



## 은 나노 와이어 전극의 대면적 전사를 위한 롤 투 롤 공정

박양규<sup>a</sup>, 김재필<sup>b</sup>, 김완호<sup>b</sup>, 정강<sup>a,\*</sup>, 정호중<sup>b,\*</sup>

<sup>a</sup>전남대학교, 기계설계공학부 · <sup>b</sup>한국광기술원, 조명소재부품연구센터

### Roll-to-roll process for large-area transfer of Ag nanowire electrode

Yangkyu Park<sup>a</sup>, Jae Pil Kim<sup>b</sup>, Wan Ho Kim<sup>b</sup>, Kang Jung<sup>a,\*</sup>, Ho-Jung Jeong<sup>b,\*</sup>

<sup>a</sup> Department of Mechanical Design Engineering, Chonnam National University, 50 Daehak-ro, Yeosu, Chonnam 59626, South Korea

<sup>b</sup> Lighting Materials and Components Research Center, Korea Photonics Technology Institute (KOPTI), Gwangju 61007, Republic of Korea

(Received 11 May, 2022 ; revised 31 May, 2022 ; accepted 31 May, 2022)

#### Abstract

This study presents a roll-to-roll process which is capable of Ag nanowire (AgNW) transfer from polyethylene terephthalate (PET) film to polycarbonate (PC) film. We developed a roll-to-roll machine that consists of two film suppliers, a coater of photo-curable resin, a film laminator, an ultraviolet (UV) exposure unit, and a film winder to facilitate large-area electrode transfer between different flexible substrates. Using the process, optimal fabrication condition was investigated by parametric experiments in terms of the UV exposure time, number of thermal cycling, and exposure time of high temperature and humidity. A fabricated AgNW on PC film showed sheet resistance of 52  $\Omega$ /sq and optical transmittance of approximately 80 % over a range of visible light.

*Keywords* : Roll-to-roll; Ag nanowire; AgNW/PET; AgNW/PC.

## 1. 서 론

미래형 자동차에서는 운행 성능 뿐만 아니라 운전자와 탑승객의 안전과 편의 기능에 대한 비중이 점차 커지면서, 차량의 자율주행(autonomous driving system)과 인포테인먼트(infotainment) 기능이 확대되고 있다. 기존 실내 디자인의 개념을 넘어 주거용 미래 인테리어 디자인을 제시하는

차량들까지 선보이고 있다. 이에 따라, 차량은 운전자의 직관적인 운행정보 전달을 비롯하여 조작의 편의성, 가시성, 심미성(aesthetic)을 모두 만족시키기 위하여, 계기판을 비롯한 공조기, 오디오 등 차량 내부의 모든 것이 물리적 버튼이 아닌 디스플레이 기반의 디지털 회로로 변하고 있다. 한편, 1 대 1 기능의 많은 물리적 버튼을 하나의 디스플레이 화면 안에 구현한 통합 디스플레이는 차량 디자인의 심미성과 자유도를 향상시켰지만, 상대적으로 제약된 화면 공간 내에 다수의 user interface(UI)가 통합 되어야하기 때문에, 사용자의 터치 횟수가 증가하는 불편함이 발생되고 있다. 차량 디스플레이의 효과적인 확대를 위해서는

\*Corresponding Author: Kang Jung (Department of Mechanical Design Engineering, Chonnam National University)  
Tel: +82-61-659-7381 ; E-mail: ckang@jnu.ac.kr  
Ho-Jung Jeong (Lighting Materials and Components Research Center, Korea Photonics Technology Institute)  
Tel: +82-62-605-9391; Fax: +82-62-605-9569  
E-mail: hojung@kopti.re.kr

복잡한 3D 형상의 차량 내장재 표면에 직접적으로 터치 버튼을 구현할 수 있는 기술, 즉, 고정형 평면 터치 버튼에서 자유 곡면 터치 버튼 기술이 요구된다. 이를 통해, 별도의 센서 printed circuit board (PCB)가 없이도 내장재 표면에 터치 센서 구현이 가능하며, 기존의 일반 차량 내장재의 전장부품화로 고부가가치를 이룰 수 있다.

