

1 나노의 세계

1/1,000로 쪼개면 표면적 1000배

- 특이한 물성 이용, 에너지 · 소재 · 환경개선에 활용

글 _ 서상희 나노소재기술개발사업단 단장 shsuh@kist.re.kr

연합포토



21세기 들어 전세계 과학기술계의 최대 관심 분야 중의 하나는 나노과학 · 나노기술이다. 미국 클린턴 정부가 2000년 1월에 NNI(National Nanotechnology Initiative) 계획을 발표한 이후에 우리 나라를 포함하여 독일, 일본, 중국 등에서도 나노과학 · 나노기술에 집중적인 연구와 투자를 진행하고 있으며 이에 관련된 국제학술회의가 수를 세기 어려울 정도로 많이 열리고 있다. 그러면 나노과학 · 나노기술이란 무엇이고 우리에게 어떤 미래를 약속해 주기에 이런 열풍이 불고 있는 것인가? 나노미터 크기의 물질세계는 마이크로미터 이상의 물질세계와 무엇이 다른가?

1nm는 수소원자 10개 길이

나노는 10억분의 1, 즉, $1/10^9$ 를 의미한다. 즉, 1nm는 1 m의 $1/10^9$ 를 의미한다. 머리카락의 굵기가 100 μm (=10만 nm) 이므

로 1nm가 얼마나 작은 크기인지 짐작할 수 있을 것이다. 1nm는 수소원자 10개를 일직선으로 늘어놓은 길이와 같다(그림1). 1 nm가 대단히 작은 것 같지만 실제로는 이 정도의 크기를 갖는 것이며 1nm^3 의 정육면체에는 약 1천개의 수소원자를 넣을 수 있는 것이다. 우리가 나노세계를 말할 때는 1nm 이상 100nm 이하 크기의 물질세계를 의미한다. 나노과학은 물질이 이러한 크기 범위에서 나타나는 특이한 성질을 다루는 과학이며, 나노기술은 나노크기의 물질이 나타내는 특이한 성질을 이용하여 재료와 소자를 제조하고 이용하는 기술이다. 이에 나노 크기의 재료와 소자를 이용하여 만들어지는 시스템 기술이 포함되며, 이 때 시스템의 크기는 반드시 나노미터 규모일 필요는 없다.

소자의 크기 또는 재료의 구조를 나노화하면 어떤 이득이 있을까. 2004년 9월 삼성전자에서는 60나노 8기가 낸드플래시

메모리와 80나노 2기가 DDR2 DRAM을 세계 최초로 개발하였다고 발표하였다(그림2). 이것은 과연 어떤 의미를 갖는가? 이것은 120, 160nm 크기의 기억소자에 비해 면적이 1/4로 작아진 것이며, 한 개의 웨이퍼에서 제조해낼 수 있는 메모리소자의 수가 4배로 늘어났다는 것을 말한다. 이것은 경제적으로 대단히 큰 의미를 갖는다. 메모리소자 부문에서 세계 최고의 기술력으로 세계 최고의 수익률을 뒷받침하고 있는 것을 의미하기 때문이다.

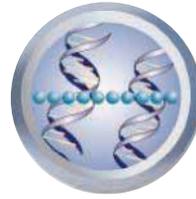
銀나노입자촉매 응용, 신모델 냉장고·세탁기 상품화

나노화에 의한 이득으로서 나노입자의 경우를 생각해보자. 표면에 위치하는 원자들은 표면 바깥쪽으로는 원자간 결합을 이루고 있지 않기 때문에 화학반응성이 대단히 크다(그림3). 입자의 크기가 나노미터 규모로 작아지게 되면 표면에 위치하는 원자의 수가 입자 내부에 위치하는 원자들의 수와 거의 같은 규모로 커지게 된다.

즉, 입자의 크기가 나노미터 규모로 작아짐으로써 입자에 존재하는 전체 원자수 중에서 화학반응성이 큰 표면에 위치한 원자수의 비율이 늘어나게 되는 것이다. 다음 예와 같은 쉬운 계산을 해보자(그림4). 한 변의 길이가 1mm인 정육면체의 표면적은 6mm²이다. 이 정육면체를 한 변의 길이가 1nm(1mm의 1/1000)인 정육면체로 쪼개면 표면적은 얼마로 늘어날까? 이 작은 정육면체의 표면적은 6x10⁻⁶mm²이고 이 정육면체가 총 10⁹개가 있으므로 총면적은 6x10³mm²로 된다. 즉, 크기를 1천분의 1로 줄이면 표면적은 1천배로 늘어나는 것이다.

