

아산 및 서울 일부 지역의 대기 중 PM₁₀의 농도 및 금속원소 성분의 특성 연구

양원호 · 손부순*† · 김윤신** · 최경호*** · 손종렬**** · 이종대**

대구가톨릭대학교 산업보건학과, *순천향대학교 환경보건학과,
한양대학교 환경 및 산업의학연구소, *서울대학교 보건대학원 환경보건학과,
****고려대학교 보건대학 환경보건학과

Characteristics of PM₁₀ and Air-borne Metallic Elements in Asan and Seoul

Won-Ho Yang · Bu-Soon Son*† · Yoon-Shin Kim** · Kyung-Ho Choi*** ·
Jong-Ryeul Sohn**** · Jong-Dae Lee**

Department of Occupational Health, Catholic University of Daegu

**Department of Environmental Health Science, Soonchunhyang University*

***Department of Occupational & Environmental Medicine, Hanyang University*

****Department of Environmental Health, School of Public Health, Seoul National University*

*****Department of Environmental Health, College of Health Science, Korea University*

(Received April 25, 2004; Accepted June 21, 2004)

ABSTRACT

The purpose of this study was to characterize background mass concentration of PM₁₀ and metallic composition from September 2001 to August 2002 in comparison with Asan and Seoul. Annual mean of PM₁₀ concentrations in Asan and Seoul were 47.98 and 75.33 µg/m³, respectively. The concentrations of PM₁₀ were highest in spring season in both cities. The concentrations of measured metals except for As and Pb in Asan were higher than those in Seoul. Yellow dust could affect the mass and metals concentrations of measured PM₁₀ in Asan and Seoul. Relationship between measured metals concentrations showed that Si and Fe were associated with natural sources such as soil. Pb, Cu and Zn were closely related to urban anthropogenic sources such as fuel combustion. Especially, relationship between metals showed different association during yellow dust. Proper management for PM₁₀ will need in Asan, considered the concentrations of metallic elements in PM₁₀ in Asan were relatively higher than those in Seoul.

Keywords: PM₁₀, metallic elements, yellow sand, receptor

I. 서 론

대기오염물질 중에 부유분진(suspended particulate matters)은 대기 중에 부유하는 미세한 고체상 또는 액체상의 입자이며, 오랜 기간 동안 대기 중에 체류한다. 부유분진은 1차 입자와 2차 입자로 구분할 수 있는데 1차 입자는 해염입자와 토양입자 등의 자연 발생원에서

유래하는 물질들이며, 2차 입자는 기체로 방출되는 물질들이 다양한 화학반응에 의하여 입자상 물질로 변환된 것이다. 특히 미세입자는 총부유분진에 비해 표면적이 상대적으로 크므로 유해성 금속이나 가스상 오염물질의 흡착이 용이하고, 호흡기를 통해 유해성 오염물질이 폐에 침착되어 폐암 등의 질병을 일으킬 가능성이 높다.¹⁾

대기중 입경이 10 µm 이하의 PM₁₀들은 자동차, 트럭, 버스와 같은 이동 오염원과 각종 공장의 굴뚝이나 물리화학적 공정 등과 같은 고정오염원에 의해 주로 인위적으로 방출된다. 입자의 입경이 10 µm 보다 큰 입

Corresponding author : Department of Environmental Health Science, Soonchunhyang University
Tel: 82-41-530-1272, Fax: 82-41-530-1272
E-mail : sonbss@sch.ac.kr

자상 물질은 호흡시 구강이나 코에서 대부분 걸러지나, 10 μm 보다 작은 입자상 물질은 호흡기관을 통해 기관지나 폐까지 침투할 수 있다.^{2,3)} 이러한 입자상 물질에는 여러 가지 금속성분, 유기물질, virus, 조류 및 곰팡이 등이 포함되어 있으며, 다환 방향족 탄화수소 (polycyclic aromatic hydrocarbon, PAH) 등의 발암성 물질이 포함되어 있다. 미세먼지에 포함된 물질 중 금속성분은 대부분 오래 전부터 알려진 독성물질로 주기율표 내 원소 중 약 80개의 원소가 중금속으로 분류되며, 그 중 약 30가지 금속이 사람에게 독성을 발현하는 것으로 알려져 있고, 일부는 발암성도 가지고 있다.⁴⁾ 먼지에 대한 우리나라 대기 환경기준은 2001년부터 총먼지에 대한 환경기준을 삭제하고 PM₁₀ 환경기준을 연간 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 24시간 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 강화하여 관리되고 있다.⁵⁾

현재까지의 환경관리가 대기, 수질, 폐기물, 토양의 오염매체의 발생원(source) 중심으로 추진하여 온 반면, 환경오염물질의 피해를 받는 생태계 즉 인간에 미치는 영향을 규명하는 수용체(receptor) 중심의 환경오염물질을 적극 해결하려는 연구가 국·내외에서 활발히 진행되고 있다.⁶⁻⁸⁾ PM₁₀에 대한 제어를 성공적으로 수행하기 위해서는 대기오염물질 및 그 배출원에 대한 여러 가지 특성의 파악과 더불어 각종 오염원에서 배출되는 대기오염물질의 양과 수용지점 농도 사이의 관계가 규명되어야만 합리적이고 경제적인 통제 정책이 수행될 수 있다. 따라서 대기 중 PM₁₀는 자연적, 인위적인 원인에 의해 발생되지만, 입자내 화학적 성분은 발생원에 따라 조성 성분의 차이를 보임으로 PM₁₀의 발생원을 추정하는 것이 매우 중요하다.⁹⁾ 또한 PM₁₀는 계절에 따른 농도와 화학 조성 변화가 큰 것으로 알려져 있기 때문에 PM₁₀의 계절별 농도와 각 구성요소의 성분비에 관한 자료와 함께 그 배출원 규명은 대기질 관리를 위한 필수적인 요소가 된다.¹⁰⁾

본 연구는 대기오염물질 발생 특성이 차이가 있을 것으로 예상되는 중소도시인 아산시와 대도시인 서울시 두 지역에서 연간, 계절별, 그리고 황사 발생시 PM₁₀ 농도와 PM₁₀ 중 금속성분을 측정, 비교하고, 발생원을 추정하여 대기오염 관리대책 수립 및 규제를 위한 기초 자료를 제공하고자 한다.

