

논문 2003-12-1-03

**Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> 단결정 성장과 열형광 특성**

박강수\*, 안정근\*, 김동진\*, 황윤희\*, 김형국\*, 박명환\*\*, 강희동\*\*\*, 김도성\*\*\*\*

**Growth of Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> Single Crystal  
and Its Thermoluminescent Properties**

Kang-Soo Park\*, Jung Keun Ahn\*, Dong Jin Kim\*,

Yoon-Hwae Hwang\*, Hyung-Kook Kim\*, Myeong-Hwan Park\*\*,

Hee-Dong Kang\*\*\* and Do-Sung Kim\*\*\*\*

## 요 약

Czochralski 법으로 조직등가 물질인 Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> 단결정을 성장하고 열형광 특성을 조사하였다. 단결정 성장시 종자결정의 회전속도는 10 rpm, 인상속도는 0.18 mm · h<sup>-1</sup> 이하에서 core가 없는 양질의 단결정을 얻을 수 있었으며, X-선 회절분석을 통해 성장한 Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> 단결정의 구조는 정방정 계임을 확인하였다. 열형광 glow 곡선은 쉽게 분해할 수 있는 세 개의 peak들이 중첩되어 나타났으며, X-선에 대한 Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> 단결정 TLD의 열형광감도는 50 mGy에서 1.5 Gy까지의 선량범위에서 선형적으로 나타났다. 가온율법에 의한 열형광 glow 곡선 분석과 PL 스펙트럼 분석 결과에 의한 glow peak의 활성화에너지는 각각 0.93, 1.78, 2.25 eV으로 평가되었다.

## Abstract

Thermoluminescent properties of Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> single crystal grown by Czochralski method have been investigated. The high quality Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> single crystal without core was obtained at rotation speed of 10 rpm for seed crystal and pulling speed below 0.18 mm · h<sup>-1</sup>. The structure of Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> single crystal was classified as tetragonal by XRD analysis. The TL glow curve was composed with three overlapped peaks which can be easily deconvoluted and the TL response of Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> single crystal TLD to X-ray radiation is linear within the range of 50 mGy ~ 1.5 Gy. Activation energies of three TL glow peaks analyzed by the various heating rates method and PL spectrum were 0.93, 1.78 and 2.25 eV, respectively.

Key Words : Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> single crystal, Czochralski method, TLD

## I. 서 론

\* 부산대학교 물리학과(Department of Physics & RCDAMP, Pusan National University)

\*\* 대구보건대학 방사선과(Department of Radiologic Technology, Daegu Health College)

\*\*\* 경북대학교 물리학과(Department of Physics, Kyungpook National University)

\*\*\*\* 대구대학교 과학교육학부(Division of Science Education, Daegu University)  
<접수일자 : 2002년 11월 19일>

Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>는 압전재료로서 음파장치나 비선형 광학 등에 매우 유용하게 활용되며<sup>(1)</sup>, 격자상수 a=0.9479 nm, c=1.028 nm의 정방정계 구조를 갖는 결정이다<sup>(2)</sup>. 또한 Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>을 모체로 한 열형광선량계(thermoluminescent dosimeter, TLD)는 유효원자번호가 7.4로써 현재 까지 알려진 TLD 물질들 중 인체조직과 가장 가까우므로 에너지의존성에 대한 보정이 필요치 않으며<sup>(3)</sup>. 특히 Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>내의 B와 Li이 열증성

자 반응단면적이 매우 크므로 열중성자에 대한 열형광 감도가 높고<sup>[4]</sup>, 측정 후의 열처리가 필요 없는 등의 여러 가지 장점으로 인해 최근까지 많은 연구가 진행되고 있다<sup>[3, 5, 6]</sup>.

Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>을 TLD로 활용한 최초의 연구는 Mn을 활성화한 Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>:Mn 열형광체 분말<sup>[7]</sup>이지만 열형광의 파장이 광전증배관의 감도와 맞지 않아 열형광 감도가 매우 낮았으며, 이후 Cu를 활성화한 Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>:Cu가 개발되어<sup>[8]</sup> 열형광 감도를 개선하였으나, 이들 모두 분말형태로서 TLD로 사용하기에 매우 불편하며, 높은 흡습성으로 인해 공기 중에서 장시간 보관하면 감도가 크게 저하되는 단점이 있다. 최근에는 Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>:Cu, In과 Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>:Cu, In, Ag를 pellet 형태로 제작한 연구가 보고되고 있으나<sup>[5]</sup>, Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> 단결정 자체의 열형광 특성을 연구한 바는 많이 알려져 있지 않다.

한편, Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> 단결정 성장을 위하여 결정의 core, crack 등의 결함에 관하여 다양한 연구가 수행되어 왔으며<sup>[9]</sup>, 양질의 결정을 얻기 위해 hydrothermal 방법<sup>[10]</sup>, Bridgmann 법<sup>[1, 11]</sup>, Czochralski 법에 의한 성장연구<sup>[2]</sup> 등 성장방법을 달리하거나, 순수한 Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> 다결정분말을 사용하여 저항 전기로에서 결정을 얻는 연구<sup>[12]</sup> 등이 보고되고 있다.

본 연구에서 Czochralski 법에 의해 직접 Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> 단결정을 성장시키고 결정성장조건을 확립하며, 성장된 Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> 단결정의 열형광 glow 곡선과 PL 스펙트럼을 분석하여 열형광 glow peak의 활성화에너지를 구하였으며, X-선에 대한 선량의존성을 조사하여 TLD로서의 사용가능성을 조사하고자 한다.

## II. 측정장치 및 시료

### 1. 결정성장

본 연구에서는 고주파 유도가열로내에서 백금 도가니를 피가열체로 사용한 Czochralski 법으로 단결정을 성장시켰다. 결정 성장을 위한 원료 분말 Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>(99%, Aldrich Chemical Company Inc.)와 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(99.9%)를 1:2 화학당량비로 섞은 후 약 24시간 동안 ball mill하여 결정성장용 원료분말을 준비하였으며, 준비된 원료분말을 직경 60 mm, 높이 35 mm의 백금 도가니에 담고 1000 °C까지 가열한 후 그 상태

를 2 ~ 3일 동안 유지하면서 결정을 성장시켰다. 이때 Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> 단결정 반응식은 다음과 같다.

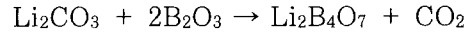


Fig. 1은 본 연구에서 사용한 단결정 성장 장치의 개략도이다. 결정성장에 사용된 고주파로는 가열주파수 140 kHz, 최대출력 10 kW이고 입력전원은 AVR(Automatic Voltage Regulator)를 설치하여 110±0.5 V로 안정시켰다.

Czochralski 법으로 단결정을 성장시킬 때 소결온도와 종자결정(seed crystal)의 인상속도 및 회전속도를 최적화하면 양질의 단결정을 얻을 수 있다. 본 연구에서는 컴퓨터로 제어되는 온도조절 장치를 이용하여 소결온도를 ±0.3 °C가 유지되도록 하였으며, 종자결정의 인상속도와 회전속도를 달리하면서 단결정을 성장시켜 결정 성장 조건을 최적화하였다. 그리고 결정성장용 종자결정은 {001} 면을 사용하였으며, 종자결정의 결정면은 편광현미경을 사용하여 결정하였다.

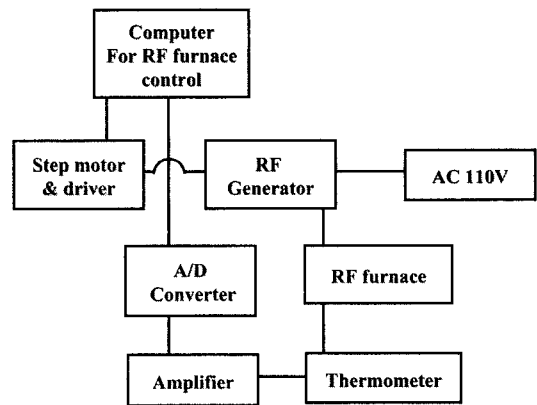


그림 1. 결정 성장 장치 개략도.

