

인광석 사용업체 주변 환경시료의 자연방사능 조사

이길재¹ · 고상모^{1*} · 장병욱² · 김통권¹ · 김용욱¹

¹한국지질자원연구원 광물자원연구본부, ²한국원자력안전기술원 안전연구부

Investigation on Natural Radioactivity of Environmental Samples Near the Phosphate Rock Processing Facility

Gill Jae Lee¹, Sang Mo Koh^{1*}, Byung-Uck Chang², Tong-Kwon Kim¹ and Young Ug Kim¹

¹Mineral Resources Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

²Radiation Research Department, Safety Research Division, Korea Institute of Nuclear Safety

Some industrial minerals used in domestic industries such as monazite, apatite, bauxite, and ilmenite belong to NORM (Naturally Occurring Radioactive Materials) because they show a high radioactivity. Products, semi-products, wastes, and by-products which show higher radioactivity than NORM belong to TENORM (Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Materials). Apatite used for manufacturing phosphate fertilizer in Namhae Chemical company belongs to NORM, and its by-product, phospo-gypsum, belongs to TENORM. A geological investigation is needed for the future environmental impact assessment of the Namhae Chemical company's site. According to survey results of the Namhae Chemical company's site, soil mineral composition indicated the mixture of minerals derived from the country rock (quartz, feldspar, mica, 14Å mineral, kaolin and amphibole) and minerals from the gypsum open-air storage yard (gypsum and apatite). Soil samples showed average content of U 4.6 ppm and Th 10 ppm, which are similar to average crustal abundances. They also show average contents of ⁴⁰K 191-1,166 Bq/kg, ²²⁶Ra 15.6-710 Bq/kg, and ²³²Th 17.4-72.7 Bq/kg, which indicate moderate levels of radionuclide. But ²²⁶Ra anomaly in the gypsum open storage yard is clearly confirmed and ²³²Th anomaly is also confirmed in the east road side of the factory and nearby mountain areas. Soil external hazard indices ranged 0.24-2.01 with the average 0.54. Although most external hazard indices were lower than 1, which means radiation hazard index to be negligible, 5 samples out of total 40 samples showed higher values than 1, and further detailed investigation is needed.

Key words : NORM, apatite, environmental investigation, radiation hazard index

국내에서 유통되는 산업원료물질 중 모나자이트, 인회석, 저어콘, 보오크사이트, 티탄철석 등은 천연방사성핵종을 함유한 원료광물로서 '자연기원방사성물질 (NORM)'에 속한다. 이러한 원료광물을 사용하여 제조된 제품, 반제품, 부산물 또는 폐기물이 원료광물보다 천연방사성핵종의 농도가 증가된 물질은 '인위적으로 농축된 자연기원방사성물질 (TENORM)'로 분류한다. 인산비료를 제조하는 남해화학(주)에서 사용하는 인회석은 NORM에, 부산물로 생산되는 인산석고는 TENORM에 해당된다. 이와 같은 NORM을 대량 사용하는 사용시설인 남해화학(주) 내부 및 주변 지역 지질환경에 대한 영향평가가 필요하다. 이러한 배경에서 이 공장 내부 및 주변 지역의 지질특성, 토양에 대한 광물학적 및 지화학적 분석을 수행하여 향후 관리에 관한 과학적인 기초자료를 제공하고자 한다. 남해화학(주) 공장 내부 및 인근 지역 토양의 광물조성은 석영, 장석, 운모, 14Å광물, 고령토, 각섬석 등 모암으로부터 유래된 광물조성과 석고, 인회석 등 석고 야적장에서 유래된 광물조성으로 혼화되어 있다. 이 지역 토양의 평균 U 함량은 4.6 ppm, Th 함량은 10 ppm으로서 지각의 평균 함량과 거의 유사하다. 토양의 ⁴⁰K의 농도는 191-1,166 Bq/kg, ²²⁶Ra의 농도는 15.6-710 Bq/kg 이고 ²³²Th의 농도는 17.4-72.7 Bq/kg으로서 극히 높은 핵종 농도는 보이지 않으나 상대적으로 높은 ²²⁶Ra 농도는 인산석고 적재장에서 뚜렷이 확인되며 ²³²Th 농도가 높은 지점은 공장 동편 도로변 및 산채에서 잘 확인된다. 토양시료

*Corresponding author: kohsm@kigam.re.kr

의 외부위해지수 범위는 0.24-2.01이며 평균 0.54로서 전체적으로는 위해 기준치로 제시되는 1.0 이하이지만 일부 지점에서는 1.0 이상이다.

주요어 : 자연기원방사성물질, 인회석, 환경조사, 외부위해지수

1. 서 론

‘자연기원 방사성물질 (NORM: Naturally Occurring Radioactive Materials)’과 ‘인위적으로 농축된 TENORM (Technologically Enhanced NORM)’에 대해서 국제적인 안전지침이 IAEA에서 마련된 바 있다 (IAEA, 2004). EU에서는 NORM 사용 사업장에 대해 순차적인 접근을 통한 규제접근을 권고하고 있으며 선량 기준을 1 mSv/y 미만은 규제 제외, 1-6 mSv/y 는 약한 규제 개입, 6-20 mSv/y는 강한 규제 개입 및 20 mSv/y 이상은 작업장 및 종사자 관리를 제안하고 있다 (EC RP 95, 1999).

1990년 국제방사선보호위원회 (ICRP: International Commission on Radiological Protection)에서는 작업 종사자의 연간 평균 선량을 20 mSv (5년 평균), 일반인의 연간 평균 선량을 1 mSv로 제한하여 관리할 것을 권고한 바 있다 (ICRP 60, 1990). 자연기원방사성물질과 인위적으로 농축된 TENORM에 대한 규제 접근은 국가마다 차이가 있으며 유럽연합의 경우 회원국에게 적절한 선량평가에 따른 순차적인 접근을 권고하고 있다 (European Commission, 1999).

국내에는 다양한 종류와 많은 양의 산업원료광물이 유통·활용되고 있다. 수입되고 있는 일부 원료광물 중 저어콘, 티탄철석, 점토, 보오크사이트 및 인회석 등은 상대적으로 천연방사성핵종 농도가 높은 광물로서 국내 생산, 수입, 유통되는 주요 원료광물에 대한 조사 및 평가가 수행된 바 있다 (Chang, 2007; Chang *et al.*, 2008). 국내에서 인회석은 인산비료용으로만 사용되며 2008년 총수요량 (총수입량)이 1,417,731 톤 (3,670 억원)이며 중국, 모로코, 나우르, 요르단 등으로부터 수입된다 (MKE and KIGAM, 2009). 비료제조회사는 남해화학, 동부 하이텍, 달재화학 등이며 남해화학에서 연간 100만톤의 인회석을 사용하고 있다.

