

## 열형광선량계용 팬텀을 이용한 호흡 움직임에 따른 선량분포의 평가

가톨릭대학교 의과대학 의공학교실, \*건국대학교병원 방사선종양학과

홍주영 · 김연래\* · 라정은 · 정진범 · 서태석

본 연구에서는 열형광선량계(TLD)용 팬텀을 설계 및 제작하고 구동장치에 위치시켜 팬텀이 호흡과 유사하게 움직이는 경우에 선량분포의 변화를 측정하였다. 제작된 팬텀은 TLD를 최소 3 mm 간격으로 위치시킬 수 있는 TLD용 판과 필름을 장착시킬 수 있는 판으로 구성된다. 선량분포 측정을 위하여 팬텀 속 깊이 1.5 cm ( $d_{max}$ )에 TLD가 배열된 판을 삽입하고, 6 MV X-선이 조사되는 상태에서 팬텀을 SI 방향으로 1~2 cm 범위에서 0.5 cm 간격으로 왕복운동하도록 하였다. 측정된 선량 프로파일에서 이동범위에 따른 반응영과 반측폭을 구하여 정지 상태와 비교한 결과 팬텀의 이동범위가 증가함에 따라 반응영 영역은 0.71 cm에서 2.10 cm로 증가하였으며 반측폭은 7.52 cm에서 7.02 cm로 감소하였다. 본 연구에서는 필름을 사용하여 위의 결과를 재확인한 결과 유사한 경향을 나타내었다. 따라서 호흡에 의해 위치의 변화가 발생하는 종양에 대하여 치료계획을 수립하는 경우에 이 결과를 고려한다면 치료 효과 향상에 기여할 것으로 기대된다.

**중심단어:** 열형광선량계, 호흡, 선량분포

### 서 론

방사선 치료의 목적은 정상조직에는 최소한의 선량을 전달하고 종양에는 가능한 많은 선량을 조사하여 암의 국소 제어율을 높이고 생존율을 증가시켜 치료의 효과를 극대화하는 데 있다.<sup>1)</sup> 이러한 방사선 치료의 효율성을 극대화시키기 위해서는 방사선이 치료 부위에 정확히 전달되어야 하고 계획된 방사선량과 실제 투여된 방사선량이 일치해야 한다. 특히, 3D-CRT, IMRT, Cyberknife를 통한 치료 등에서 폐, 유방, 간, 신장과 같이 흉부 또는 복부에 위치한 부위에 발생하는 종양의 경우 환자의 호흡, 심박, 방광용적의 변화로 인하여 치료부위에 정확한 선량이 전달되기 어렵다. 따라서 종양에 주어지는 선량분포가 좋지 않고 정상조직에 불필요한 선량이 분포하게 되며 계획된 방사선량이 정확히 원하는 위치에 조사되는지에 대한 선량확인이 어려워 호흡에 의해 변화가 많은 부위에서의 치료가 활발하지 못한 상태이다.<sup>2-4)</sup> 지금까지의 연구는 이러한 부위의 치료 시 환자 자세와 움직임 제어, 호흡운동과 장기움직임 및 치료기기와의 상관관계에 집중되었다. 또한 선량평가에 대한 분야에서

도 이온전리함과 필름을 이용한 연구가 주로 진행되었다.

본 연구에서는 크기가 작고 취급이 용이한 TLD (열형광선량계)를 이용한 평면형 선량 측정장치와 팬텀을 제작하여 다양한 방향의 움직임을 모사할 수 있는 구동장치 (moving device)에 위치시켜 호흡 움직임에 따른 선량분포 차이를 확인하였으며 필름을 이용하여 측정된 결과와 상호 비교하였다.

### 재료 및 방법

#### 1. TLD용 팬텀과 구동장치

본 연구에서는 호흡움직임에 따른 선량분포 차이를 확인하기 위하여 TLD용 팬텀을 고안하였다. 팬텀은 밀도가 0.96 g/cm<sup>3</sup>인 아크릴로 제작하였으며 TLD를 위치시키기 위하여 16×16×1 cm<sup>3</sup>의 크기이며 TLD를 최소 0.3 cm 간격으로 최대 400개까지 원하는 위치에 장착시킬 수 있는 TLD용 판(slab)을 설계하였다. 이때 TLD에 각각의 고유번호를 부여하여 반복 측정 실험 시 동일한 위치에 위치시켰다. 각각의 TLD를 장착시키는 구멍(hole)은 직경 0.5 cm, 높이 0.31 cm로 TLD를 위치시킬 때 손상되지 않도록 여유를 두어 제작하였으며 TLD는 각 구멍의 중앙에 위치하도록 배열하였다. 그리고 깊이에 따른 선량분포를 확인하기 위하여 팬텀 내 TLD용 판의 위치를 이동시키며 측정가능하게 제작하였다.<sup>5)</sup> 또한 선량분포 차이를 비교하기 위하여 필름을 삽입할 수 있는 판을 별도 제작하였다(Fig. 1).