Fig. 1. The schematic diagram of crystal growing equipment.

성장된 Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> 단결정은 편광 현미경으로 축을 결정하고, 결정성장면에 수직으로 다양한 크기로 절단하여 TLD로 사용하였다. 제작된 단결정 TLD의 양면을 사포로 연마한 후 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(0.3 μm)분말과 메칠알콜을 사용하여 다시 연마하였다. 또한 Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> 단결정 TLD는 절단이나 연마과정에서의 마찰 등에 의해 트랩에 포획될 수 있는 전자들을 완전히 방출하기 위하여 질소 분위기에서 모든 TLD들을 400 °C에서 약 2분

동안 열처리하였다.

## 2. 측정장치

성장된 Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> 단결정의 열형광 특성을 조사하기 위하여 Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> 단결정에 X-선을 조사한 후 열형광 glow 곡선을 측정하였다. Fig. 2는 열형광 측정장치(Teledyne Brown Engineering, SYSTEM 310)의 개략도이다. 시료를 planchet에 고정하고 drawer에 넣어 가열하며, 시료의 가열은 planchet 가열방식으로서 약 500 °C까지 가열이 가능하고, 시료의 온도는 planchet 밑면으로부터 방출되는 적외선을 감지하여 측정한다. 이 때 방출되는 열형광량을 광전자증배관의 출력 전류로 변환하고 이 전류를 전류-주파수 변환방법의 펄스 전환 회로에서 디지털화된 신호로 바꾸고, 이를 계수하는 전류 측정법으로 측정한다. 이 신호는 개인용 컴퓨터의 프로그램으로 제어되고, 이 때 시간에 따른 전기적 신호를 측정하여 열형광 glow 곡선을 얻는다.

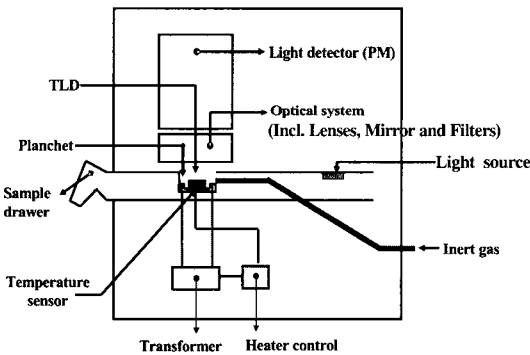


그림 2. TLD 판독기의 개략도.  
Fig. 2. The schematic drawing of TLD reader.

한편, 본 연구에서는 성장된 Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> 단결정 glow 곡선을 구성하는 glow peak들의 활성화 에너지를 확인하기 위하여 PL 스펙트럼을 측정하였으며, 그 장치는 Fig. 3과 같다. He-Cd (442 nm) 레이저에서 나온 빛을 chopper와 렌즈를 지나서 저온유지장치의 창을 통해 시료에 입사시켰다. 시료로부터 나오는 빛은 원하는 PL 뿐만 아니라 산란된 레이저 빛도 포함되어 있으며, 이러한 신호들을 집속 렌즈로 모아서 분광기의 슬릿에 집적시켰으며, 이때 분광기 앞에 있는 필터를 이용하여 레이저에서 나오는 강한 빛이

광전자증배관에 입사되는 것을 방지하였다.

Lock-in 증폭기를 이용하여 광전자증배관에서 오는 신호 중에서 chopper에서 오는 표준 신호와 같은 주기의 것만 선별하고, 또한 미약한 신호는 증폭하여 원하는 PL 신호만 동기시켜 컴퓨터로 보내어 PL 스펙트럼을 측정하였다.

