

산학연 연구실 소개(1)

국민대학교 나노 하이브리드 재료 실험실

(Nanohybrid Materials Research Lab., Kookmin University)

주소: 서울특별시 성북구 정릉로 77, 국민대학교 공학관 407 (우:02707)

전화: 02-910-5129, E-mail: hyunjung@kookmin.ac.kr

홈페이지: <http://nanohybrid.kookmin.ac.kr/>

연구책임자 | 이현정 교수
국민대학교 신소재공학부

1. 연구실 소개

최근 재생 가능하며 친환경적인 에너지 발전 장치에 대한 관심이 높아지고 있다. 본 나노 하이브리드 재료 연구실(Nanohybrid materials research lab, NMR)은 그중 에너지 하베스팅(energy harvesting)과 관련된 소재 및 소자 개발을 주요 연구 과제로 진행하고 있다. 열전 소자는 온도 차를 이용해 에너지를 발생시키는 장치로, 본 연구실은 다양한 형태의 소자를 제작하여 열전 특성에 관한 연구를 수행하고 있다. 주로 저차원 물질과 전도성 고분자의 에너지 준위를 조절하여 열전 특성을 분석하거나, 이를 온도 구배 전계효과 트랜지스터(field effect transistor, FET) 소자로 제조하여 온도 구배에 따른 전하 전달 특성 분석 및 유기 전기화학 트랜지스터(organic electrochemical transistor, OECT) 소자를 이용해 전기화학적 도핑에 따라 달라지는 열전 특성을 분석하였다. 또한, 전자 이동뿐만 아니라 기능성 이온 겔을 통해 온도 구배에 따른 이온 이동을 통해 전압을 발생시키는 이온 열전 소자 및 소재에 대한 연구를 수행하며, 의료 기기 및 스마트 패션 아이템을 위한 웨어러블 에너지 발전 장치로의 응용까지 확장하고 있다. 최근에는 이러한 에너지 발전 장치뿐 아니라 에너지 저장 장치로서 리튬 이온 배터리 분야에 대한 연구도 수행하고 있다. 현재 리튬 이온 배터리의 음극이 지니고 있는 문제점을 소재적으로 해결하고자, 기능성 나노 구조체 합성 및 이차원 물질 도입을 통해 무금속 독립형 음극을 개발하고, 이를 인쇄 가능한 배터리 소자로 응용하는 등의 연구를 수행하고 있다. 에너지 분야 이외의 다른 연구분야로는, 특정 화학 물질을 측정 혹은 검출하는 화학 센서 개발에 대한 것으로, 본 실험실에서는 생체 적합성 및 생분해성 소재를 기반으로 기능기 도입을 통해 소재의 특성 개질 및 폭발성 화합물 탐지 바이오 센서 연구와 유해가스 감지를 위해 pH 지시제를 포함하는 하이드로겔 기반 화학 센서 연구를 수행하고 있다(그림 1).

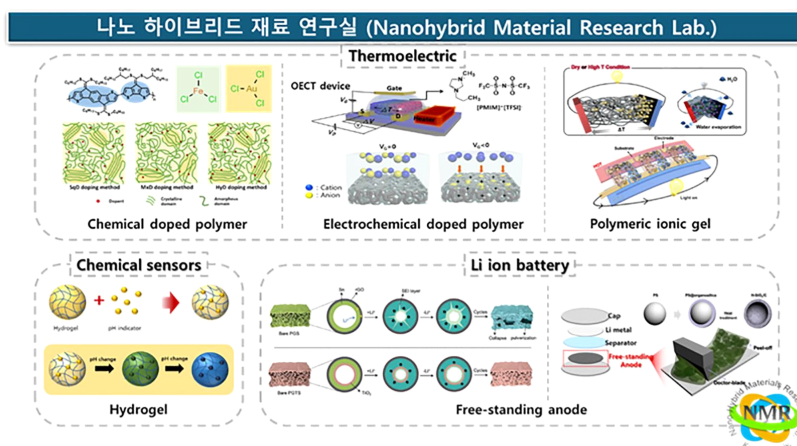


그림 1. 나노 하이브리드 재료 연구실의 연구 분야.

