

치료용 고에너지 전자선 계측을 위한 광섬유 방사선 센서의 제작 및 특성 분석

장경원¹, 조동현¹, 유옥재¹, 이봉수¹, 이정환¹, 탁계래¹, 조효성², 김신³

¹건국대학교 의료생명대학 의학공학부, 의공학 실용기술 연구소

²연세대학교 보건대학 방사선학과

³제주대학교 공과대학 에너지공학과

(Received October 9, 2006. November 16, 2006)

Fabrication and Characterization of a Fiber-Optic Radiation Sensor for High Energy Electron Beam Therapy

Kyoung Won Jang¹, Dong Hyun Cho¹, Wook Jae Yoo¹, Bongsoo Lee¹, Jeong Han Yi¹

Gye-Rae Tack¹, Hyosung Cho², Sin Kim³

¹School of Biomedical Engineering, College of Biomedical & Health Science, Research Institute of Biomedical Engineering, Konkuk University

²Department of Radiation Science, Institute of Health Science, Yonsei University

³Department of Nuclear & Energy Engineering, Applied Radiological Science Research Institute Cheju National University

Abstract

In this study, we have fabricated a fiber-optic radiation sensor using an organic scintillator for high energy electron beam therapy. The intensities of scintillating light from a fiber-optic radiation sensor are measured with different field size, electron beam energy and monitor unit of a clinical linear accelerator. To obtain percent depth dose(PDD), the amount of scintillating light is measured at different depth of polymethylmethacrylate(PMMA) phantom. Also the intensity of Cerenkov light is measured and characterized as a function of incident angle of electron beam and a subtraction method is investigated using a background optical fiber to remove a Cerenkov light.

Key words : radiation sensor, optical fiber, scintillator, electron beam

1. 서 론

최 근 근접방사선치료(brachytherapy)나 세기조절방사선치료(Intensity Modulated Radiation Therapy), 영상유도방사선치료(Image Guided Radiation Therapy) 등과 같은 방사선 치료 기술들은 복잡한 선량 분포를 다루며 더욱 정확한 선량 계측을 요구한다. 이와 같은 이유로 방사선 계측기는 작은 크기로 제작하여 높은 공간 분해능을 가져야 하며 보정이 필요 없는 물과 등가(water-equivalence)인 재질로 제작하여야 한다[1]. 본 연구에 사용된 광섬유 방사선 센서는 작은 크기로 물과 등가인 성질을

가지는 유기섬광체(organic scintillator)와 플라스틱 광섬유를 이용하여 제작하였고, 고에너지 전자선이 광섬유 방사선 센서의 섬광체 부분에 조사되었을 때 섬광체에서 발생된 섬광빛은 광섬유를 통하여 광 계측장비로 전달된다[2,3]. 이렇게 제작되어진 광섬유 방사선 센서는 유연성, 센서제작의 용이성, 신호의 장거리전달 능력, 전자기파에 대한 무간섭 등 방사선 계측에 있어 많은 장점을 가지고 있다[4]. 그러나 광섬유와 고에너지 전자선(electron beam)의 직접적인 작용으로 광섬유 자체에서 어떠한 전자기파가 생성되는데 이것을 체렌코프 복사(Cerenkov radiation) 또는 체렌코프 빛(Cerenkov light)이라고 부른다[5]. 체렌코프 빛은 하전입자가 어떠한 매질 속에서 빛보다 빠른 속도로 움직일 때 발생되며 본 연구의 경우 고에너지 전자선이 광섬유를 빠른 속도로 통과할 때 발생된다. 생성된 체렌코프 빛은 섬광체의 섬광빛을 측정하는데 방해요소로 작용하게 되며 정확한 선량 측정을 위해서 제거되어야 한다.

