

# Thermoluminescence Kinetics of LYGBO Crystal

Sunghwan Kim\*

Department of Radiological Science, Cheongju University

Received: January 03, 2023. Revised: February 06, 2023. Accepted: February 28, 2023.

## ABSTRACT

In this study, the thermoluminescence kinetics of electron trap in  $\text{Li}_6\text{Y}_{0.5}\text{Gd}_{0.5}(\text{BO}_3)_3$  ( $\text{LY}_{0.5}\text{G}_{0.5}\text{BO}$ ) scintillator for neutron detection composed of Li, Gd, and B with a high neutron response cross-section were investigated. The thermoluminescence glow curve of the  $\text{LY}_{0.5}\text{G}_{0.5}\text{BO}$  scintillation single crystal was measured and analyzed using the peak shape method, the initial rise method, and the machine learning algorithm to evaluate the physical parameters of the electron trap. The glow curve of the  $\text{LY}_{0.5}\text{G}_{0.5}\text{BO}$  scintillation single crystal consisted of a single peak. As a result of analyzing this peak, the activation energy, emission order, and frequency factor of the electron trap were 0.61 eV, 1.1, and  $1.7 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$ , respectively. In addition, the possibility of thermoluminescence analysis of scintillators using machine learning was confirmed.

Keywords:  $\text{Li}_6\text{Y}_{0.5}\text{Gd}_{0.5}(\text{BO}_3)_3$ , Scintillator, Thermoluminescence, Electron Trap, Glow Curve, TensorFlow

## I. INTRODUCTION

리튬보레이트 계열의 섬광체는 매질 속에 포함된 붕소가 열중성자에 대한 반응단면적(cross-section)이 3,840 b으로 매우 커서 열중성자 검출에 용이하며, 넓은 자외선 영역에서 투명성을 가지고, 화학적인 안정성이 높아 중성자 검출기로 연구되고 있다<sup>[1-3]</sup>. 또한 보레이트 섬광체에 다양한 3가 희토류원소를 활성화제로 도핑하여 X-선 영상, 핵물리 실험, plasma display panels (PDP), 레이저, 열형광선량계 등으로도 많은 연구가 수행되고 있다<sup>[4-7]</sup>. 리튬보레이트는 일반적으로  $\text{Li}_6\text{Ln}(\text{BO}_3)_3$  (Ln: Rare earth) 형태로 많이 연구되고 있으며<sup>[8-10]</sup>, 리튬보레이트 계열 섬광체 중  $\text{Li}_6\text{Y}(\text{BO}_3)_3$  (LYBO)와  $\text{Li}_6\text{Gd}(\text{BO}_3)_3$  (LGBO)는 감마선에 대해서도 우수한 섬광체 특성을 보인다<sup>[11,12]</sup>. 두 섬광체 모두 열중성자와 반응 단면적이 높은  $^6\text{Li}$  (520 b),  $^{10}\text{B}$  (3,840 b),  $^{157}\text{Gd}$  (237 kb),  $^{155}\text{Gd}$  (57 kb) 동위원소를 구성 성분으로 포함하고 있어서 중성자 측정에 매우 유용하지만, 감마

선에 대한 검출효율도 높아서 중성자와 감마선이 동시에 존재하는 혼합장에서는 중성자와 감마선 분리 측정에 어려움이 있다. 일반적으로 섬광체의 경우 방사선의 종류에 따라 발생하는 섬광감쇠시간 특성 차이를 이용한 펄스형상법(pulse shape method)으로 감마선과 중성자선을 분리 측정하고 있다<sup>[13]</sup>. Fawad 등은 감마선과 중성자선 분리 측정을 위하여 방사선의 종류에 따른 섬광감쇠시간 특성 차이를 증가시킬 목적으로 LYBO와 LGBO를 일정 몰비(x-mol%)로 혼합한  $\text{Li}_6\text{Y}_x\text{Gd}_{1-x}(\text{BO}_3)_3$  (LYGBO) 섬광체를 개발하고 그 특성에 대하여 보고하였다<sup>[14]</sup>.