II. 연구내용 및 방법

1. PM₁₀의 농도측정

대기 중 PM₁₀의 농도 및 금속성분의 조성을 조사하기 위하여 아산시는 순천향대학교 자연과학대학 옥상

과 서울시 한양대학교 의과대학 옥상에서 유량이 약 5 l/min인 Mini-volume portable air sampler(MiniVol, AIRmetrics社)를 이용하여 시료를 포집하였다. 대기 시료 포집기간은 2001년 9월부터 2002년 8월까지이었으며 이 기간 동안 매주 6일씩(화요일 15시부터 월요일 15시까지) 연속 포집하였다. 시료 포집은 pallflex membrane filter(47 mm, Gelman sciences社)를 이용하였으며, 사용전 항온, 항습 상태인 데시케이터 내에서 24시간 이상 보관하여 항량이 되도록 하였고, 시료 채취 후에도 동일한 조건에서 항량이 되도록 조작하였다. 충돌판 위에 입자를 부착시키기 위해 grease (Apiezon社) 1 inch와 n-Hexane 30 ml를 잘 섞어 이 현탁액을 충돌판 위에 도포하였다. 용제 건조 후 한번 더 도포 하여 건조시킨 후에 재조립하여 측정하였다. 측정 후 충돌판을 n-Hexane으로 여러 번 세척하여 퇴적된 먼지를 깨끗하게 제거하였다.

2. PM₁₀의 농도 및 금속성분 분석

1) PM₁₀ 농도

MiniVol sampler로 채취된 시료 여지를 채취 전과 동일한 방법으로 항온, 항습 상태인 데시케이터 내에서 24시간 이상 방치한 후 0.01 mg까지 측정 가능한 semi-micro balance(Sartorius社, BP211D)를 사용하여 여지 무게를 측정 후 질량 농도 분석을 실시하였다.

2) 금속성분 농도

PM₁₀ 중의 금속성분을 추출하기 위해 미국 EPA (1999)에서 고시한 microwave(Questron사, QLab6000) 전처리 방법을 이용하였다.¹¹⁾ Microwave vessel에 여지를 넣고 1.03 mol의 HNO₃와 2.23 mol의 HCl을 10 ml 가한 후 545 watt에서 10분, 344 watt에서 5분을 가열하였다. Microwave법은 기존의 전처리 방법에 비해 시간을 단축할 수 있고, 고온·고압 하에서 여지의 분해가 가능하다. 전처리 후 ICP-OES(inductively coupled plasma optical emission spectrometry, Optima 3000DV, PerkinElmer社)를 이용하여 As, Mn, Ni, Fe, Cr, Cu, Cd, Pb, Zn, Si 총 10개의 금속성분 농도를 분석하였다. 분석된 금속성분의 농도는 시료 여지와 같은 방법으로 분석된 공시료(blank) 값들을 이용하여 보정하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 측정된 PM₁₀의 농도

아산시 순천향대학교 자연과학대학 옥상과 서울시 한양대학교 의과대학 옥상에서 동시 측정된 결과 PM₁₀의

평균 농도는 아산시의 경우 47.98(±45.57) µg/m³을 나타내었으며 서울시는 75.33(±40.52) µg/m³을 나타내었다(Table 1). PM₁₀의 농도는 서울시가 아산시보다 통계적으로 유의하게 높았다(p<0.01). 측정 기간동안 2001년 12월 13, 14일, 2002년 1월 12일, 3월 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23일, 4월 8, 9, 10, 12, 17일은 황사가 발생하였다. 황사가 발생한 기간을 '황사시'로 하고 황사가 발생하지 않은 기간을 '일반 기상시'로 구분하여 농도 비교를 하였다. 일반 기상시 아산시 PM₁₀ 평균 농도는 36.71(±20.53) µg/m³, 서울시의 평균 농도는 71.24(±41.47) µg/m³로 측정되었다(p<0.001). 황사시 총 7개의 시료 측정기간 동안에 영향을 주었고, 이 기간 중 아산시와 서울시의 PM₁₀ 평균농도는 각각 99.47(±84.86) µg/m³와 103.98(±14.66) µg/m³로 일반 기상시 보다 각각 약 2.7배와 1.5배 높게 측정되었다. 일반 기상시의 농도보다 황사시 농도가 아산시와 서울시에서 모두 통계학적으로 유의하게 높았으며(각각 p<0.05), 이것은 황사기간의 농도가 일반 기상시에 비해 높다는 다른 연구의 결과와 비슷한 수준을 나타내고 있다.¹²⁾ 황사시에는 아산시와 서울시의 PM₁₀ 평균농도는 통계적으로 유의한 차이를 나타내지 않았으며, 이것은 황사가 두 지역 모두에 높은 영향을 주는 것으로 나타났다.

