

CaSO₄ : Tm, CaSO₄ : Tm-PTFE TLD 소자의 제작과 특성에 관한 연구

대구보건전문대학 방사선과
박명환 · 이준일

Abstract

Fabrication of CaSO₄ : Tm, CaSO₄ : Tm-PTFE TLD Radiation Sensors and Its Characteristics

Myeong Hwan Park, Joon Il Lee

Dept. of Radiotechnology, Taegu Junior Health College

In this study, to develop highly sensitive radiation sensors, CaSO₄ : Tm phosphors and its disc-type TLD elements embedded PTFE(polytetrafluoroethylene) are fabricated.

The highest sensitivity of CaSO₄ : Tm phosphors is obtained when phosphors have been doped with 0.5mol% Tm and sintered in atmosphere at 600°C for two hours.

Fabricated disc-type elements are made from a homogeneous mixture of phosphors and PTFE powder. They are first cold-pressed and then polymerized at 370°C in air for one hour.

The dose dependence of the prepared CaSO₄ : Tm TLD radiation sensors is linear within the range of 100 μGy~10Gy for X-rays and γ-rays.

The response of CaSO₄ : Tm to 30keV X-rays is ten times higher than that of 1.25MeV ⁶⁰Co γ-ray. The fading rate of the main peak is about 2% per a month. The spectral peaks of TL emission spectrum are at about 350nm and 475nm.

The CaSO₄ : Tm TLD radiation sensors prepared in this work may be used as radiation dosimeter for personal and environmental monitoring because of their high sensitivity and little fading.

I. 서 론

근년들어 의료기관은 물론 대학 및 연구소, 원자력발전소와 산업체 등 방사선취급기관에서의 방사선발생장치 및 방사성동위원소의 사용이 늘어남에 따라 방사선검출과 선량평가의 필

요성이 증대되고 있다. 따라서 환경방사능측정과 개인선량평가용 방사선선량계의 개발이 활발히 진행되고 있다.

방사선작업종사자의 개인피폭선량을 측정하기 위하여 pocket dosimeter, film badge 및 TLD(thermoluminescent dosimeter) 등이 보편

적으로 사용되고 있으나, 그 중에서 TLD는 이온화방사선에 대한 감도와 안정성이 높고 적절한 열처리과정을 통하여 재사용이 가능함은 물론 비교적 동작원리가 간단하고 소형화와 장기간에 걸친 집적선량의 측정이 가능하며, 넓은 선량과 에너지영역에서 선형적인 응답특성을 가지므로 개인피폭선량측정 및 환경방사능평가에 있어 경제성, 휴대성 및 신뢰성을 가진 방사선검출기로 각광을 받고 있으며^{1,2)}, 종래에 가장 많이 사용되어온 film badge에서 점차적으로 TLD로 대체되어 가고 있는 추세이다^{3~5)}.

TLD소자용 열형광체로서는 유효원자번호(Z_{eff})가 생체조직($Z_{eff}=7.42$)과 등가인 LiF ($Z_{eff}=8.14$), $Li_2B_4O_7$ ($Z_{eff}=7.4$), BeO ($Z_{eff}=7.13$) 및 MgB_4O_7 ($Z_{eff}=8.4$) 등과 뼈조직과 등가인 $CaSO_4$ ($Z_{eff}=15.3$), CaF_2 ($Z_{eff}=16.3$) 및 Al_2O_3 ($Z_{eff}=10.2$) 등⁶⁾이 주로 사용되고 있다.

한편 $CaSO_4$ 는 유효원자번호가 생체조직과 비등가이긴 하지만 뼈조직과 등가이므로 열형광체 연구의 초기부터 매우 유용한 열형광물질로 알려져 왔다^{1,2)}. Watanabe⁷⁾는 Mn을 활성화한 $CaSO_4:Mn$ 을, Krasnaya 등^{8,9)}은 $CaSO_4:Sm$ 열형광체를 각각 제작하였으며, Yamashita 등^{10,11)}은 $CaSO_4:Dy$ 및 $CaSO_4:Tm$ 을 제작하여 물리적 특성의 검토와 함께 방사선선량계로서 활용화하기 위하여 많은 연구를 실시한 바 있다.

