

^{60}Co 감마선 분광에서 동시중첩 피크에 나타난 각상관의 영향

The Influence of Angular Correlation on Coincidence Summing Peak in ^{60}Co Gamma-ray Spectrum

김인중, 김석권, 선광민, 변수현, 최희동

서울대학교
서울특별시 관악구 신림동 산56-1

요 약

HPGe 검출기를 이용하여 측정한 Co-60 감마선 스펙트럼으로부터 동시중첩(coincidence summing) 피크에 나타난 각상관의 영향을 분석하였다. 측정은 선원-검출기간 거리를 0.6 cm에서 25.6 cm까지 변화시키며 수행하였고, 계측계통은 40~3100 keV 영역의 스펙트럼을 측정하도록 구성하였다. 몬테카를로 방법을 통해 얻은 감마선 입사각에 따른 검출효율을 이용하여 본 연구에 사용한 HPGe 검출기에 대한 각상관을 이론적인 방법으로 계산하고 실험과 비교하였다.

Abstract

The influence of angular correlation on coincidence summing peak was analyzed from the Co-60 gamma-ray spectrum measured with HPGe detector. The measurement was performed varying the source-to-detector distance from 0.6 cm to 25.6 cm, and the spectroscopy system was set up to measure the spectrum in the range of 40~3100 keV. The angular correlation for the HPGe detector used in this study was calculated by using the detector efficiency for the incident angle of gamma-rays obtained by Monte Carlo method and compared with the experiment.

1. 서론

HPGe 검출기를 이용한 감마선 분광에서 동시중첩(coincidence summing)은 스펙트럼을 왜곡하여 검출효율의 결정에 영향을 미친다. 동시중첩은 하나의 핵으로부터 cascade로 방출된 감마선이 검출기에 동시 흡수되어 나타나며, 그 영향은 decay scheme과 중첩되는 감마선간 각상관 그리고 검출효율에 의해 결정된다. 검출기의 검출효율 결정에서 동시중첩의 영향을 보정하기 위한 연구는 다양하게 수행되었다 [1,2,3]. 그러나 일반적으로 동시중첩의 보정에서 각상관의 영향은 다음과

같은 이유로 무시되었다. 먼저, 검출기에 대한 각상관 자료가 부족하기 때문이다. 핵의 붕괴로부터 방출되는 감마선 사이의 각상관은 이론적, 실험적 방법으로 연구되었다 [4]. 그러나 검출기 내에서의 각상관은 검출효율에 대하여 평균한 결과로 나타나므로 실험 및 계산이 복잡하여 그 자료가 부족하다. 그리고 대부분 핵종의 경우 방출되는 감마선 사이의 각상관이 크지 않은 까닭에 그 영향이 무시되었다. 본 연구에서는 HPGe 검출기를 이용한 Co-60 감마선 스펙트럼 측정을 통해 동시중첩 피크에 나타난 각상관의 영향을 분석하였다. 비교를 위하여 몬테카를로 방법을 이용해 감마선의 입사각에 따른 검출효율을 계산하고, 이로부터 검출기에 대한 각상관을 계산하였다.

2. 피크 계수율 관계

비교적 간단한 decay scheme을 갖는 Co-60의 감마선 분광에서, 0.1% 미만의 분기율을 갖는 경우를 무시하고 1173, 1332 keV 감마선만을 고려하면 피크 계수율과 총계수율은

$$N_1 = A \cdot \epsilon_1^p \times [1 - \epsilon_2^t \cdot \overline{W}(0)] \quad (1)$$

$$N_2 = A \cdot \epsilon_2^p \times [1 - \epsilon_1^t \cdot \overline{W}(0)] \quad (2)$$

$$N_s = A \cdot \epsilon_1^p \cdot \epsilon_2^p \times \overline{W}(0) \quad (3)$$

$$N_t = A \times [\epsilon_1^t + \epsilon_2^t - \epsilon_1^t \cdot \epsilon_2^t \cdot \overline{W}(0)] \quad (4)$$

