JOURNAL OF RADIATION INDUSTRY

Original article

17(4) : 471-479 (2023)
https://doi.org/10.23042/radin.2023.17.4.471

비정형 공정부산물 In-Situ 감마선 측정 정확도 향상을 위한 효율교정 모델 최적화 방법 개발

최우철[1,2], 전태훈[2], 송정호[2], 김광표[1,*]

[1]경희대학교 원자력공학과, [2]BRNC

Development of an Efficiency Calibration Model Optimization Method for Improving In-Situ Gamma-Ray Measurement for Non-Standard NORM Residues

WooCheol Choi[1,2], Tae-Hoon Jeon[2], Jung-Ho Song[2] and KwangPyo Kim[1,*]

[1]Department of Nuclear Engineering, Kyung Hee University, 1732 Deokyoungdae-ro Giheoung-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do, 17104, Republic of Korea
[2]BNRC, 6F, 79-4 Mullae-ro, Yeongdeungpo-gu, Seoul 07294, Republic of Korea

Abstract In In-situ radioactivity measurement techniques, efficiency calibration models use predefined models to simulate a sample's geometry and radioactivity distribution. However, simplified efficiency calibration models lead to uncertainties in the efficiency curves, which in turn affect the radioactivity concentration results. This study aims to develop an efficiency calibration optimization methodology to improve the accuracy of in-situ gamma radiation measurements for byproducts from industrial facilities. To accomplish the objective, a drive mechanism for rotational measurement of an byproduct simulator and a sample was constructed. Using ISOCS, an efficiency calibration model of the designed object was generated. Then, the sensitivity analysis of the efficiency calibration model was performed, and the efficiency curve of the efficiency calibration model was optimized using the sensitivity analysis results. Finally, the radiation concentration of the simulated subject was estimated, compared, and evaluated with the designed certification value. For the sensitivity assessment of the influencing factors of the efficiency calibration model, the ISOCS Uncertainty Estimator was used for the horizontal and vertical size and density of the measured object. The standard deviation of the measurement efficiency as a function of the longitudinal size and density of the efficiency calibration model decreased with increasing energy region. When using the optimized efficiency calibration model, the measurement efficiency using IUE was improved compared to the measurement efficiency using ISOCS at the energy of ^{228}Ac (911 keV) for the nuclide under analysis. Using the ISOCS efficiency calibration method, the difference between the measured radiation concentration and the design value for each simulated subject measurement direction was 4.1% (1% to 10%) on average. The difference between the estimated radioactivity concentration and the design value was 3.6% (1~8%) on average when using the ISOCS IUE efficiency calibration method, which was closer to the design value than the efficiency calibration method using ISOCS. In other words, the estimated radioactivity concentration using the optimized efficiency curve was similar to the designed radioactivity concentration. The results of this study can be utilized as the main basis for the development

http://www.ksri.kr/

Copyright © 2023 by
Korean Society of Radiation Industry

***Corresponding author.** KwangPyo Kim
Tel. +82-31-201-2560 Fax. +82-31-273-3592 E-mail. kpkim@khu.ac.kr
Received 6 December 2023 **Revised** 18 December 2023 **Accepted** 19 December 2023

of regulatory technologies for the treatment and disposal of waste generated during the operation, maintenance, and facility replacement of domestic byproduct generation facilities.

Key words: Atypical byproduct, In-Situ gamma ray Measurement, Improve measurement accuracy, Efficiency calibration model, Efficiency calibration optimization

1. 서 론

국내 천연방사성핵종 함유물질(Naturally Occurring Radioactive Material, 이하 "NORM")관련 산업시설에서는 NORM이 농축되어 특정 공정에 침적되는 등 원료로 사용된 물질보다 훨씬 높은 방사능 농도의 공정부산물이 발생되고 있다[1]. NORM 취급 산업시설에서 발생하는 공정부산물은 대부분 비정형이며 오염원인 NORM 방사능 분포도의 특정이 어렵고 채취시료에 대한 대표성 입증이 용이하지 않다[2]. 이처럼 비정형 형태의 공정부산물일 경우, 방사능 측정 및 분석에 어려움 있어 국내 NORM 취급 산업시설 특성을 고려한 적절한 관리방안 마련이 시급한 상황이다.

미국에서는 오일정유, 광물질 취급, 석탄연소, 비료생산 등 NORM 취급 산업시설에서 공정부산물 안전관리를 위해 In-Situ 감마선 측정 기술을 개발하여 적용하였다[3]. Frosio 등은 In-Situ를 이용한 방사능 농도 측정 시, 측정기하에 따른 불확도 개선을 위해 ISOCS (In Situ Object Counting System)를 기반한 새로운 효율교정방법을 제시하였다[4]. Bosko 등은 ISOCS를 이용한 효율교정 시, 발생하는 측정불확도를 낮출 수 있는 최적화된 효율교정 방법에 대한 연구를 수행하였다[5]. Ludovic 등은 기하학적 형상에 따른 불확도를 개선하기 위해 AIGS (Advanced ISOCS In-Situ Gamma Spectrometry)에 대한 연구를 수행하였다[6]. 오스트리아에서는 과거에 NORM 산업 부지의 오염 여부 판별 및 폐기물 분류를 위하여 ISOCS를 이용하여 오염 부지 토양의 방사능 농도를 평가하였다[7]. 독일, 호주에서도 산업시설에서 대규모로 발생되는 NORM 처리·처분을 위해 표본 시료채취 및 방사능 농도 평가관련 연구를 지속적으로 수행 중이다[7]. 리투아니아 방사선방호센터(Radiation Protection Centre, RPC)는 감마선 방출 핵종으로 인한 부지오염을 현장에서 평가하기 위해 ISOCS를 사용한 현장 측정 지침을 수립 및 운용하고 있다[7]. 국내의 경우, 한국원자력연구에서는 서울 연구로 1호기, 2호기 해체를 위해 건물 내 잔류방사능 분석 연구를 수행하였다[8]. 이 과정에서 In-Situ 감마선 측정 기술을 활용하여 건물 내 잔류방사능 농도를 추정하였다. 고리 원자력발전소에서는 원자력발전소 해체 시 선원항 평가를 위해 ISOCS를 활용하여 원자로헤드의 방사능을 측정 및 분석하였다. 분석 결과는 GEANT4, Microshield 전산코드를 활용하여 검증하였다[9].

