

초학자를 위한 형광체 입문

유형선, 강동석, 전덕영 (한국과학기술원 신소재공학과)

I. 서 론

17 세기경 이탈리아의 연금술사인 Vincentinus Casciarolo 에 의해 처음으로 태양광에 의해 여기되었다가 어두운 곳에서 발광하는 물질이 관찰된 후에, 인류는 더 많은 종류의 발광 물질을 찾고 발광 메커니즘을 이해하고 발광 효율을 향상시키기 위해 많은 노력을 기울여왔다^[1]. 특히 1897년 CRT(Cathode-Ray Tube)가 발명된 후에 발광 물질에 대한 연구가 본격적이고 체계적으로 시작되었고, 오늘날에는 디스플레이, 조명뿐만 아니라 X-ray 검출, 태양 전지에서 에너지 수확, 의료, 보안등 여러 가지 응용 분야에 널리 활용되고 있다.

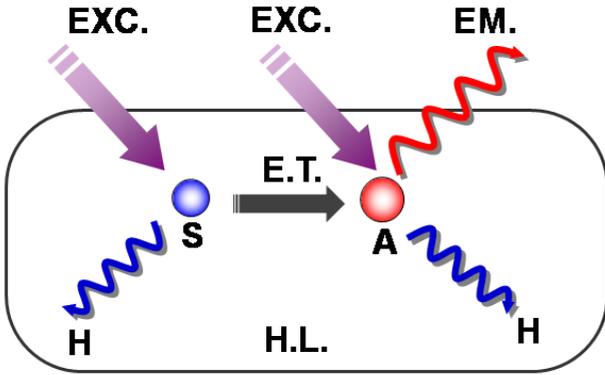
발광 물질은 외부로부터 공급된 에너지를 흡수하여 가시광선 영역의 빛 에너지를 방출하는 물질로, 발생된 빛

의 특성은 해당 발광 물질이 갖는 고유의 에너지 준위 상태 및 천이에 따라 달라진다. 발광 현상은 공급된 외부 에너지의 종류에 따라 분류할 수 있으며 이에 따라 발광 물질의 종류와 응용 범위가 달라진다 [표 1]. OLED(Organic Light Emitting Diode)를 제외한 대부분의 디스플레이 및 조명 소자에는 무기물 발광 물질이 사용되는데, 이러한 무기물 발광 물질을 흔히 형광체라고 부른다. 형광체는 분말 혹은 박막 형태를 취하는데, 현재 상용화되고 있는 대부분의 디스플레이 및 조명 소자에는 분말 형태의 형광체가 사용된다. 형광체는 각 디스플레이 및 조명 소자에서 직접적으로 빛을 내는 역할을 하는 핵심 소재이므로, 사용된 형광체의 발광 특성은 소자의 성능에 큰 영향을 미친다.

[그림 1]에 나타낸 바와 같이, 형광체는 일반적으로 모

[표 1] 외부 에너지원에 따른 발광 현상의 분류 및 주요 응용 분야

발광 현상	외부에너지		주요 응용 분야
광 발광 Photoluminescence	빛	X-ray	(방사선) 선량계, 의료 분야 등
		Vacuum ultraviolet(UV) ~ 200 nm	Neon sign PDP(Plasma Display Panel)
		UV 200 ~ 400 nm	형광 램프(Fluorescent Lamp) CCFL(Cold Cathode Fluorescent Lamp)
		Near UV, 가시광선 400 nm ~	백색 LED(Light Emitting Diode) 형광/야광 안료
음극선 발광 Cathodoluminescence	전자빔	10 ~ 40 kV	CRT(Cathode Ray Tube)
		300 ~ 3,000 V	FED(Field Emission Display)
		~ 100 V	VFD(Vacuum Fluorescent Display)
전계 발광 Electroluminescence	고전압 AC/DC field		ELD(Electroluminescence Display)



[그림 1] 형광체의 구성 H.L.(Host Lattice): 모체; A(activator): 활성 이온, S(Sensitizer): 부활성제, EXC.(Excitation) 외부 에너지에 의한 여기, E.T.(Energy Transfer): 에너지 전달, EM.(Emission): 발광, H(Heat): 열적 진동

체(Host Lattice)와 모체 내에 고르게 도핑(doping)된 활성 이온(activator)으로 구성된다. 활성 이온의 농도는 형광체의 종류에 따라 수 ppm(parts per million)에서 수십 퍼센트에 이른다. 모체는 활성 이온을 지지해 주는 역할을 하며 외부로부터 공급된 에너지를 흡수하여 활성 이온에 전달해 주는 역할을 한다. 활성 이온은 에너지를 전달 받아 직접적으로 빛을 내는 역할을 하지만, 직접 외부 에너지를 흡수할 수도 있다. 활성 이온의 전자 에너지 준위 및 천이는 형광체의 발광 파장을 직접적으로 결정하며 발광 효율에도 큰 영향을 미친다. 활성 이온으로는 희토류 및 전이 금속 이온이 주로 쓰인다. 경우에 따라, 에너지 전달이 더욱 효과적으로 일어나도록 돕거나 모체 내에서 활성 이온의 전하 균형을 맞추기 위해 부활성제(sensitizer)가 추가적으로 사용되기도 한다. 예를 들어, $\text{BaGa}_2\text{S}_4: \text{Eu}^{2+}$, Ce^{3+} 형광체에서 cubic 구조를 갖는 BaGa_2S_4 는 모체에 해당하고 Eu^{2+} 이온은 활성 이온으로 작용하며 Ce^{3+} 이온은 직접적으로 가시광선을 발광하기 보다는 외부로부터 공급된 에너지를 흡수하여 활성 이온인 Eu^{2+} 이온에 전달해주는 부활성제로 작용한다 [2].

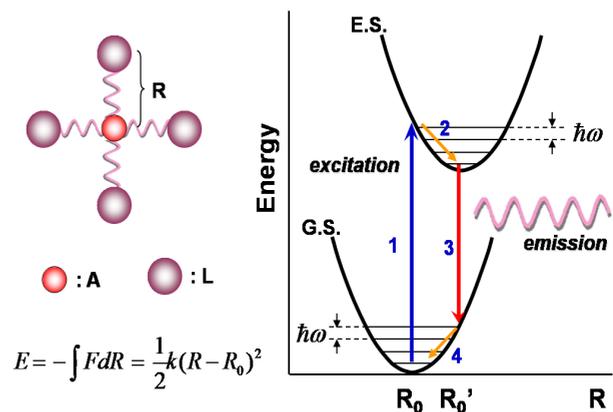
본 글은 형광체에 대해 연구 개발하는데 있어 반드시 습득되어야 할 기초적인 내용을 다루고자 한다. 구체적으로 형광체의 발광 메커니즘, 합성 및 표면 처리에 대한 기술적 이슈, 형광체의 발광 특성 등 형광체의 기초를 설명하여 형광체에 대한 이해를 돕고자 한다.

II. 형광체의 발광 메커니즘

형광체가 외부 에너지를 흡수하여 가시광선 영역의 빛을 내는 과정을 쉽게 이해하기 위하여, 활성 이온을 둘러싸고 있는 주변 이온들이 활성 이온을 중심으로 symmetrical stretching vibrational mode로 조화 진동을 하고 있는 단순화된 단위조직을 생각하자. 진동에 의해 발생하는 힘은 평형 위치로부터 벗어난 거리에 비례하므로, 활성 이온의 potential 에너지는 거리의 제곱에 비례한다. 따라서 [그림 2]의 configurational coordinate diagram에 나타난 바와 같이 활성 이온이 느끼는 potential energy는 평형 위치로부터 벗어난 거리에 대해 포물선 형태의 관계를 갖는다. 외부로부터 에너지가 공급되면,

- (1) 전자가 기저 상태에서 여기 상태로 여기.
- (2) 여기 상태의 최저 준위로 비발광 천이.
- (3) 여기 상태에서 기저 상태로의 발광 천이.
- (4) 기저 상태의 최저 준위로 비발광 천이.

