

A Study on Efficiency Error in Distance Inverse Square Law using Cylinder NaI(Tl) Scintillation Detector

Samyol Lee*, Jungran Yoon**, Taelk Ro**

*Department of Radiological Science, Dongseo University**

*Department of New material Physics, Dong-A University, Hadan-dong***

원통형 NaI(Tl) 신틸레이션 검출기를 이용한 거리의 역자승 법칙에서 효율 오류에 대한 연구

이삼열*, 윤정란**, 노태익**

동서대학교 방사선학과*, 동아대학교 신소재물리학과**

Abstract

Generally, it's known fact that intensity of radioactivity satisfies inverse-square law. However, the law was dissatisfied with practical experiment because of limited shape of scintillation detector. Especially, in the case of near distance between the surface of detector and the radioactive source, the difference grows larger. In the present study, reason of this difference was confirmed by experiment with $2'' \times 2'' \phi$ NaI(Tl) scintillation detector and ^{60}Co (1.174 MeV, 1.333 MeV) and ^{137}Cs (0.662 MeV) gamma ray sources. From the experiment, the correction coefficient was obtained with gamma ray detection efficiency and geometrical volume. In the result of the present study, the efficiency difference of the detector was corrected with the coefficient. In the present result, we obtained that the inverse-square law experiment have to consider the efficiency and geometrical value of the detector.

Key words: scintillation detector, inverse-square law, gamma ray source

요약

일반적으로 방사선 선원의 강도는 거리의 역자승 법칙을 따른다. 그러나 방사선 선원과 검출기와의 거리가 가까울수록 거리의 역자승 법칙 실험은 이론과 실험의 일치하지 못하는 오류를 가져오게 된다. 본 연구에서는 방사선 선원과 검출기와의 거리에 따른 거리의 역자승 법칙이 실제 실험에서는 정확하게 성립하지 않는 이유를 실험적으로 확인하였다. 그리고 이 문제를 해결하기 위하여 측정된 방사능을 보정하기 위하여 보정계수를 실험적으로 얻었다. 측정에 사용한 검출기는 $2'' \times 2'' \phi$ NaI(Tl) 신틸레이션 검출기를 사용하였고, 방사선에너지의 변화에 따른 효과를 확인하기 위하여 감마선 선원 ^{60}Co (1.174 MeV, 1.333 MeV)와 ^{137}Cs (0.662 MeV)에 대한 실험도 병행하였다. 측정에서 얻어진 거리의 역자승 법칙의 결과들을 보정계수를 이용하여 측정값들을 보정한 결과 거리의 역자승 법칙과 매우 일치하는 경향을 보였고, 오류에 대한 원인을 실험적으로 확인하였다. 이러한 결과는 유한한 체적을 가진 검출기를 사용하여 방사선의 강도가 거리의 역자승에 반비례하는 실험을 할 경우 모두 해당되는 문제이므로 본 연구의 결과는 방사선계측 분야에 매

우 유용하게 사용되어질 것으로 사료된다.

