

# 나노시대 콜로이드 기술의 활용

## 개요

콜로이드(colloid)의 결정은 그 자체가 중요한 연구 대상일 뿐만 아니라 다른 나노구조물의 제작을 위한 2차 또는 3차원적인 주형으로 사용될 수 있기에 주목받는 연구 대상이다. 또한, 양질의 콜로이드 결정을 제조할 수 있게 되면서 이를 주형으로 사용하는 매크로 다공체의 연구도 활발히 진행되고 있다. 최근 들어서는 나노 콜로이드 입자부터 mm 크기의 소재에 이르기까지 넓은 범위의 물체를 이용하여 전기적 기능을 갖는 구조체를 제조하는 연구가 주목을 받고 있다.

콜로이드 입자를 사용하여 제조한 기능성 콜로이드 구조체는 2차원 또는 3차원의 콜로이드 결정과 콜로이드 결정을 이용하여 만든 다공체 그리고 콜로이드 입자의 상호연결을 통하여 전기적 회로로 연결한 소자 등으로 나눠서 고찰 할 수 있다. 콜로이드의 응용분야는 화학 및 바이오센서, 생체재료, 광학센서, 배터리, 반도체 이종집합, 디스플레이 등 그 활용 범위가 매우 넓다.

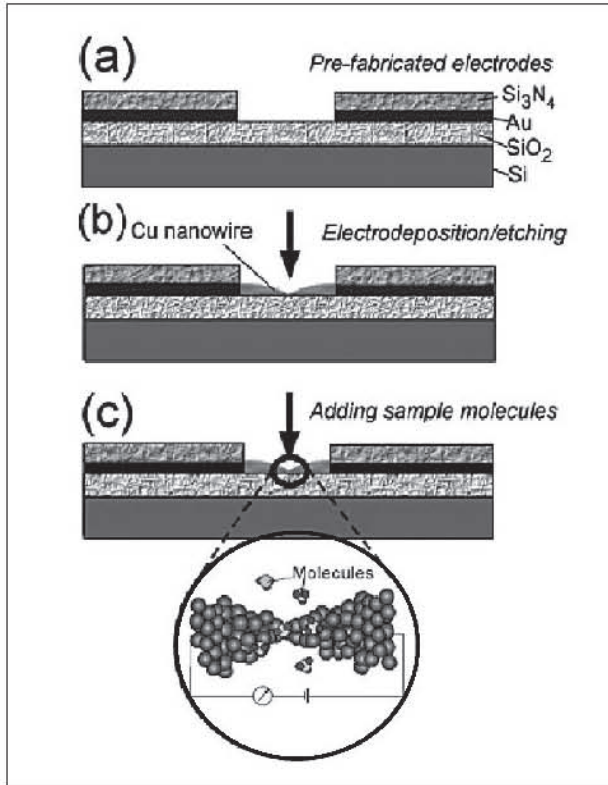
〈그림 1〉 구형 콜로이드 결정의 공을 제조하는 방법과 그 미세구조

## 콜로이드의 응용 분야

### 가. 화학 기능성 구조체

나노 입자나 막대는 비표면적이 매우 크기 때문에 전기적 특성이 주위의 환경변화에 대단히 민감하다. 예를 들어 전기화학법으로 제조한 금속 막대를 수백 nm의 간격을 갖는 전극으로 배열하면 분자의 흡착에 의해 전기전도도의 변화가 나타나므로(chemiresistance effect) 분자를 검출할 수 있다. 또한, 매크로 기공과 마이크로 또는 메조 기공이 공존하면 마이크로(메조) 기공이 분자 흡착의 선택성을 부여하고 매크로 기공을 통하여 화학물질의 전달이 쉬워지므로 효과적인 화학센서로 작용할 수 있다. 다공체에 흡착성이나 촉매 기능을 부여하기 위하여 화학적 기능을 갖는 물질을 연결기에 의하여 부착시

