

## HPGe 고정밀 분광에서 Pile-up 보정법의 유용성 평가

### Validity Test of Pile-up Correction Methods on HPGe High-precision Spectrometry

김인중, 박창수, 김석권, 선광민, 변수현, 최희동

서울대학교  
서울특별시 관악구 신림동 산56-1

#### 요 약

HPGe를 이용한 감마선 분광에 대해 pile-up 보정을 수행하고 보정의 신뢰성에 대하여 평가하였다. Pile-up 보정에는 pulse generator method[1]와 fixed source method[1]를 사용하였고, IAEA[2]에서 수행한 연구 결과와의 비교를 통해 보정의 신뢰성을 평가하였다. 연구 결과 실질적인 pile-up 보정방법으로서 pulse generator method가 적합한 것으로 평가하였다.

#### Abstract

The pile-up correction on the HPGe  $\gamma$ -ray spectrometry was carried out and the validity of the correction was tested. The pulse generator method[1] and fixed source method[1] was used for the pile-up correction, and the correction validity was tested by comparison with the result by IAEA[2]. As a result, the pulse generator method was estimate to be the optimum method for the practical pile-up correction.

#### 1. 서 론

고방사능 환경에서의 HPGe 감마선 분광계통을 이용한 정밀 계측 수행을 위한 pile-up 보정방법을 확립하고자 pulse generator method[1]와 fixed source method[1]를 이용하여 pile-up 보정을 수행하고, 보정의 신뢰성을 평가하였다. 보정 결과는 IAEA[2]에서 수행한 dead time 및 pile-up 보정에 관한 국제비교연구 결과와 비교하여 신뢰성을 평가하였다.

IAEA[2]에서는 65 개 연구그룹에서 지원한 98 개 측정결과에 대하여 pile-up 보정방법을 모두 다섯 가지로 분류하고, 각 data set에 대하여 보정한 결과의 편차를 기준으로 하여 보정의 신뢰성을 정량적으로 비교하고 평가하였다. IAEA에서는 pile-up 보정방법을,

- (A) Correction with multichannel analyzer live time
- (B) Pulse generator method

- (C) Fixed source method
- (D) Introducing a pile-up resolving time  $\tau$
- (E) Other methods

의 다섯 가지 방법으로 분류하였다. 그리고 보정 결과의 정량적 비교를 위해 average percentage deviation  $\bar{\sigma}$ 를,

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{K \times I} \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I \left| \frac{C_{ik} - \bar{C}_k}{\bar{C}_k} \right| \times 100 \quad (1)$$

과 같이 정의하였다. 여기서  $i$ 는 선원을 나타내고,  $k$ 는 감마선 에너지를 나타낸다.  $C_{ik}$ 는  $i$  선원내  $k$  감마선의 전흡수 피크 계수율  $N_{ik}$ 와  $k$  감마선을 방출하는 핵종의 방사능  $A_{ik}$ 의 비,  $N_{ik}/A_{ik}$ 로 정의되며,  $\bar{C}_k$ 는 선원  $i$ 에 대하여  $C_{ik}$ 를 평균한 값이다.

## 2. Pile-up 보정법

Pulse generator method는 고계수율 환경에서 pulser에 의한 pulse와 감마선에 의한 pulse가 동일한 pile-up을 경험한다는 가정을 전제로 하여, pulser에 의한 피크 면적의 손실만큼 감마선 전흡수 피크 면적을 보정함으로써 pile-up을 보정하게 된다. 따라서 측정된 감마선 피크 계수율을  $N_m$ 이라고 하였을 때, pile-up이 일어나지 않았을 때의 피크 계수율  $N$ 은,

$$N = N_m \times \frac{f}{N_p} \quad (2)$$

과 같다[1]. 여기서  $f$ 는 pulser frequency이고  $N_p$ 는 pulser에 의한 피크 계수율이다. 그러나 pulser method를 사용하는 경우에는 다음과 같은 한계를 갖는다. 첫째, 스펙트럼상에서 pulser에 의한 피크의 모양이 감마선에 의한 피크와 다르다[3]. 둘째, pulser에 의한 pulse는 주기적인 특성으로 인해 자기 자신에 의한 중첩이 일어나지 않기 때문에 실제 감마선의 중첩과는 같지 않다[4].

