

의료용 선형가속기의 X-선 분포도 측정을 위한 1차원 광섬유 방사선 센서의 제작 및 성능평가

조동현 · 장경원 · 유욱재 · 이봉수[†] · 조효성* · 김신**

Fabrication and performance evaluation of one-dimensional fiber-optic radiation sensor for X-ray profile irradiated by clinical linear accelerator

Dong Hyun Cho, Kyoung Won Jang, Wook Jae Yoo, Bongsoo Lee[†],
Hyosung Cho*, and Sin Kim**

Abstract

In this study, one-dimensional fiber-optic radiation sensor with an organic scintillator tip is fabricated to measure high energy X-ray beam profile of CLINAC. According to the energy and field size of X-ray, scintillating light signal from one-dimensional fiber-optic sensor is measured using a photodiode-amplifier system. This sensor has many advantages such as high resolution, real-time measurement and ease calibration over conventional ion chamber and film.

Key Words : radiation sensor, optical fiber, scintillator, photon beam

1. 서 론

대상 물질과의 상호작용으로 대상체를 이온화시키는 능력을 지닌 전리 방사선 (ionizing radiation)을 일반적으로 방사선(radiation)이라 말하는데, 그 중에서 생물체와 많은 연관성을 갖는 엑스선과 감마선은 파장이 매우 짧은 전자기파임과 동시에 입자적인 성질을 지니고 있다^[1]. 엑스선과 감마선은 방사선동위원소에서 방출되는 알파선과 베타선에 비해, 높은 투과력을 지니고 있어서 의료 영역의 악성 종양 치료 및 진단에서 널리 이용되고 있다^[2]. 이와 같이 방사선을 이용한 치료 및 진단 과정에서 정상 조직이나 의료진에 대한 방사선 피폭을 최소화하는 것은 매우 중요하기 때문에 방사선 계측에 대한 정확성 및 신속성이 요구되고 있다. 방사

선 치료의 성패여부는 환부에 얼마나 정확한 양의 방사선이 조사되는지에 의해 결정되며, 특히 방사선 치료는 인체를 대상으로 시행되기 때문에 보다 정확한 양의 방사선이 조사되어야 한다. 이와 같은 이유로 외부방사선치료의 경우, 선형가속기(linear accelerator, LINAC)를 이용하여 암세포를 제거하는 치료과정을 환자에게 직접 시행하기에 앞서 고 에너지의 방사선이 환부에 어느 정도 조사되는지를 물이나 플라스틱 재질의 팬텀에 방사선 계측 센서를 삽입하여 방사선 흡수선량을 미리 측정 한 후, 환자에게 방사선 치료를 시행하게 된다. 그러므로 치료용 방사선 계측 센서는 방사선 치료에 있어 인체와 유사한 성질을 갖는 물질(tissue equivalence or water equivalence)일수록 정확도가 높아진다. 하지만 현재 이용되고 있는 이온 전리함은 0차원 측정, 낮은 공간 분해능, 복잡한 보정과정 등 많은 문제점을 가지고 있다^[3]. 따라서 인체에 조사되는 방사선을 복잡한 보정잡업 없이 실시간으로 정확하게 측정하기 위해서 새로운 센서의 개발이 요구되고 있는 실정이다. 최근에, 유기 섬광체를 사용한 소형 광섬유 방사선 센서들에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는데, 소형 광섬유 방사선 센서부(sensor tip)를 구성하고 있는 유기

건국대학교 의료생명대학 의공학부, 의공학실용기술연구소 (School of Biomedical Engineering, College of Biomedical & Health Science, Research Institute of Biomedical Engineering, Konkuk University)

*연세대학교 보건대학 방사선학과 (Department of Radiation Science, Institute of Health Science, Yonsei University)

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

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

(Received : October 19, 2006, Accepted : December 21, 2006)

섬광체는 거의 인체조직과 유사한 물리적 특성을 가지고 있고 부피가 매우 작기 때문에 플라스틱 팬텀이나 물에서 방사선 흡수량 측정 시 오류를 최소화 시킬 수 있다^[4,5]. 일반적으로 방사선 치료 시 계측을 위한 광섬유 방사선 센서는 유기 섬광체, 광섬유 그리고 광 측정 장비로 구성된다^[6,7].

