

《原著》

## 2008년 대전지역에서 발생한 황사의 중금속 오염도

이평구<sup>1\*</sup> · 배법근<sup>2</sup>

<sup>1</sup>한국지질자원연구원 지구환경연구본부

<sup>2</sup>대전대학교 지구시스템공학과

## Pollution Level of Heavy Metals of Asian Dust in Daejeon Area, 2008

Pyeong-Koo Lee<sup>1\*</sup> · Beob-Geun Bae<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Geologic Environment Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

<sup>2</sup>Department of Geosystem Engineering, Daejeon University

### ABSTRACT

The aims of this study were to determine concentrations of selected metals in Asian and non-Asian dust collected in Daejeon, Korea between February 2008 and December 2008 and to estimate the pollution level. The geochemical analyses of Asian dust (AD) and Non Asian dust (NAD) show that the mean concentrations of As, Cd, Cu, Pb, Zn, Zr, Sb, Mo and S reached levels up to 16, 209, 31, 43, 81, 28, 31, 122 and 302 times higher, respectively, than those in uncontaminated Chinese desert soils. These results indicate that both AD and NAD serve as an atmospheric repository for trace and heavy-metal accumulation. The the enrichment factor (EF) and pollution index (PI) show that AD and NAD were severely contaminated by S, Mo, Zr, Cd, Pb, Zn, Sb, Cu, and As. All indices for these metals showed either strong or notably high level of pollution relative to Chinese desert soil, principally due to the severe atmospheric pollution derived from anthropogenic activities in heavily industrial Chinese cities. Therefore, Mo, Cd, Zr, As, Cu, Sb, Pb, and Zn are the ones most strongly affected by anthropogenic inputs such as airborne pollutants.

**Key works :** Asian dust, Trace element, Enrichment factor, Pollution index, Pollution level

### 1. 서 언

최근 중국 동부 및 남부지역의 산업 활동에 따른 화석 연료 사용의 급격한 증가로 인하여, 인위적인 대기 오염 물질의 배출이 크게 증가하고 있으며, 대기 환경이 날로 악화되고 있는 실정이다(Youngming et al., 2006; Tanner et al., 2008; Zheng and Zhang, 2008; Wei and Yang, 2010; Cao et al., 2011; Wang et al., 2012). 이렇게 배출되는 대기오염물질은 국지적인 규모의 대기 환경 오염문제 뿐만 아니라, 편서풍을 따라 상당 수준 인접국가로 이송되기 때문에 황사 발원지 주변 지역인 한국과 일본 뿐만 아니라 북태평양 및 북미 지역까지 이동되어 환경오염 문제를 발생시키는 것으로 알려져 있다(Chun et al., 2001; David et al., 2001; Lin, 2001; MacKendry

et al., 2001).

지금까지의 황사의 화학적 성분 특성연구는 황사의 질량농도, 대기환경 측면에서의 황사의 화학적 성분 농도특성, 황사 이동경로 및 비황사기간과의 화학적 특성 비교 등에 관한 연구가 주로 수행되어 왔다(Kim et al., 2002a; Kim et al., 2002b; 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 토양지구화학적 특성에 관한 연구는 지금까지 수행된 사례가 거의 없다. Lee et al.(2012a)과 Lee et al.(2013)의 연구결과에 의하면 2007년에 채취한 황사의 TSP, PM<sub>10</sub> 및 PM<sub>2.5</sub> 시료에서의 평균 함량과 황사발원지 토양의 평균 함량과 비교 시, S는 평균 639배, Mo 257배, Cd 227배, Zn 140배, Pb 93배, Sb 69배,

\*Corresponding author : pkleee@kigam.re.kr

Received : 2013. 8. 8 Reviewed : 2013. 12. 25 Accepted : 2013. 12. 25

Discussion until : 2014. 4. 30 까지

Zr 52배, Cu 22배, As 15배 증가하였고 대기부유물에서도 유사한 결과를 보였다고 보고한 바 있다. 또한, 황사뿐만 아니라 평상시 대기부유물에서의 미량원소 함량은 중국으로부터 장거리 이동되는 대기부유물의 영향을 받고 있다고 하였으며 이들 원소들은 인간의 건강문제 뿐만이 아니라, 장기간 토양과 수계환경에 퇴적될 경우 환경오염으로 인한 주변 생태계에 해로운 영향을 미치게 될 것이라고 하였다(Lee et al., 2013). 이들의 연구에 의하면 중국의 대기오염에 기인하는 원소인 S, Cd, Mo, Zn, Pb, Sb, Cu 및 Zr 함량은 황사와 대기부유물에서 차이를 보이지 않으나, 대기오염에 기인하지 않는 미량원소로 규명된 Li, Cs, Co, U, Cr, Ni, Rb, V, Th, Y, Sr 및 Sc 등은 황사에서 2-4.2배 높아지는 것으로 보고하였다. 또한, 미량원소의 함량은 황사의 이동경로에 따라 중국의 대도시 및 산업단지를 경유하여 국내 유입된 황사가, 북한을 경유하여 국내에 도달한 황사에 비해서, S, Cd, Zn, Pb, Cu, Mo 및 As 함량이 높게 나타나며, 황사의 이동경로가 이들 미량원소 함량 및 오염도를 결정하는데 중요한 역할을 하는 것으로 보고한 바 있다(Lee et al., 2012a). 한편 황사 및 대기부유물 내 미량원소의 부화지수(Enrichment factor)를 기준으로 오염도를 분류한 결과, 미량원소 22개 중에서도 S, Zn, Cu, Pb, As, Mo, Cd의 오염도가 매우 심각하였으며, Pb 안정동위원소 분석결과 중국 동북부 및 서안 일대의 산업단지 및 대도시지역의 대기오염이 주요 오염원이라고 밝힌 바 있다(Lee et al., 2012a; Lee et al., 2013).

이번 연구에서는 2008년에 채집한 황사 및 대기부유물을 대상으로 2007년과 동일한 방법으로 미량원소의 지구화학적 거동 특성 규명 및 정량적 오염정도를 평가하였으며, 2년 연구결과를 종합하여 비교평가 하였다.

## 2. 시료채취 및 분석

### 2.1. 황사 및 대기부유물 시료 채취

대기 중 황사 및 대기부유물 시료의 채취는 대전시 유성구 가정동 한국지질자원연구원 제2연구동(3층 건물)의 옥상에서 실시하였으며, 일본 시바타(SIBATA)사의 대용량 공기채집기(High Volume Air Sampler)를 이용하였다. 시료의 채취는 크게 황사 발생 기간(기상청에서 발령하는 황사주의보/경보 기간) 및 비황사 기간으로 구분하였으며, 시료채취 기간 및 채취 방법은 Lee et al.(2012a)에 기재된 바와 동일하다. 여기서 황사는 황사 기간에 채취한 대기 중 미세먼지이며, 대기부유물은 비황사 기간에 채취한

것이다. 채취 후의 필터 무게에서 채취 전의 필터 무게를 빼서, 미세먼지의 무게를 구하였다. 석영필터는 무게를 칭량하기에 다소 크기 때문에, 시료 채취 이전에 필터를 4등분하여 각각의 무게를 칭량하도록 하였다. 황사시료는 모두 7회 채취되었으며, 대기부유물은 27회 채취되었고 황사 및 대기부유물의 입도별(TSP, PM<sub>10</sub> 및 PM<sub>2.5</sub>) 질량농도를 Table 1에 정리하였다.

### 2.2. 2008년도 황사발생 현황

2008년 전국적인 국내 황사 발생일은 평균 6일이었으며, 백령도에서 최대 13일로 나타났다. 기상청에서 발령한 2008년 대전지역의 황사발생일은 총 7일(6회)이며, 황사 발생 일자는 2월 12일, 2월 29일, 3월 2일, 3월 3일, 3월 16일, 5월 30일 및 5월 31일이다. 2008년도에 국내 황사 기간 중에서, 기상청에서 발표한 가장 높은 PM<sub>10</sub> 평균질량농도는 대구에서의 404 µg/m<sup>3</sup>(3월 2일)이었으며, 연구지역인 대전에서는 234 µg/m<sup>3</sup>(PM<sub>10</sub>)이었다(5월 30일).

### 2.3. 화학분석

채취된 황사 7개 시료와 대기부유물 28개 시료를 대상으로 화학분석을 수행하였다. 화학분석 방법은 각 시료의 총 농도를 분석하기 위해 완전분해 방법을 수행하였다. 분석하고자 하는 시료를 정확하게 무게를 측정하여 테플론 비이커에 넣고, 40% 불산(HF) 10 mL와 70% 과염소산(HClO<sub>4</sub>) 2 mL를 부은 후 잘 혼합한다. 시료와 시약이 잘 혼합된 테플론 비이커를 110°C로 조정된 가열판에 올려 놓고 가열하여 완전하게 증발시킨다. 이후 불산 10 mL와 과염소산 1 mL를 부은 후 잘 혼합한 후 110°C에서 완전하게 증발할 때까지 가열한다. 마지막으로 과염소산 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. 모든 분석 과정에서 사용한 불산, 과염소산 및 염산은 Merck사의 analytical grade(Suprapur)를 사용하였다.

### 2.4. 기기분석

화학분석은 한국기초과학지원연구원에서 수행하였으며, Fe, Mn, Ca, Sr, S 및 Zn은 PerkinElmer 사의 ICP-AES(Model: OPTIMA 4300 DV)를 이용하여 분석하였으며, 분석조건은 다음과 같다: RF Frequency, 40.68 MHz;

