



ISSN 1225-8024(Print)  
ISSN 2288-8403(Online)

한국표면공학회지  
J. Korean Inst. Surf. Eng.  
Vol. 49, No. 4, 2016.

<http://dx.doi.org/10.5695/JKISE.2016.49.4.323>

## 탄소나노튜브와 은나노와이어 복합 유연투명전극 필름 기술

한중탁\*

한국전기연구원 나노융합기술연구센터

### Nanocarbon/silver Nanowire Hybrid Flexible Transparent Conducting Film Technology

Joong Tark Han\*

Nano Hybrid Technology Research Center, Korea Electrotechnology Research Institute,  
Changwon 51543, Korea

(Received July 15, 2016 ; revised July 29, 2016 ; accepted July 29, 2016)

#### Abstract

The flexible transparent conducting films (TCFs) are required to realize flexible optoelectronic devices. 1D nanomaterials such as carbon nanotubes (CNTs), metal nanowires are good candidates to replace indium tin oxide that is currently used to fabricate transparent electrode. Particularly, silver nanowires are used to produce flexible TCFs. In this review, we introduce TCF technologies based on silver nanowires/CNTs hybrid structures. CNTs can compromise drawbacks of silver nanowires for applications in high performance TCFs for optoelectronic devices.

*Keywords : Transparent conducting films, Carbon nanotubes, Silver nanowires*

## 1. 서 론

1차원구조인 단일벽 탄소나노튜브, 금속나노와이어들은 우수한 전기전도도와 유연성으로 인해 기존의 세라믹 투명전극을 대체하고 유연소자에 적합한 유연투명전극을 개발하고자 많은 연구가 진행되어 오고 있다[1-8]. 특히, 은나노와이어는 최근에 지름이 작아지고 양산화가 가능해지면서 학계뿐만 아니라 기업체에서도 활발한 실용화 연구가 진행되고 있다. 그러나, 금속의 특성상 그 지름이 50 nm 이하로 작아지게 되면 귀금속인 은의 경우도 산화가 쉽게 진행될 수 있다. 또한 은나노와이어가 네트워크 구조로 투명전극을 형성하기 때문에 그 접합이

좋지 못할 경우 접점에서의 높은 접촉저항으로 인해 전압을 걸어줄 경우 줄가열(Joule heating) 현상에 의해 스파크가 발생하여 은나노와이어가 끊어지는 현상이 발생하게 된다[9,10]. 이러한 단점을 보완하기 위해 후처리 공정을 통해 나노와이어를 접합시키는 방법 이외에 다양한 이종물질을 그 상부에 도포하여 은나노와이어의 물리화학적 안정성을 확보하고자 하는 노력이 이루어지고 있다[11-23]. 따라서, 본 고에서는 은나노와이어의 안정성과 전기전도도를 향상시키기 위해 탄소나노튜브와 은나노와이어를 복합화하는 연구결과에 대해 소개하고자 한다.

## 2. 본 론

은나노와이어의 합성기술은 투명전극기술이 대두되기 전인 1999년부터 보고되기 시작했다. 그러나 당시 은나노와이어는 지름이 100 nm에 가깝고 상

\*Corresponding Author : Joong Tark Han

Nano Hybrid Technology Research Center, Korea Electrotechnology Research Institute  
Tel : +82-55-280-1678 ; Fax : +82-55-280-1590  
E-mail : jthan@keri.re.kr

용화하기 어려운 기술이었다. 그러나 양산화가 가능한 폴리올 공정(polyol process)가 2000년대 초반에 개발되면서 합성기술이 정립되기 시작하였다. 그러나 당시까지도 은나노와이어기술은 실험실 수준에 머무르고 있었다. 그리고, 2000년대 중반 터치패널 기반의 스마트폰이 등장하면서 투명전극에 대한 관심이 높아졌으며, 인듐주석산화물(Indium tin oxide, ITO)기반의 투명전극이 사용되었다. 그러나, ITO 투명전극에 사용되는 인듐의 매장량 한계와 높은 원가로 인해 이를 대체하고자 하는 노력이 시작되었고, 2008년부터 은나노와이어를 이용한 투명전극기술이 논문을 통해 보고되기 시작하였다. 하지만 당시에는 현재와 같이 지름이 30 nm 이하의 지름을 갖는 은나노와이어 합성기술이 정립되기 전이어서 상업적으로 사용하기에는 부족한 것이 현실이었다. 이에 반해 단일벽 탄소나노튜브를 이용한 투명전극기술은 국내 탄소나노튜브 합성업체의 기술력을 바탕으로 실용화를 위한 노력이 2000년대 중반부터 시도되어 기존 ITO 투명전극 대체하고자 하였다. 그러나 단일벽 탄소나노튜브를 이용한 투명전극의 경우 그 유연성은 매우 우수하지만, 네트워크 구조로 되어 있고 탄소나노튜브간 접합이 용이하지 않기 때문에 매우 낮은 면저항과 높은 투과도 구현이 어려웠다. 2010년대에 들어 지름이 50 nm 이하의 작은 은나노와이어의 대량생산기술이 개발되면서 다시금 깨지기 쉬운 ITO 투명전극을 대체하는 연구가 활발히 진행되었다. 특히, 플렉서블 디스플레이, 웨어러블 디바이스에 대한 관심이 집중되면서 유연하고 전기전도도가 매우 우수한 투명전극의 시장수요가 급증하고 있다. 또한 그림 1에서와 같이 중대형 디스플레이 및 터치패널의 경우 기

