

산학연 연구실 소개

한양대학교 유기나노공학과 첨단소재 연구실

(Advanced Materials Research Laboratory, Hanyang University)

주소: 서울특별시 성동구 왕십리로 222, 한양대학교 유기나노공학과 신소재공학관 332호

전화: 02-2220-0488, E-mail: jjwie@hanyang.ac.kr

홈페이지: <https://amrl.hanyang.ac.kr>

연구책임자 | 위정재 교수
한양대학교
첨단소재연구실

1. 연구실 소개

한양대학교 공과대학 유기나노공학과와 첨단소재 연구실은 물리 지능 기반의 프로그래밍 가능한 지능 소재와 자원 순환을 통한 폐기물의 고부가가치화 연구를 두 축으로 삼아 미래 첨단소재 기술을 선도하고 있다. 센서나 복잡한 전자 회로 없이 소재 자체의 구조 설계만으로 지능적 거동을 구현하는 것은 차세대 로봇 및 소자 분야의 핵심 과제이다. 이를 위해 본 연구실은 광 감응성 및 자성 응답성을 갖춘 고분자 소재의 구조-물성을 프로그래밍하여, 원격 제어가 가능한 소프트 로봇과 주변 환경에 능동적으로 대응하는 재구성 가능한 가변형 표면 기술을 연구하고 있다. 동시에, 급증하는 산업 폐기물 문제를 해결하기 위해 버려지는 원소 황을 고성능 황 고분자로 전환하여 마찰대전 나노발전기 및 적외선 광학 소자에 적용하고 있다. 또한, 셀룰로오스와 리그닌 등 폐바이오매스를 활용한 고분자 복합소재 연구를 병행하며, 압출·사출 공정을 통한 가공-구조-물성-성능의 상관관계를 명확히 규명함으로써 지속 가능한 사회 구현을 위한 실용적인 소재 솔루션을 제공하고 있다. 이러한 다각적인 연구를 통해 본 연구실은 지능형 소재의 한계를 넓히고 환경 문제를 동시에 해결하는 혁신적인 연구 플랫폼을 지향한다.

2. 주요 연구 분야

2.1 광 감응성 액정 고분자 액추에이터

열, 광열, 광화학 및 자기장 등 다중 자극 응답성을 갖춘 액정 고분자 기반의 소프트 로봇을 개발



그림 1. 첨단소재 연구실 주요 연구분야.

하고 있다. UV 민감성 염료인 아조벤젠(azobenzene)을 액정 고분자 매트릭스 내에 도입하여 소재의 응답성을 확보하며, 이를 통해 구르기, 기어가기, 점프 등 방향 제어가 가능한 다기능 움직임을 구현한다. 특히 액정 고분자의 배향 설계를 통해 내부의 배향질서도와 자가조립 구조를 정밀하게 프로그램 함으로써 로봇의 구동을 원격으로 제어하는 연구를 수행 중이다. 또한, 액정 고분자의 우수한 형상 재구성 성능을 활용하여 차세대 가변형 전자 기기 구현을 위한 다목적 플랫폼 기술을 연구하고 있다. 그래핀(graphene) 및 맥신(MXene)과 같은 2차원 나노 소재를 액정 고분자와 이중 층 구조(bilayer structure)로 결합하여, 높은 전기 전도성과 기계적 응답성을 동시에 갖춘 지능형 전자소자용 복합재를 개발하였다. 또한, 잉크젯 및 다층 프린팅 공정 기술을 도입하여 온도 변화와 적외선에 의한 광열 효과에 반응해 사전에 프로그램된 형상으로 변형되는 가변형 슈퍼커패시터를 제작하는 데 성공하였다. 이러한 형상 재구성 가능 장치는 고분자 복합체의 구조-물성 상관관계 분석을 통해 물성을

최적화하고 있으며, 향후 스마트 전자소자 및 에너지 저장 장치 분야로의 광범위한 응용이 가능하다.