자유 곡면 터치 버튼의 구현을 위해서는 고연신성, 고투과도, 고전도도의 플렉시블 투명전극 소재 기술이 핵심이다. 대표적인 투명전극 소재로 indium tin oxide(ITO)가 있다. 이는 우수한 전도도와 빛 투과율로 인해 현재까지 대부분의 제품 제작에 사용되어 왔으나, 희토류인 인듐의 가격상승 및 변형률(strain)이 1%를 넘어가는 경우 전도도의 상실 등의 어려움이 존재한다 [1-4]. 이러한 ITO의 한계를 극복하기 위한 다양한 소재가 개발되고 있는데, 대표적으로는 탄소 나노 튜브 또는 그래핀을 이용한 탄소 기반 소재, PEDOT:PSS와 같은 전도성 고분자 소재, 금속 나노 와이어를 이용한 금속 기반 소재로 나눌 수 있다. 탄소 나노 튜브는 낮은 전도성, 원소재로부터의 분리, 정제, 분산, 코팅 과정에서 어려움이 존재하고, 그래핀의 경우 월등한 intrinsic property 에도 불구하고 사용될 소재의 작은 부피로 인해 특정 application 적용에 한계점 있다 [1, 3, 5]. PEDOT:PSS와 같은 전도성 고분자는 온도, 습도, 자외선에 대한 안정도가 부족하고 소재 특유의 색상으로 인해 ITO 대체 소재로 적합하지 않는 평가를 받고 있다 [3]. 금속 나노 와이어를 이용한 투명전극은 투과도 90%( $\lambda=550$  nm) 이상, 전도도  $100\Omega/\text{sq}$  이하의 우수한 특성을 보이면서 가장 각광받고 있는 투명전극에 해당한다 [1, 6-9]. 그 중 은을 활용한 은 나노 와이어 (AgNW; Ag nanowire)는 금에 비해 낮은 가격, 니켈이나 구리와 비교하였을 경우 공기 중에서 안정성이 우수하고 높은 전도성을 장점으로 가장 많이 활용된다 [10]. 또한, 은 나노 와이어는 비진공 (nonvacuum)에서 제작이 가능하여 상대적으로 제작이 수월하다 [1].

Polyethylene terephthalate(PET)는 테레프탈산과 에틸렌글리콜과의 축·중합으로 얻어지는 필름으로, AgNW의 기판으로 많이 사용되며, 자동차, 디스플레이, 전자, 섬유산업 등에서 광범위하게 활용되고 있다 [11-13]. 한편, 차량 주행 시 디스플레이 화면을 보면, PET 필름 기반 디스플레이

의 경우 화면 색상이 왜곡되거나 디스플레이 표면에서 무지개 형태의 얼룩이 보이는 레인보우 현상이 발생할 수 있다. 또한, 범용 PET 필름은 국내에서도 많이 생산되고 있지만 고기능성 광학 필름은 수입 의존율이 높아, 최근 대면적 디스플레이의 생산이 본격화되면서 공급 부족 현상이 발생하고 있어, PET 필름 외에도 다양한 소재로 제조된 광학 필름 개발이 요구되고 있다.

본 연구에서는 서로 다른 유연 기판에서 전극을 전사시킬 수 있는 롤 투 롤(roll-to-roll) 전사 공정 시스템과, 이를 이용한 PET 필름기반의 AgNW(AgNW/PET)가 아닌, polycarbonate(PC) 필름기반의 AgNW(AgNW/PC) 제작기법을 소개한다. 해당 공정 시스템을 통해서, UV 조사시간, 열 사이클 횟수, 고온다습 환경에 노출시간을 조건으로 최적 공정 조건을 도출하였다. 또한, 최적 조건일 때 AgNW/PC 필름의 전기적 및 광학적 특성평가를 수행하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1. AgNW/PET 필름

#### 2.1.1 AgNW 코팅액 재료

70 nm 크기의 은 나노 입자(NovaWire-Ag-A70, Novarials, USA)를 톨루엔(Sigma-Aldrich, USA)을 사용하여 분산(emulsion)시켰다. 코팅액을 PET 필름에 부착되기 위한 부착제로 hexamethoxymethylmelamine(HMMM; Sigma-Aldrich, USA)와 dinonylnaphthalene disulfonic acid(DNNSA; Sigma-Aldrich, USA)를 혼합하였다. 은 나노 입자의 습윤성 및 분산 안전성 증가를 위한 첨가제로는 decamethylcyclopentasiloxane(DMCPS; Sigma-Aldrich, USA), 2-amino-3-methyl-1-butanol(AMB; Sigma-Aldrich, USA), polyethersiloxane(PES; Sigma-Aldrich, USA)를 사용하였다 [14].

#### 2.1.2 AgNW 코팅액 제조

2 g의 은 나노 입자와 58 g의 톨루엔을 자력 교반기에 넣은 후 1 시간 동안 10,000 rpm 속도로 교반하여 은 나노 입자 분산액 60 g을 제조하였다. 부착제 0.3 g(HMMM: 0.15g, DNNSA: 0.15g)과 첨가제 1.1 g(DMCPS 0.35 g, AMB 0.35 g,

PES 0.4 g)을 증류수 38.6 g과 혼합하여 수분 산액 40 g을 준비하였다. 은 나노 입자 분산액 60 g과 수분산액 40 g을 분산기에 넣은 후, 상온에서 10,000 rpm 속도로 1 시간 동안 교반하여 AgNW 코팅액 100 g을 완성하였다. 최종적으로, 제조된 코팅액은 PET 필름(V7610, SKC, Republic of Korea)에 자동도공기(AP-P100, AP Lab, Republic of Korea)를 이용하여 코팅됨으로써, AgNW/PET 필름이 제작되었다.

