

## 熱螢光線量計의 에너지依存性 補償

大邱保健專門大學 放射線科

朴明煥 · 李準逸

嶺南大學校病院 放射線科

權德文

Abstract

### **The Compensation of the Energy Dependence of TLD**

**Myeong Hwan Park, Joon Il Lee**

*Dept. of Radiotechnology, Taegu Health Junior College*

**Duk Moon Kwon**

*Dept. of Diagnostic Radiology, Yeungnam University Hospital*

The  $\text{CaSO}_4 : \text{Tm}$ -PTFE TLDs have been prepared and their energy dependences of TL intensity to X-rays have been investigated.

The dose dependence of the prepared  $\text{CaSO}_4 : \text{Tm}$ -PTFE TLDs is linear within the range of  $100 \mu\text{Gy} - 10\text{Gy}$  for X-rays and gamma rays. The spectral peaks of TL emission spectrum are at about 350nm and 475nm. The fading rate of the main peak has been found to be about 2% for 30days when  $\text{CaSO}_4 : \text{Tm}$ -PTFE TLDs stored in the dark room at room temperature.

The energy dependence of  $\text{CaSO}_4 : \text{Tm}$ -PTFE TLD has been compensated by combining the TL responses of one bare TLD and five TLDs filtered with 1.0mm Al, 0.2mm Cu, 0.5mm Cu, 1.5mm Cu, 2.0mm Pb respectively. The determined correction coefficients for filter combination are  $a_0=0.078$ ,  $a_1=-0.009$ ,  $a_2=-0.235$ ,  $a_3=0.588$ ,  $a_4=0.568$  and  $a_5=0.180$  respectively.

From the results of these studies, the prepared TLD badge of six dosimeter combination may be useful as a radiation dosimeter for personal and environmental monitoring.

## I. 서 론

최근 의료기관, 원자력발전소 및 산업체연구 소와 대학 등과 같은 방사선 취급기관에서의 방사선발생장치 및 방사성동위원소의 사용이 늘어남에 따라서 방사선 작업종사자의 수도 급격히 증가하고 있어 방사선검출과 선량평가의 필요성이 증대되고 있다. 방사선 작업종사자의 개인피폭선량을 측정하기 위하여 개인피폭선량계(pocket dosimeter), film badge 및 열형광선량계(thermoluminescent dosimeter, TLD) 등이 일반적으로 사용되고 있으며, 특히 열형광선량계<sup>1, 2)</sup>는 다른 선량계로는 측정이 불가능한 인체의 조직내라든가 空胴内の 측정에도 이용될 수 있고 선량측정 범위가 넓으며 장기간의 집적선량 측정이 가능하므로 개인피폭선량 측정이나 환경방사선 측정에 사용될 수 있으며 판독 과정이 간단하고 적절한 열처리를 통해 반복사용이 가능한 장점이 있다<sup>3-5)</sup>.

TLD의 열형광체로서는 유효원자번호( $Z_{eff}$ )가 생체조직 ( $Z_{eff}=7.42$ )과 등가인  $\text{LiF}$  ( $Z_{eff}=8.14$ ),  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  ( $Z_{eff}=7.4$ ),  $\text{BeO}$  ( $Z_{eff}=7.13$ ) 및  $\text{MgB}_4\text{O}_7$  ( $Z_{eff}=8.4$ ) 등과 뼈조직과 등가인  $\text{CaSO}_4$  ( $Z_{eff}=15.3$ ),  $\text{CaF}_2$  ( $Z_{eff}=16.3$ ) 및  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $Z_{eff}=10.2$ ) 등<sup>6)</sup>이 주로 사용되고 있다. 유효원자번호가 조직과 유사한 열형광체는 열형광감도가 비교적 낮은 반면 유효원자번호가 큰 열형광체는 조직등가물질에 비해 5배 내지 60배정도 열형광감도가 우수하나 에너지에 대한 의존성이 크다는 단점이 있다.

한편 환경방사선(자연방사선 및 인공방사선)과 임상에서 사용되는 방사선의 에너지 범위는 광범위하다. 즉 진단방사선에서는 10-150keV의 X선을 조사하고, 핵의학에서는 140keV인 <sup>99m</sup>Tc 동위원소가 많이 사용되며, 방사선치료에서는 1.25MeV의  $\gamma$ 선을 비롯하여 선형가속장치에서 발생하는 수 MeV의 고에너지 X선이 이용되고 있다.

