

레이저 기반 플라즈모닉 어닐링을 통한 은 나노입자 자가 생성 및 소결 공정과 이를 활용한 메탈메쉬 전극 기반 투명 웨어러블 히터

황윤식, 남의연, 김연욱, 우유미, 허재찬, 박정환 

금오공과대학교 기계설계공학과

Ag Nanoparticle Self-Generation and Agglomeration via Laser-Induced Plasmonic Annealing for Metal Mesh-Based Transparent Wearable Heater

Yun Sik Hwang, Ui Yeon Nam, Yeon Uk Kim, Yu Mi Woo, Jae Chan Heo, and Jung Hwan Park
Department of Mechanical Design Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Gumi 39177, Korea

(Received June 29, 2022; Revised July 5, 2022; Accepted July 6, 2022)

Abstract: Laser-induced plasmonic sintering of metal nanoparticles (NPs) is a promising technology to fabricate flexible conducting electrodes, since it provides instantaneous, simple, and scalable manufacturing strategies without requiring costly facilities and complex processes. However, the metal NPs are quite expensive because complicated synthesis procedures are needed to achieve long-term reliability with regard to chemical deterioration and NP aggregation. Herein, we report laser-induced Ag NP self-generation and sequential sintering process based on low-cost Ag organometallic material for demonstrating high-quality microelectrodes. Upon the irradiation of laser with 532 nm wavelength, pre-baked Ag organometallic film coated on a transparent polyimide substrate was transformed into a high-performance Ag conductor (resistivity of $2.2 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$). To verify the practical usefulness of the technology, we successfully demonstrated a wearable transparent heater by using Ag-mesh transparent electrodes, which exhibited a high transmittance of 80% and low sheet resistance of $7 \Omega/\text{square}$.

Keywords: Laser-induced plasmonic interaction, Nanoparticle sintering, Organometallic ink, Metal mesh electrode, Transparent wearable heater

1. 서론

투명하고 휘어지는 전자 시스템은 유연 디스플레이, 플렉서블 터치스크린 패널, 스마트 헬스케어 센서, 웨어러블 히터, 사물인터넷(internet of things), 가상현실(virtual

reality) 분야 등 그 응용처가 무궁무진하다 [1]. 한 예로, 투명하고 유연한 히팅 소자는 다양한 곡면에 부착되어 최근 주목받고 있는 헬스케어용 의료기기로 사용될 수 있을 뿐만 아니라 자동차 및 건물의 유리, 안경 등의 서리 제거가 가능한 스마트 글래스용 기기로 활용될 수 있는 등 폭넓은 분야에 적용될 수 있다. 이러한 전자기기를 위해서는 유연하고 투명한 전극이 필수적이다 [2]. 인듐 주석 산화물(indium tin oxide)은 약 3.5~4.3 eV의 밴드갭(bandgap)을 가져 가시광선 영역에서의 투과도가 우수할 뿐만 아니라 $10 \Omega/\text{sq}$ 의 낮은 면저항 값을 나타내어 기존의 유연 투명전극 소재로 널리 사용되고 있다. 하지만 산화 인듐 주석

✉ Jung Hwan Park; parkjh1151@kumoh.ac.kr

Yun Sik Hwang and Ui Yeon Nam equally contributed to this work

Copyright ©2022 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.

의 주재료인 인듐의 매장량이 제한적이어서 가격이 비싸고, 취성이 강해 휘거나 굽혔을 경우 전극이 쉽게 깨진다는 단점이 존재한다 [3].

이러한 문제점을 해결하기 위하여 그래핀(graphene), 탄소나노튜브(carbon nanotube), 전도성 폴리머(conductive polymer), 금속 나노와이어(metal nanowire) 등을 활용한 유연투명전극 개발 연구가 활발히 진행되고 있다 [4]. 하지만 그래핀, 탄소나노튜브와 같은 탄소 기반 소재의 경우 광전자 특성이 좋지 않으며, 전도성 폴리머는 습기 등의 환경적 피로에 취약하고, 금속 나노와이어의 경우 헤이즈(haze) 문제가 있다 [5]. 금속 전극을 미세한 메쉬 형태로 제작하는 메탈 메쉬(metal mesh) 전극은 금속선이 매우 얇아 눈에 잘 보이지 않으면서도 금속 고유의 높은 전기 전도도를 이용할 수 있을 뿐만 아니라 휘어짐에 대한 내구성이 높아 차세대 유연투명전극 소재로 많은 각광을 받고 있다 [6].

