

## 〈원저〉

## 감마 분광분석법에 따른 방사능 국제 숙련도 시험 결과 평가

이지은<sup>1)</sup>·강영록<sup>1)</sup>·장희진<sup>1,2)</sup>·계용욱<sup>1)</sup>·조월순<sup>1)</sup>·백정화<sup>1)</sup>·이창근<sup>1)</sup>·이동연<sup>2)</sup>·김효진<sup>1)</sup><sup>1)</sup>동남권원자력의학원·<sup>2)</sup>동의대학교 방사선학과International Proficiency Test for Radioactivity by  
Gamma Spectroscopy Evaluation of ResultsJi-Eun Lee<sup>1)</sup>·Yeong-Rok Kang<sup>1)</sup>·Hee-Jin Jang<sup>1,2)</sup>·Yong-UK Kye<sup>1)</sup>·Wol-Soon Jo<sup>1)</sup>·  
Jeong-Hwa Baek<sup>1)</sup>·Chang-Geun Lee<sup>1)</sup>·Dong-Yeon Lee<sup>2)</sup>·Hyo-Jin Kim<sup>1)</sup><sup>1)</sup>Research Center, Dongnam Institute of Radiological & Medical Sciences<sup>2)</sup>Department of Radiological Science, Dong-eui University

**Abstract** The method for verifying analytical technology in the field of radioactivity measurement involves participation in a proficiency test(PT). Proficiency tests are mandatory requirements of ISO/IEC 17025 for maintaining calibration and testing laboratories. These tests are intended to evaluate the analytical capabilities of laboratories, identify problems, support corrective actions, and verify uncertainties. We conducted a proficiency test on the Environmental Resources Association of America(ERA). In the field of radiochemistry, we participated in RAD 136 and compared our results with those of 24 laboratories world wide. The analytical capability of gamma nuclide was evaluated as satisfactory, warning, or unsatisfactory, according to the Z-score of ISO 13528. The radioactivity of <sup>133</sup>Ba, <sup>134</sup>Cs, <sup>137</sup>Cs, <sup>60</sup>Co and <sup>65</sup>Zn contained in gamma emitters sample was measured and analyzed, and all the result values  $|z| < 2$  were satisfactory according to the Z-score evaluation criteria. Hence, we received the result Laboratory of Excellence.

**Key Words :** Gamma spectroscopy, Radioactivity, Proficiency Test, Z-score, HPGe detector

**중심 단어 :** 감마 분광분석법, 방사능, 숙련도 시험, Z-score, 고순도 게르마늄 검출기

## 1. 서론

숙련도 시험(Proficiency Testing; PT)이란 시험 기관 간 비교를 통하여 미리 확립된 기준에 대한 참가자의 숙련도를 평가하는 것으로 정의하며, 목적상 숙련도 시험이라는 용어는 광범위한 의미로 사용 될 수 있다. 숙련도 시험은 특정 시험이나 측정에 대한 참가자(시험소, 검사기관 또는 개인)의 수행 능력을 결정, 수행능력이 계속 이어지는지 검증하기 위한 방법으로 사용된다[1]. 방사성 핵종 식별에 대한 기관의 측정능력을 정량적으로 입증하고 측정 및 분석 결과의 신뢰성을 보장하기

위해 숙련도 시험에 참여한다. 국제표준화기구(International Organization for Standardization; ISO) 및 국제전기기술위원회(International Electrotechnical Commission; IEC)의 ISO/IEC 17025 품질 시스템을 따르면 교정/시험 기관을 유지하기 위해서는 숙련도 시험 참여는 필수 요구 사항이다[2]. 국내·외에 숙련도 시험 운영기관이 존재하며 이 기관들로부터 숙련도 시험에 참여할 수 있다. 숙련도시험 항목들은 공기, 방사화학, 토양, 상수도, 수질오염 등 분야별로 다양하게 존재하며 숙련도시험 종류도 시험 기관 간 비교 시험, 시험자간 비교 시험, 측정 심사 등 여러 가지가 존재하고 다양한 실험실이 참

This work was supported by the Dongnam Institute of Radiological & Medical Sciences(DIRAMS) grant funded by the Korea government(MSIT) (No. 50491-2024)

Corresponding author: Hyo Jin Kim, Research Center, Dongnam Institute of Radiological & Medical Sciences, 40 Jwadong-gil, Jangan-eup, Gijang-gun, Busan-si, 46033, Republic of Korea / Tel: +82-51-720-5815 / E-mail: kimhyojin@dirams.re.kr

Received 13 August 2024; Revised 11 September 2024; Accepted 14 September 2024

Copyright ©2024 by The Korean Journal of Radiological Science and Technology

여하고 감마선 측정분석 기술에 관한 연구 결과들을 공유하고 있다.[3-12]. 숙련도 시험에 참여함으로써 ISO/IEC 및 한국 인정 기구(Korea Laboratory Accreditation Scheme; KOLAS)의 인정 요구사항 및 품질기준을 충족할 수 있으며 시험 결과의 정확도 및 시험능력을 입증할 수 있으며 고객에게 신뢰도를 제공할 수 있다.

