

LiF:Mg,Cu,P 열형광선량계의 선량특성을 이용한 눈가림법에 의한 출력선량 평가

*계명대학교 의과대학 의공학교실, †가톨릭대학교 의과대학 방사선종양학교실,
‡동국대학교 의과대학 방사선종양학교실, §계명대학교 의과대학 방사선종양학교실

최태진* · 이호준[†] · 예지원[‡] · 오영기[§] · 김진희[§] · 김옥배[§]

조사면의 크기와 한계 측정부위의 선량평가에는 형체가 자유로운 열형광분말체를 이용하는 것이 적합함을 뒷받침하기 위하여 LiF:Mg,Cu,P TLD 분말체의 선량특성을 조사하고, 작성된 평가 알고리즘에 따라 선형가속기의 출력선량을 눈가림법으로 조사한 TLD에 적용했을 때 평가 신뢰성을 확인하고자 한다. 열형광분말소자는 PTW 사의 LiF:Mg,Cu,P (200 Mesh)이며, 판독기는 LTM (LTM Co, France)이다. 물의 흡수선량은 전리함과 전위계를 표준선량평가기관에서 교정한 흡수선량계수를 사용하여 구하였으며, TLD 조사는 자체 제작한 미니 프라스틱 수조의 중앙에 삽입하여 조사면 10×10 cm²로 시행 하였다. 방사선조사는 두 대학병원에 설치된 선형가속기(Oncor, Siemens와 Clinac Ix, Varian)의 6 MV 광자선으로 하였으며, TLD의 눈가림법 선량평가는 glow 곡선의 특성과 분말질량에 의한 감도변화, 선량률의존성, 선량-TL 강도의 비례성과 퇴행성 조사를 통해 시행되었다. LiF:Mg,Cu,P TLD는 3개의 glow peak를 보였고 232도에 나타나는 peak는 선량과 비례성이 높고 감도가 높으며 퇴행현상이 적어 선량계로서 좋은 조건을 보이고 있다. 열형광선량분말체는 1,000 cGy까지 대략적인 선형관계를 유지하였으나, 정밀 측정평가를 위해 비선형 함수를 통해 평균 1% 오차범위에서 평가할 수 있었다. LiF:Mg,Cu,P TLD는 선량률 22.2 cGy/min에서 600 cGy/min까지 TL 감도에 거의 영향을 주지 않았으나, 가열판(Planchette)의 분말체의 량에 따라서는 TL 감도에 변화가 있음을 확인하였다. 눈가림법으로 두 기관의 선형가속기에서 15회와 10회 조사하였고, 선량범위는 15~800 cGy였다. 눈가림법에 의한 양 기관의 TL 선량은 평균 1% 이하의 오차범위에서 일치하고 편차는 각각 ±1.9%와 ±2.58 이내 에 있었다. 열형광분말소자를 사용하여 눈가림법으로 출력선량을 평가한 결과 실험오차범위에서 표준전리함의 선량과 잘 일치하였으며, 전리함으로 접근할 수 없는 작은 조사면이나 경계성 조사면에 대한 선량평가에 신뢰성 있는 평가를 할 수 있을 것으로 생각한다.

중심단어: LiF:Mg,Cu,P, TLD, Glow curve, Blind test

서 론

환부의 종양에 도달되는 선량과 선량분포는 심부선량백분률과 콜리메터 산란계수, 팬텀산란계수, 선량평탄도 및 출력선량계수와 치료보조기구에 대한 선량계수가 입력된 방사선치료용 선량계획프로그램을 이용하여 구하게 된다. 이들 교정계수는 조사면의 크기에 따라 영향을 받게 되고, 기준 조사면에 대한 상대적인 선량비로 얻게 되므로 교정계수의 변화는 비교적 적은 것으로 알려져 있다. 반면에 기

준조사면의 임의의 지정 깊이에서 모니터 선량(MU)에 대한 출력 선량(cGy)의 비로 정의되는 MU (Monitor Unit)교정계수는 전기기계적 영향에 의해 출력선량(률) 변화를 가져오므로 주기적인 평가와 교정이 필요하다.

출력선량의 평가는 대체로 기준 조사면과 지정 깊이에 지두형(Thimble typed) 공기전리함을 두고 가속기에서 방출되는 선량을 TG-51 또는 IAEA 398 Report의 규정과 정의에 따라 조직의 흡수선량으로 변환하여 구하는 것이 일반화된 과정이다.

특히 출력선량의 평가는 방사선치료의 제반 평가의 기본이 되고 있으며, 출력선량 평가의 오차는 치료선량에 직접 전달되고, 모든 치료계획 환자에게 적용되어 확산적이며 또한 지속적으로 오차를 일으키게 되므로 정확한 선량평가를 강조하게 된다.^{1,2)}

표준선량계인 지두형 공기전리함은 전자평형조건을 만

이 논문은 2009년 11월 18일 접수하여 2009년 11월 30일 채택되었음.
책임저자 : 이호준, (705-718) 대구시 남구 대명4동 3056-6
가톨릭대학교 의과대학 방사선종양학교실
Tel: 053)650-4788, Fax: 053)623-7507
E-mail: hjlee@cu.ac.kr

축해야 하는 등의 제약으로 인해 세기조절치료법의 작은 분할조사면의 선량검증에는 적합지 않은 것으로 알려져 있다.^{3,4)}

열형광선량계는 전자평형에 무관하며 열에 의한 발광원리가 비교적 잘 알려져 있고, 소형 또는 분말체로 재사용이 가능하며, 선량비례성이 높은 것으로 알려져 있어 작은 조사면의 선량평가에 적합하게 활용될 수 있다.

