A Study on the Validation of Effective Angle of Particle Deposition according to the Detection Efficiency of High-purity Germanium Gamma-ray Detector

Boseok Chang

Department of Radiological Science, Collage of Health Sciences, Gimcheon University

Received: July 15, 2020. Revised: August 20, 2020. Accepted: August 31, 2020.

ABSTRACT

The distance between the source and the detector, the diameter of the detector, and the volume effect of the radiation source result in a change in solid angle at the detector entrance, which affects the determination of detection efficiency by causing a difference in path length within the detector. A typical analysis method for calculating solid angles was useful only for a source (^{60}Co) with a simple geometric structure, so in this experiment, the distance between the detector and the source was measured by switching on for up to 25 cm with the reference point of window cap 0.5 cm. In addition, 450 and 1000 ㎖ Marinelli beaker of standard volumetric sources were closely adhered to the detector. For circular point sources co-axial with the detector, the change in the solid angle to the distance from the detector window is equal to half the square radius of the source versus the square radius of the detector, if the resulting relationship of the calculation analysis results in the detector being less than the radius of the source. Since the solid angular difference is 0.5 the result of Monte Carlo is acceptable. The relationship between detector and source distance is shown. Solid angles have been verified to decrease rapidly with distance. Measurement and simulation results for a volumetric source show a difference of ±1.01% from a distance of 0 cm and less than 4 % when the distance is reduced to 5 and 10 cm. It can be seen that the longer distance, the smaller efficiency angle, and the exponential increase in attenuation as the energy decreases, is reflected in the calculation of efficiency. Thus, the detection efficiency has proved sufficient for the use of solid angle and Monte Carlo codes.

Keywords: Effective Solid Angle, PENELOPE code, HPGe

Ⅰ. INTRODUCTION

유효입체각(Effective solid angle)이란 선원에서 방출된 감마선이 검출기 표면창으로 입사하는 방사선량의 기하학적 면적을 의미한다. 입사한 방사선은 선원과 검출기 사이의 거리, 입사창의 반경, 입사 방사선의 기하학적 효과 등에 의해 입사창 표면적에서 입체각(solid angle)의 변화가 발생하여 검출효율 결정에 영향을 미치게 된다.[1] 검출효율 결정은 방사선원과 입사창의 거리가 짧은 부피 선원일수록 유효입체각에 미치는 기하학적 영향이 크므로, 정확한 계측을 위해 입체각과 검출효율의 관계에 대한 연구가 요구되고 있다.[2] 검출기의 효율은 계산으로 획득할 수 있지만 HPGe 검출기의 경우 장비마다 효율이나 종류가 다양하므로 제조사에서 제공한 데이터를 기준으로 직접 실험을 통해 측정한 자료를 사용하는 것이 보다 정확한 결과를 얻는다. 검출기의 효율 결정에 이용하고 있는 표준점 선원 및 표준 부피 선원의 기하학적 반영이 필요하며, 또한 밀도가 다른 표준 시료를 이용하여

* Corresponding Author: BoSeok Chang E-mail: yiktus153@daum.net Tel: +82- 054-420-4462
Address: Department of Radiological Science of Gimcheon University, 214, Daehak-ro, Gimcheon City, Gyeong-Buk. Korea

구한 후 밀도 차에 대한 효율에 대한 보정이 요구되고 있다.[2,3] 따라서 선행 연구에서 많은 연구자들은 PENELOPE code와 같은 몬테카롤로 시물레이션과 같은 프로그램을 이용하여 적용한다.

검출효율을 결정함에 있어서, 선원과 검출기의 거리가 짧은 다양한 표준 부피선원일수록 입체각에 영향이 크기 때문에 입체각과 검출효율의 관계에 대한 분석이 요구되고 있다.[4] 따라서 본 연구에서는 입체각 및 격자법에서 구한 검출효율을 환경시료에 적용하여 유효입체각 특성을 평가하고자 한다.

유효입체각의 성능평가를 위해 점 선원과 표준부피 선원을 측정하고 PENELOPE 비교를 통해 분석하고자 한다. 검출효율 오차의 해석은 정량적 분석를 통해 선원의 매질, 부피선원와 검출기효율에 따른 차이을 분석하여 유효입체각의 특성을 수학적 예측 모델을 통해 검증방안을 제시하고자 한다.

