

## 신축성 기판에 삽입된 은 나노와이어 네트워크 전극의 전사특성 조절 및 유기태양전지 적용

황경석 · 로버트바일\* · 진병두†

단국대학교 고분자공학과, \*단국대학교 창의융합제조공학과  
(2016년 5월 16일 접수, 2016년 6월 1일 수정, 2016년 6월 13일 채택)

### Controlled Transfer Behavior of Embedded Ag-nanowire Network Electrode in Stretchable Substrate and Its Application to Organic Solar Cell

Gyeong seok Hwang, Robert Bail, and Byung-Doo Chin†

Department of Polymer Science & Engineering and Center for Photofunctional Energy Materials,  
Dankook University, Yongin, Gyeonggi 16890, Korea

\*Department of Creative Convergent Manufacturing Engineering (CCME), Dankook University, Yongin, Gyeonggi 16890, Korea  
(Received May 16, 2016; Revised June 1, 2016; Accepted June 13, 2016)

**초록:** 은 나노와이어는 유연/신축 투명전극의 전도성 재료로 많은 관심을 받고 있다. 본 연구에서는 실란 커플링제 표면 개질을 통해 폴리디메틸실록산 탄성체 기판에 은 나노와이어 네트워크 구조를 전사, 삽입시키고 그 전사율을 제어하였다. 은 나노와이어가 삽입된 탄성체 기판은 유리 위에 은 나노와이어 네트워크를 코팅하고 이어 실록산폴리머를 코팅, 경화시킨 후, 유리로부터 이를 떼어 내어 제조하였다. 은 나노와이어의 전사율과 두께는 네트워크 구조체 위에 실란계 개질제(메타크릴옥시프로필트리메틸실란; MPS, 및 옥타데실트리클로로실란; OTS)를 코팅하여 조절하였는데, 이 탄성체 투명필름은 MPS로 개질 시 투과율이 20% 증가했고, 낮은 표면 거칠기로 유기박막 소자에 더 적합했다. OTS 표면개질 조건으로 제작한 투명전극은 40%의 신장조건으로 200회의 신축성 테스트를 했을 때 약 3배로 저항이 증가하였다. 최종적으로 MPS 개질 조건에서 3.2%의 광전효율을 갖는 은 나노와이어 전극형 유기태양전지를 제작하였다.

**Abstract:** Recently, silver nanowires (AgNWs) have had a great interest as a conducting materials for flexible and transparent electrodes. In this paper, we studied the embedded network structure formation of AgNWs in polydimethylsiloxane (PDMS) by stamping transfer process and various surface treatments. We have designed various conditions of AgNWs surfaces using silane-coupling modifiers. Transfer yield of AgNWs was adjusted by the variation of surface treatment condition with silane modifier coating such as methacryloxypropyltrimethoxysilane (MPS) and octadecyltrichlorosilane (OTS) on top of AgNWs. Transparency of embedded AgNWs film has increased up to 20% at the optimum surface treatment condition. Especially, MPS treatment process was found to be appropriate for thin film organic device substrate due to its generation of transferred AgNWs with low surface roughness. Transparent electrodes with OTS treatment showed resistivity with three times at 40% elongation at 200 cycle test. An organic solar cell with 3.2% of power conversion efficiency was fabricated with MPS-treated AgNW networks in a PDMS substrate.

**Keywords:** surface treatment, stretchable, organic solar cell.

## 서 론

최근 인듐 주석 산화물(indium tin oxide; ITO)을 대신해 유기 전자소자에 적합한 전도성 투명전극 소재 및 기판에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. ITO는 유연성이 부족할 뿐

아니라 부식성과 유기 층으로의 인듐의 침투, 청색 영역의 투과율, 고온에서의 불안정성 등 여러 문제가 있다.<sup>1</sup> 이를 해결하기 위해 ITO를 대신해서 탄소 나노 튜브(CNT), 그래핀, 은 나노와이어, 메탈 메쉬같은 금속 나노 구조와 나노 입자 복합체<sup>2</sup> 등을 유기 전자 소자의 전극으로 하거나<sup>3</sup> 약 500~1000 S/cm의 전도도를 가진 전도성 고분자 poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly(styrenesulfonate) (PEDOT:PSS)를 전극으로 사용해 ITO가 없는 구조의 투명전극이 적용된 바 있다.<sup>4</sup> ITO

†To whom correspondence should be addressed.  
E-mail: bdchin@dankook.ac.kr

©2016 The Polymer Society of Korea. All rights reserved.

는 외부 변형에 취약하기 때문에, 차세대 전자소자의 특성 중 유연하거나, 굽혀지거나, 늘어나는 특성을 향상시키기 위하여 ITO 대신 위의 여러 전도체를 전극으로 사용하고 기능성 고분자들을 기판으로 사용해서 기판/전극 형태로 사용되는 방법에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

유연하고 굽힘 가능한 전자소자의 기판으로는 poly(ethylene terephthalate)(PET), poly(ethylene naphthalate)(PEN), polycarbonate(PC), poly(ethersulfone)(PES), polyimide(PI) 등이 널리 사용된다. 또한 신축성있는 thermoplastic polyurethane elastomers(TPU) 탄성체 등 기판은 최근 들어 신축성 전자소자에 널리 연구되고 있다.<sup>5-10</sup>