**Table 1.** Mass concentration in TSP, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> in spring 2008 at Daejeon

No	Date	Mass (g)			Flow (1000 L)			Mass Conc. (μg/m <sup>3</sup> )		
		TSP	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>	TSP	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>	TSP	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>
<b>59</b>	<b>2008.2.12</b>	<b>0.1137</b>	<b>0.0743</b>	<b>0.0151</b>	<b>1439.9</b>	<b>1439.9</b>	<b>815</b>	<b>79</b>	<b>51.6</b>	<b>18.5</b>
61	2008.2.27	0.0924	0.0610	0.0123	1439.9	1440.0	815	64.2	42.4	15.1
<b>63</b>	<b>2008.2.29</b>	<b>0.0903</b>	<b>0.0646</b>	<b>0.0013</b>	<b>1246.3</b>	<b>1147.9</b>	<b>684.4</b>	<b>72.5</b>	<b>56.3</b>	<b>2</b>
<b>65</b>	<b>2008.3.02</b>	<b>0.2994</b>	<b>0.1253</b>	<b>0.0157</b>	<b>1271.5</b>	<b>1272.1</b>	<b>719.7</b>	<b>235.5</b>	<b>98.5</b>	<b>21.9</b>
<b>66</b>	<b>2008.3.03</b>	<b>0.0590</b>	<b>0.0404</b>	<b>0.0098</b>	<b>384.5</b>	<b>385.2</b>	<b>217.7</b>	<b>153.4</b>	<b>104.9</b>	<b>45</b>
71	2008.3.08	0.0823	0.0589	0.0105	1421.4	1421.6	804.5	57.9	41.4	13.1
73	2008.3.10	0.0988	0.0691	0.0119	1406.0	1405.4	795.5	70.2	49.2	15
76	2008.3.13	0.0683	0.0569	0.0100	474.9	474.7	268.8	143.8	119.9	37.2
<b>79</b>	<b>2008.3.16</b>	<b>0.3557</b>	<b>0.2492</b>	<b>0.0356</b>	<b>1403.9</b>	<b>1405.0</b>	<b>795.2</b>	<b>253.4</b>	<b>177.4</b>	<b>44.7</b>
81	2008.3.18	0.1468	0.0971	0.0190	1439.9	1439.9	815	102	67.4	23.3
94	2008.4.03	0.1007	0.0655	0.0139	1415.3	1416.3	801.3	71.2	46.2	17.3
95	2008.4.04	0.1264	0.0822	0.0145	1419.5	1413.6	803.3	89	58.1	18
100	2008.4.11	0.1401	0.1037	0.0202	1388.9	1387.9	785.9	100.9	74.7	25.6
106	2008.4.18	0.1367	0.0840	0.0168	1439.9	1439.9	815	94.9	58.3	20.6
107	2008.4.19	0.1419	0.1019	0.0212	1405.2	1404.6	795.2	101	72.5	26.7
114	2008.4.28	0.1627	0.1070	0.0193	1433.3	1430.4	811.2	113.5	74.8	23.8
115	2008.4.29	0.1850	0.1179	0.0208	1420.3	1420.9	804.5	130.3	83	25.9
117	2008.5.01	0.2039	0.1355	0.0220	1411.4	1410.1	798.5	144.5	96.1	27.5
118	2008.5.02	0.2234	0.1476	0.0039	1439.9	1439.9	815	155.1	102.5	4.8
119	2008.5.03	0.2175	0.1118	0.0283	1390.7	1390.9	787.2	156.4	80.4	35.9
126	2008.5.20	0.0909	0.0641	0.0133	1436.6	1437.1	813.2	63.3	44.6	16.4
<b>130</b>	<b>2008.5.30</b>	<b>0.5383</b>	<b>0.3373</b>	<b>0.0302</b>	<b>1439.9</b>	<b>1439.9</b>	<b>815</b>	<b>373.8</b>	<b>234.3</b>	<b>37.1</b>
<b>131</b>	<b>2008.5.31</b>	<b>0.1155</b>	<b>0.0717</b>	<b>0.0128</b>	<b>1340.1</b>	<b>1339.0</b>	<b>758</b>	<b>86.2</b>	<b>53.5</b>	<b>17</b>
132	2008.6.09	0.0755	0.0474	0.0115	1437.5	1438.1	813.9	52.5	33	14.2
133	2008.6.11	0.0500	0.0334	0.0058	1437.1	1434.7	813.4	34.8	23.3	7.1
136	2008.7.07	0.0526	0.0415	0.0087	1384.0	1383.5	783.2	38	30	11.1
139	2008.7.17	0.0440	0.0345	0.0043	1429.3	1428.2	808.7	30.8	24.2	5.4
140	2008.8.06	0.0553	0.0442	0.0069	1439.9	1439.9	815	38.4	30.7	8.4
141	2008.8.20	0.0183	0.0144	0.0026	408.1	407.1	230.7	44.8	35.3	11.1
142	2008.8.25	0.0277	0.0206	0.0027	1439.9	1439.9	815	19.2	14.3	3.3
143	2008.8.26	0.0299	0.0242	0.0050	1364.2	1363.2	771.8	21.9	17.8	6.5
147	2008.9.18	0.0585	0.0435	0.0082	1439.9	1439.9	815	40.6	30.2	10.1
152	2008.10.24-25 10.27-29	0.1445	0.1145	0.0136	4319.7	4319.7	2445	33.5	26.5	5.6
154	2008.11.7	0.1193	0.0915	0.0155	1439.9	1439.9	815	82.9	63.5	19
	Mean	0.1314	0.0871	0.0137	1408.2	1405	796.4	98.3	65.6	18.6
	Max	0.5383	0.3373	0.0356	4319.7	4319.7	2445	373.8	234.3	45
	Min	0.0183	0.0144	0.0013	384.5	385.2	217.7	19.2	14.3	2
	STD	0.1025	0.0627	0.0079	580.7	581.7	328.9	73	44.8	11.3

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 이용하였으며, 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 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 함량을 의미한다. 부화지수 값을 기준으로 오염정도 분류는 Banwart and Malmstrom(2001)에 따랐다. 사막토양과 화학성분의 차이가 유의한 지각의 평균 함량 대신에 사막토양을 기준으로 한 것은 황사의 근원물질인 사막토양과 중국 및 우리나라의 대기오염에 의한 부화정도를 정량적으로 판단하기 위한 것이다. 부화지수 계산 시, Fe 함량을 기준으로 계산 한 것은 비교 대상인 사막토양에서

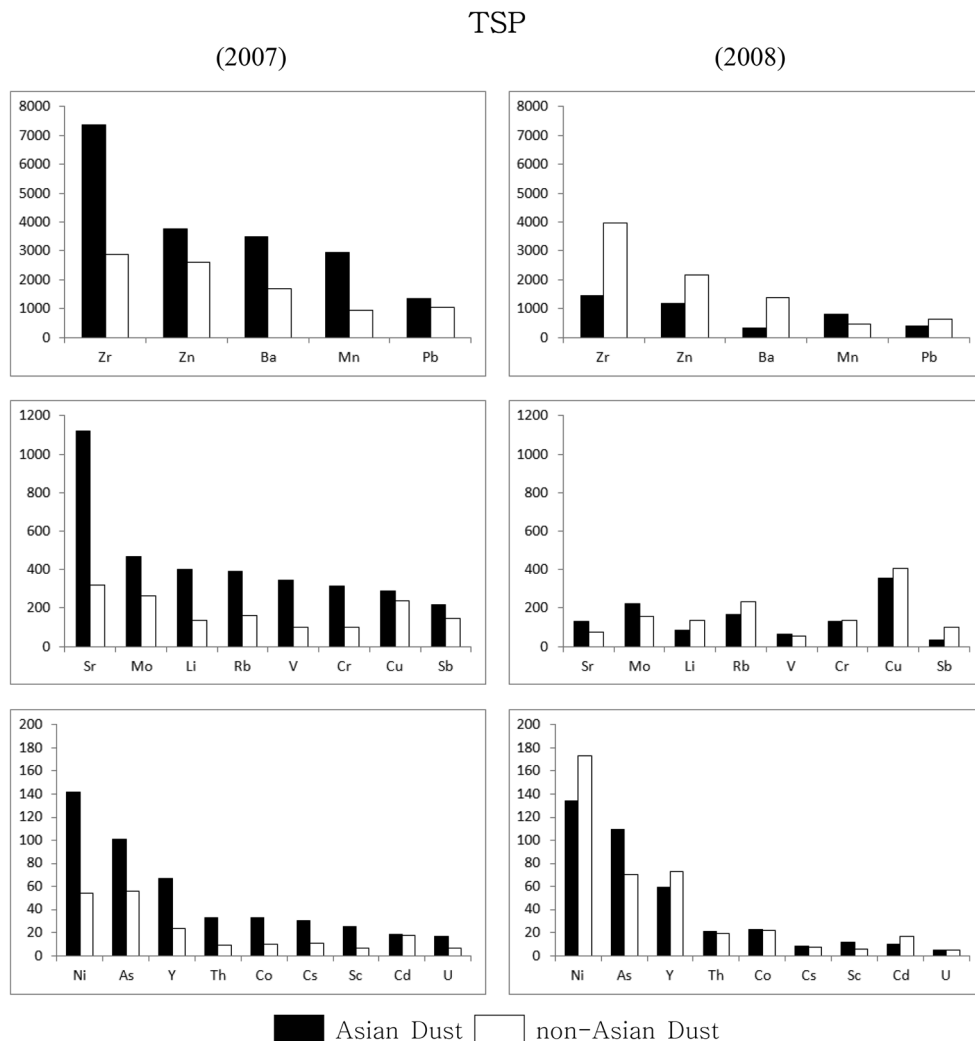


Fig. 1. Comparison of trace element concentrations in Asian Dust and Non Asian Dust between 2007 and 2008 ( $\mu\text{g/g}$ ).

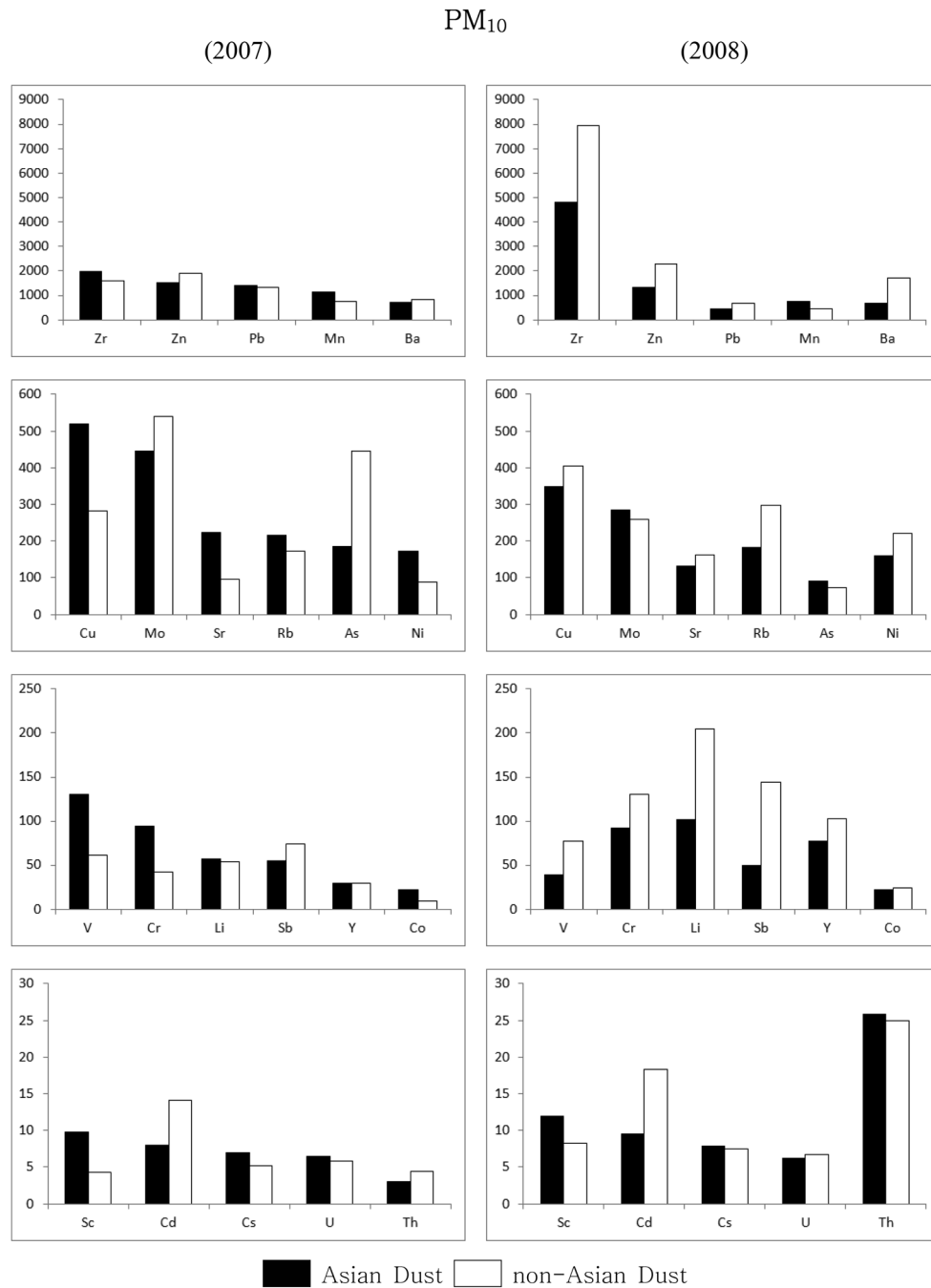


Fig. 1. (continued).

