

BaFBr:Eu²⁺, X(X=K⁺, Na⁺) 형광체의 PSL 특성

Photostimulated Luminescence of BaFBr:Eu²⁺, X(X=K⁺, Na⁺) Phosphors

김성환, 천중규, 최영백, 김찬중, 김 완, 강희동
경북대학교
대구광역시 북구 산격동 1370번지

김도성
대구대학교
경상북도 경산시 진량읍 내리리 15번지

도시홍, 서효진
부경대학교
부산광역시 남구 대연3동 599-1번지

요 약

BaFBr:Eu²⁺ 형광체에 알칼리 금속원소 Na⁺ 혹은 K⁺를 첨가한 BaFBr:Eu²⁺,Na⁺ 및 BaFBr:Eu²⁺,K⁺ PSL 형광체를 제작하였다. 제작된 형광체의 감도, 발광 스펙트럼, 선량의존성, fading 특성 등을 측정하여 상용 영상판(ST-III, Fuji Photo Film Co.)의 특성과 비교하였다. 제작된 BaFBr:Eu²⁺, Na⁺ 및 BaFBr:Eu²⁺,K⁺ 형광체의 PSL 스펙트럼 파장 범위는 모두 350~450 nm 이었으며, 최대 피크 파장은 390 nm 이었고, 선량의존성은 0.23 mGy~10 Gy 영역에서 매우 좋은 직선성을 나타내었다. 그리고 상온에서 BaFBr:Eu²⁺,Na⁺ 및 BaFBr:Eu²⁺,K⁺ 형광체의 Fading 특성은 모두 상용 영상판과 거의 같았으며, 제작한 형광체들의 결정구조는 PbFCl과 같은 matlockkite 구조로서 격자상수는 활성제의 종류에 관계없이 모두 a=b=4.503 Å, c=7.434 Å 이었다. Na⁺를 4 mol% 첨가한 BaFBr:Eu²⁺,Na⁺ 형광체의 PSL 강도는 상용 영상판보다 약 2배 정도 크게 나타났다.

Abstract

In this study, Na⁺ or K⁺ were used as an activator in order to enhance the sensitivity and efficiency of BaFBr:Eu²⁺ phosphor, and BaFBr:Eu²⁺,Na⁺ and BaFBr:Eu²⁺,K⁺ PSL phosphors were prepared. The sensitivity, emission spectrum and dose response of prepared PSL phosphors were measured and these characteristics were compared with the characteristics of commercial image plate(ST-III) obtain from Fuji Photo Film Co. The spectral ranges of PSL of BaFBr:Eu²⁺,Na⁺ and BaFBr:Eu²⁺,K⁺ phosphors were 350~450 nm, and their peak emission appeared at 390 nm, and dose response of the phosphors were linear within 0.23 mGy~10 Gy of 6 MV X-ray. Fading of the phosphors at room temperature were approximately equal to that of commercial image plate(ST-III). Crystal structure of the prepared phosphors were matlockkite like PbFCl and they were confirmed that their lattice constant was a=b=4.503 Å,

$c = 7.434 \text{ \AA}$ independent of activators. PSL intensity of the $\text{BaFBr:Eu}^{2+}, \text{Na}^+$ phosphor doped with and 4mol% Na^+ was about twice that of commercial image plate obtained from Fuji Photo Film Co.

I. 서론

광자극발광(Photostimulated luminescence: PSL) 형광체를 이용한 영상판(image plate, IP)은 X-선 필름에 비해 감도가 우수하고, 넓은 동적영역(dynamic range)을 가지며, 재사용이 가능하고, 디지털화된 영상을 얻을 수 있어서 진단 X-선 영상, X-선 회절, 단백질 결정학, 투과전자현미경, 오토라디오 그래피 등 여러 분야의 폭넓게 활용되고 있다. 특히 1986년 Fuji Photo Film Co.에서 CR(computed radiography) system이 개발됨에 따라 PSL 형광체에 대한 연구가 더욱 많이 진행되게 되었다^[1-4]. 현재 전세계적으로 KBr:In^{5} , KCl:Eu^{6} , RbBr:Tl^{7} , RbI:Tl^{8} 및 NaCl:Cu^{9} 등과 같은 알카리 할라이드계 형광체, CaS:Eu, Sm , CaS:Ce, Sm , SrS:Eu, Sm , $\text{Ca}_x\text{Sr}_{1-x}\text{S:Eu, Sm}$ 등의 II-VI족 화합물 형광체^[10-15] 및 $\text{Y}_2\text{SiO}_5:\text{Ce}^{3+}$ ^[16]와 같은 산화물 형광체 등에 관한 연구가 진행중이며, BaFBr:Eu^{2+} 형광체로 제작한 영상판은 이미 상용화되어 사용되어지고 있다.

그러나 BaFBr:Eu^{2+} 형광체는 방사선에 대한 우수한 감도와 넓은 동적영역을 나타내지만, fading이 크고, 소거된 정보가 다시 나타나는 잠상현상이 발생하며, matlockite 결정구조에 의한 복굴절로 공간분해능이 감소하는 단점을 가지고 있다. 따라서 BaFBr:Eu^{2+} 형광체의 특성을 개량하기 위한 연구가 많이 진행되고 있으며, Br 대신에 Cl 혹은 I를 사용한 BaFCl^{17} 과 BaFI^{18} 형광체 (Ba, Sr) $\text{F}_{1-x}\text{Br}_x:\text{Eu}^{2+}$ ^[19]형광체 등에 관한 연구가 수행되었다. 또한 활성제 Eu^{2+} 대신에 Sm^{2+} 을 첨가한 $\text{BaF(Cl, Br):Sm}^{2+}$ ^[20] 등도 연구되었다.

