산학연 연구실 소개(1)

광주과학기술원 신소재공학부 고분자 나노소재 나노스코피 연구실

(Soft Matter Nanoscopy Lab., SO-MAT, GIST)

주소: 광주광역시 북구 첨단과기로 123, 광주과학기술원 중앙연구기기센터, 415호 (우: 61005)
전화: 062-715-2730
E-mail: eunjilee@gist.ac.kr
Homepage: https://so-mat.wixsite.com/gist

연구책임자 | **이은지** 교수
광주과학기술원
신소재공학부

1. 연구실 소개

자연계는 분자 수준에서부터 세포, 조직, 장기에 이르기까지 여러 단계의 계층적 자기조립(self-assembly)을 거듭함은 물론 동시다발적인 화학반응과 함께 다중응답성 자기조립 과정을 수반하는 고도의 복잡계이다. 분자간 상호작용에 의해 형성된 정적(static) 기하 구조와 더불어 위상변화, 자극감응 등의 동적(dynamic) 자가반응을 이해하는 것은 생리활성 물질의 구조-기능의 상관관계, 생명활동에서 일어나는 복잡한 신호전달 체계 등을 규명할 수 있는 매우 중요한 기초 연구일 뿐 아니라 기존의 과학적, 공학적 한계를 극복하여 혁신적인 기능성 나노소재를 개발하고자 하는 연구자들에게 창의적인 소재 설계 및 개발 전략을 제공하고 있다. 구조의 정교함, 계층적인 형태변화, 혼성화, 외부 저항력, 소형화 등이 그 예가 될 수 있겠다. 따라서, 자기조립 나노기술(self-assembly nanotechnology)을 기반으로 혁신적인 소재 합성 전략을 제시하기 위해서 분자 자기조립의 거동 규명, 물질의 합리적인 설계, 자기조립된 구조체의 정밀 제어 및 응용, 정확한 물성평가 등의 체계적인 소재개발 플랫폼 구축이 선행되어야 한다.

본 고분자 나노소재 나노스코피 연구실(SO-MAT)은 전기 및 광학분야, 신재생 에너지 분야, 의료 및 바이오 분야 등에서 미래 핵심 융합 소재로 각광받고 있는 유기·고분자 및 콜로이드 연성소재를

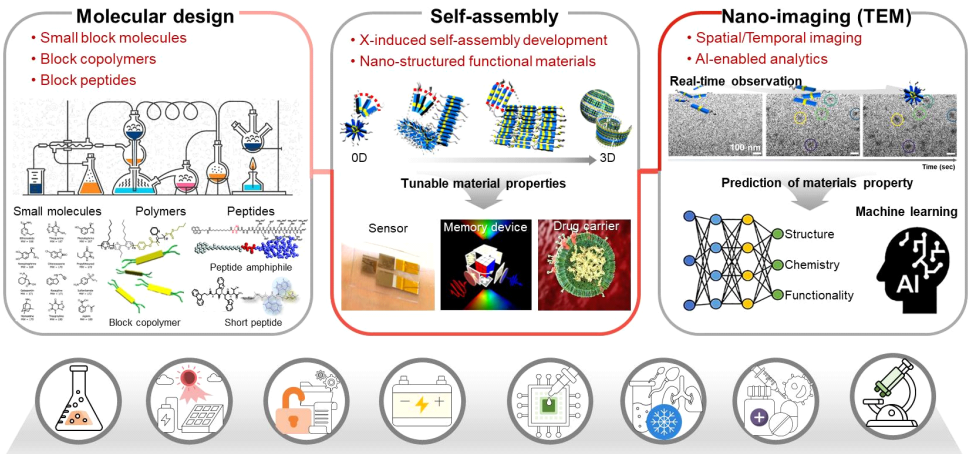

그림 1. 고분자 나노소재 나노스코피(SO-MAT) 연구실의 연구 전략 및 분야.

