

## Czochralski 방법에 의한 $\text{LaF}_3$ 단결정 육성 및 특성 분석

박재우<sup>1</sup> · 이우교<sup>2</sup>

1 제주대학교 기계에너지시스템공학부  
2 방사선안전기술연구센터, 한양대학교

## Growing of $\text{LaF}_3$ single crystals by Czochralski method and analysis of their properties

Jae Woo Park<sup>1</sup> and Woo Gyo Lee<sup>2</sup>

1 Department of Nuclear & Energy  
Engineering, Cheju National University  
2 Innovative Technology Center for  
Radiation Safety, Hanyang University

### Summary

Single crystals of pure  $\text{LaF}_3$  and  $\text{LaF}_3$  doped with 10% cerium have been grown by Czochralski method, and their physical properties are analyzed. The X-ray diffraction analysis of the grown crystals shows that the diffraction pattern of the pure  $\text{LaF}_3$  well agrees with the JCPDS card(32-0483). The diffraction pattern of the cerium-doped  $\text{LaF}_3$  indicates that there exist some irregularities in the crystal. The photoluminescence analysis shows the emission peaks of the pure  $\text{LaF}_3$  at 285nm, 435nm and 553nm, which well agrees with data reported in the literature. The emission peaks of the cerium-doped  $\text{LaF}_3:\text{Ce}(10\%)$  are observed at 431nm and 570nm. The decay time analysis of the grown crystals shows four decay components for the pure

$\text{LaF}_3$  crystal, and the decay constant for the fastest component is 60ns. The decay spectrum of  $\text{LaF}_3:\text{Ce}(10\%)$  crystal is composed of three decay components, for which the fastest decay constant is 30ns.

### 서론

무기 섬광체는 지난 수 십년간 고에너지 물리학이나 의료영상장비의 방사선 검출기로 사용되어 왔고, 현재도 사용 목적에 적합한 물성을 갖는 새로운 섬광체의 개발이 활발하게 진행되고 있다. 섬광체의 발견은 3단계로 나눌 수 있다. 첫 번째 단계는 초기 섬광체로 Roentgen이 X 선을 발견할 당시 사용한  $\text{CaWO}_4$ ,와 Becquerel 이 1896년 방사능을 발견할 때 사용하였던 우라늄염과 Rutherford가 alpha 입자 산란실험에 사용한 ZnS 등이 있다. 이때는 광전자증배관(PMT)을 사용하지 않고 섬광체에서 방출되는 섬광을 육안으로 검사하는 방법으로 방사선을 검출하였다. 두 번째 단계는 1948년 Hofstadter가 개발한 NaI(Tl) 섬광체가 시초가 되어 알칼리 금속과 할로겐원소 화합물로 이루어진 섬광체인 CsI(Tl) 및 LiI(Eu)이 개발되는 시기이다[1]. 세 번째 단계는 고에너지 물리학에서 요구되는 보다 성능이 우수한 섬광체 및 의료영상장비에서 필요한 섬광체와 수많은 과학 분야와 산업분야에서 필요로 하는 섬광체에 대한 연구 개발로 섬광체의 르네상스를 이룬다. 중성자 검출용으로 개발된 섬광체는 Ce를 첨가한  $\text{Lu}_2\text{S}_3:\text{Ce}$ ,  $\text{LiBaF}_3$ 와  $\text{Li}_6\text{Gd}(\text{BO}_3)_3:\text{Ce}$  등이 있다[2-4].

섬광체는 물리적 화학적인 성질(밀도, 원자번호, 발광파장, 붕괴시간, 녹는점, 발광량, radiation length, after glow, refractive index, 안정성)이 섬광체마다 각각 다르므로 응용분야에서 맞는 적절한 섬광체를 선택해야한다. 최근 의료분야에서 SPECT, PET (positron emission tomography) 등과 같은 고부가 가치의 첨단 영상장비가 대중화 되면서 이들의 목적에 적합한 새로운 섬광체를 개발하는 연구가 더욱 필요하게 되었다. 지금까지 새로운 섬광체를 찾기 위하여 원소주기율표

상에 있는 거의 모든 원소를 조합한 화합물질을 대상으로 시도를 하였다고 해도 과언이 아니다. 그러나 같은 섬광물질이라도 미량 첨가하는 활성제의 종류와 양, 결정성장 방법 및 조건 등에 따라서 특성이 아주 다를 수 있으므로 이러한 변수를 달리하면서 새로운 섬광체를 찾는 연구는 필요하다.

