

MDA Assessment of NaI(Tl), LaBr₃(Ce), and CeBr₃ Detectors for Freshly Deposited Radionuclides on the Soil

지표면 침적 방사성핵종에 대한 NaI(Tl), LaBr₃(Ce) 및 CeBr₃ 검출기의 MDA 비교 평가

Jun-Ho Lee^{1,2}, Bong-Gi Kim^{1,2}, Dong Myung Lee^{1,2}, and Jong-In Byun^{1,2*}

¹Korea Institute of Nuclear Safety, 62, Gwahak-ro, Yuseong-gu, Daejeon, Republic of Korea

²University of Science and Technology, 217, Gaheong-ro, Yuseong-gu, Daejeon, Republic of Korea

이준호^{1,2}, 김봉기^{1,2}, 이동명^{1,2}, 변종인^{1,2*}

¹한국원자력안전기술원, 대전광역시 유성구 과학로 62

²과학기술연합대학원대학교, 대전광역시 유성구 가정로 217

(Received May 2, 2019 / Revised June 26, 2019 / Approved September 9, 2019)

The detection performances of the NaI(Tl), LaBr₃(Ce) and CeBr₃ scintillation detectors, which can be used to rapidly evaluate the major artificial radionuclides deposited on the soil surface in a nuclear accident or radiological emergency, were compared. Detection performance was assessed by calculating the minimum detectable activity (MDA). The detection efficiency of each detector for artificial radionuclides was semi-empirically determined using mathematical modelling and point-like sources having certified radioactivity. The background gamma-ray energy spectrum for MDA evaluation was obtained from relatively wide and flat grassland, and the MDA values of each detector for the major artificial radionuclides that could be released in nuclear accidents were calculated. As a result, the relative MDA values of each detector regarding surface deposition distribution at normal environmental radiation level were evaluated as high in the order of the NaI(Tl), LaBr₃(Ce), and CeBr₃ detectors. These results were compared based on each detector's intrinsic and measurement environment background, detection efficiency, and energy resolution for the gamma-ray energy region of the radionuclide of interest.

Keywords: In-situ gamma-ray spectrometry, Scintillation detector, NaI(Tl), LaBr₃(Ce), CeBr₃, MDA

*Corresponding Author.

Jong-In Byun, Korea Institute of Nuclear Safety, E-mail: k975bji@kins.re.kr, Tel: +82-42-868-0876

ORCID

Jun-Ho Lee <http://orcid.org/0000-0003-0143-6124>

Dong Myung Lee <http://orcid.org/0000-0002-6922-5721>

Bong-Gi Kim

Jong-In Byun

<http://orcid.org/0000-0002-6624-277X>

<http://orcid.org/0000-0003-0391-3203>

본 연구에서는 원자력 사고 또는 방사선 비상 시 지표면에 침적될 수 있는 감마선방출 핵종의 방사능을 신속하게 평가하기 위해 이용될 수 있는 NaI(Tl), LaBr₃(Ce) 및 CeBr₃ 섬광검출기의 성능을 비교 평가하였다. 검출성능은 최소검출가능방사능(MDA, Minimum Detectable Activity)을 통해 평가하였으며, 각 검출기의 지표면 침적 감마선방출 핵종에 대한 검출효율은 수학적 모델링과 점선원을 이용하여 반실험적으로 산출하였다. MDA 평가를 위한 백그라운드 감마선에너지스펙트럼은 비교적 넓고 평탄한 초지에서 측정되었으며, 원자력 사고 시 방출될 수 있는 주요 핵종에 대한 각 검출기의 MDA를 산출하였다. 그 결과 일반 환경방사능 준위에서 지표면 침적 감마핵종에 대한 각 검출기의 MDA 크기는 대체로 “NaI(Tl) > LaBr₃(Ce) > CeBr₃”로 평가되었으며, 백그라운드 준위가 유사한 에너지 영역에서는 분해능이 가장 우수한 LaBr₃(Ce)에서 최소 값을 보였다. 이는 관심 핵종의 감마선에너지 영역에 대한 각 검출기의 자체 및 측정 환경 백그라운드, 측정 효율, 그리고 에너지 분해능 특성을 바탕으로 비교 분석되었다.

