

고에너지 전자선의 흡수선량 측정에 있어서 TLD의 유용성

대구보건대학 방사선과 · 대구대학교 물리교육과*
박명환 · 김도성*

- Abstract -

Measurement of Absorbed Dose for High Energy Electron using CaSO₄:Tm-PTFE TLD

Myeong Hwan Park · Do Sung Kim*

Dept. of Radiologic Technology, Taegu Health College

Dept. of Physics Education, Taegu University*

In this study, the highly sensitive CaSO₄:Tm-PTFE TLDs has been fabricated for the purpose of measurement of high energy electron. CaSO₄:Tm phosphor powder was mixed with polytetrafluoroethylene(PTFE) powder and moulded in a disk type(diameter 8.5 mm, thickness 90 mg/cm²) by cold pressing. The absorbed dose distribution and ranges for high energy electron were measured by using the CaSO₄:Tm-PTFE TLDs. The ranges determined were R₁₀₀=14.5 mm, R₅₀=24.1 mm and R_p=31.8 mm, respectively and the beam flatness, the variation of relative dose in 80% of the field size, was 4.5%. The fabricated CaSO₄:Tm-PTFE TLDs may be utilized in radiation dosimetry for personal, absorbed dose and environmental monitoring.

I. 서 론

열형광선량계(TLD)는 방사선에 대한 감도와 안정성이 좋고, 측정 가능한 선량범위가 넓으며 재사용과 집적선량의 측정이 가능하므로 현재 국내의 방사선 작업종사자중 80% 이상의 개인피폭선량 측정 뿐 만 아니라, 의료기관에서의 방사선 치료 계획시의 흡수선량 측정에도 TLD가 많이 이용되고 있다^{1, 2)}. 특히 TLD는 다른 선량계로는 측정이 불가능한 인체의 조직내라든가 공동내(空洞內)의 선량측정이 가능하며, 얇은 TLD를 사용하면 비교적 간단하게 표면선량도 측정할 수 있고, 두께가 얇을수록 다른 선량계로서는 측정이 어려운 선량 변화가 극심한 영역에서의 선량측정이 가능한 장점이 있다.

현재 주로 사용되고 있는 TLD용 열형광체는 실효원자번호가 인체조직과 등가인 LiF 계열과 뼈조직과 등가인 CaSO₄ 계열이 있고, Yamashita³⁾ 등에 의해 처음으로 개발된 CaSO₄:Tm 및 CaSO₄:Dy는 방사선에 대한 감도가 LiF:Mg, Ti보다 약 30배 높을 뿐만 아니라⁴⁾ 감쇠율이 매우 적어 이를 이용한 선량측정 및 개인피폭선량계 개

발의 연구가 활발히 진행되어 왔다. 이들 열형광체는 X선과 γ 선에 대한 감도가 매우 높고 TL감도가 넓은 선량 영역에서 선형적이며 측정 가능한 에너지 영역이 넓고 감쇠율이 적은 장점이 있는 반면 저에너지 영역에서 TL감도의 에너지존성이 비교적 큰 단점이 있다⁵⁻¹²⁾. 또한 실효원자번호가 적은 LiF계 열형광체를 이용한 β 선의 선량분포, 고에너지 전자선의 흡수선량 측정 및 n- γ 혼합장에서의 상대적 중성자 감도 측정에 관한 연구¹³⁾는 보고되지만 실효원자번호가 큰 고감도의 CaSO₄계 TLD에 관한 연구 내용이 미흡하기에 이에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 디스크 형태의 CaSO₄:Tm-PTFE TLD를 직접 제작하여 TLD 소자의 균일성과 인체 팬텀 물질인 polystyrene 내에서의 고에너지 전자선의 최대흡수선량 깊이(R₁₀₀), 50% 선량깊이(R₅₀), 실용비정(R_p), beam 평탄도를 측정하였다. 이때 보다 정확한 선량 평가를 위해 각 TLD 소자의 개별적인 소자보정인자(Sample Correction Factor, SCF)를 구하여 소자별 열형광감도의 차이를 보정하였다.