국외에서는 NORM 취급 산업시설의 안전관리, 해체 등을 위해 In-Situ 감마선 측정 기술을 활용하고 있다. 또한, In-Situ 감마선 측정 기술의 정확도 향상을 위한 많은 연구들이 수행되었다. 그러나, 국내 NORM 취급 산업시설에 대해서는 In-Situ 감마선 측정 기술 개발 및 활용은 상대적으로 미미한 실정이다. 일반적인 In-Situ 감마선 측정 기술은 측정대상물질의 효율교정 모델을 생성하여 방사능 농도를 추정한다. 효율교정 모델은 ISOCS에서 제공하는 시료의 형상(치수, 소스-검출기 거리, 물질 유형 등) 및 방사능 분포로 정의된다[10]. 하지만, 단순화된 효율교정 모델은 시료의 형상에 따른 효율 곡선의 불확도를 초래하고 결과적으로 방사능 농도 결과값에 영향을 미친다. 따라서, 국내 NORM 취급 산업시설에서 발생하는 비정형 공정부산물에 대해 In-Situ 감마선 측정 정확도 향상을 위한 효율교정 최적화 방법 개발이 필요하다.

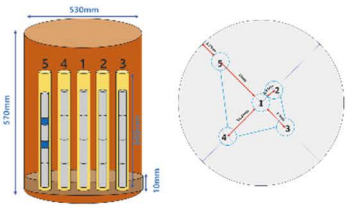
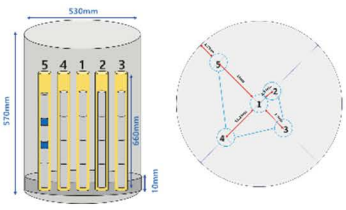
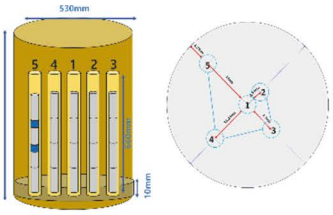
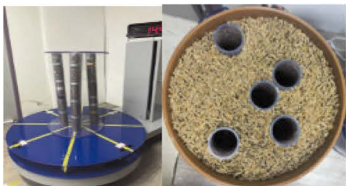
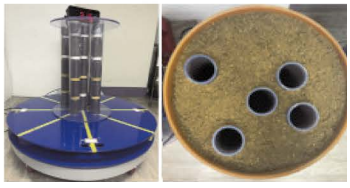
본 연구의 목적은 NORM 취급 산업시설의 In-Situ 감마선 측정의 정확도 향상을 위한 효율교정 모델 최적화 방법론 개발이다. 이를 위해 공정부산물 모의피사체 및 구동기구를 제작하였다. 그리고 ISOCS를 활용하여 설계된 모의피사체의 효율교정 모델을 생성하였다. 생성된 효율교정 모델은 ISOCS IUE를 활용하여 민감도 분석을 수행하였고, 민감도 분석 결과를 통해 효율교정 모델의 효율곡선을 최적화하였다. 최종적으로 모의피사체의 방사능 농도를 추정하였고 설계된 인증값과 비교 및 평가하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. In-Situ 측정을 위한 공정부산물 모의피사체 및 구동기구 제작

NORM 취급 산업시설에서는 공정부산물 등 폐기물의

Table 1. Design and specification of the mock subject

Category	Mock Subject A	Mock Subject B	Mock Subject C
Design			
Crafting			
Material	Wood	Polystyene	Sand
Source high	63 cm	65 cm	64 cm
Weight	74.5 kg	73.9 kg	141.3 kg
Density	0.67 kg L^{-1}	0.66 kg L^{-1}	1.33 kg L^{-1}
Radioactivity	463.30 Bq g^{-1}	463.30 Bq g^{-1}	463.30 Bq g^{-1}

수거 및 처리 등을 위해 방사성물질이 농축될 수 있는 관석, 부스러기, 슬러지 등을 분리 및 수거하여 원통형 드럼 또는 톤백에 포장한다. 본 연구에서는 가장 빈번한 공정부산물 포장 형태인 원통형 드럼을 대표 모의피사체로 선정하였다[11-13]. 모의피사체는 나무, 폴리스티렌, 모래 3가지 재질로 채움재를 구성하였다. 선원은 NORM을 포함한 IAEA-RGTh 선원을 사용하였으며, 분석핵종으로는 ^{232}Th의 붕괴 계열 중 주요 감마방출핵종인 ^{228}Ac (911 keV)을 선정하였다[14]. 그리고 선원 배치는 불균질한 오염분포 모사를 위하여 선원을 한쪽 방향으로 편향되게 제작하였다. 모의피사체의 제원은 Table 1에 나타내었다.

In-Situ 감마선 측정을 위해 모의피사체 구동기구를 설계 및 제작하였다. 모의피사체의 회전 및 여러 방향 측정에 따른 방사능 결과값의 변화를 확인하기 위하여 구동기구를 회전할 수 있도록 제작하였다. 회전구동제어반의 높이는 100 cm 폭은 60 cm로 제작하여 100 L 원통형 드럼을 적재할 수 있도록 하였다. 구동제어반에서는 원형 테이블의 회전속도를 1~10 rpm까지 조작 및 제어가 가능하며 0.1~500 kg의 무게를 측정할 수 있도록 제작하였다.