$CaSO_4:Mn$ 은 가장 고감도의 TLD^{7,12,13)}이지만 감쇠율이 크므로 환경방사능이나 개인피폭선량 측정 등의 집적선량계로서는 부적합하다^{14,15)}. 그러나 $CaSO_4:Tm$ 은 $CaSO_4:Mn$ 에 비해 감도는 다소 떨어지지만 감쇠율이 매우 적고 안정한 trap준위는 물론 짧은 파장의 spectrum과 단순한 glow 곡선을 나타내므로 방사선선량계로서 적합한 것으로 알려져 있다^{10,11)}.

본 연구에서는 $CaSO_4$ 에 Tm을 활성화체로 첨가한 $CaSO_4:Tm$ 열형광체를 제작하여 물리적 특성을 검토하였으며, 이를 PTFE(polytetra-

fluoroethylene)와 중합하여 디스크형으로 소화한 $CaSO_4:Tm-PTFE$ TLD소자를 제작하여 환경방사능 및 개인피폭선량계로서 실용화하기 위한 기초적인 특성을 조사하였기에 그 결과를 보고하는 바이다.

II. 실험장치 및 방법

1. $CaSO_4:Tm$ 열형광체 분말 및 TLD소자의 제작

그림 II-1은 $CaSO_4$ 에 Tm을 첨가하여 활성화시키기 위해 활성체의 농도 및 열처리조건의 변화에 따른 열형광강도의 변화를 조사하여 $CaSO_4:Tm$ 열형광체의 제작에 필요한 최적 활성화조건을 구하였다. 먼저 활성체인 Tm을 0~1mol%까지 변화 시키면서 모체인 $CaSO_4$ 와 함께 묽은황산용액에 용해시킨 후 황산중류장치를 사용하여¹⁶⁾ 400°C에서 4.5시간 동안 중류하여 유독물질인 황산을 95% 이상 수거하였으며, 이때 carrier gas로서는 공기를 사용하였다. 혼합된 시료는 400~1100°C에서 15분~5시간까지 변화시키면서 최적소성 온도 및 시간을 결정하였으며, 제작된 $CaSO_4:Tm$ 열형광체는 200 mesh(<75 μm) 이하의 입자를 선별하여 실험에 사용하였다.

그리고 제작한 $CaSO_4:Tm$ 열형광체분말과 PTFE분말을 액체질소온도에서 분쇄한 후 혼합하였으며, 혼합시 열형광체 특성의 변화를 최소화하기 위하여 PTFE에 대한 열형광체 분말의 함량을 5~40wt%까지 변화시키고, 또한 직경과 두께를 각각 변화시키면서 저온에서 압축·성형하였다.

압축·성형된 디스크 형태의 소자를 PTFE 용점 근처인 370°C(PTFE의 용점: 327°C)에서 1시간 동안 공기 중에서 열처리 하므로써 PTFE와 열형광체를 중합시켜 TLD소자를 제작하여 최적제작조건을 검토하였다.

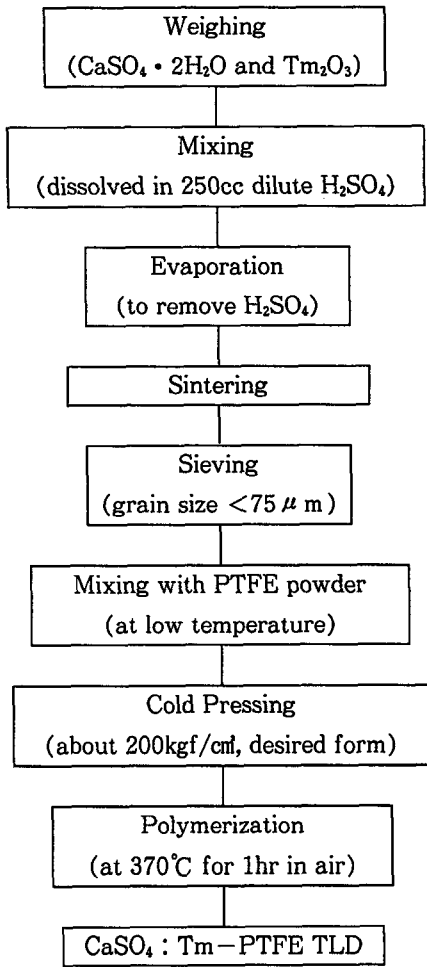


Fig. II - 1. Preparation of $\text{CaSO}_4 : \text{Tm}$ TL phosphors and $\text{CaSO}_4 : \text{Tm-PTFE}$ TLD radiation sensors