존의 스마트폰에 사용되는 투명전극보다 훨씬 낮은 70 Ω/sq 이하의 면저항과 높은 투과도를 요구하기 때문에 금속소재인 금속나노와이어를 이용하거나 금속을 패터닝한 금속메쉬전극을 이용한 유연 투명전극 개발이 주를 이루고 있다.

그러나, 은나노와이어의 경우 전기전도도는 매우 우수하지만 네트워크구조에서 투과도를 높이고 햇빛에 반사돼 뿌옇게 보이는 헤이즈 현상을 줄여 시인성을 향상시키기 위해서는 그 지름을 계속적으로 줄여가야 하지만 지름이 30 nm 이하의 경우 쉽게 산화가 되고 네트워크 구조를 이룰 경우 전기적으로 불안정하여 접합점에서 와이어가 끊어지는 단점을 지니고 있다. 이러한 단점을 보완하기 위한 방법으로 가장 많이 연구된 것이 금속산화물과 같은 안정한 소재로 은나노와이어 상부를 코팅하는 방식이다[21-23]. 다음으로는 탄소나노튜브나 그래핀과 같은 물리화학적으로 안정한 전도성 나노소재와 복합화하여 은나노와이어의 안정성을 확보하고자 하는 노력이 진행되고 있다. 본 논문에서는 이와 같이 은나노와이어와 탄소나노소재를 복합화한 연구 내용에 대해 소개하고자 한다.

2012년 일본의 Tokuno 그룹에서는 그림 2에서와 같이 70 nm의 비교적 지름이 큰 은나노와이어를 이용하여 투명전극을 제조하였으며, 단일벽 탄소나노튜브를 6% 정도 첨가하여 복합화할 경우 투과도 80%에서 면저항이 132 Ω/sq에서 29.2 Ω/sq로 크게 감소한다고 보고하였다[11]. 이 경우 은나노와이어의 지름이 크기때문에 탄소나노튜브에 의해 은나노와이어의 접촉저항을 줄여준 것으로 판단된다. 그러나, 지름이 30nm 이하의 은나노와이어를 사용할 경우 탄소나노튜브에 의한 면저항 감소는 미비한



Fig. 1. The sheet resistance requirements for touch panels in smart devices.

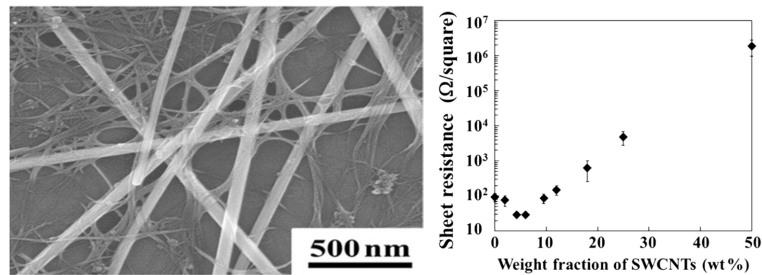


Fig. 2. (Left) FE-SEM image of the AgNW hybrid electrode with 6 wt% of SWCNTs. (Right) Sheet resistances of the hybrid electrodes with 0 to 50 wt% of SWCNTs [11].

것으로 판단된다. 그리고, 본 논문에서는 에탄올에 분산된 은나노와이어와 탄소나노튜브를 혼합하여 일액형으로 투명전극을 제조하였으나, 이는 에탄올의 휘발속도가 너무 빠르기 때문에 롤투를 공정과 같은 대면적 코팅을 위한 양산공정에는 부적합할 것으로 판단된다.

