

금속 나노 파티클의 레이저 플라즈모닉 어닐링을 통한 메탈메쉬 전극 형성과 이를 활용한 유연 터치 센서

정성민¹, 황윤식¹, 우유미², 조용준¹, 김찬혁¹, 안민기¹,

서호석¹, 양찬현¹, 박귀일³ , 박정환² 

¹ 금오공과대학교 기계설계학과

² 금오공과대학교 기계공학과(항공기계전자융합전공)

³ 경북대학교 신소재공학부 금속신소재공학전공

Formation of Metal Mesh Electrodes via Laser Plasmonic Annealing of Metal Nanoparticles for Application in Flexible Touch Sensors

Seongmin Jeong¹, Yun Sik Hwang¹, Yu Mi Woo², Yong Jun Cho¹, Chan Hyeok Kim¹, Min Gi An¹,
Ho Seok Seo¹, Chan Hyeon Yang¹, Kwi-II Park³, and Jung Hwan Park²

¹ Department of Mechanical Design Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Gumi 39177, Korea

² Department of Mechanical Engineering (Department of Aeronautics, Mechanical and Electronic Convergence Engineering),
Kumoh National Institute of Technology, Gumi 39177, Korea

³ Department of Materials Science and Metallurgical Engineering, School of Materials Science and Engineering,
Kyungpook National University, Daegu 41566, Korea

(Received December 28, 2023; Revised January 14, 2024; Accepted January 15, 2024)

Abstract: Laser-induced plasmonic sintering of metal nanoparticles (NPs) holds significant promise as a technology for producing flexible conducting electrodes. This method offers immediate, straightforward, and scalable manufacturing approaches, eliminating the need for expensive facilities and intricate processes. Nevertheless, the metal NPs come at a high cost due to the intricate synthesis procedures required to ensure long-term reliability in terms of chemical stability and the prevention of NP aggregation. Herein, we induced the self-generation of metal nanoparticles from Ag organometallic ink, and fabricated highly conductive electrodes on flexible substrates through laser-assisted plasmonic annealing. To demonstrate the practicality of the fabricated flexible electrode, it was configured in a mesh pattern, realizing multi-touchable flexible touch screen panel.

Keywords: Laser-material interaction, Plasmonic annealing, Ag organometallic ink, Flexible electronics, Touch screen panel

✉ Kwi-II Park; kipark@knu.ac.kr

Jung Hwan Park; parkjh1151@kumoh.ac.kr

Seongmin Jeong and Yun Sik Hwang equally contributed to this work.

Copyright ©2024 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.

현대의 전자기기 기술은 급속도로 성장하고 있으며 이는 성능의 측면을 벗어나 형태나 구조를 변화하는 폴더블, 플렉서블, 롤러블 등의 기기들이 소개되고 있는 추세이다 [1]. 이러한 다양한 웨어러블 기기에 사용되기 위한 유연하고 투명한 전극 연구에 대한 관심 또한 커지고 있다 [2]. 기

존 전극을 제작하기 위해 포토리소그래피 공정이 상용화 되어 있다. 하지만 노광 장비의 가격이 매우 비싸며 제작 공정이 복잡할 뿐만 아니라 증착 공정에서의 진공/고온의 환경으로 인해 유연한 기판이 손상되는 문제 등이 제기되어 왔다. 이런 문제들을 해결하기 위해 스크린 프린팅, 금속 증기 기상 증착과 같은 공정이 시도되어 왔다. 그러나 스크린 프린팅의 경우 공정이 빠르고 단순한 장점이 있으나, 제작하고자 하는 전극의 패턴에 맞추어 별도의 마스크를 제작해야 하며 밀도와 결정성 측면을 개선하기 위해 추가적인 열처리 공정이 필요하다. 금속 증기 기상 증착의 경우 유연 기질 표면에 Ag, Au, Pt 등과 같은 금속을 증기 상태로 증착 또는 금속성 이온을 주입해 유연 전극을 제작하고 스크린 프린팅에 비해 더 작은 스케일의 전극이 구현 가능하며 우수한 전극 품질을 통해 안정적인 전기적 성질을 보인다는 장점이 있다. 하지만 이렇게 제작된 전극들은 10% 이상의 인장 변형 하에서 금속층이 유연 기질로부터 박리되어 전기 전도성이 저하되는 문제가 있으며 금속 증착 공정을 사용해 공정 비용이 매우 비싸다는 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 진공과 고온의 환경이 필요하지 않으며 비교적 공정이 단순한 레이저 소결 공정을 활용해 전극을 제작하고자 한다. 레이저 소결 공정의 경우 소프트웨어상의 도면 변경을 통해 원하는 패턴을 추가적인 마스크 제작 없이 구현 가능한 장점이 있으며 증착을 위한 장비가 필요하지 않고 상온, 상압의 환경에서 공정이 진행된다는 점에서 비교적 비용이 저렴하다. 추가로 레이저의 초점, 파워, 속도 등과 같은 파라미터를 변경해 전극의 크기 또한 조절이 가능하며 레이저를 통해 발생하는 국부적인 열로 인해 소결이 함께 진행된다는 점에서 추가적인 열처리 공정이 필요하지 않아 산업적 효용성 또한 높다고 볼 수 있다.

