


# BaZrO<sub>3</sub>:Eu<sup>3+</sup> 적색 형광체의 발광과 농도 소광 특성

응웬티김난, 조신호 

신라대학교 배터리학과

## Luminescence and Concentration Quenching Properties of BaZrO<sub>3</sub>:Eu<sup>3+</sup> Red-Emitting Phosphors

Nguyen Thi Kim Ngan and Shinho Cho

Department of Batteries Science and Engineering, Silla University, Busan 46958, Korea

(Received December 21, 2023; Revised January 11, 2024; Accepted January 11, 2024)

**Abstract:** Eu<sup>3+</sup>-doped BaZrO<sub>3</sub> (BaZrO<sub>3</sub>:Eu<sup>3+</sup>) phosphor powders were prepared using a solid-state reaction by changing the molar concentration of Eu<sup>3+</sup> within the range of 0.5 to 30 mol%. Irrespective of the molar concentration of Eu<sup>3+</sup> ions, the crystal structures of all the phosphors were cubic. The excitation spectra of BaZrO<sub>3</sub>:Eu<sup>3+</sup> phosphors consisted of an intense broad band centered at 277 nm in the range of 230–320 nm. The emission spectra were composed of a dominant orange band at 595 nm arising from the <sup>5</sup>D<sub>0</sub>→<sup>7</sup>F<sub>1</sub> magnetic dipole transition of Eu<sup>3+</sup> and two weak emission bands centered at 574 and 615 nm, respectively. As the concentration of Eu<sup>3+</sup> increased from 0.5 to 10 mol%, the intensities of all the emission bands gradually increased, approached maxima at 10 mol% of Eu<sup>3+</sup> ions, and then showed a decreasing tendency with further increase in the Eu<sup>3+</sup> ions due to the concentration quenching. The critical distance between neighboring Eu<sup>3+</sup> ions for concentration quenching was calculated to be 11.21 Å, indicating that dipole-dipole interaction was the main mechanism of concentration quenching of BaZrO<sub>3</sub>:Eu<sup>3+</sup> phosphors. The results suggest that the orange emission intensity can be modulated by doping the appropriate concentration of Eu<sup>3+</sup> ions.

**Keywords:** Phosphor, Luminescence, Concentration quenching

### 1. 서론

최근 고체 광원과 전계 발광 소자에 응용할 수 있는 강한 적색 계열 발광을 구현하기 위하여 적색 계열 발광 에너지 준위를 갖는 희토류 이온을 도핑하는 산화물 형광체 화합물에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다 [1,2]. 희토류 이온을 기반으로 하는 적색 발광 계열 형광체의 발광 파장과

세기를 결정하는 중요한 요인은 열과 화학적으로 안정하고 불순물 이온과 잘 결합하는 모체 결정의 선택과 모체 결정에 주입되는 희토류 이온의 적절한 도핑 농도와 그 화합물을 소결하는 최적의 온도와 시간과 모체 결정 내에 위치하는 희토류 이온의 자리 대칭성(site symmetry)과 관련되는 것으로 알려져 있다 [3]. 활성화 이온이 비반전 대칭(non-inversion symmetry) 자리에 위치하면 전기 쌍극자 전이(electric dipole transition)가 주도적으로 발생하여 발광 파장과 세기는 활성화 이온 주변의 국소적 환경에 따라 매우 민감하게 변한다. 이에 반하여, 활성화 이온이 반전 대칭(inversion symmetry) 자리를 차지하면 자기 쌍극자 전이(magnetic dipole transition)가 지배적이며

✉ Shinho Cho; [shinhocho@gmail.com](mailto:shinhocho@gmail.com)

Copyright ©2024 KIEEME. All rights reserved.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서 발광 파장과 세기는 활성제 이온 주위의 환경에 전혀 영향을 받지 않는다 [4]. 특히, +3가의 Eu, Pr, Sm 희토류 이온이 적색 계열 발광 센터의 역할을 하는 활성제로 널리 응용되고 있는데, 이 중에서  $\text{Eu}^{3+}$  이온은 다수의 가시광선 영역의 에너지 준위를 갖고 있는 장점이 있고,  $\text{Eu}^{3+}$  이온의 자리 대칭성에 따라 주황색 혹은 적색 발광이 주도적으로 구현되는 것으로 보고되고 있다 [5].