이들 고분자 기판에 전자 소자의 양극을 형성하기 위해서는 기판 위에 고분자 전극을 사용하고, 이의 전도도를 높이기 위해 메탈 메쉬를 인쇄해서 투명전극으로 사용하는 방법이 있다.<sup>11</sup> 하지만, 인쇄를 통해 형성한 전극(기판/메탈 그리드)은 접착력이 좋지 않기 때문에 전자소자 공정 시 떨어져 나가는 문제점이 있다. 기판과 메탈 그리드의 안정성 향상을 위한 방법으로는 고분자 기판 안에 메탈 그리드를 삽입하여 투명전극으로 사용하는 방법으로 기판과 메탈 그리드의 접착력 문제를 해결한 사례가 있다.<sup>12</sup> 또한, 그리드의 선폭/밀도를 조밀하게 조절해서 저항을 낮추는 방법으로 전도도를 향상시킬 수 있다고 알려져 있다. 하지만, 메탈 그리드는 두꺼운 선폭의 문제로 인해 개구율이 떨어지는 단점과 유연성 테스트에서 그리드가 손상되는 문제를 무시할 수 없다. 메탈 그리드에 비해 얇은 선폭을 갖고 네트워크 구조를 형성할 수 있는 메탈 나노와이어를 이용해 이런 문제를 개선할 수 있고, 용액공정도 보다 수월하다는 장점이 있다. 이를 메탈 나노와이어 구조물을 기판 내에 삽입하는 과정에서는 와이어 전극의 밀도/두께 제어, 표면 거칠기 개선 등의 정밀한 조절이 요구된다.

본 연구에서는 은 나노와이어의 표면에너지와 PDMS의 표면에너지 특성 차이가 전사율에 미치는 영향을 보기 위해 실관계열 물질 중 소수성 특성을 갖는 octadecyltrichlorosilane (OTS)과 친수성 특성인 methacryloxypropyltrimethoxysilane (MPS)으로 은 나노와이어 표면을 화학적으로 개질시켜서<sup>13</sup> 기판 내에 삽입되는 은 나노와이어의 전사율을 제어했으며, OTS의 농도를 다르게 해서 조절한 은 나노와이어의 전사율에 대해 비교 분석하였다. 또한 만들어진 유연성 투명전극을 가지고 신축성 테스트를 하고, 최종적으로 만들어진 투명전극들을 사용해 유기 태양전지를 제작하여 효율특성에 대해 고찰하였다.

## 실 험

**시약 및 재료.** 본 연구에 사용된 은 나노와이어(NTC-01 0.5 wt%, methanol based)는 NANOPYXIS 사의 제품을 사용

했으며, PDMS 및 경화제(SYLGARD 184 silicone elastomer kit)는 Dow Corning사의 제품을 사용했고, PEDOT:PSS (CLEVIOS PH1000)는 HERAEUS사의 제품을 사용했다. 유기 태양전지의 도너로 사용된 물질은 poly[(4,8-bis-(2-ethylhexyloxy)-venzo[1,2-b;4.5-b']dithiophen)-2,6-diyl-alt-(4-(2-ethylhexanoyl)-thieno[3,4-b]thiophen))-2,6-diyl] (PBDTTT-c, Solarmer  $M_w > 23000$ )이며, 액셉터로는 phenyl-C<sub>71</sub>-butyric acid methyl ester (PC<sub>71</sub>BM, Nano-c)를 추가정제 없이 사용하였다. 표면개질로 사용한 OTS, MPS는 Aldrich사의 제품을 사용하였다.

**삽입 전극 제작.** 유리 기판을 아세톤, 이소프로필알코올(1:1)로 30분, 클로로포름으로 30분, IPA로 30분 동안 초음파 분산기에서 분산시키고, 진공오븐에 180 °C로 잔류 용매를 제거한 후 자외선-오존(UV/O<sub>3</sub>) 장치로 10분 동안 표면처리를 해서 세정하였다. 세정된 유리에 은 나노와이어를 메탄올과 1:5의 부피비로 섞어서 스프레이 코팅을 하였다. 스프레이 코팅을 1회 실시한 은 나노와이어의 두께는 220 nm로 측정되었다. 유리 기판 위에 은 나노와이어를 쌓은 후 톨루엔 10 mL에 190 mg의 OTS 용액(0.05 mmol)을 혼합해서 3000 rpm으로 30초 동안 스핀 코팅한 후 오븐에서 80 °C로 열처리하고 톨루엔으로 씻어준 후 오븐에서 80 °C로 다시 열처리 해준 후 PDMS 용액으로 경화시켰다. 다음으로 유리를 제거해서 OTS 처리한 은 나노와이어 삽입 전극을 제작하였다. MPS 또한 0.05 mmol 용액을 제조해서 OTS와 같은 방법으로 기판을 제작하였다. 이후 OTS의 농도를 0.01, 0.02, 0.04 mmol로 변경해서 기판을 제작하고 유기태양전지에 적용했다. 은 나노와이어의 전사율은 처음 쌓은 은 나노와이어의 두께를 측정하고, 전사되고 남은 은 나노와이어의 두께를 측정한 후 처음 쌓은 두께와 부피비로 계산했다. 은 나노 와이어의 두께는 Veeco instruments(US)사 D150 surface profiler로 측정하였다.

**유기 태양 전지 제작.** 투명전극 위에 buffer layer로 PEDOT:PSS를 이소프로필알코올과 1:1로 혼합해서 4000 rpm으로 30초간 스핀코팅을 하고 글로브박스 안에서 100 °C로 30분간 열처리를 시켰다. 광 활성층으로 PBDTTT-c:PC<sub>71</sub>BM(1:1.5) 용액을 1500 rpm에 60초로 스핀코팅하였다. 이후 글로브 박스 안에서 30분 동안 pre-annealing을 하고 0.1 Å/sec의 속도로 LiF를 증착을 한 후 1 Å/sec의 속도로 알루미늄을 증착하였다. 제작한 유기 태양전지는 PEDOT:PSS(40 nm)/PBDTTT-c:PC<sub>71</sub>BM(110 nm)/LiF(0.7 nm)/Al(100 nm)의 구조를 갖는다. 제작한 소자의 효율은 AM 1.5G, 10 mW/cm<sup>2</sup>에서 측정하였다.

