

산학연 연구실 소개(1)

광주과학기술원 신소재공학과 생체전자소재연구실 (Bio-Electronic Materials Laboratory, GIST)

주소: 광주광역시 북구 첨단과기로 123 신소재공학부 314호 (우: 61005)
 전화: 062-715-3196, E-mail: mhyoon@gist.ac.kr
 홈페이지: <https://sites.google.com/site/gistbioelectronics/>



연구책임자 | **윤명한** 교수
 광주과학기술원 신소재공학과

1. 연구실 소개

외부의 환경 변화에 스스로 반응하거나 성질을 바꾸는 스마트 전자재료는 플렉서블 디스플레이와 에너지 저장 장치뿐만 아니라, 약물 전달 조절, 바이오 액추에이터, 이식형 신경 보철 장치 등 다양한 생체전자 분야에서도 활발히 활용되고 있다. 특히 인공 달팽이관, 인공 망막, 뇌-기계 인터페이스와 같은 바이오닉스 기술에서는 전기적 성능이 우수하고 인체에 잘 맞는 소재 개발이 매우 중요하고, 이러한 기술은 고령화 시대에 사람들의 삶의 질을 높이는 데 큰 역할을 할 수 있다고 기대된다.

본 '생체전자소재연구실'에서는 3차원 구조를 가진 전자재료의 합성과 유연하고 생체적합한 전자소자의 개발을 중점적으로 연구하고 있다. 유기물 및 무기물 기반 다양한 소재를 활용하며, 차세대 전자소자를 제작하는 것을 목표로 하며, 소재 물성 관련 다양한 특성화 기기를 활용하여 분자의 전기적, 광학적, 기계적 특성이 어떻게 나타나는지를 이해하고, 이를 바탕으로 전도성이 뛰어나고 표면 화학이 조절 가능하며 기계적 특성이 우수한 다기능 유연 소재를 개발하고 있다.

2. 주요 연구 분야

2.1 유/무기물 소재 기반 차세대 전자소자 개발

2.1.1 용액공정을 이용한 금속 산화물 기반 전자소자

금속산화물 반도체는 높은 전기적 특성 및 우수한 열적 안정성과 고온 고습 환경에서도 장기적

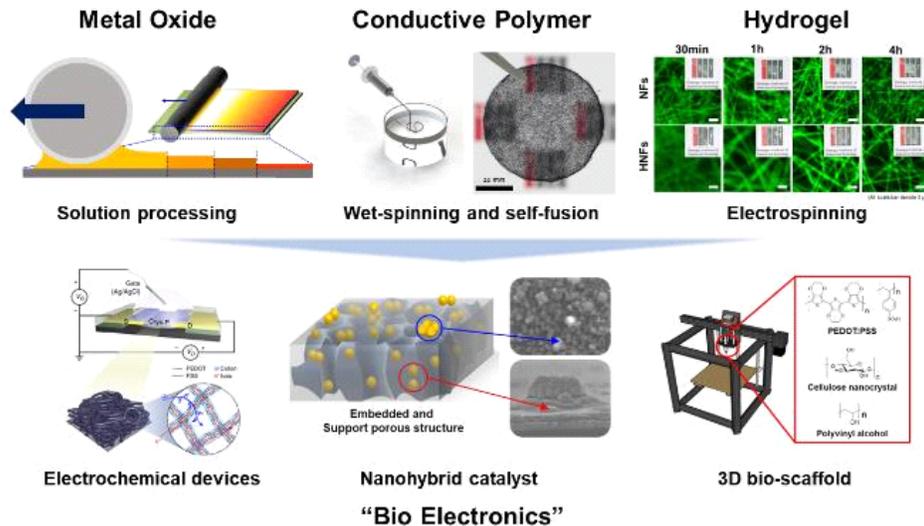


그림 1. 생체전자소재연구실 주요 연구분야.

