Printed in the Republic of Korea
ANALYTICAL SCIENCE & TECHNOLOGY
Vol. 30, No. 5, 262-269, 2017
https://doi.org/10.5806/AST.2017.30.5.262

Distribution of natural radionuclide in the Geum river sediment

Bitna Seol, Yoonhae Cho★, Kyungok Min, Wansuk Kim, Dayeon Oh, Gibeom Kil, Yunmo Yang, Junbae Lee, Byungik Kim, and Seok Cheon

Geum River Environment Research Center, National Institute of Environmental Research 182-18, Jiyong-ro, Gyodong-ri, Okcheon-eup, Okcheon-gun Chungcheongbuck-do 29027, Korea
(Received March 7, 2017; Revised June 9, 2017; Accepted June 30, 2017)

금강수계 퇴적물 중 천연 방사성핵종 분포 조사

설빛나 · 조윤해★ · 민경옥 · 김완석 · 오다연 · 길기범 · 양윤모 · 이준배 · 김병익 · 천세억

국립환경과학원 금강물환경연구소
(2017. 3. 7. 접수, 2017. 6. 9. 수정, 2017. 6. 30. 승인)

Abstract: The concentration of natural radioactivity in the sediment of the Geum River was investigated. The river and lake sediment samples were collected at 23 points during September to November, 2015 and March to April, 2015, respectively. The gamma-rays emitted from the ^{226}Ra and ^{232}Th decay series and ^{40}K were measured with a high purity germanium (HPGe) gamma detector. The average radioactivity concentrations of the ^{226}Ra, ^{232}Th decay series and ^{40}K for the river sediment was found to be 15.6 ± 0.6, 33.8 ± 1.2, 789.8 ± 26.0 Bq/kg, respectively, while for the lake sediment, the concentrations were 17.1 ± 0.5, 37.8 ± 1.1, 269.4 ± 9.6 Bq/kg, respectively. Spearman's correlation was conducted to compare the radioactivity concentration and properties of the sediment. The radioactivity concentration of the ^{232}Th decay series showed a negative correlation with the particle size of the sediment, and was measured to be higher than the ^{226}Ra decay series according to mobility of the radionuclides. The radioactivity concentration of ^{40}K showed a negative correlation with organic matter content. The concentration of ^{40}K in the lake sediment was lower than that in the river sediment.

요 약: 금강수계 하천 및 호소 퇴적물에 대하여 천연 방사성핵종 농도를 조사하였다. 조사의 대상이 되는 지점은 하천 17 개 지점, 호소 6 개 지점으로 총 23 개 지점이며, 하천은 2015년 9월부터 11월, 호소는 2015년 3월부터 4월까지 시료를 채취하였다. 분석 대상 핵종은 ^{226}Ra 계열, ^{232}Th 계열과 ^{40}K 핵종이며, 고순도 게르마늄 검출기(HPGe)를 이용하여 대상 핵종 또는 그 자핵종이 방출하는 감마선을 계측하였다. 분석 결과 하천 퇴적물 중 ^{226}Ra계열, ^{232}Th 계열과 ^{40}K의 방사성핵종 농도는 각각 15.6 ± 0.6, 33.8 ± 1.2, 789.8 ± 26.0 Bq/kg 으로 나타났으며, 호소 퇴적물의 농도는 각각 17.0 ± 0.5, 37.8 ± 1.1, 269.4 ± 9.6 Bq/kg 으로 나타났다. ^{232}Th 계열 방사성핵종의 농도는 퇴적물 입도와 연관성을 보였으며, 핵종의 이동 특성에 따라 ^{226}Ra 계열보다 높게 나타났다. ^{40}K의 농도는 퇴적물 중 유기물 함량과 관련을 보였으며, 하천에 비하여 호소에서 낮은 농도로 조사되었다.

Key words: natural radionuclide, Geum river, sediment, gammy-ray

★ Corresponding author
Phone : +82-(0)43-730-5642 Fax : +82-(0)43-733-9408
E-mail : yh.cho@korea.kr

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons. org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

www.kci.go.kr

1. 서 론

방사성핵종 중 우주 또는 지각에서 기인한 천연 방사성핵종은 환경 중에 항상 존재하며 이로 인한 영향은 일반인 연간 평균 피폭의 약 70 %를 차지한다.[1] 그 종류로는 크게 붕괴계열을 이루는 핵종들과 단일핵종으로 나눌 수 있다. 그 중 우라늄 계열과 토륨 계열의 핵종들은 대표적인 지각기원 천연 방사성핵종이며 그 반감기가 각각 4.5×10^{9}년, 1.4×10^{10}년으로 지구 생성과 함께 존재하여 방사성 붕괴 계열을 이루며 현재까지 존재하고 있다. 이러한 방사성핵종에 고선량 또는 장기적으로 피폭 받을 경우, 폐질환과 종양 등을 유발하고 신체 암 및 백혈병을 유발하는 등 인체에 여러 건강상 악영향을 끼칠 수 있다.[2-10]

