

탄소나노튜브의 신소재로서의 가능성

임 지 순

탄소 나노튜브란?

탄소나노튜브가 올해 2월 17일자 미국의 뉴욕 타임즈지에 미래 전자산업의 새로운 물질로 대서특필된 이후 해외 언론 및 학술계에서 탄소반도체에 대한 기대와 관심이 크게 높아졌다.

탄소는 지구상에서 흑연 및 다이아몬드의 두 가지 결정 형태로 존재하여 오랜 세월동안 인류와 친숙하게 지내온 물질이다. 그리고 또 한편으로 탄소는 산소, 수소, 질소 등과 결합하여 우리 몸을 비롯한 모든 생물체의 가장 중요한 구성요소가 된다. 그러나 탄소가 첨단산업의 소재인 반도체로 쓰이리라고는 과거에는 전혀 상상하지 못하였다. 이러한 새로운 용도의 가능성이 보인 것은 지금부터 13년 전의 일이다. 1985년 축구공 모양을 가진 탄소분자 C_{60} (탄소원자 60개가 모인 것으로서 풀러린이라고 부름)가 처음 발견된 이래 전 세계의 많은 연구소에서는 새로운 구조의 탄소를 합성하기 위한 연구가 진행되고 있었다. 일본전기회사(NEC) 부설연구소의 수미오 이치마 박사는 이러한 연구에 골몰하던 중 1991년에 우연히 가늘고 긴 대롱 모양의 탄소구조가 형성된 것을 전자현미경을 통해 확인하였고 이 사실을 세계적 과학학술지 Nature[1]에 보고하였다. 이것이 탄소 나노튜브의 시작이고 그뒤에 많은 실험적, 이론적 연구가 계속되어 왔다.

탄소 나노튜브에서 하나의 탄소원자는 3개의 다른 탄소원자와 결합되어 있고 육각형 벌집 무늬를 이룬다. 만약 평평한 종이 위에 이러한 벌집 무늬를 그린 후 종이를 둥글게 말면 나노튜브 구조가 된다. 즉 나노튜브 하나는 속이 빈 튜브

(혹은 실린더)와 같은 모양을 갖고 있다. 이것을 나노튜브라고 부르는 이유는 그 튜브의 직경이 보통 1나노미터(10억분의 1미터) 정도로 극히 작기 때문이다. 이것은 머리카락 굵기의 칠만분의 일이며 면적으로 따지면 그 숫자를 제공해야 하므로 나노튜브 수십억개를 모아야 머리카락 한개 굵기가 된다. 종이에 벌집 무늬를 그리고 둥글게 말면 나노튜브가 된다고 했는데 이때 종이를 어느 각도로 말 것인가, 튜브의 직경이 얼마나 되게 말 것인가가 문제가 된다. 이에 따라 탄소 나노튜브는 금속과 같은 전기적 도체가 되기도 하고 또 전기가 잘 안 통하는 반도체가 되기도 한다. 전기적 성질 뿐만 아니라 역학적 성질도 또한 중요한데 이것은 탄소사이의 결합이 강하여 대단히 튼튼한 섬유가 될 수 있기 때문이다. 역학적, 탄성적 성질에 관하여는 작년 10월 9일자 Nature[2]지에 커버 스토리로 나오기도 하였다.

나노튜브 한개가 반도체가 될 수 있다는 사실은 이미 알려져 있었다. 그러나 이것이 반도체 소자로 쓰이기 위해서는 커다란 문제가 있다. 현재 가장 널리 쓰이는 실리콘에서와 같이 반도체가 트랜지스터 등에 이용되기 위해서는 반드시 도핑(doping) 과정을 거쳐야 한다. 즉 순수한 반도체는 전기를 거의 통하지 못하는데 붕소(boron), 인(phosphorus)같은 소량의 불순물을 일부러 첨가하여 소위 p-형, 혹은 n-형의 반도체를 만들어야 하며 이런 과정을 도핑이라고 한다. 도핑을 한 반도체에는 미량의 전류가 흐를 수 있으며 이것을 외부전압을 통해 조정함으로써 반도체 소자로 이용할 수 있게 된다. 그리고 잘 알려진 바와 같이 이러한 반도체소자는 컴퓨터,

Carbon Nanotube as a Next Breakthrough in Semiconductive Materials / Jisoon Ihm
 서울대학교 물리학과 교수, (151-742) 서울 관악구 신림2동 산 56-1, Phone: 02)880-6614, Fax: 02)884-3002, e-mail: jihm@snu.ac.kr

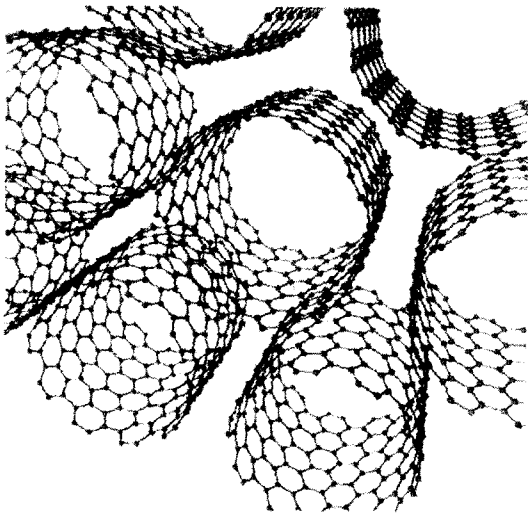


Figure 1. 탄소나노튜브 다발.