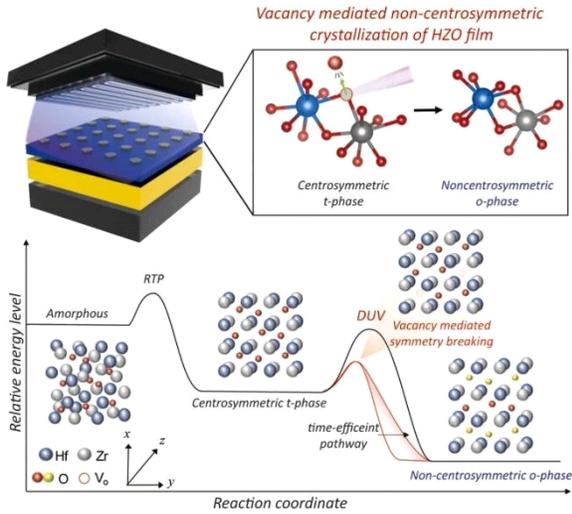


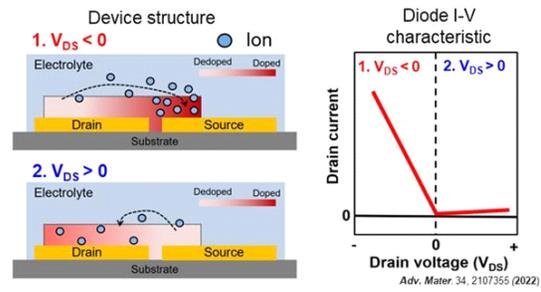
그림 2. 심자외선 기반 산소 원자 결합 유도.

안정성을 갖고 있어 신뢰성이 뛰어난 반도체 소재로 알려져 있다. 특히 높은 투명성과 전기적 특성을 동시에 갖추고 있어 디스플레이용 박막 트랜지스터, 가스 센서, 광센서, 태양전지 등 다양한 응용 분야에서 핵심 소재로 활용되고 있으며, 최근 생체 모니터링, 스마트 의류 등 웨어러블 전자장치에 대한 수요가 증가함에 따라 유연 기판 위에서 전자소자를 구현하려는 연구가 활발히 이루어지고 있다.

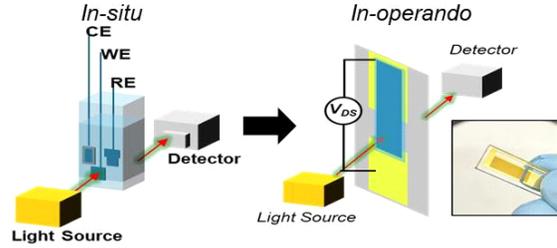
한편, 기존 금속산화물 반도체는 산화물 형성 및 특정 결정 성장을 위한 고온 열처리 공정이 필요하기 때문에 열에 취약한 유연기판과의 공정 호환성이 떨어진다는 한계점이 존재한다. 이러한 한계를 극복하기 위해 저온공정 기반의 산화물 반도체 제조기술이 주목받고 있다. 본 연구실에서는, 금속산화물 형성을 위한 에너지원으로 심자외선(deep ultraviolet, DUV)을 이용한 저온 광활성화 공정법을 활용하고 있다. 심자외선 공정은, 금속산화물 격자 내 산소 원자 결합을 유도할 수 있는 것으로 알려져 있는데, 이를 통해 격자구조 및 밴드갭을 조절하거나 전하 이동도와 같은 전기적 특성에 영향을 미칠 수 있기 때문에, 고성능 금속산화물을 위한 후속 공정으로도 이용되고 있어 다양한 전자 소재 개발에 적용되고 있다(그림 2).

2.1.2 유기 혼합 이온-전자 전도체 기반 뉴로모픽 소자

뉴로모픽(neuromorphic) 소자는, 인간의 뇌 구조와 신경망의 작동 방식을 모사하여 설계된 전자소자로서 전통적인 폰 노이만 컴퓨팅 구조와는 다르게 정보 저장과 처리 기능을 동시에 진행할 수 있는 소자를 의미한다. 특히, 유기 혼합 이온-전자 전도체(organic mixed ionic-electronic conductor, OMIEC)는 이온과 전자를 동시에 수송하는 독특한 특성 덕분에 뉴로모픽 장치의 핵심 재료로 주목받고 있다. 그러나, 이온과 고분자 간의 복잡한 상호작용, 비정질이며 무질서한 미세구조는, 그 작동 원리를 이해하는 데 있어 큰 장애물로



In-operando spectroelectrochemistry



In-operando GIWAXS measurement

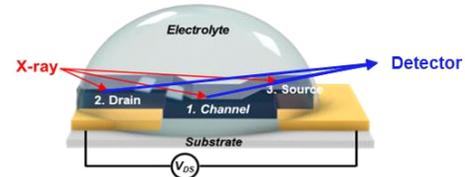


그림 3. 뉴로모픽 소자의 구동 원리 및 분석법.