$\text{CaSO}_4 : \text{Tm}$ 의 열형광체는 X선 및  $\gamma$ 선에 대한 감도가 매우 높고 선량의존성 및 측정 가능

한 에너지 영역이 넓으며 감쇠율이 작은 장점<sup>7)</sup>이 있지만 저에너지 영역에서의 에너지의존성이 크게 나타나기 때문에 환경방사선 측정이나 개인선량계로서 사용하기 위해서는 입사광자의 에너지에 무관하게 사용할 수 있도록 에너지의존성을 보상하여야 한다.

본 연구에서는  $\text{CaSO}_4 : \text{Tm}$ 을 PTFE(polytetrafluorethylene)와 중합하여 디스크형으로 소자화한  $\text{CaSO}_4 : \text{Tm}-\text{PTFE}$  TLD를 직접 제작하여 선량계적 특성을 조사하였다. 아울러 Al, Cu, Pb등의 필터를 부착한 TLD badge를 제작하였으며 24.1keV-1.25MeV 영역의 X/ $\gamma$ 선에 대한 열형광감도의 에너지의존성을 측정하고, 각 TLD 감도의 에너지의존성을 적절히 조합하여  $\text{CaSO}_4 : \text{Tm}-\text{PTFE}$  TLD의 에너지 의존성을 보상하고자 하였다.

## II. 이 론

### 1. TLD에 의한 방사선 선량측정 이론

#### 1) 방사선 자체를 표현하는 물리량

##### (1) 에너지분포를 갖는 방사선

입사 방사선의 에너지가 에너지 스펙트럼- $\Phi(E)$ 를 갖는 경우, 스펙트럼 분포의 최대에너지를  $E_{max}$ 라고 할 때 입사 fluence  $\Phi$ , 에너지 fluence  $\psi$  및 입사입자의 평균에너지  $E_{ave}$ 는 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \Phi &= \int_0^{E_{max}} \Phi(E) dE \\ \psi &= \int_0^{E_{max}} E \Phi(E) dE \\ E_{ave} &= \int_0^{E_{max}} E \Phi(E) dE / \int_0^{E_{max}} \Phi(E) dE \end{aligned} \quad (1)$$

(2) X선의 유효에너지

X선은 통상 연속에너지 스펙트럼을 가지므로 X선의 성질을 표현하기 위하여 반가층(half value layer, HVL)과 유효에너지(effective energy)라는 물리량을 사용한다. 반가층은 측정시 산란선이 무시될 수 있는 미세한 beam이라는 조건하에서 X선의 조사선량율이 1/2이 되는 흡수층의 두께로 정의하고, 선감쇠계수  $\mu$ 와는 다음의 관계를 갖는다.

$$HVL = \frac{0.693}{\mu} \quad (2)$$

그리고 X선의 유효에너지는 연속에너지 스펙트럼을 갖는 X선의 반가층이 어떤 특정에너지의 X선의 반가층과 같을 때 그 에너지를 연속에너지 스펙트럼을 갖는 X선의 유효에너지로 정의한다.

2) 방사선과 물질과의 상호작용계수

방사선과 물질과의 상호작용의 정도를 나타내는 상호작용계수는 비하전입자에 대한 선감쇠계수, 에너지 전이계수, 에너지 흡수계수 및 하전입자에 대한 저지능과 선에너지전이로 나누어 생각할 수 있다.

(1) 선감쇠계수

동일한 에너지를 갖는 방사선이 동일한 방향으로 N개 입사하여 길이 dl의 흡수체 물질을 통과하면서 흡수 또는 산란에 의해 dN개의 변화가 일어났을 때 선감쇠계수(linear attenuation coefficient)  $\mu$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\mu = \frac{1}{N} \cdot \frac{dN}{dl} \quad (3)$$

따라서 입사방향과 에너지가 변화하지 않고 길이 l의 흡수체를 통과하는 입자의 수는  $N=N_0 \cdot \exp(-\mu l)$ 이며 선감쇠계수  $\mu$ 를 물질의 밀도  $\rho$ 로 나눈 값  $\mu/\rho$ 를 질량흡수계수라고 한다.

(2) 에너지 전이계수

에너지 E를 갖는 방사선이 N개 입사하여 길이 dl의 흡수체를 통과하는 동안에 흡수체와 상호작용에 의해 생긴 2차 하전입자의 운동에너지로 전이한 에너지를  $dE_{tr}$ 라고 할 때 에너지 전이계수(energy transfer coefficient)  $\mu_{tr}$ 은 다음과 같이 정의된다.

$$\mu_{tr} = \frac{1}{EN} \cdot \frac{dE_{tr}}{dl} \quad (4)$$

그리고 에너지 전이계수  $\mu_{tr}$ 를 물질의 밀도  $\rho$ 로 나눈 값  $\mu_{tr}/\rho$ 를 질량-에너지 전이계수라고 한다.

