

Research and Verification of Distance and Dead Thickness Changes of Coaxial HPGe Detectors using PENELEOPE Simulation

Eun-Sung Jang¹, Byung-In Min^{2,*}

¹Department of Radiation Oncology, Kosin University gospel Hospital

²Department of Radiation Chemistry, Inje University

Received: February 21, 2023. Revised: April 11, 2023. Accepted: April 30, 2023.

ABSTRACT

Based on the actual shape of the detector and the data provided by the manufacturer, the shape of the detector was implemented through Penelope simulation and applied to the appropriate four-layer thickness based on the efficiency obtained from the measurements. Efficiency calculations to determine the effect of the simulated number of Full Energy Peak Efficiency (FEPE) channels in the detector and the outside contact layer in the crystal on the Full Energy Peak Efficiency were performed for various four-layer thicknesses of 0.3, 0.5, 0.7, 1.0, 1.2, and 1.4 mm using the Penelope Code. When the thickness of the external contact layer was increased by 5 times, the Full Energy Peak Efficiency decreased by about 36% for 59.50 keV, and the Full Energy Peak Efficiency decreased by 10% for 1836. In addition, as it increased by 10 times, the Full Energy Peak Efficiency decreased by about 20% for 59.54 keV, and 7% for 1836.01 keV. The Penelope simulated Full Energy Peak Efficiency channel decreases exponentially with the increase in the four layers. In addition, it was confirmed that the total effect curve was well matched with a relative difference of less than 3.5% in the 0.3–1.4 mm dead layer thickness region. However, it was found that the inhomogeneous dead layer is still a parameter in the Monte Carlo model.

Keywords: Outside contact layer, HPGe : High Purity Germanium, PENELOPE : Penetration and ENergy LOss of Positrons and Electrons, FEPE: Full Energy Peak Efficiency

I. INTRODUCTION

방사선을 측정함에 있어 측정 장비마다 기하학적 형상은 같으나 제조사에서 제공한 물리적 특징이 다르기 때문에 효율이 달라진다. 따라서 정확한 각각의 에너지에 대한 에너지 값 및 효율 값을 구하기 위해서는 방사능 선원의 검증이 필요하다.

방사성 선원의 검증은 표준 선원이 없을 때 필수적인 문제를 고려한다. 이 문제를 극복하기 위해 선원과 검출기의 기하학에 대한 검출기 형상이 필요하다^[1]. 방사능 선원의 정량적 분석에 감마선 검출기를 활용하기 위한 필수 요건은 특정 선원과 검

출기에 대한 전체 에너지 피크 효율(Full Energy Peak Efficiency : FEPE)의 측정 또는 계산이다. 각 샘플의 측정 조건에 적합한 검출기 효율에 대한 정확한 정보가 필요하다^[1-3]. 측정 기하학, 샘플 유형, 부피 등과 같은 조건의 다양성을 감안할 때 실험 기반만으로는 완전한 보정을 얻을 수 없다. 고순도 게르마늄(High Purity Germanium : HPGe) 검출기의 최대 에너지 효율을 정확하게 결정하려면 검출기의 정확한 치수를 알아야 한다. 하우징의 재질 구성 및 창두께, 결정 직경 및 길이, 검출기 체적, 하우징 내부의 결정 위치 및 사층 두께를 알아야 한다^[4-8].

그러나 사층 두께는 전체에너지피크 효율에 영

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

향을 미치는 결정적인 매개변수이다. 사층은 반도체 접합을 얻기 위해 리튬 원자로 도핑 된 외부 표면에 가까운 공핍되지 않은 검출기 영역에 해당한다. 광자는 crystal의 활성 부피에 들어가기 전에 이 영역을 통과해야 하고 계산된다. 이 영역의 두께는 리튬 원자가 게르마늄 결정 내부로 지속적으로 확산되어 시간이 지남에 따라 사층 두께가 증가하기 때문에 제조사의 정보가 실제 두께와 다를 수 있다⁵⁻⁸⁾. 따라서 Penelope (PENetration and Energy Loss of positrons and Electron) simulation에서 얻은 결과를 최적화하기 위해 사층 두께는 계산 및 측정된 효율성이 서로 일치시켰다가 조율하여 맞추는 과정을 통해 일치하였다. Penelope Code를 사용한 몬테카를로 시뮬레이션을 검출기의 에너지 및 효율성 교정을 위해 사용하였다. 계산 능력이 향상되고 다양한 유형의 컴퓨터 코드가 사용 가능해짐에 따라 검출기 시스템의 몬테카를로 시뮬레이션은 실험 효율성 교정을 대체하거나 보완하게 되었다⁹⁻¹⁴⁾. 표준 혼합 선원을 사용하여 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 컴퓨터 모델을 구축하여 효율성 보정을 결정하는 것은 감마선 분광법의 일반적인 관행이다¹⁵⁻¹⁹⁾. 따라서 본 연구는 검출기의 실제 모양과 제조사에서 제공한 데이터를 기준으로 Penelope simulation을 통해 검출기 모양을 구현하며 측정치에서 얻은 효율을 기준으로 하여 적합한 사층 두께에 적용하였다. 검출기의 simulation 된 전체 에너지 피크 효율 채널수와 다양한 사층 두께에 대한 비율을 통해 효율에 미치는 영향을 검증하고자 한다.

