

디스플레이 고색 재현 형광 소재 기술

글_ 최성우, 김성민, 오정록, 윤철수
삼성전자

Abstract

Recently, display technology has been focused in regard with with color reproduction, contrast ratio, image resolution and color bit. Among these technologies, the color reproducibility of White, Red, Green, and Blue is associated with the TV platform and is expressed as a major technology. Major TV platforms are divided into three categories since 2015, including LCD-based phosphor covered LED BLU technology, QD sheet technology using nano-sized quantum dots, and OLED technology. In this paper, we describe the color reproducibility definition and background, luminescent materials with wide color gamut, color reproducibility of TV display performance, and discuss about next luminescent materials.

Keywords: Display, Color gamut, Phosphor, Quantum dots, OLED

1. 서론

최근 TV 디스플레이의 경우, 영상 관련 산업 발전과 더불어 주요 전시회(CES, IFA 등)에서 큰 관심을 받고 있으며 성능(pixel, contrast ratio, color gamut 등)과 디자인(두께, 크기, 굴곡)측면이 강조되고 있다. 성능의 경우, UHD(Ultra High Definition) TV Alliance 규격에서 요구하는 부분과 밀접하게 연관되어 있는데 색 재현성(Color reproducibility, palette), 명암비(Contrast ratio, HDR: High Dynamic Range), 이미지 해상도(Image resolution, pixel 4K, 8K), 그리고 color bit depth와 같은 4개 요소가 TV display의 기술력으로 표현되고 있다. TV platform과 성능에 관련된 기술 중 주요 요소인 빛(W/R/G/B)을 구현하는 기술은

2015년 이후 3가지 platform으로 나누어 볼 수 있다. 첫 번째로는 LCD 기반의 LED BLU(Back Lighting Unit) 기술, 두 번째로는 나노 크기(nano-meter)의 Quantum dot을 이용한 QD sheet/film 기술, 마지막으로 OLED를 이용한 TV 기술이 최근 TV를 구현하는 대표적인 방식이다. 현재까지 위 기술들을 사용하여 제품화되어 있으며 세가지 기술 모두 white spectrum 발광을 color filter로 색 영역을 확대하는 방식이다. 그렇기 때문에 white 발광을 구현하는데 사용되는 spectrum 기술이 색 재현성을 표현하는 부분에 있어 각 platform 별로 주요 비교 기술이 될 수 있다. 본 글에서는 이와 관련된 색 재현성 정의와 배경, 고색재현 형광 소재 기술, TV display 색 재현 성능을 설명하고 향후 형광 소재에 대해 논의하고자 한다.

2. 본론

2.1 색 재현성 정의와 배경

주요 색 영역: NTSC, sRGB, Adobe RGB, DCI, REC. 2020

흑백 TV에서 컬러 TV로 넘어오면서 TV 색 영역의 표현 기술이 TV 성능의 중요한 경쟁 기술 축으로 여겨지고 있다. 일반적인 색 영역은 특정한 색의 부분합이라고 할 수 있으며 아날로그 사진에서부터 TV, 휴대폰 등의 디지털 디바이스에 이르기까지 색 정보를 포함하는 콘텐츠의 제작과 배포 과정에는 약속된 색 영역이 필요하다. 색 영역은 색 개머트(color gamut)이라고 표현하기도 하는데 디바이스에서 구현 가능한 색상을 나타내는 성능 지표의 기준으로 표준 색 영역의 일치율, 면적율로 표현한다. 즉 특정 색 영역의 일치율이 100%라고 하는 것은 특정 색 영역의 삼각형 내부에 포함된 모든 색상을 표현할 수 있다는 의미이다. 이러한 색 영역 기준으로 콘텐츠 배포 과정과 디바이스 구현 과정에서 특정 색 영역을 표현 할 수 있는 정도를 색 재현성이라고 한다. 특정 디바이스의 색을 표현할 수 있는 영역이 넓을수록 다양한 색상과 정확한 색상을 표현하는데 유리하며 우수한 색 공간을 보유한 디스플레이라고 할 수 있다. 이 때 색 영역에 대한 일치율과 면적율의 절대값 외에도 각 주요 색(R/G/B)에 대한 방향도 고려해야 한다. 예를 들어 blue 영역으로 치우친 색 영역과 red 영역으로 치우친 색 영역이 일치율, 면적율이 동일하더라도 보이는 색감, 색 재현성이 실제로 보이기에 차이는 난다.

1950대 최초의 컬러 TV 가 보급되기 시작하자 1953년 미국 FCC(Federal Communications Commission)에서 최초의 표준으로 NTSC (National Television System Committee) 색 영역을 정의하였다. NTSC 색 영역은 2018년 현재도 미연방 규제 목록에¹⁾ 기재되어 있다. 이와 같이 규정된 NTSC 색 영역은 당시 시점의 CRT TV 가 구현할 수 있는 색 표현 능력에 맞춰 설계 되었다.