이 논문은 2006년 6월 13일 접수하여 2006년 12월 18일 채택되었음.

책임저자 : 서태석, (137-701) 서울시 서초구 반포동 505

가톨릭대학교 의과대학 의공학교실

Tel: 02)590-2420, Fax: 02)532-1779

E-mail: suhsanta@catholic.ac.kr

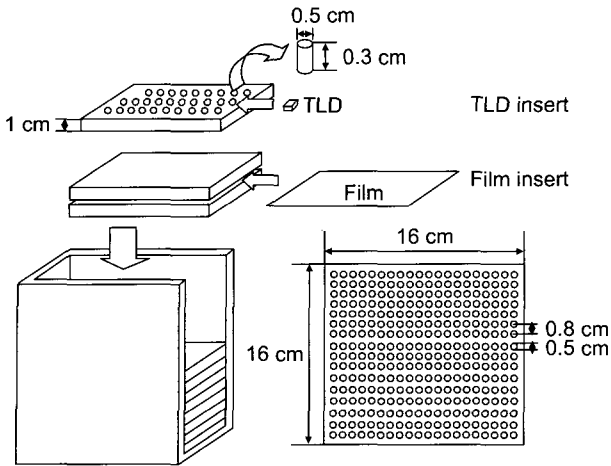


Fig. 1. Schematic of TLD phantom.

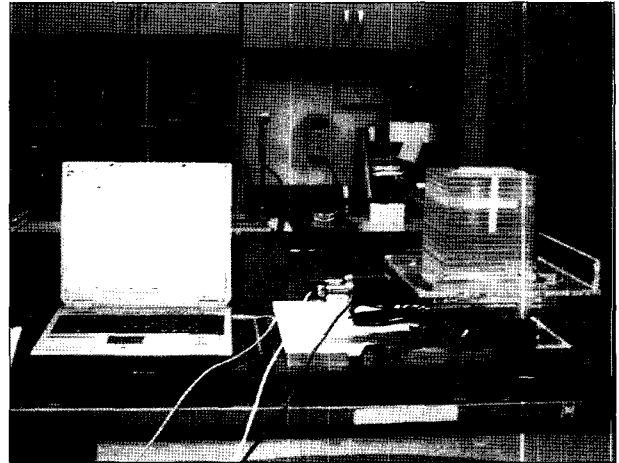


Fig. 2. Measurement with TLD in acrylic phantom on moving device and its software.

호흡 움직임에 따른 선량분포를 TLD로 확인하기 위해 구동 시스템(Paker deal Inc., Rohnert, CA)을 이용하였다(Fig. 2). 이 시스템은 TLD의 팬텀을 놓을 수 있는 부착용 판과 x, y, z축, 구동장치, 그리고 제어기로 구성되어 있다. 구동 장치는 3개의 축과 4개의 스텝모터를 사용하는 회전판으로 이루어져 있으며 각 모터의 회전에 따라 각각의 3방향으로 최대 30 cm까지 구동할 수 있어 구동 시스템의 움직임 범위 내에서 사용자가 구현하고자 하는 범위에 맞게 정교하게 구현 가능한 장비이다. 구동 제어기는 컴퓨터와 인터페이스된 소프트웨어(motion planar software)와 드라이버로 구성되어 있다. 이 소프트웨어는 구동범위 및 움직이는 방향을 고려하여 프로그램을 자체 구현하여 구동시스템의 움직임을 제어할 수 있다. 하지만 움직이는 장치의 이동범위는 AP (Anterior-Posterior) 방향에서 측정하였을 때 좌우방향의 움직임은 작고 SI (Superior-Inferior) 방향의 움직임은 크므로 본 연구에서는 SI 방향으로 구동장치를 구간 반복 이동시켜 측정하여 보았다.<sup>6)</sup> 이때 SI 방향으로의 이동은 1차원적인 내부 장기 움직임을 수학적으로 나타낸 Lujan 등<sup>7)</sup>의 연구에 의해 환자 호흡 시 한 호흡주기 시간이 평균 4초인 것을 고려해 실제 움직임과 유사하도록 구동장치를 40초간 9번 반복 이동하였다.