각종 통신장비, 전자기구, 큰 기계의 자동조정장치, 그리고 첨단 자동차 내부에까지도 이용되어 첨단산업의 총아가 되어왔다. 그런데 탄소 나노튜브는 도핑하기가 극히 어려워서 반도체로서의 응용이 힘든 것으로 생각되어 온 것이 사실이었다.

나노튜브의 연구 성과

이 글 처음에 언급한 축구공 모양의 탄소분자를 처음 합성하여 1996년 노벨 화학상을 수상한 미국 Rice대학의 스몰리(Richard E. Smalley)교수는 최근 몇 년 동안 탄소 나노튜브 합성에 진력해 왔다. 그리고 1996년 이후 다발모양의 나노튜브를 합성하는데 성공하였다. 그런데 원래 전기적으로 도체인 나노튜브(실제로 많이 만들어지는 종류는 (10, 10) 나노튜브라고 불리는 것임)가 여러 가닥으로 모여 다발을 이룬 소위 "밧줄(ropes)"이 될 때 그 전기적 성질은 어떻게 될 것인가가 필자가 흥미를 갖게 된 연구주제였다. 그림에서와 같이 나노튜브가 다발을 이룰 때 나노튜브의 상호작용에 의해 그 전기적 성질이 바뀔 수 있다는 것이 필자의 생각이었다. 서울대학교에서 안식년을 맞이하여 미국 버클리대학 물리학과를 방문하여 공동연구를 수행한 결과 이

러한 밧줄형태의 튜브는 일부러 도핑을 하지 않아도 저절로 도핑한 반도체의 성질을 띠는 것을 발견하였다. 즉 튜브와 튜브가 모여 상호작용을 하면서 그 전기적인 성질이 도체에서 도핑한 반도체로 변화된 것이다.

슈퍼컴퓨터를 수백시간 돌려 여러가지로 계산한 결과 이러한 결론을 얻었지만 중요한 것은 이런 중대한 변화를 가져오게 한 물리적인 원인이 무엇인가를 밝히는 것이다. 즉 전기적 성질이 변한 이유를 이해해야만 우리가 원하는 대로 그 성질을 조절하고 목적에 맞게 최적화시킬 수 있기 때문이다. 과연 탄소튜브와 튜브 사이의 비교적 약한 상호작용이 어떻게 그 전기적 성질을 이처럼 전혀 다르게 바꿀 수 있는 것인가? 이 문제를 놓고 오랫동안 고심한 결과 마침내 그 원인을 알아내었는데 여기서 등장하는 개념은 거울대칭성(mirror symmetry)이다. 기하학적인 대칭성이 원자들과 같은 미시세계에서 그 성질에 커다란 영향을 미친다는 것은 현대물리학이 밝혀낸 중요한 사실이다. 나노튜브의 축을 따라 거울을 놓고 비친 상은 원래 튜브와 같다. 즉 좌우가 똑같은 대칭성이 있다. 이러한 튜브들이 다발을 이루거나, 혹은 튜브 모양을 적당히 변형시키면 거울대칭성이 깨어짐을 보일 수 있다. 그러면 전기적인 성질이 변하면서 n-형, p-형, 혹은 두가지가 섞인 (즉 어떤 형태로든 도핑이 된) 반도체가 된다. 이 결과는 올해 1월 29일자 Nature[3]지에 발표되었다.

미래 신소재로서 탄소나노튜브의 가능성

이러한 새로운 탄소 반도체의 장점은 아래와 같이 요약할 수 있다.

첫째, 앞서 언급했듯이 이 반도체는 이미 도핑이 된 효과를 지니고 있어 그 응용을 위해 따로 도핑할 필요가 없다는 것이다. 반도체 소자 제작 공정에서 하나의 중요한 과정이 줄어들어 유리해진다. 이것은 실제 대량생산을 염두에 둘 때 대단히 큰 장점이 된다.

