

방사성 오염도 측정을 위한 광섬유 검출기 제작

Fabrication of Fiber-optics Detector for Measuring Radioactive Waste

김 정 호*, 주 관 식**

Jeong-Ho Kim*, Koan-Sik Joo**

Abstract

In this study, an optical fiber detector was constructed by using a Ce:GAGG scintillator, optical fiber, and photomultiplier. The single crystal size of the scintillator was set to $3 \times 3 \times 20$ mm after simulating the counting efficiency of gamma rays in the scintillator by using the MCNPX code. The constructed detector used the standard gamma ray sources ^{137}Cs and ^{133}Ba to measure radiation and analyze the spectral characteristics of gamma rays. The resulting trend curve showed excellent linearity with an R-squared value of 0.99741, and the detector characteristics were found to vary 2% or less with distance based on comparison with the MCNPX value. Furthermore, the spectroscopic analysis of the gamma ray energy from the single-ray and mixed-ray sources showed that ^{137}Cs had its peak energy at 662 keV, and ^{133}Ba had at 356 keV. It seems that if the fiber-optics detector is used, working hours and exposure of worker can be reduced.

요 약

본 연구에서는 연구에서는 Ce:GAGG 섬광체, 광섬유 그리고 광전자증배관을 이용하여 광섬유 검출기를 제작하였다. 섬광체의 단결정 크기는 MCNPX 코드를 이용하여 섬광체 깊이에 따른 감마선 계수효율을 전산모사하여 $3 \times 3 \times 20\text{mm}^3$ 로 설정하였다. 제작된 검출기는 표준 감마선원인 ^{137}Cs 과 ^{133}Ba 을 이용하여 세기의 다른 선형성 평가와 거리 변화에 따른 계수량 변화 측정을 하였다. 그 결과 추세선식 R-square 값이 0.99741로 매우 좋은 응답선형성을 보였고, 거리에 따른 검출 특성 또한 MCNPX값과 비교하였을 때 2% 이하로 좋은 검출특성을 보였다. 또한 단일선원과 혼합선원에서 감마선 에너지 분광 결과 ^{137}Cs 은 662keV에서 그리고 ^{133}Ba 은 356keV에서 감마선 에너지 피크를 확인하였다. 광섬유 검출기를 사용한다면 작업자의 작업시간과 피폭을 줄여줄 것으로 보인다.

Key words : Ce:GAGG, PMT, Optical fiber, Gamma spectra, radioactive waste, MCNPX

I. 서론

원자력 시설물 해체에서 다양한 방사성 폐기물이 발생하며, 이러한 방사성 폐기물의 처리를 위해서는 정

확한 방사성 오염 특성 평가가 요구된다.[1] 방사성 폐기물 중 배관 폐기물은 배관의 직경이 작아 기존의 검출기의 삽입이 곤란하다. 배관 폐기물은 외부가 아닌 내부가 오염된다. 배관 폐기물의 내부의 오염도

* Dept. of Physics, Myongji University

★ Corresponding author

031-330-6167, ksjo072@gmail.com

Manuscript received Jun. 30, 2015; revised Aug. 06, 2015 ; accepted Aug. 06, 2015

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.

