

Evaluate the usefulness of Coincidence Summing Correction Factors for Cylinder and Extended Source Penelope Simulation

Eun-Sung Jang¹, Bo-Seok Chang^{2,*}

¹Department of Radiation Oncology Kosin University Gospel Hospital

²Department of Radiological Science, GimCheon University

Received: September 23, 2021. Revised: November 26, 2021. Accepted: November 30, 2021

ABSTRACT

In order to calibrate energy and efficiency using the PENELOPE Code, a PENELOPE simulation was performed using a volume source. Here, we want to verify peak efficiency and usefulness by performing simultaneous measurement and correction. calculate the coincident sum correction for all volumes, first subdivide the volumes of the cylinder and the four Marinelli beakers into three heights again. Therefore, the simultaneous measurement correction coefficient in three areas and the simultaneous measurement correction coefficient for the entire volume source are calculated as output. At low energies, the j value for each source volume (50-300 ml) is small and increases significantly in the high energy range. Simulation results showed good agreement within 2.5% for all source volumes except for 50 ml and 300 ml, which were up to 4%. This means that the correction for the simultaneous measurement effect during measurement is effective. In addition. Based on this, it can be confirmed that there is an advantage to improve the detection efficiency when measuring various sources and environmental samples.

Keywords: Penelope simulation, Coincidence Summing Correction Factors, Volume source, Full Peak Efficiency

I. INTRODUCTION

High Purity Germanium(:HPGe) 검출기를 사용한 감마선 분광법은 방사성핵종을 결정하는 부피선원이나 환경시료에 많이 사용된다. 방사성핵종의 농도를 정확하게 평가하려면 측정 시스템의 검출 한계를 줄이기 위해 선원-검출기 거리가 필요하다. 두 개의 감마선이 검출기에 도달할 확률이 있기 때문에 동시에 입사 흡산 효과는 선원-검출기 거리가 더 중요하다^[1,2]. 따라서 거리를 무시할 수 없다. 또한 표준 부피선원 측정에는 반드시 고려해야 할 요소들이 있고 또한 보정이 반드시 필요하다. HPGe 검출기를 사용하여 다중 감마선을 방출(⁶⁰Co, ⁸⁸Y) 하는 감마선을 검출할 때 동시합성이 발생한다. 동시 합성 효과는 보정이 수행되지 않으면 두 개의

감마선 및 핵종에 해당하는 피크로부터 계수가 부정확해진다. 이를 보정해주는 것이 동시계측보정이다.

동시계측보정에 대한 연구는 1970년대부터 시작되었다^[2]. 처음 시작한 간단한 점선원의 동시계측보정 계산부터 이후 실제 표준부피 선원 및 환경시료와 같은 부피선원에서 동시계측보정연구도 시작되었다^[1]. 따라서 부피선원의 경우 다양한 계산방법론이 제시되었다. 직접 피크 효율을 구해 계산에 필요한 데이터를 얻었지만 시간이 많이 필요해 점차 몬테카를로 전산모사가 연구에 활용되며 다양한 방법론이 제시되었다^[2-3].

즉, 시뮬레이션에서 Peak/Total ratio(P/T ratio)를 구하고 Coincidence Summing Correction(:CSC)를 계산하는 기법 등 다양한 방법론이 제시되었다^[4].

* Corresponding Author: Bo-Seok Chang E-mail: yiktus153@hanmail.net

Tel: *** - **** - ****

또한 많은 저자들은 피크, 총 효율 및 Coincidence Summing Factor(CSF) 계산을 위해 확장된 선원의 검출기에 위치하는 점 선원의 접근방식을 제안하였다^[3]. Debertin & Schotzig 방법을 사용하여 총 효율에서 CSF를 계산하였다.

총 효율에서 CSF를 계산하기 위해 분석적 접근 방식을 사용하였다. 본 연구에서는 점선원에서 사용한 PENELOPE Code를 부피선원에 적용하여 계산 및 몬테카를로 전산모사 하였다. PENELOPE Code를 교정하기 위해 ¹³³Ba, ¹⁵²Eu, ⁶⁰Co 선원을 사용하여 계측과 함께 code 계산을 수행하였다. 교정에서의 동시계측보정계수 PENELOPE Code에 적용하여 피크 효율 값 및 유용성을 검증하고자 한다.

II. MATERIAL AND METHODS

1. PENELOPE Computer Simulation Geometry

PENELOPE란 "PENetration and Energy Loss of Positions and Electron"에서 파생되었다. PENELOPE의 알고리즘은 100 eV - 1 GeV 사이의 에너지를 가진 전자와 양전자에 적용 가능한 산란 및 충돌 단면적 데이터베이스와 상호작용 모델을 채용하고 있다. PENELOPE는 측면변위와 경계면 통과과정을 유효 적절히 처리하여 에너지요동에 일괄성이 있다. PENELOPE는 전산모사방법에 따라 검출기의 특성을 전산모사 하도록 구성되어 있는데, 전산모사 방법이란 시뮬레이션 테크닉의 일종으로 많은 수의 실험을 바탕으로 통계 자료를 얻어 그 자료로부터 역산하여 어떤 특정한 수치나 확률분포를 구하는 방법이다. 통계자료가 많을수록, 입력값의 분포가 고를수록 결과의 정밀성이 보장되는 특성이 있다^[5-6]. 또한 전산모사를 통해 획득한 결과는 동시계측 보정의 검·교정 단계가 필요하기 때문에, Geometry는 이전 연구에서 수행한 점 선원 및 표준 부피선원의 측정과 똑같은 조건으로 설정하여 나타내었다. 동시 계측 보정계수의 정확한 결과를 도출하기 위해 P형 HPGe 검출기를 이용한 상대효율 30%가 사용되었다. ⁶⁰Co의 1332.5 keV 감마선에 대한 에너지 분해능은 1.78 keV이다.

