

## Hydroxypropyl methylcellulose 접착력 증진제 첨가에 따른 은 나노와이어 용액 및 필름의 특성 변화

정진욱<sup>1,2</sup> · 김종복<sup>1,2†</sup>

<sup>1</sup>금오공과대학교 신소재공학과  
<sup>2</sup>금오공과대학교 에너지공학융합전공  
(2023년 03월 28일 접수, 2023년 04월 12일 채택)

## Characteristics of Silver Nanowire Solution and Film Depending on Hydroxypropyl Methylcellulose Adhesion Promoter Addition

Seungju Kang<sup>1,2</sup>, Boseok Kang<sup>1,2†</sup>

<sup>1</sup>Department of Materials Science and Engineering, Kumoh National Institute of Technology,  
Gumi, 39177, Korea

<sup>2</sup>Department of Energy Engineering Convergence, Kumoh National Institute of Technology,  
Gumi, 39177, Korea

(Received March 28, 2023; Accepted April 12, 2023)

**요약:** 은 나노와이어 기반 투명전극은 우수한 전도도와 투과도, 유연성을 가지고 있어 ITO 기반의 유연전극을 대체할 수 있는 차세대 유연투명전극으로 각광받고 있다. 그러나 은 나노와이어 기반 투명전극 제작에 사용되는 은 나노와이어 용액에 대한 이해가 부족하여 전자소자 응용 시 소자의 비정상적인 작동이나 전극 필름의 박리 문제가 종종 발생하곤 한다. 본 연구에서는 은 나노와이어 용액에 대한 이해를 높이고자 은 나노와이어 용액에 사용되는 첨가제 중 하나인 hydroxypropyl methylcellulose 접착력 증진제에 대한 연구를 진행하였으며, 접착력 증진제를 첨가함에 따라 은 나노와이어 용액의 특성이 어떻게 변화되고 이러한 용액을 사용하여 제작된 은 나노와이어 필름의 특성이 어떻게 변화되는지 연구하였다. 용액의 특성으로는 극성성분의 표면장력과 분산성분의 표면장력이 측정되었으며, 필름 특성으로는 표면 에너지와 표면 형상, 은 나노와이어 밀도, 면저항 등이 분석되었다.

**Abstract:** Silver nanowire-based transparent electrodes are very attractive as a next-generation flexible and transparent electrode that can replace ITO-based flexible electrodes because they have excellent conductivity, transmittance and mechanical flexibility. However, weak understanding of the silver nanowire solution for the fabrication of silver nanowire-based transparent electrodes often cause abnormal operation of the electrical device or peeling problem of the electrode films when applied to electronic devices. Here, we studied a Hydroxypropyl Methylcellulose (HPMC) adhesion promoter, which is one of the additives for silver nanowire solution, to improve the understanding of silver nanowire solution. In detail, it is characterized how the HPMC changes the properties of silver nanowire solution and silver nanowire film, which is fabricated with silver nanowire solution including the HPMC adhesion promoter. As the characteristics of solution, polar surface tension and dispersive surface tension were measured. As the film characteristics, surface energy, surface morphology, silver nanowire density, and sheet resistance were analyzed.

**Keywords:** Silver Nanowire Solution, Silver Nanowire Film, Surface Tension, Morphology, Electrical Characteristics

† Corresponding author: Jongbok Kim(jb1956k@gmail.com)

## 1. 서론

전극은 낮은 전기저항을 가짐으로써 손실없이 전자를 잘 흘려줄 수 있는 전도성 부분을 말하며, 주로 디스플레이[1], 트랜지스터[2] 등과 같은 전자소자에서 전자를 주입하거나 수집하는 역할을 하곤 한다. 따라서 전통적인 개념의 전극은 얼마만큼 전기저항을 낮춤으로써 전자 흐름에 대한 손실을 줄일 수 있을 것인가가 주요 연구 주제였으며, 더불어 전극 물질에 대한 자원고갈 문제 및 생산단가 문제 등을 어떻게 해결할지가 주요 연구되었다. 그러나 최근 전자소자는 기존의 단단한 형태에서 플렉서블한 형태로 진화되었으며, 그 결과 전극 또한 낮은 저항과 더불어 인장 또는 굽힘 응력에 대해 얼마만큼 저항성을 갖고 전도성을 그대로 유지할 수 있을지가 중요한 사항이 되었다. 구부러지거나 휘어도 전극으로서의 특성을 그대로 유지할 수 있는 유연전극을 제작하는 가장 간단한 방법은 Polyethylene Terephthalate (PET) 필름과 같은 유연기판 위에 전통적으로 사용하는 전도성 소재인 Indium Tin Oxide (ITO)를 증착하는 방법[3]이다. 이 방법은 기존의 ITO 증착 공정이 잘 정립되어 있고 PET의 유연성으로 인해 전극의 유연성을 어느 정도 구현할 수 있다는 장점은 있으나 산화물 소재 자체는 휨, 구부림 등 외부의 응력에 의해 크랙을 발생시키는 특성을 가지고 있으므로 유연전자소자용 전극으로서 한계가 있다는 단점을 가지고 있다 [4,5].