퇴적물은 지리적 영역에서 오염물질을 축적 및 운반하는 역할을 하며, 자연적 또는 인공적으로 배출되는 오염원을 흡수한다.[8] 퇴적물 중 방사성핵종은 수중생물들이 방사선에 노출되는 주요 원인이 될 수 있으며, 이를 채취하여 건설공사 등에 골재로 이용할 경우 그 주변에서 생활하는 사람들에게 영향을 미칠 수 있다.[11,12] 그러므로 퇴적물 중 방사성핵종의 농도와 분포에 대한 조사는 일반인에 미치는 영향 조사에 유용한 기초 정보가 될 것이다.[13]

퇴적물은 물환경에 영향을 미치는 기본적인 환경인자로 인식되어 세계적으로 조사 및 연구가 이루어지고 있는 추세이나, 현재 국내에서는 이에 대한 연구가 부족한 상황이다. 국내의 퇴적물에 대한 방사성핵종 농도 조사는 주로 연안 퇴적물 중 인공방사성핵종을 대상으로 이루어졌으며,[14-16] 토양에 대한 조사가 일부 지역에서 이루어진 바 있다.[17,18] 환경 중 존재하는 방사성핵종에 대한 정기적인 모니터링은 「수질 및 수생태계 보전에 관한 법률」 및 「원자력안전법」에 근거하여 각각 환경부와 원자력안전위원회에서 실시하고 있다.[19-22] 국외의 천연 방사성핵종에 대한 연구는 환경 기초자료 마련을 위한 배경농도 조사를 위해 진행되고 있으며, 특히 공공수역의 퇴적물을 대상으로 한 연구는 다양한 국가에서 각 수계에 대하여 이루어지고 있다.[23-34] UN 과학위원회(이하 UNSCEAR, United nations scientific committee on the effects of atomic radiation)는 세계 각국의 퇴적물과 토양 중 방사성핵종 농도 조사 결과를 보고하였으나, 그 중 국내 퇴적물 조사결과는 포함되지 않았으며, 토양 중의 ^{40}K 농도 조사 결과만 포함되었다.[1,35]

본 연구에서는 우리나라의 대표적 수계 중 하나인 금강수계를 대상으로 하천 및 호소의 퇴적물 중 존재하는 천연 방사성핵종의 농도를 조사하였다. 조사결과는 상관분석을 통해 퇴적물의 물리·화학적 특성과의 관계를 확인하였고, 세계 각국의 경향과 비교하였다.

2. 연구방법

2.1. 시료채취

본 연구의 대상이 되는 퇴적물은 금강수계 내의 하천 17개 지점과 호소 6개 지점이며, 하천지점은 2015년 9월부터 11월, 호소지점은 같은 해 3월부터 4월까지 시료를 채취하였다. 각 지점별 위치는 *Fig.* 1에 나타내었다. 퇴적물 시료는 공정시험기준에 준하여 지점을 대표하는 균일한 시료가 되도록 채취하였다. 하천은 지점별 하폭을 동일한 간격으로 나누고, 호소는 해당 위치를 중심으로 원을 만들어 수심 등을 확인한 후 각 지점을 대표할 수 있는 시료채취 포인트

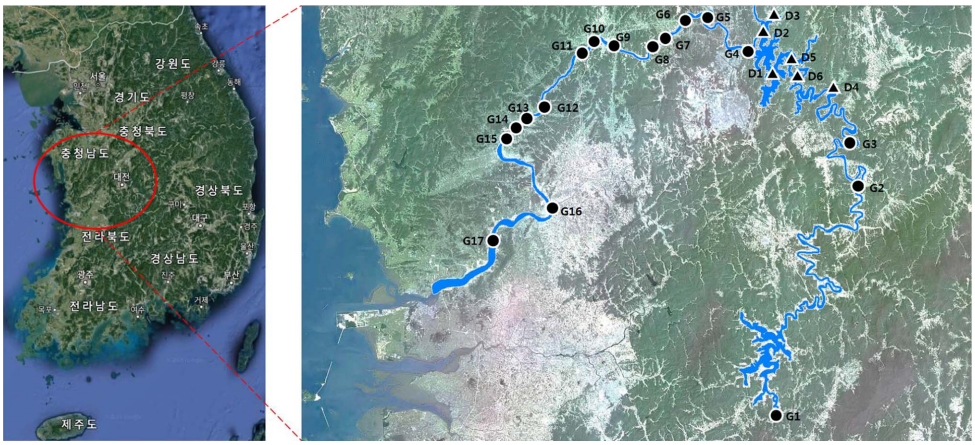

Fig. 1. Sampling site of Geum River.

