

우리나라 일부지역의 입자상 물질 농도에 대한 연구

손부순 · 공미연 · 박종안 · 양원호* · 김종오**

순천향대학교환경보건학과 · 대구카톨릭대학교산업보건학과* · 동남보건대학환경위생과**

A study of particulate matters in Korea

Bu-Soon Son · Mi-Yeon Gong · Jong-An Park · Won-ho Yang* · Jong-Oh Kim**

Dept. of Environmental Health Science, Soonchunhyang University.

**Dept. of Occupational Health, Catholic University of Daegu.*

***Dept. of Environmental sanitation, Dongnam Health College*

Abstract

Recent epidemiologic studies revealed that the concentration of air pollutants and fine particulated matter have some effects on health status and are associated with increased mortality and morbidity. The purpose of this study was to characterize background mass concentration of fine particle (PM_{2.5}) and metallic composition from September 2001 to August 2002 in comparison with a medium city, Asan and metropolitan city, Seoul. Conclusively, proper management for fine particles was required in a medium city, Asan, considering the concentrations of metallic elements in fine particles in Asan were relatively higher than those in Seoul. The results were as followed.

1. Average mass concentrations of fine particles in Asan and Seoul were $37.70(\pm 18.41 \mu\text{g}/\text{m}^3)$ and $5.83(\pm 38.50) \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectively. When the weather conditions were classified as normal and yellow-sand, measured average mass concentrations of fine particles in yellow-sand weather condition was significantly higher than those of normal weather condition in both cities ($p < 0.05$).
2. Depending on seasons, measured average mass concentrations of fine particles in Asan and Seoul in spring were $47.76(\pm 19.07) \mu\text{g}/\text{m}^3$ and $61.53 (\pm 4.37) \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectively. In summer, the average mass concentrations of fine particles in Asan and Seoul were $29.44(\pm 9.85) \mu\text{g}/\text{m}^3$ and $25.42(\pm 8.10) \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectively. Especially, the concentration was the highest in spring and the lowest in summer among four seasons.
3. Average concentrations of manganese(Mn), iron(Fe), chromium(Cr), cadmium(Cd), lead(Pb) and silicon(Si) in fine particles in Asan were significantly higher in Seoul ($p < 0.05$). Average concentration of Si in fine particle in Asan was statistically higher than that of Seoul during yellow -sand condition ($p < 0.05$).

4. Considering the characterization of four seasons, average Pb concentration of fine particle in Asan is significantly higher than that of Seoul in spring($p<0.01$). In summer, average Mn and Cr concentrations of fine particle in Asan is higher than those of Seoul ($p<0.05$). Average Mn, Fe, Cr and Si concentrations in fall ($p<0.05$), and average Mn, Fe, Cr, Pb, and Si concentrations in winter ($p<0.05$) in Asan were higher than those of Seoul, respectively.
5. Mass concentrations of each Mn, Fe, Cd and Si in fine particles were significantly correlated with both cities. In normal weather condition, Mn, Cu and Si concentrations are statistically significant in Asan, while Mn, Fe, Cu and Si concentrations are statistically significant in Seoul. Mn, Fe and Si concentrations in both cities were statistically significant during yellow-sand weather.

I. 서 론

우리가 숨쉬고 있는 대기 중에는 많은 부유 먼지가 존재하고 있으며, 이는 산업활동의 증가와 도시화, 차량 수 등의 증가로 인하여 그 종류와 농도가 크게 변화하여 자연 생태계 및 인체 건강에 심각한 영향과 피해를 유발시키고 있다^{1,2}. 이러한 부유 먼지는 거대먼지(coarse particle)와 미세먼지(fine particle)로 분류할 수 있으며, 거대먼지는 주로 발생원에서 직접 대기 중에 방출된 입자로 화산활동, 토양 먼지의 비산 등과 같은 자연발생 분진이 대부분이며, 크기가 $2.5\mu\text{m}$ 보다 큰 먼지이다. 미세먼지는 $2.5\mu\text{m}$ 이하의 먼지(particulated matter less than $2.5\mu\text{m}$ as an aerodynamic diameter, PM_{2.5})를 말하며 인위적 발생에 의한 가스상 물질이 대기 중에 방출되어 광화학 반응 또는 물리·화학적 반응을 거쳐 생성된 입자로, 화석연료의 연소, 자동차 배기가스 등과 같이 연소에서 직접 배출되거나 배출된 물질들의 응집, 휘발성 물질의 응축, 가스상 물질의 입자상으로 전환 등에 의해 생성되는 산성 오염물질이 대부분이다.

이러한 미세먼지에는 여러가지 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 발암성을 가지고 있다³.

미세먼지의 경우 입자크기가 $0.1 \sim 1 \mu\text{m}$ 일 때 폐속으로의 침투가 최대가 되어서 폐질환을 야기시키는데, 이는 동일 질량의 분진을 가정할 때 입자크기가 감소할수록 표면적이 급증하여 유해성 가스 및 As, Ni 등의 화학원소를 쉽게 흡착하여 인체에 전달하는 매체가 될 수 있기 때문이다⁴. 이러한 금속 성분 등은 조직 내 그들의 지속성 때문에 다른 유기성 발암물질에 대해 촉진제 또는 공동 발암원으로 작용할 수 있다⁵. 또한 태양광을 산란, 흡수시켜 시정감소의 주요 원인물질로 작용하고, 구름속에 혼입되어 구름의 반사율을 변화시키고, 정밀 기계손상 및 일사량 감소 등 많은 영향을 미친다.

