

판상형 Ag 나노구조체의 합성 및 센서 소재로의 응용

Synthesis of Silver Nanoplates and Their Sensing Applications

김진우 · 김문호 | Jinwoo Kim · Mun Ho Kim

Department of Polymer Engineering, Pukyong National University,
365 Sinseon-ro, Nam-gu, Busan 48547, Korea
E-mail: munho@pknu.ac.kr

1. 서론

금속 기반의 나노구조체는 특유의 촉매, 전기, 자기, 광학 특성으로 인해서 최근 들어 매우 활발히 연구되고 있다.¹ 금속 중에서 가장 높은 전기 전도성을 보유하고 있는 은(silver; Ag) 기반의 나노구조체는 전도성 잉크 소재로서 활발히 사용되어 왔다. 최근 들어 Ag 나노구조체는 조절가능한 국소 표면 플라즈몬 공명(localized surface plasmon resonance, LSPR)이라는 독특한 광학적 특성으로 인해서 화학 및 바이오 센서 소재 영역으로 그 응용 분야를 넓혀 가고 있다.² 국소 표면 플라즈몬 공명은 금속 내부의 자유전자들이 외부 전자기장에 반응하여 집단적으로 진동하는 현상을 말하는데, 이로 인해 귀금속 기반의 나노구조체들은 특정한 파장의 빛을 강하게 흡수하거나 산란하는 특성을 나타낸다.³ 금속 나노구조체들이 흡수하거나 산란시키는 빛의 파장은 입자의 크기 및 형상, 조성, 입자간 거리, 구조(속이 빈 또는 속이 꽉 찬), 그리고 외부 유전율에 의존하게 되는데, Ag의 경우 가시광선 영역에서 공명을 일으킬 수 있다.⁴ 따라서 나노구조체의 크기, 모양, 입자간 거리나 외부환경 등이 변화하면 눈으로 관찰되는 색상이 변하기 때문에 플라즈모닉 센서 소재로 활용될 수 있다.

판상형 Ag 나노구조체(Ag nanoplates)는 매우 흥미로운 구조적 이방성(extreme degree of anisotropy)과 이로 인한 강한 국소 표면 플라즈몬 특성을 보여주기 때문에 많은 관심을 받아왔다.⁵ 판상형 Ag 나노구조체의 LSPR 특성은 나노구조체의 크기와 모양, 종횡비에 따라 변화될 수 있다.⁶ 판상형 나노구조체는 얇으면서도 표면적이 넓은 구조적 특성과 내부 결함(stacking faults)으로 인해 표면에너지가 높기 때문에 열역학적으로 안정된 구조가 아니다. 따라서 이들 나노구조체는 높은 온도나 UV light, 산(acids), 할라이드(halide) 이온 등에 노출이 되면 형상이 변하게 되는데, 이와 같은 형상의 변화는 LSPR 특성에 영향을 미쳐서 분산액의 색상이 변화하게 된다.⁷⁻⁸ 이와 같은 내재적 불안정성은 판상형 Ag 나노구조체의 활용을 제한할 수 있는 요인이 되기도 하지만, 오히려 이러한 약점을 이용하면 참신하고 새로운 응용 분야를 개척할 수 있다.

본 특집에서는 고분자 물질을 환원제 및 분산안정제로 사용하여 삼각형상을 가지는 판상형 Ag 나노구조체를 고수율로 합성하는 방법에 대해서 설명하고, 합성된 판상형 Ag 나노구조체의 화학적 안정성에 대해서 논의하고자 한다. 그리고 판상형 Ag 나노구조체의 내재적 불안정성을 활용하여 새로운 플라즈모닉 센싱 플랫폼을 개발하는 최신 연구동향에 대해서 소개하고자 한다.

Author



김진우

2017 부경대학교 고분자공학과 (학사)
2017-현재 부경대학교 고분자공학과 (석사과정)



김문호

1997 연세대학교 화학공학과 (학사)
2006 KAIST 생명화학공학과 (박사)
2007-2008 미국 워싱턴대학교 (Post-Doc.)
2008-2010 LG화학기술연구원 과장
2011-2014 한국화학연구원 선임연구원
2014-현재 부경대학교 고분자공학과 조교수

