

## 치료용 전자선 계측을 위한 1차원 광섬유 방사선량계의 제작 및 특성분석

건국대학교 의공학부 의공학실용기술연구소\*, †동국대학교 에너지·환경시스템학부,  
‡순천향대학교 에너지환경공학과

장경원\* · 조동현\* · 신상훈\* · 유옥재\* · 전재훈\* · 이봉수\* · 문주현† · 박병기‡

본 연구를 통하여 개발된 1차원 광섬유 방사선량계는 PMMA 팬텀에 10개의 광섬유 방사선 선체를 배열하여 제작하였다. 1차원 광섬유 방사선량계를 구성하는 각각의 광섬유 방사선 센서는 플라스틱 광섬유와 유기섬광체로 구성되어 있다. 각각의 유기섬광체는 치료용 선형가속기에서 발생하는 고 에너지 방사선에 의해 섬광빛을 방출하고 방출된 섬광빛은 플라스틱 광섬유를 통하여 광 계측장비인 다채널의 포토다이오드 증폭 시스템으로 전달된다. 본 연구에서는 1차원 광섬유 방사선량계를 이용하여 에너지와 조사야의 크기에 따른 치료용 전자선의 1차원적 선량분포를 측정하였고 섬광체의 광 신호 측정에 있어 방해요소로 작용하는 체렌코프 빛을 전자선의 입사각도에 따라 계측 및 분석하였다. 또한 PMMA 팬텀의 깊이에 따른 선량을 계측함으로써 3차원적 심부선량분포를 측정하였고 그에 따른 등선량곡선을 도시화하였다. 본 연구를 통하여 개발된 1차원 광섬유 방사선량계는 고 분해능, 실시간 측정, 쉬운 보정 등 많은 장점을 가지고 있다.

**중심단어:** 방사선량계, 광섬유, 유기섬광체, 전자선

### 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 기술은 정상조직의 피해를 최소화 하면서 암 조직에 정확한 양의 방사선을 조사하기 위하여 개발된 기술이므로 기존의 선량계보다 정확하고 정밀한 선량 및 선량분포까지 실시간으로 측정할 수 있는 새로운 방사선량계의 개발이 요구되고 있는 실정이다. 이와 같은 이유로 방사선량계는 높은 공간분해능(spatial resolution) 및 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 방사선량계(fiber-optic dosimeter, FOD)

는 섬광체(scintillator), 광섬유(optical fiber) 그리고 광 계측 장비로 구성된다.<sup>4)</sup> 특히 본 연구에 사용된 광섬유 방사선량계의 센서부는 부피가 매우 작고 물과 등가인 성질을 갖는 유기섬광체(organic scintillator)로 구성되어 있으므로 높은 공간분해능을 가지며 복잡한 보정작업을 필요로 하지 않는다. 그리고 선량율(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.

광섬유 방사선량계의 가장 큰 단점으로 작용하는 체렌코프 빛(Cerenkov light)은 하전입자(ionizing particle)와 광섬유와의 직접적인 작용으로 생성된다. 체렌코프 빛은 하전입자가 매질 내에서 매질 내의 빛의 속도보다 빠른 속도로 투과할 때 입사선을 중심으로 일정한 각도를 갖는 원추형 모양으로 발생된다. 특히 광섬유에서 발생하는 체렌코프 빛의 파장은 가시광영역을 포함하므로 섬광체의 섬광빛 계측에 있어 방해요소로 작용하게 된다.<sup>6)</sup> 그러나 광 계측장비에서 계측되는 체렌코프 빛은 광섬유에 조사되는 전자선의 조사각도에 크게 의존하며 90°일 경우 가장 작은 값을 갖는다.<sup>7)</sup> 일반적으로 광자선에 의해 발생하는 체렌코프 빛은 광자선과의 직접적인 작용으로 발생되지 않고 1차 혹은

본 연구는 과학재단 원자력연구사업 핵심기초연구 지원에 의하여 이루어진 것임(M20809005555-08B0900-55510).

이 논문은 2008년 9월 2일 접수하여 2008년 12월 20일 채택되었음.

