

## Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> 계열 단결정 TLD 소자의 제작과 특성

— Fabrication of Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> Series Single-Crystal TLDs and their TL properties —

대구보건대학 방사선과 · 양산고등학교

박명환 · 박강수\*

### — 국문요약 —

본 연구에서는 Czochralski 법으로 양질의 Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> 단결정과 Cu, Mn, Mg를 활성화제로 첨가한 Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> 계열 단결정을 육성하였다. 또한 이들을 TLD 소자로 제작하고, 감쇠율 및 에너지의존성의 열형광 특성을 조사하였다.

실온에 보관하면서 각 TLD들의 주 peak에 대한 감쇠율을 측정된 결과, 30일 동안 10% 내외의 감쇠율로 비교적 안정하였다. 소자 형태의 단결정 TLD가 분말 형태보다 감쇠율이 다소 낮게 나타났으며, 그 이유는 소자 형태의 단결정 TLD가 흡습성에 의한 영향을 적게 받기 때문인 것으로 생각된다. 그리고 각 TLD 소자의 광자에 대한 에너지의존성은 32 keV의 열형광 감도가 1.25 MeV의 <sup>60</sup>Co γ선에 비해 약 85% 정도이며, 이론적 계산값과 측정값이 대체로 잘 일치하는 결과이다.

이상에서와 같이, 본 연구에서 제작한 Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>:Cu와 Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>:Mn 단결정 TLD는 X선에 대한 감쇠율 및 에너지의존성의 특성이 우수하다. 따라서 의료기관 및 산업체 분야에서 개인피폭선량 측정, 환경방사선 측정, 방사선 치료시의 선량 평가에 활용이 가능할 것으로 생각한다.

**중심단어** : 단결정, 열형광, 발광곡선, 감쇠율

## I. 서 론

열형광선량계(thermoluminescent dosimeter, TLD)는 방사선에 대한 감도와 안정성이 좋고, 측정 가능한 선량 범위가 넓다. 또한 재사용과 집적선량의 측정이 가능하므로 현재 국내의 방사선 작업종사자 중 90% 이상이 개인 피폭선량 측정에 TLD를 사용하고 있다<sup>1)</sup>.

Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>을 모체로 한 열형광선량계는 유효원자번호가 7.4로써 현재까지 알려진 TLD 물질들 중 인체조직과 가장 가까우므로 에너지의존성에 대한 보정이 필요치 않다<sup>2)</sup>. 그

리고 Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> 내의 B와 Li이 열중성자 반응단면적이 매우 크므로 열중성자에 대한 열형광 감도가 높고<sup>3)</sup>, 측정 후의 열처리가 필요 없는 등의 여러 가지 장점으로 최근 까지 많은 연구가 진행되고 있다<sup>2,4,5)</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>6)</sup>이지만 열형광의 파장이 광전자증배관의 감도와 맞지 않아 열형광감도가 매우 낮았으며, 이후 Cu를 활성화한 Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>:Cu가 개발되어<sup>7)</sup> 열형광감도를 개선하였다. 그러나 이들 모두는 분말형태로서 TLD로 사용하기에 매우 불편하며, 높은 흡습성으로 인해 공기 중에서 장시간 보관하면 감도가 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>4)</sup>, Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> 단결정 소자나 분말형태로 제작하여 열형광 특성을 연구한 바는 많이 알려져 있지 않다.

\*이 논문은 2004년 11월 1일 접수되어 2005년 2월 7일 채택됨

책임저자 : 박명환, (702-260) 대구광역시 북구 태전동 산 7번지  
대구보건대학 방사선과  
Tel : 053-320-1315  
E-mail : mhpark@mail, dhc, ac, kr

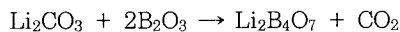
한편,  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  단결정 성장을 위하여 결정의 core, crack 등의 결함에 관하여 다양한 연구가 수행되어 왔으며<sup>8)</sup>, 양질의 결정을 얻기 위해 hydrothermal 법<sup>9)</sup>, Bridgmann 법<sup>10,11)</sup>, Czochralski 법에 의한 성장연구<sup>12)</sup> 등 성장방법을 달리하거나, 순수한  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  다결정분말을 사용하여 저항 전기로에서 결정을 얻는 연구<sup>13)</sup> 등이 보고되고 있다.

본 연구에서 Czochralski 법에 의해 직접  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  단결정을 성장시키고 결정 성장조건을 확립하며, 제작한  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  단결정 TLD의 glow 곡선을 측정 후 감쇠율과 에너지 의존성의 특성을 조사하여 TLD로서의 사용 가능성을 조사하였다.