## 결과 및 토론

Figure 1에 은 나노와이어 표면을 개질해서 PDMS 기판에

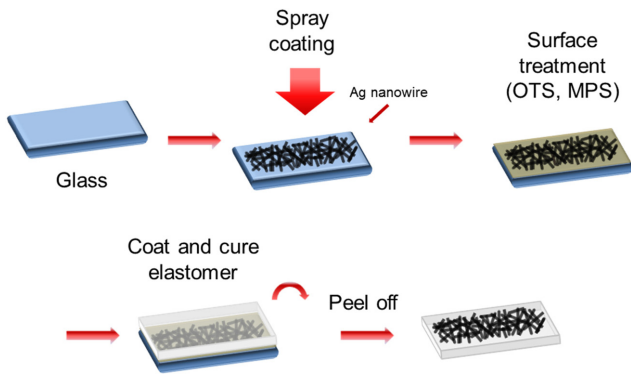


Figure 1. Schematic illustration of embedding process.

삽입하는 과정을 나타내었다. 스프레이 코팅을 통해 유리기판에 은 나노와이어를 도포한 후 화학적 표면개질을 통해 은 나노와이어 필름의 표면에너지를 제어하였고, 이후 PDMS를 도포하고 경화시켜 떼어내 신축성 투명전극을 제작할 수 있었다.

기판 표면의 접촉각이 비슷할수록 상대적인 표면 에너지는 비슷하다. Table 1에 나타내었듯이, 일반 유리의 표면에너지는 46 mJ/m<sup>2</sup>이다. 은 나노와이어를 코팅하고 톨루엔으로 씻어준 후 접촉각을 측정해 보면 31 mJ/m<sup>2</sup>의 표면에너지가 측정되었다. 그 위에 OTS로 표면처리를 해주면 표면에너지가 31에서 7 mJ/m<sup>2</sup>로 감소함을 확인할 수 있었다. 또한 MPS로

표면처리를 해주면 표면에너지가 31에서 42 mJ/m<sup>2</sup>로 증가하였다. 은 나노와이어를 삽입시키는 기판인 PDMS의 표면에너지는 18 mJ/m<sup>2</sup>이다.

Figure 2와 같이 아무 처리를 하지 않은 은 나노와이어 필름의 표면상태에서 PDMS에 삽입을 시키는 경우 (b) 70 nm (31% 전사율)의 은 나노와이어가 PDMS로 전사되었다. 은 나노와이어 필름의 표면에너지와 PDMS의 표면에너지가 가장 비슷한 조건인 OTS 조건에서 많은 양의 은 나노와이어가 (161 nm; 73% 전사율) PDMS로 전사되었다. 반면, 은 나노와이어 필름과 PDMS의 표면에너지가 가장 많이 차이 나는 MPS 조건의 경우 37 nm(17% 전사율)의 나노와이어가 전사되고 가장 많은 양의 은 나노와이어(약 183 nm)가 유리기판에 남았다. 은 나노와이어의 두께는 PDMS에 전사되는 나노와이어의 양이 증가할수록 두꺼워지는 경향을 보였다.

은 나노와이어 전극의 표면 거칠기는 삽입되는 은 나노와이어가 표면을 고르게 채우는 정도에 따라 정해진다.<sup>16</sup> 제작된 투명전극은 Figure 3에 나타내었듯이 OTS로 표면처리한 경우 35 nm의 표면 거칠기가 측정되었고, 아무 처리를 하지 않은 경우 22 nm의 거칠기가, MPS로 표면처리를 한 경우 13 nm의 표면 거칠기가 측정되었다. 은 나노와이어의 삽입 정도가 많아질수록 네트워크의 형성이 많이 생기고 나노와이어의 엉킴이 많아지기 때문에 표면 거칠기가 증가함을 확인하였다.

