2007년 봄철 대전지역에서 발생한 황사 및 대기부유물의 지구화학적 특성 및 중금속의 오염도

이평구^{1*} · 염승준¹ · 배법근²

¹한국지질자원연구원 지구환경연구본부, ²대전대학교 지구시스템공학과

Geochemical Characteristics and Pollution Level of Heavy Metals of Asian Dust in Daejeon Area, 2007 (spring season)

Pyeong-Koo Lee^{1*}, Seung-Jun Youm¹ and Beob-Geun Bae²

¹Geologic Environment Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

²Department of Geosystem Engineering, Daejeon University

We evaluated the geochemical characteristics and their potential pollution of Asian Dusts in Daejeon, Korea during spring 2007. Compared with the chemical compositions of soils in source area of Asian Dust, those of aerosols in Daejeon were enriched with trace elements (ten to hundred fold), inferring that pollutants from China have affected on local environment in adjoining country such as Korea. Chemical analysis of aerosols during Asian dust showed that fine particles (PM_{2.5}) contained high contents of trace elements such as Cr, Cu, Pb, Zn, V, S, As, Cd, Co, Ni, Mo, Sb, Cs, Rb, Th, Sc and Y. In the case of TSP (Total Suspended Particle), Zr, Sr, Ba, Li, Th and U were contained much more than other trace elements. The contents of some elements (i.e. Li, Cs, Co, U, Cr, Ni, Rb, V, Th, Y, Sr and Sc) in aerosols collected in Asian Dust period, which are not likely enriched by air pollutants, were higher (2 - 4.2 fold) than those in Non Asian Dust period, indicating that these elements could be used as indicator elements for determining the occurrence of Asian Dust phenomena (especially, Sr, V, Cr & Li). In the case of Asian Dust coming through the big cities and/or industrial areas of China, the domestic aerosols had higher contents of trace elements (such as S, Cd, Zn, Pb, Cu, Mo and As) than those from Northeastern China via North Korea, indicating that the transportation courses of air mass are very important to determine the pollution degrees. Using the enrichment factors of trace elements in aerosols during Asian Dust and Non Asian Dust, we identified that some elements (i.e. S, Zn, Cu, Pb, As, Mo and Cd) were most problematic in terms of environmental hazard aspects, and these elements could affect adverse effects on human health as well as ecosystem and surface environment (soil and water) through long-lived precipitation.

Key words : Asian Dust, trace element(heavy metal), source area, transportation route, enrichment factor

본 연구에서는 2007년도 봄철 대전 지역에서 발생한 황사(황사 기간) 및 대기부유물(비황사 기간)의 미량원소의 지구화학적 특성과 정량적 오염정도를 평가하였다. 황사 내 미량원소의 함량은 황사발원지 토양의 평균 함량에 비하여 수십에서 수백 배 높은 함량을 보여주고 있으며, 비황사 시기의 대기부유물에서도 유사한 특성을 보이고 있어, 황사 시기뿐만 아니라 비황사 시기에도 중국으로부터 이동되는 오염물질의 영향을 받고 있음을 지시하고 있다. 입도별 미량원소의 함량은 PM_{2.5}에서 Cr, Cu, Pb, Zn, V, S, As, Cd, Co, Ni, Mo, Sb, Cs, Rb, Th, Sc, Y 등이, 그리고 TSP에서는 Zr, Sr, Ba, Li, Th, U 등의 함량이 가장 높은 것으로 나타났다. 황사의 S, Cd, Mo, Zn, Pb, Sb, Cu 및 Zr 함량은 대기부유물과 큰 차이를 보이지 않으나, 대기오염으로 부화가 발생하지 않는 Li, Cs, Co, U, Cr, Ni, Rb, V, Th, Y, Sr, Sc 등은 황사에서 2-4.2배 높아졌다. 그러므로 이들 원소들을 황사발생의 지시원소로 사용할 수 있으며, 특히 Sr, V, Cr 및 Li 등은 황사 발생을 판단하기 위한 지시원소로 사용하기에 적합한 것으로 보인다. 한편 황사의 이동경로에 따른 미량원소의 함량을 살펴본 결과, 중국의 대도시 및 산업단지를 경유하여 국내 유입된 황사가,

*Corresponding author: pklee@kigam.re.kr

북한을 경유하여 국내에 도달한 황사에 비해서, S, Cd, Zn, Pb, Cu, Mo 및 As 함량이 높게 나타나, 황사의 이동경로가 이들 미량원소 오염 여부 및 오염도를 결정하는데 중요한 역할을 하는 것으로 판단된다. 황사 및 대기부유물 내 미량원소의 부화지수(Enrichment factor)를 기준으로 오염정도를 분류한 결과, 환경재해 측면에서 가장 문제가 되는 미량원소는 S, Zn, Cu, Pb, As, Mo, Cd이며, 이들은 인간의 건강 뿐만 아니라, 오랜 기간 토양과 수계환경에 퇴적될 경우 환경오염으로 인한 주변 생태계에 해로운 영향을 미치게 될 것으로 판단된다.

주요어 : 황사, 미량원소(중금속), 발원지, 이동경로, 부화지수

1. 서 언

황사는 중국과 몽골의 사막지대인 타클라마칸, 바다인자단, 텐켈, 오르도스, 고비 사막 및 만주지역과 황토고원 등으로부터 기원하는 것으로 알려져 있다(Joussaume, 1990; Kai *et al.*, 1988; Choi *et al.*, 2003; Guo *et al.*, 2004). 최근 중국 동부 및 남부지역의 산업 활동에 따른 화석연료 사용의 급격한 증가로 인하여, 인위적인 대기오염물질의 배출이 크게 증가하고 있으며, 대기환경이 날로 악화되고 있는 실정이다. 이렇게 배출되는 대기오염물질은 국지적인 규모의 대기환경 오염문제뿐만 아니라, 이들 대기오염물질이 편서풍을 따라 상당 수준 인접국가에 이송되기 때문에, 황사 발생은 발원지 주변지역인 한국과 일본에 심각한 환경문제를 발생시키고 있을 뿐만 아니라 북태평양 및 북미 지역까지 이동되어 환경오염 문제를 발생시키는 것으로 알려져 있다(Chun *et al.*, 2001; David *et al.*, 2001; Lin, 2001; McKendry *et al.*, 2001).

90년대 이후 국내에서 황사에 관한 연구는 황사와 기후특성과의 관련성, 황사가 기상현상이나 대기환경에 미치는 영향 등 기상 및 대기환경학적인 측면에서 황사의 발생과 이동에 관한 추정 및 수치모델 등에 관한 연구가 주로 수행되어 왔다. 황사가 유입되면 대기에 토양성분이 증가하게 되므로 대기 중 대기부유물의 물리적 및 화학적 성분에도 큰 변화가 발생하게 된다. 더욱이 황사가 장거리 이동 중에, 중국의 산업단지를 통과하여 국내에 유입되는 경우, 국내에서 채취된 황사의 화학적인 성분 특성은 황사발생 지역 토양의 지구화학적 특성, 당시의 기상조건, 황사의 이동경로 및 대기환경, 그리고 황사 채취지점에서의 대기조성 등의 영향을 종합적으로 받게 되는 것으로 알려져 있다(Kim *et al.*, 2004; Shin *et al.*, 2005). 지금까지의 황사의 화학적 성분 특성연구는 황사의 질량농도, 대기환경 측면에서의 황사의 화학적 성분 농도특성, 황사이동경로 및 비황사기간과의 화학적 특성 비교연구

등에 관한 연구가 주로 수행되어 왔다(Kim *et al.*, 2002; Kim *et al.*, 2003; Choi *et al.*, 2003; Kim *et al.*, 2004; Shin *et al.*, 2005; Jeon *et al.*, 2005; Jeon and Hwang, 2010). 그러나 황사의 구성광물에 대한 토양화학적 특성에 관한 연구는 지금까지 수행되지 않았다.

이번 연구에서는 2007년 황사 기간 및 비황사 기간에 채취한 황사와 대기부유물에 대한 중금속 등 미량원소의 지구화학적 거동 특성 규명 및 정량적 오염정도를 평가하고자 수행하였다.

2. 시료채취 및 분석

2.1. 황사 및 대기부유물 시료 채취

대기 중 황사 및 대기부유물 시료의 채취는 주변 토양 및 가능한 오염물질(차량, 도로변 퇴적물 등)의 유입을 방지하기 위하여 대전시 유성구 가정동 한국지질자원연구원 제2연구동 (3층 건물)의 옥상에서 실시하였으며, 일본 시바타 (SIBATA)사의 대용량 공기 채집기(High Volume Air Sampler)를 이용하였다. 시료의 채취는 크게 황사 발생 기간(기상청에서 발령하는 황사주의보/경보 기간) 및 비황사 기간으로 구분하였으며, 과거의 황사발생 기록을 근거로 하여, 황사가 발생할 가능성이 높은 2월 말에서 5월 초까지의 기간을 황사 집중 발생기간으로 정하고, 집중적으로 미세먼지를 채취하였다. 비황사 기간에는 1주일에 1회 (24시간) 채취하였다. 여기서 황사는 황사 기간에 채취한 대기 중 미세먼지이며, 대기부유물은 비황사 기간에 채취한 것이다.

3대의 대용량 공기채집기를 동시에 가동시켜, 입도별(TSP(Total Suspended Particle), PM₁₀ 및 PM_{2.5})로 미세먼지를 채취하였다. 채취 시간은 매일 아침 9시부터 익일 아침 9시까지 24시간 채취하는 것을 원칙으로 하였으나, 우기 시에는 채취하지 않았으며, 비가 그친 후 시료를 채취하였다. 사용한 여과지(Filter)는 Quartz fiber filter 이며, 유량은 1000 L/min(TSP 및 PM₁₀) 및 566 L/min(PM_{2.5})이다. 채취 후의 필터 무게에서

채취 전의 필터 무게를 빼서, 미세먼지의 무게를 구하였다. 석영필터는 무게를 칭량하기에 다소 크기 때문에, 오차가 발생할 확률이 높다. 따라서 시료 채취 이전에 필터를 4등분하여 각각의 무게를 칭량하도록 하였다. 황사시료는 모두 8회 채취되었으며, 대기부유물은 18회 채취되었고 황사 및 대기부유물의 입도별(TSP, PM₁₀ 및 PM_{2.5}) 질량농도를 Table 1에 정리하였다.

2.2. 2007년도 황사발생 현황 및 이동경로

2007년 전국적인 국내 황사 발생일은 평균 8.9일이었으며, 최대 발생일은 백령도에서 16일로 나타났다. 기상청에서 발령한 2007년 대전지역의 황사발생일은 총 11일(5회)이며, 2월에도 2일의 황사가 발생하여, 겨울에도 황사가 지속적으로 발생할 수 있음을 보여주었

다. 2007년도에 국내 황사 기간 중에서, 기상청에서 발표한 가장 높은 PM₁₀ 질량농도는 4월 1일, 오후 4시 대구의 2,019 µg/m³이었으며, 속초 및 부산에서도 각각 일평균 PM₁₀ 질량농도가 1,097 µg/m³과 1,040 µg/m³이었다. 연구 지역인 대전에서의 최대 PM₁₀ 질량농도는 1,211 µg/m³이었다(4월 1일, 오후 4시).

