

# Sum-Peak Method를 이용한 $^{60}\text{Co}$ 절대 방사능 측정에서의 Pile-up 보정 Pile-up Correction in the Measurement of $^{60}\text{Co}$ Absolute Activity using Sum-Peak Method

김인중, 김석권, 선광민, 변수현, 최희동

서울대학교  
서울특별시 관악구 신림동 산56-1

## 요 약

Sum-peak method를 이용한 Co-60 절대 방사능 측정을 위해 AMP shaping time 조건을 이용하는 새로운 pile-up 보정방법을 제안하였다. Co-60 감마선 스펙트럼 측정에는 HPGe 검출기를 이용하였으며, 다양한 AMP shaping time 조건과 선원 위치에 대하여 측정을 수행하였다. 절대 방사능 결정에는 각상관을 고려하였으며, 다양한 AMP shaping time 조건에서의 측정값으로부터 AMP shaping time 0 sec까지 외삽하여 pile-up을 보정하였다. 결과적으로 절대 방사능의 오차는 3.0% 이내이고 실제 방사능과의 편차는 3.5% 이내이다.

## Abstract

New pile-up correction method using AMP shaping time condition is suggested for the absolute activity measurement of Co-60 using sum-peak method. HPGe detector was used for Co-60  $\gamma$ -ray spectroscopy at various AMP shaping time conditions and source positions. In the determination of absolute activity, the angular correlation was considered, and the pile-up was corrected by extrapolating the measured value at various AMP shaping time condition to AMP shaping time 0 sec. As a result the uncertainty of the absolute activity is less than 3.0% and the deviation to the true activity is less than 3.5%.

## 1. 서론

Sum-peak method[1-5]는 동시에 두 개의 감마선을 방출하는 방사성 동위원소에 대하여 단일 검출기를 이용하여 방사능을 결정하는 절대 측정법으로, 전흡수 피크 계수율과 동시중첩 피크 계수율 그리고 전체 계수율만으로 절대 방사능이 결정된다. Sum-peak method는 1960년대 Brinkman et. al.[1-5]에 의해 처음 제시되어 Co-60, Sc-46, Na-22의 절대 방사능 결정에 이용되었고, 당시에 검출기는 NaI(Tl)이 사용되었으며 정확도는 2 ~ 5%로 보고되었다. 이후 sum-peak method에는 주로 검출 효율이 높은 NaI(Tl) 검출기가 이용되었고, 분해능이 우수한 반도체 검출

기는 1990년대에 이르러 R.H. Martin et. al.[6]에 의해 처음 사용되었다. 본 연구에서는 HPGe 검출기를 이용한 sum-peak method에 대하여 조사하였다.

Pile-up은 검출 계통의 펄스 처리 과정에서 두 개의 펄스가 pile-up resolving time 이내의 짧은 시간 간격으로 서로 중첩되어 일어나며, 감마선 계수율에 비례하여 전흡수 피크 계수율의 손실을 일으킨다. 따라서 감마선의 정밀 계측을 위해서는 pile-up 보정이 필요하며, 특히 HPGe 검출기를 이용한 sum-peak method에서는 전체 계수율이 낮기 때문에 전흡수 피크 면적의 오차가 정확도에 큰 영향을 미치게 되어 pile-up의 보정이 매우 중요하다. Sum-peak method에서의 pile-up 보정에 관한 연구는 V. Zajic[7]에 의해 처음 시도되었으며, 두 개의 NaI(Tl) 검출기로 동시, 역동시 계수 계통을 구성하여 pile-up, 불감시간, 무작위 동시중첩의 보정을 통해 오차를 2.4% 이하로 낮추었다.

Pile-up 보정 방법은 크게 두 가지로 구분할 수 있다. 첫째는, 검출 계통에서 pile-up rejector 또는 live-time corrector 등의 회로를 이용하는 방법으로 측정 동안에 보정이 이루어지며, V. Zajic[7]의 방법이 이에 해당한다. 그리고 둘째는, effective dead time 또는 pulser method를 이용하는 방법으로, 측정 후 보정하는 방법이다. 본 연구에서는 pile-up 보정 방법의 구분에서 둘째 분류에 속하는 방법으로서, 다양한 AMP shaping time 조건에서의 측정 결과로부터 pile-up을 무시할 수 있는 AMP shaping time 0 sec 조건에서의 절대 방사능을 외삽을 통해 결정하는 pile-up 보정 방법을 제안하였다. 그리고 이를 Co-60 절대 방사능 측정에 응용하고, 계측 효율의 몬테카를로 모사와 두 개의 방출 감마선에 관한 각상관 이론의 적용을 통해 각상관을 고려하여[8] 절대 방사능을 결정하였다.

