

The Effect of Applying Self-absorption and Coincidence Summation Correction when Measuring Environmental Samples

Eun-Sung Jang¹, Byung-In Min^{2,*}

¹Department of Radiation Oncology, Kosin University gospel Hospital

²Department of Radiation Chemistry, Inje University

Received: May 08, 2023. Revised: August 19, 2023. Accepted: August 31, 2023.

ABSTRACT

Self-absorption is the most important factor affecting the accuracy of gamma spectroscopy measurements in environmental samples. In particular, it is affected by other factors such as the chemical composition of the sample, geometric shape, thickness, density, atomic number, distance between the sample and detector, energy of the emitted gamma photon, and humidity coefficient or percentage in the sample. To test the calibration method, a 450 ml CRM standard source (9 nuclide) Marinelli beaker was used. Five soil samples among environmental samples were measured by density by applying the corrected values. Therefore, it can be seen that the self-absorption value is more effective for somewhat large and low photon energy. In the case of environmental samples, it was confirmed that the overall energy peak efficiency through self-absorption of the source greatly depends on the density of the sample.

Keywords: Full energy peak efficiency, Environmental samples, Standard volume source, Coincidence summing correction, Self-absorption

I. INTRODUCTION

고순도 게르마늄 검출기(High purity Germanium, HPGe)를 사용한 감마선 스펙트럼 분석은 환경시료에서 알려지지 않은 방사성핵종의 농도와 핵종 및 에너지 식별을 결정하는 데 널리 사용된다^[1-3]. 시료의 방사능 농도를 측정하기 위해서는 검출 시스템의 효율을 알아야 한다. 각 방사성핵종의 농도를 결정하기 위해서는 주어진 측정 기하학에 대한 감마선 방출 에너지에서 전체 에너지 피크 효율을 계산해야 한다.

그러나 실제 시료의 경우보다 정확한 방사능 농도 결과를 얻기 위해 몇 가지 수정을 고려해야 한다^[4]. 첫째, 감마선 분광법에서 시료가 가까운 기하학 조건에서 계수될 때 상당한 보정이 필요할 수

있다. 이 경우, 효율 곡선이 적용되는 시료에서의 농도 결정은 동시합성 효과의 현상에 영향을 받는다. 둘째, 시료가 검출기에 가까우면 Cascade에서 방출되는 두 광자의 신호가 증가한다. 따라서 동시합성 효과를 무시하면 잘못된 결과가 발생하고 방사성 핵종이 누락되거나 잘못 식별될 수 있다. 셋째, 감마선이 분광계의 분해능 시간보다 짧은 시간 간격 내에서 본질적으로 동시에 방출되는 경우 이들은 하나의 카운트로 스펙트럼에 등록된다. 이 효과는 보정이 수행되지 않으면 부정확해지기 때문에 환경 측정에서 특히 중요하다. 왜냐하면, 높은 검출기 효율과 낮은 선원-검출기 거리는 수정이 필요한 실제 동시합성 의 높은 비율로 이어질 수 있기 때문이다^[5-9].

최초의 동시합성 보정은 1972년대에 발표되었으며, 전통적으로 검출기의 피크 및 총 효율에 대한

* Corresponding Author: Byung-In Min E-mail: rimbi@inje.ac.kr Address: 197, Inje-ro, Gimhae-si, Gyeongsangnam-do, Republic of Korea

사전 지식을 기반으로 했다^[10-13]. 이는 체계적인 오류를 피하기 위해 효율성 곡선이 처음 설정될 때 동시합성을 설명하는 것일 필수적임을 의미한다.

실제로, 총 효율 곡선은 표준부피혼합 선원 중에서 Co 및 Y와 같은 핵종에는 효과에 취약하다더라도 자주 사용된다. 따라서 보정이 이루어지지 않으면, 두 개의 감마선 및 핵종 농도에 해당하는 피크에서의 카운트의 동시합성 효과 변화는 부정확해질 수 있다. 이러한 효과의 보정을 위해, 전체 에너지 피크 효율과 함께 총 효율의 기여도 요구된다^[14-16]. 자체흡수는 환경 시료의 감마 분광 측정 정확도에 영향을 미치는 가장 중요한 요소이다^[17-19]. 감마선 방출로 환경 시료의 방사능을 결정할 때는 자체흡수 계산을 하지 않으면 안 된다. 따라서 본 연구에서는 일반 붕괴 도식도와 ⁶⁰Co 점 선원을 사용하여 동시합성 효과 보정용 붕괴 도식도를 비교하고자 한다. 보정 방법을 테스트하기 위해 5 cm 거리에서 측정하였다. 또한 450 ml CRM 표준선원(9개 핵종) 마리넬리 비커를 사용하여 측정 했을 때 효율 값과 자체흡수 및 동시합성을 보정하였을 때 효율 값을 비교하였다. 양전자 및 전자의 PEN 칩투 및 에너지 손실(페넬로피) 계산값과 자체흡수, 동시합성 효과의 보정 위한 총 효율 측정치와 비교하였다. 보정된 값들을 환경시료 중 토양시료 5개를 밀도별로 측정하였다. 보정된 효율을 적용하여 효과를 검증하고자 한다.

