

## 은 나노와이어를 활용한 신축성 바이오전극 개발

최재원 · 선우성혁<sup>†</sup>

국립금오공과대학교 화학공학과  
39177 경상북도 구미시 대학로 61  
(2025년 7월 23일 접수, 2025년 8월 20일 수정본 접수, 2025년 8월 21일 채택)

### Fabrication of Stretchable Bioelectrodes Using Silver Nanowires

Jae Won Choi and Sung-Hyuk Sunwoo<sup>†</sup>

Department of Chemical Engineering, Kumoh National Institute of Technology,  
61 Daehak-ro, Gumi, Gyeongsangbukdo, 39177, Korea  
(Received 23 July 2025; Received in revised from 20 August 2025; Accepted 21 August 2025)

#### 요 약

최근 다양한 생체 신호의 측정을 위해 생체에 부착 또는 삽입되는 바이오전극이 활발히 개발 및 활용되고 있다. 기존에 상용화되어 널리 사용되던 금속 기반의 전극은 우수한 전기 전도성과 가공성을 가지고 있으나, 높은 기계적 강성으로 인해 생체조직과의 기계적 부정합이 발생하여 바이오전극으로서의 활용이 제약된다. 생체조직에서 발생하는 전기생리학적 신호를 정확하게 기록하고 효과적인 전기자극을 전달하기 위해서는 전극과 생체조직의 밀착성을 극대화하여야 한다. 전극과 생체조직의 밀착이 불충분하면 전극과 조직 사이의 공기층이 전기적 절연층으로 작용하여 신호의 크기를 감소시키고 각종 노이즈의 발생을 초래한다. 이를 해결하기 위해 다양한 연성의 전도성 전자재료가 개발되고 있으며, 신축성 나노복합체는 높은 전기전도성과 우수한 신축성을 동시에 제공하여 바이오전극의 유망한 소재로 각광받고 있다. 특히 은나노와이어 기반 나노복합체는 은의 탁월한 전기전도성과 높은 종횡비 특성 덕분에 바이오전극 소재로서 이상적인 후보로 평가받고 있다. 나노복합체의 전도성과 신축성을 향상하기 위해서는 고분자 매트릭스 내에서의 조밀하고 균일한 전도성 네트워크의 형성이 필수적이며, 이는 필러로 사용되는 은나노와이어의 구조를 정밀하게 조절함으로써 가능하다. 본 연구에서는 은나노와이어의 합성 메커니즘을 체계적으로 분석하고 합성 조건을 최적화하여 나노복합체 제작에 가장 적합한 나노와이어를 제조하였다.

**Abstract** – Bioelectrodes that are attachable or implantable into biological tissues have recently attracted considerable attention for measuring diverse physiological signals. Although conventional metal-based electrodes exhibit excellent electrical conductivity and ease of fabrication, their inherent mechanical rigidity limits their effectiveness as bioelectrodes. Effective recording of electrophysiological signals and delivery of electrical stimulation necessitate intimate contact between electrodes and biological tissues. Poor contact leads to air gaps functioning as electrical insulation, reducing signal amplitude and introducing noise. To address these issues, soft conductive electronic materials, particularly stretchable nanocomposites, have been extensively developed. Among these, silver nanowire-based nanocomposites have emerged as promising bioelectrode materials due to silver's exceptional electrical conductivity and high aspect ratio. The electrical and mechanical properties of nanocomposites critically depend on the formation of conductive networks within the polymer matrix. This study optimizes silver nanowire synthesis conditions to produce nanowires ideal for bioelectrode fabrication, thereby enhancing nanocomposite performance.

Key words: Soft electronics, Nanocomposite, Nanowires, Silver nanowires, Bioelectronics.

#### 1. 서 론

최근 신체 내의 장기나 근육들을 실시간, 지속적으로 모니터링하는 연속적 생체 신호 측정의 수요가 증가함에 따라 사용자 친화성이 있는 바이오전극에 대한 관심도 함께 높아지고 있다<sup>1,2</sup>. 높은 전기 전도성과 우수한 신축성을 동시에 제공하는 바이오소재에 대한 기술이 진보하며 이러한 소재를 활용한 바이오전극이 활발히 개발 및

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.

E-mail: shsunwoo@kumoh.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

이용되고 있다.<sup>3</sup> 기존의 금속 기반 바이오 전극은 단단한 특성으로 인해 기계적 부정합이라는 한계를 지니고 있으며, 이러한 한계를 보완하기 위하여 전도성을 지니며 동시에 유연한 성질을 지니는 연성 바이오 전자소재가 개발되고 있다.<sup>4,5</sup> 현재 활발하게 개발되고 있는 연성 바이오전극은 우수한 전기 전도성과 생체적합성을 동시에 가져 생체 신호를 고해상도로 기록할 수 있다. 바이오전극은 생체 조직들과 유사한 부드럽고 유연한 특성 또한 지니고 있어 기존의 금속 기반 전극에 비해 조직 손상, 면역 반응에 대한 위험도가 상대적으로 낮으므로 신뢰성을 향상시킬 수 있다는 점에서도 주목받고 있다.<sup>6,7</sup>

바이오전극에 사용되는 나노복합체는 복합소재 내에서 주체가 되는 탄성중합체 매트릭스에 전도성을 띄는 나노필러나 나노입자를 첨가하여 만들어진다.<sup>8</sup> 탄성중합체는 나노복합체에 유연성, 신축성, 생체적합성, 구조 안정성 등을 제공하며 이는 생체 환경 내에서의 움직임에도 바이오전극이 전기신호를 효과적으로 전달할 수 있게 한다. 전도성 나노물질은 탄성중합체의 매트릭스에 고르게 분산되어 전도성 경로를 형성하며 나노소재의 고표면적, 고충형비 특성에 따라 바이오전극의 민감도는 향상될 수 있다.<sup>9</sup> 나노복합체는 기존의 단단한 금속 소재의 한계를 극복하여 기계적 유연성과 전기적인 기능을 동시에 지니며 이러한 특성으로 인해 생체조직과의 밀착성을 극대화하여 바이오전극으로서 활용할 수 있다.

나노복합체는 전도성 나노물질이 탄성중합체 기지에 임계 농도 이상으로 분산되었을 때, 나노물질들이 서로 연속적인 전도성 경로를 형성하여 전기가 흐르기 시작하며 이를 전도성 네트워크(percolation network)라고 한다.<sup>10,11</sup> 나노복합체에 사용되는 나노필러 중 일차원 나노구조인 나노와이어는 구조적으로 높은 충형비를 가지며 탄성중합체와 함께 복합적으로 사용되었을 때 나노와이어는 구부러지고 늘어남에도 견디며 전도성 경로를 유지할 수 있다. 바이오전극 중에서도 은나노와이어 기반 나노복합체가 이상적인 후보로 평가받고 있다. 은나노와이어의 경우에는 은의 특성인 탁월한 전기전도성 덕분에 전도성 경로를 형성하고 바이오전극의 민감도를 올리는 데 중요한 역할을 한다. 은나노와이어의 충형비를 변화시킬 수 있는 합성 조건을 찾기 위한 다양한 합성조건이 개발되었다.<sup>12-15</sup> 가령, Chen et al.의 연구에서는 은 이온의 농도와 질산은 용액의 첨가속도를 변화시켜 충형비를 조절하였으며,<sup>16</sup> Wang et al.은 봉지제와 은의 비율을 조절하고 촉매를 활용하여 충형비를 조절할 수 있음을 보였다.<sup>14</sup> 한편, Guzman et al.은 봉지제의 분자량이 낮을수록 방향성이 없는 입자가 형성됨을 보였다.<sup>17</sup> 이러한 선행연구들을 통해, 은 이온의 농도 및 주입속도, 봉지제의 양과 분자량, 촉매의 존재 여부 등이 높은 충형비를 갖는 나노와이어 합성에 핵심적인 요소임을 확인할 수 있다. 그러나 선행연구에서는 신축성과 전도성이 동시에 우수한 연성 나노복합체에 활용되기 위해 활용될 수 있는 나노와이어의 연구는 체계적으로 이루어지지 않았다.