본 연구에서는 형광감쇠 시간이 짧아서 시간 분해능이 우수한 의료용 영상장비에 적합한  $\text{LaF}_3$ [5]를 모체로 하는 섬광체를 개발하기 위하여 Czochralski 방법으로 섬광체 단결정을 육성하였으며, X-선회절분석(XRD)을 통하여 육성된 단결정의 결정구조를 분석하였고, 발광스펙트럼과 형광감쇠시간 등을 측정하였다.

### 단결정 육성 및 시편 제작

Czochralski 방법은 1917년 처음으로 단결정을 육성하는 방법의 하나로 창시자의 이름을 따서 명명되어졌다. 불활성 금속 도가니 속에 단결정 재료를 넣고 고주파 유도코일을 이용하여 가열하면 재료가 용융되는 데 이때 용융액 표면에 단결정 seed를 접촉하여 회전하면서 느리게 인상하면 seed로부터 단결정이 성장하기 시작한다. 육성된 단결정은 도가니에 구애를 받지 않고 자유로운 상태에서 성장하므로 비교적 완전성이 양호하다. 단결정 형상이나 성질은 인상 속도 (성장 속도), 회전 속도, 온도 기울기 또는 seed 결정의 방위에 의하여 지배되므로 이들에 대한 적절한 제어가 가장 중요하다.

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 단결정 육성장치를 나타내고 있으며, Fig. 2는 고주파 유도 가열로의 구조를 나타낸 것이다.  $\text{LaF}_3$ 는 용융점이  $1493^\circ\text{C}$ 이기 때문에 용융점이  $2466^\circ\text{C}$ 인 Ir 재질의 도가니를 사용하였다. 도가니의 크기는 직경 32 mm, 높이 32 mm, 두께 1 mm이다. 고주파 유도 가열장치에 공급된 전원의 출력은 7kW이고, 출력진동수는 105 kHz이다. 재료는 99.99%의  $\text{LaF}_3$ (Alfa Aesar) 분말을 사용하였고, 활성제로는  $\text{CeF}_3$ (Aldrich 99.99%)를 사용하였다. Table 1은  $\text{LaF}_3$  재료의 특성을 나타낸 것이다.  $\text{LaF}_3$ 은 흡습

성이 크기 때문에 공기 중의 습기로부터 시약을 보호하기 위하여 진공 펌프가 달린 glove box안에 넣고 진공 펌프로 공기를 뽑은 뒤 질소가스를 주입하고, 다시 펌프로 공기를 뽑고, 질소 가스 주입과정을 5회 반복하여 청량하였다. 청량된  $\text{LaF}_3$  시약은 이리듬도가니에 넣고 이 이리듬도가니를 밀봉할 수 있는 작은 바이알에 넣은 뒤 뚜껑으로 밀폐시켰다. 이렇게 밀폐된 바이알은 glove box에서 단결정 성장장치의 챔버로 가는 중의 공기와의 접촉을 차단할 수 있었다.

일반적으로 단결정은 양질의 결정을 seed로 사용하여 육성한다. seed용으로 사용할 결정은 용융액에 백금 봉(지름 2.5 mm)을 접촉하여 육성하였다. Fig. 3은 백금봉으로부터 육성된  $\text{LaF}_3$  결정이고 Fig. 4는 seed로부터 육성된 단결정이다. 육성된  $\text{LaF}_3$  단결정의 크기는 지름이 13 mm정도이고, 길이는 18 mm 정도이다.

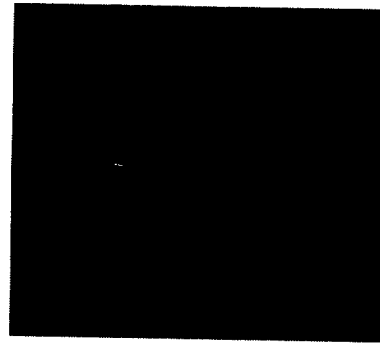


Fig. 1 Czochralski crystal growing system used for growing  $\text{LaF}_3$  scintillator sample

