

산학연 연구실 소개(2)

한국과학기술원 연성소재조립 연구실 (Soft Material Assembly Group, SMA, KAIST)

주소: 대전광역시 유성구 대학로 291 한국과학기술원 E6-6 빌딩, 214호 (우: 34141)

전화: 042-350-2888, E-mail: nandk@kaist.ac.kr

홈페이지: <https://yoon.kaist.ac.kr/>

연구책임자 | **윤동기** 교수
한국과학기술원 화학과

1. 연구실 소개

최근, 자기조립 초분자(self-assembled supramolecular) 기반의 유기 소재는 전자, 정보, 에너지, 정밀화학 및 차세대 나노기술의 총아로 각광을 받고 있다. 특히, 자기조립 소재의 핵심 특징이 외부의 전자기적 및 물리화학적 환경에 민감하게 반응하는 ‘반응성’이라는 점에서 다양한 전자산업에서 자기조립 초분자 재료는 핵심소재기술로 여겨져 왔다. 예를 들어, 전기장에 빠르게 반응하는 액정(liquid crystal) 물질을 이용하여 개발된 액정 디스플레이(LCD)는 현재까지도 유례없이 만큼 전자 기기의 혁명적 부흥을 일으키며 3차산업 혁명의 주역이 되었다. 이제 앞으로 도래할 4차산업에서는 초연결(hyperconnectivity)과 초지능(superintelligence)을 기반으로 하여, 원하는 시공간에서 기대하는 기능을 최대로 발휘하도록 하는 유/무기 재료가 그 기반을 이룰 것이며, 그 중 ‘반응성’을 특징으로 하는 자기조립 초분자 물질은 가장 중심에 있는 지능형 소재들 중 하나로 평가 받고 있다. 따라서 이러한 소재를 이용한 기술혁신을 이루기 위해서 선행적으로 초분자 물질의 설계 및 정밀구조제어 및 제작기술 개발, 그리고 물성 평가 및 원리 규명 등이 이루어져야 한다.

본 연성소재조립 연구실(SMA)은 “연성재료(soft material)가 미래의 기술 및 산업혁신을 이끈다”라는 슬로건 아래, 유기 초분자 재료의 자기조립 특성을 이용하여 수 나노미터에서 십 수 마이크로미터 수준의 구조체의 배향 제어 및 다차원 기능성 구조에 대한 연구 및 기술들을 개발하고 있다. 더 자세히는, 그림 1의 추진전략과 같이 연성재료의 전자기적 특성 및 자기조립 거동을 고려하여 합성을 진행하고, 물리-화학적 표면 개질(surface treatment), 공간적 구속효과(confined geometry), 전기, 자기장, 마찰력 등의 외부장(external stimuli) 인가와 같은 구조 제어 기법을 통해 원하는 구조를 형성하고 미세하게 조절할 수 있는 기술을 개발하고 있다. 더 나아가, 제어된 구조의 평형상태에 있는 정적인 구조뿐만 아니라 동역학적 제어를 통한 외부환경과 소통(communication) 가능한 지능형 소재 개발에도 연구를 진행하고 있으며, 제작된 구조체의 물성 평가 및 소자 제작을 통해 유기재료



그림 1. 연성소재조립 연구실의 단계별 연구 로드맵.

기반의 트랜지스터(transistor), 고감도 분자센서, 플라스모닉 편광판, 발수(hydrophobic) 및 발유(oleophobic) 코팅, 광위상 제어 등 다양한 응용들도 보고한 바 있다. 더불어, DNA나 식용색소등 생체 적합형 재료를 본 연구실에서 개발한 나노 제어기술을 이용하여 광전자 소자 개발을 위한 원천기술을 확보하고자 노력하고 있다.

2. 주요 연구분야

2.1 이방성 연성소재: 액정 결함 제어와 LCP 응용 (Anisotropic Soft Materials: LC Defect Engineering and LCP Applications)

연성 소재는 방향에 따른 물질의 특징이 다른 비등방성 특징을 가져 등방성 소재에 비해 독특한 물리적, 광학적 거동을 보인다. 그 중, 액정(liquid crystal)은 이방성 분자 구조 및