본 연구에서는 바이오전극에 사용되는 나노물질인 은나노와이어의 합성 메커니즘을 정확히 이해하고, 은나노와이어의 합성 시 조절 가능한 변수(예: 온도, 반응시간, 농도, 첨가제, 공정 조건)들을 변화하며 이로 인해 달라지는 은나노와이어의 특성을 파악하였다. 아울러, 보다 우수한 전기전도성과 신축성을 보이는 나노복합체를 제조하기 위한 조건을 확인하였으며, 최종적으로는 웨어러블 및 임플란터블 디바이스로 활용될 수 있는 예시를 보였다. 특히, 실제 소동물의 심장 신호를 기록하는 과정에서 충형비가 높은 우수한

나노복합체가 심장 신호를 높은 신호-대-잡음비로 기록할 수 있음을 확인하였다.

## 2. 실험

### 2-1. 사용 재료

본 연구에서 사용된 시료인 질산은(silver nitrate), polyvinylpyrrolidone (PVP, average  $M_w \sim 10,000$ ,  $M_w \sim 360,000$ ,  $M_w \sim 1,300,000$ ), 염화구리(Copper (II) chloride)는 Sigma-Aldrich에서 구매하였으며 용매로 활용된 ethylene glycol은 Samchun Chemicals에서 구매하였다.

### 2-2. 연구 방법

은 나노와이어는 폴리올 공정을 이용하여 제작되었다.<sup>18,19</sup> Polyol, 특히 ethylene glycol을 용매로 하여 은 이온을 환원시켜 은 원자 핵을 만들고 이를 단방향 성장시켜 높은 충형비를 가지는 은 나노와이어를 제작하였다(Fig. 1a). 용매 및 환원제는 ethylene glycol로 고정되었으며, 촉매 및 성장유도인자로는 염화구리( $CuCl_2$ )가 활용되었다.<sup>20,21</sup> 은 입자에 성장 방향성을 부여하는 봉지제(capping agent)로는 다양한 분자량의 PVP가 활용되었다.

은 나노와이어는 선행 연구에서 제시한 방법에 따라 합성되었으나, 최적의 조건을 확인하기 위하여 세부 조건은 변경되었다. 은 나노와이어의 합성 과정은 다음과 같다. 깨끗이 세척된 비커에 145.6g의 ethylene glycol을 넣고 PVP 0.38 g을 첨가한 후 오일베이스에서 180 °C의 온도로 교반하며 가열하였다. 이 때, ethylene glycol이 증발하지 않도록 뚜껑을 덮은채로 진행하였다. PVP가 ethylene glycol에 용해되는 동안 ethylene glycol 33.6 g을 튜브에 넣고  $AgNO_3$  0.48g을 용해하였다. 환원제 용액을 먼저 비커 내에 주입하였다.  $AgNO_3$ 가 모두 용해된 이후, 스테어링을 멈춘 상태로 시린지 펌프를 이용하여 180 mL/hr의 속도로 주입하였다. 이 때, 질산은 용액이 주입되는 중에도 비커 내 용액의 전체 온도가 177 °C로 유지되도록 오일 베이스의 출력을 조절하였다. 질산은 용액의 주입이 종료된 이후, 일정 시간동안 반응시간을 주었으며, 이후 비커를 오일 베이스에서 천천히 상온으로 냉각하였다. 합성이 완료된 이후 생성된 은 나노와이어를 에탄올을 이용해 3번 세척하여 불필요한 용매와 PVP를 제거하였다.

제작된 은 나노와이어는 다양한 탄성중합체에 혼입되어 나노복합체로 가공되었다. 이후, 나노복합체의 구조와 물리적 성질은 주사전자현미경(SEM, JEOL, Japan)과 만능시험기(Mark-10, USA)을 이용하여 분석되었다. 전기적 성질은 전자멀티미터(Keithley DMM6500, Tektronix, USA)를 활용하여 분석되었다. 특히, 전기전도성을 측정하기 위해 우선 필름 형태로 제작된 나노복합체의 크기 및 두께를 측정하고 이를 4-point probe로 측정된 면저항 값에 나누어 계산하였다.

### 2-3. 동물실험

동물실험은 동물실험윤리규정과 IACUC 프로토콜을 준수하여 실행되었다 (SNU-221026-2-3). 8주령의 수컷 래트를 isoflurane을 활용해 마취한 후 기관 삽관을 실시하여 인공호흡장치(RoVent Jr. Kent Scientific, USA)에 연결하여 인공 호흡을 유지하였다. 상복부를 절개하고 횡격막을 절단하여 흉강을 노출시키고 심장에 접근하였다. 제작한 전극을 심외막을 제거한 심장 표면에 위치시키고 전기신호

측정장치(PowerLab, AD Instruments, New Zealand)를 이용해 전기생리신호를 측정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3-1. 나노와이어의 합성 메커니즘 설명

전구체인 질산은은 ethylene glycol 용매 내에  $Ag^+$  이온을 공급하며, 촉매인 염화구리는 용매 내에  $Cu^{2+}$  금속 양이온과  $Cl^-$  음이온을 공급한다. Ethylene glycol은 고온에서 산화되면서  $H^+$ 와 전자를 형성하는데, 여기서 만들어진 전자는 용매 내의  $Cu^{2+}$ 와 반응하여  $Cu^+$ 를 형성한다.  $Cu^+$ 는 용매 내의 다른 금속이온인  $Ag^+$ 가  $Ag$  핵( $Ag^0$ )으로 환원되는 것을 돕거나  $Ag$  핵의 표면 성장을 촉진하는데, 특히 결정이 특정방향 {111}으로 성장하는 것을 돕는다(Fig. 1b). 고온의 ethylene glycol은 염화구리가 없어도  $Ag^+$ 를 직접 환원시킬 수도 있지만, 염화구리의 존재 하에서 성장 방향 및 속도가 더욱 강하게 제어될 수 있다.

