

YSO 섬광체의 기하학적 구조에 따른 감마선 검출기의 검출 특성 연구

Study on Detection Characteristics of Gamma Radiation Detector using different Geometry of YSO Scintillator

김 정 호*, 주 관 식*

Jeong-Ho Kim*, Koan-Sik Joo*

Abstract

In this study, gamma radiation detectors are created by integrating the following combinations of different YSO scintillators and PMT(photomultiplier-tubes) respectively: 3mm×3mm×2mm, 3mm(Dia)×15mm, 3mm(Dia)×20mm, 10mm(Dia)×20mm. In addition, the scintillator with a 10mm diameter was integrated with a light guide with a 2mm thickness, 10mm entry and 3mm exit, using LightTools. The constructed detector used the standard gamma ray sources ¹³⁷Cs(662keV) to analyze the spectral characteristics of gamma rays. The results indicate that at 662keV, the energy resolutions were 14.46%, 21.10%, and 10.71% for the first three combinations respectively. The best results were recorded for the 10mm(Dia)×20mm detector with light guide, which had an energy resolution of 7.48%.

요 약

본 연구에서는 3mm×3mm×2mm, 3mm(Dia)×15mm, 3mm(Dia)×20mm, 10mm(Dia)×20mm. YSO 섬광체와 광전자증배관을 결합하여 검출기를 제작하였다. 또한 10mm의 지름을 가진 섬광체는 LightTools를 이용하여 최적화된 광가이드와 결합하였다. 광가이드의 두께는 2mm이며 입사부는 섬광체 크기와 같은 10mm이고 출사부는 다른 섬광체와 같은 3mm이다. 제작된 검출기는 표준 감마선원인 ¹³⁷Cs를 이용하여 분광 특성을 분석하였다. 그 결과 662keV에서 각각의 에너지 분해능이 14.46%, 21.10%, 10.71%, 나왔으며 10mm의 지름과 20mm의 길이를 가진 섬광체에 광가이드를 결합한 섬광체가 7.48%로 분해능이 가장 좋게 나왔다.

Key words : YSO, PMT, Optimization, Gamma spectra, LightTools, Energy resolution

* Dept. of Physics, Myongji University

★ Corresponding author

e-mail: ksjoo72@gmail.com, tel:031-330-6167

※ Acknowledgment

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(No. R1A12011572)

Manuscript received Feb. 24, 2016; revised Mar. 31, 2016; accepted Apr. 4, 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

국내 원자력 산업의 발달에 따라 방사성 물질을 이용하는 기술의 수요는 매년 증가하고 있으며, 방사성 물질에 따른 오염과 작업자의 피폭에 관한 우려가 상존한다. 따라서 방사성 물질의 사용에서 오염 또는 피폭에 대한 감시와 관리가 필요하다. 이에 따라 작업자의 안전성 확보를 위하여 검출기의 성능 향상에 초점을 맞춘 검출기의 개발이 요구되고 있다[1]. 검출기의 성능에 영향을 줄 수 있는 인자로는 반사체, 섬광체의 표면구조와 모양 등이 있다[2]-[5]. 특히 섬광체의 길이, 내부 반사각 그리고 입사 면적의 경우 섬광체에서 발생한 빛이 광센서에 도달하는데 큰 영향을 미친다.[5] 일반적으로 감마선 분광분석을 위해서는 원자번호가 높은 $LYSO((Lu,Y)_2SiO_5)$, $BGO(Bi_4Ge_3O_{12})$, CsI , $YSO(Y_2SiO_5)$ 와 같은 무기섬광체가 많이 사용된다. $LYSO$ 는 YSO 에 비하여 빠른 잔광시간을 갖는 장점이 있지만 자가 방사능으로 인한 배경잡음이 발생한다는 단점이 있다. BGO 는 YSO 에 비하여 잔광시간이 느리며 발생 광량 또한 YSO 에 비하여 낮다. 또한 CsI 섬광체는 52000개의 높은 광자 발생 확률을 가지고 있지만 잔광시간이 1000ns로 느리다는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 70ns의 빠른 잔광시간을 가지며 MeV의 감마선 에너지당 11,000의 발생 광자를 갖고 420nm의 발생 파장을 가지는 YSO 섬광체를 사용하였다. 검출기의 최적화를 위하여 다양한 모양의 YSO 섬광체와 광전자증배관을 이용하여 검출기를 제작하였고 검출 및 분광 특성을 분석하였다.

