

HPGe 검출기의 단일이탈 및 이중이탈 피크 효율 결정

Determination of Single Escape and Double Escape Peak Efficiency for a HPGe Detector

박창수, 선광민, 최희동

서울대학교
서울특별시 관악구 신림동 산56-1

요 약

Monte Carlo 방법을 이용하여 즉발 감마선의 단일이탈 및 이중이탈 피크 효율을 계산하고 측정값과 비교하였다. 측정된 전흡수 피크 효율 및 이탈 피크와의 면적비를 이용하여 이탈 피크의 효율을 구하였다. 다른 감마선에 의한 피크와 간섭하는 이탈 피크는 보정을 통해 순면적을 구하였다. Monte Carlo 코드로는 CERN에서 개발한 GEANT를 이용하였다. 계산한 이탈 피크 효율은 측정값과 대부분 12% 이내로 일치하였다.

Abstract

The efficiencies of single escape and double escape peaks were calculated by using Monte Carlo method, and compared with the measured efficiency. The efficiencies of the escape peaks were obtained by using the measured full absorption energy peak efficiencies and the area ratio to escape peak. For the escape peaks interfered with another γ -ray peak, the pure area were obtained by correction. The GEANT code developed by CERN was used as Monte Carlo code. The calculated efficiencies of escape peaks almost agreed to the measurement within 12%.

1. 서 론

1022 keV 이상의 감마선 스펙트럼에서는 감마선의 쌍생성에 이어지는 양전자의 소멸로 인해, 입사에너지보다 511 keV 작은 단일이탈(SE)과 1022 keV 작은 이중이탈(DE) 피크가 나타난다. 수 MeV 이상의 고에너지 영역에서는 쌍생성이 일어날 확률이 광전효과나 콤프턴 산란의 효과보다 높아지기 때문에, 통상적인 크기의 검출기에서 이탈피크 효율이 전흡수(FE) 피크 효율보다 높아져

이탈 피크가 FE 피크보다 중요해진다[1,2]. 이러한 이탈 피크들은 Doppler 효과 및 소멸 방사선의 흡수에 따른 통계적 요동으로 인해 FE 피크와는 형성되는 모양이 달라 피크 분석에 주의해야 한다[1,3]. 특히 다른 피크와 간섭하는 경우는 피크의 분석이 더욱 어려워진다. 고에너지 영역의 스펙트럼을 이러한 영향을 고려하여 분석하기 위해서는 이탈 피크 효율을 구할 필요가 있다.

이탈 피크의 효율은 측정과 Monte Carlo 계산을 통해서 구할 수 있다. 측정을 통해 이탈 피크 효율($\epsilon_{SE(or\ DE)}$)을 FE 피크의 면적(A_{FE})과 SE 피크의 면적(A_{SE}) 및 DE 피크의 면적($A_{SE(or\ DE)}$)의 비($A_{SE(or\ DE)}/A_{FE}$)를 구하고 FE 효율(ϵ_{FE})[4]을 곱하여 (1) 식과 같이 결정한다.

$$\epsilon_{SE(or\ DE)} = \frac{A_{SE(or\ DE)}}{A_{FE}} \times \epsilon_{FE} \quad (1)$$

그러나, 측정은 2 MeV 이하 또는 10 MeV 이상인 영역에서 저효율로 인해 제한되며, 측정값 사이의 효율은 내삽에 의존하여야 한다. 측정 가능한 에너지가 충분한 경우에는 비교적 정확한 값을 구할 수 있으나, 측정 영역을 벗어나는 부분에 대해서는 fitting 식에 따른 값의 변동이 심하며, fitting에 일반적으로 사용되는 다항식에는 물리적 의미를 부여하기 어렵다. 반면, Monte Carlo 계산은 임의의 에너지에 대하여 충분한 통계로 계산이 가능하며, 계산 코드 내에 삽입된 알고리즘은 입자 운동을 모사할 수 있어, 물리적 현상이 반영된 결과를 얻을 수 있다.

본 연구에서는 Monte Carlo법을 통해 SE, DE 피크 효율을 구하였다. Monte Carlo 코드로는 HPGe 검출기 모사에 널리 활용되고 있는 GEANT 코드[5]를 선택하였다. 계산은 한국원자력연구소의 하나로에 설치된 SNU-KAERI PGAA(Prompt Gamma Activation Analysis)장치의 n-type HPGe 검출기[4]를 대상으로 하였다. 동일 검출기에 대해 GEANT를 이용한 광범위 에너지 영역(0.06 ~ 11 MeV)의 FE 피크 효율 계산[6]을 토대로 1.022 MeV 이상의 에너지를 갖는 감마선에 대해서 이탈 피크 효율을 계산하고 측정값과 비교하였다.