미세먼지는 사망률의 증가, 호흡기 또는 심혈관계 질환 관련 외래환자수의 증가, 천식증상의 악화, 호흡기 질환 증상발현 또는 폐기능 저하^{6)~10} 등과 같은 건강영향과 유의한 상관성이 있는 것으로 보고되고 있다.

근래 PM₁₀보다 PM_{2.5}에 대한 인체 유해성이 더 심각한 것으로 보고되고 있고¹¹), 미국 등 일부 선진국에서는 이미 $2.5\mu\text{m}$ 이하의 먼지인 PM_{2.5}에 대한 대기환경기준을 설정하여 규제하고 있다. 미세먼지가 PM₁₀보다 낮은 농도에서 건강에 크게 영향을 줄 수 있음에도 불구하고 우리나라는 환경기준이 설정되지 않았을 뿐만 아니라 이 분야의

연구도 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 중·소도시인 아산시와 대도시인 서울시 두 지역간의 미세먼지 농도와 금속성분의 조성을 비교하고 발생원을 추정, 대기오염 관리대책에 필요한 기초자료를 제공하고자 한다.

II. 연구방법

1. 시료의 포집

미세먼지의 농도 및 금속성분의 조성을 조사하기 위하여 아산시는 순천향대학교 자연과학대학 옥상을 선정하였으며, 서울시는 한양대학교 의과대학 옥상에서 2001년 9월부터 2002년 8월까지 측정하였다.

미세먼지의 포집을 위하여 유량이 약 5 l/min 인 mini-volume portable air sampler(MiniVol, AIRmetrics社)(그림 1)를 이용하여 주 6일(화요일 15시부터 월요일 15시까지)을 연속 측정하였으며, filter는 pallflex membrane filter (47 mm, Gelman sciences社)를 이용하여 항온, 항습 상태인 데시케이터 내에서 24시간 이상 보관하여 항량이 되게 한 후 포집 하였고 이와 같은 조작은 시료 채취 전과 채취 후 모두 동일한 조건에서 실시하였다.

미세먼지의 포집 원리는 입경이 2.5 μm보다 큰 입자가 미세먼지 분립장치 내의 충돌판(target disk)에 관성 충돌하여 붙고 2.5 μm보다 작은 입자는 충돌판에서 위로 흐르는 공기의 흐름에 따라

여지에 쌓이게 된다. 충돌판 위에 입자를 부착시키기 위해 grease(ApiezonM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 여러번 세척하여 퇴적된 먼지를 깨끗하게 제거하였다.

2. 시료의 분석방법

2-1. 미세먼지 농도

Mini-volume portable air 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 아래의 식을 이용하여 질량 농도 분석을 실시하였다.

$$\begin{aligned}
 & \text{- 질량 농도 계산 식} \\
 & \text{질량 농도 } C(\mu\text{g}/\text{m}^3) \\
 & = \frac{\text{먼지무게}(\mu\text{g})}{\text{시료채취총유량}(\text{m}^3)} \\
 & = \frac{\text{측정 후 여지무게}(\mu\text{g}) - \text{측정 전 여지무게}(\mu\text{g})}{\text{시료채취유량}(\ell/\text{min}) \times \text{시료채취시간}(\text{min})} \\
 & \quad \times 1000(\ell/\text{m}^3)
 \end{aligned}$$

2-2. 금속성분 농도

미세먼지 중의 금속성분을 추출하기 위해 미국 EPA(1999)에서 고시한 microwave(Questron사, QLab6000) 전처리 방법을 이용하여 그림 2에 나타난 방법과 같이 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 농

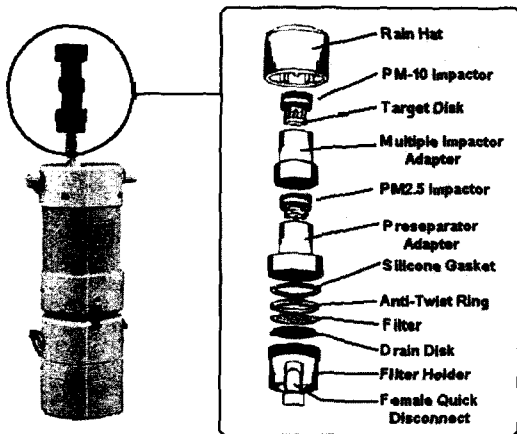


Fig. 1. MiniVol portable sampler.

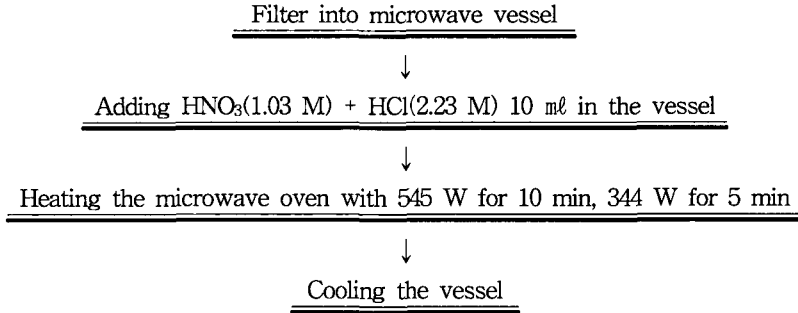


Fig. 2. Pretreatment of samples using microwave.

