

## 방사능 분석에서 밀도에 따른 HPGe 검출기의 검출효율 변화

서범경\* · 이길용\* · 윤윤열\* · 정기정 · 오원진 · 이근우

한국원자력연구소

\*한국지질자원연구원

(2004. 10. 8 접수, 2004. 11. 16 승인)

### Variation of the Detection Efficiency of a HPGe Detector with the Density of the Sample in the Radioactivity Analysis

Bum-Kyoung Seo\*, Kil-Yong Lee\*, Yoon-Yeol Yoon\*, Ki-Jung Jung, Won-Zin Oh and Kune-Woo Lee

Korea Atomic Energy Research Institute, Deokjin-dong 150, Yuseong-gu, Daejeon, 305-353 Korea

\*Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources, Gajeong-dong 30, Yuseong-gu, Daejeon, 305-350 Korea

(Received Oct. 8, 2004, Accepted Nov. 16, 2004)

**요 약** : 방사능 준위가 낮은 시료의 경우에는 방사능 측정 시 많은 양의 시료가 요구되며, 시료량의 증가로 인하여 방출된 감마선이 시료 자체에서 산란되거나 흡수될 확률이 증가하게 되므로 검출기에 도달할 확률은 감소하게 된다. 이러한 자체흡수효과를 보정하기 위해서는 측정시료의 기하학적 조건 및 밀도에 따른 효율을 보정하여야 한다. 대부분의 측정에서 기하학적인 조건은 표준선원과 동일한 측정용기를 사용함으로써 해결될 수 있다. 그러나 다양한 종류의 폐기물을 측정대상으로 할 경우에는 측정시료와 동일한 기하학적 조건 및 밀도를 가지는 표준선원을 이용하여 효율을 결정한다는 것은 사실상 불가능하다. 다양한 측정 용기에 대하여 측정 시료의 밀도 차이에 따른 자체흡수효과를 비교하기 위하여 수용액 상태의 표준선원에 용해도가 높고 밀도가 큰 NaI를 첨가하면서 밀도차이에 따른 검출기의 효율 변화를 조사하였다. 모든 결과는 Monte Carlo 방법에 의한 계산결과와 비교하였으며, 500 keV 이하의 낮은 에너지 영역에서는 자체흡수효과에 대한 보정이 이루어지지 않을 경우 많은 오차가 발생한다는 것으로 확인하였다.

**Abstract** : When the low level radioactivity sample is measured, it is required to have many samples. For increase of the sample volume, a scattering and absorbing probability of the emitted gamma-ray in the sample are to be increased. In order to correct the self-absorption effect, the counting efficiency must be calibrated according to a geometrical condition and sample density. But, it is impossible to determine efficiency for counting sample using standard source with the same geometrical condition and density. In this study, the measuring efficiencies were determined with various counting containers and densities. In order to compare the self-absorption effect with the sample density in the various sample container,

★ Corresponding author

Phone : +82+(0)42-868-8210 Fax : +82+(0)42-868-2499

E-mail : bumja@kaeri.re.kr

the variation of the counting efficiency with the densities was investigated by adding NaI, which has high solubility and density. Also, they were compared with Monte Carlo simulation. The self-absorption effect was found to be significant in the low energy region below 0.5 MeV.