1990대에 들어서면서 PDP, LCD와 같은 평판 디스플레이 기술이 발전하면서 ITU-R (International Telecommunication Union Radio communication)에

서 BT, 709 (Broadcasting service Television)으로 명명된 HDTV의 표준을 규정하였다.²⁾ 1996년에 미국 기업 Hewlett-Packard Company와 Microsoft Corporation 이 협력하여 만든 컴퓨터 환경에서의 색 영역 표준을 sRGB(standard Red Green Blue)라고 이름 붙였으며 색 영역 좌표는 BT, 709과 동일한 gamut, 좌표를 채택 하였다. 또한 sRGB는 국제전기표준회의(IEC: International Electrotechnical Commission) 표준 색 영역으로 규격화 되었다.³⁾ sRGB 색 영역은 CRT TV 및 평판 LCD, PDP 디스플레이 시장에서 널리 받아들여 졌으며 현재(2018년)까지도 표준 규격으로 광범위하게 쓰이고 있다.

출판물의 색 영역을 대응, 색 손실 문제를 극복하기 위하여 Adobe에서는 1998년에 기존보다 더 넓은 영역의 Adobe RGB 색 영역을 개발하였다.⁴⁾ 아래 Fig. 1. CIE 1976 색 좌표계에서 보는 것과 같이 sRGB의 경우, green, cyan color 영역 손실이 있는 것을 알 수 있다. Adobe RGB는 출판물에서 요구되는 CMYK (cyan-magenta-yellow-black) 색 영역을 만족시키기 위해 sRGB보다 green, cyan 색 영역이 확대된 영역으로 고안되었으며 아래 그래프와 같이 CIE 1976 기준 17% 정도 더 넓은 색 영역을 표현할 수 있다.

극장 환경이 디지털화 되면서 보다 높은 수준의 기술,

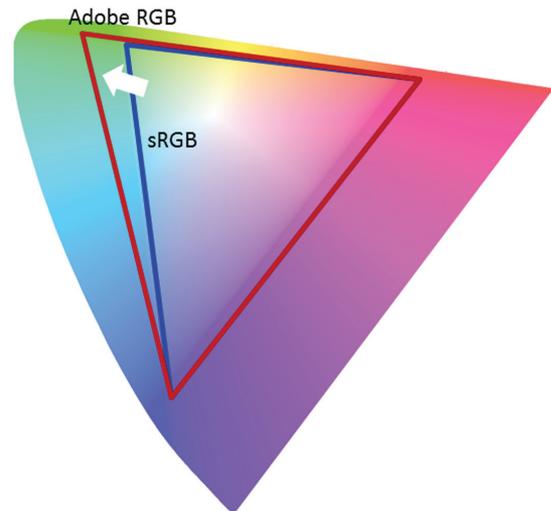


Fig. 1. CIE 1976 색 좌표계에서 sRGB와 Adobe RGB 비교

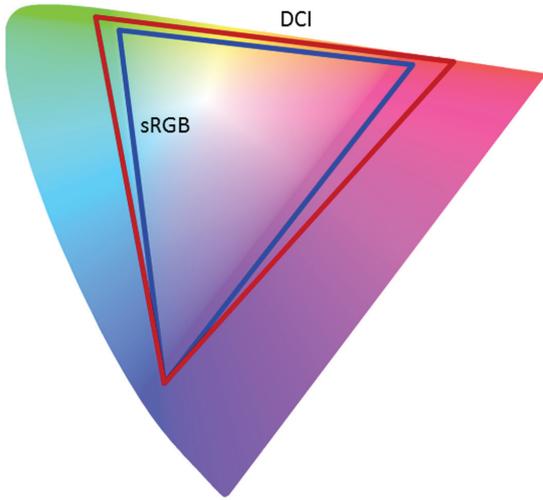


Fig. 2. CIE 1976 색 좌표계에서 sRGB와 DCI 비교

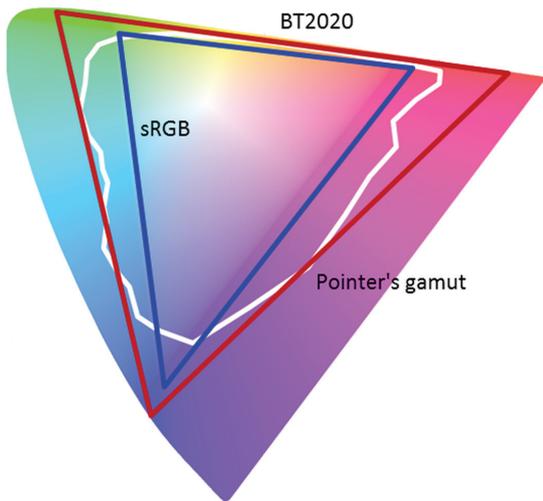


Fig. 3. CIE 1976 색 좌표계에서 sRGB, Pointer's gamut, BT 2020 비교

실제와 같은 색을 구현하고 그에 맞는 표준을 정하기 위해 Paramount Pictures, Sony Pictures Entertainment 등의 영화 관련 회사들이 합작하여 Digital Cinema Initiatives, LLC (DCI) 를 설립하였다. 색 영역은 Society of Motion Picture and Television Engineers (SMPTE)의 Digital Source Processing - Color Processing for D-Cinema의 색 영역을 따랐다.⁵⁾ DCI-P3 라고도 불리는 DCI 색 영역은 Blue 좌표는

sRGB 와 동일하며 Green, Red, 좌표가 넓어 졌으며 특히, Red 좌표가 615nm 단색광(monochromatic) 좌표인 점이 특징이다. 이에 따라서 DCI-P3 색 영역의 표현 영역은 sRGB 색 영역에 비해서 25.6% 더 넓어졌으며 red 좌표가 단색광(monochromatic)에 해당되어 red 가시광 영역의 최대치에 근접하였다.