메탈메쉬전극을 제작하기 위해서 기존의 포토리소그래피(photolithography) 공정이 대표적으로 사용되어 왔다. 하지만 노광 장비의 가격이 매우 비싸고 제작 공정이 복잡할 뿐만 아니라 증착 과정에서의 진공과 고온의 환경으로 인한 유연기판 손상 문제 등이 제기되어 왔다 [7]. 비록 금속 나노입자(metal nanoparticle)들을 선택적으로 레이저 소결(laser sintering)하여 미세한 메탈메쉬 전극을 구현하는 공정이 개발되었지만, 금속나노입자를 제조하고 이들의 추가적 산화를 방지하기 위한 비용이 매우 높아 상용화에 어려움을 겪고 있다 [8].

이에, 본 연구에서는 은 이온과 유기화합물이 이온결합 상태로 존재하고 있는 매우 저가의(은 나노입자 잉크 대비 1/100)은 유기금속화합물(silver organometallic) 잉크

를 레이저 어닐링 공정에 적용하여 저렴하고 간단하게 고성능의 유연 메탈메쉬 전극을 제작하는 공정을 개발하였다. 532 nm 파장의 그린 레이저는 저온 가열된 유기은 잉크에 조사되어 플라즈마 광열 반응을 일으켰고, 이를 통해 은 나노입자의 자가 생성 및 소결 반응을 유도하여 고성능의 은 전극을 성공적으로 구현하였다. 광학 렌즈를 통해 집광된 레이저 에너지로 제작된 메탈메쉬 전극은 투과도 80%, 면저항 7 Ω /sq의 우수한 광전자 특성을 나타내었고, 투명 웨어러블 히터에 적용되어 산업적 효용성을 증명하였다.

2. 실험방법

2.1 메탈 메쉬 기반 유연 투명전극 및 투명 웨어러블 히터 제작

그림 1은 레이저를 은 유기금속화합물 잉크에 조사하여 메쉬 패턴의 은 전극을 무색 투명한 폴리이미드 기판 위에 제작하는 실험 개략도를 보여준다. 투명전극을 위한 기판으로는 기존 불투명한 폴리이미드 필름을 대신해 투명하면서도 내열성과 유연성을 가진 투명 폴리이미드 필름을 사용했다 [9]. 필름은 우선 보호필름을 제거한 뒤 초순수 증류수(deionized water)에 세척되었으며 가공 평탄도 유지를 위해 소다 라임 유리(soda-lime glass) 위에 스펀코팅된 PDMS (polydimethylsiloxane)를 통해 부착되었다. 실험에 사용한 PDMS는 주제와 경화제를 10:1의 질량비로 혼합해 진공 데시케이터에서 기포를 제거했고 이후 3,000

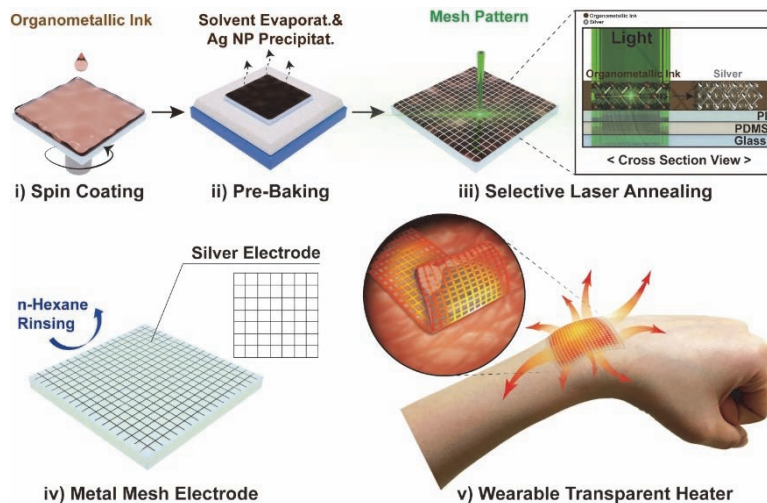


Fig. 1. Schematic illustrations showing the laser annealing of Ag organometallic ink and its final application for transparent wearable heater.

