

고에너지 전자선 측정을 위한 광섬유 방사선 센서에서의 체렌코프 빛 측정 및 분석

장경원 · 조동현 · 정순철 · 전재훈 · 이봉수[†] · 김 신* · 조효성** · 박성용*** · 신동호***

Measurements and characterizations of cerenkov light in fiber-optic radiation sensor irradiated by high energy electron beam

Kyoung Won Jang, Dong Hyun Cho, Jae Hun Jun, Bongsoo Lee[†], Sin Kim*,
Hyosung Cho**, Sung-Yong Park***, and Dongho Shin***

Abstract

In general, Cerenkov light is produced by a charged particle that passes through a medium with a velocity greater than that of visible light. Although the wavelength of Cerenkov light is very broad, the peak is in the almost visible range from 400 to 480 nm. Therefore, it always causes a problem to detect a real light signal that is generated in the scintillator on the fiber-optic sensor tip for dose measurements of high-energy electron beam. The objectives of this study are to measure, characterize and remove Cerenkov light generated in a fiber-optic radiation sensor tip to detect a real light signal from the scintillator. In this study, the intensity of Cerenkov light is measured and characterized as a function of incident angle of electron beam from a LINAC, and as a function of the energy of electron beam. As a measuring device, a photodiode-amplifier system is used, and a subtraction method using a background optical fiber is investigated to remove Cerenkov light.

Key Words : Cerenkov light, fiber-optic sensor, scintillator, LINAC

1. 서 론

현재 치료용 방사선의 선량측정 및 교정을 위한 광섬유 방사선 센서가 연구, 개발 중에 있으며 보통 방사선 센서부(sensor tip)로 유기 섬광체(plastic scintillator)가 사용된다^[1,2]. 유기 섬광체로부터 발생된 미약한 섬광빛은 일반적으로 플라스틱 또는 유리 광섬유에 의해서 광증배관(photomultiplier tube), 포토 다이오드, 또는 광 파워미터 등과 같은 광 계측 장비로 전달되고 전달된 광신호는 증폭되어 계측된다. 특히 섬광빛을 전달

할 수 있는 매체로서 광섬유는 유연성, 제작의 용이성, 연결 및 표면처리와 같은 사용의 편리성, 전자기장으로 부터 간섭을 받지 않는 등 많은 장점을 가지고 있다^[3,4]. 그러나 섬광빛의 전달 매체로 사용되는 유리 또는 플라스틱 광섬유는 고에너지 전자선 또는 X선과의 직접적인 작용으로 인해 센서부로 사용되는 섬광체가 아닌 광섬유 자체에서 체렌코프 빛(Cerenkov light)이 발생하게 되며, 발생한 체렌코프 빛은 광 계측장비로 전달된다^[5]. 체렌코프 빛은 하전입자가 어떠한 매질 속에서 빛보다 빠른 속도로 움직일 때 발생되고, 생성된 체렌코프 빛의 파장은 광범위한 영역에 걸쳐 존재하게 된다^[6]. 특히 가시광선영역에서의 체렌코프 빛이 갖는 파장의 최대값은 약 400~480 nm로 고에너지 전자선에 의해 광섬유 방사선 센서의 섬광체 센서부에서 발생하는 빛 신호와 유사한 파장을 방출함으로써 섬광체 자체 신호의 계측에 어려움을 준다.

본 연구는 고에너지 전자선에 의해 광섬유 방사선 센서에서 발생하는 체렌코프 빛을 제거하여 섬광체 센

전국대학교 의료생명대 의학공학부 (School of Biomedical Engineering, College of Biomedical & Health Science)

*제주대학교 공과대학 에너지공학과 (Department of Nuclear & Energy Engineering, Cheju National University)

**연세대학교 보건대학 방사선학과 (Basic Atomic Energy Research Institute and Department of Radiological Science)

***국립암센터 양성자치료센터 (Center for Proton Therapy, National Cancer Center)

[†]Corresponding author: bslee@kku.ac.kr

(Received : January 11, 2006, Accepted : March 3, 2006)

서부 자체에서 발생하는 빛 신호를 계측하는 것이다. 본 연구에서는 선형가속기(LINAC)에서 발생하는 고에너지 전자선의 각도, 에너지, 조사야(field size) 등을 변화시키면서 각 변량들과 체렌코프 빛과의 관계를 분석하였다.

