

## 황사지역 발원지에 따른 표층퇴적물의 자연방사능 특성

이길용★ · 윤윤열 · 조수영 · 고경석 · 김용제

한국지질자원연구원 지구환경연구본부  
(2008. 10. 6. 접수, 2008. 11. 26. 승인)

### Natural radioactivity of surface sediments by source regions of the asian dust

Kil Yong Lee★, Yoon Yeol Yoon, Soo Young Cho, Kyung Seok Koh and Yongje Kim

Geologic Environment Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources  
92 Gwahang-no, Yuseong-gu, Daejeon, 305-350, Korea

(Received October 6, 2008, Accepted November 26, 2008)

**요 약:** 중국의 주요 황사발원지로 알려진 오도스 사막, 알라산 사막, 타클라마칸 사막 및 황토고원의 표층퇴적물에 분포되어 있는 우라늄계열의  $^{226}\text{Ra}$ , 토륨계열의  $^{228}\text{Ac}$ 과 비 계열인  $^{40}\text{K}$ 과 같은 각각중 대표적인 자연방사성핵종의(naturally occurring radioactive nuclide: NORN) 방사능 특성을 조사하였다. 감마선 분광법을 이용하여 NORN의 비방사능(specific activity: SA, Bq/kg)을 측정하고 비방사능 비(specific activity ratio: SAR)를 산출하여 발원지에 따른 자연방사능 특성을 분석하였다. 발원지에 따른 세 핵종의 SA값은  $^{226}\text{Ra}$ 의 경우 세 사막지대에서는 평균 17.9~21.9 Bq/kg으로 매우 유사한 값을 가지는 반면 황토고원에서는 평균 35.0 Bq/Kg으로 큰 차이를 나타내고 있었다.  $^{228}\text{Ac}$ 의 경우는 오도스 사막과 알라산 사막에서는 평균 27.1~27.2 Bq/kg으로 거의 같은 값을 가지며 타클라마칸 사막에서는 31.7 Bq/kg 그리고 황토고원에서는 49.0 Bq/kg으로 큰 차이를 나타내고 있었다.  $^{40}\text{K}$ 의 경우는 636~943 Bq/kg 으로 네 곳의 발원지에서 특별한 차이를 나타내지 않았다.  $^{226}\text{Ra}/^{228}\text{Ac}$ 의 평균 SAR 값에서 네 곳의 발원지에서 0.708-0.721로 거의 일정하게 나타났고  $^{226}\text{Ra}/^{40}\text{K}$ 과  $^{228}\text{Ac}/^{40}\text{K}$ 의 평균 SAR 값을 보면, 오도스와 알라산 사막은 각각 0.0209-0.0213과 0.0287-0.0320으로 유사한 값을 나타내고 있으나 타클라마칸 사막과 황토고원 표층시료들에서의 평균 SAR 값을 보면, 0.0353, 0.0506과 0.0493, 0.0773으로 상당한 차이를 나타낸다.

**Abstract:** Radioactivity of naturally occurring radioactive nuclides (NORN) such as  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ac}$  and  $^{40}\text{K}$  were investigated for surface sediments collected from Ordos, Alashan, Taklimakan deserts and Loess plateau regions in China. By a Gamma-ray spectrometry, specific activity (SA) and SA ratio (SAR) of the NORN were determined for each source region of Asian dust. Characterization of the source regions of Asian dust was performed with the SA and SAR values. SA of  $^{226}\text{Ra}$  in the three desert regions have almost same values in the range of mean value 17.9~21.9 Bq/kg, however, the SA in Loess Plateau has much higher values in the mean value of 35 Bq/Kg. SA of  $^{228}\text{Ac}$  in the Ordos and Alashan desert regions have almost same values

★ Corresponding author

Phone : +82-(0)42-868-3652 Fax : +82-(0)42-868-3393

E-mail : kylee@kigam.re.kr

in the range of mean value 27.1~27.2 Bq/kg, and those in Taklimakan desert and Loess Plateau were 31.7 and 49.0 Bq/kg, respectively. In case of  $^{40}\text{K}$ , the SA in all regions have similar values in the range of 636~943 Bq/kg. The mean SAR value of  $^{226}\text{Ra}/^{228}\text{Ac}$  in four source regions was almost same in the range of 0.708-0.721. It is shown that relationship between  $^{226}\text{Ra}$  and  $^{228}\text{Ac}$  is clearly presented in the source regions. The mean SAR values of  $^{226}\text{Ra}/^{40}\text{K}$ ,  $^{228}\text{Ac}/^{40}\text{K}$  are 0.0209-0.056, 0.0287-0.0773, respectively.

