

<원저>

Check Source를 이용한 HPGe감마핵종분석시스템의 자체흡수 보정방법 연구

박정수¹⁾·임효진²⁾·서현수²⁾·장다빈²⁾·김명준²⁾·이상복^{1,3)}·안성민^{1,2)}¹⁾가천대학교 일반대학원 보건과학과·²⁾가천대학교 방사선학과·³⁾(주)엘씨젠 기술연구소

A Study on the Self-absorption Correction Method of HPGe Gamma Spectroscopy Analysis System Using Check Source

Jeong-Soo Park¹⁾·Hyo-Jin Lim²⁾·Hyun-Soo Seo²⁾· Da-bin Jang²⁾·Myoung-Joon Kim²⁾
Sang-Bok Lee^{1,3)}·Sung-Min Ahn^{1,2)}¹⁾Dept. of Health Science, Gachon University General Graduate School²⁾Dept. of Radiological Science, Gachon University³⁾Dept. of Institute of technology, LCGen Co., Ltd

Abstract Gamma spectroscopy analysis is widely used for radioactivity analysis, and various factors are required for radioactivity calculations. Among the factors, K3 for each sample significantly influences the results. The previous methods of correcting the self-absorption effect include a computational simulation method and a method that requires making a CRM(certified reference material) identical to the sample medium. However, the above methods have limitations when used in small institutions because they require specialized program utilization skills or high manufacturing costs and large facilities. The aim of this study is to develop a method that can be easily and rapidly applied to radioactivity analysis. After filling the beaker with water, we placed the radiation source in a uniform position and used the measured value as the benchmark. Next, a correction factor was derived based on the difference in the radiation source count of the benchmark and the identically measured sample. For the radiation source, Eu-152, which emits a broad range of energy within the measurement range of gamma rays, and Cs-134 and Cs-137, which are indicator nuclides in environmental radiation analysis, were used. The sample was selected within the density range of 0.26-2.11 g/cm³, and the correction factor was derived by calculating the count difference of each sample compared to the reference value of water. This study presents a faster and more convenient method than the existing research methods for determining the self-absorption effect correction, which has become increasingly necessary.

Key Words: Gamma spectroscopy, Self absorption correction, Correction factor, Radiation shielding, Radioactivity

중심 단어: 감마핵종분석, 자체흡수효과보정, 보정인자, 방사선차폐, 방사능

I. 서론

후쿠시마 원전 사고와 국내 침대 매트리스 라돈 검출 사건 등의 여파로 방사능 오염에 대한 대 국민적 우려와 관심이 증가함에 따라 방사성 핵종 분석에 대한 요구가 증가하고 있다[1]. 감마 핵종 분석은 알파, 베타 방출 핵종 분석

보다 상대적으로 전처리 난이도가 낮고 빠른 시간 내 분석 결과를 확인할 수 있어 초기 방사능 분석에 널리 활용되고 있다. 감마 방출 핵종 분석 결과를 산출하기 위해서는 여러 인자가 요구되는데, 이 중 시료의 자체흡수효과 보정인자는 시료 그 자체의 매질이라는 변수에 의해 크게 좌우된다[2]. 감마 방출 방사성 핵종 분석에서는 시료 전처리 과정이 항

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Science and ICT(NRF-2020M2D6A2093776)
Corresponding author: Sung-Min Ahn, Department of Radiological Science, Gachon University, 191 Hambakmoe-ro, Yeonsu-gu, Incheon city, 21936, Republic of Korea / Tel: +82-32-820-4363 / E-mail: sman@gachon.ac.kr

