Journal of Radiation Industry 12(3) : 177~182(2018)

CT 방법을 이용한 질량감쇠계수 결정 및 자체감쇠 보정

이정빈[1] · 이준호[1] · 변종인[2,*] · 윤주용[2]

[1]과학기술연합대학원대학교, [2]한국원자력안전기술원

Determination of Mass Attenuation Coefficient and Self-Attenuation Correction Using the CT Method

Jeong-Bin Lee[1], Jun-Ho Lee[1], Jong-In Byun[2] and Ju-Yong Yun[2]

[1]*Department of Nuclear and Radiation Safety, University of Science and Technology, 217, Gajeong-ro 34113, Yuseong-gu, Daejeon, Korea*

[2]*Center for Environmental Radiation & Radioactivity Assessment, Korea Institute of Nuclear Safety, 62, Gwahak-ro 34142, Yuseong-gu, Daejeon, Korea*

Abstract - In this study, the mass attenuation coefficients for all five of the IAEA reference material samples (apparent density in a measuring bottle: 0.50~1.45 g·cm^{-3}), including soil, milk powder, hay and moss soil, were determined using the CT (Calibration Transmission) method. A certified mixed gamma-ray sources including ^{241}Am, ^{88}Cd, ^{57}Co, ^{113}Sn, ^{85}Sr and ^{137}Cs were added to the IAEA reference samples for the validation of present method. The self-attenuation correction factors for the gamma-ray energies of 59.5 keV, 88 keV, 122.1 keV, 391.7 keV, 514 keV and 661.7 keV were determined and applied to the self-attenuation correction. As a result, the accuracy of gamma-ray spectrometry for environmental samples used in this study was improved especially for lower energy gamma-ray emitting radionuclides.

Key words : Gamma-ray spectrometry, Self-attenuation correction, Mass attenuation coefficient, Linear attenuation coefficient

서 론

감마선분광분석은 시료의 전처리 과정이 알파선 또는 베타선 분광분석에 비해 비교적 용이하기 때문에 감마선방출 시료의 방사능 분석에 널리 이용되고 있다. 일반적인 환경시료에 대한 감마선분광분석에서는 분석대상 시료의 기하구조와 동일한 인증표준 감마선원을 이용하여 검출기의 에너지에 따른 효율교정을 수행하며, 효율교정 선원과 분석대상 시료의 화학 조성 및 밀도가 다를 경우, 자체감쇠(self-attenuation) 차이가 발생할 수 있으며 이로 인한 방사능 분석 결과의 과소 또는 과대 평가를 방지하기 위해 자체감쇠 보정(self-attenuation correction)을 수행한다. 자체감쇠 보정에서 가장 중요한 인자는 효율교정선원 및 분석대상 시료의 선감쇠계수(linear attenuation coefficient, μ_l)이며, 이는 일반적으로 원소분석을 통해 구성원소비에 대한 정보를 이용하여 산출하거나, 콜리메이터(collimator)를 이용하는 방법으로 구할 수 있다(Hubell *et al*. 1982; Cutshall *et al*. 1983). 콜리메이터 이용법은 정교한 시스템과 비교적 높은 방사능을 갖는 감마선원이 요구되어 일반적인 환경방사능분석 실험실에서는 제한적일 수 있으며, 구성원소비 분석은 비용 및 시간적인 면에서 비효율적일 수 있다. 이러한 단점을 보완

* Corresponding author: Jong-In Byun, Tel. +82-42-868-0876, Fax. 82-42-868-0563, E-mail. k975bji@kins.re.kr

하기 위해 일반 환경 방사능분석 실험실에서 활용 가능한 CT (Calibration Transmission) 방법이 개발되었다 (Byun *et al*. 2015).

