

= 총 설 =

## $k_0$ -표준화방법에 의한 기기중성자방사화 분석법의 고찰

문종화\*, 정용삼, 김선하  
한국원자력 연구소

### The Review of Instrumental Neutron Activation Analysis by $k_0$ -standardization method

Jong-Hwa Moon\*, Yong-Sam Chung, Sun-Ha Kim  
Korea Atomic Energy Research Institute 150  
Dukjin Dong, Yusong, Taejon, Korea, 305-600

**요 약** : 기기중성자방사화 분석법은 핵 분석기술의 대표적인 방법으로 비파괴-동시 다원소분석의 장점과 함께 절대측정값에 의해 정량 할 수 있다는 특징을 갖고 있다. 최근에는 정확도와 편의성을 만족할 수 있는  $k_0$ -정량법을 사용한 기기중성자방사화 분석법이 세계적으로 일반화되고 있다. 본 연구에서는  $k_0$ -법의 적용을 위하여 이 방법의 전체적인 개념의 소개와 함께  $k_0$ -파라미터를 측정하고자 하였다. 이를 위하여  $k_0$ -법의 개념이해와 정량에 필요한 인자들의 정의 및 파라미터인  $Q_0(\alpha)$ 와  $f$  값을 결정하기 위한 수식과 실험적 측정방법 등을 요약하였고 중성자조사공에 따라 특성 값을 갖는  $\alpha$ 와  $f$  값을 하나로 연구용원자로의 방사화분석용 조사공(NAA#1)에서 측정하여  $k_0$ -법의 도입을 위한 기반을 마련하였다.

**Abstract** : Instrumental Neutron Activation Analysis as a representative method of nuclear analytical technique, has advantages of non-destructive, simultaneous multi-element analysis with the characteristics of absolute measurement method. Up to date,  $k_0$ -quantitative method which is accurate, convenient and user-friendly, has been generalized world-widely. In this study, it is intended to introduce the general concept of  $k_0$ -method and to measure  $k_0$ -parameters for the future implementation to our NAA system. For this objectives, the definition of relevant factors for the quantitative analysis and the equation for the experimental determination of parameters such as  $Q_0(\alpha)$  and  $f$  were summarized. Furthermore, a foundation for the  $k_0$ -standardization method was prepared through the measurement of  $\alpha$  and  $f$ -value which depend on the specific character of irradiation hole at NAA #1-hole of HANARO research reactor.

**Key words** : Instrumental Neutron Activation Analysis (INAA),  $k_0$ -standardization method,  $k_0$ -factors and parameters ( $\alpha$  and  $f$ )

★ Corresponding author  
Phone : +82-(0)42-868-8534, Fax : +82-(0)42-868-8448  
E-mail : jhmoon1@kaeri.re.kr

