

산학연 연구실 소개(2)

한국과학기술원 신소재공학과 연성나노소재 연구실 (Soft Nanomaterials Lab. (SNML), KAIST)

주소: 대전광역시 유성구 대학로 291 W1-1(응용공학동) 1406호 (우: 34141)

전화: 042-350-3339, E-mail: sangouk.kim@kaist.ac.kr

홈페이지: <https://snml.kaist.ac.kr/>

연구책임자 | 김상욱 석좌교수
한국과학기술원 신소재공학과

1. 연구실 소개

연성소재(soft materials)는 고체와 액체 사이의 물성을 지닌 일련의 소재들을 의미하며, 고분자, 액정, 폼, 겔, 멤브레인, 생물학적 물질 등이 이에 속하고, 상온에서의 열에너지 수준으로 거동이 지배되며 점탄성(viscoelasticity), 자기조립(self-assembly), 이방성(anisotropy)과 같이 기존의 고체·액체·기체 분류로 설명할 수 없는 고유한 물성을 발현한다. 특히 연성소재들이 형성하는 분자조립 현상에 의한 다양한 나노구조를 정밀하게 설계하고 제어하면 유연성, 신축성, 자가치유성, 외부 자극에 대한 민감도와 같은 특성을 실현할 수 있어 차세대 전자소자, 에너지 변환 및 저장 장치, 바이오센서, 헬스케어, 환경대응형 스마트 시스템 등 다양한 첨단 분야에서 주목받고 있다.

연성나노소재의 실용화를 위해서는 고도화된 나노구조 제어기술이 필수적이며, 이를 위해 나노 스케일에서의 정렬 제어, 계면 조립, 복합화 등 정밀한 구조 설계가 병행되어야 한다. 특히 자기조립 기반의 구조 형성 기술은 연성소재의 동적 반응성과 기능성 나노소재의 특성을 융합하여, 외부 자극에 민감하게 반응하는 스마트 시스템 구현이 가능하다. 이러한 전략은 기존 소재의 물리적 한계를 극복하고, 새로운 기능성 재료 설계의 패러다임을 제시한다.

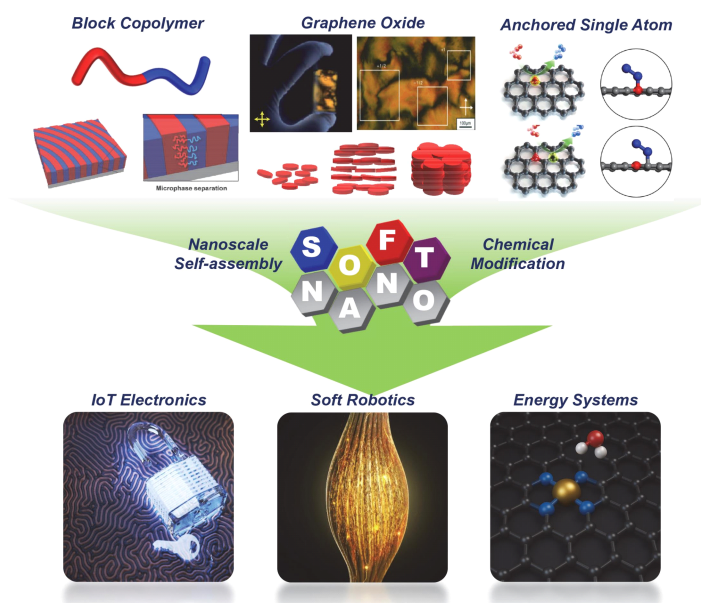


그림 1. 연성나노소재 연구실 연구분야.

본 “연성나노소재 연구실”은 구조-물성 상관관계를 기반으로 한 융합형 소재 개발을 목표로 연구를 하고 있다. 블록공중합체 자기조립 나노패터닝, 그래핀 및 저차원 물질의 계면 제어 및 나노조립소재, 액정탄성체 기반의 복합섬유 설계 및 소프트 로보틱스 응용 등 다양한 연구를 수행하고 있으며, 이를 통해 고차원 정렬 구조, 정밀 나노패터닝, 고기능 복합 재료를 구현하고 실제 응용 가능한 신소재 플랫폼을 구축하는 것을 목표로 한다.

