주요 황사발원지 토양의 지구화학적 특성 및 미량원소 존재형태 연구

이평구* · 염승준 · 안기오

한국지질자원연구원 지구환경연구본부

Geochemical Characteristics and Trace Metal Speciation of Soils in Major Source Area of Asian Dust

Pyeong-Koo Lee*, Seung-Jun Youm and Gi-O An

Geologic Environment Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

In this study, we investigated the chemical characteristics of soils collected from the several deserts and loess in China known as the typical source areas of Asian dust (the Taklamakan desert, the Alashan desert, the Ordos desert and the Loess Plateau). Based on our analysis, we examined the possibility of adverse effects on environments and human health. In each desert and loess, major elemental compositions of soils did not show large variations, implying that the long-periodic mixing of soils in each area made their chemical compositions homogeneous. Minor elements of soils in each desert and loess showed more complicated patterns with strong correlations each other (e.g., Cr, Cu, As, Co, Ni, V, Y, Sc, Sn, Pb, Zn, Cd, Cs, Li, Th, U). These results thus enable us to discriminate the soil of the Loess Plateau from those of the other deserts in China. The results of sequential extraction experiments for soils showed that the chemical speciation of Fe was dominant in residual fraction (>85%) in all deserts and loess, but the fractions of Mn and Ca chemical speciations were very different in each area. In the case of Mn, the fraction of amorphous Fe-Mn hydroxides (55.4%) in the Central Loess Plateau and the carbonate fraction (33.8%) in Taklamakan desert were higher as much as 2 to 5 times than other deserts. The chemical speciations of Ca are dominant in carbonate fraction in Taklamakan (75.9%) and Alashan (50.5%) deserts, but carbonate fractions of Ca in the Loess Plateau and Ordos deserts were low (6.6% and 2.1%, respectively). According to the mobility of trace elements inferred from the results of sequential extraction procedure, we could classify them into five groups, and the mobility of Cd, Pb and Cu are more than 87%, 33% and 30%, respectively. Therefore, Cd, Pb and Cu in soils of deserts and loess could be easily dissolved when interacted with surface water. As such, they could give adverse effects on surficial environments and human health.

Key words : Asian dust, source areas, soils of desert & loess, geochemical characteristics

본 논문에서는 황사 발원지 (타클라마칸, 알라산, 오도스 사막 및 황토고원) 토양 시료의 지구화학적 특성을 규명하고, 이들이 지표환경과 인체에 미치는 영향을 알아보고자 하였다. 중국 건조지역에서 채취한 토양 시료 내 주원소 함량의 공간적 변화는 각 지역별로 크지 않았으며, 이는 각 지역 내 토양이 오랜 기간 동안 바람에 의해 균질하게 혼합된 것으로 해석된다. 한편 미량원소의 경우에는, 시료 채취 지점에 따라 미약한 함량의 차이를 나타낸다. 이들 중 Cr, Cu, As, Co, Ni, V, Y, Sc, Sn, Pb, Zn, Cd, Cs, Li, Th, U 등은 원소 간에 서로 양의 상관관계를 보이며, 이들의 특성은 황토고원과 다른 사막 (타클라마칸, 알라산 및 오도스 사막) 토양에서 뚜렷하게 구분된다. 모든 사막 및 황토고원 토양의 Fe의 지구화학적 존재형태는 대부분 “잔류형 (85% 이상)”으로 나타났으나, Mn 및 Ca의 존재형태는 사막에 따라 존재형태의 차이가 현저하게 나타났다. Mn은 황토고원 토양에서는 “산화철망간광물 수반형 (55.4%)” 이, 그리고 타클라마칸 사막에서는 “탄산염광물 수반형 (33.8%)”이 다른 사막 토양에 비해 2-5배 높게 나타났다. 또한 Ca의 경우에는 타클라마칸 및 알라산 사막 토양에서 “탄산염광물 수반형”이 각각 75.9% 및 50.5%로 높게 나타났으나, 황토고원 (6.6%)과 오도스 사막 (2.1%)에서는 낮게 나타났다. 사막 및 황토고원 내 미량원소의 이동도를 기준으로 이들 미량원소를 5개의 그룹으로 분류하였으며, Cd, Pb 및 Cu의 이동도가 각각 87%, 33% 및 30% 이상으로

*Corresponding author: pklee@kigam.re.kr

나타났다. 따라서 사막 및 황토고원 내 Cd, Pb 및 Cu는 지표수 등과 반응하였을 때 쉽게 용해되어 지표환경 및 인체 건강에 악영향을 줄 가능성이 있음을 지시하고 있다.

주요어 : 황사, 발원지, 사막-황토 토양, 지구화학적 특성

1. 서 언

최근 국내 황사 발생일 및 강도가 증가하고 있으며, 중국 내 황사 발원지가 점차 동쪽으로 이동하고 있어 황사에 의한 피해가 더욱 심각해질 것으로 예상되고 있다 (기상청 홈페이지, www.kma.go.kr). 특히 최근 중국 북부지역에 급심한 가뭄현상이 자주 발생하여 우리나라에 미칠 황사 피해가 크게 우려되고 있다. 황사 현상은 반도체 등 정밀 산업뿐만 아니라 항공 및 유통업, 농작물 등 광범위한 분야에서 피해를 유발시키고 있다. 또한 황사는 인체 건강에 악영향을 주고 있고, 특히 기관지질환 환자 및 노약자 등에게는 매우 유해한 것으로 알려져 있다 (Lee *et al.*, 2007; Lee *et al.*, 2009).

황사는 중국 동부에 분포하고 있는 공업지대를 통과하면서 대기 중 오염물질을 흡착하여 함께 이동하여 오기 때문에 우리나라와 같이 황사의 이동경로 상에 있는 지역의 토양, 하천수 등 지표환경 및 인체 건강에 미치는 피해에 대한 관심이 증대되고 있으며 이에 대한 연구가 많이 수행되고 있다 (Wilkening *et al.*, 2000; Ro *et al.*, 2001; Chun *et al.*, 2003; Shin *et al.*, 2005; Oh *et al.*, 2007; Kim *et al.*, 2008a; Kim *et al.*, 2008b; Youm and Lee, 2008; Do *et al.*, 2009). 황사를 구성하는 대부분의 물질은 중국 건조지역의 사막 및 황토고원의 토양이다. 중국 내 황사발원지는 지역별로 상이한 암석으로 구성되어 있기 때문에 이들의 풍화산물인 토양은 지역에 따라 다양한 광물로 구성되어 있으며 이에 따른 화학조성이 다르다 (Jeong *et al.*, 2011). 따라서 최근 황사의 광물학적 연구가 활발하게 이루어지고 있으며, 황사의 기원물질인 사막 및 황토고원의 토양과의 광물학적 비교연구 결과도 많이 보고되고 있다 (Masatoshi and Hiroshi, 1998; Kwon *et al.*, 2004a, 2004b; Jeong, 2008; Jeong and Lee, 2010). 따라서 중국 공업지대에서 유래한 중금속 등 오염물질 외에도 발원지의 지질에 따른 자연적인 오염물질에 의한 영향도 고려해야 할 것으로 판단된다.

일반적으로 토양에 함유된 원소가 주변 생태계 환경 및 인간의 건강에 미치는 영향은 각 원소의 독성, 이동도 (mobility), 생물학적 흡수도 (bio-availability) 등

에 따라 차이가 큰 것으로 알려져 있으며, 이러한 특성은 원소의 지구화학적 존재형태(geochemical speciation)에 의해서 결정된다. 그러므로 황사가 토양 및 수계 환경에 유입될 경우에 발생할 수 있는 생태계 및 인체 건강에 미치는 영향을 평가하기 위해서는 총함량 뿐만 아니라 각 원소의 지구화학적 존재형태를 규명하고 원소의 상대적인 결합세기 (binding strength)를 평가하는 것이 필수적이라고 할 수 있다. 원소의 지구화학적 존재형태는 광물형태, 탄산염광물, 산화광물 및 황화광물 등과 공침, 퇴적물 중 유기물과 결합, 광물표면에 흡착, 기타 규산염광물 입자격자에서의 치환 등의 형태로 존재하는 것이 일반적이다. 원소의 지구화학적 존재형태를 규명하기 위해서는 연속추출방법 (sequential extraction procedure)이 가장 적합한 것으로 알려져 있다. 연속추출방법은 선택성과 재흡착의 문제점이 지적되고 있지만, 환경에 미치는 장기적 악영향을 예측하고 환경의 변화에 따른 미량원소의 이동도 및 생체흡수도의 차이를 평가하는데 있어 유용한 방법으로 현재까지 사용되고 있다 (Tessier *et al.*, 1979; Hickey and Kittrick, 1984; Banerjee, 2003; Lee *et al.*, 2005).

