

# LYSO 섬광체를 이용한 감마선 분광용 광섬유 방사선 센서의 개발

한기택<sup>1</sup> · 유욱재<sup>1</sup> · 신상훈<sup>1</sup> · 전다영<sup>1</sup> · 박장연<sup>1</sup> · 박병기<sup>2</sup> · 이봉수<sup>1,\*</sup>

## Development of Fiber-optic Radiation Sensor Using LYSO Scintillator for Gamma-ray Spectroscopy

Ki-Tek Han<sup>1</sup>, Wook Jae Yoo<sup>1</sup>, Sang Hun Shin<sup>1</sup>, Dayeong Jeon<sup>1</sup>, Jang-Yeon Park<sup>1</sup>,  
Byung Gi Park<sup>2</sup>, and Bongsoo Lee<sup>1,\*</sup>

### Abstract

A fiber-optic radiation sensor was fabricated using a sensing probe, a plastic optical fiber, a photomultiplier tube, and a multichannel analyzer for gamma-ray spectroscopy. As an inorganic scintillator of the sensing probe, a LYSO crystal was used. In this study, we obtained the relationship between the photon counts of the fiber-optic radiation sensor and the activity of the radioactive isotope. In addition, the gamma-ray energy spectra were also measured using a fiber-optic radiation sensor to discriminate species of gamma-ray emitters.

**Keywords :** Gamma Spectroscopy, Fiber-Optic Sensor, Radiation Sensor, Plastic Optical Fiber, Multichannel Analyzer

### 1. 서론

최근 산업계 및 의료계에서 원자력 시설의 운영과 방사성 동위원소(radioisotope)의 사용이 빈번해짐에 따라 방사성 폐기물(radioactive waste) 및 방사성 물질의 환경오염에 대한 관심이 높아지고 있다. 특히 원자력시설의 오염도(contamination) 측정은 안전관리 측면에서 지속적인 감시와 관리가 반드시 필요하다[1, 2].

방사성 동위원소로 인한 환경오염을 감시하기 위해서는 방사선의 에너지 분광(energy spectroscopy)을 통한 방사성 핵종(radioactive nuclide)의 확인과 핵종의 방사능(radioactivity) 측정이 동시에 수행되어야 한다. 그러나 일반적인 경우, 방사선의 유무 또는 방사능의 크기만을 측정하는 것이 대부분인 실정이다. 또한 방사성 물질의 오염을 측정 및 감시하기 위한 기존의 방법들은 오염 환경 내 또는 근거리에서 계측기를 가지고 직접 측정하는 것이 대부분으로 이 경우, 인체의 방사선 피폭(radiation exposure)이 불가

피하다는 단점을 가진다.

일반적으로 광섬유(optical fiber)를 이용한 방사선 센서는 섬광체(scintillator), 광섬유 그리고 광 계측장비로 구성된다[3]. 이러한 광섬유 방사선 센서(fiber-optic radiation sensor)는 공간분해능(spatial resolution)이 높고, 주위 온도 및 압력에 영향을 받지 않으며, 원거리 계측이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 또한 전자기파(electromagnetic wave)의 영향을 받지 않으며, 실시간 계측이 가능하다[4-6]. 이러한 특성들은 방사선 계측에 있어서 큰 장점으로 작용한다. 특히 광섬유 방사선 센서를 이용하여 방사성 동위원소의 환경오염을 감시할 경우, 높은 공간분해능으로 협소한 장소에서 방사성 동위원소를 원거리에서 식별이 가능하다는 장점을 가진다.

본 연구에서는 감마선 분광용 광섬유 방사선 센서의 개발을 위한 연구의 일환으로 섬광체와 플라스틱 광섬유를 이용한 감지프로브를 제작하였고, 파고분석기(multi channel analyzer, MCA)를 이용하여 Cs-137과 Co-60에서 방출되는 감마선 에너지를 분광하였다. 또한, 서로 다른 방사능을 가지는 Cs-137을 이용하여 방사능에 대한 광섬유 방사선 센서의 선형성(linearity)을 측정하였고, 혼합 선원에 대한 감마선 에너지 스펙트럼(spectrum)을 측정하였다.