2. X선 및 γ 선 조사

표 II - 1은 선량 및 에너지의존성을 측정하기 위한 조사조건들이다. 제작한 $\text{CaSO}_4 : \text{Tm}$ 열형광체분말 및 $\text{CaSO}_4 : \text{Tm}$ TLD소자의 선량의존성측정에는 선형가속장치(Mevatron 7074, Siemens Co.)에 의한 6MV X선과 ^{60}Co γ 선을, 그리고 에너지의존성측정에는 앞의 두 장치와 함께 진단용 X선발생장치(DC-15K, Toshiba Co.)를 사용하였다. 한편 X선발생장치는 인가전압을 변화시키고 아울러 여러 종류의 필터를

사용하여 X선의 유효에너지를 증가시켰으며, 각 실험조건에서 X선의 유효에너지를 측정하기 위해서는 흡수체의 두께를 변화시키면서 조사선량을 측정한 후, 그 결과를 최소자승법에 의해 직선으로 fitting하여 그 기울기로부터 반가중을 계산하고 반가중으로부터 유효에너지를 결정하였다.

Table II - 1. Irradiation condition for dose and energy dependence measurement

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
γ -ray	^{137}Cs		662.0
	^{60}Co		1250.0

그리고 국립보건원에서 검 · 교정한 electrometer(192A, Capintec Co.)와 ionization chamber(PM-30 및 PR-06C, Capintec Co.)를 사용하여 IAEA 보고서 No. 277의 절차¹⁷⁾에 따라 선량을 측정하여 시료에 조사된 방사선의 선량을 측정하였다.

3. TLD소자의 열형광측정

그림 II - 2는 본 실험에서 사용한 열형광측정 장치의 개요이다. 백금 planchet에 담은 시료를 세라믹열판으로 가열하고 이때 방출되는 열형광을 광전증배관(R268, Hamamatsu Co.)으로 검출하였다. TL분석기(2001S, Top Electronics

Co.)는 광전증배관에 전원을 공급하며, 광전증배관으로부터의 TL신호를 증폭·측정한다. 또한 ramp generator를 통해서 단위시간당의 전압증가가 일정한 기울기를 갖는 직류전원을 세라믹열판에 공급하고, ramp generator를 조절하여 세라믹열판의 가온률을 조절할 수 있으며, 열전대(Chromel-Alumel)로부터의 온도신호를 증폭한다. TL분석기로부터의 온도신호를 X축, 열형광감도신호를 Y축으로 하여 X-Y 기록계 및 A/D 변환기를 장치한 개인용컴퓨터로 동시에 glow 곡선을 각각 측정하였다.

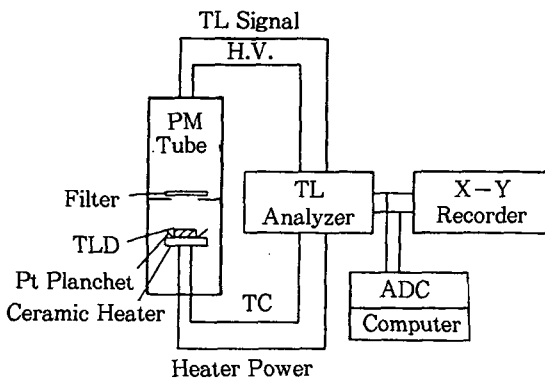


Fig. II - 2. The schematic diagram of TL measurement system

한편 300~700nm 범위의 파장을 갖는 간섭필터를 광전증배관 앞에 설치하여 단일파장의 glow 곡선을 측정하고, 개인용컴퓨터를 사용하여 이를 각 온도에서의 스펙트럼을 재구성하므로써 열형광스펙트럼을 측정하였다.

III. 결과 및 고찰

1. CaSO₄ : Tm 열형광체의 Glow 곡선과 활성화 조건

그림 III-1은 활성체인 Tm을 0.5mol%첨가하고 공기 중 600°C에서 2시간동안 소성한 CaSO₄ : Tm 열형광체에 r 선을 조사한 후 5.8 °C/s의 가온률로 측정된 대표적인 glow 곡선이며, peak I, II, III의 온도는 각각 108°C, 157

°C, 250°C부근이었다. Peak I, II는 감쇠율이 크므로 peak III를 주 peak로 결정하였으며, peak III의 열형광감도는 동일한 조사선량으로 조사한 TLD-100(Harshaw Chemical Co.)에 비해 15배 정도 높게 나타나므로 r 선에 대한 감도가 매우 우수함을 알 수 있었다.