본 연구에서는 BaFBr:Eu^{2+} 형광체의 효율과 감도를 증가시키기 위하여 Na^+ 및 K^+ 를 활성제로 첨가한 $\text{BaFBr:Eu}^{2+}, \text{Na}^+$ 및 $\text{BaFBr:Eu}^{2+}, \text{K}^+$ PSL 형광체의 최적제작조건을 확립하였다. 그리고 제작된 PSL 형광체의 발광스펙트럼, fading 특성, 선량의존성 등을 조사하였고, 그 특성을 상용 영상판(ST-III, Fuji Photo Film Co.)의 특성과 비교하였다.

II. 실험

1. $\text{BaFBr:Eu}^{2+}, \text{X}(\text{X}=\text{Na}^+, \text{K}^+)$ PSL 형광체의 제작

그림 1은 $\text{BaFBr:Eu}^{2+}, \text{Na}^+$ 및 $\text{BaFBr:Eu}^{2+}, \text{K}^+$ 형광체를 제작하기 위한 흐름도이다. 이온 교환수에서 BaF_2 와 $\text{BaBr}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 를 mole비 1:1로 혼합하고, 활성제로 EuF_3 , NaF 혹은 KF 를, 촉매로 NH_4Br 을 첨가하였다. 이 혼합물을 80~90 °C의 온담(溫淡)속에서 마그네틱 스티러(magnetic stirrer)로 약 2시간 정도 습식혼합한 후 80 °C에서 3일간 완전히 건조한 다음, 고체상태의 혼합물을 930 °C, 수소분위기에서 소결한 후 급랭하였다. 소결한 형광체는 수정 mortar로 분쇄하여 입자크기가 45~75 μm 인 분말만 선별하였다.

소결은 분말 혼합물을 결정화시킴과 동시에 활성제를 모체 중으로 침투시킴으로써 발광중심으로서 필요한 전자적, 기하학적 상태를 부여하는 역할을 한다. 또한 원료에 존재하는 선천적 격자결함을 소멸시키며, 동시에 F 중심과 같은 발광에 관여하는 후천적 결함을 생성한다. 또한 소결분위기는 형광체의 PSL강도에 중요한 영향을 미친다. 일반적으로 대기 중(산화적 분위기)에서는 p형, 수소 분위기(환원적 분위기)에서는 n형 반도체 또는 그것과 유사한 특성을 가지게 된다. BaFBr:Eu^{2+} 형광체의 경우 Eu 이온은 수소분위기에서는 Eu^{2+} 형으로 dope되지만, 대기 중에서는 Eu^{2+} 뿐만 아니라 Eu^{3+} 도 dope되므로 본 실험에서는 수소의 환원분위기에서 소결하였다.

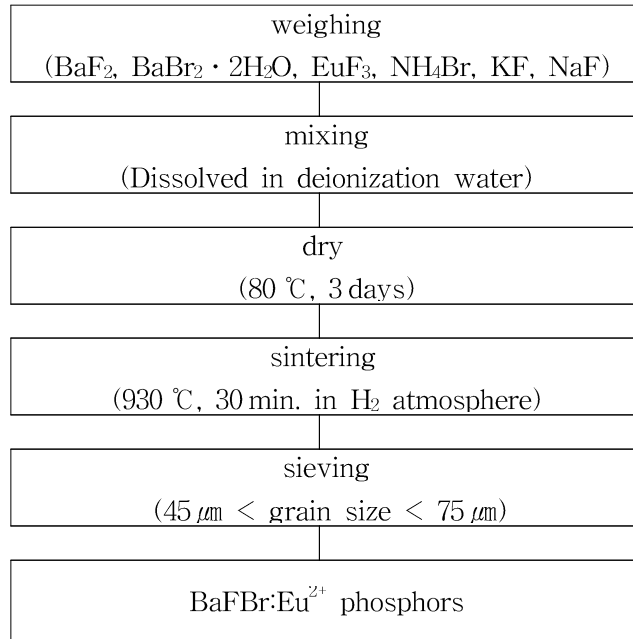


Fig. 1. Fabrication process of PSL phosphor.

BaFBr:Eu²⁺ 형광체의 PSL 강도를 증가시키기 위하여 BaFBr:Eu²⁺ 형광체의 최적 조성비에 Na⁺ 이온을 첨가하였다. 활성화제인 EuF₃ 최적농도는 0.5 mol%, 촉매인 NH₄Br의 최적농도는 5.0 mol%이다^[21]. 그림 2는 최적 조성비로서 첨가한 BaFBr:Eu²⁺에 Na⁺를 1~8 mol%까지 첨가한 후 제작한 BaFBr:Eu²⁺,Na⁺ 형광체의 Na⁺ 농도에 따른 PSL 강도변화를 나타낸다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 BaFBr:Eu²⁺,Na⁺ 형광체는 Na⁺를 4 mol% 첨가하였을 때 최대강도를 나타내었다.

따라서 BaFBr:Eu²⁺,Na⁺ 형광체의 최적 조성비는 BaF₂와 BaBr₂ · 2H₂O를 mole비 1:1로 혼합하고, NH₄Br은 0.5 mol%, 활성화제 EuF₃와 NaF는 각각 0.5 mol% 및 4 mol%이었다.

