


# 변형 가능한 전자 회로를 위한 3D 프린팅 액체 금속 전극 개발

정종준<sup>1</sup>, 박상윤<sup>1,2</sup>, 최세진<sup>1,2</sup>, 고유진<sup>1,3</sup>, 이한얼<sup>1,2,3</sup> 

<sup>1</sup> 전북대학교 신소재공학부

<sup>2</sup> 전북대학교 JBNU-KIST 산학연융합학과

<sup>3</sup> 전북대학교 전자공학부

## 3D-Printed Liquid Metal Electrodes for Deformable Electronic Circuit

Jong Jun Jung<sup>1</sup>, Sang Yoon Park<sup>1,2</sup>, Se Jin Choi<sup>1,2</sup>, Yu Jin Ko<sup>1,3</sup>, and Haneol Lee<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup> Division of Advanced Materials Engineering, Jeonbuk National University, Jeonju 54896, Korea

<sup>2</sup> Department of JBNU-KIST Industry-Academia Convergence Research, Jeonbuk National University, Jeonju 54896, Korea

<sup>3</sup> Division of Electronics and Information Engineering, Jeonbuk National University, Jeonju 54896, Korea

(Received September 4, 2025; Accepted September 25, 2025)

**Abstract:** Flexible and wearable electronics, which require stable operation under mechanical deformation, are increasingly utilizing Eutectic Gallium-Indium (EGaIn) for their conductive components. This study presents a systematic approach to fabricating highly reliable, deformable electrodes via a direct-ink-writing (DIW) 3D printing process using EGaIn as the functional ink. We conducted a thorough optimization of key printing parameters, specifically the extrusion pressure and printing speed, to achieve stable and uniform conductive lines. Through this optimization, we successfully established an optimal process window, achieving a stable line width of approximately 130  $\mu\text{m}$  at an extrusion pressure of 300 kPa and a printing speed of 16 mm/s. The fabricated flexible electrodes exhibited exceptional electromechanical stability, maintaining negligible resistance change ( $< 0.82\%$ ) both under severe bending (3 mm radius) and after 100 repetitive bending cycles. This work demonstrates that the 3D printing of EGaIn is a viable and effective method for creating robust, high-performance electrodes for the next generation of deformable and wearable electronic devices.

**Keywords:** EGaIn, Deformable electronics, Liquid metal, 3D printing

4차 산업혁명과 사물 인터넷(IoT) 시대의 도래는 기술의 급진적인 발전을 촉진했으며, 이는 전자기기 기술의 고도화를 가속화하는 계기가 되었다. 특히 최근 전자 피부(electronic skin, e-skin), 웨어러블 디바이스, 스마트 텍스타일 등 휴대성에 중점을 둔 기기들의 활용 범위가 확장

됨에 따라, 인체의 역동적인 움직임 속에서도 안정적인 성능을 구현할 수 있는 유연하고 변형가능한 시스템에 대한 수요가 급증하고 있다 [1-7]. 이처럼 신축성과 부착성을 갖춘 변형가능한 장치에 대한 연구가 심화되면서, 전극 소재 역시 고유의 전기적 특성은 유지하면서 뛰어난 기계적 유연성을 확보해야 하는 과제를 안게 되었다 [8,9]. 전통적으로 이러한 전자기기의 전극 소재로는 금속, 탄소 기반 재료, 전도성 고분자 등이 주로 사용되어 왔지만 각 소재는 명확한 한계를 지니고 있다. 금속 전극은 우수한 전기 전도성과 공정 호환성을 장점으로 가지나, 인장 변형 시 발생하

✉ Haneol Lee; [haneol@jbnu.ac.kr](mailto:haneol@jbnu.ac.kr)

Copyright ©2026 KIEEME. All rights reserved.  
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

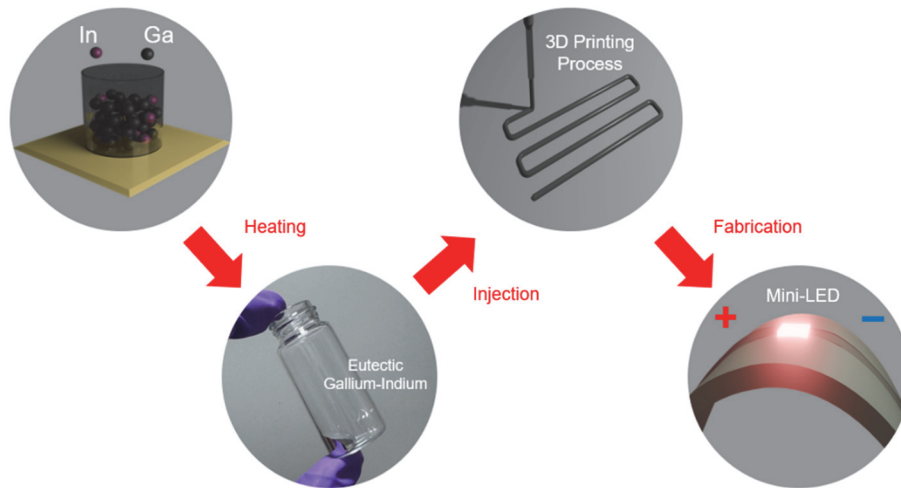
는 미세 균열로 인해 저항이 급격히 증가하고 취성이 높아 변형가능한 소자에 적용하기에는 본질적인 한계가 존재한다 [10,11]. 또한 탄소 기반 전극은 기계적 변형에 대한 저항성이 높지만, 표면적에 비례하여 전하를 저장하므로 정전용량 확보에 제약이 따르며 이는 고출력 구현을 어렵게 만든다 [12,13]. 더불어 전도성 고분자 전극은 금속에 비해 전기 전도성이 상대적으로 낮고, 반복적인 충·방전 과정에서 분자 골격의 붕괴로 인한 구조적 불안정성이 야기되어 소자의 수명을 단축시키는 단점을 지닌다 [14]. 이러한 기존 변형가능한 전극 소재들이 지닌 단점들을 종합적으로 보완할 대안으로, 최근에는 액체 금속(liquid metal)을 활용하여 본질적으로 유연하고 신축적인 전극을 구현하려는 연구가 활발히 진행되고 있다 [15,16].