본 연구에서는 레이저 공정에 활용하기 위한 다양한 나노 물질 중 유기 금속 화합물 용액을 사용했다. 그래핀, 금속 나노 와이어, 전도성 폴리머 등과 같은 다양한 나노 물질들을 사용한 유연 전극 개발 연구가 활발히 진행되고 있으나, 그래핀, 탄소나노튜브와 같은 탄소 기반 소재의 경우 광전자 특성이 좋지 않으며, 금속 나노 와이어는 헤이즈의 문제가 있고, 전도성 폴리머의 경우 습기 등의 환경적

피로에 취약하다는 문제가 있다 [3].

이에 본 연구에서는 금속 이온이 유기화합물과 이온 결합 상태로 존재해 산화로 인해 보관이 어려운 금속 나노 파티클에 비해 보관이 용이하고 제작 비용이 상대적으로 저가(은 나노 입자 잉크 대비 1/100)의 은 유기 금속 화합물 용액을 공정에 적용해 저렴하고 간단하게 우수한 성능의 유연한 전극을 개발했다 [4]. 실험 과정에서 532 nm 파장의 CW 레이저는 저온으로 가열된 은 유기 금속 화합물 용액에 조사되었고 플라즈모닉 광열 반응을 통해 나노 입자의 자가 생성과 소결 반응을 유도해 은 전극을 성공적으로 구현했다. 제작된 전극을 메쉬 모양으로 제작해 면 전극을 구현했고 투과도 80% 이상, 면 저항은 $7 \Omega/\square$ 의 우수한 광전자 특성을 나타내었다. 유연한 전극 소재는 전극만으로 사용될 뿐만 아니라 변형률 센서, 터치 센서 등 자체로도 쓰일 가능성이 있다. 이에 본 논문에서는 레이저 소결 공정과 유기 금속 화합물 용액을 활용해 제작한 유연하고 투명한 전극을 통해 웨어러블 터치센서를 구현해 레이저 공정의 장점과 나노 물질을 사용한 유연 전극의 다기능성에 대해 소개하고자 한다.

그림 1은 532 nm CW (continuous wave) 레이저 플라즈모닉 어닐링을 통한 메탈 메쉬 전극을 제작하는 실험 개략도를 보여준다. 투명 전극을 위해 기존의 불투명한 폴리이미드 필름을 대신하여 투명한 폴리이미드 필름을 사용했다. 폴리이미드 필름을 고정하기 위해 PDMS (polydimethylsiloxane)가 부착된 소다 라임 유리(soda-lime glass)가 사용되었고, 폴리이미드 필름은 고정된 후 보호필름을 제거 후, 초순수 증류수(deionized water)에 세척하여 이물질을 제거하였다. 실험에 사용된 PDMS는 주제와 경화제 10:1의 질량비로 혼합하였고, 3,000 rpm, 5 ramp, 30 sec의 조건으로 스핀 코팅하여 소다 라임 유리 기판 위에 도포했다. PDMS의 적절한 경화를 위해 컨벡션 오븐에서 80°C로 20분간 건조시켰다. 이후에 은 유기 금속 화합물 잉크를 투명 폴리이미드 필름 위에 도포하기 위해 2,000 rpm, 5 ramp, 20 sec 조건으로 스핀코팅을 진행하였다.

은 이온과 암모늄 카바메이트(ammonium carbamates,

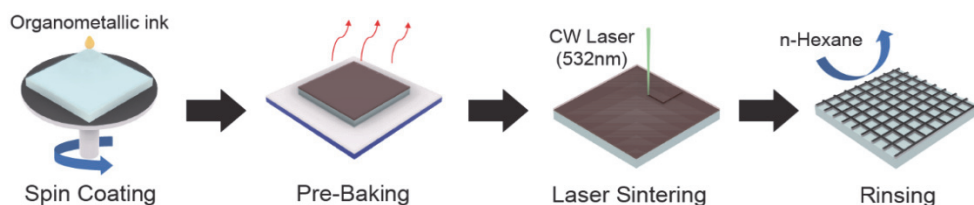


Fig. 1. Schematic of laser-induced electrode fabrication process.

