Journal of RADIATION INDUSTRY
Vol. 19, No. 1, pp. 75-80, 2025
https://doi.org/10.23042/radin.2025.19.1.75

Technical article

LabSOCS를 이용한 감마분광분석에서 시료량에 따른 효율성 보정방법에 관한 연구

박민용[1,2] · 정성재[2] · 허재승[2] · 신중기[2] · 이길용[2] · 김용민[1,*]

[1]대구가톨릭대학교 방사선학과, [2]㈜네오시스코리아

A Study on the Efficiency Correction Method According to the Sample Volume in Gamma Spectroscopy Using LabSOCS

Minyong Park[1,2], Seongjae Jeong[2], Jaeseung Heo[2], Jung-ki Shin[2], Kil Yong Lee[2], and Yongmin Kim[1,*]

[1]Department of Radiological Science, Daegu Catholic University, 13-13 Hayang-ro, Gyeonsan-si 38430, Republic of Korea
[2]NeosisKorea, 10-11, Expo-ro 339beon-gil, Yuseong-gu, Daejeon 34122, Republic of Korea

ABSTRACT Gamma spectroscopy is widely used in radioactivity analysis, and gamma spectrometers are calibrated using certified reference materials (CRMs). The efficiency of this instrument is determined by various factors such as the energy of the gamma rays, the distance between the sample and the detector, the volume of the sample, and the characteristics of the detector. After the efficiency of the instrument is calibrated, a common measurement method is to estimate the radioactivity value by measuring an unknown sample made with the same volume and density as the CRM. The sample can be a variety of materials such as food, soil, and sediment, and it may be difficult to make the same volume as the calibration source CRM due to the scarcity of the sample or the difficulty of sampling. In this study, when the sample amount was insufficient, a correction value for the difference in sample amount was derived based on the efficiency value calculated using the software LabSOCS of Mirion Technologies, Inc., and it was confirmed that the result value after correction was improved compared to the result value before correction.

Key words: Radioactivity, Gamma spectroscopy, HPGe Detector, Correction factor, LabSOCS

1. 서 론

감마분광분석은 알파분광분석 또는 베타분석에 비하여 상대적으로 전처리 난이도가 낮고 빠른 시간 내 미지시료에 포함되어 있는 방사능 농도를 평가할 수 있는 장점이 있다[1]. 일반적인 감마분광분석은 인증표준물질(CRM: Certified Reference Materials)을 이용하여 효율교정을 수행하고 시료를 제조한 후 검출기와 시료 간 거리 등 동일한 실험 조건 하에 분석을 수행하고 있다[2].

국내에서 보편적으로 사용하는 CRM은 한국표준과학연구원에서 고체 또는 용액 형태로 제조하고 있으며, 밀도는 1 g·cm^{-3}에 근사하게 된다. 식품과 같이 미지시료의 경우 대부분 고체 시료로 측정시료의 밀도를 CRM과 동일하게 시료를 제작하는 것은 매우 어려우며, 이에 따라 밀도 차에 따른 자체흡수 보정인자를 산출하여 적용하게 된다. 자체흡수 보정인자에 대한 연구는 몬테카를로 시뮬레이션을 이용하는 등 다양한 방식으로 연구가 진행되었다[3,4]. 다만, 시료의 밀도가 1 g·cm^{-3}이라 하더라도 시료 채취 및 전처리 과정 등 시료의 희소성으로 CRM과 동일한 부피로 시료를 제조하기 어려울 수 있다.

본 연구에서는 시료의 양이 부족한 경우 실험실 조건에서 CRM 없이도 측정 효율 계산이 가능한 LabSOCS (Laboratory Sourceless Calibration Software, Mirion Technologies, Inc., USA)로 효율을 계산하여 보정인자를 산출하였고 제시한 보정인자의 검증을 위해 부피별로 CRM을 제조한 후 효율교정을 수행하였다. 보정인자가 실제 분석에 미치는 정도를 확인하기 위하여 상대측정법인 CRM으로 부피별 교정하여 분석한 방사능농도와 미지시료를 측정 후 1 L 교정 후 보정인자를 적용한 방사능농도를 비교하였다.

