

GEANT를 이용한 HPGe 검출기 효율 계산

Calculation of Efficiency for HPGe Detector by Using GEANT

박창수, 선광민, 변수현, 최희동

서울대학교
서울특별시 관악구 신림동 산56-1

요 약

Monte Carlo 방법을 이용하여 0.05 ~ 1.5 keV의 저에너지 영역과 0.06 ~ 11 MeV의 광범위 에너지 영역에서 HPGe 검출기에 대해 감마선 에너지에 따른 검출효율을 계산하였다. 효율 계산에는 GEANT 모사코드를 이용하였다. 두 영역에 대해 각각 p-type, n-type closed-end coaxial HPGe 검출기로 측정된 값과 비교하였다. 계산치와 측정치 간의 차이를 최소화하기 위해 Ge dead layer 두께, crystal 직경, crystal에서 window까지의 거리 등 parameter들을 미세하게 조정하였다. 최종 계산 결과는 측정치와 비교하여 저에너지 영역에서는 6%, 광범위 에너지 영역에서는 10% 이내로 일치하였다.

Abstract

The efficiencies of HPGe detector were calculated as a function of γ -ray energy by using Monte Carlo method both in low energy range of 0.05 ~ 1.5 MeV and in wide energy range of 0.06 ~ 11 MeV. GEANT simulation code was used for calculating the efficiency. Calculated efficiencies were compared with measured for a p-type closed-end coaxial HPGe detector in low energy range and for a n-type in wide energy range. In order to minimize difference between calculation and measurement, geometric parameters like Ge dead layer thickness, crystal diameter and crystal to window distance were finely tuned. The final calculated results agreed with the measured within 6% for the low energy range and 10% for the wide energy range.

1. 서 론

HPGe 감마선 검출기를 이용하여 미지 핵종의 방사능을 측정하기 위해서는 검출기 효율 검정이 필수적으로 요구된다. 검출효율은 감마선 에너지의 함수이며, 일반적으로 다양한 에너지의 감마선

표준 선원을 이용하여 측정에 의해 검정하는 방법이 널리 사용되고 있다. 그러나 다양한 기하학적 형태의 부피 선원에 대해서 표준 선원의 에너지 영역을 벗어나는 2 MeV 이상 또는 측정이 어려운 수 십 keV 미만의 에너지 영역에서, 측정만을 통해 효율 검정을 수행하기는 현실적으로 어렵다. Monte Carlo 방법에 의한 이론적인 계산 방법은 이런 효율 측정이 곤란한 경우에 대해 측정치를 보완할 수 있고, 효율 경향성의 물리적 이해를 도우며, 감마선 스펙트럼의 모사를 통해 검출기의 response를 이론적으로 해석할 수 있다. 최근에는 감마선 수송용 Monte Carlo 계산 코드의 정확도 및 계산 속도가 크게 향상됨에 따라 이론적인 효율 계산의 중요성이 더욱 증대되었다.

Monte Carlo 법에 의한 이론적인 효율 계산은 PGAA(Prompt Gamma Activation Analysis)와 같은 in-beam 감마선 분광에서 특히 유용하다. PGAA에서는 감마선의 에너지가 11 MeV의 영역에까지 도달하여 일반적인 감마선 분광에 비해 에너지 영역이 크게 확대되는데, Monte Carlo 법으로 계산한 전 에너지 영역의 효율 경향성은 효율 측정치가 드물거나 존재하지 않는 고에너지 영역의 효율 특성에 대한 정보를 제공할 수 있기 때문이다.

본 연구에서는 한국원자력연구소의 하나로에 설치된 SNU-KAERI PGAA 장치에서 사용되는 n-type HPGe 검출기에 대해 0.06 ~ 11 MeV의 광범위 에너지 영역에서 이론적인 효율값을 계산하였다. Monte Carlo 코드로서는 HPGe 검출기 모사에 널리 활용되고 있는 GEANT 코드[1]를 선택하였다. GEANT 코드를 이용하여 HPGe 검출기의 효율을 계산한 예는 참고문헌 [2-7]에서 볼 수 있다. GEANT 코드의 신뢰성을 확인하기 위해 0.05 ~ 1.5 MeV의 저에너지 영역에서 효율을 계산하여 측정치[8]와 비교·검증하였으며, 동일한 방법론을 광범위 에너지 영역에 적용하였다. 광범위 에너지 영역에 대한 효율 계산 결과는 효율 측정 결과[9]와 비교하였다.

