[54]. 이처럼 IPMC 센서는 다양한 인간 생체 신호 센싱을 통해 인간 활동을 식별할 수 있으므로, 다양한 형태의 센서로 더 응용이 가능할 것으로 사료된다.

2024년에는 IPMC를 충격 센서로 적용하기 위한 연구가 발표되었다[50]. 물체를 IPMC 위에 떨어뜨려 충격을 가하기 직전의 속도를 두 개의 광센서를 이용해 측정하고, 이를 바탕으로 물체의 충격 속도를 계산하였다. 물체의 낙하 높이와 질량을 조절하여 다양한 충격 에너지 수준을 만들고, 고속 데이터 수집 시스템을 통해 IPMC 센서에서 발생하는 개방 회로 전압을 기록하여 충격 반응을 분석하였다. 이 방법을 통해 충격 에너지를 측정하고, IPMC 센서의 동적 반응을 평가하였다. 다양한 에너지를 가진 기계적 충격을 받을 때 IPMC 센서는 일시적인 전압 스파이크를 생성하며, 충격 에너지와 전압 피크 진폭은 지수 관계에 있음을 확인하였다. IPMC 전압 특성은 충격자 특성이나 접촉 기하학보다 주로 충격 에너지와 그에 따른 변형률에 의존하는 것으로 나타났으며, 이는 IPMC 센서가 스포츠 활동 중 선수들의 충격을 지속적으로 모니터링할 수 있는 가능성을 가지고 있음을 나타낸다.

IPMC는 유량 센서로서의 가능성도 탐구되고 있다. 유량 센서는 액체나 기체의 흐름을 측정하는데 중요한 역할을 하며, IPMC의 민감한 변형 특성을 활용한 유량 감지 기술이 주목받고 있다. Li는 다양한 매질과 온도 조건 하에서 센서의 특성을 확인하는 실험을 수행하였으며, 이는 유량 센싱 분야에서 상용화되는데 중요한 참고자료가 될 것으로 보인다[51]. 매질의 온도가 증가함에 따라 점도는 감소했으나, 이에 따른 변형과 압력 차이는 크지 않아 IPMC가 높은 온도 적응성을 나타내는 것을 확인하였다. 밀도가 높은 매질에서 변형에 더 민감하지만, 유속과 전압 사이의 관계에서 매질 밀도의 영향은 크지 않으며, 유량이 클수록 높은 변형 및 센서 출력을 보였다. IPMC의 종횡비가 감소하고, 유속이 증가함에 따라 센서의 감도는 증가하지만 피로가 더 쉽게 발생하는 경향도 있다. 해당 연구에서는 유속

방향에 대한 센서의 각도가 클수록 센서의 감도가 높다는 점도 보고되었으며, 이러한 특성들이 유량 센서 분야에서 IPMC가 상업적 응용에 중요한 참고자료가 될 것으로 기대된다.

3.2 자가 감지

IPMC는 외부의 물리적인 신호를 감지하여 전기적으로 변환하는 센서와 전기적인 신호나 에너지를 물리적인 형태로 변환하는 액추에이터 분야에서 연구되고 있다. 이 둘의 특성을 융합하면 IPMC만으로 감지와 동작 모두 수행할 수 있는 자가 감지를 실현할 수 있다. 이는 추가적인 장치를 사용하는 자가 감지 장치에 비해 하드웨어 및 시스템 구성을 간소화할 수 있으며 제어 시스템의 효율성을 높일 수 있다.

Luo et. al.은 여러 이온을 IPMC에 도핑하여 특성을 평가한 후, 최적의 이온을 사용하여 자가 감지 시스템을 구축하였다[12,55]. TEA⁺, Na⁺를 IPMC에 도핑하여 특성을 관찰하였으며, TEA로 도핑된 IPMC는 넓은 대역폭 특성을 가지는 반면, Na⁺는 빠른 응답을 낼 수 있다는 것을 확인하였다. 이 결과에 따라 TEA⁺로 도핑된 IPMC를 센서로 사용하고, Na⁺가 도핑된 IPMC를 액추에이터로 사용하여 최적의 자가 감지 시스템을 마련하였다. 제작된 자가 감지 시스템은 센서 시스템에서 추정된 굽힘 각도 값을 통해 IPMC 액추에이터의 굽힘 각도를 제어할 수 있도록 한다. 또한, H_∞ 제어 이론을 기반으로 결합된 IPMC 액추에이터에 대한 선행제어 컨트롤러를 설계하였으며, 제작된 위치 제어 시스템이 효과적임을 확인하였다. 이후, 센서 신호의 피드백으로 자율적인 추진 동작을 실현할 수 있는 뱀 모양 로봇을 제작하였다. 로봇은 3개의 링크로 이루어져 있으며, 첫 번째 관절의 입력 토크가 두 번째 관절 각도의 피드백으로 작용한다. IPMC 액추에이터 자체의 탄성 특성과 관절 각도의 피드백을 활용해 추진 운동을 실현하였으며, 관절 각도가 측정되지 않더라도 IPMC 센서의 증폭된 출력 신호를 직접 피드백으로 사용함으로써 추진 운동이 가능하게 하였다.

Lee et. al.은 추가적인 센서 없이 IPMC 내부의 누적된 전하를 활용하는 선진적인 자체 감지 방법을 개발하였다[56]. 해당 연구에서는 감지 특성을 표현하기 위해 IPMC의 위치와 축적된 충전량 사이의 관계를 설명하는 새로운 모델을 제안하였으며, IPMC의 위치 제어를 위한 PI 컨트롤러를 개발하였다. 이 컨트롤러는 IPMC에 전압을 인가하여 동작시킨 후, 목표 위치에 도달하면 전압을 제거함으로써, 컨트롤러가 IPMC 자체의 감지 데이터를 사용해 액추에이터의 위치 제어가 가능하도록 한다. 충전 전압과 휘어짐 곡률 간의 관계를 이용하면 축적된 전압 수준으로 곡률을 예측할 수 있으며, 이를 통해 액추에이터가 특정 위치를 유지하도록 할 수 있다. Oh et. al.은 동작 중에 휘어짐을 정밀하게 감지할 수 있는 자가 감지 이온성 소프트 액추에이터를 개발하였다[13]. IPMC는 Fig. 10(a)와 같이 유연성과 이온 투과성이 우수한 그래핀 메시가 고분자 막 내부에 비대칭적으로 위치하도록 제작되었다. 해당 연구 팀은 제작된 IPMC에서 3D 직조 메쉬를 신호 수집기로 활용하여, DC 전압이 입력될 때

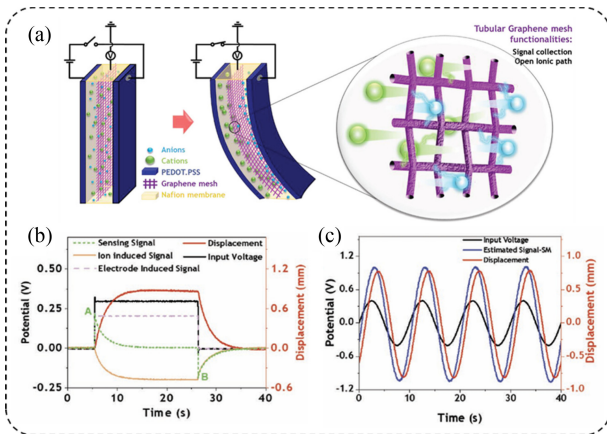


Fig. 10 (a) Actuation and sensing mechanism of self-sensing actuator using embedded graphene mesh electrode [13], (b) Plot of acquired signals and components of sensing signal, and (c) Real and estimated displacement signals obtained by static model for self-sensing actuator stimulated by 0.4 V AC voltage (Adapted from Ref. 13 on the basis of OA)

와 AC 전압이 입력될 때 변위를 예측할 수 있는 정적 모델과 동적 모델을 개발하였다. 정적 모델은 3D 그래핀에서 수집된 전압에 상수를 곱한 값을 예측 변위로 사용하였다. Fig. 10(b)에 DC 전압을 인가하였을 때 IPMC에서 측정되는 신호와 변위가 나타나 있다. IPMC의 감지 신호는 외부 전압에 의해 발생된 전압과 이온의 이동에 의해 발생된 전압의 조합으로 나타나며, 외부 전압에 의해 발생된 전압은 입력 전압의 상수배로 표시할 수 있다. 각 전압의 관계는 이온의 이동에 의해 발생된 전압을 센싱 전압과 외부 전압에 의해 발생된 전압의 차이로 다시 표시할 수 있으며, 정적 모델에서는 이 값을 상수배 하여 변위를 예측하였다. 동적 모델을 활용한 IPMC의 변위 예측 결과는 Fig. 10(c)에 나타나 있다. 이는 측정되는 신호를 보정하여 변위 값을 예측하는 그래프로, 추정된 변위 값과 레이저로 측정된 변위 값이 거의 유사하며, 96%의 높은 정확도를 달성하였다.

IPMC의 자가 감지에 관한 연구는 주로 스스로 위치를 인식하고 제어하는 방식으로 자가 감지를 구현하는 연구들이 주를 이루는 반면, 이러한 기술이 조정 분야에도 활용될 수 있다는 연구가 존재한다. 2024년 Wang et. al.은 센싱과 구동을 통합하여 인공지능 조정에 대한 아이디어를 제시하였다[57]. 미모사는 잎을 건드리면 아래로 늘어지는 식물으로, 해당 연구에서는 IPMC를 이용하여 생체모방 미모사를 제작하였다. 생체모방 미모사에 외부 자극을 가하면 컴퓨터는 전압 신호를 얻게 되고, 컴퓨터가 신호 처리한 후 구동 전압 5 V를 3초간 출력시켜 잎이 오므러지도록 하였다. IPMC 양쪽에 있는 수분 분자의 농도 차이로 인해 생체 모방 미모사의 깃털은 다시 펼쳐지게 된다. 이러한 연구는 인공지능 기반의 생체모방 시스템을 개발하는데 중요한 기초가 될 수 있으며, 향후 스마트 환경 조성 및 자율적인 식물 기반 시스템 구현에 큰 기여를 할 것으로 기대된다.

4. 결론

본 논문은 IPMC 센서의 연구 동향을 기계적 변형, 습도, 압력 등 다양한 자극 입력 모드에 따라 분류하여 자세히 조사하였다. 이를 통해 자극 방식, 특징, 활용 방안 등에 대한 포괄적인 분석을 다루고 있으며, 생체 반응 감지를 위한 센서 개발의 최신 연구 동향을 소개하였다. 또한, IPMC의 액추에이터 및 센서로서의 특성을 통합하여 자가 감지 개발에 관한 연구를 보고하였으며, 전극과 전해질 간의 부착력이 센서 성능에 미치는 영향에 대해서도 논의하였다.

IPMC의 제조 과정과 장기 사용에 따른 전기화학적 안정성 문제는 센서의 성능과 신뢰성에 중대한 영향을 미친다. 특히, 전극과 전해질 간의 부착력은 센서의 정밀도와 일관성에 결정적인 역할을 하며, 이는 센서의 정확성과 신뢰도를 직접적으로 좌우한다. 따라서, 전해질과 전극 사이의 최적화된 부착력을 확보하는 것은 센서의 성능을 극대화하는 핵심 요소이다. 이를 위해, 전극과 전해질 간의 상호작용을 극대화할 수 있는 새로운 재료와 제조 기술의 개발이 필요하며, 이는 센서의 반응성과 안정성을 향상시키는데 중요한 기여를 할 것이다. 더불어, 센서의 성능에 영향을 미치는 다양한 요인들에 대한 심층적인 연구를 통해, 센서의 정확도와 신뢰성을 지속적으로 개선할 수 있는 방안을 모색해야 한다.

나아가 IPMC 센서의 높은 잠재력을 현실적으로 구현하기 위해서는, 실험실 단계에서의 성능 입증을 넘어 제조 공정 효율과 대량생산 가능성도 고려해야 한다. 소재 비용이나 제조 시간 등 실용적 요인을 보완함으로써 산업 및 의료 현장에서 보다 쉽게 적용할 수 있을 것이며, AI 기반 신호 처리 기술과의 융합을 통해 복잡한 생체 환경 신호도 정밀하게 해석할 수 있을 것으로 기대된다. 이와 같은 멀티-융합 연구가 진행된다면, IPMC 센서가 실시간 생체 모니터링이나 소프트 로봇, 웨어러블 디바이스 등 다양한 응용 분야에서 혁신적인 솔루션을 제공할 수 있을 것이다.

IPMC의 유연성과 민감한 감지 능력은 생체 반응 감지 및 건강 모니터링 분야에서 혁신적인 가능성을 제시한다. 이러한 특성은 의료 기기 개발뿐만 아니라 웨어러블 기술의 발전에도 중요한 역할을 할 것으로 기대되며, IPMC 기반 센서의 연구와 개발은 이 분야에서의 혁신을 촉진할 것이다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2024-00456368).

REFERENCES

1. Javaid, M., Haleem, A., Singh, R. P., Rab, S., Suman, R., (2021), Significance of sensors for industry 4.0: Roles, capabilities, and applications, *Sensors International*, 2, 100110.

2. Wang, L., Wang, K. L., Lou, Z., Jiang, K., Shen, G., (2018), Plant-based modular building blocks for 'green' electronic skins, *Advanced Functional Materials*, 28(51), 1804510.
3. Wang, L., Jackman, J. A., Ng, W. B., Cho, N., (2016), Flexible, graphene-coated biocomposite for highly sensitive, real-time molecular detection, *Advanced Functional Materials*, 26(47), 8623-8630.
4. Rao, Z. C., Ershad, F., Almasri, A., Gonzalez, L. C., Wu, X., Yu, C., (2020), Soft electronics for the skin: From health monitors to Human-Machine interfaces, *Advanced Materials Technologies*, 5(9), 2000233.
5. Mohdlsa, W., Hunt, A., Hosseinia, S. H., (2019), Sensing and self-sensing actuation methods for ionic polymer-metal composite (IPMC): A review, *Sensors*, 19(18), 3967.
6. Wang, G., Sun, Y., Ji, A., Yin, G. X., Ge, H., Liu, X., Tong, X., Yu, M., (2024), Review on the research progress and application of IPMC sensors, *Journal of Bionic Engineering*, 21, 2687-2716.
7. Ahsan, M., Teay, S. H., Sayem, A. S. M., Albarbar, A., (2022), Smart clothing framework for health monitoring applications, *Signals*, 3(1), 113-145.
8. Porfiri, M., (2019), Sensing mechanical deformation via ionic polymer metal composites: A primer, *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 22(5), 5-12.
9. De, A., Pal, A., Ash, D., Das, K., Mondal, K., Dhar, P., Chakraborty, R., Rakshit, P., Bhattacharya, S., Bepari, B., Bhaumik, S., (2021), Taste sensor using ionic polymer metal composite, *IEEE Sensors Letters*, 5(4), 5500304.
10. Das, S., Bhadra, S., Bhattacharya, S., Chattopadhyay, S., (2023), Ionic polymer metal composite based smart tongue using machine learning, *IEEE Sensors Letters*, 7(2), 5500304.
11. Ming, Y., Yang, Y., Fu, R. P., Lu, C., Zhao, L., Hu, Y. M., Li, C., Wu, Y. X., Liu, H., Chen, W., (2018), IPMC sensor integrated smart glove for pulse diagnosis, braille recognition, and Human-Computer interaction, *Advanced Materials Technologies*, 3(12), 1800257.
12. Kamamichi, N., Yamakita, M., Asaka, K., Luo, Z., (2006), A snake-like swimming robot using IPMC actuator/sensor, *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1812-1817.
13. Tabassian, R., Nguyen, V. H., Umrao, S., Mahato, M., Kim, J., Porfiri, M., Oh, I., (2019), Graphene mesh for Self-Sensing ionic soft actuator inspired from mechanoreceptors in human body, *Advanced Science*, 6(23), 1901711.
14. Wang, J., Wang, Y., Zhu, Z., Wang, J., He, Q., Luo, M., (2019), The effects of dimensions on the deformation sensing performance of ionic polymer-metal composites, *Sensors*, 19(9), 2104.
15. Bonomo, C., Fortuna, L., Giannone, P., Graziani, S., (2005), A method to characterize the deformation of an IPMC sensing membrane, *Sensors and Actuators A: Physical*, 123-124, 146-154.
16. Wang, Y., Tang, G., Zhao, C., Wang, K., Wang, J., Ru, J., Sheng, J., Chang, L., Li, L., (2021), Experimental investigation on the physical parameters of ionic polymer metal composites sensors for humidity perception, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 345, 130421.
17. Tang, G., Ji, Y., Zhao, C., Mei, D., Zhao, X., Ru, J., Li, L., Wang, Y., (2023), The effects of ethanol content on the electrical response of IPMC for drinking perception, *Sensors and Actuators A: Physical*, 366, 114894.
18. Zhu, Z., Horiuchi, T., Kruusamäe, K., Chang, L., Asaka, K., (2016), Influence of ambient humidity on the voltage response of ionic Polymer-Metal composite sensor, *The Journal of Physical Chemistry B*, 120(12), 3215.
19. Gudarzi, M., Smolinski, P., Wang, Q., (2017), Bending mode ionic polymer-metal composite (IPMC) pressure sensors, *Measurement*, 103, 250.
20. Gudarzi, M., Smolinski, P., Wang, Q., (2017), Compression and shear mode ionic polymer-metal composite (IPMC) pressure sensors, *Sensors and Actuators A: Physical*, 260, 99.
21. Deole, U., Lumia, R., Shahinpoor, M., Bermudez, M., (2008), Design and test of IPMC artificial muscle microgripper, *Journal of Micro-Nano Mechatronics*, 4(3).
22. Shahinpoor, M., Bar-Cohen, Y., Simpson, J. O., Smith, J., (1998), Ionic polymer-metal composites (IPMCs) as biomimetic sensors, actuators and artificial muscles—a review, *Smart Materials and Structures*, 7(6), 15.
23. Dominik, I., Kwaśniewski, J., Kaszuba, F., (2016), Ionic polymer-metal composite displacement sensors, *Sensors and Actuators A: Physical*, 240, 10-16.
24. Dong, R., Tan, Y., (2015), A model based predictive compensation for ionic polymer metal composite sensors for displacement measurement, *Sensors and Actuators A: Physical*, 224, 43.
25. Song, D. S., Han, D. G., Rhee, K., Kim, D. M., Jho, J. Y., (2017), Fabrication and characterization of an ionic polymer-metal composite bending sensor, *Macromolecular Research*, 25(12), 1205.
26. Chang, L., Wang, D., Hu, J., Li, Y., Wang, Y., Hu, Y., (2021), Hierarchical structure fabrication of IPMC strain sensor with high sensitivity, *Frontiers in Materials*, 8, 748687.
27. Nagel, W. S., Fakharian, O., Aureli, M., Leang, K. K., (2023), Engineered IPMC sensors: Modeling, characterization, and application towards wearable postural-tactile measurement, *Smart Materials and Structures*, 33(1), 015035.
28. Brunetto, P., Fortuna, L., Giannone, P., Graziani, S., Strazzeri, S., (2011), Characterization of the temperature and humidity influence on ionic Polymer-Metal composites as sensors, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 60(8), 2951-2959.
29. Ganley, T., Hung, D. L. S., Zhu, G., Tan, X., (2010),

- Temperature-dependent ionic polymer-metal composite (IPMC) sensing dynamics: Modeling and inverse compensation, *Proceedings of the 2010 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, 447-452.
30. Ganley, T., Hung, D. L. S., Zhu, G., Tan, X., (2011), Modeling and inverse compensation of temperature-dependent ionic Polymer-Metal composite sensor dynamics, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 16(1), 80-89.
 31. Gonzalez, C., Lumia, R., (2015), An IPMC microgripper with integrated actuator and sensing for constant finger-tip displacement, *Smart Materials and Structures*, 24(5), 055011.
 32. Beigi, F., Mousavi, M. S. S., Manteghi, F., Kolahdouz, M., (2018), Doped nafion-layered double hydroxide nanoparticles as a modified ionic polymer metal composite sheet for a high-responsive humidity sensor, *Applied Clay Science*, 166, 131.
 33. Esmaeli, E., Ganjian, M., Rastegar, H., Kolahdouz, M., Kolahdouz, Z., Zhang, G. Q., (2017), Humidity sensor based on the ionic polymer metal composite, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 247, 498.
 34. Zhao, C., Ji, Y., Tang, G., Zhao, X., Mei, D., Ru, J., Zhu, D., Wang, Y., (2023), Rapid preparation of novel ionic Polymer-Metal composite for improving humidity sensing effect, *Polymers*, 15(3), 733.
 35. Wang, Y., Wang, J., Hao, M., Li, B., Zhu, Z., Gou, X., Li, L., (2020), Rapid preparation of a nafion/ag NW composite film and its humidity sensing effect, *RSC Advances*, 10(46), 27447-27455.
 36. Zhu, Z., Horiuchi, T., Takagi, K., Takeda, J., Chang, L., Asaka, K., (2016), Effects of cation on electrical responses of ionic polymer-metal composite sensors at various ambient humidities, *Journal of Applied Physics*, 120(8), 084906.
 37. Topcu, G., Guner, T., Demir, M. M., (2019), *Pressure sensors based on IPMC actuator*, Springer International Publishing.
 38. Gao, F., Weiland, L. M., (2010), Ionic polymer transducers in sensing: Implications of the streaming potential hypothesis for varied electrode architecture and loading rate, *Journal of Applied Physics*, 108(3), 034910.
 39. Gao, F., Weiland, L. M., (2011), Streaming potential hypothesis for ionic polymer transducers in sensing: Roles of ionomer state and morphology, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 22(14), 1623.
 40. Wang, Y., Tang, G., Zhao, C., Mei, D., Zhao, X., Ji, Y., Li, B., (2022), The effects of contact area on pressure sensing of ionic polymer metal composite sensor with a soft substrate, *Smart Materials and Structures*, 31(6), 065013.
 41. Low, J., Chee, P., Lim, E., Ganesan, V., (2024), Kirigami-inspired self-powered pressure sensor based on shape fixation treatment in IPMC material, *Smart Materials and Structures*, 33(2), 025029.
 42. Tang, G., Zhao, X., Ji, Y., Zhao, C., Mei, D., Wang, Y., (2023), Influence of contact characteristics on pressure sensing of IPMC sensors, *Proceedings of the International Conference on Intelligent Robotics and Applications*, 119-127.
 43. Bonomo, C., Fortuna, L., Giannone, P., Graziani, S., Strazzeri, S., (2007), A resonant force sensor based on ionic polymer metal composites, *Smart Materials and Structures*, 17(1), 015014.
 44. Volpini, V., Bardella, L., Rodella, A., Cha, Y., Porfiri, M., (2017), Modelling compression sensing in ionic polymer metal composites, *Smart Materials and Structures*, 26(3), 035030.
 45. Histed, R., Ngo, J., Hussain, O. A., Lapins, C. K., Fakharian, O., Leang, K. K., Liao, Y., Aureli, M., (2021), Ionic polymer metal composite compression sensors with 3D-structured interfaces, *Smart Materials and Structures*, 30(12), 125027.
 46. Lee, J., Chee, P., Lim, E., Tan, C., (2021), Artificial intelligence-assisted throat sensor using ionic Polymer-Metal composite (IPMC) material, *Polymers*, 13(18), 3041.
 47. Chattaraj, R., Bhaumik, S., Khan, S., Chatterjee, D., (2018), Soft wearable ionic polymer sensors for palpatory pulse-rate extraction, *Sensors and Actuators A:Physical*, 270, 65-71.
 48. Park, K., Lee, B., Kim, H.M., Choi, K.S., Hwang, G., Byun, G.S., Lee, H.K., (2013), IPMC based biosensor for the detection of biceps brachii muscle movements, *International Journal of Electrochemical Science*, 8(3), 4098-4109.
 49. Li, M., (2025), The application of IPMC material sensors in collecting flow rates of products, *Materials Science*, 31, 75-84.
 50. Xie, M., Li, X., (2024), Fabrication and application of wearable ionic polymer metal composite sensors for sports science, *Alexandria Engineering Journal*, 108, 169.
 51. Li, M., (2025), The application of IPMC material sensors in collecting flow rates of products, *Materials Science*, 31 75-84.
 52. Yang, Q., Hu, Q., Zhu, Z., Liu, Y., Li, S., Shan, L., (2022), Highly sensitive and stable encapsulated ionic Polymer-Metal composite sensor under the optimal water content, *IEEE Sensors Journal*, 22(23), 22446-22455.
 53. Das, S., Ghosh, S., Guin, R., Das, A., Das, B., Saha, S., Bhattacharya, S., Bepari, B., Bhaumik, S., (2022), IPMC as EMG sensor to diagnose human arm activity, *Proceedings of International Conference on Industrial Instrumentation and Control: ICI2C 2021*, 111-117.
 54. Annabestani, M., Esmaeili-Dokht, P., Nejad, S.K., Fardmanesh, M., (2021), NAFAS: Non-rigid air flow active sensor, a cost-effective, wearable, and ubiquitous respiratory bio-sensor, *IEEE Sensors Journal*, 21(7), 9530-9537.
 55. Yamakita, M., Sera, A., Kamamichi, N., Asaka, K., Luo, Z., (2006), Integrated design of IPMC actuator/sensor, *Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1834-1839.