본 연구는 종양치료용 선형가속기의 6 MV X선의 기준 조사면 10×10 cm²에서 공기전리함에 의한 일정깊이의 물의 흡수선량을 LiF:Mg,Cu,P 분말체 TLD에 조사하여 선량 특성을 구하고, 개발된 선량평가 연산을 이용하여 임상에서 많이 이용되는 범위의 선량을 눈가림법으로 조사한 TLD의 출력선량과 오차를 평가하여 출력선량검증에 활용하고자 한다.

대상 및 방법

1. 이론적 배경

지금까지 알려진 바에 의하면, 유전체에 불순물(희토류 등의 물질)이 미량 함유되면 안정된 격자구조에 결함이 일어나 전자-정공 트랩이 형성된다.

이온화 방사선이 조사되면 가전자대(valence band)의 전자는 에너지 준위가 높은 전도대(conduction band)로 올라간 다음, 격자결함에 의해 생성된 electron trap에 갇히게 되고, 전자의 이동으로 정공 트랩이 금지대(forbidden band)로 이동하며, 외부에서 열을 가하면 전자트랩에 갇힌 전자들이 에너지 트랩을 벗어나 정공과 결합하게 되는 과정에 에너지 차이 만큼 가시광선을 발하며, 형광강도는 조사된 방사선량과 비례하는 것으로 알려져 있다.⁵⁻⁷⁾

열형광소자에서 발한 가시광선은 광전자증배관(Photomultiplier tube)을 통해 전기신호로 전환되고, 가열온도 또는 가열시간에 대한 열형광강도를 나타내는 섬광곡선(glow curve)을 얻게 된다.

Randall과 Wilkins⁸⁾ (1945)는 glow curve를 통해 트랩의 깊이와 포획전자의 진동수 및 가온율의 관계를 밝혔다.

열형광 강도는 단위시간당 이탈 전자의 수와 비례한다고 가정하면 다음과 같이 쓸 수 있다. 즉, 열형광 강도(I)는

$$I=C \frac{dn}{dt} \tag{1}$$

여기서 C=비례상수이고, n은 포획전자의 농도를 의미하며 dn/dt는 단위시간당 이탈전자의 수이다.

포획전자의 재결합율이 Maxwell-Boltzmann 분포를 이룬다고 가정하면, 재결합확률은

$$P=S \exp(-E/kT) \tag{2}$$

가 된다. 단 S(sec⁻¹)는 전자의 진동수인자(Frequency factor)이며, E(eV)는 활성화에너지이며, k는 Boltzmann 상수(eV/K), T(K)는 절대온도이다.

단위시간당 이탈된 전자수(dn/dt)는

$$I=dn/dt=n S \exp(-E/kT) \tag{3}$$

와 같이 된다. 상수 가온율 β=dT/dt를 두고, 초기가열온도(T₀)에서 가열온도(T)까지 적분하면

$$n=n_0 \exp[-(S/\beta) \int_{T_0}^T \exp(-E/kT')dT'] \tag{4}$$

를 얻게 된다.

Randall과 Wilkins에 의한 1차 발광과정의 TL 강도I(T)는 다음과 같이 된다.

$$I(T) = S n_0 \exp(-E/kT) \exp[-(S/\beta) \int_{T_0}^T \exp(-E/kT')dT'] \tag{5}$$

여기서 n₀와 T₀는 각각 포획전자의 초기농도와 초기온도를 의미한다.

Chen⁹⁾은 Randall-Wilkins의 이론을 확장하여 다중재포획(multiple retrapping) 등의 복합발광과정에 의한 열형광현상을 발표하였으며, 재결합율과 재포획율이 같은 2차발광과정은 차수 m=2차로 둔다. 다중포획의 전자이탈률은 일반적으로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{dn}{dt}=n^m S \exp(-E/kT) \tag{6}$$

따라서 m차 발광과정에 대한 열형광강도 I(T)는

$$I(T) = C S n_0 \exp(-E/kT) \left\{ (m-1) \frac{S}{\beta} \int_{T_0}^T \exp(-E/kT')dT' + 1 \right\}^{-m/(m-1)} \tag{7}$$

이 된다. 여기서 m=1이면, Randall-Wilkins의 1차 발광과정과 같이 된다.

방사선에 조사된 TLD는 가열온도에 따라 glow 곡선을

으며, glow peak의 모양은 포획전자의 활성화에너지와 진동수 및 다중재포획차수의 정보를 제공한다.

Halperin과 Braner¹⁰⁾은 1차발광과정과 2차발광과정에 의한 열발광을 동시에 고려하고 측정된 glow curve의 대칭성을 이용하여 발광차수와 활성화에너지를 구하였다.

Halperin과 Braner에 따르면 Fig. 1의 단일 glow peak에서 Peak 온도를 T_g , 반치폭(FWHM)을 ω , T_2-T_g 를 δ , $\mu_g = \delta/\omega$ 라 할 때, 발광과정의 차수는 μ_g 에 의해 결정하였다.

즉, $\mu_g < e^{-1}(1+\Delta)$ 일 때는 1차발광과정이고, $\mu_g > e^{-1}(1+\Delta)$ 일 때는 2차발광과정이다. 여기서 $\Delta = 2 kT_g/E$ 이다.