전자 소자의 전극은 10 nm 내외의 표면 거칠기가 요구된

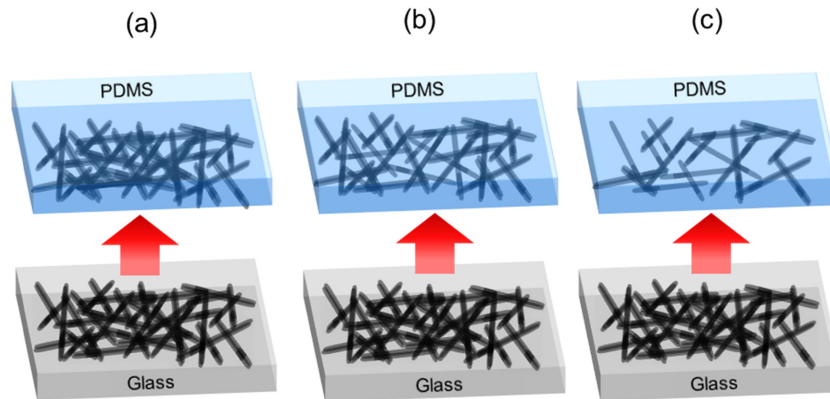
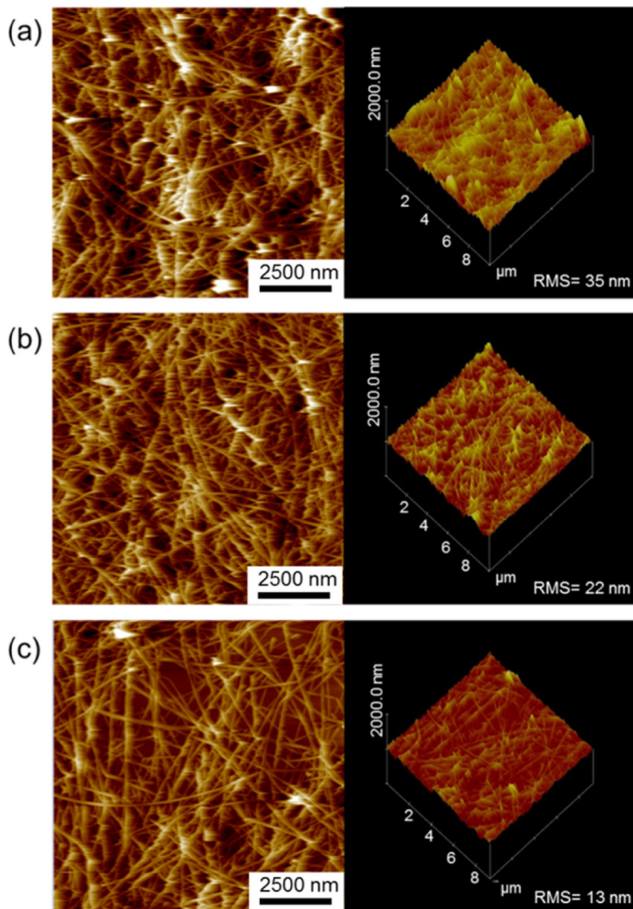


Figure 2. Illustration of transfer system with silane treatment: (a) OTS; (b) non treated; (c) MPS.

Table 1. Analysis of Contact Angle with Various Conditions of Substrate

Substrate	Glass	PDMS	AgNWs film	AgNWs film	AgNWs film
Treatment material			OTS	Non treated	MPS
Contact angle (deg)	62	109	119	86	71
Surface energy <sup>a</sup> (mJ/m <sup>2</sup> )	46	18	7	31	42

<sup>a</sup>Analyzed from equation:  $(1+\cos\theta)\gamma_{pl} = 2(\gamma_s^d \gamma_{pl}^d)^{1/2} + 2(\gamma_s^p \gamma_{pl}^p)^{1/2}$ , where  $\gamma_s$  and  $\gamma_{pl}$  are the surface energies of the substrate and the probe liquid.<sup>14,15</sup>

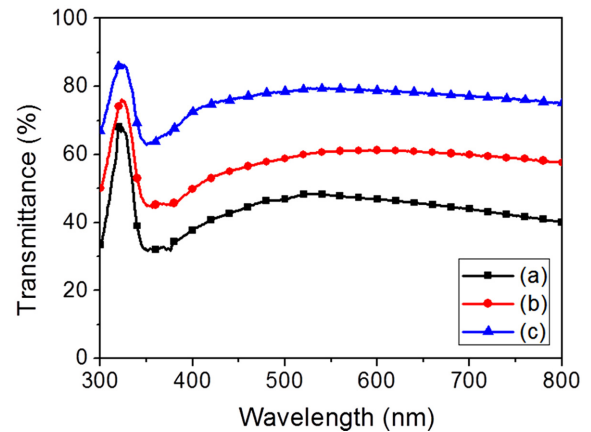


**Figure 3.** AFM images (scale=10 μm) with root-mean-squared (RMS) roughness measurements of substrates: (a) OTS; (b) non treated; (c) MPS.

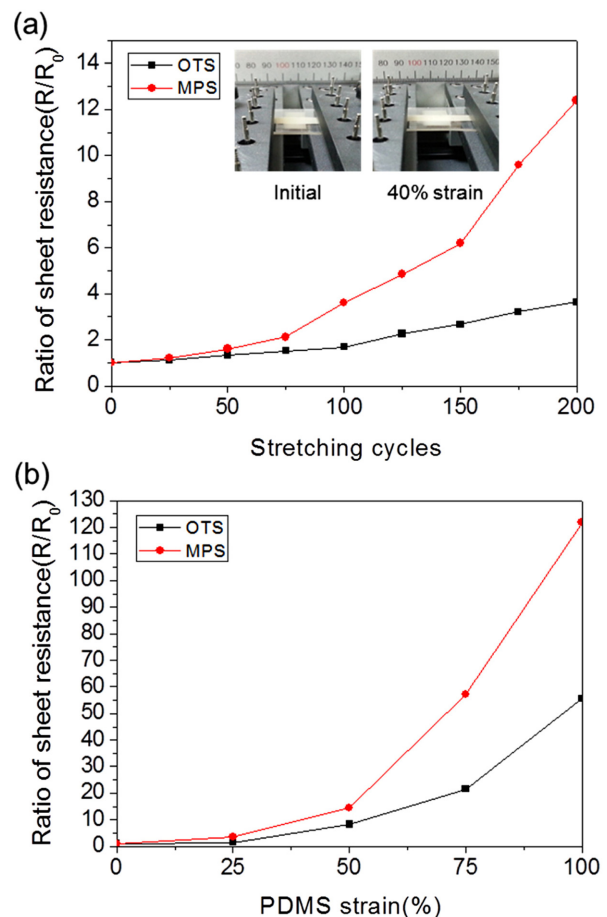
다. MPS 처리를 한 투명전극의 표면 거칠기가 가장 평탄하게 측정되어 전자 소자에 가장 적합하다. 하지만, 많은 양의 은 나노와이어를 삽입시켜 전극의 안정성 및 전도도를 높이고 태양전지 전극으로서 광 전류를 향상시키기 위해서는 OTS를 이용한 삽입 방법이 유리할 수 있으므로, 이 조건에 대해 좀더 적합한 은 나노와이어 표면 성질 제어가 필요하다.