## II. 실험장치 및 방법

### 1. $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 계열 단결정 TLD 소자의 제작

본 연구에서는 고주파 유도가열로 내에서 백금 도가니를 피가열체로 사용한 Czochralski 법으로 단결정을 성장시켰다. 결정 성장을 위한 원료 분말은  $\text{Li}_2\text{CO}_3$ (99%, Aldrich Chemical Company Inc.)와  $\text{B}_2\text{O}_3$ (99.9%)를 1:2 화학당량 비로 섞은 후 약 24시간 동안 ball mill 하여 결정 성장용 원료분말을 준비하였다. 이 원료분말을 직경 60 mm, 높이 35 mm의 백금 도가니에 담고 1000°C까지 가열한 후, 그 상태를 2~3일 동안 유지하면서 단결정으로 육성하였다. 이때  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  단결정 반응식은 다음과 같다.



한편,  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7 : \text{Cu}$ ,  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7 : \text{Mn}$  및  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7 : \text{Mg}$  단결정 성장용 원료분말을 준비할 때  $\text{CuO}$ ,  $\text{MnO}_2$ ,  $\text{MgO}$ 를 각각 1 mol % 씩 첨가하였다. Fig. 1은  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  계열 단결정 TLD의 제작 과정이고, Fig. 2는 본 연구에서 사용한 단결정 성장 장치의 개략도이다. 결정성장에 사용된 고주파로는 가열주파수 140 kHz, 최대출력 10 kW이고 입력전원은 AVR(Automatic Voltage Regulator)를 설치하여  $110 \pm 0.5 \text{ V}$ 로 안정시켰다. Czochralski 법으로 단결정을 성장시킬 때 소결온도와 종자결정의 인상속도 및 회전속도를 최적화하면 양질의 단결정을 얻을 수 있다.

본 연구에서는 컴퓨터로 제어되는 온도 조절장치를 이용하여 소결온도를  $\pm 0.3^\circ\text{C}$ 가 유지되도록 하였으며, 종자결정의 인상속도와 회전속도를 달리하면서 단결정을 성장시켜 결정 성장 조건을 최적화하였다. 그리고 결정 성

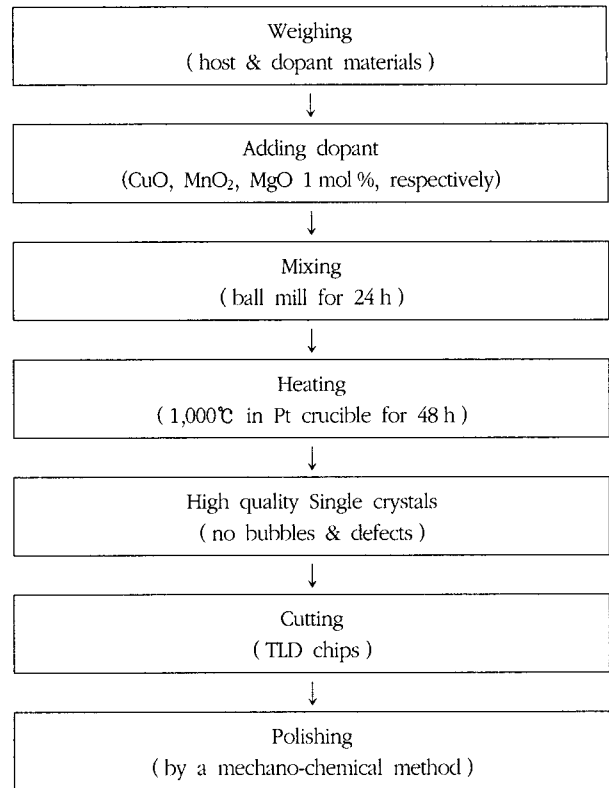


Fig. 1. The fabricating procedures of  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  series single crystal TLDs

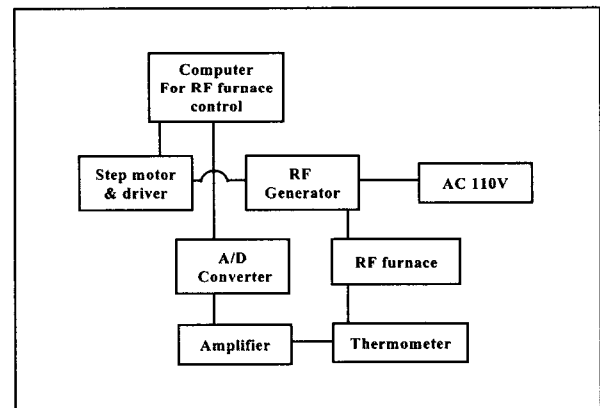


Fig. 2. Schematic diagram of the single-crystal growing equipment.

장용 종자결정은 [001]면을 사용하였으며, 종자결정의 결정면은 편광현미경을 사용하여 결정하였다.