## 2.2. AgNW/PC 필름

AgNW/PET 필름에 있는 AgNW 전극을 다른 광학 필름에 전사시키기 위하여, 롤 투 롤 장비를 그림 1과 같이 개발하였다. 롤 투 롤 장비는 제1 필름 공급부(1st film supplier), 코팅부(coater), 제2 필름 공급부(2nd film supplier), 필름 합지부(laminator), 광경화부(UV exposure unit), 필름 적층부(winder)로 구성된다. 그림 2는 코팅부, 합지부, 광경화부의 세부사진을 보여준다.

제1 필름 공급부는 AgNW/PET 필름을 코팅부에 공급한다. 그림 2(a)와 같이, 코팅부의 분사노즐(dispenser)은 AgNW/PET 필름과 10 mm 이격되어, 일정한 공압에 의해서 광경화 수지를 갈지자 형상으로 코팅한다. 이때 코팅된 광경화 수

지는 닥터 블레이드(Dr. blade unit)에 의해서 일정한 두께로 도포된다. 제2 필름 공급부는 PC 필름을 광경화 수지층 위에 위치하도록 공급한다. 필름 합지부는 코팅부의 닥터 블레이드 바로 후단에 위치하며, 그림 2(b)와 같이 2 개의 롤러로 구성된다. 2개의 롤러들은 광경화 수지층을 매개로 AgNW/PET 필름과 PC 필름에 일정한 압력을 가함으로써 필름들을 합지시킨다. 광경화부는 필름 합지부 하단에 위치하며, UV를 조사함으로써 광경화 수지층을 경화시킨다. 그 후, 경화된 필름을 적층(winding)하고, 최종적으로, 합지 필름에서 PET 필름을 박리하게 되면 AgNW가 PET 필름에서 PC 필름으로 전사된 AgNW/PC 필름이 완성된다.

최초, 자동도공기를 이용하여 PET 필름에 AgNW 코팅액을 면적  $350 \times 300 \text{ mm}^2$ ,  $27.5 \mu\text{m}$  두께로 도포하고 경화하여  $6\text{--}8 \mu\text{m}$  두께의 전극층을 가지는 AgNW/PET 필름을 제작하였다. 제작된 AgNW/PET 필름은 내경 76.2 mm, 폭 500 mm의 지관에 감겨졌고, 롤 투 롤 장비의 제1 필름 공급부를 통해서 30 mm/s의 속도로 코팅부에 공급되었다. 코팅부의 분사노즐로부터 분사된 광경화 수지(QF1818, QENTOP, Republic of Korea)는 닥터 블레이드에 의해  $15 \mu\text{m}$  두께로 AgNW/PET에 도포되어 필름 합지부에 공급되었다. 필름 합지부의 2개의 롤러에 의해서 AgNW/PET와 PC 필름에  $35.33 \text{ gf/cm}^2$ 의 압력을 인가함으로써, 2개의 필름은  $10 \mu\text{m}$  두께의 광학수지층을 매개로 합지 되었다. 합지 된 필름의 광경화 수지층은 광경화부의 UV( $365 \text{ nm}$ ,  $1 \text{ W}$ )에 의해서 경화되었다. 최종적으로, 합지 필름에서 PET 필름을 박리함으로써, AgNW/PC 필름이 제작되었다.

AgNW를 PET 필름으로부터 PC 필름에 전사시키기 위한 주요 인자를 찾기 위해 1) UV 조사 시간 2) 열사이클(thermal cycling) 횟수 3) 고온다습 환경 노출시간을 이용한 파라메트릭 실험

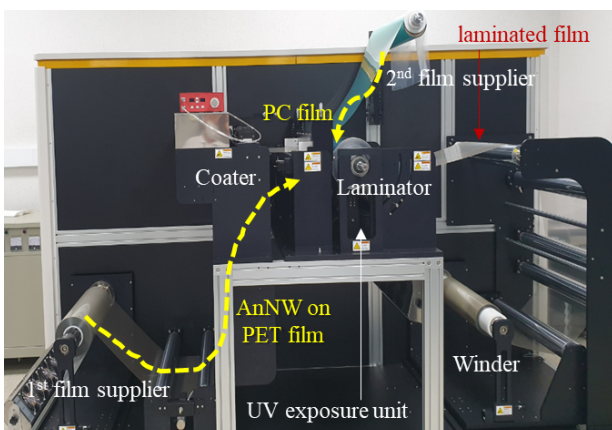


Fig. 1. Roll-to-roll process system for AgNW transfer between different flexible substrates.