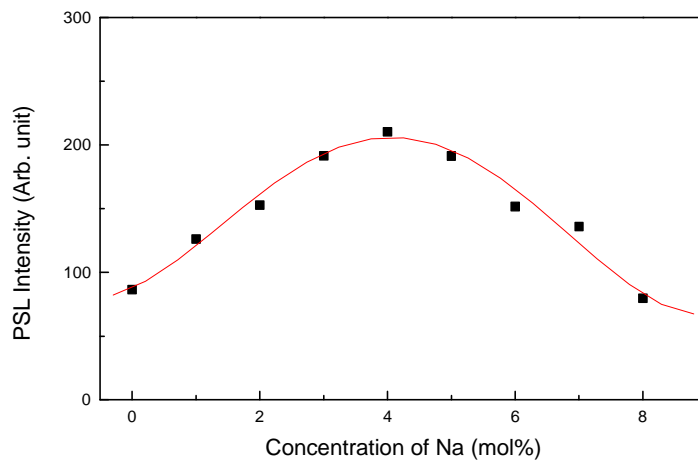


Fig. 2. PSL intensity of BaFBr:Eu²⁺ as a function of Na⁺ concentrations.

그림 3은 BaFBr에 Eu^{2+} 를 0.5 mol%, NH_4Br 을 5.0 mol% 첨가한 $\text{BaFBr}:\text{Eu}^{2+}$ 에 K^+ 를 0.5~5 mole% 첨가하여 제작한 $\text{BaFBr}:\text{Eu}^{2+},\text{K}^+$ 형광체의 K^+ 농도에 따른 PSL 강도 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 $\text{BaFBr}:\text{Eu}^{2+},\text{K}^+$ 형광체는 K^+ 이온을 1.5 mole% 첨가하였을 때 최대 PSL 강도를 나타내었다. 따라서 $\text{BaFBr}:\text{Eu}^{2+},\text{K}^+$ 형광체의 최적조성비는 BaF_2 와 $\text{BaBr}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 를 mole% 비 1:1로 혼합하고, NH_4Br 은 0.5 mole%, 활성제 EuF_3 와 KF 는 각각 0.5 mole%와 1.5 mole%이었다.

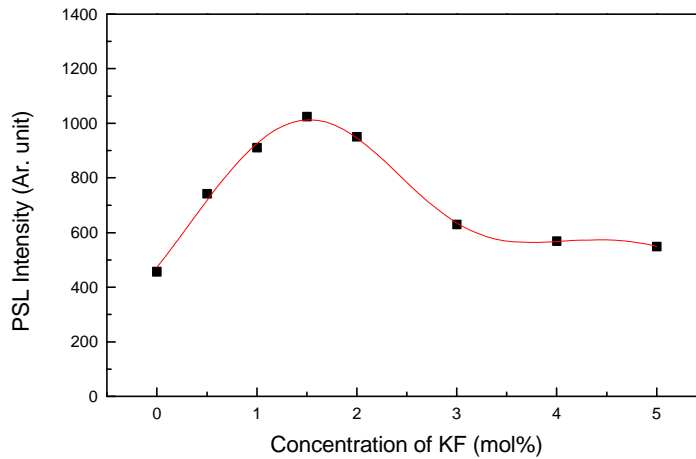


Fig. 3. PSL intensity of $\text{BaFBr}:\text{Eu}^{2+},\text{K}^+$ as a function of K^+ concentrations.

2. 광자극발광 측정

그림 4는 PSL 스펙트럼을 측정하기 위한 장치의 개략도이다. 가전자대의 전자를 전도대로 여기시킨 다음 트랩준위에 포획시키기 위한 1차 여기광으로 Nd-YAG 레이저(Spectron Laser Sys, SL800, 3rd harmonics 355 nm, 5 mW)를 사용하였고, 포획된 전자를 재여기시켜 PSL을 발생시키기 위한 2차 여기선원으로 He-Ne 레이저(633 nm, 35 mW)를 사용하였다. Nd-YAG 레이저에 의한 PL을 제거하고 He-Ne 레이저에 의한 PSL만을 monochrometer(SPEX, ARC, 22.5 cm)에 입력시키기 위하여 초퍼 1로 He-Ne 레이저를 450 Hz로 변조시키고, 이 초퍼신호에 Lock-in Amp. (Stanford SR530)를 동기시켰다. 그리고 Nd-YAG 레이저는 10 Hz의 초퍼 2에 동기시켰다. Monochrometer에서 분광된 PSL 신호는 광전자증배관 (Hamamatsu, R928)에서 전기적 신호로 변환된 후 전류증폭기 (Keithely, 427)에서 증폭되고, Lock-in Amp. 출력신호로 컴퓨터에 입력시켜 저장하였다. 그림 5는 PSL의 측정원리를 나타낸 것이다. Nd-YAG 레이저에 의한 PL 신호는 초퍼 2에 의해 완전히 제거되고, PSL 신호는 초퍼 2에 의해 10 Hz의 점멸을 반복하므로 Lock-in AMP의 시정수는 0.3 s 이상으로 하였다.

