

대전지역 황사(아시아 먼지)내 희토류원소 분포도의 지구화학적 특성-근원지 규명을 위한 초기연구

이승구^{1,*} · 염승준²

¹한국지질자원연구원 지하수지열연구부, ²한국지질자원연구원 지질환경재해연구부

Geochemical Implication of Rare Earth Element from Yellow sand (Asian Dust) at Daejeon Area, Korea: A Preliminary Study for Clarifying Source Area of Yellow Sand

Seung-Gu Lee^{1,*} and Seung Jun Youm²

¹Groundwater and Geothermal Resources Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 305-350, Korea

²Geological and Environmental Hazard Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 305-350, Korea

요약: 대전지역에 날아온 황사의 근원지를 규명하기 위해 희토류원소 지구화학적 연구방법을 적용하였다. 대전지역 황사의 채집은 2007년 3월31일에서 4월2일 그리고 5월25일에서 5월27일 사이와 같이 총 2회에 걸쳐 수집되었다. 그리고 비교를 위해 한국지질자원연구원 주변의 토양을 채취하였다. 연구결과, 대전 지역 황사면지의 경희토류(La-Gd) 분포도는 편평한 양상을 갖고 있고 Gd을 기점으로 중희토류(Gd-Lu)는 결핍되어 있으며 Eu의 이상은 관찰되지 않는다. 토양시료의 경우 경희토류의 경우 약간 부화된 경향을 보여주고, 중희토류의 분포도가 현저하게 결핍되어 있으며, Eu의 약한 부(-)의 이상을 보여준다. 이와 같이 대전지역 토양시료와 다른 양상을 갖는 대전 지역 황사면지의 희토류원소 분포도의 특성은 중국의 오도스 사막 남동부의 풍성퇴적물과 매우 유사하다. 초기연구결과를 토대로 볼 때, 대전지역 황사의 주 근원지는 중국의 오도스 사막 남동부일 가능성이 매우 높은 것으로 나타났다.

핵심어: 황사, 대전, 토양, 희토류원소, 근원지, 오도스 사막

Abstract: A geochemical technique based on rare earth element geochemistry was used to clarify the source of the Asian dust (Yellow sand) in the Daejeon area. The Asian dusts were collected 4 times during 31st March- 2nd April and 25th May-27th May 2007. The Yellow sand shows PAAS (Post Archean Australian Shale)-normalized REE pattern of the flattened LREE and slightly depleted HREE without Eu anomaly, whereas the Daejeon soil has slightly enriched LREE and depleted HREE with negative Eu anomaly. Our results show that REE patterns of the Asian dust are LREE-flattened similar to those of the sediment from the south-eastern part of Ordos desert. This suggests that Asian dust in the Daejeon area might be derived from the south-eastern part of Ordos desert.

Key words: Yellow sand, Daejeon, Soil, Rare earth element, Source area, Ordos desert

서 언

최근 들어, 매년 봄이 되면 중국으로부터 날아오는 황사로 인해 황사경보 혹은 주의보가 기상청으로부터

내려진다. 기상청의 정의에 의하면 황사 또는 황사현상이라 함은 중국 북부의 황토지대 혹은 사막에서 바람에 의하여 상류기류에 실린 모래먼지가 지상 4~5 km 상공까지 도달한 후 대기중에 퍼졌다가 강한 고층 기