비공유 상호작용에 의해 자발적으로 배향될 수 있으며, 이에 따라 이방성 광학적, 전기적 특징을 나타낸다. 본 연구실에서는 패턴된 실리콘 기반, 콜로이드 등을 기반으로 한 지형적 구속 조건과 표면처리, 전기장 인가 등을 이용하여 액정의 위상 결함 또는 솔리톤을 규칙적으로 제작하고 그들의 거동을 현미경 및 시뮬레이션을 이용하여 분석하고 있다. 이러한 액정 결함 및 솔리톤 구조체는 패턴된 광학 특징을 가질 뿐만 아니라, 일반적인 벌크 상태에서는 나타나지 않는 고유의 비선형적 광학 특징까지 동시에 발현시키는 특징으로 인해 스마트 디스플레이에 응용될 수 있다. 또한, 이들은 현미경 수준에서 관찰할 수 있고, 우주론, 응집물질물리학과 같은 분야의 현상과 위상학적 특징을 공유하기 때문에 기초 과학 연구의 모델로 활용될 수 있다(그림 2).

액정 고분자(LCP)는 이러한 특성을 한 단계 발전시켜, 분자 수준의 정밀한 배향 제어와 안정화를 가능하게 합니다. 액정의 유동성과 고분자의 강성을 결합한 LCP는 비등방적 기계적·광학적·전기적 특성이 요구되는 응용에서 탁월한 성능을 보인다. 더 나아가, (1) 액정 단량체 단계에서 설정한 배향 상태를 고분자화 이후에도 그대로 프로그램 가능한 구조로 고정할 수 있어, 이를 활용해 다공성 구조의 LCP 마이크로입자를 제조하고 여기에 다양한 기능성 무기 나노 입자(예: 도전성/자성/광열 나노필러)를 도입한 하이브리드 복합체를 구현할 수 있다. (2) 또한 특정 이온과의 상호작용·친화도가 높은 작용기를 액정 단량체에 설계적으로 도입하면 필름 형태의 LCP 분리막 제작이 가능하며, 액정 분자의 배향을 제어함으로써 도입된 유기 작용기의 배향까지 프로그램할 수 있다. 그 결과, 원하는 방향으로 이온 전달 경로를 정렬시키는 이방성 이온전달 분리막을 설계할 수 있다. 이러한 다재다능함 덕분에 LCP는 기초 과학부터 첨단 기술까지 폭넓은 분야에서 핵심적인 재료로 자리매김하고 있다.

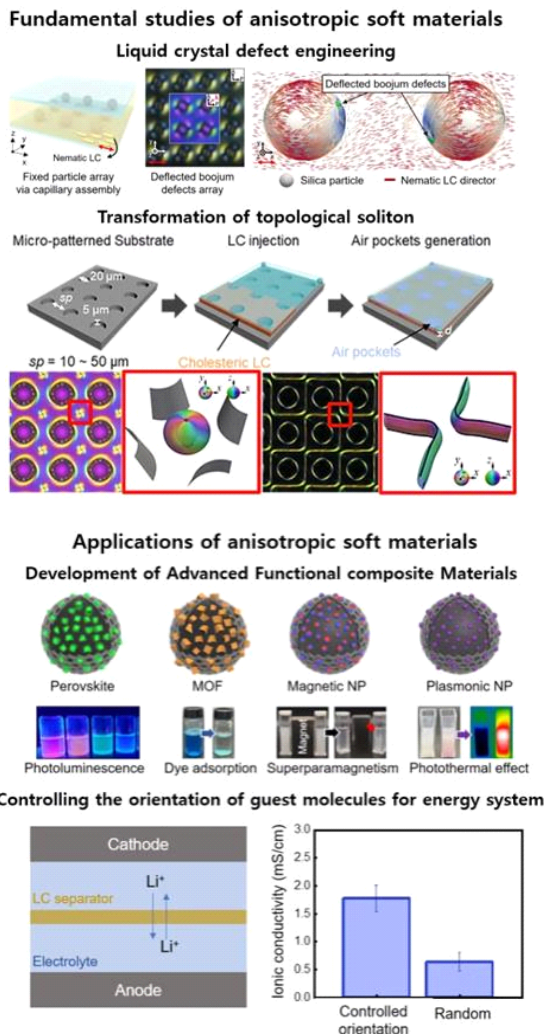


그림 2. 패턴·표면처리·전기장으로 액정의 결함·솔리톤을 정밀 제어하고 이를 하이브리드 LCP 복합체·이온전달 분리막 등으로 확장해 패턴형 광응답·비선형 광학·에너지 기능을 구현하는 비등방성 연성소재 설계·응용 기술.