II. MEASUREMENT METHODS

1. 에너지 및 효율 교정

교정을 하기 위해 p-type의 동축형 HPGe 검출기가 있는 감마 분광계 GEM 30185(ORTEC)를 사용하였으며, ⁶⁰Co 동위원소의 1332 keV 감마선에서 30 %의 상대 효율과 1.78 keV 에너지 분해능을 갖는다. 에너지 및 효율 교정 철자는 교정선원 저에너지 50 keV 영역부터 고 에너지 2000 keV 영역인 표준혼합 감마선원 ²⁴¹Am, ¹⁰⁹Cd, ⁵⁷Co, ¹³⁹Ce, ⁵¹Cr, ¹¹³Sn, ⁵¹Cr, ¹¹³Sn, ⁸⁵Sr, ¹³⁷Cs, ⁶⁰Co, ⁸⁸Y 50 ml 원통형을 사용하여 측정하였다. 표준 혼합선원의 감마 스

펙트럼 측정은 에너지, FWHM(Haft Maximum의 전폭) 및 전체 에너지 피크 효율을 보정하고¹⁵⁾, 검출기에 대한 몬테카를로 시뮬레이션의 검증을 위해 계수하였다. Fig. 1과 같다.

또한 측정치와 계산치를 비교하였다. 에너지 및 효율은 Gamma Vision을 통해 분석하였다²⁰⁾.

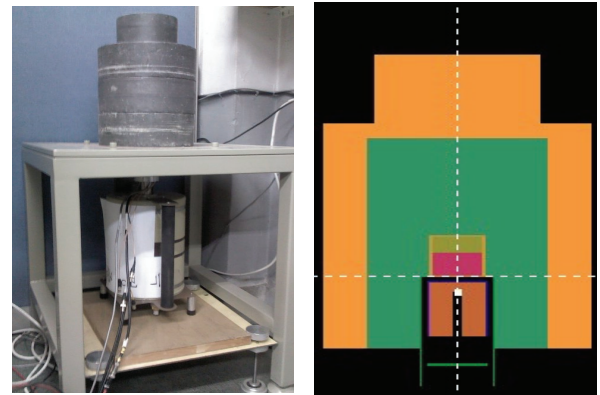


Fig. 1. Comparison of Experiments Setup with Detector Simulation.

교정에 필요한 선원의 정보는 Table 1에 나타나 있다.

Table 1. Single Line and Multi Gamma Ray Nuclides 50 ml Crm Source

Nuclide	Energy (keV)	Activity (Bq)
²⁴¹ Am	59.50	8542
¹⁰⁹ Cd	88.02	19973
⁵⁷ Co	122.06	702
	136.47	702
¹³⁹ Ce	165.85	687
⁵¹ Cr	320.08	18715
¹¹³ Sn	391.69	1304
⁸⁵ Sr	514.00	1333
¹³⁷ Cs	661.66	1268
	898.02	3461
⁸⁸ Y	1836.01	3461
	1173.24	1693
⁶⁰ Co	1332.50	1693

에너지 교정 수치를 구하기 위해, 직선 맞춤은 Eq. (1), (2)가 이용된다.

$$E(keV) = a_1 \times Channel + b_2 \quad (1)$$

$$E(keV) = a_1 \times Counts + b_2 \quad (2)$$

$$y_1 = a \times x_1 + b$$

$$y_2 = a \times x_2 + b$$

$$a = (y_1 - y_2) / (x_1 - x_2)$$

$$b = [(y_1 + y_2) - a(x_1 + x_2)] / 2$$

기준 에너지 교정 기능은 오프셋이 0이고 채널당 0.15 keV 이다. 에너지는 0.53 keV 이상의 변화가 관찰되면 교정을 하였다. 또한, 피크효율은 교정요소를 적용하여 효율성이 정해졌을 시, 전체적인 효율성 커브는 비선형 최소 제곱법을 적용하여 다항식 로그 함수의 사승에 측정 점들을 피팅하여 Eq. (3)을 통해 구하였다.

$$\epsilon(E) = \frac{N(E)}{A \cdot P_\gamma \cdot C} \quad (3)$$

- $\epsilon(E)$: 감마에너지 E에서 검출기 계수효율,
- $N(E)$: 감마선 에너지 E의 스펙트럼 Peak의 실계수율
- A : 측정선원의 방사능(Bq)
- P_γ : 감마선 방출확률
- C : 측정선원의 자체흡수, 동시합성, 방사성핵종의 붕괴 시간 등에 의한 보정

1.1. 비선형 함수

효율성과 에너지 사이의 관계를 구한 다음 400 keV 미만의 핵종에 대한 효율에 미치는 영향을 결정하기 위해 이 방법을 사용했다. 관심 있는 에너지 영역에서 충분한 수의 데이터가 실험적으로 획득되면 에너지의 함수로서 효율성을 나타내는 방법을 선택해야 한다.

적합 절차는 효율성 데이터를 분석 Eq. (4)에 사용된다. 일반적으로 사용되는 효율성(σ)의 간단한 표현은 아래와 같이 나타낸다.

$$\epsilon = \frac{P_1 + P_2 \ln(E) + P_3 \cdot \ln^2(E) + P_4 \ln^3(E) + P_5 \ln^5(E) + P_6 \ln^7(E)}{E} \quad (2)$$

여기서 에너지는 keV, 50 keV에서 2000 keV까지의 감마 에너지 효율을 결정하는데 적합하다. 방사선 에너지에 대한 효율의 의존성은 실험적으로 그리고 그레이와 아흐마드 적합 함수를 사용하여 결정되었다^[6].

