

&lt;원저&gt;

## 중성자선과 감마선 동시측정이 가능한 휴대용 계측시스템 개발에 관한 연구

김희경<sup>1)</sup>·홍용호<sup>1)</sup>·정영석<sup>1)</sup>·김재현<sup>2)</sup>·박수연<sup>1)</sup><sup>1)</sup>주식회사 액트·<sup>2)</sup>한양대학교 원자력공학과

### Development of a Portable Detection System for Simultaneous Measurements of Neutrons and Gamma Rays

Hui-Gyeong Kim<sup>1)</sup>·Yong-Ho Hong<sup>1)</sup>·Young-Seok Jung<sup>1)</sup>·Jae-Hyun Kim<sup>2)</sup>·Sooyeon Park<sup>1)</sup><sup>1)</sup>Atomic Creative Technology (ACT) Co.,Ltd<sup>2)</sup>Department of Nuclear Engineering, Hanyang University

**Abstract** Radiation measurement technology has steadily improved and its usage is expanding in various industries such as nuclear medicine, security search, satellite, nondestructive testing, environmental industries and the domain of nuclear power plants (NPPs). Especially, the simultaneous measurements of gamma rays and neutrons can be even more critical for nuclear safety management of spent nuclear fuel and monitoring of the nuclear material. A semiconductor detector comprising cadmium, zinc, and tellurium (CZT) enables to detect gamma-rays due to the significant atomic weight of the elements via immediate neutron and gamma-ray detection. Semiconductor sensors might be used for nuclear safety management by monitoring nuclear materials and spent nuclear fuel with high spatial resolution as well as providing real-time measurements. We aim to introduce a portable nuclide-analysis device that enables the simultaneous measurements of neutrons and gamma rays using a CZT sensor. The detector has a high density and wide energy band gap, and thus exhibits highly sensitive physical characteristics and characteristics are required for performing neutron and gamma-ray detection. Portable nuclide-analysis device is used on NPP-decommissioning sites or the purpose of nuclear non-proliferation, it will rapidly detect the nuclear material and provide radioactive-material information. Eventually, portable nuclide-analysis device can reduce measurement time and economic costs by providing a basis for rational decision making.

**Key Words:** Detection, CZT sensors, Prompt gamma, Simultaneous measurements, Nuclear nonproliferation

**중심 단어:** 방사선 계측, CZT 센서, 즉발감마선, 동시측정, 핵비확산

## I. 서 론

국내외 방사선 측정 분야가 빠르게 성장하면서 방사선 측정기술은 비파괴 검사뿐만 아니라 원자력발전과 방사선 산업 및 핵의학, 보안 및 검색, 인공위성, 비파괴, 환경 등 다양한 산업 분야까지 그 활용성이 확장되고 있다[1]. 방사성 물

질은 의료분야뿐만 아니라, 산업 분야, 식품 분야, 학술 분야에서 물리학, 천문학, 생물학의 영역에 이르기까지 매우 폭넓게 사용되고 있으므로 방사성 물질의 생물학적 영향으로부터 사람을 보호하기 위한 측정기술은 매우 중요하다고 할 수 있다[2,3]. 그중 원전의 핵분열 생성물로부터 다량으로 발생 될 수 있는 중성자선과 감마선의 정확한 측정은 방사

This work was supported by a nuclear safety research project and funded by the Nuclear Safety and Security Commission (No.1075000999)  
Corresponding author: Sooyeon Park, Lab for energy engineering, Atomic Creative Technology Co.,Ltd., 1434, Yuseong-daero Yuseong-gu, Daejeon, 34101, Republic of Korea / Tel: +82-42-331-3885 / E-mail: linapark@actbest.com

