

$^{238,235}\text{U}$, ^{232}Th 과 ^{40}K 의 베타선 및 감마선에 의한 토양의 흡수선량 환산 인자

김기동★ · 음철현 · 방준환

한국지질자원연구원 지질특성분석센터
(2007. 9. 14. 접수. 2007. 10. 8. 승인)

Dose rate conversion factor for soil by the beta-rays and gamma-rays from $^{238,235}\text{U}$, ^{232}Th and ^{40}K

Gi-Dong Kim★, Chul-Hun Eum and Jun-Hwan Bang

Geochemical Analysis Center, Korea Institutes of Geoscience, and Mineral Resources
30 Gajeong-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-350, Korea
(Received September 14, 2007; Accepted October 8, 2007)

요 약: 자연계에 존재하는 ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th 그리고 ^{40}K 의 감마선과 베타선에 대해 토양의 흡수선량을 평가하기 위한 유효 흡수선량 환산인자를 계산하였다. 이 때 감마선과 베타선에 대한 붕괴당 에너지, 반감기, 분기율등의 핵자료들은 National Nuclear Data Center (NNDC)의 최근 자료들을 이용하였다. 본 연구에서 계산한 흡수선량 인자 및 이를 이용하여 얻은 ^{238}U , ^{232}Th 그리고 ^{40}K 의 베타선과 감마선에 유효 흡수선량은 1998년 Aitken의 결과와 비교적 잘 일치하였지만, ^{235}U 의 경우는 많은 차이가 있음을 확인하였다. 한국 충북 청원군 오성에 있는 선사유적지(만수리) 내의 토양에 대해 고 분해능 감마선 분광 분석 장치(HP Ge 검출기)로 지각 방사선의 감마선 스펙트럼을 측정하고, 계산된 유효 흡수선량 환산인자를 이용하여 연간방사선량을 평가하였는데, 연간방사선량이 3.8~5.9 mGy/year으로 평가되었다. 또한 Rn 이하의 붕괴 핵종을 포함하여 연간방사선량을 평가하는 경우와, 이를 포함하지 않고 연간방사선량을 평가하는 경우는 9~30% 차이를 나타내었다. 이 흡수선량 환산인자로 토양에 존재하는 자연 방사성 동위원소들의 베타선과 감마선에 대한 유효 흡수선량 평가법이 확립하였다.

Abstract: Dose rate conversion factor was calculated to estimate the absorbed effective annual doses for soils for the beta-rays and gamma-rays, which were emitted from $^{238,235}\text{U}$, ^{232}Th , and ^{40}K isotopes. The most recent data of the emitted energies per decay, half-lives, and branching ratios, which were obtained from National Nuclear Data Center, were used. When this factor and the effective annual doses for the beta-rays and the gamma-rays of natural radioisotopes were compared with those of Aitken, these of ^{238}U , ^{232}Th and ^{40}K are estimated to have good agreements but a large difference is shown in this for ^{235}U . Through the calculations of effective annual doses by using these factor and the measurements of gamma-ray spectra for soils, which were extracted from prehistoric remains (Mansuri) on Osong, Chungcheongbuk-do, The annual effective doses

★ Corresponding author

Phone : +82-(0)42-868-3665 Fax : +82-(0)42-868-3393

E-mail : gdkim@rock25t.kigam.re.kr

were obtained to be 3.8~5.9 mGy/yr. Also, when these doses including decay elements upper Rn were compared with those on all isotopes, the differences within 9~30 % were obtained. The analysis method of the annual effective doses for the beta-rays and the gamma-rays of the natural isotopes of soils was established by this dose rate conversion factor.

Key words: Dose rate conversion factor, beta-ray, gamma-ray, annual effective dose of soil

1. 서 론

자연 방사선인 ^1H , ^7Be , ^{14}C , ^{22}Na 와 같은 핵종들은 우주에 존재하는 높은 에너지를 가진 양성자나 중성자와 같은 우주 방사선들에 의해서 대부분 만들어지며, ^{238}U , ^{235}U 과 ^{232}Th 같은 방사선들은 지구가 만들어질 때 핵융합 현상에 의해서 생성된다. ^{238}U , ^{235}U 과 ^{232}Th 같은 핵종들은 지구의 나이에 비해서 그 반감기가 상당히 커서, 오늘날 아직도 지구에서 발견되며, 알파, 베타붕괴들을 일으켜, 그들을 형성하고 있는 주변 물질들에 다양한 방사선들을 조사하게 된다. 특히 토양은 토질의 종류에 따라 ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th 및 ^{40}K 등을 함유하고 있는 상대적인 분포 차이가 있어, 흡수선량에서 큰 차이를 보인다. 화강암, 혈암과 인산염암 등이 비교적 높은 수준 방사선량을 흡수하는 반면에, 퇴적물로 이루어진 암석의 경우는 그 수준이 낮은 것으로 보고되고 있다.¹ 또한 이들 중 일부는 대기로 이동하여 공기에 영향을 주게 되는데, 공기에서는 토양에 비해 1/10 정도의 흡수선량을 나타내는 것으로 보고되고 있다.²

