

Efficiency Calibration of HPGe Detector in Normal and Coincidence Mode for the Determination of Prompt Gamma-ray

즉발감마선 측정을 위한 HPGe 검출기의 전계수 또는 동시계수모드에서의 광대역 계측효율 보정

Byoung-Chul Song, Yong-Joon Park and Kwang-Yong Jee

Korea Atomic Energy Research Institute, 150 Duck-Jin Dong, Yuseong-gu, Daejeon

nbcsong@kaeri.re.kr

송병철, 박용준, 지광용

한국원자력연구소, 대전광역시 유성구 덕진동 150

(Received March 17, 2004 / Approved May 14, 2004)

Abstract

Neutron induced prompt gamma-ray spectroscopy(NIPS) system measures the prompt gamma-ray emitting by the interaction of a neutron with various materials. This system will be of great benefit to scientists worldwide, since it provides the non-destructive measurement of many element in either solid or liquid wastes. In this study, the full-energy-peak (FEP) efficiency calibration for a HPGe detector was constructed in the γ -ray energy range from 80 keV to 8 MeV, using ^{133}Ba and ^{152}Eu RI sources and $^{35}\text{Cl}(\text{n}, \gamma)^{36}\text{Cl}$ thermal neutron captured reaction. The FEP efficiency curve for the higher energies using the $^{35}\text{Cl}(\text{n}, \gamma)^{36}\text{Cl}$ reaction was normalized with the curve obtained from the RI sources, since the accurate activity of its prompt γ -ray is unknown. The average thermal neutron flux was theoretically calculated using the FEP efficiency curve for the KCl standard solutions. The NIPS system equipped with a γ - γ coincidence setup with two n-type coaxial HPGe detectors was considered in order to reduce the interfering γ -ray background. The FEP efficiency curve for the γ - γ coincidence system was also obtained for full energy range. The performance of the normal and coincidence NIPS system was tested by comparing signal-to-noise ratio in each mode using the reference sample.

Key Words : Efficiency calibration, Neutron, Prompt gamma-ray, Coincidence, HPGe detector

요약

NIPS 시스템은 중성자 핵반응 결과 방출되는 즉발 감마선을 정량적으로 측정하는 장치이며 고체

및 액체 폐기물 중 존재하는 다양한 원소를 비파괴적으로 분석할 수 있는 장점이 있다. 본 연구에서는 NIPS 시스템에 이용된 고순도반도체 검출기의 계측효율을 ^{133}Ba 및 ^{152}Eu 방사성 동위원소 선원과 $^{35}\text{Cl}(n, \gamma)^{36}\text{Cl}$ 핵반응 시 발생되는 즉발감마선을 이용하여 80 keV에서 8 MeV까지 높은 영역에 대하여 구하였다. $^{35}\text{Cl}(n, \gamma)^{36}\text{Cl}$ 핵반응을 이용한 고에너지 감마선의 계측효율은 즉발감마선의 방사능 값을 정확히 알 수 없기 때문에 저에너지 영역에서 정확히 알고 있는 검출기 효율곡선에 규격화시켜 전 에너지 영역에서의 효율보정곡선을 구하였다. 또한 KCl 표준용액에 ^{252}Cf 중성자 선원을 조사시켜 표준용액으로부터 방출되는 즉발 감마선을 고순도반도체 검출기로 측정하고 광대역 계측효율 곡선을 이용하여 수용액 시료에서의 평균 열중성자 속을 예측하였다. NIPS 측정시스템은 주변 재료 물질의 핵반응으로 방출되는 감마선 background를 줄이기 위해 두 개의 고순도반도체 검출기를 이용한 동시계수 장치가 고안되었으며, 동시계수 모드에서의 계측효율도 함께 고려되었으며, 표준선원을 이용하여 전계수 또는 동시계수모드에서의 background에 대한 측정감도를 비교하였다.

중심단어 : 광대역 계측효율, 중성자, 즉발감마선, 동시계수, 고순도반도체 검출기

I . 서론

NIPS 시스템은 열중성자를 시료에 조사시킬 때 시료가 중성자를 흡수한 후, (n, γ) 반응에 의하여 10¹⁴ sec 이내에 방출되는 즉발감마선을 계측함으로써 시료 내 성분 원소의 함량을 비파괴적으로 분석하는 장치이다. 이 분석방법은 X-선 형광분석법(XRF) 또는 중성자방사화분석법(NAA) 등의 기존의 비파괴 분석법으로는 분석하기 힘든 수소, 질소, 인, 황, 또는 규소와 같은 원소들의 분석에 매우 유리한 장점을 지니고 있다.