II. MEASUREMENT METHODS

1. 에너지 및 효율 교정

동시합성 보정을 계산하기 위하여 ⁶⁰Co 점 선원을 먼저 실험 하였다. 450 mL 마리넬리 비커에 함유된 혼합표준 감마선원(²⁴¹Am, ¹⁰⁹Cd, ⁵⁷Co, ¹³⁹Ce, ⁵¹Cr, ¹¹³Sn, ⁵¹Cr, ¹¹³Sn, ⁸⁵Sr, ¹³⁷Cs, ⁶⁰Co, ⁸⁸Y) 30% 상대 효율을 갖는 p형 HPGe 검출기를 사용하였다.

선원-검출기 형상은 검출기 하우징인 선원은 납으로 차폐하였다. 검출기의 효율 교정은 표준 선원을 사용하여 얻었으며, 검출기 창에서 밀착하여 원통형 부피선원 및 마리넬리 비커 선원을 사용하였다. Fig. 1와 같다.

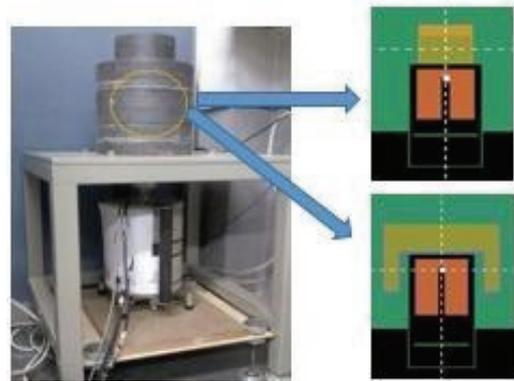


Fig. 1. Monte Carlo simulation of the HPGe detector and Marinelli beaker.

2. 자체흡수

자체흡수란 방사선을 방출하는 표본에 의한 감마선의 흡수를 의미하며 검출기에 도달하지 않는다. 자체 흡수는 샘플의 화학적 구성, 기하학적 모양, 두께, 밀도, 원자 번호, 샘플과 검출기 사이의 거리, 방출된 감마 광자의 에너지 및 샘플 내 습도 계수 또는 백분율과 같은 기타 요인에 의해 영향을 받는다. 자체흡수는 환경 시료의 감마 분광 측정 정확도에 영향을 미치는 가장 중요한 요소이다.

감마선 방출로 환경 시료의 방사능을 결정할 때는 자체흡수 계산을 하지 않으면 안 된다.

2.1. 자체 흡수 보정 계수

자체흡수 보정계수는 특정 광자 에너지 E에 대한 샘플(s)과 재료(ref)의 효율 비율로 정의된다.

$$C_{SA} = \frac{\epsilon_s(E)}{\epsilon_{ref}(E)} \quad (1)$$

표준선원의 경우 자기 흡수 보정(Self-absorption correction, CSA)는 샘플 재료에만 의존한다. 자체흡수 계수는 선원으로부터 방출되는 입자 또는 광자의 수와 그것으로부터 방출되는 실제 입자의 수의 비율로 정의되며, 이 경우 그 값은 0과 1 사이에서 제한될 것이다^[17,20].