3월 6일 발생한 황사는 만주 부근에서 발생하여 북풍을 타고 국내로 유입되었으며, 전국 평균 94 µg/m³의 질량농도를 보였으며, 최고 평균 질량농도는 강화도의 162 µg/m³이었다. 이외에도 관악산, 안면도, 춘천, 천안, 청원, 추풍령, 군산, 영월, 안동, 대관령 등에서도 100 µg/m³ 이상의 상대적으로 높은 평균 질량농도를 나타냈다. 3월 27-28일에 발생한 황사는 내몽골 지역에서 발생하여 대륙고기압이 확장하면서 형성된 북서

Table 1. Mass Concentration in TSP, PM₁₀, PM_{2.5} in spring 2007 at Daejeon

No	Date	Mass (gr.)			Flow (1000 L)			Mass Conc. (µg/m ³)		
		TSP	PM ₁₀	PM _{2.5}	TSP	PM ₁₀	PM _{2.5}	TSP	PM ₁₀	PM _{2.5}
1	2007.2.21	0.2300	0.1771	0.0328	1439.9	1439.9	815.0	159.7	123.0	40.2
3	2007.2.27	0.0926	0.0723	0.0126	1439.9	1439.9	814.9	64.3	50.2	15.4
4	2007.3.6	0.0973	0.0740	0.0118	1439.9	1439.9	815.0	67.6	51.4	14.4
5	2007.3.12	0.0666	0.0481	0.0077	1334.5	1338.3	756.6	49.9	35.9	10.2
8	2007.3.21	0.1366	0.0976	0.0200	1420.4	1421.3	804.1	96.2	68.7	24.9
11	2007.3.25	0.2155	0.1614	0.0264	1421.7	1419.7	804.0	151.6	113.7	32.9
12	2007.3.26	0.0394	0.0282	0.0062	233.3	233.9	132.2	168.9	120.5	46.7
13	2007.3.27	0.2674	0.1623	0.0331	1430.9	1431.4	809.8	186.9	113.4	40.9
14	2007.3.28	0.1203	0.0528	0.0095	399.4	400.1	226.3	301.3	131.9	42.2
15	2007.3.31	1.4977	0.6480	0.0574	1439.9	1439.9	815.0	1040.1	450.0	70.4
16	2007.4.1	0.4066	0.1768	0.0216	929.8	930.1	526.3	437.3	190.1	41.0
17	2007.4.2	0.1176	0.0816	0.0134	1425.6	1425.1	807.0	82.5	57.3	16.6
18	2007.4.3	0.0738	0.0532	0.0122	1427.4	1429.6	802.0	51.7	37.2	15.2
19	2007.4.4	0.1759	0.1128	0.0220	1411.4	1409.3	798.5	124.6	80.0	27.6
22	2007.4.7	0.2010	0.1405	0.0262	1417.8	1419.0	802.9	141.8	99.0	32.7
23	2007.4.8	0.1144	0.0789	0.0206	1416.1	1413.8	800.7	80.8	55.8	25.7
27	2007.4.14	0.1141	0.0732	0.0125	1419.7	1420.3	803.8	80.4	51.5	15.6
29	2007.4.18	0.0901	0.0692	0.0170	1418.4	1418.7	802.9	63.5	48.8	21.1
34	2007.4.25	0.2341	0.1641	0.0304	1439.9	1439.9	815.0	162.6	114.0	37.3
41	2007.5.4	0.2208	0.1722	0.0319	1439.9	1439.9	815.0	153.3	119.6	39.1
42	2007.5.7	0.2334	0.1634	0.0264	1437.2	1437.0	813.5	162.4	113.7	32.5
43	2007.5.8	0.2733	0.1798	0.0327	1432.7	1432.3	810.6	190.8	125.5	40.4
44	2007.5.10	0.1336	0.1017	0.0270	1439.9	1439.9	815.0	92.8	70.6	33.1
45	2007.5.25	0.4582	0.2896	0.0234	1424.7	1424.2	806.4	321.6	203.3	29.0
46	2007.5.26	0.4036	0.2758	0.0192	1439.9	1439.9	815.0	280.3	191.5	23.6
50	2007.12.03	0.0761	0.0563	0.0136	1439.9	1439.9	815.0	52.8	39.1	16.6
	mean	0.2342	0.1427	0.0218	1321.5	1321.7	747.8	183.3	109.8	30.2
	max	1.4977	0.6480	0.0574	1439.9	1439.9	815.0	1040.1	450.0	70.4
	min	0.0394	0.0282	0.0062	233.3	233.9	132.2	49.9	35.9	10.2
	STD	0.2803	0.1231	0.0110	313.0	312.8	177.0	199.1	84.5	13.4

풍을 타고 내려와, 전국에 약한 황사가 나타났다. 전국의 평균 질량농도는 $67 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, 대구에서 가장 높은 평균 질량농도($96 \mu\text{g}/\text{m}^3$)를 보여주었다. 한편 관악산은 평균 질량농도가 $79 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 3월 31일 - 4월 2일 발생한 황사는 내몽골과 고비사막 부근에서 발생하여 느리게 남동진하면서 중국 만주지역의 커얼친 사막을 통과하여 선양·다롄 공업지대를 거쳐 국내 유입되었다. 전국의 평균 질량농도는 $471 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이며, 대구 및 속초에서 가장 높은 $687 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 나타냈다. 이외에도 구덕산(부산) 및 영덕에서도 $600 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상의 높은 평균 질량농도를 기록했으며, 전국적으로 $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상의 높은 질량농도를 보여준 황사이다. 5월 25-27일 발생한 황사는 내몽골과 만주 지역에서 발원하였으며, 전국 대부분 지역에서 약한 황사가 발생하였다. 전국 평균 질량농도는 $155 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, 백령도에서 $210 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 최고의 평균 질량농도를 나타냈다 (Fig. 1).

2007년 국내로 유입된 황사를 황사의 유입경로로 구

분하였다(Type I, II 및 III). Type I 은 북한을 거쳐 국내로 유입된 경우로 3월 6일(F4) 및 3월 31일-4월 2일(F15-F17)에 발생한 황사가 해당된다. Type II 는 5월 25일-26일에 발생한 황사 (F45-F46)로서, 발해만을 거쳐 국내로 유입되었고, Type III는 3월 27일-28일에 발생한 황사(F13-F14)로 중국 동부 및 남부를 지나, 우리나라 남서부 지방으로 유입되었다 (Fig. 1).

2.3. 화학분석

화학분석시료는 채취된 황사 8개 시료와 대기부유물 17개 시료를 대상으로 화학분석을 수행하였다. 화학분석 방법은 각 시료의 총 농도를 분석하기 위해 완전분해 방법을 수행하였다. 분석하고자 하는 시료를 정확하게 무게(1 gr.)를 측정하여 테플론 비이커에 넣고, 불산 (HF) 10 ml와 과염소산 (HClO_4) 2 ml를 부은 후 잘 혼합한다. 시료와 시약이 잘 혼합된 테플론 비이커를 110°C 로 조정된 가열판에 올려놓고 가열하여 완전하게 증발시킨다. 완전하게 증발되면 테플론 비이

Fig. 1. Three-days back trajectories of air-mass during Asian Dust in 2007 using HYSPLIT-4 (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory-Version 4) model, developed by NOAA Air Resources Laboratory (Draxler and Rolph, 2003).

커에 다시 한번 불산 (HF) 10 ml와 과염소산 (HClO₄) 1 ml를 부은 후 잘 혼합한 후 110°C에서 완전하게 증발할 때까지 가열한다. 완전하게 증발되면 테플론 비이커에 과염소산 (HClO₄) 1 ml를 부은 후 잘 혼합한 후 110°C에서 더 이상 흰 연기가 발생하지 않을 때까지 가열하여 과염소산을 완전하게 증발시킨다. 흰 연기가 발생하지 않으면 12 N 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 (Tessier *et al.*, 1979). 모든 분석과정에서 사용한 불산 (HF), 과염소산 (HClO₄) 및 염산 (HCl)은 Merck社の analytical grade를 사용하였다.

2.4. 기기분석

화학분석은 한국기초과학지원연구원에서 수행하였으며, Fe, Mn, Ca, Sr, S 및 Zn은 PerkinElmer사의 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, Cd, Cs, Mo, Sb, Sc, Sn, U 등은 ThermoElemental사의 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 표준용액은 1,000 ppm stock solution (Merck)을 희석하여 사용하였다. 전 분석과정에 이용된 탈이온수를 얻기 위해 Milli-Q Millipore system을 사용하였다.

2.5. 황사 및 대기부유물의 오염도 평가

2.5.1. 부화지수(Enrichment factors : EF)

부화지수는 (EF)는 일반적으로 수계 퇴적물에서 인간에 의한 인위적인 오염원을 확인하고 오염 정도를 정량화하기 위해서 주로 사용하고 있다. 특히, 다양한 환경매체에서의 오염도를 서로 비교할 수 있기 때문에 다양하게 사용되고 있다 (Rashed, 2010). 그러므로 부화지수 값이 1 이상인 경우는 부화 (enrichment)를

지시하는 것이고 1 이하인 경우는 결핍 (depletion)을 지시한다. 계산식은 다음과 같다.

$$EF = \frac{\left\{ \frac{Me}{Fe} \right\}_{sample}}{\left\{ \frac{Me}{Fe} \right\}_{background\ soil}} \quad (1)$$

여기서 {Me}_{sample}은 황사 및 대기부유물의 금속 함량, {Fe}_{sample}은 황사 및 대기부유물의 Fe 함량, {Me}_{background soil}은 배경토양의 금속 함량, {Fe}_{background soil}은 배경토양의 Fe 함량이다. 부화지수 값을 기준으로 오염정도는 다음과 같이 분류된다 (Banwart and Malmstrom, 2001). 부화지수 값이 2 이하(EF<2)는 “depletion to minimal enrichment”, 부화지수 값이 2-5 (EF=2~5)는 “moderate enrichment”, 부화지수 값이 5-20 (EF=5~20)는 “significant enrichment”, 부화지수 값이 20-40 (EF=20~40)는 “very high enrichment”, 부화지수 값이 40 이상인 것(EF>40)은 “extremely high enrichment”로 오염정도를 구분하였다.