Received 23 November 2020; Revised 3 December 2020; Accepted 13 December 2020

Copyright ©2020 by The Korean Journal of Radiological Science and Technology

선 안전관리뿐만 아니라 주변 환경과 원자력시설 구조물의 방사화 평가를 위해서도 중요하지만, 원전 내에서 핵연료 집합체 저장소와 같은 협소한 공간이나 방사선사고 상황에서 현장 측정은 환경적 제약이 따르므로 높은 유연성을 갖춘 소형 계측기의 개발이 요구되는 실정이다[3-5]. 이러한 환경에서 사용하기 위해 본 연구에서 개발한 휴대용 계측시스템은 CZT 센서를 활용하여 간단한 회로의 구현으로 계측시스템을 경량화하였고, 사용 및 보관 시 냉각할 필요 없이 상온에서도 손쉽게 운용할 수 있도록 하였다. 반도체 검출기 중에서도 CZT는 Cadmium, Zinc, Tellurium로 구성되어 원자량이 크기 때문에 광전효과가 잘 일어나고, 측정 가능한 에너지 범위가 넓어 엑스선과 감마선 검출이 우수한 물리적 특징이 있다[6-9]. 따라서 환경 준위에서부터 0.1 mSv/h 이상의 고선량 준위까지 효율적인 적용이 가능하다.

본 연구에서는 상온에서도 감마선 방출 핵종을 효율적으로 탐지할 수 있는 CZT 센서를 이용하여, 즉발감마선 검출을 통해 중성자선과 감마선의 동시 계측이 가능하도록 한 휴대용 계측시스템을 개발하였고 개발된 장비의 활용 가능성에 대해 평가하고자 한다.

## II. 대상 및 방법

### 1. CZT 기반의 반도체형 방사선 검출기 설계

#### 1) CZT 센서

반도체 방사선 계측기는 방사선의 에너지 및 스펙트럼을

측정하기 위해 반도체 물질의 성질을 활용한 장비를 말하며, 적은 에너지로 전자와 양공의 이온쌍을 생성할 수 있으므로 기체나 섬광형 등의 다른 방사선 검출기에 비하여 여러 가지 장점을 지닌다[6-8]. 특히 CZT센서는 상온에서 사용할 수 있는 반도체로 카드뮴(Cd), 아연(Zn), 텔루륨(Te)의 물리적 상호작용을 전기적 신호로 변환시켜 검출하므로 입사 방사선에 대한 출력신호가 크고 안정적인 펄스파고를 얻을 수 있다는 장점이 있다[9]. 이러한 장점 때문에 차세대 검출기의 핵심 소재로 각광받고 있으며, Table 1에서 나타난 바와 같이 소형화 및 경량화된 계측기가 활발하게 출시되고 있으나, 국내외의 연구기관들에서 반도체 검출기에 대한 연구 내용을 공개하지 않고 있으므로 해당 분야에 대한 원천기술을 확보하는 것이 중요한 과제로 인식되어 왔다[10].

따라서 본 연구에서 개발하고자 하는 계측시스템은 CZT 센서와 같이 수입에 의존할 수 밖에 없는 핵심부품을 모듈 형식이 아닌 단위 부품 또는 칩(chip) 형태로 도입하여 해외 의존성을 최소화하고자 하였다[10]. Table 2에서는 HPGe (MarsOdyssey, NASA)와 본 연구에서 개발하고자 하는 계측시스템의 비교표를 나타내었다. 상용 실리콘 센서 중 신제품 개발을 위해 센서만 개별적으로 판매되면서 100 μSv/h 이하의 영역에서 포화 되지 않는 CdZnTe(DM500, BSI Co., Ltd. Latvia) 검출기를 선정하였고, CZT센서의 신호 특성에 맞는 회로를 자체 제작하여 CZT 검출시스템의 국산화를 이루고자 하였다.

#### 2) 검출기시스템 신호처리 회로 설계

검출기시스템의 설계를 위해 Fig. 1에서 나타난 바와 같이

**Table 1.** Basic specifications for portable gamma/neutron detectors using semiconductor sensors

		Portable gamma/neutron detectors		
Name		Raymon10	NanoRaider R300	Interceptor
Image				
Country		United Kingdom	USA	multinational corporation
Company		Kromek	FLIR	Thermo
Detectable energy range	Gamma	30 keV ~ 3 MeV		25 keV ~ 3 MeV
	Neutron	N/A		
Sensor	Gamma	CZT(CdZnTe)		
	Neutron	N/A	He-3	
Sensitivity		up to 1 mSv/h @ 662 keV	0.1 ~ 100 mSv/h, 2.6 cps/nv	1.5 cps/μR/h, 1.2 cps/nv

**Table 2.** Specification comparison of HPGe detector and developed detector

	HPGe detector	Developed detector
Cooling method	Liquid nitrogen	No need
Detection	X, $\gamma$	n, $\gamma$
Function	Radionuclides analysis	Radionuclides analysis and dose rate detection
Mass, kg	30* or heavier	Less than 6**
Size	Large	Small

\* The value corresponds to the HPGe spectrometer (MarsOdyssey, NASA) with its electrical cooling system included.