여겨져 왔다.

본 연구실에서는, 유기 전기화학 다이오드를 기반으로 한 뉴로모픽 소자를 최초로 제시하였으며, 기존 유기 전기화학 트랜지스터보다 단순하고 작은 회로로 구현이 가능하며 에너지 효율성과 공간 효율성을 동시에 획기적으로 개선했다. 또한, 소자 작동 중 전기화학 측정 및 분석을 진행하여 동작 원리를 검증해냈으며(그림 3), 이 측정 기법을 X-선 분광법에도 접목하여 그동안 밝혀지지 않은 OMIEC의 작동 원리를 증명함으로써 뉴로모픽 소자 응용에 최적화할 수 있도록 노력하고 있다.

2.2 전도성 고분자 기반 생체전자소자 개발

최근 휴먼-기계 인터페이스, 실시간 건강 모니터링, 생체 신호 기반의 질병 분석 및 치료와 같은 생체전자소자 기술이 주목받으며 일상생활에 빠르게 도입되고 있다. 다양한 소재 중에서도 전도성 고분자는, 유연하고 부드러운 물성, 조절 가능한 전기적 특성 덕분에 정밀하고 지속적인 생체 신호 측정에 적합한 소재로 각광을 받고 있다. 특히, PEDOT:PSS는 우수한 생체적합성과 용액 가공성을 바탕으로 다양한 형태의 전극 제작이 가능하며, 후처리를 통해 1,000 S/cm 이상의 전기전도도와 pseudo-capacitive 특성으로 인한 높은 정전 용량을 보임으로써 가장 주목받는 전도성 고분자이다.

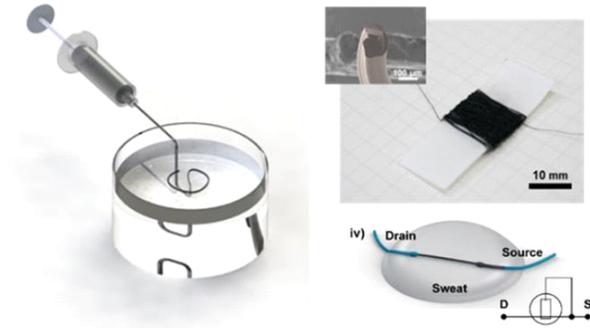


그림 4. 습식방사로 제작된 PEDOT:PSS 섬유.

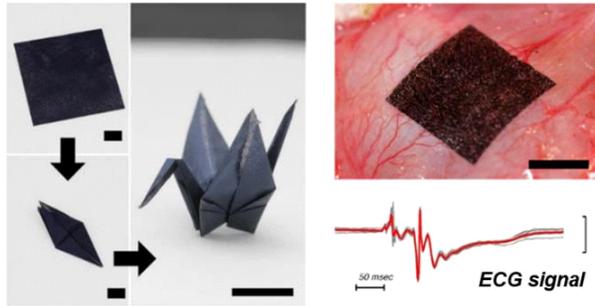


그림 5. 2차원 다공성 메쉬 전극의 응용 방법.

본 연구실에서는 PEDOT:PSS를 습식방사 공정을 통해 마이크로 섬유 형태로 제작하고, 이 섬유의 높은 전기 및 이온 전도성을 활용하여 침, 땀, 눈물 등 체액 내 전해질 농도를 측정할 수 있는 센서를 개발했다(그림 4). 또한, PEDOT:PSS 마이크로 섬유를 기본 단위로 사용하여 섬유 간 자가 융합 특성을 활용함으로써 2차원 다공성 메쉬와 3차원 다공성 스펀지 구조를 구현하였고, 이를 바탕으로 모션 아티팩트가 없는 생체전자소자를 개발했다(그림 5). 제작한 다공성 전극은, 우수한 전기화학적 및 기계적 특성을 갖추고 있어 향후 다양한 종류의 생체전자 소자 및 전극으로 활용될 수 있다.