본 연구에서는 의료용 선형가속기(CLINAC)로부터 고 에너지 X-선 조사량 분포도를 측정하기 위해 유기 섬광체와 일반광섬유를 이용해서 방사선 센서를 제작하였고, 이에 대한 간단한 성능평가 후 PMMA(Poly-methyl methacrylate) 팬텀에 배열하여 일차원 광섬유 방사선 센서를 제작하였다. 유기 섬광체를 이용하여 제작된 광섬유 방사선 센서는 타 센서들에 비해 인체와 가장 유사한 성질을 가지고 있으며 높은 공간 분해능과 유연성, 계측의 정확성, 전자기파로부터의 무간섭, 복잡한 보정과정을 거치지 않는 등 많은 장점들을 가지고 있다^[8,9].

2. 실험 방법

본 연구에 사용된 광섬유(CK-40, Mitsubishi)는 멀티 모드 플라스틱 광섬유로서 외경이 1 mm, 클래딩(cad-ding)의 두께는 0.02 mm이다. 광섬유의 코어(core) 부분은 PMMA 재질로 굴절률은 1.49이고 클래딩 부분은 fluoropolymer로서 굴절률은 1.402이며, 광섬유의 개구수(numerical aperture)는 0.504이다. 그리고 유기 섬광체는 광섬유와 비슷한 원통형의 BCF-10, BCF-20(Bicron Co.)을 사용하였다. 또한, 광섬유에 의해서 전달된 미약한 광신호를 증폭, 계측하기 위한 장비로서 광증배관(PMT, H5784, Hamamatsu Inc.) 및 포토다이오드(S1336-18bk, Hamamatsu Inc.)를 사용하였다. 그림 1

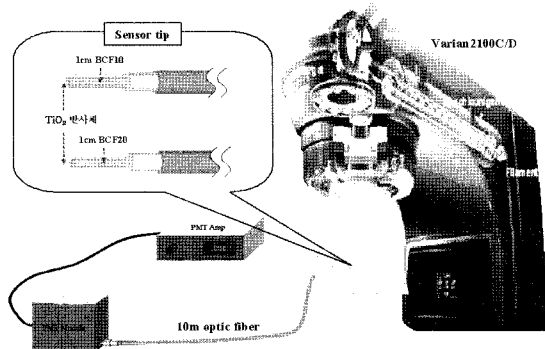


그림 1. 하나의 광섬유 센서를 이용한 실험구성 및 방법
Fig. 1. Experimental setup for zero-dimensional fiber-optic radiation sensor.

표 1. 유기 섬광체의 물리적 특성

Table 1. Physical properties of organic scintillators

Scintillator	Emission peak (nm)	Refractive index	Density
BCF-10	432	1.6	1.05 g/cm ³
BCF-20	492	1.6	1.05 g/cm ³

표 2. 접착 물질에 따른 섬광광 측정 실험

Table 2. Measurements of scintillating light according to the bonding material

Adhesive	Power [μ W]	
	315~400 nm	280~360 nm
일반 Epoxy	0.079	0.127
유리전용 Epoxy	0.166	0.233
순간접착제	0.291	0.300
DP-610	0.327	0.344
DP-100	0.225	0.212
Bare POF (Non)	0.010	0.019

은 하나의 광섬유 센서를 이용한 실험 구성도를 보여 주고 있으며, 선형가속기로부터 발생하는 엑스선에 의해 광섬유 센서부의 유기 섬광체에서 발생된 섬광 빛은 10 m의 플라스틱 광섬유를 거쳐 광증배관에 전달된다. 광증배관에서는 전달된 섬광 빛을 증폭하여 전압으로 표시하게 된다. 실험에 사용된 선형가속기는 Varian 2100C/D이고 6, 15 MV X-선을 센서부에 조사하였다. X-선의 조사야(field size)는 5×5 cm², 10×10 cm² 두 가지 크기를 사용하였고, 각각의 경우에 대해서 센서부에서 발생하는 섬광 빛의 양을 측정하였다.

