



Breakthroughs in Nanoparticle Utilized Nano-Medical Technology



천진우
연세대
화학과 교수

1. 나노기술과 나노 입자 (nanoparticle)의 기본 배경

20세기 중반까지 과학을 통한 한 개의 전자 및 원자의 인위적으로 제어할 수 있는 장치의 제조는 어려울 것이라 예측되었고, 많은 사람들은 이러한 생각을 받아들였다. 그러나 1959년 Feynman은 그의 미래 지향적 언급에서 "There's plenty of room at the bottom," 이라 하여 당시에 불가능하다고 생각되던 단일 전자, 원자 및 분자의 제어가 20세기 안에 가능해질 것을 예시하였고, 실제로 그의 예상대로 1981년 Binnig 와 Rohrer가 STM을 사용한 원자 및 분자 조작이 가능하다는 것을 밝혔으며, 1985년에 Likharev는 단일전자 트랜지스터 (single electron transistor)를 통해 전자 한 개의 조작이 가능하다는 것을 보여주었다.

현재 과학 기술의 발달은 과거의 과학 기술 발전 속도에 비해 대단히 빠른 속도로 발전하고 있다. 이 중에서도 전기 전자 기술의 발달은 금속, 반도체 기술의 발전에 따라 최근 몇 십 년간 눈부신 발전을 이룩하였다. 이러한 전자기술의 발전은 끊임없는 소자 크기의 감소를 통해 이루어지고 있으며, 이러한 경향은 전자 소자의 집적도 수준에서의 증가뿐

만 아니라 동시에 소자 실행 속도의 증가라는 두 가지 목적을 두고 발전하고 있다. 한편, 기존의 소자 기술은 이미 21세기 과학 및 기술의 요구를 충족하기 어려운 한계성이 예시되고 있으며, 당면한 문제점들을 해결하기 위한 새로운 형태 또는 크기를 갖는 소재가 필요하게 되었다. 이러한 요구 조건을 만족시킬 수 있는 새로운 21세기 연구 영역으로서 나노 과학(nanoscience) 및 나노기술(nanotechnology)이 대두되고 있다.

그렇다면 이러한 나노기술이 지금까지의 사용해왔던 근본적인 기술과 다른 점은 무엇일까? 단편적인 예를 들어 컴퓨터로 예를 들어 보겠다. 우리가 예전에 사용했던 386 컴퓨터로는 몇일을 걸려 계산할 문제를 펜티엄 4 프로세서를 사용하면 단 몇 초만에 계산이 되는 속도로 발전 되었듯이 현재의 펜티엄 4 프로세서보다 수 천배 빠른 프로세서가 손목 컴퓨터에 내장되려면 전자회로를 훨씬 작게 만듦으로써, 고집적화를 도모하는 것이다. 현재 펜티엄 4 프로세서의 기술은 마이크로 기술에 의존하고 있는데, 이 기술로 이루어지고 있는 최소 선 폭이 약 100 nm 정도에 머물고 있다. 이러한 마이크로 기술은 빛을 사용한 리소그래피 기술의 한계로 인해 전선의 폭을 줄이는 데에는 어려움이 있으며, 이

러한 한계를 극복하는 방안으로 다양한 나노기술이 필요하다. 현재 차세대 초소형 컴퓨터를 구현하기 위한 여러 가지 새로운 형태의 나노소자들이 개발되고 있는데, 그 한 예로써, 단전자 트랜지스터를 들 수 있다. 이 트랜지스터는 그 핵심 동작 부분이 약 수-수십 nm정도이며, 전자하나를 제어하여 on/off를 조절하는 스위치기능을 수행할 수 있다. 즉 1개의 전자로서 연산작용을 수행할 수 있어서 전력소모가 거의 없으며, 그 크기가 나노크기 이므로 현재 팬티엄 4 프로세서 보다 수 백배의 집적이 가능하다. 아래 그림 2.는 60개의 탄소로 이루어진 풀러렌 (지름 = 0.7nm)을 이용하여 미국 버클리대학 연구진에 의해서 개발된 약 1nm 크기의 세계에서 가장 작은 단전자 트랜지스터이다. 구동방식은 (+) (-) 전극사이에 풀러렌을 고정시킨 후 또 다른 제 3의 전극을 통하여, 전류가 이동하는 것을 통제하는 것이며, 전자 하나를 사용하여 on/off를 수행할 수 있는 트랜지스터이다.

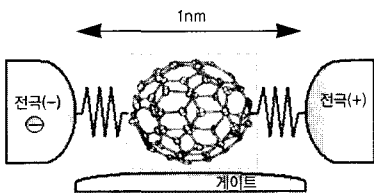


그림 1. 풀러렌을 이용한 단전자 트랜지스터.