황사에 적용한 부화지수 (Enrichment factors)는 일반적으로 부화지수 값이 10보다 적은 경우 주로 토양 성분에 의해 영향을 받은 비부화 성분으로 규정하는 반면에 10보다 큰 경우에는 비지각기원 혹은 비토양 성분으로 간주하고 인위적으로 부화된 성분으로 규정한다 (Chester *et al.*, 2000; Shin *et al.*, 2005; Rashed, 2010). 부화지수 계산 시, 일반적으로 평균 지각구성 화학성분을 이용하는 경우가 많은데, 이는 지각의 평균 함량과 특정한 시료 채취 장소들의 암석 종류 및 토양의 화학성분 혹은 근원물질의 화학성분과는 매우 큰 유의한 차이가 존재하므로 참고자료를 선택하는 데 있어 세심한 주의가 필요하다 (Berg *et al.*, 1994). 특히 Rubio *et al.* (2000)은 지역적인 배경값을 사용하기를 권장하였다. 그러므로 이번 연구에서 부화지수 계산 시, 사막토양과 화학성분의 차이가 유의한 지각의 평균 함량 대신에 사막토양을 기준으로 한 것은 황사의 근원물질인 사막토양과 중국 및 우리나라의 대기오염에 의한 부화정도를 정량적으로 판단하기 위해서 사용하였다. 부화지수 계산 시 normalization을 위해 Al을 사용하는 이유는, 세립질 입자에 주로 수반되고 다른 미량원소의 지구화학적 특성과 유사한 경향이 있고 자연 상태에서 비교적 균질한 함량을 보이고 있기 때문이다 (Daskalakis and O'Connor, 1995). 일반적으로 사용하는 Al 함량 대신에 Fe 함량을 기준으로 계산한 것은 Al과 유사하게 Fe 광물이 주로 세립

질 입자로 산출되고 미량원소와 지구화학적 거동이 매우 밀접하며 비교 대상인 사막토양에서의 미량원소 함량과 Fe 함량과의 상관관계가 매우 높았기 때문이다 (Lee *et al.*, 2011).

2.5.2. Pollution index(PI)

오염지수 (pollution index)는 각각의 금속 함량을 배경값 (background value)으로 나눈 비율로 정의된다 (Faiz *et al.*, 2009).

$$PI = \frac{[C]_{sample}}{[C]_{background soil}} \quad (2)$$

여기서 $[C]_{sample}$ 는 황사 및 대기부유물의 각 미량원소의 함량이고 $[C]_{background soil}$ 은 배경토양의 각 미량원소의 함량을 의미한다. 우리나라에 유입되는 황사에 함유된 미량원소 함량을 기원토양과 비교하기 위해 오염지수는 황사 발원지 사막토양의 평균 함량을 기준으로 계산하였다. 대기부유물의 경우에도 중국에서 불어오는 편서풍의 영향을 받기 때문에 사막토양의 평균 함량을 기준으로 계산하였다. 그러므로 대기부유물의 오염지수는 절대값을 의미한다고 보기 어려우며 같은 기간에 유입된 황사의 오염지수와 비교하기 위한 것이다.

2.5.3. Pollution load index(PLI)

오염부하지수 (Pollution load index)는 다음과 같이 정의된다 (Rashed, 2010).

$$PLI = (P I_1 \times P I_2 \times P I_3 \times \dots \times P I_n)^{1/n} \quad (3)$$

여기서 PI 는 각 원소의 오염지수 (pollution index) 값을 의미한다. 이 오염부하지수 값은 비교적 단순한 값을 제시하므로 황사 및 대기부유물 채취시기에 따른 원소 및 시료의 오염정도를 상대적으로 비교가 가능하다.

3. 결 과

3.1. 채취된 황사 및 대기부유물의 질량농도

연구기간 중 입도별 (TSP, PM_{10} , $PM_{2.5}$) 미세먼지의 질량농도는 비황사 기간에 비해 황사 기간의 질량농도가 높게 나타났다 (Table 1). 2007년도에 채취한 미세먼지 중 TSP의 평균 질량농도는 $183.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이며, $49.9\text{--}1,040.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 범위를 보인다. 가장 높은 TSP 질량농도는 3월 31일의 $1,040 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이며, 4월 1일에도 $437.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 높은 농도를 나타내었다. 또한 3월 27일-28일에도 각각 $186.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 $301.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$

의 높은 TSP 농도를 보여준다. 하지만 기상청에서 발표한 황사 발생일인 4월 2일과 3월 6일에는 TSP 농도가 각각 $82.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 $67.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 비황사 기간에 채취한 미세먼지 농도의 중간값 보다도 낮은 농도를 보이고 있다. 비황사 기간 미세먼지의 TSP 농도는 $49.9\text{--}190.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 범위를 보이며, 중간값은 약 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 정도이다. 이들 비황사 기간의 미세먼지 중에서 4월 25일 ($162.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$)과 5월 7일-8일 (162.4 및 $190.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$)의 TSP 농도는 일부 황사 기간에 채취된 미세먼지 TSP 질량농도 보다 훨씬 높은 값을 나타내고 있다. 하지만, 5월 7일-8일에 채취한 미세먼지의 TSP 질량농도는 황사의 영향을 배제할 수 없다. 기상청 발표에 의하면, 이 기간에 대전지역에서는 황사가 발생하지 않았으나, 백령도 지역에서는 황사가 발생하였다고 발표하였다. 따라서 비황사 시기에 비해 미세먼지의 질량농도가 증가하였을 가능성이 매우 높다. PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 의 경우에도 황사 기간인 3월 31일-4월 1일에 높은 농도를 보이고 있다. 특히 PM_{10} 은 3월 31일에 최대 농도($450.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$)를 보이며, $PM_{2.5}$ 는 $70.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 나타냈다.

3.2. 황사 및 대기부유물의 Fe, Mn 및 Ca 함량

2007년에 채취한 황사의 TSP, PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 시료의 Fe, Mn 및 Ca 평균 함량은 다음과 같다. Ca는 각각 $153,867 \mu\text{g}/\text{g}$ ($42,394\text{--}350,641 \mu\text{g}/\text{g}$), $40,111 \mu\text{g}/\text{g}$ ($9,130\text{--}74,986 \mu\text{g}/\text{g}$) 및 $106,379 \mu\text{g}/\text{g}$ ($18,659\text{--}213,047 \mu\text{g}/\text{g}$), Fe는 각각 $144,760 \mu\text{g}/\text{g}$ ($47,075\text{--}318,682 \mu\text{g}/\text{g}$), $50,299 \mu\text{g}/\text{g}$ ($14,350\text{--}86,774 \mu\text{g}/\text{g}$) 및 $154,504 \mu\text{g}/\text{g}$ ($32,866\text{--}244,832 \mu\text{g}/\text{g}$), Mn는 각각 $2,935 \mu\text{g}/\text{g}$ ($1,151\text{--}5,945 \mu\text{g}/\text{g}$), $1,139 \mu\text{g}/\text{g}$ ($560\text{--}2,031 \mu\text{g}/\text{g}$) 및 $3,817 \mu\text{g}/\text{g}$ ($1,432\text{--}5,766 \mu\text{g}/\text{g}$) 이었다 (Table 2).

2007년에 채취한 대기부유물의 TSP, PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 시료에 대한 Ca 함량은 각각 $43,639 \mu\text{g}/\text{g}$ ($14,003\text{--}92,924 \mu\text{g}/\text{g}$), $18,310 \mu\text{g}/\text{g}$ ($6,730\text{--}42,373 \mu\text{g}/\text{g}$) 및 $57,449 \mu\text{g}/\text{g}$ ($7,850\text{--}373,109 \mu\text{g}/\text{g}$), Fe 함량은 각각 $37,543 \mu\text{g}/\text{g}$ ($17,870\text{--}88,085 \mu\text{g}/\text{g}$), $22,288 \mu\text{g}/\text{g}$ ($7,911\text{--}45,870 \mu\text{g}/\text{g}$) 및 $67,580 \mu\text{g}/\text{g}$ ($24,013\text{--}345,154 \mu\text{g}/\text{g}$), Mn 함량은 각각 $950 \mu\text{g}/\text{g}$ ($388\text{--}1,790 \mu\text{g}/\text{g}$), $753 \mu\text{g}/\text{g}$ ($242\text{--}2,142 \mu\text{g}/\text{g}$) 및 $1,993 \mu\text{g}/\text{g}$ ($668\text{--}7,666 \mu\text{g}/\text{g}$) 이었다 (Table 2).

3.3. 황사의 미량원소 함량

2007년에 채취한 황사의 TSP, PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 시료에 대한 미량원소 평균 함량은 각각 다음과 같다.

미량원소 중 함량이 가장 높은 원소는 황(Sulfur)이었으며, 이외 1,000 µg/g 이상인 원소는 Zr, Zn, Ba, Pb인 것으로 나타났다. S의 평균 함량은 TSP, PM₁₀ 및 PM_{2.5} 각각 151,505 µg/g, 45,044 µg/g 및 181,182 µg/g 이었다. S 다음으로 높은 값을 보이는 Zr의 평균 함량은 각각 7,358 µg/g, 1,982 µg/g 및 7,081 µg/g, Zn는 각각 3,754 µg/g, 1,508 µg/g 및 5,747 µg/g, Ba는 각각 3,501 µg/g, 711 µg/g 및 2,786 µg/g, Pb는 각각 1,358 µg/g, 1,396 µg/g 및 4,558 µg/g 이었다 (Table 2).

평균 함량이 100-1,000 µg/g인 원소는 Sr (1,120 µg/g, 224 µg/g 및 753 µg/g), Mo (468 µg/g, 445 µg/g 및 3,363 µg/g), Cu (291 µg/g, 520 µg/g 및 740 µg/g), Cr (313 µg/g, 93.9 µg/g 및 381 µg/g), V (346 µg/g, 130 µg/g 및 408 µg/g), Li (401 µg/g, 57.5 µg/g 및 205 µg/g), As (100 µg/g, 184 µg/g 및 645 µg/g), Ni (141 µg/g, 171 µg/g 및 494 µg/g), Rb (389 µg/g, 217 µg/g 및 1,051 µg/g), Sb (219 µg/g, 54.8 µg/g 및 296 µg/g) 등 이었다 (Table 2). 평균 함량이 100 µg/g 이하인 원소는 Y, Cs, Sc, Co, Cd, Th, U 등 이었다 (Table 2).