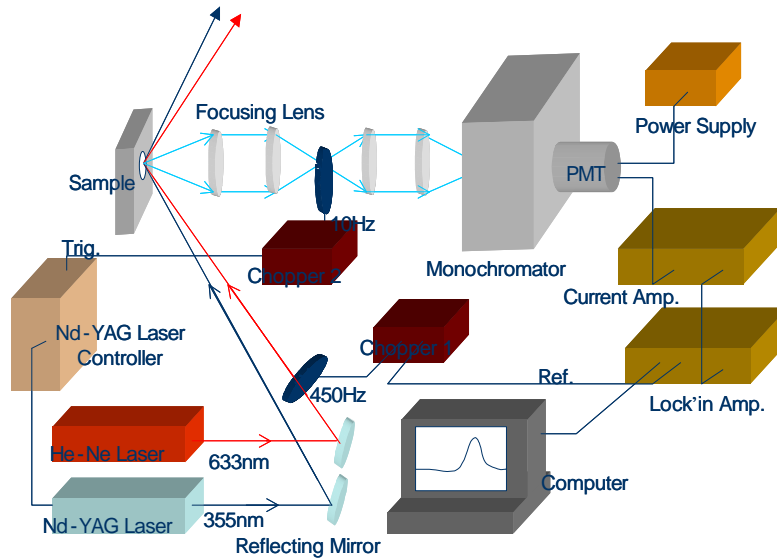


Fig. 4. Block diagram of the PSL measuring system.

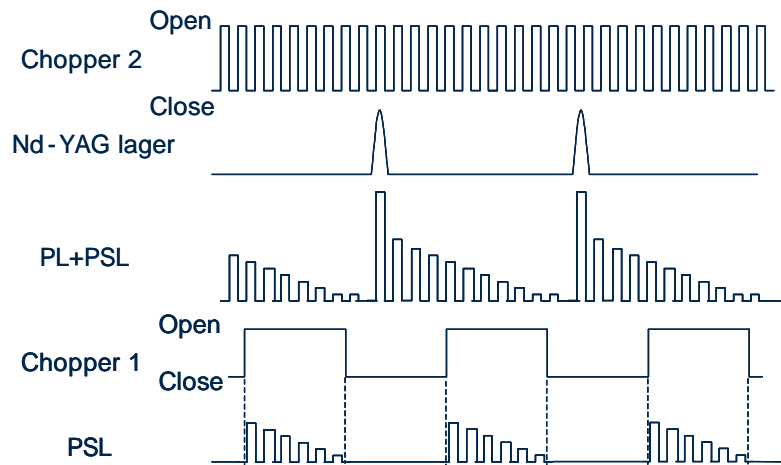


Fig. 5. Pulse shapes of PSL by chopper 1 and 2.

III. 실험결과 및 고찰

1. PSL 스펙트럼과 여기광 스펙트럼

그림 6은 BaFBr:Eu²⁺,Na⁺와 BaFBr:Eu²⁺,K⁺ 형광체의 PSL 스펙트럼과 1차 여기광(파장 355nm) 및 2차 여기광(파장 633nm)의 스펙트럼을 나타낸 것이다. 발광파장의 범위는 350~450nm, 최대 피크 파장은 390nm이었으며, 첨가된 활성화제의 종류와 관계없이 동일한 발광파장 범위와 피크 파장을 나타내었다. 또한 PSL 스펙트럼은 2차 여기광(파장 633nm)의 스펙트럼과 잘 분리되었다. 따라서 이 형광체를 이용하여 제작한 영상판(image plate)의 영상을 관독할 때 2차 여기광의 영향을 쉽게 제거할 수 있으므로 안정된 X-선 영상을 얻을 수 있다.

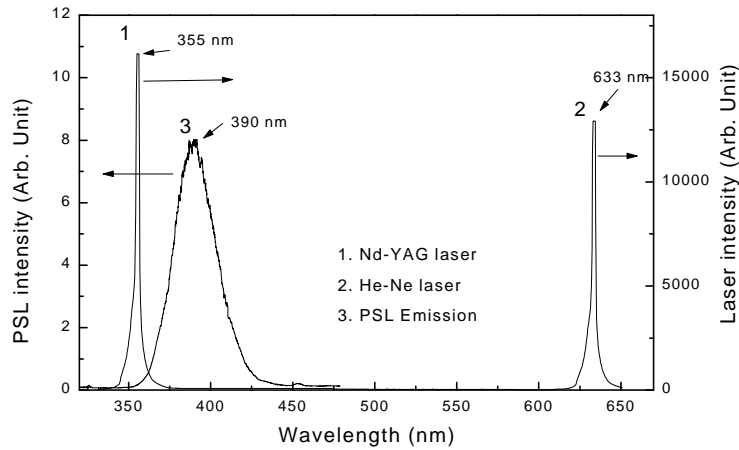


Fig. 6. PSL emission and excitation spectra of BaFBr:Eu²⁺,Na⁺ and BaFBr:Eu²⁺,K⁺.

그림 7은 본 실험에서 제작한 BaFBr:Eu²⁺,Na⁺ 및 BaFBr:Eu²⁺,K⁺ 형광체와 일본 Fuji Photo Film Co.에서 개발한 영상관(model ST-III, BaFBr_{0.85}I_{0.15}:Eu²⁺ 형광체)의 PSL 스펙트럼과 PSL 강도를 비교한 것이다. 제작한 PSL 형광체들의 PSL 스펙트럼의 파장 범위는 첨가된 활성체의 종류와 농도에 관계없이 모두 350~450 nm 사이였으며, 피이크 파장은 390 nm이었다. 그러나 ST-III의 PSL 스펙트럼 파장 범위는 360~450 nm 사이였으며, 피이크 파장은 약 405 nm이었다. 일반적으로 전자친화력이 적은 원소는 Eu²⁺의 발광을 장파장 쪽으로 이동시키는 것으로 알려져 있다. ST-III 형광 물질(BaFBr_{0.85}I_{0.15}:Eu²⁺)은 Br의 전자친화력(3.5)보다 작은 I(전자친화력 3.1)를 소량 첨가하였기 때문에 Eu²⁺의 PSL 피이크가 장파장 쪽으로 이동되었다고 생각된다. PSL 강도는 Eu를 0.5 mol%, Na를 4 mol% 첨가한 BaFBr:Eu²⁺, Na⁺ 형광체가 시판하고 있는 ST-III 영상관의 약 2배 정도였다.