체렌코프 빛을 제거하기 위한 방법으로는 광섬유 방사선 센서와 센서부가 없는 동일한 성질의 광섬유(background optical fiber)에서 발생하는 광신호를 동시에 계측하여 그 차이를 측정하는 방법(subtraction method)을 사용하였다.

2. 배경 이론

그림 1에서 보는 것과 같이 광섬유에서 발생하는 체렌코프 빛의 양은 전자선의 입사각도(δ)에 의해서 결정됨을 알 수 있다. 일반적으로 광섬유로 입사되는 전자선의 입사각도와 체렌코프 빛의 방출각도가 같아지면 체렌코프 빛은 광섬유로 평행하게 가이드(guide)되며

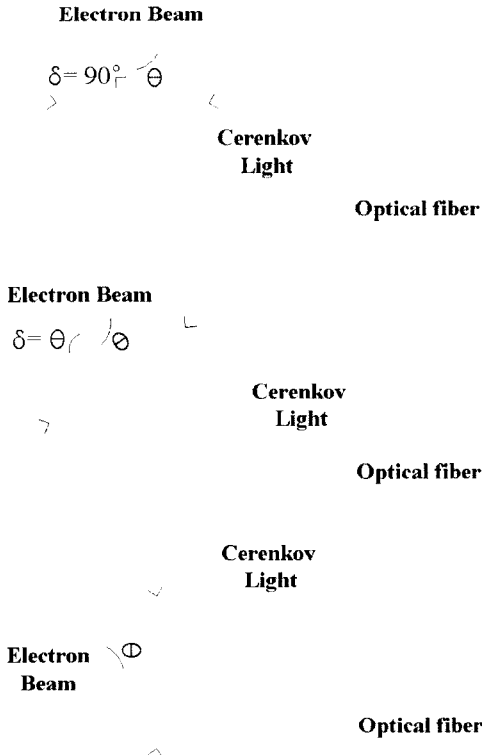


그림 1. 전자선의 입사각도와 광섬유에서 전달되는 체렌코프 광량과의 관계
 Fig. 1. Relationship between an incident angle of electron beam and an amount of Cherenkov light.

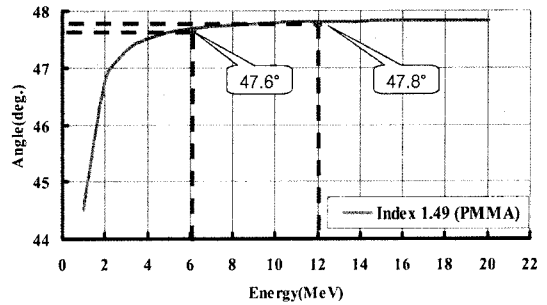


그림 2. 전자선의 에너지와 체렌코프 빛의 방출각도와의 관계
 Fig. 2. Relationship between energies of electron beam and emission angles of Cherenkov light.

그에 따라 계측기에서 가장 많은 섬광량이 검출된다. 그림 2는 전자선 에너지와 체렌코프 빛의 방출각도(θ)와의 관계를 나타내는 그래프로 실험에 사용된 6, 12 MeV의 전자선 에너지에 대하여 굴절률(refractive index)이 일정한 광섬유에서 생성되는 체렌코프 빛의 방출각도를 나타낸 것이다. 광섬유로 입사된 전자선의 속도에 대한 체렌코프 빛의 방출각도(θ)는 다음 식 (1)에 의해서 결정된다⁷⁾.

$$\cos\theta = \frac{c}{nv} \tag{1}$$

여기서, c : 빛의 속도, n : 물질의 굴절률, v : 입사 입자의 속도
 위 식에서 입사 입자의 속도(v)는 특수 상대성의 이론에 따라서 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서, E : 전자선의 에너지, c : 빛의 속도, v : 입사 입자의 속도
 식(1)과 식(2)를 이용하여 광섬유의 코어물질이 PMMA(polymethylmethacrylate)로 이루어진 광섬유에서 발생하는 체렌코프 빛의 방출각도를 계산하면 6 MeV에서 약 47.6°, 12 MeV에서 약 47.8°의 값을 얻을 수 있다.