둘째, 역시 앞에서 언급했듯이 선풍이 대략 나노미터 정도로 작기 때문에 만약 수 나노미터 정

도 크기의 기억소자나 회로를 만든다면 현재 최첨단의 집적회로 선평의 백분의 일 정도가 된다. 넓이로 따져 만분의 일이므로 현재보다 만배 정도 집적도가 높은 칩을 만들 수 있다는 계산이 나온다. 기억소자로 이야기하면 그 집적도가 대략 테라(10^{12} 즉 1조) DRAM에 이르게 된다. 다시말해 엄지손톱만한 면적에 Encyclopedia Britanica 전질의 100배 가까운 정보를 기억시킬 수 있다는 이야기이다(그러면 과연 이렇게 많은 정보를 저장할 필요가 있는냐는 질문을 할 수 있는데 실제로 그런 큰 기억용량이 필요하다. 예를 들어 영화와 같은 움직이는 화상을 기억시킬 경우 영화한편 즉 비디오 카세트 하나에 대략 1조 정도의 기억단위가 필요하다). 이렇게 되면 인류 과학기술의 궁극적 반도체소자로 생각되는 단일 전자 트랜지스터(single electron transistor) 혹은 단일전자 기억소자에 거의 접근하게 된다. 즉 전자한개의 움직임을 조정해 작동하는 논리소자나 전자 한개를 잡아두었다가 놓아주는 것으로 기억의 한 단위(bit)를 삼는 소자에 접근하는 것이다. 최근(5월 7일자)의 Nature[4]지에는 탄소나노튜브를 이용하여 상온에서 작동하는 전계효과 트랜지스터를 제작했다는 소식이 보도되기도 하였다.

세제, 탄소 원자 사이의 결합은 현재 반도체의 주종을 이루고 있는 실리콘보다 훨씬 더 강하다. 따라서 실내온도의 공기 중에서 화학적으로 극히 안정되고 강하며, 전자회로 외에도 초강력섬유나 열, 마찰에 잘 견디는 표면재료로도 쓸 수 있다(기존의 흑연섬유도 대략 강철만큼 강하지만 새로운 나노튜브 섬유는 그보다 10배 정도 강하다. 즉 인장강력을 평가할 수 있는 Young's modulus가 강철의 10배 정도 된다). 그리고 열전도도가 실리콘보다 훨씬 높아 열을 잘 방출하므로 반도체소자가 작동하면서 뜨거워지는 문제가 쉽게 해결된다.

네제, 탄소는 화학적으로 성질이 이미 많이 연구되어 있으므로 폴리머(합성수지 등 고분자 화합물)를 만드는 기술등 이미 고도로 발전된 노하우를 이용하여 새로운 방면에 응용이 가능하다. 실리콘에서는 어려웠던 생물체와의 직접적인 정

보교환(일종의 interface)도 용이해질 것으로 기대된다.

그러나 문제점 또한 만만치 않다. 우선 그 생산이 고도의 기술을 요하므로 대량생산이 아직 요원하고 또한 원하는 트랜지스터를 만들기 위해 회로를 어떻게 깔 것인가도 해결해야할 문제이다. 기존의 실리콘에서는 기본적으로 실리콘 위에 회로를 그리는 기술이 필요했지만 여기서는 이미 존재하는 가는 선을 원하는 대로 배열시키는 기술이 필요하다. 따라서 기존의 반도체를 개량하는 것보다 전혀 새로운 응용 가능성을 탐구하는 것도 바람직하다. 예를 들어 튜브들을 정밀하게 배열하지 않고 어느정도 뒤엉킨 상태 그대로 놓고 소위 병렬분산기억(parallel distributed memory)소자로 쓰는 것이 한 예이다. 이것은 인간의 두뇌에서 다른 사람의 얼굴을 전체적으로 기억하고 알아보는 것과 비슷한 개념의 기억방법이다. 인간의 두뇌에는 가는 신경세포들이 복잡하게 뒤엉켜있다. 그러면서 두뇌는 그 어떤 컴퓨터보다 월등하게 사람의 얼굴을 기억하고 또 회상해 낼 수 있다. 이것은 기존의 기억소자와는 전혀 다른 기억방법이며 신경회로망이라는 학문분야에서 열심히 연구하고 있으나 아직은 그 신비를 밝혀내지 못한 상태이다.

반도체소자 및 초강력섬유 이외에도 탄소나노튜브의 용도는 다양하다. 미국의 한 회사(Hyperion Catalysis International Company of Cambridge)는 플라스틱에 소량의 전도성 나노튜브를 섞으면(예를 들어 앞서 언급한 (10, 10)나노튜브) 페인트 칠을 낭비없이 고르게 할 수 있음을 알아내어 이렇게 처리한 플라스틱을 자동차 부품으로 이미 쓰고 있다. 그리고 튜브속에 빈공간이 있음에 착안하여 그속에 다른 화학물질이나 약성분을 넣었다가 필요한 경우에(혹은 필요한 신체의 부분에 도달했을때) 빼어쓰는 기술도 연구되고 있다. 물론 튜브 바깥 표면에 다른 분자들을 부착시켜 다양하게 이용할 수도 있다.

현재로서는 탄소 나노튜브, 그 다발(로프), 혹은 튜브들의 뭉치들이 구체적으로 어느 곳에 많이 이용될 것인지 미지수이다. 탄소반도체가 인류생활에 어떻게 이바지할 것인가는 앞으로 과

학자와 공학자들의 끊임없는 연구와 기술개발에 달려있다고 할 것이다.

참고문헌

1. S. Iijima, *Nature*, **354**, 56(1991).
2. M. R. Falvo *et al.*, *Nature*, **389**, 582(1997).
3. P. Delaney, H. J. Choi, J. Ihm, S. G. Louie, and M. L. Cohen, *Nature*, **391**, 466(1998).
4. S. J. Tans, A. R. M. Verschueren, and C. Dekker, *Nature*, **393**, 49(1998).