II. 본론

1. 재료 및 검출기 제작 방법

1.1 YSO 섬광체 및 광가이드 설계

그림 1은 본 연구에서 검출기에 사용된 다양한 모양의 YSO 섬광체이다. 섬광체의 모양은 4가지이며, 직경 3mm에 길이가 20mm, 직경 3mm에 길이가 15mm 그리고 직경 10mm에 길이가 20mm인 원통형 섬광체와 가로와 세로가 각각

3mm이며 길이가 20mm인 직육면체 섬광체이다. 표 1은 $LYSO$, BGO , CsI , YSO 섬광체의 물리적 특성 표이다.

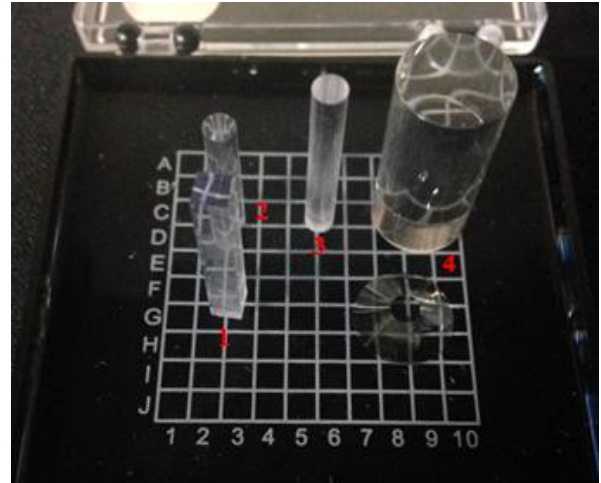


Fig. 1. YSO scintillator
그림 1. YSO 섬광체

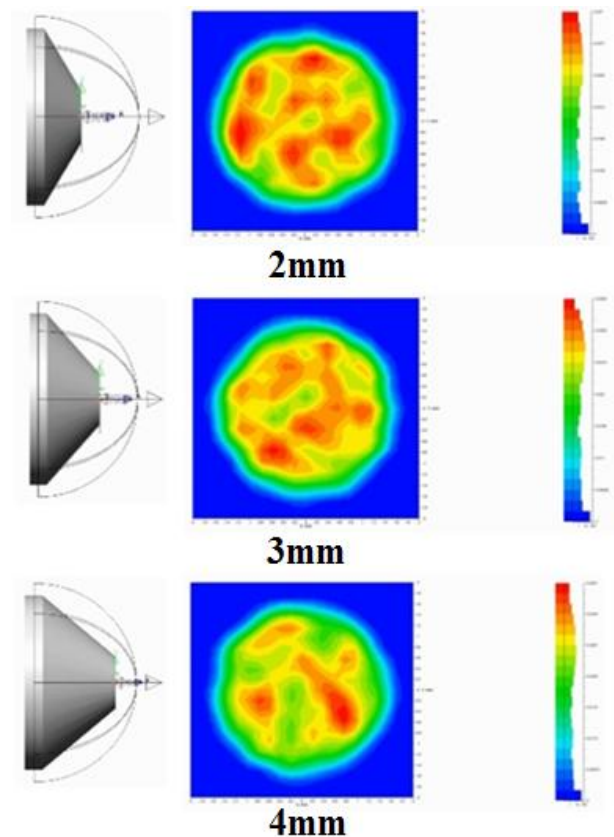


Fig. 2. Geometry and Result of light guide using LightTools

그림 2. LightTools 이용한 광가이드의 기하학적 구조 및 전산모사 결과

그림 2는 광학 설계 프로그램인 LightTools를 이용하여 설계한 광가이드와 그 결과이다. LightTools는 광학 설계 및 분석 프로그램으로서 시제품의 특성을 시제품을 제작하기 전에 파악할 수 있는 설계 프로그램이다. 대면적의(직경 10mm, 길이 20mm) 섬광체와 결합할 광가이드의 최적화된 설계를 위하여 사용되었다[6]. 광가이드를 이용한 검출기에서 광가이드의 물질 및 두께, 내부 반사각은 광자 전달 효율에 중요한 인자이다. 광가이드의 길이는 제작 가능 길이를 고려하여 1mm는 제외 하였으며, 광가이드의 길이가 너무 길어질 경우 광가이드 내부에서 흡수되는 흡수 손실의 양이 증가하기 때문에 광가이드의 길이를 2mm, 3mm 그리고 4mm로 설계하였다. 세 광가이드 모두 광 입사부는 대면적 섬광체의 직경인 10mm이며 출사부는 다른 원통형 섬광체의 직경인 3mm이다. 광가이드의 재질은 광학 유리인 BK7을 사용하였고 표면에 사용한 반사체의 반사율은 테프론 테이프의 반사율인 90%로 설계하였다. 그 결과 Relative irradiance가 2mm에서 67.2%, 3mm에서 62.7%, 4mm에서 41.5%로 2mm에서 가장 높은 irradiance를 가진다. 전산모사 결과를 바탕으로 2mm 두께의 광 가이드를 제작하였다.

