

5 탄소나노튜브의 세계

# 예상 못할 '물성 최대값' 창출한다

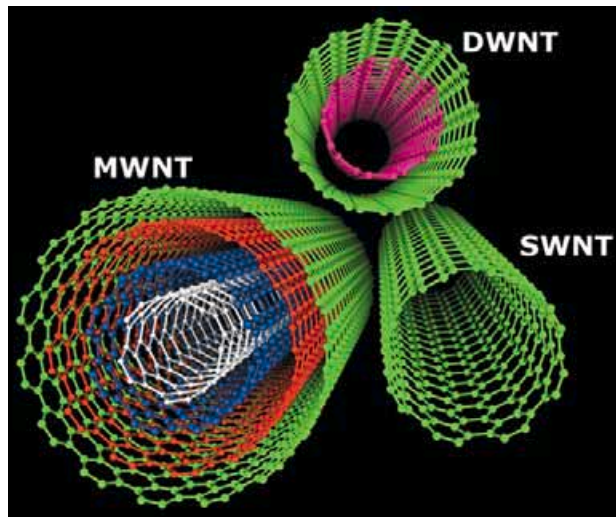
글\_이영희 성균관대학교 물리학과 교수 leeyoung@skku.ac.kr

**탄**소나노튜브란 말 그대로 탄소로 이루어진 물질이고 직경이 나노미터인 속이 비어있는 튜브 형태를 띠고 있다. 또 흑연 한 층을 돌돌감은 형태라고도 볼 수 있다. 1991년 일본의 이지마 박사는 전기방전법을 이용하여 축구공과 같이 둥근 형태의 풀러렌 구조를 합성하여 전자현미경을 통해 그 구조를 관찰하고 있었다. 그런데 이런 둥근 형태의 풀러렌 구조 이외에도 직경이 수nm이고 길이가 수μm인 이상한(?) 나노튜브 형태를 관측하고 이에 대해 논문을 발표했다.

### 1991년 이지마 박사가 첫발견

탄소나노튜브는 다양한 형태로 존재한다. 탄소나노튜브는 층이 하나인 단층탄소나노튜브, 두개 짜리인 이중층탄소나노튜브, 층이 여러 개인 다층탄소나노튜브로 구분된다. 또 한 층 내에서의 원자 배치도 모두 다를 수 있어서, 그 구조의 다양성 면에서 다른 어느 재료와도 비교될 수 없다. 특히 재미있는 것은 말린 형태에 따라 금속이나 반도체의 성질을 띠기도 하고 나노튜브의 직경에 따라 에너지 갭 값이 달라진다. 또 한 가지 구조적 특징은 직경은 수nm~수십nm인데 반해 나노튜브의 길이가 수μm~수백μm에 이른다.

이런 특이한 구조 때문에 탄소나노튜브는 장점이 많은 재료이다. 첫째 우수한 전기전도성이다. 단층탄소나노튜브의 경우 직경이 0.7~3 nm가 보통이다. 이 경우 튜브 축에 수직인 방향으로 전자의 운동이 제한되기 때문에 축 방향으로 전자의 운동이 용이해진다. 이런 현상은 저차원 재료에서 흔히 나타나는 양자현상으로, 이제까지 실험결과에 의하면 금속성 나노튜브는 물론 반도체성 나노튜브조차도 수 백nm 이내에서는 저항 없이 대포알처럼 그냥 전자가 나노튜브를 지나가는 것으로 관측되고 있다.



다양한 탄소나노튜브의 종류. 오른쪽 아래에서부터 반시계 방향의 순서로 단층나노튜브, 이중층나노튜브, 다층나노튜브

둘째 높은 열전도도이다. 탄소로 이루어진 다이아몬드나 흑연 등은 열전도를 잘 하는 물질로 알려져 있고 탄소나노튜브 역시 탄소로 구성되어 있어 그런 현상이 나타날 수 있다고 예상할 수 있지만 탄소나노튜브에서는 이론적으로 예상할 수 있는 최대값을 얻을 수 있다. 이런 현상은 회로에서 발생한 열을 외부로 쉽게 발산시킬 수 있어 응용처가 많다.

### 전기·열전도·강도, 이론적 계산 안돼

탄소나노튜브는 기계적 강도가 그 어느 재료보다 크다. 강철의 100배이고 기존 방탄조끼의 강도보다 10배나 크면서도 탄력성은 더 좋다. 따라서 기계적 강도가 낮은 재료와 혼합하면 기계적 강도를 개선할 수 있다.

