

## 나노와이어 센서

주울 가열(joule heating)을 이용하여 선택적으로 큰 소자의 한 부분인 반도체 나노와이어의 표면에 기능성을 부여하는 간단한 방법이 개발되었다.

대면적의 조밀한 실리콘 나노와이어(silicon nanowires)의 어레이가 화학 센서(chemical sensor)로의 응용이 가능하다. 나노와이어는 화학 약품과 DNA 혼성화(DNA hybridization)와 같은 바이오분자의 인식(biomolecular recognition) 등과 같은 센서에 사용이 가능하다. 또한, 예일 대학(Yale University)의 연구진들에 의하여 나노와이어 합성의 새로운 방법을 통해 최초로 마이크로전자 시스템에 직접 나노선이 집적될 수 있었을 뿐 아니라 생체 진단의 혁신을 이끌 수 있는 고감도 생분자 검출기의 가능성도 입증되었다. 제조된 나노 와이어는 구조적으로 안정하며, 항체 및 생체 중요 분자의 검출 센서로서 뛰어난 감도를 나타내었다.

반도체 나노와이어의 저항은 표면의 성질에 따라 매우 민감하게 반응한다. 따라서 이러한 성질을 이용하여 나노와이어를 가스나 pH의 변화에 따른 좋은 검출기로 사용이 가능하다. 하지만 나노와이어 센서에서 각각의 나노와이어가 서로 다른 화학물질을 검출하는 것은 아직까지 해결해야 할 문제로 남아있다. 반도체는 특정 화학물질에 민감하게 반응하지 않기 때문에 표면에 적합한 화학적 연결고리를 부여하는 물질을 코팅하여 센서의 역할을 수행할 수 있게 만들었다.

이번에 미국 캘리포니아 대학교 버클리(University of California at Berkeley)와 휴렛-팩커드(Hewlett-Packard)의 공동 연구로 아주 간단한 방법으로 반도체 나노와이어에 기능성을 부여하고 센서로 작동되는 현상을 구현하였다. 연구진들은 폭이 100나노미터와 두께가 100나노미터인 실리콘 나노와이어에 200나노미터 간격의 산화 실리콘 표면을 만들었다. 전기적 결합은 각각의 나노와이어에 연결하였고, 전체를 열에 민감한 고분자를 코팅하였다. 나노와이어에 10 V의 전압을 가하였을 때에 섭씨 300도까지 올라가서 나노와이어의 주변에 있는 고분자를 제외한 다른 부분의 고분자를 기화시켰다. 센서 어레이 전체에 DNA나 단백질과 결합할 수 있는 화학적 결합 분자를 증착하였을 때에 열이 가해진 실리콘 나노와이어만을 깨질시킬 수 있었다. 실리콘 나노와이어를 이용한 기술은 탄소 나노튜브를 이용한 센서를 만드는 것보다 매우 간단하게 화학 센서 및 생물학 센서를 만들 수 있는 장점이 있다. 이러한 기술은 기본적으로 다른 반도체 물질이나 화학 결합 분자를 이용하여 나노와이어 기반의 센서 어레이를 제조하는 데에 적용이 가능할 것으로 여겨진다.

(*Nano Letters*, September, 2007)