2.2. 동시합성 효과 보정

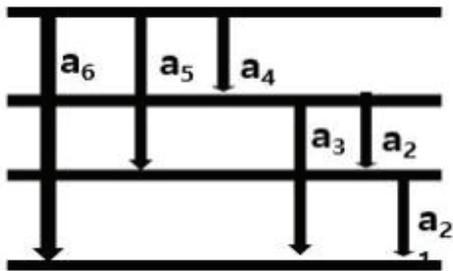
Fig. 2에서 (A)는 단일선원을 사용하였을 때 1개

의 에너지만 발생하는 일반적인 붕괴식인 반면 (B)에서 ^{60}Co 과 ^{88}Y 의 경우 2개 이상의 에너지가 발생하는 동시합성의 붕괴도이다. 동시합성의 영향은 어떤 측정대상 선원 또는 시료의 방사능을 과대 또는 과소평가 할 수 있기 때문에 매우 주의해야 한다^[21]. 따라서 환경 분석을 위해 검출기를 교정할 때 동시합성 보정계수에 문제가 있는 일부 방사성 핵종(예: ^{60}Co)에 대해 효율을 보정 적용하였다. 또한 표준부피선원을 사용하여 피크 대 총 비율 계산하여 보정하였다.

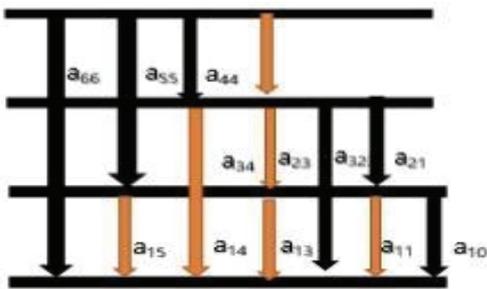
2.3. 측차 붕괴식 계산방법

동시합성효과는 붕괴형식이 복잡하기 때문에 Fig. 2와 같이 수정해서 생각하면 이해하기가 쉽다.

Fig. 2 붕괴도(A)에서 주목하는 감마선을 γ_3 (방출비 a_3) 라고 표현하면 (B)는 γ_3 와 γ_4 는 Cascade로 방출하기 때문에 γ_3 계수율 감소효과가 있다^[22,23].



(A) General radioactive decay schematic



(B) Summing effect Correction radioactive decay schematic

Fig. 2. Comparison of radioactive decay schematic.

즉, γ_3 피크감소 확률은 γ_4 의 전체효율(total efficiency)이 관계한다. γ_1 와 γ_2 가 γ_3 와 동일한 준위로 Cascade하는 경우는 γ_3 의 피크 계수율 증가효과가 있다. 또한 a_1, a_2 가 a_3 과 동일한 준위로 Cascade

하는 경우 a_1, a_2 가 모두 전에너지를 검출기내어서 잃어버리면 a_3 의 peak에 해당하는 계수율에 기여를 한다. 즉 a_3 의 peak 계수율이 증가하는 효과가 발생한다. 즉 γ_3 피크 증가 확률은 γ_1 과 γ_2 의 피크효율이 관계한다. $I = 1$ 인 경우 (γ_1)Eq. (2)와 같으며, $I = 3$ 인 경우(γ_3)(3)와 같다.

$$\epsilon_1 = \epsilon_1 \left[\frac{a_{11}}{a_1} + \frac{a_{12}}{a_1}(1-f_2T_2) + \frac{a_{14}}{a_1}(1-f_2T_2)(1-f_4T_4) + \frac{a_{16}}{a_1}(1-f_5T_5) \right] \quad (2)$$

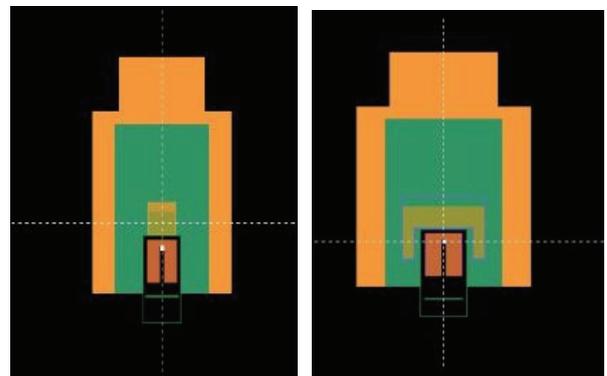
$$\epsilon_3 = \epsilon_3 \left[\frac{a_{33}}{a_3} + \frac{a_{35}}{a_3}(1-f_4T_4) \right] + \frac{a_2}{a_3} f_1 \epsilon_2 \epsilon_2 \quad (3)$$

2.4. 피크 대 총 비율 및 효율

피크 대 총 비율 PT 는 전체 에너지 피크의 카운트 수와 스펙트럼의 총 이벤트 수간의 비율로 정의된다^[18,20,21]. 볼륨 원본의 경우 P_T 다음과 같이 주어진다.

$$PT = \frac{\int \epsilon_p(E, r, z) P_T(E, r, z) r dr dz}{\int \epsilon_p(E, r, z) r dr dz} \quad (4)$$

3. 검출기 및 원통형, 마리넬리 비커의 Penelope 시뮬레이션



(a) Cylindrical beaker (b) Marinelli beaker

Fig. 3. Monte Carlo simulation of Geometry for standard sources.

