J. of the Korean Sensors Society
Vol. 17, No. 2 (2008) pp. 100 – 105

섬광검출을 위한 플라스틱광섬유에서의 체렌코프 빛 측정 및 제거

조동현 · 장경원 · 유욱재 · 신상훈 · 이봉수 · 박병기*,† · 조효성** · 김신***

Measurement and removal of a cerenkov light in a plastic optical fiber to detect a scintillating light

Dong Hyun Cho, Kyoung Won Jang, Wook Jae Yoo, Sang Hun Shin, Bongsoo Lee, Byung Gi Park*,†, Hyosung Cho, and Sin Kim*****

Abstract

The objectives of this study are to measure and to remove Cerenkov lights generated in a fiber-optic radiation sensor by a charge-coupled device. we have fabricated a fiber-optic radiation sensor which comprises an organic scintillator, a plastic optical fiber and a charge-coupled device. Charge-coupled device as a light measuring tool has many advantages which are easy in multi-dimensional measurements, high spatial resolution and relatively low cost.

Key Words : Cerenkov light, fiber-optic sensor, scintillator, electron beam

1. 서 론

일반적으로 광섬유를 사용한 센서의 가장 큰 장점은 전자기장의 간섭을 받지 않고 장거리 전송이 가능하다는 것이다[1]. 특히, 치료용 고에너지 방사선 계측에 사용되고 있는 방사선 계측용 광섬유 센서는 주로 유기섬광체(organic scintillator)와 광섬유의 접합으로 제작되며, 기존 방사선 계측 장비들에 비해 높은 공간분해능, 유기섬광체의 물과 등가(water equivalence)인 성질로 인한 광신호의 선량 변환 시 무(無)보정 등 많은 장점을 가지고 있다[2].

그러나 방사선 계측용 광섬유 센서를 이용한 전자선 측정 시, 광섬유와 전자선의 직접적인 작용으로 인해 발생되는 체렌코프 빛(Cerenkov light)은 섬광체에서의 광신호 측정에 있어 방해요소로 작용하게 된다. 체렌코프 빛은 하전입자가 투명한 매질 내에서 빛보다 빠른 속도로 투과할 때 발생되며 입사선에 대해 일정한 각도를 가지는 원추형의 빛으로 방출된다[3]. 이는 입자가 통과하는 매질 안에서의 편극현상을 근원으로 하여 전자기파가 복사될 때, 하전입자의 속도가 매질 안의 광속보다 클 경우에 전자기파가 멀리까지 전파되는 현상으로 설명된다.

전자선에 의해 발생된 체렌코프 빛은 광섬유를 통해 포토다이오드(photodiode), 광파워미터(power meter), 그리고 광증배관(photomultiplier tube) 등과 같은 광계측장비로 전달되며 특히, 가시광선 영역에서의 체렌코프 빛이 갖는 파장의 최대값은 약 400~480 nm로 섬광체에서 발생되는 광신호와 유사한 파장으로 방출됨으로써 섬광체 자체 신호의 계측에 어려움을 준다. 또한, 입사선의 조사각도와 광섬유를 통해 계측장비로 전달되는 체렌코프 빛의 세기는 밀접한 관계를 가지고 있는데, 이는 광섬유의 임계각(critical angle)과 체렌코프 빛의 방출각도에 의한 것으로 조사선의 입사각도와 체렌코프 빛의 방출각도가 같을 때 최대 값을 갖게 된다[4,5].

본 연구 이전에 시행된 실험은 포토다이오드, 광증배관을 이용해 체렌코프를 측정하였으나 2차원 이상의

건국대학교 의료생명대학 의학공학부, 의공학실용기술 연구소(School of Biomedical Engineering, Research Institute of Biomedical Engineering, College of Biomedical & Health Science, Konkuk University)
*순천향대학교 에너지환경공학과(Department of Energy & Environmental Engineering, Soonchunhyang University)
**연세대학교 보건대학 방사선학과(Department of Radiation Science, Institute of Health Science, Yonsei University)
***제주대학교 에너지공학과(Department of Nuclear & Energy Engineering, Applied Radiological Science Research Institute, Cheju National University)

†Corresponding author: byunggi@sch.ac.kr
(Received : January 4, 2008, Accepted : February 21, 2008)

장치 구성 시 포토다이오드의 경우 각 포토다이오드와 증폭장치의 오차 보정의 어려움, 광증배관의 경우 높은 비용의 문제점이 있다.