의 과정을 거쳐 형광체가 발광하게 된다. 이러한 과정을 여러 가지 경우로 나누어 더욱 구체적으로 살펴보도록 한다.



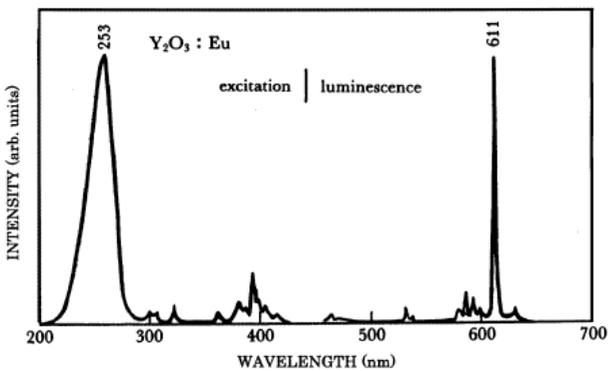
[그림 2] Symmetrical stretching vibrational mode와 configurational coordinate diagram; L(Ligand): 주변 이온, G.S.(Ground State): 기저 상태, E.S.(Excited State): 여기 상태

1. 여기 메커니즘

형광체가 외부 에너지를 흡수하여 여기되는 경우는 크게 모체에 의한 흡수, 모체와 활성 이온 간 전하 이동(charge transfer)에 의한 흡수, 활성 이온에 의한 직접적인 흡수 등으로 나누어 볼 수 있다.

CRT용으로 주로 사용되었던(Zn, Cd)(S, Se)계 형광체와 같이 모체가 반도체 특성을 갖는 경우, 모체의 에너지 밴드 갭보다 큰 외부 에너지가 공급되면 모체가 에너지를 흡수하여 conduction band와 valence band에 각각 자유전자와 정공이 형성된다. 그러나 그 밖의 대부분의 모체 흡수는 자유 전자와 정공의 delocalization을 수반하지 않는다. 가령 YVO₄와 같은 모체에서는 VO₄³⁻ 그룹 내에 전자-정공 쌍을 형성하며 외부 에너지를 흡수하기도 하고, 할로겐화물 조성의 모체에서는 할로겐 이온 내에서의 전자의 이동을 수반하며 외부 에너지를 흡수하기도 한다.

한편 모체 내 음이온의 전자가 활성 이온의 에너지 준위로 이동(전하 이동)하며 외부 에너지를 흡수하기도 한다. 가령 Y₂O₃:Eu³⁺ 형광체는 O²⁻ 이온에서 Eu³⁺ 이온으로 전자가 이동하면서 외부 에너지를 흡수하며, [그림 3]에 나타낸 바와 같이 여기 스펙트럼 내 253 nm 부근에 이에 따른 강한 흡수 밴드를 갖는다. 전하 이동에 필요한 에너지는 음이온의 전기 음성도와 밀접하게 관련되어 있다. 음이온의 전기 음성도가 클수록 이온결합성이 강하여, 전자를 떼어내는데 필요한 에너지가 증가하기 때문에 전하 이동 밴드가 단파장 영역으로 이동한다. 따라서 YF₃:Eu³⁺ 형광체의 전하 이동 밴드는 Y₂O₃:Eu³⁺ 형광체의 경우에

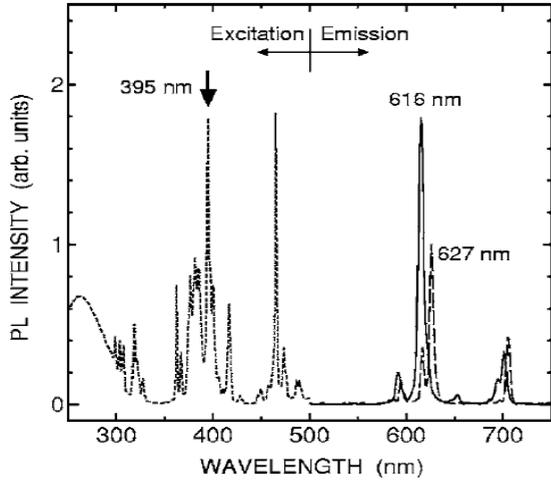


[그림 3] Y₂O₃:Eu³⁺ 형광체의 여기 및 발광 스펙트럼^[3]

비해 단파장 영역에 위치하게 되고, Y₂O₂S:Eu³⁺ 형광체의 전하 이동 밴드는 상대적으로 장파장 영역에 위치하게 된다.

앞서 설명한 바와 같이, 활성 이온으로는 전이 금속 및 희토류 금속 이온이 주로 사용되며 활성 이온의 에너지 준위간 천이에 의해서도 외부 에너지를 직접 흡수할 수 있다. 먼저 전이 금속 이온은 완전히 채워지지 않은 *d* 오비탈의 에너지 준위간 전자 천이를 수반하며 외부 에너지를 흡수한다. 희토류 금속 이온의 경우 4*f* 준위와 5*d* 준위간의 천이 혹은 4*f* 준위간 천이를 수반하며 외부 에너지를 흡수할 수 있다. 특별히 Eu²⁺ 이온과 Ce³⁺ 이온의 경우 4*f*5*d* 천이에 의한 흡수 밴드가 다른 이온들에 비해 낮은 에너지 영역에 위치하여, 최근 근자외선 및 청색광 영역에 강하고 넓은 흡수 밴드를 요구하는 백색 LED용 형광체에 주로 사용되고 있다. 이러한 희토류 금속 이온의 4*f*5*d* 전이는 선택 규칙에 허용되므로 강하고 넓은 흡수 밴드를 갖는다. 반면 희토류 금속 이온의 4*f* 준위간 천이는 선택 규칙에 의해 허용되지 않으므로, 대체로 흡수 밴드의 폭이 좁고 강도는 약하다. 또한 희토류 금속의 4*f* 전자들은 외부의 5*s*, 5*p* 전자들에 의해 차폐되어 있어, 주변 이온에 의한 영향을 적게 받아 흡수 밴드의 위치가 모체의 구성에 따라 크게 변하지 않는다. [그림 3]의 300 nm 내지 450 nm의 흡수 밴드가 이에 해당한다.

희토류 금속 이온의 4*f* 준위간 천이를 이용할 때 가장 중요한 점은 높은 도핑 농도까지 농도 소광(concentration quenching) 현상이 관찰되지 않는 모체를 탐색하는 것이다. 농도 소광은 흡수된 에너지가 발광으로 이어지지 않은 채 같은 에너지 준위를 갖는 여러 활성 이온을 거쳐 공명 전달된 후 결국에 표면 결함 등으로 전달되어 소멸되어 버리는 현상을 말한다. 활성 이온의 농도가 높을수록 공명 전달될 확률이 높아지므로 농도 소광 현상이 나타나기 쉽다. 4*f* 준위간 천이 흡수는 전적으로 활성 이온에 의해 나타나므로, 활성 이온의 농도가 증가할수록 더욱 강한 흡수 밴드를 갖게 된다. 층상 구조를 갖는 모체는 높은 도핑 농도까지 농도 소광 현상이 관찰되지 않는 대표적인 모체이다. 층상 구조를 갖는 La_{2-x}W₃O₁₂:xEu³⁺ 형광체에서 최적 Eu³⁺ 이온의 농도는 무려 75 mol%이었으



[그림 4] La_{0.5}Eu_{1.5}W₃O₁₂ 형광체의 여기 (dot line) 및 발광 (solid line) 스펙트럼. Y₂O₃:Eu³⁺ 형광체의 발광 스펙트럼 (dash line)과 비교^[4]

며^[4], [그림 4]에 나타난 바와 같이 300 nm 내지 500 nm 부근의 4f 준위 흡수 강도가 Y₂O₃:Eu³⁺ 형광체 [그림 3]의 경우에 비해 월등히 증가됨을 알 수 있다.