따라서 토양의 흡수선량은 방사선 방호 측면에서 뿐만 아니라, 최근 연대 측정법의 하나로 한창 부각되고 있는 Optical Stimulated Luminescence(OSL)법^{3,4}에 반드시 필요한 인자여서, 많은 연구자들이 이를 연구하여 왔다.⁵ 하지만 토양의 흡수선량을 평가하는 핵자료에 대한 측정 방법들이 매년 개선되어, 이전 보다 높은 정밀도와 정확도를 갖는 핵자료들이 축적되고 있어,⁶ 최근 핵자료에 의한 흡수선량 인자가 새로 만들어질 필요가 생겼다.

일반적으로 흡수선량 환산인자란 붕괴당 흡수선량 인자를 말하는데, 토양 내에 존재하는 U, Th 및 K를 정량하면 토양의 총 흡수선량을 계산할 수 있다. 토양 내의 U, Th 및 K의 방사선의 양을 측정하는 방법으로는 ICP (Induced Couple Plasma) 장치를 이용하는 방법과 감마선 분광 분석 장치를 이용하는 방법이 있는데, ICP를 이용하는 방법은 K, U 및 Th의 총량을

측정하고, 자연계 내에 존재하는 비율로 ^{40}K , ^{238}U , ^{235}U 과 ^{232}Th 량을 계산하여 흡수선량을 얻는 방법이다. 하지만 이 방법은 토양 내에 존재하는 동위원소 분포 비율이 다르든지, 붕괴 도중 빠져 나가버리는 Rn의 거동에 따라 흡수선량에 많은 오차를 유발할 수 있다. 하지만 감마선 분광 분석 장치인 고 분해능 감마선 검출기(High purity Ge 검출기)를 이용하는 경우에는 붕괴 도중에 있는 각 동위원소들에 대한 거동을 함께 조사할 수 있어 이런 단점을 해소할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 비교적 동위원소들의 붕괴 거동에 충실한 정보를 가지는 감마선 분광법을 이용하여 충청북도 청원군 오송 선사유적지(만수리)내의 토양에 존재하는 ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th 그리고 ^{40}K 의 핵종 및 그들의 딸 핵종에 대한 감마선 스펙트럼을 측정하고, 이 방사성 동위원소들에 대해 토양내의 흡수선량 환산인자를 NNDC (national nuclear data center)에 보고⁶된 가장 최근 자료로 계산한 후, 연간 유효 흡수선량을 평가하였다.

2. 흡수선량 인자 계산

지구의 생성시 태초부터 만들어진 방사성 동위원소 ^{232}Th , ^{238}U 과 ^{235}U 들의 붕괴 고리를 Fig. 1에 나타내었는데, 알파와 베타 붕괴를 주로 하고 있지만, 알파나 베타 붕괴시 감마붕괴, 내부 전환 전자, Auger 전자 등이 방출되는 경우도 있다. Auger 전자 및 내부 전환 전자에 의한 흡수선량 인자 계산은 방출되는 방사선들이 모두 전자이므로 베타선에 합쳐서 계산하였다.

그리고 NNDC의 베타와 감마선 붕괴당 에너지를 이용하여, 흡수선량 환산인자를 계산하였는데, 이때 알파 붕괴와 베타 붕괴가 같이 일어나는 경우는 그 분기율로 붕괴당 에너지를 배분하여 흡수선량 인자를 계산하였다. 흡수선량 인자를 계산할 경우 생기는 오차는 NNDC 측정 핵자료의 오차가 상당히 작아서 (0.01 % 이내) 고려하지 않았다.

