

# 실리콘광증배관 기반의 미세기둥 구조 CsI:Tl 제작 및 평가

## Fabrication and Performance of Microcolumnar CsI:Tl onto Silicon Photomultiplier

박찬종\*, 김기담\*\*, 주관식\*

Chan-Jong Park\*, Ki-Dam Kim\*\*, Koan-Sik Joo\*

### Abstract

This study conducted the gamma ray spectroscopic analysis of the microcolumnar CsI:Tl deposited onto the SiPMs using thermal evaporation deposition. The SEM measured thickness of microcolumnar CsI:Tl and of its individual columns. From the SEM observation, the measured thickness of CsI:Tl were 450 $\mu$ m and 600 $\mu$ m. The gamma ray spectroscopic properties of microcolumnar CsI:Tl, 450 $\mu$ m and 600 $\mu$ m thick deposited onto the SiPMs were analyzed using standard gamma ray sources  $^{133}\text{Ba}$  and  $^{137}\text{Cs}$ . The spectroscopic analysis of microcolumnar CsI:Tl deposited onto the SiPMs included the measurements of response linearity over the  $^{137}\text{Cs}$  gamma ray intensity; and gamma ray energy spectrum. Furthermore from the gamma ray spectrum measurement of  $^{133}\text{Ba}$  and  $^{137}\text{Cs}$ , 450 $\mu$ m thick CsI:Tl showed good efficiency when measured with  $^{133}\text{Ba}$  and 600 $\mu$ m thick CsI:Tl was highly efficient when measured with  $^{137}\text{Cs}$ .

### 요약

본 연구에서는 SiPM에 열진공증착법을 이용하여 증착한 미세기둥 구조의 CsI:Tl의 감마선 분광특성연구를 진행하였다. SEM장비를 사용하여 미세기둥 구조의 CsI:Tl의 두께와 각각의 CsI:Tl 미세기둥의 두께를 측정하였다. SEM 관측 결과 CsI:Tl의 두께는 450 $\mu$ m, 600 $\mu$ m이다. SiPM에 450 $\mu$ m, 600 $\mu$ m 두께로 증착한 미세기둥 구조의 CsI:Tl은 표준 감마선원인  $^{133}\text{Ba}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ 를 사용하여 감마선의 분광특성 평가를 진행하였다. SiPM에 증착한 미세기둥 구조 CsI:Tl의 분광특성 평가는  $^{137}\text{Cs}$  감마선 세기에 따른 응답 선형성과, 감마선 에너지 스펙트럼을 측정하였다. SiPM에 증착한 두께 450 $\mu$ m와 600 $\mu$ m CsI:Tl은 감마선 세기에 따라 선형성을 나타냈다. 또한  $^{133}\text{Ba}$ 과  $^{137}\text{Cs}$ 의 감마선 에너지 스펙트럼 측정 결과 450 $\mu$ m 두께의 CsI:Tl은  $^{133}\text{Ba}$ 에 대한 특성이 좋게 평가되었고, 600 $\mu$ m 두께의 CsI:Tl은  $^{137}\text{Cs}$ 에서 우수한 특성을 확인할 수 있었다.

*Key words* : SiPM, microcolumnar, CsI:Tl, gamma spectra, thermal vapor deposition.

\* Dept. of Physics, Myongji University

\*\* Dept, of Material development team, Rayence

★ Corresponding author (e-mail: [ksjoo72@gmail.com](mailto:ksjoo72@gmail.com), tel:031-330-6167)

Manuscript received Sep. 23, 2016; accepted Nov. 22, 2016; accepted Nov. 29, 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.

## I. 서론

최근 연구되는 방사선 검출분야는 높은 에너지 영역의 영상화 또는 계측에 대한 연구가 많이 되고 있다[1]. 상대적으로 감마선이나 X선의 낮은 에너지 영역과 중간 에너지 영역에 대한 연구는 적다. 방사선 검출은 섬광체의 종류와 두께에 따라 방사선 검출 영역이 나뉘게 되는데 낮은 에너지 영역 검출과 높은 에너지 영역 검출에 대한 요구 사항을 모두 충족시키기 어렵다[2]. 따라서 CsI:Tl(thallium-doped cesium iodide)의 미세기둥(microcolumnar) 구조 제작을 통해 방사선 저에너지 영역에 대한 검출 연구를 진행하였다[3].