2013년 Kim 그룹에서는 은나노와이어와 단일벽 탄소나노튜브를 플라스틱 기판에 순차적으로 코팅하여 투명히터를 제작하였다[12]. 본 연구에서는 탄소나노튜브를 나노와이어 상부에 도입함으로써 은나노와이어의 높은 헤이즈를 줄이고자 하였으며, 저전압에서 충분히 온도가 상승하고 장시간 안정성과 기계적 유연성이 확보된 유연투명히터를 제작하였다. 이와 같이 탄소나노튜브는 물리적 특성뿐만 아니라 빛을 반사하지 않는 광학적 특성 때문에 고투명도와 시인성을 요구하는 광전소자응용에 매우 유용한 나노소재로 여겨지고 있다. 그러나 본 연구에서는 그림 3에서와 같이 은나노와이어와 탄소나노튜브를 혼합하여 일액형으로 코팅하지 못하고 순차적으로 코팅하는 방식으로 진행하여 생산성 측면에서는 효과적이지 못한 면이 있다.

2014년 Ko 그룹에서는 앞서와 마찬가지로 은나노와이어와 단일벽 탄소나노튜브를 복합화하여 신축전극을 제작하였다[24]. 본 연구에서는 그림 4에서와 같이 은나노와이어 네트워크에 단일벽 탄소나노튜브 번들을 거미줄처럼 웹을 형성시켜 변형 시 전자가 이동할 수 있는 패스를 만들어주고 신축전극으로써의 구동이 가능하도록 하였다. 본 연구에서는 계면활성제에 분산된 단일벽 탄소나노튜브를 우선 필터링하여 멤브레인에 네트워크를 형성시키고 순차적으로 에탄올에 분산된 은나노와이어를 그 상부에 필터링하여 은나노와이어/탄소나노튜브 복합 필름을 형성시켰다. 그리고 원하는 기재를 상부에 부착시킨 후 멤브레인과 투명전극을 떼어낸 후 미리 변형을 시켜준 고무기판에 전사하여 신축전극을 형성시켰다. 본 연구는 탄소나노튜브에 의해 은

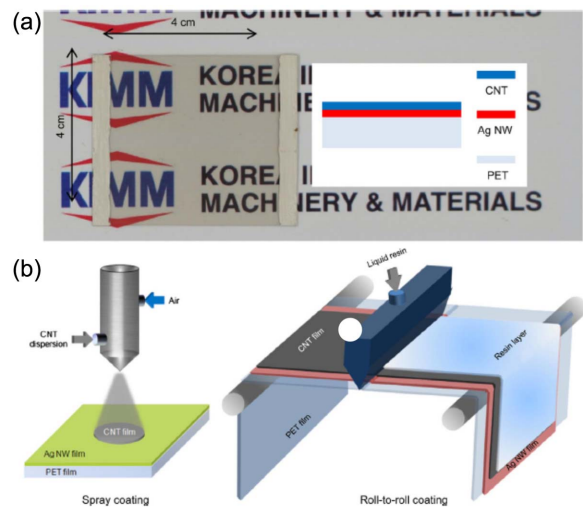


Fig. 3. (a) Prepared film heater with layer structure and (b) employed we-coating processes [12].

나노와이어 네트워크의 물리적 안정성이 확보될 수 있다는 것을 보여주는 좋은 예라고 할 수 있다. 그러나 본 연구 또한 계면활성제에 분산된 탄소나노튜브 용액을 사용하고 필터링 공정과 전사공정을 통해 시편을 제작하기 때문에 대면적에 대량 생산이 어려운 제조공정이라 할 수 있다.

다음으로 C. S. Han 그룹에서는 은나노와이어와 단일벽 탄소나노튜브가 혼합된 용액을 앞서 논문에서와 같이 필터링하여 복합 네트워크를 제조하고 이를 유연기판에 전사하여 투명전극을 제조하였다[25]. 본 연구에서는 그림 5와 같이 은나노와이어 사이에 형성되는 나노미터 수준의 공간에서 광에너지를 받아 고에너지 플라즈몬 모드에 의한 가열에 의해 은나노와이어 네트워크를 접합하여 면저항이 낮고 기계적 안정성이 확보된 투명전극을 제조하였다. 플라즈몬-접합 투명전극은 92.3% 투과도에서 29 Ω/sq의 우수한 광전기적 특성을 나타내었다. 밴딩 테스트 결과, 탄소나노튜브와 복합화되었다더라도 플라즈몬 접합이 이루어지지 않은 경우에 비해 접합이 된