### 금속 촉매의 양을 줄일 수 있는 덴드리머 나노입자

덴드리머로 안정화된 팔라듐(Pd) 나노입자는 탄소-탄소 결합 형성의 촉매로 사용되어 활성을 증가시키고 농도를 감소시키는 특성을

보여주었다. 또한 이러한 반응에 사용되는 금속은 일반적으로 비싸고 인간이나 환경에 독성을 나타내기 때문에 화학 반응에서는 종종 금속 기반의 촉매의 양을 줄이기를 원한다. 따라서 전이 금속 나노입자(transition metal nanoparticles)의 경우 부피에 비하여 넓은 표면적을 가지고 있어서 효율성이 매우 우수하여 새로운 촉매 형태로 주목을 받고 있다. 또한, 아주 많은 가지를 가진 마이크로 분자인 덴드리머(dendrimer)는 크기와 금속 원자를 제어할 수 있는 새롭고 효율적인 템플레이트로 사용이 가능하다. 이는 정확하게 나노입자의 크기를 제어하여 안정화된 촉매 반응을 일으킬 수 있는 것이 가장 큰 장점이다. 현재 프랑스 볼더악스 I 대학교(Universite Bordeaux I)의 아스트루크(Didier Astruc) 교수팀은 덴드리머로 안정화된 팔라듐 나노입자를 제조하여 잘 알려진 스즈키 반응(suzuki reaction)인 탄소-탄소 결합의 반응에서 촉매로서의 팔라듐의 역할을 연구하였다. 연구진들은 덴드리머가 반응 속도와 수율에서 우수하다는 것을 발견하고 팔라듐이 함유된 촉매의 양이 기존의 반응에 비하여 적게 사용되는 것을 발견하였다. 연구진들은 정밀한 분석을 통하여 촉매의 양과 반응 속도의 최적화를 연구하여 이들 사이의 상관관계를 밝혀내어서 적은 양으로도 이 반응을 충분히 만들 수 있음을 밝혀내었다.

더욱이, 이러한 조건하에서 스즈키 반응의 메커니즘을 밝혀내었고, 팔라듐의 양을 효율적으로 제어할 수 있다는 것이 이번 연구의 가장 큰 성과이다.

(*Angew. Chem. Int. Ed.*, October, 2007)

### 의약 운송체용 수용성 탄소 나노튜브의 연구

탄소 나노튜브(carbon nanotubes)를 의료적으로 유용한 약물, 이미징 시약, 운송 시약(drug and imaging agent, delivery agents)으로 변환하는데 있어 연구자들은 나노튜브에 생체적합성(biocompatibility)을 부여하기 위해 종종 외벽에 고분자를 코팅한다(polymer coatings). 최근 스탠포드 대학(Stanford University) 연구진은 코팅되었을지라도 탄소 나노튜브가 안정하고 가역적인 방식으로 다수의 약물 및 이미징 시약 분자에 결합되는 성질이 유지된다는 것을 발견하였다. 스탠포드 대학의 다이(Hongjie Dai)교수팀은 물에 용해된 탄소 나노튜브에 약물이 첨가되었을 때 고분자가 코팅된 탄소 나노튜브가 표면에서 자발적으로 항암제인 독소루비신(doxorubicin)을 흡수한다는 것을 ACS Nano에 보고하였다. 결과적으로 구성체는 약 50~60 중량 퍼센트의 독소루비신을 담지하며, 이는 8~10 퍼센트를 나타내는 리포솜(liposomes) 혹은 덴드리머(dendrimers)와 비교되는 수치이다.

또한 연구진은 탄소 나노튜브가 일반적인 생리 완충 용액 및 혈청에 용해되었을 때 약물 담지량이 유지되지만, 종양 세포 내부의 특징적인 산성 환경에선 빠르게 방출된다는 것을 발견하였다. 연구진은 종양 표적분자와 이미징 대조 시약을 나노튜브에 부착하여, 종양을

검출하고 치료할 수 있는 다기능 나노장치의 제조 가능성을 향상시킬 수 있음을 입증하였다.

(*ACS Nano*, August, 2007)

### 고분자 박막을 이용한 나노 구조 제어

미국 국립 표준 기술 연구소(National Institute of Standards and Technology)의 연구원들은 아주 간단하고 빠른 방법으로 블록 공중합체(block copolymers) 박막을 만들고 마이크로 전자 소자에 사용될 수 있는 새로운 측정법을 개발하였다. 연구진들은 향후 차세대 마이크로칩이나 정보 저장 소자에 응용될 수 있는 나노수준의 공중합체 나노 패턴 기술을 실용화하는 방법을 어닐링(annealing)을 통하여 개발하였다.

최근 나노 리소그래피나 고밀도 정보저장 소자 등에 응용하기 위해 관심이 집중되고 있는 블록공중합체의 자기조립, 그리고 이를 이용한 분자구조의 고도 제어는 최근 각광받고 있는 나노기술(NT) 분야중의 하나이다. 이는 나노미터 크기의 구조를 정밀 제어하여 기존의 방법으로는 구현할 수 없는 것을 고성능 및 신기능성 재료를 이용하여 현실화시키는 것이다. 공중합체 박막은 반도체 제조사에서 마이크로칩의 크기를 줄이고 나노 수준의 패턴을 형성하는 데에 매우 중요한 물질이다. 이번 연구에서 열처리 공정인 어닐링을 이용하여 최소 5나노미터까지 거리를 둔 나노실린더 형태의 일정한 패턴을 만들거나, 나노 수준의 점들을 만들 수 있다. 또한 다른 고분자들은 화학적으로 제거하여 마이크로칩에서 나노 구조를 만드는 템플레이트로 사용이 가능하다.

