

A Germanium Detector Structure PENEL OPE Characteristic Analysis by Computer Simulation

Eunsung Jang*, BoSeok Jang**

Pusan National University Nuclear Physics and Radiation Technology Research Center,
Department of Image Information Engineering, Pusan National University, Busan*

HPGe 검출기의 PENELOPE 전산모사에 의한 특성 분석

장은성*, 장보석**

부산대학교 핵물리 및 방사선기술연구소*, 부산대학교 공과대학 영상정보공학과**

Abstract

In order to observe the detailed structure of the detector, it was CT scanned to reproduce the detailed structure of the crystal shapes and traverse layer using the Monte Carlo calculation applying the detector model. The uncertainty of measurement was lowered by adjusting the detector core by the edge effect at a higher energy (400 keV or higher) through the offset of peak efficiency of the gamma ray at low energy. It was confirmed that there was the appropriate matching with spatial dependency using the PENELOPE calculation. That was achieved by adjusting the parameters describing the crystal core and rounding of edge and crystal core.

Key Words : PENELOPE, Dead layer, Core,

요약

검출기의 자세한 구조를 알고자 CT 스캐닝을 하였으며 크리스털 형상과 사층에 관한 세부적인 구조를 전산모사 계산법을 이용해 재현하였다. 낮은 에너지의 감마선에 대한 피크 효율이 거리가 작아질수록 감소, 보다 높은 에너지 (400 keV) 이상에서의 전체 효율성은 검출기 코어를 조정함으로써 불확도를 줄일 수 있었다. PENELOPE 계산법을 이용해 얻은 공간적 의존성 사이에 적절한 일치점이 달성되었음을 확인 하였다. 이는 크리스털 코어, 모서리와 크리스털 코어의 라운딩을 설명해 주는 매개변수들을 조정함으로써 달성되었다.

중심단어: 컴퓨터 전산모사, 사층, 코어

I. INTRODUCTION

2000년 이후 컴퓨터 소프트웨어 및 반도체 기술이 눈부시게 발전됨에 따라 이를 이용한 많은 종류의 검

출기가 개발되고 있다. 그 중에서도 HPGe 검출기가 현재 여러 γ 선 분광 분석 분야에서 광범위하게 이용되고 있다. 본 연구에서는 PENELOPE 코드를 사용하여 모사하고자 한다. PENELOPE^[1] 시스템은 물리적 상관 관계가 있는 검출기를 매개변수화 할 목적으로 사용

되었는데, 그 이유는 일반적으로 제작사로부터 사층을 설명하는 검출기 중심 및 크리스털 블릿화에 관한 정교한 매개변수 값을 얻을 수 없기 때문이다^{[2]-[6]}. 잘 입증된 PENELOPE 코드를 사용해 측정 및 계산된 점선원의 전체 침투 흡수율의 공간 의존성 사이에 양호한 일치성을 얻기 위해 조정하였다. 점선원을 사용하여 측정된 바 있는 HPGe 검출기의 광전피크의 에너지교정 및 효율과 컴퓨터 전산모사를 이용하였다^[7-9]. 또한 각각의 점선원에 대해 선행 연구에서 얻은 실험값을 바탕으로 HPGe 검출기를 PENELOPE로 전산모사하여 특성을 분석하고자 한다.

II. MEASUREMENT METHODS

1. HPGe 검출기 제원

제작사에서 제공한 HPGe 데이터 실체치[Table 1]를 바탕으로 검출기의 자세한 구조를 알고자 CT 스캐닝을 하였다^[7]. 같은 효율을 가진 검출기라도 제작사에 제공한 데이터에 따라 조금씩 다르기 때문에 Monte Carlo validation 과정을 통해 최적화된 효율을 구하였다. 또한 크리스탈 형상과 사층에 관한 구조를 전산모사 계산법을 이용해 재현하였다.

