

CaSO₄:Tb TLD의 제작과 특성에 관한 연구

대구보건대학 방사선과
박 명 환

- Abstract -

A Study on Fabrication and Characteristics of CaSO₄:Tb TLD

Myeong Hwan Park

Dept. of Radiologic Technology, Taegu Health College

In this study, the highly sensitive CaSO₄:Tb glass capsule type TLDs are fabricated and their trap parameters are determined. The optimum conditions of fabricating of CaSO₄:Tb phosphor was obtained to be in impurity concentration of Tb 1.0 mol% and sintering of 600 °C, 2 hr. The glow curve of CaSO₄:Tb consists of three glow peaks and these peaks are isolated by thermal bleaching method. Activation energy of the three glow peaks measured by the initial rise, the peak shape and the heating rate method are 0.70, 0.87, and 1.03 eV. The frequency factors are 1.76×10^9 , 1.74×10^9 , and 9.77×10^8 s⁻¹, and the kinetic orders are 1.12, 1.46, and 1.34, respectively. The isolated glow peaks are fitted by least square method and optimum temperature range of the main peak for radiation dosimetry is 230~295 °C.

I. 서 론

열형광선량계(thermoluminescent dosimeter, TLD)는 방사선에 대한 감도와 안정성이 좋고, 측정 가능한 선량범위가 넓으며 재사용과 집적선량의 측정이 가능하므로 현재 국내의 방사선 작업종사자중 80% 이상이 개인피폭선량 측정에 TLD를 이용하고 있다¹⁾. 현재 주로 사용되고 있는 TLD용 열형광체는 유효원자번호가 생체조직과 등가인 LiF 계열과 뼈조직과 등가인 CaSO₄ 계열로 나눌 수 있는데, 유효원자번호가 생체조직과 유사한 열형광체는 열형광 감도가 비교적 낮은 반면, 유효원자번호가 큰 열형광체는 조직등가 물질에 비해 5배 내지 60배 정도 열형광 감도가 우수하나, 열형광 감도의 에너지의존성이 크다는 단점이 있다²⁻⁴⁾.

Yamashita 등에⁵⁾ 의해 처음으로 개발된 CaSO₄:Tm과 CaSO₄:Dy는 방사선에 대한 감도가 높을 뿐만 아니라 감쇠율이 매우 적어 이를 이용한 선량측정 및 개인피폭선량계 개발의 연구가 활발히 진행되어 왔으며, 열형광체의 제작과정이나 불순물의 역할 등에 대해서도 잘 알려져 있다⁶⁻⁸⁾. 그러나 일반적으로 열형광체의 모체가 동일한 경우라도 활성체의 종류와 농도 그리고 첨가하는 방법에 따라 열형광 감도가 크게 차이가 있다⁹⁾. 즉 CaSO₄ 열형광체에 활성체로

이용되는 희토류 원소는 화학적 성질이 매우 비슷하다고 하지만 열형광 glow 곡선의 모양, peak 온도, 고유의 발광 스펙트럼, 감쇠율 특성 등이 달라지므로¹⁰⁾ 열형광체의 특성이 향상된 새로운 고감도의 열형광소자의 연구가 필요하다. 그리고 TLD를 사용할 때 열형광체의 여러 특성 중 선량의 존성과 에너지의존성, 발광스펙트럼 등의 선량계 특성에 대한 조사도 중요하지만 열형광 glow 곡선을 이해하고 보다 정확한 선량평가를 위해서는 활성화에너지(activation energy, E), 진동수인자(frequency factor, S), 발광차수(kinetic order of thermoluminescence, m) 등의 트랩매개변수¹¹⁻¹³⁾와 같은 물리적 특성도 함께 조사되어야 한다.

본 연구에서는 희토류 원소인 Tb를 활성화한 고감도 유리 캡슐형 CaSO₄:Tb TLD를 제작하여 첨가하는 Tb의 활성체 농도와 소성 조건에 따른 최적 조건을 구하고, 또한 glow 곡선을 구성하는 각 glow peak를 thermal bleaching 법으로 단일 glow peak로 분리하여 측정 후 초기상승법, peak 형상법, 가온율법 및 최소자승법에 의한 glow 곡선 fitting 등의 방법으로 활성화에너지, 진동수인자, 발광차수 등의 트랩매개변수를 측정하고 아울러 glow 곡선을 구성하는 각 peak의 감쇠율을 조사한다.

* 이 논문은 1998학년도 대구보건대학 학술연구비 지원에 의한 논문임.

