신축성 금속 나노선 압저항 전극 기반 로젯 스트레인 센서

김강현¹ · 차재경² · 김종만^{1,3,*}

¹부산대학교 나노융합기술학과

²부산대학교 나노메카트로닉스공학과

³부산대학교 나노에너지공학과

Rosette Strain Sensors Based on Stretchable Metal Nanowire Piezoresistive Electrodes

Kang-Hyun Kim¹, Jae-Gyeong Cha², and Jong-Man Kim^{1,3,*}

¹Department of Nano Fusion Technology, Pusan National University, Busan 46214, Republic of Korea

²Department of Nanomechatronics Engineering, Pusan National University, Busan 46214, Republic of Korea

³Department of Nanoenergy Engineering, Pusan National University, Busan 46214, Republic of Korea

Abstract: In this work, we report a delta rosette strain sensor based on highly stretchable silver nanowire (AgNW) percolation piezoresistors. The proposed rosette strain sensors were easily prepared by a facile two-step fabrication route. First, three identical AgNW piezoresistive electrodes were patterned in a simple and precise manner on a donor film using a solution-processed drop-coating of the AgNWs in conjunction with a tape-type shadow mask. The patterned AgNW electrodes were then entirely transferred to an elastomeric substrate while embedding them in the polymer matrix. The fabricated stretchable AgNW piezoresistors could be operated at up to 20% strain without electrical or mechanical failure, showing a maximum gauge factor as high as 5.3, low hysteresis, and high linearity ($r^2 \approx 0.996$). Moreover, the sensor responses were also found to be highly stable and reversible even under repeated strain loading/unloading for up to 1000 cycles at a maximum tensile strain of 20%, mainly due to the mechanical stability of the AgNW/elastomer composites. In addition, both the magnitude and direction of the principal strain could be precisely characterized by configuring three identical AgNW piezoresistors in a delta rosette form, representing the potential for employing the devices as a multidimensional strain sensor in various practical applications.

(Received August 22, 2018; Accepted September 8, 2018)

Keywords: rosette strain sensor, silver nanowire, stretchable piezoresistor, drop-coating, tape-type shadow mask, solution process

1. 서 론

스트레인 센서 (strain sensor)는 외부에서 인가되는 힘에 따라 대상물에 발생하는 스트레인 (변형률)을 감지하는 소자로 최근에는 기계적 유연성 (flexibility) 및 신축성 (stretchability)을 기반으로 인체의 다양한 부위에 직접 부착되어 인체의 크고 작은 움직임을 실시간으로 감지할 수 있는 형태로 개발되고 있으며, 차세대 개인 건강 모니터링 (personal health monitoring) 분야의 핵심 기술로 적용하

기 위한 활발한 연구가 진행되고 있다 [1].

이러한 신축성 스트레인 센서 구현에 있어 가장 중요한 요소는 외부에서 가해지는 힘에 대해 높은 스트레인 민감도 (sensitivity)와 넓은 감지 범위 (detection range)를 갖는 압저항 전극 (piezoresistive electrode)을 개발하는 것이다. 이를 위해 현재 금속 나노선 (nanowires, NWs) [2-4], 금속 나노입자 (nanoparticles, NPs) [5,6], 탄소 나노튜브 (carbon nanotubes, CNTs) [7,8], CNT 시트 (sheet) [9-11], 카본 블랙 나노입자 (carbon black (CB) NPs) [12,13], 그래핀 필름 (graphene films) [14-17], 하이브리드 (hybrid) 구조 [18-22] 등 전도성 나노물질 (conductive nanomaterials) 기반의 압저항 전극이 활발히 개발되고 있으며, 신축성 기판과의 결합을 통해 다양한 형태의 신축성

- 김강현: 석박사통합과정, 차재경: 학사과정, 김종만: 교수

*Corresponding Author: Jong-Man Kim

[Tel: +82-55-350-5288, E-mail: jongkim@pusan.ac.kr]

Copyright © The Korean Institute of Metals and Materials

스트레인 센서가 구현되고 있다.

전도성 나노물질 기반 신축성 압저항 전극은 일반적으로 외력이 인가될 때 전극을 구성하는 전도성 나노물질 네트워크 (network) 상에 발생하는 변형에 의해 전류 통로 (current pathway)를 잃어 전기 저항 (electrical resistance)이 증가하는 동작 원리를 가지며, 기존 금속 포일 (metal foil) 기반의 스트레인 센서에 비해 민감도와 감지 범위를 동시에 개선할 수 있는 장점을 갖는다. 하지만 현재 보고되고 있는 대부분의 신축성 스트레인 센서는 주로 단축 (single axis) 방향 스트레인을 감지하는 구조를 띄고 있어 외력을 정확히 감지하기 위해서는 스트레인이 발생하는 축에 센서가 정렬되어야 하므로 보다 복잡한 다축 (multi-axis) 외력을 감지하는 데는 어려움이 있다. 이는 결국 임의의 방향과 크기의 스트레인을 발생시키는 인체의 다양한 움직임을 정확하게 측정하는 데 있어 기술적인 한계를 드러내고 있음을 의미한다.

