

나노 입자 헤테로 구조 기반 고성능 우주용 웨어러블 스트레인 센서 개발

Designing nanocrystal heterostructures to fabricate high performance wearable strain sensors for aerospace development

1. 서론

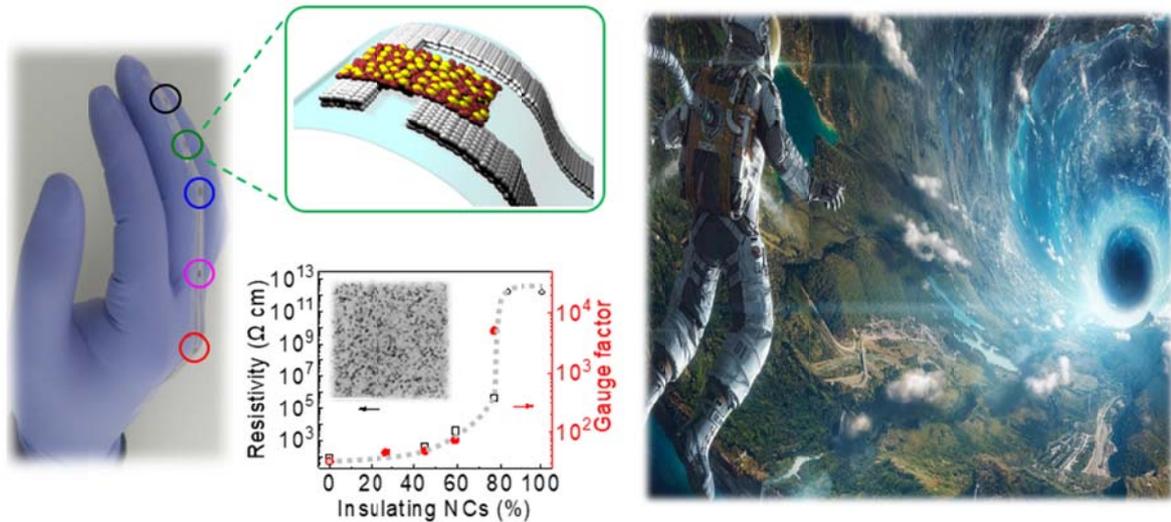
우주 과학은 IT 기술, 로켓 기술, 첨단 소재기술 등의 기술적 수단을 물리학, 수학, 화학, 생태학 등의 과학적 지식에 융합시킨 선진국형 지식집약산업이다. 우주 연구는 지속적으로 장기적인 투자, 대규모 투자자금이 요구되며 성공 가능성이 낮아 고위험 산업으로 분류된다. 그러나 기술 개발과 시장 진출에 성공하면 타 산업에 비해 부가가치와 파급효과가 막대하므로 전세계적으로 우주 연구의 중요성이 급증하고 있는 추세이다.

성공적인 우주 개발을 위해선, 우주비행사의 안전 및 건강 확보가 최우선 과제이며, 이를 위해 국내외에서 다양한 연구가 수행되고 있다. 그러나 우주비행사가 선외 작업을 하는 도중 우주복에 구멍이 나거나 결함으로 인해 우주선이 대기권 진입 중 폭발하는 등, 철저히 관리되는 우주선 및 우주 비행사의 안전 관리 시스템에도 불구하고 예기치 않은 사고가 다수 발생하고 있다. 뿐만 아니라, 장시간 지구와 다른 환경에서 근무하는 우주비행사의 건강관리가 무엇보다 중요한데, 우주비행사의 건강상태를 실시간으로 모니터링하여 질병 예방 및 조기치료를 할 수 있는 시스템 구축에 대한 연구는 미미한 상황이다.

웨어러블(wearable) 스트레인(strain) 센서는 우주비행사의 작업 안정성 확보 및 체계적인 건강 관리 시스템 구축에 효과적으로 적용할 수 있는 소자이다. 스트레인 센서는 피부에 바로 부착해, 사람-기계 인터페이스(human-machine interface)에 적용하여, 사람의 동작, 음성을 인식해 손쉽게 기계를 제어할 수 있어 위험한 우주선 외 작업을 기계가 대체할 수 있게 해준다. 또한, 혈압, 맥박, 호흡 등 생체 신호를 읽어낼 수 있어 헬스케어 시장에서 최근 각광받고 있는 핵심 기술 중 하나로써 우주비행사의 실시간 건강관리를 가능하게 한다. 뿐만 아니라, 우주선 내외의 균열을 조기에 감지해 내어 우주선 폭발사고 등을 미연에 방지할 수 있다.