Ⅱ. MATERIAL AND METHODS

1. 유효입체각

기하학적 입체각(Ω)이란 방사선원으로부터 기하학적으로 방출되는 방사선이 검출기 입사장으로 진입하는 면적을 의미하며, 입사 시 검출효율을 고려하였다.

공간에서의 퍼짐을 표시하는 척도이다. 즉, 선원으로부터 4π로 방출되는 감마선이 검출기로 입사하는 면적, 즉 검출효율성과 밀접하게 관련되며 수학적 표현은 Eq. (1)과 같다.[5]

$$\overline{\Omega} = \int_{Vs, S_D} d\overline{\Omega} \tag{1}$$

Vs: 체적선원, S_D: 선원에 노출된 검출기 표면

$$d\overline{\Omega} = \frac{F_a \cdot F_{eff} \cdot T \bullet P \bullet n_u}{|T \bullet P|^3} d\sigma \tag{2}$$

Eq. (2)에서 T는 Vs에 따라 다른 점, P는 SD에 따라 다른 점, n는 외부 단위 벡터가 최소 영역에 대해 정규 분포를 따르는지 여부평가인자.

Fa: 검출기 활성영역에서 벗어난 방향 TP에 따른 감마선의 감쇠.

Feff : 에너지 분해 가능 광자가 검출 물질과 상호작용할 확률.

Eq. (1), (2) 방법으로 표준 점선원 및 표준부피선원에 대한 입체각을 계산할 수 있다.

여기에서 구한 각각의 효율값들을 대칭축인 격자 방식으로 응용하여 환경시료에 적용하여 검출효율을 구할 수 있다.

1.1 유효입체각 검출효율에 미치는 영향 인자

선원과 검출기 사이의 거리, 검출기 지름, 선원 컨테이너 및 홀더, 검출기 윈도우 창, 사층 등 방사선원 4π, 점 선원, 부피 효과 등에 의해 검출기 입사면에서 입체각의 변화가 생기고 이는 검출기 내부에서의 경로 길이 차이를 유발하여 검출효율을 결정에 영향을 미친다. 선원과 검출기의 거리가 가까운 부피 선원일수록 입체각에 의한 영향이 좌우되기 때문에 입체각과 효율의 관계를 정확히 파악해야 한다.[6-9]

1.3 유효입체각 코드(PENELOPE Code)

PENELOPE란" PENetration and Energy Loss of positrons and Electrons"에서 파생되었다.[6]

PENELOPE의 알고리즘은 적용 범위는 100 eV ~ 1 GeV 사이의 양전자와 전자를 대상으로 방사선과 물질과의 상호작용에서 발생하는 산란 및 충동 단면적 모델을 적용하였다.

PENELPE는 몬테카를로(Monte Carlo) 방법에 따라 검출기의 특성을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 인과 관계를 확인할 수 있다. 몬테카를로 처리는 확률 분포를 이용한 최적화된 결과값을 얻기 위한 방안으로 사용된다. 또한 여러 번의 반복실험을 통해 획득한 최적화된 결과값을 도출하여 그 결과로 부터 역산하면 어떤 특정한 변수 또는 유의미한 확률분포를 구할 수 있다. 통계 데이터 분량이 많을수록, 입력값에 대한 분포가 다양할수록 결과의 정밀성이 보장되는 특성이 있다.[7]

유효입체각 코드는 몬테카를로(PENELOPE) 방법을 적용하여 검출기의 특성을 예측하였다. Fig. 1은 크리스털의 직경, 길이 및 깊이 등의 다양한 기하학적 구성요소는 검출기 제조사에서 생산 시 규격화된 값 Fig. 1을 적용하여 시뮬레이션하였다.[8-10]

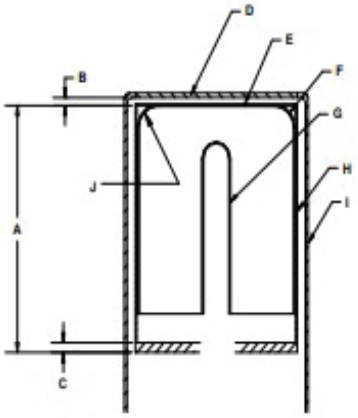


Fig. 1. Compared of energy spectrum between Worm and Solle.