II. 고에너지 전자선의 에너지 - 비정 관계

전자선은 비적의 단위 길이당 에너지 손실이 크고 짧은 거리에서 대부분의 에너지를 잃어버리기 때문에 인체의 피부 표면에서의 피폭이 특히 중요시된다. 따라서 ICRU에서는 피부선량을 인체의 표면으로부터 0.07 mm (7 mg/cm²) 깊이에서 측정하도록 제시하고 있다¹⁴⁾. 인체의 표면선량 측정에서는 여러 가지 검출기가 사용되지만 그 중에서 반도체검출기와 TLD가 가장 많이 사용되고 있다¹⁵⁾. 실제 표면선량은 외삽형 전리조에 의해 정확히 결정되지만 측정시간이 많이 소비되고 장치의 부피가 커서 환자의 치료와 같은 상황에서는 비실용적이다¹⁶⁾. 그리고 대부분의 반도체검출기는 대개 0.5 cm~2.0 cm 사이의 깊이에서 유효측정점을 갖는다¹⁷⁾. 그러나 얇은 TLD를 사용하면 TLD 두께 깊이에서 흡수선량이 바로 측정되기 때문에 비교적 간단하게 표면선량을 측정할 수 있고, 두께가 얇을수록 선량 변화가 극심한 영역에서의 선량 평가에 더욱 유리하다.

전자선과 같은 가벼운 하전입자들은 물질을 통과하면서 흡수물질 속의 전자들을 전리 또는 들뜸 시키는 과정과 제동복사 과정에 의해 대부분의 운동에너지를 잃는데, 하전입자가 그의 운동에너지를 전부 잃기까지 진행한 거리를 비정(range)이라 한다.

Fig. 1은 균일한 에너지의 전자선에 대한 깊이-선량 분포 곡선의 일반형을 나타낸 것이다¹⁸⁾. Fig. 1은 깊이-선량 분포 곡선에서 감소하는 부분의 접선이 background 연장선과 만나는 점의 깊이를 실용비정(practical range : R_p)이라 정의하고, 깊이-선량 분포와 background가 만나는 점의 깊이를 최대비정(maximum range : R₀)으로 정의한다. 이들 비정 외에 깊이-선량 분포 측정 시 중요

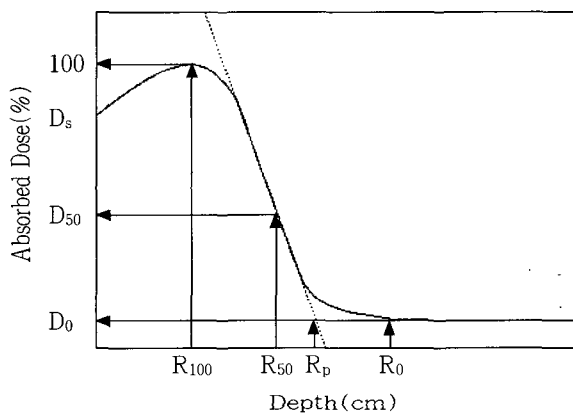


Fig. 1. Absorbed dose distribution of electron in water phantom : D₁₀₀ is maximum absorbed dose : D₅₀ is 50% absorbed dose : D₀ is absorbed dose due to bremsstrahlung : R₁₀₀ is the depth for dose maximum : R₅₀ is the depth for 50% absorbed dose : R_p is the practical range : R₀ is the maximum range.

한 변수로는 그림에서와 같이 흡수체 표면에서의 표면선량(D_s)과 최대선량(D₁₀₀) 및 최대선량에 대해 50%인 값으로 정의되는 50% 선량(D₅₀)이 있다. 그리고 이들 선량이 나타나는 깊이를, D₁₀₀에 대해 최대선량깊이(R₁₀₀), D₅₀에 대해 50% 선량깊이(R₅₀)로 정의한다.

에너지가 10 MeV 이하인 전자선에 대해 비정-에너지 관계식을 적용할 때, 실험적으로 플라스틱 팬텀을 이용해서 비정을 구하는 경우는, 다음의 식을 이용하여 플라스틱에서의 비정 R_{pl} 값을 물등가의 R_w 값으로 환산하여 사용해야 한다.

$$\frac{R_{pl}}{R_w} = \frac{\left(\frac{r_0}{\rho}\right)}{\left(\frac{r_0}{\rho}\right)_{pl}} \dots\dots\dots (1)$$

여기서 R_{pl}과 R_w는 R₁₀₀, R₅₀, R_p 등과 같은 비정으로서 각각 플라스틱과 물에서의 값을 나타내며, r₀/ρ는 ICRU 37¹⁹⁾에서 에너지의 함수로 나타나는 연속감속비정(linear continuous - slowing - down range)을 이용할 수 있다.