II. 실험장치 및 방법

CaSO₄:Tb TLD의 최적 제작조건을 구하기 위하여 Fig. 1과 같이 먼저 Tb를 0.1~2.0 mol%의 농도로 변화시키면서 모체인 CaSO₄·2H₂O와 첨가하는 불순물로 TbCl₃·6H₂O를 ±10⁻⁶ g의 정밀도를 가진 전자저울로 정량한 후, 묽은 황산용액에 용해시켜, 황산증류장치를 사용하여 380 °C에서 4시간 동안 증류하여 유독물질인 황산을 98% 이상 수거하였다. 그리고 혼합된 시료는 백금도가니에 담아 공기중에서 400~900 °C로 변화시키며, 2시간 동안 소성하여 최적 소성온도를 결정하였다. 또한 열형광체를 200mesh(<75 μm)의 분말로 만든 후, 항상 일정량의 열형광체 분말과 아울러 측정을 편리하게 하기 위하여 기존의 상용화된 CaSO₄:Dy(Teledyne) TLD가 분말인 경우는 1회의 방사선량 측정으로 재사용이 곤란하며, rod형과 disk형태는 오염을 전혀 배제할 수 없는 문제가 생기기 때문에 본 실험에서는 모세혈관의 혈액 채취 시에 이용되는 모세관(capillary)을 구입하여 내경 1 mm, 외경 1.2 mm, 길이 8 mm 크기에 일정량의 CaSO₄:Tb 열형광분말을 넣어 유리캡슐형 TLD 소자를 제작하였기에 더욱 쉽고, 간편할 뿐 만 아니라 수회에 걸쳐 재사용이 가능하며, 오염에 의한 열형광량의 변화도 없앨 수 있는 유리캡슐형 CaSO₄:Tb TLD 소자를 제작하였다. 그리고 CaSO₄에 Tb를 활성화하기 위하여 활성체의 농도 및 열처리 조건 변화에 따른 열형광강도의 변화를 조사하여 CaSO₄:Tb 열형광체의 제작에 필요한 최적 활성화 조건을 구하였다.

제작한 CaSO₄:Tb TLD에 6MV X선 발생용 선형가속기[Mevatron MD 67, Siemens Co.]를 이용하여 X-선을

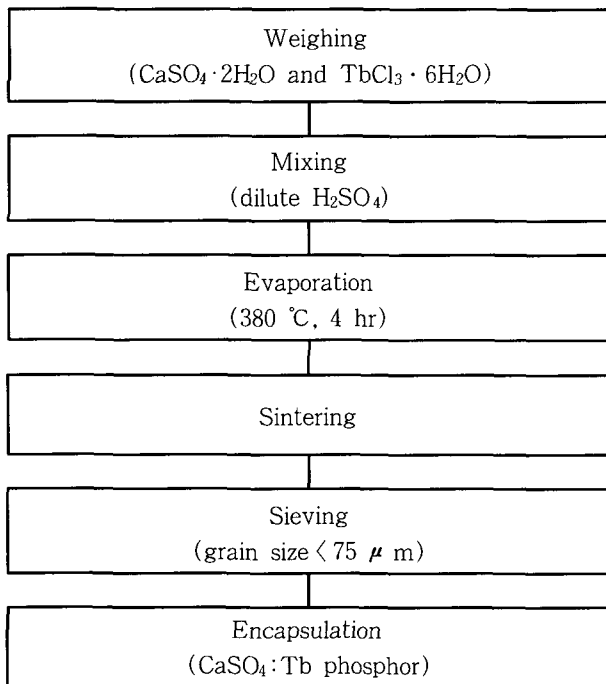


Fig. 1. Fabricating procedure for CaSO₄:Tb TLD.

조사하였으며, 선형적인 가온율을 변화시킬 수 있는 TLD 판독장치(Harshaw, Model 4000)로 glow 곡선을 측정하고, 측정된 glow 곡선 data를 ASCII 형태로 TLD 판독장치에서 PC로 전송하여 분석에 사용하였다.

Glow 곡선이 단일 glow peak로 구성되거나 두 개 이상의 glow peak로 구성되더라도 서로 중첩되지 않는 경우에는 전체 glow 곡선으로부터 트랩매개변수를 구할 수 있지만, 2개 이상의 glow peak가 중첩된 경우에는 각각의 glow peak를 분리·측정하여야만 각 glow peak의 트랩매개변수를 정확히 구할 수 있다. 본 연구에서는 부 peak의 온도근처에서 주 peak에 영향을 주지 않을 정도의 일정 시간동안 TLD를 가열하여 주 peak만을 측정하는 thermal bleaching법으로 glow peak를 분리하였다.