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

Miscellaneous Detector Assembly Dimensions		
Detector parameter	Dimension	Optimised
Detector length	94 mm	108 mm
Detector diameter	56 mm	56 mm
Detector radius	8 mm	8 mm
Hole diameter	9.1 mm	9 mm
Hole depth	60.4 mm	60.4 mm
End cap window	1.3 mm	2 mm
Mount cup base	3.2 mm	3.2 mm
Insulator/shield	0.03/ 0.03 mm	0.03/ 0.03 mm

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

2. PENELOPE 전산모사

PENELOPE란 “PENetration and Energy Loss of

positrons 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. PENELPE는 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^[7]. 검출기 구조는 크리스털의 길이, 직경 및 깊이 등 다양한 구성요소들을 제작사에서 제공한 데이터 값을 시뮬레이션에 적용하여 모사하였다. 또한 크리스탈 모델링에 사용된 디스크와 링을 나타내었다(Fig.1).

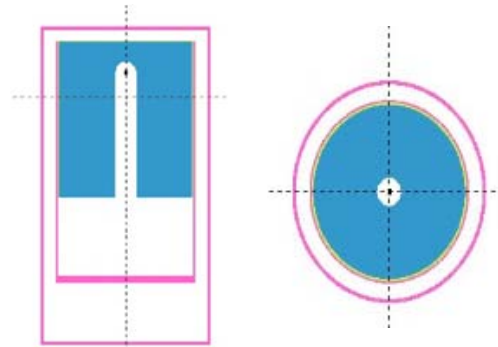


Fig. 1. Schematic representation of the detector model(2D) used in the Monte Carlo simulations.

3. 전산모사 측정

검출기와 점선원의 기하학적 배치는 검출기 Ge 결정 민감층 표면에서 격자 방식으로 6cm 거리까지 PENELOPE 전산모사를 통해 측정하였다. 이는 중심 영역에 위치하는 블릿화된 모서리인 크리스탈 표면 사층의 두께를 조절하였다. 크리스탈 표면 사층을 생성하기 위해 두께를 0.1 mm 씩 조절하여 최적화된 효율을 구하여 적용하였다(Fig. 2). 비스듬하게 위치하는 검출기 표면에 충돌하는 경우, 두께 결정의 정확성은

그 의미가 더 크다. 계산된 효율성은 크리스털 표면 1.5 cm 하부의 크리스털 세부 사항에 민감하게 작용한다. 이로 인해 에너지 범위에서 계산된 효율성은 크리스털 상부에서의 세부 사항을 보여 줄 것이다. 크리스털 표면 상부와 측면 표면 사측, 중심 상단부, 중심 반경과 주변 사측 두께에 관한 세부 사항을 알기 위해 점선원 (¹³³Ba, ¹⁵²Eu)을 측정하였다. 이와 동일한 방식으로 모든 소스 위치에서의 효율성 불확도가 3% 이하로 감소될 때까지 조절하였다(Table 1).

III. RESULT

선원과 검출기 간의 거리에 따른 피크효율은 교정 요소를 적용하여 효율성이 정해졌을 시, 전체적인 효율성 커브는 식(1)을 통해 구하였다.

$$\epsilon = \frac{N}{N_{re}\gamma} \quad \text{식(1)}$$

ϵ = efficiency

N = Net Area

N_{re} = 계측시간동안 예측 붕괴수

γ = Gamma Intensity

위 식(1)에 의해 산출된 효율값은 에너지의 함수로서 내삽하여 사용되어 지고 있으며 효율곡선의 fitting 방법은 사용목적 또는 사용자에게 의해 여러 가지 형태로 구할 수 있다. 이 fitting 방법은 현재 상용된 분석 program에서 많이 사용되고 있는 방법이다. 이 함수를 사용함에 있어서 에너지 함수로서의 효율곡선은 0.2 MeV 에너지 근처에서 2개의 포물선을 접합하는 형태로 나타나며 두 포물선의 연결 부분은 적절히 곡선으로 연결하여 사용할 수 있다(Fig.2).