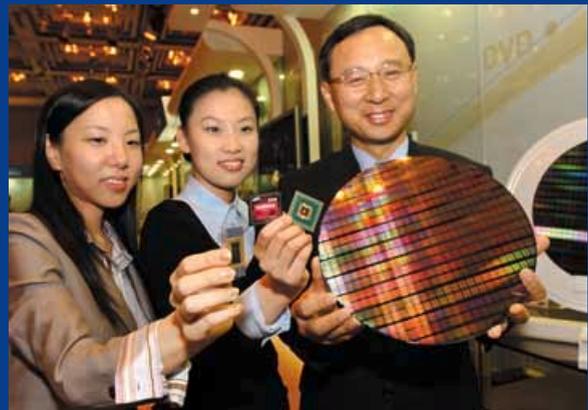
입자의 나노화에 의해 화학반응성이 높은 표면적이 늘어나는 현상을 이용하는 것이 촉매다. 나노입자 촉매는 이미 자동차의 배기가스로부터 나오는 질소·황산화물과 탄화수소를 제거하는 삼원 촉매에 널리 사용되고 있다. 최근 인기리에 시판되고 있는 은나노 냉장고, 은나노 세탁기, 심지어 은나노 팩, 양말 등이 이러한 은나노입자의 촉매 작용과 이에 의한 살균작용을 이용한 것이다.

또 다른 촉매 응용 분야는 정유 분야이다. 이 분야에서는 제올라이트라고 하는 나노미터 크기의 기공을 갖는 물체를 이용하여 원유를 정제하고 있는데, 이것은 나노기공 내부 표면의 촉매작용을 이용하는 것으로서 전세계의 원유 정제량을 계산하면

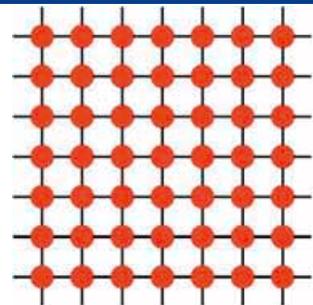


1nm=0.000000001m

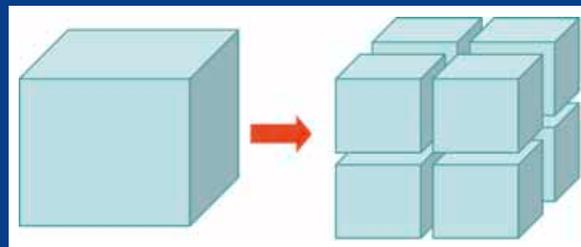
〈그림 1〉 1 nm (=1/10⁹m)의 길이는 수소원자 10개를 일렬로 늘어놓은 것과 같다.



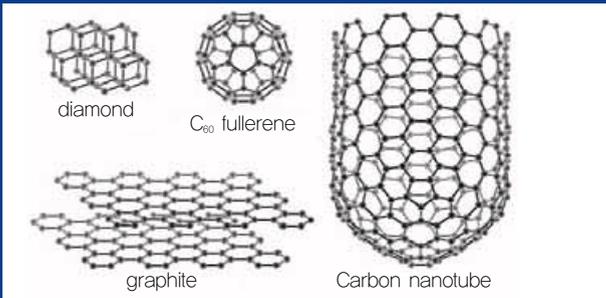
〈그림 2〉 나노미터 기술을 적용하여 제조한 메모리소자 웨이퍼를 들고 있는 삼성전자 황창규 사장



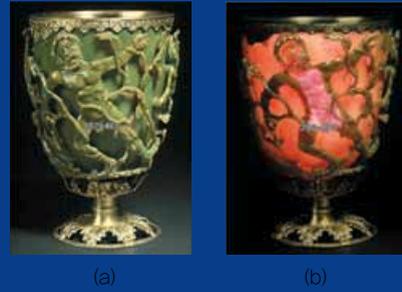
〈그림 3〉 나노입자의 원자간 결합의 2차원 모델



〈그림 4〉 정육면체의 크기가 1/2로 되면 표면적은 2배로 된다.



〈그림 5〉 탄소분자의 여러 형태



〈그림 6〉 리카거스 컵(대영박물관 소장), (a) 외부 빛이 반사된 컵의 모습, (b) 빛을 내부에서 투과시킨 컵의 모습

연간 300억 달러 이상의 엄청난 기여를 하고 있는 것이다.

