

천연색 화소용 아누스입자 제조

광자결정 기반 광자유체 신기술들을 개발하여 세계 최고 권위의 학술지인 네이처 포토닉스(Nature Photonics)誌 등에 관련 논문을 게재했던 국내 연구진이 최근 또 다른 광자결정 신기술을 개발했다. KAIST 생명화학공학과 양승만(梁承萬, 광자유체집적소자창의연구단 단장) 교수 연구팀이 지난 8월 ‘굴절을 조절이 가능한 미세입자 대량생산기술’과 ‘광자유체 기술을 이용한 광결정구 연속생산 기술’을 개발한데 이어, 이번에는 “전자종이(e-paper)”나 “접을 수 있는 디스플레이(flexible display)”를 구현하는데 필요한 핵심소재인 천연색화소를 실용적으로 제조할 수 있는 광자결정구조체를 개발했다. 관련 논문은 국제적 저명 학술지인 어드밴스드 머티리얼스(Advanced Materials)誌 최근호(11월 3일자)에 게재됐으며, 광자결정의 실용성을 구현하는데 크게 기여했다고 인정받았다. 특히, 네이처(Nature)誌 최근호(11월 6일자)는 양 교수 연구팀 연구의 중요성과 응용성에 주목하여 “나노기술-차세대 표시소자(Nanotechnology-Future Pixels)”라는 제목 하에 리서치 하이라이트(Research Highlights)로 선정했다.

양 교수 연구팀은 균일한 크기와 모양을 갖는 광자결정구를 생산하는 데 있어 크기가 수십 혹은 수백 마이크로미터인 균일한 액체방울에 나노입자를 가두고, 빛을 매개로 액체를 고형화시킴으로써 종래에 수십 시간 소요되던 광자결정 자기조립공정을 연속적으로 불꽃 수십 초 만에 제조할 수 있는 기술을 이번 연구에서 확보했다. 이들 광자결정구는 차세대 반사형디스플레이 색소나, 나노바코드, 생물감지소자 등으로 활용될 수 있다. 특히 주목할 것은 몇 개의 다른 색을 반사하는 아누스 광자결정 구슬을 제조했다는 것과, 전기장을 이용하여 이들 아누스 구슬을 회전시켜 실시간으로 색깔을 바꿀 수 있도록 광자결정 내부에 전기적 이방성을 갖도록 했다는 점이다. 전기장으로 아누스 구슬을 구동시켜 색 조절을 가능케 한 이번 기술은 앞으로 “전자종이”나 “접을 수 있는 디스플레이” 소자에 활용될 수 있다. 이러한 광자결정 표시소자는 현재 세계 굴지의 화학회사들이 연구개발 중이며 이번 연구 결과는 이 분야의 국제 경쟁에서 우위를 확보하는데 필요한 핵심요소이다. 지난 20여 년 동안 자연 상태에 존재하는 광자결정의 나노구조를 인공적으로 제조하기 위한 연구가 많은 과학자들에 의해 시도돼 왔으나, 실용적인 구조를 얻는 데에는 한계가 있었다. 양 교수팀은 2006년부터 교육과학기술부의 “창의적연구진흥사업”으로부터 지원을 받아 광자결정소재의 실용성을 확보하기 위한 연구를 수행하여 최근 해외 저명학술지로부터 크게 주목받는 연구 성과를 거뒀다.

※ 광자결정: 광자결정은 굴절률이 다른 물질이 규칙적으로 쌓여서 조립된 결정체로서 오팔보석, 나비와 공작새의 날개 등이 자연에 존재하는 광자결정이다. 이들이 발산하는 아름다운 색깔은 색소에 의한 것이 아니라 이 물질을 이루는 구조가 규칙적인 나노구조로 되어 있기 때문이다. 예를 들면, 오팔은 크기가 수백 나노미터(머리카락 굵기의 약 100분의 1정도)의 유리구슬이 차곡차곡 쌓여 있는 것으로서 오팔이 아름다운 색을 띠는 것은 오팔이 자신의 광 밴드 갭, 즉 오팔이 선택적으로 반사하는 파장영역대의 빛만을 우리가 볼 수 있기