본 연구는 과학기술부 원자력기초공동연구소사업(BAERI)의 지원에 의하여 이루어진 것임. (M2-0376 -03-0002)

Corresponding Author : 이봉수

충북 충주시 단월동 322 건국대학교 의료생명대학 의학공학부

Tel : 043-840-3755 / Fax : 043-851-0620

E-mail : bslee@kku.ac.kr

II. 배경 이론

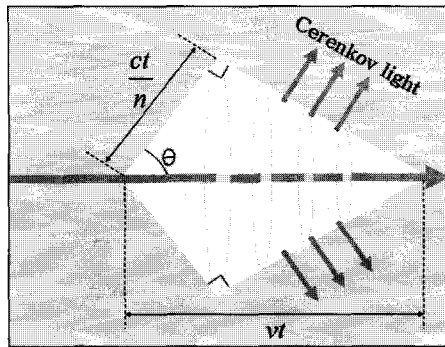


그림 1. 입사선에 대한 체렌코프 빛의 진행방향
Fig. 1. Cerenkov light path according to a incident electron beam

본 연구에서는 치료용 고에너지 전자선에 대한 광섬유 방사선 센서의 특성을 알아보기 위해 치료용 선형가속기의 각각 다른 조사야 (field size), 전자선 에너지, 모니터 유닛(MU)에 대해 광섬유 방사선 센서의 섬광량을 측정하였다. 또한 에너지에 따른 전자선의 percent depth dose(PDD)를 측정하기 위해서 polymethylmethacrylate (PMMA) 팬텀(phantom)의 깊이에 따른 광섬유 방사선 센서의 섬광량을 측정하였으며 전자선의 조사각도에 대한 광섬유 방사선 센서의 체렌코프 빛을 측정, 분석하였다. 측정장비로는 포토다이오드 증폭기 시스템을 이용하였고 체렌코프 빛을 제거하기 위해 기준 광섬유(background optical fiber)를 사용하여 감법(subtraction method)을 적용하였다.

광섬유에서 발생되어 계측기로 전달되는 체렌코프 빛의 양은 전자선의 입사각도에 의해서 결정된다. 일반적으로 광섬유로 입사되는 전자선의 입사각도와 체렌코프 빛의 방출각도가 같아지면 체렌코프 빛은 광섬유로 평행하게 가이드 되며 그에 따라 계측기에서 가장 많은 섬광량이 검출된다.

그림 1은 입사선에 대한 체렌코프 빛의 진행방향을 나타내는 그림으로 굴절률이 n인 매질에 입사된 전자선 주위로 일정한 각도를 갖는 원추형의 체렌코프 빛이 방출되는 것을 보여주고 있다. 전자선의 방향에 대해 체렌코프 빛은 다음과 같은 방출각도(θ)를 가진다[6].

$$\cos \theta = \frac{ct/n}{vt} = \frac{c}{nv} \quad (1)$$

여기서, c는 빛의 속도를 나타내며 n은 물질의 굴절률, v는 입사 입자의 속도를 나타낸다. 위 식에서 입사입자의 속도(v)는 다음 식 (2), 특수 상대성의 이론을 이용하여 구할 수 있다.

$$v = c \sqrt{1 - \frac{1}{\left(\frac{E(\text{MeV})}{0.511(\text{MeV})} + 1\right)^2}} \quad (2)$$

위 식들을 이용하여 PMMA를 코어물질로 사용하는 광섬유에서 발생하는 체렌코프 빛의 방출각도를 계산하면 6 MeV에서 약 47.7°의 값을 얻을 수 있다.

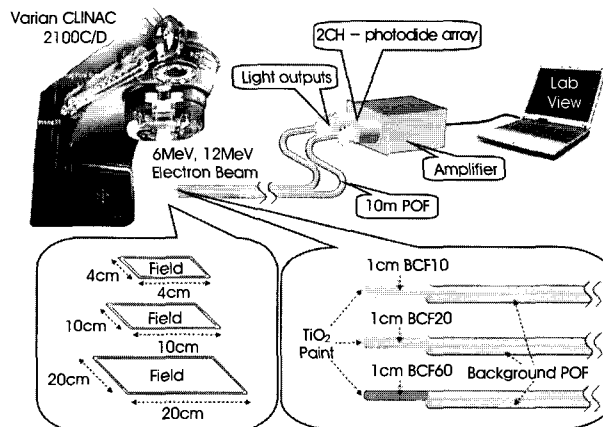


그림 2. 실험구성
Fig. 2. Experimental setup

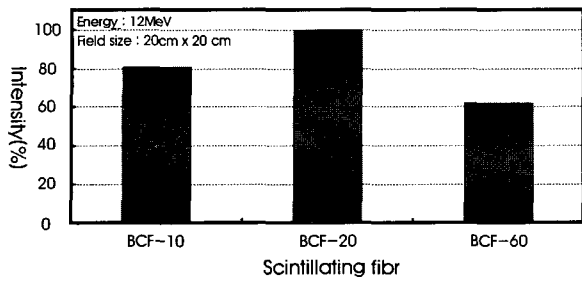


그림 3. 유기 섬광체(organic scintillator)의 종류에 따른 섬광량 측정
 Fig. 3. Measurements of scintillating light of different kinds of organic scintillators

