

황사발원지 (몽골) 토양에 대한 특성 분석

A Study on the Characteristics of Soil in the Asian Dust Source Regions of Mongolia

김 덕 래* · 김 정 수¹⁾ · 반 수 진²⁾

국립환경과학원 기후변화연구과, ¹⁾국립환경과학원 교통환경연구소,

²⁾국립환경과학원 대기환경연구과

(2010년 6월 3일 접수, 2010년 7월 23일 수정, 2010년 9월 13일 채택)

Deok-Rae Kim*, Jeong-Soo Kim¹⁾ and Soo-Jin Ban²⁾

Climate Change Research Division, Climate and Air Quality

Research Department, National Institute of Environmental Research

¹⁾*Transportation Pollution Research Center, National Institute of Environmental Research*

²⁾*Air Quality Research Division, Climate and Air Quality Research Department,*

National Institute of Environmental Research

(Received 3 June 2010, revised 23 July 2010, accepted 13 September 2010)

Abstract

This study aims to identify the characteristics of soil in Mongolia, one of the major Asian dust sources that influence the Korean Peninsula. Soil particle size was analyzed and the result shows that sand (57.5~97.3%) was identified prominently in most regions, followed by silt (2.5~34.7%) and clay (0.0~7.8%). Soil pH of the covered regions were in the range 7.1~10.1, either weak alkaline or strong alkaline. Analysis of ion species in the soil samples exhibited that Na^+ (91.9 mg kg^{-1}), Cl^- (65.9 mg kg^{-1}), and Ca^{2+} (53.5 mg kg^{-1}) were detected more in the soil than other species such as SO_4^{2-} (19.2 mg kg^{-1}), NO_3^- (46.6 mg kg^{-1}), NH_4^+ (3.9 mg kg^{-1}), K^+ (22.0 mg kg^{-1}), and Mg^{2+} (10.2 mg kg^{-1}). As for heavy metal content in the soil, concentrations of soil-borne metals including Fe, Al, Ca, Mg, and K tended to be high, while metals that come from manmade sources Pb, Cd, Cr, V, and Ni were remarkably low. The concentration of organic carbon (OC) was relatively high at $15.9 \mu\text{g mg}^{-1}$, while elemental carbon (EC), directly released in the process of fossil fuel combustion, was not detected at all or found in very small amounts. The result indicates that pollution from manmade sources scarcely occurred.

The analysis results from this study may contribute to improving modeling accuracy by providing input data for Asian dust prediction models, and be used as base data for determining the process of physiochemical transformation of Asian dust during long-range transport.

Key words : Mongolia, Asian dust, Soil particle size, pH, Heavy metals

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)32-560-7308, E-mail : kimdr78@korea.kr

1. 서 론

황사는 자연적으로 발생하는 대표적인 오염현상으로서 발원지로부터 수백에서 수천 킬로미터까지 장거리 이동하여 우리나라에 큰 영향을 준다. 또한 최근에는 황사가 이동 과정 중에 중국 대도시 지역이나 공업 지대 등의 대기오염 발생지역을 통과할 경우 유해대기오염물질이 함께 우리나라로 이동해올 수 있다는 가능성이 제시되기도 한다. 이를 위해 황사의 크기 분포, 황사 중 유해물질농도 분석 및 정량적인 특성 파악과 이동과정에서의 변환특성 규명을 위하여 황사발원지 토양 및 대기 중 황사성분에 관한 분석 자료는 매우 중요한 정보를 제공하게 된다. 현재 황사관련 연구 및 대책은 주로 우리나라에 발생한 현상 및 영향 분석 등에만 국한되어 있어, 황사 현상의 근원지이며 황사 성분의 기준이 되는 황사 발원지별 토양에 대한 구체적인 연구는 미흡한 실정이다.

이러한 황사발원지 토양 특성에 관한 기존 연구로는 Park (2002)이 중국 내륙의 황토고원과 북부지방의 내몽고 지역 등에서 37개 토양시료를 채취하여 광물 성분, 화학 성분 및 토양입자의 크기를 분석한 자료가 있으며, Gwon *et al.* (2005)이 중국 타클라마칸 사막 13개 지점에서 채취한 시료를 이용하여 지화학적 특성을 분석한 결과가 있다. 또한 Han *et al.* (2004)은 Park (2002)의 토양 시료를 이용하여 발원지 토양의 입도분석, 이온 및 금속성분 분석을 수행하여 토양 성분 특성을 조사하였으며, Zhang *et al.* (2005)과 Park *et al.* (2008)은 중국과의 공동 연구로 중국 황사발원지 토양시료 분석을 통해 우리나라 풍적모재 토양의 기원 해석 및 황사가 토양 및 농업환경에 미치는 영향을 분석하였다. Kim *et al.* (2006)은 단일입자 분석법으로 중국 내 주요 발원지 토양의 주요 화학 조성에 대하여 분석하였으며, Zhang *et al.* (1993)는 황사발원지 지역과 영향 지역간 주요 성분 간의 관계 분석을 위하여 중국 북부 사막지역에서의 토양 성분을 분석한 바 있다.

