

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 Kaiji Jiang가 개발한 이 장치는 단지 나노튜브의 얇은 막을 가진다. 지난해, Kaiji와 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 고대로 압력 파동과 소리를 만들어낸다고 보고한다. 이러한 “열음향(thermoacoustic)” 효과는 얇은 금속 박편을 가지고 실험했던 연구자들에 의해 100년도 더 이전에 최초로 보고되었다. 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 Kaiji는 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. Kaiji는 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 신체적으로나 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 단힌 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 스트렙타이비딘(streptavidin) 단백질에 결합하는 특성을 갖는 바이오분자인 바이오틴(biotin)으로 변형시켰다. 금 나노입자(gold nanoparticles)에 결합된 스트렙타이비딘이 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 스트렙타이비딘이 첨가되면 튜브 표면 위의 바이오틴 연결체는 아비딘에 결합하게 된다. 아비딘 근방의 파이렌 그룹은 형광을 띄게 된다. 형광 억제자인 금-스트렙타이비딘은 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

물질을 만들기 위한 이러한 방법의 증합은 새로운 접근 방식이다. 연구진은 화학적으로 고리 모양으로 서로 연결되어진 원자 클러스터로 형성되어진 고무 같이 매우 특이한 복합 폴리머 화합물을 만들 수 있는 새로운 방법을 제공했다. 폴리머 네트워크를 만들기 위한 현재의 방법들은 큰 분자들을 교차 연결(cross-link)하는 화학적 반응에 의존했다. 그러나 이런 방법으로 만들어진 물질들은 응력을 받았을 때 자주 약한 연결로 되어 있는 교차 연결 부위가 깨어져서 물질이 파괴되는 사태까지 발생할 수 있다고 연구진은 말했다. 연구진은 마술사들이 “마술 링(magic ring)”을 선보일 때 사용되는 것과 비슷하게 두 개의 링 모양의 분자들이 서로 연동되도록 하는 다른 방법을 시도했다.

연구진이 이번에 만든 물질들은 기계적으로 뒤틀릴 때 움직일 수 있는 교차 연결을 위한 기준점(anchor point)을 제공하면서 폴리머 사슬을 따라서 미끄러질 수 있는 링의 형식으로 되어 있다. 연구진은 유연한 네트워크로 되어 있는 폴리머를 만드는데 이 방법을 사용할 수 있었고 이 디자인이 폴리머 물리학자들이 제안한 이론적 모델에 적격이라고 말했다. 폴리머 물리학자들이 제안한 이론적 모델은 폴리머가 이러한 링으로 교차 연결되도록 하는 것이다.

연구진은 현재 이 기술에 적합한 물질들을 만들기 위한 최적화된 방법을 개발했다. 이 연구결과는 *Journal of the American Chemical Society*에 “Polypseudorotaxanes via Ring-Opening Metathesis Polymerizations of [2] Catenanes”이라는 제목으로 게재되었다.

(*J. Am. Chem. Soc.*, October 2008)

올레핀 복분해 반응을 위한 강력한 촉매

강력한 올레핀 복분해(olefin metathesis: 이중 결합을 가진 단순한 물질을 보다 복잡한 화학 물질로 변환시키는 기법) 반응을 일으킬 수 있는 매우 효과적인 새로운 촉매가 보스턴대학 및 MIT 과학자들에 의해 발견됨으로써, 의약품, 생물 및 재료 분야 연구에 광범위한 과학적 원천을 제공하고 있다. 2005년 촉매 올레핀 복분해 발견으로 노벨화학상을 수상한 바 있는 MIT의 Richard Schrock와 보스턴대학의 Amir H. Hoveyda 교수에 따르면, 이 새로운 촉매는 쉽게 제조할 수 있으며, 예전에 화학자들에 의해 구현된 적이 없는 독특한 특성을 가지고 있다고 한다. 이 연구팀의 연구결과는 *Nature*지 온라인 판에 게재되어 있다.

인류의 삶을 질을 향상시킬 수 있는 분자를 획득하기 위해서는, 신빙성 있고 효율이 높으며 선택적이고 친환경적인 화학반응이 필요하다. 이런 변환을 촉진시키는 촉매의 개발은 현대화학의 큰 성과 중 하나라고 볼 수 있다. 촉매 올레핀 복분해는 단순한 분자들을 복잡한 분자로 변환시킨다. 그러나 가장 큰 난제는 다양한 반응에 적용함에 있어서 실제적이고 선택성이 매우 큰 유기화학반응을 일으킬 수 있는 촉매의 개발이었다. 전례 없는 이번의 촉매는 다양한 분야에서 연구를 향상시키는데 기여할 것으로 기대하고 있다. 알켄 혹은 올레핀으로 불리는 탄소-탄소 이중결합을 갖는 매우 쓰임새가 많은 분자들은, 의약품 분야나 생물학적 활성분자에 널리 존재하는 물질이다. 사면체 형상의 새로운 촉매는 중심금속에 네 가지 리간드를 갖는 형태로 되어 있으며, 촉매의 반응성과 선택성을 높여주는 역할을 한다.

