

보오크사이트 사용업체 주변 환경시료의 자연방사능 조사

Investigation on Natural Radioactivity of Environmental Samples Near the Bauxite Processing Facility

문 동 혁(Dong Hyeok Moon)¹ · 고 상 모(Sang Mo Koh)^{1,*} · 장 병 욱(Byung-Uck Chang)² ·
김 통 권(Tong-Kwon Kim)¹ · 김 용 욱(Yong Ug Kim)¹

¹한국지질자원연구원 광물자원연구본부 해외광물자원연구실
(Overseas Mineral Resources Department, Mineral Resources Research Division, Korea Institute of
Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 305-350, Korea)

²한국원자력안전기술원 안전연구부 방사선연구실
(Radiation Research Department, Safety Research Division, Korea Institute of Nuclear Safety,
Daejeon 305-338, Korea)

요약 : 알루미늄과 수산화알루미늄을 제조하는 (주)KC에서 사용하는 보오크사이트는 ‘자연기원방사성 물질(NORM)’에, 가공 중 발생하는 폐기물 또는 부산물인 red mud는 ‘인위적으로 농축된 자연기원방사성물질(TENORM)’에 해당된다. 이 연구는 NORM의 대량사용시설인 (주)KC 공장 내부 및 주변 지역의 지질특성, 토양에 대한 광물학적 및 지화학적 분석을 수행하여 향후 작업장과 그 주변 지역의 방사능 피복량을 측정하고 방호하기 위한 과학적인 기초자료를 제공하고자 한다. (주)KC 공장 내부 및 인근지역 토양의 광물조성은 석영, 장석, 운모, 고령토, 깃사이트, 세피올라이트 등 모암으로부터 유래된 광물조성과 적철석, 보에마이트, 방해석 등 원광석인 보오크사이트로부터 유래된 광물조성으로 혼화되어 있다. 이 지역 토양의 평균 U 함량은 4.7 ppm, Th 함량은 23.6 ppm으로서 Th 함량이 다소 높게 나타난다. 토양의 ⁴⁰K의 농도는 100~1,433 Bq/kg, ²²⁶Ra의 농도는 8.4~179 Bq/kg이고 ²³²Th의 농도는 13.5~300 Bq/kg으로서 높은 농도는 보이지 않으나 상대적으로 높은 ²²⁶Ra 농도는 red mud 적재장 주변에서 확인된다. 토양시료의 외부 위해지수 범위는 0.10~1.66이며 평균 0.63으로서 전체적으로는 위해 기준치로 제시되는 1.0 이하이지만 41개 지점 중 4개 지점이 1.0 이상을 나타낸다.

주요어 : 자연기원방사성물질, 보오크사이트, 환경조사

ABSTRACT : Bauxite is a main raw material for the production of alumina and aluminum hydroxide in the processing plant of KC company. It is a NORM (Naturally Occurring Radioactive Materials), and its waste, red mud, is a TENORM (Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Materials). The purpose of the geochemical and mineralogical investigations of the bedrock and soils in and around the plant, a large NORM source, was to provide basic data for measuring the radiation dose and protecting from radioactive hazards. Soils were mixtures of minerals derived from the country rock (quartz, feldspar, mica, kaolin, gibbsite, and sepiolite) and bauxite (hematite, boehmite, and calcite) of open-air storage. Average U and Th contents of the soil samples were 4.7 ppm and 23 ppm, respectively, indicating somewhat Th anomaly. The average concentrations of radionuclides are ⁴⁰K 100~1,433 Bq/kg, ²²⁶Ra

*교신저자: kohsm@kigam.re.kr

anomaly in the red mud open-air storage. Soil external hazard indices range from 0.10 to 1.66 with an average of 0.63. Although most of the indices are below 1.0 that is a regulation value, those of 4 samples of total 41 soil samples exceed 1.0, requiring further detailed investigation.

Key words : NORM, bauxite, environmental investigation

서 론

‘자연기원 방사성물질(NORM: Naturally Occurring Radioactive Materials)’과 ‘인위적으로 농축된 자연기원 방사성물질(TENORM: Technologically Enhanced NORM)’에 대해서 국제적인 안전지침이 국제원자력기구(International Atomic Energy Agency, IAEA)에서 마련된 바 있다(International Atomic Energy Agency, 2004). EU에서는 NORM 사용 사업장에 대해 순차적인 접근을 통한 규제접근을 권고하고 있으며 선량기준을 1 msv/y 미만은 규제 제외, 1~6 msv/y는 약한 규제 개입, 6~20 msv/y는 강한 규제 개입 및 20 msv/y 이상은 작업장 및 종사자 관리를 제안하고 있다(EC RP 95).

1990년 국제방사선방호위원회(ICRP: International Commission on Radiological Protection)에서는 작업종사자의 연간 평균 선량을 20 mSv (5년 평균), 일반인의 연간 평균 선량을 1 mSv로 제한하여 관리할 것을 권고한 바 있다(ICRP 60, 1990). NORM과 TENORM에 대한 규제 접근은 국가마다 차이가 있으며 유럽연합의 경우 회원국에게 적절한 선량평가에 따른 순차적인 접근을 권고하고 있다(Euro-pean Commission, 1999).