탄소나노튜브의 또 하나의 강점은 모든 탄소나노튜브가 표면에 노출되어 있어 표면적이 높아 각종 기체를 흡착시킬 수

있고 이 경우 전지나 슈퍼커패시터로 응용하여 그 성능을 개선할 수 있다. 또 탄소나노튜브는 속이 비어 있고 나노튜브끼리 다발을 만들어 그 빈 공간에 수소를 저장할 가능성도 있다. 수소저장은 아직까지 해결되지 않은 숙제이지만 성공할 경우 연료전지 개발에 획기적인 발전을 가져올 수 있다.

직경이 작고 뾰족한 성질은 또한 나노크기의 침도 만들 수 있어 살아있는 세포내에서 반응을 인위적으로 조작하고 어떤 반응이 일어나고 있는지 알아낼 수 있으며 주사전자현미경의 고성능 탐침도 만들 수 있다. 크기가 작고 분말로 존재할 수 있기 때문에 다른 종류의 분말과 섞어 그 분말의 물리·화학적 성질을 변형시킬 수 있다. 예를 들면 페인트와 섞으면 페인트의 접착력을 향상시킬 수 있고, 고분자와 섞으면 고분자의 전기전도성이나 역학적 강도를 크게 향상시킬 수 있다. 이런 종류의 복합체 응용은 끝이 없다.

탄소나노튜브 소재의 장점은 위에 열거한 우수한 특징 때문에 다양한 응용을 예상할 수 있다. 전계방출소자, 전등, 메모리 소자, 센서 등의 전자소자와 전지, 커패시터, 수소저장, 연료전지 등의 에너지 저장소자의 응용이 가능하고 그 외에도 크기가 작아서 이로온 많은 응용분야가 있다.

#### ‘저온전자방출’로 평판디스플레이 첨단화

가장 두드러진 탄소나노튜브 응용분야 중의 하나가 평판디스플레이이다. 현재 디스플레이 종류는 텔레비전 브라운관, 액정모니터, PDP, 유기EL 등이 있다. 브라운관은 무게가 덩치가 큰 것이 큰 단점이다. 액정모니터는 평판디스플레이가 가능한 대신 시야각이 좁고 화면이 브라운관에 비해 밝지 않으며 고분자 액정의 운동에 의해 소자의 반응속도가 결정되기 때문에 응답속도가 느리다. PDP는 평판이 가능하나 전력소모가 크고 비싸다. 유기 EL은 밝기가 높고 스스로 발광하기 때문에 색상 표현이 뛰어나나 재료자체가 불안하여 수명이 짧은 단점이 있다.

전계방출 디스플레이(FED)는 전자를 방출시켜 전면의 유리판에 입혀진 형광체를 때려 빛을 얻는 원리는 브라운관과 같으나 브라운관이 덩치가 크고 무거운데 반해 FED는 얇은 판으로 전자총을 대체하기 때문에 가벼워 쉽게 평판으로 만들 수 있고, 저전압의 전압구동으로 전력소모가 작아 PDP와 달리

열이 거의 나지않는 장점을 갖고 있는 디스플레이이다. FED는 따라서 이론적으로는 가장 이상적인 디스플레이 조건을 갖추고 있다.

FED의 동작원리는 간단하다. 브라운관처럼 음극에서 방출된 전자가 양극에 입혀진 형광체에 충돌하여 빛을 만들어낸다. 다만 음극의 덩치 큰 브라운관 대신 끝이 뾰족한 금속탐침을 써서 양극과 음극 사이에 작은 전압을 걸어주어도 전자가 방출될 수 있도록 했고 따라서 무거운 브라운관 대신 뾰족한 탐침을 평면에 배열하여 평판 디스플레이를 만들었다. 또 열전자 방출이 없기 때문에 금속탐침의 온도가 아주 낮다. 이 구조는 브라운관의 단점을 보완한 것으로 이론적으로는 완벽하다. 유일한 단점은 금속탐침을 만드는 과정이 비싸고 금속탐침 자체도 수명이 길지 않다는 점이다.