때문이다. 마찬가지로 나비의 날개나 공작새의 깃털을 전자현미경을 통하여 보면 아주 작은 공기주머니가 날개나 깃털의 기질 속에 규칙적으로 적층되어 있는 광자결정구조를 보유하고 있음을 알 수 있다. 즉, 이러한 구조의 광자결정은 특정한 파장 영역대의 빛만을 완전히 선택적으로 반사시키는 기능을 보유하게 된다. 이러한 특수한 기능으로 인하여 광자결정은 나노레이저, 다중파장의 광정보를 처리할 수 있는 슈퍼프리즘(superprism), 광도파로(waveguide) 등 차세대 광통신 소자와 현재의 컴퓨터 속도를 획기적으로 높일 수 있는 수십 테라급 초고속 정보처리능력을 갖춘 광자컴퓨터의 개발에 필요한 소재로 주목받고 있다. 이러한 이유로 광자결정은 광자(빛)가 정보를 처리하는 미래에 오늘날의 반도체와 같은 역할을 할 것이므로 “빛의 반도체”라 불린다.

(Advanced Materials, November, 2008)

저렴하고 효과적인 나노입자 초격자의 패터닝 방법

코넬 대학(Cornell University) 연구자들이 미소 유체 액적의 건조 방식을 조작하여, 보통은 값비싼 리소그래피 장비로만 제작이 가능한 나노와이어와 소자들을 저렴하게 제작, 패터닝하는 혁신적인 방법을 개발했다. 이 공정은 주형(mold)을 이용해 원하는 구조를 스탬핑(stamping)하는 것으로, 연구 결과가 *Nature Nanotechnology* 최근호에 발표되었다. “원리상으로는 원하는 어떠한 종류의 나노 구조도 만들 수 있다.”고 Dan Luo 교수(코넬대 생물환경공학)는 말한다. 연구팀은 이 공정을 실증하기 위하여 금 나노입자를 나노와이어, 디스크형, 정사각형, 삼각형 및 “corral”(나노와이어로 둘러싸인 우리 모양의 공간) 형으로 자기조립하고, 이 나노와이어가 마이크로 제작된 전극에 연결될 수 있으며, 또 이를 통해 다른 회로에 연결될 수 있음을 보여주었다. 금속 나노입자 외에도 이 공정은 양자점(quantum dot), 자성 구(magnetic sphere) 및 다른 나노입자에도 적용될 수 있다고 한다. 연구팀은 또, 단일 염 결정(single salt crystal)의 어레이를 자기조립하였으며, 결정화가 가능한 어떤 재료라도 이 공정에 의해 조작될 수 있음을 시사하고 있다.

연구팀은 먼저 직경 약 12 nm의 금 입자를 물에 현탁하기 위해 금속과 물에 부착하는 리간드(ligand)로 입자들을 코팅했다. 이 코넬 공정의 혁신성 중의 하나가 합성 DNA의 단일 사슬을 리간드로 사용하는 것이다. DNA 분자는 머리카락처럼 입자로부터 뻗어 나와, 물이 증발함에 따라 입자들을 서로 엉키게 한다. DNA 길이를 조절하면 입자간의 거리를 정확히 조절할 수 있기 때문에, 입자들이 엉킴 없이 고도로 정렬된 어레이(초격자(superlattice)라 함)로 자기조립하게 할 수 있다. 이러한 금속 초격자는 컴퓨터 메모리나 광학분야에 응용될 수 있으며 전자회로에서 독특한 성질을 나타낸다. 다음 단계는 실리콘 고무 몰드를 실리콘 기판상의 용액 박막층에 압인하는 것이다. 몰드의 아래쪽에 있는 마이크로 기공과 채널들이 이 유체 상에 원하는 형상을 효과적으로 스탬핑 한다. 액적들은 건조하면서 축소되어 마이크로 크기의 몰드로부터 나노크기의 와이어와 여러가지 형상들을 생성한다. 연구자들은 이 방법에 의해 현재 고가의 전문 장비로만 가능한 나노 초격자 형상들을 저렴한 방법으로 제작할 수 있다고 말한다.