분리·측정된 각 glow peak는 초기상승법, peak 형상법, 가온율법 등의 방법으로 분석하여 활성화에너지, 진동수인자, 발광차수와 같은 트랩매개변수를 측정하고, 각 glow peak를 최소자승법으로 fitting하여 트랩매개변수를 구하여 비교하였다. 또한 glow 곡선의 fitting 결과를 이용하여 방사선 선량 평가에 사용할 glow 곡선의 온도범위를 최적화하였다. 한편 CaSO₄:Tb TLD의 glow 곡선을 구성하는 3개 glow peak 각각의 감쇠율을 측정하고, 각 peak의 감쇠율의 차이를 이용하여 방사선조사 후의 경과시간을 평가할 수 있는 가능성을 검토하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 열형광 Glow 곡선과 활성화 조건

Fig. 2는 활성체인 Tb를 1.0 mol% 첨가하고 공기중에서 600 °C로 2시간 동안 소성하여 제작한 유리 캡슐형 CaSO₄:Tb TLD에 X선을 조사한 후 4 °C/sec의 가온율로 측정된 전형적인 glow 곡선으로서 85.0 °C (peak I), 167.8 °C (peak II), 257.8 °C 근처에 형성된 3개의 glow peak로 구성되었다.

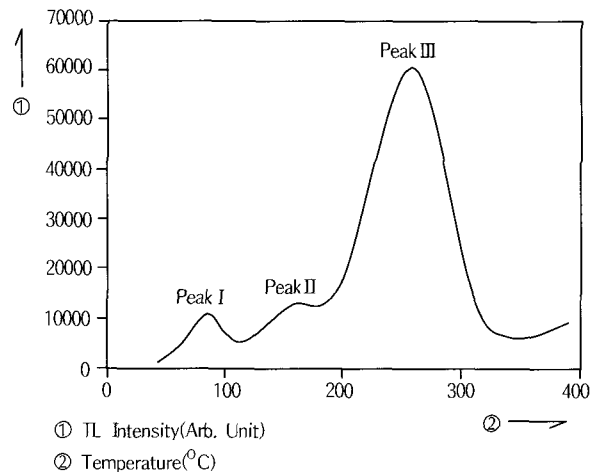


Fig. 2. The typical glow curve of CaSO₄:Tb TLD

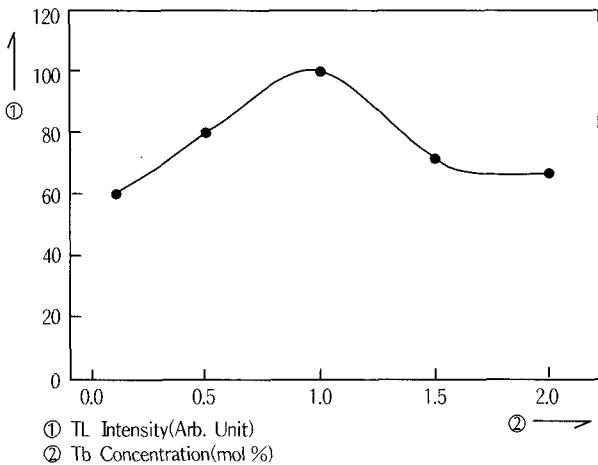


Fig. 3. The variation of TL intensity with different Tb concentration.

Fig. 3과 4는 활성체의 농도와 소성 온도 변화에 따른 주 peak의 상대적인 열형광 강도를 나타내었다. 활성체의 최적 조건을 찾기 위하여 Tb농도를 0.1~2.0 mol%, 소성 온도를 400~900 °C까지 변화시킨 결과, 활성체의 최적농도가 1.0 mol%, 소성 온도가 600 °C일 경우 상대적인 열형광 강도가 가장 높게 나타났다.

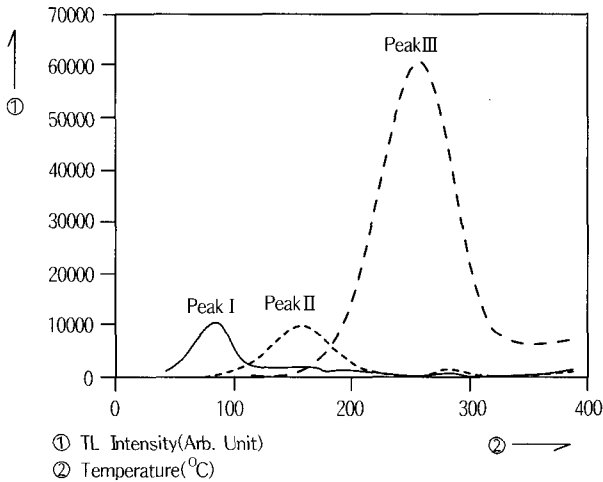


Fig. 4. The variation of TL intensity with different sintering temperature.

