

NaI(Tl) 검출기의 G-factor를 이용한 인공 감마핵종의 조사선량을 계산방법

지영용, 강문자, 정근호, 이완로, 조영현, 김원영, 임종명, 김현철, 장미, 박두원, 박효국, 최상도, 이창우, 최근식

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111

vyji@kaeri.re.kr

1. 서론

NaI(Tl) 검출기를 이용한 조사선량을 계산방법은 검출기를 이용한 에너지 스펙트럼 측정으로부터 선량을 계산하기 때문에, 계산된 선량 값의 변동이 자연방사선에 의한 영향인지 인공방사선에 의한 변동인지를 판단할 수 있는 장점이 있다. 이러한 계산방법으로는 대표적인 자연방사성 핵종인 ⁴⁰K, ²³⁸U 및 ²³²Th 계열을 대표하는 감마선 스펙트럼의 피크들로부터 조사선량을 구하는 Energy band 방법[1, 2]과 NaI(Tl) 검출기의 감마선 에너지별 반응함수를 이용하는 G-factor 방법[3]으로 나눌 수 있다.

본 실험에서는 자연방사선뿐만 아니라 인공방사선에 의한 조사선량을 측정 스펙트럼으로부터 쉽게 계산할 수 있는 G-factor 방법을 이용하였다. 먼저, 3"x3" NaI(Tl) 검출기에 대한 입사 감마선 에너지별 반응함수로부터 해당 검출기에 대한 G-factor를 계산하였으며, 이를 표준선원을 이용한 스펙트럼 측정에 적용하여 해당 선원으로부터의 조사선량과 선원별 조사선량 기여분을 각각 평가하였다. 이때 조사선량 기여분을 선원별로 평가하기 위해서는 해당 검출시스템의 입사 감마선 에너지별 PTT(peak-to-total) 비를 활용하였다.

2. 본론

2.1 NaI(Tl) 검출기의 G-factor

일반적으로 측정된 스펙트럼과 선량률과의 관계는 해당 검출시스템의 선량률 변환인자인 G-factor를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{X} = \int_{E_0}^{E_1} n(E)G(E)dE \dots\dots\dots (1)$$

여기서, n(E)는 펄스 파고 스펙트럼에서 단위 에너지당 계수율, E₀ 및 E₁은 펄스파고 스펙트럼에서 최소 및 최대 에너지 그리고 G(E)는 선량률

변환인자인 G-factor(uR/h/cps)로써 검출기의 반응함수와 관련된다.

위 식에서 측정된 파고 스펙트럼은 검출기 반응함수(R_{ij})와 입사 감마선속밀도(Φ_j)에 비례하며, 다음과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 i 및 j는 측정된 스펙트럼의 채널을 의미하며, j번째 채널에 해당하는 감마선이 입사하여 파고 스펙트럼의 i번째 채널에 계수됨을 의미한다.

$$n_i = R_{ij}\Phi_j \dots\dots\dots (2)$$

그리고 입사 감마선속밀도에 의한 조사선량률은 공기중 질량에너지흡수계수(μ/ρ)_{air}와 입사감마선의 에너지(E) 등으로부터 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{X} = C \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_{air} E_j \times \Phi_j \equiv \left(\frac{\dot{X}}{\Phi} \right)_j \times \Phi_j \dots\dots\dots (3)$$

여기서, C는 단위환산에 필요한 상수들의 곱이며, (Ẋ/Φ)_j는 에너지 E의 단위 감마선속밀도 당 조사선량률로서 감마선속밀도를 조사선량률로 변환하기 위한 변환계수를 의미한다.

식 (1)에서 (3)으로부터 검출시스템의 G-factor는 다음과 같이 검출기 반응함수의 역함수로 표현할 수 있다.

$$G_i = \left(\frac{\dot{X}}{\Phi} \right)_j \times R_{ij}^{-1} \dots\dots\dots (4)$$

따라서 NaI(Tl) 검출기의 G-factor를 구하기 위해 검출기 반응함수를 MCNP 코드로 계산하였으며, 이의 역행렬을 구하여 식 (4)로부터 검출시스템의 G-factor를 Fig. 1과 같이 구하였다.