ITO를 대체하기 위한 소재 중 대표적인 소재로는 PEDOT:PSS, PANI:PAAMPSA와 같은 전도성 고분자[6, 7], 탄소나노튜브, 그래핀과 같은 탄소계열 전도성 물질 [8,9], 금속 그리드 또는 금속 나노와이어를 이용한 금속 기반 전도성 네트워크[10,11]를 생각할 수 있다. 그 중 전도성 고분자는 투과도가 우수하고 가격이 저렴하나 탄소 소재에 비해서 전기저항이 높다는 단점을 가지고 있으며, 탄소계열 전도성 물질은 환경 안정성이 우수한 반면 전자소자 적용 시 전하수집 효율이 낮아지는 문제가 제기되고 있다. 그에 비해 금속 그리드와 금속 나노와이어 같은 금속 기반 소재는 금속 소재가 갖는 높은 전기전도성으로 인해 전극으로 가장 적합한 특성을 나타내고 있으며 네트워크의 밀도를 제어함으로써 우수한 투과도 또한 달성가능하다는 장점을 가지고 있어, 용액 공정이 가능한 금속 나노와이어 기반 유연전극은 ITO를 대체할 수 있는 유연전극 소재 중 가장 유망할 것으로 판단된다.

금속 나노와이어를 이용한 유연전극은 주로 금속 나노와이어 용액을 준비한 후 이를 PET와 같은 유연기판에 코팅함으로써 제작된다. 금속 나노와이어 중 가장 많이 사용되는 은 나노와이어 용액은 주로 폴리올법을 통해 만들어진다[12]. 폴리올법에서는 질산은( $\text{AgNO}_3$ )이 은 나노와이어에 대한 source물질로 사용되며 ethylene glycol(EG)

이 용매와 환원제, poly(vinylpyrrolidone) (PVP)이 안정제로 사용되게 된다. 그 중 PVP는 은 결정의 (100)면에만 흡착하여 은 결정이 (111)면으로만 성장하게 함으로써 은 결정이 나노와이어 형태로 자랄 수 있도록 유도하는 역할을 하게 되며, 이렇게 제작된 은 나노와이어를 증류수 또는 이소프로필 알코올에 분산시킨 후 각종 목적의 첨가제를 넣게 되면 은 나노와이어 용액 준비가 완료된다. 은 나노와이어 용액 코팅은 주로 스핀코팅, 스프레이 코팅, Meyer road 코팅 등 다양한 방법이 사용된다[13-15]. 즉 유연한 기판 위에 은 나노와이어 용액을 떨어뜨리고 회전 시킴으로써 적정 두께의 은 나노와이어 네트워크를 형성하거나 스프레이로 은 나노와이어 용액을 분사함으로써 은 나노와이어 네트워크를 형성할 수 있다. 그리고 용액을 기판에 떨어뜨리고 다양한 흡을 가지고 있는 Meyer road로 용액을 한 방향으로 밀어냄으로써 적정 두께의 은 나노와이어 네트워크를 형성할 수 있다. 각 코팅 방법은 공정의 편의성, 대면적화 가능성, 코팅 균일성 등에서 서로 다른 장단점을 가지고 있는 반면, 모든 방법에서 메탈 나노와이어 용액에 대한 이해가 부족할 경우 전자소자 응용 시 소자가 정상적으로 작동하지 않거나 전극이 박리되는 문제가 발생하곤 하며 코팅을 원활하게 하고 원하는 전도도와 박막 안정성 등을 확보하기 위해서는 메탈 나노와이어 용액에 대한 이해가 필수적이다.