56. Koo, B., Na, D., Lee, S., (2009), Control of IPMC actuator using self-sensing method, IFAC Proceedings Volumes, 45(3), 267-270.
57. Wang, H., Tian, A., Hui, X., Li, J., Liu, K., Zou, Y., (2021), Research on motion control of bionic mimosas based on IPMC driving, Proceedings of the 2021 IEEE International Symposium on Applications of Ferroelectrics (ISAF), 1-4.

**Gwon Min Kim**

B.S. candidate in the School of Mechanical Engineering, Kumoh National institute of Technology. Her research interests are soft actuators and sensors.

E-mail: khhena@kumoh.ac.kr

**Seong-Jun Jo**

B.S. candidate in the School of Mechanical Engineering, Kumoh National institute of Technology. His research interests are soft actuators and sensors.

E-mail: audtnr6606@kumoh.ac.kr

**Jaehwan Kim**

Associate Professor in the School of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology. His research interests are soft robotics and smart materials.

E-mail: kimjh8729@kumoh.ac.kr

다구치 방법을 이용한 사출성형 미세유체 칩의 거시적/미시적 변형 거동에 대한 공정 변수의 영향 분석

Taguchi Analysis of Effects of Processing Parameters on Macro/Micro-scale Deformation Behavior of Injection-molded Microfluidic Chips

박지원¹, 이봉기^{1,#}
Jiwon Park¹ and Bong-Kee Lee^{1,#}

¹ 전남대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Chonnam National University)
Corresponding Author / E-mail: b.lee@chonnam.ac.kr, TEL: +82-62-530-1685
ORCID: 0000-0002-3191-4222

KEYWORDS: Injection molding (사출성형), Microfluidic chip (미세유체 칩), Deformation behavior (변형 거동), Taguchi method (다구치 방법), Processing parameter (공정 변수)

Microfluidic chips have become a critical component in advanced applications such as biochemical analysis, medical diagnostics, drug development, and environmental monitoring because of their ability to precisely control fluid flow at the microscale. The functionality of these chips is highly dependent on the precision and dimensional stability of microchannel structures formed on them. While injection molding is an efficient method for a mass production of microfluidic chips, it is required to minimize undesirable deformation due to thermal and mechanical stresses, which can degrade the overall performance. This study investigated global (Macro-scale) and local (Micro-scale) deformation behaviors of injection-molded microfluidic chips. Effects of processing parameters, including mold temperature, melt temperature, filling time, and packing pressure, were investigated. The Taguchi-based design of experiments approach was employed to systematically analyze these effects and to determine optimal conditions to minimize deformation.

Manuscript received: February 20, 2025 / Accepted: March 15, 2025
This paper was presented at KSPE Autumn Conference in 2024

1. 서론

미세유체 칩(Microfluidic Chip)은 미세 유체역학을 기반으로 마이크로 스케일에서 유체의 흐름과 조작을 정밀하게 수행할 수 있는 소형 플랫폼이다[1]. 이 장치는 마이크로미터 크기의 채널과 구조가 집적된 형태로 제작되며, 물리, 화학, 생물학 등 다양한 분야에서 광범위하게 활용되고 있다[2,3]. 미세유체 칩은 유체의 흐름, 혼합, 분리, 분석 등의 과정을 정밀하게 수행할 수 있어, 질병 진단, 약물 개발, 환경 모니터링, 세포 연구 등 여러 응용 분야에서 중요한 역할을 한다[4,5]. 소형화, 경제성, 높은 정밀도, 신속한 처리 속도 등의 장점으로 기존의 대규모 실험 장비를 대체할 수 있는 기술로 주목받고 있다[6]. 이러한 기술적 우수성 덕분에 랩-온-어-칩(Lab-on-a-chip)이라는 개념으로

발전하였으며, 이를 통해 단일 플랫폼에서 실험실 수준의 다양한 기능을 통합적으로 구현할 수 있다[7,8].

사출성형(Injection Molding) 공정은 미세유체 칩의 대량 생산과 정밀 제조를 실현하는 데 있어 핵심적인 역할을 한다. 이 공정은 열가소성 플라스틱을 금형(Mold)에 주입한 뒤 냉각과 고화 과정을 거쳐 원하는 형태의 제품을 제작하는 방식으로, 복잡한 구조를 정밀하게 구현할 수 있는 기술로 널리 인정받고 있다[9]. 사출성형은 대량 생산과 효율성 측면에서 뛰어난 장점을 제공하는 반면, 치수 안정성과 성능에 직접적인 영향을 미칠 수 있는 변형 문제가 발생할 수 있다[10]. 특히 미세유체 칩의 경우, 마이크로 채널의 정밀한 구조와 칩의 기능이 밀접하게 연관되어 있어 변형 문제는 제품 성능에 치명적인 영향을 줄 수 있다.

이와 같은 변형 문제를 해결하기 위해 다양한 연구가 진행되어

왔다. Chu 등은 인몰드 본딩(In-mold Bonding) 공정에서 열과 압력으로 발생하는 마이크로 채널 변형을 연구하여, 접합 온도와 압력을 조정하여 열팽창과 잔류응력을 감소시키고 구조적 정확성을 유지할 수 있음을 입증하였다[11]. Wang 등은 이형(Demolding) 공정에서 금형 인서트 설계와 표면 처리가 변형에 미치는 영향을 분석하여, 금형 표면 코팅과 냉각 시간 최적화를 통해 복제 품질을 향상시킬 수 있음을 보고하였다[12]. 또한, Attia 등은 미세 사출성형(Micro-injection Molding) 과정에서 재료의 유동성과 냉각 수축으로 인한 변형 문제를 해결하기 위해 유동 시뮬레이션과 실험을 병행하여 사출 온도, 압력, 냉각 조건을 최적화하는 방법을 제안하였다[13]. 이러한 연구들은 공정 단계별 변형 제어를 위한 유용한 데이터를 제공하였으나, 변형 메커니즘을 정량적으로 규명하고 공정 변수 변화가 변형에 미치는 영향을 체계적으로 분석한 사례는 여전히 부족하다.

본 연구는 이와 같은 한계를 보완하고자, 사출성형 공정을 통해 제조된 미세유체 칩에서 발생하는 변형 문제를 거시적(Macro) 및 미시적(Micro) 관점에서 함께 평가하고, 변형을 최소화하기 위한 최적의 공정 변수를 도출하는 데 초점을 맞추었다. 이는 변형 문제가 미세유체 칩의 전체적인 구조만이 아니라 마이크로 채널의 세부 기능에 미치는 영향을 종합적으로 이해하기 위함이다. 다구치 방법(Taguchi Method)을 활용하여 사출성형 공정 변수가 미세유체 칩의 각 변형에 미치는 영향을 체계적으로 분석하고, 변형을 최소화하기 위한 최적의 공정 변수를 도출함으로써 미세유체 칩의 제품 품질을 향상시키는 방안을 제시하였다.

2. 변형 해석 방법

2.1 미세유체 칩 모델

본 연구에서는 실제 사출성형 공정을 통해 제작된 미세유체 칩을 대상으로 변형 분석을 수행하였다. Fig. 1은 변형 분석의 주요 대상으로 선정된 미세유체 칩의 실제 사진을 보여준다. 이를 바탕으로, 사출성형 공정 중 발생하는 변형을 분석하기 위해 Fig. 2와 같이 미세유체 칩의 형상을 3D 모델로 설계하였다. 칩의 전체적인 치수는 길이 30 mm, 너비 15 mm, 두께 3 mm이며, 표면에는 깊이 0.04 mm인 Y형 교차 구조의 마이크로 채널이 설계되어 있다. 이때 게이트는 해석 모델에 포함하였으나, 스프루(Sprue) 및 러너(Runner)는 설계에서 제외하였다.

2.2 유한요소 설정

본 연구에서는 미세유체 칩의 변형을 분석하기 위해서 Moldflow Plastic Insight (MPI)를 사용하여 사출성형 해석을 진행하였다. 유한요소 해석 수행을 위해 메쉬 수렴성 테스트(Mesh Convergence)를 통해 적절한 메쉬 크기(Mesh Size)를 결정하였다. 실제 사출성형에 이용된 범용 폴리카보네이트(Generic Polycarbonate)의 권장 성형 조건을 기준으로 금형 온도

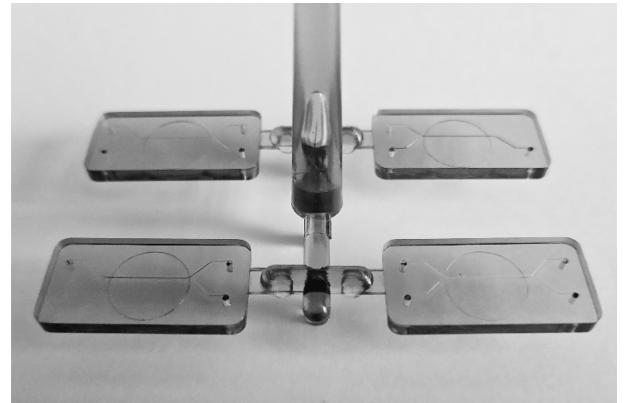


Fig. 1 Microfluidic chip manufactured by injection molding

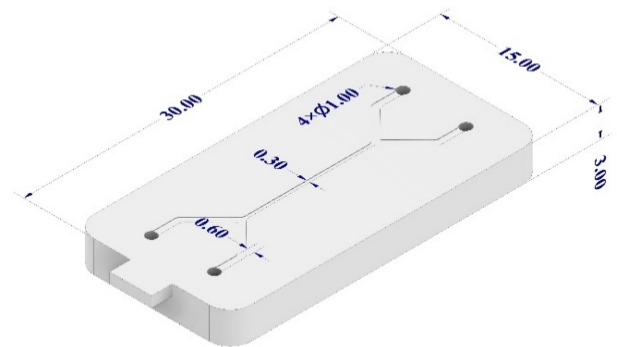


Fig. 2 3D model and dimensions of the microfluidic chip

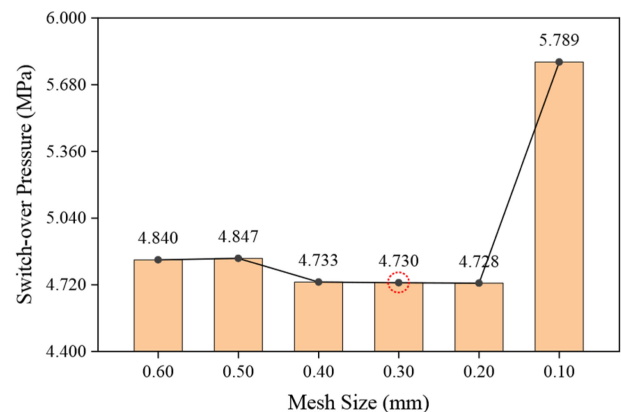


Fig. 3 Mesh convergence test using switch-over pressure

(Mold Temperature)는 95°C, 용융 온도(Melt Temperature)는 300°C로 설정하였고, 충전 시간(Filling Time)은 기본값인 1 s로 설정하여 테스트 공정 조건을 구성하였다. 이후 메쉬 크기를 0.60에서 0.10 mm까지 조정하며 보압 전환 압력(Switch-over Pressure)을 측정하였다.

Fig. 3과 같이, 메쉬 크기가 0.40에서 0.20 mm로 변하는 과정에서 압력이 서서히 감소하며 수렴하는 경향을 보였다. 그러나 메쉬 크기를 0.10 mm로 설정한 경우, 압력이 급격하게 증가하는 현상이 관찰된다. 이는 과도하게 세밀한 메쉬 설정으로 인해 계산 과정에서 수치적 불안정성이 발생한 것으로 판단된다.

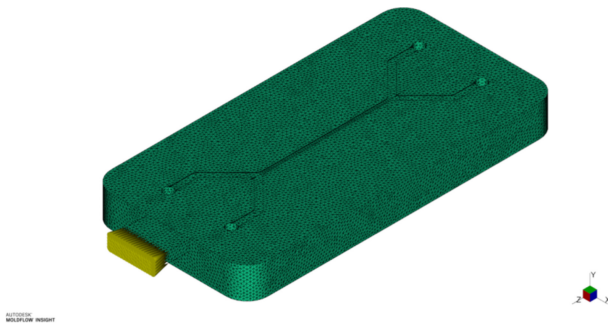


Fig. 4 Finite element model of the microfluidic chip

이러한 결과를 바탕으로, 계산 효율성과 결과의 신뢰성을 고려하여 메쉬 크기를 0.30 mm로 설정하였다.

최종적으로, Fig. 4와 같은 절점(Node) 수 89,286개, 요소(Element) 수 474,972개로 구성된 3차원 유한요소 모델을 구축하였다. 또한, 게이트 입구에 위치한 83개의 절점에 사출 주입구를 설정하여 캐비티 내 유동 해석의 안정성과 정확성을 확보하였다.

2.3 공정 변수 설정

본 연구에서는 미세유체 칩의 사출성형 품질과 특성에 영향을 미치는 주요 공정 변수로 충전 시간, 금형 온도, 용융 온도, 보압 압력(Packing Pressure)을 선정하였으며, Table 1과 같이 4요인 3수준의 공정 변수표를 구성하였다.

충전 시간(A)의 범위는 성형 품질에 미치는 영향을 고려하여 0.1-0.5 s로 설정하였다. 금형 온도(B)와 용융 온도(C)는 연구에서 가정한 범용 폴리카보네이트 소재의 권장 성형 온도 범위를 기준으로 각각 70-120°C, 280-320°C로 설정하였다. 보압 압력(D)은 공정 변수 조합에 따라 변하는 사출 압력에 대해서 최소한의 보압 효과를 보장하기 위해, 보압 절환 압력을 기준으로 하는 백분율 값인 100-200%로 설정하였다.

다른 공정 변수 중 보압 시간(Packing Time)의 경우, 기초 해석을 통하여 보압 시간이 6 s 이상일 경우 질량 변화가 발생하지 않음을 확인하였다. 따라서 본 해석에서는 보압 시간을 6 s로 고정하였다. 냉각 시간(Cooling Time)의 경우 별도의 냉각 시스템이 없으므로, 기본값인 15 s를 유지하여 해석을 진행하였다.

2.4 실험설계 및 보압 절환 압력 해석

다구치 방법은 제품 품질 향상 및 공정 최적화를 위해 널리 사용되는 통계적 기법으로[14], 실험의 효율성을 높이고 변동성을 최소화하기 위한 강건 설계(Robust Design) 개념을 기반으로 한다. 제어요인(Control Factors)이 응답 변수(Response Variable)에 미치는 영향을 평가하여 최적 조건을 도출하며, 신호 대 잡음비(Signal-to-noise Ratio, S/N Ratio)를 활용해 품질 특성을 정량적으로 분석하는 것이 특징이다. 또한, 실험 횟수를 최소화하면서도 요인들의 영향을 체계적으로 평가할 수 있도록 직교배열표(Orthogonal Array)를 적용한다. 본 연구에서는 가장 많이

Table 1 Injection molding processing parameters and their level

Processing parameter		Level		
Symbol	Description	1	2	3
A	Filling time [s]	0.1	0.3	0.5
B	Mold temperature [°C]	70	95	120
C	Melt temperature [°C]	280	300	320
D	Packing pressure [%]	100	150	200
-	Packing time [s]	6		
-	Cooling time [s]	15		

Table 2 $L_9(3^4)$ orthogonal array table and switch-over pressure

Run	Result	Processing parameter			
	Ps [MPa]	A [s]	B [°C]	C [°C]	D [MPa]
1	22.412	0.1	70	280	22.412
2	16.378	0.1	95	300	24.567
3	12.053	0.1	120	320	24.106
4	9.398	0.3	70	300	18.796
5	6.490	0.3	95	320	6.490
6	12.883	0.3	120	280	19.325
7	4.822	0.5	70	320	7.233
8	10.460	0.5	95	280	20.920
9	6.661	0.5	120	300	6.661

사용되는 $L_9(3^4)$ 직교배열표를 활용하여 공정 조건 조합을 구성하고, 사출성형 시뮬레이션을 수행하였다.

보압 절환 압력(Ps)은 사출성형 과정에서 충전이 99%에 도달하는 시점에 측정된 충전 단계에서 보압 단계로 전환되는 순간의 주입구에서의 압력이다. A(충전 시간), B(금형 온도), C(용융 온도)를 변수로 설정하여 $L_9(3^4)$ 직교배열을 기반으로 유동 해석을 진행하였으며, 보압 절환 압력의 범위는 4.822-22.412 MPa로 나타났다. 최종적으로, 측정된 보압 절환 압력을 바탕으로 최소한의 보압 효과를 보장하는 D(보압 압력)를 산출하였으며, Table 2의 공정변수 조합을 이후 진행될 변형 해석에 활용하였다.

실험과 달리 수치 해석은 동일한 공정조건에서 항상 일정한 결과를 도출하므로, 일반적인 다구치 방법과는 달리 반응 값 자체를 활용하고 신호 대 잡음비는 따로 계산하지 않았다. 또한 4요인 3수준 공정변수에 $L_9(3^4)$ 직교배열을 적용하면 표본이 9개로 제한되므로, 분산분석(ANOVA)에서 공정 변수 간 상호작용은 포함하지 않았다.

2.5 변형 측정

본 연구에서는 미세유체 칩의 변형을 거시적 관점과 미시적 관점으로 나누어 분석하였다. 거시적 변형은 미세유체 칩의 전체적인 외형의 변형으로, 미시적 변형은 미세유체 칩 표면에 형성된 마이크로 채널의 변형으로 정의하고 각각에 적합한 평가

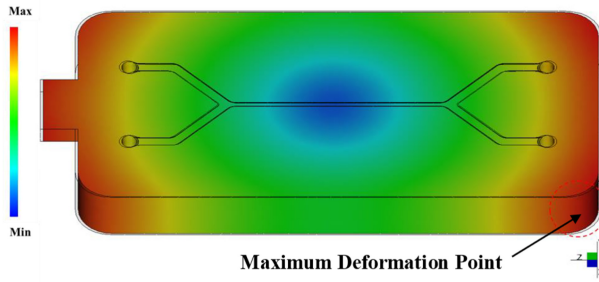


Fig. 5 Global (Macro-scale) deformation measurement location

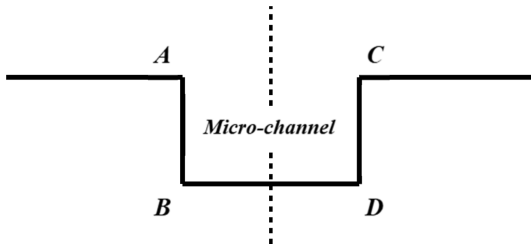


Fig. 6 Square section edge points of microchannel



Fig. 7 Microchannel deformation measurement location (Micro)

기준을 설정하였다.

거시적 변형 평가는 칩에서 최대 변형이 발생하는 지점을 측정하는 방식으로 진행하였다. Fig. 5에 나타난 바와 같이 게이트로부터 가장 먼 모서리 중심부에서 최대 변형이 관찰되었으며, 이는 9가지 설계 조건 모두에서 일관된 결과를 보였다.