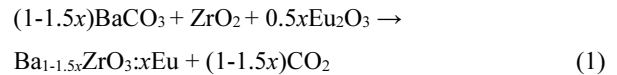
일반적으로  $\text{SrZrO}_3$ ,  $\text{BaTiO}_3$ ,  $\text{BaSnO}_3$ 와 같은 화학식  $\text{ABO}_3$ 를 갖는 페로브스카이트(perovskite) 구조는 넓은 밴드갭과 도핑의 용이성으로 인하여 발광 모체(host crystal)로 사용하기에 적합하다 [6,7].  $\text{BaZrO}_3$ 는 넓은 밴드갭 에너지(4~5.6 eV), 높은 유전상수(~50), 우수한 화학, 열 및 기계적 안정성, 높은 녹는점(3,193 K), 4~1,600 K 온도 영역에서 상 전이(phase transition)가 발생하지 않는 입방 결정 구조를 갖고 있어서 마이크로파 소자, 발광체의 모체 결정, 습도 센서, 열차폐 코팅제, 초전도체 합성용 도가니를 포함하는 다양한 분야에 응용되고 있다 [8,9]. 예를 들면, Gupta 등 [10]은 용융염법(molten salt method)을 사용하여  $\text{Eu}^{3+}$  이온이 도핑된  $\text{BaZrO}_3$  형광체를 제조하였으며, 서로 다른 두 파장(279, 395 nm)으로 여기시켜  $^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_0$  전이에 의한 575 nm의 황색 발광과  $^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_3$  전이에 의한 653 nm 적색 파장의 세기 변화를 관측하였다. Khirade 등 [11]은 졸겔 자동 연소법(sol-gel auto combustion method)을 사용하여 Fe 이온이 도핑된  $\text{BaZrO}_3$  나노 분말을 합성하였고, Fe 이온의 농도가 증가함에 따라 산소 빈자리(vacancy)의 농도와 자성(magnetic properties)이 증가함을 발표하였다. Basavaraj 등 [12]은 알로에 베라(aloe vera) 젤을 계면 활성제로 사용하는 녹색 연소 합성법(green combustion synthesis route)으로  $\text{BaZrO}_3:\text{Sm}^{3+}$  형광체를 제조하였으며, 403 nm로 여기시켰을 때  $\text{Sm}^{3+}$  이온의  $4f \rightarrow 4f$  전이에 의한 565, 607, 649 nm에 피크를 갖는 발광 스펙트럼을 관측하였다.

본 연구에서는 모체 결정  $\text{BaZrO}_3$ 에 서로 다른 농도를 갖는 활성제  $\text{Eu}^{3+}$  이온을 도핑하여 고효율의 주황색 발광 형광체를 제작하였다. 특히, 백색 발광 다이오드에 응용하기 위한 최대의 주황색 발광 세기를 갖는 최적의  $\text{Eu}^{3+}$  이온의 농도를 결정하였고, 활성제 이온의 농도 변화에 따른 발광 세기의 변화와 농도 소광을 일으키는 기본 원리를 조사하였다.

## 2. 실험

$\text{BaZrO}_3:\text{xEu}^{3+}$  ( $\text{x}=0.5\sim 30$  mol%) 형광체 분말은 고상반

응법(solid-state reaction method)을 사용하여 합성하였다. 초기 물질인  $\text{BaCO}_3$  (순도: 99.9%),  $\text{ZrO}_2$  (99%),  $\text{Eu}_2\text{O}_3$  (99.9%)를 화학양론적으로 측정하여 합성하였으며, 이때 불순물로 도핑한  $\text{Eu}^{3+}$  이온의 몰 비(x)를 각각 0, 0.5, 1, 5, 10, 15, 20, 25, 30 mol%로 변화시켰으며, 화학 반응식은 식 (1)과 같다.

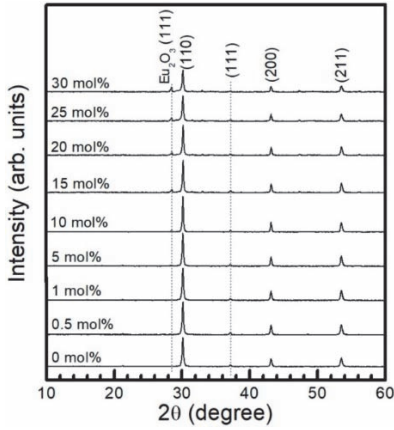


플라스틱 병에 정밀 저울을 사용하여 측정된 적정 양의 초기 물질과 직경 3 mm의  $\text{ZrO}_2$  볼과 에탄올을 넣고 밀봉한 다음에 20 시간 동안 볼밀(ball-milling) 공정을 수행한 후에, 85°C에서 24시간 동안 오븐에서 건조시켰다. 건조한 물질을 체로 걸러서 각각 몰 비로 알루미늄 도가니에 담아 전기로에 넣고, 분당 5°C의 속도로 승온시켜 1,100°C에서 5시간 소결하여 합성하였다.

