〈연구논문〉
ISSN 1225-8024(Print)
ISSN 2288-8403(Online)

한국표면공학회지
J. Korean Inst. Surf. Eng.
Vol.53, No.4, 2020.
https://doi.org/10.5695/JKISE.2020.53.4.131

백색광 소자 응용을 위한 $Gd_2WO_6:RE^{3+}$ (RE = Dy, Sm, Dy/Sm) 형광체의 구조 및 발광 특성

박기원, 정재용, 조신호*

신라대학교 신소재공학부

Structural and Luminescent Properties of $Gd_2WO_6:RE^{3+}$ (RE = Dy, Sm, Dy/Sm) Phosphors for White Light Emitting Devices

Giwon Park, Jaeyong Jung, and Shinho Cho*

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

(Received 18 May, 2020 ; revised 1 July, 2020 ; accepted 9 July, 2020)

Abstract

A series of Dy^{3+}, Sm^{3+}, and Dy^{3+}/Sm^{3+} doped Gd_2WO_6 phosphors were synthesized by the conventional solid-state reaction. The X-ray diffraction patterns revealed that all of the diffraction peaks could be attributed to the monoclinic Gd_2WO_6 crystal structure, irrespective of the type and the concentration of activator ions. The photoluminescence (PL) excitation spectra of Dy^{3+}-doped Gd_2WO_6 phosphors contained an intense charge transfer band centered at 302 nm in the range of 240−340 nm and two weak peaks at 351 and 386 nm. Under an excitation wavelength of 302 nm, the PL emission spectra consisted of two strong blue and yellow bands centered at 482 nm and 577 nm. The PL emission spectra of the Sm^{3+}-doped Gd_2WO_6 phosphors had a series of three peaks centered at 568 nm, 613 nm, and 649 nm, corresponding to the $^6G_{5/2} \rightarrow {}^6H_{5/2}$, $^6G_{5/2} \rightarrow {}^6H_{9/2}$, and $^6G_{5/2} \rightarrow {}^6H_{11/2}$ transitions of Sm^{3+}, respectively. The PL emission spectra of the Dy^{3+}- and Sm^{3+}-codoped Gd_2WO_6 phosphors showed the blue and yellow emission lines originating from the $^4F_{9/2} \rightarrow {}^6H_{15/2}$ and $^4F_{9/2} \rightarrow {}^6H_{13/2}$ transitions of Dy^{3+} and reddish-orange and red emission bands due to the $^4G_{5/2} \rightarrow {}^6H_{7/2}$ and $^4G_{5/2} \rightarrow {}^6H_{9/2}$ transitions of Sm^{3+}. As the concentration of Sm^{3+} increased from 1 to 15 mol%, the intensities of two PL spectra emitted by the Dy^{3+} ions gradually decreased, while those of the three emission bands due to the Sm^{3+} ions slowly increased, thus producing the color change from white to orange. The CIE color coordinates of Gd_2WO_6:5 mol% Dy^{3+}, 1 mol% Sm^{3+} phosphors were (0.406, 0.407), which was located in the warm white light region.

Keywords : Phosphor, Photoluminescence, Solid-state reaction, Gadolinium tungstate

1. 서 론

최근에 높은 발광 효율과 연색지수를 갖는 백색광 소재를 개발하는 연구에 많은 노력이 경주되고 있다 [1-3]. 백색광을 구현하기 위하여 열 및 화학적으로 안정한 모체 결정에 두 종류의 활성제 이온을 동시 도핑하는 방법은 단일 도핑하는 경우에 비하여 발광 세기와 연색지수가 높은 장점을 갖고 있다 [4]. 백색광 방출은 기본 삼색인 적색, 녹색, 청색광을 방출하는 발광 센터를 갖는 두 종류의 활성제 이온의 선택과 그것의 농도비를 적당하게 조합함으

*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

로써 달성할 수 있다. 일반적으로, 연색지수가 높은 백색광을 얻기 위하여 모체 결정에 도핑되는 네 종류의 활성제 이온의 이중 도핑이 서로 경쟁하고 있다. 청색과 황색을 동시에 방출하는 Dy^{3+}와 Tb^{3+} 활성제 이온과 적색과 주황색을 모두 발광하는 Eu^{3+}와 Sm^{3+} 이온의 조합으로 구성된다. 예를 들면, Sun 등 [5]은 고상반응법을 사용하여 Eu^{3+}와 Dy^{3+}가 동시 도핑된 $SrGd_2O_4$ 형광체를 합성하였고, Eu^{3+} 이온의 농도가 증가함에 따라 발광 파장이 황색에서 적색으로 이동함을 발표하였다. Li 등 [6]은 대기압에서 고상반응법을 사용하여 합성한 $Sr_{0.8}Ca_{0.2}Al_2Si_2O_8:Eu^{3+},Tb^{3+}$ 형광체의 경우에 Tb^{3+} 이온에 의한 발광이 관측되지 않았으나, 환원 분위기에서 합성한 경우에는 Tb^{3+}의 전형적인 발광 파장이 나타남을 보고하였다. Sun 등 [7]은 NaCl/KCl을 플럭스 (flux)로 사용하는 용융염법 (molten salts synthesis)으로 $Ba_3MgSi_2O_8:Tb^{3+},Sm^{3+}$ 형광체를 합성하여 Sm^{3+} 이온의 농도가 1%에서 5%로 증가함에 따라 발광 색깔이 녹황색에서 적황색으로 이동함을 관측하였다. Devakumar 등 [8]은 고상반응법으로 $K_3Y(PO_4)_2$:3% Dy^{3+},1% Sm^{3+} 형광체를 제조하였으며, 파장 351 nm로 여기시켰을 때 (0.433, 0.406)의 색 좌표를 갖는 따뜻한 백색광을 관측하였다.