일반적으로 황사가 중국을 거쳐 한반도로 유입되면서 대전지역에 이르기까지 중국 및 국내의 산업단지 지역을 통과하면서 대기오염에 의한 황사 구성물질의 중금속 및 미량원소의 오염이 예상된다. 따라서 이동 경로 상 대기오염에 의한 황사의 오염정도를 평가하기 위해서 채취된 황사의 미량원소 함량을 사막토양의 중금속 및 미량원소 함량과 단순비교 하여 보았다 (Lee *et al.*, 2011). 2007년 대전지역에서 채취한 TSP, PM₁₀ 및 PM_{2.5} 시료 중 황사발원지 토양의 평균 함량과 비교할 수 있는 것은 입도분포의 문제로 TSP 시료를 이용하는 것이 타당할 것이다. 함량이 가장 크게 증가한 원소는 S로 사막토양의 평균 함량보다 평균 639배 (157-1025배) 증가하였으며, Mo는 평균 257배 (97-522배) 증가하였고, Cd도 평균 227배 (127-385배), Zn는 평균 140배 (60-235배) 증가하였다. 평균 50배 이상 증가한 원소로는 Pb 평균 93배 (34-147배), Sb 평균 69배 (34-107배), Zr 평균 52배 (16-96배) 증가하였다. 평균 10배 이상 증가한 원소는 Li 23배, Cu 22배, Cs 20배, As 15배, U 12배, Cr 11배 이었다. 이외, Ni, Rb, V 등이 평균 8배, Th와 Y이 평균 7배, Ba와 Sc가 평균 6배, Sr과 Co 평균 5배 증가된 함량을 보였다. 황사에 함유된 미량원소 중 Ni, Rb, V, Th, Y, Ba, Sc, Sr 및 Co 등의 원소 함량이 황사발

원지 토양의 평균 함량보다 5-8배 정도 증가한 것은 황사 발생 시에 황사발원지 토양 중 이들 미량원소 함량이 상대적으로 높은 비교적 세립질 입자의 토양 구성광물이 강한 바람에 상승하여 황사의 구성물질이 되었기 때문이다.

3.4. 대기부유물의 미량원소 함량

2007년에 채취한 대기부유물의 TSP, PM₁₀ 및 PM_{2.5} 시료에 대한 미량원소 평균 함량은 각각 다음과 같다. 역시 미량원소 중 함량이 가장 높은 원소는 황(Sulfur)이었으며, 평균 함량은 TSP, PM₁₀ 및 PM_{2.5} 각각 87,112 µg/g, 61,451 µg/g 및 161,546 µg/g 이었다. 이외 1,000 µg/g 이상인 원소는 Zr (2,885 µg/g, 1,579 µg/g 및 8,302 µg/g), Zn (2,612 µg/g, 1,889 µg/g 및 5,842 µg/g), Ba (1,702 µg/g, 838 µg/g 및 3,830 µg/g), Pb (1,029 µg/g, 1,339 µg/g 및 3,928 µg/g)인 것으로 나타났다 (Table 2).

평균 함량이 100-1,000 µg/g인 원소는 Sr (320 µg/g, 96.2 µg/g 및 407 µg/g), Mo (265 µg/g, 541 µg/g 및 2,390 µg/g), Cu (239 µg/g, 282 µg/g 및 782 µg/g), Cr (100 µg/g, 42.2 µg/g 및 231 µg/g), V (102 µg/g, 61.8 µg/g 및 222 µg/g), Li (133 µg/g, 53.5 µg/g 및 376 µg/g), As (55.7 µg/g, 444 µg/g 및 457 µg/g), Ni (54.1 µg/g, 89.5 µg/g 및 305 µg/g), Rb (160 µg/g, 171 µg/g 및 728 µg/g), Sb (145 µg/g, 73.6 µg/g 및 389 µg/g) 등 이었다. 평균 함량이 100 µg/g 이하인 원소는 Y, Cs, Sc, Co, Cd (17.3 µg/g, 14.1 µg/g 및 46.3 µg/g), Th, U 등 이었다 (Table 2).

2007년도에 대전지역에서 채취한 대기부유물에 함유되어 있는 미량원소의 오염정도를 비교하려면 국내 토양의 영향을 고려하여 복합적으로 비교하는 것이 타당하지만 대기부유물 역시 중국으로부터 불어오는 편서풍의 영향을 상당기간 받으므로 중국 사막토양의 평균 함량 (Lee *et al.*, 2011)과 단순 비교하여 보았다. 대기부유물의 S 함량도 사막토양의 평균 함량과 비교하면 평균 367배(54-718배) 높은 것으로 나타났으며, Cd 평균 216배(41-472배) 높고, Mo 평균 146배(16-539배) 높은 것으로 나타났다. 대기부유물의 Zn 함량은 사막 토양의 함량과 비교하여 평균 97배(13-140배), Pb 평균 70배(13-140배), Sb 평균 45배(3-217배), Zr 평균 20배(0.8-112배) 및 Cu 평균 18배(5-73배) 높은 것으로 나타났다. 이외 대기부유물에 함유된 As 함량은 사막토양의 평균 함량과 비교하여 약 8배(2.1-23배), Li

과 Cs는 평균 7배, U는 평균 5배, Cr, Ba, Ni 및 Rb는 평균 3배, V, Th, Y는 평균 2배 높았으며, Sr과 Sc는 유사한 함량을 보였다.

3.5. 황사와 대기부유물의 미량원소 함량 비교

황사와 대기부유물의 시료채취 시기별 미량원소 함량과 사막토양의 미량원소 평균 함량을 비교한 결과, 황사에서 뿐만 아니라 대기부유물에서의 높은 농집(enrichment) 현상을 보이는 미량원소는 황(Sulfur), 몰리브덴(Mo), 카드뮴(Cd), 아연(Zn), 납(Pb), 저어콘(Zr) 등으로 동일하였다. 이러한 것은 황사뿐만 아니라 평

상시 대기부유물에서의 미량원소 함량은 중국으로부터 장거리 이동되는 대기부유물의 영향을 받고 있다고 추정할 수 있다. 이러한 연구결과는 중국의 산업시설에서 발생된 미세먼지가 황사와 함께 장거리 이동되어 우리나라에까지 영향을 미치고 있다는 것을 지시한다 (Lee *et al.*, 2002).

2007년도에 채취한 황사와 대기부유물의 미량원소 함량을 단순 비교하면, 대부분의 미량원소는 비황사 시기의 대기부유물보다 황사 시기의 황사에서 함량이 높은 것으로 나타났다. 황사의 TSP 입자에서의 S, Cd, Mo, Zn, Pb, Sb, Cu 및 Zr 함량은 대기오염에 의해

Fig. 2. Box-whisker plot of elemental concentration in TSP, PM₁₀, PM_{2.5} for Asian Dust and Non Asian Dust in spring 2007 at Daejeon.

황사발원지 사막토양에 비교한다면 함량증가가 뚜렷하였지만 평상시 대기부유물에서의 함량과 비교할 경우 차이가 크지 않은 것으로 나타났다. Zr (대기부유물 함량의 약 2.6배)을 제외하면 황사에서의 이들 원소들의

함량은 비황사시기에 채취한 대기부유물과 비교할 때 약 1.0-2.0배 정도 증가하였다 (Fig. 2). 이러한 결과는 기존 연구결과와 비교할 때 일치되기도 하지만 대체로 상이한 결과이다 (Kim *et al.*, 2002). 기존 연구결과에

Fig. 2. Continued.

서는 황사 발생에 의해 사막토양 기원의 원소의 함량은 증가하지만 인위적인 오염에 의한 미량원소들의 함량은 큰 변화가 없거나 감소하는 것으로 나타난 바 있었다 (Kim *et al.*, 2002; Kim *et al.*, 2003; Choi *et al.*, 2003; Kim *et al.*, 2004; Jeon *et al.*, 2005; Jeon and Hwang, 2010). 이외 황사에서의 Ba와 As 함량도 대기부유물과 단순 비교하면 증가한 함량이 2배 미만이었다. 그러나 2007년도에 채취한 황사에 함유되어 있는 Li, Cs, Co, U, Cr, Ni, Rb, V, Th, Y, Sr과 Sc 함량은 대기부유물에서 검출된 함량보다 최소 2배에서 최대 4.2배 높아졌다 (Fig. 2). 이는 Jeon and Hwang (2010)의 연구결과와도 일치된다. 이들 원소들은 주로 황사에 함유되어 있는 반면에 평상시 대기부유물의 입자에는 토양 기원인 이들 원소들을 함유하고 있는 입자상 물질이 적기 때문인 것으로 판단된다. 이러한 경향은 PM_{10} 에서는 다소 차이가 있고 뚜렷하지 않았으나 $PM_{2.5}$ 에서는 TSP와 동일하게 미량원소별 함량의 차이가 뚜렷하게 나타났다 (Fig. 2). 이러한 연구 결과는 Chung and Kim (2004)의 기존 연구결과와도 일치한다. 이들의 연구결과에 의하면 황사발생기간과 비행사시 중금속 농도의 비교에서 Pb, Cd, Cu는 황사 발생기간과 비행사시와 큰 차이를 보이지 않는 반면에 Cr, Fe, Mn, Ni은 큰 차이를 나타내며 황사가 대기 중 농도에 상당한 기여를 한다고 보고한 바 있다 (Chung and Kim, 2004). 2001년 황사기간 및 비행사기간의 중금속 농도분포 특성을 연구한 Choi *et al.* (2003)의 연구결과에서도 인위적인 오염원에 기인하는 미량원소인 Mo, Cr, Cu, Pb 등은 기간별 농도의 차이가 미미하지만 자연적인 기원의 미량원소들은 상대적으로 차이가 큰 것으로 나타난 바 있다.

3.6. 입도별 황사 및 대기부유물의 지구화학적 특성

황사에 함유된 미량원소의 함량을 비교한 결과, Cr, Cu, Pb, Zn, V, S, As, Cd, Co, Ni, Mo, Sb, Cs, Rb, Sc, Y 등의 미량원소 들은 $PM_{2.5}$ 에서의 함량이 가장 높은 것으로 나타났으며, Zr, Sr, Ba, Li, Th, U 등의 미량원소들의 함량은 TSP에서의 함량이 가장 높은 것으로 나타났다 (Table 2). $PM_{2.5}$ 에서의 Cr, Cu, Pb, Zn, V, S, As, Cd, Co, Ni, Mo, Sb, Cs, Rb, Sc, Y 등의 함량이 가장 높은 것은 황사가 이동 중에 중국을 거치면서 대기오염 (Cu, Pb, Zn, S, As, Cd, Mo, Sb)에 기인하거나 황사 구성물질인 세립질 광물 (Cr, V, Co, Ni, Cs, Rb, Th, Sc, Y)에 함유된 것에 기인한 것으로 판단된다. Sr, Ba, Li, Th, U 등의 원

소가 TSP에서 함량이 가장 높은 이유는 이들 원소들이 중국의 대기오염과 관련이 있기 보다는 황사 입자의 근원물질인 사막토양에 이들 원소들의 함량이 상대적으로 높기 때문이다. 반면에 대기부유물에 함유된 모든 미량원소 들은 입자가 상대적으로 가장 작은 크기인 $PM_{2.5}$ 에서의 함량이 가장 높은 것으로 나타났다 (Table 2). 이런 결과는 비행사기간 동안에는 미량원소가 $PM_{2.5}$ 의 작은 입자에 많이 함유되어 있음을 지시한다.