국제 숙련도 시험은 전 세계 분석기관을 대상으로 분석 능력 향상과 신뢰성 확보를 위해 매년 실시되고, ISO/IEC 규정을 준수하는 국제 숙련도 시험 기관에서 진행한다. 국제 숙련도 시험은 시험자(시험 기관)의 분석 능력 확인을 위해 국제 숙련도 시험 운영 기관에서 분야별로 접수해 균질성을 유지하는 시료를 제조 후 참가기관에 시료를 발송, 분석 결과를 받아 Z-score로 평가 후 인증서를 교부한다. 미국 환경자원협회(Environmental Resource Association; ERA)는 ISO/IEC 17043 인증을 받은 국제 숙련도 시험 기관으로 1991년부터 국제 숙련도 시험을 제공하기 시작했고, 80개국 이상이 국제 숙련도 시험에 참여하여 결과 데이터 분석을 수행한다.

본 기관에서는 ISO/IEC 17025 표준을 기반으로 한 품질 관리 시스템을 따르고 있으며 한국 인정 기구로부터 교정/시험 기관으로 인정받아 방사선/방사능 분야의 교정 및 시험 업무를 수행하고 있다. 국제적 비교를 통해 본 기관의 감마 분광분석법에 따른 분석 결과의 타당성과 신뢰성을 평가할 수 있을 것으로 기대하였다. 국외 숙련도 시험 기관 중 미국 환경자원협회에서 주관한 숙련도 시험에 참여하였고 Radiochemistry RAD 136 숙련도 시험 샘플에서 5개 방사성 핵종을 분석한 결과 및 통계적 평가를 제시한다.

## II. 대상 및 방법

### 1. 실험 장비 및 연구 재료

#### 1) 고순도 게르마늄 검출기(High Purity Germanium detector, HPGe)

방사성 물질을 측정하기 위해서 감마 핵종분석 장비를 사용한다. 감마 핵종분석 장비는 고순도 게르마늄 검출기(High Purity Germanium detector; HPGe detector), 전치 증폭기(Pre-Amplifier), 전기적 신호를 처리하는 증폭기(Amplifier), MCA(Multi-Channel Analyzer) 등으로 구성되어 있다. 반도체 검출기는 입사된 감마선이 물질과의 상호작용(광전효과, 콤프턴 산란, 전자쌍 생성)에 의해 발생된 펄스 또는 전류 신호를 수집하여 감마선 에너지와 방사능을 측정하여 핵종분석을 수행한다.

숙련도 시험 시료의 감마 핵종 분석을 위하여 GC4018 HPGe 검출기(CANBERRA Inc.)를 사용하였다. GC4018 검출기의 직경은 63 mm, 효율 40%이며, 1.33 MeV에서 1.8 keV의 분해능을 가진다. 장비의 사양을 Table 1에 나타내었다. HPGe 검출기 전체 모습과 CRM을 검출기에 삽입했을 때의 모습을 Fig. 1에 나타내었다. HPGe 검출기의 에너지 교정, 효율 교정은 한국표준과학연구원(Korea Research Institute of Standards and Science, KRISS)의 소급성이 확보된 인증표준물질(Certifies Reference Material, CRM)을 사용하였다. 인증표준물질은 Marinelli Beaker에 담은 1 l 고상 선원으로 감마선 방출 혼합 핵종(10개)이 포함된 방사능 인증표준물질이다. 인증표준물질에 포함 된 핵종은 <sup>241</sup>Am, <sup>109</sup>Cd, <sup>57</sup>Co, <sup>139</sup>Ce, <sup>51</sup>Cr, <sup>113</sup>Sn, <sup>85</sup>Sr, <sup>137</sup>Cs, <sup>60</sup>Co 및 <sup>88</sup>Y 핵종으로 구성되어 있으며 59.54 ~ 1836.05 keV 에너지 범위를 포함하며 이를 Table 2에 나타내었다.

Table 1. Detector specifications

Detector	GC4018
Corporation	CANBERRA
Operating Voltage	+3500 V
Diameter	63 mm
Measurement Range	50 keV ~ 2 MeV
Resolution	1.8 keV at 1.33 MeV
Relative efficiency	40%

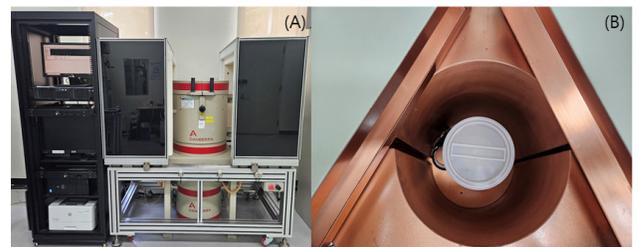


Fig. 1. GC4018 HPGe detector(A) and CRM(sample) appearance inside the HPGe detector(B)

#### 2) Proficiency testing (PT) sample

PT 시료는 유리 바이알에 10 ml로 농축되어 있는 액상 시료로 질산을 사용하여 pH < 2 상태로 보존되어 있다. 숙련도 시험 시료는 <sup>133</sup>Ba, <sup>134</sup>Cs, <sup>137</sup>Cs, <sup>60</sup>Co 및 <sup>65</sup>Zn으로 구성되어 있으며 분석 핵종 및 방사능 범위를 Table 3에 나타내었다. 시료에는 비방사성 Ba(10 mg/l), Zn(5 mg/l), Co(10 mg/l)도 포함되어 있었다.