### 1. 서 론

중성자방사화 분석법(NAA ; Neutron Activation Analysis)은 1930년대에 G. Hevesy와 H. Levi에 의해 제안된 이후로 연구용 원자로의 발전과 함께 감도가 좋은 분석법으로 널리 활용되기 시작하였다. NAA는 크게 기기중성자방사화분석법(INAA ; Instrumental NAA)과 방사화학적 분리를 통한 방사화분석법(RNAA ; Radiochemical NAA)으로 나눌 수 있다. 이중 INAA에서 적용되고 있는 정량법들은 절대법, 비교법, 비교체법 및  $k_0$ -법으로 나눌 수 있다. 절대법에 의한 정량법에서는 각 핵종에 대한 핵 자료와 원자로의 특성에 따른 중성자속분포 등의 정확한 측정이 필수적이며 이들의 정확성은 다소 큰 불확도 및 계통적인 오차요인을 포함하고 있다. 이와같은 불확도 및 오차를 줄이기 위하여 분석시료를 표준물과 동시에 중성자 조사하여 표준물의 보증된 원소의 함량 값으로부터 표준물과 시료의 초기방사능의 비를 구하여 정량하는 방법인 비교법이 보편화되어 있다. 또한 이와 유사한 방법으로 비교법의 단점인 표준물의 사용을 줄이기 위하여 표준물 대신에 비교체가 될 수 있는 모니터(주로 금)를 시료와 동시에 조사하여 모니터와 각 분석대상 핵종의 방사능(specific activity)의 상대적인 비율로서 정량하는 방법인 단일비교체법이 개발되어 적용되어 왔다. 그러나 비교법을 적용하는 경우에는 시료를 분석할 때 항상 표준물이 필요하여 편의적이지 못하다는 단점이 있다. 비교체법 또한, 사용되는 모니터에 대한 각 분석핵종들의 방사능 비인 k-factor<sup>1</sup>를 미리 각 원소에 대한 표준체를 사용하여 실험적으로 측정, 결정해야 하며, 만약 원자로의 출력특성이 변한다면 이를 모두 재 측정해야만 하는 불편성을 내재하고 있다. 비교법과 비교체법의 단점을 보완하기 위하여 1970년대를 거쳐 1980년대 초에 A. Simonits, F. De. Corte등은<sup>2</sup>  $k_0$ -정량법을 제안하고 발전시켜 다양한 원자로의 중성자 조사 조건에서의  $k_0$ -parameters를 측정 한 후 실험적으로  $k_{0,Au}$ -factor를 결정하고 문헌값과 비교하였으며 다양한 표준물질분석을 통하여 이 방법의 유효성을 입증하였다.<sup>3,4</sup>  $k_0$ -정량법은 원리적으로는 단일비교체법과 절대법의 중간적인 방법으로 볼 수 있으며 비교법의 분석시 항상 사용되는 표준물질의 사용을 배제하여 편의성을 높이고 분석정확도를 비교법과 동일하게 유지하면서 컴퓨터와  $k_0$ -용 소프트웨어를 사용하여 데이터를

처리함으로써 편리한 정량을 가능하게 하는데 목적이 있다.

본 논문에서는  $k_0$ -법의 도입 및 적용을 위하여 전체적인 개념을 요약하여 소개하였다. 또한  $k_0$ -정량법의 적용에 필요한 일차적 파라미터인  $Q_0(\alpha)$ 의 결정을 위해 필수적인 열외중성자의 1/E-법칙에 대한 편차를 보정하기 위한  $\alpha$  값과 열중성자와 열외중성자의 선속 비(flux ratio), f값에 대한 실험적 측정방법 및 수식을 정리하였고 원자로의 중성자조사공에 따라 특성값을 갖는  $\alpha$ 와 f에 대해 하나로 연구용원자로의 방사화분석용 조사공(NAA#1)에서 측정하였고 측정값을 고찰하였다.

### 2. $k_0$ -정량법

원자로중성자에 비교체(대부분 Au)와 분석시료를 동시에 조사시키는 경우 잘 알려진 방사능생성성에 따라 원소의 질량분율,  $c_m$ 을 비교체\*와 분석핵종(원소)에 대하여 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$C_m = \frac{[(Np/tc)/SDCW]}{[(Np/tc)/SDCW]^*} \frac{M \cdot \theta^* \cdot \sigma_0 \cdot \gamma^*}{M^* \cdot \theta \cdot \sigma_0 \cdot \gamma} \frac{f + Q_0 \cdot (a) \cdot \epsilon \cdot p^*}{f + Q_0 \cdot (a) \cdot \epsilon \cdot p} \dots\dots\dots(1)$$

- 여기서
- $c_m$  : 분석원소의 농도, g/g
  - M : 원자량
  - $\theta$  : 동위원소 존재비
  - $\sigma_0$  : 2200 m/sec의 에너지를 갖는 중성자와의 (n,  $\gamma$ )반응에 대한 방사화 단면적
  - $\gamma$  : 감마선 방출율
  - $N_p$  : 알짜피크 면적
  - W : 시료의 질량, g
  - $W^*$  : 비교체(Au)의 질량, g
  - S : 포화계수, [ 1 - exp(-  $\lambda t_{ima}$ ) ],  $\lambda$ 는 붕괴상수(0.693/ $T_{1/2}$ ),  $t_{ima}$ 는 조사시간
  - D : 감쇠보정계수, exp(-  $\lambda t_d$ ),  $t_d$ 는 냉각시간
  - C : 계측시간 보정계수, [ 1 - exp(-  $\lambda t_m$ ) ] /  $\lambda t_m$ ,  $t_m$ 은 계측시간
  - f : 열중성자속과 열외중성자속의 선속 비(flux

ratio,  $\Phi_{in}/\Phi_e$ )

