산학연 연구실 소개

이화여자대학교 자연과학대학 화학나노과학과 POETICS 연구실

(Polymer/Plasmonics·Optoelectronics·Theragnosis·Intergrated with Catalyst & Energy Storage, Ewha Womans University)

주소: 서울특별시 서대문구 이화여대길 52 이화여자대학교 종합과학관 D212-214 (우: 03760)
전화: 02-3277-3434
E-mail: dhkim@ewha.ac.kr
Homepage: https://polykim.ewha.ac.kr/
Instagram: @nanobiohybridlab

연구책임자 I **김동하** 교수
이화여자대학교 자연과학대학
화학나노과학과

1. 연구실 소개

공유결합을 배제한 다양한 이차 결합에 기인한 분자 간 상호 작용을 바탕으로 발현되는 나노구조체는 그 유형의 다양함, 활용 가치와 확장성이 무궁무진함으로써 나노·바이오 과학계에서 광범위하게 응용되고 있다. 본 연구진은 특히 초분자화학, 블록공중합체 자기 조립 및 생체분자 자기 조립 등의 현상에 대한 체계적인 이해와 응용에 깊은 관심이 있다. 이화여자대학교 POETICS 연구실은 고분자 과학 및 융복합 나노소재를 근간으로 학문 간의 경계를 아우르는 나노과학의 혁신을 주도하고 창안하는 연구를 지향한다. 이러한 지향점에 도달하기 위해 저차원 나노소재군의 다차원적·유기적 상호 집적을 통한 소재를 설계하여 에너지 저장·변환, 광-/전기-촉매, 디스플레이, 생의학적 진단·치료 등의 융합 분야에 응용하고 향상된 물성의 메커니즘을 고찰해 왔다.

세부 연구 주제로는 녹색 나노기술 영역에서 주된 관심사인 에너지 저장 및 변환 분야로써 태양 전지/연료 전지/이차 전지의 성능 향상에 필수적인 전극 소재 및 소자 최적화 기술 개발과 수소 생산/이산화탄소 전환/플라스틱 재구성에 요구되는 촉매 나노소재를 도출하는 원리와 기법을 확립하고자 한다. 디스플레이 소자 및 소재 분야에서는 페로브스카이트 및 다음 세대 발광소재의 분자 설계 및 공정 최적화를 통한 고성능 발광소자를 개발하는 연구를 수행 중이다. 생의학적 진단 및 치료 분야에서는 귀금속 나노구조체의 표면 플라즈몬 공명(surface plasmon resonance, SPR) 현상을 기반으로 고감도·고선택성·다중검출 성능을 갖춘 바이오센서 개발 및 광역학·광열·다중 치료 효과를 발현하는 나노소재를 창안하는 연구를 진행하고 있다. 본 연구진은 궁극적으로 이러한 다학제·학제간 연구 분야에 요구되는 융복합 나노소재 설계의 근간이 되는 통합 원리를 제시하는 목적을 추구한다.

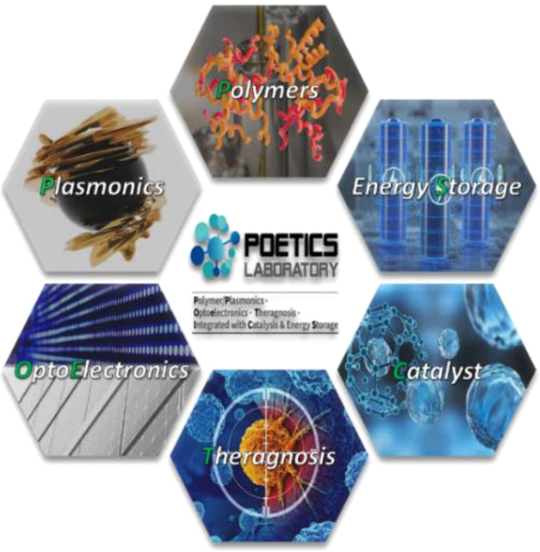

그림 1. POETICS 연구실의 주요 연구 분야.

2. 주요 연구 분야

2.1 광전 소재·소자(Optoelectronics)

녹색 나노기술의 영역에서 가장 큰 관심사 가운데 하나인 광전소자 연구 관련하여 본 연구실은 최근 유무기 하이브리드 페로브스카이트 소재에서 나아가 다음 세대의 광활성층 개발에 관심을 갖고 있다. 잘 알려진 페로브스카이트의 취약한 열적·수분 안정성, 진청색 소재 확보 및 전기발광소자 불안정성 등을 극복하는 원천 기술 개발과 아울러 광전소자의 신기능 연계 응용을 모색하고 있다.

