

Characteristics of the Maximum Glow Intensity According to the Thermoluminescent Phosphors used in the Absorbed Dose Measurement of the Radiation Therapy

Suman Kang*, Inchul Im*, Cheolwoo Park**, Mihyeon Lee***, Jaeseung Lee*

*Department of Radiological Science, Dong-eui University**,
*Department of Radiological Technology, Dong-eui Institute of Technology***,
*Department of Radiation Safety Management, Dong-pusan College****

방사선치료 선량 측정에 사용되는 열형광체에 따른 최대 형광 강도 특성

강수만*, 임인철*, 박철우**, 이미현***, 이재승*

동의대학교 방사선학과*, 동의과학대학교 방사선학과**, 동부산대학교 방사선안전관리실***

Abstract

The purpose of this study were to analyze the characteristic of the glow curves in order to the glow temperature of the thermoluminescent dosimeters (TLDs) for the absorbed dose measurement of the radiation therapy. In this study, we was used the TLDs of the LiF:Mg·Ti, LiF:Mg·Cu·P, CaF₂:Dy, CaF₂:Mn (Thermo Fisher Scientific Inc., USA). The source-to-solid dry phantom (RW3 slab, IBA Dosmetry, Germany) surface distance was set at 100 cm, and the exposure dose of 100 MU (monitor unit) was used 6- and 15-MV X-rays, and 6- and 12-MeV electron beams in the reference depth, respectively. After the radiations exposure, we were to analyze the glow curves by using the TL reader (Hashaw 3500, Thermo Fisher Scientific Inc., USA) at the fixed heating rate of 15°C/sec from 50°C to 260°C. The glow peaks, the trapping level in the captured electrons and holes combined with the emitted light, were discovered the two or three peak. When the definite increasing the temperature of the TLDs, the maximum glow peak representing the glow temperature was follow as; LiF:Mg·Ti: 185.5±1.3°C, LiF:Mg·Cu·P: 135.0±5.1°C, CaF₂:Dy: 144.0±1.6°C, CaF₂:Mn: 294.3±3.8°C, respectively. Because the glow emission probability of the captured electrons depend on the heating temperature after the exposure radiation, TLDs by applying the fixed heating rate, the accuracy of measurement will be able to improve within the absorbed dose measurement of the radiation therapy.

Key Words : Thermoluminescent dosimeter (TLD), Glow curve, Maximum glow peak, Glow temperature.

요약

본 연구는 방사선 치료 영역의 선량 측정을 위하여 상용화된 열형광선량계의 가열 온도에 따른 형광 곡선의 특성을 분석하였다. 본 연구에 사용된 열형광선량계는 LiF:Mg·Ti, LiF:Mg·Cu·P, CaF₂:Dy, CaF₂:Mn(Thermo Fisher

Corresponding Author: Jae-seung Lee	E-mail: jslee111@deu.ac.kr	Tel: +82-51-890-2679
No. 614-714, Dong-Eui University, 995 Eomgwang-no, Busanjin-gu, Busan, Korea		
Received : May, 21, 2014	Revised : June 15, 2014	Accepted : June 25, 2014

Scientific Inc., USA)이었다. 선원과 고체 팬텀 표면(RW3 slab, IBA Dosimetry, Germany)간 거리를 100cm로 하여 기준점 깊이에서 6MV, 15MV X선과 6MeV, 12MeV 전자선을 각각 100MU 조사하였다. 방사선 조사 후 열형광 관독기(Hashaw 3500, Thermo Fisher Scientific Inc., USA)를 사용하여 50°C에서 260°C까지 15°C/sec의 가온율로 가열하여 형광 곡선을 분석하였다. 트랩 준위에 포획된 전자가 정공과 결합하면서 빛을 방출하는 형광 피크(glow peak)는 2개 또는 3개의 피크가 나타났으며 방사선 조사 후 TLD의 온도를 일정하게 증가시켰을 때 최대 형광 피크를 나타내는 형광 온도의 경우 각각의 에너지에 따라 LiF:Mg·Ti 선량계는 185.5±1.3°C, LiF:Mg·Cu·P 선량계는 135.0±5.1°C, CaF₂:Dy 선량계는 144.0±1.6°C, CaF₂:Mn 선량계는 294.3±3.8°C 근처에서 최대 형광 피크를 각각 나타냈다. 방사선 조사 후 포획 전자의 형광 방출 확률은 가열 온도에 의존하게 되므로 방사선 치료 영역의 선량 측정에서 방사선 조사 후 열형광선량계에 일정한 가온율을 적용함으로써 고유한 물리적 특성에 따른 측정 정확도를 향상시킬 수 있을 것으로 판단되었다.