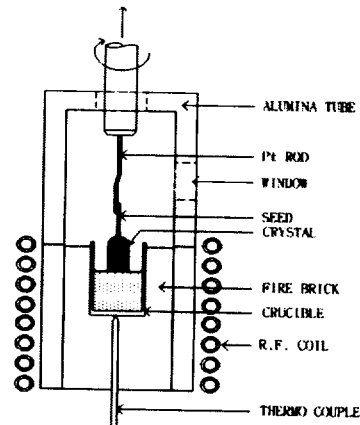


Fig. 2 High frequency induction coil heater

Table 1. Properties of LaF<sub>3</sub>

Density (g/cm <sup>3</sup> )	5.94
Melting point ℃	1493
Sensitivity	Hygroscopic
Hardness (Moh)	4.5
Crystal structure	Trigonal (hex), P3c1,

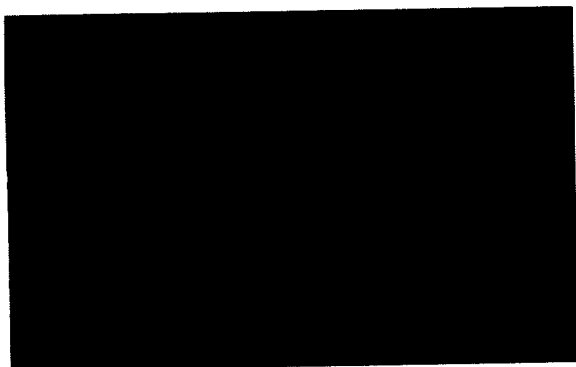
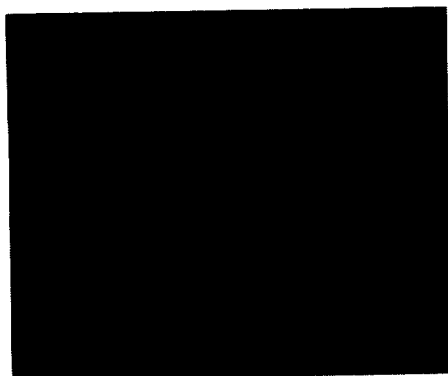


Fig. 3. Seed crystal grown from platinum rod

Fig. 4 LaF<sub>3</sub> crystal grown from the seed crystal

LaF<sub>3</sub> 단결정의 특성분석에 사용할 시편을 제작하기 위하여 육성한 단결정을 다이아몬드 결정절단기(BUEHLER ISOMET)로 시편 크기로 절단하였다. 절단된 LaF<sub>3</sub> 조각은 절단시 생긴 흔적을 제거하기 위하여 1차로 1,500번의 사포로 절단자국을 제거한 후 2차로 4,000번 사포를 이용하여 첫 단계에서 생긴 표면의 거친 부분을 제거하였다. 그 다음 polishing cloth 위에서 1 μm의 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powder를 사용하여 1차 polishing하고 0.05 μm Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powder를 사용하여 2차로 polishing하였다.

## 결과 분석

### 가. X-선회절(XRD) 분석

육성된 LaF<sub>3</sub> 단결정의 결정성을 확인하기 위하여 X-선 회절분석기(Model D/Max-2100H, Rigaku)를 이용하여  $\theta \sim 2\theta$  scan을 실시하였다. 측정시 사용한 X-선원은  $\text{CuK}\alpha_1$  (파장 1.5405 Å)으로 단색광 장치(Flat graphite, monochromator  $\theta_c = 13.25^\circ$ )를 거쳐서 나오는 X-선을 사용하였다.  $\theta \sim 2\theta$  범위는  $15^\circ \sim 80^\circ$  까지였으며, 격자상수 계산을 위하여  $0.01^\circ$  간격으로  $0.6^\circ/\text{min}$  속도로 측정하였다. 통상적인  $\theta \sim 2\theta$  scan으로부터 박막의 결정화 정도를 조사하고, 주 피크의 위치로부터 박막의 격자상수를 계산하였다. 실험에 사용된 X-선의 세기는 전압 40 kV, 전류 30 mA로 고정하여 측정하였으며, 입사시 X-선의 손실을 최소화하기 위하여 슬릿의 폭을 최소로 하여 측정하였다.

Fig. 5와 6은 순수한 LaF<sub>3</sub>(pure) 단결정과 활성제로 Ce가 10% 첨가된 LaF<sub>3</sub>:Ce(10%) 단결정의 X-ray 회절(XRD) 무늬를 나타낸 것이다. LaF<sub>3</sub>(pure)의 XRD 무늬는 JCPDS(Joint Committee on Powder Diffraction Standards) 카드의 LaF<sub>3</sub> 분말의 회절 무늬 카드(32-0483)와 잘 일치하였다. 이것은 본 연구에서 육성한 LaF<sub>3</sub>(pure) 단결정의 구조가 JCPDS에서 정의한 육방정계의 구조로 육성되었음을 확인할 수 있다.