2.2. 방사능 측정 효율교정 모델 구축

제작된 모의피사체의 방사능 측정 효율교정 모델 생성을 위해 ISOCS의 Geometry Composer를 활용하였으며, Complex Pipe 모델을 사용하였다. 효율교정 모델의 입력자료는 설계자료를 기반으로 입력하여 실제와 유사한 형상의 효율교정 모델을 생성하였다. 제작된 모의피사체 형상은 100 L 드럼 바닥에 일정 간격으로 5개의 구멍이 뚫린 아크릴판이 고정되어 있고, 각 구멍에는 5개의 아크릴봉이 고정되어 있다(Table 1 참조). 아크릴봉에는 각각의 채움재(목재, 폴리스티렌, 모래)와 IAEA-RGth선원이 단일방향 측정기준으로 가장 먼 거리에 아크릴봉 중간에 채워진 형태이다. 선원이 채워진 이외의 드럼 내부 공간은 각각 채움재를 채운 형태이다. 모의피사체의 경우 선원이 채움재 중앙에 위치한다. 따라서, Table 1과 같이 선원과 채움재를 상단, 중단, 하단 등 3부분으로 구분한 후, 각 부분을 모델링하였다. 방사능 측정 효율교정의 입력인자와 모델은 Fig. 1에 나타내었다.

2.3. 민감도 분석 및 효율교정 모델 최적화

Canberra 사의 IUE (ISOCS Uncertainty Estimator tool)

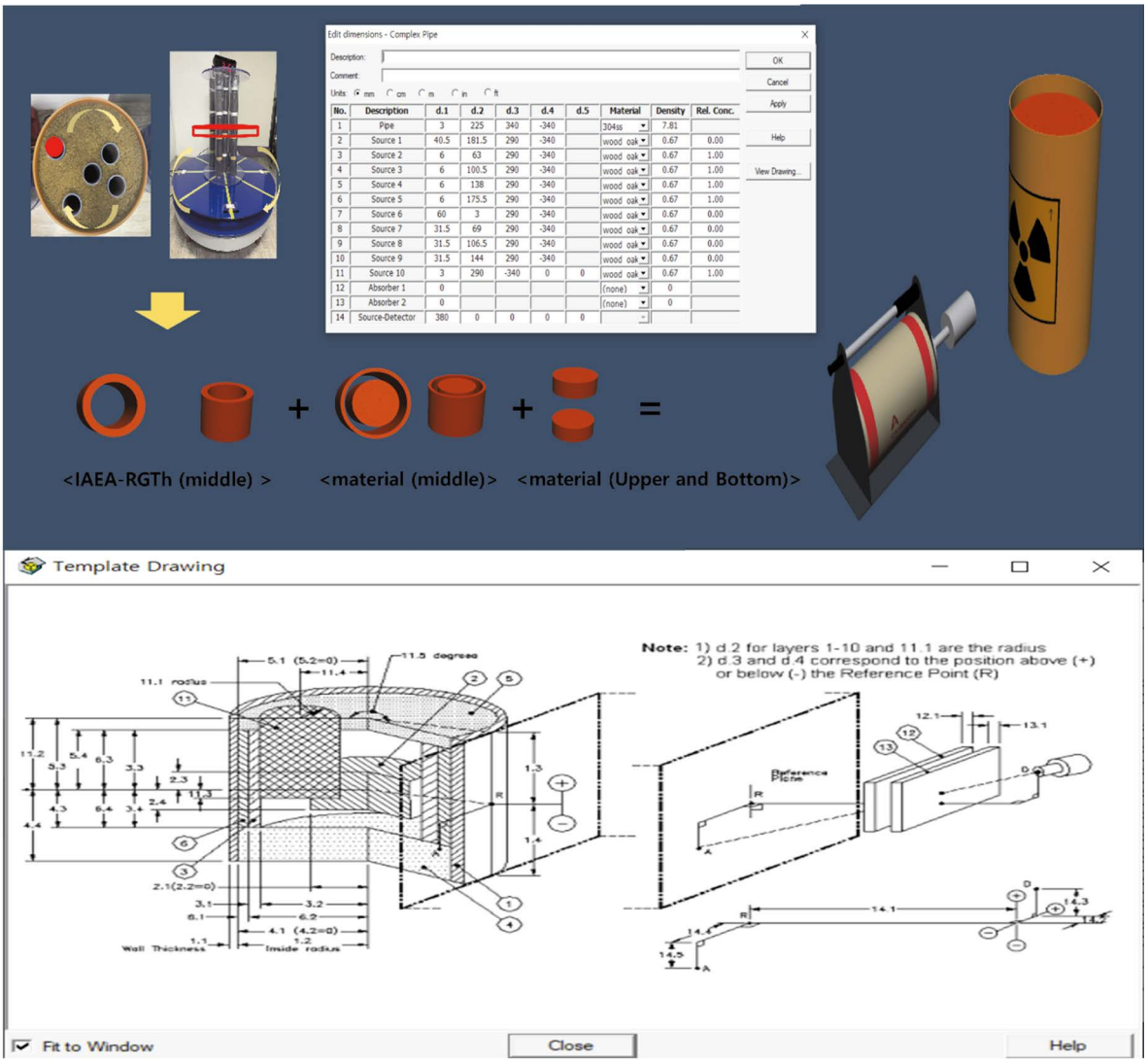


Fig. 1. Mock subject models and input factors with ISOCS.