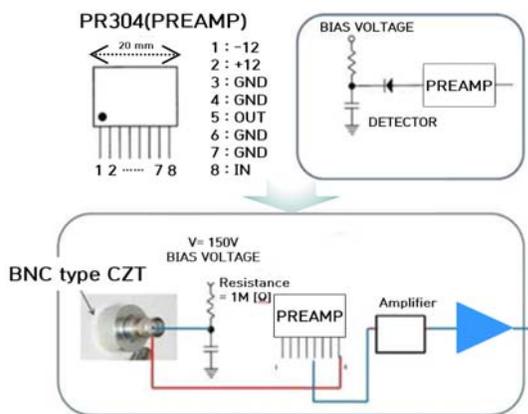
\*\* The value corresponds to the developed system including battery packs and modules.

10 × 10 × 5 mm<sup>3</sup> 크기의 CZT센서(BSI Co.,Ltd, Latvia)와 센서에서 받은 신호를 성형하기 위한 전치증폭기(preamplifier), 성형된 신호를 증폭하기 위한 주증폭기(amplifier) 및 이를 판별하기 위한 파고선별기(rise time discriminator)로 신호처리 회로를 구성하였다[10,11].

주증폭기, 고전압 공급장치 및 파고선별기는 기존에 개발되어 여러 계측기의 개발에 활용된 보드를 사용하였고, 노이즈 차폐를 위한 외장하우징 내에서 CZT센서와 chip의 위치를 바꾸어 조립하며 동작 테스트를 수행하여 Fig. 2와 같이 회로 구성을 최적화하였다.



**Fig. 1.** Components of the circuit for detection system development



**Fig. 2.** Schematic diagram of the circuit for signal processing

### 3) 검출기시스템 구조부 설계

검출기시스템에서 센서의 크기는 측정 가능한 선량률 범위를 결정짓는 중요한 요인이다.

센서의 크기가 5 mm<sup>3</sup> 정도로 작으면 50 mSv/h에서 약 200 mSv/h까지 측정이 가능하지만 작은 크기로 인해 측정 가능한 감마선 에너지 범위 또한 저에너지 영역으로 좁아지므로 일반적인 현장에서 사용하기에는 적절하지 않다. 반면에 센서의 크기가 500 mm<sup>3</sup> 이상으로 큰 경우 환경 준위부터 3 mSv/h까지의 측정이 가능하며 방사선사고 현장에서 2 MeV의 감마선도 측정이 가능하므로 500 mm<sup>3</sup> 크기의 CZT 센서를 선택하였다[12]. 검출시스템은 Fig. 3에서 나타낸 바와 같이 두 개의 CZT센서를 나란히 배치하여 첫 번째 센서로 기준이 되는 감마선을 측정하도록 하였고, 두 번째 센서는 High-Borate Polyethylene(HBP)와 같은 감속재로 차폐하여 총 두 개의 스펙트럼을 획득할 수 있도록 설계하였다.

### 2. CZT 기반의 반도체형 검출기 외형 설계 및 제작

보다 효율적인 중성자선 반응을 유도하기 위해 Fig. 4와 같이 Polyethylene(PE)를 감속재 물질로 선정하여 설계하였고, CZT와 중성자선의 반응으로 발생할 수 있는 즉발감마선의 에너지를 도출하기 위해 MCNPX-PoliMi v2.0(Monte Carlo N-Particle Transport Code System To Simulate Time-Analysis Quantities)를 활용하여 전산모사를 수행하였다.

위와 같이 설계 및 제작까지 완료된 계측기에 대해 실제 선원을 사용하여 시험적으로 측정을 수행하였다. 사용된 선원의 방사능은 각각 1 mCi(37 MBq)인 Cs-137과 Co-60이며, 약 10 cm 정도의 거리에서 10분간 측정하여 에너지 스펙트럼을 획득하였다.

