

LED용 형광체에서의 에너지 전달

김태곤¹, 손기선² (¹삼성종합기술원 소재기술센터, ²순천대학교 인쇄전자공학과)

I. 서론

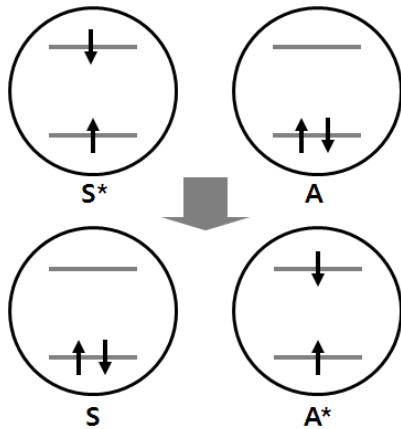
에너지 전달(energy transfer)이란 발광원(activator) 간의 물리적 상호작용을 매개로 여기된(excited) 에너지가 근접한 다른 발광원으로 이동하여 에너지가 공간적으로 전달되는 현상을 말한다. [그림 1]에 도식적으로 나타냈듯이 단지 에너지만을 전달할 뿐 직접적인 전하(charge)의 이동이 없다는 점에서 전하이동(charge transfer)과는 구분되는 현상이다. 에너지 전달은 발광원 간의 상호작용이 가능한 수 Å에서 수 nm에 이르는 미시적인 영역에서 매우 높은 확률로 발생한다. 따라서 호스트 결정 내에 수 nm 간격으로 발광원이 분포되어 있는 무기 형광체의 경우, 발광원 간, 발광원과 격자 원자 간, 발광원 및 격자 결합 간의 에너지 전달 현상이 복합적으로 발생하여 형광체

의 광 특성에 많은 영향을 주게 된다. 특히, 흡수된 에너지가 빛을 생산하는 발광원까지 도달하는 과정은 물론, 발광원에 도달한 여기 에너지가 어떤 과정을 통하여 소실되는지를 직접적으로 설명해 줄 수 있는 핵심적인 현상이다. 그러므로 에너지 전달 현상을 올바르게 이해하는 것은 형광체의 효율 및 색 특성을 개선하고 조절하는 데에 기본 요건이 된다. 본 원고에서는 형광체에서 발생하는 에너지 전달의 기본적인 개념 및 특징을 소개하고, 에너지 전달을 이용하는 형광체의 LED 소자에서의 가능성 및 한계에 대하여 살펴보고자 한다.

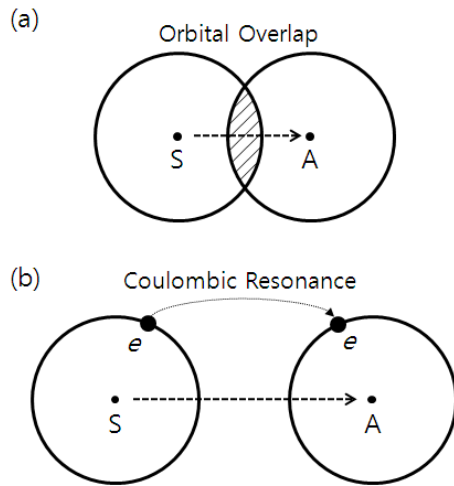
II. 에너지 전달의 원리

1. 교환 상호작용과 쿨롱 상호작용

여기된 발광원의 에너지가 다른 발광원으로 전달되기 위해서는 두 발광원 간의 물리적 상호작용이 필요하며, 상호작용은 그 방식에 따라 오비탈의 직접적인 중첩에 의한 교환 상호작용(exchange interaction, Dexter energy transfer)과 극성이 있는 오비탈의 전기적 공진을 통한 쿨롱 상호작용(coulomb interaction, Förster energy transfer)의 두 종류로 나눌 수 있다^[1]. [그림 2]에 두 종류의 상호작용을 도식적으로 나타내었다. 교환 상호작용에 의한 에너지 전달은 여기원(sensitizer)과 수용원(acceptor)의 전자 파동함수의 직접적인 중첩이 있는 경우에만 발생하므로 1차 근접 이웃(the first nearest neighbor) 정도의 짧은 거리에서 유효하며, 전달 확률이 발광원의 거리에 따라 지수함수 적으로 감소한다. 여기서 에너지 전달 확률이



[그림 1] 에너지 전달 전 후의 여기원(sensitizer, S)과 수용원(acceptor, A)의 전자 상태 변화



[그림 2] (a) 교환 상호작용 및 (b) 쿨롱 상호작용에 의한 에너지 전달을 나타내는 개략도. S 및 A는 각각 여기원과 수용원

50%가 되는 거리를 임계거리(critical distance)라고 하는데, 교환 상호작용에 의한 에너지 전달의 경우 약 1 nm 안팎의 값을 갖는다.