책임저자 : 이봉수, (380-701) 충북 충주시 단월동 322

건국대학교 의료생명대학 의공학부

Tel: 043)856-0976, Fax: 043)851-0620

E-mail: bslee@kku.ac.kr

2차적으로 발생하는 전자선에 의해 발생된다.<sup>8)</sup>

본 연구에서는 PMMA (polymethyl metacrylate) 팬텀 (phantom) 1 cm 깊이에 10개의 광섬유 방사선 센서를 5 mm 간격으로 배열하여 1차원 광섬유 방사선량계를 제작하였고 제작된 1차원 방사선량계를 이용하여 에너지와 조사야 (field size)에 따른 치료용 전자선의 1차원적 선량분포를 측정하였다. 섬광체의 광신호 측정에 있어 방해요소로 작용하는 체렌코프 빛 역시 측정하였으며 전자선의 입사각도에 따라 발생하는 체렌코프 빛을 분석하였다. 또한 PMMA 팬텀의 깊이에 따른 섬광량을 계측함으로써 3차원적 심부선량분포(percentage depth dose, PDD)를 측정하였고 그에 따른 등선량곡선(isodose curve)을 도시화하였다.

### 실험재료 및 구성

실험에 사용된 광섬유(CK-40, Mitsubishi)는 계단형의 굴절률(step index)을 갖는 플라스틱 멀티모드 광섬유로서 직경은 1 mm이며 클래딩(cladding)의 두께는 0.02 mm이다. 또한 코어(core)와 클래딩의 굴절률(refractive index)은 각각 1.49, 1.402이고 개구수(NA: numerical aperture)는 0.504이며 감쇄율(attenuation rate)은 650 nm 파장의 빛에서 0.20 dB/m 이하이다. 계측의 안전성을 고려하여 치료실 밖에서 계측이 가능하도록 10 m 길이의 광섬유를 사용하였다. 조사량에 의

한 광섬유의 수명은 3.5 kGy이상으로 보고되고 있다.<sup>9)</sup> 센서 부로 사용된 섬광체는 원자번호가 낮은 물질로 구성된 유기 섬광체(BCF-10, BCF-20 and BCF-60, Saint-Gobain)로써 BCF-10과 BCF-20의 경우 최대 방출 파장이 각각 432 nm, 492 nm이며 잔광시간(decay time)은 2.7 nsec로 매우 짧다. 두 유기섬광체들은 1 MeV의 에너지를 갖는 하전입자에 대하여 약 8,000개의 광자를 방출한다. BCF-60의 경우 최대 방출파장이 530 nm로서 세가지 유기섬광체 중에서 가장 길며 잔광시간은 7 nsec, 1 MeV 하전입자당 방출되는 광자는 약 7,100개이다. 유기섬광체들은 모두 원통형으로 직경은 1 mm이며 길이는 1 cm를 사용하였다. 또한 조사량에 의한 유기섬광체의 수명은 1.0 kGy이상으로 보고되고 있다.<sup>10)</sup> 유기섬광체와 광섬유의 양 끝 단은 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 320~1,100 nm이며 최대 검출 파장대는 960 nm이다.

실험에 사용된 1차원 광섬유 방사선량계는 PMMA 팬텀 1 cm 깊이에 10개의 광섬유 방사선 센서들을 5 mm 간격으로 나란히 배열하여 제작하였고 각 유기섬광체에서 발생하는 섬광량의 누출을 막기 위해 액체형태의 반사체(reflec-

