

# QD-LCD 기술 개발 현황과 과제

강연수, 이종수(에너지시스템공학전공, 대구경북과학기술원)

## 1. 서론

21세기 들어서면서 IT(정보기술), BT(생명공학기술), NT(나노기술), ET(신에너지, 환경기술) 등이 신산업혁명을 이끌어갈 핵심 기술들로 부각되면서 각 기술들에 대한 투자 및 연구개발로 눈부신 발전을 이루고 있다. 그 가운데 IT기술로 대표되는 디스플레이 기술은 삼성전자와 삼성디스플레이, 엘지전자 같은 국내 대기업을 필두로 전 세계 시장을 주도하고 있으며 최근에는 UHD급 해상도를 가지는 디스플레이를 내놓고 있다. UHD급 해상도의 디스플레이로는 OLED(Organic Light Emitting Diode)와 QD-LCD(Quantum Dot Liquid Crystal Display) 기술이 대표적이며 QD-LCD의 경우 NT 및 IT의 융합기술로 양자점(Quantum dot)이라는 수 나노미터(주로 2nm~10nm)의 반도체 결정이 가지는 특별한 양자역학적 광학 특성을 기존 LCD 기술에 접목하여 디스플레이의 색재현율을 기존에 비해 50% 정도 더 끌어올림으로써 차세대 디스플레이로 각광받는 OLED 기술과 경쟁하고 있다.

본 논문에서는 QD-LCD의 필수 소재기술인 양자점에 대한 소개와 양자점 디스플레이의 분류 및 종류에 대해 다루고 경쟁 기술인 OLED 및 QLED와 비교 분석하여 QD-LCD 기술의 현주소와 향후 기술 발전 과제를 다룬다.

## 2. 양자점

### 2.1. 양자점의 합성

양자점은 1980년대 러시아 물리학자인 알렉세이 아키모프(Alexei Ekimov)박사가 바빌로프 국립광학연구소(Vavilov State Optical Institute)에서 반도체를 도핑한 유리의 색변화를 연구하다가 유리 안에서 나노미터 크기의 결정을 발견함으로써 양자점이 세상에 알려지게 된다.<sup>[1]</sup> 비슷한 시기인 1984년 벨 연구소에서 CdS 콜로이드에 대해 연구하던 루이스 브루스(Louis Brus)박사에 의해 반도체 나노결정의 크기와 밴드갭 사이의 관계를 구체 속의 입자 모델(particle in a sphere model approximation)을 통해 밝힘으로써 체계적인 양자점에 대한 연구가 가능하게 된다.<sup>[2]</sup>

양자점이란 지름이 수십나노미터 이하의 반도체 결정으로 각 반도체 물질이 가지는 엑시톤 보어 반지름(Exciton bohr radius) 이하의 크기를 가지게 되면 양자역학적인 현상인 양자구속 효과(Quantum confinement effect)가 발생하여 양자점의 크기에 따른 흡수 및 발광 스펙트럼이 변하는 독특한 광학적 특성을 보이게 되는데 양자점의 크기가 작아질수록 스펙트럼이 청색 이동(Blue shift)하는 경향이 나타난다. 이러한 양자점은 Top-down방식이나 Bottom-up방식으로 합성이 가능한데 Top-down방식으로는 MBE(Molecular beam epitaxy), Ion implantation, E-beam lithography 그리고 X-ray

lithography 등의 방법이 활용되고 있으며 Bottom-up 방식은 Wet-chemical과 Vapor-phase 방식으로 구분되는데 디스플레이에 이용되는 양자점은 주로 Wet-chemical 방식으로 화학적 환원을 통한 용액의 자가조립으로 콜로이달 양자점을 합성하여 활용하고 있다.