방사선 분야에 사용되는 검출시스템은 작은 크기, 방사선에 대한 안정성, 높은 성능과 저렴한 가격 등을 요구한다. 이에 따라 광센서로 실리콘 광증배관(SiPM, silicon photomultiplier)에 대한 연구가 급속하게 늘어나고 있다. 과거 많이 사용되었던 광전자증배관(PMT, photomultiplier tube)은 SiPM은 비해 높은 인가전압과 비싼 가격, 전자기장에 대한 영향을 받으며, 상대적으로 거대한 크기와 같은 단점을 가지고 있다[4, 5]. PMT는 진공관 기반으로서 CsI:Tl 증착 공정에서 발생하는 열에 의해 열팽창이 발생해 기능저하가 발생할 수 있는 문제가 있다. 또한 APD(avalanche photodiode)와 비교했을 때 높은 증배율과 낮은 동작전압 등의 이점이 있다. 따라서 PMT, APD의 단점을 보완할 수 있는 SiPM을 사용하였다[6]. 이러한 SiPM의 장점을 기반으로 열진공증착기를 사용하여 미세기둥 구조의 CsI:Tl을 제작하였다. 기존의 미세기둥 구조 CsI:Tl은 X선 영상분야에 주로 활용되었다[7]. 하지만 방사선 계측분야에 접목시킨 연구는 많지 않다. 따라서 제작한 미세기둥 구조 CsI:Tl은 다채널과고분석기(multi channel analyzer, MCA)를 이용하여 표준 감마선 원인  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{133}\text{Ba}$ 에 대해 분광특성 분석을 하였고, 방사선 세기에 따른 선형성 평가하였다[8, 9].

Table 1. Characteristics of commercial sensors.

표 1. 상용 센서의 특성

Sensor	SiPM	PMT	APD
Supply voltage	~75 V	~1000 V	~200 V
Size	Small	Big	Small
Gain	$10^5 \sim 10^7$	$10^5 \sim 10^7$	$\sim 10^2$
Sensitivity to microphonics	No	No	Medium
Magnetic field	No	Yes	No

## II. 실험 방법

### 1. 미세기둥 구조 CsI:Tl 제작 및 평가 방법

#### 1.1 Thermal evaporator를 이용한 CsI:Tl 제작

그림 1은 미세기둥 구조 CsI:Tl의 증착 공정 전과 모든 공정이 끝난 후의 SiPM 사진이다. Hamamatsu 사의 S13360-3050CS를 CsI:Tl 증착에 사용하였으며, 표 2는 미세기둥 구조 CsI:Tl 증착에 사용된 SiPM의 특성을 보여준다.

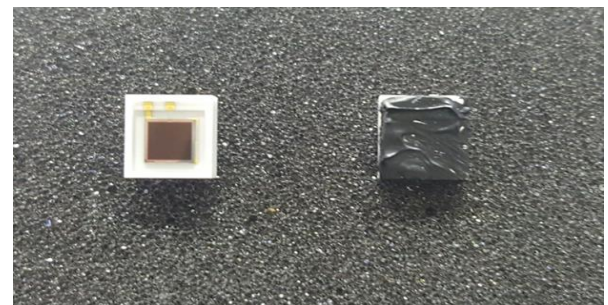


Fig. 1. Picture of Hamamatsu MPPC model S13360-3050CS.

그림 1. 공정에 사용된 SiPM

Table 2. Characteristics of SiPM.

표 2. S13360-3050CS(SiPM)의 특성

Parameter	Typical Value
MPPC model	S13360-3075CS
Sensitivity area	3mm×3mm
Number of microcells	3600
Pixel pitch	50um
Fill factor	74%
Spectral range	270nm~900nm
Peak sensitivity wavelength	450nm
Structure	Silicon resin
Epoxy refractive index	1.41

SiPM에 미세기둥 구조 CsI:Tl 증착 공정은 다음과 같이 총 4단계로 진행되었다.

- (1) SiPM 플라즈마 공정
- (2) 미세기둥 구조 CsI:Tl 증착
- (3) Parylene 증착
- (4) 반사체 코팅

첫 번째로 플라즈마 공정은 SiPM과 CsI:Tl의 adhesion을 높이기 위해 실시하였다. CsI:Tl 공정을 진행하기 전 SiPM 표면에 묻어있는 이물질들을 제거하고 CsI:Tl의 증착을 원활하게 하여 미세기둥 구조로 잘 증착하기 위한 기초 작업이다.