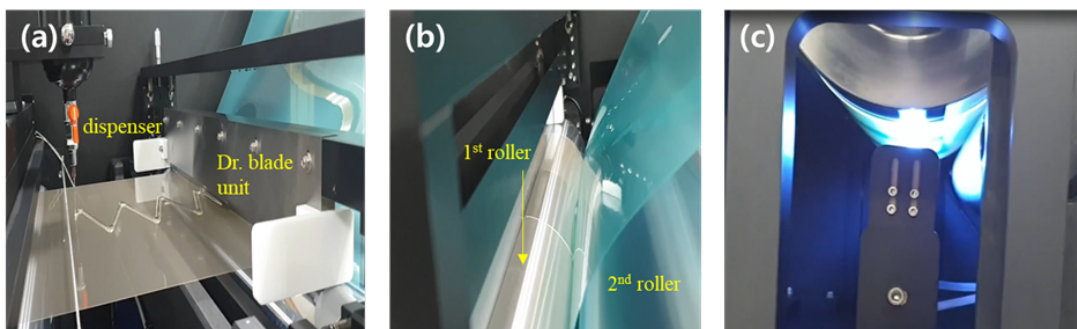


Fig. 2. Magnified view for (a) coater of photo-curable resin, (b) laminator, and (c) UV exposure unit.

(parametric study)을 수행하였다.

### 2.3. AgNW/PC 필름의 특성평가

PET 필름과 PC 필름에 형성된 은 나노 입자의 망상(mesh)형상 분석을 위해서 광학 현미경(SMZ 1000, Nikon, Japan)과 scanning electron microscope(SEM; SU8010, Hitachi, Japan)이 사용되었다. AgNW/PC 필름의 전기적 특성평가를 위해서, 4탐침법을 사용한 표면저항 측정장비(MCP-T610, Mitsubishi Chemical Analytech, Japan)를 이용하여 샘플의 임의의 위치 10군데에서 면저항을 측정하였다. 열 사이클 횟수와 고온다습 환경에 노출시간이 전극전사에 미치는 영향을 확인하기 위해서 환경챔버(HRS-306L, ESPEC, Japan)가 사용되었다. AgNW/PET와 AgNW/PC 필름의 광학적 특성평가를 위해서, 분광광도계 측정기(Cary 5000 UV-VIS-NIR Spectrophotometer, Agilent Technologies, USA)를 이용하여 300-1000 nm에서 빛 투과도를 측정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

UV 조사시간이 전극 전사에 미치는 영향을 확인하기 위하여, 광경화 수지가 UV에 노출되는 시간에 따라 전기전도도를 측정하였다. UV 조사시간은 10-120 초까지 10초 간격으로 설정하였다. UV 조사시간 60 초에서 AgNW/PC 필름의 면저항이  $52 \Omega/\text{sq}$ 로 가장 작게 측정되었다. UV 조사시간이 60초 미만에서는 전극 전사가 잘 이루어지지 않았으며, 60-120초에서 AgNW/PC 필름의 면저항 변화율은 미비하였다. UV 조사시간 60 초에서 AgNW/PC 필름의 면저항이  $52 \Omega/\text{sq}$ 로 가장 작게 측정되었으며, 기존 AgNW/PET 필름 면저항  $49 \Omega/\text{sq}$  비교시 약 6.12% 면저항 변화율을 보였다. 그

림 3은 광경화부에서 합지 필름에 UV를 60 초 조사하고 PET 필름을 박리한 후에, PET 필름과 PC 필름에서 광학 현미경으로 관측된 은 나노 망상 구조 형상을 보여준다. 그림에서 보는 것과 같이 AgNW의 상당부분이 PET 필름에서 PC film으로 전사한 것을 확인할 수 있다.

합지 필름에서 PET 필름을 박리할 때, PC 필름으로의 전극 전사의 비율을 높이기 위해서는 PET 필름과 AgNW의 접착강도를 감소시키는 방법이 있다. 열 사이클과 고온다습 환경에 노출이 해당 접착강도를 감소시켜 전극전사의 주요인자가 될 수 있는지 여부를 확인하기 위해서 다음의 실험을 수행하였다.