Penelope code는 HPGe 검출기와 실린더 및 마리넬리 비커를 시뮬레이션에 사용되었으며, 이는 HPGe 검출기의 효율성을 얻기 위해 많은 연구자들이 사용을 하고 있다. HPGe 검출기 모델은 EG&G Ortec GEM30185 HPGe로 Fig. 3과 같다. 시료의 치수는 마리넬리 비커의 치수크기와 밀도는 동일하게 하였다. 시뮬레이션 결과의 검증을 위해 표준부피선원 CRM 50, 450 ml에서 시뮬레이션 하였다. 자체흡수 및 동시합성 보정하여 효율을 측정값과 비교하였다.

4. 환경시료 적용 및 측정

표준혼합선원 측정에서 결과를 바탕으로 자체흡수 계수 및 동시합성 효과를 보정하여 환경시료에 적용하였다. 환경시료 중 토양시료를 사용하여 검출기에서 측정하였다. 토양시료는 밀도에 따라 각각 0.84, 1.04, 1.32, 1.59g/cm³ 였다. 밀도변화로 인한 자체흡수 계수 값을 구하였다.

III. RESULT

1. 자체흡수 계수

Table 1에서 표준부피선원에서 에너지 범위(59.59 ~ 1836.01 keV)의 경우 자체흡수 보정계수와 2% 이내 범위에서 잘 일치함을 검증하였다.

Table 1 Relative deviation between experimental and simulated full energy peak efficiency values with self-absorption correction factor 450 ml CRM

Energy (keV)	experiment	simulated	self-absorption correction factor
59.50	0.03261	0.03284	0.99
88.02	0.05615	0.05642	1.0
122.06	0.06673	0.06698	1.0
165.85	0.06116	0.06152	0.99
320.08	0.04255	0.4255	0.99
391.69	0.03682	0.03711	0.99
514.00	0.02922	0.2945	0.99
661.66	0.02316	0.02347	0.99
898.02	0.01739	0.01754	0.99
1173.24	0.01920	0.01938	0.99
1332.50	0.01237	0.01255	0.98
1836.01	0.00983	0.00999	0.98

2. 동시 합산 보정 계수

보정방법을 테스트하기 위해 ⁶⁰Co는 5 cm 거리에 측정되어 얻은 에너지 스펙트럼을 나타낸다.

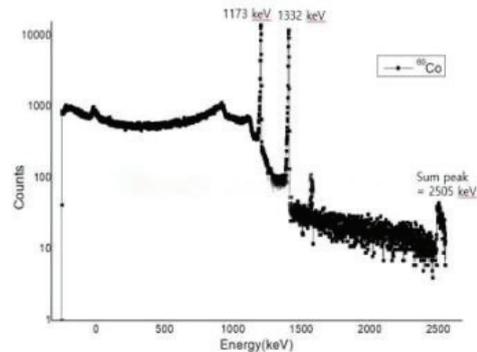


Fig. 4. Gamma ray spectrum of ⁶⁰Co.

Eq. (1) ~ (3)에 따라 ⁶⁰Co의 두 에너지 피크에 대한 동시합성 보정 계수는 다음 Eq. (5), (6)과 같다.

$$k_{1173} = \frac{1}{1 - \epsilon_{t1332}} \quad (5)$$

$$k_{1332} = \frac{1}{1 - \frac{p_{1173}}{p_{1332}} \epsilon_{t1173}} \quad (6)$$

Table 2는 표준부피선원 및 환경시료 분석을 위해 검출기를 교정할 때 동시합성 보정 계수에 문제가 있는 일부 방사성핵종(예: ⁶⁰Co)에 대해 효율을 보정하여 적용한 결과 2% 이내에서 일치하였음을 확인하였다.