2. 효율 계산 User 코드 작성

GEANT는 CERN에서 개발한 입자 수송 코드로서, Monte Carlo 계산 방식을 기본으로 한다. Electron, photon, alpha, muon, meson 등의 입자 운동을 모사할 수 있으며, 입자 수송에 관련된 함수들을 지원하고 있다. 사용자는 모사 목적에 필요한 함수들을 조합하여 user 코드를 작성함으로써 계산을 수행하게 된다. 본 연구에서 사용한 GEANT 모사 코드는 4.4.1 버전이며, 사용 OS는 Linux RH-6.2이고, compiler는 gcc-egcs 2.91.66 이다. GEANT의 설치시 compile 옵션은 compiler를 egcs로, library는 global & granular로 설정하였고, 나머지는 default 값으로 설정하였다. 효율 계산을 위한 user 코드는 GEANT 4.4.1 버전으로 작성된 user 코드 예제 중에서 HPGe 검출기의 효율 모사에 가장 근접한 형태인 ExN03의 코드를 수정하여 작성하였다.

입사한 photon의 모사 과정에서 photon의 자취 및 검출기 각 영역에서의 상호 작용을 추적하여 Ge crystal의 active volume에 흡수된 에너지를 계산하였다. 모사 event의 수는 효율값의 통계 오차가 1% 미만이 되도록 정하였다. Active volume에 흡수된 에너지의 분포로부터 감마선의 스펙트럼을 구하였다. 스펙트럼에서 full energy peak의 판별은 흡수된 에너지가 입사한 photon의 에너지를 기준으로 저에너지는 0.01 keV, 고에너지는 0.1 keV 구간 이내인 경우로 각각 설정하였다.

입사 photon의 방향은 선원의 위치에서 crystal의 active volume을 바라보는 입체각 내로 제한하였다. 절대 효율값은 full energy peak로 인식되는 event를 계수하여 입사 photon의 수로 나누고, 입체각을 곱하여 계산하였다.

3. 효율 계산 결과 및 측정치와의 비교

0.05 ~ 1.5 MeV의 저에너지 영역에서 p-type HPGe 검출기에 대해 full energy peak의 효율을 계산하였다. 검출기의 제원 및 개략도는 각각 표 1과 그림 1에 나타내었다. 그림 2는 HPGe 검출기에 대해서 Cs-137 선원에서 방출되는 661.66 keV 감마선에 대한 측정 스펙트럼과 모사 스펙트럼을 나타낸다. 이론적으로 모사된 스펙트럼에서는 단일 에너지의 감마선만이 입사되고 있기 때문에 background 감마선의 영향이 배제된 이상적인 단일 감마선 스펙트럼이 나타난다. 두 스펙트럼을 비교할 때 모사 스펙트럼에서도 full energy(F.E.) peak 및 Compton edge가 잘 재현되는 것을 확인할 수 있다. 그림 3은 1408.022 keV 감마선에 대해 모사한 스펙트럼이며, 감마선의 에너지가 1.022 MeV 이상이기 때문에 full energy peak 외에 single escape(S.E.), double escape(D.E.) peak가 판별되고 있다.

효율의 에너지에 따른 경향성을 살펴보기 위해 Ge dead layer, Al cap의 두께를 차례로 반영하면서 계산한 결과는 그림 4와 같다. 그림에서 볼 때 100 keV 이하의 감마선은 Ge dead layer 및 Al cap에서의 흡수에 크게 영향을 받고 있다. Ge dead layer와 Al cap을 모두 반영하여 계산한 결과는 측정치의 경향성을 잘 따르고 있지만 효율의 절대값은 전체적으로 측정치보다 약간 크게 계산되었다. 이와 같은 차이는 다른 모사 결과에서도 빈번히 나타나고 있으며[2,4,5], 근본적인 이유는 제작사에서 제공된 dead layer 두께의 오차 및 dead layer 두께의 불균일성 등을 들 수 있다. 따라서 계산된 효율의 절대값은 일반적으로 dead layer 두께를 미세하게 조정함으로써 측정 결과와 최대한 일치시킨다[2,4-6,10-12]. 본 연구에서도 Ge dead layer 두께를 변화시켜 계산을 수행하였으며, dead layer 두께가 0.55 mm일 때 측정치와 가장 잘 일치하였다. 최종 계산 결과와 측정치를 비교하면 그림 5와 같다. 계산 결과는 측정치와 6% 이내로 일치하고 있다.

