

Corrections of Self-Absorption Effect Using the Monte Carlo Method in the Radioactivity Analysis of Environmental Samples

Bum Kyoung Seo, Dae Won Lee, Kil Yong Lee*, Yoon Yeol Yoon*
and Tae Keun Yang*

Department of Physics, Pusan National University, *Environmental Geology Division,
Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources(KIGAM)

환경시료의 방사능 분석에서 Monte Carlo 방법을 이용한 자체흡수 효과 보정

서범경 · 이대원 · 이길용* · 윤윤일* · 양태건*
부산대학교 물리학과, *한국지질자원연구원 환경지질연구부

(2000년 12월 22일 접수, 2001년 4월 30일 채택)

Abstract - In the low level radioactivity measurement, such as environmental radioactivity, there were used commonly cylindrical and Marinelli type beakers by means of measurement container. If there are differences in the matrix density or sample height between standard source and sample, it must be determined full energy peak efficiency considering self absorption effect. In this paper, we compared measured efficiency with calculated full energy peak efficiencies in the HPGe detector using the Monte Carlo method. For cylindrical container, we calculated the variation of the efficiency with sample height. Also, we calculated the variation of the detection efficiency with apparent density in the cylindrical and Marinelli container. It was seen that it need to be corrected for self absorption in the energy range of below 1000keV. Also, in order to verify the validity of calculation, we compared the calculated value with reference value using NIST SRM 4353 reference soil.

Key words : self absorption, Monte Carlo method, HPGe detector, environmental sample, counting efficiency.

요약 - 환경방사능과 같은 저준위 방사능 측정에서는 원통형과 Marinelli형 측정용기가 가장 일반적으로 사용된다. 효율교정용 표준선원과 측정시료의 높이 또는 매질의 밀도가 다르면 자체흡수 효과의 차이로 인한 보정이 필요하다. 본 연구에서는 Monte Carlo 방법을 이용하여 HPGe 검출기의 전에너지 피크 효율을 계산하여 측정치와 비교하였다. 원통형 용기에 대해서는 높이에 대한 효율변화 정도를 계산하였고, 원통형 및 Marinelli 측정용기에 대해서는 밀도변화에 따른 효율을 계산하였다. 밀도에 따른 효율의 감소 정도는 1000keV 이하의 에너지 영역에 대해 자체흡수 효과의 보정이 필요하다는 것을 알았다. 또한 계산의 타당성을 검증하기 위하여 NIST SRM 4353 표준물질을 이용하여 계산값과 인증값을 상호비교한 결과 오차범위 이내로 잘 맞는다는 것을 확인하였다.

중심어 : 자체흡수, Monte Carlo 방법, HPGe 검출기, 환경시료, 계측효율.

서론

방사능 측정시 가장 중요한 것은 검출기의 전에너지(full energy) 피크효율을 정확히 결정하는 것이다. 효율교정용 표준선원과 측정하고자하는 시

료는 동일한 매질이어야 한다. 그러나 모든 측정시료에 대하여 물리적 및 화학적 성질이 동일한 표준선원을 제조하여 효율을 구한다는 것은 불가능하기 때문에, 대부분의 실험실에서는 수용액 상태의 표준선원을 이용하여 효율을 구한 뒤 다양한

매질(유기물, 토양 등)의 측정시료에 적용하고 있다.

환경방사능과 같은 저준위 방사능 측정에서는 원통형과 Marinelli 비커형의 측정용기가 가장 일반적으로 사용된다. 이들 용기들은 많은 양의 시료를 담을 수 있는 장점은 있지만, 시료량의 증가로 인하여 시료내에서 감마선의 흡수 또는 산란이 일어날 확률이 증가하게 된다. 즉, 체적선원(voluminal source)의 경우는 시료내에서의 자체흡수 효과를 고려한 전에너지 피크효율을 결정하여야한다. 자체흡수 효과는 시료의 겉보기 밀도에 주로 의존하는데, 환경시료들의 밀도는 대부분 0.4(예; 건조 유기물)에서 $1.6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ (예; 토양)까지 범위 이내이다[1]. 그러나 효율 교정시 대부분의 경우에 밀도가 $1.0 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 인 수용액 상태의 표준선원을 사용하므로, 표준선원과 측정시료의 밀도 차이로 인한 시료 내에서 자체흡수 효과가 달라진다.

