

무기 섬광체를 이용한 플라스틱 광섬유 방사선 센서부 제작 및 특성평가

황영묵 · 조동현 · 이봉수[†] · 조효성* · 김 신**

Fabrication and characterization of plastic fiber-optic radiation sensor tips using inorganic scintillator material

Young-Muk Hwang, Dong-Hyun Cho, Bong-Soo Lee[†], Hyo-Sung Cho*, and Sin Kim**

Abstract

In this study, radiation sensor tips are fabricated for remote sensing of X or gamma ray with inorganic scintillators and plastic optical fiber. The visible range of light from the inorganic scintillator that is generated by radiation source is guided by the plastic optical fiber and is measured by optical detector and power-meter. Two kinds of sensor tips are designed and fabricated such as film type and powder type. Many kinds of inorganic scintillators are used to fabricate both sensor tips, and the different wavelength of emitting lights from them are measured to determine the optimal inorganic scintillator which has maximum light output. As a radiation source X-ray generator and Ir-192 are selected to test a performance of sensor tip. It is expected that the fiber-optic radiation sensor is widely used in nuclear industry and medical applications due to its special characteristics such as good flexibility, easy in processing, long lengths and no interference to electro magnetic field.

Key Words : plastic optical fiber, radiation sensor, inorganic scintillator

1. 서 론

대상 물질과의 상호작용으로 대상체를 이온화시키는 능력을 지닌 전리 방사선(ionizing radiation)을 일반적으로 방사선(radiation)이라 말하는데, 그 중에서 생체와 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 같은 방사선을 이용한 치료 및 진단 과정에서 정상 조직이나 의료진에 대한 방사선 피폭을 최소화하는 것이 가장 중요하기 때문에 방사선

계측에 대한 정확성 및 신속성이 요구되고 있다. 방사선의 계측은 방사선 검출 원리에 따라 전기적 검출, 빛 방출을 이용한 검출, 화학 작용을 이용한 검출, 핵반응을 이용한 검출 등 여러 가지 방법이 있다^[3]. 그 중, 빛 방출을 이용한 방사선 검출은 다른 검출기에 비해서 분해 시간이 짧고 섬광체를 이용하기 때문에 여러 가지 방사선에 대한 측정 및 높은 계수율 측정이 가능하며 감마선의 에너지 분석이 가능하다는 특징을 지니고 있다^[3,4]. 그러나 기존의 섬광체를 이용한 방사선 계측기는 계측 정보의 전달 과정에서 전자기파 장애로부터 간섭을 받게 되며, 계측기의 큰 용적으로 인하여 공간적인 제약이 따르는 단점 등이 있다. 이를 보완하기 위해서 발광 스펙트럼이 다른 여러 종류의 무기 섬광체를 이용하여 필름과 분말 형태로 엑스 또는 감마선 측정용 플라스틱 광섬유 방사선 센서를 제작하였다. 무기 섬광체와 플라스틱 광섬유를 이용하여 제작한 방사선 센서의 성능을 평가하기 위해서 엑스선 발생 장치와 일반적으로 비파괴 검사장비에서 사용하는 Ir-192를 선원으로 사용하였고, 방사선에 의해 발생되는 무기 섬광체의 가시광영역의 섬광 빛은 플라스틱 광섬유, 광검출

건국대학교 의료생명대학 의학공학부(Department of Biomedical Engineering, School of Biomedical & Health Science Medicine, Konkuk University)

*연세대학교 보건과학대학 방사선학과(Department of Radiological Science, Yonsei University)

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

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

(Received : February 3, 2005, Accepted : May 6, 2005)

기 및 광파워미터를 이용하여 측정하였다.

무기 섬광체와 플라스틱 광섬유를 이용하여 제작한 엑스선 또는 감마선 원거리 측정용 방사선 센서는 빛 방출을 이용한 방사선 계측으로 기존의 방사선 센서보다 빠른 응답 시간을 지닐 것이며, 광섬유의 직경에 따라 다양한 형태의 방사선 측정 센서 제작이 가능하므로 기존의 섬광 계측기가 갖는 공간적인 제약을 해결할 수 있을 것으로 기대된다¹⁵⁻¹⁷. 또한, 광섬유를 이용한 원거리 계측 및 전기적인 신호에 대한 외부 교란이 없기 때문에 보다 정확하고 신속한 방사선 계측이 가능할 것으로 기대된다^{18, 19}.

