



BaWO₄:Dy³⁺, Eu³⁺ 백색광 형광체의 발광 특성과 에너지 전달 효율

조신호

신라대학교 신소재공학과

Luminescent Properties and Energy Transfer Efficiency of BaWO₄:Dy³⁺, Eu³⁺ White Light-Emitting Phosphors

Shinho Cho*

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

(Received 21 May, 2021 ; revised 27 June, 2021 ; accepted 27 June, 2021)

Abstract

Dy³⁺- and Eu³⁺-codoped BaWO₄ phosphors for white light-emitting diode were synthesized with different activator ions via a solid-state reaction process. The structural, morphological, and optical properties of the BaWO₄:Dy³⁺, Eu³⁺ phosphors were investigated as a function of Eu³⁺ concentration at a fixed concentration of Dy³⁺ ions. XRD patterns exhibited that all the synthesized phosphors had a tetragonal system, irrespective of the concentrations of Dy³⁺ and Eu³⁺ ions. The excitation spectra of the synthesized phosphors were composed of three intense bands centered at 251, 355, and 393 nm and several weak peaks. For the BaWO₄:Dy³⁺, Eu³⁺ phosphors synthesized with 1 mol% of Eu³⁺, the emission spectra under ultraviolet excitation at 393 nm showed two strong blue and yellow bands at 485 and 577 nm corresponding to the ⁴F_{9/2}→⁶H_{15/2} and ⁴F_{9/2}→⁶H_{13/2} transitions of Dy³⁺ ions, respectively and several weak bands in the range of 600–700 nm resulting from the 4f transitions of Eu³⁺ ions. As the concentration of Eu³⁺ ions increased, intensities of the blue and yellow emission bands gradually decreased while those of the red emissions increased rapidly and the energy transfer efficiency from Dy³⁺ to Eu³⁺ ions was 95.3% at 20 mol% of Eu³⁺. The optimum white light emission with x=0.363, y=0.357 CIE 1931 chromaticity coordinates was obtained for the sample doped with 5 mol% Dy³⁺ and 1 mol% of Eu³⁺.

Keywords : Phosphor, Photoluminescence, Solid-state reaction

1. 서 론

최근에 백색광을 구현하기 위한 광전환(light conversion) 물질과 디스플레이 소재로 응용하기 위하여 희토류 이온이 도핑된 형광체 화합물에 대한 연

구가 활발히 진행되고 있다 [1-3]. 디스플레이와 조명 분야로 응용하기 위해서는 높은 색 순도와 광효율을 갖는 적색, 녹색, 청색(RGB)의 기본 삼색을 구현하는 물질이 필요하고, 발광 다이오드(light emitting diode; LED)를 광원으로 하는 백색광의 실현을 위해서는 광원으로 선택하는 청색 또는 자외선 LED의 사용 여부에 따라 광전환 물질로 황색 혹은 RGB 발광 형광체가 요구된다. 최근에 상용화되고 있는 백색광은 청색 LED 상부에 YAG:Ce³⁺ 황색 형광체 분말을 결합

*Corresponding Author: Shinho Cho
Division of Materials Science and Engineering,
Silla University
Tel: +82-51-999-5698; Fax: +82-51-999-5465
E-mail: scho@silla.ac.kr

하여 제조하고 있으나, 자연광 대비 연색 지수가 낮기 때문에 이를 보완하기 위하여 적색 또는 녹색 형광체를 추가로 혼합하여 합성하는 실정이다 [4-6].

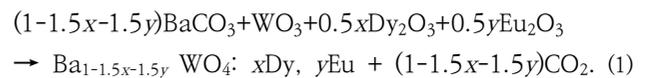
낮은 연색 지수의 문제를 해결하기 위하여 연구자들은 새로운 고효율의 RGB 형광체 개발에 많은 노력을 경주하고 있다. 예를 들면, Lin 등[7]은 420 nm의 청색 발광을 나타내는 $\text{KBaPO}_4:\text{Eu}^{2+}$ 형광체를 제조하였고, Grasser 등[8]은 $\text{CaWO}_4:\text{Pb}^{2+}$ 형광체를 합성하여 450 nm의 청색 발광에 성공하였다. Nazarov 등[9]은 543 nm에 발광 피크를 갖는 $\text{CaWO}_4:\text{Tb}^{3+}$ 녹색 형광체를 합성하였고, Yang 등[10]은 고상반응법을 사용하여 1250 °C에서 4 시간 동안 소결하여 599 nm에 피크를 갖는 $\text{Sr}_3\text{Bi}(\text{PO}_4)_3:\text{Sm}^{3+}$ 주황색 발광 형광체를 제조하였다. Shi 등[11]은 전하 보상(charge compensation) 효과가 615 nm에 발광 피크를 갖는 $\text{CaWO}_4:\text{Eu}^{3+}$ 적색 형광체의 발광 세기에 미치는 영향을 보고하였다. 이와 같은 연구에서 볼 수 있듯이, 모체인 무기질 화합물에 도핑되는 활성화제 이온의 종류와 동일한 희토류 물질의 경우에도 어떤 종류의 무기질 모체 결정에 활성화제 이온이 도핑 되는지에 따라 발광 파장과 세기가 다른 것으로 보고되고 있다 [12]. 일반적으로 희토류 이온은 가시광선 영역에서 많은 에너지 밴드를 가지고 있어서 RGB 색상을 발광하는데 있어서 매우 효율적인 발광 물질로 응용할 수 있는 장점을 가지고 있다.