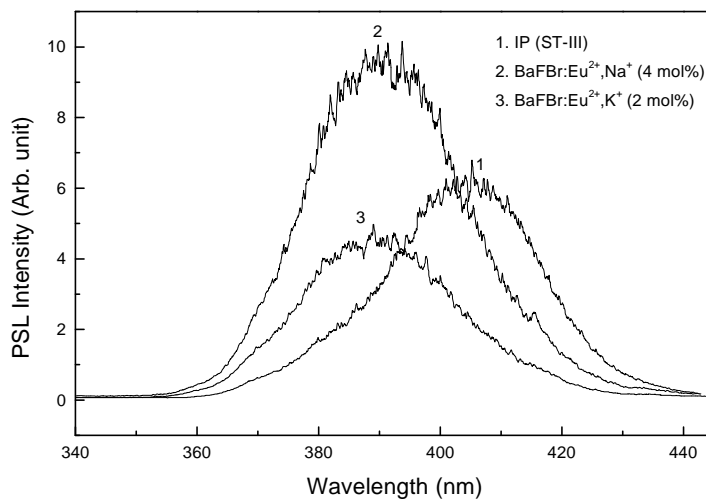


Fig. 7. Comparison of PSL spectra of BaFBr:Eu²⁺,Na⁺, BaFBr:Eu²⁺,K⁺ and IP(ST-III).

2. XRD 분석

제작한 $\text{BaFBr:Eu}^{2+},\text{Na}^+$ 및 $\text{BaFBr:Eu}^{2+},\text{K}^+$ 형광체들의 격자 상수와 결정구조를 확인하기 위하여 X-ray diffraction(XRD)법으로 결정분말의 X-선 회절상을 측정하였다. XRD 측정장치(Philps, X'Pert-APD)에서 발생한 X-선은 monochrometer (Diff, Beam PW1752 curved graphite)를 이용하여 $\text{CuK}\beta$ 를 제거하고, $\text{CuK}\alpha_1$ 과 $\text{CuK}\alpha_2$ 를 X-선 선원으로 사용하였으며, $\text{CuK}\alpha_1$ 과 $\text{CuK}\alpha_2$ 의 파장은 각각 1.54056 Å, 1.54439 Å 이었고 강도의 비율은 2:1이었다. 이 때 X-선 발생장치의 가속전압은 40 kV, 전류는 30 mA이었다. 주사속도는 분당 2.4° 로 하였으며 2θ 각은 10° 에서 80° 까지 측정하여 X-선 회절상을 얻었다.

측정한 회절무늬는 그림 8 과 같이 (001), (101), (002), (110), (112), (103), (104) 및 (203)면 등에서 피크가 나타났고 Miller지수 (hkl)값들은 JCPDS 카드의 값과 잘 일치하였으므로 소결된 $\text{BaFBr:Eu}^{2+},\text{Na}^+$ 및 $\text{BaFBr:Eu}^{2+},\text{K}^+$ 형광체들은 모두 PbFCl 와 같은 matlockkite 구조를 가지고 있다는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 XRD분석을 통해 계산한 이 결정들의 격자상수 a, b, c 는 각각 $a = b = 4.503 \text{ \AA}$, $c = 7.434 \text{ \AA}$ 이었다.

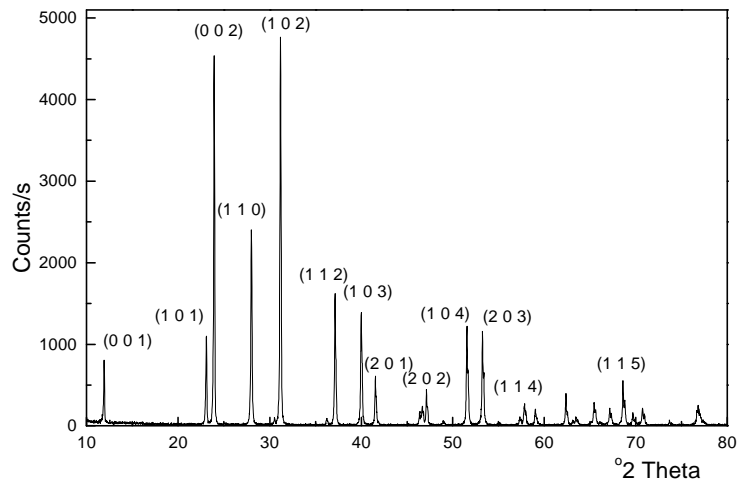


Fig. 8. X-ray diffraction pattern of fabricated phosphor powder.