다. 이 연구는 미 국립과학재단(NSF)과 뉴욕주 과학기술혁신재단(New York State Foundation for Science, Technology and Innovation)으로부터 지원받았다.

(*Nature Nanotechnology*, November, 2008)

탄소 나노튜브(Nanotube)로 이루어진 확성기

지난해 수염처럼 생긴 탄소 나노튜브로 만들어진 난쟁이 나라의 라디오에 관한 소식이 있었다. 이제 중국의 연구자들이 거기에 함께 쓰일 수 있는 초박(ultrathin) 확성기를 추가했다. 투명하고 유연한 탄소 나노튜브로 만들어진 그 장치는 전통적인 확성기에서 쓰이는 덩치 큰 자석이나 원뿔모양의 진동판을 필요로 하지 않는다. 따라서 그들은 거의 보이지 않고 평평해서 천장이나 벽으로부터 옷이나 커튼에 이르기까지 모든 것에 통합가능한 새로운 세대의 확성기로 이끌 수 있을 것이다.

탄소 나노튜브는 강도와 높은 전도성 때문에 오랫동안 환영받아 왔다. 그러나 소리를 생성하는 능력은 뜻밖의 일이었다. 전통적인 확성기는 자석을 사용하여 얇은 격막(diaphragm)을 움직여, 공기 중에 우리가 소리로 인식하는 압력의 파동을 만들어낸다. 새로운 나노 확성기는 이러한 장비를 하나도 가지고 있지 않다. 그 대신에, 베이징(Beijing)의 칭화대학(Tsinghua University)의 물리학자 Kaili Jiang가 개발한 이 장비는 단지 나노튜브의 얇은 막을 가진다. 지난해, Kaili와 동료들은 10 cm 폭의 막의 반대쪽 끝에 전극을 설치하고, 전류를 켜서 그것이 잡음을 만들때 깜짝 놀랐다. Nano Letters 12월 10일 호에 발표된 이 연구에서 과학자들은 전류의 변화가 나노튜브 주변의 공기를 신속하게 가열하거나 냉각시키는데, 이를 통해 자석이나 격막 없이 교대로 압력 파동과 소리를 만들어낸다고 보고한다. 이러한 “열음향(thermoacoustic)” 효과는 얇은 금속 박편을 가지고 실험했던 연구자들에 의해 100년도 더 이전에 최초로 보고되었었다. 그러나 그것을 이용하려는 초기의 노력은 그것이 매우 약했기 때문에 실패로 돌아갔다. 탄소 나노튜브로부터 나오는 소리는 나노튜브가 전기를 열로 더 잘 전환하기 때문에 260배 더 크다고 Kaili는 말한다. 중국 연구진은 몇 cm에서 공책의 종이만큼 큰 것까지 다양한 크기와 모양을 가진 종이 두께만큼 얇은, 극소의 뒤틀림(distortion)과 고음질을 가지고 전통적 확성기만큼 크게 울릴 수 있는 확성기를 만드는데 그들의 발견을 이용하였다. Kaili는 그의 연구진이 현재 그 기술을 상용화하기 위해 일하고 있다고 말한다.

어바나샴페인(Urbana-Champaign)에 소재한 일리노이대학(University of Illinois)의 재료과학자이며 나노튜브 라디오를 만들고 있는 John Rogers는 그 새 연구가 매우 독창적이라고 말한다. 달라스(Dallas)에 있는 텍사스대학(University of Texas)의 재료 과학자이자 탄소 나노튜브 막 창시자인 Ray Baughman은 그 새로운 확성기의 간단함이 신적적으로나 정신적으로 난청인 사람들을 도울 수 있는 말하는 옷을 포함하여 잠재적인 응용을 향한 길을 여는데 “큰 장점”이라고 말한다.

(*Nano Letter*, December, 2008)

단백질 검출용 유기 나노튜브

유기 나노튜브(organic nanotubes)는 다양한 구축 블록으로 쉽게

변형될 수 있기 때문에 나노전자소자 및 바이오의학 분야에서 기능성 나노물질(functional nanomaterials)로서 빠르게 발전하고 있다. 최근 인하대학교 김철희 교수 연구진은 덴드론(dendrons)과 시클로덱스트린(cyclodextrins)으로 제조된 나노튜브를 개발하였는데, 튜브의 표면에 기능성을 부여함으로써, 특정 단백질을 검출할 수 있는 바이오센서를 개발하였다.