2012년 ITU-R(International Telecommunication Union Radio communication)에서 HDTV 환경에서 기술적으로 진보된 UHD 환경의 표준을 권고하면서 기존 sRGB 보다 넓은 Rec. 2020 색 영역을 규격화 하였다.⁶⁾ Rec. 2020 색 영역은 세가지 색 red, green, blue 좌표 모두 단색광(monochromatic, primary color) 좌표인 점이 특징으로 Blue는 467nm 파장을, Green은 532nm 파장을, 그리고 Red는 630nm 파장을 갖는다. 기존 디스플레이 분야에서 표준 규격으로 사용되던 NTSC 대비 150%, sRGB 대비 172%, Adobe RGB 대비 148% 그리고 DCI 대비 137% 수준으로 매우 넓은 색 영역을 포함한다. 이와 같이 넓은 색 영역을 구현하는 Rec. 2020 색 영역을 이해하기 위해서는 Pointer's gamut의 개념을 도입해야 한다. Pointer's gamut은 사람 눈으로 볼 수 있는 실제 물체에서 볼 수 있는 색의 영역을 나타내는 것으로 Michael R. Pointer 연구에 의해 알려져 있다.⁷⁾ 이는 색 영역이 Pointer's gamut을 모두 포함한다면 color 혼합 등을 통해 모든 물체의 색을 표현할 수 있다는 의미이기 때문에 현재까지는 극한의 색 영역 기술 목표라고 볼 수도 있다. 이러한 Pointer's gamut 영역을 최대한 충족하기 위해 Rec. 2020이 고안되었으며 CIE 1931 좌표와 CIE 1976 좌표 두 경우 모두에서 Pointer's gamut 99% 이상 커버한다. 하지만 세 가지 primary color 로 Pointer's gamut 을 모두 커버하는 것은 물리적으로 불가능하다. 물리적인 의미는 Fig. 3에서 볼 수 있는 것처럼 Pointer's gamut은 각 색깔의 지점을 연결한 선으로 이루어진 도형인데 각 최외각 점들을 연결하는 삼각형을 구성하기는 불가능 하기 때문이다. 이를 극복하기 위해 4 개 이상의 primary color와 point를 계산 및 연구를 하고 있으나 현실적으로 그에 맞는 color spectrum을 얻는 것이 어려워 4가지 이상의 primary color 를 사용하는

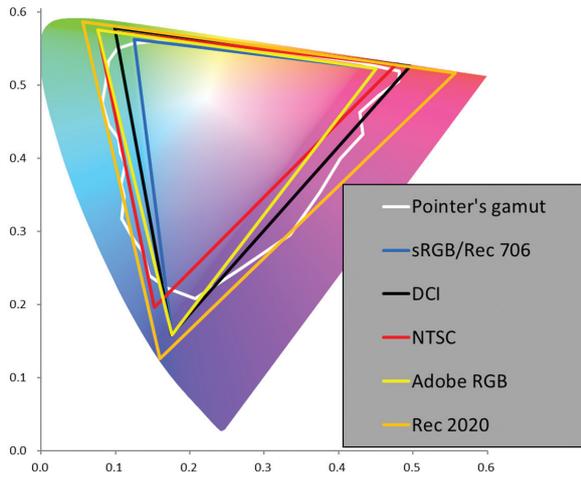


Fig. 4. CIE 1976 색 좌표계에서 대표 색 영역 비교

경우에 대한 기술은 논외로 한다. Fig. 4에서는 NTSC, sRGB, Adobe RGB, DCI, REC, 2020 색 영역을 비교해 놓았고, 디스플레이 영상, 출력 기술의 발전함에 따라 색 영역 또한 확대, 발전해 색 재현율 상향을 도모했다.

2.2 고색재현 형광소재 기술 및 Display별 특성비교

TV display의 고색재현(WCG: Wide Color Gamut)을 구현하는 방식은 대표적으로 BLU 방식(back lighting unit), sheet/stack 방식과 자발광 방식(active emission)으로 나누어 볼 수 있다. BLU의 경우, LED 패키지를 TV edge나 direct에 적용하는 기술로 pc-LED(Phosphor converted-LED)가 적용되고 있다.

pc-LED의 경우, 20년 이상 지속되어온 blue chip + Yellow (Red/Green) phosphor 기술로 이때 사용된 형광체는 무기 형광체(Inorganic phosphor)가 주로 사용된다. 무기 형광체 종류는 조명과 TV용이 나누어서 사용