3. 실험재료 및 방법

본 연구에 사용된 광섬유(CK-40, Mitsubishi Inc.)는

표 1. 실험에 사용된 유기 섬광체(BCF-20, Bicron)의 특성
Table 1. Specific properties of scintillator(BCF-20, Bicron) in experiment

Organic scintillator	BCF-20
Emission Color	Green
Emission Peak, nm	492
# of Photons per MeV	~8000
Decay time, ns	2.7

멀티모드 플라스틱 광섬유로써 외곽의 지름이 1 mm, 클래딩(cladding)의 두께는 0.02 mm이다. 광섬유의 코어(core) 부분은 PMMA(polymethylmethacrylate)재질로 그 굴절률은 1.49이고, 클래딩 부분은 fluoropolymer로써 굴절률은 1.402이며, 이 광섬유의 개구수(numerical aperture)는 0.504이다. 센서부 제작에 사용된 섬광체는 섬광 광섬유(scintillating optical fiber)로써 지름이 1 mm인 원통형의 유기 섬광체(BCF-20, Bicron)를 사용하였고, 그 특성은 표 1과 같다.

섬광체 센서부에서 발생된 광신호와 광섬유 자체에서 발생하는 체렌코프 빛은 포토다이오드(S1336-18BK, Hamamatsu)와 별도로 제작된 증폭기를 사용하여 측정하였다. 실험에 사용된 포토다이오드의 광 검출 파장영역은 320~1100 nm이며 960 nm 파장대에서 가장 큰 민감도를 가진다. 전자선원(electron beam source)으로는 선형가속기(Clinac 2100CD, Varian)에서 발생하는 6, 12 MeV 에너지의 전자선을 사용하였다.

그림 3은 실험장치의 구성도를 보여주고 있다. 실험에 사용된 광섬유 방사선 센서는 유기 섬광체(BCF-20)와 플라스틱 광섬유를 결합, 부착하여 제작하였고, 섬

광체 센서부에서 발생하는 빛이 외부로 손실되는 것을 막기 위해서 섬광체 주위에 반사페인트(TiO₂)를 도포하여 주었다.

실험에서는 광섬유 방사선 센서에서 발생하는 빛과 광섬유(background optical fiber) 자체에서 발생하는 체렌코프 빛을 동시에 측정하기 위해서 섬광체 센서부를 포함하는 광섬유 센서와 일반 광섬유(background optical fiber)를 나란히 놓고 섬광체의 중앙에 전자선을 조사하였으며, 조사각도에 따라 광섬유에서 발생되어 전달되는 체렌코프 빛의 광량을 알아보기 위해서 조사각도를 0°~90°로 변화시켰다. 그리고 조사야(field size)에 따른 체렌코프 빛의 광량을 측정하기 위해서 조사야를 4 cm × 4 cm, 20 cm × 20 cm으로 변화시켰고, 에너지 변화에 따른 체렌코프 빛의 광량을 측정하기 위해서 6, 12 MeV 두 가지 에너지의 전자선을 사용하였다.

광섬유 센서와 일반 광섬유에서 발생하는 섬광빛은 실험자의 안전을 위해 10 m 뒤에서 측정하였고 광섬유를 통해서 전달된 광신호는 포토다이오드-증폭기 시스템을 이용하여 동시에 계측하였다.

4. 실험 결과

그림 4는 조사야(field size)가 20 cm × 20 cm인 전자선의 각도의 변화에 따라 광섬유 자체(background optical fiber)에서 발생하는 체렌코프 빛을 측정 한 결과를 보여주고 있다. 전자선의 에너지가 12 MeV 경우, 6 MeV 때 보다 더 많은 체렌코프 빛이 검출되었으며, 약 48° 부근에서 가장 많은 체렌코프 빛이 검출되었다. 이 결과는 위에서 계산한 이론값과 거의 일치함을 알 수 있다.

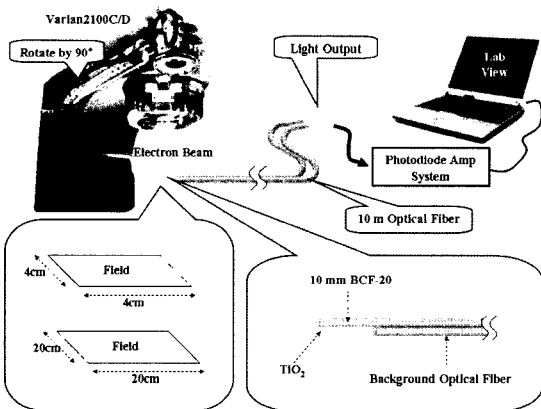


그림 3. 실험구성 및 방법
Fig. 3. Experimental setup.