천연방사성핵종을 함유한 광물인 인회석을 대량 사용하여 인산비료를 제조하는 남해화학(주) 공장 내부 및 주변에 대한 토양의 핵종 농도를 포함한 지화학적 특성을 규명하여 지질환경조사를 수행하였다. 이 연구 결과는 향후 공장 내부 및 주변지역의 환경관리를 위한 과학적인 기초자료로서 활용 될 수 있을 것이다.

2. 남해화학 현황

남해화학(주)는 전라남도 여수시 낙포단지 내에 위치하고 있다. 남해화학(주)는 요소비료 및 복합비료, 원에 과수비료와 BB비료 등 40여종의 비료와 10여종의 화학제품을 생산하여 판매하고 있다. 원료광물인 인광석을 모로코, 요르단, 토고 및 중국으로부터 197,606톤 (2009년 기준) 수입하였으며, 2009년 인광석 수요량은 약 100만톤이었다. 원광석을 이용한 1차 생산 품목은 인산과 인산석고이다. 2009년 인산 생산량이 111,840톤, 인산석고 생산량이 559,263톤 이다. 인산은 비료제조용으로 사용되고 인산석고는 (주)KCC 및 (주)라파즈 코리아에 석고제조용으로 판매하고 있다. 최종제품인 인산비료의 2009년 생산량은 111,840 톤이고 복합비료 생산량은 566,567 톤이다. 남해화학(주)의 여수공장에는 행정인력 5명과 기술인력 35명이 근무한다. 과거 자연방사성물질에 대한 관리는 인광석 보관장고 비산먼지 관리를 하는 것 외에는 특별히 없었으나 2009년 4월과 9월 고농도 NORM Scale 발견을 계기로 전담인력 (방사선안전관리자)을 지정, 관리하고 있다 (Chang, 2009).

3. 연구방법

3.1. 시료채취

남해화학(주)에서의 토양시료 채취는 공장 내부, 인산석고 야적장 및 주변 지역을 대상으로 총 40곳의 시료가 채취되었다 (Fig. 1). 시료채취는 한 지점에서 지표 10 cm 하부층(A)과 30 cm 하부층(B)에 대해 각각 수행 되었다.

3.2. 화학분석 및 X선 회절분석

남해화학(주)에서 채취한 토양시료의 U 및 Th 분석은 한국지질자원연구원 분석센터에서 유도결합 플라즈마 질량분석기 (ICP-MS)로 수행하였다. X선 회절분석은 한국지질자원연구원 해외광물자원연구실에서 보유하고 있는 Rigaku/Rint2002 고분해능 X선 회절분석기를 이용하였으며, 흑연 단색화된 파장 ($CuK\alpha=1.5406\text{\AA}$)을 사용하였다. 정량분석을 위한 원 시료의 분석조건은 40 kV/

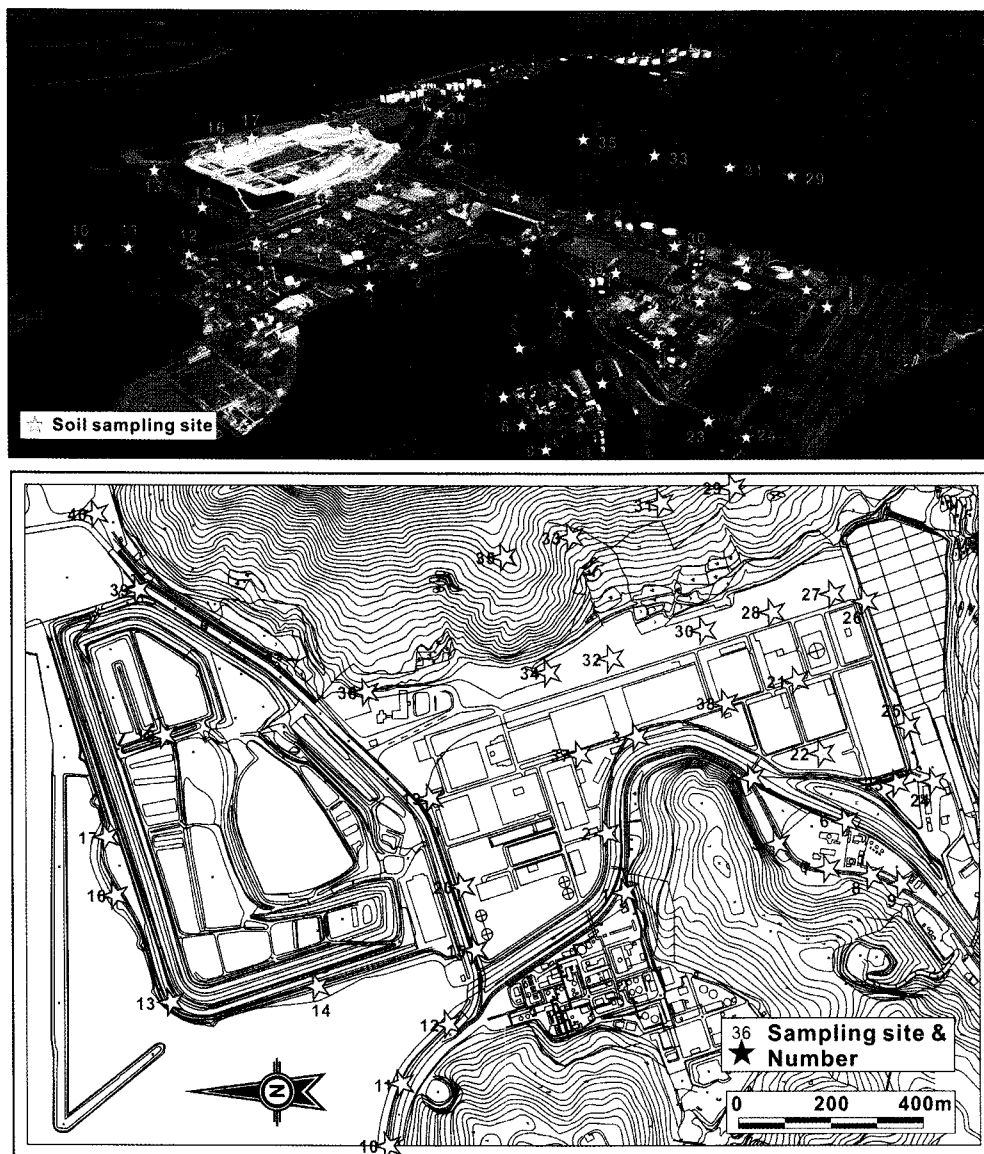


Fig. 1. Soil sampling sites around the Namhae Chemical company.

20 mA, 2~45° 2-theta 구간에서 주사 간격 0.01°, 주사 시간 2° two-theta/min로 설정하여 회절값을 기록하였다.