*Corresponding author: Tel. 82-42-868-3376, E-mail. sgl@kigam.re.kr

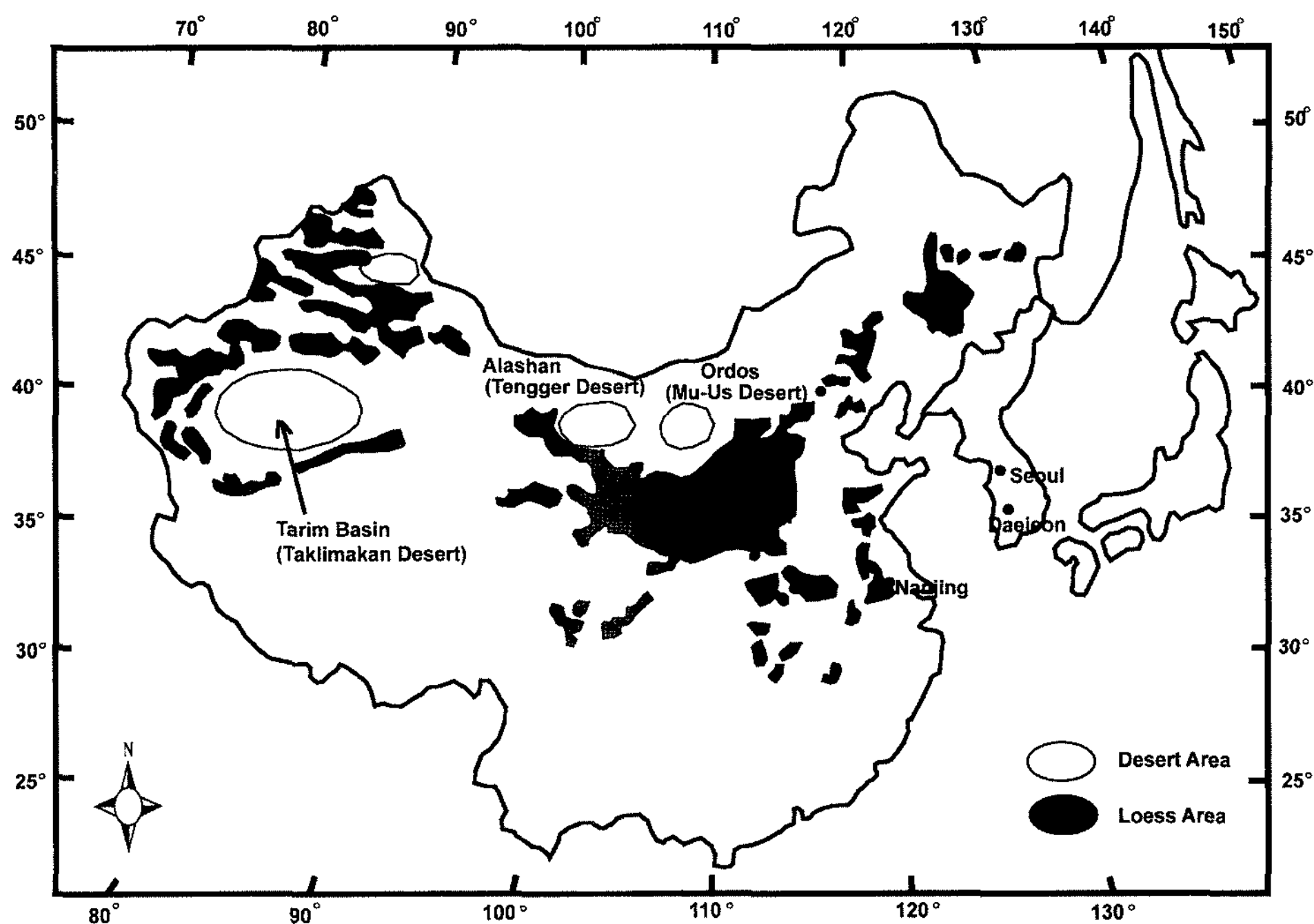


Fig. 1. Distribution of desert and loess area in China, modified from Chen *et al.* (2007).

류에 의해 먼 지역까지 확산되어 서서히 강하하는 현상 또는 모래먼지를 말한다. 학술적으로는 '노란 모래' 뜻의 황사란 용어보다 '아시아 먼지(Asian dust)'로 알려져 있다(Yoshikazu *et al.*, 1980; Braaten and Cahill, 1986; Fan *et al.*, 1996; Zhang *et al.*, 1998; Ro *et al.*, 2001; Kwon *et al.*, 2002; Lee *et al.*, 2007a; Lee *et al.*, 2007b; Sun *et al.*, 2007; Kim, 2008; Kim *et al.*, 2008). 일반적으로 발원지에서는 안개처럼 뿌연 황사가 아니라 시야를 거의 가리는 모래폭풍이 일어난다. 그러나 황사의 발원지로부터 1,500~2,000 km 이상 떨어진 한반도와 일본지역에서는 중국처럼 강한 바람이 동반되는 모래폭풍은 거의 발생하지 않는다. 다만 한반도와 일본지역에는 발원지에서 발생한 후 보통 2~5일 정도 후에 도달하고, 이로 인해 누린 먼지가 공중에 퍼져 마치 안개가 낀 모습을 연상시킨다. 이와 같이, 우리나라와 비교해 볼 때, 황사 발원지는 가깝게는 만주(거리 약 500 km)에서부터 멀리는 타클라마칸(Taklamakan, 혹은 Taklimakan이라고도 함) 사막(거리 약 5,000 km)에까지 분포하므로(Fig. 1), 어디에서 발원된 황사인지에 따라 이동시간이 달라지고 상층바람의 속도에 따라 도달하는 시간이 달라진다. 이처럼 황사알갱이의 크기는 관련되는 여건에 따라 달라지지만, 한반도와 일본에서 관측되는 황사의 크기는 대체로 약

1~10 μm 이다. 특히 최근 들어 황사의 발생빈도와 강도가 증가하는 추세인데, 이처럼 황사가 늘고 있는 것은 황사의 발원지인 중국내륙지역에 삼림의 파괴와 사막화가 가속화하고 있는데다 고온건조한 날씨가 몇 년째 지속되고 있기 때문이다.

기상관측 자료를 토대로 한 연구결과에 의하면, 우리나라에 영향을 미치는 황사는 대체로 타클라마칸 사막과 고비사막, 황하강 유역의 황토고원 등에서 발생되는 것으로 알려져 있다(윤용황, 1990). 그리고, 최근의 연구결과에 의하면, 만주에서도 황사현상이 발원되는 것으로 알려졌다(전영신 외, 2003). 최근 최재천 외(2002)는 한반도 중서부 해안가인 안면도에서 관측된 황사의 물리·화학적 특성에 대해 보고하였다. 이외에 한국 및 중국에 강하된 황사의 토양학적/지구화학적 연구, 서울시에 떨어진 황사의 자기적 특성연구 등의 연구가 최근에 활발하게 이루어지고 있다(전경무 외, 2004; 김원년 외, 2007; 박찬원 외, 2007). 그리고 Kim(2008)은 지난 40년간의 국내에서 관측된 자료를 토대로 황사의 이동경로와 근원지에 대해 추적하였다.