Table1. Physical Characteristics of LYSO, BGO, CsI and YSO

표 1. LYSO, BGO, CsI, YSO의 물리적 특성

Scintillator	LYSO	BGO	CsI	YSO
Density (g/cm ³)	7.40	7.13	4.51	4.50
Peak emission wavelength (nm)	420	480	550	420
Decay time (ns)	40	300	1000	70
Light yield (photons/MeV)	32,000	8,500	52,000	11,000
Hygroscopicity	No	No	Yes	No

1.2 감마선 검출기 제작

그림 3은 4가지 모양의 YSO를 이용하여 제작한 검출기의 측정 시스템이다. 감마선 검출기는 검출부와 신호처리부로 구성된다. 검출부는 YSO 섬광체와 광전자증배관으로 구성된다. 광전자 증

배관과 같은 광센서는 섬광체 외에 외부에서 들어오는 빛이 신호잡음을 유발 할 수 있기 때문에 외부의 빛을 차폐하는 것은 매우 중요하다. 차폐 케이스의 하단부는 광전자 증배관과 결합되며 외경은 20mm이고 내경은 광전자증배관의 크기와 같은 10mm이다. 차폐 케이스의 상단부는 4가지 모양의 섬광체와 결합 할 수 있게 외경 20mm로 하였고 섬광체의 직경과 반사체의 두께를 고려하여 내경을 3.1mm, 4.1mm, 10.1mm로 하였다. 상단부와 하단부의 결합 정도에 따라 20mm와 15mm 길이의 섬광체와 결합 할 수 있도록 제작하였다. 4가지 모양의 섬광체와 광 가이드의 수광 효율을 높이기 위하여 250에서 1000nm까지의 방출파장영역에 대하여 90% 이상의 반사율을 가지는 Saint Gobain사의 테프론 반사체(teflon reflector)인 BC-642를 사용하였다.

섬광체에서 발생한 섬광 신호를 측정하기 위한 광센서는 Hamamatsu사의 H3164를 사용하였다. 표 2는 H3164 광전자증배관의 특성표이다. 본 광전자증배관의 최대 민감 파장은 420nm이다. 광전자증배관의 작동전압은 -1250V이며 555 high voltage power supply를 이용하여 전압을 인가하였다. 신호처리부는 증폭기와 MCU 계수기 그리고 파고분석기로 구성된다. 섬광체에서 발생한 광자가 광전자증배관에 입사하여 펄스를 형성한다. 생성된 펄스는 신호 증폭기(575 amplifier)에서 증폭되어 파고분석기(Ortec사의 926 MCB)와 MCU를 거쳐 PC 및 아두이노 디스플레이에 나타난다.

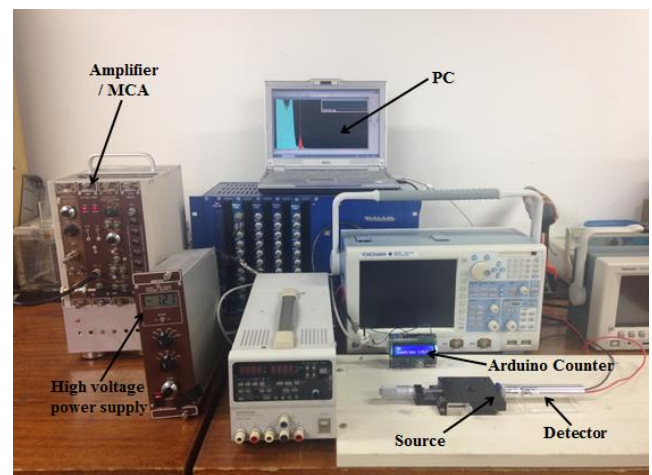


Fig. 3. Measurement system

그림 3. 측정 시스템

Table2. Characteristics of H3164(PMT)

표 2. H3164(PMT)의 특성

Peak Wavelength(nm)	420
Operating Voltage(V)	-1250
Dark Current(nA)	1
Rise Time Typ(ns)	0.8
Transit time Typ(ns)	9
Transit Time Spread Typ(ns)	0.5

2. 결과 및 논의

그림 4는 방사선원의 세기에 따른 검출기의 특성 그래프이다. 검출기와 선원의 거리는 선원의 밀봉 재질을 포함하여 0.2cm이다. 사용된 선원은 Disc type의 ¹³⁷Cs로 662keV의 감마선 에너지를 가지며 30.17년의 반감기를 갖는다. 그 결과 4가지 검출기 모두 0.99의 결정계수(R-square) 값을 갖는다.