Received 08 August 2022; Revised 24 October 2022; Accepted 08 December 2022

Copyright ©2022 by The Korean Journal of Radiological Science and Technology

상 동일할 수 없고, 이는 시료 취급 시마다 각기 다른 자체흡수 효과를 나타내는 것을 의미하기 때문에 시료별 자체흡수 효과를 평가하여야 한다[3]. 현재는 전산모사 기법을 적용하거나 시료별 측정대상 핵종의 표준물질(RM, reference material)을 제작하여 보정하는 방법을 적용하고 있다[4]. 전산모사 기법의 경우 가장 많이 쓰이는 방법이나, 전산모사 프로그램 구비와 모델링 결과물의 해석 및 검증에 대해 전문가 수준의 능력이 요구되므로 접근성이 쉽지 않다. 모델링을 통해 시료 및 검출기를 구현해 놓는다 하더라도 실제 제작되는 시료는 모델링 결과물과 동일 할 수 없는 한계점이 존재한다[5-7]. 시료별 RM을 제작하는 방법은 시료와 동일한 매질에 측정 대상 핵종들을 첨가하는 것으로 동위원소 사용 허가와 화학적 전처리 설비가 동반되어야 하며, 사용하고자 하는 선원들의 구입경로가 제한적이며 인증 기간이 짧고, 고비용의 선원을 매질별로 매번 확보하여야 하므로 소규모 분석기관의 적용에는 어려움이 존재한다[2]. 이에 본 연구는 이러한 결점들을 극복하기 위해 대중적으로 사용될 수 있는 방법을 연구하고자 시료용기(1 L Marinelli Beaker)에 교정 인증표준물질(CRM, Certificated reference material 우룻가사리, 밀도: 1,001 g/cm³)의 매질과 비슷한 물(밀도: 1.0 g/cm³)을 채운 후 그 위에 방사선원을 위치시켜 측정된 방사능 값을 기준으로 자체흡수에 대한 보정인자를 계산하였다. 이를 통해 기존에 연구된 방법보다 적은 비용 및 단순한 절차로 자체흡수 효과 보정을 수행하고자 하였다.

II. 대상 및 방법

1. 측정 장비 및 선원

연구에 사용된 장비는 고순도게르마늄검출기(HPGe)로 해당 장비는 한국표준과학연구원(KRISS)에서 보급하는 측정소급성이 확보된 CRM(1 L Marinelli Beaker에 담긴 감마선 방출 10 핵종)로 교정된 장비를 사용하였다[8-10]. 이에 대한 세부 사항은 Table 1과 같다.

고순도게르마늄 감마 핵종 분석시스템을 이용해 시료의 감마선을 측정할 때는 각 핵종 고유의 에너지별로 측정효율을 확보한 후 방사능을 산출한다. 따라서, 본 연구는 감마선 측정범위 내 다양한 에너지 범위를 적절히 보여줄 수 있고 비교적 반감기가 길어 장기간 사용이 가능한 Cs-137, Cs-134 및 Eu-152 Check source를 선정하여 측정하였다. Eu-152는 다양한 에너지대(121.78 keV, 244.69 keV, 344.27

Table 1. HPGe Detector Specification

Category	Specification
Detector Model	GC3018
Preamplifier Model	iPA-SL10
Type	STD P-type Coaxial Detector
Efficiency	≥30 %
Resolution	≤1.8 keV FWHM @ 1.33 MeV
Diameter	62 mm
Length/Thickness	40 mm
Window Material	Aluminum

keV, 411.11 keV, 443.96 keV, 778.90 keV, 867.38 keV, 964.07 keV, 1,085.85 keV, 1,112.07 keV, 1,408.01 keV)의 감마선을 방출하며, Cs-134(604.72 keV, 795.86 keV) 및 Cs-137(661.65 keV)는 현재 식품 중 방사능 오염 정도를 추산하는데 사용되는 지표 핵종으로 분류되어 있으므로 연구 결과의 활용성이 높아질 수 있다는 것을 고려하였다. 연구는 Fig. 1과 같이 Disk 형 선원을 활용하였다.