NIPS 시스템에 사용되는 고순도반도체 감마선 검출기의 계측효율은 특정 선원으로부터 방출되는 감마선 에너지와, 선원과 검출기 사이의 기하학적 구조에 따라 크게 달라지는데, 이는 검출기 자체의 특성으로 감마선에 대한 감응율과 선원의 검출기에 대한 유효 입사각도에 따라 변화하기 때문이다. 감마선 분광분석을 위해서는 일정한 기하학적 구조에서 감마선 검출기의 에너지에 따른 계측효율 보정곡선을 우선적으로 구해야 하며, 특히 본 연구에서와 같이 열중성자 핵반응에 의하여 방출되는 즉발감마선은 고에너지 영역의 스펙트럼을 가지므로 정량분석을 위해서는 높은 에너지까지의 광대역 에너지에 대한 계측효율 보정곡선이 요구된다.

넓은 감마선 에너지 영역에서의 계측효율을 구하

기 위해서는 다음과 같은 몇 가지 어려운 점이 있는데, 그 첫째로는 일정한 에너지 영역을 포함할 수 있는 방사성 표준선원의 종류가 제한적이며, 특히 3MeV 이상의 에너지를 방출하는 방사성 표준선원을 확보하는 것은 어렵기 때문에 높은 에너지 영역에서의 계측효율을 직접 측정하기가 곤란하다는 점이다. 또한 높은 에너지 영역에서는 감마선 에너지와 계측효율 사이의 함수관계가 명확히 알려져 있지 않기 때문에 실험적으로 측정한 데이터의 해석 또는 보정이 매우 불분명하다는 것이다. 따라서 광대역 에너지영역에 대한 계측효율 보정곡선을 구하기 위해 다양한 방법들이 연구자들에 의해 제안되었으며[1,2], 저 에너지 영역과 고 에너지 영역으로 구분하여 보정곡선을 구하는 것이 일반적이다. 이때 저 에너지 영역에서는 몇 가지 잘 알려진 방사성 표준선원을 이용하며, 고 에너지 영역에 대해서는 주로 열중성자 핵반응에 의해 방출되는 즉발감마선을 이용함으로써 전 에너지피크 계측효율을 구할 수 있다.

본 연구에서는 에너지 영역을 세 구간으로 구분하여 보정곡선을 구하였으며, 저 에너지 영역에서는 ^{133}Ba 방사성 표준선원을 사용하여 80keV~384keV 에너지 영역에서 계측효율을 구하였고 중간 에너지 영역에서는 ^{152}Eu 방사성 표준선원을 사용하여 121keV~1,408keV 에너지 영역에서 계측효율을 구하였다. 또한, 고 에너지 영역에서는 1M KCl 표준용

액에 중성자를 조사시켜 $^{35}\text{Cl}(n, \gamma)^{36}\text{Cl}$ 핵반응으로부터 방출되는 즉발감마선을 이용하여 1,064keV~7,790keV 까지의 에너지 영역에서 계측효율을 구하였다. 또한, 본 연구에서는 NIPS 측정시스템의 재료물질과 주변 차폐물질로부터 발생되는 높은 에너지의 즉발감마선에 의한 감마선 background는 검출기의 방사선 차폐체 만으로는 줄이기가 매우 어렵기 때문에 전자적 차폐개념의 timing spectroscopy를 이용한 동시계수장치를 도입하는 것이 유리하며, 이에 대한 광대역 계측효율 보정곡선도 함께 고려되어야 할 것으로 판단된다. 따라서, 동시계수 모드에서의 계측효율을 구하고 표준선원을 이용하여 background에 대한 측정감도를 전계수모드와 비교하였다.