그림 5는 거리에 따른 각 검출기의 특성 그래프이다. 검출기와 선원의 거리를 0.5cm 간격으로 2.5mm까지 이동하여 검출량을 측정하였다. 각 검출기의 거리에 따른 특성 그래프는 거리역자승 법칙 그래프와 비교하였다. 그 결과 4가지 검출기 모두 5% 미만의 평균 오차율을 보였다. 최대 평균 오차율을 가지는 검출기는 3mm의 지름과 15mm의 높이를 가지는 YSO를 이용한 검출기로 4.96%의 평균 오차율을 보였다. 최소 평균 오차율을 가지는 검출기는 입사 면적이 3mm²이고 높이가 20mm인 YSO를 이용한 검출기로 0.18%의 오차율을 보였다.

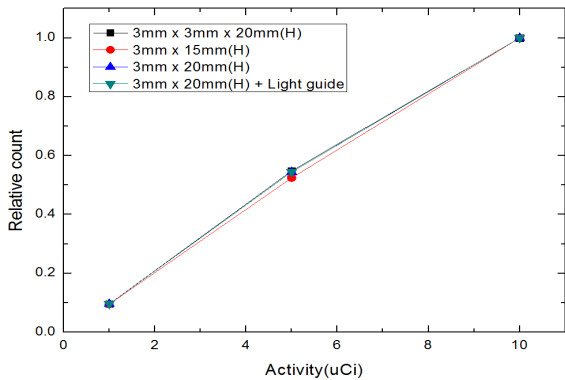


Fig. 4. Measured energy spectra of ¹³⁷Cs(662keV) using YSO gamma-ray detector

그림 4. YSO 감마선 검출기를 이용한 ¹³⁷Cs(662keV)의 감마 에너지 스펙트럼

그림 6은 4가지 형태의 검출기를 이용하여 측정된 ¹³⁷Cs 선원의 감마선 스펙트럼이다. 에너지 분해능은 검출기의 성능을 평가하는데 있어 가장 중요한 인자로서 에너지 분해능을 구하는 공식은 식 (1)과 같다. FWHM은 반폭치를 의미하며 E_γ는 선원의 감마선 에너지를 의미한다.

