

절대 피크 효율 계산을 위한 유효입체각 계산 프로그램 개발

Development of the Effective Solid Angle Program for the Calculation of the Absolute Peak Efficiency

선광민, 최희동

서울대학교
서울특별시 관악구 신림동 산56-1

요 약

부피선원의 절대 피크 효율 계산을 위하여 선원 및 HPGe 검출기 인접 흡수체 내에서의 감마선 감쇠를 고려한 유효입체각 계산 프로그램 ESA(Effective Solid Angle) code를 개발하였다. 그 결과를 close-ended coaxial HPGe 검출기와 원통형 선원의 경우에 대하여 Moens 등의 자료와 비교함을 통하여 프로그램의 타당성을 검증하였다.

Abstract

For the calculation of the absolute peak efficiency of the HPGe detector, we developed the ESA(Effective Solid Angle) program that takes into account the attenuation of the gamma-rays in the source and the interjacent absorbers between the detector and the source. The validation of the program is accomplished by comparison with the data of Moens et al. in the case of the close-ended coaxial HPGe detector and cylindrical source.

1. 서 론

절대 감마 계측(absolute gamma-counting)을 위해서는 해당 계측 조건에서 관심 감마선 에너지(E_γ)에 대한 절대 피크 효율(absolute peak efficiency, ϵ_p)이 필요하다. 점 선원인 경우 절대 피크 효율을 실험적으로 결정하는 것은 비교적 쉽다. 그러나, 방사화 분석에서 사용되는 대부분의 시료와 환경 시료 등과 같은 부피 선원일 경우 실험에 의한 피크 효율 결정은 매우 번거롭고 시간이 많이 소요되는 지루한 작업이다. 또한 정확히 검정된 다양한 형상과 조성의 선원을 준비하는 것도 현실적으로 매우 어렵다. 따라서, 대개의 경우에 있어 계산에 의한 피크 효율 결정 방법이

선호되며, 그 방법론에 대하여 다양한 저자들에 의해 논의된 바 있다[1]. 특히, Moens 등은 coaxial Ge(Li) 검출기에 대하여 선원, 검출기 및 인접 흡수체 등에서의 감마선 감쇠효과를 고려한 유효입체각(effective solid angle) 계산을 통한 피크 효율 결정 방법을 제시하였다[2]. 유효입체각 계산을 통한 입체의 기하학적 계측 조건에서의 피크 효율 결정 과정은 다음과 같다.

- 1) 동시중첩을 무시할 수 있을 만큼 검출기에서 충분히 먼 거리에서 표준 점 선원(ref)을 이용하여 절대 피크 효율($\epsilon_{p,ref}$)을 측정한다.
- 2) 점 선원에 대한 유효입체각($\overline{\Omega}_{ref}$) 및 관심 선원(x)에 대한 유효입체각($\overline{\Omega}_x$)을 각각 계산한다.
- 3) 관심 선원에 대한 절대 피크 효율($\epsilon_{p,x}$)은

$$\epsilon_{p,x} = \epsilon_{p,ref} \left(\overline{\Omega}_x / \overline{\Omega}_{ref} \right) \quad (1)$$

로부터 구한다.

2. 유효입체각 계산 방법

그림 1과 같은 부피 선원에 대하여 선원, 검출기 및 인접 흡수체 등에서의 감마선 감쇠효과를 고려한 유효입체각은

$$\overline{\Omega} = \int_{z_s} \int_{y_s} \int_{x_s} \int_{y_{cf}} \int_{x_{cf}} \frac{G_{att} H_{eff} z_s dx_{cf} dy_{cf} dx_s dy_s dz_s}{[(x_s - x_{cf})^2 + (y_s - y_{cf})^2 + (z_s - z_{cf})^2]^{\frac{3}{2}}} \quad (2)$$

와 같다. 여기서, G_{att} 는 선원-검출기 사이에 놓여져 있는 공기 및 인접 흡수체에서의 감마선 감쇠를 나타내는 감쇠인자(attenuation factor)로서

$$G_{att} = \exp\left(-\sum_{i=1}^m \mu_i \delta_i\right) \quad (3)$$

와 같다. 여기서 μ_i 는 coherent scattering을 제외한 i 번째 흡수체의 감쇠계수이고, δ_i 는 각 흡수체에서의 감마선 행정이다. H_{eff} 는 검출기 민감영역에 입사한 감마선이 이탈하기 전까지 검출기와 상호작용할 확률을 나타내는 효율인자(efficiency factor)로서