국내에는 다양한 종류의 산업원료광물들이 여러 분야에서 많은 양이 유통·활용되고 있다. 수입되고 있는 일부 원료광물 중 저어콘, 티탄철석, 점토, 보오크사이트, 인회석 등은 상대적으로 천연방사성 핵종 농도가 높은 광물로서 국내 생산, 수입, 유통되는 주요 원료광물에 대한 조사 및 평가가 수행된 바 있다(장병욱, 2007; Chang *et al.*, 2008). 보오크사이트는 알루미늄(Al_2O_3)과 수산화알루미늄[$Al(OH)_3$] 제조 및 내화물용으로 주로 이용되고 있다. 2008년 연간 총 수요량(총 수입량)이 459,039톤(약 400억 원)으로서 주로 호주와 중국으로부터 수입된다(지식경제부 및 한국지질자원연구원, 2009).

보오크사이트를 사용하는 대량사용시설 중 알루미늄과 수산화알루미늄을 제조하는 (주)KC 공장 내부 및 주변에 대한 토양의 핵종 농도를 포함한 지화학적 특성을 규명하여 환경조사를 수행하였다.

(주)KC에서 사용하는 보오크사이트와 폐기물인 red mud는 이전 연구(고상모 외, 2008)에서 방사능 핵종 농도가 높은 광물에 속하여 관리대상 물질로 지정된 바 있다. 따라서 사용시설 내부 및 주변지역의 방사능 환경관리가 요구되며 지속적 관리를 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

(주)KC 현황

주식회사 KC는 전라남도 영암군 대불국가산업단지 내에 위치하고 있다. 이 회사는 보오크사이트를 사용하여 알루미늄과 수산화알루미늄을 제조한다. (주)KC의 2009년 보오크사이트 사용량은 387,857 톤이며 호주로부터의 수입량이 450,872 톤(2009년 기준)이다. 주 생산품은 수산화알루미늄으로서 2009년 연간 생산량은 253,908톤(수분 9% 기준)이다. 호주로부터 수입되는 보오크사이트 원광은 주로 깁사이트(gibbsite: $Al(OH)_3$)와 보에마이트(boehmite: $AlOOH$)로 구성되고, 소량의 카올리나이트[kaolinite: $Al_2Si_2O_5(OH)_4$]가 수반된다(고상모 외, 2008).

간단한 공정과정은 펠릿(pellet)상의 보오크사이트를 NaOH와 반응시키면 수산화알루미늄이 형성되며, 이를 300 μm 이하의 입도로 분쇄하여 250°C 이하에서 소성하여 최종적으로 알루미늄을 생산한다. 알루미늄을 생산한 후 나오는 공정부산물인 red mud는 적철석과 보에마이트로 주로 구성되고 방해석과 강옥이 수반 산출한다(고상모 외, 2008).

연구방법

시료채취

토양시료는 공장 내부와 인근 도로변을 대상으로 격자상으로 총 41곳에서 채취하였다(그림 1). 시료채취는 한 지점에서 지표 10 cm 하부층(A)과 30 cm 하부층(B)에 대해 각각 수행하여 모두 82개의 시료를 수집하였다.



Fig. 1. Location map of soil samples around the bauxite processing plant of KC company.

화학분석 및 X선 회절분석

(주)KC 주변에서 채취한 총 82개 토양시료의 U, Th 분석은 한국지질자원연구원 분석센터에서 유도 결합 플라즈마 질량분석기(ICP-MS)로 수행하였다. X선 회절분석은 한국지질자원연구원 해외광물자원 연구실에서 보유하고 있는 Rigaku/Rint2002 고분해능 X선 회절분석기를 이용하였으며, 흑연 단색화된 파장($CuK\alpha = 1.5406 \text{ \AA}$)을 사용하였다. 정량분석을 위한 분석조건은 40 kv/20 mA, 2~45° 2 θ 구간에서 주사 간격 0.01°, 주사 시간 2° 2 θ /min로 설정하여 회절값을 측정하였다.

천연방사성핵종분석

채취된 토양시료는 모두 16 mesh체로 걸러 그 이하 입도물의 천연방사성핵종 농도를 한국원자력 안전기술원에서 분석하였다. 전처리가 완료된 시료는 ^{226}Ra 의 딸 핵종인 ^{222}Rn 의 확산유출을 막기 위해 알루미늄캔에 충전하고 Can Scamer를 사용하여 완전 밀봉시켰다. 라듐동위원소와 딸 핵종 간의 방사평형이 이루어지도록 3주 이상 방치한 뒤 감마분광분석법을 이용, 대표적인 천연방사성핵종인 ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th 의 농도를 분석하였다. ^{40}K 는 1461 keV의 감마선을 직접 측정하였으며 ^{226}Ra 와 ^{232}Th 는 각각 ^{214}Bi 의 609 keV 감마선과 ^{228}Ac 의 911 keV의 감

마선을 고순도게르마늄검출기(HPGe)로 측정하여 구하였다. 사용된 게르마늄검출기의 상대효율은 30%이며 FWHM 값은 ^{60}Co 의 1,332 keV 감마선에 대해 2.0 keV이었으며 시료에 대한 측정시간은 80,000초였다. 알루미늄캔에 대한 효율교정은 혼합 희석선원을 사용하여 수행하였으며 희석선원에는 59.5 keV와 1,836.1 keV 사이의 감마선을 방출하는 핵종인 ^{57}Co , ^{60}Co , ^{85}Sr , ^{88}Y , ^{109}Cd , ^{113}Sn , ^{137}Cs , ^{139}Ce , ^{203}Hg 와 ^{241}Am 이 포함된 혼합 희석선원(Certified by Amersham)을 사용하였다.