본 연구에서는  $\text{LY}_{0.5}\text{G}_{0.5}\text{BO}$  섬광체에서 발광에 기여하는 전자포획준위의 물리적 특성을 열형광현상을 이용하여 규명하였다. 열형광곡선의 물리적 인자(kinetic parameter)인 활성화에너지(E), 주파수 인자(s) 및 발광차수(m)를 열형광곡선에 대한 피크형상법, 초기가온법 및 텐서플로우 인공지능 라이브러리를 이용한 기계학습법으로 결정하였다.

\* Corresponding Author: Sunghwan Kim E-mail: kimsh@cju.ac.kr  
Address: 298, Daesungro Cheongju, Choongcheongbukdo

Tel: +82-43-229-7992

## II. MATERIAL AND METHODS

열형광(Thermoluminescence; TL)은 매질에 조사된 방사선 에너지를 흡수한 가전자대의 전자가 전도대로 여기된 후 전자포획준위에 포획된 상태에서 열을 가하였을 때 포획된 전자가 재여기되어 기저준위로 내려오면서 빛을 방출하는 현상이다<sup>[15]</sup>. 이때 발생하는 형광량이 조사한 방사선 선량에 비례하므로 개인피폭선량계로서 활용되고 있다. Fig. 1에서 열형광현상을 에너지밴드로 설명하고 있다. 입사된 방사선의 에너지를 흡수하여 전도대로 여기된(①) 전자 중 대부분은 짧은 시간 동안 섬광으로 방출되지만(②), 일부가 첨가된 활성제에 의해 생성된 전자포획준위에 포획되며(③), 이때 전자와 같이 생성된 정공은 정공포획준위에 포획되게 된다. 포획준위에 포획된 전자는 열에너지에 의해 재여기된 후(⑤), 재결합중심에서 전자와 정공이 재결합하면서 가시광선영역의 빛으로 방출된다(④)<sup>[15]</sup>. 이때 방출되는 빛의 양은 시료에 가해주는 온도에 따라 결정되며, 이를 열형광곡선(glow curve)라고 하며, 이 곡선을 해석하면 전자포획준위에 대한 물리적인 정보를 구할 수 있다.

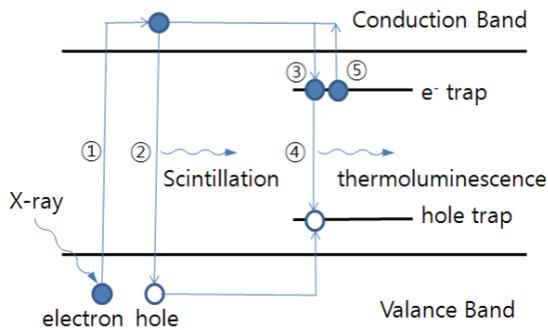


Fig. 1. Schematic Energy Band Diagram of Scintillation and Thermoluminescence.

열형광곡선 분석법으로 피크형상법<sup>[16]</sup>, 초기상승법<sup>[17]</sup>, 가온율법<sup>[18]</sup> 등이 있으며, 최근 인공지능 라이브러리를 이용한 포획준위의 물리적 인자 해석 등이 수행되고 있다<sup>[19]</sup>. 본 연구에서는 피크형상법, 초기상승법 및 인공지능을 이용한 포획준위의 물리적 인자를 결정하고 그 결과를 비교하였다.