Fig. 5는 glow 곡선을 각각 분리·측정한 결과를 나타내었다. 먼저 glow peak I의 분리는 X-선을 조사한 TLD를 [X선 조사 직후 곧바로 측정된 glow 곡선(peak I이 감쇠하지 않은 전체 glow 곡선)]으로부터 [X선 조사 후 140분이 경과한 후에 측정된 glow 곡선(peak I이 제거된 glow 곡선)]을 감산함으로써 glow peak I만을 분리할 수 있었으며, peak III의 분리는 여러 온도에서 시간을 변화시키면서 thermal bleaching한 결과, 120 °C, 600 sec에서 glow peak III에 영향을 주지 않으면서 peak II를 제거하고 peak III만

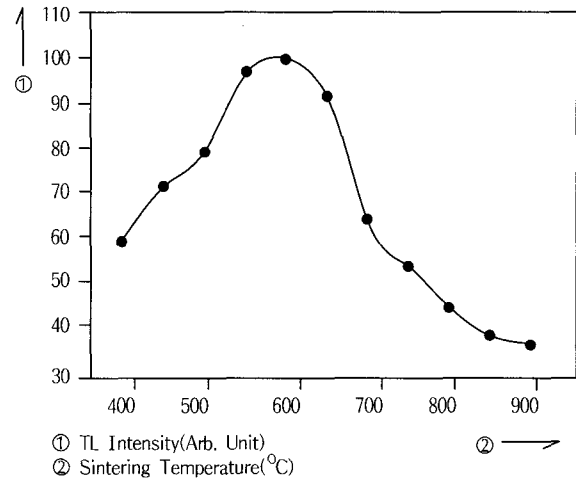


Fig. 5. Isolated glow peaks of CaSO₄:Tb TLD by thermal bleaching method.

을 분리·측정할 수 있었다. 또한 peak II의 분리는 [X선 조사 후 140분이 경과한 후에 측정된 glow 곡선]으로부터 [120 °C, 600 sec로 thermal bleaching하여 peak II를 제거한 glow 곡선]을 감산함으로써 분리할 수 있었으며, 따라서 각각 분리·측정된 3개의 glow peak들을 합하면 실험적으로 측정된 전체 glow 곡선과 잘 일치함을 알 수 있었다.

2. 트랩매개변수

1) 초기상승법

열형광 glow peak의 초기상승부분은 발광차수에 관계없이 절대온도 T와 열형광 강도 I(T)와의 관계를

$$\ln[I(T)] = -\frac{E}{kT} + \text{constant} \quad (1)$$

로 표현할 수 있다. 여기서 E는 활성화에너지이며 k는 Boltzmann 상수이다. 따라서 glow peak 강도의 약 5% 이내의 초기 상승부분을 1/T에 대한 ln[I(T)]의 그래프로 나타내고 (Arrhenius plot) 그 직선의 기울기로부터 활성화에너지를 측정할 수 있다³⁾.

Fig. 6은 분리·측정된 glow peak I, II 및 III의 초기상승부분을 1000/T에 대한 ln[I(T)]로 나타낸 것이며, 이 직선의 기울기로부터 peak I, II 및 III의 활성화에너지를 구한 결과 각각 0.72, 0.93, 1.07 eV였다.

2) Peak 형상법

Peak 형상법은 Fig. 7과 같이 단일 glow peak에서 peak 온도를 T_g, 반치폭(full width at half maximum, FWHM)에 해당하는 저온측 온도를 T₁, 고온측 온도를 T₂, ω = T₂-T₁, δ = T₂-T_g, τ = T_g-T₁, glow peak의 대칭성을 나타내는 기하학적 인자를 μ_g = δ/ω 로 정의하고, 활성화에너지 E는 다음 식으로 구하는 방법이다³⁾.