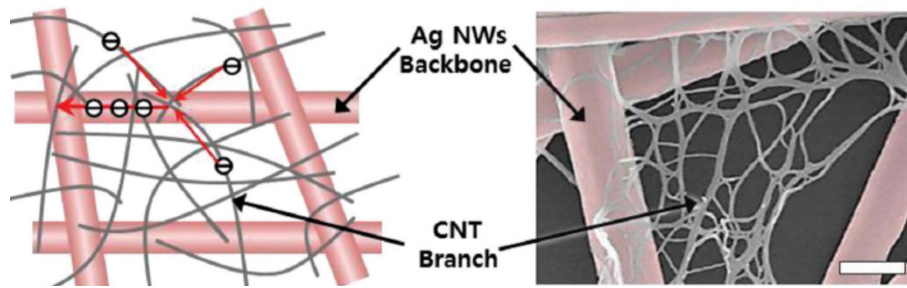


Fig. 4. Schematic diagram (left) and SEM image (right) of hierarchical multiscale AgNW/ CNT hybrid nanocomposite for highly stretchable conductors or highly transparent/flexible conductors [24].

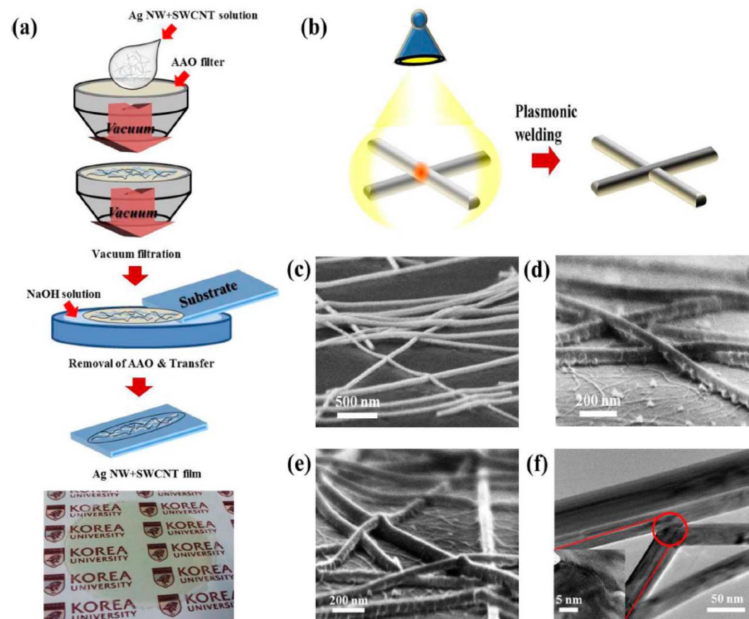


Fig. 5. (a) Schematic diagram showing the AgNW/SWCNT hybrid film fabrication procedure. Bottom inset picture shows photograph of a highly transparent AgNW/SWCNT hybrid film on a PET substrate. (b) Schematic diagram illustrating the AgNW junction plasmonic welding process. Tilted cross-sectional SEM images of (c) AgNW networks, (d) AgNW/SWCNT hybrid structures, and (e) plasmonic-welded AgNW/SWCNT networks on a silicon wafer. (f) TEM images of AgNW junctions after optical plasmonic welding. The inset is a higher-magnification TEM image showing the plasmon-welded spot between AgNWs [25].

경우 매우 안정하고 탄소나노튜브에 의한 안정성이 훨씬 높아지는 것을 확인하였다. 그러나, 이 연구 또한 탄소나노튜브를 계면활성제에 분산하고 필터링공정과 전사공정 등 대면적으로 상용화가 어려운 공정을 택하고 있어, 실용화를 위해서는 탄소나노튜브 분산기술과 롤투를 공정과 같은 대면적 연속 코팅공정이 가능한 코팅액 조성물 개발이 요구되고 있다.

이러한 기술적 요구에 맞춰 2013년 J. T. Han 그룹에서는 탄소나노튜브나 그래핀과 같은 탄소나노소재를 분산제 없이 고농도로 분산하는 기술을 개발하였다[26]. 이를 바탕으로 동일 그룹에서 2014년에는 은나노와이어와 단일벽 탄소나노튜브 복합 투명전극을 대면적으로 손쉽게 제조할 수 있는 코

팅액 기술을 보고하였다. 그림 6에서와 같이 다중 수소결합이 가능한 관능기를 탄소나노튜브에 도입하여 고농도의 페이스트를 제조하고 이를 은나노와이어 수용액 첨가하여 별도의 분산제 없이 은나노와이어와 단일벽 탄소나노튜브가 혼합된 일액형 코팅액을 제조할 수 있다. 우레이도피리미딘(ureido pyrimidinone) 구조의 관능기는 수용액상에서 물분자와 수소결합을 할 수 있기 때문에 분산제 없이 탄소나노튜브를 수용액에 분산시키는 역할을 하게 된다.