이처럼 국내·외 황사발원지 토양분석과 관련된 연구자료는 많이 부족한 편이며, 이들 중 대부분은 중국 사막지역에 대해서 이루어지고 있다(Zhang *et al.*, 1993). 그러나 우리나라에 영향을 주는 주요 황사

발원지는 내몽고 고원 39%, 몽골 고비사막 23%, 만주 16%, 황토고원 14%, 타클라마칸 사막 8%로써 (Korea Meteorological Administration (KMA), 2001~2007), 내몽고 고원 및 몽골 고비사막이 60% 이상을 차지하고 있다. 또한 몽골은 2006년 현재 남부 고비사막을 포함한 전 국토의 약 90%가 사막화 등급 중간 이상의 심각한 수준의 사막화와 토지퇴화에 처해 있는 등 점차 사막화가 심각해지고 있는 지역이다 (National Institute of Environmental Research (NIER), 2008). 이에 따라 몽골에서 발원하는 황사의 발생 빈도 및 강도는 점점 증가하는 추세에 있다.

따라서 본 연구에서는 우리나라에 영향을 주는 황사 발원지인 몽골(고비사막)을 대상으로 하여 발원지 토양 특성을 분석함으로써 황사 피해 대책 마련 등을 위한 기초 자료를 확보하고자 하였다.

2. 연구방법

2.1 토양시료 채취

몽골지역 황사발원지에 대한 토양시료 채취는 다음과 같이 진행하였다. 시료 채취 지점은 몽골의 지형도, 식생 및 토지이용 현황 자료 등을 조사하여 몽골 고비사막의 사막지역 뿐 아니라 사막화 진행지역 및 비사막화 지역(산림지역)을 포함한 몽골 전 지역에 걸쳐 34개 지점으로 선정하였으며 이들 지점에서 총 34개 (표토, 0~5 cm)의 시료를 확보하였다. 이러한 몽골 지역의 토양시료 채취 작업은 2008년 7월 21일부터 8월 25일까지 6주에 걸쳐 진행되었으며, 이 기간 동안 시료 채취를 위해 차량으로 이동한 거리는 대략 1만 km로 서울-부산간을 10회 이상 왕복하는 거리에 해당하였다(그림 1). 토양시료는 환경부의 토양오염공정시험방법 (Korean Ministry of Environment (MOE), 2007)과 농촌진흥청의 토양 및 식물체 분석법 (National Institute of Agricultural Science and Technology (NIAST), 2000)을 참고하여 토양표면(0~5 cm)을 삼을 이용하여 잡초나 유기물 등 이물질층을 제거한 후 채취하였으며, 10 mesh 체를 이용하여 체거름을 하고 Polypropylene (PP)병에 담아 밀봉하였다. 토양시료 채취 지점에 대한 위치 정보는 GPS (Global Positioning System)를 이용해 기록하였다. 표 1은 각 토양시료 채취 지점의 위·경도 좌표 및 고도와 주



Fig. 1. Soil sampling sites in Mongolia.

변특성에 대한 정보를 나타내었다.

2.2 토양분석

채취한 황사발원지 토양에 대한 분석방법은 다음과 같다. 토양입도분포 (particle size distribution)는 한국산업규격 (KS F 2302)의 방법을 이용하여 입자의 직경이 0.074 mm보다 큰 조립토는 체분석, 0.074 mm보다 작은 세립토는 비중계분석을 적용하여 입자크기에 따라 모래 (0.075 ~ 2 mm), 미사 (0.005 ~ 0.075 mm), 점토 (0.005 mm 이하)로 구분하였다. 토양의 유기물함량 (organic content)은 600°C의 전기로 안에서 30분간 강열한 도가니 무게를 측정 한 다음 음건토양 20g을 취하여 측정 한 무게와 여기에 25% 질산암모늄용액을 넣고 600°C의 전기로 안에서 3시간 강열한 후 측정 한 무게와의 차이로 계산하였다. 토양의 양이온교환 능력 (CEC, Cation Exchange Capacity)은 1N-ammonium acetate에 의한 치환침출법을 이용하였으며, 수소 이온농도 (pH)는 음건토양 30g을 증류수 80g과 혼합

하여 3시간 방치 후 여과액을 pH meter (Accumet Model)로 측정하였다.

이온성분은 토양오염공정시험방법에 의거하여 토양 시료 10g과 증류수 100mL로 혼합비를 1:10으로 하여 진탕기에서 2시간 동안 추출 후 여과하여 이온크로마토그래피 (Dionex, USA)를 이용하여 양이온과 음이온을 동시 분석하였다.

금속성분은 US EPA 3051A Method를 적용하여 풍건된 시료 0.5g을 정확히 칭량하여 분석용 질산 (65%) 10mL를 용기에 넣고 마이크로파 분해장치를 이용하여 추출하였다. 추출액은 3,000 rpm으로 20분간 원심분리 후 상등액을 취하여 ICP-OES (Perkinelmer, Optima 5300DV)를 이용하여 분석하였다.

탄소성분은 TOT (Thermal Optical Transmittance)법을 이용하여 시료를 분석하였고 (Park and Kim, 2005), 채취매체는 석영필터 (Quartz Fiber filter, 47 mm)를 850°C에서 2시간 전처리하여 사용하였다. 전처리한 석영필터는 1 × 1.5 cm²으로 자른 후 미세저울을 이용

Table 1. Specifications of soil sampling sites.