**Table 2.** Certified reference material values and Uncertainties

Nuclide	Energy (keV)	Photon emission intensity(%)	Activity (Bq) <sup>1)</sup>
<sup>241</sup> Am	59.54	35.92	1440 ± 58
<sup>109</sup> Cd	88.03	3.66	7133 ± 290
<sup>57</sup> Co	122.06	85.49	419 ± 17
	136.47	10.71	
<sup>139</sup> Ce	165.86	79.90	405 ± 17
<sup>51</sup> Cr	320.08	9.89	42852 ± 1800
<sup>113</sup> Sn	391.70	64.97	1032 ± 42
<sup>85</sup> Sr	514.00	98.5	1380 ± 56
<sup>137</sup> Cs	661.66	85.01	627 ± 25
<sup>60</sup> Co	1173.23	99.85	1010 ± 41
	1332.49	99.98	
<sup>88</sup> Y	898.04	93.70	1821 ± 73
	1836.05	99.34	

<sup>1)</sup> Confidence level: approx. 95%,  $k = 2$

**Table 3.** Analysis nuclide and radioactivity range

Nuclide	Specific Activity (pCi/ l)	Half-life
<sup>133</sup> Ba	10 - 100	10.54 year
<sup>134</sup> Cs	10 - 100	2.06 year
<sup>137</sup> Cs	20 - 240	30.05 year
<sup>60</sup> Co	10 - 120	5.27 year
<sup>65</sup> Zn	30 - 360	244.01 day

## 2. 연구 방법

### 1) PT sample 전처리 및 방사능 측정

PT 시료는 농축액 상태로 분석 전에 희석 과정을 수행하였다. 바이알을 개봉 전에 충분히 흔들어서 시료가 잘 혼합되게 해준다. 이후 마이크로 피펫으로 농축액 5 ml을 분취하고 0.1 M 질산 용액을 넣어 혼합하여 최종 부피를 1 l로 만들었다. PT 시료의 방사능은 HPGe 검출기로 측정하였고 과정을 Fig. 2에 나타내었다. ISO 18589-3:2015, HASL 300 Ga-01의 감마 분광분석 절차를 적용하였다[13,14]. PT 시료와 같은 기하학적 구조를 갖는 인증표준물질을 사용하여 에너지 및 효율 교정을 수행하였다. HPGe 검출기와 PT 시료 간의 거리는 0 cm, 측정시간은 160000 s, 시료에 포함된 핵종들의 계수 표준불확도가 1% 미만, 불감시간(Dead time)이 5% 미만이 되도록 측정하였다. 획득한 PT시료의 스펙트럼을 사용하여 각 핵종의 방사능 농도를 분석하였다. 방사능을 구하기 위해 분석에 영향을 미치는 요소의 보정 및 불확도 요소를 포함한 수학적 모델은 Eq. 1과 같다.

$$A = \frac{N}{\varepsilon \times P_r \times t_s \times m \times K_1 \times K_2 \times K_3} \quad \text{Eq. 1}$$

여기서, N : 시료의 순 계수

$\varepsilon$  : 검출효율

$P_r$  : 감마선 방출률

$t_s$  : 시료 측정 시간

$m$  : 시료 무게

$K_1$  : 동시합성효과 보정인자

$K_2$  : 측정 중 붕괴에 대한 보정인자

$K_3$  : 농도 기준일에 대한 붕괴 보정인자

수학적 모델을 바탕으로 측정불확도를 계산하였다. 순 계수, 측정시간, 시료 무게, 검출효율, 동시합성효과 보정인자, 측정 중 붕괴 보정인자, 농도 기준일에 대한 붕괴 보정인자는 실험결과 및 추가적 분석으로 얻어진 값을 적용하였고, 감마선 방출률은 참고문헌의 값을 적용하였다[15].

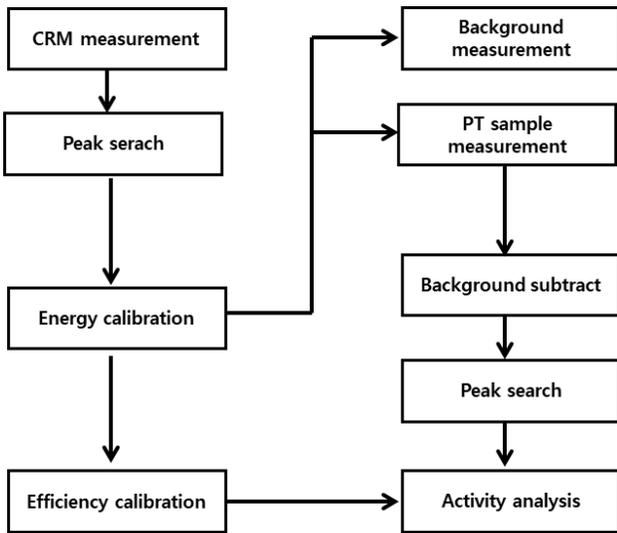


Fig. 2. Experiment method flow chart

2) Proficiency testing Z-score 평가 방법

ISO/IEC 17043, 13528에 따라 Z-score를 기준으로 실험실 분석 능력을 평가한다[16]. Z-score는 참여기관에서 제출한 값이 숙련도 시험 기관에서 정한 기준값과 얼마나 떨어져 있는지를 나타낸다. Z-score는 Eq. 2 같이 계산하며 Z-score 점수 범위는 Table 4와 같다.

$$z = \frac{(x - X)}{SDPA} \quad \text{Eq. 2}$$

여기서,  $x$  : 실험실에서 보고한 PT 값  
 $X$  : 공식 또는 Robust 평균에 의해 결정된 값  
 SDPA : 추정회귀 표준편차 또는 Robust 표준편차 기반으로 숙련도 평가를 위한 표준편차