본 연구에서는 화학적 안정성이 높은 BaWO_4 모체 결정에 Dy^{3+} 와 Eu^{3+} 이온을 동시 도핑하여 높은 발광 세기를 갖는 백색광 형광체를 합성하고자 한다. 특히, AWO_4 (A=Ba, Ca, Sr) 결정은 정방정계 (tetragonal system) 구조를 갖고, 열 및 화학적으로 안정하여 다양한 종류의 희토류 이온을 도핑하기에 적합한 모체 물질이다. 백색광 형광체를 제조하기 위하여 Dy^{3+} 이온의 농도를 5 mol%로 고정하고, Eu^{3+} 이온의 농도를 체계적으로 변화시켜 방출되는 발광 파장과 세기를 조절하였고, 이때 발광 에너지가 Dy^{3+} 이온에서 Eu^{3+} 이온으로 전달되는 효율을 계산하였다. Eu^{3+} 이온의 농도 변화에 따른 형광체의 색 좌표를 조사하여 최적의 백색광을 발광하는 Dy^{3+} 와 Eu^{3+} 이온의 농도를 결정하였다.

2. 실험방법

$\text{BaWO}_4:\text{Dy}^{3+},\text{Eu}^{3+}$ 형광체 분말은 초기 물질

BaCO_3 (순도: 99.0%), WO_3 (99.5%), Dy_2O_3 (99.9%)와 Eu_2O_3 (99.95%)를 화학양론적으로 준비하여 합성하였다. 활성화제 Dy^{3+} 이온의 몰 비(x)는 5 mol%로 고정하였고, Eu^{3+} 이온의 몰 비(y)를 1, 5, 10, 15, 20 mol%로 변화시켜 합성하였다. 화학 반응식은 식 (1)과 같다:



상기의 초기 화학 물질을 정밀 저울로 측량하여 에탄올, ZrO_2 볼과 함께 플라스틱 통에 담아 300 rpm의 속도로 10 시간 동안 볼밀(ball-mill) 작업을 수행하였다. 혼합 분쇄된 용액을 비커에 담아서 80 °C의 건조기(oven)에서 20 시간 동안 건조한 후에, 아게이트 막자사발(agate mortar)에서 건조물을 막자로 갈아서 체로 걸러내고 알루미늄 도가니에 담아 1100 °C에서 5 시간 동안 전기로에서 소결 작업을 수행하여 합성하였다 [13].

형광체의 결정 구조는 X-선 회절 장치(Ultima IV, Rigaku)를 사용하여 회절각 10-80° 구간에서 측정하였고, 결정 입자의 크기와 형상은 주사전자현미경(SEM, CX-200, Coxem)을 사용하여 촬영하였다. 발광 스펙트럼과 색좌표는 제논 램프를 광원으로 사용하는 형광광도계(FS-2, Scinco)를 사용하여 상온에서 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 1은 BaWO_4 모체 결정에 두 종류의 활성화제 Dy^{3+} (5 mol%)와 Eu^{3+} (1, 5, 10, 15, 20 mol%) 이온을 동시 도핑하여 제조한 $\text{BaWO}_4:\text{Dy}^{3+},\text{Eu}^{3+}$ 형광체에 대해 측정한 X-선 회절 결과를 보여주고 있다. 활성화제 Eu^{3+} 이온의 농도 변화에 관계없이 모든 형광체 분말 시료의 경우에, 강한 회절 세기는 26.47°와 28.07°에서 각각 발생한 (112)와 (004)면의 회절 신호이었다. 상기의 두 피크에 비하여 상대적으로 회절 세기가 약한 피크들이 31.88°, 42.98°, 48.70°, 53.57°에서 관측되었으며, 이것은 (200), (204), (116), (132)면에서 회절된 피크들이다. Eu^{3+} 이온이 1 mol% 도핑되었을 때, 회절 피크의 세기가 강한 (112)와