이러한 기존 단축 센서의 문제점을 극복하기 위해 복수의 단위 센서를 일정 각도로 배열하여 임의의 외력에 대해 주 (principal) 스트레인의 크기와 방향을 감지할 수 있는 로제트 타입 (rosette-type) 신축성 스트레인 센서를 구현하기 위한 다양한 연구가 진행되고 있다 [7,12,14]. X. Wang 등은 컴퓨터 제어가 가능한 분무 증착 프린팅 (spray deposition printing) 기술을 이용하여 신축성 폴리디메틸실록산 (polydimethylsiloxane, PDMS) 기판 상에 CNT 잉크 (ink)를 직접 분사하여 압저항 전극 패턴을 형성하는 방법을 통해 3축 로제트 센서를 성공적으로 구현하였다 [7]. 하지만 이는 압저항 전극 패턴링 (patterning)을 위해 복잡한 장치가 필요하며, 직접 인쇄 (direct writing) 방식의 특성 상 비교적 긴 공정 시간이 요구되는 문제점을 갖는다. J.-H. Kong 등은 소프트리소그래피 (soft-lithography) 기반 PDMS 스탬프 (stamp)를 이용하여 전도성 CB/PDMS 복합체 (composite) 잉크 패턴링을 위한 접촉 전사 프린팅 (contact transfer printing) 기술을 제안하였으며, 이를 기반으로 일회용 접촉 전사 공정을 통해 3축 로제트 스트레인 센서를 구현하였다 [12]. 하지만 이는 로제트 구조로 배열된 개별 압저항 전극들이 서로 유사한 압저항 특성을 갖기 위해서는 균일한 분포를 갖는 전도성 복합체 잉크 합성 및 접촉 전사 공정 조건의 최적화가 수반되어야 하는 까다로움을 보인다. S.-H. Bae 등은 포토리소그래피 (photolithography) 및 반응성 이온 식각 (reactive ion etching) 기술을 이용하여 그래핀 필름을 패턴링하는 방법을 통해 투명한 3축 로제트 스트레인 센서를 구현하였다 [14]. 하지만 이는 그래핀 필름 합성을 위한 진공 (vacuum)

장비가 요구되며, 다단계의 그래핀 필름 패턴링 및 전사 (transfer) 과정을 포함하고 있어 공정이 비교적 복잡한 문제점을 갖는다.

본 연구에서는 테이프형 새도우 마스크 (tape-type shadow mask) 및 은 나노선 (silver nanowire, AgNW) 드롭 코팅 (drop-coating) 공정을 결합하여 AgNW 압저항 전극을 정밀하게 패턴링하고 신축성 기판으로 침투 전사하는 방법을 통해 신축성 로제트 스트레인 센서를 구현하였다. 제작된 센서를 구성하는 AgNW 압저항 전극의 세부 구조 및 인장 (stretching)에 따른 형상 변화를 면밀히 관찰하였으며, 이를 기반으로 인장에 대한 센서의 압저항 특성을 평가/분석함으로써 다축 센서로의 활용 가능성을 검증하였다. 본 연구에서 제안하는 센서 구현 기술은 복잡하고 값비싼 장비를 필요로 하지 않으며, 간단하고 빠른 용액 공정 (solution process)을 기반으로 비교적 정밀한 압저항 전극을 형성할 수 있는 장점으로 인해 기존 로제트 센서 기술의 문제점을 극복할 수 있는 대안 기술로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

2. 실험 방법

2.1 은 나노선 합성

본 연구에서는 우수한 전기적, 광학적, 기계적 특성을 갖는 AgNW를 압저항 전극 물질로 활용하였으며, AgNW는 염화 제2구리 (copper(II) chloride, CuCl_2) 매개 폴리올 (polyol) 법을 기반으로 합성하였다 [23]. 합성 과정을 간단히 요약하면 다음과 같다. 먼저 160 °C의 온도로 1 시간 동안 예열된 에틸렌 글리콜 (ethylene glycol, EG) 10 mL에 4 mM CuCl_2 40 μL 를 넣고 360 rpm의 회전 속도로 교반하면서 15 분 동안 유지하였다. 각각 10 mL의 EG에 녹인 0.3 M 폴리비닐피롤리돈 (polyvinyl pyrrolidone, PVP) 3 mL와 0.1 M 질산은 (silver nitrate, AgNO_3) 3 mL를 2 채널 시린지 펌프 (two-channel syringe pump; Legato 111, KD Scientific)를 이용하여 준비된 CuCl_2 /EG 용액에 주입한 후 1 시간 동안 반응시켰다. 반응 과정 중에는 160 °C의 온도와 360 rpm의 교반 속도를 유지하였다. 마지막으로 합성된 AgNW를 원심분리기 (centrifuge; TD4Z-WS, Nasco Korea)를 이용하여 충분히 정제한 후 5 mg/mL의 농도로 탈이온수 (deionized water)에 분산함으로써 압저항 전극 형성을 위한 드롭 코팅 용액을 준비하였다.