본 연구에서는 은 나노와이어의 접착력을 향상시키기 위해 사용되는 첨가제 중 하나인 Hydroxypropyl Methylcellulose (HPMC)가 은 나노와이어 용액 특성 및 이를 이용하여 제작된 은 나노와이어 필름 특성에 어떠한 영향을 미치는지 연구하였다. 은 나노와이어 용액에 대한 HPMC 양은 0 wt%에서 1.0 wt%까지 제어되었으며 스핀코팅을 통해 기판에 은 나노와이어 필름을 형성하였다. 용액의 특성을 평가하기 위하여 표면 에너지를 알고 있는 특정 기판에 대한 은 나노와이어 용액의 접촉각을 측정하였으며 이로부터 용액의 극성 표면장력과 분산성분의 표면장력을 도출해 내었다. HPMC 양에 따른 필름 특성으로는 전자소자 응용 시 중요한 표면 에너지, 표면 거칠기 등이 측정되었으며 은 나노와이어 밀도와 전기전도도 등도 분석되었다.

## 2. 실험 방법

HPMC 첨가제가 은 나노와이어 용액 및 은 나노와이어 필름 특성에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 먼저 첨가제가 포함되어 있지 않은 은 나노와이어 용액을 C3Nano 사로부터 구매하였다. 은 나노와이어는 물에 분산되어 있었으며 용액의 농도는 0.5 wt%였다. 은 나노와이어의 직경은 20 nm이었으며 길이는 20  $\mu\text{m}$ 였다. HPMC는 시그마 알드리치 사로부터 구매하였으며 수평균 물질량은 10,000

g이었다. 은 나노와이어 용액과 HPMC 구매 후 HPMC를 은 나노와이어 용액에 첨가하여 혼합용액을 제조하였다. 혼합용액은 HPMC가 은 나노와이어 용액에 균일하게 분산되도록 하기 위하여 볼텍스 믹서를 사용하여 혼합하였으며 HPMC 첨가제의 양은 0~1.0 wt%까지 변화되었다.

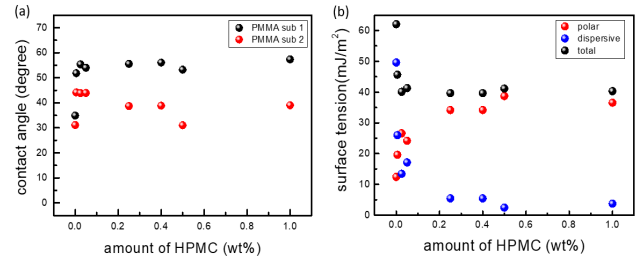
은 나노와이어 필름은 HPMC가 포함되어 있는 은 나노와이어 용액을 기판에 스펀코팅함으로써 준비되었다. 기판으로는 유리기판이 사용되었으며 아세톤, 이소프로필알코올을 이용하여 각각 60°C에서 15분간 초음파 세척한 후 건조하여 사용하였다. 은 나노와이어 용액은 기판 도포 후 1000 rpm에서 1분간 스펀코팅되었으며 용매 제거를 위하여 100°C에서 1분간 건조되었다.

은 나노와이어 용액의 표면장력을 알기 위하여 PMMA가 코팅된 유리기판을 준비하였다. PMMA 기판은 두 종류를 사용하였으며 첫 번째 기판은 32.2 mJ/m<sup>2</sup>의 극성 표면 에너지와 7.8 mJ/m<sup>2</sup>의 분산 표면 에너지, 두 번째 기판은 54.4 mJ/m<sup>2</sup>의 극성 표면 에너지와 3.0 mJ/m<sup>2</sup>의 분산 표면 에너지를 나타내었다. 두 종류의 PMMA 기판 표면 에너지는 UV/Ozone 처리 유무에 따라 결정되었다. 그 후 다양한 양의 HPMC를 포함하는 은 나노와이어 용액을 두 PMMA 기판에 떨어뜨리고 접촉각을 측정하였으며, Owens-Wendt 모델을 이용하여 은 나노와이어 용액의 표면장력을 계산하였다[16].