중심단어: 신틸레이션검출기, 거리의 역자승 법칙, 감마선 선원

I. 서 론

거리의 역자승의 법칙은 방사선의 강도가 점선원으로부터 거리가 멀어질수록 거리의 역자승에 따라서 감소함을 나타내는 법칙으로, 방사선 선원과 검출기 사이에 매질이 존재하지 않는 진공 상태에서 적용되는 매우 잘 알려진 물리 법칙이며 최근까지 연구가 되고 있다^{[1]-[2]}. 이 법칙은 거리가 증가함에 따라서 그 강도가 급속하게 감소하기 때문에 이 원리를 이용한 방사선 방호, 피폭 및 차폐원리 등이 다양한 분야에 적용되고 있다. 더욱이 방사선 선원을 취급할 때 Tongs, Manipulator, 핀셋, 작대기 등을 사용하여 방사선 선원과의 거리를 멀게 함으로써 방사선 피폭량을 감소시키며 또한 Hot Spot 부위를 표시하여 방사선구역에 관계자 외 접근을 막는 것도 이 기본적인 원리를 이용한 것이라 하겠다. 그러나 실제로 검출기를 사용하여 다양한 위치에서의 방사능을 측정할 경우 방사선의 종류, 방사선의 에너지, 검출기와 선원과의 거리 및 매질의 종류에 따라서 방사선강도의 감소 형태는 다르게 나타난다. 특히 선원에서 방출되는 방사능의 세기를 검출기로 측정할 경우 근거리에서의 이 효과는 매우 크게 나타난다. 특히 검출기와 방사선 선원과의 거리는 다양하게 주어지게 되며 유한한 크기를 가지는 검출기를 이용한 측정에 있어서는 거리에 따른 방사능 측정실험의 결과가 이론과 다른 값을 보임으로 인하여 당황해 하는 경우가 있다. 이러한 이유는 최종적으로 실험을 통하여 결론에서 서술하겠지만 방사선 선원과 검출기와의 거리가 가까워질 수록 검출기의 측정효율(주로 기하학적 효율)이 감소하기 때문인 것으로 알려져 있다. 즉, 검출기의 검출되는 부피 감소와 선원의 유한한 크기가 원인으로 추정되며 본 연구에서는 이 원인을 실험적으로 확인하였다.

본 연구에서는 감마선 검출기로 보편적으로 사용하고 있는 2"×2"φ NaI(Tl) 신틸레이션 검출기(ORTEC)를 사용하여 거리에 따른 방사선 강도와 검출기의 효율을 측정된 결과 거리의 역자승 법칙과 큰 차이를 확인

하였다. 그러나 입체각에 따른 감마선의 섬광체 통과 부피가 감소되는 효과를 보정했을 때 거리의 역자승 법칙에 잘 근접하는 결과를 확인하였다.

II. 이 론

일반적으로 방사선 선원에서 발생하는 방사능의 세기는 거리의 역자승 법칙을 따르게 되며 식(1)로 표현된다.

$$S(r) = \frac{S_0}{r^2} \text{-----} \quad (1)$$

여기서 S(r)은 거리 r에서의 방사선의 강도이며, S₀는 점선원의 초기 강도를 의미한다. 즉, 방사선 선원에서 멀어질수록 거리의 자승에 역비례하여 급격하게 그 강도가 감소함을 의미한다. 실제 실험에서 식(1)을 확인하기 위해서는 점에 가까운 방사선 선원을 사용한다 하더라도 검출기의 유효한 면적이 원인이 되어 정확한 S(r)을 구하는 것은 여러 복잡한 절차를 거치게 된다. 검출기가 유한한 체적과 표면적을 가질 경우 입체각 Ω를 포함하는 식(1)의 S₀는 아래와 같이 표현된다.

$$S_0 = N \frac{4\pi}{\epsilon_{ip}\Omega} \text{-----} \quad (2)$$

여기에서 Ω는 검출기와 방사선 선원이 만드는 입체각이며, N은 방사선 검출기에 의해서 측정되는 신호의 수, ε_{ip}는 검출기의 효율이다. 검출기가 유효한 크기를 가질 경우 Ω는 식(3)과 같이 표현된다^[3].

$$\Omega = 2\pi \left(1 - \frac{d}{\sqrt{d^2 + a^2}} \right) \text{-----} \quad (3)$$

여기에서, d는 선원과 검출기 표면과의 거리이며 a는 검출기의 반지름을 나타낸다. 선원의 크기가 검출기의 크기와 비교해 무시 못 할 정도의 유효한 크기를

가질 경우 식(3)의 입체각은 매우 복잡한 형태를 가지게 된다¹³⁾. 그리고 실제 측정에 있어서는 검출기는 일정 체적을 가지게 되므로 Fig.1에서 보는 것과 같이 검출기 전면의 모서리 부분에서는 방사선이 모두 검출되는 것이 아니다. 이것은 방사선이 물질 속에 들어갔을 때 비정이 검출기 체적보다 짧을 경우 방사선이 검출되지 못하는 경우가 생기게 되기 때문이다. 위와 같은 현상은 선원과 방사선 검출기의 거리의 변화에 따라서 감마선이 통과하는 섬광체의 부피가 다르게 나타나서 거리의 역자승법칙은 성립하지 않게 될 것으로 예상된다. 본 실험에서는 실제 이 차이를 보정 계수로 환산하여 보정이 되는지를 확인하였다.