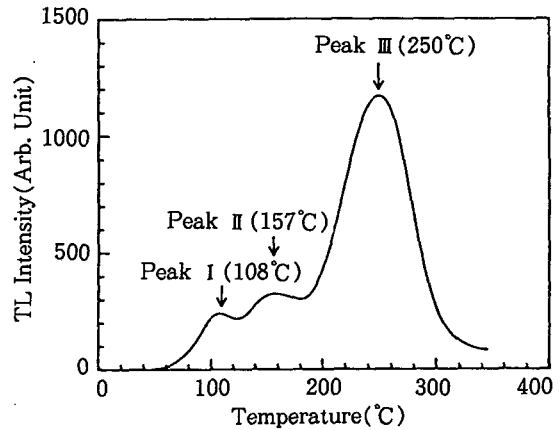


Fig. III - 1. The typical TL glow curve of CaSO₄ : Tm phosphor

그림 III-2는 활성체의 농도변화와 소성온도의 변화에 따른 주 peak의 상대적강도를 3차원적으로 나타낸 그림이다.

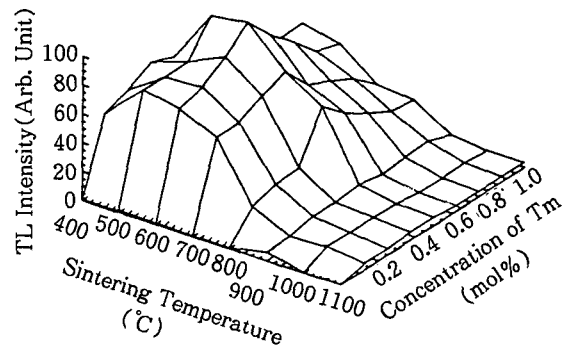


Fig. III - 2. The variation of TL intensity of CaSO₄ : Tm TL phosphors vs. sintering temperature and concentration of Tm

활성체 Tm의 최적조건을 찾기 위하여 활성체의 농도를 0~1mol%까지 변화시키고, 소성온도는 400~1100°C까지 변화시킨 결과, Tm의

최적농도는 0.5mol%, 최적소성온도는 600°C였으며, 공기중에서 2시간 소성했을 때 상대적강도가 가장 높게 나타났다.

그리고 물리적 특성 및 선량계 특성 검토에 사용한 시료는 모두 최적조건에서 제작한 것을 사용하였다.

그림 III-3은 소성온도변화에 따른 glow 곡선의 변화이다. 활성체인 Tm의 농도변화에 대해서는 상대적인 열형광강도가 다소 차이가 있었지만 glow 곡선의 모양변화는 관찰할 수 없었다.

그러나 소성온도를 변화시킨 결과 온도상승과 함께 주 peak는 점차 증가하여 600°C에서 가장 높게 나타난 후 점차 감소하였으며, 감쇠율이 큰 peak I도 점점 증가하다가 1000°C에서 최대를 이루고 역시 그 후로는 감소하는 것을 볼 수 있었다.

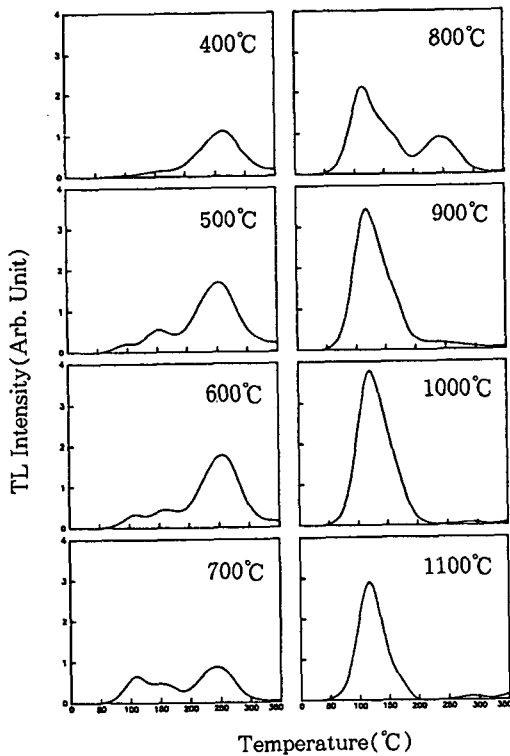


Fig. III-3. The TL glow curves for the different sintering temperature of $\text{CaSO}_4:\text{Tm}$ phosphor

2. $\text{CaSO}_4:\text{Tm}$ -PTFE TLD소자의 제작조건

그림 III-4는 PTFE에 대한 열형광체분말의 최적혼합비를 찾기 위하여 열형광체분말의 함량변화에 대한 주 peak 온도의 변화를 관찰한 결과로서 열형광체 함량이 많을수록 주 peak 온도는 분말상태의 주 peak 온도에 가까워지는 것을 확인할 수 있었다.