액체 금속은 금속 고유의 우수한 전기 전도도를 가지면서도 액체 특유의 유연성 및 변형성을 동시에 지녀, 차세대 유연 전자 소자의 핵심 소재로 주목받고 있다. 이는 상온 또는 그 근처의 온도에서 액체 상태를 유지하는 순수 금속 및 그 합금을 총칭하는 개념이다 [17]. 자연계에 존재하는 대표적인 액체 금속 원소로는 수은(Hg), 세슘(Cs), 프랑슘(Fr), 그리고 갈륨(Ga) 등을 꼽을 수 있으나, 인체와 밀접하게 상호작용하는 전자기기에 적용하기 위해서는 소재의 안전성 확보가 무엇보다 중요하다. 이러한 관점에서 볼 때, 수은은 심각한 신경독성을 지니며 생체 내에 축적되어 배출되지 않는 특성 때문에 인체 친화적 소자에는 사용이 불가능하다 [18,19]. 또한, 알칼리 금속에 속하는 세슘과 프랑슘은 공기나 수분과 매우 격렬하게 반응하여 폭발할 수 있는 위험성을 내포하고 있으며 [20], 특히 프랑슘은 강한 방사선을 방출하는 불안정한 원소이므로 상용 전자기기 적용에는 부적합하다 [21]. 이러한 대안으로 주목받는 갈륨은 증기압이 극히 낮아 안정적이며 쉽게 증발하지 않아 공정 안정성이 높고, 인체에 무해한 무독성과 뛰어난 생체 적합성을 바탕으로 차세대 웨어러블 및 바이오 전자 소자를 위한 핵심 소재로 평가받고 있다 [22]. 다만 순수 갈륨은 29.8°C라는 비교적 높은 녹는점을 가져, 상온 환경에서는 고체상으로 존재할 수 있다는 잠재적 한계를 내포하고 있다 [23]. 이러한 단점을 극복하기 위해, 인듐(In), 주석(Sn) 등을 갈륨과 합금하여 상온보다 훨씬 낮은 영하의 온도에서도 액체 상태를 유지하는 갈륨 기반 합금, 예를 들어 Eutectic Gallium-Indium (EGaIn)이나 Gallium-Indium-Tin (Galinstan) 등이 변형가능한 전극 물질로서 활발히 연구 및 적용되고 있다 [24,25].

본 연구에서는 우수한 화학적 안정성과 생체 적합성을 지닌 EGaIn을 잉크 소재로 활용하여, 3D 프린팅 공법 기반의 고유연성 전극을 제작하였다. 프린팅된 전극 패턴의

정밀도와 균일성을 확보하고자 노즐 직경, 기판과 노즐 사이의 Z축 거리, 토출 압력, 프린팅 속도 등 핵심 공정 변수를 체계적으로 제어하며 최적화를 진행했으며, 강성 기판인 유리 위에서 확립된 최적 조건(압력 300 kPa, 속도 16 mm/s)을 유연한 투명 PET 기판에 적용하여 최종 전극을 제작했다. 제작된 유연 EGaIn 전극은 곡률 반경 3 mm의 극심한 굽힘 변형 하에서도 우수한 기계적 유연성과 전기적 신뢰성을 보였다. 나아가, 동일한 조건의 굽힘-펼 테스트를 100회 반복하는 사이클 테스트 이후에도 저항 값의 유의미한 변화가 관찰되지 않았으며, 이를 통해 본 연구에서 제작된 전극이 반복적인 기계적 변형에도 견딜 수 있는 탁월한 내구성을 갖추었음을 입증하였다.