Table 4. Z-score levels performance

	Performance Evaluation	Color Code
z Score less than or equal to 2.0	Satisfactory	Green
z Score greater than 2.0 and less than 3.0	Warning	Orange
z Score greater than or equal to 3.0	Unsatisfactory	Red

III. 결과

1. 에너지 및 검출효율 교정

시료에 함유된 감마선 핵종을 정성분석하기 위해 에너지 및

검출효율을 교정하였다. 에너지 교정은 인증표준물질로 스펙트럼을 측정한 후 피크가 위치하는 채널과 에너지를 연관 짓는 과정이다. 측정된 스펙트럼의 채널과 에너지를 최소자승 회귀방법을 사용한 결과  $E(keV) = -0.214 + 0.366x$ 로 구해졌으며  $x$ 에 각 채널 번호를 대입하여 에너지를 구한 결과는 Fig. 3과 같다. 각 감마선 피크 에너지에서 구한 검출효율 값은 에너지의 함수로서 내삽 방법에 의하여 결정되며 이들을 효율 함수로부터 시료의 방사능을 산출하게 된다[17]. 검출효율을 Table 5에 나타내었다.

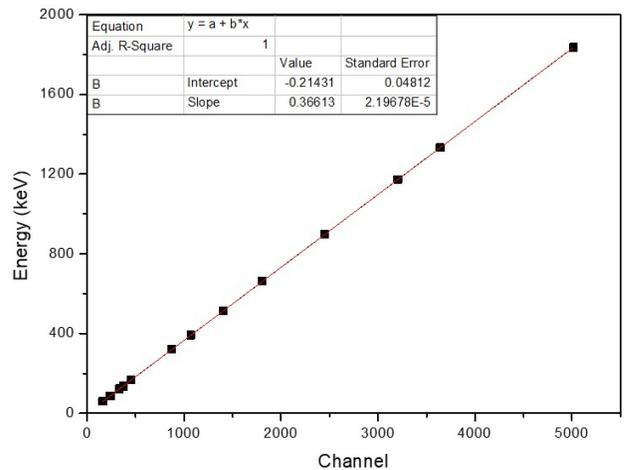


Fig. 3. Energy calibration result

2. PT 방사능 측정 결과

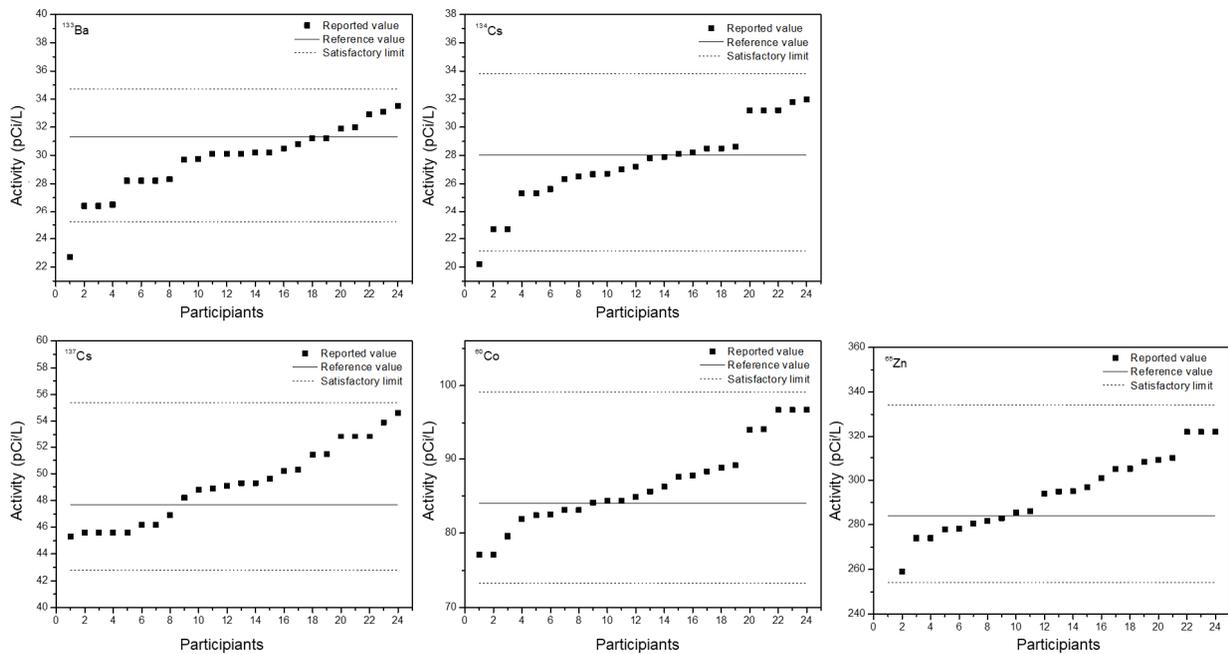
RAD 136 숙련도 시험에 24개 실험실에서 결과를 제출하였다. 분석방법으로는 ISO 18589-3, EML HASL 300 Ga-01 등이 사용되었다[13, 14]. 24개 실험실에서  $^{133}\text{Ba}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{65}\text{Zn}$  핵종의 방사능을 분석하여 제출하였다. 에너지 및 효율 교정된 HPGe 검출기로 측정된 PT 시료의 방사능을 Table 6에 다른 실험실의 방사능 분석 결과를 Fig. 4에 나타내었다.  $^{133}\text{Ba}$ (30.816 pCi/l),  $^{134}\text{Cs}$ (26.662 pCi/l),  $^{137}\text{Cs}$ (48.197 pCi/l),  $^{60}\text{Co}$ (84.320 pCi/l),  $^{65}\text{Zn}$ (294.854 pCi/l)로 방사능이 측정되었다. 핵종에 따른 satisfactory range는  $^{133}\text{Ba}$  (25.2 - 34.7 pCi/l),  $^{134}\text{Cs}$  (21.2 - 33.8 pCi/l),  $^{137}\text{Cs}$ (42.8 - 55.4 pCi/l),  $^{60}\text{Co}$  (73.3 - 99.1 pCi/l),  $^{65}\text{Zn}$  (254 - 334 pCi/l)이었다. ERA의 certified value와 비교한 결과 5개 핵종 모두 상대차이가 0.4 ~ 4.8% 이내로 5%를 넘지 않았다. 숙련도 시험에 참여한 대부분의 실험실이 satisfactory range를 만족하는 결과를 보여주었다. 그러나  $^{133}\text{Ba}$ ,  $^{134}\text{Cs}$  핵종에 대해서 1개 실험실이 satisfactory range를 벗어나는 결과를 제출하였다.