활성제 Ce가 첨가된 LaF<sub>3</sub>:Ce(10%) 단결정은 일부 비정질 패턴을 관찰할 수 있었다. 이러한 결과는 첨가된 Ce의 영향으로 인한 CeF<sub>3</sub>와 LaF<sub>3</sub>와의 alloy형성으로 생각할 수 있다. 현재 보고되고 있는 LaF<sub>3</sub> 단결정의 경우 육방정계로써 격자상수는 각각  $a=7.1871\text{Å}$ ,  $c$ 는  $7.3501\text{Å}$ 이다. 본 연구에서 육성한 LaF<sub>3</sub>의 격자상수를 구하기 위하여 XRD 회절 무늬 결과의 (002), (300) peak을 이용하였다. Cohen법을 이용하여 격자상수를 구할 수 있는데 격자상수는 다음의 식으로 주어진다.

$$a = \frac{3\lambda}{\sqrt{3}\sin\theta}, \quad c = \frac{\lambda}{\sin\theta}$$

여기서  $\theta$ 는 peak의 위치를 나타낸다. 실험에 사용한 X-선의 파장은  $\lambda=1.5405 \text{ \AA}$ 이다.

계산된  $\text{LaF}_3$ (pure) 단결정의 격자상수는 각각  $7.154 \text{ \AA}$ ,  $7.3056 \text{ \AA}$ 으로 보고된 값보다 조금 작게 나타났다. 이 원인은 결정성장시 F가 증발하여  $\text{LaF}_3$  단결정의 조성비가 화학 양론적 결합에서 비화학 양론적 결합으로 성장했음을 의미한다. 따라서  $\text{LaF}_3$  내부에는 F 공공이 다수 존재하고, 더불어 격자간 La도 존재하고 있음을 알 수 있다. 이 결과로 인하여 투명한  $\text{LaF}_3$  단결정의 투명도가 저하될 수도 있다. 활성제로 Ce가 첨가된  $\text{LaF}_3:\text{Ce}$  단결정의 XRD 결과를 순수한  $\text{LaF}_3$  단결정의 XRD 결과와 비교하여 보았다. Fig. 7은  $\text{LaF}_3$ (pure) 단결정의 XRD 무늬와 활성제로 Ce가 첨가된  $\text{LaF}_3:\text{Ce}(10\%)$  단결정의 무늬 비교한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 (002), (110), (300) 및 (113) peak가 낮은 회절 각도 쪽으로 이동하였고,  $\text{LaF}_3:\text{Ce}(10\%)$  단결정의 XRD 회절 무늬에서 (002), (300) peak 강도의 비  $I/I_0$ 가 변화하였음을 알 수 있다. 회절강도의 비 변화는 내부 결정학적 변화가 있다는 것을 의미하며, 활성제로 첨가된 Ce의 의한 것으로 보인다. 활성제로 Ce가 첨가된 경우 주 peak의 위치는 낮은 각도 방향으로 모두 이동하고 있었으며, 본 실험 결과에서 회절 peak의 이동은 면간거리의 증가를 나타낸다.

Fig. 8은 XRD 회절 무늬의 위치로부터 계산한 격자상수를 비교한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 활성제로 Ce가 첨가된  $\text{LaF}_3:\text{Ce}(10\%)$  단결정의 격자 상수가 증가하였음을 확인할 수 있다. Ce가 첨가된 경우의 격자상수  $a$ ,  $c$ 는 각각  $7.18051 \text{ \AA}$ ,  $7.37088 \text{ \AA}$ 으로 보고된 순수한  $a=7.1871 \text{ \AA}$ ,  $c=7.3501 \text{ \AA}$ 에 대해서  $a$ 는 약간 작고,  $c$ 는 약간 크게 나타났다. La의 경우 원자반경은  $1.15 \text{ \AA}$ , Ce의 경우 원자반경은  $1.01 \text{ \AA}$ 으로 Ce가 La 자리에 치환되었을 경우 통상적으로 결합길이의 감소가 일어나야 하지만 본 결과와는 반대로 나타났으며, 이 현상은 회절결과에서 나타나는 비정질 패턴으로 설명할 수 있다. Ce가 La 자리에 일부 치환되었으나,  $\text{LaF}_3$ 와  $\text{CeF}_3$ 의 결합

에너지의 차이 때문에 대부분의 Ce가 격자간 이온으로 존재하여 격자길이를 증가시킨 것으로 보인다.