또한, 전산모사의 기하학적 정보들은 EG&G ORTEC 제조사에서 제공한 데이터 값들을 시뮬레이션에 적용하여 모사하였다. 검출기의 주요 매개변수는 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Detector Dimensions as Specified by the Manufacturer

Detector Assembly Dimensions		
Component	Dimension (mm)	
A	Mount cup, Length	94
B	End cap to crystal gap	3
C	Mount cup base	3.2
D	End cap window	1.3
E	Insulator/Shield	0.03/0.03
F	Outside contact layer	700 microns
G	Hole contact layer	0.3 microns
H	Mount cup wall	0.76
I	End cap wall	1.3

PENELOPE 전산모사에 입력 정보 및 수행하고 에러가 없음을 확인한 후 전산 모사하였다. Fig. 1와 같다.

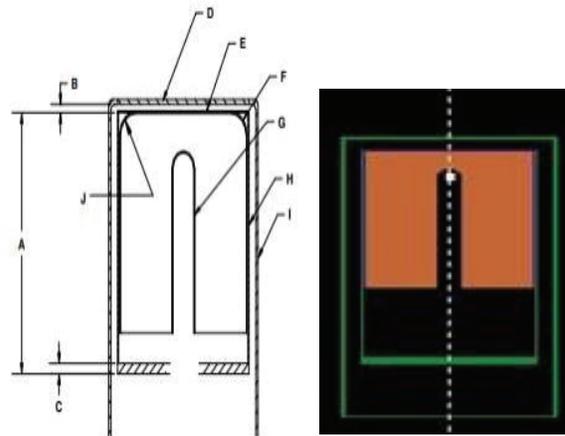


Fig. 1. Detector Information(Left) Provided by Manufacturer and implemented by Penelope detector geometry(Right).

HPGe 동축형 모양의 시뮬레이션은 크리스털 반경 8 mm, 길이 94 mm, 홀 직경 9.1 mm, 홀 깊이 60.4 mm 엔트 캡은 두께 3.2 mm, 윈도우 끝창 1.3 mm, 마운드 캡 3.2 mm의 Al으로 하였다.

1.1 Source and Radioactive

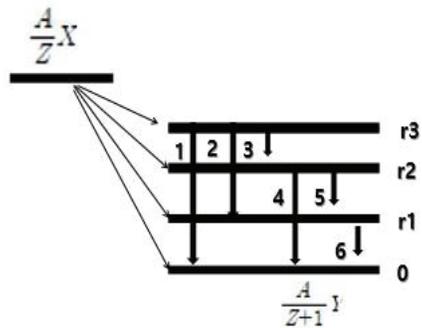
부피선원(50 ml, 450 ml Certificate Reference Material (CRM), ¹³³Ba, ¹⁵²Eu)을 각각 4개로 설정하였다. 각 영역은 즉, V1(50 ml), V2(100 mL), V3(200 ml) 및 V4(300 ml)의 감마 방사성 핵종 채워진 원통형 선원 값을 얻기 위해 사용되었습니다. V5(450 ml), V6(600 ml), V7(800 ml) 및 부피선원(50 ml, 450 ml Certificate Refort Material(CRM), ¹³³Ba, ¹⁵²Eu)을 각각 4개로 설정하였다. 각 영역은 즉, V1(50 ml V2(100 ml), V3(200 ml) 및 V4(300 ml)의 감마 방사성 핵종 채워진 원통형 선원 값을 얻기 위해 사용되었습니다. V5(450 ml), V6(600 ml), V7(800 ml) 및 V8(1000 mL)의 부피가 Table 2에 표시된 Marinelli 선원도 시뮬레이션에 사용되었습니다. 또한, γ 선 방출 선원에 포함된 방사성 핵종은 Table 2에 나열되어 있습니다.

Table 2. Single Line and Multi Gamma Ray Nuclides Crm Source and Efficiency

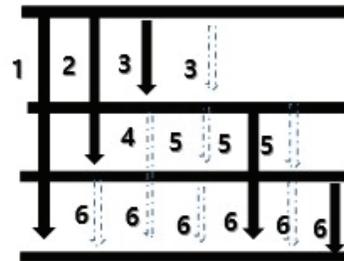
Nuclide	Energy(keV)	Intensity(%)
²⁴¹ Am	59.50	35.91
¹⁰⁹ Cd	88.02	3.68
⁵⁷ Co	122.06	85.60
	136.47	10.72
¹³⁹ Ce	165.85	79.90
¹¹³ Sn	391.69	64.21
⁸⁵ Sr	514.00	95.64
	1836.01	99.23
¹³⁷ Cs	661.66	85.11
	898.02	93.67
⁸⁸ Y	1836.01	99.23
	1173.24	99.90
⁶⁰ Co	1332.50	99.98
	80.99	90.0
	160.61	0.826
	276.4	7.53
¹³³ Ba	302.85	19.10
	356.01	3.63
	244.7	7.58
¹⁵² Eu	443.93	2.82
	778.9	12.94
	1212.97	1.42
	1408.02	21.05