중심단어: 열형광선량계, 형광 곡선, 최대 형광 피크, 형광 온도.

I. INTRODUCTION

LiF(lithium fluoride), CaF(Calcium fluoride) 등의 단결정에 Mg(magnesium), Mn(manganese) 등의 불순물을 소량 혼합한 물질에 방사선을 조사하면 물질의 결정 안에서 가전자대(valence band)의 전자가 여기(excitation)되어 전도대(conduction band)로 올라가고 결정 내 격자결합과 불순물에 기인된 금지대(forbidden band)의 특정 에너지 준위(trapping level)에 포획되어 일정 시간 동안 열적으로 불안정한 준안정 상태(metastable state)가 되며 포획된 전자의 수는 물질의 결정 내에서 흡수된 방사선량에 비례한다. 방사선 조사 후 그 결정의 온도를 증가시키면 포획된 전자는 포획 준위로부터 전도대로 올라와 결정 내 다른 정공과 재결합하면서 빛(가시광선)을 방출하는데 이러한 현상을 열형광(thermoluminescence, TL)이라 하며 이러한 원리를 이용한 측정기를 열형광선량계(thermoluminescent dosimeter. 이하 TLD)라 한다^{[1]-[5]}.

TLD는 방사선량과 형광량간 직선적 비례관계가 수 mR에서 105mR의 넓은 범위에 걸쳐 있어 아주 넓은 범위의 선량 측정이 가능하고 방사선에 대한 감도 및 안정성이 높다는 이점 때문에 임상적으로 고 선량 영역의 흡수선량 측정 및 치료방사선의 선량보증(quality assurance for dosimetry in radiotherapy) 등에 폭 넓게 이용되고 있다^{[6]-[8]}. 일반적으로 TLD는 열형광체의 유효 원자번호(effective atomic number, Zeff)가 인체의 연부 조직(Zeff=7.42)과 등가인 LiF 선량계(LiF:Mg·Ti, LiF:Mg·Cu·P 등)와 뼈(Zeff=14)와 등가인 CaF 선량계

(CaF₂:Dy, CaF₂:Mn 등)가 대표적으로 사용되고 있다. LiF 선량계는 CaF 선량계와 비교하여 인체에 X선 또는 감마(γ)선을 조사할 때 흡수선량을 정량적으로 평가하는데 적합하고 화학적으로 안정하며 퇴행(fading) 현상이 낮다는 장점이 있으나 형광 감도(glow intensity)가 낮다^[9]. 또한 CaF 선량계는 LiF 선량계와 비교하여 형광 감도는 우수하지만 에너지 의존성이 크다는 단점이 있다^{[10],[11]}. 이를 개선하기 위하여 LiF 선량계는 과우더 형태의 LiF:Mg·Ti(TLD-100: 99.96% 7Li, 0.04% 6Li)을 사용하여 결정의 크기 및 균일도 의존성을 개선하고 열형광 관독 및 교정 유효성을 증가시켜 치료 방사선 선량보증 사업에 이용되고 있으며^{[12]-[14]} CaF 선량계의 경우 방사선량에 민감한 활성화제(CaF₂:Cu, CaF₂:Tm, CaF₂:Dy, CaF₂:Mn) 첨가에 따른 형광 스펙트럼을 변화시키고 가열온도에 대한 열형광 응답(TL response) 속도를 감소시켜 효율성을 증대하려는 노력이 있었다^{[15],[16]}. 열형광 현상의 물리적 특성은 결정 내 포획된 전자의 방출 확률이 온도에 의존하기 때문에 방사선 조사 후 가열온도를 점차 증가시키면 포획된 전자와 정공의 재결합에 비례하여 열형광 강도가 증가하다가 최대를 이루고 점차 감소하는 형광 곡선(glow curve)과 포획된 전자의 에너지 준위에 해당하는 활성화 에너지(activation energy)가 다른 여러 개의 형광 피크(glow peak)가 중첩되어 나타난다^{[17],[18]}. 그러나 열형광체 또는 소량 혼합하는 활성화제의 종류에 따라 형광 곡선의 형태, 형광 피크 온도 및 퇴행 특성이 달리 나타날 수 있기 때문에 방사선 치료 영역의 선량 측정에 사용되는 열형광체의 형광 곡선 및 포획 준위에 의해 만들어진 형광 피크의 형태를 분석하고 고유

한 열형광체의 물리적 특성을 적용하는 것은 측정 오차를 최소화하기 위하여 임상적으로 매우 중요하다^[19].