rpm, 5 ramp, 30 sec의 조건으로 스핀 코팅(spin-coating)하여 소다 라임 유리 기판에 도포했다. 만들어진 PDMS기판의 경화를 위해 오븐에서 80°C로 20분간 건조시켰다. 소다 라임 유리위에 부착된 고정 폴리이미드 필름 위에 유기금속화합물 잉크를 골고루 도포했고 이 과정에서 기포가 생기는 것을 방지하기 위해 시린지 필터(syringe filter)를 활용하였다. 이후에 2,000 rpm, 5 ramp, 20 sec 조건으로 은 유기금속화합물 잉크를 스핀 코팅 하여 투명 폴리이미드 필름 위에 고른 은 유기금속화합물 잉크층을 형성하였다. 코팅된 잉크 내부의 은 이온과 암모늄 카바메이트(ammonium carbamates, $H_2NCO_2NH_4$) 사이의 유기 화학적 결합을 끊어 고상의 은 입자를 석출하기 위해 핫플레이트(hot plate)위에서 90°C 온도로 60 sec간 예비가열(pre-baking)을 진행했다 [10]. 출력 100 mW의 레이저 출력에서 스캐너 패터닝 프로그램(scanlab사의 laserdesk)을 사용해 5 mm/s의 스캔 속도로 메탈 메쉬 전극 패턴을 제작하였다. 레이저 공정 후의 폴리이미드 필름은 노말헥산(n-Hexane)용액으로 세척하여 레이저 어닐링이 진행되지 않은 부분의 유기금속화합물을 제거하였다. 웨어러블 투명 히터를 제작하기 위해 메쉬 패턴의 전극 양 끝에 구리테이프를 부착했고 1.5 V 건전지 4개를 직렬 연결해 만든 6 V 전압을 가하였다.

2.2 은 메쉬 전극 및 투명 웨어러블 히터 특성 평가

메탈 메쉬 전극의 전기적 성능을 평가하기 위해 면저항을 4 Point Probe-I(CMT-SR2000N)로 측정했고 주사전자현미경(SEM, Quattro S)을 통해 전극 내부에 은 나노입자들이 잘 소결되었는지를 확인하였다. 또한 레이저 공정을 통해 유기금속화합물 잉크로부터 은 전극이 잘 생성되었는지를 확인하기 위해 X선 회절 분석기(XRD, SmartLab)를 사용했다. 메탈 메쉬 전극의 광학적 투과도를 측정하기 위해 UV-VIS-NIR Spectrophotometer (UV-3600 Plus)를 이용해 가시광선 영역에서의 투과도 분석을 진행하였다. 전극의 접착력 특성을 평가하기 위해 3M사의 접착 테이프로 부착력 실험을 진행하였고, 선형 스테이지 장비를(CT-BJS-0815-PCK) 사용해 반복적인 굽힘 응력하에서의 유연 메쉬 전극의 기계적 내구성을 평가했다. 마지막으로 IR 카메라(infrared camera, SE/A325)를 사용해 히터의 발열 온도와 시간을 측정했다.