표 1은 실험에 사용한 유기 섬광체의 물리적 특성을 보여준다.

센서부 제작 시 플라스틱 광섬유와 유기 섬광체 결합의 최적화를 위해 절단은 광섬유 전용 절단기(IF-FC1, industrial fiber optic)를 이용하였고, 절단면 연마는 5, 3, 1 그리고 0.3 μ m의 lapping film을 사용하여 순차적, 반복적으로 수행하였다. 표 2는 여러 가지 접착 물질들을 이용하여 센서부를 제작한 후 300~400 nm 광원을 이용하여 결합 효율을 측정된 결과이다. DP-610의 경우 다른 접착물질과 다르게 폴리우레탄(Polyurethan) 재질로 접착면에 도포하고 2시간 동안 자외선을 비추어 접착시킨다. 접착물질을 사용하지 않은 것보다 사용하였을 때 보다 좋은 결과를 얻었으며 DP-610을 썼을 때 가장 높은 출력을 보였다. 플라스틱 광섬유와 유기 섬광체의 굴절률이 DP-610의 굴절률과 가장 유사하여 높은 출력 값이 측정 되었다고 판단된다.

그림 2는 유기 섬광체를 이용한 광섬유 방사선 센서

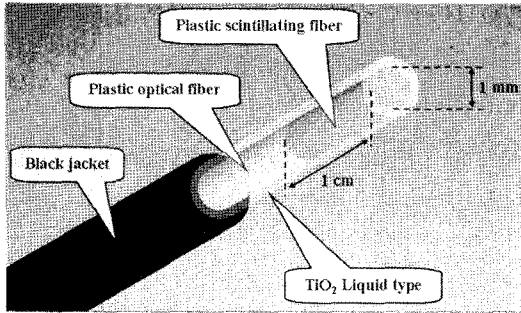


그림 2. 유기 섬광체와 플라스틱 광섬유를 이용한 방사선 광섬유 센서부
Fig. 2. Fiber-optic radiation sensor tip using an organic scintillator and a plastic optical fiber.

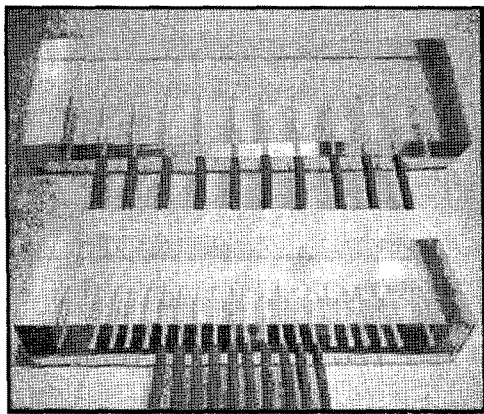


그림 3. 1차원 광섬유 방사선 센서
Fig. 3. One-dimensional fiber-optic radiation sensor.

를 보여주고 있다. 섬광체 센서부는 1 mm 지름의 유기 섬광체를 플라스틱 광섬유 끝부분에 부착하고, 반사 페인트(TiO₂)를 사용하여 외부로 손실되는 섬광량을 최소화하였다.

그림 3은 유기 섬광체를 이용한 광섬유 방사선 센서를 일정한 간격으로 배열하여 제작한 1차원 광섬유 방사선 센서를 보여주고 있다. PMMA 팬텀 두께는 2 cm 이고, PMMA 팬텀 1 cm 깊이에 평행하게 1 cm와 0.5 cm 간격으로 유기 섬광체를 이용한 광섬유 방사선 센서들을 배열하였다.