따라서 본 연구는 방사선 치료 영역의 선량 측정을 위하여 상용화된 TLD를 대상으로 고 에너지 X선과 전자선을 조사하고 형광 곡선 및 형광 피크 등을 분석하여 열형광체의 고유한 물리적 특성을 임상적으로 적용함으로써 정확한 선량 측정을 위한 기초 자료를 제공하고자 하였다.

II. MATERIAL AND METHOD

본 연구는 방사선 치료 선량 측정에서 상용화된 LiF 선량계(LiF:Mg·Ti, LiF:Mg·Cu·P, Thermo Fisher Scientific Inc., USA)와 CaF₂ 선량계(CaF₂:Dy, CaF₂:Mn, Thermo Fisher Scientific Inc., USA)를 사용하여 수행되었다. 열형광체 및 소량 혼합된 활성제에 따른 물리적 특성은 Table 1에 제시하였다. 방사선을 조사하기 전 포획된 전자들을 제거하기 위하여 전기로(아전가열, Korea)를 사용하여 100°C에서 1시간, 300°C에서 2시간 동안 소성(annealing) 하였다.

Fig. 1은 본 연구를 위하여 고에너지 X선과 전자선의 출력 선량(output dose)을 측정하기 위한 기하학적 구조를 보여준다. 고에너지 X선과 전자선은 선형가속기(Clinac® iX, Varian Medical System, Palo Alto, USA)에서 출력되는 6MV, 15MV X-선과 6MeV, 12MeV 전자선을 사용하였다. 선원 표면간 거리(source-to-surface distance, SSD)는 100cm로 하였으며 기준 조사야(10×10cm²)에서 각각 100MU(monitor unit)를 조사하였다. 또한 고체 팬텀(solid dry phantom, RW3 slab, IBA Dosimetry, Schwarzenbruck, Germany)을 이용하여 에너지에 따른 기준점 깊이(6MV X-ray: 1.5cm, 15MV X-ray: 3.0cm, 6MeV electron: 1.3cm, and 12MeV electron: 2.8cm)에서 각각 측정하였다. 방사선이 조사된 TLD는 약 3시간 경과 후 형광 곡선을 분석하기 위하여 개인용 컴퓨터로 제어되는 열형광 판독기(Hashaw 3500, Thermo Fisher Scientific Inc., USA)를 사용하여 50°C에서 260°C까지 1초당 15°C씩 온도를 증가시켜 형광체의 물리적 특성을 분석하였다.

Table 1. Physical characteristics of the thermoluminescent dosimeters (TLDs) in this study.

Physical characteristics	Lithium fluoride		Calcium fluoride	
	LiF:Mg·Ti	LiF:Mg·Cu·P	CaF ₂ :Dy	CaF ₂ :Mn
Description	TLD-100	TLD-100H	TLD-200	TLD-400
Type	Chip	Chip	Chip	Chip
Size (mm)				
Depth	3.20	3.20	3.20	3.20
Width	3.20	3.20	3.20	3.20
Height	0.89	0.89	0.89	0.89
Accuracy (%)	±15	±15	±30	±30
ES (Ao)	3500-6000	4000	4835	5000
ER (keV/60Co)	1.25	0.98	12.5	13
MR (Gy)	1×10 ⁻¹¹ -10	1×10 ⁻¹² -10	1×10 ⁻¹³ -10	1×10 ⁻¹³ -100
AT (°C)	300	250	300	400

ES: Emission spectra, ER: Energy response, MR: Measurement ranges, AT: Annealing temperature.

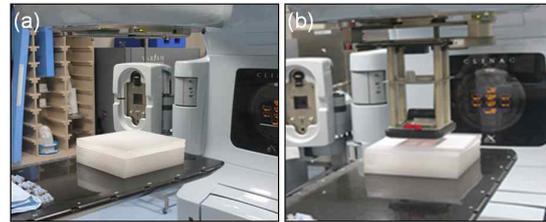


Fig. 1. Geometric diagram to the measured output dose of the high energy X-rays and electron beams with the thermoluminescent dosimeters (TLDs). (a) setting up the X-ray mode, and (b) setting up the electron mode.

