

평판디스플레이용 형광체

윤철수

Phosphor Technology Center of Excellence
Georgia Institute of Technology
chulsoo.yoon@mse.gatech.edu

1. 서론

화상정보의 신속한 교환에 대한 필요성과 이동 통신화에 대한 사회적 요구는 정보의 효율적 교환을 가능케 하는 처리 시스템의 발전과 보급에 대한 요구를 증대시키고 있다. 이에 따라 최근 10여년 동안 화상정보를 전달하는 매체인 디스플레이 기술은 경량화, 고해상도화,

초소형화 또는 초대형화 등 여러 가지 요구조건의 증가로 이에 부합될 수 있는 평판디스플레이화로 급속히 진행되고 있는 추세이다. 그 응용분야도 매우 다양화하여 기존의 개인용 데스크탑 모니터, TV 등이 평판화 함은 물론이거니와 노트북, mobile phone, camcorder, 자동차 및 항공기 등 일상용 전자제품에서부터 군사용 및 우주항공기의 표시소자에까지 광범위하게 평판디스플레이

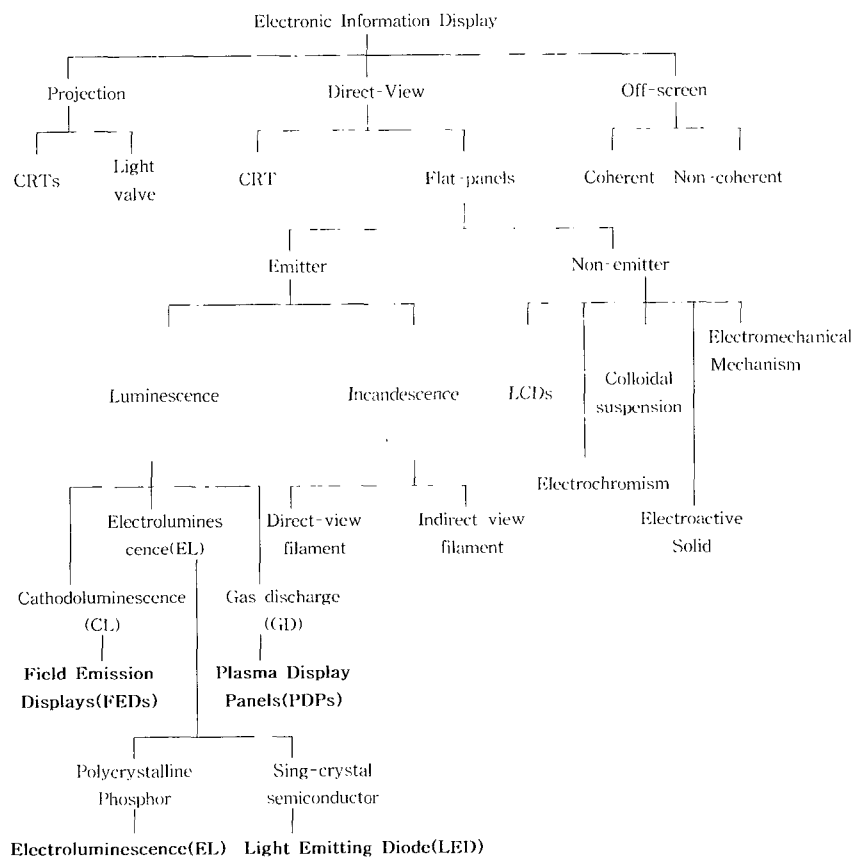


Fig. 1. Classification of electric information display technology.

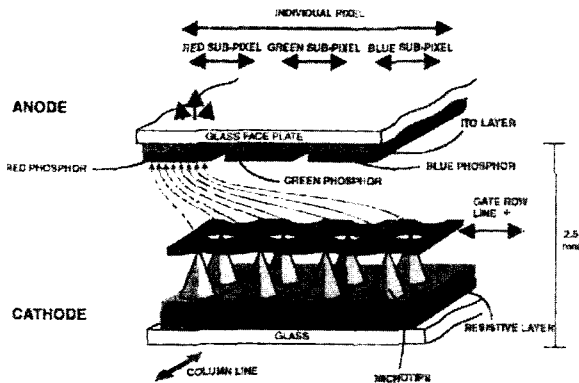


Fig. 2. Structure of typical Field Emission Displays.

의 응용이 확대되고 있다.