**Key words :** China desert, Asian dust, surface sediment, natural radioactivity, gamma-ray spectrometry

## 1. 서 론

중국의 사막화가 집진적으로 가속화되어 과거에 비해 황사의 발생 빈도와 양이 증가하고 있으며 중국대륙에서 발생한 황사는 편서풍의 영향으로 우리나라와 일본 등의 동아시아지역 국가는 물론 태평양 건너 미국에서도 관찰된 경우도 있다. 최근 중국의 급속한 산업화와 황사의 이동경로에 많은 산업단지가 조성되어 다량의 유해성분이 황사에 혼입되어 우리나라에 유입되기 때문에 인체에 대한 피해뿐만 아니라 농업, 반도체, 자동차 산업과 같은 전 산업에 피해를 주고 있다.<sup>1</sup> 대부분의 황사는 봄철 중국과 몽고의 사막지대, 황하, 화북지방 등 황토지대에서 저기압이 통과할 때 상층으로 올라가 공중에 떠 있다가 고도 약 5.5 Km에서 강한 편서풍 기류를 타고 약 3~5일 만에 우리나라를 통과하며, 하강기류 발생 시 지표면에 낙하한다. 발원지에서 배출되는 황사 량을 100%라고 할 때 보통 30%는 발원지에서 재 침적되고 20%는 주변지역으로 수송되며, 50%는 장거리 수송되어 한국, 일본, 태평양 등에 침적이 된다고 알려져 있다.<sup>2</sup> 황사의 성분은 발원지가 사막지대인 경우 석영이 많고 황토지대일 때는 알루미늄이 대량으로 함유되어 있으며 또한 이동경로에 따라서도 특성이 다르게 된다. 황사에 의한 인체 및 산업 분야의 피해를 줄이고 예방하기 위해서는 국내에 유입되는 황사의 물리화학적 특성을 파악하는 것이 매우 중요하다.<sup>3-5</sup> 국내에서는 대기 시료를 채취하여 유해원소 및 미량원소를 연구한 경우는 많

으나<sup>6-12</sup> 발원지 표층퇴적물에 대한 특성 연구는 그리 많지 않은 실정이다.<sup>13-15</sup> 최근에 주요 황사 발원지인 타클라마칸 사막과<sup>16</sup> 오도스 및 알라산 사막<sup>17</sup> 그리고 황토고원<sup>18</sup> 표층퇴적물의 지화학 특성에 관한 연구가 발표되었다.

본 연구에서는 우리나라에 가장 큰 영향을 끼치는 오도스 사막, 알라산 사막, 타클라마칸 사막 그리고 황토고원 지역의 표층퇴적물에 함유된 자연방사성핵종의 방사능 특성을 조사하였다. 본 연구에서 조사한 자연방사능은 우라늄계열의  $^{226}\text{Ra}$ , 토륨계열의  $^{228}\text{Ac}$ , 그리고 비 계열 자연방사선행종인  $^{40}\text{K}$ 를 대상으로 하였으며, 각 지역에서 채취한 토양시료중의 비방사능 (specific activity; SA, Bq/kg) 과 비방사능 비 (SA ratio; SAR)를 산출하여 이 두 인자를 황사발원지의 방사능 특성조사에 적용하였다.