본 연구에서는 치료용 고에너지 전자선에 대한 방사선 계측용 광섬유 센서에서의 체렌코프 빛의 영향을 알아보기 위해 치료용 선형가속기의 20 cm×20 cm 조사야(field size)를 갖는 6, 12 MeV 에너지의 전자선을 이용하여 전자선의 조사각도에 대한 방사선 계측용 광섬유 센서의 체렌코프 빛을 측정, 분석 및 제거하였다. 계측장비로는 높은 공간분해능, 비교적 낮은 비용, 측정의 편리성 등의 장점을 가진 전하결합소자(charge-coupled device)를 이용하였고, 체렌코프 빛을 측정, 제거하기 위해 유기섬광체를 포함하지 않는 일반 광섬유(background optical fiber)와 유기섬광체를 포함하는 광섬유 센서를 동시에 사용하여 감법(subtraction method)을 적용하였다[6].

2. 배경이론

상대성이론에 의하면 물체의 질량은 모든 관측자에 동일하지 않고 각 관측자들에 대한 물체의 속도에 의존한다. 속도에 의한 질량변화는 로렌츠 변화(Lorentz transformation)에 의해 다음 식 1과 같다.

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \tag{1}$$

여기서 m은 상대운동을 하는 물체의 질량(상대론적 질량), m_0는 정지상태에서의 물체의 질량(정지질량), v는 운동을 하는 물체의 속도, c는 자유공간에서 빛의 속도이며, 위 식에 따르면 관측자에 대한 물체의 속도에는 상한이 있음을 알 수 있다. 모든 매질 내에서의 광속도는 결코 자유공간에서의 광속도보다 빠를 수는 없지만 소립자 중에는 물질 내에서의 속도가 그 물질 내에서의 광속도보다 더 빨리 운동할 수 있다. 이와 같은 고속의 하전입자가 물, 유리, 플라스틱 등과 같은 투명한 매질 내를 통과할 때는 그림 1과 같은 원추형의 체렌코프 빛을 방출한다. 광섬유로 입사되는 전자선의 입사각도와 체렌코프 빛의 방출각도가 같아지면 체렌코프 빛은 광섬유로 평행하게 진행되며 그에 따라 계측기에서 가장 많은 섬광량이 검출된다[7].

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 대

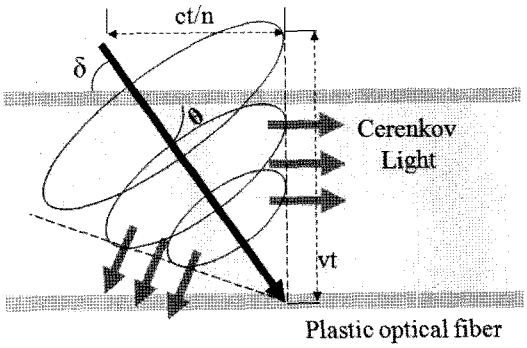

그림 1. 입사선에 대한 체렌코프 빛의 진행방향
Fig. 1. Directions of Cerenkov light according to incident electron beams.

한 체렌코프 빛의 방출각도(θ)는 다음 식 2에 의해서 결정된다[8].

$$\cos\theta = \frac{ct/n}{vt} = \frac{c}{nv} \tag{2}$$

여기서, c는 빛의 속도를 나타내며 n은 물질의 굴절률, v는 입사입자의 속도를 나타낸다. 위 식에서 입사입자의 속도(v)는 다음 식 3, 특수 상대성 이론을 이용하여 구할 수 있다.

$$v = c\sqrt{1-\frac{1}{\left(\frac{E(MeV)}{0.511(MeV)}+1\right)^2}} \tag{3}$$

위 식들을 이용하여 PMMA (poly methyl methacrylate)를 코어물질로 사용하는 광섬유에서 발생되는 체렌코프 광량이 최대가 될 때의 방출각도를 계산하면 6 MeV 전자선에 대해서 약 47.7°, 12 MeV에 대해서 약 47.9°의 값을 얻을 수 있다.