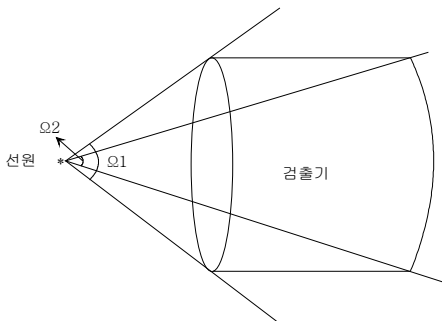


Fig. 1. The solid angle differences at front and back of the detector surface with the distances between source and detector. These solid angles presents with the equation (3).

Ⅲ. 실험

본 연구에서는 위와 같이 검출기의 구조적인 문제로 인하여 발생되어지는 거리의 역자승법칙 문제를 직접 두 가지 감마선 선원과 NaI(Tl) 신틸레이션 검출기(Model: 905-3, ORTEC사)를 이용하여 측정을 하였다. 실험에 사용한 검출기의 측정회로와 장치를 Fig. 2에 나타내었다. 사용되어진 NaI(Tl) 신틸레이션 검출기는 2"×2"φ의 크기를 가지며 검출기 표면과 감마선 선원과의 거리는 5~30 cm의 거리를 5 cm씩 증가시켜 가면서 측정된 감마선의 신호를 측정하고 그 신호를 분석하였다. 검출기에 인가된 전압은 +900 Volt로 충분히 작은 방사선 에너지에 의한 신호들도 증폭이 되도록 설정을 하였으며, 검출기에서 발생된 신호들은 전

치증폭기(Pre-Amplifier)와 주증폭기 (Main Amplifier)를 거쳐서 다중과고분석기 (MCA: Multi-Channel Analyzer)를 통하여서 방사선 에너지 별로 분배한 후 컴퓨터에 나타내었다.¹³⁷Cs(22,240 Bq) 선원과 ⁶⁰Co(28,603 Bq) 선원에서 방출되는 감마선을 측정할 시간은 각각 1000 sec 이며, 통계적인 오차를 줄이기에 충분한 시간을 선택하였다. 실제 해석에 있어서는 자연방사선을 측정하여 측정된 스펙트럼에서 제외하고 순수한 선원으로 부터의 감마선만을 에너지스펙트럼으로 Fig.3과 4에 각각 나타내었다. 그림에서 (A), (B), (C), (D),

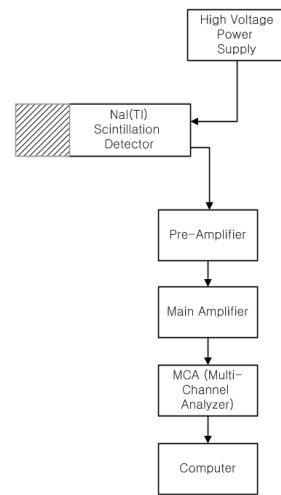


Fig. 2. The experimental arrangement with NaI(Tl) scintillation detector

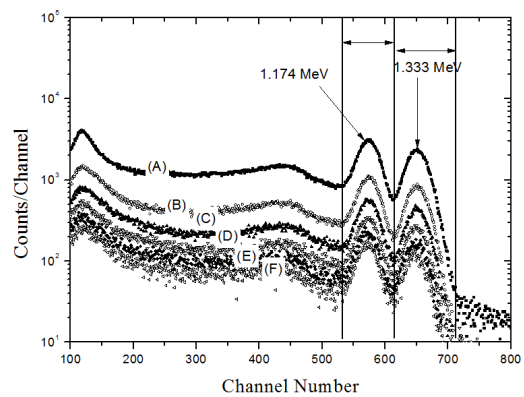


Fig. 3. The measured gamma ray energy spectrum of ⁶⁰Co source from NaI(Tl) scintillation detector