Figure 4에는 제작한 투명전극의 투과율을 나타내었다. 투과율의 경우 가시광 영역(400~700 nm)에서 OTS 처리한 투명전극의 경우 44.63%, 아무 처리를 하지 않은 경우 58.9%, MPS 처리한 경우 77.42%의 투과율이 얻어졌다. 투과율은 두께에 비례하여 감소했다. 이런 현상은 은 나노와이어 네트워크가 증가함에 따라 산란이 증가해서 투과도가 감소하고 탁도가 증가한다고 판단된다.<sup>17</sup>

OTS, MPS 처리 조건으로 제작한 투명전극의 신축성을 측정 한 결과를 Figure 5에 나타내었다. 투명전극을 100%에서 140%로 신장과 수축을 반복한 결과 OTS 처리 조건의 투명전극은 100회까지는 안정적인 전기적 특성을 보였고 200회

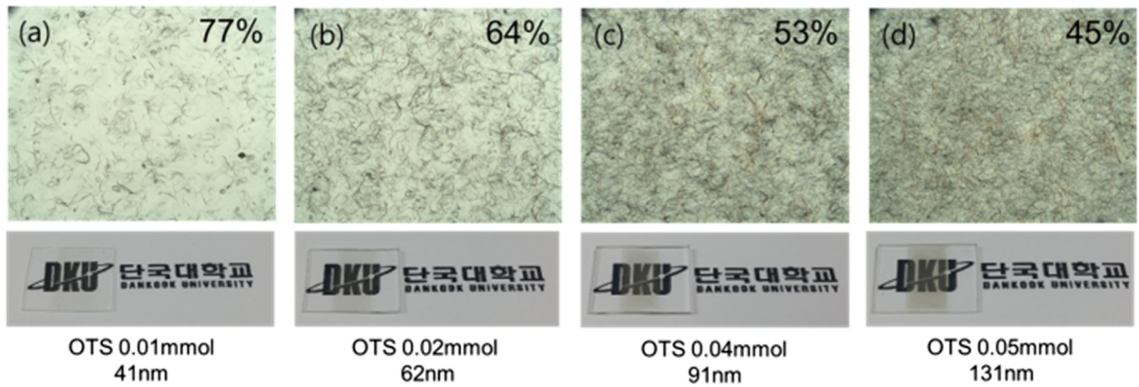


**Figure 4.** Optical transmission of embedded substrates: (a) OTS; (b) non treated; (c) MPS.



**Figure 5.** Ratio of sheet resistance of Ag nanowire embedded films: (a) sample size: 2 cm,  $\epsilon$ : 40% analyze after stretching; (b) sample size: 2 cm.

까지 3배 정도의 저항 변화를 나타내었다. 하지만, MPS 처리 조건의 투명전극은 100회의 신장 수축 반복에서 OTS와는 다르게 저항이 크게 증가함을 확인하였다. 또한 두 조건의

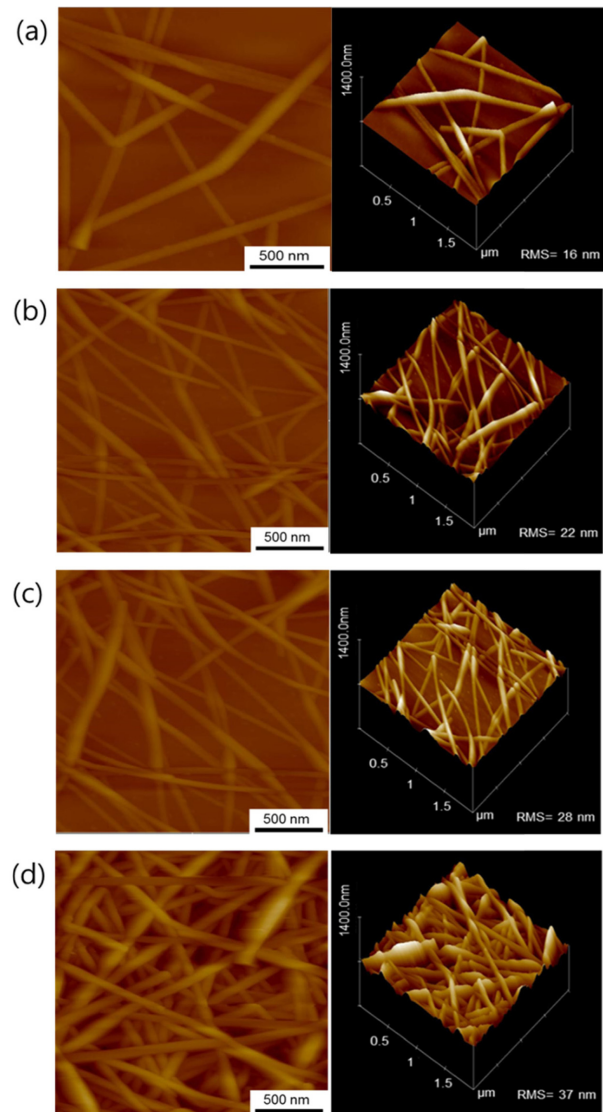


**Figure 6.** Optical images of Ag nanowire embedded substrates: (a) OTS 0.01 mmol; (b) OTS 0.02 mmol; (c) OTS 0.04 mmol; (d) OTS 0.05 mmol.