### 2. 실험 방법

<sup>1</sup>건국대학교 의료생명대학 의공학부, 의공학실용기술연구소(School of Biomedical Engineering, College of Biomedical & Health Science, Research Institute of Biomedical Engineering, Konkuk University)  
<sup>2</sup>순천향대학교 공과대학 에너지환경공학과(Department of Energy & Environment Engineering, College of Engineering, Soonchunhyang University)

\*Corresponding author: bslee@kku.ac.kr

(Received : Mar. 16, 2012, Revised : Jun. 29, 2012, Accepted : Jul. 3, 2012)

일반적으로 감마선을 분광하기 위한 섬광체로는 원자번호가 높은 무기섬광체(inorganic scintillator)가 사용된다. 광섬유에 부착하기 위한 조해성(hygroscopic)이 없는 무기섬광체에는 BaF<sub>2</sub>, CeF<sub>3</sub>, BGO(bismuth germinate), LYSO(lutetium yttrium orthosilicate) 등 다양한 무기섬광체들이 있으나, LYSO와 BGO의 경우 감마선 검출에 가장 적합한 특성을 가지고 있다.

Table 1은 LYSO와 BGO 결정의 특성을 보여주고 있으며, LYSO의 경우 BGO에 비해 섬광효율(light yield)이 4배 가량 높은 것을 확인할 수 있다. 굴절률(refractive index) 또한 BGO보다 낮은 1.82로 광섬유의 굴절률에 상대적으로 가깝기 때문에 광 전달에 있어서 유리하다. 따라서 본 연구에서는 조해성이 없고, 섬광효율이 높으며 감마선 검출에 적합한 LYSO 섬광체를 이용하여 실험을 진행하였다.

Table 1. Characteristics of BGO and LYSO crystals

	BGO	LYSO
Density (g/cm <sup>3</sup> )	7.13	7.40
Melting Point (°C)	1,050	2,050
Radiation Length (cm)	1.12	1.14
Refractive Index	2.15	1.82
Luminescence (nm)	480	402
Decay Time (ns)	300	40
Light Yield (%)	21	85

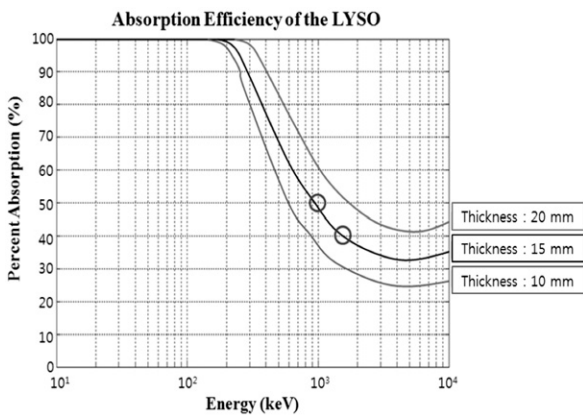


Fig. 1. Absorption efficiency of the LYSO.

Fig. 1은 LYSO의 길이에 따른 흡수효율(absorption efficiency)을 보여준다. 감마선원인 Cs-137은 661.6 keV에서 에너지 피크(energy peak)를 갖고, Co-60은 1.17 MeV와 1.33 MeV에서 에너지 피크를 가진다. 감마선원의 고유한 특성이 되는 에너지 피크를 에너지 분광을 통하여 획득하기 위해서는 방출된 감마선의 대부분이 섬광체 내에서 흡수되어야 한다. 그러므로 섬광체는 감마선 에너

지를 충분히 흡수할 수 있는 길이를 가져야 한다. 본 연구에서는 Cs-137과 Co-60의 감마선 에너지 분광을 위하여 1 MeV에서 약 50%의 흡수효율을 가지고, 1.5 MeV에서는 약 40%의 효율을 가지는 15 mm의 길이를 갖는 LYSO를 이용하여 실험을 진행하였다.