(004)면의 반치폭 (full width at half maximum)은 0.12° 와 0.11° 로 최소값이었고, 15 mol%일 때 0.17° 와 0.16° 로 최대값이었다. 이 결과로부터 합성된 형광체는 (112)와 (004)면 방향으로 주로 배열되어 있으며 Eu^{3+} 가 1 mol%일 때 이러한 경향이 가장 높게 나타났다. X-선 회절 결과로부터 합성한 형광체 분말은 ICDD #01-72-0746와 일치하는 정방정계 (tetragonal system) 결정 구조임을 확인할 수 있었다. (112)면의 반치폭과 회절각을 Scherrer의 식에 대입했을 때 결정 입자의 평균 크기는 Eu^{3+} 가 1 mol% 도핑되었을 때 71 nm로 계산되었다 [14].

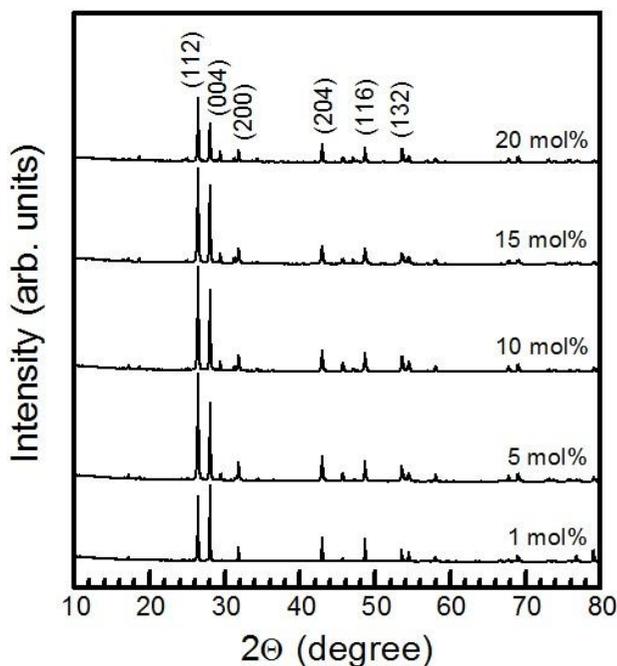


Fig. 1. XRD patterns of $\text{BaWO}_4:\text{Dy}^{3+},\text{Eu}^{3+}$ phosphors doped with different concentrations of Eu^{3+} .

Fig. 2는 모체 BaWO_4 결정에 Dy^{3+} 이온 농도를 5 mol%로 고정시키고 Eu^{3+} 이온의 농도를 1, 5, 10, 15, 20 mol%로 변화시켰을 때의 결정 입자의 형상을 SEM으로 측정된 결과를 나타낸 것이다. Eu^{3+} 이온이 1 mol% 도핑된 형광체의 결정 입자는 5 mol% 이상 도핑된 결정 입자의 형상들과 다른 형태를 보여주고 있다. 결정 입자는 평균 크기를 측정하기 어려운 불규칙한 형태로 구성되어 있으며, 결정 입자들 사이에 공간이 존재하는 완전히 충전되지 않은 형태를 보이고 있다. Fig. 2(c)와 2(d)에서 보듯이, Eu^{3+} 이온이 각각 10와 15 mol%로 도핑된 형광체의 경우에는 크기가 20 mm 이하의 작은 불규칙한 입자들로 치밀하게 채

워져 있는 것을 볼 수 있다. 특히, Eu^{3+} 이온이 10 mol% 도핑된 경우에 결정 입자는 1 mol%와 15 mol% 도핑된 형광체의 중간 형태로서 결정 입자의 크기는 15 mol% 도핑 되었을 때의 크기와 비슷하지만 결정 입자들 사이에는 작지만 약간의 공간이 존재하는 형태를 나타내고 있다. Fig. 2(e)에서 보듯이, Eu^{3+} 이온이 20 mol% 도핑된 경우에는 20 mm 이하의 작은 불규칙한 입자들이 전체적인 기본 형태를 이루고 있으나 부분적으로 40 mm의 크기에 근접하는 불규칙한 큰 결정 입자들이 분포하고 있다.