3. Fading 특성

그림 9는 $\text{BaFBr:Eu}^{2+},\text{Na}^+$ 를 6 MV X-선 발생용 선형가속기(Siemens Co. MD67)를 이용하여 1 Gy의 X-선을 조사한 직후 측정된 PSL 강도와 30°C , 50°C 및 80°C 의 온도에서 일정시간동안 저장한 후 측정된 PSL 강도의 비를 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 PSL 강도는 온도가 증가함에 따라 매우 급격히 감소하였다. 이것은 온도가 증가하면 F 중심에 포획된 전자의 이탈확률이 커지기 때문이다. 실온(30°C)에서의 PSL 강도는 약 20분 경과하였을 때 초기치의 약 40%가 감소하였으며, 이것은 불순물, 격자간 원자 등의 격자결함에 의해 금지대 내에 생성된 얇은 포획 준위에 포획된 전자들의 영향으로 생각된다. 50°C 및 80°C 의 온도에서 PSL 강도는 20분 경과 후 각각 50% 및 80% 감소하였다. 실온에서의 fading 특성은 X-선 조사 후 20분부터 매우 안정적이었다. 그리고 30분 이후의 PSL 강도의 감소율은 거의 없었다.

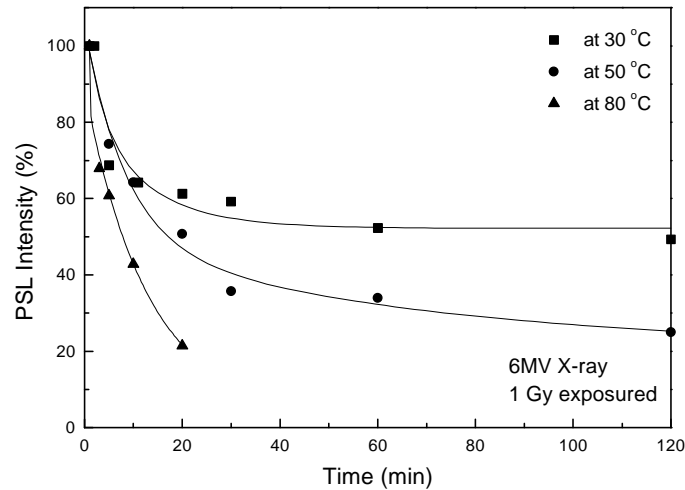


Fig. 9. Fading of BaFBr:Eu²⁺,Na⁺.

그림 10은 동일한 조건으로 BaFBr:Eu²⁺,K⁺를 6MV X-선 발생용 선형가속기를 이용하여 1Gy의 X-선을 조사한 직후 측정된 PSL 강도와 30 °C, 50 °C 및 80 °C의 온도에서 일정시간동안 저장하면서 측정된 PSL 강도의 비를 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 fading은 온도와 경과시간이 증가함에 따라 급격히 증가하였다. X-선 조사 후 20분 경과하였을 때 30 °C, 50 °C 및 80 °C의 온도에서 PSL 강도는 각각 30 %, 65 % 및 90 % 감소하였다. 실온에서의 fading 특성은 X-선 조사 후 20분부터 매우 안정적이었다.

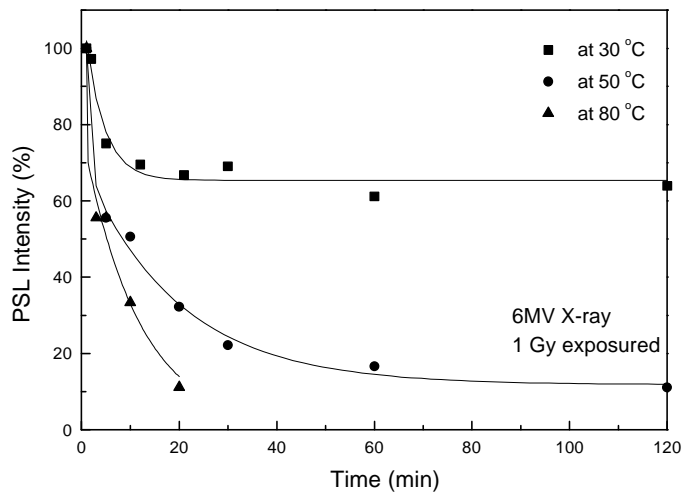


Fig. 10. Fading of BaFBr:Eu²⁺,K⁺.

그림 11은 본 연구에서 제작한 BaFBr:Eu²⁺,Na⁺ 및 BaFBr:Eu²⁺,K⁺ 형광체와 시판되는 ST-III 영상판(일본 Fuji Photo Film Co.)의 실온(30 °C)에서의 fading 특성을 나타낸 것이다. Fading 특성에 큰 차이는 없었지만, X-선 조사 후 20분 경과한 후 PSL 강도 변화는 Eu²⁺의 농도를 0.5 mol%, K⁺의 농도를 1.5 mol% 첨가한 BaFBr:Eu²⁺,K⁺ 형광체가 가장 적게 나타났다. BaFBr:Eu²⁺,Na⁺의 경우 PSL 강도는 20분 경과하였을 때 초기치의 약 40%가 감쇠하였다. 그리고 20분 이후의 PSL 강도의 감쇠율은 거의 없었으며, BaFBr:Eu²⁺,K⁺의 경우 X-선 조사 후 20분 경과하였을 때 PSL 강도는 약 30% 감소하여 이후 매우 안정적인 fading 특성을 나타내었다.

