

## 1차원 광섬유 방사선량계의 개발 및 특성분석 : 치료용 고에너지 전자선 계측

장경원<sup>1</sup> · 조동현<sup>1</sup> · 유욱재<sup>1</sup> · 신상훈<sup>1</sup> ·  
Santhosh Kumar Subramanian<sup>2</sup> ·  
Muhammad Nauman Malik<sup>2</sup> · 이봉수<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>건국대학교 의료생명대학 의학공학과,  
의공학실용기술연구소,  
<sup>2</sup>제주대학교 공과대학 에너지공학과

\*380-701 충북 충주시 단월동  
건국대학교 의료생명대학 의학공학과  
전화: 043-856-0976,  
Fax: 043-851-0620,  
E-mail: bslee@kku.ac.kr

## Development and Characterization of a One-dimensional Fiber-optic Dosimeter : Measurement of High Energy Electron Beam for Radiation Therapy

Kyoung Won Jang<sup>1</sup>, Dong Hyun Cho<sup>1</sup>,  
Wook Jae Yoo<sup>1</sup>, Sang Hun Shin<sup>1</sup>,  
Santhosh Kumar Subramanian<sup>2</sup>,  
Muhammad Nauman Malik<sup>2</sup> and Bongsoo  
Lee<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>*School of Biomedical Engineering, College of  
Biomedical & Health Science, Research  
Institute of Biomedical Engineering, Konkuk  
University, Chungju 380-701, Republic of  
Korea*

<sup>2</sup>*Department of Nuclear & Energy  
Engineering, Cheju National University*

## Abstract

In this study, a one-dimensional fiber-optic dosimeter is developed for electron beam therapy dosimetry. Each fiber-optic dosimeter has an organic scintillator as a sensitive volume and it is embedded and arrayed in the plastic phantom to measure one-dimensional high energy electron beam profile of clinical linear accelerator. The scintillating lights generated from each dosimeter probe are guided by plastic optical fibers to the photo-diode array. The one-dimensional electron beam profiles in a plastic phantom are measured with different field sizes and energies of electron beam. Also, isodose and three-dimensional percent depth dose curves in a plastic phantom are obtained using a one-dimensional fiber-optic dosimeter with different electron beam energies.

**Key words :** Dosimeter, Optical fiber, Organic scintillator, Does distribution

## 서 론

치료용 광자선이나 전자선 계측에 사용되는 방사선량계 (dosimeter)의 질을 가늠하는 척도는 계측의 정확성과 정밀성이다. 특히 세기조절 방사선 치료 (intensity modulated radiation therapy)와 같은 첨단 기술은 정상조직의 피해를 최소화 하면서 암 조직에 정확한 양의 방사선을 조사하기 위하여 개발된 기술이므로 기존의 선량계 보다 정확하고 정밀한 선량 및 선량분포까지 실시간으로 측정할 수 있는 새로운 방사선량계의 개발이 요구되고 있는 실정이다. 이와 같은 이유로 최첨단 방사선치료 기술에 사용될 수 있는 방사선량계는 높은 공간분해능 (high spatial resolution)과 복잡한 보정작업을 필요로 하지 않는 피부 또는 물과 등가인 (tissue or water equivalent) 성질을 가져야 하며 실시간으로 다차원의 계측이

가능하도록 설계되어야 한다<sup>1,3)</sup>.

일반적으로 광섬유 방사선량계는 섬광체(scintillator), 광섬유(optical fiber) 그리고 광계측 장비로 구성된다<sup>4)</sup>. 특히 본 연구에 사용된 광섬유 방사선량계의 계측부는 부피가 매우 작고 물과 등가인 성질을 갖는 유기섬광체(organic scintillator)로 구성되어 있으므로 높은 공간분해능을 가지며 복잡한 보정작업을 필요로 하지 않는다. 그리고 선량을(dose rate)에 비례하여 발생하는 섬광량, 에너지에 대한 독립성은 치료용 방사선 선량 계측에 있어 큰 장점으로 작용한다<sup>5)</sup>. 또한 광 전달 매체인 광섬유를 사용함으로써 전자기파의 영향을 받지 않으며 실시간으로 선량 계측이 가능하다.