(E), (F)는 각각 NaI(Tl) 검출기와 선원과의 거리가 5, 10, 15, 20, 25, 30 cm임을 나타낸다. 그림에서 보는 것과 같이 거리가 멀어질수록 전체적인 감마선의 강도가 급격하게 감소함을 알 수 있었다. 본 실험에서는 정확한 감마선의 강도 감소를 효과를 측정하기 위하여 Fig. 3과 4에서 보는 것과 같이 가장 강도가 높은 광전흡수피크 부분의 신호의 강도를 분석함으로써 거리에 따른 감마선의 강도 변화를 측정하였다. ⁶⁰Co 선원의 경우 두 개의 감마선이 근접해 있으므로 두 감마선 신호 중 제일 낮은 부분을 경계로 구분하여 신호분석을 하였다.

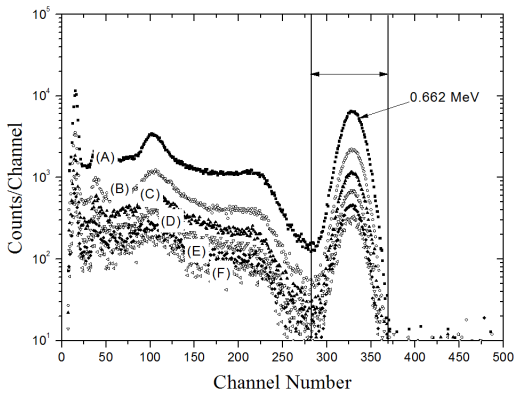


Fig. 4. The measured gamma ray energy spectrum of ¹³⁷Cs source from NaI(Tl) scintillation detector

IV. 해석

거리에 따른 검출기에서 측정된 각각의 신호들의 수와 실제 선원에서 발생된 방사선의 수를 Table 1~3에 나타내었다. 선원에서 발생하는 방사선의 수는 선원의 초기 방사선의 강도, 반감기, 입체각 등을 고려한 계산을 통하여 얻었다. 실제 검출기로 측정된 방사선의 수를 같이 표현하였다. 이 결과들에서 얻은 상대 측정효율들은 Fig. 5에 나타내었다. 30 cm를 상대효율의 기준으로 했을 때, 거리에 따른 효율의 차이를 나타냈다.

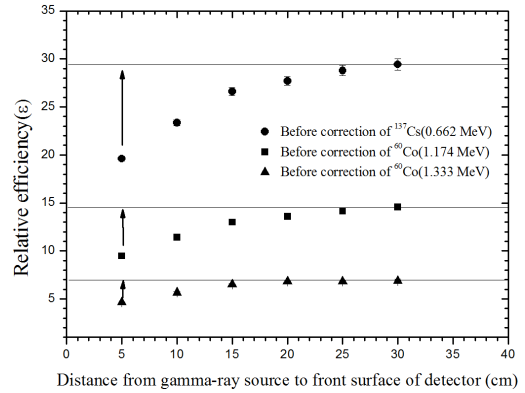


Fig. 5. The experimental result of radioactivity with the distance between source and detector

Table 1~3과 Fig. 5에서 보는 것과 같이 검출기와 선원과의 거리가 가까울수록 그 상대 효율은 감소함을 알 수 있다. 특히 5, 10 cm 거리에서는 그 경향이 두드러지게 나타났다. 이 상대 효율의 감소 원인으로 본 연구에서는 거리에 따른 검출기와 선원이 만드는 입체각의 크기의 변화에 주목하였고, Fig. 1에서 표현한 입체각과 검출기가 겹쳐지는 부분을 제외한 부분이 원인이 된다고 가정하였다. 이것은 거리 변화에 따라서 입체각이 검출기를 포함하는 체적의 변화가 거리에 따라서 달라짐을 이론적으로 알 수 있었고 그 체적의 변화를 계산하였다. 그 결과 30 cm를 기준(100%)으로 했을 경우 25 cm는 97.5%, 20 cm는 94.1%, 15 cm는 89.1%, 10 cm는 81.3%, 5 cm는 67.4%의 값을 얻었으며 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 즉, 30 cm를 기준으로 했을 경우 5 cm에서는 32.6%의 방사선이 측정되지 않을 확률을 가진다는 의미를 나타낸다.