육성한  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  계열 단결정은 편광 현미경으로 축을 결정하고, 결정성장면에 수직으로 자른 후 이를 일정하고 다양한 크기로 다시 절단하여 단결정 TLD로 제작하였다. 그리고 단결정 TLD를 사포로 양면을 잘 문지르고  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $0.3 \mu\text{m}$ ) 분말과 메틸알콜을 사용하여 다시 연마(polishing)

하였다. 또한 Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> 계열 단결정 TLD는 절단이나 연마 과정에서 마찰 등에 의해 트랩에 포획될 수 있는 전자들을 완전히 방출하기 위하여 질소분위기에서 모든 단결정 TLD들을 400℃로 유지하면서 약 2분 동안 열처리하였다. 열처리한 후 단결정 TLD들의 열형광을 재측정한 결과, 제작 과정에서 포획된 전자들이 모두 방출되어 잔류 열형광은 나타나지 않았다.

## 2. 열형광 측정장치

열형광 측정장치를 사용하여 열형광 glow 곡선을 측정

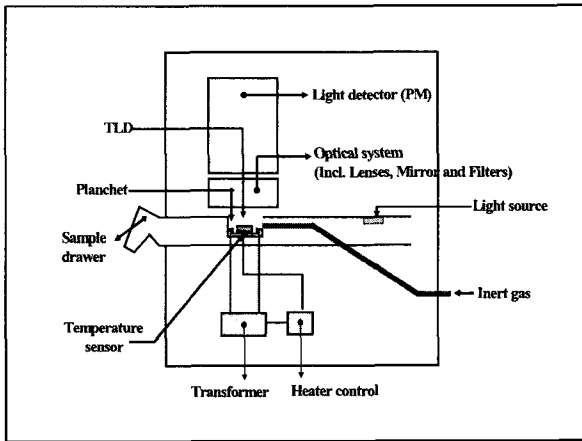


Fig. 3. Schematic layout of the TLD reader.

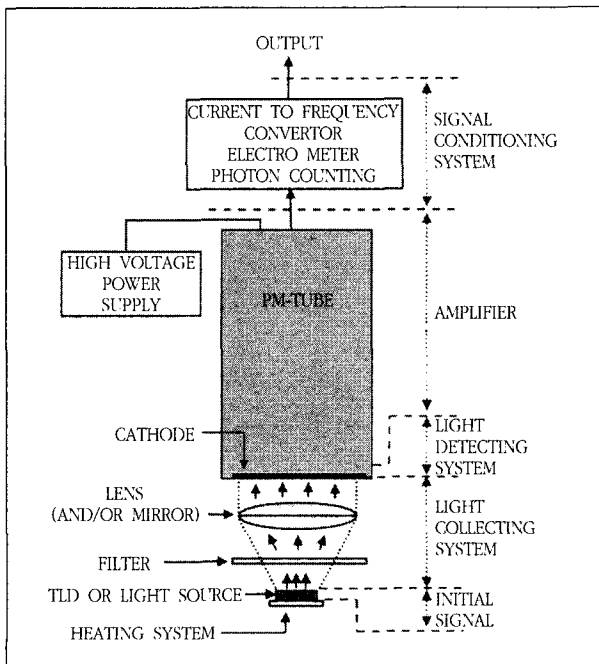


Fig. 4. Schematic layout of the light detecting system of TLD reader.

하며, 이를 분석하여 TLD의 열형광 특성을 알 수 있다. Fig. 3은 열형광 측정장치(Teledyne Brown Engineering, SYSTEM 310)의 개략도이다. 열형광 측정장치는 시료를 가열하고 온도를 조절하는 부분과 시료로부터 방출되는 빛을 검출하는 열형광 검출 부분으로 나눌 수 있다. 또한 측정장치로부터 데이터의 수집 및 처리, 결과의 표시, 출력 및 저장, 회로 제어 기능은 개인용 컴퓨터로 하게 된다.

Fig. 4는 SYSTEM 310 TLD Reader 에서 열형광을 검출하는 부분을 보다 자세히 나타낸 것이다. 아래 부분이 검게 코팅된 스테인레스 플랜치(planchet, D-20 Black)에 시료를 고정하고 서랍에 넣어 가열한다. 시료의 가열은 플랜치 가열방식(direct high current heating)으로서 약 500℃까지 가열이 가능하다. 온도 설정 간격은 1℃이고, 온도 신뢰성은 ±4℃이다. 시료의 온도는 플랜치 밑면으로부터 방출되는 적외선(IR ; infrared)을 감지하여 측정한다. 방출되는 열형광량을 광전자증배관을 통해 출력 전류로 변환하고, 이 전류를 전류-주파수 변환 방법의 펄스 전환 회로에서 디지털화된 신호로 바꾸며, 이를 계수하는 전류측정법으로 측정한다. 이 신호는 개인용 컴퓨터의 프로그램으로 제어되고, 이 때 시간에 따른 전기적 신호를 측정하여 열형광 glow 곡선을 얻는다<sup>14)</sup>.