사용된 EGaIn 액체 금속 잉크는 그림 1의 공정 개략도에 따라 정밀하게 제작되었다. 먼저, 75.5:24.5의 공용 조성비를 구현하기 위해 고순도(99.999%, 5N)의 입상 갈륨 15.1 g과 인듐 4.9 g을 정밀 계량하여 바이알에 투입하였다 [26]. 이후, 합금 과정 중 공기에 의한 불필요한 산화를 최소화하기 위해 200°C로 설정된 핫플레이트를 이용하여 약 2시간 동안 충분히 가열하는 열처리 공정을 진행하였다 [27]. 이 과정에서 녹는점이 29.8°C로 상대적으로 낮은 갈륨이 먼저 용융되어 액체상으로 변하고, 이어서 156.6°C의 녹는점을 갖는 인듐이 액상 갈륨 내에서 점진적으로 용해되며 합금이 형성된다 [28]. 두 금속이 완전히 용융된 후, 균질한 원자 분포를 갖는 공용 합금을 형성시키기 위해 막대를 이용한 기계적 교반을 5분간 수행하였다. 이렇게 형성된 EGaIn은 구성 원소인 갈륨이나 인듐보다 훨씬 낮은 15.7°C의 용융점을 갖게 되므로, 상온까지 자연 냉각시킨 후에도 고체상으로 응고되지 않고 안정적인 액체 상태를 유지하게 된다 [29]. 제작이 완료된 EGaIn 잉크는 압출 기반 3D 프린팅을 위해 플라스틱 주사기에 충전하였다. Dr.INVIVO 4D6 바이오 프린터(Rokit Healthcare, 대한민국)를 사용하였으며, 해당 장비는 최대 700 kPa의 공압과 50 mm/s의 인쇄 속도까지 적용이 가능하다. 프린팅된 전극 패턴의 선폭 균일성과 기판 접착력은 노즐과 기판 사이의 Z축 간격에 매우 민감하게 좌우되는데, 본 장비에는 자동 간격 보정 기능이 부재하여 수동 제어 방식을 통해 간격을 100  $\mu\text{m}$  이하로 정밀하게 유지하였다. 또한, 공정 변수 최적화 단계에서는 기판 자체의 평탄도 편차로 인한 오차를 최소화하고자 강성 및 평탄도가 우수한 유리 기판을 우선적으로 사용하였으며, 고해상도 패턴링을 구현하기 위해 장비에 적용 가능한 최소 내경인 70  $\mu\text{m}$ 를 갖는 플라스틱 재질의 마이크로 노즐을 채택하였다. 이러한 체계적인 최적화 과정을 통해 확립된 최종 공정 조건을 바탕으로, 목표로 하는 유연 투명 기판 위에 성공적으로 액체 금속 전



**Fig. 1.** Schematic fabrication procedure of flexible EGaIn electrodes through 3D printing process.

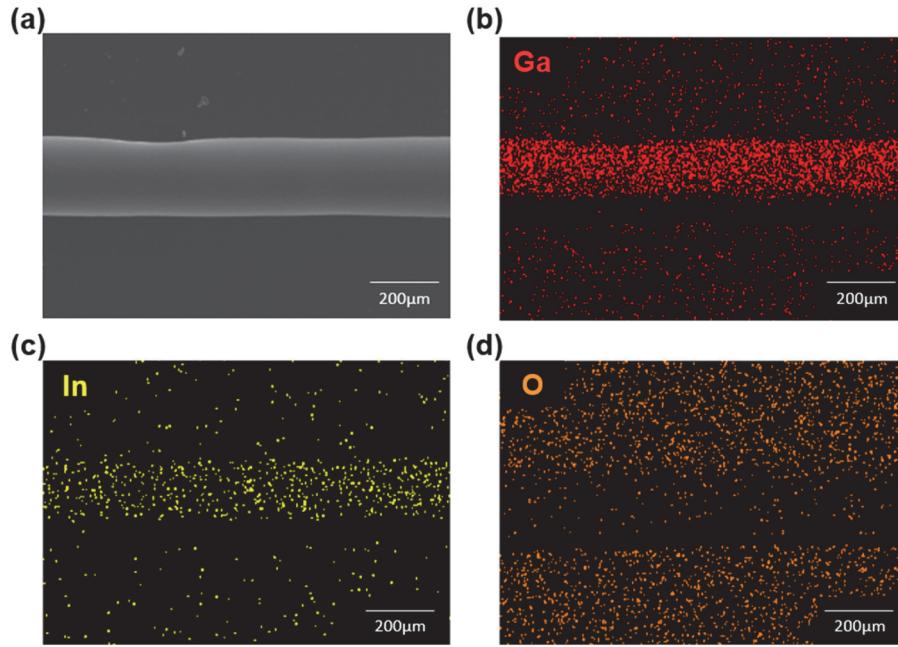
극을 제작하였다.

안정적인 직접 잉크 압출(direct-ink-writing; DIW) 3D 프린팅 공정을 위해서는 잉크 소재가 노즐 내 막힘 현상 없이 안정적으로 토출되어야 하며, 프린팅 이후에는 의도된 패턴의 형상을 온전히 유지할 수 있는 구조적 안정성이 요구된다 [30]. 액체 금속 EGaIn은 이러한 두 가지 핵심 요구조건을 모두 충족시키는 이상적인 소재이다. 먼저, 15.7°C의 낮은 녹는점 덕분에 상온에서 항상 액체 상태를 유지하므로 노즐 막힘의 우려가 없어 탁월한 공정 안정성을 보장하는 동시에, 구조적 안정성은 공기 노출 시 표면에 자발적으로 형성되는 얇은 산화갈륨( $Ga_2O_3$ ) 표면층이 담보하게 된다 [31]. 이러한 특성을 실제 제작된 전극에서 확인하고자 그림 2처럼 미세구조 및 원소 분포 분석을 진행하였다. 그림 2(a)는 유리 기판 위에 형성된 전극의 표면을 전계방사형 주사전자현미경(field emission scanning electron microscope, FESEM)으로 관찰한 이미지이며, 그림 2(b)부터 2(d)는 동일 영역에 대한 에너지 분산형 X선 분광법(energy-dispersive spectroscopy, EDS) 원소 맵핑 결과이다. EDS 분석 결과, 갈륨과 인듐이 특정 영역에 치우침 없이 전극 전체에 걸쳐 매우 균일하게 분포하고 있음을 확인하였으며, 이는 성공적인 공용 합금 형성을 시사한다.