ISSN 1976-2402 **http://www.ksri.kr/**

Copyright© 2025 by Korean Society of Radiation Industry

***Corresponding author:** Yongmin Kim
Tel: +82-53-850-2522, E-mail: ymkim17@cu.ac.kr

Received 25 February 2025 **Revised** 26 March 2025 **Accepted** 26 March 2025

2. 재료 및 방법

2.1. 장비 및 재료

실험에 사용된 고순도게르마늄검출기(High Purity Germanium detector: HPGe)는 상대효율이 60%인 GC6022 (Mirion Technologies, Inc., USA)모델을 사용하였고, MCA (Multi Channel Analyzer)는 Lynx (Mirion Technologies, Inc., USA) 모델을 사용하였다.

소프트웨어는 실험 조건과 동일하게 효율 계산이 수행될 수 있도록 Geometry Composer (Mirion Technologies, Inc., USA)를 이용해 실험 조건을 전산으로 모사하였고, 몬테카를로 방법론을 기반으로 전산코드를 활용한 LabSOCS를 이용하여 특정 실험 조건에서의 효율을 산출하였다[5]. 시료의 측정, 교정 및 분석은 Gamma Acquisition & Analysis V3.4 (Mirion Technologies, Inc., USA)를 이용하여 시료를 측정하고 교정 및 분석을 수행하였다.

연구에 사용된 시료는 공인된 표준물질 생산(ISO/IEC 17034:2016) 및 숙련도시험(ISO/IEC 17043:2010)기관인 Waters™ ERA에서 제조한 CRM과 숙련도시험(PT: Proficiency Test)시료를 이용하였다.

CRM은 0.1 mol 질산에 혼합된 12 mL의 선원으로 5 mL에 대한 방사능 농도 인증서가 제공되며 Table 1과 같다. PT시료는 Table 1과 같이 방사능 농도에 대한 핵종별 범위가 제공되며 마찬가지로 0.1 mol 질산과 혼합된 12 mL로 5 mL를 소분하여 0.1 mol 질산을 혼합하여 제조된 1 L의 시료에 대한 분석 결과값을 평가받게 되며 미지 시료로 활용하였다.

용기는 감마분광분석에서 보편적으로 사용되는 1 L 마리넬리 비커(Marinelli Beaker)를 이용하였다. 피펫을 이용하여 CRM과 PT시료를 각각 5 mL 마리넬리 비커에 소분한 후 0.1 mol 질산을 혼합하여 650 mL 시료를 제조하고 측정하였으며, 질산을 100 mL 단위로 단계적으로 1 L까지 Fig. 1과 같이 시료를 제조하고 측정하였다

Table 1. CRM and PT Source Sample

Nuclides	CRM (R132-758)		PT (RAD138)
	Certified value ($Bq \cdot L^{-1}$)	Uncertainty (%)	Range ($Bq \cdot L^{-1}$)
^{133}Ba	1.13	4.00	0.37-3.70
^{134}Cs	1.04	8.33	0.37-3.70
^{137}Cs	7.03	2.02	0.74-8.88
^{60}Co	4.07	1.32	0.37-4.44
^{65}Zn	3.89	3.37	1.11-13.32

