

산학연 연구실 소개 (1)

서울대학교 지능형 유도조합체 연구단

(The National Creative Research Initiative Center for Intelligent Hybrids)

주소: 서울시 관악구 관악로 1 서울대학교 302동 616호 (우: 08826)

전화: 02-880-1877, Fax: 02-873-1548

E-mail: khchar@snu.ac.kr Homepage: <http://intelligent-hybrids.snu.ac.kr>

연구책임자 | 차국헌 교수
서울대학교

1. 연구실 비전 및 개요

최근 자연에 존재하는 생체물질의 독특한 형상 및 내부구조를 인공적으로 모방하여 생체물질이 지닌 다양한 기능성을 모사하고자 하는 생체 모사학(Biomimetics)이 세계적으로 많은 관심을 받고 있으며, 이와 같은 과학적 해석을 기반으로 생체 시스템을 모사하려는 접근은 기존 상상력의 틀을 벗어나 나노바이오 및 에너지, 환경 분야의 연구에 새로운 가능성을 제시하고 있다. 예를 들면, 연꽃 잎은 마이크로 및 나노미터의 계층적 표면 거칠기를 통해 초소수성 및 자정작용(self-cleaning)을 보이며, 전복껍질 진주 층은 수백 나노미터 두께의 탄산칼슘 무기물질과 수십 나노미터 두께의 단백질 유기 박막층이 번갈아 적층되어, 그 균열 저항성이 3,000배 이상 증가된다. 본 연구단은 교육과학기술부에서 지정한 창의적 연구사업의 일환으로 2010년 지능형 유도조합체 연구단(The National Creative Research Initiative Center for Intelligent Hybrids)으로 선정되어, 생물체 내의 유기/무기 조합체(Hybrid) 및 계층적 구조와 다양하고 독특한 기능성과의 상관관계를 이해하고, 그 생성 기전으로부터 단서를 얻어 기존의 기술과 접근법으로는 불가능했던 혁신적인 구조 및 신조합체 물질을 개발하여 인류가 당면한 문제점인 생명공학 및 에너지, 환경 문제를 해결하는 돌파구를 제시하기 위한 연구를 수행하고 있다. 이를 위해 자연이나 생체에서 배울 수 있는 다양한 기능 및 특성을 재료화학적인 측면으로 이해하고, 다양한 기능성 나노 구조물을 체계

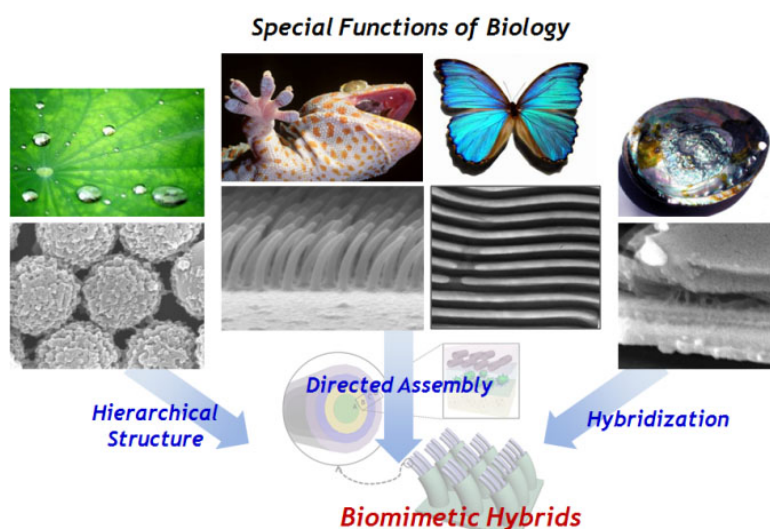


그림 1. 생체 모사구조에 기반한 지능형 유도조합체의 계층적 구조에 대한 예.

적으로 조합화(hybridization)하고, 이를 원하는 형태로 유도조립(directed assembly)하여, 계층적인 구조(hierarchical structure)를 지닌 지능형 유도조합체를 설계하고 제조할 수 있는 플랫폼을 제시하며, 이를 바이오 메디컬 분야 및 에너지/환경 분야에 능동적으로 적용할 수 있는 다기능 지능형 유도조합체 시스템을 구현하는 것을 목표로 하고 있다(그림 1). 본 연구단은 최근 6년간 *Nature Chemistry*, *Nature Communications*, *Angewandte Chemie*, *Advanced Materials*, *ACS Nano* 등과 같은 최우수 학술지를 비롯한 SCI급 저널에 100여 편의 논문을 게재했으며, 매년 상위 10 %의 저널에 10편 이상의 논문을 꾸준히 발표하고 70여 건의 특허를 출원 및 등록하였다.