www.kci.go.kr

를 각각 4~6 개로 결정하였다. 시료를 채취할 때는 연구결과에 영향을 미칠 수 있는 나무, 생물 등이 포함되지 않도록 유의하였으며, 채취한 시료를 현장에서 1차 체질한 후(체 눈 크기 2 mm) 각 포인트의 시료를 동일한 양으로 균일하게 혼합하였다. 시료의 운반 시에는 밀폐용기를 적절히 이용하여 운반과 이동 도중 시료 및 수분이 유실되지 않도록 주의하였다.[36]

2.2. 방사능 농도 분석

실험실로 운반한 시료는 105 °C에서 24시간 동안 건조하고 분쇄한 후 2차 체질하여(체 눈 크기 200 μm) 균일하게 혼합하였다. 이후 실린더 형태의 용기(지름 5 cm, 높이 8 cm)에 일정한 밀도로 충진하여 방사평형을 이루도록 4주 이상 밀봉하여 보관하였다. 시료의 계측에는 고순도 게르마늄 검출기(HPGe, High purity germanium, GC3018, canberra, USA)를 이용하여 각 핵종의 방사능 농도를 계측하였다. 검출기의 에너지 및 효율교정에 이용한 인증표준물질(CRM, Certified reference material)은 13개의 감마선 에너지를 방출하는 10 개의 핵종이 혼합되어 있으며, 이는 표준과학연구원에서 제조하였다. 백그라운드의 측정은 시료의 측정에 이용한 것과 동일한 형태의 실린더 용기를 같은 시간 계측하여 이용하였다. 각 시료는 스펙트럼의 대상피크의 계수오차가 3 % 이내가 되도록 계측시간을 결정하여 계측의 정확도를 확보하였으며, 시료 분석 시 시료 10 개 당 1 개의 이중시료를 제작하였고 반복계측을 통하여 오차범위 내의 계측 재현성을 확인하였다. 조사 대상 핵종은 천연 방사성핵종 중 라듐(^{226}Ra)계열과 토륨(^{232}Th)계열, ^{40}K 으로 각 핵종의 농도 분석에 사용한 에너지는 *Table* 1에 나타내었다. 붕괴 계열을 이루는 ^{226}Ra과 ^{232}Th 계열의 경우 시료 충진 후 4주 이상의 평형으로 자핵종과 방사평형이 이루어진 상태로 가정하여 각각 그 자핵종인 ^{214}Bi와 ^{228}Ac의 농도로 각 계열의 농도를 분석하였다.[37]

Table 1. Gamma energy and yield of radionuclides operating

Nuclide		Energy(keV)	Yield(%)
^{226}Ra series	^{214}Bi	609.3	46.30
		1120.3	15.10
		1764.5	15.80
^{232}Th series	^{228}Ac	338.3	11.40
		911.1	27.70
		969.1	16.60
^{40}K		1460.83	10.72

2.3. 농도 계산

용기에 담은 시료의 계측에는 상대효율이 30 %인 고순도 게르마늄 검출기를 이용하였다. 계측되는 에너지 범위는 4 keV~3 MeV이며, ^{60}Co 핵종의 1.33 MeV 감마선 에너지에 대한 에너지분해능(FWHM)은 1.8 keV, 피크 대 컴프턴 비는 ≥58 : 1 이다. 방사능 농도는 시료채취 시점을 기준으로 산출하였으며, 농도는 다음 식 (1)을 이용하여 계산하였다.

$$A = \frac{N}{\varepsilon \gamma t m K_i} \quad (1)$$

여기서, A는 방사능 농도(Bq/kg), N은 방출 감마선 에너지 피크 면적, ε은 해당 에너지 감마선의 감마계수효율, γ는 해당 에너지의 감마선방출률, t는 계측시간(s), m은 시료의 질량(kg), K_i는 보정인자를 나타낸다.[38,39]

3. 결과 및 고찰

3.1. 방사능 농도

금강수계 내 하천퇴적물 17개 지점(G1~G17)과 호소퇴적물 6개 지점(D1~D6)을 대상으로 ^{226}Ra계열, ^{232}Th계열과 ^{40}K의 농도분포를 조사한 결과를 *Table* 2,