3.3. 천연방사성핵종분석

채취된 토양시료는 모두 16 mesh 체로 걸러 그 이하 입도물의 천연방사성핵종 농도를 한국원자력안전기술원에서 분석하였다. 전처리가 완료된 시료는 ²²⁶Ra의 딸핵종인 ²²²Rn의 확산유출을 막기 위해 알루미늄캔에 충전하고 Can Seamer를 사용하여 완전 밀봉시켰다. 라듐동위원소와 딸 핵종 간의 방사평형이 이루어지도록

3주 이상 방치한 뒤 감마분광분석법을 이용, 대표적인 천연방사성핵종인 ⁴⁰K, ²²⁶Ra, ²³²Th의 농도를 분석하였다. ⁴⁰K는 1461 keV의 감마선을 직접 측정하였으며 ²²⁶Ra와 ²³²Th는 각각 ²¹⁴Pb의 609 keV 감마선과 ²²⁸Ac의 911 keV의 감마선을 고순도게르마늄검출기(HPGe)로 측정하여 구하였다. 사용된 게르마늄검출기의 상대효율은 30%이며 FWHM 값은 ⁶⁰Co의 1,332 keV 감마선에 대해 2.0 keV이었으며 시료에 대한 계측시간은 80,000초였다. 알루미늄캔에 대한 효율교정은 혼합 희석선원을 사용하여 수행하였으며 희석선원에는 59.5 keV와

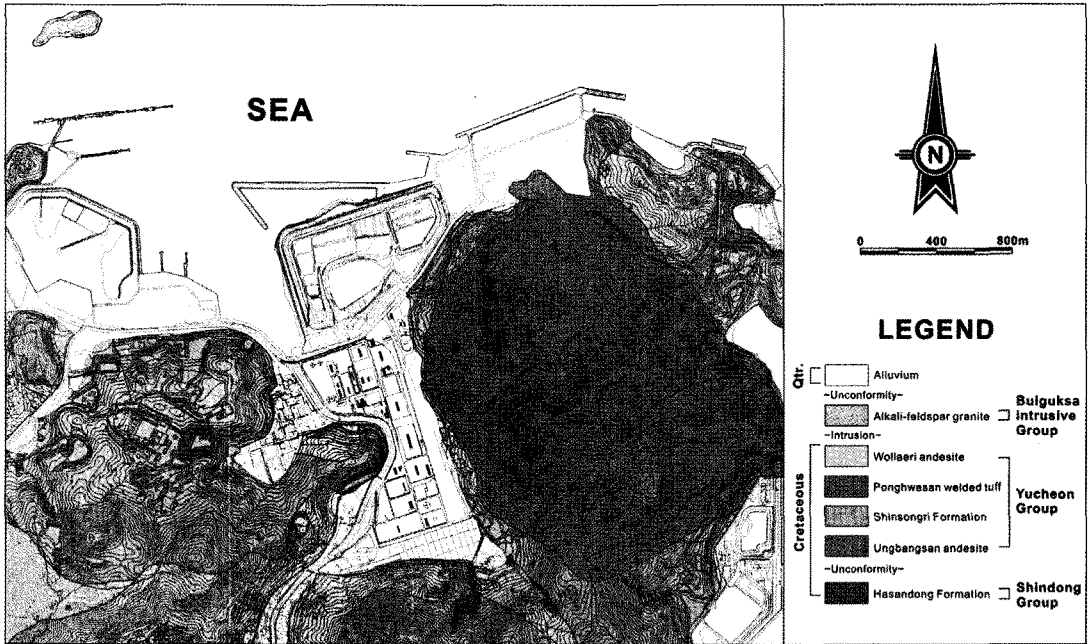


Fig. 2. Geological map around the Namhae Chemical company (Chang *et al.*, 1989; Park *et al.*, 1989).

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 Amer-sham)을 사용하였다.

4. 결 과

4.1. 주변지질환경

남해화학(주) 주변 지역은 중생대 백악기에 형성된

유천층군에 대비되는 화산암류와 퇴적암류로 주로 구성된다 (Fig. 2). 화산암류는 안산암질 응회암과 각력암으로 주로 구성되는 화산암 하부층과 이에 정형적으로 화산성 쇄설퇴적암류인 이암, 사암 및 역암이 파복되며, 이 퇴적층 상부에는 유문암질 응회암류가 분포한다. 남해화학의 동편 및 북동편에는 유문암류가 주로 분포하며, 서편과 북서편에는 안산암질암이 주로 분포한다. 남부에는 화강암류가 다소 우세하게 분포하고 있다 (Fig. 2).

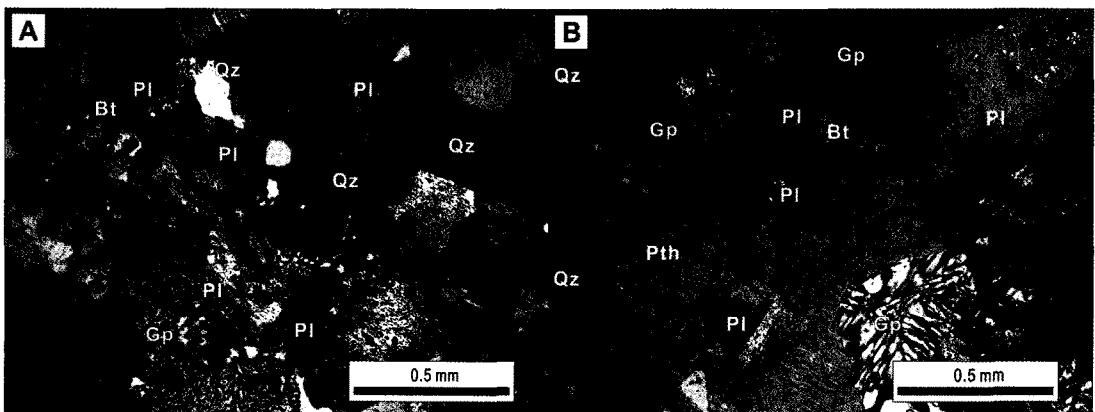


Fig. 3. Microphotographs of granites around the Namhae Chemical company (Bt:biotite; Gp:granophyre; Pl:plagioclase; Pth:perthite; Qz:quartz).

