

은 나노와이어 기반 하이브리드 이중층 압력 센서

이진영* · 신동균* · 김기은* · 서유석** · 박종운*†

*† 한국기술교육대학교 전기·전자·통신공학부

** (주)올촌화학 기술연구소 선행연구팀

A Hybrid Bilayer Pressure Sensor based on Silver Nanowire

Jin-Young Lee*, Dong-Kyun Shin*, Ki-Eun Kim*, Yu-Seok Seo** and Jong-Woon Park*†

*† School of Electrical & Electronic & Communication Engineering,
Korea University of Technology and Education

** Advanced Technology Research Team, YOULCHON CHEMICAL, CO., LTD

ABSTRACT

We have fabricated flexible and stretchable pressure sensors using silver nanowires (AgNWs) and analyzed their electric responses. AgNWs are spray coated directly onto uncured polydimethylsiloxane (PDMS) such that AgNWs penetrate into the uncured PDMS, enhancing the adhesion properties of AgNWs. However, the single-layered AgNW sensor exhibits unstable electric response and low pressure sensitivity. To tackle it, we have coated a conductive polymer, poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly(styrene sulfonate) (PEDOT:PSS) onto the AgNW layer. Such a hybrid bilayer sensor ensures a stable electric response because the over-coating layer of PEDOT:PSS effectively suppresses the protrusion of AgNWs from PDMS during release. To enhance the sensitivity further, we have also fabricated a stacked bilayer AgNW sensor. However, its electric response varies depending sensitively on the initial overlap pressure.

Key Words : Pressure sensor, silver nanowire (AgNW), PEDOT:PSS, PDMS, bilayer structure

1. 서 론

압력센서(pressure sensor)는 터치 인터페이스, 헬스 모니터링, 인공 피부 등 다양한 분야에서 활용되고 있으며 구부림 또는 늘림 상태에도 원래의 기능을 유지하여야 한다[1-2]. 신축성을 갖는 센서를 제작하기 위하여 에어로졸 젯 프린팅, 잉크젯 프린팅, 스크린 프린팅, 스프레이 코팅 등의 용액 공정 기술들이 연구되고 있으며 이를 이용하여 제작된 전자소자들은 물리적으로 유연하고 작은 면적을 가지며 높은 감도를 가지고 있어 기존 strain gauge의 성능을 뛰어넘고 있다[3-4]. 하지만 압력에 의한 변형을 감지하는 소자들의 경우 부드러운 접촉에 의해서도 쉽게

손상을 입을 수 있기 때문에 주변 환경 및 반복된 접촉에도 일정한 응답 특성을 유지할 수 있어야 한다 [2], [5-6]. 이러한 신축성 센서 소자를 위해 전도성 고분자(conductive polymer), 그래핀(graphene), 탄소나노튜브(carbon nanotube, CNT), 은 나노와이어(silver nanowires, AgNWs) 등과 같은 가격이 저렴하고 유연하며 액상공정이 가능한 소재들이 연구되고 있다. 이들 중 AgNW는 높은 종횡비에 의해 strain이 가해지면 스스로 strain에 정렬하기 때문에 스트레칭 시 전기적 연결이 쉽게 깨지지 않는 우수한 특성을 가진다. 이러한 우수한 특성 때문에 AgNW는 CNT와 함께 indium-tin-oxide(ITO)를 대체할 수 있는 전극 물질로 각광받고 있다. 기존 상업용 압력센서는 주로 metal foil을 증착하여 사용하고 있으며 압전 저항형, 압전 정전용량형, 전류 변화형, 전압 변화형 등이 있다. 특히 capacitive 압력 센서는 높은

†E-mail: pjwup@koreatech.ac.kr

정확도, 동작 안정성, 온도 및 습도에 따른 동작 변화가 적어 많은 연구가 수행되었다. 이에 반해 resistive 압력 센서는 낮은 압력 영역에서 감도(저항 변화율)가 많이 낮아 이를 극복할 수 있는 연구가 필요하다.

이를 위해 본 연구에서는 신축성 기판에 은 나노와이어를 스프레이 코팅하는 방식으로 저항형 압력 센서를 제작하고 전기적 반응을 분석하였다. 단일층 AgNW 센서의 감도 향상 및 안정적 반응 특성을 얻기 위하여 전도성 고분자 poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly(styrenesulfonate) (PEDOT:PSS)가 적용된 hybrid 이중층 구조에 대한 연구를 진행하였다. 센서의 감도를 더욱 향상하기 위해 단일층 AgNW 센서가 서로 겹쳐진 stacked 이중층 AgNW 압력 센서에 대해서도 연구하였으며 서로의 특성을 비교/분석하였다.