현재까지 가장 많이 사용되고 있는 정보표시용 디스플레이는 CRT (Cathode Ray Tube)이지만, 큰 부피와 무게 그리고 높은 구동전압으로 인해 이동 개념이 적용되어야 하는 경우나 대형 화면급 디스플레이로서의 한계를 지니고 있어 CRT의 무게를 줄이려는 연구도 진행되고 있으나 그 구동 개념상 한계를 지니기에 새로운 개념의 평판 디스플레이의 개발이 활발히 진행되고 있다. Fig. 1에서 보듯이 디스플레이 기술은 크게 Projection, Direct-view 그리고 Off-screen 방식으로 나눌 수 있다. 이중 급격한 수요 증대와 응용분야의 확대로 인해 주목을 받고 있는 평판디스플레이 기술에는 Direct-view 방식으로서 형광체를 외부 여기원에 의해서 발광시켜서 화면을 구현하는 Emitter 방식과 백색광을 필터링하여 삼원색을 구현하는 Non-emitter 방식인 LCD (Liquid Crystal Display) 기술이 있다. Emitter 방식의 디스플레이에서는 형광체의 발광 특성이 그 디스플레이의 색상 및 휘도를 결정하는 직접적인 요인이기에 좋은 발광특성을 지니는 형광체의 연구 개발에 많은 관심이 집중되고 있다.

Emitter 방식의 디스플레이에 응용되고 있는 형광체는 이미 상용화되어 그 발광특성이 잘 알려진 많은 수많은 형광체가 있으나, 구동 환경과 형광체를 여기시키는 에너지원이 다른 평판디스플레이에서는 아직까지 만족할 만한 수준의 발광특성을 보이고 있지 못하고 있다. 따라서 본 논문에서는 평판디스플레이 기술을 대표하는 PDP (Plasma Display Panels), FED (Field Emission Displays), 그리고 LED (Light Emitting Diode)의 구동원

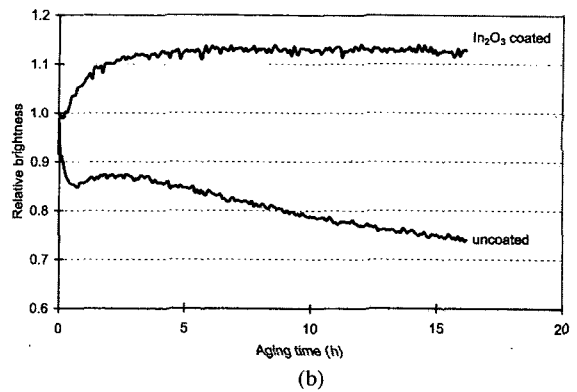
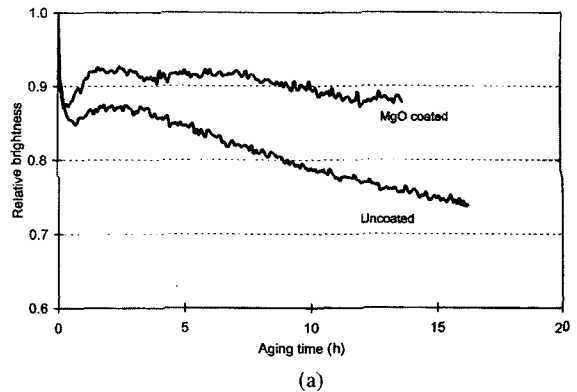


Fig. 3. Relative luminescence-behavior of uncoated and (a) MgO coated and (b) In₂O₃ coated SrGa₂S₄:Eu phosphors as a function of time when irradiated by a pulsed electron beam at 2kV.

리와 이에 응용되는 형광체에 대한 소개 및 연구 동향에 다루고자 한다.

2. 평판디스플레이용 형광체

2-1. FEDs

1990년에 프랑스의 LETI사에 의해 처음으로 시제품이 선보인 FED는 방출된 전자에 의해 형광체를 여기시켜 가시광을 방출시키는 측면에서 기존의 CRT와 유사한 구동개념을 가진다. 그러나 충분한 가속거리에 의해 전자총에서 방출된 열전자가 높은 에너지로(~수십 kV 이상) 형광체에 충돌하여 발광을 하는 CRT와는 달리 Fig. 2에서 보는 바와 같이 FED는 전계 방출 (Field Emission) 전자에 의해 형광체를 여기시키는 저전압 (~5 kV 이하) 음극선에 의한 발광이라는 차이점을 가진다.