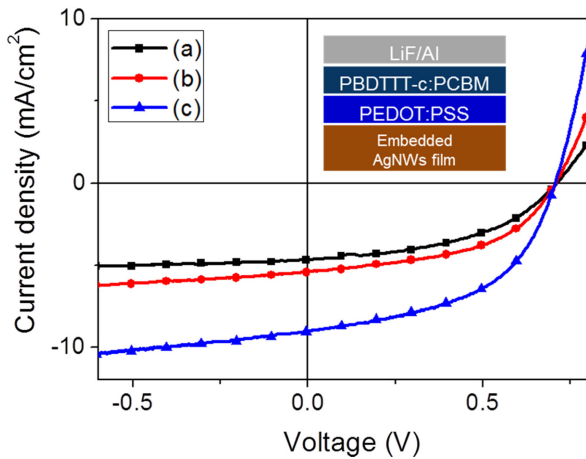
투명전극을 100% 신장시켰을 때는 OTS 처리 조건은 초기 저항보다 약 50배 큰 저항이 측정되고, MPS 처리 조건은 초기 저항보다 약 120배 증가함을 확인하였다. 두 투명전극의 차이는 은 나노와이어 네트워크 형성의 차이에서 나타난다고 생각한다. MPS 처리한 투명전극은 OTS 처리 조건의 투명전극보다 낮은 집적도의 은 나노와이어 네트워크를 형성하여 전기적 특성이 떨어진 것으로 판단된다. 수축 신장 반복 테스트에서 저항의 감소는 은 나노와이어의 네트워크가 기판의 수축 이완의 반복에 의해 손상되기 때문이다.<sup>18</sup>

은 나노와이어의 전사율이 좋은 OTS 처리 조건에서 농도 변화를 통해 다양한 투과율과 전도도를 갖는 투명전극을 제작하였다. OTS를 이용한 표면 처리시 농도는 표면에너지 및 표면 거칠기에 매우 중요한 인자로 보고된 바 있다.<sup>19</sup> Figure 6에 OTS의 농도 별 PDMS에 삽입된 은 나노와이어 전극의 광학이미지, 투과율 및 두께를 나타내었다. 투과율은 농도가 가장 낮은 OTS 0.01 mmol 조건에서 77%의 투과율과 137.084( $\Omega/\text{sq}$ )의 면 저항이 측정되었고, 가장 높은 농도인 OTS 0.5 mmol 조건에서는 45%의 투과율, 27.664( $\Omega/\text{sq}$ )의 면 저항이 측정되었다. 면 저항 또한 OTS농도가 증가할수록 감소하는 경향성을 확인하였다. 은 나노와이어의 두께는 41 nm에서 131 nm까지 조절할 수 있었다. OTS의 농도가 증가함에 따라 당연히 투과율은 감소하고, 전사율은 증가하는 결과를 보였다. 앞선 실험에서 MPS로 은 나노와이어의 표면을 개질했을 때 가시광 영역에서 약 77.42%의 투과율을 갖는 신축성 투명전극을 제작하였는데, 유사하게 OTS의 농도를 낮추어서도 투명전극을 제작한 결과 MPS와 비슷한 투과율을 갖는 투명전극이 제작되었다. 전체적으로 은 나노와이어의 네트워크가 증가할수록 투과율은 감소하지만 저항이 감소하는 경향성을 보인다. 이런 경향성을 이용해서 실란계열 물질을 사용해 은 나노와이어 필름의 전사형태와 점도를 최적화하면 더 좋은 전자소자용 투명전극을 제작할 수 있을 것으로 기대된다.

Figure 7은 OTS의 다양한 농도 조건으로 제작한 투명전극



**Figure 7.** AFM images (scale=2  $\mu\text{m}$ ) with root-mean-squared (RMS) roughness measurements of substrates: (a) 0.01 mmol; (b) 0.02 mmol; (c) 0.04 mmol; (d) 0.05 mmol.



**Figure 8.** I-V curves of the organic solar cells based on embedded films: (a) OTS; (b) non treated; (c) MPS.

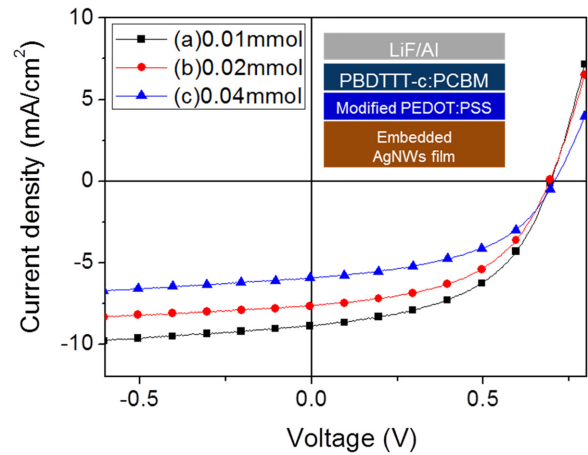
**Table 2. Characteristics of Organic Solar Cells with Various Conditions of Substrate**

	(a) OTS	(b) Non treated	(c) MPS
$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	4.68	6.25	10.33
FF(%)	45.5	42.7	43.8
$V_{oc}$ (V)	0.715	0.710	0.710
PCE(%)	1.52	1.90	3.22
$R_s$ (Ω/sq)	14.69	11.21	10.68
$R_p$ (Ω/sq)	1330	589	408

<sup>a</sup>Analyzed from equation:  $I = I_{sc} - AA \times (e^{BB \times V} - 1) - V/R_p$ , with  $V = E + I \times R_s$ , where  $I$  is total current,  $E$  is total potential,  $V$  is internal potential across solar cell (= excluding potential drop over  $R_s$ ,  $I_{sc}$  is shortcut photocurrent ( $V=0$ )),  $AA$  is saturation current,  $BB$  is exponential constant related to ideality factor.

