

광학 필터를 이용한 광섬유 방사선 센서의 체렌코프 빛 제거

장경원 · 이봉수[†] · 조동현 · 김형식 · 이정한 · 이정환

전국대학교 의료생명대학 의학공학부

⑨ 380-701 충청북도 충주시 단월동 322

김 신

제주대학교 공과대학 에너지공학과

⑨ 690-756 제주도 제주시 제주대학로 66

조효성

연세대학교 보건대학 방사선학과

⑨ 220-710 강원도 원주시 234

(2006년 6월 19일 받음, 2006년 8월 11일 수정본 받음)

본 연구에서는 유기 섬광체와 플라스틱 광섬유를 이용하여 치료용 전자선의 계측을 위한 광섬유 방사선 센서를 제작하였다. 또한, 선형가속기에서 발생되는 고 에너지 전자선에 의해 광섬유 방사선 센서에서 발생되는 체렌코프 광량을 측정하였고 전자선의 입사각도에 따른 체렌코프 광량의 변화도 측정하였다. 광섬유 방사선 센서를 이용한 전자선 계측에 있어 방해요소로 존재하는 체렌코프 빛을 감법 및 광학 필터링 방법을 이용하여 제거하였고 두 가지 방법들을 비교, 분석하였다.

주제어 : Cerenkov light, Fiber-optic sensor, Optical filter, Scintillator.

I. 서 론

현재 연구, 개발 중인 광섬유 방사선 센서는 유연성, 높은 공간 분해능, 제작의 용이성, 연결 및 표면처리와 같은 사용의 편리성, 전자기장으로부터 간섭을 받지 않는 등 많은 장점을 가지고 있다^[1]. 특히 치료용 방사선의 선량측정 및 교정을 위하여 개발되고 있는 광섬유 방사선 센서는 유기 섬광체(organic scintillator)를 일반 광섬유 앞에 부착하여 제작한다^[2,3]. 제작에 사용된 유기 섬광체는 현재 사용되고 있는 타 센서들(이온 전리함, 다이오드, 필름)에 비해 인체와 가장 유사한 성질(tissue equivalence or water equivalence)을 지니고 있으므로 보다 정확한 선량측정이 가능하다^[4].

그러나 전술한 많은 장점들에도 불구하고 유리 또는 플라스틱 광섬유에 고 에너지 전자선이 조사되면 광섬유 자체에서 체렌코프 빛(Cerenkov light)이라는 섬광빛이 발생하게 된다^[5]. 체렌코프 빛은 하전입자가 어떠한 매질 속에서 빛보다 빠른 속도로 움직일 때 발생되고, 생성된 체렌코프 빛의 파장은 광범위한 영역에 걸쳐 존재하게 된다^[6]. 특히 가시광선 영역에서의 체렌코프 빛이 갖는 파장의 최대값은 약 400 ~ 480 nm로서 광 계측 장비인 포토다이오드-증폭기 시스템 및 광증배관(PMT)을 이용하여 섬광체에서 발생하는 섬광량을 계측하는데 방해요소로 작용하게 된다. 즉, 광섬유에서 발생된 체렌코프 빛은 섬광체에서 발생되는 빛에 더하여져 실제

전자선 계측 시 의도하지 않은 결과를 낳게 되는 것이다.

현재까지 광섬유에서 발생되는 체렌코프 빛을 제거하기 위한 방법으로 감법(subtraction method)이 제시되어 왔다^[5]. 감법은 광섬유 방사선 센서에서 발생되는 섬광량과 동일한 성질의 기준 광섬유(background optical fiber)에서 발생되는 체렌코프 빛의 섬광량을 동시에 측정하여 감하는 방법으로써 가장 이상적인 방법이지만 2채널 광 계측장비를 사용해야 하며 각 채널의 증폭률을 동일하게 조정해야 한다는 어려움이 존재한다.