중심단어: 현장감마선분광분석, 섬광검출기, NaI(Tl), LaBr₃(Ce), CeBr₃, MDA

1. 서론

현장 감마선분광분석(in-situ gamma-ray spectrometry)은 현장에서 시료를 채취하지 않고 직접 감마핵종을 판별하고 방사능을 평가할 수 있는 방법으로서 신속한 현장 평가가 요구되는 원자력 사고 또는 방사선 비상 시 효과적으로 적용될 수 있다. 현장 감마선분광분석을 위한 검출기 중 최근 주로 활용되고 있는 NaI(Tl), LaBr₃(Ce) 및 CeBr₃와 같은 섬광검출기는 HPGe 검출기와 같은 반도체 검출기에 비해 낮은 에너지 분해능을 갖고 있지만 상온 및 저전력 조건에서 측정이 가능하므로 비상 시 이동형 검출기로서 용이하게 활용될 수 있다. NaI(Tl)는 LaBr₃(Ce) 및 CeBr₃에 비해 에너지 분해능이 낮고 온도 의존성이 높지만 섬광체 자체의

백그라운드는 거의 없는 장점을 지니고 있다. LaBr₃(Ce)은 동일 크기의 NaI(Tl) 및 CeBr₃에 비해 에너지 분해능이 우수하며 온도 의존성이 낮은 반면 섬광체 내부의 자연방사성핵종으로 인해 상대적으로 높은 자체 백그라운드를 갖는다. 또한 CeBr₃의 에너지 분해능은 NaI(Tl)보다 높지만 LaBr₃(Ce)보다 낮으며, LaBr₃(Ce)에 비해 비교적 낮은 자체 백그라운드를 가지고 있다[1-4]. 이와 같이 섬광검출기는 검출기 결정 구성에 따라 각기 다른 측정효율, 에너지 분해능 및 자체 백그라운드 특성을 보이며, 검출기 종류 및 감마선 에너지에 따라 검출 가능 수준이 다를 수 있다. 그러므로 측정 환경 및 목적에 따라 적합한 검출기를 선택해야 하며, 특히 비상 시 신속 대응을 위해서는 사전에 활용 가능한 검출기에 대한 검출 가능 수준의 평가가 선행될 필요가 있다.

Table 1. Physical specification of 2"Ø × 2" NaI(Tl), LaBr₃(Ce) and CeBr₃ used in the study

	NaI(Tl)	LaBr ₃ (Ce)	CeBr ₃
Density (g·cm ⁻³)	3.7	5.3	5.1
Effective atomic number	50.8	48.3	45.9
Light yields (photons/MeV at 662 keV)	38,000	60,000	50,000
Decay time (ns)	230	16	20
Internal radionuclides	-	¹³⁸ La (0.09%), ²²⁷ Ac	²²⁷ Ac
Relative efficiency (%)*	28.8	40.3	39.6

*Measured value in this study

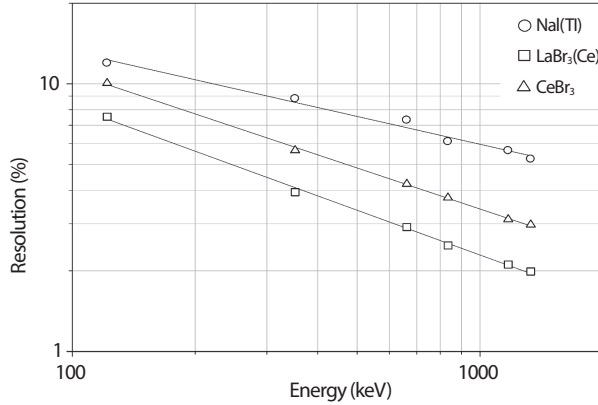


Fig. 1. Resolutions of 2"Ø × 2" NaI(Tl), LaBr₃(Ce) and CeBr₃ detectors.

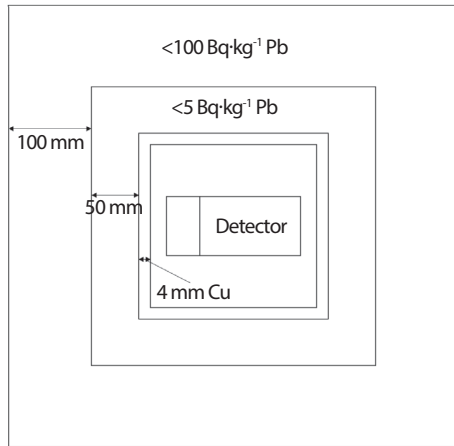


Fig. 2. The experimental setup for the internal background measurement of the scintillation detector.

