

논문 2003-12-3-05

란타게열 원소를 활성화체로 첨가한 LiPO_3 유리 섬광체의 제작과 섬광특성

황주호*, 정석준*, 신상원*, 최석호**, 수마로코프***

Fabrication and Scintillation Characteristics of LiPO_3 glass scintillators with the lanthanides activators

J. H. Whang*, J. M. Lee*, S. J. Jung*, S. H. Choi** and S. Yu. Sumarokov***

요 약

LiPO_3 에 란타게열의 원소를 활성화체로 첨가하여 ' LiPO_3 :Lanthanides' 유리 섬광체를 제작하였다. 최적의 가열 조건에서 유리 섬광체를 제작하여 광발광(photoluminescence, PL) 특성을 분석하였다. 유리 섬광체의 투명도가 최적이 되는 온도 950°C , 시간 90 분의 조건에서 제작하였으며, 발광스펙트럼 측정 결과 란타게열의 원소 중 Pr, Nd, Gd, Ho, Er, Tm, Yb, Lu은 고유의 발광 스펙트럼이 형성되지 않아 활성화체로서의 적용이 불가능한 것으로 나타났다. Eu^{2+} 와 Eu^{3+} 의 중심파장은 각각 420 nm, 620 nm이었고, Ce^{3+} 는 약 380 nm, Tb^{3+} 는 약 550 nm 이었다. Bi^{3+} , Eu^{2+} , Ce^{3+} 를 첨가한 LiPO_3 유리 섬광체에 광전증배관을 결합하여 섬광검출기를 구성하여, Ra-Be 중성자 선원을 이용한 중성자 검출실험을 진행한 결과 Ce^{3+} 를 첨가한 LiPO_3 유리섬광체가 가장 좋은 효율을 보여주었다.

Abstract

LiPO_3 glass scintillators were fabricated, and lanthanides(except Pm) oxides or chlorides were used as an activator. For the fabrication of LiPO_3 glasses, optimum heating conditions were obtained, and the photoluminescence of the glasses was measured by the monochromator. For the best transparency of the glass samples, optimum heating temperature and time are 950°C and 90 min, respectively. It was found that Pr, Nd, Gd, Ho, Er, Tm, Yb and Lu do not work as activator; emission spectrums of samples with them were equal to those of samples without activators. In the case of samples with Europium, the peaks of emission spectrum of Eu^{2+} and Eu^{3+} were 420 nm and 620 nm respectively. And samples with Ce^{3+} were about 380 nm, and Tb^{3+} were about 550 nm. Glass scintillators with Bi^{3+} , Eu^{2+} , and Ce^{3+} were found to be more applicable to neutron detection. The result of neutron detection by Ra-Be sources showed that Ce^{3+} was found to be the best activator of LiPO_3 .

Key Words : Neutron detection, Glass scintillator

1. 서 론

20 세기 초 방사선 측정에 섬광체가 이용되기 시작하여 1940 년대에 와서 섬광체를 광전자증배관과 함께 사용함으로써 입사방사선의 계수뿐만 아니라 에너지도 측정할 수 있게된 결과, 섬광검출기는 방사선 측정 기술에 있어서 비약적인 발전을 가져오게 되었다. 1950년대부터 각국의 연구기관과 대학 등에서 리튬을 함유한 유

* 경희대학교 원자력공학과(Dept. of Nuclear Eng., Kyung Hee Univ.)

** 경희대학교 전자정보학부 및 자연과학융합연구원(College of Electronics and Information & Ins. of Natural Sciences, Kyung Hee Univ.)

*** 단결정연구소(Institute for Single Crystals, Ukraine)

<접수일자 : 2001년 9월 27일>

리 섬광체에 대한 연구가 이루어지기 시작하였다. 1959년 Voitovetskii에 의해 lithium glass가 증성자 계측에 있어서 borate glass 보다 좋은 효율을 보인다는 것을 발견한 이래, 1961년 Anderson은 6%의 Li₂O를 함유한 유리 섬광체의 제작을 시작으로 Li₂O의 농축도를 17%, 27%로 증가시켜 나갔다^[1]. 그 후, 다양한 리튬의 농도로 제작된 유리 섬광체에 대한 연구가 더욱 발전되었다^[2]. 주물질에 변화를 주어 새로운 섬광체 개발에도 많은 발전을 가져와, terbium-lithium glass^[4], 6Li158Gd(11-3O3)^[5], LiPO₃(Bi) glass^[6] 등 주 물질에 대해 다양한 시도가 이루어져 왔으며, ZnS(Ag), 6Li-glass, NE102A를 사용하여 α, β, γ, 열중성자를 동시에 계측하는 장비에 대한 연구도 진행되었다^[7]. 최근에는 우주개발에 대한 관심이 고조되면서 우주비행사나 승무원의 피폭에 초점을 맞추어, 6Li-7Li glass를 이용한 'multi-moderator neutron spectrometer'의 개발도 진행되고 있다^[8].

많은 유리 섬광체에 대한 연구에서 활성체로서 가장 유력하게 지목되어 온 원소가 란타넘계열의 원소이다. Fluorophosphate glasses에 (III)가의 란타넘계열원소를 첨가하여 특성을 조사한 사례가 있고^[9], borophosphate glasses에 Eu³⁺, Sm³⁺, 그리고 Dy³⁺을 첨가하여 발광특성에 대한 연구도 진행되었다^{[10][11]}. 또한, 다양한 산화물의 x-ray 분석을 위한 발광체로서 리튬 인산염을 적용한 연구도 진행되었다^{[12][13]}. 최근에 들어와서 란타넘계열원소의 환원형태인 Eu²⁺^{[14][15]}, Ce³⁺^[16], 그리고 Tb³⁺^{[14][15][16]}에 대한 관심이 고조되면서 이들의 활성체로서의 가능성에 대한 연구에 초점이 맞추어지고 있다.