도는 시료 여지와 같은 방법으로 분석된 공시료 (blank) 값들에 대하여 각각 보정하였다.

2-3. 통계 분석

아산시와 서울시의 미세먼지 농도 및 금속 농도는 비모수 통계 방법인 Mann-Whitney U test를 이용하여 분석하였고, 계절별 농도 변화는 Kruskal-Wallis H test를 이용하여 분석하였다. 자료 분석은 Excel 2000과 SPSS 11.0 통계 프로그램을 사용하였다.

III. 연구결과 및 고찰

1. 미세먼지의 농도

아산시는 순천향대학교 자연과학대학 옥상에서, 서울시는 한양대학교 의과대학 옥상에서 같은 시간에 동시 측정 한 결과 아산시 미세먼지의 평균 농도는 $37.70(\pm 18.41) \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 나타내었으며 서울시 미세먼지의 평균 농도는 $45.83(\pm 38.50) \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 나타내었고(표 1과 그림 3), 두 지역 농도는 통계학적으로 유의한 차이가 없는 것으로 나타났다.

측정 기간동안 2001년 12월 13, 14일, 2002년 1월 12일, 3월 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23일, 4월 8, 9, 10, 12, 17일은 황사가 발생하였으며(대전지방기상청, 2002) 황사가 발생한 기간을 황사시로 하고 황사가 발생하지 않은 기간을 일반 기상시로 구분하여 농도 비교를 하였다.

일반 기상시 아산시 미세먼지 평균 농도는 $34.42(\pm 15.50) \mu\text{g}/\text{m}^3$, 서울시 미세먼지의 평균 농도는 $32.31(\pm 17.85) \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 측정되었다. 이 결과는 다른

국내 도시에서 측정된 미세먼지 연구논문 결과들과 비슷한 농도 수준을 나타내고 있다^{12)~14)}. 황사시 총 7개의 시료 측정기간 동안에 영향을 주었고, 이 기간 중 아산시의 미세먼지 평균농도는 $58.33(\pm 22.99) \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 일반 기상시 보다 약 1.7배 높게 측정되었으며, 서울시의 미세먼지 평균농도는 $92.20(\pm 54.32) \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 일반 기상시 보다 약 2.9배정도 높게 측정되었다. 일반 기상시의 농도보다 황사시 농도가 아산시와 서울시에서 모두 통계학적으로 유의하게 높았다(각각 $p < 0.01$). 이는 황사기간의 농도가 일반 기상시에 비해 약 2~3배 높다는 다른 연구의 결과와 비슷한 수준을 나타내고 있다¹⁵⁾.

아산시와 서울시 모두 미국의 PM_{2.5} 연간 환경기준치인 $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 약 2.5~3배정도 높은 농도가 측정되었고, EC(European Commission) 권고기준에서 2005년 목표인 연간 $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 약 1.8~2.3배정도 높게 측정되었다.

캐나다 토론토에서 측정된 미세먼지(PM_{2.5})의 연간 월평균 농도인 $28.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 비교할 때 서울시뿐만 아니라 아산시보다도 높은 농도를 나타냈으며, 황사기간을 제외한 일반 기상시에도 서울시 및 아산시의 미세먼지의 농도는 약 $4\sim 6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 높았다¹⁶⁾. 이와 같이 미세먼지의 측정 결과가 다른 국가 기준치보다 높은 것을 고려하면 우리나라의 미세먼지에 대한 지속적인 관리 및 대책이 필요하다고 생각한다.

2. 미세먼지의 계절적 농도 변화

아산시의 계절적 평균농도는 봄 $47.76(\pm 19.07)$

Table 1. Concentrations ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) of fine particles (PM2.5) in normal weather and yellow sand conditions in Asan and Seoul

	Asan		Seoul		p^a
	n	Mean \pm S.D. (Range)	n	Mean \pm S.D. (Range)	
Yellow sand condition	7	58.33 \pm 22.99 (33.10~89.81)	7	92.20 \pm 54.32 (59.03~203.01)	0.225
Normal weather condition	44	34.42 \pm 15.50 (13.43~99.07)	24	32.31 \pm 17.85 (2.78~87.50)	0.376
Total	51	37.70 \pm 18.41	31	45.83 \pm 38.50	0.785
p^b		0.009**		0.000**	

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

$\mu\text{g}/\text{m}^3$, 여름 29.44(\pm 9.85) $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 가을 39.19(\pm 24.57) $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 겨울 33.78(\pm 12.62) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도로 각각 나타났으며, 서울시의 계절별 평균농도는 봄 61.53(\pm 4.37) $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 여름 25.42(\pm 8.10) $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 가을 45.60(\pm 53.30) $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 겨울 42.92(\pm 31.49) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도로 각각 측정되었다(표 2). 봄철의 농도가 두 지역 모두 높게 나타났으며 서울시가 통계학적으로 유의

하게 높았다($p < 0.05$). 이는 봄철에 주로 발생하는 황사현상의 영향일 것으로 생각한다. 여름철의 농도가 다른 계절의 농도보다 낮게 측정되었는데 이것은 국내의 강¹⁷⁾의 연구와 비슷한 결과를 보였으며, Qin¹⁸⁾ 등이 홍콩에서 측정된 미세먼지의 농도가 여름철이 다른 계절보다 낮게 측정된 이유가 강수량 때문이라고 한 것과 일치한다. 아산시는 계절별 농도가 유의한 차이가 나타났고($p < 0.05$), 서울시는 계절별 차이가 없는 것으로 나타났는데 이는 측정기기의 고장 등으로 여름철과 봄철의 시료가 적었기 때문인 것으로 생각 할 수 있다.