2. 이탈 피크 효율 측정

이탈 피크 효율은 측정된 FE 피크 효율에 대해 (1) 식을 이용하여 상대적으로 구하였다. 피크 면적의 분석은 HYPERMET 코드를 이용하였다[7].

이탈 피크가 다른 감마선에 의한 피크와 간섭하는 경우, 보정을 통해 이탈 피크의 순면적을 구할 수 있다. 간섭되는 피크는 Compton suppression spectrometer에서 pair 모드로 측정된 스펙트럼과 single 모드에서의 스펙트럼을 비교하여 쉽게 판별할 수 있다. 그림 1에 멜라민 시료를 측정된 즉발 감마선 스펙트럼에서 이탈 피크들이 간섭되는 경우를 나타내었다. Single 모드에서는 FE 피크와 더불어 SE, DE 피크도 기록되나, pair 모드에서는 SE, DE 피크만이 기록된다[2,4]. 그림에서 FE 피크인 6322 keV 피크는 single 모드에서만 나타나고 있으나, FE 피크인 5298 keV 피크는 pair 모드에서도 기록되고 있다. 따라서 5298 keV 피크에는 FE 피크 뿐 아니라, 6322 keV의 DE

피크인 5300 keV 피크가 간섭되어 있음을 확인할 수 있다. 그림 2에 동일 핵종으로부터 방출되는 감마선들에 대해 SE, DE 피크가 다른 감마선의 FE, SE 피크와 간섭되는 경우를 단순화하였다. 그림에서 FE₁, SE₁ 피크는 각각 SE₂, DE₂ 피크와 간섭되어 있다. FE₁ 피크의 순면적 A_{FE1}은,

$$A_{FE1} = A_{FE2} \cdot \frac{\epsilon_{FE1}}{\epsilon_{FE2}} \cdot \frac{\Gamma_1}{\Gamma_2} \quad (2)$$

와 같이 FE₂ 피크 면적(A_{FE2}), 각 FE 피크 효율값($\epsilon_{FE1}, \epsilon_{FE2}$)과 즉발 감마선 방출율(Γ_1, Γ_2)[8]로부터 결정된다. SE₂ 피크 순면적(A_{SE2})은 간섭된 피크의 면적(A_(SE2+FE1))에서 FE₁ 피크의 순면적(A_{FE1})을 제거함으로써,

$$A_{SE2} = A_{(SE2+FE1)} - A_{FE1} \quad (3)$$

와 같이 구해진다. 다른 핵종으로부터 방출되는 감마선끼리의 간섭인 경우도 방사능의 비를 고려하면 같은 방법으로 보정할 수 있다.

또한 이탈 피크의 효율을 정확히 알고 있다면, 이탈 피크의 순면적을 구해 (3) 식의 관계를 이용하여 간섭된 피크의 면적에서 FE 피크의 순면적을 구할 수 있다.

3. GEANT를 이용한 이탈 피크 효율 계산

GEANT를 이용한 이탈 피크 효율의 계산은 모사된 스펙트럼에서 이탈 피크의 순면적을 분석하는 방법과 입자 수송 중에 계수하는 방법이 있다. 에너지가 6760.08 keV인 감마선에 대하여 모사한 스펙트럼을 Ti의 즉발 감마선 스펙트럼 측정 결과와 함께 나타내면 그림 3과 같다. 스펙트럼에서 SE 또는 DE 피크의 면적은 백그라운드 continuum을 제거한 net count의 값으로 구할 수 있다. 이 방법은 모사한 스펙트럼에서 이탈 피크 각각에 대해 순면적을 구해야 하기 때문에 번거로운 단점이 있다. 두 번째 방법으로 Monte Carlo 계산 과정에서 이탈 피크가 형성되는 event를 직접 계수하여 계산할 수 있다. 즉, 양전자가 생성되는 조건과 전체 흡수 에너지가 입사 에너지보다 511 keV 또는 1022 keV만큼 작다는 조건을 동시에 만족하는 경우를 계수하여 효율을 계산한다. 두 가지 방법으로 구한 이탈 피크의 효율은 2% 이내로 일치하므로 보다 간편한 후자의 방법으로 이탈 피크 효율을 계산하였다.