본 연구를 통하여 개발된 1차원 광섬유 방사선량계는 PMMA(poly methyl meta acrylate) 팬텀(phantom) 1 cm 깊이에 10개의 광섬유 방사선량계를 5 mm 간격으로 배열하여 제작하였다. 각각의 유기섬광체는 치료용 선형가속기에서 발생되는 고 에너지 방사선에 의해 섬광빛을 방출하고 방출된 섬광빛은 플라스틱 광섬유(POF: plastic optical fiber)를 통하여 광 계측장비인 다채널의 포토다이오드 증폭 시스템으로 전달된다.

본 연구에서는 1차원 광섬유 방사선량계를 이용하여 에너지와 조사야(field size)의 크기에 따른 치료용 전자선의 1차원적 선량분포를 측정하였고 에너지와 PMMA 팬텀의 깊이에 따른 선량을 계측함으로써 3차원적 심부선량분포(PDD: percentage depth dose)를 측정하였고 그에 따른 등선량곡선(isodose curve)을 도시화하였다.

## 실험재료 및 방법

실험에 사용된 광섬유(CK-40, Mitsubishi Ltd.)는 계단형의 굴절률(step index)을 갖는 플라스틱 멀티모드 광섬유로써 직경은 1 mm이며 클래딩(cladding)의 두께는 0.02 mm이다. 또한 코어(core)와 클래딩의 굴절률(refractive index)은 각각 1.49, 1.402이며 개구수(NA: numerical aperture)는 0.504이다. 계측의 안전성을 고려하여 치료실 밖에서 계측이 가능하도록 10 m 길이

의 광섬유를 사용하였다. 계측부로 사용된 섬광체는 원자번호가 낮은 물질로 구성된 유기섬광체(BCF-20 Saint-Gobain)로써 최대 방출 파장은 492 nm이고 잔광시간(decay time)은 2.7 nsec이며 1 MeV의 에너지를 갖는 하전입자에 대하여 약 8000개의 광자를 방출한다. 본 유기섬광체는 원통형으로 직경은 1 mm이며 길이는 1 cm를 사용하였다. 유기섬광체와 광섬유의 양 끝단은 여러 종류의 폴리싱 패드(polishing pad)를 이용하여 연마하였으며 광학용 에폭시(DP-100 plus, 3M)를 사용하여 광섬유와 유기섬광체를 결합하였다. 광 계측 장비로 사용된 포토다이오드(S1336-18BK, Hamamatsu Photonics) 증폭기 시스템은 10채널로서 파장의 계측 범위는 320 nm ~ 1100 nm이며 최대 검출 파장대는 960 nm이다.

그림 1은 실험 구성도를 보여주고 있다. 1차원 광섬유 방사선량계는 PMMA 팬텀 1 cm 깊이에 10개의 광섬유 방사선량계들을 5 mm 간격으로 나란히 배열하여 제작하였고 각 유기섬광체에서 발생하는 섬광량의 누출을 막기 위해 액체형태의 반사체(reflector)인 산화티타늄(TiO<sub>2</sub>)을 계측부 주위에 도포하였다. 전자선원으로는 치료용 선형가속기(CLINAC: clinical linear accelerator)에서 발생되는 6 MeV, 12 MeV 에너지의 전자선을 사용하였고 조사야는 3 cm × 3 cm, 6 cm × 6 cm를 사용하였다.