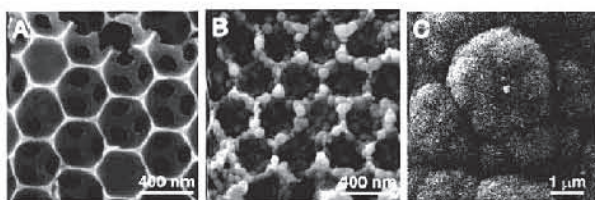
킨다. 예를 들어  $TiO_2$ 나  $ZrO_2$  다공체 지지체에 싸이올 기능을 실록산이나 설펜 연결기를 통하여 부착시킨다. 이 물질은 수용액에서 금속을 흡착하여 제거하는 기능을 한다. 그 밖의 응용으로서 산화물 반도체는 고온에서 반응성 기체와 접촉하면 전기전도도의 변화로 반응하는데, 매크로 기공에 의하여 효율적인 센서를 제조할 수 있다.



〈그림 2〉 금속 나노막대를 이용하여 분자의 흡착을 검출하는 개략도

#### 나. 바이오센서, 생체 재료

전자 칩이나 입자 집적체와 직접 연결된 바이오센서는 광검출에 의한 기존의 기술에 비하여 많은 장점을 갖고 있다. 이는 바이오 환경에 접촉하는 3차원 구조체와 2차원적인 전기회로로 구성되어 있다. 또한 매크로 다공체는 의료용이나 생체재료로 응용이 가능하다. 생체활성 다공체 유리는 생체 적합성이 있는 수산화탄산 아파타이트와 결합하여 인공뼈를 성장시킨다. 아래 그림은 솔젤법으로 제조한 다공체 유리가 의사 생체용액 내에서 아파타이트를 성장시키는 모습을 보여준다.



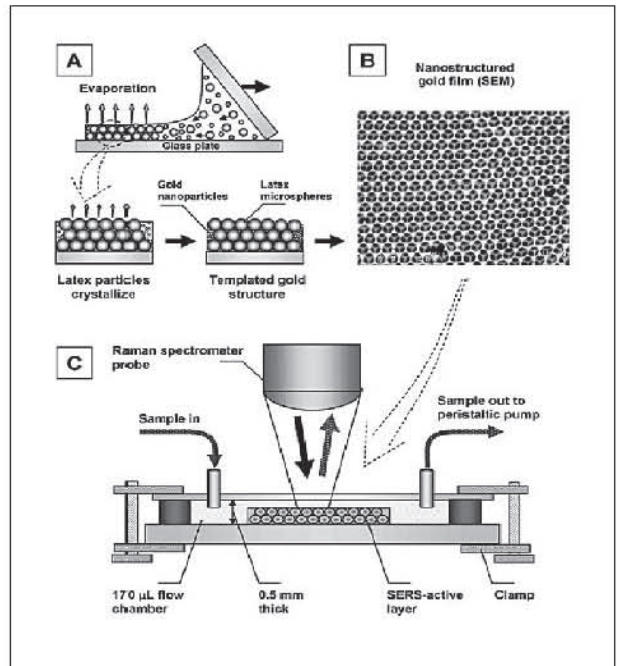
〈그림 3〉 의사 생체용액 내에서 아파타이트가 유리 다공체로부터 성장하는 모습

#### 다. 포토밴드갭(PBG), 광학 센서

3차원 콜로이드 구조체의 응용으로서 포토닉밴드갭(PBG)은 가장 상업적 실현 가능성이 높은 재료다. PBG 재료란 마치 반도체 재료에서 전자의 흐름을 제어하듯이 유전율의 차이로 광의 흐름을 제어하는 것을 말한다. 완벽한 PBG 특성을 보이는 재료의 제조는 빛의 흐름을 가두거나 방향을 제어한다는 점에서 과학적, 기술적으로 중요하다. 또한 광촉매 반응의 효율을 높이거나 광통신 레이저의 문턱을 낮추는데 기여할 수 있다. 완전한 PBG를 제조하기 위한 몇 가지 조건이 있는데, 고체의 부피 분율이 낮고( $\sim 20$  vol%), 굴절률 차이가 어느 한도 이상이 되어야 하며, 사용하는 파장대에서 흡수율이 낮으며, 적어도 파장의 길이만큼 격자 주기성이 균일해야 한다. 고체 매트릭스에 고정된 콜로이드 결정은 광센서로 응용이 가능하다. 광은 특정 파장에서 Bragg 식에 따라 회절 하는데, 결정격자의 간격이나 굴절률에 변화가 발생하면 회절조건이 변하게 된다. 이 특성을 이용하면 주위의 환경변화를 감지하는 광센서로 사용될 수 있다.

