

PGNAA Database 구축을 위한  
Prompt  $k_0$ -factor의 계산 및 실험적 보정항 고찰

Calculation and Consideration of the Experimental  
Correction Factor of the Prompt  $k_0$ -factors  
for the Development of the PGNAA Database

선광민, 최희동  
서울대학교  
서울특별시 관악구 신림동 산56-1

요 약

즉발 감마 중성자 방사화 분석(Prompt Gamma Neutron Activation Analysis, PGNAA)에 필요한 database 구축을 위하여 가벼운 원소들( $A < 45$ )에 대한 prompt  $k_0$ -factor를 Cl을 comparator로 계산하였다. 핵종에 대한 절대 감마 강도와 원소에 대한 절대 감마 강도를 사용할 경우를 고려하였으며, 각각 Lone table[9]과 Firestone 자료[10]를 이용하여 계산하였다. 이때  $(n, \gamma)$  반응의 Q-값과 Firestone 자료의 핵종에 대한 절대 감마 강도,  $\gamma$ -선 에너지 간의 일치도를 평가하였다. 또한 prompt  $k_0$ -factor의 실험적 결정 방법의 일환으로서 열외중성자 성분을 갖는 입사 중성자 스펙트럼에 대한 보정항을 유도하였으며, non- $1/v$  흡수체에 대한 보정항으로서 필요한 Westcott g-factor에 대해 논의하였다. 특히, HANARO의 PGNAA 장치의 다색 중성자 스펙트럼의 경우에 대해서도 고려하였다.

Abstract

The prompt  $k_0$ -factors are calculated for the light elements( $A < 45$ ) with Cl comparator to develop a database for Prompt Gamma Neutron Activation Analysis(PGNAA). Calculations are performed by using the Lone table[8] and Firestone data[10], respectively, where both the absolute gamma intensities of the isotope and the element are used. The quality of the Firestone data is checked by comparing the Q-value of  $(n, \gamma)$  reaction with the absolute gamma intensities and gamma energies. For the experimental determination of the prompt  $k_0$ -factor, correction factor is derived for the case of the incident neutron spectrum containing epithermal component. For non- $1/v$  absorbers, the correction factor is discussed in terms of the Westcott g-factors of the standard and comparator isotopes. Finally, the correction factor is derived for the polychromatic neutron beam of the PGNAA system in HANARO.

## 1. 서론

복합핵상수  $k_0$ -factor는 1975년에 처음 도입된 이래 전통적인 중성자 방사화 분석법인 NAA(Reactor Neutron Activation Analysis)등에서 표준화를 위한 단순한 개념의 분석 도구로서 지속적으로 개발되어져 왔다[1]. 또한 최근에는 그 활용의 간편함과 광범위함으로 인하여 PGNAA(Prompt Gamma-ray Neutron Activation Analysis)등에 이르기까지 그 개념이 확대되고 있다[2]. PGNAA에서는 prompt  $k_0$ -factor라고 한다. Prompt  $k_0$ -factor 값이 정확히 알려져 있을 때, 열중성자 포획 단면적과 절대 감마 강도의 평가 및 중성자 속의 비의 결정, 동시 중첩 효과 보정, 복잡한 반응/붕괴 scheme의 조사 등에 활용될 수 있다. 또한 시료에 포함된 원소의 종류, 농도에 이르는 다양한 분석을 위한 기본적인 자료로서 이용할 수 있다. 그러므로, 신뢰도 높은 PGNAA에 활용 가능한 prompt  $k_0$ -factor 자료집의 완성이 요구되어지고 있다. 최근에 Molnár 등이 냉중성자빔을 사용하여 16개의 핵종에 대하여 Cl comparator에 대한 prompt  $k_0$ -factor 값을 측정 한 바 있으나[3], 아직까지는 대부분의 핵종에 대하여 실험 및 평가 자료 등이 거의 결여된 상태이다. 따라서 현재 국제원자력기구의 주관아래 이에 대한 국제 공동 연구가 진행되고 있다.

본 연구에서는 열중성자 포획 단면적, 절대 감마 강도를 비롯한 기본적인 핵자료를 이용하여 prompt  $k_0$ -factor의 계산을 수행하였으며, prompt  $k_0$ -factor의 실험적 결정에 중대한 역할을 하는 입사 중성자 스펙트럼에 포함된 열외중성자 성분의 경우, non-1/v 흡수체의 경우, HANARO의 PGNAA 장치의 경우인 다색 열중성자 스펙트럼의 경우에 대하여 각각 논의하였다.