2. 주요 연구 분야

2.1 열전(Thermoelectric)

열전이란 온도를 전기로 변환하는 것을 의미하며, 그 중에서도 유기 열전 고분자는 낮은 열전도도, 가벼운 무게 및 물리적 유연성을 지니면서도 분자 구조 및 전기적 성질을 쉽게 조절할 수 있다는 장점으로 각광받고 있는 연구 분야이다. 본 연구실에서는 온도 구배 FET 구조를 도입해 인가 전압에 의한 전기화학적 도핑을 구현하고, 동시에 고분자 끝단에 온도를 가해 온도 구배에 따른 전도성 고분자의 도핑 레벨 조절과 전하 전달 특성을 동시에 모니터링할 수 있는 측정 플랫폼을 구축하는 등의 연구를 수행하고 있다. 해당 플랫폼을 통해 저차원 나노 소재부터 전도성 고분자까지 에너지 준위를 제어함으로써 열전특성을 향상시키는 원천기술을 확보하고 있다. 마지막으로, 이온 겔을 이용한 이온 열전 연구를 통해 웨어러블 디바이스로의 응용 등을 보이고 있다.

2.1.1 OFET를 이용한 열전 특성 분석 연구(Study on thermoelectric property via OFET)

나노 소자의 에너지 준위와 열전 특성의 상관관계에 대한 연구를 진행했다. 온도구배 FET 구조를 이용한 전기적 또는 열전 측정법을 확립하여 환원된 산화 그래핀이 열처리 조건에 따라 에너지 준위가 변화하는 거동을 분석하였고(*ACS Sustainable Chem. Eng.*, **6**, 7468 (2018)), 산화 그래핀을 화학적 도핑 방법을 이용해 에너지 준위를 제어함으로써 각 물질의 전기적 구조와 지벡 계수 간의 연관성에 대해 연구하였다(그림 2, *J. Mater. Chem. A*, **6**, 15577 (2018)).

2.1.2 이온성 액체 기반 OEET를 이용한 열전 특성 분석 연구(Study on the Thermoelectric property via electrolyte-gated OEET)

이온성 액체 전해질 게이트형 OEET시스템을 사용하여 in-situ 전기화학적 도핑을 통해 고분자의 에너지 준위를 제어,

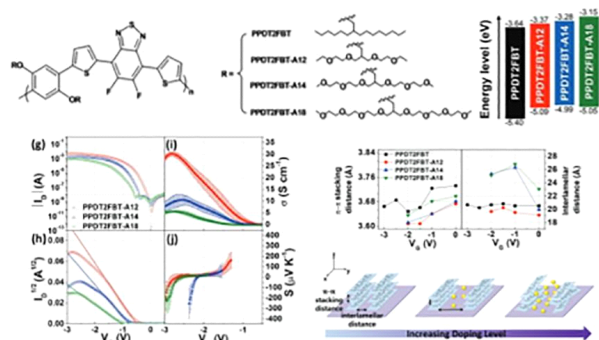


그림 2. 화학적으로 도핑된 환원된 산화 그래핀의 지벡 계수와 전하 구조 간의 상관 관계 연구. *J. Mater. Chem. A*, **6**, 15577 (2018).

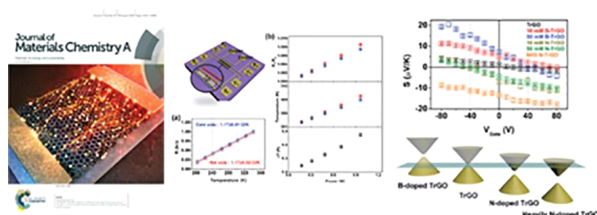


그림 3. 전기화학적 도핑 수준을 미세 제어하여 고분자의 치환기에 따른 전하 이동 거동 및 열전 거동에 관한 연구. *Small Methods*, **7**, 2201145 (2023).

전하 거동 분석 및 열전 특성을 향상시키는 원천 기술을 확보하였다. 고분자 PPOT2FBT의 치환기 및 측쇄 길이에 따른 전하 이동 및 열전 거동을 국부적인 상태 밀도 구조와 분자 패킹 구조의 관계에 기초하여 해석하였다. 고분자의 결정성과 편재화된 에너지 상태 및 전하 전달 특성 사이의 관계를 연구하였다. 또한 고분자의 density of state(DOS) 밴드 구조와 분자 구조를 분석하며 반 결정성 고분자의 분자 설계와 캐리어 수송을 직관적으로 제안, 효율적인 열전 재료와 장치를 제공하는 방법을 제시하였다(그림 3, *Small Methods*, **7**, 2201145 (2023)).