구체적인 콜로이달 양자점 합성 방식으로 핫 인젝션(Hot-Injection), 논인젝션 히팅(Noninjection heat-up) 그리고 유동식 반응기(Flow reactor) 합성 방법으로 구분할 수 있다.<sup>[3]</sup> 핫 인젝션 방식은 양자점의 표면 리간드를 포함하는 뜨거운 용액에 상대적으로 차가운 전구체를 빠르게 주사함으로써 초기에 유도된 과포화 상태로 핵생성이 이루어지고 바로 이어서 차가운 전구체로 인해 떨어진 용액의 온도는 핵생성(Nucleation)을 멈추게 하고 다음 단계인 성장(Growth)단계를 시작함으로써 핵생성과 성장 단계를 분리시킴으로써 균일한 양자점을 합성할 수 있게 한다. 균일한 양자점 합성을 하는데 있어서 Hot-Injection 방식이 가장 유용한 방법으로 알려져 있으며 오랫동안 많은 양자점 합성에 이용되어 왔지만 합성의 부피를 증가시킬 때(Scale up) 시약의 혼합 시간, 반응 냉각 시간, 인젝션 할 수 있는 전구체의 부피 제한성 그리고 합성의 재현성에 제약이 생기므로 합성의 스케일 업에

는 적합하지 않다. 이러한 단점을 극복할 수 있는 수단으로 Noninjection heat-up 방식이 있으며 이 방식은 합성에 필요한 모든 시약을 반응조(Reaction vessel)에 넣고 혼합하여 온도를 올려서 핵생성과 성장을 시키는 방법으로 스케일업에 유용한 합성 방식으로 알려져 있다.<sup>[4]</sup> 위에 소개한 두 가지 배치(Batch) 방식과 달리 연속적인 유동식 반응기 합성 방식은 단순성과 스케일업, 합성의 자동화 측면에서 장점이 있고 온도를 두 단계로 나눠서 조절함으로써 핵생성과 성장을 분리시켜 양자점의 균일도를 올릴 수 있다.

## 2.2. 디스플레이에 응용 가능한 양자점 분류

디스플레이는 인간의 시야를 자극하는 정보를 지닌 경계(Interfaces)라고 정의 내려지며 이러한 정의 관점에서 디스플레이는 가시광선 영역의 파장대로 제한할 수 있다. 많은 종류의 양자점이 존재하며 이 중에 가시광선 영역의 파장을 내는 양자점 위주로 현재 양자점 디스플레이에 사용되고 있고 앞으로 활용 가능한 양자점 종류를 살펴보고자 한다.

### 2.2.1. II-VI계 양자점

대표적인 II-VI계 양자점으로 Cd계열의 CdS, CdSe, CdTe이 있으며 양자점 초창기 연구에서부터 오랫동안 합성되어지고 가장 활발히 이론적, 실험적으로 개발된 양자점이다. [그림 2]에서 보는 바와 같이 Cd계열의 양자점으로 모든 가시광선 영역 스펙트럼을 표현할 수 있으며 현재까지 디스플레이용 양자점으로써 가장 좋은 특성을 보인다고 알려져 있다. 최근 보고된 논문들을 보면 광 발광(Photoluminescence)의 양자효율이 거의 100%에 이르며 발광 스펙트럼의 반가폭은 약 20nm 수준으로 매우 좋은 색순도를 가지며 수분 및 열적, 광적 안정성 측면에서도 많은 개선이 이루어져 있는 것으로 보고되고 있다.<sup>[5,6]</sup> 하지만 유럽연합의 특정유해물질 규제(RoHS, Restriction of Hazardous Substances)지침으로 인해 적극적으로 활용되기 어려운 측면이 있어서 현재 비카드뮴계 양자점 소재 개발로 관심이 집중되고 있다.