각 매질에서의 경로 길이(path length), 선원 내에서의 자체차폐 인자(self-shielding factor), 검출효율 및 검출기 내에서의 검출효율 인자(efficiency factor)는 수식으로 계산하였다. 또한, Fig. 2와 같이 혼합부피표준선원(450 ㎖, 1000 ㎖)을 사용하여 시뮬레이션하여 비교하였다.

(a) 450 ㎖ CRM source (b)1000 ㎖ CRM source

Fig. 2. Schematic diagram of 450 ㎖, 1000 ㎖ marinelli beakers used for the simulation.

2. HPGe 검출기 표준선원 교정 및 분석

Fig. 3는 감마선 실험 및 Simulation에 사용한 검출기는 EG&G ORTEC사의 동축형 p-type HPGe 검출기이다.

1,332 keV 감마선에 대하여 1.73 keV의 FWHM, 20 %, 30%의 상대 효율, Peak-to-Compton Ratio 58:1을 가진다.

혼합부피표준선원 450 ㎖ CRM(Certified Reference Material) :^{241}Am, ^{109}Cd, ^{57}Co, ^{139}Ce, ^{51}Cr, ^{113}Sn, ^{85}Sr, ^{137}Cs, ^{88}Y, ^{60}Co 사용하여 에너지 및 효율을 교정하였다. 비이커는 검출기에 밀착 시켜 에너지 스펙트럼 및 효율을 측정 비교하였다. 측정이 끝난 스펙트럼은 분석용 프로그램인 GammaVision(EG ORTEC Co.)을 이용하여 분석하였다.

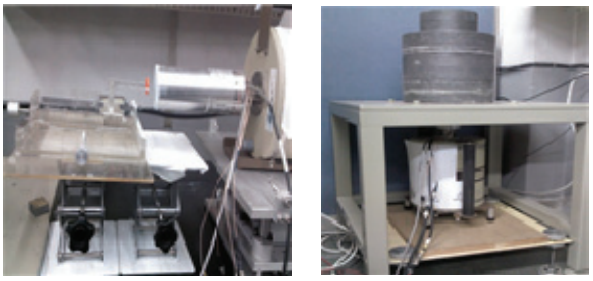


Fig. 3. Experimental HPGe Gamma-ray Set-Up.

Table 1. Detector dimensions as specified by the manufacturer and as optimised by Monte Carlo simulations

Miscellaneous Detector Assembly Dimensions			
Detector parameter	Identifier	Dimension (mm)	Optimisied (mm)
Detector length	A	94	108
Detector diameter	B	3	3.3
Detector radius	C	3.2	3.3
Hole diameter	D	1.3	1.3
Hole depth	E	0.03	0.03
End cap window	F	0.7	0.7
Mount cup base	G	0.3	0.3
Insulator/shield	H	0.76	0.76
	I	1.3	1.3

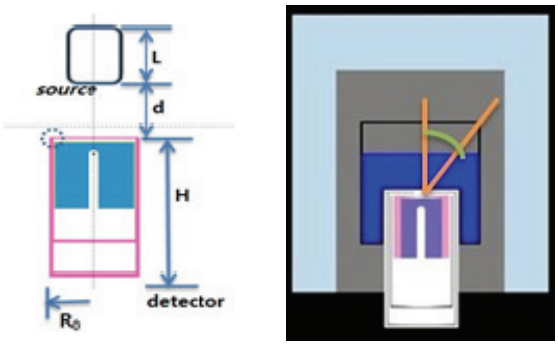
Note) PENELOPE: PENetration and Energy Loss of Positrons and Electrons

2.1. 유효입체 각도 측정

^{60}Co 선원에서 방출되는 감마선은 4 π형태로 공간 전체와 모든 방향으로 방사된다.[11] Fig. 4에서 입체 각도 계산의 경우, 점 선원 및 혼합 부피 표준선원이 감마선을 방사할 경우 감마 광자는 검출기 창뿐만 아니라 측면에서도 들어갈 수 있다.