H₂NCO₂NH₄) 사이의 유기 화학적 결합을 끊어 내부에 코팅된 잉크에서 고상의 은 입자를 석출하기 위해 100°C의 온도에서 60초 동안 핫플레이트에서 예비가열(pre-baking)을 진행했다. 100 mW의 레이저 출력을 사용하여, 스캐너 패터닝 프로그램(Laserdesk, Scanlab사)을 이용하여 5 mm/s의 마크 속도로 메탈 메쉬 전극 형태의 패턴을 제작했다. 레이저의 어닐링이 사용되지 않은 부분의 유기 금속 화합물을 제거하기 위해 레이저 공정 후의 필름의 표면을 노말헥산(n-hexane) 용액으로 세척하였다.

그림 2는 메쉬 형태의 유연 터치 센서를 제작하기 위한 공정 개략도를 보여준다. 그림 2(a)의 유연 터치 센서의 구성으로 전극 제작 공정과 같은 방법으로 제작된 샘플에 멀티 터치를 구현하기 위한 3개의 메쉬 패턴을 형성하여 sensing cell을 제작하였으며, 터치 센서의 정확하고 안정적인 인식을 유도하기 위해 베젤(bezel)을 만들어 안정적인 전기신호가 생성될 수 있도록 하였다. 끝으로 각각의 베젤과 연결된 bezel circuit을 만들었다. Bezel circuit은 단자를 통해 각각 연결되었고, 아두이노 우노(UNO)와 최종적으로 연결되어 정상적으로 터치를 인식하는 데 사용되었다.

그림 2(b)의 레이저 패터닝을 통해 sensing cell, bezel 그리고 bezel circuit을 형성 후, 레이저 어닐링이 진행되지 않은 부분의 유기 금속 화합물은 노말헥산(n-hexane) 용액으로 세척하여 투명도를 높이고자 하였다. 끝으로, 폴

리이미드 필름을 PDMS로부터 제거한 후, 전극이 쉽게 산화되고 손상되는 것을 방지하기 위해 3 M tape를 사용한 encapsulation 과정을 거쳐 유연 터치 센서를 제작하였다. 비록 complementary metal oxide semiconductor (CMOS) 공정법을 통한 패시베이션(passivation) 방식이 소자의 내구성을 향상시키는 데 있어 더욱 효과적일 수 있지만, 본 연구에서는 디바이스의 실현 가능성(feasibility)을 손쉽게 검증하는 데 초점을 두었다. 따라서 제작된 소자 위에 3 M tape를 이용하여 간단히 encapsulation층을 형성하였고, 이를 통하여 유연 터치 센서의 성능과 안정적인 동작 유무를 확인할 수 있었다.

최종적으로 제작된 유연 터치 센서는 저항식 터치 센서의 작동 방법을 따른다. 폴리이미드 필름 위에 제작된 메쉬 패턴의 은 전극에 터치를 하게 되면 그림 2(c)와 같이 전기 저항이 변하고, 이를 측정하여 터치를 감지하게 된다. 전기 저항의 변화를 측정하기 위해 아두이노 우노(UNO)가 사용되었으며, 간단한 형태의 디바이스를 제작하기 위해 발광다이오드(LED)를 연결하여 터치에 따른 상호작용을 구현하였다.

은 유기 금속 화합물 용액의 경우 상온에서 은 이온과 암모늄 카바베이트(H₂NCO₂NH₄)와 같은 유기화합물이 이온 결합을 하고 있는 상태로 존재하며, 다양한 파장에서 활발한 광흡수를 가능하게 하는 고상의 입자가 존재하지 않는다 [5]. 따라서 광학적으로 투명한 용액의 이러한 광 흡수