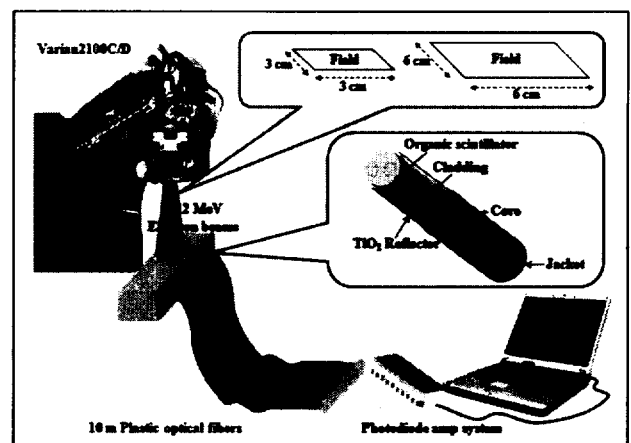


Fig. 1. Experimental setup.

**실험 결과**

Fig. 2는 PMMA 1 cm 깊이에서 1차원 광섬유 방사선량계의 전자선 선량분포 측정 결과를 보여 주고 있다. 그림을 살펴보면 조사야가 클수록 상대적으로 더 큰 선량이 계측되었고 3 cm × 3 cm 혹은 6 cm × 6 cm 조사야 안에 포함되는 센서들의 경우 거의 일정한 값을 가지는 것을 알 수 있다. 또한 그림에서 조사야가 3 cm × 3 cm일 때의 결과들을 살펴보면 조사야 경계면의 기울기가 6 MeV일 때 보다 12 MeV일 때 더욱 큰 것을 확인할 수 있는데 이는 1 cm 깊이의 PMMA 팬텀에서 6 MeV 전자선이 12 MeV 전자선 보다 상대적으로 산란이 더욱 많다는 것을 의미한다<sup>6)</sup>.

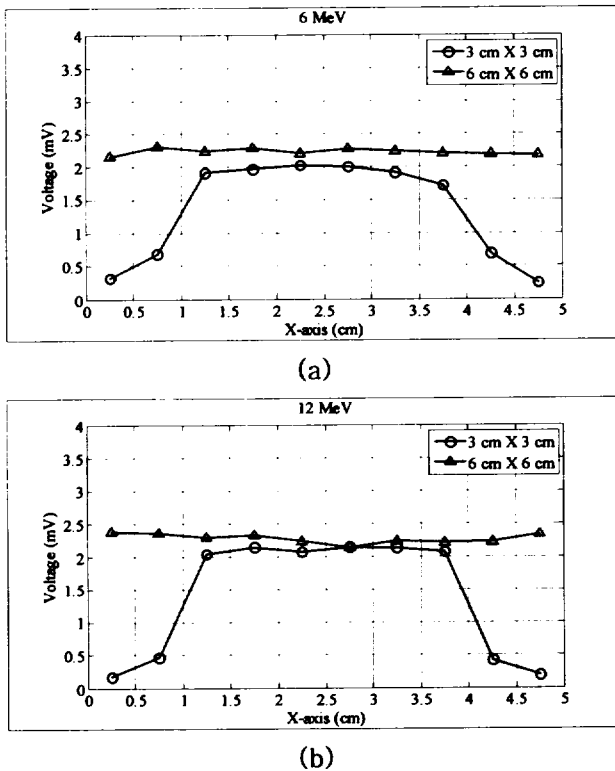


Fig. 2. Measurements of scintillating lights using a one-dimensional fiber-optic dosimeter with 3 cm × 3 cm and 6 cm × 6 cm field sizes of two different energy electron beams ((a) 6 MeV, (b) 12 MeV electron beams).

Fig. 3은 1차원 광섬유 방사선량계를 이용하여 3 cm × 3 cm 조사야를 가지는 6 MeV, 12 MeV 전자선의 3차원적 심부선량백분율 결과를 보여주고 있다. 일반적으로 심부선량백분율은 최대 흡수

선량 ( $D_{max}$ )에 대한 각 깊이 별 흡수선량의 비율을 나타낸다. 비교적 낮은 에너지를 갖는 6 MeV 전자선은 심부선량백분율의 표면에서부터  $D_{max}$  깊이까지 (buildup region) 12 MeV 전자선에 비해 산란이 많이 일어나며 급한 경사를 가지고 증가하게 된다. 일반적으로 6 MeV 전자선의  $D_{max}$  깊이는 1.3 cm이며 12 MeV의 경우는 2.8 cm이다. 실험 결과를 살펴보면 이론값과 거의 일치하는 것을 알 수 있다.

