Journal of Radiation Industry 15(4) : 235~241(2021) https://doi.org/10.23042/radin.2021.15.4.235

방사성 금속폐기물 오염도 측정 및 분류 시스템 구축을 위한 검출기 성능평가

노 성 진[1] · 한 기 택[1] · 임 영 기[2,*]

[1]한국방사선 진흥협회 방사선기기표준화연구센터
[2]가천대학교 메디컬 캠퍼스

Performance Evaluation of Detector for Building a Radioactive Metal Waste Contamination Level Measurement and Classification System

Sung Jin Noh[1], Ki Taek Han[1] and Young-Khi Lim[2,*]

[1]*Radiation Technology and Standardization Center, Korean Association for Radiation Application, Jeollabuk-do, Republic of Korea*
[2]*Medical Campus, Gachon University, Incheon, Republic of Korea*

Abstract - The purpose of this study is to evaluate detector characteristics like evaluation of the dependence on linearity, accuracy, and directionality by utilizing a gamma-ray standard benchmark irradiation system which was built to test the radial performance of the LBC (Lanthanum BromoChloride) detector among the main components of the radioactive metal waste contamination level measurement and classification system that is to be developed in this study. The detector characteristics were evaluated through benchmark irradiation by using ^{60}Co, ^{137}Cs, ^{241}Am mounted on a gamma-ray standard irradiation equipment. For linearity, evaluating linearity from the 3,000 mm or greater interval was verified to be better than evaluating linearity for the entire section and R-square value for each source was verified to be ^{60}Co: 0.999 904, ^{137}Cs: 0.999 923, ^{241}Am: 0.999 700. For the reproducibility, the average coefficient value for each source was verified to be ^{60}Co: 943 282.1, ^{137}Cs: 416 943.8, ^{241}Am: 856 398.1, and the relative standard deviation value for each was verified to be ^{60}Co: 0.10, ^{137}Cs: 0.14, ^{241}Am: 0.09. Finally, for the response of angle, a change in relative responsiveness from 1.057~1.205 in the horizontal direction was verified. While it was satisfied within a 20% range for most directions, there was a 0.5% difference in the −75° area. Through this result, we aim to contribute to the improvement of safety reliability for nuclear decommissioning by securing a lower bound for detection that is sufficiently low by enhancing the measurement efficiency by building a measurement system that utilizes multiple scintillators for rapid measurement and classification of large volume of metal waste in the future and by securing easiness of self-disposal by solving the representative sample problem through radioactivity homogeneity evaluation.

Key words : LBC detector, Linearity, Gamma irradiation system, Reproducibility, Response of angle

* Corresponding author: Young-Khi Lim, Tel. +82-32-820-4365,
Fax. +82-32-820-4500, E-mail. yklim@gachon.ac.kr

서 론

원자력시설의 해체 시 발생하는 폐기물은 금속 조각, 콘크리트, 토양 등 종류도 다양할 뿐만 아니라 발생량 또한 방대하다. EC (European Commission)의 자료에 의하면 앞으로 60년 동안 유럽 국가들에 있는 원자력시설의 해체 시 발생되는 금속폐기물의 양이 스테인레스강은 약 30만 톤, 연강이나 탄소강은 약 100만 톤, 알루미늄과 구리는 약 2~3만 톤 정도가 될 것이며, 전 세계적으로는 향후 50년 동안 약 1,200만 톤의 스테인레스강은 약 95만 톤, 탄소강은 870만 톤, 구리 220만 톤이 발생할 것으로 예측하고 있다(김 2016). 원자력 선진국 등은 방사성 금속폐기물량을 최소화하기 위해 해체폐기물 재활용 시나리오, 방사성 핵종의 거동특성, 다양한 용융슬래그의 특성 등의 장기간에 걸친 연구개발과 경험 축적을 통해 기반기술을 확보하였으며, 실제로 상용규모의 처리시설을 갖추어 운전하고 있으며, 보다 안전하고 경제적인 금속폐기물 재활용을 위하여 계속적인 연구가 진행되고 있다(Hopkinson *et al*. 1998).

국내외 원자력관계시설에서 발생되는 금속방사성폐기물은 원전 운영에 따른 설비 개선, 계통 및 장비 성능개선 등의 단위작업, 노후 시설물 교체의 유지·보수 관점에서 꾸준하게 발생하고 있으며 지속적으로 축적되고 있으며 해외 원자력 선진국에서는 이미 각종 원자력시설의 운영 및 해체과정에서 대형, 다량의 금속방사성폐기불이 발생되었고 이를 재활용하기 위한 연구와 방안에 대해 활발히 논의되고 있고, 일부 국가에서는 이미 기준이 마련되어 체계적인 재활용 절차를 운영 중에 있다(Korean Radioactive Agency 2018).