3. 결과 및 고찰

그림 2(a)는 예비가열 전 후의 은 유기금속화합물 잉크에 대한 파장별 흡광계수(extinction coefficient) 결과를

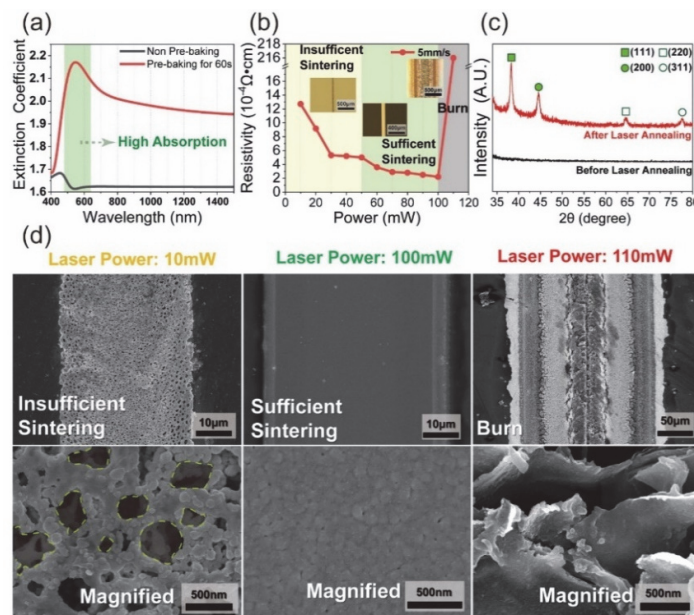


Fig. 2. (a) Wavelength dependent extinction coefficient of pristine and pre-baked organometallic ink, (b) resistivities of Ag electrodes fabricated by different laser power conditions (scan rate: 5 mm/s), (c) XRD measurement results of pristine and laser-processed organometallic ink, and (d) SEM images of Ag conductors demonstrated by different laser irradiation conditions (scan speed: 5 mm/s, laser power: 10, 100, and 110 mW, respectively)

보여준다 [10]. 유기금속화합물 잉크는 상온에서 은 이온과 암모늄 카바베이트($\text{H}_2\text{NCO}_2\text{NH}_4$)와 같은 유기화합물이 이온결합을 하고 있는 상태로 존재하며, 다양한 파장에서 활발한 광흡수를 가능하게 하는 고상의 입자가 존재하지 않는다 [11]. 광학적으로 투명한 유기은 잉크내의 이러한 광흡수매개체의 결여는 레이저 조사를 통한 광열 발생 효과를 일으키기 어렵게 하였고, 이에 따라 레이저 어닐링 공정을 통한 고성능 전극 제조가 불가능 하였다. 반면, 예비 가열된 유기은 용액의 경우 높은 수치의 흡광계수가 ~ 550 nm 영역의 파장대역에서 측정되었다. 이는 적정의 미량 열에너지가 유기은 용액에 전달될 때 유기은 이온과 유기물 사이의 결합이 깨지면서 $2\sim 3$ nm의 매우 작고 균일한 은 나노입자가 석출됨에 기인한다. 생성된 은 나노입자는 $500\sim 600$ nm 파장의 레이저 광에 의해 플라즈모닉 공명 현상을 일으켜 효과적인 광흡수를 가능하게 한다 [12]. 위 결과를 바탕으로 본 실험에서는 낮은 레이저 출력에서도 효율적으로 광 어닐링 공정이 잘 진행될 수 있도록 532 nm 파장의 그린 레이저를 사용해 실험을 진행하였다. 그림 2(b)는 5 mm/s의 동일 속도에서 레이저 파워 출력을 다르게 하였을 때 구현된 전극들의 비저항값을 보여준다. 예비 가열된 유기은 용매에 레이저를 조사하면 석출된 미세 은 나노입자들에 의해 레이저 광 흡수가 먼저 일어나고, 이렇게 발생된 열을 통해 추가적인 은 나노입자 자가 생성 및 순차적 소결반응이 연쇄적으로 일어나 고성능의 은 전극이 구현되게 된다 [10]. 레이저 출력이 너무 낮은 경우 발생된 광열 에너지가 너무 약하여 자가 생성된 은 나노입자들의 소결이 잘 이루어지지 않아 높은 비저항의 은 전극이 생성되었다. 반면 레이저 출력이 100 mW 인 경우는 은 나노입자의 자가 생성 및 소결 반응이 효과적으로 일어나 $2.2 \cdot 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 비저항의 은 전극이 형성됨을 확인하였다. 100 mW 이상의 강한 레이저 세기로 조사한 경우에는 과도한 열에너지에 의해 필름이 녹아 전극이 손상된 것을 볼 수 있다. 그림 3(c)는 레이저를 조사하기 전후의 예비가열된 유기은 용매에 대한 XRD 결과를 보여준다. 레이저를 조사하