**Table 5.** Calculated and Measured Efficiency

Nuclide	Energy (keV)	Measured	Calculated	Difference (%)
<sup>241</sup> Am	59.54	0.012100	0.012100	0.00
<sup>109</sup> Cd	88.03	0.032000	0.032010	-0.03
<sup>57</sup> Co	122.06	0.042130	0.042440	-0.74
<sup>57</sup> Co	136.47	0.042630	0.042630	0.00
<sup>139</sup> Ce	165.86	0.041860	0.041110	1.79
<sup>51</sup> Cr	320.08	0.027690	0.028460	-2.78
<sup>113</sup> Sn	391.70	0.024690	0.024610	0.32
<sup>85</sup> Sr	514.00	0.020460	0.020200	1.27
<sup>137</sup> Cs	661.66	0.017010	0.016910	0.59
<sup>88</sup> Y	898.04	0.013760	0.013740	0.15
<sup>60</sup> Co	1173.23	0.011400	0.011450	-0.44
<sup>60</sup> Co	1332.49	0.010370	0.010450	-0.77
<sup>88</sup> Y	1836.05	0.008080	0.008050	0.37

**Table 6.** PT Performance evaluation results

Nuclide	Reported PT result (pCi/l)	Certified value (pCi/l)	Satisfactory Range	Z-score
<sup>133</sup> Ba	30,816	31,3 ± 0,56	25,2 - 34,7	0,366
<sup>134</sup> Cs	26,662	28,0 ± 0,29	21,2 - 33,8	-0,271
<sup>137</sup> Cs	48,197	47,7 ± 0,47	42,8 - 55,4	-0,289
<sup>60</sup> Co	84,320	84,0 ± 0,55	73,3 - 99,1	-0,296
<sup>65</sup> Zn	294,854	284,0 ± 3,01	254,0 - 334,0	0,048



**Fig. 4.** Reported results for activity values of <sup>133</sup>Ba, <sup>134</sup>Cs, <sup>137</sup>Cs, <sup>60</sup>Co and <sup>65</sup>Zn

### 3. 측정불확도

수학적 모델을 바탕으로 측정불확도의 인자들과 불확도 기여량을 예시로 계산하여 Table 7에 나타내었다. 불확도 성분의 평가는 구하는 방법에 따라 A형 불확도 평가, B형 불확도 평가로 분류한다. A형 불확도 평가의 경우 일련의 측정값을 통계적으로 분석하여 불확도를 평가하는 방법이며, B형 불확도 평가의 경우 일련의 관측 값이 통계적 분석이 아닌 다른 방법(예시: 과거 측정 데이터, 교정 성적서 및 기타 인증서에 주어진 데이터, 핸드북에서 인용한 참고 자료의 불확도 등)으로 불확도를 평가한다. A형 불확도로 평가된 인자는 순 계수, 측정시간, 질량, 검출효율, 동시합성효과 보정인자이며, B형 불확도로 평가된 인자는 측정 중 붕괴 보정인자, 농도 기준일에 대한 보정인자는 실험결과 및 추가적 분석으로 얻어진 값을 적용하였고, 감마선 방출률은 참고문헌을 참조하여 반영하였다. 동시합성효과는 동위원소가 방출하는 감마선에 따라 존재하지 않거나 효과가 다르게 나타나며, 기하학적 조건에 의존하므로 검출기 교정 시 추가적인 측정을 통해 보정인자를 산출하였다. 측정 중 붕괴

보정인자는 측정 중에도 방사능이 감소하므로 이에 대한 보정을 수행하였다. 측정불확도 계산 결과 신뢰수준 약 95%에서 약 3.6 ~ 4.8% 로 분석되었다. 불확도 기여량을 계산한 결과 계수율(counts)과 검출효율(efficiency) 두 요소의 합이 98% 이상으로 불확도 요인 중 가장 큰 기여량을 가진다.