Cutshall *et al.*[2], Kitto[3], 그리고 Ramos - Lerate *et al.*[4]은 원통형 용기에 토양시료를 충전한 뒤, 직접 투과법을 이용하여 자체흡수 효과에 대하여 연구하였다. 그리고 Sánchez *et al.*[1]은 Petri vial과 Marinelli 비커에서 Monte Carlo 계산을 이용하여 자체흡수 효과를 계산하였고, Debertain *et al.*[5]과 Dryák *et al.*[6]은 Marinelli 비커에서의 자체흡수 효과를 연구하였다. 또한 기존의 많은 연구자들이 Monte Carlo 방법을 이용하여 Ge 검출기의 효율과 응답함수를 계산하기 위하여 많은 연구를 수행하였다[1,7-14].

체적시료의 자체흡수는 많은 연구자들에 의하여 현재까지도 연구되고 있으며[15-16], 본 연구에서는 Monte Carlo 방법을 이용하여 현재 환경방사능 측정분야에서 가장 많이 사용되고 있는 다양한 기하학적 모양의 측정용기(원통형과 Marinelli 형 : 450 및 1000 ml)에 대한 HPGe 검출기의 전에너지 피크효율을 계산하였다. 또한 원통형 측정용기의 경우는 시료의 높이별 변화와 밀도변화에 따른 전에너지 피크효율의 변화정도를 계산하였으며, Marinelli (450 및 1000 ml) 측정용기는 시료의 밀도변화에 따른 계측효율의 변화를 계산하였다. 계산결과의 타당성을 검증하기 위하여 자체 제작한 알루미늄 측정용기에[17] NIST SRM 4353 표준물질을 충전하여 측정된 뒤, Monte Carlo 방법에 의하여 계산한 효율을 적용하여 인증값과 비교하였다.

재료 및 방법

실험에 의한 전에너지 피크효율 결정

다른 모양의 측정용기에 대한 전에너지 피크효

율은 HPGe 검출기를 이용하여 한국표준연구원에서 제작·보급한 원통형(직경 60 mm, 높이 30 mm) 및 Marinelli형 (450 및 1000 ml) 표준선원을 이용하여 측정하였고, 검출기와 측정용기의 기하학적 배치는 그림 1과 같다. 한국표준연구원에서 제작된 표준선원의 매질은 한천(agar)이며, 밀도는 $1.0 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 이다. 이 때 사용된 표준선원의 핵종, 에너지 그리고 반감기는 표 1과 같다. 실험에 사용한 검출기는 EG&G ORTEC 사의 동축형 HPGe 검출기이다. Ge 결정은 직경이 54.0 mm이고, 길이가 49.5 mm이며, ^{60}Co 의 1332.5 keV 감마선에 대하여 에너지 분해능은 1.8 keV, 상대효율은 20%, 그리고 피크 대 콕프턴(peak-to-compton) 비는 51이다.

결과의 타당성을 검증하기 위하여 측정된 NIST SRM 4353 표준물질은 자체제작한 알루미늄 용기에 충전하여 측정하였는데, 이 때 겉보기 밀도는 $0.78 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 이었고, 높이는 2.8 cm였다. 그리고 측정시간은 250,000초였다. ^{40}K 와 ^{228}Ac 은 각각 1460.8과 911.1 keV 감마선을 이용하여 직접 분석하였고, ^{226}Ra 은 방사평형된 딸핵종인 ^{214}Pb (351.9 keV)와 ^{214}Bi (609.3 keV) 마찬가지로 ^{228}Th 은 ^{212}Pb (238.6 keV) 및 ^{208}Tl (583.1 keV)을 이용하여 간접적으로 분석하였다.

Table 1. Photon energies and intensities of radioactive standard sources

Nuclides	Photon energy (keV)	Intensity (%)	Half life
^{241}Am	59.54	35.90	432.20 y
^{109}Cd	88.03	3.61	462.60 d
^{57}Co	122.06	85.60	271.79 d
	136.47	10.68	
^{139}Ce	165.85	79.90	137.64 d
^{113}Sn	391.69	64.20	115.09 d
^{85}Sr	514.01	95.71	64.84 d
^{137}Cs	661.66	85.12	30.07 y
^{60}Co	1173.24	99.90	5.27 y
	1332.50	99.98	
^{88}Y	989.04	93.68	106.65 d
	1836.06	99.24	

Monte Carlo 계산

HPGe 검출기의 전에너지 피크효율을 계산하기 위하여 사용한 Monte Carlo 코드는 다양한 분야에 적용할 수 있는 MCNP4A이다[18]. MCNP는 초기에 중성자 수송을 위하여 개발된 코드이지만, 최근에는 전자와 광자에까지 적용되고 있다. 본 연구에서는 광자 모드만을 사용하여 원통형과 Marinelli형(450 및 1000 ml) 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.