Fig. 2는 LYSO 섬광체(Advanced Microwave Technologies Solution)와 플라스틱 광섬유(CK-120, Mitsubishi Rayon)를 사용하여 제작한 광섬유 방사선 센서의 감지프로브(sensing probe)의 구조를 보여준다. 실험에 사용된 플라스틱 광섬유는 계단형 굴절률(step-index)을 갖는 멀티모드(multimode) 광섬유로서 직경은 3 mm이고, 길이는 2 m이다. 코어(core)와 클래딩(cladding)의 굴절률은 각각 1.492, 1.402이고, 개구수(numerical aperture, NA)는 0.510이다. 섬광체의 두께는 광섬유와의 결합이 용이하도록 광섬유의 직경과 동일한 3 mm × 3 mm 크기의 정방형(square type) LYSO 결정을 사용하였다. 수광 효율을 높이기 위하여 LYSO의 표면을 테플론 반사테이프(BC-642, Saint Gobain)로 감싼 뒤, 외부에 알루미늄 호일(aluminum foil)과 검은색 폴리메틸 메타크릴레이트(polymethyl methacrylate, PMMA) 홀더(holder)를 부착시켜 주변광의 간섭을 최소화하였다. 또한 섬광체와 광섬유를 결합 시, 굴절률 차에 의한 광 손실을 최소화시키기 위하여 광학용 수지(optical grease : BC-630, Saint Gobain)를 사용하였다.

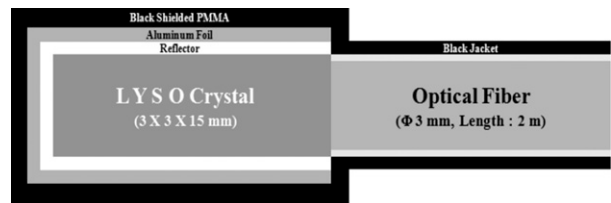


Fig. 2. Structure of a fiber-optic gamma sensing probe using LYSO crystal.

본 연구에서는 감마선원으로 Cs-137과 Co-60을 사용하였으며, Table 2는 실험에 사용한 Cs-137과 Co-60 감마선원의 특성을 보여준다.

Table 2. Characteristics of Cs-137 and Co-60 gamma ray sources

Radioactive Source	Activity (μ Ci)	Energy (keV)
Cs-137	0.9160	661.6
	2.5159	
	4.4267	
	7.6890	
	91.6633	
Co-60	29.6901	1173, 1332

Fig. 3은 감마선 에너지 분광을 위한 실험구성을 보여준다. 본 연구에서 섬광신호를 측정하기 위한 광 계측장비로는 광증배관 (photomultiplier, PMT : H9305-03, Hamamatsu Photonics)을 사용하였다. 본 광증배관은 약 450 nm의 최대 민감 파장(peak sensitivity wavelength)을 가지며, 공급전압을 조절하여 섬광신호의 증폭률을 조절할 수 있다. 광증배관에서 발생된 전류신호는 증폭기(C7319, Hamamatsu Photonics)에 의해서 전압신호로 변환 및 증폭되며, 최종적으로 증폭기에서 출력되는 전압신호는 파고분석기(Easy-MCA-8K, Ortec)로 전달된다. 파고분석기는 입력된 전압신호를 분석하여 컴퓨터로 전송하며, 전용 프로그램(MAESTRO32, Ortec)을 통해 디스플레이 및 저장된다.

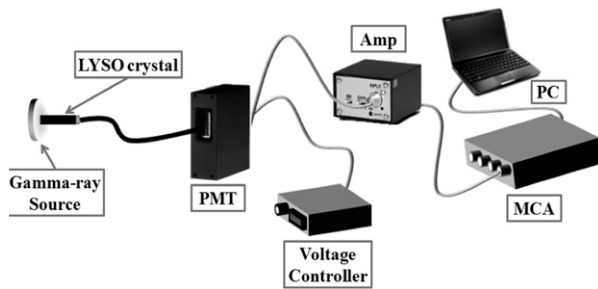


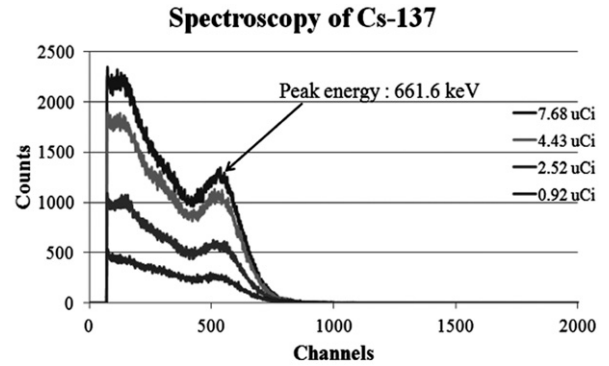
Fig. 3. Experimental setup for measuring gamma-ray energy spectra.