토양 속에 존재하는 ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th 그리고 ^{40}K 등

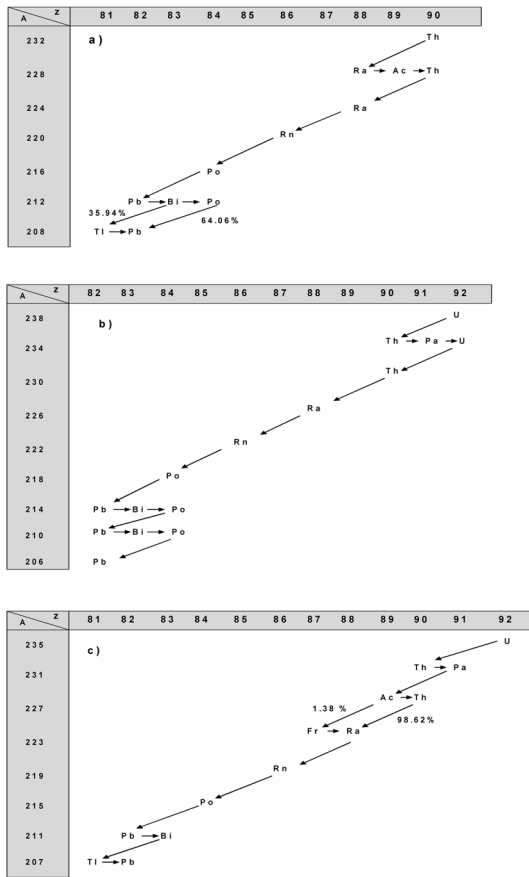


Fig. 1. Decay diagrams of a) ²³²Th, b) ²³⁸U, and c) ²³⁵U.

에서 붕괴되는 알파 입자들의 평균에너지는 4~6 MeV 이고, 감마선은 2 MeV이하의 에너지를 나타내지만, 베타입자는 2 MeV이내의 연속적인 에너지 분포를 갖는다. 따라서 알파 입자들은 토양에서 수 um까지, 베타선의 경우는 30 cm까지, 감마선의 경우는 3 m까지 영향을 미치는 것으로 보고하고 있다.⁷

또한 토양의 많은 부분을 구성하는 SiO₂(수정)과 Al₂O₃(장석)들이 토양 속에 존재하는 자연방사선들에 대한 센서로 이용되어질 수 있는데(OSL법),⁸ 수정이나 장석에서 발현하는 형광을 이용하여, 토양에서 방출되는 방사선에 대한 흡수선량을 측정, 분석할 수 있다.⁷ 따라서 방사선에 민감한 형광량을 분석하기 위해서는 수정이나 장석의 표피 부분에 존재하는 여러 가지 불순물들이 제거되어야만 하는데, 일반적으로 불산으로 녹이는 방법을 사용한다. 이 때 표피에서 가장 짧게 영향을 미치는 알파나 베타 입자에 의한 흡수선량 역시 함께 제거가 되므로, 흡수선량 인자를 계산할 경우에

이를 고려하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 흡수선량 인자를 계산할 경우에 알파선에 의한 영향은 고려하지 않았고, 베타선의 경우도 제거되는 확률을 고려하여 계산하였다.

3. 실험

3.1. 감마선 분광 분석 장치

자연방사선에 의한 토양의 흡수선량을 평가하기 위해서는 시료 무게당 감마선 방사능을 구하여야 하는데, 본 연구에서는 감마선 분광분석법을 이용하였다. 사용한 장치는 30 % HP Ge (Canberra GMX series) 장치를 이용하였고, Genie 2000 이란 software를 이용하여 분석하였다. 이 장치의 에너지 분해능과 각 에너지에 대한 효율은 한국 표준과학 연구원에서 제작한 450 mL 마리넬리 비이커 표준 시료를 이용하여 교정하였다. 표준 시료 속에는 ⁶⁰Co(감마 에너지 1.173 MeV, 1.333 MeV), ²³⁵Np(감마 에너지 58.57 keV), ¹⁰⁹Cd(감마 에너지 88.04 keV), ⁵⁷Co(감마 에너지 122.06 keV, 136.474 keV), ¹³⁹Ce(감마 에너지 165.86 keV), ⁵¹Cr(감마 에너지 320.08 keV), ⁸⁵Sr(감마 에너지 514.06 keV), ¹³⁷Cs(감마 에너지 661.65 keV), ⁸⁸Y(감마 에너지 898.02 keV, 1836.01 keV) 등의 방사성 동위원소들이 존재한다. 이 표준 시료로부터 얻어진 에너지 교정식은 (식 1)에, 절대 효율은 Fig. 2에 표시하였다. (식 1)에서 ch #은 다중과고 분석기의 channel number를 나타내며, 에너지 단위는 keV이다. 절대 효율을 구할 경우는 122.06 keV 기준으로 그 아래와 위를 두 구간으로 나누어서 다항식과 지수적 감소함수를 이용하여 fitting하여 얻었다.

$$E \text{ (keV)} = 0.2746 + 0.2441 \times \text{ch\#} + 3.057 \times 10^{-20} \times \text{ch\#}^2 - 2.524 \times 10^{-24} \times \text{ch\#}^3 \quad (1)$$

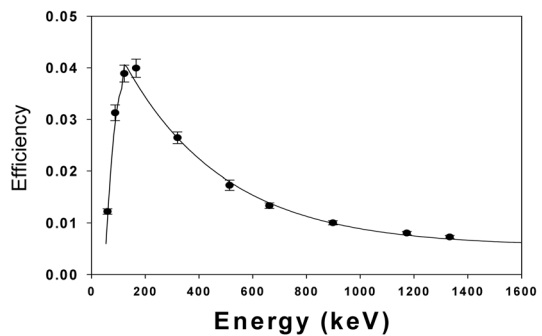


Fig. 2. Absolute efficiency for HP Ge detector.