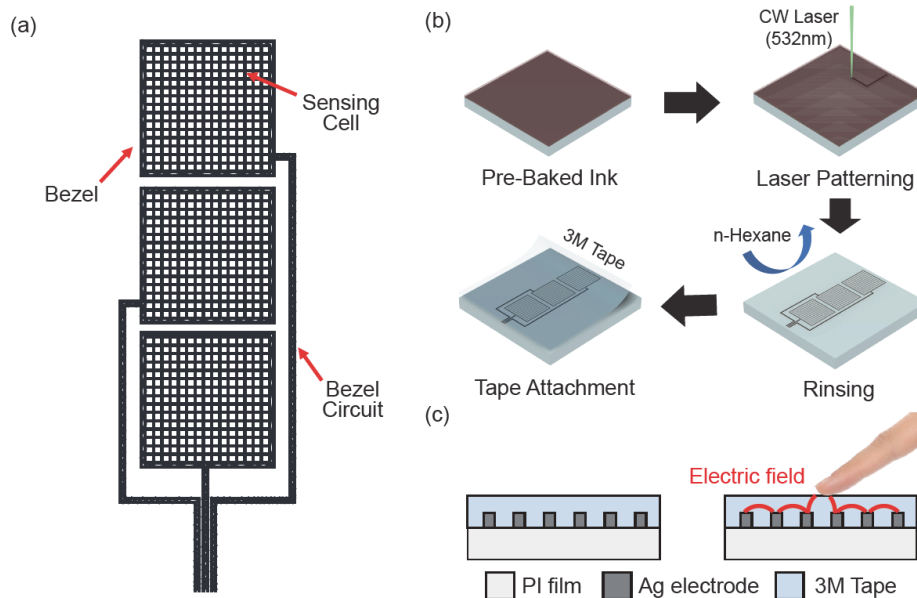


Fig. 2. (a) Fabrication of flexible touch sensor based on metal mesh structure, (b) schematic of fabrication process for a flexible touch sensor, and (c) operating principle of touch sensor.

매개체의 결여는 레이저 조사를 통한 광열 발생 효과가 일어나지 못하는 이유가 된다. 이를 예비 가열 공정을 통하면 미량의 열 에너지가 용액에 전달될 때 유기 은 이온과 유기 물 사이의 결합이 깨지며 2~3 nm의 매우 작고 균일한 은 나노 파티클이 석출된다. 이렇게 제작된 은 나노 파티클이 자가 생성된 용액의 경우 흡광계수가 550 nm 영역의 파장 대역에서 높게 측정되었다.

은 유기 금속 화합물 용액의 예비 가열로 자가 생성된 은 나노 파티클이 생성된 모습은 그림 3(a)의 scanning electron microscope (SEM) 사진을 통해 확인 가능하다 [6]. 이때 예비 가열의 시간이 너무 길어지게 되면 은 나노 파티클의 자가 생성과 더불어 소결 또한 함께 발생하기 때문에 세척이 되지 않거나 소결된 은 입자의 반사율 증가로 인해 레이저 공정에서 빛 에너지를 충분히 받지 못해 소결이 발생하지 않는 등의 문제가 발생하게 된다. 따라서 예비 가열의 시간의 최적화가 추후 공정에 중요한 영향을 끼치며 본 실험에서는 100°C의 온도에서 약 60 sec 동안 가열했다. 용액의 흡광계수가 550 nm의 파장대역에서 높게 측정됨에 따라 본 실험에서는 532 nm의 파장을 가지는 continuous wave (CW) 레이저를 사용했다. 흡광계수가 높은 영역과 동일한 파장의 레이저 광원을 사용하면 레이저 광에 의해 나노 입자가 플라즈모닉 공명 현상을 일으켜

효과적인 광흡수가 가능하도록 한다 [7].

그림 3(b)는 1 mm/s, 5 mm/s, 10 mm/s의 각각 다른 레이저 패터닝 속도에서 레이저의 파워를 달리하며 제작한 전극의 폭을 나타낸 결과 그래프이다. 이 과정에서 레이저 소결 공정을 통해 제작된 전극은 X-ray diffraction (XRD) 분석을 통해 은이 검출된 것을 그림 3(c)의 XRD 결과 피크를 통해 확인했다. 이때, 레이저 파워 10 mW 이전의 결과 값이 없는 것은 미약한 레이저의 파워로 인해 소결이 진행되지 않아 전극이 만들어지지 않았기 때문이다 [8]. 또한, 그래프의 결과 값이 우측으로 상승하는 이유는 레이저의 세기가 강해질수록 입자들에 발생하는 플라즈모닉 현상이 강해지게 되고 이 때문에 발생하는 열이 주변으로 더 많이 발생하며 전극의 폭이 두꺼워지게 되었다 [9]. 추가적으로 생성된 전극 중 가장 얇은 전극을 사용하는 것이 좋으나 소결 상태가 100 mW 아래에서는 기공이 발생하거나 박리가 일어나는 좋지 못한 상태를 보였다.

