

산학연 연구실 소개(2)

울산과학기술원 에너지화학공학과 기능성 나노소재 및 소자 연구실 (Functional Nanomaterials & Devices Lab., UNIST)

주소: 울산시 울주군 언양읍 유니스트길 50, 에너지화학공학과 (우: 44919)

전화: 052-217-2532

E-mail: hyunhko@unist.ac.kr



연구책임자 | 고현협 교수

울산과학기술원
에너지화학공학과

1. 연구실 소개

최근 사물인터넷(Internet of things, IoT) 기술의 급격한 성장으로 인해 사람과 전자기기 또는 시스템 간 상호작용 거리가 가까워지면서 전자기기의 소형·집적화와 더불어 착용형(wearable)-부착형(attachable)-삽입형(implantable) 등 사용자의 편의성을 극대화할 수 있는 형태 발전이 요구되고 있다. 따라서 하나의 소자에 대하여 높은 내구성과 다양한 기능이 요구됨과 동시에 소재에 대한 유연성, 신축성 및 생분해성 등의 형태 변형 가능성과 자가치유, 자가발전 등의 고효율 및 재사용 가능성에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 한편 전자소자는 외부 물리량 변화를 감지할 수 있는 센서, 전기적 신호를 처리하는 집적회로, 소자의 구동 전원 및 사용자에게 정보를 직접 전달할 수 있는 디스플레이 등 크게 4가지로 분류할 수 있고, 각 파트에 대하여 앞서 언급한 형태 변형 가능성을 만족하면서 개별적 성능 개선에 대한 연구가 요구되고 있다.

본 “기능성 나노 재료 및 소자 연구실”은 유/무기 나노 소재와 고분자 기반의 복합재료를 이용하여 다기능성 전자피부(e-skin), 신축성 투명전극, 나노 발전 소자 및 유/무기 트랜지스터 등의 연구 개발을 수행하고 있으며, 소재의 3차원 구조제어 및 패터닝 기술을 통해 수준 높은 연구 결과를 발표하고 있다. 특히, 생체모사를 통하여 체내 맞물린 마이크로 구조(interlocking microstructure) 및 오감 인식 메커니즘을 이용하여서 외부자극(압력, 진동, 온도, 빛, 화학물질)을 고감도로 감지하는 센서 개발의 핵심 기술을 확보하였고, 신축성 투명전극 기술과 융합하여 미래형 첨단 소자로서 활용 가능성을 제시하였다. 또한, 자가치유, 생분해성 및 자극 감응형 소재 개발을 통해 다기능성 전자소자 및 스마트 액추에이터, 접착소재 등의 폭넓은 응용 가능성을 보여주었다(그림 1). 최근에는 유기재료 기반의 유연성 트랜지스터 연구를 접합하여 인간의 신경전달 메커니즘을 모사하는 뉴로모픽 기술에 대한 연구와 함께 고효율 스마트 소자 개발 연구를 활발히 진행 중이다.



그림 1. 기능성 나노 소재 및 소자 연구실의 주요 연구분야.

2. 주요 연구 분야

2.1 전자피부(electronic skin, e-skin)

2.1.1 사람 피부 구조 모사 마이크로 구조 기반의 전자피부 소자

사람 피부 내 표피와 진피 층 사이의 맞물려진 마이크로 구조는 응력 집중 효과에 의해 외부에서 가해진 촉각 자극을 증폭시켜 진피 층에 존재하는 자극수용체가 촉각을 민감하게 감지하는 역할을 한다. 본 연구실에서는 표피-진피 사이의 맞물려진 마이크로 구조와 자극수용체의 촉각 감지 메커니즘을 모사하여 다양한 촉각 자극을 고감도로 검출할 수 있는 인공 전자피부 소자를 개발하였다(그림 2a). 이러한 전자피부 소자는 기존 평면구조 전자피부 소자 대비 2만 배 이상의 높은 민감도로 촉각 자극을 검출할 수 있다(그림 2b).

기존 마이크로 구조 기반 전자피부는 고분자 소재의 제한적인 변형특성으로 인해 높은 압력 범위에서 민감도가 급감하는 문제점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 맞물려진 마이크로 돔 구조를 다층으로 적층한 전자피부 소자를 구현하여, 각 층으로의 효과적인 응력 분산으로 인해 넓은 범위의 촉각 자극을 높은 민감도 및 선형적으로 감지할 수 있다(그림 2c). 또한, 마이크로 구조 표면에 점진적 전도도를 지니는 나노 두께의 전도성 고분자를 도포하여 현재까지 개발된 전자피부 중 가장 높은 민감도를 보이는 전자피부 소자를 구현하였다.