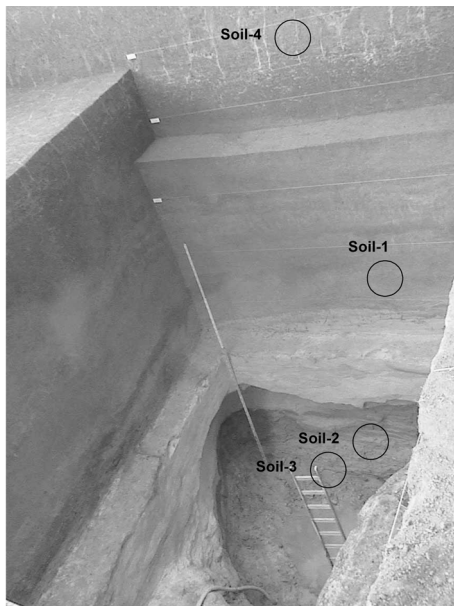


Fig. 3. Osong site for soil sampling.

3.2. 흡수선량 측정을 위한 토양 샘플 채취

토양의 연간방사선선량을 평가하기위해서 우리나라의 선사시대 유적지의 하나로 최근 알려지기 시작한 충청남도 청원군 오송(만수리)에서 토양을 채취하였다. 토양의 채취는 지하 10 m에서 20 m 사이의 4 군데에서 이루어졌으며(Fig. 3 참조), 2 kg 정도였다. 공기 중에서 하루 말린 후, 2 시간 동안 전기 오븐에서 100 °C로 건조시켜, 이중 일부분을 1.44 mm 체로 쳐서, 450 mL 비이커에 들어갈 정도로 채웠다. 건조 전 후

의 무게를 측정하여 수분율을 산정하였다. 감마선 스펙트럼은 80,000초 동안 측정하였으며, 이 때 background도 같은 시간 측정하여 방사능 계산시 보정하여 주었다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 등위 원소에 대한 NNDC 자료

일반적으로 등위원소가 감마나 알파 붕괴할 경우에는 정해진 에너지를 방출하지만, 베타 붕괴의 경우는 중성미자를 동반하기 때문에 다양한 에너지를 갖는다. 이들 에너지를 다른 연구자들이 측정하여, National Nuclear Data Center(NNDC)에 보고하고 있다.⁶ 최근의 자료일수록 가장 새로운 방법으로 정밀하게 측정된 자료이므로, 본 연구에서 2007년 8월에 보고된 자료를 이용하였다.⁶ 자연방사선들에 대한 붕괴 핵자료와 1998년 Aitken이 인용한 붕괴 핵자료를 비교하여, Table 1(^{232}Th), Table 2(^{238}U), Table 3(^{235}U), Table 4(^{40}K)에 나타내었다. 여기서 $^{234\text{m}}\text{Pa}$ 은 반감기가 다른 ^{234}Pa 의 이성체를 나타내며, 등위원소 아래의 괄호 안의 숫자는 분기율을 나타낸다. 또한 -는 아직까지 확인된 붕괴 핵자료가 존재하지 않음을 의미한다. KIGAM에서 계산한 붕괴핵자료는 keV 단위 까지만 표현하였다. Aitken의 자료⁵와 비교했을 때, 비교적 비슷한 값을 나타내고 있으나, ^{232}Th 붕괴시 ^{212}Bi 의 경우가 가장 큰 차이를 보였고, 특히 ^{235}U 의 붕괴 핵자료가 다른 등위원소의 붕괴 핵자료에 비해 큰 차이를 보였다.

Table 1. Decay characteristics of ^{232}Th

Isotope	Half-life	Beta decay (MeV/decay)		Gamma decay (MeV/decay)	
		Aitken ⁵	KIGAM	Aitken ⁵	KIGAM
^{232}Th	14.5 Gyr	-	0.034	$<5*10^{-4}$	0.001
^{228}Ra	5.75 yr	0.010	0.009	0.001	0.000
^{228}Ac	6.15 d	0.413	0.417	0.854	0.861
^{228}Th	1.91 d	0.019	0.020	0.003	0.003
^{224}Ra	3.66 d	0.002	0.002	0.010	0.010
^{220}Rn	55.6 s	-	-	0.001	0.001
^{216}Po	0.145 s	-	-	$<5*10^{-4}$	0.000
^{212}Pb	10.6 h	0.173	0.172	0.144	0.144
^{212}Bi	60.6 m	0.502	0.325	0.103	0.104
^{212}Po (0.6406)	0.299 m	-	-	-	-
^{208}Tl (0.3594)	3.05 m	0.209	0.209	1.205	1.207
Total		1.33	1.188	2.320	2.331
Pre-Rn total		0.444	0.482	0.868	0.875