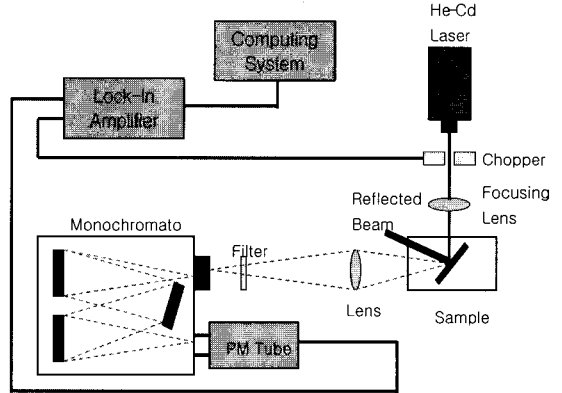


그림 3. PL 측정장치의 개략도.  
Fig. 3. The schematic drawing of photoluminescence measuring system.

## III. 실험 결과 및 논의

### 1. 결정성장 특성

Czochralski 법으로 단결정을 성장시킬 때 소결온도, 종자결정의 인상속도와 회전속도, 원료분말의 순도 등의 조건에 따라 최적 조건이 정해지며, 특히 인상속도와 회전속도가 매우 중요하다. 인상속도가 빠르면 제대로 단결정이 형성되지 못하고 다결정 상태가 되거나 crack이 많이 형성되며, 회전속도가 적당하지 못하면 기포가 형성된다. 본 연구에서는 원료분말로서 순도 99%의 Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>와 순도 99.9%의 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>를 사용하였으며, 소결온도와 회전속도 및 인상속도를 여러 가지로 변화시키면서 Czochralski 법으로 단결정을 성장시키고 XRD 분석을 통해 성장한 단결정의 결정성을 조사하여 최적조건을 조사하였다. 그 결과 Czochralski 법에 의한 Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> 단결정 성장시에 1000 °C의 소결온도에서 회전속도는 10 rpm, 인상속도는 0.18 mm · h<sup>-1</sup> 이하에서 core가 없는 양질의 단결정을 얻을 수 있었다.

Fig. 4는 다양한 크기로 절단하여 제작한

$\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  단결정 TLD의 사진이다. 연마하지 않은 TLD는 다소 어두운 색을 띠고 있어 불투명하였으며, 표면을 광학현미경으로 관찰한 결과 절단과정에서 발생한 파편들로 추정되는 물질들이 무질서하게 박혀 있었다. 그러나 잘 연마한 TLD는 투명하였으며, 연마하기 전과 후의 열형광 감도 차이는 나타나지 않았다.

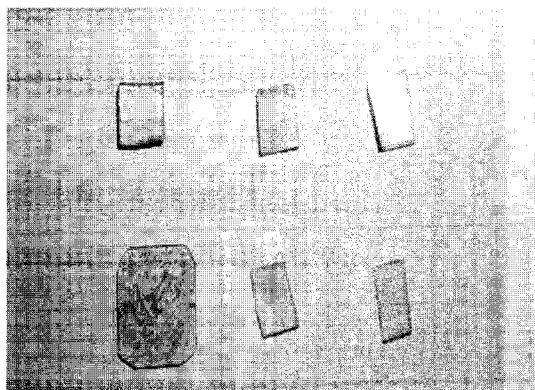


그림 4.  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  단결정 시편의 사진.  
Fig. 4. Photograph of sliced  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  single crystals.

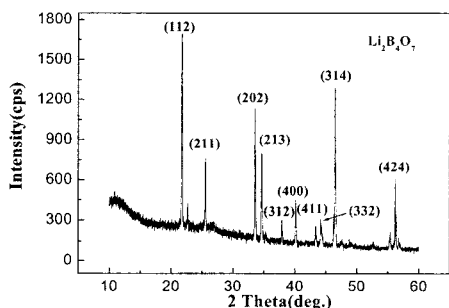


그림 5.  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  결정분말의 X-선 회절상.  
Fig. 5. X-ray diffraction pattern of  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  crystalline powder.