2. Penelope simulation

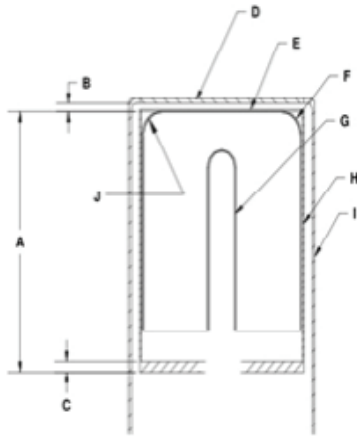
PENELOPE는 "PENetration and Energy Loss of positrons and Electron"에서 파생되었다^[22]. 임의의 재료와 복잡한 사변형 기하학에서 결합된 전자-광자 수송의 몬테카를로 시뮬레이션을 수행한다. 혼합 절차는 전자 및 양전자 상호 작용 (탄성 산란, 비탄성 산란 및 bremsstrahlung 방출)의 시뮬레이션에 사용되며, 광자 상호 작용 (레일리 산란, Compton 산란, 광전 효과 및 전자-양전자 쌍 생성) 및 양전자 소멸은 이벤트별로 시뮬레이션 된다. 특히 Penelope는 simulation에 따라 검출기의 특성을 전자 모사 하도록 구성되어 있다.

2.1. Penelope Code model

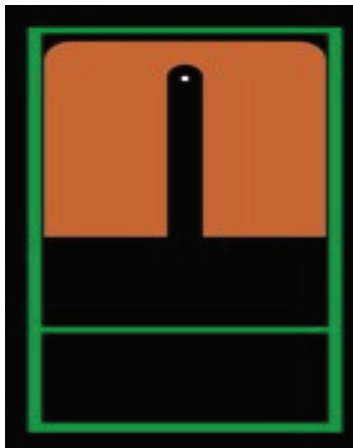
p-type의 동축형 HPGe 검출기가 있는 감마 분광 Penelope 시뮬레이션에 사용되었다 Fig. 2 (a) ~ (c)와 같다. Table 2는 검출기 모델에 대한 파라미터가 제조업체로부터 검출기의 활성 부피, 엔드 캡 입구 윈도우와 관련된 crystal의 위치는 얻어질 수 있지만 검출기의 둔감한 영역의 두께, 특히 접점의 사층의 두께와 관련하여 상당한 불확실성이 종종 남아 있다.

Table 2. Detector dimensions as specified by Monte Carlo simulations

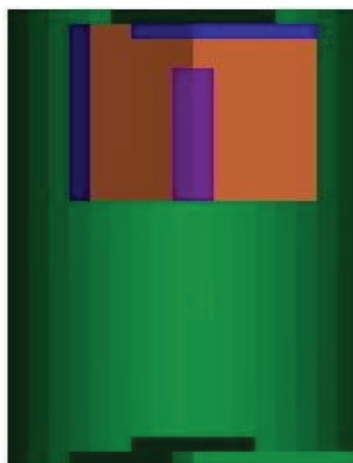
Miscellaneous Detector Assembly Dimensions and materials			
ID	Dimension	Description	Material(s)
A	94 mm	Mount cup, Length	Aluminum
B	3 mm	end cap to crystal gap	N.A.
C	3.2 mm	Mount cup base	Aluminum
D	1.3 mm	end cap window	Aluminum
E	0.03 mm	Insulator/shield	Mylar/ Aluminized mylar
F	700 microns	outside contact layer	Ge with Lithium ions
G	0.3 microns	Hole contact layer	Ge with Boron ions
H	0.76 mm	Mount cup wall	Aluminum
I	1.3 mm	End cap wall	Aluminum



(a) Characteristics of HPGe detector as provided by the manufacturer



(b) Construction of p-type HPGe detector of GEM30185 simulated by the PENELOPE code

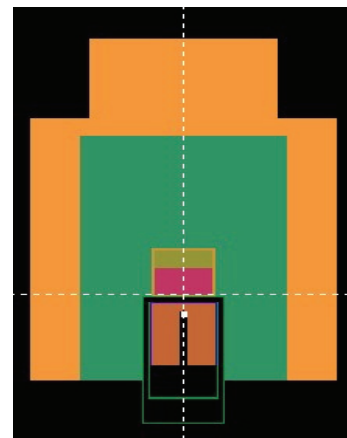


(c) Detector model used in Monte Carlo simulation for PENELOPE 3D image

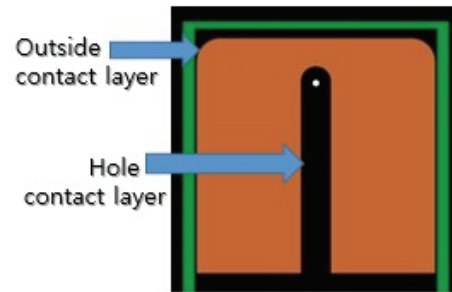
Fig. 2. Simulation comparison with data provided by manufacturer of HPGe detector.