Fig 4에서 유효각도 계산을 위한 일반적인 분석

방법은 단순한 기하학적 구조를 가진 선원 (^{60}Co)에만 유용하여 본 실험에서는 검출기와 선원 간 거리 window cap 0.5 cm 기준점으로 하여 먼저 동축 방향으로 1 cm씩 이동하면서 측정하였다. 또한 검출기 중심축에서 각도를 1◦씩 이동하면서 5◦ 까지 측정하여 효율을 구하여 비교하였다. 동축 방향으로 최대 ± 10 cm, 방사상 방향으로 최대 ± 10 cm 위치에서 대칭축으로 0.5 cm 간격으로 이동하면서 효율을 구하여 맵핑하였다. 측정 범위는 cylinder, Marinelli beaker 시료의 크기에 적합하도록 결정하였다.



(a) Point source or 40 ㎖ CRM source

(b)4 500 ㎖ CRM source

Fig. 4. The Solid angle of the window and the around detector.

2.2. 지표생물(쑥, 솔잎) 효율 적용 측정

감마선 혼합핵종 표준시료(450 ㎖)에서 구한 검출효율을 유효입체각을 적용하여 환경 시료 중 지표생물(솔잎)에 적용하여 측정하였다.

Ⅲ. RESULT

1. 유효입체각 검출효율

선원과 검출기 간의 축 및 방사상 방향에서 낮은 에너지의 감마선에 대한 피크 효율이 거리가 가까울수록 감소함을 확인하였다. Fig. 5에서 선원이 검출기에 가까워짐에 따라 사층 영역에서 경로 길이가 짧은 모서리 부분으로 투과하는 비율이 증가하는 것은 모서리 효과에 의해 피크 효율은 감소함을 확인하였다.[12,13]

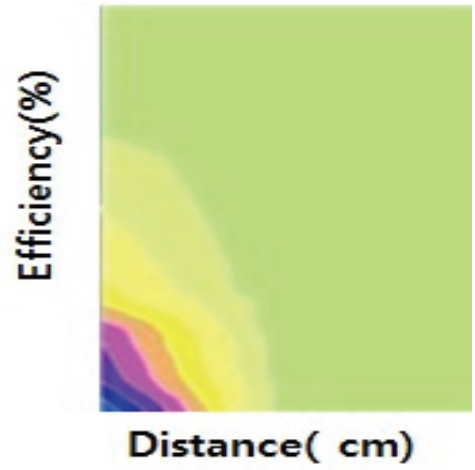


Fig. 5. Comparison between the measured and calculated energy dependence of the peak and total effiency for the source at the center of the front of the detector.

Table 2에서 입체각도에 따른 검출효율을 구하여 적용한 결과 450 ㎖ 마리넬리 비이커에 대해 ^{113}Sn 에너지를 제외하면 불확도는 ± 3.6% 이내의 차이를 보여 잘 일치함을 확인하였다.

Table 2. Comparison between the measured and calculated energy dependence of the peak and total effiency for the source at the center of the front of the detector.

Energy(keV)	Measurement	PENELOPE
88.03	0.06845	0.06864
122.06	0.06317	0.06332
136.47	0.06027	0.06038
165.85	0.05495	0.0551
320.08	0.0363	0.03641
391.69	0.02986	0.02997
514.01	0.02289	0.02296
661.66	0.01794	0.01808
898.04	0.01337	0.01351
1173.24	0.01046	0.01056
1332.17	0.00953	0.00962
1836.06	0.00744	0.00753

Table 3에서 1000 ㎖ 마리넬리 비이커에 대한 측정 결과는 88.03 keV ~ 1836.06 keV의 전체 에너지 범위에서 불확도는 3.5 % 이내의 차이로 보여 잘 일치하였음을 확인하였다.

Table 3. Comparison between the measured and calculated energy dependence of the total-to peak ratios for the source on the detector can and on the symmetry axis of the detector

Energy(keV)	Channel	Fit(keV)
88.03	527.76	59.69
122.06	731.78	122.15
136.47	818.20	136.58
165.85	994.00	165.92
320.08	1918.56	320.25
391.69	2344.78	391.40
514.01	3075.86	513.43
661.66	3961.28	661.21
898.04	5380.86	898.14
1173.24	7032.40	1173.77
1332.17	7983.61	1332.51
1836.06	10999.34	1835.74

대부분 검출기의 동축으로 수직하게 광자가 입사하는 원통형에 비해 마리넬리 형태는 검출기의 전면 및 측면까지도 입사가 가능하여 높은 에너지에서 거리 대비 효율은 더욱 더 줄어듦을 확인하였다.