$Q_0(\alpha)$ : 열외중성자 분포의 비 이상성이 보정된  
공명반응단면적,  $\{I_0(\alpha)\}$ 에 대한  $\sigma_0$ 의 비  
 $\epsilon_p$ : 광전피크의 검출효율

또한 (1)의 수식으로부터  $k_0$ 는 식(2)로 정의한다

$$k_0 = \frac{M^* \cdot \Theta \cdot \sigma_0 \cdot \gamma}{M \cdot \Theta^* \cdot \sigma_0^* \cdot \gamma^*} \dots\dots\dots(2)$$

별표는 비교체를 의미하고 일반적으로  $^{197}\text{Au}(n, \gamma)^{198}\text{Au}$  ( $E_\gamma = 411.8 \text{ keV}$ )를 사용하므로  $k_{0,\text{Au}}$ -factor라고 부른다. (1)의 수식에서 시료의 무게 및 비교체인 Au의 무게는 칭량으로 정할 수 있으며 포화계수(S),

감쇠보정계수(D), 계측시간보정계수(C) 및 각 분석핵종의 붕괴형식(decay mode)을 고려한 비 방사능( $A_{sp}$ )은 감마선 계측과 보정을 통하여 구하여 진다. 결과적으로 나머지 변수들인,  $k_{0,\text{Au}}$ -factor,  $Q_0(\alpha)$ ,  $f$  및  $\epsilon_p$ 를 미리 측정하여 분석시료중의 목적원소를 정량할 수 있게 된다.

**2.1  $k_{0,\text{Au}}$ -factor**

$k_{0,\text{Au}}$ -factor는 문헌에 나와있는 핵 자료들을 사용하여 계산한 이론값과 실험에 의한 측정값을 적용할 수 있다. 이론값을 적용할 경우에는, 불확실한 감마선방출율과 열중성자 방사화단면적 자료로<sup>5,6</sup> 인하여 신뢰성이 적은 결과를 초래할 수 있으므로 A. Simonits 등<sup>2</sup> 헝가리의 KFKI-원자로와 벨기에의 INW-원자로를 사

Table 1.  $k_{0,\text{Au}}$ -factors measured at KFKI reactor, Hungary and at INW reactor, Belgium