박막의 성능을 향상시키기 위한 기존의 오픈 어닐링 방법은 어닐링 시간이 길고 효율성이 떨어지는 문제점이 있었다. 특히 공정에서 고온 영역(hot zone) 어닐링이라 불리는 것은 온도 차로 인한 고분자의 불균일성이 일어날 수 있다.

하지만 이번에 국립 표준 기술연구소에서 개발한 저온 영역(cold zone) 어닐링 방법은 아주 안정적인 방법이고 일시적으로 원하는 부위에 온도를 제어하여 결합을 최소화시킬 수 있는 장점이 있다. 향후 연구진들은 이러한 현상을 체계적이고 과학적인 접근방법을 이용하여 기초적인 과학 현상을 이해하고 적용할 수 있는 분야를 창출할 것이라고 말하였다.

(*Nano Letters*, September, 2007)

### 나노 구조체 내에서의 단백질의 접힘 현상

단백질의 접힘 속도는 정확한 기하학적 모양을 가진 나노컨테이너(nanocontainer) 내에 단백질을 위치함으로써 증가시킬 수 있다. 일반적으로 단백질 결정의 구조 분석을 통해 단백질의 기능 해석이 가능하기 때문에 결정 제조와 분석에 대한 기술 발전은 오래 전부터 진행되어 왔다.

또한, 단백질은 종종 바이러스 캡시드(capsids)나 기공 등의 한정된 공간 내에서 접히게 된다. 실험과 이론 연구를 통하여 단백질이 아

주 작은 부피로 압축되어 있을 때에 더욱 안정적인 것을 보여주었다. 본 연구에서는 나노컨테이너의 모양이 단백질의 접힘 현상에 어떻게 영향을 주는지를 이해하기 위하여 적절하게 제어된 바이오 물질을 이용하여 연구하였다.

이번에 미국 휴스턴 대학교의 마가렛 청(Margaret Cheung) 박사는 나노컨테이너의 형상이 바이오 고분자의 동역학에 어떻게 영향을 미치는지에 대하여 체계적으로 연구하여 발표하였다.

연구진들은 특정 단백질(Streptococcal G의 B1 도메인)의 모양 변화에 따라 여러 번의 이론적인 계산을 하였다. 그들은 수 나노미터 크기를 가지는 구형, 타원형과 낮은 원통형의 나노 컨테이너에 대하여 연구하였다. 이론적인 계산 결과에 따르면 낮은 원통형의 구조에서 단백질의 접힘 속도가 가장 향상되었다. 따라서 단백질은 특정 형태의 공간을 순간적으로 파악하여 변형하는 것을 밝혀내었다. 이러한 연구를 통하여 단백질이 어떻게 다른 물질과 결합하고 세포와 반응하는지에 대한 이해를 넓혔으며, 나노 기술을 적용하여 새로운 약물 전달과 약물 개발에 유용하게 적용될 것으로 여겨진다.

(*Nano Letters*, October, 2007)

### 강철과 같이 강한 투명 플라스틱

미국 미시간 대학교(University of Michigan)의 니콜라스 코토프(Nicholas Kotov) 교수와 공동 연구진들은 조개껍질에서 발견된 층층이 쌓여진 분자 구조를 모방하여 강철과 같이 강하면서 가볍고 투명한 복합 플라스틱을 제조하였다. 이는 나노판상의 점토층과 수용성 고분자를 이용하여 만들었다. 개별적인 나노수준 탄소 나노튜브, 나노판과 나노로드 등은 상당히 강하지만, 실제로 덩어리나 큰 형상으로 만들었을 때에는 강도가 약한 것이 지금까지 문제점으로 지적되고 있었다. 하지만 연구진들은 이러한 문제점을 혼합 물질로 만들어서 해결하였다. 특히 나노물질을 접착제와 같은 고분자 용액에 분산시켜서 균일한 판상을 제조하고 건조시킨 후, 이렇게 만들어진 300층의 판상을 겹쳐서 플라스틱을 만들었다. 실험에서 접착제처럼 사용된 고분자는 폴리비닐 알콜(polyvinyl alcohol)로 층상의 결합에 매우 중요한 역할을 한다. 이는 층간 사이에 강한 수소 결합을 만들어서 재료를 강하게 만든다.