2. 점 선원에 대한 유효입체 각도 측정 비교

Table 4는 검출기와 동축인 원형 점선원의 경우, 검출기 창으로부터의 거리에 대한 유효입체 각도의 변화를 측정치와 몬테카롤로 시뮬레이션으로 계산 분석 관계의 결과와 비교하였다. 선원의 반지름 및 검출기의 반지름에 대해 계산한다.Table 5는 선원이 검출기 창과 매우 가까우며 선원의 후면으로부터 방출된 모든 광선이 검출기에 도달할 수 없기 때문에 검출기의 반지름이 선원의 반지름보다 작을 경우, 입체 각도는 선원의 제곱 반지름 대 검출기의 제곱 반지름의 절반과 같다. 따라서 이 계산에서 검출기와 선원의 반지름에 대해 입체각도 차이는 0.5가 되므로 몬테카롤로의 결과는 허용된다.

따라서, 검출기-선원 간 거리의 역수와의 관계를 나타내었다. 입체각도는 거리에 따라 급격하게 감소함을 확인하였다.

Table 4. The variation of the solid angle of the point source versus distance of the window of detector.

Distance (cm)	Measurement solid angle	PENELOPE	Measurement solid angle	PENELOPE
0	5.38	5.29	4.62	4.57
1	4.07	4.02	3.66	3.58
2	2.08	2	1.86	1.82
3	1.15	1.1	1.04	1.0
4	0.24	0.19	0.21	0.18
5	0.103	0.1	0.096	0.092
6	0.096	0.092	0.083	0.079
7	0.091	0.086	0.074	0.070
8	0.084	0.081	0.067	0.061
9	0.072	0.069	0.052	0.048
10	0.063	0.058	0.044	0.041
15	0.055	0.051	0.031	0.028

Table 5. Comparing of the variation the solid angle of the point source and the 450 ㎖ source versus the distance of the window detector

Distance (cm)	Measurement Point	PENELOPE	Measurement 450 ㎖	PENELOPE
0	5.38	5.29	1.62	1.57
1	4.07	4.02	1.23	1.28
2	2.08	2	0.88	0.91
3	1.15	1.1	0.53	0.63
4	0.24	0.19	0.035	0.031
5	0.103	0.1	0.021	0.026
6	0.096	0.092	0.011	0.009
7	0.091	0.086	0.054	0.058
8	0.084	0.081	0.031	0.035
9	0.072	0.069	0.002	0.0027
10	0.063	0.058	0.0095	0.0099
15	0.055	0.051	0.0031	0.0028

같은 에너지 영역에서 원통형 부피선원에 대한 측정치와 시뮬레이션 결과는 거리 0 cm에서 1.01 %이며 거리가 5 cm, 10 cm로 멀어지면 4 % 미만의 차이를 보인다. 이 결과는 마리넬리 비이커 형태의 분석 결과에서 검출기 헤드와 접한 상태로 측정 시 검출효율이 높게 계산되는 원인으로 찾았던 동시 합성에 의한 영향이 거리가 멀어질수록 적게 반영됨을 확인해 볼 수 있는 근거가 될 수 있다. 거리가 10 cm 일 때 처음으로 계산 결과가 측정 결과보다

작아진다.

따라서 거리가 멀어질수록 입체각이 작아지고, 에너지가 낮아질수록 감쇠 효과가 지수 함수적으로 증가하는 원리가 효율의 계산에 반영되는 것을 확인할 수 있다.

4. 지표생물(쑥, 솔잎) 효율 적용 측정

Fig. 10에서 감마 핵종 표준선원에서 구한 효율을 체적 선원, 즉 입체각도에 적용한 결과 쉽게 구할 수 있는 지표생물의 대표적인 샘플인 (쑥, 솔잎) 두 종류를 측정하여, 각각 4% 이내의 불확도를 보여 검출기보다 작은, 또는 큰 시료에 적용해도 무방함을 확인하였다.