본 연구에서는 섬광체에서 발생되는 섬광빛의 파장(약 560 nm)과 체렌코프 빛의 파장(약 400 ~ 480 nm)에 차이를 두어 가시광선 영역에서 체렌코프 빛을 두 종류의 광학 필터들을 사용하여 제거할 수 있는 방법을 제안하였다. 이 방법은 2채널 광 계측장비를 사용할 필요가 없으며 감법에 사용되었던 기준 광섬유를 사용하지 않으므로 센서의 부피를 줄일 수 있는 장점을 가지고 있다.

또한 선형가속기에서 발생되는 고 에너지 전자선을 이용하여 전자선의 조사 각도에 따라 광섬유 방사선 센서에서 발생되는 체렌코프 빛을 계측, 분석하였다.

II. 실험재료 및 방법

본 연구에서 사용된 광섬유는 CK-40(Mitsubishi Inc.)으로 외곽의 지름이 1 mm, 클래딩(cladding)의 두께는 0.02

[†]E-mail: bslee@kku.ac.kr

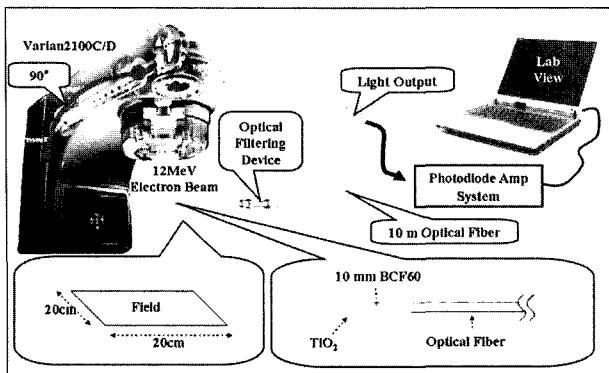


그림 1. 실험구성 및 방법.

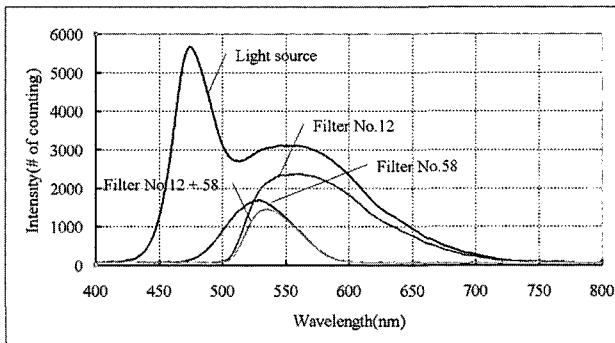


그림 2. 실험에 사용된 광학 필터의 특성.

mm인 멀티모드 플라스틱 광섬유이다. 광섬유의 코어(core) 부분은 PMMA(polymethylmethacrylate)재질로 그 굴절률(refractive index)은 1.49이고, 클래딩 부분은 fluoropolymer로 굴절률은 1.402이며, 개구수(numerical aperture)는 0.504이다. 실험에 사용된 섬광체는 1 mm 지름의 유기 섬광체(BCF-60, Bicron)로 530 nm 파장대의 섬광빛을 방출한다.

섬광체에서 발생된 광신호와 체렌코프 빛은 별도로 제작된 포토다이오드(S1336-18BK, Hamamatsu)-증폭기 시스템을 사용하여 계측하였다. 증폭기 시스템은 Op-amp를 이용하여 제작하였고 약 300배의 증폭률을 가진다. 전자선원으로는 선형 가속기(Clinac 2100CD, Varian)에서 발생되는 12 MeV 에너지의 전자선을 사용하였다.