2. True Coincidence Summing Correction

HPGe 검출기를 사용하여 표준 혼합 감마선원을 계측하는 경우 Fig. 2와 같이 붕괴방식을 이용하여 다중 감마선을 방출하게 된다. 따라서 이런 과정을 통해 검출기의 resolving time 내에 일어날 때 검출기에서 연속적 신호를 하나의 신호로 인식하게 된다. 그러므로 count loss가 발생하며 이를 보정해주는 것이 동시계측보정이다^[4-6]. 검출 핵종 방출 붕괴에 따라 달라지며 ⁶⁰Co, ⁸⁸Y 및 ¹³³Ba 같은 복잡한 핵종까지 다양하다. 총 효율성을 시뮬레이션하기 위해 세부적인 붕괴 방식이 고려된다^[6].



(a) Typical decay scheme of a nuclide X decaying to Y



(b) summing of gamma-ray

Fig. 2.Cascade coincidence summing among the gamma-ray emitted by beta decay of $\frac{A}{Z}X$

핵종 X는 Y의 두 가지 여기 상태로 붕괴된다. 두 개의 여기 상태는 각각의 확률이 r1, r2 및 r3 인 3 개의 감마선은 분해시간 이내 동시에 방출되었기 때문에 마치 1개의 감마선이 들어온 것처럼 보이고 마치 합쳐진 형태가 된다.

Fig. 2와 같이 에너지 레벨이 3개인 경우 계산식

은 아래 식 (1) - (3)과 같다. ϵ_{pi} 는 피크 효율, ϵ_t 는 전 효율, r 는 방출확률을 나타낸다.

$$C_1 = \frac{1}{1 - p_2 \cdot \epsilon_{T2}} \quad (1)$$

$$C_2 = \frac{1}{1 - p_1 \cdot \epsilon_{T1}} \quad (2)$$

$$C_3 = \frac{1}{1 + \frac{p_1 p_2}{p_3} \cdot \frac{\epsilon_{p1} \cdot \epsilon_{p2}}{\epsilon_{p3}}} \quad (3)$$

3. 교정선원 및 에너지 교정

검출기와 점선원의 기하학적 배치는 검출기 Ge 결정 민감층 표면으로부터 밀착시켜 전산 모사하였다. HPGe 검출기의 교정선원은 저에너지 50 keV 영역부터 고에너지 영역 2000 keV 영역인 감마선원 ^{133}Ba , ^{152}Eu , ^{60}Co 선원을 사용하여 측정 및 전산 모사하였다. 에너지 교정 수치를 구하기 위해, 직선 맞춤이 이용된다. 교정하고자 하는 스펙트럼의 에너지는 Table 2에 제공한 것을 바탕으로 분석하였다. ^{60}Co 는 β 에서 ^{60}Ni 까지 붕괴하고 두 개의 감마선을 계단식으로 방출하며 Fig. 3과 같이 나타내었다.

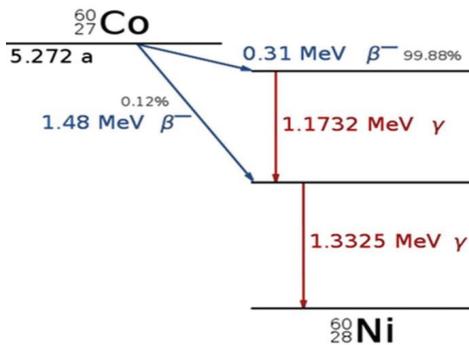


Fig. 3. ^{60}Co Decay Scheme.

^{60}Co 의 두 에너지 피크에 대한 True Coincidence Summing(TCS) 보정 계수는 다음 Eq. (4), (5)와 같다.

$$k = \frac{1}{1_{1173} - \epsilon_{1332}} \quad (4)$$

$$k_{1332} = \frac{1}{1 - \frac{p_{1173}}{p_{1332}} \epsilon_{t1173}} \quad (5)$$

또한, ^{133}Ba 에서 302.8 keV, ^{152}Eu 1406.02 keV도 Eq (4), (5)와 같다.

4. 부피선원 효율 및 계산

최대 에너지 피크 효율의 평가를 위해 검출기의 활성 볼륨에 전체 에너지를 축적하는 β 선만 고려되었다^[7-9]. 시뮬레이션 된 최대 에너지 피크 효율은 Eq. (6)과 같다. 여기서 Δ 는 최대 에너지 피크 효율이고, Q 는 활성 검출기 볼륨에 최대 에너지를 축적하는 계수의 수이며, M 은 주어진 에너지 E 에 대한 총 시뮬레이션 Δ 선 카운트의 수이다.

$$\epsilon = \frac{Q}{M} \quad (6)$$

CSFsimu 및 bCSFsimu가 시뮬레이션 된 일치 합산 보정 계수인 경우 aTsimu 및 bTsimu는 시뮬레이션 된 총 효율이다. CSFsimu는 Eq (7), (8)과 같이 주어진다.

