

몬테칼로 방법을 이용한 감마선 스펙트로메트리 중첩현상 재현

Reproduction of the Coincidence Effect in Gamma ray Spectrometry by Using Monte Carlo Method

박성호, 김종경, 이상훈
한양대학교

요 약

방사선 검출기를 이용해 방사선원의 종류 및 방출 방사선의 세기를 측정/평가하기 위해 NaI(Tl) 과 같은 섬광 검출기를 사용하거나, HPGe 같은 반도체 검출기를 사용한다. 측정된 에너지 스펙트럼을 이용하여 방사선원의 종류 및 방사선의 세기를 평가하게 되는데, 이때 방사선원이 Co-60 과 같이 동시에 2개 이상의 감마선을 방출할 때 계측기에 동시에 측정되는 현상인 참중첩 현상에 대한 보정과, 방사선의 세기가 증가함에 따라 계측 시스템에서 발생하는 무작위 중첩현상을 보정한 평가가 이루어져야 한다. 실제 정확한 방사선 평가를 위해서는 적절한 측정장치를 구비하여 실험을 수행해야 하며, 하드웨어 및 소프트웨어적으로 중첩현상을 보정해 주고 있다. 일반적으로 실험의 한계 및 난이성 때문에 실험과 유사한 환경을 전산적으로 모사하여 방사선 평가를 수행하기도 한다. 모사 실험의 경우 직접 실험하는 경우보다 기술적/시간적/재정적으로 많은 이점을 포함하고 있기 때문에 널리 이용되고 있는 실정이다. 이번 연구에서는 모사연구의 도구로 몬테칼로 방법을 사용하지만 중첩현상 보정방법이 포함되지 않은 MCNP4B 코드의 결과를 사용해 중첩현상을 재현하는 방법을 제시하였다.

Abstract

Scintillation detector, such as NaI(Tl), or semiconductor detector, such as HPGe, are used for Measurement/Assessment of the radiation type and radiation activity. The measured energy spectrum are used for measuring the radiation type and activity. Corrections for true coincidence due to emit more than 2 photons at the same time and random coincidence due to measuring system when increasing of the radiation intensity. For accurate assessment,

measurement with adequate measure system is performed, and corrections for coincidence are performed in the hardware aspect and software aspect. In general, there are limitations or difficulties in measurement of radiation assessment, computational simulation is instead used. In simulation, it has much advantages than measurement in technically, timely, and financially, it is widely used instead of measurement. In this study, the method to reproduce of the coincidence effect was proposed by using monte carlo method.

1. 서 론

감마 스펙트로메트리는 측정된 스펙트럼을 분석하여 방사선원의 종류를 판단하며, 스펙트럼에 발생하는 피크의 크기를 이용해 방사선의 세기를 평가하는 분야이다. 일반적으로 스펙트로메트리를 수행하기 위해서는 방사선 검출기, 전치증폭기를 포함하는 증폭기, 다중채널분석기, 컴퓨터로 이루어진 시스템이 필요하다. 이 분야는 원자력 발전소, 방사선 사용 산업체, 환경시료 측정 분야 등 여러 분야에 응용되고 있다.

측정/평가하고자 하는 방사선의 종류가 Co-60과 같이 붕괴당 발생하는 광자의 갯수가 2개 이상이며 그 둘이 물리적으로 아주 적은 시간차이를 두고 거의 동시에 방출하게 되면 검출기에는 발생광자의 에너지에 해당하는 2개의 피크외에 광자 2개의 에너지의 합에 해당하는 피크가 검출되기도 한다. 이 피크는 일반적으로 Sum Peak라고 불리기도 하는데 이것은 물리적으로 동시에 발생하는 광자가 검출기에 동시에 입사하여 에너지를 전달하는 과정을 거치기 때문에 참중첩현상(True Coincidence)이라 불리며 핵종의 고유피크로 분류되며 측정시스템의 기하학적 구조와 밀접한 관계를 가진다. 한편 방사선의 세기가 증가하여 검출기에 검출되는 신호가 잦아지면서 전기적 신호가 중첩되는 현상이 발생하게 되는데 이는 검출기 및 증폭회로의 특성과 밀접한 관련이 있으며 이를 무작위중첩현상(Random Coincidence)이라 한다.[1]

방사선 측정측면에서 획득된 스펙트럼을 평가하여 방사선원의 종류 및 방사선의 세기를 평가함에 있어서 중첩현상은 정보를 왜곡시키는 정보가 된다. 정확한 방사선 평가가 이루어지기 위해서는 중첩현상에 대한 하드웨어 측면 또는 소프트웨어 측면에서의 보정이 이루어져야 한다.

