

과학 고등학교 교사를 위한 첨단 과학 실험: CdTe 양자점의 크기와 발광 파장의 관계

김의영^{1,2}, 전동렬^{1*}

^{1*}서울대학교 물리교육과, 서울특별시 151-742

²양지고등학교, 경기도 안산시 425-903

Inquiry of Advanced Science for Science High School Teacher: Relationship between Diameter and Emission Wavelength of CdTe Quantum Dot

Eui-Young Kim^{1,2} and Dong-Ryul Jeon^{1*}

^{1*}Department of Physics Education, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

²Yangji High School, Kyunggi 425-903, Korea

요약

크기가 매우 작은 물질에서는 양자 효과가 나타난다. 덩어리 물질에서 볼 수 없는 나노 입자의 이런 특성은 원자 또는 분자와 덩어리 물질의 중간 성질을 띠는 에너지 구조 때문에 나타난다. 양자 효과는 특히 반도체 나노 입자에서 잘 나타난다. 양자점은 반도체 결정을 수십~수백 개 합성한 구형의 나노 입자로서 양자 크기 효과로 인한 광학적 특성을 잘 나타낸다. 이 논문에서는 CdTe 양자점에서 나오는 빛의 파장이 양자점의 크기와 어떤 상관성이 있는지 측정하고 이론과 비교한 결과를 보인다. 양자점의 크기는 주사 프로브 현미경으로 측정했고 빛의 파장은 형광 측정 장치를 이용했다. 주사 프로브 현미경은 나노 입자 관찰이 가능한 현미경이고, 형광 측정 장비는 입자에서 발광된 빛의 파장을 재는 장치로서 과학 고등학교와 대학에 많이 보급되어 있다. 이 논문에서 이 장비들을 이용하여 양자점 발광 현상과 이론을 체계적으로 체험하는 과정을 기술했다.

주제어 : 나노 입자, 양자점, 주사 프로브 현미경, 형광 측정 장치

서론

양자점 소개

양자 효과는 원자의 불연속적인 에너지 구조에서 나오는데, 원자가 뭉쳐서 덩어리가 되면 전자의 에너지 상태가 점차 연속적으로 변해서 양자 효과가 사라진다. 거시적인 물성이 양자 효과와 만나는 영역은 물질의 크기가 나노 미터 정도 되었을 때다. 그래서 나노 미터는 ‘마법의 지점’이라 불리기도 하는

데, 이유는 이 크기에서 덩어리 물질에서 볼 수 없는 여러 가지 양자적 특성이 나타나기 때문이다. 이러한 특성을 이용하려면 덩어리 상태의 물질을 깎거나, 반대로 개별 원자나 고체 결정을 조립하여 나노 미터 크기로 만드는 기술이 필요하다. 양자점 (quantum dot)은 후자의 방법을 이용하여 합성된 나노 구조물로서 양자 효과로 인한 광학적 특성을 구현한다(Knoss, 2009). 양자점은 II-IV 족의 반도체 결정(CdSe, CdTe, CdS 등) 수십 개를 뭉친 것으로 크기는 수 나노 미터 정도이며 인공 원자라고 불릴 만큼 개별 원자와 유사한 광학적 특성을 잘 보여준다 (Knoss, 2009). (개별 원자의 광학적 특성이란 원자핵 주위의 전자의 들뜸과 탈들뜸 과정에서 에너지 준위 차이에 해당하는

*교신저자: d.jeon@snu.ac.kr

•2010년 1월 13일 접수, 2010년 2월 1일 수정, 2010년 2월 5일 통과.

전자의 에너지가 광자 형태로 방출되는 현상이다.) 특히 양자점의 에너지 구조는 크기에 따라 달라지는데 이 현상을 양자 크기 효과(quantum size effect)라 한다. 따라서 양자점의 크기를 변화시킴으로써 방출되는 파장을 조절할 수 있으며, 단일 물질로 모든 파장의 가시광선을 방출할 수 있는 광원으로 이용할 수 있다(Redíngolo et al., 2003). 이러한 광학적 용이성은 생명 및 유전 공학, 의학 분야에서 매우 이용 가치가 높다. 형광을 내는 양자점을 특정 세포나 유전 물질에 화학적으로 붙여서 위치를 추적하거나 작용 기작을 밝히는 데 이용할 수 있기 때문이다. 또 양자점을 발광 소자, 태양전지, 레이저 등에 응용하기 위한 연구도 활발하다.