한편 전이 금속의 d 준위간 천이 역시 선택 규칙에 의해 허용되지 않으므로 대체로 흡수 밴드의 폭이 좁고 강도는 약하다. 그러나 전이 금속의 d 전자들은 다른 전자들에 의해 차폐되어 있지 않으므로, 주변 이온에 의해 발생하는 결정장에 크게 영향 받는다.

2. 발광 메커니즘

외부 에너지를 흡수하여 여기된 전자는 에너지를 잃으며 다시 기저 상태로 되돌아오고, 이때 가시광선 영역의 빛이 방출된다. 발광 특성은 활성 이온의 에너지 준위에 직접적으로 영향을 받으므로, 발광 메커니즘을 활성 이온의 종류에 따라 구분해볼 수 있다.

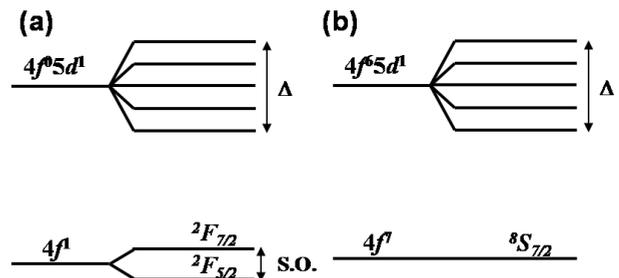
먼저 희토류 금속의 3가 이온들은 대체로 4f 준위간 천이에 의해 발광한다. 대표적으로 Eu³⁺, Tb³⁺, Sm³⁺, Gd³⁺, Pr³⁺, Dy³⁺ 등이 이에 해당한다. 5s, 5p 전자들에 의해 차폐된 4f 전자들은 주변 이온과 상호작용이 매우 적으므로 결정장의 크기가 매우 작고 configurational coordinate diagram 상에서 평형 위치로부터 벗어난 거리가 매우 작다. 따라서 [그림 3]과 [그림 4]에 나타난 것과 같이 모체의 구성에 따라 크게 변하지 않는 고유의 발광 스펙트럼

을 나타내며, 발광 밴드는 대체로 폭이 좁다. 따라서 4f 준위간 천이에 의해 발생된 빛의 색은 활성 이온의 종류에 의해 이미 정해졌다고 볼 수 있다.

몇몇 희토류 금속 이온들은 강하고 넓은 발광 밴드를 보인다. 이것은 4f-5d 천이를 일으키는 경우에 해당하며, Ce³⁺, Eu²⁺, Sm²⁺, Yb²⁺ 이온 등이 대표적이다. [그림 5]는 Ce³⁺ 이온과 Eu²⁺ 이온의 에너지 준위를 개략적으로 나타낸 것이다. 최외각에 존재하는 5d 전자들은 외부 결정장에 의해 크게 영향을 받아 에너지 준위가 분열된다. 발광은 5d 준위 중 가장 낮은 에너지 준위에서 4f 준위로의 천이에 의해 주로 나타나므로, 결정장의 크기가 변하면 형광체의 발광 파장은 변하게 된다. 결정장에 의해 5d 준위가 분열되는 정도(Δ_0)는 식 1에 나타난 바와 같이 활성 이온과 주변 이온 사이의 거리(a)에 크게 영향을 받는다^[5].

$$\Delta_0 = \frac{5}{3} Z e^2 \frac{r^4}{a^5}. \quad (\text{식 1})$$

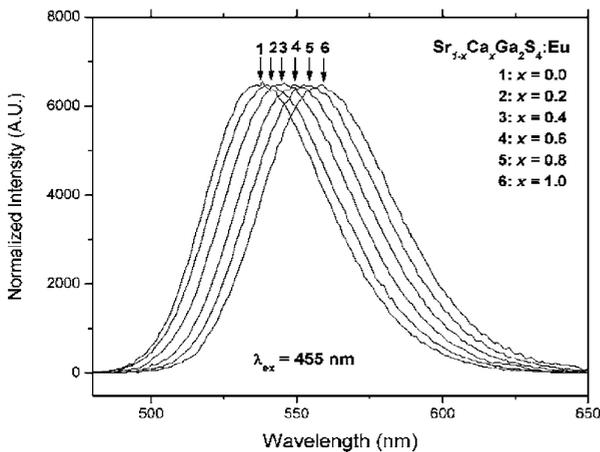
식 1에서 Z는 주변 음이온의 전하, e는 전자의 전하, r은 d 오비탈의 반경을 나타낸다. 따라서 모체의 조성 변화를 통해 활성 이온과 주변 이온 간의 거리를 제어하면 발광 파장을 손쉽게 제어할 수 있다. 예를 들어 Sr_{1-x}yCa_xGa₂S₄:yEu²⁺ 형광체의 경우 Eu²⁺ 이온의 농도(y)를 고정한 채 Ca²⁺ 이온의 농도(x)를 변화시키면, 모체는 orthorhombic 구조를 유지한 채 격자 상수가 줄면서 활성



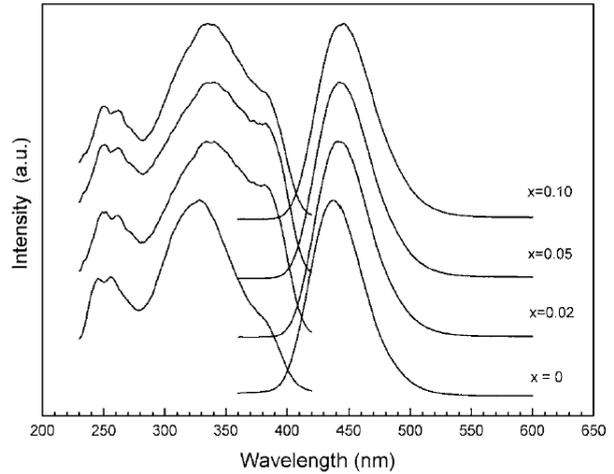
[그림 5] 단순화된 (a) Ce³⁺ 이온과 (b) Eu²⁺ 이온의 에너지 준위. S.O.(Spin Orbit coupling): 스핀-오빗 결합, Δ (Crystal field): 결정장

이온인 Eu^{2+} 이온과 주변 S^{2-} 이온 사이의 거리가 감소하게 된다. 그로 인해 결정장의 크기는 증가하게 되고 [그림 6]에 나타낸 바와 같이 발광 파장은 Ca^{2+} 이온의 농도(x)의 증가에 따라 점차 장파장 영역으로 이동한다 [6].

한편 $4f-5d$ 천이의 경우, 활성 이온과 주변 이온간의 공유 결합성(covalency)에 의해서도 발광 파장이 변한다. 공유 결합성이 증가하면 $5d$ 오비탈이 넓은 공간상에 퍼지면서 전자들 간의 상호 작용이 감소하고, 따라서 $4f$ 준위와 $5d$ 준위들의 대칭 중심(center of symmetry)간 에너지 차이가 줄어들게 된다. 이러한 현상을 nephelauxetic effect라고 하며, 이러한 이유로 활성 이온과 주변 이온간의 공유 결합성이 증가할수록 발광 파장은 장파장 영역으로 이동하게 된다. [그림 7]은 $\text{CaAl}_{2-x}\text{Si}_x\text{O}_{4-x}\text{N}_x:\text{Eu}^{2+}$ 형광체의 여기 및 발광 스펙트럼을 나타낸다. O^{2-} 이온을 전기음성도가 작은 N^{3-} 이온으로 치환할수록 Eu^{2+} 이온과 주변 이온들 간의 공유결합성이 점차 증가하여 발광 파장이 점차 장파장 영역으로 이동하는 것을 확인할 수 있다 [7]. $4f-5d$ 천이를 일으키는 경우 활성 이온은 주변 이온과의 상호 작용이 크므로 configurational coordinate diagram 상에서 평형 위치로부터 벗어난 거리가 매우 크므로, [그림 6]과 [그림 7]에 나타낸 바와 같이 발광 밴드가 넓다. 또한 $4f-5d$ 천이는 선택 규칙에 의해 허용되어 발광 강도도 우수하고, 상대적으로 Stokes shift가 작아 활용 가치가