결과 및 토의

주변지질환경

이 지역은 모두 산성암질 응회암인 용당 응회암으로 구성된다(그림 2). 이 응회암은 회류응회암(ash flow tuff)의 일종인 이그님브라이트(ignimbrite)에 해당되며 조립질의 결정편이 우세하다. 결정편은 불규칙한 석영, 견운모화가 일부 진행된 정장석, 퍼사이트, 사장석과 일부 흑운모로 구성된다(그림 3). 기질부는 미립의 석영편과 장석류 결정편, 견운모, 산화철 광물로 구성된다. 장경 5 mm~수 cm의 본질암편과 니질암편이 관찰되며, 니질암편은 주변의 층리가 잘 발달된 우항리층의 실트암이 대부분이다.

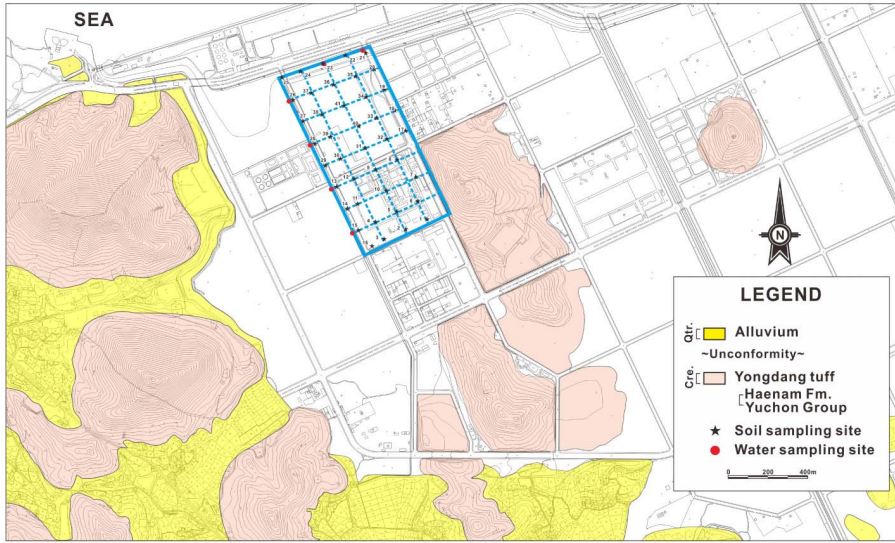


Fig. 2. Geological map and sampling sites around the bauxite processing plant of KC company.

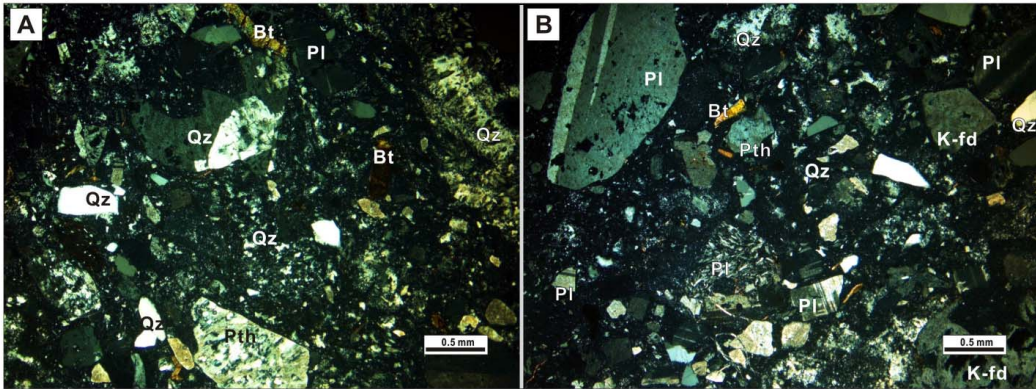


Fig. 3. Microphotographs of tuff around the bauxite processing plant of KC company (Bt = biotite, K-fd = alkali feldspar, Pl = plagioclase, Pth = perthite, Qz = quartz). Cross-polarized light.

(주)KC 주변에 분포하는 용당 응회암 4개 시료의 U 함량은 각각 3.13, 2.61, 2.87 및 2.71 ppm (평균 2.83 ppm)이며, Th 함량은 각각 14.8, 14.4, 15.0 및 13.7 ppm (평균 14.5 ppm)이다. Vinogradov (1962)에 의해 정리된 화강암류의 U 평균함량은 3.5 ppm, Th는 18 ppm으로서 (주)KC 지역의 기반암인 응회암류는 이보다 다소 낮은 함량을 나타냄이 특징이다.

광물조성

지표 30 cm 하부에서 채취된 41개 시료에 대해

X선 회절분석을 실시하여 조성광물을 파악하였다. 각 토양시료는 다음과 같은 다양한 산출광물군을 나타낸다(표 1, 그림 4).

- 석영-장석-운모(일라이트 포함)-고령토 광물(-세 피올라이트)
- 석영-장석-고령토 광물-세피올라이트
- 석영-장석-운모(일라이트 포함)-세피올라이트
- 석영-장석-운모(일라이트 포함)-방해석-깁사이트 (-적철석)
- 석영-보에마이트-적철석-방해석