희토류원소는 유사한 물리적/화학적 특성과 더불어 자연계 내에서 규칙성이 매우 강하기 때문에, 지난 45여년간 암석, 토양, 해수, 지하수와 같은 지구구성물질 및 지구외물질(운석)의 성인연구, 지구시스템의 생성시

및 현재의 지구화학적 환경변화를 해석하는 데 아주 중요한 도구로 사용되어 왔다(Taylor and McLennan, 1985; Lipin and McKay, 1989; Johannesson *et al.*, 1995, 1996, 1997; Dia *et al.*, 2000; Monecke *et al.*, 2007). 그리고 희토류원소 분포도 양상은 황사의 근원지 규명연구에도 활용되고 있다(Liu *et al.*, 1994; Honda *et al.*, 2004; Zdanowicz *et al.*, 2006). 그러나, 황사의 발원지로 추정되고 있는 중국의 황토고원, 사막의 모래 혹은 토양시료와 국내에 떨어진 황사시료와의 지구화학적 비교에 의한 황사근원지 규명연구는 거의 없다. 특히 희토류원소 분포도를 이용한 황사기원 연구는 중국 사막에서 채취된 표층시료(권영인 외, 2004a, 2004b)에 대한 연구를 제외하면 수행된 바 없다. 따라서 이 연구에서는 대전지역에 강하된 황사시료를 토대로, 대전 지역내 황사먼지의 근원지를 지구화학적으로 밝혀내고자 한다.

시료채취 및 분석방법

황사시료의 지구화학적 특성을 비교하기 위해서 이 연구에서는 황사먼지시료를 대전의 한국지질자원연구원 제2연구동 옥상에서 채취하였다. 대전지역 황사먼지의 채집은 총 4회에 걸쳐 수집되었다. 2007년 3월31일에서 4월2일 그리고 5월25일에서 5월27일 사이에 2회 실시하였다. 아울러 황사먼지시료와 비교하기 위해서, 한국지질자원연구원 주변의 토양시료를 채취하였다. 중국의 사막시료 및 황토고원의 자료는 기존에 발표된 자료(Liu *et al.*, 1994; 권영인 외, 2004a, 2004b)를 이용하였다.

채취된 황사먼지시료 및 토양시료 지질자원연구원 주변 토양시료의 희토류원소 및 기타 미량원소 함량은 한국지질자원연구원의 ICP-MS(Elan 6100, Perkin-Elmer Ltd.)를 이용하여 분석하였다. 희토류원소의 분석오차는 10% 이내로 판단되며, 희토류원소의 실험방법은 김건한과 음철현(2004)에 기재되어 있다.

연구결과

이번 실험에 사용된 황사먼지시료 및 대전지역 토양에 대한 희토류원소와 기타 미량원소의 함량은 Table 1에 기재되어 있다. 희토류원소 전체 함량을 볼 때, 황사기간중의 공기중의 먼지내 희토류원소 함량은 185-214 ppm 정도이고, 대전 지질자원연구원 주변의 토양내 희토류원소 함량은 182-246 ppm이다. 전체적인 희토류원소 함량면에서 볼 때, 황사먼지시료와 대전지역

Table 1. Rare earth and trace element abundance of aeorian dust (Yellow sand) and soil at Daejeon area.

	Aeorian Dust		Soil		
	Sd1 ^{a)}	Sd3 ^{b)}	BS1	BS2	BS3
La	49.9	44.2	48.8	64.6	50.1
Ce	88.8	77.6	77.8	108	90.8
Pr	10.5	9.03	8.90	12.1	9.52
Nd	40.6	34.3	32.1	44.1	34.9
Sm	6.94	5.78	5.00	6.62	5.66
Eu	1.37	1.16	1.05	1.04	0.91
Gd	5.82	4.82	3.96	5.02	4.52
Tb	0.76	0.61	0.43	0.51	0.52
Dy	3.96	3.11	1.97	2.06	2.39
Ho	0.77	0.60	0.32	0.33	0.42
Er	1.92	1.52	0.77	0.86	1.00
Tm	0.28	0.21	0.10	0.10	0.14
Yb	1.73	1.35	0.64	0.64	0.92
Lu	0.23	0.19	0.09	0.09	0.14
Sc	5.51	4.20	3.27	2.30	4.40
Y	26.6	21.4	11.4	10.8	13.4
Th	12.9	11.1	13.5	20.0	16.8
U	2.48	2.39	2.19	3.47	3.75
Ba	556	526	681	813	646
Rb	129	112	169	152	194
Sr	224	247	267	241	123
Zr	84.2	62.1	294	196	336
Nb	10.8	9.71	11.2	6.66	13.5
ΣREE	213.58	184.49	181.93	246.27	201.93
Eu/Eu* ^{c)}	1.01	1.02	1.10	0.84	0.84
Ce/Ce* ^{d)}	0.89	0.89	0.86	0.89	0.96
(La) _N /(Yb) _{Nd} ^{e)}	2.13	2.41	5.62	7.44	4.01