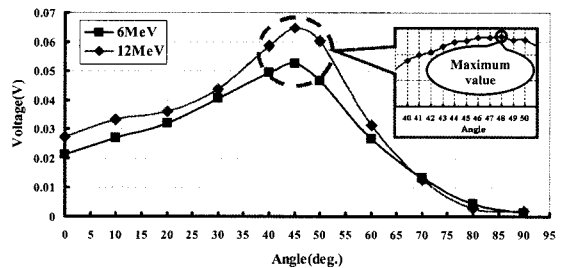


그림 4. 6 MeV, 12 MeV 전자선의 조사각도에 따른 광섬유 자체에서 발생하는 체렌코프 빛의 광량 측정
Fig. 4. Measurements of Cerenkov light intensity in background optical fiber with different angles between gantry and an optical fiber when electron beam energies are 6 and 12 MeV.

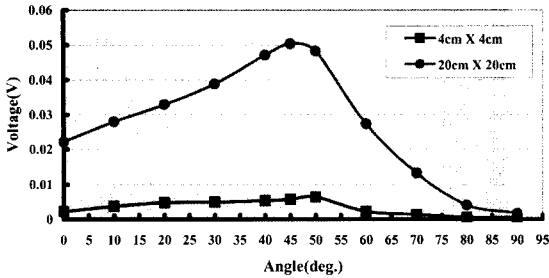


그림 5. 조사야가 다른 전자선에 의해 광섬유 자체에서 발생하는 체렌코프 광량
 Fig. 5. Measurements of Cerenkov light intensity in background optical fiber with different field size of electron beam.

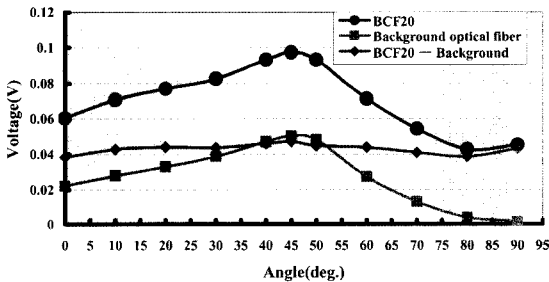


그림 6. 광섬유 방사선 센서의 섬광량 측정과 광섬유 자체의 체렌코프 빛 측정 및 감법(subtraction method) 적용 결과
 Fig. 6. Measurements of the light output from a fiber-optic radiation sensor with organic scintillator (BCF-20) and from a background optical fiber and the result from subtraction method.

6 MeV 전자선의 조사야에 따라 광섬유 자체에서 발생하는 체렌코프 빛의 광량 변화는 그림 5와 같으며, 전자선의 조사야가 커짐에 따라 더 많은 체렌코프 빛이 검출되는 것을 알 수 있다. 조사야의 증가로 광섬유에 조사되는 전자선의 영역이 더 넓어지게 되며, 그로 인해서 광섬유에서는 더 많은 체렌코프 빛이 발생하게 된다⁸⁾. 그리고 전자선의 조사 각도가 0°인 경우에 조사각도가 90°일 때 보다 더 많은 체렌코프 빛이 검출되었는데 이는 전자선이 0°로 조사될 때 전자선에 노출된 광섬유의 영역이 90°일 때 보다 더 많아지기 때문인 것으로 판단된다.

그림 6에서는 조사야가 20 cm × 20 cm 전자선에 대해서 유기 섬광체를 포함하는 광섬유 방사선 센서에서 발생하는 섬광량과 광섬유 자체에서 발생하는 체렌코프 빛의 측정 결과를 보여주고 있다. 유기 섬광체(BCF-20) 센서부에서만 발생하는 섬광량은 감법(subtraction

method)을 사용하여 계산하였다. 그 결과 섬광체에서만 발생하는 광 신호는 예상했던 것과 같이 동일한 전자선 에너지에 대해서 조사각도의 변화와는 무관하게 동일한 값으로 측정되었다. 그림에서 상단에 위치한 곡선은 광섬유 방사선 센서에서 발생하는 섬광량을 나타내며, 하단에 위치한 곡선은 광섬유 자체(background optical fiber)에서 발생하는 체렌코프 광량을 나타낸다. 그리고 중앙에 위치한 곡선은 감법의 결과를 나타낸 것으로 섬광체 자체에서만 발생하는 섬광량을 나타낸다.