#### 라. 표면증강라만산란(SERS)

SERS는 굴곡이 있는 금속 표면에서 표면 플라즈몬에 의하여 발생하는 강한 신호를 이용한다. 콜로이드 결정을 주형으로 사용하여 제조한 금속 다공체는 SERS 용으로 적합한 재료이다. 주로 Au의 매크로 다공체에 대하여 연구되었다. 여기에 사용된 다공체는 Au와 라텍스 입자를 동시에 조립한 후 톨루엔으로 라텍스를 녹여내어 제조한다. Au 입자 사이에서 표면 플라즈몬이 상호작용하여 강한 전계를 발생



〈그림 4〉 Au 다공체 제조법 및 SERS 구성도

한다. 그 결과 다공체 표면 근처에 존재하는 분자는 강한 라만 스펙트럼을 나타낸다(104 이상의 강도 증진). 매우 낮은 농도의 오염 물질을 검출하는데 유용할 것으로 예상된다.

#### 마. 배터리

다공체는 계면에서 확산이 빠르기 때문에 연료전지나 배터리의 전극 재료로 유망하다. 고체산화물 연료전지(SOFC)의 음극 재료로서 금속염 용액에서 전구체를 제조하고 이를 하소하여 다공체  $\text{Sm}_0.5\text{Sm}_{1.5}\text{CoO}_3$ 를 제조하였다. 세리아 전해질과 결합하여  $600^\circ\text{C}$ 에서  $267 \text{ mW}/\text{Cm}^2$ 의 전력을 발생시켰다.  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ ,  $\text{LiCoO}_2$ ,  $\text{LiNiO}_2$ 와 같은 전도성 산화물 다공체는 Li 이온 배터리용 전극으로 연구되었다.

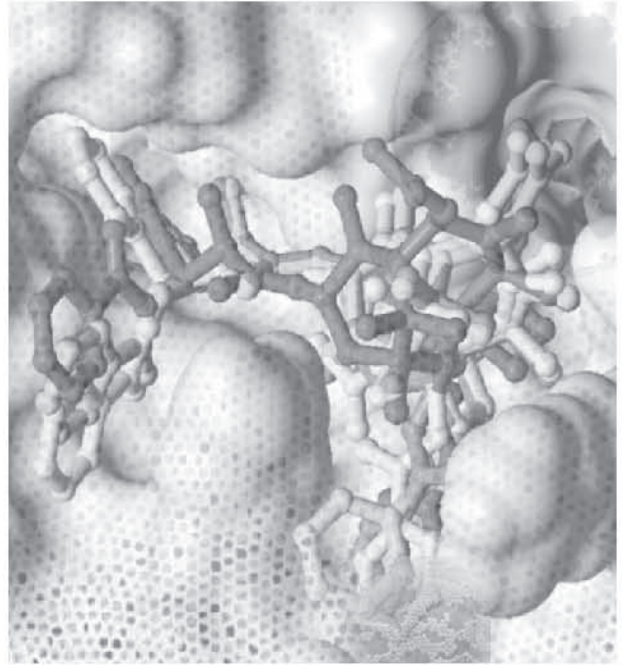
#### 바. 반도체 이종접합

여러 가지 종류의 반도체나 금속 나노 입자를 서로 반대되는 전하를 이용하여 층상 구조로 조립하면 고체 반도체 소자처럼 전자 기능을 갖는 이종접합이 얻어진다. 현재 제너 다이오드, 발광 다이오드, 광전소자 등이 제조되었다. 실리콘이나 화합물 반도체를 기본으로 하는 고체 반도체 소자에 비하여 이 방법은 제조가 간단하고, 층의 정확한 두께 조절이 가능하며, 반도체성을 갖는 많은 나노 입자( $\text{CdSe}$ ,  $\text{CdS}$ ,  $\text{Si}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZnO}$  등) 중에서 선택할 수 있다는 장점이 있다.