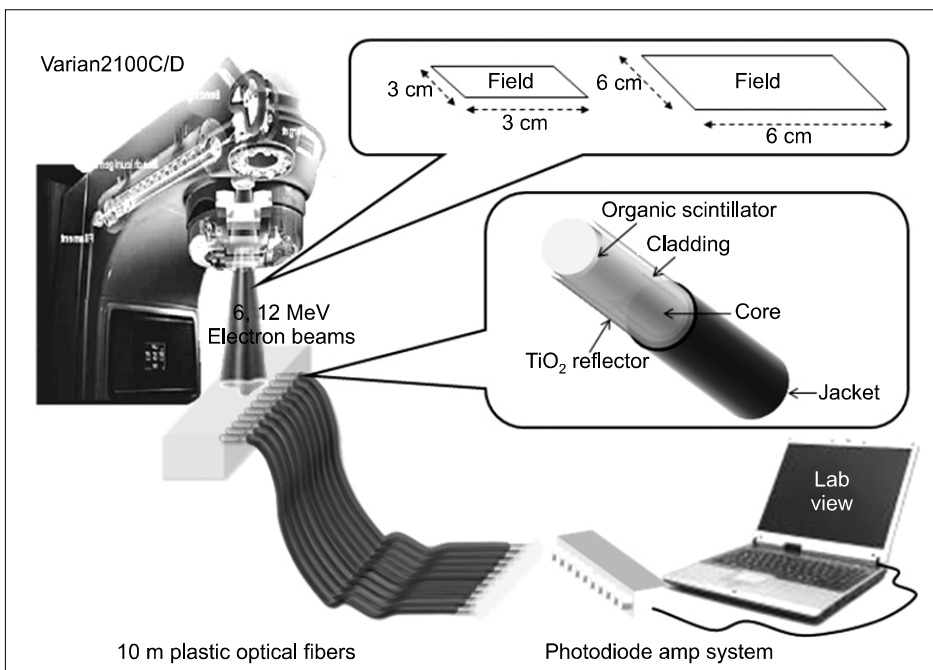


Fig. 1. Experimental setup.

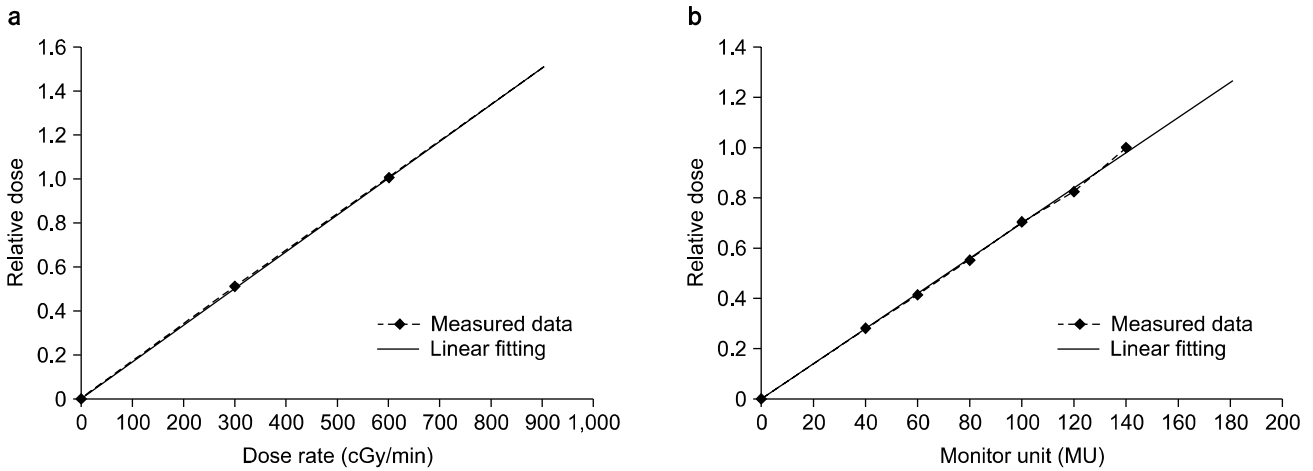


Fig. 2. Measurements of scintillating lights according to dose rates and monitor units of the CLINAC.

tor)인 산화티타늄(TiO<sub>2</sub>)을 계측부 주위에 도포하였다. 각각의 센서들의 오차를 보정하기 위하여 각 센서들을 20×20 cm<sup>2</sup> 조사야를 가지는 6 MeV 에너지의 전자선 중앙에 위치시키고 섬광량을 측정하여 모든 센서의 측정값들의 평균값을 구한 뒤 각각의 센서들이 평균값을 갖도록 일정한 상수들을 구하여 보정하였다.

전자선원으로는 치료용 선형가속기(CLINAC 2100 C/D, Varian)에서 발생하는 6 MeV, 12 MeV 에너지의 전자선을 사용하였고 조사야는 3×3 cm<sup>2</sup>, 6×6 cm<sup>2</sup>, 20×20 cm<sup>2</sup>를 사용하였다. 선형가속기의 선량율(dose rate)은 300, 600 cGy/min이며 Monitor unit (MU)은 40, 60, 80, 100, 120 MU를 이용하였다.

Fig. 1은 실험 구성도를 보여주고 있다. 1차원 광섬유 방사선량계의 각각의 유기섬광체는 치료용 선형가속기에서 발생하는 고 에너지 전자선에 의해 섬광빛을 방출하고 방출된 섬광빛은 플라스틱 광섬유(plastic optical fiber, POF)를 통하여 광 계측장비인 다채널의 포토다이오드 증폭 시스템으로 전달된다. 포토다이오드 증폭 시스템으로 전달된 섬광빛은 전압으로 변환되어 랩뷰(Lab VIEW)를 통하여 측정된 후 컴퓨터로 저장된다.