2.1.3 도핑법에 따른 열전 특성 분석 연구(Study on thermoelectric property depending on the doping method)

본 연구실에서는 전도성 고분자의 도핑법을 최적화하여 열전 특성을 분석하는 연구를 수행하고 있다. 전하의 형성 및 수송은 도핑법에 따라 크게 변화하며, 본 연구에서는 하이브리드 도핑된 전도성 고분자의 경우 결정 및 비정질 영역 모두에서 도핑됨을 확인하였고, 금속과 유사한 전하 수송 특성을 확인하였다(*J. Mater. Chem. C*, **11**, 5646 (2023)).

2.1.4 이온 열전(Ionic thermoelectric)

이온 열전은 전해질 성 물질을 이용해 온도 차에 따라 전자가 아닌 양이온 혹은 음이온의 이동으로 전압을 발생시키는 것을 의미한다. 이온 겔은 웨어러블 디바이스로의 응용이 활발하게 진행되고 있으며, 생체 적합성과 유연성이 뛰어나야 함과 동시에 우수한 전기적 성질이 필요하다. 이를 바탕으로 본 연구실에서는 흡습성이 낮으며 자가 치유 특성 및 내열성을 지닌 고분자를 디자인하여 저습(30%) 및 고온(125 °C) 환경에서도 작동하는 이온 겔을 개발하였다. 개발된 이온 겔로 열전 소자를 제작해 향상된 이온 전도도 및 지벡 계수 값을 확보하였다. 본 연구 결과는 높은 열전 성능 및 구동 안정성, 자가 치유 특성, 및 투명도를 지녀 웨어러블 디바이스 분야에 광범위하게 적용할 수 있을 것으로 기대된다(그림 4, *Adv. Funct. Mater.*, **33**, 2305499 (2023)).

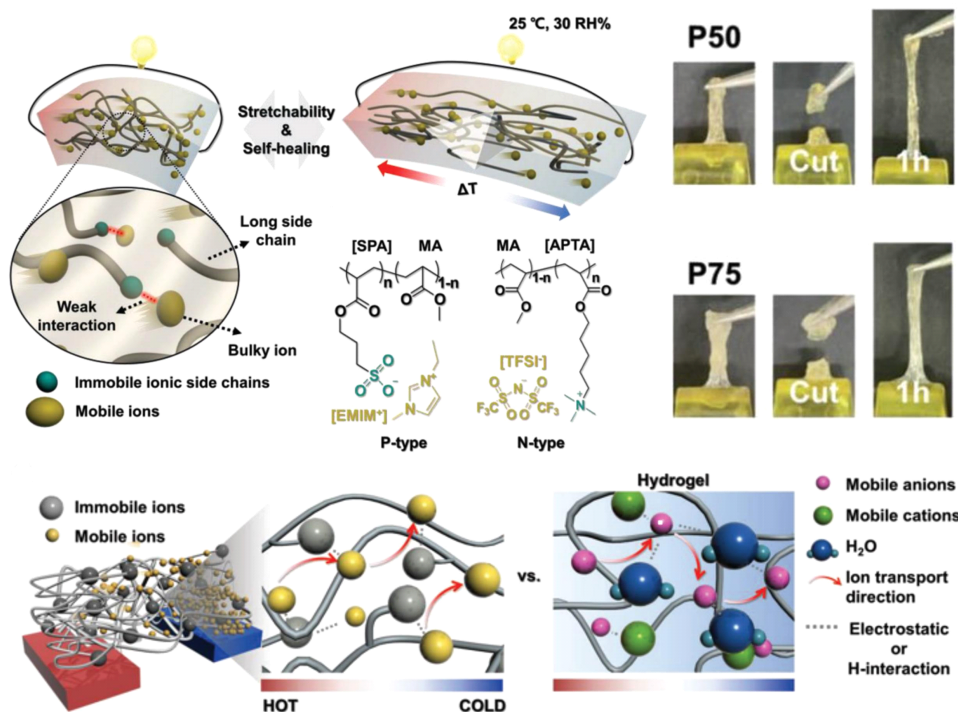


그림 4. 저습도 환경에 구동 가능한 이온 열전을 위한 측쇄가 조절된 P 또는 N형 비수용성 폴리머 이온 겔 연구. *Adv. Funct. Mater.*, 33, 2305499 (2023).