2. 실험 방법

엑스 또는 감마선 측정용 플라스틱 광섬유 방사선 센서를 제작하기 위해서 사용된 무기 섬광체는 총 9가

표 1. 무기 섬광체 특성표

Table 1. Properties of inorganic scintillators

Inorganic scintillator	Emission [nm, Peak #]	Density [g/ml]	ptl.size [μm]
A Gd ₂ O ₂ S: Eu	626	7.5	9.4
B Gd ₂ O ₂ S: Pr	513	7.5	10.9
C Gd ₂ O ₂ S: Pr,Ce,F	513	7.5	10.9
D Gd ₂ O ₂ S:Tb	545	7.5	3.0
E La ₂ O ₂ S: Eu	624	5.7	2.1
F La ₂ O ₂ S: Tb	543	5.7	2.9
G CsI:Tl	White	4.5	.
H Y ₃ Al ₅ O ₁₂ : Ce	550	5.0	3.9
I CaWO ₄	420	6.1	4.0

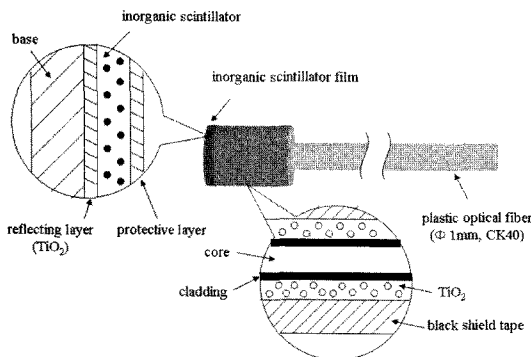


그림 1. 무기 섬광체를 이용한 필름 형태의 방사선 센서
Fig. 1. Schematic diagram of film type fiber-optic radiation sensor with inorganic scintillator.

지 종류로, 평균 입자의 크기가 5~25 μm이고 밀도는 4.5~7.5 g/ml이다. 실험에 사용된 9가지의 무기 섬광체에 대한 특성은 표 1과 같다.

필름 형태의 무기 섬광체를 이용한 플라스틱 광섬유 방사선 센서는 그림 1과 같이 지지층, 반사층, 무기 섬광체 그리고 보호층의 다층 구조로 이루어져 있다. 실험에 사용된 무기 섬광체 필름의 총 두께는 약 0.3 mm이며, 지지체는 PET(polyethylene terephthalate), 반사층은 TiO₂ 물질로 구성되어 있다.

필름 형태의 무기 섬광체는 3M 사의 광학용 에폭시 DP-610과 원통 형태의 플라스틱 커넥터를 이용하여 광섬유와 결합되어 있으며, 무기 섬광체로부터 발생된 섬광 빛의 계측 효율을 높이기 위해서 Bicron사의 반사 테이프, BC-642를 원통 형태의 플라스틱 커넥터에 균등한 두께로 도포시켰다. 그리고 커넥터의 바로 위층은 black shield 테이프를 사용하여 엑스선에 의해 발생된 섬광 빛에 대한 외부 가시광의 간섭을 최소화하였다¹⁰.

그림 2는 분말 형태로 제작한 방사선 센서에 대한 것으로, 필름 형태의 방사선 센서 제작에 사용된 9가지 종류의 무기 섬광체와 중심부에 원형의 구멍이 뚫린 원통 형태의 PMMA(Poly-Methyl Methacrylate) 커넥터를 사용하여 센서를 제작하였다^{11, 12}. 또한, 무기 섬광체에서 발생된 섬광 빛의 검출 효율을 높이기 위해서 TiO₂반사 테이프와 외부 빛에 대한 간섭을 최소화하기 위해 black shield 테이프를 사용하여 센서를 제작하였다.