Table 1. Mineral compositions of soil samples around the KC company

Sample no.	quartz	feldspar	mica (ill)	kaolinite	gibbsite	sepiolite	hematite	boehmite	calcite
KC-1-B	***	*	**	**	**	*			
KC-2-B	*	*	*		***				
KC-3-B	***	**	*	*	*				
KC-4-B	***	*	*	*	*				
KC-5-B	***	*	*	*	*				
KC-6-B	***	*	*		*				
KC-7-B	***	*	*	*	**				
KC-8-B	***	*	*		*				
KC-9-B	***	**	*		*				
KC-10-B	***	***	*	*					
KC-11-B	***	*	*		*				
KC-12-B	***	**	*						
KC-13-B	*						***	*	*
KC-14-B	***	*	*	*	*				
KC-15-B	***	*	*	*	*				
KC-16-B	***	**	**		*				*
KC-17-B	***	*	**	*					
KC-18-B	***	*	**	*					
KC-19-B	***		**	**					
KC-20-B	***	*	*	*	**				
KC-21-B	***		*	*					
KC-22-B	***	**	*	*					*
KC-23-B	***	**	*	*					*
KC-24-B	***	*	*						*
KC-25-B	***	**	*						*
KC-26-B	***		*	*					
KC-27-B	***	**	*						*
KC-28-B	***	**							
KC-29-B	***	*	**	*		*			
KC-30-B	***	*	*						
KC-31-B	***	*	*	*					
KC-32-B	***	**	*						
KC-33-B	***	**	*						*
KC-34-B	***	**	**						
KC-35-B	***	*	**		*		**	*	**
KC-36-B	***	**	*						*
KC-37-B	***	**	*	*					*
KC-38-B	***	**	*						
KC-39-B	***	**	*						
KC-40-B	***	*		*					
KC-41-B	***	**	*						*

*** : abundant, ** : common, * : rare.

상위의 산출광물군은 대부분 보오크사이트(구성광물: 김사이트, 보에마이트, 카올리나이트)와 부산물로 산출하는 red mud (구성광물: 적철석, 보에마

이트, 방해석)의 적재장으로부터 비산되거나 빗물에 의해 운반되어 토양층에 퇴적된 것으로 생각된다.

Table 2. U and Th contents of soil samples around the KC company

Sample no.	U	Th	Sample no.	U	Th	Sample no.	U	Th
KC-1-B	4.4	35.3	KC-16-B	5.8	27.5	KC-31-B	3	12.1
KC-2-B	1.7	8.6	KC-17-B	4.7	38.0	KC-32-B	1.5	6.1
KC-3-B	4.3	21.3	KC-18-B	4.5	30.9	KC-33-B	4.8	12.2
KC-4-B	4.3	29.6	KC-19-B	6.0	34.3	KC-34-B	4.3	30.6
KC-5-B	4.1	31.3	KC-20-B	3.8	17.0	KC-35-B	25.8	91.4
KC-6-B	3.4	16.8	KC-21-B	4.3	20.9	KC-36-B	2.3	8.3
KC-7-B	4.3	23.7	KC-22-B	2.8	10.5	KC-37-B	3	12.7
KC-8-B	3.6	15.7	KC-23-B	3.1	10.8	KC-38-B	2.5	12.4
KC-9-B	2.2	9.5	KC-24-B	2.9	18.3	KC-39-B	8.8	55.2
KC-10-B	3.4	15.3	KC-25-B	3.3	14.4	KC-40-B	3.4	19.0
KC-11-B	4.2	22.0	KC-26-B	7.8	24.1	KC-41-B	2.8	12.4
KC-12-B	5.0	15.2	KC-27-B	3.0	10.2	KC-42-B	2.2	12.0
KC-13-B	12.4	87.3	KC-28-B	3.3	15.7	KC-43-B	3.9	25.4
KC-14-B	4.3	20.4	KC-29-B	7.2	39.8	KC-44-B	4.7	24.4
KC-15-B	4.2	20.0	KC-30-B	3.7	19.4			

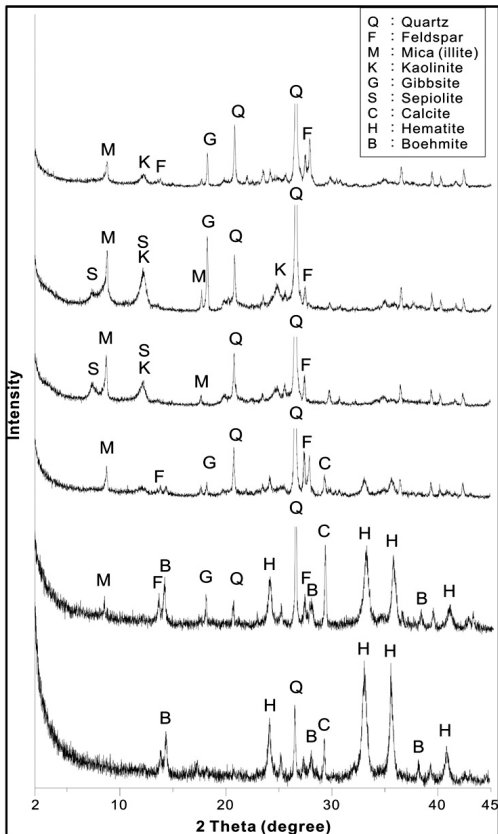


Fig. 4. X-ray diffraction patterns of soil samples around the bauxite processing plant of KC company. Cu-K α radiation.

토양 U, Th 함량

(주)KC 공장 내부와 주변지역에 대한 41개 토양 시료(지표 30 cm 하부시료)의 U, Th 분석 결과 U의 함량범위는 1.5~25.8 ppm, 평균함량은 4.7 ppm이며 Th의 함량 범위는 6.1~91.4 ppm, 평균 함량은 23.6 ppm이다(표 2). U의 평균 함량비는 지각의 U 평균함량 4 ppm과 유사하나 Th의 평균 함량비인 23.6 ppm은 지각의 평균 함량 11 ppm (Goldschmidt, 1937)의 2배 정도 높다.