마이크로 채널의 미시적 변형 분석은 너비 0.3 mm의 중심부 채널을 대상으로 수행되었으며, 채널 단면을 사각형으로 가정하였다. 채널의 네 모서리의 점은 Fig. 6과 같이 각각 A, B, C, D로 명명하고, 채널의 길이 방향으로 일정 간격으로 정의된 8개의 지점에서 변형 양상을 평가하였다(Fig. 7). 마이크로 채널 변형의 정량적 분석을 위해서 부피 변형률(Volumetric Deformation Ratio)을 사용하였다. 마이크로 채널과 같은 육면체의 부피를 계산하기 위하여 다음식과 같이 각 위치의 8개 좌표점을 4개씩 조합하여 사면체 6개로 나누는 방식을 적용한다[15].

$$V = \frac{1}{6} \left| \det \begin{pmatrix} x_j - x_i & y_j - y_i & z_j - z_i \\ x_k - x_i & y_k - y_i & z_k - z_i \\ x_l - x_i & y_l - y_i & z_l - z_i \end{pmatrix} \right| \quad (1)$$

$$V_{Total} = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_5 + V_6 \quad (2)$$

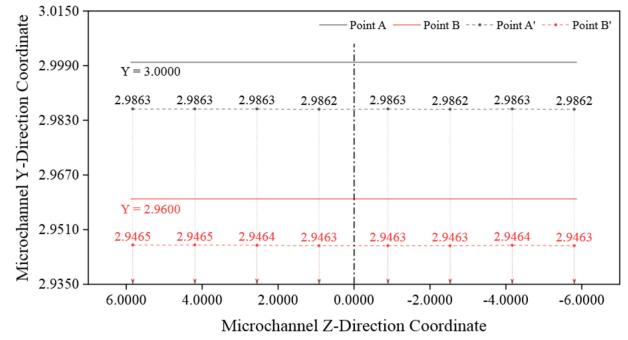


Fig. 8 Changes in Y and Z coordinates at 8 measurement points before and after deformation

점 $P_i(x_i, y_i, z_i)$, $P_j(x_j, y_j, z_j)$, $P_k(x_k, y_k, z_k)$, $P_l(x_l, y_l, z_l)$ 은 사면체를 구성하는 각 꼭짓점들의 3차원 좌표이며, V 는 사면체의 부피를 나타낸다. 이때 1번과 2번 위치, 2번과 3번 위치처럼 인접한 위치들의 8점을 기반으로 모든 부피를 계산할 경우, 계산 과정이 매우 복잡해진다는 단점이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해, 채널 중심부를 기준으로 양끝 위치에 해당하는 1과 8번 측정 위치에서 8개 점($A_1, B_1, C_1, D_1, A_8, B_8, C_8, D_8$)을 활용하여 마이크로 채널의 부피를 계산하였다.

$$\varepsilon_V = ((V_{Before} - V_{After}) / V_{Before}) \times 100 \% \quad (3)$$

$$V_{After} = V_{1235} + V_{2346} + V_{2356} + V_{3458} + V_{3578} + V_{4568} \quad (4)$$

$$V_{Before} = \overline{A_1 B_1} \times \overline{A_1 C_1} \times \overline{A_1 A_8} \quad (5)$$

부피 변형률(ε_V)을 사용한 해석 방법의 타당성 검증을 위해, 기준 조건(모든 공정변수가 2수준)에서 마이크로 채널 단면의 점 A와 B 지점의 Y, Z 좌표 변화를 측정하였다. Fig. 8의 측정 결과에서 Z 좌표 위치에 따른 Y 좌표 변동이 대략 0.0001에서 0.0002 정도로 나타났다. 이는 μm 단위로 환산하더라도 미미한 수준에 해당하며, 해석 결과에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 생각된다. 따라서 이러한 접근 방식이 계산을 단순화하고 시간 소모를 줄이면서 분석에 적합한 것으로 판단하였다.

3. 변형 해석 결과

3.1 거시적 변형 해석

3.1.1 변형 거동

Fig. 9에 나타난 바와 같이, 미세유체 칩은 사출성형 후 전체적으로 초기 형상을 유지하면서 칩의 중심부를 향해 수축하는 변형 경향을 보였다. 이 과정에서 휨 변형은 거의 발생하지 않았으며, X, Y, Z 세 방향 모두에서 수축이 관찰되었다. 사출성형에서 용융된 플라스틱 수지(Resin)는 금형에 주입된 후 냉각 및 고화 과정에서 부피가 줄어든다. 그러나 위치에 따라 냉각 속도가 균일하지

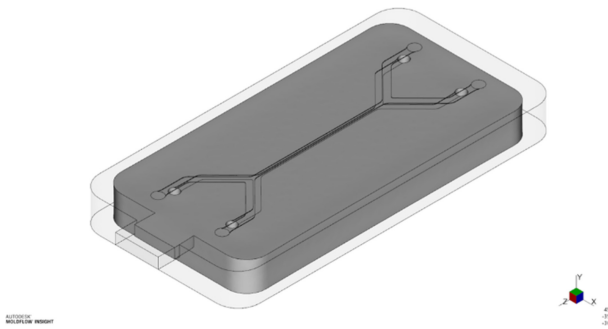


Fig. 9 Global deformation behavior of microfluidic chip

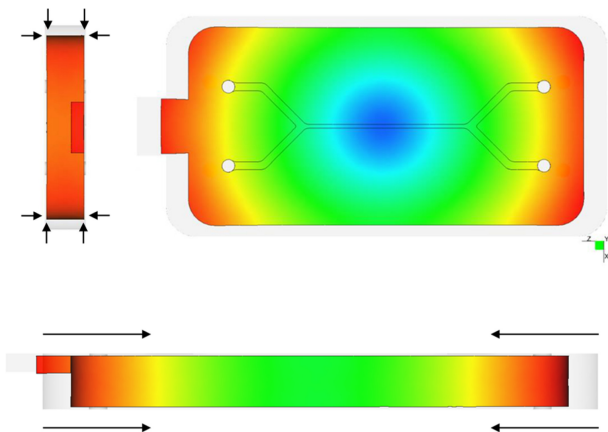


Fig. 10 Comparison of shrinkage deformation in X, Y, Z directions

않기 때문에 변형이 일정한 방향성을 띠게 된다. 일반적으로 플라스틱은 온도가 낮아질수록 수축하는 특성을 가지며, 이 과정에서 외부와 내부의 냉각 속도 차이가 변형의 원인이 된다.

냉각은 금형과 맞닿은 외부에서 먼저 시작되며, 표면이 빠르게 고화됨에 따라 외부층이 먼저 수축한다. 반면, 내부는 상대적으로 늦게 냉각되면서 더 많은 수축이 진행된다. 하지만 외부는 이미 고화된 상태이므로 내부의 수축을 충분히 보상할 수 없으며, 결과적으로 내부 물질이 중심부 방향으로 끌려가면서 변형이 발생하게 된다.

Fig. 10에서 확인할 수 있듯이, 변형은 Z 방향(길이)에서 가장 크게 나타났으며, 그 다음으로 X 방향(너비), Y 방향(두께) 순으로 진행되었다. 이는 일반적인 사출성형 플라스틱 부품에서 흔히 관찰되는 변형 특성과 일치하며, 냉각 과정에서의 응력 분포에 영향을 받는다. 특히 Z 방향에서는 유동 경로가 가장 길어 온도 변화가 복잡하게 이루어지며, 유동 끝단에서는 상대적으로 낮은 온도에서 고화가 진행된다. 이로 인해 잔류응력이 축적되면서 Z 방향의 변형이 더욱 두드러지게 나타난다. 또한, 치수가 큰 방향일수록 냉각 시간 차이가 커지고 내부 응력 분포가 불균형해지면서 변형이 더욱 강조되는 경향을 보인다[16].

이와 같은 변형 패턴은 공정 변수에 따라 변형량의 차이는 있었으나, 실험에 사용된 9가지 설계 조건 모두에서 일관되게 나타났다.

Table 3 Simulation results of global deformation

Run	Processing parameter				Response value Global deformation [mm]
	A	B	C	D	
1	1	1	1	1	0.1533
2	1	2	2	2	0.1557
3	1	3	3	3	0.1577
4	2	1	2	3	0.1576
5	2	2	3	1	0.1702
6	2	3	1	2	0.1514
7	3	1	3	2	0.1683
8	3	2	1	3	0.1506
9	3	3	2	1	0.1642
Optimum	1	3	1	3	0.1387

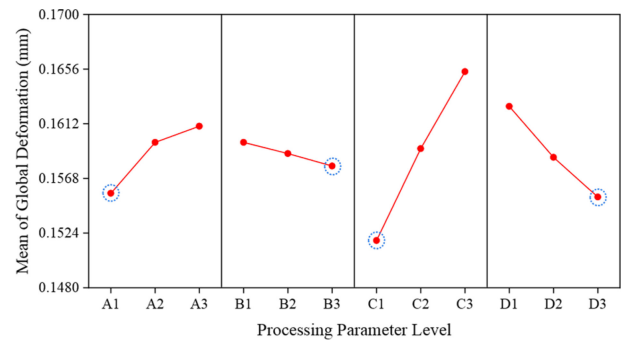


Fig. 11 Main effects plot for global deformation

3.1.2 변형 해석 결과

Table 3의 거시적 변형 시뮬레이션 결과, 최대 변형값은 0.1702 mm, 최소 변형은 0.1506 mm로 확인되었다. 이를 바탕으로 변형을 최소화할 수 있는 최적의 공정 변수 조합을 도출하기 위해 다구치 방법의 절차에 따라 주효과도(Main Effect Plot) 분석과 분산분석을 진행하였으며, 각 공정 변수의 영향과 기여도를 평가하였다.

Fig. 11의 주효과도 분석 결과, C(용융 온도)가 가장 큰 영향을 미치는 변수로 나타났으며, 그 뒤를 이어 D(보압 압력), A(충전 시간), B(금형 온도) 순으로 변형에 미치는 영향이 큰 것으로 확인되었다.

용융 온도(C)는 사출성형 공정에서 수지의 유동성과 응고 속도를 결정하는 가장 중요한 요소 중 하나로, 그 변화에 따라 제품의 수축률과 내부 응력이 크게 달라진다고 알려져 있다. 용융 온도의 수준이 낮을수록 변형이 감소하는 경향을 보였으며, 이는 용융 온도가 낮을 경우, 수지가 금형 내부에서 빠르게 응고하여 수축 시간이 단축되고 내부 응력이 균일하게 형성되어 변형이 억제되기 때문으로 해석된다. 그러나 용융 온도가 지나치게 낮으면 충전 불량 등의 문제가 발생할 수 있으므로, 변형 최소화를 위해 적절한 온도 조절이 필요하다.

Table 4 Response table for global deformation

Level	A	B	C	D
1	0.1556	0.1597	0.1518	0.1626
2	0.1597	0.1588	0.1592	0.1585
3	0.1610	0.1578	0.1654	0.1553
Delta	0.0055	0.0020	0.0136	0.0073
Rank	3	4	1	2
SS (E-2)	0.0049	0.0006	0.0279	0.0080
Contribution [%]	11.84	1.45	67.39	19.32

보압 압력(D)은 증가할수록 변형이 감소하는 경향을 보였다. 이는 보압 압력이 높을수록 수지가 금형 벽면에 더욱 강하게 밀착되어 수축이 효과적으로 억제되기 때문으로 해석된다. 기존 연구에서도 보압 압력이 불충분할 경우, 재료 밀도가 균일하게 유지되지 않아 비대칭적인 수축이 발생하며, 이로 인해 제품 변형이 증가하는 경향이 보고된 바 있다[17]. 다만, 보압 압력이 과도하게 높아지면 내부 응력이 증가하여 오히려 제품의 품질에 부정적인 영향을 미칠 수 있으므로, 최적의 보압 압력 범위를 설정하는 것이 중요하다.

충전 시간(A)은 낮은 수준에서 변형이 감소하는 경향을 보였으며, 이는 재료가 금형 내에서 흐를 시간이 줄어들면서 내부 응력의 비대칭적 분포가 완화되기 때문으로 해석된다. 반대로, 충전 시간이 길어질 경우 수지의 흐름이 불균일해지고, 특정 부위에서 과도한 응력이 발생하여 제품의 치수 정밀도가 저하될 수 있다고 보고된 바 있다[18]. 그러나 충전 시간이 너무 짧으면 충전이 불완전하게 이루어져 제품 내부에 결함이 발생할 가능성이 있으므로, 충전 시간을 적절하게 설정해야 한다.

금형 온도(B)가 높은 수준일수록 변형이 감소하는 경향을 보였으나, 다른 공정 변수들과 비교했을 때 변형에 미치는 영향은 상대적으로 적었다. 이는 금형 온도가 일정 수준 이상으로 설정되면 냉각 속도가 안정화되면서 수축 억제 효과가 포화 상태에 도달하여, 추가적인 온도 증가가 변형 저감에 미치는 영향이 크지 않기 때문으로 해석된다. 금형 온도가 너무 낮으면 불균일한 냉각으로 인해 수축 변형이 증가하지만, 일정 온도 이상에서는 변형 감소 효과가 저하된다고 보고된 바 있다[19].

분산분석 결과(Table 4)에 따르면, 용융 온도는 기여도가 67.39%로 가장 지배적인 영향을 미치는 변수로 확인되었다. 보압 압력의 기여도는 19.32%로, 변형 최소화에서 있어 중요한 보조적 역할을 하는 것으로 나타났다. 충전 시간은 기여도가 11.84%로, 보압 압력의 절반 정도의 영향을 미쳤다. 반면, 금형 온도는 기여도가 1.45%에 불과하여 거시적 변형 거동에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 확인되었다. 이러한 분석 결과를 바탕으로 거시적 변형을 최소화하는 최적의 공정 변수 조합은 A1-B3-C1-D3으로 도출되었다. 해당 조합은 기존 초기 설계에 포함되지 않은 새로운 변수 조합으로 변형량은 0.1387 mm로 나타났다. 이는 기존 최대 변형값(0.1702 mm) 대비 18.51% 감소한

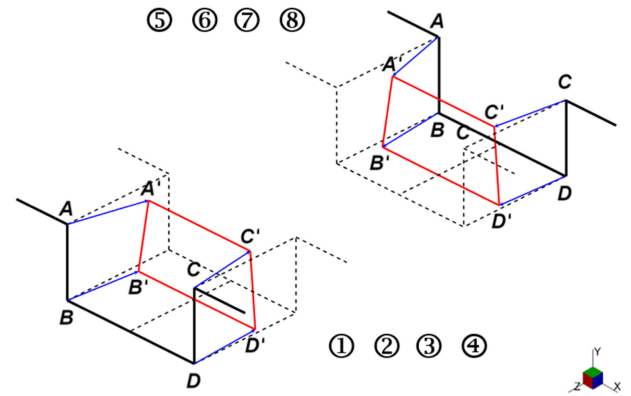


Fig. 12 Deformation behavior of microchannel cross-section at 8 measurement points

수준이며, 기존 최소 변형값(0.1506 mm)과 비교해도 7.9% 감소하여 변형 최소화 목표를 성공적으로 달성하였다.

3.2 미시적 변형 해석

3.2.1 변형 거동

마이크로 채널의 미시적 변형 전후의 좌표 분석 결과, 점 A, B, C, D는 모두 기본적으로 미세유체 칩의 중심 방향으로 이동하는 경향을 보였다. 특히 X 좌표에서 A와 C 지점의 변위가 B와 D 지점보다 더 크게 나타났으며, 이로 인해 단면이 Fig. 12와 같이 사다리꼴 형태로 변형되었다.

Y 좌표에서는 모든 지점이 하향 이동하는 경향이 관찰되는데, 이는 마이크로 채널이 칩의 중심선보다 상부에 위치하는 구조적 특성과 관련이 있다. 마이크로 채널의 깊이는 0.04 mm, 칩 전체 두께는 3 mm로 설정되었으므로, 채널은 칩 중심선(1.5 mm)보다 위쪽에 존재한다. 사출 성형 공정에서 칩이 전반적으로 수축할 때, 상부에 위치한 채널은 중심선을 향해 움직이며, 이로 인해 Y 좌표 방향으로 하향 변위가 발생한다. 이와 같은 현상은 칩 내부에서 균일하지 못한 온도 분포가 발생하고, 냉각 과정에서 수축량이 겉면과 내부가 다르게 나타나기 때문에 더욱 뚜렷하게 나타난다.

Z 좌표에서의 변위는 네 지점 모두에서 거의 동일한 수준을 보였고, 이에 따라 단면 전체가 평행하게 이동한 것으로 분석되었다. 이는 미세유체 칩의 냉각 시스템이 별도로 설정되지 않았고, 메쉬 구조가 Z 방향으로 대칭적이었기 때문으로 해석된다. 이는 사출 성형 과정에서 재료의 흐름이 Z 방향으로 균일하게 이루어졌음을 의미하며, 결과적으로 단면 전체가 동일한 방향으로 평행하게 이동하는 변형 거동을 초래하였다.

결과적으로, 위와 같은 미시적 변형 특성은 사출 성형 중 발생하는 온도 분포, 응력 분포, 그리고 채널의 구조적 위치 등이 복합적으로 상호 작용하여 나타나는 결과로 해석된다. 사출 성형 중 생기는 잔류응력은 마이크로 채널의 위치와 깊이에 따라 불균형적으로 형성되고, 이를 기반으로 채널 영역의 수축률이 주변 영역과 상이해진다. 또한 사출 압력과 보압 압력, 금형 온도,

Table 5 Total volume and volumetric deformation rate of microchannel

Run	Total volume [mm ³]	Volumetric deformation [%]
1	0.13751	2.4740
2	0.13763	2.3898
3	0.13753	2.4606
4	0.13745	2.5193
5	0.13733	2.6049
6	0.13769	2.3492
7	0.13752	2.4684
8	0.13743	2.5316
9	0.13730	2.6213
Optimum	0.13785	2.2332

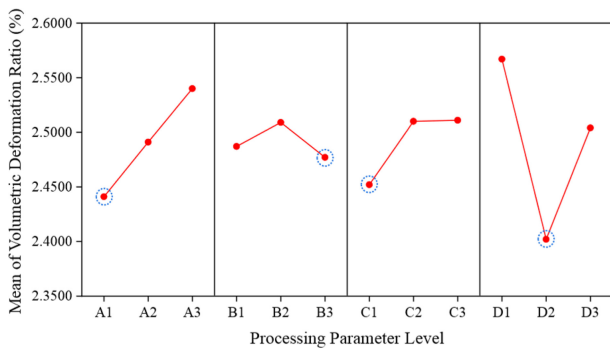


Fig. 13 Main effects plot for volumetric deformation rate of micro-channel

냉각 속도 등 공정 변수들은 채널 부위에 걸리는 응력 분포와 열 전달(Heat Transfer)을 좌우하여, 마이크로 채널 단면의 변형 양상을 결정하는 주요 요인이 된다.

3.2.2 변형 해석 결과

변형 전 마이크로 채널의 육면체 부피는 0.1410 mm³로 계산되었으며, 변형 후 부피는 4면체 6개의 부피 합으로 계산하였다. 이후 Table 5에 정리된 바와 같이 부피 변형률을 도출하였다. Fig. 13의 주효과도 분석 결과를 보면, 그래프의 기울기가 거시적 변형 결과를 전반적으로 반영하는 가운데 일부 공정 변수에서 상이한 특성을 보이는 것을 확인하였다. 충전 시간과 용융 온도의 경우, 낮은 수준에서 변형이 감소되는 경향이 거시적 변형 결과와 유사한 것으로 나타났다.

금형 온도의 경우, 그래프 기울기가 증가하다가 다시 낮아지는 형태로 나타났으며, 중간 수준에서 변형이 최대가 되는 특징을 보인다. 이러한 비선형적 변화는 금형 온도가 일정 범위를 넘어가면 더이상 냉각 효과가 지배적이지 않고, 대신 재료의 점도 변화나 유동성 개선이 주요 변수로 작용하기 때문으로 볼 수 있다. 결과적으로 중간 수준에서 금형 온도가 변형이 최대가 되었지만, 낮은 수준과 높은 수준만 비교하면 거시적 변형과

Table 6 Response table for volumetric deformation rate of micro-channel

Level	A	B	C	D
1	2.441	2.487	2.452	2.569
2	2.491	2.509	2.510	2.402
3	2.540	2.477	2.511	2.504
Delta	0.099	0.032	0.060	0.164
Rank	2	4	3	1
SS (E-2)	1.4699	0.1573	0.6991	4.1200
Contribution [%]	22.80	2.44	10.84	63.91

큰 차이를 보이지 않는다.

보압 압력에서는 기울기가 먼저 감소한 뒤 다시 증가하여, 중간 수준에서 변형량이 가장 낮게 나타나는 경향이 관찰된다. 이는 금형 온도와 달리 변형 최소값이 중간 수준에서 나타나므로, 단순히 낮은 수준과 높은 수준을 비교하기 어렵다. 보압 압력이 과도하게 높으면 사출품 내부에 과다한 응력 축적이 발생할 수 있으며, 지나치게 낮으면 충분한 보압 작용이 이루어지지 않아 수축 공정의 균일성이 저해될 가능성이 크다. 이러한 결과는 주어진 공정 변수 범위에 의해 나타났을 가능성이 있으나, 마이크로 채널 변형을 최소화하기 위해서는 보압 압력의 적정값을 세밀하게 설정할 필요가 있다.

Table 6의 분석 결과에 따르면, 미시적 변형에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 D(보압 압력)로 기여도가 63.91%로 나타났으며, A(충전 시간)은 22.80%의 기여도로 두 번째로 큰 영향을 미치는 변수로 확인되었다. 이는 보압 압력이 마이크로 채널과 같은 미시적 변형을 제어하는 데 핵심적인 역할을 하며, 충전 시간 또한 변형의 발생에 중요한 영향을 미친다는 것을 보여준다.

이 결과는 마이크로 채널 구조가 매우 작은 잔류응력 변화에도 민감하게 반응하기 때문에, 보압 압력이 마이크로 채널의 형상 안정성과 잔류응력 제어에 결정적인 역할을 한다는 점과 일치한다[20]. 보압 압력은 보압 절환 압력과 밀접하게 연관되어 있으며, 이는 사출 압력과도 깊은 관계가 있다. 따라서 보압 압력과 관련된 충전 시간도 중요한 요소로 작용하며, 보압 압력과 충전 시간이 서로 상호 보완적으로 작용하는 결과를 나타낸다.

C(용융 온도)와 D(금형 온도)는 각각 10.84%와 2.44%의 기여도를 보여 상대적으로 낮은 영향력을 보였다. 미시적 변형에서 용융 온도의 기여도는 거시적 변형에 비해 상대적으로 감소한다. 이는 용융 온도가 물질의 유동성에 영향을 주긴 하지만, 미세 구조에서의 잔류응력 분포에는 보압 압력에 비해 덜 민감하다는 점을 의미한다. 금형 온도 역시 변형에 간접적으로 작용하는 변수로서, 주어진 조건 하에서는 변화 폭이 제한적이다. 다만 매우 정밀한 마이크로 채널 구조인 경우 국부 냉각 속도 및 응력 분포가 미세하게 달라질 수 있어, 필요에 따라 충전 시간 및 보압 압력과 함께 고려하여 조정하는 방안이 유효할 것으로 보인다[21].

Table 7 Residual stress (Mises-hencky stress) simulation results

Type	Parameter combination				Mises-hencky stress [MPa]
Reference	A2	B2	C2	D2	12.790
Global	A1	B3	C1	D3	9.798
Local	A1	B3	C1	D2	9.230

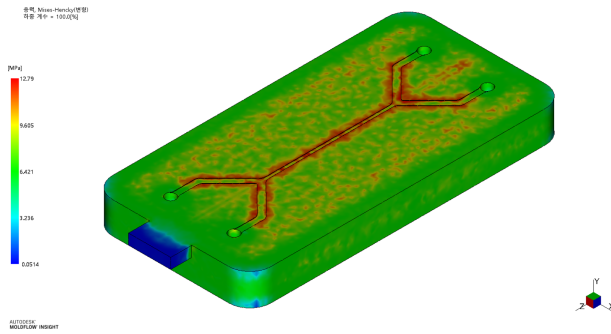


Fig. 14 Residual stress distribution under reference condition

미시적 변형의 최적 공정 변수 조합은 A1-B3-C1-D2로 나타났으며, 시뮬레이션 검증 결과, 이 조합에서의 부피 변형률은 2.2332%로 측정되었다. 이는 기존 최댓값인 2.6213% 대비 0.3881% 감소한 수치이며, 최솟값인 2.3492%와 비교했을 때도 0.1160% 더 감소하였다.