두 번째로 미세기둥 구조 CsI:Tl 증착은 경사입사 증착법을 사용하여 공정을 진행하였다. 두께는 다음과 같은 조건 아래 450 $\mu\text{m}$ , 600 $\mu\text{m}$ 로 증착하였다. SiPM을 기판에 고정시킨 후 기판을 1~30rpm으로 회전시키며 미세기둥 구조를 제작하는데 챔버 내부의 진공은  $5 \times 10^{-6}$ Torr 이하로 설정하였고, 기판의 온도는 최고 150 $^{\circ}\text{C}$ 이다.

세 번째로 미세기둥 구조 CsI:Tl 증착이 완료된 후 parylene 증착 공정을 진행하였다. CsI:Tl은 조해성을 갖는 특징을 갖고 있고, 수분에 노출되었을 때 구조가 붕괴될 위험이 있기에 parylene을 증착하였다.

네 번째로 반사체 코팅은  $\text{TiO}_2$ 를 주성분으로 하는 용액을 사용하였다. 반사체 용액과 경화제를 섞어 3차 공정이 완료된 후 코팅을 하였다. 스핀 코터를 사용하여 혼합용액을 고르게 도포한 후 진공건조기를 사용하여 100 $^{\circ}\text{C}$ 에서 60분 동안 건조하였다. 또한 흑색 잉크를 도포하여 외부의 빛을 차단하여 효율을 높였다. 그림 2는 증착한 CsI:Tl의 미세기둥 구조를 주사전자현미경(SEM, scanning electron microscope)으로 관측한 사진이다. CsI:Tl의 두께는 증착목표인 450 $\mu\text{m}$ , 600 $\mu\text{m}$ 로 두께 5% 이하의 오차율을 보이며 증착이 되었다. 증착두께가 450 $\mu\text{m}$  일 때 각 기둥의 두께는 4~6 $\mu\text{m}$ , 600 $\mu\text{m}$ 의 경우 5~8 $\mu\text{m}$ 로 측정되었다. 또한 CsI:Tl 미세기둥의 구조 또한 밀집형 구조를 띄는 것을 확인할 수 있었고, SEM측정 후 빠른 parylene 증착을 통해 투습현상에 의한 CsI:Tl 구조 붕괴를 방지하였다.

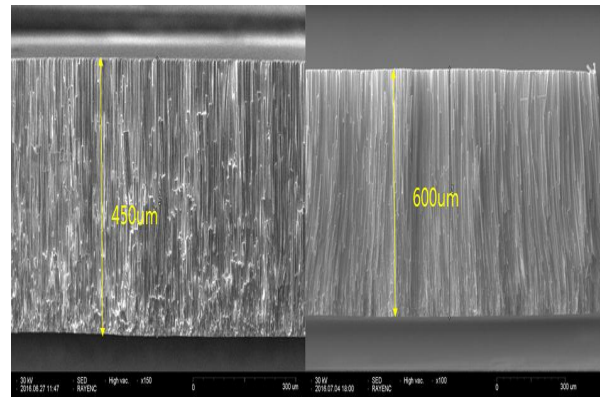


Fig. 2. SEM images of the microcolumnar CsI:Tl deposited on SiPM(left side image, right top image).

그림 2. SEM을 이용하여 관측한 미세기둥 구조 CsI:Tl

### 1.2 평가 방법

그림 3은 SiPM에 증착한 미세기둥 구조 CsI:Tl을 평가하기 위한 전체 시스템이다. 제작한 미세기둥 구조 CsI:Tl의 평가에는 일반적인 SiPM 구동 회로 구성을 기본으로 하여 검출부, 신호처리부, 출력부로 구성된다.

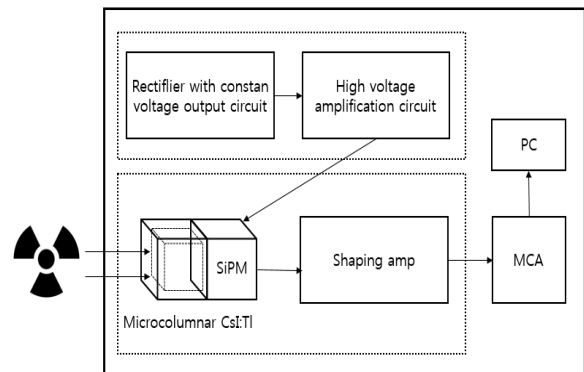


Fig. 3. The total structure diagram of system for measuring CsI:Tl deposit to SiPM.