측정을 위하여 기존에는 서베이미터(survey meter)를 이용하여 외부에서 내부 오염도를 측정하거나 시료를 채취하여 오염도를 측정한다. 외부에서 오염도를 측정하는 경우 내부의 오염도를 정확하게 측정 할 수 없다. 또한 시료를 측정하는 방법은 작업자의 피폭 등이 불가피하다는 단점이 있다. 따라서 작업자의 안전성 확보와 원거리 측정 그리고 검출부 소형화를 통한 검출기 내부 삽입 위하여 다양한 형태의 광섬유 검출기가 개발 중에 있다. 그러나 광섬유 검출기의 분광분석에 대한 연구는 많은 성과를 내지 못하였다. 본 연구에서는 비교적 저렴하며 원거리 측정의 장점을 가지고 있는 광섬유와 조해성이 없으며 감마선 에너지에 대해 높은 광수율과 형광감쇠시간, 에너지 분해능이 향상된 Ce:GAGG 그리고 광전자증배관을 이용하여 배관 내부의 방사성 오염도 측정용 광섬유 검출기를 제작하였다. 광섬유를 이용한 검출기는 공간 분해능이 높으며 온도나 압력에 영향을 받지 않으며 원거리측정이 가능하다. 또한 자기장에 취약한 광전자증배관에 자기장의 영향을 감소하는 장점이 있다 [1-3]. 제작한 검출기는 파고분석기를 이용하여 표준 감마선원인 ¹³⁷Cs과 ³³Ba에 대한 분광특성 비교분석을 하였고 계수기를 이용하여 방사선의 세기에 따른 선형성 평가와 거리에 따른 계수값을 측정하였다.

II. 본론

1. 재료 및 방법

1.1 Ce:GAGG 섬광체

일반적으로 감마선 분광분석을 위해서는 원자번호가 높은 LYSO, BGO, CsI와 Ce:GAGG와 같은 무기 섬광체가 많이 사용된다. Ce:GAGG와 기존에 상용화된 섬광체인 LYSO, BGO, CsI 비교하였을 때, LYSO는 40ns의 빠른 잔광시간을 갖는 장점이 있지만 자가 방사능으로 인한 배경잡음이 발생한다는 단점이 있다. BGO는 잔광시간과 발생 광량이 모두 Ce:GAGG이 비하여 좋지 못하다. 또한 CsI 섬광체는 52000개의 높은 광자 발생 확률을 가지고 있지만 잔광시간이 1000ns로 느리며 조해성이 있어서 광섬유와 접합이 불가하다. 따라서 본 연구에서는 광섬유와 섬광체를 접합하여 사용하기 위하여 조해성이 없으며 1MeV의 에너지가 입사하였을 때 55000개의 광자방출 확률을 가지고 90ns 빠른 잔광시간을 가지는 Ce:GAGG를 사용하였다. 그림 1은 3×3×20 mm³ 크기의 Ce:GAGG 섬광체이다[4],[5]. 그림 2는 Ce:GAGG 섬광체의 크기

의 최적화하기 위하여 몬테카를로 기반의 MCNPX 전산코드를 사용하여 얻은 ¹³⁷Cs에 대한 Ce:GAGG 섬광체의 radiation tracking model이다. MCNPX는 이온화 방사선 시스템의 최적화에 적합한 전산모사 프로그램으로이다. MCNPX는 전산모사 하고자 하는 선원의 형태, 에너지, 방출입자 및 방향을 설정한다. 그리고 방출입자와 상호 작용 할 여러 물질들의 원자번호, 밀도 등의 정보를 설정하여 모든 기하학적 구조를 구현 할 수 있다. 전산모사는 ¹³⁷Cs 선원의 감마선 에너지인 662keV 기준으로 하여 섬광체와 거리를 2mm로 고정하였다. 전산모사 결과 20mm 깊이에서 80% 이상의 감마선이 섬광체와 상호작용하는 것을 확인하였다. 전산모사 결과를 기반으로 섬광체의 길이를 20mm로 제작하였다. 표 1은 Ce:GAGG와 상용화된 무기 섬광체의 물리적 특성이다[4-6].