Marinelli형 표준선원을 이용한 실제 측정치와 Monte Carlo 방법에 의한 계산치를 비교하여 최적의 검출기 치수를 결정하였다. 표 2에 제작자에 의하여 주어진 검출기 치수와 본 연구에서 얻은 검출기 치수를 나타내었다. 제작자에 의하여 주어진 검출기 규격과 비교하여 볼 때, 가장 차이가 많이 나는 것은 Ge 불감층으로서, 스캐닝 방법을 이용하여 검출기의 유감체적을 결정한 연구자들도 이와 유사한 결과를 얻었다[12-13]. 또한 Ge 결정과 저온유지장치(cryostat)의 열적 접촉을 위한 내부 불감영역에 관한 정보는 제작자에 의하여 제공되지 않는 것으로서, 다른 연구자들의 결과[1,11,13-14]를 참고하여, 표준선원 측정에 의한 실험치와 Monte Carlo 방법에 의한 계산치를 비교하여 결정하였다.

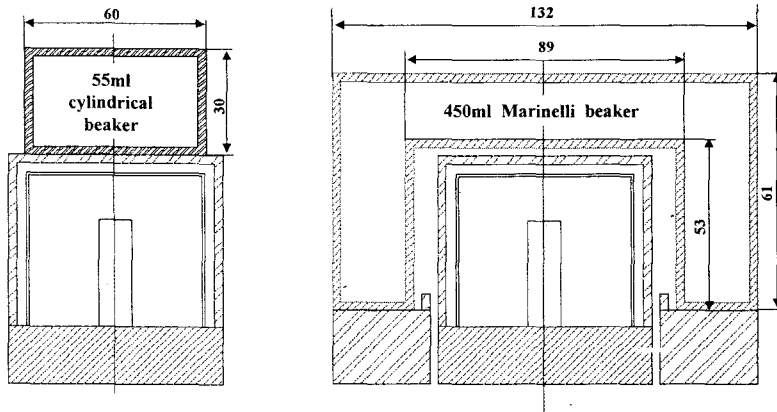


Fig. 1. Experimental and calculating geometry of cylindrical and Marinelli type beakers.

결과 및 논의

HPGe 검출기의 전에너지 피크효율을 결정하기 위한 표준선원과 검출기의 배치도는 그림 1에 나타내었다. 원통형 표준선원은 검출기 끝단(end cap)에 바로 올려놓았으며, Marinelli형은 측정용기 지지대 위에 올려놓아 검출기 끝단으로부터 일정한 거리만큼 떨어져 있다.

실제로 검출기 제작자에 의하여 제시된 검출기 규격과 측정시의 유감체적(sensitive volume)은 상당한 차이가 나는데, 일부 연구자들은 스캐닝(scanning) 방법을 이용하여 검출기 유감체적을 구하였으나[11-12], 여기서는 원통형과 450 ml

표 3과 4는 각각 원통형과 450 ml Marinelli형 표준선원을 이용하여 측정한 효율과 Monte Carlo 방법을 이용하여 계산한 효율을 비교한 것이다. 55 ml 원통형 측정용기에 대해서는 전에너지 영역에 대하여 측정값과 계산값이 10% 오차범위 이내로 잘 일치하며, 450 ml Marinelli 측정용기는 1000 keV 이하의 에너지 영역에 대해서는 측정값과 계산값이 5% 오차범위 이내로서 아주 잘 일치하고, 1000 keV 이상에서도 10% 정도 오차범위 이내로 잘 맞는다.

Table 2. HPGe detector details supplied by the manufacturer and calculation values used in the MCNP code.