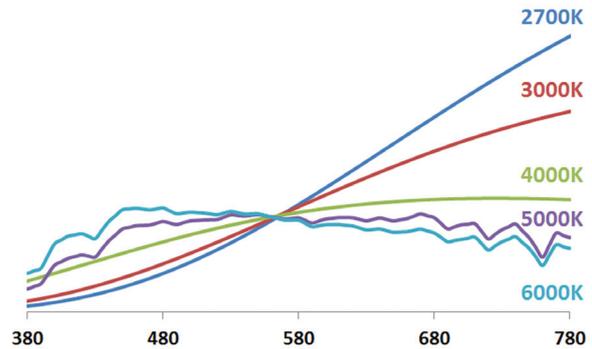


Fig. 5. 조명용 LED CCT별 BL대표 색 영역 비교

되는 데, 그 이유는 조명은 연색성(Color Rendering Index, TM-30-15)을 중요시하는 반면, TV는 색재현성(sRGB, Adobe, DCI)의 색 영역 측면을 중요시 하기 때문이다. 연색성(CRI, Ra: Color rendering index)은 Fig. 5와 같이 색 온도(CCT)별로 태양광(Blackbody radiation)과 유사하게 spectrum을 구현하는 성능을 나타내는 것이 조명의 색 관련 기술이다. TV display에 적용되는 색 재현성은 blue, green, red 각 색의 개별, 혼합했을 때 색 영역을 얼마나 잘 표현할 수 있는 성능을 갖고 있는지를 나타낸다.

조명과 TV에서 요구되는 색 특성이 다르기 때문에 그에 맞는 형광소재 기술도 상이하다. TV용 BLU LED의 경우에는 조명에서 요구되는 특성인 CCT별 blackbody curve와 일치율을 향상하는 것과 다르게 각 색 영역별 고색재현에 맞는 Red, Green primary point에 근접하는 형광체의 파장과 반치폭 개선이 필요한 상황이다. 일반적으로 조명용 형광소재는 green, yellow 형광체는 시각도 곡선과 연색성을 향상시키고자 비교적 90nm 이상의 넓은 반치폭 형광체를 사용하고 red 형광체는 시각도 곡선

Table 1. CIE 1976 색 좌표계에서 각 색 영역의 R/G/B primary point 비교

Pointer's gamut coverage	NTSC 1953		sRGB		Adobe RGB		DCI-P3		Rec. 2020	
	79.4%		70.2%		80.3%		85.5%		99.7%	
Primary Point	CIE u'	CIE v'	CIE u'	CIE v'	CIE u'	CIE v'	CIE u'	CIE v'	CIE u'	CIE v'
Red	0.477	0.528	0.451	0.523	0.451	0.523	0.496	0.526	0.557	0.517
Green	0.076	0.576	0.125	0.563	0.076	0.576	0.099	0.578	0.056	0.587
Blue	0.152	0.196	0.175	0.158	0.175	0.158	0.175	0.158	0.159	0.126

Table 2. Blue 여기 가능한 형광체 별 양자효율 및 발광 파장영역

Phosphor	IQE (%)	Emission (nm)	FWHM
β -SiAlON:Eu ²⁺	80%	527~540	50nm
Lu ₃ Al ₅ O ₁₂ :Ce ³⁺	99%	530~545	100nm
Y ₃ Al ₅ O ₁₂ :Ce ³⁺	99%	530~555	100nm
La ₃ Si ₆ N ₁₁ :Ce ³⁺	95%	535~550	80nm
Ca- α -SiAlON:Eu ²⁺	95%	560~600	90nm
K ₂ SiF ₆ :Mn ⁴⁺	95%	637	< 10nm
(Ca, Sr)AlSiN ₃ :Eu ²⁺	95%	605~650	80nm

에 포함되는 영역이 좁아 연색성(Ra)을 80, 90 유지하면서 반치폭이 좁은 형광체가 요구되고 있다. 반면 TV 디스플레이용 형광소재는 서두에 언급한 확대된 색 영역 단색광에 가까운 primary point를 만족하기 위해 반치폭이 좁은 형광 소재를 사용하고 있으며 더 좁은 반치폭을 갖는 형광 소재가 필요한 실정이다.

LED에서 대표적으로 사용하는 형광체 종류는 아래 표와 같으며 주요 특징(IQE: Internal quantum efficiency, Emission at 450nm, FWHM: Full Width Half Maximum)을 기재 하였다.

일반적으로 반치폭이 좁을수록 특정 색상의 순도를 높일 수 있어 blue chip을 사용하는 경우에는 red와 green 형광체의 반치폭이 좁을수록 효율과 색 재현성 측면에서 향상될 수 있다. 효율의 경우에는 color filter를 사용하기 때문에 color filter에 의해서 소실되는 광 영역을 최소화하는 것이 중요하다. 효율 손실을 최소화하는 접근 방법은 두 가지가 있으며 효율이 높으나 반치폭이 넓은 경우, 흡수 영역이 더 넓은 color filter로 spectrum을 재단하는 방식이 있고, 반치폭이 좁은 형광체를 사용하여