비카드뮴 계열의 II-VI계 양자점으로 자외선 영역 및 청색 영역을 표현할 수 있는 ZnSe은 광 발광 스펙

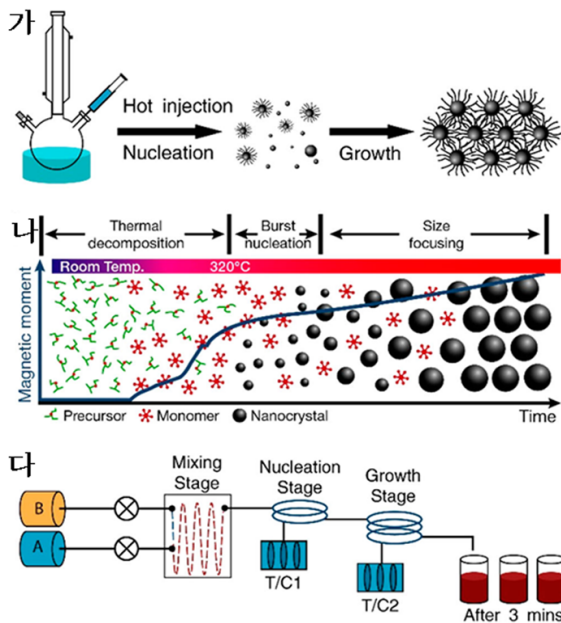


그림 1. 여러 종류의 양자점 합성 방법.<sup>[3]</sup> (가)핫 인젝션 합성 (나)논인젝션 히팅 합성 (다)유동 반응기 합성

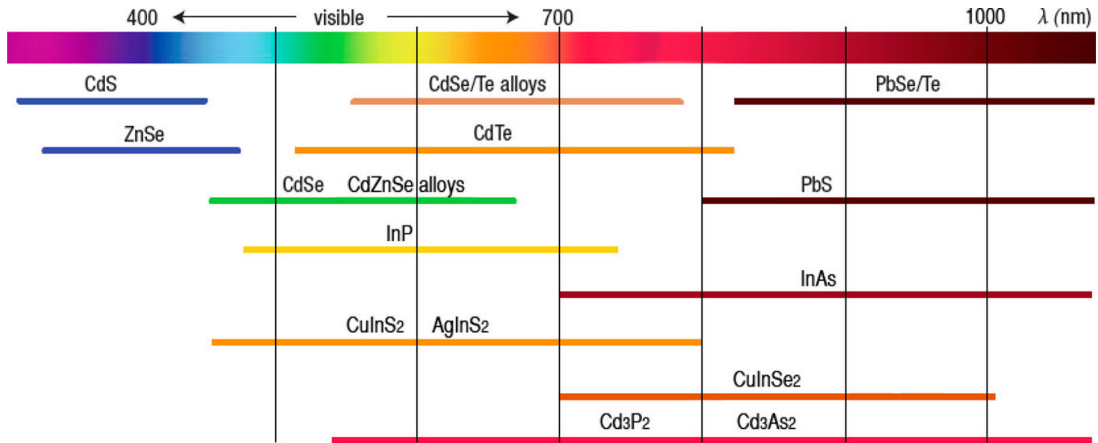


그림 2. 양자점 종류별 발광 스펙트럼<sup>[14]</sup>

트럼의 반가폭이 약 13nm 정도이고 양자효율은 80% 이상으로 비카드뮴계열 중 청색 스펙트럼을 낼 수 있는 대표적인 양자점이다.<sup>[7]</sup> 또한 Mn이나 Cu 같은 천이금속을 도핑함으로써 녹색에서 적색까지 다양한 가시광선 영역의 스펙트럼을 표현할 수 있다는 장점을 가졌다.<sup>[8,9]</sup>

### 2.2.2. III-V계 양자점

III-V계 양자점은 InP가 가장 활발히 연구되고 개발되었으며 현재 비카드뮴계 양자점으로 가장 주목받고 있는 소재로 모든 가시광선 영역을 표현할 수 있는 것으로 보고되고 있으며 양자효율은 보통 60%에서 최고 90%, 반가폭은 40nm-50nm로 디스플레이에 적용하기에 적합한 광학적 특성을 보인다.<sup>[10]</sup> 현재 삼성전자의 QD-LCD에 쓰이는 비카드뮴 양자점은 InP를 활용하고 있는 것으로 알려져 있으며 앞으로 특성 개선 및 활용도가 더욱 높아질 것으로 예상된다.

### 2.2.3. I-III-VI<sub>2</sub>계 양자점

3원소 화합물 중에서는 Chalcopyrite 구조의 CuInS<sub>2</sub>가 가장 주목받고 있으며 보통 녹색영역에서 적색영역까지 표현이 가능하다.<sup>[11]</sup> 양자효율은 70% 이상이지만 발광 스펙트럼의 반가폭이 약 100nm로 색순도 측면에서 다른 경쟁 양자점 소재들에 비해 특성이 떨어진다.