Fig. 6에서 얻어진 결과들을 기초로 fitting을 하여 식 (4)와 같은 함수를 얻었다. 이 결과는 임의의 거리에서의 보정계수를 얻는데 도움이 된다.

$$\eta(r) = -0.57 \times e^{-r/10.59} + 1.03 \quad \text{--- (4)}$$

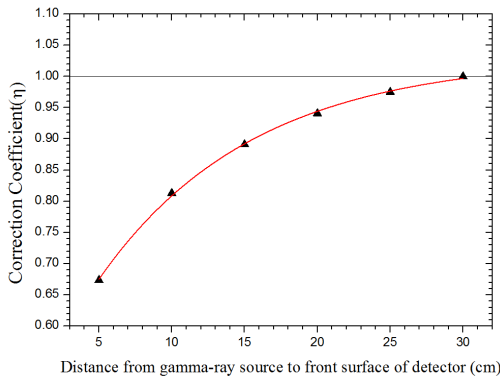


Fig. 6. The correction coefficient obtained from geometrical calculation

한편, 감마선이 물질 속에 들어갔을 경우의 비정온 식(5)와 같이 표현된다.

$$\lambda(E) = \frac{1}{\mu(E)} \text{-----} \quad (5)$$

여기에서 λ는 감마선의 비정, μ는 선형 감쇄계수이다^[3]. NaI(Tl) 신틸레이션 검출기의 선형 감쇄계수는 에너지에 따라서 다르지만 약 1 MeV의 감마선에 대하여 4~5 cm 정도의 거리를 가진다^[4]. 따라서 본 연구에서 사용하고 있는 2"×2"φ NaI(Tl) 신틸레이션 검출기에 대해서는 모서리 부분에서는 평균 비정보다 짧은 0~5 cm 정도의 길이를 가지는 경향들이 생기고 이 원인에 의해서 방사선이 측정되지 못해 기하학적인 상대 효율이 감소한다고 보여 진다.

Table 1. Number of radiation from ¹³⁷Cs gamma source(0.662 MeV) and NaI(Tl)detector

거리 (cm)	선원에서 발생된 방사선수	검출기로 측정된 방사선수	측정 상대 효율(%)	보정효율 (%)
5	968	189.7	19.6± 0.2	29.1± 0.4
10	275	64.1	23.4± 0.3	28.7± 0.4
15	125	33.3	26.6± 0.4	29.9± 0.5
20	71	19.7	27.7± 0.5	29.4± 0.5
25	46	13.2	28.8± 0.5	29.5± 0.6
30	32	9.4	29.4± 0.6	29.4± 0.6

Table 2. Number of radiation from ⁶⁰Co gamma source(1.174 MeV) and NaI(Tl)detector

거리 (cm)	선원에서 발생된 방사선수	검출기로 측정된 방사선수	측정 상대 효율(%)	보정효율 (%)
5	1551	146.9	9.5± 0.1	14.1± 0.2
10	440	50.3	11.4± 0.2	14.0± 0.2
15	201	26.1	13.0± 0.2	14.6± 0.2
20	114	15.5	13.6± 0.2	14.4± 0.3
25	73	10.4	14.2± 0.3	14.5± 0.3
30	51	7.4	14.6± 0.3	14.6± 0.3

Table 3. Number of radiation from ⁶⁰Co gamma source(1.333 MeV) and NaI(Tl)detector

거리 (cm)	선원에서 발생된 방사선수	검출기로 측정된 방사선수	측정 상대 효율(%)	보정효율 (%)
5	1551	108.0	4.6± 0.1	6.9± 0.1
10	440	37.4	5.7± 0.1	7.0± 0.1
15	201	19.6	6.5± 0.1	7.3± 0.1
20	114	11.7	6.8± 0.1	7.3± 0.1
25	73	7.5	6.8± 0.2	7.0± 0.2
30	51	5.3	6.9± 0.2	6.9± 0.2