**Key words** : Radioactivity analysis, HPGe detector, self-absorption, Monte Carlo

## 1. 서 론

1962년 국내에서 처음 가동되었던 연구용 원자로 1호기(KRR-1)와 10년 후에 가동이 시작된 연구로 2호기(KRR-2)는 운전기간이 길어지고 장비가 노후화되었으며, 새로운 연구로인 「하나로(HANARO)」가 운전됨으로써 그 효율성이 저감되어 1996년에 해체가 결정되어 현재 해체가 진행 중에 있다. 연구로 1, 2호기의 해체가 진행됨에 따라 대량의 해체 폐기물이 발생되고 있으며, 이들 대부분은 아주 낮은 농도의 방사성 물질을 함유한 폐기물이다. 방사성 폐기물은 다양한 핵종성분 및 방사능을 가지고 있으므로, 개개의 방사성 폐기물의 처리방법을 결정하기 위해서는 방사성 폐기물 관리절차에 따라 개별적인 평가를 수행하여야 한다. 여기에는 시료 채취, 표면오염도 조사, 주요 핵종 분석, 방사능 측정 및 평가 등이 포함된다. 이들을 일반폐기물로 자체처분하기 위해서는 대상 폐기물에 대한 방사능 농도의 정확한 측정과 평가가 선행되어야 한다.

일반적으로 방사능 농도가 낮은 시료의 경우는 측정용기에 일정량을 채우고, 감마선 핵종 분석용으로 가장 많이 사용하는 Ge 검출기 상부에 올려 놓고 감마선 방출률을 측정함으로써 방사능을 분석한다. 그러나, 시료량의 증가로 인하여 방출된 감마선이 시료 자체에서 산란되거나 흡수될 확률이 증가하게 되므로 검출기에 도달할 확률은 감소하게 된다. 즉, 정확한 방사능을 얻기 위해서는 다음과 같은 조건들이 만족되어야 한다. 먼저, 측정 시료와 동일한 기하학적 구조를 가지는 표준선원을 사용하여 검출기를 교정하여야 하며, 두 번째로 시료와 교정된 검출기 주변에 놓인 물질의 크기, 성분 등이 동일해야 한다. 또한, 표준선원의 밀도와 화학적 성분도 측정시료와 동일해야만 한다.

위의 조건들 중에서 기하학적인 조건은 표준선원과 동일한 측정용기와 측정 검출기를 사용함으

로써 쉽게 해결될 수 있다. 그러나 원자력시설의 해체와 같이 다양한 종류(종이류, 유리류, 철재류, 콘크리트 등)의 폐기물을 측정대상으로 할 경우에는 측정시료와 동일한 조건 및 밀도를 가지는 표준선원을 이용하여 효율을 결정한다는 것은 사실상 불가능하다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 여러 연구자<sup>1-13</sup>들이 정확한 방사능 농도를 결정하기 위하여 다양한 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 일반적으로 방사능 측정 시 많이 이용되고 있는 측정용기인 cylindrical(원통형)과 Marinelli(역우물)형 용기에서의 밀도변화에 따른 HPGe 검출기의 효율변화를 조사하였다. 밀도변화에 따른 검출기의 응답특성을 측정하기 위하여 수용액 상태의 표준선원에 용해도가 높고 밀도가 큰 NaI를 첨가하면서 여러 가지 밀도에 대한 자체흡수효과를 평가하였다. 또한, 모든 계산의 결과는 Monte Carlo 방법에 의한 계산과 비교하였으며, Monte Carlo 계산법의 타당성을 검증하기 위하여 자체 제조한 표준선원을 이용하여 측정값과 계산값을 비교하였다.

## 2. 실험 방법

실험에 사용한 검출기는 Canberra 사의 동축형 HPGe 검출기이다. Ge 결정은 직경이 62 mm이고, 길이가 58 mm이며, <sup>60</sup>Co의 1332.5 keV 감마선에 대하여 에너지 분해능은 1.8 keV, 상대효율은 47.1%, 그리고 피크 대 컴프턴(peak-to-compton) 비는 68.1이다.

측정 시료의 밀도의 차이로 인한 자체흡수 효과를 평가하기 위하여 준비한 표준선원 용액에 NaI 분말을 첨가하여 효율의 변화정도를 측정하였다. NaI는 물 1 mL에 약 2 g 정도가 녹을 정도로 용해도가 높고, 밀도가 3.67 g/cm<sup>3</sup>으로 클 뿐만 아니라 저에너지에서 감마선에 대한 자체흡수가 큰

요오드(iodine) 때문에 선택하였다.