본 연구에서는 국내에서는 최초로 증성자 검출에 방사선의 광변환물질을 적용하는 관점에서 다가의 란타넘계열원소 산화물을 활성체로 첨가한 LiPO₃ 유리 섬광체에 대한 연구를 수행하였다. 이를 위해 제작의 최적조건을 도출하여 LiPO₃ 유리 섬광체를 제작 및 발광 스펙트럼을 측정하였고, 섬광체와 광전증배관을 결합시켜 구성한 증성자 계측시스템을 이용하여 증성자 파고스펙

트럼을 측정하여 에너지 분해능, 광 출력 등과 같은 광 및 섬광 특성을 측정하였다.

II. 본 론

1. 리튬 인산염(LiPO₃) 유리 섬광체의 제작 및 측정

그림 1은 LiPO₃ 유리 섬광체를 제작하기 위한 흐름도이다. 란타넘계열 원소를 활성체로 첨가한 유리 섬광체를 제작하는 과정으로서, 주 물질과 첨가된 활성체에 대한 성분조건은 표 1에 정리하였다. 분말형태의 시약을 정량하여 고온에 대한 저항성이 좋고 시약과 반응하지 않는 백금도가니 또는 환원역할을 하는 탄소도가니에 넣고, 900℃이상의 고온을 유지하는 전기로에 넣어 가열시킨다. 이 때 분말형태의 시약은 액화되고, 액화된 시약은 상온에서 냉각되어 유리형태가 된다. 일정시간 동안 가열된 액화시약은 상온에서 30분간 냉각시키고, 다시 290℃에서 1시간 가열한 뒤 냉각시켜 물리적인 강도를 높여주는 작업을 수행한다.

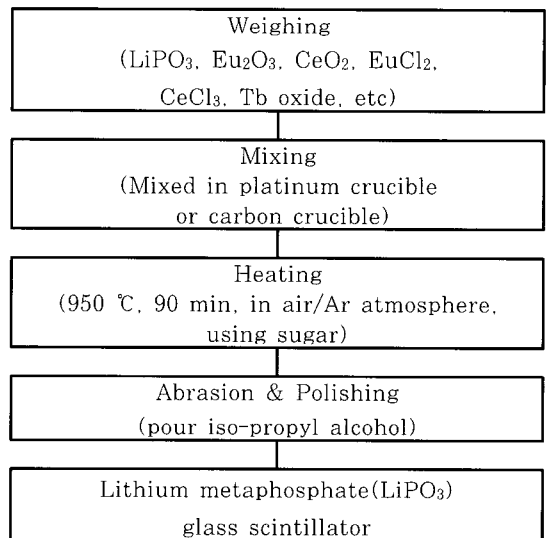


그림 1. 라튬인산염 유리 섬광체의 제작과정
Fig. 1. Fabrication process of LiPO₃ glass scintillator.

이 열처리 작업은 크기가 큰 유리 섬광체를 제작할 경우에 적용되며 냉각 중에 결합(crack)이 발생하는 것을 막아주는 역할을 한

다. 제작에 있어 최적 온도와 시간 조건을 도출하기 위해 다양한 실험을 수행한 결과, 투명도가 가장 좋게 나타난 온도 950℃와 가열 시간 90분을 모든 섬광체 시료에 적용하였다. 90분의 가열시간 동안 10분 간격으로 추가적인 혼합 작업을 수행하여 섬광체 시료의 균질성을 향상시키고, 투명도도 증가시켰다.

제작에 소요된 시약의 총량은 10g이며, 모든 활성체는 1wt.% 첨가하였다. 활성체중에 Eu는 Eu²⁺, Eu³⁺ 형태 두 가지를 제작하였는데, 가열동안 산소와 반응하여 산화되는 현상을 막기 위하여 Ar 분위기를 형성하고, 설탕을 시약에 첨가 하였다. 여기서 Ar 분위기와 설탕은 환원제 역할을 하게 되는데, 활성체가 산화되는 현상을 막아주고, 발광특성을 향상시키는 역할을 한다. Ce과 Tb를 첨가한 섬광체 시료도 설탕과 Ar 분위기를 각각 적용하여 시료를 제작하였다.

Ar 분위기를 형성하여 유리 섬광체를 제작할 경우, 전기로를 가열시키기 전에 시약이 들어있는 탄소도가니를 전기로에 넣고, 2시간 동안 전기로 내에 Ar을 주입하여 충분한 Ar 분위기가 되도록 한 후 온도를 950℃로 상승시킨 뒤 이 온도에서 90분 동안 가열하여 섬광체를 제작하였다. 제작된 대부분의 시료는 무색의 투명한 유리 형태로 나타났으나, 일부에서는 활성체의 시약 색에 따라 약간의 색깔을 띠었다.

발광스펙트럼과 중성자 에너지 스펙트럼을 측정하기 위한 시편은 지름 25mm, 길이 5mm의 원통형으로 제작하였고, 이런 형태로 제작하기 위하여 두랄루민으로 제작된 링을 사용하였다. 두랄루민은 고온에서 잘 견디며, 중성자에 대해 비교적 투명하기 때문에 유리 섬광체 제작에 이용되었다.