[그림 6] Ca^{2+} 이온의 농도를 달리하여 제조한 $\text{Sr}_{1-x}\text{Ca}_x\text{Ga}_2\text{S}_4:\text{Eu}^{2+}$ 형광체의 발광 스펙트럼 [6]



[그림 7] $\text{CaAl}_{2-x}\text{Si}_x\text{O}_{4-x}\text{N}_x:\text{Eu}^{2+}$ 형광체의 여기 및 발광 스펙트럼 [7]

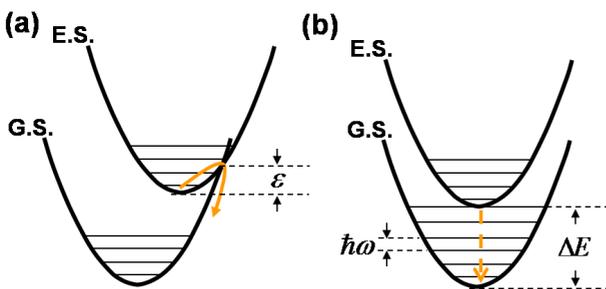
높다. 전이 금속의 d 준위간 천이는 선택 규칙에 의해 허용되지 않지만, 희토류 금속의 $4f$ 준위와 달리 주변 이온과 상호 작용이 크다. 그로인해 선택 규칙이 크게 완화되어 대체로 발광 밴드가 넓다. 또한 활성 이온으로 사용되는 대표적인 전이 금속 이온인 Mn^{2+} 이온의 경우, 주변 이온들에 의해 발생된 결정장의 크기에 따라 발광 색이 달라진다. Mn^{2+} 이온이 결정장의 크기가 작은 사면체 자리(tetrahedral site)에 치환되면 보통 녹색 발광을 하고, 결정장의 크기가 큰 팔면체 자리(octahedral site)에 치환되면 보통 적색 발광을 하게 된다. 따라서 모체의 조성을 디자인하여 Mn^{2+} 이온이 치환하는 자리를 제어하면 발광 파장을 제어할 수 있다.

3. 비발광 천이

앞서 [그림 2]에 나타낸 바와 같이 외부 에너지에 의해 전자가 기저 상태에서 여기 상태로 이동한 후, 여기 상태의 최저 에너지 준위로 되돌아가며 잉여 에너지를 주변에 발산한다. 마찬가지로 여기 상태에서 기저 상태로 발광 천이한 후, 기저 상태의 최저 준위로 되돌아가며 잉여 에너지를 주변에 발산한다. 이러한 과정을 relaxation 과정이라 하며 이때 발생된 잉여 에너지는 발광에 관여하지 않으므로 비발광 천이에 해당한다. 이러한 현상은 여기 상태 혹은 기저 상태에서 중심 금속 이온인 활성 이온이

평형 위치로 이동하는 과정에서 발생한다고 이해할 수 있다. Relaxation 과정에 의해, 일반적으로 흡수 파장 대역이 발광 파장 대역보다 단파장 영역에 존재하며 Stokes shift 현상이 관찰된다.

한편 열적 소광(thermal quenching) 등에 의해서도 비발광 천이가 나타날 수 있다. 먼저 온도가 높은 경우 모체의 열적 진동이 크므로, 여기된 활성 이온은 빛의 형태로 에너지를 방출하기 보다는 phonon의 형태로 방출하게 된다. 이러한 현상은 [그림 8]-(a)의 configurational coordinate diagram 상에서 평형 위치로부터 벗어난 거리가 클수록 열적 활성화 에너지(thermal activation energy, ϵ)가 감소하게 되어 일어날 확률이 높아진다. 따라서 일반적으로 형광체의 발광 강도는 측정 온도가 증가할수록 감소하게 된다. 한편 [그림 8]-(b)와 같이 평형 위치로부터 벗어난 거리가 매우 작은 경우에도 역시 비발광 천이가 일어날 확률이 높아진다. 이러한 경우는 희토류 금속 이온의 4f 준위간 천이 경우에 해당하며, 여기 상태에서 기저 상태로 되돌아오며 격자 진동의 형태로 에너지를 잃는다. 이러한 현상을 multi-phonon 현상이라 하며, 여기 상태와 기저 상태의 에너지 차이(ΔE)가 작을수록 일어날 확률이 증가한다. 실제 형광체에서는 일반적으로 여러 가지 configuration이 복합적으로 발생하므로, 열적 소광 현상과 multi-phonon 현상 등이 동시에 일어나기 쉽다. 이러한 비발광 천이는 형광체의 효율에 큰 영향을 미치므로 발광 메커니즘을 이해하는 것만큼 중요하다.



[그림 8] 비발광 천이 과정에 대한 configurational coordinate diagram. (a) 열적 소광 현상, (b) multi-phonon 현상

III. 형광체의 합성관련 이슈

1. 형광체의 합성

형광체의 발광 특성, 표면 특성 및 내구성 등은 형광체의 조성, 결정 구조, 결정성, 입자의 형태, 입자의 모양 등 다양한 요인에 의해 달라진다. 그리고 이러한 요인들은 형광체의 합성 기술 및 표면 처리 기술에 크게 영향을 받으므로, 이러한 기술적인 요인들에 대한 이해가 필요하다. 여기서는 현재 상용화되고 있는 디스플레이 및 조명 소자에 주로 사용되고 있는 분말 형광체에 초점을 맞춰 논의하고자 한다. 분말 형광체는 고상합성법과 침전법, 솔젤법, 연소합성법, 수열합성법 등의 액상 반응법과 기상합성법인 분무열분해법에 의해 제조되고 있다.

그 중 고상합성법은 분말 형광체 제조 시 가장 일반적으로 사용되고 있는 방법으로 대부분의 상용 형광체는 고상합성법을 통해 제조되고 있다. 고상합성법은 고체 분말 원료물질을 혼합한 후 고온에서 열처리하여 원료 물질 간의 확산을 통해 원하는 상(phase)를 형성하는 방법이다. 고상합성법은 합성 공정이 비교적 단순하고 수율이 높으며 합성 단가가 저렴하여 대량 생산에 용이하다. 그러나 상대적으로 열처리 온도가 높다는 단점이 있다. 열처리 중 원료 물질 간의 반응성을 높여 결정성을 향상시키고, 열처리 공정 온도를 낮추기 위해 화학량론 비에 맞는 원료 물질들에 추가적으로 용제(flux)를 사용하기도 한다. 용제로는 NH_4Cl , NH_4F , NaCl , AlF_3 , Li_2CO_3 , Na_2CO_3 등 녹는점이 비교적 낮은 물질들이 사용된다. 용제는 열처리 시 용해되어 표면 장력을 발생시키고 입자들의 이동 및 확산을 도와주어 결정의 성장 및 상 형성을 촉진한다. 형광체 합성에 적합한 용제는 먼저 형광체와 반응하여 양이온이 치환되거나 발광에 영향을 주어서는 안 되며 물과 같은 용제에 잘 용해되어 열처리 후 세정 공정 중에 잘 제거되어야 한다.