2.2 센서 제작

AgNW 압저항 전극을 제작하기 위해 먼저 캐드 (computer-

aided design; CAD) 기반 자동 플로터 (automatic plotter; Cameo, Silhouette)를 이용하여 폴리이미드 (polyimide, PI) 테잎에 로켓 패턴 홀을 형성하여 새도우 마스크를 준비하였다. 그 후 도너 (donor) 기판으로 사용되는 PI 필름에 제작된 새도우 마스크 테잎을 밀착하여 부착하고, 그 위에 준비된 AgNW 용액을 드롭 코팅하였다. 70 °C 온도의 대류 오븐 (convection oven; ON-11E, JEIO TECH)에 샘플을 유지하여 용매를 증발시킨 후 새도우 마스크 테잎을 제거함으로써 AgNW 압저항 전극을 패터닝하였으며, 전극의 전기 전도도 개선을 위해 200 °C의 온도에서 1 시간 동안 열처리 (thermal annealing)를 수행하였다. 그 후, 주제와 경화제가 10:1의 질량비 (weight ratio)로 혼합된 PDMS 용액을 PI 기판에 패터닝된 AgNW 압저항 전극 상에 붓고 70 °C의 온도에서 1 시간 동안 경화시켰으며, 경화된 PDMS 기판을 PI 필름으로부터 분리하여 AgNW 압저항 전극을 PDMS 기판 쪽으로 침투 전사하는 과정을 통해 센서 제작을 완료하였다. 마지막으로 센서 성능 평가를 위해 은 페이스트 (silver paste)를 이용하여 센서의 압저항 전극에 전선 (electric wire)을 연결한 후 PDMS 보호층 (protection layer)을 코팅하였다.

2.3 형상 관찰 및 센서 성능 평가

제작된 압저항 전극의 형상, 내부 AgNW 네트워크 구조 및 인장에 따른 전극의 표면 형상 변화는 전자주사현미경 (scanning electron microscope, SEM; SNE-3200M, SEC)과 광학현미경 (optical microscope, OM; BX60M, Olympus)을 이용하여 관찰하였다.

센서의 스트레인 감지 성능 평가를 위해 제작된 센서를 컴퓨터 제어 전동 스테이지 (motorized stage; JSV-H100,

JISC)의 지그 (Jig)에 연결하여 2 mm/min의 속도로 인장하였으며, 이와 동시에 압저항 전극 양단에 연결된 디지털 멀티미터 (digital multimeter; 34465A, Keysight Technologies)를 이용하여 인장 대비 저항 변화를 실시간으로 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 1(a)는 폴리올 법을 이용하여 합성된 AgNW의 SEM 분석 결과를 보여준다. 그림 1(b)는 그림 1(a)의 SEM 분석 결과를 바탕으로 측정된 AgNW의 길이 (length)와 직경 (diameter)의 분포를 나타낸다. 측정은 입자 형상을 제외하고 무작위로 선택된 500 개의 AgNW에 대해서 진행되었다. 그림 1(b)에서 볼 수 있는 바와 같이 합성된 AgNW의 길이의 경우 측정 대상의 88.6%가 10~25 μm 내에, 직경의 경우 78%가 0.2~0.6 μm 내에 분포함을 볼 수 있다. 또한, 합성된 AgNW의 평균 길이와 직경은 각각 약 17.8 μm 와 0.51 μm 를 보여 약 35의 비교적 높은 종횡비 (aspect ratio)를 갖는 것으로 확인되었다.

그림 2(a)는 본 연구에서 제안하는 신축성 로켓 스트레인 센서의 제작 과정 모식도를 보여주며, 전체 공정 과정이 매우 간단한 특징을 나타낸다. 드롭 코팅 기술은 간단하고 빠른 공정 측면에서의 장점으로 인해 전도성 나노물질 필름을 형성하는 데 있어 가장 유용한 방법 중 하나이다. 하지만 새도우 마스크를 이용하여 전극 패턴을 형성할 때, 새도우 마스크와 기판이 밀착되지 못하면 코팅 용액이 패턴 경계면을 통해 마스크 아래로 스며들어 정밀한 전극 형상을 얻기 어려운 문제점이 있다. 따라서 본 연구에서는 테잎형 새도우 마스크를 적용하여 이러한 문제점을

Fig. 1. AgNWs synthesized via a CuCl_2 -mediated polyol process: (a) top-view SEM image of the synthesized AgNWs, scale bar: 10 μm , and (b) length and diameter distribution of the synthesized AgNWs (500 AgNWs measured).