## 2. Sum-peak method와 pile-up 보정

두 개의 감마선  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$ 를 동시에 방출하는 방사성 동위원소의 방사능을  $N_0$ 라 하고 두 감마선 사이의 각상관을 고려하면,  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$ 의 전흡수 피크 계수율  $N_1$ ,  $N_2$ 와 동시중첩 피크 계수율  $N_{12}$ 는,

$$N_1 = N_0 \cdot \epsilon_1^p \times [1 - \epsilon_2^t \cdot \overline{W(0)}] \quad (1)$$

$$N_2 = N_0 \cdot \epsilon_2^p \times [1 - \epsilon_1^t \cdot \overline{W(0)}] \quad (2)$$

$$N_{12} = N_0 \cdot \epsilon_1^p \epsilon_2^p \times \overline{W(0)} \quad (3)$$

와 같이 주어진다[1-5]. 여기서  $\epsilon_1^p$ ,  $\epsilon_2^p$ 와  $\epsilon_1^t$ ,  $\epsilon_2^t$ 는 각각  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$ 의 전흡수 피크 효율과 전효율이며,  $\overline{W(0)}$ 는 effective angular correlation으로서 두 감마선 사이의 각상관과 선원-검출기의 기하구조 및 검출 효율을 고려한 각상관 보정인자이다. 그리고 전체 계수율  $N_t$ 는 다음과 같다.[1-5]

$$N_t = N_0 \times [\varepsilon_1^t + \varepsilon_2^t - \varepsilon_1^t \varepsilon_2^t \cdot \overline{W(0)}] \quad (4)$$

따라서 (1) ~ (4)식으로부터 방사능  $N_0$ 는  $N_1, N_2, N_{12}, N_t$ 로부터 다음과 같이 결정된다.[1-5]

$$N_0 = \left( \frac{N_1 N_2}{N_{12}} + N_t \right) \times \overline{W(0)} \quad (5)$$

Sum-peak method를 이용한 절대 방사능 결정에서 가장 근본적인 문제는 전흡수 피크 계수율의 오차로 인해 절대 방사능의 정확도가 크게 악화될 수 있다는 점이다. (5)식으로부터 절대 방사능은 전체 계수율항과 전흡수 피크 계수율항의 합으로 결정되므로 전체 계수율항과 전흡수 피크 계수율항은 서로 경쟁관계를 갖게되어, 전체 계수율항이 전흡수 피크 계수율항에 비하여 월등하지 못한 경우에는 전흡수 피크 계수율의 오차가 인해 절대 방사능의 오차에 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 전효율이 낮은 HPGe 검출기를 이용하는 경우에는 전흡수 피크 계수율의 정밀한 측정이 요구되며, 특히 동시중첩 피크의 계수율은 다른 두 전흡수 피크에 비해 매우 낮기 때문에 충분한 계수율을 얻을 수 있는 측정 조건과 정밀한 면적 분석이 필요하다. 그러나 실제적인 측정에서 동시중첩 피크 계수율을 높이기 위해서는 전체 계수율이 더욱 크게 증가하기 때문에 절대 방사능의 오차를 낮추기 위해서는 정밀한 피크 면적 분석과 더불어 pile-up 보정이 매우 중요하다.

Pile-up은 pile-up resolving time 이내의 짧은 시간 동안 입사한 두 개의 펄스의 중첩에 의해 발생되므로, pile-up을 무시할 수 있는 조건에서의 전흡수 피크 계수율  $N(\tau_{pu}=0)$ 와 실제 전흡수 피크 계수율  $N(\tau_{pu})$  사이에는 다음의 관계가 성립한다[9].

$$N(\tau_{pu}) = (1 - \tau_{pu} N_t) \cdot N(\tau_{pu}=0) \quad (6)$$

여기서  $\tau_{pu}$ 는 pile-up resolving time으로 pole zero adjustment와 AMP shaping time에 관계한다 [10]. 그리고  $N_t$ 는 전체 계수율로서 LLD나 ULD에 의한 손실은 없는 것으로 가정하였고 두 개 펄스의 중첩에 의한 1차적인 pile-up만을 고려하였다. 따라서 pile-up을 고려하면 (1) ~ (3)식의 우변에는  $(1 - \tau_{pu} N_t)$ 가 곱해져야 하고 (5)식은,

$$\left( \frac{N_1 N_2}{N_{12}} + N_t \right) \times \overline{W(0)} = (1 - \tau_{pu} N_t) \cdot N_0 + \tau_{pu} \cdot \overline{W(0)} \cdot N_t^2 \quad (7)$$

과 같이 다시 쓸 수 있다. 여기서 전체 계수율의 pile-up에 의한 감소는 무시하였고, (7)식은 pile-up을 무시할 수 있는 경우에는  $(1 - \tau_{pu} N_t)$ 이 1의 값으로 다가가 다시 (5)식으로 환원된다.