1) 분자프로그래밍을 기반으로 설계 및 합성하고, 2) 용액상에서 자기조립 아키텍처링 기술을 적용하여 다양한 기능성을 부여함은 물론, 3) 최첨단 투과 전자현미경 분석법(cryo-TEM, 3D TEM, in-situ LP TEM)과 연계하여 새롭게 발견되는 물리적, 광학적, 전기적, 기계적 특성을 규명하고자 노력하고 있다(그림 1). 다양한 분자간 인력을 통해 자발적으로 특정한 나노구조 및 물성을 가지는 전도성 유기·고분자 집합체의 분자 배열, 배향, 쌓임구조 등을 제어하여 정보·전자소재로서의 적용가능성을 탐색하고 새로운 자기조립 나노기술을 개발하여 전기변색, 자가 에너지 변환 등의 특성을 유도 및 제어한다. 또한, 펩타이드의 독특한 계층적 자기조립과정을 이해하고 그 거동을 모사하여 그 자체 또는 금속과의 하이브리드 복합체를 제조하여 조직공학, 대체의학, 진단 분야에 적용이 용이한 생체친화적 생활성 나노입자를 개발한다. 나아가, 새로이 개발된 자기조립 나노기술의 적용으로 기 개발된 소재 및 소자의 성능개선과 더불어 자가변환 자연계 시스템을 모방한 소재의 집적화, 시스템 소형화를 통해 혁신적인 다차원 다기능성 나노소재 개발의 가속화를 도모한다.

2. 주요 연구 분야

2.1 분자 블록 설계 기반 초분자 나노구조체 제어 및 자기조립 나노기술 개발

분자 자기조립이 정밀하게 제어된 맞춤형, 지능형 유기·고분자 소재 개발을 위해서는 분자의 응집을 통한 기하구조 형성 및 변형, 외부 자극에 따른 자가변환 응답 속도, 추가적인 화학반응에 의한 새로운 자기조립 반응경로 등의 상관관계를 이해하는 것이 중요하다(그림 2). 다시 말하면, 기 개발된 유기·고분자라고 하더라도 제안된 자기조립 경로에 따라 전혀 다른 초분자 고분자 나노입자를 형성할 수 있음을 의미한다.

본 연구실에서는 용액공정이 가능한 양친매성 소분자, 펩타이드, 고분자의 다양한 화학적 인자(블록간 상대적 조성비, 분자량, 화학조성 등)를 조절하여 열역학적으로 안정하며 크기와 모양이 비교적 균일한 자기조립 나노구조체를 제조하고자 노력해 왔다. 특히, 블록간의 미세 상 분리를 극대화한 정밀제어 나노입자를 제조하고자 Flory-Huggins 상호작용 인자를 고려하여 견고한 로드 블록과 유연한 코일 블록으로 이루어진 블록 분자를 설계하였으며, 각 블록의 신축 페널티, 계면 상호작용 등을 고려하여 나노입자 제조 및 제어 전략을 수립할 수 있었다. 최근에는 다양한 자기조립 경로를 제공할 수 있는 용액공정 나노입자 제조 기술(X-induced self-assembly)을 개발하여 형태학적으로 기존에 발견되지 않은 나노구조체의 자기조립 메커니즘을 규명 중이다.