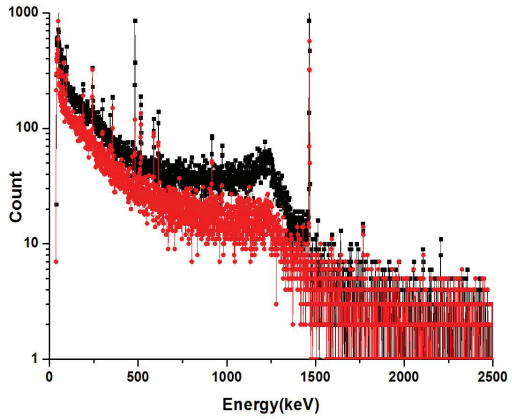


Fig. 10. Compared of energy spectrum between Worm and Solle.

Ⅳ. CONCLUSION

본 연구에서 효율은 검출기와 선원 간 거리가 멀어질수록 감소하였으며, 검출기 창으로부터 거리에 대한 입체각의 변화는 검출기 창으로부터 선원의 거리가 증가함에 따라 점선원의 결과와 유사함을 확인하였다. HPGe 검출기 마다 효율이 다르기 때문에 검출효율은 유효입체각 및 격자법에서 구할 수 있다. 즉, 검출기 크리스털보다 작거나 큰 환경 시료를 적용하여도 불확도 3.5% 이내로 확인하였다.

실험에 비해 시간이 적게 소모되는 Monte Carlo simulation으로도 적용할 수 있음을 확인하였으며, 입체각도의 유효성을 입증할 수 있다. 부피선원에 대한 측정치와 시뮬레이션 결과는 거리 0 cm에서 1.01 %이며 거리가 5 cm, 10 cm로 멀어지면 4 % 미만의 차이를 보인다. 거리가 10 cm 일 때 처음으로 계산 결과가 측정 결과보다 작아진다. 이는 거리가 멀어질수록 입체각이 작아지고, 에너지가 낮아질수록 감쇠 효과가 지수 함수적으로 증가하는 원리가 효율의 계산에 반영되는 것을 확인할 수 있다.[14] 따라서 검출효율은 유효입체각 및 몬테카를로 코드를 사용하기에 충분함을 입증하였다.

Acknowledgement

본 논문은 2019년도 김천대학교 교내학술 연구비에 의하여 지원되었음.

Reference

[1] T. Vidmar, M. J. Anagnostakis, D. Arnold, "An Intercomparison of Monte Carlo Codes Used in Gamma-Ray Spectrometry", Applied Radiation and Isotopes, Vol. 66, No. 6, pp. 764-768, 2008. http://dx.doi.org/10.1016/j.apradiso.2008.02.015

[2] M. I. Abbas, "HPGe Detector Photopeak Efficiency Calculation Including Self-Absorption and Coincidence Corrections for Cylindrical Sources Using Compact Analytical Expressions", Applied Radiation and Isotopes, Vol. 61. No. 5, pp 429-431, 2001. https://doi.org/10.1016/S0969-806X(01)00288-2

[3] M. C. Lepy, T. Altzitzoglou, D. Arnold, F. Bronson, "Intercomparison of efficiency transfer software for gamma-ray spectrometry", Applied Radiation and Isotopes, Vol. 55, No. 4, pp 493-503, 2001. https://doi.org/10.1016/S0969-8043(01)00101-4

[4] G. M. Sun, Development of Effective Solid Angle Calculation Program for Absolute Peak Efficiency Calculations, Annual progress report, Applied Nucler Physics Group, Department of Nuclear Engineering, Seoul National University, 2001.

[5] M. S. Badawi, M. M. Gouda, S. S. Nafee, A. M. El-Khatib, "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 2661–2668, 2012. http://dx.doi.org/10.1016/j.apradiso.2012.08.014

[6] J. Baró, J. Sempau, J. M. Fernández-Varea, F. Salvat, "PENELOPE: an algorithm for Monte Carlo simulation of the penetration and energy loss of electrons and positrons in matter", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Vol. 100, No. 1, pp 31-46, 1995. http://dx.doi.org/10.1016/0168-583X(95)00349-5

[7] E. S. Jang, B. S. Chang, "A Germanium Detector Structure PENEL OPE Characteristic Analysis by Computer Simulation", Journal of the Korean Society of Radiology, Vol. 9, No. 2, pp. 73-77, 2015. http://dx.doi.org/10.7742/jksr.2015.9.2.73

[8] R. G., Helmer, *γ- and X-ray spectrometry with semiconductor detectors*, North Holland, Amsterdam Publishing Co., pp. 97-163, 1998.