표면작업은 100~1200 mesh abrasive cloth를 이용하여 섬광체 표면을 연마한 후, polishing cloth 위에서 6 micron Polishing compounds를 사용하여 연마하였다.

광발광 측정은 325 nm의 He-Cd 레이저광을 이용하여 상온에서 측정하였다. 발광된 빛은 렌즈를 이용하여 집광되었으며, 1m의 monochromator와 GaAs 광전자증배관을 사용하여 그 스펙트럼을 분석하였다. 측정신호의 잡음을 줄이기 위해서 표준방법인 'Lock-in 측정법'을 사용하였으며, Chopper의 주파수 속도는 300ms이고, 레이저빔의 직경은 약 0.3 mm,

빛의 세기는 약 20mW이었다.

측정된 광발광의 크기의 단위는 전압으로 표시되는데, 이 값이 작을수록 발광의 크기가 작다는 것을 의미한다.

중성자 파고스펙트럼은 펄스파고분석법으로 측정하였고, 고전압전원은 3102D(CANBERA), 증폭기는 2015A (CANBERA), MC-A 카드는 ULS 1202를 사용하였다.

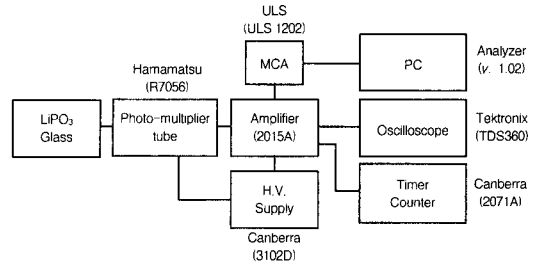


그림 2. 중성자 검출시스템
Fig. 2. Neutron detection system.

중성자 선원은 Ra-Be 중성자 선원으로 방사능은 10 mCi이며, 이 중성자 선원에서 발생하는 중성자를 감속시키기 위한 감속재로서 폴리에틸렌 실린더를 이용하였는데, 직경이 150 mm, 높이가 150 mm인 실린더를 이용하였다. 광전자증배관(PMT)은 R7056(Hamamatsu) socket assembly는 E2624(Hamamatsu)를 이용하였는데, 섬광검출기를 제작하기 위해 광전자증배관에 광학용 접착제인 BC-630(BICRON) optical grease를 바르고, 유리 섬광체를 결합하되 기포가 생기지 않도록 주의하였다.

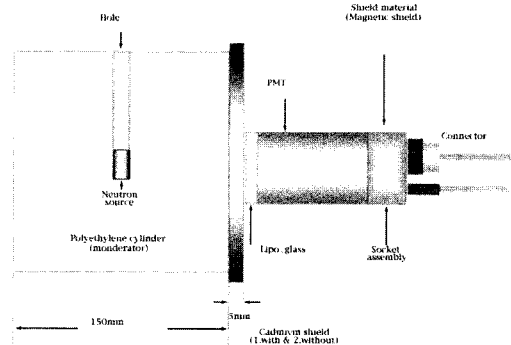


그림 3. LiPO₃ 유리 섬광체를 이용한 중성자 검출시스템 구성
Fig. 3. Neutron detection system structure using LiPO₃ glass scintillator.

표 1. 유리 섬광체 시료의 제작조건

Table 1. Fabrication conditions of glass samples

Sample number	Activator	Remarks	Sample number	Activator	Remarks
N1	-		N15	Eu ₂ O ₃	
N17	Pr ₂ O ₃	yellow-green glass	N28	EuCl ₃ ·6H ₂ O	
N18	Nd ₂ O ₃	violet glass	N29	EuCl ₂	
N19	Sm ₂ O ₃		N32	EuCl ₂	sugar
N20	Gd ₂ O ₃		N35	EuCl ₂	Ar
N22	Dy ₂ O ₃		N36	EuCl ₂	not trans., Ar, sugar
N23	Ho ₂ O ₃	pink glass	N16	CeO ₂	
N24	Er ₂ O ₃	light violet glass	N31	CeCl ₃	
N25	Tm ₂ O ₃		N33	CeCl ₃	sugar
N26	Yb ₂ O ₃		N37	CeCl ₃	Ar
N27	Lu ₂ O ₃		N21	Tb ₂ O ₃	
			N34	Tb ₄ O ₇ (III,IV)	sugar
			N38	Tb ₄ O ₇ (III,IV)	Ar

- Base material : LiPO₃, fraction of activated elements : 1 wt.%
- Conditions : 950°C, 90 min, , fraction of sugar : 1 wt.% of base material
- Total amount of reagents : 10 g
- N1, N15 - N34 : Air atmosphere

이 부분을 알루미늄 박으로 감싸고, PMT로 유입되는 잡음(noise)을 차단하기 위해 일차적으로 절연용 비닐점착 테이프를 PMT외부에 감고, PMT의 물리적인 손상을 막고 자기장의 영향을 받는 PMT를 보호하기 위해 'Magnetic shield' 를 최종적으로 적용하였다^[17]. 섬광검출기의 표면은 폴리에틸렌 실린더에 밀착시켜서 실험을 수행하였고, 저속 중성자와 고속 중성자의 측정 정도를 비교하기 위해서 5 mm의 카드뮴 판을 적용하여 섬광검출기를 밀착시킨 후 실험을 진행하였다.