5. 결 론

광섬유 방사선 센서는 고분해능, 유연성 및 전자장의 간섭을 받지 않는 등 많은 장점들을 가지고 있으므로 방사선 치료용 전자선 및 X선의 계측 및 교정용으로 개발 가능하다⁹⁾. 그러나 고에너지 전자선 계측 시 광섬유에서 발생하는 체렌코프 빛은 섬광체 자체 신호의 검출에 방해요소로 존재하게 된다. 본 연구에서는 체렌코프 빛을 측정, 제거하는 방법으로 섬광체를 포함하는 광섬유 센서 이외에 일반 광섬유를 사용하여 광섬유에서 발생하는 체렌코프 빛을 측정하였고, 광섬유 방사선 센서로부터 생성되는 섬광량으로부터 체렌코프 빛의 광량을 감법으로 분리, 제거하였다. 또한 체렌코프 빛과 전자선의 조사각도, 에너지, 조사야와의 관계를 분석한 결과, 광섬유에서 발생하는 체렌코프 빛은 각도, 에너지, 조사야에 의해 많은 영향을 받는다는 사실을 확인할 수 있었다.

감사의 글

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

참고 문헌

- [1] B. M. Rogina and B. Vojnovic, "Application of optical fiber sensors for radiation dosimetry", *Radiation Measurements*, vol. 26, no. 4, pp. 599-602, 1996.
- [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, Aug. 1999.
- [3] 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, Sep. 2000.
- [4] B. S. Lee, J. Y. Hong, Y. M. Hwang, and S. H. Cho, “Frasibility study on the development of fiber-optic pH sensor for endoscope”, *J. of the Korean Sensors Society*, vol. 13, no. 3, pp. 213-217, 2004.
- [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] 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), pp. 711-713, 1999.
- [8] Khan. Faiz M. *The Physics of Radiation Therapy - 2nd ed.* (Williams & Wilkins, USA), pp. 369-371, 1994.
- [9] Y. M. Hwang, D. H. Cho, B. S. Lee, H. S. Cho, and S. Kim, “Fabrication and characterization of plastic fiber-optic radiation sensor tips using inorganic scintillator material”, *J. of the Korean Sensors Society*, vol. 14, no. 4, pp. 244-249, 2005.



장 경 원

- 2005년 건국대학교 의공학부 의용전자 전공 졸업(공학사)
- 2006년 현재 건국대학교 의공학부 석사과정(공학석사)
- 주관심분야 : 의광학, 의료영상, 의료방사선공학

조 동 현

- 『센서학회지 제14권 제4호』 pp. 248 참조

정 순 철

- 『센서학회지 제12권 제5호』 pp. 225 참조

전 재 훈

- 1986년 고려대학교 화학공학과 졸업(공학사)
- 1993년 Texas A. M. 화학공학과 졸업(공학석사)
- 2001년 Texas A. M. 의공학과 졸업(공학박사)
- 현재 건국대학교 의공학부 조교수

이 봉 수

- 『센서학회지 제13권 제3호』 pp. 213 참조

김 신

- 『센서학회지 제14권 제4호』 pp. 249 참조

조 효 성

- 『센서학회지 제14권 제4호』 pp. 249 참조

박 성 용

- 1985년 경기대학교 이과대학 물리학과 졸업(이학사)
- 1988년 미국 Wayne State Univ., College of Natural Science, Physics(이학석사)
- 1992년 미국 Wayne State Univ., School of Medicine, Radiation Oncology(이학석사)
- 2001년 경기대학교 자연과학대학원 대학원 의학물리학(이학박사)
- 주관심분야 : 의학물리, 방사선치료, 방사선계측

신 동 호

- 1995년 경기대학교 이과대학 물리학과 졸업(이학사)
- 1997년 경기대학교 자연과학대학원 이과대학 물리학과 졸업(이학석사)
- 2004년 경기대학교 자연과학대학원 물리학과 졸업(이학박사)
- 주관심분야 : 의학물리, 방사선치료, 방사선계측