## 2. Prompt $k_0$ -factor의 이론적 계산

Prompt  $k_0$ -factor는 Simonits 등 [1-4]의 정의에 의해 특정의 대표적인 감마선들을 방출하는 standard 원소와 comparator 원소의 비방사능의 비로서 다음과 같이 주어진다.

$$(k_0)_c^D = \frac{\Gamma_s^D(E_s^\gamma)}{\Gamma_c^D(E_c^\gamma)} \cdot \frac{\sigma_{o,s}^A}{\sigma_{o,c}^A} \cdot \frac{\theta_s^A M_s}{\theta_c^A M_c} \quad (1)$$

여기서, 첨자 D는 prompt  $k_0$ -factor의 정의임을 나타낸다. 첨자 s와 c는 각각 standard 원소와 comparator 원소를 나타내며, i와 j는 각각  $E_s^\gamma$ 와  $E_c^\gamma$ 의 에너지를 방출하는 핵종을 나타낸다.  $\theta$ 는 핵종의 자연 존재비,  $M$ 은 원자 질량,  $\Gamma$ 는 핵종에 대한 절대 감마 강도,  $\sigma_o$ 는 핵종에 대한 2200 m/sec 중성자 포획 단면적,  $E^\gamma$ 는 핵종에서 방출되는  $\gamma$ -선의 에너지이다. (1)식은 핵종에 대한 절대 감마 강도가 주어졌을 때 유용한 식이다. 반면 원소에 대한 절대 감마 강도를 이용하고자 할 경우에는 (1)식을 바로 사용할 수 없으므로 단면적과 동위원소 존재비를 고려하여 얻은

$$(k_0)_c^D = \frac{\Gamma_s^*(E_s^*)}{\Gamma_c^*(E_c^*)} \cdot \frac{\sigma_{\alpha,s}^*}{\sigma_{\alpha,c}^*} \cdot \frac{M_c}{M_s} \quad (2)$$

로부터 prompt  $k_\alpha$ -factor를 계산할 수 있다. 여기서,  $\Gamma^*$ 와  $\sigma^*$ 는 원소에 대한 절대 감마 강도와 원소에 대한 2200 m/sec 중성자 포획 단면적을 나타낸다.

Prompt  $k_\alpha$ -factor를 계산하기 위해서는 정확한 핵자료가 확보되어야 한다. 핵자료 중에서 열중성자 포획 단면적은 Table of Isotope[5]과 Mughabghab 등[6]으로부터 찾을 수 있으며, 원자 질량은 Audi 등[7]에 의해 매우 정확히 알려져 있다. 그러나, 현재 존재하는 절대 감마 강도 자료는 상대적으로 불완전한 것으로 알려져 있다. 가장 널리 인정되는 핵자료집으로는 Tuli ENSDF 자료집[8]과 Lone table[9]이 존재하는데, Tuli 자료의 경우 각 핵종에 대한 상대 감마 강도가 고루 포함되어져 있으나, 절대 감마 강도가 아니므로 사용을 위해서는 기준이 되는 감마 강도를 알고 있어야 하는 불편함이 있다. 또한, 오차가 모두 생략되어 있고, 각 원소에 대한 개별 핵종들의 기여는 동위원소 존재비와 단면적을 고려하여야 한다. 따라서, 원소 분석에는 적합하지 않다. Lone table은 고 분해능의 즉발 감마선 분광을 목적으로 원소별로 절대 감마 강도가 정리되어 있으므로 원소 분석에는 유리하도록 편집되었으나, 현재의 표준을 만족시키지 못하고 있다. 에너지에 대한 오차 범위는 비교적 커서 고 에너지 감마선에 대하여 3 keV 이상이다. 또한 많은 자료에 오염 피크들(contaminant peak)(예를 들면 Cd)이 포함되어져 있다. 그리고, 중요한 저 에너지의 감마선에 대한 자료들이 빠져 있으며 절대 감마 강도의 오차가 표시되어 있지 않다. 따라서 PGNAA에 적합한 자료집은 현재 존재하지 않는다[9]. 현재 LBNL(Lawrence Berkeley National Laboratory, USA)-IKI(Institute for Isotope, Hungary)간 공동 연구를 통하여 평가된 열중성자 포획 자료들(이하 Firestone 자료)[10]의 일부( $A < 45$ )가 world wide web 상에 수록되어 있을 뿐이다. Firestone 자료와 Lone table을 이용하여 각각 (1)식과 (2)식으로부터 계산에 의해 얻은 prompt  $k_\alpha$ -factor를 표 1에 나타내었다. Cl 원소를 comparator로 하였으며, 1951 keV 즉발  $\gamma$ -선에 대하여 계산을 수행하였으며, 그 결과는 world wide web 상에 on-line으로 제공하고 있다[11]. 그리고, Molnár 등[4]에 의한 측정 결과와 비교하여 표 2와 그림 1에 나타내었다.