U 및 Th의 함량 농도에 따른 등농도 곡선을 그려보면 U, Th 가장 고농도를 보여주는 시료 KC-35 (-A, -B) 채취 지점이 보오크사이트 원광석이 적재되어 있는 곳이다(그림 5). 이 토양시료는 보오크사이트를 구성하는 깃사이트, 적철석, 보에마이트가 풍부히 함유되어 있다(표 1). 또한 KC-39 (-A, -B), KC-13 (-A, -B) 시료 채취 지점 역시 다소 높은 U, Th 농도를 나타내는데 특히 KC-13이 높다. 이 지점은 red mud 적재장에서 가까이 위치하고 있는 곳으로서 red mud의 주 구성광물인 적철석이 풍부히 함유되어 있다(표 1, 2).

자연방사성핵종농도

토양시료의 ^{40}K 의 농도범위는 100~1,433 Bq/kg (0.100~1.433 Bq/g)이며 평균 798 Bq/kg (0.798 Bq/g), ^{226}Ra 의 농도범위는 8.4~179 Bq/kg (0.0084

Table 3. Activity ranges of natural radionuclides from the soil samples in the KC company (unit: Bq/kg)

Samples (surface under 10 cm)	⁴⁰ K	²²⁶ Ra	²³² Th	Hex*	Samples (surface under 30 cm)	⁴⁰ K	²²⁶ Ra	²³² Th	Hex*
KC-01-A	701 ± 20	34 ± 0.8	100 ± 4.5	0.62	KC-01-B	944 ± 13	42 ± 0.9	130 ± 2	0.81
KC-02-A	126 ± 8	8 ± 1.29	13 ± 1.8	0.10	KC-02-B	287 ± 12	16 ± 1.3	33 ± 1.2	0.23
KC-03-A	817 ± 21	50 ± 1.8	76 ± 1.8	0.60	KC-03-B	1,006 ± 13	43 ± 0.7	94 ± 4.1	0.69
KC-04-A	752 ± 18	44 ± 0.9	97 ± 3.6	0.65	KC-04-B	843 ± 19	54 ± 0.9	116 ± 4	0.77
KC-05-A	546 ± 10	46 ± 0.9	115 ± 5	0.68	KC-05-B		-		
KC-06-A	734 ± 10	12 ± 0.5	25 ± 0.9	0.28	KC-06-B	643 ± 18	39 ± 1.9	77 ± 4.1	0.54
KC-07-A	763 ± 17	33 ± 0.8	82 ± 4.1	0.57	KC-07-B	778 ± 19	39 ± 1.8	96 ± 4.3	0.64
KC-08-A	388 ± 10	71 ± 1.3	37 ± 1.6	0.41	KC-08-B	1,042 ± 20	37 ± 1.7	73 ± 3.5	0.60
KC-09-A	928 ± 20	44 ± 1.6	71 ± 3.5	0.58	KC-09-B	883 ± 15	18 ± 1.1	35 ± 1.0	0.37
KC-10-A	1,054 ± 19	28 ± 1.4	52 ± 1.3	0.49	KC-10-B	922 ± 19	38 ± 1.6	79 ± 1.8	0.60
KC-11-A	918 ± 12	49 ± 0.9	104 ± 2	0.72	KC-11-B		-		
KC-12-A	1,131 ± 21	129 ± 3	97 ± 1.8	0.96	KC-12-B		-		
KC-13-A	503 ± 16	104 ± 2	184 ± 4	1.10	KC-13-B	100 ± 5.1	179 ± 2	300 ± 3	1.66
KC-14-A	745 ± 15	55 ± 0.9	103 ± 4	0.70	KC-14-B	746 ± 19	58 ± 1.1	110 ± 2	0.74
KC-15-A	826 ± 17	47 ± 1.6	106 ± 4	0.71	KC-15-B		-		
KC-16-A	602 ± 17	74 ± 1.2	141 ± 3	0.87	KC-16-B	652 ± 18	88 ± 1.2	145 ± 2	0.93
KC-17-A	870 ± 20	44 ± 1.0	127 ± 2	0.79	KC-17-B	930 ± 20	46 ± 1.9	140 ± 5	0.86
KC-18-A	1,214 ± 14	46 ± 0.9	134 ± 2	0.89	KC-18-B	1,115 ± 13	48 ± 0.8	133 ± 2	0.87
KC-19-A	657 ± 16	57 ± 2.0	111 ± 5	0.72	KC-19-B	702 ± 12	65 ± 1.2	138 ± 3	0.85
KC-20-A	870 ± 19	43 ± 0.9	77 ± 1.9	0.60	KC-20-B	901 ± 20	44 ± 1.8	72 ± 1.7	0.59
KC-21-A	495 ± 16	47 ± 1.8	84 ± 3.6	0.55	KC-21-B	500 ± 9	46 ± 1.7	90 ± 1.7	0.58
KC-22-A	845 ± 17	36 ± 1.4	50 ± 3.1	0.46	KC-22-B	775 ± 17	32 ± 0.7	50 ± 1.4	0.44
KC-23-A	836 ± 11	30 ± 0.6	50 ± 1.2	0.45	KC-23-B		-		
KC-24-A	834 ± 17	30 ± 0.7	48 ± 1.4	0.44	KC-24-B	744 ± 16	29 ± 6.8	44 ± 1.4	0.40
KC-25-A	690 ± 17	38 ± 1.7	70 ± 5.1	0.52	KC-25-B	742 ± 11	37 ± 0.8	65 ± 1.6	0.51
KC-26-A	509 ± 16	50 ± 1.9	92 ± 3.8	0.60	KC-26-B	473 ± 9	51 ± 1.9	94 ± 4.6	0.60
KC-27-A	725 ± 17	27 ± 0.6	40 ± 1.2	0.38	KC-27-B	681 ± 10	24 ± 0.7	38 ± 1.3	0.35
KC-28-A	1,147 ± 23	36 ± 0.8	90 ± 1.9	0.68	KC-28-B	1,142 ± 18	29 ± 2.0	77 ± 1.4	0.61
KC-29-A	980 ± 23	74 ± 1.3	148 ± 3	0.98	KC-29-B	1,036 ± 22	76 ± 2.3	157 ± 5	1.03
KC-30-A	894 ± 11	29 ± 0.6	58 ± 1.3	0.49	KC-30-B	922 ± 21	37 ± 0.8	80 ± 1.9	0.60
KC-31-A	1,267 ± 19	28 ± 0.7	55 ± 2.8	0.55	KC-31-B	966 ± 19	33 ± 1.7	57 ± 1.8	0.51
KC-32-A	853 ± 15	12 ± 1.1	20 ± 0.9	0.29	KC-32-B	887 ± 11	12 ± 0.4	24 ± 0.9	0.31
KC-33-A	718 ± 17	35 ± 0.8	56 ± 3.1	0.46	KC-33-B		-		
KC-34-A	865 ± 18	36 ± 1.5	66 ± 3.1	0.53	KC-34-B	706 ± 18	53 ± 1.0	94 ± 3.8	0.65
KC-35-A	532 ± 8	76 ± 1.0	129 ± 2	0.82	KC-35-B	123 ± 11	147 ± 2	240 ± 4	1.35
KC-36-A	766 ± 19	28 ± 1.6	46 ± 3.6	0.41	KC-36-B	776 ± 11	26 ± 0.7	48 ± 1.3	0.42
KC-37-A	812 ± 19	30 ± 1.9	51 ± 3.3	0.44	KC-37-B		-		
KC-38-A	877 ± 17	42 ± 1.6	71 ± 1.5	0.57	KC-38-B	978 ± 11	22 ± 0.6	51 ± 1.3	0.46
KC-39-A	1,097 ± 18	42 ± 0.7	107 ± 3	0.76	KC-39-B	608 ± 18	93 ± 2.3	172 ± 20	1.04
KC-40-A	1,433 ± 26	35 ± 0.8	83 ± 1.9	0.71	KC-40-B	1,427 ± 23	35 ± 0.7	84 ± 1.7	0.72
KC-41-A	745 ± 16	33 ± 2.3	57 ± 1.6	0.46	KC-41-B		-		
Range	126~1433	8~129	13~184	0.1~1.1	Range	100~1,427	12~179	24~240	0.23~1.66
Average	806	44	81	0.6	Average	647.33	47	94	0.66

