

광범위 에너지 영역에서의 SNU-KAERI PGAA System  
HPGe 감마선 분광계통에 대한 에너지-효율 검정

Energy-Efficiency Calibration for HPGe Gamma-Ray Spectrometer  
of SNU-KAERI PGAA System in Wide Energy Range

선광민, 김인중, 변수현, 최희동

서울대학교  
서울특별시 관악구 신림동 산56-1

요 약

SNU-KAERI PGAA 장치에 대하여 60 ~ 10829 keV에 이르는 넓은 에너지 구간에 대하여 에너지-효율 검정을 수행하였다.  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{133}\text{Ba}$ ,  $^{152}\text{Eu}$ ,  $^{226}\text{Rn}$  등의 표준 방사선원을 이용하여 60 keV ~ 2204 keV에 이르는 저 에너지 영역에 대한 절대 효율 곡선을 결정하고,  $^{35}\text{Cl}(n, \gamma)$ ,  $^{14}\text{N}(n, \gamma)$  반응을 통하여 방출되는 즉발 감마선을 이용하여 최대 10829 keV에 이르는 고 에너지 영역까지 상대 효율 곡선을 확장하였다. 결정된 절대 피크 효율의 상대 오차는 저에너지 영역에 대하여 3%이내이며, 전에너지 영역에 대하여 5%이하이다.

Abstract

Energy-efficiency calibration for the SNU-KAERI PGAA spectrometer is performed in a wide energy range of 60 ~ 10829 keV. Standard radioisotopes such as  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{133}\text{Ba}$ ,  $^{152}\text{Eu}$  and  $^{226}\text{Rn}$  are used to generate the absolute efficiency curve in the low energy range of 60 ~ 2204 keV. After the completion of the absolute efficiency curve with the standard radioisotope, the measurement of the prompt gamma rays from the  $(n, \gamma)$  reactions of Cl and N are performed to extend the energy range to 10829 keV. The relative standard uncertainty is less than 3% for the lower energy range and less than 5% for the whole energy range.

1. 서 론

즉발 감마 방사화 분석법(Prompt Gamma Activation Analysis : PGAA)은 열중성자에 의해 방사화된 핵종에서 나오는 즉발 감마선을 계측함으로써 시료를 분석하는 비파괴 방사화 분석기술이다. PGAA 분석법은 수소에서 우라늄에 이르는 주기율표 상의 거의 모든 원소에 대한 분석이 가

능하다. 또한, 중성자 흡수 후  $10^{-14}$  sec 이내의 짧은 시간에 방출되는 즉발 감마선을 빔 조사와 동시에 측정할 수 있으므로 1회의 측정만으로 다중 원소 분석(multielement analysis)이 가능하다 [1]. 본 연구실에서는 한국원자력연구소의 지원을 통하여 2001년 상반기에 HANARO ST1 공에 즉발감마방사화분석 장치(SNU-KAERI PGAA Facility)를 건설하였다[2,3]. 본 장치를 PGAA 분석법 등에 범용으로 활용하기 위해서는 분광계통에 대한 에너지 검정 및 효율 검정이 필수적으로 요구된다. 에너지 검정의 범위가 수십 keV에서 3 MeV의 저에너지에 걸친 통상의 방사화 분석법의 경우는 에너지 및 효율 검정의 방법론이 비교적 잘 확립되어 있다[4]. 반면 즉발감마선의 스펙트럼은 매우 넓은 영역(수십 keV ~ 11 MeV)에 걸쳐 있으므로 분광계통 검정의 어려움을 극복한 실험 방법 및 매우 엄밀하고 조심스러운 과정이 필요하다[3]. 본 연구에서는 SNU-KAERI PGAA 장치의 HPGe 분광계통에 대한 에너지-효율 검정을 수행하였다.