이탈 피크 효율은 1678 ~ 10829 keV의 에너지 영역에서 ¹H, ¹⁴N, ³⁵Cl의 열중성자 포획반응으로 방출되는 즉발감마선 피크들에 대해 계산하였다. GEANT 코드에 입력한 검출기 구조는 FE 피크 효율 계산시의 구조[6]와 동일하며, Monte Carlo 계산을 위해 총 발생된 감마선의 개수는 이탈 피크의 계수치가 통계 오차 1% 미만인 되도록 설정하였다. 계수된 이탈 피크 event 수와 총 감마선 발생 수의 비로써 이탈 피크의 효율을 구하였다.

4. 결 과

그림 4는 FE 피크에 대한 각 이탈 피크의 면적비를 계산하여 측정값과 비교한 결과이다. 그림에서 이탈 피크가 다른 피크와 간섭이 없고 전체적인 경향성을 잘 따르는 경우(uninterfered), (2,3) 식의 방법으로 같은 핵종에 의한 간섭을 보정한 경우(interference corrected), 다른 피크와 간섭되어 있으나 보정이 어려운 경우(interference checked), 경향성을 잘 따르지 않으면서도 간섭이 확인되지 않는 경우(unknown deviation) 등의 네 가지 경우로 구분하였다. 표 1에 간섭으로 인해 효율에 영향을 미치거나 경향성을 잘 따르지 않는 이탈 피크들을 정리하였다. 괄호 안에 간섭된 피크들을 나타내었다. Unknown deviation에 해당되는 이탈 피크들은 면적 분석이 쉽지 않았던 경우로 분석 결과의 오차는 15 ~ 25%이다.

그림 5에 간섭된 피크로서 보정이 곤란한 경우를 제외한 다른 경우들에 대해 SE 피크와 DE 피크의 면적비를 나타내었다. 대부분의 측정값 및 이론적인 계산값은 선형적인 관계를 잘 따른다. 쌍생성 이후의 511 keV 소멸 방사선이 Ge crystal을 탈출할 확률이 거의 일정하기 때문에 면적비는 거의 상수값을 나타낸다[1,9,10]. 에너지에 따라 약간 증가하는 경향을 보이는 것은 crystal에 입사되는 감마선이 고에너지일수록 쌍생성 위치가 crystal의 뒤쪽과 바깥쪽에 많이 분포하여 반응을 일으켜 소멸 방사선의 탈출 확률이 높아지기 때문이다.

이탈 피크와 FE 피크의 면적비에 FE 피크 효율[4]을 곱하여 구한 절대 효율 측정값과 계산값을 비교한 결과는 그림 6과 같다. Unknown deviation에 해당하는 결과는 계산값에 대해 12% 이상 차이이며, 이는 피크 분석시 간섭된 피크를 찾지 못하거나, 면적 분석 및 측정에서의 오차 때문으로 추정된다. 이들 결과를 제외한 계산값과 측정값은 모두 12% 이내로 일치하고 있다.

5. 결 론

1022 keV 이상의 에너지를 지닌 감마선에 대해 SNU-KAERI PGAA 장치에 사용되는 HPGe 검출기를 대상으로 SE, DE 피크의 효율을 GEANT를 통해 Monte Carlo 방법으로 계산하고 측정값과 비교하였다. 측정된 자료 중에 간섭되는 경우에 대해서 감마선 방출비와 면적비를 이용하여 보정하였다. 측정값과 계산값의 비교 결과, 간섭의 영향을 받지 않거나 간섭 효과를 보정한 경우는 이탈 피크의 효율이 모두 12% 이내로 일치하고 있어, 전체적인 경향성 및 측정값을 잘 따르고 있다. 본 연구를 통해서 고에너지 즉발 감마선 스펙트럼에서 이탈 피크 효율을 제시하였고, 이는 고에너지 감마선 스펙트럼을 분석하는 참고자료로서 이용될 수 있다. 전체적인 효율값의 경향성을 많이 벗어나 계산값과 두드러진 차이를 보이는 이탈 피크들에 대해서는 피크 면적 분석 과정, 추가 간섭 여부 등에 대한 추가적인 검토가 필요하다.

참고문헌

1. K. Debertin and R.G. Helmer, Gamma- and X-ray Spectrometry with Semiconductor Detectors, pp. 243-244, North-Holland, Amsterdam (1988).
2. Z.B. Alfassi, Non-Destructive Elemental Analysis, pp. 75-77, Blackwell Science Ltd, London, (2001).
3. G. Gilmore and J.D. Hemingway, Practical Gamma-Ray Spectroscopy, p. 136, John Wiley & Sons, New York, (1995).
4. G.M. Sun, C.S. Park and H.D. Choi, J. Korean Nucl. Soc. (submitted).
5. GEANT4 - Detector Description and Simulation Tool, Application Software Group, Computing and Network Division, CERN Geneva, Switzerland.
6. C.S. Park, G.M. Sun and H.D. Choi, J. Korean Nucl. Soc. (in press).
7. G.W. Phillips and K.W. Marlow, Nucl. Instr. and Meth. 137 (1976) 525.
8. R.B. Firestone, Lawrence Berkeley National Laboratory, USA, private communication.
9. J.R. Johnson and K.C. Mann, Nucl. Instr. and Meth. 112 (1973) 601.
10. H. Seyfarth, A.M. Hassan, B. Hrastnik, P. Göttel and W. Delang, Nucl. Instr. and Meth. 105 (1972) 301.