방사선 계측 시스템 설계등의 경우 실험을 통한 설계/검증/최적화 작업이 이루어져야 한다. 그러나 대부분의 경우에 몬테칼로 코드를 이용한 시뮬레이션을 수행하여 실험을 위한 최적화단계 까지 평가한 다음 실험을 수행하는 것이 시간적/금전적인 큰 이점을 가지고 있다. 이번 연구에서는 감마선 시뮬레이션에 널리 사용되는 코드인 MCNP4B 코드를 이용하여 감마 스펙트로메트리를 수행하였으며 MCNP4B 코드[2]에서는 고려하지 못하는 참중첩현상과 무작위중첩현상을 재현하기 위해 다른 몬테칼로 코드를 개발하여 그 시뮬레이션 결과를 실험스펙트럼과 비교하였다.

2. 이론적 배경

2.1 참중첩 현상 과 무작위 중첩현상

HPGe 계측 시스템으로 측정한 Co-60 스펙트럼을 그림 1에 나타내었다. Co-60의 경우 1번 붕괴할 때 1.17 MeV와 1.33 MeV 에너지를 가지는 광자를 2개 방출한다. 그림 1에서 볼 수 있듯이 1.17 MeV와 1.33 MeV 부근에 2개의 피크가 발생한다. 이 2개의 피크를 볼 때 이 스펙트럼은 Co-60의 스펙트럼이라 할 수 있다. 또한 2개의 광자가 거의 동시에 방출되기 때문에 어떤 경우 HPGe 계측기에 거의 동시에 입사되어 에너지를 전달하는 과정을 거쳐 2.5 MeV 에너지를 가지는 피크를 형성하게 된다.

한편 계측 시스템은 계측기 고유의 분해능과 증폭기 고유의 불감시간을 가지고 있다. 방사능이 증가해 계수되는 신호가 증가하게 되면 신호 중첩이 발생하게 되고 이 결과로 방출에너지보다 높은 지역에 신호가 나타나게 되는데 이를 무작위중첩현상이라 한다. 방사능이 증가하면 할수록 무작위중첩에 의한 신호가 증가하게 되고 이는 계측값을 왜곡시키는 중요 인자가 된다.