무기 섬광체로부터 발생된 가시광영역의 섬광 빛을 광 계측기와 광 파워미터로 전달하기 위해 사용된 플라스틱 광섬유의(Mitsubishi Rayon Co., Ltd.) core는 PMMA 재질로 굴절률이 1.49, cladding은 1.402, 직경

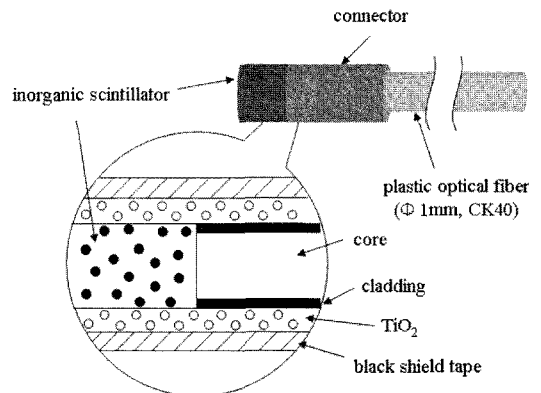


그림 2. 무기 섬광체를 이용한 분말 형태의 방사선 센서
Fig. 2. Schematic diagram of powder type fiber-optic radiation sensor with inorganic scintillator.

은 1.0 mm이며 개구수(NA, Numerical Aperture)는 0.504의 것을 사용하였다.

$$P_s > P_d \text{ 일 경우, } A_p = 10 \log_{10}(P_s/P_d) \quad (1)$$

where P_s : Measured optical power of short-length optical fiber [W]

P_d : Measured optical power of long-length optical fiber [W]

A_p : Attenuated optical power [dB]

원거리 측정용 방사선 센서 제작 시, 광섬유 길이에 대한 감쇄계수를 측정하기 위해서 Cut-back method를 이용하여 여러 가지 파장에 따른 광섬유의 감쇄계수를 측정하였다^[13]. 광섬유의 감쇄계수 측정 방법은 서로 다른 파장을 가지는 광원(Industrial Fiber Optics, Inc.)에 대해서 1m와 20m의 플라스틱 광섬유의 전달광량을 광파워미터(Newport, Inc.)를 이용하여 측정 한 후, 식(1)을 이용하여 나타내었다. 표 2는 발광 스펙트럼이 다른 4가지 LED 광원에 대해서 측정 한 광섬유의 감쇄 계수를 나타내고 있다.

무기 섬광체를 이용하여 제작한 플라스틱 광섬유 방사선 센서의 성능 평가를 위해서 60 KVp의 진단용 엑스선 발생 장치와 평균 에너지가 380 KeV인 Ir-192를 사용하였다. 방사선에 의해 발생된 가시광 영역의 섬광 빛은 광 검출기(818-UV, Newport, Inc.)와 파워미터(2832-C, Newport, Inc.)를 이용하여 그 광량을 측정하였다. 광 검출기는 ±2% 이내의 계측오차를 가지고 있고, 광 검출 파장범위는 400 - 1100 nm이다. 또한 파워

표 2. 여러 광원에 대한 광섬유의 감쇄 계수
Table 2. Measured attenuation coefficients of plastic optical fiber for various kinds of light sources

Wavelength	Power[mW]		Attenuation	
	1 m	20 m	dB/m	dB/km
430 nm	0.342	0.172	0.157	157
530 nm	37.5	24.3	0.099	99
670 nm	388	153	0.212	212
870 nm	188	0.121	1.679	1679

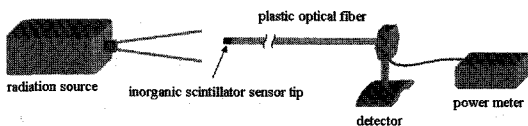


그림 3. 실험 장치 구성도
Fig. 3. Experimental setup.

메타는 100 fW-2 W까지 계측가능하고 계측 광의 파장 범위는 190 - 1800 nm까지 가능하다. 그림 3은 엑스선 또는 감마선 발생 장치를 이용한 방사선 센서의 섬광량 측정 실험 구성도를 나타내고 있다.