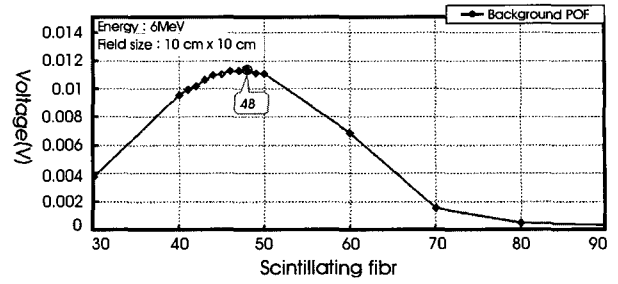


그림 4. 조사각도에 따른 기준광섬유(background optical fiber)의 체렌코프 빛 측정

Fig. 4. Measurements of the angular dependence of Cerenkov light from background optical fiber

III. 실험 재료 및 방법

본 연구에서 사용된 광섬유(CK-40, Mitsubishi Inc.)는 계단형(step index)으로 외경이 1 mm, 클래딩(cladding)의 두께는 0.02 mm인 멀티모드 플라스틱 광섬유이다. 광섬유의 코어(core) 부분은 PMMA재질로 그 굴절률은 1.49이고, 클래딩 부분은 플러로폴리머(fluoropolymer)로 굴절률은 1.402이며, 개구수(numerical aperture)는 0.504이다. 실험에 사용된 섬광체는 1 mm 지름의 유기 섬광체(BCF-10, BCF-20, BCF-60, Bicon)를 사용하였다.

섬광체에서 발생된 광신호와 체렌코프 빛은 별도로 제작된 2 채널 포토다이오드(S1336-18BK, Hamamatsu)-증폭기 시스템을 사용하여 계측하였다. 증폭기 시스템은 OP-AMP를 이용하여 제작하였고 약 300배의 증폭률을 가진다. 전자선원으로는 선형가속기(CIINAC 2100CD, Varian)에서 발생하는 조사야가 4×4, 10×10, 20×20 cm²인 6, 12 MeV 에너지의 전자선을 사용하였다.

그림 2는 실험구성을 보여주고 있는데, 실험에 사용된 광섬유 방사선 센서는 유기 섬광체(BCF-10, BCF-20, BCF-60)와 플라스틱 광섬유를 결합하여 제작하였고, 섬광체에서 발생하는 빛이 외부로 손실되는 것을 막기 위해 섬광체 주위에 반사페인트(TiO₂)를 도포하여 주었다. 선형가속기를 이용하여 조사야가 4×4, 10×10, 20×20 cm²인 6, 12 MeV 에너지의 전자선을 광섬유 방사선 센서와 감법적용을 위한 기준광섬유에 조사하면 각각 발생된 섬광빛과 체렌코프 빛은 길이가 10 m인 플라스틱 광섬유를 통해 2채널 포토다이오드 증폭기 시스템으로 전달된다.

IV. 실험 결과

그림 3은 조사야가 20×20 cm²인 12 MeV 전자선에 대해 각각 다른 유기 섬광체로 제작된 광섬유 방사선 센서들에서 발생된 섬광량을 보여주고 있다. 실험결과 BCF-20을 이용하여 제작한 광섬유 방사선 센서가 전자선에 대해 가장 많은 섬광빛을 방출하였다. 광섬유 방사선 센서에서 발생하는 섬광량은 별도의 증

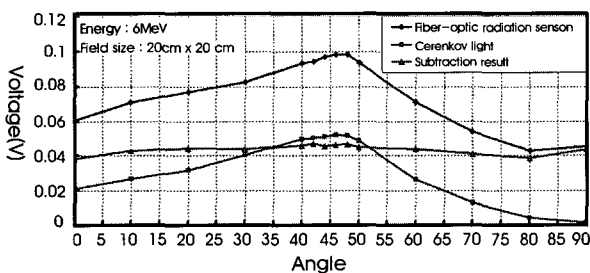


그림 5. 유기 섬광체에서 발생하는 섬광량을 계측하기 위한 감법의 결과
 Fig. 5. Subtraction method for measuring a real light signal from organic scintillator

