

소프트 템플레이트를 이용한 용액상에서의 금 나노선의 합성

Solution-Phase Synthesis of Au Nanowires Using Soft-Templates

유효종 · 최 순 | Hyojong Yoo · Soon Choi

Department of Chemistry, Hallym University, 1, Hallymdaehak-gil, Chuncheon-si, Gangwon-do 200-702, Korea
E-mail: hyojong@hallym.ac.kr

1. 서론

귀금속성(금 혹은 은 성분) 나노구조체는 가시광선에서 근적외선까지 넓은 파장영역에 걸쳐 관측되는 독특한 광학적 성질을 가지며, 물리적 혹은 화학적으로 발현되는 성질이 큰 형태의존성을 보이고, 또한 표면의 기능화(functionalization)가 용이하여 특정 실험의 테스트베드로 이용되기 쉬운 점 때문에 생리학적 혹은 나노생진단용(nanobiodiagnostics) 응용에서부터 촉매로서의 이용까지 다양한 기술적 영역에서 지속적인 관심을 받아 왔다.^{1,2} 최근의 귀금속 나노구조체에 관련된 연구는 단순 구형(spherical)이 아닌 특정한 형태를 가지는 비등방성(anisotropic)의 구조체를 효율적으로 합성하고 응용하는 연구에 집중되어 왔다. 요구되는 응용성을 구현하기 위해 필요한 성질을 발현시키는 과정에서, 조절 가능한 방식으로 원하는 형태의 귀금속 나노구조체를 합성하는 새로운 방법을 개발하기 위하여 많은 노력이 진행되었다.³⁻⁶ 현재까지 보고된 대부분의 합성 전략에서는 전형적으로 시드매개법(seed-mediated synthesis)이나 계면활성제 매개법, 혹은 나노입자의 조합을 이용하여 거나 템플레이트를 이용한 합성법 등이 이용되어 왔다. 특히 템플레이트 관련 합성법은 다공성의 멤브레인이나 실리카 혹은 고분자 재제의 고체기질을 이용하는 하드-템플레이트 방식이 주로 이용되어 왔다.⁷ 그러나 계면활성제나 고분자의 자가조립(self-assembly)으로 유도된 소프트 템플레이트를 이용한 귀금속 나노구조체 합성법 개발은 형성되는 나노구조체의 크기나 형태의 분산도가 비교적 높다는 단점에도 불구하고, 그 합성방식의 용이함과 높은 수율, 그리고 환경친화성에 기인하여 많은 관심을 끄는 연구주제이다.⁸ 용액상에서 분자간 비공유성 상호작용을 통해 형성된 계면활성제나 고분자의 자체조합체는 단순한 마이셀이나 베시클(vesicle)부터 섬유나 튜브 혹은 3D 네트워크까지의 다양한 디멘션을 가지는 구조체를 형성하면서 특정 형태의 무기 나노구조체를 형성할 수 있도록 이용되는 효율적인 소프트 템플레이트가 될 수 있다.⁹

소프트 템플레이트를 이용해 합성되는 여러가지 다양한 형태와 조성의 비등방성 나노구조체 중 본 특집에서는 용액상에서 합성되는 금 나노선에 관한 내용을 기술하는 것으로 한정하고자 한다. 본 논문에서 소개되는 1차원성의 금 나노구조체는 일반적으로 나노막대(nanorod)라고 명명 지어지는 나노구조체보다 형상종횡비(aspect ratio)가 훨씬 큰(길이/두께 = 50 이상) 섬유나 선의 형태의 구조체를 주요 대상으로 하였다. 이러한 구조체의 경우에는 대부분의 합성된 예가 하드-템플레이트를 이용한 경우이다.¹⁰ 일반적으로 비슷한 형태적 특성을 보이는 은 나노선 구조체는 용액상에서 합성된 예가 상당수 보고가 되어왔으나, 소프트 템플레이

Author



유효종

1996 연세대학교 화학과 (학사)
1998 서울대학교 화학과 (석사)
2006 University of Pennsylvania
화학과 (박사)
2010-현재 한림대학교 화학과 교수



최 순

2013 한림대학교 화학과 (학사)
2013-현재 한림대학교 화학과 (석사과정)

트를 이용하여 나노 크기의 단면의 지름을 유지하면서 수 마이크로 크기까지 금 나노선을 형성시키는 예는 그 중요성에도 불구하고 매우 적은 수준이다.¹¹ 본 특집에서는 소프트 템플레이트를 이용한 금 나노선의 합성에 영향을 주는 인자나 그 방식을 알아보고, 또한 합성되는 나노구조체의 길이나 형태 등의 조절이 실제로 어떻게 이루어 질 수 있는지, 그리고 합성된 금 나노선 구조체의 응용성이나 합성법의 후속 연구 가능성 등과 관련하여 기술하고자 한다.