본 연구에서는 고상반응법을 사용하여 화학 및 열적으로 안정한 Gd_2WO_6 모체 결정에 Dy^{3+} 이온을 단일 도핑한 청황색 형광체, Sm^{3+} 이온을 단일 도핑한 적주황색 형광체, Dy^{3+}와 Sm^{3+} 이온을 이중 도핑한 백색 형광체를 합성하였다. 활성제 이온의 종류와 몰 농도에 따른 결정 구조, 발광과 흡광 파장의 세기, CIE 색 좌표의 이동, 결정 입자의 크기를 체계적으로 조사하였으며, 백색광을 방출하는 형광체를 제조하기 위한 최적의 두 활성제 이온의 농도를 결정하였다.

2. 실 험

초기 물질 Gd_2O_3 (순도: 99.9%), WO_3 (99.9%), Sm_2O_3 (99.9%)와 Dy_2O_3 (99.9%)를 화학양론적으로 준비하여 세 종류의 $Gd_2WO_6:Dy^{3+}$, $Gd_2WO_6:Sm^{3+}$, $Gd_2WO_6:Dy^{3+},Sm^{3+}$ 형광체 분말을 합성하였다. Dy^{3+}와 Sm^{3+} 이온이 각각 단일 도핑된 Gd_2WO_6 형광체의 경우에는 Dy^{3+}와 Sm^{3+} 이온의 몰 비를 5 mol%로 정하였고, Dy^{3+}와 Sm^{3+} 이온이 동시 도핑된 Gd_2WO_6 형광체의 경우에는 Dy^{3+} 이온의 몰 비를 5 mol%로 고정한 상태에서 Sm^{3+} 이온의 몰 비를 1, 5, 10, 15 mol%로 변화시켰다.

정밀저울(ABT 220-4M, Kern)을 사용하여 초기 물질의 정량을 측정한 후에 적정 양의 에탄올과 직경 3 mm의 ZrO_2 볼을 함께 플라스틱 통에 넣고 10시간 동안 볼 밀 (ball-mill)을 수행하였다. ZrO_2 볼을 체로 걸러내고 혼합 분쇄된 용액을 비커에 담아서 80 ℃에서 20 시간 동안 건조한 후에, 아게이트 막자 사발에 놓고 잘게 갈아서 80 μm의 체로 걸러내고 알루미나 도가니에 담아 전기로에 넣고, 분당 5℃로 상승시켜 400 ℃에서 3 시간 동안 하소 공정과 1100 ℃에서 5 시간 동안 소결하여 합성하였다.

형광체 분말의 결정 구조는 X-선 회절장치 (Ultima IV, Rigaku, Japan)를 사용하여 회절각 10–60° 영역에서 분당 4°의 스캔 속도로 측정하였고, 합성한 형광체 표면의 미세 형상은 주사전자현미경 (CX-200, Coxem, Korea)을 사용하여 가속 전압 20 kV에서 10k 배율로 촬영하였다. 흡광과 발광 특성은 상온에서 제논 램프를 광원으로 갖는 형광광도계(FS-2, Scinco, Korea)를 사용하여 광증배관 전압 400V, 흡광과 발광 슬릿의 크기 5 nm에서 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 1은 5 mol% Dy^{3+} 이온과 5 mol% Sm^{3+} 이온이 각각 단일 도핑된 Gd_2WO_6 형광체와 Dy^{3+} 이온의 몰 비를 5 mol%로 고정하고 Sm^{3+} 이온의 몰 비를 1, 5, 10, 15 mol%로 변화시켜 동시 도핑한 $Gd_2WO_6:Dy^{3+},Sm^{3+}$ 형광체 시료를 X-선 회절법으로 측정한 결과를 나타낸 것이다. 활성제 이온의 종류와 몰 비에 관계없이 모든 형광체 분말의 주 회절 피크는 28.38°에서 발생하였으며, 주 회절 피크 이외에도 상대적으로 약한 회절 세기를 갖는 28.94°, 32.04°, 33.10°, 34.48°, 46.68°, 47.74°, 54.82°, 58.66°에 중심을 갖는 회절 피크들이 관측되었다. 전자의 주 회절 피크는 $(\bar{3}21)$ 면에서 발생하였으며, 후자는 (321), (040), (002), (600), (042), $(\bar{6}02)$, $(\bar{3}61)$, (930) 면에서 발생한 회절 피크들이다. 상기 결과로부터 활성제 Dy^{3+}와 Sm^{3+} 이온이 도핑된 Gd_2WO_6 형광체는 ICDD 카드 번호 00-023-1074와 일치하는 단사정계(monoclinic system)의 결정 구조임을 확인하였다. Dy^{3+} 이온이 단일 도핑된 형광체의 경우에 주 회절 피크 $(\bar{3}21)$의 세기는 최대이었으며, 반치폭(full width at half maximum)의 크기는 0.18° 이었다. 주 회절 피크의 회절각과 반치폭의 값을 Scherrer의 식에 대입하여 결정한 5 mol% Dy^{3+} 이온이 도핑된 형광체의 결정 입자의 크기는 48 nm 이었다 [9].

