

5 21세기 첨단과학 연구 소재 '나노입자'

글_ 정덕영 성균관대학교 화학과 교수 djjung@skku.edu

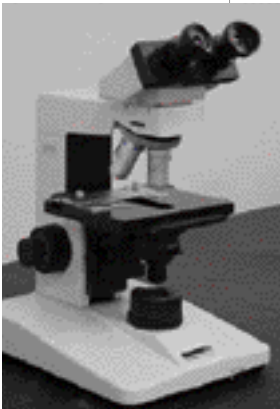
‘나노(nano)’는 ‘난쟁이’라는 뜻을 가지는 ‘나노스(nanos)’라는 그리스어에서 유래한 말이며 나노미터(nanometer, nm)는 10억 분의 1m를 가리킨다. 1mm의 크기는 원자 5개 정도의 크기이며 세포나 바이러스보다 훨씬 작다. 일반적으로 산업에 이용되는 나노입자는 입자의 크기가 수 나노미터에서 수백 나노미터의 크기를 갖는 것을 말한다. 나노미터 크기를 이해하기 위해서 크기에 따른 몇 가지 예를 들어 본다.

손톱의 너비는 보통 1~2cm이고 1cm는 100분의 1m를 의미한다. 일상 생활에서 많이 사용하는 계량용자의 경우는 일반적으로 1mm의 눈금이 새겨져 있으며 1mm는 1천분의 1m이다. 한편 연필의 대용으로 사용하는 샤프연필의 연필심이 보통 0.5mm이며 머리카락의 굵기는 0.05~0.1mm이다. 더 작은 단위로 1백만 분의 1을 의미하는 마이크로를 접두어로 사용하는 마이크로

미터를 단위로 사용하면 머리카락의 굵기는 50~100 마이크로미터이다. 생물체들을 이루는 세포들은 수십~수백 마이크로미터 정도이며 적혈구나 백혈구의 크기는 약 10마이크로미터이고 큰 박테리아의 크기는 1 마이크로미터 정도다.

바이러스의 크기는 보통 0.01에서 0.1마이크로미터 정도이며 마이크로미터의 단위보다 작은 단위인 나노미터를 사용하면 10~100나노미터크기이다. 세포내에서 단백질을 생산하는 리보솜은 직경이 약 30나노미터 정도이고 혈액에서 산소를 운반하는 헤모글로빈이라는 단백질은 약 7nm이다. 단백질들은 주로 탄소원자들의 결합으로 이루어져 있으며 탄소들간의 결합 중 단일결합은 0.154나노미터이다. 즉 1cm의 길이에는 적혈구는 약 1천개, 바이러스는 수십만 개, 탄소 원자 7천만개 정도가 일렬로 늘어서 있을 수 있다고 생각할 수 있다. 물질을 이루고 있는 원자들의 반경은 보통 0.1나노미터 부근이며 인위적으로 합성한 나노입자의 크기가 10나노미터라면 바이러스 크기와 비슷한 크기로 원자가 수십에서 수 백개 정도가 한쪽으로 늘어서 있다고 생각할 수 있다.

광학현미경(왼쪽)과 전자현미경 장비



용액에 녹아있는 나노입자크기 분석장치로 측정

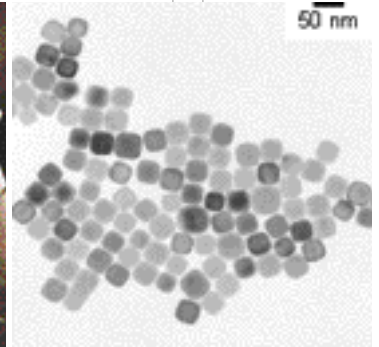
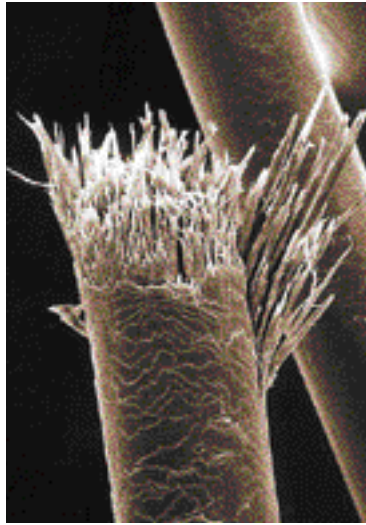
인간이 작은 크기의 물체를 크게 확대하여 볼 수 있는 도구는 바로 ‘현미경’이다. 광학현미경은 가시광선을 사용하여 렌즈를 통해 확대된 모습을 관찰할 수 있는데 광학현미경의 경우 관찰할 수 있는 물체의 크기는 200나노미터 정도이다. 인간이 눈으로 볼 수 있