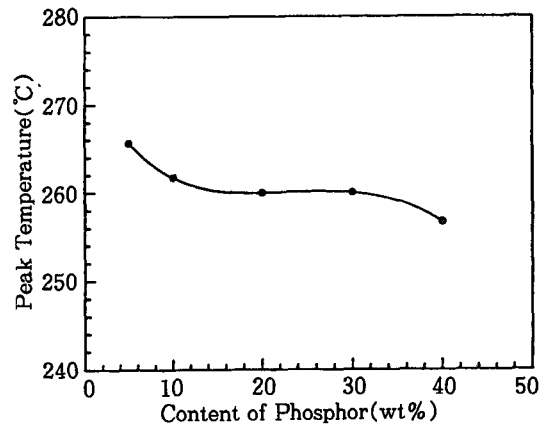


Fig. III-4. The variation of peak temperature of glow peak III vs. content of TL phosphor in $\text{CaSO}_4:\text{Tm}$ -PTFE TLD

그림 III-5는 열형광체분말의 함량변화에 따른 열형광강도의 변화이다. PTFE에 첨가하는 $\text{CaSO}_4:\text{Tm}$ 분말의 함량이 증가할수록 상대적강도는 점차 증가하다가 20wt% 이상에서는 증가가 둔화되었다.

이러한 결과로 보아 TLD의 감도를 향상시키기 위해서는 $\text{CaSO}_4:\text{Tm}$ 분말의 함량을 증가시키는 것이 좋으나 너무 많을 경우 기계적 강도와 유연성이 떨어지므로 본 연구에서는 $\text{CaSO}_4:\text{Tm}$ 분말의 최적함량을 20wt%로 결정하였다.

그림 III-6은 $\text{CaSO}_4:\text{Tm}$ -PTFE TLD소자의 두께변화에 따른 glow 곡선의 변화를 관찰한 결과이다.

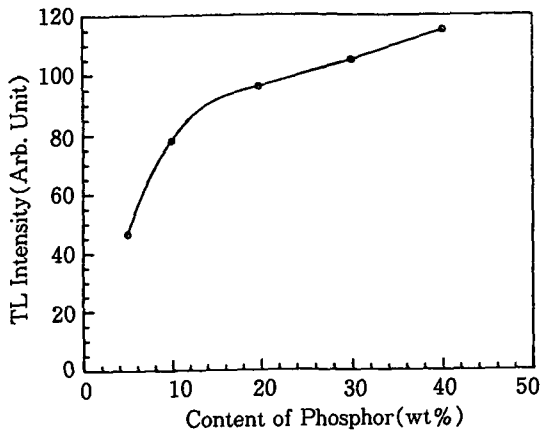


Fig. III-5. The variation of TL intensity vs. content of TL phosphor in CaSO_4 : Tm-PTFE TLD

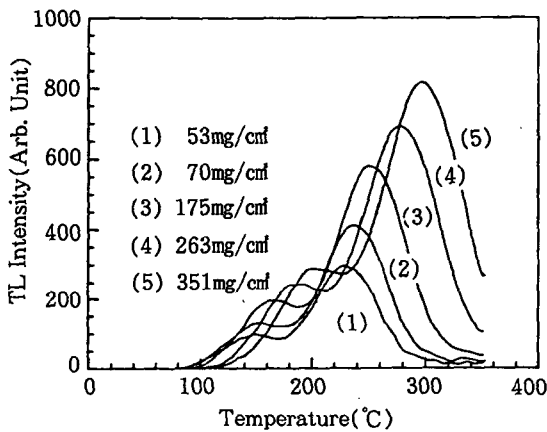


Fig. III-6. The TL glow curves for the different thickness of CaSO_4 : Tm-PTFE TLD

TLD소자의 두께가 53mg/cm²~351mg/cm²로 증가함에 따라 peak 온도가 높아짐과 동시에 peak 강도도 증가함을 알 수 있었으며, 이를 정량적으로 측정한 결과는 그림 III-7 및 III-8과 같았다.