### 4. Z-score

실험실 측정값, 기준값, Standard Deviation for Proficiency Assessment(SDPA) 값을 적용하여 5개 핵종의 Z-score를 평가하여 Table 8과 Fig. 5에 나타내었다. 본 실험실의 <sup>133</sup>Ba의 Z-score는 0.366, <sup>134</sup>Cs은 -0.271, <sup>137</sup>Cs는 -0.289, <sup>60</sup>Co는 -0.296, <sup>65</sup>Zn는 0.048 이었다. 5개 핵종 모두 |z| < 2를 만족하였다. <sup>137</sup>Cs, <sup>60</sup>Co 핵종의 경우 24개 실험실이 모두 Z-score를 만족하였고, <sup>134</sup>Cs 핵종에 대해서 1개 실험실이 2 < |z| < 3에 해당되어 경고를 받았고, <sup>133</sup>Ba, <sup>65</sup>Zn 핵종에 대해서는 각각 1개 기관들이 |z| > 3에 해당되어 불만족 결과를 받았다.

**Table 7.** Example of Uncertainty factor and contributions

Uncertainty factor	Type	Estimation value	Standard uncertainty	Sensitivity Coefficient	Uncertainty contributions	Uncertainty contributions (%)
Counts	A	4011	84.9400	0.0004	0.0370	38.75
Efficiency	B	0.0169	0.0004	-103.3407	-0.0463	60.68
Gamma-ray emission intensity	B	0.8499	0.0020	-2.0561	-0.0041	0.47
Time	A	160000	0.0010	-1.1E-5	-1.0E-8	0.00
Weight	A	1	0.0010	-1.7475	-0.0017	0.08
Coincidence summing	A	1	0.0000	-1.7475	0.0000	0.00
Decay of radionuclide	B	1	5.0E-6	-1.7506	-8.0E-6	0.01
Decay of reference date	B	1	2.0E-7	-1.7476	-3.0E-7	0.01
Total Uncertainty contributions (%)				100		

**Table 8.** PT Performance Z-score evaluation results

Nuclide	Robust Mean (pCi/l)		Standard Deviation (SPDA)		Z-score
	Assigned Value(units)	Study(%) <sup>1)</sup>	Study (units)	Study(%) <sup>1)</sup>	
<sup>133</sup> Ba	29.9	95.7	2.38	7.96	0.366
<sup>134</sup> Cs	27.5	98.3	3.16	11.40	-0.271
<sup>137</sup> Cs	49.1	103.0	3.16	6.43	-0.289
<sup>60</sup> Co	86.2	103.0	6.46	7.47	-0.296
<sup>65</sup> Zn	294	104.0	19.80	6.75	0.048

<sup>1)</sup>Indicates that the values are reported as a percentage of the formulation/certified value

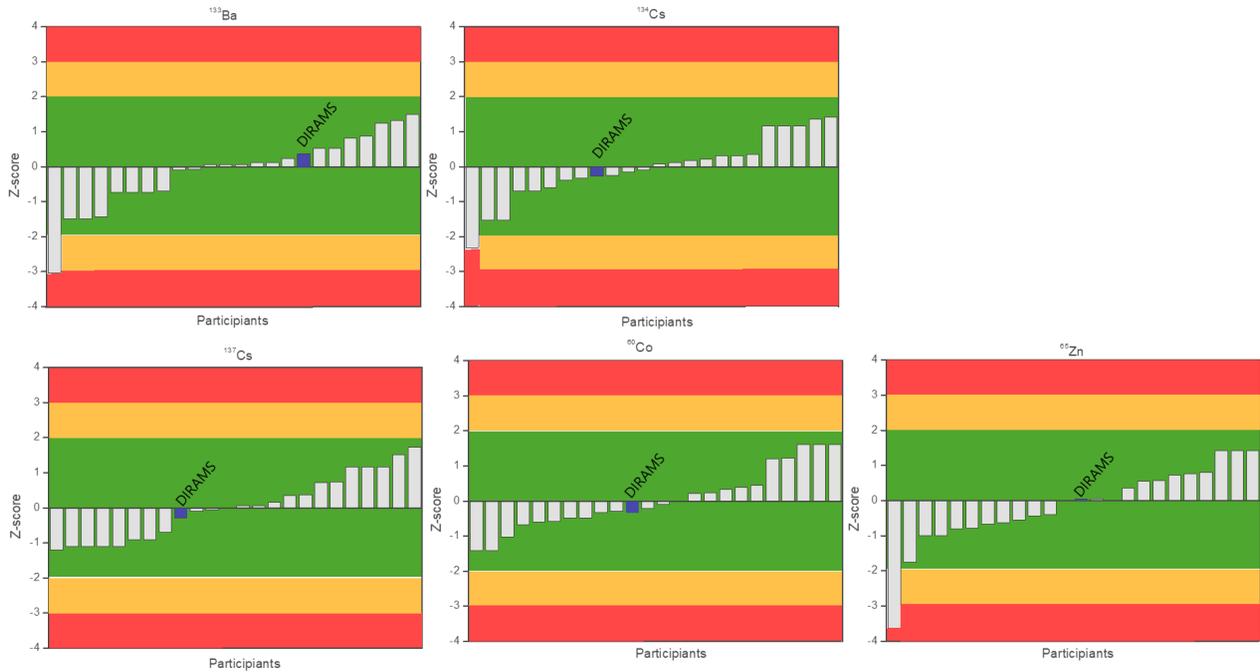


Fig. 5. Z-score for  $^{133}\text{Ba}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$  and  $^{65}\text{Zn}$  nuclide