2.1.1 태양전지(Solar cell)

본 연구실은 고효율, 안정성 및 친환경적인 특성을 두루 갖춘 페로브스카이트 태양전지 소자 제작을 위하여 귀금속 나노구조체의 도입[*Chem. Rev.*, 116, 14982 (2016)], 페로브스카이트 소재의 구조적 물성 제어[*J. Am. Chem. Soc.*, 138, 2649 (2016); *Nano Energy*, 75, 104984 (2020)], 및 친환경 페로브스카이트 소재 개발 등을 수행하고 있다.

2.1.2 발광 소재 및 디스플레이(LED)

페로브스카이트 소재는 음이온 조성 변화를 통한 발광 파장의 제어, 좁은 반치전폭, 높은 전하 이동성 등의 장점으로 고효율·고색순도의 발광 소자를 제작하는데 활용될 수 있다. 본 연구실에서는 세계 최초로 페로브스카이트의 차원 제어 공정을 활용하여 효과적인 에너지 전달을 가능케하여 발광 효율을 극대화하였다[*Nat. Nanotechnol.*, 11, 872 (2016)]. 또한 용매-반용매 동시 증발 제어법을 통해 양자 우물 분산성을 개선하거나[*Adv. Sci.*, 9, 2201807 (2022)] 유기 스페이서 엔지니어링으로 결정 배향에 변화를 주어 밴드갭을 조절하는 기법[*Adv. Opt. Mater.*, 11, 2201824 (2023)]을 통해 고색순도·고안정을 갖는 청색 발광 페로브스카이트를 개발하였다. 또한 페로브스카이트 LED의 한계로 지목되는 혼합 할라이드 기반 소자의 전기 발광 불안정성의 메커니즘을 규명하여 페로브스카이트 소재의 차세대 디스플레이로의 확장 가능성을 보여주었다[*ACS Nano*, 15, 1486 (2021)]. 최근에는 상업적으로 실현 가능한 LED를 위해 구리 할라이드와 무기 양이온이 결합된 발광 소재에 대한 연구도 수행하고 있다[*Cell Rep. Phys. Sci.*, 3, 101171 (2022)].

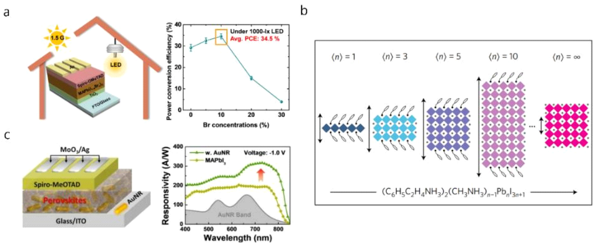

그림 2. (a) 저조도하에서 구동되는 광전지, (b) 페로브스카이트 차원공정 제어를 통해 향상된 효율을 가지는 발광 다이오드, (c) 금 나노구조체를 도입한 광 검출기.

2.1.3 광 검출기(Photodetector)

본 연구실에서는 소자 구성 및 작동 원리의 유사성을 바탕으로 태양전지 연구의 한 범주로서 광 검출기 기술 개발에도 관심을 두고 있다. 특히 귀금속 나노구조체의 도입[*Adv. Opt. Mater.*, 6, 1701397 (2018)], 유사 이차원 소재의 구조적 특성 제어[*Nano Energy*, 57, 761 (2019)]를 통해 기존의 안정성과 낮은 효율의 문제를 극복하는 연구를 진행하였다. 더불어, 페로브스카이트 기반 광검출기 핵심 활성층 소재와 이를 광 검출기에 적용한 최근의 논문들을 포괄적으로 조망한 리뷰 논문을 소개하였다[*Chem. Soc. Rev.*, 46, 5204 (2017)].

2.2 촉매 및 에너지 저장(Catalysis and energy storage)

본 연구실은 환경 친화적인 에너지 변환 및 저장 기술의 개발을 주요 연구 과제로 삼고 있으며, 이산화탄소 전환, 수소 생산, 물 분해, 암모니아 전해 등의 에너지 전환 연구 분야와 더불어, 리튬-공기 전지, 리튬-이산화탄소 전지 등의 에너지 저장 소자 연구도 활발히 수행하고 있다[*ACS Catal.*, 8, 4364 (2018); *Chem. Soc. Rev.*, 48, 205 (2019); *Chem. Soc. Rev.*, 52, 5744 (2023)].