Hex*: External hazard Index = $C_{Ra}/370 + C_{Th}/259 + C_K/4810$ (Beretka and Mathew, 1985)

-: Analysis impossible due to low sample quantity

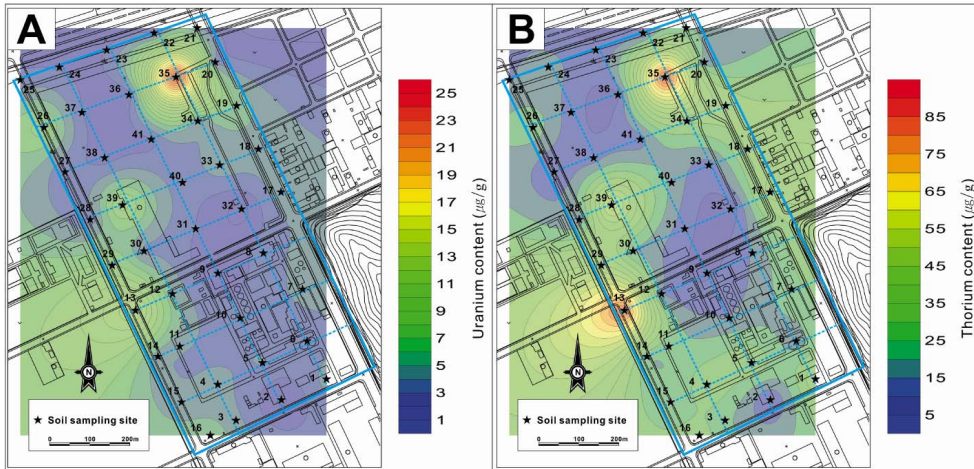


Fig. 5. Contour maps of U and Th contents of soil samples (30 cm depth from the surface) around the bauxite processing plant of KC company (A: uranium, B: thorium).

Table 4. A comparison of the activity ranges of natural radionuclides in soil, bauxite, and red mud (Koh *et al.*, 2008)

	⁴⁰ K (Bq/kg)	²²⁶ Ra (Bq/kg)	²³² Th (Bq/kg)
Soil samples	100~1,433 (Avg.798)	8.4~179 (Avg. 47)	13.5~300 (Avg. 89)
Bauxite (1 sample)	13.8 ± 4	59.3 ± 2	79.5 ± 2R
Red mud (2 samples)	65.8 ± 9 13.3 ± 8	184.2 ± 4 195.5 ± 5	261.1 ± 7 278.6 ± 7

~0.179 Bq/g)이며 평균 89 Bq/kg (0.089 Bq/g)이다. ²³²Th의 농도범위는 13.5~300 Bq/kg (0.013~0.300 Bq/g)이며 평균 89 Bq/kg (0.089 Bq/g)이다 (표 3). (주)KC에서 사용하는 호주산 보오크사이트 1개 시료의 ⁴⁰K의 농도값은 13.8 ± 4 Bq/kg, ²²⁶Ra은 59.3 ± 2 Bq/kg, ²³²Th의 농도는 79.5 ± 2 Bq/kg이며 부산물로 나오는 red mud 2개 시료의 ⁴⁰K의 농도는 65.8 ± 9, 13.3 ± 8 Bq/kg, ²²⁶Ra의 농도는 184.2 ± 4, 195.5 ± 5 Bq/kg, ²³²Th은 211.3 ± 7, 278.6 ± 7 Bq/kg이다(표 4, 고상모 등, 2008).