3. 외부 접촉 층 두께의 영향

Penelope simulation을 사용하여 50 keV에서 2,000 keV에 이르는 9개의 다른 감마 에너지에 대한 Ge crystal의 사층 두께에 영향을 측정하였다. 광자는 검출기 엔드 창 표면 2.5 cm에 표준혼합선원을 위치 시켰다. Fig. 3-(a)와 같다. 모든 시뮬레이션에서 통계적 불확실성을 줄이기 위해 10^8 개의 광자가 생성되었다. 검출기의 효율을 측정하고 Penelope Code를 적용하여 사층 두께를 계산했다. Fig. 3-(b)와 같다.



(a) HPGe detector tor model used in cylindrical beaker for PENELOPE code



(b) HPGe detector tor model used in Monte simulation for PENELOPE

Fig. 3. Measurement of detector efficiency and application of Penelope code to four-layer thickness.

crystal의 Outside contact layer와 Hole contact layer가 전체 에너지 피크 효율에 미치는 영향을 결정하기 위한 효율 계산 Penelope Code를 사용하여 0.3, 0.5, 0.7, 1.0, 1.2, 1.4 mm의 다양한 사층 두께에 대해 수행하였다. Table 3과 같다.

Table 3. Calculation efficiencies of the HPGe detector for photopeaks of 59, 122, 514, 661, 898, 1173, 1332, 1836 keV 50 ml cylindrical beaker source

Nuclide	Energy (keV)	Thickness of Outside Contact dead layer (mm)						
		Reference	0.3	0.5	0.7	1.0	1.2	1.4
²⁴¹ Am	59.50	0.05435	0.04927	0.03602	0.02702	0.02039	0.01565	0.01053
¹⁰⁹ Cd	88.03	0.1418	0.13647	0.12292	0.1103	0.09128	0.07270	0.05853
	122.06	0.1352	0.12802	0.1198	0.1054	0.08982	0.06870	0.04861
⁵⁷ Co	136.5	0.01217	0.1189	0.1083	0.0994	0.07847	0.06553	0.04489
	165.85	0.009913	0.09427	0.08935	0.08535	0.07251	0.06219	0.04226
⁵¹ Cr	320.08	0.06292	0.06071	0.055883	0.05388	0.04528	0.03717	0.02869
	391.69	0.05739	0.05621	0.05458	0.05066	0.04413	0.03518	0.02526
⁸⁵ Sr	514.00	0.04436	0.04381	0.03712	0.03523	0.02711	0.02478	0.01831
¹³⁷ Cs	661.66	0.03612	0.03526	0.02832	0.02432	0.01838	0.01582	0.009563
⁶⁰ Co	1173.24	0.02093	0.01954	0.01688	0.01491	0.011217	0.009298	0.005012
	1332.50	0.01841	0.01772	0.014453	0.01396	0.009591	0.008521	0.004718
⁸⁸ Y	1836.01	0.01389	0.01293	0.010712	0.00912	0.007867	0.005737	0.002987

4. Penelope simulation 전체 에너지 피크 효율

면적 수와 다양한 사층 두께에 대한 비율 검증

²⁴¹Am 59.54 KeV 전체 에너지 피크 효율과 1173.24 keV 전체 에너지 피크 효율의 비율을 사용했다. 이러한 비율은 Penelope Code를 사용하여 다양한 사층 두께에 대해 계산된 후 실험 데이터에서 얻은 비율과 비교하여 Penelope simulation시 적절한 사층 두께를 추론하였다. 검출기의 각 구성에 대해 다음 식을 이용하였다 Eq. (4) - (6) 주어진 감마 에너지에서 기록된 전체 에너지 피크 효율 채널 계수는 선원 A(s-1)의 Activity에 따라 달라진다.

$$\begin{aligned} N_1 &= A \cdot \zeta_1 \cdot \epsilon_1 \cdot t \\ N_2 &= A \cdot \zeta_2 \cdot \epsilon_2 \cdot t \end{aligned} \quad (4)$$

감마 방출 확률: ζ , 기록된 시간: t (s) 및 FEPE ϵ 전체 에너지 피크 효율 면적 계수: 동일한 방사성 동위원소 선원의 에너지 E1과 E2에서 Activity A와 동일한 기록 시간 t 이다. 따라서 두 전체 에너지 피크 효율 면적 채널의 비율은 다음과 같다.

$$y(x) = \frac{N_1(x)}{N_2(x)} \quad (5)$$

$$y(x) = (\zeta_1 \epsilon_1) / (\zeta_2 \epsilon_2) \quad (6)$$

여기서, x 는 밀리미터 단위의 사층 두께이다.

Eq. (6)에 이어 시뮬레이션과 측정을 위해 선원과 검출기 시스템의 동일한 설정을 사용하였으며, 이 비율은 사용된 선원의 방사능과 그 오차, 기하학에 의존하지 않는다. 또한, 두 전체 에너지 피크 효율 영역의 시뮬레이션 비율은 Table 4, 5와 같다.

사층 두께가 다른 $y(x)$, x 는 Eq. (5)에 따라 계산되었으며, 전체 에너지 피크 효율 ϵ 는 Penelope Code를 사용하여 시뮬레이션 되었다. 측정 시 Ge 결정의 사층 두께는 측정된 2개의 전체 에너지 피크 효율 면적 카운트의 비율을 Eq. (4)로 사용하여 계산하였다.