삼성SDI는 최근 금속탐침 대신 탄소나노튜브를 사용하여 FED를 만들었다고 발표하였다. 탄소나노튜브는 기본적으로 실험실에서 쉽게 만들 수 있다. 만들어진 구조는 길이가 수 마이크로 정도이고 직경이 수십 나노미터 이하가 되어 끝이 뾰족하고 길이 대 직경의 비가 아주 커서 낮은 전압에서도 많은 전자를 방출할 수 있는 장점이 있다. 또 가장 강한 공유결합을 하고 있는 흑연과 비슷한 구조를 하고 있기 때문에 화학적으로도 안정하다.

디스플레이를 만드는 방법은 여러 가지가 있지만 탄소나노튜브를 전극재료와 반축을 만들어 기판 위에 인쇄한다. 이렇게 하면 탄소나노튜브의 일부분이 표면에 노출되고 이 노출된 탄소나노튜브를 통해 전자가 방출된다. 실제로 노출된 탄소나노튜브의 숫자가 단위제곱밀리미터당 1백만 개가 넘기 때문에 그 중 몇 개에 문제가 생겨도 별로 걱정할 필요가 없다. 우군이 아직도 많으니까 말이다.

탄소나노튜브를 전자총으로 쓰는데 이것은 아주 큰 장점이 있다. 이 방법은 말 그대로 옛날 시험지 등사기 방식을 그대로 쓰기 때문에 아주 쉽고 경제적이다. 말하자면 저급 기술로 최첨단 고급 디스플레이를 만드는 방법이다. 이 방법은 손쉽게 대면적 디스플레이를 만들 수 있어 대형 벽걸이형 텔레비전으로 시장에 출시될 것으로 예상되며 탄소나노튜브를 이용해 크게 돈을 벌 수 있는 가장 앞서 있는 분야가 될 것이다. 이외에도 실험실에서 기판에 직접 수직한 탄소나노튜브를 성장하여 사용

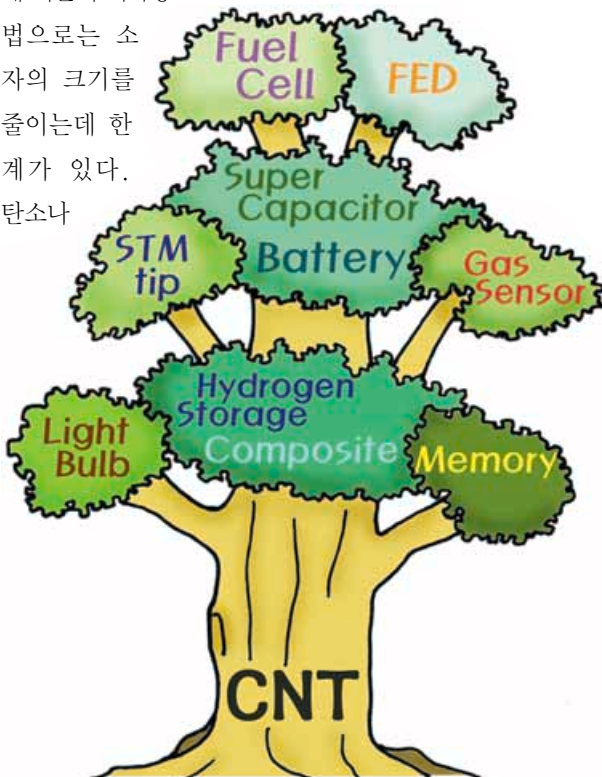
하는 경우도 있다.

그러나 이 경우는 대면적이 용이하지 않기 때문에 소형 디스플레이나 다른 종류의 전자방출소자에나 응용이 가능하다. 탄소 나노튜브의 이런 저온 전자방출능력은 휴대용 x-선 발생장치, 액정 백라이트, 초소형 램프 등에도 이용될 것으로 예상된다.

### 기체 흡착 능력 뛰어난 고감도 센서로 응용

탄소나노튜브의 또 다른 흥미있는 응용분야는 트랜지스터이다. 보통 트랜지스터는 전자 혹은 홀을 공급하는 소스와 전자를 받는 드레인, 그리고 중간에서 전자 혹은 홀의 흐름을 제어하는 게이트 전극과 소스와 드레인 사이에 전자 혹은 홀이 지나갈 수 있는 채널로 구성되어 있다. 채널은 보통 반도체의 경우 불순물을 주입하여 전하 운반자가 잘 흐를 수 있도록 만든다. 소자의 동작속도는 이 채널 속을 지나가는 전하이동속도에 달려있다. 그래서 채널의 길이를 줄이면 소자의 동작속도를 증가시킬 수 있고, 그래서 소자를 작게 만들면 메모리 밀도를 증가시킬 뿐만 아니라 속도 면에서도 이득이 있다. 그런데 기존의 식각방