⁴⁰K의 농도는 토양시료가 보오크사이트와 red mud에 비해 월등히 높은 농도를 보여준다. 이는 토양 내에는 K-함유 광물인 K-장석이나 K-운모(일라이트-운모)가 일정량 함유되어 있기 때문인 것으로 해석된다. ²³⁸U의 딸 핵종인 ²²⁶Ra의 농도는 토양시료가 보오크사이트와는 비슷한 농도를 나타내지만 red mud에서는 토양시료와 보오크사이트 시료에 비해 훨씬 높은 농도치를 보이는데, 이는 토양시료의 총 U 함량이 평균 4.7 ppm, 보오크사이트가 9 ppm

에 불과하지만 red mud는 18 ppm으로서 이들 보다 훨씬 높은 농도를 나타내기 때문인 것으로 보인다(고상모 외, 2008). ²³²Th의 농도 역시 토양시료와 보오크사이트에 비해 red mud가 매우 높은 값을 보이는 것은 토양시료 Th 평균함량 23.6 ppm, 보오크사이트가 24.3 ppm인데 비해 red mud는 75 ppm으로서 상대적으로 높은 농도를 보이기 때문이다(고상모 외, 2008). Red mud는 보오크사이트로부터 수산화알루미늄을 제조한 후 남은 잔여물로서 U이나 Th 등 미량원소들이 잔유물인 red mud에 농집되어 그 농도가 높다.

⁴⁰K, ²²⁶Ra 및 ²³²Th 핵종 등농도 곡선을 그려보면 지표 10 cm 하부 및 30 cm 하부 시료의 농도 분포는 거의 동일하며(그림 6), 이는 심도에 따라 농도변화가 거의 없음을 의미한다. ⁴⁰K 농도가 높은 지역은 공장 북편 원광석 적재장(운반장) 인근에서 나타나며, 이는 보오크사이트 원광석과 무관하게 주변에서 공급된 퇴적물 내 K-장석이나 K-운모(일라이트)가 풍부히 함유한 연유로 생각된다.