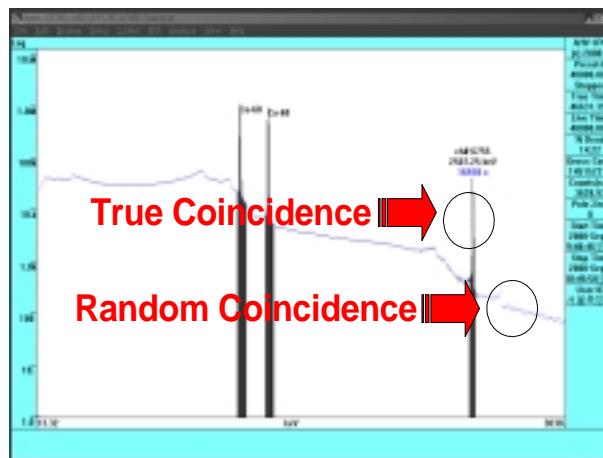


그림 1. 중첩현상을 포함하는 Co-60 스펙트럼

2.2 몬테칼로 방법을 이용한 스펙트로메트리

몬테칼로 코드를 이용한 모사실험은 실험을 대신하여 유용하게 사용되고 있다. 이 방법은 스펙트로메트리에서도 유용하게 사용될 수 있는데 물리적으로 발생하는 현상인 중첩현상에 대해서는 일반적으로 고려하지 못하고 있다. 그림2는 Co-60에서 발생하는 1.17, 1.33 MeV를 각각 시뮬레이션하여 얻어낸 결과이다. 앞쪽에 피크가 보이는 결과는 1.17 MeV를 입사에너지로 입력하였을 경우 얻어진 결과이고 뒤쪽에 피크가 보이는 결과는 1.33 MeV를 입사에너지로 입력하였을 경우 얻어지는 결과이다. 실제 Co-60은 동시에 2개의 광자를 방출하기 때문에 1.17, 1.33 MeV 광자의 방출률을 각각 100%로 입력하여 얻어낸 결과는 그림 3과 같다. 일반적으로 몬테칼로 코드를 이용한 스펙트로메트리 시뮬레이션때에 입사광자의 에너지와 방출분률이 입력문으로 작성되게 되는데 이 때 참중첩현상에 대해 고려할 수 없다. 또한 또다른 왜곡현상인 무작위중첩을 재현할 수 없다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 중첩현상을 재현하는 몬테칼로 코드를 개발하였다.

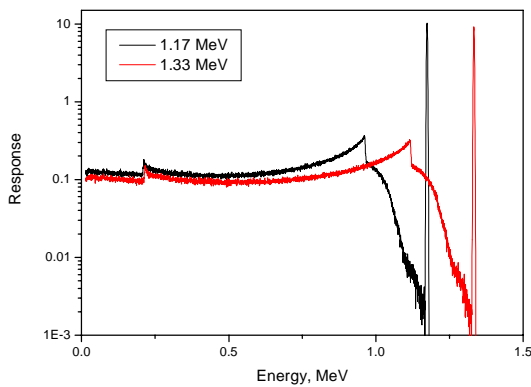


그림 2. 1.17, 1.33 MeV 광자를 방출하는 2가지 경우에 계산된 에너지 스펙트럼

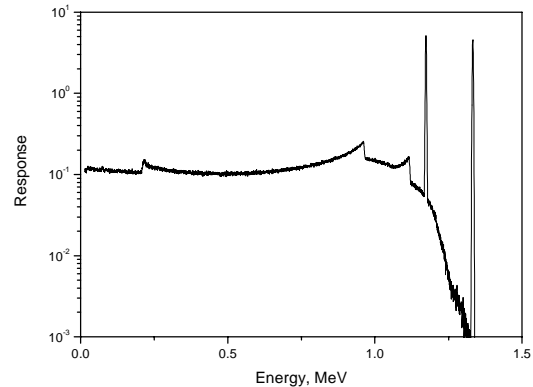


그림 3. 1.17, 1.33 MeV 2개의 광자를 동시에 방출하는 경우에 계산된 스펙트럼

3. 중첩현상 재현을 위한 몬테칼로 코드 개발

3.1 MCNP4B 시뮬레이션

Co-60를 시뮬레이션 할 경우 1.17, 1.33 MeV 2개의 광자를 동시에 방출하는 경우에 대한 계산을 수행하는 것이 일반적이지만 이 경우 앞서 언급하였듯이 참 중첩현상을 재현할 수 없기 때문에 이번 연구에서는 1.17, 1.33 MeV 광자를 방출하는 2가지 경우에 대한 계산을 각각 수행하여

얻어진 2가지 스펙트럼을 기초 데이터로 활용하였다. HPGe는 그림 4와 같이 모델링하였다.

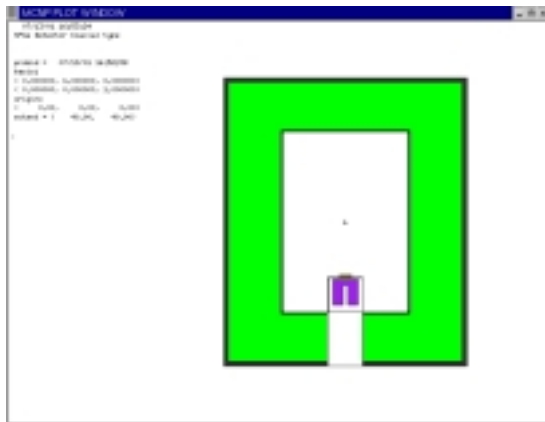


그림 4. Co-60 시뮬레이션을 위한 MCNP4B 모델링

3.2 중첩현상 모델링

참중첩현상은 방사선원에서 방출되는 광자의 붕괴방식에 따라 발생하며 이때 중요한 인자는 방사선원과 검출기간의 기하학적 구조이다. 즉, 기하학적 효율을 이용하여 참중첩 현상을 표현하였다. 이를 위한 몬테칼로 프로그램을 개발하였으며 그 절차는 다음과 같다.