에서는 몬테카를로 방법론을 기반으로 효율교정 모델의 민감도분석과 측정 효율의 기하평균을 계산할 수 있는 2가지 모드를 제공하고 있다. 따라서, 본 연구에서는 민감도분석 모드, 평균효율계산 모드를 활용하여 효율교정 모델의 최적화를 수행하였다[15].

효율교정 모델의 입력인자에 따른 측정 효율 영향범위 확인을 위해 IUE 민감도 분석 모드를 활용하여 효율교정 모델에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 민감도 분석 대상 인자는 측정 물질의 크기, 밀도로 선정하였다. 민감도분석은 기존에 생성하였던 ISOCS 효율교정 모델을 활용하였으며, 효율교정 모델의 크기(±10%), 밀도(±5%)를 변화시켜 수행하였다[16]. 이를 통해 각 인자별 효율교정 모델에 영향을 미치는 범위 및 표준편차를 산출하였다. 효율교정 모델 최적화는 민감도분석 결과인 각 인자별 표준편차 값을 사용하여 IUE의 평균효율계산 모드로 수행하였다. 계산결과를 바탕으로 관심 감마선 에너지영역인 1~1,836 kev에서 각 인자별 변화에 따른 기하평균 측정 효율을 산출하여 효율곡선을 최적화하였다[14].

2.4. 모의피사체 방사능 측정 및 분석

Fig. 2에 방향별 모의피사체 측정 방법을 나타내었다. 모의피사체 방사능측정은 In-Situ 측정에서 사용하는 단일방향, 네방향, 회전 측정방법을 적용하였다[17]. 단일방향 측정은 중앙지점 높이를 기준으로 측정하였고, 네방향 측

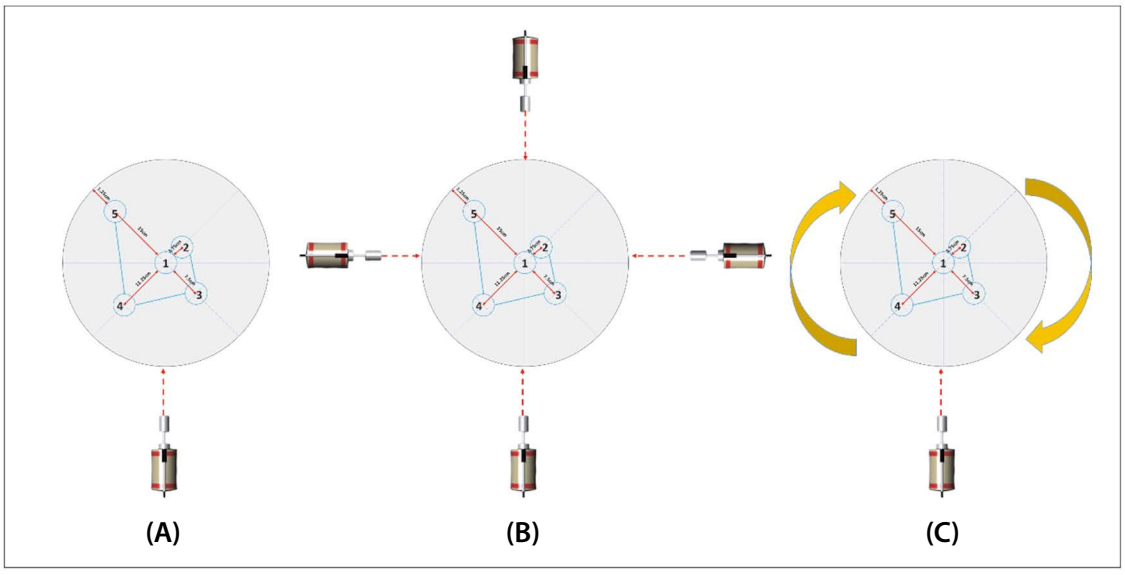


Fig. 2. Measurement methods based on measurement direction (A: one way, B: four way, C: rotation).

Table 2. Measurement Conditions for in-situ gamma-ray nuclide

Category	Direction	Time	Distance
Conditions	One-way	30 minutes	37 cm
	Four-way	30 min (7 minutes 30 seconds each way)	37 cm
	Rotation	30 minutes	37 cm

정은 단일방향 측정 중앙 지점을 기준으로, 90도 간격으로 회전하며 측정하였다. 모의피사체 방사능 측정 조건은 Table 2에 나타내었다. 회전 측정은 단일방향 측정 중앙 지점을 기준으로 모의피사체를 6 rpm으로 회전시키면서 측정하였다. 측정시간은 IAEA-RGTh 선원의 방사능 농도를 고려하고 충분한 계수치를 확보하기 위해 30분으로 설정하였다. 측정거리는 모의피사체 내 선원위치에 따른 응답 오차를 최소화하고, 동시에 충분한 계수율을 얻을 수 있도록 최적거리는 37 cm로 선정하였다. 선원-검출기 측정거리의 일반적인 설정기준은 원통형 측정대상체의 경우, 측정대상체와 검출기와의 거리가 측정대상체 반경의 2~3배로 설정하는 것을 권고하고 있다[18-20].

방사능 측정 결과 분석은 측정 스펙트럼을 사용하였다. 방사능 분석 시 ISOCS 및 IUE를 활용한 효율교정 모델을 사용하여 효율교정을 수행하였고, 감마스펙트럼 방사능 분석 절차에 따라 방사능 농도를 추정하였다. 마지막으로 효율교정방법에 따른 정확도 평가를 위해, 효율 교정방법에 따른 방사능 농도 추정결과값과 설계된 방사능 농도와 비교하였다.