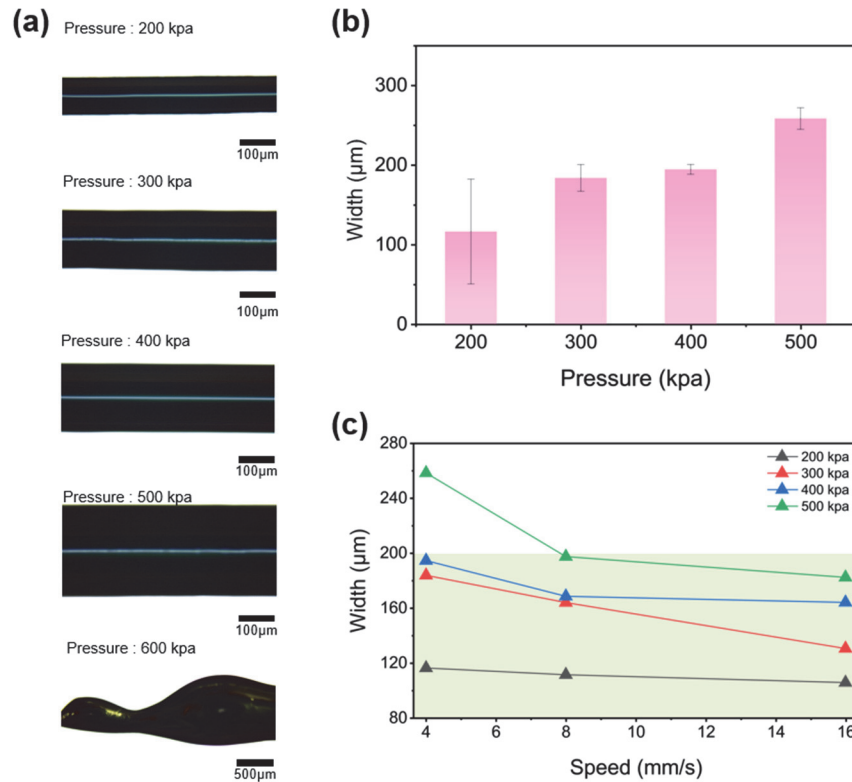
특히 EDS 맵핑에서 뚜렷하게 관찰되는 산소의 분포는 앞서 언급한 산화막의 존재를 명확히 입증하는 결과이다. 이  $Ga_2O_3$  기반의 자가 형성 산화막은 프린팅된 액체 금속 구조체의 안정성을 확보하는 데 다방면으로 핵심적인 역할을 수행하게 된다. 액체 금속의 유동성을 제어하여 의도한 미세 패턴이 붕괴하지 않고 형상을 유지하게 할 뿐만 아

니라, 금속층 내부 원자의 외부 확산을 억제하는 확산 방지층으로 작용하여 장기적인 화학적·전기적 안정성을 향상시킨다 [32-35]. 또한, 기판과의 계면 접착력을 증진시켜 구조물을 기계적으로 단단히 고정하는 역할도 담당하게 된다 [36]. 궁극적으로 이 산화막은 EGaIn이 본질적으로 액체임에도 불구하고 안정적인 고체 구조체처럼 거동할 수 있게 함으로써, DIW 공정에 요구되는 탁월한 기계적 안정성을 부여하는 핵심 요소라 할 수 있다 [37].

고집적 유연 전자 소자 구현을 위해서는 전극 패턴의 미세화가 필수적이므로, 본 연구에서는 3D 프린팅된 EGaIn 전극의 최종 해상도를 결정하는 핵심 공정 변수인 토출 압력과 프린팅 속도를 체계적으로 최적화하는 연구를 수행했다. 1차 최적화 단계로, 프린팅 속도를 4 mm/s로 일정하게 고정된 상태에서 토출 압력을 100 kPa부터 600 kPa까지 순차적으로 증가시키며 프린팅된 라인의 형상과 균일성을 정량적으로 평가했다. 그림 3(a)의 광학현미경 이미지에서 명확히 확인되듯이, 토출 압력의 증가는 노즐을 통해 압출되는 EGaIn의 단위 시간당 유량을 증가시켜 결과적으로 프린팅된 선폭을 비례적으로 증가시키는 경향을 보였다. 100 kPa의 압력 조건에서는 EGaIn 잉크의 점성과 표면장력으로 인해 발생하는 유동 저항을 극복하기에 불충분하여 안정적인 토출이 시작되는 임계 압력에 도달하지 못했다. 200 kPa 조건에서는 가장 얇은 선폭이 관찰되었으나, 그림 3(b)의 그래프에서 나타났듯 압력이 여전히 토출 안정성을 확보하기에는 다소 부족하여 프린팅 과정에서 잉크의 흐름과 멈춤이 반복되는 불안정한 토출 현상이 발생했고, 이는 불연속적인 끊김과 매우 큰 선폭 표준 편차로 이어졌다. 반면, 300 kPa과 400 kPa 조건에서



**Fig. 2.** (a) SEM image of EGaln line pattern on a glass substrate. EDS mapping image of (b) Ga, (c) In, and (d) O element, showing the exact location of the EGaln pattern.