본 연구는 Au 나노입자박막에 CdSe 나노입자를 첨가시켜 금속-절연체 헤테로(hetero) 구조를 형성함으로써 고성능 웨어러블 스트레인 센서를 구현했다. 이러한 헤테로 구조에서, Au 나노입자는 percolation 경로를 형성하며, CdSe 나노입자는 불순물로서 절연체 역할을 하여, 금속-절연체 비율을 조절한다. 금속-절연체 이중구조에서, 금속 성분이 증가할수록 전도도가 증가하게 되고, 특히 percolation 임계점(threshold)을 넘어서게 되면 급격한 저항 감소를 보인다. Percolation 임계점 근처에서, 이러한 시스템은 외부 스트레인과 같은 자극에 급격한 저항 변화를 보이게 되며, 이런 원리를 응용하여 금속-절연체 나노입자 스트레인센서를 제작해 민감도를 높였다. 뿐만 아니라 나노크랙(nanocrack)을 인위적으로 박막 내에 형성시켜 percolation 경로의 수를 추가적으로 조절하여 센서의 민감도를 더욱 높였다. 위의 두 전략을 통해 나노입자 기반 스트레인센서 최고 민감도인, 게이지 팩터(gauge factor, 스트레인 센서의 민감도) 5000을 달성하였다. 이 스트레인센서는 높은 안정성, 내구성, 민감도, 재현성을 보였고, 우주환경 내 상황인 극저온, 고진공에서도 안정적으로 작동하였다. 마지막으로 나노입자, 용액공정 기반 멀티-어레이 웨어러블 스트레인센서를 제작하여, 손가락 움직임을 측정하는 것은 물론, 손목 맥박 측정, 목소리 인식 등에 성공적으로 응용하였다. 이와 같은 사람의 동작, 목소리 인식은 추 후 기계-사람 인터

페이스에 적용되어 위험한 우주선 내외의 작업을 기계가 대체하여 우주인의 안전성을 확보할 수 있을 것으로 예상된다. 뿐만 아니라 웨어러블 스트레인 센서를 이용한 맥박 측정은 우주인의 건강상태를 실시간으로 측정하여 각종 질병예방에 도움이 될 수 있을 것으로 보인다. 따라서 본 연구결과는, 저가형 고성능 전자피부 및 웨어러블 소자관련 연구에 막대한 파급효과를 미치는 것은 물론, 우주인의 안정성 및 건강 확보를 통한 성공적인 우주개발에 새로운 길을 제시할 것이다 (요약도 1).



요약도 1. 본 연구의 요약도

2. 본문

Au 나노입자와 CdSe 나노입자는 기존에 보고된 방법을 통해 합성하였다. Au 나노입자 대비 CdSe 나노입자의 부피비가 0% (순수 Au), 45%, 77%, 83%, 100%(순수 CdSe)인 혼합 용액을 준비한 후, 스펀코팅을 통해 polyethylene terephthalate (PET) 기판위에 나노입자 박막을 형성하였다. 나노입자박막의 전도도 향상을 위해 1,2-ethanedithiol (EDT) 리간드 치환 용액에 나노입자박막을 담궈 원래의 긴 리간드를 짧은 EDT 리간드로 치환시켜 전도성을 향상시켰다. 더 높은 전도성을 위해 스펀코팅-리간드치환을 반복해 여러 층의 나노입자박막을 형성하였다.

2.1 광학적, 화학적, 구조적, 전기기계적 (스트레인 센서 성능) 특성 분석

Au-CdSe 헤테로 나노입자박막의 성공적인 리간드 치환 및 헤테로 구조 내 Au-CdSe 나노입자의 균일한 분포를 확인하기 위해 순수 Au 나노입자박막, 45%, 77% CdSe 헤테로 나노입자박막, 순수 CdSe 나노입자박막을 광학적, 화학적, 구조적으로 분석하였다. 이후 나노크랙이 형성된 Au-CdSe 헤테로 나노입자박막의 스트레인 센서로서의 성능을 평가하기 위해, 전기기계적 특성을 분석하였다.