(3) 에너지 흡수계수

입사 방사선과 흡수체와 상호작용으로 생긴 2차 하전입자의 운동에너지는 모두가 흡수체 물질에 흡수되지 않고 일부는 제동복사에 의해 흡수체 밖으로 나가게 되므로 흡수체 물질에 흡수되는 순 에너지는 하전입자의 운동에너지 중 제동복사에 의한 에너지손실을 제외한 에너지가 된다. 따라서 제동복사에 의한 손실율을 g라고 할때 에너지 흡수계수(energy absorption coefficient)  $\mu_{en}$ 은 다음과 같이 정의된다.

$$\mu_{en} = (1-g) \mu_{tr} \quad (5)$$

그리고 에너지 흡수계수  $\mu_{en}$ 을 물질의 밀도  $\rho$ 로 나눈 값  $\mu_{en}/\rho$ 를 질량에너지 흡수계수라고 한다.

(4) 저지능

하전입자가 길이 dl의 흡수체 매질내를 통과하면서 에너지 손실이 dE일때 저지능(stopping power) S는 다음과 같이 정의한다.

$$S = \frac{dE}{dl} \quad (6)$$

그리고 저지능 S를 물질의 밀도  $\rho$ 로 나눈 값  $S/\rho$ 를 질량저지능이라 한다.

(5) 선에너지전이

하전입자가 흡수체 매질내를 통과하면서 그 비적을 따라 거리 dl을 진행하는 동안에 전자와의 상호작용으로 dE의 에너지를 손실하였을 때 선에너지전이(linear energy transfer, LET)  $L\Delta$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$L\Delta = \left[ \frac{dE}{dl} \right]_{\Delta} \quad (7)$$

이때 첨자  $\Delta$ 는 충돌에 의해 생긴 2차전자의 에너지가  $\Delta$ 이하임을 의미하며  $L\Delta$ 는 저지능 S와 같은 값을 갖는다.

3) 방사선량(radiation dose)의 관계

(1) 조사선량과 흡수선량의 관계

조사선량 x로 방사선이 조사될 때 흡수체 물질이 전자평형상태에 있다고 가정하면 질량 dm으로 부터 방출된 2차전자가 공기에 부여하는 에너지는  $dQ \cdot (W_{air}/e)$ 가 된다. 여기서  $W_{air}$ 는 공기의 평균 이온화에너지(33.85eV)이며, e는 전자의 전하량이다. 따라서 전자평형상태 하에서의 공기의 흡수선량  $D_{air}$ 는 다음과 같다.

$$D_{air}[Gy] = \frac{dQ}{dm} \cdot \frac{W_{air}}{e} = x \cdot \frac{W_{air}}{e} = 33.85x[C/kg] \quad (8)$$

한편, 공기 이외의 일반적인 물질에 대해 동일한 조사선량 x로 조사할 경우 단위질량당 흡수된 에너지(흡수선량)는 질량-에너지 흡수계수  $\mu_{en}/\rho$ 에 비례하므로 물질의 흡수선량  $D_m$ 은 다음 식으로 구할 수 있다.

$$D_m[Gy] = 33.85 \frac{(\mu_{en}/\rho)_m}{(\mu_{en}/\rho)_{air}} \cdot x[C/kg] \quad (9)$$

(2) 조사선량과 에너지 fluence와의 관계

공기의 질량-에너지 흡수계수를  $(\mu_{en}/\rho)_{air}$ , 공기의 평균 이온화에너지를  $W_{air}(=33.85eV)$ , 방사선의 에너지를  $h\nu$ , 입자 fluence를  $\Phi$ 라고 하면 조사선량 x와 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$x = \Phi \cdot h\nu \cdot \left[ \frac{\mu_{en}}{\rho} \right]_{air} \cdot \frac{e}{W_{air}} \quad (10)$$

2. TLD 감도의 에너지 의존성

TLD를 X선이나  $\gamma$ 선과 같은 광자의 선량측정에 활용할 경우 TLD의 특성 중 반드시 알아야 할 특성은 광자에 대한 TLD 감도의 에너지 의존성이다. TLD 감도의 에너지 의존성은 동일한 조사선량으로 조사하였을 때 표준물질에 흡수된 에너지에 대한 TLD 물질에 흡수된 에너지의 비를 에너지 의존성으로 정의한다. 따라서 에너지 의존성은 각각의 TLD 물질 고유의 특성이며 TLD 물질이 전자평형상태에 있을 때 실험적으로 측정할 수도 있으나 측정이 비교적 어려우므로 활용 목적에 맞는 특성의 TLD를 선택하고 TLD의 특성을 평가하기 위하여 이론적인 계산치를 구하는 것이 유용하다.