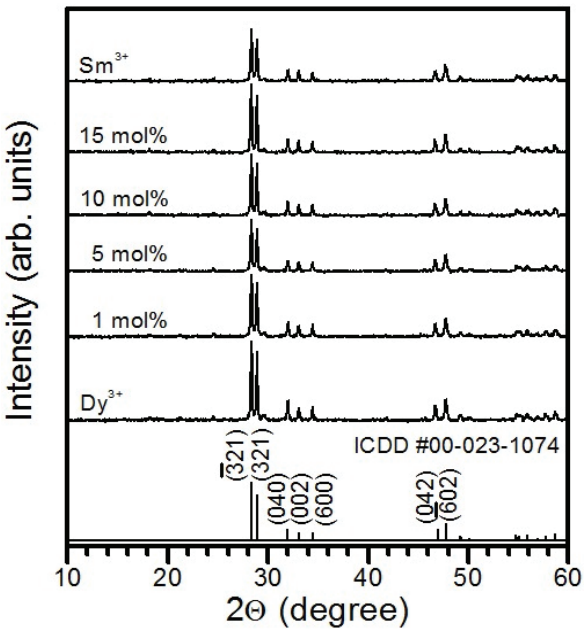

Fig. 1. XRD patterns of Gd_2WO_6 phosphors synthesized with different types and concentrations of activator ions.

Fig. 2(a)와 (b)는 각각 5 mol% Dy^{3+}와 5 mol% Sm^{3+} 이온을 단일 도핑한 Gd_2WO_6 형광체 분말 시료를 서로 다른 발광 파장에서 제어한 여기(excitation) 스펙트럼의 결과를 나타낸 것이다. Fig. 2(a)에서 보듯이, 파장 482와 577 nm로 제어한 5 mol% Dy^{3+} 이온이 단일 도핑된 형광체의 경우에는 두 종류의 여기 스펙트럼이 관측되었다. 한 종류는 파장 영역 240-340 nm에 걸쳐서 넓은 밴드를 갖고 302 nm에 피크를 갖는 Dy^{3+}-O^{2-} 이온들 사이에 발생한 전하전달밴드(charge transfer band; CTB)이고, 다른 종류는 파장 영역 340-400 nm에서 관측되는 활성제 Dy^{3+} 이온에 의한 여기 스펙트럼이다. 파장 351, 386 nm에서 발생한 여기 파장은 Dy^{3+} 이온에 의한 $^6H_{15/2} \rightarrow {}^6P_{7/2}$와 $^6H_{15/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ 전이에 의해 발생한 여기 신호이다 [10]. 상기의 여기 파장은 InGaN 칩(chip)에서 방출되는 근자외선 발광 파장과 일치하기 때문에 근자외선으로 여기되는 백색광 발광 다이오드 제작에 응용할 수 있다 [11]. 파장 577 nm로 제어했을 때 CTB의 흡광 신호의 크기는 482 nm로 제어했을 때의 흡광 신호의 크기에 비하여 약 2.7배 증가하였다. Fig. 2(b)에서 보듯이, 파장 568, 613, 649 nm로 제어한 5 mol% Sm^{3+} 이온이 단일 도핑된 Gd_2WO_6 형광체 분말의 여기 스펙트럼은 240-350 nm에 걸쳐 넓게 분포하며 302 nm에 피크를 갖는 Sm^{3+}-O^{2-} 이온들 사이에서 발생한 CTB 여기 스펙트럼과 373 nm에 피크를 갖는 $^6H_{5/2} \rightarrow {}^6P_{7/2}$ 전이에 의한 흡광 스펙트럼으로 구성되었다 [12]. 613 nm로 형광체를 제어했을 때 여기 스펙트럼의 세기가 최대이었다.

Fig. 3은 Dy^{3+} 이온의 몰 비를 5 mol%로 고정하고, Sm^{3+} 이온의 몰 비를 1-15 mol%로 변화시키면서 합성한 Gd_2WO_6:Dy^{3+},Sm^{3+} 형광체 분말 시료를 발광 파장 577 nm에서 제어한 여기 스펙트럼의 결과를 나타낸 것이다. Sm^{3+} 이온의 몰 비에 관계없이 모든 형광체 분말의 경우에 302 nm에서 정점을 갖고 240-340 nm 파장 영역에 걸쳐서 넓게 분포하는