## 2. TLD 시스템

본 연구에서 사용된 TLD 소자는 TLD-100 ( ${}^7\text{LiF:Mg,Ti}$ )형식의 칩이며 크기는  $0.31 \times 0.31 \times 0.09 \text{ cm}^3$ 이다. 이 소자는 장기간 사용 시 감도(sensitivity)가 안정하고 재현성(변동계수 3% 미만)이 양호하여 선량계로서 보편적으로 사용되고

있다.<sup>8)</sup> TLD의 재현성을 확인하기 위하여  ${}^{60}\text{Co}$  감마선(Theratron-780, AECL)에서 TLD 위치에 2 Gy의 선량이 전달되도록 하고 이를 50회 시행한 후 이를 관독하였으며 이때 상대 표준편차는 1.63% (1 SD)로 나타났다. 또한 TLD를 0.5 Gy에서 3 Gy까지 0.5 Gy 간격으로 감마선을 조사하여 선량에 대한 선형성(linearity)을 평가하였으며 적합도( $R^2$ )가 0.998로 선형적인 결과를 보였다.

TLD의 관독은 Harshaw 3500 (Saint-Gobain Crystals & Detectors, USA)을 이용하여 실시하였다. TLD 감도의 안정성 및 낮은 퇴행률을 유지하기 위해 선량측정에 사용하기 전 열처리를 수행하였으며  $300^\circ\text{C}$  오븐에서 5시간 동안 열처리한 후 실온에서 30분간 냉각시키고 다시 1시간 동안  $100^\circ\text{C}$ 에서 건조시키는 과정에 따라 진행하였다.

TLD를 이용한 선량분포의 결과와 비교, 검증을 위해 필름을 사용하여 측정하였다. 실험에 사용된 필름은 Gafchromic EBT (ISP, Wayne, NJ)로 1에서 약 8 Gy까지 선량에 대한 선형성을 가지며 조직등가이고 에너지 의존성이 낮으며 특히 Radiographic film과는 달리 현상과정이 필요 없어 사용하기에 간편한 장점이 있다.<sup>9)</sup> 조사된 필름은 필름 스캐너(Dosimetry pro advantage, Vidar, Herndon, VA)와 분석 프로그램(Omni Pro I'mRT, IBA, Belgium)을 이용하여 관독하였으며 모든 선량 프로파일은 조사면의 중심 값에 대하여 규격화하였다.

## 3. 측정조건

본 연구에서는 먼저 정지한 상태에서 선량분포를 측정한 후 다음에 구동장치를 이용하여 1.0, 1.5, 2.0 cm로 이동하

였을 때의 선량분포를 구하였다. 이때 측정깊이는 팬텀 속 1.5 cm 깊이( $d_{max}$ )였다. 측정에는 선형가속기 CL21EX (Varian, Palo Alto, USA)에서 방출되는 6 MV X-선을 사용하였으며 매 측정 시 총 조사량은 200 MU로 설정하였다. 이때 선원과 TLD 사이의 거리는 100 cm이고 조사면은  $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 로 하였다.

결 과

Fig. 3은 구동장치 위에 TLD용 팬텀을 위치시켜 정지하였을 때와 구동하였을 때의 선량 프로파일을 비교한 그래프이다. 팬텀을 1~2 cm의 범위를 가지고 구동시켜보았을 때에 측정된 선량 프로파일에서 팬텀이 정지하였을 때보다

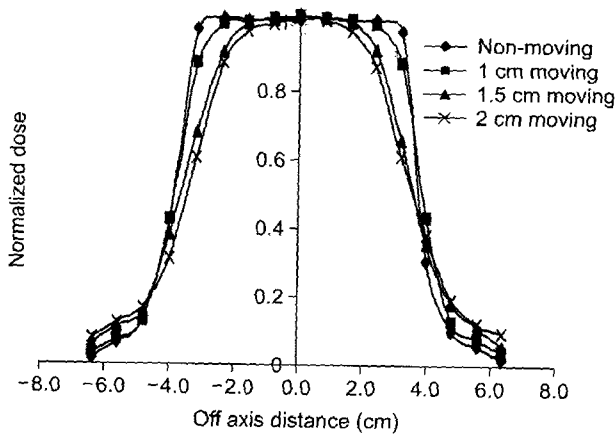


Fig. 3. The dose profiles at non-moving, 1 cm, 1.5 cm, 2 cm moving of TLD phantom.