기 전에는 XRD 회절 피크가 나타나지 않았지만 레이저를 조사한 뒤에는 (111), (220), (200), (311)과 같은 은 결정 구조 피크가 발견되었으며 [13], 이를 통해 레이저 조사에 의한 은 나노입자 자가 생성 및 순차적 소결 반응이 활발히 진행되었음을 알 수 있다. 전극의 낮은 저항과 내구성을 위해서는 물리적인 입자들의 결합 역시 중요하다 [14]. 따라서 나노 입자들의 소결 상태를 주사전자현미경(SEM)을 통해서 분석했다. 그림 2(d)는 패터닝 속도 5 mm/s에서 레이저 출력이 다른 전극들의 은 나노입자 소결 상태를 보여준다. 100 mW의 레이저 출력에서는 적절한 열에너지로 인해 나노입자들의 소결이 기공 없이 균일하게 진행되었음을 알 수 있다. 반면 레이저 출력이 약한 10 mW에서는 발생하는 열흡수 에너지가 부족해 나노입자들의 소결이 완전하지 못했고 이에 따라 불균일한 표면과 많은 기공들이 관찰되었다 [15]. 레이저 세기 110 mW부터는 가해지는 열에너지가 너무 높아 필름이 열을 견디지 못해 녹아 버렸으며, 이에 의해 심각한 전극 손상이 야기되었음을 볼 수 있다. 그림 2(b)에서의 낮은 비저항 값과 그림 2(d)에서의 우수한 소결 상태를 바탕으로 패터닝 속도 5 mm/s, 레이저 출력 100 mW의 조건이 메탈 메쉬 전극을 제조하는 데 있어 가장 적합하다고 판단하였다.

전극을 메쉬 패턴으로 제작했을 경우의 전기적, 광학적 성능을 분석하기 위해, 그림 3과 같이 패턴 간격(pitch)의 변화에 따른 메탈 메쉬 전극의 투과도와 면저항, SEM 이미징 분석을 진행했다 [16]. 우선 제작된 메탈 메쉬 전극이 투명전극으로서의 조건을 만족하는지 확인하기 위해 UV-VIS-NIR Spectrophotometer(UV-3600 Plus)로 가시광선 영역 파장($400\sim 700$ nm)에서의 투과도를 측정하였고, 550 nm 파장에서의 투과도 값을 선정해 면저항 값과 함께 그래프로 나타냈다(그림 3(a)). $1,000 \mu\text{m}$ pitch를 기점으로 전극 사이 간격이 커지는 경우, $80\sim 86\%$ 의 투과도 값으로 큰 변화의 폭이 없는 반면에 면저항 값은 $7 \Omega/\text{sq}$ 에서 $45 \Omega/\text{sq}$ 로 점차 증가하는 경향이 나타났다. 투명전극은 면저항이 $10^3 \Omega/\text{sq}$ 이하이며 $380\sim 780$ nm 파장의 가시광

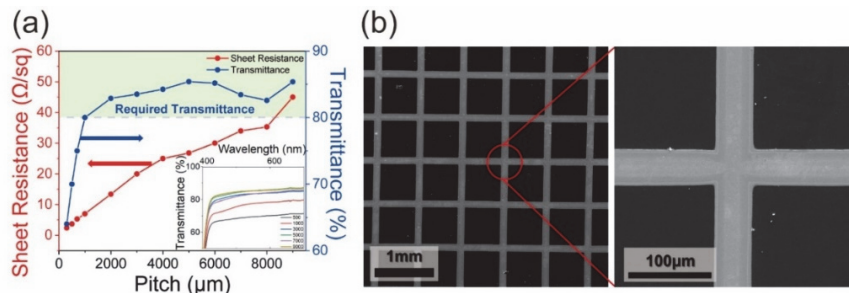


Fig. 3. (a) Sheet resistance and transmittance of metal mesh electrodes by pitch and (b) SEM images of fabricated metal mesh conductors.