그림 1은 실험구성 및 방법을 보여주고 있다. 실험에 사용된 광섬유 방사선 센서는 유기 섬광체(BCF-60)와 플라스틱 광섬유를 결합하여 제작하였고, 섬광체에서 발생되는 빛이 외부로 손실되는 것을 막기 위해 섬광체 주위에 반사페인트(TiO₂)를 도포하여 주었다. 선형가속기(LINAC)에서 발생되는 12 MeV 전자선의 조사야(field size)는 20 × 20 cm²로 고정시키고 전자선의 초점은 유기 섬광체의 중앙에 위치하게 하였다. 그리고 조사 각도에 의해 광섬유에서 가이드(guide)되는 체렌코프 빛의 변화량을 알아보기 위해 조사 각도는 0° ~ 90° 까지 변화시켰다. 12 MeV 전자선에 의해 섬광체에서 발생된 섬광빛은 광섬유를 통하여 광 필터부(optical filtering device)로 전달되며 광 필터부로 전달된 섬광빛은 필터의 특

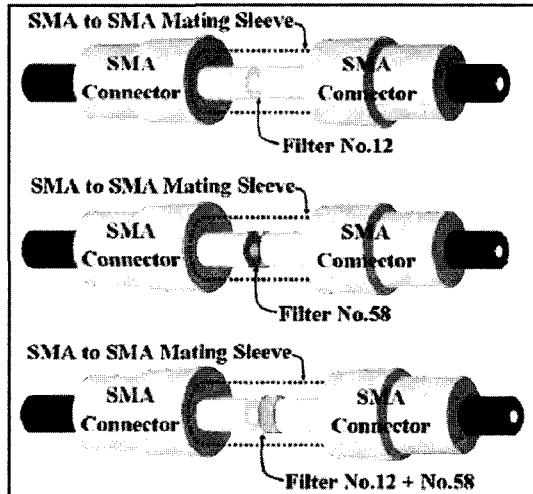


그림 3. 광 필터부의 구성.

성에 따라 체렌코프 빛이 제거된 후 10 m 광섬유를 통하여 포토다이오드-증폭기 시스템으로 전달된다.

광섬유 자체에서 발생되는 체렌코프 빛을 제거하기 위해서 광학 필터는 두 종류(Kodak wratten filter, No.12 와 No.58)가 사용되었으며, 그림 2는 일반 백색 LED광원에 대한 이 두 가지 필터들의 특성을 보여주고 있다.

그림 3은 광 필터부의 구성을 나타내고 있다. 실험에 사용된 필터들은 섬광체에서 발생되는 빛의 파장(약 560 nm)을 통과시키고 체렌코프 빛의 파장(약 400 ~ 480 nm)을 제거하기 위한 것으로써 필터 No.12는 500 nm 이하의 파장대를 제거하는 cutoff filter와 No.58은 480 ~ 600 nm의 파장대만 통과시키는 bandpass filter를 사용하였다. 각 필터들은 가시 영역에서의 체렌코프 빛의 파장영역(약 400 ~ 480 nm)을 제거하고 섬광체에서 발생되는 섬광빛만 통과시키는 역할을 한다. 본 실험에서는 SMA 커넥터들 사이에 필터를 부착시켜 광 필터부의 부피를 간소화시켰으며 공기 중으로 손실되는 섬광빛의 누출을 막음으로써 광 계측 효율을 증가시켰다.

III. 배경 이론

그림 4에서 보는 것과 같이 광섬유에서 발생되는 체렌코프 빛의 양은 전자선의 입사각도(δ)에 의해서 결정됨을 알 수 있다. 일반적으로 광섬유로 입사되는 전자선의 입사각도와 체렌코프 빛의 방출각도(θ)가 같아지면 체렌코프 빛은 광섬유로 평행하게 가이드(guide)되며 그에 따라 계측기에서 가장 많은 섬광량이 검출된다.

그림 5는 전자선 에너지와 체렌코프 빛의 방출각도(θ)와의 관계를 나타내는 그래프로서 실험에 사용된 12 MeV의 전자선 에너지에 대하여 PMMA 재질의 광섬유에서 생성되는 체렌코프 빛의 방출각도를 확인할 수 있다. 광섬유로 입사된 전자선의 속도에 대한 체렌코프 빛의 방출각도(θ)는 다음 식 (1)에 의해서 결정된다^[7].