2. 본론

2.1 판상형 Ag 나노구조체의 합성

균일한 크기와 형태를 가지는 Ag 나노구조체를 제조하는 방법으로는 화학 환원(chemical reduction)법이 가장 효율적으로 사용될 수 있다. 환원제를 포함하고 있는 고온의 반응물에 Ag 이온을 첨가하게 되면 Ag 이온은 원자로 환원되고 서로 엉겨 붙어 클러스터를 형성하게 된다. 클러스터가 성장하여 임계 크기 이상으로 성장하게 되면 특정한 결정구조를 가지는 시드(seeds)을 생성하게 되는데, 시드의 구조는 크게 단결정형(single crystal)과 쌍정형(twinned crystal)으로 구분할 수 있다. 단결정형은 말 그대로 나노입자 전체 영역에 걸쳐 결정립계(grain boundary)를 가지지 않고 원자의 배열이 하나의 일정한 배열을 하고 있다. 쌍정형은 결정이 특이한 축 혹은 면에 관하여 서로 대칭관계를 유지하면서 접합하고 있는 구조를 말하는데, 크게 단일쌍정(single crystal), 다중쌍정(multiply twinned crystal) 구조가 있다(그림 1). 이 중에서 다중쌍정 구조는 생성되는 시드의 구조 중에서 열역학적으로 가장 선호되는 구조라고 할 수 있는데, 이는 면심입방(face-centered cubic) 구조를 가지는 Ag의 결정면 중에서 가장 낮은 표면에너지를 가지고 있는 {111} (밀러 지수) 결정면으로만 표면이 노출되어 있고, 입자의 형상이 구형에 가깝기 때문이다.⁹

그림 1에서 보는 바와 같이 판상형 시드는 낮은 표면에너지
를 가지는 {111} 결정면으로 둘러싸여 있지만, 넓은 표면적
으로 인해서 자유에너지도 높고, 적층 결함(stacking faults)
을 내부에 포함하고 있기 때문에 열역학적으로 선호되는 구
조가 아니다. Ag^+ 가 원자로 환원되는 속도가 빠른 경우에는,
시드는 열역학적으로 선호되는 구조(다중쌍정 및 단결정)를

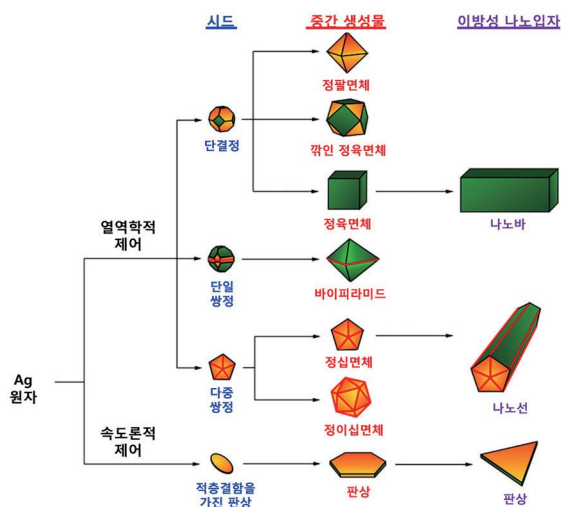


그림 1. 다양한 형상을 가지는 Ag 나노입자의 합성 경로(오렌지색은 Ag의 {111} 결정면을, 녹색은 {100} 결정면을 각각 나타냄.),

취하기 때문에, 판상형 시드를 형성하기가 어렵다. 대신 Ag^+ 의 환원 속도를 충분히 낮추게 되면, 생성되는 원자의 농도가 매우 낮게 되는데 이와 같은 환경에서는 원자의 클러스터들이 열역학적으로 선호되는 구조를 벗어나 판상형 형태로 성장할 수 있다. 이와 같은 시스템을 속도론적 제어 공정(kinetically controlled process)이라 일컫는다.¹⁰

화학 환원법을 이용하여 판상형 Ag 나노구조체를 합성하는 방법들이 활발히 연구가 되어 왔는데, 이들 방법은 대부분 미세한 시드 입자를 먼저 형성시킨 후에 이 시드 입자를 판상형으로 성장시키는 단계적 성장 메커니즘을 적용하고 있고, NaBH_4 , hydrazine, DMF(dimethylformamide)와 같은 유독한 환원제나 유기용매를 사용하는 경우가 많았다.¹¹ 따라서 친환경적이고 단일 공정 기반의 합성법 개발이 요구되고 있다.