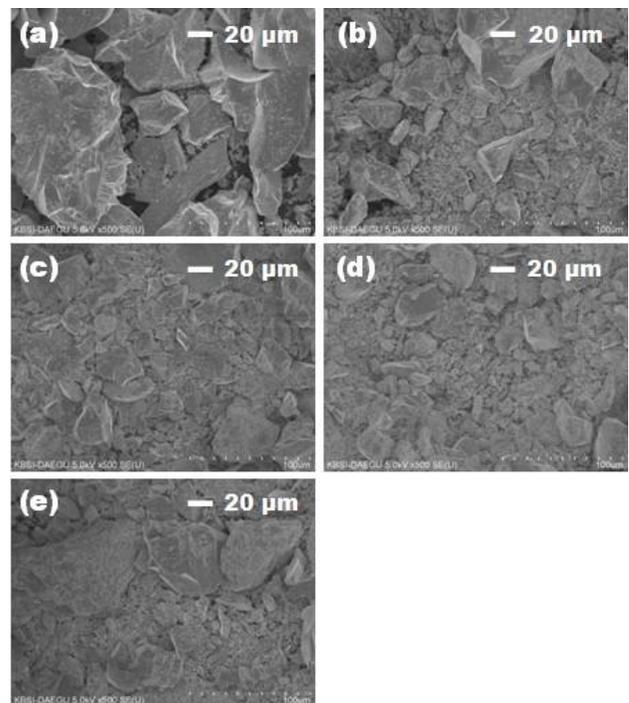


Fig. 2. SEM surface images of $\text{BaWO}_4:\text{Dy}^{3+},\text{Eu}^{3+}$ phosphors doped with (a) 1, (b) 5, (c) 10, (d) 15, and (e) 20 mol% of Eu^{3+} .

Fig. 3은 Eu^{3+} 이온의 몰 비를 변화시키면서 합성한 $\text{BaWO}_4:\text{Dy}^{3+},\text{Eu}^{3+}$ 형광체 시료를 발광 파장 577 nm로 제어하여 측정된 흡광 (absorption) 스펙트럼의 결과를 나타낸 것이다. Eu^{3+} 이온의 몰 비가 1 mol% 일 때 두 종류의 흡광 스펙트럼이 관측되었다. 첫째는 파장 220-280 nm에 걸쳐 넓게 분포하며 251 nm에 피크를 갖는 $\text{Dy}^{3+}-\text{O}^{2-}$ 이온들 사이에서 발생한 전하 전달 밴드 (charge transfer band; CTB) 이며, 두번째는 파장 300-450 nm 영역에서 관측되는 Dy^{3+} 이온의 4f-4f 전이에 의해 발생한 흡광 스펙트럼이다

[15]. 본 시료의 경우에, 여섯 종류의 흡광 파장이 관측되었는데, 이것은 Dy^{3+} 이온의 ${}^6H_{15/2} \rightarrow {}^4H_{13/2}$ (301 nm), ${}^6H_{15/2} \rightarrow {}^6P_{3/2}$ (329 nm), ${}^6H_{15/2} \rightarrow {}^6P_{7/2}$ (355 nm), ${}^6H_{15/2} \rightarrow {}^6P_{5/2}$ (368 nm), ${}^6H_{15/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ (393 nm), ${}^6H_{15/2} \rightarrow {}^6G_{11/2}$ (432 nm) 전이에 의해 발생한 흡광 스펙트럼이다 [16]. 이 중에서 제일 강한 흡광 스펙트럼은 Dy^{3+} 이온의 ${}^6H_{15/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ (393 nm) 전이에 의해 발생한 신호이다. Eu^{3+} 이온의 몰 비가 증가함에 따라 모든 흡광 스펙트럼의 세기는 점차적으로 감소하는 경향을 나타내었다.

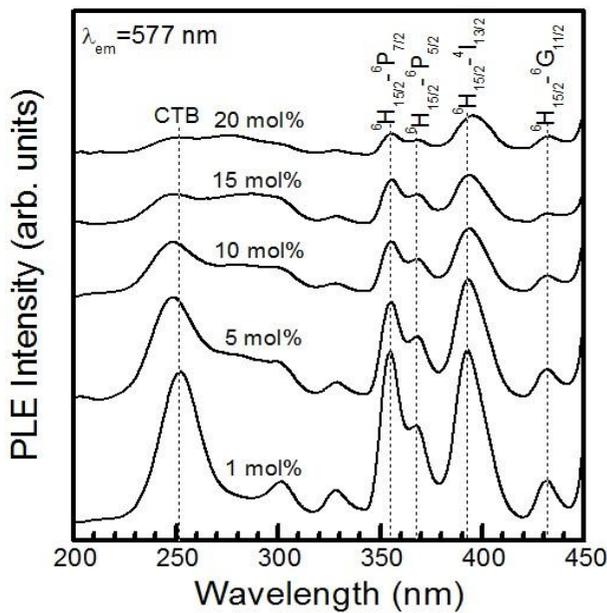


Fig. 3. Excitation spectra of $BaWO_4:Dy^{3+},Eu^{3+}$ phosphors doped with different concentrations of Eu^{3+} .