섬광검출기를 이용한 토양 중 방사능 평가와 관련된 연구로서 최근에 3"Ø × 3" NaI(Tl), 2"Ø × 2" LaBr₃(Ce) 및 2"Ø × 2" CeBr₃ 검출기를 이용한 토양 중 자연핵종에 대한 방사능농도 및 지표면 침적 인공 방사성핵종에 대한 최소검출가능방사능(MDA, Minimum Detectable Activity)에 대한 연구가 수행되었다[5, 6]. 그러나 비상 시를 대비하여 지표면 침적 인공 방사성 핵종에 대한 동일한 크기를 갖는 NaI(Tl), LaBr₃(Ce) 및 CeBr₃ 검출기의 검출 가능 수준을 비교한 연구는 보고되지 않고 있다.

본 연구의 목적은 방사선 비상 시 현장 감마선분광분석에 주로 활용되고 있는 섬광검출기의 검출 가능 수준을

비교 분석하여 측정 현장 및 목적에 맞는 검출기 선정에 필요한 데이터를 제공하는 것에 있다. 이를 위해 동일한 크기의 NaI(Tl), LaBr₃(Ce) 및 CeBr₃ 검출기에 대해 지표면에 침적된 인공방사성핵종을 가정하여 원자력 사고 시 초기에 방출될 수 있는 주요 핵종에 대한 MDA를 평가하고, MDA 차이에 대하여 각 검출기의 측정 효율, 에너지 분해능 및 백그라운드 요인을 바탕으로 비교·분석하였다. 본 논문에서는 각 검출기의 자체 백그라운드, 에너지 분해능 및 측정 효율 특성 평가 방법과 현장 백그라운드 에너지 스펙트럼 측정 및 MDA 평가 결과를 소개하고, MDA에 미치는 요인에 대하여 논의한다.

2. 재료 및 방법

본 연구에서는 동일한 조건에서 NaI(Tl), LaBr₃(Ce) 및 CeBr₃ 검출기의 검출가능 수준을 비교하기 위해 모든 검출기의 크기를 2"Ø × 2"로 정하였으며, NaI(Tl), LaBr₃(Ce) 및 CeBr₃ 검출기의 에너지 분해능, 상대효율(3"Ø × 3" NaI(Tl) 검출기에 대한 절대효율 비) 및 현장 감마선분광분석을 위한 교정인자 산출을 위해 약 370 kBq의 방사능을 갖는 ¹⁵²Eu (121.8 keV), ²²⁶Ra (²¹⁴Pb, 351.9 keV), ¹³⁷Cs (661.6 keV), ⁵⁴Mn (834.8 keV) 및 ⁶⁰Co (1173.2 및 1332.5 keV)의 단일 동위원소 점선원(point-like source, Eckert & Ziegler series)을 이용하였다. 본 연구에서 사용된 각 검출기의 상대효율은 ⁶⁰Co 선원으로부터 250 mm 거리에서 1332.5 keV의 전에너지 피이크 계수율을 측정하고 동일한 측정 조건에서 측정된 3"Ø × 3" NaI(Tl) 검출기에 대한 전에너지 피이크 계수율에 대한 상대 비로서 계산되었으며, Table 1에서 보여주는 것과 같이 동일한 크기 조건에서 LaBr₃(Ce)와 CeBr₃ 검출기의 상대효율은 유사하지만 NaI(Tl) 보다는 약 1.4배 높은 값을 보인다. 또한, 위의 측정 조건에서 각 점선원을 측정하여 얻어진 에너지에 따른 검출기의 에너지 분해능 특성은 Fig. 1에서 보여주는 것과 같이 121.8 keV에서 1332.5 keV 사이의 감마선 에너지 영역에서 "LaBr₃(Ce) > CeBr₃ > NaI(Tl)" 으로 우수성이 평가된다.

각 검출기의 자체 백그라운드를 평가하기 위해 Fig. 2와 같이 검출기 외부 백그라운드를 줄이기 위해 총 150 mm 두께의 납과 4 mm 두께의 무산소 고전도 구리(OFHC, Oxygen

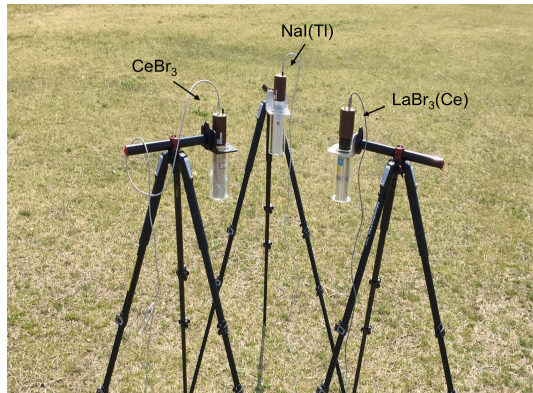


Fig. 3. In-situ measurement setup of 2"Ø × 2" NaI(Tl), LaBr₃(Ce) and CeBr₃ detectors.