Table 2. Decay characteristics of ^{238}U

Isotope	Half-life	Beta decay (MeV/decay)		Gamma decay (MeV/decay)	
		Aitken ⁵	KIGAM	Aitken ⁵	KIGAM
^{238}U	4.468 Gyr	0.007	0.007	0.0011	0.001
^{234}Th	24.1 d	0.060	0.060	0.0093	0.010
$^{234\text{m}}\text{Pa}$	1.17 m	0.818	0.818	0.0161	0.016
^{234}Pa (0.016)	6.75 h	0.001	0.001	0.0023	0.002
^{234}U	246 kyr	0.012	0.012	0.0015	0.001
^{230}Th	75.4 kyr	0.013	0.013	0.0014	0.001
^{226}Ra	1600 yr	0.0038	0.004	0.0074	0.007
^{222}Rn	3.82 d	-	-	0.0004	0.000
^{218}Po	3.11 m	-	-	-	-
^{214}Pb	26.8 m	0.294	0.294	0.2521	0.251
^{214}Bi	19.9 m	0.652	0.652	1.4814	1.478
^{214}Po	164 ms	$<5 \times 10^{-4}$	-	0.0001	0.000
^{210}Pb	22.3 yr	0.033	0.033	0.0047	0.005
^{210}Bi	5.01 d	0.389	0.389	-	-
^{210}Po	138.4 d	$<5 \times 10^{-4}$	0.000	$<5 \times 10^{-5}$	0.000
Total		2.28	2.283	1.780	1.772
Pre-Rn total		0.906	0.915	0.037	0.038

Table 3. Decay characteristics of ^{235}U

Isotope	Half-life	Beta decay (MeV/decay)		Gamma decay (MeV/decay)	
		Aitken ⁵	KIGAM	Aitken ⁵	KIGAM
^{235}U	704 Myr	0.037	0.033	0.180	0.163
^{231}Th	25.5 h	0.1506	0.146	0.028	0.022
^{231}Pa	32.8 kyr	0.032	0.032	0.040	0.039
^{227}Ac	21.8 yr	$<5 \times 10^{-4}$	0.010	$<5 \times 10^{-4}$	0.000
^{227}Th (0.9862)	18.7 d	0.028	0.050	0.108	0.157
^{227}Fr (0.0138)	21.8 m	0.006	0.005	0.001	0.001
^{223}Ra	11.4 d	0.066	0.068	0.137	0.135
^{219}Rn	3.96 s	0.007	0.062	0.058	0.538
^{215}Po	1.78 ms	-	-	$<5 \times 10^{-4}$	-
^{211}Pb	36.1 m	0.455	0.450	0.064	0.064
^{211}Bi	2.14 m	0.001	0.013	0.047	0.047
^{207}Tl	4.77 m	0.494	0.495	0.002	0.002
Total		1.27	1.364	0.665	1.168
Pre-Rn total		0.319	0.344	0.493	0.517

Table 4. Decay characteristics of ^{40}K

Isotope	Half-life	Beta decay (MeV/decay)		Gamma decay (MeV/decay)	
		Aitken ⁵	KIGAM	Aitken ⁵	KIGAM
^{40}K	1.277 Gyr	0.501	0.500	0.156	0.156

4.2. K, Th, 및 U에 대한 흡수선량 비교

NNDC에서 보고⁶된 자료를 이용하여 ^{40}K , ^{238}U , ^{235}U , 및 ^{232}Th 에 대해서 토양의 유효 흡수 선량을 계산하였다. 이 결과를 Aitken의 계산 결과와 비교하여

Table 5에 나타냈었다. 유효 흡수선량(effective dose rate)을 계산할 때, grain 사이즈가 큰 경우(150~200 μm)는 베타선이 방출되면서 자체 흡수되는 비율과 화학적 etching 과정에서 소멸되는 량을 고려하여 방출

Table 5. Comparison of the effective dose calculated by KIGAM with that of Aitken

Nuclear	Concentration	Effective dose rates (mGy/yr)			
		Beta-ray		Gamma-ray	
		Aitken ⁵	KIGAM	Aitken ⁵	KIGAM
K	1 %	0.782	0.779	0.243	0.243
Th	3 mg/kg	0.082	0.082	0.143	0.143
U	1 mg/kg	0.145	0.143	0.113	0.111
total		1.009	1.004	0.499	0.497