양자점의 크기와 발광 파장의 정량적 관계

반도체 물질에서 전자가 전도대로 여기되면, 가전자대에 전자가 부족한 상태가 생기고 이 곳을 양의 전하를 띤 가상 입자로 취급하여 ‘정공’이라 부른다. 전도대의 전자와 정공은 전기력으로 속박되어 전자-정공 쌍인 엑시톤을 형성하며, 전자는 정공 주변을 돌게 된다. 따라서 엑시톤은 그림 1(a)와 같이 유전체 속의 수소 원자와 같이 취급할 수 있으며 에너지 준위도 수소의 것과 비슷하게 생각할 수 있다(Paul, 2005). 그림 1(b)와 (c)가 양자점의 경우에 해당하는데 굵은 선으로 표시된 원이 양자점을 의미한다. 양자점은 엑시톤이 엑시톤-보어 직경(엑시톤-보어 반지름의 두 배) 정도의 공간에 속박된 것이며, 전자는 이 공간 밖으로 나갈 수 없다. 따라서 전자는 무한 전위 우물 안에 갇힌 것으로 간주한다. 우물의 폭은 양자점의 직경에 대응되며 이것이 좁을수록 전자의 에너지 준위 간격은 커지고 서로 다른 준위의 에너지 차이는 증가한다. 에너지 준위 사이의 차이는 대략 그림 1에서 ΔE 로 표시할 수 있으므로 식 (1)이 성립한

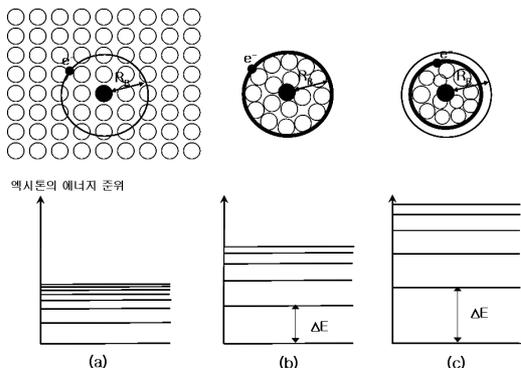


그림 1. 반도체 물질에서의 엑시톤. 반도체 물질의 크기가 작아질수록 에너지 상태의 밀도가 감소한다.

다. ($E_{g,QD}$ 는 양자점의 에너지 준위 차이, $E_{g,bulk}$ 는 덩어리 물질의 에너지 준위 차이를 나타낸다)

$$E_{g,QD} = E_{g,bulk} + \Delta E \tag{1}$$

보어의 수소 원자 모형에서의 마찬가지로, 구형의 무한 전위 우물에서 전자의 에너지 준위는 식 (2)로 표현된다. (μ 는 전자의 유효 질량, r 은 전위 우물의 반지름)

$$E_n = \frac{n^2 \pi^2 \hbar^2}{2\mu r^2} \tag{2}$$

따라서 식 (1)은 식 (3)으로 바꾸어 쓸 수 있다.

$$E_{g,QD} = E_{g,bulk} + \frac{\hbar^2 \pi^2}{2\mu r^2} \tag{3}$$

덩어리 물질의 에너지 준위 차이는 일정하다. 그러므로 양자점의 에너지 준위 차이와 양자점의 반지름은 대략 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$E_{g,QD} \sim \frac{1}{r^2} \tag{4}$$

참고로, 정확한 계산에 의한 관계는 식 (5)과 같다(Masumoto and Sonobe, 1997).

$$E_{g,QD} = E_{g,bulk} + \frac{\hbar^2 \pi^2}{2\mu r^2} - \frac{1.786e^2}{\epsilon_r \epsilon_0 r} - 0.248 \frac{\mu e^4}{2\hbar^2 \epsilon_r^2 \epsilon_0^2} \tag{5}$$

양자점의 크기와 발광 스펙트럼의 관계

양자점이 빛을 흡수하고 방출하는 이유는 수소 원자에서와 같다. 그러나 반도체 물질에서는 엑시톤의 결합 에너지 때문에 조금 다른 매커니즘을 갖는다. 양자점이 빛을 흡수하면 엑시톤의 전자-정공 쌍이 분리되고 남은 에너지로 전자가 높은 에너지 상태로 올라간다. 높은 에너지 상태의 전자는 다시 낮은 에너지 상태로 떨어지는데 이 과정에서 광자를 방출한다(Paul, 2005)(그림 2). 그러므로 방출되는 에너지는 흡수한 에너지에서 엑시톤이 전자-정공으로 분리되는데 필요한 에너지를 뺀 나

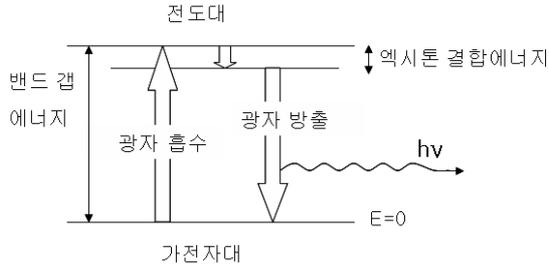


그림 2. 양자점의 발광 원리. 흡수한 에너지에서 엑시톤 결합 에너지를 뺀 나머지를 방출함.