의 미량원소 함량과 Fe 함량과의 상관관계가 매우 높았기 때문이다(Lee et al., 2012b).

#### 2.5.2. 오염지수(Pollution index, PI)

Faiz et al.(2009)에서 오염지수(pollution index) 계산은 다음과 같다.

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

여기서  $[C]_{sample}$ 는 황사 및 대기부유물의 각 미량원소의 함량,  $[C]_{background\ soil}$ 은 황사 발원지 사막토양에서 각 미량원소의 평균 함량을 의미한다. 대기부유물의 오염지수는 절대값을 의미한다고 보기 어려우며 같은 기간에 유입된

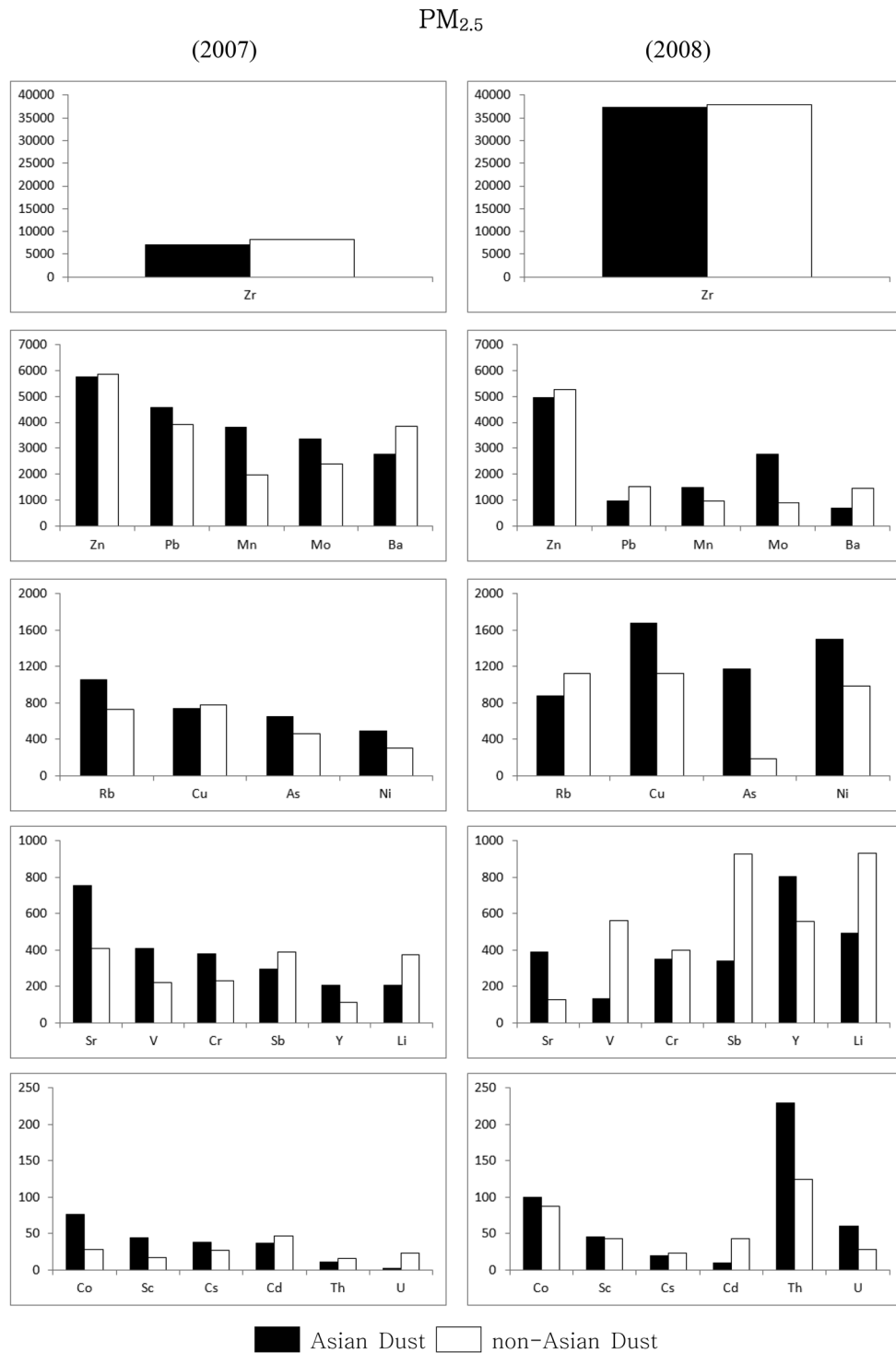


Fig. 1. (continued).

황사의 오염지수와 비교하기 위한 것이다.

### 2.5.3. 오염부하지수(Pollution load index, PLI)

오염부하지수(Pollution load index)는 다음과 같이 정의

되며,  $PI_i$ 는 각 원소의 오염지수(pollution index) 값을 의미한다(Rashed, 2010).

$$PLI = (PI_1 \times PI_2 \times PI_3 \times \dots \times PI_n)^{1/n} \quad (3)$$

### 3. 결 과

#### 3.1. 채취된 황사 및 대기부유물의 질량농도

2008년도에 채취한 미세먼지에서 황사발생 기간 중의 TSP(Total suspended particulates) 평균 질량농도는  $179.1 \pm 113.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 2007년도와 유사한 값을 보이고 있으나 최대 질량농도는  $373.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 2007년에 비교하여 현저하게 낮았으며, 이는 2008년에 심각한 황사 발생은 없었던 것을 의미한다(Table 1). 비황사 기간 미세먼지의 TSP 농도는  $19.2\text{--}156.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 범위를 보이며, 평균값은 약  $78.2 \pm 41.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$  정도이다. 4월말에서 5월초 비황사 기간 중에는 집중적으로 TSP의 질량농도가  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 초과하였다.  $\text{PM}_{10}$ 과  $\text{PM}_{2.5}$ 의 경우에는 황사 기간에 평균 질량농도가 각각  $110.9 \pm 70.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$  및  $26.6 \pm 16.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  이었고 비황사 기간 중에는 각각  $54.2 \pm 27.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  및  $16.6 \pm 9.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다(Table 1). 이러한 값들은 모두 2007년도 각각의 질량농도 값보다 낮은 값을 보였다(Lee et al., 2012a).

#### 3.2. 황사의 미량원소 함량

Zr의 경우(TSP  $1,430 \pm 1,070 \mu\text{g}/\text{g}$ ,  $\text{PM}_{10}$   $4,820 \pm 3,470$

$\mu\text{g}/\text{g}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$   $37,390 \pm 30,270 \mu\text{g}/\text{g}$ ), TSP에서의 함량은 2007년도(Lee et al., 2012a)에 비교하여 감소하였지만  $\text{PM}_{10}$  및  $\text{PM}_{2.5}$  각각 2.4 및 5.3배 증가하였다. Zn(평균  $1,180 \pm 600 \mu\text{g}/\text{g}$ ,  $1,340 \pm 812 \mu\text{g}/\text{g}$ ,  $4,960 \pm 6,800 \mu\text{g}/\text{g}$ )은 2007년도에 비교하여 TSP에서의 함량이 현저하게 감소하였지만  $\text{PM}_{10}$  및  $\text{PM}_{2.5}$ 에서는 유사한 함량을 보이고 있다(Fig. 1). Cu( $356 \pm 336 \mu\text{g}/\text{g}$ ,  $348 \pm 301 \mu\text{g}/\text{g}$ ,  $1,680 \pm 2,070 \mu\text{g}/\text{g}$ ), As( $109 \pm 59.7 \mu\text{g}/\text{g}$ ,  $89.8 \pm 63.2 \mu\text{g}/\text{g}$ ,  $1,170 \pm 1,670 \mu\text{g}/\text{g}$ ) 및 Ni( $134 \pm 49.7 \mu\text{g}/\text{g}$ ,  $159 \pm 57.0 \mu\text{g}/\text{g}$ ,  $1,510 \pm 2,130 \mu\text{g}/\text{g}$ )은 2007년도 측정값과 비교하면 TSP에서는 유사한 함량을 보이는 반면에,  $\text{PM}_{10}$ 에서는 감소하는 경향을 보였고  $\text{PM}_{2.5}$ 에서는 모두 증가하는 경향을 보였다. Sb는 2007년에 비교하면 TSP 입도에서는 1/5 수준으로 감소하였지만  $\text{PM}_{10}$ 과  $\text{PM}_{2.5}$  입도에서는 약간 증가하는 경향을 보였다. Mo( $222 \pm 237 \mu\text{g}/\text{g}$ ,  $284 \pm 164 \mu\text{g}/\text{g}$ ,  $2,790 \pm 3,320 \mu\text{g}/\text{g}$ ), Pb( $413 \pm 180 \mu\text{g}/\text{g}$ ,  $455 \pm 176 \mu\text{g}/\text{g}$ ,  $991 \pm 537 \mu\text{g}/\text{g}$ ), Cd( $9.7 \pm 5.7 \mu\text{g}/\text{g}$ ,  $9.6 \pm 6.2 \mu\text{g}/\text{g}$ ,  $10.0 \pm 8.3 \mu\text{g}/\text{g}$ )는 2007년도에 비교하면 크게 감소하였다(Fig. 1). 한편, S( $30,200 \pm 15,400 \mu\text{g}/\text{g}$ ,  $30,100 \pm 13,900 \mu\text{g}/\text{g}$ ,  $69,400 \pm 45,200 \mu\text{g}/\text{g}$ )는 2007년 측정된 값보다 TSP,  $\text{PM}_{10}$  및  $\text{PM}_{2.5}$  모두 크게 감소하였다.