레이저의 속도 또한 중요한 요소로 작용하는데 1 mm/s의 매우 느린 속도에서는 전극의 소결 상태는 우수했으나 공정의 진행이 너무 느려 추후 세척과정에서 용액이 세척되지 않는 문제가 발생을 했고 10 mm/s의 속도에서는 전극의 폭은 얇아지나 소결의 전극이 균일하게 소결되지 않는 문제가 발생했다. 속도 측면에서 보면 10 mm/s, 120

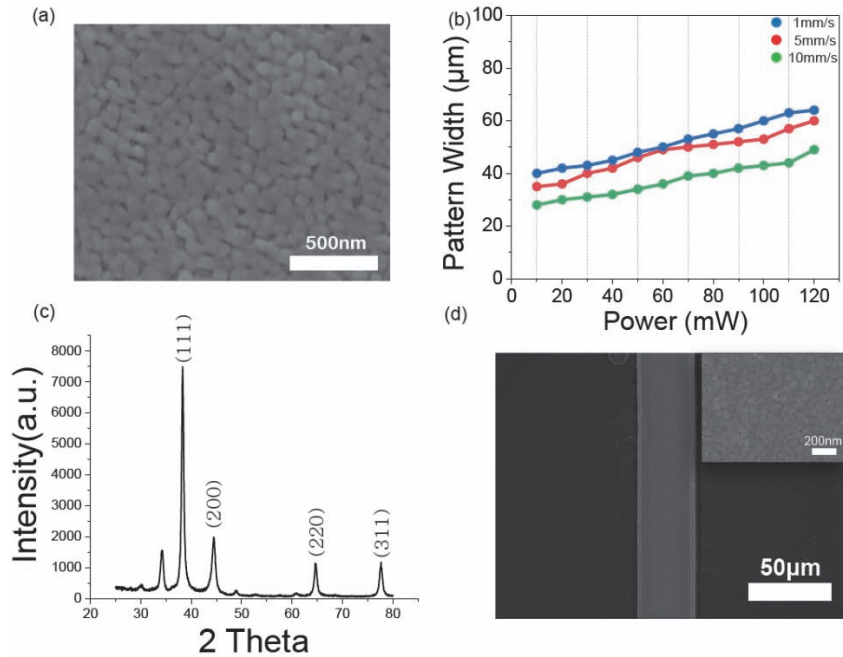


Fig. 3. Optimization conditions and results of the laser-induced electrode: (a) SEM image of self-generated silver nanoparticles, (b) graph of the change in electrode width according to laser power and scanning speed, (c) the XRD graph depicting the detection of silver from the sintered electrode., and (d) SEM image of the electrode under optimized conditions.

mW 공정 조건이 좋을 수 있지만, 과도한 레이저 intensity 조사로 인해 은 유기 금속 화합물 속에 포함되어 있는 유기 물 등이 폭발적으로 기화되는 문제, 그리고 빠른 레이저 스캐닝 공정에 의한 마랑고니 효과 등이 발생하여 제작된 전극의 소결 퀄리티가 저하되었다. 따라서 본 실험에서는 소결 상태가 우수하며 전극의 폭 또한 얇은 5 mm/s, 100 mW의 조건으로 전극을 제작했고 이렇게 제작된 우수한 소결 상태의 폭 45 μm 전극은 그림 3(d)의 SEM 사진을 통해 확인할 수 있다 [10].

메쉬 패턴의 전극에서 인접한 전극으로 인해 생기는 열적 손상을 확인하기 위해 제작된 메쉬 패턴 전극의 전극 상태를 확인하였다 [11].

그림 4(a)에서 SEM으로 분석해본 결과 인접한 전극에 기인하는 열적 손상을 확인할 수 없었으며, 전극 자체의 소결이 매우 잘 되어 있다는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 만들어진 메쉬 패턴의 광학적, 전기적 성능 분석을 위해 투과도(transmittance)와 면 저항(sheet resistance)을 측정하였다 [12].

그림 4(b)에서 투명전극이 되기 위한 조건을 만족하는지 확인하기 위해 UV-VIS-NIR Spectrophotometer (UV-

3600 Plus)로 가시광선 영역 파장인 400~700 nm에서의 투과도를 측정한 결과 간격이 500 μm 인 경우부터 70%를 넘기기 시작하고, 그 이후 대부분 영역에서 80%의 투과도를 보여 히터가 투명하다고 판단할 수 있다 [13].

전기적 특성을 파악하기 위한 면 저항 측정에 대해 그림 4(b)를 보면 전극 간 간격이 100 μm 인 경우 면 저항값이 7 Ω/sq 이고 9,000 μm 까지 간격을 늘려보니 면 저항이 52.47 Ω/sq 를 보이게 되었다. 투명전극이 되기 위해서는 면 저항이 10 Ω/sq 이하인 경우와 투과도가 80% 이상이라는 조건을 만족해야 한다 [14]. 상기 그래프에서는 전극 간격이 500 μm 사이에서 투명전극의 조건을 만족하는 것을 확인할 수 있었다 [14]. 따라서 광 투과율이 투명전극이 되기 위한 기준에 부합하는 동시에 전기 전도도가 높은 경우로 판단할 수 있는 전극 간 간격은 500 μm 로 확정할 수 있었다. 이때, 높은 투과율과 낮은 면 저항을 가진 메쉬 패턴 전극을 구현하여 투명전극을 만들 수 있다는 것을 시연할 수 있었다.