TLD 감도의 에너지 의존성의 이론적 계산은 (a) TLD 물질이 전자평형 상태에 있고 (b) 검출기 자체에 의한 흡수를 무시할 수 있으며 (c) 단위선량당의 TL의 광량(light yield/rad)이 LET(linear energy transfer)에 독립적이라 가정할 때 Bragg의 원리로부터 다음과 같이 계산할 수 있다. 즉 TLD의 에너지 의존성은 공기를 표준물질로 택할 때(공기에 대해서는 정의에 따라 조사선량을 정확히 측정할 수 있고 조사선량과 흡수선량의 비가 일정함으로 표준물질로서 적합함) 공기와 TLD물질의 질량-에너지 흡수계수의 비로서 계산할 수 있다. 따라서 TLD 물질의 질량-에너지 흡수계수를  $(\mu_{en}/\rho)_d$ , 공기의 질량-에너지 흡수계수를  $(\mu_{en}/\rho)_{air}$ 라 할 때 에너지 의존성 S(E)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S(E) = \frac{[\mu_{en}/\rho]_d}{[\mu_{en}/\rho]_{air}} \quad (11)$$

단, TLD 물질이 화합물이나 혼합물인 경우 질량-에너지 흡수계수는 각 구성원소들의 질

량-에너지 흡수계수의 합으로 주어진다. 즉 각 구성원소들의 질량-에너지 흡수계수를  $(\mu_{en}/\rho)_i$ , 중량에 대한 weighting factor를  $W_i$ 라 하면 화합물 또는 혼합물의 질량-에너지 흡수계수는 다음 식으로 주어진다.

$$[\mu_{en}/\rho]_d = \sum [\mu_{en}/\rho]_i \cdot W_i \quad (12)$$

따라서 TLD 감도의 에너지 의존성을 계산할 때 TLD 물질내에 원자번호가 큰 불순물이나 dopant가 있을 경우에는 이를 고려하여야 한다.

그림 II-1는 TLD로서 가장 많이 사용하는 열형광체에 대해서 J.H.Hubbell<sup>8)</sup>의 질량-에너지 흡수계수의 표를 이용하여 (11)식에 의해서 이론적으로 계산한 에너지 의존성 값으로 유효원자번호가 적은 LiF, Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>의 경우에는 에너지 의존성이 비교적 낮은 반면에 유효원자번호가 큰 CaF<sub>2</sub>, CaSO<sub>4</sub>인 경우에는 30keV에서 약 10배 이상의 높은 에너지 의존성을 보여 주고 있다. 이는 열형광 감도가 저에너지 광자에서 광전흡수가 주로 일어나고 광전흡수는 유효원자번호의 4-5승에 비례하므로 선량계의 유효원자번호가 커지면 저에너지 광자에 대한 에너지 의존성이 크게 되기 때문이다.

선량계의 목적으로서는 X선이나  $\gamma$ 선에 대한 TLD 감도의 에너지 의존성이 넓은 에너지 영역에 걸쳐 일정한 것이 바람직하므로 TLD 물질의 유효원자번호가 낮은 것이 좋고, 유효원자번호가 큰 경우에는 TLD에 적절한 필터를 조합하여 사용할 수 있으며 이 경우 TLD 감도의 에너지 의존성은 선량계의 설계에 따라 달라질 수 있으므로 실험적으로 측정하여야 한다. TLD 감도의 에너지 의존성을 실험적으로 측정하는 경우에는 통상 <sup>60</sup>Co 또는 <sup>137</sup>Cs  $\gamma$ 선에 대한 TLD의 판독치와 특정에너지의 판독치의 비로서 나타내며 이를 에너지 의존성의 보정인자로 사용한다.

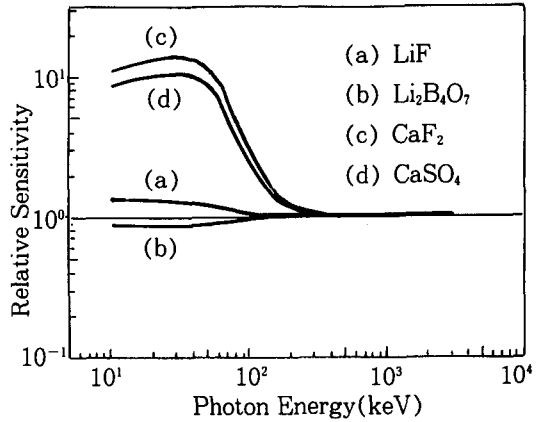


Fig. II - 1. The calculated energy dependence of some TL phosphors

### 3. 에너지 의존성의 보상 방법

본 연구에서는 CaSO<sub>4</sub>:Tm-PTFE TLD의 에너지 의존성을 보상하기 위하여 Stammers와 Kingston<sup>9)</sup>이 제시한 방법을 사용하였는데 이들은 TLD에 적절한 필터를 부착하고, 각 TLD의 에너지 의존성을 측정하여 이를 적절히 조합하므로써 에너지 의존성이 1이 되게 하였다. 즉 n개의 필터를 부착한 TLD에 대해