이 지역에서 주로 분포하는 화강암류는 주로 조립질의 석영과 정장석, 사장석으로 구성되며, 일부 흑운모가 수반된다 (Fig. 3). 석영은 자형-반자형으로 산출하며 평균 0.3 mm의 장경을 갖는다. 장석류는 부분적으로 견운모화 되었고, 일부 흑운모는 녹니석화가 진행되었다. 이 화강암류는 정장석과 석영이 연정 (inter-growth)

하며 문상조직 (granophytic texture)을 보이는 문상 화강암이다. 흑운모는 대부분 작은 결정의 반자형-타형으로 산출된다 (Fig. 3). 이 화강암 3개 시료의 U 함량은 각각 2.21, 1.83 및 1.13 ppm이며 Th 함량은 각각 12.8, 11.6 및 8.89 ppm이다. Vinogradov (1962)에 의해 정리된 화강암류의 U 평균함량은 3.5 ppm, Th는 18 ppm

Table 1. Mineral compositions of soil samples around the Namhae Chemical company

sample no.	quartz	feldspar	mica (illite)	14Å mineral	kaolinite	amphibole	gypsum	apatite
NH-1-B	***	**	*	*	*			
NH-2-B	***	**	*	*				
NH-3-B	***	**	*	*	*	*		
NH-4-B	***	**	*					
NH-5-B	***	*	*	*	*			
NH-6-B	***	**	*	*	*			
NH-7-B	***	**	*					
NH-8-B	***	**	*		*			
NH-9-B	***	**		*	*			
NH-10-B	***	**	*	*				
NH-11-B	***	**	*					
NH-12-B	***	**	*					
NH-13-B	***	**				*	***	
NH-14-B	***	**	*				***	
NH-15-B	***	***	*					
NH-16-B	*						***	
NH-17-B	***	**	**					
NH-18-B	*						***	
NH-19-B	***	**	*				*	*
NH-20-B	***	**	*					
NH-21-B	***	**	*					
NH-22-B	***	**	*	*	*			
NH-23-B	***	***		*	*	*		
NH-24-B	***	***		*	*			
NH-25-B	***	***		*	*			
NH-26-B	***	**	*		*			
NH-27-B	***		*		*			
NH-28-B	***				*			
NH-29-B	***		*		*			
NH-30-B	***	*	*	*				
NH-31-B	***					*		
NH-32-B	***	*	*	*	*			
NH-33-B	***				*			
NH-34-B	***	*	*		*			
NH-35-B	***	*	*	*	*			
NH-36-B	***	*		*	*	*		
NH-37-B	***	**	*		*	*		*
NH-38-B	***	**	*	*	*			*
NH-39-B	***	**					***	
NH-40-B	***	**	*					*

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

으로서 조사 지역의 화강암류는 이보다 훨씬 낮은 함량을 보인다.

4.2. 토양분석결과

4.2.1. 광물조성

지표 30 cm 하부 채취된 40개 시료에 대해 X-선 회절분석을 실시하여 조성광물을 파악하였다. 각 토양시료는 다음과 같은 다양한 산출광물군을 나타낸다 (Table 1, Fig. 4).

- 석영-장석-운모 (일라이트 포함)
- 석영-장석-운모 (일라이트 포함)-14Å광물 (-고령토 광물) (-각섬석)
- 석영-장석-14Å광물-고령토광물 (-각섬석)
- 석영-석고 (-장석)
- 석영-장석-14Å광물-석고
- 석영-장석-각섬석-석고

석고를 제외한 구성광물들은 주변지역에 분포하는 화강암류와 유문암질암으로부터 주로 유래되고, 일부는 안산암질암으로부터 유래된 것으로 추정된다. 석고의 산출은 북편에 위치한 인산석고 야적장으로부터 비산되어 퇴적되거나, 빗물에 의해 운반되어 토양층에 퇴적 되었을 것이다. 석고는 주로 석고 야적장 주변에 분포하는 토양시료에 함유되어 있는 것이 이를 뒷받침한다 (Fig. 1, 4, Table 1).

4.2.2. 방사능 농도

남해화학 공장 내부와 주변지역에 대한 40개 토양시료 (지표 30 cm 하부시료)의 U, Th 분석 결과 U 함량

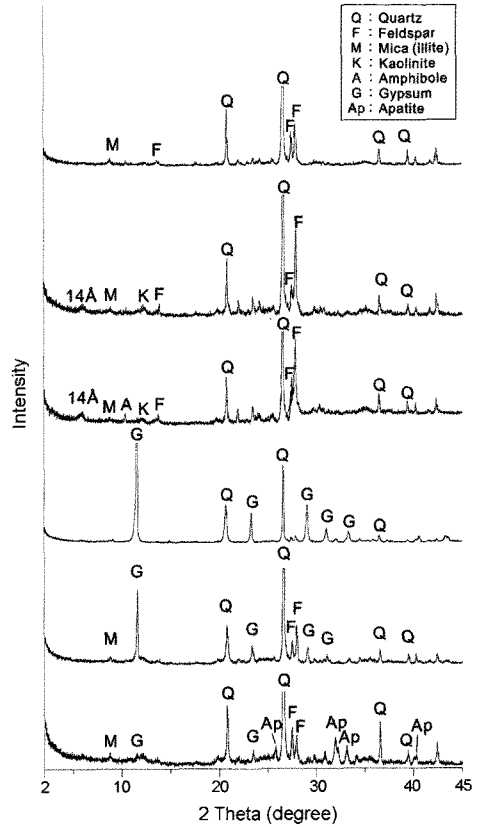


Fig. 4. X-ray diffraction patterns of soil samples around the Namhae Chemical company.

범위는 1.9-19.6 ppm, 평균함량은 4.6 ppm이며 Th의 함량 범위는 4.9-15.4 ppm, 평균 함량은 10.0 ppm이다 (Table 2). 이러한 평균 함량비는 지각의 U 평균함량

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

sample no.	U	Th	sample no.	U	Th	sample no.	U	Th
NH-1-B	6	10.8	NH-15-B	4.4	4.9	NH-29-B	4.5	12
NH-2-B	3.9	9.8	NH-16-B	8.6	4.9	NH-30-B	3.6	14.6
NH-3-B	5	9.3	NH-17-B	2.8	8.5	NH-31-B	4.4	13.4
NH-4-B	4.2	15.4	NH-18-B	10.9	7	NH-32-B	4.3	14.1
NH-5-B	3.7	10.9	NH-19-B	19.6	8.1	NH-33-B	3.4	11.8
NH-6-B	2.4	10.1	NH-20-B	2.2	5.9	NH-34-B	3.6	11.1
NH-7-B	2.5	11.8	NH-21-B	2.5	8.5	NH-35-B	4.7	10.6
NH-8-B	3.1	11.1	NH-22-B	3.2	12	NH-36-B	4.7	12.1
NH-9-B	4.3	10.9	NH-23-B	1.9	8.5	NH-37-B	9	9.2
NH-10-B	2.9	10	NH-24-B	2.2	8.9	NH-38-B	3.6	9
NH-11-B	3.3	8.6	NH-25-B	2.6	8.6	NH-39-B	6	8.1
NH-12-B	3.4	9.1	NH-26-B	2.7	10.2	NH-40-B	9	9.2
NH-13-B	2.9	9.5	NH-27-B	3.4	11.1			
NH-14-B	6.5	8.5	NH-28-B	2.8	13.2			