Table 1. Chromaticity Goals and Phosphors Investigated for FEDs Applications

칼라	적색		녹색		청색	
	x	y	x	y	x	y
형광체 요구조건	> 0.55	< 0.30	< 0.20	> 0.50	< 0.15	< 0.15
	Wavelength for line emission (nm)					
	770-645		525-500		480-465	
후보 재료	Y ₂ O ₃ :Eu Y ₂ O ₂ S:Eu Gd ₂ O ₃ :Eu SrTiO ₃ :Pr,Mg,Al CaTiO ₃ :Pr,Mg,Al		ZnGa ₂ O ₄ :Mn SrGa ₂ S ₄ :Eu Gd ₂ O ₂ S:Tb YAG:Tb Y ₂ SiO ₅ :Tb		SrGa ₂ S ₄ :Ce ZnGa ₂ O ₄ Y ₂ SiO ₅ :Ce Sr ₃ (PO ₄)Cl:Eu	

FED 응용을 위한 형광체에 대한 초기의 연구는 음극선 발광이라는 유사성으로 인해 높은 휘도를 보이는 CRT용 형광체인 Y₂O₃:Eu, Y₂O₂S:Eu (적색), ZnS:Cu,Al, Gd₂O₂S:Tb, Y₂O₂S:Tb (녹색), 그리고 ZnS:Ag,Cl (청색)에 대하여 이루어 졌다. 대부분이 황화물계인 CRT용 형광체는 수십 KV의 가속전압을 지니는 음극선에 의해서는 만족할만한 휘도를 보인다. 그러나 FED 발광조건인 저전압 전자 여기에 의해서는 휘도의 감소가 일어나는 점과 고진공의 FED 픽셀 내에서 형광체 표면에서의 전자 충돌 및 전하 축적으로 인해 형광체가 분해되면서 나오는 가스에 의해서 마이크로 팁의 손상이 일어나는 점으로 인해 황화물계 형광체가 FED용으로는 한계를 지니게 된다.

이를 극복하기 위한 하나의 방법으로 황화물계 형광체에 전도성 물질인 In₂O₃, MgO, SnO₂, SiO₂, Y₂O₃ 등을 코팅하여 전도성과 표면 안정성 증가시켜 휘도의 증진과 열화현상의 억제를 도모하려는 연구가 진행되어 왔다. 이 경우 전도성 물질의 코팅 방법으로는 주로 졸겔법과 같은 액상법을 이용하게 되는데, 이러한 방법으로 만들어진 형광체는 전자충돌에 의한 열화현상이 어느 정도 줄어든다고 보고되고 있다. Fig. 3은 SrGa₂S₄:Eu 형광체가 2 kV 가속전압 전자에 노출되었을 때 시간에 따른 휘도 변화이다. 코팅이 되지 않은 경우에는 초기 휘도에 비하여 15시간 경과 후 75%의 휘도를 보이는 반면, MgO가 코팅된 경우에는 초기 휘도에 비하여 88%를, In₂O₃를 코팅한 경우에는 110%의 휘도 값을 보여준다. 이외에도 ZnS 형광체에 In₂O₃, SiO₂, 또는 Y₂O₃ 등을 코팅하게 되면 열화현상이 어느 정도 억제되고 때로는 CL(Cathodoluminescence) 특성이 향상된다는 보고

도 있었다.

다른 한편으로는 전자빔에 의한 분해가 일어나는 황화물계 형광체를 대체하여 물리-화학적으로 보다 안정한 산화물계 형광체를 개발하고자 하는 연구가 진행되어 왔다. 그러나 산화물계 형광체의 경우 형광체의 분해에 의한 형광체와 팁의 손상이 일어나지 않는 장점을 지닌 반면 대부분 황화물계 형광체에 비하여 발광효율이 현저히 떨어지는 단점을 지니고 있다. 따라서 FED용 산화물계 형광체에 대한 연구개발은 발광 효율의 증진에 초점이 맞추어져 있으나, 아직까지는 황화물계 형광체에 필적하는 만족할만한 수준의 발광효율을 보이는 형광체가 개발되고 있지는 못하다. Table 1에 FED 형광체로서 요구되는 조건과 현재까지 연구되고 있는 대표적인 황화물 및 산화물 형광체들을 정리하였다.