4. 고 찰

4.1. 황사 발생 시기 및 이동경로에 따른 미량원소 함량 변화

황사발생 시기 및 이동경로에 따른 미량원소의 함량변화를 평가하기 위하여 중국의 동부 및 남부연안 산업단지와 대도시를 통과한 황사와 중국의 동북부 지역을 통과하여 북한을 경유해 국내에 유입된 황사로 구분하였으며, 유입경로에 따른 황사의 미량원소 함량의 차이를 검토하고 황사의 미량원소 오염여부 및 오염도를 평가하고자 하였다. 특히, 이번 연구를 통해 알려진 대기오염에 의해 함량이 매우 높은 미량원소인 S, Cd, Zn, Pb, Cu, Mo, As, Sb 및 Zr 등과 황사에 원래 구성광물에 주로 함유된 미량원소인 Cs, Rb, Ni, Cr, Li, V, Co, U, Y, Sr, Ba, Sc 및 Th 등으로 구분하여 검토하였다.

2007년 경우, 발원지에 따라 국내에 유입되는 황사의 이동경로가 구분됨을 확인할 수 있었다 (Fig. 1). 고비 지역에서 발생하는 황사는 내몽골 지역 (주로 훈산타크 사지)을 지나 만주 지역(키얼친 사지)를 경유한 후, 북한을 거쳐 국내로 유입되었다. 일부 만주 지역에서 발생한 황사 역시 북한을 거쳐 국내 유입되었다 (Type I). 고비 사막에서 발원하게 되면 약 2일, 만주 지역은 1일 이후에 우리나라에 영향을 주는 것으로 나타났다. 내몽골 지역 사막에서 황사가 발생하는 경우에는 황토고원을 거쳐 발해만을 경유하거나, 서해를 거쳐 국내 서해안 지역에 영향을 주는 것으로 나타났다 (Type II). 황토고원에서 황사가 발생하는 경우에는 중국 동부지방의 연안지역으로 남하하는 경우가 관찰되었으며, 주로 남서해 또는 서해를 경유하여 우리나라의 서부 또는 남서부지방부터 영향을 주기 시작하는 것으로 나타났다 (Type III). 2007년 발생하여 시료를 채취한 황사 (시료번호 4, 13, 14, 15, 16, 17, 45 및 46)는 중국의 동북부 지역을 지나 북한을 경유하여 국

내로 유입된 Type I (시료번호 4, 15, 16, 17)의 경우와 중국의 동부 및 남부연안 산업단지와 대도시를 통과하여 국내로 유입된 Type II와 Type III (시료번호 각각 45, 46 및 13, 14)로 구분할 수 있다.

TSP와 PM_{2.5}의 경우, 중국의 동부 및 남부연안 산업단지와 대도시를 통과하여 유입된 Type II와 Type III 황사에서의 S, Cd, Zn, Pb, Cu, Mo 및 As 함량이 중국 동북부를 통과하고 북한을 경유하여 국내로 유입된 Type I 황사에서의 함량보다 상대적으로 높은 함량을 보이고 있다. 반면에, Sb와 Zr은 Type I 황사에서 함량이 Type II와 III 황사에서보다 더 높은 함량을 보였다. PM₁₀의 경우에는 Type I 황사에서는 Pb와 Cu 함량이 상대적으로 더 높은 함량을 보이고 있어 입도별로 미량원소의 특성의 차이가 관찰되었다 (Table 3). 이러한 연구결과는 동해나 북한지역을 경유

하여 유입되는 황사보다 중국의 동부 및 남부 연안지역으로부터 유입된 황사에서 다수의 성분이 더 높은 농도를 보인다고 한 기존의 연구결과와도 일치된다 (Choi *et al.*, 2003). 황사가 중국 동부/남부연안 산업단지와 대도시를 통과한 경우 황사에 이들 원소들의 오염이 심각한 반면, 중국 동북부-북한을 경유하여 국내로 유입된 황사의 경우 이들 원소에 의한 오염은 상대적으로 미약하다는 것을 지시한다. 그러므로 황사가 중국의 산업단지와 대도시 지역을 통과하지 않고 북한을 통하여 국내에 유입될 경우, 즉, 대기오염이 상대적으로 낮은 지역을 통과할 경우에 황사에서의 S, Cd, Zn, Pb, Cu, Mo 및 As의 오염도가 낮아질 수 있다는 것을 지시한다. 즉, 황사의 이동경로가 이들 미량원소 오염 여부 및 오염도를 결정하는데 중요한 역할을 하는 것으로 밝혀졌다.

Table 3. Comparison of elemental concentration ($\mu\text{g/g}$) in TSP, PM₁₀, PM_{2.5} among Asian Dusts according to transportation course

Fraction	elements	TYPE I	TYPE II	TYPE III	TYPE II+III
TSP	S	51282.8 $\pm$ 19847.6	239467.6 $\pm$ 4909.9	163765.8 $\pm$ 13340.6	201616.7 $\pm$ 44470.4
	Cd	10.8 $\pm$ 0.8	20.8 $\pm$ 6.1	23.0 $\pm$ 11.1	21.9 $\pm$ 7.4
	Mo	617.1 $\pm$ 33.7	221.3 $\pm$ 61.8	567.3 $\pm$ 542.8	394.3 $\pm$ 373.3
	Zn	1892.2 $\pm$ 393.7	5439.6 $\pm$ 1204.1	3931.3 $\pm$ 1389.0	4685.5 $\pm$ 1372.9
	Pb	584.4 $\pm$ 122.7	1938.0 $\pm$ 294.2	1554.5 $\pm$ 606.3	1746.3 $\pm$ 447.6
	Sb	297.6 $\pm$ 61.2	121.1 $\pm$ 17.0	239.9 $\pm$ 135.2	180.5 $\pm$ 104.4
	Zr	9222.1 $\pm$ 6096.0	5750.8 $\pm$ 4929.7	7102.5 $\pm$ 3286.0	6426.6 $\pm$ 3508.4
	Cu	212.8 $\pm$ 39.9	349.5 $\pm$ 13.0	312.3 $\pm$ 217.7	330.9 $\pm$ 127.7
	As	75.6 $\pm$ 21.2	133.1 $\pm$ 0.1	94.1 $\pm$ 35.6	113.6 $\pm$ 30.5
PM ₁₀	S	20329.6 $\pm$ 6146.9	43537.7 $\pm$ 3008.2	95982.8 $\pm$ 9341.9	69760.3 $\pm$ 30804.8
	Cd	5.1 $\pm$ 3.3	4.8 $\pm$ 1.1	17.2 $\pm$ 5.5	11 $\pm$ 7.9
	Mo	337.8 $\pm$ 253.5	249.8 $\pm$ 25.2	856.3 $\pm$ 592.7	553 $\pm$ 489.8
	Zn	1103 $\pm$ 557.5	1137 $\pm$ 194	2692.8 $\pm$ 565.9	1914.9 $\pm$ 962.4
	Pb	1669.5 $\pm$ 2193.1	647.5 $\pm$ 43	1598.6 $\pm$ 747.6	1123.1 $\pm$ 698.9
	Sb	29.9 $\pm$ 38.9	14.7	124.8 $\pm$ 124.7	88.1 $\pm$ 108.7
	Zr	1718.9 $\pm$ 1179	746.6	3126 $\pm$ 3149.8	2332.8 $\pm$ 2616.8
	Cu	805.9 $\pm$ 1378.4	138 $\pm$ 7.8	330.4 $\pm$ 169.2	234.2 $\pm$ 148
	As	176.6 $\pm$ 159.2	113.3 $\pm$ 6.6	270.7 $\pm$ 185.5	192 $\pm$ 140.5
PM _{2.5}	S	75980.5 $\pm$ 30738.5	293615.2 $\pm$ 24331.4	279154.2 $\pm$ 1213.3	286384.7 $\pm$ 16356.6
	Cd	22.3 $\pm$ 7.4	41.7 $\pm$ 17.7	61.5 $\pm$ 24.3	51.6 $\pm$ 20.8
	Mo	3234.1 $\pm$ 1679.6	2820.2 $\pm$ 388.4	4164.5 $\pm$ 3504.6	3492.3 $\pm$ 2178.7
	Zn	3280.9 $\pm$ 1237.8	8415.6 $\pm$ 2357.3	8012.8 $\pm$ 2701.1	8214.2 $\pm$ 2082.9
	Pb	3583.5 $\pm$ 1644.5	5561.7 $\pm$ 759.6	5503.2 $\pm$ 1276.2	5532.5 $\pm$ 858.1
	Sb	354.3 $\pm$ 279.9	186.8 $\pm$ 97.2	290.2 $\pm$ 281.9	238.5 $\pm$ 182.2
	Zr	8714.6 $\pm$ 6776.4	6948.0 $\pm$ 3163.1	3947.8 $\pm$ 4890.8	5447.9 $\pm$ 3782.7
	Cu	490.5 $\pm$ 71.7	982.9 $\pm$ 63.1	996.8 $\pm$ 603.7	989.9 $\pm$ 350.6
	As	549.7 $\pm$ 213.1	772.6 $\pm$ 105.1	711.7 $\pm$ 297.3	742.1 $\pm$ 185.4

4.2. 대기부유물 시료채취 시기별 미량원소의 함량 변화

2007년에 채취한 대기부유물의 미량원소 함량을 시료채취 시기에 따라 도시한 결과, 대기부유물 중 미량원소 함량이 최대값을 보이는 시기는 각 미량원소별로 차이가 있는 것으로 나타났으나, 주로 5 (2007.3.12), 18 (2007.4.3), 23 (2007.4.8), 27 (2007.4.14), 29 (2007.4.18) 및 41 (2007.5.4) 등에서 미량원소 함량이 최대 함량을 보이고 있었다. 이들 중 5과 18번 시료는 황사 발생일 다음날이므로 황사의 영향을 받았다고 추정할 수 있다. 그러므로 황사 발생과 관련 없이 대기부유물에 함유된 미량원소의 함량이 크게 증가한 시기는 23, 27, 29 및 41 등 이었다.

대기부유물의 시료채취 시기에 따른 미량원소 함량을 검토한 결과, TSP와 PM_{10} 에서의 날짜별 함량변화가 서로 일치하고 있으며, TSP와 PM_{10} 의 각 미량원소 함량의 차이도 크지 않았고 시료채취시기에 따른 함량변화도 크지 않았다 (Fig. 2). 그러나 TSP와 PM_{10} 보다 $PM_{2.5}$ 에서의 각 미량원소의 함량이 월등하

게 높았으며, $PM_{2.5}$ 에서의 시료 채취시기에 따른 함량의 변화가 매우 뚜렷하였다. 이러한 결과는 대기부유물에서의 미량원소는 주로 입자 작은 $PM_{2.5}$ 에 주로 수반되어 있음을 지시한다.