$$\frac{N_1}{N_1^*} = \frac{1}{1 - \epsilon_{T2}} \quad (7)$$

$$N_1 = A P_1 \epsilon_1 \quad N_1^* = A P_1 \epsilon_1 \epsilon_{T2}$$

$$\frac{N_1^*}{N_1} = 1 - \epsilon_{T2} \quad (8)$$

$$CSF_{\sim u}^a = 1 - \epsilon_{Tsimu}^b \quad (9)$$

$$CSF_{\sim u}^b = 1 - \frac{P_1}{P_2} \epsilon_{\sim u}^a \quad (10)$$

50 ml 와 450 ml 기준으로 확장된 부피선원의 경우 동시합성 효과가 더 복잡해진다^[10]. 이 경우 보정 계수는 피크 및 총 효율뿐만 아니라 부피선원 및 선원내의 차등 효율 분포에 따라 달라진다^[11-13]. 따라서 모든 부피에 대한 일치 동시합성 보정을 계산을 위해 먼저 원통형 및 Marinelli 부피를 다음과 같이 세분화하였다. 즉, 원통형부피(h1= 3 cm, h2 = 6 cm 및 h3 = 9 cm 및 Marinelli 부피 (h1 = 5 cm, h2 = 10 cm 및 h3 = 15 cm)를 조절하여 Fig. 4, 5와 같이 나타내었다. 또한 전체 에너지 범위 50 keV ~ 2000 keV 에너지에 전산모사를 실행하였다. 부피선원의 영역을 나눔에 있어 반경 및 높이 방향으로 똑같이 나눴다. 전산모사 실행 시 부피에 비례하여 빔이 나가도록 설정하였다. 따라서 감마선의 빔 발생 설정은 부피가 50 ml에서 10⁸개, 1000 ml에서는 6 × 10⁸ 개로 하였다.

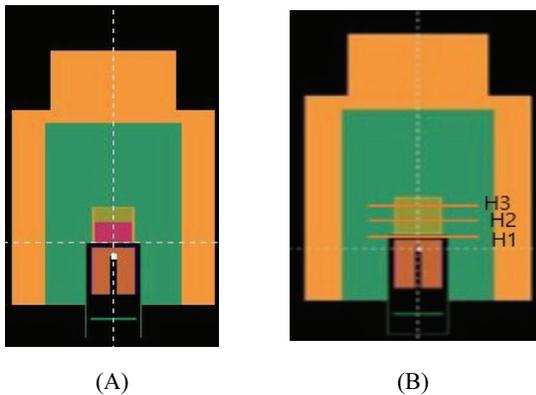


Fig. 4 Monte carlo simulation of the cylindrical source according of height chang.

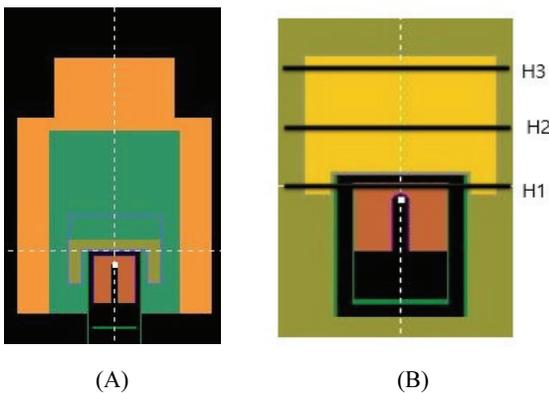


Fig. 5. Monte carlo simulation of the marinelli beaker source according of height chang.

전체 볼륨 소스 높이의 경우 Eq. (11), (12)와 같다.

$$J_{1h_1} = J_{1h_1} = \sum \rho_i \epsilon_1 \epsilon^{b_{Tsimu}} d\rho / \sum \rho_i \epsilon_1 d\rho \quad (11)$$

$$[J_1] = \frac{\sum_{i=1}^3 J_{1hi}}{3} \quad (12)$$

여기서 hi는 선원바닥에서부터 다른 높이 체적 소스 높이 h1에서 898.02 keV 또는 1173.24 keV에 대해 1h를 얻으려면 먼저 선원 체적의 3가지 다른 높이에서 ε 및 bTsimu ε(1836.01 keV 또는 1332.50 keV에서) 값을 계산한 다음 적분(즉, 각 값에 ρi를 곱함, 합한 다음 ρi ε)의 합으로 나눈다. CSF 값은 ¹³³Ba 및 ¹⁵²Eu에 대해서도 얻었습니다. 핵종은 동일한 절차를 사용하여 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션 접근법으로 얻은 효율(j) 값의 표준선원은 CSF 계산에 사용하기에 간단하고 정확하다. 또한, 다양한 선원 체적에 대한 핵종 ⁶⁰Co 및 ⁸⁸Y의 j 값은 Table 3에 열거되어 있다.

Table 3. Penelope Simulated Integration of Efficiency Values for Cylindrical and Marinelli Beaker Sources

Energy (keV)	Volume	Efficiency	Volume	Efficiency
1173.24	50	0.0204	450	0.0148
1332.50		0.01812		0.0125
898.04		0.0264		0.0145
1836.02		0.0138		0.00761
1173.24	100	0.0191	600	0.107
1332.50		0.01784		0.129
898.04		0.0253		0.0132
1836.02		0.1259		0.00649
1173.24	200	0.0173	800	0.0778
1332.50		0.0157		0.00957
898.04		0.0239		0.100
1836.02		0.108		0.00418
1173.24	400	0.0152	1000	0.00649
1332.50		0.0129		0.008814
898.04		0.0165		0.00892
1836.02		0.00832		0.00371

⁶⁰Co 및 ⁸⁸Y에 대한 Eq. (4), (5)에서 얻은 시뮬레

이전 동시합산 보정 계수(CSCFsimu) 값은 Table 4, 5에 나타내었다.