그림 III-7은 CaSO_4 : Tm 열형광체분말을 20wt%로 고정하여 제작한 CaSO_4 : Tm-PTFE TLD소자의 두께변화에 따른 주 peak 온도의 변화로서 두께가 70 mg/cm² 이하에서는 분말의 peak 온도와 거의 같았다. 그러나 TLD소

자의 두께가 두꺼워질수록 주 peak의 온도가 고온쪽으로 이동하였으며, 이러한 현상은 PTFE의 열전도율이 매우 낮기 때문인 것으로 생각된다.

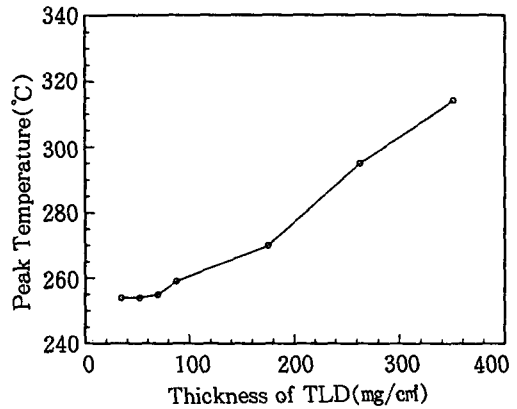


Fig. III-7. The variation of peak temperature of glow peak III vs. thickness of CaSO_4 : Tm-PTFE TLD

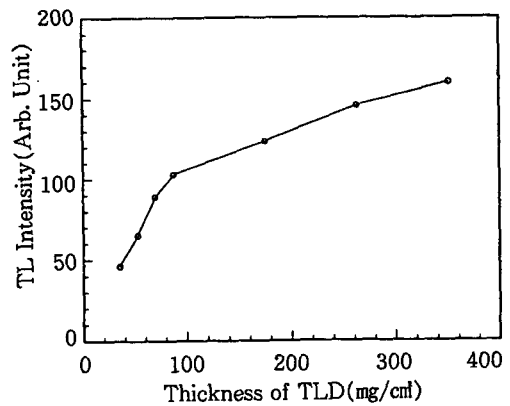


Fig. III-8. The variation of TL intensity vs. thickness of CaSO_4 : Tm-PTFE TLD

그림 III-8은 CaSO_4 : Tm-PTFE TLD소자의 두께변화에 따른 주 peak 강도의 변화로서 두께가 두꺼워질수록 상대적인 열형광강도는 점차 증가하였으나 90mg/cm² 이상에서는 그 폭

이 둔화하는 경향을 나타내었다. 따라서 TLD의 감도를 향상시키기 위해서는 두꺼워질수록 좋으나 본 실험에서 사용한 analyzer의 특성을 고려할 때 약 300°C 이상에서는 열판에서 발광하는 열선이 광전증배관에 영향을 주어 열적 잡음이 커지고, 또한 TLD소자에 큰 손상을 주므로 90mg/cm² 이상의 두께는 바람직하지 않는 것으로 사료되었다.

한편 중합조건을 설정하기 위하여 중합온도 및 시간 등을 변화시키면서 TL감도의 변화를 조사한 결과 최적중합조건은 공기 중, 370°C에서 1시간이었다.

3. 열형광감도의 선량 및 에너지의존성

그림 III-9는 제작된 열형광체분말 및 TLD소자의 선량의존성으로서 100 μGy~10Gy의 넓은 영역에서 선형적인 특성을 나타내었으며, 이 영역에서는 glow 곡선의 모양이나 peak 온도는 변화하지 않았고, 10 Gy 이상에서는 supralinearity가 나타나는 것을 볼 수 있었다. 또한 TLD소자는 PTFE를 첨가하므로써 열형광체에 비해 상대적인 감도가 다소 떨어짐을 알 수 있었다.