Chen<sup>[16]</sup>이 제안한 피크형상법은 단일 열형광강도 곡선에서 피크의 중심온도  $T_g$ 와 TL 강도의 절반 높이에 해당하는 지점에서 피크의 매개변수인  $\omega$ ,  $\tau$  및  $\delta$  값을 결정하고 이로부터 열형광 전자포획준위의 물리적 인자를 결정하는 방법이다. Chen<sup>[16]</sup>은 단일 열형광곡선 피크에서 Eq. (1), (2), (3)으로 열형광피크의 활성화에너지( $E$ )를 결정하였으며, Eq. (4)로 발광차수( $m$ ), Eq. (5)로 주파수인자( $s$ )를 결정하였다. 여기서,  $k$ 는 Boltzman 상수,  $T$ 는 가열온도,  $T_g$ 는 피크 온도,  $\mu_g (= \omega/\delta)$ 는 대칭인자 그리고  $\beta$ 는 가온율이다.

$$E_\omega = [2.52 + 10.2(\mu_g - 0.42)] \frac{kT_g^2}{\omega} - 2kT_g \quad (1)$$

$$E_\tau = [1.51 + 3(\mu_g - 0.42)] \frac{kT_g^2}{\tau} - [1.58 + 4.2(\mu_g - 0.42)] 2kT_g \quad (2)$$

$$E_\delta = [0.976 + 7.3(\mu_g - 0.42)] \frac{kT_g^2}{\delta} \quad (3)$$

$$m = e^{(-2.962 + 7.064\mu_g)} \quad (4)$$

$$s = e^{\left(\frac{E}{kT_g}\right) \frac{\beta}{kT_g^2} \left(1 + \frac{2kT_g}{E}\right)^{-1}} \quad (5)$$

$E$  : activation energy (eV)

$k$  : Boltzman's constant  $8.617 \times 10^{-5}$  (eV/K)

$\mu_g$  : symmetric factor ( $=\omega/\delta$ )

$T_g$  : peak temperature of glow peak (K)

$m$  : kinetic order

$s$  : frequency factor ( $s^{-1}$ )

$\beta$  : heating rate (K/s)

Garlick-Gibson 등은 열형광곡선의 초기 상승부에서 포획준위의 활성화에너지를 결정하는 방법을 제안하였으며, 이를 초기상승법이라고 한다<sup>[17]</sup>. 초기상승법은 열형광곡선에서 강도가 증가하는 초반부에서 활성화에너지를 다음 Eq. (6)으로 결정할 수 있다. 여기서,  $T$ 는 가열온도,  $I(T)$ 는 가열온도에 따른 열형광강도,  $E$ 는 포획준위의 활성화에너지,  $k$ 는 Boltzman 상수이다. Eq. (6)으로부터  $1/T$ 에 대한 열형광강도의 로그값  $\ln [I(T)]$ 의 그래프에서 직선의

기울기로부터 활성화에너지를 결정할 수 있다.

$$\ln[I(T)] = -\frac{E}{kT} + C \quad (6)$$

E : activation energy (eV)

I(T) : TL intensity of glow curve

k : Boltzman's constant  $8.617 \times 10^{-5}$  (eV/K)

T : temperature (K)

2015년 구글에서 오픈 소스로 공개한 텐서플로우는 기계학습 라이브러리로 파이썬을 활용하여 비전문가들도 쉽게 인공지능을 구현할 수 있게 되었다. Fig. 2는 텐서플로우를 이용한 열형광곡선 해석과정을 나타낸 것이다. 측정된 열형광곡선에서 피크 온도를 결정한 후, 측정값과 Basun 등이 제시한 열형광함수 Eq. (7)의 차이로 cost 함수를 정의하였다. 인공지능학습에서 cost 함수값을 최소화한다는 것은 실제 측정값을 정확히 해석할 수 있는 계산 결과를 도출한다는 의미이며, 열형광현상에 있어서는 발광에 기여하는 전자의 포획준위의 물리적 인자를 결정한다는 것이다.  $LY_{0.5}G_{0.5}BO$  섬광체의 열형광곡선 측정은 Fig. 3에서 보는 네오시스코리아의 열형광관독기(Neo TL Reader)를 사용하였으며, 실험에 사용된  $LY_{0.5}G_{0.5}BO$  섬광체 단결정을 보여준다.