3. 실험 결과

3.1. 필름 형태의 방사선 측정 센서

그림 4는 필름 형태로 제작한 방사선 측정 센서의 성능 평가에 대한 것으로, 서로 다른 길이의 플라스틱 광섬유와 60 KVp의 진단용 엑스선 발생 장치를 이용하여 무기 섬광체의 섬광량을 optical power로 나타내었다. 실험 결과, CsI:Tl 무기 섬광체를 이용하였을 때 최대 광량, La₂O₂S:Eu, Y₃Al₅O₁₂:Ce와 CaWO₄ 무기 섬광체를 이용하였을 때 상대적으로 적은 양의 섬광량이 획득됨을 알 수 있다.

그림 5는 25.1 Ci의 Ir-192와 10m의 플라스틱 광섬유를 이용한 필름 형태의 방사선 측정 센서 성능 평가에 대한 것으로, 진단용 엑스선 발생 장치를 이용한 그림 4의 실험 결과와 유사한 분포로 섬광량이 획득됨을 알 수 있다.

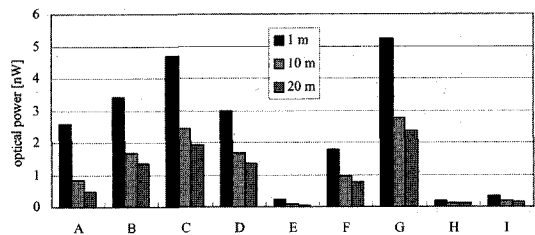


그림 4. 엑스선을 이용한 필름 형태의 방사선 센서 성능 평가

Fig. 4. Evaluation of performance on the film type radiation sensor with various kinds of inorganic scintillators when X-ray is used as a radiation source.

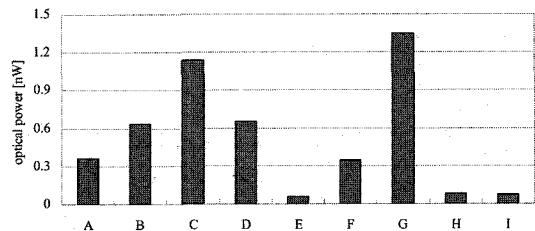


그림 5. Ir-192를 이용한 필름 형태의 방사선 측정 센서 성능 평가
Fig. 5. Evaluation of performance on the film type radiation sensor with various kinds of inorganic scintillators when Ir-192 is used as a radiation source.

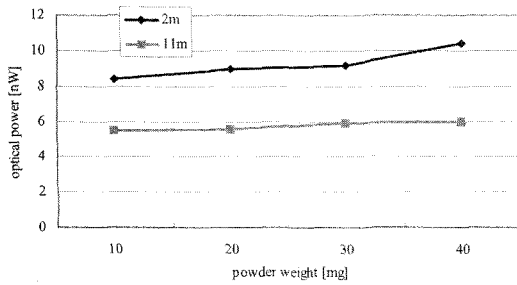


그림 6. 무기 섬광체의 질량에 대한 섬광량
Fig. 6. Measurements of optical power using powder type sensor with different amount of inorganic scintillator.

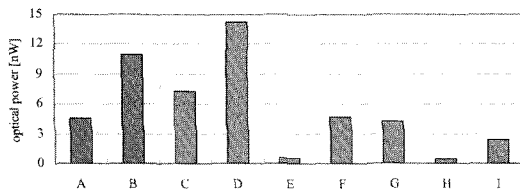


그림 7. Ir-192를 이용한 분말 형태의 방사선 센서 성능 평가
Fig. 7. Evaluation of performance on the powder type radiation sensor with various kinds of inorganic scintillators when Ir-192 is used as a radiation source

3.2. 분말 형태의 방사선 측정 센서

그림 6은 $Gd_2O_3:S:Tb$ 와 60 KVp의 엑스선 발생 장치를 이용하여 분말 형태로 제작한 방사선 센서의 최대 전달 섬광량을 획득하기 위한 최적의 섬광체량 결정에 대한 것이다. 실험 결과, 광섬유의 길이에 따른 최대 전달 섬광량은 섬광체의 질량에 상관없이 거의 동일하게 획득됨을 알 수 있다.

그림 7은 무기 섬광체의 질량이 20 mg일 때, 10.5 Ci의 Ir-192에 대한 분말 형태의 방사선 측정 센서 성능 평가에 대한 것으로, $Gd_2O_3:S:Tb$ 무기 섬광체를 이용한 센서에서 최대 광량이, $La_2O_3:S:Eu$ 및 $Y_3Al_5O_{12}:Ce, CaWO_4$ 무기 섬광체에서 비교적 적은 양의 광량이 획득됨을 알 수 있다.