2. 본론

2.1 계면활성제의 단순 이용을 통한 귀금속 나노선의 합성

나노크기의 단면과 마이크로크기의 길이를 가지는 선 형태의 금 나노구조체(이하 금 나노선) 합성을 위해 이미 다양하고, 유용한 방법들이 보고되었다. 실제로 금 나노선 합성이 주목 받는 이유는 독성이 없어 이용도가 크고, 1차원적 나노선의 구조로부터 흥미로운 양자크기효과(quantum size effect)가 관측되거나, 또한 독특한 표면증강라만효과(surface enhanced Raman)나 국지적 표면플라즈몬 공명(localized surface plasmon resonance) 등을 관측할 수 있으며, 광학, 생물의학, 촉매 등의 넓은 범위에서의 큰 응용 가능성을 보이기 때문이다.¹²

실제로 결정상태가 분명한(단결정) 일차원성 금 나노선의 합성은 다른 비등방성 나노구조체 경우에 비하여 매우 드물며, 대부분의 보고들이 하드템플레이트를 사용하거나, 전기방사(electrospinning), 혹은 여러 단계의 복잡한 반응을 통하여 합성하는 경우이다.^{10,11} 현재까지 용액상에서 이루어지는 금 나노선의 소프트 템플레이트 합성 방식은 많은 보고가 이루어지지 못하였다. 하지만 지속적으로 용액상에서의 소프트 템플레이트 방식이 관심을 끌고 있는 이유는 환경 친화적인 공정으로 일반 하드 템플레이트 방식에서 사용되는 부식성, 독성 화학 물질을 필요로 하지 않으며, 높은 수율로 나노선을 얻을 수 있고, 합성 과정 또한 손쉽게 진행할 뿐만 아니라 무엇보다 현재까지 수 많은 연구결과에서 보고되는 것과 같이 나노 테크놀로지의 가장 대중적인 방법이자 기본이 되는 합성 방법이기 때문이다.

소프트 템플레이트를 이용한 귀금속성 나노선 합성은 초기에 양이온성 계면활성제를 이용하여 용액상에서 나노막대의 구조체의 길이를 조절해 가는 방식으로부터 그 가능성이 제시되었으며, 대표적인 것은 세틸트리메틸 암모늄 브로마이드(cetyltrimethyl ammonium bromide, CTAB)을 수용액에서 이용한 예이다. 이러한 양이온성 계면활성제의 단순 이용을 통하여 다양한 크기의 금 나노막대를 합성하였으며,¹³ 계면활성제의 양을 다르게 이용하여 나노구조체의 형상종횡비 조절이 가능하였다. 은 나노선의 합성의 경우에는 CTAB의

단순이용으로도 쉽게 합성이 가능하였다.^{14,15} 특히 합성 과정에서 가장 중요한 인자로 소프트 템플레이트를 형성하는 계면활성제의 구조적인 특성과 이로 인하여 형성되는 마이셀(micelle)의 역할을 보고하였다. 마이셀은 계면활성제의 친수성과 소수성을 지니는 구조에 의하여 형성되는 이중층의 막이며, 금 수용액이 선 형태의 구조체를 이룰 수 있도록 친수성 외층을 형성하는 마이셀을 만들어 금 표면에 흡착하여 환원되는 합성 메커니즘을 제시하였다.¹⁶ 비록 이 연구결과들이 금 나노선의 합성이 보고가 된 예는 아니지만, 용액상에서 소프트 템플레이트의 조절을 통해 1차원적 금 나노구조체를 합성하는 가능성과 반응 메커니즘을 제시하였다는 점에서 의미를 둘 수 있다.

다양한 형태의 금속성 나노구조체를 용액상에서 합성한 연구를 발표하여 온 Y. Xia 그룹에서 금 나노선의 합성도 보고하였다. Xia 그룹은 은 나노선 합성 등의 1차원성 나노구조체 합성의 결과 보고를 통해서 나노선을 만드는 과정에 소프트 템플레이트를 적용하는 것이 균일한 형태의 선을 대량

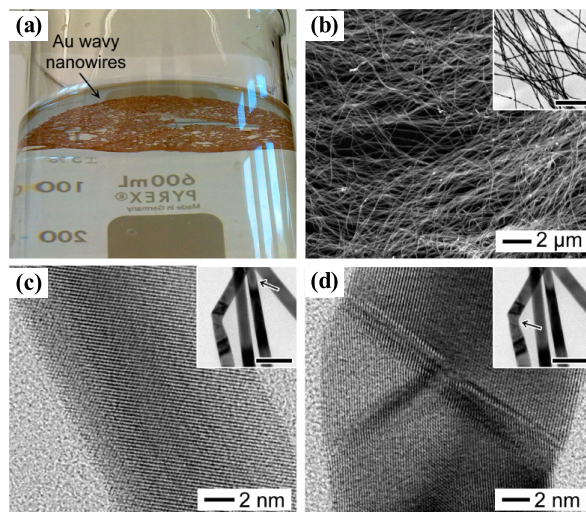


그림 1. (a) 합성된 금 나노선이 수용액상의 계면에 떠있는 모습. (b) 금 나노선의 주사전자현미경 사진과 투과전자현미경 사진. (c-d) 합성된 금 나노선의 전자회절 무늬분석 사진(추가된 이미지의 scale bar = 500 nm).¹⁷