형광체의 입형이나 입자크기는 형광체 자체나 형광막의 휘도에 영향을 미치게 된다. 또한 전통적인 고상합성법에 의한 형광체 제조는 분쇄공정에서 수반되는 불순물의 혼입과 형광체 표면결함을 발생시켜 비발광 층을 형성할 수 있다. 이러한 관점에서 볼 때 액상법이나 기상법에 의한 형광체 합성은 활성제의 균일한 도핑, 입자 크기 및 입형의 제어 가능성, 불순물 혼입 및 표면 결함 생성 억제 등 여러 가지 장점을 지닐 수 있다. 이러한 이유로 기존의 형광체 물질들을 공침법, 졸겔법, 수열합성법, 분무열분해법 등 다양한 합성법으로 제조하는 연구가 시도되고 있으며, 실제로 이를 통한 발광특성 개선에 대한 결과가 보고되고 있다. 그러나 이러한 합성법들은 낮은 수율과 제조 단가가 높다는 점에서는 많은 개선의

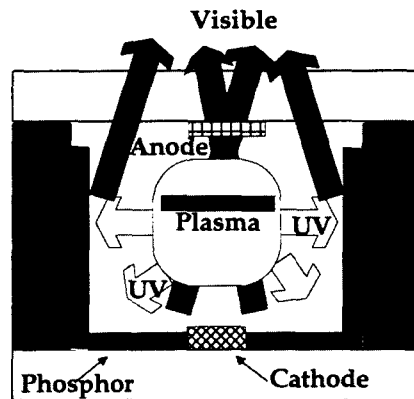


Fig. 4. Pixel structure of PDPs.

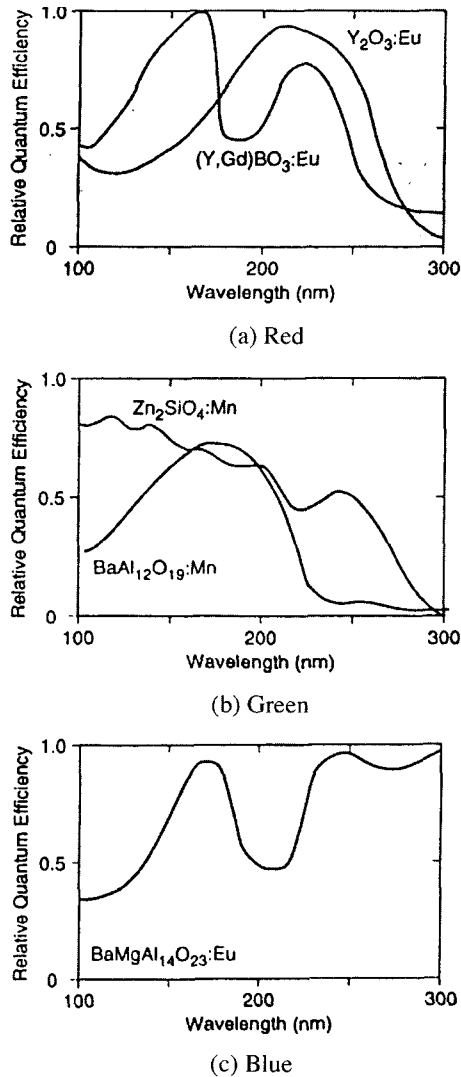


Fig. 5. Excitation spectra and relative quantum efficiency of important PDPs phosphors.

여지를 지니고 있다고 할 수 있다. 궁극적으로는 FED 발광 조건에 맞는 새로운 형광 재료의 설계와 더불어, CNT(Carbon Nano-Tube)를 이용한 FED의 개발과 같이 형광체 여기 전자의 가속전압이나 전하밀도를 개선하는 연구의 병행이 필요하리라 생각된다.

2-2. PDPs

최초의 가스 방전 표시 장치가 1927년 Bell Telephone Lab에서 개발된 이후, 1980년대 초반에 Matsushita사가 컴퓨터용 Monochrome DC PDP를 상업화하면서

Table 2. Survey of most important PDP Phosphors

Phosphor	Color	CIE		$\tau_{1/10}$ (ms)
		x-axis	y-axis	
(Y,Gd)BO ₃ :Eu	Red	0.641	0.356	9
Y ₂ O ₃ :Eu	Red	0.648	0.347	3
SrAl ₂ O ₄ :Eu	Green	0.260	0.590	< 1
Zn ₂ SiO ₄ :Mn	Green	0.242	0.708	~14
BaAl ₁₂ O ₁₉ :Mn	Green	0.182	0.732	17
BaMgAl ₁₀ O ₁₇ :Eu	Blue	0.147	0.067	< 1
BaMgAl ₁₄ O ₂₃ :Eu	Blue	0.142	0.087	< 1