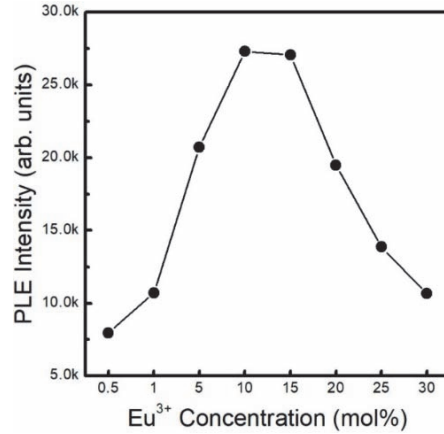
형광체의 결정 구조는 회절각 10~60° 영역에서 Cu-K $\alpha$  복사선(파장: 0.15406 nm)을 사용하는 X-선 회절 장치(Ultima IV, Rigaku)로 측정하였다. 형광체 분말의 흡광과 발광 스펙트럼, 국제조명위원회(Commission Internationale de l'Éclairage, CIE) 1931 색좌표는 상온에서 제논(Xe) 램프를 광원으로 갖는 형광 광도계(FS-2, Scinco)를 사용하여 측정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

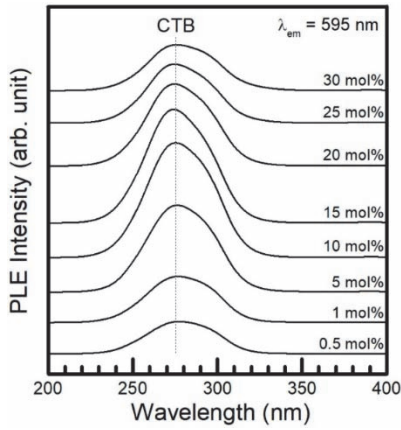
그림 1은 활성제  $\text{Eu}^{3+}$  이온의 몰 비를 0.5, 1, 5, 10, 15, 20, 25, 30 mol%씩 변화시키면서 합성한  $\text{BaZrO}_3$  형광체 분말의 X-선 회절 패턴을 나타낸 것이다.  $\text{Eu}^{3+}$  이온의 몰 비에 관계없이 모든 형광체 분말 시료는 회절각  $2\theta=30.20^\circ$ 에서 최대 회절 세기를 갖는 (110)면에서 발생한 회절 피크와  $37.18^\circ$ ,  $43.12^\circ$ ,  $53.54^\circ$ 에 상대적으로 약한 회절 세기를 갖는 각각 (111), (200), (211)면에서 발생한 회절 신호로 구성되었다. 합성한 형광체 분말의 결정 구조는 ICDD #00-006-0399의 회절 상과 일치하는 입방정계(cubic system)였다. 주 회절 피크 (110)의 반치폭(full width at half maximum)은  $\text{Eu}^{3+}$  이온의 몰 비가 10 mol%일 때  $0.22^\circ$ 로 최소였으며, 30 mol%에서  $0.26^\circ$ 로 최대였다.  $\text{Eu}^{3+}$  이온의 몰 비가 15 mol% 이상으로 증가함에 따라 회절각  $2\theta=28.46^\circ$ 에  $\text{Eu}_2\text{O}_3$  (111)면의 회절 피크가 나타나기 시작하였다.



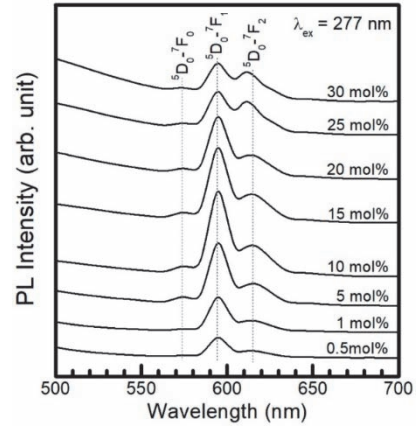
**Fig. 1.** XRD patterns of BaZrO<sub>3</sub> phosphors prepared with different concentrations of Eu<sup>3+</sup> ions.