2.2 결정화 기반 분자 자기조립 및 화학반응 수반 나노구조체 제어기술

반결정질 유기·고분자는 비정질 유기·고분자와는 다르게 강한 비공유 결합을 기반으로 핵생성 및 결정 성장과정을 수반하는 결정화 자기조립 거동을 보인다. 본 연구진은 반결정질 유기·고분자의 나노구조체를 제어하고자 1) 핵생성과 성장과정을 제어할 수 있는 자기조립 기술(crystallization-driven self-assembly), 2) 액상/액상 계면에서 결정성을 극대화시키는 자기조립 기술(interfacial crystallization-driven self-assembly), 3) 계면장력을 고려하여 화학적 불안정성을 유도함으로써 반결정질-비정질 전이 자기조립 기술(emulsification- induced self-assembly) 등을 개발하였다. 이들은 반결정성 전도성 고분자의 배열 및 배향, 모폴로지 제어에 있어 매우 유용한 기술이기에 광전소자에 응용 가능한 유기·고분자 소재의 기능성 향상 및 최적화를 위해 적극 활용하고 있다. 또한, 최근 본 연구실은 비공유결합에 의존하는 액상 자기조립 과정과 동시에 추가적인 화학반응 도입 시 나타나는 입자 거동 및 변이를 이해하고자 노력하고 있다. 예를 들어, 중합반응 도입 시 분자량 증가와 함께 나타나는 특징적인 형태의 나노입자를 취사 선택할 수 있으므로, 유기·고분자를 선합성하고 자기조립 기술을 후적용하는 기존의 나노입자 제조공정과 크게 대비된다. 우리는 분자 내 원자들에 운동에너지를 전달하여 원자간의 화학결합을 해리 및 재배치시킬 수 있는 전자빔을 이용하여 고분자 화학반응(e-beam induced assembly)을

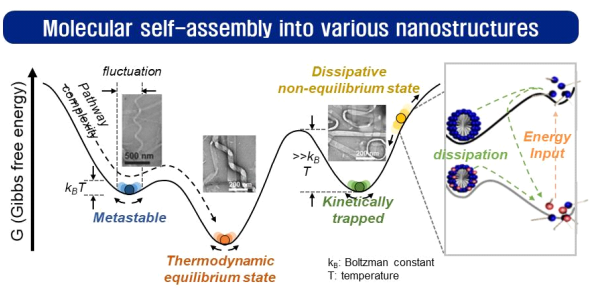

그림 2. 분자 자기조립에 의해 형성되는 초분자성 고분자의 다양한 열역학적 거동 제어.

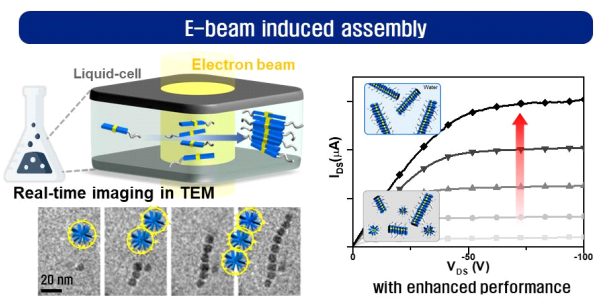

그림 3. 나노입자의 액상 안정성, 균일성을 기대할 수 있는 전자빔 유도 화학반응 수반 분자조립 기술.

설계함으로써 관련 연구를 진행하고 있다(그림 3). 액상에서 균일성과 안정성이 확보된 고기능성 입자의 대량생산이 가능하기를 기대한다.

2.3 전도성 블록고분자의 나노구조체 제조 및 응용

최근 웨어러블 전자소자, 전자피부 등의 연구가 활발해짐에 따라 유기·고분자의 자기조립 제어를 이용하여 광전자소자에 높은 전도도, 유연성, 신축성, 부착성 등의 고기능을 부여하는 기술이 대두되고 있다. 전도성 고분자의 자기조립을 기반으로 하는 일차원 나노구조체는 유기태양전지, 트랜지스터, 다이오드 등과 같은 광전자소자에 적용가능하여 많은 관심을 받고 있다. 이러한 박막 소자의 성능을 향상시키기 위해서는 적절한 에너지 준위를 가지는 새로운 고분자 개발과 더불어 전하이동과 분리에 영향을 미치는 고분자 구조체의 결정성 및 나노모폴로지 제어 연구가 반드시 선행되어야 한다(그림 4). 이에 본 연구실은 유기태양전지의 공액 고분자 기반 활성층에 후처리 어닐링 공정이 필요 없는 용액 기반 나노선 제조 기술을 확보하고 구조체 내 결정성을 제어하여 광전변환 효율 향상은 물론 열/광/대기 안정성을 보장할 수 있는 유기태양전지 제조 기술을 제안한 바 있다. 또한, 공액 분자의 초분자 자기조립을 유도하여 우수한 키랄 흡수를 가지는 나노선을 제조하고 서로 다른 원편광에 감응하는 광트랜지스터를 개발하여 강력한 전자 물리적 복제 방지 기능(physical unclonalbe function)을 갖는 유기 반도체로 활용한 바 있다(그림 4).