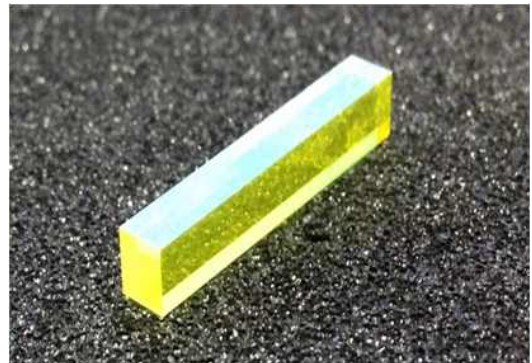


Fig. 1. Ce:GAGG scintillator
그림 1. Ce:GAGG 섬광체

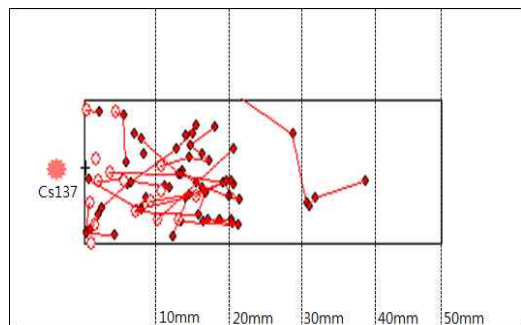


Fig. 2. Radiation tracking model using MCNP
그림 2. MCNP를 이용한 방사선 추적 모델

Table 1. Physical Characteristics of LYSO, BGO, CsI and Ce:GAGG

표 1. LYSO, BGO, CsI, Ce:GAGG의 물리적 특성

Scintillator	LYSO:Ce	BGO	CsI	Ce:GAGG
Density (g/cm ³)	7.40	7.13	4.51	6.63
Peak emission wavelength (nm)	420	480	550	520
Decay time (ns)	40	300	1000	90
Light yield (photons/MeV)	32000	8500	52000	55000
Hygroscopicity	No	No	Yes	No

1.2 광섬유 분광분석기 제작

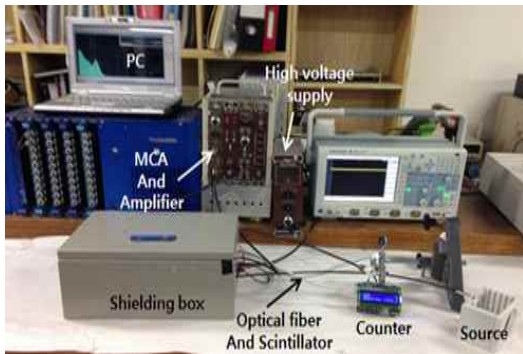


Fig. 3. Measurement system
그림 3. 측정 시스템

그림 3은 측정 시스템이다. 광섬유 검출기는 검출부와 신호처리부로 구성된다. 검출부는 Ce:GAGG 섬광체와 광섬유 그리고 광전자증배관(photo multiplier)으로 구성된다. 입사한 방사선은 Ce:GAGG 내부에서 광자로 변환된다. 변환된 광자는 광섬유를 통하여 광전자증배관에 전달된다. 검출부에서 사용된 광섬유는 계단형 굴절률을 갖는 멀티모드 광섬유로 코어와 클래딩의 굴절률은 각각 1.492와 1.402이며 0.510의 개구수(numerical aperture)를 가지는 Mitsubishi Rayon의 CK-120을 사용하였다. 광섬유의 지름은 섬광체와 접합 사이즈를 고려하여 3mm로 설정하였고 길이는 배관 내부로 충분히 삽입하기 위하여 1m로 설정하였다. 섬광체와 광섬유의 접합에서의 광손실을 줄이기 위하여 Saint Gobain의 BC-603 광구리스

(optical grease)를 이용하였으며 광섬유의 단면을 4가지 종류의 연마지를 사용하여 연마하였다[3],[7],[8]. 섬광체의 반사체로는 수광 효율을 높이기 위하여 250에서 1000nm까지의 방출과장영역에 대하여 90% 이상의 반사율을 가지는 Saint Gobain의 테프론 반사체(teflon reflector)인 BC-642를 사용하였다. 또한 외부에서 들어오는 빛으로 인한 신호잡음을 줄이기 위하여 반사체 표면에 검은색 아크릴 페인트를 도포하였다. 섬광 신호를 측정하기 위한 광센서는 Hamamatsu의 광전자증배관인 H3164를 사용하였다. 본 광전자증배관은 300nm에서 650nm까지의 넓은 영역에서의 민감과장(sensitive peak)을 가지며 최대 민감과장은 420nm이다. 광전자증배관의 작동전압은 -1250V이다. 광전자증배관의 구동을 위하여 -3000에서 3000V까지 전압인가가 가능한 Ortec의 556 high voltage power supply를 사용하였다. 표 2는 H3164 광전자증배관의 특성표이다.