2. 주요 연구분야

2.1 유·무기 하이브리드 기능성 나노물질 제조에 대한 연구

본 연구단은 나노입자, 그래핀, 콜라겐 및 양친화성 물질인 미셀 등의 기능성 물질 간 조합화(hybridization)를 통해 새로운 구조 및 다양한 기능을 가지는 조합체를 개발하는 연구를 수행하고 있다. 나노입자는 작은 입자크기와 상대적으로 큰 표면적으로 인해 벌크 상태에서는 구현되지 못했던 독특한 성질을 발현하기 때문에 유도조합체를 형성하기 위해서는 이상적인 물질이다. 따라서 본 연구단에서는 0차원의 양자점(quantum dot), 1차원의 나노막대(nanorod), 3차원의 4족류(tetra pods) 등 다양한 형태의 무기 나노입자를 합성하였다(그림 2a). 또한, 기능성 나노물질을 기반으로 하여 다기능 유도조합체를 구현하기 위해서는 나노물질들 사이의 상호작용을 조절함으로써 나노물질 간의 회합 대칭성을 조절하는 기술의 확립이 매우 중요하다. 나노물질 간 상호인력을 조절할 수 있는 대표적인 방법은 나노물질 표면에 고분자 브러쉬를 도입함으로써 나노물질의 표면 에너지를 조절

하는 것이다. 그림 2b에서는 고분자 브러쉬 도입에 따른 나노입자의 분산 안정성을 보여주고 있으며, 4족류의 경우도 표면에 고분자 브러쉬를 도입함으로써 그 분산이 매우 안정적임을 확인하였다. 이와 같이 상호인력 및 계면현상 제어를 통해 나노물질의 성능을 극대화할 수 있는 기반기술 구축을 통하여 고효율, 고기능성 금속-반도체 나노조합체를 구성할 수 있었다. 본 연구단은 다양한 색을 지니는 양자점만으로 구성된 다층 초박막 제조기술로 우수한 휘도와 색 균일도를 지니는 발광소자를 제작하였으며(*Nano Lett.* **10**, 2368 (2010)), 더 나아가 현재까지 확보한 기술들을 바탕으로 다양한 색을 띠는 양자점을 복합화한 백색광 발광소자 구현에 성공하였다(*Adv. Mater.*, **26**, 6387 (2014))(그림 2c). 또한, 4족류 고분자-무기 나노입자를 사용, 고분자 매트릭스 내에서 효율적인 분산구조를 형성하여 궁극적으로 빛에 응답하는 하이브리드 태양전지로의 응용이 가능하다는 것을 보였다(*Macromol. Rapid Commun.*, **35**, 1685 (2014)).

최근에는, 전 세계적으로 원유정제에 따른 황의 과잉생산에 따른 환경 문제를 최소화하고자 황을 다량으로 활용하기 위하여 황과 유기 단량체와의 고차원 복합화를 통해 유무기 조합체로 활용함과 동시에 물리화학적 성질을 변화시킴으로써 차세대 기능성 소재로 사용하는 연구를 활발히 진행하고 있다. 황은 근본적으로 높은 전기 화학적 용량 및 높은 굴절률, 항균성 등 뛰어난 물성을 가지고 있으나, 그 자체만으로는 대부분의 유기용매에 녹지 않는 특성을 지녀 가공이 어렵다는 단점이 있었다. 본 연구단은 세계 최초로 역가황반응

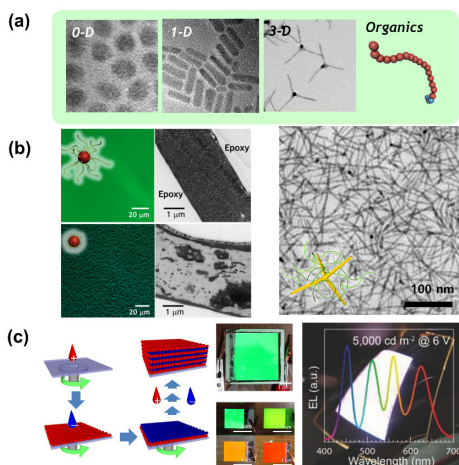


그림 2. (a) 나노물질의 합성, (b) 유/무기 조합을 통한 나노물질의 분산, (c) 나노물질 기반 발광소자 제작.