Fixed source method는 pulse generator를 대신하여 하나의 선원을 고정된 위치에 둠으로써, 전체 계수율 변화에 따라 기준 감마선의 피크 면적이 손실되는 비로부터 effective dead time을 결정하여 pile-up을 보정한다. Fixed source method에서는,

- 1) 측정 동안 계수율 변화는 무시할 수 있다.
- 2) ADC 이외의 electronics에서의 dead time은 무시할 수 있다.
- 3) Dead time에 의한 loss는 live-time 보정을 통해 보정된다.

의 3 가지 가정을 사용한다. Effective dead time은 전체 계수율에 대한 전흡수 피크 계수율의 그

래프에서의 기울기로부터 결정되며, 이때 전흡수 피크 계수율은 전체 계수율  $N_t = 0$  cps 지점에서 전흡수 피크 계수율이 1이 되도록 normalize한다. Effective dead time  $\tau_p$ 로부터 pile-up 보정은 다음과 같다[1].

$$N = N_m \times \frac{1}{(1 - \tau_p \cdot N_t)} \quad (3)$$

여기서  $N$ ,  $N_m$ ,  $N_t$ 는 앞에서 정의한 바와 같다. Fixed source method는 pile-up 보정에 실제 감마선을 사용하여 pulse generator method에서와 같은 문제를 갖지 않는 장점을 갖는다. 그러나 effective dead time  $\tau_p$ 가 피크 에너지와 전체 스펙트럼의 분포에 의존적인 특성을 갖는 점을 유의하여야 한다[1,5].

## 2. 실험 및 분석

Pulse generator는 Berkeley Nucleonics Model PB-4 research pulser를 사용하였으며, fixed source method에는 서로 다른 에너지의 감마선을 방출하는 두 개의 선원을 이용하는 two source method[1]를 이용하였다. Two source method는 moving source를 이용하여 전체 계수율을 조절하기 때문에 여러 개의 선원이 필요하지 않고 측정에 사용한 선원의 방사능을 알 필요가 없는 장점을 갖는다. 실험은 fixed source method를 이용한 측정에 pulse를 인가함으로써 개별 스펙트럼에 대하여 pulse generator를 이용한 보정 결과와 fixed source method를 이용한 보정 결과를 직접 비교하도록 하였다.

Pulse의 frequency는 60 Hz로 설정하였다. Pulser의 높이는 감마선 스펙트럼과의 간섭이 적고, pulse shape과 AMP pole zero 특성에 의한 스펙트럼 왜곡이 최소화되도록 하였다. AMP의 pole zero adjustment는 Co-60 선원을 기준으로 설정하였다. AMP pole zero를 맞춘 상황에서 pulse generator에 의한 pulse는 전체적으로 under shoot되는 경향을 보였고, 그 정도는 pulse의 높이가 작을수록 감소였다. 따라서 pulse generator에 의한 pulser의 높이는 낮으면서도 감마선 스펙트럼에서 pulser에 의한 피크가 다른 감마선과 간섭이 최소화되도록 결정하였다.

Fixed source와 moving source에는 각각 Co-57과 Cs-137, Ba-133과 Cs-137, Ba-133과 Am-241, mixed source와 Am-241 그리고 Eu-152, Co-60과 Am-241을 사용하였다. Fixed source는 moving source가 없는 조건에서의 계수율이 대략 수백에서 1000 cps 가 되도록 위치를 설정하였다. 그리고 moving source의 위치는 전체 계수율이 최대  $\sim 10^4$  cps 되도록 하였으며, fixed source로부터 방출되는 감마선이 검출기로 향하는 경로가 가려지는 효과를 최소화하였다. Fixed source와 moving source를 선택할 때, moving source는 fixed source로부터 방출되는 감마선의 에너지보다 에너지가 낮고 random summing에 의한 간섭을 무시할 수 있는 감마선을 방출하는 핵종을 이용한다. 그러나 Co-57의 경우에는 Am-241로부터 방출되는 59.537 keV 감마선의 random sum peak와의 간섭으로 인해 부득이 더 큰 에너지의 감마선을 방출하는 Cs-137을

moving source로 사용하였다. Ba-133은 Am-241과 함께 Cs-137을 moving source로 사용하여 스펙트럼에 의한 effective dead time의 의존성을 비교하였다. Eu-152, Co-60 선원과 mixed source는 동일한 moving source Am-241에 대하여 effective dead time의 스펙트럼 의존성을 비교하였다.