$$S(E) = a_0 S_0 + a_1 S_1 + \dots + a_n S_n(E) = 1 \quad (13)$$

이 되게 함으로서 에너지 의존성을 평탄하게 할 수 있다. 여기서 S<sub>i</sub>(E)는 에너지 E에서 필터 i에 나타나는 TLD 감도의 에너지 의존성이며, a<sub>i</sub>는 각 필터의 에너지 의존성에 곱해주는 보정계수이다. (13)식의 보정계수를 최소자승법에 의하여 구하면<sup>10)</sup> 다음과 같이 주어진다. 따라서 (14)식으로 부터 a<sub>i</sub>를 구할 수 있으며, 이로부터 각 TLD 감도의 에너지 의존성 S<sub>i</sub>(E)를 알게 되면 (13)식에 따라 이를 조합하여 에너지 의존성을 보상할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \Sigma(S_0^2) & \Sigma(S_0S_1) & \Sigma(S_0S_2) & \cdots & \Sigma(S_0S_i) \\ \Sigma(S_1S_0) & \Sigma(S_1^2) & \Sigma(S_1S_2) & \cdots & \Sigma(S_1S_i) \\ \Sigma(S_2S_0) & \Sigma(S_2S_1) & \Sigma(S_2^2) & \cdots & \Sigma(S_2S_i) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Sigma(S_iS_0) & \Sigma(S_iS_1) & \Sigma(S_iS_2) & \cdots & \Sigma(S_i^2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Sigma S_0 \\ \Sigma S_1 \\ \Sigma S_2 \\ \vdots \\ \Sigma S_i \end{bmatrix} \quad (14)$$

### III. 실험장치 및 방법

#### 1. CaSO<sub>4</sub>: Tm-PTFE TLD의 제작

CaSO<sub>4</sub>: Tm-PTFE TLD의 제작과정은 다음과 같다. 먼저 활성체인 Tm 0.5mol%를 모체인 CaSO<sub>4</sub>와 함께 묽은 황산용액에 용해 시킨 후 황산증류 장치를 사용하여<sup>11)</sup> 400°C에서 4시간 30분 동안 증류하여 유독 물질인 황산을 95% 이상 수거 하였으며, 이때 carrier gas로서는 공기를 사용하였다. 혼합된 시료는 최적의 조건 600°C 2시간으로 소성시켰으며, 제작된 CaSO<sub>4</sub>: Tm 열형광체 75μm 이하 입자로 선별하여 PTFE(polytetrafluorethylene) 분말과 잘 혼합하기 위하여 액체질소 온도에서 분쇄한 후 혼합하였으며, 열형광체 특성의 변화를 최소화하기 위하여 PTFE에 대한 열형광체 분말의 함량을 20wt%에 직경 8.5mm, 두께 0.4mm의 디스크 형태로 저온압축·성형하였다. 압축·성형된 디스크 형태의 소자를 PTFE용접 근처인 370°C(PTFE의 용점은 327°C)에서 1시간 동안 공기 중에서 열처리 함으로써 PTFE와 열형광체를 중합하여 CaSO<sub>4</sub>: Tm-PTFE TLD를 제작하였다.

#### 2. CaSO<sub>4</sub>: Tm-PTFE TLD Badge의 제작

그림 III-1은 에너지 의존성을 측정하기 위해 제작한 CaSO<sub>4</sub>: Tm-PTFE TLD badge이다. 6개의 TLD를 한조로 하고 양쪽으로 1.5mm의

Lucite를 두어서 고에너지가 조사될 경우 Cu나 Pb과 같은 원자번호가 큰 필터로부터 방출되는 전자와 제동복사선을 차폐하였다.<sup>12)</sup> 그리고 5개의 TLD에는 필터를 부착하고 1개의 TLD에는 필터를 부착하지 않았다.

필터물질의 종류 및 두께는 24.1keV-1.25MeV 사이의 에너지 영역에서 γ선의 감쇠를 고려하고 열형광감도가 뚜렷하게 구별되게 선택하였는데 본 실험에서는 1.0mm Al, 0.2mm Cu, 0.5mm Cu, 1.5mm Cu, 2.0mm Pb를 사용하였다.