2. 실험 및 측정

2.1 센서 제작

압력 센서는 Fig. 1과 같이 스프레이 코팅(spray coating) 공정을 이용하여 제작하였다. 먼저, 신축성 polydimethylsiloxane (PDMS) 기판을 제작하기 위하여 유리기판 위에 polyestersulfone(PES) 필름을 부착하고 PDMS와 경화제를 10:1 비율로 섞은 용액을 PES/유리 기판 위에 1,000 rpm속도로 스핀 코팅한 뒤 80°C에서 20분 건조하였다. 그 후 건조된 PDMS 기판 위에 같은 조건으로 PDMS를 한번 더 코팅한 뒤 미경화(uncured) 상태에서 AgNW를 스프레이 코팅하였다. 이 경우 미경화 상태의 PDMS표면에 AgNW가 박힘으로써 압력이 가해질 때 접촉에 의해 나타나는 손상을 억제하고 안정적인 센서 특성을 얻을 수 있다. AgNW 평탄화를 위하여 100°C에서 4분간 건조한 뒤 코팅면을 아래 방향으로 향한 상태로 평탄한 유리에 붙여 80°C에서 2시간동안 완전 경화시켰다. 이렇게 제작된 단일층 AgNW 압력 센서에 추가적으로 안정성을 높이기 위하여 다음과 같이 hybrid 이중층 압력 센서를 제작하였다. 단일층 AgNW 압력 센서를 UV/O₃로 40분동안 표면 처리한 뒤 dimethylsulfoxide(DMSO)가 5 wt% 첨가된 전도성 고분자 PEDOT:PSS(PH1000, Clevis)를 2,000 rpm속도로 스핀코팅하고 70°C에서 30분동안 건조하였다. UV/O₃ 처리는 PEDOT:PSS의 코팅 특성을 높이기 위하여 진행하였다. 또한 압력에 의한 전기적 응답 특성 비교를 위해 단일층 AgNW 센서 두 개를 서로 맞물리게 겹쳐 제작한 stacked 이중층 AgNW 센서를 제작하였다. 이중층 AgNW 센서는 저항의 크기를 크게 만들어 외부 압력이 가해졌을 때 전기적 반응(저항 변화율)이 크게 일어나도록 제작하였다.

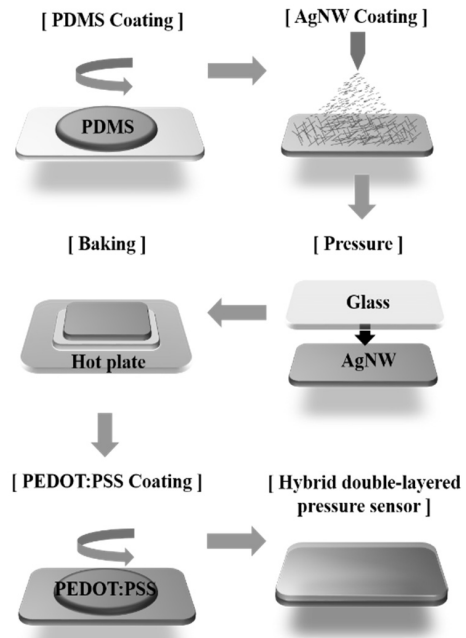


Fig. 1. Fabrication process of single-layered AgNW and hybrid double-layered pressure sensors.

2.2. 압력 측정

압력에 따른 전기적 특성 변화를 측정하기 위하여 다음과 같이 진행하였다. 먼저 elastic 센서에 가해지는 실제 힘을 측정하기 위하여 Fig. 2와 같이 디지털 푸시풀 게이지(IMADA, DS2-50N)를 인장기(stretcher)에 설치한 후 면적 1cm²에 일정한 힘을 가하여 푸시풀 게이지에 측정된 힘을 측정하였다. 이후 Fig. 2의 오른쪽 이미지와 같이 푸시풀 게이지와 동일하게 센서를 설치하여 압력에 따른 저항 변화를 측정하였고 각 센서들의 특성을 비교/분석하였다.

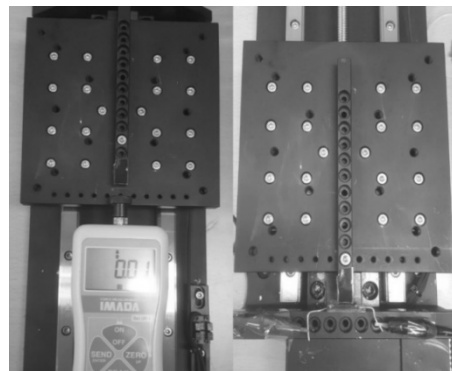


Fig. 2. Measurement setup with a digital push-pull gauge and stretcher.