3. 실험 방법

본 연구에 사용된 광섬유(CK-40, Mitsubishi Inc.)는 계단형 굴절률(step index)을 갖는 직경 1 mm, 클래딩(cladding)의 두께가 0.02 mm인 멀티모드 플라스틱 광섬유이다. 광섬유의 코어(core) 부분은 PMMA 재질로 그 굴절률은 1.49이고, 클래딩 부분은 플러로폴리머(fluoropolymer)로 굴절률은 1.402이며, 광섬유의 개구수(numerical aperture)는 식 4와 같다.

$$NA = \sqrt{n_{core}^2 - n_{cladding}^2} = \sqrt{1.49^2 - 1.402^2} = 0.504 \tag{4}$$

여기서 n_{core}와 $n_{cladding}$은 각각 코어와 클래딩의 굴절률

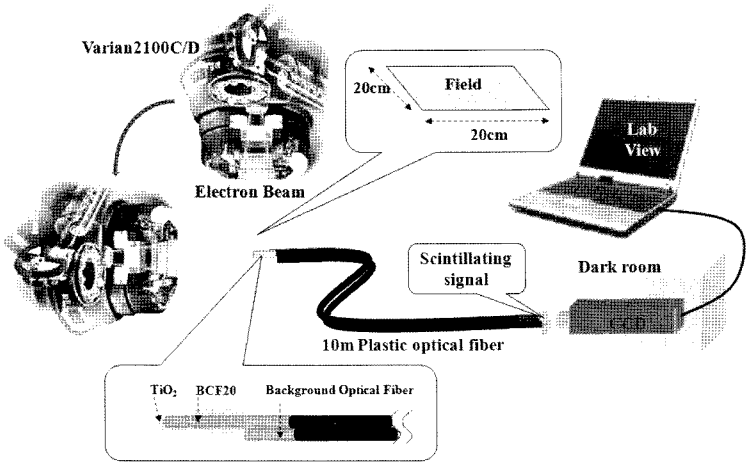

그림 2. 실험구성 및 방법
Fig. 2. Experimental setup.

을 나타낸다. 실험에 사용된 섬광체는 지름이 1 mm, 길이는 10 mm인 유기 섬광체(BCF-20, Bicron)를 사용하였다.

섬광체 센서부에서 발생된 광신호와 체렌코프 빛은 전하결합소자를 사용하여 계측하였고, 전자선원으로는 의료용 선형가속기(Clinac 2100CD, Varian)에서 발생되는 6, 12 MeV 에너지의 전자선을 사용하였다.

그림 2는 연구에 사용된 실험장치의 구성도를 보여주고 있다. 실험에 사용된 방사선 계측용 광섬유 센서는 유기 섬광체(BCF20)와 플라스틱 광섬유의 양면을 전용 절단기로 절단, 폴리싱 한 후, 광학 에폭시(DP 100 plus, 3M)로 부착하여 제작하였고, 섬광체 센서부에서 발생되는 빛이 외부로 손실되는 것을 막기 위해 섬광체 주위에 반사페인트(TiO_2)를 도포하여 주었다.

그림 2에서와 같이 방사선 계측용 광섬유 센서에서 발생되는 빛과 일반 광섬유(background optical fiber)에서 발생되는 체렌코프 빛을 동시에 측정하기 위해, 섬광체 센서부를 포함하는 광섬유 센서와 일반 광섬유를 나란히 놓고 섬광체의 중앙을 중심으로 전자선을 조사하였다. 조사야는 20 cm×20 cm로 고정시키고, 조사각도에 의해 광섬유 자체에서 발생되어 전달되는 체렌코프 빛의 광량을 알아보기 위해 조사각도를 0°~90°로 변화시켰다. 그리고 에너지 변화에 따른 체렌코프 광량을 측정하기 위해 6, 12 MeV의 전자선을 실험에 사용하였으며, 실험자의 안전을 위해 10 m의 광섬유를 이용하여 방사선치료실 외부에서 섬광빛을 측정하였다.