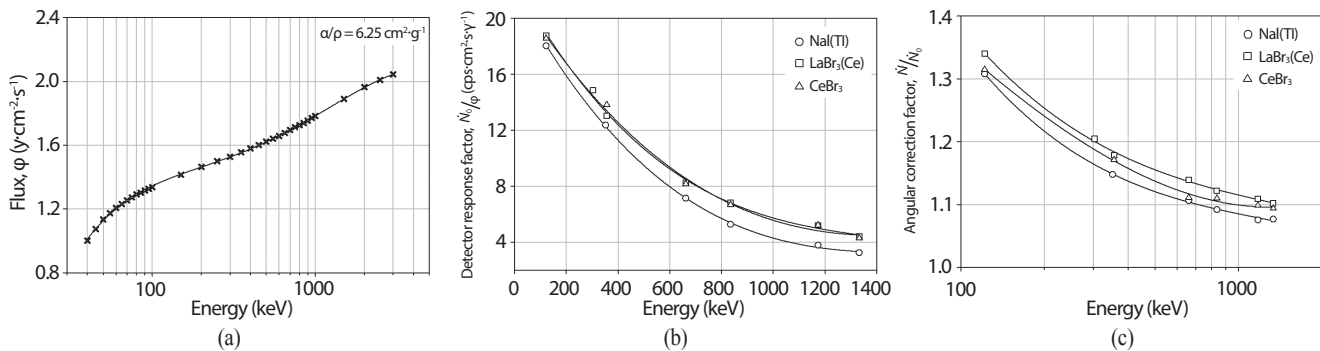


Fig. 4. (a) Theoretical flux for $\alpha/p=6.25 \text{ cm}^2\cdot\text{g}^{-1}$, (b) detector response and (c) angular correction factor with gamma energy for conversion factor N/A_x of 2"Ø × 2" NaI(Tl), LaBr₃(Ce) and CeBr₃ detectors.

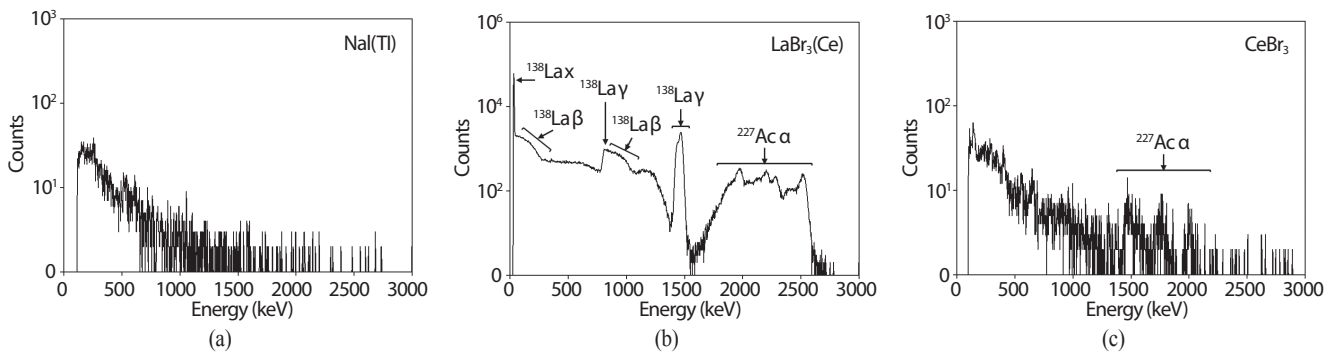


Fig. 5. Internal background of 2"Ø × 2" NaI(Tl), LaBr₃(Ce) and CeBr₃ detectors in a low-level lead shield. (a) NaI(Tl), (b) LaBr₃(Ce), (c) CeBr₃.

Free High Conductivity Copper)로 구성된 차폐체 내부에 각 검출기를 위치 시킨 후 3,600초 동안 백그라운드를 측정 하였다.