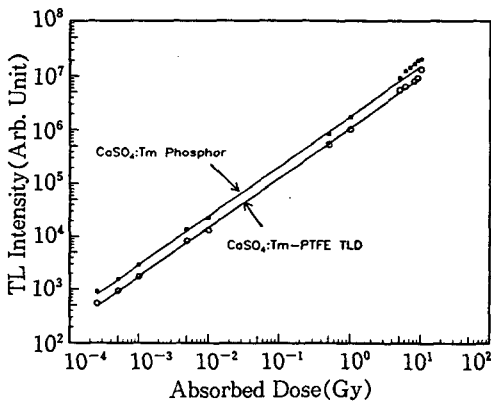


Fig. III-9. The dose dependence of CaSO₄:Tm TL phosphor and CaSO₄:Tm-PTFE TLD

그림 III-10은 열형광체분말의 에너지의존성으로서 원은 실험·측정값이며, 실선은 질량-에너지 흡수계수를 고려하여 열형광체에 대해서 J. H. Hubbell의 표¹⁸⁾를 이용하여 계산한 이론적인 값이다. 실험에서의 측정값은 대체적으로 이론값과 일치하였으며, 1.25MeV에서의 열형광강도 보다 30keV 근처에서의 단위선량당 상대적인 열형광강도가 약 10배 정도 높게 나타났다. 이러한 경향은 CaSO₄:Tm-PTFE TLD소자의 경우도 거의 동일하였으며, 따라서 정확한 선량평가를 위해서는 적절한 필터의 사용¹⁹⁾으로 에너지의존성을 보상할 필요가 있다고 생각된다.

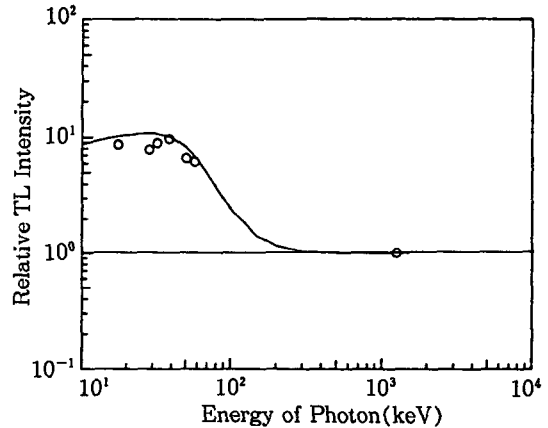


Fig. III-10. The energy dependence of CaSO₄:Tm TL phosphor

4. 감쇠율특성과 발광스펙트럼

그림 III-11은 CaSO₄:Tm 열형광체에 방사선을 조사한 후, 실온에서 보관했을 때의 세 peak에 대한 감쇠율 특성을 나타내는 glow 곡선의 변화로서 peak I은 감쇠율이 높아 약 4시간 후에는 완전히 감쇠하였으며, peak II도 약 30일 후면 거의 감쇠되었다. 그러나 peak III는 실온·암실에서 보관하였을 경우 30일 경과에 약 2% 정도의 감쇠율을 나타내어 매우 안정되었음을 알 수 있었으며, 이 결과는 우의 연구²⁰⁾와도 유사한 경향을 나타내었다.

IV. 결 론

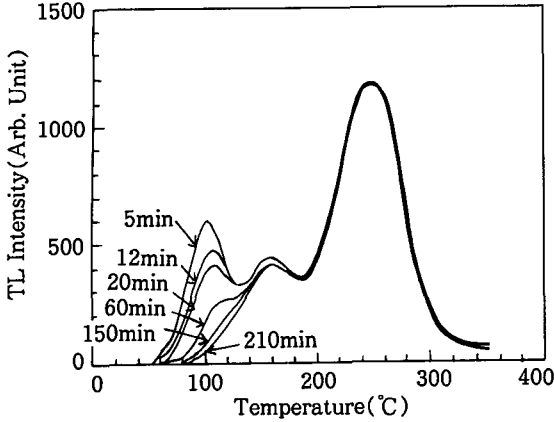


Fig. III - 11. The TL glow curves of $\text{CaSO}_4 : \text{Tm}$ phosphor for the different elapsed time

그림 III-12는 간섭필터를 사용하여 단일파장의 glow 곡선을 측정하고 이를 간섭필터의 투과율과 광전증배관의 감도를 보정한 후, 개인용 컴퓨터로 재구성한 $\text{CaSO}_4 : \text{Tm}$ -PTFE TLD의 발광스펙트럼으로서 350nm와 475nm 근처에서 peak가 나타났으며, 이 파장영역은 사용한 광전증배관의 파장응답특성과 잘 일치하기 때문에 고감도를 얻을 수 있었던 것으로 사료된다.