그림 4는 1차원 광섬유 방사선 센서를 사용한 X-선 측정 실험 방법을 보여주고 있다. 1차원 광섬유 방사선 센서에서 발생하는 섬광빛을 실시간으로 측정하기 위해 포토다이오드-증폭 시스템을 제작하였다. 선형 가속기로부터 조사되는 X-선에 의해 PMMA 팬텀 1 cm 깊이에 위치한 유기 섬광체들에서 발생된 섬광빛은 각각

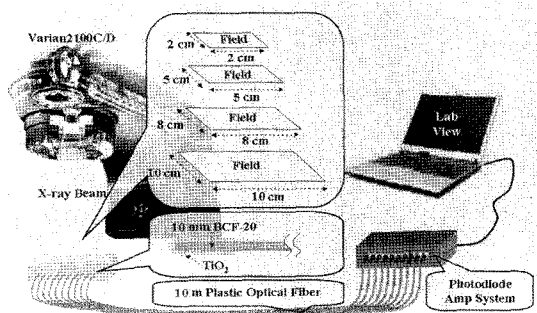


그림 4. 1차원 광섬유 방사선 센서 실험구성 및 방법
Fig. 4. Experimental setup for one-dimensional fiber-optic radiation sensor.

10 m의 플라스틱 광섬유를 거쳐 포토다이오드 배열에 전달된다. 포토다이오드에 전달된 섬광빛은 전기신호로 변환된 후 별도의 증폭장치에서 약 300배 증폭되어 전압의 형태로 컴퓨터에 표시 및 저장된다. PMMA 팬텀 안에 광섬유 방사선 센서를 0.5 cm의 간격으로 배열시킨 1차원 센서는 X-선의 조사야를 2×2 cm², 5×5 cm²로 변화시키면서, 1 cm 간격으로 배열시킨 센서는 X-선의 조사야를 8×8 cm², 10×10 cm²로 변화시키면서 각각의 광섬유 센서에서 발생하는 섬광량을 측정하였다.

3. 실험 결과

그림 5, 6은 센서부의 유기 섬광체가 BCF-10과 BCF-20일 때 에너지 6 MV, 15 MV에 대하여 조사야 별로 하나의 광섬유 센서에서 측정된 섬광량을 보여주고 있다. 유기 섬광체의 종류에 관계없이 조사야가 5×5 cm²에서 10×10 cm² 넓어짐에 따라 높은 출력값이 측정되었고, 에너지가 높아짐에 따라 5×5 cm²에서 출력값의 차이 보다 10×10 cm²에서 출력값의 차이가 크게 측정

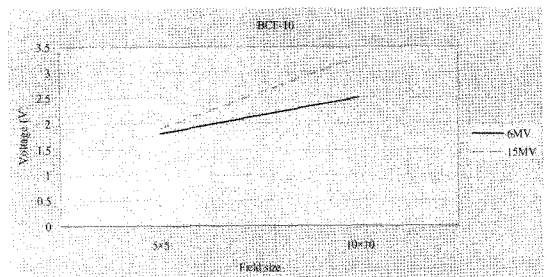


그림 5. BCF-10에서의 섬광량 측정
Fig. 5. Measurements of scintillating light with BCF-10.

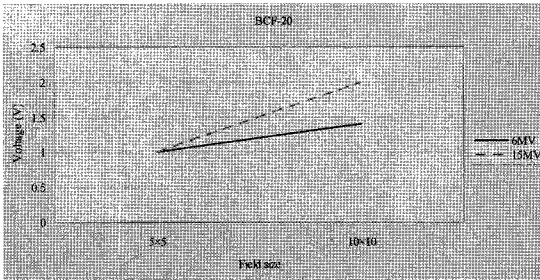


그림 6. $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 조사야에서의 섬광량 측정
Fig. 6. Measurements of scintillating light with $10 \times 10 \text{ cm}^2$ field size of X-ray.