## 3. 방사선(X, γ-선) 조사

제작한 Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> 및 Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> : Cu, Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> : Mn, Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> : Mg 단결정 TLD에 X선을 조사하기 위하여 K대학병원 치료방사선과에 소재하고 있는 10 MV 선형가속기(Nippon Electric Company, Model NELAC - 018 - D, W-target)를 사용하였다. 이때 표준조사조건은 SSD를 100 cm로 하고 조사야의 크기는 20×20 mm<sup>2</sup>로 하였다. 또한 공기중에서 2차전자평형을 얻기 위하여 TLD 소자 위에 30 mm 폴리에틸렌 판을 덮은 상태에서 X 선을 조사하였다.

Table 1. Irradiation conditions for measurement of energy dependence.

Source	kVp	Filter	HML(mmAl)	Eff. Energy(keV)
X-ray	40	-	1,553	25.27
	60	1 mmAl	2,725	32.00
	70	0.3 mmCu	5,447	43.78
	85	0.4 mmCu	7,164	50.83
	95	0.6 mmCu	8,848	58.26
<sup>60</sup> Co	-	-	-	1,250

한편, 에너지존성 실험에는  $^{60}\text{Co}$  원격조작식 강내치료기(Shimadzu, Model RALS system)를 사용하여 평균 에너지 1.25 MeV의  $\gamma$ 선을 조사하였다. 조사 조건은 선원 두 개를 사용하여 SSD를 30 cm로 하고, 공기 중에서 2 차 전자평형을 얻기 위하여 5 mm 폴리에틸렌 판을 얹었다. Table 1과 같이 25 keV에서 58 keV까지 저에너지 영역에서는 D대학 방사선과에 있는 진단용 X선발생장치(Dong-A, Model DXGH-325R)를 사용하였다. 장치의 인가전압을 변화시키면서 X선관 앞에 적절한 알루미늄과 구리 필터를 동시에 바꾸면서 X선의 유효에너지를 구하여 실험에 활용하였다.

### III. 실험결과 및 고찰

#### 1. $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 계열 단결정 TLD 소자의 제작

동일한 환경에서 성장한 한 종류의  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  모체 단결정이라도 첨가한 Cu, Mn, Mg의 활성제 밀도가 단결정의 위치에 따라 불균일하게 약간씩 다를 수 있다. 그러므로 모체가 같아도 TLD 소자가 단결정의 어떤 위치로부터 절단되어 제작되었는지에 따라 열형광 감도에 다소 차이가 생길 수 있다. 또한 TLD 소자의 두께나 질량의 차이로 열형광 감도가 달라질 수 있다. 따라서 실제 선량 평가에 사용하기 위해서는 각 TLD 소자의 열형광 감도 보정인자를 구하여 실험 결과에 이를 환산하는 것은 필수적이며, 이렇게 함으로써 선량 측정값의 신뢰도를 증가시킬 수 있다.

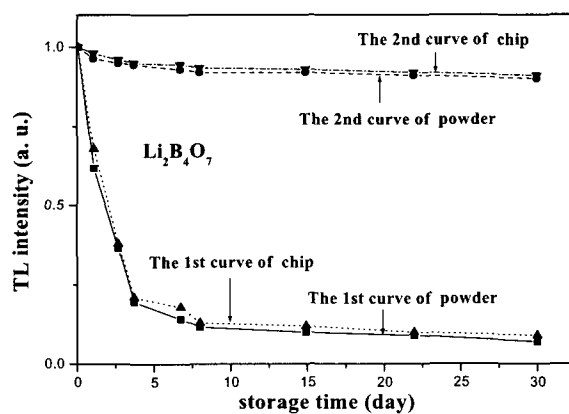
본 연구에서는 육성한 단결정들을 성장 축에 대해 수직인 면으로 절단하여  $4 \times 5 \times 1 \text{ mm}^3$  등 다양한 크기의 TLD 소자들로 제작하였으며, 각각의 TLD 소자들에 고유번호를 부여하고, 동일한 조건에서 같은 양의 방사선을 조사하였다. 방사선을 조사할 때 TLD 소자들의 배열을 조사야의 크기 내에서도 가급적 중심점으로부터 거리를 최소로 하여 위치에 따른 흡수선량의 오차를 줄였다. 그리고 측정된 열형광 glow 곡선으로부터 peak 높이보다 오차가 상대적으로 적은 glow peak의 면적을 적분하여 각 TLD 소자들의 보정인자를 구하였다. 이 보정인자를 모든 실험 결과에 환산하여 규격화함으로써 소자간에 발생할 수 있는 오차를 없앴다.