Target isotope	Isotope formed	$E_\gamma$ (keV)	Measured $k_{0,\text{Au}}$ -factor		Recommend $k_{0,\text{Au}}$ -factor (Rel error %)	Theoretical $k_{0,\text{Au}}$ -factor using ref [7,8]
			KFKI (ch. "Mila" f=34)	INW (ch.3, f=25)		
Na-23	Na-24	1368.6	$4.71 \times 10^{-2}$	$4.61 \times 10^{-2}$	$4.68 \times 10^{-2}$ (0.6)	$4.83 \times 10^{-2}$
Al-27	Al-28	1779.0	$1.79 \times 10^{-2}$	$1.73 \times 10^{-2}$	$1.75 \times 10^{-2}$ (0.8)	$1.81 \times 10^{-2}$
Cl-37	Cl-38	1642.7	$1.95 \times 10^{-3}$	$1.95 \times 10^{-3}$	$1.97 \times 10^{-3}$ (1.4)	$2.50 \times 10^{-3}$
K-41	K-42	1524.7	$9.65 \times 10^{-4}$	$9.46 \times 10^{-4}$	$9.46 \times 10^{-4}$ (0.6)	$9.87 \times 10^{-4}$
Sc-45	Sc-46	889.3	1.25	1.23	1.24 (0.5)	1.17
Ti-50	Ti-51	320.1	$3.77 \times 10^{-4}$	$3.63 \times 10^{-4}$	$3.74 \times 10^{-4}$ (1)	$3.78 \times 10^{-4}$
V-51	V-52	1434.0	$1.91 \times 10^{-1}$	$1.95 \times 10^{-1}$	$1.96 \times 10^{-1}$ (1.2)	$2.02 \times 10^{-1}$
Cr-50	Cr-51	320.1	$2.53 \times 10^{-3}$	$2.50 \times 10^{-3}$	$2.50 \times 10^{-3}$ (0.5)	$2.85 \times 10^{-3}$
Mn-55	Mn-56	1810.7	$1.34 \times 10^{-1}$	$1.36 \times 10^{-1}$	$1.35 \times 10^{-1}$ (0.4)	$1.53 \times 10^{-1}$
Fe-58	Fe-59	1099.2	$7.87 \times 10^{-5}$	$7.76 \times 10^{-5}$	$7.81 \times 10^{-5}$ (0.5)	$8.01 \times 10^{-5}$
Co-59	Co-60	1173.2	1.30	1.32	1.32 (0.4)	1.34
Cu-65	Cu-66	1039.2	$1.87 \times 10^{-3}$	$1.84 \times 10^{-3}$	$1.86 \times 10^{-3}$ (0.5)	$2.03 \times 10^{-3}$
Zn-64	Zn-65	1115.5	$5.67 \times 10^{-3}$	$5.70 \times 10^{-3}$	$5.68 \times 10^{-3}$ (0.4)	$6.55 \times 10^{-3}$
Ga-71	Ga-72	834.1	$5.16 \times 10^{-2}$	$5.24 \times 10^{-2}$	$5.24 \times 10^{-2}$ (0.6)	$5.37 \times 10^{-2}$
As-75	As-76	559.2	$4.88 \times 10^{-2}$	$4.99 \times 10^{-2}$	$4.97 \times 10^{-2}$ (0.7)	$5.19 \times 10^{-2}$
Se-74	Se-75	264.7	$7.18 \times 10^{-3}$	$7.18 \times 10^{-3}$	$7.25 \times 10^{-3}$ (0.5)	$7.31 \times 10^{-3}$
Rb-85	Rb-86	1076.8	$7.44 \times 10^{-4}$	$7.32 \times 10^{-4}$	$7.48 \times 10^{-4}$ (1.0)	$7.04 \times 10^{-4}$
Zr-94	Zr-95	756.7	$1.09 \times 10^{-4}$	$1.08 \times 10^{-4}$	$1.09 \times 10^{-4}$ (0.9)	$1.64 \times 10^{-4}$
Ru-102	Ru-103	497.1	$7.05 \times 10^{-3}$	$7.54 \times 10^{-3}$	$7.35 \times 10^{-3}$ (1.9)	$7.70 \times 10^{-3}$
I-127	I-128	442.9	$1.11 \times 10^{-2}$	$1.09 \times 10^{-2}$	$1.12 \times 10^{-2}$ (1.7)	$2.11 \times 10^{-2}$
La-139	La-140	1596.2	$1.36 \times 10^{-1}$	$1.34 \times 10^{-1}$	$1.34 \times 10^{-1}$ (1.1)	$1.31 \times 10^{-1}$

용, 측정하여  $k_{0,Au}$ -factor를 측정된 후 이론값과 비교하였다. 실험적으로  $k_{0,Au}$ -factor를 결정하기 위한 방법은 원자로의 중성자속분포를 측정하여 뒤에 설명될  $\alpha$ ,  $f$  및 검출기에 대한 효율의 정확한 측정을 통하여 이루어진다. 이를 수식으로 표현하면 아래와 같다.

$$k_{0,Au} = \frac{Asp}{Asp^*} \frac{f + Q_0(\alpha)^*}{f + Q_0(\alpha)} \frac{\epsilon p^*}{\epsilon p} \dots\dots\dots(3)$$

일반적으로는 실험에 의해 결정된  $k_{0,Au}$ -factor의 사용이 선호되고 있다. Table 1에는 문헌[2]에서 발표한 측정값들중 2개의 조사공에서, 19개 분석핵종에 대해 측정된 실험값과 이론값을 비교하여 예시하였다. 표로부터 대부분의 측정값이 이론값보다 작게 나타난 것을 알 수 있으며 실제 시료의 분석시에  $k_{0,Au}$ -factor의 측정값과 이론값의 편차(bias)에 의한 분석값의 차이를 보정하기 위하여 각각의 방사화분석 실험실에서 사용하고 있는 각 조사공에서 실험적으로 측정된  $k_{0,Au}$ -factor 값을 적용하여야 함을 확인할 수 있다.