3. 미세먼지 중의 금속성분

3-1. 금속성분의 농도

미세먼지 중의 금속성분을 분석한 결과 아산시는 규소 574.69ng/m³, 철 313.14ng/m³, 구리 109.15ng/m³, 아연 107.26ng/m³의 순으로 나타났고, 서울시는 규소 274.83ng/m³, 철 219.62ng/m³, 아연 106.72ng/m³, 구리 93.67ng/m³의 순으로 나타났으며, 니켈은 검출한계(limit of detection) 이하의 값을 나타내었다(Table 3). 두 지역의 금속성분 농도 비교시 망간, 철, 크롬, 카드뮴, 납, 규소에서 아산시가 서울시보다 통계학적으로 유의하게 높았다(각각 $p < 0.05$). 규소, 철의 농도에서 아산시가 서울시보다 높게 측정되었는데($p < 0.001$), 이는 대도시인 서울시가 포장 등으로 지면이 적는데 비해 중·소도시인 아산시는

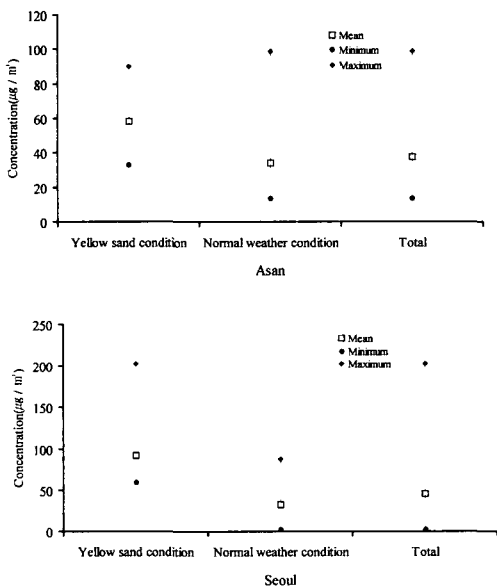


Figure 3. Concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) of fine particles (PM2.5) in normal weather and yellow sand condition in Asan and Seoul.

Table 2. Seasonal concentrations ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) of fine particles (PM2.5) in Asan and Seoul

	Asan		Seoul		p ^a
	n	Mean±S.D. (Range)	n	Mean±S.D. (Range)	
Spring	13	47.76±19.07 (20.14~89.81)	5	61.53±4.37 (58.10~68.75)	0.026*
Summer	12	29.44±9.85 (13.43~46.06)	2	25.42±8.10 (19.69~31.15)	0.584
Fall	13	39.19±24.57 (14.12~99.07)	12	45.60±53.30 (13.89~203.01)	0.430
Winter	13	33.78±12.62 (18.98~71.30)	12	42.92±31.49 (2.78~126.16)	0.231
p ^b		0.017*		0.082	

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

산과 들이 많아 이들의 영향을 받은 것으로 추정 할 수 있다.

일반 기상시 아산시의 금속성분 농도는 규소 329.05ng/m³, 철 221.48ng/m³, 구리 113.07ng/m³, 아연 108.22ng/m³로 높은 농도를 나타냈으며, 납 44.05ng/m³, 망간 17.52ng/m³의 순으로 측정되었다. 서울시 금속성분 농도는 아연 111.16ng/m³, 구리 97.27ng/m³, 철 70.22ng/m³으로 다른 금속에 비해 높은 농도를 나타냈으며, 납 21.14ng/m³, 비소 8.92ng/m³의 순으로 측정되었다. 서울시보다 아산시의 농도가 철이 약 3.2배, 망간이 약 2.9배, 납이 약 2배 정도로 높게 나타났으며, 규소의 경우 서울시 농도가 검출한계 이하의 값이 많아 아산시와 직접 비교가 어렵지만 그 외 두 지역의 금속성분 농도는 비슷하게 증가되었다. 이러한 농도 측정 범위는 다른 연구에서도 비슷하게 나타나고 있다^{19)~21)}. 일반 기상시 두 지역을 비교했을 때 망간, 철, 크롬, 카드뮴, 납, 규소에서 아산시가 서울시보다 통계학적으로 유의하게 높았다(p<0.01).

황사시 아산시의 금속성분 농도는 규소가 2,118.69ng/m³로 높은 농도를 보였으며 철 889.29ng/m³, 아연 101.24ng/m³의 순으로 측정되었고, 서울시 금속성분 농도는 규소가 1,193.18ng/m³, 철이 731.87ng/m³로 높은 농도를 보였으며, 아연 91.51ng/m³, 구리 81.31ng/m³의 순으로 나타났다. 두 지역을 비교해 보면 아산

시 규소가 약 1.8배, 철이 약 1.2배 정도 높았고 다른 금속들은 비슷한 수준을 보였으며, 황사시 두 지역을 비교했을 때 규소가 서울시보다 아산시에서 유의하게 높았다(p<0.05).