Fig. 2. Fabrication of the stretchable AgNW rosette strain sensor: (a) schematic illustration of the fabrication process, (b) pattern widths measured on the shadow mask and patterned AgNW strips (inset: digital images of the shadow mask and patterned AgNW strip, scale bar: 500 μm), and digital images of (c) the AgNW piezoresistors patterned on the donor PI film in a rosette configuration (inset: CAD drawing of the rosette strain sensor, scale bar: 20 mm) and (d) the fabricated AgNW rosette strain sensor, scale bars: 20 mm.

해결하고자 하였다. PI 테잎의 접착층 (adhesion layer)에 의해 코팅 대상 기판과의 밀착 접합이 가능하므로 드롭 공정 시 코팅 용액이 기판 상에 퍼지는 현상을 효과적으로 방지할 수 있다. 그림 2(b)는 상기 방법을 통해 제작된 스트립 (strip) 형상의 AgNW 전도체 폭 (width)을 측정하고, 새도우 마스크 상의 패턴 폭과 비교한 결과를 보여준다. 이 때, 서로 다른 홀 패턴 폭을 갖는 새도우 마스크를 이용하여 4가지 모델 (model)의 AgNW 스트립을 패터닝하였다. 그림 2(b)에서 볼 수 있는 바와 같이 패터닝된 AgNW 스트립은 모델에 관계없이 새도우 마스크 상의 홀 패턴 보다 다소 작은 폭을 보였는데, 이는 드롭 코팅을 하는 과정에서 AgNW 용액이 장력 (tension)의 영향으로 새도우 마스크 홀 패턴의 가장자리 (edge) 영역까지 완벽히 채우지 못한 결과로 사료된다. 하지만 새도우 마스크에 형성된 홀 패턴의 폭과 이를 이용하여 기판 상에 제작된 AgNW 스트립의 폭은 최대 5.8% 이하의 작은 편차를 보임을 확인할 수 있었으며, 이는 본 연구에서 적용한 테잎

형 새도우 마스크 및 드롭 코팅 방법의 결합을 통해 센서 공정을 단순화하면서 비교적 정밀한 전도성 나노물질 패턴을 형성할 수 있음을 의미한다.

그림 2(c)는 테입형 새도우 마스크 기반 드롭 코팅 공정을 바탕으로 PI 필름 상에 패터닝된 AgNW 압저항 전극의 디지털 이미지를 보여준다. 3개의 단위 압저항 전극이 120°의 등 각도로 배열되어 로제트 구성을 이루고 있으며, inset의 설계된 새도우 마스크 카드 도면을 따라 안정적으로 패터닝되었음을 볼 수 있다. 또한, 그림 2(d)에서 볼 수 있는 바와 같이 3개의 압저항 전극은 최초 패터닝된 형태를 유지하면서 PDMS 기판으로 전사되어 안정적인 로제트 스트레인 센서가 제작되었음을 확인할 수 있다. 이는 본 연구에서 도너 필름으로 사용된 PI가 갖는 낮은 표면 에너지 (surface energy)로 인해 AgNW 패턴과의 접착력이 좋지 못한 특성에 기인한다. 마지막으로 센서 성능 평가를 위한 전선 연결 후 PDMS 보호층을 코팅하였다. PDMS 보호층은 일차적으로 압저항 전극을 외부 환경으로

Fig. 3. Fabrication results of the unit AgNW strain sensor: (a) digital image of the fabricated sensor, scale bar: 20 mm, (b) top-view SEM image of the patterned AgNW piezoresistor, scale bar: 50 μm , and (c) magnified SEM image of the AgNW/PDMS composite, scale bar: 10 μm .

Fig. 4. Stretchable AgNW strain sensor under tensile strain: (a) sequential digital images of the sensor under tensile strain applied up to 20% at a step of 10%, scale bars: 10 mm and (b) the corresponding OM images of the AgNW network marked in (a), showing the strain-dependent morphological changes, scale bars: 25 μm .

부터 보호하며, 은 페이스트로 연결된 전선들을 고정하여 센서 동작의 안정성을 확보할 수 있도록 한다. 또한, AgNW 압저항 전극이 신축성 기판 물질 사이에 위치하는 샌드위치 (sandwich) 구조를 구현함으로써 반복 구동에 따라 압저항 전극 상에 연속적인 주름 (wrinkle) 형상의 발생을 막아주는 역할을 한다.