이러한 넓은 반가폭을 이용하여 조명용 백색 LED (WLED)에 대한 응용 쪽으로 개발되고 있으며 같은 구조의 AgInS<sub>2</sub>나 CuGaS 등도 같이 연구 개발되고 있는 중이다.<sup>[12,13]</sup>

## 3. 양자점 디스플레이의 분류

양자점 디스플레이 기술은 양자점의 발광특성을 활용하여 디스플레이의 성능을 향상시킨 기술들을 총칭하는 것으로 기존 평판 LCD 구조에 양자점의 광 발광 (Photoluminescence)을 이용하여 색재현성을 높인 QD-LCD 기술과 양자점의 전계발광(Electroluminescence) 특성을 활용하는 QLED 기술이 대표적이다. BLU (Backlight unit)이 필요하지 않는 QLED 기술은 1982

표 1. LCD, QD-LCD TV, OLED TV 특성 비교

구분	LCD TV	QD-LCD TV	OLED TV	
화질	응답속도	1~5ms	1~5ms	0.0001ms 이하
	명암비	5000:1	5000:1	무한대
	시야각 (휘도/명암)	50°/20°	50°/20°	Free
	색재현력	70%	100~110%	100%
구현방식	LCD패널 뒤의 조명을 광원으로 사용	LCD패널에 쿼터웨이브 필름을 붙여 색재현성 높임	자체 발광 물질로 색상 표시	
장점	•제조비용 저렴 •안정된 공정 및 수율	•높은 색 재현율 •OLED보다 제조비용 낮음	•얇은 두께 •높은 색 재현율 •뛰어난 명암비 •Flexible 응용 가능	
단점	•낮은 색 재현율 •두꺼운 두께 •Flexible 응용 어려움	•LCD보다 높은 제조비용 •OLED대비 명암비 떨어짐 •중금속(Cd)사용	•높은 제조비용과 소비전력	

자료: KB금융지주 경영연구소

년 칭 탕(C. W Tang) 박사에 의해 자체발광 디스플레이인 OLED 기술이 미국 특허로 처음 소개된 것에 비해 12년 늦은 1994년 A. P. Allvisatos 그룹에서 CdSe 양자점을 이용한 전계방출 소자를 처음으로 제작하여 논문에 투고하게 된다.<sup>[15]</sup> QLED 기술은 연구 개발되지 오래되지 않았고 비카드뮴계를 이용할 경우 외부양자효율(External Quantum Efficiency)이 OLED에 비해 아직 많이 낮아서 상용화까지 시간이 더 필요할 것으로 생각되지만 OLED와 다르게 값이 싸고 안정성이 우수한 무기물을 발광층으로 사용하고 번인(Burn-in) 현상이 발생하지 않으며 양자점의 발광 스펙트럼 색순도가 높고 투명하고 플렉시블한 디스플레이 구현이 가능하여 차세대 디스플레이로 주목받고 있다.

### 3.1. QD-LCD 분류

#### 3.1.1. LCD에서의 양자점 활용

기존 LCD에 양자점을 적용하는 기술은 크게 양자점 필름을 백라이트 유닛 위에 삽입하는 방식[그림 3]의 (가)와 기존의 컬러필터 대신 양자점 컬러필터를 활용하는 방식 [그림 3]의 (나)로 나눌 수 있다. 현재 상용화된 방식은 QDEF(Quantum Dot Enhancement Film)으로 알려진 양자점 필름을 백라이트 유닛 위에 넣어서 색재현율을 기존에 비해 50% 가량 상승시켜 UHD급 해상도(3840×2160)를 구현하는 방식이다. 백색 LED BLU를 사용하는 기존 방식의 경우 보통 색순도가 높은 청색 LED 위에 발광 스펙트럼이 넓은 YAG:Ce 형광체를 올려서 백색을 구현하며 이러한 백색광이 컬러필터를 통과해서 RGB를 만들게 된다.(그림 5) 이러한 경우 적색과 녹색의 발광 파장이 넓어서 색재현율이 NTSC (National Television System Committee) 규격 기준 70%로 표현되는데 반해 QDEF을 적용한 BLU를 이용한 LCD의 경우 색재현성은 NTSC 기준 100% 이상으로 상승하여 다양한 색 표현이 가능해진다. 2016년 현재 국내의 삼성전자, LG디스플레이 및 중국의 TCL, 하이센스 등 디스플레이 업체에서 양자점 필름을 이용해서 4K UHD TV를 제품으로 내놓으며 OLED TV와 경쟁 중이다. OLED TV에 비해 가격은 낮지만 비슷하거나 높은 색재현성, 긴 수명을 장점으로 디스플레이 시장