2.1.2 기능성 고분자 복합소재 기반 고민감도 전자피부 및 생분해성 전자피부

사람 피부 내에는 다양한 자극수용체가 존재하여 다양한 촉각 자극과 외부 환경 변화를 구분 감지할 수 있다. 본 연구실에서는 다양한 전도성 소재 및 기능성 고분자의 복합

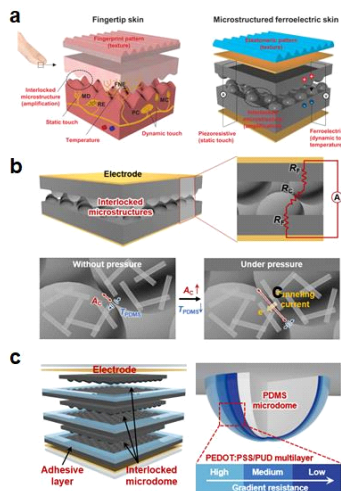


그림 2. (a) 사람 피부 모사 마이크로 구조 기반의 전자피부 소자, (b) 마이크로 구조의 전달 메커니즘, (c) 적층형 구조 소자 및 다층구조 마이크로 돔 구조.

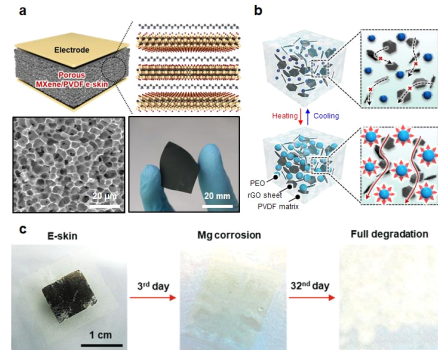


그림 3. (a) Mxene, PVDF 복합소재 기반 다공성 전자피부, (b) 온도 감지 메커니즘, (c) 생분해성 전자피부.

소재를 활용하여 특정 촉각 자극을 고민감도로 검출할 수 있는 전자피부를 개발하였다. 특히, 전도성 소재인 맥신(MXene)과 압전 고분자인 polyvinylidene fluoride(PVDF)의 복합소재의 내부구조를 다공성 구조로 제어하여 동적 촉각 자극수용체를 모사한 전자피부 소자를 구현하였다(그림 3a). 또한, 피부 내 온도수용체를 모사하기 위해 열에 대해 큰 부피 변화를 보이는 polyethylene(oxide)(PEO) 활용하여 온도 변화를 고민감도로 검출할 수 있는 전자피부를 개발하였다(그림 3b).

최근 사용자 친화적인 웨어러블 전자 기기와 스마트 전자제품 등이 발달하면서 전자·전기 제품의 소비 및 사용이 크게 증가하였다. 그만큼 인간 생활의 편리성은 증가하였지만 그로 인해 발생한 대량의 전자 폐기물은 대부분 분해가 불가능하고, 위험한 성분을 포함하고 있기 때문에 재활용할 경우에도 생태계에 위협을 가할 가능성이 높다. 따라서, 완전히 생분해될 수 있는 재료를 활용한 전자기기에 대한 관심 높아지고 있다. 본 연구실에서는 자연 환경에서 분해되며 먹을 수도 있는 재료인 젤라틴을 사용하여 압력과 온도의 두 가지 자극 감지가 가능한 고민감도 멀티 모달 센서를 개발하였다. 압전(piezoelectricity)과 초전(pyroelectricity) 원리를 이용하는 센서는 전력 공급이 필요 없으며, 생체 피부를 모방한 맞물린 마이크로 구조를 통해 높은 압력 및 온도 민감도를 가진다. 또한 젤라틴 분자의 분극 조절을 통해 기존의 젤라틴을 사용한 연구에 비해 높은 압전 및 초전 계수를 확보하여서 외부 자극의 정밀한 감지가 가능하다. 개발된 생분해성 멀티 모달 센서는 대면적 어레이 형태로 제작되어 피부에 부착할 수 있고, 물체가 닿았을 때 물체의 모양 및 온도를 동시에 맵핑할 수 있으며, 접촉한 물체의 표면 질감 감지를 위하여 압력 민감도를 향상시키는 연구를 진행하고 있다(그림 3c).