선 영역에서 투과율이 80% 이상이라는 성질을 만족해야 하는데 위 그래프에서는 전극 간격 1,000 μm 이상에서 투명전극의 조건을 만족하는 것을 확인할 수 있다 [3]. 따라서, 광 투과율이 투명전극 기준에 부합하면서 전기전도도 또한 높은 투과도 80%, 면저항 7 Ω/sq 가 나오는 간격 1,000 μm 로 제작된 메탈메쉬 전극을 투명전극으로 사용하기 가장 적합하다고 판단하였다. 그림 3(b)에는 은 메쉬 패턴 전극의 표면을 분석하기 위해 주사전자현미경(SEM)을 사용한 분석 사진이 나와 있으며 단순히 한 줄 형태뿐만 아니라 전극이 서로 겹치는 부분에서도 전극의 손상 없이 소결이 잘 된 우수한 성능의 전극을 제작할 수 있음을 확인했다.

제작된 금속 메쉬 전극의 접착력 특성을 알아보기 위해 그림 4(a)에서 보이는 것과 같이 3M사의 투명 접착 테이프를 사용해 실험을 진행했다. 100회의 부착력 실험 테스트에도 불구하고 그림 4(b)의 SEM 이미지와 같이 전극 표면에 약간의 스크래치는 보였지만 기공이 생기거나 심각한 손상 또는 박리(delamination)가 일어난 모습은 확인할 수 없었다. 그림 4(c)의 접착력 실험에 따른 전극 면저항 및 투과도 데이터를 통해 100회가 넘는 접착력 실험에서도 전극의 면저항 및 투과도가 안정적으로 유지되는 것을 확인할 수 있었다. 또한 구현된 유연 메탈 메쉬 전극의 굽힘 응력에 대한 내구성을 테스트하기 위해 1초에 한 번 반복되

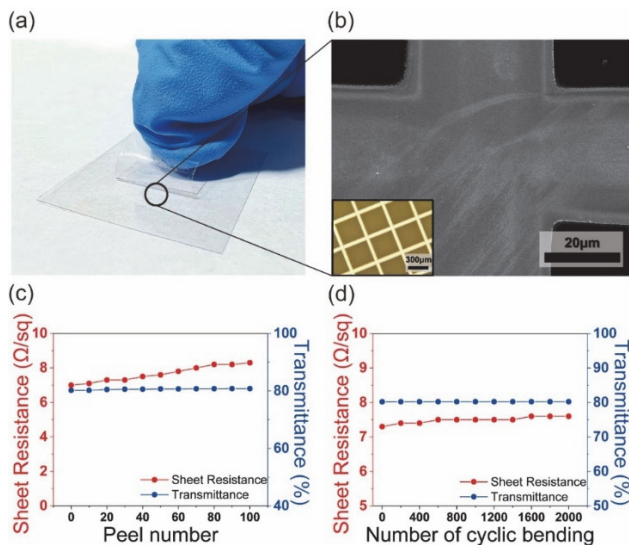


Fig. 4. (a) Photographic image of adhesion test using 3M tape, (b) top-view SEM image of metal mesh electrodes after adhesion test (inset shows microscopic image of metal mesh conductors after adhesion test), (c) sheet resistance and transmittance data of metal mesh electrodes after adhesion test, and (d) sheet resistance and transmittance of metal mesh conductors after bending test.

는 사이클링 테스트에서 굽힘반경 5 mm로 굽힘 실험을 진행했다 (그림 4(d)). 2,000회의 반복적인 굽힘 실험에도 불구하고 면저항 값의 변화는 0.6 Ω/sq 로 작았으며 투과도는 일정하게 유지되었다. 상기 결과로부터, 유기은 잉크의 레이저 어닐링 공정을 통해 유연 기판 위에 제작된 메탈 메쉬 전극의 우수한 접착력 및 유연성을 확인했다.