II. 실험

가. NIPS 시스템의 중성자 조사장치 및 검출기

조사선원으로는 ^{252}Cf (5.4mCi , $2.4 \times 10^7 \text{n/s}$, Frontier Technology Co.) 중성자 선원을 이용하였다. 중성자 선원의 보관은 반경 45cm의 원통형의 폴리에틸렌 보관함을 이용하였으며 보관함과 측정함 사이에 압축공기 실린더를 이용하여 선원 이동이 가능하도록 구성하였다. 시료용기가 위치하는 측정함은 20cm의 폴리에틸렌과 5cm의 납으로 차폐되어 있으며 고순도반도체 검출기의 차폐를 위해서 별도로 2cm의 납으로 차폐하고 안쪽에 soft X-ray를 차단하기 위하여 Cu lining을 하였다. HPGe 감마선 검출기는 중성자 선원으로부터 15cm 거리에 마주 보지 않도록 차폐체를 이용하여 90도 방향으로 위치시켰다. 두 개의 고순도반도체 검출기의 주위는 10cm 두께의 납벽들로 차폐하고 검출기 방향은 시료용기 쪽으로 향하게 하였으며 검출기 전면에는 Li-PE 차폐체를 부착하여 중성자에 의한 검출기의 흐손을 최소화할 수 있도록 구성하였으며 NIPS 시스템 개략도를 Fig. 1에 나타내었다.[3, 4].

나. 표준선원 및 방사능 계측

저 에너지 영역(80keV~384keV)의 계측효율 측정

을 위해 사용되는 방사성 동위원소 표준선원은 ^{133}Ba 을 선택하였으며, 중간 에너지 영역(122keV~1,408keV)을 위한 방사성 동위원소 표준선원은 ^{152}Eu 를 선택하였다. 또한 고에너지 영역(1,164keV~7,790keV)은 중성자 조사에 의한 $^{35}\text{Cl}(n, \gamma)^{36}\text{Cl}$ 핵반응에서 방출되는 즉발감마선을 이용하였다. 방사성 표준선원 ^{133}Ba 과 ^{152}Eu 는 각각 28.86kBq과 26.64kBq(2003-01-05일)이 되도록 혼합하여 1L 수용액으로 만들어 사용하였으며, 고에너지 감마선 표준선원으로서 1M KCl 용액의 $^{35}\text{Cl}(n, \gamma)^{36}\text{Cl}$ 중성자 핵반응으로 방출되는 즉발감마선을 이용하였다.

측정시스템은 ADCAM 100(EG&G ORTEC)과 두 개의 HPGe 검출기를 사용하였으며 소프트웨어는 MAESTRO II(EG&G ORTEC)를 이용하였다. 표준선원 측정은 방사성 동위원소 표준선원($^{133}\text{Ba} + ^{152}\text{Eu}$, 1L)을 NIPS 시스템의 측정함에 넣고 일반모드와 동시계수 모드에서 각각 10,000초 동안 측정하였으며, 또한 같은 조건에서 고에너지 감마선 표준선원(1M KCl, 1L)에 중성자를 조사시키면서 방출되는 즉발감마선을 측정하였다.

다. 동시계수장치 구성

감마-감마 동시계수장치 구성은 Fig. 1에 보인 바와 같이 TAC(Time-to-Amplitude Converter)를 이용

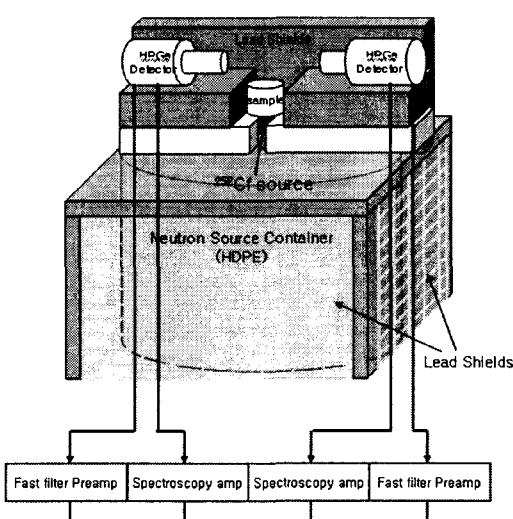


Fig. 1. The conceptual drawing of a neutron induced prompt gamma system.

한 시스템이 CFD(Constant-Fraction Discriminator)를 통해서 만들어진 총 output pulse가 그대로 동시에 계수율이 되므로 효율면에서 유리하기 때문에 채택되었다.

검출기는 휴대용으로 변환한 HPGe(GMX60-P-AS)와 HPGe(GMX25190-P) 검출기를 사용하고, ^{22}Na 와 ^{60}Co 동위원소 선원을 이용하여 동시계수장치의 timing을 조절하고 ^{60}Co 선원의 1,173.2keV와 1,332.5keV에 대한 γ - γ 동시계수법을 적용하여 동시계수장치의 성능을 평가하였다.