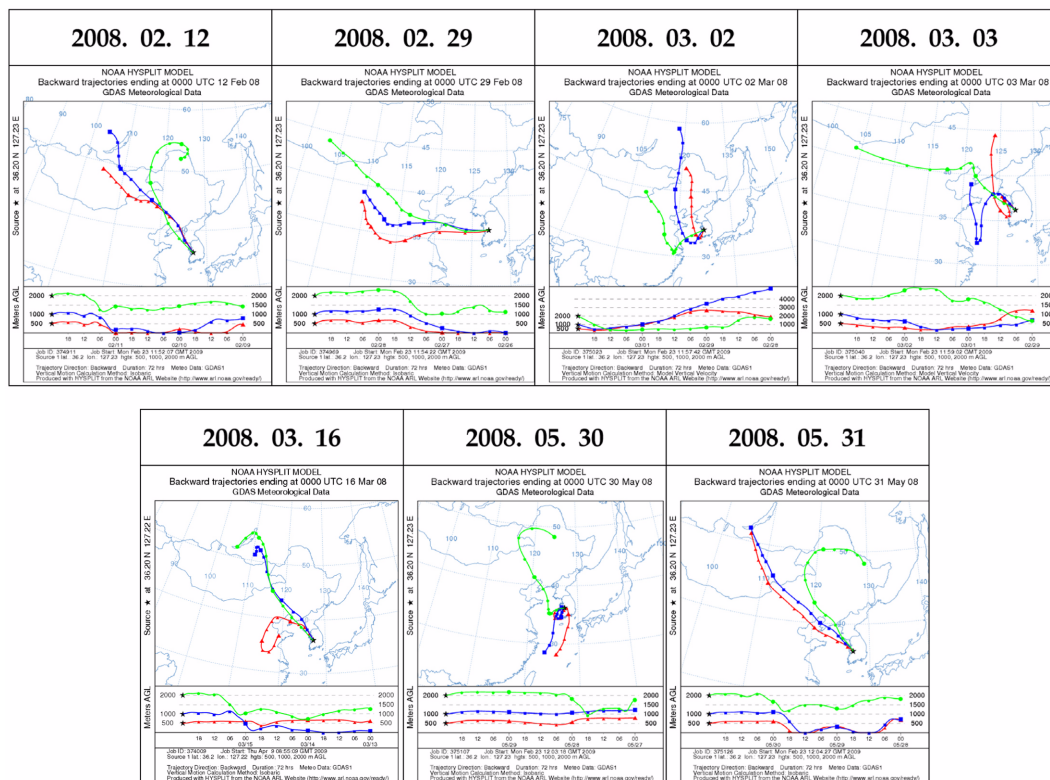


Fig. 2. Three-days back trajectories of air-mass during Asian Dust in 2007 using HYSPLIT-4 (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory-Version 4) model, developed by NOAA Air Resources Laboratory (Draxler and Rolph, 2003).

이러한 이유는 황사가 발생하여 우리나라로 유입된 이 동경로와 황사의 질량농도 차이에 기인한 것으로 추정된다. 2월 12일의 황사는 만주지방에서 발생하여 북한을 지나면서 국내로 유입되었으며, 전국적으로 약한 황사현상이 나타났다. 2월 29일의 황사는 내몽골에서 발생하여 북서풍을 타고 느리게 남하하였으며, 충청과 호남지방을 중심으로 약한 황사현상이 관측되었다. 3월 2-3일의 황사는 고비사막 남쪽에서 발생하여 황토고원과 발해만 부근을 지나, 호남지방에서부터 나타나기 시작하였다. 만주 지역에서 발생한 황사가 북한지역에서 동시에 나타났으나, 더 이상 남쪽으로 내려오지 않고 소멸되었다. 3월 16일의 황사는 몽골 부근에서 발원하였으며, 중부와 호남 내륙지방에는 약한 황사현상이 나타났다. 5월 30-31일의 황사는 내몽골 및 고비사막에서 발원하였으며, 발해만과 산둥반도, 북한지방을 통과하여 국내로 유입되어, 동해안 일부를 제외한 전국에 황사현상이 나타났다(Fig. 2).

### 3.3. 대기부유물의 미량원소 함량

S(평균 TSP 71,600 ± 40,600 µg/g, PM<sub>10</sub> 85,300 ±

43,600 µg/g, PM<sub>2.5</sub> 184,600 ± 94,300 µg/g), Zn(평균 2,180 ± 833 µg/g, 2,280 ± 837 µg/g, 5,260 ± 3,640 µg/g) 및 Cd(평균 16.8 ± 10.2 µg/g, 18.4 ± 11.0 µg/g 및 43.1 ± 29.6 µg/g)은 2007년 측정값(Lee et al., 2012a)과 TSP, PM<sub>10</sub> 및 PM<sub>2.5</sub> 모두 큰 차이가 없으며, 이런 결과는 평상시 대기부유물에 함유된 이들 원소들의 함량의 변화는 년도에 따른 차이가 없을 것임을 지시한다. Zr(평균 3,980 ± 3,450 µg/g, 7,930 ± 6,070 µg/g, 37,830 ± 36,270 µg/g)는 2007년도 측정값과 비교할 때 각각 1.4, 5.0 및 4.6배 증가한 값으로 입도가 세립질 일수록 함량이 더 크게 증가하였다. Cu(평균 407 ± 141 µg/g, 404 ± 147 µg/g, 1,120 ± 578 µg/g)와 Ni(평균 173 ± 72.4 µg/g, 221 ± 104 µg/g, 984 ± 526 µg/g)도 2007년도 측정값과 비교할 때 각각 1.4-1.7 및 2.5-3.2배 증가한 값이다(Fig. 1). 그러나 Pb(평균 633 ± 305 µg/g, 675 ± 269 µg/g, 1,540 ± 837 µg/g)와 Mo(평균 157 ± 102 µg/g, 259 ± 147 µg/g, 908 ± 632 µg/g)는 2007년도 측정값과 비교할 때 두 원소 모두 2/5~3/5 수준으로 감소한 값이다. Sb(100 ± 118 µg/g, 145 ± 180 µg/g 및 926 ± 241 µg/g)는 TSP는 약간 감소한 반면에 PM<sub>10</sub>과

**Table 2.** Elemental concentration (µg/g) in TSP, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> for Asian Dust and non-Asian Dust in spring 2008 at Daejeon

Element	Asian Dust						non-Asian Dust					
	TSP		PM <sub>10</sub>		PM <sub>2.5</sub>		TSP		PM <sub>10</sub>		PM <sub>2.5</sub>	
	Mean	Stdev.	Mean	Stdev.	Mean	Stdev.	Mean	Stdev.	Mean	Stdev.	Mean	Stdev.
Cr	129	77.4	92.4	66.0	352	224	136	102	130	103	399	515
Cu	356	336	348	301	1680	2070	407	141	404	147	1120	578
Pb	413	180	455	176	991	537	633	305	675	269	1540	837
Zn	1180	600	1340	812	4960	6800	2180	833	2280	837	5260	3640
V	64.7	8.9	39.0	17.5	132	0	53.5	26.8	76.8	67.5	561	337
Zr	1430	1070	4820	3470	37390	30270	3980	3450	7930	6070	37830	36270
S	30200	15400	30100	13900	69400	45200	71600	40600	85300	43600	184600	94300
Sr	131	104	132	94.1	390	0	72.9	55.8	163	203	127	78.0
Ba	315	393	688	0	687	0	1390	836	1700	1980	1470	1410
Li	87.3	30.2	101	53.3	491	80.6	137	180	204	175	934	735
As	109	59.7	89.8	63.2	1170	1670	69.9	62.3	73.1	47.4	183	163
Cd	9.7	5.7	9.6	6.2	10.0	8.3	16.8	10.2	18.4	11.0	43.1	29.6
Co	22.8	4.1	22.3	3.7	99.8	91.9	21.5	15.2	24.6	25.1	87.5	77.6
Ni	134	49.7	159	57.0	1510	2130	173	72.4	221	104	984	526
Mo	222	237	284	164	2790	3320	157	102	259	147	908	632
Sb	35.4	40.2	49.5	0	341	0	100	118	145	180	926	241
Cs	8.6	3.5	7.9	4.5	19.8	20.7	7.1	5.7	7.5	5.5	23.1	29.3
Rb	167	33.7	183	40.5	874	634	235	222	297	365	1130	1100
Sc	11.8	4.2	11.9	5.5	45.6	26.8	5.4	4.3	8.2	7.4	43.2	44.6
Th	21.0	7.8	25.9	7.8	230	301	19.3	15.7	25.0	24.0	124	92.5
U	4.5	4.2	6.3	2.3	60.1	49.4	5.2	3.2	6.7	5.3	28.3	22.3
Y	59.6	24.3	77.4	32.2	806	1200	72.7	53.7	103	85.5	559	391



PM<sub>2.5</sub> 입도에서는 각각 2.0 및 2.4배 증가하였다. As ( $69.9 \pm 62.3 \mu\text{g/g}$ ,  $73.1 \pm 47.4 \mu\text{g/g}$  및  $183 \pm 163 \mu\text{g/g}$ )는 TSP는 약간 증가한 반면에 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub> 입도에서는 1/5~2/5 수준으로 감소하였다(Table 2; Fig. 1).

2007년에 이어 2008년에도 황사에서 Zr의 함량이 높은 것은 중국 북동부 지역 공업단지에서의 회토류광물의 제련과 관련이 있을 가능성이 큰 것으로 추정할 수 있으며, 황사 및 비황사 기간에도 중국의 대도시 지역의 대기오염