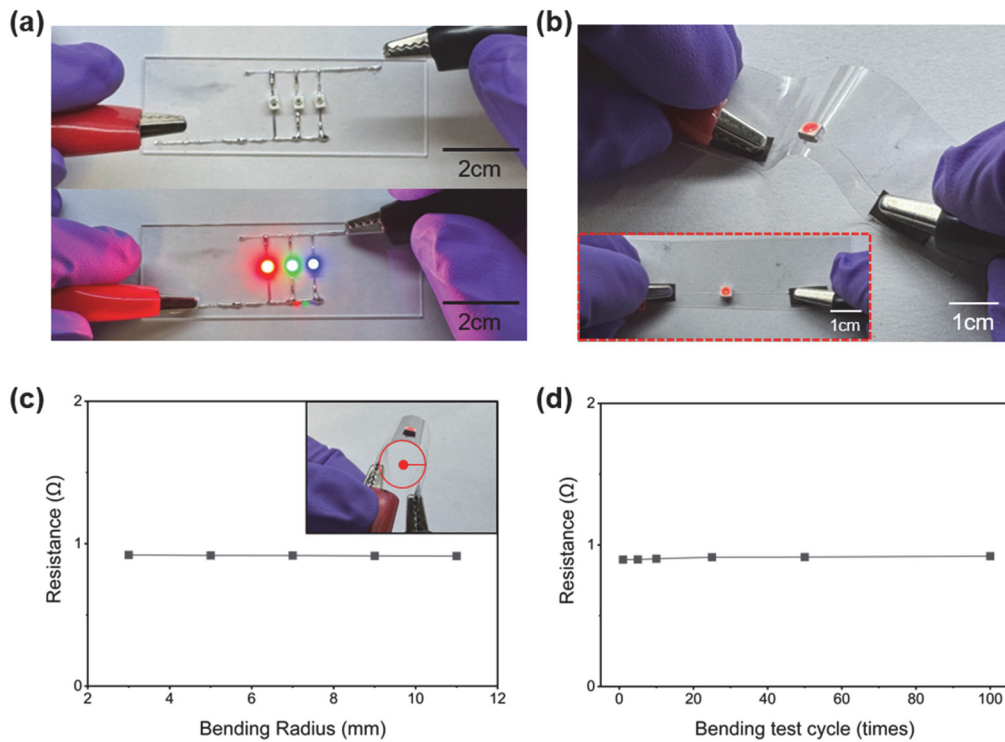


**Fig. 3.** (a) Magnified optical images and (b) average line width of the 3D-printed EGaln patterns according to output pressure of the printer nozzle. (c) 3D-printed EGaln line width as a function of the printing speed at various output pressure of the printer nozzle.

는 압력과 토출량이 균형을 이루는 안정적인 연속 흐름 영역에 도달하여, 각각 183  $\mu\text{m}$  (표준편차 16  $\mu\text{m}$ ) 및 194  $\mu\text{m}$  (표준편차 6  $\mu\text{m}$ )의 평균 선폭을 갖는 매우 균일하고 연속적인 라인이 안정적으로 프린팅 되었다. 하지만 600 kPa 이상의 과도한 압력 조건에서는 과다 토출로 인해 압출된 액체 금속 스트림이 선형을 유지하지 못하고, 불규칙한 액적 형태로 응집되어 정밀한 전극 배선 형성이 불가능했다. 이러한 압력 최적화 결과를 바탕으로, 가장 안정적이면서도 미세한 패턴 구현에 유리한 300 kPa를 최적 압력으로 선정하고, 2차 최적화 단계로 프린팅 속도가 선폭에 미치는 영향을 4, 8, 16 mm/s로 변화시키며 분석하였다. 그림 3(c)에서 확인할 수 있듯이, 일정한 압력 하에서 프린팅 속도가 증가함에 따라 단위 길이당 증착 되는 잉크의 양이 감소하여 선폭이 이에 반비례하여 감소하는 뚜렷한 경향성을 확인했다. 특히, 300 kPa 압력에서 속도를 16 mm/s까지 높였을 때, 선폭의 균일도를 나타내는 표준편차는 20  $\mu\text{m}$  수준으로 안정적으로 유지되면서도 평균 선폭은 130  $\mu\text{m}$  까지 성공적으로 감소시킬 수 있었다. 이처럼 체계적인 공정 최적화를 통해, 초기 500  $\mu\text{m}$  이상의 불안정했던 선폭

을 200  $\mu\text{m}$  이하의 미세하고 균일한 라인으로 안정적으로 프린팅할 수 있는 핵심 공정 윈도우를 확보하였다. 향후 연구에서는 본 최적화된 라인을 기반으로 서펜타인 (serpentine) 구조와 같은 다양한 패턴의 전극을 제작하고, 마이크로 소자 적용을 위해 EGaIn과의 습윤성이 제어된 기판 및 노즐 소재를 도입하거나, 제어된 분위기에서 산화막 두께를 조절하는 방식을 통해 100  $\mu\text{m}$  이하의 초미세 선폭을 구현하기 위한 심화 연구를 진행할 계획이다.