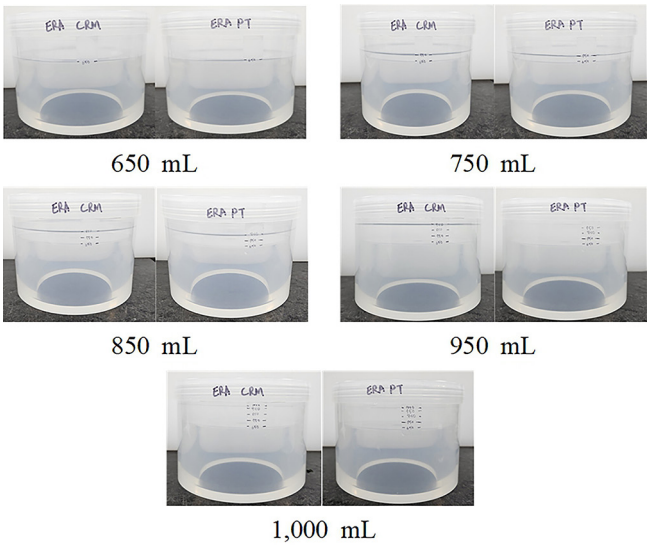

Fig. 1. Sample filled according to volume difference.

2.2. 실험 방법

부피별로 제조된 5개의 CRM (1 L, 950, 850, 750, 650 mL)을 각 1회 172 800 s (2일) 이상 측정을 수행하고 검출기의 효율 교정을 수행하였다. 효율은 분석 소프트웨어를 활용하여 식 (1)과 같은 산출식에 의하여 교정을 수행하였다.

$$\varepsilon(E) = \frac{S}{tyAK_wU_f} \quad (1)$$

$\varepsilon(E)$ = 감마선 E에 대한 검출기의 효율($cps \cdot dps^{-1}$)
y = 핵종 특성에 따른 감마선 방출률
S : 방사능 농도에 따른 감마선 피크의 계수(count)
t : 계수시간[live time] (s)
A : 교정일 기준 CRM 중 감마선 를 방출하는 감마방출핵종의 방사능(Bq = dps)
K_w : 기준일부터 측정시작까지 붕괴보정인자
U_f : 단위 변환 인자(Bq 또는 Ci)

미지시료 또한 CRM과 동일한 5개의 PT시료를 제조하여 각 1회 172 800 s (2일) 이상 측정을 수행하였다. 방사능 농도 및 교정에 수행된 감마선 에너지는 핵종의 방출 특성 중 방출률이 높고 간섭 피크가 발생하지 않는 감마선에너지를 선정하였으며 Table 2와 같다.

측정된 PT시료와 동일한 부피의 CRM 효율을 이용하여 방사능 농도를 평가하였다. 추가로 부피차를 가정하여 측정된 5개의 PT시료를 1 L 효율만을 이용하여 방사능 농도를 평가하고 보정인자를 적용한 평가 결과를 비교하였다.

Table 2. Gamma emission nuclides energy

Nuclides	Energy (keV)	Gamma ratio (%)	Half life
^{133}Ba	356.00	60.00	10.500 y
^{134}Cs	604.69	97.60	2.062 y
^{137}Cs	661.65	85.12	30.170 y
^{60}Co	1 173.31	100.00	5.271 y
^{65}Zn	1 115.52	50.75	244.400 d

2.3. 방사능 농도 산출 및 보정인자

감마분광분석은 기하학적으로 동일하다는 가정하에 방사능 농도를 평가하며, 방사능 산출식은 식 (2)와 같다. 본 연구에서는 각 보정인자(K)를 파악한 후 방해가 될 수 있는 각 인자들을 최대한 배제하고 실험을 수행하고자 하였다.

$$A = \frac{N}{\varepsilon \times V \times y \times t \times K_w \times K_c \times K_{sa} \times K_{rc} \times K_{cc}} \quad (2)$$

A = 단위 부피 당 방사능 ($Bq \cdot L^{-1}$)
N = 계수 값 (count)
ε = 검출기의 효율 ($cps \cdot dps^{-1}$)
V = 시료의 부피 (L)
y = 핵종 특성에 따른 감마선 방출률
t = 계수시간[live time] (s)
K_w = 기준일부터 측정시작까지 붕괴보정인자
K_c = 측정 시간동안 붕괴보정인자
K_{sa} = 시료에 의한 자체흡수 보정인자
K_{rc} = 우연합성 보정인자
K_{cc} = 동시합성 보정인자