측정 자료와 계산 자료의 불일치도를 상세히 검토하기 위해서는 우선 가장 불확실도가 높은 절대 감마 강도의 평가가 필요하다. 따라서, 가장 최근의 자료를 평가하여 수록한 Firestone 자료의 절대 감마 강도에 대한 일치도는 (3)식과 같이 각 즉발  $\gamma$ -선과 절대 감마 강도의 곱의 합이 Q-값과 일치한다는 사실을 이용하여 평가하였다. 결과는 그림 2에 나타내었다.

$$D[\%] = \left[ 1 - \frac{Q}{\sum_i P_i(E_i - E_{\beta i})} \right] \times \frac{100}{N} \quad (3)$$

여기서,  $Q$ 는  $(n, \gamma)$  반응의 Q-value,  $P_i$ 는 핵종에 대한 절대 감마 강도,  $E_i$ 는  $i$ 번째  $\gamma$ -선 에너지,  $E_{\beta i}$ 는  $i$ 번째 감마선 에너지에 대한 핵종의 반도 에너지이며,  $N$ 은 즉발  $\gamma$ -선의 개수이다. 결과의 평가는  $D$ 의 수준을 각각 0.1%, 0.3%, 1%으로 분류하여, 매우 우수(Excellent), 우수(Good), 양호(Fair), 불량(Poor)으로 구분하였다.  $^6\text{Li}$ 와  $^{36}\text{Ar}$  등 일부 핵종을 제외한 대부분의 핵종이 1% 수준이하의 값으로 양호한 일치도를 보였다.

Table 1. Comparison of the prompt  $k_0$ -factor set calculated using Firestone data and those calculated using Lone table.

Target	Representative $\gamma$ -ray Energy, keV	using Firestone data[10]		using Lone table[9]	
		$k_0$	Error	$k_0$	Error
<sup>1</sup> H	2223.23	1.825	0.055	1.614	0.0685
<sup>6</sup> Li	7245.87	$1.603 \times 10^{-3}$	$5.117 \times 10^{-5}$	$1.034 \times 10^{-3}$	$4.385 \times 10^{-5}$
<sup>7</sup> Li	2032.5	$2.966 \times 10^{-2}$	$9.368 \times 10^{-4}$	$2.297 \times 10^{-2}$	$9.745 \times 10^{-4}$
<sup>9</sup> Be	6809.4	$3.014 \times 10^{-3}$	$9.680 \times 10^{-5}$	$3.200 \times 10^{-3}$	$1.357 \times 10^{-4}$
<sup>10</sup> B	477.59	$3.9 \times 10^2$	2.8	-	-
<sup>12</sup> C	4945.3	$1.086 \times 10^{-3}$	$3.265 \times 10^{-5}$	$9.330 \times 10^{-4}$	$3.959 \times 10^{-5}$
<sup>16</sup> O	870.89	$6.555 \times 10^{-5}$	$6.844 \times 10^{-5}$	$8.297 \times 10^{-5}$	$3.520 \times 10^{-6}$
<sup>14</sup> N	5269.16	$8.813 \times 10^{-3}$	$2.807 \times 10^{-4}$	$7.795 \times 10^{-3}$	$3.307 \times 10^{-4}$
<sup>19</sup> F	583.55	$1.063 \times 10^{-3}$	$3.283 \times 10^{-4}$	$3.201 \times 10^{-4}$	$1.358 \times 10^{-5}$
<sup>20</sup> Ne	2035.67	$7.289 \times 10^{-3}$	$2.325 \times 10^{-3}$	$7.110 \times 10^{-3}$	$3.017 \times 10^{-4}$
<sup>22</sup> Ne	1017.0	$8.902 \times 10^{-4}$	$2.926 \times 10^{-5}$	$8.332 \times 10^{-5}$	$3.535 \times 10^{-6}$
<sup>23</sup> Na	472.2	0.1186	$3.563 \times 10^{-3}$	$5.118 \times 10^{-2}$	$2.171 \times 10^{-3}$
<sup>24</sup> Mg	3916.86	$6.956 \times 10^{-3}$	$2.197 \times 10^{-4}$	$6.196 \times 10^{-3}$	$2.629 \times 10^{-4}$
<sup>26</sup> Mg	1808.68	$4.023 \times 10^{-3}$	$1.365 \times 10^{-4}$	$3.819 \times 10^{-3}$	$1.620 \times 10^{-4}$
<sup>27</sup> Al	7724.03	$1.270 \times 10^{-2}$	$3.815 \times 10^{-4}$	$1.150 \times 10^{-2}$	$4.877 \times 10^{-4}$
<sup>28</sup> Si	3538.98	$2.256 \times 10^{-2}$	$6.803 \times 10^{-4}$	$1.905 \times 10^{-2}$	$8.080 \times 10^{-4}$
<sup>31</sup> P	3899.95	$5.163 \times 10^{-3}$	$1.561 \times 10^{-4}$	$4.560 \times 10^{-3}$	$1.935 \times 10^{-4}$
<sup>32</sup> S	840.97	$5.906 \times 10^{-2}$	$1.828 \times 10^{-3}$	$6.024 \times 10^{-2}$	$2.556 \times 10^{-3}$
<sup>39</sup> K	770.30	0.1176	$3.705 \times 10^{-3}$	0.1359	$5.768 \times 10^{-3}$
<sup>40</sup> Ar	4745.30	$4.657 \times 10^{-2}$	$1.400 \times 10^{-3}$	$4.589 \times 10^{-2}$	$1.947 \times 10^{-3}$
<sup>40</sup> Ca	1942.61	$4.856 \times 10^{-2}$	$1.477 \times 10^{-3}$	$3.827 \times 10^{-2}$	$1.624 \times 10^{-3}$
<sup>45</sup> Sc	227.77	0.8773	$2.643 \times 10^{-2}$	1.515	$6.427 \times 10^{-2}$