II. 실험결과 및 고찰

1. 유리 섬광체 시료의 발광스펙트럼 특성 분석

섬광체의 활성체로서 높은 이용율과 가능성을 내포하고 있는 란탄계열 원소들을 첨가하여, 섬광체가 가지는 광발광(photoluminescence, PL) 특성을 조사하였다. 이 측정에서 나타난 파장은 대부분의 경우 파장분포가 넓게 형성되었으

나 Eu³⁺, Tb, Dy의 경우에는 날카로운 피크를 형성하였다.

섬광물질에 있어서 주요 요구사항 중의 하나가 무색투명(colorless & transparency)이다. Pr, Nd, Ho, Er는 표 1과 같이 색을 띄었고, 이를 제외한 섬광체 시료가 무색투명한 형태로 제작이 이루어졌다. 시료 N36은 색을 띠고 동시에 불투명하고 비 균질한 형태를 나타냈다.

1.1. (III)가의 전하를 가지는 란탄계열 원소가 첨가된 섬광체의 발광스펙트럼

그림 4와 5에서는 Eu, Ce, Tb를 제외한 란탄계열 원소를 활성체로 첨가한 LiPO₃ 유리 섬광체 시료의 발광파장을 그래프로 나타냈다. 그래프 상의 x축은 380 ~ 900 nm 사이의 파장(wavelength)를 나타내고, y축은 광 발광강도(PL intensity)를 나타낸다. 광 발광강도는 임의의 단위를 이용하여 상대적인 강도 크기를 비교할 수 있도록 표시하였다.

활성체가 첨가되지 않은 섬광체 시료 N1과 (III)가의 전하를 띄는 Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Pr, Nd, Sm, Gd, 그리고 Dy가 활성체로 첨가된 시료 N17-20, 22의 발광스펙트럼을 분석

해 볼 때, Sm과 Dy가 첨가된 시료를 제외한 나머지 시료는 활성체가 첨가되지 않은 시료 N1의 발광스펙트럼과 동일한 형태를 보여주고 있다.

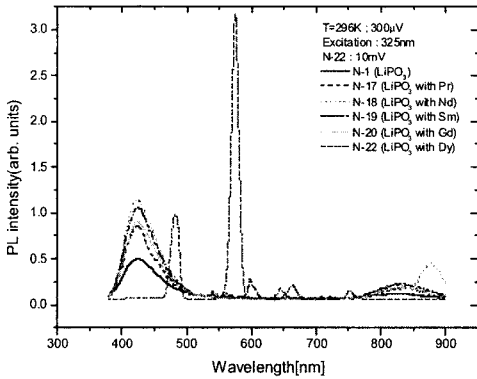


그림 4. Pr, Nd, Sm, Gd, Dy의 발광스펙트럼
Fig. 4. Photoluminescence of Pr, Nd, Sm, Gd, Dy.

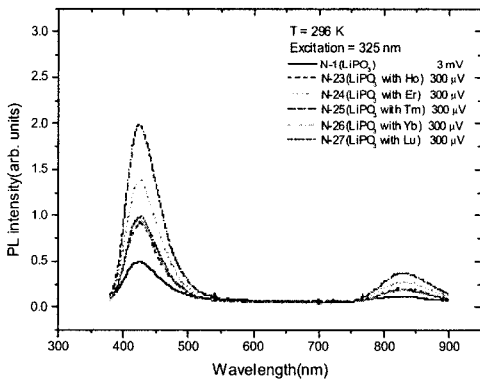


그림 5. Ho, Er, Tm, Yb, Lu의 발광스펙트럼
Fig. 5. Photoluminescence of Ho, Er, Tm, Yb, Lu.

이들은 모두 428 nm에서 파장피크를 나타내는데, 이는 란탄계열 원소가 활성체로서 역할을 하여 형성된 것이 아니라, 주물질인 LiPO₃가 가지는 고유한 발광스펙트럼이다. 따라서, 란탄계열 원소의 일부는 LiPO₃ 유리 섬광체에 첨가되는 활성체로서의 가능성이 없다는 결과를 나타낸다. 모든 시료 중에 가장 좋은 발광강도를 가지는 것은 N22(with Dy)이고, N19(with Sm)도 몇 개의 약한 피크를 형성하였다. 이 두 시료는 Sm이 첨가된 LiPO₃의 발광강도가 본 연구에서 비교적 낮게 나타났다는 점을 제외하고는 이전의 연구결과와 동일하다^[11].

1.2. Europium(Eu)를 첨가한 섬광체의 발광스펙트럼

Eu³⁺가 첨가된 유리 섬광체의 발광 피크는 620 nm로 잘 알려져 있다^[10]. 그림 6은 Eu를 활성체로 첨가하고, 각기 다른 제작 조건을 적용한 시료들의 발광특성을 나타낸 그래프이다. 420 ~ 440 nm 영역에서 나타나는 피크는 시료 내에 Eu²⁺가 존재하고 있다는 것을 의미한다. 그림 6에서 형성된 발광스펙트럼을 분석해 볼 때, LiPO₃ matrix 내에 첨가된 Eu³⁺의 화학적인 형태(oxide, chloride)에 상관없이 동일한 발광스펙트럼을 형성한다. EuCl₂가 활성체로 첨가된 시료에서 Eu²⁺는 대부분이 Eu³⁺로 산화되었다. 하지만, 환원제로 설탕을 첨가하거나 Ar 분위기를 조성하였을 경우 Eu²⁺는 산화되지 않고 대부분이 Eu²⁺로 남아서 좋은 발광강도를 보여주고 있다.