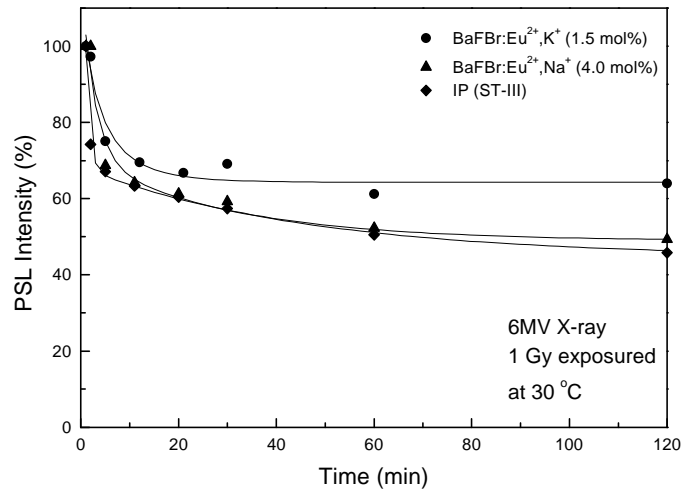


Fig. 11. The characteristics of fading at room temperature.

4. 선량 의존성

제작한 BaFBr:Eu²⁺,Na⁺ 및 BaFBr:Eu²⁺,K⁺ 형광체의 X-선에 대한 선량 의존성을 측정하기 위하여 고선량 영역에서는 선량율이 2 Gy/min 인 6MV X-선 발생용 선형가속기(Siemens Co., MD67)를 사용하였고, 저선량 영역에서는 X-선 발생장치(Varian, Ximatron C series X-ray unit)를 사용하였다. 그리고 조사야 크기(field size, FS)와 선원표면간 거리(source to sample distance, SSD)는 각각 10 cm × 10 cm, 100 cm로 하였다. X-선에 조사된 BaFBr:Eu²⁺ 형광체의 fading에 의한 효과를 최소화하기 위하여 암실에서 정확하게 1분이 경과한 후 PSL 강도를 측정하였다.

그림 12는 제작된 BaFBr:Eu²⁺,Na⁺ 형광체의 선량의존성을 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 BaFBr:Eu²⁺,Na⁺ 형광체는 약 0.3 mGy ~ 10 Gy까지, 약 10⁵ 차수의 넓은 선량 범위에서 선형성을 나타내었으며, 조사선량 범위 내에서 X선의 선량증가에 대해 PSL 스펙트럼 분포와 피이크 파장은 변하지 않았다.

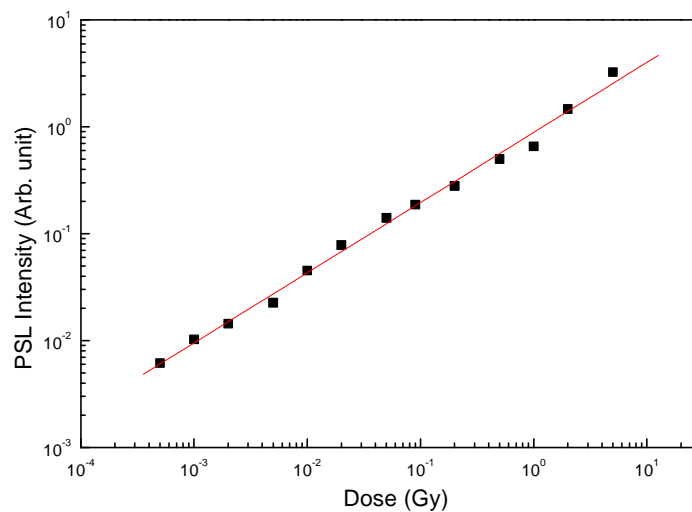


Fig. 12. Linearity of PSL intensity of BaFBr:Eu²⁺,Na⁺ to irradiated dose.

그림 13은 제작된 BaFBr:Eu²⁺,K⁺ 형광체의 선량의존성을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 BaFBr:Eu²⁺,K⁺ 형광체는 약 0.3mGy~10Gy까지, 약 10⁵ 차수의 넓은 선량범위에서 선형성을 나타내었다. 조사선량 범위 내에서 X선의 선량증가에 대해 PSL 스펙트럼 분포와 피이크 폭장은 변하지 않았다.

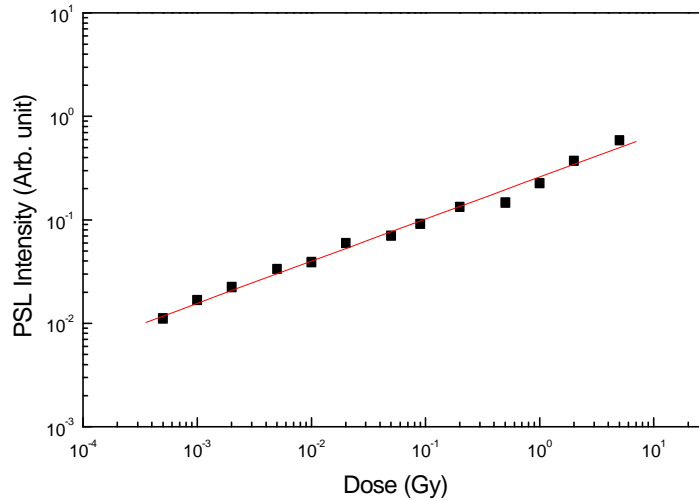


Fig. 13. Linearity of PSL intensity of BaFBr:Eu²⁺,K⁺ to irradiated dose.