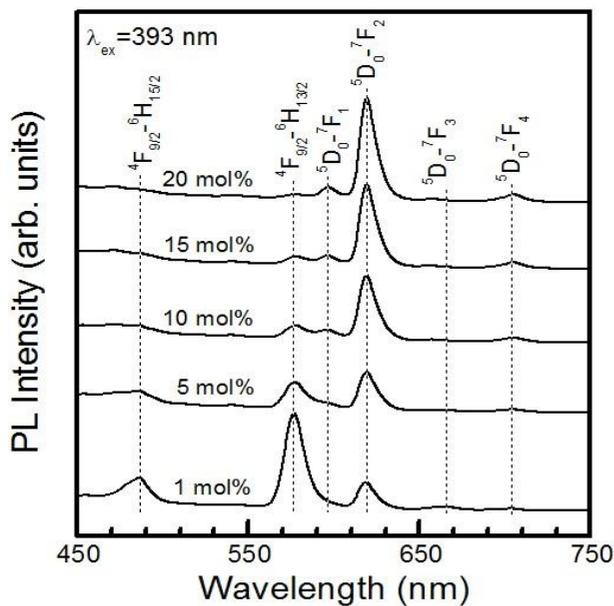


Fig. 4. Photoluminescence spectra of $BaWO_4:Dy^{3+},Eu^{3+}$ phosphors doped with different concentrations of Eu^{3+} .

Fig. 4는 Dy^{3+} 이온의 몰 비를 5 mol%에 고정하고 Eu^{3+} 이온의 몰 비를 1-20 mol%로 변화시키면서 합성한 $BaWO_4:Dy^{3+},Eu^{3+}$ 형광체 분말을 파장 393 nm로 여기시켜 측정한 발광 (photoluminescence) 스펙트럼을 나타낸 것이다. 5 mol% Dy^{3+} 이온과 1 mol% Eu^{3+} 이온이 동시에 도핑된 $BaWO_4$ 형광체의 경우에 두 종류의 활성제 이온에 의한 발광 스펙트럼이 관측되었다. 첫번째는 활성제 Dy^{3+} 이온의 ${}^4F_{9/2} \rightarrow {}^6H_{13/2}$ 전기 쌍극자 전이와 ${}^4F_{9/2} \rightarrow {}^6H_{15/2}$ 자기 쌍극자 전이에 의한 각각 577 nm에 피크를 갖는 가장 강한 황색 발광 신호와 485 nm의 청색 발광 신호가 나타났으며, 두번째는 Eu^{3+} 이온의 ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_2$ 전기 쌍극자 전이에 의한 619 nm에 피크를 갖는 적색 발광 스펙트럼과 상대적으로 발광 세기가 매우 미약한 Eu^{3+} 이온의 ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_3$ 와 ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_4$ 전이에 의한 각각 657 nm와 703 nm에 피크를 갖는 적색 발광 스펙트럼이 관측되었다 [17, 18]. 이 경우에 Dy^{3+} 이온에 의한 577 nm의 황색 발광의 세기는 Eu^{3+} 이온에 의한 619 nm의 적색 발광의 세기에 비하여 약 3.3 배 증가하였다. Eu^{3+} 이온의 몰 비를 5 mol%로 증가시켰을 때, Dy^{3+} 이온의 전이에 의한 발광 스펙트럼의 세기는 크게 감소하였고, Eu^{3+} 이온의 전이에 의해 발생하는 발광 스펙트럼의 세기는 증가하여 두 종류의 발광 스펙트럼의 세기는 역전되기 시작하였다. Eu^{3+} 이온의 몰 비가 10, 15, 20 mol%로 증가함에 따라 Dy^{3+} 이온에 의한 황색과 청색 발광 스펙트럼의 세기는 현저히 감소하였고, Eu^{3+} 이온에 의한 적색 발광 스펙트럼의 세기는 급격히 증가하였다. Eu^{3+} 가 20 mol% 도핑되었을 때 ${}^5D_0 \rightarrow {}^7F_2$ (619 nm) 전기 쌍극자 전이에 의한 적색 발광의 세기는 1 mol% 일 때의 적색 발광 세기에 비하여 약 3.5 배 증가하였다. Eu^{3+} 이온의 몰 비 변화에 따른 발광 파장의 세기 변화를 Fig. 5에 나타내었다. Eu^{3+} 이온의 몰 비가 1 mol% 일 때 주 발광 파장은 황색 발광이었으나, Eu^{3+} 이온의 몰 비가 20 mol%로 증가함에 따라 주 발광 신호는 적색 발광으로 이동하였다. 상기의 결과는 Eu^{3+} 이온의 몰 비가 1 mol%에서 20 mol%으로 순차적으로 증가함에 따라 발광 에너지가 모체 결정내에 위치하는 Dy^{3+} 이온에서 Eu^{3+} 이온으로 전환되는 것을 의미한다. Dy^{3+} 이온에서 Eu^{3+} 이온으로 에너지 전달 효율 (energy transfer