쿨롱 상호작용에 의한 에너지 전달은 여기원과 수용원의 전기장에 의한 상호 작용에 기반을 두는 만큼, 오비탈 중첩에 의한 에너지 전달 보다 긴 수 nm의 임계거리를 갖는다. 쿨롱 효과에 의한 에너지 전달은 공진에 참여하는 전자 오비탈의 극성 종류에 따라 쌍극자(dipole)-쌍극자, 쌍극자-사극자(quadrupole), 사극자-사극자 상호작용으로 나눌 수 있으며, 어떤 종류의 상호작용이 작동하는지는 여기(excitation)에 참여 하는 오비탈의 대칭성이 어떠한지에 따라 결정된다. 실험적으로는 에너지 전달 확률이 여기원과 수용원 간의 거리에 따라서 몇 차 함수적으로 변화하는지를 측정함으로써 확인할 수 있다. 무기 형광체에서 발광원으로 도핑되는 전이 금속, 희토류 금속 이온 간의 주요 에너지 전달 기구는 쿨롱 상호작용에 의한 경우가 많다.

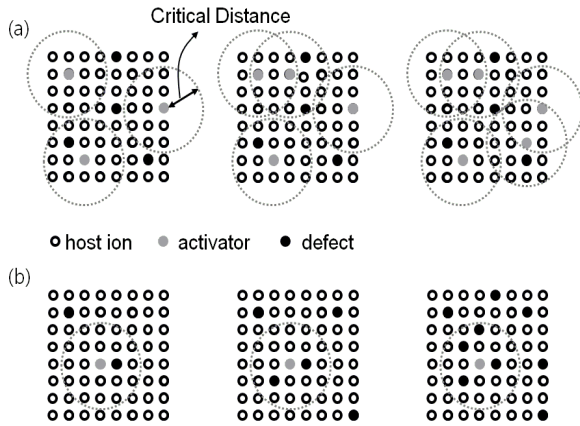
교환 또는 쿨롱 상호작용에 의한 에너지 전달 확률은 여기원의 발광 스펙트럼과 수용원의 흡수 스펙트럼이 얼마나 중첩되는가에 의해 좌우 된다. 따라서 두 종류의 발광원 간의 에너지 전달의 발생 여부는 개별 발광원의 흡수 및 발광 스펙트럼을 비교해 봄으로써 예측할 수 있다. 다만, 에너지 전달 현상은 전자 전이(electronic transition)

의 선택 규칙(selection rule)에 적용받지 않기 때문에 스펙트럼에 드러나지 않은 에너지 준위가 관여 될 수도 있으므로 판단에 유의하여야 한다.