만들어진 메쉬 패턴의 굽힘 시험에 대한 내구성 테스트를 위해 투과도와 면 저항을 측정하였다. 그림 4(c)에서 굽힘에 대한 내구성을 만족하는지 확인하기 위해 100번의 굽

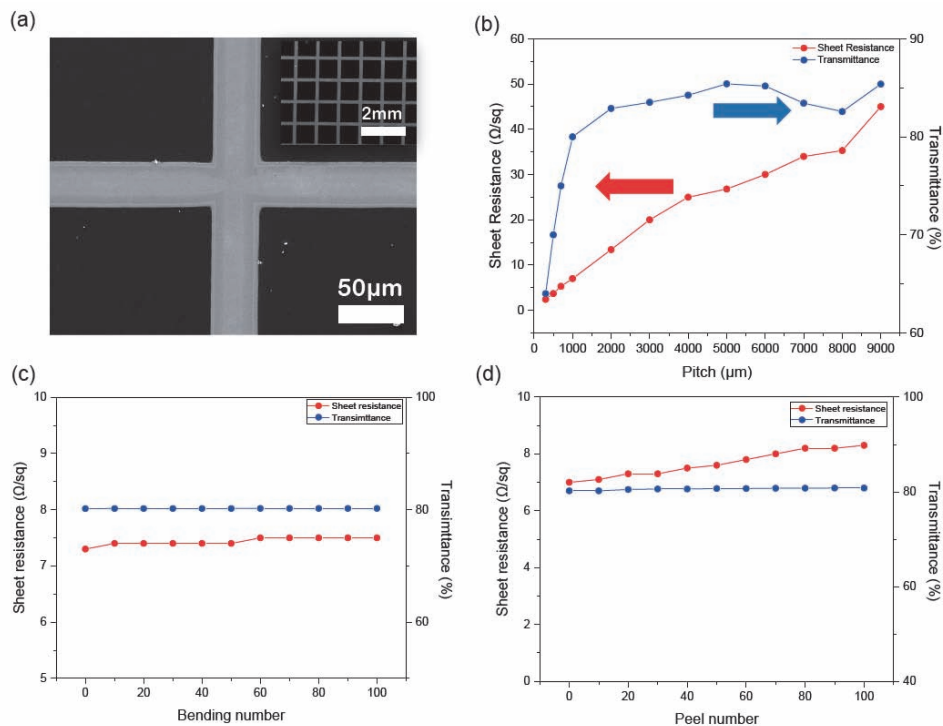


Fig. 4. Optical, electrical, and mechanical properties according to the mesh shape of the electrode: (a) SEM image of a mesh-shaped electrode, (b) graph of changes in sheet resistance and transmittance according to electrode spacing, (c) graph of changes in sheet resistance and transmittance for bending tests, and (d) graph of changes in sheet resistance and transmittance for adhesion tests.

힘 테스트를 진행하였고, 굽힘을 하지 않았을 경우면 저항값이 $7.24 \Omega/\text{sq}$, 80%의 투과도를 보였다. 60번의 굽힘 테스트에서는 면 저항값이 $7.25 \Omega/\text{sq}$, 80%의 투과도를 보였고, 100번의 굽힘 테스트에서 동일한 결과값을 보여 굽힘에 대한 안정성을 확인할 수 있었다 [15].

접착력에 대한 전극의 특성을 파악하기 위한 면 저항 측정 및 투과도 측정에 대해 그림 4(d)을 보면 접착력 테스트를 진행하지 않았을 경우 $7.24 \Omega/\text{sq}$, 80%의 투과도를 보였다 [16]. 60번의 접착력 테스트를 진행한 경우 $8 \Omega/\text{sq}$, 80%의 투과도를 보였고, 100번의 접착력 테스트를 진행한 경우 $8.6 \Omega/\text{sq}$, 80%의 투과도를 보였다. 그림 4(c), (d)를 통해 전극의 메쉬 형태에 따른 굽힘과 접착력에 대한 내구성이 우수하다고 확인할 수 있었다.

소자의 성능 측정을 수행하기 위해 온 전극의 끝단에 구리 테이프를 부착하고, 케이블을 사용하여 아두이노를 연결하였다.