기하학적으로 동일하다는 가정 하에 감마분광분석에서 주요한 보정인자는 총 5가지이다. 그 중 K_w, K_c의 경우 시간이 경과되면서 감쇠되는 방사성물질 특성에 기인되며 식 (3) 및 (4)와 같은 수식으로 보정할 수 있다[6].

$$K_w = e^{\left(-\frac{\ln(2)t_w}{T_{1/2}}\right)} \quad (3)$$

t_w = 계수시간[live time] (s)
T = 반감기 (s)

$$K_c = \frac{T_{1/2}}{\ln(2)t_s}\left(1 - e^{-\frac{\ln(2)t_s}{T_{1/2}}}\right) \quad (4)$$

t_s = 측정시간[real time] (s)

K_{sa}의 경우 CRM과 시료와의 밀도 차에 의하여 발생되는 시료 자체의 흡수 현상에 대한 보정인자이며 CRM과 PT시료의 밀도가 동일하므로 K_{sa} = 1로 보정 값을 배제할 수 있었다. K_{rc}는 우연합성 보정인자로 방사성물질의 방사능이 높은 경우 검출기의 신호처리 시간에 중복된 펄스가 발생하면서 발생하는 것으로 계수율이 <1 000 s^{-1} 조건에서 펄스 중첩 보정은 대개 1%보다 작다[7]. 본 연구에서 사용되는 시료는 계수율이 <1 000 s^{-1} 미만인 방사능 농도가 매운 낮은 시료로 우연합성 보정인자는 무시할 수 있었다. 는 동시합성효과에 의한 보정인자로 하나의 방사성물질 붕괴과정에서 두 개 이상의 광자가 동시에 검출기에 입사하여 반응했을 때 합산되는 펄스를 말하며, 동시합성이 발생하는 핵종은 ^{60}Co, ^{133}Ba, ^{134}Cs로 교정핵종과 분석핵종이 동일하여 K_{cc} = 1로 하여 평가를 수행하였다.

2.4. 부피 차이에 따른 보정인자

기하학적으로 동일하지 않은 시료 양, 즉 부피 차이로 인한 결과 보정을 위하여 Geometry Composer를 이용하여 부피별(1 L, 950, 850, 750, 650 mL)로 용기에 대한 형상 및 시료의 형태, 검출기-시료 간 거리를 Fig. 2와 같이 전산모사를 한 후 LabSOCS를 이용하여 검출기의 효율을 산출하였다.

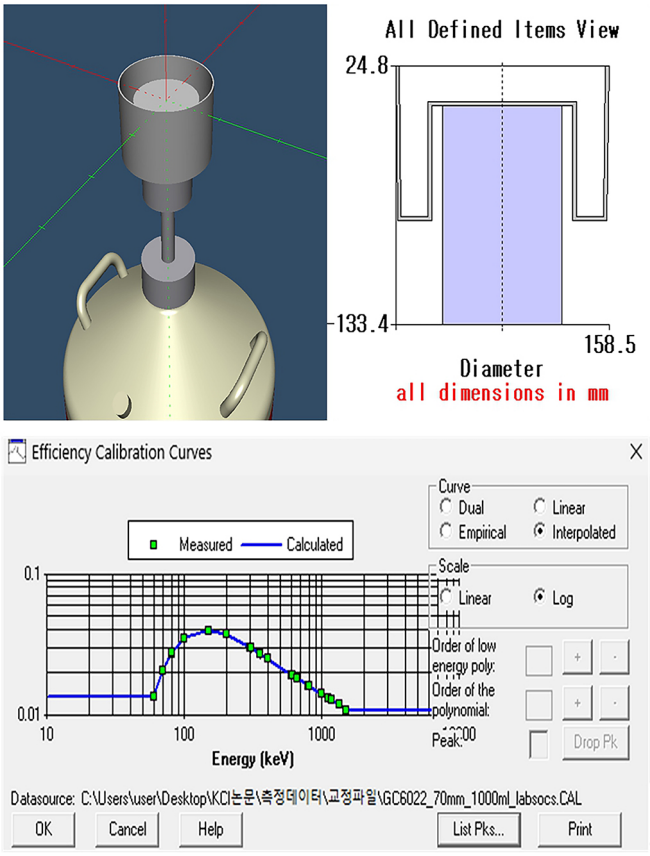

Fig. 2. Modeling Using Geometry Composer (up), Efficiency Calculated Using LabSOCS (bottom).