Details	Manufacturer (mm)	Calculation (mm)
Diameter of crystal	54	54
Length of crystal	49.5	49.5
Distance of end cap to crystal	3	4
Thickness of end cap (Al)	1.27	1.3
Thickness of inactive outer germanium	0.7	1.45
Thickness of mounting cup (Al)	-	0.5
Diameter of inner inactive volume	-	10
Length of inner inactive volume	-	32.3

Table 3. Comparison between measured and calculated efficiency for the 55 ml cylindrical type beaker.

Energy (keV)	Measured efficiency	Calculated efficiency	Difference (%)
59.54	0.0124	0.0129	3.55
88.03	0.0415	0.0437	5.25
122.06	0.0568	0.0569	0.17
136.47	0.0588	0.0574	-2.45
165.85	0.0582	0.0549	-5.66
391.69	0.0296	0.0274	-7.45
514.01	0.0224	0.0214	-4.36
661.66	0.0174	0.0171	-2.00
898.04	0.0139	0.0135	-3.13
1173.24	0.0101	0.0110	9.52
1332.50	0.0090	0.0099	9.87
1836.06	0.0073	0.0077	5.00

Table 4. Comparison between measured and calculated efficiency for the 450ml Marinelli type beaker.

Energy (keV)	Calculated efficiency	Calculated efficiency	Difference (%)
59.54	0.0064	0.0062	-2.54
88.03	0.0217	0.0224	3.19
122.06	0.0326	0.0324	-0.67
136.47	0.0341	0.0330	-3.21
165.85	0.0340	0.0333	-2.28
391.69	0.0175	0.0173	-0.75
514.01	0.0134	0.0136	1.62
661.66	0.0106	0.0111	4.82
898.04	0.0085	0.0085	-0.72
1173.24	0.0065	0.0070	7.04
1332.50	0.0058	0.0063	9.34
1836.06	0.0047	0.0050	7.98

Table 5. Comparison between measured and calculated efficiency for the 1000 ml Marinelli type beaker.

Energy (keV)	Calculated efficiency	Calculated efficiency	Difference (%)
59.54	0.0039	0.0043	9.80
88.03	0.0146	0.0155	6.39
122.06	0.0226	0.0229	1.66
136.47	0.0240	0.0237	-1.23
165.85	0.0237	0.0237	-0.11
391.69	0.0133	0.0125	-5.94
514.01	0.0101	0.0099	-2.01
661.66	0.0080	0.0078	-1.63
898.04	0.0061	0.0062	0.51
1173.24	0.0049	0.0050	2.24
1332.50	0.0044	0.0048	7.94
1836.06	0.0033	0.0037	13.59

Table 6. Calculated efficiency for sample height of the 55 ml cylindrical beaker

Energy (keV)	Sample height			
	1 cm	2 cm	3 cm	4 cm
59.54	0.0218	0.0177	0.0141	0.0116
88.03	0.0695	0.0545	0.0441	0.0362
122.06	0.0890	0.0695	0.0559	0.0463
136.47	0.0888	0.0679	0.0544	0.0453
165.85	0.0837	0.0656	0.0529	0.0435
391.69	0.0413	0.0326	0.0265	0.0219
514.01	0.0316	0.0251	0.0208	0.0175
661.66	0.0250	0.0197	0.0166	0.0139
898.04	0.0197	0.0157	0.0131	0.0110
1173.24	0.0159	0.0128	0.0105	0.0090
1332.50	0.0144	0.0116	0.0098	0.0085
1836.06	0.0116	0.0093	0.0076	0.0067

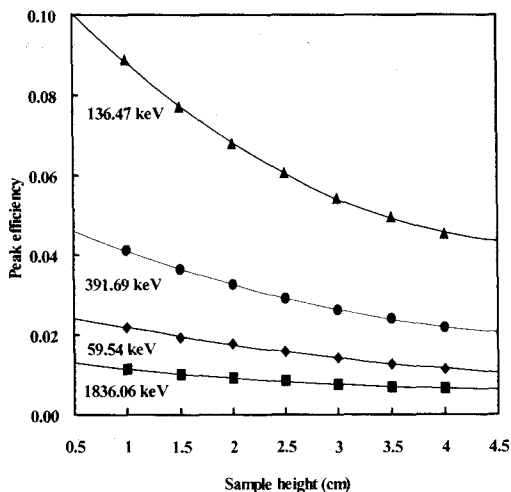


Fig. 2. Changes of peak efficiency with sample height in the 55ml cylindrical type beaker.