한편 형광체의 결정성을 향상시키고 특정 반응을 일으키거나 구성하고 있는 이온들의 전하수를 맞추기 위해 분위기 가스를 사용하기도 한다. 가령 황화물 형광체를 고상 합성법으로 합성하기 위해서 H_2S 나 CS_2 와 같이 황화 반응을 촉진할 수 있는 가스 분위기에서 열처리 할 수 있

다. 또한 $BaMgAl_{10}O_{17}$ 과 같은 모체의 Ba^{2+} 이온 자리를 Eu^{2+} 이온으로 치환하는 경우 Eu^{3+} 이온이 포함된 Eu_2O_3 를 원료 물질로 사용하는데, Eu^{3+} 이온을 환원시키기 위해 H_2 가스가 일부 혼합된 N_2 가스를 흘려 환원 분위기를 조성하여야 한다.

상기한 고상 합성법은 입자의 평균 직경이 $1 \mu m$ 이상의 벌크 형광체를 합성하는데 적합하다. 그러나 일반적으로 높은 결정성과 효율을 가급적 유지할 수 있다면, 형광체의 입자는 작고 구형의 형태를 취하는 것이 활용 및 형광막 제작 시 유리하다. 고온 장시간 열처리 공정을 수반하는 고상 합성법을 통하여 형광체 입자의 형태나 크기를 제어하는 것은 비교적 어렵다. 반면 솔젤법, 침전법, 수열 합성법 등의 액상 반응법은 입자의 크기 및 형태의 조절이 용이하여, 나노 형광체나 구형 형광체를 합성하는데 적합하다.

솔젤법은 금속 알콕사이드 혼합물을 물을 포함하는 용매에서 연속적인 가수 분해 및 축합 반응을 거쳐 젤 형태로 만든 후, 건조 및 추가적인 열처리를 통해 형광체를 얻는 방법이다. 솔젤법은 분자 단위에서의 화학 반응을 이용하므로 균일성이 높고 최적 열처리 온도가 낮으며, 입자의 크기 및 미세 구조 제어가 용이하다는 장점을 갖는다. 또한 솔젤법을 통해 분말, 섬유상, 코팅, 박막, 벌크 형광체 등 여러 가지 형태의 형광체를 얻을 수 있다. 반면 수산화기 혹은 유기물이 잔류할 수 있고 수율이 낮은 편이다. 침전법은 금속염을 원료 물질로 사용하고 비교적 반응 속도가 빠르다는 점을 제외하면 솔젤법과 유사하다. 침전법을 통해 얻어지는 침전물은 대체로 분말의 형태를 취하며 수산염의 조성을 갖는다. Urea와 ester와 같은 침전제를 사용하는 경우 반응 속도를 손쉽게 제어할 수 있어, 단분산 구형의 형광체를 얻을 수 있다^[8]. 한편 수열 합성법은 autoclave 반응기를 이용함으로써, 원료 물질의 수용액을 $100^\circ C$, 1 기압 이상의 조건에서 반응시키는 방법이다. 수열합성법은 온도와 압력의 조건을 동시에 제어함으로써 여러 가지 형태의 분말을 얻을 수 있고 열처리 온도를 낮출 수 있다는 장점이 있다. 최근 많은 연구자들이 위와 같은 액상 반응법 등을 통해 여러 가지 조성의 형광체를 합성하고 있으며, 제조된 형광체는 대체로 $1 \mu m$

이하의 작은 크기를 갖는다. 그러나 액상 반응법은 공정이 복잡하고 대체로 공정비용이 높다. 또한 얻어진 미세(나노) 형광체 분말은 비표면적이 높고, 대체로 결정성 및 발광 효율이 낮아 실제 사업성은 낮은 편이다. 이러한 형광체의 활용도를 더욱 향상시키기 위해서는 표면 처리 기술에 대한 연구도 활발히 진행되어야 한다.

기상 합성법인 분무열분해법은 전구체 용액을 미세한 액적 형태로 분무한 후 반응기에서 건조 및 열처리를 통해 입자를 제조하는 방법이다. 이때 공기 중에 분무된 액적이 구형의 형태를 취하므로 구형의 형광체 분말을 쉽게 얻을 수 있다. 그러나 입자의 크기 분포가 매우 크며, 액적의 외부에서부터 결정화가 일어나면서 내부가 텅 빈 구조를 갖는다는 점 등이 분무열분해법의 큰 단점이다. 최근 많은 연구를 통해 이러한 문제를 해결하기 위해 노력하고 있다.

2. 표면 처리 기술

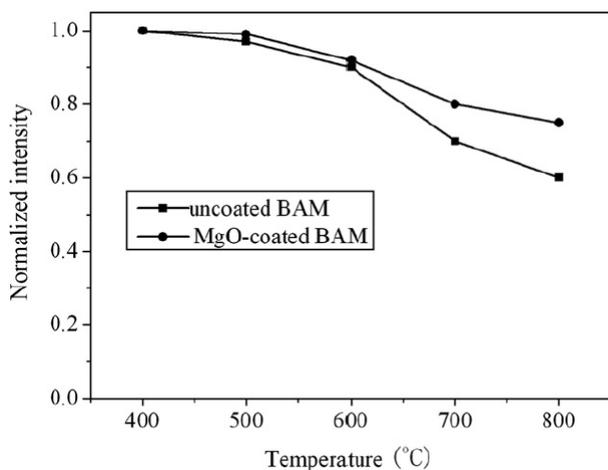
형광체의 표면은 발생된 빛이 외부로 빠져나가는 통로 입과 동시에 또한 일종의 결함으로 작용한다. 따라서 형광체의 표면 처리는 매우 중요하며, 실제 표면 처리를 통해 형광체의 특성을 더욱 향상시킬 수 있다. 일반적으로 표면 처리는 형광체의 열적 화학적 변화를 방지하거나 정전기적인 특성을 이용하여 형광체의 발광 효율을 증가시키거나 슬러리 제조 시 분산성과 흐름성을 향상시키기 위해 수행된다. 이들 각각의 용도에 따라 몇 가지 예를 소개하고자 한다.

ZnS 계열의 황화물 형광체는 CRT 용으로 널리 사용되어 왔으며, 최근에는 thiogallate 계열의 황화물 형광체는 백색 LED 용으로 연구되어 왔다. 황화물 형광체는 발광 특성이 비교적 우수하지만 화학적, 열적 안정성이 상대적으로 매우 낮은 단점을 가지고 있다. 그러나 SiO_2 , Al_2O_3 와 같은 무기물로 표면을 코팅하면, 형광체 표면이 수분이나 산소와 반응하여 산화되는 것을 방지하여 황화물 형광체의 열적, 화학적 안정성을 크게 향상시킬 수 있다^[9].

한편 PDP나 형광등 등의 소자 제작 시, 형광체 분말에 레올로지 특성을 부여하기 위해 고분자 바인더와 혼합하여 페이스트를 만들어 사용한다. 형광체 페이스트를 도포

한 후에 발광에 참여하지 않는 고분자 바인더 등은 후열처리 공정을 통해 제거된다. 이때 많은 조성의 형광체가 열화되어 발광 강도가 감소하게 된다. 특히 PDP, 형광등, CCFL 등 여러 분야에 널리 활용되었던 청색 발광 $\text{BaMgAl}_{10}\text{O}_{17}:\text{Eu}^{2+}$ 형광체의 열화 문제는 많은 연구자들의 빈번한 연구주제가 되어 왔다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 $\text{BaMgAl}_{10}\text{O}_{17}:\text{Eu}^{2+}$ 형광체의 표면에 SiO_2 와 MgO 와 같은 무기물을 코팅하는 연구가 수행되었으며, [그림 9]에 나타낸 바와 같이 표면 코팅을 통해 후열처리 공정에서 발생하는 형광체의 열화 문제를 개선할 수 있었다^[10]. 이러한 코팅막은 후열처리 중 Eu^{2+} 이온이 Eu^{3+} 로 산화되는 것을 막아주는 역할을 한다.

