

Crystal Structure and Photoluminescence of Domestic Natural Alkaline Feldspar

Jin-Ho Choi,* Chae-Il Cheon,* and Jeong Seog Kim[†]

Department of Digital Display, Hoseo University, Asan, 336-795 Korea

*Department of Materials Science and Engineering, Hoseo University, Asan, 336-795 Korea

(Received February 10, 2007; Accepted April 24, 2007)

국산 천연알카리 장석의 결정구조와 Photoluminescence

최진호* · 천채일* · 김정석[†]

호서대학교 디스플레이공학부

*호서대학교 신소재공학과

(2007년 2월 10일 접수; 2007년 4월 24일 승인)

ABSTRACT

Blue light-emitting phosphors having the excitation spectrum range of the medium-long ultraviolet (280 nm~400 nm) have been prepared by solid state reaction method. As a starting material the natural alkaline feldspar powder produced from the domestic mine field in Buyeo, Chungnam-do. The photoluminescence characteristics and crystal structures have been analyzed for the phosphor samples. The powder mixture of the natural alkaline feldspar and the rare-earth oxide was calcined at 800~1000°C for 3~4 h in air. The calcined samples were fully ground at room temperature and then heat-treated in the mild reducing gas atmosphere of 5%H₂-95%N₂ mixture at 1100~1150°C for 3~4 h. The natural alkaline feldspar material consists of the monoclinic orthoclase (KAlSi₃O₈) and the triclinic albite (NaAlSi₃O₈) phases. At the 0.5 wt%Eu₂O₃ addition the PL spectrum showed the maximum intensity and with further increase of Eu₂O₃ the PL intensity decreased. The albite phase disappeared in the Eu₂O₃ doped phosphors. The effect of the co-doped activator on the PL characteristics have been also discussed.

Key words : Alkaline feldspar, Domestic, Buyeo, Eu₂O₃, Phosphor, PL characteristics

1. 서 론

Eu²⁺이온의 광발광(photoluminescence)은 LED(light emitting diode) 광원, PDP, 형광램프(fluorescent lamp), 플라즈마 평면광원, FED(field emission display) 등의 형광체 분야에 적용되고 있다. UV(ultraviolet)-LED를 이용한 청색, 녹색, 적색 및 백색LED 광원에 대한 연구는 휴대폰 백라이트광원으로 가장 널리 사용되고 있는 청색 LED와 YAG:Ce를 조합한 백색 광원에 대한 대안으로서 연구가 되고 있다. 이를 위해서는 UV 여기원 (300 nm~400 nm 파장)에 대해 발광효율이 우수한 청·녹·적색 형광체가 요구되고 있다. 발광효율 개선을 위해 activator 뿐만 아니라 형광체 기지상(matrix phase)에 대한 연구도 많이 이뤄지고 있다.^{1,2)}

이제까지 보고된 대표적 기지상은 BAM(barium aluminium magnesium oxide), alkaline earth feldspar(SrAl₂Si₂O₈), X_{3-x}MgSi₂O₈: yEu²⁺(x=Ba, Ca, Sr) 등으로서, 화학적 안정성 등으로 인해 실리케이트 계가 가장 많이 보고되어 있다. 알

카리토류 실리케이트(X_{3-x}MgSi₂O₈: yEu²⁺, x=Ba, Ca, Sr) 경우는 대체로 청색 발광을 하나 시료 조성 및 열처리 분위기에 따라 발광파장이 400 nm~550 nm범위 내에서 변화한다.²⁻⁵⁾

화성암의 약 60%를 구성하고 있는 천연 알카리장석은 알칼리장석과 알칼리토류장석으로 구분되며, 도자기나 유리 등의 원료로 널리 사용되고 있다. 장석과 관련된 기존의 문헌들은 thermoluminescence와 cathodoluminescence에 관한 것들이 많다.⁶⁻⁸⁾ 그 외에 red-infrared, blue-green stimulated luminescence, 광여기 발광(optically stimulated luminescence) 등이 있으며,^{9,10)} 방사능에 피폭된 물질의 방사선량을 이용해 출토 유적물 및 출토층의 연대를 측정하는 논문들도 있다.^{11,12)} 국산 천연 알카리 장석(feldspar group)은 알카리 실리케이트의 일종으로서 형광체 모재로서의 충분한 가능성을 가지고 있다. 본 연구에서는 국내 천연 장석을 이용하여 형광체를 제조하고 그 특성을 평가하여, 형광체 기지상(matrix phase)으로서의 적용 가능성을 연구하였다.