먼저 세 가지의 측정용기인 55 mL 원통형 (55 CB), 450 역우물형 (450 MB) 및 1000 mL 비커 (1000 MB)에 표준선원 용액을 준비한 다음에 일정한 NaI를 첨가하여 부피를 측정하여 밀도를 결정한 뒤, 측정용기에 담아서 HPGe 검출기로 검출효율을 결정하였다. 이러한 절차를 수회 반복하여 Table 1과 같이 밀도가  $1.6 \text{ g/cm}^3$ 가 될 때까지 실험을 수행하였다. 또한 측정 시 통계오차를 1% 미만으로 줄이기 위하여 용기별로 3000 초에서 10000 초까지 측정하였으며, 매 측정마다 5회 반복 측정하였다.

Table 1. Density variation with a added amount of the NaI

No.	Volume of the standard source (mL)	Amount of the adding NaI (g)	Density (g/mL)
0	1000	0	1.00
1	1000	73	1.06
2	1000	133	1.11
3	1000	193	1.17
4	1000	283	1.24
5	1000	433	1.34
6	1000	733	1.50
7	1000	983	1.60

밀도에 따른 자체흡수 효과의 보정하기 위하여 사용한 표준선원은 연구용 원자로인 하나로에서 중성자로 조사시킨 시약을 사용하여 제조하였다. Table 2에 표준선원의 방사화 시약 및 핵종, 에너지 그리고 방출률 등을 나타내었다. 이들 시약은 시중에서 쉽게 구할 수 있는 것이며, 원자로에서 실험조건 등을 고려하여 약 1분간 조사시킨 후에 용매로 녹인 다음 혼합하여 제조하였다.<sup>13</sup>

Table 2. Nuclear data of standard sources and reagent

Nuclides	Half-life	Photon energy (keV)	Intensity (%)	Reagent	Solvent
<sup>147</sup> Nd	10.98 d	91.11	27.90	Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Nitric acid
		531.02	13.09		
<sup>141</sup> Ce	32.50 d	145.44	48.20	Ce(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> · 6H <sub>2</sub> O	Water
<sup>134</sup> Cs	2.06 y	604.70	97.56	Cs <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	Water
		795.85	85.44		
<sup>60</sup> Co	5.27 y	1173.24	99.88	CoCl <sub>2</sub>	Water
		1332.50	99.98		

HPGe 검출기의 전에너지 피크효율을 계산하기 위하여 MCNP 코드를 이용하였다. MCNP는 초기에 중성자 수송을 위하여 개발된 코드이지만, 최근에는 전자와 광자에까지 적용되고 있다. 본 연구에서는 광자 모드만을 사용하여 원통형과 역우물형 측정용기에 대해 전에너지 피크효율을 계산하였다. 모든 효율계산에 대해 채널폭은 실제 측정의 에너지 폭과 맞추기 위하여 0.5 keV로 정하였다. 측정효율은 피크 계수치에서 이웃 에너지 빈(bin)의 계수치 평균을 소거하여 얻었다. 실험과 계산에서 전에너지 피크효율에 대하여 통계적 정밀도는 결과의 타당성을 확신하기 위해서 3% 이하로 유지하였다.

### 3. 결과 및 논의

방사능 분석에서 가장 우선 시 되어야 할 것이 표준선원을 이용하여 HPGe 검출기의 정확한 효율을 결정하는 것이다. 본 연구에서는 제조한 표준선원<sup>13</sup>을 이용하여 방사능 측정에서 주로 이용되고 있는 세 가지 측정용기 (55 CB, 450 MB, 그리고 1000 MB)에 대한 측정 효율을 결정하였다. Fig. 1은 세 가지 측정용기에 대한 측정효율의 변화 정도를 보여주고 있다. 55 CB가 450 MB와 1000 MB 보다는 측정효율이 큰 것을 볼 수 있다. 그러나, 55 CB 보다는 450 MB 및 1000 MB에 10 배 이상의 시료를 담을 수 있기 때문에 동일한 측정조건에서는 시료의 양이 충분하다면 역우물형 측정용기의 사용이 권장된다.