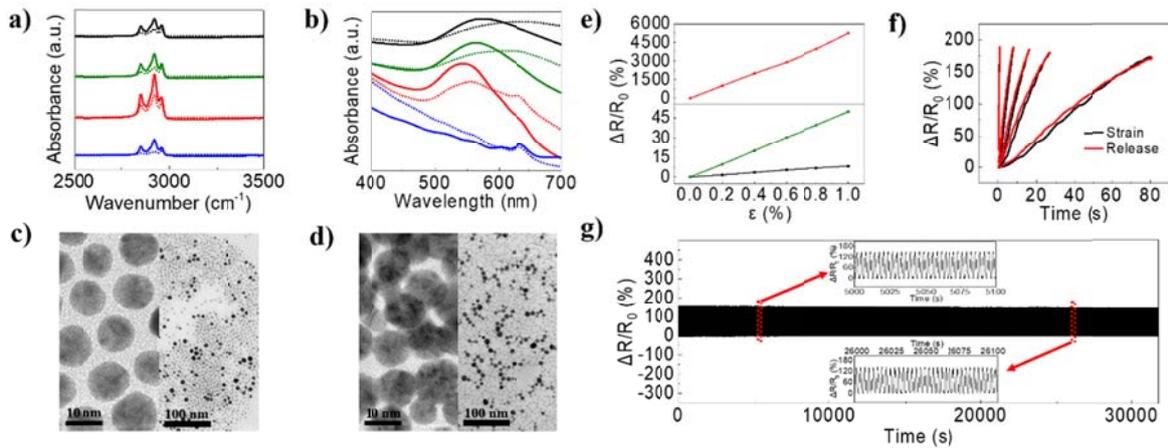


그림 1. 리간드 치환 전(실선), 후(점선) 순수 Au 나노입자박막(검정), 45%(초록), 77%(빨강) CdSe 헤테로 나노입자박막, 순수 CdSe 나노입자박막(파랑)의 (a) FTIR 스펙트럼과 (b) UV-vis 스펙트럼. 리간드 치환 전(c), 후(d) 순수 Au 나노입자박막(좌측)과 77%(우측) CdSe 헤테로 나노입자박막의 TEM 사진. (e) 나노크랙이 형성된 순수 Au 나노입자박막, 45%, 77% CdSe 헤테로 나노입자박막의 스트레인 증가에 따른 저항변화. 나노크랙이 형성된 77% CdSe 헤테로 나노입자박막의 (f) 히스테리시스와 (g) 10,000회 이상의 스트레인 사이클

Fourier transform infrared (FTIR), Ultra-visible (UV-vis), transmission electron microscopy (TEM), scanning electron microscopy with energy disperse x-ray (SEM-EDX) 분석을 통해, 성공적인 리간드 치환 및 헤테로 구조 내 균일한 Au, CdSe 나노입자의 분포를 확인하였다.

다양한 전기기계적 특성 분석을 통해 나노크랙이 형성된 77% CdSe 나노입자박막이 나노입자 기반 스트레인 센서 최고 민감도 (게이지 팩터 5000) 및 뛰어난 안정성, 내구성, 신뢰성을 보이는 것을 확인했다.

2.3 전하 이동 메커니즘 / 게이지 팩터 향상 메커니즘 분석

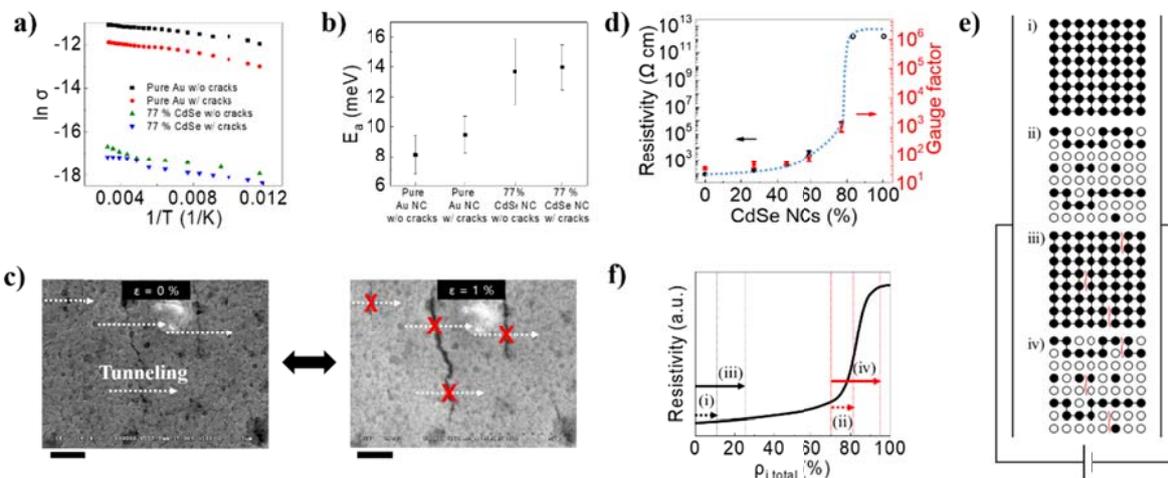


그림 2. (a) 나노입자박막의 $\ln \sigma$ vs. $1/T$ 그래프. (b) 나노입자박막의 활성화 에너지. (c) 나노입자박막의 SEM 사진. (d) 헤테로 나노입자박막의 CdSe 나노입자 비율에 따른 비저항