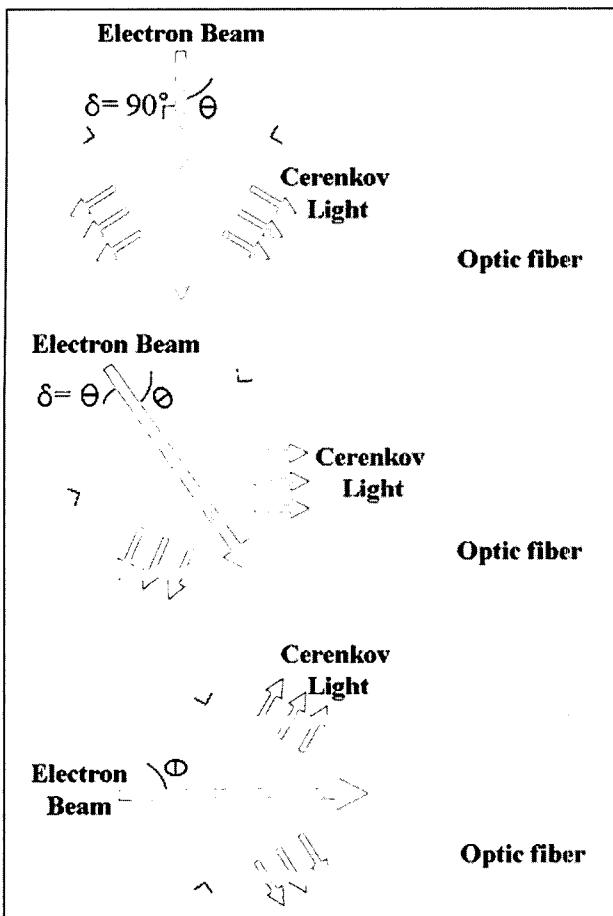


그림 4. 전자선의 입사각도와 광섬유에서 전달되는 체렌코프 광량과의 관계.

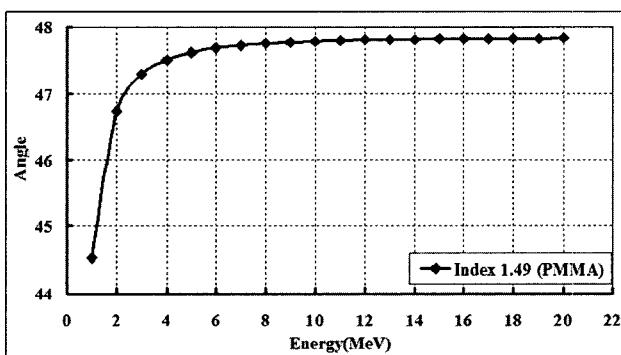


그림 5. 전자선의 에너지와 플라스틱 광섬유에서 발생되는 체렌코프 빛의 방출각도와의 관계.

$$\cos \theta = \frac{c}{nv} \quad (1)$$

여기서, c : 빛의 속도, n : 물질의 굴절률, v : 입사입자의 속도

위 식에서 입사입자의 속도(v)는 특수상대성의 이론에 따라서 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

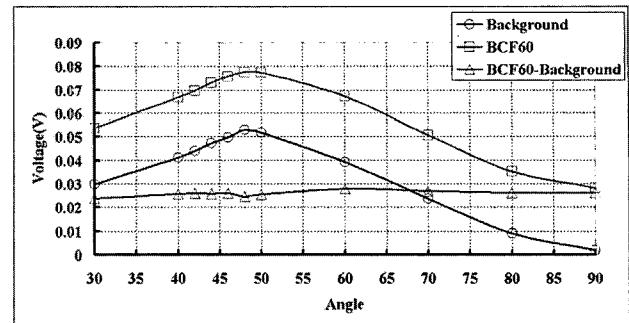


그림 6. 광섬유 방사선 센서의 섬광량과 기준 광섬유(background optical fiber)에서의 체렌코프 빛 측정 및 감법(subtraction method) 적용 결과.