이렇게 제조된 코팅액을 스프레이 코팅법이나 슬롯다이 코팅법을 통해 플라스틱 기체에 코팅함으로써 투명전극을 제조할 수 있는데, 그림 7에서와 같이 코팅액에 함유된 탄소나노튜브의 양을 달리함으



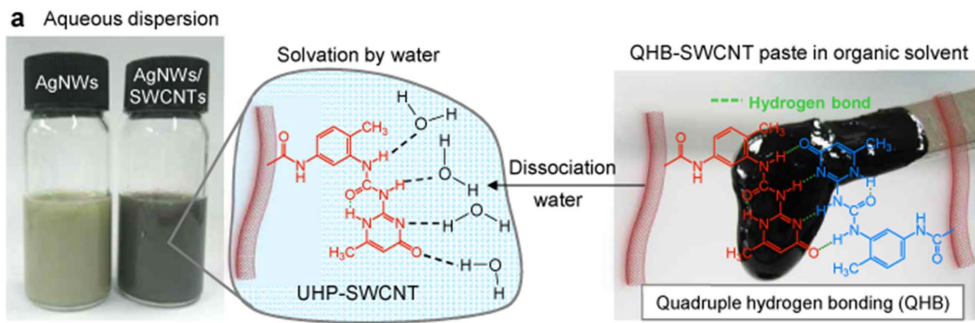


Fig. 6. A schematic representing the fabrication procedures used for preparing a stable AgNW/SWCNT mixture [26].

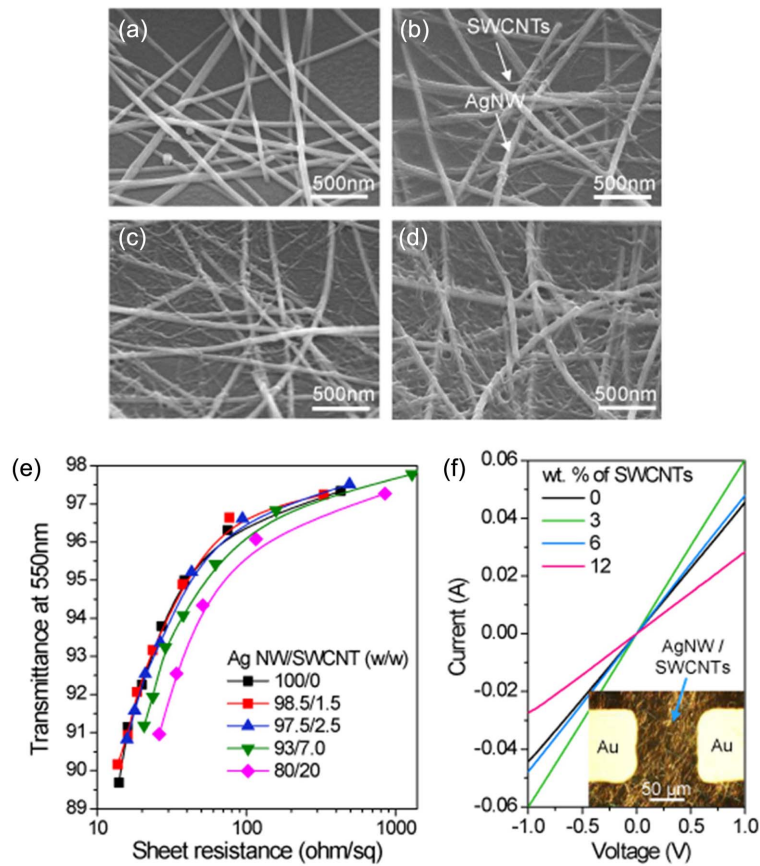


Fig. 7. Tilted SEM images of the (a) AgNW film and AgNW/SWCNT hybrid films incorporating different amounts of SWCNTs; (b) 2.5, (c) 7.0, and (d) 20 wt%. (e) Plot of  $T$  (550 nm) vs.  $R_s$  for AgNW and AgNW/SWCNT hybrid films containing various amounts of SWCNTs. (f) I-V plots of pristine AgNW and AgNW/SWCNT hybrid films [26].