## 2. 에너지-효율 검정(Energy-Efficiency Calibration)

효율 검정을 위하여 사용된 검출기는 민감 부피가 약  $200 \text{ cm}^3$ 이고, 0.5 mm의 표준 Be window를 가진 상대효율이 43%인 closed end coaxial n-type HPGe detector이다. 검출 계통의 gain은 13 MeV에 이르는 감마선을 검출할 수 있도록 조정하였다. 검출 신호를 처리하기 위하여 16K ADC를 사용하였고, 스펙트럼을 on-line상에서 나타내고 분석하기 위하여 ORTEC Gamma-Vision을 사용하였다. 측정된 감마선 피크에 대한 상세 분석을 위해서는 본 연구실에서 이미 개발한 HYPERMET dos version을 이용하여 수행하였으며, 현재 PGAA spectrum에 대한 on-line 분석을 위하여 상호작용적이고 자동 분석이 가능한 Windows 용의 HYPERMET을 개발하고 있다. 검출기의 위치는 표적이 없는 상태에서 중성자 빔을 조사하여 측정하였을 때 ADC 불감 시간이 수% 이하가 되도록 결정하였다. 결정된 거리는 표적으로부터 25.5 cm이며, 이때 측정된 total background 계수율은 약 3 kcps이다.  $^{60}\text{Co}$ 의 1333 keV 감마선 피크의 전형적인 분해능은 2.5 keV이다. 감마선 효율 곡선을 결정하기 위해서는 적절한 에너지 범위를 포괄하는 감마선을 방출하는 표준 선원이 필수적이다. 60 keV에서 3 MeV에 이르는 저 에너지 영역은 감마선 방출율(gamma-ray emission probability)과 에너지가 잘 알려진 표준 선원을 이용하여 효율 곡선을 결정할 수 있다. 이에 대한 방법은 Debertin and Helmer [4]를 포함한 다양한 저자들에 의해 잘 확립되어 있다. 반면 그 이상의 감마선 에너지를 방출하는 적당한 표준 선원의 부재는 PGAA에서 효율 곡선을 결정하는 데 가장 큰 난점이 되고 왔다. 따라서 표준 선원을 대신할 중성자 포획 반응에 의해 방출되는 즉발 감마선을 이용하는 방법이 여러 저자들에 의해 시도되어 왔다. 본 연구에서는 우선  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{133}\text{Ba}$ ,  $^{152}\text{Eu}$ ,  $^{226}\text{Rn}$  등의 표준 방사선원을 이용하여 60 keV ~ 2204 keV에 이르는 저 에너지 영역에 대한 절대 효율 곡선을 결정하고, 열중성자 포획 즉발감마선의 에너지와 절대강도가 매우 정확하게 알려진  $^{35}\text{Cl}(n, \gamma)$ ,  $^{14}\text{N}(n, \gamma)$  반응을 통하여 방출되는 즉발 감마선을 이용하여 최대 10829 keV에 이르는 고 에너지 영역까지 상대 효율 곡선을 확장하였다.  $^{226}\text{Rn}$ 을 제외한 표준 방사선 선원의 감마선 방출율은 IAEA-TECDOC[5]에서 취하여 사용하였다.

$^{226}\text{Rn}$ 의 감마선 방출율은 참고문헌[6]에 제시된 Helmer가 추천한 값을 사용하였다. 피크 면적의 통계적 불확실성을 분석에 사용한 가장 작은 피크에 대하여 1% 이하가 되도록 측정하였다. 상대 효율 결정에 사용한 감마선 에너지와 즉발 감마선 절대 강도는 최근 Hungary의 Institute of Isotopes(IKI)의 Molnár 등에 의해 평가된 자료[7]를 사용하였다.  $^{35}\text{Cl}(n, \gamma)$ ,  $^{14}\text{N}(n, \gamma)$  반응을 통하여 결정된 고 에너지 영역에서의 상대효율은 저 에너지 영역에서의 절대효율에 대하여 규격화하였다. 이를 8차의 다항식으로 fitting함을 통하여 60 ~ 10829 keV에 이르는 넓은 에너지 영역에 대하여 PGAA 분광계통의 절대 피크 효율을 결정하였으며[8], 이를 그림 1에 나타내었다. 결정된 절대 피크 효율의 상대 오차는 저에너지 영역에 대하여 3%이내이며, 전에너지 영역에 대하여 5%이하이다.