는 가시광선의 파장이 200나노미터 이상이기 때문인데 입자의 크기가 이보다 작게 되면 해상도가 떨어지고 초점이 흐려져 물체의 형상을 정확히 관찰할 수 없게 된다. 이 크기는 에너지를 생성하는 미토콘드리아의 크기 정도에 해당하며 단백질이나 나노입자의 점토의 모양을 광학현미경으로 관찰할 수 없다.

200나노미터보다 작은 입자의 모양을 정확히 관찰하기 위해서는 전자현미경을 사용한다. 가시광선 대신 전자빔을 진공에서 시료에 굴절, 반사시켜 물체의 모양을 관찰할 수 있다. 전자현미경은 주사 방식과 투과 방식이 있으며 투과 방식을 사용하려면 시편을 전자빔이 통과할 만큼 얇게 준비하여 모양과 결정구조 등을 관찰할 수 있다. 전자현미경의 단점은 높은 진공의 장비에 시료를 넣어 전자빔을 쬐어 주어야 하며 기화되기 쉬운 액체를 수반하거나 전자빔에 손상되기 쉬운 시료의 측정이 거의 불가능하다는 점이다.

생명체가 단백질과 같은 나노입자를 만들 때는 매우 균일한 조성과 크기, 모양의 조절이 가능하지만 인간이 밀가루와 같은 입자를 만들 경우 입자의 크기는 고른 입자를 만드는 것이 매우 어려운 일이다. 예를 들면 방아기계를 사용하여 밀가루를 곱게 만들 경우 입자의 크기는 평균값을 중심으로 매우 넓은 영역의 크기 분포를 갖게 되며 모양의 조절은 더욱 어렵다. 인간의 생활에 유용한 금속, 산화물, 고분자 입자의 경우 마이크로미터 이상의 큰 입자를 딱딱한 물체를 사용하여 작게 부수어 나노입자를 합성한 연구가 이미 수십년 전부터 있어 왔다.

나노미터 크기의 입자를 입자크기에 따라 분리하는 방법은 그리 간단하지 않다. 예를 들어 거름종이는 마이크로미터 이상의 크기를 갖는 입자를 걸러내는데 사용할 수 있으나 나노입자를 거르려면 나노미터 크기의 구멍이 있는 거름종이를 제작해야 하는데 이는 기술적으로 매우 어려우며 존재한다고 해도 쉽게 막혀서 분리하는 작업이 어렵다. 한편 나노입자를 포함하는 용액에서 나노입자는 용액상에서 오랜 시간이 흘러도 가라앉지 않는다. 예를 들어 고운 점토를 포함



70마이크로미터의 머리카락(왼쪽)과 35나노미터크기의 반도체 나노입자의 전자현미경사진

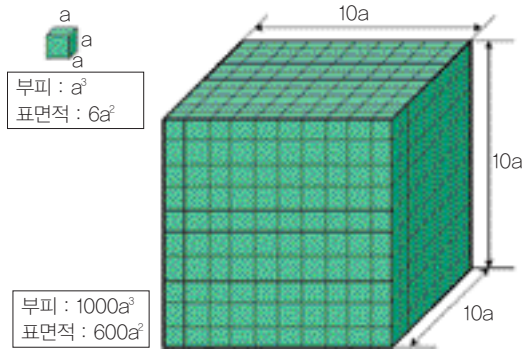
하는 용액은 오랜 시간이 흘러도 가라앉지 않는데 용매에 고체 나노 입자가 분산되어 있으면 입자에 미치는 중력과 부력이 상호 보상적이기 때문이다. 따라서 강력한 원심분리기를 사용하여 입자를 크기별로 어느 정도 분리할 수 있다.