CSCF 값은 ^{133}Ba (80.99 keV, 276.39 keV, 302.85 keV, 356.01 keV)은 원통형 선원 및 ^{152}Eu (244.7 keV, 443.93 keV 778.9 keV, 1212.97 keV) Marinelli 선원을 사용하여 시뮬레이션 하였다.

Table 4. The Simulated Coincidence Summing Correction Factors for Cylindrical Source

Volume	Energy (keV)	CSFsimu	CSFcal
50	1173.24	0.0205	0.0203
	1332.50	0.0182	0.0180
	898.04	0.0273	0.02271
	1836.02	0.0141	0.0140
100	1173.24	0.0194	0.0192
	1332.50	0.0180	0.0178
	898.04	0.0254	0.0255
	1836.02	0.128	0.0127
200	1173.24	0.0177	0.0176
	1332.50	0.0160	0.0159
	898.04	0.0244	0.0242
	1836.02	0.112	0.111
400	1173.24	0.0156	0.0155
	1332.50	0.0132	0.0131
	898.04	0.0167	0.0166
	1836.02	0.0086	0.0084

Table 5. The Simulated Coincidence Summing Correction Factors for Marinelli Beaker Source

Volume	Energy (keV)	CSFsimu	CSFcal
450	1173.24	0.0129	0.0127
	1332.50	0.0100	0.0098
	898.04	0.0152	0.0151
	1836.02	0.00844	0.00841
600	1173.24	0.01197	0.01196
	1332.50	0.00974	0.00972
	898.04	0.01497	0.01495
	1836.02	0.0086	0.0084
800	1173.24	0.01087	0.01086
	1332.50	0.00956	0.00953
	898.04	0.01389	0.01387
	1836.02	0.00843	0.00842
1000	1173.24	0.00962	0.00960
	1332.50	0.0923	0.0921
	898.04	0.0193	0.0192
	1836.02	0.00783	0.00781

III. RESULTS

Fig. 6에서 측정된 스펙트럼은 Gamma Vision 프로그램을 사용하여 분석하였으며 검출기에서 표준 부피선원(^{133}Ba , ^{152}Eu , ^{60}Co)의 저에너지 영역 50 keV 부터 2000 keV까지 측정치와 계산치의 오차는 2.5% 이내에서 잘 일치하였다.

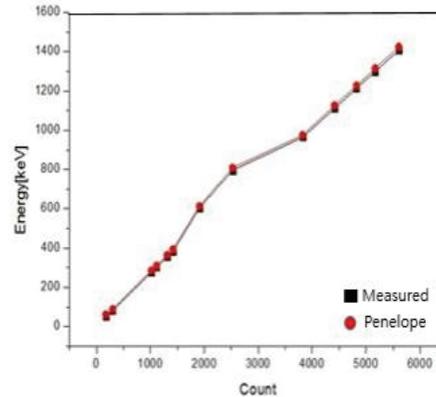


Fig. 6. Energy Calibration with γ -rays from ^{133}Ba , ^{152}Eu , ^{60}Co Sources.

Fig. 7은 동시계측보정 전·후 ^{152}Eu 에너지 전체 피크 효율 곡선을 나타내었다. 검은 점모양은 에너지에 따른 피크 효율은 일정한 경향성을 보이지 않고 몇몇 에너지에서 어깨곡선처럼 부드럽게 이어지지 않음을 확인할 수 있다. 각각의 에너지 데이터와 피크 효율 곡선간 차이가 다소 있음을 확인하였다.

그러나 붉은 둥근 점은 보정 후 에너지 데이터와 피크 효율 곡선 간 차이가 줄어들었음을 확인하였다.

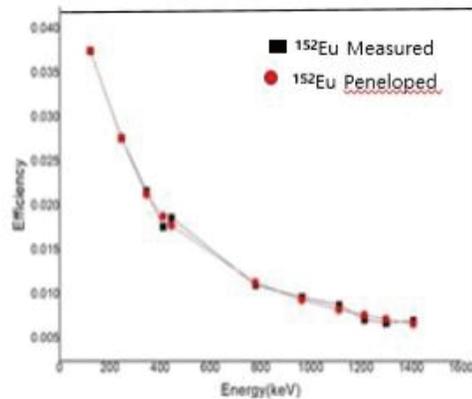


Fig. 7. Comparison between the Measured and Simulated ^{152}Eu Source

Fig. 8에서 볼 수 있듯이 다중 산란은 최저범위의 광자에너지가 증가하면 결정 활성 부피에서 산란된 광자의 확률은 에너지가 증가하면 전체피크 효율이 서서히 떨어짐을 확인하였다.