2. 실험 방법

형광체 시료들은 통상적인 고상반응법에 의해 제조하였

[†]Corresponding author : Jeong Seog Kim

E-mail : kimjungs@office.hoseo.ac.kr

Tel : +82-41-540-5921 Fax : +82-41-540-5345

다. 형광체의 모상원료는 국내(충남 부여 광산)의 천연 장석을 사용하였고, 이에 대한 조성 및 상분석은 실험결과에 나타내었다. 천연장석원료 분말에 활성화제(activator) 원료분말(Eu_2O_3 , Dy_2O_3 , Sm_2O_3 , $\text{TmCl}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$, Lu_2O_3)을 일정량 (0.1 wt%~25 wt%) 첨가한 후 agate mortar를 이용하여 알콜을 첨가하면서 혼합하였다. 알칼리장석과 활성화제(activator)를 혼합한 후 공기 중에서 800~1000°C에서 3~4시간 열처리 한 후 이를 다시 분쇄하여 1100~1150°C에서 3~4시간 동안 $\text{H}_2/\text{N}_2=5/95$ 환원분위기에서 처리하였다. $\text{TmCl}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ 시료는 2-methoxyethanol(99.8%, Aldrich)에 녹여 수용액으로 만든 후 micropipette를 사용하여 첨가하였다. 열처리 후 분쇄하여 얻어진 형광체의 발광특성(PL)은 Photoluminescence Spectrometer Perkin Elmer LS55를 이용하여 측정하였다. XRD 실험은 X'Pert ProMRD (X-ray Diffractometer, Philips)를 이용하였고, 결정상 분석과 rietveld 정밀화 분석하였다. Rietveld 정밀화는 Rietan-2000 프로그램을 이용하였다. 천연장석의 화학조성은 EDX를 이용하여 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 알칼리장석 형광체의 결정상 분석

천연장석 원료분말의 성분분석(EDX 분석)에 의하면 원료는 Na:1.0~1.5, K:4.0~8.5, Al:4.6~8.5, Si:27.0~27.5, O:balance(weight%)로서, 알칼리 성분은 대부분 K인 알칼리 장석으로 분석되었다. 천연장석 원료분말의 XRD 패턴을 JCPDS 데이터를 바탕으로 분석하여 그 결과를 Fig. 1(a)에 나타내었다. 천연장석의 X선 회절패턴은 주로 두 가지 상, monoclinic orthoclase인 KAlSi_3O_8 상(JCPDS No. 31-966, 86-0439)과 triclinic albite인 $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ 상(No. 09-0466)

으로 이뤄져 있었다. Orthoclase인 KAlSi_3O_8 상은 ★, albitet인 $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ 상은 ▼로 표시하였다. 천연상태에 존재하는 장석은 orthoclase와 albite가 섞인 형태로 존재하는 것으로 알려져 있는데, 본 XRD 분석 결과도 orthoclase인 KAlSi_3O_8 상이 주 회절 피크 상으로 나타났고, albite인 $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ 상이 비교적 낮은 회절 피크 강도를 나타냈다.

천연 알칼리 장석(Fig. 1에서 0 wt% Eu_2O_3 로 표시)과 0.5 wt% Eu_2O_3 를 첨가한 형광체 시료(Fig. 1에서 0.5 wt% Eu_2O_3 로 표시)의 XRD 패턴을 Fig. 1에 나타내었다. 형광체 시료는 0.5 wt% Eu_2O_3 와 천연 알칼리 장석 혼합물을 1000°C에서 4시간동안 대기 중에서 열처리한 후 1150°C에서 3시간 동안 $\text{H}_2/\text{N}_2=5/95$ 환원 분위기에서 열처리하였다. 두 XRD 패턴을 비교해 보면, 형광체에서는 albite상($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$:▼표시)이 소멸하였고, orthoclase상(KAlSi_3O_8 :★표시)과 일부 불순물 상이 존재함을 볼 수 있다. 결정상에 대한 상세한 설명은 다음의 rietveld법에 의한 분석 결과(Fig. 3)에 나타내었다.