보정인자는 부피(V)와 효율(ε)을 이용하여 부피 1 L (V_{1L})와 시료 i의 부피(V_i)의 분율, 효율의 경우 부피 1 L일때의 효율(ε_{1L})과 LabSOCS를 이용한 부피 i의 효율(ε_i)의 분율로 보정인자를 식 (5)와 같이 계산하였다.

$$K_{vc} = \frac{V_i}{V_{1L}} \times \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{1L}} \quad (5)$$

ε_{1L} : 1 L에서 관심영역에 해당하는 피크의 효율
ε_i : 시료 i의 관심영역에 해당하는 피크의 효율
V_{1L} = 1 L 부피
V_i = 시료 i의 부피

3. 결 과

3.1. 효율 및 보정인자 계산 결과

80 keV에서 1500 keV영역의 효율을 LabSOCS로 계산한 결과는 Fig. 3과 같으며 부피가 작을수록 효율이 증가하고 저에너지 영역에서의 부피 차이로 인한 효율의 영향이 더 큰 것으로 확인되었다.

Fig. 3의 계산된 효율은 식 (5)에 따라 Table 3과 같이 보정인자를 산출하였다. 보정인자는 부피가 작고(650 mL) 에너지가 낮을(356 keV) 때 보정 값이 가장 크며, 최대 1.592배 정도의 보정이 필요하다.

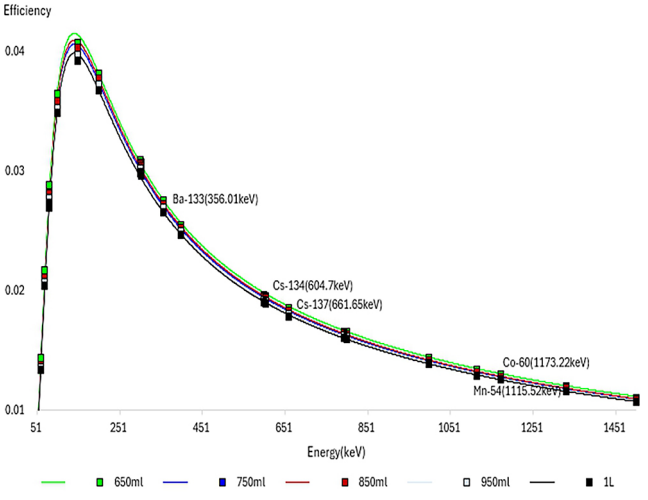

Fig. 3. Efficiency by Volume (LabSOCS).

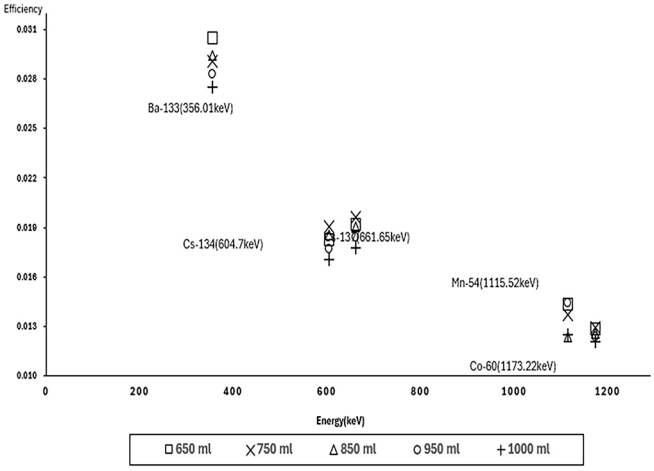

Fig. 4. Efficiency by Volume (CRM).