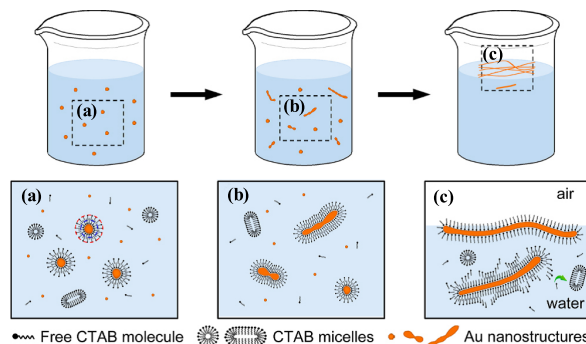


그림 2. 금 나노선의 합성과정의 모식도. 계면활성제 CTAB 분자를 이용한 금 수용액 표면에서 마이셀에 추가적으로 다른 마이셀이 병합되어(a-c) 성장하는 bottom-up 시스템의 합성과정 모식도.¹⁷

합성하는데 용이하며, 화학적인 관점에서 속도론적인 조절을 통하여 길이 조절이 가능함을 보였다.¹⁵ 금 나노선의 합성에서도 전구물질인 금 이온용액 내의 계면활성제의 자가조립체를 조작함으로써 제어 하는 소프트 템플레이트를 이용하여 합성하였다.¹⁷ 제시된 반응 메커니즘은 우선 초기에 생성되는 작은 금 나노 입자 표면에 CTAB 이중층 마이셀이 흡착되게 된다. CTAB 마이셀은 친수성기 외층이 금 나노입자 표면에 둘러 쌓이고, 여기에 추가적으로 금 표면과 직접 결합한 CTAB 이중층의 단층이 전반적인 일차원적인 금 나노선 형성에 큰 작용을 한다고 하였다. 또한 마이셀과 조합체로 구성되어 있는 금 나노 입자들은 마이셀이 유연하게 형성될 수 있다는 장점으로 인해 서로 가까운 위치에서 입자끼리 부착 및 병합되면서 금 나노선이 형성될 수 있다(그림 1, 2).¹⁷

Huang 그룹에서는 앞서 언급한 합성 과정과 비슷한 과정을 거쳐 금 나노선을 합성하였다.¹⁸ 이들 역시 CTAB의 양친성을 지니는 분자 구조로 마이셀을 형성하는 메커니즘을 이용하여 금 수용액 전구체와 환원제를 혼합한 성장 용액을 이용하였다. 환원제로는 수소화 붕소 나트륨(sodium borohydride)를 사용하였고, 세 단계의 성장 용액을 거치는 시드매개법으로 안정한 일차원적인 금 나노선의 합성을 성공하였다. 또한 관련하여 Xing 그룹에서는 올레일아민(oleylamine)을 용액상에서 단순 이용하여 일차원적 금 나노구조체를 합성하였다.¹⁹ 올레일아민 용액상에서 금 수용액과 트리아이소 프로필 실란을 환원제로 사용하여 한 단계의 간단하며, 효과적인 방법으로 금 나노선을 합성하였다. 합성된 얇은 금 나노선은 높은 표면 증강라만효과를 보이며 이는 이러한 금 나노선 구조체의 물질 검출 영역에의 응용 가능성을 보여준다. Ravishankar 그룹도 올레일아민과 올레익 산(oleic acid)을 이용하여 금 나노입자를 형성하고 아세트산을 가하여 에이징 시키는 방법을 통해 두께 1-2 nm의 매우 가는 금 나노선의 합성에 성공하였다.²⁰

2.2 계면활성제와 첨가물의 상호작용에 의한 마이셀의 구조 변화와 금 나노선의 합성에서의 소프트 템플레이트로의 이용

계면활성제를 단순히 이용하는 방식으로 1차원적 금 나노선을 합성하는 경우는 형태 조절이 용이하지 못한 단점이 있다. 이를 보완하기 위해 서로 다른 계면활성제를 섞어 주거나 혹은 다양한 물질을 양이온성 계면활성제에 첨가시켜 주면서 효율적으로 금 나노선을 형성하는 예가 최근에 다수 보고되었다. 첨가물은 많은 경우에 금속성 나노결정의 형성과정에서 표면 흡착 등의 방식에 의한 특정 방향의 성장제어를 통해 형태를 결정할 수 있다. 보다 중요하게 첨가물과 계면활성제가 상호작용을 하면서 다양한 형태의 마이셀이 형성되게 되고 이러한 마이셀이 1차원성 금 나노구조체나 금 나노

표 1. HNO₃ 농도에 따른 금 선 구조체의 길이²¹

	HNO ₃	Average length (nm)	Average diameter (nm)	Aspect ratio	Max length (nm)
a	1 mM	580 ± 100	25.3	22.9	760
b	5 mM	996 ± 360	33.5	29.7	1730
c	10 mM	1024 ± 185	33.7	30.3	1280
d	20 mM	1289 ± 390	23.5	54.8	2390
e	53 mM	2848 ± 654	33.7	84.5	4010

선의 형성을 제어하는데 영향을 줄 수 있는 소프트 템플레이트로 작용할 수 있다.