열 사이클이 전극 전사에 미치는 영향을 확인하기 위하여, AgNW/PET와 PC의 합지 필름에 다양한 열 사이클 조건의 파라미터 실험을 수행하였다. 열 사이클 실험의 주요 파라미터는 최대설정온도와 사이클 횟수이며, 최대설정온도는  $60^\circ\text{C}$ ,  $100^\circ\text{C}$ ,  $140^\circ\text{C}$ , 사이클 횟수는 10회, 30회, 50회로 총 9번의 실험이 수행되었다. 그림 4는 UV에 60초간 노출된 합지 필름에 대하여 최대설정온도  $100^\circ\text{C}$ ( $0-100^\circ\text{C}$ ), 사이클 횟수 10회의 열 사이클 조건을 인가하고 PET 필름을 박리한 후에, PET 필름과 PC 필름에서 광학 현미경으로 관측된 은 나노 망상 구조 형상을 보여준다. 그림을 비롯한 대부분의 열 사이클 실험에서, PET 필름에 잔류하는 AgNW가 많이 관찰되었으며, AgNW/PC 필름의 면저항은 개방 회로 값이 측정되었다.

고온다습 환경에 노출시간이 전극 전사에 미치는 영향을 확인하기 위하여, AgNW/PET와 PC 합지 필름에 고온다습 노출시간을 파라미터로 실험을 수행하였다. 고온다습 실험에서, 온도는  $85^\circ\text{C}$ , 습도는 85%로 설정하였으며, 노출시간은 1-6 시간까지 1시간 간격으로 설정하여, 총 6번의 실험이 수행되었다.

그림 5는 UV에 60초간 노출된 합지 필름에 대하여, 6 시간의 고온다습 노출 실험을 수행하고 PET 필름을 박리시킨 후, PET 필름과 PC 필름에서 광학 현미경으

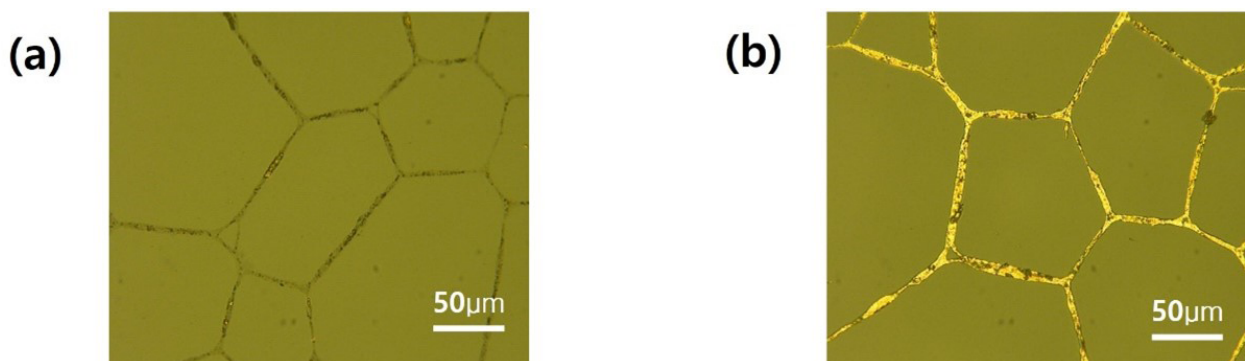


Fig. 3. Microscopic view of AgNW on each film after UV exposure (60 seconds) and the removal of the PET film from the laminated film. (a) AgNW on PET film and (b) AgNW on PC film.

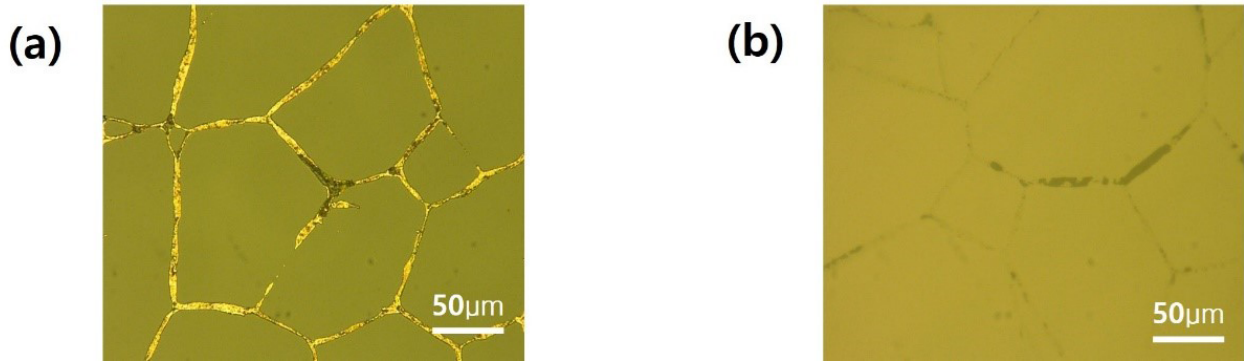


Fig. 4. Microscopic view of AgNW on each film after thermal cycling experiments were performed and the PET film was removed from the laminated film. (a) AgNW on PET film and (b) AgNW on PC film.