### 3. 입사 중성자 스펙트럼에 따른 Prompt $k_0$ -factor의 실험적 결정 방법

#### 1) 일반화된 입사 중성자 스펙트럼에 대한 Prompt $k_0$ -factor 결정

입사 중성자의 스펙트럼을 Maxwell 분포에 열외중성자 요소가 부가된 일반화된 스펙트럼으로 가정하고, 중성자속 밀도가 시간에 따라 일정하게 유지된다고 가정하면, 실험적으로 prompt  $k_0$ -factor,  $(k_0)_c^m$ 는

$$(k_0)_c^m = \frac{A_s/\epsilon(E_s^*)n_sM_s}{A_c/\epsilon(E_c^*)n_cM_c} \cdot \frac{g_c}{g_s} \cdot \frac{G_{th,c} + G_{e,c} \frac{1}{(R_{eff}-1)_c}}{G_{th,s} + G_{e,s} \frac{1}{(R_{eff}-1)_s}} \quad (4)$$

로부터 결정된다. 여기서,  $A$ 는  $E^*$ 의 에너지를 갖는  $\gamma$ -선에 의한 순 피크 면적,  $\epsilon(E^*)$ 은 검출 효

Table 2. Comparison between the measured and the calculated prompt  $k_0$ -factor for some isotopes.

Isotope	Measured Data		Calculated Data	
	Molnár[4]		using Lone	using Firestone
$^1\text{H}$	1,971	1	1,614	1,825
$^{12}\text{C}$	0,0139	3	0,001	0,0109
$^{23}\text{Na}$	0,114	1	0,0512	0,119
$^{40}\text{K}$	0,130	1	0,136	0,118
$^{44}\text{Ca}$	0,0479	10	0,0383	0,0486
$^{53}\text{Cr}$	0,145	2	0,091	-
$^{55}\text{Mn}$	0,148	2	0,093	-
$^{58}\text{Ni}$	0,0804	10	0,056	-
$^{113}\text{Cd}$	74	2	90,529	-
$^{138}\text{Ba}$	0,00107	2	0,006	-
$^{207}\text{Pb}$	0,005	15	0,004	-

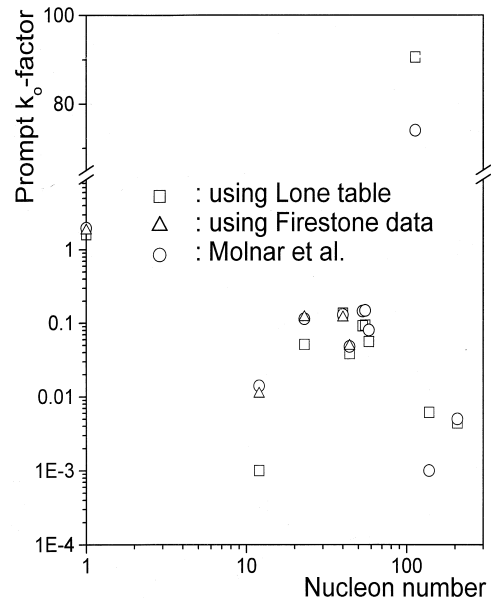


Fig. 1. Comparison between the measured and the calculated prompt  $k_0$ -factor for some isotopes.