III. 결론

본 연구에서는 BaFBr:Eu²⁺,Na⁺ 및 BaFBr:Eu²⁺,K⁺ PSL 형광체의 최적 제작조건을 구하기 위하여 EuF₃의 농도를 0.5mol%, NH₄Br의 농도를 5.0mol%로 고정하고, 활성제로 첨가된 Na⁺의 농도를 각각 1~8mol%, K⁺의 농도를 0.5~5mol%까지 변화시켜 최적첨가량을 결정하였다. 이때 수소 환원분위기에서 930 °C, 30분간 소결하였다.

그리고 제작한 BaFBr:Eu²⁺,Na⁺ 및 BaFBr:Eu²⁺,K⁺ 형광체의 여러 가지 특성을 측정하여, 다음 결론을 얻었다.

BaFBr:Eu²⁺,Na 및 BaFBr:Eu²⁺,K 형광체의 최적제작조건은 BaF₂와 BaBr₂·2H₂O를 mole비 1:1로 혼합하고, NH₄Br은 5.0mol%, 그리고 활성제 EuF₃는 0.5mol%, NaF는 4mol% 및 KF는 1.5mol%이었다. 그리고 소결분위기는 수소 환원분위기로 하였으며, 소결온도는 930 °C, 소결시간은 30분이었다. BaFBr:Eu²⁺,Na⁺ 및 BaFBr:Eu²⁺,K⁺ 형광체의 PSL 스펙트럼 파장범위는 모두 350~450nm이었으며, 최대 피이크 폭장은 390nm이었다. Eu²⁺를 0.5mol%, Na⁺를 4mol% 첨가한 BaFBr:Eu²⁺,Na⁺ 형광체의 PSL 강도는 시판하고 있는 영상판(model ST-III, 일본 Fuji Photo Film Co.)보다 약 2배 정도 컸다. 제작된 BaFBr계 형광체의 선량의존성은 0.23mGy~10Gy 영역에서 매우 좋은 직선성을 나타냈으며, fading 특성은 상용 ST-III 영상판의 fading 특성과 거의 같았다. 그리고 방사선 조사 후 보관온도가 높을수록 PSL의 강도가 급격히 감소하였으며, 상온에서 X-선 조사 후 20분 경과한 다음부터의 PSL 강도 변화는 BaFBr:Eu²⁺,K⁺ 형광체가 가장 작았다. 제작한 BaFBr:Eu²⁺,Na⁺ 및 BaFBr:Eu²⁺,K⁺ 형광체의 결정구조는 PbFCl과 같은 matlockite 구조를 가지며, 격자상수는 모두 a = b = 4.503 Å, c = 7.434 Å이었다.

참고문헌

- [1] A. Ohnishi, I. Akimoto, K. Kanno, Y. Iwabuchi and N. Mori, *Journal of Luminescence*, 72 (74), 755 (1997).
- [2] P. F. Caricia, R. S. McLean, M. K. Crawford and B. D. Jones, *Applied Physics Letters*, 72 (12), 1415 (1998).
- [3] M. Bradford, D. A. Andrews, A. Harrison, S. G. Roden and T. A. King, *Journal of Luminescence*, 72 (74), 742 (1997).
- [4] Wei Chen, Qiaqing Song and Mianzeng Su, *J. Appl. Phys.* 81 (7), 3170 (1997).
- [5] L. E. Trinrler, M. F. Trinrler, and A. I. Popov, *Phys. Stat. Sol. (h)* 180, K31 (1993)
- [6] H. Nanjo, K. Murayama, T. Usuda, S. Tanigdchi, and N. Takeuchi. *Radiat. Prot. Dosimetry* 47, 281 (1993)
- [7] H. Von Seggern, A. Meijerinr, J. Voigt. and A. Winnacker. *J. Appl. Phys.* 66, 4418 (1989).
- [8] M. Thoms, H. von Seggern, and A. Winnacker, *J. Appl. Phys.* 76, 1800 (1994).
- [9] H. Nanto, T. Usuda, K. Murayama, H. Sokoosm, S. Nakamura, K. Inabe and N. Takeuem, *Appl. Phys. Letters* 59, 1838 (1991).
- [10] H. H. Ruter, H. von Seggern, R. Reninger and Saile, *Phys. Rev. Letters* 65, 2438 (1990).
- [11] F. H. Koscunik, J. M. Spaetll, R. S. Eachus, W. G. McDugle and R. H. D. Nurrall, *Phys. Rev. Letters* 67, 3571 (1991).
- [12] S. V. Moharil, *Bull. Mater. Sci.* 17, 25 (1994).
- [13] A. R. Lakyeshmanan and K. G. Rajan, *Radiat. Prot. Dosimetry* 55, 247 (1994).
- [14] M. K. Crawford and L. H. Brixner, *J. Lum.* 48/49, 37 (1991).
- [15] J. H. Lin and M. Z. Su, *J. less-common Metals* 148, 233 (1989).
- [16] A. Medarink, W. J. Sehpper and G. Blasse, *J. Phys. D* 24, 997 (1991).
- [17] W. Chen. et al., *J. Phys. Solid Vol.* 59, No 1, 49(1998).
- [18] J.L.Sommerdijk et al., *J. Lumin.*, Vol. 8., 502(1974).
- [19] R. J. Klee, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 28, 2529(1995).
- [20] H. Song, J. Zhang, S. Lu, L. Sun, S. Huang and J. Yu, *Solid State Communications*, vol. 99, No. 10, 759 (1996).
- [21] S.H. Kim et al., *Proceedings of Sensor Conf.*, 11, 1, 49, 2000.