(7)식으로부터 좌변의 값은 pile-up과 일차적인 관계를 갖는 것을 볼 수 있다. 만일  $\tau_{pu}$ 를 조절할 수 있다면 (7)식의 좌변과 조절 변인간에는 함수관계가 얻어질 수 있을 것이고, 함수관계로부터 pile-up을 무시할 수 있는 조건에서의 값을 얻을 수 있을 것이다. 따라서 AMP shaping time을 조절하여 다양한 조건의  $\tau_{pu}$  조건에서의 측정을 수행하면, 각 측정 조건에서의 절대 방사능값과 AMP shaping time 사이의 관계를 얻을 수 있게 되고, 이로부터 pile-up을 무시할 수 있는 AMP shaping time 0 sec 에서의 절대 방사능을 결정함을 통해 pile-up을 보정할 수 있다.

#### 4. 실험

HPGe 검출기를 이용하여 Co-60 감마선 스펙트럼을 측정하였다. HPGe 검출기는 상대 효율이 15% 이고, 1.33 MeV 감마선에서 1.73 keV의 분해능을 갖는 Canberra closed-ended coaxial 형을 사용하였고, 검출 계통에는 Canberra 2020 AMP와 Canberra 8701 ADC를 사용하였다. AMP는 pile-up보정을 위해 AMP shaping time은 1.5, 2, 3, 4, 5, 8  $\mu$  sec를 사용하였고 pile-up rejection은 하지 않았다. Canberra 2020 AMP는 0.5  $\mu$  sec에서부터 12  $\mu$  sec까지 모두 12 경우의 shaping time을 지원하지만 pole zero adjustment를 만족하고 스펙트럼의 왜곡이 적은 조건을 선택하였다. 측정은 AMP shaping time 조건과 선원-검출기간 거리를 변화시키며 측정하였고, 계수율은 높이고 지나친 불감시간을 막기위해 선원의 위치에 따라 방사능이 다른 두 개의 선원을 사용하였다. 선원-검출기간 거리는 검출기 Al cap 표면(0.6 cm)에서부터 7.6 cm까지 변화시켰으며, 선원은 IAEA와 NAS에서 제작한 교정용 표준 선원을 사용하였다. 선원의 방사능은 42.1 kBq, 358.1 kBq 이고, 오차는 99% 신뢰수준에서 각각 1%와 4%로 알려져있다. 불감시간은 전체 계수시간의 9%에서 최대 41%까지 기록되었다.

HYPERMET 코드[11]를 이용하여 감마선 스펙트럼을 분석하고, sum-peak method를 이용하여 각 측정 조건에서의 절대 방사능값을 결정하였으며, 이때 절대 방사능값 결정에는 각상관이 고려되었다[8]. 그림 1에는 선원-검출기간 거리 6.6 cm에서의 AMP shaping time에 따른 계수율의 변화를 나타내었다. 그림 1로부터 Co-60의 1173, 1332 keV 두 감마선의 전흡수 피크(FEP) 계수율이 (6)식으로부터 기대하는 것과 같이 AMP shaping time에 대해 선형적인 변화를 보이는 것을 확인할 수 있다. 그러나 동시중첩 피크(sum-peak) 계수율과 전체(total) 계수율은 선형적인 관계에서 벗어나는 것을 볼 수 있는데, 전체 계수율의 경우는 AMP shaping time의 변화에 대해 수% 이내로 그 변화가 적기 때문에 (7)식에서 전체 계수율의 pile-up에 의한 감소를 무시한 것은 타당한 가정으로 볼 수 있다. 그리고 동시중첩 피크 계수율의 AMP shaping time에 대한 불규칙적인 변화는 다른 전흡수 피크에 비교하여 면적 결정에 불확실한 요소가 많이 포함되어 있는 것으로 보이며, 이러한 요소의 대표적인 것으로는 통계적인 원인과 무작위 동시중첩을 생각해 볼 수 있다. 동시중첩 피크에서의 통계가 좋고 선원-검출기간 거리가 가까운 경우에는 동시중첩 피크 계수율에서도 AMP shaping time과의 뚜렷한 선형관계를 볼 수 있다. 그림 2에는 AMP shaping