### 실험 결과

실험에 앞서 유기섬광체 선별을 위해 20×20 cm<sup>2</sup> 조사야를 갖는 6 MeV 에너지의 전자선에 대하여 유기섬광체(BCF-10, BCF-20, BCF-60)의 종류에 따른 섬광량을 측정하였다. 실험결과 BCF-20의 섬광량이 가장 크게 검출되었으

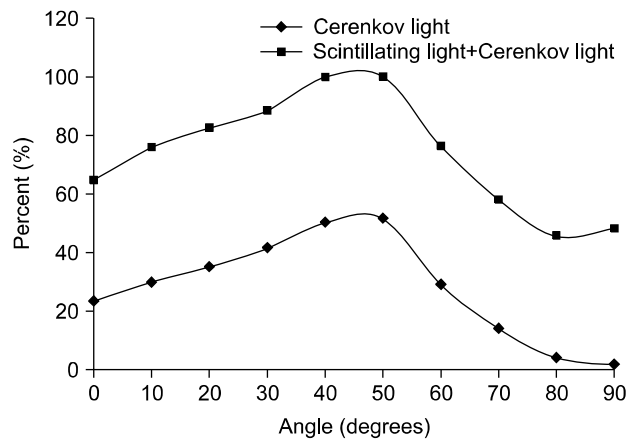


Fig. 3. Measurements of Cerenkov lights and total lights generated from a background optical fiber and a FOD according to irradiation angles of electron beams.

며 이후 실험에서는 본 실험을 통하여 선정된 가장 효율이 좋은 BCF-20 섬광체를 이용하여 실험하였다.

Fig. 2a는 선형가속기의 선량율에 따른 광섬유 방사선량계의 선형적인 응답을 보여주고 있다. 본 실험은 광섬유 방사선량계에 조사되는 시간을 일정하게 고정하고 선형가속기의 선량율을 변화시키며 진행하였다. 선형가속기의 선량율이 일정하게 증가하면 선형가속기에서 발생하는 펄스 사이의 간격이 일정하게 감소하게 되며 그에 따라 방사선량계에서 측정되는 값 역시 선형적으로 증가하게 된다. 600 cGy/min에서의 측정값이 300 cGy/min에서의 것보다 2배 큰 것을 알 수 있다. Fig. 2b는 선형가속기의 MU에 따른 광섬유 방사선량계의 응답을 보여주고 있다. 선형가속기의 MU

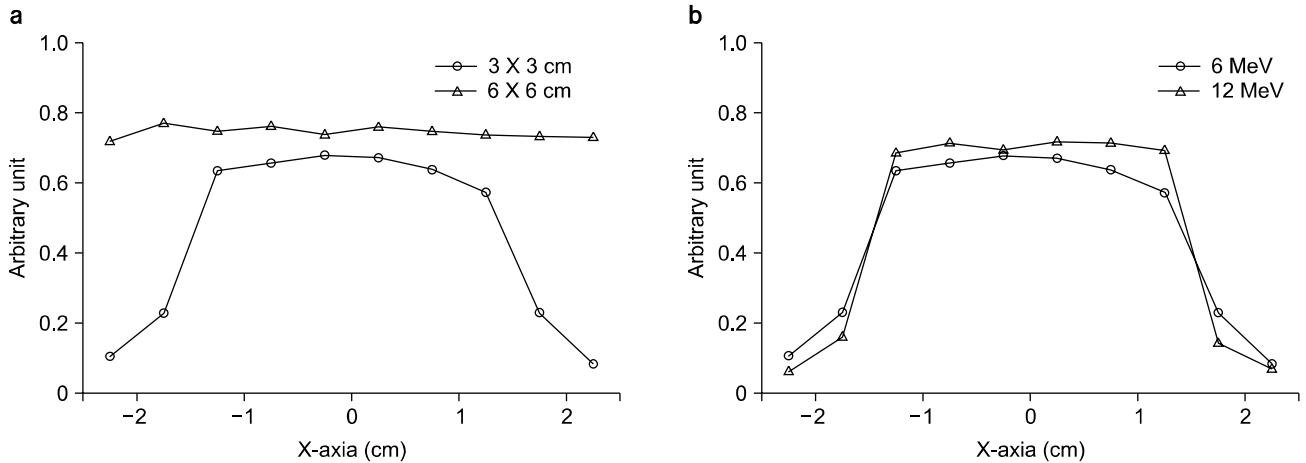


Fig. 4. Measurements of electron beam dose distributions using a one-dimensional fiber-optic dosimeter according to field sizes and energies.