본 실험에서 우리는 레이저와 은 유기금속화합물 잉크를 활용해 제작한 메탈 메쉬 전극이 플렉서블 디바이스에 적용 가능성을 증명하기 위해 투명 웨어러블 히터를 제작했다. 그림 5(a)는 메탈 메쉬 전극 기반 웨어러블 투명 히터 소자의 사진 이미지이며 높은 투과도와 유연성을 보여주고 있다. 구현된 히터의 성능을 확인하기 위해 3, 6, 9 V의 다양한 전압을 소자에 인가하면서 시간에 따라 발열되는 온도를 측정하였다 (그림 5(b)). 투명 웨어러블 히터는 각기 다른 전압에서도 10 분이라는 시간 동안 안정되게 작동되었고 3, 6, 9 V의 전압에서 각각 36, 53, 65°C의 발열 온도를 나타내었다. 제작된 웨어러블 히터는 그림 5(c)의 IR 카메라 촬영 이미지에서와 같이 인위적으로 구부린 상

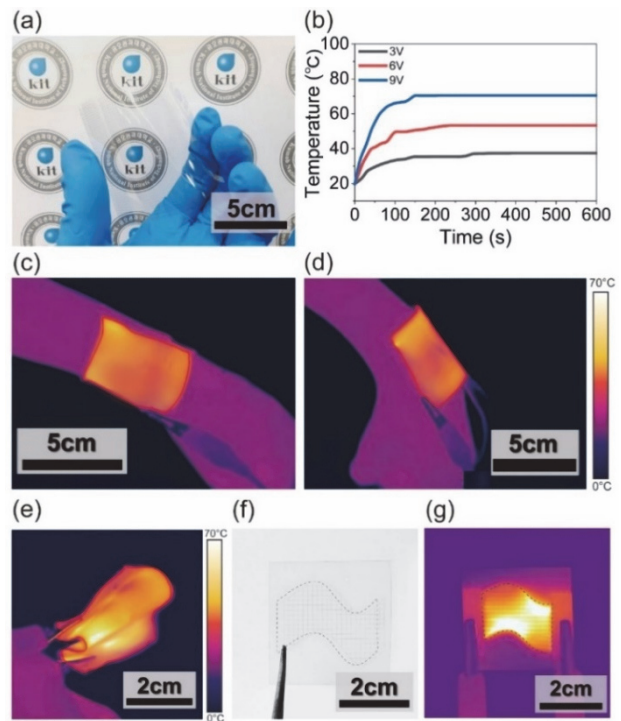


Fig. 5. (a) Photo Image of transparent wearable heater, (b)-(d) temperature distribution of transparent wearable heater obtained by IR camera, (e) heating temperature of the heater according to the different applied voltages, (f) photo of metal mesh electrodes (S-shape) on a transparent PI substrate patterned by laser processing, and (g) IR camera image of S-shaped Ag mesh conductors under applied voltage of 9 V.

태에서도 안정적으로 60~65°C의 열을 균일하게 발생시켰다 [17]. 그림 5(d)는 팔등에 부착된 투명 웨어러블 히터를 작동시켰을 때 IR 카메라로 촬영된 이미지이다. 제작된 히터 디바이스는 그림 5(e)와 같이 손목의 각도를 변화시켜도 안정적으로 작동하였으며, 향후 웨어러블 테라피용 소자 등으로 응용이 가능함을 기대할 수 있다 [18]. 원하는 패턴을 별도의 마스크나 몰드(mold)의 사용 없이 즉시 제작할 수 있는 레이저 직접 패터닝 공정의 특성을 보여주기 위해 그림 5(e)에서와 같이 S자 형태의 메탈 메쉬 전극을 제조했다. 그림 5(f)의 IR 카메라 이미지에서 보듯이 S자 모양으로 패턴된 메탈 메쉬 전극에만 선택적으로 열이 생성됨을 확인 가능하다.