2.2.1 유용한 화합물 생산 및 폐플라스틱 재활용 응용 촉매 및 전해셀 개발

전통적인 물 분해 반응의 한계를 극복하고자 산소 발생 반응을 대체하여 전지의 전압을 저감시킨 전해셀을 개발하고 플라스틱 광개질 반응에 적용하는 연구를 모색하고 있다. 산화 전극에서는 플라스틱을 광개질하여 산소를 발생시키고, 환원 전극에서는 수소 발생 반응을 수행하는 광촉매를 개발하는 연구를 진행하고 있다. 이와 동시에, 키랄성을 도입하여 광개질된 플라스틱의 분해물을 선택적으로 추출할 수 있는 연구도 수행 중이다. 이 연구 결과는 국내 특허로 출원하였고 관련된 전문 학술지에 투고 중이다.

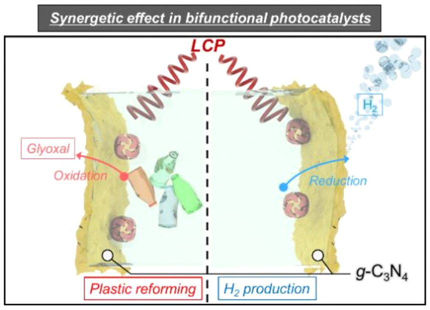

그림 3. 키랄 광촉매를 이용한 수소발생-플라스틱 분해 모식도.

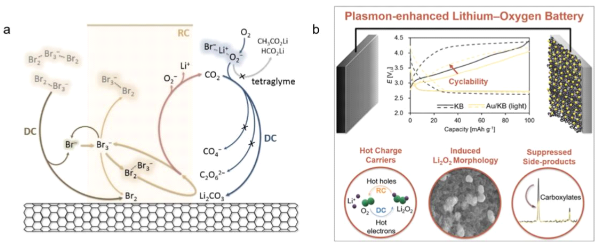

그림 4. (a) 리튬-산소 배터리 내 산화환원쌍 개념도, (b) 플라즈몬 효과를 도입한 리튬-산소 배터리 모식도.

2.2.2 차세대 에너지 저장장치 연구

본 연구팀은 리튬–공기 배터리 및 차세대 전기화학 에너지 저장 장치에 대한 광범위한 연구를 수행하고 있다. 공기 중의 이산화탄소가 리튬–공기 배터리의 성능에 미치는 부정적인 영향을 밝혀내어 이 문제를 해결하기 위한 새로운 접근법으로 Br_3^-/Br_2 산화환원쌍을 활용하여 과전압을 감소시켰다. 또한, 분광학적 방법을 통해 Br_2와 Br_3^- 복합체가 Li_2CO_3의 분해를 촉진하는 촉매 역할을 한다는 것을 확인했다[*Adv. Energy Mater.*, 10, 1903486 (2020)]. 이외에도, 플라즈모닉 소재를 전극에 적용하여 빛을 이용한 배터리 구동 시 핫 캐리어의 발생이 과전압을 줄이는 데 기여한다는 사실을 실험적으로 증명했다. 이러한 연구 결과는 플라즈모닉 금속 나노구조체를 이용한 고에너지 저장의 새로운 가능성을 제시한다[*Mater. Today Energy*, 27, 101033 (2022); *J. Power Sources*, 547, 232002 (2022)].

2.3 진단 및 치료(Theragnosis)

Theranosis는 치료와 진단의 두가지 기능을 포괄하는 개념으로써 최소한의 시간과 비용을 바탕으로 효과적으로 치료 가능한 원리와 기술을 탐구하는 학문 분야이다. 본 연구진에서는 융복합 플라즈모닉 나노 입자를 이용한 약물 전달, 광열 치료 및 광역학 치료 분야의 연구를 활발히 진행하고 있으며, 저차원 귀금속 나노 소재의 LSPR 현상을 활용한 진단 키트 개발 연구를 병행하여 나노 과학 기반의 생의학 응용 연구 분야의 발전에 기여하고자 한다[*Wiley Interdiscip. Rev.-Nanomed. Nanobiotechnol.*, 8, 23 (2016); *Sens. Actuat. B Chem.*, 371, 132453 (2022)].

2.3.1 플라즈모닉 Bioorthogonal 촉매 기반 암 치료

Bioorthogonal 반응은 생체 내 다양한 분자 및 생화학적 프로세스에 대한 간섭 없이 일어나는 화학 반응으로, 약물의 부작용을 최소화하고 높은 치료 효과를 제공하여 암 치료를 포함한 다양한 의료 분야에서 주목받고 있다. 본 연구진은 Pd와 금 나노바이피라미드(nanobipyramid)를 결합한 소재를 설계하여, 조직 내 종양 부위에서 특이적으로 alloc-MB를 항암 물질로 활성화시키는 반응을 유도하고, in-vitro 및 in-vivo 실험으로 생체 내 높은 종양 억제 능력을 확인했다. 본 연구 결과는 국내 특허 출원 후 전문 학술지에 투고 중이다.