$$H_{eff} = 1 - \exp(-\mu_d \Delta_d) \quad (4)$$

와 같다. 여기서 μ_d 는 coherent scattering을 제외한 검출기 물질의 총선형감쇠계수이고, Δ_d 는 검출기내 감마선 행정이다. Close-ended coaxial HPGe 검출기에 대해서 선원 위치를 각각 축 방향 및 반경 방향으로 변화시키면서 검출기내 감마선 행정을 계산한 결과를 검출기로의 입사각도에 대하여 각각 그림 2와 그림 3에 나타내었다. Ge 결정 가운데 존재하는 원통형 공동(cavity)으로 인한 감마선 행정의 변화가 뚜렷이 보인다. 프로그램은 Compaq Visual Fortran 6.1로 작성되었으며, 각 흡수체 및 검출기 내에서의 감쇠계수 계산을 위하여 원소 및 화합물에 대한 1 keV에서 100 GeV에 이르는 광자의 미분상호작용단면적 및 선형감쇠계수를 계산할 수 있는 XCOM routine[3,4]을 삽입하였다. 또한 적분의 정확성을 위하여 매우 신속하고 정확한 다중 적분 코드로 알려져 있는 Adaptive Multi-dimensional Integration Routine for a Vector of Integrals[5]을 채용하였다. 그리고 점 선원, 원판형 선원, 원통형 선원, 구형 선원의 유효입체각을 계산할 수 있도록 하였다.

3. 계산 및 결과

프로그램의 타당성 검증을 위하여 Moens 등의 계산 조건[2]에 맞추어 계산하여 결과를 상호 비교하였다. Moens의 논문 중에 선원 및 선원 container의 재질에 대한 정보가 제시되지

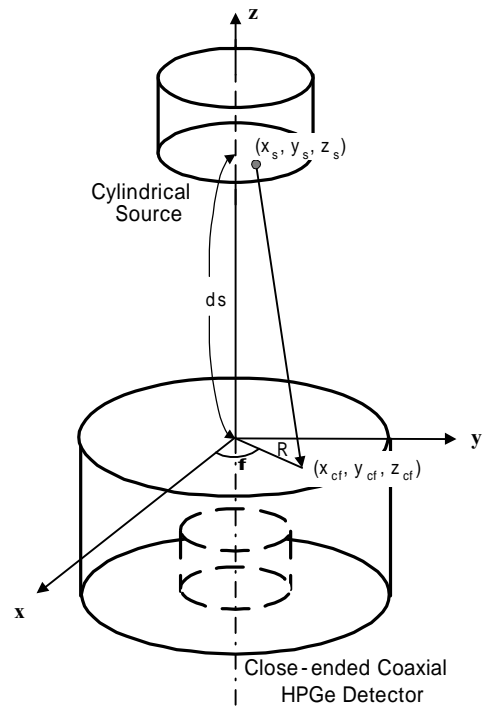


Fig. 1. Calculation of effective solid angle for arbitrary shape source.

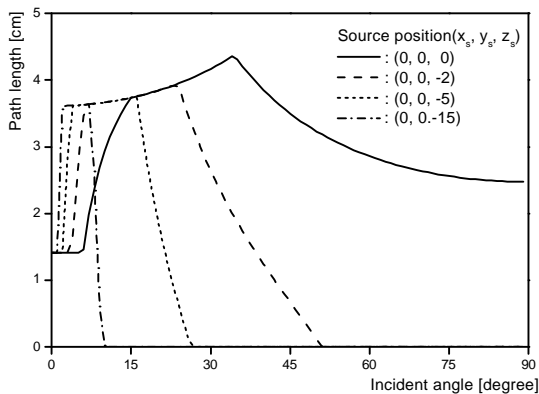


Fig. 2. Variation of the path length in the detector by moving the source in the axial direction.

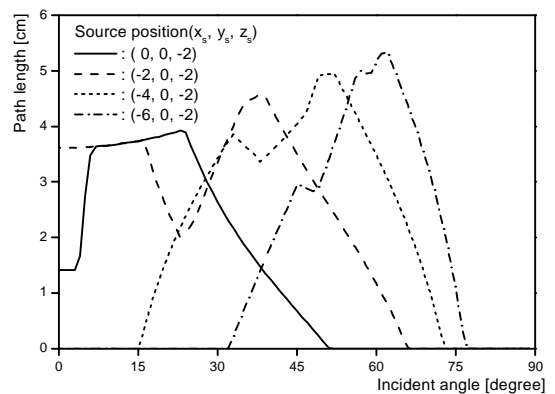


Fig. 3. Variation of the path length in the detector by moving the source in the radial direction.