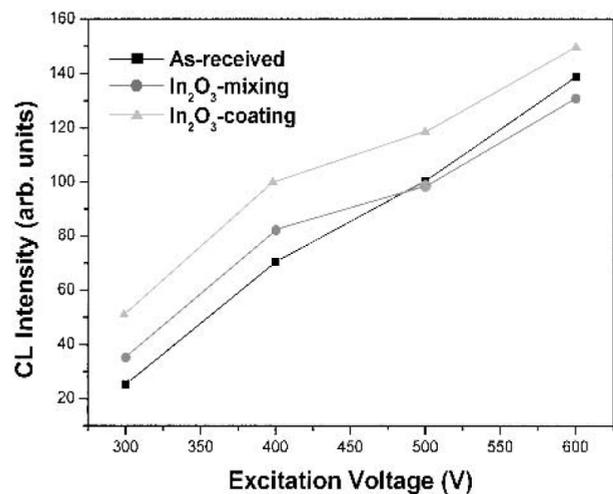
PDP, FED 용 형광체는 진공 자외선과 저속 전자빔에 의해 각각 여기되는데, 이러한 여기원들은 무기물 형광체에 대한 침투 깊이가 깊지 못하다. 따라서 형광체의 발광이 주로 표면에서 일어나게 되어 형광체의 표면 특성이 발광 특성에 큰 영향을 미친다. 먼저 PDP용 청색 형광체로 주로 사용되는 $\text{BaMgAl}_{10}\text{O}_{17}:\text{Eu}^{2+}$ 형광체의 표면에는 본질적으로 많은 결함이 존재한다. 이러한 결함들은 표면 처리를 통해 안정화될 수 있으며, 이를 통해 형광체의 발광 특성 역시 개선될 수 있다. 가령 $\text{BaMgAl}_{10}\text{O}_{17}:\text{Eu}^{2+}$ 형광체의 표면에 SiO_2 를 코팅하면 표면 결함으로 인한 비발광 전이를 줄여 발광 효율을 향상시킬 수 있다^[11]. PDP



[그림 9] MgO 코팅 전/후 $\text{BaMgAl}_{10}\text{O}_{17}:\text{Eu}^{2+}$ (BAM) 형광체의 후열처리 온도에 따른 발광 강도 변화^[10]

용 녹색 형광체로 사용되는 $\text{Zn}_2\text{SiO}_4:\text{Mn}^{2+}$ 형광체는 제조 공정 중 ZnO 의 상대적으로 낮은 증기압으로 인해, 표면에 주로 SiO_2 가 존재하게 되어 음전하로 대전된다. 따라서 방전 개시 전압이 증가되는 문제가 발생하는데 이는 양전하 표면 특성을 갖는 MgO 를 $\text{Zn}_2\text{SiO}_4:\text{Mn}^{2+}$ 형광체의 표면에 코팅함으로써 개선시킬 수 있다. FED 용 형광체 역시 표면 전하 상태를 변화시킴으로써 발광 효율을 향상시킬 수 있다. 저전압 형광체로 연구되었던 $\text{ZnS}:\text{Ag}$, Cl 형광체를 염기 용액으로 처리하면 표면이 음전하로 대전되는데, 이것이 형광체 내에서 전자빔을 더욱 가속시켜 형광체의 효율을 향상시킨다^[12]. 또한 대부분의 FED용 형광체는 전기전도도가 낮아 표면에 전자가 축적되기 쉬우며, 축적된 전자는 전자빔의 침투 깊이 및 발광 효율을 낮추는 문제를 가지고 있다. 이러한 문제는 In_2O_3 와 같은 전도성 물질을 형광체 분말에 섞거나 표면에 코팅함으로써 개선시킬 수 있으며, 이를 통해 [그림 10]에 나타낸 바와 같이 CL 발광 강도를 향상시킬 수 있었다^[13].

상기한 바와 같이, 형광체의 표면 처리는 여러 가지 방식으로 형광체의 특성을 향상시킬 수 있다. 표면 처리는 일반적으로 코팅을 통해 이루어지는데, 코팅 물질의 선정 시 유의할 사항을 정리해 볼 수 있다. 먼저 코팅 물질은 형광체의 실제 사용 중 겪을 수 있는 열적, 기계적, 화학적 변화로부터 형광체를 보호할 수 있어야 한다. 또한 가시광



[그림 10] In_2O_3 분말의 mixing 및 표면 coating 후 $\text{ZnGa}_2\text{O}_4:\text{Mn}^{2+}$ 형광체의 CL 발광 강도 변화^[13]

선 영역에서의 투과도가 높아 발생된 빛이 외부로 잘 빠져 나가도록 해야 한다. PDP 및 FED용 형광체는 진공 자외선이나 저속 전자빔에 대한 투과도가 높을수록 좋다. 마지막으로 코팅 물질은 형광체 표면과 결합력이 강해야 한다.

IV. 형광체의 발광 특성

형광체의 중요한 발광 특성으로는 발광 파장, 발광 효율, 잔광 시간 등을 꼽을 수 있으며, 이러한 형광체의 특성이 디스플레이 및 조명 소자의 성능에 큰 영향을 미친다. 앞서 기술한 바와 같이 형광체의 발광은 활성 이온의 에너지 준위에서의 에너지 천이에 의해 일어난다. 따라서 형광체에서 발생하는 빛의 파장 즉 발광 색은 활성 이온의 에너지 준위 상태에 따라 달라지며, 활성 이온의 종류에 따른 특성은 발광 메커니즘을 설명하며 기술한 바 있다. 여기서는 형광체의 발광 효율과 잔광 시간에 대해 간략하게 소개하고자 한다.

1. 발광 효율

디스플레이 및 조명 소자의 특성을 나타내는 가장 중요한 지표 중 하나는 바로 밝기 즉 휘도이다. 형광체는 각 소자에서 직접적으로 가시광선 영역의 빛을 발생시키므로, 소자의 휘도는 결국 형광체의 효율에 영향을 받는다. 외부로부터 공급된 에너지를 형광체가 가시광선 영역의 빛 에너지로 바꾸어주는 비율이 바로 형광체의 효율이 된다.

형광체의 효율은 발광 메커니즘 상의 각 단계 별 에너지 전달의 효율로부터 알아낼 수 있다. 앞서 기술한 바와 같이 형광체는 ① 외부 에너지를 흡수하는 단계, ② 흡수된 에너지가 활성 이온으로 전달되는 단계, ③ 활성 이온에서 빛을 생성하는 단계, ④ 발생된 빛이 형광체 표면을 빠져나오는 단계를 거치므로, 광 발광 현상에서 형광체의 외부 양자 효율(η_{EXE})은 식 2와 같이 각 단계 별 효율의 곱으로 나타낼 수 있다.

$$\eta_{EXT} = \eta_{AB} \times \eta_{TR} \times \eta_{AC} \times \eta_{EM} \quad (\text{식 2})$$

$$= \eta_{AB} \times \eta_{INT}$$

여기서 외부 양자 효율은 외부로부터 형광체에 공급된 광자 수에 대한 형광체에서 발생된 광자수의 비율을 의미한다. 반면 내부 양자 효율은 형광체에 공급된 광자 중 형광체에 흡수된 광자만을 고려한 효율이다. 따라서 ① 단계의 효율을 뺀 ② 단계, ③ 단계, ④ 단계의 효율의 곱으로 나타낼 수 있다. 양자 효율은 경우에 따라 100% 이상의 값을 가질 수 있다. 가령 VUV 영역의 광자를 흡수하여 가시광선 영역의 광자가 2개 이상 발생하게 된다면 양자 효율이 100% 이상의 값을 갖게 된다. 이러한 현상을 quantum cutting이라 불리며, Gd^{3+} , Eu^{3+} , Tb^{3+} 이온과 같은 4f 준위간 천이에 의해 발광하는 희토류 금속 이온들에서 주로 나타난다^[4]. 일반적으로 소자 혹은 양자 효율 측정 장치 내에서 정해진 형광체 양에 공급되는 외부 에너지와 형광체에서 발생된 빛 에너지를 정확하고 빠짐없이 측정하는 것은 어렵다. 따라서 절대적인 양자 효율을 측정하기 보다는 표준 시료를 이용하여 상대적인 수치를 나타내는 것이 보통이다. 광 발광 현상에서 형광체의 발광 효율은 양자 효율과 더불어 광자 에너지 변환 효율도 고려해야 한다. 즉 흡수된 광자 에너지와 발생된 광자 에너지 차이에 의해 Stokes shift가 나타나는데, 이로 인한 에너지 손실이 클수록 발광 효율은 낮아진다. 최근 백색 LED용 형광체로 각광 받고 있는 질화물계 형광체들의 경우, 적색 형광체들이 녹색 혹은 황색 형광체들에 비해 발광 효율이 상대적으로 낮은 것도 Stokes shift 차이에 의한 효과가 포함되어 있다.