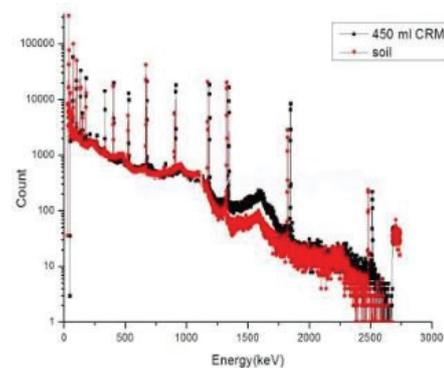


Fig. 5. Comparison of 450 ml CRM energy spectrum with soil.

각 핵종별 peak-to -total 비는 Eq. (5), (6)에 의거하여 구하였다.

$$^{241}\text{Am } r(59.54) = \frac{P(59.54)}{A(59.54) + C}$$

$$^{109}\text{Cd } r(88.01) = \frac{P(88.01)}{A(88.01) + C - P_N(22) - P_N(25)}$$

$$^{113}\text{Sn } r(391.) = \frac{P(391.) + P(255)}{A(391.) + C - P_N(24) - P_N(27)}$$

$$^{137}\text{Cs } 6(661.) = \frac{P(661.)}{A(661.) + C - P_N(32) - P_N(37)}$$

여기서 A는 측정된 감마선 스펙트럼상의 peak 에너지 E 이하의 전체 면적이고, C는 저에너지 (0 ~ 20 keV)에 대하여 외삽하여 구한 면적. $P_N(E)$ 는 에너지 E인 광자 peak의 net 면적으로서 방출핵종에 대해 보정해 준 값이다. Table 2는 보정 계수가 총 효율성과 감마 방출 확률에만 의존한다는 것을 보여준다.

Table 2 Peak-to total ratio for the HPGe detector (50ml)

Nuclide	Energy(keV)	Peak-to total ratio (50 ml)
²⁴¹ Am	59.50	0.682
¹⁰⁹ Cd	88.02	0.625
⁵⁷ Co	122.06	0.571
¹³⁹ Ce	165.85	0.552
⁵¹ Cr	320.08	0.431
¹¹³ Sn	391.69	0.304
⁸⁵ Sr	514.00	0.249
¹³⁷ Cs	661.66	0.205
⁸⁸ Y	898.02	0.182
	1836.01	0.142
⁶⁰ Co	1173.24	0.166
	1332.50	0.158

⁶⁰Co 및 ⁸⁸Y에 대한 보정 계수 값은 Table 3에 나타내었다. 전체 에너지 피크와 총 효율에 크게 의

존한다. 이에 비해 ⁶⁰Co 및 ⁸⁸Y 핵종에 대한 효율과 동시합성 계수값 사이에는 역관계가 있다

Table 3 Comparison of experimental and simulated full energy peak efficiency values with coincidence summing correction factor

Nuclide	Energy (keV)	Experimental	simulated	CSF
⁶⁰ Co	1173	0.01377	0.01395	0.98
	1332	0.01237	0.01252	0.98
⁸⁸ Y	898	0.01739	0.01748	0.99
	1836	0.00983	0.00998	0.98

Table 4를 통해 전체 에너지 피크와 총 효율은 단일 광전 상호 작용에서 감마선의 흡수가 그림과 같이 약 140 keV 미만의 에너지에 대해서만 우세하기 때문에 낮은 에너지 범위에서 서로 가깝다. 높은 광자 에너지에서, 전체 에너지 피크 효율은 Compton 산란 후 산란된 광자의 광전 흡수가 단일 광전 이벤트에서 전체 광자 에너지의 흡수보다 우세하기 때문에 전체 효율보다 빠르게 떨어진다. 또한 자체흡수 값은 다소 크고 낮은 광자 에너지에 더 효과적임을 알 수 있다. 시뮬레이션 값과 측정값의 결과 자체흡수 포함으로 인한 낮은 에너지에서 2% 이내의 양호한 일치율을 보여준다.

Table 4. Full- energy peak efficiencies and corrected efficiencies for coincidence summing of multi-gamma-emitters

Nuclide	Energy(keV)	Peak efficiency	Corrected Efficiency
²⁴¹ Am	59.54	0.03188	0.03261
¹⁰⁹ Cd	88.03	0.05585	0.05615
⁵⁷ Co	122.06	0.06625	0.06673
¹³⁹ Ce	165.85	0.06039	0.06116
⁵¹ Cr	320.08	0.04219	0.04255
¹¹³ Sn	391.69	0.03644	0.03682
⁸⁵ Sr	514.00	0.02882	0.02922
¹³⁷ Cs	661.66	0.02280	0.02316
⁸⁸ Y	898.04	0.01711	0.01739
	1836.01	0.00957	0.00983
⁶⁰ Co	1173.23	0.01349	0.01377
	1332.549	0.01214	0.01237

3. 환경시료 적용 및 측정

Fig. 6은 0.84 ~ 1.59 g/cm³이다. 토양 시료의 자체 흡수 효과는 밀도가 0.84와 1.04는 증가에 따라 감소되며, 1.45와 1.59에서는 밀도의 증가에 따라 자체흡수계수가 증가함을 알 수 있다.