그림 5(a)에서 메탈 메시 기반의 유연한 touch screen panel (TSP)는 아두이노의 light emitting diode (LED)를 작동시키는 것을 증명하였으며, 메탈 메시로 제작된 센서를 접촉할 때마다 LED가 작동하였다 [17]. 그림 5(b)는 아두이노 시스템상에서의 접촉에 대한 전기 신호가 출력되는 그래프이며, 센서에 많은 터치를 수행했음에도 안정적인

으로 신호가 출력되면서 TSP의 높은 내구성을 증명하였다.

그림 5(c)와 같이 손목 관절에 착용되어 구부러진 상태임에도 불구하고 신호가 원활하게 이동하여 LED를 작동시켰다. 추가로 각각의 센서에 지정된 LED가 연결되어 있고, 한 가지의 센서에 대한 LED 작동뿐만 아니라 그림 5(d)와 같이 다수의 센서를 동시에 눌렀을 때 지정된 LED가 모두 작동했다. 이는 멀티터치형 TSP의 구현을 증명하였음을 보여준다 [18]. 이 과학적이고 실용적인 연구는 Ag 나노 물질 레이저 가공의 중요한 분야를 제안하고 산업 요구 사항에 대한 효과적인 솔루션을 제공할 수 있다 [19].

본 연구에서는 은 유기 금속 화합물 용액의 레이저 소결 공정을 통한 우수한 전기적 성능과 높은 투과율을 갖는 메쉬 패턴의 금속 전극을 제작하였고 이를 활용해 멀티 터치가 가능한 정전식 유연 터치 센서를 제작하였다. 5 mm/s의 레이저 패터닝 속도와 100 mW의 레이저(532 nm 파장) 파워를 통해 제작된 우수한 품질 및 소결 상태의 전극 제조가 가능한 것을 확인했고 앞선 레이저 공정 조건을 기반으로 약 $45 \mu\text{m}$ 의 폭을 가지는 전극을 $1,000 \mu\text{m}$ 간격의 메쉬 패턴으로 투명 폴리이미드 필름 위에 제작했다. 이를 통해 80% 이상의 광 투과도와 $7 \Omega/\square$ 의 높은 전기 전도도를 가지는 유연 투명 전극이 제작 가능함을 입증했다. 구현한 유연 투명 전극은 아두이노 보드와 소프트웨어를 통해 유

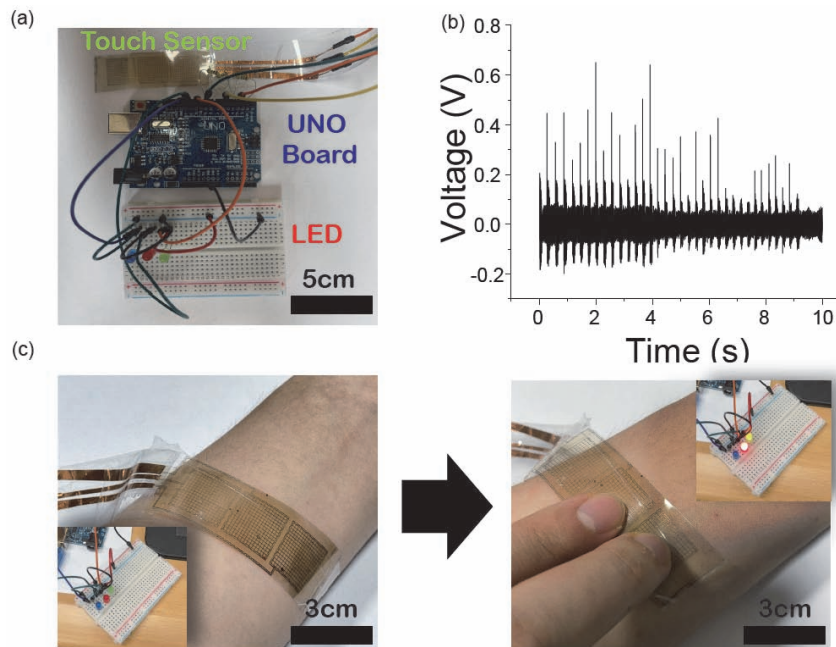


Fig. 5. Performance evaluation of the manufactured flexible touch sensor: (a) structure of the manufactured flexible touch sensor, (b) a graph of oscilloscope measurements of the sensor's voltage being changed by resistance to the user's continuous input, and (c) operational image of a manufactured flexible touch sensor.