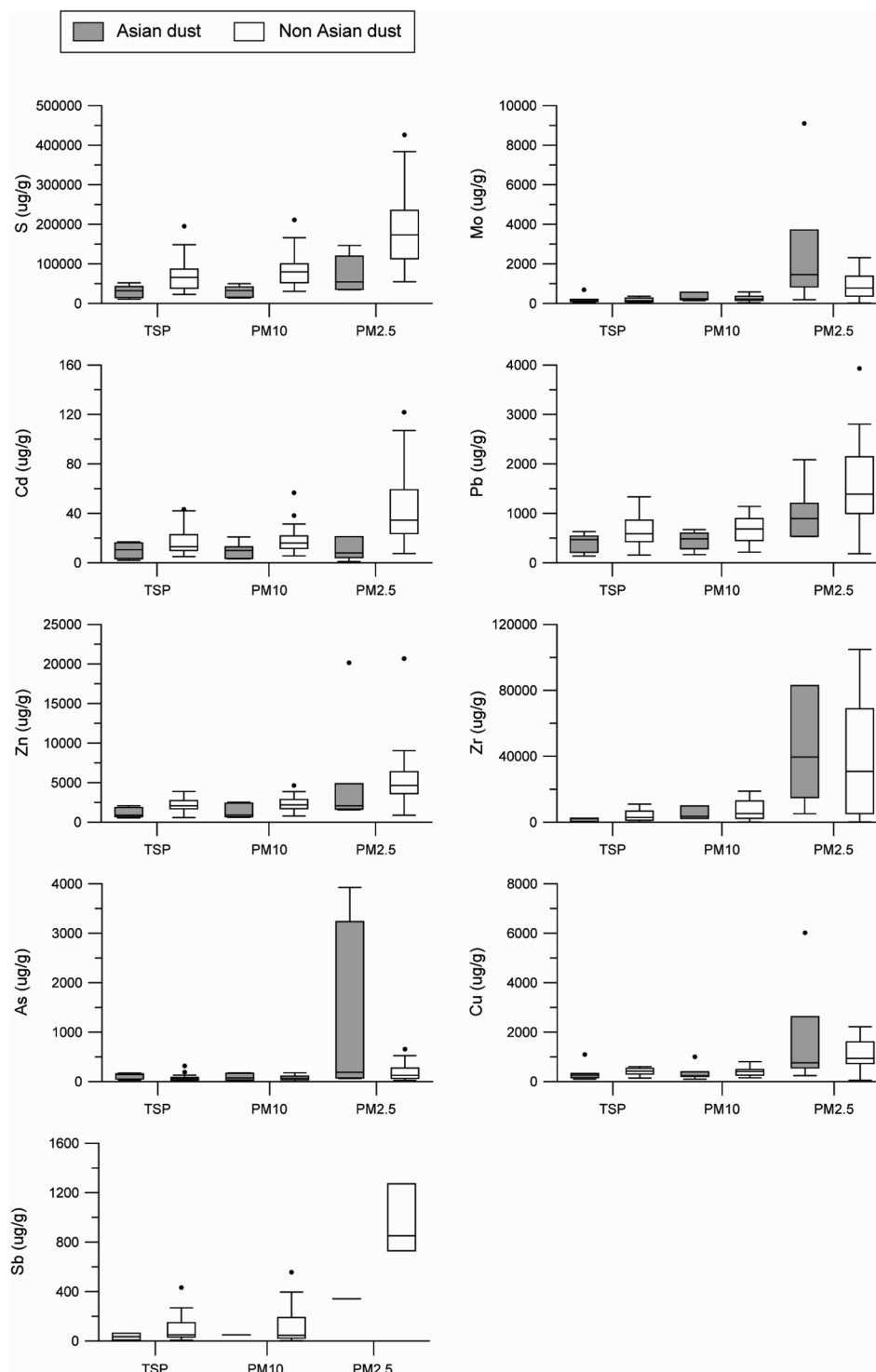


Fig. 3. Box-whisker plot of elemental concentrations in TSP, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> for Asian Dust and Non Asian Dust in spring 2008 at Daejeon.

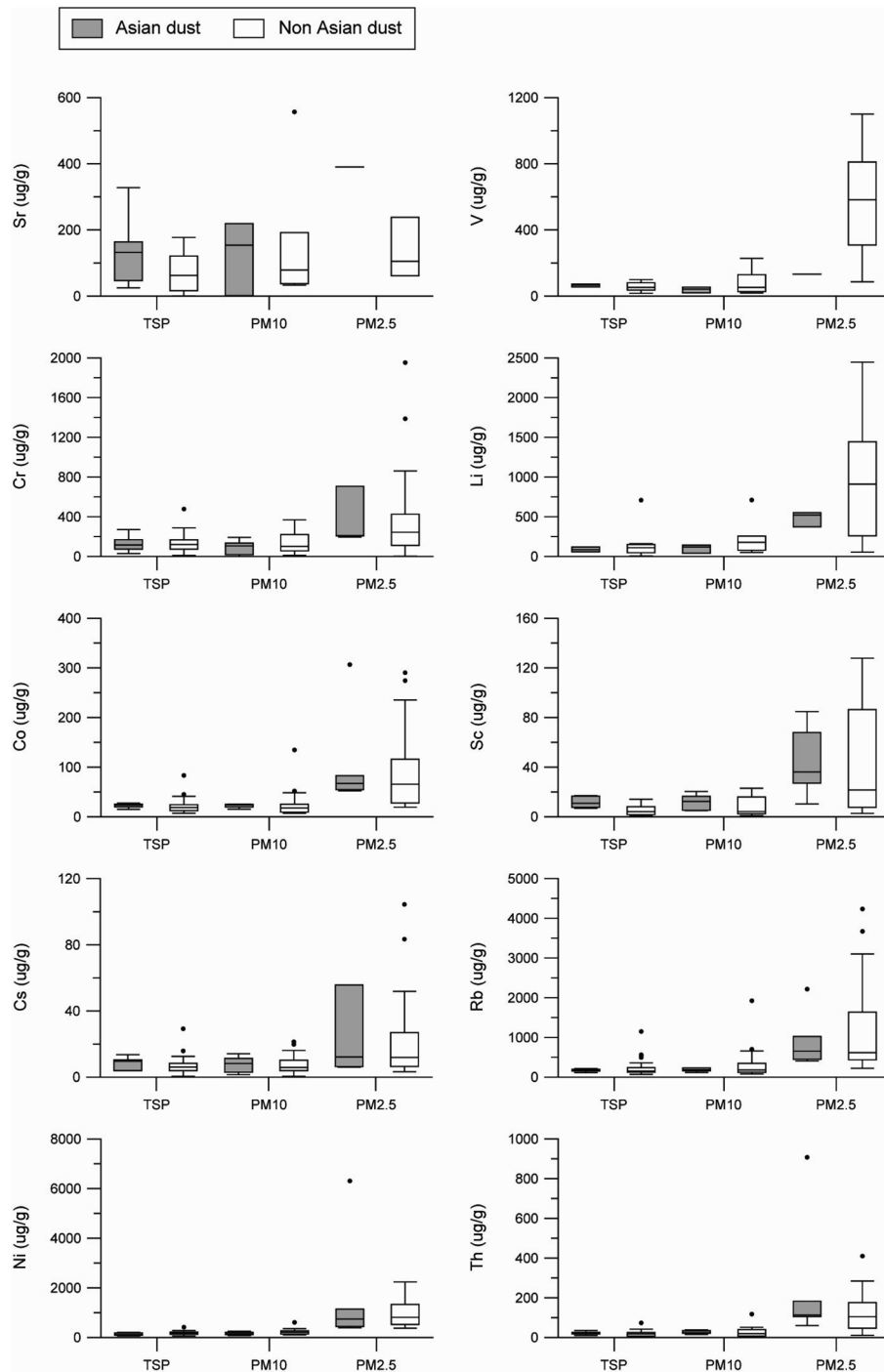


Fig. 3. (continued).

에 영향을 받고 있다는 것을 지시하고 있다. Zr 원소는 아직까지 환경에 미치는 영향에 대한 연구결과가 거의 없지만 대기부유물에서도 역시 높은 함량으로 측정되고 있어 후속연구가 필요하다.

#### 3.4. 황사와 대기부유물의 미량원소 함량 비교

Cr, Pb, Zn, Zr, Cd, Sb 등 대기오염에 기인하는 원소는 입자 크기와 상관없이 비황사 시기의 대기부유물에서의 함량이 높은 것으로 나타났다(Fig. 3). 이러한 결과는 대기오염에 기인하는 미량원소들은 황사기간에 대기 중에

황사 물질이 증가함으로써 단위 중량 당 함량이 약간 낮아지는 것을 의미하는 것으로, 기존 연구결과와 비교할 때 일치되는 결과이다. 기존 연구결과에서는 황사 발생에 의해 사막토양 기원의 원소의 함량은 증가하지만 인위적인 오염에 의한 미량원소들의 함량은 큰 변화가 없거나 감소하는 것으로 나타난 바 있었다(Kim et al., 2002a; Kim et al., 2002b; Kim et al., 2003; Choi et al., 2003; Kim et al., 2004; Jeon et al., 2005; Jeon and Hwang, 2010). 이외, Cu, Ni 등 대기오염에 기인하는 원소와 V, Sr, Co, U 및 Y 등 황사 기원의 미량원소들은, TSP와 PM<sub>10</sub>의 경우에는, 비황사 기간 대기부유물에서 함량이 상대적으로 높았으나 PM<sub>2.5</sub> 입자의 경우에는 황사에서의 함량이 상대적으로 높았다. 2001년 황사기간 및 비황사기간의 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. 그러나 2008년도에 채취한 황사에 함유되어 있는 As와 Mo 등은 대기오염에 기인하는 원소들임에도 불구하고 황사에서 함량이 크게 높아지는 경향을 보였으며, 특히 PM<sub>2.5</sub> 입도에서 함량 증가가 매우 큰 것으로 나타났으며, 각각 6.4배와 3.1배 증가하였다(Table 2). 이들 원소들은 주로 황사에 함유되어 있는 미세립질 물질에 특히 흡착이 잘 되었기 때문인 것으로 추정된다.

#### 4. 고 찰

##### 4.1. 황사 및 대기부유물 미량원소 함량과 토양환경보전법 기준과의 비교

Park et al.(2010)이 자체 개발한 대기모델인 ADAM2를 이용하여 2007년도 발생한 황사로 인해 우리나라 육상에 침적된 연간 황사 총 침적량은 12.6 t/km<sup>2</sup> 인 것으로 추정된 바 있다. 이러한 추정 자료를 근거로 2007년도에 남한에 침적된 황사 침적량은 1,254,000톤 인 것으로 추정된다. 이 침적량이 토양 및 수계환경을 포함한 지표 환경에 침적되었으므로 침적된 황사의 오염정도를 평가할 필요가 있다. 그러나 대기로부터 지표환경에 침적된 침적물의 중금속 오염도를 평가할 수 있는 국내 기준이 없으므로 이번 연구에서는 토양에 침적된 경우만 가정하여 황사에서의 중금속 함량을 토양오염 우려 및 대책기준과 비교하였다.

2008년 채취한 황사의 중금속 함량을 토양오염 우려기

준과 비교한 결과, Zn함량은 1지역 기준은 모두 초과하였고, 2지역 기준은 입도별로 85.7-100%, 3지역 기준은 14.3-71.4%가 초과하였다. As의 경우 입도별로 1지역 기준을 85.7-100%가 초과하였으나, 2지역 기준으로는 71.4-100% 초과, 3지역 기준으로는 TSP와 PM<sub>10</sub> 입도의 경우 모두 우려기준 이하이고, PM<sub>2.5</sub> 시료의 경우 42.9%가 우려기준을 초과하였다. Pb의 경우 1지역 기준과 비교할 때 85.7-100%가 초과하였고, 2지역과 비교하면 57.1-100%가 초과한 반면에 3지역과 비교하면 TSP와 PM<sub>10</sub> 입도의 경우 우려기준 이하였고 PM<sub>2.5</sub> 시료의 경우 71.4%가 초과하였다. Ni의 경우, 1지역기준과는 전체시료의 71.4-100%가 초과하였고, 2지역과는 14.3-100%가 초과하였다. 한편, 3지역 우려기준과 비교한 결과, TSP와 PM<sub>10</sub> 입도의 경우 우려기준 이하였으나, PM<sub>2.5</sub> 시료의 경우에는 71.4%가 초과하였다. Cu의 경우 1지역 85.7-100%와 2지역 14.3-85.7%가 초과하였지만, 3지역의 경우 TSP와 PM<sub>10</sub> 입도의 경우 우려기준 이하였고 PM<sub>2.5</sub> 시료는 28.6% 만이 우려기준을 초과하였다. Cd의 경우에는 1지역과 비교하면 57.1-71.4%가 초과하고, 2지역과 비교한 결과 28.6-57.1%가 초과하였으나, 3지역과 비교한 결과는 모든 입도에서의 함량이 우려기준 이하였다(Table 3).

