

산학연 연구실 소개(2)

포항공과대학교 화학공학과

콜로이드 시스템 집적 연구실

(Colloidal Systems and Integration (CSI) Lab, POSTECH)

주소: 경상북도 포항시 남구 청암로 77 포항공과대학교 화학공학과 (환경공학동) (우편번호: 37673)

전화: 054-279-2266

E-mail: yigira@postech.ac.kr, Homepage: <http://yigira.com>

연구책임자 | 이기라 교수

포항공과대학교
화학공학과

1. 연구실 소개

콜로이드 분산계(colloidal dispersions)는 전통적으로 화장품, 페인트, 프린터용 토너(toner), 촉매, 식품 등의 핵심소재기술로 오랫동안 활용되어 왔으며, 최근에는 반도체 평탄화 용액(CMP slurry), 배터리 전극, 전자종이용 잉크 등의 응용 소자를 위한 주요 소재로서 광범위하게 적용되고 있다. 또한, 보다 정밀한 콜로이드 입자의 크기조절이 가능해지면서 비등방성 도전성 필름(anisotropic conductive film, ACF)용 마이크로입자, 고화질 디스플레이용 컬러필터용 양자점 등이 구현되는 등 새로운 응용 분야가 점차 확대되고 있다.

본 “콜로이드 시스템 집적 연구실”에서는 콜로이드의 크기 조절 기술을 바탕으로 입자간의 상호작용을 제어함으로써 콜로이드 입자의 자기조립 구조에 관한 기초 연구와 다양한 응용연구를 아래 그림과 같이 수행하고 있다.

콜로이드 조립구조 연구와 관련하여, 최근 콜로이드 입자 표면에 DNA를 코팅하는 다양한 방법을 개발하여, 염기서열을 설계하여 입자간 상호작용을 프로그램함으로써 이전에는 구현할 수 없는 다양한 콜로이드 결정구조체를 조립할 수 있음을 보고하였으며 최근에는 입체장에 효과와 결합하여

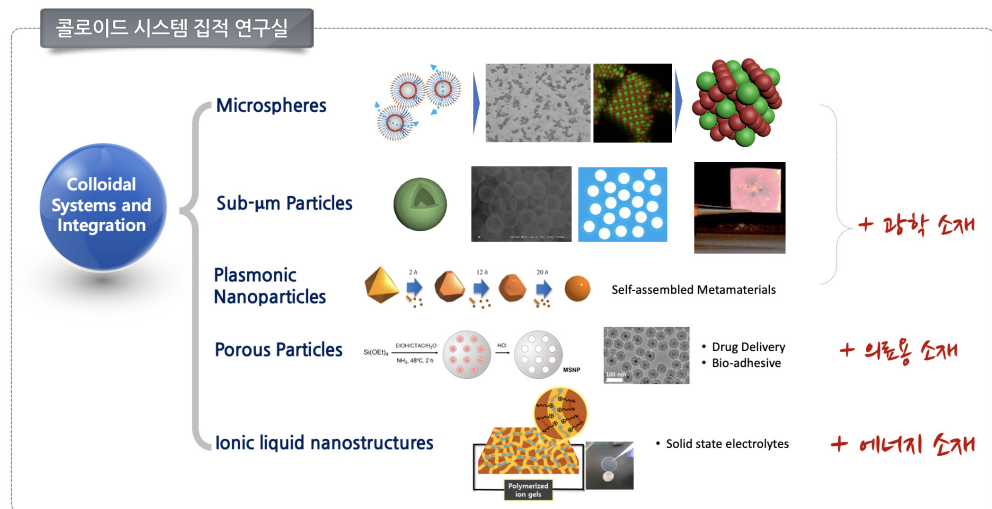


그림 1. “콜로이드 시스템 집적 연구실”의 주요연구분야.

다이아몬드 구조를 구현하는데 성공하였다. 또한, 특정부분에만 DNA가 코팅된 DNA 패치입자를 성공적으로 제조하고, 소형 집합체(cluster), 선형 체인(chain), 이중 판상(bilayer) 구조 등의 단백질 구조와 유사한 콜로이드 슈퍼구조(superstructure)를 실험적으로 구현하여, 단백질과 같은 생체물질에서 관찰되는 복잡한 구조와 거동을 이해하기 위한 연구를 수행 중이다.