현장감마선분광분석을 이용하여 토양 중 방사성핵종의

방사능을 평가하기 위해 측정 계수를 방사능으로 환산하기 위한 교정인자 산출을 위해 ICRU 53 report에서 제시한 반실험적 교정방법을 적용하였으며, 이 교정인자 (N/A_x)는 다음과 같이 산출될 수 있다[7].

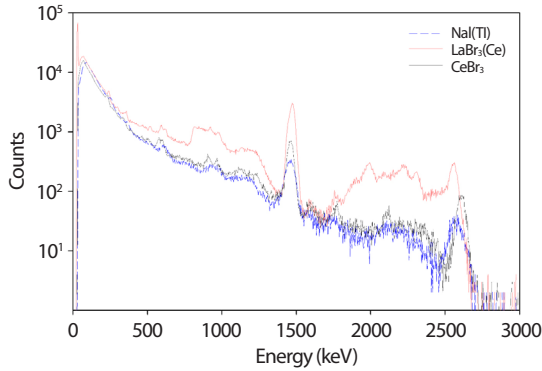


Fig. 6. In-situ measurement spectra of 2''Ø × 2'' NaI(Tl), LaBr₃(Ce) and CeBr₃ detectors.

$$\dot{N}/A_x = \left(\varphi/A_x\right) \times \left(\dot{N}_0/\varphi\right) \times \left(\dot{N}/\dot{N}_0\right) \quad (1)$$

여기에서 φ/A_x 은 토양 중 방사능 농도 (Bq·m⁻²)에 대한 감마선 플럭스(flux)이며, \dot{N}_0/φ 는 검출기의 중심축선상의 선원에 의한 검출기의 측정 기준점에서의 감마선 플럭스에 대한 측정 계수율을 나타낸다. \dot{N}/\dot{N}_0 는 토양 중 선원의 분포에 따른 \dot{N}_0/φ 에 대한 각도 보정인자로서 다음과 같이 나타낼 수 있다[7].

$$\dot{N}/\dot{N}_0 = \frac{1}{\varphi} \int \frac{\cos \theta_2}{\cos \theta_1} \varphi \cos \theta \frac{\dot{N}(\theta)}{\dot{N}_0} d \cos \theta \quad (2)$$

위 방법을 적용하여 식 (1)의 \dot{N}_0 는 각 점 선원을 검출기 중심축상 검출기 표면으로부터 1 m 거리에 위치시켜 측정되었으며, 식 (2)의 $\dot{N}(\theta)$ 는 \dot{N}_0 를 0도로 기준하여 검출기와 선원의 거리를 1 m로 유지하면서 90도까지 15도 간격으로 선원의 위치를 이동하여 측정하였다. 또한, 식 (1)와 (2)의 φ/A_x 및 \dot{N}/\dot{N}_0 에 대한 φ 계산 시 α/ρ (α : relaxation length의 역수, ρ : 토양 밀도)는 토양 중 감마핵종이 깊이에 따라 지수 분포를 갖는 것을 전제하여 6.25 cm²·g⁻¹로 정하였다[8]. 본 연구에서 적용된 NaI(Tl), LaBr₃(Ce) 및 CeBr₃ 검출기에 대한 교정인자 산출 과정은 Lee et al. (2019)에 보다 상세하게 언급되어 있다[5, 6].

검출하한치 평가를 위한 환경 백그라운드 감마선을 측정하기 위해 검출기 위치를 기준으로 반경 50 m 이상의 면적을 갖는 비교적 평탄한 초지를 선정하였다. Fig. 3은 측정 현장에 설치된 검출기를 보여주며, 각 검출기는 삼각대를

이용하여 지표면으로부터 1 m 높이에 위치시킨 후 3,600초 동안 감마선 에너지스펙트럼을 측정하였다.