2.3 수화젤 섬유 기반 생체모사 스캐폴드 개발

세포외기질(extracellular matrix, ECM)은 단순한 구조적 지지체를 넘어 세포의 부착, 이동, 분화, 증식 등에 영향을 미치는 생화학적 신호와 기계적 자극을 전달하는 복잡한 미세 환경을 제공한다. 따라서, ECM의 물리적·화학적 특성을 정밀하게 재현할 수 있는 수화젤(hydrogel)은 세포가 실제 생체 내 환경과 유사한 조건에서 기능하도록 유도할 수 있으며, 이는 조직 공학, 질병 모델링, 약물 반응 평가 등 다양한 생물학적인 응용에서 실험의 정확도와 재현성을 높이는 생체 스캐폴드로 널리 활용되고 있다. 그러나, 기존 벌크 형태의 스캐폴드는 세포의 정렬, 이동, 상호작용을 정밀하게 유도하지 못하고 있어 이를 보완하기 위한 다공성과 정렬성을 가진

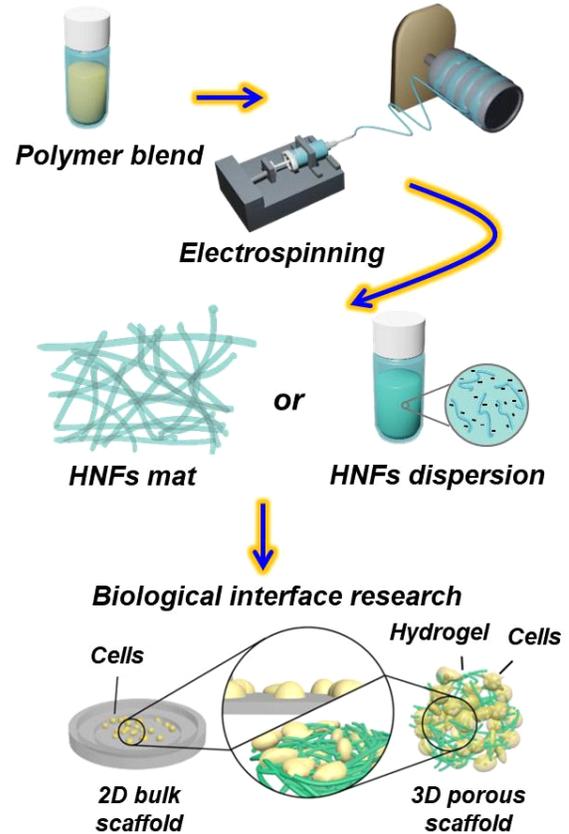


그림 6. 전기방사 기반 3차원 다공성 스캐폴드.

마이크로/나노 섬유 구조의 스캐폴드의 개발이 요구되고 있다. 본 연구실에서는, 전기방사를 통해 폴리비닐 알코올 기반으로 화학적으로 가교된 마이크로/나노 섬유를 제작하고, 황산 처리를 이용해 이를 수화젤화(hydrogelification)하여 마이크로/나노 섬유 기반 다공성 수화젤을 개발하였다(그림 6). 또한, 제작한 수화젤은, 바코팅을 통해 섬유의 배향을 정렬함으로써 3D 세포 배양에 적합한 다공성과 배향성을 가지는 생체모사 스캐폴드를 구현할 수 있었다. 개발된 스캐폴드는 실제 세포 및 조직 배양 등 응용에서도 기존 수화젤보다 생체조직을 더 유사하게 모사함으로써 그 유효성을 입증하였다.