우리나라도 원자력발전 선진국 진입과 고리 원전의 해체 시기가 가까워짐에 따라 원자력시설에서 발생되는 다량의 금속방사성폐기물에 대한 적극적인 기술 검토가 필요하며, 이미 발생된 금속방사성폐기물의 효율적인 관리와 방사성폐기물 발생 절감을 위하여 재활용 및 자체처분에 대한 관심이 높아지고 있다(Korean Radioactive Waste Society 2013).

원전 해체 시 발생하는 방사성 금속폐기물은 자원의 재활용이라는 기술·경제적 측면과 제염을 통한 방출이라는 환경적 측면을 동시에 고려하는 것이 필요하다(IAEA 2009). 이를 위해서는 해체 현장에서 금속폐기물의 방사성 오염 여부를 신속·정확하게 측정·분류하여 오염 준위별로 분류할 수 있는 통합관리시스템 확보가 필요하다. 원전 해체 시 발생되는 금속폐기물은 방사화를 제외하고 대부분 다양한 준위 및 종류의 표면·체적 오염폐기물 발생이 예측되며 이러한 금속폐기물은 해체 현장에서 동시다발적으로 발생하므로, 처리·처분 또는 자체처분을 위한 신속한 결정이 중요하다(IAEA 2008; Min *et al*. 2012).

또한 원자력시설의 해체과정에서 발생되는 대량 금속폐기물의 효율적인 관리를 위해서는 방사성폐기물과 자체처분 대상 폐기물을 신속하게 분류하여 해체폐기물 중 대부분을 차지하는 극저준위 이하 폐기물을 분류하여 폐기물 발생량을 최소화하고, 현장 측정기술을 활용하여 시료 채취의 어려움과 작업자의 안전성을 확보할 수 있다(이 2016).

다양한 형상의 해체 금속폐기물에 대한 측정·분석기술은 해체과정에서 발생되는 금속폐기물의 방사성 오염도를 현장에서 신속 측정하기 위하여, 다양한 형상의 금속폐기물에 대한 측정효율평가 및 검출기 교정방안 수립 등 분석 알고리즘을 개발하는 것이 필요하다(한국방사성폐기물학회 2013; 원자력안전위원회 2020). 또한 검출 효율 향상을 위한 측정시스템에 PVT (Plastic Scintillator)를 배치하여 각각의 섬광체에서 발생되는 신호를 분석하여 폐기물의 위치별 오염의 균질도 평가 및 국부오염의 위치를 확인할 수 있는 기술과 $LaBr_3$ 또는 NaI (Tl) 등의 검출기를 사용하여 선량률 및 핵종 분석을 수행할 수 있는 기술이 매우 중요하다.

본 연구에서는 개발하고자 하는 방사성 금속폐기물 오염도 측정 및 분류 시스템의 주요 구성품 중 LBC (Lanthanum BromoChloride) scintillator의 방사학적 성능 시험평가를 하기 위하여 구축된 감마선 표준 조사시스템을 활용하여 선형성, 재현성 및 방향성에 대한 의존성 평가 등의 검출기 특성평가 결과를 통해 향후 대용량 금속폐기물의 신속 측정 및 분류를 위해 다중의 섬광체를 활용한 측정시스템을 구축하여 방사능 균질도 평가를 통해 대표시료 문제를 해결하여 자체처분 용이성을 확보하여 원전 해체에 대한 안전 신뢰도 향상에 기여하고자 한다.

재료 및 방법

해체 금속폐기물에 대한 측정·분석기술은 해체과정에서 발생하는 금속폐기물의 방사성 오염도를 현장에서 신속하게 평가하기 위한 필수 기술이다. 해체 금속폐기물은 다양한 형상으로 발생하기 때문에 측정효율 평가 및 검출기 교정방안 수립 등 분석 알고리즘 개발이 요구된다. 따라서 본 연구에서는 해체현장 적용 방안 수립을 위해 국제표준에 의해 구축된 감마선 표준 조사시스템을 활용하여 방사선 조사시 LBC 섬광체 검출기의 선형성, 재현성 및 방향성에 대한 특성평가를 실시하였다.