로써 은나노와이어와 탄소나노튜브의 비율을 자유 자재로 변화시킬 수 있다. 앞서 Tokuno 그룹에서 보고한 바와 같이 본 연구에서도 단일벽 탄소나노튜브가 6 wt% 이하로 첨가될 경우 전기전도도가 향상되는 것을 볼 수 있다. 그러나, 본 연구에서는 지름이 30 nm 정도의 은나노와이어를 사용하여 Tokuno 그룹에서와 같이 면저항 감소가 매우 큰 경향을 보이지는 않았다. 그리고, 단일벽 탄소나노튜브가 다량 첨가되면 투과도가 감소하고, 탄소나노튜브가 은나노와이어 네트워크 사이로 침투하기때문에 면저

항이 급격히 증가하게 된다.

앞서 언급한 바와 같이 은나노와이어 네트워크는 전기적으로 불안정한 경향을 보이게 된다. 그림 8의 윗 그림에서와 같이 은나노와이어만으로 이루어진 네트워크 구조에 전압을 걸어주게 되면 9 V 정도의 낮은 전압에서도 은나노와이어 사이 접점에서 핫스팟이 형성되면서 와이어가 끊어지는 현상이 발생하게 된다. 하지만 탄소나노튜브와 복합화를 할 경우 15 V 이상의 전압을 걸어주더라도 안정적인 전류가 흐르고 은나노와이어가 전혀 손상되지 않는

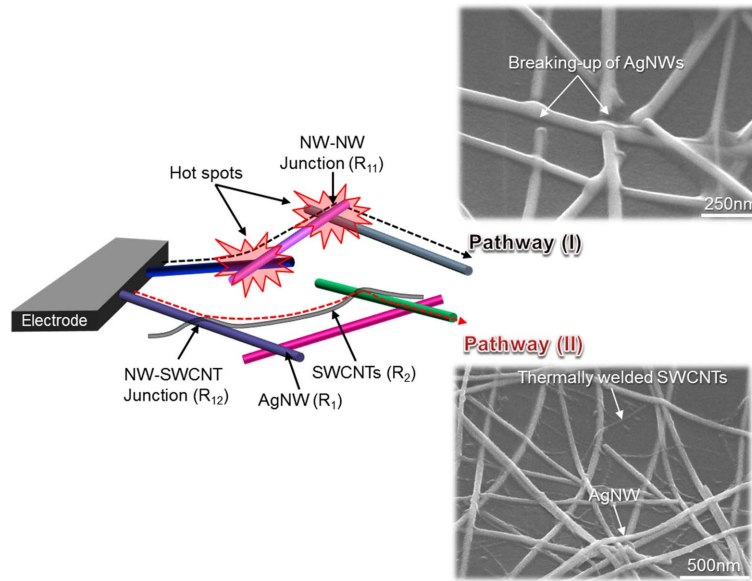


Fig. 8. Film stability under the current flow of AgNW and AgNW/SWCNT hybrid films. Schematic of the AgNW/SWCNT hybrid networks shows the possible current flow pathway (I, II).  $R_1$  and  $R_2$  indicate the resistivity of AgNWs and SWCNTs, respectively.  $R_{11}$  or  $R_{12}$  indicate the contact resistances between AgNWs or between an AgNW and SWCNTs [26].

것을 확인할 수 있다. 따라서, 본 연구에서 은나노 와이어와 탄소나노튜브를 복합화한 이유는 단일벽 탄소나노튜브가 은나노와이어 네트워크를 연결해줌으로써 접촉저항이 높은 나노와이어 사이로 전류가 흐르지 않고 은나노와이어와 탄소나노튜브 사이로 전류가 흐르도록 유도함으로써 은나노와이어의 전기적 안정성을 확보하기 위함이다. 이러한 전략적 접근이 가능한 것은 탄소나노튜브를 분산하는 기술과 더불어 탄소나노튜브에 도입된 우레아도피리미딘 구조의 관능기가 질소원자가 풍부하기 때문에 단일벽 탄소나노튜브에 전자를 주입시켜 줌으로써 일함수를 4.3 eV 정도로 감소시킴으로써 은나노와이어와 탄소나노튜브가 일함수 차이를 좁혀 접촉저항을 줄인 것이 주 요인이라고 보고하고 있다.