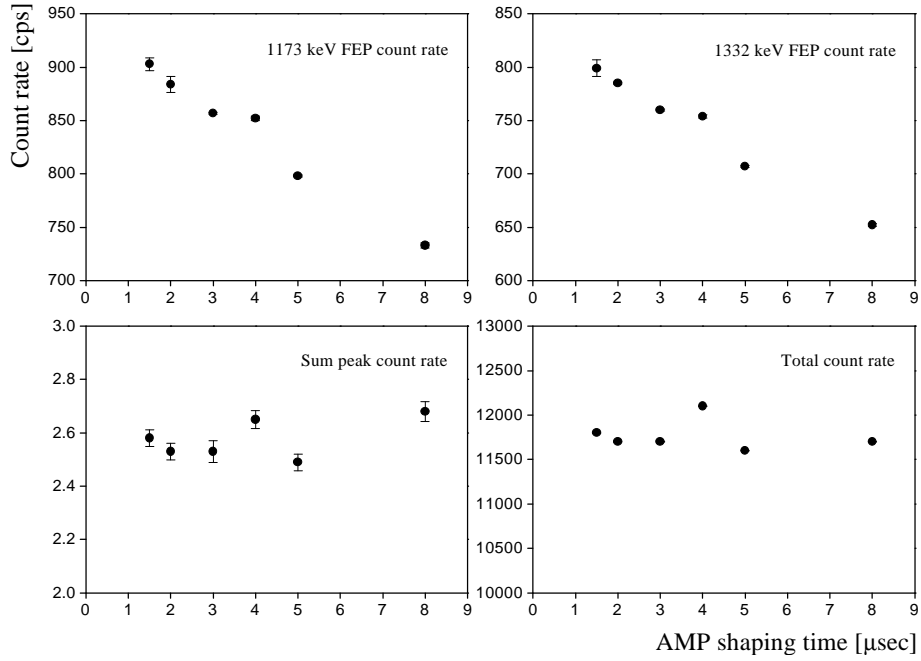


Fig. 1. The count rates for AMP shaping time at source-to-detector distance 6.6 cm.

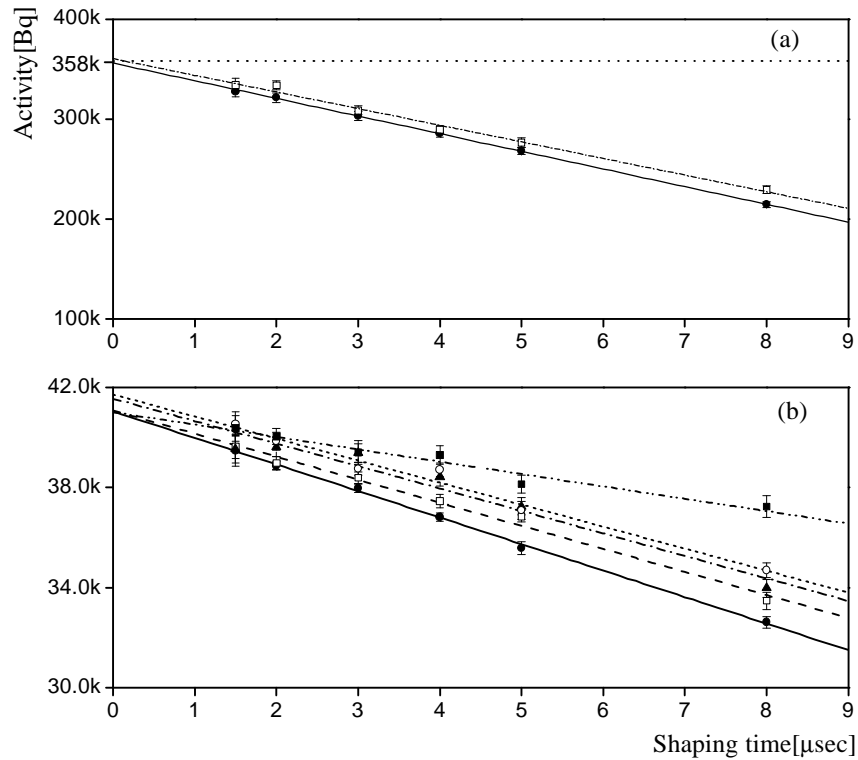


Fig. 2. The absolute activities according to AMP shaping. The symbols are measurements and the lines are linear fittings for the data points at the given source position. (a)  $\square$  : 7.6 cm and  $\bullet$  : 6.6 cm with NAS source. (b)  $\blacksquare$  : 2.6 cm,  $\circ$  : 1.6 cm (I),  $\blacktriangle$  : 1.6 cm (II),  $\square$  : 1.1 cm,  $\bullet$  : 0.6 cm with IAEA source.