본 논문은 황사의 주요 발원지인 중국의 대표적인 사막 (타클라마칸, 알라산, 오도스 사막) 및 황토고원의 토양 시료를 대상으로, 지구화학적 특성 (총함량 및 지구화학적 존재형태)을 규명함으로써 국내에 도달하는 황사가 지표환경 및 인간에 미치는 유해성을 예측하고자 하였다.

2. 시료채취 및 분석

2.1. 시료 채취 및 X-선 회절분석

연구에서 사용한 중국 건조지역의 토양 시료는 Kwon *et al.* (2004a, 2004b, 2004c)에 의해 사용된 시료로서, 2002년도에 황사의 주요 발생지인 중국 내 몽골 자치주의 2개 사막(알라산 및 오도스 사막) 및 황토고원, 그리고 2003년도에 서부 중국의 타클라마칸 사막 중부 및 동부지역에서 시료를 채취하였다. 오도스 및 알라산 사막의 토양 시료의 채취 위치 및 경위도는 Kwon *et al.* (2004b, Table 1 및 Fig. 1)에,

Table 1. Mineralogy of soils from the Loess Plateau and several deserts in China

areas	samples	Mineralogical Composition (%)												
		Qtz	Ab	IL	Or	Cc	Dol	Mu	Chl	Kaol	Hn	Ht	Bt	Mont
the Taklamakan deserts	mean	48.2	19.7	0.0	5.9	10.1	2.4	6.9	2.9	0.0	3.3	0.5	0.0	0.0
	max	54.2	24.9	0.0	11.3	12.0	3.5	8.8	4.5	0.0	7.4	1.5	0.0	0.0
	min	43.4	14.0	0.0	2.4	7.2	0.0	4.3	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	stdev	3.8	3.3	0.0	2.5	1.5	1.1	1.5	0.8	0.0	1.9	0.6	0.0	0.0
	CV	0.08	0.17		0.42	0.15	0.46	0.22	0.28		0.58	1.20		
the Loess Plateau	mean	38.9	15.9	0.0	4.4	14.0	2.8	13.4	7.1	0.0	2.5	1.0	0.0	0.0
	max	52.8	21.1	0.0	7.2	19.4	17.9	22.1	9.5	0.0	5.5	2.0	0.0	0.0
	min	27.3	12.0	0.0	0.0	9.4	0.0	8.3	4.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	stdev	6.7	2.6	0.0	2.0	3.3	5.1	3.6	1.3	0.0	2.5	0.7	0.0	0.0
	CV	0.17	0.16		0.45	0.24	1.82	0.27	0.18		1.00	0.70		
the Alashan desert	mean	59.8	18.3	0.0	6.6	2.4	0.7	5.6	3.4	0.0	2.6	0.6	0.0	0.0
	max	64.7	21.0	0.0	9.3	6.2	2.6	6.5	4.9	0.0	5.1	1.2	0.0	0.0
	min	53.7	15.0	0.0	3.8	0.8	0.0	4.7	1.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	stdev	0.0	2.0	0.0	2.0	2.0	1.2	0.7	1.1	0.0	1.9	0.5	0.0	0.0
	CV	0.00	0.11		0.30	0.83	1.71	0.13	0.32		0.73	0.83		
the Ordos desert	mean	50.0	25.4	1.5	8.1	1.7	0.4	7.5	2.9	0.3	0.9	0.5	0.5	0.3
	max	65.6	36.1	5.0	16.5	6.9	3.3	13.1	7.7	2.3	4.5	4.8	2.2	2.7
	min	38.0	13.7	0.0	3.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	stdev	7.7	6.1	1.9	3.6	2.6	1.0	2.8	2.0	0.8	1.6	1.2	0.8	0.8
	CV	0.15	0.24	1.27	0.44	1.53	2.50	0.37	0.69	2.67	1.78	2.40	1.60	2.67

Max: Maximum, Min: Minimum, Stdev: Standard deviation, CV: Coefficient Variation,

Ab: Na-plagioclase, Bt: biotite, Cc: calcite, Chl: chlorite, Dol: doloite, Hn: hornblende, Ht: hematite,

IL: illite, Kaol: kaolinite, Mont: montmorillonite, Mu: muscovite, Or: orthoclase, Qtz: quartz

그리고 타클라마칸 사막의 경우에는 Kwon *et al.* (2004c; Table 1 및 Fig. 1)에 기재되어있다. 황토고원에서 채취한 시료의 채취 위치는 Xian 북부 지역에서 부터 황토고원 중앙에 걸쳐 분포한다.

Fig. 1. Mineral compositions of soils from major source areas of Asian Dust (TK, Tklamakan desert; Loess, Loess Plateau; AL, Alashan desert; OR, Ordos desert; GB, Gobi desert).

황사발원지 토양시료의 광물학적 특성을 규명하기 위해 황사발원지 사막 (타클라마칸 사막, 황토고원, 알라산 사막 및 오도스 사막)의 토양 시료를 대상으로 하여 X-선 회절분석을 수행하고, 주요 구성광물의 정량적 구성비를 분석하였다. 황사 발원지 시료로써, 중국 타클라마칸 사막의 토양시료 11개, 황토고원 토양시료 10개, 알라산 사막의 토양시료 7개 및 오도스 사막 토양시료 16개를 확보하고 (Kwon *et al.*, 2004a, 2004b, 2004c), 이에 대한 정량적 구성광물 비율을 X-선 회절분석 기기를 이용하여 분석하였다. X-선 회절분석 기기는 PHILIPS X'PERT MPD Diffractometer (Cu Ka: 40 KV, 25 mA)를 이용하였고, Cu target을 사용하여 3°-45°까지 2°/1분의 속도와 0.01의 간격으로 하였다. 구성광물의 정량 분석을 위해서는 리트벨트 이론 및 방법에 근거하여 만들어진 광물 정량 분석용 소프트웨어 SIROQUANT™를 사용하였다 (Sietronics, 1996). X-선회절도를 스텝-스캔(step-scan) 방식으로 얻은 피크와 똑같은 피크를 결정학적인 방법에 의하여 수차례 반복 계산하여 전체적으로 완전히 일치시켜 정량치를 얻었다 (Taylor, 1991).

2.2. 화학분석

사막토양은 각각 1 g의 무게를 재어 화학분석을 수행하였다. 화학분석은 주원소 (major element)로 Ti, Al, Fe, Mn, Mg, Ca, Na, K 및 P 등 9개 원소, 미량원소 (trace element)로 Ba, Cr, Cu, As, Cd, Co, Ni, Rb, Pb, Zn, Ga, Li, S, Sr, V, Zr, Hf, Th, Y, Cs, Mo, Sb, Sc, Sn, U 등 26개 원소를 분석하였다.

화학분석 방법은 각 시료의 총 농도를 분석하기 위해 완전분해 방법을 수행하였다 (Tessier *et al.*, 1979). 분석하고자 하는 시료의 무게를 정확하게 측정하여 테플론 비커에 넣고 불산 (HF) 10 ml와 과염소산 (HClO₄) 2 ml를 부은 후 110°C로 가열하여 완전하게 증발시킨다. 이후 다시 불산 (HF) 10 ml와 과염소산 (HClO₄) 1 ml를 부은 후 110°C에서 완전하게 증발할 때까지 가열한다. 완전하게 증발되면 과염소산 (HClO₄) 1 ml를 부은 후 110°C에서 더 이상 흰 연기가 발생하지 않을 때까지 가열하여 과염소산을 완전하게 증발시킨다. 흰 연기가 발생하지 않으면 12N 염산 (HCl) 5 ml를 넣어 잔류물을 용해시킨 후 탈이온수 (deionized water) 20 ml를 부어 총 25 ml가 되도록 희석하여 0.45 µm 필터로 여과한 후 기기분석을 수행하였다. 모든 분석과정에서 사용한 불산 (HF), 과염소산 (HClO₄) 및 염산 (HCl)은 Merck사의 analytical grade를 사용하였다.

2.3. 연속추출

이번 사막토양에 함유된 원소들의 지구화학적 존재 형태 연구를 위해서는 Tessier *et al.* (1979)이 제시한 연속추출법을 이용하였다. 각 단계에서 회수된 광물찌꺼기는 다음 단계에서 분석하기에 앞서 증류수로 세척하여 각 연속추출단계에서의 오염을 최소화하였으며, 공시료 (blank samples)를 각 실험별로 분석하여 분석의 정확성을 검증하였다. 연속추출방법의 각 단계에서 분석된 각 원소의 함량이 신뢰도를 검토하기 위해, 연속추출의 fraction I에서 fraction V까지에서 검출된 원소의 함량을 합한 각 원소의 총 함량을 산분해로 분석한 각 원소의 함량과 비교하였으며, 분석방법은 다음과 같다.