2.4 펩타이드 블록 분자의 나노구조체 제조 및 응용

피부, 뼈, 근육, 머리카락 등을 구성하는 콜라겐, 케라틴 등의 구조 단백질, 생체 신호 및 물질 수송, 면역 시스템의 중추적 역할을 하는 생물학적 활성 단백질은 아미노산의 펩타이드 결합을 통해 계층적인 자기조립 과정을 거쳐 특징적인 입체 구조를 형성함으로써 경이로운 생물학적 기능을 나타낸다. 따라서, 구조적 기능성을 담보한 생체친화성 소재로 활용할 수 있다(그림 5). 본 연구진은 체계적으로 설계된 기능성 펩타이드 블록 분자의 자기조립을 활용하여 질병의 진단과 치료가 동시에 가능한 나노제제(theranostic nanoagent), 항균성 치료진단 나노제제(antimicrobial theranostic nanoagent)를 개발하였고, 부작용을 최소화하고 효과를 극대화하기 위해 세포 소기관을 정밀 표적할 수 있는 초분자 약물제재를 개발하였다. 또한, 일차원 펩타이드 나노구조체가 일산화탄소를 포집함으로써 국소적인 영역에서 방출이 가능하며 심장보호 효과, 항염증효과를 보여주는 수화젤 패치를 개발한 바 있다. 최근 본 연구진은 극지방 생물의 항동결 단백질의 구조 및 얼음결정 성장 억제 메커니즘을 모방하여 세포 및 조직, 제대혈, 이식 장기 등에 사용가능한 고기능성 펩타이드 동결보존제를 개발하였다(그림 5).

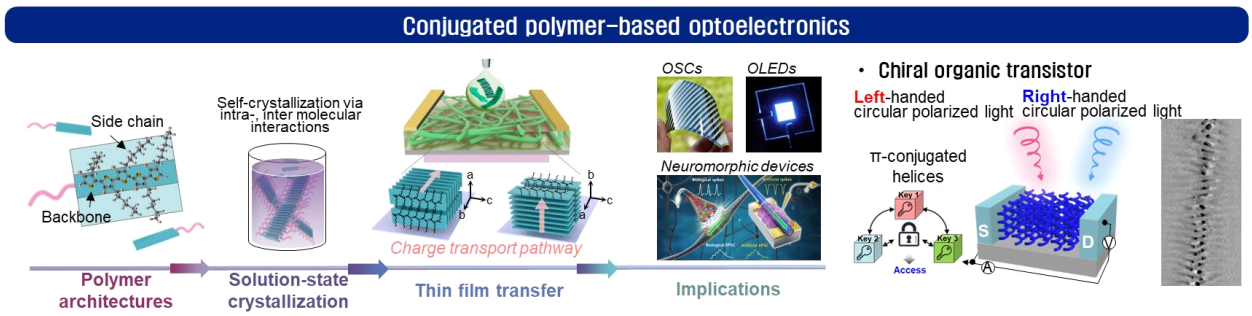

그림 4. 전도성 고분자 액상 자기조립 유도 및 박막 소자로의 전사 나노기술 및 이의 응용.