한편, 이러한 콜로이드 입자는 크기가 빛의 파장영역대로 작아지는 경우 빛과의 상호작용이 강해져서 입자의 형상과 구조에 따른 강한 산란특성이 나타나게 되므로, 이를 위한 콜로이드 입자를 합성하고 조립하여 필요에 따른 구조색을 구현하는 광학소재 응용 연구를 수행 중이다. 특히, 입자의 표면에 매질과 굴절률이 같은 물질을 코팅하여 코어-셸 구조 입자를 합성하여 입자간 거리를 효과적으로 조절하여 단일산란(single scattering)에 의한 유용한 구조색을 구현하는 연구를 집중적으로 진행하고 있다.

또한, 입자내에 기공을 도입한 다공성 나노입자를 합성하여 약물전달체 또는 화장품용 소재로 활용하는 연구를 수행하고 있으며, 최근 다공성 나노입자의 넓은 비표면적을 이용하여 하이드로젤 또는 조직내의 고분자의 흡착을 통한 의료용 접착제로 활용하기 위한 연구를 하고 있다. 마지막으로 이온성 액체 계면활성제를 기반으로 이중연속상 구조를 제조하고, 고정화를 통해 유연하면서도 이온전도도가 높은 고체전해질 개발을 목표로 연구를 진행 중이다.

2. 주요연구분야

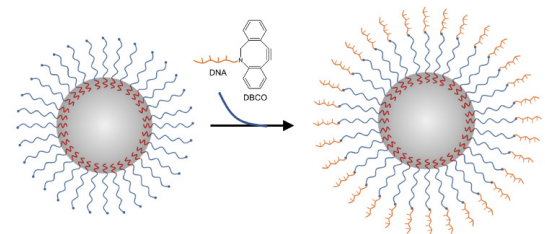
2.1 DNA가 코팅된 콜로이드 입자 조립과 관한 연구

콜로이드 분산계는 정전기힘과 같은 입자간 반발력에 의해 안정하게 분산되지만, 조립을 통한 구조화를 위해서는 입자간 인력의 조절이 핵심기술이다. 본 연구실에서는 최근에 아래 그림에 보인 바와 같이 입자 표면에 양친성 블록 공중합체를 코팅하고, 클릭반응에 의해 DNA를 결합함으로써 고밀도 DNA 브러쉬(brush)를 구현할 수 있음을 보고 하였다. 고밀도 DNA 브러쉬로 코팅된 마이크로 입자는 DNA 결합이 녹는점 근방에서 유지하여 콜로이드 결정을 구현하였다. DNA 염기서열이 자체적으로 상보적(self-complimentary)인 경우 면심입방구조(face-centered cubic structure)로 조립되었으며, 크기가 같은 두 입자가 서로 상보적(complimentary)인 DNA로 코팅된 경우 체심입방구조(body-centered cubic structure)로 조립됨을 알 수 있다.

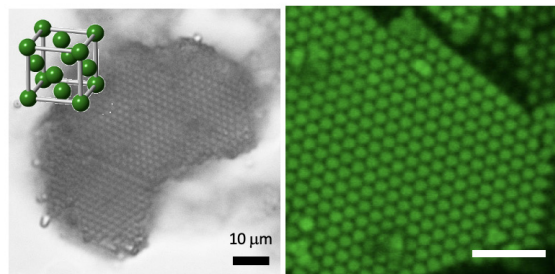
구형의 입자 뿐만 아니라 사면체 클러스터에도 DNA를 코팅하고 사면체 클러스터를 결합하여, $MgCu_2$ 구조와 같은 형태의 콜로이드 구조체를 제조할 수 있음을 보였다. $MgCu_2$ 구조는 다이아몬드 구조와 파이로클로로(pyrochlore) 구조

가 서로 혼합된 구조로 한쪽 상을 제거하여 광학특성이 매우 우수한 광결정(photonic crystals)을 구현하는 연구를 진행 중이다. 또한, 이러한 연구 결과를 바탕으로 자연계에 존재하는 합금(alloy) 또는 금속간화합물(intermetallic compound)의 형성 원리를 탐구하고, 자연계에 존재하지 않는 준결정 등의 새로운 콜로이드 결정을 구현하는 연구를 진행 중이다.