머지에 해당하며, 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$h\nu = E_{g,QD} - E_{exciton\ binding\ energy} \quad (6)$$

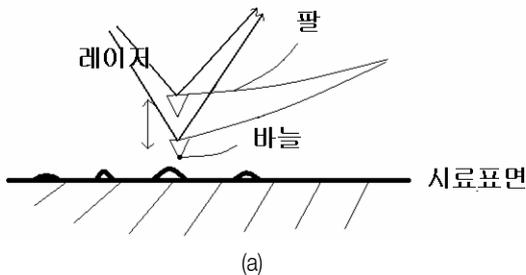
밴드 갭 에너지에 비하여 작은 엑시톤의 결합 에너지를 무시 하면 양자점의 밴드 갭 에너지는 양자점의 반지름에 반비례하므로 발광 파장과 양자점의 반지름의 관계는 식 (7)과 같다.

$$E_{g,QD} = \frac{hc}{\lambda_e} \sim \frac{1}{r^2}, \quad \lambda_e \sim r^2 \quad (7)$$

이와 같이 발광 파장이 양자점의 크기에 비례하는 관계는 밴드 갭 에너지가 나노입자의 크기에 의존하는 양자 크기 효과를 보여준다. 지금까지 이론적으로 규명한 이 관계를 원자 힘 현미경과 형광 측정 장치를 이용하여 검증하는 것이 이 실험의 목적이다.

장 치

여기서는 이 실험에 사용한 장치를 간단히 소개한다.

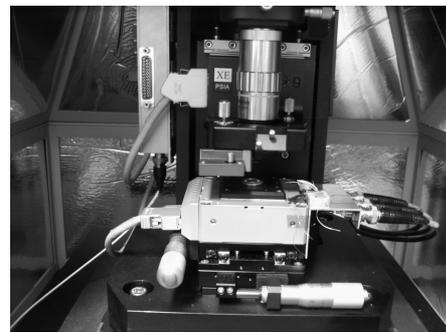


(a)

원자 힘 현미경

광학 현미경의 한계 분해능은 가시광선의 파장인 200 nm 정도다. 따라서 수 나노 정도의 크기를 갖는 나노 입자는 광학 현미경으로 관찰할 수 없다. 투과 전자 현미경은 시료에 고에너지의 전자빔을 입사시켜 시료를 투과해 형광관에 도달한 전자의 위상과 강도를 영상화하는 장비로서 시료 단면의 크기, 모양, 구조, 형태 등을 직접적으로 측정할 수 있다. 그러나 시료의 두께가 매우 얇아야 한다는 제약이 있다. 주사 전자 현미경은 전자빔을 시료 표면의 한 점에 주사해 이 때 튀어나오는 이차 전자를 검출하여 음극선관에 상이 맺히게 한다. 이런 방법으로 두꺼운 시료를 3차원 공간에서 측정할 수 있지만, 해상도가 투과 전자 현미경보다 낮고 진공 상태에서 구동해야 하는 단점이 있다. 해상도가 높으면서 공기 중이나 액체 안에서 시료 표면의 모양을 관찰하는 현미경으로, 시료 표면과 시료 표면의 구조를 더듬으면서 측정하는 뾰족한 바늘 사이의 반 데르 발스 인력이나 척력을 사용하는 원자 힘 현미경(atomic force microscope, AFM)이 있다. AFM은 바늘을 탐침으로 사용하므로 주사 프로브 현미경(scanning probe microscope, SPM)이라고도 불린다. 그림 3(a)는 탐침과 시료 표면의 인력에 의해 바늘이 휘는 각도를 레이저 반사 각도로 측정하는 모식도이며, (b)는 이 실험에 사용한 AFM의 사진이다.

탐침이 시료 표면과의 당기거나 미는 힘 때문에 휘는 각도는 탐침이 붙은 팔에 입사한 레이저가 반사하는 각도로 측정한다. AFM에서는 탐침이 휘는 각도로 시료의 굴곡을 계산하여, 명암도로 나타낸다.



(b)

그림 3. AFM과 측정 원리. (a) 진동하는 팁이 시료에 가까이 가면 반 데르 발스 인력에 의해 팁의 진폭이 변한다. 반 데르 발스 힘은 탐침과 시료 표면 사이의 거리에 의존한다. (b) AFM 사진.

