

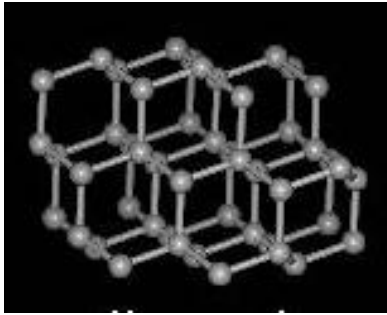
3차원에서 0차원 탄소화합물까지

한양대학교 화학과 이휘건 교수

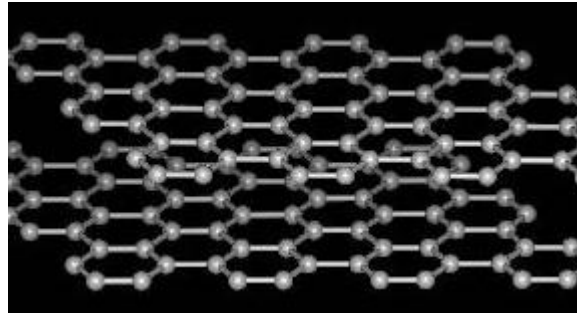
탄소는 110종이 넘는 원소들 중에, 수소 헬륨 산소 다음으로 우주에 많이 분포되어 있는 원소이다. 우리의 주변에 있는 종이, 목재, 음식물 등의 대다수가 탄소 원자들을 뼈대로 하는 화합물들이다. 탄소는 원자번호 6번으로 원소주기율의 4B족에 속하고, 6개의 전자가 K 껍질에 2개 ($1s^2$), L 껍질에 4개 ($2s^2 2p^2$) 들어가 있으며 주변의 다른 탄소와 다양한 공유결합을 하고 있다.

주로 탄소만으로 이루어진 탄소화합물의 대표적인 것들은 다이아몬드, 흑연, 그리고 앞으로 이야기할 탄소나노튜브와 버키볼 등이 있다. 이들의 형태는 다음 그림에서 보는 바와 같이 3차원, 2차원, 1차원, 0차원의 구조를 지니고 있다. 과학자들은 이들을 탄소동소체(allotrope)라 부르는데, 다이아몬드의 경우 탄소 간 결합이 공간을 통해 모든 방향으로 이뤄지고 있어 3차원 구조를 갖는다. 이러한 3차원 결합으로 인해 다이아몬드는 녹는점이 매우 높고($0C$), 경도는 10으로 모든 물질 중에서 가장 단단한 것으로 알려져 있다. 다이아몬드는 결합에 참여하는 전자가 탄소원자 간에 고정되어 있으므로, 전자 이동에 의한 전기 전도성은 없다. 흑연(graphite)이나 연탄의 경우, 탄소 간의 결합은 2차원 평면을 통해 전파되고 있어 같은 평면 내에서 탄소 간 결합은 매우 강하고 전자도 평면을 따라 움직일 수 있어 전기 전도성을 보인다. 그러나 2차원 평면끼리의 부착력은 반데르발스(van der Waals)라는 약한 힘으로 유지되어 있어, 일상에서 연탄이나 흑연이 잘 부서지는 것은 이 때문이다.

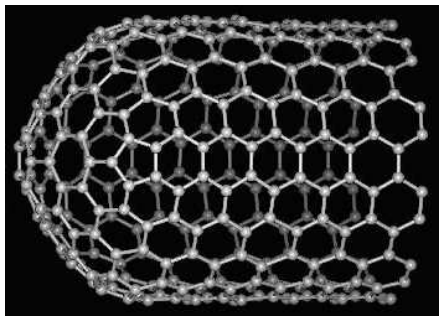
탄소원자로 구성된 평면을 동그랗게 말아서 하나의 긴 관을 형성한 것이 바로 탄소나노튜브이다. 사진상으로는 길다란 실 혹은 대롱 모양으로 보이는 1차원 배열이며, 속은 비어 있는 형태이다. 마지막으로 0차원 탄소동소체는 어떤 모양을 갖는지 생각해 보자. 당연히 점의 형태를 가질 것이다. 사진상으로는 점의 형태이나, 자세히 들여다보면 탄소원자 60개로 구성된 축구공의 모양을 갖는다. (일명 버키볼) 3차원에서 0차원까지의 탄소의 세계 중 최근 들어 각광을 받는 버키볼과 탄소나노튜브의 세계를 살펴보도록 하자.