2. PM₁₀의 계절적 농도 변화

Table 2는 아산시와 서울시의 PM₁₀ 평균농도를 계절별로 요약한 것이다. 아산시의 계절적 PM₁₀ 평균농도는 봄 67.55(±70.65) µg/m³, 여름 27.40(±10.50) µg/m³, 가을 45.09(±32.84) µg/m³, 겨울 50.46(±28.55) µg/m³의 농도로 각각 나타났으며, 서울시의 계절별 평균농도는 봄 96.30(±22.70) µg/m³, 여름 45.96(±16.10) µg/m³, 가을 61.32(±49.56) µg/m³, 겨울 78.17(±41.99) µg/m³의 농도로 각각 측정되었다. 두 지역 모두에서 봄철의 PM₁₀ 평균농도가 높게 나타났으며 서울시가 통계적으로 유의하게 높았으며(p=0.005), 이는 봄철에 주로 발생하는 황사현상 때문이다. 여름철의 농도가 다른 계절의 농도보다 낮게 측정된 되었는데 이것은 여름철에 집중된 경우에 의한 것으로 보이며, 국내의 PM₁₀을 측정 한 강병욱 등(1998)의 연구와 비슷한 결과를 보였다.¹³⁾ Qin 등(1997)이 홍콩에서 측정 한 PM₁₀의 농도가 여름철이 다른 계절보다 낮게 측정된 이유를 강우량 때문으로 설명한 바 있다.¹⁴⁾ 그러나 2000년 대구지역에서 계절별로 측정된 PM₁₀의 농도는 가을이 가장 낮았으며, 여름, 봄, 겨울 순으로 높아, 본 연구에서 얻은 결과와 일치하지 않는다. 즉, 지역적 특성에 따라 계절적 PM₁₀ 농도가 차이를 나타낼 수 있음을 시사한다.¹⁵⁾ 아산과 서울 두 도시 모두 계절별 농도는 통계적으로 유

Table 1. Concentrations (µg/m³) of PM₁₀ in yellow dust and non-yellow dust conditions of Asan and Seoul

	Asan		Seoul		p ^a
	n	Mean ± S.D. (Range)	n	Mean ± S.D. (Range)	
Yellow dust condition	7	99.47 ± 84.86(27.08~278.01)	5	103.98 ± 14.66(85.88~120.14)	0.223
Non-yellow dust condition	32	36.71 ± 20.53(15.05~127.08)	35	71.24 ± 41.47(20.83~190.05)	0.001**
Total	39	47.98 ± 45.57	40	75.33 ± 40.52	0.006**
p ^b		0.012*		0.023*	

p^a(p-value) : Mann-Whitney U test between concentrations of particles of Asan and Seoul.

p^b(p-value) : Mann-Whitney U test between concentrations of particles of yellow sand condition and normal weather condition.

Table 2. Seasonal concentrations (µg/m³) of PM₁₀ in Asan and Seoul

	Asan		Seoul		p ^a
	n	Mean ± S.D. (Range)	n	Mean ± S.D. (Range)	
Spring	12	67.55 ± 70.65 (23.84~278.01)	12	96.30 ± 22.70 (63.66~132.41)	0.005**
Summer	11	27.40 ± 10.50 (18.06~55.56)	4	45.96 ± 16.10 (29.64~67.36)	0.019*
Autumn	9	45.09 ± 32.84 (15.05~127.08)	12	61.32 ± 49.56 (20.83~187.73)	0.355
Winter	7	50.46 ± 28.55 (21.76~104.63)	12	78.17 ± 41.99 (37.73~190.05)	0.052
p ^b		0.029*		0.004**	

p^a(p-value) : Mann-Whitney U test between concentrations of particles of Asan and Seoul.

p^b(p-value) : Kruskal-Wallis H test between concentrations of particles with regard to season.

의한 차이를 나타내었다($p < 0.05$).

3. PM₁₀ 중의 금속성분

1) 금속성분의 농도

PM₁₀ 중의 금속성분을 분석한 결과 아산시는 규소 1491.34 ng/m³, 철 980.18 ng/m³, 구리 164.88 ng/m³, 아연 156.86 ng/m³, 순으로 나타났고, 서울시는 규소 700.74 ng/m³, 철 722.12 ng/m³, 아연 137.90 ng/m³, 구리 117.24 ng/m³의 순으로 나타났으며, 니켈은 검출 한계(limit of detection) 이하의 값을 나타내었다(Table 3). 두 지역의 금속성분 농도 비교시 니켈, 망간, 크롬, 구리에서 아산시가 서울시보다 통계적으로 유의하게 높았다(각각 $p < 0.05$). 비소와 납을 제외한 측정된 모든 금속성분에서 아산시가 서울시보다 높게 측정이 되었으며, 이것은 대도시인 서울시가 도로 포장 등으로 노출된 지면이 적은데 비해 중·소도시인 아산시는 상대적으로 산과 들이 많아 노출된 토양과 암석 등 지면의 영향을 많이 받은 것으로 추정할 수 있다. 또한 아산시의 측정지점인 순천향대학교는 트럭 등의 중형차가 자주 운행되는 국도 옆에 위치하여 인위적 발생원으로부터 유래된 금속성분(Pb, Mn, Ni, Cr, Cu, Cd, Zn)이 PM₁₀ 내에서 우세하게 존재하는 것으로 생각할 수 있다.^{16,17)}

일반 기상시 아산시의 금속성분 농도는 철 530.14 ng/m³, 규소 478.38 ng/m³, 구리 172.95 ng/m³, 아연 155.86 ng/m³로 높은 농도를 나타냈으며, 납 36.03 ng/m³, 망간 30.41 ng/m³의 순으로 측정되었다. 서울시 금속성분 농도는 철 600.26 ng/m³, 규소 459.63 ng/m³, 아연 140.80 ng/m³, 구리 120.35 ng/m³으로 다른 금속에 비해 높은 농도를 나타냈으며, 납 46.70 ng/m³, 망간 17.97 ng/m³의 순으로 측정되었다. 일반 기상시 두 지역의 PM₁₀ 중 금속성분 농도를 비교했을 때 서울시보다 아산시에서 망간, 크롬, 구리가 통계학적으로 유의하게 높았다($p < 0.01$).