일반 기상시와 황사시를 비교했을 때 아산시는 규소, 철, 망간에서 황사시가 유의하게 높았으며(p<0.05), 규소 농도가 약 6.4배 정도의 차이를 보였으며, 철의 농도가 약 4배 정도의 차이를 보였다. 망간의 경우 약 1.8배의 차이를 보였으며 그 외 금속은 비슷한 수준을 나타내었다. 이 결과는 신등¹⁵⁾의 연구 결과와 비슷한 수준을 나타내었다. 서울시는 황사시에 망간, 철, 규소가 일반 기상시보다 유의하게 높았으며, 철의 농도는 약 10.4배 정도 차이가 났고, 망간은 약 4.3배의 차이를 보였다. 서울시는 규소 농도가 약 170배 정도의 높은 차이를 나타냈는데 이것은 일반 기상시 규소의 농도가 대부분 검출한계 이하로 나타났기 때문이다. 구리는 일반 기상시보다 황사시의 농도가 더 낮게 측정되었는데 이는 최등²²⁾의 연구 결과와 비슷하여 구리는 황사와 연관이 없는 것으로 생각할 수 있다.

유등²³⁾과 Hiroshi 등²⁴⁾의 연구에서 토양에 기인한 오염원은 Si, Fe, K, Ca 등이며, 유류 관련 오염원은 K, Ca, Zn, Pb, Mn 등이고 K, Zn, Pb은 자동차 오염원으로 분류하였다. 차량 등의 영향을

많이 받는 대도시보다 중·소도시인 아산시가 차량성분인 납과 망간 등에서 높은 농도가 나타났는데 이것은 아산시가 차량 등의 영향도 받았을 것이라고 추정할 수 있다. 또한, 대도시인 서울시는 살수차, 진공 흡입차 등 미세먼지에 대한 관리가 이루어져 상대적으로 낮은 농도를 나타냈지만 중·소도시인 아산시는 미세먼지 발생원에 대한 관리가 소홀하여 서울시 보다 대부분의 금속성분에서 높은 농도가 나타난 것으로 추정할 수 있다.

3-2. 금속성분의 계절적 농도 변화

아산시의 금속성분 농도를 보면 규소(1301.85 ng/m³)와 철(552.24ng/m³)이 봄에 농도가 높았으며 규소는 가장 낮은 가을(275.56ng/m³)보다 약 4.7배 정도 높게 측정되었다(Table 4). 망간, 니켈, 납에서는 여름철의 농도가 가장 높게 측정되었으며, 계절별 농도는 망간, 니켈, 크롬, 구리, 납, 아연, 규소에서 통계학적으로 유의한 차이를 보였다(p<0.05). 서울시는 규소 1670.45ng/m³와 철 926.74 ng/m³, 망간 27.34ng/m³에서 봄의 농도가 가장 높았으며 철의 경우 여름, 가을, 겨울의 평균 농도보다 약 11.3배정도 높게 측정되었고, 납은 봄의 농도보다 겨울의 농도가 더 높게 측정되었다. 니켈은 모든 계절에서 검출한계 이하의 값을 나타냈고, 규소는 봄에 1670.45ng/m³의 높은 농도를 나타냈으며 여름에서는 검출한계 이하의 값을 나타내었다. 두 지역 모두 규소와 철의 농도가 봄철에 높게 나타났는데 이는 봄철의 황사 현상으로 인한 토양 성분의 증가 때문이라고 추정되어진다.

계절별 농도 변화를 금속별로 그림 4와 그림 5에 나타내었다. 두 지역의 계절별 농도 변화는 봄에 납 농도가 서울시보다 아산시에서 유의하게 높았으며(p<0.01), 여름은 망간, 크롬이 서울시보다 아산시가 유의하게 높았다(p<0.05). 가을은 망간, 철, 크롬, 규소에서 아산시가 서울시보다 유의하게 높았으며(p<0.05), 겨울은 망간, 철, 크롬, 납, 규소에서 아산시가 통계학적으로 유의하게 높았다(p<0.05).

아산시에서 망간과 크롬의 농도가 봄을 제외한 계절에서 높게 나타났으며, 납은 봄철에 높은 농도를 나타내었다. 두 지역의 금속성분 분석 결과 서

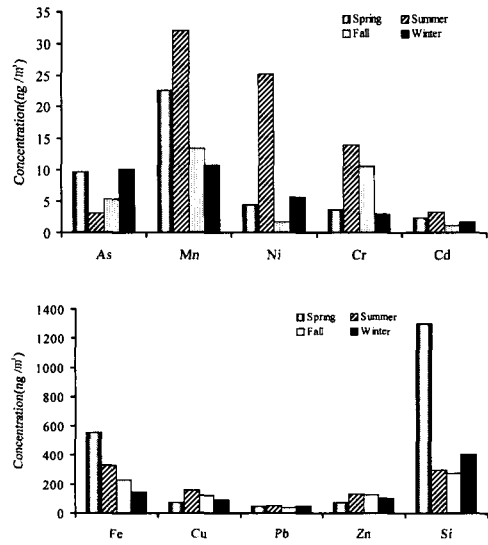


Fig. 4. Seasonal concentrations (ng/m³) of metallic elements in fine particles (PM2.5) in Asan.