2.3.2 플라즈모닉 나노구조체 기반 광열 치료 및 나노자임 (nanozyme) 활성 기반 광역학 치료

플라즈모닉 특성을 이용한 암 치료 연구는 나노의학 분야에서 큰 관심을 받고 있는 분야이며, 특히 진단 및 치료 목적을 위해 탁월한 광 흡수 및 변환 능력을 갖춘 나노입자를 개발하고 활용하는데 중점을 두고 있다. 이를 바탕으로 본 연구진에서는 암 치료를 위한 광열 및 광역학 병용 요법을 위해 상향변환 나노입자로 코팅된 금 나노 막대를 합성하였으며, 광치료제로서 도입된 하이브리드 나노 구조체는 효율적인 라디칼 형성과 LSPR 유도로 인해 NIR 조사 하에서 효율적인 항암 치료 효과를 보였다[*ACS Appl. Mater. Interfaces*, 13, 58422 (2021)].

2.4 키랄 융복합 나노소재

2.4.1 블록공중합체 기반 키랄 초분자 광학 소재 개발

최근 인공 시냅스, 3D 디스플레이, 암호화 소자, 키랄 센서 등 폭넓은 응용 가능성을 제시하며 빛의 회전성에 대한 연구가 부상하고 있다. 그 중에서도 고분자 기반 키랄 초분자 소재는

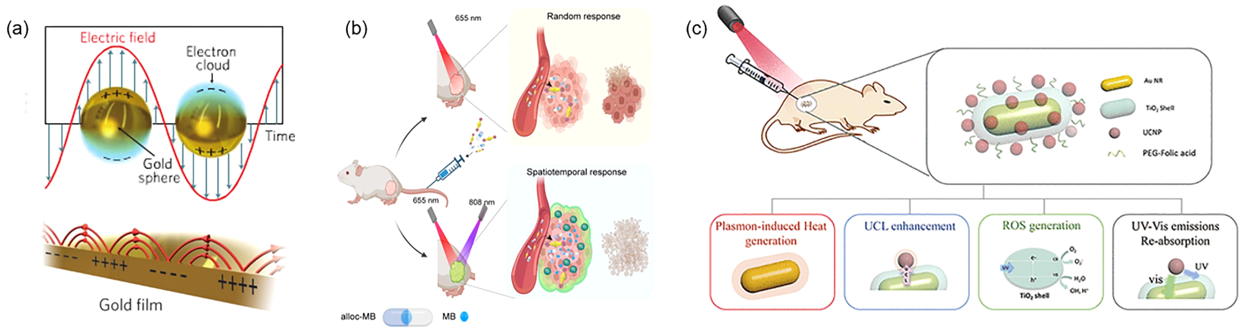

그림 5. (a) LSPR, SPP에 대한 개념 모식도, (b) 이중 레이저 조사 하 alloc-MB의 플라즈몬 강화 생체 직교 촉매 반응에 대한 도식적 설명, (c) NIR 하에서 상향 변환 및 플라즈몬 강화 무기 감광제의 광치료법에 대한 도식적 설명.

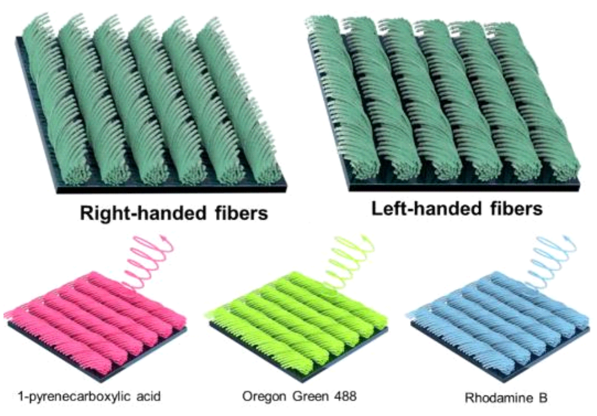

그림 6. Dye를 활용한 나선형 섬유형태의 초분자 키랄 구조체 합성 모식도.