이러한 미래의 나노기술을 가능하게 하는 핵심 물질중의 한 종류는 바로 나노입자이다. 나노입자의 세계에는 주목할 만한 새로운 과학적 현상들이 많이 일어나고 있다. 일부 소주 속에 들어 있는 반짝이는 금가루의 크기가 나노 크기로 작아지면 빨간 적포도주 색의 소주로 변화된다. 또한 반도체 물질인 카드뮴셀렌 (CdSe)은 그 크기를 약 12 nm에서 1.2 nm로 작아지면서 완벽한 무지개색깔을 보여 주는 흥미로운 현상을 나타낸다.(그림2.) 이러한 현상은 전자전이에 필요한 에너지가 물질의 크기에

따라 변하는 양자크기제한 현상 (quantum confinement effect)에 의한 것이다.

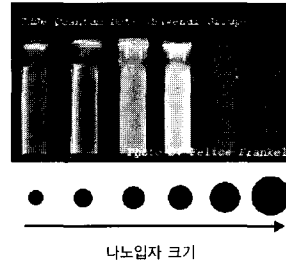


그림 2. CdSe 나노입자의 크기에 따른 색변화.

한편, 한 개의 자성 나노입자는 on/off를 구현하는 저장 기록 매체(bit)로 사용 가능하다. 본 저자의 연구실에서는 CoPt라는 6 nm 크기의 강자성 나노 입자를 개발하여 이를 이용한 차세대 자성 기록 매체를 개발 중이다 (그림 3.) 이것은 tera bit/in²의 저장 능력이 가능하며, 2차원 patterning을 시도하였을 경우 손목 시계 크기에 CD 25000장 분량에 해당되는 정보를 기록하는 획기적인 방법이다.

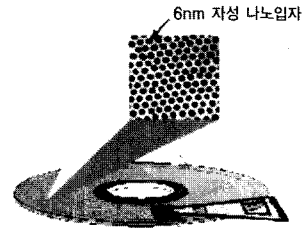


그림3. 자성 나노입자를 이용한 차세대 자성기록매체.

현재, 나노과학은 나노입자 (nanoparticle, nanocrystal, quantum dot), 탄소 나노튜브, C₆₀, 메조포러스 물질, 금속 및 반도체 등과 같은 물



질 합성 분야와 STM, AFM, lithography를 통한 제어 및 소자 응용 분야로 크게 두 가지로 분류되고 있다. 특히, 화학 원리를 이용한 나노물질 합성 및 제어 기술은 지난 수년간 괄목할 만한 획기적 발전이 진행되어 왔다.

2. 나노입자의 합성 및 구성

지난 20년간 화학, 물리학, 재료공학등의 분야에서 나노입자의 합성법 개발에 많은 노력을 기울여 왔다. 나노입자는 bulk와 분자의 중간체라고 할 수 있다. 따라서 두가지 방향에서 나노입자를 합성하는 접근이 가능하다. 즉, “top-down” approach (bulk to nano)와 “bottom-up” approach (molecule to nano)가 그것이다. (그림 4)

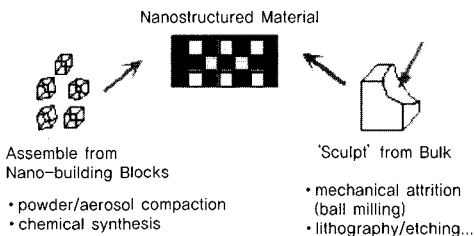


그림 4. “bottom-up” vs. “top-down” approaches.

“top-down” approach는 bulk 물질의 조각내는 방법을 통해 3차원 입자를 더 낮은 차원을 갖는 나노입자로 만든다. 이러한 접근법은 주로 리소그래피 (lithography)나 mechanical attrition (ball milling)을 통해 이루어 졌다. 이 방법은 나노입자의 크기를 쉽고 정확하게 조절할 수 있다는 장점과 원하는 위치에 만들 수 있다는 장점을 갖고 있으나 현재 기술로는 50nm 이하에서 그 한계를 갖고 있으며 기술적인 진보가 가능하다고 해도 10 nm이하의 범주의 나노입자에 대해서는 거의 불가능하다는 단점을 갖고 있다. 앞서 알아보았듯이 반도체 나노입자의 Exciton Bohr Radius는 일반적으로 10 nm 보다 작다. 따라서 top-down

approach를 통해서 strongly confined 된 나노입자의 합성이 어렵다. 이러한 단점의 해결은 분자선구 물질을 통한 “bottom-up” approach를 통해 가능해진다. 이러한 bottom-up approach는 STM을 통한 원자의 재배열 갖은 방법도 포함하지만, 주로 화학적인 분자나 원자 선구 물질을 통해 콜로이드 용액상 합성을 통해 이루어진다. 이러한 화학적 용액 합성에서 가장 중요시 되는 것은 나노입자의 크기 및 형태의 조절이다.