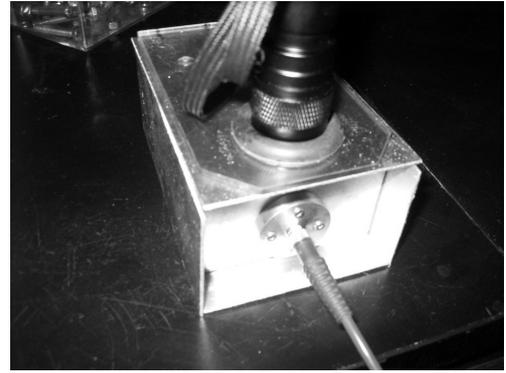
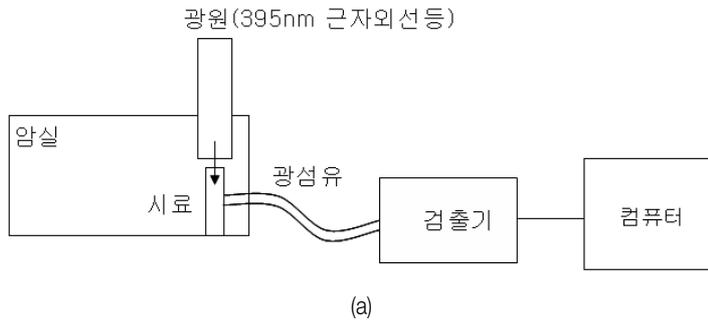


그림 4. 간단한 형광 측정 장치의 측면(a)과 실제 모습(b).

형광 측정 장치 (photoluminescence)

발광(photoluminescence)은 고체 내에서 광자를 흡수하여 전도대로 들뜬 전자가 다시 가전자대로 내려가면서 광자를 방출하는 현상이다. 이 때 방출되는 빛을 파장별로 늘어놓은 것을 발광 스펙트럼이라 하는데, 이것을 측정하기 위해 그림 4(a)와 같이 간단한 형광 측정 장치를 제작하였다. CdTe 양자점은 근자외선(약300~400nm)을 흡수하므로 해당 파장 영역의 광원을 제공하였으며 방출되는 광자는 광섬유를 통해 검출기로 들어가도록 하였다. 검출된 광자는 전기 신호로 전환되어 컴퓨터 모니터 상에 나타난다.

형광 측정 장치의 본체는 알루미늄 판을 사용하였고 광섬유는 시료에 닿도록 하여 고정시켰다. 광원의 강도가 세므로 시료의 발광 스펙트럼에 영향을 줄 수 있다. 따라서 광원과 광섬유는 시료를 중심으로 직각을 이루게 하였으며 광섬유의 끝이 큐벳에 완전히 닿아 틈이 생기는 것을 최대한 방지하였다.

시료 제작

이 실험에서 사용한 양자점의 재료는 CdTe이다. 일반적으로 양자점은 약 2~10 nm크기의 중심체와 ZnS(황화아연)로 이루어진 껍질로 구성되며 껍질 밖 표면에 고분자 코팅을 하기 때문에 통상 10~15 nm 크기이지만 중심체의 크기를 측정해야 하므로 코팅 처리 되지 않은 CdTe를 이용하였다. CdTe는 상품으로 만들어진 것을 구입했으며, 입자의 크기와 발광 파장이 다른 6종을 건조된 분말 상태로 사용했다. 입자를 AFM으로 관찰하기 위해 일정 비율로 물에 분산하여 콜로이드 형태로 만든 다음 한 방울 씩 기판에 떨어뜨려서 말렸다. CdTe는 하이드록시

그룹과 연결되어 친수성이므로 물에 잘 분산된다. 분산한 용액은 에탄올로 세척한 바이알에 종류별로 번호를 붙여 4℃정도로 냉장 보관한다. 분말 형태의 양자점은 습기가 차면 뭉쳐서 사용할 수 없으므로 건조한 상태를 유지하도록 한다. 시료를 떨어뜨릴 기판(실리콘 웨이퍼)은 약 가로 1 cm, 세로 1 cm로 절단하여 세척하고 오존 클리너에 15분 정도 넣어 준비한다. 준비된 기판에 마이크로 피펫으로 시료를 10 μm 정도 떠서, 기판에 골고루 뿌렸다. 이 때, 최대한 얇게 뿌려져야 양자점 입자들이 뭉치는 현상을 최대한 막을 수 있다. 시료가 뿌려진 웨이퍼는 불순물이 들어가지 않도록 비이커로 덮어 4~5분 정도 방치하여 양자점 입자가 기판에 충분히 붙도록 한다. 몇 초의 시간 차이에도 시료마다 상태가 달라질 수 있으므로 초시계를 사용하여 모든 시료가 같은 시간동안 방치되도록 해야 한다. 그 후 기판의 끝을 핀셋으로 잡고 질소로 가볍게 불어내어 남아있는 용액을 제거한다. 이렇게 만들어진 시료는 바로 AFM으로 측정할 수 있다. 형광 측정을 위한 시료는 별도의 처리가 필요 없으며, 보통 사각형의 투명한 큐벳에 담아 사용한다. 그러나 편이상 시료가 담긴 바이알 전체를 대상으로 하여도 발광 스펙트럼의 측정에는 무리가 없다.