법으로는 소자의 크기를 줄이는데 한계가 있다. 탄소나



탄소나노튜브의 다양한 응용성의 예

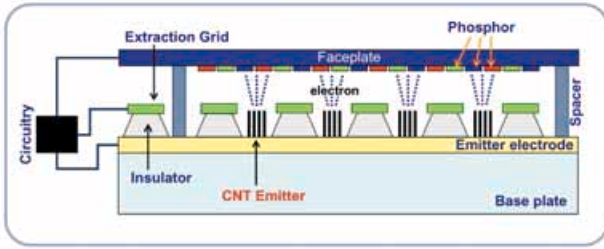
노튜브는 이 목적을 잘 만족시키는 소자가 될 수 있다. 우선 크기가 수 나노미터로 작게 이미 만들어져 있고 일차원적인 구조를 가지고 있어 전자나 홀이 거의 저항없이 잘 흐를 수 있어 채널로서 여러 가지 이득이 있다. 여기서 중요한 점은 채널로 사용하기 위해서는 금속성 탄소나노튜브가 아닌 반도체성 탄소나노튜브를 사용해야 한다는 점이다.

탄소나노튜브는 다른 유기분자소자나 DNA 등에 비해 발전속도가 엄청나게 빠르나 아직도 해결해야 할 문제가 산적해 있다. 이제까지 세계 여러 그룹에서 탄소나노튜브를 사용하여 각종 단일 논리, 메모리소자가 구동된다는 것을 개념적으로 보여주었고 삼성종합기술원을 비롯한 여러 그룹이 반도체성 탄소나노튜브가 메모리소자로 작동된다는 것도 보여주었다. 또 탄소나노튜브가 기체를 흡착시키는 능력이 뛰어나고 기체가 흡착될 경우 나노튜브에 흐르는 전류가 변하기 때문에 고감도 센서로도 응용이 가능하다.

### 수소저장체로서의 가능성 여전히 긍정적

탄소나노튜브의 또 다른 미래 시장은 뭐니 뭐니 해도 에너지 저장 분야이다. 이 분야는 응용 분야가 아주 넓다. 우선 수소저장이다. 수소는 아주 중요한 무공해 미래 에너지원이다. 예를 들면 연료전지는 수소와 공기 중의 산소를 결합시켜 전기를 만들어 낸다. 연료전지는 이동형 발전소나 마찬가지로. 미국의 GM 회사는 수소를 사용하여 2007년에 전기자동차를 시판할 야심찬 계획을 갖고 있다. 전기자동차로 500km를 쉬지 않고 달리기 위해서는 저장체 무게비로 약 6%의 수소 저장용량이 필요하다. 그러나 수소는 크기가 작고 흡착력이 낮아 저장체를 찾기가 어렵다. 기존의 수소 저장체는 금속이다. 수소는 금속 속에 들어가 금속원자와 쉽게 결합한다. 이 경우 저장되는 수소무게는 1% 정도였으나 최근에는 이보다 높은 수치도 발표되었다. 그러나 금속의 결정적인 결합은 수소저장이 반복되면 금속이 깨져 더 이상 수소를 저장하는 용기로 쓸 수 없다는 점이다.

탄소나노튜브는 속이 비어 있어 빈 공간에 수소분자를 가둘 가능성이 있다. 또 탄소나노튜브가 다발을 형성하는 것이 여기에서는 유리하다. 탄소나노튜브가 다발을 형성하면서 튜브와 튜브 사이에 수소기체가 저장되는 자리가 많이 생긴다는 점



전계방출소자의 예. 텔레비전 브라운관 대신 평판디스플레이로 대체가 가능하다. 가운데 수직 튜브가 탄소나노튜브로 이루어져 있다.

을 착안하면 탄소나노튜브도 좋은 수소저장체가 될 수 있을 가능성이 있다. 다발의 길이가 수 마이크로미터로 길기 때문에 튜브 틈새로 수소저장이 반복되어도 탄소나노튜브의 구조는 변하지 않기 때문에 이상적인 저장체가 될 수 있다.