No.	Sites	Latitude (N)	Longitude (E)	Elevation (m)	Classification
1	Bayangol soum	48° 38'59"	106° 05'54"	1155	Grassland
2	darhan town	49° 32'22"	105° 58'52"	668	Grassland
3	Sikhbaatar town	50° 05'34"	106° 13'02"	672	Grassland
4	Erdenet town	48° 57'39"	103° 58'50"	1379	Grassland
5	Orkhon soum	48° 36'13"	103° 35'28"	1086	Grassland
6	Bayangnuur	47° 50'22"	104° 26'21"	974	Grassland
7	lun soum	47° 51'26"	105° 09'58"	1018	Grassland
8	Baganuur-gu	47° 46'42"	108° 21'10"	1353	Grassland
9	Jargaltkhaan soum	47° 29'05"	109° 29'00"	1331	Grassland
10	undurkhan town	47° 28'02"	110° 42'41"	1145	Grassland
11	Bayanmunk	46° 53'50"	109° 46'45"	1137	Grassland
12	Choyr town	46° 13'24"	108° 33'37"	1216	Grassland
13	Sainshand town	45° 12'30"	110° 20'08"	936	Desertification or desert
14	Zamin uud soum	43° 49'10"	111° 41'57"	973	Desertification or desert
15	Khubsugul soum	43° 34'56"	109° 30'00"	972	Desertification or desert
16	Hanbogd soum	43° 08'19"	108° 02'45"	863	Desertification or desert
17	Moltsog Els	44° 08'05"	104° 00'45"	1218	Desertification or desert
18	Huld soum	45° 07'23"	105° 40'55"	1232	Desertification or desert
19	Mandalgovi town	45° 54'31"	106° 23'54"	1442	Desertification or desert
20	Zomot town	47° 46'11"	106° 44'41"	1345	Grassland
21	Bulgan soum	44° 12'57"	103° 47'35"	1309	Desertification or desert
22	Bogd soum	44° 45'47"	102° 42'59"	1436	Desertification or desert
23	Baruunbayanulaan soum	45° 21'33"	101° 50'57"	1436	Desertification or desert
24	eoreugeu lake	45° 17'14"	100° 46'56"	1225	Desertification or desert
25	Bayan tsagaan soum	45° 04'16"	98° 59'47"	2087	Desertification or desert
26	Chandmain soum	45° 33'29"	98° 11'52"	2284	Desertification or desert
27	Biger soum	45° 56'24"	97° 02'03"	1364	Desertification or desert
28	Altayderun soum	46° 44'31"	95° 22'42"	1522	Desertification or desert
29	Hovd town	48° 16'29"	91° 45'24"	1353	Desertification or desert
30	Uurgaamal soum	48° 40'02"	94° 29'30"	1291	Desertification or desert
31	Tiliming lake	49° 06'12"	97° 34'16"	1786	Desertification or desert
32	Ziher soum	48° 07'53"	99° 13'56"	2126	Grassland
33	Tsenher soum	47° 23'16"	101° 32'20"	1688	Grassland
34	Kharkhorin soum	47° 14'11"	102° 53'19"	1450	Grassland

하여 무게를 측정하였고, 필터팩을 이용하여 토양시료를 2L/min으로 5분간 석영필터에 흡착시켰다. 흡착된 시료는 미세저울을 이용하여 무게를 측정 후 OC/EC 분석기를 이용하여 분석하였고, 1 mg 당 OC/EC량으로 환산하여 전체 시료중 TC(Total Carbon)를 구하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 토양의 물리·화학적 특성

황사발원지(몽골) 토양의 물리·화학적 특성은 표 2에 나타내었다. 토양의 입도분포는 조사지역 전체에서

모래(Sand) 함량이 57.5~97.3% 범위로 평균 86.8%, 미사(Silt) 함량이 2.5~34.7% 범위로 평균 11.3%, 점토(Clay) 함량이 0.0~7.8% 범위로 평균 2.0%로 나타났다. 모래>미사>점토의 순서로 모래의 비중이 가장 크게 나타났다. 그리고 조사지역 중 초원지역(1~12, 20, 32~34)의 경우 모래 80.3%, 미사 16.0%, 점토 3.7%로 나타났으며, 사막화가 진행 중이거나 사막인 지역(13~19, 21~31)의 경우 모래 92.5%, 미사 7.1%, 점토 0.4%로 나타나 초원지역은 미사와 점토 함량이 많이 나타났고, 사막화가 진행 중이거나 사막인 지역은 상대적으로 모래 함량이 다소 높게 나타났다. 중국의 황사발원지에 대해 조사한 Han *et al.* (2004)의 연구 결과에 따르면 황토토양은 미사가 가

Table 2. Physical and chemical properties of soils in Mongolia.