한편, 아래 그림에 나타난 바와 같이 두 가지 물질로 이루어진 이중상(biphasic) 입자를 이용하여 한쪽 상에만 선택적으로 DNA를 코팅함으로써 두가지 서로 다른 특성을 표면을 갖는 야누스(Janus) 입자를 제조하는 방법을 개발하여, 두 면의 비율 즉 패치 비율에 따라서 클러스터, 사슬, 이중판상형 구조체가 언어짐을 확인하였다. 뿐만 아니라, 그림 4c에 보인 바와 같이 중심입자 주위로 4개의 입자를 코팅하여 언어진 사면체 클러스터에서 붉은색으로 표시된 영역에 DNA를 코팅하여 중심간 결합을 유도하고, 이 과정에서 입자의 입체장에 효과에 의해 특정 각도로만 결합을 유도하여 다이아몬드 결정구조가 한번에 언어짐을 보고한 바 있다.



Self-complementary FCC structure



Complementary CsCl-like structure

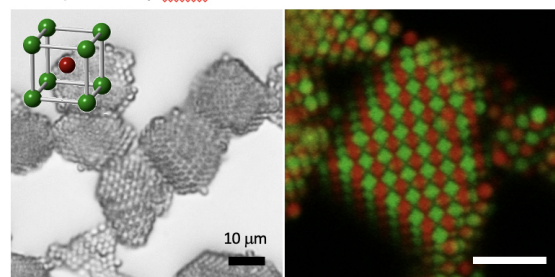


그림 2. 고밀도 DNA 브러쉬로 코팅된 마이크로 입자의 합성 과정과 조립구조의 예.

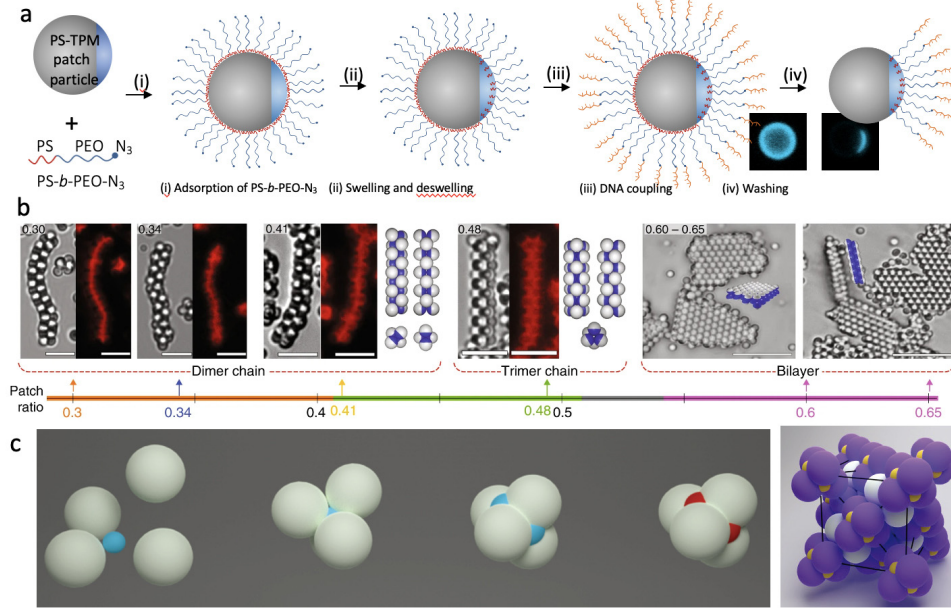


그림 3. (a) 고밀도 DNA사 선택적으로 코팅된 야누스 입자의 합성 방법과 (b) 이들의 DNA의 선택적 조립을 통해 얻어진 콜로이드 수퍼구조, (c) 정전기적 인력을 이용한 사면체 패치입자 제조과정과 사면체 패치입자의 중심간 DNA결합을 통해 조립되는 다이아몬드 구조체 모식도.

2.2 콜로이드 구조색 (Structural Colors)

콜로이드 입자의 크기가 빛의 파장크기와 유사하면 강하고 독특한 산란특성이 나타나게 되며, 산란광은 입자간 거리에 따라 조절될 수 있음이 알려져 있다. 본 연구실에서는 중공형 실리카 입자를 제조하고, 이들로 이루어진 필름을 제조한 후 실리카와 같은 굴절률의 고분자로 입자 사이를 채움으로서 아래 그림과 같은 복합필름을 만들었다. 입자간