한편, 연마하지 않은 TLD 소자들은 다소 어두운 색을 띠고 있어 불투명하였으며, 표면을 광학 현미경으로 분석한 결과 절단 과정에서 발생한 파편들로 추정되는 물질들이 무질서하게 박혀 있었다. 그러나 사포와  $\text{Al}_2\text{O}_3$  분말

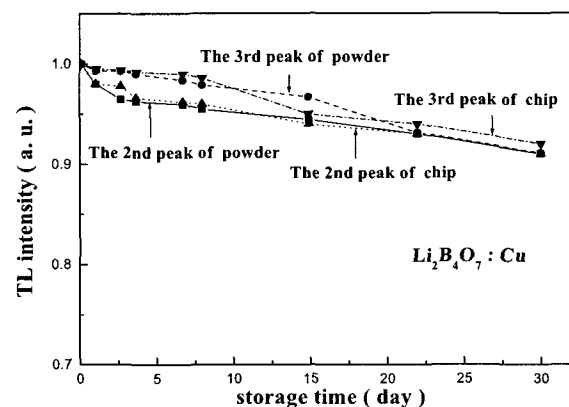
을 이용하여 잘 연마한 TLD 소자들은 투명하였으며, 연마하기 전과 후의 열형광 감도 차이는 나타나지 않았다.

#### 2. $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 계열 단결정 TLD의 감쇠율 특성

TLD를 환경방사선이나 개인피폭선량 측정에 사용할 때 감쇠율은 매우 중요하다. 감쇠율은 시간이 지남에 따라 열형광 물질이 지니고 있는 정보의 자연적인 손실을 의미한다. 이 손실은 주로 열형광 물질의 전자트랩에 포획된 전자가 시간이 지남에 따라 자연적으로 방출되는 통계적인 현상 때문에 일어나며, 온도나 빛에 의해 영향을 가장 많이 받는 것으로 알려져 있다. 열형광 물질에서 전자가 트랩을 이탈할 확률은 온도의 함수이며, 열에 의한 감쇠율은 트랩의 깊이가 얕을수록 빨리 감쇠한다. 따라서 장기간에 걸쳐 집적 선량을 평가할 경우 감쇠율 특성을 고려하여 선량을 보정해 주어야 한다. Fig. 5는 소자와 분말 형태의  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  계열 단결정 TLD 소자에 0.5 Gy의 X선을 조사한 후 실온( $20 \sim 30^\circ\text{C}$ )에 보관하면서 glow 곡선의 감쇠율을 측정된 그림이다.  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 와  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7 : \text{Cu}$



(a)



(b)

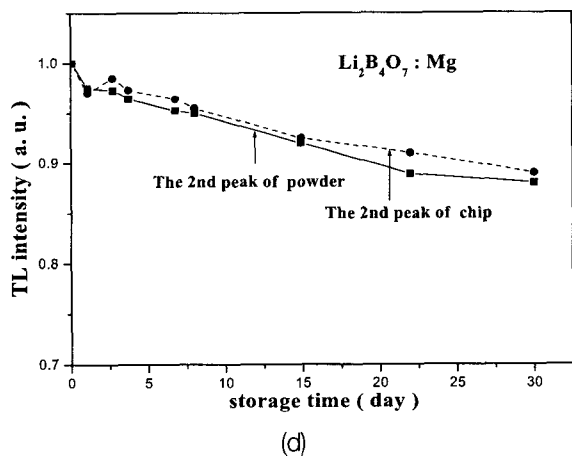
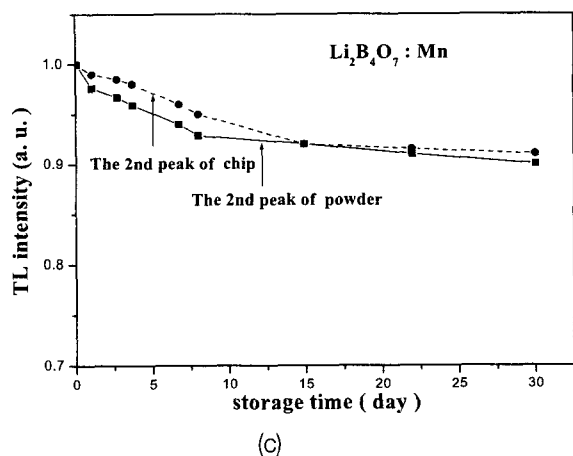


Fig. 5. The fading characteristics of main peak for (a) Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>, (b) Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>: Cu, (c) Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>: Mn and (d) Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>: Mg single crystal TLDs.

