

## 수중 내 베타선 모니터링 센서 개발을 위한 기초연구

박혜민 · 주관식<sup>+</sup>

### Feasibility Study on Development of an Underwater Beta-ray Monitoring Sensor

Hye Min Park and Koan Sik Joo<sup>+</sup>

#### Abstract

In this study, a beta monitoring sensor was developed as a part of basic research for quantitative beta monitoring underwater, and its performance was evaluated using a calibration source. A beta detection sensor was manufactured by using SiPM(silicon photomultiplier) and  $\text{CaF}_2:\text{Eu}$ ,  $\text{YAG}:\text{Ce}$ ,  $\text{YAP}:\text{Ce}$  scintillator. A large-area light guide was introduced to improve beta-ray detection efficiency. As calibration sources, the Beta source  $^{90}\text{Sr}$ , which is the main fission product of a nuclear accident, and the gamma source  $^{137}\text{Cs}$  are used. In the performance evaluation, it is confirmed that scintillator  $\text{CaF}_2:\text{Eu}$  gives the highest beta-ray detection response. Compared to gamma ray, beta-ray detection responsivity and detection efficiency are verified. Therefore, this study is expected to contribute to basic research in the development of an underwater beta-ray monitoring system.

**Keywords** : Beta-ray monitoring sensor, Silicon photomultiplier, Lighttools, Light guide

#### 1. 서 론

최근 방사선 관련 산업의 발달로 산업계 및 의료계에서 원자력 시설의 운영과 방사성 동위원소(radioisotope)의 사용이 증가함에 따라 방사성 폐기물(radioactive waste) 및 방사성 물질의 환경오염에 대한 관심이 높아지고 있다.

특히 2011년 일본 후쿠시마 원전 사고 발생으로 다량의 방사성 물질이 바다로 유출 및 확산되어 전 세계적으로 해양환경의 방사능 오염 경고 및 지속 적인 모니터링 방법에 주목하고 있다[1]. 이에 따라 수중에서의 방사능 오염 시 즉각적으로 방사선 모니터링 및 분석을 할 수 있는 기술개발이 요구되었고, 현재 다양한 수중용 방사선 검출 장비가 개발되고 있다.

그러나 상용화된 대부분의 수중용 방사선 검출 장비는  $\text{NaI}:\text{Tl}$ (thallium doped sodium iodide) 섬광체와 광증배관(photomultiplier tube)이 직접 연결되어 있는 기존의 상용 기술로서 감마 핵종(radionuclide)에 대해서만 검출이 가능하고, 원

전 사고 시 발생하는 핵분열의 주요 생성물인 베타 핵종에 대해서는 정량적인 측정이 불가능하다[2].

따라서 수중에서의 정량적인 베타선 모니터링을 위해 기존의 상용 기술보다 베타선 검출에 유효한 모니터링 센서 연구의 필요성이 요구 되고 있다. 그러므로 본 연구에서는 수중에서의 베타선 모니터링 시스템 개발을 위한 기초 연구의 일환으로 섬광체  $\text{CaF}_2:\text{Eu}$ ,  $\text{YAG}:\text{Ce}$ ,  $\text{YAP}:\text{Ce}$ 를 이용하여 베타 핵종에 대한 검출효율을 분석 하였으며, 검출효율이 분석된 섬광체를 기반으로 광 가이드 설계를 통해 검출부가 대면적화된 베타선 모니터링 센서의 성능을 평가하였다[3].

#### 2. 실험 방법

베타선 검출을 위한 섬광물질로는 무기섬광체 결정 (crystal)인  $\text{CaF}_2:\text{Eu}$ (europium-doped calcium fluoride)와  $\text{YAG}:\text{Ce}$ (cerium-doped Yttrium Aluminum Garnet),  $\text{YAP}:\text{Ce}$ (cerium-doped Yttrium Aluminum Perovskite) 를 사용하였다. 기본적으로 섬광체에서 저 에너지 감마선 또는 베타선 하전 입자와의 반응은 짧은 감쇠시간과 높은 섬광효율 그리고 낮은 원자번호 및 밀도의 특성이 고려되어야 한다. 원자번호 및 밀도에 대해서는 원자번호가 높아질수록 베타선의 후방산란(backscattering) 확률이 증가하여 입사한 하전 입자의 전에너지 흡수 확률이 감소하기 때문이다[4].