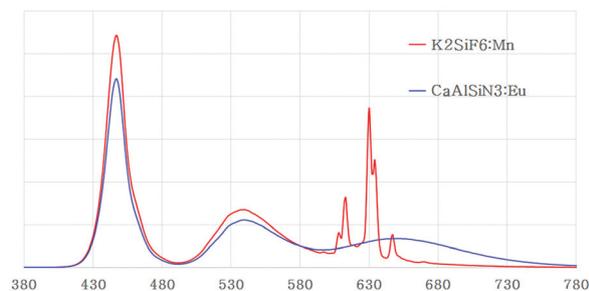


Fig. 6. KSF와 CASN white spectrum 비교

Table 3. 상용 red 형광체 K₂SiF₆:Mn⁴⁺와 CaAlSiN₃:Eu²⁺ BLU 특성 비교

조성	FWHM (nm)	IQE (%)	Wavelength (nm)	DCI (CIE 1976)
K ₂ SiF ₆ :Mn ⁴⁺	10	95	630	99
CaAlSiN ₃ :Eu ²⁺	90	95	640	93

color filter로 인한 손실을 최소화 하는 방식이 있다. 2015년 이전까지는 대부분 색 재현성에 대한 기술 발전이 더디었고, red 영역에서 적합한 형광체가 없었으나 K₂SiF₆:Mn⁴⁺ 형광체가 개발되어 높은 효율과 높은 반치폭을 동시에 확보 가능하게 되었다. 그 외 CaAlSiN₃:Eu²⁺ 계열을 사용하여 color filter 흡수 영역을 확대하여 사용할 수도 있다. Green 형광체의 경우, β -SiAlON 형광체의 성능(반치폭 50nm, IQE > 80%)을 갖는 다른 조성 green 형광체는 아직까지 상용화 수준의 조성이 없는 실정이다. 따라서 green 형광체는 535nm 발광을 갖는 β -SiAlON:Eu²⁺ 으로 고정하여 K₂SiF₆:Mn⁴⁺ 형광체와 CaAlSiN₃:Eu²⁺ 형광체에 대해서 아래 Table. 3과 같이 특성을 비교하였다. Green 형광체는 β -SiAlON으로 고정하여 DCI를 평가하였으며 Green의 파장은 535nm, 반치폭 50nm이었다. 이 때 사용한 Red 형광체의 특성은 반치폭 측면에서 K₂SiF₆:Mn⁴⁺ 가 10nm로 CaAlSiN₃:Eu²⁺ 90nm 대비 매우 좁은 반치폭을 갖고 있으며 이에 따라 DCI 값이 99%로 UHD alliance 규격 90%을 훨씬 상회하는 특징을 갖고 있다. Mn⁴⁺의 활성이온으로 비발광 전이에 의한 중심파장 이동이 어렵지만 서두에 언급한 가장 최근에 나온 Rec. 2020의 primary point와 K₂SiF₆:Mn⁴⁺ red의 630nm 발광, 10nm 반치폭이 Pointer's gamut에 부합하는 것을 알 수 있다.

이와 같은 무기 형광체 기술을 통해 UHD 규격인 DCI 90 % 이상의 특성이 구현 가능하며 동시에 UHD HDR 규격 또한 만족 시킬 수 있다. HDR의 경우, 평상 시 구동 조건에서 500nit 이상의 밝기와 peak 전류 구동 조건에서 1000nit 이상의 밝기를 구현해야 하는데 위에 언급한 두 가지 형광체 기술 모두 가능하며 신뢰성 또한 규격 조건을 만족하는 형광체 기술이 발전하여 두 기술 모두 현재 상용화 되어 사용 중이다.

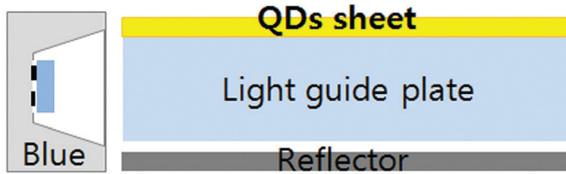


Fig. 7. QD sheet/film을 이용한 TV display 모식도

무기 형광체와 달리 수 nano-meter 크기의 양자점(QD: quantum dots) 기술을 이용하는 방식은 무기형광체를 이용한 white LED와 색 재현성을 높이기 위해 color filter를 적용하는 기술과는 방식에 있어 차이점이 있다. Fig. 7과 같이 White LED 대신에 blue LED를 back lighting으로 사용하고 panel 단계에서 도광판(Light guide plate) 전면에 QD film/sheet를 사용하게 된다. 이 때 red, green QD로 sheet를 만들 게 되며 blue 광을 받아서 white emission을 하며 sheet/film으로부터 나온 white 광을 color filter를 통해 R/G/B 광을 구현하게 된다. 무기물 형광체는 LED PKG 구조에 적용되고 QD 형광 소재는 panel의 sheet/film 구조에 적용된다. 이를 통해 기존 기술인 형광체의 반치폭을 극복하여 좀 더 넓은 색 영역을 확보하고자 하는 것이다. 2000년 초반부터 반치폭(FWHM)이 형광체 대비 매우 좁은 QD(Quantum dot) 연구가 진행되어 왔으며 주요 개발 성분은 CdS, CdSe 를 기본으로 한 조성이었으나 Cd이 포함

된 물질의 경우, RoHS 환경 유해물질로 구분 및 금지되어 유럽, 중국, 일본, 한국 등에서 규제가 되어서 주요 성분이 변경된 InP 계열로 2010년 초반부터 개발되어 왔다. 효율 특성을 향상시켜 현재는 quantum yield가 90% 이상인 제품들도 나오고 있는 상황이다. QD의 종류는 다양한 형태와 조성으로 존재하는 데 하기 표와 같이 다양하며 대표적인 상용 조성은 Core InP과 Shell ZnSe, ZnS로 이루어져 있다. QD란 일반적으로 양자점으로 부르고 있으며 엑시톤 보어 반경 이하의 사이즈(5 ~ 20nm)를 가지는 반도체로 크기에 따른 양자 구속 효과로 인해 발광 파장 변화를 보일 수 있다.