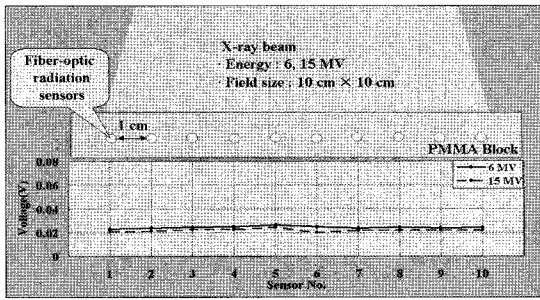


그림 7. 조사야가 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 일 때 1 cm 간격으로 배열된 1차원 광섬유 방사선 센서의 섬광량 측정
Fig. 7. Measurement of scintillating lights in one-dimensional fiber-optic radiation sensor whose gap is 1 cm for $10 \times 10 \text{ cm}^2$ field size of photon beam.

되었다. BCF-10의 출력값이 BCF-20의 출력값보다 전 영역에서 높게 측정 되었고 에너지가 증가할 때 같은 조사야에서 출력값의 변화가 크게 측정되었다.

그림 7은 6, 15 MV X-선을 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 의 조사야로 1차원 광섬유 방사선 센서에 조사하였을 때 발생하는 섬광량을 측정 한 것이다. 그림을 살펴보면, 각각의 센서에서는 위치와 상관없이 거의 일정한 섬광량이 측정 되었다. 이는 LINAC에서 발생하는 X-선의 분포가 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 의 조사야에서 거의 일정함을 나타낸다. 에너지에 따른 1차원 센서의 섬광량을 살펴보면 15 MV의 X-선에 대한 1차원 광섬유 방사선 센서의 섬광량은 6 MV일 때 보다 작은 값이 계속되었다. 이는 15 MV의 X-선이 물을 기준으로 약 3 cm 깊이에서 가장 많은 흡수율을 보이며 6 MV의 X-선은 약 1.5 cm 깊이에서 가장 많은 흡수율을 보이는데 기인한다. 그러므로 물과 비슷한 굴절률을 가지는 PMMA 팬텀의 1 cm 깊이에서는 6 MV의 흡수율이 15 MV의 흡수율 보다 큰 값을 가지게 되며 그에 따라 각 0차원 광섬유 센서는 15 MV 보다 6 MV에서 더 많은 섬광량을 발생시키게

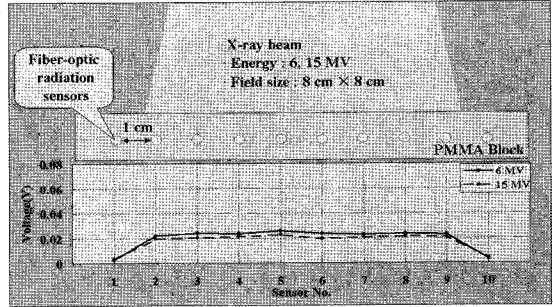


그림 8. 조사야가 $8 \times 8 \text{ cm}^2$ 일 때 1 cm 간격으로 배열된 1차원 광섬유 방사선 센서의 섬광량 측정
Fig. 8. Measurement of scintillating lights in one-dimensional fiber-optic radiation sensor whose gap is 1 cm for $8 \times 8 \text{ cm}^2$ field size of photon beam.

된다.

그림 8은 6, 15 MV의 X-선 에너지에 대해서 조사야만 $8 \times 8 \text{ cm}^2$ 로 변화시켜 측정 한 결과를 보여주고 있는데 이 역시 그림 7과 거의 비슷한 결과를 나타내고 있다. 그림 8에서 1번과 10번 광섬유 센서에서 신호가 계속되지 않은 이유는 각각의 0차원 센서가 조사야 밖에 위치해 X-선의 영향을 받지 않았기 때문이다. 이 결과는 본 연구에서 제작된 1차원 방사선 센서 공간 분해능이 1 cm 이하이고, 정확한 X-선 분포 측정이 가능함을 보여주고 있다.