No.	Particle separate (%)			Organic content (%)	pH	CEC (cmol kg ⁻¹)
	Sand	Silt	Clay			
1	57.5	34.7	7.8	12.4	7.2	8.8
2	78.0	15.2	6.8	1.5	8.6	0.9
3	74.8	18.7	6.5	4.1	7.9	6.6
4	82.0	11.5	6.5	8.7	7.5	7.3
5	62.9	30.3	6.9	5.2	8.7	4.6
6	89.5	9.6	0.9	1.8	9.0	2.4
7	76.0	17.2	6.8	2.8	8.6	2.9
8	84.9	12.8	2.3	3.9	7.7	4.6
9	84.5	14.7	0.8	5.1	8.3	5.9
10	89.3	9.5	1.2	5.0	8.5	5.1
11	93.9	5.7	0.3	1.3	7.6	2.2
12	86.5	12.6	0.9	2.7	7.9	4.0
13	87.7	11.8	0.5	1.5	8.0	4.8
14	94.9	3.7	1.4	0.8	9.9	2.0
15	92.7	7.0	0.3	1.0	9.5	4.4
16	92.2	7.8	0.0	1.3	9.7	9.7
17	90.9	9.0	0.0	1.4	9.7	7.5
18	93.6	6.3	0.1	1.7	9.7	5.9
19	91.6	8.4	0.1	2.1	8.6	4.0
20	82.1	17.4	0.6	4.0	7.9	7.9
21	89.7	10.2	0.1	1.5	8.5	8.8
22	92.0	8.0	0.1	2.8	9.6	14.5
23	92.5	7.5	0.1	1.8	9.5	10.8
24	95.0	4.9	0.1	0.8	8.7	6.6
25	91.5	7.5	1.0	3.6	9.7	17.2
26	95.7	3.7	0.6	4.2	9.6	9.9
27	81.2	17.9	0.9	3.2	9.3	22.4
28	93.7	5.6	0.8	2.8	7.5	18.9
29	96.9	2.9	0.2	1.2	8.9	11.0
30	97.3	2.5	0.2	0.7	8.6	8.4
31	96.2	3.6	0.2	3.4	8.3	19.8
32	82.9	16.2	0.9	8.2	8.1	13.0
33	78.3	17.7	4.1	4.2	8.1	10.8
34	82.0	11.7	6.4	3.0	8.0	11.2

장 큰 구성을 이루고 있고, 고비지역(Gobi)과 모래지역의 경우 모래 크기의 토양 입자들이 가장 큰 비중을 차지하고 있다. 또한 Zhang *et al.* (2005)의 연구 결과에 따르면 황사발원지인 중국북부 사막지대(타클라마칸사막, 고비사막)는 모래함량이 70.3~97.8%, 점토의 함량은 7.3% 이하를 보였으며, 황토지대(황토고원)는 대부분이 미사나 점토가 주로 분포하고 모래함량은 극히 적은 0.9%를 보였다. 따라서 본 연구에서 조사지역의 경우, 지역적으로 다소 차이는 있으나 전체적으로 모래의 함량이 높게 나타났으며, 중국북부 사막지대와 유사한 경향을 보이고 있었다.

토양의 유기물함량 분석 결과, 조사지역 전체에서

0.7~12.4% 범위로 평균 3.2%였으며, 초원지역이 4.6%, 사막화가 진행 중이거나 사막인 지역이 2.0%로 초원지역이 사막화가 진행 중이거나 사막인 지역보다 풍부한 유기물을 포함한 것으로 나타났다. 그러나 조사지역 전체의 유기물함량은 우리나라 산림토양의 평균 유기물함량인 4.5% (Jeong *et al.*, 2002)와 유사하거나 낮은 수준이었으며, 이는 사막과 풍부한 산림자원을 가지고 있는 지역의 차이에서 기인하는 것으로 판단된다.

토양의 pH는 무기성분 및 미량 원소들의 용해도를 지배하고, 토양 미생물의 활동에 영향을 주기 때문에 토양의 화학적 특성에 있어 중요한 인자 중 하나

이다. 조사지역 전체에서 pH는 7.2~9.9 범위로 평균 8.6 이었으며, 초원지역이 8.1, 사막화가 진행 중이거나 사막인 지역이 9.1로 약알칼리 또는 강알칼리성 토양으로 나타났다. 이러한 결과는 pH가 8.3~9.0으로 조사된 중국북부 사막지대, 황토지대와 유사한 수준이었다(Zhang *et al.*, 2005). 그러나 조사지역 대부분의 토양에서 pH는 8.0 이상으로 일반적으로 식물생장에 적합한 pH(Shim *et al.*, 1999)와 우리나라 밭 토양의 적정 pH(Park *et al.*, 2008)인 6.0~6.5 보다 높은 수준으로 조사되었다.

양이온교환능력(CEC)은 조사지역 전체에서 0.9~22.4 Cmol kg⁻¹ 범위로 평균 8.4 Cmol kg⁻¹으로 분석

되었다. 양이온교환능력은 토양비옥도를 나타내는 하나의 지표이며 CEC가 높은 토양일수록 양분을 지니는 능력이 크고 토양 비옥도가 높다고 볼 수 있다(Lim *et al.*, 2007). 그러나 양이온교환능력의 경우 입자가 작을수록, 점토함량이 높고 유기물이 많을수록 크게 증가할 것이라는 예상과는 달리 본 연구에서는 초원이나 사막 등 지형적 특성에 관계없이 큰 차이를 보이지 않았다.

3.2 토양의 이온 및 금속 성분

황사발원지(몽골) 토양의 이온성분 분석결과는 표 3에 나타내었다. 조사지역 전체에서 각 성분들의 평균

Table 3. Composition of ion compound of soils in Mongolia.