- fraction FI: “양이온교환형”; 1M MgCl₂, pH 7
- fraction FII: “탄산염광물 수반형”, 1M CH₃COONa, HOAc로 pH 5 조절, 5시간,
- fraction FIII: “산화철망간광물 수반형”, 0.04M NH₂OH·HCl + 25%HOAc, pH2, 96°C, 6시간
- fraction FIV: “유기물 및 황화광물 수반형”,

30%H₂O₂ + 0.02M HNO₃, 85°C,
5시간, 3.2M NH₄OAc + 20%
HNO₃, 30분
- fraction FV: “잔류형”, HF + HClO₄, 110°C
증발, 12N HCl, 30분

2.4. 기기분석

화학분석은 한국기초과학지원연구원에서 수행하였으며, Ti, Al, Fe, Mn, Mg, Ca, Na, K, P, Sr, S 및 Zn은 PerkinElmer 사의 ICP-AES (Model: OPTIMA 4300 DV)를 이용하여 분석하였으며, 분석조건은 다음과 같다: RF Frequency, 40.68 MHz; RF Power, 1300 W; Coolant gas flow, 18 L/min; Auxiliary gas flow, 0.5 L/min; Nebulizer gas flow, 0.6 L/min; Wavelength (Ca, 317.933 nm; P, 213.617 nm; Fe, 238.204 nm; Zn, 206.200 nm). 한편 Ba, Cr, Cu, As, Cd, Co, Ni, Rb, Pb, Ga, Li, V, Zr, Hf, Th, Y, Cs, Mo, Sb, Sc, Sn, U 등은 ThermoElemental 사의 ICP-MS (Model: X-Series (X5))를 이용하여 분석하였으며, 분석조건은 다음과 같다: RF Frequency, 27.12 MHz; RF Power, 1300 W; Coolant gas flow, 13 L/min; Auxiliary gas flow, 0.7 L/min; Nebulizer gas flow, 0.9 L/min; Sample Cone, Ni; Skimmer Cone, Ni). 사용된 시약은 analytical grade(Merck)였고, ICP 분석시 사용된 표준 용액은 1,000 ppm stock solution (Merck)을 희석하여 사용하였다. 전 분석과정에 이용된 탈이온수를 얻기 위해 Milli-Q Millipore system을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 발원지 토양의 광물학적 구성성분

타클라마칸 사막, 황토고원, 알라산 사막 및 오도스 사막에서 산출되는 광물은 석영, 장석류, 탄산염광물, 백운모, 녹니석, 각섬석, 적철석 등이나, 오도스 사막에서 채취한 토양시료에서는 이러한 광물 이외에 견운모, 흑운모, 카올리나이트 및 몬모릴로나이트 등이 산출되었다 (Table 1).

알라산 사막, 오도스 사막 및 타클라마칸 사막의 석영 비율은 각각 평균 59.8%, 50.0% 및 48.2%로, 황토고원의 평균 38.9% 보다 훨씬 높은 비율을 나타내고 있다. 한편 방해석과 백운석의 경우에는 황토고원과 타클라마칸 사막에서 각각 평균 합계 16.8%와 12.5%의 높은 비율은 보이는 반면, 알라산 사막과 오도스 사막 토양에서는 각각 평균 합계 3.1%와 2.1%로,

Table 2. Mineralogy of local background soils in Korea

area	samples	size (μm)	Mineralogical Composition (wt. %)													
			Qtz	Ab	IL	Or	Cc	Dol	Mu	Chl	Kaol	Hn	Ht	Bt	Mt	Mont
Local background soil	1-1	2	38.4	26.6	0.0	15.9	0.0	0.0	12.2	3.4	3.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	1-2	2-0.15	52.4	16.7	0.0	14.1	0.0	0.0	9.7	3.3	3.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	1-3	0.15	19.6	38.6	0.0	14.3	0.0	0.0	15.4	4.9	7.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	2-1	2	45.1	13.8	0.0	21.1	0.0	0.0	16.9	1.5	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	2-2	2-0.15	64.8	18.0	0.0	9.8	0.0	0.0	7.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	2-3	0.15	48.4	29.4	0.0	7.6	0.0	0.0	10.9	0.5	3.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	3-1	2	49.9	7.1	0.0	14.1	0.0	0.0	14.9	3.6	10.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	3-2	2-0.15	55.0	0.0	0.0	14.3	0.0	0.0	15.5	4.3	10.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	3-3	0.15	40.2	10.4	0.0	11.5	0.0	0.0	18.8	4.2	14.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	BS	75	28.6	44.4	0.0	12.2	0.0	0.0	11.3	0.0	2.4	0.0	0.0	0.9	0.1	0.0
	mean		44.2	20.5	0.0	13.5	0.0	0.0	13.3	2.6	5.8	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0
	max		64.8	44.4	0.0	21.1	0.0	0.0	18.8	4.9	14.9	0.0	0.0	0.9	0.1	0.0
	min		19.6	0.0	0.0	7.6	0.0	0.0	7.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	stdev		13.2	14.1	0.0	3.6	0.0	0.0	3.6	1.9	4.8	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0
	CV		0.30	0.69		0.27			0.27	0.73	0.83			3.00		

Max: Maximum, Min: Minimum, Stdev: Standard deviation, CV: Coefficient Variation

Ab: Na-plagioclase, Bt: biotite, Cc: calcite, Chl: chlorite, Dol: doloite, Hn: hornblende, Ht: hematite,

IL: illite, Kaol: kaolinite, Mont: montmorillonite, Mt: magnetite, Mu: muscovite, Or: orthoclase, Qtz: quartz

황토고원과 타클라마칸 사막 토양이 약 4-8배 높은 함량을 보이고 있다 (Table 1). 점토광물+탄산염광물의 함량은 평균적으로 황토고원 21.8%, 타클라마칸 사막 15.4%, 오도스 사막 7.2%, 알라산 사막 6.5%로, 황토고원과 타클라마칸 사막 토양이 현저하게 높았고 석영, 장석 및 점토광물+탄산염광물의 삼각 다이어그램을 이용하여 도시한 결과, 점토광물+탄산염광물의 양으로 각 사막의 유형을 구분할 수 있었다 (Fig. 1).

한편, 이번 연구에서 황사시료를 채취한 한국지질자원연구원 주변 배경토양에서 산출되는 광물은 석영, 장석류, 백운모, 녹니석, 카올리나이트 등이 산출되었다 (Table 2). 관측지점 주변 배경토양의 광물 구성 비율의 특징은 탄산염광물이 산출되지 않았고 석영의 구성 비율은 평균 44.2% (19.6-64.8%)로 알라산 사막과 오도스 사막의 석영비율보다 낮았으나 타클라마칸 사막과 황토고원의 석영 비율과 유사한 구성 비율을 보였다. 또한 카올리나이트 구성 비율은 평균 5.8% (0.0-14.9%)로 알라산 사막, 오도스 사막 및 타클라마칸 사막 및 황토고원에서의 구성 비율보다 크게 높은 것으로 나타났다.

3.2. 발원지 토양의 지구화학적 특성

3.2.1. 주원소의 지구화학적 특성 및 비교

황토고원에서 채취한 시료에서 Ti, Al, Fe, Mn, Mg, Ca 및 P 평균 함량이 다른 사막토양에 비교하여 각각

1.7-2.0배, 1.3-1.4배, 2.2-2.4배, 2.0-2.1배, 1.6-2.9배, 1.2-4.0배 및 2.0-3.0배 높았다. 이 중에서도 Ca 함량의 경우에는 황토고원 및 타클라마칸 사막에서 채취한 토양이 알라산 및 오도스 사막 토양의 평균 함량보다 약 4배 정도 높은 것으로 나타났다. Na와 K의 평균 함량은 각각 오도스 사막 및 알라산 사막 시료에서 가장 높았다. 한편 알라산 사막과 오도스 사막 시료의 Ti, Al, Fe, Mn, Ca, K 및 P 함량은 유사한 것으로 밝혀졌으며, 이러한 결과는 알라산 사막과 오도스 사막의 토양시료는 주원소 함량에 대해 지구화학적으로 유사한 특성을 갖는 것임을 지시한다 (Table 3).