거리는 쉘의 두께에 따라서 달라지게 되므로, 쉘 두께를 조절하면 입자간 거리에 따라 정해지는 반사 산란 파장 즉 구조인자(structure factor)를 조절할 수 있다. 방향에 따라서 입자가 거리가 일정하도록 하기 위해서, 쉘두께가 다른 입자를 혼합하여, 아래와 같이 비정질의 콜로이드 필름을 제조하였다. 반사율 그래프에서 보인 바와 같이 얻어진 반사 산란색은 각도에 관계없이 일정하다. 쉘두께를 조절하면 가

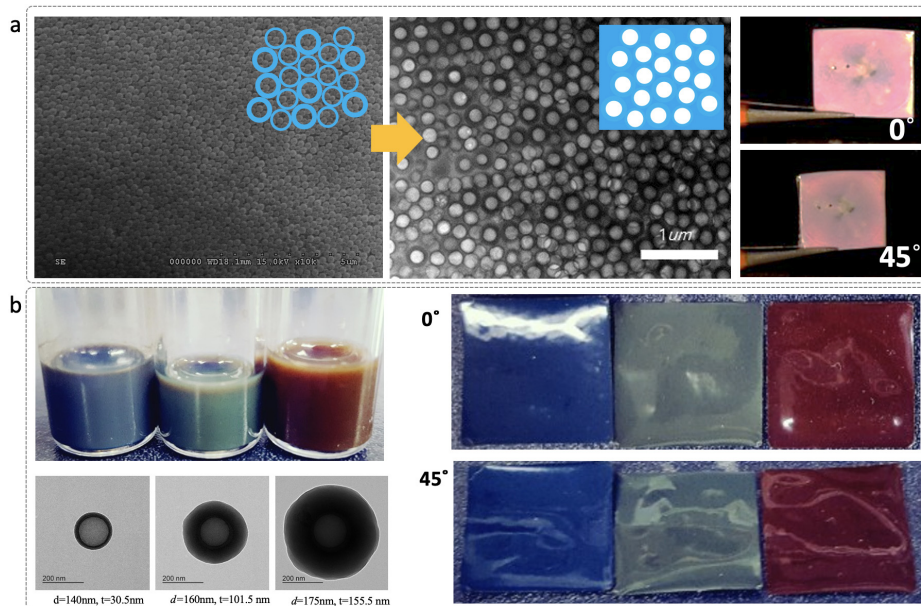


그림 4. (a) 코어의 크기는 같고 쉘의 두께는 다른 두가지 중공형 실리카입자로 이루어진 비정질 구조의 콜로이드 필름과 실리카와 굴절률이 같은 고분자로 채워진 복합체 필름의 사진, (b) 크기가 다른 중공형 실리카 입자 용액의 구조색과 전자현미경 사진과 필름의 구조색을 보여주는 사진.

시광 뿐만 아니라 적외선 또는 자외선을 선택적으로 반사하는 필름을 제조할 수 있으므로 이를 활용한 응용 연구를 수행 중이다.

한편, 반사 산란광은 입자의 크기에 해당하는 파장에서도 나타나는데, 이를 형상인자(form factor)라고 부르며, 일반적으로 구조인자 파장보다 짧은 파장에서 나타나며, 각도의 의존성이 없음이 알려져 있다. 본 연구실에서는 이러한 원리를 바탕으로 실험적으로 중공형 실리카 입자의 크기를 키워서 각도의 의존성이 없는 구조색을 나타내는 콜로이드 용액을 구현하였다. 바인더와 함께 사용하면 다양한 컬러 패턴을 구현할 수 있다.

2.3 다공성 나노입자를 이용한 하이드로젤 및 의료용 접착제

하이드로젤은 고분자 내부에 물을 흡수한 상태로 고분자 농도가 매우 낮은 물질로, 다양한 분야에 활용되어 왔으며, 최근에는 피부 상처치료 용도로 매우 활발하여 사용되고 있

다. 따라서, 하이드로젤과 피부간의 접착에 관한 연구는 많은 관심을 받아왔다. 본 연구진은 하이드로젤 표면에 메조기공 나노입자를 도포하여 하이드로젤 표면의 고분자가 흡착되도록 하고, 반대편은 다른 하이드로젤의 고분자 또는 피부의 생체 고분자가 흡착하도록 하여 접착하는 연구를 진행하였다. 화학결합이 아니고 흡착에 의한 것으로 약하지만, 상처치료 용도로는 충분히 높고, 화학물질이 아니므로 상대적으로 부작용에 대한 염려가 적다는 장점이 있다. 뿐만 아니라 피부의 깊은 상처를 봉합 용도로 활용할 수 있다. 실리카는 생체 내에서 서서히 분해가 일어나기 때문에 고분자 기반의 접착체와 달리 접착 후에 상처가 남지 않는 장점이 있다.