III. 결과 및 고찰

가. 측발감마선 background 및 염소 측발감마선 측정

NIPS 측정시스템의 ^{252}Cf 중성자 선원이 보관함에 있을 경우 와 선원을 조사장치로 옮렸을 때의 측발감마선 background 스펙트럼을 측정하였다. ^{252}Cf 중성자 선원이 중성자 보관함에 있을 때, 자연방사선 이외의 감마선 background에 가장 큰 영향을 주는 원소는 중성자 보관함의 재질인 폴리에틸렌의 주성분인 수소이고, 2,223.3keV의 측발감마선이 발생되었다. 자연방사선은 ^{40}K (1,460.8keV)와 ^{208}Tl (2,614.5keV) 등이 확인되었으며 background 스펙트럼의 수소피크(2,223.3keV)에서 에너지 분해능의 지표인 반치폭이 2,46keV임을 확인하였다.

^{252}Cf 중성자 선원이 조사장치로 이동하였을 때, 주변 재료물질에 의해 발생하는 측발감마선 background가 증가되어 ^{40}K 와 ^{208}Tl 등의 자연방사선이 background 스펙트럼에 묻혀서 사라지는 현상을 확인하였다. 측발감마선 background는 중성자 차폐물질로 쓰이는 폴리에틸렌의 수소에 의한 피크뿐만 아니라 검출기 자체성분인 Ge의 측발감마선 596.4, 608.9 그리고 868.4keV이 증가하며 그 외의 주변 재료물질인 Fe(5,920.3keV), Cu(7,914.5, 7,636.6, 7,306.2keV), Pb(7,367.7keV), Ni(8,533.4, 8,998.2keV), Cr(8,884.1, 9,720.3keV) 등의 피크가 증가됨을 확인하였다.

염소 시료에 대한 측발감마선은 516.73, 786.26, 788.40, 1,164.7, 1,600.8, 1,950.9, 1,959.1keV에서

강한 피크를 보여주었다. 이들의 CFD window setting은 낮은 에너지 영역의 516.73, 786.26, 788.40keV의 peak를 같은 영역으로 하고 높은 에너지 영역의 1,164.7, 1,600.8, 1,950.9, 1,959.1keV의 peak를 뮤어 감마-감마 regional 동시계수법으로 측정하였다. 1.0M KCl 용액에 대한 전계수모드에서의 측발감마선 스펙트럼의 반치폭은 1,164.7keV에서 2.20keV이며 동시계수모드에서의 스펙트럼의 반치폭은 1,164.7keV에서 2.22keV임을 확인하였다.

나. 동시계수장치 성능평가

동시계수장치의 성능시험으로 ^{22}Na (1274.5keV) 와 ^{60}Co (1173.2keV, 1332.5keV) 동위원소 선원을 이용하여 timing을 조절하였으며, ^{60}Co 의 두 감마에너지 선에 대한 동시계수 window setting을 하였다. Fig. 2에 나타낸 바와 같이 ^{22}Na 선원과 ^{60}Co 선원을 동시에 사용하여 ^{60}Co 선원의 1,173.2keV와 1,332.5keV에 대한 γ - γ peak 동시계수법을 적용하였을 때, ^{60}Co peak을 제외한 소멸방사선(511keV), ^{22}Na 에서 방출되는 감마선 및 수소의 (n , γ)반응에 의한 측발감마선(2,223.3keV)이 제거됨을 확인하였다.

1M Cl 용액을 이용하여 $^{35}\text{Cl}(n, \gamma)^{36}\text{Cl}$ 반응에 의해 발생하는 788.4keV 및 1,164.8keV 측발감마선에 대해 CFD window 값을 잡고 동시계수 스펙트럼을 얻었다. Fig. 3에 보이는 바와 같이 동시계수법을 이용하였을 때 NIPS 장치 주변 차폐물질에 의한 background가 현저하게 감소되었으며 signal/noise 비가 증가됨을 알 수 있었다. Table 1에 나타낸 바와 같이 Cl, Ca, Mg, Si, Gd, F 등의 주요 대상원소의 대표적인 에너지에 대한 동시계수모드에서의 전계수모드에 대한 signal/noise 비의 증가율을 계산한 결과 평균적으로 약 5배의 증가를 나타내었다. 그러나, 동시계수장치모드에서의 계수율은 광대역에너지 계측효율 보정곡선에 보이는 바와 같이 350 keV ~2,000 keV 사이의 국한적인 에너지영역 이외에서는 매우 낮은 경향을 보이고 있다. 따라서 미량으로 존재하는 원소의 정량에는 동시계수장치의 이용이 더 불리할 것으로 판단된다.