을,  $G_n$ 와  $G_e$ 는 각각 열중성자와 열외중성자에 대한 중성자 자체차폐 인자(neutron self-shielding factor),  $g$ 는 Westcott  $g$ -factor[12]로서 열중성자 포획 단면적이  $1/v$ -경향에서 벗어난 정도를 나타내는 인자이다. (4)식에서 보는 바와 같이 정확한 prompt  $k_0$ -factor를 얻기 위해서는 중성자 차폐 효과를 비롯하여 열외중성자속에 대한 보정이 필수적이다. CI을 comparator로서 사용하는 경우는 대부분의 standard 원소와 균일 화합물을 이루므로 중성자의 자체 차폐 효과가 상쇄되며 ( $G_{n,s} \approx G_{n,c}$ ,  $G_{e,s} \approx G_{e,c}$ ), 카드뮴 비가 충분히 커서 열외중성자 성분을 무시할 수 있을 경우 ( $R_{Cd} \gg 1$ , HANARO PGAA 장치의 경우,  $R_{Cd} \approx 1,600$  정도로 예상[13]), (4)식은

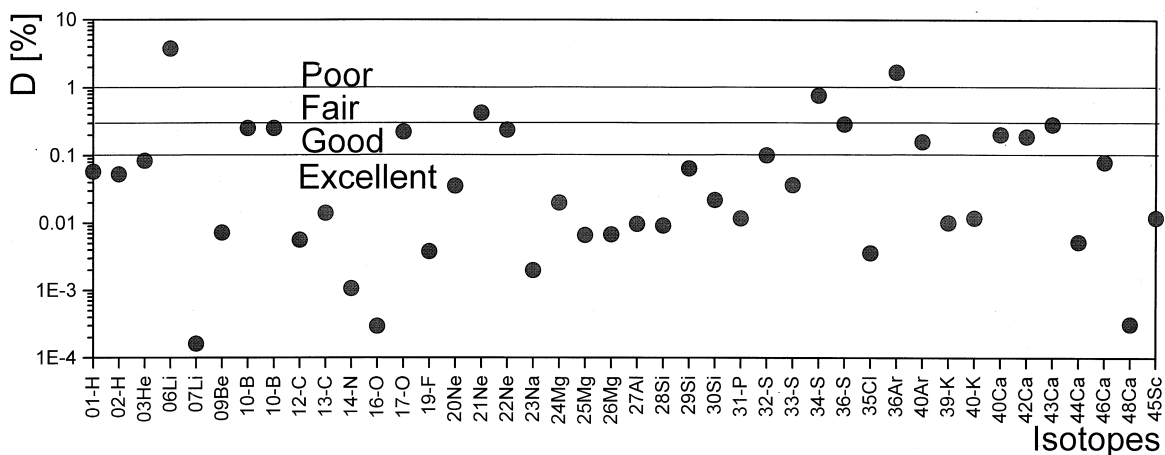


Fig. 2. Comparisons of the quality of the data of isotopic absolute gamma intensity for  $A < 45$  isotopes from Firestone data(Excellent, Good, Fair, or Poor).

$$(k_0)_c^m = \frac{A_p / (\varepsilon(E_p^*) n_p M_p)}{A_c / (\varepsilon(E_c^*) n_c M_c)} \cdot \frac{E_c}{E_p} \quad (5)$$

와 같이 단순화 할 수 있다.

## 2) 다색(polychromatic) 중성자 스펙트럼에 대한 Prompt $k_0$ -factor 결정

현재 한국원자력연구소(KAERI)의 HANARO에 건설중인 PGNAA 장치는 pyrolytic graphite (PG) 결정에 의해 회절된 다색중성자빔을 이용한다. PG 전단에서 중성자 스펙트럼이 Maxwell 분포를 이룬다고 가정하였을 때, mosaic spread가  $0.4^\circ$  인 PG 결정에 대하여 측정된 회절 중성자속에 대한 자료[13]는 표 3과 같다. 이러한 이산적인 중성자 스펙트럼은 각 회절 차수에 해당하는 중성자속의 에너지 폭이 충분히 작다고 할 수 있으므로,  $\phi(E_n, t, r) = \phi_k(t, r) \delta(E_n - E_k)$ 와 같이 근사할 수 있다. 여기서  $E_n$ 은 중성자 에너지이고  $E_k$ 는 회절 중성자의 스펙트럼에서 회절 차수 (order of diffraction)  $k$ 에 해당하는 중성자 에너지이다.