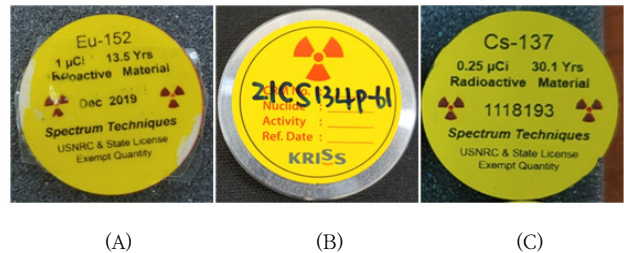


Fig. 1. Source used in this study

(A) Eu-152 Check source(121.78 keV-1,408.01 keV), (B) Cs-134 Check source(604.72 keV, 795.86 keV), (C) Cs-137 Check source(661.65 keV)

2. 대상 및 방법

1) 선원의 위치 결정

Check source의 가장 적절한 위치를 결정하기 위해 기준 물질인 물을 1 L Marinelli Beaker에 넣고 Fig. 2와 같이 Marinelli Beaker에 Check Source를 부착할 수 있는 부위를 Group A(겉뚜껑), B(속뚜껑), C(측면)으로 나눈 후 각 Group 안에서 위치별 Check Source의 계수값을 확인해 최적 위치 선정을 위해 3개의 Point로 구분하였다. 총 9개의 Point에 표시한 원안에 Check Source를 위치시켜 각 3회씩 반복 측정하였다. 이때 사용된 Check Source는 Single peak의 높은 방출확률을 가지고 있는 Cs-137(661.65 keV)로 결정하였다.

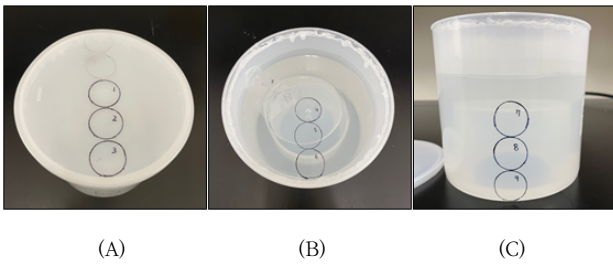


Fig. 2. Grouping Diagram for source positions

(A) Three circles on the outer lid to position the check source,
 (B) Three circles of the inner lid to position the check source,
 (C) Three circles on the side of the marinelli beaker to position the check source

9개의 Point 측정을 통해 선정된 최종 1개의 Point에 Human error에 의한 Check Source의 위치 변화를 통제하고 Marinelli beaker와 항상 같은 위치를 유지할 수 있는 고정틀을 3D 프린터를 이용해 Fig. 3과 같이 제작하였다.

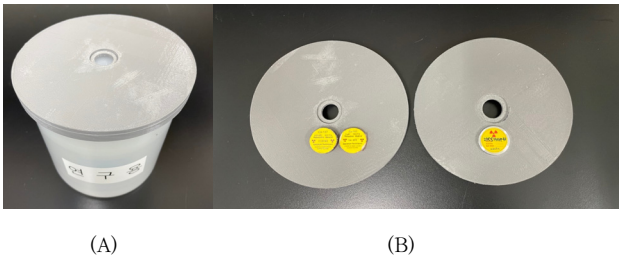


Fig. 3. Source fixed frame made with 3D printer
 (A) Fixed frame attached to top of marinelli beaker, (B) Fixed frame for size of check source

시료는 변경되어도 Marinelli beaker 상단에 위치되는 고정틀에 중앙에 Check Source를 고정해 Marinelli beaker 변경 시 위치 이동에 따른 Count의 오차를 통제한다.

2) 시료의 선정 및 전처리

감마 핵종 분석시스템 교정에 사용되는 CRM과 유사한 밀도인 물을 기준 시료로 사용하였다. 물을 기준으로 저밀도와 고밀도의 다양한 시료에서 선원의 방사능을 측정하였으며 물과의 방사능비를 통하여 각 밀도 별 보정인자를 도출하였다. 시료는 환경방사능 측정에 주로 사용되는 식품과 천연석 등으로 선정하였다. 식품은 식품의약품안전처의 수입식품 방사능안전정보를 기반으로 선정하였고[11], 천연석은 관세법에 따라 세관을 통해 수입되는 물질들로서 생활주변방사선 안전관리법에 의해 관리되는 물질 시료로 선정하였다[12][13]. 감마 방사능 분석을 위해 시료의 균질성을 최대한 확보하였으며 이를 위해 식품 시료는 식품공전에서 제

시한 방사능 시험법에 따른 전처리방법을 적용하였고[14], 천연석 시료는 표준 규격으로 정의되어 있는 KS A ISO 18589-2에 따라 수행하였다[15].