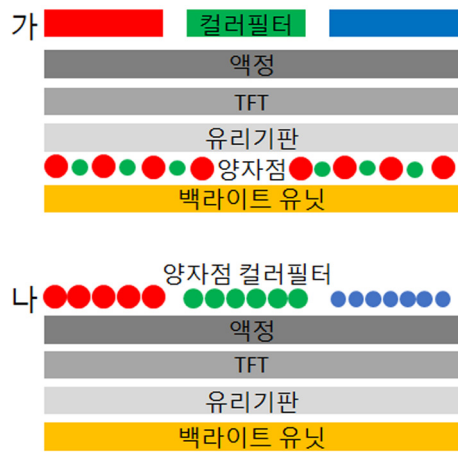


그림 3. LCD에서 양자점 활용

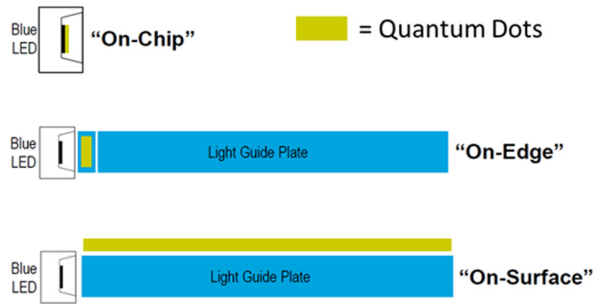


그림 4. BLU에 양자점을 적용하는 방식(3M Electronics & Energy Business Group, RoHS Exemption Request 2013-5 Meeting 자료)

을 공략하고 있지만 LCD는 투명하고 플렉시블한 차세대 디스플레이 특성을 이루는 데 많은 제한이 있다는 점에서 향후 디스플레이 시장의 주도권은 가격이 낮아지는 OLED 쪽이 잡을 가능성이 있다.

양자점을 컬러필터로 활용하는 방법 또한 LCD의 색순도를 높여 색재현율을 상승 시킬 수 있는 방법으로 알려져 디스플레이 업체들의 특허 출원 및 등록이 이루어져 있지만 현재까진 상용화되지 못한 방식이다.

#### 3.1.2. 양자점을 이용한 BLU 유형

양자점을 BLU에 적용하는 방식은 크게 On-Chip 타입, On-Edge 타입, On-Surface 타입으로 구별된다. (그림 4) On-Chip 방식은 LED 패키지에 양자점을 직접 실장하는 방법으로 간단한 구조이지만 LED 발열에 의해 양자점의 열적 광학적 열화 문제가 심하다. 이러한 문제를 해결하기 위해 양자점에 실리카 모노리스를 도