2.2 화학센서(Chemical sensor)

화학 센서는 화학 반응을 통해 물질을 선택적으로 탐지하거나 수치적으로 분석 가능한 센서를 의미한다. 화학 센서는 높은 민감도 및 선택성이 중요하며, 본 연구실에서는 표면 개질로 물질을 효과적으로 부착해 형광 신호를 향상시키거나 pH 지시제를 도입해 저농도의 암모니아를 탐지하는 등의 연구를 수행하고 있다.

2.2.1 바이오 물질을 이용한 형광 화학 센서(Chemical sensor using bacteria)

생체 친화적이고 생분해성의 다공성 마이크로 비드를 이용해 폭발물을 탐지하는 바이오 센서를 제조하였다. 양전하로 표면 개질된 다공성 poly(lactic-co-glycolic acid) (PLGA) 마이크로 비드와 니트로아로마틱 화합물에 형광 신호를 보이는 대장균을 정전기적 인력으로 부착시켜 표면 개질 전 대비 형광 신호가 5배 향상된 바이오 센서를 개발하였다(*ACS Appl. Mater. Interfaces*, 11, 14354 (2019)).

2.2.2 pH 지시제를 이용한 색 변화 화학 센서(Chemical sensor using pH indicator)

하이드로겔 기반의 색 변화 화학 센서에 대한 연구 역시 활발히 진행되고 있다. 색 변화 센서는 낮은 가격, 간단 공정 및 쉽게 식별 가능하다는 장점으로 현재 각광받고 있는

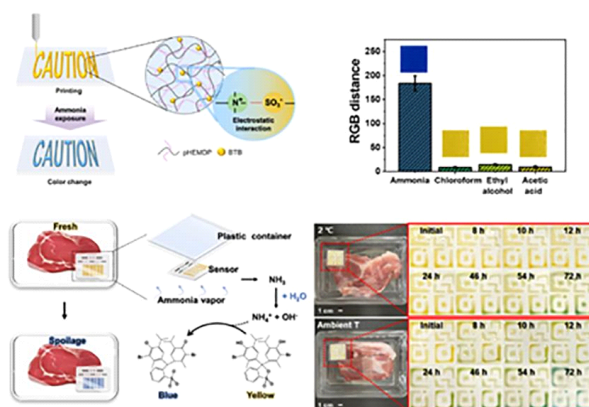


그림 5. 저농도 암모니아 탐지용 인쇄 가능한 하이드로겔 색 변화 센서 연구. *Biosensors*, 13, 13010018 (2022).

분야이며, 본 연구실은 그 중 pH 지시제의 색상 변화를 통해 식품 부패를 시각적으로 나타내는 색 변화 센서를 개발하였다. 합성액의 점도를 조절해 인쇄 가능하면서도 이온의 빠른 이동을 부여해 높은 민감도 및 특이도로 저 농도의 암모니아까지 탐지하는 효과를 통해 스마트 식품 포장 센서로의 응용을 보였다(그림 5, *Biosensors*, 13, 13010018 (2022)).

2.3 에너지 저장장치 연구

리튬 이온 배터리의 음극 활물질 및 독립형 전극 제작에

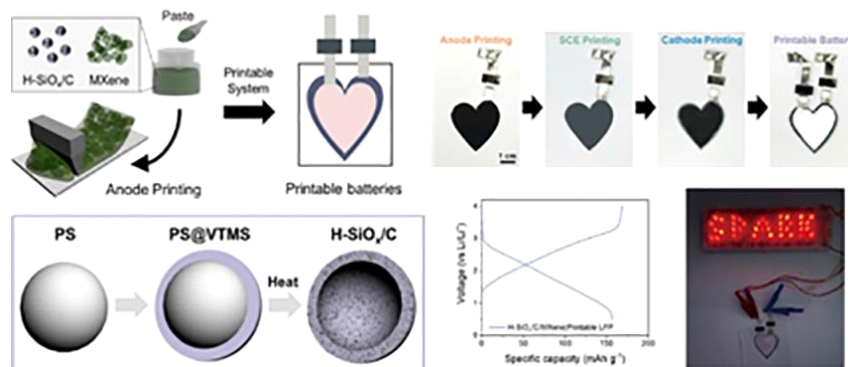


그림 6. 리튬 이온 배터리의 인쇄 가능하고 독립형의 실리콘 기반 음극 연구. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 15, 51215 (2023).