(Unit: mg kg⁻¹)

No.	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	NH ₄ ⁺	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
1	7.9	81.6	96.3	14.4	205.0	59.4	65.1	16.5
2	2.7	ND	87.0	10.0	132.3	38.5	47.0	11.1
3	2.1	ND	137.9	ND	117.2	4.7	80.7	8.7
4	7.9	217.3	141.0	ND	174.8	11.4	21.3	3.9
5	2.4	9.1	57.2	ND	185.2	6.0	69.3	18.3
6	1.5	ND	91.6	ND	149.6	15.8	37.0	5.2
7	3.5	0.9	120.8	ND	83.0	8.8	40.0	4.6
8	4.1	81.0	138.7	ND	239.8	10.2	20.9	2.6
9	6.2	173.3	141.3	ND	175.0	5.7	32.6	5.5
10	8.4	46.6	108.8	ND	165.2	9.0	9.0	1.3
11	6.0	18.3	126.2	ND	175.4	6.3	ND	ND
12	6.3	5.9	114.3	ND	184.8	4.7	5.7	1.2
13	38.6	13.5	130.7	ND	178.0	35.2	30.2	6.5
14	3.2	ND	166.2	ND	207.6	3.6	11.1	1.7
15	2.7	ND	119.9	ND	125.2	2.5	18.9	2.1
16	4.2	7.1	47.6	ND	88.7	13.8	27.8	4.2
17	4.0	ND	130.2	ND	175.4	2.7	35.6	4.1
18	3.5	ND	133.6	ND	176.5	3.3	33.6	5.3
19	3.2	21.7	0.9	3.9	2.4	15.7	11.0	3.1
20	2.9	64.6	1.0	3.9	0.7	52.3	18.1	2.5
21	2.9	5.1	1.7	3.9	2.4	10.8	35.4	3.9
22	3.5	13.1	1.2	1.7	6.7	52.4	115.7	21.8
23	3.1	8.8	1.0	1.6	6.1	45.6	94.7	14.5
24	2.8	4.0	1.4	ND	8.6	31.0	64.3	9.6
25	12.7	40.7	16.8	2.0	14.6	31.5	111.3	13.4
26	15.2	63.7	2.7	1.5	8.6	40.1	104.5	25.8
27	27.2	52.1	5.8	ND	32.8	39.7	63.4	17.9
28	58.6	ND	40.8	4.2	34.8	27.6	95.1	20.8
29	10.8	37.8	2.1	1.5	4.0	10.2	83.6	5.6
30	1.7	16.4	1.4	1.2	1.7	15.2	23.3	2.6
31	340.0	34.6	61.3	6.2	48.3	71.0	169.6	59.2
32	45.6	169.3	5.5	2.5	9.0	16.8	90.1	18.4
33	3.6	13.7	1.9	2.3	1.5	19.2	41.9	5.4
34	3.4	10.7	5.0	1.5	2.7	28.9	50.6	8.3

ND: not detected

농도는 SO_4^{2-} 19.2 mg kg^{-1} , NO_3^- 46.6 mg kg^{-1} , Cl^- 65.9 mg kg^{-1} , NH_4^+ 3.9 mg kg^{-1} , Na^+ 91.9 mg kg^{-1} , K^+ 22.0 mg kg^{-1} , Ca^{2+} 53.5 mg kg^{-1} , Mg^{2+} 10.2 mg kg^{-1} 로 $\text{Na}^+ > \text{Cl}^- > \text{Ca}^{2+} > \text{NO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{NH}_4^+$ 순으로 나타났으며, Na^+ , Cl^- , Ca^{2+} 의 농도가 상대적으로 다른 이온성분들에 비하여 높게 나타났다. 토양 분류별 농도를 비교한 결과, 초원지역의 경우 SO_4^{2-} 7.2 mg kg^{-1} , NO_3^- 68.6 mg kg^{-1} , Cl^- 85.9 mg kg^{-1} , NH_4^+ 5.8 mg kg^{-1} , Na^+ 125.1 mg kg^{-1} , K^+ 18.6 mg kg^{-1} , Ca^{2+} 42.0 mg kg^{-1} , Mg^{2+} 7.6 mg kg^{-1} 로 $\text{Na}^+ > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^- > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{SO}_4^{2-} > \text{NH}_4^+$ 순으로 나타났으며, NO_3^- 가 다소 높게 나타났다. 사막화가 진행 중이거나 사막인 지역의 경우 SO_4^{2-} 29.9 mg kg^{-1} , NO_3^- 24.5 mg kg^{-1} , Cl^- 48.1 mg kg^{-1} , NH_4^+ 2.8 mg kg^{-1} , Na^+ 62.4 mg kg^{-1} , K^+ 25.1 mg kg^{-1} , Ca^{2+} 62.7 mg kg^{-1} , Mg^{2+} 12.3 mg kg^{-1} 로 $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{K}^+ > \text{NO}_3^- > \text{Mg}^{2+} > \text{NH}_4^+$ 순으로 나타났으며, SO_4^{2-} 가 상대적으로 높게 나타났다. 그러나 조사 지역에서의 이온성분 농도는 지역에 관계없이 Na^+ , Cl^- , Ca^{2+} 의 농도가 다른 이온성분들에 비하여 높은 값을 나타내었다. 이러한 경향은 건조 및 반건조 지역의 경우 풍화로 인해 염의 비율이 높다는 연구결과 (Cooke and Smalley, 1968) 및 중국북부 사막지대와 황토지대의 토양 중 SO_4^{2-} , Na^+ , Ca^{2+} 성분의 농도가 다른 이온 성분들에 비해 많이 검출되었으며 (Han et