2.2 액정과 카이랄성 기반 소재 제작 및 응용(Self-Assembled Chiral Structures in Liquid Crystals)

카이랄성은 자연계의 다양한 스케일에서 나타나는 물질의 근본적 비대칭성이다. 일반적 재료의 카이랄성은 분자 고유의 비대칭성에서 기인하지만, 액정에서는 분자의 자가조립으로 형성된 나선형 구조에서도 카이랄성이 발현된다. 본 연구실은 액정의 카이랄 자기조립 메커니즘을 분석하고, 온도·전기장·빛·화학적 첨가제 등 외부 자극을 활용해 카이랄 구조의 형태를 정밀 제어하는 전략을 개발한다. 아울러 카이랄과 빛의 상호작용을 응용하여 첨단 포토닉스와 광학 소자에 적용하는 연구를 수행하고 있으며, 카이랄성 자가조립 구조체에 대한 기초 이해에서 실용적 광학 응용까지 융합 연구를 전개하고 있다(그림 3).

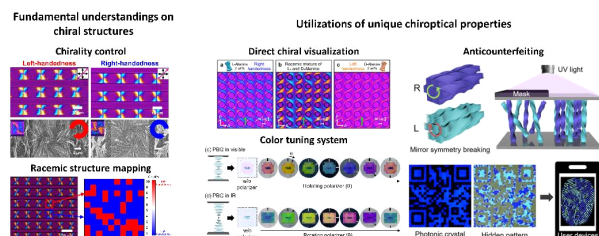


그림 3. 액정의 자가조립으로 형성된 나선형 카이랄 구조를 온도·전기장·빛·화학 첨가제로 능동 제어해 카이랄·광 상호작용을 증강하고 포토닉스·광학 소자에 적용하는 카이랄성 기반 소재·응용.

2.3 하이브리드 유·무기 소재의 이방성 및 응용(Anisotropy in Hybrid Organic-Inorganic Materials and Applications)

재료의 구조와 성질 사이의 관계를 규명하는 것은 재료 화학 분야의 핵심 과제이다. 본 연구실은 거시적 배향(macroscopic alignment)을 통해 구조적 이방성(anisotropy)에서 기인하는 물리적 성질을 관찰하며, 미시적 구조가 물리화학적 성질에 미치는 영향을 탐구하는 것을 목표로 한다. 금속-유기 골격체(metal-organic framework)나 2D 나노 재료(MXene 등)와 같은 결정성 재료들은 흔히 그 자체로 광학적, 전기적, 기계적 이방성을 지닌다. 하지만 일반적인 벌크(bulk) 분말이나 필름 형태에서는 개별 결정들이 무작위로 배열되어 있어 재료 본연의 이방성이 발현되기 어렵다는 한계가 있다. 본 연구실은 이방성을 극대화하기 위해 합성된 나노/마이크로 결정의 배향을 후-합성(post-synthetic) 단계에서 정밀하게 제어하는 독창적인 전략을 보고하였다. 대표적으로 (1) 액정(liquid crystal)을 매트릭스로 사용하여 결정의 자가 조립을 유도하거나 (2) 전기장과 같은 외부 자극을 이용해 결정을 원하는 방향으로 능동적으로 배열한 바 있다. 이를 통해 개별 결정의 고유 특성을 거시적인 스케일에서 구현해내고, 고유의 이방적 성질을 극대화하여 구조-성질 상관관계 확립에 기여한다. 이러한 접근법을 바탕으로 본 연구실은 ▲편광(polarized light)에 따라 고유한 패턴을 나타내는 광학 보안 소자(Nano Letters, 2023), ▲전기 신호로 전도도 이방성을 원하는 대로 조절하는 복합 필름(Small, 2024), ▲빛과 습도에 모두 반응하여 특정 방향으로 움직이는 이중 감응형 소프트 액추에이터(ACS Applied Materials & Interfaces, 2025) 등을 성공적으로 개발하였다(그림 4).

2.4 생체고분자 배향 제어 및 응용(Alignment Control of Biopolymers and Applications)

자연유래 고분자는 생체 내외 환경과 정교하게 상호작용할 수 있는 고유의 구조적·화학적 특성을 지니고 있어, 차세대 기능성 소재로 주목받고 있다. DNA, 셀룰로오스, 키틴, 실크, 아미로이드, 바이러스(M13 등)와 같은 고분자들은 분자 수준에서 규칙적으로 배열된 기능성 작용기를 고밀도로