되는 베타선의 90 %만 토양에 흡수된다고 가정하였다.⁵ Aitken 자료⁵와는 비교적 잘 일치함을 볼 수 있었으나, 베타선과 감마선 모두 약간 적게 평가되었다. 이 때 함량은 K의 경우는 1%로, Th의 경우는 3 mg/kg으로, U의 경우는 1 mg/kg으로 계산하였다. Th에서 ²³²Th의 경우는 무게비로 100% 존재하며, U의 경우는 ²³⁸U 이 99.29%, ²³⁵U 이 0.71% 존재하는 것으로 보고⁷하고 있다. ⁴⁰K의 경우는 K 속에 0.119 mg/g 존재하는 것으로 알려져 있다.⁷

4.3. 오송 토양의 연간 유효 흡수선량

측정 감마선 스펙트럼으로부터 방사능 계산에 이용되는 감마선 에너지는 발생 감마선 모두를 측정하면 좋으나, 에너지 분해능뿐 만 아니라, 실제 함유하고 있는 물질의 방사능에 따라 측정이 용이하지 않을 수 있고, 핵종들의 붕괴시 모핵보다 딸핵의 반감기가 짧으면, 영년 평형이 일어나, 딸핵의 방사능으로부터 모핵의 방사능도 쉽게 얻을 수 있으므로, Table 6에서 나타낸 핵종만 선택하여 측정하였다. 선택된 핵종 중에서 존재비가 3% 미만의 붕괴에너지에 대해서는 방사능 계산시 고려하지 않았다. 선택된 핵종은 기체인 Rn 을 중심으로 윗 쪽에서 한 핵종과 아래쪽에서 두 핵종을 선택하였다. 윗 쪽의 경우 모핵부터 그 핵종까지는 한 핵종에 대한 측정값을 모두에 적용하여 계산하고, 아래 쪽에서는 두 핵종의 평균값을 적용하여 계

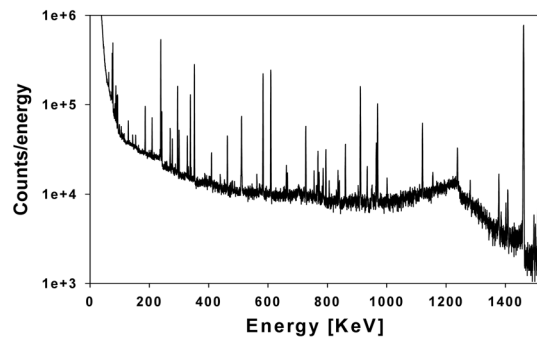


Fig. 4. Gamma-ray spectrum of Osong soil-1 by HP Ge.

산하였다. 또한 ²³⁵U에 대한 유효 흡수선량은 ²³⁸U과 ²³⁵U의 존재비를 이용하여 계산하였다. Fig. 3은 실제 토양시료로부터 측정된 감마선 스펙트럼을 나타내고 있다. 이로부터 시료의 단위 무게당 방사능을 Genie 2000 프로그램을 이용하여 얻었는데, 이는 Table 6에 나타내었다. 오차는 표준 오차 (1σ이내)를 의미한다.

Rn의 경우는 기체이므로, 토양의 공극률이 클수록 토양 밖으로 방출할 수 있는 가능성이 많은 동위원소이다. ²³⁸U 붕괴의 경우에 Rn을 기준으로 윗 쪽 동위원소들의 방사능과 아래쪽에 존재하는 동위원소들에 대한 방사능을 비교하면 많은 차이를 나타내었지만, Rn 아래쪽에 존재하는 두 동위원소들 (²¹⁴Bi, ²¹⁴Pb)에 대해서는 비슷한 측정량을 나타내므로, Rn이 토양으

Table 6. Activities per sample weights of soil samples

Isotope	Emitted main energy (MeV)	Soil-1 (Bq/kg)	Soil-2 (Bq/kg)	Soil-3 (Bq/kg)	Soil-4 (Bq/kg)	Related nuclear
⁴⁰ K	1.4600	1219.4 ± 48.6	1057.4 ± 42.3	1198.2 ± 48.0	680.8 ± 27.6	⁴⁰ K
²²⁸ Ac	0.9112	36.6 ± 0.7	105.3 ± 1.4	111.3 ± 1.6	98.2 ± 1.4	²³² Th
²¹² Pb	0.2386	30.5 ± 1.3	89.1 ± 3.2	77.1 ± 3.2	85.3 ± 3.1	²³² Th
²⁰⁸ Tl	0.5831	11.5 ± 0.4	37.0 ± 0.8	37.5 ± 0.9	32.0 ± 0.8	²³² Th
²²⁶ Ra	0.1862	44.4 ± 5.0	168.9 ± 15.9	172.3 ± 16.4	150.5 ± 14.5	²³⁸ U
²¹⁴ Pb	0.3520	19.2 ± 0.6	63.5 ± 1.8	71.4 ± 2.0	60.8 ± 1.7	²³⁸ U
²¹⁴ Bi	0.6093	18.0 ± 0.5	65.7 ± 1.2	75.6 ± 1.3	62.1 ± 1.1	²³⁸ U