2. 주요 연구분야

2.1 블록공중합체 나노패터닝 기술

블록공중합체는 두 가지 이상의 화학적으로 서로 다른 고분자 사슬이 공유결합으로 연결되어 있는 고분자로, 사슬 간 서로 섞이지 않으려는 성질에 의해 미세상분리(microphase separation) 현상이 발생한다. 이로 인해 나노미터 수준의 구(sphere), 실린더(cylinder), 라멜라(lamellae), 자이로이드(gyroid) 등 다양한 나노패턴을 자발적으로 형성할 수 있다.

이러한 나노패턴은 수 옴스트롱(Å) 수준 계면 두께, 높은 화학적 대비, 대면적에서의 균일한 패턴 형성 등 기존 광리소그래피(photo-lithography) 대비 뛰어난 공정 효율성과 비용 절감 효과를 제공하여 반도체 산업에서 차세대 리소그래피 기술로 주목받고 있다. 뿐만 아니라, 센서, 에너지 하베스팅, 보안 소자 등 비반도체 분야에서도 활용 가능하다.

최근에는, 무작위적으로 형성된 블록공중합체 나노패턴을 활용한 복제 불가능한 하드웨어 보안 소자인 PUF(physical unclonable functions)로의 응용 가능성을 본 연구실에서 제시하였다. 이는 인간의 지문이나 혈관과 유사한 구조 및

복잡도를 가지며, 광학적 또는 전기적 자극에 민감하게 반응하여 초고속 인증이 가능하다. 나아가, 개미나 세균과 같은 극소형 개체에도 부착 및 추적이 가능하며, 높은 보안성과 범용성을 갖춘 차세대 IoT 하드웨어 보안 솔루션으로 활용될 수 있다.

2.2 그래핀 나노소재 응용 기술

흑연으로부터 화학적으로 박리된 산화그래핀은 표면의 풍부한 산소기능기로 인해 수분산성이 뛰어나 용액 공정이 용이하고 화학적 개질을 통해 다양한 특성을 부여할 수 있다. 본 연구실에서는 그래핀 적층 수가 10층 이하이면서 플레이크가 충분히 큰 고품질의 산화그래핀에서 면간 결합과 배제 부피를 최소화하려는 특성으로 인해 액정성(liquid crystallinity)을 나타냄을 세계최초로 보고하였다.

산화그래핀의 우수한 분산성과 액정성을 기반으로 그래핀 시트를 자기조립하여 배열성을 향상시킴으로써 우수한 기계적 강도와 유연성 등 복합기능성을 갖는 그래핀 기반 다차원 구조체로 제작 가능하다. 본 연구실에서는 2차원 소재로 3차원 구조 자기조립을 유도할 수 있는 대표적인 3가지 메커니즘을 제시하였다. 먼저, 이슬이 맺히는 자연계의 원리를 이용하여 2차원 물질 기반의 다공성 구조체를 제작하였다. 또한, Rayleigh 대류와 Marangoni force를 통해 용매의 계면에서 2차원 물질들을 단시간에 초박막·대면적 필름으로 제작하였다. 마지막으로 금속과 산화그래핀 간의 표준환원전위 차이를 이용한 자발적 산화환원 반응을 통해 그래핀 시트가 정렬된 다공성 다층 구조의 수화젤을 제작하였다. 위와 같은 다양한 과학적 원리를 2차원 나노소재에 적용함으로써 에너지 저장 및 변환 소자, 전자과 차폐, 투명전극 등의 응용분야에 활용 가능하다.