al., 2004), 건조 및 반건조 지역인 고비사막에서 Na^+ , Cl^- , Ca^{2+} 성분 농도가 높게 나타난 연구결과 (Wang et al., 2008)와 유사하였다. 또한 Shin et al. (2005)은 우리나라에서 관측된 황사 중의 주요한 이온성분은 Na^+ , Ca^{2+} 이며, 특히 Ca^{2+} 의 농도는 일반적인 에어로졸의 성분농도와 비교하여 황사시에 현저하게 증가함을 보여주었다.

황사발원지(몽골) 토양의 중금속 성분을 분석한 결과를 표 4에 나타내었다. 조사지역 전체에서 중금속 성분들의 평균농도는 Al 7,937 mg kg^{-1} , Fe 10,517 mg kg^{-1} , Ca 4,668 mg kg^{-1} , K 1,592 mg kg^{-1} , Mg 3,791 mg kg^{-1} , Mn 263 mg kg^{-1} , Na 85 mg kg^{-1} , Cd 1.1 mg kg^{-1} , Cr 11.0 mg kg^{-1} , Co 4.7 mg kg^{-1} , Cu 8.7 mg kg^{-1} , Pb 5.5 mg kg^{-1} , Ni 8.9 mg kg^{-1} , Zn 23.5 mg kg^{-1} , V 17.1 mg kg^{-1} 로 나타났으며, 지역별 일부 차이는 있으나 대부분의 지역에서 $\text{Fe} > \text{Al} > \text{Ca} > \text{Mg} > \text{K} > \text{Mn} > \text{Na} > \text{Zn} > \text{V} > \text{Cr} > \text{Ni} > \text{Cu} > \text{Pb} > \text{Co} > \text{Cd}$ 의 순으로 나타났다.

따라서 주로 토양기원 금속성분인 Fe, Al, Ca, Mg, K의 농도가 전체지역에서 높았으며, 인위적인 발생 원으로부터 기인하는 미량유해중금속 성분인 Pb, Cd, Cr, V, Ni 등의 농도는 상대적으로 매우 낮게 나타났다. 그리고 초원지역에서는 Al, K, Zn의 농도가 다소 높았으며, 사막화가 진행 중이거나 사막인 지역에서는 Ca, Mg, Na의 농도가 상대적으로 높은 것으로 조

Table 4. Soil component concentration compared with other studies.

(Unit: mg kg^{-1})

	Mongolia			China (Han et al. (2004))		
	Total	Grassland	Desertification and desert	Loss	Gobi	Sand
Al	7937.2 (2483.7~21047.7)	8684.9	7272.5	32400	20600	10500
Fe	10517.4 (3907.4~21610.4)	10840.9	10229.8	26700	19900	8430
Ca	4668.0 (592.4~23034.3)	3208.6	5965.3	115000	73900	14500
K	1591.6 (579.4~4824.3)	1803.2	1403.5	2550	1550	777
Mg	3791.4 (739.7~9520.5)	3128.5	4380.6	14100	13800	4300
Mn	232.7 (12.1~881.9)	234.0	231.5	479	421	166
Na	84.7 (26.1~209.7)	65.8	101.5	111	113	53.5
Cd	1.14 (0.38~2.58)	1.2	1.1	1.4	1.2	0.5
Cr	11.01 (3.01~25.7)	10.6	11.4	28.6	31.4	12.4
Co	4.68 (1.46~15.97)	5.2	4.2	11.7	9.5	4.3
Cu	8.71 (2.59~27.41)	8.4	9.0	28.7	19.9	8.6
Pb	5.52 (2.07~12.81)	5.9	5.2	26.5	20.3	5.8
Ni	8.89 (2.27~23.69)	8.2	9.5	33.5	-	8.9
Zn	23.47 (8.39~56.09)	27.4	20.0	46.2	31.0	14.1
V	17.07 (4.72~44.42)	18.0	16.2	30.4	24.2	11.9

Table 5. Carbonaceous concentrations of soils in Mongolia. (Unit: $\mu\text{g mg}^{-1}$)

No.	OC	EC
1	47.72	5.21
2	6.81	0.40
3	19.19	1.66
4	25.22	5.34
5	23.39	1.21
6	6.34	0.59
7	12.85	0.43
8	14.72	1.18
9	23.35	1.58
10	24.55	1.30
11	7.26	0.44
12	13.56	0.51
13	6.03	0.16
14	3.79	0.63
15	2.08	0.37
16	4.40	3.13
17	6.45	1.66
18	7.38	1.91
19	8.03	2.76
20	11.34	1.17
21	3.63	0.06
22	12.39	0.17
23	4.94	0.74
24	3.06	0.28
25	8.23	2.48
26	11.71	2.80
27	10.22	1.48
28	14.53	0.80
29	6.24	2.05
30	6.94	3.24
31	53.98	6.79
32	25.09	1.12
33	91.77	2.35
34	13.65	0.83