다양한 양의 HPMC를 포함하는 은 나노와이어 필름의 표면에너지는 증류수와 글리세롤을 각각 떨어뜨리고 접촉각을 측정 후 Owens-Wendt 모델에 의해 극성표면에너지와 분산표면에너지를 계산함으로써 도출해내었다[16]. 은 나노와이어 필름의 표면 형상은 SEM 분석과 AFM 분석을 통해 관찰하였다. 그 후 SEM 이미지와 ImageJ 프로그램을 이용하여 표면에 있는 은 나노와이어 밀도를 계산하였으며 AFM 이미지로부터 rms roughness 값을 도출하였다. 전극으로서의 특성을 평가하기 위하여 면저항을 측정하였으며 면저항 측정을 위해 EDTM사의 RC21475 면저항 측정기를 사용하였다.

### 3. 결과 및 토론

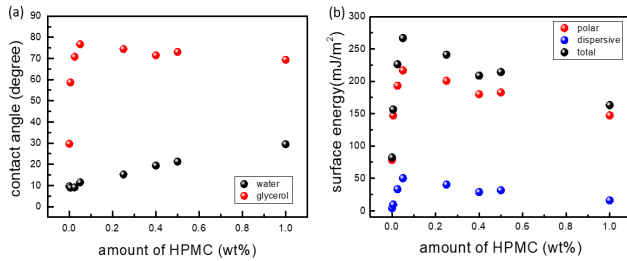
은 나노와이어 용액의 특성이 HPMC 첨가제 양에 따라 어떻게 변화되는지 관찰하기 위하여 두 종류의 PMMA 기판에 대한 은 나노와이어 용액의 접촉각을 측정하였으며 이를 Fig. 1(a)에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 PMMA 기판 1의 경우 HPMC 첨가에 따라 용액의 접촉각이 급격하게 증가하였으며 0.025 wt% 이상 첨가하였을 경우 55° 정도로 접촉각이 수렴하는 것을 관찰할 수 있었다. PMMA 기판2를 사용하였을 경우에는 기판1과 유사하게 HPMC를 조금만 첨가하여도 용액의 접촉각이 빠르게 증가함을 관찰할 수 있었으나 기판1과 다르게 HPMC



**Figure 1.** (a) Contact angle and (b) surface tension of silver nanowire solutions with different amount of HPMC additives.

양이 0.05 wt% 이상이 될 경우 오히려 접촉각이 조금 감소하는 경향이 관찰되었다. 서로 다른 두 접촉각 결과를 이용하여 은 나노와이어 용액의 표면장력을 계산하였으며 이를 Fig. 1(b)에 나타내었다. 먼저 HPMC 첨가제를 넣지 않은 순수 은 나노와이어 용액은 12.4 mJ/m<sup>2</sup>의 극성 표면장력과 49.6 mJ/m<sup>2</sup>의 분산 표면장력을 나타내었으며 총 표면장력은 62.0 mJ/m<sup>2</sup>을 나타내었다. 그에 비해 HPMC를 0.005 wt% 첨가하였을 경우 극성 표면장력은 19.6 mJ/m<sup>2</sup>으로 증가하고 분산 표면장력은 26.0 mJ/m<sup>2</sup>으로 감소함을 관찰하였으며 그 결과 총 표면장력은 45.6 mJ/m<sup>2</sup>으로 감소되었다. 0.05 wt%의 HPMC를 첨가하게 되면 24.2 mJ/m<sup>2</sup>과 17.1 mJ/m<sup>2</sup>의 극성 및 분산 표면장력을 나타내었고 총 표면장력은 41.3 mJ/m<sup>2</sup>이었으며, 0.25 wt% 이상 HPMC 첨가 시 극성 및 분산 성분에서 약간의 차이는 있었으나 총 표면장력은 40 mJ/m<sup>2</sup> 수준으로 유사한 값을 나타내었다. 이를 통해 은 나노와이어 용액에 HPMC를 첨가할 경우 0.25 wt% 수준까지는 용액 특성에 급격한 변화를 주지만 추가적인 HPMC첨가는 용액 특성 제어에 큰 효과가 없음을 확인할 수 있었다.