본 연구는 CT 방법을 이용한 다양한 환경시료의 질량감쇠계수 (mass attenuation coefficient, μ_m) 산출 및 자체감쇠 보정에 대한 적용성 평가를 위해 수행되었으며, 이를 위해 인증표준선원을 첨가한 환경시료 IAEA RM (Reference Material)에 대해 감마선분광분석을 수행하고 첨가된 감마선방출핵종의 인증농도와 비교·평가하였다. 본 논문에서는 CT 방법을 이용한 환경시료에 대한 μ_m 결정과 자체감쇠 보정인자 산출 적용 방법 및 적용성에 대하여 논의된다.

재료 및 방법

1. 질량감쇠계수 결정을 위한 측정 시스템 교정

CT 방법을 이용하여 μ_l을 산출하기 위해서는 감마선 투과비율 (I_m/I_0)에 따른 μ_l의 교정곡선을 결정해야 한다. 본 연구에서는 시스템 교정을 위해 다양한 밀도를 갖는 환경시료를 고려하여 교정용 기준 물질로서 불순물 함유량이 1% 미만의 C (activated charcoal), H_2O, MnO_2, NaCl, Na_2CO_3 및 $(NH_4)_2SO_4$를 사용하였다. 이때, I_m/I_0은 시료를 투과한 감마선의 계수율 (I_m)과 시료가 없는 빈 용기를 투과한 감마선의 계수율 (I_0)의 비율이다. 기준 물질들은 측정 용기 내의 균질성을 확보하기 위해 200 μm 미만으로 분쇄한 후 직경 60 mm, 높이 40 mm의 원통형 아크릴 용기에 20 mm 높이로 충전하였다. 이때, 측정용기에 충전된 C, H_2O, MnO_2, NaCl, Na_2CO_3 및 $(NH_4)_2SO_4$의 겉보기밀도는 각각 0.637 $g\cdot cm^{-3}$, 1.00 $g\cdot cm^{-3}$, 2.77 $g\cdot cm^{-3}$, 1.34 $g\cdot cm^{-3}$, 1.23 $g\cdot cm^{-3}$ 및 1.07 $g\cdot cm^{-3}$로 측정되었다. 감마선 투과비율 산출을 위해 직경 24.5 mm, 두께 3.2 mm의 아크릴 캡슐에 밀봉된 약 37 kBq의 ^{210}Pb (46.5 keV), ^{241}Am (59.5 keV), ^{152}Eu (121.8, 244.7, 344.3, 444, 778.9, 1408 keV), ^{137}Cs (661.7 keV) 및 ^{60}Co (1173.2, 1332.5 keV)의 점선원 (point-like disk source, Eckert & Ziegler series)을 사용하였으며, 감마선측정을 위해 상대효율 60%의 BEGe (Broad Energy Germanium, Canberra series) 검출기를 이용하였다. 측정 시 축차우연동시합산효과 (true coincidence summing effect)를 무시하기 위해 시료와 검출기 전면과의 간격을 200 mm로 두었으며 교정용 점선원은 충전한 시료 뚜껑 위 중앙에 위치하도록 하였다. 이 때 감마선원, 시료 및 검출기는 Fig. 1에서 보여주는 것과 같이 동일 축선상에 각 중심을 위치시켰다. 각 시료에 대한 I_m 및 I_0를 얻기 위해 분석대상 시료 및 빈 용기에 대하여 전에너지흡수피이크의 계수표준불확도가 1% 미만이 되도록 측정하였다. 또한 CT 방법을 위한 측정 시스템의

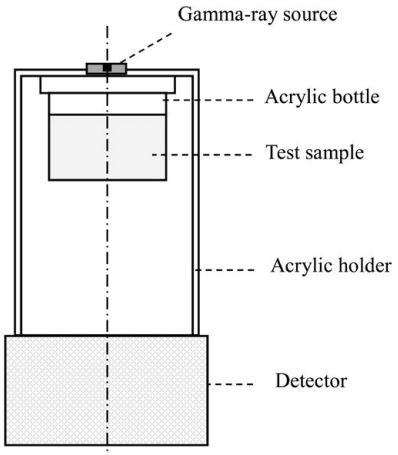

Fig. 1. Experimental arrangement of the CT system for μ_m (not to scale).