3. 결 과

본 연구에서는 NORM 취급 산업시설의 In-Situ 감마선 측정의 정확도 향상을 위한 효율교정 모델 최적화 방법론을 개발하였다. 이를 위해 공정부산물 모의피사체 및 구동기구를 제작하였다. 그리고 ISOCS를 활용하여 효율교정 모델을 생성하였다. 효율교정 모델을 활용하여 측정 물질의 크기, 밀도에 따른 민감도 분석을 수행하였고, 민감도 분석 결과를 통해 효율교정 모델의 기하평균 측정 효율을 산출하였다. 최종적으로 모의피사체의 방사능 농도를 추정하였고 설계된 인증값과 비교 및 평가하였다.

3.1. 모의피사체 민감도 분석 및 효율교정 모델 최적화

Fig. 3에 모의피사체 효율 교정 모델의 민감도 분석 결과를 나타내었다. 측정 물질의 크기에 따른 민감도 평가 결과, 측정 물질의 가로 크기 변화에 따른 에너지별 측정 효율의 표준편차는 7.7~9.6%였으며 122 keV보다 높은 에너지 영역에서는 표준편차가 감소하는 것으로 나타났다. 122 keV에서 측정 효율의 표준편차는 약 9.6%로 나타났으며

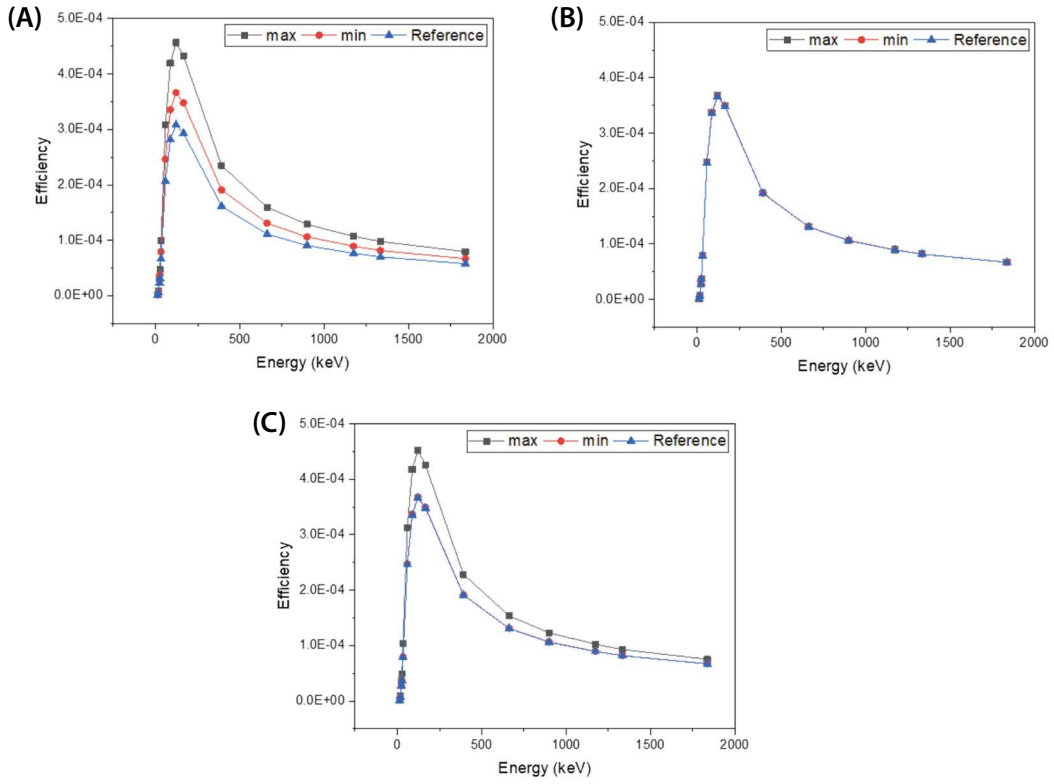


Fig. 3. Efficiency differences for Geometry variations (A: width , B: high, C: density).

측정 효율의 최대, 최소값은 각각 4.57×10^{-4}, 3.08×10^{-4}으로 나타났다. 분석대상 핵종의 에너지인 911 keV의 측정 효율의 표준편차는 약 8.4%로 나타났으며 측정 효율의 최대, 최소값은 각각 1.29×10^{-4}, 9.07×10^{-5}으로 나타났다. 분석대상 핵종의 에너지인 911 keV에서 측정 효율의 표준편차와 122 keV에서 측정 효율 표준편차를 비교했을 때 약 1.2% 낮은 수치이다. 측정 물질의 세로 크기 변화에서 측정 효율의 표준편차는 0.8~1.6%로 나타났다. 13.9 keV에서 측정 효율의 표준편차가 1.6%로 가장 높게 나타났으며, 에너지영역이 높아 질수록 표준편차의 차이가 낮아져 1,836 keV에서 가장 낮은 수치인 0.8%로 나타났다. 911 keV에서 측정 효율의 표준편차는 0.06%로 기존의 측정 효율과 근사한 값을 나타내었다. 밀도에 따른 민감도 평가 결과, 측정 효율의 표준편차는 4.5~10%로 나타났다. 13.9 keV에서 10%로 가장 높게 나타났으며, 1,836 keV에서 가장 낮은 수치인 4.5%로 나타났다.