2.2 자성 소프트 로봇

자기장은 외부 전력원 없이 소프트 로봇의 원격 제어를 가능케 하는 핵심 기술로, 본 연구팀은 자성 응답성 소프트 로봇에 관한 연구를 수행하고 있다. 3차원 이방성 설계를 적용한 다양한 자성 로봇은 수중과 수상 환경을 가리지 않고 오르막 등반, 민첩한 유영 등 다채로운 이동(locomotion) 기능을 수행할 수 있다. 또한, 다수 로봇 간의 자율적 협업을 통해 화물 운송이나 미세 유체 내 와류(vortex) 조절과 같은 복잡한 작업을 수행하며 단일 객체의 한계를 극복하고 있다. 최근에는 로봇의 조립 구성(assembly configurations)을 프로그래밍하여 자기장 기반의 군집 지능(swarm intelligence)을 구현하는 데 성공하였다. 이러한 자성 군집 시스템은 장애물 넘기 및 들어 올리기, 회로 배선 연결 및 차단, 액체 금속의 형상 변조뿐만 아니라 미세 관로의 막힘 해소, 생물체 가이드

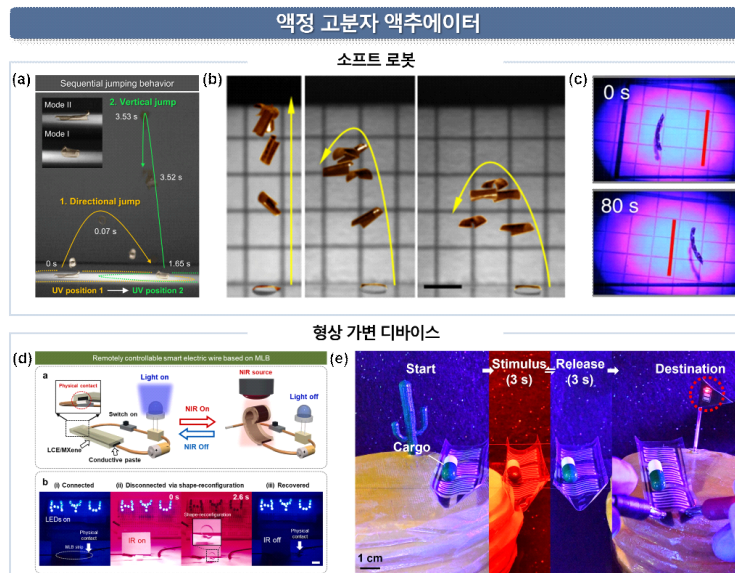


그림 2. (a) 강성 패터닝 설계 기반 수직 및 방향 제어 점프: *Sci. Adv.*, **11**, ead8301 (2025) (b) 스냅스루(snap-through) 메커니즘 기반 광기계적 점프: *Mater. Today*, **49**, 97 (2021). (c) 광감응 롤링(rolling): *Nat. Commun.*, **7**, 13260 (2016). (d) 액정 엘라스토머/맥신 이중층이 도입된 스마트 스위치: *Nano Energy*, **118**, 108953 (2023) (e) 가변형 슈퍼커패시터: *Mater. Today*, **55**, 56 (2022).

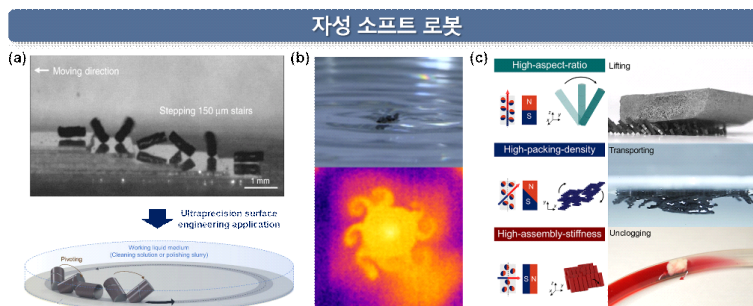


그림 3. (a) 자성 로봇의 개별 구동 및 표면 폴리싱: *Nat. Commun.*, **10**, 4751 (2019). (b) 로봇 협력 구동을 이용한 유체 와류 조절: *Nat. Commun.*, **13**, 6750 (2022). (c) 자화 프로그래밍을 통한 군집 지능 구현 및 군집 구조별 기능 구현: *Device*, **3**, 100626 (2025).