본격적인 디스플레이로서 PDP의 연구개발에 불이 붙기 시작했다. 현재 PDP는 주로 40인치급 이상의 벽걸이형 TV로서 개발되어 양산화 되고 있는데, 이는 PDP가 LCD나 FEDs와 같은 다른 평판디스플레이 기술보다 그 구조가 간단해서 대형 디스플레이로 제작하기에 용이하기 때문이다. 그 구조는 두께가 3 mm 정도 되는 두 장의 유리 기판에 전극과 형광체를 도포하고 격벽을 생성시켜 두 장의 유리를 0.1-0.2 mm 간격으로 유지시키는 형태이며, 그 사이 공간에 생기는 픽셀에 플라즈마를 형성시켜 화면을 구현하게 된다. 픽셀의 구조에 따라 투과형과 반사형으로 나뉘는데 근래에는 Fig. 4와 같은 반사형 픽셀 방식이 채택되어 생산되고 있다.

PDP에 사용되는 형광체는 발광 원리 면에서는 기존의 수은 방전관과 유사한 개념에 의하여 발광되지만 254 nm의 UV를 내는 수은 증기가 아닌 Xe-Ne 혼합 gas로부터 나오는 147 nm의 Xe atomic resonance line과 dimer로부터 나오는 173 nm 근처의 연속선에 의하여 발광이 되기 때문에 이에 적합한 새로운 형광체가 요구되고 있다. Fig. 5에 최근 PDP용으로 채택되고 있는 형광체의 VUV(Vacuum Ultraviolet) 양자효율을 나타내었다. 주로 VFD (Vacuum Fluorescent Lamp)용으로 사용되는 형광체가 채택되고 있는데, 이는 양자효율을 보면 알 수 있듯이 200 nm이하의 짧은 파장에 의한 여기 영역에서도 좋은 발광효율을 지니고 있기 때문이다.

Table 2에 주요 PDP용 형광체의 특성을 정리하여 놓았다. Y₂O₃를 기본 모체로 하는 적색 형광체의 경우에는 잔광시간이 약간 긴 점을 제외하곤 휘도 및 색순도 측면에서는 큰 무리가 없어 현재 PDP에 적용되고 있다. 녹색 형광체인 Zn₂SiO₄:Mn의 경우에는 휘도는 큰 문제점이 없으나, 잔광시간이 $\tau_{1/10}$ =14ms로써 길다는 문제점을 가지고 있다. 이는 absorption edge 이상의 여기광의

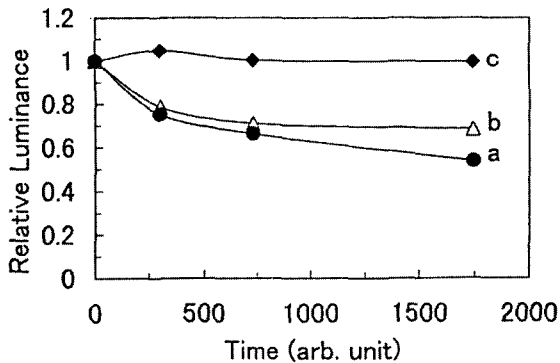


Fig. 6. Time dependence of luminance of PDP pixels with (A) BAM:Eu²⁺ blue emitting phosphor, (B) Zn₂SiO₄:Mn²⁺ green emitting phosphor, and (C) (Y,Gd)BO₃:Eu³⁺ red emitting phosphor.