저에너지 영역에서의 효율 모사를 토대로 0.06 ~ 11 MeV 영역에서의 효율 계산을 수행하였다. HPGe 검출기는 SNU-KAERI PGAA 장치에서 사용하고 있는 n-type 검출기를 선정하였으며, 검출기의 제원과 구성은 각각 표 2와 그림 6과 같다. HPGe 검출기 주변에 배치된 차폐체의 구성 및 규격은 참고문헌[13]에 상세하게 기술되어 있다. HPGe 검출기의 효율에 영향을 미치는 차폐체로서는 그림 6과 같이 검출기 전단에 설치된 ${}^6\text{LiF}$ 열중성자 흡수체와 이를 지지하는 Teflon 판을 들 수 있다.

HPGe 검출기 전단에 배치된 ${}^6\text{LiF}$ 타일 및 Teflon 판에 의한 영향을 확인하기 위해 차폐체의 배치에 따라 검출기의 효율값을 계산하여 비교한 결과는 그림 7과 같다. n-type HPGe 검출기는 Ge dead layer가 crystal 내부 홀 주변에 형성되고 crystal 앞쪽이 얇은 Be window로 되어 있어 p-type 검출기와 비교할 때 100 keV 이하의 에너지에서도 효율값이 높은 상태로 유지되고 있다

[3]. 그림 7에서 ${}^6\text{LiF}$ 타일과 Teflon 판이 모두 포함된 계산 결과는 측정치보다 대략 10 ~ 20% 정도 높다. 측정치와의 차이를 줄이기 위해 저에너지 영역에서의 계산에서와 동일한 방식으로 검출기 제원을 조정하면서 효율 계산을 수행하였다. HPGe 검출기의 일반적인 dead layer 두께가 약 0.6 mm 정도임을 감안하여 dead layer 두께를 변화시켰으며 crystal 직경, crystal에서 window까지의 거리를 추가로 조정하였다[3,11]. 최종적으로 조정된 Ge dead layer 두께, crystal 직경 및 Be window까지의 거리는 각각 0.7 mm, 57.2 mm, 9.0 mm이다. 조정이 완료된 최종 상태에서의 효율 계산 결과값을 측정치와 비교한 결과는 그림 8과 같다. 그림에서 최종 계산 결과와 측정치는 10% 이내로 일치하고 있다.

4. 결 론

GEANT 코드를 이용하여 0.05 ~ 1.5 keV의 저에너지 영역과 0.06 ~ 11 MeV의 광범위 에너지 영역에서 closed-end coaxial HPGe 검출기에 대해 에너지에 따른 full energy peak 효율을 계산하였다. 계산치와 측정치의 차이는 저에너지 영역에서 6%, 광범위 에너지 영역에서 10% 이내이다. 광범위 영역의 경우 에너지 범위가 훨씬 넓기 때문에 차이가 더 크게 나타났다. 그러나 광범위 에너지 영역에서의 검출기 효율 계산 결과는 측정치가 존재하지 않는 고에너지 영역에 대해 full energy peak 효율의 에너지 의존성을 제시하므로 저에너지 영역에서의 계산 결과에 비해 중요도는 훨씬 높다고 볼 수 있다. Full energy peak 이외에 single escape, double escape peak의 효율에 대한 모사와 측정치의 비교가 향후 계속될 것이다.