4.3. 황사의 미량원소 농집 및 오염도 평가

4.3.1. 부화지수(Enrichment Factor)

황사에 함유된 미량원소의 함량을 황사 발원지 사막 토양의 미량원소 함량과 비교하여 각 미량원소의 부화지수를 계산한 결과를 Table 4에 정리하였다. Banwart and Malmstrom(2001)이 부화지수 값을 기준으로 오염정도를 분류한 것에 의하면, 황사에서 검출된 미량원소 중 부화지수(Enrichment factor) 값이 40이상으로 “extremely high enrichment”로 분류된 원소는 S, Cd 및 Mo의 세 원소이었다. 부화지수 값이 20-40으로 “very high enrichment”로 분류된 원소는 Pb와 Zn이며, 부화지수 값이 5-20으로 “significant enrichment”로 분류된 원소는 Cu, Zr, As 및 Sb 등 이었다. 부화지수 값이 2-5로 황사에서 “moderate enrichment”로

Table 4. Enrichment Factor in TSP, PM_{10} , $PM_{2.5}$ for Asian Dust and Non Asian Dust in spring 2007 at Daejeon

element	Asian Dust						Non Asian Dust					
	TSP		PM_{10}		$PM_{2.5}$		TSP		PM_{10}		$PM_{2.5}$	
	Mean	Stdev.	Mean	Stdev.	Mean	Stdev.	Mean	Stdev.	Mean	Stdev.	Mean	Stdev.
Cr	1.6	0.6	1.1	0.4	1.8	2	1.4	0.8	1.1	0.8	2.7	1.4
Cu	3.6	1.8	10.7	13	8.2	6.5	8.6	5.3	17	9.8	20.5	13.1
Pb	13.8	8.1	32.9	26.9	48.3	44.1	32.3	15.4	72.6	41.5	102	70.9
Zn	21	11	25.9	28.6	33.4	33.2	45	19.6	60.6	30.2	73.8	38.9
V	1	0.3	1.2	0.7	1.2	0.7	1.1	0.3	1.2	0.5	1.8	1.2
Zr	10	7.8	5.3	4.4	6.1	6	8.9	8.9	7.8	5.7	26.7	36.2
S	92.3	65.1	102.2	149.5	130.4	174.4	182.3	111.3	235	150	231	137
Sr	0.7	0.2	0.3	0.1	0.3	0.1	0.6	0.2	0.3	0.1	0.3	0.3
Ba	1	0.5	0.4	0.2	0.5	0.4	1.3	0.8	1	0.9	3.1	4.1
Li	3.7	2.1	1.1	1.1	1.1	0.8	3	2.6	2	1.6	10.7	13.2
As	2.5	1.3	10.3	8	14.1	10.5	3.8	2.4	38.4	100.2	26.4	20.8
Cd	37.4	22.2	48.7	58.5	76.8	83.5	102.2	58.3	152.5	85.7	205	124
Co	0.7	0.3	1.2	0.4	1.4	0.2	0.7	0.2	1.3	0.6	1.6	0.8
Ni	1.2	0.6	3.1	2	3.6	1.9	1.5	1	4.4	3.7	7	5.3
Mo	53.3	44.8	106	101.6	272.7	208.6	72.7	82	233.1	194.6	480	397
Sb	14.4	10.7	7.3	8.8	13.1	11.5	20.6	17.2	18.7	10.9	55.1	67
Cs	3.3	1.8	1.8	1.2	3.2	1.7	3.3	1.9	2.8	1.4	7.5	8.1
Rb	1.4	0.8	1.9	1.2	2.9	1.5	1.6	1	2.9	1.8	6.6	6.9
Sc	0.9	0.4	0.8	0.2	1.2	0.3	0.6	0.4	0.7	0.3	1.5	1.3
Th	1	0.4	0.2	0.3	0.2	0.2	0.9	0.6	0.5	0.3	0.6	0.3
U	2	1.2	1.5	-	0.2	0.2	2.5	2.3	2.4	2.3	2.9	2.5
Y	1.2	0.7	1.4	0.9	3	1.6	1.3	1.4	2.5	2	4.5	3.2

분류된 미량원소는 Cs, Rb, Ni 등 이었으며, 부화지수 값이 2 이하로 “depletion to minimal enrichment”로 분류된 미량원소는 Cr, Li, V, Co, U, Y, Sr, Ba, Sc 및 Th 등 이었다. 이로써 황사가 중국을 거쳐 국내에 유입되면서 이동경로 상 대기오염에 의한 부화지수가 높은 원소는 S, Cd, Mo, Pb, Zn, Cu, Zr, Sb 및 As 등인 것으로 확인되었으며, 기존의 연구결과와도 일치한다 (Lee *et al.*, 2002). 황사의 이동 경로 중 대기오염으로 인한 부화가 발생하지 않는 원소들은 “moderate enrichment”로 분류된 Cs, Rb, Ni 등과 “depletion to minimal enrichment”로 분류된 Cr, Li, V, Co, U, Y, Sr, Ba, Sc 및 Th 등 이었다 (Table 4).

S, Cd, Mo, Pb, Zn, Cu, Zr, Sb 및 As 등 대기오염에 의해 오염도가 증가되는 원소들은 황사의 입도가 작아질수록 부화지수 값이 크게 증가하는 경향이 관찰되었으며, 대기오염에 의한 영향을 받지 않고 사막토양의 기원에 의해 영향을 받는 원소들인 Cs, Rb, Ni, Cr, Li, V, Co, U, Y, Sr, Ba, Sc 및 Th 등은 입도가 큰 입자가 상대적으로 많은 TSP에서 부화지수 값이 큰 경향이 관찰된다. 황사에 대한 입도별 평균 부화지수 값을 내림차순으로 정리하면 다음과 같다 (Fig. 3).

- TSP: S(92.3) > Mo(53.3) > Cd(37.4) > Zn(21.0) > Sb(14.4) > Pb(13.8) > Zr(10.0) > Li(3.7) > Cu(3.6) > Cs(3.3) > As(2.5) > U(2.0) > Cr(1.6) > Rb(1.4) > Ni(1.2) = Y(1.2) > V(1.0) = Ba(1.0) = Th(1.0) > Sc(0.9) > Sr(0.7) = Co(0.7)

- PM₁₀: Mo(106.0) > S(102.2) > Cd(48.7) > Pb(32.9) > Zn(25.9) > Cu(10.7) > As(10.3) > Sb(7.3) > Zr(5.3) > Ni(3.1) > Rb(1.9) > Cs(1.8) > U(1.5) > Y(1.4) > V(1.2) = Co(1.2) > Cr(1.1) = Li(1.1) > Sc(0.8) > Ba(0.4) > Sr(0.3) > Th(0.2)

- PM_{2.5}: Mo(272.7) > S(130.4) > Cd(76.8) > Pb(48.3) > Zn(33.4) > As(14.1) > Sb(13.1) > Cu(8.2) > Zr(6.1) > Ni(3.6) > Cs(3.2) > Y(3.0) > Rb(2.9) > Cr(1.8) > Co(1.4) > V(1.2) = Sc(1.2) > Li(1.1) > Ba(0.5) > Sr(0.3) > Th(0.2) = U(0.2)

이번 연구에서 각 미량원소의 부화지수 값은 Zn, Mo, Pb, Cu, Ni 및 Cr의 경우 기존 Kim *et al.* (2002)의 연구결과와 비교할 때 낮은 부화지수 값을 보이고 있다. 이러한 결과는 부화지수 값을 계산할 때 보정하기 위한 기준값으로 이번 연구에서는 사막토양의 평균값을 사용한 반면에 Kim *et al.* (2002)에서는 지각의 평균함량을 사용하여 부화지수 값을 계산하였기 때문일 것으로 추정된다.

Fig. 3. Comparison of Enrichment factor of trace elements in TSP, PM₁₀, PM_{2.5} for Asian Dust in spring 2007 at Daejeon.

한편, 이러한 미량원소의 분류는 Table 4에서와 같이 황사와 대기부유물의 미량원소 함량을 단순 비교한 결과와도 완전하게 일치하였다. 부화지수 값을 기준으로 분류된 대기오염에 의해 부화가 발생하는 원소들 (S, Cd, Mo, Pb, Zn, Cu, Zr, Sb 및 As)은 모두 황사에서나 대기부유물에서나 함량의 차이가 크지 않았으나 (Zr를 제외하면, 황사에서 최소 1.2에서 최대 1.8 배 높음) (Fig. 3), 대기오염으로 부화가 발생하지 않는 Cs, Rb, Ni, Cr, Li, V, Co, U, Y, Sr, Ba, Sc 및 Th은 모두 황사에서 검출된 함량이 대기부유물에서 검출된 함량보다 최소 2.0에서 최대 4.2배 뚜렷하게 높은 것으로 나타났다 (Fig. 3). 이러한 결과는 평상시 대기부유물에서의 미량원소의 지구화학적 함량 특성과 달리, 황사에서는 Cs, Rb, Ni, Cr, Li, V, Co, U, Y,

Sr, Ba, Sc 및 Th의 함량이 뚜렷하게 높아지는 것이 특징이라고 할 수 있다. 이러한 원소들은 대기오염에 의한 것이 아니고 사막토양에 의한 영향을 받고 있기 때문이다. 즉 대기 중 부유물의 미량원소 함량 중 Cs, Rb, Ni, Cr, Li, V, Co, U, Y, Sr, Ba, Sc 및 Th의 함량이 증가하게 되면 황사가 발생한 것임을 지시하는 것으로 이들 미량원소들은 황사발생의 지시원소로 판단할 수 있다. 특히 황사 발생 시, 함량이 3배 이상 증가하면서 검출 함량이 비교적 높아 분석하기에 용이한 미량원소는 Sr, V, Cr 및 Li 등이었으며, 이들 원소들은 황사 발생을 판단하기 위한 지시원소로 사용하기에 적합하다.

대기부유물의 경우, Banwart and Malmstrom (2001)에 “extremely high enrichment”로 분류된 원소는 S, Cd, Mo, Pb 및 Zn 등이었으며, 부화지수가 “very high enrichment”로 분류된 원소는 As와 Sb이었다. 부화지수가 “significant enrichment”로 분류된 원소는 Cu와 Zr이었으며, “moderate enrichment”로 분류된 미량원소는 Li, Ni, Cs, Rb, U 및 Y, “depletion to minimal enrichment”로 분류된 미량원소는 Cr, V, Sr, Ba, Co, Sc 및 Th이었다 (Table 4). 대기부유물에서의 미량원소 함량을 사막토양의 미량원소 함량과 비교한 부화지수 값을 검토한 결과에서도 부화지수가 높은 원소와 부화지수가 낮은 원소의 구분은 황사의 경우와 동일한 결과를 보였다. 이러한 결과는 중국의 산업 활동으로 배출되는 미세먼지에 함유된 이들 원소들의 대기오염으로 인한 영향이 황사기간뿐만 아니라 평상시에도 우리나라에 까지 미치고 있음을 지시한다. 대기부유물에서의 S, Cd, Mo, Pb, Zn, Cu, Zr, Sb 및 As 등 원소들의 부화지수 값은 대기부유물의 입도가 작아질수록 증가하는 경향이 황사에서의 경향보다도 더 뚜렷하게 관찰되었다. 대기부유물에 대한 입도별 평균 부화지수 값을 내림차순으로 정리하면 다음과 같다 (Fig. 4).