생성된  $Ag$  핵 표면에는 PVP가 봉지제로 부착되어  $Ag$  핵의 성장 방향을 1D 방향으로 유도한다(Fig. 1c). 생성된  $Ag$  핵의 봉지되지

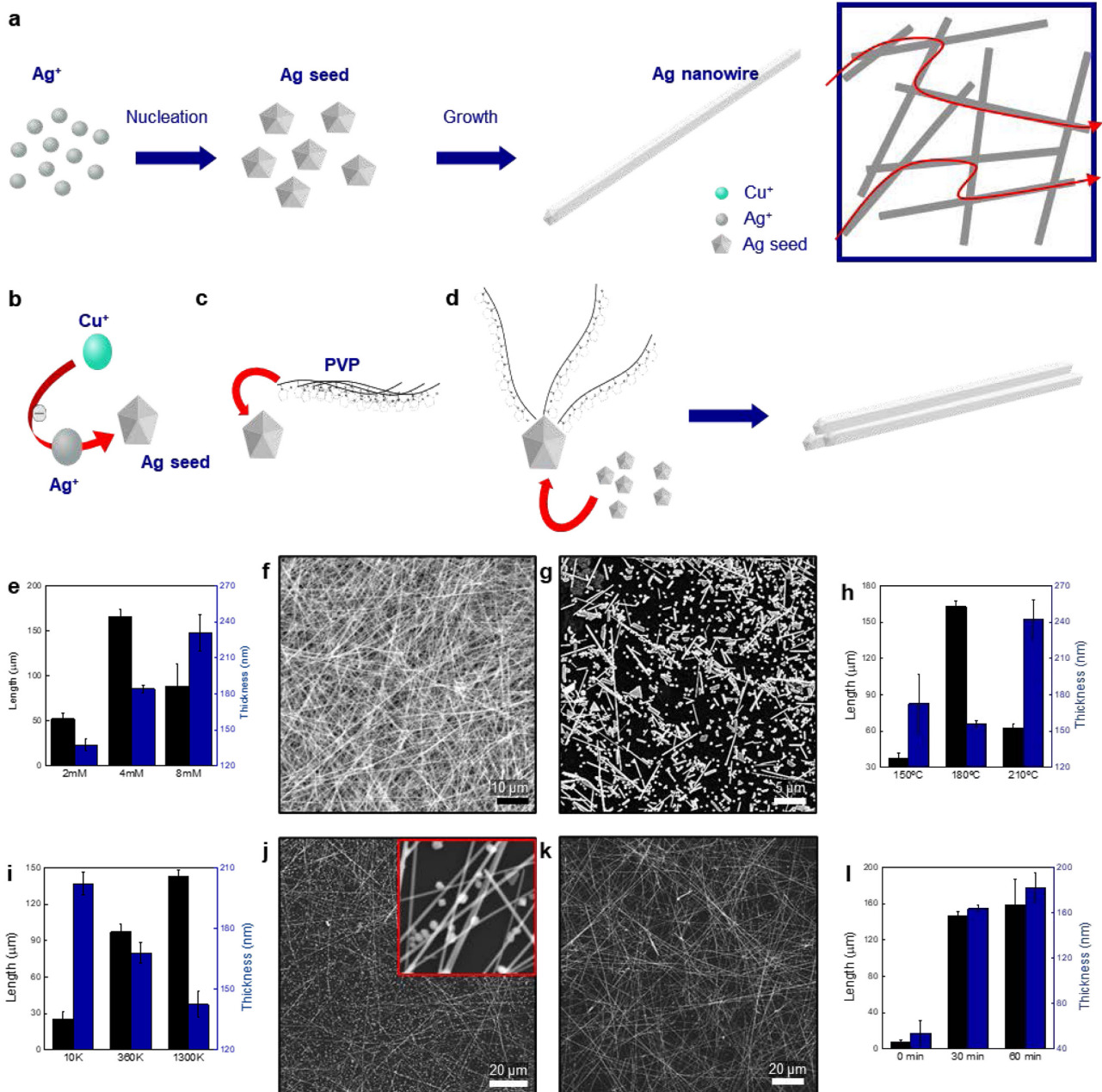


Fig. 1. Synthesis mechanism and optimization of nanowires. a) Synthesis of nanowires and their conductive networks within nanocomposites. b-d) Mechanism of nanowire synthesis. e) Structural changes in silver nanowires with varying concentrations of copper chloride reductant. f) SEM image of optimized silver nanowires synthesized using the optimal concentration of copper chloride reductant. g) SEM image of silver nanowires synthesized with a low concentration of copper chloride reductant. h) Structural evolution of silver nanowires as a function of reaction temperature. i) Structural variation in silver nanowires depending on the molecular weight of the capping agent. j) SEM image of silver nanowires synthesized using a capping agent with a molecular weight of 360K. k) SEM image of silver nanowires synthesized using a very high molecular weight capping agent. l) Structural changes in silver nanowires according to reaction time.

얇은 방향에  $\text{Ag}^+$ 이온이 연속적으로 환원되면서 높은 종횡비를 가지는 은 나노와이어가 만들어진다(Fig. 1d).

### 3-2. 나노와이어 조건 변경에 따른 결과

#### 3-2-1. 촉매 농도 조건

우선, 염화구리 환원제의 농도에 따른 은 나노와이어 종횡비 특성을 비교하였다. Ethylene glycol 용매 내에서 염화구리는  $\text{Cu}^{2+}$ 와  $\text{Cl}^-$ 의 이온 형태로 존재하며,  $\text{Cu}^{2+}$ 는 ethylene glycol과 반응하여  $\text{Cu}^+$ 를 형성한다.  $\text{Cu}^+$ 의 이온화 경향이  $\text{Ag}^+$ 보다 높기 때문에  $\text{Cu}^+$ 는 환원제로서 작용하며  $\text{Ag}^+$ 를 환원하여 Ag 핵( $\text{Ag}^0$ )을 형성한다. 따라서 환원제의 농도가 높아질수록 환원제에 의해 형성되는 Ag 핵의 양이 많아진다(Fig. 1e). 또한, 염화구리에서 제공되는 또다른 이온인  $\text{Cl}^-$  이온은  $\text{AgCl}$ 의 형성을 유도하게 되는데, 이로 인해 과도한 핵이 형성되는 것을 방지하며, Ag 핵의 공급속도를 조절하여 적절하게 핵이 반응시스템 내에 공급되도록 돕는 역할을 한다. 4mM 농도의 염화구리를 활용하였을 경우,  $165.6 \pm 8.74 \mu\text{m}$ 의 길이에  $184.2 \pm 3.24 \text{ nm}$  두께를 가진 은 나노와이어를 형성할 수 있다(Fig. 1f). 만일 촉매의 농도가 적정 농도보다 낮다면 Ag 핵에 비해 PVP의 양이 상대적으로 많아 적은 Ag 핵과 많은 PVP가 반응하여 종횡비가 높은 나노와이어보다는 나노입자(nanoparticle)이나 나노막대(nanorod)가 많이 형성되며, 나노와이어가 형성되더라도 그 길이가 짧고 직경도 얇다(Fig. 1g). 반대로, 촉매의 농도가 지나치게 높으면 Ag 핵의 과도한 형성으로 인해, 충분히 긴 나노와이어로 성장하기 위한  $\text{Ag}^+$ 의 양이 부족해지게 된다. 따라서, 보다 많은 개수의 은 나노와이어가 형성되기는 하지만 이 나노와이어의 길이는 상대적으로 짧아진다. 따라서, 적절한 농도의 촉매를 사용하는 것이 중요하며, 염화구리를 활용한 본 실험에서는 4 mM이 최적 농도였다고 판단된다.