본 기술은 기타 첨가제 없이 은나노와이어와 탄소나노튜브의 혼합이 가능하기 때문에 상용화를 위한 코팅액 조성물 개발이 매우 용이하고 필요에 따라 기타 이종물질을 추가로 혼합하여 다양한 물성의 투명전극을 제조할 수 있다는 장점을 지니고 있다. 그러나, 투명전극의 터치패널 및 기타 광전소자 응용을 위해서는 투명전극 상부에 오버코팅층을 형성하여 코팅층을 보호하거나 평활도를 향상시키는 등의 추가적인 연구개발이 필요한 실정이다.

### 3. 결 론

은나노와이어를 이용한 투명전극 기술은 은나노

와이어의 합성기술 발전과 더불어 대면적 터치패널 등에서 낮은 면저항을 요구하고 유연성이 확보된 투명전극의 필요성이 대두되고 있어 활발한 연구가 진행되어 왔다. 그러나, 은나노와이어는 전기적 안정성, 화학적 안정성 및 광학적 특성인 헤이즈가 높다는 단점을 지니고 있다. 이를 보완하기 위해 이종소재와 복합화하여 투명전극을 제조하고자 하는 노력이 이루어지고 있다. 본 고에서는 단일벽 탄소나노튜브와 은나노와이어를 복합화하여 각 소재의 장점을 이용해 보다 우수한 기계적 성질과 전기적 안정성이 확보된 투명전극 기술을 소개하였다. 특히, 분산제를 사용하지 않고 탄소나노튜브를 고농도로 분산하고 이를 은나노와이어 수용액에 첨가하여 일액형 분산액을 제조하는 기술은 실용화 측면에서 매우 획기적인 기술이라 할 수 있다. 앞으로 보다 다양한 소재와의 복합화를 통해 진보된 유연 투명전극 기술이 지속적으로 연구개발이 될 것을 기대해 본다.

### References

- [1] J. -Y. Lee, S. T. Connor, Y. Cui, P. Peumans, Solution-processed metal nanowire mesh transparent electrodes, *Nano Lett.* 8 (2008) 689-692.
- [2] S. De, T. M. Higgins, P. E. Lyons, E. M. Doherty, P. N. Nirmalraj, Silver nanowire networks as flexible transparent, conducting films: Extremely