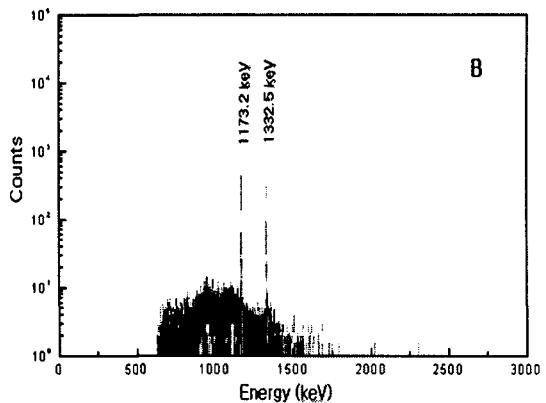
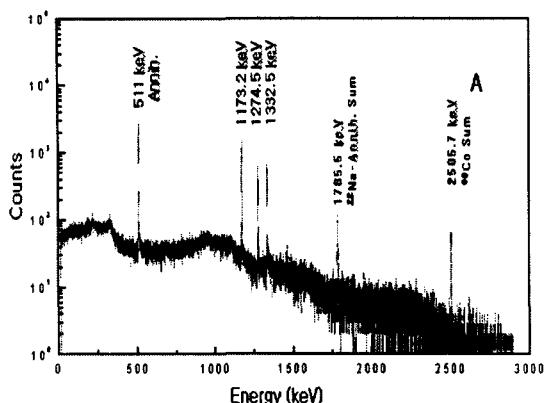


Fig. 2. Full energy spectrum(A) and gamma-gamma coincidence spectrum(B).

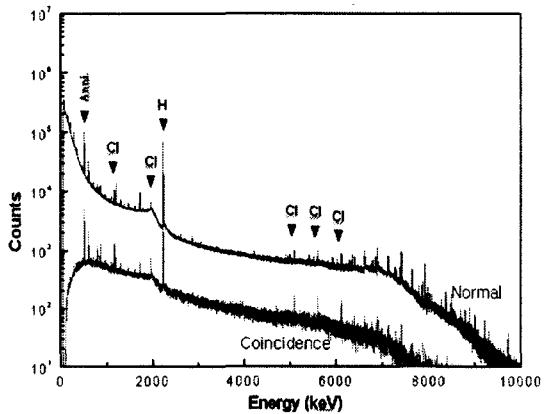


Fig. 3. Normal and coincidence spectra of 1M KCl standard solution.

다. 광대역에너지 계측효율 보정

일반적으로 측발감마선은 낮은 에너지 뿐만 아니라 3MeV이상의 높은 에너지영역에서 방출되기 때문에 80keV~8MeV 사이의 광대역 에너지에 대한 계측효율을 구해야하며 저 에너지영역에서는 감마선 동위원소 표준선원을 이용할 수 있으나 3MeV 이상 에너지를 갖는 감마선 표준선원은 확보하기가 어렵기 때문에 저 에너지, 중간 에너지, 고 에너지 영역으로 나누어 각각에 맞는 표준선원을 사용하여 검출기 계측효율을 별도로 구하였다.

방사성 표준선원을 계측하고 각 에너지(keV)에 대한 계측효율을 계산하여 Table 2에 나타내었다. 여기서 ^{133}Ba 및 ^{152}Eu 의 방사능은 계측시점(2003-07-02일)으로 통과 보정한 값이다. 또한 $^{35}\text{Cl}(n, \gamma)^{36}\text{Cl}$ 반응을 이용한 고에너지 감마선의 계측효율은 측발