1. High Resolution LBC (Lanthanum Bromo Chloride) Scintillators

방사성 금속폐기물의 정성적 핵종 분석을 위해 사용한 LBC 검출기는 무기물질 섬광 검출기 가운데 한 종류로서 상당히 뛰어난 시간 분해능과 준수한 에너지 분해능을 가진

Table 1. The typical resolution vs energy is summarized (https://www.berkeleynucleonics.com)

Energy (keV)	Typical resolution LBC	Typical resolution $CeBr_3$	Typical resolution NaI (Tl)
30 (^{129}I)	15%	22%	16%
59.5 (^{241}Am)	10%	15%	12%
122 (^{57}Co)	6.4%	10%	9%
356 (^{133}Ba)	4%	5%	8%
662 (^{137}Cs)	3%	4%	7%
1332 (^{60}Co)	2.5%	3%	5.5%

Table 2. Measurement spectrum to obtain the gamma-ray energy resolution

Nuclide	Energy (keV)	FWHM	ROI (keV)
^{137}Cs	661.6	48.126	589~734
^{60}Co	1173.2	64.322	1101~1245
	1332.5	68.628	1260~1404

다. 검출기를 구성하는 무기물질의 가전자띠(Valence band)에 존재하는 전자는 감마선을 흡수하며 전도띠(Conduction band)로 들떴다가 다시 가전자띠로 안정화하며 광자를 방출한다. 광증배관(Photomultiplier: PMT)으로 방출된 광자를 전기 신호로 변화, 증폭하여 에너지와 특정 사건 발생 시간을 측정한다. 감마방출에 걸리는 시간은 수 피코(10^{-12}) 초부터 길게는 수백 마이크로(10^{-6})초까지 광범위하며, 3% 정도의 에너지 분해능(FWHM, 662 MeV)을 보유하고 있다 (Table 1).

본 연구에서 제작된 MCA를 기반으로 선량률 측정과 핵종분석을 할 수 있도록 조건을 분석하고 이를 적용하였으며 선량률의 경우, 감마선 표준 기준 조사시스템을 이용해 방사선량률과 그에 따른 LBC 검출기의 실시간 계수율의 평균값을 비교하여 피팅곡선을 계산하였다. 계산된 값은 선량 교정인자로서 LBC 검출기의 계수율에 해당 교정인자를 적용해 선량률로 나타내게 되며, 핵종별 선량 기여도 계산 방법은 관심핵종(^{137}Cs, ^{60}Co)의 ROI 영역 계수값에 전체 스펙트럼의 계수값을 나누어 총선량률에 대한 기여도를 평가하였다. ROI 면적 지정방법과 피크면적 계산은 핵종별 ROI를 절대값으로 결정 후 백그라운드 면적 계산과 함께 피크면적 계산을 하였다(Table 2). 선정된 LBC 검출기(Detector type, 38B51/2M-LBC)는 차후 Conveyor 벨트 중안의 Roller 안에 설치하여 방사성 금속폐기물의 정성적 핵종 분석으로 사용될 예정이며 특성은 Table 3과 같다.

Table 3. Specifications of the LBC detector

Scintillation crystal	LBC 38 × 51 mm, standard
Drawing	VS-889-895
Photomultiplier tube	Φ 51 mm, type Hamamatsu R6231-100
Housing	0.5 mm aluminum
Magnetic shielding	Solid 0.63 mm around PMT
Dimensions. Length, Diameter	152 mm, 58.8 mm
Connectors	14-pin JEDEC connector
Temperature range	−20°C to +60°C
Energy resolutions	<3% FWHM @ 662 keV
Gain stability	<1% over 24 h at 20°C
Typical high voltage	600~800 V

Table 4. Specifications of the gamma irradiation equipment

Nuclide	Energy (keV)	Radioactivity (GBq)	Standard
^{137}Cs	661.7	0.37	ISO 4037-1: 2019
^{60}Co	1,173.3 1,332.5	3.7	ISO 4037-1: 2019
^{241}Am	59.54	3.7	KS A ISO 4037-1: 1996