time에 따른 절대 방사능값의 변화와 이에 대한 linear fitting 결과를 나타내었다. 그림 2의 (a)는 NAS 선원을 사용한 결과이고 (b)는 IAEA 선원을 사용한 결과이다. 그림으로부터 각 조건에서의 절대 방사능값이 AMP shaping time에 대해 선형적인 관계를 잘 나타내고 있음을 확인할 수 있으며, IAEA 선원의 경우 AMP shaping time 조건에 따라 pile-up에 의해 서로 최대 20% 정도의 편차를 갖는 것을 볼 수 있고 NAS 선원의 경우는 계수율이 더 큰 까닭으로 최대 약 40% 가량의 편차를 갖는 것을 볼 수 있다. 그리고 AMP shaping time 0 sec에서의 외삽을 통해 pile-up을 보정한 결과는 NAS 선원의 경우 알려진 선원 방사능에 대해 1% 미만의 편차를 보인데 비해 IAEA 선원의 경우 약 3% 정도 낮은 결과를 보였다. IAEA 선원 경우에서 NAS 선원의 경우와 달리 편차가 크게 나타나는 이유에 대해서는 첫째, 절대 방사능 결정에서 고려된 각상관 보정이 가까운 거리에서 실제 값과 벗어나는 경우와 둘째, IAEA 선원의 방사능 검증 연도가 매우 오래된 것과, 선원 형상이 AI으로 이루어져 전에너지 감마선의 1% 가량이 감쇠하고 있으나 주어진 방사능에서 이것이 고려되었는지 여부가 불확실한 점 등을 열거해 볼 수 있다.

## 5. 결론

Pile-up 보정을 통해 최종적으로 결정한 절대 방사능은 95% 신뢰도에서 3.0% 이내의 오차를 가졌고 서로 다른 선원 위치에서의 결과와는 IAEA: 1.6%, NAS: 1.5% 이내의 편차를 보였으며, 알려진 선원의 방사능과는 IAEA의 경우 3.5% 내로 일치하였고, NAS의 경우 1% 내로 일치하였다. 따라서 본 연구에서 시도된 AMP shaping time을 이용한 pile-up 보정 방법은 sum-peak method를 이용하여 절대 방사능을 측정하는 경우 매우 유용한 보정 방법으로 간주된다. 향후에는 방사능 값의 신뢰도가 높은 선원을 사용하여 가까운 거리에 대한 실험을 추가할 계획이다.

## 6. 참고문헌

- [1] G.A. Brinkman, A.H.W. Aten and J. Th. Veenboer, *Int. J. Appl. Radiat. Isot.* 14 (1963) 153.
- [2] G.A. Brinkman, A.H.W. Aten and J. Th. Veenboer, *Int. J. Appl. Radiat. Isot.* 14 (1963) 433.
- [3] G.A. Brinkman and A.H.W. Aten, *Int. J. Appl. Radiat. Isot.* 14 (1963) 503.
- [4] G.A. Brinkman, A.H.W. Aten and J. Th. Veenboer, *Int. J. Appl. Radiat. Isot.* 16 (1965) 15.
- [5] G.A. Brinkman and A.H.W. Aten, *Int. J. Appl. Radiat. Isot.* 16 (1965) 177.
- [6] R.H. Martin and J.G.V. Taylor, *Nucl. Instr. and Meth.* A312 (1992) 64.
- [7] V. Zajic, *Appl. Radiat. Isot.* 37 (1986) 1225.
- [8] 김인중, 김석권, 선광민, 변수현, 최희동, “<sup>60</sup>Co 감마선 분광에서 동시중첩 피크에 나타난 각상관의 영향”, 2000 추계학술발표회 논문집, 한국원자력학회.
- [9] E.J. Cohen, *Nucl. Instr. and Meth.* 121 (1974) 25.

- [10] G. Gilmore and J.D. Hemingway, "Practical Gamma-Ray Spectrometry", 264, John Wiley & Sons, Chichester, 1995.
- [11] G.W. Phillips and K.W. Marlow, NRL Memorandum Report 3198 , Naval Research Laboratory, 1976.