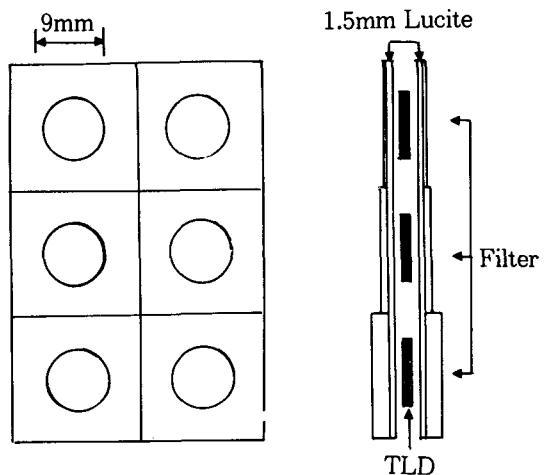


Fig. III-1. View of the CaSO<sub>4</sub>: Tm-PTFE TLD badge with filters

### 3. X선 및 $\gamma$ 선 조사

표 III-1은 TLD의 에너지 의존성을 조사하기 위하여 본 실험에서 사용한 X선 및  $\gamma$ 선의 조사조건이다. 저에너지 영역에서는 X선 발생장치(Toshiba, Model DC-15K)를 고에너지 영역에서는  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$  원격 조사장치(Buchluer Co.)를 사용하였다.

X선 발생장치를 사용한 경우에는 인가전압을 변화시키고 동시에 X선관 앞에 여러가지 필터를 두어 X-선의 유효에너지를 증가시켜 사용하였다.

Table III-1. Irradiation condition for the measurements of energy dependence of TLD radiation sensors

Source	kV Setting	Absorber	Effective Energy(keV)
X-ray	30kVp	none	24.1
	50kVp	0.5mm Al	29.0
	75kVp	4.5mm Al	39.7
	100kVp	0.2mm Cu + 0.5mm Al	49.2
	120kVp	0.4mm Cu + 1.0mm Al	62.2
	130kVp	0.6mm Cu + 2.0mm Al	70.0
	130kVp	1.0mm Cu + 2.0mm Al	77.0
Cs-137			662.0
Co-60			1250.0

각 실험조건에서 X선의 유효에너지를 측정하기 위해서 흡수체의 두께를 변화시키면서 조사선량을 측정하고, 그 결과를 최소자승법에 의해 직선으로 fitting하여 그 기울기로부터 반가층을 계산하고 반가층으로부터 유효에너지를 결정하였다. 그리고 국립보전원에서 검·교정한 electrometer(Capintec, Model 192A)와 ionization chamber(Capintec, Model PM-30 및

PR-06C)를 사용하여 IAEA 보고서 No. 277<sup>13)</sup>의 절차에 따라 선량을 측정하여 시료에 조사된 방사선의 선량을 측정하였다.

### 4. 열형광 측정장치

그림 III-2는 본 실험에서 사용한 열형광 측정장치의 개요이다.  $\text{CaSO}_4 : \text{Tm} - \text{PTFE}$  TLD 디스크 형태의 소자를 세라믹 열판으로 가열하고 이때 방출되는 열형광을 광전증배관(Hamamatsu Co., Model R268)으로 검출하였다. TL분석기(Top Electronic, Model 2001S)는 광전증배관에 전원을 공급하며 광전증배관으로부터의 TL신호를 증폭·측정하였다. 또한 ramp generator를 통해서 단위시간당 전압증가가 일정한 직류전원을 세라믹 열판에 공급하고, ramp generator를 조절하여 세라믹 열판의 가온율을 조절할 수 있으며, 열전대(chromel-alumel)로부터의 온도신호를 증폭한다. TL분석기로부터

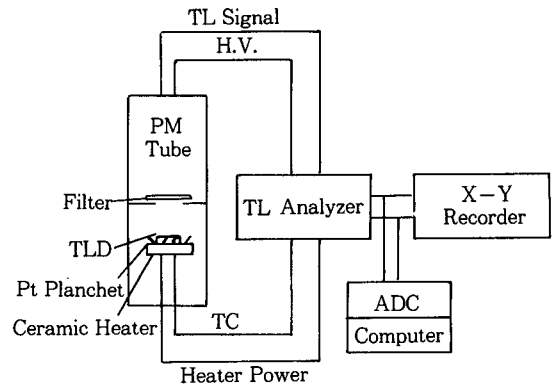


Fig. III-2. The schematic diagram of TL measurement system

터의 온도신호를 X축, 열형광 강도신호를 Y축으로 하여 X-Y기록계로 glow 곡선을 측정하였으며 동시에 A/D변환기를 장치한 개인용 컴퓨터로 glow 곡선을 측정하였다.