경우에 Mn²⁺가 Mn³⁺로 이온화되면서 생성된 자유전자가 Zn₂SiO₄ 모체의 conduction band까지 전이되었다가 Mn³⁺와 재결합하여 다시 Mn²⁺을 생성하는데, 이러한 과정이 긴 시간을 소요시키기 때문이다. 또 하나의 근본적인 이유로는 선택규칙(selection rule)에 따르면 4T₁ → 6A₁는 금지된 전이이기 때문이다. 이러한 단점은 Zn₂SiO₄:Mn에 Al과 Li 또는 Ga과 Li를 첨가하거나, Mn과 더불어 Mg 또는 Cr를 함께 도핑 하면 잔광시간을 τ_{1/10}=7ms까지 줄일 수 있다고 보고되었다. 또 다른 단점은 Zn₂SiO₄:Mn의 색좌표가 yellowish-green 쪽으로 치우쳐져 있다는 점이 있으나, 색좌표의 경우 국가나 민족에 따라 선호하는 색상이 다를 수 있으므로 PDPs 제조사에 따라서도 적-녹-청색 형광체의 색좌표 기준이 다를 수 있어, 녹색용 Zn₂SiO₄:Mn 형광체에 대한 연구는 주로 잔광시간을 줄이는 것에 초점이 맞추어져 있다.

청색형광체인 BaMgAl₁₀O₁₇:Eu 또는 BaMgAl₁₄O₂₃:Eu (이하 BAM)의 경우에는 색좌표와 잔광 시간은 무난한 반면 휘도가 충분치 못하다. 이는 대부분의 개발중인 디스플레이가 지니고 있는 문제점으로서 휘도를 가늠하는 물리적인 측면에서의 방출 가시광의 광자의 수가 적은 이유도 있지만, 사람의 시각이 청색에 둔감하게 반응하는 이유로 인해 청색이 적색이나 녹색에 비하여 더 밝아야 비슷한 밝기로 인식하는 이유도 있다. 청색 형광체의 또 하나의 단점은 실제 패널 제작 시 열처리 공정 후 휘도 감소 현상과 Fig. 6에서 보듯이 제작 후 사용 중에 나

타나는 추가적인 휘도 감소 현상이다. 이에 대한 원인은 제시되는 여러 가지 이론들이 있지만 현재는 합성시 환원 분위기에서 유지될 수 있었던 Eu²⁺가 후막 제조를 위한 열처리 공정을 거치면서 형광체 표면부에서 Eu³⁺로 산화되고, 그 후 픽셀 내에서 플라즈마에 장시간 노출됨으로써 형광체 모체 표면도 결정성 저하가 나타나거나 2차상이 생성되는 것이 그 원인이라고 생각되어지고 있다. 따라서 일부에서는 이를 억제하기 위하여 BAM 형광체의 표면처리에 대한 연구가 진행되고 있다.

비록 2000년대 초반부터 PDP의 양산화가 시작되었지만 CRT에 버금가는 수준의 화질을 구현하기 위해서는 현재 사용 중인 형광체보다 우수한 발광특성을 지니는 형광체의 개발이 수반되어야 한다. 발광 특성상 가장 취약한 점을 지닌 청색 형광체의 경우 현재까지 기존의 BAM를 대체할만한 형광체 재료가 나타나고 있지 못한 실정이지만, BAM 형광체의 표면 개선이나 합성법 변화를 통한 형광체 분말 특성의 향상에 의한 휘도 증진 차원에서 더 나아가, 궁극적으로 147 nm 또는 173 nm에서 보다 높은 양자 효율을 보이는 새로운 형광체 재료를 찾아야 타 디스플레이에 필적할 수 있는 화질의 개선을 이룰 수 있을 것으로 생각된다. 분말 표면의 결정성이 좋은 Phosphate같은 재료를 모체로 하여 양이온을 치환하거나 고용시킴으로써 VUV 흡수 파장대를 변화시키거나, 격자상수 변화를 통한 결정장(Crystal Field) 조절을 통해 색좌표를 개선하는 등의 연구가 그 좋은 예일 것이다.

2-3. LED

1960년대 말에 GaAsP가 상용화되면서 표시램프용으

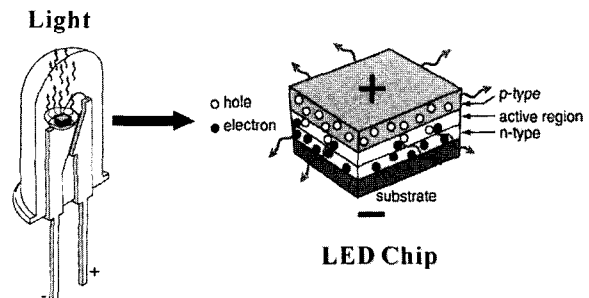


Fig. 7. Structure of LED.