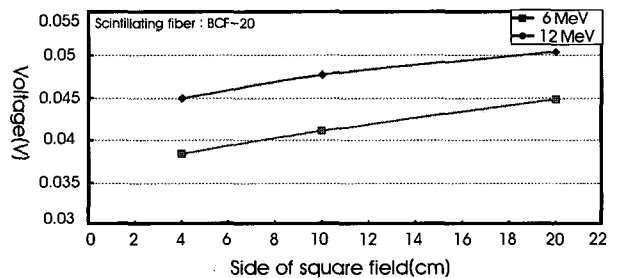


그림 6. 전자선의 조사야 및 에너지에 따른 광섬유 방사선 센서의 섬광량 측정
 Fig. 6. Measurements of scintillating light with different field sizes and electron beam energies

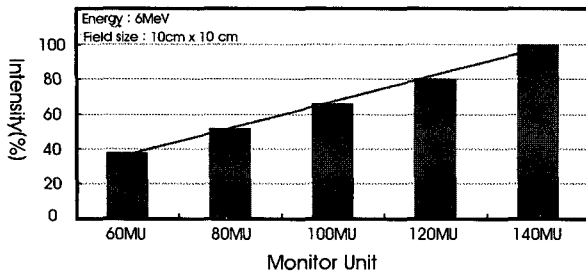


그림 7. 모니터 유닛에 따른 광섬유 방사선 센서의 섬광량 측정
 Fig. 7. Measurements of scintillating lights with fiber-optic sensor according to monitor units

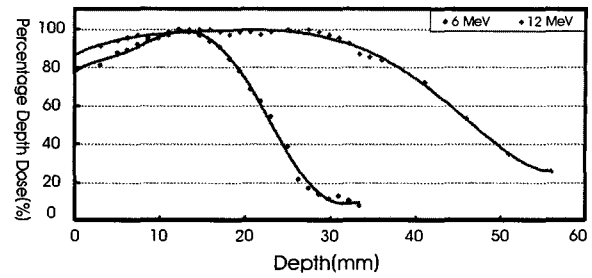


그림 8. PMMA 블록의 깊이에 따른 6, 12 MeV 전자선의 PDD 측정
 Fig. 8. Measurement of PDD at different depth of PMMA block for 6, 12 MeV electron beam

폭기를 이용하여야만 측정이 가능할 만큼 적기 때문에 이후에 진행된 실험들은 BCF-20을 이용하여 제작한 광섬유 방사선 센서를 사용하였다.

그림 4는 전자선의 조사각도를 30~90°까지 바꿔가며 기준 광섬유에 전자선을 조사하였을 때 측정되는 체렌코프 빛의 광량을 보여주고 있다. 결과를 살펴보면 약 48°에서 최대값을 가지는 것을 알 수 있다. 이는 위에서 구한 이론값과 거의 일치함을 알 수 있다.

그림 5는 체렌코프 빛을 제거하기 위한 감법을 나타내는 것으로 광섬유 방사선 센서에서 발생하는 섬광빛에서 기준광섬유에서 발생하는 체렌코프 빛을 제거하는 방법을 보여준다. 각각의 조사각도에 대해 광섬유 방사선 센서에서 발생하는 섬광빛은 큰 차이를 보였으며 이는 광섬유 방사선 센서에서 발생하는 섬광빛이 체렌코프 빛까지 포함하는데 기인한다. 여기서 각각의 각도에 대해 기준광섬유에서 발생하는 체렌코프 빛을 제거하게 되면 섬광체에서 발생하는 섬광량은 거의 일정함을 알 수 있고 각도에 의한 영향을 받지 않는다는 사실 역시 확인할 수 있다.

그림 6은 전자선의 조사야 및 에너지에 따른 광섬유 방사선 센서의 섬광량 측정 결과를 보여주고 있다. 체렌코프 빛을 포함하지 않는 광섬유 방사선 센서에서 발생한 섬광빛은 전자선의 조사야 및 에너지가 커짐에 따라 증가하였다. 조사야의 증가로 선형가속기의 콜리메이터(collimator) 및 공기 중에서 산란되는 전자선의 양이 증가되고, 이에 따라 광섬유 방사선 센서에서 발생하는 섬광량 또한 증가하게 된다[7].