그림 8은 무기 섬광체의 부피가 10~11 mm³일 때, 60 KVp의 엑스선 발생 장치에 대한 분말 형태의 방사선 센서 성능 평가에 대한 것으로, $Gd_2O_3:S:Tb, La_2O_3:S:Tb$ 및 $CsI:Tl$ 무기 섬광체에서 비교적 큰 광량이 획득됨을 알 수 있다.

4. 결론 및 고찰

다양한 특성을 갖는 무기 섬광체들을 이용하여 필름

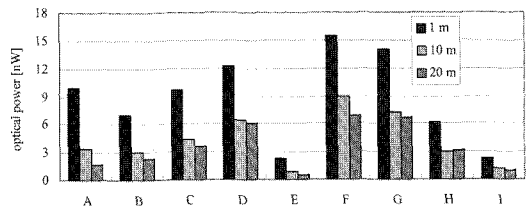


그림 8. 엑스선을 이용한 분말 형태의 방사선 센서 성능 평가

Fig. 8. Evaluation of performance on the powder type radiation sensor with various kinds of inorganic scintillators when X-ray is used as a radiation source.

과 분말 형태의 엑스 또는 감마선 원거리 측정용 플라스틱 광섬유 방사선 센서를 제작하였고, 진단용 엑스선 발생 장치와 Ir-192에 대한 방사선 센서의 전달 섬광량을 플라스틱 광섬유, 광 검출기 및 광 파워미터로 측정하여 감도가 우수한 무기 섬광체를 선택할 수 있었다. 필름형태 광섬유 센서의 경우, 무기 섬광체 $CsI:Tl$ 이 엑스선(60 KVp)과 감마선(Ir-192)에 대해서 섬광빛 발생효율이 가장 높게 나타났다. 분말형태 광섬유 센서의 경우는 엑스선(60 KVp)에 대해서 $La_2O_3:S:Tb$ 가 감마선(Ir-192)에 대해서는 $Gd_2O_3:S:Tb$ 의 섬광빛 발생효율이 높게 나타났는데, 이 결과를 바탕으로 방사선에 민감한 센서물질을 결정할 수 있었다.

본 연구 결과, 무기 섬광체를 이용한 엑스 또는 감마선 원거리 측정용 플라스틱 광섬유 방사선 센서는 기존의 방사선 센서보다 고분해능, 고감도, 초소형 및 초경량의 특성을 지니고 있어서 보다 저렴한 비용으로 제작이 가능할 것으로 기대된다. 앞으로 더 수행해야 할 연구 방향은 방사선 계측 효율 증대를 위한 센서 개발에 대한 것으로, 그 구조 및 구성 물질에 대한 연구를 계속 진행할 것이고, 개발한 센서의 성능 평가를 위해서 여러 가지 에너지 범위를 갖는 감마선원에 대한 섬광량 측정 및 다양한 길이의 광섬유에 대한 원거리 계측 실험도 병행할 것이다. 또한 계측 섬광량의 신호/잡음 비율(S/N ratio)이 높은 시스템 구축을 위해서 광 검출기 및 광 파워미터 이외에 광증배관(PM tube)이나 광다이오드를 이용한 실험도 수행해 나갈 것이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력기초공동연구소사업(BAERI)의 지원에 의하여 이루어진 것임(M203760 30002-04B0505-00210).