중심금속은 몰리브덴(molybdenum)이며, 화학자들이 간단하고,

독특하면서 효율적으로 원하는 분자를 생성시키거나 원하는 반응을 유도하는데 이용할 수 있는 방법을 제공한다. 새로운 촉매는 또한 구조적으로 유연하고 상대적으로 독특한 특성을 가지고 있다. 안정적인 분자구성과 유연한 구조를 가진 촉매의 발견으로 전례 없던 수준의 반응성과 선택성을 가진 새로운 화학변환 기법의 설계, 준비 및 개발이 가능할 것으로 기대된다고 공동저자인 보스턴대학의 Steven J. Malcolmson, Simon J. Meek, 및 Elizabeth S. Sattely 등은 밝히고 있다. 본 발견은 Hoveyda 연구팀과 Schrock 연구팀의 장기간에 걸친 협동연구의 최신 결과이며, 미국국립보건원으로부터 거의 10년에 걸쳐 350만 달러의 자금을 지원받았다.

(*Nature Advance Online Publication*, 16 November, 2008, doi:10.1038/nature07594)

생체 분자를 감지하는 수직 그래핀 시트

원자 한 개 두께의 탄소로 이루어진 그래핀은 새롭게 밝혀진 전자 성질 때문에 현재 응집물리학(condensed matter physics)과 재료 과학 분야에서 높은 관심을 가진다. 지금까지 알려지지 않았던 그래핀의 중요한 특징은 전기촉매(electrocatalytic) 성질과 기능화를 위한 장소로 사용될 수 있는 그래핀의 모서리(edge)에서 나왔다. 그래핀 자체는 자연계에서 저절로 존재하지 않고 중합되거나 조절하기가 지극히 어렵다. 또한, 대면적으로 장치에 적용되기가 매우 어렵다. 그러나 실제 적용을 위해서는 신뢰성 있고 대면적으로 생산할 수 있는 기술을 개발해야 한다.

영국 울스터 대학(University of Ulster)의 P. Papakonstantinou 박사와 N. Shang 박사는 그래핀 시트가 효율적이고 대면적으로 성장할 수 있고 전기촉매 성질을 가질 수 있는 새로운 방법을 개발했다. 이것을 하기 위해서 연구진은 원-스텝 마이크로파 플라즈마 강화 화학 기상 증착(one-step microwave plasma enhanced chemical vapour deposition) 방법을 사용하여 풍부한 모서리 면/결합이 있는 플랫폼(platform) 속에 대량의 수직 그래핀 시트를 결합시켰다. 이 플랫폼을 사용해서 연구진은 빠른 전자 이동, 뛰어난 전기촉매 그리고 생체 감지 성질을 첫 번째로 성공적으로 증명했다. 이 연구결과는 *Journal of Advanced Functional Materials*에 게재되었다.

도파민(Dopamine)은 중추 신경, 신장, 호르몬 그리고 심장 혈관계에서 매우 중요한 역할을 하는 신경 전달 물질이다. 도파민의 농도 변화로 인간의 건강 상태를 알 수 있기 때문에 도파민을 검출하는 것은 중요하다. 기존의 전극은 도파민 응답에 대한 선택성과 감도가 떨어지기보다는 도파민과 같이 공존하는 아스코르브산(ascorbic acid)과 요산(uric acid)에 의해서 불명확한 값이 나왔다. 그러나 이번의 그래핀 플랫폼은 고감도에서 도파민을 잘 감지할 수 있다. 뛰어난 전기촉매와 민감한 감지 성질은 그래핀의 독특한 전자 구조, 풍부한 모서리 결합 그리고 대면적 때문이다. 기존의 다른 전극의 다단계 제조 과정에 비해서 이 그래핀 플랫폼은 CVD 프로세스로 매우 짧은 시간에 간단하고 효율적인 한 공정으로 제조할 수 있다.

이 연구결과는 전기분석, 생체 감지, 에너지 저장/변환 분야 등의 다양한 영역에서 적용할 수 있는 새로운 종류의 그래핀 전극을 만들었고 이 그래핀 전극은 수직으로 정렬된 탄소 나노튜브 전극과 경쟁할 수 있다. 고순도 다층 그래핀 나노플레이크(nanoflake) 박막은 촉매를 사용하지 않고도 간단한 방법으로 실리콘을 효율적으로 성장시