위의 표에서 보는 것과 같이 계산에서 얻어진 보정 계수들을 사용하여 얻어진 효율(보정효율)들은 거리에 관계없이 거의 오차범위 내에서 일정한 값을 가지고 있음을 알 수 있었고 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 따라서 검출기의 기하학적인 모양에 따라서 발생되어 질 수 있는 문제들에 대한 보정계수를 얻어 측정 상대 효율에 나누어 최종적인 결과들을 얻게 되었다.

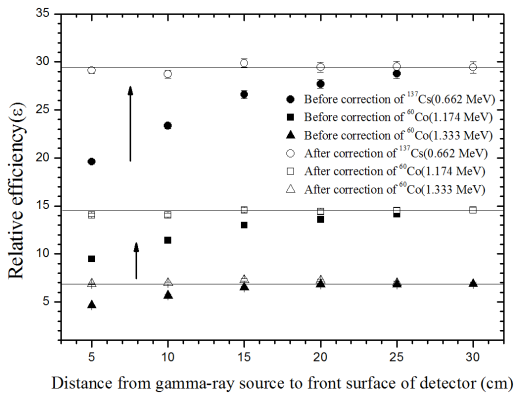


Fig. 7. The corrected final result of radioactivity with the distance between source and detector

V. 결 론

본 연구에서는 방사선 선원과 검출기와의 거리에 따른 거리의 역자승 법칙이 실제 실험에서는 정확하게 성립하지 않는 이유를 실험적으로 확인하여 거리에 따른 보정계수를 실험적으로 얻었다. 측정에 사용한 검출기는 2"×2" NaI(Tl) 신틸레이션 검출기를 사용하였고, 방사선 에너지의 변화에 따른 효과를 확인하기 위하여 감마선 선원 ^{60}Co (1.174 MeV, 1.333 MeV)와 ^{137}Cs (0.662 MeV)을 사용하였다. 측정에서 얻어진 거리에 따른 측정효율을 통해 보정계수 식(4)를 얻었다. 이 보정계수를 이용하여 측정값들을 보정한 결과는 거리의 역자승 법칙과 매우 일치하는 경향을 보였고, 오류에 대한 원인을 실험적으로 확인하였다. 이러한 결과는 유한한 체적을 가진 검출기를 사용하여 방사선의 강도가 거리의 역자승에 반비례하는 실험을 할 경우 모두 해당되는 문제이므로 본 연구의 결과는 방사선계측 분야에 매우 유용하게 사용되어질 것으로 보여 진다^{[5],[6],[7]}.

참고문헌

- [1] F. W. Spiers, British Journal of Radiology. 14, 147-156, 1941.
- [2] E. G. Adelberger, B.R. Heckel, A.E. Nelson, "Tests of the Gravitational Inverse-Square Law", Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. Vol. 53, pp. 77-121, 2003.
- [3] M.R. Kacal, I Han, F, Akman, "Measurement of mass

attenuation coefficients by Si(Li), NaI(Tl) and Cd(Tl) detectors", Nuclear Science and Technology, pp. 59-69, 2012.

- [4] Glenn F. Knoll, John Wiley & Sons, Inc, "Radiation Detection and Measurement", pp. 118-119, 2000.
- [5] J. Yoon, T. Ro. S. Lee, S. Yamamoto, and K. Kobayashi, "Measurement of neutron capture cross-section of indium in the energy region from 0.003 eV to 30 keV", Ann Nucl. Energy 29, p 1157, 2002.
- [6] Samyol Lee, "A Study on Neutron Resonance Energy of Tantalum by 46-MeV Electron Linac TOF Method", J. of the Korean Society of Radiology, Vol. 7, No. 3, pp. 245-249, 2013.
- [7] C. H. M. van Bavel, N. Underwood and S. R. Ragar, "Transmission of Gamma Radiation by Soils and Soil Densitometry", Vol. 21, No. 6, pp. 588-591, 1957.