2. 감마선 표준 조사시스템

LBC 검출기의 방사학적 성능 시험평가를 하기 위하여 사용된 감마선 표준 조사시스템은 ^{60}Co (3.7 GBq), ^{137}Cs (0.37 GBq), ^{241}Am (3.7 GBq) 방사성동위원소를 장착하여 국제표준(ISO-4037-1)과 한국산업표준(KS A ISO 4037-1)에 명시되어 있는 감마선 표준을 조사할 수 있도록 구축하였다 (Table 4). 감마선조사장치, 레일장치, 기준점설정장치로 구성되어 있으며 감마선조사장치는 베이스, 구동부, 방사성동위원소 및 홀더, 차폐함, 콜리메이터, 셔터로 이루어져 있고 감마선장은 조사실 바닥에서 1,200 mm 위치에서 선원에서 조사방향으로 1,000 mm 지점에서 직경 200 mm 원형 감마선장이 형성되게 되어 있다(Fig. 1). 선원 구동부는 리볼빙 방식으로 장착된 방사성동위원소를 선택적으로 조사가 용이하도록 되어 있으며 기준점설정자치 3개의 레이저 수평계를 이용하여 선원 조사점에서 빔 수평방향으로 1,000 mm 지점을 시각적으로 확인할 수 있도록 설계하고 물리적 기준바를 이용하여 중간점검을 할 수 있도록 구성하였다.

감마선 표준 조사시스템에서 발생되는 방사선장 균질도, 재현성, 산란성, 셔터 개폐시간에 대한 일반적은 특성은 선원에서 1,000 mm 지점(기준점)에서 형성되는 방사선장을 기준으로 전리함(A5, A6), 전위계(Keithley 6517B), 온도계(CTR 5000), 압력계(CPG 2500) 측정기기로 평가하였으며

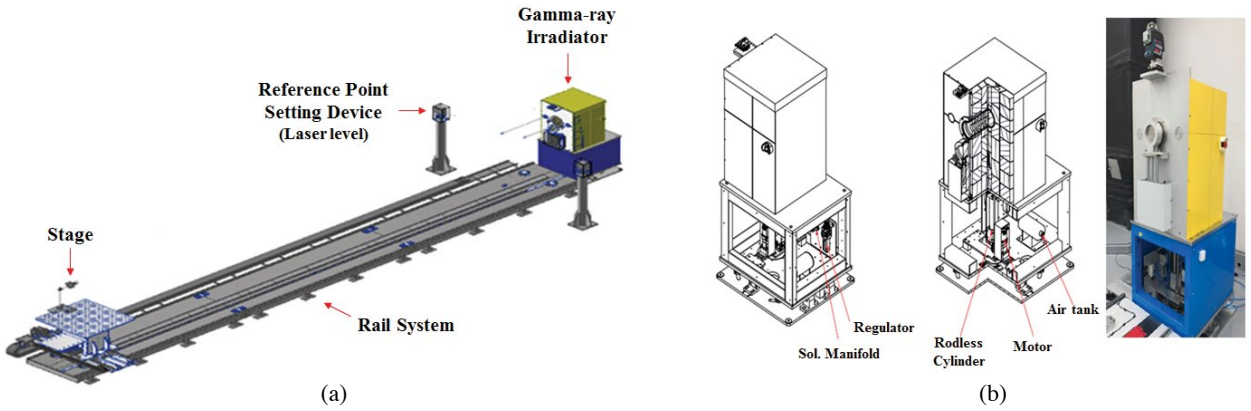


Fig. 1. Gamma irradiation system.

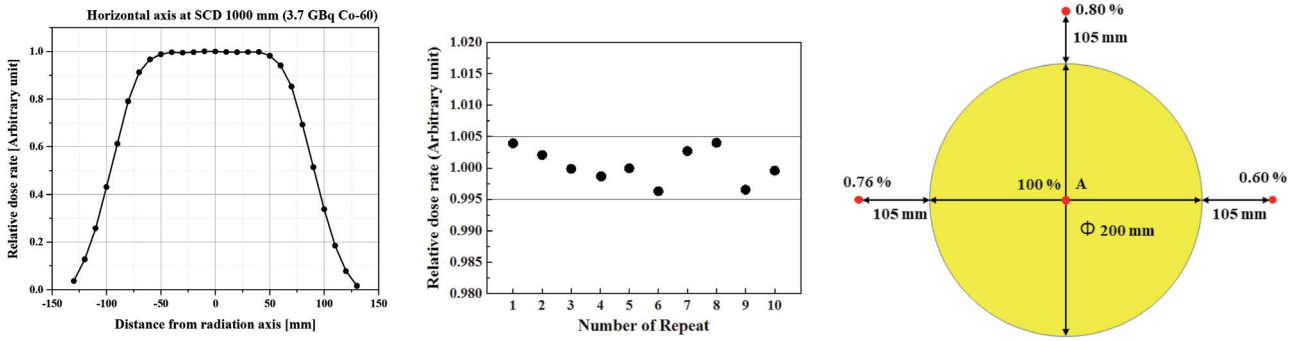


Fig. 2. Evaluation of characteristics in the standard gamma radiation field: (a) the radial uniformity for gamma-ray field, (b) reproducibility, (c) effect of scatter ray in primary beam.