Chen은 glow peak의 대칭성을 이용하여 glow곡선에서 측정된 ω 와 T_g 로부터 1차 발광차수에 대한 활성화에너지 E_1 은

$$E_1(\text{eV}) = 2.52 \frac{kT_g^2}{\omega} - (1+a/2) 2 kT_g \quad (8a)$$

2차 발광차수에서는

$$E_2(\text{eV}) = 3.54 \frac{kT_g^2}{\omega} - (1+a/2) 2 kT_g \quad (8b)$$

로 주어진다. 단 여기서 진동수가 온도에 무관할 때는 $a=0$ 고, 진동수가 온도함수인 경우 실험적으로 $-2 \leq a \leq 2$ 의 범위에 있다.⁹⁾

이 활성화에너지와 glow peak의 대칭성은 열형광선량계의 반복적인 annealing 주기에 따라 포획전자의 구조적 변화 유무를 조사하는 데 이용될 수 있다.

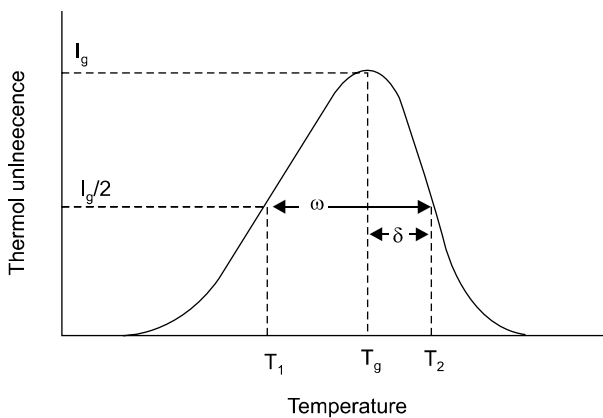


Fig. 1. An isolated glow peak showing the parameters as $\omega = T_2 - T_1$, $\delta = T_2 - T_g$ and $\tau = \omega - \delta$.

2. 실험방법

열형광선량계의 소자는 LiF에 미량의 마그네슘과 구리, 인을 미량의 화학적불순물로 첨가하여 소성하여 200 mesh (~0.05 mm)의 분말체로 만든 LiF:Mg,Cu,P를 이용하였으며, 판독기는 매뉴얼 방식인 LTM (LTM Co, France)이다.

LiF:Mg,Cu,P 분말체의 glow 곡선의 특성을 알아보기 위해 가운을 6°C/sec로 일정하게 두고 300°C까지 온도를 가하여 glow 곡선을 얻은 다음, glow peak의 위치를 조사하고 선량계로써 이용할 수 있는 peak를 정하기로 하였다.

분말체는 고체소자와 달리 캡슐의 형태를 자유롭게 정할 수 있고, 소량의 분말을 이용해 초소조사면의 출력선량을 결정할 수 있다. 분말체의 분배기(dispenser)를 이용할 수 없는 극소량의 분말체를 판독하기 위해서 일정선량을 조사한 뒤 1 mg에서 10 mg까지 질량 변화에 따른 열형광세기를 조사하였다.

열형광선량 분말체 LiF:Mg,Cu,P의 선량에 대한 특성곡선을 얻기 위한 기준선량계는 한국 표준연구원(Korea Research Institute of Standards and Science, KRISS)에서 교정한 0.125 cc의 지두형 전리함(TM31010, PTW)을 사용했으며, 6 MV X선(Varian iX, USA)의 조사면 10×10 cm²으로 깊이 1.5 cm의 물흡수선량은 TG-51 프로토콜에 따라 평가하여 TLD에 조사 실험하였다.

물 팬텀의 전리함측정 위치에 TLD 캡슐을 설치하기 위해 플라스틱으로 30×30×3 cm의 미니 물팬텀(둘레 0.6 cm

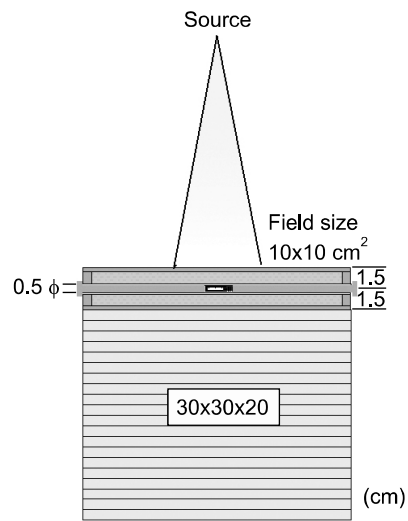


Fig. 2. The TLD capsule mounted into the center of the mini-water phantom on the solid water equivalent phantom.

두께, 입사면의 두께는 0.1 cm)을 Fig. 2와 같이 제작하였다. 미니 물팬텀의 중앙에는 6 MV X선의 최대선량깊이에 캡슐을 삽입할 수 있도록 외경 0.8 cm (내경 0.5 cm)의 플라스틱 튜브를 관통되게 설치하고 플라스틱 봉(0.5 cm ϕ)으로 밀착하면 캡슐이 항상 선속의 중심에 놓이게 되도록 고안하였다.

LiF:Mg,Cu,P의 선량특성을 조사하기 위해 6 MV X선으로 미니 워터 팬텀의 TLD 위치에 삽입하고 3, 5, 10, 30, 50, 100, 300, 500, 750, 1,000 cGy를 각각 조사하여 TL 강도를 얻어 함수를 구하였다.

LiF:Mg,Cu,P를 넣은 캡슐의 크기는 외경 0.49×2.2 cm (내경 0.3×1.3 cm)이고 캡슐의 재질은 합성수지이다.

정량적인 선량평가를 위해 검출기에 도달된 선량률의 변화와 열형광세기를 조사하기 위해 선량률 22.2, 50, 100, 200, 300, 400, 600 cGy/min을 조사하여 변화유무를 평가하였다.