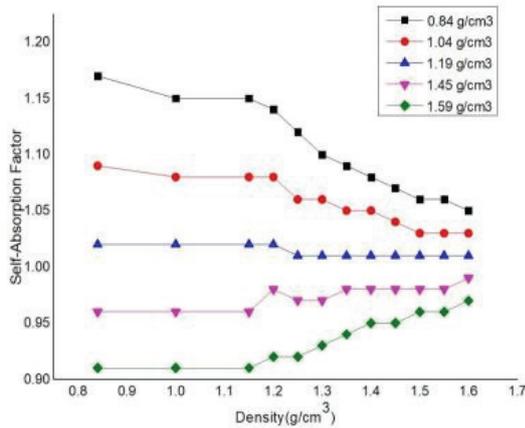


Fig. 6. Self-absorption variation with density for soil samples.

서로 다른 광자 에너지에서의 밀도에 따른 검출기 효율의 변화는 최소, 중간, 최고로 선택하였으며 Fig. 7과 같다.

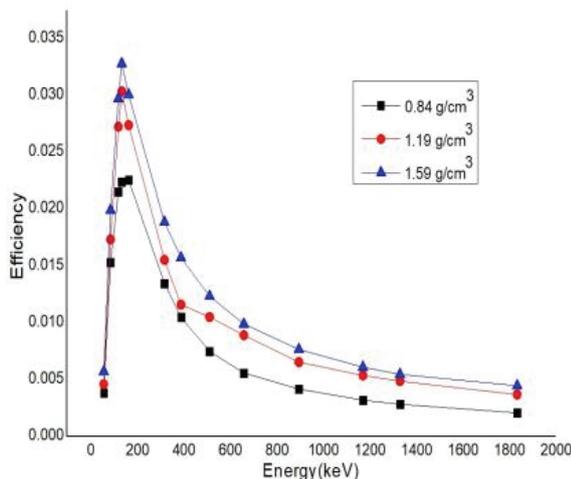


Fig. 7. Efficiency for soil samples different densities 450 ml Marinelli beakers.

따라서 모든 에너지의 계수 효율은 시료의 밀도가 증가함에 따라 감소한다. 자체흡수 계수와 밀도

사이의 상관 계수는 연관성이 있었고 토양 시료의 선형 곡선 Fig. 7에서 매우 강했다. 이것은 시료의 밀도가 증가할 때 측정된 값이 감소하는 것을 보여 주는데, 이는 시료 자체에 산란된 최소 감마선 수가 더 큰 밀도이기 때문이다. 표준부피 선원의 경우, 화학적 조성 및 밀도가 다른 샘플들이 전체 에너지 피크 효율 값에 상당한 변화를 일으켰다. 그러나 대부분의 환경 시료의 경우 선원자체 흡수를 통한 전체 에너지 피크 효율은 샘플의 밀도에 크게 의존한다. 토양시료의 보정계수가 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 차이 시료별로 밀도가 변동하기 때문이다.

IV. CONCLUSION

표준혼합부피선원을 측정 및 시뮬레이션을 통해 피크 및 총 효율에서 자체흡수 및 동시합성 보정 계수 결과 2% 이내에서 잘 일치하였음을 결과를 통해 확인하였다. 또한 결과에서 얻은 값들을 적용한 결과 각각의 토양 밀도(0.84 ~ 1.59 g/cm³)에 대한 보정 계수 값의 의존성을 관찰하였다. 복잡한 핵종의 동시 합성 보정 계수를 계산하기 위해 여러 가지 공식을 통해 유효함을 검증하였다. 따라서 컴퓨터 전산모사나 측정용 검출기를 통해 검출기 반경보다 적거나 큰 다양한 환경시료에 적용할 수 있음을 실험을 통해 알 수 있다.