Table 7. Effective dose rates for gamma-rays and beta-rays of soil samples. Effective dose rate⁵ was obtained by 0.9 x beta-ray sum + gamma-ray sum in all cases. Errors mean standard errors of radioactivities per sample weights within 1 σ . Errors of sum and effective dose were obtained by using error propagation formula for error of gamma-ray and that of beta-ray

Sample	Isotope	Beta-ray (mGy/yr)	Gamma-ray (mGy/yr)	Pre-Rn Beta-ray (mGy/yr)	Pre-Rn Gamma-ray (mGy/yr)	
Soil-1	⁴⁰ K	3.080±0.123	0.961±0.038	3.080±0.123	0.961±0.038	
	²³² Th	0.156±0.004	0.266±0.006	0.083±0.001	0.162±0.003	
	²³⁸ U	0.333±0.027	0.168±0.006	0.205±0.023	0.009±0.001	
	²³⁵ U	0.001±0.000	0.001±0.000	0.001±0.000	0.001±0.000	
	Sum	3.570±0.126	1.396±0.039	Pre-Rn Sum	3.369±0.125	1.133±0.038
	Effective dose rate	4.609±0.120		Pre-Rn Effective dose rate	4.165±0.119	
Soil-2	⁴⁰ K	2.671±0.107	0.833±0.033	2.671±0.107	0.833±0.033	
	²³² Th	0.453±0.010	0.790±0.014	0.238±0.003	0.465±0.006	
	²³⁸ U	1.230±0.083	0.606±0.014	0.781±0.074	0.033±0.003	
	²³⁵ U	0.004±0.000	0.005±0.000	0.002±0.000	0.003±0.000	
	Sum	4.358±0.136	2.234±0.039	Pre-Rn Sum	3.692±0.130	1.334±0.034
	Effective dose rate	6.156±0.128		Pre-Rn Effective dose rate	4.657±0.122	
Soil-3	⁴⁰ K	3.027±0.121	0.944±0.038	3.027±0.121	0.944±0.038	
	²³² Th	0.452±0.011	0.867±0.016	0.252±0.004	0.492±0.007	
	²³⁸ U	1.308±0.087	0.690±0.016	0.797±0.076	0.033±0.003	
	²³⁵ U	0.005±0.000	0.005±0.000	0.002±0.000	0.003±0.000	
	Sum	4.792±0.149	2.506±0.044	Pre-Rn Sum	4.078±0.143	1.472±0.039
	Effective dose rate	6.819±0.141		Pre-Rn Effective dose rate	5.142±0.134	
Soil-4	⁴⁰ K	1.720±0.070	0.537±0.022	1.720±0.070	0.537±0.022	
	²³² Th	0.427±0.010	0.723±0.014	0.222±0.003	0.434±0.006	
	²³⁸ U	1.122±0.076	0.571±0.013	0.696±0.067	0.029±0.006	
	²³⁵ U	0.004±0.000	0.004±0.000	0.002±0.000	0.003±0.000	
	Sum	3.273±0.104	1.835±0.029	Pre-Rn Sum	2.640±0.097	1.003±0.023
	Effective dose rate	4.781±0.098		Pre-Rn Effective dose rate	3.379±0.090	

로부터 방출된 것으로 생각되었다. 이 측정 자료와 환산인자를 이용하여 얻은 토양의 유효 흡수선량을 Table 7에 나타내었는데, Rn 이하의 동위원소를 포함하지 않는 유효 흡수선량과(pre-Rn)와 포함하는 유효 흡수선량과는, 9~30% 정도의 차이가 나타났다. 유효 흡수선량의 오차는 오차 전과식을 이용하여 얻었다.

또한 실제 토양 속에는 수분이 산재되어 있으면, 주변 방사선에 의한 흡수선량은 상당량 감소한다. 이 양은 밀도를 이용하여 보정해 주었으며, Table 8에 그 결과를 표시하였다. 이때 토양의 평균 밀도는 2.6 g/cm³으로 계산하고, 그 부피를 감소된 건조 전 후의 무게를 이용하여 계산하였다. 오송 토양 시료로부터 얻어진 토양의 유효 흡수선량은, 3.8~5.9 mGy/year로 얻어졌다. 이는 전 세계적으로 분포하는 토양의 흡수선량⁹⁻¹¹ 0.1~7 mGy/year에 비해 조금 큰 값에 해당되었다.