열형광선량계를 이용하여 저자들이 속한 2개 병원의 종양학과에 사용 중인 선형가속기(Varian, iX)의 6 MV X선을 임의로 조사하고, 관독자는 조사값을 알지 못한 상태에서 TLD의 선량을 평가하여 물의 흡수선량값을 알아맞히는 소위 눈가림법을 사용하여 선량평가 프로토콜의 신뢰성을 확인하고자 하였다.

결 과

열형광선량계는 시간에 따라 온도가 일정하게 증가하는 열을 가하면 트랩에 포획된 전자가 트랩을 이탈해 정공과 결합하면서 에너지 차이만큼 가시광선을 발하게 되고

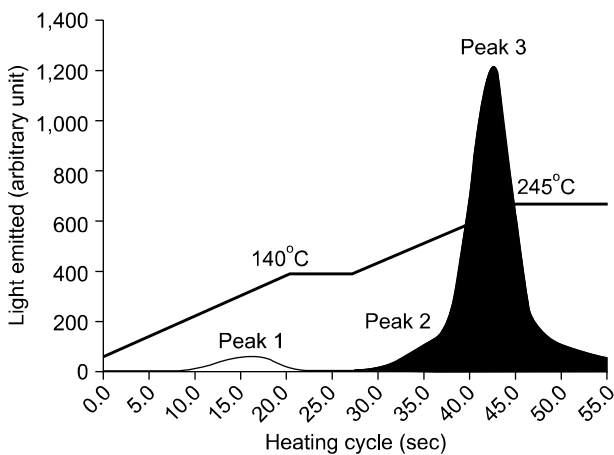


Fig. 3. Light emitted of TLD as a function of heating cycle.

Rhandal와 Wilkins 등이 발표한 바와 같이 열형광의 세기는 열형광소자에 조사된 방사선량에 비례성을 보였다.

열형광선량계 중 유효원자번호가 8.2로 조직 등가물질인 LiF에 미량의 망간과 구리, 인을 불순물로 함량시킨 LiF:Mg,Cu,P 열형광선량계는 전형적으로 glow peak가 Fig. 3과 같이 110°C와 183°C 그리고 232°C에 각각 나타났다. 단, peak 2는 중첩에 의해 peak 3에 묻혀보이게 된다. 이 중 110°C의 glow peak는 보관 중 상온에서도 쉽게 감쇠가 일어나고, 감도는 232°C의 glow peak에 비해 약 1/20 수준의 크기를 나타내었으며, 감도가 높고 안정적인 높은 온도의 peak 3을 중심으로 포획전자의 활성화 에너지와 포획전자의 발광차수 및 선량과 열형광량의 비례관계를 조사하였다. Glow 곡선의 FWHM의 T₁, T₂의 온도는 214.7°C, 244.9°C이며 peak 온도는 232°C이다. Glow 곡선의 파라미터 μ_g 는 0.49를 얻어 발광차수가 2차임을 알 수 있었으며, 포획전자의 활성화에너지는 a=0일 때 식 (8b)에 따라 2.5 eV를 얻었다.

가온율은 LiF:Mg,Cu,P의 공급사에서 추천한 가열주기를 따랐다. 본 실험에서는 Fig. 3의 기울기선과 같이 6°C/sec로 20초 간 가온하여 Pre-heating하고 140°C에서 7초간 항온을 유지한 후 27초에 다시 같은 가온율로 245°C까지 가열한 후 44.3초부터 54.3초까지 10초간 항온을 유지하는 가열주기를 택하였으며, LiF:Mg,Cu,P의 전형적인 glow 곡선을 보여준다.

열형광강도는 1차 항온이 끝나고 두 번째 가온율이 적용되는 시점과 가열주기가 끝나는 시점사이에 나타나는 glow curve의 면적을 적분한 량과 glow peak의 높이로 선량-TL 강도의 관계를 비교해서도 평가할 수 있으나, 본 실험에서는 전자의 방법을 택하였다.

방사선조사는 Fig. 1과 같이 LiF:Mg,Cu,P의 분말체(200 mesh)를 넣은 합성수지 캡슐을 미니 물팬텀의 1.5 cm 깊이의 중앙에 삽입하여, 선속중앙과 일치시키고, 선원-팬텀포면간 거리(SSD) 98.5 cm, 조사면 10×10 cm²로 하여 100 MU를 주게 하였다.

조사된 열형광선량계는 조사 익일 관독하였으며, 먼저 미량의 분말체를 이용하기 위해 분말체의 량과 열형광강도의 변화를 알고자 1.25 mg, 3.5 mg, 5 mg, 7.5 mg, 10 mg을 마이크로그램 저울(CHAN, USA)에 달아 관독 비교하여 Fig. 4와 같은 결과를 얻었다.

최소자승법을 이용하여 최적화 된 다항식은 $f(x)=a+bx+cx^2+dx^3+gx^4$ 이고, 다항식의 계수는 $a=0.77512581$, $b=0.11972714$, $c=-0.017307122$, $d=0.001294785$ 와 $g=-0.000037799136$ 였으

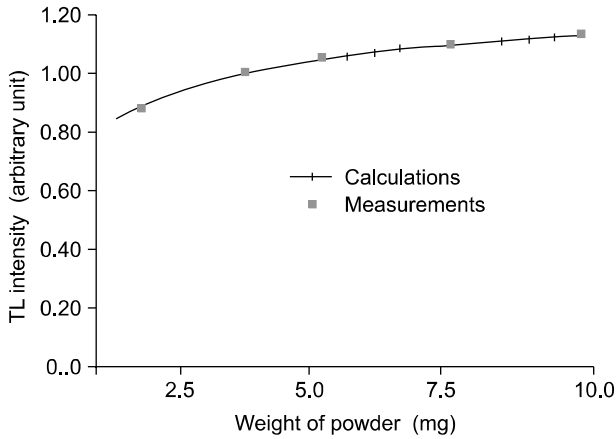


Fig. 4. Relative TL intensity in arbitrary units as a function of powder weight.