타클라마칸 사막, 황토고원, 알라산 사막 및 오도스 사막 등은 다양한 암석으로 구성되어 있어, 각 사막의 토양시료의 주성분 원소 함량은 각 사막별 및 각 사막에서의 시료 채취 위치에 따라 크게 차이가 예상되며, 이러한 특성을 변동계수 (coefficient of variation: CV)를 이용하여 검토하였다 (Table 3). 오도스 사막에서 채취한 토양시료를 제외하면 일반적으로 변동계수 값이 모두 0.5 이하인 것으로 나타났으며 이 결과는 분석된 각 시료의 주원소 함량이 시료에 따른 함량변화가 크지 않다는 것을 지시하는 것으로 주원소의 함량이 균질하다는 것을 의미한다. 주성분 원소의 함량이 균질한 특성을 보이는 원인은 사막 기후 특성상 바람에 의해 이동된 모래가 오랜 세월을 통하여 혼합되었기 때문인 것으로 해석된다. 최근 Jeong *et al.*

Table 3. Total major metals concentrations($\mu\text{g/g}$) of soils from the Loess Plateau and several deserts in China

		Ti	Al	Fe	Mn	Mg	Ca	Na	K	P
the Taklamakan desert	mean	1,653	38,597	11,698	208	4,892	41,908	23,235	10,492	300
	max	2,020	46,043	14,046	269	7,458	55,044	42,473	14,260	345
	min	1,297	33,109	10,506	181	3,298	30,321	17,698	6,759	240
	stdev	209	4,426	1,126	29	1,255	8,019	8,229	2,308	33.9
	CV	0.13	0.11	0.10	0.14	0.26	0.19	0.35	0.22	0.11
the Loess Plateau	mean	3,146	52,864	26,296	425	7,819	48,923	15,314	10,410	605
	max	3,518	63,157	33,770	675	14,582	75,123	29,972	13,171	747
	min	2,312	40,049	17,030	281	3,011	37,677	11,259	7,191	423
	stdev	348	8,814	4,981	120	3,180	11,389	5,444	2,131	102
	CV	0.11	0.17	0.19	0.28	0.41	0.23	0.36	0.20	0.17
the Alashan desert	mean	1,546	41,498	12,129	203	4,591	12,208	18,436	19,710	201
	max	2,257	48,034	17,467	304	9,585	23,506	21,733	25,227	318
	min	916	37,755	8,011	115	2,392	5,524	16,573	16,042	91.7
	stdev	510	3,498	3,939	78.7	3,044	7,717	1,729	3,589	83.3
	CV	0.33	0.08	0.32	0.39	0.66	0.63	0.09	0.18	0.41
the Ordos desert	mean	1,899	41,923	10,836	201	2,671	13,492	25,013	17,027	226
	max	3,825	51,746	21,480	366	7,917	33,589	32,716	20,018	563
	min	436	31,392	3,230	55.6	566	5,629	15,819	13,413	100
	stdev	987	6,359	6,047	109	2,149	8,452	5,419	1,789	142
	CV	0.52	0.15	0.56	0.54	0.80	0.63	0.22	0.11	0.63
local background soil	mean	1,470	38,746	8,872	243	1,826	8,945	21,194	22,789	222
	max	1,561	44,762	9,656	265	2,013	9,374	22,987	26,764	243
	min	1,379	32,731	8,089	222	1,639	8,516	19,400	18,815	201
	stdev	129	8508	1,108	30.2	264	607	2,536	5,621	29.7
	CV	0.09	0.22	0.12	0.12	0.14	0.07	0.12	0.25	0.13

(2011) 연구에서도 유사한 결과가 보고되었다. 이들의 연구결과에 의하면 황토고원의 토양 시료의 광물학적 성분이 황토고원 전체적으로 비교적 균질한 것으로 보고하였다. 또한, 세밀하게 보면 지리적으로 광물성분의 변화가 있으며, 이는 바람에 의한 분급작용과 화학적 풍화작용과 관련되었다고 보고한 바 있다 (Jeong *et al.*, 2011). 그러나 타클라마칸 사막과 황토고원에 비교해서 알라산 사막과 오도스 사막에서 채취한 토양시료의 주원소 함량의 변동계수 값이 상대적으로 큰 것으로 나타났다. 이는 알라산 사막과 오도스 사막의 토양 시료의 균질도가 낮은 것으로 평가된다 (Table 3).

타클라마칸 사막, 황토고원, 알라산 사막 및 오도스 사막에서 채취한 토양시료의 주원소 (Ti, Al, Fe, Mn, Mg, Ca, Na, K 및 P 등 9개 원소)에 대한 상관관계를 분석하였다. 9개 주원소 중 뚜렷한 양의 상관관계를 보이는 원소는 Ti, Fe 및 Mn 등 3개 원소 이었다. 또한 이들 원소는 타클라마칸 사막, 알라산 사막 및 오도스 사막에서 채취한 토양과는 달리 황토고원에서 채취한 토양의 Ti, Fe 및 Mn 함량이 뚜렷하게 높은

특징을 보이고 있다. 타클라마칸 사막과 알라산 사막에서 채취한 토양의 Ti, Fe 및 Mn 함량은 좁은 범위 내에 집중적으로 분포하고 있으나, 오도스 사막에서 채취한 토양의 Ti, Fe 및 Mn 함량은 타클라마칸 사막과 알라산 사막의 Ti, Fe 및 Mn 함량의 범위를 포함하면서 넓게 분포하고 있는 특징이 관찰되었다 (Fig. 2).

3.2.2. 미량원소 지구화학적 특성 및 비교

주원소와 유사하게 일반적으로 황토고원의 토양시료가 다른 사막들의 토양시료보다 미량원소 함량이 높은 것으로 나타났다. 황토고원 토양시료에서 검출된 Cr, Cu, As, Co, Ni, Pb, Zn, Ga, Li, V, Th, Y, Cd, Cs, Sc, Sn, Ta 및 U 함량이 타클라마칸 사막, 알라산 사막 및 오도스 사막 토양시료에서의 함량보다 각각 1.8-2.3배, 2.3-3.0배, 2.2-2.3배, 2.5-2.9배, 1.9-3.0배, 1.2-1.4배, 2.0-2.6배, 1.1-1.4배, 1.6-2.2배, 1.9-2.3배, 1.9-2.6배, 1.8-2.2배, 1.4-2.2배, 2.4-2.7배, 1.8-2.3배, 1.5-2.1배, 1.6-2.0배 및 1.5-2.2배 높다. Ba와 Sr은 오도스 사막, Rb와 Sb는 알라산 사막, Mo는 타클라마칸 사막

Fig. 2. The correlations for Ti-Fe, Ti-Mn and Fe-Mn of soils from the Loess Plateau and several deserts in China.

시료에서 함량이 가장 높았다 (Table 4).

미량원소 함량에 대한 변동계수 값은 주원소에 비교하여 상대적으로 큰 것으로 나타났으며, 미량원소에 대한 변동계수 값이 가장 큰 원소는 S이다 (Table 4). 연구대상 사막에서 채취한 토양시료의 미량원소 중 Ba, Rb, Pb, Ga, Li, Sr, Y, Cd, Cs, Sn, U 등의 원소들은 변동계수 값이 0.5 이하로 시료채취 위치에 따른 함량의 변화가 가장 적은 원소들인 것으로 밝혀졌다. 또한 변동계수 값이 0.5 이상인 미량원소의 수가 가장 많은 사막은 오도스 사막으로 (S, Ni, Cu, Th, Co, Sc, Zn, Ta, Cr, V 및 As), 이는 다른 사막에 비교하여 오도스 사막 토양시료의 미량원소 함량이 가장 균질하지 않음을 지시한다. 타클라마칸 사막, 황토고원 및 알라산 사막의 경우 미량원소의 변동계수 값이 0.5 이상인 원소의 수가 적으며, 타클라마칸 사막과 황토고원은 S, Zr, Hf, Mo, 알라산 사막은 S, Ni 및 Sb 등이 있다 (Table 4).