Table 3. Measured relative fraction of the diffracted neutron flux from each diffraction order for a PG crystal(2mm thick, mosaic spread :  $0.4^\circ$ ).

order	wavelength	energy	relative flux
$k$	$\lambda_k$ [ $\text{\AA}$ ]	$E_k$ [meV]	$\phi_k$
1	4.74327	3.64467	0.04255
2	2.37164	14.57866	0.25701
3	1.58109	32.802	0.3964
4	1.18582	58.31466	0.22557
5	0.94865	91.11665	0.06586
6	0.79055	131.20798	0.01261

다색 중성자빔에 대해서는 2200 m/sec 중성자 포획 단면적과 Maxwell 평균 중성자 포획 단면적(Maxwellian averaged neutron capture cross section)의 비로 정의된 Westcott  $g$ -factor를 적용하는 것이 어려워진다. 따라서, 중성자 포획 단면적의 영향을 나타내는 새로운 인자를 도입할 필요성이 생긴다. 먼저  $w(E_n)$ 를

$$\sigma(E_n) = w(E_n) \sigma_0 v_0 / v_n \quad (6)$$

와 같이 정의하면, 다색 중성자빔을 이용하는 경우에 대하여 prompt  $k_0$ -factor는 실험적으로

$$(\kappa_0)_c^m = \frac{A_s / (\varepsilon(E_s^*) n_s M_s)}{A_c / (\varepsilon(E_c^*) n_c M_c)} \cdot \frac{\sum_k w_c(E_k) \phi_k / \nu_k}{\sum_k w_s(E_k) \phi_k / \nu_k} \quad (7)$$

로부터 결정할 수 있다[Appendix A]. (7)식에서 열중성자 포획 단면적과 중성자 스펙트럼 모양에 의존하는 보정항을

$$\Omega = \frac{\sum_k w_s(E_k) \phi_k / \nu_k}{\sum_k w_c(E_k) \phi_k / \nu_k} \quad (8)$$

로서 정의한다. 관심 있는 몇몇 핵종에 대한  $\Omega$ -인자를 그림 3에 comparator 원소와 standard 원소의 Westcott  $g$ -factor의 비와 비교하여 나타내었다. 열중성자 포획 단면적은 ENDF-IV[14]와 NGATLAS[15]의 자료를 이용하였다. Westcott  $g$ -factor의 비는  $1/v$ -경향을 잘 따르는 핵종들의 경우에는 1에 가까운 값을 가지나,  $1/v$ -경향을 잘 따르지 않는  $^{113}\text{Cd}$  핵의 경우에는 1에서 크게 벗어나는 것을 볼 수 있다. 그러나,  $\Omega$ -인자는  $^{113}\text{Cd}$ 을 비롯하여 살펴본 모든 핵종에 대하여 1에 가까운 값을 갖는다. 이를 통하여 HANARO의 PGNAA 장치와 같이 이산적인 다색스펙트럼을 갖는 중성자빔을 사용할 경우는 연속스펙트럼을 갖는 중성자빔을 사용하는 경우에 비하여 열중성자 포획 단면적의 경향에 민감하지 않음을 알 수 있다. 이러한 특성은 냉중성자를 이용한 측정에서도 비슷할 것으로 예상되므로 HANARO 장치에서는 보다 신뢰도 높은 prompt  $\kappa_0$ -factor의 측정이 가능할 것으로 기대된다.

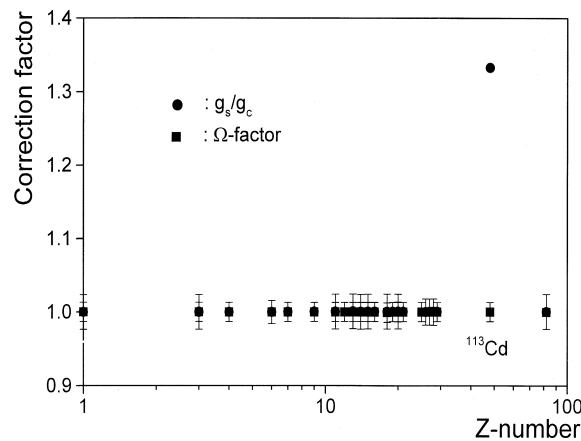


Fig. 3. Correction factor for various isotopes.