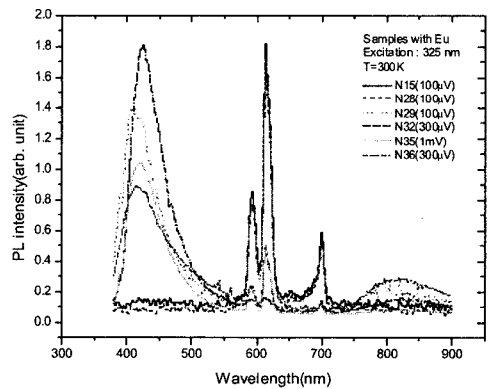


그림 6. LiPO₃:Eu 유리 섬광체의 발광스펙트럼
Fig. 6. Photoluminescence of LiPO₃:Eu glasses.

설탕 첨가와 Ar 분위기의 조성을 동시에 적용한 시료 N36의 경우, Eu²⁺의 산화가 전혀 일어나지 않아 약 420 nm에서만 피크를 형성하고, 발광강도 또한 상당히 높은 것으로 나타났으나, 시료 자체가 불투명하고 비 균질하여 실제로 유리 섬광체로서 적용하기에는 불가능한 것으로 나타났다.

1.3. Cerium(Ce)를 첨가한 섬광체의 발광스펙트럼

그림 7과 표 2는 Ce가 활성체로 첨가된 섬광체 시료의 발광스펙트럼과 발광강도를 나타내고 있다. 시료 N16에서 660 nm에서 나타난 파장

피크는 Ce^{4+} 로서 380 nm 및 390 nm에서 나타난 Ce^{3+} 의 발광강도보다 매우 낮은 값을 보여 주고 있다. Ce^{3+} 의 발광강도가 최고로 나타난 시료 N33은 탄소도가니를 이용하고, 설탕을 환원제로 첨가하여 제작한 것이다. Ce^{3+} 의 발광스펙트럼은 다른 활성체와는 달리 자외선 영역에서 형성되었다는 점이 큰 차이로 나타났다.

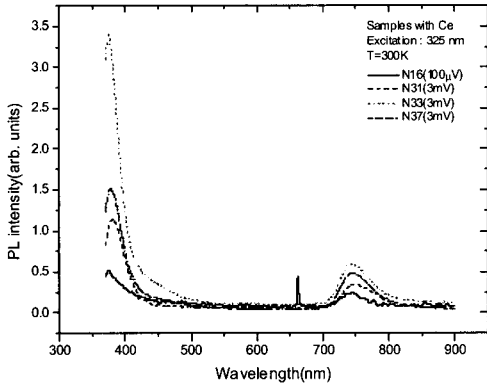


그림 7. $LiPO_3:Ce$ 유리 섬광체의 발광스펙트럼
Fig. 7. Photoluminescence of $LiPO_3:Ce$ glasses.

표 2. $LiPO_3:Ce$ 유리 섬광체의 발광특성

Table 2. PL characteristics of $LiPO_3:Ce$ glass scintillators.

Sample number	Strongest peak [nm]	PL intensity [arb. units]	
Ce	N16	660	0.5
doped	N31	380	30
samples	N33	390	100
	N37	380	45

1.4. Terbium(Tb)를 첨가한 섬광체의 발광스펙트럼

그림 8과 표 3은 Tb가 활성체로 첨가된 섬광체 시료의 발광스펙트럼과 발광강도를 나타내고 있다. Tb의 경우 앞서 표 1에서 설명한 것과 같이 시료 N21을 제외한 나머지는 Tb^{3+} 와 Tb^{4+} 가 혼합되어 있는 시약을 이용하였다.

Tb의 경우 가시광 중에 녹색 영역인 545 nm 및 550 nm에서 피크를 보여주고 있다. 시료 N34와 N38에서는 Tb^{3+} 과 Tb^{4+} 가 혼합된 시약을 사용하였으나, Tb^{4+} 에 의해 형성된 피크는

형성되지 않았다. 이는 환원제로서 설탕을 첨가하거나 Ar 분위기에서 섬광체 시료를 제작하였기 때문에, Tb^{3+} 가 Tb^{4+} 로 산화되는 것을 막아 주고, Tb^{4+} 가 환원제 영향으로 Tb^{3+} 로 환원되어, Tb^{4+} 에 의한 피크는 나타나지 않고, 상대적으로 Tb^{3+} 에 의한 피크는 크게 형성된 것으로 판단된다.

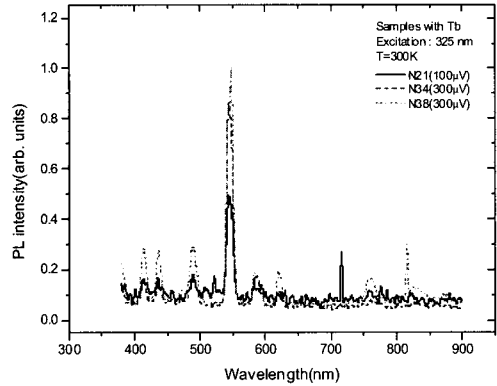


그림 8. $LiPO_3:Tb$ 유리 섬광체의 발광스펙트럼
Fig. 8. Photoluminescence of $LiPO_3:Tb$ glasses.