함량이 100 $\mu\text{g/g}$ 이상인 미량원소는 Ba, S, Sr 및 Zr이었다 (Table 4). 사막 토양시료의 미량원소 중 가장 함량이 높은 원소는 Ba (평균 445-645 $\mu\text{g/g}$)으로 황토고원 시료에서 가장 낮은 함량을 보이고 오도스

사막에서 최대 함량을 보인다. S 함량은 타클라마칸 사막에서 가장 높은 것으로 나타났으나 (평균 342 $\mu\text{g/g}$), 가장 높은 함량 (2,480 $\mu\text{g/g}$)을 제외하면 106-144 $\mu\text{g/g}$ 으로 비교적 균질한 함량을 보이고 있다. 이외 황토고원 평균 192.2 $\mu\text{g/g}$, 알라산 사막 평균 322 $\mu\text{g/g}$, 오도스 사막 평균 92.6 $\mu\text{g/g}$ 이었다. 이외, Sr 함량은 평균 154-239 $\mu\text{g/g}$, Zr 함량은 평균 113-168 $\mu\text{g/g}$ 으로 함량의 차이가 크지 않았다 (Table 4). 함량이 10 $\mu\text{g/g}$ 이상 100 $\mu\text{g/g}$ 미만인 미량원소는 Rb, V, Zn, Cr, Li 및 Pb이었으며, 이러한 미량원소 이외에도 타클라마칸 사막에서는 Ni 및 Cu, 황토고원에서는 Ni, Cu, Y, As, Co 및 Ga 등이 포함된다. 함량이 10 $\mu\text{g/g}$ 미만인 미량원소는 Th, Hf, Sc, Sb, Sn, Ta, Mo, Cs, U 및 Cd이었으며, 황토고원을 제외한 다른 사막토양에서는 Ni, Ga, Cu, Y, As, Co 등이 포함된다 (Table 4).

한편, 이번 황사연구의 관측지점 주변에서 채취한 토양 시료에 함유된 미량원소 함량과 비교한 결과, 사막 및 황토고원의 함량이 관측지점 주변 국내 토양에서의 함량보다 높은 원소는 Cr (1.4-3.2배), As (2.0-4.6배), Ni (1.6-4.9배), V (1.6-3.7배), Mo (2.5-6.2배), Sb (5.9-8.6배) 및 Sc (1.8-4.1배) 등이었으나, Rb, Ga 및 Th

Table 4. Total trace metals concentrations/(g) of soils from the Loess Plateau and several deserts in China

	Ba	Cr	Cu	As	Co	Ni	Rb	Pb	Zn	Ga	Li	S	Sr	V	Zr	Hf	Th	Y	Cd	Cs	Mo	Sb	Sc	Sn	Ta	U	
TK	mean	516	20.9	10.2	4.90	4.20	12.8	41.6	13.7	23.7	7.33	16.6	342	211	31.4	168	4.28	4.02	7.84	0.089	0.95	2.77	3.47	3.12	1.73	1.46	1.33
	max	615	29.5	13.2	5.48	5.38	15.4	49.5	19.1	43.5	9.35	21.6	2,481	244	36.8	541	13.3	5.56	9.67	0.114	1.50	8.82	6.80	4.17	2.04	2.34	1.52
	min	473	16.9	8.01	4.26	3.57	11.4	34.3	12.1	15.6	6.37	13.2	107	172	28.2	62.2	1.63	3.31	6.62	0.047	0.50	1.20	1.83	2.71	1.53	0.94	1.14
	stdev	36.6	3.27	1.54	0.41	0.52	1.16	4.66	2.13	8.74	0.87	2.61	709	19.0	2.71	167	4.07	0.66	0.97	0.021	0.31	2.68	1.50	0.45	0.17	0.43	0.12
	CV	0.07	0.16	0.15	0.08	0.12	0.09	0.11	0.16	0.37	0.12	0.16	2.07	0.09	0.09	1.00	0.95	0.16	0.12	0.235	0.33	0.97	0.43	0.14	0.10	0.29	0.09
LS	mean	445	45.4	23.7	11.4	10.6	29.7	44.8	17.8	46.4	10.4	27.2	192	218	65.9	157	4.07	7.68	13.8	0.123	2.59	2.11	3.00	6.56	2.60	2.34	2.02
	max	563	56.8	31.2	13.6	14.2	39.8	61.5	21.1	58.1	12.3	32.9	486	434	81.6	491	11.0	9.68	16.4	0.160	4.27	7.18	5.11	8.19	2.96	4.12	2.45
	min	366	37.6	16.2	9.39	7.48	22.9	35.3	14.7	32.5	8.31	20.0	80.0	162	48.8	104	2.98	4.69	9.69	0.088	1.06	1.29	2.41	4.18	2.18	1.29	1.72
	stdev	51.6	6.52	4.34	1.57	2.07	5.34	8.31	1.80	8.55	1.30	4.02	127	79.1	9.8	118	2.46	1.51	1.80	0.025	1.07	1.79	0.76	1.39	0.28	0.99	0.24
	CV	0.12	0.14	0.18	0.14	0.20	0.18	0.19	0.10	0.18	0.12	0.15	0.66	0.36	0.15	0.75	0.60	0.20	0.13	0.200	0.41	0.85	0.25	0.21	0.11	0.42	0.12
AL	mean	611	25.6	9.65	5.32	4.18	16.0	50.1	12.4	19.2	7.41	12.4	322	154	34.1	113	2.83	3.30	6.34	0.055	1.08	1.24	3.70	3.69	1.23	1.19	0.92
	max	743	45.4	13.5	8.18	6.74	32.7	62.7	15.4	25.6	8.51	15.7	1,682	190	47.0	182	4.32	4.37	9.38	0.077	1.41	2.13	7.63	5.85	1.66	1.96	1.30
	min	515	15.4	6.91	3.33	2.38	8.01	39.8	9.55	13.9	6.10	9.55	59.0	132	23.7	73.6	1.90	2.22	3.95	0.032	0.75	0.80	2.19	2.21	0.83	0.54	0.53
	stdev	90.1	12.3	2.35	1.72	1.64	9.31	6.92	2.01	4.58	0.80	2.30	601	19.0	9.82	38.8	0.87	0.90	2.07	0.016	0.24	0.48	2.00	1.48	0.30	0.50	0.30
	CV	0.15	0.48	0.24	0.32	0.39	0.58	0.14	0.16	0.24	0.11	0.18	1.87	0.12	0.29	0.34	0.31	0.27	0.33	0.288	0.22	0.39	0.54	0.40	0.24	0.42	0.33
OR	mean	645	20.0	7.90	5.11	3.64	9.78	45.9	14.3	17.7	9.41	12.6	92.6	239	28.7	121	2.99	3.00	6.38	0.060	1.13	1.14	2.55	2.87	1.26	1.26	0.93
	max	852	40.3	22.6	11.0	8.48	25.3	64.4	16.0	43.0	10.7	22.9	770	317	57.6	185	4.56	6.59	12.7	0.114	2.70	1.87	5.12	6.45	2.18	3.52	1.81
	min	409	5.67	3.43	2.22	1.13	3.13	32.6	12.2	6.97	7.00	7.71	26.8	141	8.46	65.2	1.62	1.24	2.85	0.025	0.71	0.75	1.47	0.95	0.52	0.38	0.36
	stdev	131	11.2	5.50	2.70	2.32	7.52	8.41	0.89	10.5	1.14	4.93	182	55.1	15.2	41.2	1.02	1.95	3.06	0.025	0.51	0.38	1.13	1.84	0.50	0.73	0.45
	CV	0.20	0.56	0.70	0.53	0.64	0.77	0.18	0.06	0.59	0.12	0.39	1.96	0.23	0.53	0.34	0.34	0.65	0.48	0.419	0.45	0.33	0.44	0.64	0.40	0.58	0.48
LBS	mean	601	14.4	7.10	2.50	3.30	6.10	82.5	20.7	44.0	22.9	25.4	91.3	168	17.7	45.8	20.3	11.2	0.118	3.05	0.45	0.43	1.59	2.84			1.41
	max	659	15.4	7.50	2.80	3.50	6.50	98.9	21.4	45.3	24.2	27.5	162	179	18.8	50.3	22.8	12.8	0.138	3.19	0.52	0.48	1.87	2.84			1.55
	min	543	13.3	6.70	2.30	3.10	5.70	66.2	20.0	42.8	21.6	23.3	20.9	157	16.7	41.4	17.9	9.5	0.098	2.92	0.38	0.38	1.31	2.85			1.26
	stdev	81.9	1.50	0.60	0.40	0.30	0.60	23.1	1.00	1.80	1.80	3.00	100	15.1	1.50	6.30	3.50	2.30	0.028	0.19	0.10	0.06	0.40	0.01			0.21
	CV	0.14	0.10	0.08	0.16	0.09	0.10	0.28	0.05	0.04	0.08	0.12	1.09	0.09	0.08	0.14	0.17	0.21	0.24	0.06	0.21	0.15	0.25	0.00			0.15
AL : the Alashan desert, LS : the Loess Plateau, OR : the Ordos desert, TK : the Taklaman desert, LBS : local background soil																											

AL : the Alashan desert, LS : the Loess Plateau, OR : the Ordos desert, TK : the Taklamakan desert, LBS : local background soil

등은 낮은 함량을 보였다. 한편, Ba, Cu, Co, Pb, Zb, Li, S, Sr, Zr, Y, Cd, Sn 및 U 등의 원소들은 사막토양에서의 평균 함량과 관측지점 주변 토양에서의 함량이 거의 유사한 함량을 보였다 (Table 4).