^{a)}Dust sample during 31th March-2nd April, 2007 (Asian dust days)

^{b)}Dust sample during 25th May-27th May, 2007 (Asian dust days)

^{c)}Eu* is defined as the ratio of observed Eu abundance to that which would fall on the Sm-Gd join in PAAS-normalized REE patterns.

^{d)}Ce* is defined as the ratio of observed Ce abundance to that which would fall on the La-Pr join in PAAS-normalized REE patterns.

^{e)}The ratio of between La and Yb values normalized by Post Archean Australian Shale (PAAS, Taylor and McLennan, 1985)

토양간의 명확한 차이가 관찰되지는 않는다. Figure 2는 대전지역에 떨어진 황사먼지시료, 중국의 퇴스(loess) 그리고 대전 지질자원연구원 주변 토양의 희토류원소 분포도이다. 중국 퇴스의 자료는 Liu *et al.*(1994)의 자료를 사용하였다. Figure 2a에서 볼 수 있는 바와 같이, 황사먼지시료의 희토류원소 분포도는 Ce의 미세한 부(-)이상과 함께 경희토류(LREE: La-Gd)는 편평한 양

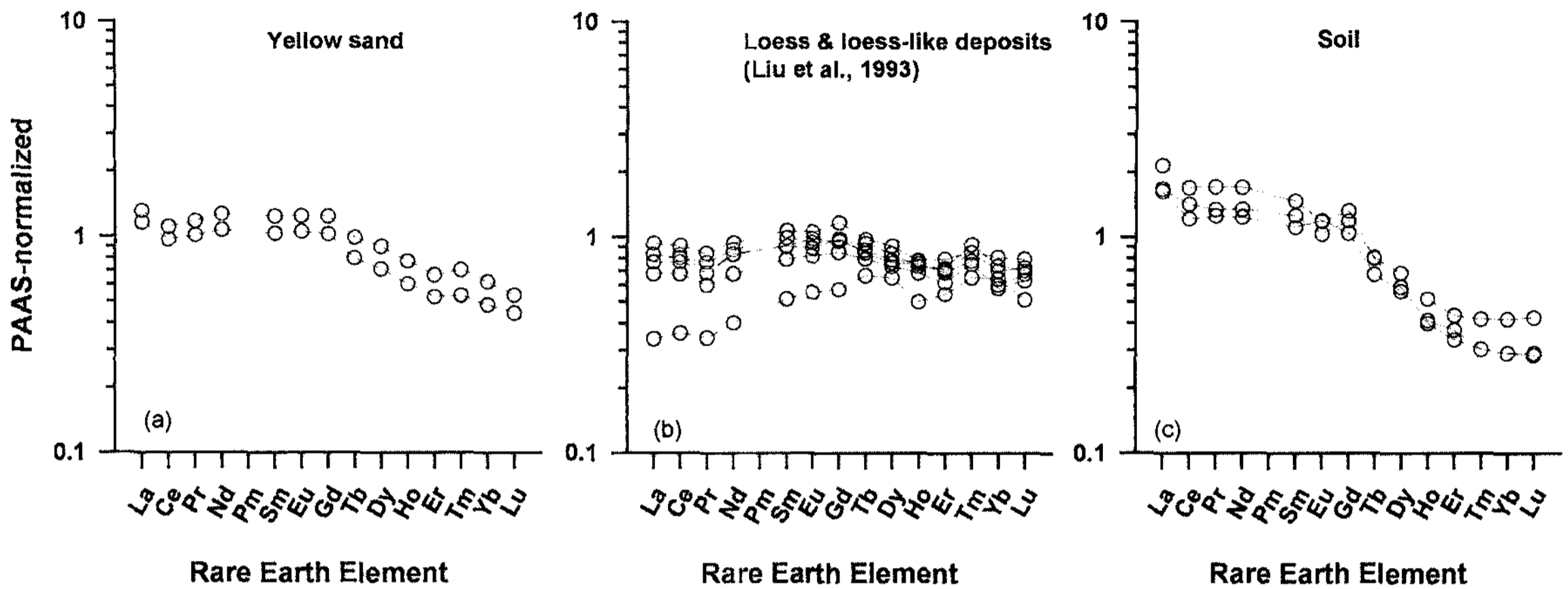


Fig. 2. PAAS (Taylor and McLennan, 1985) normalized REE patterns of aeolian dust and soil at Daejeon area.