4. 결론

본 연구에서는 유기인 잉크의 레이저 어닐링 공정을 통해 우수한 면저항과 높은 광 투과율을 갖는 메탈 메쉬 전극을 제조하였고 이를 활용해 웨어러블 투명 히터를 제작하였다. 5 mm/s의 패터닝 속도와 100 mW의 그린 레이저(532 nm 파장) 출력 조건을 바탕으로 우수한 퀄리티 및 소결 상태의 전극 제조가 가능하다는 것을 확인했다. 앞선 레이저 조건을 기반으로 40~45 μm 폭, 1,000 μm 간격의 메탈 메쉬 네트워크를 투명 PI 필름 위에 제작했고, 이를 통해 80%의 투과도와 7 Ω/sq 의 면저항을 갖는 유연 투명 전극이 제작 가능함을 입증했다. 구현된 메탈 메쉬 네트워크는 9 V의 인가 전압에서 전극과 기판의 손상 없이 60~65°C의 열을 고르게 발생시켰으며 10분 이상의 작동 시간에서도 안정적으로 온도가 유지되는 히터의 기능을 성공적으로 수행했다. 본 연구에서 제작한 메탈 메쉬타입의 전극은 낮은 면저항, 우수한 투과도, 높은 유연성 등을 바탕으로 스마트 헬스케어, 플렉서블 디스플레이, 웨어러블 터치 스크린 패널, VR 디바이스, 스마트 글래스 등 다양한 응용처에 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

ORCID

Jung Hwan Park

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

감사의 글

이 연구는 금오공과대학교 학술연구비로 지원되었음 (2019104167).

REFERENCES

- [1] M. Mardonova and Y. Choi, *Energies*, **11**, 547 (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] Y. Xia, K. Sun, and J. Ouyang, *Adv. Mater.*, **24**, 2436 (2012). [DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.201104795>]
- [4] T. H. Im, D. Y. Park, H. K. Lee, J. H. Park, C. K. Jeong, D. J. Joe, and K. J. Lee, *Part. Part. Syst. Charact.*, **34**, 1 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.1002/ppsc.201600429>]
- [5] 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>]
- [6] H. Kim, S. Yang, K. Noh, and S. Lee, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **29**, 414 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2016.29.7.414>]
- [7] Y. S. Jo and G. E. Jang, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **31**, 408 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2018.31.6.408>]
- [8] P. G. Jamkhande, N. W. Ghule, A. H. Bamer, and M. G. Kalaskar, *J. Drug Deliv. Sci. Technol.*, **53**, 101174 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jddst.2019.101174>]
- [9] H. J. Ni, J. G. Liu, Z. H. Wang, and S. Y. Yang, *J. Ind. Eng. Chem.*, **28**, 16 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jiec.015.03.013>]
- [10] B. Kang, S. Ko, J. Kim, and M. Yang, *Opt. Express.*, **19**, 2573 (2011). [DOI: <https://doi.org/10.1364/oe.19.002573>]
- [11] Z. Cai, X. Zeng, and J. Liu, *J. Electron. Mater.*, **40**, 301 (2011). [DOI: <https://doi.org/10.1007/s11664-010-1418-7>]
- [12] X. Li, H. Li, J. Liu, X. Qi, and X. Zeng, *Appl. Surf. Sci.*, **233**, 51 (2004). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2004.03.208>]
- [13] S. Latha, M. Shilpa, N. Parushuram, and Y. Sangappa, *Proc. AIP Conference Proceedings* (AIP Publishing LLC, 2020) p. 020192. [DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0001143>]
- [14] J. H. Park, S. Jeong, E. J. Lee, S. S. Lee, J. Y. Seok, M. Yang, Y. Choi, and B. Kang, *Chem. Mater.*, **28**, 4151 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.6b00013>]
- [15] M. Knoerr, S. Kraft, and A. Schletz, *Proc. 2010 12th Electron. Packag. Technol. Conf. (IEEE, 2010)* p. 56. [DOI: <https://doi.org/10.1109/EPTC.2010.5702605>]
- [16] S. Son, J. E. Park, J. Lee, M. Yang, and B. Kang, *Sci. Rep.*, **6**, 1 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.1038/srep34629>]
- [17] Y. H. Yoon, J. W. Song, D. Kim, J. Kim, J. K. Park, S. K. Oh, and C. S. Han, *Adv. Mater.*, **19**, 4284 (2007). [DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.200701173>]
- [18] H. E. Lee, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **34**, 221 (2021). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2021.34.4.221>]