Huang 그룹은 금 결정의 성장 용액으로 계면활성제 CTAB 과, 수산화나트륨, 아스코르브산 혼합용액을 이용한 소프트 템플레이트에 시드매개법을 도입하면서 이러한 합성법 내에서만 변화 줄 수 있는 요인들로 길이 조절이 가능한 금 나노선 구조체를 합성하였다.²¹ 이는 일반적으로 하드 템플레이트를 이용한 금 선 구조체 합성법에서는 응용이 어려운 형태의 합성 방법이기 때문에 소프트 템플레이트를 이용한 장점이 부각되는 결과이다. 특히 이들은 시드매개법 성장 방식을 도입하여 길이가 매우 긴 금 나노선을 합성하고자 접근했던 체계적인 방법에 대해서 보고하였다. 우선적으로 금 나노막대부터 제조 과정에서 성장 용액의 pH가 길이에 미치는 영향을 조사하였다. 결과적으로 염기성 조건에서 230-310 nm 수준의 짧은 금 나노막대가 산성 용액의 환경에서는 330-410 nm 수준의 상대적으로 긴 나노막대가 합성되었다.

이들은 이를 금 나노막대 실험에서 얻은 길이를 제어 할 수 있는 여러 가지 실험적인 매개 변수를 조정하여 금 나노선 합성 과정에 도입하였다. 결과적으로 시드매개법의 성장 용액의 질산의 농도를 증가시킴으로써 2-3 마이크로미터 수준의 금 나노선을 합성할 수 있었다고 보고하였다.

추가적인 연구 결과로 강산성 용액이 갖는 금 나노선 성장 과정에서의 속도론적인 문제들에 대해서 언급하여 더 긴 금 나노선을 만들고자 하였으며, 다양한 실험을 통해 pH의 길이의 가장 중요한 요인이 아닌 질산 이온 자체의 합성과정에서의 역할에 대한 중요성을 강조하였다.

성장 용액의 질산 이온을 대신한 다른 산에 의한 양 조절 및 용액 속에서의 반응 시간 조절, 시드매개법에서의 시드 용액의 부피 조절을 통하여 길이 조절을 하였지만, 전반적으로 질산에서 확인하였던 뚜렷한 결과를 얻지 못하였다. 때문에 이들은 특히 이들은 질산 이온의 양이 높은 형상중형비 나타내는 중요 인자가 됨을 보였다(표 1, 그림 3).

우리 연구그룹은 유기물을 계면활성제에 첨가하는 방식을 이용하여 특정한 계면활성제: 유기물 비의 영역에서만 금 나노선이 합성될 수 있음을 보였다. 합성 과정에서 금 결정의 길이 성장의 핵심 인자로 계면활성제가 만들어내는 마이셀이 중요한 소프트 템플레이트가 될 수 있다.^{22,23} 합성 과정에

서 살리실산 나트륨(sodium salicylate, NaSal)을 CTAB 수용액에 첨가해 주어서 Sal과 CTAB 간의 강한 상호작용을 유도하여 보다 강한 선 형태의 마이셀 형성을 이끌었고 이 구조체를 템플레이트로 하여 1차원성 금 나노선을 합성할 수 있다는 연관관계를 제시하였다(그림 4).²⁴