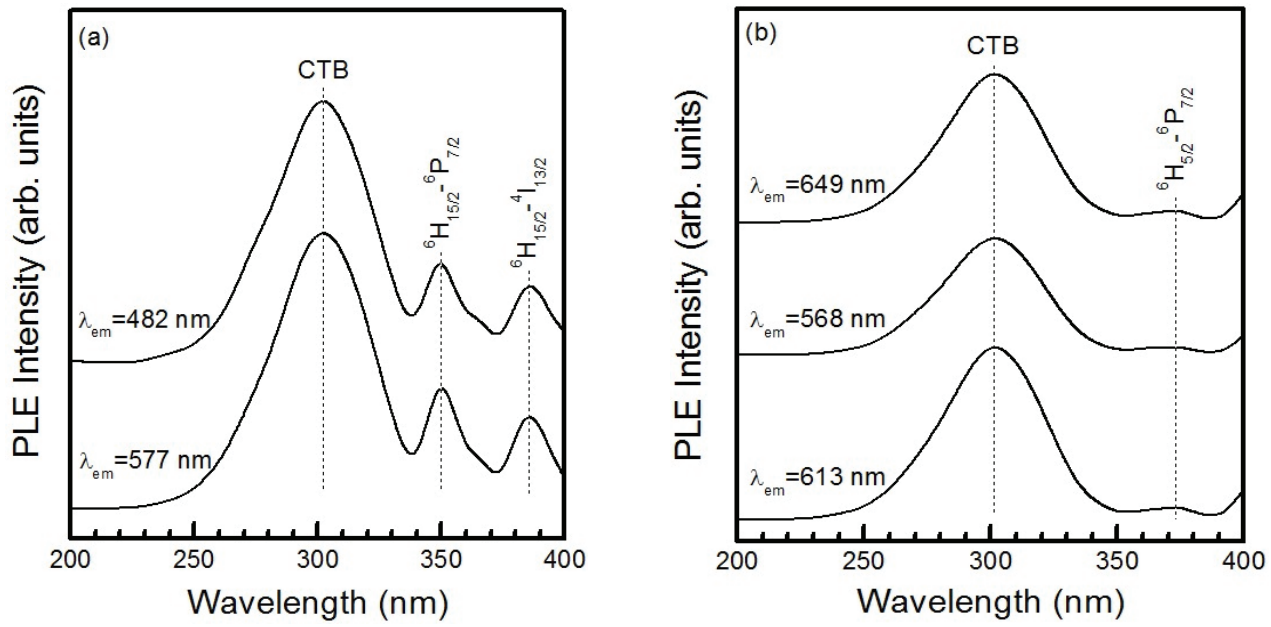

Fig. 2. Excitation spectra of Gd_2WO_6 phosphors synthesized with different types of (a) Dy^{3+} and (b) Sm^{3+}.

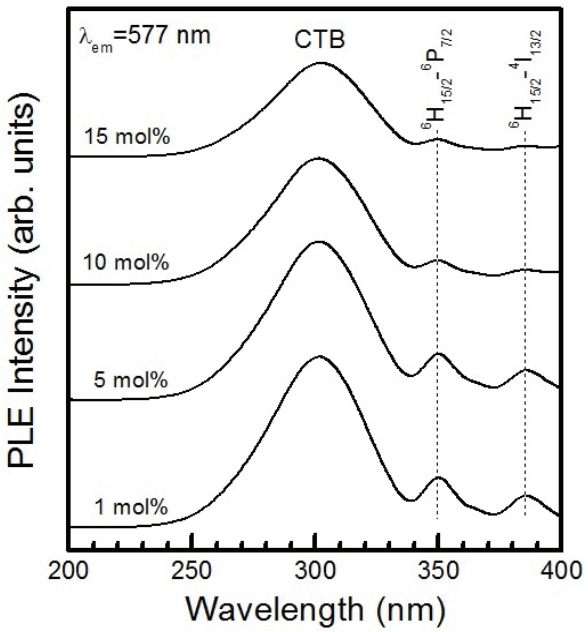

Fig. 3. Excitation spectra of Gd_2WO_6:Dy^{3+},Sm^{3+} phosphors synthesized with different concentrations of Sm^{3+}.

Dy^{3+}-O^{2-} 이온들 사이에 발생하는 CTB 스펙트럼과 340-400 nm 파장 영역에서 관측되는 CTB 여기 신호에 비해 상대적으로 약한 350와 385 nm에 피크를 갖는 두 종류의 여기 신호로 구성되었다. 여기서 두 개의 여기 스펙트럼은 Dy^{3+} 이온의 $^6H_{15/2} \rightarrow {}^6P_{7/2}$ 전이와 $^6H_{15/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ 전이에 의하여 발생한 여기 신호이다 [13]. 세 종류의 여기 스펙트럼 중에서, CTB 여기 신호의 세기가 최대이었다. Sm^{3+} 이온의 몰 비가 증가함에 따라 CTB 여기 신호와 Dy^{3+} 이온의 4f-4f 전이에 의한 두 여기 스펙트럼의 세기는 순차적으로 감소하는 경향을 보였다.