## 2. 실험

### 2.1. 시료준비

실험에 사용한 3곳의 사막지역과 황토고원의 표층퇴적물 시료는 황사발원지의 지화학적 특성을 조사한 이전 연구자들로부터 제공받았으며,<sup>16,17</sup> 시료 채취에 대한 자료를 Table 1에 나타내었다. NORN의 분석하기 위하여 모든 표층퇴적물 시료는 전기오븐에서 105°C로 유지시키면서 24시간 건조시킨 후 4분법으로 나누고 이를 다시 시료혼합장치인 eight branched sampler를 이용하여 균질하게 혼합하였다. 균질하게

Table 1. Geographical and geological informations of the sampling points of Chinese deserts regions<sup>16-18</sup>

| Region<br>(number of samples) | Latitude              | Longitude               |
|-------------------------------|-----------------------|-------------------------|
| Ordos (16)                    | 37°29'47" - 39°14'03" | 107°41'30" - 109°44'19" |
| Alashan (7)                   | 38°57'36" - 42°02'09" | 101°20'26" - 105°39'23" |
| Taklimakan (13)               | 37°35'40" - 40°44'50" | 82°52'46" - 88°22'09"   |
| Loess Plateau (10)            | 34°24'32" - 35°53'34" | 107°58'18" - 109°33'11" |

혼합한 각각의 시료는 지질물질의  $^{226}\text{Ra}$  방사능 측정에 적합하게 특수 제작한 알루미늄 Marinelli beaker에 담고 밀봉하였다. 시료의 질량을 정확하게 측정할 다음 상온에서 3주간 방치하여,  $^{226}\text{Ra}$ 의 자핵종인  $^{214}\text{Bi}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ 간의 방사평형을 이루도록 하였다. 일반적으로 지질물질 중 자연방사능 측정에 사용되는 용기는 플라스틱으로 제작한 450 mL 혹은 1,000 mL 용량의 Marinelli beaker를 세계적으로 사용하고 있으나,  $^{226}\text{Ra}$ 의 측정에서 기체상인  $^{222}\text{Rn}$ 의 누출을 억제하기 위하여 본 실험에서는 알루미늄으로 특수 제작한 측정용기를 사용하였다.<sup>19)</sup>

## 2.2. 자연방사능 측정

밀봉 3주후, 각각의 표층퇴적물 시료는 HPGe 감마선 검출기를(relative efficiency: 30%, fwhm: 1.9 keV at 1.333 MeV, CANBERRA, U.S.A.) 이용하여 각 핵종의 방사능을 측정하였다. 우라늄 계열의  $^{226}\text{Ra}$ 의 측정은 방사평형 도달 후에 자핵종인  $^{214}\text{Pb}$ 와  $^{214}\text{Bi}$ 의 방사능을 측정하였고, 토륨계열은  $^{232}\text{Th}$ 의 자핵종인  $^{228}\text{Ac}$ 의 방사능을 비계열의  $^{40}\text{K}$ 의 경우는 이를 직접 측정하여 각 시료에서 각 핵종의 SA 값을 측정하였다. 방사능 측정기간 동안 질소가스를 측정함 내부로 흘려주어 공기 중 혹은 측정함에 존재하는  $^{222}\text{Rn}$ 에 의하여 매우 큰 변화를 보이는 바탕방사능(back ground radioactivity)을 안정화시켰다<sup>20)</sup>. 또한 미국 표준국(National Institute of Standard and Technology: NIST)에서 개발한 NIST SRM 4353 토양을 이용하여 실험결과를 검증하고자 하였다.

## 3. 결과 및 토의

### 3.1. 자연방사능핵종의 비방사능 특성

Table 2에는 실험방법의 검증에 사용한 표준물질의 분석결과를 나타내었으며, 세 핵종 모두 불확도 5% 내외 정도로 인증 값과 일치함을 알 수 있다. 4곳의 황사 발원지 표층퇴적물 시료에서 측정된 각 핵종의 SA 값을 전세계 범위와<sup>21)</sup> 함께 Table 3에 나타내었다. 발원지 토양 44개 시료의  $^{226}\text{Ra}$  비방사능은 5.3-46(평균  $23.3 \pm 10.3$ ),  $^{228}\text{Ac}$ 의 비방사능은 14.7-61(평균  $32.9 \pm 13.5$ ),  $^{40}\text{K}$ 의 비방사능은 516-1080(평균  $769 \pm 186$ ) Bq/kg으로 나타났다. 오도스, 알라산, 타클라마칸 사막의 시료를 측정하여 얻은  $^{226}\text{Ra}$ 의 평균 SA 값은 18-22 Bq/kg으로 거의 일정한 값을 보이나, 황토고원의 경우는 35 Bq/kg으로 세곳 사막지역의 약 두배의 큰 차이를 보이고 있다.  $^{228}\text{Ac}$ 의 평균 SA 값을 지역별로 보면, 오도스와 알라산 사막의 경우 각각 27.1과 27.2 Bq/kg으로 거의 동일한 값을 가지며, 타클라마칸 사막은 31.7 Bq/kg으로 이들보다는 높으나 황토고원 시료에서는 평균 SA 값이 49.0 Bq/kg으로 매우 높은 특성으로 보이고 있다.  $^{40}\text{K}$ 의 경우는  $^{226}\text{Ra}$ 과  $^{228}\text{Ac}$  경우와는 달리 평균 SA 값이 황토고원과 타클라마칸 사막