Table 2. Characteristics of H3164

표 2. H3164의 특성

Short Wavelength(nm)	300
Long Wavelength(nm)	650
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

신호처리부는 증폭기(amplifier)와 과고분석기(multi channel analyzer) 그리고 마이크로 제어 장치(micro controller unit)로 구성된다. 광전자증배관에 입사한 하나의 광자는 하나의 펄스를 형성한다. 생성된 펄스를 과고분석기와 마이크로 제어 장치에서 처리하기 위해서는 2V 이상의 출력신호가 필요하다. 2V 이하의 신호를 2V 이상의 신호로 증폭하기 위하여 Ortec의 증폭기인 575 amplifier를 사용하였다. 본 증폭기의 gain range는 5에서 1250까지이다. 증폭된 신호는 방사선 세기와 거리에 따른 계수량 측정을 위하여 마이크로 제어 장치인 Arduino Mega2560으로 전달되어 모니터에 나타난다. 감마선의 분광분석을 위하여 신호가 Ortec의 과고분석기인 926 MCB로 전달되며, 전용프로그램인 Maestro를 이용하여 스펙트럼을 측정한다.

1.3 방사선 세기와 거리 변화에 따른 계수량 측정 및 감마선 분광분석 측정 방법

그림 4는 배관 내부에서의 광섬유 검출기의 방사선 세기 및 거리에 따른 계수량 측정 방법이다. ¹³⁷Cs과 검출기의 거리를 5mm로 고정하고 동위원소의 세기를 1μCi, 5μCi, 10μCi로 변화하여 검출기의 선형성을 측정하였다. 또한 광섬유 검출기와 방사성 폐기물과의 거리에 따른 검출 특성을 평가하기 위하여 검출기에서 5mm에서 40mm까지 ¹³⁷Cs(10μCi)을 5mm 간격으로 이동하여 측정하였다. 측정 결과는 방사선 검출기의 기능적인 검증과 검출 신뢰성을 높이기 위하여 동일한 조건으로 전산모사한 MCNPX값과 비교 분석하였다.

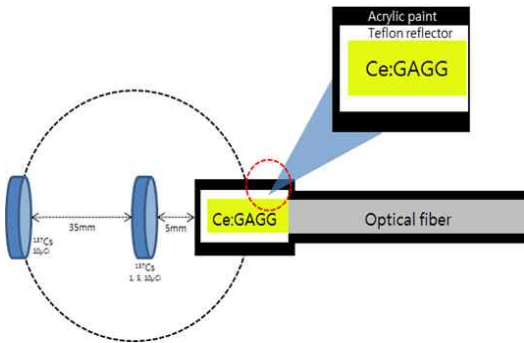


Fig. 4. Measurement method of radiation
그림 4. 방사선 측정방법

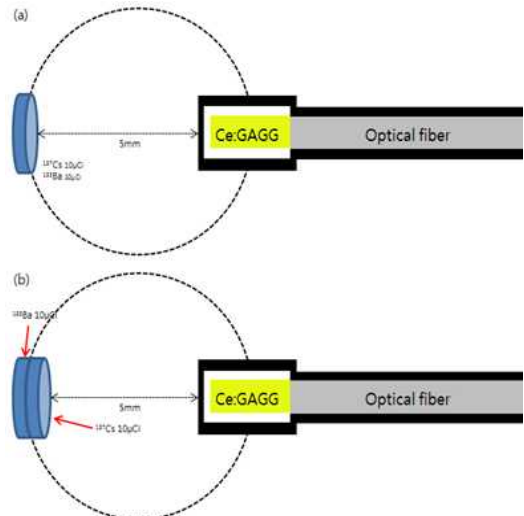


Fig. 5. Measurement method of gamma-ray energy spectra
그림 5. 감마 스펙트럼 측정 방법

었다. 본 연구에서 사용된 방사선원은 Disc type의 표준선원이며 ¹³⁷Cs은 30.17년의 반감기를 갖는다.