III. RESULT

Fig. 2는 고에너지 X선과 전자선이 조사된 TLD에 대한 형광 곡선을 보여준다. 15°C/sec의 가온율로 일정하게 온도를 증가시킬 때 트랩 준위에 포획된 전자가 정공과 결합하면서 빛을 방출하는 형광 피크(glow peak)는 2개 또는 3개의 피크가 나타났다(LiF:Mg·Ti, CaF₂:Mn: 2 peak, LiF:Mg·Cu·P, CaF₂:Dy: 3peak). 형광 강도가 낮은 피크(P1)는 보관 중 상온에서 쉽게 퇴행(fading) 현상이 발생하였으며 최대 형광 피크(maximum glow peak, P3)에 근접한 다른 형광 피크(P2)는 최대 형광 피크(P3)와 중첩되어 나타나거나 매우 낮은 형광 강도를 나타내었다. 따라서 본 연구는 형광 강도가 높고 안정적인 최대 형광 피크(P3)를 중심으로 TLD의

물리적 특성을 분석하였다.

방사선 조사 후 TLD의 온도를 일정하게 증가시켰을 때 최대 형광 피크를 나타내는 형광 온도(glow temperature)의 경우 각각의 에너지에 따라 LiF:Mg·Ti 선량계는 $185.5 \pm 1.3^\circ\text{C}$, LiF:Mg·Cu·P 선량계는 $135.0 \pm 5.1^\circ\text{C}$, CaF₂:Dy 선량계는 $144.0 \pm 1.6^\circ\text{C}$, CaF₂:Mn 선량계는 $294.3 \pm 3.8^\circ\text{C}$ 근처에서 최대 형광 피크를 각각 나타냈으며 LiF:Mg·Cu·P와 CaF₂:Mn 선량계는 각각의 에너지에 따라 최대 형광 피크를 나타내는 형광 온도가 민감하다는 것을 알 수 있었다(Table 2). 본 연구에 사용된 선량계 중 형광 온도에 따른 각각의 최대 형광 피크는 LiF:Mg·Cu·P 선량계가 461.17×10^6 형광량으로 방사선량에 대한 감도가 가장 높게 나타났으며 방사선의 종류 또는 선질(energy)에 대한 의존성이 가장 낮게 나타났다.

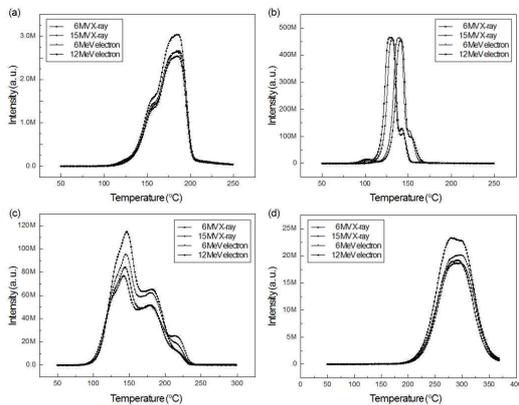


Fig. 2. Shows the glow curves of the radiation energies according to the thermoluminescent (TL) phosphors. (a) LiF:Mg·Ti, (b) LiF:Mg·Cu·P, (c) CaF₂:Dy, and (d) CaF₂:Mn.

Table 2. Comparison results of the glow temperature according to the thermoluminescent dosimeters (TLDs) and radiation energies.

Thermoluminescent materials	Maximum glow temperature (°C)			
	X-rays (MV)		Electron beams (MeV)	
	6	15	6	12
LiF:Mg·Ti	186	184	185	187
LiF:Mg·Cu·P	129	139	131	141
CaF ₂ :Dy	146	145	142	143
CaF ₂ :Mn	290	298	298	291

CaF₂:Dy 선량계를 제외하고 대부분의 선량계는 전자선에 대하여 특정 에너지 준위(trapping level)에서 발광하는 최대 형광 피크가 일정하게 나타났으며 전자선 에너지에 대한 의존성이 작은 것으로 나타났다(6, 12MeV 전자선에 대한 최대 형광 피크, LiF:Mg·Ti: 2.54 and 2.55×10^6 형광량, LiF:Mg·Cu·P: 459 and 459×10^6 형광량; CaF₂:Mn: 19.1 and 18.9×10^6 형광량). 또한 LiF:Mg·Cu·P 선량계를 제외하고 LiF:Mg·Ti, CaF₂:Dy, CaF₂:Mn 선량계는 15MV X선과 비교하여 6MV X선에 대한 형광 감도가 각각 1.27배, 1.18배, 1.13배 높게 나타났으며 2개 영역의 에너지에 대한 형광 곡선을 peak shape 법^[20]으로 구한 활성화 에너지 변화는 각 선량계의 종류에 따라 전체 형광량의 70% 이상을 차지하는 최대 형광 피크 영역에서 근소한 차이를 보여 큰 차이가 없는 것으로 확인 되었다.