사되었다. 이러한 연구결과는 황사발원지 토양의 주요 구성성분이 Si, Al, Fe, Ca 등이고, 중국의 사막이나 황토지대에서 특히 Al, Ca, Fe과 같은 토양기원 금속성분들의 농도 수준이 높고 그 이외의 성분들의 농도는 상대적으로 낮게 나타난 연구결과(Han *et al.*, 2004; Park, 2002; Nishikawa *et al.*, 2000)와 유사하였다. 그리고 Kim *et al.* (2009)은 우리나라에 발생한 황사 중 성분을 분석한 결과, 대부분의 중금속 성분이 증가하고 특히 Al, Ca, Fe의 토양기원 금속성분이 크게 증가하는 것을 보였다. 이는 황사발원지 토양에서 높은 농도를 차지하고 있는 금속성분들의 영향을 받아 증가한 것으로 판단된다. 그러나 본 연구 조사지역

에서의 중금속 성분 농도는 중국 황사발원지 토양에서의 중금속 성분들 값보다 낮은 것으로 나타났으며(표 4), 이러한 차이는 두 지역간 지리적인 위치와 도시화 및 산업화 정도 차이에 의한 것으로 판단된다. 그리고 이러한 황사발원지 토양에 대한 위해성 정도를 살펴보기 위해, 우리나라 토양환경보전법 상에서 정한 토양오염 원인물질인 Cd, Cu, Pb의 우려기준(각각 1.5, 50, 100 mg kg^{-1})을 적용해 본 결과, 몽골지역 토양의 경우 우려기준을 초과하지 않는 것으로 나타나, 토양에 대한 오염의 염려는 아주 작은 것으로 판단된다.

황사발원지(몽골) 토양의 탄소성분을 분석한 결과는 표 5에 나타내었다. 유기탄소농도는 전체 조사 토양에서 2.0~91.8 $\mu\text{g mg}^{-1}$ 범위로 평균 15.9 $\mu\text{g mg}^{-1}$ 수준이었으며, 초원지역이 22.9 $\mu\text{g mg}^{-1}$, 사막화가 진행 중이거나 사막인 지역이 9.7 $\mu\text{g mg}^{-1}$ 로 초원지역에서의 농도가 더 높게 나타났다. 원소탄소농도는 전체 지역에서 0.1~6.8 $\mu\text{g mg}^{-1}$ 범위로 평균 1.7 $\mu\text{g mg}^{-1}$ 수준이었으며, 초원지역이 1.6 $\mu\text{g mg}^{-1}$, 사막화가 진행 중이거나 사막인 지역이 1.8 $\mu\text{g mg}^{-1}$ 로 큰 차이를 보이지는 않았다. 그러나 전반적으로 유기탄소의 농도가 비교적 높았으며, 원소탄소는 전혀 검출되지 않거나 극히 미량 검출되어 조사지역 전체 토양의 경우 인위적인 배출원에 의한 오염이 거의 이루어지지 않았음을 추정 할 수 있다.

4. 결 론

2000년대 들어 발생빈도 및 강도가 점차 증가하고 있는 황사현상에 대한 기초자료 확보를 위해, 우리나라에 영향을 미치는 주요 황사발원지 중 하나인 몽골 지역의 토양시료 채취 및 분석을 통해 발원지 토양에 대한 특성을 파악하였으며 그 결과는 다음과 같다.

1. 황사발원지(몽골)의 토양 입도분포는 조사지역 전체에서 모래가 57.5~97.3%, 미사가 2.5~34.7%, 점토가 0.0~7.8%로 모래의 비중이 크게 나타났으며, 유기물함량은 0.7~12.4%, 토양의 pH는 7.1~10.1로 대부분의 토양에서 pH가 8.0 이상으로 나타나 약알칼리 또는 강알칼리 토양이었으며, 양이온교환능력(CEC)은 0.9~23.3

Cmol kg⁻¹로 조사되었다.

- 이온성분은 조사지역 전체에서 Na⁺, Cl⁻, Ca²⁺ 성분들이 다른 이온들에 비해 많이 나타났으며, Na⁺ > Cl⁻ > Ca²⁺ > NO₃⁻ > SO₄²⁻ > K⁺ > Mg²⁺ > NH₄⁺ 순으로 나타났다.
- 중금속 함량은 일부지역에서 차이는 있으나 대부분의 지역에서 Fe > Al > Ca > Mg > K > Mn > Na > Zn > V > Cr > Ni > Cu > Pb > Co > Cd의 순으로 나타났다. 주로 토양기원 금속성분인 Fe, Al, Ca, Mg, K의 농도가 높게 나타났으며, 인위적인 발생원으로부터 기인하는 Pb, Cd, Cr, V, Ni 등의 농도는 매우 낮게 나타났다.
- 탄소성분은 조사지역 전체에서 유기탄소의 농도가 비교적 높았으며, 원소탄소는 전혀 검출되지 않거나 극히 미량 검출되어 조사지역 전체 토양의 경우 인위적인 배출원에 의한 오염이 거의 이루어지지 않았음을 알 수 있다.