## IV. 결과 및 고찰

## 1. CaSO<sub>4</sub>:Tm-PTFE TLD의 에너지 의존성

그림 IV-1은 표 III-1로 설정한 유효에너지의 X/γ선을 CaSO<sub>4</sub>:Tm-PTFE TLD badge에 조사한 후 필터를 부착한 각 TLD 감도의 에너지 의존성을 측정하고, 이를 Co-60 γ선에 대한 상대적인 열형광강도를 나타낸 것이다. 각 TLD 감도의 에너지 의존성의 이론적 계산값과 실험 측정값이 잘 일치함을 볼 수 있고, 필터의 두께가 두꺼워질수록 저에너지 영역에서 TLD 감도가 낮아져 cut off 되어 가며 에너지 의존성이 점차 줄어들어 들어감을 알 수 있다. 또한 필터가 너무 두꺼워지면 저에너지 영역이 cut off 되어서 각각의 TLD 1개로서는

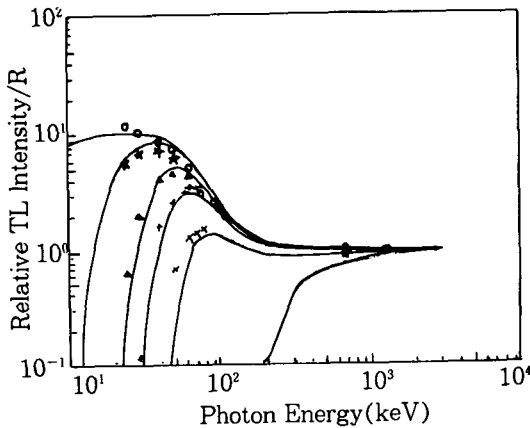


Fig. IV-1. The energy dependence of CaSO<sub>4</sub>:Tm-PTFE TLD(solid line:calculated, symbols:measured)

저에너지 영역의 X/γ선의 측정이 불가능해진다. 그러나 필터를 부착한 5개의 TLD와 필터를 부착하지 않은 1개의 TLD에서 나타나는 에너지 의존성을 (13)식에 따라 적절히 조합하여 표현하므로써 에너지 의존성을 거의 평탄하게 나타낼 수 있다.

## 2. 에너지 의존성의 보상

제작한 TLD badge에서 6개 TLD에 대해 측

정한 열형광 강도를 (13)식에 의해 조합하면 에너지 의존성을 보상할 수 있다. 표 IV-1은 필터를 부착한 각 TLD의 에너지 의존성의 측정 결과(그림 IV-1)로부터 구한 보정계수이며, 이론적인 에너지 의존성으로부터 구한 보정계수를 함께 나타내었다.

Table IV-1. Correction coefficients for CaSO<sub>4</sub>:Tm-PTFE TLD badge of six dosimeter combination

	Measured	Calculated
a <sub>0</sub>	0.078	0.119
a <sub>1</sub>	-0.009	-0.063
a <sub>2</sub>	-0.235	-0.344
a <sub>3</sub>	0.588	0.913
a <sub>4</sub>	0.568	0.306
a <sub>5</sub>	0.180	0.195

그림 IV-2은 표 IV-1의 보정계수를 이용하여 (13)식으로부터 구한 전체적인 에너지 의존성 함수이다. 원은 이론적으로 계산한 값이고, 별표는 실험적으로 측정된 값을 나타내고 있다. 대체적으로 이론치와 실험치가 잘 일치하고, 필터를 부착하지 않은 TLD경우의 저에너지(30keV)에서 약 10배정도 높은 에너지 의존성이 거의 평탄하게 나타남을 알 수 있었다. 따라서 필터를 부착한 5개의 TLD와 필터를 부착하지 않은 1개의 TLD로 구성된 TLD badge를 사용함으로써 입사에너지에 무관하게 정확한 선량을 평가할 수 있을 것으로 판단된다.