Fig. 3은 TLD의 종류에 따른 형광 온도와 형광 피크를 보여준다. 방사선 치료 영역의 선량에서 적용할 수 없는 약 30% 미만의 낮은 형광 피크를 가우스 피팅(Gaussian fitting)하여 구한 형광 곡선의 면적(glow peak area)은 CaF₂:Dy와 CaF₂:Mn 선량계가 각각 $2.78 \times 10^3 \text{ mm}^2$, $2.29 \times 10^3 \text{ mm}^2$ 으로 넓게 나타났으며 상대적으로 LiF:Mg·Ti와 LiF:Mg·Cu·P 선량계가 CaF₂:Dy 선량계와 비교하여 각각 72.6%, 56.7% 감소되어 나타났다.

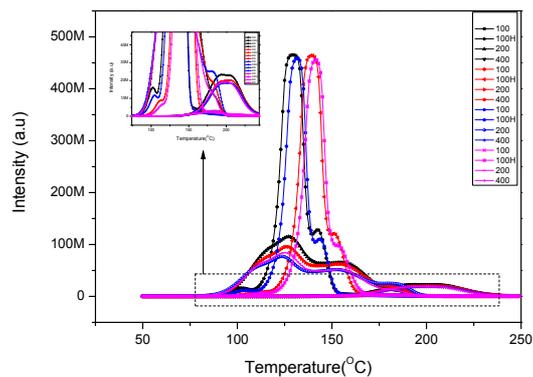


Fig. 3. Comparison results for the glow peaks and glow temperatures of the thermoluminescent (TL) phosphors.

IV. DISCUSSION

일반적으로 30Gy(gray) 이상의 대단위 선량이 적용되는 고에너지 방사선 치료에서 정확한 선량 측정은

임상적으로 매우 중요하다. 최근 국제보건기구(World Health Organization, WHO)는 방사선 치료의 정밀도를 5%로 상향 조정할 것을 권고하고 있으며 미국의학물리학회(American Association of Physicist in Medicine, AAPM)에서도 국제보건기구에서 권고한 치료 정밀도를 유지하기 위하여 흡수선량의 측정 불확정도(uncertainty)가 3% 미만으로 주어져야 한다는 연구 결과를 보고하였다^{[21]-[23]}. 국내의 경우 고에너지 방사선 치료 영역에 대한 중요성을 인식하고 방사선 치료 기관에서 이온함(ionization chamber)와 물 팬텀(water phantom)을 이용한 흡수선량 평가 방법을 도입하고 있으며 열형광선량계(thermoluminescent dosimeter, TLD)를 이용하여 조직 내 흡수선량 측정 및 치료방사선 선량보증 체제를 구축하여 시행하고 있다^{[24],[25]}. TLD는 방사선 치료 영역에서 크기와 형태를 임의로 제작 가능하고 인체의 조직 또는 공동 내에서 심부선량 및 조직 내 선량분포를 직접적으로 측정 가능하기 때문에 임상적으로 사용이 급증하고 있으나 열형광체의 종류가 매우 다양하고 측정 전 열처리 또는 가열 온도, 시간의 경과에 따라 포획 전자수가 감소하는 퇴행 현상, 제조 공정에서 발생하는 불균등한 형광 강도, 감도에 대한 직선적 선량 의존성 등 열형광체의 종류에 따라 물리적 특성이 다르므로 방사선량 측정 목적에 부합되는 TLD를 선택하는 것은 임상적으로 중요하다.

따라서 본 연구는 치료방사선 영역의 선량 측정을 위하여 상용화된 TLD(LiF:Mg·Ti, LiF:Mg·Cu·P, CaF₂:Dy, CaF₂:Mn)를 대상으로 가열 온도에 따른 형광 곡선을 구하여 물리적 특성을 분석하였다. 가열 온도에 따라 트랩 준위에 포획된 전자가 정공과 결합하면서 빛을 방출하는 형광 피크(glow peak)는 2개 또는 3개의 피크를 나타냈으며 형광 강도가 낮은 피크(P1) 또는 최대 형광 피크(maximum glow peak, P3)에 근접한 다른 형광 피크(P2)는 시간의 경과에 따라 포획 전자수가 감소하는 퇴행 현상이 빈번하거나 낮은 형광 강도를 나타내기 때문에 형광 곡선에서 강도가 높고 안정적인 최대 형광 피크(P3)를 중심으로 선량 평가에 적용해야 할 것으로 판단하였다.