앞서 체계적인 실험을 통해 확립된 최적 공정 조건(토출 압력 300 kPa, 프린팅 속도 16 mm/s)을 적용하여, 유리 기판 위에 EGaIn 전극기반 간단한 Mini-LED 구동 회로를 성공적으로 제작하였다 [그림 4(a)]. 제작된 회로의 전기적 성능을 시각적으로 입증하기 위해, 회로 양단에 Mini-LED를 직접 연결하여 안정적으로 점등되는 것을 확인하였다. 더 나아가, 실제 유연 소자에 적용하기 위한 핵심 특성인 기계적 변형 하에서의 전기적 안정성을 평가하고자, 동일한 최적 조건으로 투명하고 유연한 PET 기판 위에 전극을 프린팅하였다. 그림 4(b)와 같이 굽힘 변형 하에서도 전극의 물리적 단선이 발생하지 않았으며, 심지어는 기판을 구



**Fig. 4.** (a) Photograph of a simple circuit pattern printed with EGaIn on a glass substrate, shown before and after powering an LED, (b) image of LED operation using electrodes printed on a PET substrate, shown in flat and bent states, (c) graph of resistance measurements as a function of bending radius with an inset showing the bending radius measurement, and (d) graph of resistance measurements as a function of bending test cycles.

부린 상태에서도 Mini-LED가 안정적으로 구동됨을 확인하여 탁월한 유연성을 입증하였다. 이를 정량적으로 분석하기 위해, 1 V의 전압을 Mini-LED에 인가한 상태에서 곡률 반경 변화에 따른 저항 변화를 측정하였다. EGaIn 소재의 본질적인 유동성과 변형성 덕분에 그림 4(c)에서처럼 곡률 반경 변화에도 저항 변화율이 0.82% 미만에 머무르는 매우 안정적인 전기적 거동을 보였다. 마지막으로, 반복적인 기계적 변형에 대한 내구성을 평가하기 위해 최대 100회의 굽힘-펴 테스트를 진행하였다. 그림 4(d)의 그래프에서 볼 수 있듯이, 굽힘 횟수가 100회에 도달할 때까지 전극의 초기 저항값인 약 0.9  $\Omega$ 을 거의 변화 없이 일정하게 유지하는 것을 확인하였고, 이를 통해 본 연구에서 제작된 EGaIn 전극의 뛰어난 기계적 내구성과 전기적 신뢰성을 최종적으로 입증하였다.

본 연구에서는 차세대 유연 전자 소자의 핵심 소재인 액체 금속 EGaIn을 3D 프린팅 기술로 패터닝하기 위한 체계적인 공정 최적화를 수행하고, 제작된 전극의 기계적·전기적 특성을 평가하여 유연 전극으로서의 응용 가능성을 검증하고자 하였다. 이를 위해 EGaIn의 합성부터 SEM/EDS를 통한 균일한 조성 및 자가 산화막 형성 검증, 그리고 토출 압력과 프린팅 속도라는 핵심 공정 변수가 최종 선풍과 안정성에 미치는 영향을 정량적으로 분석하여 300 kPa의 압력과 16 mm/s의 속도라는 최적 조건을 확립하였다. 이러한 최적화 공정을 통해 제작된 유연 EGaIn 전극의 기계적 유연성과 전기적 신뢰성을 평가한 결과, 곡률 반경 3 mm의 극심한 굽힘 변형 하에서도 초기 저항 대비 저항 변화율이 0.82% 미만으로 매우 안정적인 전기적 특성을 확인하였다. 더 나아가, 동일한 조건의 굽힘-펴 변형을 100회 반복하는 사이클 테스트 이후에도 저항 값의 유의미한 변화가 관찰되지 않았으며, 이를 통해 본 연구에서 제작된 전극이 반복적인 기계적 변형에도 견딜 수 있는 탁월한 내구성을 갖추었음을 입증하였다. 이러한 결과는 3D 프린팅 기술과 EGaIn 소재의 고유한 특성이 결합하여, 기계적 스트레스가 인가되는 환경에서도 높은 신뢰성을 유지하는 고성능 유연 전극을 성공적으로 구현할 수 있음을 명확히 보여준다. 그러나 현재 전자 소자의 고집적화 및 소형화 추세에 따라 100  $\mu\text{m}$  이하의 고해상도 패터닝 기술이 요구되고 있다 [38-41]. 따라서 향후 연구에서는 100  $\mu\text{m}$  이하의 고해상도 전극 형성 기술 개발을 목표로, EGaIn의 습윤성 제어 위한 기판 표면 처리 및 노즐 소재 변경, 산화막 두께의 정밀 제어, 그리고 자동화된 공정을 통한 복잡한 회로 패턴 구현 등 후속 연구를 통해 EGaIn 기반 유연 전자기술의 실용화 가능성을 더욱 구체화할 계획이다.

## ORCID

Haneol Lee

<https://orcid.org/0000-0003-2866-5947>

## 감사의 글

This research was supported by the Regional Innovation Systems & Education (RISE) initiative, funded by the Ministry of Education and administered by the National Research Foundation of Korea (NRF), and also supported by the Commercializations Promotion Agency for R&D Outcomes (COMPA) grant funded by the Korean Government (Ministry of Science and ICT, 2023) (RS-2023-00304743).