표 3. $LiPO_3:Tb$ 유리 섬광체의 발광특성

Table 3. PL characteristics of $LiPO_3:Tb$ glass scintillators.

Sample number	Strongest peak [nm]	PL intensity [arb. units]	
Tb	N21	545	0.5
doped	N34	545	2.4
samples	N38	550	3.3

2. 중성자 검출 실험

발광강도를 높게 형성시키는 활성체로서 Bi^{3+} , Ce^{3+} , Eu^{2+} , Tb^{3+} 가 확인되었으며, 본 실험실에서 보유하고 있는 광전증배관과의 결합성이 상대적으로 좋은 Bi^{3+} , Ce^{3+} , Eu^{2+} 에 대해 중성자 검출실험을 진행하였다. 각각의 유리 섬광체를 이용한 중성자 검출실험에 세 가지의 기하학적 조건을 적용하였다. 백그라운드 측정, 선원을 폴리에틸렌 중심에 놓은 상태에서의 측정, 5 mm의 카드뮴 판을 적용한 상태에서의 측정, 이렇게 세 가지의 측정 조건 하에서 중성자 계측실험을 수행하였다. 계측시간은 600초(live tim-

ε)로 고정하였고, 각각의 유리 섬광체에 대해 동일한 조건을 적용하여 파고스펙트럼을 획득하여, 결과를 분석하였다.

폴리에틸렌 실린더만 적용하여 검출실험을 수행한 경우 중성자 검출에 있어서 높은 계수 값을 보여주었고, 카드뮴 판을 적용하였을 경우 앞서 언급한 바와 같이 약 0.5 eV의 저속 중성자가 카드뮴 판에 모두 흡수되어 전체적인 스펙트럼의 형태가 약간 떨어지는 경향을 보였다.

발광스펙트럼 측정실험에서 가장 좋은 발광강도를 보였던 LiPO₃:Ce³⁺ 유리 섬광체를 적용한 섬광검출기가 가장 좋은 중성자 파고스펙트럼을 나타내고 있다. 발광피크가 광전증배관의 최고 반응파장인 420 nm와 일치하는 LiPO₃:Eu²⁺ 유리섬광체는 광전증배관의 좋은 결합성을

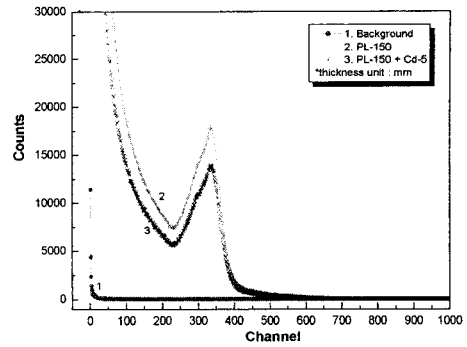


그림 11. LiPO₃(Ce) 유리 섬광체의 Ra-Be 중성자선에 대한 파고스펙트럼

Fig. 11. Pulse height spectra of LiPO₃(Ce) glass scintillator to Ra-Be neutron Radiation.

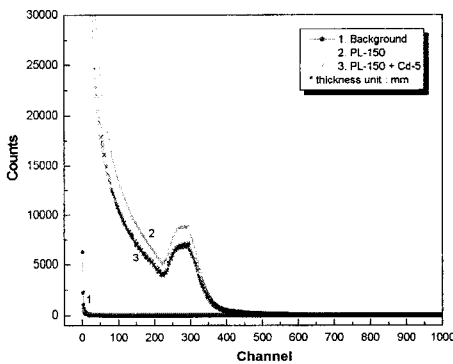


그림 9. LiPO₃(Bi) 유리 섬광체의 Ra-Be 중성자선에 대한 파고스펙트럼

Fig. 9. Pulse height spectra of LiPO₃(Bi) glass scintillator to Ra-Be neutron Radiation.

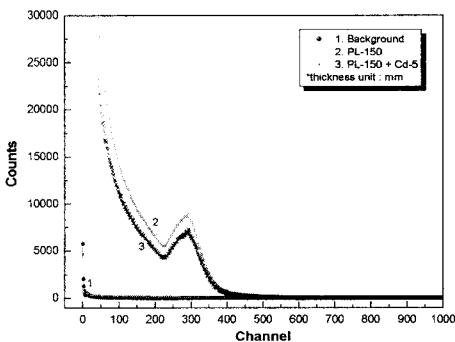


그림 10. LiPO₃(Eu) 유리 섬광체의 Ra-Be 중성자선에 대한 파고스펙트럼

Fig. 10. Pulse height spectra of LiPO₃(Eu) glass scintillator to Ra-Be neutron Radiation.

가지고 있으나 상대적으로 낮은 발광강도를 가지고 있어 중성자 파고스펙트럼이 다른 유리 섬광체에 비해 좋지 않은 것으로 나타났다. LiPO₃:Bi³⁺ 유리 섬광체는 발광피크가 690 nm에 발광영역이 600 nm에서 780 nm 사이로서 광전증배관과의 결합조건이 다른 유리 섬광체와 비교해 볼 때 상대적으로 가장 좋지 않지만, LiPO₃:Eu²⁺ 유리 섬광체를 이용한 중성자 검출실험에서 나타난 스펙트럼 결과와 거의 동일한 형태와 계수값을 보여주고 있다. 이것은 광전증배관과의 결합성은 좋지 않지만, 상대적으로 좋은 효율을 가진다는 의미가 된다. 따라서, LiPO₃:Bi³⁺ 유리 섬광체의 발광파장에 대해 좋은 반응파장을 가지고 있는 광전증배관을 결합시켜 섬광검출기를 구성한다면 더욱 좋은 중성자 검출실험 결과를 얻을 수 있을 것으로 예상된다.