결과는 그림과 같다. 방사선장 균질도는 기준점에서 형성되는 방사선장의 빔 프로파일을 측정한 결과 직경 160 mm 원형에서 98% 이상으로 평가되며, 재현성은 선원이동, 선원조사 과정을 10회 반복하여 기준점에서 측정된 선량률의 평균을 기준으로 평가한 결과 상대표준편차 ±0.33% 이내로 평가되었다. 또한 1차 빔의 산란선 기여도는 ISO 4037-1: 2019에 따라 기준점(Φ200 mm 방사선장 형성)에서 콜리메이터 내외부 선량률을 측정한 결과 방사선장 중심점에서 105 mm 떨어진 지점에서 지점에 선량률은 1% 이하, 선원이동시간은 50초 10회와 500초 1회 조사 시 누적된 선량측정 결과로 계산한 결과 1초 이내로 평가되었다(Fig. 2).

감마선 표준 조사장치와 LBC 검출기의 전체적인 실험 구조는 Fig. 3과 같이 구성하였으며, 조사실 내부의 실험배치는 Fig. 4와 같다. 검출기로부터 나오는 방사선 신호는 광전자증배관을 거쳐 B14A 규격에 맞춰 신호를 전달할 수 있고 이때 방사선검출을 위해서 고전압을 인가해야 하며 광전자증배관의 규격에 맞는 고전압 분배기를 사용하였으며 구성한 Preamplifier socket은 고전압 모듈을 내장하고 있으며,

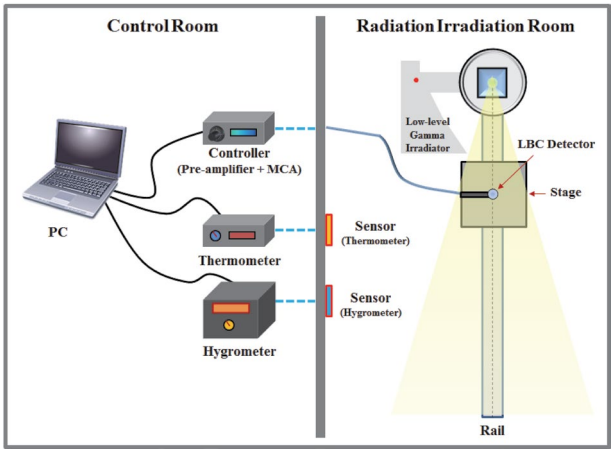


Fig. 3. Layout of an implemented LBC detection system.

미약한 신호를 증폭(VGA: 0.287)시키고 성형시키기 위해 Preamplifier와 Shaping amplifier (Shaping time: 1 μs) 회로로 구성하였다.

3. 방사학적 성능 시험 평가

LBC 검출기의 방사학적 성능 시험평가를 위해 구축된 방사선 표준 기준 조사시스템을 활용하여 선형성, 재현성 및 방향성 의존성 평가를 실시하였다. 첫 번째로 거리에 따른 선량변화로 인한 LBC 검출기의 선형성 평가의 경우 감마선 표준 조사장치에 장착된 ^{60}Co, ^{137}Cs, ^{241}Am 선원을 이용하여 선원의 중심과 LBC 검출기 표면 간의 일정한 측정 거리(2,000 mm~7,000 mm, 1,000 mm 간격)에 따른 총 계수 변화를 확인하였으며 두 번째로 재현성 평가의 경우 선형성 평가 시 동일한 선원들을 이용하여 기준거리 2,000 mm 지점에서 LBC 검출기를 위치하여 60초씩 10회 방사선을 조사하여 LBC 검출기에 대한 계수 변화를 확인하고 이에 따른 상대 표준편차를 확인하였다. 마지막으로 방향성에 대한 의존성 평가는 LBC 검출기의 측정 기준점을 중심으로 수평방향에 대하여 각각 0°, ±15°, ±30°, ±45°, ±60°, ±75° 및 ±90°에 대한 반응도 변화를 확인하고 측정결과 값을 바탕으로 0° 방향을 기준으로 입사각에 따른 상대 반응도를 확인하였다(Fig. 5).