시료의 부피를 통일하기 위해 Fig. 4와 같이 Marinelli Beaker의 채움 선까지 시료를 균질화하여 충전한 후 외부 누출 및 오염 방지를 위해 Parafilm으로 밀봉하였다.



Fig. 4. Homogeneously filled samples used in the study

3) 방사능 및 보정인자 산정 방법

방사능 계산식은 Eq. 1과 같으며 방사능 분석 결과 계산을 위해 다양한 인자가 요구된다.

$$A = \frac{N_s - N_b}{\epsilon \times \gamma \times t_s \times m \times K_1 \times K_2 \times K_3 \times K_4 \times K_5}$$

Eq. 1. Gamma radioactivity calculation formula

A는 방사능(Bq/g), N_s는 측정하고자 하는 피크의 순면적, N_b는 백그라운드 피크의 순 면적, ε는 계수 효율, γ는 핵종의 감마선 에너지 방출 확률, t_s는 시료의 측정시간(sec), m은 시료의 무게(g), K₁은 샘플링과 측정 사이에 경과된 시간에 대한 방사성 붕괴 보정인자, K₂는 측정 시간 중에 발생하는 방사성 붕괴 보정인자, K₃는 샘플의 자체흡수 효과에 의한 보정인자, K₄는 우연합산효과에 의한 보정인자, K₅는 측정 핵종의 동시합성효과에 의한 보정인자를 나타낸다. 본 연구의 목적인 시료의 자체흡수효과에 의한 보정인자(K₃) 계산식은 Eq. 2와 같다.

$$K_3 = \frac{A_{sample}}{A_{water}}$$

Eq. 2. Calculation formula for self-absorption correction factor

4) 측정기준 설정 및 적용 방법

측정기준을 포함하여 총 네 번의 측정을 수행한다. 첫 번째로 물(밀도: 1 g/cm³) 1 L를 Marinelli Beaker에 채워 계측한다. 두 번째로 물 시료 위에 Check source를 올려놓고 계측하여 그 결과에서 첫 번째 측정값을 차감한 후 물을 통

과한 Check source의 순수 계수값만을 얻을 수 있다. 세 번째는 대상 시료를 계측한 후 시료에 존재하는 Target 핵종의 Count를 측정하였다. 마지막으로 측정 대상 시료 위에 Check source를 올려놓고 계측한다. 네 번째 계측값은 시료 내부의 방사선원과 Check source의 방사선원이 합산된 계측값이며, 이 값에서 세 번째 시료의 Target 값을 차감하게 되면 시료에 의해 흡수된 Check source의 측정값을 알 수 있게 된다. 기준이 되는 Check source의 계수값 (C_{water})과 흡수된 Check source의 계수값(C_{sample})의 비율을 계산하여 Target 값에 보정하게 되면 K_3 값을 구할 수 있으며, 이를 방사능 계산식에 적용하면 자체흡수효과가 보정된 방사능 값을 산출할 수 있다.

III. 결과

Fig. 2에 따라 측정된 결과는 Table 2와 같이 나왔으며, Group A는 Marinelli Beaker의 겉뚜껑 부분으로 해당 위치에서 선원을 측정하면 내부 시료와의 간극(Air-gap)이 존재하여 방사선 감약 효과가 나타났다. Group B는 Marinelli beaker의 속 뚜껑 부분으로 Group A보다 상대적으로 많은 방사능 계수 값이 나타났으며, Group C에서는 가장 높은 계수 값을 보였는데 이는 선원의 9번 위치에서 Marinelli Beaker를 통과하지 않은 감마선이 디텍터의 하단부로 직접 입사되기 때문이었다.