3.3 변형 최적화 검증

앞선 다구치 방법을 사용한 분석을 통해 거시적 변형과 미시적 변형을 각각 최소화하는 최적 공정변수 조합을 도출하였으며, 이를 통해 미세유체 칩 성형 시 변형이 응력과 밀접하게 연결되어 있음을 확인하였다. 그러나 이와 같은 최적 조건을 적용하더라도, 사출성형 공정 과정에서 발생하는 잔류응력(Residual Stress)이 재료의 항복응력을 초과할 경우 치명적인 치수 안정성 저하와 구조적 손상이 발생할 수 있다[25]. 이에 따라 도출된 최적 조건에서의 잔류응력을 분석하여, 실제 성형 과정에서 안전한 범위 내에 있는지 검증하고자 하였다.

Table 7과 Fig. 14에 제시된 결과를 살펴보면, 잔류응력은 주로 마이크로 채널 주변에 집중되어 나타난다. 기준 조건(A2-B2-C2-D2)에서의 잔류응력 최대값은 12.790 MPa로, 폴리카보네이트의 항복응력(약 60 MPa)의 1/3 이하 수준임을 확인하였다. 이는 기준 조건이 재료 물성 범위 내에서 충분히 안전하게 성형될 수 있음을 시사한다. 거시적 변형 최소화 조건(A1-B3-C1-D3)을 적용했을 때는 잔류응력이 9.798 MPa로 나타나 기준 조건 대비 23.39% 감소하였으며, 마이크로 채널 변형 최소화 조건(A1-B3-C1-D2)에서는 9.230 MPa까지 낮아져 기준 조건보다 27.83% 감소하는 것으로 확인되었다.

결과적으로, 미시적 변형 최소화를 위한 조건이 거시적 변형 최소화 조건보다 잔류응력을 더 효과적으로 줄이는 것으로 나타났다. 이는 마이크로 채널의 변형을 감소시키는 최적화 접근이

성형 과정에서의 비대칭적 응력을 보다 균일하게 분산시켜 구조적 안정성과 정확도를 높일 수 있음을 의미한다. 미세유체 칩에서는 마이크로 채널의 구조적 정확도가 전체 성능에 직결되므로, 이러한 점을 고려할 때 마이크로 채널의 변형 최소화 조건(A1-B3-C1-D2)이 성능 향상 및 안정성 확보에 더욱 적합하다고 할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 사출성형 미세유체 칩의 거시적 및 미시적 변형거동을 이해하고 공정 변수의 영향을 확인하기 위한 모델링 및 해석적 연구를 수행하였다. 이를 위하여 다구치방법을 사용하여 주요 공정변수들의 영향을 분석하고 변형을 최소화하는 공정변수 조합을 도출하였다. 이를 통하여 다음과 같은 주요 결과를 확인할 수 있었다.

(1) 거시적 변형 해석 결과, 칩은 균일한 형상을 유지하면서 중심부를 기준으로 수축 변형이 발생하여 일반적인 사출성형 제품에서 나타나는 경향과 유사한 결과를 보였다.

(2) 주어진 공정 변수 범위에서 용융온도는 거시적 변형에 가장 큰 영향을 미치는 변수이며 67.39%의 높은 기여도를 갖는다. 용융 온도가 높아질수록 수지의 유동성이 증가하여 충전과 압축 단계에서 보다 균일한 응력 분포를 형성함으로써 변형이 감소하였다. 최적 공정조건은 A1-B3-C1-D3이고, 이때의 변형량은 0.1387 mm로 기존 시뮬레이션 데이터 대비 7.9-18.51%의 변형 감소를 달성하였다.

(3) 미시적 변형 해석에서는 채널 단면이 사다리꼴 형태로 변화하며 평행 이동하는 양상이 관찰되었고, 채널 중심선에 가까워질수록 변형량이 감소하는 경향을 보였다.

(4) 미시적 변형의 최적 공정 조건은 A1-B3-C1-D2로 부피 변형률이 2.2332%로 나타났으며, 기존 시뮬레이션 데이터 대비 0.1160-0.3881% 추가 감소를 확인하였다. 또한 보압 압력과 이에 직결되는 충전 시간은 마이크로 채널의 구조적 특성상 잔류응력 및 변형 결과에 큰 영향을 미치는 요인으로 분석되었다.

(5) 금형 온도가 거시적 변형 및 마이크로 채널 변형에 미치는 영향은 각각 1.45%, 2.44%로 다른 공정 변수에 비해 기여도가 매우 낮았다.

(6) 미시적 변형을 최소화하는 A1-B3-C1-D2 조건이 잔류응력을 더욱 효율적으로 줄여 구조적 안정성과 정확도를 높이는 데 유리함을 확인하였다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2024-00357288).

REFERENCES

1. Ziółkowska, K., Stelmachowska, A., Kwapiszewski, R., Chudy, M., Dybko, A., (2013), Long-term three-dimensional cell culture and anticancer drug activity evaluation in a microfluidic chip, *Biosensors and Bioelectronics*, 40(1), 68-74.
2. Wu, J., He, Z., Chen, Q., Lin, J. M., (2016), Biochemical analysis on microfluidic chips, *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 80, 213-231.
3. Ren, K., Zhou, J., Wu, H., (2013), Materials for microfluidic chip fabrication, *Accounts of Chemical Research*, 46(11), 2396-2406.
4. Wang, X., Liu, Z., Fan, F., Hou, Ya., Yang, H., Meng, X., Zhang, Y., Ren, F., (2019), Microfluidic chip and its application in autophagy detection, *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 117, 300-315.
5. Fan, X. Y., Deng, Z. F., Yan, Y. Y., Shypko, A., Orel, V. E., Orel, V. B., Ivanova, D., Pilarsky, C., Tang, J., Chen, Z. S., Zhang, J. Y., (2022), Application of microfluidic chips in anticancer drug screening, *Bosnian Journal of Basic Medical Sciences*, 22(3), 302-314.
6. Gao, H., Yan, C., Wu, W., Li, J., (2020), Application of microfluidic chip technology in food safety sensing, *Sensors*, 20(6), 1792.
7. Guo, L., Feng, J., Fang, Z., Xu, J., Lu, X., (2015), Application of microfluidic "lab-on-a-chip" for the detection of mycotoxins in foods, *Trends in Food Science & Technology*, 46(2), 252-263.
8. Özyurt, C., Uludağ, İ., İnce, B., Sezgintürk, M. K., (2023), Lab-on-a-chip systems for cancer biomarker diagnosis, *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 226, 115266.
9. Su, C.-W., Su, W.-J., Cheng, F.-J., Liou, G.-Y., Hwang, S.-J., Peng, H.-S., Chu, H.-Y., (2022), Optimization process parameters and adaptive quality monitoring injection molding process for materials with different viscosity, *Polymer Testing*, 109, 107526.
10. Lan, X., Li, C., Yang, L., Xue, C., (2018), Deformation analysis and improvement method of the Ni-P mold core in the injection molding process, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 99, 2659-2668.
11. Chu, C.-P., Jiang, B.-Y., Weng, C., Jiang, F.-Z., (2014), Microchannel deformation of polymer chip in in-mold bonding, *International Polymer Processing*, 29(2), 245-251.
12. Wang Y, Weng C, Fei Z, Sun H, Jiang B., (2024), Enhancing structural replication of microfluidic chips: Parameter optimization and mold insert modification, *Polymer Engineering & Science*, 64(5), 2082-2095.
13. Attia, U. M., Marson, S., Alcock, J. R., (2009), Micro-injection moulding of polymer microfluidic devices, *Microfluidics and Nanofluidics*, 7, 1-28.
14. Moayyedian, M., Abhary, K., Marian, R., (2018), Optimization of injection molding process based on fuzzy quality evaluation and Taguchi experimental design, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 21, 150-160.
15. Duczek, S., Duvigneau, F., Gabbert, U., (2016), The finite cell method for tetrahedral meshes, *Finite Elements in Analysis and Design*, 121, 18-32.
16. Azdast, T., Hasanzadeh, R., (2019), Experimental assessment and optimization of shrinkage behavior of injection molded polycarbonate parts, *Materials Research Express*, 6(11), 115334.
17. Otieno, S. O., Mwema, F. M., Mharakurwa, E. T., Jen, T. C., (2024), Fuzzy assessment of process parameter interactions on warpage defect modeling in plastic injection molding, *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 1-14.
18. Zhao, J., Cheng, G., (2016), An innovative surrogate-based searching method for reducing warpage and cycle time in injection molding, *Advances in Polymer Technology*, 35(3), 288-297.
19. Momeni, V., Hufnagl, M., Shahroodi, Z., Gonzalez-Gutierrez, J., Schuschnigg, S., Kukla, C., Holzer, C., (2023), Research progress on low-pressure powder injection molding, *Materials*, 16(1), 379.
20. Weng, C., Sun, H., Lai, J., Liu, J., Zhai, Z., (2021), Experimental investigation and molecular dynamics simulations of the effect of processing parameters on the filling quality of injection-molded micropillars, *Polymer Engineering & Science*, 61(10), 2427-2436.
21. Nian, S. C., Wu, C. Y., Huang, M. S., (2015), Warpage control of thin-walled injection molding using local mold temperatures, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 61, 102-110.

**Jiwon Park**

M.S. candidate in the School of Mechanical Engineering, Chonnam National University. His research interest is polymer injection molding.

E-mail: parkji9694@gmail.com

**Bong-Kee Lee**

Professor in the School of Mechanical Engineering, Chonnam National University. His research interests include multiscale polymer processing molding technologies and advanced nanocomposites.

E-mail: b.lee@chonnam.ac.kr

공작기계 에너지 효율화를 위한 국제표준 기반 에너지 소비 평가 시스템 개발

Development of an International Standards-based Energy Consumption Evaluation System for Enhancing Machine Tool Energy Efficiency

김경호^{1,#}, 오정석¹, 이성철¹, 이재학²

Gyungho Khim^{1,#}, Jeong Seok Oh¹, Sungcheul Lee¹, and Jaehak Lee²

¹ 한국기계연구원 자율제조연구소 초정밀장비연구실 (Department of Ultra Precision Machines & Systems, Research Institute of Autonomous Manufacturing, Korea Institute of Machinery & Materials)

² 한국생산기술연구원 자율형제조공정연구부 (Autonomous Manufacturing & Process R&D Department, Korea Institute of Industrial Technology)

Corresponding Author / E-mail: gyungho@kimm.re.kr, TEL: +82-42-868-7105

ORCID: 0000-0002-1130-3176

KEYWORDS: Energy efficiency (에너지 효율), Machine tools (공작기계), ISO 14955 (국제표준 14955), Energy consumption evaluation (에너지 소비 평가), Carbon neutrality (탄소중립)

As the global manufacturing industry moves toward carbon neutrality, improving energy efficiency of machine tools has become essential. Although machine tools contribute significantly to industrial energy consumption, systematic methods for evaluating their energy consumption remain insufficient. To address this issue, this study developed an energy consumption evaluation system based on ISO 14955, the international standard for machine tool energy efficiency. The proposed system enabled a detailed analysis of energy usage patterns in different operating states, identifying key areas for energy reduction. The developed system could measure energy consumption of individual machine tool components in various operating states using power meters and automatically generates reports. This allows users to identify which components and operating states consume the most energy. We tested and validated this system on three different machine tools and analyzed strategies for reducing energy consumption. The developed evaluation system can help machine tool manufacturers integrate it into their equipment, develop energy-efficient technologies, and contribute to sustainable manufacturing.

Manuscript received: March, 6 2025 / Revised: April 7, 2025 / Accepted: April 10, 2025

1. 서론

기후변화 완화를 목표로 2050년 탄소중립이 글로벌 의제로 부상하면서, 에너지 및 운송 분야뿐만 아니라 제조 산업에서도 에너지 절약과 효율성 향상이 중요한 과제로 떠오르고 있다. 제조 산업에서 핵심적인 역할을 하는 공작기계는 전체 산업 에너지 소비의 약 5-10%를 차지하는 것으로 추정되며, 탄소중립 및 친환경화를 실현하기 위해 공작기계의 에너지 사용을 보다 효율적으로 관리하는 것이 필수적이다 [1,2].

Mori [3]는 머시닝센터 절삭 공정에서 소비되는 에너지를

측정하고 절삭 조건을 수정하는 것에 의해 에너지 저감을 달성하고자 하였으며, Holakup [4]는 절삭 공작기계에서 에너지 효율성을 향상시키기 위한 방안을 설계자와 사용자 입장에서 분석하고, JIS (Japanese Industrial Standards) 표준시편에 대해 에너지를 측정하고 분석하는 기법을 제시하였다. Li [5]는 CNC 가공시스템의 개별 공정에서 발생하는 탄소 배출량을 정량적으로 분석하는 방법을 제시하였다. 한편, 글로벌 공작기계 선도 기업인 DMG MORI, MAZAK, OKUMA 등은 EMO (Exposition Mondiale de la Machine Outil)와 같은 국제 공작기계 전시회를 통해 자사의 친환경 공작기계 기술 소개 및 이 기술 적용 후 에너지 저감량

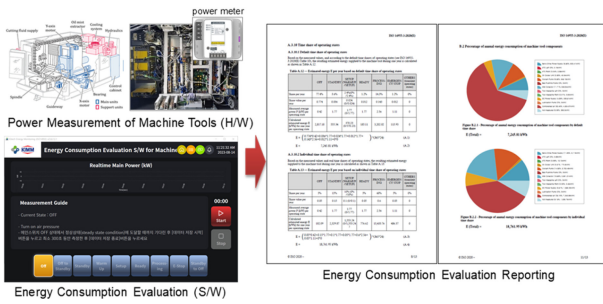


Fig. 3 Energy consumption evaluation system and reporting

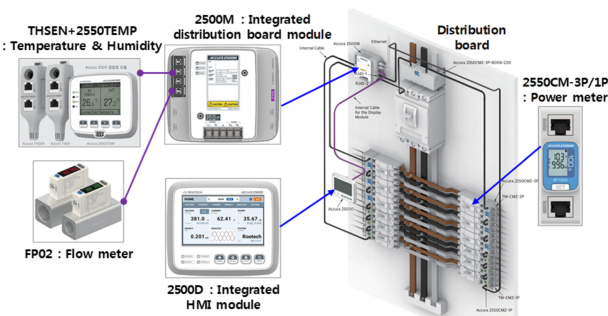


Fig. 4 Hardware configuration of the energy consumption evaluation system

(kW), 유효전력량(kWh) 등의 측정이 가능하며, 측정정밀도는 유효전력 기준으로 99% (ICE 61557-12 Class 0.5) 이상이다. 공작기계 구성품의 용량에 맞춰 파워미터 세부모델을 선택하여 설치할 수 있으며, 설치된 파워미터를 세팅하고 통합하여 데이터를 수집할 수 있도록 분전반 통합 모듈인 Accura 2500M과 Accura 2500D도 같이 설치하였다. Accura 2500M 모듈은 랜 케이블을 통해 다수의 파워미터 정보를 수집하며, 이렇게 수집된 정보를 HMI 모듈인 Accura 2500D를 통해 디스플레이 화면으로 사용자에게 제공한다.

압축 공기에 의한 전기 에너지는 유량을 측정한 후 압축 공기에 대한 전기 에너지 등가 계수를 곱해 환산하는 방법을 이용하였다[11]. 이 값은 0.11-0.13 kWh/m³으로, 중앙 공급 장치에서 공작기계까지 1m³의 압축 공기를 공급하는데 필요한 전기 에너지가 0.11-0.13 kWh(본 논문에서는 상단값인 0.13 사용)라는 것을 의미한다. 이때 압축 공기의 유량은 디지털 유량계(TPC사 FP02 시리즈)를 사용하여 측정하였다.

소비 에너지를 측정하는 동안의 환경온도 및 습도 데이터도 측정하여 보고서에 같이 포함하기 위해 Rootech사의 Accura THSEN과 Accura 2550TEMP를 이용하였다. 분전반 각 구성품의 전력 및 압축 공기의 유량, 환경온도, 습도 데이터는 Accura 2500M과 2500D를 거쳐 최종적으로 사용자 PC에 저장된다. 이렇게 구축된 시스템의 에너지 소비량을 측정하고 분석 및 리포팅하기 위한 소프트웨어를 개발하였다.

소프트웨어는 Fig. 5와 같이 설정, 일반측정, 표준 기반 측정, 표준 기반 측정보고서의 4가지 기능으로 구성되어 있다. 설정

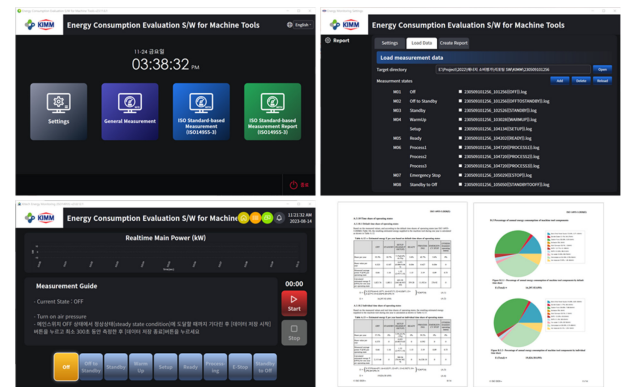


Fig. 5 Software for the energy consumption evaluation system

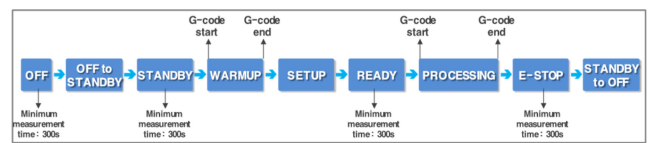


Fig. 6 Energy measurement process in each operating state

메뉴에서는 공작기계 각 구성품에 대한 전력 측정 유무, 파워미터 및 온도 센서 설정, 데이터 수집 간격, 리포팅에 필요한 정보 설정 등을 수행하며, 일반 측정에서는 각 동작 상태에서의 전력을 수동으로 측정하고 기존에 측정한 데이터를 로딩하여 화면에 출력할 수 있다. 표준 기반 측정에서는 ISO 14955-3에 따른 일련의 측정과정을 수행하고 이후 측정보고서를 생성하게 된다.

ISO 14955-3에 따른 표준 기반 측정에서는 Fig. 6에서와 같이, 공작기계 각 동작 상태를 OFF(전원 종료), OFF to STANDBY(전원 종료에서 대기), STANDBY(대기), SETUP(셋업), READY(준비), PROCESSING(공정작업), EMERGENCY-STOP(비상정지), STANDBY to OFF(대기에서 전원 종료)로 나누어 각 동작 상태에서의 전력을 측정하게 된다. 이때 OFF, STANDBY, READY, EMERGENCY-STOP 상태에서는 최소 300초 동안 측정이 이루어져야 하며, 나머지 상태에서는 실제 동작이 이루어지는 시간 동안 측정하면 된다. 이때 SETUP 공정의 일부인 WARMUP(예열) 동작 상태 및 PROCESSING 동작 상태에서는 G-code에 의해 수행되므로 G-code 처음과 끝에 시작과 종료를 표시하는 M코드를 삽입하여 자동 측정을 수행하고 나머지 동작상태에서는 수동 측정을 하였다.

이런 과정으로 각 동작 상태마다의 전력 측정값이 데이터 파일로 저장되고, 리포팅 단계에서 이 데이터 파일을 로딩하여 각 동작 상태에서의 평균전력(kW)을 계산하고, 각 동작 상태가 1년 중 차지하는 시간(h)을 고려하여 연간 소비되는 에너지(kWh)를 산출하게 된다.

3.2 평가 시스템 검증

구축된 소비 에너지 평가시스템의 측정 정확도를 평가하기 위해 AL6061 재질의 JIS 시편[13]을 가공하면서 고사양·고가형의

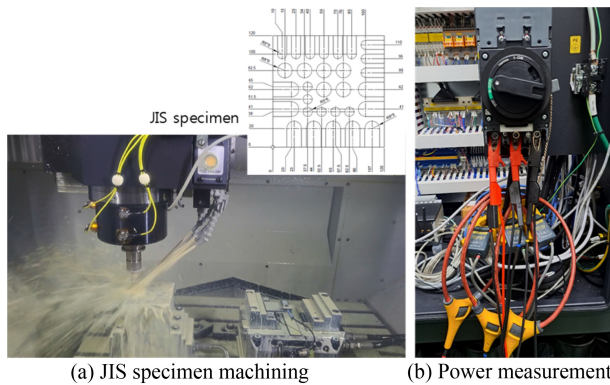


Fig. 7 Photographs for JIS specimen machining and power measurement

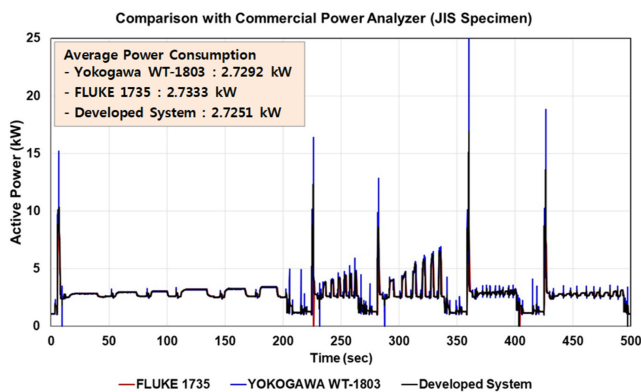


Fig. 8 Comparison of power measurements with commercial power analyzers

전력분석계(Yokogawa WT-1803, FLUKE 1735)와 비교 평가를 수행하였다. Figs. 7(a)와 7(b)는 각각 JIS 시편을 가공하고 상용 전력분석계로 측정하는 사진을 보여준다.

Fig. 8은 JIS 시편을 가공하는 500초 동안 소비전력을 측정한 그래프를 보여주고 있으며, 평균 소비전력은 Yokogawa 제품의 경우 2.7292 kW, FLUKE 제품의 경우 2.7333 kW, 개발 시스템의 경우 2.7251 kW로 측정되어 Yokogawa 제품과는 0.15%, FLUKE 제품과는 0.3% 차이만을 보이고 있다.