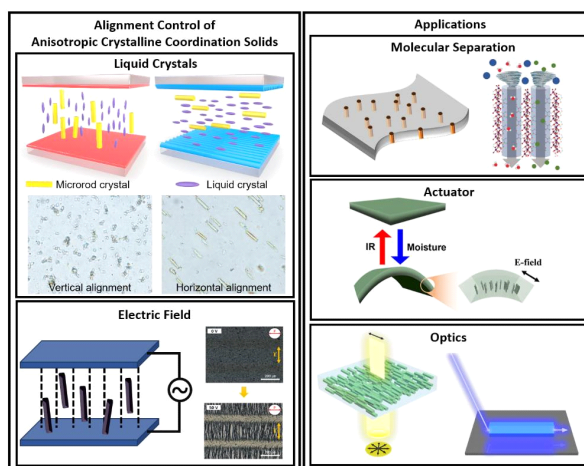


그림 4. 유·무기 하이브리드 소재의 이방성 구조와 배향제어를 통한 전자·광학·에너지 성능을 구현하는 응용 기술.

포함하고 있으며, 이는 기존 합성 고분자로는 구현이 어려운 구조적 정밀성과 더불어 생체적합성, 생분해성 등의 우수한 특성을 제공한다. 본 연구실은 이러한 자연유래 고분자 중에서도 막대형 구조체를 중심으로, 특정 농도 이상에서 발현되는 액정상(liquid crystalline phase)의 집단적 정렬 현상에 주목하고 있으며, 이를 기반으로 정렬된 기능성 구조체의 설계 및 응용을 위한 연구를 수행하고 있다.

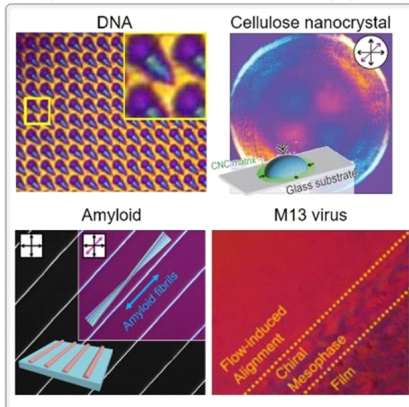
액정상은 분자 간 배타 부피(excluded volume)를 최소화하려는 경향으로 인해 자발적 정렬(self-assembly)을 유도하며, 이로 인해 비교적 작은 외력만으로도 정렬 상태를 형성할 수 있는 장점을 가진다. 본 연구실은 이러한 특성을 활용하여, 전단력을 효과적으로 인가할 수 있는 증발유도 자기조립(EISA), 광중합 기반 확산(diffusion-induced mass flow) 등 다양한 접근법을 통해 정렬 구조체를 구현해왔다. 제작된 구조체는 하이드로젤, 오키노젤, 나노복합 필름 등 다양한 형태로 확장 가능하며, OLED 산란층, 균열 제어 기능성 필름, 항서리(anti-icing) 코팅 등 실제 응용 사례로도 연결되고 있다. 이처럼 본 연구실은 자연기반 고분자의 고유한 물성과 액정 상태에서의 집단적 동역학을 융합함으로써, 생체재료, 연성전자, 환경소재 등 다양한 분야에 적용 가능한 차세대 비등방적 기능성 소재 플랫폼을 구축하는 것을 목표로 하고 있다(그림 5).

2.5 액정 고분자 기반 소프트 일렉트로닉스(Liquid Crystal Polymer-Based Soft Electronics)

고주파 대역에서 손실과 비선형성이 심화됨에 따라, 재구성 가능한 유전층(reconfigurable dielectric layer)으로서 액정(liquid crystal)의 활용이 주목받고 있다. 액정은 RF 전계에 따라 분자 배열을 조절해 유효 유전율을 제어할 수 있으며, 이는 공진 특성과 전파 상수의 변화를 유도해 전파를 능동적으로

Shear force - induced alignment

Evaporation induced self assembly (EISA)



Diffusion induced mass flow

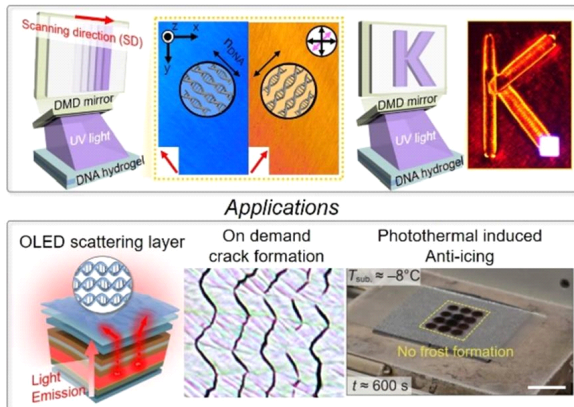
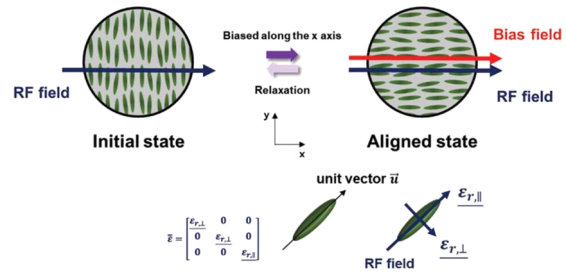