이상에서 측정 용기에 따른 HPGe 검출기의 효율의 변화 정도를 살펴보았다. 실제 방사능 분석에서 가장 어려운 문제 중의 하나가 모든 측정용기에 대하여 표준선원을 이용하여 효율을 결정하

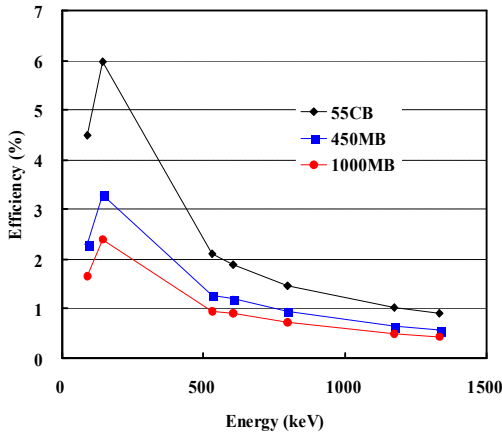


Fig. 1. Measuring efficiency of the HPGe detector in a various counting containers.

여야 한다는 것이다. 이러한 작업은 시간이 많이 소요될 뿐만 아니라 방사성 동위원소를 이용한 작업으로 인하여 절차상의 어려움과 부차적인 방사성 폐기물의 발생 등으로 인하여 많은 문제점이 있다. 이러한 문제점을 해결할 수 있는 방안으로 기존의 많은 연구자들<sup>2-9</sup>은 다양한 검출기에 대하여 Monte Carlo 계산을 이용하여 검출기의 효율을 계산하였다. 그러나, Monte Carlo 방법에 의한 모의실험을 통하여 정확한 효율을 계산하기 위해서는 HPGe 검출기의 정확한 기하학적인 모양을 파악하여야 한다. 본 연구에서는 일차적으로 제작자에 의하여 주어진 검출기 치수를 적용하여 효율을

계산하였으며, 측정효율과 비교하여 결정하였다. 계산 결과를 바탕으로 측정값과 계산값이 가장 일치하는 검출기 규격을 결정하였으며, 제작자에 의하여 주어진 검출기 규격과 비교하여 볼 때, 가장 차이가 많이 나는 것은 Ge 불감층이었다. 이 결과는 스캐닝 방법을 이용하여 검출기의 유감 체적을 결정한 연구자들<sup>7-8, 15</sup>도 이와 유사한 결과를 얻었으며, 또한 Ge 결정과 저온 유지 장치 (cryostat)의 열적 접촉을 위한 내부 불감영역에 관한 정보는 제작자에 의하여 제공되지 않는 것으로서, 다른 연구자들<sup>7-8, 15</sup>의 결과를 참고하여 표준선원 측정에 의한 실험치와 Monte Carlo 계산에 의한 계산치를 비교하여 결정하였다.

Table 3은 세가지 측정용기에 대한 측정효율을 Monte Carlo 방법을 이용하여 계산한 효율과 비교한 것이다. 측정효율은 계산한 결과와 상대오차 10% 내외에서 아주 잘 맞는 것을 확인할 수 있다. 이는 측정시료의 정확한 기하학적 조건만 알 수 있다면, 표준선원을 이용하여 효율을 교정하지 않고도 Monte Carlo 방법에 의하여 계산함으로써 큰 오차없이 계측효율을 평가할 수 있다는 것을 알 수 있다.