그림 3. SiPM에 증착된 CsI:Tl 측정 시스템의 전체 구조

SiPM의 동작전압인 56V를 인가해주기 위해 정전압회로와 Ultravolt사의 Ultravolt xs series 전압증폭기(high voltage power supply)를 사용하여 SiPM 구동회로에 56V의 전압을 인가해주었다. 신호처리부에 사용된 성형증폭기(shaping amp)와 다채널과고분석기는 각각 ORTEC사의 ORTEC 575, ORTEC 926 모델을 사용하였다[10].

### III 결과

미세기둥 구조 CsI:Tl의 성능 평가를 위해 표준 감마선원인  $^{133}\text{Ba}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ 을 사용하여 평가하였다. 그림 4는 450 $\mu\text{m}$ , 600 $\mu\text{m}$  두께의 CsI:Tl을 증착한 SiPM의  $^{133}\text{Ba}$ (1 $\mu\text{Ci}$ , 10 $\mu\text{Ci}$ )에 대한 감마선 에너지 스펙트럼을 보여준다. 450 $\mu\text{m}$ , 600 $\mu\text{m}$  두께의 CsI:Tl의 경우  $^{133}\text{Ba}$ 에 대한 감마선 에너지 피크

인 31keV, 81keV, 356 keV가 모두 검출되었다. 하지만 서로 다른 CsI:Tl 두께에 따라 감마선 에너지 스펙트럼의 차이가 있다.  $^{133}\text{Ba}$ 에 대한 CsI:Tl의 반응성은 두께가 450 $\mu\text{m}$ 일 때가 더 민감하였다. 상대적으로 600 $\mu\text{m}$ 일 때 보다 감마선 에너지 스펙트럼이 우수하게 나온 것을 확인할 수 있다. 방사능 세기에 따른 측정결과 또한 CsI:Tl의 두께가 450 $\mu\text{m}$ 일 때 더 우수하게 나타났다.