Fig. 2는 800°C에서 4시간동안 대기 중에서 열처리한 다음 1150°C에서 3시간 동안 $\text{H}_2/\text{N}_2=5/95$ 환원 분위기에서 열처리한 형광체(0.5 wt% $\leq\text{Eu}_2\text{O}_3\leq 10$ wt%)의 XRD 패턴이다. Eu_2O_3 양의 증가에 따라 알바이트(albite)상의 회절강도가 현저히 감소함을 볼 수 있다. 이것은 Eu_2O_3 의 첨가량이 증가함에 따라 유로피움의 장석 내에 고용한계를 넘어, $2\theta=32^\circ$ 부근에서 나타난 바와 같은 2차상(second phase)의 형성 및 결정화도의 감소에 기인하는 것으로 생각된다.

Orthoclase상(KAlSi_3O_8 :★표시)의 장석은 SiO_4 사면체가 3차원 망목을 형성하며 서로 corner-sharing을 한다. 4면체 내의 Si 이온 자리 중 20-40%가 Al이 차지함에 따라 발생하는 전하 불균형을 보상하기 위해 K^+ 및 Na^+ 이온이 망목 구조 사이의 빈공간(large oval-shaped cavities)에 채

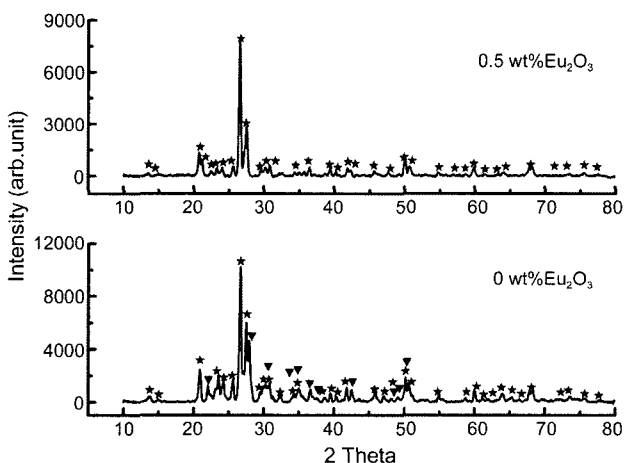


Fig. 1. XRD patterns of the natural alkaline feldspar (0 wt% Eu_2O_3) and the phosphor (0.5 wt% Eu_2O_3) prepared at 1150°C under the gas mixture of $\text{H}_2/\text{N}_2=5/9$. (★ : orthoclase KAlSi_3O_8 ▼ : albite $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$)

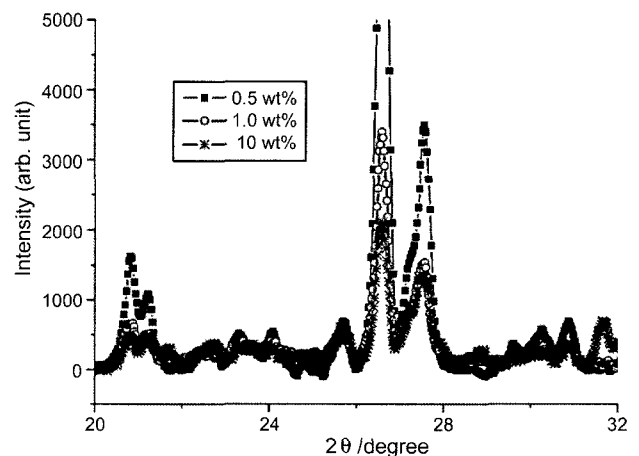


Fig. 2. XRD patterns of the natural alkaline feldspar phosphors doped with 0.5 wt% Eu_2O_3 (■), 1.0 wt% Eu_2O_3 (□), 10 wt% Eu_2O_3 (※) fired at 800°C in air then at 1150°C under the gas mixture of $\text{H}_2/\text{N}_2=5/95$.