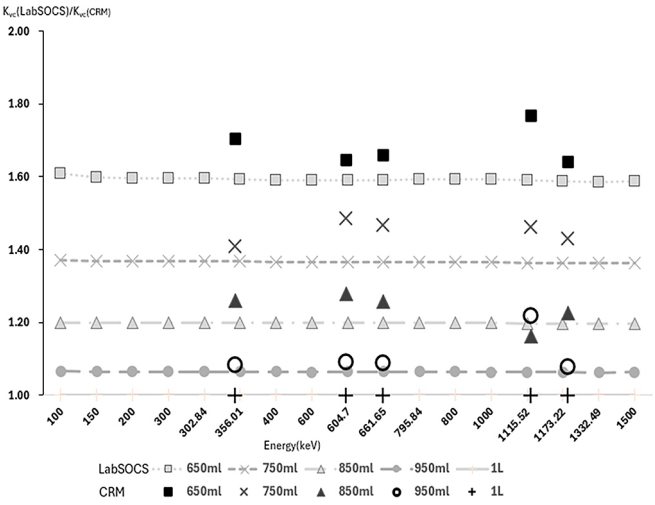

Fig. 5. Comparison of volume Correction factor.

LabSOCS로 계산된 효율 검증을 위하여 CRM을 이용하여 Table 2의 감마선 에너지의 효율을 계산하였다. 계산된 효율은 Fig. 4와 같다.

1 L일 때의 보정인자(K_{1L})를 기준으로 부피일 때의 보정인자

Table 3. Correction factor according to sample volume difference

Nuclides (Energy)	Correction factor				
	650 mL	750 mL	850 mL	950 mL	1000 mL
^{133}Ba (356keV)	1.592	1.358	1.206	1.065	1.000
^{134}Cs (604keV)	1.591	1.358	1.205	1.064	1.000
^{137}Cs (662keV)	1.591	1.358	1.205	1.064	1.000
^{60}Co (1173keV)	1.588	1.357	1.203	1.063	1.000
^{65}Zn (1115keV)	1.590	1.357	1.204	1.064	1.000

(K_i)에 대한 비($K_i/K_{1\,L}$)로 보정 값에 대한 검토와 CRM과 LabSOCS의 차이를 검토하기 위하여 비교한 데이터는 Fig. 5와 같다. LabSOCS와 CRM 간의 값 차이는 2~13% 정도를 확인할 수 있었다. LabSOCS와 CRM간 보정인자 차이는 시료의 방사능 농도가 매우 낮아 약 2일 이상 측정하였음에도 계수값의 통계적 오차가 발생한 것으로 예상된다.

3.2. 숙련도시험 결과

1 L에 대한 Waters™ ERA의 숙련도시험 평가 결과 Table 4와 같으며 시료 제작 및 실험 과정에서 특이사항 없이 5개의 핵종에 대한 숙련도 결과는 모두 만족을 얻을 수 있었다. 추가로 숙련도시험 결과의 인증 값(Certified Value)과 만족 범위(Satisfactory Range)를 이용하여 효율을 직접측정(CRM)하여 평가한 결과와 LabSOCS를 이용한 보정인자 적용 후 평가 결과를 비교하였다.

3.3. 직접교정(CRM) 평가 결과

각 부피별(1 L, 950, 850, 750, 650 mL) 효율 계산된 CRM의 교정 결과를 PT (1 L, 950, 850, 750, 650 mL)시료에 적용하여 방사능을 평가한 결과는 Table 5와 같으며 Certified value와 비교하였을 때 모든 결과가 Table 4의 Satisfactory Range 이내에 해당하여 만족스러운 결과를 확인할 수 있었다.