황사발원지 토양성분은 황사가 우리나라 대기환경에 미치는 영향을 분석하기 위한 기초 자료로서, 향후 황사 이동과정 중 물리·화학적 변환 과정 규명, 황사 예측 모델의 정확도 개선 등에 활용할 수 있을 것이며, 또한 본 연구에서 확보된 황사발원지 토양시료는 산림, 생태 등 다양한 분야의 연구에도 적극 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- Cooke, R.U. and I.J. Smalley (1968) Salt weathering in deserts, *Nature*, 220, 1226-1227.
- Gwon, Y.-I., K.-M. Yu, I.-G. Hwang, N.-W. Park, J.-B. Shin, S.-S. Lee, and H.-Y. Lee (2005) Geologic study on provenance of yellow-sand, National Research Foundation of Korea.
- Han, J.-S., S.-A. Shin, B.-J. Kong, M.-S. Park, S.-U. Park, and S.-J. Kim (2004) Soil chemical properties in asian dust source region in northern China, *Environmental Impact Assessment*, 13(6), 277-284. (in Korean with English abstract)
- Jeong, J.-H., K.-S. Koo, C.-H. Lee, and C.-S. Kim (2002) Physico-chemical properties of Korean forest soils by regions. *Journal of Korean Forest Society*, 91, 694-700.
- Kim, H.K., H.J. Hwang, and C.U. Ro (2006) Single-particle characterization of soil samples collected at various arid areas of China, using low-Z particle electron probe X-ray microanalysis, *Spectrochimica Acta, Part B*, 61, 393-399.
- Kim, N.-K., H.-J. Park, and Y.-P. Kim (2009) Chemical composition change in TSP due to dust storm at Gosan, Korea: Do the concentrations of anthropogenic species increase due to dust storm?, *Water Air Soil Pollut*, 204, 165-175.
- Korea Meteorological Administration (2001 ~ 2007) Analysis Transport Paths of Asian Dust.
- Korean Ministry of Environment (2007) The Korean standard test (KST) methods for soils, 225pp. (in Korean)
- Lim, J.-H., S.-Y. Woo, M.-J. Kwon, and Y.-K. Kim (2007) Antioxidant enzyme activities and soil properties of healthy and declining abies koreana (Wils.) in Mt. Halla, *Jour. Korean For. Soc.*, 96(1), 14-20. (in Korean with English abstract)
- National Institute of Environmental Research (2008) Research on the current status of Asian Dust from Mongolia and countermeasures, 189pp.
- National Institute of Agricultural Science and Technology (2000) Method of soil and plant analysis, 135-137.
- Nishikawa, M., Q. Hao, and M. Morita (2000) Preparation and evaluation of certified reference materials for Asian mineral dust, *Global Environ. Res.*, 4, 103-113.
- Park, B.-J., S.-C. Kim, and J.-Y. Cho (2008) Content of benzo(a)pyrene and heavy metal and physico-chemical properties of turfgrass playground soil in elementary school of Jeollabuk-do, *J. Korean Env. Res. & Reveg. Tech.* 11(3), 39-49. (in Korean with English abstract)
- Park, C.-U., S.-K. Ha, S.-O. Hur, H.-Y. Weon, Y.-S. Zhang, Y.-H. Kim, and K.-H. Jung (2008) Physico-Chemical Characteristics of Asian Dust, NAAS, Report, 1038-1055.
- Park, J.-S. and S.-D. Kim (2005) The characteristics of secondary carbonaceous species within PM₁₀ and PM_{2.5} in Seoul and Incheon area, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 21(1), 131-140. (in Korean with English abstract)
- Park, S.-U. (2002) Physical and chemical processes of yellow sand deflection, transport and transformation in East Asia, National Research Foundation of Korea, 61pp.
- Shim, K.-K., K.-Y. Huh, and H.-C. Kang (1999) Developing growth media for artificial ground by blending calcined clay and coconut peat, *Jour. Korean Land. Arc.* 27(3), 109-113. (in Korean with English abstract)
- Shin, S.-A., J.-S. Han, Y.-D. Hong, J.-Y. Ahn, K.-J. Moon,

- S.-J. Lee, and S.-D. Kim (2005) Chemical composition and features of Asian dust observed in Korea (2000~2002), J. Korean Soc. Atmos. Environ., 21(1), 119-129. (in Korean with English abstract)
- Wang, X., D. Xia, T. Wang, X. Xue, and J. Li (2008) Dust sources in arid and semiarid China and southern Mongolia: Impacts of geomorphological setting and surface materials, Geomorphology, 97, 583-600.
- Zhang, Y.-S., Y.-H. Kim, Y.-K. Sonn, G.-J. Lee, M.-S. Kim, S.-K. Kim, H.-Y. Weon, J.-H. Joa, K.-C. Eom, S.-H. Kim, H.-K. Kwak, and H.-M. Kim (2005) Pedological characteristics of Asian dust in Korea, Korean J. Soil Sci. Fert., 38(6), 301-306. (in Korean with English abstract)
- Zhang, X., R. Arimoto, Z. An, T. Chen, G. Zhang, G. Zhu, and X. Wang (1993) Atmospheric trace elements over source regions for Chinese dust: concentrations, sources and atmospheric deposition on the Loess plateau, Atmospheric Environment, Part A, 27A(13), 2051-2067.