한편 음극선 발광의 경우 외부 양자 효율은 식 3과 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta_{EXT} = (1 - r) \times \frac{h\nu_e}{E} \times \eta_{TR} \times \eta_{AC} \times \eta_{EM} \quad (\text{식 3})$$

여기서 r 은 배면 산란된 일차 전자의 비율, $h\nu_e$ 는 발생한 광자의 에너지, E 는 한 쌍의 전자-정공을 생성하기 위해 필요한 에너지를 의미한다.

앞서 살펴본 바와 같이 형광체의 효율은 발광 메커니즘의 각 단계별 효율에 영향을 받으므로, 형광체의 효율을 향상시키기 위한 전략을 단계별로 세워볼 수 있다. 먼

저, 형광체가 외부 에너지를 효과적으로 흡수할 수 있도록 형광체의 조성이 이루어져야 한다. 외부 에너지의 종류에 따라 이를 잘 흡수할 수 있는 모체의 조성을 선정하고 필요에 따라 부활성제를 적절히 활용하여야 한다. 둘째, 형광체 내의 불순물의 존재는 흡수된 에너지가 활성 이온으로 전달되는 효율을 현저하게 감소시킬 수 있으므로 불순물 혹은 이차상이 포함되지 않도록 제조 시 유의해야 한다. 특히 Fe^{2+} 와 같은 짝 없는(unpaired) 전자를 갖는 금속 이온들은 trap 준위를 형성하여 형광체의 발광에 치명적인 악영향을 끼치는 것으로 잘 알려져 있다. 셋째, 적절한 조성의 활성 이온이 선정되어야 한다. 일반적으로 전이 금속 및 희토류 금속 이온인 활성 이온이 모체의 양 이온을 치환하는데, 이때 모체의 양이온과 활성 이온 간의 이온 반경, 전하 상태 등이 유사하여 모체의 결정 구조 및 전자 상태 변화를 최소화하는 것이 바람직하다. 물론 경우에 따라 인위적으로 심각한 변화를 부여하여, 원하는 발광 특성을 얻도록 조성을 디자인 할 수 있다. 또한 앞서 설명한 바와 같이 농도 소광 현상에 의해 발광 효율이 감소하지 않도록 적절한 농도의 활성 이온을 사용하는 것이 바람직하다. 마지막으로, 활성 이온에서 발생한 빛이 최종적으로 형광체 표면을 빠져나가는 단계에서, 표면 결함은 비발광 천이를 일으키는 주된 요인으로 작용할 수 있다. 따라서 앞서 설명한 형광체의 표면 처리 기술을 적절히 활용하여 표면 결함에 의한 빛의 손실을 최소화해야 한다.

2. 잔광 시간

디스플레이 소자의 특성을 나타내는 또 다른 중요한 특성은 바로 이미지의 자연스러운 연속성이다. 어떤 이미지가 바로 다음 이미지가 나타날 때까지 사라지지 않으면 이미지들이 서로 겹쳐보이게 된다. 반대로 한 이미지가 지속되는 시간이 너무 짧아 다음 이미지가 나타나기 전에 사라져버리면 깜박이는 현상이 나타난다. 이러한 소자의 특성은 바로 사용된 형광체의 잔광 시간에 영향을 받는다.

형광체의 잔광 시간(τ)은 여기원을 제공했을 때의 발광 강도(I_0)와 비교할 때, 여기원을 제거한 후 I_0 의 $1/e$ (혹은 $1/10$) 까지 떨어지는데 걸리는 시간을 의미하며, 여기

원을 제거한 후 시간(t)에서의 발광 강도(I)와 식 4의 같은 관계를 갖는다.

$$I = I_0 \exp(-t/\tau) \quad (\text{식 4})$$

형광체의 발광 메커니즘 관점에서 볼 때, 잔광 시간은 여기된 전자가 여기 상태에서 기저 상태로 되돌아오는 시간에 큰 영향을 받는다. 즉 전자가 여기 상태에서 머무는 시간과 관련되어 있다. 따라서 형광체의 잔광 시간은 사용된 활성 이온의 종류에 따라 달라진다. 일반적으로 선택 규칙에 의해 허용된 4f-5d 발광 천이를 하는 희토류 금속 이온들은 잔광 시간이 $10^{-6} \sim 10^{-9}$ s 단위로 짧다. 그러나 4f 준위간 천이에 의해 발광하는 3가의 희토류 금속 이온들은 선택 규칙에 의해 천이가 억제되어 잔광 시간이 10^{-3} s 단위로 길어진다. 또한 d 준위간 천이에 의해 발광하는 전이 금속의 경우 역시 잔광 시간이 길다. 특히 PDP 용 녹색 발광 $Zn_2SiO_4:Mn^{2+}$ 형광체의 경우 다른 색 발광 형광체들에 비해 상대적으로 긴 잔광 시간이 형광체 연구자들에게 한 가지 이슈였다. 이를 해결하기 위해 추가적인 이온의 첨가, 형광체 입자의 크기 조절, 합성 방법의 변화, 활성 이온의 농도 변화 등을 통해 잔광 시간을 줄이는 연구가 수행되었다.

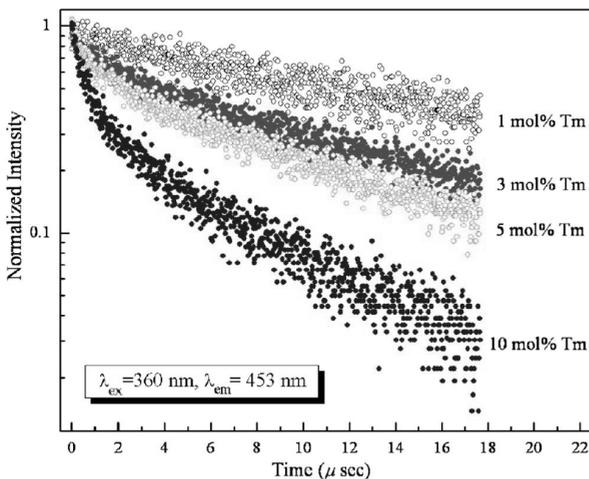
앞서 설명한 바와 같이 형광체에서 여기된 전자는 발광 천이를 통해 기저 상태로 되돌아가지만, 비발광 천이를 통해 되돌아 갈 수도 있다. 따라서 형광체의 전체 잔광 시간(τ)은 발광 천이로 인한 잔광 시간(τ_R)과 비발광 천이로 인한 잔광 시간(τ_{NR})에 영향을 받는다. 또한 활성 이온의 농도가 증가할수록 활성 이온 간의 공명 전달이 관여하므로 전체 잔광 시간은 식 5로 나타낼 수 있다.