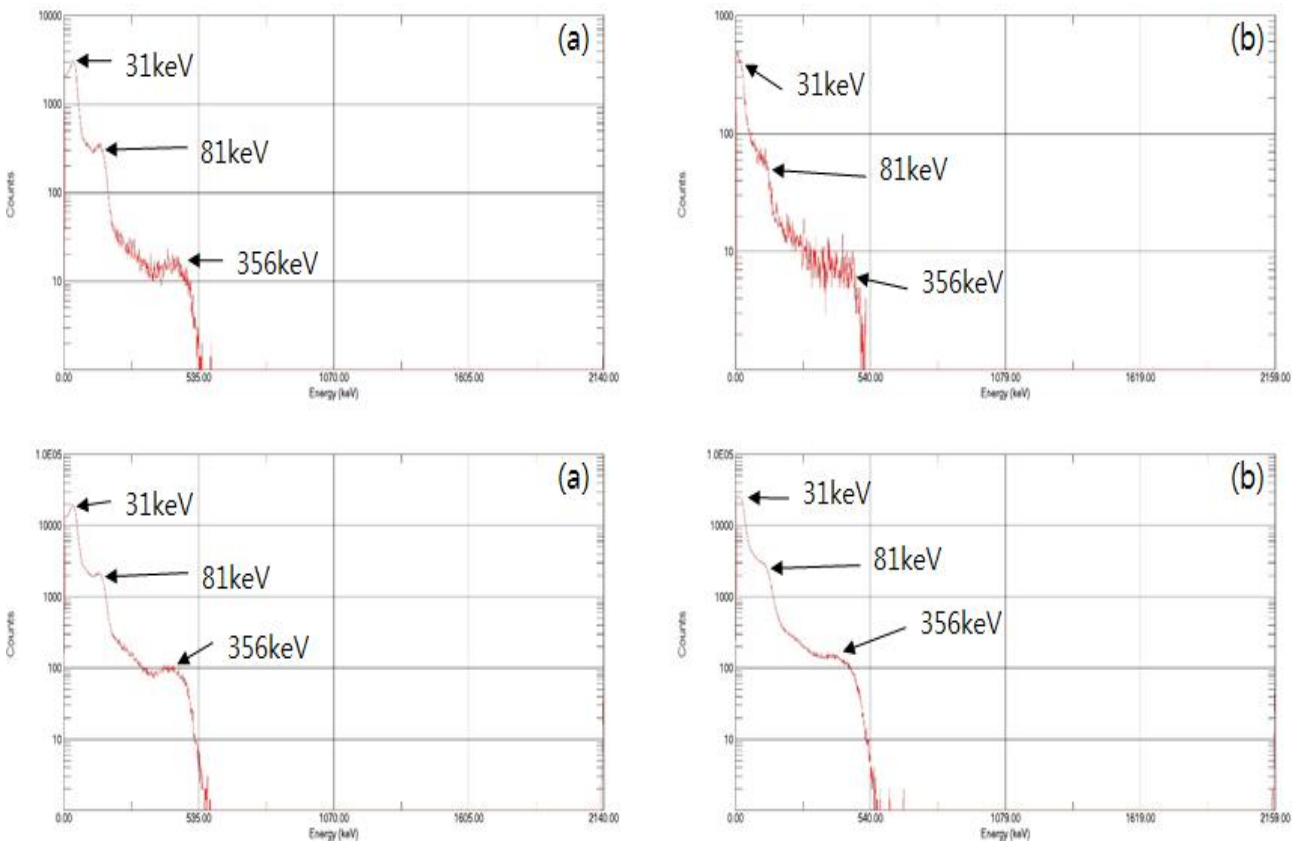


Fig. 4. Measuring  $^{133}\text{Ba}$ (top 1 $\mu\text{Ci}$ , bottom 10 $\mu\text{Ci}$ ) gamma-ray energy spectra for deposited CsI:Tl on SiPM.

그림 4. CsI:Tl의 두께가 각각 (a)450 $\mu\text{m}$ , (b)600 $\mu\text{m}$  일 때 측정된  $^{133}\text{Ba}$ (top 1 $\mu\text{Ci}$ , bottom 10 $\mu\text{Ci}$ ) 감마선 에너지스펙트럼