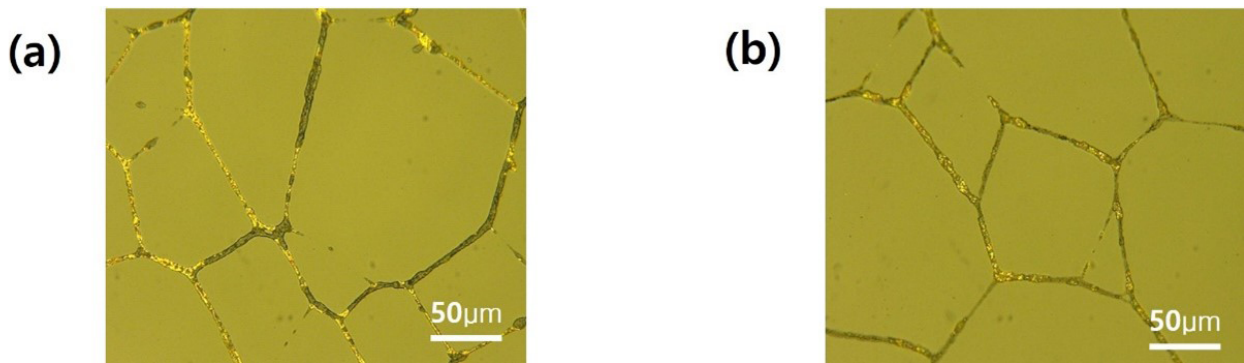


Fig. 5. Microscopic view of AgNW on each film after high temperature and humidity experiments were performed and the PET film was removed from the laminated film. (a) AgNW on PET film and (b) AgNW on PC film.

로 관측된 은 나노 망상 구조의 형상을 보여준다. 그림과 같이 PET 필름에 잔류하는 AgNW가 일부 관찰되었으며, 대부분의 AgNW/PC 필름의 면저항은  $400 \Omega/\text{sq}$  이상으로 측정되어 UV 조건만을 인가했을 때 보다 전기적 성능의 감소를 보였다.

이상의 실험으로부터 전극전사에 영향을 미치는 주요인자는 UV 조사시간이며, 열 사이클과 고온다습 환경에 노출이 전극전사 특성에 악영향을 미치는 요인으로 확인하였다. 열 사이클과 고온다습 환경에 노출이 PET 필름과 AgNW 사이의 접착강도 감소에 영향을 주지만, 광경화 수지와 AgNW 사이의 접착강도 역시 감소하여 전체적으로는 전극전사 비율이 감소한 것으로 사료된

다. 그림 6은 전극 전사 전 AgNW/PET 필름과 최적조건에서 전극 전사 후 AgNW/PC 필름의 SEM 이미지를 각각 보여준다.

그림 7은 300-1000 nm 영역에서 빛의 투과도 (transmittance)를 측정한 실험 결과로, AgNW/PET 필름, AgNW/PC 필름에 대한 분석결과를 보여주고 있다. 전극 전사 전 AgNW/PET 필름을 분광광도계를 통해서 빛의 투과도를 측정하고, 해당 AgNW/PET 필름으로부터 전극을 PC 필름으로 전사시킨 후 AgNW/PC 필름의 투과도를 측정하였다. PC 필름이 PET 필름보다 가시광선 영역 근처에서 빛의 투과도가 더 좋기 때문에, AgNW/PC 필름 역시 전극전사 전 AgNW/PET 필름보다

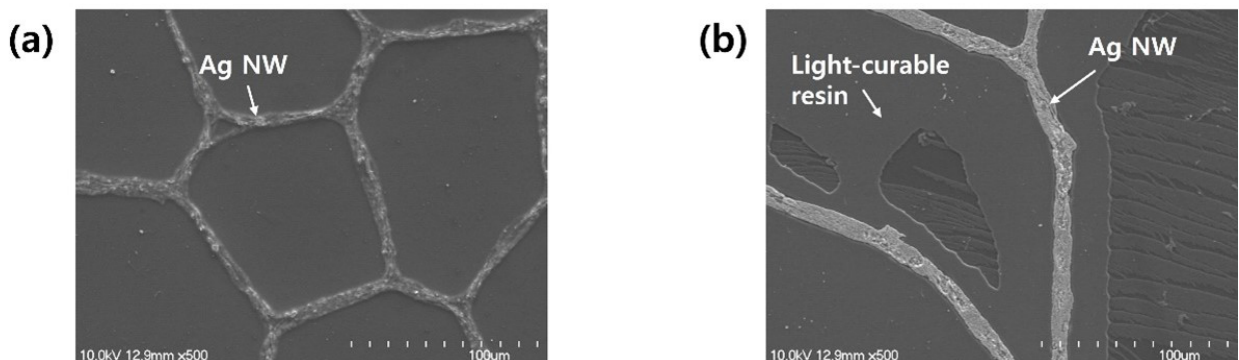


Fig. 6. SEM images of (a) AgNW/PET film before electrode transfer and (b) AgNW/PC film after electrode transfer.