폴리비닐피롤리돈(polyvinylpyrrolidone, PVP)은 독성이 없고 화학적으로 안정하며 그림 2A의 구조에서 보는 바와 같이 친수기와 소수기를 함께 가지고 있기 때문에 물을 비롯한 다양한 극성 용매에 대한 용해성이 높은 편이다. 금속 나노구조체의 합성 공정에서 PVP는 주로 생성된 나노결정들의 응집을 막는 분산안정제(colloidal stabilizer)로서 사용되어 왔는데, 이는 소수성의 탄화수소 체인들이 용매 속으로 확장되고 서로 작용하여 입체장애 효과(steric hindrance effect)를 유도하기 때문이다(그림 2B).¹² PVP는 때로는 구조 유도제(shape-control agent)로서 사용되기도 한다. 이는 폴리오 올 용매에서 PVP는 Ag의 {100} 결정면과 강하게 결합되어 {100} 결정면을 안정화시킬 수 있기 때문이다(그림 2C). 최근 들어 PVP를 환원제(reducing agent)로 사용하는 연구들이 보고되고 있는데, 이는 PVP 말단에 존재하고 있는 수산화기(-OH)들 때문이다. PVP에 존재하는 수산화기는 말단기에만 존재하고 있기 때문에 고분자 전체에서 차지하는 부분은 매우 적은 편인데, 이와 같은 적은 농도로 인해서 PVP

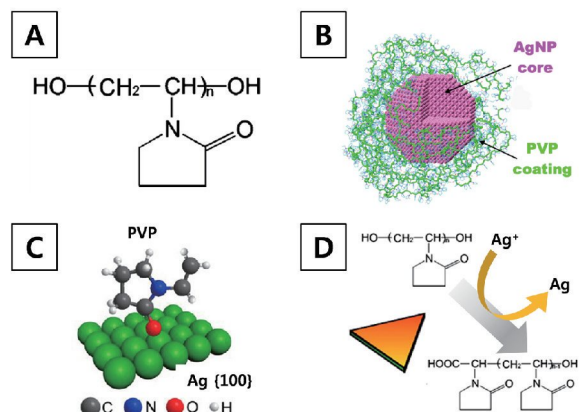


그림 2. (A) PVP의 분자 구조, (B) 물에서 Ag 나노입자와 PVP의 상호작용, (C) Ag {100} 결정면과 PVP의 상호작용, (D) 판상형 Ag 나노구조체 합성을 위한 환원제로서의 PVP.¹²⁻¹³

가 Ag^+ 을 환원시키는 속도는 매우 느리다. 이처럼 매우 느린 환원 속도에서는 내부 결함을 가지는 결정들이 성장하여 판상형 입자로 성장할 수 있기 때문에 PVP는 판상형 Ag 나노구조체를 합성하기 위한 이상적인 환원제가 될 수 있다(그림 2D).¹²⁻¹³

PVP를 환원제 겸 분산안정제로 활용하여 판상형 Ag 나노구조체를 합성하는 선행 연구에서는 NMP(N-methylpyrrolidone)와 DMF(dimethylformamide)를 반응 용매로 이용하여 수율이 거의 100%에 가까운 나노구조체를 합성할 수 있었다.¹⁴⁻¹⁵ 하지만 이러한 유기용매 대신 물을 반응 용매를 사용하면 환원 속도가 빨라서 최종 생성물에서 판상형 나노구조체의 수율이 높지 않았다. 물을 반응 용매로 이용하게 되면 친환경적 공정 면에서 그리고 폼 후드와 같은 공정설비 또한 필요하지 않는다는 유리한 면이 있다. 따라서 물을 반응 용매로 사용하고자 하였고 물에서의 빠른 환원속도는 Ag^+ 과 배위화합물을 형성할 수 있는 리간드 물질을 추가로 투입하여 늦출 수 있었다. 리간드 물질로는 polyacrylamide(PAM)와 acetonitrile을 동시에 사용하였고, 이들 물질을 주입하여 물 기반에서 단일공정으로 삼각형상의 판상형 Ag 나노구조체를 제조할 수 있었고, 판상형 나노구조체의 수율은 80% 정도로 높게 나타났다(그림 3A). 그림 3B에서 보이는 바와 같이 합성된 삼각형상의 나노구조체의 입자 크기는 평균적으로 71 nm였고 UV-vis-NIR 스펙트럼에서 확인되는 바와 같이 823 nm에서 강한 LSPR 소광(extinction) 피크를 보여주었는데, 이는 in-plane dipole resonance에 의한 것이다.¹⁶