그림 9와 10 또한 각 에너지에 대한 X-선 조사야의 1차원 분포를 보여주고 있다. 그림 9에서 각각의 광섬유 센서는 PMMA 팬텀 1 cm 깊이 안에 0.5 cm 간격으로 위치하고 X-선 조사야의 범위는 $5 \times 5 \text{ cm}^2$ 이다. 조사야 범위 내에서 각각의 광섬유 센서의 신호는 일정함을 알 수 있다. 그림 10은 조사야가 $2 \times 2 \text{ cm}^2$ 에서

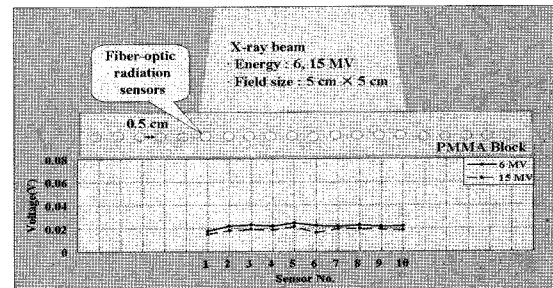


그림 9. 조사야가 $5 \times 5 \text{ cm}^2$ 일 때 0.5 cm 간격으로 배열된 1차원 광섬유 방사선 센서의 섬광량 측정
Fig. 9. Measurement of scintillating lights in one-dimensional fiber-optic radiation sensor whose gap is 0.5 cm for $5 \times 5 \text{ cm}^2$ field size of photon beam.

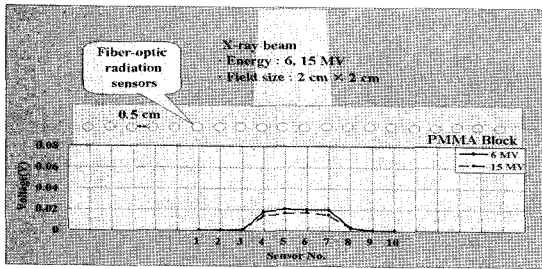


그림 10. 조사야가 2×2 cm² 일 때 0.5 cm 간격으로 배열된 1차원 광섬유 방사선 센서의 섬광량 측정

Fig. 10. Measurement of scintillating lights in one-dimensional fiber-optic radiation sensor whose gap is 0.5 cm for 2×2 cm² field size of photon beam.

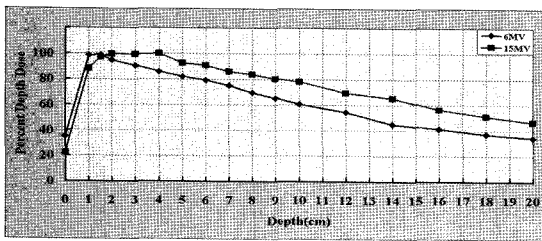


그림 11. 1차원광섬유 방사선 센서를 사용한 깊이 에 따른 선량 측정

Fig. 11. Measurement of percent depth doses using a one-dimensional fiber-optic radiation sensor.

광섬유 센서의 간격이 0.5 cm일 때 각 에너지에 대한 결과이다. 그림 9와 10으로써 1차원 광섬유 방사선 센서의 공간 분해능이 0.5 cm 이하로 판단된다.

X-선 에너지 6, 15 MV에서 1차원 광섬유 방사선 센서를 사용하여 깊이 에 따른 선량을 측정 한 결과는 그림 11에 보여주고 있다. PMMA 팬텀 안에서 6, 15 MV의 X-선과 최고 반응점은 약 1.5 cm와 3 cm로 물속에서 이온 전리함을 이용해 측정 한 결과와 같다.

4. 결 론

방사선 치료는 환부에 얼마나 정확한 양의 방사선이 조사되는지에 의해 성패여부가 결정되므로 치료 전 방사선 흡수선량을 미리 측정하게 된다. 최근 연구가 활발히 진행되고 있는 유기 섬광체를 이용한 플라스틱 신타레이터-광섬유 방사선 센서는 기존의 방사선 센서인 이온 전리함이나 필름 등에 비해 인체와 가장 유사한 성질을 가지고 있으며 고 분해능, 초소형, 초경량, 실시간 측정, 간단한 보정과정 등의 많은 장점을 가지

고 있다.