측정된 감마선 에너지스펙트럼을 이용하여, 비상 시 각 검출기의 검출 가능 수준을 비교하기 위해 원자력 사고 시 방출 될 수 있는 주요 감마핵종인 ¹³¹I (364.5 keV), ¹⁰³Ru (497.1 keV), ¹⁴⁰Ba (537.3 keV), ¹³⁴Cs (604.7 keV), ¹³⁷Cs (661.6 keV) 및 ⁹⁵Zr (756.7 keV)에 대한 MDA를 평가하였다[9]. MDA는 Currie가 제시한 방법을 이용하여 산출하였으며 관계 식은 아래와 같다[10].

$$MDA = \frac{L_D}{t \times (\dot{N}/A_x)} = \frac{271 + 4.65\sqrt{B}}{t \times (\dot{N}/A_x)} \quad (3)$$

여기서 L_D 및 t 는 각각 검출한계(Detection limit)와 측정시간을 나타내며, B 는 백그라운드로서 분석 대상 감마선 에너지를 중심으로 반치폭(FWHM, Full Width at Half Maximum)의 2.5배에 해당되는 스펙트럼 영역(ROI, Region of Interest)으로 산출되었다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 4의 (a), (b) 및 (c)는 토양 중 방사성핵종이 $\alpha/\rho = 6.25 \text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 의 연직 분포를 가질 때 각 검출기의 교정인자로서 각각 φ/A_x , \dot{N}_0/φ 및 \dot{N}/\dot{N}_0 을 보여주며, 121.8 ~ 1332.5 keV의 에너지 범위에서 LaBr₃(Ce)와 CeBr₃ 검출기의 검출기 효율은 유사하며 NaI(Tl)에 비해 높은 것을 확인할 수 있다. 이는 유효 원자번호는 NaI(Tl)이 LaBr₃(Ce) 및 CeBr₃ 보다 높지만 검출기 결정의 밀도가 약 1.7배 차이가 나기 때문이다. Fig. 5의 (a), (b) 및 (c)는 저준위 납 차폐체 내에서 측정된 NaI(Tl), LaBr₃(Ce) 및 CeBr₃ 검출기의 백그라운드 감마선 에너지스펙트럼을 보여준다. LaBr₃(Ce) 검출기에 대해서는 검출기 결정에 존재하는 ¹³⁸La 및 ²²⁷Ac의 감마선 에너지가 자체 백그라운드로서 보여지며, CeBr₃ 검출기의 경우에는 1500~2000 keV의 영역에서 ²²⁷Ac에 의한 백그라운드 감마선 에너지 피크가 확인된다[11]. Fig. 6은 초지에서 측정된 감마선 에너지스펙트럼을 보여주며, LaBr₃(Ce)의 자체백그라운드로 인해 전체적인 백그라운드가 NaI(Tl)와 LaBr₃(Ce)에 비해 높은 준위를 갖는 것을 확인할 수 있다. Table 2, 3 및 4는 방사선 비상 시 환경으로 방출될 수 있는 주요 핵종으로서

Table 2. The in-situ and intrinsic background measurement results, \dot{N}/A_x and MDA for some artificial radionuclides using 2"Ø × 2" NaI(Tl) detector, assuming deposition on the ground surface ($a/\rho=6.25 \text{ cm}^2\text{g}^{-1}$, Measurement time is 3600 sec)

Nuclide	Energy (keV)	Energy range (keV)	In-situ background		Intrinsic background		\dot{N}/A_x	MDA (Bq·m ⁻²)
			*Gross	**Count/keV	*Gross	**Count/keV		
¹³¹ I	364.5	324.0~405.0	34957	431	401	4.95	17.4	139
¹⁰³ Ru	497.1	448.0~546.2	21272	217	303	3.09	15.7	121
¹⁴⁰ Ba	537.3	485.9~588.7	20270	197	305	2.97	4.03	459
¹³⁴ Cs	604.7	549.7~659.7	18600	169	291	2.65	14.2	124
¹³⁷ Cs	661.6	603.8~719.4	15215	132	237	2.05	11.3	142
⁹⁵ Zr	756.7	694.3~819.1	12138	97.2	160	1.28	6.32	226

*ROI in spectrum for the artificial radionuclides is the 2.5 times FWHM

**The ratio of gross count to energy range

Table 3. The in-situ and intrinsic background measurement results, \dot{N}/A_x and MDA for some artificial radionuclides using 2"Ø × 2" LaBr₃(Ce) detector, assuming deposition on the ground surface ($a/\rho=6.25 \text{ cm}^2\text{g}^{-1}$, Measurement time is 3600 sec)