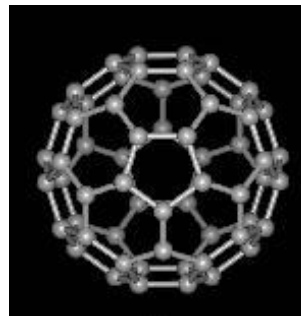
〈다이아몬드〉



〈흑연〉



〈탄소나노튜브〉



〈버키볼〉

1. 버키볼의 발견

순수한 탄소만으로 구성된 축구공 모양의 분자가 1985년 발견되었으며, 이후 이 완벽한 대칭성을 갖는 분자에 대한 연구가 과학계에서 활발히 진행되었다. 지구의 표면에는 우주로부터 도달하는 많은 종류의 빛들이 있다. 이 많은 빛들은 근본적으로 우주폭발에서 기인한 것으로 현재도 수많은 별들이 다양한 파장의 빛을 방출하고 있으며, 이 빛들은 우주 공간을 이동하여 지구상에 설치된 광학 현미경으로 들어온다. 빛의 스펙트럼을 분석하던 과학자들은 220 nm ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$)의 파장을 갖는 영역에서 항상 강한 흡수가 일어남을 관찰할 수 있었다. 우주를 가로질러 지구로 오던 빛들이 무언가에 의해 강하게 흡수되는 현상으로 이해하였고, 이들은 탄소입자들로 구성되었다고 생각하였다. 과연 어떤 종류의 탄소가 별들과 별 사이에 형성되는지 연구하기 위해 영국의 크로토(Kroto) 교수는 미국 라이스(Rice) 대학의 스몰리(Smalley) 교수를 찾아가 실험을 제안했다. 당시 스몰리 교수는 레이저를 물질에 쏘여 증발시킨 후 플라즈마 상태를 만들 수 있는 장비를 보유하고 있었다. 실험결과에 관한 분광학적인 해석을 위해 분광전문가인 컬(Curl) 교수가 참가하면서 시작된 실험은, 흑연에 레이저를 쏘이고 플라즈마 상태로 만든 후 다시 응축시키는 과정을 반복하며 이루어졌다. 질량분석기로 분석한 결과 탄소원자 60개 (C_{60})로 이루어진 새로운 물질이 있음을 알게 되었고 이 물질은 수소, 질소산화물, 이황

산가스 등과 반응하여도 안정된 구조를 그대로 유지하는 것으로 밝혀졌으나, 이 물질의 구체적인 모양을 확실하게 입증할 수는 없었다. 이러한 업적으로 크로토, 스몰리, 컬 교수는 1996년 노벨화학상을 수상한다. 축구공 모양의 가설로만 받아들여졌던 이 물질은 1990년 독일 막스 플랑크 연구소에서 후프만(Huffman)과 크래쉬머(Kratschmer) 박사가 흑연봉에 전기를 가해 방전한 후 벤젠을 이용하여 C_{60} 를 분리하였고, 이를 핵자기 공명 분광기와 적외선 분광기 등을 사용하여 C_{60} 가 축구공 형태임을 완벽히 증명하였다. C_{60} 를 간단히 버키볼(bucky ball) 혹은 풀러렌(fullerene) 이라 부르는데 이는 리차드 버크민스터풀러(Buckminster Fuller)라는 건축 양식가가 캐나다 몬트리올에서 열린 'Expo-67' 박람회에서 선보인 둥근 돔식의 구조물이 C_{60} 와 닮았다고 하여 그의 이름을 본따 버키볼(즉, 버키의 공) 혹은 풀러렌이라 부르게 된다.

2. 버키볼은 어디에 쓰이나?

1985년 버키볼이 세상에 알려진 후 인접 과학과의 무한한 응용 가능성, 놀라운 성능들이 하나씩 밝혀져 세계 과학자들의 이목을 집중시켜 왔으며 오늘날 나노기술의 핵심이 되고 있다. 버키볼은 동소체인 다이아몬드를 웃도는 경도를 갖고 있으며, 고온 고압에 잘 견딜 수 있어 나노머신의 윤활제로 쓰일 수 있다. 버키볼은 또한 특이한 전기적 반응을 보이는데, 다른 물질과 어떻게 섞여 있느냐에 따라 도체, 반도체, 초전도체의 기능을 나타낸다. 도체란 전기를 통하는 물질이며, 반도체란 그 자체로서는 전기를 통할 수 없으나 약간의 화학물질 처리에 의해 전기를 통할 수 있는 물질, 초전도체는 전기를 매우 잘 통하여 저항이 0인 상태, 즉 전기적 손실이 전혀 없이 전기를 전달할 수 있는 물질을 의미하는 것으로 버키볼의 상태에 따라 세가지 기능을 보인다는 것은 매우 특이한 현상이다. 버키볼은 지름이 $7.1\text{\AA}$ ($1\text{\AA} = 10^{-10}\text{ m}$)인 축구공과 같은 상태로 속이 텅 비어 있어서 내부에 약 성분을 넣어 인체에 주입하면, 특정기관으로 약을 전달하는 일도 가능하다.