일반적으로 용액상 합성은 안정화 리간드 (stabilizer)의 micelle을 반도체 나노입자 성장의 틀로 사용하여 이루어진다. 이러한 용액상 합성은 여러가지 방법으로 시도되었는데 크게 보면 두 가지 방법으로 나눌 수 있다. 물 또는 polyol용매하 (또는 mixed phase)에서 ionic precursor를 사용하여 입자를 성장시키는 방법 (wet chemical synthesis)과 hot surfactant (stabilizer)를 용매로, 유기금속 화합물을 선구 물질로 사용하여 rapid injection을 통한 열분해 반응을 이용한 입자핵의 생성 및 입자 성장을 통한 방법이다 (non-hydrolytic synthesis).

Nonhydrolytic synthesis는 1993년 TOPO를 이용한 hot injection 방법으로 인해 큰 관심을 이끌었다. 이 연구에서는 유기금속 카드뮴 화합물 (CdMe₂)과 셀레늄 화합물 (TOPSe)를 hot TOPO에 주입시켜 homogeneous하게 nucleation 시키고 그 후에 열에너지에 의해 입자성장을 시켜 반도체 나노입자를 합성하는 방법을 사용하였다. 합성된 나노입자는 그 크기에 따른 용해도 차이를 이용하여 분리하는 size selective precipitation 방법을 통해 그 크기분포가 약 5%이하가 되도록 매우 균일하게 합성할 수 있다는 것을 보여주었다. (그림 5) 이러한 size selective precipitation 방법은 균일한 크기의 나노입자를 분리할 수 있다는 점에서 큰 의미를 갖는다. 균일한 크기의 나노입자를 합성할 수 있으므로 해서 크기에 따른 unique한 물리적 화학적 성질을 기대할 수 있을 뿐만 아니라 나노입자의 정렬을 통한 초격자 구조도 가능하게 하여 소자로서의 응용을 가능하게 할 뿐만 아니라 정렬된 구조에서 나타나는 새로운 성질에 대한 연구도

가능하게 한다.

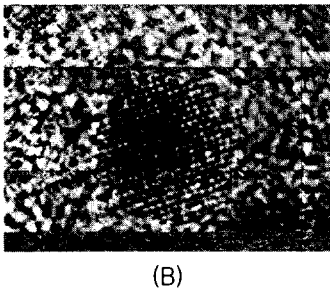
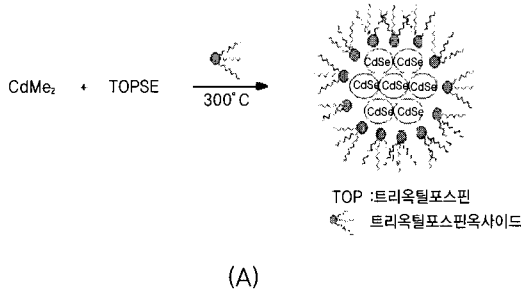


그림 5. CdSe 나노입자 (A) 합성 요약도 (B) 8 nm CdSe 나노 입자.

Wet-chemical synthesis는 주로 Weller와 Eychmuller에 의해 시도되어왔다. 이들은 질소 분위기 하의 수용액에서 $Cd(ClO_4)$ 와 $NaHSe$ 또는 $NaHTe$ 같은 이온 선구물질을 이용하여 thiol stabilizer 에서 반응시켜 반응 시간, stabilizer의 종류에 따라 서로 다른 크기를 갖는 CdSe, CdTe 나노 입자를 합성하였다. 얻어진 나노입자는 TOPO method와는 달리 zinc blende 구조를 갖고 있으며 수용액에 녹는 성질을 갖고 있다.

이밖에 고분자에 embedding 하는 방법, 수용액 상에서 sonication을 통한 합성, autoclave에서의 elemental 반응 등 여러가지 방법들을 통해 나노입자의 합성이 이루어지고 있으나 아직 쉽게 크기와 형태를 조절할 수 있는 일반적인 합성법이 확립되지 않고 있다.

나노입자는 그 크기뿐만 아니라 형태에 의해서도 전자구조의 변화가 생긴다. 즉, 나노입자가 3차원 벌크 입자에서 2차원 quantum layer, 1차원 quantum wire, 0차원 quantum dot의 형태로 변화되면서 전자 상태가 더 discrete하게 변해간다. (그림 6) 형태에 의해 나노입자의 전자 구조가 바뀔때로 인해 새로운 성질들이 나타나기 시작하는데, 예를 들면 반도체 nanorod에서 나타나는 편광 현상, 자성 나노rod에서 나타나는 magnetic anisotropic property등 다른 형태에서는 볼 수 없는 새로운 현상들이 나타난다.