(guiding) 및 반도체 부품의 화학 기계적 연마(CMP) 등 고난도의 정밀 공정과 의료 및 산업 분야의 난제 해결을 위한 혁신적인 플랫폼을 제공한다.

2.3 가변형 표면

또한, 본 연구팀은 자성 구동 원리를 표면 위에 집적된 다수의 미세구조로 확장하여 능동형 스마트 표면을 구현하고 있다. 자기장을 통해 집단적으로 구동되는 자성 응답성 미세기둥 배열(magneto-responsive micropillar arrays)을 개발하였으며, 각각의 미세기둥이 외부 자기장에 즉각적으로 반응하여 굽힘, 비틀림, 조립 및 진동과 같은 다양한 변형을 수행함으로써 표면의 형상과 기능을 동적으로 변화시킬 수 있다. 이러한 가역적 다중 모드 자성 액추에이션(actuation)을 기반으로 단계적 집단 자성 자가조립(magnetic self-assembly), 자연 모사형 미세구조 배열 구현, 그리고 고진폭 자성 진동(dynamic oscillation)을 이용한 유체 흐름 제어 기술을

개발하였다. 또한, 자기장에 의해 변형된 미세기둥의 형상을 고정하는 공정을 통해 자연에서 영감을 얻은 복잡한 3차원 미세구조를 제작하였다. 특히, 상어 피부의 리블렛(riblet) 구조에서 영감을 얻은 미세 패턴 표면을 제작하여 유체와 표면 사이의 마찰 저항을 감소시키는 유체 저항 저감(drag reduction) 기술을 구현하였다. 유연한 고분자 미세구조는 반복적인 유동이나 외부 접촉에 의해 쉽게 휘어지거나 붕괴할 수 있으므로, 원자층 증착법(atomic layer deposition, ALD)을 이용해 수십 나노미터 두께의 무기물 박막을 다층으로 균일하게 적층한 hard-on-soft 구조를 도입하였다. 이를 통해 상어 피부와 유사한 계층적 표면 구조를 구현하는 동시에, 미세구조의 기계적 안정성과 형상 유지 능력을 향상시켰다. 최근에는 미세기둥 배열을 집단적이고 신속한 고진폭 자성 진동이 가능하도록 구동하는 기술을 확보하였다. 미세기둥의 진동 방향과 진폭을 정밀하게 제어함으로써 주변 유체에 방향성 흐름과 국소 와류를 형성할 수 있으며, 이를 바탕으로