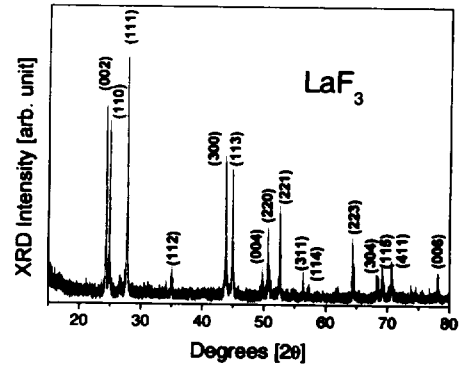


Fig. 5 X-ray diffraction spectrum of the grown pure  $\text{LaF}_3$  crystal

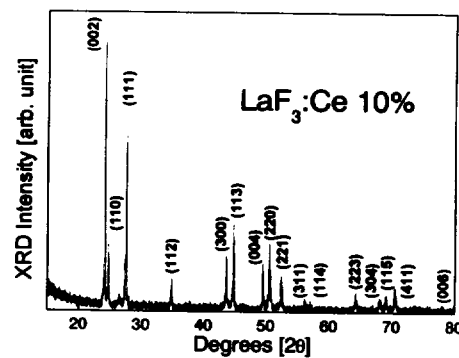


Fig. 6 X-ray diffraction spectrum of the grown  $\text{LaF}_3:\text{Ce}(10\%)$  crystal

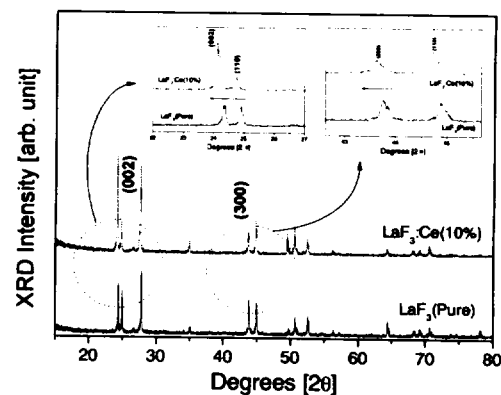


Fig. 7 Comparison of XRD spectrum of  $\text{LaF}_3$  (pure) and  $\text{LaF}_3:\text{Ce}(10\%)$  crystals

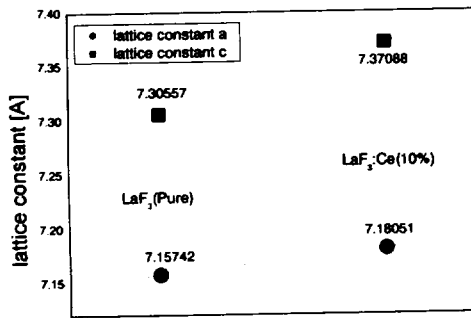


Fig. 8 Comparison of the lattice constant of LaF<sub>3</sub>(pure) and LaF<sub>3</sub>:Ce(10%) crystals

#### 나. 단결정의 발광스펙트럼 측정

발광(PL: photoluminescence) 스펙트럼은 섬광체의 특성을 규정하는 중요한 인자이다. Fig. 9는 육성한 LaF<sub>3</sub> 단결정의 발광 스펙트럼을 측정하기 위하여 사용한 장치의 개략도이다. 여기광은 266 nm 파장의 Nd-YAG(pulse) 레이저를 사용하였다. 육성된 LaF<sub>3</sub> 단결정으로부터 두께 3 mm 인 시편을 만들어 결정 홀더에 저온 접착제로 접착 시킨 후 여기 광으로 여기 시켰다. 시편에서 나오는 반사 빛을 제외한 산란광을 수집하여 모노크로메터(Spectra pro 750, USA)에 입사시켰다. 모노크로메터에서 분광된 광은 광전자증배관(PMT)에 받아들여 컴퓨터로 기록하였다. PL 스펙트럼 측정시 레이저에서 발진하는 광의 시간은 10 ns이고 주기는 10 Hz이었다. 스펙트럼 조사 간격은 1 nm이었다.