Table 4. Full Energy Peak area Channel of 59.54 and 1173.24 keV photons and ratios (y) with different Outside contact layer thickness

Energy (keV)	Chan-nel	Outside Contact layer, x (mm)						
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.7	1.0
59.50	144	86	55	37	21	12	8	
1173.24	3745	3395	2856	2471	2186	1968	1847	
y(x)		0.036	0.022	0.019	0.014	0.0096	0.0061	0.0043

III. RESULT & DISCUSSION

1. 에너지 및 효율 교정

표준혼합선원을 이용한 에너지 교정은 저에너지 영역 50 keV부터 고 에너지 영역 2000 keV 까지 1% 이내의 오차범위로 잘 일치하였다. Fig. 4와 같다.

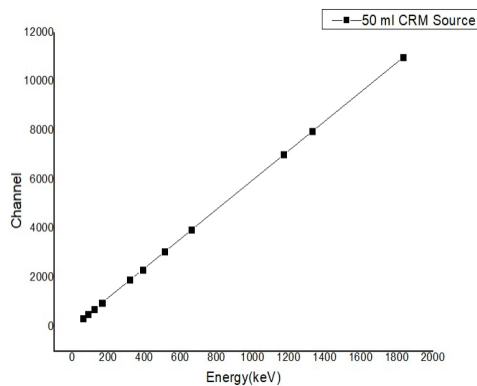


Fig. 4. Energy-channel calibration fitting of 50 ml CRM source.

측정에서 얻은 결과를 확인하기 위해 Fig. 2-(b)와 같은 검출기 기하학적 구조에 대한 전체 에너지 피크 효율을 계산하기 위해 Penelope Code을 사용하였다. 에너지 함수로서의 효율성 보정은 주어진 범위 (50 keV ~ 2000 keV)내의 모든 에너지에서 효율 값을 제공하며, 흑점들은 교정된 효율을 표준혼합 감마선 표준선원에 적용하여 얻은 측정치이며 붉은 점들은 Penelope simulation을 이용하여 얻은 효율을 나타낸 것이다. 또한 실선은 점들을 다항식 fitting 한 값이다. 측정치와 Penelope simulation 값은 2.5% 이내에서 오차범위로 잘 일치된다는 것을 확인하였다. Fig. 5와 같다.

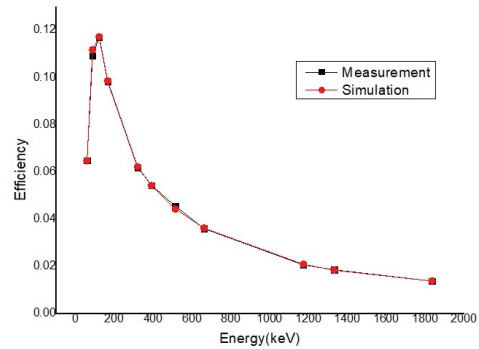


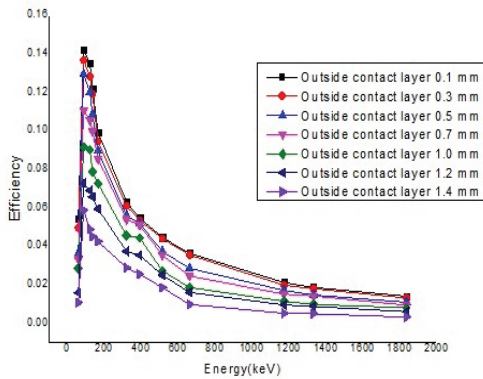
Fig. 5. Comparison of efficiency calibration measurement (back mark) and simulation (red mark) in the 50 ml CRM source.

2. 외부 접촉 층 두께의 영향

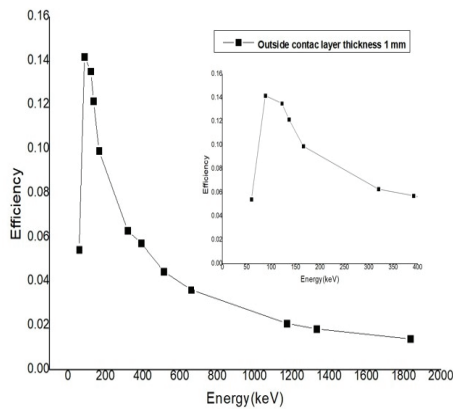
Table 3에서 외부 접촉 층 두께의 영향을 확인하기 위해 전체 에너지 피크 효율에서 crystal 층은 0.1 mm에서 1.4 mm의 값이 얻어질 때까지 사층 두께를 점진적으로 증가시켰다. Fig. 6-(a)에서 검출기 crystal의 사층 두께가 증가하면 전체 에너지 피크 효율이 감소하는 것으로 확인되었다. 따라서 에너지 값이 저에너지 (50~ 400 keV)는 검출기 활성 부피에 도달하여 에너지를 축적하고 전체 에너지 피크 효율에 기여하기 전에 해당 층에서 해된다는 것을 확인하였다.

Fig. 6-(c)에 나타난 바와 같이, 외부 접촉 사층 두께의 변화는 특히 저 에너지 영역 59.54 ~400 keV에 대해 전체 에너지 피크 효율에 상당한 영향이 있음을 확인하였다.