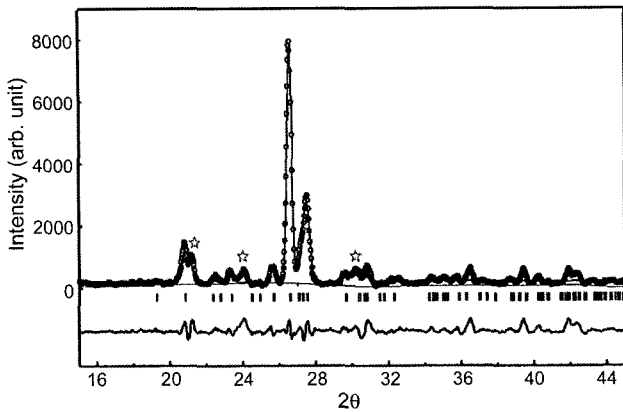


Fig. 3. Refined XRD profiles by rietveld method for the natural alkaline feldspar doped with 0.5 wt%Eu₂O₃ fired at 800°C in air then at 1150°C under the gas mixture of H₂/N₂=5/95.

워지는 구조를 가지고 있다.¹³⁾ Eu³⁺도핑원소는 원자이온 반경이나 전하 등을 고려할 때 K⁺ 및 Na⁺ 이온 자리에 치환될 가능성이 크다. 본 연구에서는 활성제 Eu³⁺가 결정 구조 내 어느 자리에 차지하는지를 알아보고, 또한 상기에서 논의된 결정상 분석결과가 맞는지 확인하고자 rietveld 정밀화를 수행하였다.

0.5 wt%Eu₂O₃를 도핑한 형광체시료의 결정상에 대해 rietveld 정밀화 분석을 수행하였다. Fig. 3에는 정밀화한 패턴profile을, Table 1에는 구조분석결과를 요약하여 나타내었다. 전체 XRD 패턴에 대한 신뢰도(R-values)인 Rp 및 Rwp는 높으나 형광체 내의 주상인 알바이트상에 대한 R 값(Rb, Rf)은 5% 내외였다. 일반적으로 천연광물의 rietveld 정밀화 분석에서 R값이 높은 편인 것을 고려한다면, 본 분석결과에 대해 신뢰성을 부여 할 수 있는 수준이라 판단된다. R값(Rp, Rwp)이 높은 주된 이유는 Fig. 3에 (☆) 표시된 피크들과 같이 시료 내 불순물들이 존재하기 때문이다. Table 1에 나타난 원자 위치 및 격자상수 들은 Phillips 등의¹⁶⁾ potassium aluminosilicate(KAlSi₃O₈)상에 대

한 분석과 일치하였다.

3.2. Eu₂O₃를 doping한 형광체의 PL 특성

Figs. 4와 5는 각각 1차 가소를 800°C와 1000°C에서 4시간 동안 대기 중에서 시행한 후, 1150에서 3시간 동안 H₂/N₂=5/95 분위기에서 환원한 천연알칼리 장석 (0.1 wt%=Eu₂O₃=25 wt%)의 흡수 및 발광 스펙트럼이다. 모든 조성에서 발광스펙트럼의 파장 범위는 360~550 nm까지였고, 최대발광피크 파장은 405~414 nm인 청색 발광이 관찰되었다. PL스펙트럼의 모양과 강도는 Eu₂O₃조성에 따라 다소 차이가 있으나, Eu₂O₃의 농도가 0.5 wt%(B)로 증가할 때 최대강도를 나타내고, 0.5 wt% 이상에서는 강도가 감소하는 concentration quenching현상을 나타냈다.