의 표면 거칠기를 나타내었다. 가장 낮은 농도인 0.01 mmol로 제작된 투명전극은 16 nm의 표면 거칠기가 측정되었다. OTS의 농도가 증가할수록 많은 은 나노와이어가 삽입되어 표면 거칠기가 증가하는 경향을 보였고, 가장 높은 농도인 0.05 mmol의 조건에서는 37 nm의 표면 거칠기가 측정되었다. 이 결과 역시 OTS-MPS 처리에서의 거칠기 차이 경향과 유사한 것을 확인하였다.

OTS, MPS 표면처리를 통해 은 나노와이어가 삽입된 투명전극을 유기 태양전지의 양극에 이용해서 PEDOT:PSS/PBDTTT-c:PC<sub>71</sub>BM/LiF/Al 구조의 유기 태양전지를 제작한 결과를 Figure 8과 Table 2에 표기하였다. OTS 처리를 이용해 만든 투명전극에서는 4.68 mA/cm<sup>2</sup>의  $J_{sc}$ , 45.5%의 FF, 0.715 V의  $V_{oc}$ , PEC( $\eta$ )는 1.52%가 측정되었다. 아무 처리를 하지 않은 소자는 6.25 mA/cm<sup>2</sup>의  $J_{sc}$ , 42.7%의 FF, 0.710 V의  $V_{oc}$ ,  $\eta$ 는 1.90%가 측정되었다. MPS를 사용한 투명전극은 10.33 mA/cm<sup>2</sup>의  $J_{sc}$ , 43.8%의 FF, 0.710 V의  $V_{oc}$ ,  $\eta$ 는 3.22%



**Figure 9.** I-V curves of the organic solar cells based on embedded films: (a) OTS 0.01 mmol; (b) OTS 0.02 mmol; (c) OTS 0.04 mmol.

**Table 3. Characteristics of Organic Solar Cells with Various OTS Conditions of Substrate**

	(a) 0.01 mmol	(b) 0.02 mmol	(c) 0.04 mmol
$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	8.84	7.62	5.91
FF(%)	50.2	50.6	49.1
$V_{oc}$ (V)	0.700	0.695	0.710
PCE(%)	3.10	2.68	2.06

가 측정되었다. 가장 높은 투과율을 갖고, 가장 평탄한 표면 거칠기를 갖는 MPS로 표면처리를 한 기판이 가장 효율특성이 좋았다.

$R_s$ (series resistance)는 물질이 가지는 저항이며 전극과 물질 사이의 접촉 저항 그리고 전극 자체의 저항에 의해 결정된다.  $R_p$ (parallel resistance)는 소자 상에서 누설 전류에 기인한다. 결국  $J_{sc}$ 는  $R_s$ 에 제한되고  $R_p$ 가 작은 값을 가지면  $V_{oc}$ 가 작아지게 된다. 제작한 소자의  $R_s$ 는 Table 2에 나타내었던 은 나노와이어의 삽입이 많을수록 작아지나 투과도에도 영향 받아 (a) 소자에서 큰 값을 보였다.

유기태양전지의 효율특성에서 도너와 억셉터의 highest occupied molecular orbital(HOMO)와 lowest unoccupied molecular orbital(LUMO)의 차이에 비례하여 나타나는 특성인  $V_{oc}$ 는 동일하게 0.7 V로 나왔지만 광 흡수와 전자 에너지로의 변환특성인  $J_{sc}$ 가 차이 나는 것을 확인할 수 있다. 이런 결과는 OTS의 경우 기판의 투과율이 45%로 광 에너지의 전기 에너지로의 변환이 원활하지 않으나 MPS의 경우 78%의 투과율에 의해 가장 높은  $J_{sc}$ 가 측정되어 가장 높은 효율이 측정됨을 알 수 있다.<sup>20</sup>

앞의 연구결과에서 OTS 처리를 한 투명전극으로 제작한 유기 태양전지는 가장 낮은 효율이 측정되었지만, OTS 표면

처리는 가장 많은 은 나노와이어의 전사가 이루어지는 조건이다. 하지만, 은 나노와이어의 두께가 너무 두꺼워서 떨어지는 투과율의 문제가 있기 때문에 이를 해결하기 위해 OTS를 이용하여서도 농도를 조절함으로써 투과율이 높으면서 전도도가 우수한 전극을 얻을 수 있었다.

Figure 9와 Table 3에 OTS 0.01, 0.02, 0.04 mmol 조건으로 표면을 처리해 제작한 투명전극으로 유기태양전지를 제작한 후 I-V 특성과 효율 특성에 대해 나타내었다. 0.01 mmol의 농도로 투명전극을 제작한 소자는 8.84 mA/cm<sup>2</sup>의  $J_{sc}$ , 50.2%의 FF, 0.700 V의  $V_{oc}$ ,  $\eta$ 는 3.10%가 측정되었다. 0.02 mmol의 농도로 투명전극을 제작한 소자는 7.62 mA/cm<sup>2</sup>의  $J_{sc}$ , 50.6%의 FF, 0.695 V의  $V_{oc}$ ,  $\eta$ 는 2.68%가 측정되었다. 0.04 mmol의 농도로 투명전극을 제작한 소자는 5.91 mA/cm<sup>2</sup>의  $J_{sc}$ , 49.1%의 FF, 0.710 V의  $V_{oc}$ ,  $\eta$ 는 2.06%가 측정되었다. OTS의 농도에 증가에 따라서  $J_{sc}$ 가 감소함을 확인했고, 최종적으로 은 나노와이어를 삽입한 투명전극의 투과율이 가장 효율에 크게 영향을 미치는 것을 확인했다.