참고 문헌

- [1] 최중학, 임한영, 이준일, 강정호, 김성수, 홍시영, 김정삼, 이인자, 최성관, “의료방사선 생물학”, 신광출판사, pp. 19-20, 2004.
- [2] 강세식 외 19명, “방사선 치료학”, 도서출판 대학서림, pp. 339-340, 2001.
- [3] 고성진, 김승국, 노경석, 박명환, 안봉선, “방사선 계측학”, 청구문화사, pp. 13-14, 2001.
- [4] C. M. Meger wells, T. R. Mackie, M. B. Podgorsak, M. A. Holmes, N. Papanikolaou, P. J. Reckwerdt, J. Cygler, D. W. O. Rogers, A. F. Bielajew, D. G. Schmint, and J. K. Muehlenkamp, “Measurements of the electron dose distribution near inhomogeneities using a plastic scintillation detector”, *Elsevier Sci. Ltd.* vol. 29, p. 1157, 1994.
- [5] T. Aoyama, S. Koyama, and H. Maekoshi, “A scintillator-optical fiber detector with photodiode readout for dosimetry in small irradiation fields”, *VI International Conference on Med. Phys.*, pp. 117-122, 1999.
- [6] D. Flühs, M. Heintz, F. Indenkampen, and C. Wiczorek, “Direct reading measurement of absorbed dose with plastic scintillators-the general concept and applications to ophthalmic plaque dosimetry”, *Med. Phys.*, vol. 23, no. 3, pp. 427-430, 1996.
- [7] A. S. Beddar, T. R. Mackie, and F. H. Attix, “Water-equivalent plastic scintillation detectors for high-energy beam dosimetry: I. Physical characteristics and theoretical considerations”, *Phys. Med. Biol.*, vol. 37, no. 10, pp. 1883-1900, 1992.
- [8] A. S. Beddar, T. R. Mackie, and F. H. Attix, “Water-equivalent plastic scintillation detectors for high-energy beam dosimetry: II. Properties and measurements”, *Phys. Med. Biol.*, vol. 37, no. 10, pp. 1901-1913, 1992.
- [9] M. H. Sun, K. A. Wickersheim, and J. Kim, “Fiberoptic temperature sensors in the medical setting”, *Optical Fibers in Medicine IV*, Proc. SPIE 1067, pp. 15-21, 1989.
- [10] C. Mori, T. R. Mackie, M. B. Podgorsak, M. A. Holmes, N. Papanikolaou, P. J. Reckwerdt, J. Cygler, D. W. O. Rogers, A. F. Bielajew, D. G. Schmint, and J. K. Muehlenkamp, “Measurement of neutron and g-ray intensity distributions with an optical fiber-scintillator detector”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, A 422, pp. 129-132, 1999.
- [11] C. Mori, K. Kageyama, Y. Mito, Y. Takenaka, A. Uritani, K. Yanagida, H. Miyahara, and Y. Wu, “Measurement of in-core γ -ray flux distributions by using optical fiber with scintillator”, *Proc. of the 9th International Symposium on Reactor Dosimetry*, pp. 154-158, 1996.
- [12] T. Aoyama, S. Koyama, M. Rszaka, and H. Maekoshi, “A depth-dose measuring device using a multichannel scintillating fiber array for electron beam therapy”, *Med. Phys.*, vol. 24, no. 8, pp. 1235-1239, 1997.
- [13] A. Kimura, E. Takada, Y. Hosono, M. Nakazawa, H. Rakahashi, and H. Hayami, “New techniques to apply optical fiber image guide to nuclear facilities”, *Journal of Nuclear Sci. and Tech.*, vol. 39, no. 6, pp. 603-607, 2002.

황 영 목

- 2003년 건국대학교 의공학부(공학사)
- 2005년 건국대학교 대학원 의공학과(공학석사)

조 동 현

- 1977년 6월 16일생
- 2002년 건국대학교 의공학과(공학사)
- 2004년 건국대학교 대학원 의공학과(공학석사)
- 현 건국대학교 대학원 의공학과 박사과정
- 주관심 분야 : 의광학, 의료영상, 의료방사선공학

이 봉 수

- [센서학회지 제13권, 제3호] pp. 213 참조

조 효 성

- 1986년 서울대학교 원자핵공학과(공학사)
- 1988년 서울대학교 원자핵공학과(공학석사)
- 1997년 UC Berkeley, Department of Nuclear Engineering(공학박사)
- 현재 연세대학교 보건과학대학 방사선학과 부교수
- 방사선영상, 방사선계측

김 신

- 1986년 서울대학교 원자핵공학과(공학사)
- 1988년 서울대학교 원자핵공학과(공학석사)
- 1995년 서울대학교 원자핵공학과(공학박사)
- 현재 제주대학교 에너지공학과 부교수
- 주관심 분야 : 이상유동, 방사선