단결정 TLD 소자의 열형광 glow 곡선은 분리된 peak I의 첫 번째 부분과 peak II, III이 중첩된 두 번째 부분으로 나뉘어져 있다<sup>5)</sup>. Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> 단결정 TLD의 경우, 첫 번째 glow 곡선 부분은 감쇠율이 매우 커서 30일이 경과하면 약 95% 감쇠하였고, 두 번째 glow 곡선 부분의 감쇠율은 30일 경과 후 약 8%였다. 또한 소자 형태 Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>: Cu 단결정 TLD의 분리된 peak I은 3일이 경과하면 감쇠율이 커서 거의 나타나지 않았으며, peak II와 III은 30일 경과 후 각각 약 9%와 8% 감쇠하였다. 그리고 Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>: Mn 단결정 TLD 소자의 peak I은 약 3일이 경과하면 감쇠하여 거의 나타나지 않았고, peak II는 30일 경과 후 약 9% 정도 감쇠하였다. 분말 형태 단결정 TLD의 감쇠율은 약 10% 정도로 소자 형태 단결정 TLD보다 약간 높게 나타났다. 열형광 glow 곡선이 두 개의 glow peak로 중첩되어 있는 Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>: Mg 단결정 TLD의 감쇠율은

peak I의 경우에 약 1일이 경과되면 완전히 감쇠하여 peak를 확인하기 어려웠다. 소자 형태 단결정 TLD의 peak II는 30일 경과 후 약 11%의 감쇠율을 나타내었으며 Table 2. The relation of temperature and fading rates of TLDs.

TLDs	Main Peak Temperature (K)	Fading Rate (%)	
		Powder	Chip
Li <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub>	550	8	8
Li <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> : Cu	533	8	8
Li <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> : Mn	518	10	9
Li <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> : Mg	486	12	11

며, 분말 형태 단결정 TLD의 peak II는 약 12% 감쇠하여, 소자 형태의 단결정 TLD 감쇠율보다 다소 높게 나타났다.

이상과 같이 본 연구에서 제작한 TLD의 감쇠율은 8~12%이며, 대체적으로 안정하였다. 그리고 단결정으로 제작한 소자 형태의 TLD와 이를 분쇄하여 분말 형태로 제작한 TLD의 감쇠율 특성을 비교해 본 결과 소자 형태 TLD의 감쇠율이 다소 낮게 나타났다. 그 이유는 소자 형태 단결정 TLD가 분말 형태 보다 흡습성에 의한 감쇠 영향을 적게 받는 것으로 생각된다.

Table 2는 주 peak의 감쇠율 특성으로 모든 TLD들은 분말 형태보다 소자 형태의 감쇠가 약 1% 정도 느리게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 또한 주 peak의 중심 온도가 높을수록 감쇠율은 낮았으며, 이는 감쇠율 특성이 주 peak의 중심 온도와 밀접한 관련이 있는 것으로 생각된다. 즉, 중심 온도가 높을수록 높은 온도에서 전자가 방출되므로 감쇠가 느리게 일어나는 것으로 해석할 수 있다.

### 3. Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> 계열 단결정 TLD의 에너지 의존성

동일한 조사선량일 경우라도 입사 방사선의 에너지가 다르면 상대적 열형광 강도는 다르게 나타난다. 환경방사선과 진단이나 치료 등의 임상에서 사용하는 방사선의 에너지 범위는 넓고 다양하다. 진단 영역에서는 주로 10 keV~100 keV까지 사용하며, 방사선 치료용으로는 1.25 MeV의 <sup>60</sup>Co γ선이나 수 MeV의 고에너지 X 선을 이용한다. TLD로 사용하기 위해서는 넓은 영역에서 에너지 의존성이 일정한 것이 유용하므로 TLD 물질의 유효원자번호가 공기나 인체조직과 유사하게 낮은 유효원자번호일수록 좋다. 유효원자번호가 큰 경우는 TLD에 적절한 필터를 부착하