## REFERENCES

- [1] Y. Ko, J. H. Kim, S. Y. Park, K. H. Kim, S. M. Hong, B. Y. Lee, and H. E. Lee, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **37**, 554 (2024).  
doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2024.37.5.13>
- [2] S. Y. Park, S. J. Choi, J. C. Kim, D. J. Joe, and H. E. Lee, *Energy Environ. Mater.*, **8**, e70039 (2025).  
doi: <https://doi.org/10.1002/eem2.70039>
- [3] S. J. Choi, C. H. Kim, J. H. Kim, K. H. Kim, S. Y. Park, Y. J. Ko, H. Kang, Y. B. Kim, Y. M. Woo, J. Y. Seok, B. Kang, C. K. Jeong, K. I. Park, G. T. Hwang, J. H. Park, and H. E. Lee, *Energy Environ. Mater.*, **8**, e70005 (2025).  
doi: <https://doi.org/10.1002/eem2.70005>
- [4] L. K. Bae and M. K. Choi, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **38**, 21 (2025).  
doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2025.38.1.3>
- [5] G. Singh, A. P. Singh, Z. Ali, N. K. Sharma, and V. K. Singh, *Trans. Electr. Electron. Mater.*, **26**, 78 (2025).  
doi: <https://doi.org/10.1007/s42341-024-00576-7>
- [6] S. Park, T. J. Kim, H. E. Lee, B. S. Ma, M. Song, M. S. Kim, J. H. Shin, S. H. Lee, J. H. Lee, Y. B. Kim, K. Y. Nam, H. J. Park, T. S. Kim, and K. J. Lee, *Nat. Commun.*, **14**, 7744 (2023).  
doi: <https://doi.org/10.1038/s41467-023-43342-8>
- [7] J. H. Lee, Y. Ahn, H. E. Lee, Y. N. Jang, A. Y. Park, S. Kim, Y. H. Jung, S. H. Sung, J. H. Shin, S. H. Lee, S. H. Park, K. S. Kim, M. S. Jang, B. J. Kim, S. H. Oh, and K. J. Lee, *Adv. Healthc. Mater.*, **12**, 2201796 (2023).  
doi: <https://doi.org/10.1002/adhm.202201796>
- [8] S. J. Choi and H. E. Lee, *J. Powder Mater.*, **32**, 67 (2025).  
doi: <https://doi.org/10.4150/jpm.2024.00465>
- [9] S. Yang, J. Cheng, J. Shang, C. Hang, J. Qi, L. Zhong, Q. Rao, L. He, C. Liu, L. Ding, M. Zhang, S. Chakrabarty, and X. Jiang