와 같이 나타낼 수 있다 [1]. 여기서 아래첨자 1, 2는 각각 1332 keV, 1173 keV 감마선을 나타내며 s는 두 감마선의 동시중첩에 의한 sum peak를 의미한다. A는 선원의 방사능이고 N은 피크 계수율(N_t 는 총계수율)이며, ϵ^p 와 ϵ^t 는 각각 검출기의 전흡수 피크효율과 전효율이다. 그리고 $\overline{W}(0)$ 은 동시중첩을 일으키는 감마선의 검출기에 대한 각상관이다.

위의 관계로부터 선원의 방사능 A에 대하여 정리하면 A는 다음과 같이 나타내어진다.

$$A = \left[\frac{N_1 \cdot N_2}{N_s} + N_t \right] \times \overline{W}(0) \quad (5)$$

이때 각상관을 무시하고 A'을

$$A' \equiv \frac{N_1 \cdot N_2}{N_s} + N_t \quad (6)$$

와 같이 정의하면, A'과 A와의 비교를 통해 각상관의 영향을 다음과 같이 분석할 수 있다.

$$\begin{aligned} (\text{Relative Dev.}) &\equiv \frac{A'}{A} - 1 \\ &= \frac{1}{\overline{W}(0)} - 1 \end{aligned} \quad (7)$$

3. HPGe 검출기에 대한 각상관 계산

동시중첩을 일으키는 감마선 1과 2사이의 각상관은 HPGe 검출기에 대하여 다음과 같다 [5.6].

$$\overline{W}(\theta) = \sum_{\text{even } l} \alpha_l P_l(\cos \theta) \cdot Q_l(1) Q_l(2) \quad (8)$$

$$Q_l(i) \equiv J_l(i) / J_0(i) \quad (9)$$

$$J_l(i) \equiv \int_0^{\beta_{\text{max}}} d\beta \sin(\beta) \cdot P_l(\cos \beta) \epsilon_i(\beta) \quad (10)$$

여기서 θ 는 감마선 사이의 각상관을 측정하는 두 개의 검출기가 이루는 각으로, 단일 검출기에 대한 경우에는 0이다. $\epsilon_i(\beta)$ 은 검출기 중심축에 대해 β 의 각도로 입사한 감마선 i (1 또는 2)에 대한 검출기의 검출효율이다. 그리고 α_0 는 감마선 사이의 각상관 계수로서, Co-60의 붕괴는 E2 transition에 의해 $4^+ \rightarrow 2^+ \rightarrow 0^+$ 상태로 여기 준위 변화가 일어나므로, $\alpha_0 = 1$, $\alpha_2 = 0.1020$, $\alpha_4 = 0.0091$ 로 주어지며, 고차항은 무시된다 [4].

몬테카를로 모사를 통해 $\epsilon(\beta)$ 는 계산하였다. 계산은 선원-검출기간거리 0.6 cm부터 25.6 cm까지의 구간에서 수행하였다. 계산으로부터 각상관 $\overline{W}(0)$ 는 그림 1과 같다.