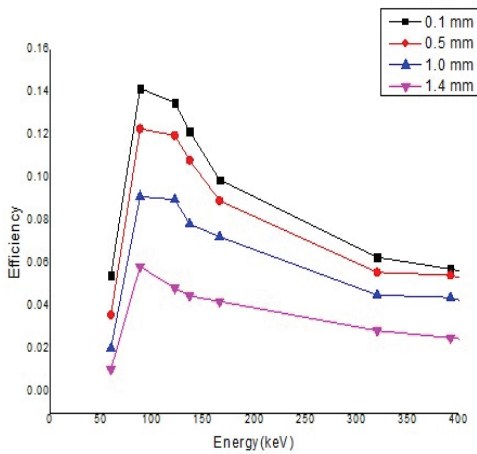
Fig. 6-(c)에서 외부 접촉 사층 두께가 5배 증가하였을 때, 59.54 keV의 경우 전체 에너지 피크 효율이 약 36% 감소하였으며, 1,836. 01 keV 경우 10% 감소하였다. 또한 10배 증가할수록 59.54 keV의 경우 전체 에너지 피크 효율이 약 20% 감소하였으며, 1,836. 01 keV 경우 7% 감소하였음을 확인하였다. 따라서, 에너지의 사층 두께증가에 따른 효율 감소는 차폐 및 부피효과에 의해서 확인하였다. Table 2에서 외부 접촉 사층 두께 700 μm의 사층 두께와 비교하면 0.3 μm 붕소 층 두께의 증가는 무시하였다. 59.54 keV 측정에서 0.05435의 효율을 얻었으며, 이는 해당 사층 두께 0.5mm로 이어짐을 확인하였다. 또한, 총 효과 곡선은 0.3 ~ 1.4 mm 사층 두께 영역에서 3.5% 미만의 상대적 차이로 잘 일치함을 확인하였다.



(a) Comparison of efficiency calibration measurement(back mark) and simulation (red mark) in the 50 ml CRM source



(b) Energy-Efficiency depending on the thickness of the Outside contact layer thickness 1 mm



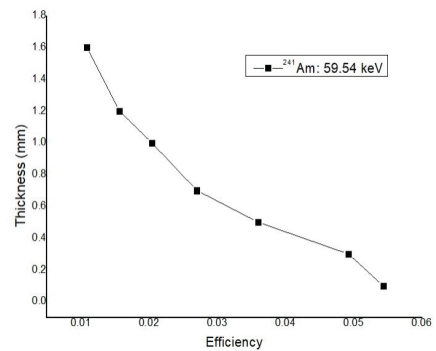
(c) Analysis PENELOPE varying dead layers thickness

Fig. 6. Analysis of the effect of outer contact layer thickness.

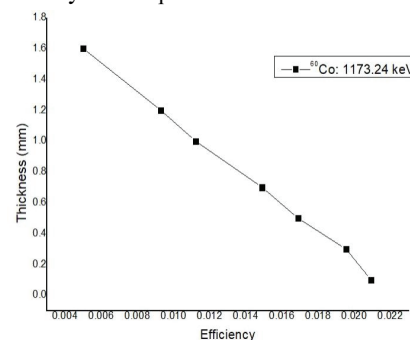
3. 전체 에너지 피크 효율 채널 수와 다양한 사층 두께에 대한 비율

Penelope simulation 된 전체 에너지 피크 효율 채널을 계산하기 위해 분석프로그램 Gamma Vision 소프트웨어 사용했다. 전체 에너지 피크 효율 채널의 불확실성은 감마 방출 확률의 불확실성과 Eq. (6)에 따른 오차에 의해 계산되었다. 효율성의 상대적 불확실성은 약 3% 미만이었으며, 이는 주로 표준선 원 불확실성에 의해 결정된 반면, 통계적 오차는 1.5% 미만 이었다.

Fig. 7-(a)에서 59.54 keV에서 Penelope simulation된 전체 에너지 피크 효율 채널은 사층 증가에 따라 기하급수적으로 감소한다. 59.54 keV 에너지의 감마선에 대한 이러한 큰 효율 감소는 물질에 대한 강한 흡수로 설명될 수 있다. Fig. 7-(b)에서 1,173.24 keV 광자의 전체 에너지 피크 효율 채널 수는 사층 증가와 함께 선형적으로 감소했다. 이러한 감소는 게르마늄 결정 부피의 감소에 의해 야기될 수 있다



(a) Determination of the dead layer thickness of efficiency Penelope simulation results : ²⁴¹Am



(b) Determination of the dead layer thickness of efficiency Penelope simulation results : ⁶⁰Co

Fig. 7. An Analysis of the Effect of Full Energy Peak Channel on Dead Layer.

Fig. 8은 사층 두께 변화에 따른 표준혼합 선원 중에서 방출되는 59.54 keV와 1173.24 keV 광자에 대한 Penelope simulation된 전체 에너지 피크 효율 채널계수와 그 비율을 보여주었다. Table 4와 같이 59.54 keV에서 사층이 0.1에서 1.0로 증가할 때 감소는 18회 감소하였다. 이러한 현저한 감소는 54.54 keV X선에 대한 두꺼운 사층의 강한 흡수로 설명됨을 알 수 있었다.