3.4. 보정인자(LabSOCS) 적용 후 평가 결과

일반적인 분석시스템과 같이 특정 기하학 조건에 교정이 수행된 경우를 고려하여 보정인자를 적용하지 않고 1 L로 교정을 가정하여 방사능 농도를 평가한 후 보정인자를 적용하고 평가된 방사능 농도는 Table 6과 같다.

750 mL에서 제조된 ^{134}Cs의 경우 Satisfactory Range에 벗어났으며 이는 시료의 방사능 농도가 매우 낮은 시료를 1회만 측정하여 통계적 오차가 발생한 것으로 예상되며, 반복된 측정을 수행한다면 개선될 수 있을 것으로 판단된다. 보정결과는 대체적으로 만족스러운 결과를 확인할 수 있었다. 또한 보정결과는 직접 교정을 수행한 결과에 비하여 상대적으로 큰 차이를 보이지만 보정 전보다 개선된 측정결과를 확인할 수 있었다.

Table 4. Proficiency testing results

Nuclides	Reported PT Result ($Bq \cdot L^{-1}$)	Certified value ($Bq \cdot L^{-1}$)	Satisfactory range ($Bq \cdot L^{-1}$)	z Score	Performance evaluation
^{133}Ba	1.43	**1.41**	**1.15-1.61**	0.41	Satisfactory
^{134}Cs	0.71	**0.70**	**0.49-0.78**	1.08	Satisfactory
^{137}Cs	2.16	**2.11**	**1.92-2.52**	-0.41	Satisfactory
^{60}Co	2.86	**2.84**	**2.60-3.23**	-0.33	Satisfactory
^{65}Zn	11.39	**11.54**	**10.66-13.39**	-0.93	Satisfactory

Table 5. Results of radioactivity analysis applied by volume calibration

Nuclides	Certified value (Bq)	650 mL Value (Bq)	750 mL value (Bq)	850 mL value (Bq)	950 mL value (Bq)	1000 mL value (Bq)
^{133}Ba	1.41	1.41	1.46	1.43	1.43	1.43
^{134}Cs	0.70	0.71	0.73	0.67	0.70	0.71
^{137}Cs	2.11	2.20	2.13	2.10	2.18	2.16
^{60}Co	2.84	2.90	2.86	2.88	2.82	2.86
^{65}Zn	11.54	11.31	11.96	12.85	10.70	11.39

Table 6. Raidoactivity (after applying correction factor): A_2 and certified value: A, comparison result (A_2/A)

Nuclides	Certified value ($Bq \cdot L^{-1}$)	650 mL value ($Bq \cdot L^{-1}$)	750 mL value ($Bq \cdot L^{-1}$)	850 mL value ($Bq \cdot L^{-1}$)	950 mL value ($Bq \cdot L^{-1}$)	1000 mL value ($Bq \cdot L^{-1}$)
^{133}Ba	1.41	1.51	1.51	1.49	1.46	1.43
^{134}Cs	0.70	0.73	0.79	0.71	0.72	0.71
^{137}Cs	2.11	2.29	2.30	2.19	2.23	2.16
^{60}Co	2.99	3.02	2.93	2.85	2.80	2.86
^{65}Zn	11.54	12.59	12.88	12.42	12.26	11.39

Warning or Unsatifactory

4. 고찰 및 결론

CRM을 이용하여 직접 교정을 수행한 결과 모두 만족으로 시료와 동일한 부피로 교정을 수행하는 것이 바람직하다. 그러나 시료와 동일한 부피로 CRM을 매번 제작하기에는 현실적인 어려움이 있어 LabSOCS와 같이 전산모사를 통한보정인자를 산출하여 보정을 수행하여도 개선된 결과를 기대할 수 있을 것이다.