않았으므로, 제시된 감마선 감쇠계수로부터 선원은 방사성 물질이 균질하게 혼재해 있는 수용액으로, container는 폴리에틸렌수지($[CH_2]_n$)로 가정하였다. 또한 선원-검출기간 인접 흡수체들은 Al cap, Ge 불감층, Mylar/Kapton 층 및 공기층으로 구성된 것으로 가정하여 계산을 수행하였다. Close-ended coaxial HPGe 검출기와 원통형 선원에 대한 입력 및 출력 예는 표 1, 2와 같다. 그림 4에서는 본 계산 결과와 Moens의 계산 결과[2]를 비교하여 나타내었다. 본 계산 결과는 1.2 MeV에서 0.06822 sr으로서 Moens의 계산 결과 0.06736 sr과 약 1.3%의 차이를 보였다. 이러한 차이는 선원 및 검출기 인접 흡수체에 대한 정보가 부족하고, 사용한 선형감쇠계수의 차이에서 비롯된다. 선형감쇠계수는 Moens가 사용한 자료와 1.2 MeV에서 약 1% 정도의 차이를 보였다. 그림 5는 기하입체각(geometrical solid angle)과 유효입체각을 비교하여 나타내었으며, 감쇠인자(G_{att})와 효율인자(H_{eff})를 함께 나타내었다. 감쇠인자는 입사 감마선 에너지 0.1 MeV까지 급격히 증가하다가 그 이후 완만히 증가하는 반면, 효율인자는 입사 감마선 에너지가 증가함에 따라 점진적으로 감소한다. 이에 따라 유효입체각은 약 0.1 MeV 근처

Table 1. Example of input.

```

=====
[Source type] CYLINDRICAL SOURCE
[Detector type] Close-ended coaxial HPGe Detector
[Detector dimension(rd, z1d, z2d, rh, hgap)]
0.2615e1 0.0 0.504e1 0.65 0.194e1
[Adjacent layers(talu, dalu, tmyl, dmyl, tkap, dkap, tiGe, dGe, tair, dair)]
0.15 2.69890 0.01 1.40000 0.20000 1.42000 0.05 5.32300 0.05 0.00120479
[Source dimension(rs, ls, drc, dbc)]
1.375 1.34 0.1625 0.200
[Source Center Position(xs, ys, zs)]
0.0 0.0 -1.3943
[Source and Container material(src, dsrc, ctn, dctn)]
H2O 1.00 CH2 0.93
=====

```

Table 2. Example of output.

ENERGY [MEV]	FTEST CALLS	F _{ATT} FACTOR	F _{EFF} FACTOR	GEOMETRICAL SOLID ANGLE	ESTIMATED ERROR	EFFECTIVE SOLID ANGLE	ESTIMATED ERROR
0.07	9555	0.55784	0.91521	0.31972	± 0.00154	0.07508	± 0.00158
0.08	9555	0.63555	0.89806	0.31972	± 7.7365E-4	0.08763	± 0.00117
0.12	9556	0.77197	0.81637	0.31971	± 5.1911E-4	0.10186	± 0.00111
0.3	9555	0.85914	0.59744	0.31971	± 3.8507E-4	0.08603	± 6.3173E-4
0.6	9555	0.88751	0.49488	0.31971	± 5.5707E-4	0.07878	± 7.5362E-4
1.2	9555	0.9105	0.40168	0.31971	± 3.8837E-4	0.06822	± 6.162E-4
2	9555	0.92406	0.34098	0.31971	± 3.8837E-4	0.05918	± 5.3652E-4

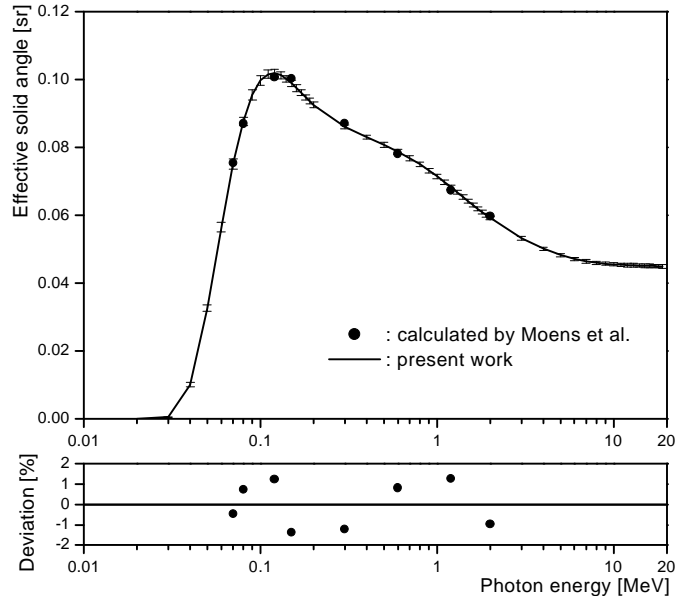


Fig. 4. Comparison between the present work and Moens' work.