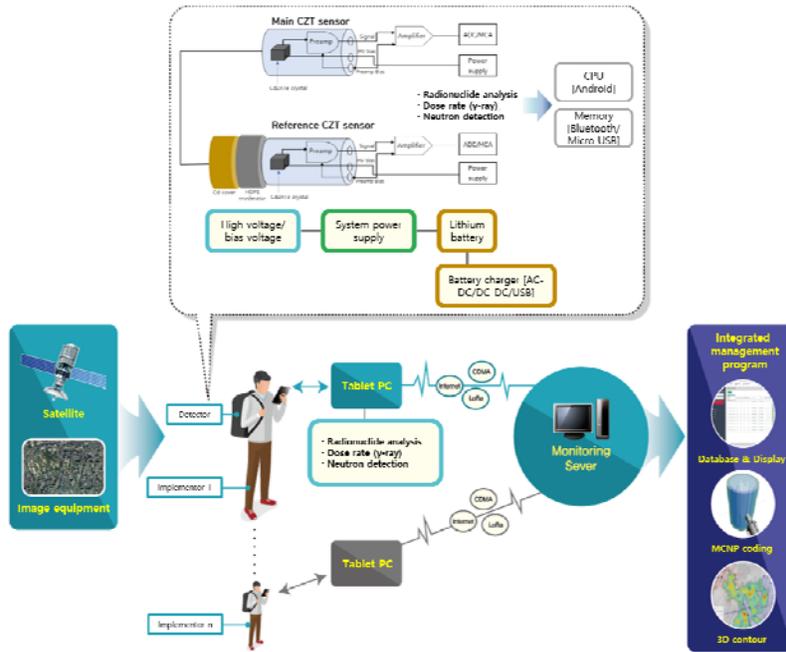


Fig. 3. Conceptual diagram of the neutron/gamma simultaneous measurement system with double CZT sensors

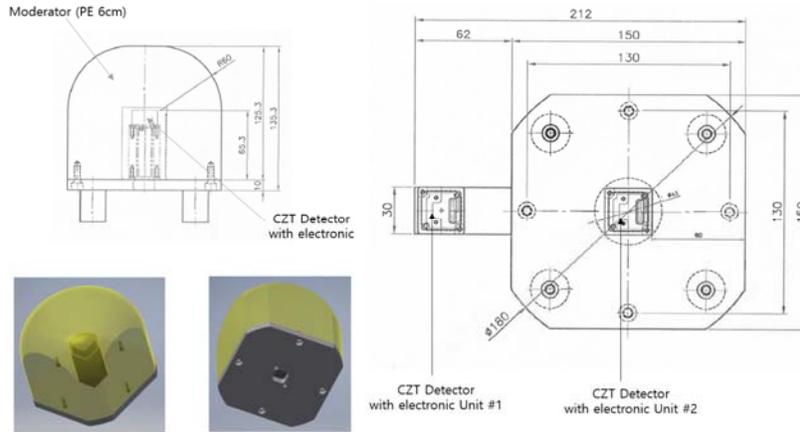


Fig. 4. Detector array and exterior design with moderator

### III. 결 과

본 연구에서는 화합물 반도체인 CZT(Cadmium Zinc Tellurium) 센서 두 개를 사용하여 상온에서도 중성자선과 감마선의 계측이 가능한 계측시스템을 개발하였다.

MCNP/MCNP-Polimi를 활용한 시뮬레이션 결과, CZT와 중성자선의 반응으로 발생할 수 있는 즉발감마선은 Fig. 5에서 나타난 바와 같이 95 keV, 558.3 keV, 651.2 keV 로 나타났으며, PE와 중성자선의 반응으로 발생할 수 있는 감마선은 478 keV 인 것으로 나타났다. 감속재를 사용하였을 때 95 keV, 558.3 keV, 651.2 keV의 에너지를 각각 약 420 counts, 610 counts, 100 count 정도 얻었으며, 감속재와

의 상호작용으로 다른 에너지에서도 약간의 피크가 관찰됨을 보였다. 감속재를 사용하지 않았을 때는 95 keV, 558.3 keV, 651.2 keV의 에너지를 각각 12000 counts, 21000 counts, 2500 counts 측정하였다.

Fig. 6은 1 mCi(37 MBq)의 Cs-137 선원과 Co-60 선원을 10 cm 거리에서 10분간 세 번 측정했을 때 획득한 채널별 에너지 스펙트럼을 나타내었으며, 각각의 채널별로 획득한 에너지는 선형적으로 증가함을 확인하였다.