대기부유물의 경우, 1지역 우려기준과 비교할 때 초과하는 비율이 입도별로 Zn 96.4-100%, Cu 92.9-100%, Pb 89.3-100%, As 82.1-100%, Cd 85.7-100% 및 Ni 82.1-100%이었으며, 황사보다는 대기부유물의 시료가 1지역 우려기준을 초과한 비율이 더 높았다. 2지역 우려기준과 비교하면, Zn 96.4-100%, Pb 78.6-89.3%, Cd 75.0-82.1%, As 57.1-78.6%, Ni 32.1-100% 및 Cu 21.4-89.3%가 초과하였다. 3지역 우려기준과 비교한 결과, Zn 50.0-89.3%, Pb 32.1-82.1%, Ni 0-78.6%, As 0-35.7%가 기준을 초과하였으나 Cu와 Cd은 TSP와 PM<sub>10</sub>은 모두 우려기준 이하였고 PM<sub>2.5</sub>에서만 각각 7.1%와 17.9%가 초과하였다(Table 3). 따라서 3지역을 제외한 1과 2지역에 퇴적되는 황사와 대기부유물 시료는 Zn, Pb, As, Cd, Cu 및 Ni에 의한 토양 및 수계환경에 심각한 오염을 유발할 수 있음을 이번 연구에서 확인되었다.

황사에 함유된 중금속 함량을 1, 2, 및 3지역의 대책기준과 비교하면, Zn의 경우 각각 42.9-100%, 28.6-71.4% 및 0-14.3%가 초과하였고 As는 각각 57.1-71.4%, 28.6-71.4% 및 0-28.6%가 초과하였다. Cu의 경우에는 1지역 기준초과 시료 수는 입도별로 14.3-85.7%인 반면에 2지역 및 3지역 기준의 비교에서는 TSP와 PM<sub>10</sub>에서 모두 대책기준 이하인 반면에 PM<sub>2.5</sub>에서만 각각 28.6%과

**Table 3.** Sample numbers of Asian Dust and non-Asian Dust exceeding soil contamination Worrisome Level and Countermeasure Standard (%)

			Sample					
			Cu	Pb	Zn	As	Cd	Ni
Asian Dust (n = 7)								
TSP	Worrisome Level	1	85.7	85.7	100	100	71.4	71.4
		2	14.3	57.1	85.7	85.7	57.1	14.3
		3	0	0	14.3	0	0	0
	Countermeasure standard	1	14.3	14.3	42.9	57.1	28.6	0
		2	0	0	28.6	42.9	0	0
		3	0	0	0	0	0	0
PM10	Worrisome level	1	85.7	85.7	100	85.7	71.4	85.7
		2	14.3	71.4	85.7	71.4	42.9	28.6
		3	0	0	28.6	0	0	0
	Countermeasure standard	1	14.3	14.3	42.9	57.1	28.6	0
		2	0	0	28.6	28.6	0	0
		3	0	0	0	0	0	0
PM2.5	Worrisome level	1	100	100	100	100	57.1	100
		2	85.7	100	100	100	28.6	100
		3	28.6	71.4	71.4	42.9	0	71.4
	Countermeasure standard	1	85.7	71.4	100	71.4	28.6	100
		2	28.6	28.6	71.4	71.4	0	71.4
		3	14.3	0	14.3	28.6	0	14.3
non-Asian dust (n = 27)								
TSP	Worrisome level	1	92.9	92.9	100	82.1	100	82.1
		2	32.1	78.6	96.4	57.1	75.0	32.1
		3	0	32.1	50.0	3.6	0	0
	Countermeasure standard	1	46.4	46.4	89.3	32.1	60.7	3.6
		2	0	3.6	60.7	7.1	10.7	0
		3	0	0	0	0	0	0
PM10	Worrisome level	1	100	100	100	89.3	100	100
		2	21.4	82.1	100	64.3	78.6	53.6
		3	0	46.4	64.3	0	0	3.6
	Countermeasure standard	1	32.1	60.7	96.4	42.9	75.0	14.3
		2	0	0	75.0	7.1	14.3	3.6
		3	0	0	0	0	0	0
PM2.5	Worrisome level	1	96.4	89.3	96.4	100	85.7	100
		2	89.3	89.3	96.4	78.6	82.1	100
		3	7.1	82.1	89.3	35.7	17.9	78.6
	Countermeasure standard	1	89.3	85.7	92.9	67.9	82.1	100
		2	28.6	50.0	89.3	39.3	50.0	75.0
		3	0	25.0	39.3	3.6	0	14.3

14.3%가 초과하였다. Pb의 경우에서도 1지역 기준초과 시료 수는 입도별로 14.3-71.4%인 반면에 2지역은 TSP와 PM<sub>10</sub>에서 모두 대책기준 이하인 반면에 PM<sub>2.5</sub>에서만 28.6%가 초과하였고 3지역은 모든 입도에서 대책기준 이하였다. Cd는 1지역의 경우 28.6%의 시료가 대책기준을

초과하였으나, 2지역과 3지역 모두 대책기준 이하였다. Ni은 TSP와 PM<sub>10</sub>에서 모두 대책기준 이하인 반면에 PM<sub>2.5</sub>에서만 1지역 100%, 2지역 71.4% 및 3지역 14.3%가 초과하였다(Table 3).

대기부유물에 함유된 중금속 함량을 1, 2, 및 3지역의

대책기준과 비교한 결과, Zn은 각각 89.3-96.4%, 60.7-89.3% 및 0-39.3%가 초과하였고, As는 각각 32.1-67.9%, 7.1-39.3% 및 0-3.6%가 초과하였다. Cu의 경우에는 32.1-89.3%가 1지역 대책기준을 초과하였고, 2지역 대책기준과 비교하면 TSP와 PM<sub>10</sub>에서 대책기준 이하였고 PM<sub>2.5</sub>에서만 28.6% 초과한 반면에 3지역 대책기준에서는 모든 입도에서 기준 이하였다. Pb는 전체 시료의 46.4-85.7%가 1지역 대책기준을 초과하였고, 2지역에서는 0-50.0%가 초과하였으며, 3지역에서는 TSP와 PM<sub>10</sub> 모두 대책기준 이하이고 PM<sub>2.5</sub>는 25.0%의 시료가 대책기준을 초과하였다. Cd는 1지역과 2지역의 경우 각각 60.7-82.1%와 10.7-50.0%가 초과한 반면에 3지역 기준에서는 모두 대책기준 이하였다. Ni는 1지역 대책기준과 비교 시 3.6-100%가 초과한 반면 2지역과 비교에서는 0-75.0%가 초과하였고, 3지역과 비교에서는 TSP와 PM<sub>10</sub>가 모두 기준 이하인 반면에 PM<sub>2.5</sub>에서는 14.3%가 초과하였다 (Table 3).

이러한 결과는 토양오염 우려기준과 비교할 경우 황사

와 대기부유물이 1지역과 2지역에 침적될 경우 1지역 및 2지역의 토양을 오염시킬 수 있음을 지시한다. 또한 3지역에서도 초미세먼지에 해당하는 PM<sub>2.5</sub>의 입자가 침적될 경우 Zn, Pb, As, Cu 및 Ni 등의 원소들의 오염이 우려된다. 한편, 대책기준과 비교할 경우에도 황사와 대기부유물의 Zn, As 및 Cu 함량이 1지역과 2지역의 기준을 상회하는 경우가 자주 있으므로 이에 대한 토양오염 모니터링이 필요하다.

## 4.2. 황사의 미량원소 농집 및 오염도 평가

### 4.2.1. 부화지수(Enrichment Factor)

Banwart and Malmstrom(2001)이 부화지수 값을 기준으로 오염정도를 분류한 것에 의하면, 황사에서 검출된 S와 Mo는 모든 입도에서 “extremely high enrichment”로 분류된다. Zn, Zr 및 As는 PM<sub>2.5</sub>, Cd은 TSP와 PM<sub>10</sub>에서 “extremely high enrichment”로 분류되었고, Cu, Cd, Ni 및 Y의 PM<sub>2.5</sub>, Zr의 PM<sub>10</sub> 및 Zn의 TSP와 PM<sub>10</sub> 등은 “very high enrichment”로 분류된다. Pb의 TSP,

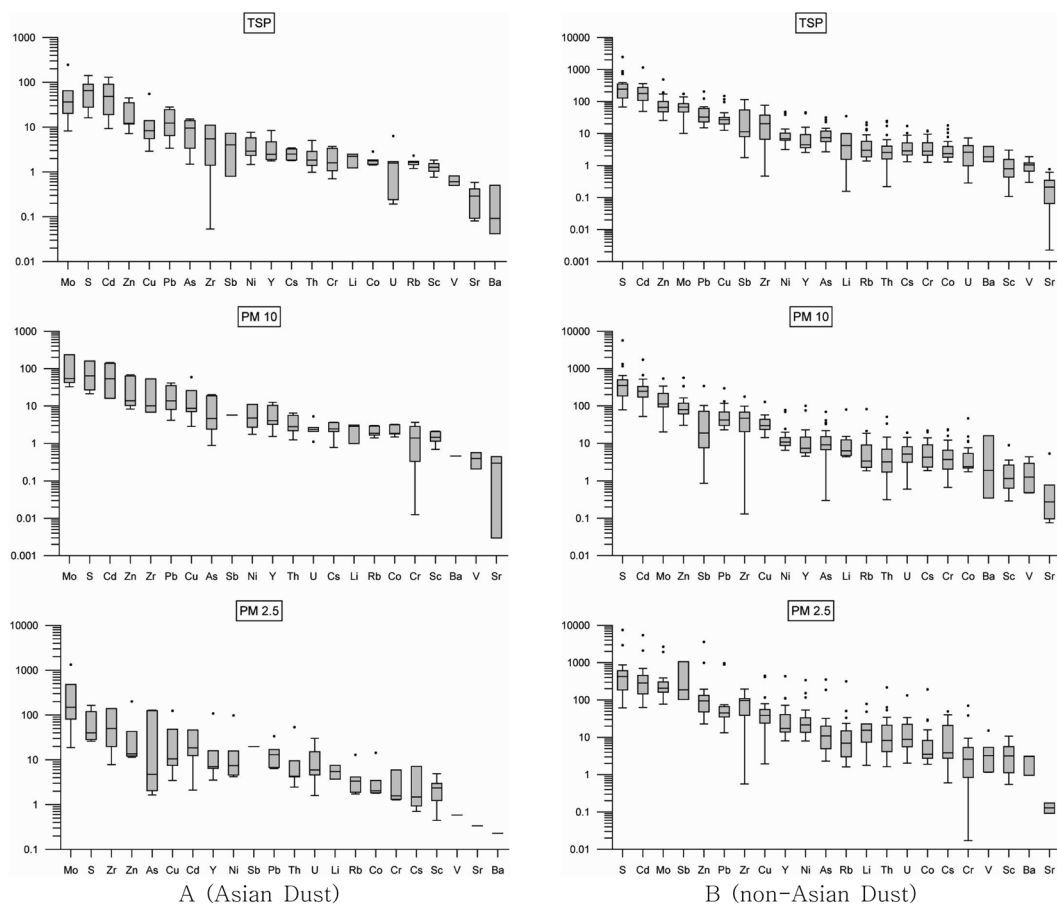


Fig. 4. Comparison of Enrichment factor of trace elements in TSP, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> for Asian Dust in spring 208 at Daejeon.