Table 1. List of interfered escape peaks and unknown deviation.

Case	Nuclide	Peak energy [keV]
Interference corrected	^{14}N	4508.73 SE, DE, 5533.40 DE (4508.73 _(FE) + 4511.40 _(DE)) 5297.82 SE, DE, 6322.43 DE (5297.82 _(FE) + 5300.43 _(DE))
	^{35}Cl	6110.84 DE, 6619.62 SE (6110.84 _(FE) + 6108.62 _(SE) , 5599.84 _(SE) + 5597.62 _(DE))
Interference checked	^{14}N	2830.79 SE, DE (2319.79 _(SE) + background 2321 _(FE))
	^{35}Cl	4979.76 SE, DE (4979.76 _(FE) + background 4977.80 _(DE))
Unknown deviation	^{14}N	1678.28 SE, 1884.82 SE 3531.89 SE, 7298.98 DE
	^{35}Cl	2863.82 DE

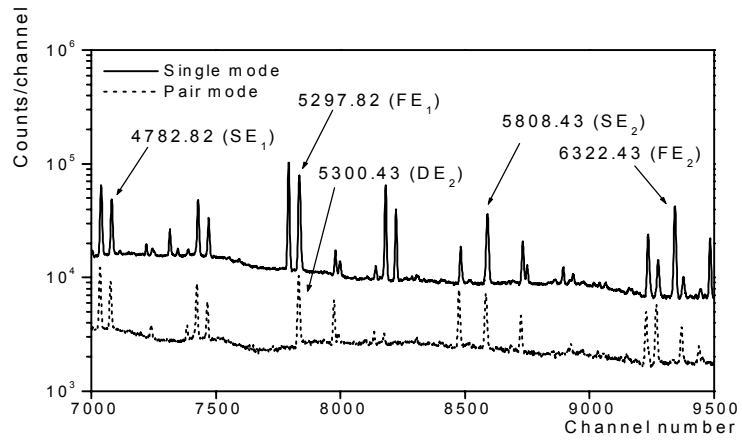


Fig. 1. Single mode and pair mode spectra of prompt γ -ray from melamine($C_3H_6N_6$).

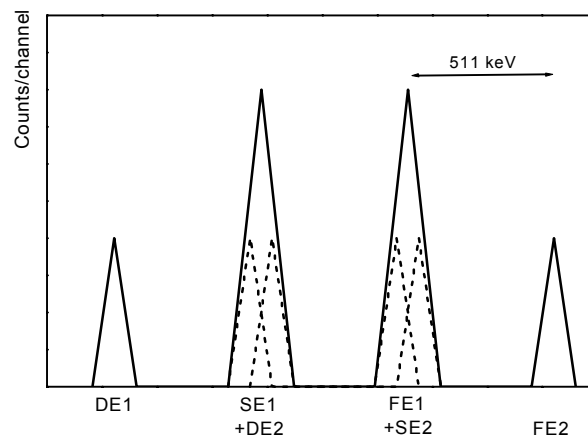


Fig. 2. Schematic diagram of interfered escape peaks.

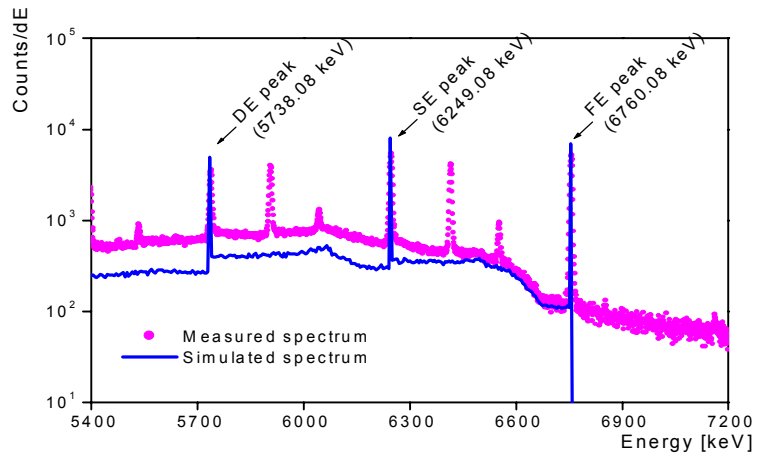


Fig. 3. Measured prompt γ -ray spectrum for Ti and simulated spectrum for 6760.08 keV γ -ray.