이와 같은 특성들을 고려하여 상용 무기섬광체 중  $\text{CaF}_2:\text{Eu}$ ,  $\text{YAG}:\text{Ce}$ ,  $\text{YAP}:\text{Ce}$ 를 사용하여 베타 핵종에 대한 검출효율을 분

명지대학교 물리학과  
(Department of Physics, Myongji University)

<sup>+</sup>Corresponding author: [ksjoo72@gmail.com](mailto:ksjoo72@gmail.com)

(Received: Aug. 16, 2016, Revised: Sep. 19, 2016, Accepted: Sep. 27, 2016)

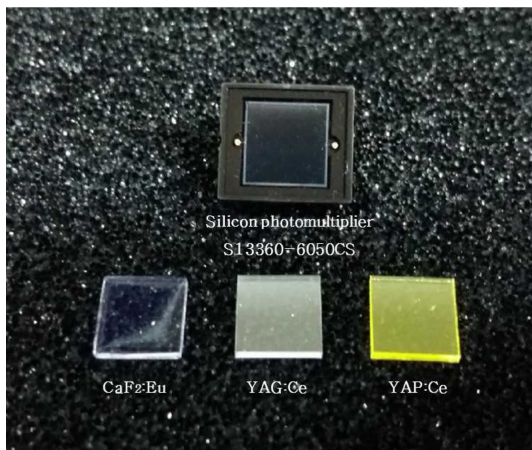
This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

**Table 1.** Physical Properties of Inorganic Scintillators

Scintillator	NaI:Tl	CaF <sub>2</sub> :Eu	YAG:Ce	YAP:Ce
Density (g/cm <sup>3</sup> )	3.67	3.18	4.57	5.4
Effective atomic number	50	16	32	36
Peak Emission (nm)	415	435	550	370
Decay time (ns)	230	940	70	25
Light yield (photons/MeV)	38,000	23,000	8000	18,000
Hygroscopic	Yes	No	No	No

**Table 2.** Specifications of the SiPM used in this Study

Parameter	Value
Photosensitive area	6 × 6 mm <sup>2</sup>
Number of pixels	14400
Spectral response range	270~900 nm
Peak PDE (at 450 nm)	40%
Bias voltage	V <sub>br</sub> + 3 V
Breakdown voltage	53 ± 5 V
Gain	1.7 × 10 <sup>6</sup>
Operating temperature	-20 ~ 40°C



**Fig. 1.** Picture of inorganic scintillators together with the 6 × 6 mm<sup>2</sup> Hamamatsu SiPM.

석 하였다. Table 1은 실험에 사용한 무기섬광체 결정의 물리적 특성을 보여준다.

베타선 검출을 위한 소자로는 Hamamatsu의 실리콘 광 증배소자(silicon photomultiplier): S13360-6050CS를 사용하였다[5]. 기존의 광증배관과 비교하여 수중 내에서 전체적인 시스템의 소형화를 위해 6 × 6 mm<sup>2</sup> 크기의 소자를 사용하였으며, 검출소자에 대한 특성은 Table 2와 같다.

Fig. 1은 왼쪽부터 각 6 × 6 × 1 mm<sup>3</sup> 크기의 CaF<sub>2</sub>:Eu, YAG:Ce, YAP:Ce섬광체와 Photosensitive area 6 × 6 mm<sup>2</sup>의 실리콘 광 증배소자를 보여준다.

실험에 사용된 무기섬광체 결정은 너비 6 × 6 mm<sup>2</sup>, 두께 1 mm의 정방형 형태이다. 두께 결정에는 섬광체에서 발생된 광



**Fig. 2.** Experimental setup for measuring beta-ray detection efficiency.

자가 섬광체 결정의 광학적 특성으로 인해 결정에 흡수되는 자체흡수(self-absorption)가 고려되어야 하는데 이는 결정의 두께가 두꺼워질수록 전송되는 광자량이 점차 감소하게 되어 광 감쇄(light attenuation)를 유발한다.