2. 같은 이온 간의 에너지 전달

동일 이온 사이에서도 흡수 및 발광 에너지 사이의 중첩이 있기 때문에, 하나의 이온에서 여기된 에너지는 그 자리에서 바로 발광되기도 하지만 몇 단계의 에너지 전달을 거쳐 동일한 종류의 다른 이온에서 발광이 일어나기도 한다. 이러한 동일 이온 간의 에너지 전달 현상은 특별히 에너지 확산(diffusion) 또는 에너지 이동(migration)이라고 구분되기도 한다. 에너지 확산의 빈도가 높아 질 경우, 전자 구조가 동일한 종류의 이온 사이를 이동하다가 발광을 하는 것이기 때문에 측정되는 광특성의 변화는 없으나, 문제는 에너지가 전달되는 과정에서 비발광 소멸(nonradiative decay)을 일으키는 호스트의 결함을 만날 가능성이 커진다는 것이다. 이 경우 에너지 전달을 통하여 발광원을 호스트를 돌아다니던 에너지는 비발광 결함으로 전달되어 빛으로 변화하지 못하고 열로 소모되어 버린다. 이 같은 특성 때문에 무기 형광체에 발광원이 되는 이온을 도핑할 때는 에너지 전달로 인한 비발광 소멸이 전체 발광 효율을 떨어뜨리지 않는 수준으로 억제 하게 된다. 이 수준은 일반적인 경우 호스트에서 도핑되는 사이트의 수 % 안팎이 되며, 그것 보다 더 많은 농도가 도핑되면, 비발광 소멸이 발생할 확률이 높아져 형광체의 효율이 감소하게 되는데, 이를 농도 소광(concentration quenching)이라 한다. 농도 소광 현상을 [그림 3]-(a)에 개략적으로 표현하였다. 호스트 결정 내에 비발광 결함의 양은 일정하다 하더라도 발광원의 농도가 높아짐에 따라 에너지 전달이 발생할 수 있는 영역(임계거리 이하의 영역)이 넓어져서 비발광 결함으로 에너지가 전달될 확률이 커지게 된다.

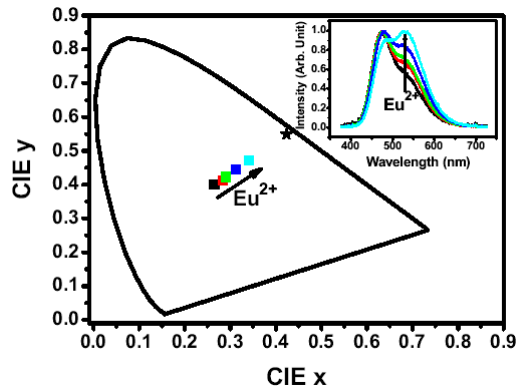
같은 원리로 발광원의 양이 일정하더라도 비발광 소멸을 일으키는 격자 결함의 농도가 높은 경우, 발광원에서 결함으로의 에너지 전달 확률이 높아져 효율이 감소하게 된다. [그림 3]-(b)은 결정성의 저하로 동일한 농도의 발광원으로부터 에너지 전달이 가능한 영역 내부에 비발광



[그림 3] (a) 농도 소광 현상을 설명하는 개략도 및 (b) 결정성 저하에 따른 효율 감소를 설명하는 개략도

결합의 양이 증가하는 것을 표현하고 있다. 따라서 높은 효율의 형광체를 얻기 위해서는 도핑되는 발광원의 양을 최적화하는 것 외에도 호스트 결정의 품질을 높이는 것도 매우 중요하게 된다. 고온 공정 중 질화물이 승화되는 것을 막아 질소 결함을 최소화하기 위하여 10기압 이상의 가압 합성을 하는 것이 바로 그와 같은 이유에서이다 [3].

일반적으로 에너지 전달과 관련한 임계 거리 및 에너지 전달 확률 등은 호스트 결정 내에 발광원이 등간격으로 고르게 분포되어 있다는 전제하에 계산된다. 따라서 형광체 시스템의 에너지 전달 특성은 발광원이 되는 이온의 종류 및 농도, 호스트의 격자 상수만으로 기술 될 수 있었다 [2]. 하지만 최근의 연구 결과에 따르면 이와 같은 정보 외에 발광원이 도핑되는 위치의 대칭성 역시 에너지 전달 현상을 기술하는데 매우 중요한 영향을 미친다는 것이 밝혀졌다. 예를 들어, 화학양론이 같으나 결정 구조가 다른 $\text{Li}_2\text{CaSiO}_4$, $\text{Li}_2\text{SrSiO}_4$, $\text{Li}_2\text{BaSiO}_4$ 의 경우 Eu^{2+} 가 도핑되는 사이트의 대칭성이 각각 D_{2d} (tetragonal), C_{1h} (monoclinic), C_2 (monoclinic)로 대칭성의 수준(hierarchy)이 높은 $\text{Li}_2\text{CaSiO}_4$ 에서 농도 소광이 잘 발생한다 [4]. 즉, $\text{Li}_2\text{CaSiO}_4$ 의 최적 도핑 농도가 다른 형광체의 최적 농도보다 작다. 이와 같은 현상은 격자의 대칭성에 대한 고려 없이 설명되지 않는다. 같은 이유로 도핑 사이트의 대칭성이 C_1 (triclinic)인 $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}$ 형광체에서는 Eu^{2+} 도핑에 따른 농도 소광이 거의 발생하지 않는다 [4].