3. 실험결과

그림 3은 그림 2의 각 에너지에서 실험장치를 통해 전하결합소자로 측정한 영상들을 보여준다. 선형가속기에서 발생되는 전자선의 에너지는 각각 6, 12 MeV이고 조사야는 20 cm×20 cm로 고정하였다. 조사각도는 0°~40°, 60°~90° 범위에서는 10°씩, 40°~60° 범위에서는 5°씩 변화시키며 일반 광섬유와 섬광체 센서부를 포함하는 광섬유 센서에 조사하여 각각의 광섬유 끝단의 단면영상을 전하결합소자를 이용하여 촬영하였다. 0°~40°, 60°~90° 보다 40°~60°에서 각도

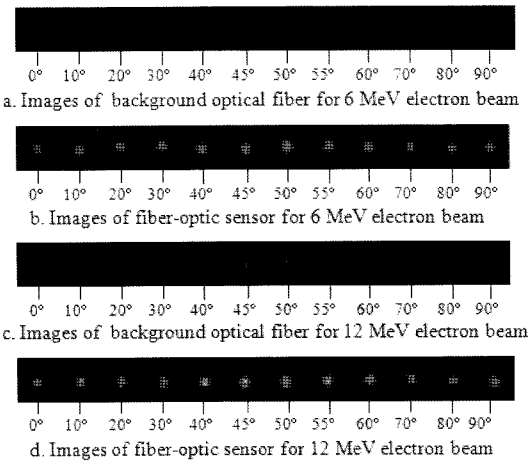

그림 3. 전하결합소자를 이용하여 획득한 광섬유 센서부와 일반 광섬유 끝단의 영상
Fig. 3. Obtained proximal end images of fiber-optic sensor and background optical fiber using a CCD.

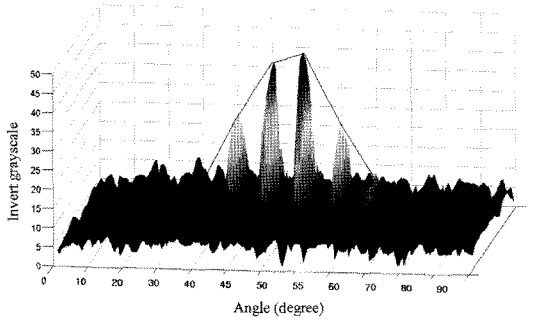

그림 4. 6 MeV 전자선의 조사각도에 따른 전하결합소자를 이용한 방사선 계측용 광섬유 센서의 섬광량 측정

Fig. 4. Measurements of scintillating lights with different incident angles of 6 MeV electron beam using a CCD.

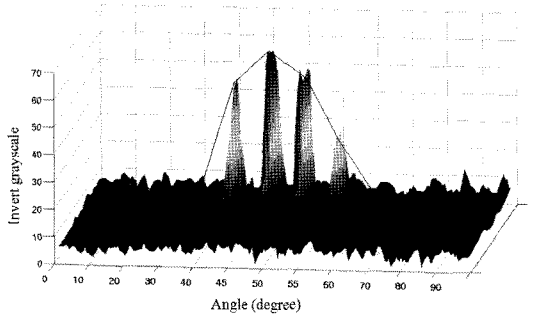

그림 5. 12 MeV 전자선의 조사각도에 따른 전하결합소자를 이용한 방사선 계측용 광섬유 센서의 섬광량 측정

Fig. 5. Measurements of scintillating lights with different incident angles of 12 MeV electron beam using a CCD.

를 작게 움직이며 측정한 이유는 40 °~60 °에서 체렌코프 빛의 변화 폭이 크기 때문이다[8-12].

6 MeV 전자선을 각도에 따라 일반 광섬유에 조사하였을 때 40 °~60 °에서 다른 각도 보다 많은 체렌코프 빛이 검출되었고, 섬광체 센서부를 포함하는 광섬유 센서는 모든 각도에서 섬광빛이 검출되었다. 12 MeV 전자선을 조사하였을 경우에는 6 MeV 전자선을 조사하였을 때보다 강한 체렌코프 빛과 섬광빛이 검출되었다.

그림 4, 5는 그림 3에서 6, 12 MeV 전자선을 일반 광섬유에 조사하였을 때 획득한 영상을 가지고 영상처리 프로그램(Scion Image)을 이용하여 각각의 광량을 측정한 결과를 보여주고 있다. x축은 전자선의 조사각도이고 y축은 역 그레이 스케일(invert gray scale)로 광섬유 센서 끝단에서의 측정된 광량을 나타낸다. 6 MeV 전자선을 조사하였을 때 그림 3과 같이 40 °~

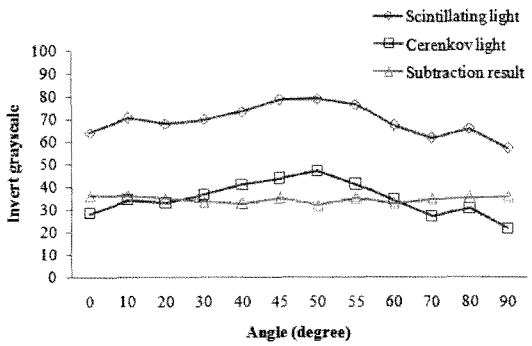

그림 6. 6 MeV 전자선에 대한 방사선 계측용 광섬유 센서에서 발생되는 순수 섬광량 측정을 위한 감법의 결과

Fig. 6. Measurements of real scintillating light signals using a subtraction method for 6 MeV electron beam.