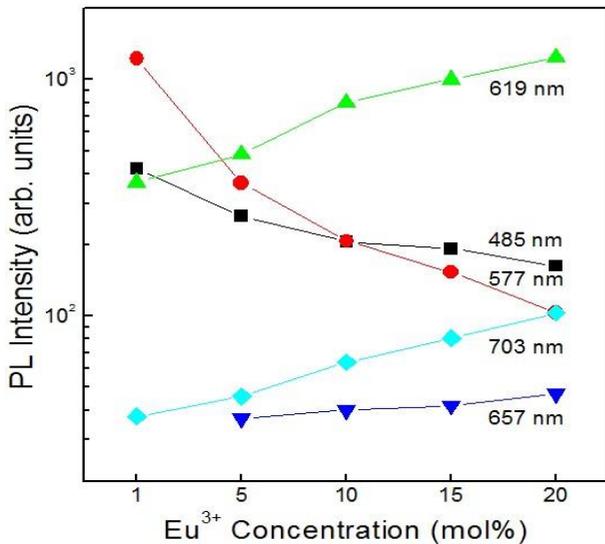


Fig. 5. Dependence of the emission intensities of BaWO₄:Dy³⁺,Eu³⁺ phosphors on the doping concentration of Eu³⁺.

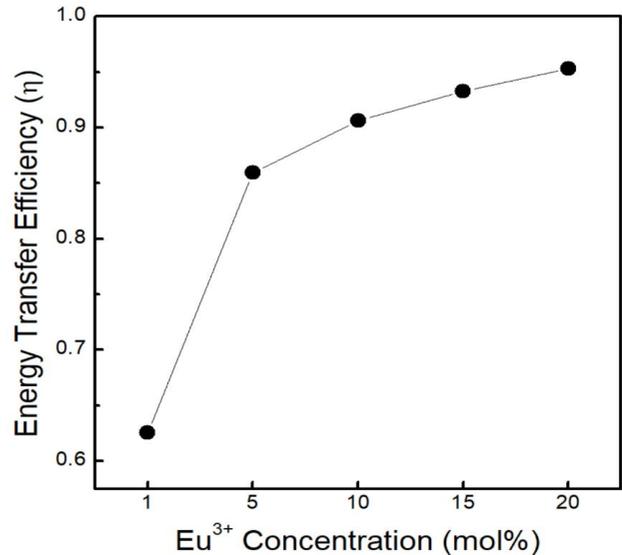


Fig. 6. Energy transfer efficiency from Dy³⁺ to Eu³⁺ ions in BaWO₄:Dy³⁺,Eu³⁺ phosphors synthesized with different concentration of Eu³⁺ at a fixed 5 mol% Dy³⁺.

efficiency) η 은 식(2)

$$\eta = 1 - I / I_0 \quad (2)$$

을 사용하여 계산할 수 있다 [19]. 여기서 I_0 는 Dy³⁺ 이온이 단일 도핑된 형광체에서 Dy³⁺ 이온이 방출하는 청색과 황색 발광 에너지의 세기이고, I 는 Dy³⁺와 Eu³⁺ 이온이 동시 도핑된 형광체에서 Dy³⁺ 이온이 방출하는 발광 에너지의 세기를 나타낸다. Fig. 6은 Eu³⁺ 이온의 도핑 농도의 변화에 따른 Dy³⁺ 이온에서 Eu³⁺ 이온으로 이동하는 에너지 전달 효율을 나타낸 것이다. Eu³⁺ 이온의 도핑 농도가 1 mol%일 때 에너지 전달 효율은 62.5% 이었고, Eu³⁺ 이온의 농도가 5%, 10%, 15%, 20%로 증가함에 따라 에너지 전달 효율은 각각 85.9%, 90.6%, 93.2%, 95.3%로 현저하게 증가하였다.