[그림 4] $\beta\text{-Sr}_2\text{SiO}_4:\text{Eu}^{2+}$ 의 Eu^{2+} 도핑 농도 증가에 따른 발광 스펙트럼의 변화 및 그에 따른 색좌표의 변화 [5]

하나의 호스트 격자 내에 화학 조성은 같으나 대칭성이 다른 복수의 사이트가 존재할 경우, 발광원 이온은 두 사이트에 모두 도핑되게 되는데, 이런 경우 동일 대칭을 가지는 이온 간의 에너지 전달과 더불어 다른 대칭을 가지는 이온 간에도 에너지 전달이 발생하게 된다. 대칭성의 차이로 각각의 이온에서는 다른 에너지의 빛이 나오며, 두 종류의 발광원 간에 에너지 전달이 얼마나 이루어지냐에 따라 전체 형광체의 발광 색깔이 결정되게 된다. 예를 들어 $\beta\text{-Sr}_2\text{SiO}_4:\text{Eu}^{2+}$ 나 $\text{Sr}_2\text{Si}_5\text{N}_8:\text{Eu}^{2+}$ 는 2 종류의 Eu^{2+} 도핑 사이트를 갖는데, 동일 대칭을 갖는 Eu^{2+} 보다는 다른 대칭을 갖는 Eu^{2+} 이온 간의 에너지 전달이 활발하게 일어난다 [5,6]. 따라서 Eu^{2+} 의 도핑 농도가 늘어날수록 높은 에너지를 갖는 Eu^{2+} 에서 상대적으로 낮은 에너지를 갖는 Eu^{2+} 로의 에너지 전달이 활발해져 전체적으로 발광이 적색 편이(red shift)하는 현상이 나타난다 [그림 4]. 또한, 호스트 내의 비발광 소멸을 일으키는 결함은 동일 대칭의 Eu^{2+} 뿐만 아니라 이종 대칭의 이온 간의 에너지 전달에도 영향을 주어, 형광체의 전체 효율뿐만 아니라 발광 색깔에도 영향을 미치게 된다. 즉, 결합의 양이 많아 질수록 두 사이트 간의 에너지 전달 대신 비발광 결합으로의 에너지 전달이 주로 발생하여 발광은 전체적으로 청색 편이(blue shift)하게 된다.

3. 선택 규칙과 다른 이온 간의 에너지 전달

발광원으로서 LED용 형광체에 도핑되는 이온은 주로

최외각 에 d 오비탈을 갖는 전의 금속이나 f 오비탈을 갖는 희토류 금속들이다. 이와 같은 금속 이온에서 일어나는 전자 전이는 크게 다음의 2가지 규칙을 따르게 된다.

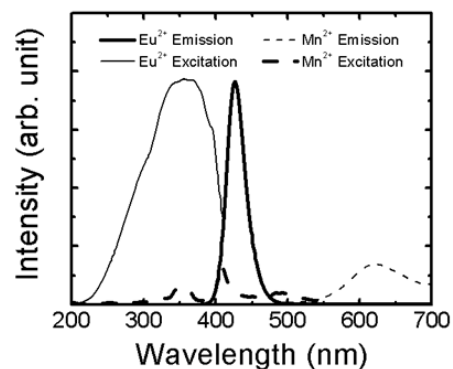
- (1) 스핀 선택 규칙(spin selection rule): 외부의 자극에 의하여 전자 전이가 일어나는 동안 전자는 스핀 상태를 유지하여 한다.
- (2) 반전성 선택 규칙 (parity selection rule 또는 Laporté selection rule): 동일한 반전성을 갖는 오비탈 사이에서는 전자 전이가 일어 날 수 없다.