Nuclide	Energy (keV)	Energy range (keV)	In-situ background		Intrinsic background		\dot{N}/A_x	MDA (Bq·m ⁻²)
			*Gross	**Count/keV	*Gross	**Count/keV		
¹³¹ I	364.5	347.3~381.6	22908	668	5780	169	19.6	100
¹⁰³ Ru	497.1	477.0~517.2	17520	436	7244	180	18.3	94
¹⁴⁰ Ba	537.3	516.3~558.3	16717	398	7068	168	4.79	351
¹³⁴ Cs	604.7	582.2~627.2	18806	419	7434	165	17.3	103
¹³⁷ Cs	661.6	638.1~685.1	12801	272	6866	146	14.1	104
⁹⁵ Zr	756.7	731.1~782.3	12223	239	5533	108	8.16	176

*ROI in spectrum for the artificial radionuclides is the 2.5 times FWHM

**The ratio of gross count to energy range

¹³¹I, ¹⁰³Ru, ¹⁴⁰Ba, ¹³⁴Cs, ¹³⁷Cs 및 ⁹⁵Zr에 대한 각 검출기의 검출 효율, 자체 백그라운드 및 에너지 분해능에 따른 백그라운드 영역과 MDA를 평가한 결과를 보여준다. 전반적으로 각 핵종의 관심 에너지에 대한 ROI의 에너지당 백그라운드 계수율(B/keV)은 자체 백그라운드 계수율(Intrinsic B/keV)이 상대적으로 높은 LaBr₃(Ce) 검출기에서 가장 높은 값을 보였다. 그러나 전반적인 MDA 크기는 “NaI(Tl) > LaBr₃(Ce) > CeBr₃” 으로서 NaI(Tl)에서 가장 큰 값을 보였으며, 이는 상대적으로 낮은 검출 효율과 에너지 분해능으로 인해 보다 넓은 백그라운드 영역을 포함하기 때문이다.

¹³¹I (364.5 keV)의 경우 LaBr₃(Ce) 검출기에서 가장 낮은

MDA를 보였으며, 이는 Fig. 6에서 보여주는 바와 같이 해당 영역에서는 자체백그라운드에 비해 환경 백그라운드 기여도가 크기 때문에 세 검출기에 대하여 유사한 준위를 보이며 상대적으로 우수한 에너지 분해능으로 인해 보다 작은 영역의 백그라운드를 포함하기 때문이다.

약 500 keV 이상의 감마선 에너지를 갖는 핵종들은 모두 CeBr₃ 검출기에서 가장 낮은 MDA를 보였다. 그 이유는 LaBr₃(Ce)에 비해 낮은 에너지당 백그라운드(B/keV)와 NaI(Tl)에 비해 높은 검출효율과 우수한 에너지 분해능을 보이기 때문이다.

이와 같이 지표면 침적 인공방사성핵종에 대한 NaI(Tl),

Table 4. The in-situ and intrinsic background measurement results, \dot{N}/A_x and MDA for some artificial radionuclides using 2" ϕ × 2" CeBr₃ detector, assuming deposition on the ground surface ($\alpha/\rho=6.25 \text{ cm}^2\cdot\text{g}^{-1}$, Measurement time is 3600 sec)

Nuclide	Energy (keV)	Energy range (keV)	In-situ background		Intrinsic background		\dot{N}/A_x	MDA (Bq·m ⁻²)
			*Gross	**Count/keV	*Gross	**Count/keV		
¹³¹ I	364.5	339.2~389.8	24319	480	306	6.04	19.7	103
¹⁰³ Ru	497.1	467.8~526.4	15589	266	216	3.69	18.3	89
¹⁴⁰ Ba	537.3	506.9~567.7	14133	233	165	2.71	4.73	326
¹³⁴ Cs	604.7	572.7~636.7	14717	230	222	3.47	17.0	93
¹³⁷ Cs	661.6	628.3~694.9	9550	144	136	2.04	13.6	93
⁹⁵ Zr	756.7	721.1~792.3	8740	123	124	1.74	7.77	156