2.2 자극 감응형 스마트 전자 소자

본 연구실에서는 자극 감응형 소재를 이용한 스마트 전자 소자 개발에 대한 연구를 진행하고 있다. 특히 하이드로겔

기반의 소재는 3차원 친수성 폴리머 내부에 다량의 물을 함유하고 있어, 가공이 용이하고 여러가지 화학적 물성을 가지며 높은 생체적합성을 보이는 특징이 있다.

변색형 온도센서의 경우, 온도에 따라 팽윤/수축하는 Poly (N-isopropylacrylamide) (PNIPAM) 마이크로겔과 플라즈몬 (plasmonic) 금 나노 입자를 사용하였다. PNIPAM은 하한 임계온도(lower critical solution temperature, LCST, 약 32 °C)를 가지며 LCST 이하에서 팽윤, LCST 이상에서 수축하는 특성이 있는데 이러한 온도반응성 폴리머를 마이크로겔 형태로 만들게 되면 효과적인 부피변화를 얻을 수 있다. 또한, 플라즈몬 금 나노 입자는 입자 간 거리가 수 나노미터 이하로 가까워지게 되면 플라즈몬 커플링에 의해 흡수되는 전자기파의 파장대가 달라진다. 따라서, PNIPAM의 표면에 금 나노 입자를 코팅하여 플라즈몬 마이크로겔을 제조, 온도에 따른 금 나노 입자 간의 거리를 조절하여 효율적인 온도 반응성 변색 센서를 개발하였다(그림 4a).

또한, 이온 전도성 하이드로겔 기반의 소프트하고 유연한 센서를 기반으로 뚝은맛 감지 전자 혀를 개발하였다. 뚝은맛은 혀 표면의 타액단백질과 뚝은맛 분자들의 결합 및 응집체 형성을 통하여 촉각으로 감지되는 화학자극이다. 뚝은맛 자극에 반응하는 하이드로겔의 경우, 화학적 자극을 전기신호로 얻기 위해 전해질을 사용하고 뚝은맛 분자와 선택적으로 응집할 수 있는 뮤신 단백질을 첨가하였다. 뚝은맛 자극에 따라 형성되는 소수성 응집체는 하이드로겔 내부 구조를 친수성 마이크로 다공구조에서 계층적 마이크로/나노 소수성 다공 구조로 변화시켜 이온 전도성을 크게 향상시킨다. 이러한 전자 혀는 로보틱스, 플렉시블 전자기기, 식품안전테스트, 헬스케어 모니터링, 센서 산업 등에서 핵심기술로 다양한 산업에 걸쳐 그 활용도가 크다. 최근에는 다양한 화학분자에 대한 선택적인 감지를 할 수 있는 전자 혀 개발 연구를 진행하고 있다(그림 4b).

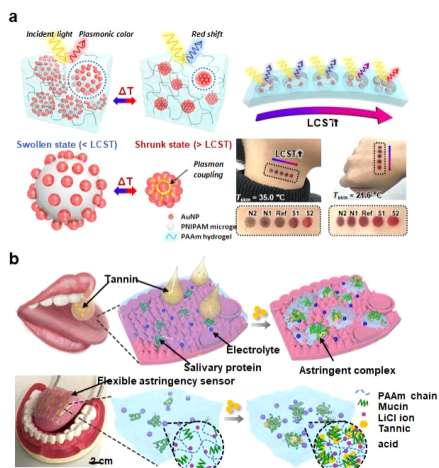


그림 4. (a) 온도 자극형 소재 기반 온도 센서, (b) 맛 감지 메커니즘을 이용한 전자 혀 연구.

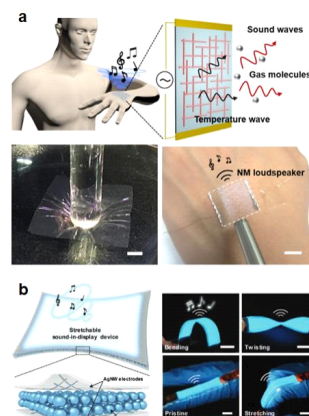


그림 5. 투명 전극 기반 (a) 열 음향 소자 및 (b) 전계 발광 소자.