용액에 존재하는 나노입자의 크기를 육안으로 구분할 수 없지만 레이저나 초음파를 사용한 입자크기 분석장치를 사용하면 나노입자의 평균크기와 입자의 크기분포를 측정할 수 있다. 앞서 설명한 전자현미경을 사용하여 직접 각 입자의 크기를 사진으로 측정하는 것이 더욱 효과적이지만 입자크기 분석장치를 사용하면 용액상태로 크기에 대한 평균값을 손쉽게 알아낼 수 있다는 장점이 있어 널리 사용되고 있다.

입자가 작을수록 촉매반응 격렬

작은 크기를 갖는 나노입자의 가장 큰 특징은 무엇보다 큰 표면적에 있다. 입자크기와 표면적의 상관관계를 살펴보기 위해 각설탕처럼 생긴 입자가 있다고 가정하자. 한 변의 크기가 10배로 커지면 부피는 1천 배로 커지지만 표면적은 100배가 커진다. 따라서 큰 부피의 입자를 1천개의 작은 각설탕으로 잘라내면 표면적은 무려 10배나 늘어난다. 1cm(=10mm)의 입자를 10나노미터의 작은 입자로 만들면 대략 1백만 배의 표

작은 입자와 큰 입자의 부피와 표면적 비교



면적을 얻을 수 있다. 큰 표면적은 촉매 반응 등과 같은 화학반응에 매우 유리한 요소로 작용할 수 있다. 나노입자는 고체이며 나노입자의 표면은 다른 기체, 액체, 고체와 접촉하여 반응을 할 수 있는 넓은 면적을 가지고 있기 때문에 매우 격렬한 반응을 유도할 수 있다. 예를 들면 주방용 제품으로 쓰이는 알루미늄 호일 한 장을 나노입자 분말로 만들면 공기 중에 노출된 순간 바로 불이 붙고 폭발한다. 이는 호일의 경우보다 분말의 경우 표면적이 크기 때문에 산소와의 반응이 훨씬 효과적으로 일어나기 때문이다. 촉매반응을 포함한 많은 반응은 입자가 작아지면서 더욱 강력해 진다고 생각할 수 있으며 이는 '작은 고추가 맵다'라는 우리 속담을 생각하면 재미있을 것 같다.

고체 입자의 크기가 작아지면 광학적, 전기적, 자기적 특성 등이 변화한다. 시판되고 있는 음주용 술 중에는 금가루가 들어 있는 것이 있다. 금은 수백 나노미터 크기까지의 노란색에 가까운 금속 빛깔을 띠지만 수 나노미터가 되면 빨간색을 띠게 되는데 이는 입자가 흡수하

우리나라의 나노기술 선진 5대강국 진입을 위해 건립되는 나노종합팩(Fab)센터의 조감도



연합모토

는 가시광선의 특정 파장이 달라지기 때문이다. 반도체 물질인 카드뮴 셀레나이드라는 물질은 12나노미터에서 2나노미터로 크기가 작아짐에 따라 각기 다른 무지개색을 나타내며 이는 전자전이에 필요한 에너지가 물질의 크기에 따라 변화하는 양자 크기 제한 현상에 기인한 것이다. 자기적 물질의 경우도 철과 같은 금속 입자의 크기가 작아짐에 따라 10nm 이하의 나노입자는 자기장을 매우 크게 적용하여도 영구자석으로 만들 수 없게 된다.

이와 같은 신기한 성질을 띠는 나노입자의 합성은 지난 수십년 동안 주로 화학자에 의해 많은 연구가 이루어져 오고 있으며 최근 들어 응용성이 부각되어 합성 방법이 더욱 다양해지고 보다 많은 양을 쉽게 만드는 합성 방법의 연구가 계속되고 있다. 나노입자의 합성은 여러 가지 방법으로 구분할 수 있으며 일반적으로 출발 물질의 상태에 따라 고체상, 액체상, 기체상 합성법으로 구분한다. 나노입자를 재료로 활용하는 경우 재료의 물리적 성질은 입자의 크기와 모양에 크게 의존하는 경우가 많은데 이는 합성 방법과 합성 시 사용하는 실험조건에 많은 영향을 받는다. 따라서 재료의 균일한 물리, 화학적 성질을 재연성 있도록 조절하기 위해서 입자의 크기와 모양을 미세하게 조절