에서 가장 큰 값을 가진다. 그림 6은 원통형 선원과 점 선원의 유효입체각비를 나타내었다. 실험적으로 점 선원에 대한 절대 피크 효율이 알려져 있을 때 유효입체각비 계산을 통하여 (1) 식으로부터 관심 선원에 대한 절대 피크 효율을 결정할 수 있다.

4. 결론

HPGe 검출기의 절대 피크 효율 계산을 위하여 선원 및 검출기 인접 흡수체 내에서의 감마선 감쇠를 고려한 유효입체각 계산 프로그램 ESA(Effective Solid Angle) 코드를 개발하였다. 그 결과를 close-ended coaxial HPGe 검출기와 원통형 선원의 경우에 대하여 Moens 등의 자료와 비교함을 통하여 프로그램의 타당성을 검증하였다. 계산 결과는 1.2 MeV에서 0.06822 sr으로서

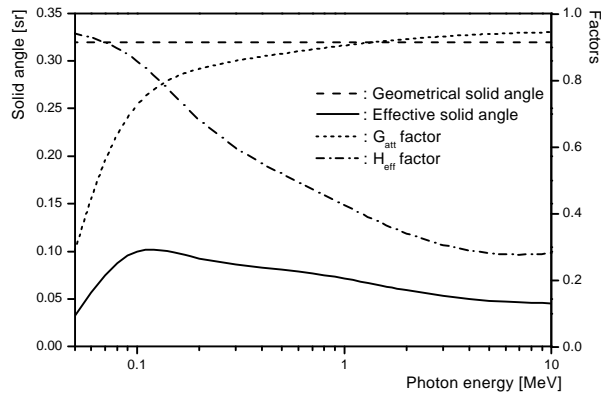


Fig. 5. Correction factors, geometrical solid angle and effective solid angle are shown according to the photon energy.

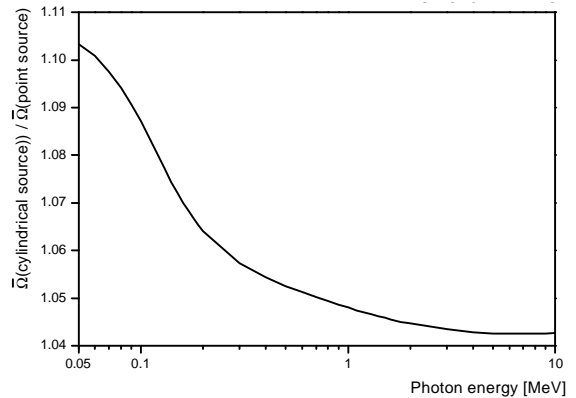


Fig. 4. Ratio of the effective solid angle for cylindrical source to that for point source is shown.

Moens의 계산 결과 0.06736 sr과 약 1.3%의 차이를 보였다. 이는 원통형 선원 및 검출기 인접 흡수체에 대한 정보가 부족하고, 사용한 선형감쇠계수의 차이에서 비롯된 것이다. 선형감쇠계수는 Moens가 사용한 자료와 1.2 MeV에서 약 1% 정도의 차이를 보였다.

5. 참고문헌

- [1] K. Debertin and R.G. Helmer, "Gamma- and X-Ray Spectrometry with Semiconductor Detectors", pp 248-258, Elsevier Science Publishers B.V., 1988.
- [2] L. Moens, J. De Donder, LIN Xi-lei, F. De Corte, A. De Wiselaere, A. Simonits and J. Hoste, Nucl. Instr. and Meth. 187 (1981) 451.
- [3] E.B. Saloman and J.H. Hubbell, "Critical Analysis of Soft X-ray Cross Section Data", Nucl. Instr. and Meth. A255, 38-42 (1987).
- [4] E.B. Saloman and J.H. Hubbell, "X-ray Attenuation Coefficients (Total Cross Sections): Comparison of the Experimental Data Base with Recommended Values of Henke and the Theoretical Values of Scofield for Energies between 0.1-100 keV", National Bureau of Standards Report NBSIR 86-3431 (1986).
- [5] J. Berntsen, T.O. Espelid and A. Genz, ACM Trans. Math. Softw. 17 (1991) 437.