- T1) MCNP4B의 계산결과인 에너지 스펙트럼을 1.17, 1.33 MeV 단일에너지 방출시 검출기에 기여하는 신호에 대한 확률밀도 함수로 정의하고 이를 계산한다.
- T2) 1.17 MeV 입자가 방출될 경우에
- T3) 무작위변수를 선택하며 이 변수가 기하학적 효율보다 작을 경우 1)에서 계산된 확률밀도함수를 이용하여 검출기에 축적된 에너지를 추출한다. 클 경우에는 축적된 에너지는 0이다.
- T4) 1.33 MeV 입자가 방출하는 경우에 대해 3)을 반복한다.
- T5) 1.17, 1.33의 결과를 합한다.

MCNP4B의 경우 2)와 4)의 절차를 수행하기는 하나 두 결과를 합하는 일을 수행하지는 못한다. 즉, 참 중첩 현상을 표현하기 위해 별도의 프로그램을 작성해야 한다.

두 번째로는 무작위중첩현상을 모사하기 위한 몬테칼로 프로그램을 작성하였다. 이를 위해 무작위중첩에 영향을 미치는 상수값을 실험을 통해 획득하였다. 무작위중첩현상은 방사선원에서 방출되는 광자는 시간에 대한 지수분포함수를 따르면서 발생하는데[3] 이때 필요한 상수는 계수율이다. 계수율은 실험결과 3628.93 count/sec로 측정되었다. 계수율은 방출되는 광자 또는 검출기에

검출되는 신호간의 시간차를 결정하는 인자가 되며 무작위 중첩여부를 결정하는 또하나의 인자는 증폭기에 검출되는 신호이다. 이를 획득하기 위해 오실로스코프를 전치증폭기에 연결해 그림 5와 같이 신호를 획득하였으며 이를 Curve Fitting 하여 그림 6과 같이 extreme function을 얻었다.

$$z = (x - x_c) / w$$

$$y = e^{-e^{-z} - z + 1}$$

$$x_c = 1.07176, \quad w = 2.12455$$

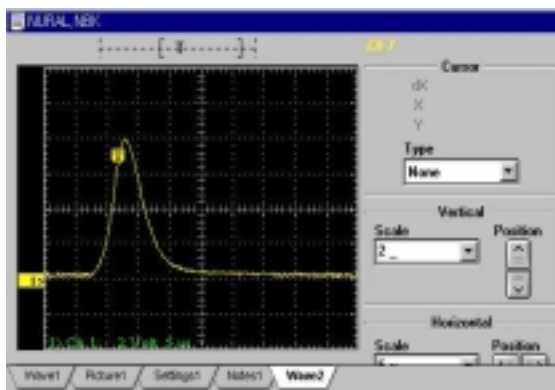


그림 5. 전치증폭기에서 검출된 신호

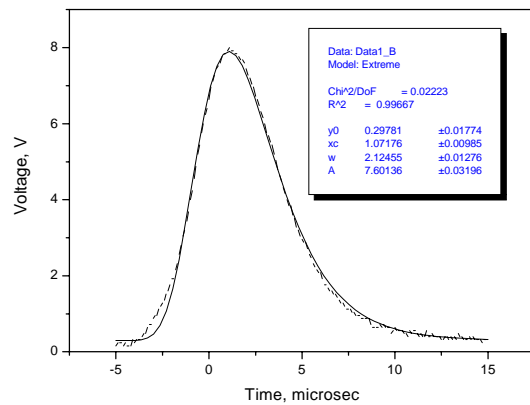


그림 6. 검출된 신호를 Curve Fitting 한 결과

무작위중첩현상을 재현하기 위해 몬테칼로 프로그램을 개발하였으며 그 절차는 다음과 같다.

- R1) 한 신호가 획득된뒤 다음 신호가 획득될때까지 소요된 시간 Δt 를 지수함수분포에서 샘플링 한다.
- R2) Δt 를 증폭기신호폭인 w_p 와 비교하여 크다면 중복이 없다고 판단한다.
- R3) Δt 가 w_p 보다 작다면 두 신호를 합성한 신호를 구하고 첫 번째 피크가 발생하는 지점을 찾아 중복신호가 기여하는 채널을 계산한다.
- R4) 현재 피크를 메모리에 기억한다.
- R5) 참중첩현상을 재현하는 T2)부터 반복 계산한다.