상을 갖고 있고, Gd을 기점으로 중희토류(HREE: Gd-Lu)는 결핍되어 있다. 그리고 Eu의 이상은 거의 관찰되지 않는다. 퇴스의 경우 한 시료를 제외하면 Gd을 기점으로 경희토류와 중희토류가 미세하게 결핍된 양상을 갖는다. 토양시료의 경우, 황사먼지시료나 퇴스에 비해 경희토류는 부화되어 있고, 중희토류는 현저하게 결핍되어 있다. $(La/Yb)_N$ 에 의한 전체적인 기울기에서도 토양시료는 4.01-7.44이고, 황사먼지시료는 2.13-2.41로 토양시료가 2배정도 높다.

기타 미량원소의 함량을 비교해보면, 다음과 같다.

(Sc)

황사기간중중의 공기중의 먼지내 Sc의 농도는 각각 4.2-5.51 ppm이고 대전지역 토양시료내 Sc 농도는 10.8-13.4 ppm로 공기중내 먼지에 비해 높은 값을 보여준다.

(U 및 Th)

두 종류의 시료내 U의 함량은 2.07-3.75 ppm으로서 전반적으로 유사한 함량을 보여준다. Th의 경우 공기중의 먼지내 함량은 8.6-12.9 ppm이고, 토양시료는 13.5-20 ppm으로 공기중의 먼지에 비해 약간 높은 편이다.

(Ba)

황사기간중중의 공기중의 먼지내 Ba 농도는 526.4-556.0 ppm이고, 토양시료내 Ba 농도는 646.3-813.3 ppm이다.

(Rb)

황사기간중중의 공기중의 먼지내 Rb 농도는 111.8-129.2 ppm이고, 토양시료내 Ba 농도는 151.6-194.0 ppm이다.

(Sr)

황사기간중중의 공기중의 먼지내 Sr 농도는 224.4-246.7 ppm이고, 토양시료내 Ba 농도는 123.0-267.4 ppm이다.

(Zr)

황사기간중중의 공기중의 먼지내 Zr 농도는 62.1-84.2 ppm이고 토양시료내 Zr 농도는 195.6-335.8 ppm이다.

(Nb)

황사기간중중의 공기중의 먼지내 Nb 농도는 9.71-10.8 ppm이고, 토양시료내 Nb 농도는 6.66-13.5 ppm이다.

토 의

기상관측 자료 혹은 황사의 토양학적/지구화학적 연구, 황사의 자기적 특성연구 등과 같은 연구결과에 의하면(윤용황, 1990; 최재천 외, 2002; 전영신 외, 2003; 전경무 외, 2004; 김원년 외, 2005; Kim, 2008), 우리나라에 영향을 미치는 황사는 대체로 타클라마칸 사막과 고비사막, 황하강 유역의 황토고원 등에서 발생되는 것으로 알려져 있다. 그러나 Figure 1에서 볼 수 있는 바와 같이, 중국의 사막 혹은 황토고원의 분포는 매우 넓고 다양하다. 따라서 황사가 주로 중국의 어느 사막 혹은 황토고원에서 왔는지에 구체적인 결과는 아직 없는 편이다.

최근에 권영인 외(2004a, 2004b)는 중국 사막에서 채취된 표층시료(풍성퇴적물)에서의 희토류원소 분포도 특성을 보고한 바 있다. Figure 3은 중국 사막에서 채취된 표층시료(권영인 외, 2004a, 2004b) 자료에 대해 PAAS(Post Archean Australian Shale, Taylor and McLennan, 1985)의 희토류원소 농도를 기준으로 규격화하여 재도시한 자료이다. 그림 3a와 3b에서 볼 수 있는 바와 같이 오도스 사막의 표층 퇴적물의 희토류원소 분포도 특성은 채취된 시료의 위치에 따라 2가지 형태로 구분된다. 그림 3a와 같이 오도스 사막의 북서