Fig. 7은 감속재(Moderator)를 적용했을 때와 적용하지 않았을 때, Cf-252를 13 cm의 거리에서 10분간 측정된 결과를 나타내고 있으며 558.6 keV에서 피크가 나타나는 것을 확인하였다.

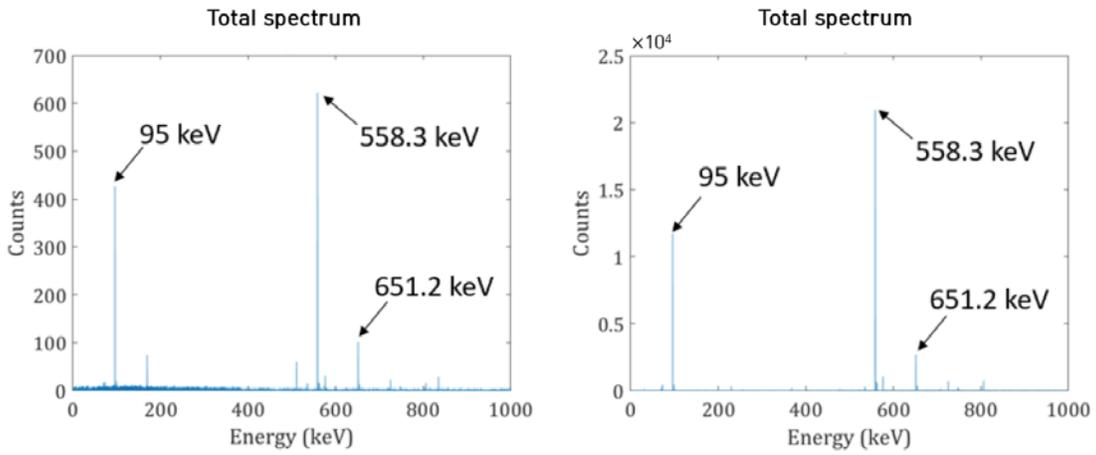


Fig. 5. Obtained energy spectrum with a 6cm moderator (left) and without moderator (right)

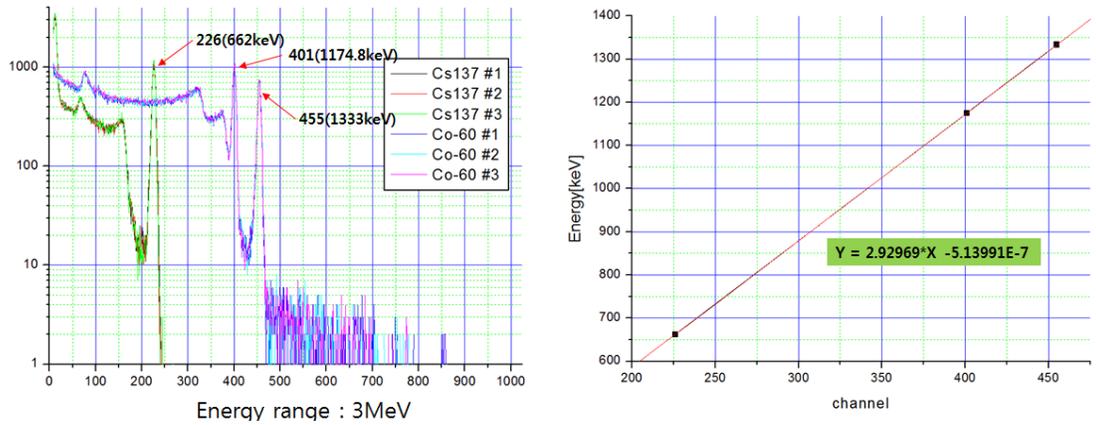


Fig. 6. Obtained energy spectrum(left) and energy linearity test result using Cs-137 and Co-60 sources