이에 따라 베타선의 최대 에너지와 섬광체의 물리적 특성을 고려하여 섬광체 결정의 두께는 1 mm로 결정하였다[6].

섬광체 결정의 반사체로는 CaF<sub>2</sub>:Eu, YAG:Ce, YAP:Ce의 방출과정에 대하여 최대 90% 이상의 반사율을 가지는 Teflon reflector를 이용하여 반사면을 형성 하였으며, SiPM의 광 입사창과 섬광체의 접촉면 사이에는 공기 중 광 산란 및 광 손실률을 최소한으로 감소 시켜주기 위해 SiPM과 섬광체 접촉면 사이에 n=1.465의 굴절률과 280~700 nm 파장에서 약 95%의 광 투과율을 갖는 Saint-Gobain의 BC-630을 사용하여 optical grease 층을 도포시켜주었다[1].

Fig. 2는 베타선 검출 및 분석을 위한 전체 실험의 구성을 나타낸다. 베타선에 의해 각각의 섬광체에서 발생된 광자 신호는 실리콘 광 증배소자를 거쳐 전압신호로 변환되며, 전압신호는 정형증폭기(shaping amplifier, 575A, ORTEC)를 통해 증폭되고, 최종적으로 검출된 베타선의 검출효율 및 스펙트럼 분석을 위하여 MCA(multichannel Analyzer, 926M, ORTEC)로 신호분석이 된다.

실험에 사용된 방사선원으로는 원전 사고 시 발생하는 핵분열의 주요 생성물인 감마선원 <sup>137</sup>Cs: 0.662 MeV과 베타선원 <sup>90</sup>Sr: 0.546 MeV (Spectrum techniques, 미국)이 사용되었다. <sup>90</sup>Sr은 순수 베타선 방출 핵종으로서 0.546 MeV의 베타입자를 방출한 뒤 자핵종 <sup>90</sup>Y이 되고, <sup>90</sup>Y은 64시간의 반감기를 가지고, 2.273 MeV의 베타입자를 방출한 다음 안정한 <sup>90</sup>Zr이 된다[7,8].

0.1 μCi의 방사능(activity)을 기준으로 하였으며, <sup>137</sup>Cs은 30.17년, <sup>90</sup>Sr은 28.8년의 반감기를 갖는다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 각 섬광체에 대한 에너지 분광 및 검출효율 평가

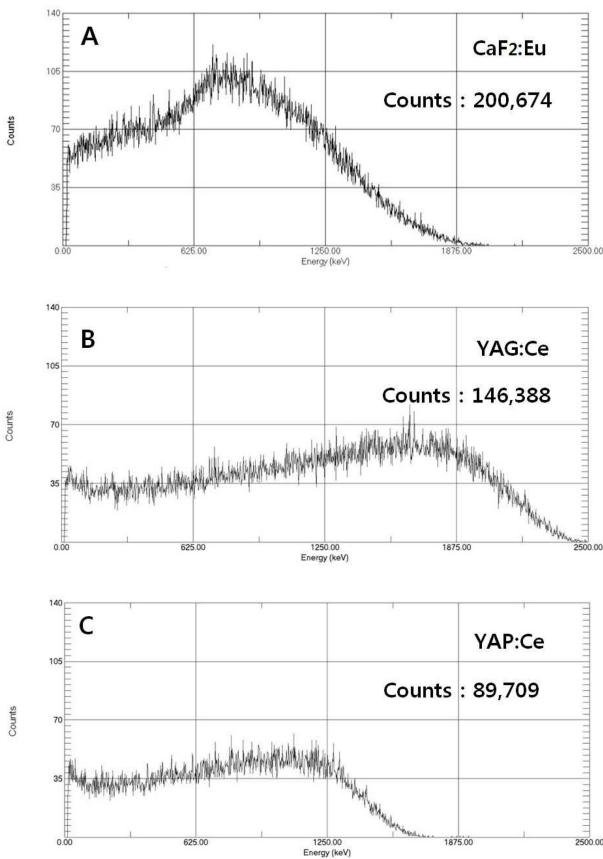


Fig. 3. Measured energy spectra of <sup>90</sup>Sr using the beta-ray Monitoring Sensor (a: CaF<sub>2</sub>:Eu b: YAG:Ce, c: YAP:Ce).