Fig. 4(a)와 (b)는 서로 다른 파장으로 여기시킨 5 mol% Dy^{3+}와 5 mol% Sm^{3+} 이온이 각각 단일 도핑된 Gd_2WO_6 형광체의 발광 스펙트럼을 나타낸 것이다. 파장 302, 351, 386 nm로 여기시킨 Dy^{3+} 이온이 단일 도핑된 Gd_2WO_6 형광체의 경우에 577 nm에 피크를 갖는 $^4F_{9/2} \rightarrow {}^6H_{13/2}$ 전기 쌍극자 전이에 의한 황색 발광 스펙트럼과 482 nm에 피크를 갖는 $^4F_{9/2} \rightarrow {}^6H_{15/2}$ 자기 쌍극자 전이에 의한 청색 발광 스펙트럼이 관측되었다 [14]. 파장 302 nm으로 여기 시켰을 때 황색 발광 (577 nm) 신호의 세기는 386 nm로 여기 시켰을 때 발광 신호의 세기에 비해 약 2.7배 증가하였다. Fig. 4(b)에서 보듯이, Sm^{3+} 이온이 단일 도핑된 경우에 파장 302 nm와 373 nm로 여기 시켰을 때 Sm^{3+} 이온의 고유한 네 종류의 발광 스펙트럼이 관측되었다. $^4G_{5/2} \rightarrow {}^6H_{5/2}$ 자기 쌍극자 전이에 의한 황색 발광 (568 nm), $^4G_{5/2} \rightarrow {}^6H_{7/2}$ 자기 쌍극자 전이에 의한 적주황색 발광 (613 nm), $^4G_{5/2} \rightarrow {}^6H_{9/2}$ 전기 쌍극자 전이에 의한 적색 발광 (649 nm)과 함께, 713 nm에 미약한 $^4G_{5/2} \rightarrow {}^6H_{11/2}$ 전이에 의한 적색 발광이 발생하였다 [15]. 파장 302 nm로 여기 시켰을 때 적주황색 발광 스펙트럼 (613 nm)의 세기는 373 nm로 여기 시켰을 때 보다 약 7.4배 증가하였다.

Fig. 5는 파장 302 nm로 여기 시켰을 때 Dy^{3+} 이온의 농도를 5 mol%로 고정하고 Sm^{3+} 이온의 몰 비

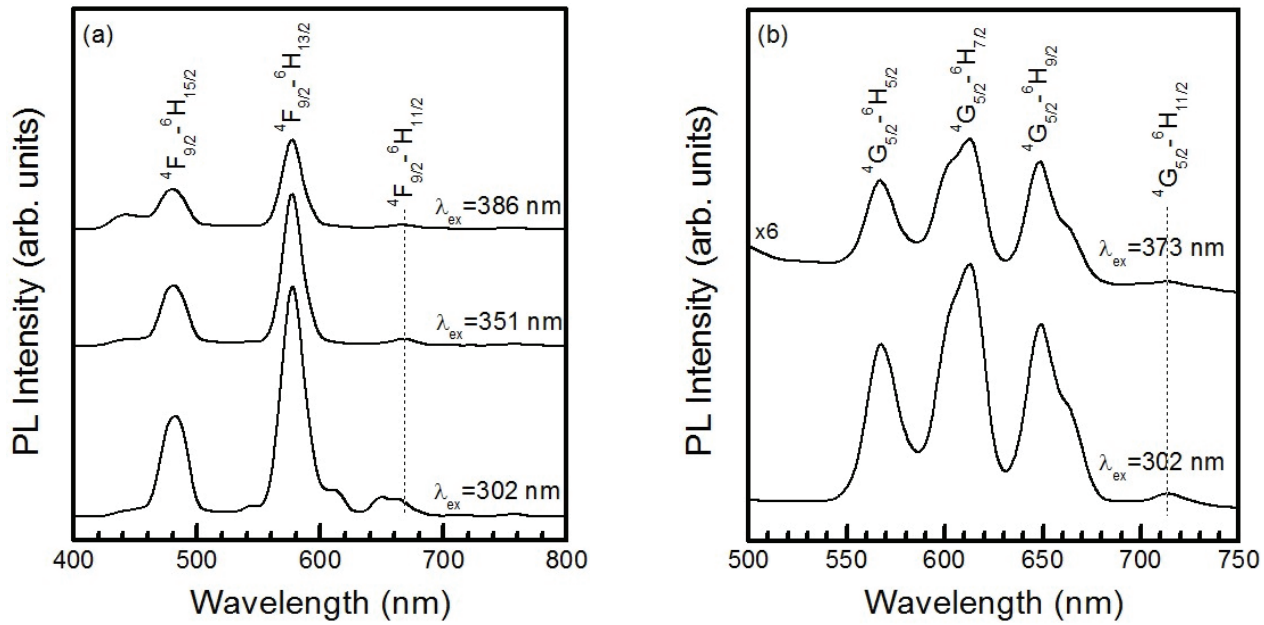

Fig. 4. Photoluminescence spectra of Gd_2WO_6 phosphors synthesized with different types of (a) Dy^{3+} and (b) Sm^{3+}.