스핀 선택 규칙은 전자 전이 과정에서 시스템의 다중도(multiplicity)가 유지 되어야 함을 의미하며, 반전성 선택 규칙은 중심 대칭성(center of symmetry)을 갖는 오비탈에서 갖지 않는 오비탈로, 또는 그 역의 방향으로만 전자 전이가 일어 날 수 있음을 의미한다. 따라서 원칙적으로 동일한 오비탈 내에서는 전자 전이가 일어 날 수 없다. LED 형광체에서 일반적으로 사용되는 Eu^{2+} 와 Ce^{3+} 는 스핀 상태를 유지한 상태에서 fd 오비탈 간의 전자 전이를 보이기 때문에 위의 두 규칙을 모두 만족하지만, Mn^{4+} 는 스핀 선택 규칙만 만족하고 $d-d$ 전이로 반전성 규칙을 만족시키지 못하며, ff 전이를 하는 Eu^{3+} , Tb^{3+} 와 $d-d$ 전이를 하는 Mn^{2+} 는 반전성과 스핀 선택 규칙 모두를 만족시키지 못한다. 그러므로 선택 규칙을 엄격하게 적용할 경우 Eu^{2+} 와 Ce^{3+} 외의 다른 이온에서는 흡수 및 발광이 관찰되지 않아야 하지만, 스핀-오비탈 결합, 전자-포논 결합, 결정 구조의 뒤틀림 등으로 실제 형광체에서는 선택 규칙의 완화가 일어나 Mn^{4+} , Eu^{3+} , Tb^{3+} , Mn^{2+} 가 도핑된 형광체에서도 흡수 및 발광 현상이 관찰된다. 다만 완화에도 불구하고 이론적으로 금지된 전이 특성을 갖는 이온의 경우, 그렇지 않은 이온이 비해 약하고 느린 전이 현상을 나타낸다. 따라서 이들의 선택 규칙의 완화만으로는 실제 형광체에 사용할 수 있을 정도의 발광 강도를 얻기 어렵게 되는데, 이의 극복을 위하여 선택 규칙의 지배를 받지 않는 호스트의 전도대(conduction band)나 전하 전달 준위(charge transfer level)로 전자를 여기시킴으로써 사용 가능한 강도의 발광을 이끌어 내게 된다. 또한, Eu^{2+}

나 Ce^{3+} 와 같이 모든 선택 규칙이 허용된 이온을 함께 도핑하여 Eu^{2+} 또는 Ce^{3+} 이 효율적으로 흡수한 에너지를 이들 이온들로 전달시킴으로써 발광 강도를 높이는 방법도 있다. Eu^{2+} - Mn^{2+} , Ce^{3+} - Tb^{3+} 등이 주로 사용되는 조합이며, Ce^{3+} - Mn^{2+} , Eu^{2+} - Tb^{3+} 조합 역시 가능하나 전하의 차이로 이중 도핑 시 불가피하게 음이온 결합이 만들어 지거나 스펙트럼이 제대로 중첩되지 않는 문제 등으로 실제 형광체에서 적용된 사례는 많지 않다.

III. LED 형광체의 광포화 현상

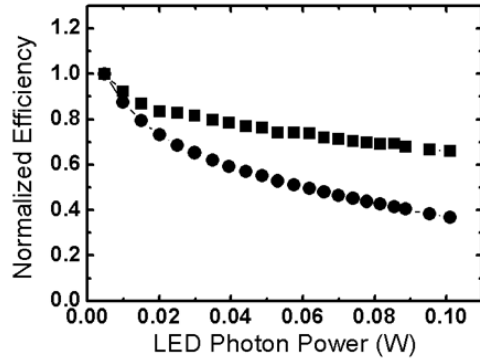
LED용 형광체는 254 nm 수은광을 이용하는 형광램프용 형광체와 달리 400 내지 450 nm 의 LED 빛을 흡수하여 청색, 녹색, 적색 빛을 낼 수 있어야 한다. 그 중 600 nm 안팎의 피크 파장을 가져야 하는 적색 형광체의 경우 Mn^{4+} , Eu^{3+} , Tb^{3+} , Mn^{2+} 등의 이온으로는 적색 또는 고효율 발광을 얻는 것이 근본적으로 어렵고, Eu^{2+} , Ce^{3+} 를 사용하더라도 공유결합성이 크지 않은 산화물로는 역시 고효율의 적색을 구현되기가 어렵다. 그 대안으로 황화물, 질화물 등 음이온이 다른 새로운 물질군으로 형광체를 만드는 방법이 있으나, 황화물의 경우 LED 패키지 금속과 반응을 하고 수분에 취약해 장시간 사용 시 휘도가 감소하는 신뢰성에 문제가 있어 배제되고 있으며, 질화물 형광체는 우수한 특성에도 불구하고 제조비용이 높고 공정이 어렵다는 단점이 있어 생산과 개발이 쉽지 않은 문제