2.2 판상형 Ag 나노구조체의 안정성

일반적으로 면심입방 구조(face-centered cubic)를 가지는 금속 결정의 표면에너지는 {111} 결정면이 가장 낮은 값을

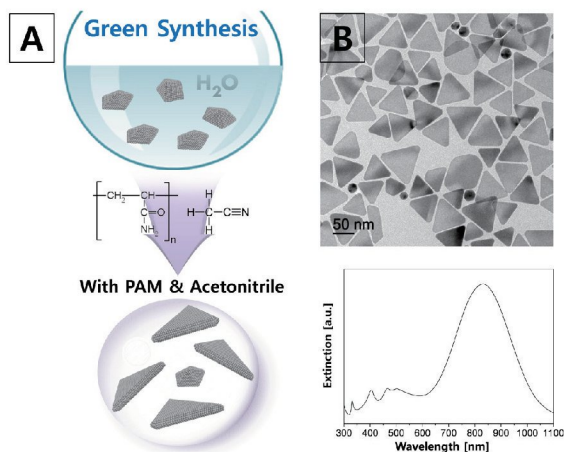


그림 3. (A) 리간드 존재하에서 판상형 나노입자의 형성 과정 모식도, (B) 합성된 판상형 Ag 나노구조체의 TEM 이미지(위) 및 UV-Vis-NIR extinction 스펙트럼(아래).

가지고 있고, {100} 결정면과 {110} 결정면이 그 뒤를 따르는 순서이다. 앞서 설명한 바와 같이 판상형 나노구조체에서 넓은 표면적을 가지는 윗면과 아랫면은 {111} 결정면을 가지고 있지만, 측면은 {100} 결정면과 {110} 결정면의 조합으로 이루어져 있다. Gibbs-Thomson 효과를 고려하면, 삼각형상을 가지는 판상형 나노구조체의 날카로운 모서리 부분은 이와 같은 높은 에너지를 가지는 두 결정면이 만나는 부분이기 때문에 불안정성이 높다.⁷ 그리고 주위에는 다른 원자들이 존재하지 않는 부분이기 때문에, 모서리 부분에 존재하는 Ag 원자들은 높은 반응성을 가지게 되어 고에너지 환경에 노출이 되거나 산이나 할라이드 이온에 노출이 될 경우 쉽게 에칭이 되어 나노구조체에서 분리되게 된다.

그림 4에서는 삼각 판상형 Ag 나노구조체가 Br^- 에 노출되었을 때 나타나는 변화를 관찰한 것이다. Br^- 에 노출이 되면 40분 동안 회색빛을 보이는 용액의 색깔이 청록색, 남색, 보라색, 분홍색으로 변화하게 되고, 60분 이후에는 마지막 색깔인 오렌지색을 보이게 된다(그림 4A). 이러한 색깔의 변화는 UV-Vis-NIR 스펙트럼에서도 확인되는데, 823 nm에서 보였던 in-plane dipole resonance 피크가 단파장쪽으로 이동하여 60분 이후에는 517 nm에서 피크를 보인다(그림 4B). 이러한 LSPR 특성의 변화는 나노구조체의 형상 변화에 따른 결과인데, 그림 4C에서 보이는 TEM 이미지들을 살펴보면, Br^- 에 노출된 Ag 나노구조체들은 모서리 부분이 에칭이 되어 점차로 뭉툰하게 변화하게 되고 결국에는 편구 타원체(oblate spheroid) 형태로 변형된다는 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과로 삼각 판상형 Ag 나노구조체는 Br^- 에 노출되면 모서리 부분이 쉽게 에칭이 되어서 형상변화가 나타난다는 것을 보여주고 있으며, 이러한 형상의 변화로 인해서 결과적으로 분산액의 색깔도 변한다는 것을 확인할 수 있다.¹⁷

Br^- 을 포함하는 할라이드, 산, 과산화수소(H_2O_2)와 같은 비교적 널리 알려져 있는 물질 이외에도 poly(styrene-4-sulfonate) (PSS)와 같은 고분자 물질에 노출될 때에도 삼각 판상형 Ag 나노구조체는 그림 5에서 보이는 바와 같이 형상이 변화되고 그 형상변화는 LSPR 특성에 영향을 미쳐서 분

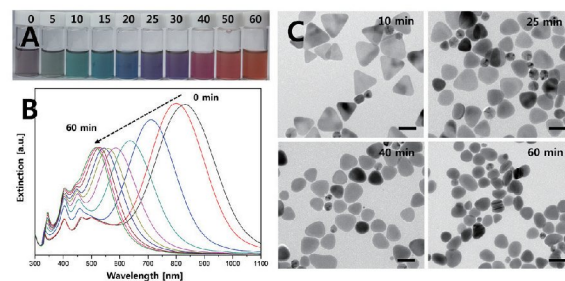


그림 4. (A) Br^- 에 노출된 삼각 판상형 Ag 나노구조체 분산액의 사진 (5분마다 노출)과 (B) UV-Vis-NIR extinction 스펙트럼, (C) Ag 나노구조체의 TEM 사진(scale bar = 50 nm).¹⁷

산액의 색깔이 변화함을 확인할 수 있다. 이와 같은 결과는 삼각 판상형 Ag 나노구조체의 경우 구조적인 특성으로 인해 열역학적으로 안정하지 못하기 때문에 주위 환경에 의해서 쉽게 손상될 수 있음을 나타내고 있다.