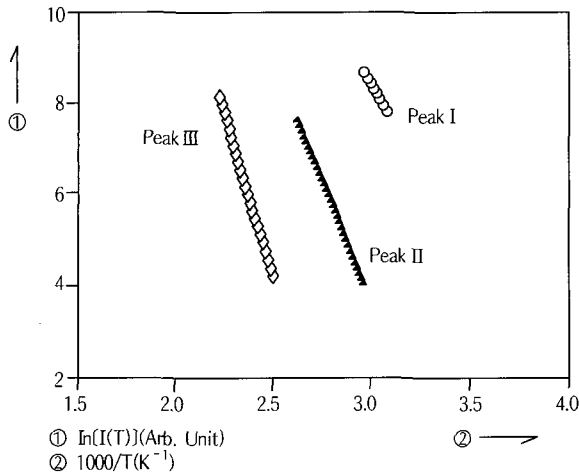


Fig. 6. The plot of $\ln I$ versus $1000/T$ for initial rise parts of the isolated glow peaks.

$$E_x = C_x \left(\frac{kT_g^2}{x} \right) - B_x (2kT_g) \quad (2)$$

단, 첨자 x 는 각각 ω , δ , τ 를 의미하며, 각 매개변수를 사용할 때 진동수인자의 온도의존성을 무시하면 상수 C_x 와 B_x 는 다음과 같이 나타낼 수 있다³⁾.

$$\begin{aligned} C_\tau &= 1.51 + 3(\mu_g - 0.42) : B_\tau = 1.58 + 4.2(\mu_g - 0.42) \\ C_\delta &= 0.976 + 7.3(\mu_g - 0.42) : B_\delta = 0 \\ C_\omega &= 2.52 + 10.2(\mu_g - 0.42) : B_\omega = 1 \end{aligned} \quad (3)$$

기하학적 인자 μ_g 는 활성화에너지가 0.1~1.6 eV, 진동수인자가 $10^5 \sim 10^{13} \text{ s}^{-1}$ 범위일 때 E와 S에 독립적이며 거의 발광차수에만 의존하는데 1차 발광의 경우 $\mu_g = 0.42$, 2차 발광의 경우 $\mu_g = 0.52$ 가 된다.

Fig. 7과 같이 분리·측정된 각각의 단일 glow peak에 대하여 peak 온도와 ω , δ , τ 를 구하고 (2)와 (3)식을 사용하여 활성화에너지를 각각 구한 후 각 glow peak I, II 및 III의 평균값은 각각 0.71, 0.84, 0.99 eV이었으며, 또한 각 glow peak의 대칭성 인자 μ_g 값으로부터 발광차수 m 를 구한 결과 peak I, II 및 III는 각각 1.12, 1.46, 1.34로 나타나 $\text{CaSO}_4:\text{Tb}$ 는 모두 일반차수(general order)의 glow peak로 되어 있음을 알 수 있었다.

3) 가온율법

열형광 glow 곡선을 측정할 때 모든 실험조건을 동일하게 유지하고 시료에 가하는 가온율을 높이면 peak 온도와 열형광 강도가 증가하게 되는데, 가온율법은 이를 이용하여 활성화에너지를 측정하는 방법이다. 두개의 서로 다른 가온율 β_1 과 β_2 에서 glow 곡선을 측정하여 peak 온도를 각각 T_{g1} , T_{g2} 라 할 때 활성화에너지 E는

$$E = \frac{kT_{g1}T_{g2}}{T_{g1} - T_{g2}} \ln \left[\frac{\beta_1}{\beta_2} \left(\frac{T_{g2}}{T_{g1}} \right)^2 \right] \quad (4)$$

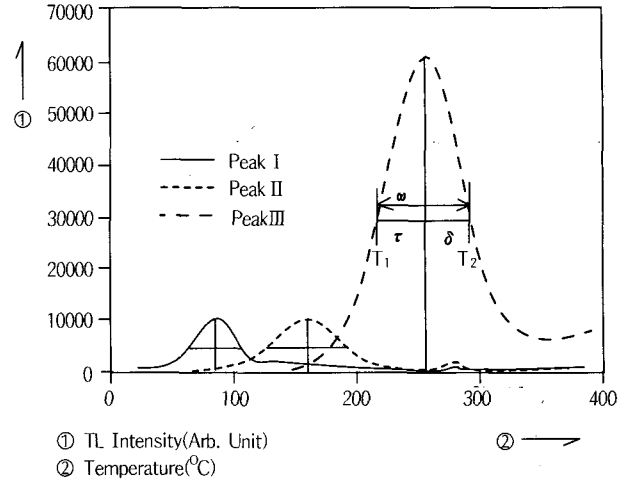


Fig. 7. Isolated glow peaks and their peak shape parameters.

로 주어진다.