그림 3(a)는 제작된 AgNW 압저항 전극 기반 스트레인 센서의 디지털 이미지를 나타내며, 기계적으로 유연한 특성을 보여준다. 그림 3(b)는 제작된 AgNW 압저항 전극의 표면 형상을 관찰한 SEM 측정 결과를 보여주며, 압저항 전극은 가장자리 부분에 경계의 모호함이 없이 비교적 정밀하게 패터닝되었음을 알 수 있다. 그림 3(c)는 압저항 전극의 확대 SEM 이미지를 나타내며, 고밀도 (high density)의 AgNW가 서로 수많은 접촉 점점 (contact junction)을 유지하면서 전자의 이동을 위한 통로를 형성하

고 있음을 확인할 수 있다. 이러한 결과로 제작된 단위 압저항 전극은 약 5.6 Ω 의 낮은 평균 초기 저항 값을 보였다. 특히, 고밀도 AgNW 네트워크 전극이 PDMS 기판의 표면 영역 내부에 안정적으로 침투되어 AgNW/PDMS 복합체를 형성하고 있음을 확인할 수 있는데, 이는 제작된 AgNW 압저항 전극이 외력에 대한 높은 기계적인 안정성을 가질 수 있음을 의미한다.

AgNW 압저항 전극은 외부에서 가해지는 힘에 대해 전극을 이루는 AgNW 간 접촉 점점을 점진적으로 잃어 전류 통로가 줄어들게 되고, 결국 이에 따라 전극의 저항이 점차적으로 증가하는 원리로 압저항성 (piezoresistivity)을 띄게 된다. 이를 검증하기 위해 제작된 압저항 전극을 점진적으로 인장하면서 AgNW의 네트워크 형상 변화를 관찰하였다. 그림 4(a)는 10% 간격으로 20%까지 인가된 스트레인에 대한 압저항 전극의 구조 변화를 나타내는 디지

Fig. 5. Strain sensing performance of the unit AgNW strain sensor: $\Delta R/R_0$ curves of the device (a) upon stretching to 20%, (b) upon release to 0%, and (c) in response to 10 cycles of continuous strain loading and unloading at a maximum strain of 20%, (d) long-term performance stability under 1000 stretching cycles at 20% strain, and (e) GF and (f) r^2 values calculated from waveforms obtained every 100 stretching cycles in (d).

털 이미지이며, 이에 따른 AgNW 네트워크의 형상 변화는 그림 4(b)의 OM 이미지에서 확인할 수 있다. 초기 고밀도 AgNW 네트워크는 인가되는 스트레인이 증가함에 따라 점차 성겨지며, 20% 인장 시 AgNW 네트워크 상에 무작위의 공동 (void) 형상이 형성됨을 관찰할 수 있었다. 이는 외부에서 인가되는 스트레인에 따라 AgNW 번들 (bundle) 간 간격이 멀어짐을 의미하며, 결국 이에 따라 전극의 저항은 점차 증가하게 됨을 예측할 수 있다. 또한, 인가된 스트레인을 모두 제거했을 때 네트워크 형상은 초기의 고밀도 상태로 회복됨을 확인할 수 있는데, 이는 AgNW 사이의 빈 공간을 채운 PDMS의 탄성에 의한 복원 (restoration) 특성의 결과로 사료되며, 센서가 특성의 가역성 (reversibility)을 가질 수 있음을 의미한다.

그림 5(a)는 20%까지 가해지는 스트레인의 증가 따른 AgNW 압저항 센서의 저항 변화 특성을 나타낸다. 외부에서 인가한 스트레인이 증가함에 따라 센서의 저항이 점진적으로 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 이는 그림 4(b)에서 확인한 바와 같이 외력 인가에 의해 AgNW 네트워크 내 AgNW 간 접촉하는 점점의 수가 점진적으로 감소하기 때문이다. 압저항 스트레인 센서의 민감도 (sensitivity)는 게이지율 (gauge factor, $GF = (\Delta R/R_0)/\epsilon$)로 평가될 수 있

으며, 이는 그림 5(a) 그래프의 기울기 (slope)를 의미한다. 그림 5(a) 그래프를 기반으로 선형 피팅 (linear fitting)을 통해 기울기를 계산한 결과 제작된 센서의 GF는 20%의 인장 범위에 대해서 약 5.3임을 확인할 수 있다. 또한, 제작된 센서의 응답 특성이 우수한 선형성 (linearity, $r^2 \approx 0.996$)을 나타냄을 확인할 수 있었는데, 이는 PDMS 매트릭스 (matrix) 내에 견고하게 침투된 압저항 전극의 구조적 안정성으로 인해 20%까지의 인장에 대해 AgNW 네트워크에 비선형적인 극심한 변형이 발생되지 않기 때문인 것으로 판단된다. 기존에 산업적으로 가장 활발히 사용되고 있는 금속 포일 기반 스트레인 센서의 GF와 신축성이 각각 약 2와 5% 정도로 제한되는 것을 감안할 때 [4], 본 연구에서 구현한 AgNW 압저항 센서는 개선된 민감도와 스트레인 감지 범위 특성을 보임과 동시에 우수한 선형성을 확보할 수 있어 높은 응용성을 가짐을 알 수 있다.