실험 과정

시료 준비

세척한 바이알에 증류수 10ml를 넣고 양자점(분말 형태) 1mg을 분산시킨다. 종류별로 #1~#6 까지 라벨링하여 냉장 보관한다.

AFM을 이용한 양자점의 크기 측정

기판에 준비된 시료를 얇게 뿌리고 4분간 기다려 양자점이 기판에 붙게 한 후 남은 시료를 질소로 불어낸다. 스캔한 이미지에서 육안으로 확인되는 입자의 최고점을 측정하여 변량을 만들고 평균값을 구한다.

형광 분광계를 이용한 발광 스펙트럼의 측정

큐벳에 시료를 담아 형광 분광계에 넣어 발광 스펙트럼을 측정하고 강도가 가장 높은 파장을 발광 파장으로 결정한다.

측정된 양자점의 크기와 발광 파장의 상관관계를 파악

양자점의 크기와 발광 파장의 관계를 알아보기 위해 원자 힘 현미경으로 양자점의 크기를 분석하고 형광 분광계로 시료 별 발광 스펙트럼을 얻어 두 자료를 비교하였다. 양자점의 크기는 지름으로 나타내고, 발광 파장은 발광 스펙트럼에서 강도가 가장 큰 파장으로 결정하였다. 발광 스펙트럼은 전자가 전도대의 바닥상태에서 가전자대로 전이할 때만 관찰되므로 발광되는 빛은 거의 단색광이다. 그러나 양자점은 외부에서 온도를 조절하여 합성하므로 지름이 대략 가우스 분포를 이룬다(Yu et al., 2003). 따라서 이것을 평균하여 크기를 결정해야 한다.

AFM으로 얻은 이미지에서는 대부분의 양자점이 뭉쳐있으므로 양자점 입자 하나의 크기를 결정하기가 쉽지 않다. 이 실험에서는 AFM 이미지에 나타난 잡음을 눈으로 골라내고 실제로

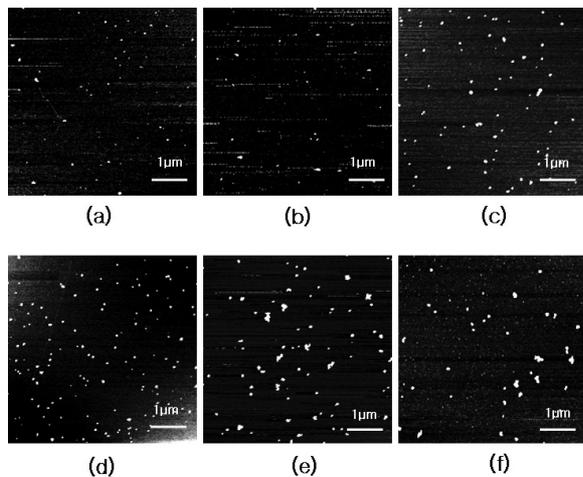


그림 5. AFM으로 얻은 CdTe 양자점 영상.

표 1. AFM 영상을 분석하여 얻은 CdTe 양자점의 직경.

시료번호	1	2	3	4	5	6
직경(nm)	3,756	5,536	7,914	8,24	9,54	10,638

양자점이라 판단되는 입자의 높이를 측정하여 평균을 내었다. 뭉쳐서 덩어리를 이루었을 경우 최고점을 정확하게 결정할 수 없으므로 어느 정도의 오차를 가정해야 한다. 그러나 실험의 목적이 양자점의 정확한 크기를 결정하는 것이 아니라 발광 파장과 파장의 관계를 파악하는 것이므로 이러한 한계는 실험 과정에 큰 영향을 주지 않는다. 실험 결과가 객관적인 신뢰도를 갖는지 판단하기 위해서는 기준이 될 정확한 데이터가 필요하므로, 장비 사용이 어렵고 흔하지 않지만 해상도가 높은 투과 전자 현미경으로 분석한 양자점의 크기를 AFM 영상으로 가능한 양자점의 크기와 비교했다. 이로부터 AFM 영상 분석의 정확성을 확인할 수 있었다.