Table 1. Information of the IAEA reference materials used in this study

RM code	Sample type	Apparent density ($g\cdot cm^{-3}$)
IAEA-152	Milk powder	0.662
IAEA-360	Soil	1.45
IAEA-447	Moss soil	1.23
IAEA-455	Soil	0.893
IAEA-PT*	Hay	0.502

*IAEA-TEL-2012-03: IAEA World-wide proficiency test sample, 2012

교정결과 검증을 위해 K_2CrO_4와 SiO_2에 대한 μ_l을 본 교정곡선을 이용하여 산출한 값과 XCOM (Berger *et al*. 2010)을 이용하여 계산한 결과 값을 비교하였다.

2. 미지의 환경시료에 대한 μ_m 및 자체감쇠 보정인자 결정

CT 방법을 이용하여 결정된 μ_m의 감마선분광분석 자체감쇠 보정에 대한 적용성 평가를 위해 토양, 우유분말 및 건초를 포함하는 5개의 IAEA RM (Reference Material)을 준비하였으며 μ_m 결정을 위해 측정용기에 충전한 상태의 겉보기 밀도를 포함한 각 시료 정보는 Table 1과 같다.

각 시료의 수분 제거를 위해 토양시료는 105°C에서, 우유 및 건초시료는 연소에 의한 시료 손상을 방지하기 위해 80°C에서 약 24시간 동안 건조시켰다. 각 건조시료에는 CT 방법을 이용하여 결정된 μ_m의 자체감쇠 보정에 대한 적용성 평가를 위해 1M HCl에 희석된 혼합감마선원 (Eckert & Ziegler series)을 정량하여 첨가하였다. 본 연구에서는 감마선분광분석에서 일반적으로 사용되는 효율교정용 표준선원 (겉보기 밀도: 약 1 $g\cdot cm^{-3}$)과의 자체감쇠 차이가 비교적 큰 저에너지 감마선을 방출하는 ^{241}Am (59.54 keV), ^{109}Cd (88

keV), ^{57}Co (122.1 keV), ^{113}Sn (391.7 keV), ^{85}Sr (514 keV) 및 ^{137}Cs (661.7 keV)을 활용하였다. 표준선원을 첨가한 후 각 시료에 포함되어 있는 액체를 제거하기 위해 50°C에서 약 48시간 동안 건조하였다. 또한, 건조된 시료는 첨가된 핵종이 시료 내에 균질하게 섞일 수 있도록 혼합기를 이용하여 충분히 혼합한 후 μ_m 결정 및 자체감쇠 보정 적용성 평가를 위해 각각 직경 60 mm, 높이 40 mm의 원통형 아크릴 용기에 20 mm 및 30 mm의 높이로 충전하였다. μ_m을 결정하기 위해 CT 시스템 교정과 동일한 방법을 이용하여 I_m/I_0를 산출하였으며, 투과비율 측정용 감마선원을 제거한 후 시료의 백그라운드를 측정하여, 시료에 의한 관심에너지 피이크의 계수율 기여분을 차감하였다. 각 IAEA RM에 대한 μ_m은 측정을 통해 얻어진 I_m 및 I_0를 CT 시스템 교정식 식(아래 식 (1))에 대입하여 산출하였다.

$$\mu_m(E) = (a + b\ ln(R(E)))/\rho \quad (1)$$

이때, $R(E)$는 에너지에 대한 감마선 투과비율(I_m/I_0), ρ는 시료의 충전밀도를 나타낸다. 위와 같이 결정된 μ_m은 각 RM 시료의 자체감쇠 보정인자 산출에 적용하였다. 본 연구에서는 자체감쇠 보정인자 산출을 위해 실효검출중심거리를 이용하여 시료 내의 감마선 투과거리 적분법(Debertin *et al*. 1988)을 이용하였으며, 이는 식(2)와 같이 교정선원과 분석대상 시료에 대한 상대 검출효율 비율로 나타낼 수 있다.