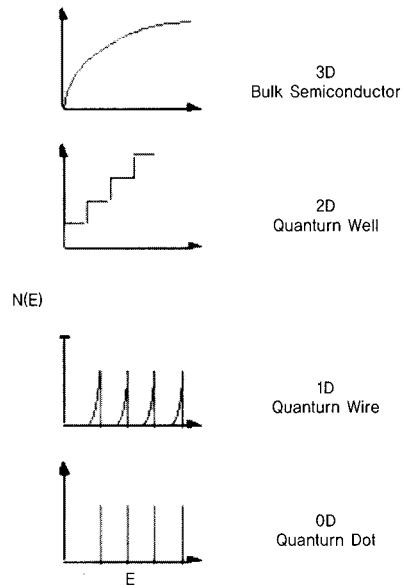


그림 6. 차원에 따른 반도체 전자의 에너지 상태.

최근에 들어 비등방성 나노입자 (anisotropic nanocrystals) 의 용액상 합성에 대해서 많은 연구가 활발히 진행되고 있다. 이 비등방성 나노입자의 합성은 처음에는 주로 Au, Ag 같은 귀금속에 대하여 많은 연구가 진행되어 왔다. 주로 수용액에서 CTAB, DDAB 등 ammonium bromide 같은 염 종류의 rod shape의 micellization 을 하는



surfactant를 통한 금속 이온의 환원을 통해 금속 nanorod를 형성시키는 것이 일반적인 방법이었다. 최근에 수용액이 아닌 nonhydrolytic 용매하에서 열분해 시킴으로서 육방 밀집 입자 성장의 방향성에 의해 CdSe nanorod를 형성될 수 있음과 이로 인해 나타나는 편광 현상에 대해 보고되었다 (그림 7).

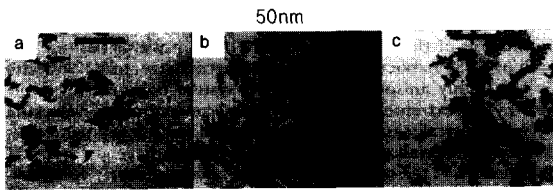


그림 7. 여러가지 크기의 CdSe 나노막대.

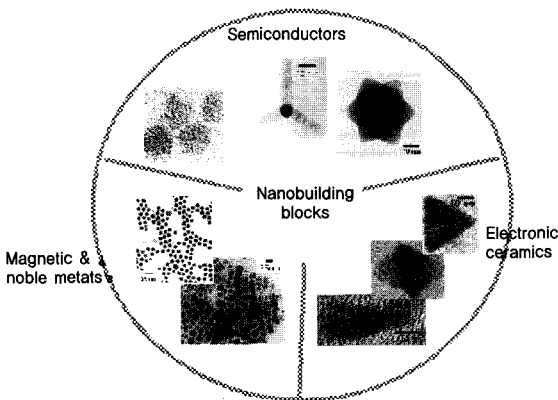


그림 8. 여러가지 형태의 나노입자들.

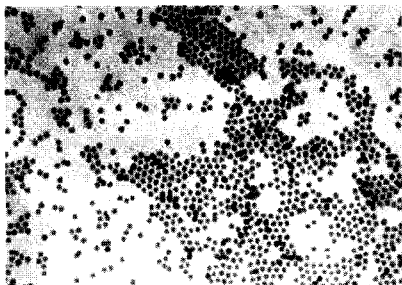


그림 9. 균일한 크기의 산화철 나노입자. 이외에 최근 수년간 본인의 나노화학 연구실에서

는 그림 8과 9에서 보여주는 막대, 큐브, 사각다리, 별 등의 여러 가지 대칭성을 가진 나노입자들의 합성이 가능함을 입증하였다. (그림 8, 9).