대한 다양한 연구를 수행하고 있다. 리튬 이온 배터리의 실용적인 개발을 위해서는 우수한 성능과 더불어 시장의 수요에 부합하는 비용 및 가공성을 고려해야 한다. 또한 휴대용 및 웨어러블 전자기기의 수요 증가로, 고에너지 밀도 배터리의 실현을 위해 고용량 활물질을 이용해 다양한 전극 형태를 제시하는 방향으로 변화가 진행되고 있다. 본 연구실에서는 저차원 나노 물질로 독립형 전극을 제조하여 높은 에너지 밀도를, 인쇄가능한 음극을 통해 제조 공정의 단축 등을 구현하고 있다.

2.3.1 금속 집전체가 없는 독립형 음극(Current collector free, free-standing lithium-ion battery anode)

입자의 표면 개질을 통한 유/무기 코어/이중 셸 구조의 나노 입자를 합성하고 그래핀 기반의 3차원 기능성 소재를 제작해 이중 버퍼 역 오팔 구조의 독립형 음극을 제조하는 연구를 수행하였다(*Small*, 16, 2004861 (2020)). rGO 지지체가 전극의 구조적 안정성을 보장하고, TiO_2 나노셸은 안정한 secondary electrode interface(SEI) 형성을 통해 안정한 수명 특성을 보였다.

2.3.2 인쇄가능한 독립형 음극 연구(Printable and free-standing lithium-ion battery anode)

속이 빈 hollow 구조의 실리콘 산화물/탄소 복합체에 이차원 물질 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ (MXene)을 도입해 독립형 음극을 제조하였다. 이때, 스텐실 프린팅 기법을 도입하여 전극 제조 공정을 간소화하는 효과를 보였다(그림 6, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 15, 51215 (2023)).

3. 연구실 현황 및 비전

본 나노 하이브리드 재료 연구실은 2010년부터 유/무기 소재의 융합 및 소재와 소자 각각의 연구를 복합적으로 수행하고 있다. 소재 측면에서는 나노 물질 합성 및 표면

개질을 통한 구조체 형성 연구를, 그리고 저차원 나노 물질과 전도성 고분자의 열전 특성을 제어하는 연구를 중점으로 진행했으며, 소자 측면에서는 온도 구배 FET를 이용해 물질의 도핑 레벨 조절 및 온도차를 동시에 부여하며 열전 특성 분석과 OEET를 통한 전기화학적 도핑 및 열전 특성 분석, 그리고 기능성 이온 겔을 이용한 이온 열전 소자 연구와 이를 웨어러블 디바이스로 응용하는 연구를 수행하였다. 폭발물에 형광 신호를 보이는 박테리아를 생체 친화적이고 생분해성인 마이크로 비드 표면에 부착한 형광 바이오 화학 센서 및 저 농도의 유해가스 탐지를 위해 pH 지시제를 함유한 하이드로겔 화학 센서 연구를 수행하고 있다. 최근 진행하고 있는 에너지 저장장치 연구 역시 유/무기 소재의 융합 및 합성을 통해 향상된 에너지 및 간소화 된 제조 공정 단축을 위한 집전체 없는 독립형 음극 및 인쇄 가능한 음극으로의 연구를 수행하고 있다. 앞선 기술 개발을 통해 국내외 학술 논문 90여 편을 게재하고 국내외 특허 50여 건(그중 국외 특허 10건)을 등록하는 등 우수한 연구성과를 내고 있으며, 축적된 원천 기술과 경험을 기반으로 5건의 기술이전 실적도 보유하고 있다. 앞으로도 본 연구실 구성원들은 각자의 연구분야에서 도전적으로 연구를 수행하며, 서로 적극적으로 협력하여 최고의 연구성과를 위한 노력을 다하고 있다(그림 7).



그림 7. 나노 하이브리드 재료 연구실 구성원 및 졸업생 일동.