[그림 5] $\text{Sr}_2\text{P}_2\text{O}_7:\text{Eu}^{2+}$ 와 $\text{Sr}_2\text{P}_2\text{O}_7:\text{Mn}^{2+}$ 의 여기 및 발광 스펙트럼

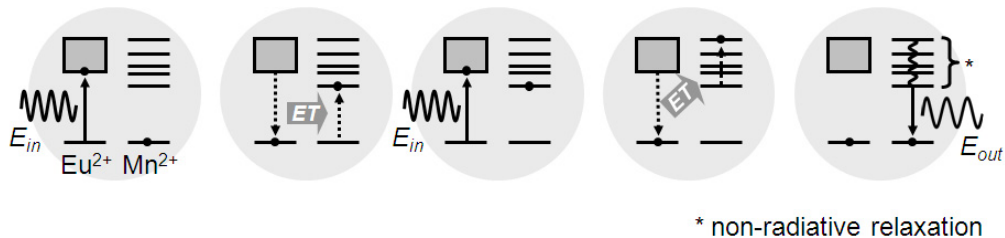
가 있다. 따라서 안정하고 제조가 용이한 산화물 형광체를 이용하여 LED용 적색 형광체를 구현하려는 노력이 있어왔으며, 그와 같은 맥락에서 산화물 형광체에 Eu^{2+} 와 Mn^{2+} 를 이중 도핑하는 방법이 소개되고 있다. Eu^{2+} - Mn^{2+} 를 이중 도핑하는 이유는, UV LED의 빛을 효율적으로 흡수하여 청색광을 내는 Eu^{2+} 와, 허용되지 않는 에너지 전이로 흡수 및 발광 강도는 약하나 600 nm 부근의 발광 피크를 갖는 Mn^{2+} 를 동시에 도핑함으로써 $\text{Eu}^{2+} \rightarrow \text{Mn}^{2+}$ 에너지 전달을 통하여 높은 효율의 적색 발광을 구현할 수 있기 때문이다. 하나의 예로써, $\text{Sr}_2\text{P}_2\text{O}_7:\text{Eu}^{2+}$ 와 $\text{Sr}_2\text{P}_2\text{O}_7:\text{Mn}^{2+}$ 의 여기 및 발광 스펙트럼을 [그림 7]에 나타내었다. $\text{Sr}_2\text{P}_2\text{O}_7:\text{Eu}^{2+}$ 의 발광 스펙트럼이 $\text{Sr}_2\text{P}_2\text{O}_7:\text{Mn}^{2+}$ 의 여기(흡수) 스펙트럼과 겹치는 것으로 부터 $\text{Eu}^{2+} \rightarrow \text{Mn}^{2+}$ 에너지 전달이 발생할 수 있는 조건을 만족하는 것을 확인할 수 있으며, 실제로 두 이온 간에는 효과적인 에너지 전달이 발생하여 $\text{Sr}_2\text{P}_2\text{O}_7:\text{Eu}^{2+}, \text{Mn}^{2+}$ 는 400 nm의 빛을 흡수하여 610 nm 파장의 높은 효율의 빛을 발광한다.