피팅식(2)을 통해 얻은 값들은 Table2에 나타내었다.

$$Y = A_1 * \exp(-\chi/t_1) + Y_0 \quad \text{식(2)}$$

Table 2. Input Data Parameters of ¹³³Bu

	¹³³ Bu		¹⁵² Eu	
	Value	Standard error		
Y0	0.00688	0.01221	0.00826	2.48253E-4
A1	0.0441	0.00967	0.04343	0.00199
PENELOPE	t1	306.9743	166.4279	327.1726 18.2161

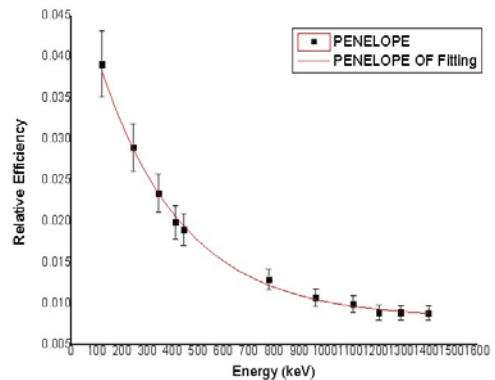


Fig. 2. Relative photopeak efficiency curve (¹³³Ba, ¹⁵²Eu) as a function of point source.

또한 Fig.2에서 보듯이 약 400 KeV 이하의 영역에서 피크 효율이 증가하는 것은 반응 단면적이 커지기 때문이며, 약 400 keV 이상의 영역에서 피크 효율이 감소하는 이유는 검출기 민감층에 도달되기 이전에 Al endcap, Ge, 불감층 등으로 이루어진 검출기 창에서 감소되는 감마선의 비율이 증가하기 때문이다. 선원이 검출기에 가까워짐에 따라 민감 영역에서의 경로길이 가 짧은 모서리 부분으로 진행되는 감마선의 비율이 증가하는 모서리 효과에 의해 전에너지 피크 효율이 감소한다. 이러한 결과로부터 효율로 나타난 HPGe 검출기의 전에너지 피크 효율은 선원과 검출기 간의 거리에 매우 민감하게 의존함을 알 수 있다⁹⁻¹¹⁾. 또한 Fig.

3.4에서 선원과 검출기 간의 축 및 방사상 방향에 따른 에너지 스펙트럼 나타낸 것으로 대칭중심축의 Ge 결정 민감층 표면에서 축 방향 ^{133}Ba (53.16 keV)에서 0.5cm, ^{152}Eu (411 keV) 5cm 방향으로 거리에 따른 효율을 나타내기 위해 방사상 방향 4cm ^{152}Eu (411 keV) 방향에서 측정하였다.

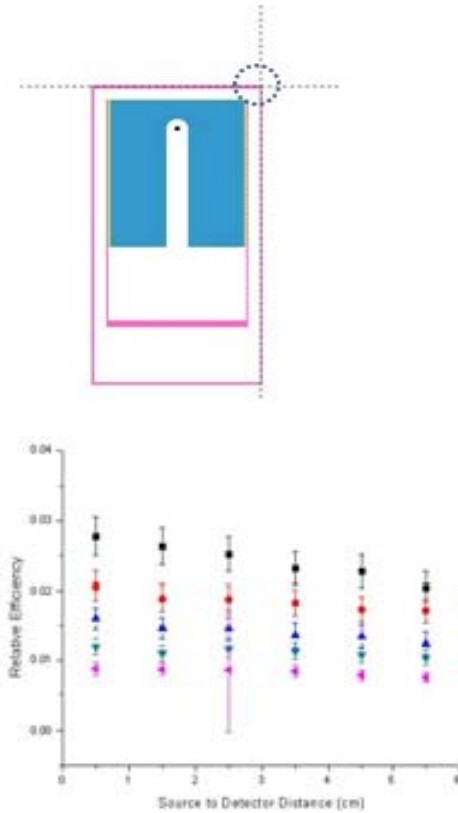


Fig. 3. Simulation of efficiency the source-to-detector distance for the detector.

^{133}Ba (53.16 keV) , ^{152}Eu (411 keV, 1408 keV) 낮은 에너지의 감마선에 대한 피크 효율이 거리가 작아질수록 감소하는 이유는 검출기 창에서의 경로길이 증가로 인해 감쇄되는 감마선의 비율이 증가하게 되는 감쇠효과 때문이다.