#### 4. 결론

Prompt  $\kappa_0$ -factor를 CI을 comparator로서 계산하였다. 핵종에 대한 절대 감마 강도와 원소에 대한 절대 감마 강도를 사용할 경우를 고려하였으며, 각각 Firestone 자료와 Lone table 자료를 이용하여 계산하였다. 계산 결과는 Molnár 등에 의한 측정 결과와 비교하였다.  $^{12}\text{C}$ 와 같은 일부 핵종을 제외하고는 대체로 20%이내에서 일치하였다. 보다 정확한 prompt  $\kappa_0$ -factor를 획득하기 위해서는

신뢰도 높은 중성자 포획 단면적과 절대 감마 강도에 대한 자료가 확충되어야 할 것이다. Firestone 자료는 대체로 양호한 신뢰성을 보였으나,  $A < 45$ 의 자료만이 자료집에 포함되어 있을 뿐이다. 또한, Lone table의 경우는 매우 유용함에도 불구하고, 자료들의 오차가 매우 크므로 실제적인 활용에는 한계가 있다. Prompt  $k_0$ -factor의 실험적 결정에 있어서 입사 스펙트럼에 따른 보정항을 고찰하였다. 회절된 다색 중성자 빔을 사용하여 prompt  $k_0$ -factor를 실험적으로 결정하는 경우에 대하여 보정항을 유도하였다. 중성자 포획 단면적이  $1/v$ -경향에서 벗어나는  $^{113}\text{Cd}$ 을 비롯하여 관심있는 핵종들에 대하여 1에 가까운 값을 가짐을 보임으로써, HANARO PGNAA 장치를 이용하여 측정을 수행할 경우 신뢰성 높은 prompt  $k_0$ -factor를 생산할 것으로 예상된다.

## Appendix A. 다색 중성자 스펙트럼에 대한 Prompt $k_0$ -factor의 실험적 결정

정의로부터 prompt  $k_0$ -factor는 다음과 같이 표현할 수 있다[1].

$$(\kappa_0)_c^D = \frac{A_s / (\varepsilon(E_s^*) n_s M_s)}{A_c / (\varepsilon(E_c^*) n_c M_c)} \quad (\text{A1})$$

여기서,  $A_s$ 와  $A_c$ 는 각각 standard 원소 및 comparator 원소에서 방출되는  $E_s^*$ 와  $E_c^*$  에너지를 가진 감마선에 의한 순 피크 면적(net peak area)으로서 일반적으로

$$A_s = w_s N_A \frac{\theta_s}{M_s} \Gamma_s(E_s^*) \varepsilon(E_s^*) \int_V d^3r \int_0^\infty dE_n \int_0^{t^*} dt \sigma_s(E_n) \phi(E_n, t, r) \quad (\text{A2a})$$

$$A_c = w_c N_A \frac{\theta_c}{M_c} \Gamma_c(E_c^*) \varepsilon(E_c^*) \int_V d^3r \int_0^\infty dE_n \int_0^{t^*} dt \sigma_c(E_n) \phi(E_n, t, r) \quad (\text{A2b})$$

와 같이 주어진다. 이산적인 다색 중성자 스펙트럼에 대하여 각 회절 차수에 해당하는 중성자속의 에너지 폭이 충분히 작다고 할 수 있으므로,

$$\phi(E_n, t, r) = \phi_k(t, r) \delta(E_n - E_k) \quad (\text{A3})$$

와 같이 근사할 수 있다. 여기서  $E_k$ 는 회절 중성자의 스펙트럼에서 회절 차수(order of diffraction)  $k$ 에 해당하는 중성자 에너지이다. 이때 (A3)식을 이용하면 (A2a)식과 (A2b)식은

$$A_s = w_s N_A \frac{\theta_s}{M_s} \Gamma_s(E_s^*) \varepsilon(E_s^*) \int_V d^3r \int_0^{t^*} dt \sum_k \sigma_s(E_k) \phi_k(t, r) \quad (\text{A4a})$$

$$A_c = w_c N_A \frac{\theta_c}{M_c} \Gamma_c(E_c^*) \varepsilon(E_c^*) \int_V d^3r \int_0^{t^*} dt \sum_k \sigma_c(E_k) \phi_k(t, r) \quad (\text{A4b})$$