그림 5는 광섬유 검출기를 이용한 분광분석 방법이며 5-(a)는 단일 선원에서의 분광분석 방법이며, 5-(b)는 혼합선원에서의 분광분석 방법이다. 단일선원에서 검출기와 교정선원과의 거리는 5mm이며 ¹³⁷Cs(10μCi)과 ¹³³Ba(10μCi) 교정선원을 사용하여 각각 1200초의 시간동안 측정하였다. 혼합선원에서의 분광분석은 ¹³³Ba(10μCi)과 ¹³⁷Cs(10μCi)을 겹쳐서 검출기와의 거리를 5mm 위치하여 1200초 동안 측정하였다. 측정에서 사용된 ¹³³Ba 선원은 10.74년의 반감기를 갖는다.

2. 결과 및 논의

방사선 세기의 증가는 방사선의 선속의 증가를 의미한다. 그에 따라 선량은 선형적으로 증가하게 된다. 그림 6은 제작한 계수기를 이용하여 ¹³⁷Cs선원 1μCi, 5μCi, 10μCi를 측정된 결과이며, 10μCi 세기에서 측정된 값을 100%로 노멀라이제이션(normalization)하여 나타낸 그래프이다. 추세선식 R-square값이 0.99741로 매우 좋은 응답선형성을 보였다.

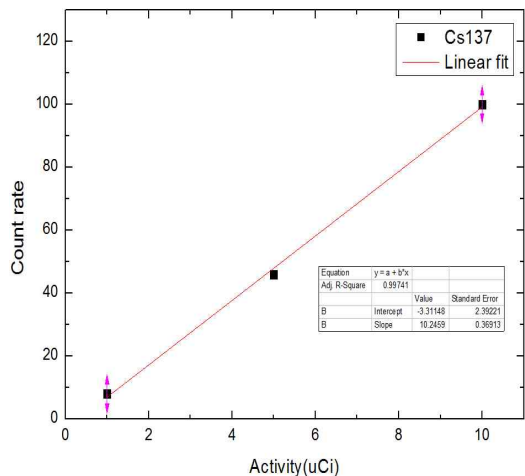


Fig. 6. Responses of the fiber-optics detector as the intensity of radiation
그림 6. 방사선 세기에 따른 광섬유 검출기의 반응성

그림 7과 8은은 거리 변화에 따른 검출기의 검출 특성 그래프이다. 방사선과 검출기의 거리가 멀어질수록 거리의 역자승법칙에 의하여 계수량은 감소한다. 7은 5mm에서 40mm까지 선원을 이동시키며 측정된 실측값이다.

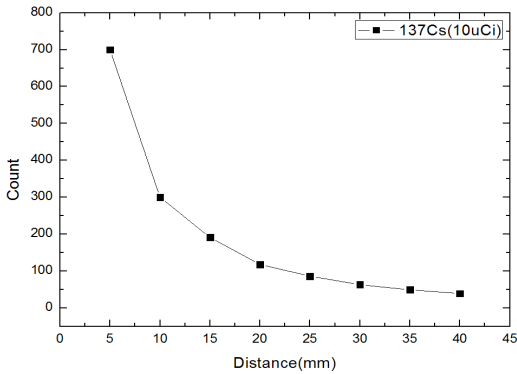


Fig. 7. Efficiency curve calculated from MCNPX values as a function of the measurement distance using ¹³⁷Cs

그림 7. ¹³⁷Cs과 검출기 거리 변화에 따른 검출기의 검출 효율 곡선(MCNPX 값)

그림 8은 MCNPX값과 비교하기 위하여 가장 가까운 거리에서의 계수값을 100%로 설정하여 노멀라이제이션(normalization)값으로 나타낸 그래프이다. 측정값과 MCNPX값과 비교하였을 때 최대 오차는 15mm 지점에서 2%로 매우 낮은 오차율을 보였다.