로 사용되기 시작한 LED는 발열이 없고, 내충격성, 신뢰성, 낮은 전류에 의해서도 작동이 된다는 여러 가지 장점을 지니고 있어 극심한 환경에서도 높은 안정성을 요구하는 우주선이나 군사용으로 응용되기 시작하였다. 1980년대 후반에 AlGaAs 적색 LED가 개발되면서 획기적인 에너지 변환 효율의 증대를 이루었고, InGaAlP가 개발되면서 휘도와 신뢰성이 높아진 적색-주황색 LED가 본격적으로 상용화되기 시작하였다. 이때까지만 해도 LED는 주로 적색 교통 신호등이나 자동차에 응용되었다. 1993년에 Nichia사에서 InGaN 청색 LED의 개발과 1995년의 녹색 LED의 개발이 이루어지면서 비로소 적색, 녹색, 청색 LED에 의한 full color 구현이 가능해졌다. 따라서 이를 이용한 초대형 full color 옥외의 광고판과 같은 대형디스플레이의 제작이 가능하게 되었다.

2000년대에 들어서면서 LED의 휘도가 백열 전구 수준을 훨씬 넘어섬에 따라 이를 이용한 차세대 백색 조명 기구의 개발에 비상한 관심이 모아지고 있다. 1W짜리 백열전구의 소비전력이 660 mW인데 비하여 LED의 경우에는 330 mW인 점을 보더라도 LED를 이용한 조명 기구 대체에 의한 막대한 에너지 절감효과를 얻을 수 있다는 것을 쉽게 예측할 수 있다. LED와 형광체의 조합에 의한 이른바 White LED의 현재 주시장은 컬러 휴대폰에 탑재되는 LCD의 백라이트이나, 근시일에 PDA와 노트북 모니터의 백라이트도 대체할 전망이다. Fig. 7은 전형적인 LED 소자의 구조를 나타낸다.

White LED는 사용 LED 광원과 형광체에 따라 크게 두 가지로 나뉜다. Fig. 8에 두 가지 White LED의 생성 원리를 나타내었다. 첫 번째 방법은 Nichia사가 1996년도에 개발한 제조방법으로 고휘도 InGaN계 청색 (~460 nm) LED 위에 YAG:Ce 황색 형광체를 도포하여 백색광을 얻는 방법이며, 두 번째 방법은 2001년에 Toyota사에서 개발한 GaN계 UV LED (370-400 nm)와 적색-녹색-청색 형광체를 조합하여 백색 광원을 얻는 방식이 있으나, 현재는 주로 청색 LED와 YAG:Ce을 조합한 White LED가 휴대폰의 백라이트로서 채택되고 있다.

그러나 차세대 백색조명 응용의 관점에서 볼 때 UV-LED와 적-녹-청색 형광체의 조합에 의한 White LED가 여러 가지 장점을 가진다. 청색 LED와 YAG:Ce에 의한

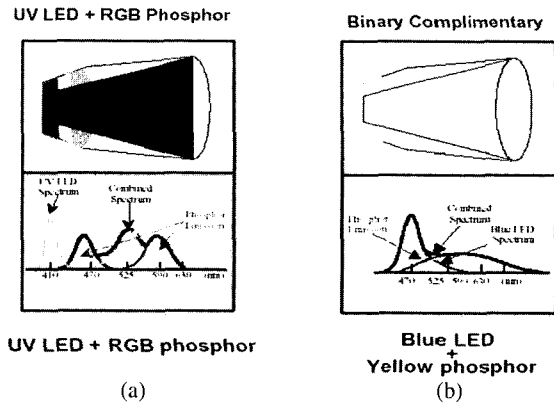


Fig. 8. Two ways of generating white light using LED. (b) blue LED + Yellow phosphors and (a) UV LED + Red, Green, and Blue phosphors.

White LED는 청색과 황색의 파장 간격이 넓어 Halo Effect를 보이는 점, CT (Color Temperature) CRI (Color Rendering Index)의 조절이 어려운 등의 단점을 지니는 반면, 형광등과 유사한 과정으로 백색광을 재현하는 UV-LED 방식은 아주 넓은 파장대의 스펙트럼을 가지고 있어 색안정성의 확보와 CT, CRI의 조절 가능 등의 장점을 지니고 있다. 따라서 이 방식에 의한 White LED가 차세대 조명용으로 많은 연구가 되고 있다.