연한 터치센서로 제작되었고 몸에 착용한 웨어러블 형태에서도 멀티 터치가 가능한 유연 터치센서로서의 기능을 성공적으로 수행했다. 본 연구에서 제작된 유연 투명전극은 낮은 면 저항, 우수한 광투과도 그리고 높은 유연성 등을 바탕으로 웨어러블 디바이스, 플렉서블 디스플레이, 스마트 헬스케어 등과 같은 다양한 응용처에 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

ORCID

Kwi-II Park
Jung Hwan Park

<https://orcid.org/0000-0002-9140-6641>
<https://orcid.org/0000-0002-9653-2161>

감사의 글

정성민, 황윤식 학생은 공동 제1저자로서 이 연구에 기여하였음. 이 연구는 금오공과대학교 대학 연구 과제비로 지원되었음(2022~2023).

REFERENCES

- [1] M. Mardonova and Y. Choi, *Energies*, **11**, 47 (2018).
doi: <https://doi.org/10.3390/en11030547>
- [2] S. G. Kwon, S. Back, J. E. Park, and B. Kang, *J. Mater. Chem. C*, **6**, 7759 (2018).
doi: <https://doi.org/10.1039/C8TC01915K>
- [3] M. H. Chung, S. Kim, D. Yoo, and J. H. Kim, *Appl. Chem. Eng.*, **25**, 242 (2014).
doi: <https://doi.org/10.14478/ace.2014.1013>
- [4] Y. M. Woo, D. G. Lee, Y. S. Hwang, J. C. Heo, S. M. Jeong, Y. J. Cho, K. I. Park, and J. H. Park, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **36**, 454 (2023).
doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2023.36.5.4>
- [5] B. Kang, S. Ko, J. Kim, and M. Yang, *Opt. Express*, **19**, 2573 (2011).
doi: <https://doi.org/10.1364/OE.19.002573>
- [6] Z. Cai, X. Zeng, and J. Liu, *J. Electron. Mater.*, **40**, 301 (2011).
doi: <https://doi.org/10.1007/s11664-010-1418-7>
- [7] S. Back and B. Kang, *Opt. Lasers Eng.*, **101**, 78 (2018).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2017.09.027>
- [8] K. C. Chung, H. N. Cho, M. S. Gong, D. H. Nam, and Y. K. Seo, 10-2005-0018364, 10-0727434 (Korea Patent, 2005).
<https://patents.google.com/patent/KR100727434B1/ko>
- [9] G. S. Oh, S. M. Lee, and S. S. Ryu, *J. Powder Mater.*, **27**, 293 (2020).
doi: <https://doi.org/10.4150/KPMI.2020.27.4.293>
- [10] D. H. Lee, *Macromol. Res.*, **20**, 990 (2012).
doi: <https://doi.org/10.1007/s13233-012-0143-x>
- [11] Z. Z. Gu, S. L. Jia, G. Li, C. Li, Y. Q. Wu, and H. Z. Geng, *RSC Adv.*, **9**, 3162 (2019).
doi: <https://doi.org/10.1039/C8RA09443H>
- [12] Y. Qin and M. Hu, *Appl. Surf. Sci.*, **255**, 7618 (2009).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2009.04.038>
- [13] B. Kang, S. Ko, J. Kim, and M. Yang, *Opt. Express*, **19**, 2573 (2011).
doi: <https://doi.org/10.1364/oe.19.002573>
- [14] C. Yoo and T. W. Kim, *Curr. Appl. Phys.*, **16**, 170 (2016).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.cap.2015.11.015>
- [15] D. J. Liaw, K. L. Wang, Y. C. Huang, K. R. Lee, J. Y. Lai, and C. S. Ha, *Prog. Polym. Sci.*, **37**, 907 (2012).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2012.02.005>
- [16] Z. Guo, X. Zheng, D. Tian, Y. Song, J. Zhai, X. Zhang, W. Li, W. Wang, S. Dou, and L. Jiang, *Nanoscale*, **6**, 12822 (2014).
doi: <https://doi.org/10.1039/C4NR03496A>
- [17] J. Jung, J. Kwon, J. Mfitumukiza, S. Jung, M. Lee, and J. Cha, *Int. J. Adv. Smart Convergence*, **6**, 76 (2017).
doi: <https://doi.org/10.7236/IJASC.2017.6.1.76>
- [18] D. Yogeve, D. Rostkier-Edelstein, and S. Efrima, *J. Colloid Interface Sci.*, **147**, 78 (1991).
doi: [https://doi.org/10.1016/0021-9797\(91\)90136-V](https://doi.org/10.1016/0021-9797(91)90136-V)
- [19] S. Latha, M. Shilpa, N. Parushuram, and Y. Sangappa, *AIP Conf. Proc.*, **2220**, 020192 (2020).
doi: <https://doi.org/10.1063/5.0001143>