평균 Count 값은 Group C> B> A 순으로 나타난다. 하지만 Group C는 Marinelli beaker의 측면으로 고정틀의 제작 등 선원의 위치를 일정하게 유지하기가 어렵다는 단점이 있다. Group B는 선원과 시료 사이의 간극이 적어, 시료 외의 요인에 의한 선량의 감약 없이 계측을 수행할 수 있으나 해

당 Point에 Check Source를 위치시키기 위해서는 천연방사성 핵종 분석에서 필요한 Marinelli beaker의 밀봉을 저해하며, 선원이 시료로부터 오염될 가능성이 높다. 따라서 선원의 오염의 영향이 적고 일정한 위치를 유지하기 유리한 Group A를 선정했다. Group A에서 가장 높은 계수 값을 나타내는 자리인 겉뚜껑의 정중앙인 Point 1로 최종 선정하였다.

Table 3은 Eu-152 선원에서 저에너지 영역의 방출에너지 121.78 keV와 고에너지 영역의 방출에너지 1,408.01 keV에 따른 측정값에 따른 Net count와 그에 따른 보정인자(K_3)이다. 121.78 keV에서 저밀도 시료인 Dry soil의 Net count는 물의 1.34배이었고, 고밀도 시료인 Calcinate bauxite는 물의 0.58배이었다. 1,408.01 keV에서 Dry soil의 Net count는 물의 1.15배이었으며 Calcinate bauxite는 물의 0.86배이었다. 물을 기준으로 밀도가 낮은 시료는 같은 선원에서 과대평가 된 것으로 나타났으며, 반대로 밀도가 높은 시료는 과소평가 되는 것을 알 수 있다. 또한 금속성 물질인 Zirconia powder 시료는 투과력이 약한 저에너지 영역 측정에서 급격한 Net count 감소를 보였으므로 시료의 재질 및 화학적 조성에 따른 흡수효과의 차이도 발생한다는 것을 알 수 있었다. 이를 통해 본 연구의 최종 목적인 자체흡수 효과에 대한 보정의 필요성을 확인할 수 있었다.

해당 연구 방법을 적용 시 측정 대상 핵종과 같은 Check Source의 사용을 추천한다. 본 연구에서는 Eu-152 선원을 통해 저에너지 및 고에너지에서의 자체흡수 효과의 영향을 확인하였고, 실제 적용 방법으로 Cs-134, Cs-137 선원을 사용하였다. Table 4는 Cs-134, Cs-137 선원에서 시료의 밀도별 Net count와 보정인자(K_3)이다. Cs-137에서는 밀도가 가장 낮은 Dry soil의 보정인자가 1.18로 가장 크게 도출되었고, 밀도가 가장 큰 Calcinate bauxite의 보정인자가

Table 2. Average count for each point of Cs-137(661.65 keV)

Group	Point	Average count	Total average
A	1	8,777.33	7,767.67
	2	8,055.00	
	3	6,200.67	
B	4	11,106.67	16,468.89
	5	17,496.67	
	6	20,803.33	
C	7	21,216.67	16,813.33
	8	17,660.00	
	9	11,563.33	

* Average count = HPGe gamma spectroscopy analysis results

Table 3. Eu-152 Source emission energy(121.78, 1,408.01)keV of Correction factor(K3)