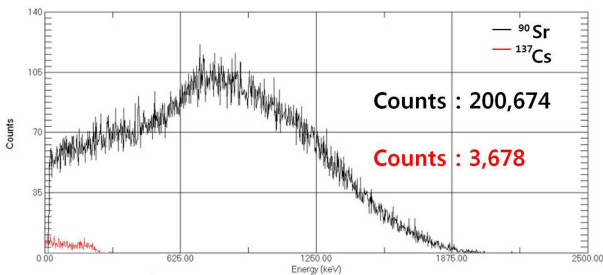


Fig. 4. Comparison of the energy spectra of the <sup>90</sup>Sr and <sup>137</sup>Cs using CaF<sub>2</sub>:Eu crystal.

Fig. 3은 베타선 모니터링 센서를 사용하여 측정된 각 섬광체의 <sup>90</sup>Sr 베타선 에너지 스펙트럼으로서, 본 스펙트럼은 400초 동안 측정된 결과를 보여준다.

에너지 스펙트럼 상의 x축은 측정된 섬광신호가 증폭시스템 및 과교분석기를 거치면서 변환된 전압신호의 크기를 나타내며, 이는 실리콘 광 증배소자로 입사하는 방사선 에너지를 의미한다. 또한 y축은 x축의 각 에너지에 대한 계수값(counts)을 의미한다.

실험결과, 섬광체 CaF<sub>2</sub>:Eu, YAG:Ce, YAP:Ce에서 모두 <sup>90</sup>Sr 베타선원이 가지는 2.273 MeV의 끝점 에너지(end-point energy)까지 연속된 붕괴 에너지 분포가 측정된 것을 볼 수 있다[9]. 하

지만 베타선의 측정 비(beta measuring ratio) 비교 시 CaF<sub>2</sub>:Eu 결정의 계수값이 YAG:Ce, YAP:Ce 결정에 비해 27%, 55.3% 더 높은 비율을 보이므로 CaF<sub>2</sub>:Eu 결정이 베타선 측정에는 더 적합하다고 볼 수 있다.

Fig. 4는 CaF<sub>2</sub>:Eu 결정으로 측정된 베타선원 <sup>90</sup>Sr과 감마선원 <sup>137</sup>Cs에 대한 비교 에너지 스펙트럼을 나타낸다.

<sup>90</sup>Sr의 경우 2.273 MeV까지의 연속된 붕괴에너지를 갖는 베타 에너지 스펙트럼이 측정되었지만 <sup>137</sup>Cs 측정 시에는 감마선 에너지가 1 mm의 CaF<sub>2</sub>:Eu 결정에 충분히 흡수되지 못한 채 대부분의 감마선이 결정을 통과하여 <sup>137</sup>Cs의 고유 전 에너지 피크(full-energy peak)인 0.662 MeV의 광전피크(photopeak)가 측정되지 않았다.

따라서 감마선에 대한 베타선의 측정 비(beta/gamma measuring ratio)는 98.2%로 감마선 대비 베타선의 계수율 차이가 명확하므로 에너지 스펙트럼을 이용하여 베타선과 감마선의 구별이 가능함을 확인할 수 있다.