1173.24 keV 감마선이 p형 검출기용 결정의 비활성 외부 층을 쉽게 통과하기 때문에 1173.24 keV 전체 에너지 피크 효율 면적 채널은 동일한 사층 두께 증가에 대해 2배 감소함을 알 수 있었다.

Fig. 8에서 이 비율은 사층 증가와 함께 기하급수적으로 감소하고 1.0 mm 이상의 두께가 거의 일정한 것을 확인할 수 있었다.

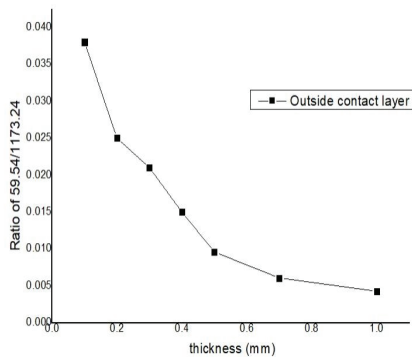


Fig. 8. Simulated ratio of 59.54 and 1173.24 keV FEP area channels versus the dead layer thickness.

IV. CONCLUSION

HPGe 검출기는 효율에서 얻은 측정 결과를 바탕으로 Penelope Code를 사용하여 적합한 외부접촉 사층 값을 적용하였다. 적용된 사층 두께를 사용하는 Penelope simulation된 전체 에너지 피크 효율과 측정 전체 에너지 피크 효율 값은 3% 미만으로 일치함을 확인하였다. 또한, 동일한 활성 부피와 상이한 사층 두께를 갖는 게르마늄 결정이 많이 필요하기 때문에 실험 검증이 매우 어렵기 때문에 Penelope simulation을 사용하여 계산 결과를 확인하고 양호함을 확인하였다. 그러나 비균질 사층이 몬테카를로

로 모델에서 여전히 매개변수라는 것을 알 수 있었다.

Reference

- [1] M. S. Badawi, M. M. Gouda, S. S. Nafee, A. M. El-Khatib, E. A. El-Mallah, "New analytical approach to calibrate the co-axial HPGe detectors including correction for source matrix self-attenuation", Applied Radiation and Isotopes, Vol. 70, No. 12, pp. 2662-2668, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2012.08.014>
- [2] W. Khan, Q. Zhang, C. He, M. Saleh, "Monte Carlo simulation of the full energy peak efficiency of an HPGe detector", Applied Radiation and Isotopes, Vol. 131, pp. 67-70, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2017.11.018>
- [3] N. Q. Huy, "The influence of dead layer thickness increase on efficiency decrease for a coaxial HPGe p-type detector", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, Vol. 621, No. 1-3, pp. 390-394, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2010.05.007>
- [4] M. Jurado Vargas, N. Cornejo Díaz, D. Pérez Sánchez, "Efficiency transfer in the calibration of a coaxial p-type HPGe detector using the Monte Carlo method", Applied Radiation and Isotopes, Vol. 58, No. 6, pp. 707-712, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0969-8043\(03\)00091-5](https://doi.org/10.1016/S0969-8043(03)00091-5)
- [5] J. Saegusa, K. Kawasaki, A. Mihara, M. Ito, M. Yoshida, "Determination of detection efficiency curves of HPGe detectors on radioactivity measurement of volume samples", Applied Radiation and Isotopes, Vol. 61, No. 6, pp. 1383-1390, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2004.04.004>
- [6] G. Hasse, D. Tait, A. Wiechen, "Determination of full energy peak efficiency for cylindrical volume sources by the use of a point source standard in gamma-spectrometry", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, Vol. 361, pp. 240-244, 1995. [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(95\)00130-1](https://doi.org/10.1016/0168-9002(95)00130-1)
- [7] J. P. Pérez-Moreno, E. G. San Miguel, J. P. Bolívar, J. L. Aguado, "A comprehensive calibration method of Ge detectors for low-level gamma-spectrometry measurements", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, Vol. 491, pp. 152-162, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(02\)01165-8](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(02)01165-8)