#### 3-2-2. 반응 온도 조건

염화구리 촉매를 사용한 합성조건에서, 반응 온도에 따른 나노와이어의 종횡비 특성을 확인하였다. 반응온도는 ethylene glycol의 산화속도에 영향을 미치며 ethylene glycol의 산화속도는 환원제로 사용되는 금속이온의 형성속도를 결정한다. 적절한 온도( $180 \text{ }^\circ\text{C}$ )의 반응온도에서는 적절한 길이( $162.8 \pm 4.7 \mu\text{m}$ )와 두께( $156.2 \pm 2.6 \text{ nm}$ )를 갖는 은 나노와이어를 얻을 수 있다(Fig. 1h). 그러나, 반응온도가 낮으면 환원제로 사용되는 금속이온의 형성 속도가 느려지며  $\text{Ag}^+$ 의 환원속도가 느려서 Ag 핵의 형성속도가 느려진다. 적은 양의 Ag 핵이 많은 양의 PVP와 반응하면서 Ag NP가 많이 형성되며 짧은 길이( $37 \pm 4.5 \mu\text{m}$ )의 은 나노와이어가 만들어진다. 반대로, 반응속도가 올라갈수록 환원제로 사용되는 금속 이온의 형성 속도가 빨라지며 Ag 핵 또한 과잉 형성된다. 이로 인해 나노와이어를 성장시키기 위한  $\text{Ag}^+$  이온이 부족해서 나노입자 혹은 나노막대의 형성이 많아지고 은 나노와이어의 형성이 적어지거나 약화( $62.3 \pm 4 \mu\text{m}$ )된다.

#### 3-2-3. 봉지제 분자량 조절 조건

봉지제로 활용되는 PVP의 분자량 또한 생성된 나노와이어의 종횡비에 큰 영향을 주는 것으로 확인하였다. 봉지제로 작용하는 PVP의 락탐고리는 Ag 핵의 {100}면에 결합하여 Ag 핵의 특정방향으로의 성장을 유도한다. PVP의 분자량이 낮을수록 Ag 핵의 {100} 결정면에서의 흡착이 약하며 Ag 핵의 방향적 선택성을 약화시킨다

(Figure 1i). 이로 인해, 나노와이어 보다는 나노입자나 두께가 두꺼운 나노막대가 많이 형성된다. 가령, 10K의 분자량을 가지는 PVP를 사용하여 합성을 진행하였을 경우 생성된 나노와이어의 길이와 두께는 각각  $25.6 \pm 6.2 \mu\text{m}$ 와  $202.3 \pm 5.8 \text{ nm}$ 로 관찰되었다. 반대로, PVP의 분자량이 높아질수록 Ag 핵의 {100} 결정면에 더 효과적인 흡착이 가능하며 이로 인해 Ag 핵은 {111} 결정면 방향으로의 성장이 유도되며 Ag NW가 형성된다. 360K의 PVP를 사용한 경우, 길이  $97.2 \pm 6.2 \mu\text{m}$ , 두께  $167.9 \pm 5.1 \text{ nm}$ 의 나노와이어가 형성되었으며(Fig. 1j), 1300K의 분자량을 가지는 PVP를 활용한 경우, 길이  $142.8 \pm 5.2 \mu\text{m}$ , 두께  $142.4 \pm 6.4 \text{ nm}$ 의 나노와이어가 형성되었다. 특히, 1300K를 사용하였을 경우, 부산물로 형성되는 나노입자의 양이 가장 적은 모습을 보여주었다(Fig. 1k).

#### 3-2-4. 반응 시간 조절 조건

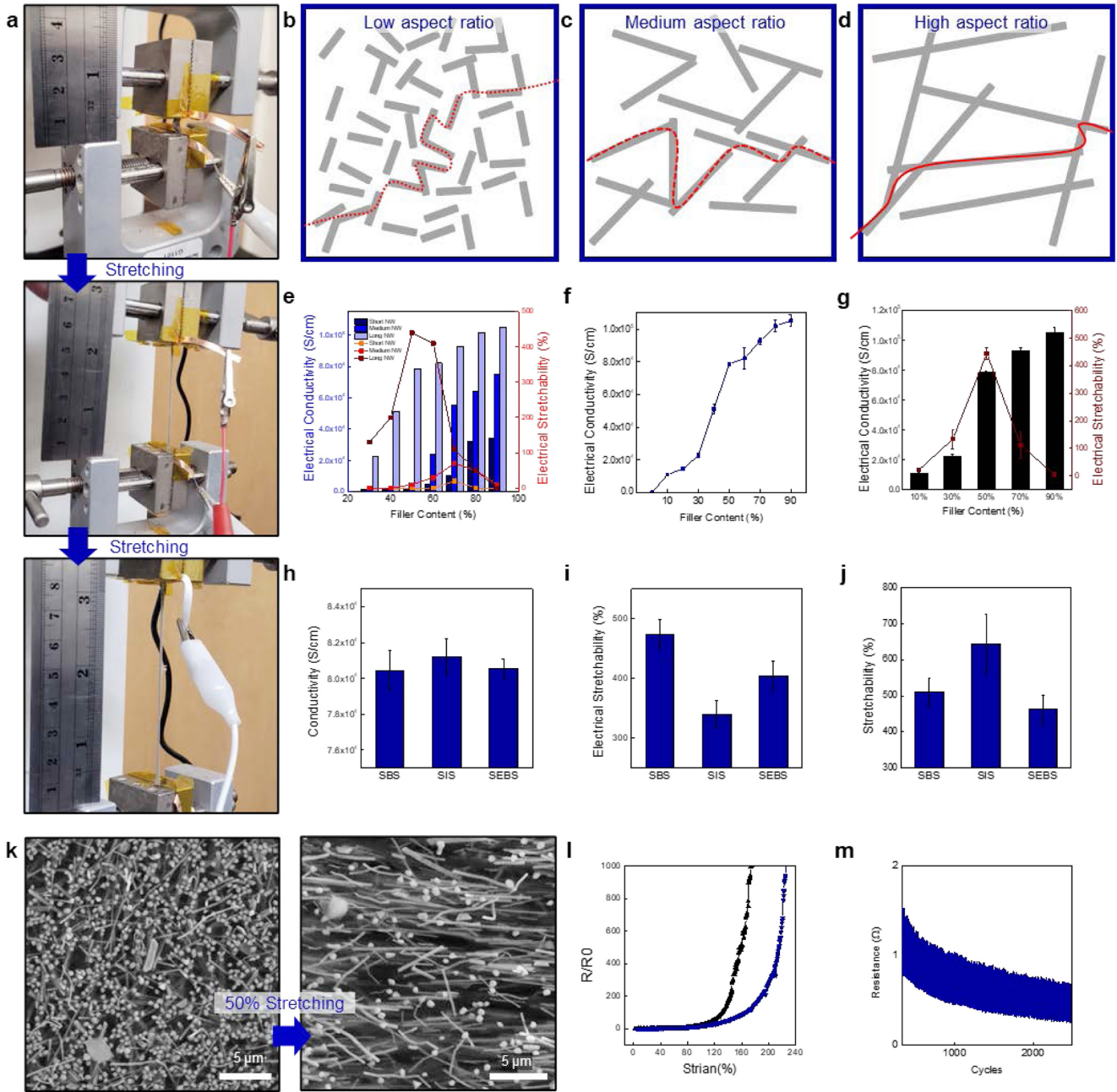
반응온도가 일정하게 유지되는 시간이 길어질수록 Ag 핵의 형성 및 성장의 속도는 균일하게 유지되며, 반응시간이 길어질수록 나노와이어의 길이 및 직경이 성장함을 의미한다. 반응시간이 충분히 주어지지 않았을 경우, 형성되는 Ag 핵의 양이 적으므로, ethylene glycol 내의  $\text{Ag}^+$  이온이 충분히 반응하지 못하여 나노와이어가 충분히 성장하지 못하게 된다(Fig. 1l). 가령, 주입 종료 이후 반응시간을 주지 않고 곧바로 냉각을 진행한 경우, nanowire는 거의 생성되지 못하였으며, 생성된 나노와이어의 길이와 두께도 각각  $7.6 \pm 2.6 \mu\text{m}$ 와  $53.7 \pm 11.1 \text{ nm}$  정도에 그쳤다. 약 30분 정도의 반응시간이 주어진 경우,  $146.4 \pm 4.7 \mu\text{m}$ 의 길이와  $163.9 \pm 3.1 \text{ nm}$  정도로 적절한 길이의 나노와이어가 합성되었다. 반응시간이 과도하게 주어졌을 때는 ethylene glycol내의  $\text{Ag}^+$  이온이 모두 반응하여 적절한 반응시간을 주었을 때와 비교하여 생성된 나노와이어의 구조에 유의미한 차이가 없음을 확인하였다(길이  $158.2 \pm 28.8 \mu\text{m}$ , 두께  $182.5 \pm 13 \text{ nm}$ ).