성장시킨 단결정의 결정성을 알아보기 위하여 성장한  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  단결정을 분말 상태로 분쇄하여 X-ray 회절상을 측정하였다. 이때 사용한 X-선 (Rigaku X-Ray Diffractometer, Model D/Max-2400)은 Cu K- $\alpha_1$ (30 kV, 40 mA)로 파장은 1.5405 Å이었고, 주사속도(scan speed)는 2°/min로 하였으며, 2 $\theta$ 각은 10°에서 60°범위까지 측정하였다. Fig. 5는  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  결정분말의 XRD 회절상이다. XRD 분석 결과, JCPDS(Joint Committee of Powder

Diffraction Standard) 표준 분석 자료(card no. 18-0717)와 잘 일치하였으며, 성장한  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 의 결정 구조가 정방정계로 확인되었다.

한편 Fig. 6은  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  단결정을 TLD 소자 형태로 절단하여 측정된 XRD 회절상이다. 회절상의 Peak의 2 $\theta$ 값이 34.866°로 정방정계임을 재확인할 수 있었으며, 결정성장면과 수직한 면으로 잘 절단되어 있음을 확인할 수 있었다.

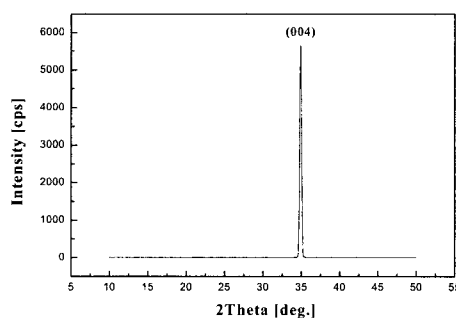


그림 6.  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  단결정의 X-선 회절상.  
Fig. 6. X-ray diffraction pattern of  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  single crystal.

## 2. 열형광 Glow 곡선과 선량계 특성

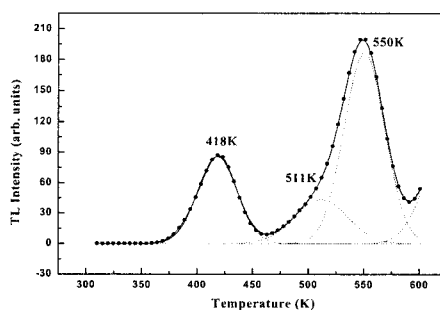


그림 7.  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  단결정의 전형적인 열형광 glow 곡선.  
Fig. 7. The typical TL glow curve of  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  single crystal.

Fig. 7은  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  단결정 TLD에 X-ray를 조사한 후 10 K·s<sup>-1</sup>의 가온율로 측정된 열형광 glow 곡선이다. 열형광 glow peak를 Gaussian 형태로 가정하여 glow 곡선을 최소자승법으로 fitting해 보면  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  단결정의

열형광 glow 곡선은 Fig. 7의 점선과 같이 세 개의 peak들이 중첩되어 있음을 알 수 있었으며, glow 곡선을 구성하는 peak I, II, III의 중심온도는 각각 418 K, 511 K, 550 K이었다.

일반적으로 열형광 glow 곡선의 일정 영역의 면적이나 peak 높이로 구한 열형광강도가 조사된 방사선량에 대해 선형적인 때 TLD로서 사용이 가능하며, 선형적인 영역이 넓을수록 방사선량계로서의 특성이 우수한 것으로 평가된다. Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> 단결정 TLD의 열형광 glow 곡선은 모양이 비교적 단순하여 선량 측정에 용이하며, Fig. 8은 X-선에 대한 Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> 단결정 TLD의 선량의존성으로 50 mGy에서 1.5 Gy까지 넓은 영역에서 선형적인 특성을 나타내었으며, 이 선량범위에서 열형광 glow 곡선의 모양 변화는 나타나지 않았다.

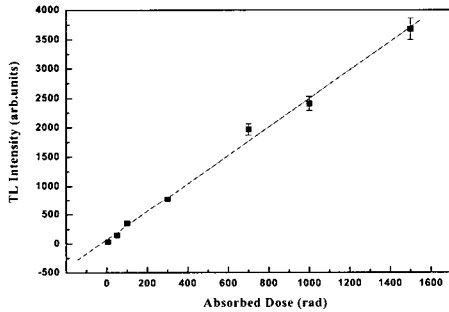


그림 8. X-선에 대한 Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> 단결정의 열형광 감도의 선량의존성.