Table 2. The activity concentration

Sampling site	^{226}Ra(Bq/kg)	^{232}Th(Bq/kg)	^{40}K(Bq/kg)
G1	14.1	25.7	1041.5
G2	15.9	32.2	815.4
G3	10.6	21.2	737.2
G4	17.0	18.6	808.4
G5	12.5	13.8	796.3
G6	10.2	19.8	850.9
G7	14.9	35.4	745.3
G8	19.4	48.0	742.0
G9	15.0	34.4	841.2
G10	17.7	37.7	563.2
G11	11.1	23.2	899.6
G12	17.4	51.4	861.6
G13	22.0	52.8	874.7
G14	16.6	39.2	799.5
G15	15.8	31.7	840.2
G16	13.4	33.6	424.0
G17	21.7	55.2	786.1
D1	13.7	30.7	184.1
D2	18.5	40.1	225.4
D3	14.2	32.5	243.6
D4	16.0	38.7	309.9
D5	18.9	42.1	261.1
D6	20.9	42.3	392.2

www.kci.go.kr

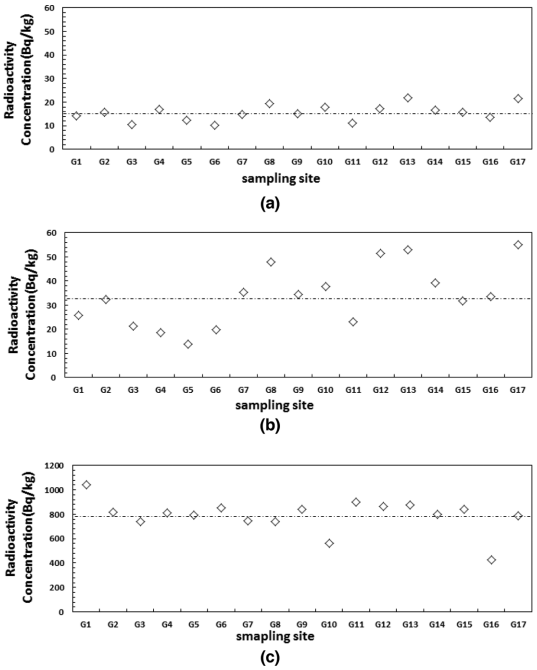

Fig. 2. Radioactivity concentration by sampling site in river sediments. (a) ^{226}Ra decay series, (b) ^{232}Th decay series, (c) ^{40}K

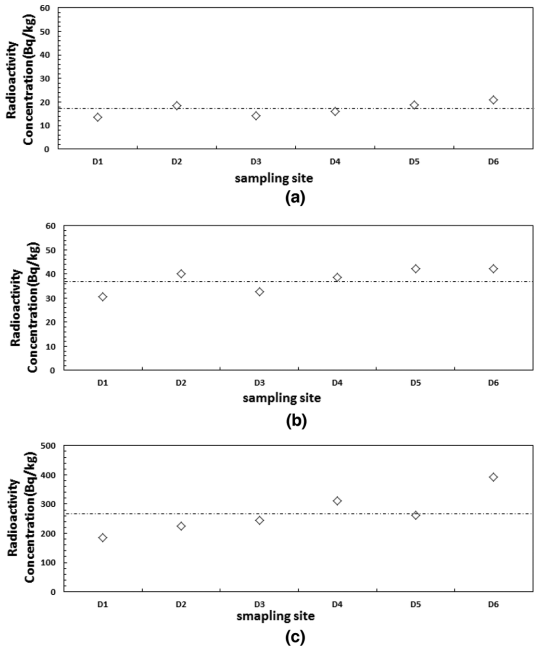

Fig. 3. Radioactivity concentration by sampling site in lake sediments. (a) ^{226}Ra decay series, (b) ^{232}Th decay series, (c) ^{40}K.

Fig. 2와 *Fig.* 3에 나타내었으며, 퇴적물 시료에서 방출하는 감마선 방출 방사성핵종의 대표적인 스펙트럼을 *Fig.* 4에 나타내었다. 하천 퇴적물에서 ^{226}Ra계열, ^{232}Th계열, ^{40}K의 방사성핵종의 평균 농도와 그 농도 범위는 각각 15.6 ± 0.6 Bq/kg (10.2 ~ 22.0 Bq/kg), 33.8 ± 1.2 Bq/kg (13.7 ~ 55.2 Bq/kg), 789.8 ± 26.0 Bq/kg (424.1 ~ 1041.5 Bq/kg)으로 조사되었고, 호소 퇴적물의 ^{226}Ra계열, ^{232}Th계열, ^{40}K의 방사성핵종 평균 농도와 그 농도 범위는 각각 17.0 ± 0.5 Bq/kg (13.7 ~ 20.9 Bq/kg), 37.8 ±1.1 Bq/kg (30.7 ~ 42.3 Bq/kg), 269.4 ± 9.6 Bq/kg (184.1 ~ 392.2 Bq/kg)으로 조사되었다. 하천과 호소 퇴적물의 방사성핵종 농도를 서로 비교하였을 때, 하천지점의 ^{40}K 농도가 호소지점에 비하여 높게 나타났다.