Table 1. The signal-to-noise ratios for the normal and coincidence measurements

Sample	Mode	Energy(keV)	S/N ratio
Cl(1M)	normal	1950.9	0.1973
		6110.9	1.327
		1164.7	0.3722
	coincidence	1950.9	0.6472
		6110.9	6.400
		1164.7	0.8803
Ca(1M)	normal	1942	0.02023
		6419.9	0.07130
	coincidence	1942	0.04741
		6419.9	-
Si(1M)	normal	3539.1	0.04971
		4934.4	0.09766
	coincidence	3539.1	0.7333
		4934.4	-
Gd(100ppm)	normal	1186.5	0.08475
		944	0.06458
		199.4	0.01705
	coincidence	1186.5	0.4047
		944	0.2914
		199.4	0.01876
Cd(50ppm)	normal	558.6	0.03241
		651.3	0.08379
	coincidence	558.6	0.03730
		651.3	0.03960
F(1M)	normal	582.2	0.002780
	coincidence	582.2	0.01266
Sm(50ppm)	normal	333.4	0.03884
		439.4	0.03657
	coincidence	333.4	0.07505
		439.4	0.07955

감마선의 방사능을 정확히 알 수 없기 때문에 저에너지 영역에서의 정확히 알고 있는 검출기 효율곡선에 규격화시켜 전 에너지 영역에서 효율보정곡선을 구하였으며, 전계수모드에서 각 에너지에 대한 계측효율을 구하고 최소자승법을 이용하여 아래와 같은 3차식의 계측효율 보정식을 얻었다⁵⁾.

$$\begin{aligned} \text{Log}(E_{ff}) = & -0.65 - 0.842^*(\text{Log En}) + \\ & 0.417^*(\text{Log En})^2 - 0.089^*(\text{Log En})^3 \dots\dots(1) \end{aligned}$$

또한 동시계수모드에서의 에너지 보정곡선은 ^{152}Eu 방사성 표준선원의 344.3keV, 778.9keV, 964.1keV, 1,112.1keV에서 나타나는 피크를 이용하여 저에너지영역의 계측효율을 구하고 고에너지 영

역은 중성자 조사에 의한 $^{35}\text{Cl}(n, \gamma)^{36}\text{Cl}$ 에서 방출되는 염소의 즉발감마선 1,164.72keV, 1,950.93keV, 2,863.94keV, 3,061.71keV와 6,110.88keV에서 나타나는 피크를 이용하였다. 동시계수모드에서도 전계수모드와 마찬가지로 $^{35}\text{Cl}(n, \gamma)^{36}\text{Cl}$ 반응을 이용한 고에너지 감마선의 계측효율은 ^{152}Eu 방사성 표준선원을 이용하여 저에너지 영역에서의 정확한 효율곡선에 규격화시켜 보정하여 아래와 같은 광대역 에너지 영역에서의 효율보정식을 얻었다.

$$\begin{aligned} \text{Log}(E_{ff}) = & -100.59 + 83.67^*(\text{Log En}) \\ & - 24.17^*(\text{Log En})^2 + 2.27^*(\text{Log En})^3 \dots\dots(2) \end{aligned}$$

NIPS 시스템의 정해진 기하학적 구조에서의 전계

Table 2. Nuclear data of the calibration sources with detection efficiencies

Source	Activity (Bq)	E (keV)	P (per decay)	dacay rates (dps)	count rates (cps)	Efficiendy (%)
^{133}Ba	27500	81.00	0.32900	9047.5	3.87	4.2774×10^{-2}
		276.40	0.07160	1969.0	0.64	3.2504×10^{-2}
		302.90	0.18340	5043.5	1.60	3.1724×10^{-2}
		356.00	0.62050	17063.7	4.99	2.9243×10^{-2}
		383.80	0.08940	2458.5	0.70	2.8472×10^{-2}
^{152}Eu	24000	121.80	0.28370	6808.8	2.75	4.0389×10^{-2}
		244.70	0.07530	1807.2	0.59	3.2647×10^{-2}
		344.30	0.26570	6376.8	1.69	2.6502×10^{-2}
		411.10	0.02238	537.1	0.12	2.2342×10^{-2}
		444.00	0.03125	750.0	0.17	2.2667×10^{-2}
		778.90	0.12970	3112.8	0.54	1.7348×10^{-2}
		867.40	0.04214	1011.3	0.17	1.6810×10^{-2}
		964.10	0.14630	3511.2	0.55	1.5664×10^{-2}
		1112.10	0.13540	3249.6	0.48	1.4771×10^{-2}
		1212.90	0.01412	338.8	0.04	1.1806×10^{-2}
$^{35}\text{Cl}(n,V)^{36}\text{Cl}$		1299.10	0.01626	390.2	0.03	7.6883×10^{-3}
		1408.00	0.20850	5004.0	0.66	1.3189×10^{-2}
		1164.72	0.19930	-	15.64	1.4268×10^{-2}
		1950.93	0.21720	-	7.47	6.2531×10^{-3}
		2863.94	0.06930	-	2.34	6.1393×10^{-3}
		3061.71	0.03950	-	0.96	4.4188×10^{-3}
		6110.88	0.20000	-	4.97	4.5182×10^{-3}
		7413.80	0.10420	-	0.62	1.0818×10^{-3}
		7790.16	0.08550	-	0.58	1.2334×10^{-3}