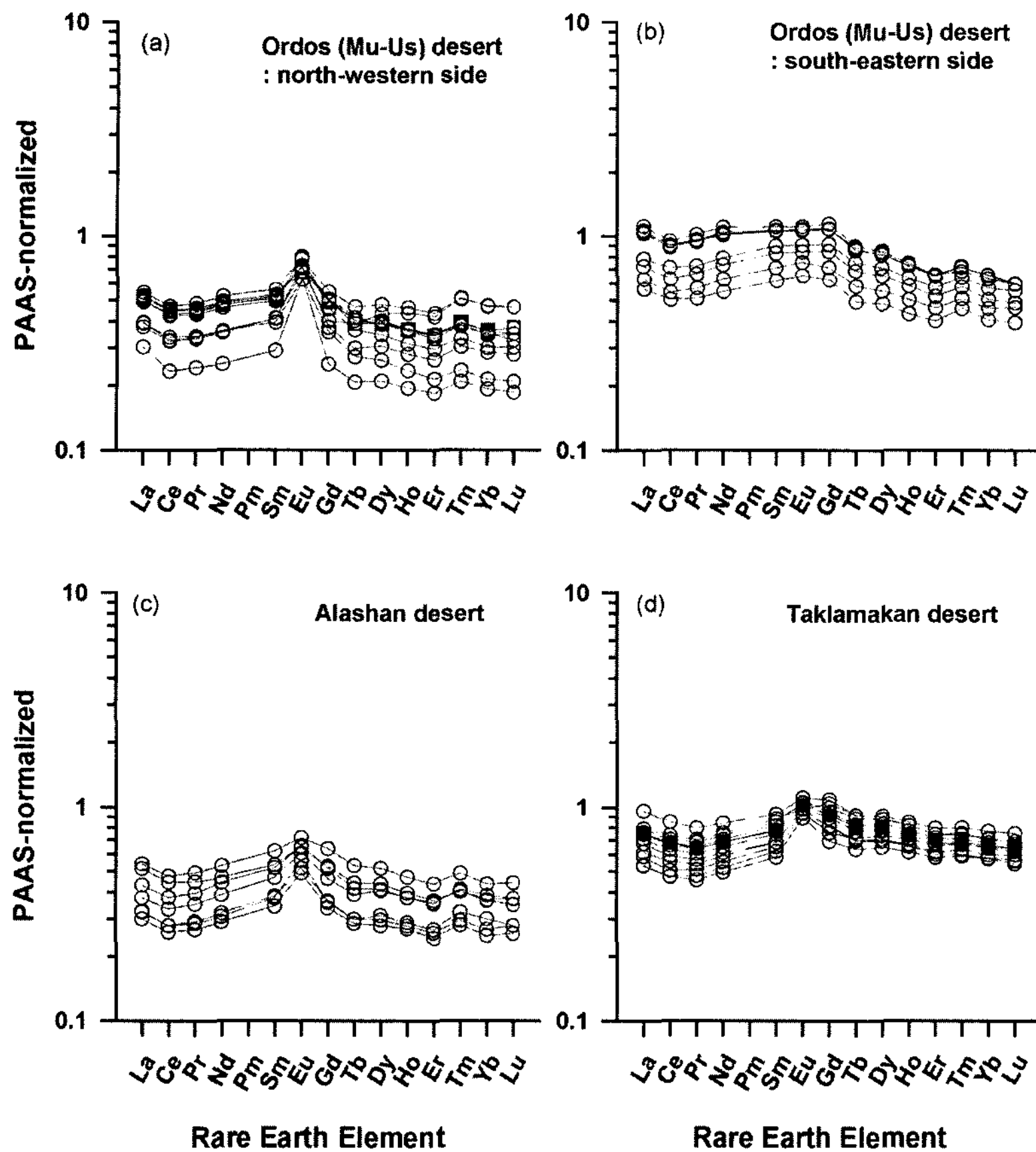


Fig. 3. PAAS (Taylor and McLennan, 1985) normalized REE patterns of Chinese desert area (권영인 외, 2004a, 2004b).

쪽에서 채취된 시료는 전체적으로 편평한 희토류원소 분포도양상을 가지면서 현저한 Eu의 정(+)³의 이상을 보여준다. 반면에 남동쪽에 위치한 표층시료들은 Figure 3b와 같이 미세한 Ce의 부(-)³의 이상을 가지면서 경희토류는 대체적으로 편평하고 중희토류는 다소 결핍된 양상을 보여준다. 이와 더불어 Eu의 이상이 거의 관찰되지 않는다. Figure 3c의 알라산 사막의 표층시료들은 경희토류는 오목한 양상을 보여주고, 중희토류는 미세하게 결핍된 양상의 분포도를 보여준다. 또한 Eu의 정(+)³의 이상을 갖고 있다. 그리고 Figure 3d의 타클라마칸 사막의 표층시료들은 알라산 사막의 시료와 대체적으로 유사하지만, 중희토류의 분포도에 있어서 알라산 사막에 비해 보다 더 편평한 양상을 갖는다. 오도스 사막내 표층시료의 희토류원소 분포도가 채취 위치에 따라 서로 다른 양상을 보여주는 것은 기원암의 종류가 서로 다른 것에 기인된 것으로 해석할 수 있다.

Figure 2에서 대전지역 황사먼지와 중국의 황토고원

의 퇴사, 그리고 대전지역 토양의 희토류원소 분포도가 서로 다른 것은, 구성물질 즉 기원물질이 서로 다를 수 있음을 지시해주는 것이라 볼 수 있다. 특히 대전지역의 토양시료와 전혀 다른 양상을 보여주고 있는 것은 황사기간 중에 채취된 대전지역 공기중의 먼지는 적어도 토양으로부터 오지 않았음을 지시해준다고 볼 수 있다. 그리고 황사먼지에 대한 Figure 2의 희토류원소 분포도와 중국의 사막 풍성퇴적물에 대한 Figure 3의 희토류원소 분포도를 비교해 보면, Figure 3에서 볼 수 있는 바와 같이 대전지역에 떨어진 먼지시료의 분포도 양상과 매우 유사하다.