$$SCF = \varepsilon_{sa.}/\varepsilon_{eff.} = I(\mu_{sa.})/I(\mu_{eff.}) \quad (2)$$

이때, $\varepsilon_{sa.}$ 및 $\varepsilon_{eff.}$는 각각 분석대상 시료의 효율 및 약 1 g·cm^{-3}의 밀도를 갖는 효율교정 선원에 대한 효율을, $I(\mu_{sa.})$와 $I(\mu_{eff.})$는 각각 분석대상 시료의 선감쇠계수($\mu_{sa.}$)가 적용된 검출기로의 입사 감마선의 상대강도와 검출기 효율교정 선원의 선감쇠계수($\mu_{eff.}$)가 적용된 상대강도를 나타낸다.

자체감쇠 보정 적용성 평가를 위해 30%의 동축형 HPGe (High Purity Germanium) 검출기를 사용하였으며, 1 M HCl의 혼합감마선원(Eckert & Ziegler series)을 이용하여 에너지에 따른 검출효율을 교정하였다. 각 RM 시료에 대하여 관심에너지에 대한 전에너지흡수피이크 계수의 상대표준불확도가 5% 미만이 되도록 측정하고 교정된 효율을 이용하여 방사능농도 분석을 수행하였다. 이때, 각 RM 시료의 기준 방사능농도는 인증표준방사성핵종을 첨가한 시료별 방사능을 총 시료량으로 나누어 결정하였으며, 기존 RM 시료에 존재하는 ^{137}Cs의 방사능농도에 대해서는 첨가된 방사능농도를 합산하여 기준 방사능을 산출하였다. 위와 같은 과정을 거쳐 계측된 시료에 대하여 CT 방법을 이용하여 산출된 μ_m을 적용한 자체감쇠 보정 전과 후를 기준 방사능농도와 비교평가를 통해 본 방법의 적용성 평가를 수행하였다.

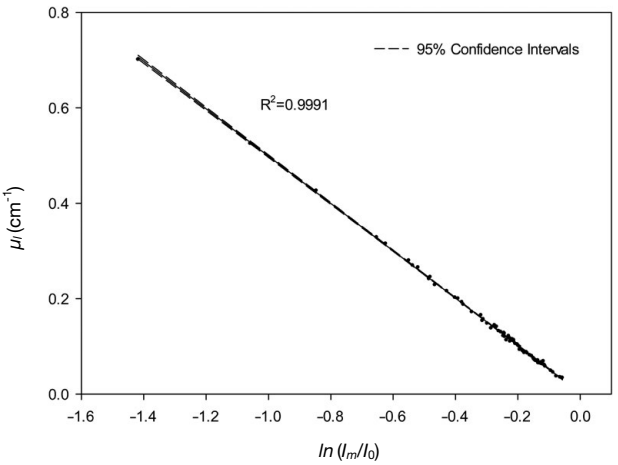

Fig. 2. The linear attenuation coefficients for C, H_2O, $(NH_4)_2SO_4$, NaCl, Na_2CO_3 and MnO_2 versus the ratio (I_m/I_0).

결과 및 고찰

Fig. 2는 C, H_2O, MnO_2, NaCl, Na_2CO_3 및 $(NH_4)_2SO_4$ 기

Table 2. Comparison of μ_l by the CT method and the XCOM for K_2CrO_4 and SiO_2

Energy (keV)	K_2CrO_4			SiO_2		
	CT method (cm^{-1})	XCOM calculation (cm^{-1})	Difference (%)	CT method (cm^{-1})	XCOM calculation (cm^{-1})	Difference (%)
46.5	1.72	1.77	−2.4	0.469	0.462	1.4
59.5	0.986	0.974	1.2	0.326	0.333	−2.1
121.8	0.327	0.329	−0.8	0.216	0.214	0.6
244.7	0.217	0.219	−1.0	0.167	0.168	−0.6
344.3	0.184	0.190	−3.0	0.145	0.148	−2.0
444	0.167	0.171	−2.5	0.132	0.134	−1.7
661.7	0.141	0.144	−1.9	0.115	0.113	1.3
778.9	0.131	0.133	−1.8	0.108	0.105	2.2
1173.2	0.107	0.109	−1.9	0.085	0.086	−1.0
1332.5	0.100	0.103	−2.3	0.078	0.081	−3.6
1408	0.097	0.099	−2.5	0.075	0.079	−4.4