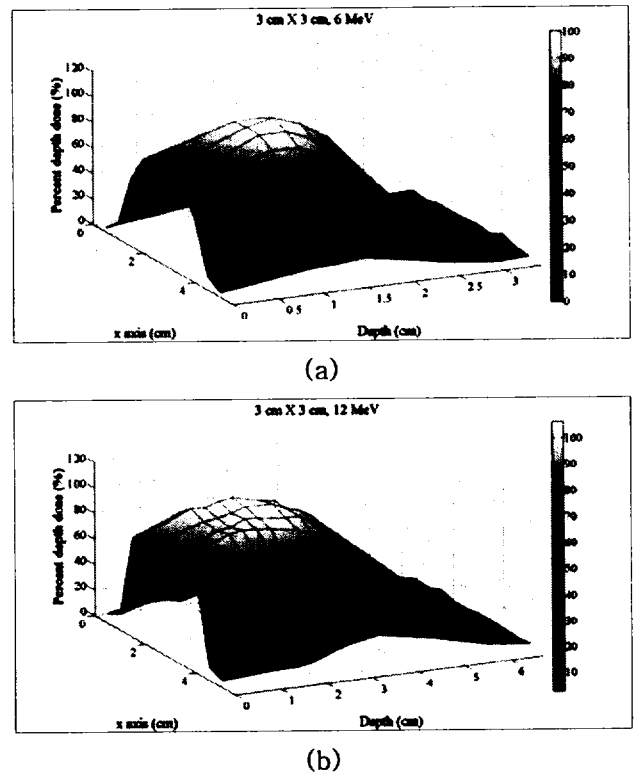


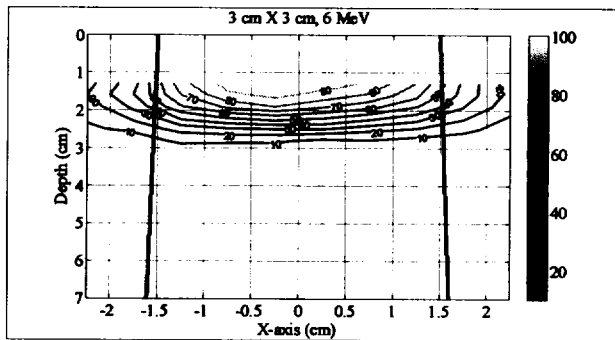
Fig. 3. Measurements of three-dimensional PDD with 3 cm × 3 cm field size of two different energy electron beams ((a) 6 MeV, (b) 12 MeV electron beams).

그림 4는 6 MeV, 12 MeV 전자선의 등선량곡선 측정 결과를 보여주고 있다. 결과를 살펴보면 6 MeV 전자선은 12 MeV에 비해 낮은 깊이에서 산란이 많이 일어났으며 등고선의 간격이 더욱 좁은 것을 알 수 있다. 이는 깊이에 따라 선량 변화가 급격히 이루어지는 것을 의미한다. 상대적으로 12 MeV 전자선은 6 MeV 보다 침투 깊이 (penetration depth,  $D_{max}$ 의 10% 값을 갖는 깊이)가 깊으며 등고선의 간격이 넓은 것을 알 수 있다. PMMA 팬텀에서 전자선의 에너지 별 침투