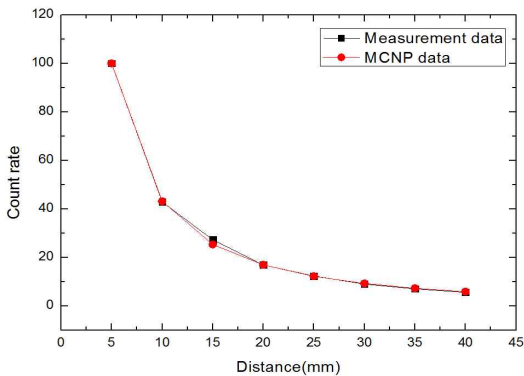


Fig. 8. Efficiency curve calculated from experimental values as a function of the measurement distance using ¹³⁷Cs.

그림 8. ¹³⁷Cs과 검출기 거리 변화에 따른 검출기의 검출 효율 곡선(측정 값)

그림 9는 각 선원에 대한 에너지 분광 결과이다. 그림 9-(a)는 ¹³⁷Cs 선원에서 방출되는 감마선 스펙트럼이다. 측정 결과 ¹³⁷Cs의 감마선 에너지인 662keV에서 감마선 피크를 확인하였다. 9-(b)는 ¹³³Ba의 감마선 스펙트럼이며 356keV에서 ¹³³Ba 선원에서 방출되는 감마선 피크를 확인하였다.

그림 10은 혼합선원에서의 에너지 분광 결과이다. 측정 결과 ¹³⁷Cs과 ¹³³Ba의 감마선 피크인 662과

356keV에서 감마선 에너지 피크를 확인하였다. 또한 ¹³⁷Cs의 위치가 ¹³³Ba의 위치보다 앞에 있지만 ¹³⁷Cs보다 ¹³³Ba의 감마선 피크가 높게 나오는 것은 Ce:GAGG의 기하학적 구조에 따라 감마선 흡수율이

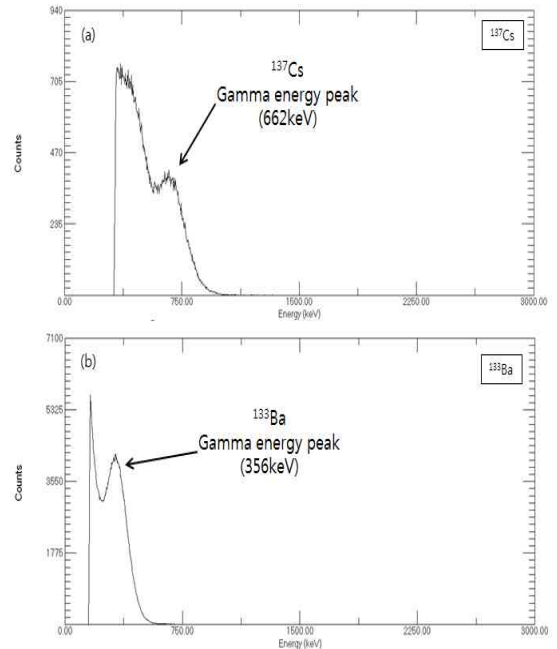


Fig. 9. Measured energy spectra of gamma-ray using fiber-optics detector, (a) ¹³⁷Cs(10µCi) (b) ¹³³Ba(10µCi).