준 시료를 이용한 CT 시스템의 교정결과를 보여준다. 식 (1)의 매개 변수 a, b는 각각 $a=(0.002623\pm0.000625)$ cm^{-1}, $b=(0.4962\pm0.0018)$ cm^{-1}와 같으며 이때의 상관계수 (correlation coefficient, R^2)는 0.9991을 보였다. 또한, 본 CT 시스템의 교정에 대한 검증을 위해 사용된 K_2CrO_4와 SiO_2는 측정용기 내의 겉보기 밀도가 각각 1.92 $g\cdot cm^{-3}$ 및 1.47 $g\cdot cm^{-3}$를 보였으며, 계측된 선감쇠계수와 XCOM을 이용하여 계산된 선감쇠계수의 값을 비교한 결과 Table 2에서 보여주는 것과 같이 46.5 keV~1408 keV의 감마선에너지에 대하여 5% 이내에서 일치함을 보였다.

본 연구를 통해 결정된 각 IAEA RM 시료의 감마선에너지에 따른 μ_m은 Fig. 3에서 보여주는 것과 같으며, 감마선에너지가 증가함에 따라 각 시료 간 μ_m의 차이가 작아지는 것을 확인할 수 있다. 이와는 반대로 저에너지 영역에서는 동일한 종류의 토양 또는 유기질의 우유분말 및 건초시료 상호간의 μ_m 차이가 비교적 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 그러므로 저에너지 영역에서는 동일한 종류의 시료라도 μ_m이 상대적으로 크게 차이가 있을 수 있으므로, 보다 정확한 감마선분광분석을 위해서는 구성 성분에 대한 정보가 없을 경우 측정대상 시료의 개별적인 μ_m 산출이 요구될 수 있다. Fig. 4는 CT 방법에 의해 결정된 μ_m을 적용하여 산출한 각 RM 시료에 대한 59.5 keV~661.7 keV의 에너지 범위에서 감마선에너지에 따른 자체감쇠 보정인자 곡선을 보여주며, ρ ($g\cdot cm^{-3}$)는 RM 시료의 측정용기 내에서의 충전 밀도를 나타낸다. 약 100 keV 이상의 에너지에 대해서는 시료의 종류에 크게 영향을 받지 않고 시료의 충전 밀도가 효율교정 선원의 밀도(약 1 $g\cdot cm^{-3}$)보다 작을 경우 자체감쇠가 작아지므로 자체감쇠 보정인자($\varepsilon_{sa}/\varepsilon_{eff.}$)는 1보다 큰 경향을 보인다. 반면, IAEA-455의 경우 충전밀도가 효율 교정 선원보다 작더라도 저에너지 영역에 대한 자체감쇠 보정인자가 1보다 작아지는 현상을 보였으며, 이는 저에너지 영역의 감마선에 대한 μ_l이 시료의 밀도뿐만 아니라 구성 성분에 따라 비교적 큰 차이를 보일 수 있기 때문이다(Carrazana González *et al*. 2010). 토양의 경우, 주요 구성요소인 SiO_2 외에 Ca와 Fe의 함유량 비율에 따라 저에너지 감마선에 대한 μ_l이 비교적 큰 차이를 보이게 되며 자체감쇠 보정인자 차이의 원인이 될 수 있다(Al-Masri *et al*. 2013). Tables 3~7은 각 IAEA RM 시료에 대하여 CT 방법에 의해 산출된 자체감쇠 보정인자 적용 여부에 따라 분석한 방사능농도와 기준 방사능농도의 비교 결과를 보여준다. 효율교정선원과 각 RM 시료의 자체감쇠 차이를 보정하지 않았을 경우, 분석된 방사능농도와 기준 방사능농도의 최대 차이는 분석