상처 봉합과정에서 일반적으로 출혈이 일어나므로 실리카 입자의 상처 봉합을 위해서는 지혈작용이 먼저 일어나야 한다. 흥미롭게도 실리카는 지혈작용을 할 수 있는 물질로서 이를 활용하여 지혈과 동시에 접착을 유도한 연구 결과를 발표한 바 있다.

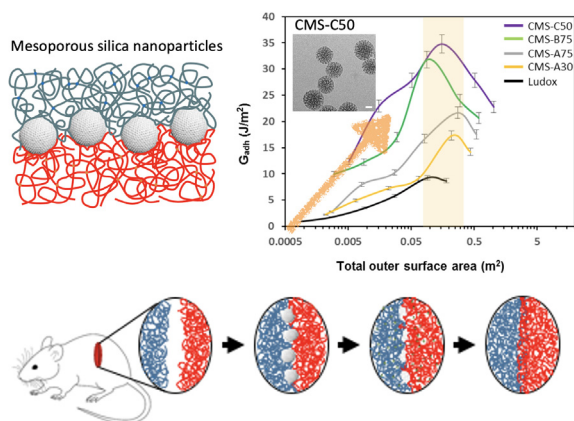


그림 5. 메조기공 실리카 나노입자를 이용한 하이드로젤 접착제의 농도와 종류에 따른 접착에너지 그래프와 상처봉합과 생체분해에 과정 모식도.

3. 연구실 현황 및 비전

“콜로이드 시스템 집적 연구실”은 지난 10여 년간 콜로이드 입자의 합성과 조립에 관해 집중적으로 연구해왔으며, 동시에 입자를 활용한 다양한 응용연구를 수행해왔다. 특히, 아래 그림에 보인 바와 같이 패치입자를 구현하여, 다양한 콜로이드 수퍼구조를 구현하고, 기능성 물질을 도입하여 전자 또는 광학소자를 구현하고, 3차원 집적(integration)을 통해 기존의 탑다운 공정의 대체 가능성을 제시하고자 한다. 또한, 입자 합성과 조립 기술을 활용하여 ‘바래지 않는 색상’의 구현, 비자연적 광학메타물질, 약물전달체, 의료용 접착체, 배터리 전극소재, 고체전해질 응용 개발 연구도 병행하여 국가 핵심 산업의 경쟁력 강화에 기여하고자 한다.

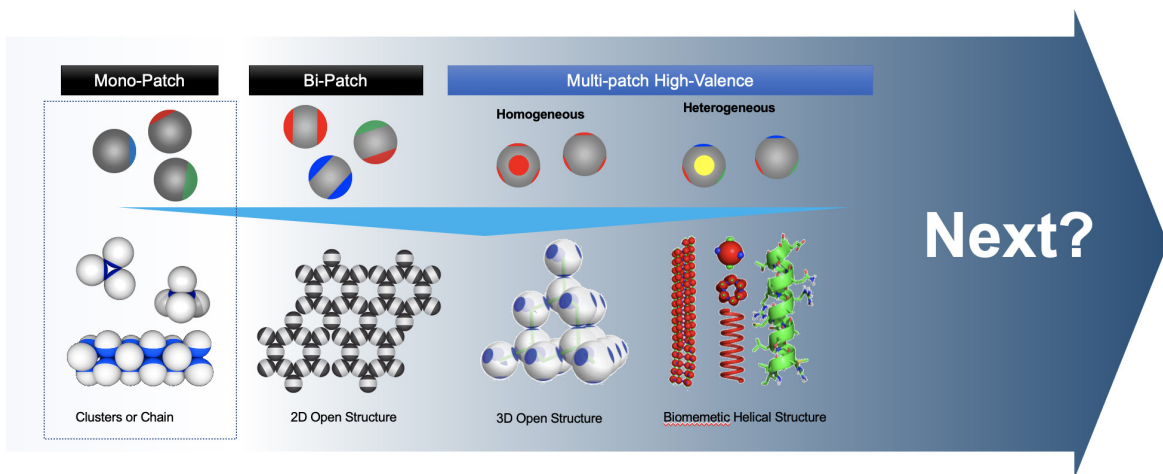


그림 6. 패치입자를 이용한 자기조립 구조 연구의 방향.