UV-LED 방식에 응용되는 형광체는 적색으로는 $Y_2O_3:Eu, Bi$ 가 있는데, 일반조명용으로 이상적인 발광스펙트럼을 보이는 $Y_2O_3:Eu$ 이 사용되지 못하는 것은 LED에서 방출되는 370-400 nm 파장대의 UV를 효율적으로 흡수하지 못하기 때문이다. 그러므로 sensitizer인 Bi를 함께 도핑하여 370-400 nm의 긴 파장대의 UV를 효과적으로 흡수하고, Eu에 에너지 transfer를 일으켜 적색발광을 일으키는 $Y_2O_3:Eu, Bi$ 을 사용한다. 녹색 형광체로는 Tb, Mn 또는 Eu를 이용한 형광체가 사용될 수 있다. 현재 연구되고 있는 형광체로서 $Ln_xBO_3:Ce, Tb$ (여기서 Ln은 lanthanide 계열의 Sc, Y, La, Ga), $CaMgSi_2O_7:Eu, Sr_2SiO_4:Eu, Ca_8Mg(SiO_4)Cl_2:Eu, Mn$ 등이 있는데, Eu과 Mn를 co-doping하는 것도 적색형광체에서처럼 370 nm UV가 Eu에 의해 흡수되고, 여기된 에너지가 Mn으로 transfer되어 555 nm 근처의 녹색발광을 일으킬 수 있게 하기 때문이다. 청색으로는 PDP와 마찬가지로 BAM이 응용되는데, 이는 앞서 언급한대로 Eu이 UV에 의해 효과적으로 여기되고 모체인 Ba

Hexaaluminates의 결정장에서 청색 발광을 일으키기 때문이다. 이외의 청색 형광체로서 연구되고 있는 재료에는 SrMgSi₂O₇:Eu, CaMgSi₂O₆:Eu 등이 있다.

3. 맺음말

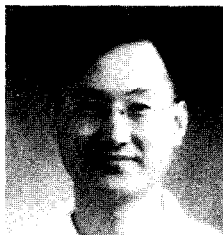
CRT와 평판디스플레이로 대별할 수 있는 전자디스플레이 시장은 2000년대를 넘어서면서 평판디스플레이의 점유율이 CRT와 대등한 수준에 육박하고 있다. LCD에 의해 주도되던 평판디스플레이의 급격한 성장세는 2000년대 초반부터 PDP가 양산화 되고, FED, LED 기술의 응용분야 확대 등으로 인해 Emitter 방식의 평판디스플레이가 차지하는 비중이 점차 확대되고 있다. 이에 발맞춰 PDP, FED 및 White LED 등 각 디스플레이 구동 조건에 맞는 형광체의 개발이 지속적으로 요구되고 있다.

디스플레이 기술 측면에서 볼 때, CRT로 대변할 수 있는 지난 한 세기 동안 이에 적합한 많은 상용 형광체들이 개발되어 디스플레이로서의 기능을 만족시켜주었던 것이, 아직은 본격적인 연구 개발의 역사가 짧다고 할 수 있는 FED, PDP, LED 등의 평판디스플레이도 현재 전세계적으로 집중적인 연구가 수행되고 있기에 근시일에 CRT를 능가하는 화질을 구현할 수 있게 되리라 기대한다. 이를 위해서는 휘도, 잔광시간, 물리-화학적 안정성 등이 개선된 형광체 개발이 반드시 따라야 함은 부언의 여지가 없으리라 생각된다. 현재 진행되고 있는 새로운 합성법의 도입, 표면처리, 입형 제어

및 입도 조절 등의 연구와 더불어 보다 근본적인 접근 방법, 즉 여기 에너지원에 맞는 새로운 형광모체와 활성제를 찾고 새로운 재료를 디자인하는 연구에도 많은 관심을 쏟아야 할 것으로 사료된다. 이는 비단 현시점의 평판디스플레이 개발을 위해서뿐만 아니라 앞으로 끊임없이 쏟아져 나올 새로운 개념의 디스플레이용 형광체 연구의 토대와 방법론을 마련할 수 있는 길이라 여겨진다.

4. 감사의 글

Georgia Institute of Technology의 Dr. Christopher J. Summers의 조언에 감사드리며, 부분적으로 이 논문은 한국과학재단의 해외 Post-doc. 연수지원에 의하여 연구되었음에 이에 감사드립니다.

	윤철수
	<ul style="list-style-type: none"> · 1993년 서울대학교 무기재료공학과 졸업 · 2001년 동대학원 재료공학 박사 · 2002년 Georgia Institute of Technology ~현재 연구원