Sample	Density(g/cm ³)	121.78 keV		1,408.01 keV	
		Net count	K3	Net count	K3
Dry soil	0.26	102,230	1.34	11,134	1.15
Silica fume	0.39	93,405	1.23	10,585	1.09
Katsuobushi	0.40	92,383	1.21	10,664	1.10
Dog food	0.45	88,487	1.16	10,736	1.11
Potato starch	0.70	80,479	1.06	9,874	1.02
Seaweed	0.73	78,183	1.03	10,149	1.05
Cooking oil	0.81	82,199	1.08	10,171	1.05
Red seabream	0.94	81,180	1.07	10,273	1.06
Soy sauce	1.00	83,867	1.10	10,474	1.08
Water	1.00	76,128	1.00	9,708	1.00
Japanese amberjack	1.02	69,192	0.91	9,644	0.99
Zircornia powder	1.17	23,066	0.30	10,082	1.04
Bentonite	1.31	64,616	0.85	9,618	0.99
Concrete	1.32	62,649	0.82	9,359	0.96
Brick	1.49	54,257	0.71	8,928	0.92
Bauxite	1.67	56,004	0.74	9,312	0.96
Granite	1.77	48,031	0.63	8,997	0.93
Calcinate bauxite	2.11	44,405	0.58	8,357	0.86

- 1) Net count = Sample with Check Source's gamma count - Pure Sample's gamma count
- 2) K3 = Results calculated in Eq. 2

Table 4. Cs-134 and Cs-137 Source emission energy of Correction factor(K3)

Sample	Density(g/cm ³)	604.72 keV		661.65 keV		795.86 keV	
		Net Count	K3	Net Count	K3	Net Count	K3
Dry soil	0.26	26,668	1.22	22,725	1.18	16,788	1.10
Silica fume	0.39	26,102	1.20	22,609	1.17	18,242	1.19
Katsuobushi	0.40	25,604	1.18	21,767	1.13	17,800	1.16
Dog food	0.45	24,712	1.13	21,560	1.12	17,288	1.13
Potato starch	0.70	22,898	1.05	19,779	1.03	16,080	1.05
Seaweed	0.73	22,817	1.05	19,968	1.04	16,076	1.05
Cooking oil	0.81	23,435	1.08	20,392	1.06	16,494	1.08
Red seabream	0.94	23,562	1.08	20,514	1.06	16,479	1.08
Soy sauce	1.00	24,431	1.12	18,900	0.98	17,154	1.12
Water	1.00	21,780	1.00	19,287	1.00	15,325	1.00
Japanese amberjack	1.02	22,220	1.02	19,696	1.02	15,810	1.03
Zircornia powder	1.17	22,010	1.01	19,291	1.00	15,668	1.02
Bentonite	1.31	21,125	0.97	18,468	0.96	15,005	0.98
Concrete	1.32	19,709	0.90	16,900	0.88	14,033	0.92
Brick	1.49	18,188	0.84	16,463	0.85	13,476	0.88
Bauxite	1.67	17,209	0.79	15,012	0.78	12,650	0.83
Granite	1.77	18,724	0.86	16,394	0.85	13,718	0.90
Calcinate bauxite	2.11	16,771	0.77	14,986	0.78	12,457	0.81

- 1) Net count = Sample with Check Source's gamma count - Pure Sample's gamma count
- 2) K3 = Results calculated in Eq. 2

0.78로 가장 작게 도출되었다. 즉, K_3 보정을 적용하지 않았을 경우에는 Dry soil은 과대평가 되며 Calcinate bauxite는 과소평가 된 것을 알 수 있었다. Cs-134 선원의 604.72 keV일 때는 밀도가 가장 낮은 Dry soil의 보정인자가 1.22, 밀도가 가장 큰 Calcinate bauxite의 보정인자가 0.77로 나타났으며 Dry soil의 보정인자가 Calcinate bauxite보다 약 1.58배 높았다. 또한, 795.86 keV일 때는 밀도가 가장 낮은 Dry soil의 보정인자가 1.10, 밀도가 가장 큰 Calcinate bauxite의 보정인자가 0.81로 나타났으며 Dry soil의 보정인자가 Calcinate bauxite보다 약 1.35배 높았다. 감마선의 투과력 차이에 의해 저에너지영역에서는 시료의 밀도와 재질에 따른 차이 고에너지영역보다 더 크게 차이가 나는 것을 알 수 있었다.