그림 9. 광섬유 검출기를 이용한 (a) ¹³⁷Cs(10µCi)과 (b) ¹³³Ba(10µCi)의 감마 스펙트럼

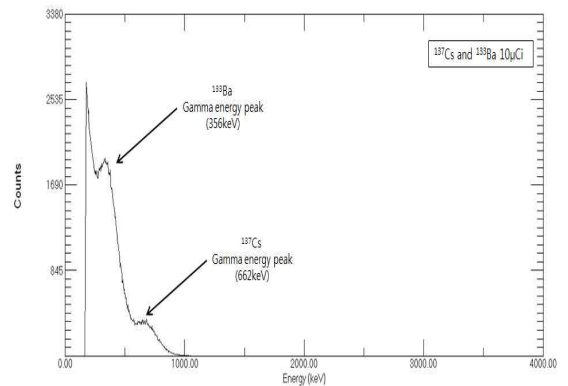


Fig. 10. Energy spectra of gamma-ray emitted from ¹³⁷Cs(10µCi) and ¹³³Ba(10µCi).

그림 10. ¹³⁷Cs(10µCi), ¹³³Ba(10µCi) 혼합선원의 감마선 스펙트럼

변화하는데 섬광체의 길이가 짧을수록 선원에서 발생되는 감마선 에너지가 클수록 섬광체에서 흡수하는 감마선 흡수율이 작아지기 때문이다.

III 결론

본 연구에서는 Ce:GAGG 섬광체와 광섬유 그리고 광전자증배관을 이용하여 감마선 에너지 분광이 가능한 광섬유 검출기를 제작하였다. ^{137}Cs 과 ^{133}Ba 고정선원을 이용하여 검출기의 특성을 분석하였다. 그 결과 선원에 세기 변화에 따른 응답선형성을 0.99741로 매우 좋은 응답선형성을 보였다. 선원의 거리 변화에 따른 검출기 특성 또한 2% 이하의 오차를 보였다. 2종류의 선원에서의 감마선 에너지 분광을 수행하였고, 그 결과 2종류에 선원 모두에서 감마선 에너지 피크를 확인하였다. 또한 2종류의 선원을 혼합하여 측정된 결과에서도 선원에 위치에 따라 양적인 변화는 발생하지만 감마선 피크의 위치는 변화하지 않는 것을 확인하였다. 현재 광섬유와 무기 섬광체를 이용하여 광섬유 검출기를 제작하는 연구는 한정적이다. 그러나 본 연구를 지속적으로 진행한다면 원자력 시설 해체 및 보수에서 측정 시간 단축과 작업자 피폭 최소화 그리고 원격측정을 장점을 가지는 광섬유 검출기를 개발 할 것으로 기대된다.

References

- [1] Gye Hong Kim, Chan Hee Park, Chong Hun Jung, Kune Woo Lee, and Bum Kyoung Seo, "Development of the ZnS(Ag)/BC-408 phoswich detector for monitoring radioactive contamination inside pipes", J. Korea Asso. Radia. Prot, 33(3), pp. 123-128, 2006
- [2] Gye Hong Kim, Woo Jin Oh, Kune Woo Lee, and Bum Kyoung Seo, "Fabrication and estimation of the plastic detector for measuring the contamination for beta-ray level of the kind of duct waste", J of the Korean Radioactivity Waste Society, 3(3), pp.159-165, 2005
- [3] Ki Tek Han, Wook Jae Yoo, Sang Hun Shin, Da yeong Jeon, and Jang Yeon Park, "Development of Fiber-optic Radiation Sensor Using LYSO Scintillator for Gamma-ray Spectroscopy" Journal of Sensor Science and Technology, 21(4), pp. 287-292, 2012
- [4] Yeom JY, Yamamoto. S et al. "First Performance Results of Ce:GAGG Scintillation Crystals With Silicon Photomultipliers", IEEE

Trans. Nucl. Sci. 60(2), pp. 988 - 992. 2013

[5] Yamamoto. S, Yoshimune O, "A compact and high efficiency GAGG well counter for radiocesium concentration measurements", Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A. 753, pp. 19 - 23, 2014

[6] 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(3), 2014

[7] 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

[8] C. M. Ahn, Y. S. Kim, "A 8-bit 10-MSample/s Folding & Interpolation ADC using Preamplifier Shaping Method", Journal of IKEEE, Vol. 17, No. 3, pp.275-283, Sep, 2013

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