**Fig. 3.** Dependence of the excitation intensity on the concentration of Eu<sup>3+</sup>.



**Fig. 2.** Excitation spectra of BaZrO<sub>3</sub>:Eu<sup>3+</sup> phosphors doped with different concentrations of Eu<sup>3+</sup> ions monitored at 595 nm.



**Fig. 4.** Emission spectra of BaZrO<sub>3</sub>:Eu<sup>3+</sup> phosphors doped with different concentrations of Eu<sup>3+</sup> ions upon excitation at 277 nm.

그림 2는 Eu<sup>3+</sup> 이온의 몰 비를 변화시키면서 합성한 BaZrO<sub>3</sub>:Eu<sup>3+</sup> 형광체 분말을 파장 595 nm로 제어하여 상온에서 측정된 흡광(photoluminescence excitation) 스펙트럼을 나타낸 것이다. Eu<sup>3+</sup> 이온의 몰 비에 관계없이 모든 형광체 분말은 277 nm에서 피크를 갖고 230~320 nm 영역에 걸쳐 넓게 분포하는 O<sup>2-</sup>→Eu<sup>3+</sup> 이온들 사이의 에너지 전달에 의하여 발생하는 전하 전달 밴드(charge transfer band, CTB) 신호만 나타났으며, Eu<sup>3+</sup> 이온의 4f→4f 전이에 의해 발생하는 흡광 스펙트럼은 검출되지 않았다. 그림 3에서 보듯이, Eu<sup>3+</sup> 이온의 몰 비가 0.5 mol%에서 10 mol%로 증가함에 따라 CTB 흡광 스펙트럼의 세기는 계속 증가하여 10 mol%에서 최대값을 나타내었으나, Eu<sup>3+</sup> 이온의 몰 비가 더욱 증가하는 15~30 mol% 영역에서 CTB 흡광 스펙트럼의 세기는 순차적으로 감소

하였다. 10 mol%에서 CTB의 흡광 세기는 30 mol%에서 흡광 세기에 비하여 약 2.6배 증가하였다. 그림 4는 파장 277 nm로 여기 시킨 Eu<sup>3+</sup> 이온의 몰 비 변화에 따른 BaZrO<sub>3</sub>:Eu<sup>3+</sup> 형광체 분말의 발광 스펙트럼을 나타낸 것이다. Eu<sup>3+</sup> 이온의 몰 비에 관계없이 모든 BaZrO<sub>3</sub>:Eu<sup>3+</sup> 형광체 분말에서 세 종류의 발광 스펙트럼이 관측되었는데, 발광 신호들은 Eu<sup>3+</sup> 이온의 대표적인 4f→4f 전이 신호였다. Eu<sup>3+</sup> 이온의 <sup>5</sup>D<sub>0</sub>→<sup>7</sup>F<sub>1</sub> 자기 쌍극자 전이(magnetic dipole transition)에 의한 발광 세기가 가장 강한 595 nm에 정점을 갖는 주황색 발광 스펙트럼, <sup>5</sup>D<sub>0</sub>→<sup>7</sup>F<sub>2</sub> 전기 쌍극자 전이(electric dipole transition)에 의한 상대적으로 발광 세기가 작은 615 nm에 피크를 갖는 적색 발광 스펙트럼, <sup>5</sup>D<sub>0</sub>→<sup>7</sup>F<sub>0</sub> 전기 쌍극자 전이에 의한 발광 세기가 미약한 574 nm의 황색 발광 스펙트럼으로 구성