2.3 센서 소재로의 응용

삼각 판상형 Ag 나노구조체의 불안정성은 나노구조체의 형상을 유지하고 광학적인 성질을 보존하는 측면에서는 장애로 작용할 수 있을 것이다. 하지만, 이러한 약점을 긍정적으로 이용하게 되면 새롭고 참신한 응용 분야를 개척해낼 수 있다. 2.3장에서는 이러한 응용에 관련된 연구들을 소개하려 한다.

Temperature Indicator. 삼각형상을 가지는 판상형 Ag 나노구조체 분산 수용액에 potassium persulfate (KPS)를 주입하였다. KPS는 상온에서는 안정하지만 높은 온도에서는 분해되어 라디칼(sulfate radical)을 생성시키기 때문에, 고분자 중합 시에 열개시제로 사용되는 물질이며, 고온에서는 아래와 같은 분해 반응(1)으로 라디칼을 생성한다.



생성된 라디칼은 불안정하여 반응성이 높기 때문에 판상형 나노구조체와 반응하게 되는데, 모서리 끝부분을 에칭을 시켜 나노구조체 분산액의 색깔이 변화될 수 있다.

그림 6A와 같이 KPS가 포함된 판상형 Ag 나노구조체의

수용액을 60 °C로 가열하면 분산액의 색깔이 변하게 되고 LSPR 특성은 그림 6B와 같이 변화하는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 분산액 색깔의 변화는 온도만 높거나, KPS만 존재하는 경우에는 나타나지 않고, KPS를 포함하는 용액을 가열할 때만 그림 6C와 같이 나타남을 확인할 수 있다. 흥미로운 것은 KPS가 라디칼로 분해되는 반응은 온도에 의존하게 된다는 것이다. 따라서 온도가 높으면 라디칼 생성량이 많아 나노구조체를 에칭시키는 정도가 크고, 따라서 색상의 변화가 심한 편이다. 반대로 온도가 낮으면 생성되는 라디칼 양이 상대적으로 적어서 나노구조체는 적게 손상이 되고 분산액의 색깔도 크게 변화하지 않았다. 즉, 외부 온도의 변화에 따라 분산액의 색깔과 LSPR 피크의 단파장 쪽으로의 이동 정도가 다르기 때문에, 이와 같은 용액 시스템은 temperature indicator로 사용이 될 수 있음을 확인하였다. 생선이나 우유와 같은 신선식품이나 의약품 같은 경우는 고온에 노출이 되며 변질될 가능성이 있어 temperature history를 확인하는 것이 중요한데, 본 연구결과를 활용하면 고온 노출 여부를 특수한 장비 없이 눈으로 확인할 수 있는 temperature indicator를 제조할 수 있다.¹⁶

Water Sensing in Water-Ethanol Mixture. 물과 에탄올의 혼합 용액은 주류 및 의약품, 정밀화학산업에서 널리 이용되고 있기 때문에, 이들 혼합 용액에서 물의 함유량을 측정하는 방법은 매우 중요하다. 혼합 용액에서 물을 확인하고 함유량을 측정하는 방법은 일반적으로 Karl-Fischer titration이 이용되는데, 이 방법은 숙련된 인력과 고가의 장비가 요구되며,

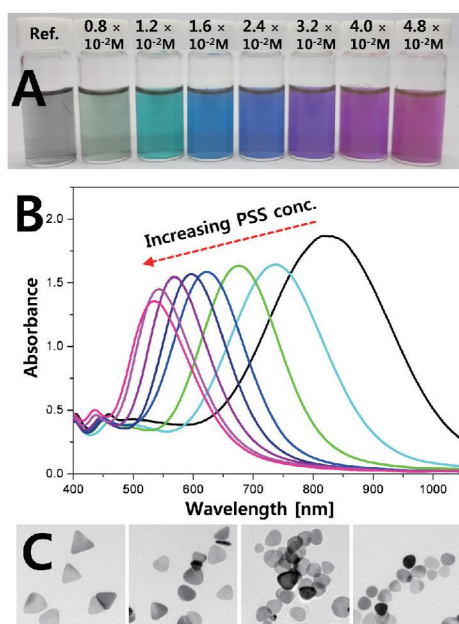


그림 5. (A) PSS 고분자에 노출된 삼각 판상형 Ag 나노구조체 분산액의 사진과 (B) UV-Vis-NIR extinction 스펙트라, (C) (A)에서 청록색과 파란색, 보라색, 분홍색을 보이는 Ag 나노구조체의 TEM 사진(scale bar = 50 nm).¹⁶