- Nat. Commun.*, **14**, 6494 (2023).  
doi: <https://doi.org/10.1038/s41467-023-42149-x>
- [10] D. Yang, G. Tian, C. Liang, Z. Yang, Q. Zhao, J. Chen, C. Ma, Y. Jiang, N. An, Y. Liu, and D. Qi, *Adv. Funct. Mater.*, **33**, 2300412 (2023).  
doi: <https://doi.org/10.1002/adfm.202300412>
- [11] S. Han, K. Kim, S. Y. Lee, S. Moon, and J. Y. Lee, *Adv. Mater.*, **35**, 2210112 (2023).  
doi: <https://doi.org/10.1002/adma.202210112>
- [12] Y. Wei, B. Tang, X. Liang, F. Zhang, and Y. Tang, *Adv. Mater.*, **35**, 2302086 (2023).  
doi: <https://doi.org/10.1002/adma.202302086>
- [13] Y. Zhang, X. Yuan, W. Lu, Y. Yan, J. Zhu, and T. W. Chou, *Chem. Eng. J.*, **368**, 525 (2019).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.02.206>
- [14] W. Du, X. Du, M. Ma, S. Huang, X. Sun, and L. Xiong, *Adv. Funct. Mater.*, **32**, 2110871 (2022).  
doi: <https://doi.org/10.1002/adfm.202110871>
- [15] Y. R. Jeong, J. Kim, Z. Xie, Y. Xue, S. M. Won, G. Lee, S. W. Jin, S. Y. Hong, X. Feng, Y. Huang, J. A. Rogers, and J. S. Ha, *NPG Asia Mater.*, **9**, e443 (2017).  
doi: <https://doi.org/10.1038/am.2017.189>
- [16] E. Kim, E. Jeong, Y. M. Hong, I. Jeong, J. Kim, Y. W. Kwon, Y. G. Park, J. Lee, S. Choi, J. Y. Kim, J. H. Lee, S. W. Cho, and J. U. Park, *Nat. Commun.*, **16**, 2011 (2025).  
doi: <https://doi.org/10.1038/s41467-024-55752-3>
- [17] C. Ladd, J. H. So, J. Muth, and M. D. Dickey, *Adv. Mater.*, **25**, 5081 (2013).  
doi: <https://doi.org/10.1002/adma.201301400>
- [18] L. Wang, J. Han, W. Su, A. Li, W. Zhang, H. Li, H. Hu, W. Song, C. Xu, and J. Chen, *Microsyst. Nanoeng.*, **9**, 2 (2023).  
doi: <https://doi.org/10.1038/s41378-022-00447-2>
- [19] M. F. Imron, S. B. Kurniawan, and S. R. S. Abdullah, *Sustain. Environ. Res.*, **31**, 14 (2021).  
doi: <https://doi.org/10.1186/s42834-021-00088-6>
- [20] M. D. Dickey, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **6**, 18369 (2014).  
doi: <https://doi.org/10.1021/am5043017>
- [21] S. Zitzmann-Kolbe, Y. Remde, I. Moen, B. Madas, L. Mázik, F. Suurs, S. Happel, M. Schäfer, C. Schatz, H. Taş, U. B. Hagemann, and M. Benešová-Schäfer, *Eur. J. Nucl. Med. Mol. Imaging*, **52**, 1 (2025).  
doi: <https://doi.org/10.1007/s00259-025-07427-4>
- [22] D. Wang, X. Wang, and W. Rao, *Acc. Mater. Res.*, **2**, 1093 (2021).  
doi: <https://doi.org/10.1021/accountsmr.1c00173>
- [23] X. Wang, X. Lu, W. Xiao, X. Liu, L. Li, H. Chang, Z. Yu, X. Yang, L. Chang, K. Sun, Q. Wang, C. Jiao, and L. Hu, *Adv. Mater. Interfaces*, **10**, 2202100 (2023).  
doi: <https://doi.org/10.1002/admi.202202100>
- [24] L. Duan, Y. Zhang, J. Zhao, Q. Li, J. Zhang, J. He, J. Liu, and Q. Liu, *ACS Appl. Electron. Mater.*, **4**, 112 (2022).  
doi: <https://doi.org/10.1021/acsaelm.1c00722>
- [25] H. Luo, L. Peng, D. Yang, B. Zou, and H. Zhang, *Adv. Funct. Mater.*, **35**, 2418868 (2025).  
doi: <https://doi.org/10.1002/adfm.202418868>
- [26] J. Xu, H. Guo, H. Ding, Q. Wang, Z. Tang, Z. Li, and G. Sun, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **13**, 7443 (2021).  
doi: <https://doi.org/10.1021/acsami.0c20549>
- [27] Q. Xu, N. Oudalov, Q. Guo, H. M. Jaeger, and E. Brown, *Phys. Fluids*, **24**, 063101 (2012).  
doi: <https://doi.org/10.1063/1.4724313>
- [28] Z. Gardner, S. Rahpeima, Q. Sun, J. Zou, N. Darwish, K. Vimalanathan, and C. L. Raston, *Small*, **20**, 2300577 (2024).  
doi: <https://doi.org/10.1002/sml.202300577>
- [29] M. Jia and J. T. Newberg, *J. Phys. Chem. C*, **123**, 28688 (2019).  
doi: <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.9b07731>
- [30] M. A. Sourou, S. I. Emu, M. S. H. Thakur, M. M. Ikram, A. K. M. M. Morshed, and M. M. Rahman, *Sci. Rep.*, **15**, 9842 (2025).  
doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-74058-4>
- [31] Y. Zhang, Z. Wang, S. Wang, Z. Yu, Z. Xu, and L. Jiang, *ACS Nano*, **19**, 4913 (2025).  
doi: <https://doi.org/10.1021/acsnano.4c16623>
- [32] Y. G. Park, H. S. An, J. Y. Kim, and J. U. Park, *Sci. Adv.*, **5**, eaaw2844 (2019).  
doi: <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaw2844>
- [33] Z. Zhao, S. Soni, T. Lee, C. A. Nijhuis, and D. Xiang, *Adv. Mater.*, **35**, 2203391 (2023).  
doi: <https://doi.org/10.1002/adma.202203391>
- [34] M. Yunusa, G. J. Amador, D. M. Drotleff, and M. Sitti, *Nano Lett.*, **18**, 2498 (2018).  
doi: <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.8b00164>
- [35] J. H. Kim, D. H. Kim, N. G. Park, M. J. Ko, J. Cho, and H. J. Koo, *Adv. Funct. Mater.*, **34**, 2311597 (2024).  
doi: <https://doi.org/10.1002/adfm.202311597>
- [36] S. Jung, J. Lee, S. Choi, and W. Kim, *Phys. Fluids*, **34**, 122114 (2022).  
doi: <https://doi.org/10.1063/5.0130491>
- [37] R. Agarwal and A. Mohamad, *Adv. Colloid Interface Sci.*, **329**, 103183 (2024).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2024.103183>
- [38] H. Zhu, S. Wang, M. Zhang, T. Li, G. Hu, and D. Kong, *npj Flex. Electron.*, **5**, 25 (2021).  
doi: <https://doi.org/10.1038/s41528-021-00123-x>
- [39] A. Jiang, F. Xu, H. Fang, C. Zhang, S. Chen, and D. Sun, *Langmuir*, **40**, 19830 (2024).  
doi: <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.4c02737>
- [40] G. Zhang, Z. Yu, D. Song, Z. Fu, X. Zhu, H. Li, P. Duan, L. Qian, J. Zhao, Q. Xu, J. He, D. Li, and H. Lan, *Nat. Commun.*, **16**, 5258 (2025).  
doi: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-60408-x>
- [41] J. Y. Lee, D. Wu, X. Guo, M. Ariannejad, M. A. S. Bhuiyan, and M. H. Miraz, *Trans. Electr. Electron. Mater.*, **25**, 304 (2024).  
doi: <https://doi.org/10.1007/s42341-024-00513-8>