Table 1은 같은 실험을 총 10번 반복한 결과로, 평균값 기준으로 측정 정확도는 WT-1803에 대해서는 99.91%, FLUKE 1735에 비해서는 99.75%의 측정 정확도를 보이고 있어, 공작기계 제조사 보급을 목적으로 경제적인 가격으로 개발된 에너지 소비 평가 시스템을 충분히 신뢰할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 공작기계 에너지 소비량 분석 및 효율화 방안

4.1 머시닝센터 대상 에너지 소비량 측정 및 분석

개발된 에너지 소비 평가 시스템을 상용 공작기계 대상으로 적용 분석하였다. Fig. 9와 Table 2는 3축 머시닝센터 분전반에

Table 1 Comparison of average power measurement results with commercial power analyzers

No.	Developed system [kW]	Commercial power analyzer [kW]		Measurement accuracy [%] with respect to	
		YOKOGAWA WT-1803	FLUKE 1735	YOKOGAWA WT-1803	FLUKE 1735
1	2.72513	2.72921	2.73330	99.85	99.70
2	2.74300	2.74075	2.74509	99.92	99.92
3	2.75308	2.75267	2.76207	99.99	99.67
4	2.76627	2.76461	2.76460	99.94	99.94
5	2.74458	2.74489	2.76179	99.99	99.38
6	2.73318	2.73543	2.74379	99.92	99.61
7	2.74435	2.74165	2.74339	99.90	99.97
8	2.75825	2.75918	2.76220	99.97	99.86
9	2.75804	2.75409	2.77008	99.86	99.57
10	2.76551	2.76030	2.76873	99.81	99.88
Mean				99.91	99.75

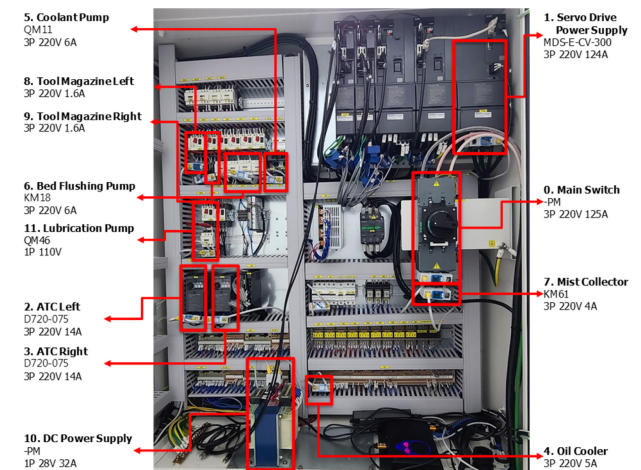


Fig. 9 Installation locations of power meters

설치된 파워미터 및 그 위치를 보여주고 있다. 메인 스위치(Main Switch)는 공작기계 전체에 입력되는 전원이고, 그 외 각 구성품인 서보 드라이브(Servo Drive), 자동 공구 교환장치(ATC), 오일 쿨러(Oil Cooler), 쿨런트 펌프(Coolant Pump), 미스트 컬렉터(Mist Collector) 등 총 12개 위치에 파워미터를 설치하였다. AL6061 재질의 JIS 시편을 가공하면서 각 동작 상태에서의 전력을 측정하고 연간 표준 사용시간을 적용하여 연간 에너지 소비량을 분석하였다.

각 동작 상태에서의 연간 시간 분량은 Table 3와 같이 ISO 14955-3에 따른 기본 시간 분량(Default time share)을 사용하였다. 이 값은 기본적으로 1년 365일, 하루 24시간 연속 가동하는 경우를 가정하여 제시된 값이다. 만약 주말 제외하고

Table 2 Machine tool components for power measurements

Unit ID	Components
0	Main switch
1	Servo drive power supply
2	ATC left
3	ATC right
4	Oil cooler
5	Coolant pump
6	Bed flushing pump
7	Mist collector
8	Tool magazine left
9	Tool magazine right
10	DC power supply
11	Lubrication pump

연간 261일, 하루 8시간만 가동하는 경우는 Table 4와 같이 이를 고려하여 기본 시간 분량을 재산정해야 한다. 또한 1년 중 가동하는 정확한 시간 분량을 알고 있다면 기본 시간 분량 대신 사용해야 한다. Table 3에서 OTHERS는 Fig. 6에서 OFF to STANDBY, STANDBY to OFF와 같은 과도(Transient) 구간을 의미하며 일반적으로 이 시간은 너무 짧기 때문에 소비 에너지 계산에 영향을 주지 않는다.

공작기계 각 구성품 및 동작 상태에 대해 전력을 측정하고, 이에 대한 시간 분량을 알고 있다면 연간 에너지 소비량은 식 (1)과 같이 계산된다. E 는 연간 에너지 소비량(kWh), P 는 각 동작 상태에서의 시간에 대한 평균 전력(kW), s 는 각 동작 상태에서의 연간 시간(h), i 는 각 동작 상태(OFF, STANDBY, ..., E-STOP, OTHERS)를 의미한다.

$$E = \sum (P_i \times s_i) \quad (1)$$

Table 5는 공작기계 각 구성품에 대해서 동작 상태마다 계산된 연간 에너지 소비량을 보여준다. 압축 공기는 유량을 측정하여 전기에너지로 환산하였으며, 메인 스위치에서 측정된 값과 합산하여 전체 소비 에너지를 계산하였다. 단, 설치공간의 제약 등으로 인해 공작기계를 구성하는 모든 구성품에 대해 파워미터를 설치하지 못했기 때문에 메인 스위치에서 측정한 값과 나머지 구성품에서 측정한 값의 합 사이에는 차이가 발생하며, 이를 Not Measured로 표시하였다. 이에 해당하는 구성품으로는 제어기 박스의 쿨링팬, 좌우 톨매거진용 모터, 슬레노이드 밸브 등이 있다.

이 장비의 경우, 전체 에너지 소비량은 18,762 kWh, 메인 스위치에서는 11,416 kWh, 압축 공기에서는 7,346 kWh가 소비되고 있으며, Not Measured는 약 8.19%로 이는 전체 소비에너지의 8.19%에 해당하는 1,536 kWh에 대해서는 측정하지 못한 것을 의미한다. Fig. 10은 이를 원형 차트로 정리한 것으로, 압축

공기에서 가장 많은 에너지(39.15%)가 소비되는 사실이 주목할 만하며, 그 다음으로 미스트 컬렉터(18.98%), 쿨러 펌프(14.52%), 서보 드라이브(11.26%) 순으로 에너지를 소비하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 11은 각 구성품들에 대해 각 동작 상태별로 소비한 연간 에너지 소비량을 하나의 그래프로 그린 것이다. 구성품 중에는 이미 설명한 바와 같이 압축 공기가 가장 많은 에너지를 소비하고 있는데, 이를 동작 상태별로 살펴보면, PROCESSING 구간에서 가장 많은 에너지를 소비하고 있으며 그 다음이 STANDBY, SETUP, READY 순이다. 압축 공기는 오일-에어 윤활, 스펀들 이물질 방지, 클램핑, 청소 등 각 동작상태에서 다양한 용도로 사용되고 있기 때문에 Table 3의 기본 시간 분량에 비례하는 동작 상태 순서대로 에너지를 많이 소비하는 것을 알 수 있다. 미스트 컬렉터의 경우도 비슷한 이유로, 가장 많은 에너지 소비는 PROCESSING에서 발생하며, 그 다음이 STANDBY, SETUP 순이다. 쿨러 펌프는 특성상 가공이 이루어지는 PROCESSING 상태에서 모든 에너지가 소비되고 있으며, 서보 드라이브도 각 축을 구동하는 PROCESSING 상태에서 대부분의 에너지가 소비되고 있다.

Fig. 12는 연간 261일, 하루 8시간 가동 조건(Table 4)에 대해 계산한 에너지 소비량을 보여주는 것으로, 연간 소비 에너지는 연속 가동하는 경우(18,762 kWh)에 비해 상당히 작아진 7,246 kWh로 평가되었다. 이 장비의 경우 실제 가공이 이루어지지 않는 OFF 상태에서도 압축 공기가 작동하여 에너지가 매우 많이 소비된다는 알 수 있으며, 에너지 저감을 위해서는 이 부분에 대한 개선이 필요해 보인다.

추가 분석을 위해 다른 제조사 및 타입의 공작기계 2종에 대해서도 JIS 가공을 하면서 에너지 소비량을 측정하였다. Figs. 13과 14는 각각 공작기계 II와 III에 대해서 연간 에너지 소비량 평가 결과만을 최종 정리한 것이다. 이때 기본 시간 분량은 1년 내내 가동하는 Table 3의 가동 조건을 이용하였다.

공작기계 II(머시닝센터)는 압축 공기에서 가장 많은 에너지를 소비하고 있으며, 그 다음이 쿨링 유닛, 미스트 컬렉터, 서보 드라이브, 쿨러 펌프 순이다. Table 3에서 보는 바와 같이 각 동작 상태에 따른 기본 시간 분량이 PROCESSING, STANDBY, SETUP 순서이므로, 에너지 소비량도 이 순서대로 많이 소비되고 있으며, 미스트 컬렉터와 서보 드라이브는 특성상 대부분의 에너지를 PROCESSING에서 사용하는 것을 확인할 수 있다.

공작기계 III(탭핑센터)의 경우, 구성품에서는 서보 드라이브, 압축 공기, 쿨러 펌프, 미스트 컬렉터 순으로 에너지를 많이 소비하며, 동작 상태에서는 PROCESSING과 STANDBY, SETUP에서 에너지를 많이 소비하는 것을 알 수 있다. 참고로, 이 두 장비(공작기계 II, III)의 경우 OFF 상태에서는 압축 공기가 사용되지 않기 때문에 Table 4의 가동 조건에서 에너지 소비량은 절대 값만 다를 뿐 경향은 Table 3의 조건과 동일하다.

Table 3 Default time share of operating states (Year-round operation)

	OFF	STANDBY	SETUP	READY	PROCESSING	E-STOP	OTHERS
Default time share [%]	5	15	10	5	60	5	0

Table 4 Default time share of operating states (261-day, 8-hour operation per day)

	OFF	STANDBY	SETUP	READY	PROCESSING	E-STOP	OTHERS
Default time share [%]	77.36	3.58	2.38	1.19	14.30	1.19	0.00

Table 5 Energy consumption of machine tool components and operating states

	OFF	STANDBY	SETUP	READY	PROCESSING	E-STOP	OTHERS	Total	Ratio [%]
Total consuming energy	182.1	2329.9	1553.2	776.6	13433.8	486.4	0.0	18762.0	100.00
Main switch	0.0	1176.6	784.4	392.2	8758.9	304.1	0.0	11416.3	60.85
Servo drive power supply	0.0	131.7	87.8	43.9	1848.6	0.0	0.0	2112.0	11.26
ATC left	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	0.0	0.0	0.7	0.00
ATC right	0.0	0.0	0.0	0.0	12.1	0.0	0.0	12.1	0.06
Oil cooler	0.0	27.0	18.0	9.0	107.4	9.0	0.0	170.5	0.91
Coolant pump	0.0	0.0	0.0	0.0	2723.5	0.0	0.0	2723.5	14.52
Bed flushing pump	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00
Mist collector	0.0	561.6	374.4	187.2	2250.7	187.2	0.0	3561.2	18.98
Tool magazine left	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00
Tool magazine right	0.0	0.0	0.0	0.0	3.5	0.0	0.0	3.5	0.02
DC power supply	0.0	205.2	136.8	68.4	837.4	48.3	0.0	1296.0	6.91
Lubrication pump	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00
Not measured	0.0	251.1	167.4	83.7	974.9	59.5	0.0	1536.8	8.19
Compressed air	182.1	1153.2	768.8	384.4	4674.9	182.2	0.0	7345.7	39.15

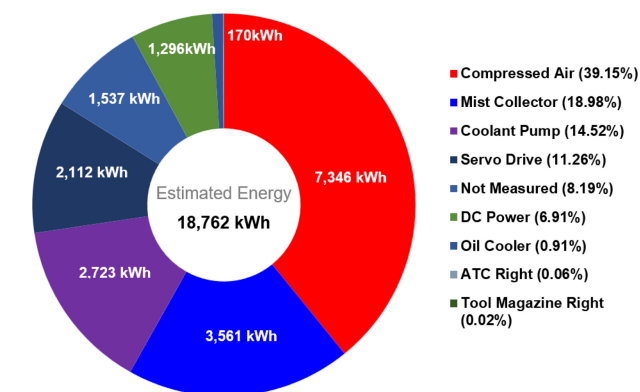


Fig. 10 Annual energy consumption of each component

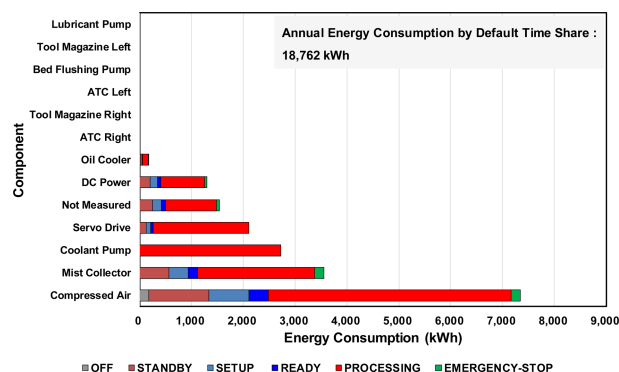


Fig. 11 Annual energy consumption of each component by operating states - Machine tools I (Year-round operation: Table 3)

4.2 에너지 효율화 방안

지금까지 서로 다른 세 종류의 공작기계에서 에너지 소비량을 살펴본 결과, 압축 공기, 미스트 컬렉터, 쿨런트 펌프, 쿨링 유닛, 서보 드라이브가 주요 에너지 소비원으로 나타났다. 연속 가동하는 Table 3의 기본 시간 분량을 기준으로 할 때, 동작 상태별로는 실제 가공이 이루어지는 PROCESSING이 60%, 나머지 비가공구간이 40%를 차지하고 있다. 에너지 소비량 계산식

에서 볼 수 있듯이 에너지 저감을 위해서는 각 구성품들의 평균 소비전력을 줄이든지, 사용시간을 줄이면 된다. PROCESSING 구간에서는 위와 같은 주요 에너지 소비원들이 모두 작동하기 때문에 현실적으로 에너지 저감이 쉽지 않다. 이 구간에서 에너지 저감을 위해서는 필수적으로 사용되는 구성품인 미스트 컬렉터, 쿨런트 펌프, 쿨링 유닛 등에 대한 에너지 저감형 고효율화 기술(고효율 제어기, 유량 가변 제어 등) 개발이 필요하고,

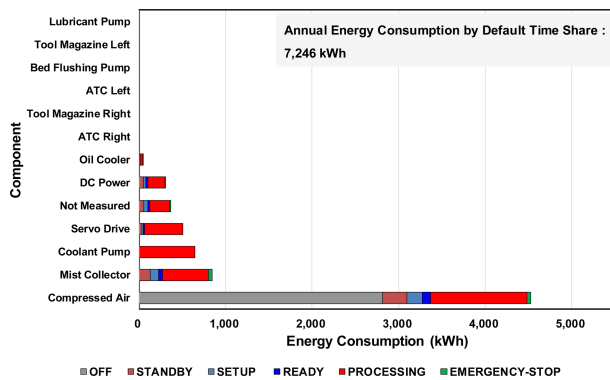


Fig. 12 Annual energy consumption of each component by operating states - Machine tools I (261-day, 8-hour operation per day: Table 4)

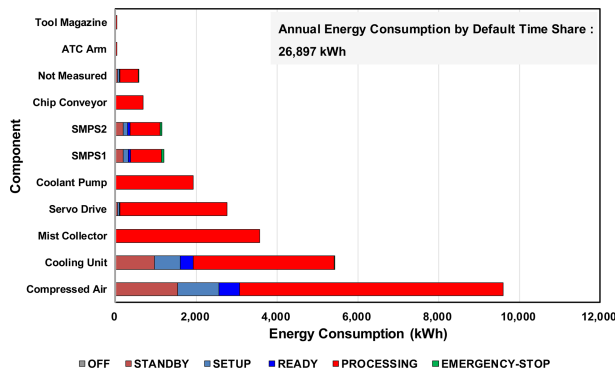


Fig. 13 Annual energy consumption of each component by operating states - Machine tools II

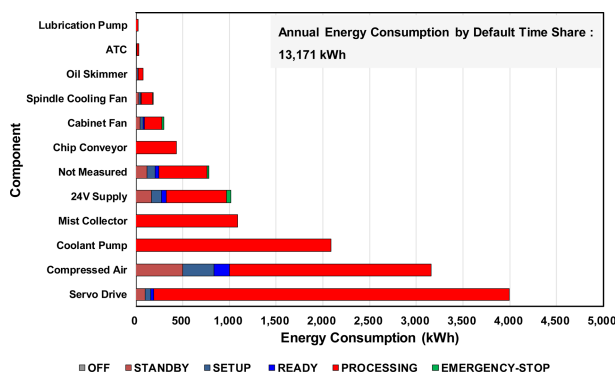


Fig. 14 Annual energy consumption of each component by operating states - Machine tools III

소비에너지 예측을 기반으로 한 공정 최적화 기술 개발이 필요할 것으로 판단된다. 실제 가공이 이루어지지 않는 STANDBY나 SETUP 구간에서는 구성품들의 운영 최적화(대기전력 차단 또는 절전 등)를 통해 에너지 저감을 달성할 수 있을 것이다. 또한 대부분 공작기계에서 가장 큰 에너지 소비원인 압축 공기의 소모량 저감을 위한 대책(유량 제어, 누출 차단, 불필요시 자동 차단 등)이 요구된다.

5. 결론

본 논문에서는 글로벌 탄소중립에 대응하고 공작기계 에너지 소비 효율화를 실현하기 위해 국제표준(ISO 14955)을 기반으로 한 공작기계 에너지 소비 평가 시스템을 개발하고 서로 다른 타입의 공작기계를 대상으로 실제 소비 에너지 평가 및 분석을 수행하였다. 본 논문의 결과를 간단히 정리하면 다음과 같다.

- (1) 국내 공작기계 제조사에 보급을 목적으로 국제표준에 기반한 공작기계 에너지 소비 평가 시스템을 구축하였으며, 개발 시스템은 고사양의 상용 전력 분석기와 비교 결과 99.7% 이상의 측정 정확도를 보이고 있다.
- (2) 국제표준에 기반한 전력 측정 및 에너지 계산을 위한 소프트웨어를 개발하였으며, 이를 통해 소비 에너지 산출 및 공작기계 에너지 효율화를 위한 분석을 수행할 수 있다.
- (3) 서로 다른 세 종류의 공작기계에 대해 에너지 소비량을 분석한 결과 압축 공기, 미스트 컬렉터, 쿨런트 펌프, 쿨링 유닛, 서보 드라이브가 주요 에너지 소비원으로 나타났다.
- (4) 공작기계 에너지 저감을 위해 주요 에너지 소비원의 고효율화 기술, 공정 최적화 기술 및 대기전력 최적화 기술 개발이 요구된다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 논문은 산업통상자원부 기계·장비산업 핵심기술 개발사업의 지원을 받아 연구되었음(Nos. 20018076 and 00416035).

REFERENCES

1. Denkena, B., Abele, E., Brecher, C., Dittrich, M., Kara, S., Mori M., (2020) Energy efficient machine tools, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 69(2), 646-667.
2. Sihag, N., Sangwan, K., (2020), A systematic literature review on machine tool energy consumption, Journal of Cleaner Production, 275(1), 123125.
3. Mori, M., Fujishima, M., Inamasu, Y., Oda, Y., (2011), A study on energy efficiency improvement for machine tools, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 60(1), 145-148.
4. Holkup, T., Vyroubal, J., Smolik, J., (2013), Improving energy efficiency of machine tools, Proceedings of the 11th Global Conference on Sustainable Manufacturing, 125-130.
5. Li, C., Tang, Y., Cui, L., Li, P., (2015), A quantitative approach to analyze carbon emissions of CNC-based machining systems, Journal of Intelligent Manufacturing, 26, 911-922.

6. MAKINO, ATHIUM. <https://www.makino.co.jp/getmedia/c0b1a3f4-48e2-4567-990c-2cbc50af7efb/AthiumPressRelease.pdf>, Japanese.
7. DMG MORI, GX-green transformation. <https://en.dmgmori.com/company/sustainability>
8. MAZAK, Mazak go green strategy. <https://www.mazakeu.co.uk/machines-technology/technology/go-green>
9. OKUMA, ECO suite plus. <https://www.okuma.co.jp/english/solution/ecosuite.php>
10. ISO 14955-1, (2017), Machine tools - Environmental evaluation of machine tools - Part 1: Design methodology for energy-efficient machine tools, second edition.
11. ISO 14995-2, (2018), Machine tools - environmental evaluation of machine tools - part 2: Methods for measuring energy supplied to machine tools and machine tool components, first edition.
12. ISO 14995-3, (2020), Machine tools - environmental evaluation of machine tools - part 3: Principles for testing metal-cutting machine tools with respect to energy efficiency, first edition.
13. JIS TS B 0024-1, (2010), Machine tools – test methods for electric power consumption – part 1: machining centers.



Gyungho Khim

Principal researcher in the Department of Ultra-precision Machines and Systems, Korea Institute of Machinery & Materials (KIMM). His research interests are precision machine design, error measurement, and compensation.

E-mail: gyungho@kimm.re.kr



Jeong Seok Oh

Principal researcher in the Research Institute of Autonomous Manufacturing, Korea Institute of Machinery & Materials (KIMM). His research interests are precision machines and metrology.

E-mail: ojs6114@kimm.re.kr



Sungcheul Lee

Principal researcher in the Department of Ultra-precision Machines and Systems, Korea Institute of Machinery & Materials (KIMM). His research interests are the mechanism design of machine tools and parallel mechanisms.

E-mail: sclee@kimm.re.kr



Jaehak Lee

Principal Researcher in the Autonomous Manufacturing & Process R&D Department, Korea Institute of Industrial Technology (KITECH). His research interests are the simulation and control of machine tools.