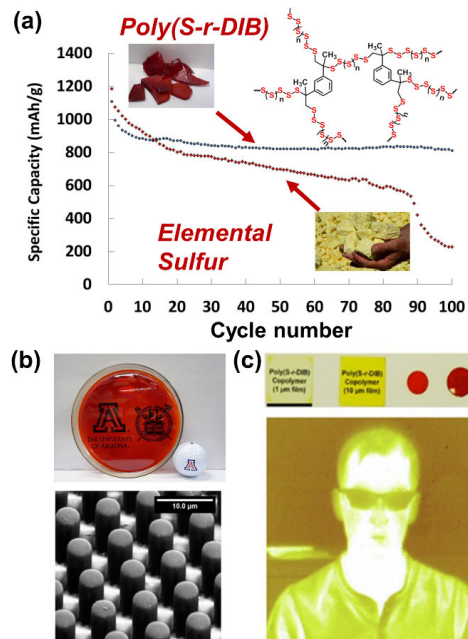


그림 3. (a) 황-유기 복합체의 배터리 양극재로서의 안정성, (b) 광학렌즈 (위)와 마이크로 렌즈 구조물(아래), (c) 황기반 유기복합체를 이용한 적외선 광학렌즈를 이용한 적외선 촬영 사진.

(inverse vulcanization)을 통한 황의 새로운 가공법을 제시함으로써, 황이 지니고 있는 우수한 기능성을 직접 차세대 배터리(그림 3a), 고굴절/적외선 렌즈(그림 3b,c) 등으로 다양하게 구현하였고(*Nature Chem.*, **5**, 518 (2013)), 다른 기능성 물질들과의 고차원 융복합화를 통해 기존에 가지고 있던 황 고유의 물성에 전기전도성 등의 추가 기능성을 효과적으로 발현시킬 수 있는 기반 기술을 확보하였다. 우수한 광학적 특성을 지닌 황을 도입하여 제조한 광학렌즈는 기존의 플라스틱 기반 광학렌즈와 함께 실제 적외선 카메라 촬영 결과, 기존의 적외선 광학소자에 사용되었던 값비싼 무기소재와 비슷한 광학 성능을 훨씬 저렴한 황기반 유기 복합체로 구현할 수 있었다(*Adv. Mater.*, **26**, 3014 (2014))(그림 3c). 그 외에도 황과 황화 나트륨의 반응을 통해 얻어낸 무기 폴리설파이드(inorganic polysulfide)를 이용한 계면중합 반응을 통하여 황 함량이 높은 균일한 황 고분자 나노입자를 합성하였다. 이와 같이 기존에 다루기 어려운 황을 화학적으로 가공하여 다량으로 사용할 수 있는 기반을 마련했다는 점에서 현재 전세계에서 높은 관심을 받고 있으며, 관련 황기반 신 가공법 및 응용에 대한 다수의 특허를 출원한 바 있다.

2.2 물질 간 상호인력 제어 기술을 통한 기능성 나노물질의 자기조립에 대한 연구

지능형 유도조립체 시스템의 구축을 위해서는 이러한 기능성 나노물질의 배열 및 형상을 목적에 맞도록 조절하는 것이 요구된다. 본 연구단은 기능성 나노물질들의 배열 및 형상을 원하는 형태로 조절하기 위하여 유도조립현상을 이용하여 열역학적으로 안정된 구조를 형성할 뿐만 아니라, 구조적 결함을 최소화하며 상대적으로 높은 완성도를 가지는 조합체 플랫폼을 갖추고자 한다. 나노물질을 원하는 형태로 배열하고 조립하기 위해서는 조합화를 통한 나노물질의 특성 조절과 더불어 기판의 표면 특성을 적절하게 조절하여 나노물질과 기판과의 상호작용을 조절하는 것이 매우 중요하다. 그 예로, 본 연구단에서는 표면에너지를 정확하게 조절할 수