PM<sub>10</sub> 및 PM<sub>2.5</sub> 등과 Cu와 As의 TSP와 PM<sub>10</sub>, Sb, PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>, Li, Th 및 U의 PM<sub>2.5</sub> 등은 “significant enrichment”로 분류된다. 즉, 2008년도에 채취된 황사에 함유된 S, Mo, Cd, Zn, Zr, As, Cu, Pb 및 Sb 등이 최소 “significant enrichment”에서 최대 “extremely high enrichment”로 분류되었다. 이는 황사가 중국을 거쳐 국내에 유입되면서 이동경로 상 대기오염에 의해 부화지수가 높아진 결과이다. 이러한 결과는 2007년도에 채취한 황사의 결과와도 거의 일치하는 결과였다(Lee et al., 2002; Lee et al., 2012a; Lee et al., 2013). Li, Th 및 U의 PM<sub>2.5</sub>의 결과가 “significant enrichment”로 분류된 것은 사막토양이 이동 중에 발생한 입도 분급작용에 따른 영향으로 해석된다. 한편, Cs이 “moderate enrichment”, Cr, Sr, Ba, Co, Rb, Sc 및 V 등은 “depletion to minimal enrichment”로 분류된다. 즉, Cs, Cr, Sr, Ba, Co, Rb, Sc, V, Li, U, Y, 및 Th 등 대기오염에 의한 영향을 받지 않고 사막토양의 기원에 의해 영향을 받는 원소들은 “moderate enrichment”에서 “depletion to minimal enrichment”로 분류된다(Fig. 4a).

대기부유물의 경우, “extremely high enrichment”로 분류된 원소는 S, Cd, Mo, Pb 및 Zn 등이었으며, 이외, Sb와 Zr의 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>, Cu, Ni 및 Y의 PM<sub>2.5</sub>가 이 그룹에 속한다. Cu TSP와 PM<sub>10</sub>, Sb와 Zr TSP, As, Li, Rb, Th 및 U의 PM<sub>2.5</sub> 등은 “very high enrichment”로 분류된다. As, Ni, Li, Rb 및 Y의 TSP와 PM<sub>10</sub>, Cr, Co 및 Cs의 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>, Th 및 U의 PM<sub>10</sub>은 “significant enrichment”로 분류된다. “moderate enrichment”로 분류된 미량원소는 Ba이 있으며, 이외, Cr, Co, Cs, Th 및 U의 TSP와 V와 Sc의 PM<sub>2.5</sub>도 이에 속하는 원소이다. “depletion to minimal enrichment”로 분류된 미량원소는 Sr이 있으며, V와 Sc의 TSP와 PM<sub>10</sub>이 속한다. 부화지수가 높은 원소와 부화지수가 낮은 원소의 구분은 일반적으로 황사의 경우와 동일한 결과를 보였으나, 황사에서 부화지수가 낮은 원소였던 Y의 PM<sub>2.5</sub>, Li, Rb, Th 및 U의 PM<sub>2.5</sub>, Li, Rb 및 Y의 TSP와 PM<sub>10</sub>, Cr, Co 및 Cs의 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>, Th 및 U의 PM<sub>10</sub> 등이 2008년도 자료에서 부화도가 2007년도에 비교해서 높아졌다(Fig. 3, Lee et al., 2012a). 결론적으로 대기오염에 기인한 원소인 S, Cd, Mo, Pb, Zn, Cu, Zr, Sb 및 As 등은 비황사기간에 부화지수 값이 현저하게 증가하였으며, 사막토양 기원 Cs, Rb, Ni, Cr, Li, V, Co, U, Y, Sr, Ba, Sc 및 Th 등의 부화지수 값도 증가되는 경향이 관찰되었다(Fig. 4b).

#### 4.2.2. 오염지수(Pollution index)

황사에서 Mo, S 및 Cd 등 세 원소가 입도에 상관없이 평균 오염지수 값이 100 이상인 원소였으며, Cu, Zn, Zr, As 및 Sb 등의 원소들은 PM<sub>2.5</sub>에서의 오염지수 값이 100 이상이었다. 이외에 평균 오염지수가 평균 20을 초과하고 100 미만인 원소로는 Pb의 모든 입도(TSP, PM<sub>10</sub> 및 PM<sub>2.5</sub>), Cu, Zn의 TSP와 PM<sub>10</sub>, Zr의 PM<sub>10</sub>과 Li, Ni, Th, U 및 Y의 PM<sub>2.5</sub>가 있다. 이외 오염지수가 20이하인 원소는 Zr의 TSP, As, Sb, Ni, Li, Th, U 및 Y 등의 TSP와 PM<sub>10</sub> 등이 속하였으며, Cr, V, Sr, Ba, Co, Cs, Rb 및 Sc 등은 모든 입도가 이 그룹에 속한다(Table 4).

대기부유물의 경우, S와 Cd 만이 입도에 상관없이 평균 오염지수 값이 100을 초과하는 원소였으며, Mo는 세립질인 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>, Pb, Zn, Zr, 및 Sb 등은 PM<sub>2.5</sub>에서만 평균 오염지수 값이 100을 초과하였다. 평균 오염지수 값이 20 이상 100 미만인 원소는 Cu가 입도에 상관없이 이 그룹에 속하는 원소이고, Pb, Zn, Zr 및 Sb는 TSP와 PM<sub>10</sub>이 속하며, Mo는 TSP, As, Ni, Li, Rb, Th, U 및 Y는 PM<sub>2.5</sub> 입도 만이 이 그룹에 속한다. 이외 오염지수가 20이하인 원소는 As, Ni, Li, Rb, Th, U 및 Y 등의 TSP와 PM<sub>10</sub>입도가 이 그룹에 속하고, Cr, V, Sr, Ba, Co, Cs 및 Sc 등은 모든 입도에서 이 그룹에 속한다(Table 4).

#### 4.2.3. 오염부하지수(Pollution load index)

오염부하지수 값은 비교적 단순한 값을 제시하므로 황사 및 대기부유물 채취시기에 따른 시료의 오염정도를 상대적으로 비교가 가능하다. S, Mo, Cd, Zn, Zr, As, Cu, Pb 및 Sb 등 대기오염의 영향을 받은 원소들을 대상으로 계산한 결과, 시료번호 66(2008/3/03), 63(2008/2/29) 및 59(2008/2/12) 시료의 오염부하지수 값이 높은 것으로 나타났으며, 그 외 다른 시기에 채취한 황사시료의 오염부하지수 값은 평상시 대기부유물의 오염부하지수 값의 평균과 비교해도 상대적으로 낮은 값을 보였다(Table 5). 일반적으로 2007년과 유사하게 2008년도의 경우에도 황사와 대기부유물의 오염부하지수 값을 비교하면 중국 동부지방의 연안지역으로 남하하고 남해 또는 서해를 경유하거나 발해만을 경유하여 우리나라로 유입된 황사에 중금속 및 미량원소의 오염이 상대적으로 현저하게 높았다(Lee et al., 2013).

대기부유물의 경우에도 평균값을 고려하면 황사에 비교하여 미세한 입자인 PM<sub>2.5</sub>에서만 오염부하지수 값이 낮은

**Table 4.** Pollution Index (PI) in TSP, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> for Asian Dust and non-Asian Dust in spring 2008 at Daejeon

Element	Asian Dust						Non Asian Dust					
	TSP		PM <sub>10</sub>		PM <sub>2.5</sub>		TSP		PM <sub>10</sub>		PM <sub>2.5</sub>	
	Mean	Stdev.	Mean	Stdev.	Mean	Stdev.	Mean	Stdev.	Mean	Stdev.	Mean	Stdev.
Cr	4.6	2.8	3.3	2.4	12.6	8.0	4.8	3.6	4.7	3.7	14.3	18.4
Cu	27.7	26.1	27.1	23.4	130	161	31.7	11.0	31.4	11.5	87.5	45.0
Pb	28.3	12.3	31.2	12.1	67.9	36.8	43.4	20.9	46.2	18.4	105	57.3
Zn	44.3	22.5	50.1	30.4	186	255	81.6	31.2	85.4	31.4	197	136
V	1.6	0.2	1.0	0.4	3.3	0	1.3	0.7	1.9	1.7	14.0	8.4
Zr	10.2	7.7	34.4	24.7	267	216	28.4	24.7	56.7	43.4	270	259
S	127	64.9	127	58.8	293	191	302	172	360	184	779	398
Sr	0.6	0.5	0.6	0.5	1.9	0	0.4	0.3	0.8	1.0	0.6	0.4
Ba	0.6	0.7	1.2	0	1.2	0	2.5	1.5	3.1	3.6	2.7	2.6
Li	5.1	1.8	5.9	3.1	28.6	4.7	7.9	10.5	11.9	10.2	54.3	42.7
As	16.3	8.9	13.4	9.5	176	249	10.5	9.3	10.9	7.1	27.4	24.5
Cd	122	71.2	120	77.3	126	104	209	128	230	137	538	370
Co	4.0	0.7	4.0	0.7	17.7	16.3	3.8	2.7	4.4	4.4	15.5	13.7
Ni	7.8	2.9	9.3	3.3	88.0	125	10.1	4.2	12.9	6.1	57.5	30.7
Mo	122	130	156	90.3	1530	1830	86.1	56.0	142	80.6	499	347
Sb	11.1	12.6	15.6	0	107	0	31.6	37.0	45.4	56.5	291	75.7
Cs	6.0	2.4	5.5	3.1	13.7	14.4	4.9	4.0	5.2	3.8	16.1	20.3
Rb	3.7	0.7	4.0	0.9	19.2	13.9	5.2	4.9	6.5	8.0	24.7	24.1
Sc	2.9	1.0	2.9	1.4	11.2	6.6	1.3	1.1	2.0	1.8	10.6	11.0
Th	4.7	1.7	5.8	1.7	51.0	66.9	4.3	3.5	5.6	5.3	27.6	20.6
U	3.5	3.2	4.8	1.8	46.2	38.0	4.0	2.5	5.2	4.0	21.8	17.2
Y	6.9	2.8	9.0	3.8	93.9	139	8.5	6.3	12.0	10.0	65.1	45.5

것으로 나타났다. TSP, PM<sub>10</sub> 및 PM<sub>2.5</sub>의 오염부하지수 값을 고려하면 시료번호 76(2008/3/13), 55(2008/1/08), 95(2008/4/04), 94(2008/4/03), 81(2008/3/18), 140(8/06), 154(2008/11/07) 및 73(2008/3/10) 등 다수의 대기부유물의 오염부하지수 값은 황사기간의 오염부하지수 값보다는 상대적으로 높은 것으로 나타났다(Table 5). 이러한 결과는 황사가 발생하지 않는 평상시에도 중국으로부터 유입되는 장거리 이동 대기부유물의 중금속 및 미량원소의 오염부하지수가 심각한 것으로 판단된다. 이는 중국 및 일부 우리나라의 대기오염에 기인하여 황사시기와 비황사시기 모두 황사와 대기부유물의 중금속 등 미량원소들의 오염이 매우 심각한 수준인 것을 지시한다.