가 증가하게 되면 조사시간이 증가하게 되고 그에 따라 광섬유 방사선량계에 조사되는 선량이 선형적으로 증가하게 된다.

Fig. 3은 조사야가 20×20 cm<sup>2</sup>인 6 MeV 전자선의 조사각도에 따라 광섬유에서 발생하는 체렌코프 빛과 광섬유 방사선량계에서 발생하는 총광량의 비율을 보여주고 있다. 본 실험에서는 체렌코프 빛의 측정을 위해 광섬유 방사선량계 외에 기준광섬유(background optical fiber)를 추가로 사용하여 체렌코프 빛만을 따로 측정하였다. 광섬유에서 발생하는 체렌코프 빛은 입사선에 대하여 일정한 각도를 가지고 진행하기 때문에 광섬유와 전자선의 조사각도에 따라 광섬유를 통하여 광 계측장비로 전달되는 체렌코프 광량은 크게 변한다. 본 연구에서 광섬유 방사선량계와 전자선이 이루는 각도는 광섬유 방사선량계를 수평으로 놓고 직각으로 전자선을 조사하였을 때를 90°로 정의하였고 전자선이 수평으로 조사될 때를 0°로 정의하였다. 6 MeV 전자선에 의해 코어의 굴절률이 1.49인 플라스틱 광섬유에서 발생하는 체렌코프 빛의 방출각도는 47.7°이며 광섬유 방사선량계와 전자선이 이루는 각도가 47.7°일 때 광 계측장비로 전달되는 체렌코프 광량은 최대값을 갖는다.<sup>7)</sup> 전자선의 조사각도가 90°일 경우, 체렌코프 빛의 방출각도는 본 실험에 사용된 플라스틱 광섬유의 임계각(critical angle)인 약 70°보다 작아지게 되며 광섬유에서 발생된 체렌코프 빛은 광 계측장비로 거의 전달되지 않는다. 또한 광섬유에서 발생하는 체렌코프 빛은 조사야의 크기가 작아질수록 조사야에 포함되는 광섬유의 영역이 더욱 줄어들게 되므로 체렌코프 빛의 절대량은 더욱 감소하게 된다.<sup>6)</sup> 이후 실험에서는 체렌

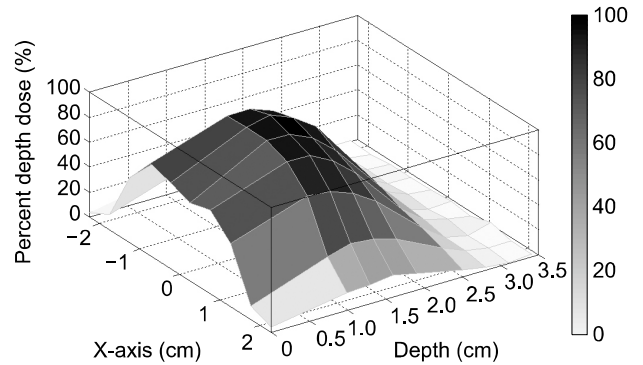


Fig. 5. Measurement of three-dimensional PDD for 6 MeV electron beam using a one-dimensional dosimeter.

코프 빛에 의한 오차를 최소화하기 위해 전자선의 입사각도를 90°로 고정하고 비교적 작은 조사야인 3×3 cm<sup>2</sup>, 6×6 cm<sup>2</sup>의 조사야를 사용하였으며 이후의 실험에서 체렌코프 빛에 의한 오차는 무시하였다.