$$I(T) = I_m m^{\frac{m}{m-1}} \exp\left(\frac{E}{kT} \frac{T-T_g}{T_g}\right) \times \left[ (m-1)(1-\Delta) \frac{T^2}{T_g^2} \exp\left(\frac{E}{kT} \frac{T-T_g}{T_g}\right) + Z_g \right]^{-\frac{m}{m-1}} \quad (7)$$

E : activation energy (eV)

I(T) : TL intensity of glow curve

k : Boltzman's constant  $8.617 \times 10^{-5}$  (eV/K)

m : kinetic order

$\Delta$  :  $2kT/E$

$Z_g$  :  $Z_g = 1 + (m-1)\Delta_g$

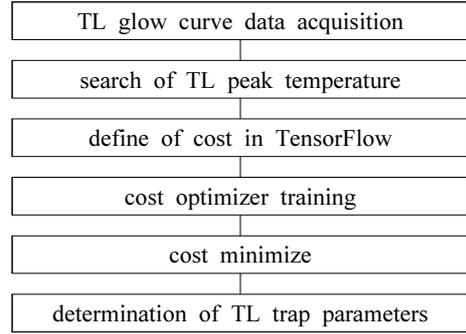


Fig. 2. Process of TL Analysis by using TensorFlow.

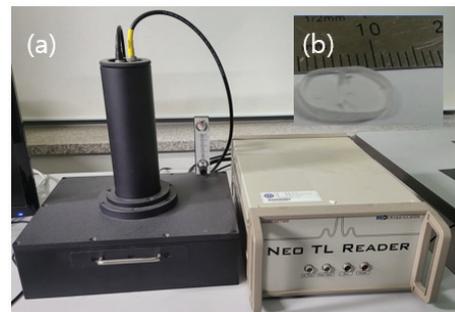


Fig. 3. (a) Neo TL Reader (NeosisKorea Co.) and (b)  $LY_{0.5}G_{0.5}BO$  Crystal.

### III. RESULT

#### 1. $LY_{0.5}G_{0.5}BO$ 섬광체의 열형광곡선 측정

Fig. 4는 Neo TL Reader로 측정한 열형광곡선을 보여주고 있다. Fig. 4에서 가온율( $\beta$ )은 5 K/s로 설정하였으며, 측정된 열형광관독기는 실험 범위 내에서 선형적으로 온도가 증가함을 확인할 수 있다. 측정된  $LY_{0.5}G_{0.5}BO$  단결정의 열형광곡선은 단일 피크로 구성되었음을 확인할 수 있다.

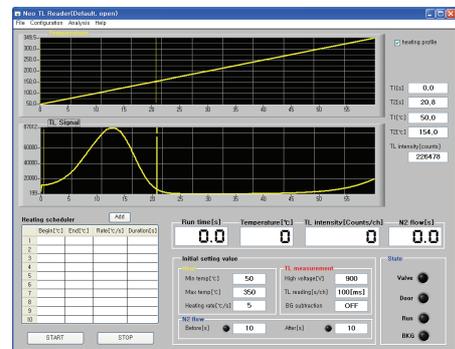


Fig. 4. GUI of TL Measurement System. (NeosisKorea Co.)

### 2. 피크형상법에 의한 TL 포획준위의 물리적 인자

Fig. 5는 LY<sub>0.5</sub>G<sub>0.5</sub>BO 단결정 시편에 X-선(MIS Co.,)을 조사한 후 가운을 5 K/s로 측정된 열형광곡선으로 피크 온도(T<sub>g</sub>)는 388.2 K이었다. 이때 조사 조건은 관전압이 70 kV, 관전류가 200 mA, 조사시간은 0.2 ms이었으며, 100 cm 거리에서 조사선량은 76 mR이었다. 피크의 최대치의 절반인 지점에서의 폭 ω는 49.3 K 이었고, 피크 중심에서 저온쪽 절반값에 해당되는 피크변수 τ값(=T<sub>g</sub>-T<sub>1</sub>)은 20.8 K, 고온쪽 절반에 해당되는 피크변수 δ값(=T<sub>2</sub>-T<sub>g</sub>)은 25.3 K이었으며, 대칭인자 μ<sub>g</sub>(=δ/ω)는 0.426 이었다. Eq. (1) ~ (5)를 이용하여 피크형상법으로 결정된 LY<sub>0.5</sub>G<sub>0.5</sub>BO 단결정 포획준위의 활성화에너지, 발광차수 및 주파수인자는 각각 0.611 eV, 1.05 및 1.80 × 10<sup>7</sup> s<sup>-1</sup> 이었다.