Monte Carlo 방법을 이용하여 계산한 검출효율의 적합성을 검증하기 위하여, 55ml 원통형과 450ml Marinelli 표준선원에서 얻은 검출기 규격

을 적용하여 1000 ml Marinelli 표준선원에 적용하였다. 그 결과는 표 5에 나타내었는데, 1836.06 keV의 경우에서만 측정값과 계산값의 상대오차가 14% 정도 차이가 나고, 다른 에너지 영역에 대하여 10% 이내로 잘 일치한다. 즉, Monte Carlo 방법에 의하여 결정된 검출기 규격을 이용하여 계산한 검출효율은 임의의 측정용기에 대해서는 큰 오차없이 적용할 수 있다는 것을 알 수가 있다.

일반적으로 환경방사능에서 많이 사용되는 Marinelli 측정용기의 경우는 시료를 용기 지시선까지 채워서 측정하기 때문에 시료의 높이는 항상 일정하다. 그러나 원통형의 경우는 시료의 양에 따라 그 높이가 달라지게 되는데, 즉, 시료의 높이에 대한 검출효율을 결정하여야 한다. 본 연구에서 사용한 직경 6cm의 원통형 측정용기에 대해 시료의 높이를 1cm부터 4cm까지 0.5cm 단계로 변화시키면서 검출효율을 계산하였다. 표 6과 몇몇 시료높이에 대한 계산효율을 나타내었다. 또한 그림 2는 몇가지 감마선 에너지에 대하여 원통형 측정용기에 충전한 시료의 높이에 따른 검출효율의 변화를 나타낸 것이다. 전에너지 영역에 대하여 시료의 높이가 증가할수록 효율은 감소하는 것을 알 수 있다. 즉, 시료량이 증가하므로써 방출된 감마선이 시료내에서 흡수 또는 산란될 확률이 증가하므로 검출기에 도달할 확률은 감소하기 때문이다. 측정시료의 효율 차이는 시료 높이가 1cm와 4cm 일 때, 59.54 keV 감마선에 대하여 약 47% 그리고 1836.06 keV 감마선에 대해서는 약 42%의 효율 차이가 난다. 즉, 원통형 측정용기의 경우는 효율교정용 표준선원과 측정시료의 높이가 다를 경우 전에너지 영역에 대하여 많은 오차를 수반하게 된다. 이러한 이유로 실제 측정에서는 각 측정시료의 높이에 따른 효율을 정확히 결정하여야 하는데, 실험적으로 모든 높이에 대한 검출기의 효율을 결정한다는 것은 절차가 복잡하고 노력이 많이 든다. 그러나, 본 연구에서와 같이 Monte Carlo 방법에 의한 효율계산은 간편하면서도 비교적 정확한 결과를 산출할 수 있다.

또한 체적시료에서는 자체흡수 효과 때문에 시료의 겉보기 밀도에 따라 측정효율이 달라지게 된다. 그러나, 같은 밀도의 시료의 경우 화학적 성분의 차이로 인한 효율변화는 무시할 수 있고[1], 본 연구에서도 시료의 화학적 성분변화에 대한 효율의 차이는 고려하지 않았다.

표 7은 세가지 측정용기에 대해(55ml C.B., 450ml 그리고 1000ml M.B.) 표준선원의 밀도를 $1.0 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 이라 가정했을 때, 측정시료의 밀도 0.6

과 $1.4 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 에 대한 효율을 비교한 것이다. 100 keV 이하의 저에너지 영역에 대해서는 계산된 효율이 표준선원에 비해 약 10% 이상 차이가 난다. 그리고 100 ~ 1000 keV 에너지 영역은 대략 3 ~ 10% 정도의 차이가 나며, 1000 keV 이상의 고에너지 영역에서는 표준선원의 밀도에 대한 효율의 차이는 3% 이하이다. 즉, 측정하고자하는 시료의 밀도가 표준선원의 밀도($\rho = 1.0 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)와 다르다면(예; $\rho = 1.4 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$), 저에너지 영역(<100 keV)에서는 아주 심각한 오차를 유발할 것이다. 그러나 고에너지 영역(>1000 keV)에서는 시료의 밀도 차이에 의한 효율의 변화정도는 통상적인 측정오차 이내의 범위로서(<3%) 무시할 수도 있다. 즉, 1000 keV 이하의 에너지 영역에 대해서는 표준선원과 측정시료의 밀도차이로 인한 자체흡수 효과의 보정은 반드시 이루어져야한다.