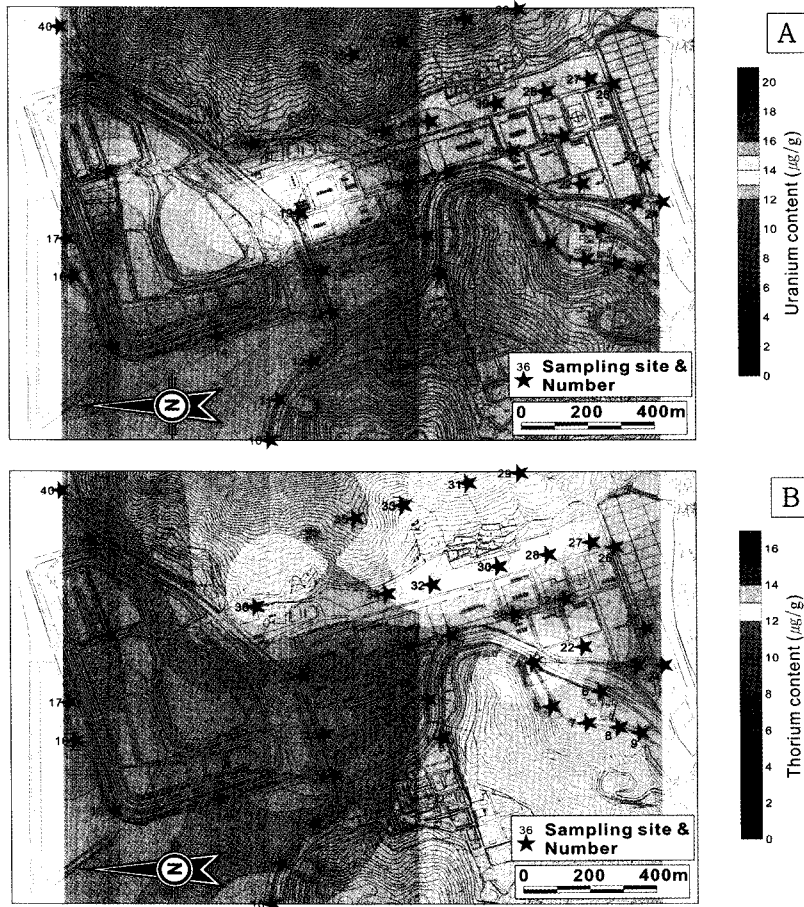


Fig. 5. U, Th contour maps of soil samples (under 30 cm part from the surface) around the Namhae Chemical company (A:uranium; B:thorium).

4 ppm, Th 평균 함량 11 ppm (Goldschmidt, 1937) 과 거의 유사한 값을 나타낸다.

남해화학에서 사용하는 인광석 3개 시료의 U 함량은 104, 102, 138 ppm이며 Th 함량은 3.5, 1.3 및 4.4 ppm이다. 부산물로 생산되는 인산석고 2개 시료는 U 함량이 6.6과 7.8 ppm이고 Th 함량은 3.0과 2.7 ppm 이다 (Koh *et al.*, 2008). 인광석과 인산석고에 비교한다면 토양시료는 Th 함량은 다소 높는데 반해 U은 보다 낮은 함량비를 나타낸다.

U 및 Th의 함량농도에 따른 등농도 곡선을 그려보면 U이 가장 고농도 (NH-19-B 시료 농도 19.6 ppm) 를 보여주는 지점이 인광석 창고와 인접한 지역의 토양 시료로서 창고 내 적재된 인회석 운반시 주변 토양을 오염시킨 것으로 생각된다 (Table 2, Fig. 5).

4.2.3. 천연방사성핵종농도

지표 10 cm 하부층과 30 cm 하부층 시료 80개에 대해 자연방사성핵종분석을 수행 하였으며 분석 결과는 Table 3과 같다. 핵종농도치를 이용하여 외부위해지수 (External Hazard Index: Hex)는 Beretka and Mathew (1985)에 의해 제안된 식을 이용하여 계산하였다.

토양시료의 ^{40}K 의 농도범위는 191-1,166 Bq/kg (0.191-1.166 Bq/g)이며 평균 650 Bq/kg (0.650 Bq/g), ^{226}Ra 의 농도범위는 15.6-710 Bq/kg (0.0156-0.710 Bq/g)이며 평균 89.3 Bq/kg (0.089 Bq/g)이다. ^{232}Th 농도는 17.4-72.7 Bq/kg (0.017-0.073 Bq/g)이고 평균 41.1 Bq/kg (0.041 Bq/g)이다 (Table 3). 남해화학(주)에서 사용하는 인광석 3개 시료의 ^{40}K 의 농도값은 19.7±5.73, 26.2±3.85, 20.4±6.12 Bq/kg, ^{226}Ra 은 934.5±19.83,

96.5±2.209, 1,176±24.9 Bq/kg, ²³²Th의 농도는 9.498±1.395, 2.252±0.62, 11.6±1.578 Bq/kg이며 부산물로 생산되는 인산석고 2개 시료의 ⁴⁰K의 농도는 19.1±5.57, 8.61±5.78 Bq/kg, ²²⁶Ra의 농도는 591.9±12.67, 432.4