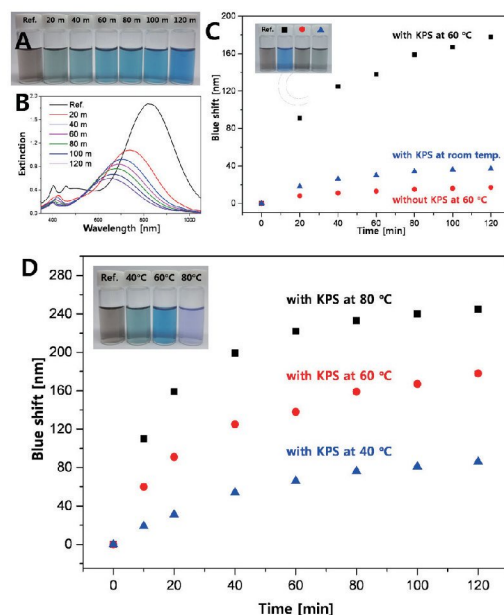


그림 6. (A) KPS를 포함하는 판상형 Ag 나노구조체 분산액을 60° 온도에 방치하였을 때 시간에 따른 색깔변화 사진과 (B) UV-Vis-NIR extinction 스펙트라, (C) 시간에 따른 플라즈몬 피크의 이동 정도, (D) 외부 온도 변화에 따른 플라즈몬 피크의 이동 정도 및 분산액의 색깔변화 사진.¹⁶

측정시간도 상당히 긴 편이다.

판상형 Ag 나노구조체를 이용하여 비교적 간단하면서도 특수한 장비 사용 없이 물의 함유량을 측정하는 sensing platform이 보고가 되었는데, 이는 Br⁻이온에 대한 판상형 Ag 나노구조체의 취약한 특성을 이용한 것이다.¹⁷ Potassium bromide (KBr)은 물에 대한 solubility는 높지만 에탄올에 대한 solubility는 매우 작고, 물과 에탄올의 혼합 용액에 대해서는 물의 함유량이 높을수록 KBr의 solubility는 증가하게 된다. 물과 에탄올의 혼합 용액에 판상형 Ag 나노구조체를 주입하고 KBr을 첨가하는 시스템을 생각하여 보면, 혼합 용액에서 물의 함유량이 많으면 KBr의 solubility도 높아져서 생성된 Br⁻ 농도가 높고 Ag 나노구조체는 상당히 많이 손상이 되어 그림 7에서 보이는 오렌지색을 보이게 된다. 반면, 혼합용액에서 에탄올의 함유량이 높으면 KBr의 solubility가 낮아 용액 속에 존재하는 Br⁻ 농도가 낮게 되고 Ag 나노구조체는 덜 손상되어 분산액의 색깔이 크게 변화하지 않게 된다. 이와 같은 색깔의 변화 실험으로는 0.2~0.6의 부피 분율

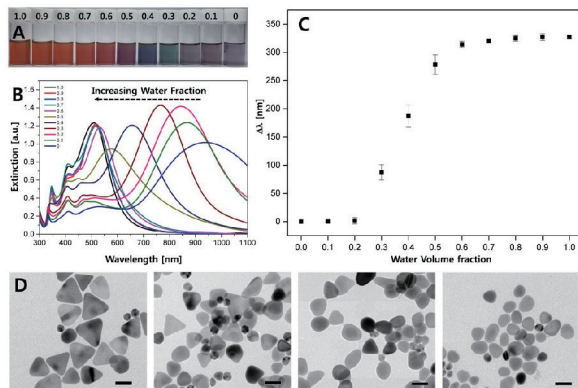


그림 7. (A) 각기 다른 조성을 가지는 물/에탄올 혼합용액에 분산된 Ag 나노구조체 용액에 Br⁻를 노출시킨 후 1시간 이후의 사진과 (B) UV-Vis-NIR extinction 스펙트럼, (C) 혼합용액에서 물의 부피분율에 따른 플라즈몬 피크의 이동 정도, (D) (A)에서 0.3, 0.4, 0.5, 0.8의 물 부피분율을 가지는 Ag 나노구조체의 TEM 사진 (scale bar = 50 nm).¹⁷