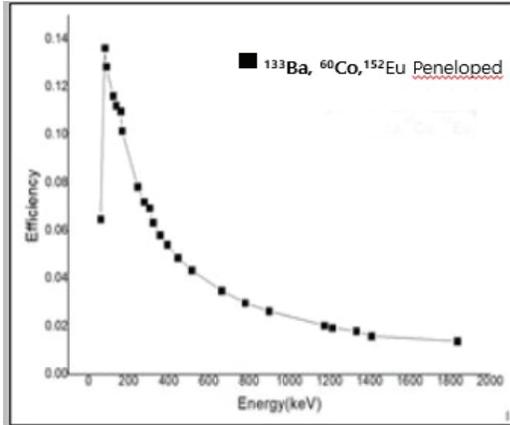


Fig. 8. The Simulated Full Peak Efficiencies.

또한 Fig. 9는 ^{60}Co , ^{88}Y 2개 이상의 감마선을 연속적으로 방출하는 방사성 핵종에서 1,000 keV 이상의 감마선에 대한 피크 효율 교정을 위해 교정용 선원 중에서 연속적으로 감마선을 방출하는 ^{60}Co 의 전산모사 측정을 통해 1% 이내에서 잘 일치하였음을 확인하였다.

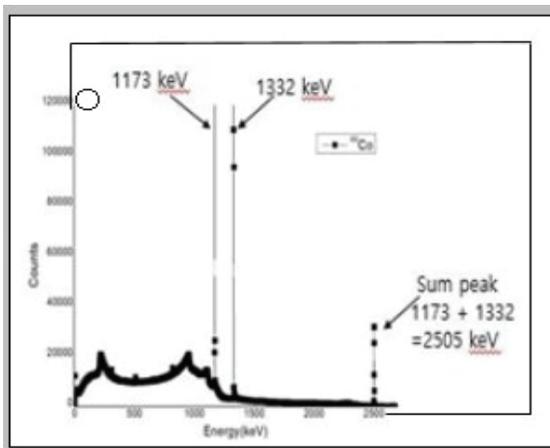


Fig. 9. Simulation Spectra of ^{60}Co obtained using the PENELOPE.

Fig. 10, 11는 다양한 부피의 단일 광전 상호작용에서 감마선의 전체 에너지 피크 효율은 검출기 측정중심으로부터 높이에 따라 약 122.06 keV 미만의

에너지에 대해서만 우세하기 때문에 낮은 에너지 범위에서 최대 에너지 피크와 효율은 서로 가깝다. 높은 광자 에너지에서, 산란된 광자의 광전 흡수가 전체 광자 에너지 흡수보다 콤프턴 산란의 확률 때문에 전체 에너지 피크 효율이 총 효율보다 빠르게 떨어짐을 확인하였다. 따라서 높이가 검출기로부터 각 에너지의 부피선원 50 ml에 대해서는 오차 3% 이내에서 변화를 보이고 있다. 이와 같이 Eq. (7)에 따라 동시합성 보정 피크 효율에 $\pm 2\%$ 이내에서 잘 일치하였음을 확인할 수 있었다.

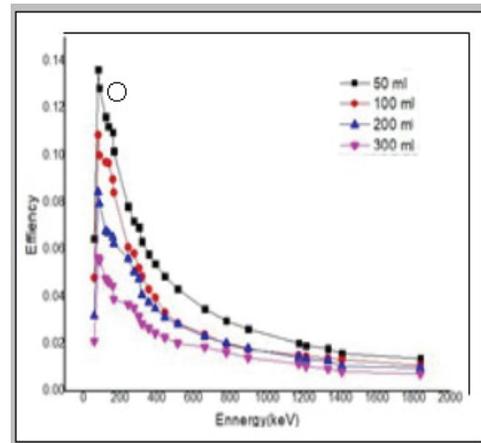


Fig. 10. Simulated Peak and Total Efficiencies for Cylindrical Beaker Source.

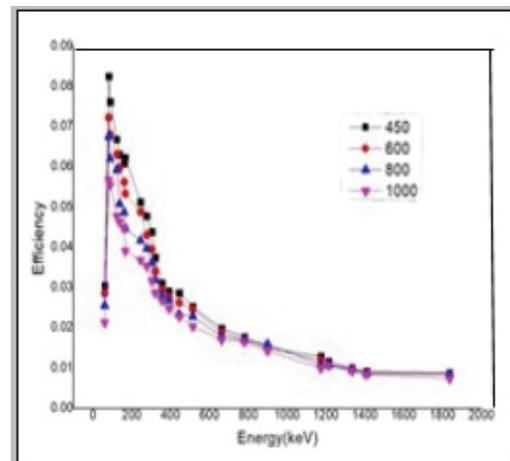


Fig. 11. Simulated Peak and Total Efficiencies for Marinelli Beaker Source.

Table 6, 7과 같이 ^{133}Ba 와 ^{152}Eu 의 CSF값을 얻기 위해 Eq. (7) - (10)에서 제안된 시뮬레이션 방법을

적용결과를 나타내었다.

Table 6, 7에서 낮은 에너지에서는 각 선원 체적 (50 ~ 300 ml)에 대한 효율 값이 작고 높은 에너지 범위에서는 크게 증가한다. 시뮬레이션 결과 최대 4% 인 50 ml 및 300 ml를 제외하고 모든 선원 부피에 대해 2.5% 이내에서 잘 일치하였다. ^{152}Eu 의 경우 450 ~ 1000 ml의 경우 각 광자 에너지에 대한 선원 부피가 증가함에 따라 감소함을 Eq. (8), (9)를 통해 잘 일치함을 확인하였다.