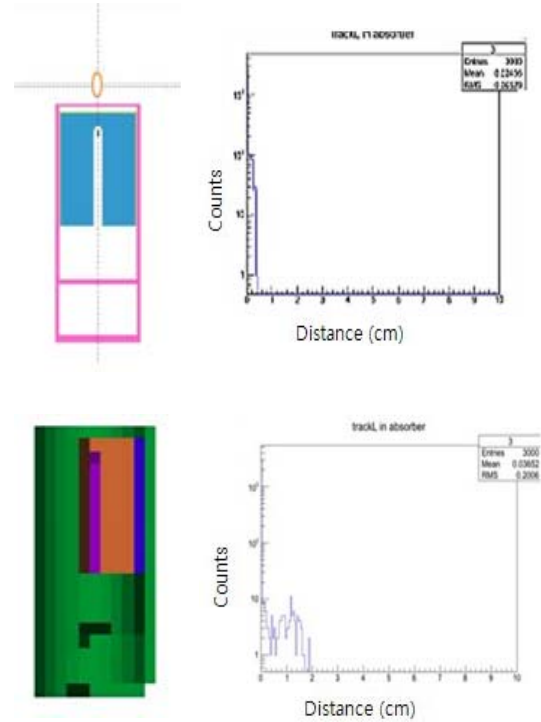


Fig. 4. ^{133}Ba spectra of track in absorber.

검출기 표면의 방사상 의존성은 크리스털 모서리면이 점원과 접하는 부분의 반경에서 최대치에 이른다. 이 부분에서 감마선과 그 모서리 부근의 크리스털 부분 사이의 상호작용 및 산란된 방사선이 이탈할 확률이 가장 커지게 된다. 높은 에너지(400 keV) 이상에서, 크리스털 모서리 부근 영역에서 상호 작용이 일어날 확률은 턱 작아져 모서리 영향이 감쇠된다. 또한 모서리 라운딩 효과는 광전비율의 공간적 의존성을 완화시키는 경향이 있음을 알 수 있다^{[8]-[10]}. 보다 높은 에너지(400 keV) 이상에서의 전체 효율성은 검출기 코어를 조정함으로써 불확도를 줄일 수 있었다.

IV. CONCLUSION

검출기 모사 및 비활성화된 층 구조에 관한 결과는 Fig.1에서 볼 수 있다. Fig.1에서 사층 구조는 적절한 형상을 가지고 있으며 실제 두께는 크리스털 중심에서 값보다 적음을 알 수 있다. 모서리에 가까운 영역은

비활성화된 층이 더 두껍다는 사실을 확인하였다. PENELOPE 계산법을 이용해 얻은 공간적 의존성 사이에 적절한 일치점이 달성되었음을 확인 하였다. 이는 크리스털 코어, 모서리와 크리스털 코어의 라운딩을 설명해 주는 매개변수들을 조정함으로써 달성되었다.

Reference

- [1] F. Salvat, J. M. Fernandez-Varea, J. Sempau, PENELOPE, A code system for Monte Carlo simulation of electron and photon transport. in : Workshop Proceeding, Issy-les Moulineaux, France, 7-10 July 2003. OECD.
- [2] M. Korun, R. Martincic, Nucl. Instr. and Meth. A 385 (1997) 511.
- [3] M. Korun, R. Martincic, Appl. Radiat. Isot. 43 (1992) 29.
- [4] K. Debertin, R.G. Helmer, Gamma and X-ray Spectrometry with Semiconductor Detectors, North- Holland, Amsterdam, 1988.
- [5] M. Geretschlager, Nucl. Instr. and Meth. B 28 (1987) 289.
- [6] M. Decombaz, J.-J. Gostely, J.-P. Laederman, Nucl. Instr. and Meth. A 312 (1992) 152.
- [7] E.S. Jang Limits to measurement ^{134}Cs in soil samples 2014.
- [8] G. Haase, D. Tait, A. Wiechen, Nucl. Instr. and Meth. A 336 (1993) 206.
- [9] C.S. Kim et al., Measurement of the HPGe Detector Efficiencies for γ -ray and a Comparison with Monte Carlo Calculations. Sae Mulli 37,(1997) 399.
- [10] Korun, M., Martincic, R. Measurements of the total-to-peak ratio of a semiconductor gamma-ray. Nucl. Instr. Methods Phys. Res. A 385 (1996) 511.
- [11] Mones, L., De Donder, J., Lin, X.-L., De Corte, F., De Wispelaere, A., Simonits, A., Hoste, J., Calculation of the absolute peak efficiency of gamma-ray detectors for different counting geometries. Nucl. Instr. Methods 187 (1981) 451.