Fig. 8는 1, 2 및 4 °C/sec의 가온율로 측정된 glow 곡선을 나타낸 것으로 가온율이 증가할수록 peak 온도가 고온쪽으로 이동하고 열형광 강도가 증가하는 것을 알 수 있다. Fig. 5의 각 glow peak를 구하는 것과 같은 방법으로 각 가온율에서 측정된 glow 곡선을 개개의 glow peak로 분리하여 측정하고 각 peak의 온도를 (4)식에 대입하여 peak I, II 및 III의 활성화에너지를 구한 결과 각각 0.68, 0.85, 1.02 eV였다.

이상과 같이 초기상승법, peak 형상법, 가온율법 등으로 구한 활성화에너지는 Table 1과 같다. 발광차수는 peak 형상법으로만 구해지며 $\text{CaSO}_4:\text{Tb}$ 의 경우 모두 일반차수의 glow peak로 되어 있다. 한편, 열형광 과정이 일반차수인 경우 진동수인자 S, 활성화에너지 E, 발광차수 m 는 근사적으로

$$\frac{\beta E}{kT_g^2} = S \cdot \exp\left(-\frac{E}{kT_g}\right) \times \left[1 + (m-1) \cdot 2 \frac{kT_g}{E}\right] \quad (5)$$

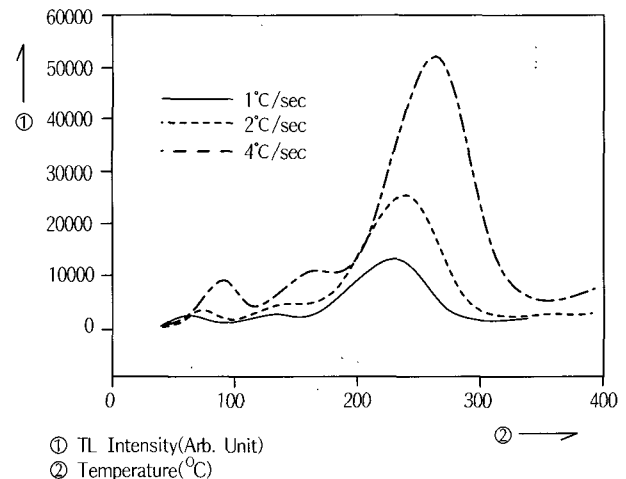


Fig. 8. The glow curves of $\text{CaSO}_4:\text{Tb}$ TLD with various heating rates.

의 관계를 만족한다¹²⁾. 여기서 β 는 가온율이고, T_g 는 peak 온도이다. 따라서 측정된 활성화에너지와 발광차수를 (5)식에 대입하여 진동수인자를 구할 수 있었으며, 그 결과를 Table 1에 함께 나타내었다.

Table 1. Trap parameters of CaSO₄:Tb TLD.

Trap Parameter	Peak I	Peak II	Peak III	Remark (method)
	0.72	0.93	1.07	initial rise
Activation Energy(eV)	0.71	0.84	0.99	peak shape
	0.68	0.85	1.02	heating rate
	0.70	0.87	1.03	average value
Kinetic Order	1.12	1.46	1.34	
Frequency Factor(s ⁻¹)	1.76×10 ⁹	1.74×10 ⁹	9.77×10 ⁸	

3. Glow 곡선 Fitting법

열형광 glow 곡선에 대한 수학적 형태를 가정하여 측정된 glow 곡선을 최소자승법으로 fitting하여 트랩매개변수를 구할 수 있다^{13, 14)}. 본 연구에서는 계산의 편의를 위하여 분리·측정된 각각의 glow peak에 대하여 fitting하고 트랩매개변수를 구하였다.

Glow 곡선으로부터 최종적으로 분리된 각 glow peak에 대해

$$\epsilon^2 = \sum_{i=1}^n [I_{th}(T_i) - I_{ex}(T_i)]^2 \quad (6)$$

가 최소가 되도록 최소자승법(least square method)으로 fitting하여 트랩매개변수를 결정할 수 있다. 여기서 $I_{th}(T_i)$ 는 온도 T_i 에서 이론적으로 계산된 glow peak이고, $I_{ex}(T_i)$ 는 측정된 glow peak의 강도이다. Glow 곡선의 수학적 형태를 Gauss함수로 가정할 수도 있으나¹³⁾, 본 연구에서는 Chen³⁾에 의해 제시된 일반차수의 발광과정에 대한 열형광 강도를 그대로 사용하였는데, 일반차수의 열형광 glow peak는 다음 식으로 나타낼 수 있다³⁾.

$$I(T) = C \cdot S \cdot \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) \left[(m-1) \frac{S}{\beta} \int_{T_0}^T \exp\left(-\frac{E}{kT'}\right) dT' + 1 \right]^{-\frac{m}{m-1}} \quad (7)$$

여기서 C는 상수이다. 따라서 단일 glow peak의 수학적 형태를 식 (7)로 두고 식 (6)의 관계가 만족하도록 활성화에너지, 진동수인자, 발광차수를 변화시켜 최소자승법으로 fitting하는 BASIC program을 개발하고 이를 측정된 glow곡선의 fitting에 사용하였으며, 이때 식 (7)의 적분은 Simpson법에 의한 수치적분으로 구하였다.