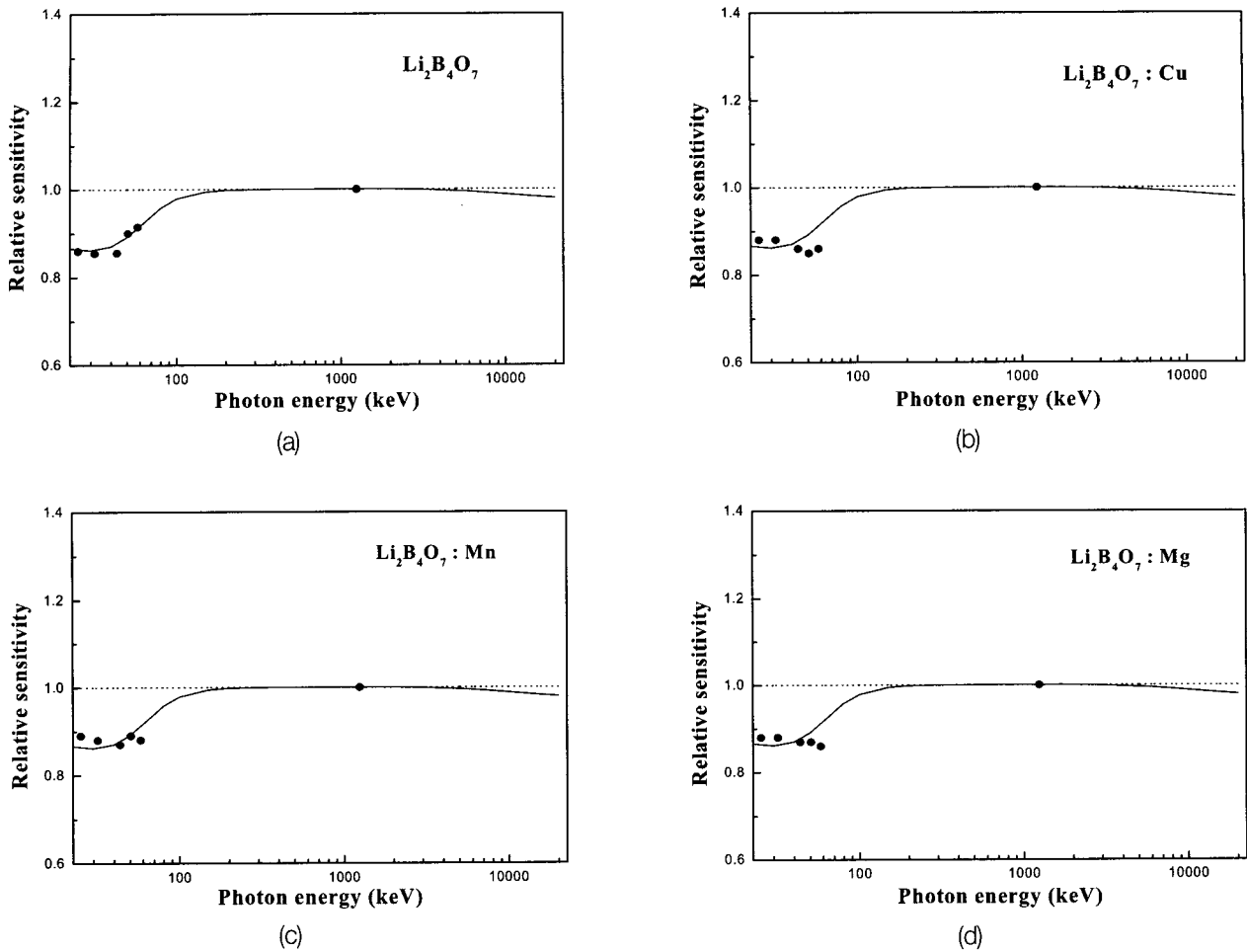


Fig. 6. Relative photon response of (a)  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ , (b)  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu}$ , (c)  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Mn}$  and (d)  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Mg}$  single crystal TLDs.

여 입사 광자에너지와 무관하게 정확한 선량을 측정할 수 있도록 에너지의존성에 대한 보정을 해야 한다.

Fig. 6은  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  계열 단결정 TLD에 반가층을 이용하여 구한 25 keV에서 58 keV까지 영역의 X선과 1.25 MeV의  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ 선을 조사하여 측정한 에너지의존성에 대한 그림이다. 실선은 질량(-)에너지흡수계수를 고려하여 이론적으로 그린 것이며, 표시된 점은 측정값이다. 유효 에너지가 1.25 MeV인  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ 선의 열형광 감도를 1.0으로 기준해서 비교할 때 32 keV의 X선에 대한 열형광 감도는 모든 TLD가 약 0.85 정도였으며, 이는 시료의 유효 원자번호가 낮고 조직등가이기 때문인 것으로 생각한다. 또한 실측값과 이론값이 비교적 잘 일치하였다.

본 연구에서 제작한  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  계열 단결정 TLD는 단결정 자체를 절단하여 소자 형태로 만들었으므로 PTFE 나 유리 캡슐과 같은 중합체에 의한 저에너지 영역의 X선 흡수를 무시할 수 있다. 따라서 에너지의존성에 대한 보정은 필요하지 않다는 큰 장점이 있다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 Czochralski 법에 의해 양질의  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  단결정과 Cu, Mn, Mg 등의 활성제를 첨가한  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Cu}$ ,  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Mn}$ ,  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Mg}$  단결정으로 육성하였다. 그리고 유효원자번호가 조직등가인  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  계열 단결정들을 TLD 소자로 제작하여 감쇠율 및 에너지의존성의 열형광 특성을 조사하였다.