Cruz-Zaragoza 등^[26]의 연구에 의하면 최대 형광 피크를 나타내는 가열 온도가 200°C 정도일 때 개인 선량 측정용으로 적합하며 180°C 미만일 경우 상온에서

퇴행 현상이 증가될 수 있고 250°C 이상일 경우 소자를 가열하는 과정에서 발생하는 자외선의 영향으로 측정 정확도와 측정 시간이 늘어날 수 있다고 하였다. 그러나 국제 방사선 단위 측정 위원회(International Commission on Radiation Units and Measurements, ICRU) 보고서 No. 74^[27]에 의하면 20°C의 상온에서 LiF 선량계(LiF:Mg·Ti, LiF:Mg·Cu·P)의 퇴행 현상은 연간 5% 미만, CaF₂ 선량계(CaF₂:Dy, CaF₂:Mn)의 퇴행 현상은 일일 1% 정도라고 보고하였다. 일반적으로 방사선 치료에서 방사선 조사 후 24시간 이내에 TLD 소자를 가열하여 판독하는 점을 고려할 때 가열 온도가 각각 180°C, 130°C, 140°C 부근에서 최대 형광 피크를 나타내는 LiF:Mg·Ti, LiF:Mg·Cu·P, CaF₂:Dy 선량계는 상온에서 발생하는 퇴행 현상에 대한 영향은 없을 것으로 판단되었으나 290°C 이상의 형광 온도를 갖는 CaF₂:Mn 선량계의 경우 가열 도중 발생할 수 있는 자외선에 대한 추가적 연구가 필요할 것으로 판단되었다.

본 연구에서 LiF:Mg·Cu·P 선량계는 기준점 깊이에 100MU를 조사한 후 50°C에서 260°C까지 15°C/sec의 가온율로 측정된 결과 3개의 형광 피크가 나타났으며 방사선의 종류 또는 에너지에 대한 의존성이 작고 최대 형광 피크(P3)에 대한 열형광 강도가 가장 높게 나타났기 때문에 고선량 영역뿐 만 아니라 저선량 영역에 대한 정확한 방사선량 측정이 가능하며 방사선 치료 영역의 선량 측정에 가장 적합하다고 판단하였다. Bilski^[28]의 연구에 의하면 LiF:Mg·Cu·P 선량계는 LiF:Mg·Ti(TL-100)에 비하여 감도가 약 25배 이상 높고 열형광 강도의 선량의존성은 1mGy-10Gy 영역에서 선형적으로 나타난다고 하였으며 Budzanowski^[29]는 에너지 의존성이 적으면서 퇴행 현상에 의한 감쇠율이 6개월간 1% 이하로 방사선 치료 영역의 조직 내 흡수선량 측정에 우수하다고 하였다. X선과 전자선에 대한 형광 곡선 특성의 차이를 보였던 CaF₂:Dy 선량계는 방사선 종류 또는 에너지에 따라 최대 형광 피크를 유도하기 위한 형광 온도를 신중하게 고려해야 할 것이며 상대적으로 낮은 형광 강도를 나타내는 CaF₂:Mn 선량계와 LiF:Mg·Ti 선량계는 저선량 영역에 대한 방사선 선량 측정에서 정확도에 영향을 줄 수 있는 변수들에 주의해야 할 것이다.

방사선 조사 후 열형광체의 가열 속도를 일정하게

상승시키면 형광 곡선의 형태는 열형광체의 종류에 따라 물리적 특성을 반영하여 나타난다. 이 때 포획된 전자의 에너지 준위에 해당하는 한 개 또는 두 개 이상의 형광 피크가 발생하며 각각의 검출이 가능하지만 포획된 전자의 에너지 준위 차이가 대단히 적거나 가열 속도를 빠르게 하면 형광 피크는 비례하여 커지고 최대 형광 피크도 높은 가열 온도로 이동할 수 있기 때문에 발광 강도를 온도의 함수로 표시한 형광 곡선에서 형광 피크 면적은 증가할 수 있다. 본 연구에서 일정한 가온율(15°C/sec)을 적용할 때 형광체의 종류에 따라 형광 곡선 면적(glow peak area)은 방사선 종류 또는 에너지에 대하여 일정하게 나타났으며 활성화 에너지 변화는 각 열형광체의 종류에 따라 전체 발광량의 70% 이상을 차지하는 최대 형광 피크 영역에서 근소한 차이를 보여 큰 차이가 없는 것으로 확인되었다.