Fig. 4는 PMMA 1 cm 깊이에서 1차원 광섬유 방사선량계의 전자선 선량분포 측정 결과를 보여주고 있다. 그림 4a를 살펴보면 조사야가 클수록 상대적으로 더 큰 선량이 측정되었고 3×3 cm<sup>2</sup> 혹은 6×6 cm<sup>2</sup> 조사야 안에 포함되는 센서들의 경우 거의 일정한 값을 가지는 것을 알 수 있다. Fig. 4b에서 조사야가 3×3 cm<sup>2</sup>일 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>11)</sup>

Fig. 5는 1차원 광섬유 방사선량계를 이용하여 3×3 cm<sup>2</sup> 조사야를 가지는 6 MeV 전자선의 3차원적 심부선량백분율 결과를 보여주고 있다. 일반적으로 심부선량백분율은 최대 흡수선량(D<sub>max</sub>)에 대한 각 깊이 별 흡수 선량의 비율을 나타낸다. 비교적 낮은 에너지를 갖는 6 MeV 전자선은 심부선량백분율의 표면에서부터 D<sub>max</sub> 깊이까지(buildup region) 12 MeV 전자선에 비해 산란이 많이 일어나며 급한 경사를 가지고 증가하게 된다. 본 연구에서 1차원 광섬유 방사선량계를 이용하여 측정된 6 MeV 전자선은 약 1.3 cm 깊이에서 D<sub>max</sub> 값을 갖는 것을 확인할 수 있다. 일반적으로 전자선의 에너지에 따른 D<sub>max</sub> 깊이는 10×10 cm<sup>2</sup> 조사야에서 6 MeV의 경우 약 1.3 cm이고 12 MeV의 경우 약 2.8 cm이다. 전자선의 D<sub>max</sub> 깊이는 광자선과 조사야에 의존하며 조사야가 작아질수록 피부 및 팬텀의 표면에 가까워지게 되지만 선형가속기마다 조금씩 차이를 보인다.

Fig. 6은 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. 상대적으로 12 MeV 전자선은 6 MeV 보다 침투 깊이(penetration depth, D<sub>max</sub>의 10% 값을 갖는 깊이)가 깊으며 등고선의 간격이 넓다. PMMA 팬텀에서 전자선의 에너지 별 침투 깊이는 다음 수식(1)

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

로써 나타낼 수 있으며 6 MeV, 12 MeV 전자선의 침투 깊이는 각각 3 cm, 6 cm로 계산된다.<sup>12)</sup> 실험결과 이론값과 일

치하는 것을 확인할 수 있다.

### 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 있으며 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 측정하였고 섬광체의 광신호 측정에 있어 방해요소로 작용하는 체렌코프 빛을 전자선의 입사각도에 따라 계측 및 분석하였다. 또한 에너지와 PMMA 팬텀의 깊이에 따른 선량을 계측함으로써 심부선량백분율을 측정하였고 그에 따른 등선량곡선을 도시화하였다. 연구 결과 이론값과 일치하는 결과를 얻을 수 있었다. 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 경제적으로 치료용 방사선 계측에 사용될 것으로 기대된다.

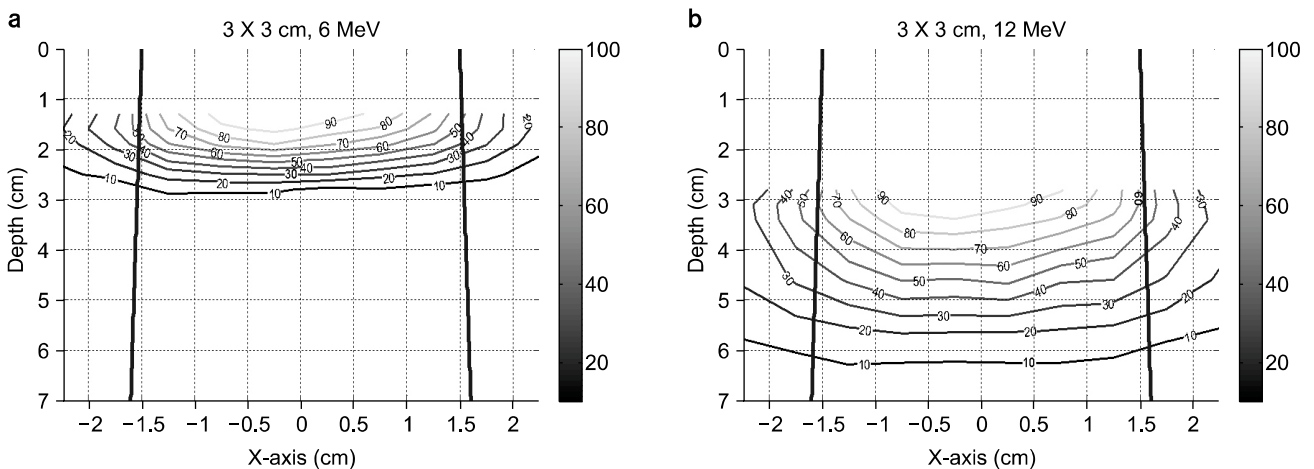


Fig. 6. Measurements of isodose curves for 6 and 12 MeV electron beams using a one-dimensional fiber-optic dosimeter.