IV. 고 찰

시료의 위치, 재질, 밀도, 충전율 등 통제하기 힘든 요인들에 의해 분석 결과는 달라질 수 있기 때문에 감마방출 방사성 핵종 분석에 있어 자체흡수 효과는 필수적으로 보정되어야 한다. 기존에 연구된 전산모사기법이나 시료별로 인증 표준물질(CRM)을 제작하여 보정하는 방법은 전문적인 지식과 시간이 오래 걸린다는 한계점을 가지고 있으므로 기존보다 간편하고 빠르게 적용할 수 있는 방법을 알아보기 위해 본 연구를 수행하였고, 그 결과 Marinelli Beaker 겉뚜껑의 정중앙에 선원을 두고 분석하는 것이 가장 적합함을 확인하였다. Eu-152 선원을 이용하여 도출한 시료별 보정인자 값을 통해 저에너지 영역에서는 고에너지 영역보다 시료에 의한 차폐효과가 더 커짐을 알 수 있었다. 이를 통해, 자체흡수효과 보정의 필요성을 한 번 더 증명하였으며 Cs-137, Cs-134 선원을 이용하여 자체흡수효과 보정을 실증하였다. Check source만 있다면 제조된 시료에 즉시 본 연구 방법을 적용하여 기존보다 훨씬 간편하게 시료의 자체흡수효과 보정을 수행할 수 있었으나, Marinelli Beaker 겉뚜껑과 시료와의 Air-gap에 의한 방사선 감약이 나타나는 것을 Marinelli beaker의 형태 개선으로 극복한다면, 방출 확률이 낮은 감마선 방출 핵종 분석에도 적용 시킬 수 있을 것으로 생각된다. 또한, 일부 핵종과 시료만을 대상으로 수행하였기에 본 연구 결과를 일반화시키기 위해서는 더욱 다양한 시료와 많은 데이터를 가지고 전 밀도영역에 대해서도 실험적으로 검증이 필요하다는 한계점이 있다. 더불어 같은 방법으로 제조한 시료를 RM을 이용한 자체흡수효과 보정, 전산모사기법의 모델링을 통한 자체흡수효과 보정까지 총 3

가지의 보정방법들을 비교하는 연구를 추가로 진행한다면 이번에 연구된 Check Source를 이용한 자체흡수효과 보정의 경제성과 신뢰성을 더 증명할 수 있을 것으로 생각된다 [16-18].

V. 결 론

본 연구는 감마 핵종 분석용 점검 선원을 이용한 시료별 자체흡수 효과 보정 방법으로 감마 방출 방사성 핵종 분석의 자체흡수 효과 보정인자를 다양한 밀도의 시료(0.13~2.11) g/cm³에 대해 수행하였고, 감마선 자체흡수 효과에 대한 보정의 필요성을 확인하였다. 보정인자를 구하기 위해 선원을 Marinelli beaker 겉뚜껑의 정중앙에 두고 방사능 분석을 하는 것이 가장 적절함을 확인하였으며 이 방법을 통해 시료별 보정인자를 도출하였다. 감마 핵종 분석 시 자체흡수효과에 대한 보정이 요구되고 있는 상황에서 본 연구 결과는 소규모 실험실에서도 어렵지 않게 적용이 가능한 방법임을 증명하였다.

REFERENCES

- [1] Kim CJ, Lim CS, Lee WN, Jang M, Ji YY, Chung GH, et al. Survey Study on Radioactivity of Domestic Fishery Product. Korean J. Food Sci. Technol. 2015;47(6):789-92.
- [2] Lee WN, Lee HP, Chung KH, Cho YH, Choi GS, Lee CW, Chung HW, et al. A Practical and Simple Method of Self-absorption Correction for Environmental Samples. Journal of Radiation Protection and Research. 2006;31(1):47-52.
- [3] Ji YY, Ryu YG, Kwak KK, Kang DW, Kim KH. Comparison of the Correction Methods for Gamma Ray Attenuation in the Radioactive Waste Drum Assay. Journal of the Korean Radioactive Waste Society. 2006;4(3):275-84.
- [4] Kim CJ, Byun JI, No JH, Yoon JY. A Study on the Determination Method of Line Dampening Coefficients for Self-absorption Correction in Gamma-ray Analysis. Journal of Radiation Protection and Research. 2010;11:122-3.
- [5] Seo BK, Lee DW, Lee KY, Yoon YY, Yang TK.