고강도 플라스틱은 다양한 분야에 응용이 가능하며, 그중에서 플라스틱 도금은 경량이면서 금속의 질감을 낼 수 있기 때문에 금속 부품의 대체로서 시장이 커지고 있다. 특히 이번에 개발된 것은 플라스틱 강철이라고 불리지만 신축성은 적은 편이다. 하지만 향후 이를 이용하여 가볍고 강한 전투 장비나 경찰 무장용기에 응용이 가능하다. 또한 이는 마이크로 전자기계 소자, 마이크로 유체 소자, 바이오 메디컬 센서와 밸브, 무인 우주선 등에 응용이 가능할 것으로 여겨진다.

(*Science*, October, 2007)

### 나노 기술을 이용한 인공 뼈 재료의 현황과 전망

다양한 바이오 재료를 이용해 현재 세계 각국에서 많은 방법을 응

용하여 인공 뼈 물질을 만들려고 시도하고 있다. 최근에는 싱가포르 국립대학교(National University of Singapore)의 수산 리아오(Susan Liao) 박사는 인간의 뼈와 닮은 나노크기(nanosize) 무기질 상(inorganic phase)을 만들기 위해서 콜라겐(collagen)과 탄산염(carbonate)을 다양한 농도로 혼합하여 인공뼈를 만들 수 있는 새로운 방법을 개발하였다. 또한 미국 알칸사스 대학교(University of Arkansas)의 연구원들은 간단하면서 경제적인 방법으로 생체 적합성이 우수한 타이타늄의 표면위에 나노와이어를 코팅하는 방법을 개발하였다. 이는 골반 뼈의 대체와 치아 보철물 등의 표면을 더욱 효과적으로 만들 수 있는 방법이다. *Journal of Materials Science*지 11월호는 MIT 교수 마르커스 부엘러의 "Nano-and micromechanical properties of hierarchical biological materials and tissues"란 논문을 통하여 생체 재료의 연구 방향을 조망하였다.

뼈와 같은 생물학적 재료의 주요한 성질 중 하나는 분자적 수준에서 계층 구조의 존재와 수소결합과 같은 약한 상호작용이다. 이러한 이해는 적당한 온도에서 더 강한 재료를 만드는데 이용된다. 분자 구조의 계층적 구조에 대한 이해 향상은 새로운 유기 혹은 유기 무기물 혼합 재료의 개발과 응용을 유도한다. 이러한 응용의 예로서 탄소 나노튜브와 단백질 혹은 폴리머-단백질 혼합체 등이 있다.

인공 뼈의 재료에서 가장 활발히 이용되는 재료는 hydroxyl-apatite(HA)일 것이다. 뼈의 주성분인 이 재료는 생체와의 접합성과 기계적 특성 때문에 인공 뼈나 인공 치아로 사용 되고 연구되어 왔다. 주요 연구 주제 중 하나는 HA를 더 단단히 만들려는 것이다. 최근 나노 기술을 HA에 접합시키려는 노력도 활발하다. 이제까지 알려진 물질 중에서 가장 단단한 것으로 알려진 탄소 나노튜브를 HA합성에 이용하려는 연구가 최근 발표되었다. 뼈 조직은 콜라겐 섬유와 HA 결정으로 이뤄지는데 미국 캘리포니아 주립대-리버사이드의 연구진은 탄소 나노튜브가 콜라겐을 대신하여 HA가 뼈에서 성장하는 것을 지원할 수 있음을 알아냈다. 이 기술을 좀 더 발전시키면 의사들은 액체로 현탁된 나노튜브액을 뼈에 넣어 굳게 할수 있다.

(*J Materials Science*, November, 2007)

본 기술뉴스는 한국과학기술정보연구원(KISTI)의 글로벌동향브리핑(GTB)에서 발췌, 정리하였습니다.

<부산대학교 정일두, e-mail: idchung@pusan.ac.kr>