3. 나노입자의 생물 및 의료 응용

나노입자는 그 크기 및 형태에 따라 다른 물리적, 화학적 성질을 나타내고, 이러한 성질은 벌크 물질에 비해 우수한 특성이 있다. 특히, 그 크기 범주가 기능성 생체 물질(예: 단백질)과 유사하므로, 생체 친화적인 나노입자는 생체 및 의학 응용에 있어 획기적인 발전을 예상할 수 있다. 예를 들면, 반도체 나노입자는 그 발광 성질이 기존의 광학 이미징에 사용되던 유기 발광체보다 훨씬 우수하며, 크기에 따라 발광색이 변하기 때문에 이를 이용하면 multiplex optical tagging이 가능하다. 이러한 응용을 위하여, 우선 나노물질의 표면 특성을 화학적 방법을 통해 변형시키고 생체 물질과 혼성시키는 단계가 필요하다. 그림 10은 나노물질과 생체물질의 혼성 방법에 대한 개략도이다. 우선 나노입자 표면의 작용기와 화학 연결자 (cross linker)의 반응을 통해 생체 물질과 결합할 수 있는 새로운 작용기를 도입한다. 이후 특정 생물활성을 띤 생체물질과의 결합을 통해 나노입자의 우수한 성질과 생체물질의 생물학적 활성을 동시에 지닌 나노-바이오 혼성체가 형성될 수 있다.

최근에 나노입자를 이용한 의료과학의 연구는 DNA, protein chip 등의 bioassay를 포함한 다양한 진단 및 치료기술에 획기적인 발전을 도모하고 있다. 본 글에서는 반도체를 이용한 생체 물질의 광학 이미징과 자성 물질을 이용한 자기 공명 영상 진단의 예를 통하여, 나노물질의 생체 응용에 대한 연구 동향을 살펴보고자 한다.

3.1 반도체 나노입자를 이용한 올챙이 배아 세포 진화과정 추적

미국 버클리 대학의 Alivisatos 교수 연구팀과 UCLA Weiss 교수 연구팀은 반도체 나노입자에 바이오틴 등의 생체 인식 분자를 이용 쥐의 모세 혈관을 광학 이미징 하는 데 성공하였으며, 두가지 다른 크기의 CdSe/ZnS 코어셸 반도체 양자점을 사

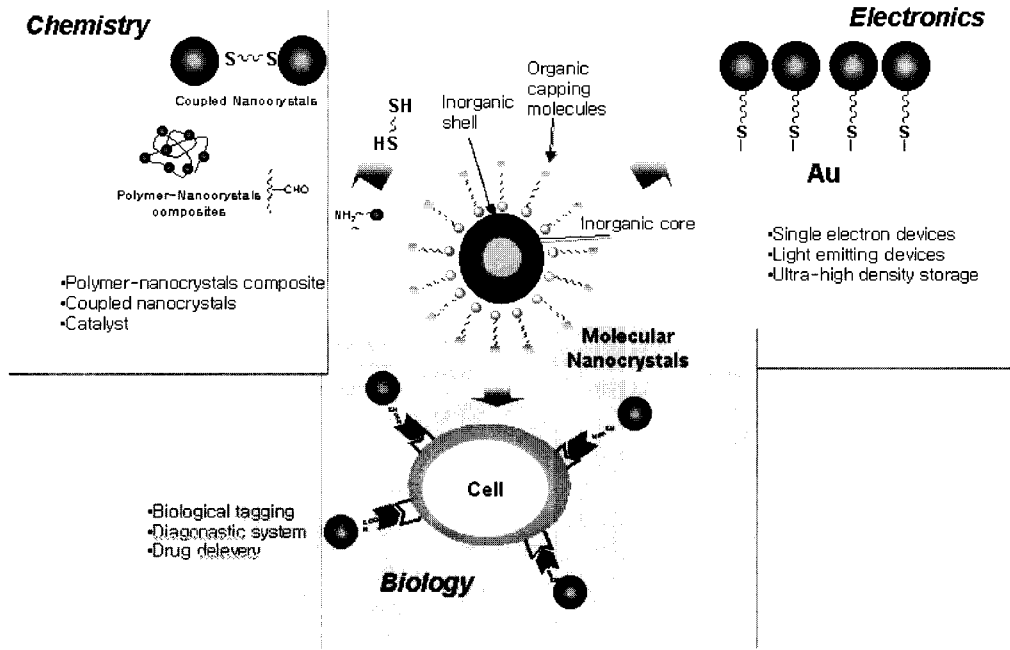


그림 10. 나노 입자의 응용화 과정.

융합으로서 멀티칼라 이미징도 가능함을 보여주었다. 이러한 연구는 반도체 나노물질을 처음으로 생

체 물질에 응용했다는 것에 그 의의를 두고 있다. 그러나 나노물질의 표면 개질에 있어 나노물질의 광학적 성질이 급격히 감소하는 것을 보여주었다. 이에 미네소타 대학의 Norris 교수 연구팀은 양자점 나노물질에 phosphid micelle을 이용하여 나노물질을 안정화 시킴으로서 그 성질이 유기용매에서 합성된 나노물질과 거의 유사하며 장시간 이미징이 가능한 나노혼성체를 개발하여 올챙이의 배아 세포에서 거의 올챙이 단계까지의 진화 과정을 관찰할 수 있었다 (그림 11, 12). 이는 기존의 유기 발광체를 이용한 광학 이미징 기술로는 이룰 수 없었던 큰 성과라 할 수 있다.