E-mail: ljh1125@kitech.re.kr

양성자 교환막 연료전지의 사형 유로 깊이에 따른 NaCl 수용액의 영향

Effects of NaCl Solution on Proton Exchange Membrane Fuel Cell with Serpentine Flow Channel of Different Depths

송동근¹, 유호준¹, 김정수¹, 홍기원¹, 정도영¹, George Ilhwan Park^{2,#}, 조구영^{1,#}
Dong Kun Song¹, Ho Jun Yoo¹, Jung Soo Kim¹, Ki Won Hong¹, Do Young Jung¹, George Ilhwan Park^{2,#}, and Gu Young Cho^{1,#}

¹ 단국대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Dankook University)
² Department of Mechanical Engineering and Applied Mechanics, University of Pennsylvania
Corresponding Authors / E-mail: gyoungcho@dankook.ac.kr, TEL: +82-31-8005-3520, ORCID: 0000-0002-7263-8172
E-mail: gipark@seas.upenn.edu, TEL: +1-215-898-5596, ORCID: 0000-0002-8242-8515

KEYWORDS: Proton exchange membrane fuel cell (양성자 교환막 연료전지), NaCl (염화나트륨), Degradation (열화), Flow channel (유로)

Degradation of proton exchange membrane fuel cells (PEMFCs) can be accelerated by impurities in the air. In maritime environments in particular, sodium chloride (NaCl) can reduce the performance of membrane electrode assembly (MEA) in PEMFCs. In this context, we experimentally analyzed effect of flow channel depth on PEMFCs humidified with a NaCl solution at the cathode side. The analysis was conducted in serpentine flow channels with different depths of 0.4, 0.8, and 1.6 mm. The initial performance of unit cells was compared to their performance after applying a constant current for 10 hours. Results showed that the degradation rate correlated positively with the flow-channel depth. Channel depths of 0.4 and 1.6 mm resulted in 2.4% and 7.3% decreases in the maximum power density, respectively. For the 1.6 mm channel depth, the activation loss after 10 hours was larger than the initial loss.

Manuscript received: March 13, 2025 / Accepted: April 29, 2025

1. 서론

세계적으로 탄소배출에 대한 규제가 강화되면서 신재생에너지에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 수소 에너지를 이용하는 연료전지는 수소와 산소의 전기화학반응을 이용하여 전기를 생산하는 장치이다. 연료전지는 전해질의 특성에 따라 여러 종류로 나뉘어져 있으며, 대표적으로 양성자 교환막 연료전지(Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC)와 고체 산화물 연료전지(Solid Oxide Fuel Cell, SOFC)가 있다. 이 중 PEMFC는 다른 연료전지에 비해 높은 성능, 100°C 이하의 저온 작동, 높은 확장성과 빠른 시동 및 정지 등의 장점을 가지고 있다[1]. 이러한 장점들은 특히 수송 수단에 적합하여 자동차, 선박, 항공 등 다양한 분야에서 활용되고 있다[2].

하지만 PEMFC는 촉매인 백금의 특성과 낮은 작동온도로 인해 불순물에 매우 취약하다[3,4]. 특히 해양환경의 공기에 포함된

염화나트륨(NaCl)이 막전극복합체(Membrane Electrode Assembly, MEA)의 열화를 가속시키는 것으로 알려져 있다. Okada et al.은 나트륨 이온(Na^+)이 전해질막 속의 수소 이온을 대체하여 PEMFC의 성능을 저하시킨다고 보고하였다[5]. Yadav et al.은 염화 이온(Cl^-)이 백금 촉매의 용해를 유도한다는 것을 실험적으로 검증하였다[6]. Li et al.은 장시간의 실험을 통하여 염화 이온이 PEMFC의 성능과 내구성을 악화시킨다는 것을 보였다[7,8]. 그 외에도 공기극에 공급되는 NaCl의 부정적인 영향에 대한 연구가 다수 진행되었다[9-14].

한편, 유로의 형상은 PEMFC의 성능과 물질전달에 큰 영향을 끼친다. NaCl은 유로를 통하여 반응물과 함께 MEA에 공급되기 때문에, NaCl의 영향을 분석할 때 유로의 형상도 함께 고려해야 할 필요가 있다. Yoo et al.은 평행 유로와 사형 유로에 대한 NaCl 수용액 가습의 영향을 조사하였다[15]. 해당 연구에 따르면 사형 유로는 평행 유로에 비해 NaCl에 의한 열화에

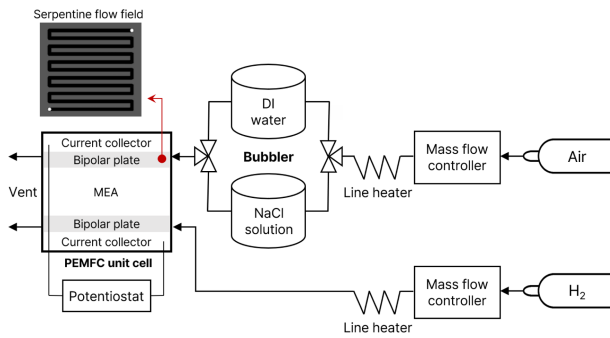


Fig. 1 Schematic of NaCl contamination setup

취약한 반면 회생에는 강점을 보이는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 NaCl 수용액으로 가습된 공기극에서 사형 유로의 깊이가 미치는 영향을 분석하기 위하여 10시간의 정전류 실험을 수행하였다. 단위 셀의 초기 성능과 정전류 실험을 한 이후의 성능을 서로 비교하였다. 3개의 서로 다른 깊이를 가진 유로를 사용하였으며, 각 유로에서 보인 경향을 서로 비교하고 분석하였다.

2. 실험 방법

실험에 사용된 연료전지 단위 셀(Unit Cell)의 활성화 면적은 $2.3 \times 2.2 \text{ cm}^2$ 이다. MEA는 CNL Energy사에서 제작된 상용 제품을 사용하였다. 기체확산층은 연료극과 공기극에 모두 SGL (Germany)사의 39 BB 모델을 이용하였다. 분리판은 사형 유로가 새겨진 흑연 재질의 분리판을 사용하였다.

Fig. 1은 실험에 사용된 시스템의 구조이다. 단위 셀의 전기화학적 특성은 BioLogic (France)사의 SP-150 (Potentiostat)과 VMP3B-10 (External Booster)을 사용하여 측정하였다. 공기극에는 탈이온수(Deionized Water, DI Water)가 담긴 버블러와 NaCl 10 wt% 수용액이 담긴 버블러를 3방밸브(3-way Valve)를 이용하여 연결하였으며, 500 sccm의 공기를 공급하였다. 연료극에는 100 sccm의 수소를 건조한 상태로 공급하였다. 모든 실험은 상온 및 상압 조건에서 진행되었다.

본 연구에서 수행한 네 번의 실험을 Table 1에 나열하였다. 먼저 동일한 유로 깊이(0.8 mm)를 가진 단위 셀에 DI Water와 NaCl 수용액을 각각 가습시킨 실험결과를 비교하여 NaCl 오염의 영향을 확인하였다. 이후 유로 깊이가 더 낮은 경우(0.4 mm)와 더 깊은 경우(1.6 mm)에 대해 실험을 진행하고 결과를 비교하였다. 모든 Case에서 유로와 격벽(Rib)의 폭은 각각 1.0과 1.1 mm로 일정하다.

활성화 과정에서의 공기극 가습은 모두 DI Water로 진행하였다. 단위 셀의 성능을 비교 및 분석하기 위해 전류밀도-전압 곡선(IV Curve) 및 전기화학 임피던스 분광법(Electrochemical Impedance Spectroscopy, EIS) 측정을 수행하였다. 초기 성능을 측정한 후, 장기 내구성 평가를 위하여 일정한 크기의 전류를

Table 1 Humidification medium and channel parameters of each case

Case	Humidification medium	Design parameters of channel	
		Depth [mm]	Width [mm]
1	DI water	0.8	1.0
2	NaCl solution	0.8	
3	NaCl solution	0.4	
4	NaCl solution	1.6	

단위 셀에 10시간 동안 지속적으로 인가하며 전압을 측정하였다. 이때 전류의 크기는 각 Case 별로 초기에 측정한 IV 곡선에서 0.6 V에 대응되는 값을 적용하였다. 10시간의 전압 측정 이후, 다시 IV 곡선과 EIS 측정을 진행하고 초기 성능과 비교하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 2(a)는 단위 셀에 대한 IV 곡선의 변화를 나타낸다. 탈이온수로 가습시킨 경우, 초기 성능과 10시간 이후의 성능 사이에 차이가 거의 없는 것을 볼 수 있다. 하지만 NaCl 수용액으로 가습시킨 경우, 10시간 이후의 성능이 초기 성능에 비해 낮아졌다. 특히 전류밀도가 높아지면서 성능 감소의 폭이 커짐을 볼 수 있다. 이는 성능의 감소가 물질전달과 관련이 있음을 나타낸다. 또한 유로의 깊이가 0.4 mm인 경우 성능 감소의 폭이 비교적 작았고, 반대로 깊이가 1.6 mm인 경우 성능이 더욱 감소한 것을 알 수 있다. Figs. 2(b)와 2(c)는 각각 전류밀도에 따른 전력밀도 곡선과 최대전력밀도를 나타낸다. 탈이온수를 사용하였을 때는 최대전력밀도가 471.9에서 468.8 mW/cm^2 로 0.7% 감소하였다. 같은 유로에서 NaCl 수용액으로 가습한 경우 최대전력밀도는 469.8에서 446.2 mW/cm^2 로 5.0% 감소하였다. 이는 NaCl 수용액으로 인해 PEMFC 성능이 낮아졌다는 것을 나타낸다. 유로의 깊이가 0.4 mm인 경우 469.4에서 458.2 mW/cm^2 로 2.4%만큼, 깊이가 1.6 mm인 경우 459.2에서 425.9 mW/cm^2 로 7.3%만큼 감소하였다.

앞서 언급하였듯이 유로의 깊이에 따른 열화율을 비교하기 위하여 10시간 동안 단위 셀에 일정한 크기의 전류를 가하였다. 일반적으로 PEMFC는 정전류법(Galvanostatic Techniques)으로 작동하기 때문에[16-17] IV 곡선의 특정 전압(0.6 V)에서 측정된 전류를 각각 인가하였다. 시간에 따른 전압의 변화를 Fig. 3에 나타내었다. 모든 경우에서 전압은 초기에 약 0.57 V가 측정되었으며, 시간이 지날수록 전압이 감소하였다. 유로의 깊이가 0.8 mm일 때 탈이온수로 가습시킨 경우의 평균 열화율은 3.4 mV/hr, NaCl 수용액으로 가습시킨 경우는 4.7 mV/hr으로 나타났다. 또한 0.4 mm 깊이에서 평균 열화율은 4.1 mV/hr, 1.6 mm 깊이일 때 6.6 mV/hr으로 나타났다. 이는 유로의 깊이가 얇을수록 장기간 작동에서 유리하다는 것을 의미한다.

Fig. 4에 NaCl 수용액으로 가습시킨 실험의 EIS 측정 결과를

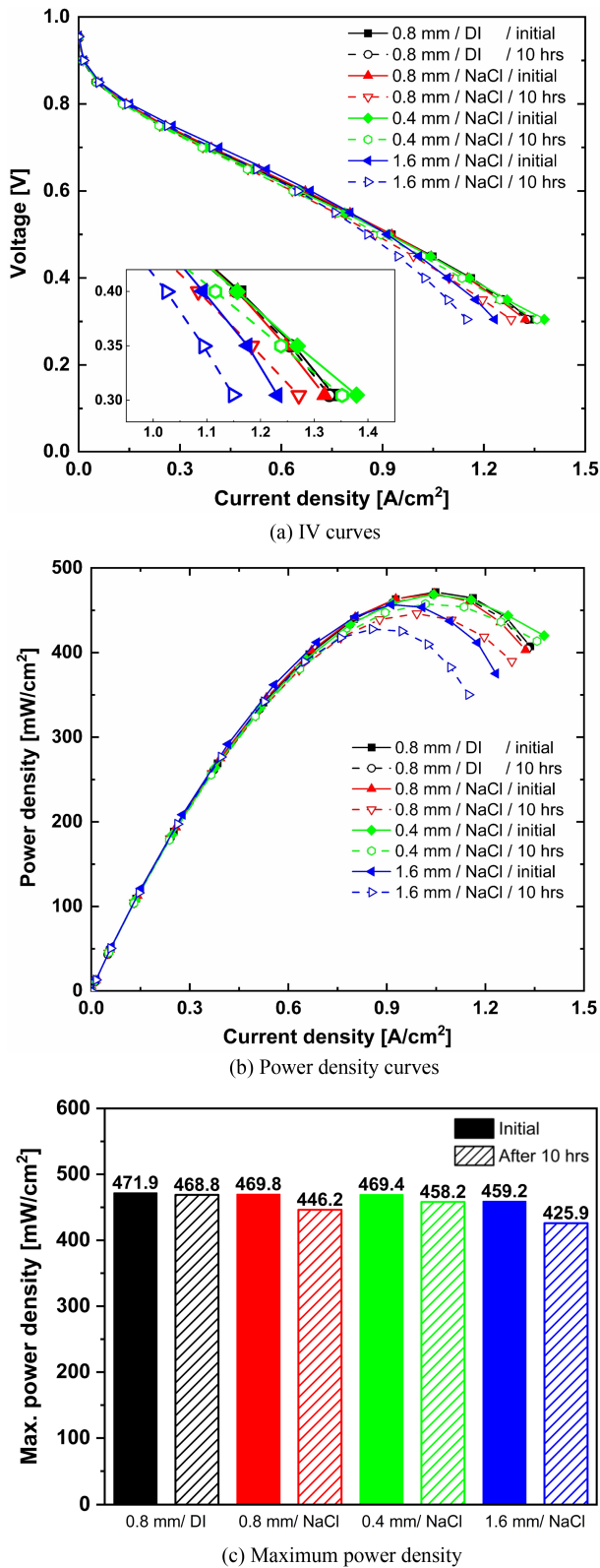


Fig. 2 Changes in electrochemical characteristics for each case

Nyquist 선도로 나타내었다. EIS의 등가회로 모델은 Dhirde가 제안한 모델을 사용하였다[18]. 해당 그래프에서 고주파수 영역에 위치한 X축 절편은 오믹 저항을 의미하며, 그래프가 나타내는

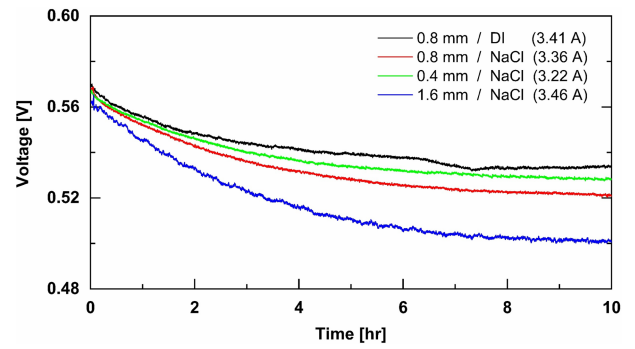


Fig. 3 Voltage changes at constant current as a function of time in 10 hours. The value of the applied current was determined by the current measured at 0.6 V in the initial IV curve

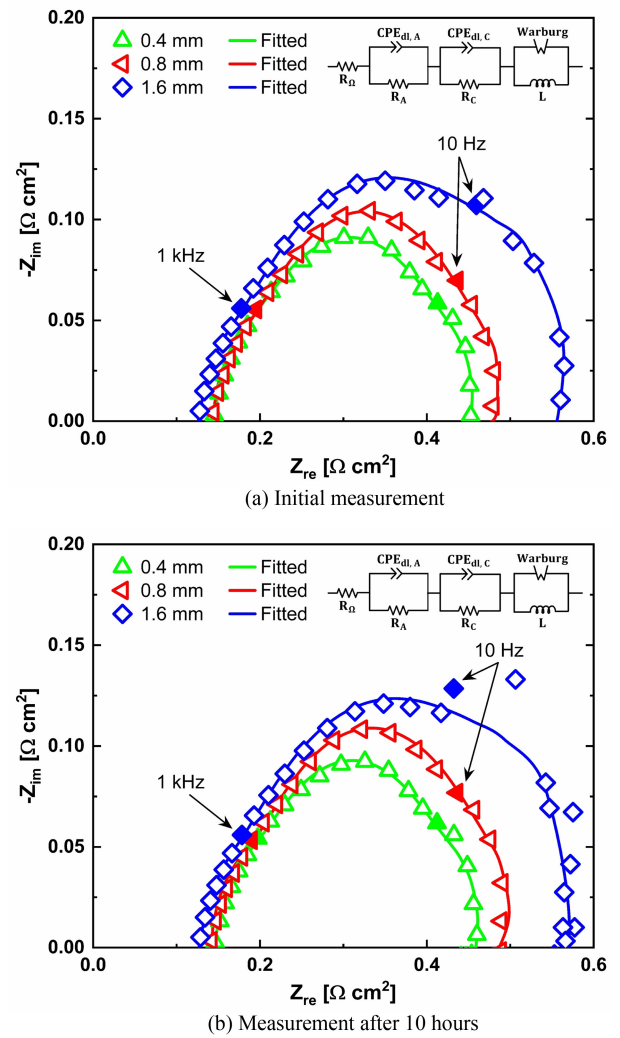


Fig. 4 EIS measurement @ 0.5 V for each case humidified with NaCl solution

첫 번째 반원의 크기는 활성화 저항을 의미한다. 두 번째 반원의 크기는 물질전달 저항을 나타내지만, 본 실험에서는 물질전달이 활발한 사형 유로로 구성된 소면적 셀(5.06 cm²)을 이용하였으므로 해당 그래프에서는 거의 나타나지 않았다. 2개의

Table 2 Performance changes of NaCl solution cases with different channel depths

Channel depth [mm]	0.4	0.8	1.6
Degradation rate @ Max. power [%]	2.4	5.0	7.3
Increase rate of activation loss [%]	1.4	4.8	6.3

그래프를 살펴보면 유로의 깊이가 얇을수록 오믹 저항이 커지고 활성화 저항이 작아지는 것을 알 수 있다. 이는 동일한 유량의 반응물이 공급될 경우 유로의 깊이가 얇을수록 유속이 증가하는 것과 연관이 있다. 유속이 증가할수록 대류에 의한 물의 제거가 활발해지며, 이는 전해질막의 수분 함량 감소를 야기하여 오믹 저항이 증가한다. 동시에 압력이 높아지면서 반응물의 농도가 증가하여 활성화 저항은 감소하게 된다[19].

Table 2에 유로 깊이에 따른 PEMFC의 성능 저하율 및 활성화 저항 증가율을 정리하였다. 초기의 저항 크기와 10시간 후의 저항 크기를 비교할 경우 오믹 저항은 큰 변화를 나타내지 않았다. 유로 깊이가 0.8 mm인 경우 활성화 저항은 323.5에서 339.0 $\text{m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 으로 4.8% 증가하였고, 0.4 mm인 경우 281.2에서 285.1 $\text{m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 로 1.4% 증가하였다. 반면에 유로 깊이가 1.6 mm인 경우, 활성화 저항은 361.6에서 384.4 $\text{m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 로 6.3% 증가하였다. 이는 유로의 깊이에 따른 물질전달이 활성화 저항에 영향을 끼친다는 것을 의미한다. 앞서 언급한 선행연구에 의하면 NaCl의 염화 이온이 촉매층 내부에 흡착된 후 백금의 용해를 유도하여 PEMFC의 성능을 저하시킨다[6]. 유로의 깊이가 얇을수록 활성화 저항이 감소하는 것은 활발한 대류 현상이 촉매층 내의 NaCl을 효과적으로 제거한 결과임을 유추할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 사형 유로의 깊이에 따라 NaCl 수용액이 PEMFC 단위 셀의 열화에 미치는 영향을 비교 및 분석하였다. 이를 위해 10시간 동안 정전류 실험을 진행하였으며 그 이후의 셀 성능을 초기 성능과 비교하였다.

유로의 깊이가 0.4 mm인 경우 최대전력밀도가 10시간 이후에 2.4%만큼 감소한 반면, 유로의 깊이가 1.6 mm인 경우 최대전력밀도가 7.3%만큼 감소하였다. EIS 그래프를 통하여 0.4 mm 깊이의 경우 활성화 저항이 1.4%만큼 증가하는 동안 1.6 mm 깊이에서 활성화 저항이 6.3%만큼 증가한 것을 확인하였다.

이를 통해 사형 유로의 깊이가 얇을수록 활발해진 대류 현상이 촉매층에 공급된 NaCl 입자를 효과적으로 제거하여 장기간 작동에 유리하다는 것을 알 수 있다. 하지만 PEMFC의 압력강하가 높아질수록 기생손실 또한 증가하기 때문에 적절한 깊이와 형상을 선정하는 것이 중요하다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2023-00213741). 본 연구는 산업통상자원부와 한국산업기술진흥원이 지원한 산업혁신인재양성지원사업(해외연계)(No. RS-2024-00435841)으로 수행된 연구결과임. 본 논문은 경기도 기술개발사업의 연구개발지원(No. H2409002)에 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

- O'hayre, R., Cha, S.-W., Colella, W., Prinz, F. B., (2016), Fuel cell fundamentals, John Wiley & Sons.
- Qasem, N. A., Abdulrahman, G. A., (2024), A recent comprehensive review of fuel cells: History, types, and applications, International Journal of Energy Research, 2024(1), 7271748.
- Misz, U., Talke, A., Heinzl, A., Konrad, G., (2016), Sensitivity analyses on the impact of air contaminants on automotive fuel cells, Fuel Cells, 16(4), 444-462.
- Debe, M. K., (2012), Electrocatalyst approaches and challenges for automotive fuel cells, Nature, 486(7401), 43-51.
- Okada, T., Møller-Holst, S., Gorseth, O., Kjelstrup, S., (1998), Transport and equilibrium properties of Nafion® membranes with H⁺ and Na⁺ ions, Journal of Electroanalytical Chemistry, 442(1-2), 137-145.
- Yadav, A. P., Nishikata, A., Tsuru, T., (2007), Effect of halogen ions on platinum dissolution under potential cycling in 0.5 M H₂SO₄ solution, Electrochimica Acta, 52(26), 7444-7452.
- Li, H., Wang, H., Qian, W., Zhang, S., Wessel, S., Cheng, T. T., Shen, J., Wu, S., (2011), Chloride contamination effects on proton exchange membrane fuel cell performance and durability, Journal of Power Sources, 196(15), 6249-6255.
- Li, H., Zhang, S., Qian, W., Yu, Y., Yuan, X.-Z., Wang, H., Jiang, M., Wessel, S., Cheng, T. T., (2012), Impacts of operating conditions on the effects of chloride contamination on pem fuel cell performance and durability, Journal of Power Sources, 218, 375-382.
- Mikkola, M. S., Rockward, T., Uribe, F. A., Pivovar, B. S., (2007), The effect of NaCl in the cathode air stream on PEMFC performance, Fuel Cells, 7(2), 153-158.
- Sasank, B. V., Rajalakshmi, N., Dhathathreyan, K. S., (2016), Performance analysis of polymer electrolyte membrane (PEM) fuel cell stack operated under marine environmental conditions, Journal of Marine Science and Technology, 21(3), 471-478.
- Park, S., Shorova, D., Kim, H., (2022), Effect of operating cell voltage on the NaCl poisoning mechanism in polymer electrolyte membrane fuel cells, Journal of Power Sources, 538, 231590.
- Yoo, H. J., Jang, G. E., Lee, Y. J., Song, D. K., Lee, H., Cho, G.