그림 3 ~ 5는 세가지 측정용기(55 ml C.B., 450 ml 그리고 1000 ml M.B.)에서 겔보기 밀도에 따른 효율변화를 59.54, 136.47, 391.69 그리고 1836.06 keV 감마선에 대하여 나타낸 것이다. 그림에서 밀도는 0.4에서 1.8까지 $0.2 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 간격으로 변화시켰고, 점들은 각 밀도에서 계산한 효율값을 나타낸 것이고, 실선은 계산한 효율을 2차 다항식으로 짜맞춤(fitting)한 것이다. 겔보기 밀도가 0.2에서 $1.8 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 범위 이내의 계산하지 않은 다른 밀도에 대해서는 계산값들을 내삽하여 얻을 수 있을 것이다.

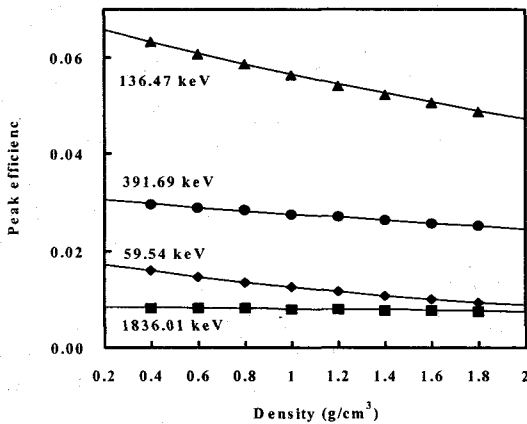


Fig. 3. Changes of peak efficiency with sample density in the 55ml cylindrical type beaker.

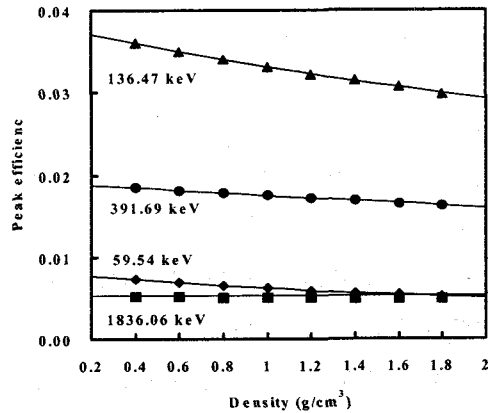


Fig. 4. Changes of peak efficiency with sample density in the 450ml Marinelli type beaker.

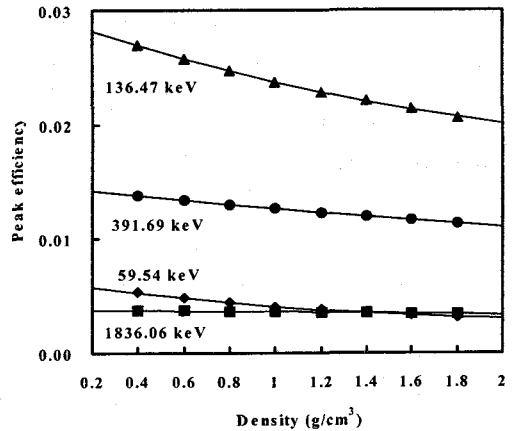


Fig. 5. Changes of peak efficiency with sample density in the 1000ml Marinelli type beaker.

계산에 의한 자체흡수 효과를 검증하기 위하여 자체 제작한 55 ml 원통형 알루미늄 측정용기에 NIST SRM 4353(Rocky flats soil number 1) 표준물질을 충전하여 측정후, MCNP 코드를 이용하여 계산한 효율을 적용하여 방사능을 계산하였다. 그 결과는 표 8에 나타내었는데, 표준물질의 방사능 인증값과 Monte Carlo 방법에 의한 계산값이 상대오차 10% 이내의 범위로 아주 잘 일치한다는 것을 알 수 있다.