원통형 선원의 경우 J값은 50 ml 302.85 keV 0.0361, 100 ml에서는 0.0327, 300 ml에서 0.0295, 그리고 400 ml에서는 0.0227, Marinelli 선원의 경우 J 값은 450 ml 778.9 keV값은 0.027이며 600 ml 0.021, 800 ml 0.0185, 1000 ml에서 0.0127로 근접한 접촉으로 인해 더 큼을 확인하였다. Table 6, 7에서 각각의 다중 감마선 핵종에 대해, 높은 광자 에너지에서 더 큰 효율값 때문에 낮은 광자 에너지에서는 CSCFsimu 값이 다소 더 크며, 이는 효율값과 CSCFsimu 값 사이에 역 관계가 있음을 의미함을 확인할 수 있었다. CSCFsimu 값은 계산된 결과와 비교하여 2%에 해당하는 불확도를 보여 아주 잘 일치하였음을 확인하였다.

Table 6. The Simulated Coincidence Summing Correction Factors of ^{133}Ba for Cylindrical Source

Volume	Energy (keV)	CSCFsimu	CSCFcal
50	80.99	0.136	0.134
	276.39	0.0721	0.0720
	302.85	0.0695	0.0693
	356.01	0.0582	0.0581
100	80.99	0.01164	0.01163
	276.39	0.00693	0.00692
	302.85	0.0659	0.00658
	356.01	0.0533	0.00532
200	80.99	0.01087	0.01087
	276.39	0.00651	0.00650
	302.85	0.0602	0.00600
	356.01	0.0518	0.0516
400	80.99	0.00845	0.00844
	276.39	0.00535	0.00534
	302.85	0.00476	0.00475
	356.01	0.00395	0.00395

Table 7. The Simulated Coincidence Summing Correction Factors of ^{152}Eu for Marinelli Beaker Source

Volume	Energy (keV)	CSCFsimu	CSCFcal
450	244.7	0.0513	0.0512
	443.93	0.0287	0.0282
	778.9	0.0170	0.0167
	1212.97	0.01093	0.01092
600	244.7	0.04885	0.04882
	443.93	0.02623	0.02620
	778.9	0.01701	0.01700
	1212.97	0.01093	0.01091
800	244.7	0.04172	0.04171
	443.93	0.02338	0.02334
	778.9	0.01698	0.01696
	1212.97	0.01078	0.01074
1000	244.7	0.03684	0.03680
	443.93	0.02287	0.02286
	778.9	0.01654	0.01654
	1212.97	0.00841	0.00840

IV. DISCUSSION

PENELOPE 코드를 사용하여 HPGe 계측기 모사, 동시계측보정계수 계산을 수행하였다. 단일 점 선원(^{60}Co , ^{88}Y)로부터 방출되는 감마선 에너지 및 효율값들에 대해 동시합성 효과를 보정하였다. 결과에서 알 수 있듯이 감마선의 에너지에 따라 그리고 선원의 높이의 차이에 따라 동시합성 효과가 감소 및 증가함을 확인하였다.

V. CONCLUSION

PENELOPE에서 각 에너지 피크 및 효율로부터 일치 합산 보정 계수를 계산하고 ^{133}Ba , ^{152}Eu , ^{60}Co , 에 대한 결과, 보정계수를 적용한 값들이 2% 이내, 또한 j값은 3%이내에서 잘 일치함을 확인하였다. 이는 계측 시 동시계측효과에 대한 보정이 실효성이 있음을 의미한다.

또한, 이를 기반으로 다양한 선원 및 환경시료 측정 시 검출 효율성을 개선할 수 있는 이점이 있음을 확인할 수 있다.

Acknowledgement

본 논문은 2021년도 정부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No, 2020R1G1A1099949).

Reference

- [1] S. B. Samat, Y. Oi, M. Taki, I. Manabe, M. Yoshida, K. Minami, Characteristics of prepared gamma-ray calibration sources for radioactivity measurement of environmental and radiation control samples, Japan Atomic Energy Research Institute, JAERI-Tech 95-010, 1995.
- [2] K. Debertin, U. Schotzig, "Coincidence summing correction in Ge (Li) spectrometry at low source-to-detector distances", Nuclear Instruments and Methods, Vol. 158, pp. 471-477, 1979.
- [3] 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. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2014.08.032>
- [4] Anas M. Ababneh, Molham M. Eyadeh, "Coincidence summing corrections in HPGe gamma-ray spectrometry for Marinelli-beakers geometry using peak to total (P/T) calibration", Journal of Radiation Research and Applied Sciences, Vol. 8, No. 3, pp. 323-327, 2015.
- [5] F. Salvat, J. M. F. Varea, J. Sempau, "PENEL OPE 2003- A code system for Monte Carlo simulation of electron and photon transport", Workshop Proceeding, Issy-les Moulineaux, France, 7-10 July, OECD, 2003.
- [6] E. S. Jang, B. S. Jang, "A Germanium Detector Structure PENEL OPE Characteristic Analysis by Computer Simulation", Vol. 9, No. 2, pp. 73-77, 2015. <https://doi.org/10.7742/jksr.2015.9.2.73>
- [7] S. Hauf, Ma. Kuster, M. Batic, et. al., "Radioactive decays in Geant4", IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 60, No. 4, pp. 2966-2983, 2013. <http://dx.doi.org/10.1109/TNS.2013.2270894>
- [8] S. Hurtado, M. García-León, R. García-Tenorio, "GEANT4 code for simulation of a germanium gamma-ray detector and its application to efficiency calibration", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Vol. 518, No. 3, pp. 764-774, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2003.09.057>
- [9] K. Debertin, U. Schötzig, "Coincidence summing corrections in Ge (Li)-spectrometry at low source-to-detector distances", Nuclear Instruments and Methods, Vol. 158, pp. 471-477, 1979. [http://dx.doi.org/10.1016/S0029-554X\(79\)94845-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0029-554X(79)94845-6)
- [10] 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)
- [11] 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. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2014.08.032>
- [12] 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, No. 1, pp. 554-557, 2007. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nimb.2006.12.056>
- [13] 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>
- [14] A. M. Ababneh, M. M. Eyadeh, "Coincidence summing corrections in HPGe gamma-ray spectrometry for Marinelli-beakers geometry using peak to total (P/T) calibration", Journal of Radiation Research and Applied Sciences, Vol. 8, No. 3, pp. 323-327, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jrras.2015.05.003>