표 3. LiPO₃ 유리 섬광체의 피크채널, 에너지 분해능과 광출력

Table 3. Peak Channel, energy resolution and relative light output obtained from LiPO₃ glass scintillators.

Sample	Peak Channel	Energy Resolution(%)	*Relative Light output(%)
LiPO ₃ (Bi)	278	39.5	34.2
LiPO ₃ (Eu)	294	40.6	36.1
LiPO ₃ (Ce)	335	32.2	41.3
Remark	* CsI(Tl)를 100로 했을때의 상대치		

표 3은 파고스펙트럼으로부터 구한 LiPO₃:-

$\text{Bi}^{3+}, \text{Eu}^{2+}, \text{Ce}^{3+}$ 유리 섬광체의 피크체널과 에너지 분해능, 그리고 광출력을 나타내었다. 성능 평가면에서 Ce^{3+} 를 활성체로 첨가한 LiPO_3 유리섬광체가 좋은 것으로 나타났다.

III. 결 론

본 연구에서는 리튬 인산염(LiPO_3)에 란타넘 계열의 원소를 1 wt.% 첨가하여 유리 섬광체를 제작하고, 란타넘 계열 원소의 활성체로서의 가능성을 판단하기 위하여 monochromator를 이용하여 광발광 특성을 분석하였다.

시약을 액화시키는 가열조건으로 시간과 온도를 조절함으로써 최적의 투명도를 얻어낼 수 있는데, 본 실험에서는 950°C , 90 분의 가열조건을 적용하였다. 이러한 가열조건에서 LiPO_3 에 란타넘 계열 원소를 첨가하여 유리 섬광체 시료를 제작하였는데, Pr, Nd, Gd, Ho, Er, Tm, Yb, Lu은 활성체를 첨가하지 않은 시료 'N1'과 같은 피크파장을 나타내는 것으로 보아 활성체로서의 이용 가능성이 없는 것으로 나타났다. Eu의 경우, Eu^{3+} 은 620 nm, Eu^{2+} 는 420 ~ 440 nm에서 각각 피크를 형성하였고, 환원제 및 Ar 분위기를 적용할 경우, Eu^{2+} 의 발광강도가 상당히 높아지는 것을 알 수 있었다. Ce^{3+} 의 발광스펙트럼은 자외선 영역인 380 ~ 390 nm에서 피크를 형성하였고, Ce^{4+} 는 환원작용으로 인해 660 nm에서 Ce^{3+} 에 비해 상대적으로 낮은 발광강도를 보여주었다. Tb의 경우 가시광 중에 녹색(green) 영역인 545 ~ 550 nm에서 피크를 보여주고 있다. Tb^{3+} 와 Tb^{4+} 가 혼합된 시약을 활성체로 이용하였으나, 환원조건을 적용하였을 경우 Tb^{4+} 도 환원되어 Tb^{3+} 가 되어 그래프 상에서는 Tb^{3+} 의 스펙트럼만이 형성되었다. Eu^{2+} 와 Tb^{3+} 은 Ar 분위기에서, Ce^{3+} 는 설탕을 환원제로 첨가하여 시료를 제작하였을 경우에 가장 좋은 발광강도를 나타내는 것으로 보아 주 물질 및 활성체 시약의 종류에 따라 발광강도가 최고가 되는 환원조건은 다른 것으로 판단된다. 결과적으로 대부분의 활성체가 환원조건을 적용하였을 때 발광강도가 더욱 좋아지는 것을 알 수 있었다.

발광특성 분석결과 광전증배관과 결합하여 섬광검출기로 제작 가능한 유리 섬광체는 LiP-

$\text{O}_3:\text{Bi}^{3+}, \text{Ce}^{3+}, \text{Eu}^{2+}$ 로 나타났다. 유리 섬광체와 광전증배관을 결합하여 섬광검출기를 제작하고 이를 중성자 검출시스템에 적용하여 중성자 검출실험을 수행하였다. Ra-Be 중성자 선원의 스펙트럼을 측정된 결과, 위의 세 가지 유리 섬광체 중 $\text{LiPO}_3:\text{Ce}^{3+}$ 유리 섬광체가 가장 좋은 효율을 보여주었다. 나머지 두 개의 유리 섬광체도 스펙트럼이 나타났으나, 상대적으로 효율은 떨어지는 것으로 나타났다. 이 실험을 통해 LiPO_3 유리 섬광체는 중성자 검출에 적용할 수 있는 가능성을 보여 주었고, 중성자 검출시스템에 적용 가능성이 있는 것으로 나타났다.

감사의 글

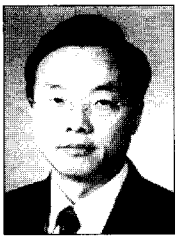
본 연구는 방사선안전기술연구센터(iTRS)의 지원에 의해서 수행한 연구결과의 일부입니다.