결과 및 논의

CdTe 양자점 크기의 원자 힘 현미경 관찰

그림 5는 CdTe 양자점을 찍은 AFM 영상이다. 스캔 범위는 가로 5 μm, 세로 5 μm 이며 척도는 1 μm을 나타낸다. 흰 점으로 나타난 부분이 양자점이며 크기의 차이는 육안으로도 대략 확인할 수 있다. 그러나 한 개의 점이 반드시 단일 양자점 입자라고 단정하기는 어렵다. 분자 사이의 힘인 반 데르 발스 인력 때문에 양자점이 뭉쳐 덩어리를 이룰 수 있기 때문이다. 이런 경우에는 이차원 영상을 삼차원으로 바꾸어서 입자가 뭉친 정도를 파악했다. 예를 들어, 그림 6은 6번 시료의 이미지를 3차원으로 나타낸 것이다. 양자점이 위로 길쭉하게 솟아 있는 모습인 것은 높이 축의 스케일이 nm인 반면 x, y 축의 스케일

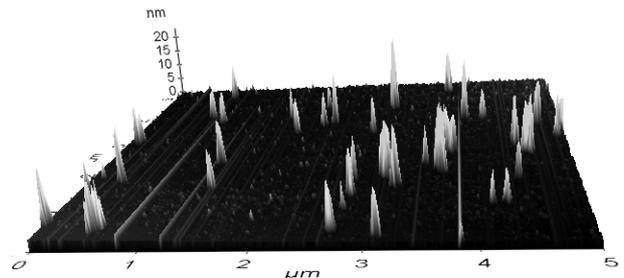


그림 6. 6번 시료의 3차원 AFM 이미지. 양자점은 뽕족하지 않지만 z축과 x축의 스케일이 달라서 그렇게 보인다.

은 μm 이기 때문인데, 보통 양자점은 등근 구로 가정한다. 표 1은 입자들의 최고점 높이를 평균하여 결정한 양자점의 직경이며 시료 번호가 커질수록 크기가 증가한다.

CdTe의 발광 파장 분석

한 종류의 양자점이 단일 파장의 빛을 내지는 않는다. 양자점의 크기가 가우스 분포를 이루기 때문이다. 표 2는 시료 번호에 따라 발광 스펙트럼에서 얻은 발광 파장을 나타낸다. 이 실험에서 발광 스펙트럼 강도의 절대값은 중요하지 않으므로 편의상 6개의 발광 스펙트럼의 강도를 정규화하면 그림 7과 같이 발광 파장의 변화를 한눈에 알 수 있다. 표 1에서 3번과 4번 시료의 직경 차이는 0.326 nm로 대단히 작으며, 따라서 이들 사이의 발광 파장 차이도 가장 작음을 그림 7에서 확인할 수 있다.

표 2. 형광 분광계로 얻은 스펙트럼을 분석한 발광 파장.

시료번호	1	2	3	4	5	6
발광파장(nm)	546.17	576.63	632.48	643.76	691.27	736.5

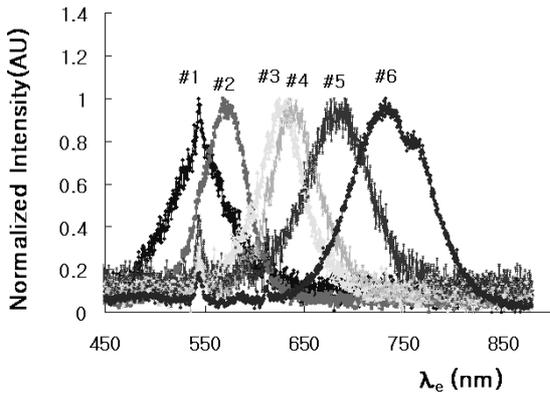


그림 7. 6개의 크기가 다른 CdTe 양자점이 방출하는 빛의 발광 스펙트럼.

CdTe 양자점의 크기와 발광 파장의 관계

그림 8은 표 1과 2에서 얻은 값을 바탕으로 양자점의 크기와 발광 파장 사이의 상관관계를 그래프로 나타낸 것으로, 양자점이 커질수록 발광 파장이 증가되는 것을 보여준다. 양자점이 클수록 에너지 준위 차이가 작아져서 방출되는 에너지가 감소되는 양자 크기 효과를 확인할 수 있다.