**2.2  $Q_0(\alpha)$ 의 결정**

$Q_0(\alpha)$ 는 앞의 수식에서 언급하였듯이 열외중성자 분포의 비이상성이 보정된 공명반응단면적( $I_0(\alpha)$ )에 대한  $\sigma_0$ 의 비를 의미한다. 일반적으로 이상적인 원자로에서의 열외중성자속의 분포는 1/E-법칙을 따르는 것으로 알려졌으나<sup>9</sup> 실제 조사위치에서는 편차가 발생하며 근사적으로 (1/E)<sup>1+ $\alpha$</sup> -법칙을 따른다는 것이 예증되었다.<sup>10,11</sup> 즉 사용되고 있는 열외중성자 영역에서의 공명반응단면적,  $I_0$ 는 1/E-법칙을 따른 값이므로  $\alpha$ 의 함수인  $I_0(\alpha)$ 로 대체되어야 한다. L. Moens등에<sup>12</sup> 의하여 유도된 비이상적인 열외중성자 분포에서의 공명반응단면적인  $I_0(\alpha)$ 를 나타내는 수식은 아래와 같이 표현된다

$$I_0(\alpha) = \{ (I_0 - 0.429 \sigma_0) / (Er)^{\alpha} + 0.429 \sigma_0 / (2\alpha + 1) \cdot E_{cd}^{\alpha} \} \dots\dots\dots(4)$$

- 여기서  $I_0$  : 1/E-법칙에서의 공명반응단면적
- Er : 유효공명반응에너지(effective resonance energy)
- $E_{cd}$  : Cd cut-off energy , 일반적으로 0.55 eV
- $\alpha$  : 1/E-법칙에 벗어나는 정도를 나타내는 변수로 정의된다

$Q_0(\alpha)$ 를 구하기 위하여  $\sigma_0$ 로 수식 (4)를 나누면 다음과 같다.

$$Q_0(\alpha) = \{ (Q_0 - 0.429) / (Er)^{\alpha} + 0.429 / (2\alpha + 1) \cdot E_{cd}^{\alpha} \} \dots\dots\dots(5)$$

즉  $Q_0(\alpha)$ 의 계산을 위해  $Q_0$ 는 문헌값,  $E_{cd}$ 는 0.55를 대입하고 각 분석핵종에 대한 유효공명에너지 Er는 L. Moens등에<sup>12</sup> 의하여 계산된 값을,  $\alpha$ 는 실험측정값을 적용한다.

**2.3  $\alpha$ -값의 실험적 측정방법**

(1/E)<sup>1+ $\alpha$</sup> -법칙을 따르는 열외중성자 분포를 결정하기 위한 실험적 방법으로 F. De. Corte등은<sup>13</sup> Bare, Cd-covered 와 Cd-ratio 방법을 제안, 정립하였으며 각각의 방법에 사용되는 monitor의 수에 따라 dual(triple) 혹은 multi-monitor 방법으로 세분화 하였다. 또한 각각의 방법을 벨기에의 THETIS 원자로에 적용, 측정하여 각 방법이 유의한 차이가 없음을 증명하였다. 그러나 정확한  $\alpha$ -값의 측정을 위해서는 조사시간동안 Cd-cover가 녹는 원자로를 제외하고는 일반적으로는 Cd-covered multi-monitor 방법이나 Cd-ratio multi-monitor 방법의 적용이 추천된다. 사용되는 monitor로는 전체 열외중성자에너지 영역을 포함 혹은 대표할 수 있도록 유효공명에너지가 수 eV에서 수천 eV 사이에 적당히 배치되도록 monitor를 선택, 조합하여 사용한다. Table 2.에는 Cd-ratio 방법에 적합한 monitor들의 일례를 들었다. 실제 실험을 통하여  $\alpha$ -값을 결정하기 위해 적용되는 수식은 아래와 같다