있는 유기실리케이트 템플레이트를 이용함으로써 블록공중합체 박막 내의 나노구조물의 조립을 원하는 방향으로 유도하는 기술을 확립하였고, 패턴이 표면에너지 조절을 통한 고분자 블록의 유도조립을 통해 쉽게 구현 가능함을 보였다(*Macromolecules*, **43**, 461 (2010))(그림 4a). 또한, 그림 4에서와 같이 물질 간의 팽윤 계수가 다른 점을 이용한 선택적인 용매처리를 통해 박막 내에 나노크기의 높낮이 차이를 가지는 표면 구조를 형성하고, 이렇게 형성된 표면 구조 위에서 다른 크기와 구조를 가지는 두 가지 이상의 나노입자를 코팅하여 선택적으로 나노입자가 배열되도록 제어하였다(*ACS Nano*, **3**, 3927 (2009))(그림 4b). 이를 바탕으로, 양/음이온성 물질의 흡/탈착 평형관계에 의해 조절되는 정전기 유도조립 기술(electrostatic directed assembly) 및 자성유도 조합기술(magnetic directed assembly) 개념을 접목한다면 앞서 제조기술을 확보한 다양한 물질들의 물성을 이용한 선택적 표면구조 형성 및 이를 통한 나노복합체의 선택적인 유도배열이 가능할 것으로 예상된다. 또한, 앞서 확보한 반도체 나노입자의 표면처리 및 표면준위제어, 반도체 나노입자와의 상호작용을 위한 전도성 고분자의 화학적 구조 제어에 대한 기반기술을 재구성하여, 4족류 나노입자의 자기조립을 이용하여 구성된 소자로 고효율의 광전변화 나노구조체를 구현하는 연구 등을 통해 나노입자의 자기조립, 입자 표면처리, 나노조합체의 형성을 분리하여 자기조립 현상을 독립적, 능동적으로 제어할 수 있는 새로운 고차원의 복합시스템을 구현하고자 한다.

2.3 계층적 구조 형성을 위한 패턴링 기술에 관한 연구

최종적으로는 기능성 나노물질의 합성과 상호인력조절 및 배열제어를 이용한 기술을 유기적으로 연계, 융합하여 각 물질이 가지고 있는 기능이 상호보완적으로 융복합화된 새로운 조합체 시스템을 창출하고자 한다. 유도조립을 통해 나노미터 수준으로 조절된 나노물질 구조체를 다시 거시적 수준(마이크로미터)의 패턴화 또는 2차 유도조립화를 통하여 새로운 기능을 갖는 계층적 구조를 형성할 수 있다. 본 연구단에서는 비전통적인 패턴링을 이용하여 유기 나노기둥을 형성하고, 사선 증착법을 이용하여 한쪽 방향으로 휘어지는 나노기둥 구조물을 만들어 방향에 따르는 접착력의 차이를 보이는 Gecko의 발바닥 구조를 유사하게 모사하였으며(*Nano Today*, **4**, 385 (2009))(그림 5a), 동일한 방식으로 알루미늄 증착에 따라 자발적으로 측면 주름(lateral buckling) 구조를 형성하는 새로운 나노벽 구조물을 제시하여 전세계적인 관심을 받았다(*Adv. Funct. Mater.*, **22**, 3723 (2012))(그림 5b).

또한, 본 연구단은 프리즘 패턴 형성 후 사선 증착법을 통해 프리즘의 한쪽 면에만 반사 혹은 흡수물질을 코팅하는 루

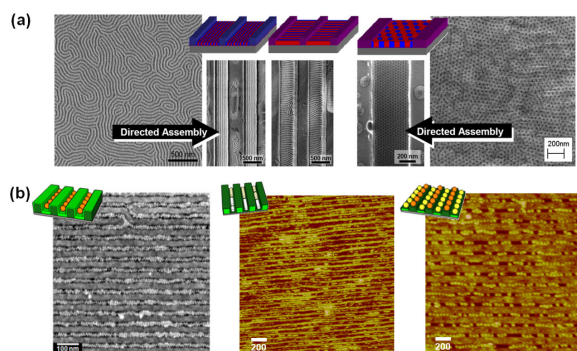


그림 4. (a) 표면에너지 조절을 통한 블록공중합체 박막의 유도조립. (b) 블록 공중합체의 높낮이 차이로 유도된 두 종류 나노입자의 선택적 배열.

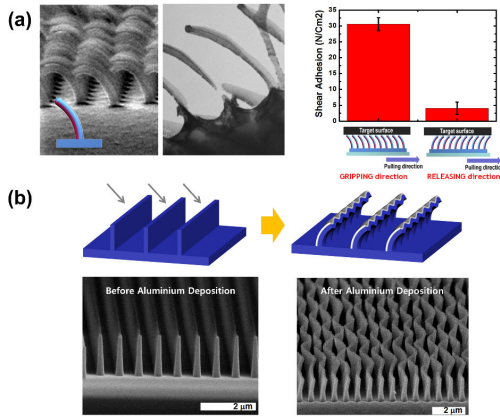


그림 5. (a) 고분자 구조물의 선택적인 금속조합을 이용한 나노 기둥 패턴을 통한 Gecko 모사 (b) 측면 주름 형성 및 제어.