이 같이 Eu^{2+} 와 Mn^{2+} 이 이중 도핑된 형광체가 구현하는 흡수 및 발광 스펙트럼은 LED용 적색 형광체로서 이상적인 모양을 나타내지만, 실제 LED 적용에서는 예상치 못한 문제를 나타내었다. 그것은 LED의 출력이 높아짐에 따라 Eu^{2+} - Mn^{2+} 적용 형광체의 효율이 급격하게 감소하는 현상이다. Mn^{2+} 를 발광원으로 사용하는 PDP용 형광체에서 이와 비슷한 효율의 포화 현상이 관찰되었는데, 그것의 원인으로는 Mn^{2+} 이온의 10 ms 안팎의 긴 감쇄 시간(decay time)이 지적 되었다. 유사하게 LED에서의 광포화 역시 Mn^{2+} 의 긴 감쇄 시간에서 비롯된다고 볼 수 있으나, 문제는 Mn^{2+} 적색 발광뿐만 아니라 감쇄 시간이 수 μs 로 충분히 짧은 Eu^{2+} 청색 발광에서도 광포화가 관찰되고 있다는 것이다 [그림 6]. 이와 같은 현상이 발생한

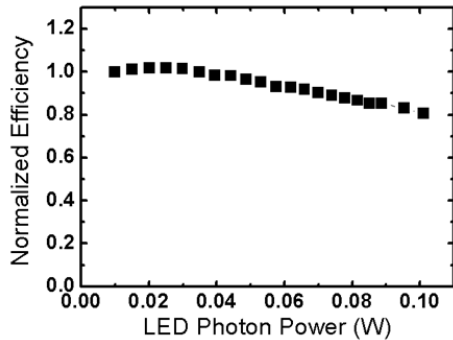


[그림 6] $\text{Sr}_2\text{P}_2\text{O}_7:\text{Eu}^{2+}, \text{Mn}^{2+}$ 의 입력 광출력에 따른 Eu^{2+} 에서 직접 발광하는 청색광 효율(■) 및 Eu^{2+} 에서 에너지 전달을 받아 Mn^{2+} 에서 발광하는 적색광의 효율(●) 변화

것은 발광원의 느린 처리 속도로 형광체로의 에너지 흡수 능력이 떨어지는 것 외에, 에너지가 소멸되는 다른 요소가 개입되기 때문인 것으로 짐작할 수 있다. 이에 대한 최근의 연구에 따르면 형광체에 들어가는 광속이 커질수록 Mn^{2+} 내부에서는 여기 상태 흡수(ESA, excited state absorption)가 가속화 되고, ESA된 에너지가 비발광 감쇄(nonradiative decay)되면서 흡수된 에너지가 열로 소모되는 것이 광포화의 원인으로 지적되었다 [7]. 광포화가 발생하게 되는 일련의 과정을 [그림 7]에 도식적으로 나타내었다. Eu^{2+} 로 유입된 빛 에너지는 Mn^{2+} 로 전달된다. 일반적인 경우라면 Mn^{2+} 로 전달된 에너지는 발광을 하며 바닥상태로 떨어 져야 하나, 빛의 유입이 빠른 상태이기 때문에 바닥상태로 떨어지기 전에 더 많은 에너지가 Mn^{2+} 로 유입하게 된다. 만약 Mn^{2+} 에 추가의 에너지를 받을 여지가 없다면 에너지는 Mn^{2+} 로 전달되지 않고 Eu^{2+} 에서 발광으로 소모되어야 하겠지만, Mn^{2+} 이온에서는 높은 확률로 ESA가 발생할 수 있기 때문에 Eu^{2+} 로부터 유입된 에너지는 Mn^{2+} 를 ESA 시키고 비발광 감쇄를 통



[그림 7] Eu^{2+} 와 Mn^{2+} 가 이중 도핑된 형광체의 광포화 현상을 설명하는 개략도 [7]



[그림 8] $3.5\text{MgO} \cdot 0.5\text{MgF}_2 \cdot \text{GeO}_2:\text{Mn}^{4+}$ 의 입력 광출력에 따른 효율 변화

하여 여기 상태로 돌아오면서 열로 사라지게 된다. 이상의 과정을 바탕으로 광포화 현상이 일어 날 수 있는 물리적인 조건을 정리하면 (1) Mn^{2+} 의 감쇄 속도(감쇄 시간의 역수)가 Mn^{2+} 로의 에너지 유입 속도에 비하여 충분히 느리고, (2) Mn^{2+} 의 ESA의 속도가 바닥상태의 흡수(ground state absorption, GSA)속도 보다 충분히 빠르며, (3) ESA의 감쇄가 비발광 감쇄이어야 한다.