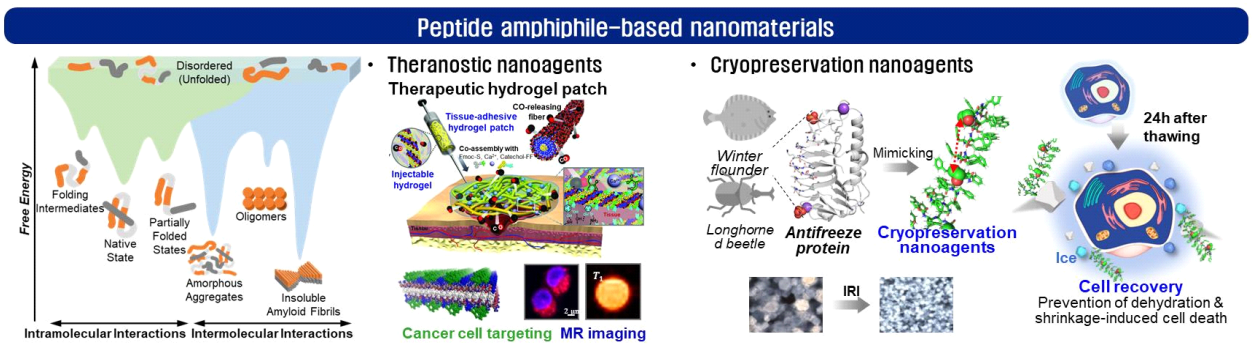

그림 5. 양친매성 펩타이드 액상 자기조립 유도: 초분자 나노 치료·진단제재와 결빙방지 단백질 모방 항동결 보존제.

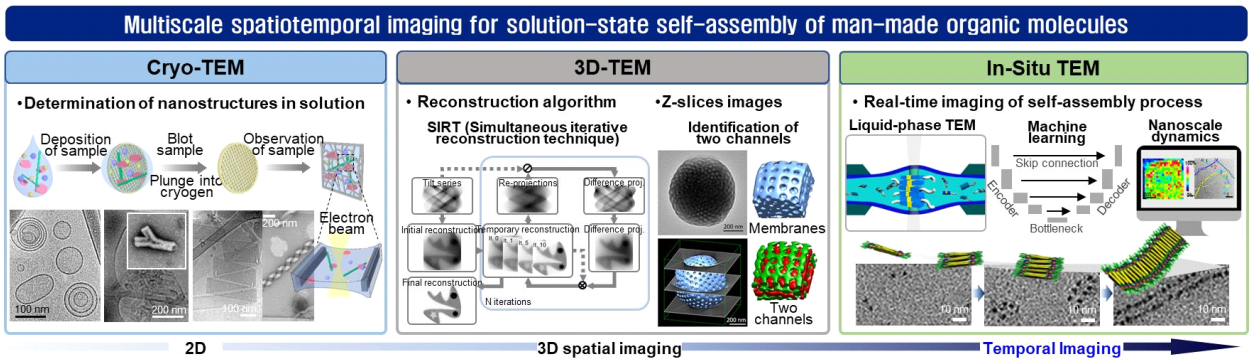

그림 6. 연성 물질의 자기조립 거동 및 구조체 제어를 위한 최첨단 투과전자현미경 나노기술 플랫폼.