계측한 방사성핵종의 농도를 핵종 간 비교한 결과를 *Table* 3에 나타내었다. Ra/Th의 비율은 지역적으로 약간의 차이는 있으나, 전 지점에서 공통적으로 1보다 낮은 값으로 조사되었다. 이는 각 계열의 모핵종인 토륨과 우라늄의 성질 때문으로 보인다. 토륨은 산화 또는 환원 조건에 대해 영향을 받지 않고 불용성이온(Th^{4+})의 형태로 퇴적물 중 침전되는 성질을 갖고 있으며, 라듐의 모핵종인 우라늄은 최종 퇴적 전에 침출

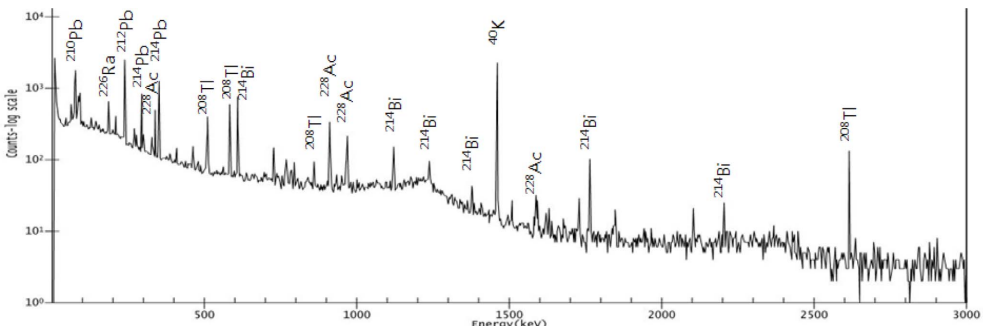

Fig. 4. Gamma-ray spectrum for sediment.

www.kci.go.kr

Table 3. The activity ratios of ^{226}Ra, ^{232}Th and ^{40}K

Sampling site	Ra/K	Th/K	Ra/Th
G1	0.01	0.02	0.55
G2	0.01	0.04	0.49
G3	0.01	0.03	0.50
G4	0.02	0.02	0.92
G5	0.02	0.02	0.91
G6	0.01	0.02	0.52
G7	0.02	0.05	0.42
G8	0.03	0.06	0.40
G9	0.02	0.04	0.44
G10	0.03	0.07	0.47
G11	0.01	0.03	0.48
G12	0.03	0.06	0.42
G13	0.02	0.06	0.34
G14	0.02	0.05	0.42
G15	0.02	0.04	0.50
G16	0.03	0.08	0.40
G17	0.03	0.07	0.39
D1	0.07	0.17	0.45
D2	0.08	0.18	0.46
D3	0.06	0.13	0.44
D4	0.05	0.13	0.41
D5	0.07	0.16	0.45
D6	0.05	0.11	0.49

되며 수용성인 것으로 밝혀진 바 있다.[40] 따라서 퇴적물 중 ^{232}Th계열의 농도는 하천과 호소 전 지점에서 ^{226}Ra계열에 비해 높게 나타나고 있다.

국내의 공공수역 퇴적물에 대하여 조사한 기존의 연구가 충분히 이루어지지 않아, *Table* 4와 5에 나타낸 국외의 다른 연구의 경향과 비교하였다.[23-34] 하천퇴적물 중 ^{226}Ra계열의 농도 분포 범위는 6.9 ~ 65.5 Bq/kg, ^{232}Th계열은 10 ~ 72.0 Bq/kg, ^{40}K은 173.96 ~ 833.3 Bq/kg 이며, 호소퇴적물 중 ^{226}Ra계열의 농도 분포 범위는 17.2 ~ 27.9 Bq/kg, ^{232}Th계열은 10.0 ~ 62.0 Bq/kg, ^{40}K은 299.7 ~ 549.3 Bq/kg으로 나타났다. 본 연구에서 조사한 금강수계 퇴적물의 방사능 농도 평균값은 기존의 조사로 나타난 세계적인 농도 범위 내에 포함되며, 핵종별 농도 경향 또한 유사한 것으로 조사되었다. 또한 퇴적물 중 ^{40}K의 농도를 UNSCEAR에 보고된 국내 토양 중 농도와 비교하였다.[1] 그 결과 토양 중 ^{40}K 농도는 17~1500 Bq/kg으로, 본 연구에서 조사한 금강수계 하천·호소퇴적물 중의 농도가 이 범위 내에 포함되는 것으로 조사되었다.