황사시 아산시의 금속성분 농도는 규소가 6122.01 ng/m³로 가장 높은 농도를 보였으며 철 3037.51 ng/m³, 아연 161.42 ng/m³의 순으로 측정되었다. 서울시 금속성분 농도는 규소가 2388.49 ng/m³, 철이 1575.14 ng/m³로 높은 농도를 보였으며, 아연 117.64 ng/m³, 구리 95.47 ng/m³의 순으로 나타났다. 두 지역을 비교해 보면 아산시가 서울시보다 규소의 경우 약 2배 높았고, 비소를 제외한 다른 금속들도 아산시에서 서울시보다 높은 값을 보였다. 즉 아산시가 황사의 영향을 더 받는 것으로 나타났다.

일반 기상시와 비교했을 때 황사시에 아산시는 규

소, 철, 구리, 니켈, 망간의 농도가 유의하게 높았으며($p < 0.05$), 특히 규소 농도는 일반기상시보다 약 12.8배, 철의 농도가 약 5.7배 높은 농도를 보였다. 서울시에서는 황사시에 규소, 철, 망간이 일반 기상시보다 유의하게 높았는데($p < 0.05$), 규소의 농도는 약 5.2배, 철의 농도는 약 2.6배 차이가 났고, 망간은 약 2.5배의 차이를 보였다. 최규훈(2001) 등이 서울시 세종대 옥상에서 측정한 PM₁₀의 금속 결과와 비교할 때, 본 연구 결과와 비슷하게 황사때의 철과 망간의 농도가 비황사시보다 각각 대략 2.5배와 2.4배 높았고, 크롬, 카드뮴 등도 비슷한 배율을 나타내었다. 반면 납과 구리는 다른 양상을 보여 매년 발생하는 황사의 성분이 변할 수 있음을 나타내고 있다.¹⁸⁾

유 등(1995)과 Nitta 등(1994)의 연구에서 토양에 기인한 오염원은 Si, Fe 등이며, 유류 관련 오염원은 Zn, Pb, Mn 등이고 Zn, Pb, As은 자동차 오염원으로 분류한 것을 고려하면,^{19,20)} 화석연료 및 자동차 오염원인 Pb, As에서 서울시가 아산시보다 높은 농도를 나타내었다. 그럼에도 Pb, As를 제외한 모든 금속에서 아산시가 서울시보다 높게 나타나 PM₁₀ 발생원에 대한 관리 및 제어 방안이 대도시 뿐만 아니라 중소도시에서도 이루어져야 함을 보이고 있다.

2) 금속성분의 계절적 농도 변화

아산시의 PM₁₀의 금속성분 농도를 보면 계절에 따라 망간, 니켈, 철, 크롬, 구리, 규소의 농도가 서로 유의한 차이를 보였다($p < 0.05$). 특히 봄에 규소(3720.85 ng/m³)와 철(2052.93 ng/m³)의 농도가 높음을 알 수 있다. 봄철 아산시의 규소 측정치는 가을(275.53 ng/m³)에 비해 약 13.5배 정도 높게 측정되었다(Table 4). 한편 망간, 니켈, 납의 경우에는 여름철에 가장 높게 측정되었다. 서울시는 봄철에 규소와 철, 아연 등의 농도가 가장 높았으며, 납의 경우에는 봄철 측정농도가 가장 낮았다. 니켈은 모든 계절에서 검출한계 이하의 값을 나타내었다. 두 지역 모두 규소와 철의 농도가 봄철에 높게 나타났다는데 이는 봄철의 황사 현상으로 인해 토양 성분의 유입이 증가했기 때문이라고 추정할 수 있다. 두 지역 사이의 계절별 농도 변화를 보면 봄에는 납 농도가, 여름철에는 망간과 구리가 서울시보다 아산시가 유의하게 높았다($p < 0.05$). 아산시에서 납이 봄을 제외한 계절에서 높게 나타났으며, 망간은 봄철에 높은 농도를 나타내었다.