### 3. 결과 및 고찰

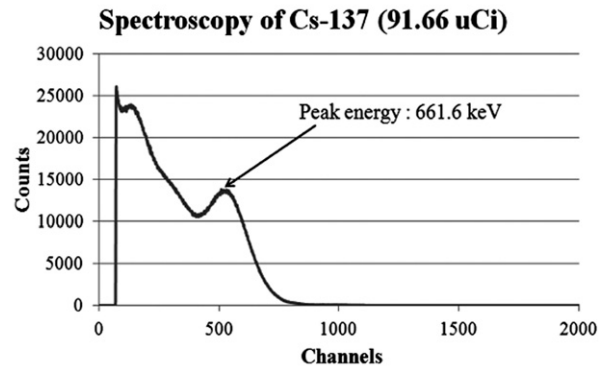
#### 3.1 각 선원에 대한 에너지 분광

Fig. 4는 광섬유 방사선 센서를 사용하여 측정된 각 선원들의 감마선 에너지 스펙트럼으로 본 스펙트럼은 1,800 초 동안 측정된 결과를 보여준다. Fig. 4(a)는 실험에 사용한 Cs-137 선원들 중에서 낮은 방사능을 가진 0.92  $\mu$  Ci, 2.52  $\mu$  Ci, 4.43  $\mu$  Ci 그리고 7.69  $\mu$  Ci 선원들의 에너지 스펙트럼을 보여준다. 실험결과, 선원의 방사능과 관계없이 Cs-137에서 방출되는 감마선의 피크 에너지인 661.6 keV에 해당하는 채널에서 피크 값을 갖는 것을 확인할 수 있다. 또한 선원의 방사능이 커질수록 전체적으로 카운트(count)가 증가하는 것을 알 수 있다. Fig. 4(b)는 91.66  $\mu$  Ci의 방사능을 가지는 Cs-137 선원의 감마선 에너지 스펙트럼을 보여주고 있으며, Fig. 4(a)에서 사용했던 선원들보다 카운트가 높은 것을 확인할 수 있다. Fig. 4(c)는 광섬유 방사선 센서를 사용하여 측정된 Co-60의 감마선 에너지 스펙트럼을 보여준다. Co-60에서 방출되는 감마선의 피크 에너지인 1.17 MeV와 1.33 MeV에 해당하는 채널에서 피크 값이 검출되었으며, 1 MeV 부근에서 컴프턴 에지(compton edge)가 측정된 것을 확인할 수 있다.

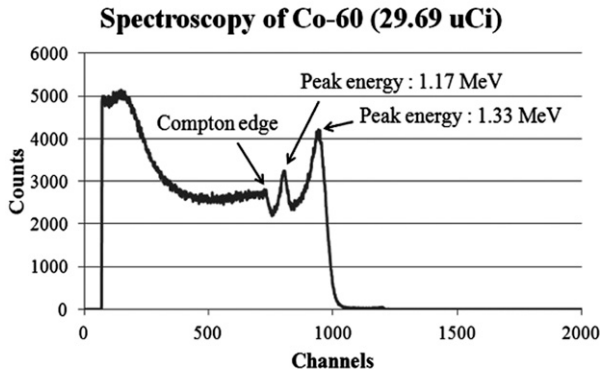
이와 같이 각 선원의 에너지 분광에 대한 실험을 수행한 결과, 광섬유 방사선 센서를 이용하여 감마선의 에너지 분광이 가능함을 확인하였다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 4. Measured energy spectra of gamma-ray using the fiber-optic radiation sensor(a: Cs-137, 0.92, 2.52, 4.43 and 7.69  $\mu$  Ci, b: Cs-137, 91.66  $\mu$  Ci, c: Co-60, 29.69  $\mu$  Ci).