*ROI in spectrum for the artificial radionuclides is the 2.5 times FWHM

**The ratio of gross count to energy range

LaBr₃(Ce) 및 CeBr₃ 검출기의 MDA는 검출기의 효율, 에너지 분해능 및 자체 백그라운드 특성과 방사성핵종의 방출 감마선 에너지에 따라 차이가 있음을 확인할 수 있다. 또한, 현장 백그라운드가 자체 백그라운드의 기여도를 무시할 수 있을 정도의 준위에서는 각 검출기의 MDA는 검출기 효율과 에너지 분해능에 크게 의존하게 된다. 그러므로 적합한 검출기를 선정하기 위해서는 현장의 방사성 오염 준위 및 핵종의 분포가 고려되어야 할 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 원자력 사고 및 방사선 비상 시 현장 감마선분광분석에 활용될 수 있는 NaI(Tl), LaBr₃(Ce) 및 CeBr₃ 검출기의 검출 가능 수준을 MDA를 이용하여 비교 평가하였다. 그 결과 지표면 침적 분포의 인공방사성핵종에 대한 MDA는 자체백그라운드 기여분이 상대적으로 큰 에너지 영역의 감마선을 방출하는 핵종에 대해서는 CeBr₃가 가장 낮은 값을 보였으며, 자체백그라운드가 무시될 수 있는 에너지 영역에서는 비교적 에너지 분해능이 우수한 LaBr₃(Ce)에서 가장 낮은 값을 보였다. 또한, NaI(Tl)은 가장 낮은 자체백그라운드를 보이지만 낮은 검출 효율 및 에너지 분해능으로 인해 LaBr₃(Ce) 및 CeBr₃에 비해 검출 가능 수준이 낮게 평가된다. 특히, 다양한 감마핵종에 의해 오염된 현장에서는 전에너지 피크가 중첩될 수 있으므로 분해능이 우수한 검출기가

보다 적합할 수 있다. 이와 같이 방사선 비상 시 적합한 검출기 선정을 위해서는 검출 효율, 에너지 분해능 및 자체 백그라운드뿐만 아니라 현장의 방사성 오염 준위 및 핵종 분포가 고려되어야 한다. 또한, 현재에는 LaBr₃(Ce) 및 CeBr₃ 검출기가 NaI(Tl)에 비해 가격이 높기 때문에 성능 대비 비용적 측면을 고려할 필요가 있다. 본 연구 결과를 통해 제시된 방사선 비상 시 주요 관심 핵종에 따른 각 검출기의 백그라운드 특성에 따른 MDA 평가 자료는 NaI(Tl), LaBr₃(Ce) 및 CeBr₃ 검출기 선정에 유용한 자료로 활용될 수 있을 것이다.

REFERENCES

[1] G.F. Knoll, Radiation detection and measurement, John Wiley & Sons (2010)

[2] L. Arnold, M. Duval, C. Falguères, J.J. Bahain, and M. Demuro, "Portable gamma spectrometry with cerium-doped lanthanum bromide scintillators: Suitability assessments for luminescence and electron spin resonance dating applications", Radiat. Meas., 47, 6-18 (2012)

[3] F. Quarati, P. Dorenbos, J. van Der Biezen, A. Owens, M. Selle, L. Parthier, and P. Schotanus, "Scintillation and detection characteristics of high-sensitivity CeBr₃ gamma-ray spectrometers", Nucl. Instrum. Meth. A., 729, 596-604 (2013)

- [4] A. Camp, A. Vargas, and J.M. Fernández-Varea, “Determination of LaBr₃(Ce) internal background using a HPGe detector and Monte Carlo simulations”, *Appl. Radiat. Isotopes.*, 109, 512-517 (2016)
- [5] J.H. Lee and J.I. Byun, “IN-SITU GAMMA-RAY SPECTROMETRY FOR RADIOACTIVITY ANALYSIS OF SOIL USING NaI(Tl) AND LaBr₃(Ce) DETECTORS”, *Appl. Radiat. Isotopes* (2019). In press.
- [6] J.H. Lee, J.I. Byun, and D.M. Lee, “In-situ CeBr₃ gamma-ray spectrometry for radioactivity analysis of soil”, *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, (2019). In press.
- [7] ICRU 53 Gamma-Ray Spectrometry in the Environment. International Commission on Radiation Units and Measurements. Bethesda, Maryland. Report 53 (1994).
- [8] K.M. Miller and P. Shebell, “In situ gamma-ray spectrometry: a tutorial for environmental radiation scientists”, USDOE Environmental Measurements Lab. (1993)
- [9] IAEA-TECDOC, B., “1092”, Generic procedures for monitoring in a nuclear or radiological emergency. International Atomic Energy Agency. Vienna (1999).
- [10] L.A. Currie, “Limits for qualitative detection and quantitative determination. Application to radiochemistry”, *Anal. Chem.*, 40(3), 586-593 (1968).
- [11] E. García-Toraño, B. Caro, V. Peyrés, and M. Mejuto, “Characterization of a CeBr₃ detector and application to the measurement of some materials from steelworks”, *Nucl. Instrum. Meth. A.*, 837, 63-68 (2016)