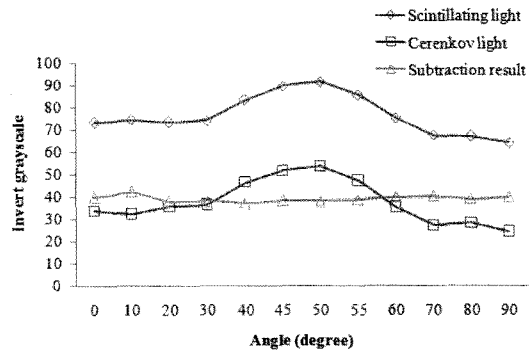

그림 7. 12 MeV 전자선에 대한 방사선 계측용 광섬유 센서에서 발생되는 순수 섬광량 측정을 위한 감법의 결과

Fig. 7. Measurements of real scintillating light signals using a subtraction method for 12 MeV electron beam.

60 °까지 5 ° 간격으로 체렌코프 빛이 측정되었으며 광섬유 자체에서 발생되는 체렌코프 방사선의 최대 방출각도는 이론값과 거의 일치하는 50 °에서 최대값이 측정되었다. 12 MeV 전자선을 조사하였을 경우는 체렌코프 빛이 측정되는 40 °~60 °에서 6 MeV 전자선을 조사하였을 때 보다 더 많은 체렌코프 빛이 측정되었다.

그림 6, 7은 유기 섬광체 센서부를 포함하는 광섬유 센서의 섬광빛과 체렌코프 빛이 합쳐진 광량, 일반 광섬유에서 발생되는 체렌코프 빛의 광량 측정 결과와 감법을 이용하여 유기 섬광체 센서부에서만 발생되는 섬광빛을 보여주고 있다. 유기 섬광체 센서부를 포함하는 광섬유 센서에서 발생되는 광량과 일반 광섬유에서 발생되는 체렌코프 빛의 광량 모두 50 ° 부근에서 최대

값이 측정되었다. 그림에서 중앙의 값이 일정한 선은 방사선 계측용 광섬유 센서에서 발생되는 섬광빛과 체렌코프 빛에서 일반 광섬유에서 발생하는 체렌코프 빛을 감한 결과로 방사선 계측용 광섬유 센서에서 체렌코프 빛이 완전히 제거되었음을 알 수 있다. 섬광체에서 발생되는 광 신호는 동일한 전자선 에너지 및 조사야에 대해서 조사각도의 변화와는 무관하게 거의 동일한 값으로 계측되었다. 전하결합소자를 사용한 감법의 결과는 체렌코프 빛을 제거함에 있어 2개의 계측 시스템을 사용하여 증폭률에 따른 오차가 존재하지 않고 광 필터를 이용하였을 시 필터에 의한 섬광빛 자체의 감쇄도 없음을 알 수 있다.

5. 결 론

방사선 계측용 광섬유 센서는 고 분해능, 유연성 및 전자기장의 간섭을 받지 않는 등 많은 장점 들을 가지고 있으므로 치료용 방사선 즉, X선 및 전자선의 계측과 교정용으로 개발 가능하다. 그러나 고 에너지 전자선 계측 시 광섬유에서 발생되는 체렌코프 빛은 섬광체 자체에서 발생되는 광신호의 검출에 방해 요소로 존재하게 된다.