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_R} + \frac{1}{\tau_{NR}} + \frac{1}{\tau_{AC}} \quad (\text{식 5})$$

여기서 $1/\tau_{AC}$ 는 활성 이온간의 에너지 전달률을 의미한다. 형광체에 결함 농도가 적거나 활성 이온의 농도가 적어 비발광 천이 및 활성 이온간 공명 전달이 무시할 정

도로 적은 경우에, 여기원 제거 후 시간에 따른 발광 강도 변화 즉 decay 곡선이 단순 지수의 형태로 나타난다. 하지만 형광체에서 비발광 천이 확률이 높아지고 활성 이온의 농도가 증가하면, 단순 지수 형태에서 벗어나 복합 지수 형태를 나타낸다. [그림 11]에 나타난 바와 같이 $\text{LaAlGe}_2\text{O}_7:\text{Tm}^{3+}$ 형광체에서 Tm^{3+} 이온의 농도가 1 mol%로 낮은 경우 단순 지수 형태의 곡선을 나타내었으나, Tm^{3+} 이온의 농도가 증가함에 따라 점차 복합 지수 형태를 나타내며 잔광시간이 감소한다.

Decay 곡선의 형태는 비발광 천이 확률, 활성 이온의 농도, 추가적인 이온의 첨가뿐만 아니라 활성 이온이 치환한 자리의 특성에도 영향을 받는다. 가령 여러 가지 자리를 갖는 모체에 활성 이온이 치환되었을 때, 활성 이온이 차지한 자리의 배위수, 주변 이온과의 거리 등의 특성이 잔광 시간에 영향을 미친다. 따라서 형광체의 잔광 시간을 이해하는 것은 활성 이온의 위치, 형광체의 발광 메커니즘 및 발광 효율을 이해하고 고찰하는 것에도 큰 도움을 준다. 따라서 형광체의 잔광 특성을 고찰하여 형광체에 대해 더욱 심도 있게 고찰하는 것은 물론 디스플레이 소자에서 요구되는 잔광 시간을 얻기 위해 형광체의 조성과 미세 구조를 디자인 할 수 있는 능력을 배양하는 것이 중요하다.



[그림 11] $\text{LaAlGe}_2\text{O}_7:\text{Tm}^{3+}$ 형광체에서 Tm^{3+} 이온의 농도를 달리하여 합성한 형광체 시료들의 decay 곡선^[15]

V. 맺음말

형광체는 인간이 필요로 하는 정보를 직접적으로 혹은 간접적으로 제공하는데 있어서 필수적이고 핵심적인 소재이다. 형광체는 현재 디스플레이 및 조명 소자에 주로 사용되고 있지만, 향후 의학, 보안 등 인간이 정보를 얻고자 하는 모든 분야에 널리 활용될 것임은 자명한 사실이다.

형광체를 이해하고 형광체에 대해 연구 개발하기 위해서는 형광체의 기초에 대해 이해하는 것이 필수적이다. 형광체의 기초는 형광체의 구성과 각 구성 물질의 역할, 그리고 발광 메커니즘을 구성 물질별, 활용 소자별로 구분하는 것으로부터 시작된다. 특히 형광체의 발광 메커니즘은 활성 이온의 종류에 따라 크게 달라지므로, 활성 이온의 종류별로 어떠한 특성을 갖는지 이해하는 것이 중요하다. 또한 형광체의 합성 및 표면 처리 기술은 형광체와 소자의 특성에 많은 영향을 미치므로 이에 대한 이해 역시 매우 중요하다. 아울러 형광체의 발광 파장, 발광 효율, 잔광 시간 등의 발광 특성은 형광체의 구성 물질 디자인 및 공정 조건 디자인을 통해 제어할 수 있으므로 이들 간의 상관관계를 명확히 이해하는 것도 형광체 연구 개발의 기초이다.

형광체에 대한 연구가 100년 이상 지속되어 왔지만, 아직도 전 세계적으로 많은 연구자들이 새로운 사회적, 환경적 니즈에 맞게 새로운 특성과 새로운 조성을 갖는 형광체 소재를 개발해 내고 있다. 또한 형광체의 제조 및 측정 기술이 지속적으로 발전하면서, 과거에 알지 못했거나 잘못 이해되었던 부분들이 명확해져 가고 있다. 형광체에 대한 기초를 확고히 하는 것을 바탕으로, 향후 인류에게 꼭 필요한 형광체 소재를 먼저 찾아내고 개발하여 대한민국이 형광체와 형광체 응용 분야의 선도국이 될 날을 기대해 본다.

참고 문헌

- [1] W. M. Yen, S. Shionoya, H. Yamamoto, "Phosphor Handbook" (CRC Press, 2006).

[2] H. S. Yoo, W. B. Im, S. Vaidyanathan, B. J. Park, D. Y. Jeon, *J. Electrochem. Soc.* **155**, J66 (2008).

[3] L. Ozawa, M. Itoh, *Chem. Rev.* **103**, 3835 (2003).

[4] S. Okamoto, H. Yamamoto, *Electrochem. Solid-State Lett.* **10**, J319 (2007).

[5] T. A. O'Brien, P. D. Rack, P. H. Holloway, M. C. Zerner, *J. Lumin.* **78**, 245 (1998).

[6] Y. R. Do, K. Y. Ko, S. H. Na, Y. D. Huh, *J. Electrochem. Soc.* **153**, H142 (2006).

[7] Y. Q. Li, G. de With, H. T. Hintzen, *J. Electrochem. Soc.* **153**, G278 (2006).

[8] H. S. Yoo, H. S. Jang, W. B. Im, J. H. Kang, D. Y. Jeon, *J. Mater. Res.* **22**, 2017 (2007).

[9] W. Park, J. H. Kim, J. S. Yoo, H. H. Shin, C. K. Kim, C. K. Choi, *J. Electrochem. Soc.* **155**, J132 (2008).

[10] H. Zhu, H. Yang, W. Fu, P. Zhu, M. Li, Y. Li, Y. Sui, S. Liu, G. Zou, *Mater. Lett.* **62**, 784 (2008).

[11] S. H. Sohn, J. H. Lee, S. M. Lee, *J. Lumin.* **129**, 478 (2009).

[12] D. C. Lee, S. A. Bukesov, S. Lee, J. H. Kang, D. Y. Jeon, D. H. Park, J. Y. Kim, *J. Electrochem. Soc.* **151**, H227 (2004).

[13] J. Y. Kim, D. Y. Jeon, I. Yu, and H. G. Yang, *J. Electrochem. Soc.* **147**, 3559 (2000).

[14] P. Vergeer, E. van den Pol, A. Meijerink, *J. Lumin.* **121**, 456 (2006).

[15] Y. C. Li, Y. H. Chang, Y. F. Lin, Y. J. Lin, Y. S. Chang, *Appl. Phys. Lett.* **89**, 081110 (2006).

강 동 석



- 한양대학교 신소재공학과 공학학사
- KAIST 신소재공학과 공학석사
- 2010년 2월~현재 : KAIST 신소재공학과 위촉연구원
- 관심분야 : 발광소재, 나노 결정, 페로브스카이트 소재

전 덕 영



- 서울대학교 해양학과 이학학사
- KAIST 물리학과 이학석사
- Lehigh University 물리학과 이학박사
- 1979년 3월~1982년 8월 : 한국표준과학연구원 (KRISS) 연구원
- 1988년 3월~1994년 8월 : AT&T Bell Labs Member of Technical Staff
- 1994년 9월~2002년 8월 : KAIST 신소재공

학과 부교수

- 2004년 8월~2005년 8월 : Fraunhofer IZM 방문교수
- 2008년 12월~현재 : World Class University (WCU) project 사업단장
- 2002년 9월~현재 : KAIST 신소재공학과 정교수
- 관심분야 : OLED, Flexible Display, ACPEL, LED 및 CCFL용 발광소재, 투명박막 발광 소재

저 자 약 력

유 형 선



- 고려대학교 신소재공학과 공학학사
- KAIST 신소재공학과 공학석사
- KAIST 신소재공학과 공학박사
- 2009년 12월~현재 : 한국과학기술정보연구원 정보분석본부 선임연구원
- 관심분야 : 디스플레이 및 조명용 발광 소재, 발광 메커니즘, 발광 광자 결정