III. 실험장치 및 방법

본 실험에 사용한 CaSO₄:Tm-PTFE TLD는 다음과 같이 제작하였다^{3, 7, 20)}. 먼저 CaSO₄·2H₂O와 Tm₂O₃를 묽은 황산에 용해시키고 황산중류장치를 사용하여 황산을 수거하고, 공기 중에서 600°C로 2시간 동안 소성한 후 200 mesh (< 75 μm)의 분말로 만들어 열형광체로 사용하였다. 그리고 제작한 CaSO₄:Tm 열형광체 분말을 PTFE (polytetrafluoroethylene) 분말과 잘 혼합하기 위하여 액체질소 온도에서 분쇄한 후 혼합하였으며, 혼합시 열형광체의 최적함량은 20 wt%로 하였다. 또한 직경 8.5 mm, 두께 90 mg/cm²(0.4 mm)로 압축·성형된 디스크 형태의 소자를 370°C에서 1시간 동안 공기중에서 열처리함으로써 PTFE와 열형광체를 중합시켰다.

제작한 각 TLD의 SCF를 구하기 위해 ⁶⁰Co 원격조사 장치(Buchluer)를 이용하여 0.5 Gy의 γ-선을 조사한 후 각각의 열형광강도를 측정하고, 측정된 열형광강도의 평균값으로부터 각 소자의 SCF를 구하였다. 그리고 먼저 TLD 소자의 균일성을 측정하기 위해 다시 동일한 조건으로 두 번째 열형광강도를 측정하여 앞서 구한 SCF를 곱한 후 보정된 열형광강도를 구하였다. 그리고 보정한 열형광강도의 평균값에서 %편차를 구한 후 이를 평균값으로 소자의 균일성을 평가하고, 또한 각 TLD 소자의 %편차가 3% 이내인 소자를 선택하여 고에너지 전자선의 흡수선량 분포 측정에 사용하였다.

전자선의 조사는 Fig. 2와 같이 선형가속기(Mevatron MD 67, Siemens Co.)를 이용하여 6 MV 전자선을 조사하였으며, 흡수선량 분포를 측정하기 위한 배치는 아래의 polystyrene판(25 × 25 cm²) 중앙에 TLD 소자 3개를 1조

로 얇고 polystyrene판의 두께를 0~50.7 mm 범위내에서 판의 두께를 변화시키며 반복하여 전자선을 조사하였다. 이때 SSD=100 cm, 조사면의 넓이는 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 의 크기로 일정하게 하였으며, 전자선의 beam 평탄도는 6 MV 전자선의 최대흡수선량 깊이인 polystyrene 1.3 cm에 TLD를 사이에 두어 측정 후 동일 조건에서 dosimetry system (Wellhöfer, Germany)로 측정한 결과와 비교하였다.

각 TLD소자의 열형광강도는 선형적인 가온율로 변화시킬 수 있는 TLD 판독장치(Teledyne Brown Engineering, System 310)로 10 psi 압력의 질소를 흘려서 주로 $10^\circ\text{C}/\text{sec}$ 로 glow 곡선을 측정하였다. 이때 보다 정확한 열형광강도를 측정하기 위해 방사선 조사 후 glow peak I이 완전히 fading 되는 6시간에 glow 곡선을 측정하여 전체 적분한 면적으로부터 열형광강도를 구하였다.