참 고 문 헌

- [1] L.A. Wraight, D.H.C. Harris, P.A. Egelstaff, Nucl. Instr. and Meth. Vol.33, pp.181-193, 1965.
- [2] V.I. Arbuzov, N.Z. Andreeva, V.A. Vitenko, M.A. Milovidov, Radiation Measurements, Vol.25, No. 1-4, pp. 475-476, 1995.
- [4] G. Zanella, R. Zannoni, R.Dall'Igna, P. Polato, M. Bettinelli, Nucl. Instr. and Meth. Vol.359, pp.547-550, 1995.
- [5] J.B. Czirr, G.M. MacGillivray, R.R. MacGillivray, P.J. Seddon, Nucl. Instr. and Meth. Vol.424, pp.15-19, 1999.
- [6] V.A. Tarasov, N.I. Shevtsov, I.I. Mirenskaya, A.B. Blank, Nucl. Instr. and Meth. Vol.438, pp.577-580, 1999.
- [7] Shingo Taniguchi, Masashi Takada, Takashi Nakamura, Nucl. Instr. and Meth. Vol.460, pp.368-373, 2001.

- [8] Shigekazu Usuda, Nucl. Instr. and Meth. Vol.356, pp.334-338, 1995.
- [9] K. Binnemans, R. Van Deun, C.G. Orller-Warlang, J.L. Adam, Journal of Non-Crystalline Solids, Vol.238, pp.11-29, 1998.
- [10] V. Aruna, N. Sooraj Hussain, K. Rajamohan Reddy, et al., Material Letters, Vol.33, pp.201-206, 1998.
- [11] V.Aruna, N. Sooraj Hussain, S. Buddhudu, Materials Research Bulletin Vol.33, No. 1, pp.149-159, 1998.
- [12] A.B. Blank, N.I. Shevstov, I.I. Mirenskaya, Z.M. Nartova, Zhurn. Analit. Khimii. Vol.45 p.1724, 1980.
- [13] N.I. Shevstov, A.B. Blank, I.I. Mirenskaya, Z.M. Nartova, Patent of Russian Federation No. 1.599.734, reg.15 March, 1993.
- [14] Renata Reisfeld, Michael Gaft, Tsiala Saridarov, Gerard Panczer, Marina Zelner, Materials Letters Vol.45, pp.154-156, 2000.
- [15] S.V. Godbole, J.S. Nagpal, A.G. Page, Radiation Measurements Vol.32, pp.343-348, 2000.
- [16] S. Baccaro, R. Dall'Igna, P. Fabeni, M. Martini, J.A. Mares, F. Meinardi, M. Nikl, K. Nitsch, G.P. Pazzi, P. Polato, C. Susini, A. Vedda, G. Zanella, R. Zannoni, Journal of Luminescence Vol.87-89, pp.673-675, 2000.
- [17] William R. Leo, "Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments," Springer-Verlag, NewYork, pp.197-199, 1987.

著 者 紹 介



황 주 호

1956년 3월 22일생.
 1982년 2월 서울대학교 원자핵공학과 졸업(공학사).
 1984년 3월 Georgia Institute of Technology School of Nuclear Engineering 졸업(공학석사)

1986년 9월 Georgia Institute of Technology School of Nuclear Engineering 졸업(공학박사).

1986년 9월~1991년 8월 한국원자력연구소 사후핵연료관리부 선임연구원.

1987년 2월~1987년 7월 독일 칼스루헤연구소 후행핵주기연구부 파견연구원.

1989년 9월~1989년 12월 한국과학기술원 원자력과 강사.

1999년 5월~2001년 4월 한국과학기술평가원 원자력전문위원.

1991년 9월~현재 경희대학교 원자력공학과 교수.
 주관심분야 : 방사성폐기물 관리, 방사선 계측 및 응용분야



신 상 원

1974년 4월 23일생.
 2001년 8월 경희대학교 원자력공학과 졸업(공학사)
 2002년 3월~현재 경희대학교 일반대학원 원자력공학과 석사과정 재학중.

주관심분야 : 중성자 검출시스템, 리튬함유 유리 섬광체.

**최 석 호**

1958년 5월 8일생.
 1981년 2월 서울대학교 물리
 학과 졸업(이학사).
 1984년 2월 KAIST 물리학
 과 졸업(이학석사).
 1987년 2월 KAIST 물리학
 과 졸업(이학박사).

1987년 7월~1991년 2월 한국표준연구소 선임
 연구원.

1989년 1월~1990년 1월 미국표준기술연구소
 (NIST) 객원연구원.

1993년 3월~1996년 2월 경희대학교 물리학과
 장.

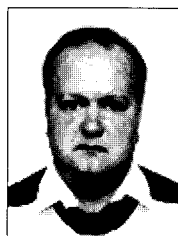
1998년 9월~1999년 8월 호주국립대학(ANU)
 객원교수.

2000년 9월~현재 경희대학교 전자정보학부 전
 공지도교수 겸 교학과장.

2001년 3월~현재 자연과학종합연구원 원장.

1991년 3월~현재 경희대학교 물리학과 교수.

주관심분야 : 반도체 나노결정, 실리콘계 반도체,
 유·무기 EL 및 소자, CVD 공정.

**Sumarokov
Stanislav Yurievich**

1962년 8월 14일생.
 1985년 Kharkov State
 university Department
 of Chemistry 졸업
 (Bachelor)

1995년 Institute for Sin-
 gle Crystals Department of Chemistry
 졸업(Ph. Doctor)

1985년 9월~1988년 8월 The Vysoxopoege
 secondary school Teacher of Chemistry.

1988년 9월~현재 Institute for Single
 Crystals of National Academy of Scien-
 ce of Ukriane Scientist.

주관심분야 : CsI(Tl,Br) crystals, LiPO₃
 glass scintillator.