3) 금속성분의 상관성 분석

아산시에서 측정된 금속성분 중 규소는 철($r=0.987$)과 망간($r=0.949$)에서 유의한 상관관계를 보였으며, 비소, 니켈, 크롬, 구리는 역상관을 나타내었다. 서울시에

Table 3. Concentrations (ng/m³) of metallic elements in PM₁₀ of Asan and Seoul

	Yellow sand condition			Normal weather condition			Total				
	Asan	Seoul	P	Asan	Seoul	P	Asan	Seoul	P		
	Mean ± S.D. (Range)			Mean ± S.D. (Range)			Mean ± S.D.				
As	N.D.	7.72 ± 8.43 (0.001~18.61)	0.007**	1.87 ± 4.10 (0.001~14.74)	10.47 ± 11.67 (0.001~45.24)	0.000**	1.53 ± 3.77	10.13 ± 11.27	0.000**	0.095	0.788
Mn	99.01 ± 77.26 (45.52~215.63)	45.36 ± 17.05 (28.80~65.04)	0.123	30.41 ± 17.62 (5.47~68.74)	17.97 ± 10.67 (1.84~46.69)	0.001**	42.72 ± 43.67	21.39 ± 14.60	0.006**	0.001**	0.002**
Ni	3.79 ± 6.67 (0.007~16.05)	N.D.	0.212	21.48 ± 18.70 (0.007~60.00)	N.D.	0.000**	18.30 ± 18.43	N.D.	0.000**	0.008**	1.000
Fe	3037.51 ± 2786.72 (787.25~7463.59)	1575.14 ± 691.51 (943.39~2426.44)	0.570	530.14 ± 320.04 (26.52~1258.72)	600.26 ± 302.62 (23.81~1352.73)	0.360	980.18 ± 1503.33	722.12 ± 485.28	0.312	0.000**	0.001**
Cr	6.05 ± 3.77 (0.44~11.66)	3.19 ± 2.38 (0.97~7.27)	0.123	18.01 ± 20.38 (0.55~104.95)	2.98 ± 2.19 (0.003~9.36)	0.000**	15.86 ± 19.04	3.01 ± 2.18	0.000**	0.026*	0.919
Cu	127.99 ± 45.80 (83.94~225.21)	95.47 ± 90.47 (6.49~246.21)	0.123	172.95 ± 100.90 (33.73~501.42)	120.35 ± 62.10 (0.01~275.00)	0.012*	164.88 ± 94.56	117.24 ± 65.35	0.011*	0.306	0.261
Cd	4.92 ± 2.89 (1.83~10.85)	2.94 ± 0.76 (1.90~3.87)	0.088	2.73 ± 3.41 (0.001~11.87)	1.98 ± 1.40 (0.001~4.54)	0.260	3.12 ± 3.40	2.10 ± 1.37	0.089	0.027	0.146
Pb	51.08 ± 30.10 (29.25~117.62)	31.58 ± 34.63 (0.001~90.17)	0.062	36.03 ± 18.61 (1.5497.04)	46.70 ± 40.17 (0.001~167.94)	0.163	38.73 ± 21.44	44.81 ± 39.43	0.396	0.242	0.297
Zn	161.42 ± 47.33 (109.27~242.67)	117.64 ± 103.63 (16.81~290.92)	0.123	155.86 ± 71.18 (0.011~309.86)	140.80 ± 71.00 (0.011~314.77)	0.389	156.86 ± 67.02	137.90 ± 74.54	0.239	0.826	0.337
Si	6122.01 ± 6395.02 (1174.50~15451.39)	2388.49 ± 1845.81 (453.43~4790.84)	0.291	478.38 ± 485.17 (66.25~2185.55)	459.63 ± 381.36 (0.15~1687.99)	0.860	1491.34 ± 3385.77	700.74 ± 945.30	0.167	0.000**	0.004**

p* : Mann-Whitney U test between concentrations of metallic elements in particle in yellow sand and normal weather condition of Asan.
 p^b : Mann-Whitney U test between concentrations of metallic elements in particles in yellow sand and normal weather condition of Seoul.
 N.D.: Not Detectable.
 N.A.: Not Applicable.

Table 4. Seasonal concentrations (ng/m³) of metallic elements in PM₁₀ of Asan and Seoul