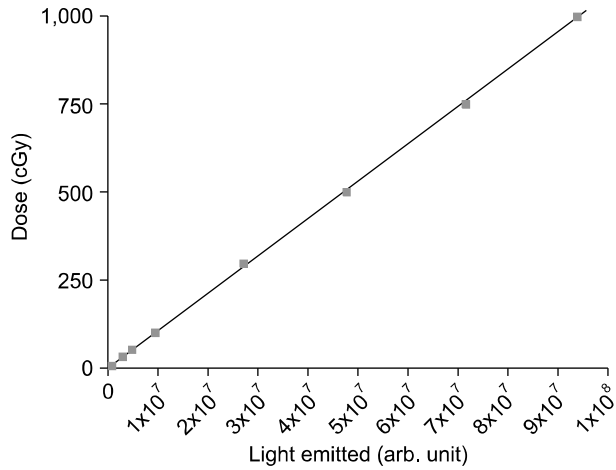


Fig. 5. Dose in cGy as a function of light emitted of LiF:Mg,Cu,P powder.

며, 최적화된 계산값은 실측치에 비해 평균 오차가 -0.2% 이내를 보였다.

저자들은 LiF:Mg,Cu,P의 강도의 변화가 적으면서 가열판의 흡에 충분히 도포될 수 있는 3.5 mg을 1회 판독질량의 기준으로 삼았다.

열형광분말 캡슐에 6 MV X선으로 물흡수선량 3, 5, 10, 30, 50, 100과 300, 500, 750, 1,000 cGy를 조사하여 선량의 존성을 조사하였으며, Fig. 5와 같은 선형성을 얻었다.

LiF:Mg,Cu,P의 232°C의 glow peak가 이루는 면적을 강도로 나타내어 선형성을 분석한 결과, 3 cGy에서 1,000 cGy까지는 대체로 직선성을 보여주고, 흡수선량에 대한 TL 강도의 관계를 일차식으로 Fitting의 결과 선량(XcGy)에 대해 열형광량(Y_{TL})은 Y_{TL}=0.94X_{cGy}+0.12로 직선성을 보였으나,

Table 1. Dose rate dependency of LiF:Mg,Cu,P thermoluminescent dosimeter.

Dose Rate (cGy/min)	22	50	100	200	300	400	600
Exposed Dose (cGy)	100.0	100.0	100.0	103.0	103.0	103.0	103.0
Evaluated Dose (cGy)	100.7	100.3	101.2	102.8	103.4	102.9	103.7
Discrepancy (%)	0.7	0.3	1.2	-0.2	0.4	0.1	0.7

30 cGy 미만의 낮은 선량에서는 측정 값에 대해 4~10% 이상 오차를 보였다.

본 실험에서는 Fig. 4와 같이 TL의 형광량으로 선량을 계산하기 위해 다항식과 지수함수를 이용하여 비선형적 최소자승법을 적용하여 다음과 같이 Fitting한 결과 측정값에 대해 평균오차 1% 이내 및 최대오차 2.2% 범위에서 평가할 수 있었다.

$$Dose [cGy] = b + cx + dx^2 + ex^3 + fx^4 + gx^5 + hx^6 \cdot \exp(TL/10^6/a) \tag{9}$$

여기서 TL은 판독기에 읽은 열형광의 강도를 의미하며, Fitting 계수 a=107373.3, b는 -1.9833632, c= 11.200141, d=-0.0885797, e=0.0088598, f=-0.0003072451, g=4.093758E-6이고, h=-1.8385505e-8이다.

LiF:Mg,Cu,P 열형광선량계의 선량비례성은 분당 선량률을 22.2 cGy/min에서 600 cGy/min까지 변화시켜 각각 100 cGy를 조사한 후 glow curve를 비교하였으며, Table 1과 같이 거의 동일한 TL 강도를 보였으며, 평균오차는 0.5%였고, 최대오차는 선량률 100 Gy/min에서 1.2%를 보였다.

LiF:Mg,Cu,P 열형광선량계는 조사후 1개월간 상온 암실에 보관 후 측정된 결과 실험오차범위내에서 Fading 현상이 나타나지 않았다.

눈가림법은 본원 선형가속기로 15회와 통신저자가 속한 병원에서 10회 조사하여 총 25회 시행하였으며, 선형가속기는 모두 6 MV X선으로 조사하였다. 팬텀은 TLD를 삽입하고 제거하기 용이하며 항상 일정한 위치를 유지할 수 있게 제작한 미니 물팬텀을 사용했으며, 조사면적은 10×10 cm²이고, 선원과 TLD간 거리는 100 cm, 길이는 1.5 cm로 두었다. Varian iX와 네트워크된 치료계획장치인 Eclipse는 SSD 100 cm와 최대선량깊이 1.5 cm의 선량을 기준으로 규격화되어 있으므로, 측정점(source-TLD distance) 100 cm에 대한 선량은 거리역자승법을 적용하였다.