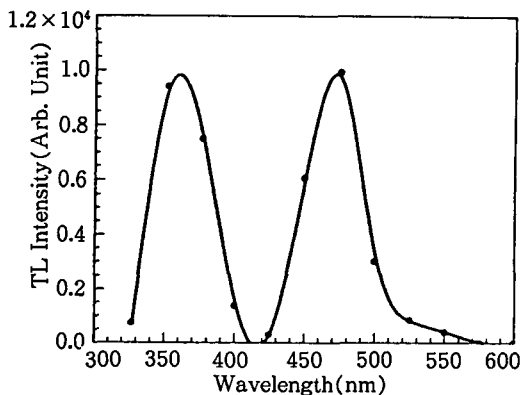


Fig. III - 12. The emission spectrum of $\text{CaSO}_4 : \text{Tm}$ -PTFE TLD

TLD소자를 제작하기 위하여 먼저 $\text{CaSO}_4 : \text{Tm}$ 열형광체분말을 제작하고, 이를 PTFE분말과 혼합하여 디스크형태로 소자화한(직경: 8.5 mm, 두께: 0.4mm) 후 물리적 특성 및 선량계로서의 특성을 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

열형광체분말 제작시 $\text{CaSO}_4 : 2\text{H}_2\text{O}$ 와 활성체인 Tm_2O_3 를 0.5 mol% 농도로 묽은 황산에 공침시켜 황산을 수거한 후 공기 중에서 600°C 로 2시간 동안 열처리하여 제작하였을 때 최대 열형광강도를 나타내었다.

그리고 TLD소자 제작시 PTFE분말에 대한 열형광체분말의 혼합비를 20wt%로 하여 공기 중 370°C 에서 1시간 동안 중합시켰을 때 가장 우수한 소자의 특성을 나타내었다.

한편 선량의존성은 $100 \mu\text{Gy} \sim 10\text{Gy}$ 의 넓은 영역에서 선형적이었으며, 특히 10Gy 이상에서는 supralinearity를 관찰할 수 있었다.

또한 에너지 의존성은 30 keV의 에너지가 1.25 MeV에서 보다 단위선량당 열형광강도는 약 10배 정도 높게 나타났으며, 정확한 선량을 평가 하기 위해서는 적절한 필터를 사용하여 에너지의존성을 보상할 필요가 있을 것으로 생각된다.

그리고 주 peak의 감쇠율은 30일에 약 2% 정도로서 매우 안정됨을 알 수 있었으며, 발광스펙트럼의 peak 파장은 350nm와 475nm 근처에서 나타났으며, 이 파장영역은 사용한 광전증배관의 파장응답특성과 잘 일치하여 고감도를 얻을 수 있었던 것으로 사료된다.

이상의 실험결과를 종합해 볼 때 본 실험에서 제작한 TLD소자는 적절한 필터의 사용으로 저 에너지영역의 에너지의존성을 보상할 경우 고감도 개인용선량계 및 환경방사능선량계로서 실용화 할 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.1, P.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) Watanabe, K. : Phys. Rev. 83, 785, 1951.
- 8) Krasnaya, A.R., Nosenko, B.M., Revzin, L.S and Ya Yaskolko, V. : Atomnaya Energy 10, 630, 1961.
- 9) Krasnaya, A.R., Nosenko, B.M., Revzin, L.S and Yaskolko, V. : Soviet J.Atom.Energy, 10, 625, 1961/1962.
- 10) Yamashita, T., Nada, N., Onishi, H. and Kitamura, S. : Proc. 2nd Int. Conf. on Luminescence Dosimetry, 4, 1968.
- 11) Yamashita, T., Nada, N., Onishi, H. and Kitamura, S. : Health Phys., 21, 295, 1971.
- 12) Patterson, D.A. and Friedman, H. : Opt. Soc. Am., 47, 1136, 1957.
- 13) Bjarngard, B. : Aktiebolaget Atomenergi AE-109, 1963.
- 14) Bjarngard, B. : CaSO₄ : Mn thermoluminescent dosimeters for small doses of gamma radiation, Rev. Sci. Instru., 33, 1129, 1962.
- 15) Kang, Y.H. et al. : The Physical Characteristics of CaSO₄ : Mn Thermoluminescent Dosimeter, New Phys., Vol.25, 479-485, 1985.
- 16) Sunta, C.M. : Nucl.Tracks, Vol.10(1/2), 47-53, 1985.
- 17) IAEA : Technical Reports Series No.277, Vienna, 1987.
- 18) Hubbell, J.H. : Photon attenuation and energy-absorption coefficients from 1 keV to 20 keV, Int.J.Appl.Radiat.Isot., 33, 1269-1290, 1982.
- 19) Stammers, K. and Kingston, S.A. : The use of metal filters to flatten the energy response of CaSO₄ : Tm TL dosimeters, and to provide spectral information, Rad. Protec.Dosim., Vol.36 : 1, 23-29, 1991.
- 20) U, Hong : A study on Thermoluminescent Dosimeter and Its Readout System, Doctoral thesis, Kyungpook National Univ., 83-85, 1992.