## 5. 결 론

2008년에 채취한 황사의 미량원소 함량을 2007년도 분석결과와 비교할 때 Zr, Cu, As 및 Ni는 증가하였고, Zn와 Sb는 유사한 함량을 보인 반면에, S, Mo, Pb, Cd

는 크게 감소하였다. 대기부유물의 경우에서도 S, Zn 및 Cd은 2007년 측정값과 큰 차이가 없는 반면에, Zr, Sb, Cu 및 Ni는 증가하였고, Pb, Mo 및 As는 크게 감소하였다. 이러한 것은 황사 및 대기부유물의 유입 경로와 황사의 세기에 기인한 것으로 추정된다. 황사와 대기부유물의 중금속 함량을 토양환경보전법의 우려기준과 비교한 결과, 3지역을 제외한 1과 2지역에 퇴적되는 황사와 대기부유물 시료는 Zn, Pb, As, Cd, Cu 및 Ni에 의한 토양오염이 우려되었다. 일부 황사 및 대기부유물 시료의 Zn와 As 함량은 대책기준을 초과한 시료 수가 많아 토양오염이 매우 우려된다. 부화지수를 값을 기준으로 대기오염에 영향을 받은 각 미량원소의 오염도를 분류하면, 황사의 경우 S와 Mo는 “extremely high enrichment”, Zn와 Cd는 “very high enrichment-extremely high enrichment”, Zr과 As는 “significant enrichment-extremely high enrichment”, Cu는 “significant enrichment-very high enrichment”, Pb는 “significant enrichment”, Sb는 “moderate enrichment-significant enrichment”로 분류되었

**Table 5.** Pollution Load Index (PLI) in TSP, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> for Asian Dust and non-Asian Dust in spring 2008 at Daejeon

Sample No. (Date)		PLI		
		TSP	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>
Asian Dust	F3-59 (02/12)	23.6	42.8	124.9
	F3-63 (02/29)	55.7	56.4	568.9
	F3-65 (03/02)	23.4	44.7	103.1
	F3-66 (03/03)	79.4	94.3	249.4
	F3-79 (03/16)	23.3	29.7	100.5
	F3-130 (05/30)	15.3	15.5	58.7
	F3-131 (05/31)	59.0	48.5	65.6
	Mean	40.0	47.4	181.6
Non Asian Dust	F3-61 (02/27)	69.7	48.0	214.4
	F3-71 (03/08)	58.7	96.5	189.1
	F3-73 (03/10)	55.1	73.7	224.4
	F3-76 (03/13)	96.2	105.2	331.1
	F3-81 (03/18)	56.5	64.3	253.2
	F3-94 (04/03)	59.5	81.4	253.9
	F3-95 (04/04)	46.2	89.7	268.2
	F3-100 (04/11)	79.5	75.0	105.7
	F3-106 (04/18)	23.0	34.1	142.6
	F3-107 (04/19)	49.2	69.6	110.7
	F3-114 (04/28)	46.2	66.7	114.9
	F3-115 (04/29)	28.8	52.2	75.9
	F3-117 (05/01)	23.4	18.4	60.9
	F3-118 (05/02)	15.9	20.7	138.4
	F3-119 (05/03)	22.6	34.2	66.4
	F3-126 (05/20)	29.2	49.8	156.1
	F3-132 (06/09)	61.8	52.9	129.6
	F3-133 (06/11)	71.6	66.8	91.3
	F3-136 (07/07)	78.2	78.7	167.7
	F3-139 (07/17)	53.6	70.6	66.6
	F3-140 (08/06)	65.2	82.6	232.2
	F3-141 (08/20)	46.3	105.5	74.0
	F3-142 (08/25)	51.8	48.8	87.4
	F3-143 (08/26)	48.6	58.9	99.6
	F3-F147 (09/18)	50.5	71.5	192.9
	F3-F152 (10/24-25, 10/27-29)	42.6	32.1	160.5
	F3-F154 (11/07)	86.2	76.9	228.0
	Mean	53.8	64.5	163.7

으며, 대기부유물의 경우도 유사하였다. 이번 연구를 통해서 중국의 산업시설에서 발생한 미세먼지가 황사뿐만 아니라 평상시에도 대기부유물의 형태로 장거리 이동되어 우리나라에까지 영향을 미치고 있다는 것을 확인하였다. 대표적인 대기오염 미량원소는 S, Mo, Cd, Zn, Zr, As, Cu, Pb 및 Sb 등이며, 함량이 매우 높고 오염도가 심각한 것으로 평가되었다. 그러므로 황사와 대기부유물은 우

리나라 국민의 건강문제 뿐만이 아니라, 토양환경에 장기 간 퇴적될 경우 주변 생태계에도 악영향을 미치게 될 것이다.

## 사 사

본 논문은 소방방재청 자연재해저감기술개발사업 “퇴적



황사재해 피해평가 및 대응기술개발에 관한 연구과제(세부과제 “퇴적황사에 의한 지표지질환경 피해평가 및 대응 기술 개발, NEMA-06-NH-08”)의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- Banwart, S.A. and Malmstrom, M.E., 2001, Hydrochemical modeling for preliminary assessment of minewater pollution, *J. Geochem. Explor.*, **74**, 73-97.
- Cao, Z., Yang, Y., Lu, J., and Zhang, C., 2011, Atmospheric particle characterization, distribution, and deposition in Xi'an, Shaanxi Province, Central China, *Environ. Pollut.*, **159**(2), 577-584.
- 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, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, **19**(1), 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 oeriod in *Atmos. Environ.*, **35**, 2715-2721.
- David, M.T., Robert, J.F., and Douglas, L.W., 2001, April 1998 Asian dust event: A Southern California perspective, *J. Geophys. Res.*, **106**(D16), 18371-18379.
- Draxler, R.R. and Rolph, G.D., 2003, HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Intergrated Trajectory) model access via NOAA ARL READY Website (<http://www.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>). NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD.
- 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, *Microchem. J.*, **92**, 186-192.
- 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, PM2.5) at Busan in 2004, *J. Korean Earth Sci. Soc.*, **26**(6), 573-583.
- Jeon, B.I. and Hwang, Y.S., 2010, Chemical Properties of the Metallic Elements and the Mass Concentration of PM10 and PM2.5 Observed in Busan, Korea in Springtime of 2006-2008, *J. Korean Earth Sci. Soc.*, **31**(3), 234-245.
- Kim, H.K., Jung, K.M., Kim, D.J., and Lee, J.T., 2002a, Characteristics of Inorganic Components in Fine Particles Collected at Chunchon during the Springtime Yellow Sand Occurrence Period in 2002, *J. Environ. Toxicol.*, **17**(4), 333-339.
- Kim, K.H., Choi, G.H., and Kang, C.H., 2002b, The Metallic Composition of PM2.5 and PM10 in a Northeast Region of Seoul During the Spring 2001, *J. Korean Earth Sci. Soc.*, **23**(6), 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, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, **20**(6), 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, *J. Korean Earth Sci. Soc.*, **24**(4), 315-324.
- Lee, P.K., Youm, S.J., and Bae, B.G., 2012a, Geochemical Characteristics and Pollution Level of Heavy metals of Asian Dust in Daejeon Area, 2007 (spring season), *Korean Soc. Econ. Environ. Geol.*, **45**(3), 217-235.
- Lee, P.K., Youm, S.J., and An, G.O., 2012b, Geochemical Characteristics of Soils in Major Source Area of Asian Dust, *Korean Soc. Econ. Environ. Geol.*, **45**(1), 9-21.
- Lee, P.K., Youm, S.J., and Jo, H.Y., 2013, Heavy metal concentrations and contamination levels from Asian dust and identification of Sources: A case study, *Chemosphere*, **91**, 1018-1025.
- 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 Distribution Characteristics of Air Pollutants by Yellow Sand Phenomenon, *Korean J. Sanitation*, **17**(2), 71-78.
- Lin, T.-H., 2001, Long-range transport of yellow sand to Taiwan in spring 2000 observed evidence and simulation, *Atmos. Environ.*, **35**, 5873-5882.
- Mackendry, I.G., Hacker, J.P., Stull, R., Sakiyama, S., Minacca, D., and Reid, K., 2001, Long-range transport of Asian dust to the Lower Fraser Valley, British Columbia, Canada, *J. Geophys. Res.*, **104**(D15), 18521-18533.
- Park, S.U., Choe, A., and Park, M., 2010, Estimates of Asian dust deposition over the Asian region by using ADAM2 in 2007, *Sic Total Environ.*, **408**, 2347-2356.
- 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, *J. Hazard. Mater.*, **178**, 739-746.
- 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), *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, **21**(1), 119-129.
- Tanner, P.A., Ma, H., and Yu, P.K.N., 2008, Fingerprinting metals in urban street dust of Beijing, Shanghai and Hong Kong, *Environ. Sci. Technol.*, **42**, 7111-7117.
- Wang, G., Oldfield, F., Xia, D., Chen, F., Liu, X., and Zhang, W., 2012, Magnetic properties and correlation with heavy metals in urban street dust: A case study from the city of Lanzhou, China,

*Atmos. Environ.*, **46**, 289-298.

Wei, B. and Yang, L., 2010, A review of heavy metal contaminations in urban soils, urban road dusts and agricultural soils from China, *Microchem. J.*, **94**, 99-107.

Yongming, H., Peixuan, D., Junji, C., and Posmentier, E.S., 2006, Multivariate analysis of heavy metal contamination in

urban dusts of Xi'an, Central China, *Sci. Total Environ.*, **355**, 176-186.

Zheng, Y. and Zhang, S., 2008, Magnetic properties of street dust and topsoil in Beijing and its environmental implications, *Chinese Sci. Bull.*, **53**, 408-417.