#### IV. 고찰

본 연구에서는 본 기관의 감마 분광분석법에 따른 분석 결과의 타당성과 신뢰성을 평가받는 것을 목적으로 국제 숙련도 시험에 참여 하였다. 분석을 위해서는 시료 측정을 고려한 인증표준물질을 이용하여 에너지 교정 및 효율 교정이 수행 하였다. 숙련도 시험 수행기관 ERA에서 제공하는 시료를 교정과 동일한 조건(용기, 시료 부피)으로 계측 시료를 준비하여 HPGe 검출기로 시료의 방사능 측정 및 분석하였다. Ep.1 적용하여 방사능을 계산하였다. 불확도 평가를 통해 측정 소급성을 확보할 수 있으므로 불확도에 대한 평가는 매우 중요하다. 순 계수, 검출효율, 감마선 방출률, 시료 측정시간, 시료 무게 외에 동시합성효과, 측정 중 붕괴 보정, 농도 기준일에 대한 보정을 수행하고 각각의 불확도 요소로 포함하여 측정불확도를 평가하였다. 분석 결과 시료에 포함된  $^{133}\text{Ba}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{65}\text{Zn}$  핵종의 방사능은 30.816 pCi/l, 26.662 pCi/l, 48.197 pCi/l, 84.320 pCi/l, 294.854 pCi/l 이었으며, 24개 실험실에서 제출한  $^{133}\text{Ba}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{65}\text{Zn}$  핵종들의 평균값은 29.9 pCi/l, 27.5 pCi/l, 47.1 pCi/l, 86.2 pCi/l, 294 pCi/l 이었다. 숙련도 시험 기관에서 설정한 기준값은 31.3 pCi/l, 28 pCi/l, 47.7 pCi/l, 84 pCi/l, 284 pCi/l 이었다. ERA의 certified value와 비교한 결과 5개 핵종 모두 상대 차이는 5%를 넘지 않았다. ERA에는 ISO/IEC 17043, ISO 13528 기준에 따라 Z-score로 평가를 하였다. 5개 핵종에 대

한 Z-score는 0.366, -0.271, -0.289, -0.296, 0.048로 평가되었고,  $|z| < 2$  기준 이내로 모두 만족하였다.  $^{133}\text{Ba}$ ,  $^{65}\text{Zn}$  핵종에 대해서는 24개 실험실 중 95.8%가 만족하는 결과를 받았고  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$  핵종에 대해서는 24개 실험실 모두 100% 만족하는 결과를 받았다. 국내에서 참여한 숙련도 시험(2019년 ~ 2022년)의 경우  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  외에  $^{51}\text{Cr}$ ,  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{88}\text{Y}$ ,  $^{109}\text{Cd}$  핵종이 교차하여 포함되었고, 평균 4개 핵종에 대해 분석하여 결과를 제출하고 Z-score로 평가한다. ERA의 경우  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ 는 국내 숙련도 시험과 동일하였으며  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{65}\text{Zn}$ ,  $^{133}\text{Ba}$  시료가 포함되고 분석 대상 핵종의 수가 국내 보다 많았고 Z-score로 평가하는 차이점이 존재하였다. 또한 국내의 경우 숙련도 시험이 연 1회 진행되지만 ERA의 경우 연 4회 진행되어 일정에 맞추어 숙련도 시험에 참가할 수 있는 장점이 있었다. 국제 숙련도 시험에서 감마 분광분석법으로 핵종분석을 수행하여 방사성 핵종의 측정 및 분석 능력과 신뢰성을 국제적으로 인정받았으므로 이를 활용하여 KOLAS 교정/시험 분야의 소급성을 확보하였다. 숙련도 시험을 통해 국내의 실험실 간 비교를 쉽게 할 수 있었으며 여러 기관 사이에 본 기관의 측정능력에 대한 일관성과 신뢰성을 확보하였다. 정기적 참여하여 실험 방법을 지속적으로 개선 및 다양한 시료 측정 대한 연구에 접목시킬 수 있을 것이다.

## V. 결론

ISO/EC 17025에 따라 교정/시험 기관을 유지하기 위해서는 숙련도 시험 참여는 필수 사항이다. 본 연구에서는 국내에서 인정받은 감마 분광분석법에 따른 방사성 핵종 측정 및 분석 능력의 타당성과 신뢰성을 국제적으로 평가하기 위해 미국 환경자원협회에서 주관한 국제 숙련도 시험에 참여하였고, Radiochemistry RAD 136 숙련도 시험에서 얻은 결과를 제시하였다.

시료 내 포함된  $^{133}\text{Ba}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{65}\text{Zn}$  핵종의 측정 및 방사능을 분석하였고 본 실험실에서 분석한 방사능 값과, ERA 숙련도 시험 기관에서 설정한 기준값과 5% 이내의 차이를 보여주었다. 또한 ISO/IEC 17025, ISO 13528에 따라 Z-score를 평가하였다. Z-score 평가 결과  $|z| < 2$ 를 만족하여 Laboratory of Excellence라는 결과를 받았다. 방사화학 분야의 숙련도 시험에서 감마 분광분석법으로 핵종분석을 수행하여 방사성 핵종의 측정 및 분석 능력과 신뢰성을 국제적으로 인정받음으로 교정/시험 분야의 소급성을 확보하였다. KOLAS 교정/시험 수행에 있어 감마분광분석법을 적용하여 다양한 시료를 분석하고 지속적인 숙련도 시험 참여를 통해 측정 능력의 소급성을 유지해야 할 것이다.