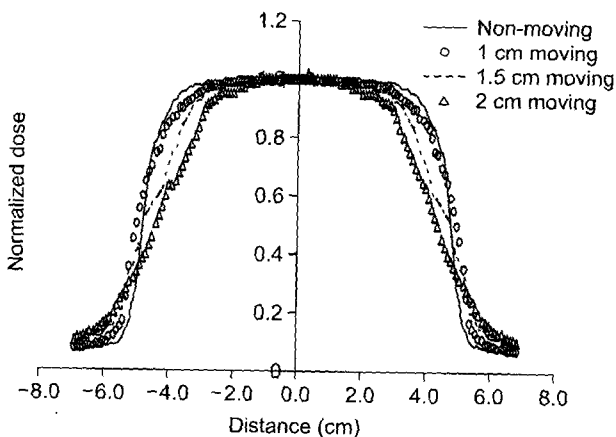


Fig. 4. The dose profile of Gafchromic EBT.

이동하였을 때 조사야 부위의 선량이 줄어들고 반응영 (penumbra) 영역이 증가하며 이동범위가 커질수록 반응영 영역도 증가함을 알 수 있다. Fig. 4는 TLD와 동일한 실험을 필름으로 수행한 결과이다. 이 결과에서도 TLD의 경우와 유사한 결과를 얻었지만 필름의 경우에 필름의 공간 분해능이 TLD보다 높기 때문에 반응영이 약간 넓게 평가되었다.

Table 1은 TLD와 필름을 이용하여 팬텀이 정지하였을 때와 이동하였을 때의 반응영 영역과 반축폭을 변화를 나타낸 것이다. 측정값을 비교한 결과 팬텀이 정지하였을 때 TLD와 필름의 반응영은 0.71, 0.81 cm였으나 팬텀을 이동시켰을 때 각각 2.10 cm과 2.18 cm로 증가하였다. 또한 팬텀의 이동거리가 증가할수록 TLD와 필름에서의 반축폭이 감소하는 경향을 보였다.

고찰 및 결론

본 연구에서 TLD의 재현성을 확인하는 실험을 수행한 결과 상대 표준편차는 1.63%로 우수한 재현성을 나타내었다. 또한 선량에 따른 열형광 반응도를 측정된 결과 0.998의 적합도( $R^2$ )를 가지는 우수한 선형성을 나타내었다. 이와 같이 본 연구에 사용된 TLD는 재현성과 선형성에 있어서 양호함을 확인하였다.

호흡에 따른 움직임으로 인한 선량분포변화를 측정하기 위하여 구동장치 위에 TLD용 팬텀을 위치시켜 정지하였을 때와 TLD용 판을 각각 1~2 cm의 범위로 0.5 cm 간격으로 이동시켜 선량분포를 확인해보았으며 필름과 상호 비교해보았다. 팬텀이 정지하였을 때보다 이동하였을 때 선량 프로파일에서의 조사야 범위에 조사되는 선량의 양이 줄어들고 반응영 영역이 증가한다. 필름에서 측정된 결과도 유사한 경향을 보이나 TLD와의 차이는 필름의 분해능으로 인

Table 1. Comparison of penumbra and FWHM, by TLD and film.

	TLD		Film	
	Penumbra (cm)	FWHM (cm)	Penumbra (cm)	FWHM (cm)
Non-moving	0.71	7.52	0.81	9.6
1 cm moving	1.26	7.6	1.35	10
1.5 cm moving	1.78	7.22	1.95	9.5
2 cm moving	2.10	7.02	2.18	8.8

해 발생한 것으로 보인다. 또한 실험을 통해 획득한 선량 프로파일에서 측정된 반측폭의 크기가 움직임에 따라 점차 감소하는 것을 알 수 있다.

호흡에 의하여 장기의 움직임이 발생하면 치료부위에 계획된 방사선량이 전달될 때 종양뿐만 아니라 주변의 정상 조직에도 불필요한 선량이 분포하게 되어 실제 선량분포가 치료계획과 차이가 생길 수 있다. 따라서 본 연구의 결과, 팬텀과 구동장치를 이용하여 호흡움직임에 따른 선량분포 차이를 TLD로 확인하였으며 이 결과를 바탕으로 호흡에 의해 변화가 발생하는 장기에 대한 방사선 치료 시에 움직임에 따른 선량분포 차이를 고려하여 치료계획을 한다면 종양과 정상조직에 적절한 선량분포를 예상하여 계획을 수립할 수 있어 치료효과 향상에 도움을 주게 될 것으로 기대한다.