Corrections of Self-Absorption Effect Using the Monte Carlo Method in the Radioactivity Analysis of Environmental Samples, *Journal of Radiation Protection and Research*, 2001;26(2):51-8.

[6] Jang ES, Kim YS, Lee SY. Marinelli Beaker Measurement and Self Absorption Correction and Application for Various Environmental Samples in Monte Carlo Simulation, *Journal of Radiation Science and Technology*. 2017;40(4):605-11.

[7] Lee KY, Kang BS. Calculation of the Correction Factors related to the Diameter and Density of the Concrete Core Samples using a Monte Carlo Simulation, *Journal of the Korean Society of Radiology*. 2020;14(5):503-10.

[8] KASTO 16-80212-062, Standard Calibration Procedure of Semiconductor Detector for Gamma-ray Measurements, Korea Association of Standard & Testing Organizations; 2016.11.30.

[9] Jo MH, Lee YJ, Maeng SJ. Uncertainty Evaluation of Energy Calibration Function of Gamma Nuclide Analysis Device, *Journal of Radiation Protection and Research*, 2011;11:114-5.

[10] Song BC, Kim YB, Han SH, Oh SJ, Lee MH, Song KS. Investigation on the techniques of quality control for radiation counting systems, *Analytical Science & Technology*. 2011;24(6):414-20.

[11] Lee WG, Goo SH. Gamma Measurement of Soil and Food in Gyeonggi Province, *The Journal of Industrial Liaison Research Institute*. 2007;13:35-43.

[12] Yoo JH, Koh SM, Kim YU, Chang BU. Investigation for some of the consumer goods which contain radioactive materials on the viewpoint of mineralogical and chemical characteristics, *Mineralogical Society of Korea and Petrological Society of Korea*, 2009;(5):109-11.

[13] Yun U, Cho BW. Evaluation of Terrestrial Gamma Radiation and Dose Rate of the Ogcheon Group Area, *The Journal of Engineering Geology*. 2020; 30(4):577-88.

[14] MFDS Notice No. 2021-79(09.30.2021.) Standards and Specifications of Food-Part 8 General Test Method: 9.9.2. Testing of radionuclides by High Purity Germanium detector; 2021.

[15] ISO. Measurement of radioactivity in the environment-Soil-Part.2: Guidance for the selection of the sampling strategy, Sampling and pre-treatment of samples; 2015.

[16] Jo JW, Lee SB, Kim SC, Nam JH, Noh EJ, Beak HW, Lee YJ, et al. Evaluation of Radioactive Substance and Measurement of Harmfulness in Drinking Water, *Journal of Radiological Science and Technology*. 2021;44(3):247-52.

[17] Lee SR, Lee SB, Kim SC, Kim JY, Kim JM, Bang YJ, Lee DS, et al. Analysis of Radioactivity Concentrations in Cigarette Smoke and Tobacco Risk Assessment, *Journal of Radiological Science and Technology*. 2021;44(5):489-94.

[18] Lee YS, Lee SB, Kim SC, Kang MS, Kim JH, Oh YS, Park JS, et al. Radon Hazard Review of Spilled Groundwater and Tap Water in Incheon Metropolitan City Subway Station, *Journal of Radiological Science and Technology*. 2021;44(6):671-7.

구분	성명	소속	직위
제1저자	박정수	가천대학교	석사 대학원생
공동저자	임효진	가천대학교	학부생
공동저자	서현수	가천대학교	학부생
공동저자	장다빈	가천대학교	학부생
공동저자	김명준	한국건강관리협회 서울서부지부	방사선사
공동저자	이상복	가천대학교/(주)엘씨젠 기술연구소	박사 대학원생/연구소장
교신저자	안성민	가천대학교	정교수