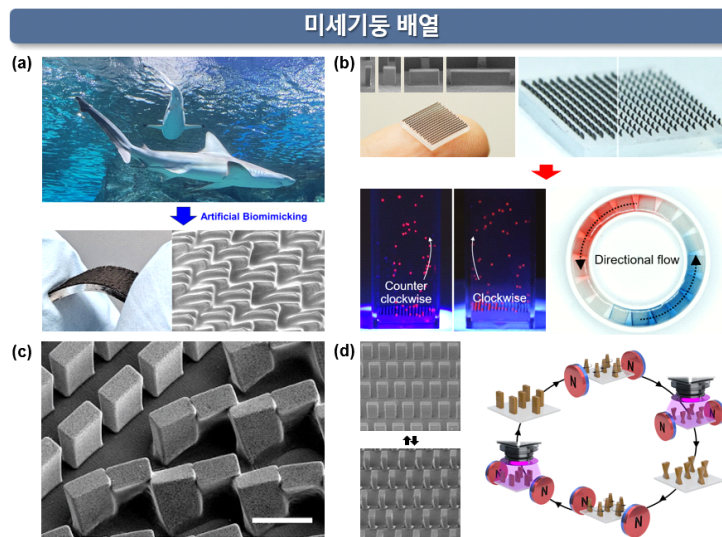


그림 4. (a) 상어 피부를 모사한 미세구조 표면 구현: *Adv. Mater.*, **36**, 2309518 (2024). (b) 자성 미세기둥의 집단 진동을 이용한 방향성 유체 흐름 제어: *ACS Nano*, **19**, 9946 (2025). (c) 자성 미세기둥의 단계적 집단 자성 자가조립: *ACS Nano*, **16**, 3152 (2022). (d) 자성-빛 동시감응형 미세기둥의 가역적인 형상 고정: *Adv. Mater.*, **37**, 2503161 (2025).

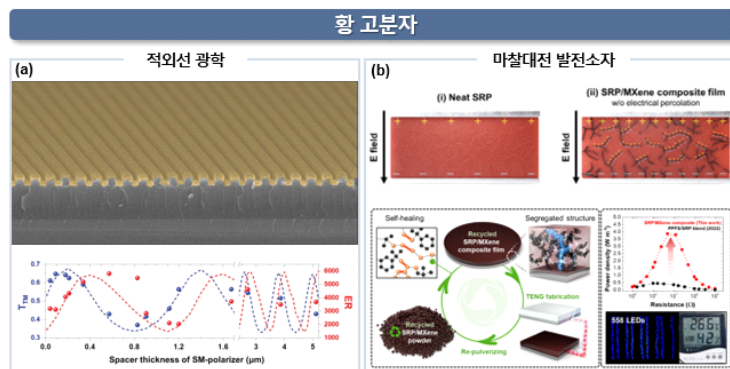


그림 5. (a) 황 고함유 고분자 기반 적외선 편광판 및 광학 성능: *Adv. Mater.*, **35**, 2209377 (2023). (b) 재활용 가능한 맥신/황 고함유 고분자 복합재 기반 고성능 마찰대전 발전소자: *Adv. Mater.*, **36**, 2404163 (2024).

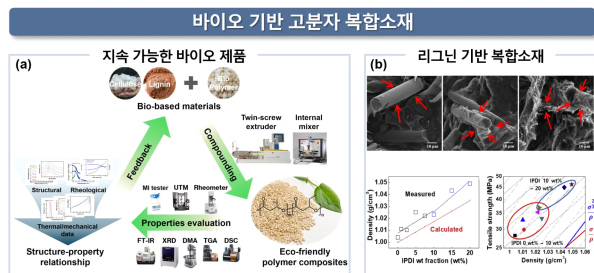


그림 6. (a) 지속 가능한 친환경 고분자 복합소재 개발 모식도. (b) 리그닌 기반 고분자 복합소재: *Composites Part B*, 165, 510 (2019).

유체의 수송, 혼합 및 국소 유동을 비접촉 방식으로 능동 제어할 수 있다.