흡수 스펙트럼은 모든 조성에서 220 nm~400 nm의 넓은 파장 범위에서 나타났으며, Eu₂O₃의 농도가 증가함에 따라 주 피크는 파장이 비교적 짧은 UV-C영역(~260 nm)에서 파장이 큰 UV-A영역(~330 nm)으로 이동하였다. 예로, 0.5 wt%Eu₂O₃일 때는 흡수파장의 최대 피크는 259 nm 이고, 25 wt%Eu₂O₃일 때는 330 nm로 이동하였다. 발광스펙트럼에서도 0.5 wt%Eu₂O₃에서 최대피크가 406 nm였고,

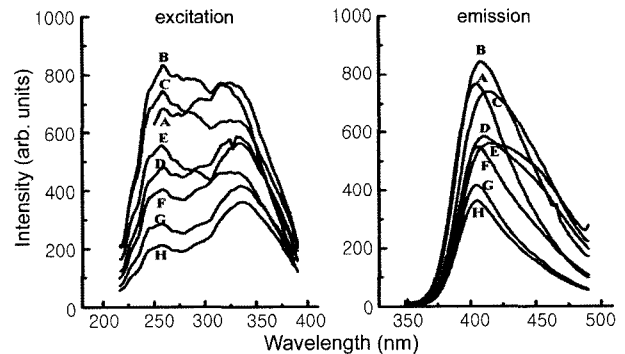


Fig. 4. PL spectra of xwt% Eu₂O₃ doped alkaline feldspars calcined at 800°C for 4 h in air and heat-treated at 1150°C for 3 h under H₂/N₂=5/95. [x=0.1(A), 0.5(B), 1(C), 5(D), 103(E), 15(F), 20(G), 25(H)]

Table 1. Refined Structural Parameters for the Phosphor Sample Doped with 0.5 wt%Eu₂O₃

Analyzed phase: orthoclase					
Lattice parameter a=8.9095(1), b=13.4108(2), c=7.3704(2)Å, β=115.61(2), SG: C2/m					
Atoms	x	y	z	B	Occ.
0.80K ⁺ /0.20Na ⁺	0.2615(3)	0.0	0.1456(1)	-1.8(1)	0.80/0.20
0.75Si ⁴⁺ /0.25Al ³⁺	0.0047(2)	0.2187(2)	0.2426(2)	-3.9(2)	0.75/0.25
0.75Si ⁴⁺ /0.25Al ³⁺	0.7121(70)	0.0548(177)	0.3670(121)	3.5(22)	0.75/0.25
O1	0.0	0.2332(5)	0.0	-7.2(2)	1.0
O2	0.5809(1)	0.0	0.1854(2)	-3.1(0)	1.0
O3	0.7968(20)	0.0992(47)	0.2472(67)	-3.5(0)	1.0
O4	0.0662(43)	0.3240(53)	0.2954(79)	0.7(10)	1.0
O5	0.1747(162)	0.0815(102)	0.3269(179)	5.4(56)	1.0

R-factors; Rp: 26.2, Rwp: 18.0, Rb: 4.3, Rf: 3.2

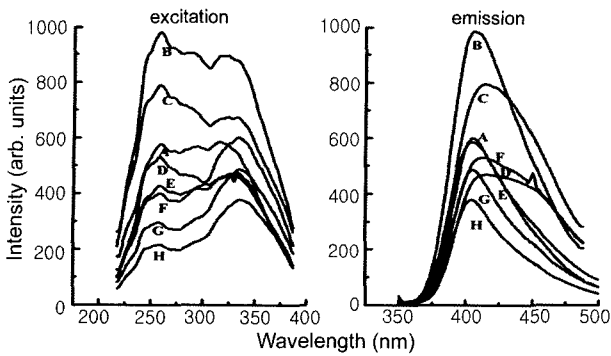


Fig. 5. PL spectra of xwt% Eu_2O_3 doped alkaline feldspars calcined at 1000°C for 4 h in air and heat-treated at 1150°C for 3 h under $\text{H}_2/\text{N}_2=5/95$. [$x=0.1$ (A), 0.5 (B), 1 (C), 5 (D), 10 (E), 15 (F), 20 (G), 25 (H)]

25 wt% Eu_2O_3 에서는 414 nm로 이동하였다.

