

의 자유에너지를 낮추게 된다.

일리노이스 대학의 Steve Granick 교수와 Sung Chul Bae 연구원이 같은 호의 Nature지에 쓴 글에서처럼, 흡착이라는 혼한 공정을 통하여 아주 강한 탄소-탄소 공유결합이 절단된다는 것은 상당히 이단적 개념으로서, 이러한 결과는 기계적 스트레스를 잘 견딜 수 있는 구조의 재료를 디자인하는데 필요한 기본 모델을 제공하며, 아울러 기계적 스트레스를 통하여 화학 반응을 느리게 하거나 아예 반응이 일어나지 않도록 하는 개념을 증명할 수 있으면 더욱 흥미로운 것이라고 덧붙였다. 표면에 응용할 복잡한 구조의 재료를 디자인하기 위해서는 반드시 표면에 의한 공유결합의 절단을 고려해야 할 것이며, 더 나아가 구조를 적절히 디자인하여 원하는 위치에 절단이 일어나도록 하는 흥미로운 결과도 생각해 볼 수 있다.

(C&EN news, March, 2006)

유연한 나노튜브

Boston college, Lawrence Livermore National Laboratory, 그리고 Massachusetts Institute of Technology에 있는 물리학자들은 단일벽 탄소나노튜브(single-walled carbon nanotube, SWNT)가 고온에서 매우 유연해진다고 최근에 발표하였다(Nature, 439, 281 (2006)).

그들은 탄소 나노튜브가 원래 길이의 4배 정도 연신되는 것을 관찰하였으며, 따라서 이러한 광대한 추가소성(superplasticity) 변형은 고온용 세라믹 재료의 강인화에 이용할 수 있다. 이러한 거동은 SWNT가 매우 강한 sp^2 - sp^2 결합을 가지고 있기 때문에 상온에서는 15% 이하의 변형률을 보인다는 점에서 대단히 놀라운 결과이다.

Jianyu Huang과 그의 동료들은 고화질 투과현미경을 이용하여 계속해서 관찰하는 가운데, 압전 장치를 이용하여 2.3 V의 일정한 bias하에서 SWNT를 약 24 nm 정도 잡아당겼다. 이러한 bias하에서 나노튜브 내부의 온도는 약 2000 °C 이상이 된다. 탄소 나노튜브가 끊어졌을 때 늘어난 길이는 91 nm이며, 280% 정도의 신장율을 보였으며, 나노튜브의 반지름은 12에서 8 nm로 줄어들었다. “우리는 추가소성(superplasticity)이 단일벽, 이중벽, 다중벽 나노튜브를 포함하는 모든 탄소 나노튜브의 일반적인 현상임을 밝혀냈다”고 Boston College의 Huang은 말했다. 고온에서의 탄소 원자가 갖는 높은 유동성이 핵심 내용이며, 바로 이러한 원자의 유동성으로 인하여 탄소 나노튜브가 유연성을 띠게 된다. 연구팀은 또한 기계적 변형하에서 탄소 나노튜브에 흐르는 전류를 측정하였는데, 80에서 0 mA으로 급격히 떨어지는 것을 관찰하였다. 이러한 급격한 감소는 나노튜브 내에 결점(defect)의 밀도가 증가하기 때문인 것으로 밝혀졌다.

(Materials Today, March, 2006)

나노크기의 고무공(Rubber Ball)을 이용한 플라스틱 Toughening

고무 강인화(rubber-toughening)는 실제 산업에서 플라스틱의 기계적 성질을 향상시키기 위해서 흔히 사용하는 방법으로, 고

무화합물을 플라스틱과 같이 섞어 플라스틱의 cracking이나 fatigue에 대한 저항성을 높여준다. 하지만 구성 성분간에 서로 상용성이 없기 때문에 종종 원하지 않는 구조와 함께 계면접착력이 약하고, 기계적 성질이나 성능이 원하는 만큼 개선되지 못하는 문제가 발생한다. 혼합시 발생하는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 화학 반응성과 표면에너지에 갖는 diene-based rubber나 acrylic-based rubber가 주로 사용되나, 이 또한 오랜 기간후에는 안정성의 문제가 발생하게 된다. 펜실베이니아 주립대학교의 연구팀은 이러한 상용성과 안정성(stability) 두가지 문제를 동시에 해결할 수 있는 새로운 강인화 기술을 개발하였다.