- [8] M. S. Dias, V. Cardoso, V. R. Vanin, M. F. Koskin "Combination of nonlinear function and mixing method for fitting HPGe efficiency curve in the 59–2754 keV energy range", *Applied Radiation and Isotopes*, Vol. 60, No. 5, pp. 683-687, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2003.10.011>
- [9] G. Xhixha, G. P. Bezzon, C. Broggin, G. P. Buso, A. Cacioli, I. Callegari, S. De Bianchi, G. Fiorentini, E. Guastaldi, M. Kaçeli Xhixha, F. Mantovani, G. Massa, R. Menegazzo, L. Mou, A. Pasquini, C. Rossi Alvarez, M. Shyti, "The worldwide NORM production and a fully automated gamma-ray spectrometer for their characterization", *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, Vol. 295, pp. 445-457, 2013. <https://doi.org/10.1007/s10967-012-1791-1>
- [10] J. Gasparro, M. Hult, P. N. Johnston, H. Tagziria, "Monte Carlo modelling of germanium crystals that are tilted and have rounded front edges", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, Vol. 594, No. 2, pp. 196-201, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2008.06.022>
- [11] E. Andreotti, M. Hult, G. Marissens, G. Lutter, A. Garfagnini, S. Hemmer, K. von Sturm, "Determination of dead-layer variation in HPGe detectors", *Applied Radiation and Isotopes*, Vol. 87, pp. 331-335, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2013.11.046>
- [12] J. Ródenas, A. Pascual, I. Zarza, V. Serradell, J. Ortiz, L. Ballesteros, "Analysis of the influence of germanium dead layer on detector calibration simulation for environmental radioactive samples using the Monte Carlo method", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, Vol. 496, No. 2-3, pp. 390-399, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(02\)01748-5](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(02)01748-5)
- [13] F. Courtine, T. Pilleyre, S. Sanzelle, D. Miallier, "Ge well detector calibration by means of a trial and error procedure using the dead layers as a unique parameter in a Monte Carlo simulation", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, Vol. 596, No. 2, pp. 229-234, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2008.07.155>
- [14] M. H. Bölükdemir, E. Uyar, G. Aksoy, H. Ünlü, H. Dikmen, M. Özgür, "Investigation of shape effects and dead layer thicknesses of a coaxial HPGe crystal on detector efficiency by using PHITS Monte Carlo simulation", *Radiation Physics and Chemistry*, Vol. 189, pp. 109746, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2021.109746>
- [15] M. T. Haj-Heidari, M. J. Safari, H. Afarideh, H. Rouhi, "Method for developing HPGe detector model in Monte Carlo simulation codes", *Radiation Measurements*, Vol. 88, pp. 1-6, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2016.02.035>
- [16] P. Dryak, P. Kovar, "Experimental and MC determination of HPGe detector efficiency in the 40–2754 keV energy range for measuring point source geometry with the source-to-detector distance of 25 cm", *Applied Radiation and Isotopes*, Vol. 64, No. 10-11, pp. 1346-1349, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2006.02.083>
- [17] Ahmed Azbouche, Belamri Mohamed, Tchakoua Theophile, "Study of the germanium dead layer influence on HP (ge) detector efficiency by Monte Carlo simulation", *Radiat Detect Technol Methods*, Vol. 2, pp. 1-6, 2018. <https://doi.org/10.1007/s41605-018-0074-y>
- [18] E. S. Jang, B. S. Jang, "A Germanium Detector Structure PENELOPE Characteristic Analysis by Computer Simulation", *Journal of the Korean Society of Radiology*, Vol. 9, No. 2, pp. 73-77, 2015. <https://doi.org/10.7742/jksr.2015.9.2.73>
- [19] E. S. Jang, H. Y. Lee, "Analysis of the Dead Layer Thickness effect and HPGe Detector by Penelope Simulation", *Journal of the Korean Society of Radiology*, Vol. 12, No. 7, pp. 801-806, 2018. <https://doi.org/10.7742/jksr.2018.12.7.801>
- [20] Gamma Vision, *Gamma-ray Spectrum Analysis and MCA Emulation for MS Windows, Software User's Manual*, version 32, V. 5.10. <https://www.ortec-online.com/products/application-software/gammavision>
- [21] J. Gasparro, M. Hult, P. N. Johnston, H. Tagziria, "Monte Carlo modelling of germanium crystals that are tilted and have rounded front edges", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, Vol. 594, pp. 196-201, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2008.06.022>
- [22] F. Salvat, J. M. Fernandez-Varea, J. Sempau, "PENELOPE, A code system for Monte Carlo simulation of electron and photon transport", *Workshop Proceeding, Issy-les Moulineaux, France*, pp. 7-10, 2003. <https://doi.org/10.1787/9d2cc3d5-en>

PENELEOPE 시뮬레이션을 이용한 동축 HPGe 검출기의 거리 및 외부 접촉 층 두께 변화 연구 및 검증

장은성¹, 민병인^{2,*}

¹고신대학교복음병원 방사선종양학과

²인제대학교 방사선화학학과

요 약

검출기의 실제 모양과 제조사에서 제공한 데이터를 기준으로 Penelope simulation을 통해 검출기 모양을 구현하며 측정치에서 얻은 효율을 기준으로 하여 적합한 사층 두께에 적용하였다. 검출기의 simulation 된 전체에너지피크 효율 채널수와 crystal의 Outside contact layer가 전체에너지피크 효율에 미치는 영향을 결정하기 위한 효율 계산은 Penelope Code를 사용하여 0.3, 0.5, 0.7, 1.0, 1.2, 1.4 mm의 다양한 사층 두께에 대해 수행하였다. 외부 접촉 사층 두께가 5배 증가하였을 때, 59.50 keV의 경우 전체에너지피크 효율이 약 36% 감소하였으며, 1836.01 keV 경우 10% 감소하였다. 또한 10배 증가할수록 59.54 keV의 경우 FEP 효율이 약 20% 감소하였으며, 1836.01 keV 경우 7% 감소하였음을 확인하였다. Penelope simulation된 전체에너지피크 효율 채널은 사층 증가에 따라 기하급수적으로 감소한다. 또한, 총 효과 곡선은 0.3 - 1.4 mm 사층 두께 영역에서 3.5% 미만의 상대적 차이로 잘 일치함을 확인하였다. 그러나 비균질 사층이 몬테카를로 모델에서 여전히 매개변수라는 것을 알 수 있었다.

중심단어: 외부 접촉 층, 컴퓨터 전산모사, 고순도 게르마늄 검출기, 전체에너지피크효율

연구자 정보 이력

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