뛰어난 광활성 반응과 흥미로운 키랄 특성, 혁신적인 응용 가능성으로 큰 주목을 받고 있다. 본 연구진은 블록 공중합체를 나노반응기로 활용하여 키랄 리간드와 무기물 전구체 도입을 통해 높은 비대칭성을 가지는 원편광 나노소재를 합성하였다 [*ACS Nano*, 17, 7611 (2023); *J. Mater. Chem. A*, 11, 12876 (2023); *Chem. Mater.*, 35, 3073 (2023)]. 또한 별모양 블록 공중합체에 키랄 리간드와 염료, 페로브스카이트, 플라즈모닉 나노입자 등 다양한 소재와의 공동조립을 유도하여 광범위한 분야에 응용한 연구 결과들을 국내 특허 출원 후 전문 학술지에 투고 중이다. 최근에는 키랄 초분자 소재가 합성에 관여하는 복합적 반응 체계 규명과 정확한 제어가 아직 성립되지 않음을 지적하고 효율적인 원편광 발광 소자를 위한 연구 방향에 대해 제시한 바 있다[*Prog. Polym. Sci.*, 151, 101800 (2024)].

2.4.2 효소 유사 특성을 가진 키랄 나노 입자를 통한 촉매 활성 기반 암 치료 연구

본 연구에서는 키랄성이 도입된 금 나노 입자 및 금@팔라듐 입자와 함께 원편광 빛을 활용하여 계단식 효소 반응의 각 단계를 광학적으로 제어하는 새로운 접근 방식을 제안하였다. 편광 빛에 각각 반응하는 키랄 나노 입자를 순차적으로 활성화함으로써 제어되지 않은 연속 반응에 비해 향상된 촉매 활성을 보였으며, 키랄성 일치를 통해 기질인 D-glu에 대해 더 높은 결합 선택성을 나타냈다. 본 연구 결과는 국내 특허 출원 후 전문 학술지에 투고 중이다.

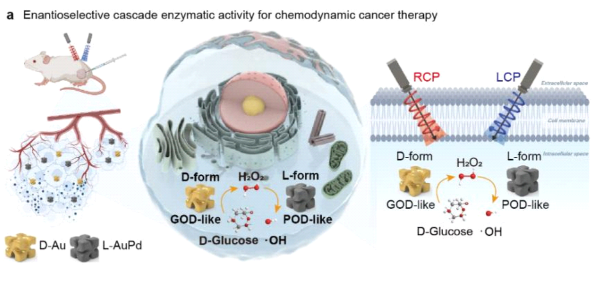

그림 7. 카이랄 플라즈모닉 입자의 세포 내 연속적인 효소 반응 모식도.

2.4.3 키랄 유도 스핀 선택성을 이용한 수전해 촉매 개발 연구

수전해를 통한 수소 생산은 잠재력 있는 에너지원으로 주목받고 있으나 귀금속 촉매의 높은 비용과 희소성으로 상업적 활용에 제한이 있다. 본 연구진은 키랄 플라즈모닉 촉매를 이용하여 LSPR로 발생한 핫 캐리어(hot carrier)를 활용하여 산소 발생 반응 속도를 높이고, 키랄 유도 스핀 선택성 효과(chiral-induced spin selectivity)로 삼중항 산소의 선택성을 향상시켜 수전해의 새로운 촉매 디자인을 제시하는 연구를 진행하고 있다. 본 연구 결과는 국내 특허로 출원하였다.

3. 연구실 현황 및 비전

본 POETICS 연구실은 2006년부터 융복합 고분자소재 및 저차원 유·무기 소재를 기반으로 다학제·학제간 기초 및 응용 연구를 지속적으로 수행해왔다. 현재까지 국내외 학술 논문 220여 편을 게재하였으며(피인용횟수: > 20,000회), 국내 특허 53건/미국 특허 2건을 등록하였다. 본 연구실은 고분자 초분자조립, 플라즈모닉 나노소재, 저차원 페로브스카이트 소재, 에너지 전환용 전해셀, 광-/전기-촉매, 진단·치료 응용 융복합 플라즈모닉 소재 및 키랄 나노소재 등 핵심원천기술을 보유하고 있다. 이러한 기술과 축적된 경험을 바탕으로 신재생에너지, 반도체·디스플레이, 수소경제, 이산화탄소 제로, 건강한 사회 및 정보 보안·암호화 등 우리 사회가 요구하는 미래 핵심 가치를 개척하는 산학계에 기여하는 중추 연구그룹으로 자리매김하는 것을 목표로 연구실의 모든 구성원이 조화로운 협력을 바탕으로 최선의 노력을 다하고 있다. 아울러 본 연구진은 국내외 세계적인 연구진과의 네트워크 구축과 공동연구 추진에 각고의 노력을 경주하고 있으며, 다음 세대를 이끌 독립적인 연구 역량을 갖춘 우수한 여성과학자 배출에도 최우선의 가치를 부여하고 연구에 매진하고 있다.