Fig. 4에 효율교정 모델 최적화 결과를 나타내었다. 모의피사체 A의 ISOCS를 활용한 효율교정 모델 측정 효율은 분석대상 핵종의 에너지인 911 keV에서 4.08×10^{-5}으로 나타났다. IUE를 활용한 최적화된 효율교정 모델의 측정 효율은 4.05×10^{-5}이었으며 측정 효율의 차이는 약 1%로 나타났다. 모의피사체 B의 ISOCS를 활용한 효율교정 모델 측정 효율은 911 keV에서 4.06×10^{-5}으로 나타났다. IUE를 활용한 최적화된 효율교정 모델의 측정 효율은 4.01×10^{-5}이었으며 측정 효율의 차이는 약 1%로 나타났다. 모의피사체 C의 ISOCS를 활용한 효율교정 모델 측정 효율은 분석대상 핵종의 에너지인 911 keV 2.39×10^{-5}으로 나타났다. IUE를 활용한 최적화된 효율교정 모델의 측정 효율은 2.35×10^{-5}으로 나타났다.

3.2. 효율교정 방법에 따른 모의피사체 측정 결과

Fig. 5에 효율교정 방법에 따른 모의피사체 측정 결과를 나타내었다. 모의피사체 A의 단일 방향 측정 결과, ISOCS와 IUE의 방사능 농도값과 인증값 차이가 각각 2% 이내로 근사한 것을 확인하였다. 모의피사체 A의 네방향 측정 결과, ISOCS와 IUE의 방사능 농도값은 각각 419 Bq, 451 Bq이었다. ISOCS를 활용한 방사능 농도 추정값과 인증값의 차이는 약 10%였으며 IUE를 활용한 방사능 농도 추정

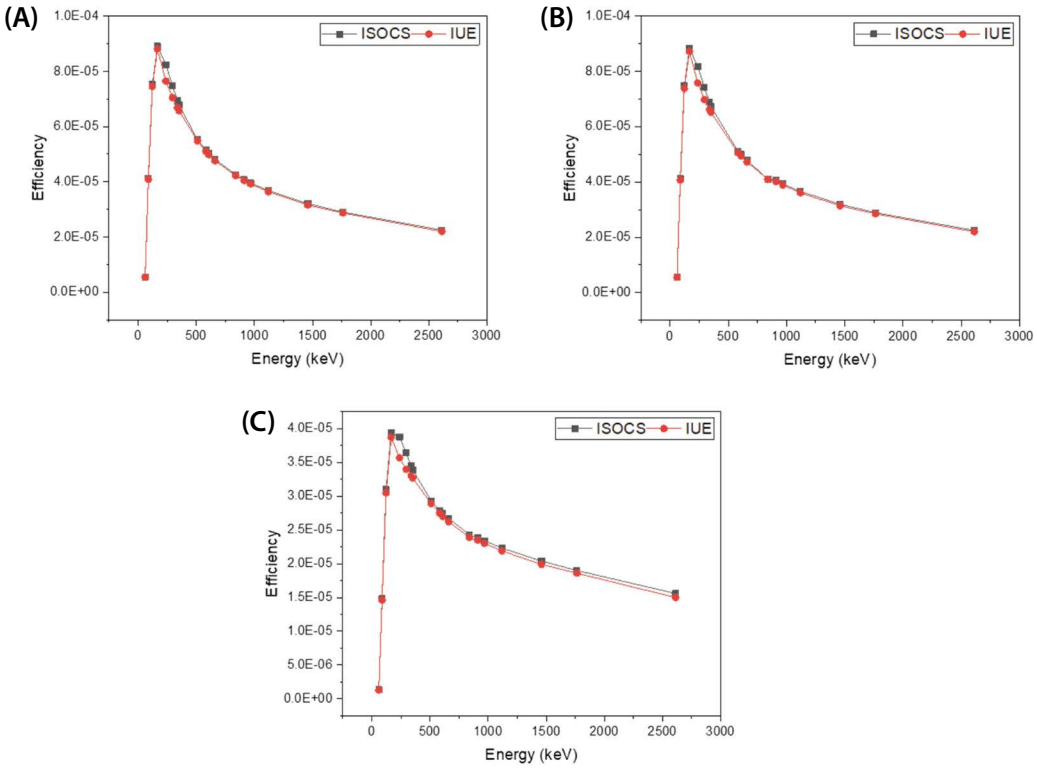


Fig. 4. Mock subject efficiency based on efficiency calibration methods (A: mock Subject - Wood, B: mock Subject - Polystyene, mock Subject - C: Sand).

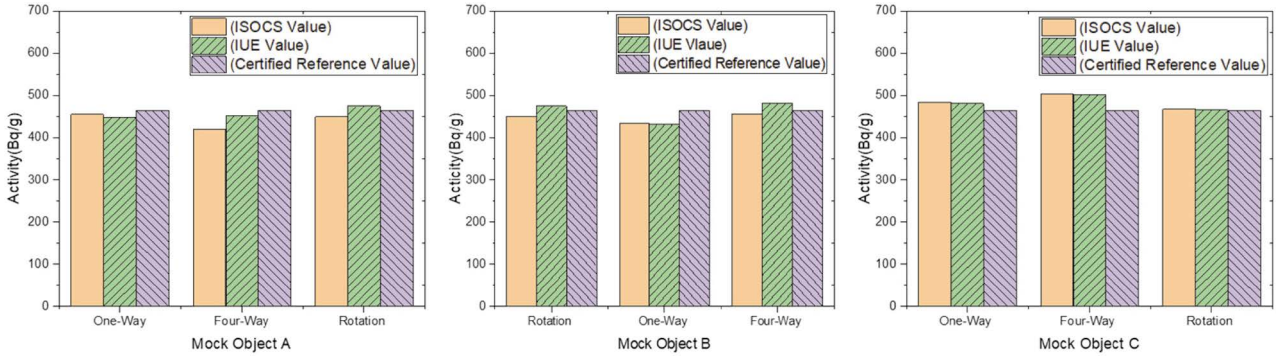


Fig. 5. Differences in radioactivity concentrations in Mock subjects based on efficiency calibration methods.