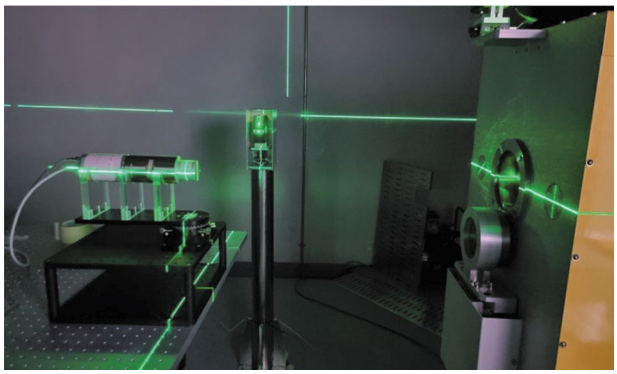


Fig. 4. Test setup of the LBC detector module in gamma irradiation.

결 과

1. 선형성 평가

감마선 표준 조사장치에 장착된 ^{60}Co, ^{137}Cs, ^{241}Am 선원을 이용하여 선원의 중심과 LBC 검출기 표면 간의 일정한 측정 거리(2,000 mm~7,000 mm, 1,000 mm 간격)에 대해서 각각 지점에서 330초 동안 방사선 조사 시, 검출기의 총 계수 변화에 따른 선형성평가 결과, Fig. 6과 같이 전체 측정 구간에서 R-square 값은 ^{60}Co: 0.999 581, ^{137}Cs: 0.999 774, ^{241}Am: 0.999 030 확인되었으며, 3,000 mm 이상 구간부터 선형성 평가 결과, 전체 구간에 대한 선형성보다 양호한 것을 확인할 수 있었으며 각 선원에 대한 R-square 값은 ^{60}Co: 0.999 904, ^{137}Cs: 0.999 923, ^{241}Am: 0.999 700로 확인되었다. 거리별 백그라운드에 대한 영향을 고려하여 그에 따른 보정을 실시하여 얻어진 순수계수에 대한 선형성 평가를 통해 선원의 종류에 따라 위와 같은 결과 값이 확인되었으며 이는 방사선에 대한 LBC 검출기의 선형성은 양호한 것으로 확인하였다.

2. 재현성 평가

선형성 평가와 동일한 방법으로 감마선 표준 조사 장치

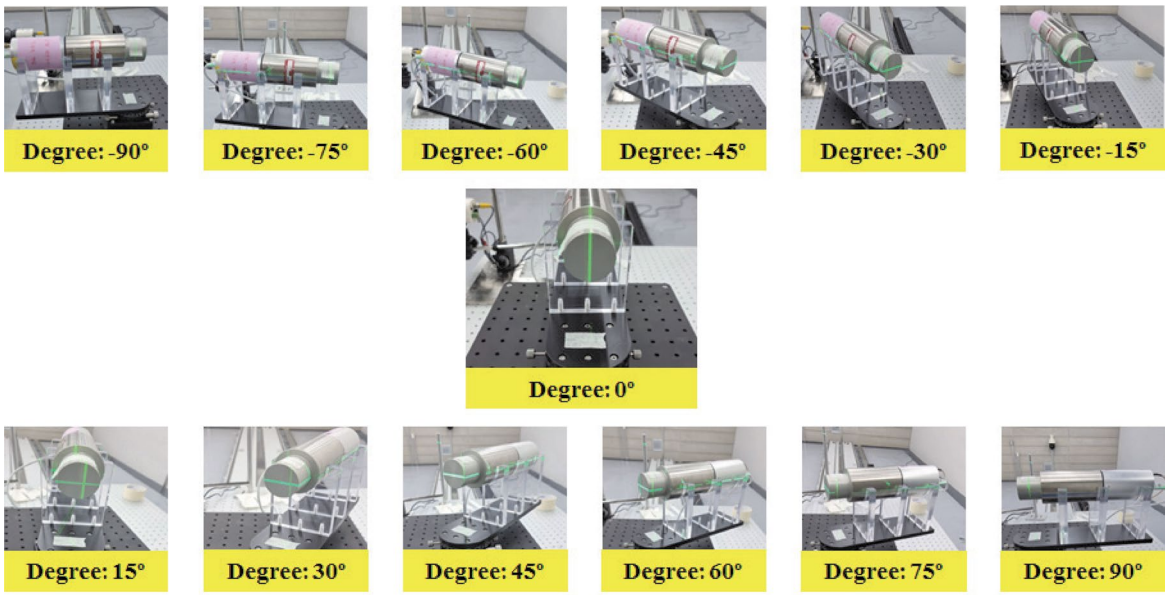
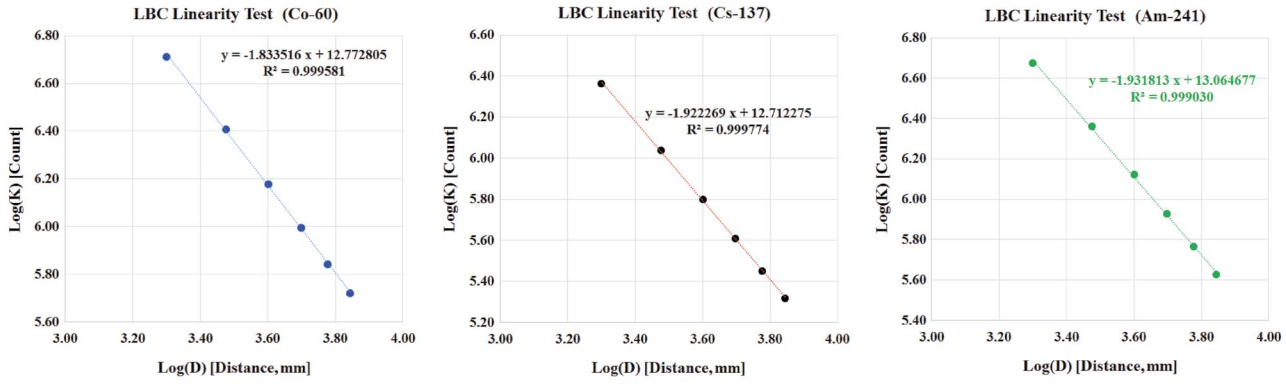