Table 2. Analytical results of NIST SRM 4353

| Nuclide           | Certified value (Bq/kg) | Measured value (Bq/kg) | Difference (%) |
|-------------------|-------------------------|------------------------|----------------|
| $^{40}\text{K}$   | $723 \pm 69$            | $684 \pm 12$           | -5.39          |
| $^{226}\text{Ra}$ | $43.0 \pm 2.8$          | $41.4 \pm 1.1$         | -3.72          |
| $^{228}\text{Ac}$ | $69.3 \pm 3.5$          | $72.7 \pm 2.1$         | 4.91           |

Table 3. Specific activity of  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ac}$  and  $^{40}\text{K}$  in Chinese desert regions

(in Bq/kg)

| Desert                | Value | $^{226}\text{Ra}$ | $^{228}\text{Ac}$ | $^{40}\text{K}$ |
|-----------------------|-------|-------------------|-------------------|-----------------|
| Ordos (n=14)          | mean  | $19.4 \pm 12.8$   | $27.1 \pm 15.5$   | $943 \pm 120$   |
|                       | range | 5.30 - 46.0       | 14.7 - 61.0       | 728 - 1080      |
| Alashan (n=7)         | mean  | $17.9 \pm 5.2$    | $27.2 \pm 9.4$    | $862 \pm 153$   |
|                       | range | 10.8 - 23.0       | 16.4 - 40.9       | 675 - 1060      |
| Taklimakan (n=13)     | mean  | $21.9 \pm 2.5$    | $31.7 \pm 8.0$    | $636 \pm 123$   |
|                       | range | 19.4 - 27.4       | 26.4 - 50.5       | 541 - 902       |
| Loess Plateau (n=10)) | mean  | $35.0 \pm 5.9$    | $49.0 \pm 6.0$    | $637 \pm 84$    |
|                       | range | 26.6 - 42.6       | 40.3 - 56.8       | 516 - 749       |
| Total                 | mean  | $23.3 \pm 10.3$   | $32.9 \pm 13.5$   | $769 \pm 186$   |
|                       | range | 5.3 - 46          | 14.7 - 61.0       | 516 - 1080      |
| World <sup>21)</sup>  | range | 1 - 43000         | 1 - 900           | 10 - 1600       |

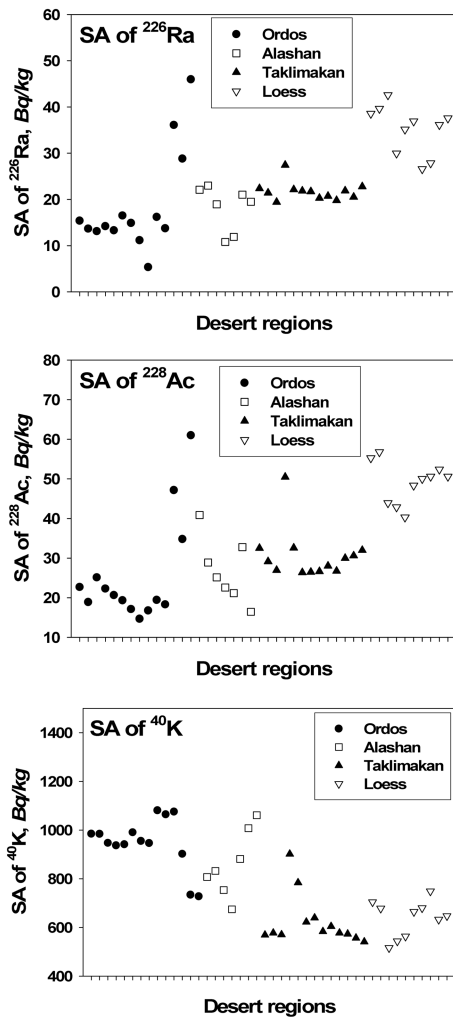


Fig. 1. Specific activity of  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ac}$  and  $^{40}\text{K}$  in 44 soils from Chinese deserts regions.