3.2.3. 미량원소의 상관관계

타클라마칸 사막, 황토고원, 알라산 사막 및 오도스 사막에서 채취한 토양시료의 미량원소에 대한 상관관계를 분석한 결과, Cr, Cu, As, Co, Ni, V, Y, Sc,

Sn, Zn, Li, Th, U 등은 원소간에 서로 양의 상관관계를 보이고 있다 (Fig. 3). 이러한 결과는 이들 미량원소들이 타클라마칸 사막, 황토고원, 알라산 사막 및 오도스 사막에서 채취한 토양시료의 일차광물과 수반된 것임을 지시한다. 미량원소간의 상관관계를 보면, 황토고원에서 채취한 토양시료와 타클라마칸 사막, 알라산 사막, 오도스 사막 등과 뚜렷하게 구분된다. 이러한 결과는 황토고원의 토양시료에 함유된 Cr, Cu, As, Co, Ni, V, Y, Sc, Sn, Pb, Zn, Cd, Cs, Li, Th, U

Fig. 3. The Correlations among metal elements of soils from the Loess Plateau and several deserts in China.

의 함량이 다른 사막의 토양시료보다 높은 함량을 보이고 있기 때문이다. 한편, 타클라마칸 사막, 알라산 사막, 오도스 사막에서 채취한 토양시료의 이들 원소의 함량에 대한 영역이 중복되어 있어 이들 사막의 기원을 구분하기 어렵다. 또한, 타클라마칸 사막에서 채취한 토양시료의 이들 원소의 함량은 영역이 매우 국한되어 있는 반면에 오도스 사막과 알라산 사막에서 채취한 토양시료의 이들 원소들의 영역은 넓게 분포하고 있는 것이 특징이다. 이는 오도스 사막과 알라산 사막에서 채취한 토양시료의 다양한 지질을 반영하고 있음을 지시하고 있다. 반면에 타클라마칸 사막에서 채취한 토양시료의 경우 오랜 지질시대에 걸쳐 풍화작용을 받아 바람에 의해 충분히 균질화 되었기 때문일 것으로 추정된다.

한편, 사막토양의 미량원소 함량은 Fe의 함량과 양의 상관관계가 있는 것으로 나타났으며, 특히, Pb, Zn, As, Cd, Cu, Ni, Cr, Co 등은 Fe와 상관도가 매우 높은 것으로 나타났다. 이러한 것은 사막토양에서 미량원소의 함량은 Fe 함량과 밀접하게 거동한다는 것을 지시하며, 특정한 지질학적 작용 (즉 풍화작용, 퇴적작용 등)에 의해 Fe 함량이 부화되면 Pb, Zn, As, Cd, Cu, Ni, Cr, Co 등의 함량도 동일한 비율로 부화됨을 의미한다.

3.3. 지구화학적 존재형태 연구결과

3.3.1. Fe, Mn 및 Ca의 지구화학적 존재형태

Fe의 지구화학적 존재형태는 사막 토양의 유형에 관계없이 “잔류형” (fraction FV)이 가장 우세하였다. “잔류형”으로 존재하는 Fe는 전체 함량의 89.7%, “유기물 및 황화광물 수반형” (fraction IV) 1.9%, “산화철망간광물 수반형” (fraction FIII) 7.9%이었다. 이외 “양이온교환형” (fraction I)과 “탄산염광물 수반형” (fraction II)으로 존재하는 Fe 함량은 전체 함량의 0.0-0.3%인 것으로 나타났으나, 타클라마칸 사막 토양에서는 “탄산염광물 수반형” (fraction II)으로 존재하는 Fe 함량이 전체 함량의 약 1.3%이었다 (Fig. 4).

타클라마칸 사막, 알라산 사막, 오도스 사막 등의 토양에 존재하는 Mn은 “잔류형”으로 존재하는 것이 전체함량의 54.2-74.9%으로 가장 높은 것으로 나타났으나, 황토고원 토양의 경우에는 35.0%만이 “잔류형”으로 존재하고, 함량이 가장 높은 형태는 “산화철망간광물 수반형”으로 전체 함량의 55.4%이었다. 타클라마칸 사막, 알라산 사막, 오도스 사막 등 토양에서 “산화철망간광물 수반형”으로 존재하는 Mn 함량은 10.2-

Fig. 4. Sequential extraction procedure (SEP) results of Ca, Fe & Mn in soils from the Loess Plateau and several deserts in China.

18.3%이었다. 한편, “탄산염광물 수반형”으로 존재하는 Mn는 타클라마칸 사막 토양이 33.8%로 다른 사막 토양의 경우와 비교할 때 가장 높으며, 이는 약산성의 용액에서도 쉽게 이온 형태로 용해되어 토양 및 수계 환경에 영향을 준다는 것을 의미한다. 이외 사막토양의 경우 4.7-18.2% 이었다. “유기물 및 황화광물 수반형”으로는 전체 함량의 1.0-4.9%, “양이온교환형”으로는 전체 함량의 0.0-1.3%이었다 (Fig. 4).

타클라마칸 사막 토양에 존재하는 Ca는 “탄산염광물 수반형”으로 존재하는 비율이 전체 함량의 75.9%로 가장 높았으며, 이외 “잔류형” 11.9%, “산화철망간광물 수반형” 9.4%, “양이온교환형” 1.7%, “유기물 및 황화광물 수반형” 1.1%이었다. 이러한 존재형태 특성은 타클라마칸 사막 토양에 방해석 등 탄산염광물이 다른 사막 토양보다 월등히 많이 존재하는 것을 지시하는 것이다. 알라산 사막 토양에도 “탄산염광물 수반형”으로 존재하는 Ca 함량 비율이 전체 함량의 50.5%로 가장 높았으며, 이외 “잔류형” 36.7%, “산화철망간광물 수반형” 4.7%, “양이온교환형” 6.5%, “유기물 및 황화광물 수반형” 1.6%이었다. 그러나 황토고원 토양의 경우에는 Ca의 존재형태의 차이가 크다 (Fig. 4). 황토고원 토양에서는 “산화철망간광물 수반형”이 전체 Ca 함량의 39.3%로 가장 높은 함량 비율을 보이고 있으며, “잔류형”이 25.4%, “양이온교환형” 16.1%, “유기물 및 황화광물 수반형” 12.6%, “탄산염광물 수반형” 1.1%이었다.

형” 6.6%이었다. 오도스 사막 토양에 존재하는 Ca는 대부분이 잔류형”으로 전체 Ca 함량의 85.0%로 주로 장석류 등으로 존재하는 것으로 추정된다. 이외, “양이온교환형”, “탄산염광물 수반형”, “산화철망간광물 수반형”, “유기물 및 황화광물 수반형” 등으로 존재하는 Ca 함량은 전체 함량의 각각 7.4%, 2.1%, 2.9%, 2.6%를 차지하고 있다 (Fig. 4).

3.3.2. 미량원소의 지구화학적 존재형태

일반적으로 5단계 연속추출 결과에서 1단계로부터 5단계로 갈수록 각 원소의 이동도 (mobility) 및 생체흡수도 (bioavailability)는 감소하며, 용해되기 어렵다고 알려져 있다 (Tessier *et al.*, 1979; Hickey and Kittrick, 1984; Banerjee, 2003; Lee *et al.*, 2005). 5단계는 일반적인 자연 상태에서는 용해되어 주변 토양 및 수계환경에 영향을 주지 않을 것으로 예측되는 형태인 것으로 알려져 있는 것이 일반적이다. 이러한 이유로 마지막 5단계인 “잔류형” (fraction FV)에서 용출되는 각 22개 미량원소의 함량비율을 기준으로 22개 미량원소를 5개 세부 그룹으로 구분하였다.

- 1 그룹 (“잔류형” 90% 이상): Sb, Sn, Zr, Rb, Cs, Th
- 2 그룹 (“잔류형” 80-89%): Ba, Cr, Li, V, Sc

· 3 그룹 (“잔류형” 70-79%): As, Y, Ni, Co, Mo, U, Zn, Sr

· 4 그룹 (“잔류형” 50-69%): Cu, Pb

· 5 그룹 (“잔류형” 50% 이하): Cd

이러한 결과를 보면, 사막토양이 황사로 장거리를 이동하여 국내에 유입되어 토양 및 수계환경에서 산성용액과 반응할 경우, 이동도가 가장 높은 원소는 Cd이며 전체 함량의 87%가 용해될 가능성이 있는 것으로 예측된다. 이는 Cd이 탄산염광물과 산화철망간광물로 존재하거나 수반되는 것에 기인한다. 이외에도 4그룹 (Cu, Pb)은 약 30%, 3그룹 (As, Y, Ni, Co, Mo, U, Zn, Sr)과 2그룹 (Ba, Cr, Li, V, Sc)에 속하는 미량원소들은 각각 20-30% 및 10-20% 범위가 용해될 것으로 예측되는 원소들이다 (Table 5). 그러나 1그룹 (Sb, Sn, Zr, Rb, Cs, Th)에 속하는 미량원소들은 산성용액과 반응할 지라도 전체 함량의 약 10% 미만만이 용해될 것으로 판단되며, 따라서 황사물질이 토양 및 수계환경에 퇴적된다 할지라도 이러한 원소들이 주변 환경 및 생태계에 미치는 영향은 미약할 것으로 예측된다.