Fig. 5. Variation of the response due to angle of incidence.



(a) (b) (c)

Fig. 6. Linearity for the entire section and R-square value for each source: (a) cobalt-60, (b) caesium-137, (c) americium-241.

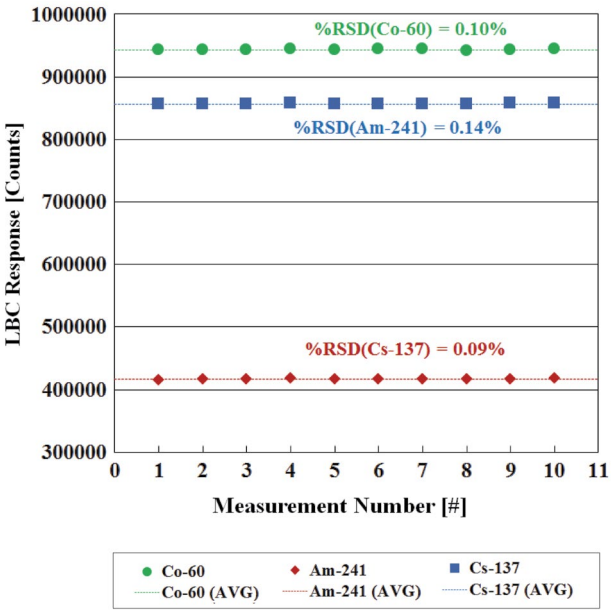


Fig. 7. Reproducibility of the LBC detector.

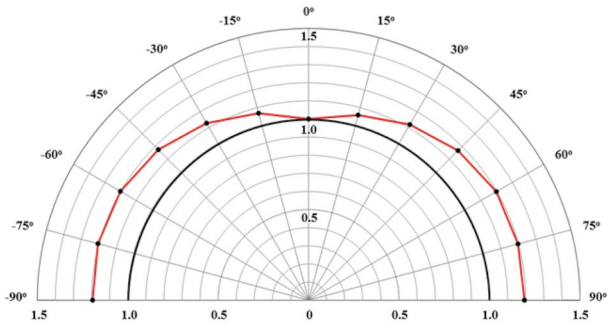


Fig. 8. Response of angle of incidence (Horizontal direction).