스펙트럼으로부터 피크 면적은, 계수율이 높은 경우의 스펙트럼에서는 피크에 pile-up에 의한 high energy tail이 매우 크게 발달하여 fitting에 의한 피크 면적 분석방법은 적용이 곤란하다. 따라서 단순한 summation 방법을 이용하는 Debertin method[6]를 이용하였다. Mixed source 스펙트럼 분석에서 Kr-85 514.01 keV 감마선과 Co-60 1332.502 keV 감마선 피크는 감마선 line 간의 간섭으로 인해 분석에서 제외되었다. Kr-85 514.01 keV 감마선 피크는 high energy 감마선에 의한 annihilation peak와 간섭되었고, Co-60 1332.50 keV 감마선의 경우는 Cs-137 661.66 keV 감마선의 random sum peak와 서로 간섭되었다. Cs-137 661.66 keV 감마선의 경우도 Co-60 1173.24 keV 감마선의 single escape peak와 간섭이 있었으나 그 영향은 무시할 수 있었다. 그림 1에는 Eu-152, Co-60을 fixed source로 사용한 측정으로부터 전체 계수율이 가장 낮은 경우와 가장 큰 경우에서 1332.502 keV 감마선의 전흡수 피크 스펙트럼을 나타내었다. 계수율이 높은 조건에서 전흡수 피크 스펙트럼에는 pile-up에 의한 high energy 쪽으로의 tail이 매우 크게 발달한 것을 볼 수 있다. 그림 2에 Eu-152와 Co-60을 fixed source로 사용하고 Am-241을 moving source로 사용하였을 때의 감마선 전흡수 피크 계수율과 전체 계수율을 도시하고, 그에 대한 fitting 결과를 함께 나타내었다. 그림 2에서 감마선 전흡수 피크 계수율은 전체 계수율이 0인 지점에서의 외삽값을 1로 normalize한 값이며, 전체 계수율은 background count를 모두 포함한 값이다.

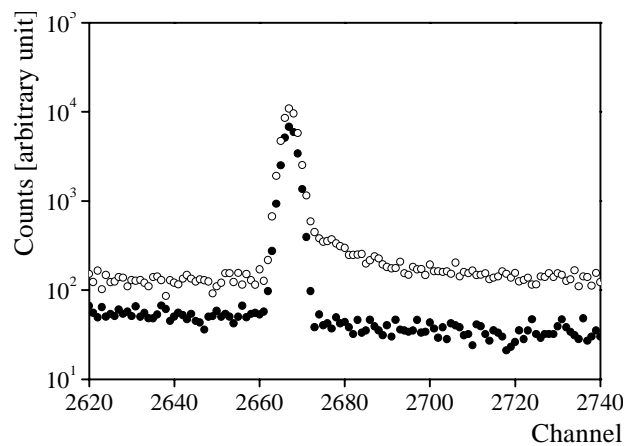


Fig. 1. Co-60 1332.502 keV full energy peak spectrum under low count rate condition and high count rate condition. Total count rate is ● :  $\sim 10^3$  cps, ○ :  $\sim 10^4$  cps.