그래핀 시트의 나노 구조 정렬은 1차원 형태인 섬유에서도

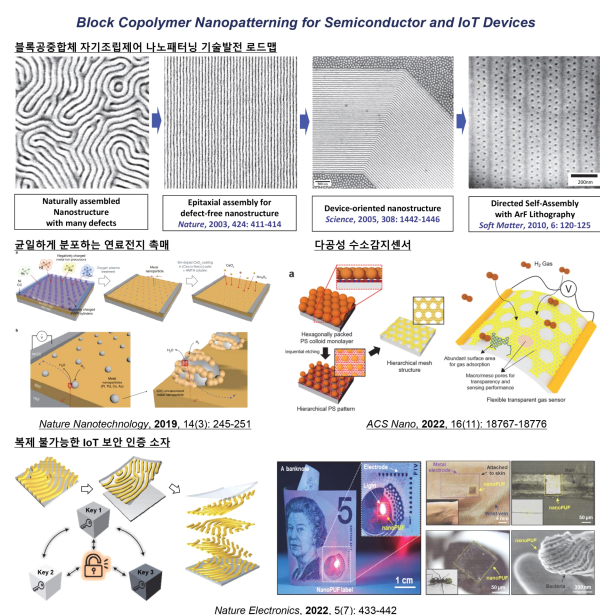


그림 2. 블록공중합체 나노패터닝과 응용기술.

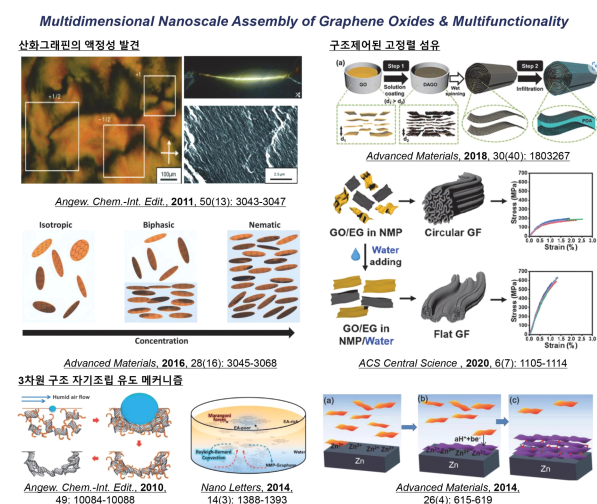


그림 3. 산화 그래핀 액정 기반 다기능성 나노구조체.

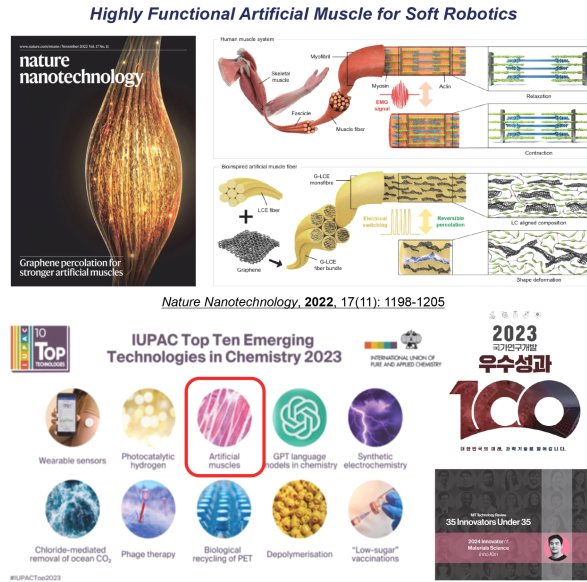


그림 4. 헤라클레스 인공근육과 소프트 로보틱스.

활용할 수 있다. 섬유 방사 과정 중 노즐(nozzle)에서 인가되는 전단 응력에 의해 2차원의 플레이크가 장축 방향으로 배향될 수 있으며 물리화학적 후가공을 통해 우수한 기계적 물성과 전기·열전도성을 지닌 기능성 섬유를 제작 가능하다. 해당 기술은 그래핀 소재 고유의 특성을 유지하면서 섬유나 직물 구조로 가공하여 실용적인 복합기능성 또한 확보 가능하다. 최근에는 본 연구실에서 그래핀을 액정탄성체에 분산시켜 복합섬유를 제작함으로써, 빛 자극에 의해 원격으로 가역적인