IV. 결과 및 고찰

1. TLD 소자의 glow 곡선 및 균일성 측정

제작한 $\text{CaSO}_4:\text{Tm}-\text{PTFE}$ TLD를 $10^\circ\text{C}/\text{sec}$ 의 가온율로 측정한 전형적인 glow 곡선은 113°C (peak I), 164°C (peak II), 251°C (peak III) 근처에 형성된 3개의 중첩된

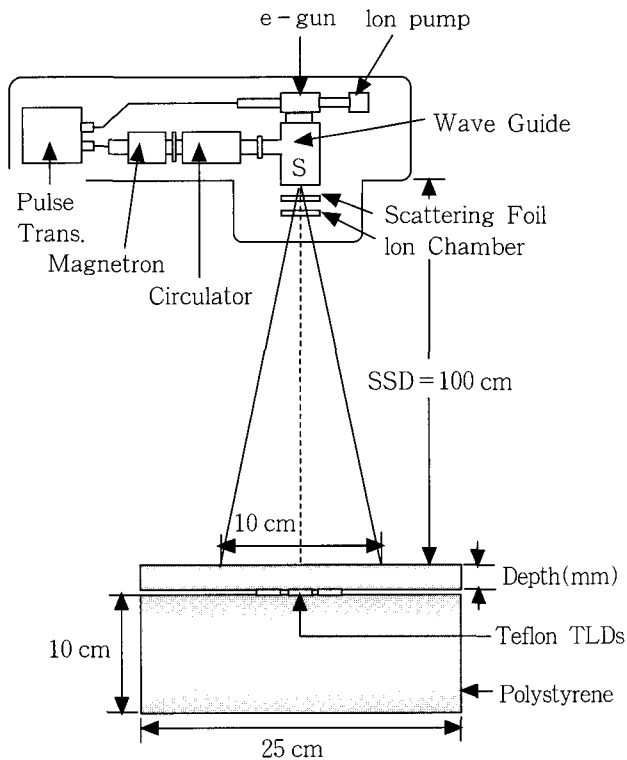


Fig. 2. Measuring arrangement for absorbed dose distribution of high energy electron.

glow peak로 나타났으며, Fig. 3은 1 batch에서 제작한 TLD를 임의로 추출하여 평균에너지 5.83 MeV인 전자선 ($E_{ave} = 2.33 \cdot R_{50}$)²¹⁾을 0.5 Gy 조사한 후 상대적인 열형광 감도를 측정한 것으로 약 4% 이내의 오차 범위내에서 균일함을 확인하였다.

2. 흡수선량 분포 측정

TLD를 이용한 polystyrene의 깊이에 있어서 흡수선량 분포를 dosimetry system과 비교하여 Fig. 4에 나타내었으며, 이때 측정값은 동일 깊이에서 소차 3개씩을 측정하여 평균값을 취하였다. Fig. 4에서 볼 때 최대선량깊이 (R_{100})는 14.1 mm, 50%선량깊이 (R_{50})는 23.5 mm, 그리고 실용비정 (R_p)은 31.0 mm였다. 측정한 polystyrene 팬텀에서의 비정값들은 물팬텀에서의 비정값으로 식 (1)을 이용하여 환산하였다²¹⁾.

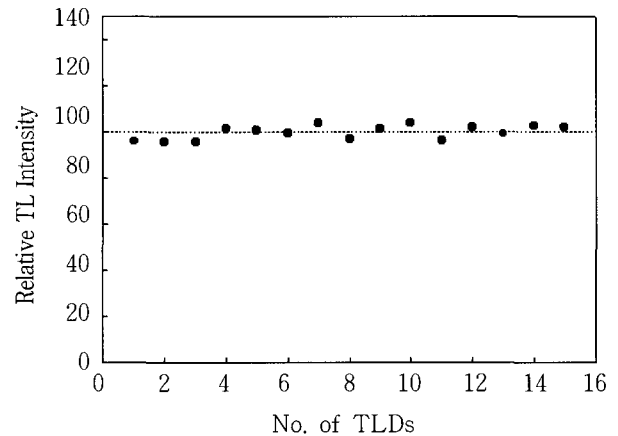


Fig. 3. The variation of TL intensity of $\text{CaSO}_4:\text{Tm}-\text{PTFE}$ TLD in a batch.