본 연구는 실제 환자를 통해 측정하기 힘든 선량분포에 관한 평가를 모든 방향으로 움직일 수 있는 팬텀과 TLD를 이용하여 AP (Anterior-Posterior) 방향에서 측정하였을 때 움직임이 큰 SI 방향으로 이동시켜 측정을 하였다. 하지만 TLD의 특성상 측정 시 많은 개수가 필요하고 관리나 계측이 어렵고 현재의 TLD 측정 장치는 2차원적 TLD 배열로 구성되어 있으므로 추후 3차원적 TLD 배열을 적용한 팬텀을 제작한다면, 움직임에 따른 3차원적 선량분포를 측정할 수 있을 것이다. 또한 본 실험은 고정된 깊이  $d_{max}$ 에서 수행하였지만 실제 치료에서는 임의의 깊이에 존재하는 종양을 치료하므로 본 연구와는 다른 결과가 나타날 수 있다. 따라서 환자의 장기를 모사하며 다양한 위치에 존재하는 종양의 선량분포를 측정할 수 있는 팬텀을 제작하여 실제 환자의 3차원 움직임을 구현하여 선량분포를 측정할 수 있는 정

확한 연구가 추가적으로 수행되어야 할 것으로 생각한다.

## 참 고 문 헌

1. Gunilla CB, Lawrence BM, George WS, David PS: A customized head and neck support system. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 32:245-248 (1995)
2. Chang SD, Adler JR: Robotics and radiosurgery - the cyber-knife. *Stereotact Funct Neurosurg* 76:204-208 (2001)
3. Gierga DP, Chen GTY, Kung JH, Betke M, Lombardi J, Willett CG: Quantification of respiration-induced abdominal tumor motion and its impact on IMRT dose distribution. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 58:1584-1595 (2004)
4. Kitamura K, Shirato H, Seppenwoolde Y, et al: Tumor location, cirrhosis and surgical history contribute to tumor movement in the liver, as measured during stereotactic irradiation using a real time tumor tracking radiotherapy system. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 56:221-228 (2003)
5. André B, Hakan N, Inaldo F, Igor G, Dominique H: A comparative description of three multipurpose phantoms (MPP) for external audits of photon beams in radiotherapy: the water MPP, the Umeå MPP and the EC MPP. *Radiother Oncol* 55: 285-293 (1999)
6. Hideo DK, Bruce CH: Respiration gated radiotherapy treatment: a technical study. *Phys Med Biol* 41:83-91 (1996)
7. Lujan AE, Larsen EW, Balter JM, et al: A method for incorporating organ motion due to breathing into 3D dose calculations. *Med Phys* 26:715-720 (1999)
8. Kron T, Metcalfe P, Wong T: Thermoluminescence dosimetry of therapeutic x-rays with LiF ribbons and rods. *Phys Med Biol* 38:833-845 (1993)
9. Sankar A, Goplakrishna Kurup PG, Murali V, Ayyangar KM, Mothilal NR, Velmurugan J: Evaluation of gafchromic EBT film for intensity modulated radiation therapy dose distribution verification. *J Med Phys* 31:7 (2006)

## **Analysis of the Respiratory Motion Effects on Dose Distribution Using TLD Phantom**

Ju-Young Hong, Yon-Lae Kim\*, Jeong-Eun Rah, Jin-Beom Chung, Tae-Suk Suh

Department of Biomedical Engineering, The Catholic University of Korea College of Medicine,  
\*Department of Radiation Oncology, Konkuk University Hospital

The purpose of this study was to measure the dose distribution from the moving phantom for the respiratory motion. The phantom for TLD measurement was designed and built for this study based on the multiple plates for placing TLD and film. The TLDs may be inserted at 3 mm intervals in each TLD plate. For the measurements, TLD plate was inserted into the phantom at 1.5 cm ( $d_{max}$ ) depth, and phantom was allowed to move in SI directions in the range of 1 to 2 cm with 0.5 cm interval for 6 MV X-ray beams. Penumbra and FWHM were measured at both moving state and compared stationary. It was found that penumbra increased 0.71 cm at stationary and 2.10 cm at moving state in 2 cm movement, and that FWHM are 7.52 cm for stationary state and 7.02 cm for moving state (2 cm movement). In this study, film was used to compared with TLD results of measurements and similar results were observed. Therefore, it is expected that TLD moving phantom may be useful for the treatment of tumors that move due to the respiratory motion.

**Key Words:** Thermoluminescence dosimeter, Respiratory motion, Dose distribution