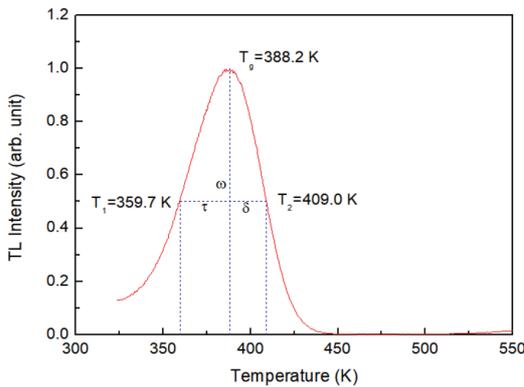


Fig. 5. Glow Curve and Peak Parameters of LY<sub>0.5</sub>G<sub>0.5</sub>BO Crystal at 5 K/s Heating Rate.

### 3. 초기상승법에 의한 전자포획준위의 활성화에너지

초기상승법은 발광차수와 관계없이 활성화에너지를 결정할 수 있으며, 열형광곡선의 가온시 초기 온도 상승부에서 활성화에너지를 결정한다. Fig. 6은 LY<sub>0.5</sub>G<sub>0.5</sub>BO 단결정의 열형광곡선 중 피크의 초기상승 부분에 대하여 ln(I) vs. 1/T 피팅한 것이다. 이때 피팅한 선형함수의 기울기로부터 활성화에너지를 결정하며, 초기상승법으로 결정된 LY<sub>0.5</sub>G<sub>0.5</sub>BO 단결정 내 포획준위의 활성화에너지는 0.590 eV 이었다.

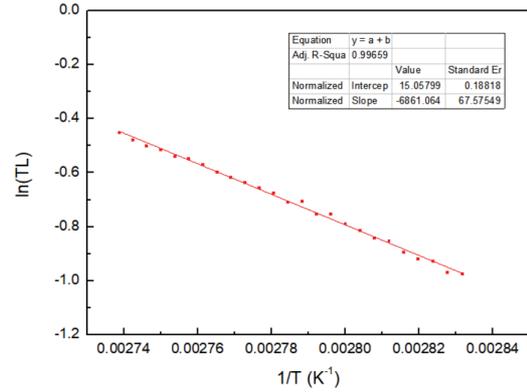


Fig. 6. Determination of Activation Energy of LY<sub>0.5</sub>G<sub>0.5</sub>BO Single Crystal by Initialize Method.

### 4. 텐서플로우 라이브러리를 이용한 기계학습

Fig. 7은 구글의 인공지능 라이브러리인 텐서플로우를 이용하여 기계학습으로 측정된 열형광곡선을 분석한 결과이다. 측정데이터(검은 색)와 텐서플로우로 학습한 결과(붉은 선)가 최대 1.3% 이내로 잘 일치하였다. 텐서플로우로 결정된 LY<sub>0.5</sub>G<sub>0.5</sub>BO 열형광 포획준위의 활성화에너지, 발광차수 및 주파수인자는 각각 0.605 eV, 1.10 및 1.67 × 10<sup>7</sup> s<sup>-1</sup> 이었다.