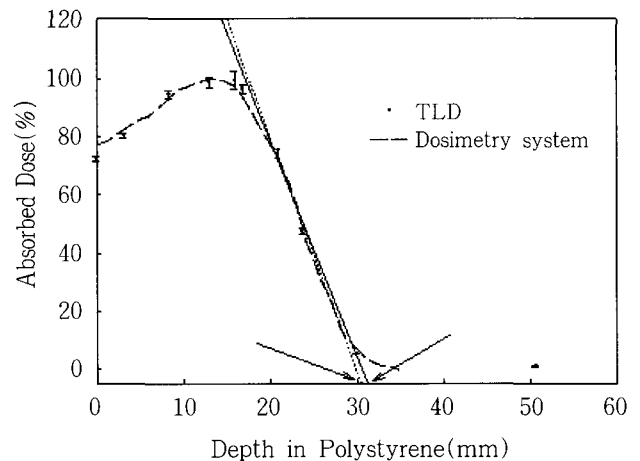


Fig. 4. The absorbed dose distribution in the polystyrene of the high energy electron

Table 1. The ranges of the absorbed dose distribution for high energy electron.

	CaSO ₄ :Tm PTFE TLD		dosimetry system
	ranges in polystyrene (mm)	corresponding ranges for water(mm)	ranges in water (mm)
R ₁₀₀	14.1	14.5	13.0
R ₅₀	23.5	24.1	23.7
R _p	31.0	31.8	30.0

Table 1에서는 식 (1)에 의해 환산된 물등가의 비정 값들과 전리조로 측정된 물팬텀에 대한 깊이-흡수선량 분포 곡선으로부터 얻은 비정 값들과 비교하여 나타내었다. 따라서 TLD로 측정된 경우의 선량분포 깊이가 유사한 경향임을 확인할 수 있었다.

3. Beam 평탄도 측정

Fig. 5는 전자선 조사에 있어서 조사야의 크기 10×10 cm² 일 경우의 beam 좌우의 평탄도를 나타내었다. 이때 평탄도의 평가는 조사면의 80% 영역내에서 결정하였으며²²⁾, dosimetry system으로 측정된 경우는 허용기준 3%를 초과하지 않았으나, CaSO₄:Tm-PTFE TLD로 측정된 경우는 좌우 대칭으로 선속의 중심보다 다소 흡수선량이 증가한 모양을 나타내어 평탄도는 4.5%로 나타났다. 따라서 전자선에 대한 TLD를 이용한 beam 평탄도 측정을 위해서는 선량의존성, 에너지의존성 등에 대한 추가적인 실험으로 이에 대한 보정이 필요하다고 본다. 그리고 이상적인 선량 분포의 모양은 조사야 내에서는 평탄하고 경계부근에서 선량은 바로 0이 되어야 하나 실제 선량분포에 관한 평탄도는 조사야 경계부근에서 지수함수 형태를 나타내고 있는데 이런 지수함수 형태 부분을 반음영(penumbra)이라고 하며, 반음영의 폭은 beam 중심축의 선량을 100%로 규격화했을 때 20~90% 사이이다. 반음영이 생기는 원인은 표적의 크기 및 SSD 등에 의한 기하학적 원인과 전자선의 산란 성분 등에 의한 물리적인 요인 때문이라고 생각된다^{15, 22)}.

V. 결 론

제작한 디스크 형태의 CaSO₄:Tm-PTFE TLD 소자의 균일성은 약 4% 이내의 오차 범위 내에서 균일하였다. 선별한 TLD를 이용하여 고에너지 전자선에 대한 polystyrene 팬텀에서의 최대선량깊이, 50% 선량깊이 및 실용비정의 값을 구할 수 있어 제작한 TLD의 유용성을

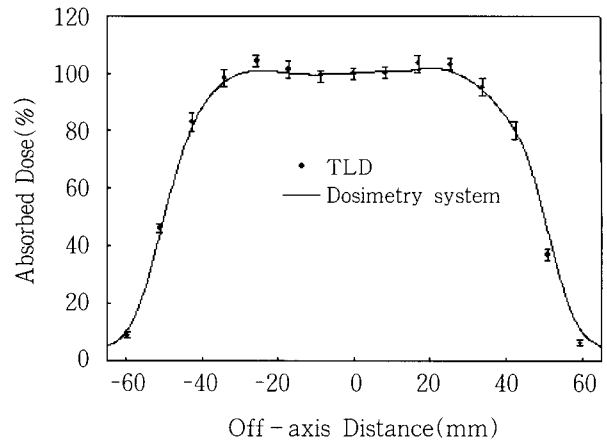


Fig. 5. The beam flatness at high energy electron

확인할 수 있었다. 또한 조사야 내의 beam 평탄도를 측정된 결과 4.5%로 측정되어 이는 dosimetry system을 사용하여 측정된 결과와 비교했을 때 산란선의 영향으로 평탄도가 다소 높게 나타났다. 이상의 결과로 디스크 형태의 얇은 고감도의 CaSO₄계열 TLD를 이용하여 비교적 간단하게 흡수선량 분포를 평가할 수 있음을 확인하였으며, 특히 다른 선량계로는 측정이 곤란한 흡수차가 큰 경계부근에서의 선량 측정 시에 더욱 유용하게 적용할 수 있을 것으로 기대한다.