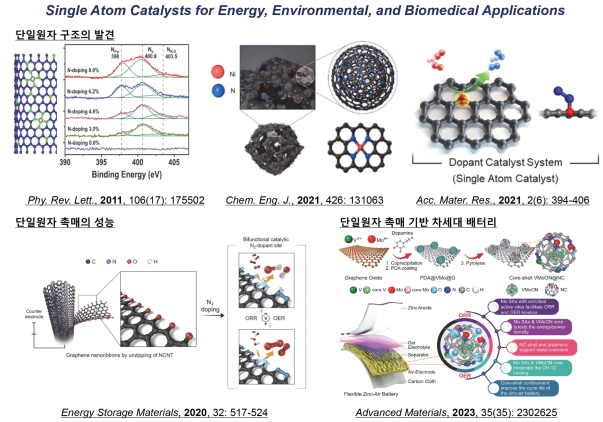


그림 5. 단일원자촉매 및 에너지 소재 응용.

수축·이완이 가능한 인공근육 섬유를 개발하였다. 이 섬유는 수축율, 수축속도, 에너지, 힘 등 모든 척도에서 생체근육을 넘는 우수한 성능을 보여 고령인구 및 장애인들의 보조 장치로써 활용 가능하다. 이 기술은 2023년 IUPAC 10대 유망기술 및 과학기술정보통신부에서 선정하는 국가연구 개발 우수성과에 선정되었다.

한편, 본 연구실에서는 다양한 탄소 구조체에 금속계 이종원소를 도핑하여 단일원자촉매에 대한 개념을 제시하였다. 금속 단일원자 구조는 활성부위를 극대화하여 우수한 촉매 성능을 구현할 수 있으며 환경친화적 조건에서 수소발생(HER), 산소발생(OER), 이산화탄소전환(CO₂RR), 질소환원(NRR) 등 다양한 전기화학 반응에 효과적으로 적용 가능하다.

From Laboratory Research to Commercialization



GrapheneTex와 이를 사용한 의복



그림 6. 그래핀 섬유 특허 기반 실제 상용화 사례.

이를 전기전도성이 우수한 탄소 지지체와 접목시킴으로써 온실가스 저감 및 탄소중립 실현을 위한 핵심 기술로 여겨지고 있으며, 고효율 에너지 전환 및 저장을 위한 차세대 촉매로 주목받고 있다.

3. 연구실 현황 및 비전

본 연구실에서는 연성나노소재의 다양한 특성을 이용하여 원천기술 및 응용기술을 개발하는 것에 그치지 않고, 위 기술들을 바탕으로 (주)소재창조 교원창업기업을 설립하여 실제 산업으로의 실용화에 기여하고 있다. 최근 우수한 기계적 탄성과 항균 특성을 지닌 산화그래핀을 미세침술모에 도입한 그래핀 칫솔이 누적 판매량 1,000만개 이상을 기록하며 성공적인 제품화를 이루었다. 또한 높은 내구성과 항균·소취 효과 등 복합기능성 의류 소재를 스포츠의류 등 실생활 의복에 적용하여 의류 산업 발전에 이바지하고 있다. 특히, 그래핀텍스

(GrapheneTex)를 사용한 태권도복을 2024년 파리 올림픽에서 선보여 큰 화제가 되었다.

“연성나노소재 연구실”은 지난 21년간 다양한 연성나노소재의 자발적인 자기조직 공정 개발 및 물리화학적 개질을 통해 전자소자, 센서, 촉매 등 다방면에서의 응용분야를 제시해왔다. 전통적인 블록공중합체 나노패터닝을 통한 반도체 분야부터 IoT 기반 보안소자까지 다양한 분야에서 응용 가능성을 확장하고 있다. 또한 대표적인 이차원 연성소재인 산화그래핀의 액정성 및 탄소 구조체에 이중원소 도핑을 통한 단일원자촉매를 세계 최초로 발견하였고, 위 원천기술을 기반으로 소프트 로보틱스 및 에너지 변환·저장 장치 등 여러 분야로의 응용을 시도하며 범용성 있는 나노기술을 확보하고 있다. 현재까지 SCI급 학술논문 310여 편을 게재하였으며(피인용횟수: 약 32,000회) 국내외 130여 편의 특허를 출원/등록하여 과학 기술 발전 뿐만 아니라 그래핀 소재 기반의 제품 실용화에도 기여하고 있다.



그림 7. 논문 커버 이미지 및 연구실 단체사진.