나노입자를 실생활에 적용한 제품들

하는 기술이 필요하며 큰 입자를 작은 크기로 부수어 합성하는 방법(top-down)보다는 원자, 분자의 출발 물질을 사용하여 나노입자를 합성하는 방법(bottom-up)이 많이 사용되고 있는 경향이다. 대부분의 나노입자의 합성에 대하여 고체상보다는 액체상과 기체상 출발 물질을 사용하는 경우가 많으며 최종 나노입자의 조성에 따라 합성 방법을 선택한다. 액체상을 사용할 경우 입자간의 응집을 억제하기 위해 계면활성제를 사용하여 분산을 촉진시키며 계면활성제를 사용하지 않을 경우 나노입자는 큰 표면적을 갖는 나노입자간의 상호 작용으로 시간이 지남에 따라 응집현상이 발생하여 침전형태로 가라 앉게 되는 경우가 많다. 기체상태로 합성할 경우는 에어러솔 공정을 사용하여 고순도, 무응집의 나노입자의 분말을 합성할 수 있어 많이 사용하며 코팅 및 복합재료의 합성도 용이하다.

나노입자간 화학적 합성으로 고기능 제품 제작

기존의 큰 크기 입자와 비교하여 나노입자 재료들은 탁월한 성질을 갖는 경우가 많이 보고되어 있어 21세기를 선도하는 첨단 재료과학의 연구 분야로 큰 관심을 모으고 있다. 입자의 크기가 10나노미터인 입자의 경우 약 40%에 달하는 재료의 부피를 계면이 차지하게 되며 원자의 구조적 관점에서 규칙적인 원자들의 배열과 불규칙적이고 불안정한 계면의 원자들이 엇비슷한 복합적인 특성을 갖는 물질이라고 볼 수 있다. 최근 탄소소재, 금속, 산화물, 황화물, 고분자 등 여러 조성의 나노입자들을 합성하는 방법이 보고되고 있으며 합성된 나노입자들의 물리적 성질을 이용하여 고밀도, 고강도, 고인성 구조 재료, 결정 이방성을 갖

는 자성체 재료, 광촉매, 연료전지 가스센서 등의 기능재료, 코팅용 나노졸 재료 등 응용분야는 매우 광범위하다. 예를 들어 화장품, 충전제, 고기능성 코팅 등의 응용은 제품의 기능 향상에 직접적인 응용이 가능한 분야 중의 하나이다.

세계적인 경제 전문지인 포브스(Forbes)가 소개한 2003년 10대 나노기술 제품은 고기능성 스키왁스, 통기성 스키자켓, 주름-얼룩 방지 섬유사, 깊이 스머드는 크림 화장품, 기능성 선글라스, 나노결정 자외선 차단제, 첨단 테니스 공과 라켓 등이었으며, 이 제품들의 대부분은 나노입자를 제품 제작에 직접 사용하여 기능을 크게 향상시킨 예로 평가받고 있다. 국내외의 나노과학 기술 중에서 나노입자의 화학적 합성에 대한 창업이 가장 활발한 이유는 나노입자의 합성이 매우 광범위하고 다양한 합성 방법을 사용하여 제품의 제조에 이용할 수 있기 때문이다. 다른 한편 나노입자는 전자, 광학, 에너지, 항공우주, 의학 등 산업 전 분야에서의 응용이 가속되고 있으며 경제적 파급효과는 정확한 추정이 어려울 정도로 막대한 규모다. 특히 반도체, 전자, 자동차공업의 비중이 큰 우리나라의 경우 국가 경쟁력의 확장을 기대할 수 있다. 필자는 나노입자가 앞으로의 인간 생활을 변화시키는 모습을 꿈꾸며 우리 나라 과학기술의 발전 뿐 아니라 나노입자를 이용한 산업과 경제적 파급을 기대해 본다.



글쓴이는 서울대학교 화학과를 졸업, 동대학원 석사를 거쳐 프랑스 보르도1대학원에서 박사학위를 받은 후 현재 성균관대학교 화학과 교수로 재직중이다.