## REFERENCES

- [1] ISO 13528:2015(E). Statistical methods for use in proficiency testing by interlaboratory comparison. International Organization for Standardization; 2015. Retrieved from <https://www.iso.org/Standards>
- [2] ISO/IEC 17025:2017(E). General requirements for the competence of testing and calibration laboratories. International Organization for Standardization; 2017. Retrieved from <https://www.iso.org/Standards>
- [3] Samed OH, Baydoun R. Proficiency tests: A tool for improvement and testing analytical performance at Gamma-Ray Spectroscopy Laboratory. Accreditation and Quality Assurance. 2021;22(26):121–27. DOI: 10.1007/s00769–021–01468–6
- [4] Sahin NK, Yeltepe E, Yücel Ü. A review of the nation-wide proficiency test on natural radioactivity measurements by gamma spectrometry. Applied Radiation and Isotopes. 2016;109:49–53. DOI: 10.1016/j.apradiso.2015.12.053
- [5] Dziel T, Listkowska A, Tymiński Z. Proficiency of  $^{90}\text{Y}$  and  $^{89}\text{Sr}$  activity measurements in Polish hospitals. Applied Radiation and Isotopes. 2014;87:24–6. DOI: 10.1016/j.apradiso.2013.11.055
- [6] Peng EC, Wang JJ. A study of production of radioactive environmental reference materials used for proficiency testing program in Taiwan. Applied Radiation and Isotopes. 2013;81:14–20. DOI: 10.1016/j.apradiso.2013.03.041
- [7] Iwahara A, Tauhata L, Oliveria AE, Nícoli IG, Alabarsa FG, Xzvier AM, et al. Proficiency test for radioactivity measurements in nuclear medicine. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 2009;42(4):255–9. DOI: 10.1590/S0100–39842009000400013
- [8] Shakhashiro A, Radecki Z, Trinkl A, Sansone U, Benesch T. Final report on the proficiency test of the Analytical Laboratories for Measurement of Environmental Radioactivity (ALMERA) network. IAEA AL 152, 2005. Retrieved from [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/42/016/42016116.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/42/016/42016116.pdf)
- [9] Denis GC, Matjaž K, Marijan N, Branko V, Benjamin Z. Evaluation of comparison and proficiency test results of gamma ray spectrometry at Jožef Stefan Institute from 1986 to 2014. Applied Radiation and Isotopes. 2016;109:54–60. DOI: 10.1016/j.apradiso.2015.12.025
- [10] Halina PM, Leon F. Proficiency testing schemes on determination of radioactivity in food and environmental samples organized by the NAEA, Poland. Nukleonika. 2010;55(2):149–54. Retrieved from <https://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element/baztech-article-BUJ7-0014-0025>
- [11] Jin DS, Hong JY, Kim HG, Kwak SS, Lee JG. A study on the technology of measuring and analyzing neutrons and gamma-rays using a CZT semiconductor detector. Journal of Radiological Science and Technology. 2022;45(1):57–67. DOI: 10.17946/JRST.2022.45.1.57
- [12] Park JS, Lim HJ, Seo HS, Jang DB, Kim MJ, Lee SB, et al. A study on the self-absorption correction method of HPGe gamma spectroscopy analysis system using check source. Journal of Radiological Science

and Technology. 2022;45(6):523-9. DOI: 10.17946/JRST.2022.45.6.523

[13] ISO 18589-3:2015(E). Measurement of radioactivity in the environment-soil- Part 3: Test method of gamma-emitting radionuclides using gamma-ray spectrometry. International Organization for Standardization; 2015. Retrieved from <https://www.iso.org/Standards>

[14] EML HASL-300, Method Ga-01-R: Gamma Radioassay. 4.5.2 Radiometry. 1997. Retrieved from <https://www.epa.gov/esam/eml-hasl-300-method-ga-01-r-gamma-radioassay>

[15] Bè MM, Chisté V, Dulieu C, Kellett MA, Mougeot X, Arinc A, et al. Monographie BIPM-5. Retrieved from <https://www.bipm.org/en/publications/monographies>

[16] ISO/IEC 17043:2023. Conformity assessment General requirements for the competence of proficiency testing providers. International Organization for Standardization; 2023. Retrieved from <https://www.iso.org/Standards>

[17] Lee JE, Kim HJ, Kye YU, Lee DY, Kim JK, Jo WS, et al. Source and LVIS based coincidence summing correction in HPGe gamma-ray spectrometry. Nuclear Engineering and Technology. 2022;54(5):1754-9. DOI: 10.1016/j.net.2021.11.008

구분	성명	소속	직위
제1저자	이지은	동남권원자력의학원	연구원
공동저자	강영록	동남권원자력의학원	선임연구원
공동저자	장희진	동의대학교 방사선학과/ 동남권원자력의학원	박사 대학원생 / 연구원
공동저자	계용욱	동남권원자력의학원	선임연구원
공동저자	조월순	동남권원자력의학원	선임연구원
공동저자	백정화	동남권원자력의학원	선임연구원
공동저자	이창근	동남권원자력의학원	선임연구원
공동저자	이동연	동의대학교 방사선학과	조교수
교신저자	김효진	동남권원자력의학원	선임연구원