다만, 본 연구에서는 시료의 밀도가 1 $g \cdot cm^{-3}$에 근사하는 액상으로 실험을 진행하였으나 실제 시료의 경우 고체와 같이 밀도 차이가 클 수 있으므로 정확한 부피 측정과 밀도 차이에 대한 고려가 필요하다. 또한 연구에서 사용된 CRM과 PT 시료의 경우 방사능 총량이 10 Bq 미만의 방사능이 낮은 물질로 2일 이상 측정을 수행하였어도 직접 교정을 수행하고 방사능 농도를 평가한 경우에도 최대 11% 정도 Certified Value 값과 차이가 발생하였고 이는 낮은 방사능 농도로 인한 계수 값의 통계적 오차가 발생하였고, 부피차이로 동시합성효과에 대한 영향도 고려가 필요하기 때문에 방사능 농도가 높은 시료를 이용하여 결과를 산출한다면 경험적 데이터를 기반으로한 보정계수 산출도 가능할 것으로 보이며 개선된 보정계수를 산출할 수 있을 것이다.

추가로 동축형(Coaxial type)검출기와 평면형(Planar type) 검출기 등 검출기 특성 차이로 인한 영향도 고려할 필요가 있다. 이번 연구에서는 동축형 검출기만을 이용하여 연구를 수행하였으나 평면형 검출기와 같이 얇은 형태의 검출기의 경우 감마선 투과가 훨씬 더 크게 발생하므로 검출기 특성에 따른 별도의 영향평가도 고려할 필요가 있다. 마지막으로 MCNP, Phits, PENELOPE 등 다양한 소프트웨어를 활용한 연구가 필요할 것으로 보이며, 본 연구에서 제시하는 보정방법은 시료의 양이 부족하더라도 분석하고자하는 핵종의 감마선 에너지와 시료의 부피를 파악한 후 LabSOCS를 이용하여 보정인자를 산출한다면 좀 더 정확한 결과를 도출하는데 기여할 것으로 기대된다.

Acknowledgments

본 연구는 중소벤처기업부에서 주관하는 중소기업기술혁신개발(R&D)사업의 일환으로 수행된 연구입니다(No. RS-2023-00270317).

참고문헌

1. Park JS, Kim YH and Lee DK. 2022. A Study on the Self-absorption Correction Method of HPGe Gamma Spectrocopy Analysis System Using Check Source. *Journal of Radiological Science and Technology.* **45**(6):523-529. https://doi.org/10.17946/jrst.2022.45.6.523.
2. Seo BK, Lee KY, Yoon YY, Jeong KJ, Oh WJ and Lee GW. 2005. Variation of the Detection Efficiency of a HPGe Detector with the Density of the Sample in the Radioactivity Analysis. *Analytical Science and Technology/Analytical Science and Technology* **18**(1):59-65.
3. Jang ES, Kim YS and Lee SY. 2017. Marinelli Beaker Measurement and Self Absorption Correction and Application for Various Environmental Samples in Monte Carlo Simulation. *Journal of Radiological Science and Technology* **40**(4):605-611. https://doi.org/10.17946/jsrt.2017.40.4.10.
4. Jang M, Ji YY, Kim CJ, Lee WN and Kang MJ. 2015. Dependence Evaluation of the Self-Absorption Correction Factor for p-type High Purity Germanium Detector Characteristics. *Journal of Nuclear Fuel Cycle and Waste Technology* **13**(4):295-300. https://doi.org/10.7733/jnfcwt.2015.13.4.295.
5. Na HJ, Kim HJ, Lee SY, Kwak MW and Kim KP. 2023. In-Situ Gamma Spectrometry Research Analysis and Radiation Efficiency Sensitivity Evaluation. *Journal of Radiation Industry* **17**(1):1-9. https://doi.org/10.23042/radin.2023.17.1.1.
6. Canberra Industries, Inc. 2013. Genie2000 Spectroscopy Customization Tools. 343-344.
7. Korean Standards Association. 2017. KS-C-IEC-61452:1995 Nuclear instrumentation – Measurement of gamma-ray emission rates of radionuclides – Calibration and use of germanium spectrometers. Industrial Standards Review, 13-14.