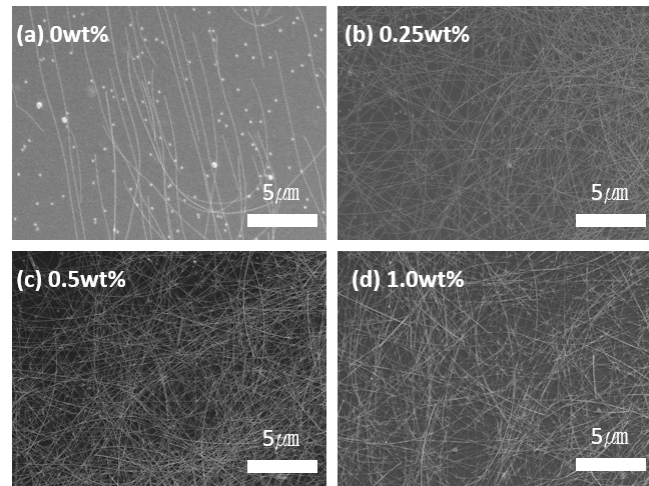
다음으로 서로 다른 함량의 HPMC를 포함하는 은 나노와이어 필름에 대한 증류수와 글리세롤의 접촉각을 측정하였으며 이를 이용하여 은 나노와이어 필름의 표면에너지를 계산하였다. 먼저 접촉각 결과를 살펴보면 Fig. 2(a)에서 보는 바와 같이 HPMC를 포함하고 있지 않은 은 나노와이어 필름은 9.7°의 증류수 접촉각을 나타내었으며 HPMC 첨가량 증가에 따라 거의 선형적으로 증류수 접촉각이 증가하였다. 그에 비해 글리세롤의 접촉각은 많이 다른 양상을 나타내었다. HPMC를 포함하고 있지 않은 은 나노와이어 필름은 29.7°의 글리세롤 접촉각을 나타낸 반면, 0.005 wt%의 HPMC를 포함하는 필름은 58.7°, 0.025 wt%를 포함하는 필름은 70.8°, 0.05 wt%를 포함하는 필름은 76.7°의 글리세롤 접촉각을 나타내었다. 그러나 그 이상 HPMC를 첨가하였을 경우에는 접촉각이 오히려 감소되는 경향을 보여주었다. 은 나노와이어 필름의 표면에너지는 Fig. 2(b)에서 보듯이 HPMC를 포함하지 않은 은 나노와이어 필름은 78.4 mJ/m<sup>2</sup>의 극성 표면에너지와 3.8



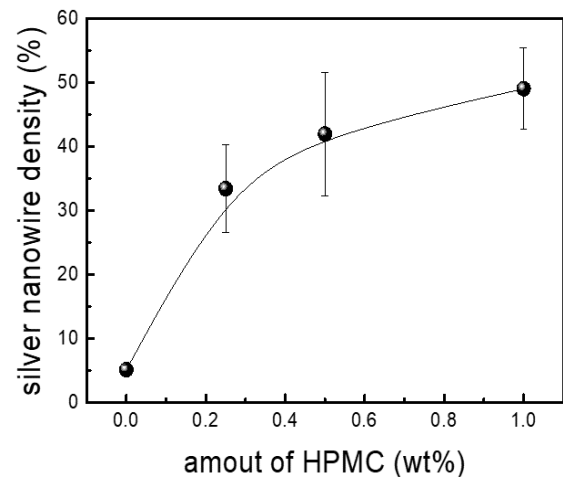
**Figure 2.** (a) Contact angle and (b) surface energy of silver nanowire films depending on the amount of HPMC additives.

$\text{mJ/m}^2$ 의 분산 표면에너지를 나타내었으며 총 표면에너지는  $82.2 \text{ mJ/m}^2$ 였다. HPMC를 소량 첨가하였을 경우 극성 표면에너지와 분산 표면에너지 모두 증가하였으며 0.05 wt%의 HPMC를 첨가하였을 때 표면에너지 값이 최대값에 도달하였다. 0.05 wt%의 HPMC를 함유하는 은 나노와이어 필름의 극성 표면에너지와 분산표면에너지는 각각  $216.7 \text{ mJ/m}^2$ 와  $50.1 \text{ mJ/m}^2$ 였으며 총 표면에너지는  $266.8 \text{ mJ/m}^2$ 였다. 0.05 wt% 이상의 HPMC를 첨가하였을 경우 극성 표면에너지와 분산 표면에너지, 총 표면에너지 모두 감소하는 경향을 나타내었으며 1 wt%의 HPMC를 첨가하였을 경우에 총 표면에너지는  $163.1 \text{ mJ/m}^2$ 을 나타내었다. 이를 통해 과량의 HPMC가 은 나노와이어 용액에 첨가되었을 경우 용액 특성에는 많은 영향을 미치지 못하지만 이를 이용하여 제작된 필름 특성에는 영향을 미치며 소량의 HPMC 첨가 시에는 표면에너지를 증가시키지만 과량의 HPMC를 첨가하면 표면에너지가 오히려 감소함을 알 수 있었다.