Reference

- [1] O. Sima, "True Coincidence Summing Corrections-Theory", International Atomic Energy Agency(IAEA) Technical Visit on Coincidence summing and geometry correction in gamma spectrometry IAEA Laboratories, Seibersdorf, Austria, 2010.
- [2] M. I. Abbas "Direct mathematical method for calculating full-energy peak efficiency and coincidence corrections of HPGe detectors for extended sources", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, Vol. 256, pp. 554-557, 2007. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nimb.2006.12.056>
- [3] M. I. Abbas "HPGe detector photopeak efficiency

- calculation including self-absorption and coincidence corrections for Marinelli beaker sources using compact analytical expressions", *Applied Radiation and Isotopes*, Vol. 54, No. 5, pp. 761-768, 2001. [http://dx.doi.org/10.1016/s0969-8043\(00\)00308-0](http://dx.doi.org/10.1016/s0969-8043(00)00308-0)
- [4] H. Jäderström, W. F. Mueller, V. Atrashkevich, A. S. Adekola, "True coincidence summing correction and mathematical efficiency modeling of a well detector", *Nuclear Instruments and Methods in Physics research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 784, pp. 264-268, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2014.08.032>
- [5] E. Tomarchio, S. Rizzo, "Coincidence-summing correction equations in gamma-ray spectrometry with p-type HPGe detectors", *Radiation Physics and Chemistry*, Vol. 80, No. 3, pp. 318-323, 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.radphyschem.2010.09.014>
- [6] Z. Wang, B. Kahn, J. D. Valentine, "Efficiency calculation and coincidence summing correction for germanium detectors by Monte Carlo simulation", *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Vol. 49, No. 4, pp. 1925-1931, 2002. <http://dx.doi.org/10.1109/TNS.2002.801679>
- [7] B. Quintana, C. Montes, "Summing-coincidence corrections with Geant4 in routine measurements by γ spectrometry of environmental samples", *Applied Radiation and Isotopes*, Vol. 87, pp. 390-393, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apradiso.2013.11.067>
- [8] F. Piton, M. C. Lepy, M. M. Be, J. Plagnard, "Efficiency transfer and coincidence summing corrections for γ -ray spectrometry", *Applied Radiation and Isotopes*, Vol. 52, No. 3, pp. 791-795, 2000. [http://dx.doi.org/10.1016/s0969-8043\(99\)00246-8](http://dx.doi.org/10.1016/s0969-8043(99)00246-8)
- [9] W. N. Lee, H. P. Lee, K. H. Chung, Y. H. Cho, G. S. Choi, C. W. Lee, H. W. Chung, E. J. Lee, Y. S. Sho, J. O. Lee, "A Practical and Simple Method of Self-absorption Correction for Environmental Samples", *Journal of Radiation Protection and Research*, Vol. 31, No. 1, pp. 47-52, 2006.
- [10] M. Jurado Vargas, A. Fernández Timón, N. Cornejo Díaz, D. Pérez Sánchez, "Monte Carlo simulation of the self-absorption corrections for natural samples in gamma-ray spectrometry", *Applied Radiation and Isotopes*, Vol. 57, No. 6, pp. 893-898, 2002. [http://dx.doi.org/10.1016/s0969-8043\(02\)00220-8](http://dx.doi.org/10.1016/s0969-8043(02)00220-8)
- [11] R. Faghihi, S. Mehdizadeh, S. Sina, "Natural and artificial radioactivity distribution in soil of Fars province Iran", *Radiation Protection Dosimetry*, Vol. 145, No. 1, pp. 66-74, 2011. <http://dx.doi.org/10.1093/rpd/ncq367>
- [12] J. M. Laborie, G. Le. Petit, D. Abt, M. Girard, "Monte Carlo calculation of the efficiency calibration curve and coincidence-summing corrections in low-level gamma-ray spectrometry using well-type HPGe detectors", *Applied Radiation and Isotopes*, Vol. 53, No. 1-2, pp. 57-62, 2000. [http://dx.doi.org/10.1016/s0969-8043\(00\)00114-7](http://dx.doi.org/10.1016/s0969-8043(00)00114-7)
- [13] M. G. Yasser, C. A. Héctor A, A. H. Carlos M, B. C. Jose L, G. A. Aniel, "Application of the Monte Carlo efficiency transfer method to an HPGe detector with the purpose of environmental samples measurement", *Applied Radiation and Isotopes*, Vol. 97, pp. 59-62, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apradiso.2014.12.013>
- [14] J. Boson, G. Ågren, L. Johansson, "A detailed investigation of HPGe detector response for improved Monte Carlo efficiency calculations", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 587, No. 2-3, pp. 304-314, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2008.01.062>
- [15] P. Jodlowski, "Self-absorption correction in gamma-ray spectrometry of environmental samples an overview of methods and correction values obtained for the selected geometries", *Nukleonika*, Vol. 51, No. 2, pp. S21-S25, 2006.
- [16] C. A. McMahon, M. F. Fegan, J. Wong, S. C. Long, T. P. Ryan, P. A. Colgan, "Determination of self-absorption corrections for gamma analysis of environmental samples: comparing gamma-absorption curves and spiked matrix-matched samples", *Applied Radiation and Isotopes*, Vol. 60, No. 2, pp. 571-577, 2004. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apradiso.2003.11.081>
- [17] D. Pittauerov, S. Mülitz, B. Hettwig, W. Chehade, J. B. Stuu, G. Mollenhauer, H. W. Fischer, "Application of self-absorption correction method in gamma spectroscopy for 210 Pb and 137 Cs