Table 3. Activity ranges of natural radionuclides from the 10 cm and 30 cm under the surface soils in the Namhae Chemical 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*
NH-01-A	809±11	77±1	46±1	0.55	NH-01-B	659±11	124±1	44±1	0.64
NH-02-A	770±11	71±1	42±1	0.51	NH-02-B	742±18	46±2	28±1	0.39
NH-03-A	679±19	145±3	37±1	0.68	NH-03-B	704±17	73±2	41±3	0.50
NH-04-A	724±14	125±2	42±2	0.65	NH-04-B	846±17	43±1	40±3	0.44
NH-05-A	771±17	69±2	53±2	0.55	NH-05-B	780±11	77±1	54±1	0.58
NH-06-A	735±18	38±2	48±1	0.44	NH-06-B	720±14	36±1	46±2	0.42
NH-07-A	825±12	29±1	41±3	0.41	NH-07-B	850±11	28±1	46±1	0.43
NH-08-A	812±12	47±2	42±4	0.46	NH-08-B	917±13	39±1	54±1	0.50
NH-09-A	934±19	30±1	48±3	0.46	NH-09-B	895±19	31±1	43±1	0.44
NH-10-A	595±16	38±2	46±1	0.40	NH-10-B	616±11	46±1	47±2	0.43
NH-11-A	799±14	42±1	34±1	0.41	NH-11-B	862±11	43±2	41±2	0.45
NH-12-A	754±19	29±1	30±1	0.35	NH-12-B	782±19	35±2	37±1	0.40
NH-13-A	297±7	411±3	21±1	1.25	NH-13-B	724±15	58±1	42±1	0.47
NH-14-A	191±7	704±5	19±4	2.01	NH-14-B	586±10	103±1	38±1	0.55
NH-15-A	917±16	27±1	37±1	0.40	NH-15-B	675±16	49±1	22±1	0.36
NH-16-A	519±17	320±3	33±1	1.10	NH-16-B	255±13	441±3	20±3	1.32
NH-17-A	955±17	23±1	35±3	0.40	NH-17-B	1,166±12	27±1	44±1	0.49
NH-18-A	455±9	447±5	30±2	1.42	NH-18-B	229±15	710±8	23±2	2.06
NH-19-A	312±9	339±3	25±5	1.08	NH-19-B	553±10	205±2	37±1	0.81
NH-20-A	546±14	84±2	20±1	0.42	NH-20-B	548±8	21±1	17±1	0.24
NH-21-A	655±13	16±1	19±1	0.25	NH-21-B	740±16	23±1	37±1	0.36
NH-22-A	1,136±13	36±1	73±2	0.61	NH-22-B	969±13	56±1	62±2	0.59
NH-23-A	689±16	23±1	40±1	0.36	NH-23-B	697±11	22±1	37±1	0.35
NH-24-A	687±17	24±1	38±1	0.35	NH-24-B	669±14	25±1	39±1	0.36
NH-25-A	651±24	25±1	30±2	0.32	NH-25-B	532±10	17±1	37±3	0.30
NH-26-A	719±18	37±2	40±1	0.41	NH-26-B	784±18	56±1	44±1	0.48
NH-27-A	442±12	29±2	49±4	0.36	NH-27-B	448±11	29±1	53±2	0.38
NH-28-A	411±14	34±1	58±3	0.40	NH-28-B	193±13	31±2	61±4	0.36
NH-29-A	356±12	26±1	40±2	0.30	NH-29-B	361±18	28±2	44±4	0.32
NH-30-A	540±21	35±1	51±4	0.40	NH-30-B	571±17	36±1	63±2	0.46
NH-31-A	454±18	29±1	52±4	0.37	NH-31-B	506±13	35±1	60±5	0.43
NH-32-A	490±11	37±1	57±2	0.42	NH-32-B	519±10	41±1	62±2	0.46
NH-33-A	499±19	30±1	45±2	0.36	NH-33-B	489±18	31±2	45±4	0.36
NH-34-A	677±18	30±1	47±1	0.40	NH-34-B	699±19	34±2	49±1	0.43
NH-35-A	530±19	32±2	37±4	0.34	NH-35-B	543±17	28±2	37±3	0.33
NH-36-A	595±21	63±1	57±5	0.51	NH-36-B	652±13	49±1	56±2	0.48
NH-37-A	622±20	104±1	41±2	0.57	NH-37-B	679±13	80±1	44±2	0.53
NH-38-A	716±10	41±1	30±1	0.38	NH-39-B	658±10	122±1	27±1	0.57
NH-39-A	609±15	135±1	24±1	0.58	NH-40-B	794±11	96±1	33±3	0.55
NH-40-A	833±11	102±1	37±1	0.59					
range	191-1,136	16-704	19-57	0.25-2.01	Range	193-1,166	17-710	17-63	0.24-1.32
average	643	100	40	0.56	Average	653	78	43	0.51

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

Table 4. A comparison of the activity ranges of natural radionuclides in soil, apatite, and phospho-gypsum (Koh *et al.*, 2008)

	⁴⁰ K (Bq/kg)	²²⁶ Ra (Bq/kg)	²³² Th (Bq/kg)
soil samples	191-1,166 (avg. 650)	15.6-710 (avg. 89.3)	17.4-72.7 (avg. 41.1)
apatite (3 samples)	19.7±6	934.5±20	9.5±1
	26.2±4	96.5±2	2.3±1
	20.4±6	1,176.0±25	11.6±2
phosphate-gypsum (2 samples)	8.6±6	591.9±13	11.3±1
	19.1±6	432.4±9	4.8±1

±9.31 Bq/kg, ²³²Th은 11.3±1.33, 4.826±1.143 Bq/kg 이다 (Table 4, Koh *et al.*, 2008).

⁴⁰K의 농도는 토양시료가 인광석과 인산석고에 비해 월등히 높은 농도를 갖는 큰 차별성을 보여주며, 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 인광석과 인산석고에 비해 현저히 낮은 농도를 보인다. 토양시료의 총 U 함량이 평균 4.6 ppm인데 비해 인광석 3개 시료는 104, 102, 138 ppm으로서 월등히 높고 인산석고는 6.6 및 7.8 ppm으로서 토양시료에 비해 다소 높은 함량비를 보인다. 생산 공정을 거치는 동안 인광석 내에 포함된 천연방사성핵종 중 라듐 (²²⁶Ra, ²²⁸Ra)는 대략 90% 이상이 인산석고로 농축되며 우라늄 (²³⁸U, ²³⁵U)은 대략 95% 이상이 인산으로 농축되게 된다 (Chang, 2008).

토양시료의 ²³²Th의 농도는 인광석과 인산석고에 비해 다소 높은 농도를 보이는데 이는 Th 함량이 토양 시료는 평균 10.1 ppm인데 비해 인광석 3개 시료는 3.5, 1.3, 4.4 ppm이며 인산석고가 3, 2.7 ppm으로서 토양시료에 비해 낮기 때문이다.

토양시료의 외부위해지수 범위는 0.24-2.01이며 평균 0.54로서 전체적으로는 위해 기준치로 제시되는 1.0 이하이지만 7개 지점에서 1.0 이상이 확인됨으로서 보다 정밀한 조사 및 차후 관리가 요구된다.

⁴⁰K, ²²⁶Ra 및 ²³²Th 핵종 등농도 곡선을 그려보면 지표 10 cm 하부 및 30 cm 하부 시료의 각 핵종농도 분포는 거의 동일하며 (Fig. 6, 7), 이는 심도에 따라 농도변화가 거의 없음을 의미한다. ⁴⁰K 농도가 높은 지점은 공장 내 동편 원수 저수지 부근 3개 지점과 서편 인산석고 적재장 1개 지점에서 나타나며 농도 범위는 812-1,166 Bq/kg 이다. ²²⁶Ra 농도는 인산석고 적재장 전체 시료에서 뚜렷이 나타난다. 강한 이상치를 나타내는 특히 높은 농도를 보이는 지점은 10 cm 하부시료 채취지점과 30 cm 하부 시료 채취한 지점이 다르게 나타나는데 이는 인산석고 적재장 내부에서 심

도에 따라 농도 변화가 있음을 의미한다. 통상 이는 시기별로 다른 수입 인광석의 원산지 차이에서 기인하는 것으로 판단된다. 가장 높은 농도를 보이는 2개 지점은 704 및 710 Bq/kg 으로서 다소 높은 농도치를 보인다. ²³²Th은 공장 동편 도로변 및 산체에 나타나며 10 cm 및 30 cm 하부 시료의 농도패턴이 거의 동일하다. 상대적으로 높은 농도를 보이는 지점이 있으나 절대량으로 보면 높은 농도치는 아니다. 수입 인광석내에 포함된 Th 농도는 U에 비하여 매우 상당히 낮다.