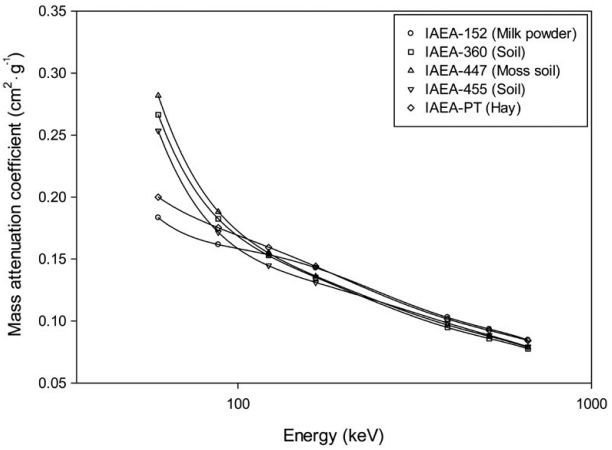

Fig. 3. The mass attenuation coefficients (μ_m) versus the energy for IAEA RM samples.

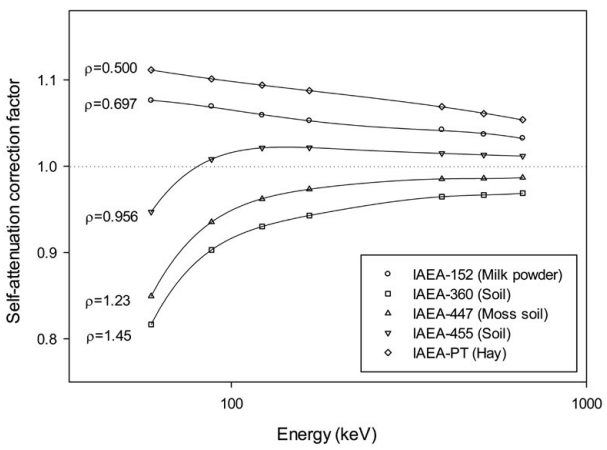

Fig. 4. Self-attenuation correction factors of the IAEA-RM samples in energy ranges from 59.5 keV to 661.7 keV.

Table 3. Comparison of radioactivity analysis results with and without the self-attenuation correction for the IAEA-152 (milk powder) sample with an apparent density of 0.697 $g\cdot cm^{-3}$

Nuclide	Energy (keV)	Activity ($Bq\cdot g^{-1}$), $k=1$			Difference (%)	
		Without correction	With correction	Reference value	Without correction	With correction
^{241}Am	59.5	1.76±0.05	1.63±0.06	1.59±0.02	10.8	3.0
^{109}Cd	88	23.8±0.2	22.3±0.5	21.8±0.3	9.2	2.2
^{57}Co	122.1	0.552±0.004	0.521±0.011	0.508±0.004	8.5	2.5
^{113}Sn	391.7	1.42±0.01	1.36±0.03	1.33±0.02	6.6	2.3
^{85}Sr	514	1.79±0.05	1.73±0.06	1.70±0.02	5.4	1.7
^{137}Cs	661.7	1.81±0.09	1.76±0.04	1.73±0.04	4.7	1.4

Table 4. Comparison of radioactivity analysis results with and without the self-attenuation correction for the IAEA-360 (soil) sample with an apparent density of 1.45 $g \cdot cm^{-3}$