에 장착된 선원(^{60}Co, ^{137}Cs, ^{241}Am)을 이용하여 선원으로 부터 기준거리 2,000 mm 지점에 LBC 검출기 표면을 위치하고 10회 반복 측정된 결과에 대한 재현성 평가 결과, Fig. 7과 같이 선원별 평균 계수 값은 ^{60}Co: 943 282.1, ^{137}Cs: 416 943.8, ^{241}Am: 856 398.1로 확인되었으며 각각의 상대표준편차 값은 ^{60}Co: 0.10, ^{137}Cs: 0.14, ^{241}Am: 0.09로 확인되었다. 반복 측정에 대한 정밀도가 우수한 것으로 확인되었으며, 이에 따른 반복에 대한 정확도 우수한 것으로 판단된다.

3. 방향의존성 평가

감마선 표준 조사장치에 장착되어 ^{137}Cs (측정기준점을 중심으로 수평방향에 대하여 각각 0°, ±15°, ±30°, ±45°, ±60°, ±75° 및 ±90°에 대한 반응도 변화 측정 결과(Fig. 8)와 같이 0° 방향을 기준으로 입사각에 따라 그 상대반응도가 수평방향에서 1.057~1.205까지 변화를 확인하였다. 대부분의 방향에서 20% 범위 이내에 만족하였으나, −75° 영역에서 0.5%의 차이를 보였다. 차후 금속폐기물의 위치 및 분포에 따라 여러 방향으로 방사선이 LBC 검출기에 도달 될 것이고 동일한 방사능 물질에 대한 검출 계수도 상이할 것으로 판단된다. 입사각에 따른 상대반응도 결과를 토대로 정량적 분석 시 부수적인 판단이 필요될 것이며, 불확도 요인을 포함한 결과 값 반영이 필요될 것으로 판단된다.

고 찰

본 연구는 차후 개발되는 방사성금속폐기물 오염도 측정·분류 시스템의 주요 구성품 중 LBC 검출기에 대한 방사학적 성능 시험평가를 실시하였고 이는 차후 기존의 원전 운영·해체에서 적용 중인 설계 및 성능기준을 적용하며 주기적인 성능 시험 등의 품질보증체계를 구축하여 개발제품 및 측정·분류 절차에 대한 신뢰성을 확보하는 발판이 되고자 한다. 이를 통해 원전 해체 방사성 금속폐기물 처리·관리를 위한 신속·정확한 방사성 오염도 측정·분류 역량 확

보, 규제요건에 부합하는 금속폐기물 분류 및 관리 운영체계 구축, 정부의 원전 해체 관리목표(방사능 관리 0.1 mSv·년$^{-1}$ 이하, 폐기물 관리 14,500 드럼·호기당$^{-1}$)에 필수적인 자체처분 적용 용이성 확보를 실현할 수 있으며, 이를 통해 정부의 원전 해체 핵심인프라 확보 및 전문기업 육성 등의 정부 정책에 적극적으로 기여하고자 한다.

사 사

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다 (No.20203210100190).

참 고 문 헌

김창락. 2016. 원전 해체 폐기물 관리 동향. Konetic Report. 2016-138호.

이재기. 2016. 방사선방호원론. 1th ed. pp. 254-258.

원자력안전위원회. 2020. 중 · 저준위 방사성폐기물 인도규정. 원자력안전위원회고시 제2020-11호.

한국방사성폐기물학회. 2013. 해체폐기물 관리 시나리오 분석. KORAD/TR/2013-24.

Hopkinson KL, Bishop A, Cross MT, Harrison J and Selgas F. 1998. Recycling and reuse of radioactive material in the controlled nuclear sector, EUR18041 EN, European Commission.

International Atomic Energy Agency. 2009. Classification of Radioactive Waste, IAEA Safety Standards Series No. GSG-1.

International Atomic Energy Agency (IAEA). 2008. Managing Low Radioactivity Material from the Decommissioning of Nuclear Facilities, Technical Reports Series No. 462.

Korean Radioactive Waste Society. 2016. Scenario analysis of decommissioning waste management, Korea Radioactive Waste Agency report, KORAD/TR/2013-24 (2013). quoted in C. Kim, Trend of nuclear power plant decommissioning waste management, KEITI, Konetic report 2016-138.

Korean Radioactive Agency (KORAD). 2018. 2018 low and intermediate level radioactive waste management implementation plan, Public disclosure, KORAD.

Min BY, Lee KY, Yun KS and Moon JK. 2012. Present Status and Program of Waste Management in KAERI, CEA & KAERI Information Exchange Meeting on Waste management and Decommissioning, France.

https://www.berkeleynucleonics.com/lanthanum-bromochloride

Received: 18 October 2021
Revised: 24 December 2021
Revision accepted: 24 December 2021