2.4 금속-고분자 복합체 기반 에너지 소자

최근 실생활에 널리 적용되려는 웨어러블 기기, 전자피부, 스마트 기기 등의 차세대 전자기기는 가볍고, 신축성이 있으며, 인체에 무해한 물질들을 바탕으로 제작되고 있다. 이러한 전자기기들이 실제로 구동되기 위해서는 슈퍼커패시터(super capacitor)나 배터리와 같은 에너지 저장 장치에 의해 전력을 공급받아야 한다. 그러나, 현재 사용되는 에너지 저장 장치들은 무겁고, 단단하며, 독성 및 인화성 위험 물질들로 구성되어 있어 환경에도 악영향을 미친다. 기존 에너지 저장

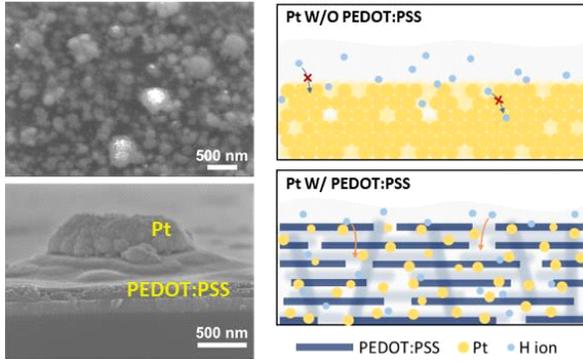


그림 7. 금속-고분자 복합체의 사진 및 모식도.

장치들의 한계를 극복하면서도 가볍고 유연한 물성을 가진 유기계 소재들이 큰 관심을 받고 있으며 많은 연구들이 실제로 진행되고 있다.

본 연구실에서는, PEDOT:PSS-MXene 구조체에 백금 나노입자를 촉매로 사용하는 금속-고분자 복합체를 제작했다. 제작한 복합체는 PEDOT:PSS의 팽윤 특성을 통해 복합체 전체에 퍼져있는 백금 나노입자가 산화환원 반응에 참여할 수 있으며, 이를 바탕으로 기존 촉매보다 우수한 효율을 가지는 것을 확인했다(그림 7). 또한, 이를 금속-공기 배터리의 전극으로 활용하여 에너지 소자로 활용할 수 있는 가능성을 확인했다. 본 연구진은 후속 연구를 통해 식물을 에너지 소자로 활용하는 친환경 에너지 저장 장치를 개발하고자 한다(그림 8).

3. 연구실 현황 및 비전

본 생체전자소재연구실은 지난 15년간 유/무기 소재를 기반으로 한 차세대 전자소자, 전도성 고분자 기반의 생체 전자소자, 그리고 하이드로겔 소재 기반의 생체 지지체 등의 연구를 지속적으로 진행해왔으며, 금속 촉매를 활용해 각종 전자소자의 전기화학적 성능을 개선하기 위한 후속 연구도 진행중이다. 이를 통해 현재까지 국내외 학술 논문 130여

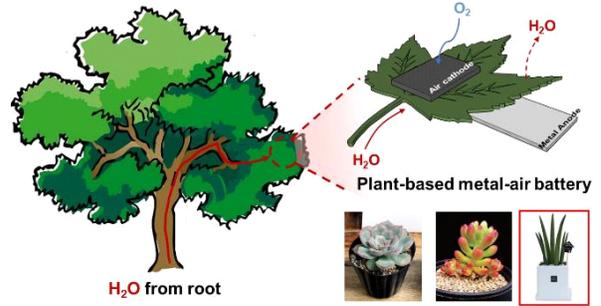


그림 8. 식물 기반 금속-공기 배터리.



그림 9. 실험실 구성원 사진.

편을 게재하였으며(피인용수: 15,000여 회), 해외 여러 연구진과 다양한 주제의 공동연구를 진행하고 있다. 본 연구실은, 차세대 뉴로몰픽 및 생체이식형 전자소자의 개발을 위해 다양한 소재와 공정을 활용하는 기술을 보유하고 있으며, 이러한 기술과 경험을 바탕으로 PEDOT:PSS에 국한되지 않고 다양한 유기물 혼합형 전도체를 이용해 차세대 전자소자 및 생체전자소자를 개발하고 다양한 형태의 전극으로 활용하여 기존 전자소자의 한계를 뛰어넘을 비전을 제시하고자 한다.