### 3-3. 나노복합체의 제작, 기계적, 전기적 특성 확인

나노복합체 형성을 위해 최적화된 나노와이어 합성 조건을 확인하였으므로, 나노와이어를 탄성중합체에 분산시키고 나노복합체를 형성하였다. 나노와이어와 탄성중합체의 양을 조절하여 제작한 용액을 테플론 몰드 내에 담지하고  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 의 대류순환건조기에서 건조하여 나노복합체 필름을 제작하였다. 이렇게 제작한 나노복합체를 전자멀티미터에 연결하여 전기전도성을 측정하면서 만능시험기를 활용해 단방향 신장시켜, 나노복합체의 전기적, 기계적 특성을 동시에 분석하였다(Fig. 2a).

#### 3-3-1. 종횡비에 따른 나노복합체의 물성 비교

탄성중합체 나노복합체의 전기전도성은 탄성중합체 기질 내에 분산된 나노필러들이 연결되어 형성하는 전도성 네트워크에 의해 결정된다(Figs. 2b-d). 따라서, 탄성중합체 내에서 무작위로 분산된 나노필러들이 얼마나 효과적으로 서로 접촉하고 있는지가 탄성중합체 나노복합체의 초기 전기전도성과 변형에 대한 민감성과 내구성을 결정하게 된다. 가령, 종횡비가 낮은 나노물질을 사용할 경우, 나노물질 간의 네트워크를 형성하기 어려우므로 많은 양의 나노물질을 필요로 하게 되며, 이렇게 제작된 나노복합체 또한 변형에 취약해 쉽게 전기전도성을 상실하게 된다. 또한, 전자 전달 과정에서 많은 나노필러를 통과해 지나가므로 필러 간 전도로 인한 접촉 저



**Fig. 2.** Performance evaluation of nanocomposites fabricated using silver nanowires. a) Image depicting the analysis of a nanocomposite film using a universal testing machine. b–d) Comparison of conductive network efficiency when utilizing nanowires with low, medium, and high aspect ratios. e) Comparison of electrical conductivity and electrical stretchability as a function of nanofiller aspect ratio. f) Percolation threshold graph of the nanocomposite fabricated using high-aspect-ratio nanowires. g) Graph of electrical conductivity and electrical stretchability of the nanocomposite fabricated using high-aspect-ratio nanowires. h–j) Graphs comparing electrical conductivity, electrical stretchability, and mechanical stretchability of nanocomposites prepared using various elastomers. k) SEM image of the nanocomposite, before (left) and after (right) 50% stretching. l) Strain-conductivity curve of the nanocomposite with medium aspect ratio nanowire (black) and high aspect ratio nanowire (blue). m) Cyclic test of nanocomposite conductivity under 30% strain.

항의 영향을 크게 받아 낮은 전기전도성을 띄게 될 것으로 기대할 수 있다(Fig. 2b). 반면, 종횡비가 높은 나노물질을 활용할 경우, 나노물질 간의 네트워크 형성이 비교적 쉬우므로, 전도성 네트워크 형성을 위해 많은 양의 나노필러가 필요로 하지 않으며, 변형에도 비교적 강한 내구성을 가질 수 있다. 또한, 필러 간 전도보다는 필러 내 전도의 비중이 더욱 높아지므로 높은 초기 전기전도성을 보일 수 있을 것으로 기대할 수 있다(Fig. 2d).

나노필러의 양이 적다면 전도성 네트워크가 형성되지 않으므로, 전기전도성은 낮게 측정된다. 필러의 양을 조금씩 증가시키면서 전기전도성을 측정할 경우, 전기전도성이 가파르게 증가하는 구간이 있는데, 이때의 필러 함량을 전도 임치(percolation threshold)라고 부르게 되며, 이 구간 이후부터 전도성이 있다고 표현한다. 전도 임치를 넘어서 필러의 양을 더욱 증가시킬 경우, 이미 네트워크가 충분히 생성되었기 때문에, 전도성의 증가 폭은 크게 감소한다. 전도

역치를 넘어설 경우, 필러가 복합체 내부에 과량으로 존재하게 되어 탄성체 네트워크 구조의 형성을 방해하므로, 기계적 성질이 크게 악화된다. 따라서, 우수한 나노복합체를 얻기 위해서는 적은 양의 필러를 활용하여 전도역치를 얻을 수 있는 조건을 확인하여야 한다. 이를 확인하기 위해, 낮은 중형비(약 200)와 중간 중형비(약 400), 그리고 높은 중형비(약 1000)를 가지는 나노와이어를 이용하여 나노복합체를 제작하고 그 필러 함량에 따른 전기적 성질을 분석하였다(Figs. 2e and f).

낮은 중형비의 나노와이어를 활용한 경우, 전도 역치는 약 80%로 확인되었으며, 그 때의 전기전도성은 32,000 S/cm로 확인되었다. 변형에 대한 민감성은 매우 높게 확인되어, 70% 함량에서만 겨우 20%의 인장을 버틸 수 있는 것으로 확인되었다. 중간 중형비 나노와이어를 활용한 경우, 전도 역치는 70%에서 나타났으며, 이 때의 전기전도성은 55,000 S/cm로 계산되었다. 나노복합체는 70%에서 70%의 인장을 견딜 수 있었다. 높은 중형비 나노와이어를 활용한 나노복합체는 50%의 함량에서 전도 역치를 보였으며, 이 때의 전기전도성은 78,580 S/cm로 확인되었다. 전도 역치에서 이 나노복합체는 440%의 인장에도 불구하고 전기전도성을 보일 수 있어, 매우 우수한 전기전도성과 전기적 안정성을 동시에 보이는 것을 확인할 수 있었다.

높은 중형비 나노필러에 대한, 필러 양에 따른 전기전도성 변화는 Fig. 2(g)에 제시되어 있다. 필러 함량이 높아질수록 당연히 전기전도성은 높아지는 것으로 확인할 수 있다. 그러나 필러 함량이 지나치게 높아지면 과도하게 밀집된 나노필러가 탄성중합체 기질의 형성과 유지를 방해하므로 나노복합체 자체가 형성되지 않거나 인장에 취약해진다. 따라서, 나노복합체를 이용하여 활용성 높은 유연성 전자소자를 제작하기 위해서는 전도 역치 수준의 필러 함량을 유지하면서 나노복합체를 제작할 필요가 있다.