- high DC to optical conductivity ratios. *ACS Nano* 3 (2009) 1767-1774.
- [3] K. Ellmer, Past achievements and future challenges in the development of optically transparent electrodes. *Nature Photon.* 6 (2012) 809-817.
- [4] R. M. Mutiso, M. C. Sherott, A. R. Rathmell, B. J. Wiley, K. I. Winey, Integrating simulations and experiments to predict sheet resistance and optical transmittance in nanowire films for transparent conductors, *ACS Nano* 7 (2013) 7654-7663.
- [5] L. Hu, D. S. Hecht, G. Grüner, Percolation in transparent and conducting carbon nanotube Networks. *Nano Lett.* 4 (2004) 2513-2517.
- [6] B. Dan, G. C. Irvin, M. Pasquali, Continuous and scalable fabrication of transparent conducting carbon nanotube films. *ACS Nano* 3 (2009) 835-843.
- [7] P. N. Nirmalraj, P. E. Lyons, S. De, J. N. Coleman, J. J. Boland, Electrical conductivity in single-walled carbon nanotube networks. *Nano Lett.* 9 (2009) 3890-3895.
- [8] J. T. Han, J. S. Kim, H. D. Jeong, H. J. Jeong, S. Y. Jeong, G. -W. Lee, Modulating conductivity, environmental stability of transparent conducting nanotube films on flexible substrates by interfacial engineering. *ACS Nano* 4 (2010) 4551-4558.
- [9] J. Zhao, H. Sun, S. Dai, Y. Wang, J. Zhu, Electrical breakdown of nanowires, *Nano Lett.* 11 (2011) 4647-1651.
- [10] H. H. Khaligh, I. A. Goldthorpe, Failure of silver nanowire transparent electrodes under current flow. *Nanoscale Res. Lett.* 8 (2013) 235/1-6.
- [11] T. Tokuno, M. Nogi, J. Jiu, K. Suganuma, Hybrid transparent electrodes of silver nanowires and carbon nanotubes: a low-temperature solution process. *Nanoscale Res. Lett.* 7 (2012) 281/1-7.
- [12] D. Kim, L. Zhu, D. -J. Jeong, K. Chun, Y. -Y. Bang, S. -R. Kim, J. -H. Kim, S. -K. Oh, Transparent flexible heater based on hybrid of carbon nanotubes and silver nanowires. *Carbon* 63 (2013) 530-536.
- [13] Y. Ahn, Y. Jeong, Y. Lee, Improved thermal oxidation stability of solution-processable silver nanowire transparent electrode by reduced graphene oxide, *ACS Appl. Mater. & Interf.* 4 (2012) 6410-6414.
- [14] I. N. Khomanov, S. H. Dominues, H. Chou, X. Wang, C. Tan, J. -Y. Kim, H. Li, R. Piner, A. J. G. Zarbin, R. S. Ruoff, Reduced graphene oxide/copper nanowire hybrid films as high-performance transparent electrodes. *ACS Nano* 7 (2013) 1811-1816.
- [15] H. -W. Tien, S. -T. Hsiao, W. -H. Liao, Y. -H. Yu, F. -C. Lin, Y. -S. Wang, S. -M. Li, C. -C. M. Ma, Using self-assembly to prepare a graphene-silver nanowire hybrid film that is transparent and electrically conductive. *Carbon* 58 (2013) 198-207.
- [16] Y. Liu, Q. Chang, L. Huang, Transparent, flexible conducting graphene hybrid films with a subpercolating network of silver nanowires. *J. Mater. Chem. C* 1 (2013) 2970-2974.
- [17] M. -S. Lee, K. Lee, S. -Y. Kim, H. Lee, J. Park, K. -H. Choi, H. -K. Kim, D. -G. Kim, D. -Y. Lee, S. W. Nam, J. -U. Park, High-performance, transparent, and stretchable electrodes using graphene-metal nanowire hybrid structures. *Nano Lett.* 13 (2013) 2814-2821.
- [18] I. K. Moon, J. I. Kim, H. Lee, K. Hur, W. C. Kim, H. Lee, 2D graphene oxide nanosheets as an adhesive over-coating layer for flexible transparent conductive electrodes. *Sci. Rep.* 3 (2013) 1112/1-7.
- [19] R. Chen, S. R. Das, C. Jeong, M. R. Khan, D. B. Janes, M. A. Alam, Co-percolating graphene-wrapped silver nanowire network for high performance, highly stable transparent conducting electrodes. *Adv. Func. Mater.* 23 (2013) 5150-5158.
- [20] T. Y. Kim, Y. W. Kim, H. S. Lee, H. Kim, W. S. Yang, K. S. Suh, Uniformly interconnected silver-nanowire networks for transparent film heaters. *Adv. Func. Mater.* 23 (2013) 1250-1255.
- [21] K. Zilberberg, F. Gasse, R. Paqui, A. Polywka, A. Behrendt, S. Trost, R. Heiderhoff, P. Görrn, T. Riedl, Highly robust indium-free transparent conductive electrodes based on composites of silver nanowires and conductive metal oxide. *Adv. Func. Mater.* 24 (2013) 1671-1678.
- [22] R. Zhu, C. -H. Chung, K. C. Cha, W. Yang, Y. B. Zheng, H. Zhou, T. -B. Song, C. -C. Chen, P. S. Weiss, G. Li, Y. Yang, Fused silver nanowires with metal oxide nanoparticles and organic polymers for highly transparent conductors. *ACS Nano* 5 (2011) 9877-9882.
- [23] A. Kim, Y. Won, K. Woo, C. -H. Kim, J. Moon, Highly transparent low resistance ZnO/Ag nanowire/ZnO composite electrode for thin film solar cells. *ACS Nano* 7 (2013) 1081-1091.
- [24] P. Lee, J. Ham, J. Lee, S. Hong, S. Han, Y. D. Suh, S. E. Lee, J. Yeo, S. S. Lee, D. Lee, S. H. Ko, Highly stretchable or transparent conductor fabrication by a hierarchical multiscale hybrid nanocomposite, *Adv. Func. Mater.* 24 (2014) 5671-5678.
- [25] J. Lee, J. Y. Woo, J. T. Kim, B. Y. Lee, C. -S. Han, Synergistically Enhanced stability of highly flexible silver nanowire/carbon nanotube hybrid

transparent electrodes by plasmonic welding, ACS Appl. Mater. Interfaces 6 (2014) 10974-10980.

[26] J. S. Woo, J. T. Han, S. Jung, J. I. Jang, H. Y. Kim, H. J. Jeong, S. Y. Jeong, K. -J. Baeg, G.

-W. Lee, Electrically Robust Metal Nanowire Network Formation by In-Situ Interconnection with Single-Walled Carbon Nanotubes, Sci. Rep. 4 (2014) 4801/1-6.