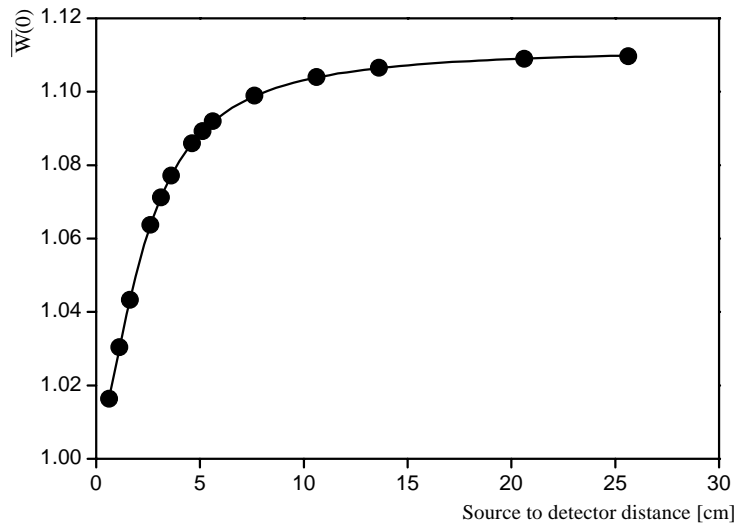


Fig. 1. The angular correlation between 1173, 1332 keV gamma-rays for HPGe detector in this study.

4. 실험

본 연구에서 사용한 HPGe 검출기는 closed-ended coaxial 형으로 체적이 72 cm^3 으로 상대효율은 15%이고, 피크의 반치폭은 1.33 MeV 감마선에 대해 1.73 keV이다. 계측계통은 대략 40~3100 keV 범위의 스펙트럼을 측정하도록 구성하였고, 선원은 Amersham사와 IAEA에서 구입한 3개의 점선원을 사용하였다. Amersham사로부터 구입한 2개의 Co-60 선원은 각각 1996년 6월 1일과

2000년 4월 1일 검정시 신뢰도 68%에서 46.1(±3%) kBq (Amersham I)과 4.54(±3%) kBq (Amersham II)였고, IAEA에서 구입한 선원은 1983년 7월 1일 검정시 415.6(±0.3%) kBq이었다. Co-60의 반감기는 1925.3393±0.5113 day를 사용하였다. 불감시간은 최대 10%이하로 유지하였다.

Co-60의 감마선 스펙트럼은 선원-검출기간 거리 0.6 cm에 대해 그림 2와 같다. 피크면적의 분석은 HYPERMET [7] 코드를 이용하여 수행하였다. 그리고 sum peak의 면적 결정에서 있을 수 있는 방법론적 오류를 확인하기 위하여, Debertin 등 [8]에 의한 피크면적 결정방법의 결과와 비교하였다. 통계가 충분히 좋은 경우 1%미만의 차이를 보였다.

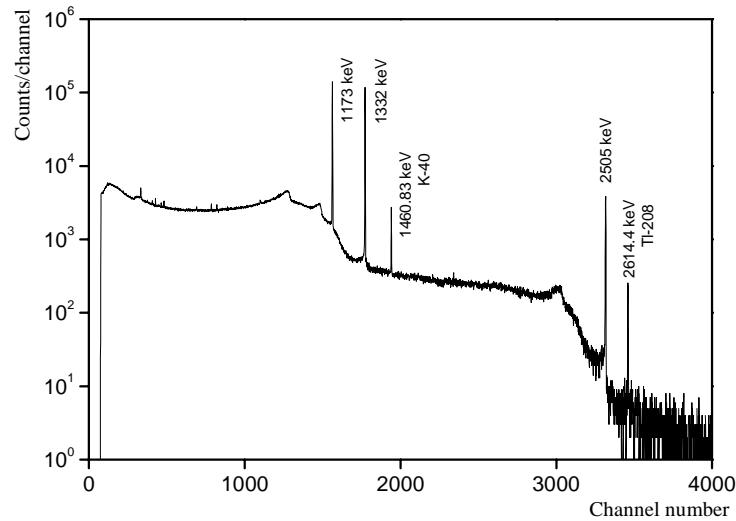


Fig. 2. The total spectrum of Co-60 by HPGe detector.

(6)식의 A'을 계산하고 공급자가 제시한 선원의 방사능 A_s와 비교하였다.

$$(Relative\ Dev.)_s \equiv \frac{A'}{A} \times \frac{A}{A_s} - 1 \tag{11}$$

여기서 A는 선원의 실제방사능이다. 결과는 그림 3과 같다.