Fig. 8. The dose response of TL sensitivity of Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> single crystal for x-ray.

### 3. Glow peak의 활성화에너지

열형광 glow 곡선을 구성하는 각 peak는 금지대 내에 있는 트랩 준위에 대한 정보를 가지고 있으며, 이 트랩들은 단결정 내의 공격자, 격자간 원자 혹은 불순물 등과 같은 격자결함들에 기인한다. Glow peak의 트랩준위 즉, 활성화에너지는 glow 곡선을 초기상승법, 가온율법, peak형상법 등으로 분석하여 구할 수 있으며<sup>[13]</sup>, PL 스펙트럼을 측정하여 직접 구할 수도 있다. 본 연구에서는 glow 곡선을 여러 가지 가온율로 측정하여 분석하는 가온율법으로 활성화에너지를 구함과 동시에 PL 스펙트럼을 분석하여 이를 확

인하였다.

Fig. 9는 열형광 glow 곡선의 활성화 에너지를 구하기 위하여 각각 8, 10, 12 K·s<sup>-1</sup>로 가온율을 달리하면서 측정한 열형광 glow 곡선들이다. 가온율을 증가시키면 열형광 glow 곡선이 고온 쪽으로 이동하면서 강도가 높아지는 것을 확인할 수 있었으며, 가온율법으로 구한 peak I, II, III의 활성화에너지는 각각 0.93, 1.78, 2.25 eV로 나타났다.

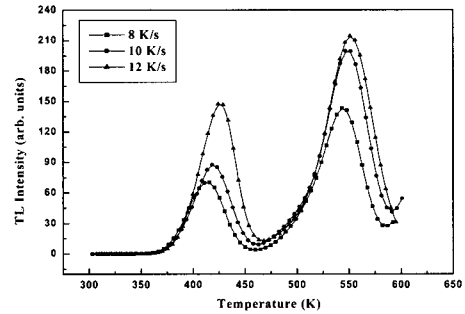


그림 9. 여러 가지 가온율로 측정한 Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> 단결정의 열형광 glow 곡선.

Fig. 9. The TL glow curves of Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> single crystal with various heating rates.

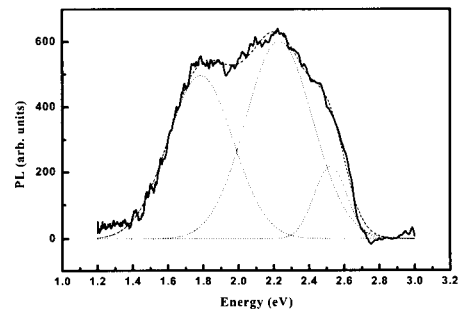


그림 10. 실온에서의 Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> 단결정의 PL 스펙트럼.

Fig. 10. The PL spectrum of Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> single crystal at room temperature.

한편 Fig. 10은 실온에서 측정된 PL 스펙트럼이며, 측정 범위는 약 1.2 eV에서 3.0 eV까지이다. 측정된 PL 스펙트럼을 fitting해 보면 1.78, 2.25, 2.53 eV에 나타나는 세 개의 peak들이 중첩된 것을 확인할 수 있었다. PL