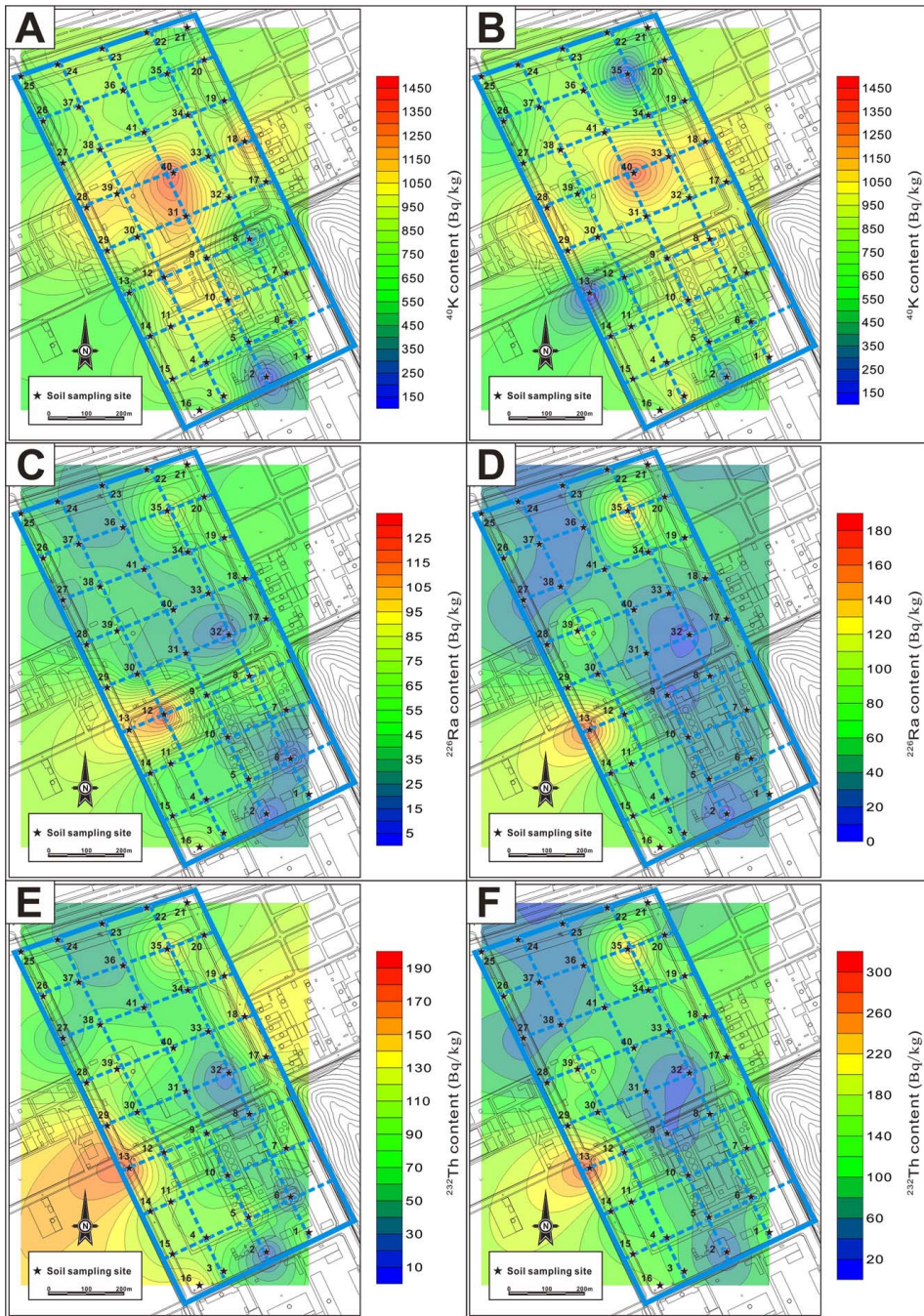


Fig. 6. Contour maps of ^{40}K , ^{226}Ra , and ^{232}Th radioactivity of soil samples (A, C, and E: 10 cm depth from the surface, B, D, and F: 30 cm depth from the surface) around the bauxite processing plant of KC company.

^{226}Ra 농도는 KC-12 및 KC-13 시료에서 높게 나타나는데 red mud 적재장 주변으로서 red mud의 영향인 것으로 판단된다. ^{232}Th 역시 KC-13 시료가

가장 높다. 이 역시 red mud 조성광물들인 적철석과 보에마이트가 토양 내 포함되어 있기 때문이다. 핵종 농도로부터 계산된 토양시료의 외부위해지

수 범위는 0.10~1.66이며 평균 0.63으로서 전체적으로는 위해 기준치로 제시되는 1.0 이하이지만 4개 지점이 1.0 이상으로서 보다 자세한 조사가 요구된다(표 3).

결 론

1) (주)KC 공장 내부 및 주변지역 토양에서 산출하는 광물은 석영, 장석 및 K-운모(일라이트 포함) 등이며 이는 모암으로부터 유래된 것으로 해석된다. 일부 시료에서는 고령토, 방해석, 세피올라이트, 보에마이트, 적철석 등이 산출되는데 이는 원광석인 보오크사이트로부터 유래된 것으로 판단된다.

2) 채취된 41개 토양 시료의 평균 U 함량은 4.7 ppm, Th 함량은 23.6 ppm으로서 U는 지각의 평균 함량인 4 ppm과 유사하나 Th는 평균 함량의 2배에 달한다. 보오크사이트 원광석이 적재되어 있는 노천 야적장에서 가장 높은 U, Th 농도(U 25.8 ppm, Th 91.4 ppm)가 확인된다.

3) 토양시료 내 ^{40}K 농도는 100~1,433 Bq/kg, ^{226}Ra 농도는 8.4~179 Bq/kg, ^{232}Th 농도는 13.5~300 Bq/kg 이다. ^{40}K 농도는 토양시료가 보오크사이트와 red mud에 비해 월등히 높은 농도를 보여준다. ^{226}Ra 의 농도는 토양시료가 보오크사이트와는 비슷한 농도를 나타내지만 red mud에서는 토양시료가 보오크사이트 시료에 비해 훨씬 높은 농도를 보인다.

4) 토양시료의 외부위해지수 범위는 0.10~1.66이며 평균 0.63으로 전체적으로는 위해 기준치로 제시되는 1.0 이하이지만 4개 지점에서 1.0 이상으로 나타나므로 보다 지속적인 감시와 관리가 요구된다.

사 사

이 논문은 교육과학기술부에서 지원하는 “원자력연구개발사업”으로 수행된 한국원자력안전기술원 연구사업(2009-0062432)의 위탁연구사업(KINS/HR-1033)으로 수

행되었다. 유익한 조언과 세심한 교정을 해주신 경상대학교 조현구 교수님과 한국기초과학지원연구원 윤혜은 박사님께 감사드립니다.

참고문헌

- 고상모, 유장한, 김용욱, 류충렬, 김대형, 김지환, 이홍진 (2008) 천연 방사성 산업물질 실태조사. 한국원자력안전기술원, KINS/HR-858.
- 장병욱 (2007) NORM/TENORM 국내현황. 제6회 방사선 안전 심포지움.
- 지식경제부 및 한국지질자원연구원 (2009) 2008년도 광산물 수급현황.
- Beretka, J. and Mathew, P.J. (1985) Natural radioactivity of Australian building materials, industrial wastes, and by-products. Health Physics, 48, 87-95.
- Chang, B.U., Koh, S.M., Kim, Y.J., Seo, J.S., Yoon, Y.Y., Row, J.W., and Lee, D.M. (2008) Nationwide Survey on the Natural Radionuclides of Industrial Raw Minerals in South Korea. Journal of Environmental Radioactivity, 99, 455-460.
- European Commission (1999) European Commission report on radiological protection principles concerning the natural radioactivity of building materials. Radiation Protection, 112.
- Goldschmidt, V.M. (1937) The principles of distribution of chemical elements in minerals and rocks. J. Chem. Soc. London, March, 655-673.
- ICRP 60 (1990) Recommendations of the International Commission on Radiological Protection.
- International Atomic Energy Agency (2004) Application of the concepts of exclusion, exemption, and clearance. Safety Standards Series, Safety Guideline RS-G-1.7.
- Vinogradov, A.P. (1962) Average content of chemical elements in the major types of igneous rocks of the earth's crust. Geochemistry, 7, 641-664.

접수일(2010년 11월 29일), 수정일(1차 : 2010년 12월 17일), 게재확정일(2010년 12월 21일)