Y., (2022), Analysis of electrochemical behavior of PEMFC humidified with NaCl solution mist using an ultrasonic vibrator, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 39(12), 939-946.

13. Yoo, H. J., Noh, H. G., Jang, G. E., Lee, Y. J., Song, D. K., Cho, G. Y., (2022), Effects of nacl solution humidification on electrochemical characteristics of pemfcs, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 39(6), 451-456.
14. Kwon, Y. Rim, Yoo, H. J., Kang, B. G., Hong, K. W., Kwon, S. K., Lee, S., Cho, G. Y., (2025), Evaluation of electrochemical performance of pemfcs with decontamination devices at marine environments, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 42(1), 57-63.
15. Yoo, H. J., Cho, G. Y., (2023), Influences of flow channel on electrochemical characteristics of polymer electrolyte fuel cells humidified with NaCl contained H₂O, Sustainability, 15(3), 2415.
16. Moçotéguy, P., Ludwig, B., Beretta, D., Pedersen, T., (2021), Study of the impact of reactants utilization on the performance of PEMFC commercial stacks by impedance spectroscopy, International Journal of Hydrogen Energy, 46(10), 7475-7488.
17. Lee, K.-S., Lee, B.-S., Yoo, S. J., Kim, S.-K., Hwang, S. J., Kim, H.-J., Cho, E., Henkensmeier, D., Yun, J. W., Nam, S. W., (2012), Development of a galvanostatic analysis technique as an in-situ diagnostic tool for pemfc single cells and stacks, International Journal of Hydrogen Energy, 37(7), 5891-5900.
18. Dhirde, A. M., Dale, N. V., Salehfar, H., Mann, M. D., Han, T.-H., (2010), Equivalent electric circuit modeling and performance analysis of a PEM fuel cell stack using impedance spectroscopy, IEEE Transactions on Energy Conversion, 25(3), 778-786.
19. Kim, H., Kim, J., Kim, D., Kim, G. H., Kwon, O., Cha, H., Park, T., (2022), Mass diffusion characteristics on performance of polymer electrolyte membrane fuel cells with serpentine channels of different width, International Journal of Heat and Mass Transfer, 183, 122106.



Dong Kun Song

Ph.D. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Dankook University. His research interests are fuel cells and fluid dynamics.

E-mail: rmsehdthd96@gmail.com



Ho Jun Yoo

Ph.D. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Dankook University. His research interests are fabrication and characterization of fuel cells, deposition and characterization of thin films.

E-mail: hojun8471@gmail.com



Jung Soo Kim

M.S. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Dankook University. His research interests are fuel cells, fluid dynamics and thin films.

E-mail: dexasd916@naver.com



Ki Won Hong

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

E-mail: rldnjs723@gmail.com



Do Young Jung

M.S. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Dankook University. His research interests are fuel cells and fluid dynamics.

E-mail: jdy@dankook.ac.kr



George Ilhwan Park

Assistant Professor in the Department of Mechanical Engineering and Applied Mechanics, University of Pennsylvania. He received his Ph.D. in Mechanical Engineering from Stanford University. His research interests are fluid dynamics and large eddy simulation.

E-mail: gipark@seas.upenn.edu



Gu Young Cho

Assistant Professor in the Department of Mechanical Engineering, Dankook University. He received his Ph.D. in Mechanical and Aerospace Engineering from Seoul National University. His research interests are fabrication and characterization of fuel cells, deposition and characterization of thin films.

E-mail: guyoungcho@dankook.ac.kr

높은 균일도 확보를 위한 제논 아크 광원의 조명광학계 설계 및 구현

Design and Implementation of an Illumination Optical System for a Xenon Arc Light Source with High Uniformity

트란 덕 히에우¹, 박여준¹, 박종훈¹, 이우정¹, 이주형^{1,*}

Tran Duc Hieu¹, Yeojun Park¹, Jong-Hun Park¹, Woojeong Lee¹, and Joohyung Lee^{1,*}

¹ 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과 (Department of Mechanical System and Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology)
Corresponding Author / E-mail: JLee@seoultech.ac.kr TEL: +82-2-970-6343
ORCID: 0000-0003-3219-878X

KEYWORDS: Xenon arc source (제논 광원), Illumination optical system (조명광학계), Uniformity (균일도), Homogenizer (균일화장치)

We present a xenon arc source-based illumination system designed to achieve high spatial uniformity and efficient light collection across a wide spectral range. The proposed optical system comprised an ellipsoid reflector, diffuser, motorized iris, and collimation lens to optimize beam homogenization. Non-sequential ray-tracing simulations were performed to evaluate angular irradiation distributions of various diffusers and the overall beam profile uniformity. The system was experimentally implemented using a fused silica holographic diffuser optimized for high-power operation, with a motorized iris enabling precise control of light intensity. The resulting beam profile exhibited a well-defined flat-top shape, with a beam uniformity of approximately 95% evaluated according to the ISO 13694 standard. The developed illumination system demonstrated its ability to produce highly uniform illumination, suitable for various optical applications including spectroscopy, precision measurement, and optical imaging.

Manuscript received: April 1, 2025 / Revised: April 14, 2025 / Accepted: April 17, 2025

1. 서론

제논 아크 광원은 자외선에서 적외선에 이르는 광대역 스펙트럼을 높은 광출력으로 확보할 수 있는 장점으로 인해, 분광 분석, 정밀 계측, 광학 이미징 등 다양한 광학 응용 분야에서 널리 사용되고 있다. 특히 고휘도 및 안정적인 스펙트럼 특성으로 인해 백색광원으로서의 활용도가 높으며, 상용화된 광원 구조에서는 다양한 형태의 비구면 반사경을 적용하여 집광 효율을 극대화하고 있다[1].

제논 아크 광원은 활용 목적에 따라 시준광원(Collimated Source) 또는 초점광원(Focused Source)으로 구현될 수 있으며, 이 경우 Fig. 1과 같이 각각 포물면(Paraboloid Surface) 또는 타원면(Ellipsoid Surface)을 반사경으로 적용할 수 있다. 하지만 두 경우 모두 제논 아크 광원을 설치하기 위해 중심 개구부(Central Aperture)가 필요하며, 전력 공급을 위한 배선 등의 구조적 요소로

인해 Fig. 1(c)와 같이 광 균일도가 저하되는 단점이 존재한다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 조명 광학계 내에서 균일도를 확보하는 균일화 장치(Homogenizer)의 적용이 필수적이다. 기존 연구에서는 고균일도 광 분포 확보를 위한 다양한 균일화(Homogenization) 기법이 제시되었으며, 대표적으로 광 도파관(Light Pipe), 회절 광학부품, 마이크로 렌즈 어레이(Microlens Array, MLA), 확산판(Diffuser) 기반 기술 등이 보고되고 있다[2-6]. 이 중에서도 확산판 및 마이크로 렌즈 어레이는 비레이저 광원에 대해서도 높은 광투과율과 넓은 스펙트럼 범위에서 적용 가능하다는 이점이 있으며, 특히 타원형 반사경과 조합 시 Fig. 1(c)와 같은 도넛형(Donut-shaped) 광 분포를 효과적으로 제거하고 광 균일도를 향상시킬 수 있다[5,6].

본 연구에서는 자외선부터 적외선 영역까지 넓은 스펙트럼을 갖는 제논 아크 광원을 기반으로 하여, 높은 공간 균일도를 확보할 수 있는 조명광학계의 설계 및 구현을 수행하였다. 이를

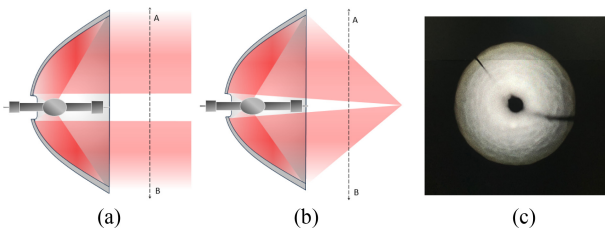


Fig. 1 Xenon light source and reflector configurations for high throughput illumination (a) Paraboloid reflector for generating a collimated beam, (b) Ellipsoid reflector for generating a focused beam, and (c) Donut-shaped beam profile resulting from the central aperture and structural shadowing

위해 타원형 반사경, 확산판, 시준 렌즈 등으로 구성된 복합 광학계를 구성하고, 균일도 향상을 위한 주요 설계 변수들을 분석하였다. 또한, 구현된 시스템의 성능을 실험적으로 평가하고 균일도 개선 효과를 검증하였다.

2. 조명광학계 설계 및 시뮬레이션

본 연구에서는 제논 아크 광원의 높은 광출력과 넓은 스펙트럼 특성을 효율적으로 활용하기 위해 Fig. 2와 같이, 타원형 반사경(Ellipsoid Reflector), 확산판(Diffuser), 조리개(Iris), 시준 렌즈(Lens)로 구성된 조명광학계를 설계하였다. 광원으로부터 방출된 빛은 타원면 반사경에 의해 제1 초점에서 제2 초점 방향으로 집광되며, 제2 초점 위치 인근에는 확산판을 배치하여 공간적 균일도를 향상시켰다. 이후 배치된 조리개는 확산 후 입사되는 개구 크기를 제어하며, 이를 통해 렌즈에 입사되는 유효광을 제한할 수 있다. 최종적으로 시준 렌즈는 확산된 광을 평행광 형태로 변환하여 관측면(Observe Plane) 상에 균일한 조명 분포를 형성하도록 설계하였다.

설계된 조명광학계의 성능을 평가하기 위해 Fig. 3과 같이 비순차적 광선 추적(Non-sequential Ray-tracing) 기법을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 고출력 제논광원의 경우, 100 W 이상의 출력이 사용되기 때문에 고온 환경에서도 안정적으로 작동할 수 있는 상용 용융실리카 홀로그래픽 확산판(Fused Silica Holographic Diffusers)을 설계에 적용하였다[7].

먼저, 다양한 확산판의 각도별 방사 분포를 분석하기 위해 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 3(a)는 확산판의 표면 거칠기를 상용 제품의 확산각에 해당하는 5°에서 25°와 동일한 결과를 얻을 수 있도록 최적화한 후, 방사 분포를 확인한 결과를 보여준다. 해당 확산각은 입사빔이 확산판 통과 후 빔의 각분포(Angular Distribution)의 반치폭 각도로 평가된다. 확산 각도가 증가함에 따라 방사 분포의 각도 범위가 넓어지는 경향을 보였으며, 상용 제품의 사양과 일치하는 것을 확인하였다[7].

Fig. 3(b)는 조명광학계의 전체적인 광선 경로를 나타낸다.

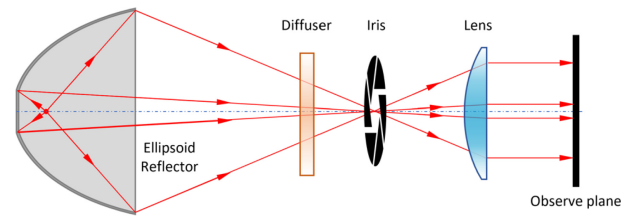


Fig. 2 Schematic diagram of a homogenized illumination optical system using an ellipsoid reflector. Light emitted from the xenon arc source is collected and directed by the ellipsoid reflector toward a diffuser, which randomizes the ray directions. The iris diaphragm controls the aperture size, and the collimating lens transforms the diverging rays into a uniform beam at the observe plane

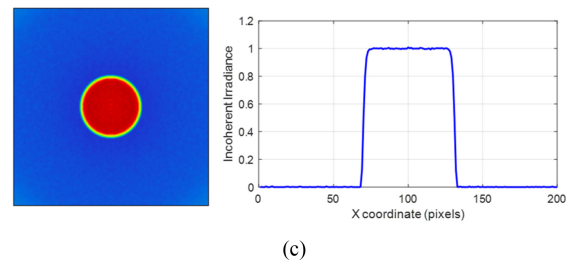
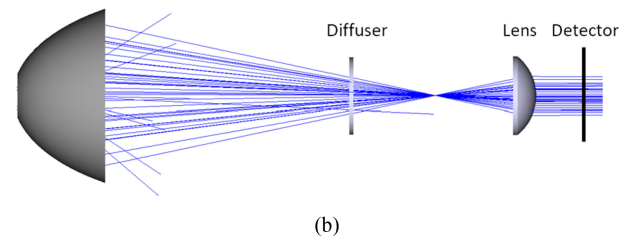
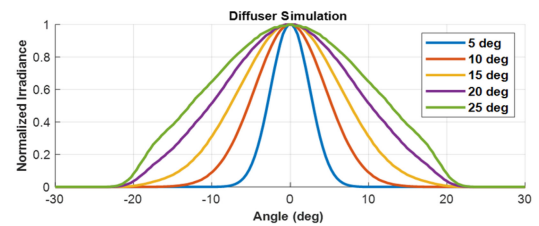


Fig. 3 Simulation results of the Xe source illumination system (a) Angular irradiation distribution of various diffusers, with surface roughness optimized to achieve results equivalent to the specifications of commercial products, (b) Ray-tracing of the illumination system performed using the non-sequential mode of the ray-tracing tool, and (c) Beam profile obtained by the simulation detector, demonstrating a clear flat-top profile

비순차적모드(Non-sequential Mode)를 활용하여 광선 추적을 수행하였으며, 타원면 반사경으로 집광된 광선이 확산판을 통과하여 시준 렌즈에 입사되도록 설계하였다. 이후 렌즈를 통과한 광선은 검출기로 도달하며, 검출기에서 측정된 빔 프로파일을 분석하였다. 이 과정에서 각 구성 요소의 위치 및 배치를 최적화하여 효율적인 광 전달 및 균일도를 확보하였다.

Fig. 3(c)는 시뮬레이션 검출기를 통해 얻어진 빔 프로파일을 보여준다. 좌측 그림은 2차원 이미지 형태로 나타난 빔의 분포를, 우측 그래프는 횡단면의 강도 분포를 수치적으로 표현한 것이다. 시뮬레이션 결과, 명확한 Flat-top 프로파일 확인이 가능하였다.

시뮬레이션으로 도출된 빔의 균일도를 평가하기 위해 레이저 빔 및 관련 광학 장치의 공간적 전력 및 에너지 밀도 분포 평가 기준을 제시하는 ISO 13694를 적용하였다[8]. 해당 표준은 빔의 균일도 및 평탄도 평가를 포함하여 다양한 레이저 응용 분야에서 중요한 기준으로 사용되며, 특히 빔 균일도(Beam Uniformity)와 평탄도 계수(Flatness Factor)는 레이저 빔의 품질을 평가하는 지표를 제시한다. 빔 균일도 U_η 는 아래 수식을 통해 평가된다.

$$U_\eta = \frac{1}{E_{\eta ave}} \sqrt{\frac{1}{A_\eta} \sum_x \sum_y (E(x, y) - E_{\eta ave})^2} \quad (1)$$

위 수식에서 $U_\eta(z)$ 는 빔 균일도, $E_{\eta ave}$ 는 평균 에너지 밀도, A_η 는 유효 면적, $E(x, y, z)$ 는 공간좌표 X, Y에서의 에너지 밀도에 해당한다. 이를 기반으로 빔의 균일도는 평균 에너지 밀도 대비 RMS 편차를 이용하여 평가되며, 값이 낮을수록 높은 균일도로 평가된다. 시뮬레이션을 통해 도출된 조명광학계의 빔 균일도를 평가한 결과, 확산판 이전의 빔과 광검출단에서의 빔의 균일도는 값은 각각 21과 0.8 수준으로 나타났다. 이를 기반으로 도출된 평탄도 계수는 각각 0.56과 0.99로 균일화기를 통과하지 않은 도넛형 빔을 균일도 99% 수준의 높은 균일도로 향상할 수 있음을 확인하였다.

3. 실험장치 및 실험결과

시뮬레이션을 통해 도출된 조명광학계의 성능을 평가하기 위해 Fig. 4와 같은 실험 장치를 구성하였다. 제논광원은 타원형 반사경과 조립되어 광 출력을 효율적으로 집광할 수 있도록 제작되었으며 타원형 반사경으로부터 방출된 광은 확산판을 통과하여 균일성을 개선한 후, 조리개에 입사된다. 조리개는 광량 조절을 위해 모터로 구동되도록 설계되었으며, 외부에서 원격 제어가 가능하도록 구성하였다. 조리개를 통과한 광은 렌즈 베럴(Lens Barrel)을 지나며 평행광으로 변환된다. 이 과정을 통해 확산된 빔은 균일화된 프로파일의 빔으로 형성되며, 최종적으로 관측면에서 측정이 이루어진다.

Fig. 5는 실험적으로 얻어진 빔 프로파일을 나타낸다. Fig. 5(a)는 관측면에서 카메라로 촬영된 빔의 2차원 이미지에 해당하며 빔의 전체적인 형태는 49.2 mm 직경을 가지는 원형으로 균일한 밝기를 유지하는 특징을 보였다. Figs. 5(b)는 5(a)에서의 횡단면 강도 분포를 그래프로 나타낸 결과로, Flat-top 프로파일을 명확히 확인할 수 있다. 측정 결과, 중심부의 강도가 일정하게 유지되며, 가장자리에서 급격히 감소하는 형태를 보였다.

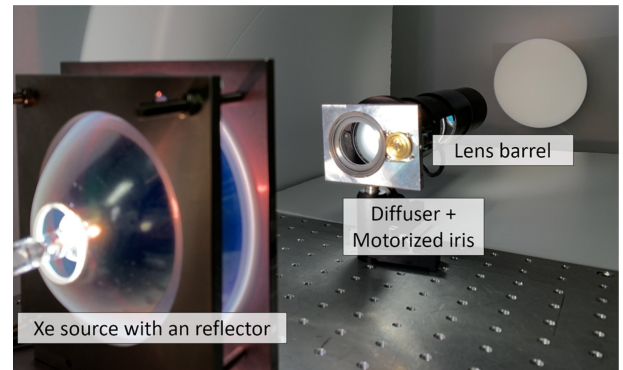


Fig. 4 Experimental setup of the Xe source illumination system. The Xe source is assembled with an ellipsoid reflector, and the emitted light passes through a diffuser before entering the iris. The iris, which is used for controlling the light intensity, is motor-driven to allow external adjustment. After passing through the second focal point, the light is directed through a lens barrel for collimation, resulting in a homogenized beam profile

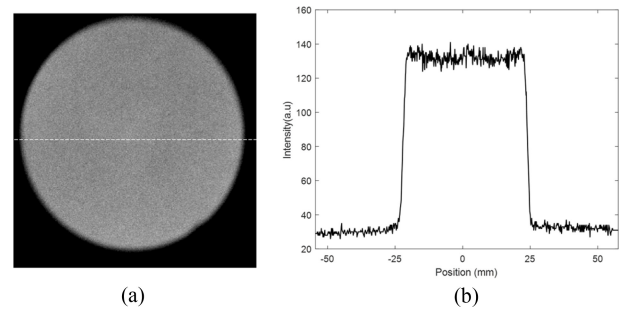


Fig. 5 Experimental results of beam profile (a) Beam profile, and (b) Flat-top cross-section of the collimated beam

실험으로 도출된 빔 프로파일을 앞서 시뮬레이션결과에 적용하였던 ISO 13694에 따라 정량적으로 평가하였으며 U_η 값은 1.52%, 이를 통해 도출된 하였으며 평탄도 계수는 95% 수준으로 평가되었다.

4. 결론

본 연구에서는 제논 아크 광원의 높은 광출력과 넓은 스펙트럼 특성을 효과적으로 활용하기 위해 타원형 반사경, 확산판, 조리개, 시준 렌즈로 구성된 조명광학계를 설계하고, 성능 평가를 수행하였다. 비순차적 광선 추적기법을 이용하여 조명광학계의 성능을 시뮬레이션 하였으며, 다양한 확산판의 각도별 방사 분포를 분석하여 균일도를 최적화한 후 ISO 13694 표준에 따라 빔 균일도를 평가한 결과 99% 수준의 균일도가 도출되었다. 설계된 조명광학계를 실험장치로 구성한 결과, 49.2 mm 직경을 가지는 원형 빔이 Flat-top으로 균일한 밝기를 유지하는 특징을 보였으며, 시뮬레이션과 동일한 기준으로 평가한 결과

95% 수준으로 시뮬레이션과 유사한 균일도가 확보되었음을 확인하였다. 본 연구의 결과는 광학 조명 시스템 설계 및 평가에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 보이며, 높은 출력과 균일도를 요구하는 분광 분석, 정밀 계측 등의 분야에 응용될 수 있을 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 일반과제 연구비 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

1. Kondász, B., Hopp, B., Smausz, T., (2018), Homogenization with coherent light illuminated beam shaping diffusers for vision applications: Spatial resolution limited by speckle pattern, Journal of the European Optical Society-Rapid Publications, 14, 1-7.
2. Zhu, G., Zhu, X., Zhu, C., (2013), Analytical approach of laser beam propagation in the hollow polygonal light pipe, Applied Optics, 52(23), 5619-5630.
3. Zheng, H., Sun, H., Zhang, H., Li, Y., Guo, H., Zhang, L., Li, R., Yin, Q., (2022), Simulation and experimental research on a beam homogenization system of a semiconductor laser, Sensors, 22(10), 3725.
4. Zimmermann, M., Lindlein, N., Voelkel, R., Weible, K. J., (2007), Microlens laser beam homogenizer: From theory to application, Laser Beam Shaping VIII, 9-21.
5. Hsiao, Y. N., Wu, H. P., Chen, C. H., Lin, Y. C., Lee, M. K., Liu, S. H., (2014), One-dimensional reflective diffuser for line beam shaper with microlens array homogenizer, Optical Review, 21(5), 715-718.
6. Deng, Z., Yang, Q., Chen, F., Bian, H., Yong, J., Du, G., Hu, Y., Hou, X., (2014), High-performance laser beam homogenizer based on double-sided concave microlens, IEEE Photonics Technology Letters, 26(20), 2086-2089.
7. Edmund Optics, Fused Silica Holographic Diffusers. <https://www.edmundoptics.co.kr/f/holographic-uv-diffusers/12652/>
8. ISO 13694:2018, (2018), Optics and photonics — Lasers and laser-related equipment — Test methods for laser beam power (energy) density distribution.



Tran Duc Hieu

M.Sc. candidate in the Department of Mechanical System and Robot Engineering, Seoul National University of Science and Technology (SeoulTech).
E-mail: duchieuys2803@gmail.com



Yeojun Park

B.Sc. candidate in the Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology (SeoulTech).
E-mail: park_c_jun@seoultech.ac.kr



Jong-Hun Park

M.Sc. candidate in the Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology (SeoulTech).
E-mail: exocistshot@naver.com



Woojeong Lee

Ph.D. candidate in the Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology (SeoulTech).
E-mail: zon5021@gmail.com



Joohyung Lee

Associate Professor in the Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology (SeoulTech).
E-mail: JLee@seoultech.ac.kr

창간

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

목적 및 연구 범위

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

금액

구독료

이 논문집은 우리학회 회원에 한하여 무료로 제공됩니다.