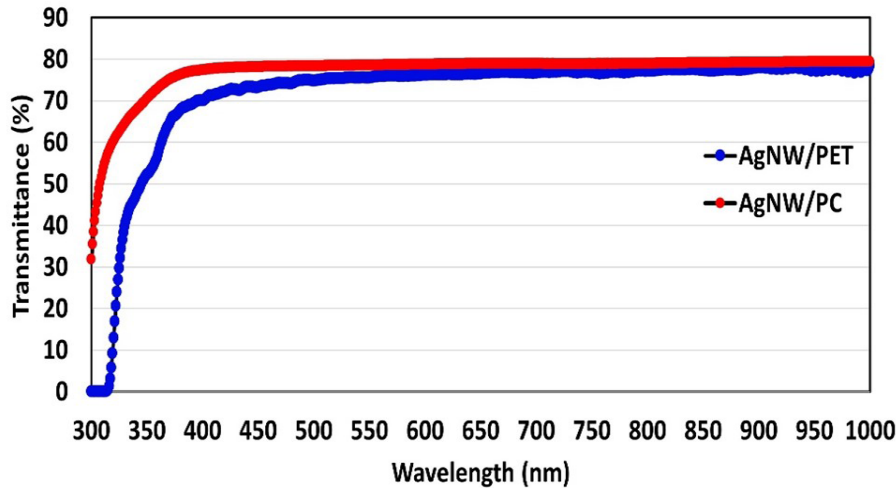


Fig. 7. Optical transmittance characterization for AgNW/PET and AgNW/PC over a range of 300–1000 nm.

투과도가 더 상승하였으며, 400–1000 nm 영역에서 대략 80 %로 측정되었다.

코팅된 필름에서 레인보우 현상이 발생하는 이유는 외부 환경 요인에 의해서 필름의 두께 또는 모양이 변화하여 입사하는 빛의 간섭 패턴이 필름 전체적으로 일정하지 않기 때문이다 (variation in interference pattern of light). 특히, 이 레인보우 현상은 열이나 자외선과 같은 외부환경요인에 취약한 열가소성 플라스틱 (thermoplastic)에 해당하는 PET 필름에서 주로 관측된다 [15]. 자외선에 강한 내구성을 가지고 있다고 알려져 있는 PC 필름이 전장용 디스플레이로 사용될 경우 이러한 레인보우 현상을 상당히 줄일 수 있을 것으로 사료된다 [16].

뿐만 아니라, PC 필름은 높은 충격 저항과 높은 탄성을 가지고 있으며, 가공 적응성이 강하고, PET 필름보다 가격이 낮으며, 자외선 차단 효율이 우수하다는 좋은 특성들을 갖고 있기 때문에 자동차 전장 부품에 적합하다. 따라서, 전도성 필름 소재를 PET 필름이 아니라 PC 필름으로 사용하게 되면, 자동차 전장 부품에 일체화가 가능하다. 더 상세하게는, 본 연구에서 제작된 AgNW/PC 필름은 광경화 수지를 통해서 전장 부품으로 사용될 사출물 표면에 in-mold labeling (IML) 공법을 이용하여 쉽게 부착할 수 있고, 따라서, 미래형 자동차의 터치 센서로 양산될 수 있다. 나아가, 개발된 롤 투 롤 공정은 PC 필름 외에도 더 다양한 소재에 투명전극을 전사시킬 수 있기 때문에 다양한 응용분야의 창출이 가능할 것으로 기대된다.

## 4. 결론

본 연구에서는 PET 필름에 부착된 AgNW를 PC 필름에 전사시킬 수 있는 롤 투 롤 공정을 개발하였다. 해당 공정을 통해서 UV 시간, 열 사이클 횟수, 고온다습 환경에 노출시간을 조건으로 최적 공정 조건을 도출하였다. UV 시간은 60초 일 때 가장 많은 비율의 AgNW가 PC 필름으로 전사되었으며, 열 사이클 횟수 및 고온다습 환경에 노출 시간은 전사에 좋지 않은 영향을 미치는 것으로 실험적으로 확인했다. 최적 조건일 때 면저항은  $52 \Omega/\text{sq}$  로 측정되었다. 또한, 전사 전 AgNW/PET 필름보다 전사 후 AgNW/PC 필름에서 빛의 투과성이 더 상승하였고, 400–1000 nm 영역에서 80% 정도로 확인되었다. 본 연구에서 개발된 롤 투 롤 공정은 PET 필름 외에 PC 필름 등 다양한 소재에 대면적 전극을 구현할 수 있고, 전극 일체화된 유연 전도성 필름을 통해 전장 부품의 디자인 자유도를 확대할 수 있으며, IML 공법을 통해 3차원 형상의 사출과 동시에 전극 구현까지 가능할 것으로 기대된다.