- TSP: S(182.3) > Cd(102.2) > Mo(72.7) > Zn(45.0) > Pb(32.3) > Sb(20.6) > Zr(8.9) > Cu(8.6) > As(3.8) > Cs(3.3) > Li(3.0) > U(2.5) > Rb(1.5) = Ni(1.5) > Cr(1.4) > Y(1.3) = Ba(1.3) > V(1.1) > Th(0.9) > Co(0.7) > Sc(0.6) = Sr(0.6)

- PM₁₀: S(235.0) > Mo(233.1) > Cd(152.5) > Pb(72.6) > Zn(60.6) > As(38.4) > Sb(18.7) > Cu(17.0) > Zr(7.8) > Ni(4.4) > Rb(2.9) > Cs(2.8) > Y(2.5) > U(2.4) > Li(2.0) > Co(1.3) > V(1.2) > Cr(1.1) > Ba(1.0) > Sc(0.7) > Th(0.5) > Sr(0.3)

Fig. 4. Comparison of Enrichment factor of trace elements in TSP, PM₁₀, PM_{2.5} for Non Asian Dust in spring 2007 at Daejeon.

- PM_{2.5}: Mo(480.4) > S(231.2) > Cd(204.8) > Pb(101.5) > Zn(73.8) > Sb(55.1) > Zr(26.7) > As(26.4) > Cu(20.5) > Li(10.7) > Cs(7.5) > Ni(7.0) > Rb(6.6) > Y(4.5) > Ba(3.1) > U(2.9) > Cr(2.7) > V(1.8) > Co(1.6) > Sc(1.5) > Th(0.7) > Sr(0.3)

한편, 각 미량원소에 대해 황사기간과 비황사기간의 부화지수 값을 비교하면, 대기오염에 기인한 S, Cd, Mo, Pb, Zn, Cu, Zr, Sb 및 As 등의 미량원소들은 비황사기간에 비교하여 황사기간의 부화지수 값이 현저하게 감소하였으며, 사막토양 기원 Cs, Rb, Ni, Cr, Li, V, Co, U, Y, Sr, Ba, Sc 및 Th 등의 미량원소들은 부화지수 값이 거의 변화하지 않고 유사한 값을 보이고 있다.

4.3.2. 오염지수(Pollution index)

황사에서 함유된 미량원소의 함량을 황사 발원지 사막토양의 미량원소 함량과 비교하여 각 미량원소의 오염지수를 계산 한 결과를 Table 5에 정리하였다. 황사에서 평균 오염지수 값이 가장 높은 원소는 Mo로 TSP 257, PM₁₀ 244, PM_{2.5} 1847이었다 그다음은 S로 각각 639, 190, 764, Cd 227, 100, 461, Zn 140, 56, 215, Pb 93, 95, 312로 모두 평균 오염지수가 평균 100을 초과하는 원소이다. 이외에 평균 오염지수가 평균 20을 초과하는 원소로는 Sb (59, 17, 93), Zr (52, 14, 50), As (15, 27, 96), Cu (22, 40, 57)이었다. 이외 오염지수가 20이하인 원소는 Cs (20, 4.9, 26), Li (23, 3.3, 12), Ni (8.3, 10, 28), Rb (8.5, 4.8, 23), Y (7.7, 3.4, 24), Cr (11, 3.4, 13), Co (5.8, 3.8, 13), V (8.7, 3.3, 10), Sc (6.3, 2.4, 10), U (12, 5.0, 1.4), Ba (6.3, 1.3, 5.0), Sr (5.5, 1.1, 3.7), Th (7.4, 0.7, 2.3) 등 이었다.

대기부유물의 경우, 미량원소 평균 오염지수 값이 가장 높은 원소는 황사와 마찬가지로 Mo이었으며, 평균 오염지수 값이 평균 100을 초과하는 원소 (Mo, S,

Cd, Zn 및 Pb) 및 20 이상인 원소 (Sb, As, Cu, Zr) 또한 황사와 일치하였다. 그러나 미량원소의 평균 오염지수 값은 황사에 비교하여 대기부유물의 경우 다소 감소하는 경향을 보이고 있었다.

4.3.3. 오염부하지수(Pollution load index)

2007년도 발생한 8번의 황사 채취시기에 대한 TSP, PM₁₀ 및 PM_{2.5}의 오염부하지수 값을 검토한 결과, F-14(2007/3/28) 시료의 오염부하지수 값이 가장 높아 황토고원에서 발생하고 중국 동부지방의 연안지역으로 남하하고 남서해 또는 서해를 경유하여 우리나라의 서부 또는 남서부지방으로 유입되는 황사 (Type III)가 중급 속 및 미량원소의 오염도가 가장 높은 것으로 나타났다. 그 다음으로는 F-45(2007/05/25)와 F-46(2007/05/26) 시료의 오염부하지수 값이 높으며, 이 황사는 Type II로 내몽골 지역 사막에서 발생하여 황토고원을 거쳐 발해만을 경유하거나, 서해를 거쳐 국내 서해안 지역으로 유입된 것이다. 오염부하지수가 가장 낮은 황사는 Type I의 황사로, 고비 지역에서 발생하여 내몽골 지역 (주로 훈산타크 사지)을 지나 만주 지역(커얼

Table 5. Pollution Index (PI) in TSP, PM₁₀, PM_{2.5} for Asian Dust and Non Asian Dust in spring 2007 at Daejeon

element	Asian Dust						Non Asian Dust					
	TSP		PM ₁₀		PM _{2.5}		TSP		PM ₁₀		PM _{2.5}	
	Mean	Stdev.	Mean	Stdev.	Mean	Stdev.	Mean	Stdev.	Mean	Stdev.	Mean	Stdev.
Cr	11.2	5.6	3.4	1.5	13.6	7.4	3.6	3.5	1.5	0.9	8.3	5.8
Cu	22.7	9.2	40.5	74.5	57.6	27.6	18.6	15.3	22	16.7	60.9	37.8
Pb	93.1	47.6	95.6	105.1	312	109.6	70.5	37.6	91.7	62.4	269.1	167
Zn	141	67.4	56.5	31.7	215	115.3	97.8	45	70.8	18.4	218.8	62.6
V	8.7	6.5	3.3	1	10.2	4.5	2.6	1.3	1.5	0.6	5.6	2.5
Zr	52.6	29.4	14.2	12.5	50.6	38.4	20.6	27.8	11.3	10.6	59.3	55.3
S	639	360.3	190.1	141.3	765	484.2	367.6	192.8	259.3	81.4	681.6	315
Sr	5.5	3.9	1.1	0.5	3.7	1.6	1.6	1	0.5	0.4	2	2.9
Ba	6.3	2	1.3	0.9	5	1.6	3.1	2.8	1.5	2.2	6.9	6.3
Li	23.3	10.2	3.3	3.4	12	5	7.8	11.1	3.1	3.6	21.9	21.5
As	15.1	4.8	27.6	20.8	96.7	31.7	8.3	5.4	66.6	209.4	68.5	56.4
Cd	227	101.6	100.3	80.2	462	266.3	216.3	121.6	176	66.3	578.3	222
Co	5.8	3.6	3.8	1.8	13.5	6.1	1.7	0.7	1.6	0.7	5	2.4
Ni	8.3	4	10	10.6	28.9	12.8	3.2	1.7	5.2	3.4	17.9	10
Mo	258	171.2	244.7	208.2	1848	992.4	146	146.4	297.3	226.4	1313	976
Sb	69	32.9	17.2	23.7	93.2	71.5	45.9	51.1	23.2	18.3	122.5	103
Cs	20.8	7.1	4.9	2.7	26	9.6	7.6	5.9	3.6	1.8	18.6	11.3
Rb	8.5	2.5	4.8	2.5	23.1	7	3.5	2.9	3.8	2.5	16	10.9
Sc	6.3	3.3	2.4	1	10.9	4.5	1.5	1.2	1.1	0.7	4.1	2.1
Th	7.4	4.1	0.7	0.9	2.3	1.4	2	1.4	1	1.1	3.3	1.9
U	12.5	4.9	5	-	1.4	1.7	5.3	5.1	4.4	4.1	17.4	17.3
Y	7.7	2.8	3.4	0.9	24.2	7.8	2.7	2.6	3.4	2.5	13.2	10.7

친 사지)를 경유한 후, 북한을 거쳐 국내로 유입된 것이다 (Table 6).

대기부유물의 경우에는 18번의 시료 채취시기에서 9번의 시료에서 오염부하지수 값이 상대적으로 높았던 것으로 나타나 황사가 발생하지 않는 평상시에도 중국으로부터 유입되는 장거리 이동 대기부유물의 중금속 및 미량원소의 오염은 심각한 것으로 판단된다. 특히 이 중에서도 F-5(2007/3/12), F-23(2007/4/8), F-27(2007/4/14), F-29(2007/4/18) 및 F-50(2007/12/3)의 오염부하지수 값은 높은 것으로 나타났다.

황사와 대기부유물의 오염부하지수 값을 비교하면 대기부유물 보다는 황사의 오염부하지수 값이 현저히 높았으며, 특히 중국 동부지방의 연안지역으로 남하하

고 남서해 또는 서해를 경유하거나 발해만을 경유하여 우리나라로 유입된 황사에 중금속 및 미량원소의 오염이 상대적으로 현저하게 높음을 지시한다. 이는 평상시보다 황사에 중금속 및 미량원소를 함유하거나 흡착할 수 있는 광물이 상대적으로 많이 포함되어 있어 오염도가 더 증가된 것으로 해석될 수 있다.

이러한 것은 중국 및 일부 우리나라의 대기오염에 기인하여 황사시기와 비황사시기 모두 황사와 대기부유물의 중금속 등 미량원소들의 오염이 매우 심각한 수준인 것을 지시한다.

5. 결 론

2007년에 채취한 황사의 TSP, PM₁₀ 및 PM_{2.5} 시료에서의 평균 함량과 황사발원지 토양의 평균 함량과 비교 시, 황사에서 S는 평균 639배, Mo 257배, Cd 227배, Zn 140배, Pb 93배, Sb 69배, Zr 52배, Cu 22배, As 15배 증가하였다. 대기부유물에서도 유사한 결과를 보였으며, 이러한 것은 황사뿐만 아니라 평상시 대기부유물에서의 미량원소 함량은 중국으로부터 장거리 이동되는 대기부유물의 영향을 받고 있다는 것을 지시한다. 중국의 동부 및 남부연안 산업단지와 대도시를 통과하여 유입된 황사에서의 S, Cd, Zn, Pb, Cu, Mo 및 As 함량이 중국 동북부를 통과하고 북한을 경유하여 국내로 유입된 황사에서의 함량보다 높았으며, 이는 황사의 이동경로가 이들 미량원소 오염 여부 및 오염도를 결정하는데 중요한 역할을 하고 있음을 지시한다. 그러나 대기오염으로 부화가 발생하지 않는 Sr, V, Cr 및 Li 등은 황사 발생을 판단하기 위한 지시원소로 사용하기에 적합하다.