3.2. 상관분석

방사성핵종의 농도와 퇴적물의 물리·화학적 성질과의 상관성을 확인하기 위하여 퇴적물 중 방사성핵종의 농도, 입도, 유기물 함량을 대상으로 상관분석을 수행한 결과를 *Table* 6에 나타내었다. 분석에는 통계 프로그램인 SPSS (Statistical package for the social sciences, IBM)를 사용하였고 변수 간 증가와 감소의

Table 4. Radioactivity concentration of other rivers sediment

Country	Lake/River	Activity concentration (Bq kg^{-1})			Reference
		^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K	
Bangladesh	Shango River	57.5	25.4	255	Chowdhurry *et al.* (1999)
	Kamapulli River	65.5	37.9	272	Chowdhurry *et al.* (1999)
China	Wei River	33.1	21.8	833.3	Xinwei *et al.* (2008)
Egypt	Nile River	12.9	16.3	200.2	El-Gamal *et al*. (2007)
	Nile Delta	17	18	316	Khater *et al.* (2005)
India	Kali River	6.9	40.1	394.7	Dar *et al.* (2013)
	Sharavathi River	11.6	72.0	493.4	Narayana *et al*. (2007)
	Netravathi River	57.5	69.7	559.7	Narayana *et al.* (2007)
	Palar River	36	10	472	Narayana *et al.* (2007)
Pakistan	Hunza River	11.7	21.4	174.0	Qureshi *et al*. (2014)
Turkey	Coruh River	11.4	18.3	510.2	Kobya *et al.* (2015)
Nigeria	Ogun River	11.8	12.7	499.5	Jibiri *et al.* (2012)
Korea	Geum River	15.6	33.8	789.8	Present study (2016)

www.kci.go.kr

Table 5. Radioactivity concentration of other lakes sediment

Country	Lake	Activity concentration (Bq kg^{-1})			Reference
		^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K	
Nigeria	Twenty Lakes	27.9	62.0	549.3	Isinkaye *et al.* (2008)
Egypt	Lake Nasser	18.4	14.3	317.6	Khater *et al.* (2007)
	Brullus Lake	17.2	10.0	299.7	Ibrahiem *et al.* (1995)
Turkey	Altunkaya Lake	27.7	19.5	460	Eroglu *et al.* (2013)
	Derbent Lake	25.5	18.8	365	Eroglu *et al.* (2013)
Korea	Geum river lake	17.0	37.8	269.4	Present study (2016)

Table 6. Spearman correlation coefficients among the variables

	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K	Sand	IL[a)]	COD[b)]	TOC[c)]
^{226}Ra	1						
^{232}Th	0.842*	1					
^{40}K	-0.144	-0.184	1				
Sand	-0.476*	-0.593**	0.776**	1			
IL[a)]	0.380	0.509*	-0.782**	-0.858**	1		
COD[b)]	0.332	0.395	-0.834**	-0.849**	0.886**	1	
TOC[c)]	0.165	0.217	-0.842**	-0.808**	0.784**	0.920**	1

*p<0.05, **p<0.01
[a)]IL : Ignition Loss of sediment
[b)]COD : Chimical Oxygen Demand of sediment
[c)]TOC : Total Organic Carbon of sediment

상관관계를 확인할 수 있는 스피어만 상관분석법을 이용하였다.