되었다 [13]. 상기의 BaZrO<sub>3</sub>:Eu<sup>3+</sup> 형광체는 근자외선(277 nm)을 여기 광원으로 사용하는 백색 발광 소자와 전계발광 소자 제작을 위한 주황색 형광체로 응용할 수 있다. 형광체의 발광 파장의 세기는 모체 결정에 고용 치환되는 활성제 이온 주위의 환경에 따라 달라지는 것으로 보고되고 있는데, 활성제 이온이 반전 대칭(inversion symmetry) 자리에 위치하면 자기 쌍극자 전이가 주도적으로 발생하고, 비반전 대칭(non-inversion symmetry) 자리를 차지하면 전기 쌍극자 전이가 지배적으로 일어난다. 본 연구의 경우에 Eu<sup>3+</sup> 이온의 몰 비가 0.5, 1, 5, 10, 15, 20, 25 30 mol%일 때 Eu<sup>3+</sup> 이온의 <sup>5</sup>D<sub>0</sub>→<sup>7</sup>F<sub>1</sub> (595 nm) 자기 쌍극자 전이에 의한 주황색 발광의 세기가 <sup>5</sup>D<sub>0</sub>→<sup>7</sup>F<sub>2</sub> (615 nm) 전기 쌍극자 전이에 의한 적색 발광의 세기에 비해 각각 2.79, 2.90, 2.75, 2.67, 2.55, 2.51, 1.29, 1.28배 증가하였다. 따라서 활성제 Eu<sup>3+</sup> 이온은 모체 BaZrO<sub>3</sub> 결정 내에서 반전 대칭 자리에 위치하는 것으로 해석할 수 있다.

그림 5는 Eu<sup>3+</sup> 이온의 몰 비 변화에 따른 BaZrO<sub>3</sub>:Eu<sup>3+</sup> 형광체 분말의 발광 스펙트럼(595 nm)의 세기 변화를 나타낸 것이다. Eu<sup>3+</sup> 이온의 몰 비가 0.5 mol%에서 10 mol%로 증가함에 따라 595 nm의 발광 스펙트럼의 세기는 순차적으로 증가하여 10 mol%에서 발광 세기는 최대를 보였고, Eu<sup>3+</sup> 이온의 몰 비가 15 mol%에서 30 mol%로 증가함에 따라 발광 스펙트럼의 세기는 감소하였다. Eu<sup>3+</sup> 이온이 15~30 mol%인 영역에서 발광 스펙트럼의 세기가 감소하는 현상은 발광 센터의 역할을 하는 활성제 Eu<sup>3+</sup> 이온의 몰 비가 임계 농도(critical concentration)인 10 mol% 이상으로 증가함에 따라 모체 BaZrO<sub>3</sub> 결정 내에 위치하는 Eu<sup>3+</sup> 이온들 사이의 거리가 좁아져서 복사선 재흡수(radiation reabsorption), 교환 상호 작용(exchange interaction), 다중극-다중극 상호 작용(multipole-multipole interaction)이 발생하여 비복사선 에너지 전달(non-radiative energy transfer)에 의한 농도 소광(concentration quenching) 현상 때문에 발생하는 것으로 보고되고 있다 [14]. Eu<sup>3+</sup> 이온의 몰 비가 증가함에 따라 나타나는 농도 소광 현상은 다른 모체 격자인 BaWO<sub>4</sub>에서 관측된 결과와 유사하였다 [15]. 상기의 세 가지 상호 작용 중에서 어느 상호 작용이 주도적인 역할을 하는지는 농도 소광 현상이 발생할 때 모체 BaZrO<sub>3</sub> 결정 내에 위치하는 활성제 Eu<sup>3+</sup> 이온들 사이의 임계 거리(critical distance) R<sub>c</sub>를 계산하여 파악할 수 있는데, 여기서 임계 거리는 Blasse의 식 (2)를 사용하여 계산할 수 있다 [16].

$$R_c = 2(3V/4\pi\chi_c N)^{1/3} \quad (2)$$

여기서 V는 단위 셀의 체적, χ<sub>c</sub>는 Eu<sup>3+</sup> 이온의 임계 농

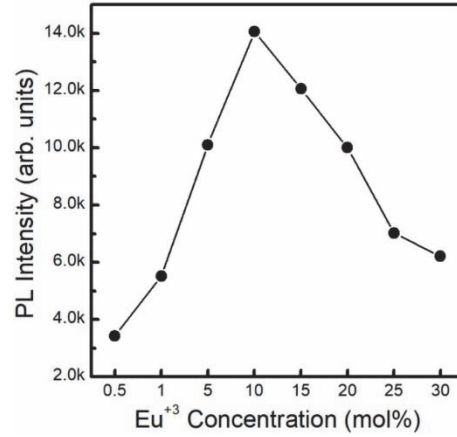


Fig. 5. Dependence of the emission intensity on the concentration of Eu<sup>3+</sup>.