Cd-covered multi-monitor 방법 ;

$$\log \{ [ (Er)^{\alpha} (A_{sp})_{cd} ] / [ (k_{0,Au}) \cdot (\epsilon_{pi}) \cdot (F_{cdi}) (Q_0(\alpha)) ] \} \text{ versus } \log(Er) \dots\dots\dots(6)$$

Cd-ratio multi-monitor 방법 ;

$$\log \{ [ (Er)^{\alpha} ] / [ (F_{cdi} R_{cdi} - 1) Q_0(\alpha) ] \} \text{ versus } \log(Er) \dots\dots\dots(7)$$

두 방법에서 구해진 값들은 각 사용된 monitor의  $\log(Er)$ 에 대해 그래프를 작성하여  $-\alpha$ 의 기울기값을 얻을 수 있다. 위의 수식들은  $\alpha$ 의 함수임으로 반복계산(iteration)에 의하여 최적의  $\alpha$ 를 결정하여야 한다.

Table 2. Standard monitors and nuclear data for Cd-ratio multi-monitor method<sup>14</sup>

Monitor	Er, eV	Q <sub>0</sub>	T <sub>1/2</sub> (half life)
<sup>197</sup> Au(n, γ) <sup>198</sup> Au	5.65 ± 0.40	15.71 ± 0.28	2.695 d
<sup>238</sup> U(n, γ) <sup>239</sup> U	16.9 ± 0.2	103.4 ± 1.3	23.50 min
<sup>232</sup> Th(n, γ) <sup>233</sup> Th	54.4 ± 0.5	11.53 ± 0.42	22.3 min
<sup>59</sup> Co(n, γ) <sup>60</sup> Co	136 ± 7	1.990 ± 0.054	5.271 y
<sup>55</sup> Mn(n, γ) <sup>56</sup> Mn	468 ± 51	1.053 ± 0.028	2.5785 h
<sup>64</sup> Zn(n, γ) <sup>65</sup> Zn	2560 ± 260	1.908 ± 0.094	244.0 d

2.4 f-값의 실험적 측정방법

f-값은 열중성자와 열외중성자의 선속 비율로 정의되며 일반적으로 Cd-ratio 방법을 사용하여 결정한다. 사용되는 monitor는 Au를 사용하나 잘 알려진 핵 자료를 갖는 다른 monitor(Co, Zr etc)들도 사용될 수 있다. f-값의 결정에 사용되는 수식은 다음과 같이 유도된다.

$$R_{cd} = (A_{sp})_{Au} / (A_{sp})_{Cd} = (\Phi_{th} \sigma_0 + F_{cd} \Phi_{el}(\alpha)) / F_{cd} \Phi_{el}(\alpha) \dots \dots \dots (8)$$

(8)식을 정리하면

$$\therefore f = (R_{cd} F_{cd} - 1) / Q_0(\alpha) \dots \dots \dots (9)$$

여기서 F<sub>cd</sub> : Cd-transmission factor, 0.991(Au) 이며 f-값 또한 α-값의 결정후에 정해진다

2.5 검출효율의 측정

감마선방출시료와 검출기의 거리 및 시료의 모양에 따라 감마선 검출효율은 변하게 된다.<sup>15</sup> 일반적인 감마선 검출효율은 50 - 2000 keV의 에너지 영역을 포함하는 점 선원(point source)들을 사용하며 동시계수효과(coincidence effect)를 최소화하기 위해 검출기와의 거리가 15 cm 이상에서 계속오차를 1% 이하로 유지하여 절대검출효율을 측정한다. 측정용 표준점선원으로는 <sup>152</sup>Eu, <sup>226</sup>Ra, <sup>60</sup>Co, <sup>241</sup>Am, <sup>88</sup>Y, <sup>57</sup>Co, <sup>137</sup>Cs 등을 사용하여 log ε<sub>p</sub> 과 log E<sub>γ</sub>의 함수로 기준검출효율곡선을 구한다. 또한 실제 동시계수효과를 보정하기 위한 간단한 예로서, 두 에너지의 감마선만을 방출하는 핵종에 아래의 수식이 적용된다.(예 <sup>24</sup>Na, <sup>60</sup>Co 등)

$$(A_{sp,1})_{corr} = A_{sp,1} / (1 - \epsilon_p \gamma / P_2) \dots \dots \dots (10)$$