Fig 10은 LaF<sub>3</sub>(pure) 단결정의 PL 스펙트럼을 나타낸 것으로, 266 nm, 399 nm, 532 nm와 665 nm에서 날카로운 peak가 보이는데 이것은 Nd-YAG 레이저의 여기광인 266 nm가 입사되어 반파장씩 증배되어 나타난 것이다. 자외선 영역에서는 파장범위가 255 nm에서 312 nm까지이며 중심파장은 285 nm 이었다. 자외선 영역에서의 중심파장 285nm 발광의 경우는 띠틈에 의한 발광으로 보이며 이미 보고된 다양한 연구결과와 유사한 결과를 나타내었다[6]. 동시에 가시광 영역에서 435 nm와 553 nm 부근에서 peak가 나타났다. LaF<sub>3</sub> 단결정의 경우 자외선 영역에 대한 연구는 매우 활발히 진행되고 있으나 가시광 영역에 대한 발광 연구는 거의 보고되고 있지 않다. 이러한 결과로 가시광 영역에 대한

LaF<sub>3</sub> 단결정의 물성에 대한 보다 많은 연구가 요구되고 있다. 발광 스펙트럼 결과에서 보이는 가시광영역에서의 광 특성을 살펴보면 2개의 발광센터가 존재하고 있음을 알 수 있고, 매우 큰 반치폭을 가지고 있었다. 일반적으로 형광특성을 가지는 넓은 띠틈 반도체의 경우 초기 결정 결함에 의해서 이러한 광특성을 가진다. 실험에 사용된 LaF<sub>3</sub>(pure) 단결정은 구조 내부에 다양한 자연 결함이 존재하는 것으로 생각되며 그 결과 F의 증발에 의한 비화학 양론적 성장에 의한 가시광 영역에서의 발광으로 사료된다. Thomas[6]의 보고에 의하면 순수한 LaF<sub>3</sub>의 경우의 가시광 영역에서의 발광을 470nm 위치에서 일어난다고 보고하였으며 Fig. 10의 결과와 유사하게 나타났다. LaF<sub>3</sub> 단결정의 가시광 영역에서의 발광은 침입형 La와 F 공공에 의한 발광으로 생각되며, 차후 양질의 단결정 성장시 사라질 것으로 판단된다.

Fig. 11은 활성제로 Ce가 10% 첨가된 LaF<sub>3</sub>:Ce(10%) 단결정의 PL 스펙트럼을 나타내었다. 399 nm, 532 nm와 665 nm의 날카로운 peak는 Nd:YAG 레이저의 여기광인 266 nm가 입사되어 반파장씩 증배되어 나타난 것이다. 가시광 영역에서의 2개의 봉우리가 관측되었으며, 각각의 파장범위는 364 nm ~ 478 nm, 502 nm ~ 631 nm 이었으며 중심 파장은 각각 431 nm와 570 nm이었다. 활성제의 첨가로 인하여 중심 파장이 청색계통으로 이동되었음을 알 수 있다. 순수한 결정의 경우 435nm에서의 중심파장이 431nm로 이동하였으며, 순수한 결정에 대해서 많은 양의 활성제가 첨가되면 띠틈의 채워짐에 의하여 중심파장이 단파장으로 이동하게 된다는 Burstein-Moss effect로 설명할 수 있다.

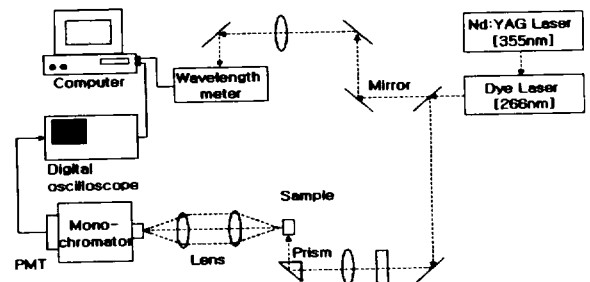


Fig. 9 Schematic diagram for the measurement of the photoluminescence spectrum of the grown crystals