#### 사. 디스플레이

위에서 언급한 응용 분야 이외에 콜로이드 입자를 이용한 기술로 전기이동(electrophoretic) 효과를 이용하여 액정 디스플레이를 대체하는 전자종이가 있다. 여기에 사용되는 잉크는 흑백의 나노 입자들이 들어가 있는 직경이 수십~수백  $\mu\text{m}$ 인 마이크로캡슐로 구성된다. 흑색과 백색의 입자는 서로 반대의 전하를 띠고 있어서 전계를 가하면 서로 다른 방향으로 분리된다. 마이크로캡슐을 얇은 판위에 부착시키고 ITO로 전극을 구성한다. 전계에 따라 흑백의 나노 입자

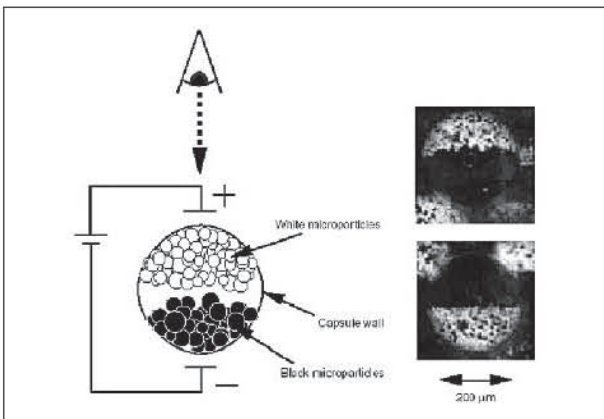
들이 배향되어 글자나 무늬를 표시하게 된다. 이러한 디스플레이는 접거나 굽혀질 수 있으며, 전계를 제거한 후에도 표시가 유지된다.



#### 나노시대를 위한 콜로이드의 연구과제

콜로이드 결정을 산업적으로 이용하기 위해서는 다양한 재료로 대상을 확대하고 더욱 복잡한 구조의 결정을 제조하여야 한다. 현재 사용 중인 주요한 재료를 구형 단분산 입자로 제조하는 기술이 선행되어야 하며, 그밖에 기존의 레이저, 다이오드와 같은 전기-광학 소자의 집적화로 제조법과 어떻게 융화시킬 것인가도 중요한 논점이다. 또한, 매크로 다공체의 응용을 위해서는 촉매, 흡착, 분리 등의 기능을 증진시키기 위하여 마이크로 또는 메조 기공의 선택성과 높은 비표면적을 유체의 원활한 흐름과 결합시켜야 한다. 특히 원하지 않는 결함을 제거하면서 동시에 원하는 결함을 원하는 장소, 농도로 넣을 수 있어야 한다. 전기적 구조체 분야에 있어서 콜로이드 결정 구조체와 분자 전자공학을 결합시킬 때 전자회로의 미세화 및 집적화에서 큰 발전을 이룰 가능성이 높다. 예를 들어 콜로이드 조립과 초미세 유동학(nano/micro fluidics)이 상호 융합하여 신개념의 센서가 출현하고 생체 진단용 전자소자와 같은 기술이 발전하리라 예상되며, 이른 시일 내에 새로운 발견과 응용이 나타나리라 기대되고 있다.

글 \_ 최봉기 · 나노정보분석실 · boongkee@kisti.re.kr



〈그림 5〉 흑백 나노입자의 전기이동 효과에 의한 디스플레이 개념도 및 사진