앞에서는 측정 시료의 기하학적인 모양에 대하여 효율을 측정하고 그 결과를 비교하여 Monte Carlo 계산의 타당성을 확인하였다. 실제 측정에서는 기하학적인 모양뿐만 아니라 측정 시료의 밀도에 따른 자체흡수 효과에 의하여 측정효율이 달라진다. 이러한 측정시료의 밀도 차이에 따른 효율의 변화 정도를 조사하였다. 체적시료 (voluminal

Table 3. Comparison between measured efficiency and calculated one in the counting containers

Energy (keV)	Counting Efficiencies								
	55 CB			450 MB			1000 MB		
	M.E.*	C.E.**	R.E.***	M.E.	C.E.	R.E.	M.E.	C.E.	R.E.
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
91.11	4.48	4.47	-0.22	2.29	2.48	8.14	1.65	1.79	8.50
145.44	5.97	5.67	-5.02	3.29	3.36	2.15	2.41	2.46	2.11
531.02	2.10	1.98	-5.86	1.27	1.25	-1.33	0.96	0.92	-3.79
604.70	1.89	1.76	-6.78	1.19	1.12	-5.78	0.91	0.85	-6.88
795.85	1.47	1.44	-2.10	0.94	0.87	-8.20	0.73	0.64	-12.52
1173.24	1.02	1.02	0.17	0.65	0.64	-1.12	0.50	0.47	-5.79
1332.50	0.91	0.91	0.74	0.57	0.60	5.63	0.44	0.46	2.81

\* Measured efficiency, \*\* Calculated efficiency, \*\*\* Relative error

sample)에서는 시료의 겉보기 밀도뿐만 아니라 화학적 성분이 달라짐으로써 계측효율이 달라질 수 있다. 그러나 동일한 밀도의 시료의 경우에 화학적 성분의 차이로 인한 효율변화는 무시할 수 있다고 보고<sup>14</sup>되었기 때문에, 먼저 화학적 성분의 차이로 인한 효율의 변화는 고려하지 않고, 겉보기 밀도에 대한 효율의 변화정도만을 조사하였다.

통상의 방사능 분석실험실에서는 밀도가 1.0 g/cm<sup>3</sup>인 수용액 상태의 표준선원을 이용하여 효율 교정을 한 후, 다른 밀도의 측정시료에 대해서도 동일한 효율을 적용하고 있는 실정이다. 이러한 표준선원과 측정시료의 밀도차이로 인한 효율의 변화정도를 알아보기 위하여 표준용액의 밀도를 변화시키면서 효율을 측정하였다.

Table 4, 5, 그리고 6은 세 가지 측정용기 (55 CB, 450 MB 그리고 1000 MB)에 NaI를 첨가하여 밀도를 1.0 g/cm<sup>3</sup>에서 1.6 g/cm<sup>3</sup>까지 변화시키면서 측정된 효율과 Monte Carlo 모사를 이용하여 계산한 효율 중에서 대표적으로 1.11, 1.34, 그리고 1.60 g/cm<sup>3</sup>에 대한 값을 비교한 것이다. 각 용기별로 밀도의 증가로 인한 효율의 감소정도는 거의 유사한 경향을 가지고 감소하는 것을 알 수가 있는데, 낮은 에너지 영역 (<500 keV)에서는 밀도가 증가할수록 효율은 급격히 감소하지만, 500 keV 이상의 감마선에 대해서는 밀도의 증가에 따른 효율의 변화정도는 아주 작다는 것을 알 수 있다. 또한, Monte Carlo 모사기법을 이용하여 계산한 효율은 실제 측정값과 상대오차 10% 내외에서 일치한다는 것을 알 수가 있다. 즉, 앞에서의 측정시료의 기하학적 인 조건을 이용하여 계산한 결과와 마찬가지로 밀도에 대해서도 표준선원을 이용하여 실험적으로 효율을 결정하지 않고서도, Monte Carlo 계산으로도 큰 오차없이 효율을 결정할 수 있다는 것을 알 수 있다.