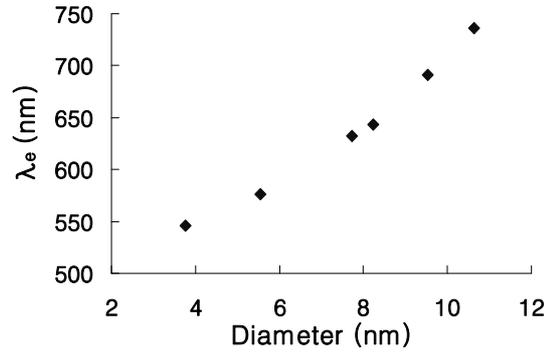


그림 8. AFM 과 형광 측정 장치로 구한 CdTe 양자점의 크기와 발광파장의 관계.

투과 전자 현미경으로 관찰한 양자점의 크기 측정

투과 전자 현미경(transmission electron microscope, TEM)은 고전압으로 가속된 전자를 시료에 직접 입사시켜 투과된 전자로 영상을 얻기 때문에 시료를 아주 얇게 만들어야 하며, 가격이 비싸 접근이 어려운 단점이 있다. 그러나 TEM은 0.2nm 이상의 해상도를 제공하므로 양자점을 구성하는 원자까지 관찰할 수 있어 양자점 관찰에 가장 적합한 장비이다(Yu et al., 2003). 때문에 쉽게 사용할 수 있는 AFM으로 얻은 영상을 투과 전자 현미경 영상과 비교하여 AFM 영상 분석의 기준, 다시 말해 측적을 정할 수 있다. 그림 9는 TEM으로 얻은 CdTe 양자점의 영상인데, 작은 점들은 CdTe 원자들이다. 한 시료 마다 5~6회 영상을 얻어 식별이 가능한 부분을 모두 변량화하여 평균하

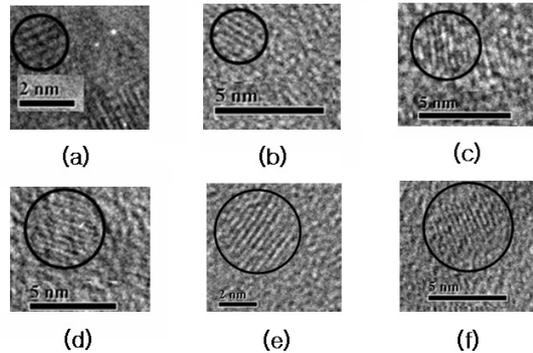


그림 9. CdTe 양자점의 TEM 이미지. (a)-(f)는 차례대로 1~6번의 시료를 나타낸다.

표 3. TEM으로 측정한 CdTe 양자점의 직경.

시료번호	1	2	3	4	5	6
직경(nm)	1.69	2.72	3.62	3.82	4.10	4.65

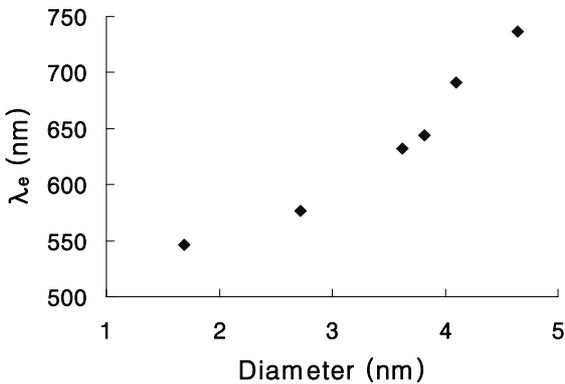


그림 10. TEM과 형광 측정 장치를 이용한 양자점의 크기와 발광 파장의 상관관계.

는 방법으로 양자점의 크기를 결정하였다. 이렇게 결정된 값은 표 3에 나타났다. 그림 10은 TEM으로 결정된 양자점의 크기와 앞에서 얻은 발광 파장의 상관관계를 보여준다.

AFM으로 얻은 양자점 크기의 신뢰성

앞에서 설명한 바와 같이 AFM으로 양자점의 크기를 정확히 측정하는 데는 한계가 있다. 따라서 TEM을 이용한 실험 결과와 비교하는 과정을 거쳤으며 양자점의 직경과 발광파장의 상관관계가 모두 비례관계로 나타났다. 그러나 측정된 양자점 직경의 규모는 AFM으로 측정된 경우가 현저히 크다. 따라서 두 경우 공통적으로 산출되는 경향만으로 AFM을 이용한 실험 결과를 신뢰하는 것은 무리가 있다. 그림 11은 AFM과 TEM을 이용한 결과를 함께 나타낸 것이며 AFM으로 측정된 양자점 지름의 최대값이 10.638 nm 임을 감안하여 11을 1로, 같은 이유로 TEM을 이용한 경우(최대값이 4.646 nm)는 5를 1로 보아 정규

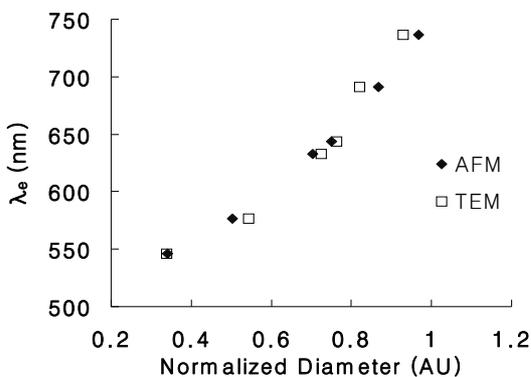


그림 11. AFM과 TEM으로 측정된 정규화된 양자점 크기의 비교.