여기서 (A<sub>sp,1</sub>)<sub>corr</sub> : 동시계수효과가 보정된 γ<sub>1</sub>의 비방사능

P<sub>2</sub> : γ<sub>2</sub> 에 대한 peak-to-total ratio

위의 수식을 적용하기 위해서는 실험적으로 결정된 절대검출효율과 peak-to-total ratio가 필요하다. peak-to-total ratio는 3 - 4 개의 단일 감마선을 방출하는 핵종(<sup>203</sup>Hg, <sup>137</sup>Cs, <sup>65</sup>Zn)들을 사용하여 측정된 후 감마선에너지와의 상관함수(log P/T 대 log E<sub>γ</sub>)를 구한다. 그러나 복잡한 붕괴형태에 따른 다중감마선 방출핵종에 대해서는 계산이 복잡하여 컴퓨터와 개발된 프로그램을 사용하여야 한다.

검출기와의 거리변화 및 시료의 형태(디스크 및 원통형)에 따른 절대검출효율을 보정하기 위해 L. Moens 등이<sup>15</sup> 개발한 프로그램이 사용된다. 즉 검출기와의 거리 및 시료의 반지름이나 시료의 높이에 대한 값을 입력하면 보정계수로서 기준유효입체각(reference effective solid angle)에 대한 시료의 유효입체각의 비율이 계산되어 시료모양에 따른 절대검출효율이 각 감마선에너지에 따라 구해진다. 절대검출효율은 아래의 수식으로 표현된다

$$\epsilon_{p, sample} = (\Omega_{sample} / \Omega_{ref}) \times \epsilon_{p, ref} \dots \dots \dots (11)$$

여기서 ε<sub>p, sample</sub> : 시료의 절대검출효율

Ω<sub>sample</sub> : 시료의 유효입체각

Ω<sub>ref</sub> : 기준위치에서의 유효입체각

ε<sub>p, ref</sub> : 기준위치에서의 절대검출효율

2.6 기타 고려요인

비 방사능(A<sub>sp</sub>)의 정확한 결정을 위해서는 측정된 핵종의 burn-up 효과와 생성 및 붕괴형식을 고려하여야 한다. 일반적으로 burn-up 효과는 특별한 경우를 제외하고는 무시될 수 있으며, 문헌[2]에 측정핵종의 생성, 붕괴형식에 따른 비방사능의 계산을 위한 수식이 자세히 요약, 정리되어 있다.

3. 하나로 중성자 방사화분석용 조사공(NAA #1)의 α , f-값의 측정

Cd-ratio 방법과 6개의 monitor를 사용하여 3회 반복하여 측정된 중성자방사화분석용 조사공인, NAA #1의

$\alpha$ -값은 95% 신뢰구간에서  $0.097 \pm 0.021$  이었고 상관계수는 0.88을 나타내었다. Au를 사용하여 측정된 f-값은  $1148 \pm 95$  이었으며 외국 원자로의  $\alpha$ 와 f의 측정값과 함께 Table 3에 나타내었다. Fig. 1에  $\alpha$ -값 측정을 위해 사용된 monitor와 결과를 도시하였다. 가는 실선은 신뢰구간(95%)을 나타낸다. 큰 f-값은 열중성자의 비율이 열외중성자에 비해 매우 높다는 것을 나타내며 열외중성자의 비이상성에 의한 영향이 f-값이 작은 조사공에 비해 적음을 알 수 있다.