나노크기로 쪼갠 탄소 분자는 색다른 형태

지금까지는 재료구조나 소자의 크기가 나노화됨으로써 면적이나 부피가 작아지는 단순한 현상에 의한 효과만을 살펴보았다. 다음에는 물질이 나노미터 규모의 크기로 되면 어떤 물성의 변화가 나타나는가를 탄소분자의 예를 이용하여 알아보자.

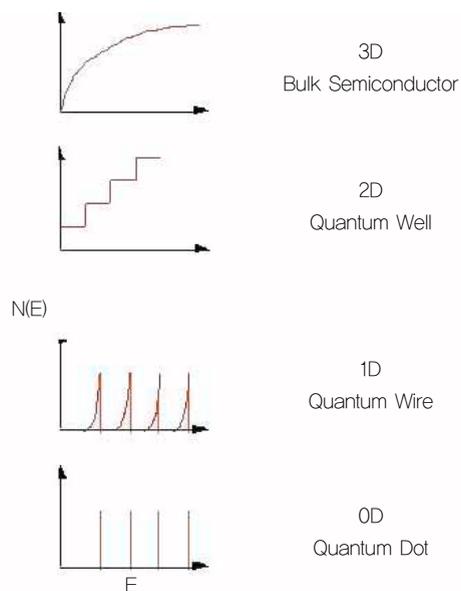
탄소 원자로 만들어진 물질로 우리는 연필의 재료인 흑연과 보석 중의 보석인 다이아몬드의 두 가지 형태를 생각하게 된다. 흑연은 탄소원자들이 판상으로 결합한 형태로서 판들은 서로 약한 반데발스 힘으로 결합되어 있다. 우리가 흑연을 연필 재료로 사용하는 것은 판 사이의 약한 결합이 끊어져 나와 흑연가루가 종이에 달라붙기 때문이다. 다이아몬드는 탄소원자들이 서로 공유결합을 이루며 삼차원적 네트워크를 이루고 있어 이 세상 물질 중에서 가장 강한 물질이 된다. 그러면 이러한 탄소 분자의 크기가 작아지면 어떠한 현상이 나타날까?

물질들은 전체 에너지가 가능한 작은 형태를 유지하려는 성질이 있다. 작은 물방울이 구형을 갖는 것은 이것이 외부로 노출된 표면을 가장 작게 할 수 있는 형태이기 때문이다. 그러나 물의 부피가 커지면 표면에 노출되는 분자의 숫자가 작아져서 표면 에너지 이외의 힘이 더 크게 작용하여 다른 형태를 갖게 된다. 탄소분자에도 동일한 이론이 적용된다. 탄소분자가 나노미터 규모로 작아지게 되면 결합이 되지 않는 원자의 수를 줄이기 위해서 다른 형태를 갖게 될 것이다. 이러한 현상이 발견된 것은 먼 옛날의 얘기가 아니다.

1985년에 크로토 박사 등이 우연히 아주 색다른 형태의 탄

소분자를 발견하게 된다. 즉, 축구공 모양의 형태를 취한 탄소 분자인 풀러렌을 발견하게 된다. 이들은 1996년에 이것을 발견한 공로로 노벨화학상을 받게 된다. 이후에 또 다른 형태의 탄소분자를 1991년에 일본의 이지마 교수가 발견하였으며 이것이 탄소나노튜브다. 이것은 풀러렌이 길게 늘어진 형태로 볼 수 있다. 탄소나노튜브는 철강보다 강하고 전자방출이 용이한 점 등, 독특한 여러 가지 물성 때문에 많은 주목을 받고 있으며 전세계적으로 많은 응용 연구가 진행되고 있다.

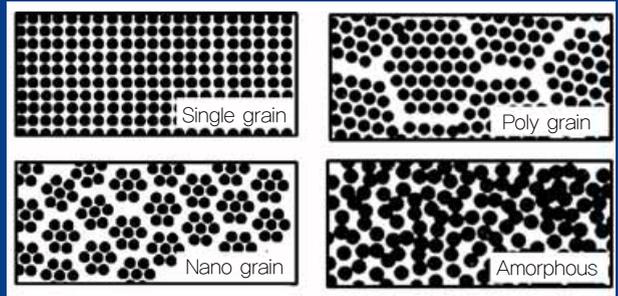
탄소분자 외에도 물질이 나노화됨으로써 물성이 달라지는 예를 하나 더 들어보자. 우리가 금의 색깔은 누런 색으로 알고 있다. 그러면 금 입자의 크기가 나노미터 규모로 되면 어떤 현상이 일어날까? 우선 결론부터 얘기하면 금이 금색같이 아니