탄소 60개로 이루어진 축구공 형태의 버키볼 발견 이후 정육각형의 개수가 더 늘어난 여러 종류의 버키볼 형제들이 만들어졌다. C_{60} , C_{70} , C_{76} , C_{78} , C_{84} 등이 그들인데 C_{70} 의 경우 럭비공처럼 생긴 것으로 알려져 있다. 다양한 종류의 버키볼이 있는 것처럼 쓰임새 또한 매우 다양하다. 현재, 축전지, 윤활유, 초전도체, 촉매, 기억소자, 로켓연료, 유기물 자석 등에 응용하고 있으며, 전기 및 광학재료에 이르기까지 광범위하게 응용이 기대되는 나노기술의 미래형 신소재이다. 2000년에는 하버드대학에서 버키볼을 이용한 극소형 트랜지스터를 만드는 연구가 보고되었으며, 약물 운반체로서 에이즈 치료 약 임상실험이 시작되는 등 활발한 연구가 계속되고 있다.

3. 우주 엘리베이터



〈우주엘리베이터〉

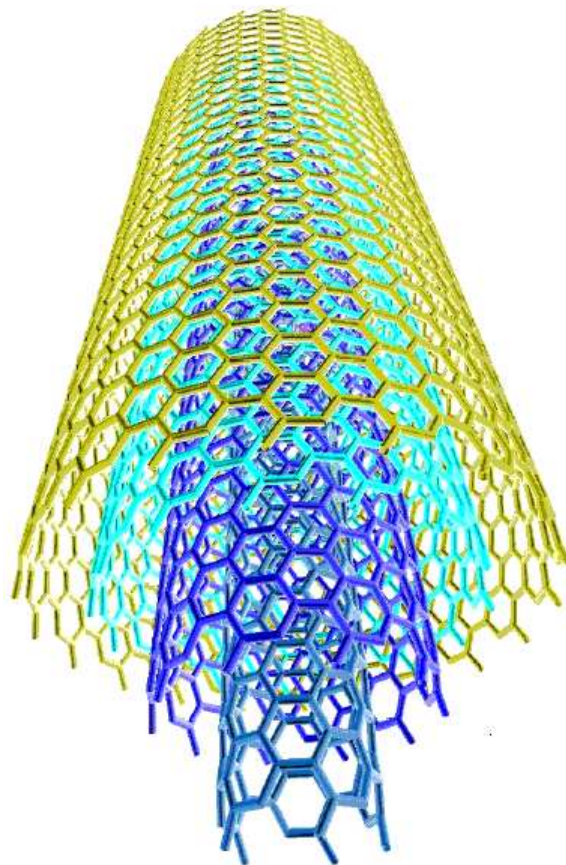
적도 상공을 돌고 있는 인공위성은 군사적 목적 외에도 자연계 탐사, 기후의 변화를 관측하는데 사용되고 있다. 인공위성은 추진로켓으로 사용해 우주로 발사하며, 일정시간 궤도를 돈 후에 수명을 다하면 중력에 의해 지구로 떨어지거나 혹은 우주의 쓰레기로 그대로 남게 된다. 우주 쓰레기의 주범은 퇴역한 인공위성 혹은 폭발에 의한 인공위성의 잔해이다. 현재 길이 10 cm 이상의 물체들이 9000개 이상 떠돌고 있다고 알려져 있는데, 이들의 속도는 초속 7~8 km로 유인 우주선이나 우주정거장에 치명적일 수 있다.

만일 우주에 엘리베이터를 연결하여 우주정거장과 연결할 수 있다면 어떠할까? 인공위성을 쏘아 올리기 위한 발사추진체도 필요 없고, 우주 잔해의 문제도 해결되며 또한 인간이 엘리베이터를 타고 올라가 연료도 공급하며 직접 우주정거장을 관리하는 것이 가능해질 것이다. 문제는 엘리베이터가 이동할 수 있는 통로 역할을 하는 탑을 어떤 물질로 만들 수 있는냐는 것이다. 미래소설의 대가인 아서 클락(Arthur Clarke)이 1997년 펴낸 '3001년: 최후의 오디세이'에서 상상력을 동원하여 등장시킨 우주탑, 우주엘리베이터의 건설은 공상 속에서나 가능할까? 우주 엘리베이터 건설의 최대 관건은 탑의 무게를 지탱할 재료를 찾는 일이다. 이 재료는 계산상으로 강철보다 30배나 강하게 버텨야 하는데, 탄소나노튜브가 바로 이에 해당하는 물질이다. 1999년 나사의 한 회의에서 2060년경 탄소나노튜브를 기반으로 우주 엘리베이터의 건설이 가능하다는 의견이 나온 것으로 알려졌다.