2.4 황 고분자

원소 황(elemental sulfur)은 원유 정제와 천연가스 처리 과정에서 황 함유 성분을 제거·회수할 때 대량으로 발생하는 부산물로, 수요를 초과하는 잉여량이 연간 약 700만 톤에 이르는 것으로 보고되어 왔다. 본 연구팀은 이러한 잉여 황을 고부가가치 소재로 전환하기 위해 역가황(inverse vulcanization) 공정을 활용하여, 황을 주쇄에 다량 포함하는 안정적인 고체 상태의 황 고함유 고분자(sulfur-rich polymer)를 합성하고 있다. 황 고함유 고분자는 기존 탄소 기반 고분자와 비교하여 본질적으로 높은 굴절률과 우수한 적외선 투과 특성을 나타낸다. 본 연구팀은 이러한 고유 물성을 기반으로 적외선 렌즈, 편광 소자 등 차세대 적외선 광학 소재로의 응용 가능성을 연구하고 있다. 또한 본 연구팀은 고분자 주쇄에 풍부하게 존재하는 황 원소의 높은 전자 친화도(약 200 kJ mol^{-1})를 활용하여, 세계 최초로 황 고함유 고분자 기반 마찰대전 나노발전기(triboelectric nanogenerator, TENG)를 개발 하였다. 나아가 2024년에는 황 고함유 고분자와 이차원 전도성 신소재인 맥신(MXene)을 분리구조(segregated structure)로 복합화함으로써, 높은 발전 성능과 재활용성을 동시에 갖춘 고성능 TENG를 구현하였다. 이외에도 황 고함유 고분자는 차세대 배터리 소재, 수은 흡착 및 여과를 비롯한 환경 정화 소재 등 다양한 분야에 적용될 수 있다. 본 연구팀은 잉여 황의 자원화와 지속가능한 소재 기술의 실현을 목표로, 황 고함유 고분자의 합성, 구조-물성 제어 및 광학·에너지·환경 분야로의 응용 연구를 수행하고 있다.

2.5 친환경 고분자 복합소재

친환경 고분자 복합재료 제조는 현재 전 세계적으로 큰 관심을 받는 관심 분야이나, 실용적인 제품으로의 활용은 여전히 도전적인 영역이다. 본 연구팀은 압출 및 사출(extrusion/injection molding) 공정을 활용하여 생분해성 고분자인 polyhydroxyalkanoate(PHA)와 천연 유래 첨가제 기반의



그림 7. 첨단소재 연구실.

고성능 복합재를 제조하고, 연구실에서 보유하고 있는 다양한 유변학적, 열적, 기계적 및 화학적 특성 분석 장비를 통해 가공-구조-물성 상관관계를 명확히 규명하는 것을 목표로 하고 있다. 특히 용융 혼합(melt mixing) 전략을 최적화하여 범용 및 친환경 고분자와 셀룰로오스, 리그닌 등 폐바이오 매스를 효과적으로 복합화하는 기술을 보유하고 있으며, 이를 바탕으로 다수의 기업 연계 과제를 수행하며 산업 현장에 적용 가능한 실용적 솔루션을 제공하고 있다. 최근에는 국제 공동 연구 협력체인 GCSB(Global Center for Sustainable Bioproducts)에 선정되어, 미국, 캐나다, 영국, 핀란드의 글로벌 전문가들과 함께 석유 기반 소재를 대체할 혁신적인 바이오 플라스틱 연구 및 지속 가능한 소재 산업을 선도해 나갈 계획이다.

3. 연구실 현황 및 비전

본 첨단소재 연구실은 지난 10여 년간 자극 감응형 소재의 물리적 지능 구현과 폐기물의 자원 순환을 통한 고부가가치화를 핵심 골자로 하여 액정 고분자, 자성 복합소재, 지속 가능한 고분자 복합소재 개발 관련 연구를 진행해 왔다. 이러한 역량을 바탕으로 현재까지 110여 편의 SCI 논문 게재, 23건의 특허 등록 및 3건의 기술이전을 달성하였으며, 총 50억 원 규모의 한국연구재단 글로벌센터(GCSB) 및 중견연구사업의 연구책임자로서 국제 공동 연구를 주도하고 있다. 또한, 미 공군 연구소(AOARD) 연구과제 5건과 미 육군 연구소(US Army) 연구과제 등 다수의 해외 연구과제를 수주하였으며, 현대자동차 연구과제 3건, 태광그룹 연구과제 5건, LG전자 자문 2건을 비롯해 롯데케미칼 등 주요 기업과의 산학협력 연구를 활발히 수행하며 국내외 우수 연구기관 및 기업과 긴밀한 협력 네트워크를 구축하고 있다. 본 연구실은 앞으로도 물리 지능 소재와 친환경 기술의 융합을 통해 지속 가능한 미래를 위한 글로벌 핵심 기술을 확보하고, 이를 바탕으로 국내외 산업 경쟁력 강화에 기여하고자 한다.