시료에서 각각 637과 636 Bq/kg 으로 거의 같은 값을 가지며, 알라산과 오도스 사막에서는 862과 943 Bq/kg으로 높게 나타남을 알 수 있다. 황토고원의 경우, 다른 세 곳의 사막 토양에서 보다 우리나라계열의  $^{226}\text{Ra}$ 와 토륨계열의  $^{228}\text{Ac}$ 는 높은 반면, 비 계열의  $^{40}\text{K}$ 의 비방사능은 오히려 낮은 특징을 보여주고 있다. 이것은 사막지역 토양의 경우 규석이나 장석의 분포가 높은 굵은 입자의 구성비가 높고 황토지역의 경우는 점토질이 우세한 미세입자의 구성비가 높은 것을 고려할 때, 우리나라나 토륨광물이 규석이나 장석보다는 점토질에 많이 분포하고 있음을 시사해 준다. Fig. 1은 발원지 각각의 표층퇴적물 시료의 SA 값을 나타낸 것이다. 모든 지역의 퇴적물에서  $^{226}\text{Ra}$ 과  $^{228}\text{Ac}$ 의 SA 값이 유사하였으며, 특히 오도스 사막의 시료에서는  $^{226}\text{Ra}$ 과  $^{228}\text{Ac}$ 의 SA 경향이 매우 유사함을 보여준다.

### 3.2. 자연방사능핵종의 비방사능 비(SAR) 특성

SAR (specific activity ratio, dimensionless) 값은 세 핵종의 상호 관련성과 발원지에 따른 특성을 보기위한 것으로  $^{226}\text{Ra}/^{228}\text{Ac}$ ,  $^{226}\text{Ra}/^{40}\text{K}$ 과  $^{228}\text{Ac}/^{40}\text{K}$ 값을 각 시료 채취지점에 대하여 산출하였으며 44개 시료의 전체 평균값과 범위 그리고 발원지 각각의 범위와 평균값을 Table 4에 나타내었다. 발원지 전체 토양에 대한 SAR 값을 보면,  $^{226}\text{Ra}/^{228}\text{Ac}$ 은 0.319-1.19 (평균  $0.715 \pm 0.140$ ),  $^{226}\text{Ra}/^{40}\text{K}$ 은 0.00493-0.0825 (평균  $0.0332 \pm 0.0176$ ), 그리고  $^{228}\text{Ac}/^{40}\text{K}$ 은 0.0155-0.0851 (평균  $0.0464 \pm 0.0225$ )로 나타났다. 발원지에 따른 SAR 특성을 보면,  $^{226}\text{Ra}/^{228}\text{Ac}$ 의 평균 SAR 값에서 네 곳의 발원지에서 0.708-0.721로 거의 일정하게 나타나 두 핵종사이에 어느정도 일정한 관계에 있음을 알 수 있다. Fig. 2에 나타난 핵종 간 관련성에서  $^{226}\text{Ra}$ 과  $^{228}\text{Ac}$ 의 사이에 정의 관