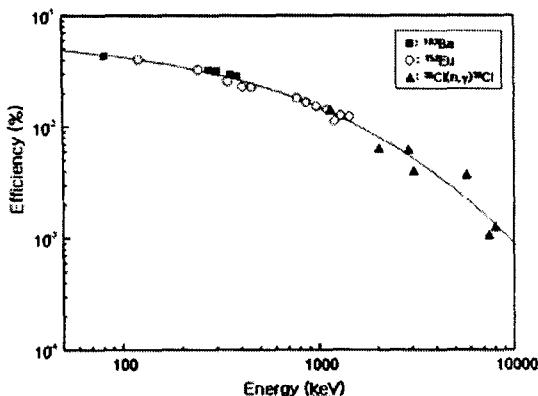


Fig. 4. The efficiency calibration curve of the normal mode for full energy range.

수모드와 동시계수 모드에서의 검출기 계측효율 보정곡선은 Fig. 4과 5에 각각 나타내었다. 이 계측효율을 보정곡선을 이용하여 NIPS 시스템에 사용된 ^{252}Cf 중성자 선원에 의한 열중성자속을 이론적으로 예측하였다. 수용액 시료의 평균 열중성자 속은 1M KCl 용액의 측발감마선 방사능 값을 이용하여 아래와 같은 방사능 식으로부터 계산할 수 있다.

여기에서 A는 즉발감마선 방사능(Bq)이고, N은 대상원소의 원자의 수이며, σ 와 Φ_{th} 는 열중성자 흡수 단면적과 열중성자 속이다. 또한 즉발감마선 방사능은 다음식과 같이 표현할 수 있다.

여기에서 a 는 계수율(cps)이며, τ 는 방사선 방출율(radiation yield)이며, ϵ 는 검출기 효율(detector efficiency)이다.

따라서 1M KCl 용액(1000mL)의 원자수 N은 6.023×10^{23} 이며, Cl의 열중성자 흡수단면적 σ 는 33.1 barn ($=3.31 \times 10^{-23}\text{cm}^2$)이고, 계측효율을 보정곡선으로부터 Cl의 대표적인 측발감마선($1,164.7\text{keV}$)의 계측효율은 1.43×10^4 , 감마선 방출율은 19.93% , 그리고 감마선 계수율은 15.64cps 로 감마선 방사능 A(dps) = $15.64/(0.1993 \times 1.43 \times 10^4)$ 로 각각의 값을

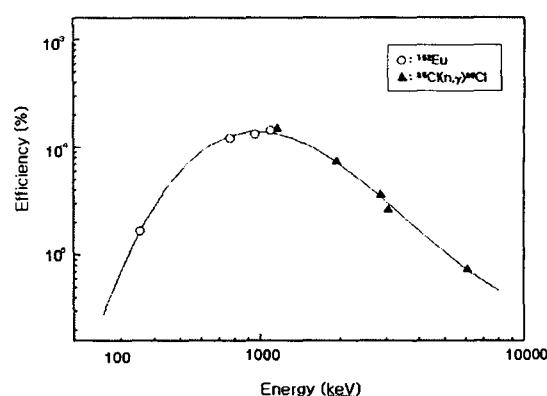


Fig. 5. The efficiency calibration curve of the coincidence mode for full energy range.

위의 식(3)에 대입하면 평균 열중성자 속은 약 2.74 $\times 10^4$ n/s인 것으로 예측된다. 이 때, 열중성자속의 확장 표준불확도는 21.7% (신뢰도 95%, k=2)로 나 타났다.

또한 동시계수 모드에서의 Cl 측발감마선 ($1,164.7\text{keV}$)에서의 계측효율은 1.48×10^6 이며, 이 때 계수율은 0.149cps 로 감마선 방사능은 $5.05 \times 10^5\text{dps}$ 이었다. 열중성자 속은 $2.53 \times 10^4\text{n/s}$ 로 계산되었으며, 전계수모드에서 예측한 열중성자 속과 비교하여 측정방법간의 편차는 약 7%로 나타났다.