	Spring			Summer			Autumn			Winter		
	Asan	Seoul	P	Asan	Seoul	P	Asan	Seoul	P	Asan	Seoul	P
	Mean ± S.D. (Range)	Mean ± S.D. (Range)		Mean ± S.D. (Range)	Mean ± S.D. (Range)		Mean ± S.D. (Range)	Mean ± S.D. (Range)		Mean ± S.D. (Range)	Mean ± S.D. (Range)	
As	2.09 ± 4.94 (0.001-14.74)	7.07 ± 7.24 (0.001-18.90)	0.038*	2.10 ± 4.47 (0.001-14.63)	2.40 ± 3.31 (0.001-7.01)	0.659	0.72 ± 1.97 (0.001-5.94)	7.02 ± 7.56 (0.001-21.59)	0.009**	0.74 ± 1.97 (0.001-5.21)	18.86 ± 14.56 (0.001-45.24)	0.004** 0.798 0.062
Mn	73.20 ± 65.71 (25.60-215.63)	28.55 ± 20.06 (3.54-65.04)	0.011*	42.76 ± 17.19 (14.44-68.74)	21.89 ± 10.29 (11.71-35.89)	0.037*	16.83 ± 7.73 (8.82-33.66)	16.19 ± 10.41 (1.84-38.62)	0.722	23.72 ± 17.48 (5.46-48.34)	19.27 ± 11.24 (9.43-46.69)	0.866 0.000** 0.366
Ni	11.21 ± 16.07 (0.007-44.93)	N.D.	0.006**	36.11 ± 15.08 (15.07-60.00)	N.D.	0.004**	16.71 ± 16.66 (4.46-58.35)	N.D.	0.000**	4.53 ± 4.60 (0.007-10.93)	N.D.	0.004** 0.000** 1.000
Fe	2052.93 ± 2396.20 (342.72-7463.59)	983.10 ± 727.93 (146.97-2426.44)	0.273	602.85 ± 243.94 (333.00-1156.92)	742.52 ± 272.11 (485.54-1125.46)	0.296	340.51 ± 127.69 (95.10-552.52)	580.19 ± 315.72 (23.81-1103.93)	0.076	556.58 ± 529.19 (26.52-1493.41)	596.27 ± 267.35 (309.47-1109.85)	0.353 0.002** 0.446
Cr	7.86 ± 4.52 (0.44-16.17)	3.20 ± 2.53 (0.003-9.36)	0.008**	23.38 ± 14.12 (6.65-55.11)	3.58 ± 1.09 (2.35-4.98)	0.004**	25.38 ± 32.72 (4.30-104.95)	3.13 ± 1.74 (0.003-5.63)	0.000**	5.53 ± 2.64 (0.55-8.32)	2.50 ± 2.59 (0.003-7.28)	0.042* 0.001** 0.400
Cu	141.25 ± 71.21 (33.73-289.89)	77.12 ± 53.10 (0.01-164.66)	0.038*	244.55 ± 120.67 (117.40-501.42)	154.23 ± 83.84 (56.19-249.51)	0.192	127.98 ± 47.31 (64.27-208.61)	129.78 ± 52.39 (66.34-231.17)	0.943	127.62 ± 60.56 (56.34-225.21)	132.48 ± 70.59 (57.30-275.00)	0.735 0.021* 0.097
Cd	4.71 ± 3.73 (0.001-10.85)	1.77 ± 1.73 (0.001-4.54)	0.056	4.08 ± 4.07 (0.001-11.87)	2.63 ± 1.48 (0.77-3.84)	0.896	0.94 ± 1.07 (0.001-3.10)	2.20 ± 1.33 (0.33-4.41)	0.027*	1.67 ± 1.44 (0.001-4.04)	2.17 ± 1.04 (0.001-3.66)	0.291 0.039* 0.709
Pb	35.24 ± 13.98 (1.54-53.38)	22.18 ± 25.95 (0.001-90.62)	0.018*	37.45 ± 11.67 (13.88-57.53)	37.59 ± 27.69 (0.85-68.09)	0.896	41.08 ± 25.45 (13.33-97.04)	60.17 ± 39.65 (11.16-139.94)	0.320	43.70 ± 37.40 (5.35-117.62)	54.49 ± 46.07 (0.001-167.94)	0.866 0.980 0.032*
Zn	159.86 ± 84.73 (0.011-309.86)	93.16 ± 61.61 (0.011-197.94)	0.046*	180.58 ± 63.61 (75.85-292.90)	178.67 ± 94.72 (69.29-286.11)	1.000	133.34 ± 47.85 (73.83-216.09)	152.09 ± 60.13 (77.56-262.22)	0.477	144.67 ± 58.61 (61.51-242.67)	154.86 ± 80.75 (68.87-314.77)	0.866 0.370 0.109
Si	3720.85 ± 5568.46 (133.84-15451.39)	1061.77 ± 1628.88 (0.15-4790.84)	0.042*	528.77 ± 343.06 (212.85-1414.71)	794.36 ± 642.41 (157.23-1687.99)	0.514	275.53 ± 195.22 (85.64-657.88)	595.14 ± 221.43 (295.44-961.77)	0.004**	745.11 ± 1000.24 (66.25-2818.35)	414.11 ± 325.89 (0.15-999.16)	0.800 0.028* 0.560

p^a : Kruskal-Wallis H test between concentrations of metallic elements in particles with regard to season of Asan.
 p^b : Kruskal-Wallis H test between concentrations of metallic elements in particles with regard to season of Seoul.
 N.D.: Not Detectable.
 N.A.: Not Applicable.

서도 규소는 철($r=0.820$)과 망간($r=0.736$)과 서로 유의한 상관관을 보였으며, 비소, 크롬, 구리, 납, 아연과 역상관 관계를 나타내었다(Tables 5, 6). 이 결과는 규소,

철, 망간이 토양에서 기인함을 시사하는 것이다. 납의 경우는 아산시에서 구리와 서울시에서는 구리, 카드뮴과 유의한 상관관계를 나타내어 차량 등의 유류사용 발

Table 5. Correlation matrix among metallic elements in Asan

	As	Mn	Ni	Fe	Cr	Cu	Cd	Pb	Zn	Si
As	1									
Mn	-0.122	1								
Ni	-0.029	-0.057	1							
Fe	-0.119	0.960**	-0.178	1						
Cr	-0.113	-0.090	0.262	-0.135	1					
Cu	0.138	0.054	0.490**	-0.119	0.245	1				
Cd	-0.017	0.502**	0.393*	0.432**	-0.024	0.314	1			
Pb	0.119	0.116	0.052	0.078	-0.156	0.396*	0.311	1		
Zn	0.209	0.100	0.469**	0.022	0.000	0.651**	0.617**	0.656**	1	
Si	-0.140	0.949**	-0.233	0.987**	-0.124	-0.150	0.326*	0.033	-0.056	1

* $p < 0.05$.

** $p < 0.01$.

Table 6. Correlation matrix among metallic elements in Seoul

	As	Mn	Fe	Cr	Cu	Cd	Pb	Zn	Si
As	1								
Mn	0.085	1							
Fe	0.023	0.973**	1						
Cr	0.107	0.304	0.217	1					
Cu	0.278	0.218	0.103	0.536**	1				
Cd	0.155	0.651**	0.621**	0.199	0.637**	1			
Pb	0.400*	0.356*	0.229	0.530**	0.807**	0.629**	1		
Zn	0.271	0.239	0.127	0.543**	0.999**	0.649**	0.810**	1	
Si	-0.059	0.736**	0.820**	-0.116	-0.131	0.447**	-0.049	-0.111	1

* $p < 0.05$.