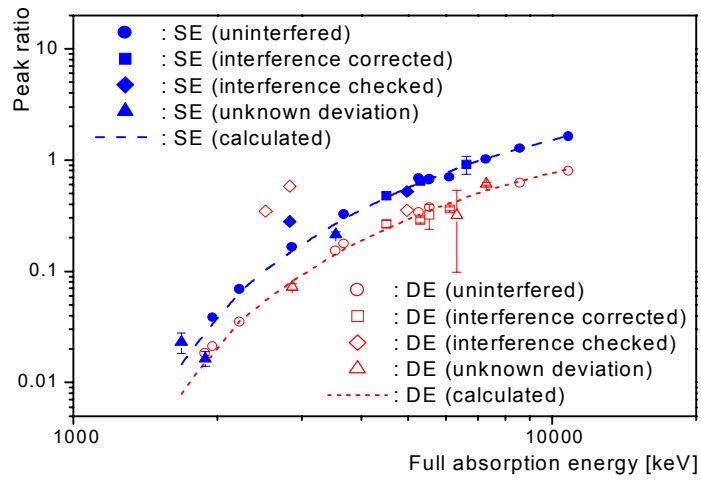


Fig. 4. Measured and calculated ratios of escape peak to full energy peak efficiency.

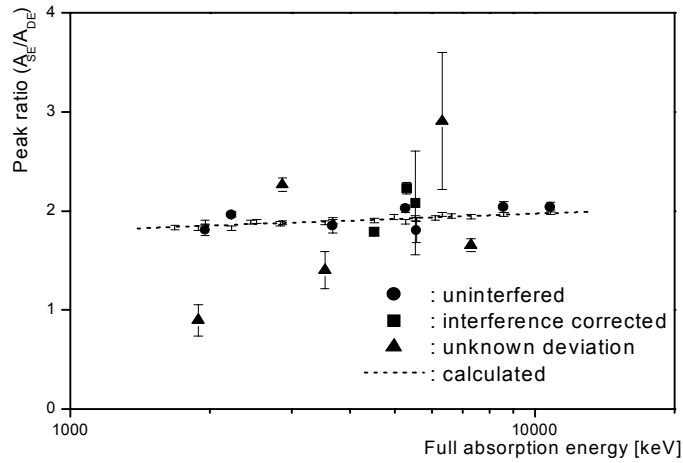


Fig. 5. Measured and calculated ratios of single escape peak to double escape peak area.

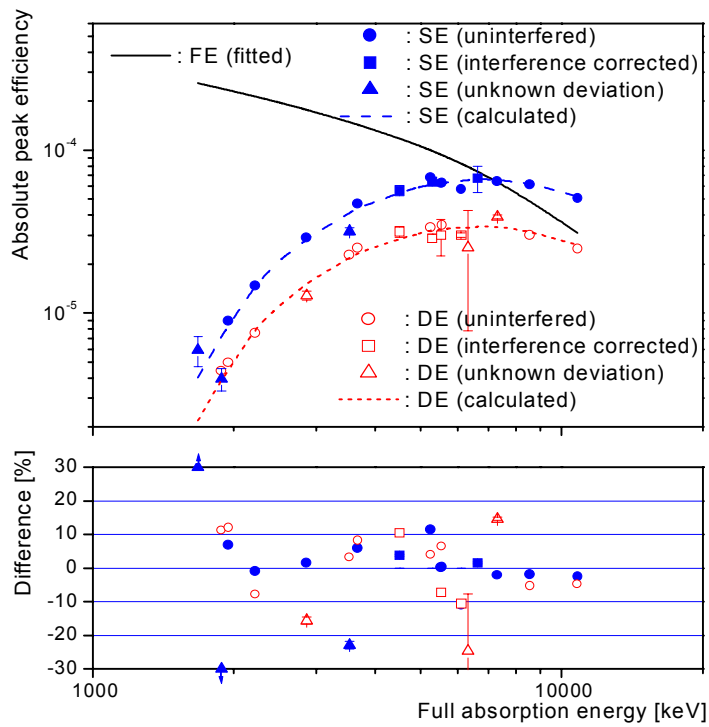


Fig. 6. Measured and calculated efficiencies of single and double escape peaks.