Quantum dots의 경우 잘 알려진 바와 같이 신뢰성 수준이 기존 무기 형광체에 비해 낮아 LED PKG에 적용되는 경우는 일반적인 구동 조건, 구조에서는 제품 특성을 만족하기 어렵다. Quantum dots은 신뢰성이 취약한 형광 소재로 알려져 있는데 그 원인은 비표면적이 커서 공기 중에서 화학적으로 불안정하며 InP core를 적용한 quantum dot의 경우 ZnSe, ZnS를 shell로 사용하는 데 이 경우 core III-V족의 원소를 사용하고 shell II-VI족의 원소를 사용하여 내부와 외부 성분 간 격자 미일치(lattice mismatch) 발생하여 strain이 발생하게 된다. 이러한 불안정적인 요소들이 수분, 산소, 광, 열과 결합할 경우, 급격한 열화가 발생하여 신뢰성에 치명적인 단점을 가져 올 수 있다. 그렇기 때문에 quantum dots은

Table 4. 대표적인 Quantum dots core/shell 조성 및 구조⁸⁻¹⁰⁾

분류	Composition		
	Core	Single compound	II-VI
III-V			InP, InAs, GaP, GaN
Shell	Single compound	II-VI	CdS, ZnS
	Multi, Alloy compounds	III-V	ZnSe/ZnS, CdS/ZnS

Table 5. 무기 형광체와 양자점 반치폭 비교 자료

Color	Type	Size	Wavelength (nm)	FWHM (nm)
Green	β -SiAlON	15~25 μ m	535~545nm	50nm
	InP G QDs	5~10nm	530~550nm	30~40nm
Red	K ₂ SiF ₆	10~25 μ m	630nm	10nm
	CaAlSiN ₃	5~25 μ m	635~645nm	85~100nm
	InP R QDs	8~15nm	615~650nm	35~50nm

Table 6. UHD TV HDR 요구 사양

High Dynamic Range	Peak brightness	Black level
사양 1 (LCD 기반)	1000 nits 이상	0.05 nits 이하
사양 2 (OLED 기반)	540 nits 이상	0.0005 nits 이하

외부 환경과의 차단 및 분산 기술이 매우 중요하며 quantum dots sheet/film 기술은 이를 극복하여 구조적으로 안정하게 만들어 적용하였다고 볼 수 있다. 광과 직접적으로 닿지 않고 떨어진 구조에 sheet/film은 산소와 수분으로부터 차단시킨 barrier 구조, 그리고 sheet내 얇고 균일하게 분산시켜 놓은 상태가 주요 기술이다. Quantum dot 기술을 적용 하여 색 순도를 향상 시키는 기술을 적용 하여 색 재현력을 차별화 시킬 수 있는 기술 개발이 이루어 지고 있으며, 계속적으로 반치폭을 줄이는 기술 향상을 이루고 있기 때문에 색 재현성에 대한 기술 발전은 앞으로도 지속 될 것으로 예측된다.

LCD기반의 TV display와 다르게 유기 발광 다이오드 (organic light emitting diodes, OLED)는 유기물을 이

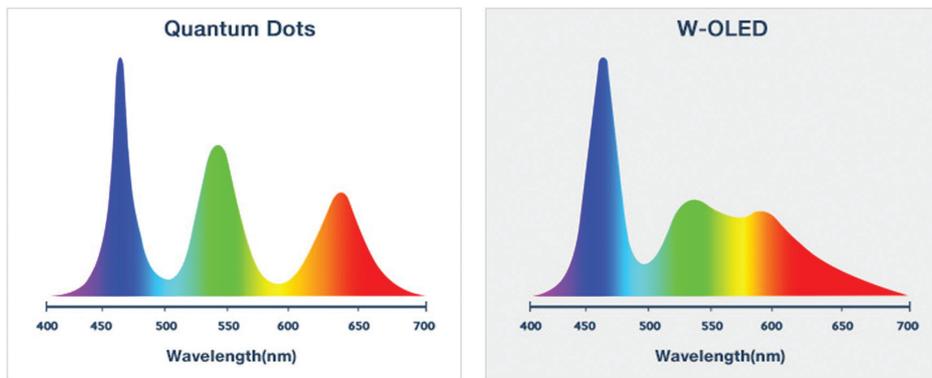
Table 7. QD sheet와 W-OLED display 색 재현성 비교

Type	DCI P3 UV	REC.2020 UV
QLED (QD sheet/film)	99.8%	77.7%
OLED (WOLED)	98.6%	75.6%