1 그룹에 속하는 Sb, Sn, Zr, Rb, Th, Cs 중에서 Sb와 Sn은 황사물질의 유형에 상관없이 모두 “잔류형”이 전체 함량비율의 100%를 차지하므로, 황사물질에 함유된 미량원소 중에서 가장 용출이 안 되는 원소인 것

Table 5. Percentages of trace metals extracted from different fractions of soils from the Loess Plateau and several deserts in China

fraction		Trace Element (%)										
		Sb	Sn	Zr	Rb	Cs	Th	Ba	Cr	Li	V	Sc
F I	mean	0.0	0.0	0.2	0.6	0.2	0.0	3.2	0.6	1.2	9.5	0.2
	range	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.3	0.2-0.9	0.0-0.2	0.0-0.0	2.1-4.4	0.4-0.7	0.8-1.5	7.0-13.3	0.1-0.2
F II	mean	0.0	0.0	0.0	0.7	0.5	3.6	4.1	2.2	2.7	0.3	4.6
	range	0.0-0.0	0.0-0.0	0.0-0.0	0.3-1.6	0.2-1.1	0.6-8.5	2.6-5.0	1.1-3.2	1.3-4.8	0.2-0.5	1.3-9.0
F III	mean	0.0	0.0	0.5	0.6	1.6	1.3	3.7	11.6	12.7	5.3	10.5
	range	0.0-0.0	0.0-0.0	0.1-1.6	0.4-0.9	0.3-3.0	0.4-2.1	1.5-8.3	8.5-13.6	10.7-17.0	2.8-8.4	6.6-13.7
F IV	mean	0.0	0.0	1.0	0.8	2.6	4.5	2.1	2.6	2.2	2.6	4.9
	range	0.0-0.0	0.0-0.0	0.5-1.7	0.6-1.2	1.2-3.2	2.9-7.3	0.2-3.8	1.8-3.1	1.3-3.1	1.9-3.2	4.0-5.3
F V	mean	100.0	100.0	98.3	97.4	95.2	90.6	86.9	83.0	81.2	82.3	80.0
	range	100.0-100.0	100.0-100.0	96.6-99.1	95.5-98.4	92.5-98.2	84.9-93.2	80.4-93.5	80.4-88.2	77.9-84.4	78.0-86.1	77.1-87.0
		As	Y	Ni	Co	Mo	U	Sr	Zn	Pb	Cu	Cd
F I	mean	1.2	0.0	2.0	1.6	7.7	1.5	12.6	1.0	0.0	1.1	8.1
	range	0.1-2.2	0.0-0.1	0.7-3.6	0.7-2.7	0.0-18.5	0.0-3.4	1.5-39.3	0.6-1.2	0.0-0.0	0.7-1.4	2.4-19.9
F II	mean	2.4	8.9	5.0	5.8	0.0	11.3	12.0	1.9	7.3	3.4	53.1
	range	1.2-3.5	2.7-18.0	1.6-9.3	1.5-8.3	0.0-0.0	1.2-27.5	0.5-38.0	0.9-3.5	3.7-12.9	0.6-6.2	46.7-68.7
F III	mean	10.6	6.1	17.3	18.1	5.9	8.2	3.7	11.7	17.4	21.9	23.7
	range	5.6-17.0	4.8-7.4	14.0-22.0	11.0-34.7	0.0-23.4	3.3-10.8	0.7-8.3	8.7-15.2	10.3-35.6	16.7-29.5	6.8-45.7
F IV	mean	7.1	9.7	2.7	2.3	11.0	4.6	1.6	13.4	8.8	5.1	2.4
	range	3.3-11.0	6.5-14.3	2.3-3.1	1.4-2.8	7.6-16.2	2.5-7.4	0.2-2.9	2.0-44.1	3.6-24.0	2.7-8.2	0.0-3.3
F V	mean	78.7	75.2	73.1	72.4	75.4	74.6	70.2	72.1	66.6	68.5	12.7
	range	70.6-81.7	66.1-84.6	72.4-74.8	60.4-78.7	60.3-86.5	52.4-90.7	47.2-97.1	44.9-86.1	36.7-78.4	54.8-75.4	0.0-32.1

으로 예측되었다. 이외의 1그룹에 속하는 원소들은 “잔류형” 다음으로 “유기물 및 황화광물 수반형”이 우세하였으며, 원소에 따라 전체 함량의 평균 0.8-4.5% 이었다. “산화철망간광물 수반형”으로 존재하는 비율은 전체 함량의 평균 0.5-1.6% 이었으며, “탄산염광물 수반형”은 전체 함량의 평균 0.0-3.6%, “양이온교환형”은 전체 함량의 평균 0.0-0.6% 이었다 (Table 5).

2 그룹에 속하는 원소는 “잔류형” 다음으로 우세한 존재형태가 “산화철망간광물 수반형” 이었다. “산화철망간광물 수반형”으로 존재하는 미량원소들의 함량은 전체 함량의 평균 3.7-12.7%, “유기물 및 황화광물 수반형”은 전체 함량의 평균 2.1-4.9%, “양이온교환형”은 전체 함량의 평균 0.2-9.5%, “탄산염광물 수반형”은 전체 함량의 평균 0.3-4.6%이었다 (Table 5).

3 그룹에 속하는 원소도 가장 우세한 존재형태는 역시 “잔류형” 형태 (전체 함량의 평균 70.2-78.7%)이다. 다음으로 우세한 존재형태는 “산화철망간광물 수반형”으로 전체 함량의 평균 3.7-18.1% 이고, “유기물 및 황화광물 수반형”은 전체 함량의 평균 1.6-13.4%, “탄산염광물 수반형”은 전체 함량의 평균 0.0-12.0%, “양이온교환형”은 전체 함량의 평균 0.0-12.6%이었다 (Table 5). 3 그룹에 속하는 원소의 각 존재형태 별 범위가 넓은 것은 Sr의 존재형태가 다른 미량원소들과 차이가 뚜렷하기 때문이다. Sr의 존재형태 중 “탄산염광물 수반형”과 “양이온교환형”으로 존재하는 함량이 다른 원소들과 비교할 때 뚜렷하게 높다. 이러한 Sr의 특징적인 광물학적 존재형태는 Sr이 탄산염 광물의 치환된 형태로 존재하거나 Sr-황산염광물 (Celestine, SrSO_4) 형태로 존재하기 때문으로 추정된다. 기존 연구결과에 의하면 Sr은 흑운모의 벽개면을 따라 Sr-황산염광물이 산출되는 것으로 알려졌다 (Jeong and Lee, 2010).

4 그룹에 속하는 원소의 경우, “잔류형”의 함량비율은 전체 함량의 평균 66.6-68.5%, “산화철망간광물 수반형”은 전체 함량의 평균 17.4-21.9%로 이들 존재형태가 전체 함량의 약 87%를 차지하고 있다. 이외, “유기물 및 황화광물 수반형”은 전체 함량의 평균 5.1-8.8%, “탄산염광물 수반형”은 전체 함량의 평균 3.4-7.3%, “양이온교환형”은 전체 함량의 평균 0.0-1.1%이었다 (Table 5).

5 그룹에 속하는 Cd는 “탄산염광물 수반형”이 차지하는 함량비율이 전체 함량의 53.1%인 반면에, “잔류형”이 차지하는 함량비율은 평균 12.7%이었다. 다음으로 우세한 Cd의 존재형태는 “산화철망간광물 수반형”

으로 평균 23.7%를 차지하고 있으며, 이러한 존재형태도 산성용액과 반응하여 쉽게 용해되어 이온형태로 존재할 수 있는 존재형태이다. 이외, “양이온교환형”은 평균 8.1%, “유기물 및 황화광물 수반형”은 평균 2.4%를 차지하였다. 이러한 사막 토양에 존재하는 Cd의 존재형태 특성은 사막토양이 황사물질로 국내에 유입되어 토양 및 수계환경에 퇴적될 경우 Cd의 이동도가 다른 미량원소에 비교하여 매우 높을 것으로 예측되는 결과이며, 만일 황사물질 중 Cd 함량이 높을 경우 황사 기원의 유형에 상관없이 많은 양의 Cd이 황사로부터 용해되어 인간의 건강뿐 만아니라 토양과 수계환경에 매우 해로운 영향을 미칠 것으로 예측된다 (Table 5).