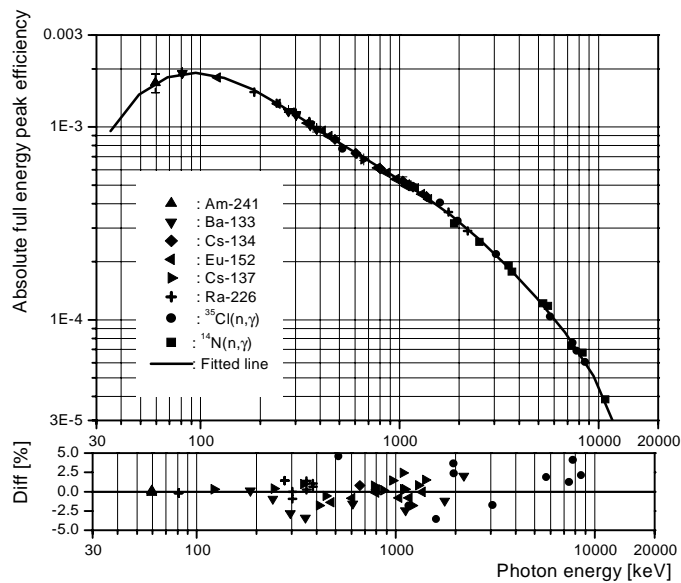


Fig. 1. Absolute full energy peak efficiency for the HPGe detector of SNU-KAERI PGAA facility.

### 3. 결론

SNU-KAERI PGAA 장치를 범용의 PGAA 장치로 활용하기 위해서는 매우 넓은 에너지 구간에 대하여 에너지-효율 검정을 수행할 필요가 있다. 본 연구에서는 표준 방사선원과 KCl 시료 및 멜라민 시료의  $^{35}\text{Cl}(n, \gamma)$ ,  $^{14}\text{N}(n, \gamma)$  반응을 통하여 방출되는 즉발 감마선을 측정하고, IAEA-TECDOC에서 취한 감마선 방출 수율 및 Institute of Isotopes(IKI)의 Molnár 등에 의해 최근 평가된 즉발 감마선 절대 강도 등의 핵자료를 활용하여, 60 ~ 10829 keV에 이르는 절대 피크 효율을 결정하였다.

### 4. 참고문헌

- [1] G.L. Molnár, Zs. Révay, R.L. Paul and R.M. Lindstrom, "Prompt-gamma activation analysis using the k<sub>0</sub> approach" J. Radioanal. Nucl. Chem. 234 (1998) 21.
- [2] S.H. Byun and H.D. Choi, "Design Features of a Prompt Gamma Neutron Activation Analysis System at HANARO", J. of Radioanal. and Nucl. Chem. 244 (2000) 413.
- [3] H.D. Choi, G.M. Sun, S.H. Byun, C.S. Kang and N.B. Kim, "Progress and Plan of the PGNA facility at HANARO", Appendix 3, Summary Report of the Second Research Co-ordination Meeting, INDC(NDS)-424, June 2001, IAEA Nuclear Data Section, Vienna, Austria.
- [4] K. Debertin and R.G. Helmer, "Gamma- and X-Ray Spectrometry with Semiconductor Detectors", pp 248-258, Elsevier Science Publishers B.V., 1988.
- [5] X-ray and gamma-ray standards for detector calibration, IAEA-TECDOC-619, International Atomic Energy Agency, Vienna, 1991.
- [6] S. Raman, C. Yonezawa, H. Matue, H. Iimura, N. Shinohara, "Efficiency Calibration of a Ge detector in the 0.1 ~ 11.0 MeV region", Nuclear Instr. and Meth. A 454 (2000) 389.
- [7] IAEA Coordinated Research Project for Development of a Database for Prompt Gamma-Ray Neutron Activation Analysis, [5]
- [8] Z. Kis, B. Fazekas, J. Östör, Zs. Révay, T. Belgya, G.L. Molnár and L. Koltay, "Comparison of efficiency functions for Ge gamma-ray detectors in a wide energy range", Nuclear Instr. and Meth. A 418 (1998) 374.