미량원소의 경우 권영인 외(2004a, 2004b)의 자료에 의하면 사막별로 약간의 차이는 있지만 사막표층시료에서의 Sc은 0.5-10.3 ppm, Th은 1.9-13.1 ppm, Ba은 350-700 ppm, Rb은 52.7-105 ppm, Nb은 7.5-100 ppm, Zr은 68-173 ppm의 범위에 놓인다. 황사먼지내 미량원소 성분의 경우에도 대전지역 토양시료보다는 중국내

사막의 표층시료로부터의 미량원소들의 함량과 대체적으로 유사한 함량특성을 보여줌을 알 수 있다. 이 또한 황사먼지의 지구화학적 특성이 대전 주변의 토양보다는 중국의 사막 표층시료와 유사함을 지시해주는 것으로 볼 수 있다. 그러므로, 소량의 시료만을 가지고 전체적인 결론을 짓는 것은 다소 무리가 있지만, 현재까지의 지구화학적 연구결과는 2007년도에 대전지역에 떨어진 먼지시료 즉 황사는 황사고원과 오도스 사막 남동부의 표층시료로부터 유래되었음을 지시해준다.

요약 및 결론

매년 봄철이 되면 우리나라에 불어오는 황사의 근원지를 지구화학적 연구기법을 이용하여 밝혀내고자 하였다. 2007년도 3월말, 5월말에 각각 대전에 떨어진 공기중의 먼지를 채취하여 희토류원소 및 Sr, U, Th, Zr 등과 같은 미량원소의 농도를 분석하였다. 현재까지의 연구결과에 의하면, 2007년도에 떨어진 황사먼지의 희토류원소 지구화학적 특성은 오도스 사막 남동부의 표층시료 및 황토고원의 퇴스 시료와 매우 유사한 분포도 양상을 보여주었다. 이는 우리나라에 불어오는 황사의 주 근원지가 오도스 사막 남동부 및 황토고원임을 지시해주는 것으로, 기존의 물리적 특성 혹은 기상학적 연구자료와 일치하는 결과라고 판단된다. 그러나 보다 명확한 결론을 내리기 위해서는 중국의 만주지역의 표층시료의 지구화학적 특성, 우리나라에 떨어지는 황사시료를 가능한 한 여러 차례에 걸쳐 전국적으로 채취하여 비교해 볼 필요가 있다. 아울러 Sr, Nd, Pb 등과 같은 원소의 각종 동위원소비를 측정하여 비교하면 자료의 신뢰도는 더욱 증가할 수 있을 것이다.

사 사

이 연구는 소방방재청 자연재해저감기술개발사업(과제명: 퇴적황사재해 피해평가 및 대응기술개발, NEMA-06-NH-08) 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다. 그리고 논문초고의 내용에 대해 세심한 지적 및 수정을 해주신 한국기초과학지원연구원의 김정민 박사님과 경상대학교의 좌용주 교수님께 감사드립니다.

참고문헌

권영인, 이승구, 유강민, 신재봉, 김건한, 2004a, 지화학 특성으로 살펴본 풍성퇴적물의 근원지와 특징: 중국 오도스 및 알라산 사막 표층시료의 경우. 지질학회지. 40/2, 119-132.

- 권영인, 이승구, 김건한, 신재봉, 유강민, 2004b, 중국 타클라마칸 사막 중동부 지역 표층시료의 지화학 특성. 지질학회지. 40/4, 383-393.
- 김건한, 음철현, 2004. 유도결합 플라즈마 질량분석법에 (ICP-MS)에 의한 암석표준물질 중의 Lanthanides, Y, Th, U 분석. 한국지질자원연구원 논문집, 8, 43-53.
- 김원년, 도성재, 유용재, 2007, 서울시 황사의 4년간(2003년~2006년) 자기적 특성 변화 연구 및 전자현미경 관찰 결과. 대한자원환경지질학회 2007년도 춘계 지질과학기술 공동학술대회 요약집, 428-430.
- 박찬원, 원항연, 하상건, 허승오, 정강호, 김유학, 장용선, 2007, 한국 및 중국에 강하한 황사의 토양학적 특성규명. 대한자원환경지질학회 2007년도 춘계 지질과학기술 공동학술대회 요약집, 412-414.
- 윤용환, 1990, 한반도에 수송되는 황사의 특징에 관한 연구, 한국기상학회지, 26/2, 111-12.
- 전경무, 이현구, 윤경무, 2004, 황토고원의 지질학적 성인과 황토의 지화학적 특성 연구. 대한자원환경지질학회 2004년도 춘계학술대회 요약집, 270-272.
- 전영신, 조경숙, 김영화, 이종국, 2003, 만주에서 발원한 황사현상. 한국기상학회지, 39/2, 251-263.
- 최재천, 차주완, 방소영, 윤용훈, 2002. 2001년 봄철 안면도에서 관측된 황사의 물리·화학적 특성에 관한 연구. 한국기상학회지, 38, 105-117.
- Braaten, D.A. and Cahill., T.A., 1986. Size and composition of Asian dust transported to Hawaii. Atmospheric Environment. 20, 1105-1109.
- Chen, J., Li, G., Yang, J., Rao, W., Lu, H., Balsam, W., Sun, Y., Ji, J., 2007, Nd and Sr isotopic characteristics of Chinese deserts: Implications for the provenances of Asian dust. 71, 3904-3914.
- Dia, A., Gruau, G., Olivie-Lauquet, G., Riou, C., Molenat J. and Curmi, P., 2000, The distribution of rare earth elements in groundwaters: Assessing the role of source-rock composition, redox changes and colloidal particles. Geochim. Cosmochim. Acta, 64, 4131-4151.
- Fan, X-B., Okada, K., Niimura, N., Kai, K., Arao, K., Shi, G-U., Qin, Y. and Mitsuta, Y., 1996. Mineral particles collected in China and Japan during the same Asian dust-storm event. Atmos. Environ. 30, 347-351.
- Honda, M., Yabuki, S., Shimizu, H., 2004, Geochemical and isotopic studies of aeolian sediment in China. Sedimentology, 51, 211-230.
- Johannesson, K.H., Lyons, W.B., Stetzenbach, K.J. and Bryne, R.H., 1995, The solubility control of rare earth elements in natural terrestrial waters and the significance of PO₄³⁻ and CO₃²⁻ in limiting dissolved rare earth element concentrations: A review of recent information. Aqua. Geochem., 1, 157-173.
- Johannesson, K.H., Stetzenbach, K.J., Hodge, V.F. and Lyons, W.B., 1996, Rare earth element complexation behaviour in circumneutral pH groundwaters: Assessing the role of carbonate and phosphate ions. Earth Planet.