를 1-15 mol%로 변화시키면서 합성한 Gd_2WO_6:Dy^{3+}, Sm^{3+} 형광체 분말에서 측정한 발광 스펙트럼을 나타낸 것이다. 모든 형광체 분말에서 Dy^{3+}와 Sm^{3+} 이온에 의한 전형적인 발광 스펙트럼이 동시에 관측되었다. Sm^{3+} 이온의 몰 비가 1 mol% 일 때, Dy^{3+} 이온의 $^4F_{9/2} \rightarrow {}^6H_{15/2}$ 자기 쌍극자 전이에 의한 482 nm의 청색 발광과 $^4F_{9/2} \rightarrow {}^6H_{13/2}$ 전기 쌍극자 전이에 의한 577 nm의 황색 발광과 함께, 상대적으로 발광 세기가 약한 Sm^{3+} 이온의 $^4G_{5/2} \rightarrow {}^6H_{7/2}$ 자기 쌍극자 전이에 의한 613 nm의 적주황색 발광과 $^4G_{5/2} \rightarrow {}^6H_{9/2}$ 전기 쌍극자 전이에 의한 649 nm에 피크를 갖는 적색 발광 스펙트럼이 나타났다. Sm^{3+} 이온의 몰 비가 1 mol%에서 5 mol%로 증가함에 따라 Dy^{3+} 이온에 의한 482 nm와 577 nm의 발광 스펙트럼의 세기는 감소하였으나, Sm^{3+} 이온에 의한 613 nm와 649 nm의 발광 신호의 세기는 증가하였다. Sm^{3+} 이온의 몰 비가 10 mol%인 경우에 Sm^{3+} 이온의 $^4G_{5/2} \rightarrow {}^6H_{5/2}$ 자기 쌍극자 전이에 의한 568 nm의 황색 발광과 Dy^{3+} 이온의 577 nm 황색 발광이 중첩되어 발광 신호의 세기가 최대를 나타내면서 단파장 쪽으로 이동하였다. 이 현상은 Gd_2WO_6 모체 결정에 도핑되는 Sm^{3+} 이온의 농도가 증가함에 따라 Dy^{3+} 이온에 의한 청황색 발광의 세기가 감소한 반면에, Sm^{3+} 이온에 의한 적주황색 발광의 세기는 증가하여 적색 계열로 색 변환이 발생하였고, Sm^{3+} 이온의 농도가 증가함에 따라 모체 격자 내에 위치하는 활성제 이온들 사이의 거리가 근접하여 서로 뭉치는 현상이 발생하여 발광 세기가 감소하는 농도 소광 (concentration quenching) 현상으로 해석할 수 있다 [16].

Fig. 6은 파장 302 nm로 여기 시켰을 때 Gd_2WO_6:Dy^{3+}, Sm^{3+} 형광체의 CIE (Commission Internationale de L'Eclairage) 1931 색 좌표 (x, y)를 나타낸 것이다. 숫자 1과 2는 Dy^{3+} 와 Sm^{3+} 이온의 몰 비를 5 mol% 로 각각 단일 도핑한 형광체의 색 좌표이고, 숫자 3, 4, 5, 6는 Dy^{3+} 이온의 몰 비를 5 mol% 로 고정하고 Sm^{3+} 이온의 몰 비를 1, 5, 10, 15 mol%로 도핑한 형광체의 CIE 색좌표를 표시한 것이다. Dy^{3+} 이온만 단일 도핑한 경우에 색 좌표는 (0.417, 0.411)으로써 따뜻한 백색 발광이었고, Sm^{3+} 이온만 단일 도핑된 경우에 색 좌표는 (0.576, 0.421)을 갖는 주황색이었다. Sm^{3+} 이온을 1 mol% 동시 도핑한 경우에, Dy^{3+} 이온에 의한 577 nm에 피크를 갖는 발광 파장의 세기가 약 1.2 배 감소함과 동시에 Sm^{3+} 이온에 의한 614 nm와 649 nm의 약한 적색 발광이 발생함으로 인하여 색 좌표는 (0.406, 0.407)의 백색으로 이동하였다. Sm^{3+} 이온의 몰 비가 10와 15 mol%로 증가함에 따라 적색 발광의 세기가 증가하여 색 좌표는 (0.487, 0.402)와 (0.504, 0.401)을 갖는 주황색으로 이동하였다.

Fig. 7은 Dy^{3+}와 Sm^{3+} 이온이 도핑된 Gd_2WO_6 형광체의 미세 표면 형상을 주사전자현미경으로 촬영한 결과를 나타낸 것이다. Fig. 7(a)에서 보듯이, Dy^{3+}가 단일 도핑된 형광체의 경우에 결정 입자의

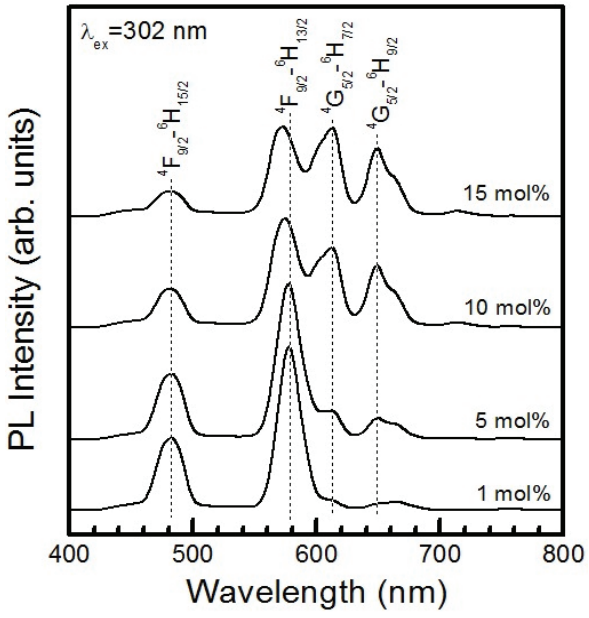

Fig. 5. Photoluminescence spectra of Gd_2WO_6:Dy^{3+},Sm^{3+} phosphors synthesized with different concentrations of Sm^{3+}.