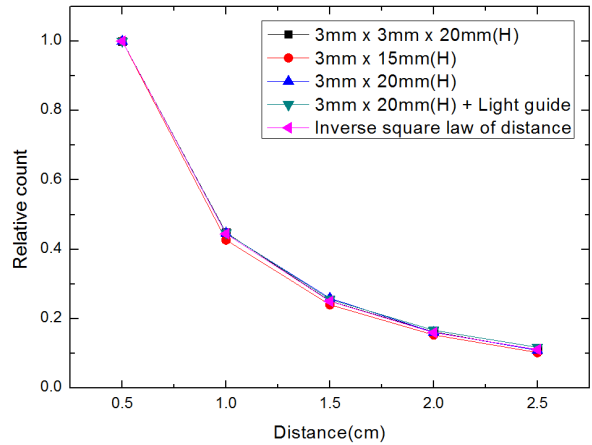


Fig. 5. Measured energy spectra of ¹³⁷Cs(662keV) using YSO gamma-ray detector

그림 5. YSO 감마선 검출기를 이용한 ¹³⁷Cs(662keV)의 감마 에너지 스펙트럼

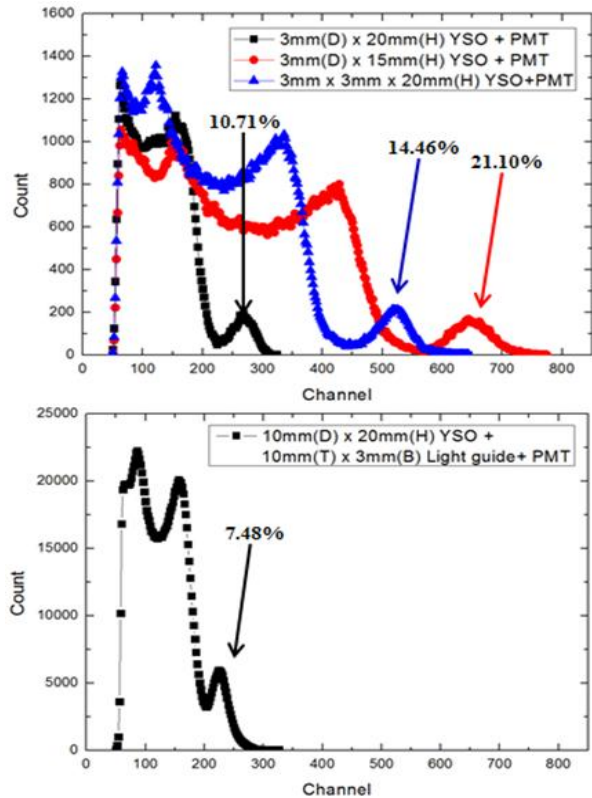


Fig. 6. Measured energy spectra of ¹³⁷Cs(662keV) using YSO gamma-ray detector

그림 6. YSO 감마선 검출기를 이용한 ¹³⁷Cs(662keV)의 감마 에너지 스펙트럼

$$R(\%) = \frac{FWHM}{E_\gamma} \times 100 \quad (1)$$

그 결과 10mm 지름에 20mm 높이의 섬광체와 광가이드를 접합하여 제작한 검출기가 7.48%로 가장 좋은 분광특성을 가졌고, 3mm 지름에 20mm 높이, 3mm² 면적에 20mm 높이 그리고 3mm 지름에 15mm 높이의 섬광체를 이용하여 제작한 검출기 순으로 분해능이 증가하였다.

III 결론

본 연구에서는 방사선 검출기 제작에서 섬광체의 기하학적 구조에 따른 특성 변화 관한 연구를 하였다. 대면적에 섬광체와 결합된 광가이드는 LightTools 전산모사를 이용하여 2mm로 제작하였다. 그 결과 4가지 검출기 모두 세기 및 거리에 따른 특성에서는 좋은 결과를 보였다. 그러나 성능 평가에서 중요한 인자인 분광 특성에서는 대면적의 섬광체와 광가이드를 이용한 검출기가 7.48%로 3mm의 지름과 15mm의 높이의 섬광체를 이용한 검출기보다 13.62% 낮은 분광 특성을 보였다. 결과를 바탕으로 섬광체의 기하학적 구조 및 다양한 두께의 광가이드를 이용하여 검출기의 분광특성을 높일 수 있다는 것을 확인하였고, 본 연구를 바탕으로 차후 육각기둥 및 삼각기둥 등 기존의 사용하지 않는 구조의 섬광체를 제작하여 분광특성을 분석 할 예정이다.

References

- [1] Jeong Ho Kim and Koan Sik Joo, "Fabrication of Fiber-optics Detector for Measuring Radioactive Waste", *Journal of IKEEE*, 19(3), pp. 282-287, 2015
- [2] Jeong Ho Kim and Koan Sik Joo, "Study on Scintillator Polishing Technology for Increasing the Detection Efficiency of Radiation Detectors Using Plastic Scintillators", *Journal of IKEEE*, 18(4), pp. 456-462, 2014
- [3] Jin Hyoung Bai and Joo Ho Whang, "The Optimization of CsI(Tl)-PIN Photodiode for

High-Energy Gamma-Ray Detection", *NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY*, 1, pp.308-311, 2011

[4] Hey Min Park, Hyun Seong Hong, Jeong Ho Kim, and Koan Sik Joo, "Development of a Portable Device Based Wireless Medical Radiation Monitoring System", *J. Korea Asso. Radia. Pro.*, 39, pp. 150-158, 2014

[5] M. Sasano, H. Nishioka, S. Okuyama, K. Nakazawa, K. Makishima, S. Yamada, T. Yuasa, A. Okumura, J. Kataoka, Y. Fukazawa, Y. Hanabata and K. Hayashi "Geometry dependence of the light collection efficiency of BGO crystal scintillators read out by avalanche photo diodes", *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A.* 715, pp. 105-111, 2013

[6] Ji Hwan Lee, Hyeol Cheol Kim, Sung Yoon Jung "Analysis of Indoor Visible Light Communication Environment based on LightTools", *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, 64, pp.935-939, 2015

BIOGRAPHY

Jeong-Ho Kim (Student Member)



2012 : BS degree in Physics,
Myongji University.

2012~ : MS Course in Physics,
Myongji University.

2015~ : PhD Course in Physics,
Myongji University.

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 : Profesor in Dept. of Physics,
Myongji University