스펙트럼의 측정범위가 1.2 eV에서 3.0 eV이므로 TL glow 곡선에서 나타난 0.93 eV의 활성화에너지를 갖는 peak를 PL 스펙트럼에서는 확인할 수 없었다. 그리고 PL 스펙트럼에서 나타난 2.53 eV의 활성화에너지의 peak는 TL glow 곡선에서는 확인할 수 없었으며 이는 TL glow 곡선의 측정온도범위가 2.53 eV의 glow peak를 확인하기에는 낮기 때문인 것으로 판단된다. 따라서  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  단결정 TLD의 glow 곡선을 구성하는 glow peak들의 활성화에너지는 각각 peak I은 0.93 eV, peak II는 1.78 eV, peak III는 2.25 eV인 것으로 분석되었다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 Czochralski 법으로 조직등가 물질인 양질의  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  단결정을 육성하고, 열형광 특성을 조사하였다. 단결정 성장시 종자결정의 회전속도는 10 rpm, 인상속도는  $0.18 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  이하에서 core가 없는 양질의 단결정을 얻을 수 있었으며, XRD 분석 결과 성장한  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  단결정은 정방정계 구조임을 확인하였다. 또한 열형광 glow 곡선을 가운올법으로 분석한 결과, 열형광 glow peak의 활성화에너지는 각각 0.93, 1.78, 2.25 eV이었으며, 이 결과는  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  단결정의 PL 스펙트럼 분석에 의해 확인할 수 있었다. 한편  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  단결정 TLD의 열형광 감도의 선량의존성은 50 mGy에서 1.5 Gy까지 넓은 영역에서 선형적이었으므로 제작한  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  단결정 TLD를 개인선량계로 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

한편, TLD로서 실제 활용하기 위해서는 습도에 의한 감도의 변화나 감쇠특성, 중성자에 대한 감도특성 등의 연구가 계속되어야 할 것이며, 열형광 감도를 향상시키기 위하여  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  열형광체에 적절한 활성화제를 첨가한 단결정 성장의 연구가 필요할 것으로 생각된다.

#### References

- [1] N. Tsutsui, Y. Ino, K. Imai, N. Senguttuvan and M. Ishii, "Growth of high quality 4in diameter  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  single crystals", J. Crystal Growth, 229, 283-288(2001).
- [2] Y. V. Burak, B. V. Padlyak and V. M. Shevel, "Radiation-induced centers in the  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ : single crystals", Nucl. Instru. Meth Phys. Res. B, 191, 633-637(2002).
- [3] C. Furetta, M. Prokic, R. Salamon, V. Prokic and G. Kitis, "Dosimetric characteristics of tissue equivalent thermoluminescent solid TL detectors based on lithium borate", Nucl. Instru. Meth. Phys. Res. A, 456, 411-417(2001).
- [4] 이동환, 김도성, 이상윤, 강희동, 우홍, " $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ :Mn/Cu 열형광체의 물리적 특성과 열중성자 선량측정", 새물리, 31(5), 510-516(1991).
- [5] M. Prokic, "Lithium borate solid TL detectors", Radiat. Measur. 33, 393-396(2001)
- [6] N. A. El-Faramawy, S. U.El-Kameesy, A. El-Agramy, G. Metwally, Radiat. Phys. and Chem. "The dosimetric properties of in-house prepared copper doped lithium berate examined using the TL-technique", 58(1), 9-13(2000).
- [7] J. H. Shulman, R. D. Kirk and E. J. West, "Use of lithium borate for thermoluminescence dosimetry", Proc. Int. Conf. Lumin. Dosim., Stanford Univ, CONF-650637, 113-118(1967).
- [8] M. Takenaga, O. Yamamoto and T. Yamashita, "Preparation and characteristics of  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ :Cu phosphor", Nucl. Instrum. Meth. 175, 77-78 (1980).
- [9] J. Liu, J. Li, K. Yang, X. Zhang, Y. Lei, M. Na, Y. Zou and R. Zhang, "The growth and application of LBO crystal", J. Korean Association of Crystal Growth, 4, 230(1994).

- [10] K. Byrappa, K. V. K. Shekar and R. Rodriguez-Clemente, "Hydrothermal synthesis and morphology of lithium tetraborate crystals", *Mat. Res. Bull.*, 28, 709(1993).
- [11] N. Senguttuvan, et. al., "Crystal growth and luminescence properties of Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> single crystals doped with Ce, In, Ni, Cu and Ti ions", *Nucl. Instru. Meth Phys. Res. A*, 486, 264-267(2002).
- [12] T. Sugawara, R. Komatsu and T. Sugihara, "Growth of 3-inch-diameter Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> single crystal using the resistance heating furnace", *Jpn. J. Appl. Phys.* 33, 5525-5528(1994).
- [13] R. Chen and Y. Kirsh, *Analysis of Thermally Stimulated Process*, Pergamon Press, Oxford(1981).