변수들 사이의 양의 상관성이 강하게 나타날수록 환경에서의 기원과 작용이 유사하다는 것을 나타낸다. ^{226}Ra계열과 ^{232}Th계열의 농도 간 높은 양의 상관성이 나타났으며, 이것은 일반적으로 이동하는 동안 일어나는 반응이 상호의존적임을 보여준다. ^{40}K와 다른 방사성핵종과의 사이에서는 유의할만한 상관성이 나타나지 않은 것과 비교하면, 이동성에 영향을 끼치는 퇴적과정이 다른 방법으로 이루어진다는 것을 나타낸다. ^{232}Th계열의 농도와 퇴적물 중 모래 함량 간의 상관계수는 유의한 수준의 음의 상관성을 나타낸다. Ra/Th의 비율이 각각 0.92, 0.91로 타 지점에 비하여 비교적 높게 나타난 G4, G5 지점의 경우, 다른 지점에 비하여 모래함량이 높아 ^{232}Th계열의 농도가 낮게 나타난 결과라고 할 수 있다. 또한 방사성핵종 중 ^{40}K 농도를 유기물 농도의 지표라 할 수 있는 완전연소가능량, 화학적산소요구량, 총유기탄소와 비교한 결과, ^{40}K의 농도와 유기물 간의 높은 음의 상관성이 나타났다. 이러한 상관분석의 결과로, ^{226}Ra계열과 ^{232}Th계열의 농도를 ^{40}K의 농도와 비교한 Ra/K, Th/K의 비가 모두 호소 퇴적물에서 높게 나타난 것은 하천에 비해 높은 유기물의 농도 때문인 것을 알 수 있었다. 이러한 결과를 통하여 퇴적물의 모래함량과 ^{232}Th 계열의 방사성핵종 농도, 퇴적물 중 유기물 양과 ^{40}K 농도의 연관성을 확인할 수 있다.[20,41]

4. 결 론

금강수계 내 하천과 호소 퇴적물을 대상으로 천연방사성핵종 ^{226}Ra계열, ^{232}Th계열과 ^{40}K의 농도를 조사하였다. 하천 17 개 지점, 호소 6 개 지점에서 퇴적물을 채취하여 분석한 결과, ^{226}Ra계열의 평균 농도는 하천퇴적물에서 15.6 Bq/kg, 호소퇴적물에서 17.0 Bq/kg으로 조사되었으며, ^{232}Th계열은 33.8 Bq/kg, 37.8 Bq/kg, ^{40}K은 789.8 Bq/kg, 269.4 Bq/kg으로 각각 조사되었다. 방사성핵종 농도를 조사한 라듐계열의 모핵종 우라늄과 토륨계열의 모핵종 토륨핵종의 산화·환원 조건에 따른 수용성 특징에 따라 퇴적물 특성과 방사성핵종 농도와의 상관분석 결과, ^{232}Th계열의 농도와

www.kci.go.kr

퇴적물의 입도 크기, ^{40}K의 농도와 유기물의 함량이 각각 유의할 수준의 음의 상관성을 갖는 것으로 나타났다.

본 연구는 금강수계의 퇴적물에 대한 것이라는 지역적인 한계는 있으나, 하천과 호소 퇴적물에 대한 국내 연구가 부족한 상황에서 공공수역 퇴적물 중 천연방사성핵종의 농도 분포를 확인하였으며, 상관분석을 이용한 연관성 확인으로 향후 퇴적물 중 방사성핵종 농도 연구에 대한 기초가 될 수 있을 것이다.