그림 5(b)는 인가된 스트레인을 점차 줄일 경우 측정된 스트레인 대비 센서의 저항 변화를 나타낸다. 그림 5(b)에서 확인할 수 있는 바와 같이 스트레인 증가 시의 경향과 큰 편차를 나타내지 않아 비교적 낮은 이력 특성 (hysteresis)을 보임을 확인할 수 있다. 이는 PDMS 매트릭스 내에 견고하게 속박되어 있어 AgNW 네트워크의 형태

Fig. 6. Stretchable AgNW rosette strain sensor: (a) schematic illustration of the rosette strain sensor configuration, (b) digital images of the device in the initial and 20%-stretched (along the x-axis) states scale bars: 20 mm, and (c) $\Delta R/R_0$ curves of the three identical AgNW piezoresistors when the device was stretched to 20% along the x-axis.

학적인 변화 (morphological change)가 주로 외력의 인가 및 제거에 따른 PDMS의 물리적인 거동에 의존하여 결정되기 때문인 것으로 판단된다. 외부에서 인가된 스트레인이 완벽히 제거되었을 때 센서의 복귀 저항은 초기 상태 대비 약 8.9% 증가한 경향을 볼 수 있었는데, 이는 기관으로 적용된 PDMS의 점탄성 (viscoelastic) 성질에 기인한 것으로 판단된다 [12]. 하지만 외력 제거 후 일정 시간이 지날 경우 센서는 초기 특성으로 복귀됨을 확인할 수 있었는데, 이는 센서의 응답 특성이 비교적 가역적임을 의미한다. 이는 그림 4(b)에서 확인한 바와 같이 외부에서 인가된 스트레인이 완벽히 제거되었을 때 AgNW 네트워크 형상이 초기 상태로 복원된 결과와 일치하는 경향이다.

이러한 이유로 그림 5(c)에서 확인할 수 있는 바와 같이 제작된 AgNW 센서는 수 차례의 반복적인 스트레인의 인가 (20%) 및 제거에 대해서도 비교적 안정적이고 가역적인 응답 특성을 보이는 것으로 사료된다.

실제적인 응용의 관점에서 볼 때, 우수한 민감도 및 넓은 감지 범위와 더불어 장기적인 동작의 안정성 (long-term stability) 또한 신축성 센서가 만족시켜야 하는 중요한 요구 조건이다. 이를 확인하기 위해 본 연구에서는 제작된 AgNW 압저항 센서에 최대 20%의 스트레인을 1000 회 반복적으로 인가/제거하면서 그 응답 특성을 관찰하였다. 그림 5(d)는 1000 회의 반복 구동 중 100 회 마다 측정된 센서의 응답 특성을 나타내며, 각 파형이 큰 편차없이 서로 겹쳐짐을 볼 수 있다. 그림 5(e)와 5(f)는 각각 그림 5(d)의 결과를 기반으로 선형 피팅을 통해 계산된 기울기 (GF)와 r^2 값을 나타낸다. 100 회 마다 측정된 GF는 반복 구동에 따라 단조 (monotonic) 증가 및 감소의 경향을 나타내지 않았으며 (그림 5(e)), 각 파형의 r^2 값

또한 초기 상태 값 대비 큰 편차를 나타내지 않음을 확인할 수 있다 (그림 5(f)). 이는 반복 구동 환경 하에서도 제작된 센서의 응답 특성이 비교적 우수한 안정성 및 선형성을 유지할 수 있음을 의미하며, AgNW/PDMS 복합체의 구조적인 안정성에 기인하는 결과라고 볼 수 있다.

그림 6(a)는 주 스트레인의 방향을 나타내는 로제트 센서 구성의 모식도이다. 여기서 $\epsilon_{\max}$ 와 $\epsilon_{\min}$ 은 각각 최대 및 최소 주 스트레인을 의미한다. 각각 S_1 , S_2 및 S_3 로 표기된 3개의 동일한 단위 AgNW 센서가 120°의 교차 각도를 가지고 배열되며, 각 단위 센서의 스트레인 값은 S_1 , S_2 및 S_3 에 대해 각각 ϵ_1 , ϵ_2 및 ϵ_3 로 표기하였다.

로제트 구성 내 기준 센서 (S_1)가 주 스트레인의 방향에 대해 θ 의 각도에 맞춰져 있다고 가정하면, ϵ_1 , ϵ_2 및 ϵ_3 는 모어 원 (Mohr's circle)으로 알려진 스트레인 변환 관계에 의해서 아래 식과 같이 $\epsilon_{\max}$, $\epsilon_{\min}$ 및 θ 에 대해서 정리할 수 있다 [7,12,14].

$$\epsilon_1 = \frac{\epsilon_{\max} + \epsilon_{\min}}{2} + \frac{\epsilon_{\max} - \epsilon_{\min}}{2} \cos 2\theta \quad (1)$$

$$\epsilon_2 = \frac{\epsilon_{\max} + \epsilon_{\min}}{2} + \frac{\epsilon_{\max} - \epsilon_{\min}}{2} \cos 2(\theta + 60^\circ) \quad (2)$$

$$\epsilon_3 = \frac{\epsilon_{\max} + \epsilon_{\min}}{2} + \frac{\epsilon_{\max} - \epsilon_{\min}}{2} \cos 2(\theta + 120^\circ) \quad (3)$$