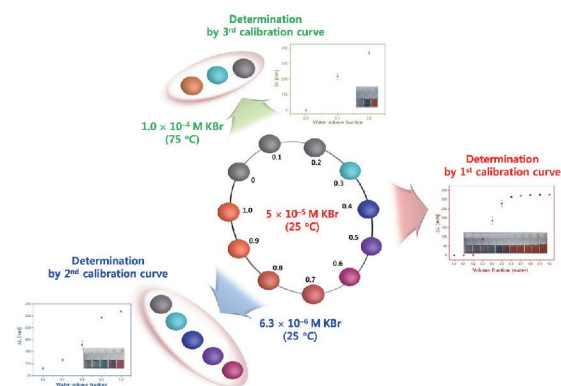


그림 8. 물과 에탄올의 혼합 용액에서 물의 함유량을 측정하는 센싱 공정의 모식도.¹⁷

을 가지는 물/에탄올 혼합용액의 분석이 가능하다. 0.6~1.0 영역에서는 Br⁻의 농도를 줄이게 되면, 0~0.2 영역에서는 Br⁻의 농도를 높이고 온도를 올리게 되면, 물 함유량에 따른 뚜렷한 색깔변화를 나타낼 수 있기 때문에, 거의 모든 조성을 가지는 물/에탄올 혼합용액에서 물의 함유량을 측정할 수 있다(그림 8).¹⁷

본 방법의 장점은 고가의 장비 사용 없이 눈으로 관찰되는 색깔변화를 통해서 물의 함유량의 측정이 가능하다는 것이다. 이와 같은 측정 방법은 물과 에탄올의 혼합물 뿐만 아니라 물과 이소프로판올의 혼합물 등을 포함하는, 물과 균일상을 이루는 다른 혼합 용액 시스템에도 동일하게 적용할 수 있음을 확인하였다.

Mercury Ion (Hg^{2+}) Detection. 삼각 판상형 Ag 나노구조체를 이용하면 고가 장비 이용, 고비용, 장시간의 실험을 필요치 않고 간단한 방법으로 빠른 시간 내에 유해한 중금속 이온을 검출해내는 것이 가능한데, 이는 삼각 판상형 Ag 나노구조체의 I⁻에 대한 취약한 특성을 이용하는 것이다. Cysteamine(CA)으로 capping된 판상형 Ag 나노구조체를 I⁻에 노출시키면 날카로운 모서리 부분이 에칭이 되어 디스크 형태를 가지는 나노구조체로 변형이 되고, 분산액의 LSPR 특성도 변화하여 빨간색을 나타낸다. 하지만, Hg^{2+} 를 주입하게 되면 Hg^{2+} 는 cysteamine의 SH와 쉽게 결합하고 산화-환원 반응에 의해서 결국에는 모서리 부분에 Ag-Hg nanoalloy를 형성할 수 있기 때문에, I⁻에 의한 화학 에칭으로부터 나노구조체를 보호할 수 있다(그림 9A). 따라서, Hg^{2+} 의 존재 하에서는 I⁻에 노출이 되더라도 분산액의 색깔이 처음 그대로의 푸른색을 유지하게 되는데(그림 9B), 이러한 현상은 Hg^{2+} 하에서만 나타났다. 이는 Cd^{2+} , Mn^{2+} , Co^{2+} 를 포함하는 다른 다양한 중금속 이온들의 존재 하에서는 나타나지 않는 구별되는 특성이므로, 본 sensing platform은 다른

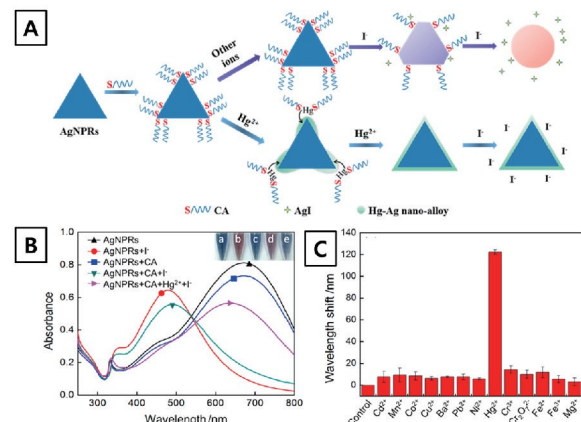


그림 9. (A) 판상형 Ag 나노구조체 기반의 Hg^{2+} 센싱에 대한 메커니즘. (B) I⁻과 Hg^{2+} 을 포함하고 있는 Ag 나노구조체 분산액의 UV-Vis-NIR extinction 스펙트럼. (C) 판상형 Ag 나노구조체 기반의 Hg^{2+} 센서의 selectivity 데이터.¹⁸