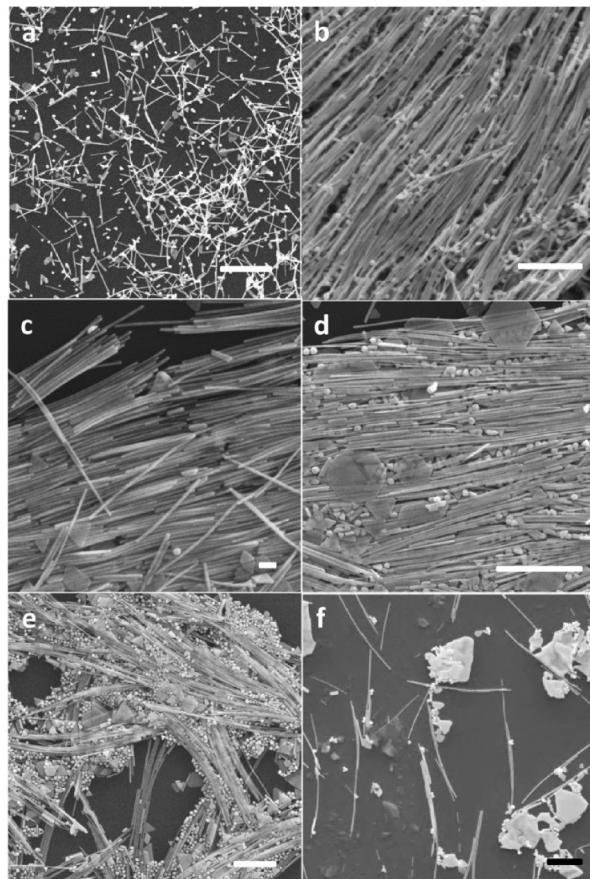


그림 3. 표 1의 각각의 경우에서 합성된 금 나노선 주사전자현미경 사진 (a-d, e-f 이미지는 실험 e의 시료, scale bars = 100 nm).²¹

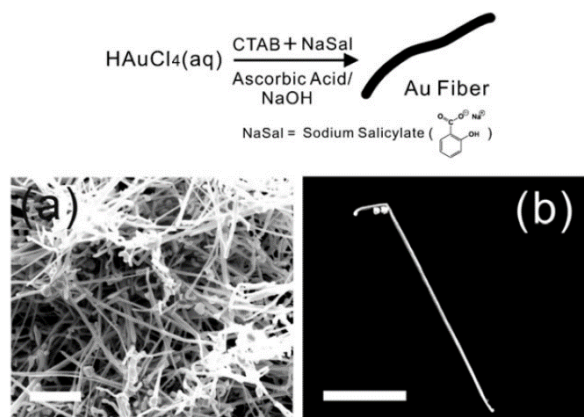


그림 4. CTAB-살리실레이트 조합을 소프트 템플레이트로 이용하여 합성한 금 나노선의 주사전자현미경 이미지(scale bars = 1 μm (a), 5 μm (b)).²⁴

이러한 결과는 실제적으로 소프트 템플레이트의 구조적 성질이 합성되는 금 나노선의 형태 조절에 이용될 수 있다고 하는 매우 획기적인 연구결과라 할 수 있다. 이를 뒷받침하는 연구성과가 최근에 발표 되었는데, 일반적인 금 나노막대와 비슷한 형상종횡비를 지니는 양추형의 금 나노구조체(gold bipyramid)의 합성과정에서, 첨가하는 살리실산 나트륨의 양을 다르게 하여 형성된 CTAC(cetyltrimethyl ammonium bromide chloride)-살리실산 마이셀이 각각 길이가 다른 소프트 템플레이트가 되어, 용액상에서 형성되는 양추형의 금 나노구조체의 길이가 조절됨을 입증하였다(그림 5).^{25,26} 합성된 양추형 금 나노구조체의 길이와 광학적 특성은 합성 시 가하는 살리실레이트 양을 변화시킴으로써 정확히 제어할 수 있었음을 보여주었으며 이는, $\text{CTA}^+\text{-Sal}^-$ 혼합물 수용액을 이용하여 제조된 각기 다른 형상과 강도의 막대-유사 마이셀들은 다른 길이의 1차원 나노결정 합성에서 효과적인 연성 주형 또는 구조지시제로 기능함을 보여주었다. 즉 합성 중 연성주형으로 작용하는 막대모양 마이셀의 파라미터를 변화 시킴으로써, 합성되는 1차원 금 나노결정 구조를 어떻게 제어할 수 있는지를 보여주며, 효과적으로 추후 용액상에서 금 나노선을 합성하는 과정에 응용될 가능성도 보여준다. 또한, 앞서 언급한 질산에 의한 길이 조절의 경우와 비교해 합성 단계에서 질산 이온의 양이 가지는 이온의 역할에 추가적으로 pH를 고려해야 하는 점에 비하여 명확한 결과를 확인할 수 있다는 점에서 응용가능성이 매우 크다고 할 수 있다.

Xia 그룹에서는 계면활성제에 고분자인 폴리비닐피롤리돈(poly vinyl pyrrolidone, PVP)를 첨가하여 금속 나노선을 합성하였고,¹⁵ 합성 과정에서 일어나는 고분자의 흡착과 탈착력이 구조체에 미치는 영향과 그로 인하여 형성되는 선의 메커니즘에 대하여 제시하였다. 또한 이들은 고분자를 이용한 경우의 실험을 진행하였다. 기존의 계면활성제와는 다른 긴 탄소 사슬을 지닌 유기분자를 이용하여 이를 고분자화시켜 중합 섬유라고 하는 금 나노선을 합성하였다. 전반적인 과정은 할로겐 금(I)과 배위 리간드를 이용한 유기 금속화