다음으로 HPMC 첨가가 필름의 표면형상에는 어떠한 영향을 주는지 살펴보기 위하여 SEM 분석을 실시하였다. Fig. 3은 0~1.0 wt% 사이의 HPMC를 포함하는 은 나노와이어 필름의 SEM 이미지를 나타낸다. Fig. 3(a)에서 보듯이 HPMC를 포함하지 않은 은 나노와이어 필름은 기판에 대한 접착력 부족으로 인해 은 나노와이어 밀도가 매우 떨어지고 기판이 많이 노출되어 있는 것을 관찰할 수 있었다. 반면 HPMC가 0.25 wt% 첨가되었을 경우 은 나노와이어 네트워크가 매우 조밀하게 형성된 것을 확인할 수 있으며 0.5 wt%, 1.0 wt%로 HPMC 양이 증가될수록 은 나노와이어의 밀도가 증가되어가는 것을 알 수 있었다. 이를 정량적으로 확인하기 위하여 은 나노와이어 밀도를 계산하였으며 이를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에서 보듯이 HPMC가 들어가 있지 않은 은 나노와이어 필름에서의 은 나노와이어 밀도는 5.1%였던 반면 0.25 wt% HPMC를 포함하는 은 나노와이어 필름은 33.4%의 은 나노와이어 밀도를 나타내었다. 0.5 wt%와 1.0 wt%의 HPMC를 포함하는 은 나노와이어 필름의 은 나노와이어 밀도는 각각 41.9%와 49.0%의 평균값을 나타내었다. 즉 HPMC가 많



**Figure 3.** Scanning electron microscope (SEM) images of silver nanowire films with different amount of HPMC.

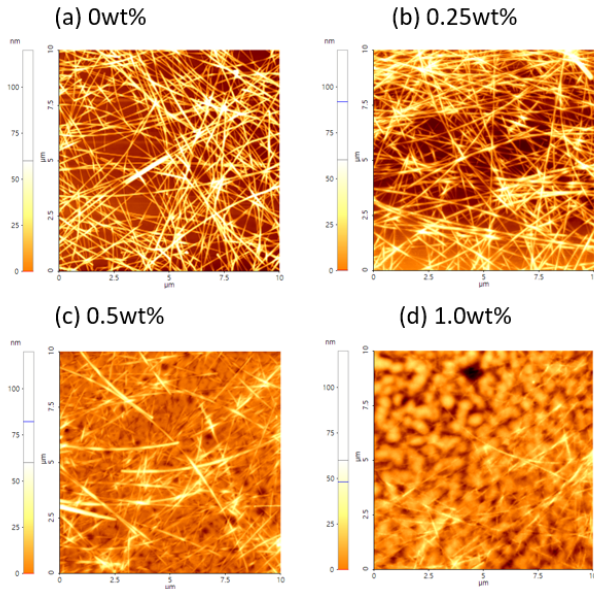


**Figure 4.** Silver nanowire densities of silver nanowire films that were calculated from SEM images.

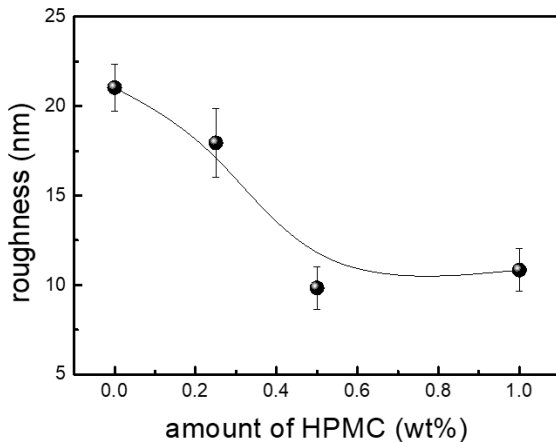
이 들어갈수록 기판과 은 나노와이어 사이의 접착력이 증가하여 더 많은 은 나노와이어 네트워크가 기판에 형성될 수 있음을 알 수 있었다.