총 U, ²²⁶Ra 고농도 지점과 총 Th, ²³²Th 고농도 지점의 패턴은 거의 동일하게 나타난다 (Fig. 5, 6, 7).

5. 결 론

남해화학(주) 공장 내부 및 주변지역 토양에서 산출하는 광물은 석영, 장석, 운모 (일라이트 포함), 고령토, 석고 등으로 주로 구성되며 석고를 제외한 광물은 주변에 분포하는 암석으로부터 유래되었으며, 석고는 석고 야적장으로부터 비산되어 유래된 것으로 판단된다.

채취된 40개 토양 시료의 평균 U 함량은 4.6 ppm, Th 함량은 10 ppm으로서 각각의 평균 함량인 U 4 ppm, Th 11 ppm 과 거의 유사하다. U 농도가 가장 높은값 (9.6 ppm)을 보여주는 지점이 인광석 창고와 인접한 지역이다. 토양시료의 ⁴⁰K의 농도는 191-1,166 Bq/kg으로서 인광석과 인산석고에 비해 월등히 높은 농도를 보여준다. 이는 토양 내에 K-함유 광물인 K-장석이나 K-운모 (일라이트-운모)가 함유되어 있는 이유이다. ²³⁸U 딸 핵종인 ²²⁶Ra의 농도는 15.6-710 Bq/kg 으로서 토양시료가 인광석과 인산석고에 비해 현저히 낮은 농도를 보인다. ²³²Th의 농도는 17.4-72.7 Bq/kg 으로서 인광석과 인산석고에 비해 다소 높은 농도를 보인다. ⁴⁰K 농도가 높은 지점은 공장 내 동편 원수 저수지 부근 3개 지점과 서편 인산석고 적재장 1개 지점에서 나타난다. ²²⁶Ra 농도가 높은 지점은 인산석고 적재장 전체 시료에서 뚜렷이 나타나고, ²³²Th 농도가 높은 지점은 공장 동편 도로변 및 산체에서 잘 확인된다.

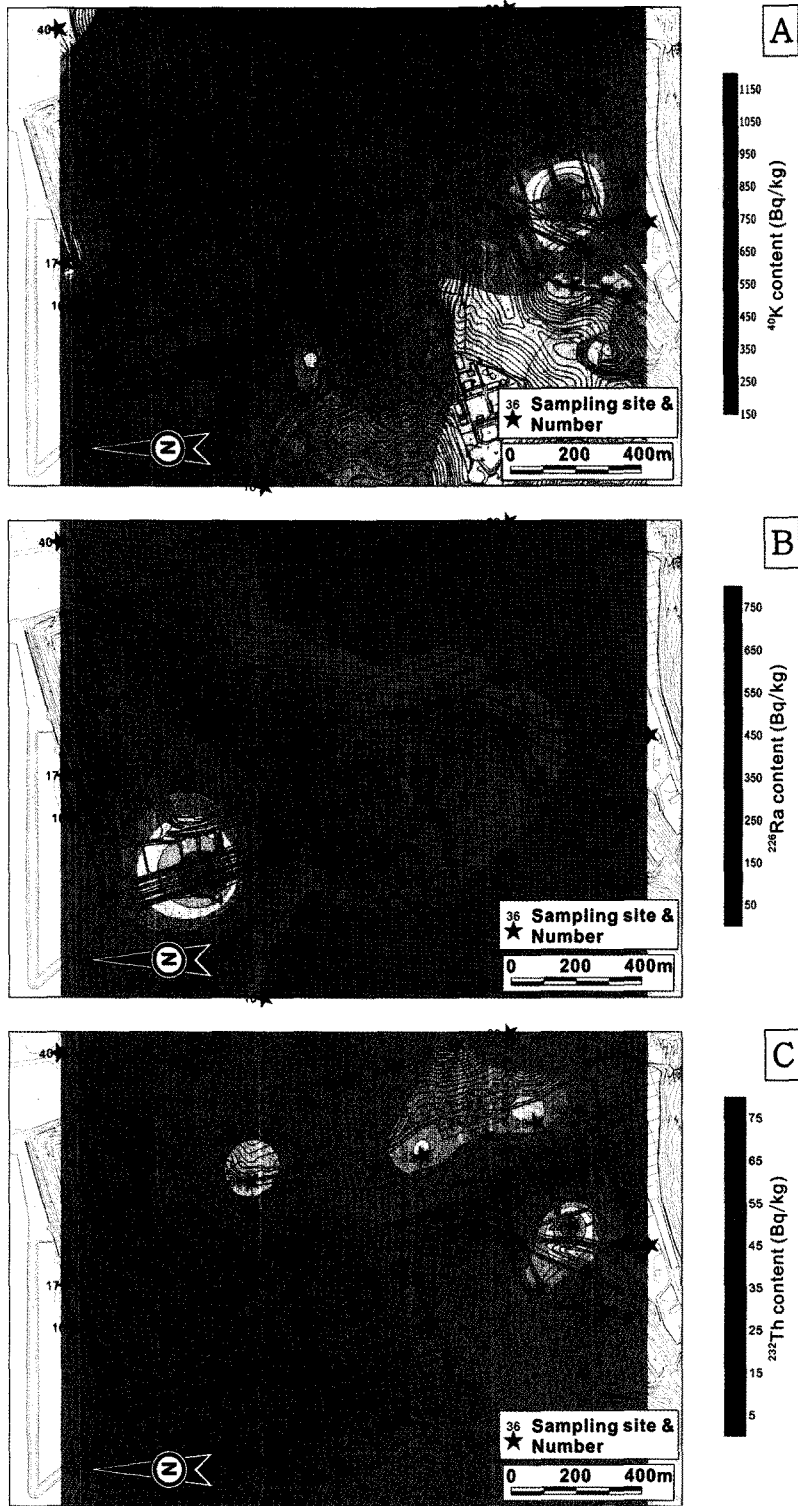


Fig. 6. ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th contour maps of soil samples (A, B, and C : under 10 cm part from the surface) around the Namhae Chemical company.