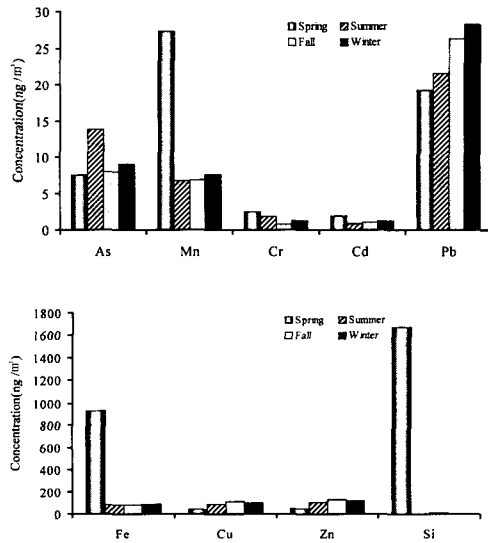


Fig. 5. Seasonal concentrations (ng/m³) of metallic elements in fine particles (PM2.5) in Seoul.

울시보다 아산시에서 규소에서 높은 농도가 나타났었고, 황사의 영향이 있었던 봄에는 두 지역 모두 영향을 받아 유의한 차이가 없었지만 가을과

겨울에서 아산시가 높은 농도를 나타낸 것으로 보아 서울시보다 아산시가 토양에 의한 영향을 많이 받은 것으로 추정할 수 있다.

금속성분의 농도와 미세먼지 농도에서도 두 지역간의 차이를 나타냈는데, 이는 지역별 발생원의 차이가 대부분이겠지만 두 지역 측정 위치가 학교 내 건물 옥상인 것으로 그 주변을 대표할 수 있는 지점이 아니기 때문에 측정 위치에도 문제가 있는 것으로 생각할 수 있다.

3-3. 금속성분의 상관성 분석

아산시에서 측정된 금속성분 중 망간, 철, 카드뮴

이 서로 유의한 상관관을 보였으며, 비소와 망간은 역상관을 나타내었다. 서울시에서는 망간, 철, 카드뮴, 규소가 서로 유의한 상관관을 보였으며, 구리, 카드뮴, 납, 아연이 서로 유의한 상관관을 보였고, 비소와 망간은 역상관을 나타내었다(Table 5와 Table 6).

일반 기상시와 금속성분 상관성을 보면 아산시에서 측정된 금속성분 중 망간, 니켈, 크롬, 구리가 서로 유의한 상관관을 보였으며 납은 카드뮴, 아연과 유의한 상관관을 보였다. 규소는 구리, 아연과의 상관관을 나타내었다. 서울시에서는 망간, 철, 구리, 카드뮴, 납, 아연, 규소와 서로 유의한 상관관을 보였으며 비소는 카드뮴과 역상관을 나타내었다(Table 7과 Table 8).

Table 5. Correlation matrix among metallic elements in Asan

	As	Mn	Ni	Fe	Cr	Cu	Cd	Pb	Zn
Mn	-0.301**								
Ni	-0.127	0.505**							
Fe	-0.273	0.594**	0.038						
Cr	-0.217	0.392**	0.581**	0.088					
Cu	-0.147	0.277*	0.681**	0.087	0.752**				
Cd	-0.002	0.533**	0.538**	0.328*	0.342*	0.424**			
Pb	0.168	0.135	0.217	-0.084	0.196	0.283*	0.540**		
Zn	-0.166	0.263	0.488**	0.064	0.655**	0.866**	0.469**	0.361**	
Si	-0.181	0.505**	-0.143	0.905**	-0.079	-0.133	0.297*	0.029	-0.052

* p<0.05

**p<0.01

Table 6. Correlation matrix among metallic elements in Seoul

	As	Mn	Fe	Cr	Cu	Cd	Pb	Zn
Mn	-0.224							
Fe	-0.154	0.941**						
Cr	-0.002	0.602**	0.628**					
Cu	-0.256	0.288	0.064	0.086				
Cd	-0.441**	0.826**	0.712**	0.453**	0.586**			
Pb	-0.250	0.457**	0.161	0.111	0.780**	0.634**		
Zn	-0.286	0.298	0.082	0.077	0.993**	0.614**	0.772**	
Si	-0.146	0.882**	0.982**	0.590**	0.043	0.675**	0.070	0.067

* p<0.05

**p<0.01

Table 7. Correlation matrix among metallic elements in normal weather condition in Asan

	As	Mn	Ni	Fe	Cr	Cu	Cd	Pb	Zn
Mn	-0.240								
Ni	-0.206	0.709**							
Fe	-0.185	0.382*	0.501**						
Cr	-0.254	0.525**	0.576**	0.446**					
Cu	-0.213	0.416**	0.674**	0.565**	0.762**				
Cd	0.047	0.478**	0.618**	0.228	0.388**	0.482**			
Pb	0.158	0.155	0.226	-0.183	0.210	0.278	0.568**		
Zn	-0.225	0.362*	0.488**	0.381*	0.679**	0.865**	0.513**	0.343*	
Si	0.172	0.087	0.270	0.247	0.206	0.333*	0.270	0.197	0.326*

* p<0.05, **p<0.01

Table 8. Correlation matrix among metallic elements in normal weather condition in Seoul

	As	Mn	Fe	Cr	Cu	Cd	Pb	Zn
Mn	-0.292							
Fe	-0.291	0.954**						
Cr	-0.047	0.216	0.282					
Cu	-0.266	0.827**	0.789**	0.156				
Cd	-0.476*	0.796**	0.830**	0.188	0.730**			
Pb	-0.223	0.917**	0.911**	0.172	0.816**	0.748**		
Zn	-0.274	0.826**	0.789**	0.152	0.999**	0.729**	0.813**	
Si	-0.283	0.567**	0.474*	0.095	0.804**	0.428*	0.454**	0.811**