Nuclide	Energy (keV)	Activity ($Bq \cdot g^{-1}$), $k=1$			Difference (%)	
		Without correction	With correction	Reference value	Without correction	With correction
^{241}Am	59.5	0.560 ± 0.011	0.688 ± 0.020	0.700 ± 0.007	−20.0	−1.7
^{109}Cd	88	8.79 ± 0.09	9.75 ± 0.22	9.62 ± 0.13	−8.6	1.4
^{57}Co	122.1	0.211 ± 0.001	0.227 ± 0.005	0.224 ± 0.002	−6.0	1.2
^{113}Sn	391.7	0.568 ± 0.004	0.589 ± 0.013	0.588 ± 0.007	−3.4	0.1
^{85}Sr	514	0.727 ± 0.007	0.753 ± 0.017	0.750 ± 0.007	−3.0	0.4
^{137}Cs	661.7	0.299 ± 0.003	0.309 ± 0.007	0.304 ± 0.014	−1.6	1.6

Table 5. Comparison of radioactivity analysis results with and without the self-attenuation correction for the IAEA-447 (moss soil) sample with an apparent density of 1.23 $g \cdot cm^{-3}$

Nuclide	Energy (keV)	Activity ($Bq \cdot g^{-1}$), $k=1$			Difference (%)	
		Without correction	With correction	Reference value	Without correction	With correction
^{241}Am	59.5	0.671 ± 0.002	0.790 ± 0.003	0.803 ± 0.008	−16.4	−1.6
^{109}Cd	88	10.5 ± 0.2	11.3 ± 0.3	11.0 ± 0.2	−4.4	2.3
^{57}Co	122.1	0.252 ± 0.002	0.262 ± 0.006	0.257 ± 0.002	−2.2	1.7
^{113}Sn	391.7	0.669 ± 0.006	0.679 ± 0.015	0.674 ± 0.008	−0.8	0.7
^{85}Sr	514	0.820 ± 0.019	0.832 ± 0.026	0.859 ± 0.008	−4.6	−3.2
^{137}Cs	661.7	0.684 ± 0.004	0.694 ± 0.015	0.691 ± 0.019	−1.0	0.3

Table 6. Comparison of radioactivity analysis results with and without the self-attenuation correction for the IAEA-455 (soil) sample with an apparent density of 0.956 $g \cdot cm^{-3}$

Nuclide	Energy (keV)	Activity ($Bq \cdot g^{-1}$), $k=1$			Difference (%)	
		Without correction	With correction	Reference value	Without correction	With correction
^{241}Am	59.5	1.07 ± 0.031	1.13 ± 0.04	1.13 ± 0.06	−4.7	0.6
^{109}Cd	88	15.9 ± 0.4	15.8 ± 0.5	15.5 ± 0.2	2.7	1.9
^{57}Co	122.1	0.377 ± 0.003	0.369 ± 0.008	0.360 ± 0.003	4.6	2.4
^{113}Sn	391.7	0.976 ± 0.007	0.962 ± 0.021	0.945 ± 0.012	3.3	1.8
^{85}Sr	514	1.27 ± 0.05	1.25 ± 0.06	1.20 ± 0.01	5.4	4.0
^{137}Cs	661.7	0.593 ± 0.004	0.586 ± 0.012	0.574 ± 0.016	3.3	2.1

Table 7. Comparison of radioactivity analysis results with and without the self-attenuation correction for the IAEA-PT(hay) sample with an apparent density of 0.500 $g \cdot cm^{-3}$

Nuclide	Energy (keV)	Activity ($Bq \cdot g^{-1}$), k=1			Difference (%)	
		Without correction	With correction	Reference value	Without correction	With correction
^{241}Am	59.5	2.40 ± 0.06	2.16 ± 0.07	2.07 ± 0.02	15.7	4.1
^{109}Cd	88	32.8 ± 0.1	29.8 ± 0.6	28.5 ± 0.4	15.1	4.5
^{57}Co	122.1	0.757 ± 0.006	0.692 ± 0.015	0.665 ± 0.005	13.8	4.1
^{113}Sn	391.7	1.88 ± 0.01	1.76 ± 0.04	1.74 ± 0.02	8.0	1.0
^{85}Sr	514	2.35 ± 0.08	2.22 ± 0.09	2.22 ± 0.02	5.9	0.1
^{137}Cs	661.7	1.70 ± 0.01	1.62 ± 0.03	1.58 ± 0.05	7.5	2.0