값의 차이는 약 3%로 IUE를 활용한 방사능 농도 추정값이 인증값과 근사한 것으로 나타났다. 모의피사체 A의 회전 측정 결과, ISOCS와 IUE의 방사능 농도값은 각각 449 Bq, 475 Bq이었으며, ISOCS, IUE와 인증값 차이는 각각 3%, 2%로 나타났다. 모의피사체 B의 단일 방향 측정 결과, ISOCS와 IUE의 방사능 농도값은 각각 434 Bq, 445 Bq이었으며, IUE를 활용한 방사능 농도 추정값이 설계된 인증값과 근사한 것으로 확인하였다. 모의피사체 B의 네방향, 회전 측정 결과, ISOCS와 IUE의 방사능 농도값과 인증값 차이가 2% 이내로 근사한 것을 확인하였다. 모의피사체 C의 단일 방향 측정 결과, ISOCS와 IUE의 방사능 농도값과 인증값 차이가 4% 나타났다. 모의피사체 C의 네방향 측정 결과, ISOCS와 IUE의 방사능 농도값과 인증값 차이가 8%로 나타났다. 모의피사체 C의 회전 측정 결과, ISOCS와 IUE의 방사능 농도값과 인증값 차이가 1% 이내로 근사한 것을 확인하였다.

4. 고 찰

4.1. 모의피사체 민감도 평가 및 효율교정 모델 측정 효율 결과 분석

모의피사체 효율교정 모델의 가로 크기 변화에 따른 에너지별 측정 효율의 표준편차는 122 keV에서 가장 높은 것으로 나타났다. 측정 효율의 표준편차는 122 keV보다 높은 에너지 영역에서 감소하는 것으로 나타났다. 효율교정 모델의 세로 크기 변화에서 측정 효율의 표준편차는 13.9 keV에서 가장 높게 나타났으며, 에너지 영역이 높아질수록 표준편차가 감소하는 것으로 나타났다. 밀도에 따른 측정 효율의 표준편차는 13.9 keV 가장 높게 나타났으며, 1,836 keV에서 가장 낮은 수치로 나타났다. 13 keV와 분석대상 핵종의 에너지인 911 keV에서 측정 효율의 표준편차를 비교했을 때 표준편차의 차이는 약 2배로 나타났다. 밀도에 의한 측정 효율의 영향은 에너지 영역이 증가할수록 감소되는 것을 확인하였다. 효율교정 모델 최적화 수행 결과, 911 keV에서 ISOCS와 IUE의 측정 효율 차이는 모의피사체 A와 B에서 1%, 모의피사체 C에서 2%로 ISOCS의 측정 효율보다 IUE를 활용한 측정 효율이 개선되어 나타났다.

4.2. 효율교정 방법에 따른 모의피사체 측정 결과 비교 분석

효율교정 방법에 따른 정확도 평가를 위해 ISOCS를 이용한 효율교정 방법과 IUE를 활용한 효율교정 방법의 방사능 농도 추정 결과를 비교분석하였다. ISOCS 효율교정 방법을 사용한 경우, 측정된 모의피사체 측정방향별 방사능 농도와 설계값의 차이는 평균 4.1% (1~10%)로 나타났다. ISOCS 효율교정 방법 결과 중, 모의피사체 A의 네방향 측정에서 방사능 농도와 설계값의 차이가 약 10% 과소 평가되어 나타났다. 네방향 측정에서 각 방향별 측정시간을 30분(각 방향 7분 30초)으로 측정하였지만, 비균질한 모의피사체의 특성에 따라 측정 방향에 따른 계수율의 손실이 발생하여 방사능 농도가 과소 평가되어 나타났다. 추후 이를 고려하여 실제 공정부산물 측정 설계 시 충분한 계수율을 확보할 수 있는 측정 시간을 선정해야 할 것으로 판단된다.

ISOCS IUE효율교정 방법을 사용한 경우, 방사능 농도 추정값과 설계값의 차이는 평균 3.6% (1~8%)로 나타났다. 모의피사체 C의 단일, 네방향 측정에서 방사능 농도와 설계값의 차이가 각각 4%, 8% 과대 평가되어 나타났다. 모의피사체 C의 채움재 재질은 모래로 구성되어 있다. 따라서, 모래에 함유된 천연방사성물질의 방사능과 설계하였던 IAEA-RGTh선원의 방사능이 동시에 측정되어 방사능 농도 추정 결과에 영향이 미치는 것으로 나타났다. 추후 이를 고려하여 NORM 취급 산업시설 특성에 따른 계측상황을 설계해야 할 것으로 판단된다.

결과적으로, ISOCS 이용한 효율교정 방법보다 최적화된 효율교정 모델을 활용하는 IUE 효율교정 방법이 설계값에 더 근사한 값을 나타내었다. 그러나 최적화된 효율교정 모델을 활용한 In-Situ 기술의 정확성, 신뢰성 평가를 위해서는 실제 산업시설에서 발생한 비정형 공정부산물을 측정하여 시료채취 결과 비교 등과 같은 추가적인 교차검증이 필요할 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 NORM 취급 산업시설의 In-Situ 감마선 측정의 정확도 향상을 위한 효율교정 모델 최적화 방법론을 개발하였다. 이를 위해 모의피사체의 효율교정 모델을 활용하여 측정 물질의 크기, 밀도에 따른 민감도 분석을 수행하였다. 민감도 분석 결과를 통해 효율교정 모델의 기하평균 측정 효율을 산출하여 최적화된 효율교정 모델을 생성하였다. 최종적으로 효율교정 모델별 모의피사체의 방사능 농도를 추정하였고 설계된 인증값과 비교 및 평가하였다.