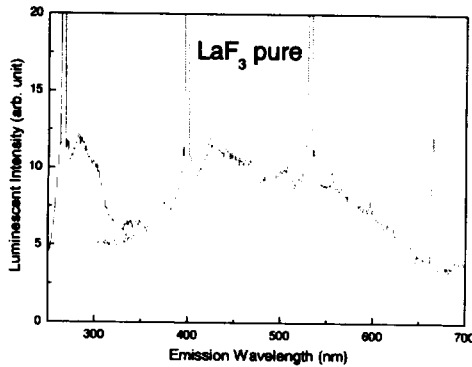


Fig. 10 Measured photoluminescence spectrum of LaF<sub>3</sub>(pure) crystal

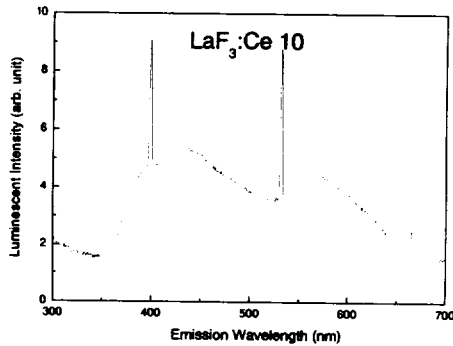


Fig. 11 Measured photoluminescence spectrum of LaF<sub>3</sub>:Ce(10%) crystal

다. 단결정의 형광 감쇠시간

섬광체에 광을 조사한 후 아주 짧은 시간 ( $\sim 10^{-8}$ s) 동안에 발광이 일어나는 것이 형광 (fluorescence)이고 긴 시간 동안에 일어나는 것이 인광(phosphorescence)이다. 섬광체의 경우 매우 짧은 시간에 발광하므로 이것의 시간에 대한 함수로 나타낸 것이 형광 감쇠곡선이다. 섬광체의 감쇠시간 특성은 섬광체의 응용분야를 결정하는데 매우 중요하다. 섬광체를 X선으로 여기시킨 후 그 섬광체로부터 나오는 잔광의 감쇠특성은 이 섬광체를 X선 단층사진 촬영의 응용에 사용할 수 있는지에 대한 적합성 여부를 판단하는데 중요한 자료가 된다. 감쇠시간을 측정하는 방법에는 단일광자 계수법, time coincidence 법 등이 있다. 본 연구에서는 Fig. 9에 보인 장치를 사용하였다. Nd-YAG(pulse) 레이저를 사용하여 266 nm 파장으로 섬광체를 여기시키고, 모노크로메터(Spectra pro 750, USA)와 디지털 오실로스코프(LeCroy 9310, USA)에서 신호를 받아

summed average 기능을 이용하여 1000 번을 평균한 파형을 컴퓨터에서 프로그램을 이용하여 형광감쇠곡선의 시간상수를 구하였다. 정확한 감쇠 시간을 측정하기 위해서 오실로스코프의 X축을 각각 0.2  $\mu$ s/div.와 2  $\mu$ s/div.로 설정하여 측정하였다.

W. W. Moses와 S. E. Derenzo는 활성제로 Ce가 첨가된 LaF<sub>3</sub>:Ce 단결정의 형광감쇠시간은 3가지 성분(3 ns, 26.5 ns 및 135 ~ 273 ns)을 가진다고 보고한 바 있다[7]. Fig. 12는 LaF<sub>3</sub>(pure) 단결정의 감쇠시간 곡선을 나타낸 것이다. 그림에서 보는바와 같이 감쇠 시간은 4가지 성분으로 나타났으며 빠른 성분의 감쇠시간은 60ns이다. Fig. 13은 활성제로 Ce가 10% 첨가된 LaF<sub>3</sub>:Ce(10%) 단결정의 감쇠 곡선이다. 그림에서 보는바와 같이 감쇠 시간은 3가지 성분으로 나타났으며 빠른 성분의 감쇠시간은 30ns이다. 본 연구에서 감쇠시간을 측정하기 위해서 사용한 시스템은 Nd:YAG 레이저의 펄스 시간이 10ns이므로 이 이하의 감쇠시간은 측정할 수 없었다.