** $p < 0.01$.

Table 7. Correlation matrix among metallic elements in non-yellow dust condition in Asan

	As	Mn	Ni	Fe	Cr	Cu	Cd	Pb	Zn	Si
As	1									
Mn	-0.011	1								
Ni	-0.112	0.484**	1							
Fe	0.031	0.689**	0.353*	1						
Cr	-0.169	0.087	0.201	-0.046	1					
Cu	0.109	0.635**	0.484**	0.332	0.213	1				
Cd	0.036	0.561**	0.580**	0.565**	0.028	0.446*	1			
Pb	0.223	0.236	0.237	0.227	-0.135	0.464**	0.372*	1		
Zn	0.228	0.425*	0.529**	0.464**	0.016	0.665**	0.730**	0.707**	1	
Si	-0.117	0.579**	0.012	0.649**	0.034	0.245	0.004	-0.030	0.023	1

* $p < 0.05$.

** $p < 0.01$.

Table 8. Correlation matrix among metallic elements in non-yellow dust condition in Seoul

	As	Mn	Fe	Cr	Cu	Cd	Pb	Zn	Si
As	1								
Mn	0.177	1							
Fe	0.108	0.960**	1						
Cr	0.074	0.559**	0.547**	1					
Cu	0.258	0.681**	0.661**	0.466**	1				
Cd	0.157	0.697**	0.726**	0.223	0.808**	1			
Pb	0.386*	0.751**	0.703**	0.491**	0.796**	0.733**	1		
Zn	0.250	0.688**	0.673**	0.472**	0.999**	0.813**	0.801**	1	
Si	-0.048	0.308	0.352*	0.057	0.550**	0.580**	0.437**	0.553**	1

*p<0.05.

**p<0.01.

Table 9. Correlation matrix among metallic elements in yellow dust condition in Asan

	Mn	Ni	Fe	Cr	Cu	Cd	Pb	Zn	Si
Mn	1								
Ni	0.092	1							
Fe	0.996**	0.013	1						
Cr	0.513	-0.633	0.554	1					
Cu	-0.415	-0.243	-0.429	0.079	1				
Cd	0.686	0.096	0.685	0.513	-0.444	1			
Pb	-0.302	-0.205	-0.324	0.314	0.890**	-0.114	1		
Zn	-0.344	0.400	-0.407	-0.304	0.783*	-0.274	0.739	1	
Si	0.997**	0.064	0.996**	0.507	-0.424	0.639	-0.337	-0.378	1

*p<0.05.

**p<0.01.

Table 10. Correlation matrix among metallic elements in yellow dust condition in Seoul

	As	Mn	Fe	Cr	Cu	Cd	Pb	Zn	Si
As	1								
Mn	0.216	1							
Fe	0.159	0.992**	1						
Cr	0.509	-0.561	-0.645	1					
Cu	0.431	-0.688	-0.757	0.985**	1				
Cd	0.660	0.752	0.744	-0.140	-0.241	1			
Pb	0.520	-0.480	-0.577	0.985**	0.950*	-0.144	1		
Zn	0.442	-0.678	-0.747	0.987**	1.000**	-0.224	0.951*	1	
Si	0.097	0.971**	0.993**	-0.725	-0.820	0.711	-0.666	-0.811	1

*p<0.05.

**p<0.01.

생원으로 분류할 수 있다.

일반 기상시에 관찰된 금속성분 사이의 상관성을 보면 아산시에서 측정된 금속성분 중 규소는 철($r=$

0.649), 망간($r=0.570$)과 유의한 상관성을 보였고, 서울시는 카드뮴($r=0.580$), 아연($r=0.553$), 철($r=0.352$)과 유의한 상관성을 나타내었다. 남의 경우 아산시에서 구리

($r=0.464$) 및 카드뮴($r=0.372$)과, 서울시에서는 구리, 망간, 카드뮴, 철, 크롬, 비소와 유의한 상관성을 보였다(Tables 7, 8). 일반 기상시 금속 성분간의 상관성을 보면, 서울시는 아산시와 다른 양상을 보이는 데, 이것은 서울시 PM₁₀의 발생원이 서로 혼재되어 있기 때문으로 생각한다.

황사시의 금속성분 상관성을 서울시와 아산시로 구분하여 분석한 결과가 Table 9와 Table 10에 제시되어 있다. 아산시에서 측정된 금속 중 규소는 망간($r=0.997$) 및 철($r=0.996$)과 유의한 상관관계를 나타냈으며, 철과 망간, 납과 구리가 각각 유의한 상관성을 보였다. 서울시에서 규소는 철($r=0.993$) 및 망간($r=0.971$)과 유의한 상관성을 보였고, 납은 크롬($r=0.985$) 및 구리($r=0.950$)와, 아연은 구리($r=0.988$), 크롬($r=0.987$), 납($r=0.951$)과 유의한 상관성을 나타내었다. 발생원 분류 항목(source profile)을 보면 규소와 철이 토양에서 주로 발생하는 것으로 보고되고 있으며, 이는 본 연구에서 나타난 황사시 철과 규소의 상관성을 설명하는 것이다.²¹⁾ 연간 PM₁₀의 농도 및 금속성분에 미치는 황사의 영향이 크다는 것을 알 수 있다.