References

1. UNSCEAR, “Sources and effects of ionizing radiation. Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation to the general assembly”, report, United Nations, New work, 2000.
2. K. Megumi, T. Oka, K. Yaskawa and M. Sakanoue, *J. Geophys. Res*., **87**, 10857-10860 (1982).
3. T. E. Myrick, B. A. Berven and F. F. Haywood, *Health phys*., **45**(3), 631-642 (1983).
4. W. Jacobi, ICRP publication 50, *Radiat. Prot. Dosim*., **24**(1-4), 19-23 (1998).
5. A. Baeze, M. del Rfo, C. Miro and J. M. Paniagua, *Radiat. Prot. Dosim*., **45**(1/4), 261-263 (1992).
6. J. Porstendorfer and A. Reineking, *Radiat. Prot. Dosim.,* **45**(1/4), 303-311 (1992).
7. UNSCEAR, “Ionizing Radiation : Sources and Biological Effects”, report, United Nations, New work., 1993.
8. P. K. Shetty and Y. Narayana, *J. Environ. Radioact.,* **101**, 1043-1047 (2010).
9. UNSCEAR, “Sources and effects of ionizing radiation. Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation to the general assembly”, report, United Nations, New work, 1993.
10. M. Krmar, J. Slivka, E. Varga, I. Bilit and M. Veskovic *J. Geochem. Explor.,* **100**(1), 20-24 (2009).
11. R. M. Amin, *Int. J. Sci. Res.*, **4**(2), 619-625 (2015).
12. M. Degerlier, G. Karahan and G. Ozger, *J. Environ. Radioact.*, **99**, 1018-1025 (2008).
13. V. Ramasamy, G. Suresh, V. Meenakshisundaram and V. Ponnusamy, *Appl. Radiat. Isot.*, **69**, 184-195 (2011).
14. G. Y. N. Eun, K. W. Kim, J. Y. Kim, I. S. Kim, J. M. Cha, D. J. Kim and K. N. Kim, *Econ. Environ. Geo.*, **33**(3), 195-204 (2000).
15. S. H. Kim, S. H. Lee, J. S. Oh, J. K. Choi and T. G. Kang, *J. Radiat. Prot. Res.*, **40**(4), 223-230 (2015).
16. Y. K. Kim, K. M. Kim, H. J. Jung, H. D. Kang, W. Kim, S. H. Doh and D. S. Kim, *Econ. Environ. Geol*., **38**(6), 689-397 (2005).
17. K. Y. Lee, Y. Y. Yoon, S. Y. Cho, H. J. Lee, J. S. Lee, S. K., Koh and Y. J. Kim, *J. Soil Groundw. Environ.*, **14**(2), 10-16 (2009).
18. J. H. Kim, C. S. Kim and C. S, Lim, *J. Korea Ind. Soc.,* **15**(6), 3658-3666 (2014).
19. Ministry of Environment Act No. 11670(2013.03.22), Republic of Korea.
20. KINS, “Environmental Radioactivity Survey Data in Korea”, Korea Institute of Nuclear Safety, 2010.
21. Y. H. Cho, B. N. Seol, K. O. Min, W. S. Kim, J. B. Lee and S. H. Lee, *J. Korean Soc. Environ. Eng*., **38**(1), 42-46 (2016).
22. J. Y. Kim, H. J. Jung, M. J. An, J. K. Hong, T. G. Kang, T. W. Kang, Y. H. Cho, Y. U. Han, B. N. Seol, W. S. Kim and K. H. Kim, *Anal. Sci. Technol.*, **28**(6), 377-384 (2015).
23. M. I. Chowdhurry, M. N. Alam and S. K. S. Hazari, *Appl. Radiat. Isot.*, **51**, 747-755 (1999).
24. M. A. Dar and A. A. El Saharty, *Radiat. Prot. Dosim.*, **157**, 85-92 (2013).
25. A. El-Gamal, Sl. Nasr and A. El-Taher, *Radiat. Meas.*, **42**, 457-465 (2007).
26. H. Eroglu and O. Kabadayi, *Radiat. Prot. Dosim.*, **156**, 331-335 (2013).
27. N. M. Ibrahiem, S. M. CShawky and H. A. Amer, *Appl. Radiat. Isot.*, **46**, 297-299 (1995).
28. M. O. Isinkaye and E. A. Oyedele, *Radioprot.*, **43**(4), 533-545 (2008).
29. N. N. Jibiri and I. C. Okeyode, *Radiat. Phys. Chem.*, **81**, 1829-1835 (2012).
30. A. E. M. Khater, Y. Y. Ebaid and S. A. El-mongy, *Int. Congr. Ser.*, **1276**, 405-406 (2005).
31. Y. Kobya, H. Taskin, C. M. Yeslkanat, A. Varinlioglu and S. Korcak, *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **303**, 287-295 (2015).
32. Y. Narayana, K. M. Rajashekara and K. Siddappa, *J. Environ. Radioact.*, **95**, 98-106 (2007).
33. A. A. Qureshi, S. A. Tariq, K. Ud Din, S. Manzoor and Waheed, A. Calligaris, *J. Radiat. Res. Appl. Sci.*, **7**(4),

www.kci.go.kr

438-447 (2014).
34. L. Xinwei, Z. Xiaolan and W. Fengling, *Environ. Geol.,* **53**, 1483-1489 (2008).
35. UNSCEAR, "Sources and effects of ionizing radiation. Reprot of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation to the general assembly", report, United Nations, New work, 1998.
36. Ministry of Environment Act No. 13530(2015.12.01), Republic of Korea.
37. A. El-Gamal, S. Sasr and A. El-Taher, *Radiat. Meas.*, **42**, 457-465 (2007).
38. F. Michael and L' Annunziata, 'Handbook of radioactivity analysis', 3rd Ed., Academic press, Elsevier, 2012.
39. R. Gilmore Gordon 'Practical gamma-ray spectrometry', 2nd Ed., Wiley, New Jersey, 2008.
40. G. Suresh, V. Ramasamy, V. Meenakshisundaram, R. Venkatachalapathy and V. Ponnusamy, *J. Environ. Radioact.*, **102**, 370-377 (2011).
41. V. Ramasamy, K. Raramasivam, G. Suresh and M. T. Jose, *Spectrohimica Acta*, **117**, 340-350 (2014).

www.kci.go.kr