### 3.2 광 가이드 기반 베타선 센서 설계

본 단계에서는 앞서 실험결과를 통해 베타선 측정에 적합한 CaF<sub>2</sub>:Eu 섬광체를 사용하여 광 가이드 기반 검출부가 대면적화된 베타선 센서를 제작하고, 검출효율 평가를 수행 하였다. CaF<sub>2</sub>:Eu 결정의 크기는 상용 감마선 검출 모듈인 2" × 2" NaI:TI +PMT모듈을 기준으로 하여 50.8 × 50.8 × 1 mm<sup>3</sup>로 제작하였다. 광 가이드는 BK-7 optical glass, 구조는 tapered 형태로 섬광결정과 접합하게 되는 입사부 면적은 50.8 × 50.8 mm<sup>2</sup>, SiPM의 윈도우와 접합하게 되는 출사부 면적은 6 × 6 mm<sup>2</sup>, 두께는 20 mm로 제작하였다. 두께 결정에는 tapered형 구조에서 광 가이드 두께가 얇아질수록 대부분의 광자가 광 가이드 빗면에서 입사면으로 반사되는 광 반사(light reflection)효과와 두께가 두꺼워질수록 전송되는 광자량이 점차 감소되는 광 감쇄(light attenuation)를 유발하기 때문에, 이와 같은 광학적 특성을 고려하여 빛의 추적과 설계가 가능한 LightTools Software Tool을 이용하여 광 가이드의 두께를 20 mm로 결정하였다 [10].

Fig. 5는 광 가이드 기반 베타선 센서의 구조를 보여준다.

Fig. 6은 광 가이드 기반 CaF<sub>2</sub>:Eu 결정으로 측정된 베타선원 <sup>90</sup>Sr과 감마선원 <sup>137</sup>Cs에 대한 비교 에너지 스펙트럼을 나타낸다. Fig. 4의 결과와 마찬가지로 <sup>90</sup>Sr 측정 시 2.273 MeV의 연속

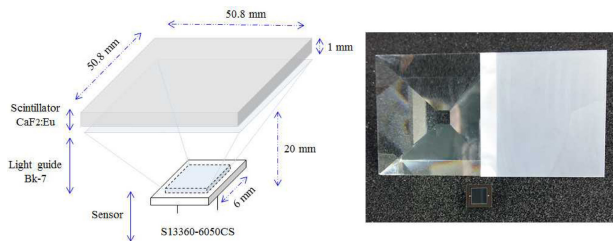


Fig. 5. Structure of the large area beta detection unit

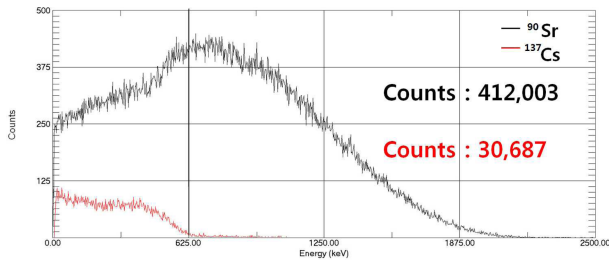


Fig. 6. Comparison of the energy spectra of the  $^{90}\text{Sr}$  and  $^{137}\text{Cs}$  using light guide based  $\text{CaF}_2:\text{Eu}$  crystal.

에너지 스펙트럼이 측정되었으며, 베타선 검출면적이 증가한 만큼 계수율도 2배 증가하였다.  $^{137}\text{Cs}$  에서도 역시 0.662 MeV의 광전피크가 측정되지는 않았지만 대면적화된 검출면적대비 비정이 짧은 베타선 보다  $^{137}\text{Cs}$ 의 감마선 반응확률이 높아져 계수율이 8배 증가하였다. 하지만 감마선에 대한 베타선의 측정 비(beta/gamma measuring ratio)는 92.5%이므로 여전히 감마선 대비 베타선의 계수율 차이가 명확하므로 계수율 및 에너지 스펙트럼을 이용하여 베타선과 감마선의 구별이 가능함을 확인할 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구는 수중에서의 정량적인 베타선 모니터링 시스템 개발을 위한 기초연구로서 실리콘 광 증배소자와 광 가이드, 무기 섬광체를 이용하여 베타선 모니터링이 가능한 모니터링 센서를 설계 및 제작하고 센서의 특성을 평가 하였다.