### 3-3-2. 탄성중합체 종류에 따른 나노복합체의 성능 분석

나노복합체의 기계적, 전기적 성능은 또한 탄성중합체 기질의 종류에 따라 달라질 수 있다. 다양한 탄성중합체 중에서 이 연구에서는 탄성중합체 나노복합체 제작에 최적화되어 있는 styrene 기반의 블록 공중합체를 활용하여 진행하였다. 높은 중형비를 가지는 나노와이어를 poly(styrene-butadiene-styrene) (SBS), poly(styrene-isoprene-styrene) (SIS), 그리고 poly(styrene-ethylene-butadiene-styrene) (SEBS) 탄성중합체에 각각 50%의 필러 함량으로 분산시켜 나노복합체를 제작하고 그 물성을 비교하였다.

우선, 탄성중합체 사이의 전기전도성을 측정하여 보았으나, SBS 나노복합체는 80,440±1,101.6 S/cm, SIS 나노복합체는 81,220±1015.1 S/cm, 그리고 SEBS 나노복합체는 80,560±523.1 S/cm로, 탄성중합체 종류에 따른 전기전도성의 차이는 유의미하지 않았다(Fig. 2h). 그러나, 변형에 대한 전기적 내구성과 기계적 물성에서는 차이를 보였다. 전기적 성능을 유지할 수 있는 최대 신축성은 SBS가 가장 우수하였으며, SIS가 가장 불량하였다(Fig. 2i). 기계적으로 손상되지 않는 최대 신축성의 경우에는 SIS가 가장 우수하였으며, SEBS가 가장 불량하였다(Fig. 2j). 이와 같은 결과를 통해, 현재 비교한 세 가지의 블록 공중합체 중에서는 전기적 물성에 큰 차이를 보이지 않았으나, 극한의 신축성을 요구하는 경우에는 SBS를 활용하는 것이 가장 적절함을 확인할 수 있었다.

### 3-3-3. 나노복합체의 기계적-전기적 성능 분석

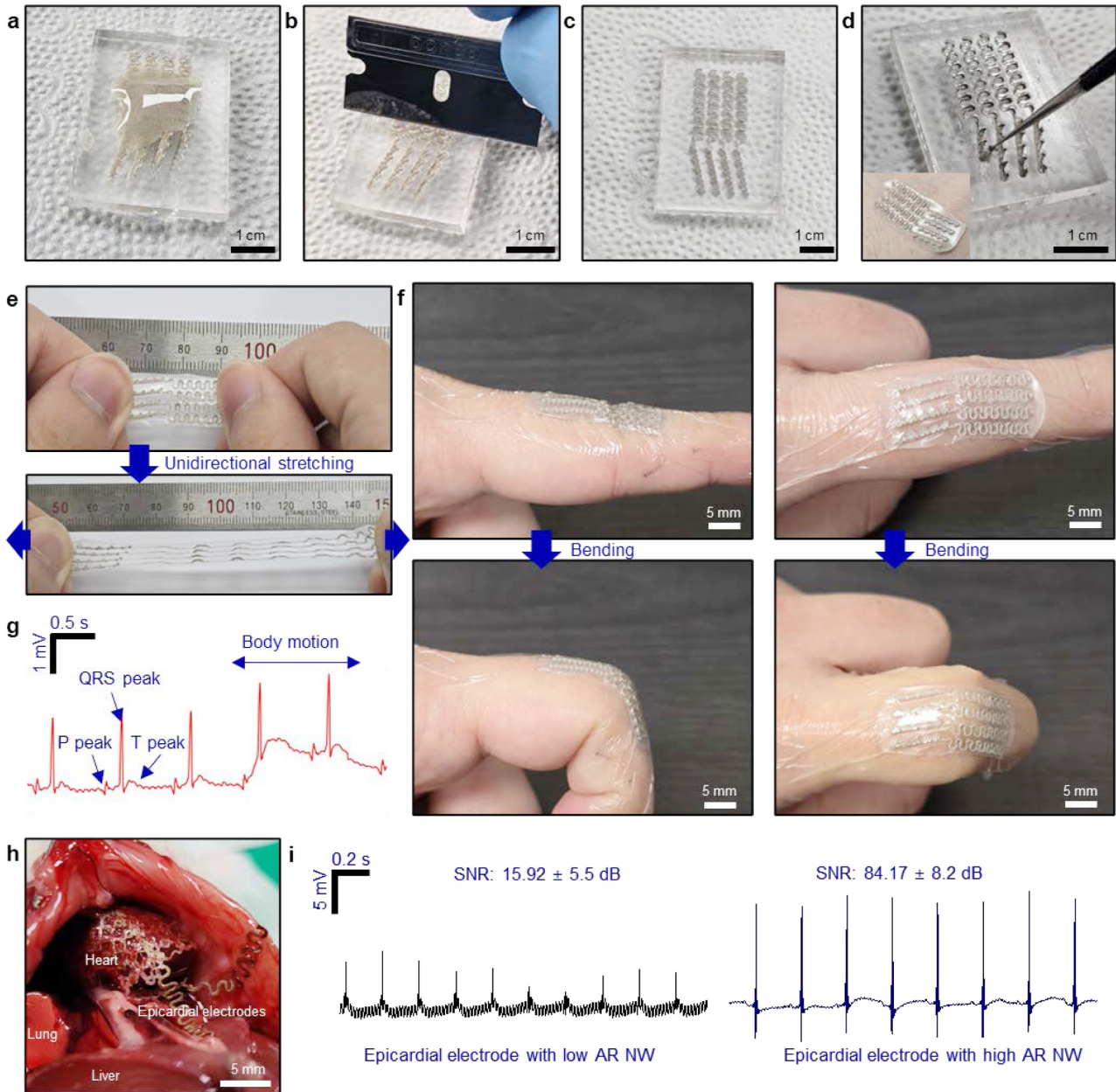
제작한 나노복합체의 기계적-전기적 성능을 분석하기 위해 인장을 가하기 전과 후의 SEM 이미지를 분석하였다(Fig. 2k). 널리 알려진 바와 같이, 전도역치의 필러 함량에서 제작된 나노복합체에 50%의 인장을 가하였을 경우, 나노필러는 탄성중합체 매트릭스 내에서 성공적으로 재배열되어 전기적 전도성을 유지하면서도 구조의 변형을 유지할 수 있음을 확인하였다. 기계적 인장에 대한 전기적 내구성을 확인하기 위해 중간 중형비의 나노와이어와 높은 중형비의 나노와이어를 활용하여 각각 전도역치의 필러 함량을 가지는 나노복합체를 제작하고, 여기에 인장을 가하면서 초기 저항 대 저항 변화를 측정하였다(Fig. 2l). 중간 중형비 나노와이어(검정)의 경우, 120% 정도의 인장에서부터 저항 변화가 크게 나타난 반면, 높은 중형비의 나노와이어(파랑)의 경우, 200% 인장까지 안정된 저항변화를 보이다 그 이후부터 큰 폭으로 변화하는 것을 확인하였다. 또한, 나노복합체의 기계적 안정성을 확인하기 위해 반복 인장 시험을 실시하였다(Fig. 2m). 높은 중형비의 나노와이어를 활용한 복합체는 30%의 인장을 2600회 이상 버티는 것을 보여주어, 생체에서 안정적으로 기능할 수 있는 생체전극으로서의 활용 가능성이 있음을 보여주었다.