본 연구에서는 유기 섬광체를 사용하여 광섬유 방사선 센서를 제작하였고, 성능평가 후 각 센서들을 1차원으로 배열시켜 1차원 광섬유 방사선 센서를 제작하였다. 그리고 실험을 통하여 치료용 선형가속기로부터의 고 에너지 X-선 조사야에 따른 조사선량의 1차원 분포도와 팬텀의 깊이에 따른 1차원 흡수선량 분포도(PDD, Percent Depth Dose)를 측정하였다.

본 연구를 통하여 개발된 1차원 광섬유 방사선 센서는 센서간의 위치를 자유롭게 배치할 수 있으므로 기존에 행해졌던 연구들 보다 높은 공간분해능을 가지며 광섬유를 이용하여 유기 섬광체의 섬광빛을 계속기로 전달함으로써 장거리에서 신호의 계측이 가능하다. 그러므로 치료용 선형가속기의 조사야 크기에 따른 1차원 빔 분포도 및 PMMA 팬텀 안에서의 PDD를 보다 정확하고 안전하게 측정할 수 있는 장점을 가진다.

계속적인 연구를 통하여 실시간, 고 분해능의 1차원 광섬유 방사선 센서의 개발이 기대된다.

감사의 글

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

참고 문헌

- [1] 최종학, 임한영, 이준일, 강정호, 김성수, 홍시영, 김정삼, 이인자, 최성관, “의료방사선 생물학”, 신평출판사, pp. 19-20, 2004.
- [2] 강세식, 고인호, 권영호, 김영산, 김우영, 김유현, 김정만, 나수경, 박영환, 박진홍, 박홍득, 윤철호, 이송재, 이정옥, 이철수, 조정희, 지광수, 지연상, 최종운, 황용구, “방사선 치료학”, 도서출판 대학서림, pp. 339-340, 2001.
- [3] T. Aoyama, S. Koyama, M. Tsuzaka, and H. Maekoshi, “Depth-dose measuring device using a multichannel scintillating fiber array for electron beam therapy”, Nagoya University College of Medical Technology, Daikokminai, Higashi-ku, Nagoya 461, Japan, pp. 1235-1239, 1997.
- [4] A. S. Beddar, T. R. Mackie, and F. H. Attix, “Water-equivalent plastic scintillation detectors for high-energy beam dosimetry I”, *Phys. Med. Biol.*, vol. 37, no. 10, pp. 1883-1900, 1992.
- [5] A. S. Beddar, T. R. Mackie, and F. H. Attix, “Water-equivalent plastic scintillation detectors for high-

- energy beam dosimetry II”, *Phys. Med. Biol.*, vol. 37, no. 10, pp. 1901-1913, 1992.
- [6] B. M. Rogina and B. Vojnovic, “Application of optical fiber sensors for radiation dosimetry”, *Radiation Measurements*, vol. 26, no. 4, pp. 599-602, 1996.
- [7] E. Takada, A. Kimura, T. 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.
- [8] K. W. Jang, D. H. Cho, J. H. Jun, B. Lee, S. Kim, H. S. Cho, S. Y. Park, and D. Shin, “Measurements and characterizations of Cerenkov light in fiber-optic radiation sensor irradiated by high energy electron beam”, *J. of the Korean Sensors Society*, vol. 15, no. 3, pp. 186-191, 2006.
- [9] Y. M. Hwang, D. H. Cho, B. 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.

조 동 현

- [센서학회지 제14권 제4호] pp. 248 참조

장 경 원

- [센서학회지 제15권 제3호] pp. 190 참조

유 옥 재

- [센서학회지 제15권 제3호] pp. 184 참조

이 봉 수

- [센서학회지 제13권 제3호] pp. 213 참조

조 효 성

- [센서학회지 제14권 제4호] pp. 249 참조

김 신

- [센서학회지 제14권 제4호] pp. 249 참조