Fig. 2, 3, 그리고 4는 각각의 측정용기에서 통상적인 수용액 상태의 표준선원 (밀도 : 1.0 g/cm<sup>3</sup>)에 대한 측정시료의 효율 비율인 자체흡수 보정인자를 나타낸 것이다. 밀도변화에 따른 자체흡수 보정인자가 500 keV 이하의 낮은 에너지 영역에서 아주 크다는 것을 알 수가 있는데, 이는 밀도를 변화시키기 위하여 첨가한 NaI의 I (iodine)가 저에너지 감마선에 대한 흡수가 크기 때문이다. 그러나,

Table 4. Comparison between measured efficiency and calculated one with sample density in the 55 mL cylindrical beaker

Energy (keV)	1.11 g/cm <sup>3</sup>			1.34 g/cm <sup>3</sup>			1.60 g/cm <sup>3</sup>		
	ME (%)	C.E (%)	R.E (%)	ME (%)	C.E (%)	R.E (%)	ME (%)	C.E (%)	R.E (%)
91.11	3.34	3.22	-3.35	2.03	1.87	-8.07	1.48	1.32	-10.81
145.44	5.48	5.13	-6.35	4.53	4.21	-7.00	3.84	3.62	-5.73
531.02	2.12	1.96	-7.36	2.06	1.91	-7.12	2.09	1.95	-6.48
604.70	1.86	1.74	-6.31	1.77	1.70	-3.79	1.78	1.66	-6.57
795.85	1.47	1.42	-3.43	1.41	1.39	-0.87	1.42	1.37	-3.68
1173.24	1.02	1.02	-0.16	0.97	1.00	3.18	0.99	0.99	-0.45
1332.50	0.89	0.90	1.12	0.86	0.89	3.33	0.88	0.88	0.28

Table 5. Comparison between measured efficiency and calculated one with sample density in the 450 mL Marinelli beaker

Energy (keV)	1.11 g/cm <sup>3</sup>			1.34 g/cm <sup>3</sup>			1.60 g/cm <sup>3</sup>		
	ME (%)	C.E (%)	R.E (%)	ME (%)	C.E (%)	R.E (%)	ME (%)	C.E (%)	R.E (%)
91.11	1.87	1.97	5.23	1.25	1.29	3.38	0.83	0.83	0.67
145.44	3.16	3.13	-0.99	2.74	2.71	-1.12	2.31	2.26	-2.31
531.02	1.29	1.24	-4.15	1.27	1.22	-4.09	1.27	1.19	-6.67
604.70	1.21	1.12	-7.60	1.18	1.09	-7.53	1.17	1.07	-8.62
795.85	0.96	0.86	-10.15	0.94	0.85	-9.49	0.94	0.84	-10.81
1173.24	0.65	0.64	-2.46	0.64	0.63	-1.58	0.64	0.62	-2.52
1332.50	0.58	0.60	2.17	0.57	0.59	3.20	0.57	0.59	2.41

Table 6. Comparison between measured efficiency and calculated one with sample density in the 1000 mL Marinelli beaker

Energy (keV)	1.11 g/cm <sup>3</sup>			1.34 g/cm <sup>3</sup>			1.60 g/cm <sup>3</sup>		
	ME (%)	C.E (%)	R.E (%)	ME (%)	C.E (%)	R.E (%)	ME (%)	C.E (%)	R.E (%)
91.27	1.23	1.25	1.57	0.73	0.70	-4.75	0.45	0.42	-5.26
145.46	2.22	2.20	-1.16	1.82	1.76	-3.23	1.45	1.36	-6.08
531.08	0.97	0.91	-5.94	0.95	0.88	-7.05	0.93	0.85	-8.87
604.56	0.92	0.84	-8.96	0.90	0.81	-9.41	0.88	0.79	-10.51
796.04	0.74	0.63	-14.37	0.72	0.62	-14.52	0.71	0.60	-15.48
1173.39	0.50	0.46	-6.73	0.49	0.45	-7.71	0.49	0.45	-8.77
1332.55	0.45	0.46	1.09	0.44	0.45	1.87	0.44	0.44	0.99

500 keV 이상의 고에너지 영역에서는 자체흡수 효과를 보정하지 않고서도, 오차범위 5% 내외로 결정할 수 있다는 것을 알 수 있다.