선형가속기의 Monit Unit (MU)는 표준선원에서 교정된

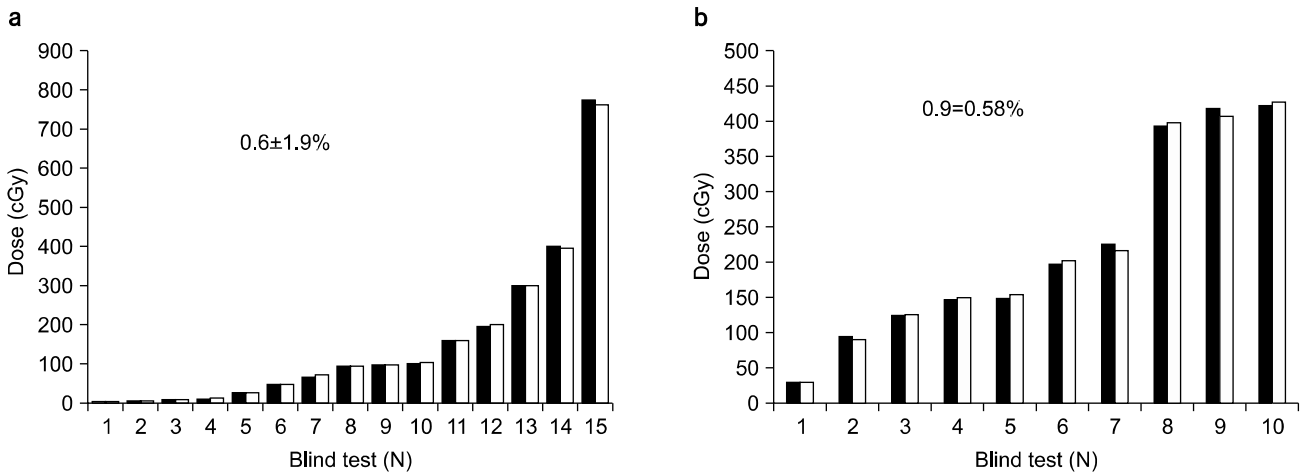


Fig. 6. Comparison of the evaluated TL dose with that of the exposed dose in cGy. Blind test were performed to Site a and b. The white color of rods (right rods) represent the TLD dose and black rods (left rods) for exposed dose which based on the air ionization chamber calibrated at SSDL in Korea.

Table 2. Comparison of the evaluated TLD dose with exposed dose to TLD powder in blind dose on Site a.

Exposed dose (cGy) (A)	Evaluated dose (cGy) (B)	(B-A)/A *100 (%)
3.0	3.1	3.3
5.0	4.9	-2.0
10.0	10.0	0.0
15.3	16.0	4.6
30.0	30.1	0.3
50.0	49.9	-0.2
70.0	71.7	2.4
96.0	95.1	-0.9
100.0	102.1	2.1
102.0	103.5	1.5
161.5	161.7	0.1
201.0	203.0	1.0
300.0	300.0	0.0
404.0	397.0	-1.7
772.0	763.0	-1.2
Average SD (%)		0.6±1.9

TM31010-1055 전리함을 사용하고 TG-51 프로토콜을 통해 평가된 선량으로 조사하였다.

눈가림법에 의한 TLD의 선량평가는 Fig. 6 (Site a, b)와 같이 선형가속기 a에서는 조사된 선량에 비해 평균 0.6±1.9%의 오차를 보였고, 선형가속기 b에서는 0.9±2.98%를 나타내었다.

Table 2는 선형가속기(Site a, Fig. 6a)에서 TLD에 미지의 선량을 조사하고, TLD 판독과 선량-감도곡선을 통해 구한

평가선량간의 오차를 보여주고 있다.

고 찰

LiF:Mg,Cu,P는 유효원자번호가 조직에 가깝고, 선량감도는 TLD-700 (Harshaw Chemical Co.)에 비해 약 15배 이상 높으며, 선량계측에 유리한 주된 glow peak는 1개월간 상온에 보관하여도 거의 잠상퇴행에 의한 감쇠가 일어나지 않는다고 보고되고 있다.¹²⁾

임 등¹²⁾이 LiF:Mg,Cu,P와 PTEE를 압축하여 제작한 열형 광선량계에서는 peak가 190°C, 245°C, 287°C, 350°C에 나타났다고 발표한 바 있으나, 본 실험에서 사용한 상용화된 LiF:Mg,Cu,P의 경우 110°C에서 Peak가 나타났으며, 본 실험에서 선형가온율을 6°C/sec로 설정하여 실온에서 350°C까지 가열한 glow 곡선에서도 250°C 이상에서 peak가 나타나지 않아, TL 제작사에서 권장하는 annealing 온도(260°C)를 초과하지 않는 범위에서 가열주기로 정했다. 그러나 상용화된 TL의 소성조건과 가열과정 및 첨가 불순물량에 대한 정량적인 언급이 없어 직접비교하기는 어려우나 본 실험의 232°C의 peak는 앞서 언급한 저자의 glow 곡선 중 287°C에 나타난 peak와 거의 유사한 감도를 보이고 있었다.

본 실험에 이용된 LiF:Mg,Cu,P의 glow peak는 110°C, 183°C와 232°C에서 나타났으며, peak 1과 peak 3은 뚜렷한 glow를 보이는 반면에 peak 2는 peak 3과 중첩되어 매우 인접한 에너지 level의 전자 트랩에서 이탈된 전자의 결합에 의해 형광이 발하는 것임을 알 수 있다.

이들 glow peak 중 110°C에서 나타나는 peak 1은 상온 보관 중에도 쉽게 감쇠가 일어나고, 감도는 peak 3에 비해 약 1/20의 크기로 분석되고 있어 결국 온도가 200~300°C 이내에서 나타나는 peak에서 퇴행에 의한 감쇠가 적게 일어나므로 선량계로 적합함을 알 수 있다. 이는 온도가 높은 곳의 전자 트랩의 에너지 준위가 깊음을 이론적 배경에서 알 수 있다.