### 3-4. 나노복합체를 활용한 웨어러블 센서

상기 논의하여 본 바를 활용하여, 중형비를 최적화한 나노와이어와 SBS 탄성중합체의 조성으로 웨어러블 센싱 전극을 제작하였다(Figs. 3a-d). Polydimethylsiloxane (PDMS)를 활용하여 서펜타인 구조를 가진 음각 몰드를 제작하고, 내부에 은 나노와이어/SBS 나노복합체 용액을 점적하여 블레이드 코팅을 진행하였다. 건조가 완료된 이후 3-4회 블레이드 코팅을 반복 진행하면 300 μm 넓이를 가지는 서펜타인 전극을 제조할 수 있다. 은 나노와이어/SBS를 조합한 나노복합체는 앞 장에서 확인한 바와 같이 최대 450% 신축이 가능하였으며, 특히 서펜타인 구조를 지니고 있는 나노복합체 역시 약 500%까지 신축할 수 있었다(Fig. 3e). 이 전극을 Tegaderm film과 함께 손가락 피부에 부착하였을 때 밀착될 수 있었으며, 손가락을 구부렸을 때 도 안정적으로 접촉을 유지할 수 있었다(Fig. 3f). 실제로 이 전극을 상용화된 생체신호처리장치(PowerLab, AD Instrument, New Zealand)에 연결하여 피부 위에서 심전도를 측정하였다(Fig. 3g).<sup>22</sup> 심장 파의 대표적인 신호(P peak, QRS peak, T peak) 등을 모두 확인할 수 있었고, 신체의 움직임에도 불구하고 안정적으로 기록할 수 있었다.

### 3-5. 나노복합체를 활용한 임플란터블 센서

위에서 언급한 바와 동일한 방법을 활용하여 소동물의 심장에 적용할 수 있는 임플란터블 심장 센서를 제작하였다. 두 가닥의 전극으로 구성된 이 심장센서는 래트(Sprague-Dawley rat)의 심장에 표면에 부착되어 심장 전기생리신호를 측정할 수 있었다. 래트의 심장은 초당 5-6회 정도로 매우 빠르게 진동하므로, 진동에 둔감한, 신축성이 우수한 전극이어야 심장 신호를 올바르게 기록할 수 있었다(Fig. 3h). 이를 확인하고자 전극은 낮은 중형비를 가지는 나노와이어를 활용한 전극(AR < 200)과 높은 중형비를 가지는 나노와이어를 활용한 전극(AR > 400) 전극, 두 가지로 나누어 제작되었다. 두 전극 모두 심장 표면에서의 전기생리신호를 기록할 수 있었으나, 낮은 중형비의 전극의 경우, 신호의 크기가 작고, 심각한 전기 노이즈를 기록함을 확인할 수 있었다(Fig. 3i). 반면, 높은 중형비의 전



**Fig. 3.** Fabrication of nanocomposites for use as wearable electrodes. a–d) Blade-coating method utilizing a PDMS mold. e) Stretchability test of the fabricated nanocomposite electrode. f) Deformation test of the electrode conformally attached to the skin. g) Electrocardiogram (ECG) recording obtained from the nanocomposite electrode attached to the skin. h) Optical image of the nanocomposite electrode mounted on the rat heart. i) Epicardial electrogram of the rat recorded with electrode with low aspect ratio nanowire (left) and high aspect ratio nanowire (right).

극의 경우, 신호의 크기도 비교적 크고 노이즈의 크기도 작아, 선명한 심장 신호를 확인할 수 있었다. 계산된 신호-대-잡음비는 15.92±5.5dB 대 84.17±8.2dB 수준으로, 높은 종횡비의 나노와이어를 활용한 전극이 전기생리신호를 효과적으로 기록할 수 있으며, 낮은 크기의 신호를 검지하여 증상의 진단 및 예방에 중요한 역할을 할 수 있을 것으로 기대할 수 있다. 다만, 이 실험에서 활용한 은 나노와이어는 체내에서 산화되어 세포독성을 가지는 은 이온을 생성하므로 체내 삽입형 전자재료로는 적절하지 않다. 이를 극복하기 위해 은 나노와이어의 표면을 금이나 백금 등의 생친화성이 우수한 전도성 금속으로 도금하여 코어-셸 구조를 만드는 방법이 광범위하게 제시되고

있으며, 본 연구에서 제시된 심장 전극 역시 이 금-도금 코어-셸 나노와이어를 활용하여 제작되었다.<sup>22,23</sup> 다만, 이 연구에서의 주제를 벗어나는 내용이므로 은 나노와이어의 생친화성 증진 전략은 이 연구에서는 다루지 않았다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 웨어러블 및 임플란터블 바이오전극으로 활용될 수 있는 탄성중합체 나노복합체를 만들기 위해 활용되는 은 나노와이어를 제작하기 위한 공정을 검토하였다. 기존 연구와 달리, 특히,

신축성 나노복합체에 최적화된 나노와이어의 생성 공정을 확인하고자 하였으며, 실제 심장신호를 기록하여 높은 중횡비의 나노와이어를 가지는 나노복합체의 생체 전극으로서의 활용 가능성을 검토하였다. 보다 구체적으로는, 전도성과 신축성을 동시에 가지는 나노복합체를 제작하기 위해 높은 중횡비를 가지는 나노와이어를 제작하는 것을 목표로 하였으며, polyol 기반 합성공정에서 촉매의 농도, 봉지제, 반응온도, 그리고 반응시간 등을 조정하여 최적의 합성 조건을 탐색, 검토하였다. 아울러, 제작된 나노와이어의 중횡비에 따라 생성된 나노복합체가 어떠한 전기적, 기계적 특성을 가지는지를 확인하였다. 또한, 이를 통해 실제 간단한 웨어러블 전극을 제작하고 이를 활용하여 피부 표면에서 심전도를 성공적으로 기록할 수 있음을 확인하였다. 마지막으로, 체내 삽입가능한 전기생리센서를 제작하고 이를 통해 심장 신호의 신호-대-잡음비를 측정하여 높은 중횡비를 가지는 나노와이어가 실제로 우수한 전기생리신호를 기록할 수 있음을 확인하였다.

## 감 사

이 연구는 국립금오공과대학교 대학 연구과제비로 지원되었음 (2024-2026).