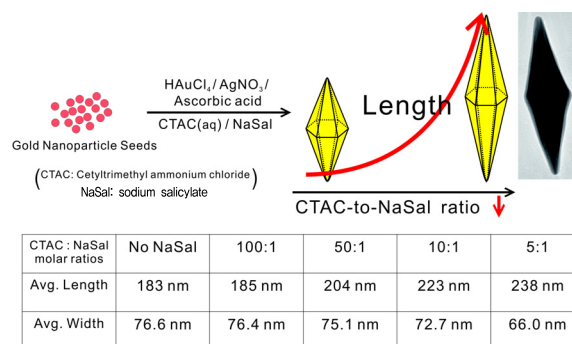


그림 5. CTAC-살리실레이트 비율 변화에 따라 합성한 양추형의 금 나노구조체의 합성개요, 주사전자현미경 이미지와 비율 변화에 따른 길이 변화 도표.²⁵

(organometallic complex) 합성으로 제시하였다.²⁷ 헥세인 용액상에서 할로젠 금(I)을 금속의 전구체로, 올레일아민을 배위 리간드로 이용하여 합성을 진행하였고, 올레일아민에 아민이 염화 금(I)과 연결되고 탄소 사슬의 분산력(van der Waals force)에 의하여 금 원자가 일렬로 배열 된 후에 은 파티클이 첨가되어 금 나노선이 환원되는 메커니즘을 보고하였다.

Kawai 그룹에서는 유기 용매 내에서 긴 체인형 아미도아민 치환 알킬그룹(C18AA)을 이용하여 두께가 2 nm 수준의 금 나노선을 합성하였다. 이때 사용된 소프트 템플레이트를 구성하는 분자는 양이온성 계면활성제에 올레일 아민을 첨가시켜 주는 것과 동일한 효과를 낼 수 있도록 두 개의 아미도아민 그룹을 치환시켜 준 계면활성제이다.²⁸ 또한 다양한 길이의 알킬체인을 가진 CnAA를 이용하여 무극성 용매 내에서 라멜라 구조의 유기젤을 형성시키고 이를 소프트 템플레이트로 이용하여 금 나노선을 합성하는 방식을 제시하였다.²⁹ 합성 과정에서 아미도아민 화합물은 weight organogelator의 역할과 계면활성제의 마이셀 이중층과 같이 상전이 시약으로 작용하였다.

화합물의 단순 첨가방식 이외에 이중 혼합 계면활성제로 구성되어 1차원성 금 나노구조체를 합성하는 경우가 다수 보고되었다. 이러한 연구는 이미 기존에 El-Sayed 그룹에서 보고된 사례가 있었고,³⁰ 이를 기반으로 현재까지 다양한 연구 결과들이 보고되고 있다.

Murray 그룹은 이중 혼합 계면활성제를 이용한 금 나노막대 합성에 대한 결과를 보고하였으며,³¹ 이중 혼합 계면활성제를 소프트 템플레이트로 사용하는 합성법은 기존의 계면활성제인 CATB으로 나노선이나 나노막대를 합성하는데 형성되는 마이셀이 만들어 지는 과정에서 발생하는 불순물로 인한 문제들을 극복하고자 하였다. CATB에 올레산 나트륨(sodium oleate)을 더하여 이중 혼합 계면활성제 만들었고, 그 결과 균일하며, 불순물이 적은 금 나노막대를 합성할 수 있었으며, 이는 기존의 금 선 구조체에 해당하는 높은 형상중량비를 얻지는 못하였지만, 어떠한 경우들 보다 균일하고 수율이 높은 결과를 보여 향후 금 나노선 합성에도 영향을 미치며, 전반적인 소프트 템플레이트를 이용한 나노 구조체 합성 분야의 발전에도 영향을 미칠 수 있는 가능성을 확인할 수 있는 연구 결과이다.

2.3 생물학적 소프트 템플레이트 이용

계면활성제 및 고분자로 구성된 소프트 템플레이트에 의한 나노구조체 합성 방법이 친환경적이며, 간단하게 합성하여 응용 가능 분야에 접목시킬 수 있다는 장점이 있으며, 이와 관련하여 인체친화성이 고려된 생물학적 소프트 템플레이트를 이용하여 나노구조체를 합성하는 방식도 많은 연구

자들의 관심의 대상이 되어 왔다. 많은 화학자와 생물학자들은 생물학적 조건에서 효소에 의해 촉진되는 촉매 반응을 통한 선택적 배열 변화와 복제, 복구 및 검출 신호 증폭 등을 통해 고도로 조직화된 방식으로 정보 전달하는 특성을 초분자 및 나노 재료 분야에 구축하고자 하는 노력을 하였고, 또한 나노구조체가 유기 물질에 의하여 소프트 템플레이트 내에서 자가조립 및 합성되는 과정이 효소 반응을 통해서 제어가 되는 등의 연구들이 많은 그룹에서 진행되었다.