모의피사체 효율교정 모델의 가로 크기 변화에 따른 에너지별 측정 효율의 표준편차는 122 keV보다 높은 에너지 영역에서 감소하는 것으로 나타났다. 효율교정 모델의 세로 크기, 밀도 변화에 따른 측정 효율의 표준편차는 에너지 영역이 높아질수록 표준편차가 감소하는 것으로 나타났다. IUE를 활용한 최적화된 효율교정 모델의 모의피사체별 측정 효율은 911 keV에서 ISOCS와 측정 효율 차이가 모의피사체 A와 B에서 1%, 모의피사체 C에서 2%였으며, ISOCS의 측정 효율보다 IUE를 활용한 측정 효율이 개선되어 나타났다.

효율교정 방법에 따른 정확도 평가를 위해 ISOCS를 이용한 효율교정 방법과 IUE를 활용한 효율교정 방법의 방사능 농도 추정 결과를 비교분석하였다. ISOCS 효율교정 방법을 사용한 경우, 측정된 모의피사체 측정방향별 방사능 농도와 설계값의 차이는 평균 4.1% (1~10%)로 나타났

다. IUE 효율교정 방법을 사용한 경우, 방사능 농도 추정값과 설계값의 차이는 평균 3.6% (1~8%)로 나타났으며, ISOCS 이용한 효율교정 방법보다 설계값에 근사한 값을 나타내었다. 그러나 최적화된 효율교정을 활용한 In-Situ 기술의 정확성 및 신뢰성 평가를 위해서는 NORM 취급 산업시설에서 발생하는 비정형 공정부산물을 측정하여 시료채취 결과 등과 같은 추가적인 교차검증이 필요할 것으로 판단된다. 본 연구의 결과는 국내 공정부산물 발생시설의 운영, 유지보수, 시설교체 시 발생 폐기물의 처리·처분 심사를 위한 규제기술 개발의 주요 기반자료로 활용할 수 있을 것이다.

사 사

본 연구는 원자력안전위원회의 재원으로 한국원자력안전재단의 지원을 받아 수행한 원자력안전규제기술개발 사업의 연구결과입니다(No. 2004025).

참고문헌

1. IAEA. 2013. Radiation Protection and Management of NORM Residues in the Phosphate Industry. IAEA Safety Reports Series No.78.
2. IAEA. 2012. Radiation Protection and NORM Residue Management in the Titanium Dioxide and Related Industries, IAEA Safety Reports Series No.76.
3. Mueller WF, Ilie G, Lange H-J, Rotty M and Russ WR. 2013. In-situ Measurements and Analysis of Naturally Occurring Radioactive Materials. ANIMMA Conference.
4. Frosio T, Menaa N, Duchemin C, Riggaz N and Theis C. 2020. A new gamma spectroscopy methodology based on probabilistic uncertainty estimation and conservative approach. *Appl. Radiat. Isot.* **155**:108929.
5. Bosko A, Menaa N, Spillane T, Bronson F, Venkataraman R, Russ W, Mueller W and Nizhnik V. 2011. Efficiency Optimization Employing Random and Smart Search Using Multiple Counts and Line Activity Consistency Benchmarks. Proceedings of the 37th Waste Management Symposia, Phoenix.
6. Bourva L, Chard P, Kirk T, Bronson F, Ilie G, Jaederstroem H and Mueller W. 2008. Probabilistic uncertainty estimator for gamma-spectroscopy measurements. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* **276**: 589-594. https://doi.org/10.1007/s10967-008-0604-z.
7. IAEA. 2013. Naturally Occurring Radioactive Material (NORM VII), Proceedings of an International Symposium.
8. Hong SB, Ju MS, Jeong GH, Lee GW and Jeong US. 2008. Evaluation of residual radioactivity in buildings using ISOCS. Proceedings of the Korean Radioactive Waste Society Conference. **2008**(5):55-56. https://scienceon.kisti.re.kr/srch/selectPORSrchArticle.do?cn=NPAP08164666.
9. Jeong HC and Jeong SY. 2014. Assessment of the Radiological Inventory for the Reactor at Kori NPP Using In-Situ Measurement Technology. *JNFCWT* **12**(2). https://doi.org/10.7733/jnfcwt.2014.12.2.171.
10. Choi JG. 2015. ISOCS V4.2 Calibration Software User Interface.
11. KINS. 2017. Development of safety management technology for decommissioning of industrial facilities generating large scale NORM residues, KINS/HR-1631.
12. KINS. 2016. Development of technical guidelines and work procedures for treatment and disposal of NORM Residues based on field test, KINS/HR-1519.
13. KINS. 2016. Development of radiological safety evaluation methods for industry using monazite and other naturally occurring radioactive materials. KINS/HR-1456.
14. IAEA. RS_RGTh-1 Reference sheet.
15. Canberra. 2018. Advanced ISCOS Measurement "Using the ISOCS Uncertainty Estimator". ISOSC manual SU-476-3.
16. Bronson F, Atrashkevich V, Geurkov and Young B. 2008. Probabilistic uncertainty estimator for gamma-spectroscopy measurements. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* **276**:589-594. https://doi.org/10.1007/s10967-008-0604-z.
17. ISO. 2015. Measurement of radioactivity in the environment, Part 3: Test method of gamma-emitting radionuclides using gamma-ray spectrometry. ISO 18589-3.
18. KAERI. 2009. Radwaste Drum Assay Technology by Segmented Gamma Scanning System, KAERI/TR-3711/2009.
19. Mirion Technologies. 2013. Model S573 ISOCS Calibration Software.
20. Mirion Technologies. 2008. In Situ Gamma Spectroscopy with ISOCS™. An In-Situ Object Counting System.