---

 著 者 紹 介
 

---

**박 강 수**

1964년 8월 21일 생  
 1990년 2월 대구대학교 사범  
 대학 물리교육과 졸업(이학사)  
 1992년 2월 대구대학교 대학  
 원 물리학과 졸업(이학석사)

2000년 2월 부산대학교 대학원 물리학과(박사  
 과정 수료)

2002년 현재 김해고등학교 교사

주관심 분야 : 방사선계측, TLD 센서개발

**김 형 국**

1953년 6월 15일 생  
 1976년 2월 서울대학교 물리  
 학과 졸업(이학사)  
 1980년 2월 서울대학교 대학  
 원 물리학과 졸업(이학석사)  
 1985년 4월 Penn. State

Univ(이학박사)

1986년 3월 ~ 현재 부산대학교 물리학과 교수

주관심 분야 : X선 회절분석과 표면산란

**안 정 군**

1967년 12월 19일 생  
 1990년 2월 고려대학교 물리  
 학과 졸업(이학사)  
 1992년 2월 고려대학교 대학  
 원 물리학과 졸업(이학석사)  
 1998년 2월 고려대학교 대학

원 물리학과 졸업(이학박사)

2000년 3월 ~ 2001년 2월 오사카 대학교 핵물  
 리 연구소 JSPS Fellow

2001년 3월 ~ 현재 부산대학교 물리학과 조교수  
 주관심 분야 : 핵반응연구, 환경방사능평가

**박 명 환**

1966년 6월 26일 생  
 1991년 2월 경일대학교 전기공학과 졸업(이학  
 사)

1993년 2월 대구대학교 대학원 물리학과 졸업  
 (이학석사)

2000년 2월 대구대학교 대학원 물리학과 졸업  
 (이학박사)

1989년 3월 ~ 현재 대구보건대학 방사선과 부  
 교수

주관심 분야 : TLD 및 방사선의료장비 개발



**김 동 진**

1967년 5월 10일 생  
1993년 2월 부산대학교 물리학과 졸업(이학사)  
1995년 8월 부산대학교 대학원 물리학과 졸업(이학석사)

2002년 8월 부산대학교 대학원 물리학과(이학박사)

2002년 9월 ~ 현재 동의대학교 전자세라믹스 연구 센터 박사연구원

주관심 분야 : 결정성장, 세라믹연구

**강 희 동**

1944년 5월 27일 생  
1966년 2월 경북대학교 물리학과 졸업(이학사)  
1973년 2월 경북대학교 대학원 물리학과 졸업(이학석사)  
1980년 3월 프랑스 Paul Sabatier 대학졸업(이학박사)

1986년 2월 ~ 1989년 3월 한국원자력연구소 책임연구원

1989년 3월 ~ 현재 경북대학교 물리학과 교수, 대구지방방사능측정소장, 방사선과학연구소장

주관심 분야 : 방사선계측기 개발, 환경방사능 분석 및 평가



**황 윤희**

1963년 4월 27일 생  
1986년 2월 연세대학교 물리학과 졸업(이학사)  
1988년 2월 연세대학교 대학원 물리학과 졸업(이학석사)

1995년 8월 U. of Pittsburg(이학박사)

1995년 9월 ~ 1997년 8월 CCNY-CUNY, Research Associate

1997년 3월 ~ 현재 부산대학교 유전체물성연구소 조교수

주관심 분야 : 유전체의 상전이, 비정질 질의 동역학

**김 도 성**

1955년 11월 1일 생  
1978년 2월 경북대학교 물리학과 졸업(이학사)  
1980년 9월 경북대학교 대학원 물리학과 졸업(이학석사)  
1987년 2월 경북대학교 대학원 물리학과 졸업(이학박사)

1981년 3월 ~ 현재 대구대학교 과학교육학부 교수

주관심 분야 : 방사선계측기 개발, 환경방사능 분석 및 평가