광포화 현상은 Mn^{2+} 가 사면체 자리에 도핑되어 녹색 발광을 하며 감쇄 시간 역시 팔면체 자리의 Mn^{2+} 보다 빠른 $\text{BaMgAl}_{10}\text{O}_{17}:\text{Eu}^{2+}, \text{Mn}^{2+}$ 에서도 적색 발광을 하는 일반적인 $\text{Eu}^{2+}-\text{Mn}^{2+}$ 시스템과 거의 유사한 형태로 나타난다. 하지만 $3.5\text{MgO} \cdot 0.5\text{MgF}_2 \cdot \text{GeO}_2:\text{Mn}^{4+}$ 의 Mn^{4+} 이온의 경우 사면체 자리의 Mn^{2+} 와 비슷한 수 ms의 감쇄 시간을 가짐에도 불구하고, 흡수와 발광의 전자 전이에 대한 선택 규칙(스핀 선택 규칙 허용, 반전성 선택 규칙 금지)이 비슷하기 때문에 흡수와 발광의 속도가 거의 비슷하고, ESA의 속도와 GSA의 속도 역시 비슷하기 때문에 ESA의 감쇄가 비발광 감쇄임에도 불구하고 광포화 현상이 거의 관찰되지 않는다 [그림 8].

IV. 결 론

본 원고에서는 무기 형광체에서 발견되는 에너지 전달 현상의 기본 개념과 형광체의 발광 특성에 미치는 영향, 다른 이온 간의 에너지 전달을 이용한 형광체의 LED 소자에서의 거동을 살펴보았다. 무기 형광체의 틀 내에서 설명하기는 하였으나 에너지 전달은 유기 염료-유기 염

료, 무기 양자점-유기 염료, 금속 이온-유기 염료 등으로 여기된 에너지가 존재하는 모든 시스템에서는 관찰되고 이용되는 일반적인 현상이다. 또한 쿨롱 상호작용으로 인한 에너지 전달이 확장된 개념으로 표면 플라즈몬이 에너지 전달의 매개가 될 수도 있음이 최근의 연구 결과에서 보고되기도 하였다^[8]. 즉, 에너지 전달 현상은 에너지를 주고받는 대상뿐만 아니라, 에너지를 매개하는 대상 역시 다양하게 존재할 수 있는 매우 유연한 현상이다. 따라서 에너지 전달 현상은 깊이 있는 이해와 창의적인 아이디어만 전제 된다면 여러 분야에 다양한 형태로 응용되어 새로운 기능을 가진 소재 및 소자를 구현하는데 중요한 도구가 될 수 있는 흥미로운 연구 주제라 할 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] D. L. Dexter, *J. Chem. Phys.* **21**, 836 (1953).
- [2] G. Blasse, *Phillips Res. Repts.* **24**, 131 (1969).
- [3] R.-J. Xie, N. Hirosaki, T. Suehiro, F.-F. Xu, and M. Mitomo, *Chem. Mater.* **18**, 5578 (2006).
- [4] C. Kulshreshtha, N. Shin, and K.-S. Sohn, *Electrochem. Sol. Stat. Lett.* **12**, J55 (2009).
- [5] D. Ahn, N. Shin, K. D. Park, and K.-S. Sohn, *J. Electrochem. Soc.* **156**, J242 (2009).
- [6] K.-S. Sohn, S. Lee, R.-J. Xie, and N. Hirosaki, *Appl. Phys. Lett.* **95**, 12903 (2009).
- [7] T.-G. Kim, Y. S. Kim, and S.-J. Im, *J. Electrochem. Soc.* **156**, J203 (2009).
- [8] P. Andrew and W. L. Barnes, *Science* **306**, 1002 (2004).

저 자 약 력

김 태 곤



- 2000년: 서울대학교 재료공학부 학사
- 2006년: 서울대학교 재료공학부 박사
- 현재: 삼성종합기술원 전문연구원
- 관심분야: 무기 형광체, 에너지 변환 소재, 표면 화학

손기선



- 1990년 : 연세대학교 금속공학과 학사
- 1996년 : 포항공과대학교 재료금속공학과 박사
- 현재 : 순천대학교 인쇄전자공학과 부교수
- 관심분야 : 무기 형광체, 조합화학, 휴리스틱스 최적화