그림 5. 액정상을 형성하는 생체고분자의 배향을 전단·증발·확산 기반 공정으로 제어하여 하이드로겔, 나노복합 필름 등으로 확장하고 이를 OLED 산란층, 균열 제어, 항서리 코팅 등 기능성 응용으로 연계하는 생체고분자 배향 제어 및 응용 기술.

제어한다. 기존의 MEMS나 P-i-n 다이오드 기반 가변 소자는 40 GHz 이상에서 손실이 커지고 전기적 길이 감소로 제작비가 급증하지만, 액정은 Debye relaxation에 기인한 저손실과 연속적인 가변성을 Sub-THz 영역에서도 유지한다. 이러한 특성은 위성통신 등 고직진성 응용에 적합하며, 소형화 및 집적화에도 유리하다. 최근에는 Merck GT 및 JNC ZOC 시리즈 등 저손실, 고가변성 RF용 네마틱 액정, LCP·엘라스토머 기반 유연 안테나, 나노입자 및 폴리머 네트워크를 활용한 응답속도 향상 연구가 활발히 진행되고 있으며, 안테나 분야에서는 액정을 이용한 Sub-THz 전파 능동 표면(reconfigurable intelligent surface), Ku band 위성통신, 홀로그래픽, 누설전파 안테나 등이 집중적으로 연구되고 있다. 다만 차세대 전자공학의 구현을 위해서는 여전히 재료적, 공정적 한계가 존재하며, 이를 극복하기 위한 지속적인 다학제적 연구가 필요하다(그림 6).



* Numerical calculation of effective dielectric constant of RF device

$$\epsilon_{eff}(r) = \epsilon_{\perp} + \Delta\epsilon(\hat{E}(r) \cdot \hat{n}(r))^2 \quad \rightarrow \quad \epsilon_{eq} = \frac{\int_V \epsilon_{eff}(r)|E(r)|^2}{\int_V |E(r)|^2 dV}$$

그림 6. 액정고분자 기반 저유전-저발열-저전압 안테나 및 절연층 개발을 통해 차세대 무선통신 품질을 향상하는 응용 기술.

3. 연구실 현황

한국과학기술원 연성소재조립 연구실은 윤동기 교수의 지도하에 박사후연구원 3명(허정무, 윤희성, 마준석), 박사과정 8명(김주리, 박영서, 김백만, 홍태균, 한정연, 이근중, 전시은, 김주영), 석사과정 2명(신지원, 이사람)으로 구성되어, 액정 나노구조 제어, 자기조립 기반 배향 제어, 광학 소자 및 센서, 바이오 나노소재 설계, 유기 복합체-액정 기반 재료 제작 등 광범위한 연성소재 연구를 수행하고 있다. 2011년 연구실 출범 이후 *Science Advances*, *Advanced Materials*, *Nature Communications*, *ACS Nano*, *Carbon*, *Advanced Functional Materials*, *Small*, *Advanced Optical Materials*, *ACS Applied Materials & Interfaces* 등 SCI급 국제학술지에 해마다 꾸준히 논문을 게재하고 국내외 특허를 출원·등록하였다. 더불어 해외(미국, 스위스, 프랑스, 폴란드, 체코, 스페인) 우수 연구진과의 협력을 통해 재료 및 기초과학 분야의 다양한 연구 과제를 활발히 추진하고 있다. 아울러 윤동기 교수는 JID 발전상, 에스-오일 과학문화재단 제6회 화학분야 차세대과학자상, ILCS 중견학술상을 수상하며 국내외에서 연구 성과와 리더십을 인정받고 있다. 졸업생들은 학계(국내 대학 교원, 정부출연연구소, 해외 박사후연구원)와 산업계(삼성, SK 등) 전반에 진출해 활발히 활동하고 있다.

감사의 글

This research was supported by the KAIST KI prototype research project.

이 논문은 KAIST KI Prototype 연구사업 지원을 받아 수행된 연구임.