〈그림 7〉 반도체 형상에 따른 전자상태밀도 함수



〈그림 8〉 CdSe 양자점의 입자 크기에 따른 UV광 여기 발광색의 변화



〈그림 9〉 재료 내부 결정립의 나노화에 따른 구조 변화

라 빨간색으로 변한다. 즉, 크기가 작아짐으로써 광학적인 성질도 변하게 되는 것이다. 옛 로마의 기술자들은 이러한 사실은 이미 알고 있었던 것 같다. 사진은 4세기의 로마시대에 만들어진 리카거스 컵을 보여준다. 반사된 컵은 초록색을 띠지만 유리컵에 빛을 투과시키면 빨간 색을 띤다. 이것은 컵에 나노미터 크기의 금입자가 분산되어 있기 때문이다.

나노크기 반도체, 에너지 밀도는 최고 효율

반도체의 경우에 전자가 가질 수 있는 에너지의 밴드가 존재하며 밴드간의 에너지 차이를 에너지 밴드갭이라고 부른다. 발광다이오드(LED)와 레이저다이오드는 전자가 상위밴드에서 하위밴드로 천이를 일으키는 현상을 이용하는 것이다. 그러면 반도체의 크기가 나노미터 크기로 작아지면 어떤 일이 일어날까?

양자이론에 의하면 어떤 물체내에 존재하는 전자는 물체의 크기에 반비례하는 기본 값의 정수배의 에너지 값을 가질 수 있다. 즉, 물체의 크기가 작아질수록 전자가 가질 수 있는 최소 에너지가 커지게 된다. 전자상태밀도는 에너지가 커질수록 커지므로 최소 에너지의 전자상태밀도가 커지게 된다(그림7). 이러한 현상을 '양자구속효과' 라고 한다. 양자구속효과를 이용, 반도체 소자의 두께를 수십 나노미터 정도로 얇게 하여 에너지 밴드 갭, 즉, 발광파장이 조절되고 효율이 높은 양자우물구조의 발광다이오드와 레이저다이오드들이 생산되고 있다. 세 방향으로의 길이가 모두 나노미터 크기인 반도체 입자를 '양자점' 이라고 하며 이 경우에 최소에너지의 상태밀도는 훨씬 더 커진다. 미래에는 양자점을 이용한 초고효율의 광소자들이 출현할 것이 기대된다.

나노입자크기 금속, 강도 · 저항력 커져

다음에 금속, 세라믹의 내부 구조가 나노 크기로 작아지면 어떤 현상이 일어나는지 살펴보자(그림9). 금속, 세라믹들은 보통 내부가 수많은 단결정 결정립들로 구성되어 있다. 결정립 사이의 경계인 결정립계는 원자들이 불규칙적인 배열을 하고 있다. 결정립의 크기가 작아질수록 결정립계에 놓이는 원자들의 숫자가 커지게 된다. 결정립의 크기가 100nm일 때 결정립계에 놓인 원자는 5% 미만이지만 이것이 10nm이면 20%가 되며 결정립이 아주 작아져 비정질이 되면 모든 원자들이 불규칙적인 배열을 하게 된다. 결정립의 크기가 작아지면 결정립계가 금속, 세라믹의 변형에 대한 저항력이 커지게 되며 이에 따라 재료의 강도가 높아진다. 이러한 방식으로 재료의 강도를 높게 되면 재료의 질감성은 크게 변화하지 않는다. 또 다른 장점은 재료의 강도를 높이는데 합금 성분을 사용하지 않아 제조비용을 줄일 수 있고 이러한 재료를 재생하기 위한 비용도 절감할 수 있다.

나노 세계는 다양한 형태와 모습을 갖고 있다. 각 형태의 나노 세계는 우리가 그것을 어떻게 사용하느냐에 따라 다양한 모양으로 우리 사회에 도움을 주게 될 것이다. 우리는 신세계를 개척하는 정신으로 새로운 나노소재, 소자, 시스템을 탐구하고 설계함으로써 인간사회가 현재 직면하고 있는 에너지 부족, 환경오염 등의 문제들을 해결하고 지속 가능한 성장을 유지하는 기반을 구축할 수 있을 것이다. ㉓



글쓴이는 서울대학교 금속공학과를 졸업 후, 한국과학기술원에서 재료공학 석사학위를, 미국 노스웨스턴대학에서 박사학위를 받았다. 현재 한국과학기술연구원 책임 연구원으로 재직중이다.