2.3 은 나노와이어 소재 기반 투명 전극

은 나노와이어는 2차원 형태의 긴 종횡비를 가지며 뛰어난 전도성과 유연성을 보이는 물질로, 사물 인터넷의 발전과 함께 활발히 연구되고 있는 나노 소재이다. 고분자 물질에 코팅되었을 때에 뛰어난 광 투과도를 보여 디스플레이 소자, 웨어러블 소자 등의 응용을 가능하게 한다. 본 연구실에서는 은 나노 와이어의 바 코팅 방법을 통하여 은 나노 와이어의 정렬을 진행하였다. 이를 통해 투명 전극의 투명도가 향상되는 것을 확인하였으며, 정렬된 은 나노 와이어 필름을 이용하여 열 음향 소자, 전계 발광 소자로의 응용을 진행하였다.

열 음향 소자는 얇은 전도성 필름인 열 음향 소자에 일정한 주파수를 가지는 전압을 인가하였을 때에 Joule heating 효과로 인하여 필름의 온도가 변화하게 되며, 주변 기체의 진동을 일으키게 되어 소리를 발생하게 된다. 정렬된 은 나노와이어를 통해 증가한 필름의 열 전도도는 열 음향 소자의 핵심인 Joule heating 효과를 크게 향상시키며, 출력되는 소리의 압력 값이 0 Hz - 20 kHz 주파수 영역대에서 증가하는 것을 확인할 수 있다(그림 5a). 또한, 전계 발광 소자의 경우 외부 전압을 인가하였을 때에 인광 층의 에너지 차이로 인해 빛이 발생하게 된다. 3차원 주름 형태 신축성 투명전극 기술을 통해 제작된 전계 발광 소자는 굽힘, 뒤틀기, 신축 같은 다양한 변형에도 훌륭한 발광 성능을 보이는 것이 확인되었다. 또한, 교류 전압을 인가층에 인가하였을 때에, 전기 에너지를 진동 에너지로 변환시켜 소리를 발생, 음향 재생을 진행하였으며, 이는 웨어러블 디바이스로의 응용을 가능하게 한다(그림 5b).

2.4 마찰전기 기반 자가발전형 센서 및 나노발전소

마찰전기는 우리 일상에서 물리적/기계적 활동으로부터 쉽게 발생하고 소멸하는 일시적인 현상으로, 소형 나노발전 소자 분야에서 유연성 및 높은 효율로 인해 각광받고 있다. 그에 따라, 에너지 저장 장치의 전기에너지원 뿐만 아니라 생체 신호 분석, 움직임 감지, 소리 감지 등 다양한 웨어러블

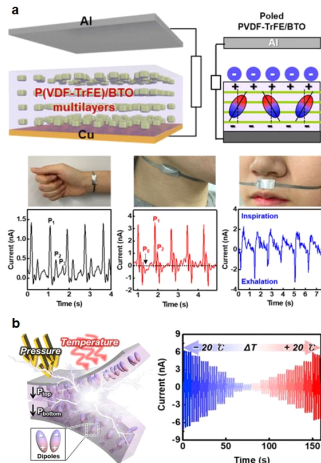


그림 6. (a) 마찰전기 자가발전형 센서 및 (b) 초전기 기반 압력, 온도 감지 멀티 모달 센서.

센서로 응용하는 연구가 활발히 진행되고 있다.

본 연구실에서는 강유전체 성질을 띠는 poly(vinylidene fluoride-co-trifluoroethylene)(P(VDF-TrFE)) 및 BaTiO₃(BTO)로 구성된 다층 구조의 나노복합체 마찰전기 센서를 개발하였다. 마찰전기 효과는 강유전체의 분극과 밀접한 관련이 있다. 따라서 기존 P(VDF-TrFE)의 유전 성질을 강화시키기 위해 BTO를 활용한 계면 분극 성질을 도입하였으며, P(VDF-TrFE) 및 BTO를 바 코팅 공정을 통하여 각 계면의 특수성을 극대화할 수 있는 다층 구조의 마찰전기 센서를 설계하였다(그림 6a). 한편, 고분자의 강유전체 특성은 초전기(pyroelectricity) 현상에도 응용할 수 있다. 초전기 현상은 강유전체 물질에 열을 가해주거나 냉각시킬 때 나타나는 쌍극자의 진동 및 배열의 변화에 의해 전기 에너지가 발생하는 현상이다. 이를 활용하여 압력 및 온도를 동시에 감지할 수 있는 멀티 모달 센서를 구현하였다. 기 개발된 센서는 경동맥, 요골 동맥의 맥박 및 호흡과 같은 생체 신호를 감지하는 헬스케어 모니터링 시스템 및 소리 센서에도 적용할 수 있기 때문에 폭넓은 웨어러블 분야에 사용할 수 있는 실현 가능성을 제시하였다(그림 6b).