IV. 결론

수용액 시료의 비파괴 정량분석을 위해 ^{252}Cf 선원을 이용한 NIPS 측정시스템을 구성하고 25% 상대효율의 HPGe 검출기의 80keV~8MeV의 광대역에 대한 계측효율을 ^{133}Ba , ^{152}Eu 및 중성자 조사에 의하여 방출되는 $^{35}\text{Cl}(n, \gamma)^{36}\text{Cl}$ 측발 감마선을 이용하여 구하였다. $^{35}\text{Cl}(n, \gamma)^{36}\text{Cl}$ 반응을 이용한 고에너지 감마선의 계측효율은 측발감마선의 방사능을 정확히 알 수 없기 때문에 저에너지 영역에서의 정확히 알고 있는 검출기 효율곡선에 규격화시켜 광대역에 에너지 영역에서 효율보정곡선을 얻었다. 이 때 얻은 3차식의 계측효율 보정식을 KCl 수용액 시료에 적용하여 NIPS 시스템에 사용된 ^{252}Cf 중성자 선원에 의한 열중성자속을 이론적으로 예측하였다. 또한 NIPS 측정시스템의 주변 재료물 질로부터 발생하는

즉 발암마선 background를 낮추기 위한 방편으로 동시계수법을 도입하였으며, Cl, Ca, Mg, Si, Gd, F 등의 주요 대상원소의 대표적인 에너지에 대한 동시계수모드에서의 전계수모드에 대한 signal/noise 비의 증가율을 계산한 결과 평균적으로 약 5배의 증가를 나타내었으나, 동시계수장치모드에서는 350 keV~2,000 keV 사이의 국한적인 에너지영역 이외의 에너지영역에서는 매우 낮은 계수율을 나타내므로 미량분석에서는 동시계수장치의 이용이 오히려 불리할 것으로 판단된다. 본 연구에서 구한 NIPS 측정시스템의 광대역 효율보정곡선은 산업폐수 또는 원자력액체폐기물중 존재하는 원소의 비파괴성량을 위해 사용될 예정이다. 이 시스템은 기존의 연구용 원자로를 이용하는 PGAA 방법에 비교하여 ^{252}Cf 중성자선원의 장점인 이동성을 이용하여 유리 또는 파라핀고화체와 같은 방사성폐기물 고화체 내에 존재하는 주성분에 대한 비파괴 실시간분석에 활용될 수 있으며, 또한 최근의 테리 등의 국제적 문제로 주목받는 폭발물 및 화학작용제의 탐지를 위해 공항 또는 항구의 승객 수화물 검색용으로 응용할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력중장기연구개발사업의 일환으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. S. Raman, C. Yonezawa, H. Matsue, H. Iimura, N. Shinohara, "Efficiency Calibration of a Ge Detector in the 0.1 - 11.0 MeV Region", Journal of the Nuclear Instrument and Methods in Physics Research, A454, pp. 389-402 (2000).
2. G. L. Molnar, Zs. Revay, T. Belgya, "The New Prompt Gamma-ray Catalogue for PGAA", Journal of the Nuclear Instrument and Methods in Physics Research, A489, pp. 140-159 (2002).
3. Y. J. Park, B. C. Song, K. Y. Jee, "Development of Neutron Induced Prompt Gamma-ray Spectroscopy System Using ^{252}Cf ", Journal of the Analytical Science & Technology, 16(1), pp. 12-24 (2003).
4. Y. J. Park, B. C. Song, K. Y. Jee, "Study on Thermal Neutron Efficiency for Neutron Induced Prompt Gamma-ray Spectrometer Using Various Reflector", Journal of the Analytical Science & Technology, 16(5), pp. 426-429 (2003).
5. Z. Kis, B. Fazekas, J. Ostor, Zs. Revay, T. Belgya, G.L. Molnar, L. Koltay, "Comparison of Efficiency Functions for Ge Gamma-ray Detectors in a Wide Energy Range", Journal of the Nuclear Instrument and Methods in Physics Research, A418, pp. 374-386 (1998). f the Practical Applicability of PID and RES Scenario Approaches for Performance and Safety Assessments in the Finnish Nuclear Spent Fuel Disposal Programme", POSIVA Work Report TURVA-96-02, April 1996.