#### 4. 결과 및 토의

Effective dead time을 계산하고 이를 이용하여 pile-up 보정을 수행하고, pulse generator

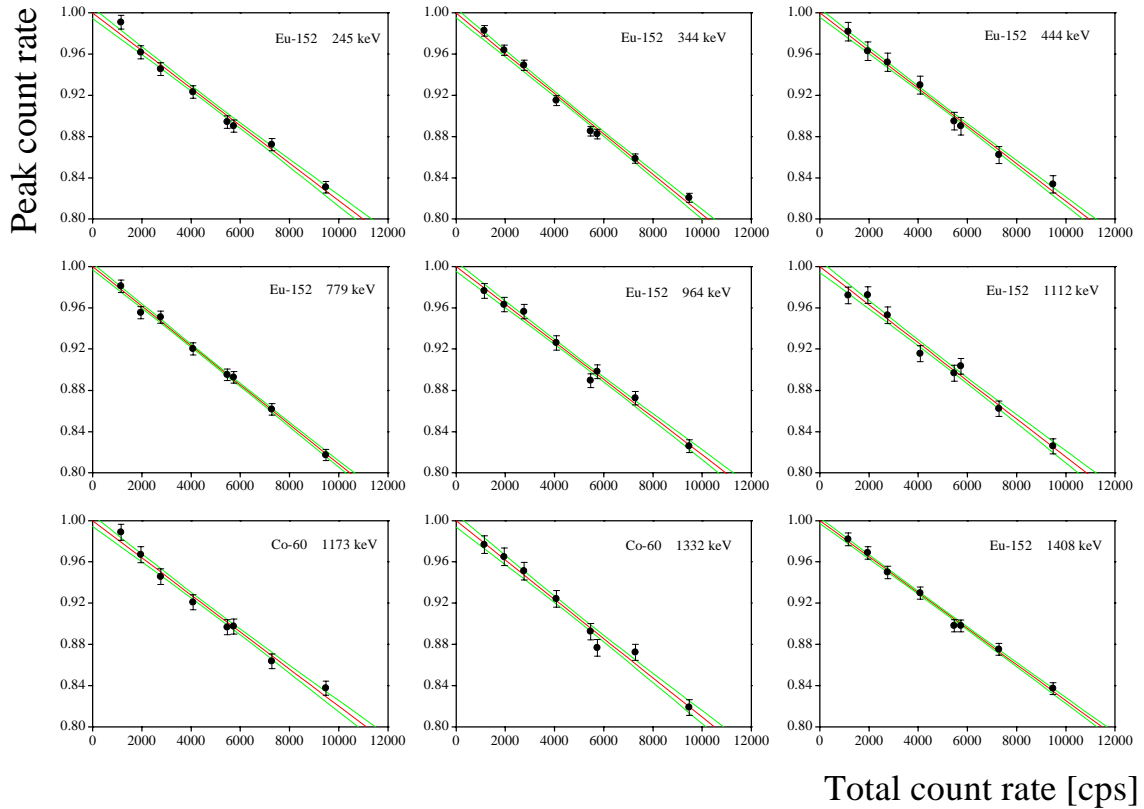


Fig. 2. Variations of the ratio of the measured peak count rate with total count rate.

method를 이용하여 보정한 결과와 함께 비교하고 평가하였다. 보정 결과는 IAEA[2]를 따라 보정 방법에 따른 average percentage deviation  $\bar{\sigma}$ 를 기준으로 하여 평가하였다.  $\bar{\sigma}$ 의 계산에서, 본 연구에서는 two source method를 사용하였기 때문에 (1) 식에서  $C_{ik}$ 는  $i$  스펙트럼에서의  $k$  감마선의 피크 계수율로 다시 정의하였다. 본 연구 결과를 IAEA[6]에 의해 수행된 평가와 함께 표 1에 나타내었다. 그리고 개별 감마선에 대하여 보정한 결과의 표준 편차 분포를 그림 3에 나타내었다. 표 1에서 비교결과 비록 자료가 5 set로 매우 적지만 대부분의 경우 1% 이하의  $\bar{\sigma}$ 를 가졌으며, 그림 3에서도 한 경우를 제외하고 2% 내외의 표준 편차를 가졌다.  $\bar{\sigma}$ 나 표준 편차가 큰 자료는 통계가 충분치 못한 경우로서 면적이 수천 count였고, 통계가 충분한 경우에는 보정 결과간의 편차가 크게 감소하였다. 본 연구결과간의 비교에서는 fixed source method가 pulse generator method를 사용한 결과보다 보다는 적은 편차를 보였다. 이것은 fixed source method의 경우 각각의

Table 1. Distribution of data sets to the different correction methods by IAEA[2] and this study.