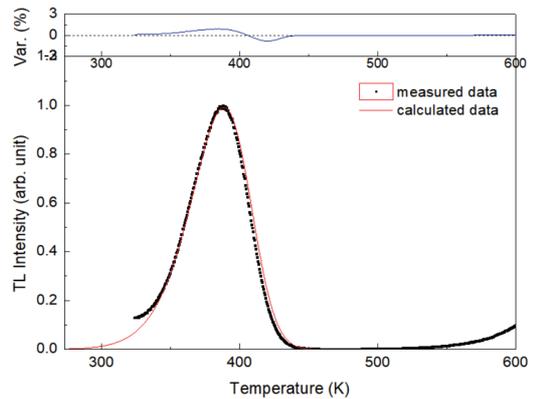


Fig. 7. Measured and Calculated TL Glow Curve of LY<sub>0.5</sub>G<sub>0.5</sub>BO by using TensorFlow.

## IV. DISCUSSION

Table 1은 피크형상법, 초기상승법 및 인공지능 학습법으로 결정한 LY<sub>0.5</sub>G<sub>0.5</sub>BO 섬광체의 열형광

포획준위 인자이다. 세 가지 측정 방법 모두 오차 범위 내에서 비슷한 결과를 얻었다. 초기상승법의 경우 가온시 초기 온도 상승부에서 분석된 결과이기 때문에 다른 측정방법에 비해 일반적으로 다소 낮게 측정되는 것으로 알려져 있다. 대부분의 섬광체에서는 방사선 입사 시 수십 마이크로초 이내에 즉시 발생하는 빠른 섬광과 시간적 지연에 의한 느린 섬광(afterglow)이 존재하며, 방사선의 종류에 따라 차이가 있다<sup>[20]</sup>. 활성제에 의한 전자포획준위에서의 재포획율은 느린 섬광현상을 증가시키는 역할을 하게 되며, 감마선 및 중성자 혼합 방사선장에서 중성자선 분리측정의 중요한 특성이 된다. LY<sub>0.5</sub>G<sub>0.5</sub>BO 전자포획준위의 발광차수(m)는 약 1.1로 열에너지에 의해 재여기된 전자의 경우 재결합율보다 재포획율이 더 우세한 결과로서 이는 감마선/중성자 분리측정에 더 장점이 있음을 의미하며, Fawad 등의 연구결과와 유사한 결론을 얻을 수 있다<sup>[14]</sup>.

Table 1. TL Trap Parameters of LY<sub>0.5</sub>G<sub>0.5</sub>BO Crystal.

Trap Parameters	Peak Shape Method	Initialized method	Machine Learning using TensorFlow
Activation Energy [E]	0.611 eV	0.590 eV	0.605 eV
Frequency Factor [s]	$1.80 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$	-	$1.67 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$
Kinetic Order [m]	1.05	-	1.10

## V. CONCLUSION

본 연구에서는 열형광측정법으로 리튬보레이트 계열의 LY<sub>0.5</sub>G<sub>0.5</sub>BO 단결정의 지연 섬광에 기여하는 전자포획준위의 물리적 인자를 결정하였다. 열형광측정법에 단결정 포획준위의 활성화에너지, 발광차수 및 주파수인자는 각각 0.61 eV, 1.1 및  $1.7 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$ 이었다. 아울러 기계학습을 이용한 섬광체의 발광 메커니즘 규명의 가능성을 확인하였다.