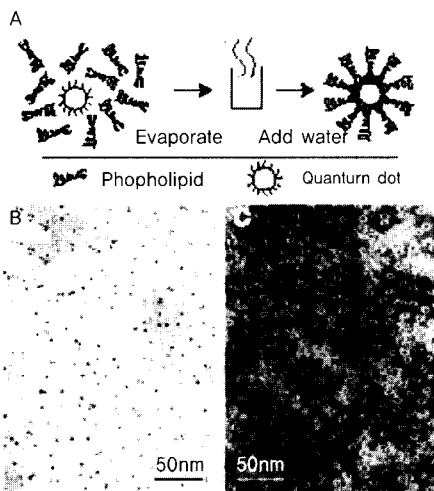


그림 11. Phospholipid 코팅된 CdSe/ZnS나노입자.

3.2 반도체 나노입자를 이용한 단일세포 이미징

또한 미국 Quantum dot corporation 연구진은 나노물질의 표면에 고분자 아크릴레이트를 코팅하여 좀 더 안정적인 나노 입자를 형성시켜, 세포

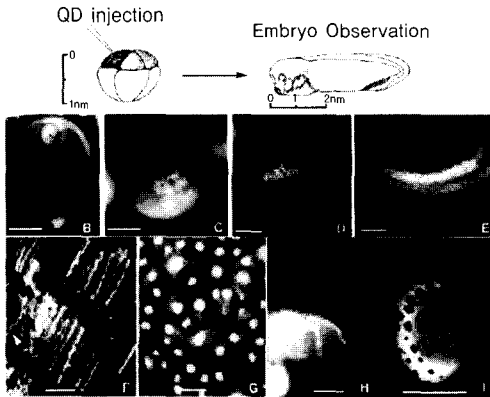


그림 12. Phospholipid 코팅된 CdSe/ZnS 나노입자를 이용한 올챙이 배아 세포의 진화 과정 이미징.

핵 및 세포막을 선택적으로 이미징할 수 있는 기술을 개발하였다. 그림 13는 시간에 따른 광학 이미징의 변화를 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이 유기 발광체로 염색된 부분들은 그 빛이 시간이 지남에 따라 점점 줄어들지만, 반도체 양자점으로 염색된 부분들은 시간이 지나가도 거의 빛의 세기를 잃지 않기 때문에 장기간 이미징이 가능하다는 것을 볼 수 있다. 한편, 이러한 나노입자들을 이용한 광학 이미징들은 가시광선이 투과할 수 있는 세포의 깊이가 매우 한정적으로 되어 있어 in vivo 이미징은 거의 불가능 하다는 단점이 있다.

3.3 반도체 나노입자 및 two-photon spectroscopy를 이용한 혈액 속도 측정

이에 코넬대학의 웹 교수 연구진은 two-photon physics를 이용하여 나노입자를 여기시키는 방법을 이용 250 μm 깊이의 세포 또한 이미징이 가능하다는 것을 보여주었다. 또한 혈액 속의 나노입자의 발광을 이용 실시간 혈액의 흐름을 이미징 하여 쥐의 혈액의 속도 및 심장 박동수의 측정도 가능함을 보여주었다. 그림 14에서 알 수 있듯이 two-photon spectroscopy를 이용하면 가시광선

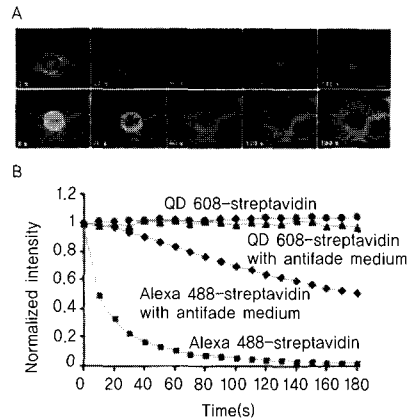


그림 13. 시간에 따른 광학 이미지의 변화 (A-위) 모세혈관: 녹색 양자점, 세포핵: Alexa-488 염색 (A-아래) 모세혈관: Alexa 488, 세포핵: 적색 양자점 (B) 시간에 따른 광안정성 변화.

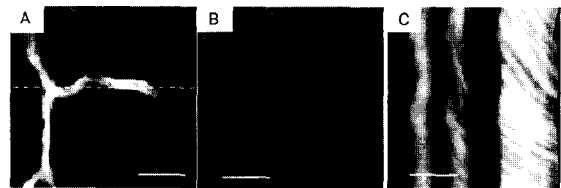


그림 14. Two-photon spectroscopy를 이용한 혈관 이미징 (A) 황색CdSe/ZnS 양자점 (B) 황색 FITC dye (C) 라인-스캔 법을 이용한 혈액 속도 측정.