* p<0.05, **p<0.01

황사시의 금속성분 상관성은 Table 9와 Table 10에 서울시와 아산시로 구분하여 분석하였다. 아산시에서 측정된 금속 중 망간, 철, 카드뮴, 규소가 서울시와 같이 서로 유의한 상관을 보였으며 납은

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

	As	Mn	Ni	Fe	Cr	Cu	Cd	Pb	Zn
Mn	-0.553								
Ni	0.987**	-0.496							
Fe	-0.619	0.986**	-0.573						
Cr	0.149	-0.476	0.183	-0.452					
Cu	0.582	-0.342	0.631	-0.493	0.035				
Cd	-0.397	0.958**	-0.305	0.908**	-0.406	-0.112			
Pb	0.613	-0.227	0.625	-0.371	0.118	0.858*	-0.059		
Zn	0.542	-0.257	0.594	-0.413	-0.040	0.995**	-0.030	0.859*	
Si	-0.586	0.983**	-0.541	0.999**	-0.439	-0.503	0.907**	-0.369	-0.425

* p<0.05, **p<0.01

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

	As	Mn	Fe	Cr	Cu	Cd	Pb	Zn
Mn	-0.405							
Fe	-0.332	0.963**						
Cr	0.211	0.753	0.820*					
Cu	-0.300	0.345	0.128	0.114				
Cd	-0.594	0.890**	0.800*	0.573	0.636			
Pb	-0.386	0.184	-0.075	-0.190	0.923**	0.473		
Zn	-0.416	0.376	0.169	0.105	0.984**	0.703	0.908**	
Si	-0.325	0.943**	0.998**	0.820*	0.084	0.775*	-0.128	0.128

* p<0.05, **p<0.01

구리, 아연과 유의한 상관을 나타내었다. 서울시에 서는 망간, 철, 카드뮴, 규소가 서로 유의한 상관을 보였으며 납은 구리, 아연과 유의한 상관을 보였고, 크롬은 철, 규소와 상관을 보였다. 여러 연구에서 나타난 발생원 분류 항목(source profile)을 보면 철, 규소가 토양에서 주로 발생하는 것으로 이는 황사시 철, 규소의 상관을 설명할 수 있다(Hopke, 1985; Mizohata and Mamuro, 1980; Shareef and Bravo, 1988; Yoshizumi, 1989). 또한 서로 유의한 상관을 나타낸 금속들은 발생원이 비슷한 것임을 나타낼 수 있다.

IV. 결 론

본 연구는 2001년 9월부터 2002년 8월까지 아산시와 서울시 일부 지역에 서 시료를 포집하여 미세먼지(PM2.5) 농도를 측정하고, 금속성분 10개 항목(As, Mn, Ni, Fe, Cr, Cu, Cd, Pb, Zn, Si)을 분석하여 그 농도 및 조성 성분을 비교한 바 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 아산시 미세먼지의 평균 농도는 $37.70(\pm 18.41) \mu\text{g}/\text{m}^3$, 서울시는 $45.83(\pm 38.50) \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 측정되었다. 일반 기상시의 미세먼지 평균 농도는 아산시 $34.42(\pm 15.50) \mu\text{g}/\text{m}^3$, 서울시 $32.31(\pm 17.85) \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었고, 황사 기간 중의 농도는 각각 $58.33(\pm 22.99) \mu\text{g}/\text{m}^3$, $92.20(\pm 54.32) \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 평상시보다 약 1.7배~2.9배 높아, 유의한 차이를 보였다(p<0.05).
2. 미세먼지의 계절별 농도 특성을 보면 아산시와 서울시의 봄철의 농도가 각각 $47.76(\pm 19.07) \mu\text{g}/\text{m}^3$, $61.53(\pm 4.37) \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었고, 여름철의 농도는 각각 $29.44(\pm 9.85) \mu\text{g}/\text{m}^3$, $25.42(\pm 8.10) \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 다른 계절의 농도보다 낮게 나타났다. 아산시는 계절에 따라 미세먼지의 농도가 유의한 차이를 나타내었다(p<0.05).
3. 미세먼지 중의 금속성분 농도는 망간, 철, 크롬, 카드뮴, 납, 규소에서 서울시보다 아산시가 통계학적으로 유의하게 높았다(p<0.05). 황사시 규소만 서울시보다 아산시에서 유의하게 높게 나타났다(p<0.05).
4. 미세먼지 중의 금속성분 계절별 농도는 봄에 납 농도가 서울시보다 아산시에서 유의하게 높았으며(p<0.01), 여름에는 망간, 크롬이 서울시보다 아산시가 유의하게 높았다(p<0.05). 가을에는 망간, 철, 크롬, 규소에서 아산시가 서울시보다 유의하게 높았으며(p<0.05), 겨울에는 망간, 철, 크롬, 납, 규소에서 아산시가 유의하게 높았다(p<0.05).
5. 금속성분의 상관성 분석 결과 망간, 철, 카드뮴, 규소가 아산시와 서울시에서 서로 유의한 상관을 나타냈다. 일반 기상시 아산시는 망간, 니켈, 크롬, 구리가 유의한 상관을 나타냈으며, 서울시는 망간, 철, 구리, 카드뮴, 납, 아연, 규소가 유의한 상관을 나타냈다. 황사시 망간, 철, 카드뮴,

규모에서 아산시와 서울시 두 지역 모두 유의한 상관관을 보였다.