첫 번째로  $\text{CaF}_2:\text{Eu}$ ,  $\text{YAG}:\text{Ce}$ ,  $\text{YAP}:\text{Ce}$  결정에 대한 베타선의 측정 비 비교 시에는  $\text{CaF}_2:\text{Eu}$  결정에서 가장 우수한 베타선 계수율을 확인하였으며, 두 번째로  $\text{CaF}_2:\text{Eu}$  결정으로  $^{90}\text{Sr}$ 과  $^{137}\text{Cs}$ 에 대한 베타/감마 에너지 스펙트럼 비교 시  $^{137}\text{Cs}$  대비  $^{90}\text{Sr}$ 에서 2.273 MeV의 정확한 연속 에너지 스펙트럼이 측정되었고, 감마선에 대한 베타선의 측정 비 또한 98.2%로 감마선 대비 베타선의 계수율의 명확한 차이를 확인 하였다. 마지막으로 광 가이드 기반 검출부가 대면적화된 베타선 센서의 특성 평가에서도  $^{90}\text{Sr}$ 의 정량적인 측정이 가능하였고, 감마선 대비 베타선의 계수율 차이가 92.5%로 명확하므로 계수율 및 에너지 스펙트럼을 이용하여 베타선과 감마선의 구별이 가능함을 확인할 수 있다.

본 연구를 기반으로 지속적인 연구를 통해 수중용 베타선 모니터링 시스템이 개발된다면 개발된 시스템이 해양환경의 방사능 오염 시 즉각적이고 지속적인 방사선감시체계 구축에 기여할 것으로 사료된다.

#### 감사의 글

본 연구는 국가과학기술연구회의 창의형 융합연구사업 “방사능 초동대응 물안보 기술 개발” 연구과제 지원으로 수행된 연구입니다.

#### REFERENCES

- [1] H. M. Park and K. S. Joo, “Development of a Real-time Radiation Level Monitoring Sensor for Building an Underwater Radiation Monitoring System”, *J. Sensor Sci. & Tech.*, Vol. 24, No. 2, pp. 1-5, 2015.
- [2] Y. Zhang, C. Li, D. Liu, Y. Zhang, and Y. Liu, “Monte Carlo simulation of a NaI(Tl) detector for in situ radioactivity measurements in the marine environment”, *Appl. Radiat. Isot.*, Vol. 98, pp. 44-48, 2015.
- [3] C. K. Kim, H. T. Kim, J. Y. Kim, C. H. Lee, H. J. Yoo, D. U. Kang, M. S. Cho, M. S. Kim, D. H. Lee, Y. W. Kim, K. T. Lim, S. Y. Yang, G. S. Cho, “Replacement of a photomultiplier tube in a 2-inch thallium-doped sodium iodide gamma spectrometer with silicon photomultipliers and a light guide”, *Nucl. Eng. Technol.*, Vol. 47, pp 479-487, 2015.
- [4] [http://www.crystals.saint-gobain.com/uploadedFiles/SG-Crystals/Documents/CaF2\(Eu\)%20data%20sheet.pdf](http://www.crystals.saint-gobain.com/uploadedFiles/SG-Crystals/Documents/CaF2(Eu)%20data%20sheet.pdf) (retrieved on Aug. 15, 2016).
- [5] [http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s13360\\_series\\_kapd1052e.pdf](http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s13360_series_kapd1052e.pdf) (retrieved on Aug. 15, 2016).
- [6] S. H. Hang, S. H. Shin, H. I. Sim, S. K. Kim, H. S. Jeon, J. S. Jang, J. S. Kim, G. W. Kwon, K. W. Jang, W. J. Yoo and B. S. Lee, “Feasibility Study on Development of a Fiber-Optic Dual Detector to Measure Beta- and Gamma-rays Simultaneously”, *Trans. KIEE.*, Vol. 63, No. 2, pp. 284-290, 2014.
- [7] <https://ehs.ucsd.edu/rad/radionuclide/Y-90.pdf> (retrieved on Aug. 15, 2016).
- [8] <https://ehs.ucsd.edu/rad/radionuclide/Sr-90.pdf> (retrieved on Aug. 15, 2016)
- [9] G. F. Knoll, *Radiation detection and measurement*, John Wiley & Sons, New York, pp. 4-5, 2000.
- [10] H. M. Park, J. H. Kim, K. H. Park, C. J. Park, W. J. Han and K. S. Joo, “Evaluation of Photon Transmission Efficiency of Light Guides used in Scintillation Detectors using the LightTools Code”, *J. Radiation Protection.*, Vol. 41, No. 3, pp. 81-85, 2016.