Fig. 9은 최소자승법으로 fitting하여 구한 단일 glow peak와 전체 glow 곡선 및 실험적으로 측정된 glow 곡선을 함께 나타낸 것이다. Fitting에 의해 계산된 glow 곡선과 실험적으로 측정된 glow 곡선이 비교적 잘 일치하고 있으며, 아울러 fitting에 의해 구한 CaSO₄:Tb의 TLD의 트랩매개변수는 Table 2와 같다. 그리고 glow peak III만을 선량측정에 사용하는 경우 230~295 °C 범위의 glow peak 면적을 사용함으로써 glow peak II의 영향이나 TLD 판독 장치의 heater에 의한 흑체복사의 영향을 거의 받지 않고 선량판독을 할 수 있을 것이며(이때 가온율은 4 °C/s이다), 이는 thermal bleaching에 의해 실험적으로 분리된 glow peak의 결과(Fig. 5)와도 잘 일치한다.

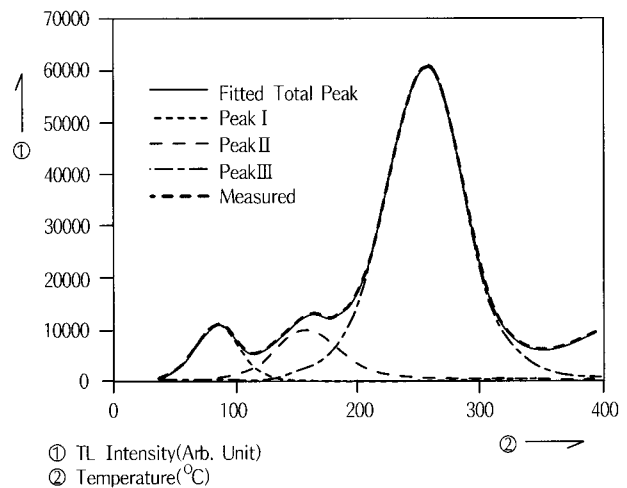


Fig. 9. The fitted and measured glow curve of CaSO₄:Tb TLD.

Table 2. Trap parameters of fitted glow curve of CaSO₄:Tb TLD.

Trap Parameter	Peak I	Peak II	Peak III
Activation Energy(eV)	0.84	0.92	0.94
Kinetic Order	1.94	2.41	1.69
Frequency Factor(s ⁻¹)	1.81 × 10 ¹¹	1.29 × 10 ¹⁰	1.30 × 10 ⁸

4. 감쇠율 특성

CaSO₄:Tb TLD의 glow peak 감쇠율을 측정된 결과는 Fig. 10과 같다. 실온의 자연상태에서 Peak I은 방사선 조사 140분 경과 후 완전히 소멸되지만, 5.22일 경과 후 peak II는 21%, 주 peak인 peak III는 2.5% 정도 감소하였다. 따라서 방사선 선량 평가시 반드시 이에 대한 보정이 필요할 것으로 생각되며, glow peak가 서로 다른 감쇠율 특성을 나타내므로, 방사선 조사가 1회에 한정되고 경과시간이 크지 않은 경우 3개 peak의 감쇠율과 각 peak 열형광 강도의 상대적 비로부터 방사선 조사 후의 경과시간을 추정할 수 있을 것이다. 또한 3개 peak의 상대적 열형광 강도의 비가 방사선 조사 직후의 열형광 강도의 비와 같지 않으면, 방사선 조사 후 일정 시간이 경과한 것이므로 glow 곡선을 fitting 하는 등의 경우 이를 고려해야 할 것이다.