그림 3으로부터 선원-검출기간 거리가 가까울수록 각상관에 의한 영향이 작아지는 것을 볼 수 있는데 이것은 선원이 검출기를 바라보는 입체각이 커지기 때문이다. 그리고 거리가 먼 경우에는 각상관에 의한 영향인 일정한 값으로 수렴하는 것은 거리가 멀어짐에 따라 입체각이 작아지기 때문이며, 접근하는 값은 각상관 계수에 관계한다. Amersham I선원과 IAEA선원의 경우에서 계산값에 대해 크게 벗어나는 이유는 공급자로부터 방사능이 5에서 10% 가량 높게 제시되었을 가능성을 생각해 볼 수 있으나 그 원인을 명확히 하기 위해서는 방사능의 절대측정이 수행되어야 한다.

5. 결론

HPGe 검출기를 이용하여 Co-60의 감마선 측정을 수행하고, 동시중첩 피크에 나타난 각상관의

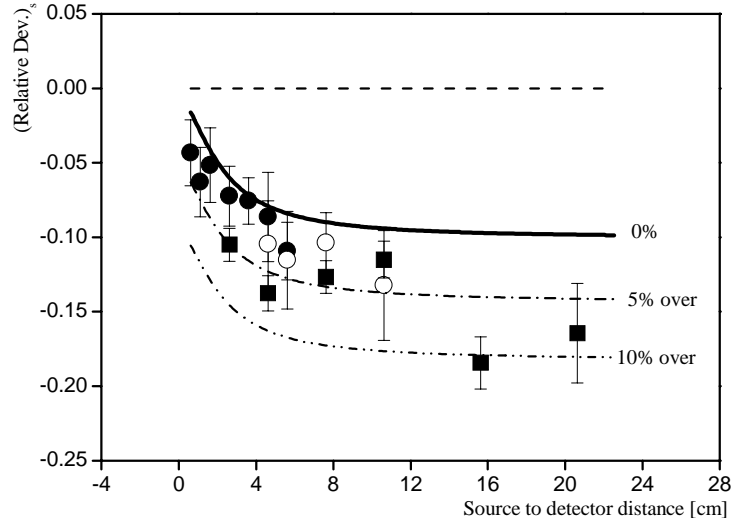


Fig. 3. The relative deviation of A' to source activity A_s .
 ○: Amersham I, ●: Amersham II, ■: IAEA source and the lines are calculated by Monte Carlo method;
 - - - - -: the angular correlation is neglected,
 —: A_s over A by 0%, - · - : by 5%, - · · - : by 10%

영향을 분석하였다. 그리고 몬테카를로 방법에 의한 감마선의 입사각에 따른 검출효율을 이용하여 HPGe 검출기에 대한 각상관을 이론적으로 계산하였다. 실험결과, 동시중첩 피크에 나타난 각상관의 영향을 확인할 수 있었다.

6. 참고문헌

- [1] G.J. McCallum and G.E. Coote, Nucl. Instr. and Meth. 130 (1975) 189.
- [2] K. Debertin and U. Schötzig, Nucl. Instr. and Meth. 158 (1979) 471.
- [3] T.M. Semkow, G. Mehmood, P.P. Parekh and M. Virgil, Nucl. Instr. and Meth. A290 (1990) 437.
- [4] H. Frauenfelder and R.M. Steffen, "Alpha-, Beta- and Gamma Ray Spectroscopy Vol. 2", edited by K. Siegbahn, 1030, North Holland, Amsterdam, 1966.
- [5] D.C. Camp and A.L. Van Lehn, Nucl. Instr. and Meth. 76 (1969) 192.
- [6] M.E. Rose, Phys. Rev. 91 (1953) 610.
- [7] G.W. Phillips and K.W. Marlow, NRL Memorandum Report 3198, Naval Research Laboratory, 1976.
- [8] K. Debertin and R.G. Helmer, "Gamma- and X-Ray Spectrometry with Semiconductor Detectors", 176, Elsevier Science Publishers, 1988.