Table 7. Calculated efficiency for apparent density in the different container

Energy (keV)	55 ml C.B.*			450 ml M.B.†			1000 ml M.B.		
	0.6 g·cm ⁻³	1.0 g·cm ⁻³	1.4 g·cm ⁻³	0.6 g·cm ⁻³	1.0 g·cm ⁻³	1.4 g·cm ⁻³	0.6 g·cm ⁻³	1.0 g·cm ⁻³	1.4 g·cm ⁻³
59.54	0.0145	0.0129	0.0108	0.0069	0.0062	0.0056	0.0048	0.0043	0.0035
88.03	0.0485	0.0437	0.0397	0.0243	0.0224	0.0211	0.0173	0.0155	0.0139
122.06	0.0629	0.0569	0.0538	0.0343	0.0324	0.0304	0.0253	0.0229	0.0215
136.47	0.0608	0.0574	0.0522	0.0350	0.0330	0.0315	0.0258	0.0237	0.0221
165.85	0.0589	0.0549	0.0516	0.0351	0.0333	0.0317	0.0257	0.0237	0.0225
391.69	0.0291	0.0274	0.0264	0.0181	0.0173	0.0168	0.0134	0.0125	0.0119
514.01	0.0225	0.0214	0.0206	0.0143	0.0136	0.0134	0.0109	0.0099	0.0099
661.66	0.0179	0.0171	0.0165	0.0115	0.0111	0.0108	0.0079	0.0078	0.0073
898.04	0.0140	0.0135	0.0131	0.0088	0.0085	0.0084	0.0065	0.0062	0.0061
1173.24	0.0112	0.0110	0.0106	0.0070	0.0070	0.0067	0.0052	0.0050	0.0049
1332.50	0.0104	0.0099	0.0099	0.0064	0.0063	0.0061	0.0047	0.0048	0.0045
1836.06	0.0081	0.0077	0.0077	0.0052	0.0050	0.0050	0.0037	0.0037	0.0035

* C.B. : cylindrical beaker

† M.B. : Marinelli beaker

Table 8. Analytical results of NIST SRM 4353 reference soil.

Nuclides	Certified activity (Bq/kg)	Calculated activity (Bq/kg)	Difference (%)
⁴⁰ K	723.0 ± 69.4	654.0 ± 12.7	9.54
²²⁶ Ra	43.0 ± 2.8	41.4 ± 1.2	3.63
²²⁸ Ac	69.8 ± 3.6	76.7 ± 2.7	-9.85
²²⁸ Th	70.8 ± 3.6	74.7 ± 2.1	-5.54

결론

환경방사능과 같은 저준위 방사능 측정에서는 많은 양의 시료를 담을 수 있는 원통형과 Marinelli 형의 측정용기가 주로 사용된다. 본 연구에서는 체적시료에 대한 높이 및 밀도변화에 대한 자체흡수 효과를 표준선원을 이용하여 측정된 결과와 Monte Carlo 방법을 이용하여 계산한 결과와 비교하였다. 원통형 측정용기의 경우, 시료의 높이가 증가할수록 자체흡수 효과에 의한 효율의 감소정도는 뚜렷이 나타났고,

시료의 높이가 4 cm 일 때, 1 cm 높이에 비해 효율은 전에너지 영역에서 40 % 이상 감소하였다. 즉, 효율교정용 표준선원과 측정시료의 높이는 항상 같게 유지하여야 한다.

세가지 측정용기(55 ml C.B., 450 ml 그리고 1000 ml M.B.)에서 밀도의 증가로 인한 효율의 감소 정도는 높은 에너지 영역(>1000 keV)보다는 저에너지 영역(<1000 keV)에서 뚜렷하게 나타났다. 만약 측정시료의 밀도가 1.4 g·cm⁻³이고, 통상의 표준선원(ρ=1.0 g·cm⁻³)을 이용하여 교정한 효율을 적용한다면, 1000 keV 이하의 에너지 영역에서는 3 ~ 20 % 정도의 오차를 유발하기 때문에 밀도차이에 따른 자체흡수 효과의 보정이 반드시 이루어져야 한다. 그러나 고에너지 영역(>1000 keV)에서는 표준선원과 측정시료의 밀도차이에 의한 효율의 변화정도는 통상적인 측정오차 이내의 범위로서(<3 %) 무시할 수도 있다.