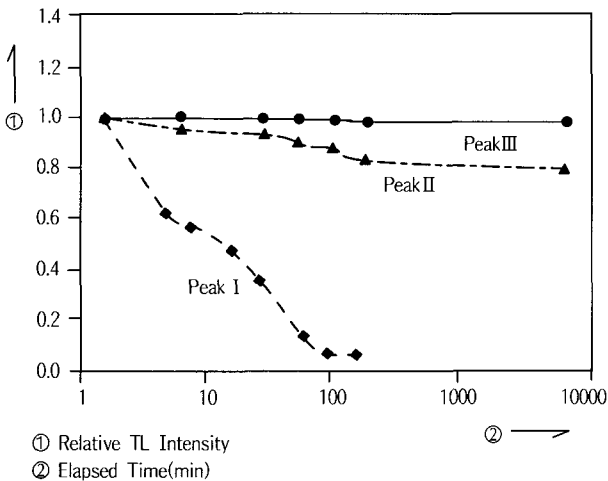


Fig. 10. Fading characteristics of CaSO₄:Tb TLD.

IV. 결 론

유리 캡슐형 CaSO₄:Tb TLD 제작시 활성체 Tb의 농도를 1.0 mol%, 공기 중에서 600°C, 2시간 동안 열처리하였을 때 최대의 열형광 강도를 나타내었다. 그리고 X선을 조사한 후 4°C/sec의 가온율로 측정하였을 때 glow 곡선은 85.0°C (peak I), 167.8°C (peak II) 및 257.8°C (peak III) 근처에 형성된 3개의 glow peak로 구성되어 있었으며, thermal bleaching법에 의한 실험적인 방법으로 각 glow peak를 분리하여 측정할 수 있었다.

분리·측정된 각각의 glow peak는 초기상승법, peak 형상법, 가온율법으로 분석하여 활성화에너지, 진동수인자 및 발광차수를 구하였는데, glow peak I, II 및 III의 활성화

에너지는 0.70, 0.87, 1.03 eV이고, 진동수인자는 1.76×10^9 , 1.74×10^9 , $9.77 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$, 발광차수는 1.12, 1.46, 1.34이었다. 또한 단일 glow peak를 최소자승법으로 fitting한 결과, peak I, II 및 III의 활성화에너지는 0.84, 0.92, 0.94 eV이고, 진동수인자는 1.81×10^{11} , 1.29×10^{10} , $1.30 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$, 발광차수는 1.94, 2.41, 1.69로 나타났으며, glow peak II의 영향이나 TLD 판독장치의 heater에 의한 흑체복사의 영향을 거의 받지 않고 선량판독을 할 수 있는 peak III의 온도범위를 가온율이 4°C/s인 경우 230~295°C로 최적화할 수 있었다. 한편 주 peak의 감쇠율은 실온의 자연상태에서 방사선 조사 후 5.22일에 약 2.5% 정도였다.

따라서 제작한 CaSO₄:Tb TLD의 특성으로 보아 각 의료기관 및 산업체 분야의 TLD를 이용한 선량 평가에 활용이 가능할 뿐 만 아니라, 열형광선량계의 국산화 개발 촉진, 새로운 고감도의 열형광물질의 개발, TLD를 이용한 선량 측정법의 확립 및 계측 정밀도 향상, 열형광 현상을 이용한 물성연구의 활성화, 열형광 mechanism 연구의 기초자료 제공, 비선형 glow 곡선 fitting 방법의 확립, 방사선 관련 시설 등에서의 선량 측정시의 응용에 기대된다.

참 고 문 헌

1. 장시영 : 동위원소회보, 13(4), 56, 1998.
2. M. Oberhofer and A. Scharmann : Applied Thermo-luminescence Dosimetry, Adam Hilger Ltd., Bristol, 1981.
3. R. Chen and Y. Kirsh : Analysis of Thermally Stimulated Processes, Pergamon Press, Oxford, 1981.
4. A. S. Pradhan : Radiat. Prot. Dosim., 1(3), 153, 1981.
5. T. Yamashita, N. Nada, H. Onishi and S. Kitamura : Health Phys., 21, 295, 1971.
6. C. M. Sunta : Nucl. Tracks Radiat. Meas., 10(1/2), 47, 1985.
7. M. Prokic : Nucl. Instrum. Methods, 151, 603, 1978.
8. I. Kasa : Radiat. Prot. Dosim., 33(1/4), 299, 1990.
9. 노경석 : 박사학위논문, 경남대학교, 1997.
10. 藤村亮一郎, 山下忠興 : 放射線による固體現象と線量測定, 養賢堂發行, 199, 1985.
11. C. Bacci, R. Bernabei, S. d'Angelo and C. Furetta : Radiat. Effect, 69, 127, 1983.
12. G. Drazic and M. Trontelj : Appl. Radiat. Isot. 37(4), 337, 1986.
13. P. Sahre : Radiat. Protec. Dosim., 18(1), 19, 1987.
14. 우 흥, 강희동, 김도성 : 센서기술학술대회논문집, 1(1), 122, 1990.