LiF:Mg,Cu,P TLD에 140도로 Preheating으로 가열하면 Peak 3의 TL 강도에 영향을 주지 않고 Peak 1을 제거할 수 있으며, 주 peak 3에 영향을 주는 peak 1의 꼬리부분의 glow 곡선을 효과적으로 낮추고 있음을 보였다.

본 실험의 주된 목적은 TLD를 이용하여 흡수선량을 어느 정도까지 정확하게 평가할 수 있는지 알아보고 눈가림법을 통해 평가선량 방법의 신뢰를 확인하고자 하는 것이다.

저자들은 TLD 선량평가를 위해 교정회수가 비교적 적은 분말체(200 mesh, ≤ 0.05 mm)를 사용하였다. 정확한 선량을 평가하기 위해서 Chip 또는 Rod형의 TLD는 원리적으로 개개의 소자별 교정수를 구해야 되고, 재사용하기 위해 시행하는 Annealing으로 초래되는 미미한 감도의 변화가 오차를 불러오게 되므로 재교정이 필요한 논리적 반복성을 피하기 어려운 점이 있다.

저자들은 TLD 분말체의 일정량(수 10 g)을 정하여 교정수를 구하고, 매 실험 시 수 10 mg을 사용하게 되면 약 1,000회 이상 사용 후 Annealing 하게 되며, 재 사용시 다시 교정수를 구하는 방법을 고려했다.

저자들이 TLD 분말체를 선호한 또 다른 이유는 형태가 없으므로, 실험 목적에 따라 캡슐의 모양과 크기를 변경하여 적용할 수 있기 때문이며, 특히 최근 방사선치료법이 종양부위 안에서 콜리메타가 개폐되는 다엽콜리메타를 많이 사용하게 되고, 중복되는 조사면 경계선량과 Tongue and Groove 효과에 대한 선량성능 및 공기 전리함을 사용할 때 따르는 전자평형을 고려하지 않고 선량을 확인하는 데 적합하다고 판단하였다.

TLD 분말체는 홈이 있는 가열판(heating planchette)에 고르게 분포시켜 관독하는 것이 중요하다. 이는 가열판과 증폭장치인 PM tube의 장이 가깝고, 분말체에서 발하는 광의 간섭과 기하학적 위치에 따라 영향을 줄 것을 예상할 수 있다.

TLD 선량 평가를 위해 저자들은 조사된 TLD 분말체를 1.3±0.1 mg, 3.5±0.1 mg, 5.0±0.1 mg, 7.5±0.1 mg, 10.0±0.1 mg 분배하여 동일한 가열주기하에 열형광량을 얻어 단위

질량당 열형광량으로 정하고 선량감도의 변화를 조사한 결과 유의한 변화가 있음을 확인하였으며, 가열판의 홈 바닥에 고르게 도포될 정도의 양인 3.5 mg을 기준량으로 하였다.

저자들은 LiF:Mg,Cu,P가 선량률에 감도변화가 있는 지를 파악하기 위해 22.2 cGy/min의 저선량률에서부터 50, 100, 200, 300, 400, 600 cGy/min의 고선량률까지 조사하여 선량률과 TL 감도를 비교한 결과 평균 1% 이내의 실험오차범위 내에 있음을 확인할 수 있었다. 이것은 특정 선량영역에서 1/30 수준의 선량률까지 선량에 대한 TL 감도가 변화하지 않을 것이라는 확신을 주는 것이다.

TLD의 glow 곡선에서 200°C 이상 높은 온도영역에서 나타나는 glow peak는 년 간 수% 이하의 Fading을 보인다고 발표되고 있으며,¹³⁾ 본 실험에서도 1개월간 관측에서 거의 변화가 없음을 확인하였다.

본 실험에서 LiF:Mg,Cu,P TLD는 선량에 대해 열형광량이 10³ cGy까지 비례하는 것을 보였으며, 선형함수를 적용했을 때 실험범위 중 저선량에 대한 평가에서 4~10%의 오차범위를 가지는 것을 확인하고 비선형 함수인 지수와 다항식으로 Fitting하여 ±1% 이내의 오차로 선량을 평가할 수 있음을 확인하였다. 이것은 구간을 크게 했을 때 평탄해 보이는 원리와 대등한 것으로 생각된다.

한편, LiF:Mg,Cu,P TLD가 에너지에 따른 TL 감도의 변화를 생각할 수 있으나, 유효원자번호가 공기 또는 인체와 유사하고 낮으므로 광전효과영역을 넘어서는 높은 에너지의 감마선이나 X선에서는 TL 감도가 거의 일정한 것으로 발표되고¹³⁾ 있으며, 낮은 에너지에 대한 TL 감도는 향후 더 많은 연구가 필요할 것으로 생각한다.

방사선에 조사된 LiF:Mg,Cu,P TLD 분말체는 매 조사당 5회씩 관독하여 얻은 열형광량으로 선량을 평가하였으며, 눈가림법으로 두 병원의 선량을 평가 비교한 결과 평균 1% 이하의 오차와 표준편차 ±2% 이하의 오차범위에서 선량을 평가를 할 수 있어 신뢰성을 확인할 수 있었다.

선량평가의 신뢰성을 더욱 높이기 위해서 국가공인기관에서 공기이온함을 정기적으로 교정하고, 선량에 대한 TL 감도계수를 지속적으로 비교 연구할 필요가 있다고 본다.

한편, LiF:Mg,Cu,P TLD의 주어진 가온율에 의한 glow 곡선의 대칭성을 나타내는 파라미터와 포획전자의 활성화에너지는 열형광선량계의 재사용에 의한 물리적 변성유무를 분별하는 데 유용할 것으로 생각한다.