그림 7은 선형가속기의 모니터 유닛(monitor unit, MU)에 따른 광섬유 방사선 센서의 섬광량 측정 결과를 보여주고 있다. 모니터 유닛이 일정하게 증가할수록 그에 따라 광섬유 방사선 센서에서 발생하는 섬광량이 선형적으로 증가하는 것을 확인할 수 있다. 모니터 유닛이 증가하게 되면 광섬유 방사선 센서에 조사되는 전자선의 양이 증가하게 되며 섬광체에서 발생하는 섬광량 역시 증가하게 된다.

그림 8은 PMMA 팬텀의 깊이에 따른 6, 12 MeV 전자선의

PDD를 측정한 것이다. 이론적으로 6 MeV 전자선은 PMMA 팬텀 약 1.3 cm 깊이에서 가장 많이 흡수되고 12 MeV 전자선은 약 2.8 cm 깊이에서 가장 많이 흡수된다[7]. 실험결과, 이론값과 거의 일치하는 결과를 얻을 수 있었다.

V. 결 론

광섬유 방사선 센서는 고 분해능, 유연성 및 전자기장의 간섭을 받지 않는 등 많은 장점들을 가지고 있으므로 방사선 치료용 전자선 및 X선의 계측 및 교정용으로 개발 가능하다. 본 연구에서는 유기섬광체와 플라스틱 광섬유를 이용하여 광섬유 방사선 센서를 제작하였고 치료용 고에너지 전자선에 대한 광섬유 방사선 센서의 특성을 알아보기 위해서 선형가속기의 각각 다른 조사야, 전자선 에너지, 모니터 유닛에 따른 광섬유 방사선 센서에서 발생한 섬광량을 계측하였다. 그 결과 조사야, 에너지, 모니터 유닛이 증가할수록 광섬유 방사선 센서에서 발생하는 섬광빛이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 체렌코프 빛을 측정, 제거하는 방법으로는 섬광체를 포함하는 광섬유 센서 이외에 기준 광섬유를 사용하여 광섬유에서 발생하는 체렌코프 빛을 측정하였고, 광섬유 방사선 센서에서 생성되는 섬광량으로부터 체렌코프 빛의 광량을 감법으로 분리, 제거하였다. 또한 체렌코프 빛과 전자선의 조사각도와 관계 분석한 결과, 광섬유에서 발생하는 체렌코프 빛은 각도에 의해 많은 영향을 받는다는 사실을 알 수 있었다. 본 연구를 통하여 개발 가능한 광섬유 방사선 센서는 치료용 고 에너지 전자선을 보다 정확하고 효율적이며 경제적으로 측정하는데 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

[1] A-M. Frelin, J-M. Fontbonne G. Ban, J. Colin, and M. Labalme, "Spectral discrimination of Cerenkov radiation in scintillating dosimeters," *Medical Physics*, vol. 32, no. 9, pp.3000-3006, 2005.

- [2] E. Takada, A. Kimura, Y. Hosono, H. Takahashi, and M. Nakazawa, "Radiation distribution sensor with optical fibers for high radiation fields," *J. of Nucl. Sci. and Tech.*, vol. 36, no. 8, pp.641-645, 1999.
- [3] B. M. Rogina, and B. Vojnovic, "Application of optical fiber sensors for radiation dosimetry," *Radiation Measurements*, vol. 26, no. 4, pp.599-602, 1996.
- [4] B. Lee, W. Y. Choi, and J. K. Walker, "Polymer-polymer miscibility study for plastic gradient index optical fiber," *Polymer Eng. and Sci*, vol. 40, no. 9, pp. 1996-1999, 2000.
- [5] A. S. Bedder, T. R. Mackie, and F. H. Attix, "Cerenkov light generated in optical fibers and other light pipes irradiated by electron beams," *Phys. Med. Biol.*, vol. 37, pp.925-935, 1992.
- [6] Knoll, Glenn F. Knoll, *Radiation detection and measurement - 3rd ed.* New York, USA: John Wiley & Sons, 1999, pp.711-713.
- [7] Khan. Faiz M., *The Physics of Radiation Therapy - 2nd ed.* Baltimore, USA: Williams & Wilkins, 1994, pp.356-371.