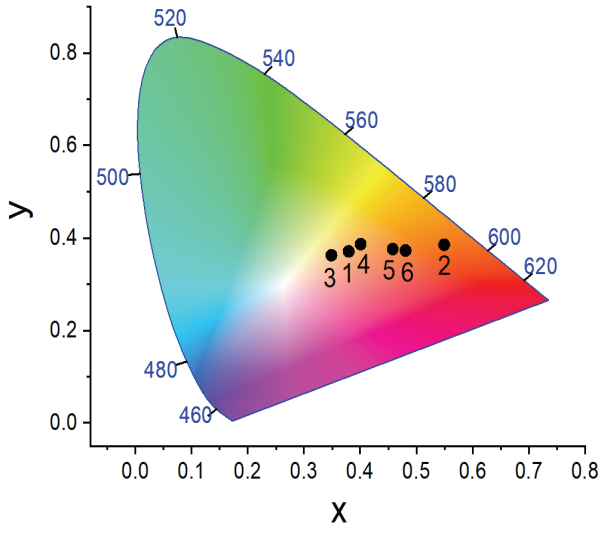

Fig. 6. CIE chromaticity coordinates of the emissions generated from Gd_2WO_6 phosphors doped with (1) 5 mol% Dy^{3+}, (2) 5 mol% Sm^{3+}, and (3) 1, (4) 5, (5) 10, and (6) 15 mol% Sm^{3+} at a fixed 5 mol% Dy^{3+}.

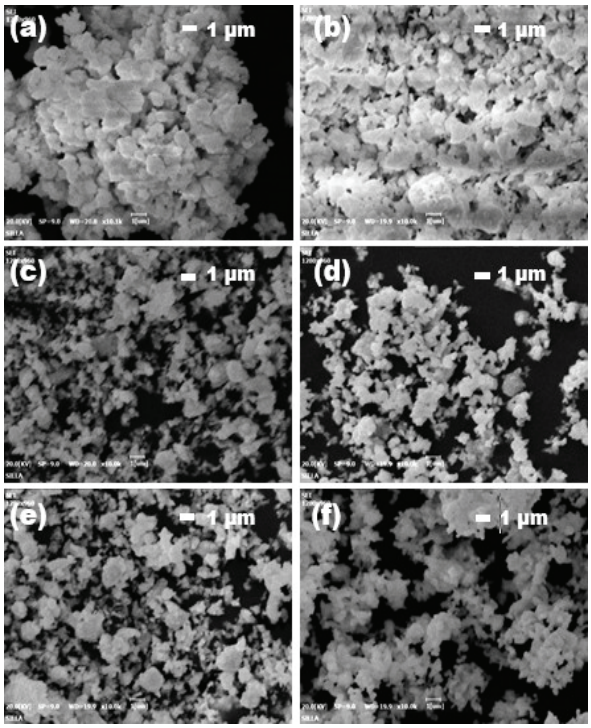

Fig. 7. SEM images of Gd_2WO_6 phosphors doped with (a) Dy^{3+}, (b) Sm^{3+}, and different Sm^{3+} concentrations of (c) 1, (d) 5, (e) 10 and (e) 15 mol% at a fixed 5 mol% Dy^{3+}.

평균 크기는 1.3 ㎛ 이었고, 불규칙한 다각형의 형태를 갖는 결정 입자들이 서로 뭉쳐 덩어리를 형성하는 모습을 보였고, Fig. 7(b)와 같이 Sm^{3+} 이온이 단일 도핑된 경우에 결정 입자는 응집된 형상을 나타내었다. 5 mol% Dy^{3+} 이온이 고정된 상태에서 동시 도핑되는 Sm^{3+} 이온의 몰 비가 증가함에 따라 결정 입자의 평균 크기는 감소하는 추세를 나타내었다.

4. 결 론

고상반응법을 사용하여 $Gd_2WO_6:Dy^{3+}$ 청황색 형광체, $Gd_2WO_6:Sm^{3+}$ 적주황색 형광체, $Gd_2WO_6:Dy^{3+}$, Sm^{3+} 백색 형광체를 합성하였으며, 활성제 Dy^{3+}와 Sm^{3+} 이온의 종류와 몰 비가 형광체 분말의 특성에 미치는 영향을 체계적으로 조사하였다. 활성제 이온의 종류와 몰 비에 관계없이 모든 형광체 분말은 단사정계의 결정 구조를 나타내었다. Dy^{3+} 이온이 단일 도핑된 $Gd_2WO_6:Dy^{3+}$ 형광체 분말은 CTB에 의한 302 nm에 피크를 갖는 넓은 파장 영역에 분포하는 강한 여기 스펙트럼과 Dy^{3+} 이온의 4f-4f 전이 신호에 의해 발생한 약한 여기 신호로 구성되었으며, 주 발광 스펙트럼은 577 nm와 482 nm에 피크를 갖는 황색과 청색 발광 신호이었다. Sm^{3+} 이온이 도핑된 $Gd_2WO_6:Sm^{3+}$ 형광체의 경우에 주 여기 스펙트럼은 302 nm에 피크를 갖는 CTB 신호이었으며, 주 발광 스펙트럼은 613 nm에서 관측된 적주황색 발광 신호이었다. Dy^{3+}와 Sm^{3+} 이온이 동시 도핑된 형광체의 경우에는 Sm^{3+} 이온의 몰 비가 증가함에 따라 백색에서 주황색으로 색 이동이 발생함을 확인하였다. 본 실험 결과를 통하여 두 활성제 이온의 몰 비를 적절히 조절함으로써 백색광을 구현할 수 있음을 제시한다.