- [15] M. S. Badawi, S. I. Jovanovic, A. A. Thabet, A. M. El-Khatib, A. D. Dlabac, B. A. Salem, M. M. Gouda, N. N. Mihaljevic, K. S. Almugren, M. I. Abbas, "Calibration of 4π NaI(Tl) detectors with coincidence summing correction using new numerical procedure and ANGLE4 software", *AIP Advances*, Vol. 7, No. 3, pp. 035005, 2017.
<http://dx.doi.org/10.1063/1.4978214>
- [16] 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>
- [17] M. Blaauw, S. J. Gelsema, "Cascade summing in gamma-ray spectrometry in marinelli-beaker geometries: the third efficiency curve", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 505, pp. 311-315, 2003.
[http://dx.doi.org/10.1016/S0168-9002\(03\)01075-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0168-9002(03)01075-1)
- [18] M. C. Lépy, T. Altitzoglou, M. J. Anagnostakis, M. Capogni, A. Ceccatelli, P. De Felice, M. Djurasevic, P. Dryak, A. Fazio, L. Ferreux, A. Giampaoli, J. B. Han, S. Hurtado, A. Kandic, G. Kanisch, K. L. Karfopoulos, S. Klemola, P. Kovar, M. Laubenstein, J. H. Lee, J. M. Lee, K. B. Lee, S. Pierre, G. Carvalhal, O. Sima, Chau Van Tao, Tran Thien Thanh, T. Vidmar, I. Vukanac, M. J. Yang, "Intercomparison of methods for coincidence summing corrections in gamma-ray spectrometry--part II (volume sources)", *Applied Radiation and Isotopes*, Vol. 70, No. 9, pp. 2112-2118, 2012.
<https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2012.02.079>
- [19] M. Y. Kang, G. M. Sun, J. H. Kim, H. D. Choi, "Determination of HPGe peak efficiency for voluminous gamma-ray sources by using an effective solid angle method", *Applied Radiation and Isotopes*, Vol. 116, pp. 69-76, 2016.
<https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2016.07.015>
- [20] T. M. Semkow, G. Mehmood, P. P. Parekh, M. Virgil, "Coincidence Summing in Gamma-Ray Spectroscopy", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 290, No. 2, pp. 437-444, 1990.
[http://dx.doi.org/10.1016/0168-9002\(90\)90561-J](http://dx.doi.org/10.1016/0168-9002(90)90561-J)

실린더 및 확장 소스 PENELOPE 시뮬레이션에 대한 동시합성보정 계수 유용성 평가

장은성¹, 장보석^{2,*}

¹고신대학교복음병원 방사선종양학과

²김천대학교 방사선학과

요 약

PENELOPE Code를 사용하여 에너지 및 효율 교정하기 위해 부피선원을 사용하여 PENELOPE simulation 하였다. 여기서 동시 계측 보정하여 피크 효율 및 유용성을 검증하고자 한다. 모든 부피에 대한 일치 합산 보정을 계산을 위해 먼저 실린더 및 마리넬리 비커 4개의 부피를 3개의 높이로 다시 세분화 한다. 따라서 3개의 영역에서의 동시계측보정계수와 부피선원 전체에 대한 동시계측보정계수가 출력으로 산출하게 된다. 부피선원의 영역별 효율 정보를 포함한 검출기입력파일은 Penelope 시뮬레이션을 사용하여 획득한다. 낮은 에너지에서는 각 소스 체적(50~300 ml)에 대한 J값이 작고 높은 에너지 범위에서는 크게 증가한다. 시뮬레이션 결과 최대 4%인 50 ml 및 300 ml를 제외하고 모든 선원 부피에 대해 2.5% 이내에서 잘 일치하였다. 이는 계측 시 동시계측효과에 대한 보정이 실효성이 있음을 의미한다. 또한, 이를 기반으로 다양한 선원 및 환경시료 측정 시 검출 효율성을 개선할 수 있는 이점이 있음을 확인할 수 있다.

중심단어: 몬테카를로 전산모사, 동시합성보정계수, 부피선원, 전체 피크효율

연구자 정보 이력

	성명	소속	직위
(제1저자)	장은성	고신대학교복음병원 방사선종양학과	주임/연구원
(교신저자)	장보석	김천대학교 방사선학과	교수