계산의 타당성을 검증하기 위하여 NIST SRM 4353 표준물질을 측정용기에 충전하여 측정된 후, Monte Carlo 방법을 적용하여 계산한 방사능 값과 표준물질 인증값과 비교한 결과 10 % 오차범위 이내로 아주 잘 일치하였다.

표준선원을 이용하여 검출효율을 결정하고 실제 시료에 적용하기 위해서는 측정시료의 높이와 밀도가 표준선원과 동일해야 한다. 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 뿐만아니라 수퍼센트 오차범위 이내로 다양한 분야에 적용될 수 있을 것이다.

참고문헌

1. F. Sánchez, E. Navarro, J.L. Ferrero, A. Moreno, C. Roldán, A. Baeza and J. Paniagua, "A Monte Carlo based method of including gamma self-absorption for the analysis of environmental samples", *Nucl. Instr. Meth.*, B61, 535-540(1991).
2. N.H. Cutshall, I.L. Larsen and C.R. Olsen, "Direct analysis of ^{210}Pb in sediment samples : self-absorption corrections", *Nucl. Instr. Meth.*, 206, 309-312(1983).
3. M.E. Kitto, "Determination of photon self-absorption corrections for soil samples", *Appl. Radiat. Isot.*, 42(9), 835-839(1991).
4. I. Ramos-Lerate, M. Barrera, R.A. Ligeró and M. Casas-Ruiz, "A new method for gamma-efficiency calibration of voluminal samples in cylindrical geometry", *J. Environ. Radioactivity*, 38(1), 47-57(1998).
5. K. Debertin and R. Jianping, "Measurement of the activity of radioactive samples in Marinelli beakers", *Nucl. Instr. Meth.*, A278, 541-549(1989).
6. P. Dryák, P. Kovář, L. Plchová and J. Šuráň, "Corrections for the Marinelli geometry", *J. Radioanal. Nucl. Chem., Letters* 135(4), 281-292(1989).
7. K.M. Wainio and G.F. Knoll, "Calculated gamma ray response characteristics of semiconductor detectors", *Nucl. Instr. Meth.*, 44, 213-223(1966).
8. B. Lal and K.V.K. Iyengar, "Monte Carlo calculations of gamma ray response characteristics of cylindrical Ge(Li) detectors", *Nucl. Instr. Meth.*, 79, 19-28(1970).
9. G. Gaggero, "Monte Carlo calculations for the photofractions and energy loss spectra of Ge(Li) semiconductor detectors", *Nucl. Instr. Meth.*, 94, 481-492(1971).
10. Ch. Meixner, "A Monte Carlo program for the calculation of gamma-ray spectra for germanium detectors", *Nucl. Instr. Meth.*, 119, 521-526(1974).
11. T. Nakamura, "Monte Carlo calculation of peak efficiencies and response functions of coaxial-type Ge(Li) detectors for disk gamma-ray sources", *Nucl. Instr. Meth.*, 131, 521-527(1975).
12. K. Debertin and B. Grosswendt, "Efficiency calibration of semiconductor detectors by primary standard sources and Monte Carlo calculations", *Nucl. Instr. Meth.*, 203, 343-352(1982).
13. T. Nakamura and T. Suzuki, "Monte Carlo calculation of peak efficiencies of Ge(Li) and pure Ge detectors to voluminal sources and comparison with environmental radioactivity measurement", *Nucl. Instr. Meth.*, 205, 211-218(1983).
14. C.E. Moss and J.R. Streetman, "Comparison of calculated and measured response functions for germanium detectors", *Nucl. Instr. Meth.*, A299, 98-101(1990).
15. M.I. Abbas, "HPGe detector photopeak efficiency calculation including self-absorption and coincidence corrections for Marinelli beaker sources using compact analytical expressions", *Appl. Radiat. Isot.*, 54, 761-768(2001).
16. T. Boshkova and L. Minev, "Corrections for self-attenuation in gamma-ray spectrometry of bulk samples", *Appl. Radiat. Isot.*, 54, 777-783(2001).
17. 이길용, 윤윤열, 서범경, "라듐 및 라돈의 감마선 분광 분석을 위한 알루미늄 용기의 제작 및 특성 조사", *분석과학*, 13(6), 743-750(2000).
18. J.F. Briesmeister(ed), *MCNP - A General Monte Carlo N-Particle Transport Code Version 4A*, Los Alamos National Laboratory, LA-12625-M(1993).