대상 핵종 중 가장 낮은 에너지를 방출하는 ^{241}Am에서 보였으며, IAEA-152 (우유분말), IAEA-360 (토양), IAEA-447 (이끼 토양), IAEA-455 (토양) 및 IAEA-PT (건초) 시료에 대하여 각각 10.8%, −20%, −16.4%, −4.7% 및 15.7%의 차이를 보였다. 본 연구를 통해 산출한 μ_m을 적용하여 자체감쇠 보정을 통해 산출된 방사능농도는 전 시료 및 핵종에 대하여 5% 이내로 분석결과와 기준 값이 일치함을 보였다.

결 론

본 연구를 통해 CT (Calibration Transmission) 방법

을 이용한 미지의 구성원소를 갖는 IAEA RM (Reference Material)-건초, 우유분말, 토양-시료에 대하여 질량감쇠계수를 결정하고 자체감쇠 보정에 적용한 결과 본 연구에서 사용한 시료에 대하여 최대 20%의 정확도가 향상됨을 확인하였다. 또한, 본 연구에서 사용된 시료에 대하여 약 100 keV를 기준으로 감마선에너지가 작아질수록 분석대상 시료의 밀도와 구성원소에 따라서 자체감쇠 효과가 큰 영향을 받는 것을 확인하였다. 그러므로, 특히 저에너지 감마선을 방출하는 핵종에 대한 감마선분광분석을 수행할 경우 동일한 종류의 환경시료라도 보다 정확한 감마선분광분석을 위해서는 해당 시료에 대한 질량감쇠계수 산출이 필요하다. 본 CT 방법을 이용한 질량감쇠계수 산출 및 자체감쇠 보정법은 고정밀의 콜리메이터(collimator) 시스템 및 고 방사능의 감마선원을 사용하지 않고 약 37 kBq의 밀봉감마선원을 이용하여 신속하고 용이하게 활용할 수 있으므로 일반 환경실험실에서 감마선분광분석의 정확성 향상을 위해 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

Al-Masri MS, Hasan M, Al-Hamwi A, Amin Y and Doubal AW. 2013. Mass attenuation coefficients of soil and sediment samples using gamma energies from 46.5 to 1332 keV. *J. Environ. Radioact.* **116**:28-33.

Berger MJ, Hubbel JH, Seltzer SM, Chang J, Coursey JS, Sukumar R, Zucker DS and Olsen K. 2010. XCOM: photon cross section database(version 1.5). National Institute of Standards and Technology. Gaithersburg. http://physics.nist.gov/xcom.

Byun JI and Yun JY. 2015. A calibration transmission method to determine the gamma-ray linear attenuation coefficient without a collimator. *Appl. Radiat. Isot.* **102**:70-73.

Carrazana González J, Cornejo Díaz N, Jurado Vargas M and Capote Ferrera E. 2010. The effect of source chemical composition on the self-attenuation corrections for low-energy gamma-rays in soil samples. *Appl. Radiat. Isot.* **68**: 360-363.

Cutshall NH, Larsen IL and Olsen CR. 1983. Direct analysis of ^{210}Pb in sediment samples: Self-absorption corrections. *Nucl. Instr. Method. Phys. Res.* **206**(1-2):309-312.

Debertin K and Helmer RG. 1988. Gamma- and X-ray spectrometry with semiconductor detectors. Amsterdam. North-Holland Publishing Company. 281-286.

Hubell JH. 1982. Photon mass attenuation and energy-absorption coefficients from 1 keV to 20 MeV. *Appl. Radiat. Isot.* **33**(11):1269-1290.

Received: 14 June 2018
Revised: 2 July 2018
Revision accepted: 10 July 2018