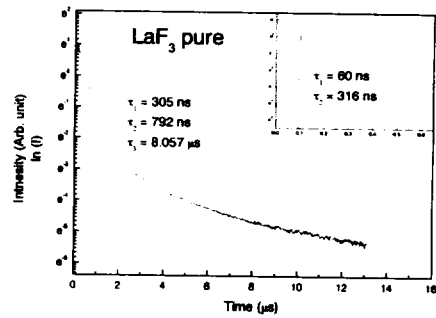


Fig. 12 Decay time spectrum of LaF<sub>3</sub> (pure) crystal

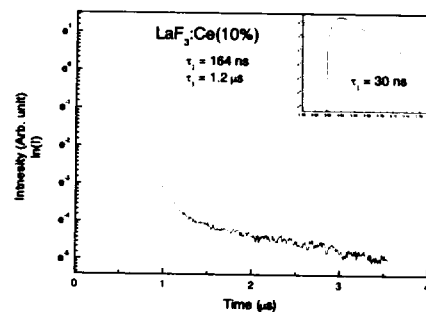


Fig. 13 Decay time spectrum of LaF<sub>3</sub>:Ce(10%) crystal

## 요약

새로운 무기 섬광체 개발을 위하여 Czochralski 방법으로 순수한 LaF<sub>3</sub> 및 활성제로 Ce이 10% 첨가된 LaF<sub>3</sub>:Ce(10%) 단결정을 육성하였다. 육성된 LaF<sub>3</sub> 단결정의 결정성을 확인하기 위하여 X-ray 회절(XRD) 스펙트럼을 JCPDS 카드(32-0483)와 비교한 결과 잘 일치하였다. 그러나 활성제로 Ce가 첨가된 LaF<sub>3</sub>:Ce(10%) 단결정은 일부 비정질 패턴을 관찰할 수 있었다. LaF<sub>3</sub>:Ce(10%) 단결정의 XRD 회절스펙트럼에서 (002), (110), (300) 및 (113) peak가 낮은 회절 각도쪽으로 이동하였고, (002), (300) peak 강도의 비  $I/I_0$ 가 변하였다. Cohen 방법으로 계산된 LaF<sub>3</sub>:Ce(10%) 단결정의 격자상수  $a$ ,  $c$ 는 각각 7.1805Å, 7.3709Å로서 문헌에 보고된 순수한 LaF<sub>3</sub> 단결정의 격자상수  $a=7.1871$ Å,  $c=7.3501$ Å에 대해서  $a$ 는 약간 작고,  $c$ 는 약간 크게 나타났다. 이것은 격자간 원자가 존재하여 격자길이를 증가시킨 것으로 여겨진다.

LaF<sub>3</sub>(pure) 단결정의 발광 스펙트럼은 자외선 영역에서 파장범위가 255nm에서 312nm까지이며 중심파장은 285nm 이었고, 가시광 영역에서 435nm와 553nm 부근에서 봉우리가 나타났고, LaF<sub>3</sub>:Ce(10%) 단결정의 발광 스펙트럼은 가시광 영역에서의 2개의 봉우리가 관측되었으며, 중심 파장은 각각 431 nm와 570 nm이었다.

LaF<sub>3</sub>(pure) 단결정의 감쇠시간은 4가지 성분으로 나타났으며 빠른 성분의 감쇠시간은 60 ns 이었다. LaF<sub>3</sub>:Ce(10%) 단결정의 감쇠 시간은 3 가지 성분으로 나타났으며 빠른 성분의 감쇠시간은 30ns이었다.

## 참고문헌

- [1] R. Hofstadter, "Alkali Halide Scintillation Counters" *Phys. Rev.*, Vol. 74, p. 100-101, 1948.
- [2] G. Huber, A. R. H. F. Ettema, J. C. Van't Spijker, P. Dorenbos, C. P. Allier and C. W. E. Van Eijk, "Lu<sub>2</sub>S<sub>3</sub>:Ce<sup>3+</sup>, a new red luminescing scintillator", *Nucl. Inst. Meth. in Phys. Res. B*, Vol. 134, P. 304-309, 1998.
- [3] M. J. Knitel et al., "LiBaF<sub>3</sub> a thermal neutron scintillator with optimal  $n - \gamma$  discrimination", *Nucl. Instr. and Meth.* Vol. A374, p. 197-201, 1996.
- [4] V. V. Chernikov, M. F. Dubovik, V. P. Gavrylyuk, B. V. Grinyov, L. A. Grin, T. I. Korshikova, A. N. Shekhovtsov, E. P. Sysoeva, A. V. Tolmachev, O. V. Zelenskaya, "Peculiarities of scintillation parameters of some complex composition borate single crystals", *Nucl. Inst. Meth. in Phys. Vol. A498*, p. 424 - 429, 2003.
- [5] P. Rodnyi, E. Melchakov, N. Zakharov, I. Munro, A. Hopkirk, "Fast luminescence of cerium doped lanthanum fluoride", *J. Lumine.*, Vol. 65, p. 85 - 89, 1995.
- [6] E. D. Thomas, H. Shields, Y. Zhang, B.C. McCollumb and R.T. Williams, "EPR and luminescence studies of LaF<sub>3</sub> and CeF<sub>3</sub> under X-ray and laser irradiation", *J. Lumine.*, Vol. 71, p. 94-104, 1997.
- [7] W. W. Moses and S. E. Derenzo "The scintillation properties of cerium doped lanthanum fluoride", *Nucl. Inst. Meth. in Phys. Vol. A299*, p. 51 - 56, 1990.