에 비해 투과율이 높은 적외선을 이용하기 때문에 더 선명한 이미지를 얻을 수 있다. 이에 반해 FITC 유기 발광자를 쓸 경우에는 거의 이미징이 불가능한 것을 그림을 통해 볼 수 있다. 이 경우 유기 발광자에 비해 나노입자는 약 1000배이상의 광학 효율이 얻어짐이 입증되었다.

3.4 나노입자를 이용한 자기공명 영상법 (MRI)

반도체 양자점을 이용한 생체 광학 이미징은 그

감도 (농도: $10^{-12}M$) 및 안정성에 있어 매우 우수하다는 장점을 갖고 있지만, 앞서도 언급했듯이 빛의 투과율에 한계를 가지고 있기 때문에 *in vivo* imaging은 거의 불가능하다는 단점을 갖고 있다. 이에 반해 Gadolinium (Gd) 을 조영제로 사용한 자기 공명 영상법은 체내 수분의 핵스핀을 탐지하는 방법이기 때문에 그 투과율 및 주변 환경을 볼 수 있다는 장점을 갖고 있지만, 그 감도($\sim 10^{-4}M$)가 광학 이미징에 비해 매우 부족하다는 단점을 갖고 있다. 이에 반해 작은 자석 입자를 조영제로 이용한 자기 공명 영상법 (MRI)은 감도가 Gd에 비해 훨씬 우수하며 ($10^{-8} M$) 동시에 쉽게 *in vivo* 이미지를 할 수 있다는 장점을 갖고 있다. 하버드 의대 및 메사추세츠 종합 병원 연구진은 텍스트라이 코팅된 나노입자를 이용하여, 쥐의 암세포를 선택적으로 조영할 수 있는 방법을 개발하였다(그림 15). 이는 나노입자를 이용한 *in vivo* 이미지를 할 수 있다는 새로운 결과라 할 수 있다.

나노입자의 뭉침 현상이 일어날 때, spin-spin relaxation time (T2)이 현저하게 감소하는 현상을 이용하여 나노물질의 센서로 이용할 수 있음을 보고하였다. 그림 16은 이 현상을 이용한 DNA 센싱 방법에 대한 개략도 이다. 그림에서 볼 수 있듯이 ssDNA를 나노입자 표면에 도입한 후 cDNA를 하면 DNA의 혼성화 예의해 나노 입자들이 뭉침 현상이 일어나게 되어 T2가 급격히 감소하게 된다. 이때, cDNA를 femtomole

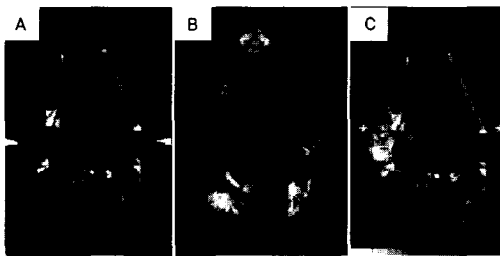


그림 15. 산화철 나노입자를 이용한 암세포의 자기 영상 이미징 (A) w/o 산화철 (B) w/ 산화철 (C) T2 mapping.

수준에서까지 감지할 수 있다. 이러한 방법은 단백질에 특별하게 결합하는 생체 리셉터를 도입하면 특정 단백질을 센싱할 수 있는 것에도 응용할 수도 있다.

한편, 이러한 연구를 통하여 나노-MRI 기술이 발전하고 있으나, 현재 사용되는 나노입자의 크기 및 물성의 열악성 등의 여러 문제 때문에, 간 및 신장 시스템에 의해 물질이 걸러지고, 진단 효과가 감소하는 단점을 갖고 있다. 이러한 문제점을 연세대학교 서진석 교수와 천진우 교수의 공동 연구팀은 새로운 자성 나노입자의 개발 및 생체 적합성 실험을 통하여 T2를 제어하고 나

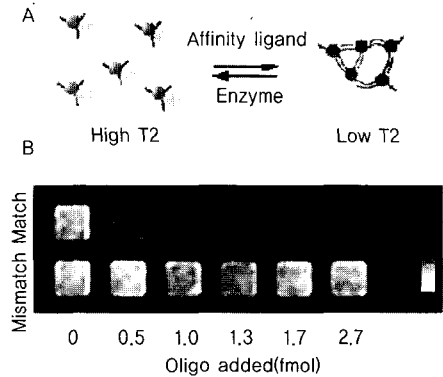


그림 16. 산화철 나노입자를 이용한 DNA센싱 (A) affinity ligand를 이용한 T2 값의 변화 (B) 첨가된 cDNA 와 one-oligo mismatched cDNA 양에 따른 자기 공명 영상 변화.