이 연구팀이 새롭게 개발한 시스템은 ethylene-based rubber로서 30 nm에서 5 mm의 크기와 낮은 유리 전이 온도를 갖는 가교된 매트릭스로 구성된 구형 고무이다. 이 고무는 상온에서 항상 유연한 상태이다. 이 새로운 고무 입자는 흔히 사용되는 ABS 수지와는 달리 야외용으로 적당하며, 입자의 표면에 존재하는 기능성 그룹(예를 들면, OH, COOH, NH_2 , epoxide, anhydride, styrene, borane, silane 등)을 조절하여 대부분의 플라스틱과 세라믹 물질과의 접촉력을 향상시킬 수 있다. 또한 입자 자체는 가교되어 있기 때문에 훌륭한 기계적 물성과 안정성을 갖게 된다. 다양한 종류의 고무 강인화된 재료가 만들어졌으며, 실제 적용된 시스템으로는 PP(polypropylene)/PE(polyethylene), PMMA/EP(ethylene propylene), Nylon/EP, Polyester/EP, Epoxy/EP, AES(acrylonitrile-EP-styrene) 등이 있다. 이러한 재료는 ethylene-based rubber의 표면 개질 그룹과 입자 크기, 가교화도, 유리 전이 온도 등을 미리 선택하여 만들어진다. 입자의 매트릭스는 가교되었지만 여전히 용액과 용융상태에서 분산시키고 가공할 수 있다. 이렇게 만들어지는 모든 재료는 core-shell 구조를 가지게 되는데 core에는 가교화된 고무가 그리고 shell에는 고무입자와 매트릭스를 연결하는 그래프트 고분자로 구성되어 있다.

(MRS Bulletin, March, 2006)

안전성(Safety) 시험을 통과한 탄소 나노튜브

최근에 새롭게 발표된 연구결과가 탄소 나노튜브와 관련된 건강과 안전에 대한 두려움을 완화시킴으로써 신체 내에서 그러한 나노재료를 이용한 연구가 활발하게 진행될 수 있도록 만들었다. 이 연구에서는 수용성 탄소 나노튜브가 정맥을 통하여 쥐에 투입되었으며, 전자현미경 분석을 통하여 단일벽과 이중벽, 두가지 타입의 나노튜브 모두가 소변을 통하여 그대로 배출되는 것을 확인하였다.

이 연구는 University of London's School of Pharmacy에 있는 the Centre for Drug Delivery Research의 Kostas Kostarelos와 프랑스 CNRS Institute of Molecular & Cellular Biology의 Alberto Bianco, 이탈리아 University of Trieste에 있는 Maurizio Prato가 공동으로 수행하고 있다. “이번에 처음으로 탄소 나노튜브가 정맥을 통해서 투입되었으며, 기초적인 약물 동력학 파라미터를 얻었다”고 Kostarelos는 말했다. 이것은 또한 살아있는 동물의 혈관에서 순환하는 탄소 나노튜브의 첫 번째 처방이며, 동시에 나노튜브의 혈액에서의 제거와 소변을 통한 배

출을 보여주는 첫 번째 결과이다. 생의학 적용의 관점에서 본다면 나노구조의 약리학적 한계와 장점을 파악하고 있는 것이 환자에게 나노튜브를 투입하거나 이식하는 등의 모든 종류의 치료나 진단 적용에 있어서 매우 중요하다.

수용성 나노튜브는 azomethine ylides의 1,3-dipolar cyclo-additio를 통하여 표면에 친수성 amino 그룹을 붙임으로써 만들어졌다. 그리고 나서 amino 그룹은 diethylenetriaminepentaacetic chelating agent와 공유결합을 만들고 agent와 complex를 형성하는 방사성 동위원소 indium-111을 이용하여 나노튜브를 이미징화했다.

방사능 추적을 통하여 정맥으로 투여된 수용성 단일벽 탄소 나노튜브가 간, 심장, 비장 같은 기관에 축적되지 않는 것을 알

수 있었다. 연구팀은 이중벽 튜브의 세포 내에 분포와 혈액에서의 완전제거 속도에 관해서 조사하지는 않았지만, 투과전자현미경을 이용하여 두가지 타입의 나노튜브의 소변 배출 연구를 수행하였다. 이러한 연구를 통해서 수용성 나노튜브가 기관 내에 축적되지 않고 순환되는 것을 보여주며, 따라서 치료시 걱정없이 나노튜브를 사용할 수 있게 되었다고 Rensselaer Polytechnic Institute의 탄소 나노튜브 전문가인 Pulickel M. Ajayan 교수가 언급하였다. 더불어 이러한 연구결과는 나노튜브를 의학 측면에서 사용할 때 드는 많은 걱정들을 덜어주게 되었으며, 따라서 나노튜브에 근거한 치료법을 개발하는데 많은 도움이 될 것이다.

(*C&EN news*, March, 2006)

<인하대학교 나노시스템공학부 김승현, e-mail : shk@inha.ac.kr>