## Acknowledgement

이 논문은 2020-2022학년도에 청주대학교 보건의료과학연구소가 지원한 학술연구조성비(특별연구과제)에 의해 연구되었음

## Reference

- [1] C. W. E. van Eijk, "Inorganic-scintillator development", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Vol. 460, pp. 1-14, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(00\)01088-31](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(00)01088-31)
- [2] N. A. El-Faramawy, S. U. El-Kameesy, A. El-Agramy, G. Metwally, "The dosimetric properties of in-house prepared copper doped lithium borate examined using the TL-technique", Radiation Physics and Chemistry, Vol. 58, pp. 9-13. 2000. [https://doi.org/10.1016/S0969-806X\(99\)00361-8](https://doi.org/10.1016/S0969-806X(99)00361-8)
- [3] P. Becker, "Borate Materials in Nonlinear Optics", Advanced Materials, Vol. 10, No. 13, pp. 979-992, 1998. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1521-4095\(199809\)10:13%3C979::AID-ADMA979%3E3.0.CO;2-N](https://doi.org/10.1002/(SICI)1521-4095(199809)10:13%3C979::AID-ADMA979%3E3.0.CO;2-N)
- [4] M. Ignatovych, M. Fasoli, A. S. Kelemen, "Thermoluminescence study of Cu, Ag and Mn doped lithium tetraborate single crystals and glasses", Radiation Physics and Chemistry, Vol. 81, No. 9, pp. 1528-1532, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2012.01.042>
- [5] Y. Mori, I. Kuroda, S. Nakajima, T. Sasaki, S. Nakai, "New nonlinear optical crystal: Cesium lithium borate", Applied Physics Letters, Vol. 67, pp. 1818-1820, 1995. <https://doi.org/10.1063/1.115413>
- [6] T. Depci, G. I. Özbayoğlu, A. Yalmaz, A. NecmeddinYazıcı, "The thermoluminescent properties of lithium triborate (LiB<sub>3</sub>O<sub>5</sub>) activated by aluminum", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, Vol. 266, No. 5, pp. 755-762, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2007.12.094>
- [7] V. Jubera, J. P. Chaminade, A. Garcia, F. Guillen, C. Fouassier, "Luminescent properties of Eu<sup>3+</sup>-activated lithium rare earth borates and oxyborates", Journal of Luminescence, Vol. 101, No. 1-2, pp. 1-10, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0022-2313\(02\)00335-6](https://doi.org/10.1016/S0022-2313(02)00335-6)
- [8] J. P. Chaminade, O. Viraphong, S. Miyazawa, "One possible mechanism of spiral/footing growth of Cz-grown Li<sub>6</sub>Gd(BO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>", Journal of Crystal Growth,