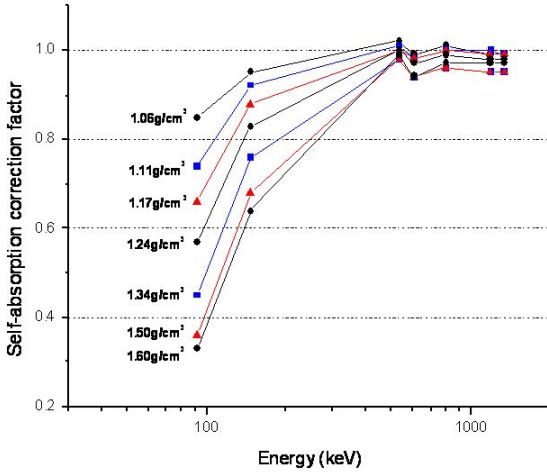


Fig. 2. Variation of the Self-absorption correction factor with the density of the sample in the 55 mL cylindrical beaker.

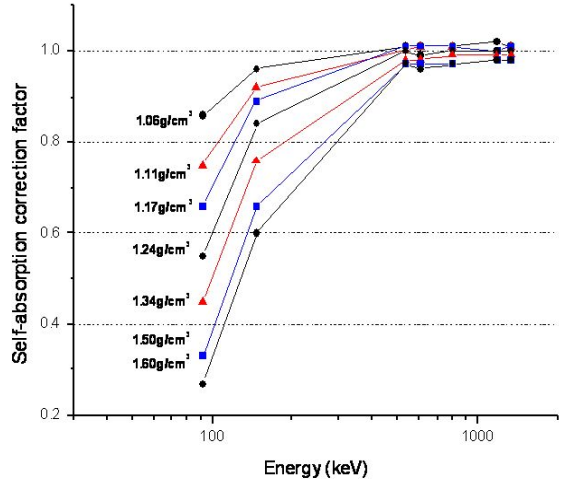


Fig. 4. Variation of the Self-absorption correction factor with the density of the sample in the 1000 mL Marinelli beaker.

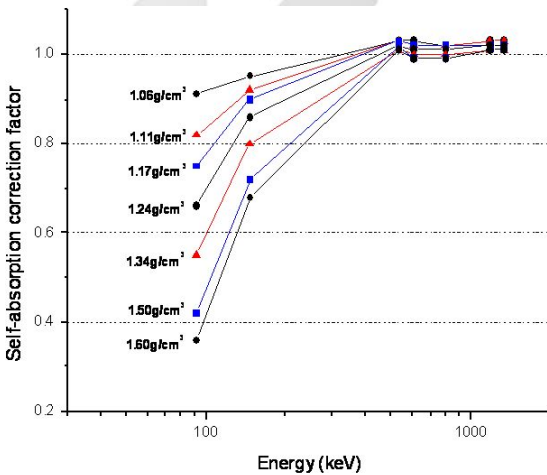


Fig. 3. Variation of the Self-absorption correction factor with the density of the sample in the 450 mL Marinelli beaker.

이상의 실험을 통하여 알 수 있듯이, 통상의 방사능 측정실험실에서 수행하고 있는 밀도가 1.0 g/cm<sup>3</sup>인 수용액을 이용하여 효율교정을 한 후, 밀도가 큰 시료에 그대로 적용한다면, 높은 에너지 영역 (500 keV 이상)에 대해서는 만족할 만한 결과를 얻을 수 있겠지만, 낮은 에너지 영역 (500 keV 이하)에서는 원하지 않는 결과를 초래할 것이다.

## 4. 결론

방사능 준위가 낮은 시료를 측정할 경우에는 측정 시 많은 양의 시료가 요구된다. 이러한 저준위 방사능 측정에서는 많은 양의 시료를 담을 수 있는 원통형과 역우물형의 측정용기가 주로 사용된다. 그러나, 이러한 체적시료의 경우는 자체흡수 효과에 의한 보정을 해주어야 한다. 또한 원자로 해체와 같이 다양한 종류의 폐기물을 측정대상으로 할 경우에는 측정시료와 동일한 기하학적 조건 및 밀도를 가지는 표준선원을 이용하여 효율을 결정한다는 것은 사실상 불가능하다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 본 연구에서는 이러한 측정시료의 기하학적인 조건과 밀도 차이에 의한 효율의 변화정도를 살펴보았으며, 또한 모든 측정결과는 Monte Carlo 방법으로 계산한 결과와 비교하였다.