HPMC 첨가에 따른 표면 거칠기 변화는 AFM 분석을 통해 살펴보았다. Fig. 5는 서로 다른 양의 HPMC를 포함하는 은 나노와이어 필름의 AFM 이미지를 나타낸다. HPMC를 포함하지 않은 은 나노와이어 필름은 매우 거친 이미지를 나타내는 것을 알 수 있으며 1.0 wt%의 HPMC를 포함하는 은 나노와이어 필름은 상대적으로 매끈한 표면을 나타내는 것을 알 수 있다. 표면 거칠기를 정량적으로 살펴보기 위하여 rms roughness를 Fig. 6에 나타내었다. 먼저 HPMC를 포함하지 않은 은 나노와이어 필름은 21 nm의 rms roughness를 나타내었다. 0.25 wt%의 HPMC





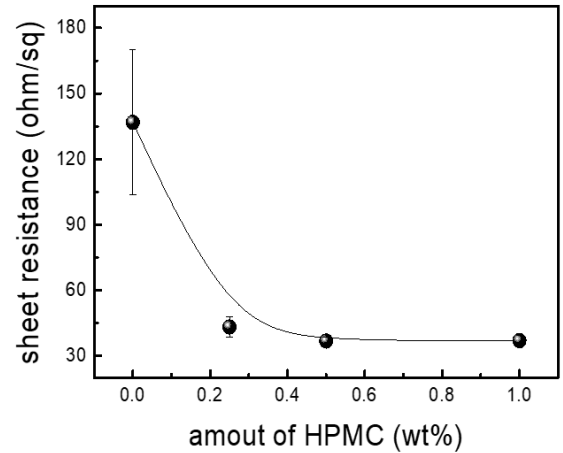
**Figure 5.** Atomic force microscope (AFM) images of silver nanowire films with different amount of HPMC.



**Figure 6.** rms roughness of silver nanowire films depending on HPMC amount.

를 첨가하게 되면 거칠기가 조금 개선되었으며 18 nm의 rms roughness를 나타내었다. 거칠기는 HPMC를 첨가함에 따라 점점 개선되었으며 1.0 wt%의 HPMC를 넣었을 경우에는 평균 11 nm의 rms roughness를 나타내었다. 이를 통해 HPMC 첨가제가 은 나노와이어 네트워크 밀도 향상과 더불어 표면 거칠기 특성 향상에도 긍정적인 영향을 준다는 것을 알 수 있었다.

서로 다른 HPMC를 포함하는 은 나노와이어 필름이 전극으로서의 역할을 할 수 있는지 확인하기 위하여 면저항을 측정하였다. Fig. 7은 0 wt%에서 1.0 wt%의 HPMC를 포함하는 은 나노와이어 필름의 면저항을 나타낸다. 면저



**Figure 7.** Sheet resistance of silver nanowire films with different amount of HPMC additives.

HPMC는 포함하지 않은 은 나노와이어 필름은 137  $\Omega$ /sq의 면저항을 나타내었다. 이는 HPMC의 부재로 인해 은 나노와이어의 밀도가 가장 낮았고 그 결과 전자를 전달할 수 있는 은 나노와이어 네트워크가 완전히 형성되지 않았기 때문인 것으로 판단된다. 반면, HPMC를 0.25 wt% 첨가하였을 경우 면저항은 43  $\Omega$ /sq로 상당히 감소하였으며 1.0 wt% 첨가 시 면저항은 37  $\Omega$ /sq 수준을 나타내었다. 이는 은 나노와이어 밀도 증가와 연관되어 있다고 판단되며, 은 나노와이어 밀도는 HPMC양과 더불어 지속적으로 증가된 반면 면저항 감소는 0.25 wt%의 HPMC 첨가 이후 미미한 것은 0.25 wt%의 HPMC만을 첨가하여도 충분한 은 나노와이어 네트워크가 형성되고 그 이후에는 은 나노와이어 밀도 증가가 두께 증가로만 이어졌기 때문일 것으로 판단된다. 결과적으로 HPMC 양에 따른 면저항 측정 결과를 살펴보면 0.25 wt%의 HPMC만을 첨가하여도 전자소자용 전극으로 충분한 성능을 발휘할 수 있을 것으로 생각된다.