실온에 보관하면서 각 TLD들의 주 peak에 대한 감쇠율을 측정한 결과, 30일 동안 10% 내외의 감쇠율로 비교적 안정하였다. 소자 형태의 단결정 TLD가 분말 형태의 단결정 TLD보다 감쇠율이 다소 낮게 나타났으며, 그 이유는 소자 형태의 단결정 TLD가 흡습성에 의한 영향을 적게 받는 것으로 생각된다. 그리고 각 TLD들의 광자에 대한 에너지의존성 실험에서는 32 keV의 X선에 대한 열형광 감도가 1.25 MeV의  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ 선에 비해 약 85% 정도로 이론적 계산값과 측정값이 대체로 잘 일치하였다.

이상에서와 같이 본 연구에서 제작한 Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>:Cu와 Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>:Mn 단결정 TLD는 X선에 대한 감쇠율 및 에너지 의존성의 특성이 우수하다. 따라서 의료기관 및 산업체 분야에서 개인피폭선량 측정, 환경방사선 측정, 방사선 치료시의 선량 평가에 활용이 가능할 것으로 생각한다.

## 참고 문헌

1. 장시영 : 개인방사선량 측정용 TL 선량계, 동위원소 회보, 13(4), 56-61, 1998
2. Furetta C, Prokic M, Salamon R, Prokic V and Kitis G : Dosimetric characteristics of tissue equivalent thermoluminescent solid TL detectors based on lithium borate, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A, 456, 411-417, 2001
3. 이동한, 김도성, 이상운, 강희동, 우 흥 : Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>:Mn/Cu 열형광체의 물리적 특성과 열증성자 선량 측정, 새물리, 31(5), 510-516, 1991
4. Prokic M : Lithium borate solid TL detectors, Radiat. Measur. 33, 393-396, 2001
5. El-Faramawy NA, El-Kameesy SU, El-Agramy A, Metwally G : The dosimetric properties of in-house prepared copper doped lithium borate examined using the TL-technique, Radiat. Phys. and Chem., 58(1), 9-13, 2000
6. Shulman JH, Kirk RD and West EJ : Use of lithium borate for thermoluminescence dosimetry, Proc. Int. Conf. Lumin. Dosim., Stanford Univ., CONF-650637, 113-118, 1967
7. Takenaga M, Yamamoto O and Yamashita T : Preparation and characteristic of Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>:Cu phosphor, Nucl. Instrum. Meth., 175, 77-78, 1980
8. Liu J, Li J, Yang K *et al.* : The growth and application of LBO crystal, J. Korean Association of Crystal Growth, 4, 230, 1994
9. Byrappa K, Shekar KVK and Rodriguez-Clemente R : Hydrothermal synthesis and morphology of lithium tetraborate crystals, Mat. Res. Bull., 28, 709, 1993
10. Tsutsui N, Ino Y, Imai K, Senguttuvan N and Ishii M : Growth of high quality 4-inch diameter Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> single crystals, J. Crystal Growth, 229, 283-288, 2001
11. Senguttuvan N : 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. Instrum. Meth. Phys. Res. A, 486, 264-267, 2002
12. Burak YV, Padlyak BV and Shevel VM : Radiation-induced centers in the Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> single crystals, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B, 191, 633-637, 2002
13. Sugawara T, Komatsu R and Sugihara T : 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
14. SYSTEM 310 TLD Reader Technical Reference : Teledyne Brown Engineering, 1994
15. Park KS, Ahn JK, Kim DJ *et al.* : Growth and properties of Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> single crystals doped with Cu, Mn and Mg, J. Crystal Growth, 249, 483-486, 2003

## • Abstract

### Fabrication of Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> Series Single-Crystal TLDs and their TL properties

Myeong Hwan Park · Kang Soo Park

Dept. of Radiologic Technology, Taegu Health College · Yangsan High School

High-quality single crystals of pure Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> as well as Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> doped with Cu, Mn and Mg impurities (1.0 mol %, respectively) have been grown from the melt of Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> + 2B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> by Czochralski method in platinum crucibles.

To study the thermoluminescent properties, Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> series single crystal TLDs were made by cutting in the size of 4×5×1 mm<sup>3</sup>. The glow curves show two or three peaks which can be easily deconvoluted. It is observed that room temperature(20~30°C) fading of the dosimetric peaks of Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> series single crystal TLDs were about 10 % for 30 days. The relative photon energy response for Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> series single crystal TLDs were about 85 % when the responses were normalized to that measured with <sup>60</sup>Co (1.25 MeV) γ-rays. The measured data are in a good agreement with theoretical ones.

The Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> series single crystal TLDs fabricated in this work can be used for monitoring personal and environmental radioactivity.

**Key words** : single crystal, thermoluminescent, glow curve, fading