2.2 조사선량률 계산

임의의 표준선원을 이용하여 펄스 파고스펙트

림을 그림 2와 같이 계측하였으며, 앞서 구한 G-factor를 이용하여 식 (1)로부터 최종적으로 표준선원에 의한 조사선량률을 계산하였다. 그 결과 임의의 표준선원으로부터 1 m 거리에서의 선량률은 약 71.2 $\mu\text{R}/\text{h}$ 로 같은 위치에서 GM 카운터로 측정된 값과 5 % 이내의 차이를 보였다.

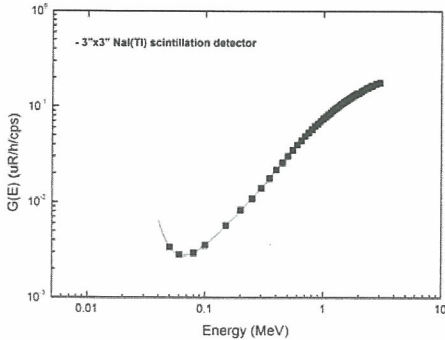


Fig. 1. G-factor of a 3" Φ \times 3" NaI(Tl) detector.

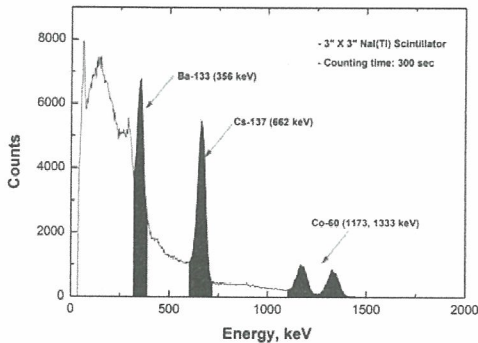


Fig. 2. Measured spectrum from a mixed standard source.

2.3 감마핵종 기여분

NaI(Tl) 검출기의 G-factor로부터 계산된 조사선량률에 대하여 표준선원에 존재하는 감마핵종의 기여분을 평가하기 위하여, 측정된 파고 스펙트럼에서 광전흡수피크를 확인하고 감마핵종과 그 에너지를 결정하였다. 그리고 입사 감마선의 에너지에 대한 해당 검출기의 PTT 비를 MCNP 코드로 계산하였다. 이때, NaI(Tl) 검출기의 분해능 및 온도의존성 등으로 순피크면적보다 Fig. 2와 같이 피크의 전계수를 사용하였다.

따라서 파고 스펙트럼의 피크면적으로부터 계산되는 조사선량률(\dot{X}^P)과 피크 에너지들에서의 PTT 비를 이용하여 다음과 같이 해당 피크에서

기인하는 총 조사선량률(\dot{X}^T)을 계산하였다.

$$\dot{X}_i^T = \dot{X}_i^P / PTT_i \dots\dots\dots (5)$$

여기서, i 는 입사 감마선의 에너지를 의미한다.

이상과 같은 방법으로 표준선원 내에 존재하는 ^{133}Ba , ^{137}Cs 및 ^{60}Co 의 피크면적에 대한 조사선량률을 계산하였으며, 해당 피크들로부터 유도되는 총 조사선량률을 각각 유도할 수 있었다.

3. 결론

NaI(Tl) 검출기를 이용한 조사선량률 계산을 위하여 해당 검출시스템의 반응함수를 MCNP 코드로 계산하였으며, 이로부터 G-factor를 유도하였다. 이를 표준선원을 이용하여 실제측으로부터 선량률을 계산하였으며, GM 카운터로 비교한 결과 약 5 % 이내의 차이를 확인할 수 있었다.

위와 같이 계산된 조사선량률로부터 감마핵종의 기여분을 각각 평가하기 위하여, 측정된 스펙트럼에서 광전흡수피크를 확인하고 그 에너지를 결정하였다. 그리고 해당 검출시스템의 에너지별 PTT비를 계산하였으며, 이를 이용하여 최종적으로 감마핵종별 조사선량률 기여분을 분리해 낼 수 있었다.

4. 참고문헌

- [1] NCRP Report, "Environmental radiation measurement", No. 50, 1976.
- [2] H.L. Beck et al., "Spectrometric techniques for measuring environmental gamma radiation", HASL-150, 1964.
- [3] Y.Y. Ji et al., "Application of the dose conversion factor for a NaI(Tl) detector to the radwaste drum assay", Radiation Measurement, vol. 46, 503-509, 2011.