- Vol. 237-239, No. 1, pp. 864-868, 2002.  
[https://doi.org/10.1016/S0022-0248\(01\)02029-2](https://doi.org/10.1016/S0022-0248(01)02029-2)
- [9] U. Rambabu, K. Annapurna, T. Balaji, J. V. Satyanarayana, K. Rajamohan Reddy, S. Buddhudu, "Fluorescence Spectra of  $\text{Eu}^{3+}$  and  $\text{Tb}^{3+}$  Doped  $\text{Na}_6\text{Ln}(\text{BO}_3)_3$  (Ln = La, Gd, Y) Phosphors", *Spectroscopy Letters*, Vol. 29, No. 5, pp. 833-839, 1996. <https://doi.org/10.1080/00387019608001614>
- [10] R. P. Yavetskiy, E. F. Dolzhenkova, M. F. Dubovik, T. I. Korshikova, A. V. Tolmachev, "Czochralski growth and optical properties of  $\text{Li}_6\text{Gd}_{1-x}\text{Eu}_x(\text{BO}_3)_3$  ( $x=0-1$ ) single crystals", *Journal of Crystal Growth*, Vol. 276, No. 3-4, pp. 485-490, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2004.11.398>
- [11] Y. W. Zhao, X. H. Gong, Y. J. Chen, L. X. Huang, Y. F. Lin, G. Zhang, Q. G. Tan, Z. D. Luo, Y. D. Huang, "Spectroscopic properties of  $\text{Er}^{3+}$  ions in  $\text{Li}_6\text{Y}(\text{BO}_3)_3$  crystal", *Applied Physics B*, Vol. 88, pp. 51-55, 2007. <https://doi.org/10.1007/s00340-007-2655-1>
- [12] J. Chen, Y. Li, G. Song, D. Yao, L. Yuan, S. Wang, "Growth and characterization of pure  $\text{Li}_6\text{Gd}(\text{BO}_3)_3$  single crystals by the modified Bridgman method", *Journal of Crystal Growth*, Vol. 294, No. 2, pp. 411-416, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2006.06.011>
- [13] H. Zhou, W. Xiao, H. Liu, T. Sun, C. Li, L. Liu, "A linear separation method for neutron/gamma discrimination with organic scintillators", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 1048, pp. 167879, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2022.167879>
- [14] U. Fawad, G. Rooh, H. J. Kim, H. Park, S. H. Kim, S. J. Khan, "Scintillation properties of  $\text{Li}_6\text{Y}_{0.5}\text{Gd}_{0.5}(\text{BO}_3)_3:\text{Ce}^{3+}$  single crystal", *Journal of Crystal Growth*, Vol. 410, pp. 18-22, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2014.09.047>
- [15] S. Basun, G. F. Imbusch, D. D. Jia, W. M. Yen "The analysis of thermoluminescence glow curves", *Journal of Luminescence*, Vol. 104, No. 4, pp. 283-294, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0022-2313\(03\)00082-6](https://doi.org/10.1016/S0022-2313(03)00082-6)
- [16] R. Chen, D. J. Huntley, G. W. Berger, "Analysis of Thermoluminescence Data Dominated by Second-Order Kinetics", *Physics State Solid*, Vol. 79, No. 1, pp. 251-261, 1983. <https://doi.org/10.1515/9783112493045-028>
- [17] N. S. Rawat, M. S. Kulkarni, D. R. Mishra, B. C. Bhatt, C. M. Sunta, S. K. Gupta, D. N. Sharma,, "Use of initial rise method to analyze a general-order kinetic thermoluminescence glow curve", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, Vol. 267, No. 20, pp. 3475-3479, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2009.08.002>
- [18] A. M. Sadek, H. M. Eissa, A. M. Basha, G. Kitis, "Development of the peak fitting and peak shape methods to analyze the thermoluminescence glow-curves generated with exponential heating function", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, Vol. 330, pp. 103-107, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2014.04.006>
- [19] N. D. Sang, H. H. Q. Thi, "Using the genetic algorithm to detect kinetic parameters of thermoluminescence glow curves", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, Vol. 517, pp. 33-42, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2022.02.009>
- [20] C. M. Bartle, A. Edgar, L. Dixie, C. Varoy, R. Piltz, S. Buchanan, K. Rutherford, "Novel methods for measuring afterglow in developmental scintillators for X-ray and neutron detection", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 651, pp. 105-109, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2011.01.001>

# LYGBO 단결정의 열형광 전자포획준위 인자

김성환\*

청주대학교 방사선학과

## 요 약

본 연구에서는 중성자 반응단면적이 높은 Li, Gd 및 B을 모체로 구성된 중성자 검출용  $\text{Li}_6\text{Y}_{0.5}\text{Gd}_{0.5}(\text{BO}_3)_3$  ( $\text{LY}_{0.5}\text{G}_{0.5}\text{BO}$ ) 섬광체의 전자포획준위에 대하여 조사하였다.  $\text{LY}_{0.5}\text{G}_{0.5}\text{BO}$  섬광 단결정에 대하여 열형광곡선을 측정하고 이를 피크형상법, 초기상승법 및 기계학습 알고리즘을 이용하여 분석하여 전자포획준위의 물리적인 인자를 평가하였다. LYGBO 섬광 단결정의 열형광곡선은 단일 피크로 이루어져 있으며, 이 피크를 분석한 결과 전자포획준위의 활성화에너지, 발광차수 및 주파수인자는 각각 0.61 eV, 1.1 및  $1.7 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$ 이었다. 아울러 기계학습을 이용한 섬광체의 열형광 해석의 가능성을 확인하였다.

중심단어: 리튬이트륨가돌리늄보레이트, 섬광체, 열형광, 전자포획준위, 열형광곡선, 텐서플로우

## 연구자 정보 이력

	성명	소속	직위
(단독저자)	김성환	청주대학교 방사선학과	교수