및 게이지팩터. (d) 위치-결합 percolation 모델에 따른 격자 구조 그림. (e) 절연 성분의 비율에 따른 금속-절연체 구조의 비저항 변화.

나노 크랙 형성 전, 후 순수 Au 나노입자박막과 Au-CdSe 헤테로 나노입자박막 내 전하이동거동을 분석하기 위해, 온도에 따른 저항변화 실험을 수행했다. 분석 결과, 모든 박막에서 전하이동이 호핑 메커니즘(hopping mechanism)을 따르는 것을 알았다. 또한, 우주내 환경인 극저온, 고진공 상황에서도 스트레인 센서가 퇴화되지 않고 안정적으로 작동하는 것을 확인했다. SEM 분석을 통해, 스트레인이 가해질 때의, 나노크랙 형상 변화를 관측했다. 위의 분석결과를 기반으로 혼합된 위치-결합 percolation model 을 고안하여, 나노크랙이 형성된 Au-CdSe 헤테로 나노입자박막의 높은 게이지팩터의 근원을 설명했다.

2.4 웨어러블 스트레인 센서 제작 및 성능 평가

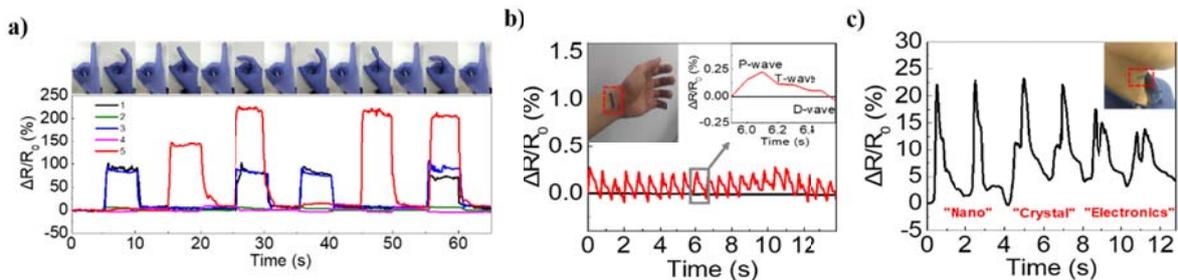


그림 3. (a) 다양한 손가락 동작에 대해 스트레인 센서가 전기신호로 각 동작을 인식한 그래프. (b) 스트레인 센서로 실시간 맥박을 측정하는 그래프. (c) 센서가 음성을 전기 신호로 탐지하는 그래프.

멀티-어레이 웨어러블 스트레인 센서를 제작하여, 손가락 움직임 감지, 손목 맥박 감지, 음성 인식에 성공했다. 사람의 움직임 및 음성 인식은 추후 사람-기계 인터페이스에 적용하여 우주선 내외 위험한 작업을 기계가 대체할 수 있도록 도와줄 것으로 기대된다. 뿐만 아니라 손목 맥박 측정은, 우주인용 웨어러블 헬스케어 시스템 구축에 핵심 기술로 적용될 것으로 기대된다.

3. 결론

Au-CdSe 헤테로 나노입자 구조를 형성하여, 고성능 웨어러블 스트레인 센서를 제작했다. 나노입자기반 스트레인 센서 최고민감도인 게이지 팩터 5000을 달성하였으며, 뛰어난 안정성, 내구성, 신뢰성을 증명했다. 뿐만 아니라 우주내 극한상황인 극저온, 고진공에서도 센서가 정상적으로 작동하는 것을 확인했다. 이러한 스트레인 센서를 피부에 부착해, 맥박측정, 성대의 떨림, 손가락 움직임을 성공적으로 했다. 본 연구결과는 사람-기계 인터페이스에 적용하여 우주인의 우주선 내외 작업 안정성을 확보하는 것은 물론, 웨어러블 헬스케어 시스템 구축을 통한 우주인의 건강관리에 응용됨으로써, 성공적인 우주개발에 새로운 지평을 열어줄 것으로 기대된다.