여기서 ϵ_1 , ϵ_2 및 ϵ_3 는 실험적으로 결정될 수 있는 값이므로 상기 식 (1)–(3)을 다시 정리하면, 아래 식과 같이 $\epsilon_{\max}$, $\epsilon_{\min}$ 및 θ 를 ϵ_1 , ϵ_2 및 ϵ_3 에 대해서 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_{\max} = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3}{3} + \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_3 - \epsilon_1)^2} \quad (4)$$

$$\varepsilon_{min} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3}{3} - \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2} \quad (5)$$

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{3}(\varepsilon_2 - \varepsilon_3)}{2\varepsilon_1 - \varepsilon_2 - \varepsilon_3} \right) \quad (6)$$

식 (4)–(6)을 이용하면 임의의 외력에 대해 주 스트레인의 크기와 방향을 동시에 알아낼 수 있게 된다.

그림 6(b)는 초기 및 S_1 이 배열된 방향으로 20%의 스트레인이 인가된 경우 AgNW 로켓 센서의 디지털 이미지를 보여준다. x 축 방향으로 20% 스트레인이 인가될 때, x 축에 배열된 S_1 의 경우 구불구불한 (serpentine) 구조가 길이 방향으로 늘어나는 형태의 변형이 발생되며, 동시에 S_2 와 S_3 의 경우 구불구불한 구조가 펼쳐지는 형상을 나타낼 수 있다.

그림 6(c)는 그림 6(b)의 외부 스트레인 인가 조건 하에 측정된 각 단위 AgNW 센서의 저항 변화율을 나타낸다. 그림 6(b)에서 확인한 바와 같이 x 축 방향으로 인가된 스트레인에 대해서 S_1 이 가장 큰 저항 변화율을 보였으며, 이는 센서 구조가 길이 방향으로 늘어나면서 내부 AgNW 네트워크에 비교적 큰 변형을 유도했기 때문인 것으로 판단된다. 반면, S_2 와 S_3 의 경우 외력이 인가된 축에 대해 120°의 교차 각도를 가져 구불구불한 센서 구조가 펼쳐지는 변형을 겪게 되므로 내부 AgNW 네트워크의 형상 변화는 상대적으로 적게 되고, 결국 동일한 크기의 외력에 대해서도 S_1 에 비해 미미한 저항 변화율을 나타낸다. 또한, S_2 와 S_3 는 외부 스트레인이 인가된 축에 대해 대칭적으로 위치하므로 유사한 응답 특성을 보임을 확인할 수 있다.

외부에서 20%의 스트레인이 인가된 경우 그림 6(c)의 측정 결과로부터 얻어진 ε_1 , ε_2 및 ε_3 는 각각 18.9%, 2.4% 및 2.6%였다. 이렇게 실험적으로 얻어진 ε_1 , ε_2 및 ε_3 의 값을 식 (4)–(6)에 대입하여 계산된 ε_{max} , ε_{min} 및 θ 는 각각 약 18.9%, -3% 및 -0.007°였다. 계산된 ε_{max} 및 θ 는 실제 외부에서 인가된 스트레인 크기 (20%) 및 방향 (0°)과 큰 오차없이 잘 들어맞는 결과를 보였다. 이는 본 연구에서 제안하는 AgNW 로켓 스트레인 센서가 임의의 외력에 대해 주 스트레인과 방향을 정확하게 감지할 수 있음을 의미하며, 향후 다양한 응용 분야에서 다축 센서로의 활용 가능성이 높을 것으로 기대된다.

4. 결 론

본 연구에서는 AgNW 압저항 전극을 이용한 신축성 로켓 스트레인 센서를 제안하였다. 테잎형 새도우 마스크 및

드롭 코팅 기술을 결합한 용액 공정을 기반으로 AgNW 네트워크 전극을 비교적 정밀하게 패터닝할 수 있었으며, 이를 신축성 기판에 침투 전사시키는 간단한 과정을 통해 신축성 로켓 센서를 성공적으로 구현하였다. 형상 관찰 결과 AgNW 네트워크가 폴리머 매트릭스 내에 안정적으로 형성되었음을 확인하였다. 제작된 AgNW 압저항 전극은 비교적 높은 민감도 ($GF > 5$), 넓은 감지 범위 (20%), 낮은 이력 특성 및 높은 선형성 등 우수한 성능을 나타냈으며, 1000 회의 반복적인 인장-이완에 대해서도 안정적이고 가역적인 압저항 특성을 보였다. 또한, 3개의 동일한 AgNW 압저항 전극을 120° 간격으로 배열한 로켓 센서를 기반으로 주 스트레인의 크기와 방향을 비교적 정밀하게 측정할 수 있었다. 이는 특정한 하나의 축에 대해서만 스트레인 감지가 가능한 단축 센서의 한계를 극복한 결과이며, 간단하고 정밀한 제작 공정의 특성 상 본 연구에서 제안하는 신축성 로켓 스트레인 센서는 향후 스마트 헬스케어 (smart healthcare) 분야의 핵심 기술로 활용될 수 있는 가능성이 충분하다고 판단된다.