그 중, 드물게 금 나노선 합성과 관련한 연구결과가 보고되었는데 대표적인 예가 Gianneschi 그룹이 DNA를 이용하여 합성을 보고한 예이다.³² 전반적인 합성의 과정으로는 DNA 중 금 나노선 합성과정에서 계면활성제와 유사한 역할이 가능한 특정한 구조의 DNA와 DNA-기반 효소를 첨가하여 생물학적 작용을 통해서 금 나노선이 합성되는 메커니즘을 제시하였다. 또한 특정한 배열의 DNA가 고분자 마이셀 템플레이트를 형성하고, 이를 이용해 모양을 선택적으로 합성할 수 있다고 보고하였고, 이를 이용하여 앞으로의 연구에서, 바이오 분야에서 패턴닝(patterning) 및 검출(detection)을 위한 구조를 포함하는 분자를 기능화하여 접목시키는 공정을 개발하는 방향에 대해서도 제시하였다.³³ 기본적으로 제시된 메커니즘에서는 두 방향의 DNA 이용을 보였는데, 우선 DNA-1이라고 하는 출발 물질을 이용하는 경우, DNA-1에 의하여 구형의 마이셀을 투석과정을 거쳐 형성하고, DNA-기반 효소를 첨가하여 배양과정을 거친다. 그리고 2 nm의 금 나노입자를 첨가하면서 금 나노선을 합성한다. 또 다른 방향으로 DNA-2를 이용하여, 온도 조절을 통하여 금 나노선을 합성하는 경우이다(그림 6).

2.4 응용성 및 후속 연구 가능성

금 성분을 기반으로 한 나노구조체 중 특히 금 나노선은 큰 응용 가능성을 지니며 일반적인 나노선 구조체들이 보이

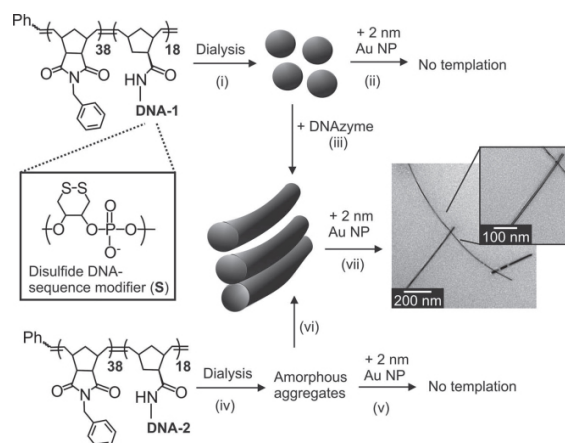


그림 6. DNA 템플레이트를 이용한 금 나노선 합성. DNA-1, DNA-2를 이용한 두 가지 방법의 금 나노선 합성 과정의 모식도.³²

는 응용성도 접목되어 최근 들어 큰 관심을 끌고 있다. 일차원적인 금 나노선은 큰 형상종횡비를 가지며, 넓은 표면과 특히 자가조립 능력으로 생화학 분야에서 나노 검출 장치(sensing device)의 구성요소로 응용되고 있다.³⁴ 또한 물리적, 화학적 특성 및 표면증강라만효과를 이용하여 나노 전자 소자, 센서, 포토닉스, 이미징, 촉매, 생물 의학 등의 유망한 응용 프로그램 연구가 많은 관심을 받고 있다.

금 나노선의 새로운 성질 및 제조 방법을 연구하면서 표면 증강라만효과에 의하여 광학적 감지 도구로의 응용을 기대할 수 있다.³⁴ 또한 일차원적인 금 나노선의 경우 금 원자의 대다수가 선 표면에 분포하며, 이로 인하여 전기화학적으로 압력감지기(pressure sensor), DNA 검출기, 나노전극 등으로 매우 다방면의 응용이 가능하다.

3. 결론

무기 나노구조체를 합성하는 과정에서 소프트 템플레이트를 이용하는 전략은 그 여러가지 장점에 기인하여 매우 효율적이고 중요한 합성전략이며, 다양한 소프트 템플레이트의 구성을 이용할 수 있으므로 그 가능성이 무궁무진하다. 1차원성 금 나노선의 다양한 응용성에도 불구하고 길이나 두께 조절과 관련하여 많은 결과가 보고되지 않았음을 감안하면 용액상에서 소프트 템플레이트를 이용해 합성하는 공정을 개발하는 것은 필수적이며 많은 추가의 연구 노력이 기울여져야 할 것으로 여겨진다.