V. CONCLUSION

본 연구는 방사선 치료 영역에서 상용화되어 사용되고 있는 열형광체의 종류에 따라 일정한 가온율을 적용하여 형광 곡선을 분석하였다. 방사선에 의해 포획 중심에 포획된 전자의 형광 방출 확률은 온도에 의존하므로 방사선 조사 후 열형광체는 가열 속도를 일정하게 서서히 상승시킴으로써 특정 에너지 준위(trapping level)에 포획된 전자의 형광 방출 확률이 증가하고 형광 강도도 비례하여 증가하였다. 또한 열형광체에 따른 포획 전자의 에너지 준위가 다르기 때문에 물리적 특성을 고려하여 방사선 치료 선량의 측정 상황에 부합되는 열형광체를 적용함으로써 국제적 수준의 측정 정확도를 향상시킬 수 있을 것으로 판단하였다.

Acknowledgement

이 논문은 2014 학년도 동의대학교 교내연구비에 의해 연구되었음(과제번호: 2014AA190).

Reference

[1] A. C. Lewandowski, S. W. McKeever, "Generalized description of thermally stimulated processes without the quasiequilibrium approximation", *Phys. Rev. B. Condens. Matter*, Vol. 43, No.

10, pp. 8163-8178, 1991.

- [2] A. Mandowski, "The theory of thermoluminescence with an arbitrary spatial distribution of traps", *Radiat. Prot. Dosimetry*, Vol. 100, No. 1-4, pp. 115-118, 2002.
- [3] A. Hernández, E. Cruz-Zaragoza, A. Negrón-Mendoza, S. Ramos-Bernal, "Dependence of thermoluminescence response of calcium sulphate activated by dysprosium on the temperature irradiation", *Radiat. Meas.*, Vol. 38, No. 4-6, pp. 431-433, 2004.
- [4] V. Correcher, J. M. Gómez-Ros, J. Garcia-Guinea, P. L. Martin, A. Delgado, "Thermal stability of the thermoluminescence trap structure of bentonite", *Radiat. Prot. Dosimetry*, Vol. 119, No. 1-4, pp. 176-179, 2006.
- [5] J. Y. Je, E. B. Kang, "The effects of magnetic field on TLD glow curve", *J. Korean Soc. Radiol.*, Vol. 7, No. 6, pp. 415-418, 2013.
- [6] L. Karsch, E. Beyreuther, T. Burris-Mog, S. Kraft, C. Richter, K. Zeil, J. Pawelke, "Dose rate dependence for different dosimeters and detectors: TLD, OSL, EBT films, and diamond detectors", *Med. Phys.*, Vol. 39, No. 5, pp. 2447-2455, 2012.
- [7] S. B. Scarboro, D. S. Followill, R. M. Howell, S. F. Kry, "Variations in photon energy spectra of a 6 MV beam and their impact on TLD response", *Med. Phys.*, Vol. 38, No. 5, pp. 2619-2628, 2011.
- [8] M. Kumar, R. K. Kher, G. Sahni, K. Chhokra, "Studies on the response of the TLD badge for high-energy photons", *Radiat. Prot. Dosimetry*, Vol. 128, No. 3, pp. 266-273, 2008.
- [9] J. H. Burnett, R. Gupta, U. Griesmann, "Absolute refractive indices and thermal coefficients of CaF₂, SrF₂, BaF₂, and LiF near 157 nm", *Appl. Opt.*, Vol. 41, No. 13, pp. 2508-2513, 2002.
- [10] M. Tsuda, T. Katsurada, F. Ando, F. Kawamata, S. Yunogami, "A study of two kinds of thermoluminescent dosimeters; CaF₂:Tm and CaSO₄:Dy in LiF", *Strahlentherapie*, Vol. 158, No. 9, pp. 563-569, 1982.
- [11] M. Tsuda, Y. Ohizumi, T. Mori, "LiF and CaF₂:Dy thermoluminescent dosimeters", *Strahlentherapie*, Vol. 156, No. 10, pp. 708-713, 1980.
- [12] J. Izewska, P. Andreo, "The IAEA/WHO TLD postal programme for radiotherapy hospitals", *Radiother. Oncol.*, Vol. 54, No. 1, pp. 65-72, 2000.
- [13] A. Dutreix, E. van der Schueren, S. Derreumaux, J. Chavaudra, "Preliminary results of a quality assurance network for radiotherapy centres in Europe", *Radiother. Oncol.*, Vol. 29, No. 2, pp. 97-101, 1993.