[9] M. Koren. R, Martincic, "Measurements of the total-to-peak ratio of a semiconductor gamma-ray detector", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, Vol. 385, No. 3, pp. 511-518, 1997. http://dx.doi.org/10.1016/S0168-9002(96)01165-5

[10] F. Salvat, J. M. Fernandez-Varea, J. Sempau, 2003, PENELOPE. A code system for Monte Carlo simulation of electron and photon transport. in: Workshop Proceeding, Issy-les Moulineaux, France, 7-10 July 2003.

[11] G. F. Knoll, *Radiation Detection and Measurement*, 3rd Edition., John Wiley & Sons Publishing Co., pp. 107-193. 2000.

[12] J. Boson, G. Agren, L. Johansson, "A detailed investigation of HPGe detector response for improved Monte Carlo efficiency calculations", Nuclear Instruments and Methods in Physics, Vol. 587, No. 2, pp. 304-314, 2008. http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2008.01.062

[13] K. Abbas, F. Simonelli, F. D'Alberti, M. Forte, M. F. Stroosnijder, "Reliability of two calculation codes for efficiency calibrations of HPGe detectors", Applied Radiation and Isotopes, Vol. 56, No. 5, pp 703-709, 2002. http://dx.doi.org/10.1016/S0969-8043(01)00269-X

[14] K. Waseem, Z. Qingmin, H. Chaohui, S. Muhammad, "Monte Carlo Simulation of the Full Energy Peak Efficiency of an HPGe Detector", Applied Radiation and Isotopes, Vol. 131, pp. 67–70, 2018. http://dx.doi.org/10.1016/j.apradiso.2017.11.018

고순도 저마늄 감마선 검출기의 검출효율에 따른 유효입체각 검증에 관한 연구

장보석

김천대학교 방사선학과

요 약

선원과 검출기 사이의 거리, 검출기 지름, 방사선원의 부피 효과 등에 의해 검출기 입사면에서 입체각(solid angle)의 변화가 생기고 이는 검출기 내부에서의 경로 길이(path length) 차이를 유발하여 검출효율 결정에 영향을 미친다. 유효입체각 계산을 위한 일반적인 분석 방법은 단순한 기하학적 구조를 가진 선원 (60Co)에만 유용하여 본 실험에서는 검출기와 선원 간 거리 window cap 0.5 cm 기준점으로 하여 25 cm 까지 이동 시 켜면서 측정하였다. 또한 표준부피선원 450 ㎖, 1000 ㎖ 마리넬리 비이커는 검출기에 밀착 시켜 측정하였다. 검출기와 동축인 원형 점선원의 경우, 검출기 창으로부터의 거리에 대한 입체 각도의 변화를 측정치와 몬테카를로 시뮬레이션으로 계산 분석 관계의 결과 검출기의 반지름이 선원의 반지름보다 작을 경우, 입체 각도는 선원의 제곱 반지름 대 검출기의 제곱 반지름의 절반과 같다. 입체 각도의 차이는 0.53가 되므로 몬테카를로의 결과는 허용된다. 검출기-선원 간 거리의 역수와의 관계를 나타내었다. 입체각도는 거리에 따라 급격하게 감소함을 확인하였다. 부피선원에 대한 측정치와 시뮬레이션 결과는 거리 0 cm에서 1.01 %이며 거리가 5 cm, 10 cm로 멀어지면 4 % 미만의 차이를 보인다. 거리가 10 cm 일 때 처음으로 계산결과가 측정 결과보다 작아진다. 이는 거리가 멀어질수록 입체각이 작아지고, 에너지가 낮아질수록 감쇠효과가 지수 함수적으로 증가하는 원리가 효율의 계산에 반영되는 것을 확인할 수 있다. 따라서 검출효율은 고체 각도 및 몬테카를로 코드를 사용하기에 충분함을 입증하였다.

중심단어: 입체각도, 검출효율, 고순도 게르마늄 검출기.

연구자 정보 이력

	성명	소속	직위
(단독저자)	장보석	김천대학교 방사선학과	교수