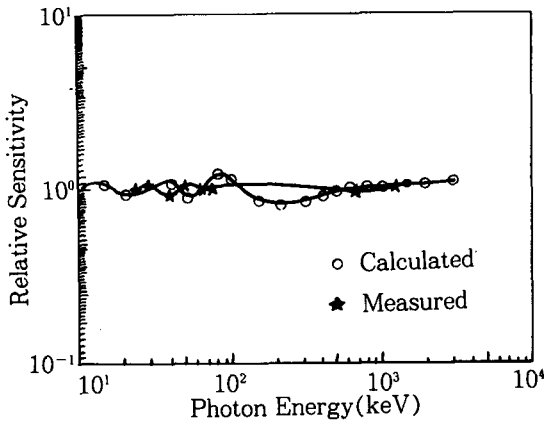


Fig. IV-2. The energy response of  $\text{CaSO}_4 : \text{Tm}$ -PTFE TLD compensated with 6 filters

## V. 결 론

$\text{CaSO}_4 : \text{Tm}$ -PTFE 열형광선량계의 에너지 의존성을 보상하기 위하여  $\text{CaSO}_4 : \text{Tm}$  열형광체 분말과 PTFE 분말을 잘 혼합하여 디스크 형태로 소자화하여 그 특성을 조사하였으며 필터를 부착한 TLD badge를 제작하여 에너지 의존성을 보상하였다.

선량 의존성은  $100 \mu\text{Gy} \sim 10\text{Gy}$ 의 광범위한 영역에서 선형적이었으며, 이 영역에서의 glow 곡선의 모양이나 peak 온도는 변화하지 않았고, 10Gy 이상에서는 supralinearity를 보였다.

또한 glow 곡선의 주 peak 온도에서 발광스펙트럼의 peak 파장은 350nm와 475nm로 나타났다으며 이 파장 영역은 사용한 광전증배관의 파장응답특성과 잘 일치하여 고감도를 얻을 수 있었다.

한편 감쇠율은 실온·암실에서 보관 하였을 때 30일 경과에 약 2%로서 매우 안정되었음을 알 수 있었다.

필터를 부착하지 않은 TLD와 필터를 부착한 5개의 TLD를 1조로 하여 제작한 TLD badge에 대해 에너지 의존성을 보상하기 위한 보정계수는  $a_0=0.078$ (bare),  $a_1=-0.009$ (1.0mm Al),  $a_2=-0.235$ (0.2mm Cu),  $a_3=0.588$ (0.5mm Cu),  $a_4=0.568$ (1.5mm Cu),  $a_5=0.180$ (2.

0mm Pb)로 결정하였으며, 이를 선형적으로 조합하여  $\text{CaSO}_4 : \text{Tm}$ -PTFE TLD의 에너지 의존성을 보상할 수 있었다.

따라서 제작한 TLD badge는 개인피폭 선량계 및 환경방사능 선량계로서 정확한 선량 평가에 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

## 참 고 문 헌

1. Oberhofer, M. and Scharmann, A., "Applied thermoluminescence dosimetry", Pergamon Press, Oxford, 1981.
2. Chen, R. and Kirsh, Y., "Analysis of thermally stimulated process", Pergamon Press, Oxford, 1981.
3. Horowitz, Y.S., "Thermoluminescence and thermoluminescent dosimetry", Vol.I, PP.12, CRC, Florida, 1984.
4. Berstein, I.A., Bjarngard, B. and Jones, D., "On the use of phosphorteflon thermoluminescent dosimeters in health physics", Health Phys. Pergamon Press, Vol.14, 3-36, 1968.
5. Hall, R.M. and Wright, C.N., "A comparison of lithium fluoride and film for personal dosimetry", Health Phys. Pergamon Press, Vol.14, 37-40, 1968.
6. Portal, G., "Review of the principal materials available for thermoluminescent dosimetry", Rad.Protec.Dosim., 17, 351-357, 1986.
7. Yamashita, T., Nada, N., Onishi, H. and Kitamura, H., "Calcium sulfate activated by thulium or dysprosium for thermoluminescence dosimetry", Health Phys. Pergamon Press, Vol.21, 295-300, 1971.
8. Hubbell, J.H., "Photon attenuation and energyabsorbtion coefficients from 1 keV to 20 keV", Int.J.Appl.Radiat.Isot., 33, 1269-1290, 1982.

9. Stammers, K. and Kingston, S.A., "The use of metal filters to flatten the energy response of  $\text{CaSO}_4 : \text{Tm}$  TL dosimeters, and to provide spectral information", *Rad. Protec. Dosim.*, Vol.36:1, 23–29, 1991.
10. Bevington, D.R., "Data reduction and error analysis for physical sciences", Ch.9, McGraw–Hill Book Co., N.Y, 1969.
11. Sunta, C.M., *Nucl.Tracks*, Vol.10, (1/2), 47–53, 1985.
12. Pradhan, A.S. and Bhatt, R.C., "Metal filter for the compensation of photon energy dependence of the response of  $\text{CaSO}_4 : \text{Dy}$ –Teflon TLD discs", *Nuclear Instruments and Methods*, 166, 497–501, 1979.
13. IAEA Technical Reports Series No.277, Vienna, 1987.