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

여기서, E : 전자선의 에너지, c : 빛의 속도, v : 입사입자의 속도

식(1)과 식(2)를 이용하여 코어물질이 PMMA로 이루어진 광섬유에서 발생되는 체렌코프 빛의 방출각도를 계산하면 12 MeV 에너지의 전자선에 대해서 약 47.8°의 값을 가짐을 알 수 있다.

IV. 실험 결과

그림 6은 조사야가 $20 \times 20 \text{ cm}^2$ 인 12 MeV 전자선에 대해서 유기 섬광체(BCF-60)를 포함하는 광섬유 방사선 센서에서 발생되는 섬광량과 기준 광섬유 자체에서 발생되는 체렌코프 빛의 측정 및 감법을 이용한 결과를 보여주고 있다. 광섬유 자체에서 발생되는 체렌코프 빛의 최대 방출각도는 이론치와 같이 약 48°로 측정되었다. 그림에서 중앙의 일정한 선은 감법을 적용시킨 것으로 광섬유 방사선 센서에서 발생되는 섬광빛에서 기준 광섬유에서 발생하는 체렌코프 빛을 감한 결과이다. 섬광체(BCF-60)에서만 발생되는 광 신호는 예상했던 것과 같이 동일한 전자선 에너지 및 조사야에 대해서 조사각도의 변화와는 무관하게 거의 동일한 값으로 계측되었다.

그림 7은 감법에서 사용했던 동일한 조건의 전자선에 대하여 광섬유 방사선 센서에서 발생되는 섬광량에 필터링 방법(filtering method)을 적용시킨 결과이다. 역시 약 48°에서 가장 많은 체렌코프 빛이 검출되는 것을 확인할 수 있다. 각 필터들을 적용시킨 결과 cutoff 필터인 No.12를 이용하였을 때 약 59%의 체렌코프 빛이 감쇄되는 것을 확인할 수 있었다. 가시광선 영역에서 체렌코프 빛의 최대파장은 400 ~ 480 nm 범위 내에서 존재하지만 체렌코프 빛의 파장은 600 nm 이상에서도 발생할 수 있다^[6]. 그래서 No.12의 경우 많은

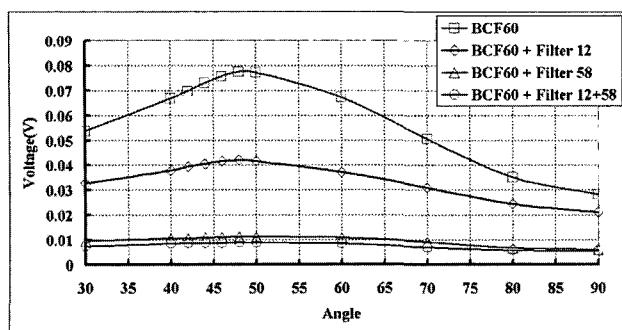


그림 7. 광섬유 방사선 센서의 섬광량에 대하여 광학 필터링 방법(filtering method)을 적용시킨 결과.

양의 체렌코프 빛을 제거하지는 못했다. bandpass 필터인 No.58의 경우는 약 89%의 체렌코프 빛을 제거하였는데 이는 유기 섬광체(BCF-60)에서 발생되는 섬광빛의 파장대만을 통과시킨 결과로 섬광체의 파장대에 존재하는 소량의 체렌코프 빛이 포함된 결과이다. 두 필터를 모두 합친 경우 가장 많은, 약 93%의 체렌코프 빛이 제거되었다. 두 필터를 모두 합친 결과, 필터를 통과하는 체렌코프 빛은 각 필터들의 특성에 의해 더욱 감소되며 이에 따라 가장 많은 양의 체렌코프 빛이 제거되었다.