참고문헌

1. GEANT4 - Detector Description and Simulation Tool, Application Software Group, Computing and Network Division, CERN Geneva, Switzerland.
2. D. Karamanis, V. Lacoste, S. Andriamonje, G. Barreau and M. Petit, Nucl. Instr. and Meth. A 487 (2002) 477.
3. M.G. Tallavera, H. Neber, M.J. Daza and B. Quintana, Appl. Radiat. Isot. 52 (2000) 777.
4. M. Korun and T. Vidmar, Appl. Radiat. Isot. 52 (2000) 785.
5. J.M. Laborie, G. L. Petit, D. Abt and M. Girard, Appl. Radiat. Isot. 53 (2000) 57.
6. S. Ashrafi, A. Likar and T. Vidmar, Nucl. Instr. and Meth. A 438 (1999) 421.
7. M. Korun, A. Likar, and T. Vidmar, Nucl. Instr. and Meth. A 390 (1997) 203.
8. 김창석, 선광민, 이재운, 변수현, 김명섭, 배영덕, 최희동, Sae Mulli 37 (1997) 399.
9. 선광민, 김인중, 변수현, 최희동, “광범위 에너지 영역에서의 SNU-KAERI PGAA System HPGe 감마선 분광계통에 대한 에너지-효율 검정”, 2001 추계학술발표회 논문집.
10. I.O.B. Ewa, D. Bodizs, Sz. Czifrus and Zs. Molnar, Appl. Radiat. Isot. 55 (2001) 103
11. M.A. Ludington and R.G. Helmer, Nucl. Instr. and Meth. A 446 (2000) 506.

12. S. Kamboj and B. Kahn, Health Phys., 70(1996) 512.

13. S.H. Byun, G.M. Sun and H.D. Choi, Nucl. Instr. and Meth. A 487 (2002) 521.

Table 1. Specification of the CANBERRA GC1518 p-type HPGe detector.

crystal diameter : 50.5 mm	hole diameter : 7.5 mm
crystal length : 36.6 mm	hole depth : 22.0 mm
dead layer thickness : 0.5 mm	crystal to cap : 3.5 mm
Al cap thickness : 1.4 mm	

Table 2. Specification of the ORTEC GMX30190-S n-type HPGe detector.

crystal diameter : 58.2 mm	hole diameter : 9.0 mm
crystal length : 79.0 mm	hole depth : 70.2 mm
dead layer thickness : 0.3 mm	crystal to window : 3.0 mm
Be window thickness : 0.5 mm	

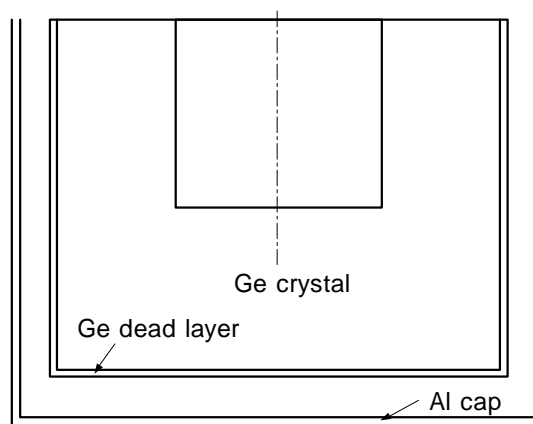


Fig. 1. Schematic diagram of CANBERRA p-type HPGe detector geometry.

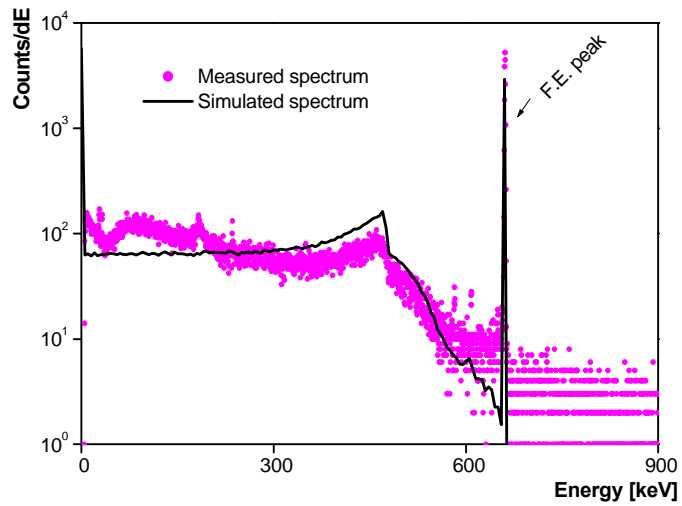


Fig. 2. Measured and simulated spectra 661.66 keV γ -ray from Cs-137.