2.5 나노물질 기반 다기능성 반도체 소자

2차원 소재는 뛰어난 전기적 특성, 다이렉트 밴드갭, 덩굴링 결합(dangling bond)이 현저히 적은 표면구조를 가지고 있어 차세대 반도체소재로 각광받고 있다. 그 중에서도 흑린(Black phosphorus)은 높은 이동도, 양극성 그리고 자연적으로 형성되는 전하구속층으로 인해 다양한 기능성 소자에 응용되고 있다. 본 연구실은 비슷한 밴드갭과 각각 뛰어난 전자, 양공 이동도를 가지는 인듐갈륨비소와 흑린을 선정하여 다기능성 p-n 이종접합 다이오드를 제작하고 분석하는 연구를 진행하였다.

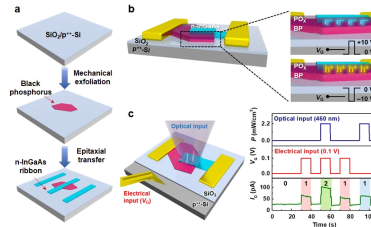


그림 7. (a) 흑린 및 인듐갈륨비소 기반 p-n 이종접합 다이오드 제작공정 모식도. (b) 메모리 특성 및 원리. (c) 다중 신호 발생기로의 응용.

그림 7a와 같이 흑린의 물리적 박리 그리고 인듐갈륨비소의 epitaxial 전사공정을 통해 제작된 다이오드는 인가된 게이트 전압에 따른 흑린의 페르미 준위 변화로 인해 다이오드 특성과 트랜지스터 특성을 동시에 보여주었다. 또한 흑린의 표면에 자연스럽게 생성되는 산화물이 전하구속층을 형성하여 비휘발성 메모리 특성을 보였다(그림 7b). 추가적으로 빛 반응성을 분석하여 전압 및 빛 자극에 따라 다양한 신호를 발생시킬 수 있는 다중 논리 연산자로의 응용 가능성을 확인할 수 있었다(그림 7c).

3. 연구실 현황 및 비전

그림 8과 같이 기능성 나노 재료 및 소자 연구실은 지난 12년간 유/무기 나노 소재와 고분자 기반의 복합재료를 이용하여 다기능성 전자 소자 개발 연구를 진행하고 있으며, 특히, 소재의 3차원 구조제어 및 프린팅을 통한 나노 소재 패터닝 기술을 통해 소재의 특성과 더불어 소자의 성능을 극대화 시키는 연구에 집중해왔다. 이를 통해, 고성능 유연/신축성 전자피부와 더불어 자극 감응형 변색 소자, 스마트 접착 패드와 같은 폭넓은 응용분야에 대한 성과를 올리고 있으며, 최근 사람의 신경전달 메커니즘을 모사하여 방대한 양의 정보를 병렬 방식으로 효과적으로 처리하며 자극의 학습/기억이 가능한 시냅틱 소자 개발 연구를 진행하고 있다.

본 연구실에서 기 개발된 기술과 시냅틱 소자와의 집적화 및 융합은 의료용 헬스케어, 소프트 로보틱스, 햅틱 인터페이스 및 휴먼-머신 인터페이스 등의 첨단 미래 산업에 필요한 핵심 원천 기술로의 응용이 가능하며, 필요에 따라 다른 연구 분야와의 적극적인 협업을 통해 응용 가능성을 보여주고 있다. 모든 연구실의 구성원들은 국내외 다양한 산업 및 연구 분야에 큰 기여를 할 수 있도록 각자 최선의 노력 및 협업을 통한 연구를 진행하고 있다.



그림 8. 기능성 나노 재료 및 소자 연구실의 연구 분야 및 비전.