참 고 문 헌

1. 장시영 : "개인방사선량 측정용 TL 선량계", 동위원소회보, 13(4), 56, 1998.
2. 유명진 : "Magnesium borate 열형광체의 제작과 photon, beta 및 고에너지 전자선에 대한 특성", 경성대학교, 1992.
3. T. Yamashita, N. Nada, H. Onishi and S. Kitamura : "Calcium Sulphate Phosphor Activated by Rare Earth", Health Phys., 21, 253, 1971.
4. A. R. Lakshmanan : "Editorial - Recent Improvements in CaSO₄ and BaSO₄ Thermo-luminescence Dosimetry Materials", Rad. Protec. Dosim., 40(4), 219, 1992.
5. K. S. V. Nambi, V. N. Bapat and A. K. Ganguly : J. Phys. C : Solid Phys., 7, 4403, 1974.
6. M. Prokic : "Improvement of the Thermoluminescence Properties of the Non-commercial Dosimetry Phosphors CaSO₄:Dy and CaSO₄:Tm", Nucl. Instrum. Methods, 151, 603, 1978.
7. C. M. Sunta : "Thermoluminescence of Calcium-Based Phosphors", Nucl. Tracks, 10(1/2), 47, 1985.
8. A. R. Lakshmanan, S. S. Shinde and R. C. Bhatt :

- "A Comparative Study of Some CaSO_4 Thermoluminescent Phosphors for Radiation Dosimetry", Rad. Protec. Dosim., 16(3), 237, 1986.
9. A. S. Pradhan and R. C. Bhatt : "Metal Filters for the Compensation of Photon Energy Dependence of the Response of $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ - Teflon TLD Discs", Nucl. Instrum. Methods, 166, 497, 1979.
 10. L. L. Campos and M. F. Lima : "Thermoluminescent $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ Teflon Pellets for Beta Radiation Detection", Rad. Protec. Dosim., 18(2), 95, 1987.
 11. I. Kasa : "Dependence of Thermoluminescence Response of $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ and $\text{CaSO}_4:\text{Tm}$ on Grain Size and Activator Concentration", Rad. Protec. Dosim., 33(1-4), 299, 1990.
 12. 강희동 외 : "TLD 방사선 센서 및 관독장치의 개발 (II)", 센서기술연구소, 1993.
 13. 남영미 : "LiF:Mg,Cu,Na,Si Teflon TLD의 특성 및 응용에 관한 연구", 부산대학교, 1997.
 14. ICRU, "Determination of Dose Equivalents Resulting from External Radiation Sources", Report 39, Bethesda, 1985.
 15. ICRU, "Determination of Absorbed Dose in a Patient Irradiated by Beams of X or Gamma Rays in Radiotherapy Procedures", Report 24, Bethesda, 1976.
 16. W. F. Gagnon and W. Grant III : Radiology 117, 705, 1975.
 17. G. Rikner and E. Grusell : Med. Phys. 17, 870, 1987.
 18. 방사선량의 표준측정법, 한국과학기술학회, 13-17, 1990.
 19. ICRU, "Stopping Powers of Electrons and Positrons", Report 37, Bethesda, 1984.
 20. 김도성, 박강수, 강희동 : " $\text{CaSO}_4:\text{Tm}$ - PTFE TLD의 제작과 선량계 특성", 새물리, 33, 517, 1993.
 21. IAEA Technical Reports Series No.277, "Absorbed Dose Determination in Photon and Electron Beams", Vienna, 22, 1987.
 22. F. M. Khan : "The Physics of Radiation Therapy", Williams & Wilkins, Baltimore, 366, 1994.