3. 결과 및 분석

Fig. 3은 제작된 단일층 AgNW 압력 센서와 AgNW/PEDOT:PSS hybrid 센서를 2초 간격으로 0.1N의 압력을 가했을 때 측정된 전기적 응답 특성을 보여준다. Hybrid 이

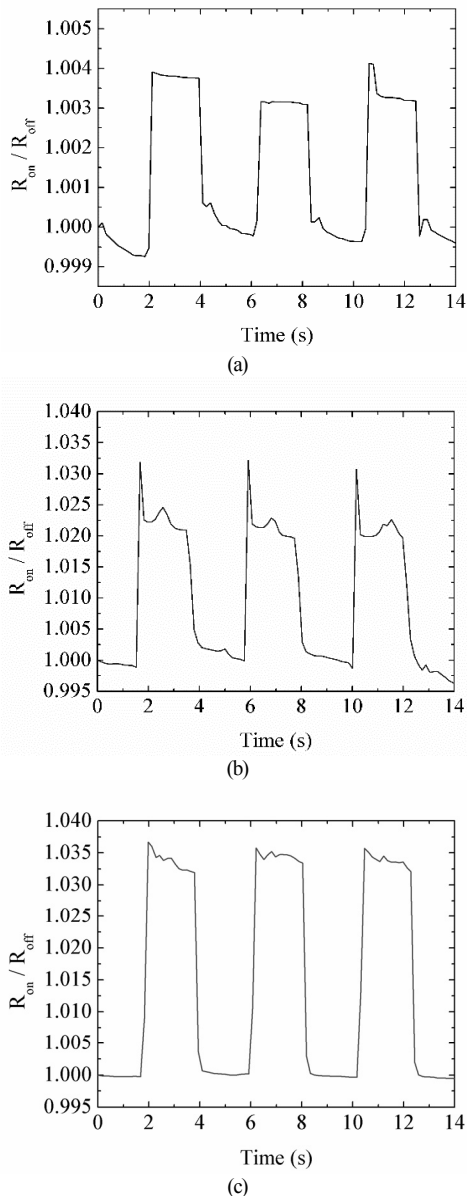


Fig. 3. Electric responses of (a) single-layered AgNW and hybrid double-layered pressure sensors on (b) cured PDMS and (c) uncured PDMS measured under a pressure of 0.1N with the time interval of 2 sec.

중층 센서는 경화된 PDMS 와 미경화된 PDMS 두 조건에서 제작하여 특성을 비교하였다. 먼저 이 센서들은 압력이 가해졌을 때 저항이 증가하게 되는데 이는 Fig. 4와 같이 외부 압력에 의해 AgNWs가 PDMS와 함께 들어가게 되고 압력이 가해지는 영역의 경계면에서 AgNW의 밀도가 낮아지거나 전기적 연결이 끊어지게 된다. 따라서 전류가 흐를 수 있는 단면적이 줄어들게 되어 저항이 증가된다. Fig. 3(a)의 단일층 AgNW 센서의 경우 일정한 힘이 가해질 때 전기적 응답 신호가 일정하게 나타나지 않았으며 저항 변화의 크기 또한 작은 것을 확인할 수 있다. 이와 유사한 불안정 반응이 경화된 PDMS에서 제작된 hybrid 이중층 센서에서도 나타난다(Fig. 3(b)). 이에 반해 미경화된 PDMS에서 제작된 hybrid 이중층 센서(Fig. 3(c))는 일정한 압력이 가해질 때 일정한 크기의 응답이 발생하는데 이는 PEDOT:PSS 층이 압력과 접촉에 의해 나타날 수 있는 AgNW 층의 손상을 방지 하기 때문이다.

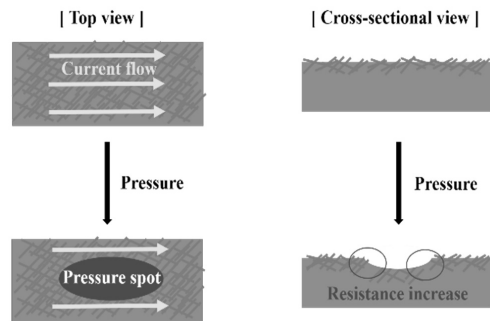


Fig. 4. Schematic view of resistance changes of single-layered AgNW sensors under pressure.