Method		A without PUR	A with PUR	B	C	D	E	B This study	C This study
Participants		17	11	22	4	9	7	1	1
Data sets		23	15	32	7	12	9	5	5
Percentage of data sets with	$\bar{\delta} < 1\%$	4%	27%	72%	86%	50%	33%	80%	80%
	$\bar{\delta} < 0.5\%$	-	20%	47%	29%	25%	11%	20%	40%

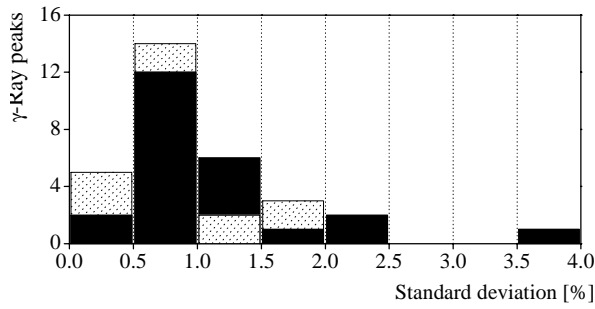


Fig. 3. The distribution of standard deviation of pile-up correction. The fully-filled bar is pulse generator method and the hatched bar is fixed source method.

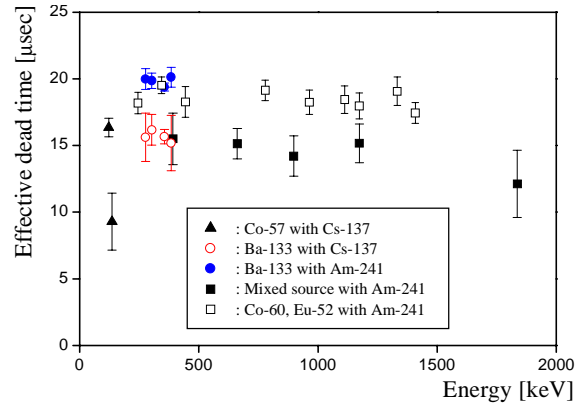


Fig. 4. The effective dead times by  $\gamma$ -ray energy and spectrums.

감마선 피크별로 effective dead time을 측정하여 개별적인 보정을 수행하였기 때문에 당연한 결과로 볼 수 있다. 그러나 fixed source method에서 구한 effective dead time은 스펙트럼에 대해 매우 큰 의존성을 보여 일반적인 pile-up 보정에는 제약이 큰 것으로 평가되었다. 개별 스펙트럼과 감마선 에너지에 따른 effective dead time은 그림 4와 같다.

측정 결과로부터 전체 계수율이 3000에서 4000 cps 이상인 조건에서는 전흡수 피크 계수율이 약 5 ~ 10% 이상 낮게 결정되어 pile-up에 대한 보정이 크게 필요한 것을 확인하였다. Pile-up 보정 결과는 개별 피크에 대해 표준 편차가 대부분 2% 이하이고, 전체적인 average percent deviation  $\bar{\sigma}$  역시 fixed source method 경우  $\bar{\sigma} = 0.63\%$ , pulse generator method 경우  $\bar{\sigma} = 0.72\%$ 로 전반적으로 신뢰성있게 평가되었다. 그리고 보정방법간의 비교에서 fixed source method를 이용하는 경우가 pulse generator method를 이용하는 경우에 비하여 편차가 적었지만 spectrum 의존성이 크기 때문에 pulse generator method를 이용하는 것이 보다 실질적인 보정 방법임을 확인하였다.

## 6. References

- [1] K. Debertin and R.G. Helmer, "Gamma- and X-Ray Spectrometry with Semiconductor Detectors", 271, Elsevier Science Publishers, 1988.
- [2] H. Houtermans, K. Schärff, F. Reichel and K. Debertin, Int. J. Radiat. Isot. 34 (1983) 487.
- [3] K. Debertin and U. Schötzig, Nucl. Instr. and Meth. 140 (1977) 337.
- [4] H.H. Bolotin, M.G. Strauss and D.A. McClure, Nucl. Instr. and Meth. 83 (1970) 1.
- [5] R.G. Helmer, Report EFF-PHYS-5735, Idaho National Engineering Laboratory, Idaho Falls, ID, USA.
- [6] K. Debertin and R.G. Helmer, "Gamma- and X-Ray Spectrometry with Semiconductor Detectors", 175, Elsevier Science Publishers, 1988.