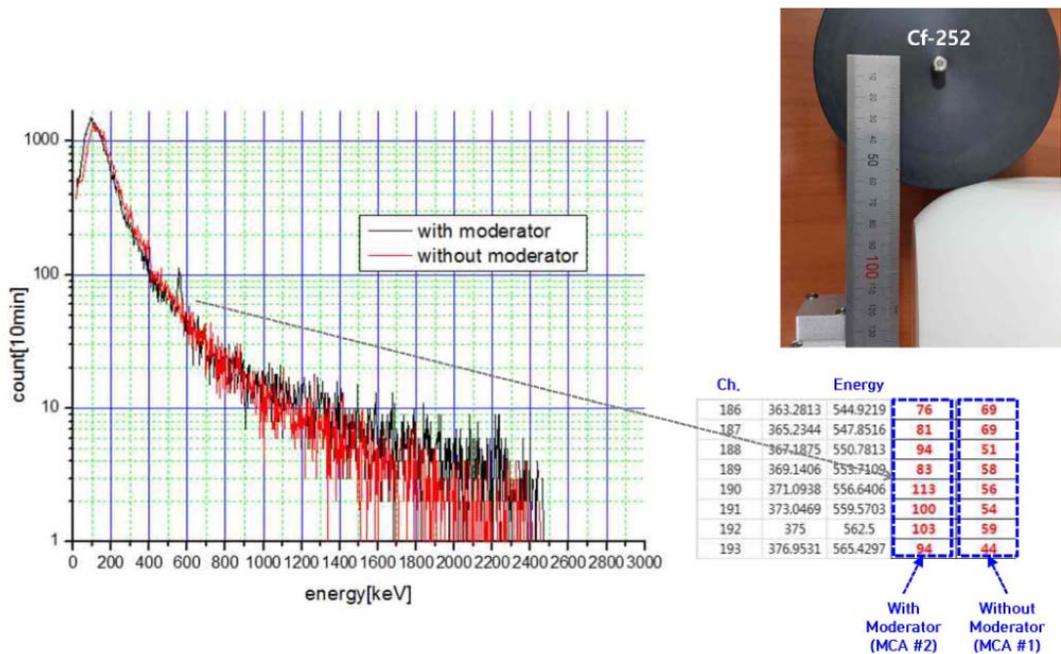


Fig. 7. Energy spectrum without moderator(MCA#1, Red) and energy spectrum with moderator(MCA#2, Black)

## IV. 고 찰

고속중성자선과 CZT의 반응은 주로 충돌에 의해 에너지 전달이 이루어지는데, 비탄성 충돌 시에는 타겟에 에너지의 일부를 전달하여 여기시키고, 여기 상태에서 안정된 상태로 에너지 준위가 떨어지면서 558 keV의 특성선을 발생시키게 된다[13]. 이와 반면에 탄성 충돌시에는 고속중성자선이 타겟으로부터 산란 되는 과정에서 운동에너지 일부를 산란 각도에 비례하여 전달하게 되며 이때 5~20 keV 정도의 에너지를 전달하게 된다[14,15]. 열중성자선의 경우 CZT와 비탄성충돌에 의해 558 keV의 감마선을 발생시키게 되는데, 백그라운드를 제거하는 것과 같은 원리로 두 번째 센서에서 얻은 스펙트럼에서 첫 번째 센서에서 얻은 스펙트럼만큼 빼주면 고속중성자선과 열중성자선을 구분한 스펙트럼을 획득할 수 있다. 본 연구에서는 이와 같은 원리를 이용하여 두 개의 CZT센서를 이용함으로써 비탄성충돌에 의한 특성 감마선 정보를 획득하였고 558 keV의 스펙트럼 면적에서 백그라운드 면적을 소거하여 검출된 중성자선 수를 산출할 수 있었다. 추후 두 개의 센서에 대해 차폐물의 구조를 다르게 적용하였을 때 발생하는 스펙트럼 신호에 대한 추가적인 연구를 수행하면 고속중성자선과 열중성자선을 구분한 측정도 가능할 것으로 사료된다[16-18].

본 연구에서 제안한 계측기는 성능 검증을 위한 반복적 측정 및 분석이 필요할 것이며, 추후 IoT를 기술을 접목하여 태블릿PC를 통해 여러 관계기관이 쉽게 정보를 실시간으로 확인 가능할 것으로 기대된다.