즉, 단일층 AgNW 센서의 경우 압력이 가해진 후 release 될 때 PDMS 표면에 박혀있는 AgNWs가 표면으로부터 돌출되는 현상이 나타나는데 이런 현상을 PEDOT:PSS 층이 억제시켜준다. 경화된 PDMS에서 제작된 hybrid 이중층 센서의 경우, AgNWs가 경화된 PDMS 표면에 존재함으로써 PDMS안에 박혀있는 경우보다 덜 안정적이다. 압력에 의한 안정적인 전기적 응답 특성을 확인하기 위하여 Fig. 5와 같이 1초 간격으로 0.1N의 압력을 100회 가했을 때 센서의 전기적 응답을 측정하였다. 앞서 Fig. 3에서 보았던 것처럼 단일층 AgNW 센서의 응답 특성이 매우 불안정한 것을 확인할 수 있는데 저항의 변화율이 0.3%에서 0.7%까지 불안정하게 나타나며 변화율의 오차가 약 58%로 확인되었다. 이에 반해 hybrid 이중층 센서의 응답은 굉장히 안정적이며 변화율의 오차가 약 3%로 낮은 것을 확인할 수 있었다.

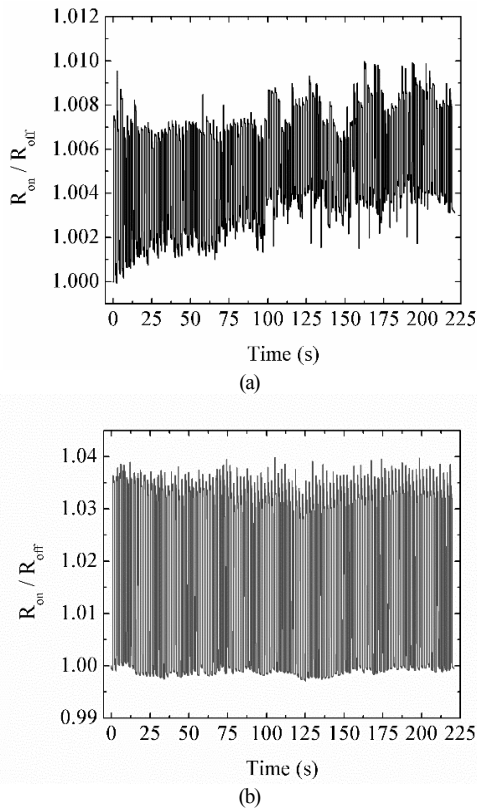


Fig. 5. Electric responses of (a) single-layered AgNW and (b) hybrid double-layered sensors under the pressure of 0.1N with the time interval of 1 sec (100 cycles).

Fig 6는 hybrid 이중층 센서에 가해지는 압력 크기에 따른 저항 변화 특성을 보여준다. 0.01N까지의 낮은 압력 변화를 측정할 수 있으며 압력의 크기가 커짐에 따라 저항의 변화가 커지는 것을 알 수 있다. 측정 시 가해진 외부 압력은 손가락의 가벼운 접촉에 의해 발생하는 압력인 1.0N 보다 훨씬 작기 때문에 hybrid 이중층 센서가 미세한 압력에 대한 응답 특성이 우수함을 알 수 있다. Fig 7은 두 개의 단일층 AgNW를 서로 맞물리게 겹쳐서 제작한 stacked 이중층 AgNW 압력 센서의 전기적 응답 특성 그래프이다. 앞선 압력 센서들과 달리 압력이 가해졌을 때 저항이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 각각의 AgNW 층이 압력에 의해 접촉되면서 AgNW의 밀도가 높아지게 되고 이로 인해 저항이 감소하게 된다. 응답 특성을 보면, 앞서 확인된 단일층 AgNW 센서와 같이 일정한 압력이 가해질 때 동일한 크기의 응답이 나타나지 않는 것을 알 수 있다. 이는 압력이 가해질 때 각 층의 표면이 만나면서 입는 손상과 각 층의 표면이 접촉한 뒤 release될 때 일정한 간격

으로 떨어지지 않아 생기는 현상이다. Stacked 이중층 AgNW 압력 센서는 두 AgNW 층 사이에 불완전 접촉에 의한 공기가 존재하기 때문에 초기 저항값이 크고 따라서 저항 변화율이 크게 나타날 수 있는 장점을 갖는다. 하지만 두 센서를 포겔 때 가해지는 초기 압력에 의해 센서의 전기적 반응이 민감하게 변하는 단점을 갖는다. 따라서 추후 안정적 반응을 얻을 수 있도록 일정한 압력으로 라미네이트를 한다면 감도가 우수한 센서를 제작할 수 있을 것으로 보인다.