#### 3.2 방사능에 따른 선형성 평가

방사선 오염 환경에서 핵종의 판별도 중요하지만 방사능에 따른 오염도 측정 역시 중요하다. 그러므로 본 연구에서는 Fig. 5와 같이 방사능에 따른 광섬유 방사선 센서의 선형성 평가 실험을 수행하였다.

Fig. 5는 Cs-137 선원의 방사능 변화에 따른 광섬유 방사선 센서의 선형성을 보여준다. 0.92  $\mu$  Ci, 2.52  $\mu$  Ci, 4.43  $\mu$  Ci 그리고 7.69  $\mu$  Ci 선원들을 이용하여 실험을 수행한 결과, 방사능이 커질수록 측정된 피크 에너지의 카운트가 선형적으로 증가하는 것을 확인할 수 있다. 측정값에 대한 추세선의 결정계수(R-square)는 99.08 % 이다.

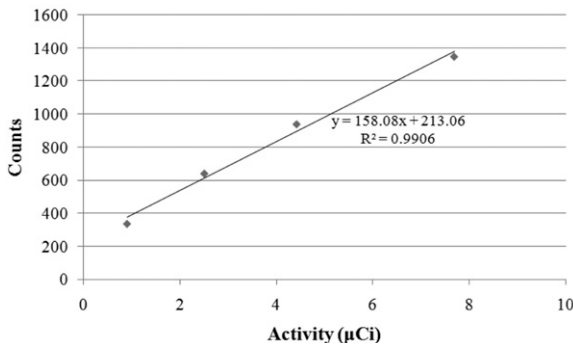


Fig. 5. Linear response of a fiber-optic radiation sensor according to activities of Cs-137.

### 3.3 혼합 선원에 대한 에너지 분광

본 연구에서는 앞서 수행한 광섬유 방사선 센서의 감마선 에너지 스펙트럼 및 방사능에 따른 선형성 측정 실험결과를 토대로 Co-60 선원(29.69 μCi)과 Cs-137(91.66 μCi) 선원을 이용하여 혼합 선원에 대한 에너지 분광 실험을 수행하였다.

Fig. 6(a)는 Co-60 선원을 앞쪽에 배치하고, Cs-137을 뒤에 배치하였을 때 광섬유 방사선 센서를 통하여 측정된 감마선의 에너지 스펙트럼을 보여주고 있다. 실험 결과, Cs-137과 Co-60의 피크 에너지가 모두 측정된 것을 알 수 있고, Co-60으로 인해 발생한 콤프턴 에지 역시 측정된 것을 확인할 수 있다. Fig. 6(b)는 Fig. 6(a)와는 반대로 Cs-137 선원을 앞쪽에, Co-60을 뒤에 배치하여 획득한 결과이다. Fig. 6(a)의 결과와 비교하면 Cs-137의 피크 에너지는 보다 선명하게 측정되었고, Co-60의 피크 에너지의 경우, 카운트가 감소된 것을 확인할 수 있다. 이는 Co-60의 방사능이 Cs-137에 비해 약 3배 정도 낮고, Co-60이 Cs-137의 뒷부분에 위치하였기 때문인 것으로 판단된다. Fig. 6(c)는 Cs-137과 Co-60 선원을 나란히 배치한 경우에 측정된 감마선 에너지 스펙트럼 결과를 보여주고 있다. 결과에서 Cs-137과 Co-60의 에너지 피크 카운트가 확연하게 차이가 나는 것은 첫째, 각 선원의 방사능 차이에 의한 결과이다. 실험에 사용한 Cs-137의 방사능이 Co-60보다 약 3배 높기 때문에 661.6 keV 감마선의 카운트가 1173 keV, 1332 keV 감마선의 카운트 보다 3배 이상 크게 측정되었다. 둘째, 이러한 결과는 실험에 사용한 LYSO 섬광체의 기하학적 형태(geometrical dimension)에 따라 상이한 감마선의 흡수율에 기인한다. Fig. 1을 살펴보면 알 수 있듯이 섬광체의 길이가 짧아질수록, 그리고 약 100 keV 이상의 감마선에서 에너지가 커질수록 섬광체의 감마선 흡수율이 작아지게 된다. 본 실험에서는 각 선원으로부터 방출되는 감마선의 섬광체 투과 길이가 제한되어 있으므로 661.6 keV의 감마선이 1173 keV, 1332 keV의 감마선 보다 섬광체 내에서 흡수율이 더욱 커지게 된다. 이는 661.6 keV 에너지의 감마선과 섬광체와의 상호작용이 1173 keV, 1332 keV의 감마선 보다 더욱 많은 것을 의미한다.