1차 가소 온도가 800°C 인 시료 (Fig. 4)와 1000°C 인 시료(Fig. 5)의 PL 특성은, 스펙트럼상의 최대강도를 단순 비교하면, 흡수 및 발광 강도가 후자의 경우에 15%정도 증가하였다. 천연알칼리 장식 형광체의 청색발광(405~414 nm)은 Eu^{2+} 이온의 $4f^7-4f^65d^1$ 전이인 것으로 판단된다.^{1,3)}

3.3. 0.5 wt% Eu_2O_3 및 부활성제의 co-doping과 PL 특성

부활성제(coactivator)는 형광체 모체 내에서 모체 밴드 갭 내에 트랩(trap) 준위를 형성시켜 모체의 전기적 특성을 변화시켜준다. 또한 활성제로의 에너지 전환효율을 높여 주거나 반대로 부활성제로 에너지를 전이시켜 활성제와는 다른 파장의 발광을 나타내게 하는 목적이다. Matsuzawa 등은¹⁴⁾ 3+원자가를 가지는 희토류 원소들 가운데 Ce^{3+} , Pr^{3+} , Tb^{3+} , Nd^{3+} , Dy^{3+} 등은 낮은 $4f-5d$ 전이 에너지(transition energy)와 비교적 높은 전하이동 에너지(charge transfer energy)를 가지고 있기 때문에 효과적인 정공트랩 기능을

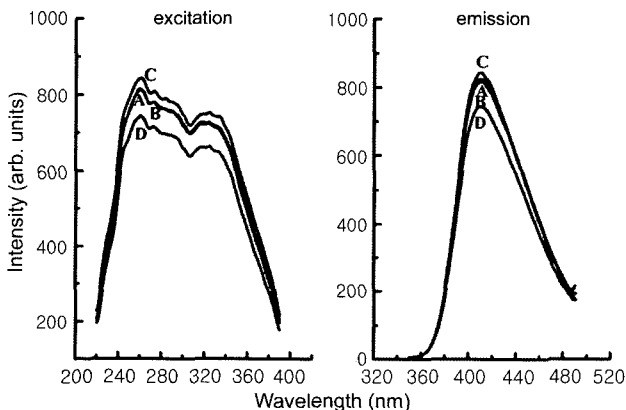


Fig. 6. PL spectra of the co-doped alkaline feldspars calcined at 1000°C for 4 h in air and heat-treated at 1150°C for 3 h in $\text{H}_2/\text{N}_2=5/95$. [$0.5 \text{ wt}\% \text{Eu}_2\text{O}_3 + 0.5 \text{ wt}\% \text{Dy}_2\text{O}_3$ (A), $+0.5 \text{ wt}\% \text{Sm}_2\text{O}_3$ (B), $+0.5 \text{ wt}\% \text{TmCl}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ (C), $+0.5 \text{ wt}\% \text{Lu}_2\text{O}_3$ (D)]

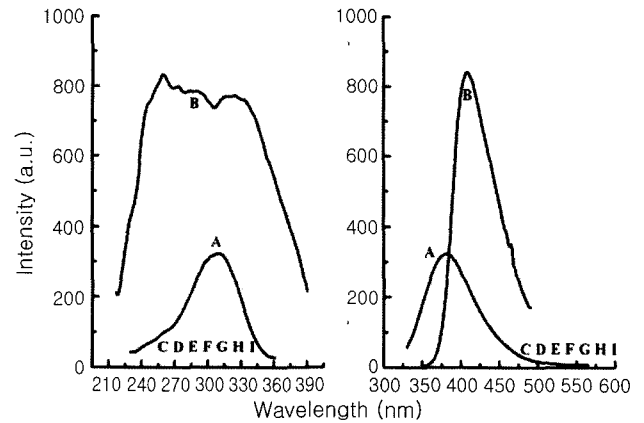


Fig. 7. PL spectra of alkaline feldspars doped with 0.5 wt% REO calcined at 800°C for 4 h in air and heat-treated at 1150°C for 3 h in $\text{H}_2/\text{N}_2=5/95$. [REO= CeO_2 (A), Eu_2O_3 (B), $\text{PrCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (C), Sm_2O_3 (D), Gd_2O_3 (E), Gd_4O_7 (F), $\text{TmCl}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ (G), Ho_2O_3 (H), Lu_2O_3 (I)]

할 수 있는 coactivator로 사용 가능하다고 하였다. 한편, Vergeer 등은¹⁵⁾ Pr과 함께 희토류 원소들을 coactivator로 사용함으로써 에너지 전이 효과와 발광효율을 연구하였다.