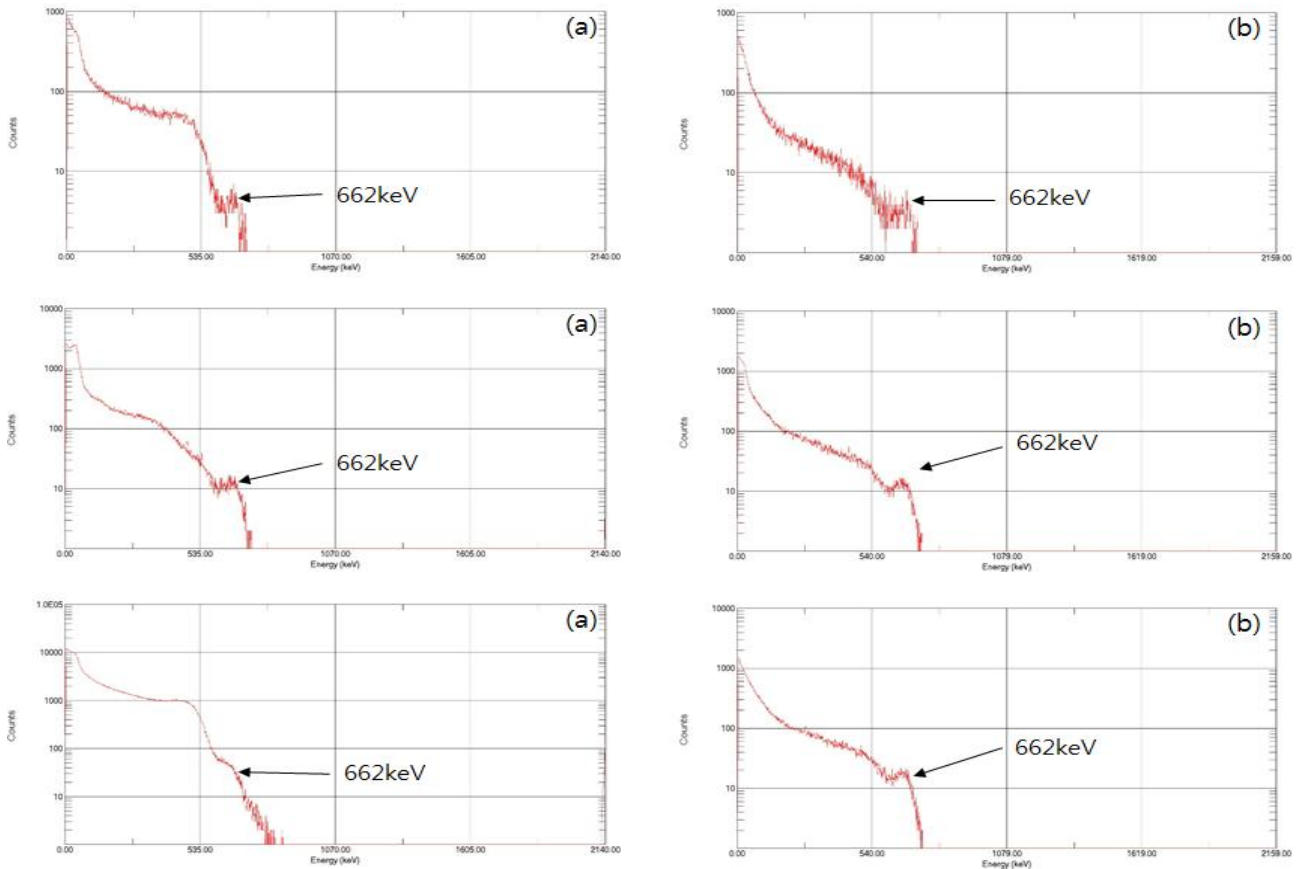


Fig. 5. Measuring  $^{137}\text{Cs}$ (top 1uCi, mid 5uCi, bottom 10uCi) gamma-ray energy spectra for deposited CsI:Tl on SiPM.  
 그림 5. CsI:Tl의 두께가 각각 (a)450µm, (b)600µm 일 때 측정된  $^{137}\text{Cs}$ (top 1uCi, mid 5uCi, bottom 10uCi) 감마선 에너지 스펙트럼

그림 5는  $^{137}\text{Cs}$ 의 방사능의 세기가 1uCi, 5uCi, 10uCi일 때 CsI:Tl의 두께 450µm, 600µm일 때 측정된 감마선 에너지 스펙트럼을 나타낸 그림이다.  $^{137}\text{Cs}$ 의 감마선 에너지 피크인 662keV에서는 450µm 두께 CsI:Tl 보다 600µm CsI:Tl이 더 우수한 반응성을 보였다. 또한 상대적으로  $^{137}\text{Cs}$  감마선 피크가 662keV인 반면에  $^{133}\text{Ba}$ 의 감마선 피크는 358keV로 에너지의 차이가 있는데, 두께가 600µm인 CsI:Tl은  $^{137}\text{Cs}$ , 두께가 450µm인 CsI:Tl은  $^{133}\text{Ba}$ 에서 우수한 반응성을 확인할 수 있었다. 그림 6은 SiPM의 감마선에 대한 검출 반응성 측정 결과를 보여주고 있다. 표준감마선원으로  $^{137}\text{Cs}$ 을 사용하였으며 방사능 세기는 1uCi, 5uCi, 10uCi이며 600초 동안 조사하였다. 그 결과 CsI:Tl의 두께가 450µm, 600µm일 때 모두 선형성을 보인다.

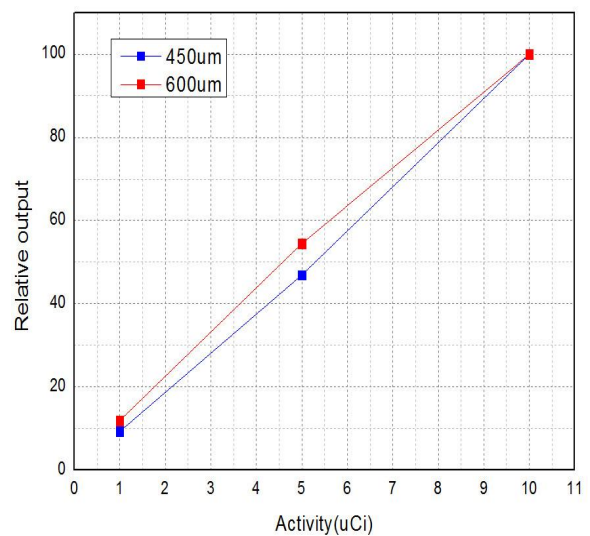


Fig. 6. Responses of the SiPM as a function of  $^{137}\text{Cs}$  activity.  
 그림 6.  $^{137}\text{Cs}$  세기에 따른 SiPM의 응답성