두 가지 방법을 비교해 보았을 때, 광학 필터링 방법은 2 채널의 계측 시스템을 사용하지 않으므로 증폭률에 따른 오차가 존재하지 않았고 기준 광섬유를 이용한 다른 보정 없이 실시간으로 체렌코프 빛이 제거된 섬광체의 신호를 측정할 수 있었다. 그러나 필터링 방법의 결과를 살펴보면 감법의 결과에 비해 필터에 의해서 섬광체의 빛이 감쇄되는 것을 확인할 수 있는데 이는 필터 자체에 의해서 생기는 광 손실로 계측 시스템의 증폭률을 증가시킴으로써 해결할 수 있다고 판단된다.

V. 결 론

광섬유 방사선 센서는 고 분해능, 유연성 및 전자기장의 간섭을 받지 않는 등 많은 장점들을 가지고 있고 이러한 장점들로 인해 치료용 전자선 및 X선의 계측 및 교정용으로 개발 가능하다. 그러나 고 에너지 전자선 계측 시 광섬유에서 발생되는 체렌코프 빛은 섬광체 자체 신호의 검출에 방해요소로 존재하게 된다. 본 연구에서는 체렌코프 빛을 제거하기 위한 방법으로 기준 광섬유를 이용한 감법과 광학 필터들을 이용한 광학 필터링 방법으로 광섬유 자체에서 발생되는

체렌코프 빛을 제거하였다. 또한 전자선의 조사각도에 따른 광섬유 방사선 센서의 체렌코프 빛을 측정, 분석하였다. 본 연구 결과 광섬유 방사선 센서를 이용한 치료용 고 에너지 전자선 계측에 방해요소로 존재하는 체렌코프 빛을 효율적, 경제적으로 제거하여 보다 정확한 전자선의 측정이 가능할 것으로 기대된다.

감사의 글

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

참고문헌

- [1] 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.
- [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] A. S Beddar, T. J. Kinsella, A. Ikhlef, and C. H. Sibata, "A miniature Scintillator-Fiberoptic-PMT detector system for the dosimetry of small fields in stereotactic radiosurgery" *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 48, no. 3, pp. 924-928, 2001.
- [5] A. S. Beddar, 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] S. F. de Boer, A. S. Beddar and J. A. Rawlison, "Optical filtering and spectral measurements of radiation-induced light in plastic scintillation dosimetry" *Phys. Med. Biol.*, vol. 38 pp. 945-958, 1993.
- [7] Knoll, Glenn F. Knoll, *Radiation detection and measurement* - 3rd ed.(John Wiley & Sons, New York, USA, 1999), pp. 711-713.

Removal of Cerenkov Light in Fiber-optic Radiation Sensor Using Optical Filters

Kyoung Won Jang, Bongsoo Lee[†], Dong Hyun Cho, Hyung Shik Kim,
Jeong Han Yi, and Jeong Whan Lee

School of Biomedical Engineering, College of Biomedical & Health, Konkuk University, Chungju 380-701, KOREA

[†] E-mail : bslee@kku.ac.kr

Sin Kim

Department of Nuclear and Energy Engineering, College of Engineering, Cheju National University, Cheju 690-756, KOREA

Hyosung Cho

Department of Radiation Science, Institute of Health Science, Yonsei University, Gangwon 220-710, KOREA

(Received June 19, 2006, Revised manuscript August 11, 2006)

In this study, a miniature fiber-optic radiation sensor has been developed using a water-equivalent organic scintillator for electron beam therapy dosimetry. The intensity of Cerenkov light is measured and characterized as a function of the incident angle of the electron beam from a LINAC. Also, a subtraction method using a background optical fiber without a scintillator and an optical discrimination method using optical filters are investigated to remove Cerenkov light, which could cause problems or limit the accuracy for detecting a fluorescent light signal in a fiber-optic radiation sensor.

OCIS code : 060.2370. 060.2380. 350.2450. 350.5610. 170.3890.