2.5 멀티스케일 최첨단 투과전자현미경 이미징 기술 개발

앞서 소개한 기능성 소재 개발을 위해서는 분자 프로그래밍 기반의 자기조립 거동을 이해하고 그 구조와 기능의 상관관계를 규명해야 한다. 특히 계층/복잡계 나노구조체 형성과정에서는 분자들이 다양한 자기조립 경로를 따르기 때문에 이를 입증할 수 있는 분자 및 나노수준의 분석법 개발이 필수적이다. 이에 평균적인 구조해석이 가능한 산란법, 분광법과 더불어 실재 공간 영상을 제공하는 투과전자현미경(transmission electron microscopy, TEM) 분석기술은 주요 기반 기술로 평가된다. 본 연구실은 시편 제조가 어렵고, 전자빔에 취약하며, 낮은 명암차에 따른 왜곡된 영상 생성으로 비교적 해석이 어려운 유기·고분자 연성재료의 특성을 고려하여 시료의 특성에 근거한 맞춤형 분석기술을 개발하고자 노력하고 있으며 기존의 분석 기술로 해석이 난해한 복잡계, 정밀계, 계층계 나노입자 거동의 용액상, 삼차원, 실시간 이미징 분석을 통해 그 해법을 만들어가고 있다(그림 6). 2017년 노벨화학상을 수상한 초저온 투과전자현미경(cryogenic TEM) 기술을 확보하여 수화된 유기·고분자의 새로운 상을 발견하거나 미세 구조를 해석하고, 이차원 구조만을 제공하는 TEM의 근본적인 문제를 해결하고자 다양한 알고리즘을 기반으로 삼차원 이미징(TEM tomography) 기술을 개발하여 나노구조체 내 제한된 미세 구조의 공간적 위치 정보를 제공하고 있다. 최근, 본 연구진은 복잡한 물리·화학적 반응에 의해 실시간으로 일어나는 미세구조 및 특성 변화를 확인하고자 시·공간 분해능을 가지는 실시간 투과전자현미경(in-situ TEM) 기술 개발에 주력하고 있다. 현미경 내부에 액체 및 기체 환경을 조성하여 응력, 전류 및 온도 변화 등과 같은 외부자극을 직접적으로 가하여 구조변화와 물리·전기화학적 특성 변화를 실시간으로 분석할 수 있다는 점이 타기술과 차별화된다. 실시간 분석을 통해 얻은 분자 구조, 결정성, 계면반응 등에 대한 정보는 반도체, 촉매, 배터리 분야에 널리 확장 응용이 가능하며(그림 7) 바이오·의학분야에서는 인공단백질, 인공바이러스, 약물제재 등이 미치는 세포 및 조직활성을 가능하게 한다. 따라서 개발된 나노소재의 맞춤형 정보를 도출하기 위해서는 언급한 이미징 기술의 상보적인 융합이 필요하다. 또한, 낮은 명암차를 극복하여 다방면의 구조 정보를 빠르게 획득하고자 인공지능 기반 데이터 처리기술에 대한 연구도 중점적으로 수행하고 있다.

3. 연구실 현황

고분자 나노소재 나노스코피 연구실은 2011년 연구실 출범 이후, 초분자 화학을 기반으로 유기·고분자 및 콜로이드 등 연성 나노소재의 구조 및 특성제어 연구, 관련 나노이미징 기술 개발을 통해 권위있는 국제학술지를 포함하여 170여 편의 SCI 논문을 게재하고, 다수의 국내·외 특허를 등록하였다. 박막형 유연소자의 성능을 극대화할 수 있는 공액고분자 자기조립 나노선 제조 용액공정 기술이 국가연구개발사업 우수성과로 선정된 바 있으며, 국내·외 소재 개발 연구진과의 긴밀한 협력체계를 구축하여 다학제간 융합 연구를 활발히 수행해왔음은 물론 삼성전자, LG전자 및 화학, 현대자동차, 코스맥스 등 산업체와의 연구교류도 활발히 진행중이다. 최근, 화학 신소재 산업 발전에 이바지한 공로를 인정받아 화학산업 유공 산업부 장관 표창을 수상하였다. 최근, 본 연구실의 구성원은 자기조립 나노구조체 제어 기술, 인공지능 시스템 연계 투과전자현미경 분석 기술을 선도하고 광전자 소자, 촉매 및 배터리, 바이오·의학 분야 등에 응용 가능한 유기 연성 소재를 개발하고자 연구에 매진하고 있다.

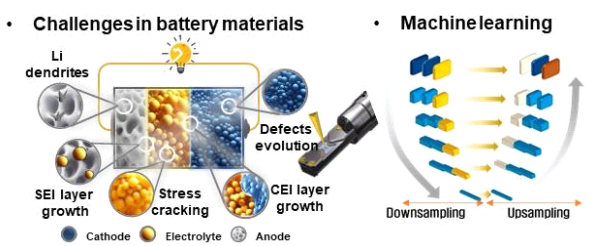

그림 7. 최근 TEM 활용 배터리 소재 연구분야.