게재료

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

연락처

[04508] 서울 중구 중림로 50-1, SKY1004빌딩 12층

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

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

한국정밀공학회지 저널: http://jkspe.kspe.or.kr

한국정밀공학회지 논문투고 및 게재규정 · 논문집필요령

논문투고 및 게재규정

제1조 (목적)

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

제2조 (투고자)

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

제3조 (책임 및 윤리규정 준수)

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

제4조 (연구범위)

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

제5조 (투고 구분)

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

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

제6조 (접수)

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

제7조 (심사 및 게재 결정)

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

제8조 (저작권)

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

제9조 (자료공개)

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

제10조 (원고작성요령)

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

제11조(게재료)

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

논문집필요령

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

한국정밀공학회지 논문심사규정

제1조 (목적)

이 규정은 사단법인 한국정밀공학회(이하 '학회'라 한다) 국문학술지(한국정밀공학회지, 이하 '학회지' 또는 'JKSPE'라 한다) 투고된 논문의 심사과 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 기본요건이 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

제 3 장 학회 구성원의 역할과 책임

- 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.

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 검소한 자세에서 객관적인 심사의견서를 작성하도록 노력하여야 한다. 심사논문에 대한 자신의 판단과 보완이 필요하다고 생각되는 내용을 그 이유와 함께 상세하게 명시하여야 한다.
- 심사위원의 개인적인 목적을 위하여 저자에게 추가 자료나 해명을 요구하는 것을 금지한다.
- 이미 다른 학술지에 공개된 논문의 내용과 유사한 내용이 심사논문에 인용 없이 포함되었을 경우에는 편집위원에게 그 사실을 상세하게 알려주어야 한다.
- 심사 의뢰된 논문과 직접적인 이해관계가 있거나 자신의 전공분야가 투고된 논문을 심사하기에 적합하지 않다고 판단되면 담당 편집위원에게 지체 없이 그 사실을 통보하여 다른 심사위원을 선정할 수 있도록 하여야 한다. 아울러, 기한 내에 심사를 마치지 못할 사유가 있을 경우 편집위원에게 이를 통보한다.

제 4 장 검증 절차와 기준

제9조 (윤리위원회)

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

제10조 (윤리위원회 기능)

위원회는 다음의 내용으로 활동한다.

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

(사)한국정밀공학회 학술활동 윤리규정

제11조 (윤리위원회 소집 및 의결)

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

제12조 (연구 부정행위의 제보)

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

제13조 (연구 부정행위에 대한 제재 및 사후조치)

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

제14조 (피조사자 권리 보호)

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

제15조 (조사의 기록과 정보의 공개)

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

제16조 (조사결과와 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://jkspe.kspe.or.kr/files/KSPE_학술활동_윤리규정.pdf)
7. 책임저자는 위 논문의 공동저자들이 1항-6항의 사실들을 인식하고 있으며, 위 6가지 사항들에 대하여 동의합니다.
8. 한국정밀공학회는 저자(들)가 위 7가지 사항에 동의하지 않았을 경우, 위 논문의 출판을 지연시키거나 중지시킬 수 있는 권리를 가집니다.
9. 전체 저자들은 위 논문의 저작권과 일체 권리 양도에 관한 권한을 책임저자에게 일임하며, 책임저자는 전체 저자들을 대표하여 저작권을 양도합니다.

20 년 월 일

책임저자명:

서 명:

책임 저자

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

(사)한국정밀공학회 소개 및 활동현황

설립목적

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

회원(사) 구성

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

관련정부기관과의 관계

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

주요활동현황

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

발간자료

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

발행규정

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

부문위원회 활동

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

특별회원사 가입

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

(사)한국정밀공학회 소개 및 활동현황

한국정밀공학회상

정밀공학대상

- 학회 발전에 현저하게 공헌한 자

학술상

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

생산기술상, 정밀기술상

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

공로상

- 학회 발전과 운영에 지대하게 기여한 자

Best Editor Award

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

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

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

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

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

KSPE Young Researcher Award

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

특별상

가헌학술상

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

현송공학상

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

유정백합학술상

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

백암논문상

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

Year of Launching

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

Aims and Scope

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

Fee

Subscription Fee:

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

Publication Fee:

1. Basic fee (up to eight pages): 200,000 won; additional pages: 30,000 won per page.
2. Manuscripts contributed as a result of funded research will be charged an extra 50%.
3. Publication fee is charged only for the papers contain 'Acknowledgement' that represent supports of academic research project by the 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 26 · Number 5 · May 2025

REGULAR PAPERS

Novel Bidirectional Volume Alternating Cavitation Technique for the Inner Surface Finishing of Small Holes
F. Li · B. Zhang · Y. Guo · Y. Wang · K. Shen 1049

Study on Milling Mechanism and Surface Roughness of CNTS/2009Al Composites
D. Yun · Q. Gao · D. Jia · B. Zhao 1061

Numerical Simulation and Parameters Optimization of Invar 36 Alloy Multi-Pulse Femtosecond Laser Processing
X. Lu · Y. Tian · Z. Wang · X. Wang · S.Y. Liang 1075

Study on the Surface Micro-texture of Blades of Continuous Rotary Electro-hydraulic Servo Motor
X. Wang · X. Wang · S. Zhang · B. Bai · Y. Zhang 1091

Study About the Effect of Spot Distance on Bending Moment and the Effect of Non-uniform Spot Array in Laser Peen Forming
J. Lyu · Y. Wang · Q. Wang · J. Wang 1101

Optimization of Precision Forging Process for Large Flange Cylinder Parts
L. Zhenhong · L. Yubao 1117

Effect of Radial Force and Radial Torque on Hole Quality Characteristics During Micro-Drilling of Nitinol Shape Memory Alloy
C.S.K. Matta · G. Talla · K.R.A. Hegde · S. Gangopadhyay 1131

Formation Mechanism and Quality Assessment of Microstructures Fabricated on PCD Tools by Electrical Discharge Machining
S. Song · Y. Sun · F. Dou · H. Sun · L. Liu · D. Zuo 1141

Improvement of the Transient Levitation Response of a Magnetic Levitation System Using Hybrid Fuzzy and Artificial Neural Network Control
Y. Zheng · H.-J. Ahn 1159

Human-Centric Framework for Robotic Assembly for Industry of the Future
M.M. Gichane · J.B. Byiringiro · M. Benoussaad · M. Rakotondrabe 1167

Prediction of Dimensional Accuracy and Surface Quality in Additively Manufactured Biomedical Implants Using ANN
A. Karadag · O. Ulkir 1187

Image Quality Analysis and Testing Process for Microlens Array-Based Optical Devices with High-Resolution Image Reconstruction
V.T. Vu · H. Yi · Y. Park · H. Lee 1215

Development of TPU/MWCNT Composite Bending Sensor
H. Kim · W. Tak · Y. Choi · J. Jeon · S. Lee · J. Cho · I. Lee 1227

Impact of Recoater Method in Stereolithography: A Comparative Analysis of Print Quality and Material Properties
J.E. Lee · J.H. Lee · S.W. Lee · H.S. Yoon · J. Park · C.W. Ha 1235

Preparation of In-Situ Reaction Particle-Reinforced Titanium Matrix Composites Layers by Friction Surfacing
H. Zheng · P. Liang · X. Liu · X. Tan · X. Hao · Y. Zou 1247

Investigation of Axial-Radial Bevel Magnetic Gear Based on Magnetic 3D Printing
P.-W. Huang · T.-W. Chang · H.-H. Huang · P.-H. Liao · I.-H. Jiang · M.-C. Tsai 1257

SHORT COMMUNICATION

Droplet Transition and Corrosion Resistance of Surfacing Layer with Flux-Core and Solid Twin-Wire Indirect Arc Welding
Y. Zhang · D. Wu · H. Yin · Y. Liu · Y. Zou 1265

REVIEW

Spider Leg Inspired Soft Actuators in Small Robotic Applications: A Brief Review
M.I. Haider · J. Ballesteros Fernandez · Y. Kim 1279

REVIEW PAPER

A Review on the Force Sensing and Force Feedback-Based Navigation of Mobile Robots
W. Lee · H. Joo · Y.-K. Kang · T. Seo 1291

CORRECTION

Correction: A Review on the Force Sensing and Force Feedback-Based Navigation of Mobile Robots
W. Lee · H. Joo · Y.-K. Kang · T. Seo 1313

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 12 · Number 3 · May 2025

PREFACE

Preface for Autonomous Manufacturing with Green Technology

Martin B.-G. Jun · Y.T. Cho · S. Kim · S. Kim 782

REGULAR PAPERS

Real-Time Interface Prediction During Laser Processing of Thin Film Layers by High-Resolution Femtosecond Laser-Induced Breakdown Spectroscopy

S.H. Jeong · I. Jang · J. Lee 785

Development of an artificial neural network-based model for prediction and compensation of hole depth by femtosecond laser drilling

M. Kim · P. Choi · K. Kim · Y.Y. Kim 799

Predicting Quality of Coated Layer Based on Meniscus Features Associated with Thickness for Sustainable Roll-to-Roll Processes

M. Kim · J. Noh · G. Cho · J. Jo · C.W. Lee 813

Iterative Semi-Auto-Labeling Method for High-Frequency Induction Brazing

M.-G. Kim · J. Moon · O.H. Kang · H. Lee · K.-Y. Oh 829

AI-Driven Process Optimization Framework for Enhancing Print Quality in Aerosol Jet Printing

H. Zhang · Y. Kim · L. Cui · S.K. Moon · J.P. Choi 853

Prediction of Normalized Material Removal Rate Profile Based on Deep Neural Network in Five-Zone Carrier Head CMP System

Y. Cho · M. Kim · M. Hong · J. Han · H.J. Kim · H. Kim · H. Lee 869

Architecture Development of Digital Twin-based Wire Arc Directed Energy Deposition

C.J. Kim · S.B. Han · B.W. Seo · I. Bae · D. Kim · S. Kim · Y.T. Cho 885

Energy Efficiency Optimisation in Wire Arc Additive Manufacturing of Invar 36 Alloy via Intelligent Data-Driven Techniques

G. Mattera · A. Caggiano · L. Nele 905

Control-Resilient Roller Wear Prediction for Thin Wire Flattening Process via an Internal Sound-Guided Dynamic Conditional Network

E. Kim · J. Jeon · Y. Kim · H. Yun · J. Wellman · Y.W. Choi · S.W. Lee · M.B.-G. Jun · J. Lee 919

Design of stiffened ribs for improving forming defects of metal bipolar plate for PEMFC

H. Ha · M. Gong · B. Choi · Y.S. Na 935

Data-Driven Approach for Fault Diagnosis of Harmonic Drives Using Wireless Acceleration Sensors and Machine Learning

M.S. Islam · K. Kim · H.Y. Kim 951

Enhancing Tool Wear Prediction Accuracy by Integrating Multi-Task Learning with Cutting Force Estimation

H. Kim · S. Lee · J. Lee · K.H. Park · S. Nam 969

Optimizing Bio-nano-silica Synthesis Processes from Rice Husk for Industrial-Scale Applications

V.H. Pham · Q.L. Ve · C.A. Vo · Q.T. Ngo · T.T. Do · A.D. Nguyen 991

AGV Path Planning with Dynamic Obstacles Based on Deep Q-Network and Distributed Training

T. Xie · X. Yao · Z. Jiang · J. Meng 1005

Development of a Real-Time Track Solver for Digital Twin of the Underwater Tracked Vehicle

H.S. Cho · J.H. Sohn · J.B. Han · T.K. Yeu 1023

Autonomous Thin-film Profile Predictions for Inkjet-Printed OLEDs from Aerial Microscopic Images using Deep Learning

D.Y. Shin · Y. Noh · K.H. Cho · B.K. Ju · K.T. Kang 1037

Multi-objective optimization for layout planning of matrix manufacturing system

J. Park · C. Lee · S.C. Oh · S.D. Noh 1057

International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Smart Technology

Volume 3 · Number 1 · January 2025

REGULAR PAPERS

Development of a Defect Diagnosis Algorithm for Blow-molded Transparent Plastic Bottles based on Convolutional Neural Networks (CNN)

Young Woon Choi · Sang Won Lee 1

Operation Status Diagnosis of an Underwater Cutting Robot Using Adaptive Weighted Parallel 1D-DenseNet

Sangwook Park · Bongcheol Kim · Byeong Guk Kang · Jonghwan Lee · Dongjun Hyun · Ikjune Kim · Hyunseok Oh · Duhwan Mun 7

Advanced Machine Learning Techniques for Predicting Z-Axis Belt Wear in Wafer Transfer Robots

MD Saiful Islam · Young Kyoung Ji · Kihyun Kim · Hyo-Young Kim 17

Thin Film Thickness Analysis Using a Deep Learning Algorithm with a Consideration of Reflectance Fluctuation

Joonyoung Lee · Jonghan Jin 31

Real-time Defect Detection in Wire-laser Directed Energy Deposition Process Using U-Net-based Semantic Segmentation

Yeong-Seo Kim · Seung-Mun Lee · Ju-Chan Yuk · Suk-Hee Park 39

In Situ Machine Tool Walking on Large Workpieces: Improvement of Machining Accuracy by Compensating Orientation Dependent Position Error

Chang-Ju Kim · Dae-Hyun Kim · Seung-Kook Ro 53

Heated Syringe Extrusion for Soft Gripper Fabrication in Additive Manufacturing

Kwang Yeol Yu · Woo Jin Jeong · In Hwan Lee 59

REVIEW

A State-of-art on Damage Detection of Composite Structure Using Lamb Wave and Deep Learning Techniques

Olivier Munyaneza · Do-Gyeong Yuk · Jung Woo Sohn 65

A Review on Deployable Structures in Space Industry

Suyeon Seo · Min-Woo Han 83

INDUSTRY CASE STUDY

The Development of REST API Gateway Application Using Unified CNC Interface Platform

Yeong-Deuk Kim · Dong Yoon Lee 97

2025년 제3차 이사회 회의록

◎ 일 자 : 2025년 3월 14일(금), 학회 회의실

◎ 장 소 : 학회회의실

◎ 참석자 : 안성훈, 이상원, 오정석, 최영재, 김동성, 김보현, 추원식, 고승환, 김창주, 김태곤, 김남근, 김해진, 손정우, 안지환, 안형준, 윤준영, 주백석, 권지연, 안상훈, 이문구, 이지혜, 정영훈, 최정옥, 한민우, 이동윤, 이주연, 박형욱, 김건희, 송시한, 조정대, 정재일, 김규만, 문두환, 강봉철, 객문규, 김동립, 박 근, 이동원, 정훈의, 김종백, 김현준, 윤주성, 이봉기, 이현섭, 장진아, 류시형, 맹상진, 송지현, 이동진, 차석원, 홍성태, 권석진, 성대운, 현승민

재적 100명 중 80명(위임 21명)참석

◎ 전차회의록 : 2025년 제2차 회의록 확인 및 추인

I. 주요보고사항

총무

*2025년 KSPE 회원 설문조사 결과 보고

1. 한국기계단체총연합회(기단연) 정기총회 참석(2025.3.11, 참석자: 이상원)
- 주요안건: 2025년 사업계획확정, 10대 기계기술 선정 운영위원 승인, 기계의 날 일정 확인 등
2. 과학기술단체총연합회(과총) 제 60회 정기총회 참석보고: 안성훈, 이상원(2025.2.27)
- 2024년 사업실적 및 2025년 사업계획 세입세출 보고
3. 사무국 직원 신규채용 보고
- 정혜림 주임, 주요업무: JKSPE, IJPEM-ST 저널2종 출판 및 창의경진대회, 뉴스레터 발행 등
4. 회원현황: 총 회원수: 3,348명 / 정회원: 2,195명, 학생회원 1,153명

재무

1. 2025년 3월말, 수입 지출 현황 보고
2. 과기부-과천과학관: 2024년 사업실적 및 2025년 사업계획서 제출 완료(2025.2.28)

편집

1. IJPEM-GT, Editorial Board 추가 위촉 1인 승인 (Yingjun Quan, Univ. of Twente(Netherlands))
2. IJPEM(GT) Special Issue 2026년 주제 논의
3. JKSPE Topical Issue 2025 진행사항 보고
4. IJPEM-ST 학술지 등재 및 Index 준비현황 보고: SCOPUS 등재신청(25.3.12)
5. IJPEM-GT OA 저널 준비 TF 회의안건 보고

사업

1. 2025 춘계학술대회(2025.5.14-16, 제주 신화월드)
 - 1) Plenary 2인, 부문 Keynote 9인, 젊은공학자 6인 초청 확정 보고
 - 2) 주요일정 및 부문 학술대회 담당자 보고
 - 3) 초록 접수현황(일반/포커스세션(24개주제), 전시부스 참여현황 및 등록현황 보고
 - 4) 학술대회 프로그램 구성(안), 현장 운영(안) 논의 보고
 - 5) 학술대회 프로그램북 QR 웹페이지 제공으로 전환 (인쇄물 제공 하진 않음)
2. PRESM 2025 제3차 조직위원회 (2025.7.6-7.11, 치앙마이 메리어트 호텔)
 - 1) Abstract 제출 현황 보고 및 주요일정 공지(포스터 세션: 2025.3.31까지)
 - 2) Focus 세션 신청 현황 및 프로그램 구성(안) 논의
 - 3) Plenary 초청강사 2, Keynote 초청강사 9인 초청 보고
 - 4) 2026년 개최지: 삿포르 예약 불가에 따른 싱가포르 대체 검토 → 회장단 위임

부문 및 위원회

1. 바이오헬스부문 춘계 워크숍 개최 결과 보고
 - 1) 2025년 3월 7일(금), 가톨릭대학교 성의교정 성의회관 1205호
 - 2) 등록 및 참석: 58명(일반38명, 학생 20명), 초청발표 6건

2. 정밀측정부문위원회 제8차 워크숍 개최 (부문회장: 이현욱(철도연))
 - 1) 일시: 2025년 3월 26일(수)-28일(금)
 - 2) 장소: 부산 부경대학교 대연캠퍼스 미래관 CEO홀
 - 3) 발표: 초청강연 14편 예정
 - 4) 등록: 일반 10만원, 학생 5만원 (구글폼 등록)
3. 각 부문위원회(10개) 구성 보고: 2025 부문이사 위촉장 KSPE 홈페이지 [학회활동현황] 발급 예정
4. ASPEN2025 : 2025.11.25-28, Fullon Hotel Tamsui Fisherman's Wharf, New Taipei City, Taiwan
 - Board Member, Committee Member 약 10인 추천 예정

II. 주요승인사항

1. 신입회원 인준(안) → 정지훈(Texas A&M University), 정회원: 강영재(LIG넥스원) 외 18명, 학생회원: 강현서(연세대학교) 외 20명 → 승인
2. 시행규칙 개정(안) - 제6장 부문위원회, 연구회, 위원회 및 분과회 제 37조, 제38조 → 승인
3. 규정 개정(안) - 학회 펠로우(Fellow) 운영규정 개정(안) → 승인
4. 한국정밀공학회 산학연관 협력위원회(2021년 신설) 폐지(안) → 승인
5. 특별회계 - 유정백합학술상기금 정기예금 갱신(안) → 승인
6. 2025-2026 평의원선거 직선선거 결과 승인(안) → 평의원 210명 승인
7. 공작기계 부문위원회 산하 - [초정밀 위치결정 기술연구회] 신설(안) → 승인

한국정밀공학회지

JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR
PRECISION ENGINEERING

VOLUME 42, NUMBER 5

MAY 2025

ISSN 1225-9071 (Print)

ISSN 2287-8769 (Online)

목차

일 반

- 349 브레이징 접합에 의해 제조된 다결정 다이아몬드(PCD) 건드릴 및 트위스트 드릴의 가공 특성 비교
손호민, 박경환, 김동규, 사민우
- 355 나노스케일 멤브레인에서 레이저 초음파로 여기된 램파의 전파 특성
김윤영
- 361 LSC/YSZ 계면 부반응이 억제된 고성능 고체산화물 연료전지용 LSC 공기극 제작
윤지성, 구미주, 안효준, 정훈훈, 김영범
- 367 이온성 고분자-금속 복합재 센서의 최신 기술 동향
김권민, 조성준, 김재환
- 381 다구치 방법을 이용한 사출성형 미세유체 칩의 거시적/미시적 변형 거동에 대한 공정 변수의 영향 분석
박지원, 이봉기
- 391 공작기계 에너지 효율화를 위한 국제표준 기반 에너지 소비 평가 시스템 개발
김경호, 오정석, 이성철, 이재학
- 399 양성자 교환막 연료전지의 사형 유로 깊이에 따른 NaCl 수용액의 영향
송동근, 유호준, 김정수, 홍기원, 정도영, George Ilhwan Park, 조구영
- 405 높은 균일도 확보를 위한 제논 아크 광원의 조명광학계 설계 및 구현
트란 덕 히에우, 박여준, 박종훈, 이우정, 이주형

JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR PRECISION ENGINEERING

VOLUME 42, NUMBER 5 / May 2025

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

CONTENTS

REGULAR

- 349 Comparison of Machining Characteristics of PCD Gun Drill and PCD Twist Drill Manufactured by Brazing
Ho Min Son, Kyung Hwan Park, Dong Gyu Kim, and Min-Woo Sa
- 355 Characteristics of Lamb Wave Propagation on a Nanoscale Membrane Induced by a Laser Ultrasonic Technique
Yun Young Kim
- 361 **Fabrication of LSC Cathode for High-performance Solid Oxide Fuel Cell with Suppressed LSC/YSZ Interface Side Reactions**
Jisung Yoon, Miju Ku, Hyojun Ahn, Hunhun Jung, and Young-Beom Kim
- 367 Recent Advances in Ionic Polymer-Metal Composite Sensors
Gwon Min Kim, Seong-Jun Jo, and Jaehwan Kim
- 381 Taguchi Analysis of Effects of Processing Parameters on Macro/Micro-scale Deformation Behavior of Injection-molded Microfluidic Chips
Jiwon Park and Bong-Kee Lee
- 391 Development of an International Standards-based Energy Consumption Evaluation System for Enhancing Machine Tool Energy Efficiency
Gyungho Khim, Jeong Seok Oh, Sungcheul Lee, and Jaehak Lee
- 399 Effects of NaCl Solution on Proton Exchange Membrane Fuel Cell with Serpentine Flow Channel of Different Depths
Dong Kun Song, Ho Jun Yoo, Jung Soo Kim, Ki Won Hong, Do Young Jung, George Ilhwan Park, and Gu Young Cho
- 405 Design and Implementation of an Illumination Optical System for a Xenon Arc Light Source with High Uniformity
Tran Duc Hieu, Yeojun Park, Jong-Hun Park, Woojeong Lee, and Joohyung Lee