본 연구에서는 천연형광체에서 Eu^{3+} 를 활성제로 사용하고 다른 희토류 원소들을 부활성제로 사용하여 발광효율 및 발광파장의 변환 가능성을 조사하였다.

Eu 형광체에서 Pr^{3+} 와 Eu^{3+} 사이의 에너지 전이 및 발광 효율에 관한 연구를 수행하였다.

Fig. 6은 천연알칼리 장식이 활성제(activator)로서 0.5 wt% Eu_2O_3 와 부활성제(co-activator)로서 Dy_2O_3 , Sm_2O_3 등을 동시에 첨가하여, 1000°C 에서 4시간 동안 대기 중에서 열처리한 후, 1150°C 에서 3시간 동안 $\text{H}_2/\text{N}_2=5/95$ 환원분위기에서 열처리한 형광체의 흡수 및 발광스펙트럼이다. 부활성제 원소인 Dy, Sm, Tm, Lu의 첨가 목적은 흡수 및 발광 파장을 장파장쪽으로 shift시키려는 것이었으나, 당초 효과를 이루지 못하였다. 흡수 스펙트럼은 최대피크의 파장이 약 260 nm로서 0.5 wt% Eu_2O_3 만을 첨가한 시료와 큰 차이가 없었다. co-doped 시료들의 발광스펙트럼에서 피크파장은 405 nm에서 410 nm로 소폭 이동하였다. 모든 co-doped 시료에서 흡수 및 발광강도는, 단순히 피크강도만을 비교하였을 때, 15%~25%정도 감소 하였다.

Fig. 7은 0.5 wt% 희토류 산화물을 단독으로 첨가한 알칼리장식 형광체이다. Eu와 Ce만이 발광특성을 나타내었고, 나머지 모든 희토류 원소들은 발광특성을 나타내지 않았다. Ce 첨가 시료의 발광특성은 Eu만을 단독으로 첨가한 시료보다 발광강도가 현저히 낮았다. Eu와 다른 희토류 원소를 co-doping한 시료(Fig. 6)들이 Eu를 단독으로 도핑한 시료보다 발광특성이 저하되는 것은 co-doping 원소들의 발광 특성이 현저히 낮거나 전혀 발광을 하지 않는 것에 기인한다.

4. 결 론

국내 천연알카리장석을 모체로 하여 중장파장 자외선 영역 (220~400 nm)에서 여기 되는 청색 형광체를 제조하였다. Eu_2O_3 첨가량이 0.5 wt%일 때 가장 발광강도가 높게 나타났고, 그 이상의 첨가량에서는 발광강도가 감소하는 concentration quenching 현상이 나타났다. 제조된 형광체들의 발광스펙트럼의 파장 범위는 360~500 nm였고, 최대발광피크는 405~414 nm였다. 흡수 스펙트럼은 모든 조성에서 230~400 nm범위였고, Eu_2O_3 의 농도가 증가함에 따라 최대 피크의 파장이 ~260 nm에서 ~330 nm으로 이동하였다. CeO_2 를 제외한 희토류 원소들은 발광특성을 나타내지 않았다. Eu_2O_3 와 다른 희토류 산화물을 co-doping 한 시료들의 발광강도는 Eu_2O_3 만 단독으로 첨가한 경우보다 낮았다. 천연알카리 장석의 결정상은 monoclinic orthoclase인 KAlSi_3O_8 상과 triclinic albite인 $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ 상으로 분석되었다. Eu_2O_3 를 0.5 wt%이상 doping한 알카리 장석 형광체에서는 albite상이 소멸하였고, orthoclase상과 일부 불순물 상이 존재하였다. Rietveld 정밀화를 통하여 0.5 wt% 도핑된 형광체의 주 결정상은 orthoclase상인 것을 확인하였다.