4. 탄소나노튜브의 발견

버키볼이 발견된 지 6년 후인 1991년 일본 전기회사(NEC)의 연구 책임자인 수미오 이지마(Sumio Iijima)박사는 쓰꾸바 연구소에서 여러 종류의 버키볼을 고배율 전자 현미경으로 관찰 중이었다. 어느 날, 화면에 가늘고 긴 바늘 형태의 탄소 튜브 구조가 있음을 발견한 그는 200만배 확대 전자 현미경을 사용하여 촬영하였다. 200만배 확대란, 3 nm 크기의 지름을 갖는 나노 구조체를 6 mm의 크기로 볼 수 있음을 의미한다. 이지마 교수는 이를 탄소나노튜브(Carbon Nanotube)라 이름 지었고, 자체의 특이성과 놀라운 성질의 발현으로 이 후 버키볼 이상으로 수많은 각광을 받는 연구의 대상이 되어 왔다. 흥미 있는 사실 하나는, 탄소화합물을 연구하며 전자현미경으로 관찰하던 초기의 과학자들 중 많은

경우는 화면상에 실이나 대롱 모양으로 관찰되던 이 탄소나노튜브를 탄소구조체 합성 중에 생긴 불순물이라 여기며 그냥 지나쳐 버렸다는 것이다. 존재하고 있어도 볼 수 없었던 과거의 한 일화라 생각할 수도 있으나, 버키볼의 발견 이후에 탄소나노튜브의 존재 가능성이 과학자들에게 영감으로 남아 있었기 때문이라고도 생각할 수 있다. 스몰리 박사의 경우, 나노튜브는 자신에게 노벨상을 안겨준 버키볼을 옆으로 길게 늘린 것으로 생각하는 경향이 있다. 즉 버키볼의 발견이 선행하였기 때문에 나노튜브가 발견된 것을 은연중에 주장하곤 한다. 스몰리 박사 역시 1994년 이후부터는 버키볼보다 나노튜브 합성, 물성 측정 등으로 연구의 방향을 바꾸었으며, 많은 과학자들도 여기에 적극 동참하게 된다. 탄소원자가 육각형으로 연결된 평면을 말아서 원통형의 모양으로 만든 것이 탄소나노튜브이며, 양끝은 열리거나 닫히는 두 가지 경우가 모두 존재한다. 길이는 대개 수 μm ($1\mu\text{m} = 10^{-6}\text{m}$)이고 지름은 수~수십 nm 에 해당하는데, 튜브 껍질이 한겹인 경우를 단일벽 탄소나노튜브(Single-walled Carbon Nanotube), 여러겹으로 이루어진 경우를 다층벽 탄소나노튜브(Multi-walled Carbon Nanotube)라 부른다. 다층벽 나노튜브는 양파나 장난감 러시아 인형처럼 한 겹을 벗기면 내부에 다른 한 겹이 있는 경우로 생각하면 된다.



〈다층벽 탄소나노튜브〉

5. 꿈의 신소재 – 탄소나노튜브

탄소나노튜브는 굵기가 머리카락의 5만분의 1정도이지만, 구리보다 전류가 더 잘 흐르며 매우 가볍고, 다이아몬드보다 열을 더 잘 전달한다. 이는 미래의 나노 구조물에서 미세 전기선으로 쓰일 수 있을 뿐 아니라, 기존의 구리 도선을 나노튜브로 바꿀 수 있음을 의미한다. 밧줄과 같이 꼬아서 지상의 발전소와 인공위성 혹은 우주정거장과 직접 연결할 경우 실시간으로 손실 없이 전류를 공급할 수 있다. 탄소나노튜브는 또한 화학적으로 매우 안정적이어서 이를 섬유에 응용할 경우 강철 무게의 6분의 1, 그리고 강도는 강철보다 100배 이상되는 ‘울트라 섬유’를 만들 수도 있다.