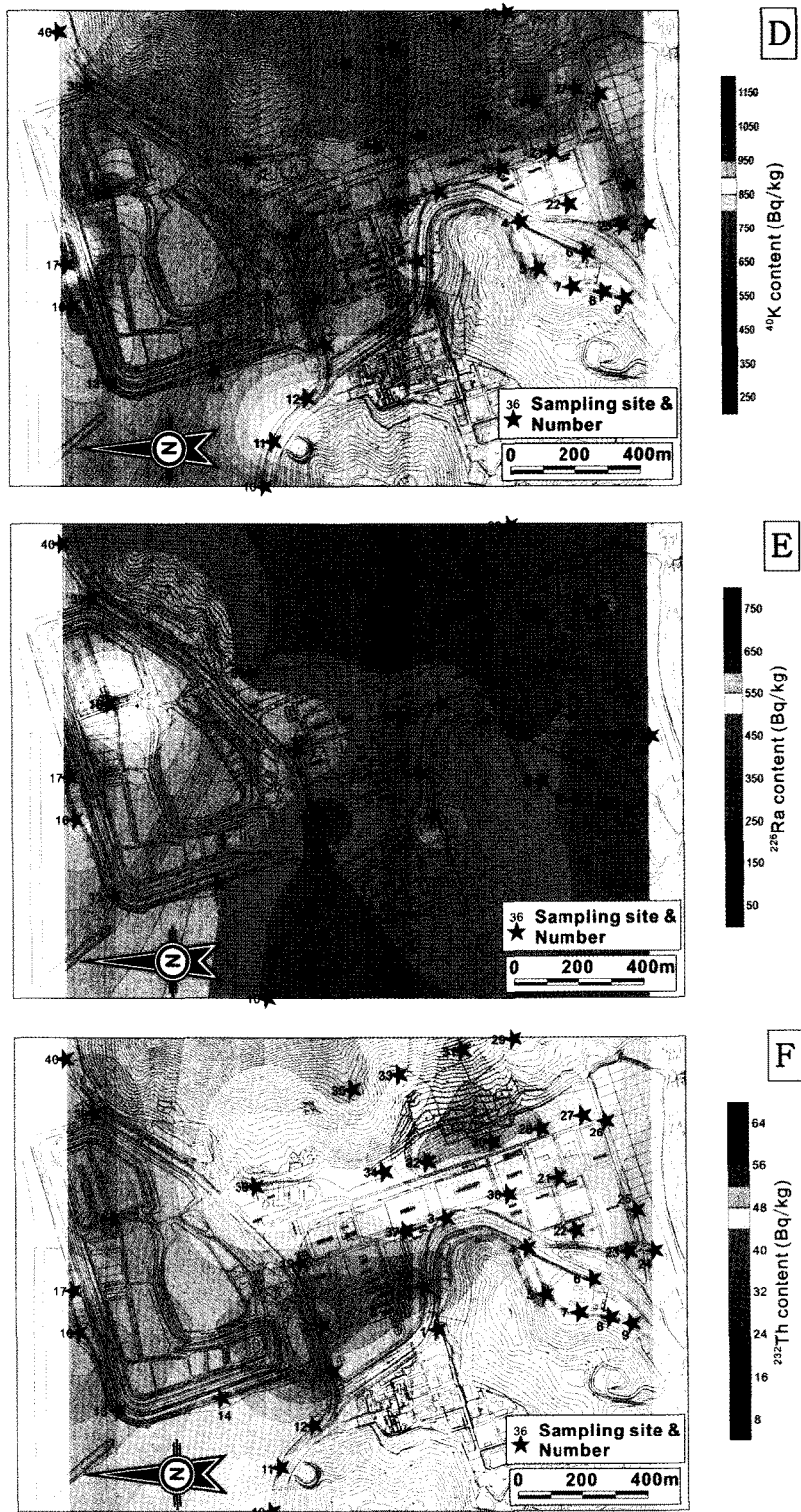


Fig. 7. ^{40}K , ^{226}Ra , and ^{232}Th contour maps of soil samples (D, E, F : under 30 cm part from the surface) around the Namhae Chemical company.

인산석고 적재장 주변, 공장 동편 도로변 및 산채 토양시료의 외부위해지수 범위는 0.24-2.01이며, 평균 0.54로서 전체적으로는 위해 기준치로 제시되는 1.0 이하이지만, 7개 지점에서는 1.0이상을 보인다. 따라서 일부 제한된 지역에 대해서는 지속적인 감시와 관리가 요구된다.

사 사

이 논문은 교육과학기술부에서 지원하는 “원자력연구개발사업”으로 수행된 한국원자력안전기술원 연구사업 (2009-0062432)의 위탁연구사업 (KINS/HR-1033)으로 수행되었다. 유익한 조언을 해주신 한국지질자원연구원 윤윤열 박사님과 익명의 심사위원에게 감사드린다.

참고문헌

- Beretka, J. and Mathew, P.J. (1985) Natural radioactivity of Australian building materials, industrial wastes, and by-products. *Health Physics* 48, 87-95.
- European Commission (1999) European Commission report on radiological protection principles concerning the natural radioactivity of building materials. *Radiation Protection* 112.
- Chang, B.W. (2007) Current Status of NORM/TENORM, The 6th Symposium on Radiation Safety.
- Chang, B.W. (2008) Radiation and Minerals IV “Current Status of TENORM”, *Minerals and Industry* 21(2), p.82-97.
- Chang, B.W. (2009) Influx of NORM in the Recycling Scrap Metal and Necessity of Safety Supervision at the Origin. Progress of Safety Supervision Workshop for Recycling Scrap Metal Contaminated by Radioactive.
- Chang, K.H., Lee, Y.G. and Kim, K.H. (1989) Geological Report of the Namhae-Sosang 1:50,000 Sheet.
- Goldschmidt, V.M. (1937) The principles of distribution of chemical elements in minerals and rocks. *J. Chem. Soc. London*, March, 655-673.
- International Atomic Energy Agency (2004) Application of the concepts of exclusion, exemption, and clearance. Safety Standards Series, Safety Guideline No. RS-G-1.7.
- Koh, S.M., Kim, J.W., Yoon, Y.Y., Lee, K.Y., Yoo, J.H., Kim, Y.U., Lee, H.Y., Kim, D.H., Cho, S.Y. and Song, M.S. (2007) Survey on the natural and artificial radioactivity of industrial raw materials. Korea Institute of Nuclear Safety, KINS/HR-787.
- Koh, S.M., Yoo, J.H., Kim, Y.U., Ryoo, C.R., Kim, D.H., Kim, J.W. and Lee, H.J. (2008) Investigation on the natural radioactive industrial materials. Korea Institute of Nuclear Safety, KINS/HR-858.
- MKE and KIGAM (2009) Korea Mineral Information 2008.
- Park, H.I., Park, Y.A. and Jeong, J.G. (1989) Geological Report of the Kwangyang 1:50,000 Sheet.
- 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.

2010년 11월 29일 원고접수, 2011년 1월 13일 게재승인