용한 자체 발광 디스플레이 소재로 최근 LCD 기반과의 차별성으로 각광받고 있다. 특히 능동형 유기 발광 다이오드 AMOLED (Active-matrix organic light emitting diodes)로 자발광이 가능하기 때문에 박막화, 단순화가 가능하나 현재 모바일에 적용된 OLED 기술은 R/G/B cell 구동이고 TV의 경우, OLED white 적층 구조에 color filter를 적용한 기술이 사용되고 있다. 그렇기 때문에 색 재현성 측면에서는 DCI 기준으로 98% 수준의 성능을 보인다. OLED의 경우 전류를 통하여 각 Pixel을 on/off 할 수 있는 구동방식으로 LED BLU와 액정 (Liquid Crystal)을 shutter로 사용하여 Pixel을 on/off 하는 구동방식의 LCD 보다 Black을 구현하기에 더 적합한 방식으로 Contrast Ratio 지표에서 큰 장점을 보인다

Table 8. 차세대 고색재현 형광 소재와 특징

발광 소재	특징	단점
QD	Nano size, 반치폭(40nm, 파장 tunable)	열, 광, 산소/수분 안정성 ↓
Graphene QD	열, 전기전도도 ↑ 친환경 물질	반치폭 大 낮은 효율 25%
Perovskite QD	Nano size, 반치폭 20nm, 파장 tunable	열, 수분 안정성 ↓ Blinking



Source : Nanosys

Fig. 8. QD spectrum과 white OLED spectrum 비교¹¹⁾

다. 그러나 발광 소재의 Spectrum과 효율, 안정성에 의해 결정 되는 최대 밝기 및 색 재현율에서는 무기물 발광 소재를 쓰는 LCD 기반 디스플레이가 유기물 발광소재를 사용하는 OLED에 비해 더 우수한 특성을 보인다. 아래 표에서와 같이 UHD Alliance에서 HDR 사양을 2가지로 제시한 것을 보면 OLED 기반 TV 사양과 LCD 기반 TV 사양을 구분하였고 이러한 장단점은 이를 통해 알 수 있다.

차세대 고색 재현 소재로 양자점과 비슷한 컨셉 혹은 크기의 발광 소재들이 PL, EL 소재로 소개되고 있다. Graphene quantum dots과 Perovskite quantum dots 소재들이 대표적이며 그에 대한 대표적 특징들과 앞으로 해결해야 하는 문제점들이 아래 표에서 볼 수 있다.

Graphene QD의 정의는 2D Carbon nano-material이며 carbon의 경우 Fig. 4와 같이 다양한 structure를 갖고 있다. Graphene의 경우, 탄소 원자 한 층으로 이루어진 벌집형태 구조 소재이며 열전도율이 $5300W/m \cdot K$ 이며 전자 이동도가 $15,000cm^2/Vs$ 로 매우 높으며 투과도는 98%, 두께는 얇은 원자 1층 0.33nm 수준으로 알려져 있다. 합성방법은 graphite를 top-down하는 방식으로 저비용, 고효율, 친환경 공정이 가능하여 차세대 물질로 장점이 있다. Graphene QD 활용은 Passive, Active 발광소재로 사용이 가능하며 2015년부터 개발되고 있으나 아직까지 PL방식의 LED 적용 방안 및 이슈 해석에 있어 경험이 많이 부족한 상태이다. 양자효율은 25% 수준이며 이는 현재 양산중인 Cd-free QD 90% 수준에 비해 매우 못 미치는 수준이다. 아직까지는 개발 초기 단계로 개선해야 하는 특성들이 많은 속제로 남아있지만 친환경적인 장점이 있어 지속적인 개발이 필요한 소재이다.^{13, 14)}

Perovskite quantum dots 소재의 적용 분야는 EL, PL 로 개발하였으나 EL소재로서 더 비중을 두어 연구되고 있다. Perovskite는 cubic 과 platelet-like nano-crystal로 파장은 400 ~ 800nm, 반치폭은 20 ~ 40nm 수준이 가능하다. 이 조성은 대표적으로 Cesium lead halide이며 CsPbX₃ Cyan, Green, Yellow, Orange, Red 발광이 가능하며 유사 조성 CH₃NH₃PbX₃, CH(NH₂)₂PbX₃도 가능하다. 양자효율은 35% 수준이고

N-H 결합이 포함될 경우, blinking이 발생하여 효율 저하가 발생할 수 있으며 특징적으로 온도/수분에 대한 안정성이 매우 낮아 반드시 해결해야 하는 과제로 남아있는 상태이다. Perovskite QD 활용방안은 상용 QDs 보다 좁은 협반치폭과 가변적인 파장을 활용하여 색 재현성 향상 가능성 있어 보이나 신뢰성 및 효율 관점에서 지속 연구가 필요한 상황이다.^{15, 16)}