화한 데이터를 사용하였다. 두 가지 경우를 비교해 보면 비례 관계가 공통적으로 성립하며 6개의 점이 거의 같은 지점에 나타남을 알 수 있다. 따라서 AFM은 양자점의 정확한 크기 측정에는 한계가 있으나 발광 파장과 상관을 파악하는 경우에는 충분한 신뢰도를 가진다고 할 수 있다.

요 약

이 실험은 AFM과 형광 분광계를 이용하여 양자점에서 나타나는 양자 크기 효과를 검증하는 과정을 통해 고등학교 교사와 학생들이 나노 과학을 체험할 수 있도록 구성되었다. 주사 프로브 현미경과 같은 나노 현미경으로 물체를 관찰하여 육안으로 보이지 않던 구조를 확인하는 것만으로는 학생들로 하여금 나노 과학을 이해하도록 하는데 도움을 줄 수 없다. 나노 과학은 단순히 ‘작은 세계를 다루는 학문’이 아니기 때문이다. 따라서 체계화된 일련의 실험 과정이 필요한데, 양자점은 나노 입자의 특성을 효과적으로 보여줄 수 있는 좋은 소재이다.

AFM 이미지에서 입자 하나하나의 최고점 높이를 측정하는 것은 분산 용액의 농도가 높을수록 양자점의 수가 많아져 어려워지므로 편이상 분산 용액 일부를 덜어 농도를 묽혀 사용할 수 있다. 실제로 증류수 10 ml에 양자점 0.5 mg을 분산하여 사용한 경우에도 통계적으로 유의미한 결과를 얻을 수 있다. 그러나 입자 수가 너무 적으면 통계적 의미가 없어지므로 주의해야 한다. TEM 실험은 AFM의 결과와 비교하여 신뢰도를 판단하기 위한 것이므로 생략해도 된다.

증류수에 분산된 6종의 CdTe 양자점은 쉽게 구할 수 있는 일반 자외선 광원 하에서도 확연히 구분된 색깔의 형광을 낸다. 실험하기 전에 교실의 불을 끄고 양자점이 방출하는 형광을 보여주고 시료들이 모두 동일한 물질임을 설명하면 학생들의 동기 유발에 도움이 될 것이다.

Abstract

Contrary to bulk material, quantum effect founded in extremely small crystals(range of nanometer). This feature comes from energy structure of nano-sized material(nano particle) has intermediated character between isolated atom and bulk material. Particularly, quantum effect is shown well in nano particles composed of semiconductor material. Quantum dot is a spherical-shaped crystal which consists of several dozens or

hundreds semiconductor particles. And its well-defined optical feature reflects quantum size effect. We measure diameter and emission wavelength of CdTe quantum dot to correlate these two quantities and compare with theoretical result. Diameter and emission wavelength of CdTe quantum dot are measured by scanning probe microscope and photoluminescence measurement system. Scanning probe microscope is generally available for visualizing nano particle. Photoluminescence measurement system is an equipment for measuring emission wavelength, which is widely used in science high school and university laboratory. This Paper describes organized process of theoretical approach and experiment about photoluminescence of CdTe quantum dot.

Key Words : nano particle, quantum dot, scanning probe microscope, photoluminescence-measurement system

참고문헌

- Knoss RW (2009) Quantum dots. Nova Science Publishers.
- Masumoto Y and Sonobe K (1997) Size dependent energy levels of CdTe quantum dots. Phys. Rev. B 56.
- Paul Harrison (2005) Quantum wells, wires and dots. John Wiley & Sons.
- Redígolo ML, Barbosa LC, de Paula AM and Brito Cruz CH (2003) Optical Absorption and Transmission Electron Microscopy Analysis of CdTe Quantum Dots Size Distribution. Microsc Microanal 9(Suppl 2).
- Yu WW, Qu L, Guo W and Peng X (2003) Experimental Determination of the Extinction Coefficient of CdTe, CdSe, and CdS Nanocrystals. Chem. Mater. 15: 2854-2860.