#### IV 결론

본 연구에서는 미세기둥 구조의 CsI:Tl 제작과 두께에 따른 감마선 분광특성에 대한 연구를 하였다. 제작한 CsI:Tl의 유용성을 평가를 하기 위해 교정용 방사선원을 사용하였다. 방사선원은  $^{133}\text{Ba}$ (1 $\mu\text{Ci}$ , 10 $\mu\text{Ci}$ )과  $^{137}\text{Cs}$ (1 $\mu\text{Ci}$ , 5 $\mu\text{Ci}$ , 10 $\mu\text{Ci}$ )을 사용하여 감마선에 대한 검출 반응성 및 감마선 세기에 따른 응답 선형성을 평가하였다. CsI:Tl의 450 $\mu\text{m}$  두께에서 600 $\mu\text{m}$  두께의 CsI:Tl보다 상대적으로  $^{133}\text{Ba}$  감마선 에너지 피크 영역에서 검출 효율이 높은 것을 확인할 수 있었다. 하지만 600 $\mu\text{m}$  두께의 CsI:Tl은  $^{137}\text{Cs}$  감마선 에너지 피크 영역의 검출효율이 우수하였다. 이러한 검출효율을 평가를 통해 감마프로브나 저에너지 방사선 선량계에서의 적용 가능성을 확인하였다.

#### References

- [1] H. Sabet et al., "High-Performance and Cost-Effective Detector Using Microcolumnar CsI:Tl and SiPM," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 59, no. 5, pp. 1841-1849, 2012.
- [2] A. Osovizky et al., "SENTIRAD-An innovative personal radiation detector based on a scintillation detector and a silicon photomultiplier," *Nucl. Inst. and Meth. A*, vol. 652, no. 1, pp. 41-44, 2011.
- [3] S. Miller, V. Gaysinskiy, I. Shestakova, and V. Nagarkar "Recent Advances in Columnar CsI(Tl) Scintillator Screens," *Proceedings of SPIE (Penetrating Radiation Systems and Applications VII, 59230F)*, vol. 5923, 2005.
- [4] H. Park and K. Joo, "Feasibility of a wireless gamma probe in radioguided surgery," *Phys. Med. Biol.*, vol. 61, no. 12, pp. 311-321, 2016.
- [5] H. Park and K. Joo, "Performance characteristics of a silicon photomultiplier based compact radiation detector for homeland Security applications," *Nucl. Inst. and Meth. A*, vol. 781, pp. 1-5, 2015.

- [6] J. Kim and K. Joo "Study on Scintillator Polishing Technology for Increasing the Detection Efficiency of Radiation Detectors Using Plastic Scintillators," *j.inst.Korean.electr.electron.eng*, vol. 18, no. 4, pp. 456-462, 2014.
- [7] B. Chae et al., "Improvement of the sensitivity and spatial resolution of pixelated CsI:Tl scintillator with reflective coating," *Nucl. Inst. and Meth. A*, vol. 607, pp. 145-149, 2009.
- [8] K. Han et al., "Development of Fiber-optic Radiation Sensor Using LYSO Scintillator for Gamma-ray Spectroscopy," *J. Sensor Sci. & Tech.*, vol. 21, no. 4 pp. 287-292, 2012.
- [9] H. Park and K. Joo, "Development of a Wireless Gamma-ray probe for Diagnosing and Evaluation of its Effectiveness," *J. Electron. & Infor. Eng.*, vol. 52, no. 2, pp. 355-363, 2015.
- [10] J. Kim and K. Joo, "Fabrication of Fiber-optics Detector for Measuring Radioactive Waste," *j.inst.Korean.electr.electron.eng*, vol. 19, no. 3 pp. 282-287, 2015.

#### BIOGRAPHY

##### Chan-Jong Park (Student Member)



2016 : BS degree in Physics,  
Myongji University.  
2016~ : MS Course in  
Physics, Myongji University.

##### Ki-Dam Kim (Member)



2002 : BS degree in Physics,  
Kangwon National University.  
2004 : MS degree in Physics,  
Kangwon National University.  
2001~ present : Senior  
research engineer in material  
development team, Rayence.

**Koan-Sik Joo** (Member)



1972 : BS degree in physics,  
Yonsei University.

1976 : MS degree in Nuclear  
Physics, Yonsei University.

1987 : PhD degree in  
Nuclear Physics, Yonsei  
University.

1981~ Present : Professor in Dept. of Physics,  
Myongji University