도, N은 단위 셀당 모체 양이온의 수이다. 본 연구의 경우에, BaZrO<sub>3</sub> 모체 결정의 체적은 V=3.718 Å<sup>3</sup>, 단위 셀당 양이온의 수는 N=1, 임계 농도는 χ<sub>c</sub>=0.1이므로, 상기의 값을 식 (2)에 대입하여 계산한 임계 거리는 R<sub>c</sub>=11.21 Å이었다. Blasse의 이론에 의하면 활성제 Eu<sup>3+</sup>-Eu<sup>3+</sup> 이온 사이의 임계 거리가 5 Å보다 크면, 다중극-다중극 상호 작용에 의한 기여가 주도적이고, 임계 거리가 5 Å보다 작으면 교환 상호 작용의 효과가 지배적인 것으로 보고되고 있으므로 본 연구의 경우에 농도 소광의 주요 원인은 다중극-다중극 상호 작용으로 판단된다 [17]. 다중극 상호 작용에는 쌍극자-쌍극자(dipole-dipole), 쌍극자-사중극자(dipole-quadrupole), 사중극자-사중극자(quadrupole-quadrupole) 상호 작용이 존재하는 것으로 알려져 있다 [18]. 세 종류의 상호 작용 중에서 어떤 상호 작용이 지배적인 상호 작용을 하는지는 Dexter가 제안한 활성제 이온의 농도와 발광 세기 사이의 관계식 (3)을 사용하여 조사할 수 있다 [19].

$$I/C = k/\beta C^{s/3} \quad (3)$$

여기서 C는 활성제 이온의 농도, k와 β는 특정한 상호 작용과 관련된 상수, s는 전기 다중극 상호 작용을 나타내는 인수이다. 쌍극자-쌍극자 상호 작용의 경우에 s=6, 쌍극자-사중극자 상호 작용은 8, 사중극자-사중극자 상호 작용은 10를 나타낸다. 식 (3)의 양변에 로그 함수를 취하면,

$$\log(I/C) = (-s/3) \log C + \log(k/\beta) \quad (4)$$

으로 주어지므로, 그림 6은 x축을 log C, y축을 log(I/C)으로 선택하여 측정된 데이터를 표시한 것이다. 농도 소광 현상에 근접한 Eu<sup>3+</sup> 이온의 농도가 10~30 mol%인 영역의

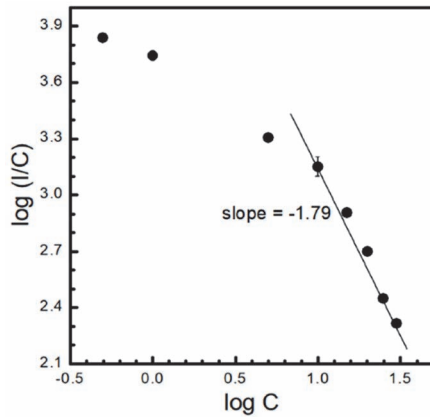


Fig. 6. The curve of  $\log(I/C)$  vs.  $\log C$  in  $\text{Eu}^{3+}$  doped  $\text{BaZrO}_3$  phosphors.

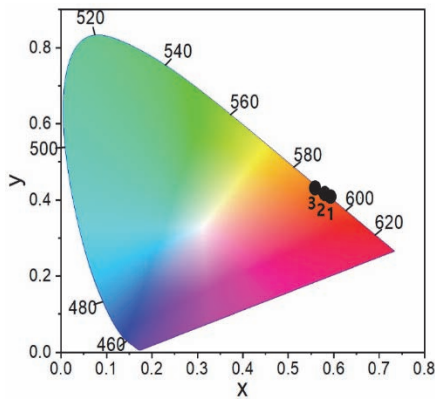


Fig. 7. CIE chromaticity diagram of  $\text{BaZrO}_3:\text{Eu}^{3+}$  phosphors doped with (1) 0.5%, (2) 20%, and (3) 25%  $\text{Eu}^{3+}$ .