덴드론은 나무를 뜻하는 그리스어이다. 덴드론은 나무 형태의 가지를 친 분자이다. 김철희 교수 및 박치영 연구진은 가지로서 네 개의 기다란 탄화수소 사슬을 갖는 분자 “나무”를 선정하였다. 이후 그들은 “줄기”의 말단에 네 개의 방향족 탄소 고리로 제조된 형태인 파이렌 그룹(pyrene group)을 부착하였다. 용액에서 이러한 덴드론은 “가지와 가지”가 만나 소포체 혹은 작은 거품 형상을 형성한다. 여기에 글루코오스 사슬이 닫힌 형태를 이룬 고리형상의 시클로덱스트린이 첨가되면 이들은 소맷부리(cuff) 장식처럼 파이렌 그룹 주변으로 위치를 잡게 된다. 이는 덴드론이 기다란 나노튜브의 형태로 자체 정렬하는 것을 보다 용이하게 만든다. 이때 나노튜브의 표면은 시클로덱스트린 “소맷부리”로 코팅된다. 위와 같은 원리가 보편적인 형태로 자리잡기 위해선 시클로덱스트린이 다양한 작용기로 쉽게 변형될 수 있어야 한다. 이때 작용기는 튜브 표면에 주렁주렁 매달린 형태를 취하게 된다. 따라서, 여기에 금 나노입자를 결합시킬 수 있는 특별한 물질들을 부착할 수 있는 것이다. 이와 같이 금속 입자로 밀집되어 표면이 감싸진 나노튜브는 나노전자소자 분야에서 관심을 받고 있다.

한편, 나노튜브 위의 파이렌 그룹은 또 다른 장점을 갖고 있는데, 이들은 형광을 나타낸다. 이러한 성질은 제조된 분자가 바이오센서를 디자인하는데 사용될 수 있다는 것을 시사한다. 이러한 개념을 입증하기 위해 연구진은 아비딘(avidin) 단백질을 이용한 실험을 착수하였다. 그들은 우선 나노튜브의 표면을 아비딘 단백질과 스트렙타아비딘(streptavidin) 단백질에 결합하는 특성을 갖는 바이오분자인 바이오틴(biotin)으로 변형시켰다. 금 나노입자(gold nanoparticles)에 결합된 스트렙타아비딘이 첨가되면 나노입자는 바이오틴 연결체에 의해 나노튜브에 결합된다. 이는 금 나노입자를 파이렌 그룹의 근처로 이동시키며, 이는 나노입자가 전자적으로 상호작용하여 형광을 꺼지게 만든다. 만약, 아비딘 단백질과 금 나노입자가 결합된 스트렙타아비딘이 첨가되면 튜브 표면 위의 바이오틴 연결체는 아비딘에 결합하게 된다. 아비딘 근방의 파이렌 그룹은 형광을 띄게 된다. 형광 억제자인 금-스트렙타아비딘은 아비딘에 의해 점령되지 않은 결합 위치에만 결합할 수 있다. 따라서, 형광의 세기는 아비딘의 농도에 비례하는 결과를 나타낸다.

(*Angewandte Chemie International Edition*, November, 2008)

링 모양으로 교차 연결된 폴리머

텍사스 공과대학(Texas Tech University) 연구진은 보다 강한 내구력이 있는 플라스틱과 보다 탄력적인 고무를 만들 수 있는 폴리머 중합 방법에 대한 새로운 접근을 시도했다. 저널 *American Chemical Society*에 게재된 이번 연구는 더 강인하고 더 탄성적인 중합물질을 만드는데 사용될 수 있는 슬립(slip)으로 연결된 도르레 시스템(pulley system)을 궁극적으로 만들기 위한 정밀하고 간단한 프로세스를 제안했다. 지금까지 어떤 사람도 이런 방법으로 폴리머를 만든 적이 없었다고 텍사스 공과대학 조교수인 메이어(Mayer)가 말했다. 폴리머