4. 결 론

타클라마칸 사막, 황토고원, 알라산 사막 및 오도스 사막 토양시료의 주원소 함량은 시료 채취 위치에 따른 함량변화가 크지 않았으나, 미량원소의 함량은 다소 차이가 있었다. 이는 바람에 의해 이동된 모래가 오랜 세월을 통하여 혼합됨으로써 토양시료의 채취 위치에 따른 화학특성의 변화가 없이 균질한 것으로 해석된다. 일부 미량원소 (Cr, Cu, As, Co, Ni, V, Y, Sc, Sn, Pb, Zn, Cd, Cs, Li, Th, U) 간의 양의 상관관계를 갖으며, 황토고원에서 채취한 토양시료와 타클라마칸 사막, 알라산 사막, 오도스 사막 토양 등과 뚜렷하게 구분된다. 사막토양의 지구화학적 존재형태 연구결과, Fe의 경우 모두 “잔류형”이 85% 이상이었으나, Mn와 Ca의 존재형태는 사막의 유형에 따라 존재형태의 차이가 현저하였다. 황토고원 및 사막 토양 시료에 함유되어 있는 미량원소의 이동도를 기준으로 24개 미량원소를 5개 세부 그룹으로 구분하였다. 이동도가 10% 미만인 1 그룹에 속하는 원소는 Sb, Sn, Zr, Rb, Cs, Th, 이동도가 20% 미만인 2그룹에 속하는 원소는 Ba, Cr, Li, V, Sc, 이동도가 30% 미만에 이르는 3 그룹 원소는 As, Y, Ni, Co, Mo, U, Zn, Sr 등이었다. 사막 토양에 함유되어 있는 Cu와 Pb의 이동도는 최대 30% 이상일 것으로 예측되며, Cd의 이동도는 평균 약 87%에 이른다. 그러므로 황사로 유입되는 사막 및 황토고원 토양에 함유된 Cd, Cu 및 Pb는 전체 함량의 상당부분이 지표수 등 수용액에 쉽게 용해되어 지표환경에 직접 영향을 미칠 수 있으며, 호흡을 통해 인간의 건강에도 악영향을 줄 수 있음을 시사한다.

사 사

본 논문은 소방방재청 자연재해저감기술개발사업 “퇴적황사재해 피해평가 및 대응기술개발에 관한 연구과제 (세부과제 “퇴적황사에 의한 지표지질환경 피해평가 및 대응기술 개발, NEMA-06-NH-08)”의 지원을 받아 수행되었고, 사막 토양 시료는 권영인 박사의 도움으로 확보하였음을 밝히며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- Chun, Y.S., Cho, K.S., Kim, Y.H. and Lee, J.K. (2003) The Features of Asian Dust Events Originated in Keoelchun Sandy Land. *Journal of the Korean meteorological society*, v.39, p.251-263.
- Banerjee, A.D.K. (2003) Heavy metal levels and solid phase speciation in street dusts of Delhi, India. *Environ. Pollut.*, v.123, p.95-105.
- Do, J.Y., Kim, K.W., Kim, Y.J. and Ryu, J.Y. (2009) Evaluation of deposited particulate on stone monuments in the national park area of Gyeongju, Korea. *Journal of the Korean Physical Society*, v.54, p.2055-2059.
- Hickey, M.G. and Kittrick, J.A. (1984) Chemical partitioning of cadmium, copper, nickel and zinc in soils and sediments containing high levels of heavy metals. *J. Environ. Qual.*, v.13, p.372-376.
- Jeong, G.Y. (2008) Bulk and single-particle mineralogy of Asian dust and a comparison with its source soils. *J. Geophys. Res.*, v.113, D02208, doi:10.1029/2007JD008606.
- Jeong, G.Y. and Lee, K.S. (2010) A mineral tracer toward high-resolution dust provenance on the Chinese Loess Plateau: SEM, TEM, and sulfur isotopes of sulfate inclusions in biotite. *American Mineralogist*, v.95, p.64-72.
- Jeong, G.Y., Hillier, S. and Kemp, R.A. (2011) Changes in mineralogy of loess-paleosol sections across the Chinese Loess Plateau. *Quaternary Research*, v.75, p.245-255.
- Kim, K.H., Kang, C.H., Ma, C.J., Lee, J.H., Choi, K.C. and Youn, Y.H. (2008a) Airborne cadmium in spring season between Asian dust and non-Asian dust periods in Korea. *Atmospheric Environment*, v.42, p.623-631.
- Kim, K.W., Do, J.Y., Kim, Y.J., Youn, M.Y. and Ryu, J.Y. (2008b) Measurement of Submicron Aerosols in the Urban Area of Seoul and in the National Park Area of Gyeongju Using PIXE Analysis. *Journal of the Korean Physical Society*, v.52, p.896-903.
- Kwon, Y.I., Lee, S.G., Yu, K.M., Shin, J.B. and Kim, K.H. (2004a) Geochemical characteristics of the surface sediments of Ordos and Alashan deserts, China: eolian sediment provenance and fingerprint. *Journal of the Geological Society of Korea*, v.40, p.119-132.
- Kwon, Y.I., Lee, S.G., Kim, K.H., Shin, J.B. and Yu, K.M. (2004b) Geochemical characteristics of the surface sediments from the middle-to eastern Taklimakan desert, China. *Journal of the Geological Society of Korea*, v.40, p.383-393.
- Kwon, Y.I., Shin, J.B. and Yu, K.M. (2004c) Scanning cathodoluminescence characteristics of the surface quartz grains of Ordos and Alashan deserts, China: eolian quartz provenance and fingerprint. *Journal of the Geological Society of Korea*, v.39, p.423-230.
- KMA homepage (<http://www.kma.go.kr>), Korea Meteorological Administration.
- Lee, J.-T., Son, J.-Y. and Cho, Y.-S. (2007) 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. *Environmental Research*, v.105, p.409-413.
- Lee, P.K., Yu, Y., Yun, S. and Mayer, B. (2005) Metal contamination and solid phase partitioning of metals in urban roadside sediments. *Chemosphere*, v.60, p.672-689.
- Lee, S.Y., Choi, H.K., Lee, K.J., Jung, J.Y., Hur, G.Y., Jung, K.H., Kim, J.H., Shin, C., Shim, J.J., In, K.H., Kang, K.H. and Yoo, S.H. (2009) The immune tolerance of cancer is mediated by IDO that is inhibited by COX-2 inhibitors through regulatory T cells. *J. Immunother*, v.32, p.22-28.
- Masatoshi Honda and Hiroshi Shimizu. (1998) Geochemical, mineralogical and sedimentological studies on the Taklimakan desert sands. *Sedimentology*, v.45, p.1125-1143.
- Oh, H.K., Lee, J.J., Lee, J.Y. and Park, J.H. (2007) Development of a Cultivation Method for Detecting Antibiotic Resistant Microorganisms from Various Water Samples. *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, v.27, p.711-717.
- Ro, C.-U., Oh, K.-Y., Kim, H.-K., Chun, Y.-S., 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. *Atmospheric Environment*, v.35, p.4995-5005.
- Shin, S.A., Han, J.S., Hong, Y.D., Ahn, J.Y., Moon, K.J., Lee, S.J. and Kim, S.D. (2005) Chemical Composition and Features of Asian Dust Observed in Korea (2000-2002). *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, v.21, p.119-129.
- Sietronics (1996) SIROQUANT: A quantitative XRD software. Sietronics Pty Limited, Belconnen ACT, Australia.
- Taylor, J.C. (1991) Computer programs for standardless quantitative analysis of minerals using the full powder diffraction profile. *Powder Diffraction*, v.6, p.2-9.
- Tessier, A., Campell, P.G.C. and Bisson, M. (1979) Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. *Anal.Chem.*, v.51, p.844-851.
- Wilkening, K.E., Barrie, L.A. and Engle, M.A. (2000) Trans-Pacific air pollution. *Science*, v.290, p.65-67.
- Youn, S.J. and Lee, P.K. (2008) Source Identification for Asian Dust Deposited on Domestic Area Using Sr-Nd Isotope Ratios in Spring, 2007. *Econ. Environ. Geol.*, v.41, p.315-326.