## 4. 결론

본 논문에서는 HPMC 접착력 증진제가 은 나노와이어 용액 및 필름 특성에 어떠한 영향을 미치는지 살펴보았다. 용액 특성의 경우 HPMC 임계량까지 극성 표면장력은 증가하고 분산 표면 장력은 감소하는 특성을 나타내었으며 그 이후 극성 및 분산 표면 장력은 거의 일정한 값을 나타내었다. 이러한 용액을 가지고 은 나노와이어 필름을 제조하였을 경우 HPMC 임계량까지는 표면에너지가 증가하는 경향을 보인 반면 그 이후에는 표면에너지가 감소하는 특성을 나타내었다. HPMC 양은 은 나노와이어 필름의 표면 형상과 전도도 등에도 영향을 미쳤으며 HPMC 양 증가에 따라 은 나노와이어 밀도가 증가하고 거칠기는

감소하는 것을 관찰할 수 있었고 면저항은 0.25 wt%의 HPMC 이후에도 조금 감소하기는 하였으며 거의 유사한 수준의 면저항을 나타냄을 알 수 있었다. 용액 및 필름 특성에 대한 분석을 통해 전도성 은 나노와이어 필름을 제조하기 위한 HPMC의 양은 0.05 wt% 수준에서 0.25 wt% 수준 사이가 적절할 것으로 판단되었다.

## 감사의 글

이 연구는 금오공과대학교 학술연구비로 지원되었음 (202000910001).

## References

1. S. Pimputkar, J. Speck, and S. DenBaars, *Nat. Photonics*, **3**, 180 (2009).
2. A. I. Khan, A. Keshavarzi, and S. Datta, *Nat. Electron.*, **3**, 588 (2020).
3. Y. Qi, A. Taotao, and J. Liyun, *RSC Adv.*, **6**, 81965 (2016).
4. T. Lee, Y. W. Choi, G. Lee, and M. Choi, *J. Mater. Chem. C*, **4**, 9947 (2016).
5. P. Li, Y. Bu, D. Chen, Q. Sai, and H. Qi, *Crystengcomm*, **23**, 6300 (2021).
6. T. Takano, H. Masunaga, A. Fujiwara, and T. Sasaki, *Macromolecules*, **45**, 3859 (2012).
7. J. Yoo, T. I. Buchholz, S. Jung, and Y.-L. Loo, *J. Mater. Chem.*, **18**, 3129 (2008).
8. P. Wu, S. Cheng, M. Yao, L. Yang, Y. Zhu, P. Liu, O. Xing, J. Zhou, M. Wang, H. Luo, and M. Liu, *Adv. Funct. Mater.*, **27**, 1702160 (2017).
9. Y. Shi, K. Kim, A. Reina, M. Hofmann, L.-J. Li, and J. Kong, *ACS Nano*, **4**, 2689 (2010).
10. S. Chu, D. Ko, J. Jung, S. Jo, D. C. Hyun, C. S. Kim, H.-J. Oh, and J. Kim, *Nanomaterials*, **12**, 718 (2022).
11. M. Chae, D. Ko, Y. Ma, S. Jo, D. C. Hyun, H.-J. Oh, and J. Kim, *Appl. Sci.*, **10**, 2202 (2020).
12. S. Hemmati, M. T. Harris, and D. P. Barkey, *J. Nanomater.*, **2020**, 9341983 (2020).
13. Y. Chen, W. Lan, J. Wang, R. Zhu, Z. Yang, D. Ding, G. Tang, K. Wang, Q. Su, and E. Xie, *Physica E*, **76**, 88 (2016).
14. T. Akter, and W. S. Kim, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **4**, 1855 (2012).
15. Junaidi, K. Triyana, Harsojo, and E. Suharyadi, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, **202**, 012055 (2017)
16. D. Ko, B. Gu, S. Kang, S. J. Jo, D. C. Hyun, C. S. Kim, J. Kim, *J. Mater. Chem. A*, **7**, 14536 (2019).