4. 계산결과 및 토의

MCNP4B 코드를 이용하여 그림 4와 같이 계산의 기하학 구조를 모델링 하였으며 Co-60에서 방출되는 1.17, 1.33 MeV 광자에 대하여 각각의 스펙트럼을 계산하였다. 이 자료를 이용하여 참중첩현상과 무작위중첩현상을 재현하기 위한 몬테칼로 코드를 작성하여 중첩현상을 포함하는 스펙트럼을 재현하였으며 계산결과를 그림 7에 나타내었다. 몬테칼로 계산결과가 측정자료와 대체로 잘 일치하고 있다. 측정자료중 저에너지부분에서 스펙트럼이 급격히 감소하는 것은 실험시 34 채널까지 신호를 제거하였기 때문이다. 1.33 MeV 이하의 결과는 전반적으로 잘 일치하였으며 참중첩현상과 무작위중첩현상을 잘 모사하고 있다. 다만 1.33 MeV 와 2.5 MeV 사이에 참중첩현상에 기인한 콤프턴 산란부분을 과다평가하고 있는데 이는 이번 연구에서 두 개의 피크가 중첩되는 것만 고려했으며 2번 이상 중첩되는것에 대해 고려치 않은 부분에서 기인하는 것으로 보인다. 무작위중첩지역을 살펴보면 몬테칼로 계산이 약간 과소평가되며 잡음이 보다 크게 나타나고 있는데 이는 몬테칼로 계산의 경우 MCNP4B로 계산한 스펙트럼에서 존재하는 확률적 통계치가 전체적으로 대략 1% 미만 정도의 기여분을 가지는 무작위중첩현상을 계산할 때 발생하는 오차증식현상으로 판단된다.

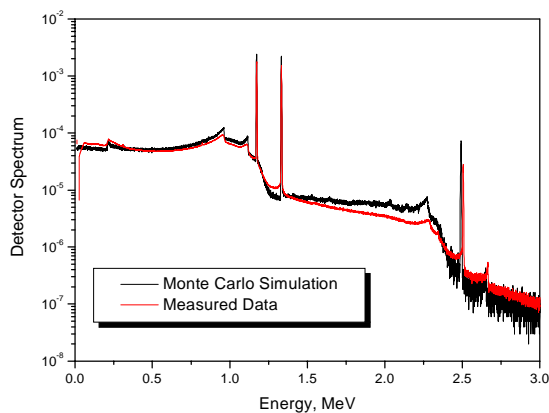


그림 7. Co-60의 측정스펙트럼과 몬테칼로 코드로 계산한 스펙트럼

5. 결론 및 추후 연구

몬테칼로 시뮬레이션은 방사선 측정 분야에서 실험을 대신하거나 최적치를 설계하기 위한 모사실험으로써 아주 유용하게 사용되고 있다. MCNP4B와 같이 범용 코드를 사용할 때 아주 유용한 도구로써 사용 가능하지만 이번 연구에서 고려된 것 같은 상황에서는 올바른 결과를 얻기가 어렵다. 이번 연구를 통해 중첩현상을 고려하기 위한 몬테칼로 코드를 개발하였으며 HPGe의 측정치와의 비교를 통해 중첩현상을 재현한 스펙트럼 계산을 수행할 수 있었다. 앞의 계산 결과부분에서도 언급하였지만 현상적인 재현은 성공적으로 수행하였지만 일부 과다평가하는 부분에 대한 원인분석 수행 등 개선의 여지가 있다.

감사의 글 : 이 연구는 기초전력공학공동연구소 지원 프로그램 및 과학재단 지정 방사선 안전 신기술 연구센터의 지원에 의해 수행되었음

참 고 문 헌

1. G. Gilmore and J.K.Hemingway, "Practical Gamma-ray Spectrometry," John Wiley & Sons, 1995.
2. J.F. Breismeister, "MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4B," LA-12625-M, Los Alamos National Laboratory, 1997.
3. R.P.Gardner and S.H.Lee, "Monte Carlo Simulation of Pulse Pile-up," Advanced in X-Ray Analysis, Vol. 41, pp 941-950, 1999.