참고문헌

1. L. R. Hirsch, R. J. Stafford, J. A. Bankson, S. R. Sershen, B. Rivera, R. E. Price, J. D. Hazle, N. J. Halas, and J. L. West, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **100**, 13549 (2003).
2. M. S. Yavuz, Y. Cheng, J. Chen, C. M. Copley, Q. Zhang, M. Rycenga, J. Xie, C. Kim, K. H. Song, A. G. Schwartz, L. V. Wang, and Y. Xia, *Nat. Mater.*, **8**, 935 (2009).
3. C. J. Murphy, T. K. Sau, A. M. Gole, C. J. Orendorff, J. Gao, L. Gou, S. E. Hunyadi, and T. Li, *J. Phys. Chem. B*, **109**, 13857 (2005).
4. S. E. Skrabalak, J. Chen, Y. Sun, X. Lu, L. Au, C. M. Copley, and Y. Xia, *Acc. Chem. Res.*, **41**, 1587 (2008).
5. Y. Xia, P. Yang, Y. Sun, Y. Wu, B. Mayers, B. Gates, Y. Yin, F. Kim, and H. Yan, *Adv. Mater.*, **15**, 353 (2003).
6. S. E. Habas, H. Lee, V. Radmilovic, G. A. Somorjai, and P. Yang, *Nat. Mater.*, **6**, 692 (2007).
7. N. Li, P. Zhao, and D. Astruc, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **53**, 1756

- (2014).
8. Y. Qiao, Y. Wang, Z. Yang, Y. Lin, and J. Huang, *Chem. Mater.*, **23**, 1182 (2011).
9. A. Sorrenti, O. Illa, and R. M. Ortuno, *Chem. Soc. Rev.*, **42**, 8200 (2013).
10. S. J. Hurst, E. K. Payne, L. Qin, and C. A. Mirkin, *Angew. Chem., Int. Ed.*, **45**, 2672 (2006).
11. Y. Xia, P. Yang, Y. Sun, Y. Wu, B. Mayers, B. Gates, Y. Yin, F. Kim, and H. Yan, *Adv. Mater.*, **15**, 353 (2003).
12. Y. Zhao, Y. Zhang, Y. Li, and Z. Yan, *New J. Chem.*, **36**, 130 (2012).
13. B. D. Busbee, S. O. Obare, and C. J. Murphy, *Adv. Mater.*, **15**, 414 (2003).
14. N. R. Jana, L. Gearheart, and C. J. Murphy, *Chem. Commun.*, 617 (2001).
15. Y. Sun, B. Gates, B. Mayers, and Y. Xia, *Nano Lett.*, **2**, 165 (2002).
16. A. M. Alkilany, P. K. Nagaria M. D. Wyatt, and C. J. Murphy, *Langmuir*, **26**, 9328 (2010).
17. C. Zhu, H.-C. Peng, J. Zeng, J. Liu, Z. Gu, and Y. Xia, *J. Am. Chem. Soc.*, **134**, 20234 (2012).
18. F. Kim, K. Sohn, J. Wu, and J. Huang, *J. Am. Chem. Soc.*, **130**, 14442 (2008).
19. H. Feng, Y. Yang, Y. You, G. Li, J. Guo, T. Yu, Z. Shen, T. Wu, and B. Xing, *Chem. Commun.*, 1984 (2009).
20. A. Halder and N. Ravishankar, *Adv. Mater.*, **19**, 1854 (2007).
21. Y.-N. Wang, W.-T. Wei, C.-W. Yang, and M. H. Huang, *Langmuir*, **29**, 10491 (2013).
22. U. R. K. Rao, C. Manohar, B. S. Valaulikar, and R. M. Iyer, *J. Phys. Chem.*, **91**, 3286 (1987).
23. Z. Wang and R. G. Larson, *J. Phys. Chem. B*, **113**, 13697 (2009).
24. H. Yoo, J. Sharma, H.-C. Yeh, and J. S. Martinez, *Chem. Commun.*, **46**, 6813 (2010).
25. H. Yoo and M. H. Jang, *Nanoscale*, **5**, 6708 (2013).
26. H. Yoo, Korean Patent 10-1468441 (2014).
27. X. Lu, M. S. Yavuz, H.-Y. Tuan, B. A. Korgel, and Y. Xia, *J. Am. Chem. Soc.*, **130**, 8900 (2008).
28. Y. Imura, H. Tanuma, H. Sugimoto, R. Ito, S. Hojo, H. Endo, C. Morita, and T. Kawai, *Chem. Commun.*, **47**, 6380 (2011).
29. C. Morita, H. Tanuma, C. Kawai, Y. Ito, Y. Imura, and T. Kawai, *Langmuir*, **29**, 1669 (2013).
30. B. Nikoobakht and M. A. El-Sayed, *Chem. Mater.*, **15**, 1957 (2003).
31. X. Ye, C. Zheng, J. Chen, Y. Gao, and C. B. Murray, *Nano Lett.*, **13**, 765 (2013).
32. M.-P. Chien and N. C. Gianneschi, *Small*, **7**, 2041 (2011).
33. M. E. Hahnab and N. C. Gianneschi, *Chem. Commun.*, **47**, 11814 (2011).
34. Y. Zhang, W. Chu, A. D. Foroushani, H. Wang, D. Li, J. Liu, C. J. Barrow, X. Wang, and W. Yang, *Materials*, **7**, 5169 (2014).