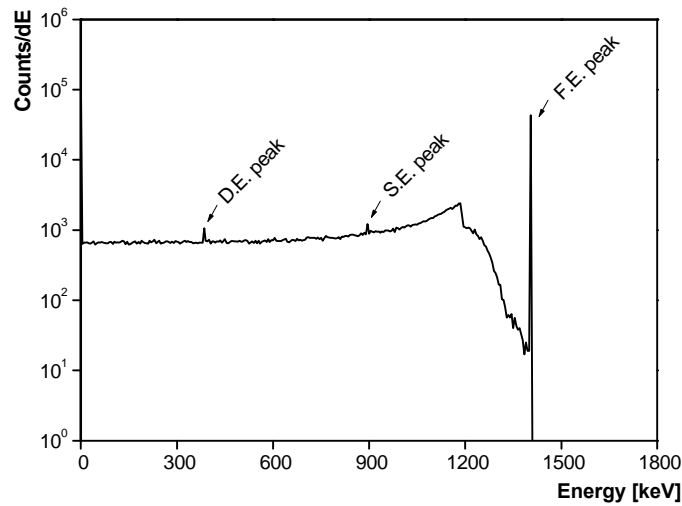


Fig. 3. Simulated spectrum of 1408.022 keV γ -ray.

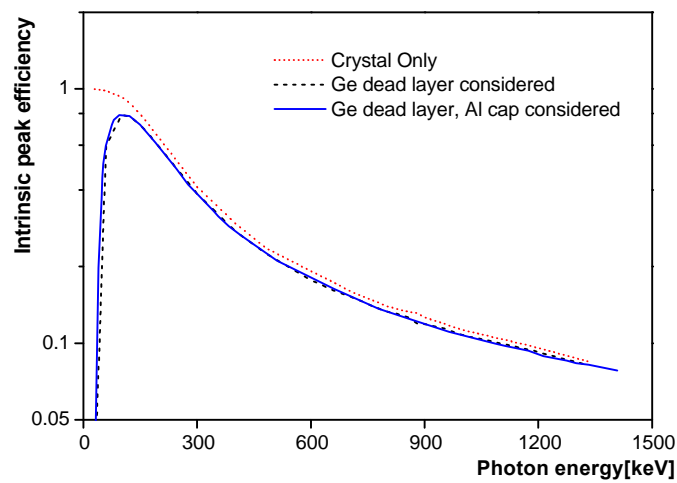


Fig. 4. Calculated intrinsic efficiency curve.

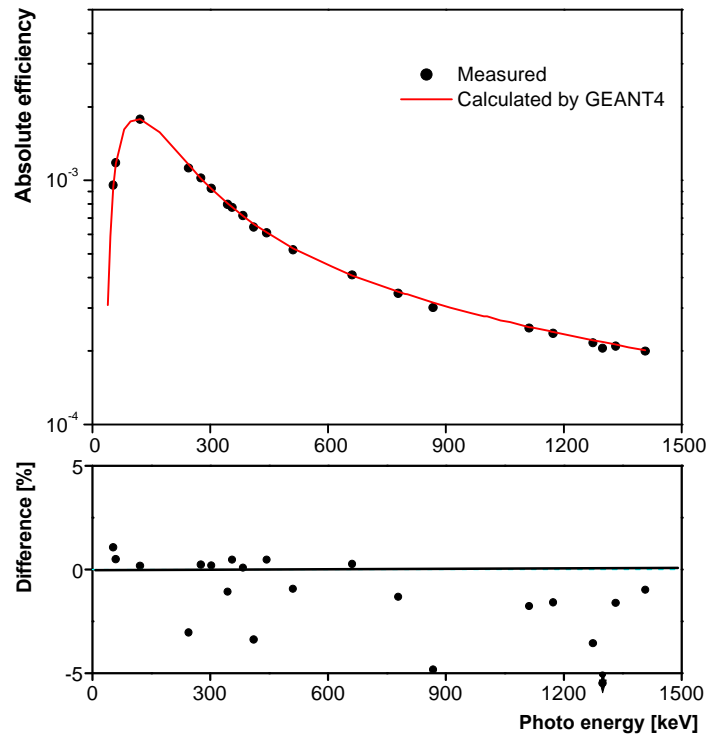


Fig. 5. Comparison between measured and calculated efficiency.