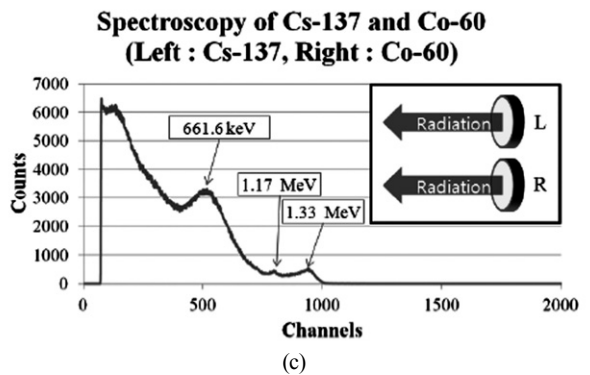
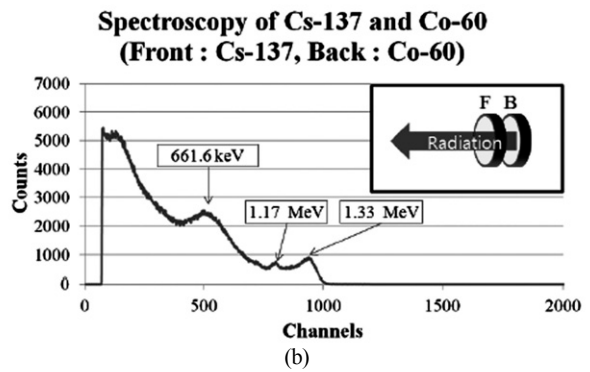
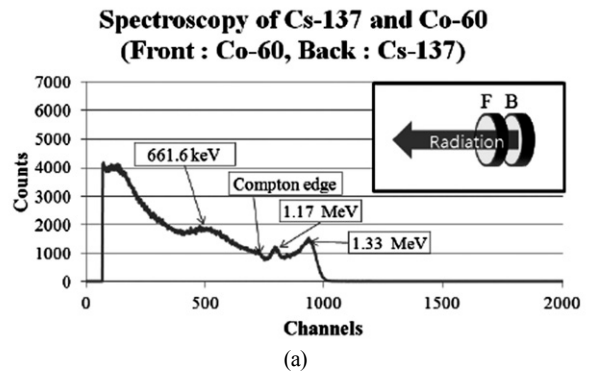


Fig. 6. Energy spectra of gamma-ray emitted from Co-60 and Cs-137.

## 5. 결론

본 연구는 감마선 에너지 분광용 광섬유 방사선 센서의 개발을 위한 기초연구로서 LYSO 섬광체와 플라스틱 광섬유를 이용하여 광섬유 방사선 센서를 제작하였고, 파고분석기를 이용하여 Cs-137과 Co-60에서 방출되는 감마선의 에너지를 분광학적으로 분석하였다.

첫 번째로 선원의 에너지 분광에 대한 실험을 수행한 결과, 광섬유 방사선 센서를 이용하여 핵종의 판별이 가능함을 확인하였다. 두 번째로 Cs-137 선원의 방사능에 따른 광섬유 방사선 센서의 선형성을 평가하였고, 방사능이 커질수록 측정된 카운트가 선형적으로

증가하는 것을 확인하였다. 마지막으로 혼합선원에 대한 실험에서는 선원의 위치에 따라 감마선 에너지 스펙트럼이 다르게 측정되지만 감마선 에너지 피크를 검출함에 따라 핵종의 판별이 가능함을 확인하였다.