단일벽 탄소나노튜브는 반도체의 성질을 갖고 있다. 현재의 반도체는 실리콘을 반도체 재료의 기본으로 사용하고 있으며 인위적으로 붕소, 인 등의 불순물을 주입한 것이다. 이 경우 외부에서 약간의 전압을 가하면 전기가 통하는데, 현재 컴퓨터나 휴대폰에 들어가는 필수 재료이다. 탄소나노튜브는 이미 불순물을 주입한 효과를 갖고 있어 응용을 위해 실리콘과는 달리 곧장 사용할 수 있는 장점이 있다. 수억 개 이상의 동일한 나노튜브를 제작 배열할 수 있는 역량이 갖추어 진다면, 고집적도의 반도체 공정을 위해 실리콘에서 지름이 1~2 nm 인 탄소나노튜브로의 전환도 기대해 본다.

브라운관 TV의 원리는 전자총에서 나온 전자들이 형광물질과 부딪혀 가시광선 영역의 빛을 발하는 것이다. 탄소나노튜브는 전자총으로 사용하기에 매우 우수한 물질이다. 수 μm 의 긴 길이와 nm 크기의 아주 작은 지름을 갖고 있고 또 끝이 매우 뾰족하기 때문에 주변에 작은 전기장을 걸어주어도 대량의 전자가 쉽게 튀어나올 수 있다. 이는 번개가 주로 뾰족한 피뢰침을 잘 때리는 것과 유사한 원리로 아주 작은 전압을 사용하여 매우 많은 전자를 나노튜브로부터 튀어나올 수 있게 하여 경제적으로 매우 유리하다. 전자 방출의 탁월성은 램프를 만드는데도 쉽게 응용할 수 있어 현재 상용화 단계이다. 나노튜브에서 나온 전자가 형광체에 부딪혀 백색의 빛을 발하는 것으로 기존의 경우보다 나노튜브를 사용하면 경제적이고 또한 램프의 수명이 훨씬 길어지게 된다.

앞서 언급했듯이 탄소나노튜브는 강철보다 수십 배 강한 탄성을 갖고 있다. 동시에 아주 강한 힘으로 대롱 형태의 나노튜브를 구부려 쓰러도 원래의 상태로 복원하는 능력이 매우 탁월한 것으로 보고되었다. 직선 형태의 나노튜브를 강한 힘을 주어 직각정도로 휜 후 외부 힘을 제거하면 아무런 손상 없이 다시 원래의 형태로 되 돌아온다. 이러한 나노튜브의 성질은 어디에 응용이 가능한가? 비행기 테러에 의해 함몰된 뉴욕의 쌍둥이 빌딩 건물의 가장자리에 나노튜브를 심어 놓은 경우를 가상해 보자. 비행기가 돌진할 때 컴퓨터 명령에 의해 나노튜브를 휘게 하면 건물전체가 움직여 비행기 충돌을 피할 수 있고, 또한 나노튜브의 원래 상태로의 복원에 의해 건물이 다시 제자리로 돌아올 수 있게 할 수 있을 것이다. 강철보다 수십 배 강한 탄성, 그리고 원래 상태로의 탁월한 복원력을 고려하면 미래에

충분히 가능할 것이다.

최첨단 미래기술로 각광 받는 탄소나노튜브가 실제 제품에 속속 적용되면서 상용화의 기반이 확대되고 있다. 나노튜브를 페인트와 섞어 칠하면 전자파 차폐, 정전기 방지에 탁월한 효과를 보인다. 이러한 나노튜브 페인트를 비행기의 외곽에 칠하면, 상대방 미사일 혹은 비행기에서 레이더의 발사에 의한 위치 추적을 불가능하게 만들 수 있다. 이는 나노튜브가 전도성을 갖고 있어 전자파를 원천적으로 차단하기 때문이다. 또한 휴대폰용 카메라모듈 업체에 나노튜브를 사용하면 정전기 방지 효과가 있어 정전지로 인한 먼지가 붙는 것을 막아 청정도를 유지할 수 있다. 이외에도 반도체 소재, 전자부품, 골프채나 야구 배트와 같은 스포츠 용품에 탄소나노튜브의 수요가 발생하고 있다.

인류의 역사는 석기시대, 청동기시대, 철기시대, 반도체 시대로 구분하듯이 인류에게 유용한 새로운 물질의 발견은 인류역사에 큰 의미를 차지한다. 새로운 재료를 도입하고 발전시킨 민족이나 국가가 부강한 나라가 되었고 역사의 중심에 섰다. 이제 인류는 버키볼, 탄소나노튜브라는 새로운 재료를 이용함으로써 혁신된 미래를 맞이할 것이다. 50년대 반도체 혁명에 비견할 0차원, 1차원 탄소화합물인 버키볼, 탄소나노튜브의 혁명이 막을 올리고 있다.