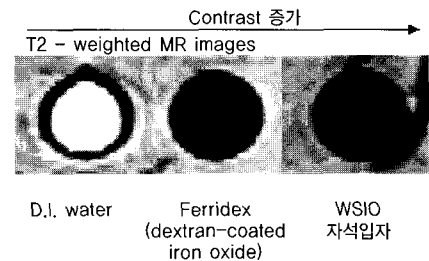


그림 17. T2-weighted 자기 영상 이미지(연세대학교 팀).



노-MR의 진단 특성을 획기적으로 발전시키고 있다. (그림 17) 이러한 결과는 기존에 알려진 세계 최고의 수준을 이미 넘어선 단계이고, 이를 이용 in vivo imaging 및 암세포 등의 특정 물질을 진단 및 치료가 가능한 차세대 나노-메디칼 시스템을 개발 중이다.

4. 결론

나노입자들은 본 지면에서 언급한 생체 진단 시스템 이외에도 다양한 목적의 생체응용이 가능한데, 그 중의 하나가 약물 전달 시스템이다. 예를 들면, 나노입자에 약물을 결합시키고 동시에 특정한 암세포를 찾아가는 특정 항체들을 이용함으로써, 특정 암세포에서만 약물을 전달하는 시스템을 개발이 가능하다. 이 경우, 현재 항암제들이 갖고 있는 구토, 어지럼증, 탈모 현상 등의 부작용을 제거하는 동시에 약물의 전달력을 향상시킴으로써 치료 효과도 급격히 향상시킬 수 있다. 또한 나노입자를 이용한 진단 시스템과 겸비하여, 치료가 가능한 지능형 나노의료 물질의 개발도 멀지 않아 이루어지리라 사료된다.

나노입자들은 그 성질이 기존의 벌크 및 분자 물질들에 비해 매우 뛰어나므로, 이러한 나노물질의 생체 응용은 차세대 생체 진단 및 치료 시스템에 있어 획기적인 발전을 이룰 수 있으리라 예상되고 있다. 이를 위해서는 우선 나노입자의 형성 및 특성 제어가 뒷받침 되어야 하며, 이후 생물, 공학 및 의학 등의 여러 분야와의 학제 협력을 통해서 발전이 이루어 질 수 있을 것이라 사료된다.

참고 문헌

1. Alivisatos, A. P., Science, Vol. 271, p. 933, 1996.
2. Whetten, R. L., Science, Vol. 253, p. 879, 1996.
3. Alivisatos, A. P., Science, Vol. 256, p. 1425, 1992.
4. Brus, L. E., J. Chem. Phys., Vol. 80, p. 4403.
5. Bawendi, M. G., J. Am. Chem. Soc., Vol. 115, p. 8206, 1993.

6. Weller, H. J., Phys. Chem. B, Vol. 103, p. 3065, 1999.
7. Wang, Z. L., J. Phys. Chem. B, Vol. 104, p. 1153, 2000.
8. Peng, X and Alivisatos, A. P., Nature, Vol. 404, p. 59, 2000.
9. Cheon, J., J. Am. Chem. Soc., Vol. 123, p. 5150, 2001.
10. Cheon, J., J. Am. Chem. Soc., Vol. 124, p. 615, 2002.
11. Cheon, J., J. Am. Chem. Soc., Vol. 124, p. 11244, 2002.
12. Norris, D., Science, Vol. 298, p. 1759, 2002.
13. Wu, Nature Biotech., Vol. 21, p. 41, 2003.
14. Bruchez, M. et al., Science, Vol. 281, p. 2013, 1998.
15. Larso, Science, Vol. 300, p. 1434, 2003.
16. Weissleder R., Nature Med., Vol. 9, p. 123, 2003.
17. Perez, J. M., Nature Biotech., Vol. 20, p. 816, 2002.

· 저 · 자 · 약 · 력 ·

성명 : 천진우

◆ 학력

- 1985년 연세대 화학과 이학학사
- 1987년 연세대 대학원 화학과 이학석사
- 1993년 Univ. of Illinois, Urbana-Champaign 이학박사

◆ 경력

- 1993년 AT&T Bell Labs, Murray Hill, NJ, 방문 연구원
- 1993년 - 1995년 Lawrence Berkeley National Laboratory & Univ. of California, Berkeley, 박사 후 과정
- 1995년 - 1998년 UCLA 화학과, Staff 연구원
- 1998년 - 2002년 KAIST 화학과 조교수, 부교수
- 2002년 - 현재 연세대 화학과 교수