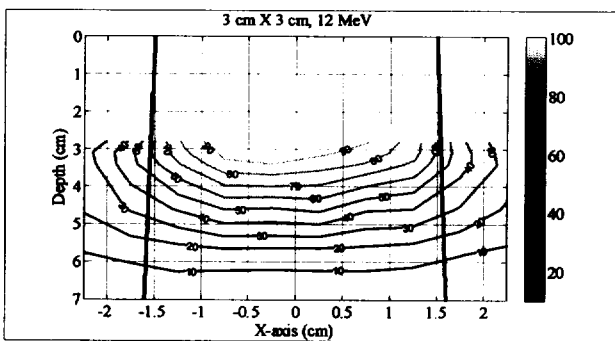
깊이는 다음 수식(1) :

$$\text{Penetration depth (cm)} = \frac{\text{electron energy (MeV)}}{2(\text{MeV/cm})} \quad (1)$$

로써 나타낼 수 있으며 6 MeV, 12 MeV 전자선의 침투 깊이는 각각 3 cm, 6 cm로 계산된다<sup>7)</sup>. 실험결과, 이론값과 거의 일치하는 것을 확인할 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 4. Measurements of isodose lines using a one-dimensional fiber-optic detector array with 3 cm × 3 cm field size of two different energy electron beams ((a) 6 MeV, (b) 12 MeV electron beams).

## 결 론

방사선 치료 기술이 발달하면서 방사선량계 역시 지속적으로 발달되어 왔다. 특히 공간분해능이 높고 계측 효율이 높은 방사선량계들이 계속적으로 개발되고 있으며 다차원의 측정이 가능한 방사선량계 역시 개발되고 있다. 그 중 다차원 광섬유 방사선량계는 물과 등가인 재질로 인해 치료용 방사선 계측에 가장 적합한 특성을 지니고 있

으며 온도, 압력, 전자기파 등으로부터 영향을 받지 않는 등 많은 장점을 가지고 있다.

본 연구에서는 1차원 광섬유 방사선량계를 이용하여 에너지와 조사야의 크기에 따른 치료용 전자선의 1차원적 선량분포를 측정하였다. 그리고 에너지와 PMMA 팬텀의 깊이에 따른 선량을 계측함으로써 심부선량백분율을 측정하였고 그에 따른 등선량곡선을 도시화하였다. 연구 결과 대부분 이론값과 일치하는 결과를 얻을 수 있었으나 실험 데이터의 부족으로 통계적인 분석은 하지 못하였다. 앞으로의 연구 방향은 계측부의 부피를 줄이고 각 계측부 간의 간격을 좁혀서 1차원 광섬유 방사선량계의 공간분해능을 더욱 높이는 것이다. 지속적인 연구를 통하여 개발될 다차원 광섬유 방사선량계는 보다 정확하고 효율적이며 경제적으로 치료용 방사선 계측에 사용될 것으로 기대된다.

감사의 글 : 본 연구는 과학기술부 원자력기초공동연구소사업(BAERI)의 지원에 의하여 이루어진 것임. (M20376030002-04B0505-00210)

## 참 고 문 헌

1. A-M. Frelin, J-M. Fontbonne G. Ban, J. Colin, and M. Labalme, *Med. Phys.* **32**, 3000 (2005).
2. T. O. White, *Nucl. Instrum. Phys. Res. A.* **273**, 820 (1988).
3. A. S. Beddar, *Radiation Measurements.* **41**, S124 (2007).
4. A. S. Beddar, T. J. Kinsella, A. Ikhlef, and C. H. Sibata, *IEEE Transactions on Nuclear Science.* **48**, 924 (2001).
5. L. Archambault, A. S. Beddar, L. Gingras, F. Lacroix, R. Roy, L. Beaulieu, *Med. Phys.* **34**, 1583 (2007).

6. F. M. Khan, *The Physics of Radiation Therapy*, 2nd. ed., Baltimore: Williams & Wilkins, 1994, pp.356-371.
7. W. R. Hendee, G. S. Ibbott, E. G. Hendee, *Radiation Therapy*, 3rd. ed., New Jersey: Jhon Wiley & Sons, 2005, pp.151-152.