## 결론

본 연구에서는 유기태양전지에 적용할 수 있는 유연, 신축성 기관을 제작하고 소자를 만들어 효율 특성을 해석하였다. 은 나노와이어의 표면에너지를 실란계열 물질인 OTS와 MPS로 조절해서 PDMS 기관으로의 전사율을 조절할 수 있었는데, 은 나노와이어의 표면을 OTS와 MPS로 개질시켰을 때는 표면이 소수성 기관인 PDMS의 표면에너지와 가장 비슷한 조건인 OTS의 조건에서 가장 높은 전사율을 확인할 수 있었다. OTS의 농도는 낮을수록 전극의 투과율이 증가하는 결과를 확인했었는데 반면, 신축성 테스트에서는 은 나노네트워크가 많아지는 OTS 처리기관이 더 안정함을 확인할 수 있었다. 제작한 신축성 투명전극에 대해 이를 기반으로 제작한 유기태양전지는 나노와이어 밀도 증가로 인한 전도성 증가 효과보다는 도너 물질의 광흡수가 일어나는 구간인 가시광 영역에서 나노와이어 전극의 투과율이 높을수록 높은  $J_{sc}$ 가 측정되며 효율이 증가하는 결과를 확인하였다. 유기태양전지에서 더 나아가 앞으로 유연하고 늘어나는 차세대 디스플레이의 전극으로 사용되기에 적합한 투명전극으로 적용할 수 있도록 신축 상태에서의 높은 투과율과 전도도를 확보하는 것이 매우 중요하다고 하겠다.

**감사의 글:** 본 연구는 2014년도 단국대학교 대학 연구비의 지원으로 연구되었습니다.

## 참고 문헌

1. J. Cui, A. Wang, N. L. Edleman, J. Ni, P. Lee, N. R. Armstrong, and T. J. Marks, *Adv. Mater.*, **13**, 1476 (2001).
2. C. Girotto, B. P. Rand, S. Steudel, J. Genoe, and P. Heremans, *Org. Electron.*, **10**, 735 (2009).
3. D. S. Hecht, L. Hu, and G. Irvin, *Adv. Mater.*, **23**, 1482 (2011).
4. T. Aernouts, P. Vanlaeke, W. Geens, J. Poortmans, P. Heremans, S. Borghs, R. Mertens, R. Andriessen, and L. Leenders, *Thin Solid Films*, **22**, 451 (2004).
5. B. C. Kim, H. T. Jeong, C. J. Raj, Y. R. Kim, B. B. Cho, and K. H. Yu, *Synth. Met.*, **207**, 116 (2015).
6. F. C. Krebs, *Org. Electron.*, **10**, 761 (2009).
7. J. W. Kang, W. I. Jeong, J. J. Kim, H. K. Kim, D. G. Kim, and G. H. Lee, *Electrochem. Solid State Lett.*, **10**, J75 (2007).
8. Y. S. Park, K. H. Choi, and H. K. Kim, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **42**, 235109 (2009).
9. T. Y. Liu, H. C. Liao, C. C. Lin, S. H. Hu, and S. Y. Chen, *Langmuir*, **22**, 5804 (2006).
10. Z. Liu, J. Li, and F. Yan, *Adv. Mater.*, **25**, 4296 (2013).
11. J. Zou, H. P. Yip, S. K. Hau, and A. K. Y. Jen, *Appl. Phys. Lett.*, **96**, 203301 (2010).
12. M. S. Miller, J. C. O'Kane, A. Niec, R. S. Carmichael, and T. B. Carmichael, *ACS Appl. Mater. Interfaces.*, **5**, 10165 (2013).
13. S. C. Lim, S. H. Kim, J. H. Lee, M. K. Kim, D. J. Kim, and T. Zyung, *Synth. Met.*, **148**, 75 (2005).
14. J. A. Lim, W. H. Lee, D. H. Kwak, and K. W. Cho, *Langmuir*, **25**, 5404 (2009).
15. A. J. Kinloch, *Adhesion and Adhesives Science and Technology*, Cambridge University Press, Cambridge, U.K., Chapter 2, p 33 (1987).
16. T. C. Hauger, S. M. I. Al-Rafia, and J. M. Buriak, *ACS Appl. Mater. Interfaces.*, **5**, 12663 (2013).
17. T. G. Kim, A. Canlier, G. H. Kim, J. H. Choi, M. K. Park, and S. M. Han, *ACS Appl. Mater. Interfaces.*, **5**, 788 (2013).
18. S. A. Lee, S. R. Shin, S. G. Lee, J. M. Seo, J. H. Lee, S. B. Son, H. J. Cho, H. Algadi, S. Al-Sayari, D. E. Kim, and T. Y. Lee, *Adv. Funct. Mater.*, **25**, 3114 (2015).
19. A. Virkar, S. Mannsfeld, J. H. Oh, M. F. Toney, Y. H. Tan, G. Y. Liu, J. C. Scott, R. Miller, and Z. Bao, *Adv. Funct. Mater.*, **19**, 1962 (2009).
20. V. Shrotriya, J. Ouyang, R. J. Tseng, G. Li, and Y. Yang, *Chem. Phys. Lett.*, **411**, 138 (2005).