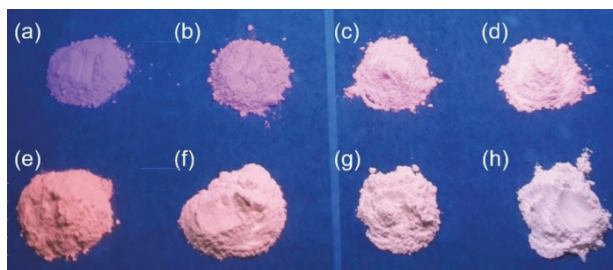


Fig. 8. Visible images of  $\text{BaZrO}_3:\text{Eu}^{3+}$  phosphors doped with (a) 0.5%, (b) 1%, (c) 5%, (d) 10%, (e) 15%, (f) 20%, (g) 25%, and (h) 30%  $\text{Eu}^{3+}$  under irradiation by 254 nm UV light.

데이터를 가장 잘 맞추는 직선의 기울기 값은  $-1.79 \pm 0.13$  이므로  $s$ 의 값은  $5.37 \pm 0.39$ 였다. 상기의 값은 쌍극자-쌍극자 상호 작용의 이론값 6에 가장 가까우므로, 본 연구에서  $\text{Eu}^{3+}$  이온의  ${}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_1$  (595 nm) 자기 쌍극자 전이에서 관측된 농도 소광의 주된 현상은 쌍극자-쌍극자 상호 작용

에 의하여 발생함을 확인할 수 있었다.

색 좌표는 적색계열 발광 형광체 분말을 전계 발광 소재, 광원, 디스플레이 분야에 응용하는 데 있어서 중요한 평가 지표로 사용되고 있다. 그림 7은 파장 277 nm로 여기시켰을 때  $\text{Eu}^{3+}$  이온의 농도를 변화시키면서 합성한  $\text{BaZrO}_3:\text{Eu}^{3+}$  형광체 분말에서 발광하는 빛의 CIE 1931 색 좌표를 나타낸 것이다.  $\text{Eu}^{3+}$  이온의 몰 농도가 0.5% 도핑된 형광체 분말의 색 좌표는 (0.591, 0.408)으로써 주황색 발광이었다. 주황색 발광 세기가 최대인  $\text{Eu}^{3+}$  이온의 몰 농도가 10%일 때 색 좌표는 (0.598, 0.401)이었고,  $\text{Eu}^{3+}$  이온의 몰 농도가 20%, 25%, 30%로 증가함에 따라 형광체 분말의 색 좌표는 각각 (0.582, 0.417), (0.578, 0.421), (0.563, 0.436)으로 이동하였다. 그림 8은  $\text{Eu}$  이온이 각각 (a) 0.5%, (b) 1%, (c) 5%, (d) 10%, (e) 15%, (f) 20%, (g) 25%, (h) 30% 도핑된  $\text{BaZrO}_3$  형광체 분말에 254 nm의 자외선 램프를 비추었을 때 형광체가 발광한 상을 촬영한 사진을 나타낸 것이다.  $\text{Eu}$  이온의 농도에 따른 주황색 발광을 관측할 수 있다. 상기의 결과는  $\text{Eu}^{3+}$  이온이 도핑된  $\text{BaZrO}_3$  형광체 분말은 주황색 발광 소재로 응용할 수 있는 것을 입증한다.

#### 4. 결론

고상반응법을 사용하여  $\text{Eu}^{3+}$  이온의 몰 비를 0.5~30 mol% 변화시키면서  $\text{BaZrO}_3:\text{Eu}^{3+}$  형광체 분말을 합성하였으며,  $\text{Eu}^{3+}$  이온의 몰 비가 형광체 분말의 결정 구조, 발광과 흡광 스펙트럼의 세기에 미치는 영향, 농도 소광 현상의 원리를 체계적으로 조사하였다.  $\text{BaZrO}_3:\text{Eu}^{3+}$  형광체 분말의 결정 구조는  $\text{Eu}^{3+}$  이온의 몰 비에 관계없이 모두 입방정계였다.  $\text{Eu}^{3+}$  이온이 도핑된  $\text{BaZrO}_3$  형광체 분말의 흡광 스펙트럼은 277 nm에 정점을 갖고 230~320 nm 영역의 넓은 스펙트럼을 보였다. 파장 277 nm로 여기시켰을 때 형광체의 주 발광 스펙트럼은  $\text{Eu}^{3+}$  이온의  ${}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_1$  자기 쌍극자 전이에 의한 595 nm에 피크를 갖는 강한 주황색 발광 신호를 방출하였다.  $\text{Eu}^{3+}$  이온의 농도가 증가함에 따라 주황색 발광의 세기는 점차 증가하여 10 mol%에서 최대를 나타내었고, 15~30 mol% 영역에서 발광 세기는 농도 소광 현상을 보였는데, 이것은 쌍극자-쌍극자 상호 작용에 의한 비복사선 에너지 전달로 발생하였다. 본 연구의 결과로부터 최대 발광 세기를 갖는 주황색 발광 형광체 제조를 위한 최적의  $\text{Eu}^{3+}$  이온의 농도는 10 mol%임을 확인하였다.