- sediment chronology on the continental slope off NW Africa", *Radioprotection*, Vol. 44, No. 5, pp. 457-461, 2009.
<http://dx.doi.org/10.1051/radiopro/20095085>
- [18] K. R. Jackman, S. R. Biegalski, "Methods and software for predicting germanium detector absolute full-energy peak efficiencies", *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, Vol. 279, No. 1, pp. 355-360, 2009.
<http://dx.doi.org/10.1007/s10967-007-7318-0>
- [19] Tamaki Watanabe, Yoshihiro Oi, Mitsumasa Taki, Katsuya Kawasaki, Makoto Yoshida, "Evaluation of peak-to-total ratio for germanium detectors", *Applied Radiation and Isotopes*, Vol. 50, No. 6, pp. 1057-1061, 1999.
[http://dx.doi.org/10.1016/S0969-8043\(98\)00127-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0969-8043(98)00127-4)
- [20] L. Moens, J. De Donder, Lin Xi-lei, F. De Corte, A. De Wispelaere, A. Simonits, J. Hoste, "Calculation of the absolute peak efficiency of gamma-ray detectors for different counting geometries", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, Vol. 187, No. 2, pp. 451-472, 1981. [http://dx.doi.org/10.1016/0029-554X\(81\)90374-8](http://dx.doi.org/10.1016/0029-554X(81)90374-8)
- [21] T. Vidmar, A. Likar, "On the invariability of the total-to-peak ratio in gamma-ray spectrometry", *Applied Radiation and Isotopes*, Vol. 60, No. 2-4, pp. 191-195, 2004.
<https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2003.11.015>
- [22] A. Cesana, M. Terrani, "An empirical method for peak-to-total ratio computation of a gamma-ray detector", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 281, No. 1, pp. 172-175, 1989.
[http://dx.doi.org/10.1016/0168-9002\(89\)91231-X](http://dx.doi.org/10.1016/0168-9002(89)91231-X)

환경시료 측정 시 자체흡수 및 동시합성 보정 적용 효과

장은성¹, 민병인^{2,*}

¹고신대학교복음병원 방사선종양학과

²인제대학교 방사선화학학과

요 약

자체흡수는 환경 시료의 감마 분광 측정 정확도에 영향을 미치는 가장 중요한 요소이다. 특히, 샘플의 화학적 구성, 기하학적 모양, 두께, 밀도, 원자 번호, 샘플과 검출기 사이의 거리, 방출된 감마 광자의 에너지 및 샘플 내 습도 계수 또는 백분율과 같은 기타 요인에 의해 영향을 받는다. 보정 방법을 테스트하기 450 ml CRM 표준선원(9개 핵종) 마리넬리 비커를 사용하였다. 보정된 값들을 적용하여 환경시료 중 토양시료 5개를 밀도별로 측정하였다. 따라서, 자체흡수 값은 다소 크고 낮은 광자 에너지에 더 효과적임을 알 수 있다. 환경 시료의 경우 선원자체 흡수를 통한 전체 에너지 피크 효율은 샘플의 밀도에 크게 의존함을 확인하였다.

중심단어: 전체에너지피크효율, 환경시료, 표준부피선원, 동시합산 보정, 자체 흡수

연구자 정보 이력

	성명	소속	직위
(제1저자)	장은성	고신대학교복음병원 방사선종양학과	연구원
(교신저자)	민병인	인제대학교 방사선화학학과	교수