## 감사의 글

This research was supported by the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE, Korea) under the Industrial Technology Innovation Program (Grant No. 20004044) and Chonnam National University (Smart Plant Reliability Center)

grant funded by the Ministry of Education, South Korea, (2020R1A6C101B197). All correspondence should be addressed to the authors Kang Jung and Ho-Jung Jeong.

## References

- [1] Q. H. Tran, D. T. Chu, Q. T. Do, S. H. Pham, P. Leclère, T. D. Nguyen, D. C. Nguyen, Enhancement of electrical and thermal properties of silver nanowire transparent conductive electrode by Ag coating, *Mater. Sci. Eng. B*, 278 (2022) 115640.
- [2] E. M. Doherty, S. De, P. E. Lyons, A. Shmeliov, P. N. Nirmalraj, V. Scardaci, J. Joimel, W. J. Blau, J. J. Boland, J. N. Coleman, The spatial uniformity and electromechanical stability of transparent, conductive films of single walled nanotubes, *Carbon*, 47 (2009) 2466-2473.
- [3] D. S. Hecht, L. Hu, G. Irvin, Emerging transparent electrodes based on thin films of carbon nanotubes, graphene, and metallic nanostructures, *Adv. Mater.*, 23 (2011) 1482-1513.
- [4] X. Li, Y. Zhu, W. Cai, M. Borysiak, B. Han, D. Chen, R. D. Piner, L. Colombo, R. S. Ruoff, Transfer of large-area graphene films for high-performance transparent conductive electrodes, *Nano Lett.*, 9 (2009) 4359-4363.
- [5] J. Lee, P. Lee, H. Lee, D. Lee, S. S. Lee, S. H. Ko, Very long Ag nanowire synthesis and its application in a highly transparent, conductive and flexible metal electrode touch panel, *Nanoscale*, 4 (2012) 6408-6414.
- [6] X. Y. Zeng, Q. K. Zhang, R. M. Yu, C. Z. Lu, A new transparent conductor: silver nanowire film buried at the surface of a transparent polymer, *Adv. Mater.*, 22 (2011) 4484-4488.
- [7] L. Hu, H. S. Kim, J. Y. Lee, P. Peumans, Y. Cui, Scalable coating and properties of transparent, flexible, silver nanowire electrodes, *ACS Nano*, 4 (2010) 2955-2963.
- [8] S. De, T. M. Higgins, P. E. Lyons, E. M. Doherty, P. N. Nirmalraj, W. J. Blau, J. J. Boland, J. N. Coleman, Silver nanowire networks as flexible, transparent, conducting films: extremely high DC to optical conductivity ratios, *ACS Nano*, 3 (2009) 1767-1774.
- [9] A. R. Madaria, A. Kumar, F. N. Ishikawa, C. Zhou, Uniform, highly conductive, and patterned transparent films of a percolating silver nanowire network on rigid and flexible substrates using a dry transfer technique, *Nano Res.*, 3 (2010) 564-573.
- [10] K. M. A. E. Nour, A. A. Eftaiha, A. A. Warthan, R. A. Ammar, Synthesis and applications of silver nanoparticles, *Arabian J. Chem.*, 3 (2010) 135-140.
- [11] M. Kaikanov, A. Kemelbay, B. Amanzhulov, G. Demeuova, G. Akhtanova, F. Bozheyev, A. Tikhonov, Electrical conductivity enhancement of transparent silver nanowire films on temperature-sensitive flexible substrates using intense pulsed ion beam, *Nanotechnol.*, 32 (2021) 145706.
- [12] A. Kumar, M. O. Shaikh, C. H. Chuang, Silver nanowire synthesis and strategies for fabricating transparent conducting electrodes, *Nanomater.*, 11 (2021) 693.
- [13] W. Li, A. Meredov, A. Shamim, Coat-and-print patterning of silver nanowires for flexible and transparent electronics, *NPJ Flex. Electron.*, 3 (2019) 1-7.
- [14] Y. W. Shin, K. B. Kim, S. J. Noh, S. Y. Soh, Effects of the particle size and shape of silver nanoparticles on optical and electrical characteristics of the transparent conductive film with a self-assembled network structure, *Appl. Chem. Eng.*, 29 (2018) 162-167.
- [15] A. Chamas, H. Moon, J. Zheng, Y. Qiu, T. Tabassum, J. Jang, M. A. Omar, S. Scott, S. Suh, Degradation rates of plastics in the environment, *ACS Sustain Chem. Eng.* 8 (2020) 3494-3511.
- [16] "five best UV-resistant plastics, <https://www.fastradius.com/resources/top-uv-resistant-plastics/>."