## References

- Sunwoo, S. H., Han, S. I., Joo, H., Cha, G. D., Kim, D. K., Choi, S. H., Hyeon, T. G. and Kim, D. H., "Advances in Soft Bioelectronics for Brain Research and Clinical Neuroengineering," *Matter* **3**, 1923(2020).
- Kim, H. J., Sunwoo, S. H., Koo, J. H. and Kim, D. H., "Soft Implantable Bioelectronics for the Management of Neurological Disorders and Cardiovascular Diseases," *Korean Journal of Chemical Engineering* **42**, 2037-2068(2025).
- Sunwoo, S. H., Ha, K. H., Lee S. K., Lu, N. S. and Kim, D. H., "Wearable and Implantable Soft Bioelectronics: Device Designs and Material Strategies," *Annu. Rev. Chem. Biomol. Eng.*, **12**, 359-391(2021).
- Lim, C., Hong, Y., Jung, J., Shin, Y. S., Sunwoo, S. H., Balk, S. M., Park, O. K., Choi, S. H., Hyeon, T. G., Kim, J. H., Lee, S. K. and Kim, D. H., "Tissue-like Skin-device Interface for Wearable Bioelectronics by Using Ultrasoft, Mass-permeable, and Low-impedance Hydrogels," *Sci. Adv.*, **7**, eabd3716(2021).
- Shin, Y., Lee, H. S., Hong, Y., Sunwoo, S. H., Park, O. K., Choi, S. H., Kim, D. H. and Lee, S. K., "Low-impedance Tissue-device Interface Using Homogeneously Conductive Hydrogels Chemically Bonded to Stretchable Bioelectronics," *Sci. Adv.*, **10**, eadi7724 (2024).
- Park, C., Kim, M. S., Kim, H. H., Sunwoo, S. H., Jung, D. J., Choi, M. K. and Kim, D. H., "Stretchable Conductive Nanocomposites and Their Applications in Wearable Devices," *Appl. Phys. Rev.*, **9**, 021312(2022).
- Sunwoo, S. H., Han, S. I., Park, C. S., Kim, J. H., Georgiou, J. S., Lee, S. P., Kim, D. H. and Hyeon, T. G., "Soft Bioelectronics for the Management of Cardiovascular Diseases," *Nat. Rev. Bioeng.*, **2**, 8-24(2024).
- Park, J., Choi, S., Janardhan, A. H., Lee, S. Y., Raut, S., Soares, J., Shin, K. S., Yang, S., Lee, C. K., Kang, K. W., Cho, H. R., Kim, S. J., Seo, P. S., Hyun, W. J., Jung, S. M., Lee, H. J., Lee, N. H., Choi, S. H., Sacks, M., Lu, N., Josephson, M. E., Hyeon, T. G., Kim, D. H. and Hwang, H. J., "Electromechanical Cardioplasty Using A Wrapped Elasto-conductive Epicardial Mesh," *Sci. Transl. Med.* **8**, 344ra86(2017).
- Cho, K. W., Sunwoo, S. H., Hong, Y. J., Koo, J. H., Kim, J. H., Baik, S., Hyeon, T. and Kim, D.-H., "Soft Bioelectronics Based on Nanomaterials," *Chem. Rev.*, **122**, 5068(2022).
- Choi, S. J., Park, J. K., Hyun, W. J., Kim, J. W., Kim, J. M., Lee, Y. B., Song, C. Y., Hwang, H. J., Kim, J. H., Hyeon, T. G. and Kim, D. H., "Stretchable Heater Using Ligand-Exchanged Silver Nanowire Nanocomposite for Wearable Articular Thermotherapy," *ACS Nano*, **9**, 6626(2015).
- Choi, S. J., Han, S. I., Kim, D. K., Hyeon, T. G. and Kim, D. H., "High-performance Stretchable Conductive Nanocomposites: Materials, Processes, and Device Applications," *Chem. Soc. Rev.*, **48**, 1566(2019).
- Pan, C. T., Yang, T. L., Hung, K. H. and Ju, S. P., "A parametric Study on Synthesis of Ag Nanowires with High Aspect Ratio," *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, **28**, 12415(2017).
- Amirjani, A., Marashi, P., and Fatmehsari, D., "The Effects of Physicochemical Parameters on the Synthesis of Silver Nanowires Via Polyol Method," *Int. Nano Lett.*, **4**, 108(2014).
- Wang, X. M., Chen, L., Sowada, E., Rodriguez, R. D., Sheremet, E., Yu, C. M., Baumann, R. R. and Chen, J. J., "Ultra-Uniform and Very Thin Ag Nanowires Synthesized via the Synergy of Cl<sup>-</sup>, Br<sup>-</sup> and Fe<sup>3+</sup> for Transparent Conductive Films," *Nanomaterials*, **10**, 237 (2020).
- Peng, S., Cao, F., Jin, L., Jin, L. M., Tang, Y. K., Chen, S. Y., Wang, W. W., Wang, D., Gan, Z. P. and Shan, C. L., "Preparation of Silver Nanowires with High Aspect Ratio and Influence of Reaction Conditions on the Morphology Size," *J. Nanosci. Nanotech.*, **18**, 3012(2018).
- Chen, T., Wang, H., Yang, H. and Guo, X., "Synthesis and Characterizing of High Aspect Ratio Silver Nanowires by Polyol Process," *Key Eng. Mater.*, **768**, 75(2018).
- Guzman, N. and Balela, M., "CuCl<sub>2</sub>-Mediated Synthesis of Silver Nanowires for Flexible Transparent Conducting Films," *MATEC Web Conf*, **27**, 03007(2015).
- Hemmati, S., Harris, M. T., and Barkey D. P., "Polyol Silver Nanowire Synthesis and the Outlook for a Green Process," *J. Nanomater.*, **2020**, 9341983(2020).
- Coskun, S., Aksoy, B., and Unalan, H. E., "Polyol Synthesis of Silver Nanowires: An Extensive Parametric Study," *Cryst. Growth Des.*, **11**, 4963-4969(2011).
- Huang, Z., Xu, J., Zhong, Q., Liu, G., Wu, T., Lin, T. and He, P., "Low-temperature Polyol Synthesis of Millimeter-scale-length Silver Nanowires Enabled by High Concentration of Fe<sup>3+</sup> for Flexible Transparent Heaters," *Mater. Today Chem.*, **30**, 101569(2023).
- Jhansi, K., Thomas, N., Neelakatan, L. and Swaminathan, P., "Controlling the Aspect Ratio of Silver Nanowires in the Modified Polyol Process," *Mater. Lett.*, **344**, 134396(2023).
- Sunwoo, S. H., Han, S. I., Jung, D. J., Kim, M. S., Nam, S. H., Lee, H. J., Choi, S. J., Kang, H. J., Cho, Y. S., Yeom, D. H., Cha, M. J., Lee, S. H., Lee, S. P., Hyeon, T. G. and Kim, D. H., "Stretchable Low-Impedance Conductor with Ag-Au-Pt Core-Shell-Shell

- Nanowires and in Situ Formed Pt Nanoparticles for Wearable and Implantable Device;’ *ACS Nano*, **17**, 7550-7561(2023).
23. Choi, S. J., Han, S. I., Jung, D. J., Hwang, H. J., Lim, C. H., Bae, S. C., Park, O. K., Tschabrunn, C. M., Lee, M. C., Bae, S. Y., Yu, J. W., Ryu, J. H., Lee, S. W., Park, K. P., Kang, P. M., Lee, W. B., Nezafat, R., Hyeon, T. G. and Kim, D. H., “Highly Conductive, Stretchable and Biocompatible Ag–Au Core–sheath Nanowire Composite for Wearable and Implantable Bioelectronics;’ *Nat. Nanotech.*, **13**, 1048(2018).

**Authors**

**Jae Won Choi:** Researcher, Department of Chemical Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Gumi 39177, Korea; 20211185@kumoh.ac.kr

**Sung-Hyuk Sunwoo:** Assistant Professor, Department of Chemical Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Gumi 39177, Korea; shsunwo@kumoh.ac.kr