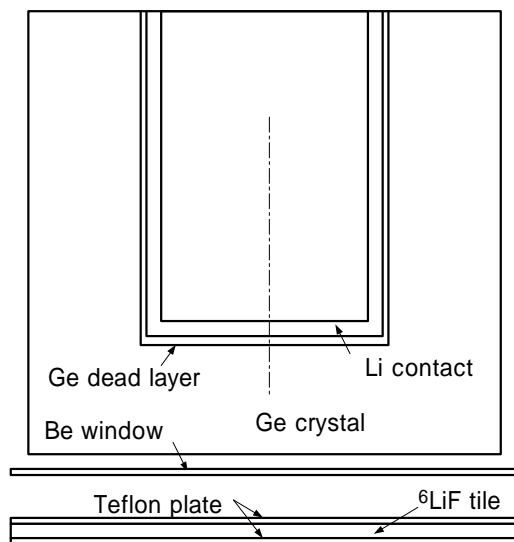


Fig. 6. Schematic diagram of ORTEC n-type HPGe detector and shield geometry.

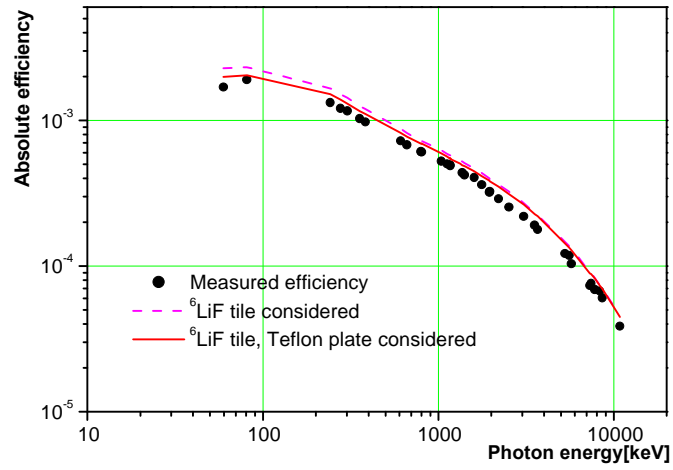


Fig. 7. Comparison between measured and calculated efficiency.

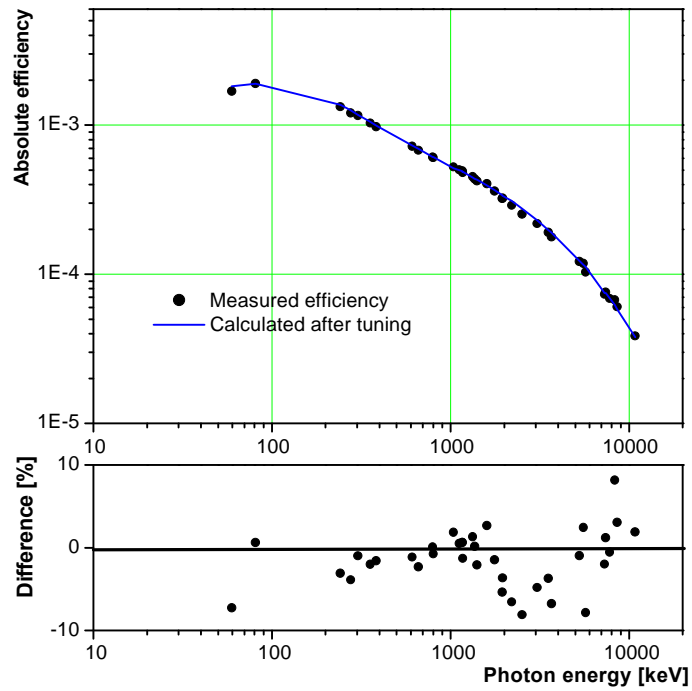


Fig. 8. Comparison between measured and calculated efficiency.