이제까지 연구결과에 의하면 탄소나노튜브의 수소저장능력을 의심하는 사람들이 많다. 1997년도 IBM 그룹결과에 의하면 탄소나노튜브의 수소저장능력이 5%에 달하고 그 후에도 많은 연구그룹이 탄소나노튜브의 수소저장능력이 우수하다고 발표했지만 최근 독일 막스플랑크 연구소의 연구결과는 어느 시료도 1% 이하의 저장능력밖에 못 가진다고 발표하였다. 이 연구의 문제점은 한 그룹의 실험 결과를 다른 그룹이 재현하지 못하는데 있다. 그래서 서로의 결과를 신뢰하지 않는다. 그렇다면 문제가 무엇일까? 정말 탄소나노튜브는 수소저장능력이 낮을까? 많은 연구자들이 확실치 않은 이 문제에 답하기를 포기했을 뿐 답이 없는 것은 아니다.

에너지 저장체의 또 다른 형태는 커패시터(축전기)이다. 축전기는 두 개의 금속판을 일정 거리만큼 떼어놓고 그 사이에 유전체를 넣어 전압을 걸어주면 전극 양단에 전하이온층이 형성되어 전기를 저장한다. 이 경우 전기는 전지처럼 화학작용에 의해 발생하지 않고 단순히 전기 이중층에 의해 만들어지고, 따라서 전극자체를 손상시키지 않아 수명은 거의 무한대이다. 또한 충전 시간이 짧아 짧은 시간에 많은 양의 전류를 저장할 수 있고, 따라서 이 장치는 고출력이 필요할 때 긴요한 전기저장장치이다. 유일한 단점은 전기저장능력이 떨어진다.

축전기의 저장 용량은 두 판 사이의 거리에 반비례하고 면적에 비례한다. 거리가 고정되어 있다고 생각하면 전극판의 면적을 늘리면 된다. 그러나 겉면적이 커지면 덩치가 커져 쓸모

가 없다. 따라서 겉면적은 변하지 않되 유효면적을 늘리면 된다. 이 유효면적은 보통 전극에 작은 구멍을 만들어 증가시킨다. 따라서 이 분야의 문제는 결국 유효면적이 큰 다공성 물질이면서 전극저항이 낮은 전극물질을 찾아내는 것이다. 물론 전극의 전도성이 좋아야 주열의 감소에 의한 에너지 소모가 적다. 이 두 가지 조건을 만족시키는 재료로서 이제까지 활성탄을 써왔다.

### 겨우 13년 역사, '기적의 최적화' 연구에 몰두

활성탄은 탄화과정 동안 만들어지는 동공들이 많아 소위 유효 표면적이 넓다. 탄소라서 전도성도 좋아 지금까지 상업용으로 이 재료를 많이 쓰고 있다. 탄소나노튜브는 모든 탄소원자가 표면에 노출되어 있어 유효 표면적이 넓고 또 구불구불한 나노튜브의 엉킴형태가 또 다른 종류의 동공을 만들어 유효면적을 배가시킬 수 있다. 또 전기전도도가 기존의 활성탄보다 높기 때문에 고출력을 내는데 도움이 된다. 지금까지 연구결과에 의하면 탄소나노튜브 자체만으로는 아직 기존의 활성탄보다 높은 용량을 주지 못하고 있다. 그러나 이는 주로 시료처리 조건을 최적화시키지 못한 원인 때문으로 보이며 이 문제는 조만간 해결될 것으로 보인다. 특히 탄소나노튜브와 기존 재료와의 복합구조형성이 당분간 이 분야의 연구방향이 될 것으로 전망된다.

몇 가지 대표적인 탄소나노튜브의 응용분야를 예로 들었다. 어느 경우건 소자의 성능을 최적화하기 위해서는 탄소나노튜브의 구조제어와 이에 따른 기능의 최적화 작업이 필요하다. 이 부분이 인내와 연구가 필요한 부분이고 경우에 따라서는 몇 년이 걸릴지도 모른다. 탄소나노튜브가 발견된지 이제 겨우 13년이 지났다. 실리콘 반도체가 돈이 될 때까지 50년의 세월이 흐른 것을 감안하면 우리는 아직도 걸음마 단계이다. 우리나라는 이 분야 투자를 늦게 시작했지만 초기인 만큼 아직 우리에게 승산이 있다. 정부의 지속적인 지원이 필요한 때이다. 57



글쓴이는 전북대 물리학과 졸업 후, 미국 켄트주립대에서 박사학위를 받았다. 미국 아이오와 주립대 방문연구원, 스위스 취리히 IBM연구소 방문연구원, 미국 미시간 주립대 객원연구원을 지냈다.