Table 3. Example of  $\alpha$  and f values for other countries irradiation facilities.<sup>2,4,14,16,17</sup>

Country	Reactor	Irradiation hole	$\alpha$	f
Korea	HANARO	NAA #1	$0.097 \pm 0.021$	$1148 \pm 95$
		PN-2	$0.140 \pm 0.004$	$188 \pm 11$
Japan	JRR-3M	PN-3	$0.043 \pm 0.005$	$2776 \pm 25$
		Rotary Rack	0.073	35.7
Vietnam	TRIGA MARK II (Dalat)	Channel 13-2	-0.040	21.5
		Channel 3	0.015	25
Belgium	Thetis(INW)	Channel 15	0.084	72
		Rotary Rack	-0.01	22.6
Malaysia	TRIGA MARK II	Rotary Rack	-0.01	22.6
Hungary	WWRS(KFKI)	Mila	0.015	32

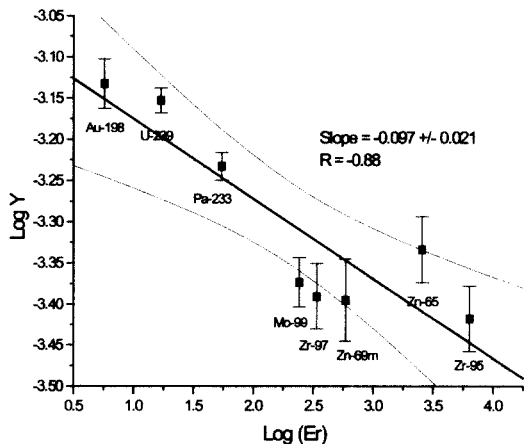


Fig 1. The result of  $\alpha$ -determination by Cd-ratio method.

## 4. 결 론

$k_0$ -표준화방법에 의한 중성자방사화분석법의 적용을 위하여 기본개념의 이해를 바탕으로  $k_0$ -파라미터인  $\alpha$ 와 f-값을 하나로 원자로의 NAA #1 조사공에서 측정하였다. 측정 불확도는 95% 신뢰구간에서  $\alpha$ -값이 약 20%, f-값이 약 10% 정도로 측정되어 좀 더 정밀한 측정이 요구되지만 큰 f-값으로 인하여 파라미터의 측정 불확도가 성분원소 분석시의 불확도에 미치는 영향이 적음을 알 수 있다. 향후 다양한 표준시료들의 분석을 통한 방법의 유효성을 입증하고 관련 데이터 베이스 및 컴퓨터 프로그램을 구축하여 분석의 정량화와 편의성을 향상시킬 수 있을 것이다.

사사 : 본 연구는 과학기술부의 원자력 중장기사업의 일환으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. A. Simonits, F. De Corte, J. Hoste, *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **24**, 31 - 46 (1975)
2. A. Simonits, L. Moens, F. De Corte, *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **60**, 461 - 516 (1980)
3. F. De Corte, A. Demeter, Lin Xilei, L. Moens, A. Simonits, *Isotopepraxis*, **20**, 223 (1984)
4. Lin. Xilei, F. De Corte, L. Moens, *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **81**, 333 (1984)
5. V. Krivan, Symp. Application of Nucl. Data in Science and Technology, Paris, 12 - 16 March, (1973)
6. G. Erdtmann, W. Soyka, Die  $\gamma$ -Linien der Radionuklide, Rept, Jul-1003, (1974)
7. Handbook on Nuclear Activation Cross-Section, IAEA, Tech. Rept. ser 156, (1974)
8. W. W. Bowman, K. W. Macmurdo, ADNDT, 13, Nos 2 - 3 Febr., (1974)
9. S. Glasstone, M. C. Edlund, Nuclear Reactor Theory, Chap. VI, 5th ed., McMillan and Co. Ltd, London
10. T. B. Ryves, *Metrologia*, **5**, 119 (1969)
11. F. De Corte, L. Moens, *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **52**, 305 (1979)
12. L. Moens, F. De Corte, A. Simonits., *J. Radioanal.*

- Nucl. Chem.*, **52**(2), 379 - 387 (1979)
13. F. De Corte, K. Sordo-el. Hammami, L. Moens, *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **62**, 209 - 255 (1981).
14. F. De Corte, A. Simonits, *J. Radioanal. Nucl. Chem., Articles*, **113**, 145 - 161 (1987)
15. L. Moens, J. De Donder, Lin. Xilei, *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **187**, 451 - 472 (1981)
16. Ho. M. Dung and F. Sasajima, "Experimental  $k_0$ -NAA Performance" JAERI-Tokai, Japan, Sept. (1998).
17. S. Sarmani, I. Abugassa, *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **274**, 17 - 20 (1998).