Acknowledgment

본 연구는 2005년도 호서대학교 교내연구비로 수행되었습니다.

REFERENCES

1. Y. Lin, Z. Tang, Z. Zhang, and C.W. Nan, "Luminescence of Eu^{2+} and Dy^{2+} Activated $\text{R}_3\text{MgSi}_2\text{O}_8$ -based (R = Ca, Sr, Ba) Phosphors," *J. Alloy Comp.*, **348** 76-9 (2003).
2. S. Shionoya and W. M. Yen, "Phosphor Handbook," Chapter 5. CRC press, 1998.
3. K. J. Choi, J. K. Park, K. N. Kim, C. H. Kim, and H. K. Kim, "Luminescence Characteristics of $\text{Sr}_3\text{MgSi}_2\text{O}_8:\text{Eu}$ Blue Phosphor for Light Emitting Diodes (in Korean)," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **41** [8] 573-77 (2004).

4. J. S. Kim, J. Z. Piao, J.-H. Choi, C.I. Cheon, and J. S. Park, "Green Light-emitting Phosphor, $\text{Ba}_{2-x}\text{CaMgSi}_2\text{O}_8:\text{Eu}_x$," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **42** [3] 145-49 (2005).
5. G. Blass and W. L. Wanmaker, "Fluorescence of Eu^{2+} Activated Silicates," *Philips Res. Repts.*, **23** 189-220 (1968).
6. R. Visocekas, N. A. Spooner, A. Zink, and P. Blanc, "Tunnel Afterglow, Fading and Infrared Emission in Thermoluminescence of feldspars," *Radiation Measurements*, **23** 377-85 (1994).
7. J. Götze, D. Habermann, R. D. Neuser, and D. K. Richter, "High-resolution Spectrometric Analysis of Rare Earth Elements-Activated Cathodoluminescence in Feldspar Minerals," *Chemical Geology*, **153** 81-91 (1999).
8. P. G. G. Slaats, G. J. Dirksen, and G. Blasse, "Luminescence of Some Activators in Synthetic Potassium Feldspar Crystals," *Materials Chemistry and Physics*, **30** 19-23 (1991).
9. A. Zink, R. Visocekas, and A. J. J. Bos, "Comparison of Blue And Infrared Emission Bands in Thermoluminescence of Alkaline Feldspars," *Radiation Measurements*, **24** 513-18 (1995).
10. R. B. Galloway, "Comparison of the Green- and Infrared-Stimulated Luminescence of Feldspar," *Radiation Measurements*, **23** 617-20 (1994).
11. M. Jain and A. K. Singhvi, "Limits to Depletion of Blue-Green Light Stimulated Luminescence in Feldspars: Implications for Quartz Dating," *Radiation Measurements*, **33** 883-92 (2001).
12. I. Jaek, G. Hutt, and I. Vassiltchenko, "Luminescence Study of Eu-and Cu-Doped Natural Alkali Feldspar and Quartz and Some Problems of Palaeodosimetry," *Radiation measurements*, **27** 473-77 (1997).
13. A. N. Winchel, "Elements of Optical Mineralogy," pp. 238-45, John Wiley & Sons, 1968.
14. T. Matsuzawa, N. Takeuchi, Y. Acki, and T. Murayama, "A long New Phosphorescence Phosphor with High Brightness $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{3+}, \text{Dy}^{3+}$," *J. Electrochem. Soc.*, **143** 2670-76 (1996).
15. P. Vergeer, V. Babin, and A. Meijerink, "Quenching of Pr^{3+}S_0 emission by Eu^{3+} and Yb^{3+} ," *J. of Luminescence*, **114** [3-4] 267-74 (2005).
16. M. W. Phillips, and P. H. Ribbe, "The Structures of Monoclinic Potassium Rich Feldspars," *American Mineralogist* **58** 263-70 (1973).