각 미량원소의 부화지수를 값을 기준으로 오염정도를 분류하면, 황사에서 “extremely high enrichment”로 분류된 원소는 S, Cd, Mo, “very high enrichment”로 분류된 원소는 Pb, Zn, “significant enrichment”로 분류된 원소는 Cu, Zr, As, Sb, “moderate enrichment”로 분류된 미량원소는 Cs, Rb, Ni, “depletion to minimal enrichment”로 분류된 미량원소는 Cr, Li, V, Co, U, Y, Sr, Ba, Sc, Th 등 이었다. 대기부유물의 경우, “extremely high enrichment”로 분류된 원소는 S, Cd, Mo, Pb, Zn, “very high enrichment”로 분류된 원소는 As, Sb, “significant enrichment”로 분류된 원소는 Cu, Zr, “moderate enrichment”로 분류된 미량원소는 Li, Ni, Cs, Rb, U, Y, “depletion to minimal enrichment”로 분류된

Table 6. Pollution Load Index (PLI) in TSP, PM₁₀, PM_{2.5} for Asian Dust and Non Asian Dust in spring 2007 at Daejeon

	Sample No. (Date)	PLI		
		TSP	PM10	PM2.5
Asian Dust	F-04 (03/06)	19.8	8.6	38.0
	F-13 (03/27)	12.7	7.3	34.9
	F-14 (03/28)	27.7	23.3	89.1
	F-15 (03/31)	-	5.2	26.4
	F-16 (04/01)	-	11.2	25.0
	F-17 (04/02)	14.2	4.8	42.7
	F-45 (05/25)	26.8	6.5	46.9
	F-46 (05/26)	32.6	7.6	56.5
	Mean	22.3	9.3	44.9
Non Asian Dust	F-01 (02/21)	8.9	5.7	25.7
	F-03 (02/27)	3.3	3.6	12.9
	F-05 (03/12)	31.6	14.8	67.1
	F-08 (03/21)	2.8	4.7	19.9
	F-11 (03/25)	3.2	3.4	13.4
	F-12 (03/26)	6.9	7.5	44.9
	F-18 (04/03)	7.2	8.4	22.8
	F-19 (04/04)	4.6	6.2	16.2
	F-22 (04/07)	-	2.7	18.3
	F-23 (04/08)	8.6	17.1	63.0
	F-27 (04/14)	16.5	13.4	75.9
	F-29 (04/18)	10.1	11.7	57.4
	F-34 (04/25)	9.1	6.5	22.4
	F-41 (05/04)	6.5	6.3	34.2
	F-42 (05/07)	10.3	8.5	35.1
	F-43 (05/08)	10.2	8.8	35.7
	F-44 (05/10)	9.4	9.3	37.9
	F-50 (12/03)	11.7	17.8	48.0
	Mean	9.5	8.7	36.2

미량원소는 Cr, V, Sr, Ba, Co, Sc 및 Th 이었다. 황사에서 오염이 심각한 원소는 S, Zn, Cu, Pb, As, Mo, Cd 등이며, 이들 원소들은 인간의 건강문제 뿐만 아니라, 장기간 토양과 수계환경에 퇴적될 경우 환경오염으로 인한 주변 생태계에 해로운 영향을 미치게 될 것이다. 대기부유물 보다는 황사의 오염부하지수 값이 현저히 높았으며, 특히 중국 동부지방의 연안 지역으로 남하하고 남서해 또는 서해를 경유하거나 발해만을 경유하여 우리나라로 유입된 황사에 중금속 및 미량원소의 오염이 상대적으로 현저하게 높음을 지시하였다. 부화지수와 오염부하지수는 황사 연구에서 각각 중금속 원소들의 오염도 평가 및 시료 채취시기별 상대적인 오염부하 정도를 평가하기에 유용한 방법이었다.

사 사

본 논문은 소방방재청 자연재해저감기술개발사업 “퇴적황사재해 피해평가 및 대응기술개발에 관한 연구 과제 (세부과제 “퇴적황사에 의한 지표지질환경 피해평가 및 대응기술 개발, NEMA-06-NH-08)”의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- Banwart, S.A. and Malmstrom, M.E. (2001) Hydrochemical modeling for preliminary assessment of minewater pollution, *J. Geochem. Explor.*, 74, p.73-97.
- Berg, T., Royset, O. and Steinners, E., (1994) Trace elements in atmospheric precipitations at Norwegian background stations (1989-1990) measured by ICP-MS, *Atmospheric Environment*, 28, p.3519-3536.
- Chester, R., Nimmo, M., Fones, G.R., Keyse, S. and Zhang, Z. (2000) Trace metals chemistry of particulates aerosols from the UK mainland coastal rim of the NE Irish Sea, *Atmospheric Environment*, 34, p.949-958.
- Choi, G.H., Kim, K.H., Kang, C.H. and Lee, J.H. (2003) The Influence of the Asian Dust on the Metallic Composition of Fine and Coarse Particle Fractions, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, v.19, n.1, p.45-56.
- Chun, Y.S., Kim, J.Y., Choi, J.C., Boo, K.O., Oh, S.N. and Lee, M.H. (2001) Characteristic number size distribution of aerosol during Asian dust period in Korea, *Atmospheric Environment*, 35, p.2715-2721.
- Chung, H.J. and Kim, J.H. (2004) A Study on the concentration of heavy metals in Asian dust at Daejeon Area, *J. Korean Society of Environmental Administration*, v.10, n.4, p.263-271.
- Daskalakis, K.D. and O'Connor, T.P. (1995) Normalization and elemental sediment contamination in the Coastal United States, *Environ. Sci. Tech.*, 29, p.470-477.
- David, M.T., Robert, J.F. and Douglas, L.W. (2001) April 1998 Asian dust event: A Southern California perspective, *Journal of Geophysical Research*, 106(D16), p.18371-18379.
- Draxler, R.R. and Rolph, G. (2003) HYSPLIT4 (HYbrid single-particle lagrangian integrated trajectory) Model. Air Resour. Lab, Natl. Oceanic and Atmos. Admin. Silver Spring, Md. (<http://www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html>).
- Faiz, Y., Tufail, M., Tayyeb Javed, M., Chaudhry, M.M. and Naila-Siddique (2009) Road dust pollution of Cd, Cu, Ni, Pb and Zn along Islamabad Expressway, Pakistan, *Microchemical Journal*, 92, p.186-192.
- Guo, Z.G., Feng, J.L., Fang, M., Chen, H.Y. and Lau, K.H. (2004) The elemental and organic characteristics of PM_{2.5} in Asian dust episodes in Qingdao, China, *Atmospheric Environment*, 38, p.909-919.
- Jeon, B.I., Hwang, Y.S., Lee, H.W., Yang, A.R., Kim, H.J., Seol, J.H., Kang, Y.J., Kim, T.H. and Jang, H.S. (2005), Characteristics of Metallic Elements Concentration of Fine Particles (PM₁₀, PM_{2.5}) at Busan in 2004, *Jour. Korean Earth Science Society*, v.26, n.6, p.573-583.
- Jeon, B.I. and Hwang, Y.S. (2010) Chemical Properties of the Metallic Elements and the Mass Concentration of PM₁₀ and PM_{2.5} Observed in Busan, Korea in Springtime of 2006-2008, *Jour. Korean Earth Science Society*, v.31, n.3, p.234-245.
- Joussaume, S. (1990) Three-dimensional simulations of the atmospheric cycle of desert dust particles using a general circulation model, *Journal of Geophysical Research*, 5(D2), p.1909-1941.
- Kai, K., Okada, Y., Uchino, O., Tabata, I., Nakamura, H., Takasugi, T. and Nikaidou, Y. (1988) Lidar observation and numerical simulation of a Kosa (Asian dust) over Tsukuba, Japan during the Spring of 1986, *J. Meteor. Soc. Japan*, 66, p.457-472.
- Kim, H.K., Jung, K.M., Kim, D.J. and Lee, J.T. (2002) Characteristics of Inorganic Components in Fine Particles Collected at Chuncheon during the Springtime Yellow Sand Occurrence Period in 2002, *J. Environ. Toxicol.*, v.17, n.4, p.333-339.
- Kim, K.H., Choi, G.H. and Kang, C.H. (2002) The Metallic Composition of PM_{2.5} and PM₁₀ in a Northeast Region of Seoul During the Spring 2001, *Jour. Korean Earth Science Society*, v.23, n.6, p.514-525.
- Kim, K.H., Kang, C.H., Lee, J.H., Choi, K.C. and Youn, Y.H. (2004) The Influence of the Asian Dust on the Springtime Distribution of Airborne Lead, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, v.20, n.6, p.833-838.
- Kim, M.Y., Cho, S.J., Kim, K.R. and Lee, M.H. (2003) The Behaviour of Dust Concentrations During Sand Storm in Seoul Area, *Jour. Korean Earth Science Society*, v.24, n.4, p.315-324.
- Lee, P.K., Youm, S.J. and An, G.O. (2011) Geochemical Characteristics of Soils in Major Source Area of Asian Dust, *Korean Society of Economic and Environmental Geology*, v.45, n.1, p.9-21.
- Lee, Y.K., Kim, J.C., Choi, S.S., Im, H.B., Choi, Y.H. and Lee, S.M. (2002) A Study on the Concentration Dis-

- tribution Characteristics of Air Pollutants by Yellow Sand Phenomenon, Korean J. Sanitation, v.17, n.2, p.71-78.
- Lin, T.-H. (2001) Long-range transport of yellow sand to Taiwan in spring 2000 observed evidence and simulation, Atmospheric Environment, 35, p.5873-5882.
- Mckendry, I.G., Hacker, J.P., Stull, R., Sakiyama, S., Mignacca, D. and Reid, K. (2001) Long-range transport of Asian dust to the Lower Fraser Valley, British Columbia, Canada, Journal of Geophysical Research, 104(D15), p.18521-18533.
- Rashed, M.N. (2010) Monitoring of contaminated toxic and heavy metals, from mine tailings through age accumulation, in soil and some wild plants at Southeast Egypt, Journal of Hazardous Materials, 178, p.739-746.
- Rubio, B., Nombela, M.A. and Vilas, F. (2000) Geochemistry of major and trace elements in sediments of the Ria de Vigo (NW Spain): an assessment of metal pollution, Marine Polluti. Bull. 11, p.968-980.
- 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, n.1, p.119-129.
- Tessier, A., Campbell, P.G.C. and Bisson, M. (1979) Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metal. Anal. Chem., v.51, p.844-850.

2011년 7월 27일 원고접수, 2012년 6월 8일 게재승인