결 론

LiF:Mg,Cu,P의 glow 곡선에서 peak는 3개를 보였으며, Peak 3은 232°C에 있어 상온에서 퇴행현상이 매우 낮고 TL 감도는 높아 선량계로 안정적이고 적합하게 사용할 수 있음을 알게 되었다. LiF:Mg,Cu,P는 glow 곡선의 대칭성을 조사한 결과 다중포획 차수가 2차인 것과 포획전자의 활성화 에너지는 2.5 eV임을 알게 되었다. LiF:Mg,Cu,P TLD의 선량감도는 실험 범위내에서 선량률에 무관한 반면, TL 분말체의 질량이 커짐에 따라 선량에 대한 TL 감도의 변화가 있음을 보였다.

저자들은 3.5 mg의 미량의 TLD 분말체로 단위 질량당 TL 형광량에 대한 선량관계를 다항식과 지수함수를 혼합한 비선형 Fitting 법을 사용하여 최대 1.2% 오차의 범위 내에서 선량을 평가하였으며, 두 대학병원의 선형가속기의 6 MV X선을 눈가림법으로 TLD에 조사하고, 선량을 비교한 결과 site a에서는 0.6±1.9%, site b에서는 0.9±2.58%의 오차 범위에서 상호 일치함을 얻어 프로토콜 및 선량 평가 방법의 신뢰성을 확보하게 되었다.

참 고 문 헌

1. Alber M, Nusslin F: Optimization of intensity modulated radiotherapy under constraints for static and dynamic MLC delivery. *Phys Med Biol* 46:3229-3239 (2001)
2. Boyer AL, Geis P, Grant W, Carol M: Modulated beam conformal therapy for head and neck tumors. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 39:227-236 (1997)
3. Li Y, Yao J, Yao D: Genetic algorithm based deliverable segments optimization for static intensity-modulated radiotherapy. *Phys Med Biol* 48:3353-3374 (2003)
4. AAPM Report 82: Guidance document on delivery, treatment planning and clinical implementation of IMRT: Report of the IMRT subcommittee of the AAPM radiation therapy committee. *Med Phys* 30:2089-2115 (2003)
5. Cameron JR, Suntharalingam N, Kenny GN: Thermoluminescent Dosimetry. Madison, Milwaukee, and London (1968), pp. 30-44
6. 강영호, 라병욱, 최태진, 김도성, 도시홍: CaSO₄:Mn 열방광선량계의 물리적 특성. *New Physics* 25:479-485 (1985)
7. 최태진, 김도성, 도시홍, 라병욱, 강영호: CaSO₄:Dy 열방광선량계의 제작과 물리적 특성. *New Physics* 26:506-512 (1986)
8. Randall JT, Wilkins MHT: Phosphorescence and electron traps. *Proc Roy Soc (A)* 184:366-389 (1945)
9. Chen R: On the Calculation of Activation Energies and Frequency Factors from Glow Curves. *J Appl Phys* 40:570-585 (1969)
10. Halperin A, Braner AA: Evaluation of Thermal Activation Energies from Glow Curves. *Phys Rev* 117:408-415 (1960)
11. Almond PR, Biggs PJ, Coursey BM, et al: AAPM's TG-51 protocol for clinical reference dosimetry of high-energy photon and electron beams. *Med Phys* 26:1847-1870 (1999)
12. 임영화, 김도성, 강희동: LiF:Mg,Cu,P-PTEE 열형광선량계의 제작과 특성. *New Phys* 33:523-529 (1993)
13. Cameron JR, Suntharalingam N, Kenny GN: Thermoluminescent Dosimetry. Madison, Milwaukee, and London (1968), pp. 150-167

Evaluation the Output Dose of Linear Accelerator Photon Beams by Blind Test with Dose Characteristics of LiF:Mg,Cu,P TLD

Tae-Jin Choi*, Ho-Joon Lee[†], Ji-Won Yie[‡], Young-Gi Oh[§], Jin-Hee Kim[§], Ok-Bae Kim[§]

*Bio-Physics Medical Engineering, School of Medicine, Keimyung University,

[†]Raidation Oncology, School of Medicine, The Catholic University, Daegu,

[‡]Raidation Oncology, School of Medicine, Doonggook University, Gyeongju,

[§]Raidation Oncology, School of Medicine, Keimyung University, Daegu, Korea

To achieve the accurate evaluation of given absorbed dose from output dose of linear accelerator photon beam through investigate the characteristics of LiF:Mg,Cu,P TLD powder. This experimental TL phosphor is performed with a commercial LiF:Mg,Cu,P powder (Supplied by PTW) and TL reader (LTM, France). The TLD was exposed to 6 MV X rays of linear accelerator photon beam with range 15 to 800 cGy in blind dose at two hospitals. The dose evaluation of TLD was through the experimental algorithms which were dose dependency, dose rate dependency, fading and powder weight dependency. The glow curve has shown the three peaks which are 110, 183 and 232 degrees of heating temperature and the main dosimetric peak showed highest TL response at 232 high temperature. In this experiments, the LiF:Mg,Cu,P phosphor has shown the 2.5 eV of electron trap energy with a second order. This experiments guided the dose evaluation accuracy is within 1% +2.58% of discrepancy. The TLD powder of LiF:Mg,Cu,P was analyzed to dosimetric characterists of electron captured energy and order by glow shape, and dose-TL response curve guided the accuracy within 1.0+2.58% of output dose discrepancy.

Key Words: LiF:Mg,Cu,P, TLD, Glow curve, Blind test