IV. 결 론

본 연구는 2001년 9월부터 2002년 8월까지 아산시와 서울시 일부 지역에서 시료를 포집하여 PM₁₀ 농도를 측정하고, 금속성분 10개 항목(As, Mn, Ni, Fe, Cr, Cu, Cd, Pb, Zn, Si)을 분석하여 그 농도 및 조성 성분을 비교하였다. 대도시인 서울의 PM₁₀의 농도는 중소도시인 아산보다 유의하게 높았으나($p<0.01$), 황사시에는 두 지역간에 유의한 차이가 나타나지 않았다. 계절에 따른 PM₁₀의 농도는 황사의 영향으로 봄이 가장 높았으며, 여름이 가장 낮은 값을 나타내었다. PM₁₀ 금속성분 농도를 비교한 결과 아산시에서 비소와 납을 제외한 모든 금속의 농도가 높게 나타났다. 황사시 비소를 제외한 모든 금속의 농도가 아산시에서 높게 측정되었으며, 일반기상시에도 아산시에서 비소, 철, 납을 제외한 모든 금속이온의 농도가 높았다. 이것은 PM₁₀의 중금속 농도를 볼 때 아산시가 서울시에 비해 황사의 영향을 더 많이 받는 것으로 이에 대한 관리 및 대책이 시급한 것으로 생각한다.

참고문헌

1. Lee, J. T. and Shy, C. M. : Respiratory function as measured by peak expiratory flow rate and PM₁₀: six

communities study. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, **9**(4), 293-299, 1999.

2. John, W., Wall, S. M., Ondo, J. L. and Winklmay, W. : Modes in the size distribution of atmospheric inorganic aerosol. *Atmospheric Environment*, **24A**(9), 2349-2359, 1990.

3. Simpson, R. W. : A statistical analysis of particulate data sets in Brisbane, Australia. *Atmospheric Environment*, **26B**(1), 99-105, 1992.

4. 나덕재, 이병규 : 산업도시 대기 중 PM₁₀의 농도 및 금속원소 성분의 특성 연구. *한국대기환경학회지*, **16**(1), 23-35, 2000.

5. 환경부 : 환경백서, 339-341, 2001.

6. 최금찬, 유수영, 전보경 : 부산지역의 입자상 대기오염물질의 농도특성에 관한 연구. *한국환경위생학회지*, **26**(2), 41-48, 2000.

7. Salvador, P., Artinano, B., Alonso, D. G., Querol, X. and Alstuey, A. : Identification and characeterisation of sources of PM₁₀ in Madrid (Spain) by statistical methods. *Atmospheric Environment*, **38**, 435-447, 2004.

8. Marazzan, G. M., Ceriani, M., Valli, R. and Vecchi, R. : Source apportionment of PM₁₀ and PM_{2.5} in Milan (Italy) using receptor modelling. *The Science of Total Environment*, 2004, In Press.

9. Watson, J. G., Zhu, T., Chow, J. C., Engelbrecht, J., Fujita, E. M. and Wilson, W. E. : Receptor modeling application framwork for particle source apportionment. *Chemosphere*, **49**, 1093-1136, 2002.

10. 이해분, 김동술, 이진홍 : PM-10 내 중금속의 장기간 평균농도 및 위해도 평가. *한국대기보전학회지*, **12**(5), 1996.

11. US EPA : Compendium of methods for the determination of inorganic compounds in ambient air. EPA, 625, R-96010a, 1999.

12. 신은상, 김희강 : 서울시에서의 대기부유먼지에 대한 황사의 영향. *한국대기보전학회지*, **8**(1), 52-57, 1992.

13. 강병욱, 이학성, 김희강 : 수용모델을 이용한 청주시 미세먼지(PM_{2.5})의 기여도 추정. *한국대기환경학회지*, **16**(5), 477-485, 2000.

14. Qin, Y., Chan, C. K. and Chan, L. Y. : Characteristics of chemical compositions of atmospheric aerosols in Hong Kong: spatial and seasonal distributions. *The Science of the Total Environment*, **206**, 25-37, 1997.

15. 최성우, 송형도 : 대구지역 부유분진 중 미량금속성분의 발생원 특성연구. *한국대기환경학회지*, **16**(5), 469-476, 2000.

16. Hughes, L. S. and Cass, G. R. : Physical and chemical characterization of atmospheric ultrafine particles in the Los Angeles area. *Environmental Sciences & Technology*, **32**(9), 1163-1160, 1998.

17. Rodriguez, S. R., Querol, X., Alastuey, A., Viana, M., Alarcon, M. and Mantilla, E. : Comparative PM₁₀-PM_{2.5} source contribution study at rural, urban and industrial sites during PM episodes in Eastern Spain. *The Science of the Total Environment*, 2004, In Press.

18. 최규훈, 김기훈, 강창희, 이진홍 : 황사와 비황사기간의 중금속 농도분포 특성: 2001년 황사기간에 대한 비

- 교연구. 한국대기환경학회지, **19**(1), 45-56, 2003.
19. 유정석, 김동술, 김윤신 : 서울시 PM-10 오염원 정량적 기여도 추정. 한국대기보전학회지, **11**(3), 279-290, 1995.
20. Nitta, H., Ichikawa, M., Sato, M., Konishi, S. and Ono, M. : A new approach based on a covariance structure model to source apportionment of indoor fine particles in Tokyo. *Atmospheric Environment*, **28**(4), 631-636, 1994.
21. Qin, Y. and Oduyemi, K. : Atmospheric aerosol source identification and estimate of source contributions to air pollution in Dundee, UK. *Atmospheric Environment*, **37**, 1799-1809, 2003.