Table 4. Specific activity ratio of three radionuclides in the source regions

| Desert        | Value | $^{226}\text{Ra}/^{228}\text{Ac}$ | $^{226}\text{Ra}/^{40}\text{K}$ | $^{228}\text{Ac}/^{40}\text{K}$ |
|---------------|-------|-----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Ordos         | mean  | $0.710 \pm 0.148$                 | $0.0209 \pm 0.0156$             | $0.0287 \pm 0.0195$             |
|               | range | 0.319 - 0.870                     | 0.00493 - 0.0632                | 0.0155 - 0.0838                 |
| Alashan       | mean  | $0.708 \pm 0.240$                 | $0.0213 \pm 0.0056$             | $0.0320 \pm 0.0108$             |
|               | range | 0.478 - 1.19                      | 0.0135 - 0.0276                 | 0.0155 - 0.0506                 |
| Taklimakan    | mean  | $0.721 \pm 0.071$                 | $0.0353 \pm 0.0036$             | $0.0493 \pm 0.0061$             |
|               | range | 0.543 - 0.828                     | 0.0282 - 0.0421                 | 0.0414 - 0.0591                 |
| Loess Plateau | mean  | $0.721 \pm 0.131$                 | $0.0560 \pm 0.0125$             | $0.0773 \pm 0.0058$             |
|               | range | 0.531 - 0.970                     | 0.0372 - 0.0825                 | 0.0676 - 0.0851                 |
| Total         | mean  | $0.715 \pm 0.140$                 | $0.0332 \pm 0.0176$             | $0.0464 \pm 0.0225$             |
|               | range | 0.319 - 1.19                      | 0.00493 - 0.0825                | 0.0155 - 0.0851                 |

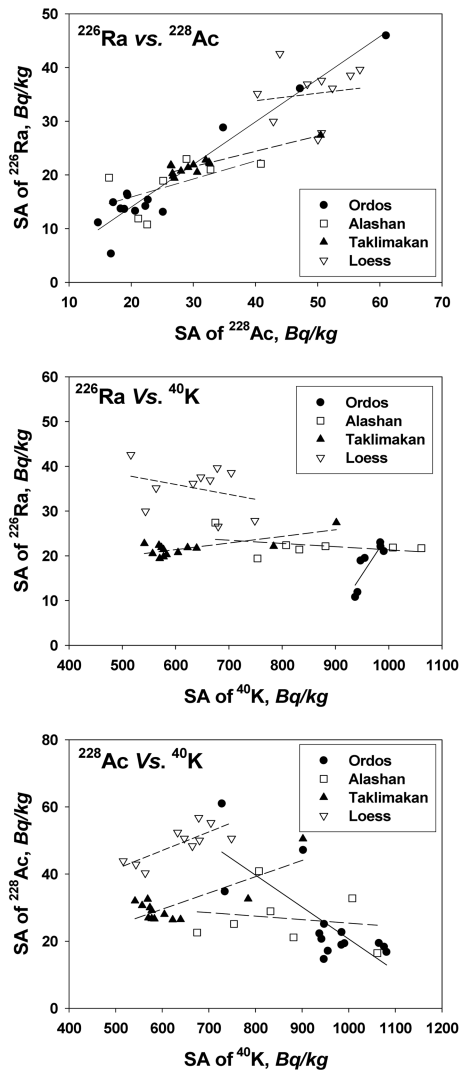


Fig. 2. Diagram showing relationships between radionuclides in 44 surface sediments collected from Chinese desert regions.

계가 있음을 볼 수 있으며 특히 오도스사막의 시료들에서는 직선성( $r^2 = 0.932$ )이 뚜렷이 나타나고 있다.  $^{226}\text{Ra}/^{40}\text{K}$ 과  $^{228}\text{Ac}/^{40}\text{K}$ 의 평균 SAR 값을 보면 오도스와 알라산 사막은 각각  $0.0209 \pm 0.0156$ ,  $0.0213 \pm 0.0056$ 과  $0.0287 \pm 0.0195$ ,  $0.0320 \pm 0.0108$ 로 유사한 값을 나타내고 있으며, 이는 Helan Shan을 경계로 두 지역이 인접해 있어 두 지역의 표층퇴적물들이 동일한 기원암으로부터 유래되었을 것이라는 이전 연구자들의 결과와 일치하고 있다.<sup>17</sup> 반면에 타클라마칸 사막과 황토고원 표층시료들에서의 평균 SAR 값을 보면,  $^{226}\text{Ra}/^{40}\text{K}$ 과

$^{228}\text{Ac}/^{40}\text{K}$ 이 각각 0.0353, 0.0506과 0.0493, 0.0773으로 상당한 차이를 보이고 있음을 알 수 있다.  $^{40}\text{K}$ 의 경우  $^{226}\text{Ra}$ 과  $^{228}\text{Ac}$ 에 대한 선형회귀분석 값( $r^2$ )이 0.8 미만으로 정량적인 관계를 보이지 않고 있다.