Fig. 7은 서로 다른 Eu³⁺ 이온의 몰 비로 합성한 BaWO₄:Dy³⁺,Eu³⁺ 형광체를 파장 393 nm로 여기 시켰을 때 발생하는 형광체의 CIE (Commission Internationale de L'Eclairage) 1931 색 좌표 (x, y)를 나타낸 것이다. 숫자 1, 2, 3, 4, 5는 Eu³⁺ 이온의 몰 비를 각각 1, 5, 10, 15, 20 mol%로 도핑한 BaWO₄:Dy³⁺,Eu³⁺ 형광체 분말에 대한 CIE 색 좌표를 표시한 것이다. Eu³⁺ 이온을 1 mol% 도핑한 경우에 색 좌표는 (0.363,

0.357)로써, 중성 백색 (neutral white)을 나타내었다. Eu³⁺ 이온의 몰 비가 5 mol%에서 20 mol%로 증가함에 따라, 적색 발광의 세기가 증가하여 형광체의 색 좌표는 (0.323, 0.295)의 차가운 백색에서 (0.401, 0.284)의 따뜻한 백색으로 이동하는 경향을 보였다.

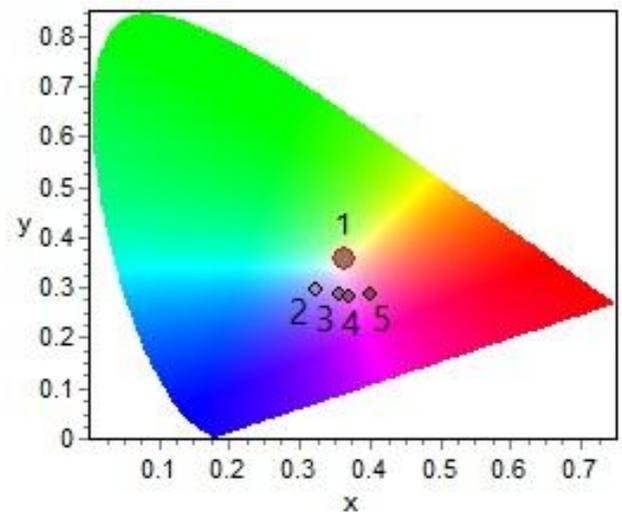


Fig. 7. CIE chromaticity diagram of BaWO₄:Dy³⁺,Eu³⁺ phosphors doped with (1) 1, (2) 5, (3) 10, (4) 15, and (5) 20 mol% Eu³⁺ at a fixed 5 mol% Dy³⁺.

4. 결 론

Dy³⁺ 이온의 몰 비를 5 mol%에 고정하고, Eu³⁺ 이온의 몰 비를 1, 5, 10, 15, 20 mol%로 증가시키면서 BaWO₄:Dy³⁺,Eu³⁺ 형광체 시료를 고상반응

법으로 합성하였다. 모든 형광체 분말의 결정 구조는 활성제 이온의 몰 비에 관계없이 주 피크 (112)을 갖는 정방정계이었으며, 결정 입자는 서로 뭉치면서 불규칙한 결정 입자의 형태를 보였다. 발광 스펙트럼의 경우에, Eu^{3+} 이온의 몰 농도가 증가함에 따라 Dy^{3+} 이온에 의해 발생하는 청황색 계통의 발광 스펙트럼의 세기는 감소하였으나, Eu^{3+} 이온에 의한 적색 발광의 세기는 급격히 증가하였으며, 주 발광 스펙트럼은 Eu^{3+} 이온의 ${}^5\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_2$ 전기 쌍극자 전이에 의한 619 nm의 적색 발광이었다. Eu^{3+} 이온의 몰 농도 증가에 따른 형광체의 적색 이동 현상이 관측되었으며, Eu^{3+} 이온의 농도가 20 mol%일 때 에너지 전달 효율은 95.3%이었다. 최적의 백색 발광은 5 mol%의 Dy^{3+} 이온과 1 mol%의 Eu^{3+} 이온을 모체 BaWO_4 결정에 동시에 도핑한 경우에 발생하였으며, 이때 색좌표는 (0.363, 0.357)이었다.