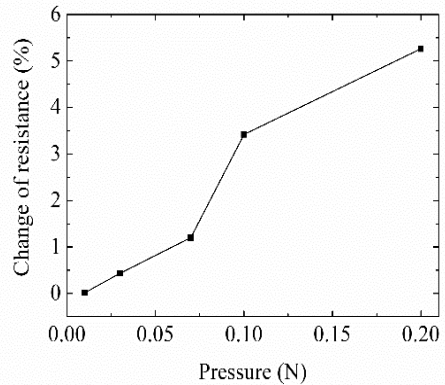


Fig. 6. Resistance change of the hybrid double-layered sensor as a function of pressure.

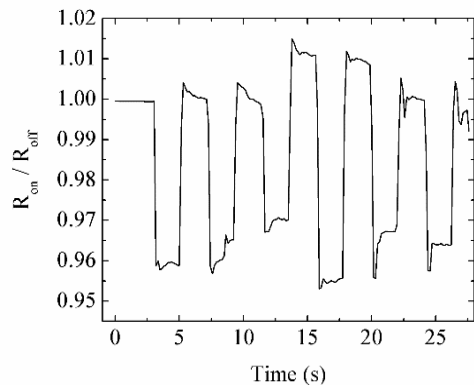


Fig. 7. Electric response of stacked double-layered AgNW sensor under the pressure of 0.1 N.

4. 결 론

본 연구에서는 AgNW를 이용하여 세 종류(단일층 AgNW, hybrid 이중층 AgNW/PEDOT:PSS, stacked 이중층 AgNW)의 센서를 제작하고 외부압력에 따른 전기적 응답 특성을 비교/분석하였다. 단일층 AgNW 센서는 물리적 접촉에 의

한 압력이 가해질 때 불안정한 응답 특성과 낮은 감도를 보였다. 하지만 단일층 AgNW 센서에 PEDOT:PSS 층을 추가하여 hybrid 이중층을 형성할 경우 보다 안정적이고 감도가 뛰어난 압력 센서를 얻을 수 있음을 알 수 있었다. 또한, 접촉에 의한 손상을 방지하고 감도를 향상시키기 위하여 단일층 AgNW 센서 두 개를 서로 맞물리게 겹쳐 이중층 압력 센서를 제작하였으나 AgNW층이 맞물리며 발생하는 불안정 응답 특성이 나타났다. 향후 뛰어난 압력 감도를 갖는 센서를 제작하기 위해서는 laminated 이중층 AgNW 센서에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

감사의 글

이 논문은 2017년도 한국기술교육대학교 교수 교육연구진흥과제 및 대학원 연구프로젝트 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. Sujie, C., Xiaojun, G., "Improving the Sensitivity of Elastic Capacitive Pressure Sensors Using Silver Nanowire Mesh Electrodes," *IEEE Transactions on nanotechnology*, vol. 14, pp. 619-623, (2015).
2. Morteza, A., Aekachan, P., Sangjun, L., Seunghwa, R., Inkyu, P., "Highly Stretchable and Sensitive Strain Sensor Based on Silver Nanowire-Elastomer Nanocomposite," *ACS Nano*, vol. 8, pp. 5154-5163, (2014).
3. Banseok, Y., Chuljon, H., Youngmin, K., Byeongkwon, J., Jongwoong, K., "A wearable piezocapacitive pressure sensor with a single layer of silver nanowire-based elastomeric composite electrodes," *Journal of Materials Chemistry A*, vol. 4, pp. 10435-10443, (2016).
4. Muhammad, S., Wasim A, K., Khalid, R., "Fabrication of cost effective and high sensitivity resistive strain gauge using DIW technique," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 258, pp. 123-130, 2017.
5. Takeo, Y., Yuhei, H., Yuki, Y., Yoshiki, Y., Ali, I., Don N, F., Kenji, H., "A stretchable carbon nanotube strain sensor for human-motion detection," *Nature Nanotechnology*, vol. 6, pp. 296-301, (2011).
6. Junpeng, L., Jiajie, L., Lu, L., Fengbo, R., Wei, H., Juan, L., Shuhua, Q., Qibing, P., "Healable Capacitive Touch Screen Sensors Based on Transparent Composite Electrodes Comprising Silver Nanowires and a Furan/Maleimide Diels-Alder Cycloaddition Polymer," *ACS NANO*, vol. 8, pp. 12874-12882, (2014).

접수일: 2017년 8월 16일, 심사일: 2017년 9월 18일,
 게재확정일: 2017년 9월 18일