- [14] I. Grmola, J. Dam, J. Isern-Verdum, J. Verstraete, R. Reymen, A. Dutreix, B. Davis, D. Huyskens, "External audits of electron beams using mailed TLD dosimetry: preliminary results", *Radiother. Oncol.*, Vol.58, No. 2, pp. 163-168, 2001.
- [15] A. S. Pradhan, "Effect of heating rate on the responses of CaF₂:Cu, CaF₂:Tm, CaF₂:Dy and CaF₂:Mn", *Radiat. Prot. Dosimetry*, Vol. 100, No. 1-4, pp. 289-292, 2002.
- [16] G. Blasse, B. C. Grabmaier, *Luminescent Materials, X-Ray Phosphors and Scintillators* (Springer, Berlin, Heidelberg), pp. 170-194, 1994.
- [17] Y. S. Horowitz, L. Oster, H. Datz, "The thermoluminescence dose-response and other characteristics of the high-temperature TL in LiF:Mg,Ti (TLD-100)", *Radiat. Prot. Dosimetry*, Vol. 124, No. 2, pp. 191-205, 2007.
- [18] Y. S. Horowitz, A. Horowitz, L. Oster, S. Marino, H. Datz, M. Margaliot, "Investigation of the ionisation density dependence of the glow curve characteristics of LiF:Mg,Ti (TLD-100)", *Radiat. Prot. Dosimetry*, Vol. 131, No. 4, pp. 406-413, 2008.
- [19] J. A. Harvey, N. P. Haverland, K. J. Kearfott, "Characterization of the glow-peak fading properties of six common thermoluminescent materials", *Appl. Radiat. Isot.*, Vol. 68, No. 10, pp. 1988-2000, 2010.
- [20] D. Yossian, S. Gimplin, S. Mahajna, Y. S. Horowitz, "Peak shape analysis of isolated peak 5 in LiF:Mg,Ti following 165°C post-irradiation annealing", *Radiat. Prot. Dosimetry*, Vol. 65, No. 1, pp. 173-178, 1996.
- [21] ICRU, "Prescribing, recording and reporting photon beam therapy", Report No. 50, International Commission on Radiation Units and Measurements, Bethesda, M. D., 1993.
- [22] AAPM, "Quality assurance for clinical radiotherapy treatment planning", Report of the American Association of Physicists in Medicine Radiation Therapy Committee Task Group No. 53, *Med. Phys.*, Vol. 25, pp.1773-1829, 1998.
- [23] AAPM, "Protocol for clinical reference dosimetry of high-energy photon and electron beams", Report of the American Association of Physicists in Medicine Radiation Therapy Committee Task Group No. 51, *Med. Phys.*, Vol. 26, pp.1847-1870. 1999.
- [24] IAEA, "Absorbed dose determination in external beam radiotherapy: An international Code of Practice for dosimetry based on standards of absorbed dose to water", IAEA Technical Report Series 398, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria, 2000.
- [25] J. Izewska, P. Andreo, S. Vatnitsky, K. R. Shortt, "The IAEA/WHO TLD postal dose quality audits for radiotherapy: a perspective of dosimetry practices at hospitals in developing countries", *Radiother. Oncol.*, Vol. 69, No. 1, pp.91-97, 2003.
- [26] E. Cruz-Zaragoza, P. R. González, J. Azorín, C. Furetta, "Heating rate effect on thermoluminescence glow curves of LiF:Mg,Cu,P+PTFE phosphor", *Appl. Radiat. Isot.*, Vol. 69, No. 10, pp.1369-1373, 2011.
- [27] ICRP, "Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation", Publication No. 74, *Ann. ICRP.*, Vol. 26, 1996.
- [28] P. Bilski, "Lithium fluoride: from LiF:Mg,Ti to LiF:Mg,Cu,P", *Radiat. Prot. Dosimetry*, Vol. 100, No. 1-4, pp.199-206. 2002.
- [29] M. Budzanowski, "The influence of post-exposure heating on the stability of MCP-N (LiF:Mg,Cu,P) TL detectors", *Radiat. Prot. Dosimetry*, Vol. 101, No. 1-4, pp.257-260, 2002.