## V. 결 론

감마선과 중성자선의 동시측정은 사용 후 핵연료의 안전 관리와 특정핵물질을 모니터링 하는데 있어 매우 중요하다. 본 연구에서는 상온에서도 감마선 핵종 분석이 가능한 CZT 센서를 활용하여 중성자선과 감마선의 동시 계측이 가능한 휴대용 분석장치를 개발하였고 활용방안에 대해 기술하였다. 본 연구를 통해 개발된 장비는 반도체 센서를 활용하였으므로 높은 공간분해능을 가지고 있을 뿐만 아니라 실시간 측정도 가능하므로 핵 비확산 현장 검증 분야와 국내외 원자력 관련 기관에서 활용이 가능할 것이며, 핵 비확산 현장 검증 분야에 적용될 경우 신속하게 핵물질을 탐지하여 방사능 정보에 대한 과학적인 데이터 수집을 가능하게 할 것이다. 또한, 국내외 방사성폐기물 관련 기관 및 원전 해체 분야에서는 짧은 시간에 분석하여 시간적 경제적 비용을 절감

하게 하고, 제염 해체와 핵물질 처리 방안 등에 대한 합리적인 의사결정이 가능하도록 근거를 제공하는 장비로 활용될 것으로 기대한다.

## REFERENCES

- [1] Knoll GF. Radiation detection and measurement. John Wiley & Sons; 2010.
- [2] Ahmed SN. Physics and engineering of radiation detection. Academic Press; 2007.
- [3] Sinclair TR, Muchow RC. Radiation use efficiency. InAdvances in agronomy. Academic Press. 1999;65: 215-65.
- [4] Yoshimuta T, Tokuda S, Tanabe K, Kishihara H, Kaino M, Yoshimatsu A, et al. Inventors; Shimadzu Corp, assignee. Radiation detector and method of manufacturing the same. United States patent US 9,985,150. 2018.
- [5] Lindell B. A history of radiation protection. Radiation Protection Dosimetry. 1996;68(1-2):83-95.
- [6] Wagenaar DJ, Parnham K, Sundal B, Maehlum G, Chowdhury S, Meier D, et al. Advantages of semiconductor CZT for medical imaging. InPenetrating Radiation Systems and Applications VIII, International Society for Optics and Photonics. 2007 Sep;6707: 67070I.
- [7] Kim JK, Lee WG, Kim SY, Shin CH, Kim KO, Park JM, et al. Simulation and performance test technology development for semiconductor radiation detection instrument fabrication. Korea Atomic Energy Research Institute; 2010.
- [8] Iniewski K. CZT detector technology for medical imaging. Journal of Instrumentation. 2014 Nov; 9(11):C11001.
- [9] Zha G, Wang T, Xu Y, Jie W. The development of CZT semiconductor X-ray and  $\gamma$ -ray detectors. Wuli. 2013;42(12):862-9.
- [10] Park SY, Kim HG, Yang H, Lee H, Han S, Jeong M, et al. Development and utilization of portable nuclide-analysis system for simultaneous measurements of neutrons and gamma rays. The Journal of the Korean Radioactive Waste Society. 2020

- July;18(1):335-6.
- [11] Jeon JY, Kim JH, Park JM, Yang JY, Kim KY, Kim YS. Development of charge sensitive preamplifier and readout integrate circuit board for high resolution detector using ASIC process. Korea Atomic Energy Research Institute; 2010.
- [12] Lee KH, Ha JH, Kim HS. Analysis of study trend of growth and characterization of CdZnTe single crystal. Korea Atomic Energy Research Institute; 2011.
- [13] Streicher M, Goodman D, Zhu Y, Brown S, Kiff S, He Z. Fast neutron detection using pixelated CdZnTe spectrometers. IEEE Transactions on Nuclear Science. 2017 May;64(7):1920-6.
- [14] Attix FH. Introduction to radiological physics and radiation dosimetry. John Wiley & Sons; 2008.
- [15] Andreo P, Burns DT, Nahum AE, Seuntjens J, Attix FH. Fundamentals of ionizing radiation dosimetry. John Wiley & Sons; 2017.
- [16] Schulte RL, Swanson FR. Inventors; Northrop Grumman Corp, assignee. Directional thermal neutron detector. United States patent US 5,659,177. 1997.
- [17] Bae SY, Kim JH. A study on the radioactive products of components in proton accelerator on short term usage using computed Simulation. KSRS. 2020;43(5):389-95.
- [18] Lee DY, Park ET, Jim JH. Characterization of the neutron for linear accelerator shielding wall using a monte carlo simulation. KSRS. 2016;39(1):89-97.

구분	성명	소속	직위
제1저자	김희경	주식회사 액트	소장
공동저자	홍용호	주식회사 액트	대표
공동저자	정영석	주식회사 액트	부장
공동저자	김재현	한양대학교	한양대학교 박사
교신저자	박수연	주식회사 액트	대리