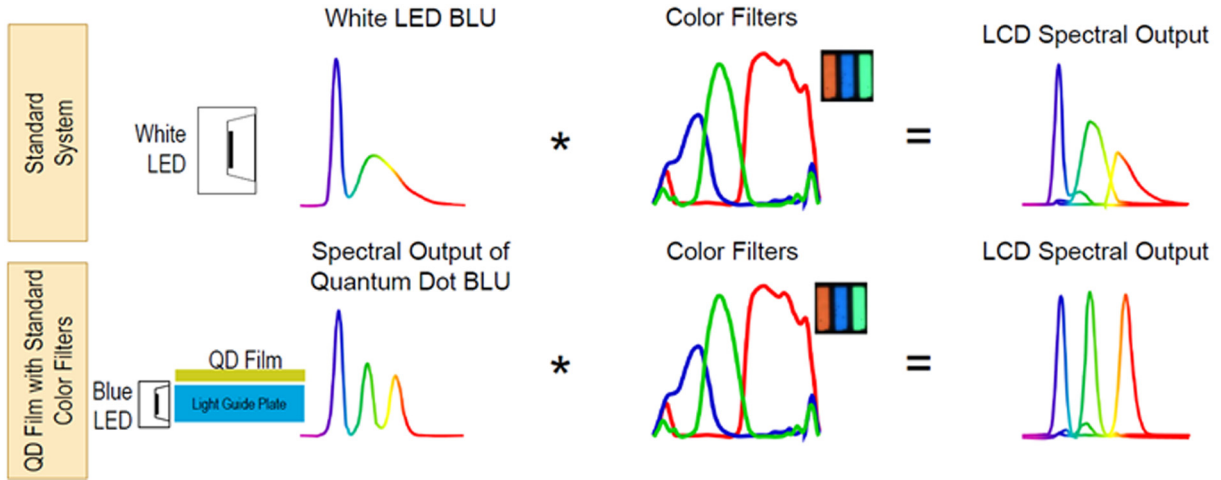


그림 5. 기존 BLU와 양자점 필름을 적용한 BLU에 따른 LCD의 스펙트럼 비교(3M Electronics & Energy Business Group, RoHS Exemption Request 2013-5 Meeting 자료)

입하는 방법이나 양자점-셀룰로스 복합재료 방식 등의 여러 연구들이 이루어지고 있다. On-Edge 타입은 양자점 소모량이 적어서 저렴하게 TV에 적용할 수 있어서 미국 QD Vision과 일본 Sony가 TV로 출시 한 적이 있었다. On-Surface 타입은 최근 4K UHD QD-LCD TV에 많이 쓰이는 방식으로 양자점을 수지에 분산시켜 필름을 만들고 이를 배리어 필름으로 감싸서 청색 BLU 모듈에 올리는 방식이다. 기존 LCD 모듈 공정과 큰 차이가 없고 얇은 필름 형태라 소형 LCD 패널에서 대형 LCD 패널까지 용이하게 적용 가능하며 배리어 필름에 의해 양자점의 열화를 억제 시킬 수 있는 장점이 있다.

#### 4. 기술 개발 동향

현재 양자점 디스플레이 산업은 크게 양자점 소재 생산, 광학필름 생산, 디스플레이 생산하는 3단계 산업 구조로 나누어져 있으며 양자점 소재 개발은 비카드뮴계 특히 III-V 계 양자점인 InP 계열로 연구개발이 집중될 것으로 보인다. 소재 생산업체로는 국내기업인 한솔케미칼, 나노스퀘어와 해외기업인 Nanosys, Nanoco가 있으며 이들 기업들과 삼성종합기술원 및 여러 대학교에서 디스플레이 응용에 필요한 양자점의 광학적 특성인 좁은 발광 스펙트럼 및 높은 양자효율 그리고 수분 및 열적, 광학적 안정성에 대한 연구가 계속적으로 이루어질 것으로 보인다. 이러한 양자점의 광학적 특성은 양자

점 자체의 반도체 물질이 가지는 밴드갭 성질 및 양자점의 표면 상태가 주요 결정인자이므로 앞으로 새로운 종류의 가시광선 영역의 발광 특성을 보이는 반도체 물질에 대한 탐구와 기존의 연구 중인 양자점들의 표면 특성 개선을 위주로 양자점 연구가 이루어 질 것이다. 광학필름 생산업체로는 국내의 엘엠에스, 미래나노텍, LG화학 및 아이컴포넌트 같은 회사들과 해외의 3M, QD Vision 등의 회사들이 있으며 이들 회사들은 양자점과 고분자 수지를 혼합하여 균일하고 얇은 필름을 만들기 위한 연구를 할 것으로 보이며 이러한 수지 혼합에서는 양자점의 표면 리간드 특성과 고분자 수지의 종류가 중요하며 이런 필름을 외부 환경에서 보호해주는 배리어 필름에 대한 기술 위주로 개발될 것으로 보인다. 디스플레이를 생산하는 업체로는 국내의 삼성전자, LG전자 및 해외의 Sony, Amazon, Hisense 등의 업체가 있으며 이들 회사는 양자점 광학필름을 LED BLU에 적용하여 디스플레이를 생산한다. 앞으로 OLED의 생산 단가가 낮아져 가격 경쟁력이 올라가면 QD-LCD 기술로는 앞으로 다가올 빠른 응답속도의 투명/플렉시블 가능한 디스플레이에 대한 대응이 힘들 것으로 예상되기 때문에 양자점 디스플레이는 전계발광 형의 자체 발광 QLED 기술로 나아갈 것으로 보여진다. OLED에 비해 무기물인 양자점이 가지는 가격 경쟁력, 열적 광학적 안정성과 높은 색순도의 발광 스펙트럼에 더해 투명 및 플렉시블 가능한 QLED 기술들이 나타날 것으로 기대된다.

## ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by the DGIST R&D Program of the Ministry of Science (16-BD-01) and the Ministry of Education (MOE) and National Research Foundation of Korea (NRF) through the Human Resource Training Project for Regional Innovation (No. 2015035858).

## 참고문헌

[ 1 ] Ekimov, A. I., Efros, Al. L. and Onushchenko, A. A, *Solid State Commun.* **56**, 921 (1985).  
 [ 2 ] Brus, L. E, *J. Chem. Phys.* **80**, 4403 (1984).  
 [ 3 ] Graham H. Carey, Ahmed L. Abdelhady, Zhijun Ning, Susanna M. Thon, Osman M. Bakr and Edward H. Sargent, *Chem. Rev.* **115**, 12732 (2015).  
 [ 4 ] Joel van Embden, Anthony S. R. Chesman and Jacek J. Jasieniak, *Chem. Mater.* **27**, 2246 (2015)  
 [ 5 ] Shinae Jun and Eunjoo Jang, *Angew. Chem.* **125**, 707 (2013).  
 [ 6 ] Ou Chen, Jing Zhao, Vikash P. Chauhan, Jian Cui, Cliff Wong, Daniel K.Harris, He Wei, Hee-Sun Han, Dai Fukumura, Rakesh K. Jain and Mounqi G. Bawendi, *Nature Mat.* **12**, 445 (2013).  
 [ 7 ] Aqiang Wang, Huaibin Shen, Shuaipu Zang, Qingli Lin, Hongzhe Wang, Lei Qian, Jinzhong Niu and Lin Song Li, *Nanoscale*, **7**, 2951 (2015).  
 [ 8 ] Jason K. Cooper, Sheraz Gul, Sarah A. Lindley, Junko Yano and Jin Z. Zhang, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **7**, 10055 (2015).  
 [ 9 ] Shinjita Acharya, D. D. Sarma, Nikhil R. Jana and Narayan Pradhan, *J. Phys. Chem. Lett.* **1**, 485 (2010).

[10] Joong Pill Park, Jae-Joon Lee and Sang-Wook Kim, *Scientific Reports*, **6**, 30094 (2016).  
 [11] Woo-Seuk Song and Heesung Yang, *Chem. Mater.* **24**, 1961 (2012).  
 [12] Hyunmi Doh, Sekyu Hwang and Sungjee Kim, *Chem. Mater.* **28**, 8123 (2016).  
 [13] Dae-Yeon Jo, Daekyoung Kim, Jong-Hoon Kim, Heeyeop Chae, Hyo Jin Seo, Young Rag Do and Heesun Yang, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **8**, 12291 (2016).  
 [14] Peter Reiss, Marie Carriere, Christophe Lincheneau, Louis Vaure and Sudarsan Tamang, *Chem. Rev.* **116**, 10731, (2016).  
 [15] V. L. COLVIN, M. C. SCHLAMP and A. P. ALIVISATOS, *Nature*, **370**, 354 (1994).

## 저 자 약 력

### 강 연 수



- 현재 : 대구경북과학기술원 에너지시스템 공학전공 석박 통합과정
- 2013년 : 금오공대 신소재공학부 학사
- 관심분야 : 나노입자 합성 및 LED응용

### 이 종 수



- 현재 : 대구경북과학기술원 에너지시스템 공학전공, 부교수 / 시카고대학, 화학과, 전문연구원
- 관심분야 : 나노입자 합성 및 디스플레이, LED태양전지 응용