중금속 이온에 대비하여 Hg^{2+} 에 대한 sensitivity가 높다는 것을 확인할 수 있다(그림 9C).¹⁸

3. 결론

지금까지 고분자 물질을 환원제 및 분산안정제로 이용하여 삼각형상을 가지는 판상형 Ag 나노구조체를 합성하는 공정과 합성된 판상형 Ag 나노구조체의 화학적 안정성을 논의하였으며, 이를 센서 소재로 활용한 최근 연구들을 살펴보았다. 판상형 Ag 나노구조체는 매우 흥미로운 구조적 이방성과 이로 인한 강한 국소 표면 플라즈몬 특성을 보여주기 때문에 많은 관심을 받아왔지만, 높은 표면에너지와 그에 따른 불안정성으로 인해서 실질적인 응용에 있어서 제약을 받아왔다. 하지만, 이러한 내재적 불안정성을 잘 활용하면 새롭고 참신한 응용 분야를 개발할 수 있음을 확인하였다. 판상형 Ag 나노구조체는 전도성 잉크 소재로도 각광을 받고 있고, 특히 펼칠 수 있는(stretchable) 전극 제조를 위한 핵심물질로 매우 유망한 전극 소재이다. 하지만 성장 메커니즘 및 구조제어에 관해서는 아직 밝혀지지 않은 부분이 많으며, 특히 합성 과정에 참여하는 고분자 물질의 역할과 중요성에 대한 연구는 활발하게 진행되지 못한 측면이 많기 때문에, 금속 나노입자 합성 공정에 참여하는 고분자물질에 대한 연구는 지속적으로 이루어질 필요가 있겠다.

참고문헌

1. Y. Xia, Y. Xiong, B. Lim, and S. E. Skrabalak, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **48**, 60 (2009).
2. M. Rycenga, C. M. Cobley, J. Zeng, W. Li, C. H. Moran, Q. Zhang, D. Qin, and Y. Xia, *Chem. Rev.*, **111**, 3669 (2011).
3. S. E. Skrabalak, J. Chen, Y. Sun, X. Lu, L. Au, C. M. Cobley, and Y. Xia, *Acc. Chem. Res.*, **41**, 1589 (2008).
4. B. Wiley, Y. Sun, and Y. Xia, *Acc. Chem. Res.*, **40**, 1067 (2007).
5. I. Pastoriza-Santos, L. M. Liz-Marzan, *J. Mater. Chem.*, **18**, 1724 (2009).
6. M. H. Kim, S. K. Kwak, S. H. Im, J. B. Lee, K. Y. Choi, and D. J. Byun, *J. Mater. Chem. C*, **2**, 6165 (2014).
7. L. Liu, C. A. Burnyeat, R. L. Lepsenyi, I. O. Nwabuko, and T. L. Kelly, *Chem. Mater.*, **25**, 4206 (2013).
8. M. Kim, Y. W. Lee, D. Kim, S. Lee, S. R. Ryoo, D. H. Min, S. B. Lee, and S. W. Han, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **4**, 5038 (2012).
9. Y. Xiong, I. Washio, J. Chen, H. Cai, Z. Y. Li, and Y. Xia, *Langmuir*, **22**, 8563 (2006).
10. I. Washio, Y. Xiong, Y. Yin, and Y. Xia, *Adv. Mater.*, **18**, 1745 (2006).
11. G. S. Metraux and C. A. Mirkin, *Adv. Mater.*, **17**, 412 (2005).
12. K. M. Koczur, S. Mourdikoudis, L. Polavarapu, and S. E. Skrabalak, *Dalton Trans.*, **44**, 17883 (2015).
13. X. Xia, J. Zeng, Q. Zhang, C. H. Moran, and Y. Xia, *J. Phys. Chem. C*, **116**, 21647 (2012).
14. M. H. Kim, J. J. Lee, J. B. Lee, and K. Y. Choi, *CrystEngComm*, **15**, 4660 (2013).
15. M. H. Kim, D. K. Yoon, and S. H. Im, *RSC Adv.*, **5**, 14266 (2015).
16. Y. N. Wijaya, J. Kim, W. M. Choi, S. H. Park, and M. H. Kim, *Nanoscale*, **9**, 11705 (2017).
17. Y. N. Wijaya, J. Kim, S. H. Hur, S. H. Park, and M. H. Kim, *Sens. Actuators B Chem.*, **263**, 59 (2018).
18. N. Chen, Y. Zhang, H. Liu, X. Wu, Y. Li, L. Miao, Z. Shen, and A. Wu, *ACS Sens.*, **1**, 521, (2016).