이다. 중성자속 밀도가 시간에 따라 일정하게 유지된다고 가정하면 (A4a)식과 (A4b)식으로부터



$$\begin{aligned}
\frac{A_s/(\varepsilon(E_s^*)n_sM_s)}{A_c/(\varepsilon(E_c^*)n_cM_c)} &= \frac{N_A\theta_s\Gamma_s(E_s^*)/M_s \int_V d^3r \int_0^{t_m} dt \sum_k \sigma_s(E_k) \phi_k(t, r)}{N_A\theta_c\Gamma_c(E_c^*)/M_c \int_V d^3r \int_0^{t_m} dt \sum_k \sigma_c(E_k) \phi_k(t, r)} \\
&= \frac{N_A\theta_s\Gamma_s(E_s^*)/M_s V t_m \sum_k \sigma_s(E_k) \phi_k}{N_A\theta_c\Gamma_c(E_c^*)/M_c V t_m \sum_k \sigma_c(E_k) \phi_k} \\
&= \frac{\theta_s\Gamma_s(E_s^*)/M_s \sum_k \sigma_s(E_k) \phi_k}{\theta_c\Gamma_c(E_c^*)/M_c \sum_k \sigma_c(E_k) \phi_k}
\end{aligned} \tag{A5}$$

와 같은 관계식을 얻을 수 있다. (A5)식을 (1)식과 (6)식을 이용하여 재정리하면

$$\begin{aligned}
\frac{A_s/(\varepsilon(E_s^*)n_sM_s)}{A_c/(\varepsilon(E_c^*)n_cM_c)} &= \frac{\theta_s\Gamma_s(E_s^*)\sigma_{0s}/M_s}{\theta_c\Gamma_c(E_c^*)\sigma_{0c}/M_c} \cdot \frac{\sum_k w_s(E_k) \phi_k \nu_k / \nu_k}{\sum_k w_c(E_k) \phi_k \nu_k / \nu_k} \\
&= (k_0)_c^D \frac{\sum_k w_s(E_k) \phi_k \nu_k}{\sum_k w_c(E_k) \phi_k \nu_k}
\end{aligned} \tag{A6}$$

와 같다. (A6)식으로부터 prompt  $k_0$ -factor는

$$(k_0)_c^m = \frac{A_s/(\varepsilon(E_s^*)n_sM_s)}{A_c/(\varepsilon(E_c^*)n_cM_c)} \cdot \frac{\sum_k w_c(E_k) \phi_k \nu_k}{\sum_k w_s(E_k) \phi_k \nu_k} \tag{A7}$$

로부터 실험적으로 결정됨을 보일 수 있다.

## 참고문헌

1. A. Simonits, F. De Corte, J. Hoste, *J. Radioanal. Chem.* 24 (1975) 31.
2. F. De Corte, A. Simonits, A. De Wispelaere, A. Elek, *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 133 (1989) 3.
3. F. De Corte, A. Simonits, F. Bellemans, M.C. Freitas, S. Jovanovic, B. Smodis, G. Erdtmann, H. Petri, A. De Wispelaere, *J. Radioanal. Nucl. Chem. Art.* 169 (1993) 125.
4. G.L. Molnár, Zs. Révay, R.L. Paul and R.M. Lindstrom, *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 234 (1998) 21.
5. R.B. Firestone, C.M. Baglin and S.Y.F. Chu, *Table of Isotopes 8ed.*, John Wiley & Sons, Inc. (1998)
6. S.F. Mughabghab and D.I. Garber, *Neutron Cross Sections*, Vol 1.
7. G. Audi and A.H. Wapstra, *Nucl. Phys.* A565 (1993) 1.
8. J.K. Tuli, *Thermal Neutron Capture Gamma-rays Tables*, National Nuclear Data Center(BNL, 1991-1997). In Web home page, "http://www.nndc.bnl.gov/wallet/tnc/capgam.shtml"

9. M.A. Lone, R.A. Leavit and D.A. Harrison, "Prompt Gamma Rays from Thermal Neutron Capture", *Atomic Data Nucl. Data Tables* 26 (1981) 511.
10. R.B. Firestone, *Thermal Neutron Capture Gamma-ray Tables*, Lawrence Berkeley National Laboratory, In Web home page, "<http://isotopes.lbl.gov/isotopes/ng.html>"
11. G.M. Sun and H.D. Choi, *Prompt  $k_{\infty}$ -factor Table*, Applied Nuclear Physics Group, Department of Nuclear Engineering, Seoul National University, In Web home page, "<http://plazal.snu.ac.kr/~vandegra/k0/k0site.htm>"
12. S.H. Byun and H.D. Choi, in Proc. 10th International Conference on Modern Trends in Activation Analysis (USA, Bethesda, 1999)
13. Westcott, *J. Nucl. Energy*, 2 (1959) 59.
13. *ENDF-IV neutron data library*, "<http://t2.lanl.gov/cgi-bin/nuclides/endfiv>"
14. J. Kopecky, *NGATLAS of Neutron Capture Cross Sections*, "<http://iaeaand.iaea.or.at/ngatlas>"