본 연구에서는 유기 섬광체와 플라스틱 광섬유를 이용하여 방사선 계측용 광섬유 센서를 제작하고, 전하결합소자를 사용하여 광섬유 센서 끝단의 영상을 획득한 후 발생광량을 측정하였다. 또한 섬광체를 포함하는 광섬유 센서 이외에 일반 광섬유를 사용하여, 광섬유에서 발생되는 섬광량으로부터 체렌코프 빛의 광량을 감법으로 분리, 제거하였다. 또한 체렌코프 빛과 전자선의 조사각도 사이의 관계를 분석한 결과, 광섬유에서 발생되는 체렌코프 빛은 각도에 의해 많은 영향을 받는다는 사실을 확인하였다. 본 연구를 통하여 개발 가능한 방사선 계측용 광섬유 센서는 치료용 고 에너지 전자선을 보다 정확하고, 효율적이며 경제적으로 측정하는데 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

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

참고 문헌

[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] 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.

[3] 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.

[4] S. F. de Boer, A. S. Bedder, and J. A. Rawlison, "Optical filtering and spectral measurements of radiation-induced light in plastic scintillation dosimetry", *Phys. Med. Biol*, vol. 33, pp. 945-958, 1993.

[5] A. S. Beddar, "Plastic scintillation dosimetry and its application to radiotherapy", *Radiation Measurements*, vol. 41, no. s124-s133, 2007.

[6] A. M. Chugg, R. Jones, P. jones, and P. Nieeminen, "A CCD miniature radiation monitor", *Nuclear sci.*, vol. 49, no. 3, pp. 1327-1332, 2002.

[7] 신귀순, 방사선물리학, 신광출판사, pp.195-197, 2005.

[8] Knoll, G. F. Knoll, *Radiation detection and measurement - 3rd ed.*, John Wiley & Sons, New York, pp. 711-713, 1999.

[9] B. S. Lee, D. H. Cho, K.W. Jang, S-C Chung, J-W Lee, S. Kim, and H. S. Cho, "Measurements and characterization of cerenkov light in fiber-optic radiation sensor irradiated by high-energy electron beam", *Japanese J. Applied Physics*, vol. 45, No. 10A, pp. 7980-7982, 2006.

[10] 장경원, 조동현, 정순철, 전재훈, 이봉수, 김신, 조효성, 박성용, 신동호, "고에너지 전자선 측정을 위한 광섬유 방사선 센서에서의 체렌코프 빛 측정 및 분석", 센서학회지, 제15권, 제3호, pp. 186-191, 2006.

[11] 장경원, 이봉수, 조동현, 김형식, 이정한, 이정환, 김신, 조효성, "광학 필터를 이용한 광섬유 방사선 센서의 체렌코프 빛 제거", 한국광학회지, 제17권, 제4호, pp. 312-315, 2006.

[12] 장경원, 조동현, 유욱재, 이봉수, 이정한, 탁계래, 조효성, 김신, "치료용 고에너지 전자선 계측을 위한 광섬유 방사선 센서의 제작 및 특성 분석", *J. Biomed. Eng. Res.*, vol. 27, no. 6, pp. 332-336, 2006.

조 동 현

- 2002년 2월 건국대학교 의학공학부 의용전자전공 학사(공학사)
- 2004년 2월 건국대학교 의학공학부 일반대학원 석사(공학석사)
- 2004년 3월~현재 건국대학교 의학공학부 일반대학원 박사과정 (공학박사)
- 주관심분야 : 의광학, 의료영상, 의료방사선공학

장 경 원

- [센서학회지 제 16권, 제 5호] pp. 331 참조

유 욱 재

- 2006년 2월 건국대학교 의학공학부 의용전자전공 학사(공학사)
- 2008년 2월 건국대학교 의학공학부 일반대학원 석사(공학석사)
- 2008년 3월~현재 건국대학교 의학공학부 일반대학원 박사과정 (공학박사)
- 주관심분야 : 의광학, 의료영상, 의료방사선공학

신 상 훈

- 2007년 2월 건국대학교 의학공학부 의용전자전공 학사(공학사)
- 2007년 3월~현재 건국대학교 일반대학원 의학공학부 석사과정 (공학석사)
- 주관심분야 : 의광학, 의료영상, 의료방사선공학

이 봉 수

- [센서학회지 제 16권, 제 5호] pp. 331 참조

박 병 기

- 1999년 서울대학교 핵공학과 박사
- 2002년~2007년 2월 (주)미래와도전 전문연구원
- 2007년 3월~현재 순천향대학 에너지환경공학과 전임강사
- 주연구분야 : 핵공학, 에너지환경공학 등

조 효 성

- [센서학회지 제 14권, 제 4호] pp. 249 참조

김 신

- [센서학회지 제 14권, 제 4호] pp. 249 참조