감사의 글

이 논문은 2020년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (NRF-2020R1I1A3A04037942).

References

[1] X. Wu, W. Bai, O. Hai, Q. Ren, F. Lin, Y. Jiao, Structure, Luminescence Properties and Energy Transfer of Dy^{3+} and Eu^{3+} Codoped $KBa(VO_4)$ Phosphor, J. Solid State Chem., 265 (2018) 109-116.

[2] F. Xiao, R. Yi, H. Yuan, G. Zang, C. Xie, Color Tunable Emission and Energy Transfer of Ce^{3+}/Dy^{3+} Codoped $Ba_3La_2(BO_3)_4$ Phosphor for UV White LEDs, Spectrochim. Acta A, 202 (2018) 352-358.

[3] X. Wu, B. Yin, Q. Ren, J. Zheng, Y. Ren, O. Hai, Structure, Luminescence, Properties and Energy Transfer of Dy^{3+} and Eu^{3+} codoped $Ca_4LaO(BO_3)_3$ Phosphor, J. Alloys Compd., 822 (2020) 153562.

[4] G. Jyothi, L. S. Kumari, K. G. Gopchandran, White Emitting Dy^{3+} Activated Perovskite Titanates and Energy Transfer by Eu^{3+} Codoping, Ceram. Int., 43 (2007) 12044-12056.

[5] X. Y. Sun, T. T. Han, D. L. Wu, F. Xiao, S. L. Zhou, Q. M. Yang, J. P. Zhong, Investigation on Luminescence Properties of Dy^{3+}-, Eu^{3+}-doped, and Eu^{3+}/Dy^{3+}-codoped $SrGd_2O_4$ Phosphors, J. Lumin. 204 (2018) 89-94.

[6] Z. Li, Y. Sun, J. Shi, G. Ma, N. Jiang, Z. Yang, P. Li, Z. Wang, Luminescence and Energy Transfer of a Novel Tunable-emitting

Phosphor $Sr_{0.8}Ca_{0.2}Al_2Si_2O_8$:Eu/Tb for White LEDs, Optik, 191 (2019) 60-67.

[7] X. Sun, Z. Huang, Y. Guo, S. Zhou, K. Liu, Tb^{3+}→Sm^{3+} Energy Transfer Induced Tunable Luminescence in $Ba_3MgSi_2O_8$:Tb^{3+}/Sm^{3+} Phosphors, J. Lumin., 219 (2020) 116925.

[8] B. Devakumar, H. Guo, Y. J. Zeng, X. Huang, A Single-phased Warm-White-Emitting $K_3Y(PO_4)_2$: Dy^{3+}, Sm^{3+} Phosphor with Tuneable Photoluminescence for Near-UV-excited White LEDs, Dyes Pigm., 157 (2018) 72-79.

[9] T. Sh. Atabaev, H. H. T. Vu, H. K. Kim, Y. H. Hwang, Synthesis and Optical Properties of Dy^{3+}-doped Y_2O_3 Nanoparticles, J. Korean Phys. Soc., 60 (2012) 244-248.

[10] S. Liu, Y. Liang, M. Tong, D. Yu, Y. Zhu, X. Wu, C. Yan, Photoluminescence Properties of Novel White Phosphor Dy^{3+}-doped $LaBSiO_5$ Glass, Mater. Sci. Semicond. Process., 38 (2015) 266-248.

[11] K. J. Choi, J. K. Park, K. N. Kim, C. H. Kim, H. K. Kim, Luminescence Characteristics of Blue and Yellow Phosphor for Near-Ultraviolet, J. Korean Ceram., 43 (2006) 304-308.

[12] Y. Jin, Y. Hu, L. Chen, X. Wang, G. Ju, Z. Mou, F. Liang, Luminescence Properties of a Novel Orange Emission Long Persistent Phosphor CaO:Sm^{3+}, Opt. Commun., 311 (2013) 266-269.

[13] Z. W. Zhang, X. Y. Sun, L. Liu, Y. S. Peng, X. H. Shen, W. G. Zhang, D. J. Wang, Synthesis and Luminescence Properties of Novel $LiSr_4(BO_3)_3$: Dy^{3+} Phosphors, Ceram. Int., 39 (2013) 1723-1728.

[14] P. Babu, K. H. Jang, Ch. S. Rao, L. Shi, C. K. Jayasankar, V. Lavin, H. J. Seo, White Light Generation in Dy^{3+}-doped Oxyfluoride Glass and Transparent Glass-Ceramics Containing CaF_2 Nanocrystals, Opt. Express, 19 (2011) 1836-1841.

[15] T. P. Tang, C. M. Lee, F. C. Yen, The Photoluminescence of $SrAl_2O_4$:Sm^{3+} Phosphor, Ceram. Int., 32 (2006) 665-671.

[16] H. Zhang, Ye Sheng, Y. Song, H. Li, J. Huang, K. Zheng, Q. Huo, X. Xu, H. Zou, Uniform Hollow TiO_2:Sm^{3+} Spheres: Solvothermal Synthesis and Luminescence Properties, Powder Technol., 239 (2013) 403-408.