3. 결론

TV display 기술에서 중요한 성능으로 판단되는 색 영역과 기준에 대해 살펴보고, 최근 사용되는 주요 형광 소재(무기 형광체, quantum dots, OLED)를 3가지로 구분하여 성능과 특징을 비교하였다. 이러한 형광 소재의 장점을 활용하여 앞으로 새로운 platform의 display에 적용하고자 많은 연구들이 진행되고 있다. 큰 흐름은 능동형(자발광) display를 축으로 연구되고 있으며 세부 내용은 quantum dots을 이용한 능동형 QD 발광 다이오드 (Active-matrix Quantum dots light emitting diodes: QLED)와 color filter 없이 R/G/B 유기발광 cell을 이용한 OLED 대형화, 혹은 융복합(LED/QD/OLED) 스타일의 TV가 대표적이라고 할 수 있다. 추가적으로 최근 Micro LED 역시 display 적용을 위해 많은 연구소, 기업에서 개발 및 양산하고 있는 단계이다. 앞으로 premium TV display의 시장의 기술 trend는 구동 방식과 이에 따른 중요한 지표인 명암비(contrast ratio), 밝기(brightness)와 색 재현성(color gamut) 향상이 주요 기술이 되어 발전할 것으로 보인다.

참고문헌

1. "TV transmission standards," Code of Federal Regulations 73,682 (20) (iv) 1953
2. "Parameter values for the HDTV standards for production and international programme exchange" ITU-R BT,709-6 1,3 1990
3. "Corrigendum 1 - Multimedia systems and equipment - Colour measurement and management - Part 2-1: Colour management - Default RGB colour space -

- sRGB" IEC 61966-2-1:1999 1999
4. "Adobe® RGB (1998) Color Image Encoding" Adobe Inc. 4.3.1.1 (1998)
 5. "Digital Source Processing - Color Processing for D-Cinema" SMPTE EG 432-1:2010 6.12
 6. "Parameter values for ultra-high definition television systems for production and international programme exchange" ITU-R BT.2020 2 2012
 7. Michael R. Pointer 《The Gamut of Real Surface Colours》. 5 (3). Color Research & Application: 145 - 155 1980
 8. B.O. Dabbousi, J. Rodriguez-Viejo, F.V. Mikulec, J.R. Heine, H. Mattoussi, R. Ober, K.F. Jensen, M.G. Bawendi, "(CdSe)ZnS Core-Shell Quantum Dots: Synthesis and Characterization of a Size Series of Highly Luminescent Nanocrystallites" *The Journal of Physical Chemistry B*, **101**[46] 9463-9475 (1997)
 9. Eunjo Jang, Shinae Jun, Hyosook Jang, Jungeun Lim, Byungki Kim, Younghwan Kim, "White-Light-Emitting Diodes with Quantum Dot Color Converters for Display Backlights", *Advanced Materials*, **22**[28], 3076-3080 (2010)
 10. Euidock Ryu, Sungwoo Kim, Eunjo Jang, Shinae Jun, Hyosook Jang, Byungki Kim, Sang-Wook Kim, "Step-Wise Synthesis of InP/ZnS Core-Shell Quantum Dots and the Role of Zinc Acetate", *Chemistry of Materials*, **21**[4], 573-575 (2009)
 11. Nanosys, www.nanosysinc.com/press-releases/
 12. Mitchell Bacon, Siobhan J. Bradley, Thomas Nann, "Graphene Quantum Dots", *Particle & Particle Systems Characterization*, **31**[4], 415-428 (2014)
 13. Dong Ick Son, Byoung Wook Kwon, Dong Hee Park, Won-Seon Seo, Yeonjin Yi, Basavaraj Angadi, Chang-Lyool Lee, Won Kook Choi, "Emissive ZnO-graphene quantum dots for white-light-emitting diodes", *Nature Nanotechnology* **7**, 465-471 (2012)
 14. Chun Sun, Yu Zhang, Cheng Ruan, Chunyang Yin, Xiaoyong Wang, Yiding Wang, William W. Yu, "Efficient and Stable White LEDs with Silica-Coated Inorganic Perovskite Quantum Dots", *Advanced Materials*, **28**[45], 10088-10094 (2016)
 15. Feng Zhang, Haizheng Zhong, Cheng Chen, Xiang-gang Wu, Xiangmin Hu, Hailong Huang, Junbo Han, Bingsuo Zou, Yuping Dong, "Brightly Luminescent and Color-Tunable Colloidal CH₃NH₃PbX₃ (X=Br, I, Cl) Quantum Dots: Potential Alternatives for Display Technology", *ACS Nano*, **9**[4], 4533-4542 (2015)

●● 최성우



- 2005년 서울대학교 재료공학부 학사
- 2011년 서울대학교 재료공학부 석/박사
- 2011년~2018년 삼성전자 LED 사업팀 수석연구원

●● 김성민



- 2009년 고려대학교 신소재공학부 학사
- 2010년~2016년 삼성전자 LED 사업팀 선임연구원
- 2017년~2018년 삼성전자 LED 사업팀 책임연구원

●● 오정록



- 2007년 국민대학교 응용화학과 학사
- 2012년 국민대학교 응용화학과 석/박사
- 2012년~2018년 삼성전자 LED 사업팀 책임연구원

●● 윤철수



- 1993년 서울대학교 재료공학부 학사
- 2001년 서울대학교 재료공학부 석/박사
- 2002년~2003년 Georgia Tech Post-Doc.
- 2004년~2014년 삼성전기, 삼성전자 책임/수석연구원
- 2015년~2018년 삼성전자 LED 사업팀 Master