Table 8. Effective dose rates for Osong soil samples with water corrections

Sample	Effective dose rate (mGy/yr)	Correction rate by water	Effective dose rate with correction (mGy/yr)
Soil-1	4.609±0.120	1.062	4.340±0.113
Soil-2	6.156±0.128	1.172	5.252±0.109
Soil-3	6.819±0.141	1.151	5.924±0.123
Soil-4	4.781±0.098	1.255	3.810±0.078

5. 결 론

본 연구에서는 NNDC 핵자료를 이용해서 토양의 유효 흡수선량 인자를 계산하였고, 이 결과를 이용하여 선사 유적지(만수리) 중의 하나인 충청북도 청원군 오송 토양을 분석하였다. 본 연구에서 얻어진 유효 흡수선량 인자는 가장 최근까지 보고된 핵자료를 이용

하여 계산한 결과로, 보다 정확한 유효 흡수선량 인자라 평가할 수 있다. 이 유효 흡수선량 인자로 오송 토양의 유효 흡수선량을 평가한 결과, Rn 붕괴 이전 핵종들만 포함하는 토양의 유효 흡수선량과 Rn 붕괴 이후의 모든 동위원소를 포함하는 유효 흡수선량과는 9~30 % 정도 차이가 남을 알 수 있었다. 그리고 유효 흡수선량 계산시는 토양의 수분 양을 보정하여 토양의 유효 흡수선량을 얻었는데, 약 3.8~5.9 mGy/yr를 나타내었다. 이것은 전 세계적으로 분포하는 자연방사능에 의한 토양의 흡수선량 범위 내에 들어가나, 비교적 큰 값에 해당되었다.

본 연구에서는 가장 최근 핵자료를 이용하여, 유효 흡수선량 환산 인자를 만들어냄으로서, 자연 방사성 동위원소들의 베타선과 감마선에 대한 토양의 유효 흡수선량 평가법이 확립되었다. 이 유효 흡수선량 환산인자는 특히 OSL 법을 이용한 토양의 연대 측정법에 많이 이용될 수 있을 것으로 생각한다. 하지만 더 정확한 값을 얻기 위해서 알파 입자에 의한 유효 흡수선량 인자도 추가되어야 하며, 이는 크기가 작은 (10 μm 이내) 토양 샘플로부터 그 타당성을 평가할 수 있다. 또한 보다 더 정확한 평가를 위해서는 우주선 및 ^{67}Ru 에 대한 효과도 추가되어야 할 것으로 생각한다. 이는 토양에 존재하는 방사성 동위원소들이 주변 환경에 영향을 주는 방사선량 평가등의 방사선 방호 목적에 이용할 수 있어, 큰 의미를 줄 수 있다.

감사의 글

본 논문은 한국지질자원연구원의 기본사업인 “지질

특성 분석 선진화 및 표준화 사업(07-3412-11)”의 지원을 받아서 수행되어진 연구입니다.

참고문헌

1. A. M. El-Arabi, *Radiat. Meas.*, **42**, 94-100 (2007).
2. S. Singh, A. Rani and R. K. Mahajan, *Radiat. Meas.*, **39**, 431-439 (2004).
3. L. Botter-Jensen, C. E. Andersen, G. A. T. Duller and A. S. Murray, *Radiat. Meas.*, **37**, 535-541 (2003).
4. J. H. Choi, A. S. Murray, M. Jain, C. S. Cheong and H. W. Chang, *J. Quat. Sci. Rev.*, **22**, 407-421 (2003).
5. G. Adamiec and M. J. Aitken, *Ancient TL*, **16**(2), 37-50 (1998).
6. [Http://www.nndc.bnl.gov/database/dataes.html#structure-decay](http://www.nndc.bnl.gov/database/dataes.html#structure-decay).
7. M. J. Aitken, “An introduction to optical age dating”, Oxford university press, Oxford, 1998.
8. L. Botter-Jensen, D. Banerjeet, H. Junger and A.S. Murrays, *Radia. Pro. Dosim*, **84**(1~4), 537-542 (1999).
9. J. H. Choi, A. S. Murray, M. Jain, C. S. Cheong and H. W. Chang, *J. Quat. Sci. Rev.*, **22**, 407-421 (2003).
10. G. W. Berger, M. Melles, D. Banerjee, A. S. Murray and A. Raab, *J. Quat. Sci. Rev.*, **19**, 5, 513-523 (2004).
11. A. S. Murray, R. Johnston and P. Marten, *J. Radio. and Nucl. Chem.*, **115**, 263-288 (1987).