밀도변화에 따른 효율의 변화정도를 조사하기 위하여, 원통형과 역우물형 측정용기에서 밀도를 1.0 g/cm<sup>3</sup>에서부터 1.6 g/cm<sup>3</sup>까지 변화시키면서 측정하였다. 그 결과, 측정용기 모두 다 밀도가 1.0 g/cm<sup>3</sup>인 통상의 표준선원을 사용하여 교정한 후 밀도변화에 따른 자체흡수 효과를 보정하지 않고 일반적인 환경시료에 적용할 경우, 높은 에너지 영역 (500 keV 이상)에 대해서는 5% 이내의 오차

범위로 방사능을 결정할 수 있겠지만, 낮은 에너지 영역 (500 keV 미만)에서는 수십 % 이상의 오차가 발생하게 되어 원하지 않는 결과를 얻게 될 것이다. 동일한 측정값에 대하여 Monte Carlo 방법으로 계산한 효율은 10% 내외의 오차범위 이내로 결정할 수 있었다.

표준선원을 이용하여 검출효율을 결정하고 실제 시료에 적용하기 위해서는 측정시료의 기하학적 조건과 밀도가 표준선원과 동일해야한다. 그러나, 모든 높이와 밀도에 대해서 표준선원을 이용하여 효율을 결정한다는 것은 절차가 복잡하고 많은 노력이 필요하다. 따라서 본 연구에서 계산한 Monte Carlo 방법에 의한 효율결정은 간단할 뿐만 아니라 수 % 오차범위 이내로 다양한 분야에 적용될 수 있을 것이다.

### 참고 문헌

1. F. Sánchez, E. Navarro, J. L. Ferrero, A. Moreno, C. Roldán, A. Baeza and J. Panigaua, *Nucl. Instr. Meth.*, **B61**, 535-540(1991).
2. K. M. Wainio and G. F. Knoll, *Nucl. Instr. Meth.*, **44**, 213-223(1966).
3. B. Lal and K. V. K. Iyengar, *Nucl. Instr. Meth.*, **79**, 19-28(1970).
4. G. Gaggero, *Nucl. Instr. Meth.*, **94**, 481-492(1971).
5. Ch. Meixner, *Nucl. Instr. Meth.*, **119**, 521-526 (1974).
6. T. Nakamura, *Nucl. Instr. Meth.*, **131**, 521-527 (1975).
7. K. Debertin and B. Grosswendt, *Nucl. Instr. Meth.*, **203**, 343-352(1982).
8. T. Nakamura and T. Suzuki, *Nucl. Instr. Meth.*, **205**, 211-218(1983).
9. C. E. Moss and J. R. Streetman, *Nucl. Instr. Meth.*, **A299**, 98-101(1990).
10. M. I. Abbas, *Appl. Radiat. Isot.*, **54**, 761-768 (2001).
11. T. Boshkova and L. Minev, *Appl. Radiat. Isot.*, **54**, 777-783(2001).
12. 서범경, 이대원, 이길용, 윤윤열, 양태건, *대한방사선방어학회지*, **26**(2), 51-58(2001).
13. 서범경, 이길용, 윤윤열, 이근우, *대한방사선방어학회지*, **29**(1), 17-23(2004).
14. F. Sánchez, E. Navarro, J. L. Ferrero, A. Moreno, C. Rolán, A. Baeza, and J. Panigaua, *Nucl. Instr. Meth.*, **B61**, 535(1991).
15. C. Birattari and A. Salomone, *Nucl. Instr. Meth.*, **174**, 391(1980).