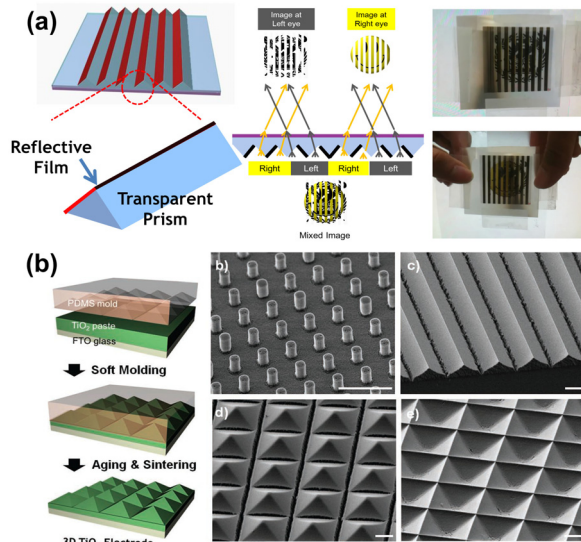


그림 6. (a) 프리즘 어레이를 이용한 빛의 제어 기술, (b) 이산화티탄 광전극의 3차원 계층적 구조를 이용한 염료감응형 태양전지 연구.

시우스 프리즘어레이(lucius prism array)를 디자인하였고, 안경이 필요없는 3D 디스플레이를 위한 빛 제어할 수 있는 기술(그림 6a)은 Nature.com의 헤드라인으로 선정되었으며, 과학전문잡지 및 국내 다양한 미디어에서 대대적으로 소개된 바 있다(Nat. Commun. 2, 455 (2011)). 뿐만 아니라, 이러한 다양한 계층적 구조 형성 기술들을 토대로, 소프트 임프린팅 기법과의 복합화를 통해 계층적 구조의 나노입자 패턴을 구현하는 기술을 구축하였다. 패턴된 PDMS 몰드를 이



〈지능형 유도조합체 연구단 구성원〉

용하여 염료감응형 태양전지에서 광전극으로 이용되는 이산화티탄 나노입자들을 여러 종류의 3차원 마이크로 구조(기둥, 프리즘, 피라미드/역피라미드)로 구현하였고(그림 6b), 그 중 기본 평면 광전극에 비해 약 25% 이상 높은 광 흡수를 증가를 보이는 피라미드 구조에 추가적으로 산란층 입자를 코팅하여 고차원 계층구조를 형성하였다. 이러한 3차원 구조의 광전극은 기존의 소자 제조과정을 크게 변화시키지 않고 간단한 공정만을 추가하여 광전극 내에서 40% 정도 광흡수율을 효과적으로 향상시켰으며, 기존의 2차원 평면구조에서 탈피한 새로운 광전극 제조 패러다임을 제시한 바 있다(Adv. Mater., 25, 3111 (2013)).

3. 지능형 유도조합체 연구단 구성원 소개

현재 본 연구단은 차국현 교수를 중심으로 박사후연구원 2명, 박사과정 11명, 석사과정 15명이 각각 독창적인 연구주제를 가지고, 국내외 다양한 분야의 연구진 및 산업체와 협력 연구를 진행하고 있다. 본 연구단의 석/박사 학위 졸업생들은 MIT, UPenn, Minnesota 대학, 독일 Max Planck Institute 고분자 연구소와 같은 해외 우수 대학 및 연구소에서 박사후 연구 과정을 거쳐 국내 대학 교수로 임용되거나, 국내 LG화학, 삼성종합기술원, 삼성전자와 같은 대기업 연구소뿐만 아니라 한국과학기술원과 같은 정부 출연 연구소에서 활발한 연구를 하고 있다. 또한, 매년 초 실험실 재학생과 졸업생들이 교수님과 함께 하는 신년 행사와 정기적인 워크숍 등의 연구실 행사를 통해 친목을 다지는 등 본 연구단은 우수한 연구개발 실적과 더불어 창의적이고 리더십이 뛰어난 인력 양성에도 기여하고 있다.