## ORCID

Shinho Cho

<https://orcid.org/0000-0002-2849-188X>

## REFERENCES

- [1] S. Cho, *J. Korean Phys. Soc.*, **74**, 707 (2019).  
doi: <https://doi.org/10.3938/jkps.74.707>
- [2] P. Du and J. S. Yu, *Mater. Res. Bull.*, **70**, 553 (2015).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2015.05.022>
- [3] B. Yan and X. Xiao, *Nanoscale Res. Lett.*, **5**, 1962 (2010).  
doi: <https://doi.org/10.1007/s11671-010-9733-8>
- [4] A. K. Parchur and R. S. Ningthoujam, *RSC Adv.*, **2**, 10859 (2012).  
doi: <https://doi.org/10.1039/C2RA22144F>
- [5] B. S. Tsai, Y. H. Chang, and Y. C. Chen, *Electrochem. Solid-State Lett.*, **8**, H55 (2005).  
doi: <https://doi.org/10.1149/1.1921128>
- [6] Y. Li and X. Liu, *Opt. Mater.*, **42**, 303 (2015).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2015.01.018>
- [7] S. Sasikumar, H. Fan, W. Wang, S. Saravanakumar, D. Sivaganesh, and K. Aravinth, *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.*, **32**, 12253 (2021).  
doi: <https://doi.org/10.1007/s10854-021-05854-1>
- [8] X. Q. Cao, R. Vassen, and D. Stoeber, *J. Eur. Ceram. Soc.*, **24**, 1 (2004).  
doi: [https://doi.org/10.1016/S0955-2219\(03\)00129-8](https://doi.org/10.1016/S0955-2219(03)00129-8)
- [9] Kh. Dhahri, M. Bejar, E. Dhahri, M. J. Soares, M.F.P. Graça, M. A. Sousa, and M. A. Valente, *Chem. Phys. Lett.*, **610**, 341 (2014).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2014.07.057>
- [10] S. K. Gupta, N. Pathak, and R. M. Kadam, *J. Lumin.*, **169**, 106 (2016).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2015.08.032>
- [11] P. P. Khirade, S. D. Birajdar, A. B. Shinde, and K. M. Jadhav, *J. Alloys Compd.*, **691**, 287 (2017).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.08.224>
- [12] R. B. Basavaraj, S. Kumar, D. P. Aarti, G. Nagaraju, H.M.S. Kumar, R. Soundar, T. S. Shashidhara, H. N. Sumedha, and M. Shahsank, *Inorg. Chem. Commun.*, **128**, 108577 (2021).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2021.108577>
- [13] Z. Hao, J. Zhang, X. Zhang, and X. Wang, *Opt. Mater.*, **33**, 355 (2011).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2010.09.035>
- [14] W. J. Yang, L. Luo, T. M. Chen, and N. S. Wang, *Chem. Mater.*, **17**, 3883 (2005).  
doi: <https://doi.org/10.1021/cm050638f>
- [15] S. Cho, *J. Korean Phys. Soc.*, **72**, 959 (2018).  
doi: <https://doi.org/10.3938/jkps.72.959>
- [16] G. Blasse, *J. Solid State Chem.*, **62**, 207 (1986).  
doi: [https://doi.org/10.1016/0022-4596\(86\)90233-1](https://doi.org/10.1016/0022-4596(86)90233-1)
- [17] H.A.A. Seed Ahmed, H. C. Swart, P. Bergman, and R. E. Kroon, *Mater. Res. Bull.*, **75**, 47 (2016).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2015.11.024>
- [18] D. L. Dexter, *J. Chem. Phys.*, **21**, 836 (1953).  
doi: <https://doi.org/10.1063/1.1699044>
- [19] W. B. Im, Y. I. Kim, J. H. Kang, D. Y. Jeon, H. K. Jung, and K. Y. Jung, *J. Mater. Res.*, **20**, 2061 (2005).  
doi: <https://doi.org/10.1557/JMR.2005.0253>