- Sci. Lett., 139, 305-319.
- Johannesson, K.H., Stetzenbach, K.J. and Hodge, V.F., 1997, Rare earth elements as geochemical tracers of regional groundwater mixing. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 61, 3605-3618, 1997.
- Kim, J., 2008, Transport routes and source regions of Asian dust observed in Korea during the past 40 years (1965-2004). *Atmos. Environ.* in press.
- Kim, K-H., Kang C-H., Ma, C-J., Lee, J-H., Choi, K-C. and Youn, Y-H., 2008. Airborne cadmium in spring season between Asian dust and non-Asian dust periods in Korea. *Atmos. Environ.* 42, 623-631.
- Kwon, H-J., Cho, S-H., Chun, Y., Lagarde and Pershagen, G., 2002. Effects of the Asian Dust Events on Daily Mortality in Seoul, Korea. *Environ. Res.* 90, 1-5.
- Lee, J-T., Son, J-Y., Cho, Y-S., 2007a. A comparison of mortality related to urban air particles between periods with Asian dust days and without Asian dust days in Seoul, Korea, 2000-2004. *Environ. Res.* 105, 409-413.
- Lee, S-J., Park, H., Choi, S-D., Lee, J-M., Chang, Y-S., 2007b. Assessment of variations in atmospheric PCDD/Fs by Asian dust in Southeastern Korea. *Atmos. Environ.* 41, 5876-5886.
- Lipin, B.R. and McKay, G.A., 1989, *Geochemistry and Mineralogy of Rare Earth Elements*. The Mineralogical Society of America, 348 p.
- Liu, C-Q., Masuda, A., Okada, A., Yabuki, S., Zhnag, J. and Fan, Z-L., 1994, A geochemical study of loess and desert sand in northern China: Implications for continental crust weathering and composition. *Chem. Geol.*, 106, 359-374.
- Monecke, T., Dulski, P. and Kempe, U., 2007, Origin of convex tetrads in rare earth element distribution patterns of hydrothermally altered siliceous igneous rocks from the Zinnwald Sn-W deposit, Zermany. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 71, 335-353.
- Ro, C-U., Oh, K-Y., Kim, H., Chun, Y., Osan, J., de Hoog, J. and Grieken, R.V., 2001. Chemical speciation of individual atmospheric particles using low-Z electron probe X-ray microanalysis: characterizing "Asian Dust" deposited with rain water in Seoul, Korea. *Atmos. Environ.* 35, 4995-5005.
- Sun, Y., Tada, R., Chen, J., Toyoda, S., Tani, A., Isozaki, Y., Nagashima, K., Hasegawa, H. and Ji J., 2007, Distinguishing the sources of Asian dust based on electron spin resonance signal intensity and crystallinity of quartz. *Atmos. Environ.* 41, 8537-8548.
- Taylor, S.R. and McLennan, S.M., 1985, *The continental crust: Its composition and evolution*. Geoscience Texts, Blackwell, Oxford, 312 p.
- Yoshikazu, H., Shigeru, T. and Winchester, J.W., 1980. Detection of an Asian dust storm event in Japan during April 1980. *Nuclear Instruments and methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 3, 526-528.
- Zdanowicz, C., Hall, G., Vavie, J., Amelin, Y., Percival, J., Girard, I., Biscaye, P., Bory, A., 2006, Asian dustfall in the St. Elias Mountains, Yukon, Canada. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 70, 3493-3507.
- Zhang, X.Y., Arimoto, R. and An, Z.S., 1998. Asian dust linked to global change. *J. Aero. Sci.* 29, S.169.

2008년 2월 27일 접수

2008년 2월 29일 심사개시

2008년 3월 10일 채택