#### 4. 결 론

우리나라에 영향을 주는 대표적인 황사 발원지인 오도스, 알라산, 타클라마칸 사막과 황토고원의 발원지에 따른  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ac}$ ,  $^{40}\text{K}$ 의 자연방사능 특성을 조사하기 위하여 네 곳에서 채취한 44점의 표층퇴적물 시료에서 각 핵종의 비방사능(specific activity: SA)과 비방사능비(SA ratio: SAR)를 측정하여 분석하였다. SA 값과 SAR 값에서 모두 오도스와 알라산 사막지역과 타클라마칸 사막과 황토고원의 특성이 다르게 나타났다. 즉, 오도스와 알라산 사막의 경우 SA, SAR 특성이 거의 일치함을 볼 수 있었고 특히 오도스 지역에서는  $^{226}\text{Ra}$ 과  $^{228}\text{Ac}$ 의 SA 값에서 직선성( $r^2 = 0.932$ )을 보이는 정의 관계를 나타내고 있다. 황토고원의 경우 세 종류의 자연방사성핵종 모두 다른 세 곳의 사막지역에서보다 높은 특성을 가진다. 본 연구의 결과로 볼 때, 자연방사성 핵종의 방사능 특성도 발원지의 분류나 추적을 위한 또 하나의 인자로 사용될 수 있음을 보여주고 있다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국지질자원연구원 기본사업인 “청정 대용량 지하수자원 확보 기술 개발”(08-3211-1) 과제의 일환으로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

1. J. Y. Lim and Y. Chun, *Global and Planetary Change*, **52**, 231-247(2006).
2. 윤순창, 박경선, 한국대기보전학회지, **7**, 52-57(1992).
3. S. S. Shin, S. C. Yoon, and J. C. Nam, *J. Kor. Meteorol. Soc.*, **40**(3), 345-359(2004).
4. 한진석, 김영성, 문광주, 안준영, 김정은, 류성운, 김영준, 공부주, 이석조, 한국대기환경학회지, **20**(2), 143-151(2004).
5. 황회진, 김혜경, 노철언, 한국대기환경학회지, **19**(4), 415-425(2003).
6. 김민영, 김광래, 이민환, 한국지구과학회지, **24**, 315-

- 324(2003).
7. 최규훈, 강창희, 김기현, 한국지구과학회지, **23**, 514-525(2002).
  8. 김민영, 신재영, 조석주, 한국지구과학회지, **22**, 480-490(2001).
  9. 신선아, 한진석, 홍유덕, 한국대기환경학회지, **21**, 119-129(2005).
  10. 김기현, 강창희, 이진홍, 한국대기환경학회지, **20**, 833-838(2004).
  11. 김희갑, 정경미, 김동진, 한국환경독성학회지, **17**, 333-339(2002).
  12. Y. Hao, Z. Guo, Z. Yang, M. Fang and J. Feng, *Atmos. Res.*, **85**, 27-37(2007).
  13. 이길용, 윤윤열, 조수영, 양명권, 권영인, 이평구, 한국대기환경학회 2007년 환경공동학술대회 초록집, 1342-1343(2007).
  14. 신선아, 한진석, 김신도, 한국대기환경학회지, **22**(2), 157-166(2006).
  15. 정용승, 김태군, 한국대기보전학회지, **7**(3), 197-202(1991).
  16. 권영인, 이승구, 유강인, 신재봉, 김건한, 지질학회지, **40**, 119-132(2004).
  17. 권영인, 이승구, 김건한, 신재봉, 유강인, 지질학회지, **40**, 383-393(2004).
  18. 윤윤열, 권영인, 조수영, 이길용, 분석과학, **20**(6), 468-473(2007).
  19. 이길용, 윤윤열, 서범경, 분석과학, **13**(6), 743-750(2001).
  20. 서범경, 이길용, 윤윤열, 이대원, 분석과학, **14**, 212-220(2001).
  21. M. J. Anagnostakis, E. P. HinisP, S. E. Simopoulos and M.G. Angelopoulos, *Environment International*, **22**, S3-S8(1996).