## 참 고 문 헌

1. Frelin AM, Fontbonne JM, Ban G, et al: Spectral discrimination of Cerenkov radiation in scintillating dosimeters. *Med Phys* 32:3000-3006 (2005)
2. White TO: Scintillating fibers. *Nucl Instr Phys Res A* 273: 820-825 (1988)
3. Beddar AS: Plastic scintillation dosimetry and its application to radiotherapy, *Radiation Measurements*. 41:S124-S133 (2007)
4. Beddar AS, Kinsella TJ, Ikhlef Colin A, et al: A Miniature "Scintillator-Fiber-optic-PMT" Detector System for the Dosimetry of Small Fields in Stereotactic Radiosurgery, *IEEE Trans. Nucl Sci* 48:924-928 (2001)
5. Archambault L, Beddar AS, Gingras Colin L, et al.: Water-equivalent dosimeter array for small-field external beam radiotherapy. *Med Phys* 34:1583-1592 (2007)
6. Lee B, Cho DH, Jang KW, et al: Measurements and characterizations of Cerenkov light in fiber-optic radiation sensor irradiated by high energy electron beam. *Japanese Journal of Applied Phys* 45:7980-7982 (2006)
7. Lee B, Jang KW, Cho DH, et al: Measurements and elimination of Cerenkov light in fiber-optic scintillating detector for electron beam therapy dosimetry. *Nucl Instr Phys Res A* 579: 344-348 (2007)
8. Kirov AS, Piao Z, Devic S, et al: An Estimate of the Perturbing Effect of Cerenkov Radiation to the Signal from a Liquid Scintillator Volume Irradiated by a Megavoltage Photon Beam, *Proceedings of the 22<sup>nd</sup> Annual EMBS International Conference*. Chicago 2000 pp. 3148
9. Laguesse M, Bourdinaud M: Characterization of fluorescent plastic optical fibers for X-ray beam detection, *SPIE*. 1592: 96-107 (1991)
10. Blumenfeld H, Bourdinaud M, Stirling AV: Ageing of scintillating fibers, natural and otherwise. *Nucl Instr Methods A* 279:281-284 (1989)
11. Khan FM: *The Physics of Radiation Therapy*. 2nd ed, Williams & Wilkins, Baltimore, MD (1994), pp. 356-371
12. Hendee WR, Ibbott GS, Hendee EG: *Radiation Therapy Physics*. 3rd ed, Jhon Wiley & Sons, New Jersey (2005), pp. 151-152

## Fabrication and Characterization of a One-dimensional Fiber-optic Dosimeter for Electron Beam Therapy Dosimetry

Kyoung Won Jang\*, Dong Hyun Cho\*, Sang Hun Shin\*, Wook Jae Yoo\*, Jae Hun Jun\*,  
Bongsoo Lee\*, Joo Hyun Moon<sup>†</sup>, Byung Gi Park<sup>‡</sup>

\*School of Biomedical Engineering, Research Institute of Biomedical Engineering, Konkuk University, Chungju, <sup>†</sup>Department of Energy and Environmental System Engineering, Dongguk University, Gyeongju, <sup>‡</sup>Department of Energy and Environmental Engineering, Soonchunhyang University, Asan, Korea

In this study, we have fabricated a one-dimensional fiber-optic dosimeter for electron beam therapy dosimetry. Each fiber-optic dosimeter has an organic scintillator with a plastic optical fiber 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 sensor probe are guided by plastic optical fibers to the multi-channel photodiode amplifier system. We have measured one-dimensional electron beam profiles in a PMMA phantom according to different field sizes and energies of electron beam. Also, the isodose and three-dimensional percent depth dose curves in a PMMA phantom are obtained using a one-dimensional fiber-optic dosimeter with different electron beam energies.

**Key Words:** Dosimeter, Optical fiber, Organic scintillator, Electron beam