지속적인 연구를 통하여 개발될 광섬유 방사선 센서는 프로브의 크기가 작고, 유연하며 실시간 측정이 가능하므로 원자력 시설 내, 안전관리 및 특정 핵물질 모니터링에 효율적으로 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

### 감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 20110006337 and No. 20110028022).

### REFERENCES

- [1] J. H. Jang, B. J. Kim, K. S. Cho, and G. D. Kim, "Development of real-time thickness measuring system for insulated pipeline using gamma-ray", *J. Korean Soc. Nondestructive Test*, vol. 22, no. 5, pp. 500-507, 2002.
- [2] H. B. Coakham and J. T. Kemshead, "Treatment of neoplastic meningitis by targeted radiation using <sup>131</sup>I-radiolabelled monoclonal antibodies", *J. Neuro-Oncol.*, vol. 38, pp. 225-232, 1998.
- [3] A. S. Beddar, T. J. Kinsella, A. Ikhlef, and C. H. Sibata, "A miniature 'Scintillator-Fiber-optic-PMT' detector system for the dosimetry of small fields in stereotactic radiosurgery", *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 48, pp. 924-928, 2001.
- [4] S. H. Shin, K. W. Jang, W. J. Yoo, J. K. Seo, B. Lee, J. H. Moon, S. Kim, and B. G. Park, "Measurement of relative depth dose rates for a brachytherapy Ir-192 source using an organic scintillator fiber-optic radiation sensor", *J. Kor. Sensors Soc.*, vol. 17, no. 6, pp. 462-469, 2008.
- [5] K. W. Jang, D. H. Cho, S. H. Shin, W. J. Yoo, J. H. Jeon, B. Lee, J. H. Moon, and B. G. Park, "Fabrication and characterization of a one-dimensional fiber-optic dosimeter for electron beam therapy dosimetry", *J. Kor. Sensors Soc.*, vol. 19, no. 4, pp. 285-290, 2008.
- [6] K. W. Jang, D. H. Cho, W. J. Yoo, J. K. Seo, J. Y. Heo, B. Lee, S. H. Shin, B. G. Park, and S. Kim, "Measurement of relative dose irradiated from a Co-60 source using a scintillating fiber-optic dosimeter", *J. Kor. Sensors Soc.*, vol. 19, no. 1, pp. 52-57, 2010.



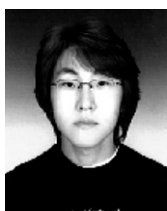
한 기 택 (Ki-Tek Han)

- 2011년 2월 건국대학교 의학공학부(공학사)
- 2011년 3월 ~ 현재 건국대학교 일반대학원 의학공학과 석사과정



유 옥 재 (Wook Jae Yoo)

- 2006년 2월 건국대학교 의학공학부(공학사)
- 2008년 2월 건국대학교 일반대학원 의학공학과(공학석사)
- 2008년 3월 ~ 현재 건국대학교 일반대학원 의학공학과 박사과정



신 상 훈 (Sang Hun Shin)

- 2007년 2월 건국대학교 의학공학부(공학사)
- 2009년 2월 건국대학교 일반대학원 의학공학과(공학석사)
- 2012년 3월 ~ 현재 건국대학교 일반대학원 의학공학과 박사과정



전 다 영 (Dayeong Jeon)

- 2012년 2월 건국대학교 의학공학부(공학사)
- 2012년 3월 ~ 현재 건국대학교 일반대학원 의학공학과 석사과정



**박 장 연 (Jang-Yeon Park)**

- 1995년 8월 서울대학교 원자핵공학과 (공학사)
- 2006년 5월 University of Minnesota (공학박사)
- 2010년 3월 ~ 현재 건국대학교 의학공학부 조교수



**박 병 기 (Byung Gi Park)**

- 1999년 2월 서울대학교 원자핵공학과 (공학박사)
- 2002년 10월 ~ 2007년 2월 (주)미래와 도전 전문연구원
- 2007년 3월 ~ 현재 순천향대학교 에너지 환경공학과 조교수



**이 봉 수 (Bongsoo Lee)**

- 1989년 2월 서울대학교 원자핵공학과 (공학사)
- 1991년 2월 서울대학교 원자핵공학과(공학석사)
- 1999년 8월 University of Florida(공학박사)
- 2001년 3월 ~ 현재 건국대학교 의학공학부 교수