References

- [1] P. Fu, Q. Shan, Y. Shang, J. Song, H. Zeng, Z. Ning, J. Gong, Perovskite Nanocrystals: Synthesis, Properties and Applications, *Sci. Bull.* 62 (2017) 369-380.
- [2] H. Y. Ryu, Analysis on the Luminous Efficiency of Phosphor-Conversion White Light-Emitting Diode, *J. Opt. Soc. Korea*, 17(1) (2013) 22-26.
- [3] Y. C. Li, Y. H. Chang, Y. F. Lin, Y. S. Chang, Y. J. Lin, Synthesis and Luminescent Properties of $\text{Ln}^{3+}(\text{Eu}^{3+}, \text{Sm}^{3+}, \text{Dy}^{3+})$ -doped Lanthanum Aluminum Germanate $\text{LaAlGe}_2\text{O}_7$ Phosphors, *J. Alloy. Compd.* 439 (2007) 367-375.
- [4] T. W. Kuo, W. R. Liu, T. M. Chen, High Color Rendering White Light-Emitting-Diode Illuminator Using the Red-Emitting Eu^{2+} -Activated CaZnOS Phosphors Excited by Blue LED, *Opt. Express*, 18(8) (2010) 8187-8192.
- [5] A. A. Setlur, Phosphors for LED-based Solid-State Lighting, *Electrochem. Soc. Interface*, Winter (2009) 32-36.
- [6] H. Wu, C. Wang, S. He, Research of Color Rendering of White LED Based on Red and Green Phosphors, *Acta. Optica. Sinica*, 28(9) (2008) 1777-1781.
- [7] C. C. Lin, Y. S. Tang, S. F. Hu, R. S. Liu, $\text{KBaPO}_4:\text{Ln}$ ($\text{Ln}=\text{Eu}, \text{Tb}, \text{Sm}$) Phosphors for UV Excitable White Light-Emitting Diodes, *J. Lumin.* 129 (2009) 1682-1684.
- [8] R. Grasser, W. Pompe, A. Scharmann, Defect Luminescence in Tungstate, *J. Lumin.* 40/41 (1988) 343-344.
- [9] M. Nazarov, D. Y. Noh, Rare Earth Double Activated Phosphors for Different Applications, *J. Rare Earth.* 28 (2010) 1-11.
- [10] Z. Yang, Y. Han, Y. Song, Y. Zhao, P. Liu, Synthesis and Luminescence Properties of a Novel Red $\text{Sr}_3\text{Bi}(\text{PO}_4)_3:\text{Sm}^{3+}$ Phosphor, *J. Rare Earth.* 30(12) (2012) 1199-1202.
- [11] S. Shi, J. Gao, J. Zhou, Effects of Charge Compensation on the Luminescence Behavior of Eu^{3+} Activated CaWO_4 Phosphor, *Opt. Mater.* 30 (2008) 1616-1620.
- [12] N. Niu, P. Yang, W. Wang, F. He, S. Gai, D. Wang, J. Lin, Solvothermal Synthesis of $\text{SrMoO}_4:\text{Ln}$ ($\text{Ln}=\text{Eu}^{3+}, \text{Tb}^{3+}, \text{Dy}^{3+}$) Nanoparticles and Its Photoluminescence Properties at Room Temperature, *Mater. Res. Bull.* 46 (2011) 333-339.
- [13] H. Cho, S. Cho, Photoluminescence Properties of $\text{CaNb}_2\text{O}_6:\text{RE}^{3+}$ ($\text{RE}=\text{Dy}, \text{Eu}, \text{Dy/Eu}$) Phosphors, *Korean J. Mater. Res.* 27(6) (2017) 339-344.
- [14] A. Pandey, V. K. Rai, $\text{Pr}^{3+}-\text{Yb}^{3+}$ Codoped Y_2O_3 Phosphor for Display Devices, *Mater. Res. Bull.* 57(9) (2014) 156-161.
- [15] Y. Zhang, W. Gong, J. Yu, H. Pang, Q. Song,

- G. Ning, A New Single-phase White-Light-Emitting $\text{CaWO}_4:\text{Dy}^{3+}$ Phosphor: Synthesis, Luminescence and Energy Transfer, RSC Adv. 5 (2015) 62527-62533.
- [16] A. K. Bedyal, V. Kumar, R. Prakash, O. M. Ntwaeaborwa, H. C. Swart, A Near-UV-Converted $\text{LiMgBO}_3:\text{Dy}^{3+}$ Nanoparticle: Surface and Spectral Investigations, Appl. Surf. Sci. 329 (2015) 40-46.
- [17] Y. Zhai, X. Li, J. Liu, M. Jiang, A Novel White-Emitting Phosphor $\text{ZnWO}_4:\text{Dy}^{3+}$, J. Rare Earth. 33(4) (2015) 350-354.
- [18] M. Shi, D. Zhang, C. Chang, $\text{Dy}^{3+}:\text{Ca}_2\text{SnO}_4$, a New Yellow Phosphor with Afterglow Behavior, J. Alloy. Compd. 639 (2015) 168-172.
- [19] B. Devakumar, H. Guo, Y. J. Zeng, X. Huang, A Single-Phased Warm-White-Emitting $\text{K}_3\text{Y}(\text{PO}_4)_2:\text{Dy}^{3+},\text{Sm}^{3+}$ Phosphor with Tuneable Photoluminescence for Near-UV-Excited White LEDs, Dyes Pigm. 157 (2018) 72-79.