감사의 글

이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

REFERENCES

1. M. Amjadi, K.-U. Kyung, I. Park, and M. Sitti, *Adv. Funct. Mater.* **26**, 1678 (2016).
2. C.-J. Lee, K. H. Park, C. J. Han, M. S. Oh, B. You, Y.-S. Kim, and J.-W. Kim, *Sci. Rep.* **7**, 7959 (2017).
3. J. H. Cho, S.-H. Ha, and J.-M. Kim, *Nanotechnology* **29**, 155501 (2018).
4. S. Gong, D. T. H. Lai, B. Su, K. J. Si, Z. Ma, L. W. Yap, P. Guo, and W. Cheng, *Adv. Electron. Mater.* **1**, 1400063 (2015).
5. J. Lee, S. Kim, J. Lee, D. Yang, B. C. Park, S. Ryu, and I. Park, *Nanoscale* **6**, 11932 (2014).
6. I. You, B. Kim, J. Park, K. Koh, S. Shin, S. Jung, and U. Jeong, *Adv. Mater.* **28**, 6359 (2016).
7. X. Wang, J. Li, H. Song, H. Huang, and J. Gou, *ACS Appl. Mater. Interfaces* **10**, 7371 (2018).
8. J. Zhou, H. Yu, X. Xu, F. Han, and G. Lubineau, *ACS Appl. Mater. Interfaces* **9**, 4835 (2017).
9. Y. Yu, Y. Luo, A. Guo, L. Yan, Y. Wu, K. Jiang, Q. Li, S. Fan, and J. Wang, *Nanoscale* **9**, 6716 (2017).

10. T. Yamada, Y. Hayamizu, Y. Yamamoto, Y. Yomogida, A. Izadi-Najafabadi, D. N. Futaba, and K. Hata, *Nat. Nanotechnol.* **6**, 296 (2011).
11. S. Ryu, P. Lee, J. B. Chou, R. Xu, R. Zhao, A. J. Hart, and S.-G. Kim, *ACS Nano* **9**, 5929 (2015).
12. J.-H. Kong, N.-S. Jang, S.-H. Kim, and J.-M. Kim, *Carbon* **77**, 199 (2014).
13. J. Shintake, E. Piskarev, S. H. Jeong, and D. Floreano, *Adv. Mater. Technol.* **3**, 1700284 (2018).
14. S.-H. Bae, Y. Lee, B. K. Sharma, H.-J. Lee, J.-H. Kim, and J.-H. Ahn, *Carbon* **51**, 236 (2013).
15. X. Li, T. Yang, Y. Yang, J. Zhu, L. Li, F. E. Alam, X. Li, K. Wang, H. Cheng, C.-T. Lin, Y. Fang, and H. Zhu, *Adv. Funct. Mater.* **26**, 1322 (2016).
16. X. Li, R. Zhang, W. Yu, K. Wang, J. Wei, D. Wu, A. Cao, Z. Li, Y. Cheng, Q. Zheng, R. S. Ruoff, and H. Zhu, *Sci. Rep.* **2**, 870 (2012).
17. S. W. Lee, J. J. Park, B. H. Park, S. C. Mun, Y. T. Park, K. Liao, T. S. Seo, W. J. Hyun, and O. O. Park, *ACS Appl. Mater. Interfaces* **9**, 11176 (2017).
18. S. Chen, Y. Wei, X. Yuan, Y. Lin, and L. Liu, *J. Mater. Chem. C* **4**, 4304 (2016).
19. X. Guo, Y. Huang, Y. Zhao, L. Mao, L. Gao, W. Pan, Y. Zhang, and P. Liu, *Smart Mater. Struct.* **26**, 095017 (2017).
20. S. Duan, Z. Wang, L. Zhang, J. Liu, and C. Li, *Adv. Mater. Technol.* **3**, 1800020 (2018).
21. P. T. Hoang, N. Salazar, T. N. Porkka, K. Joshi, T. Liu, T. J. Dickens, and Z. Yu, *Nanoscale Res. Lett.* **11**, 422 (2016).
22. S. Shengbo, L. Lihua, J. Aoqun, D. Qianqian, J. Jianlong, Z. Qiang, and Z. Wendong, *Nanotechnology* **29**, 255202 (2018).
23. K. E. Korte, S. E. Skrabalak, and Y. Xia, *J. Mater. Chem.* **18**, 437 (2008).