이상의 결과로 볼 때 아산시가 서울시와 비교하여 대부분의 금속성분 농도에서 비교적 높은 농도를 나타냄으로 대도시인 서울뿐만 아니라 중·소도시인 아산시도 미세먼지에 대한 관리가 필요하며, 발생원 항목 분류(source profile)를 고려할 때 토양·건축물 비산재뿐만 아니라 차량 등의 유류 오염원에 대한 관리가 요구된다.

감사의 글

본 연구는 순천향대학교 연구비 지원에 의해 수행되었으며 지원에 깊이 감사 드립니다.

참고 문헌

1. 조수현: 환경오염에 의한 건강피해 - 우리나라의 실태와 문제점 -, 예방의학회지, 28, 245-258, 1995.
2. Lebowitz MD: Epidemiological studies of the respiratory effects of air pollution, Eur Respir J.,9, 1029-1054, 1996.
3. 나덕재, 이병규. 산업도시 대기 중 PM10의 농도 및 금속원소 성분의 특성 연구: 한국대기환경학회지, 16(1), 23-35, 2000.
4. 김성천, 강달선, 차영희: 대기 부유분진의 입경별 특성에 관한 연구, 한국환경위생학회지, 26(2), 108-115, 2000.
5. 신동천, 정 용, 김종만, 임영욱: 서울시 대기 부유 분진 중 중금속에 대한 발암 위해성 평가. 한국대기보전학회지, 10(2), 105-115, 1994.
6. Borja-Aburto VH, Loomis DP, Bangdiwala SI, Shy CM, Rascon-Pacheco RA: Ozone, suspended particulates, and daily mortality in Mexico city, Am J. Epidemiol, 45, 258-268, 1997.
7. Schwartz J: Air pollution and hospital admissions for the elderly in Birmingham, AL Am J. Epidemiol, 139, 589-598, 1994.
8. Whittemore AS, Korn EL: Asthma and air pollution in the Los Angeles area, Am J. Pub Health, 70, 687-696, 1980.
9. Ostro BD, Lipsett MJ, Wiener MB, Selner JC: Asthmatic response to airborne acid aerosols, Am J. Pub Health, 81, 694-702, 1991.
10. Pope CA III, Dockery DW: Acute health effects of PM10 pollution on symptomatic and asymptomatic children, Am Rev Respir Dis, 145, 1123-1128, 1995.
11. Schwartz J, Norris G, Larson T, Sheppard L, Claiborne C, Koenig J: Episodes of high coarse particle concentrations are not associated with increased mortality, Environ Health Perspect, 107, 339-342, 1999.
12. 김병화, 김동술: 수원지역의 PM2.5와 PM10의 화학적 특성, 한국대기환경학회 학술대회 논문집, 21-22쪽, 1999.
13. 김창환, 이운신, 조정구, 최금찬: 부산지역 입자의 비교에 관한 연구, 한국대기환경학회 학술대회 논문집, 270-271쪽, 1999.
14. 이권호, 박승식, 홍천상, 배민석, 김영준: 시화지구 PM2.5의 화학적 특성에 관한 연구, 한국대기환경학회 학술대회 논문집, 1999, 33-34, 1994.
15. 신은상, 김희강: 서울시에서의 대기부유먼지에 대한 황사의 영향, 한국대기보전학회지, 8(1), 52-57, 1992.
16. Clayton CA, Pellizzari ED, Rodes CE, Mason RE, Piper LL: Estimating distributions of long-term particulate matter and manganese exposures for residents of Toronto Canada, Atmospheric Environment, 33, 2515-2526, 1999.
17. 강충민, 이학성, 강병욱, 김희강: 서울지역의 산성가스물질과 PM2.5농도의 특성, 한국대기환경학회 학술대회 논문집, 20-30쪽, 1998.
18. Qin Y, Chan CK, Chan LY: Characteristics of chemical compositions of atmospheric aerosols in Hong Kong: spatial and seasonal distributions, The science of the total envi-

- ronment, 206, 25-37, 1997.
19. 신훈중, 이태정, 김동술: 대기부유분진 등 미량 금속원소의 입경별 농도분포에 관한 연구, 대기보전학회지, 12(1), 67-77, 1996.
 20. 이태정: 수원지역 입자상 오염물질 중 화학원소의 농도 경향 및 오염원 기여도 추정에 관한 연구, 경희대학교 박사학위논문, 1997.
 21. 강병욱, 이학성, 김희강: 수용모델을 이용한 청주시 미세입자(PM2.5)의 기여도 추정, 한국대기환경학회지, 16(5), 477-485, 2000.
 22. 최금찬, 유수영, 전보경: 부산지역의 입자상 대기오염물질의 농도특성에 관한 연구, 한국환경위생학회지, 26(2), 41-48, 2000.
 23. 유정석, 김동술, 김윤신: 서울시 PM-10 오염원 정량적 기여도 추정, 한국대기보전학회지, 11(3), 279-290, 1995.
 24. Hiroshi Nitta, Masanori Ichikawa, Manabu Sato, Sadanori Konishi, Masaji Ono: 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.
 25. Hopke PK: Receptor modeling in environmental chemistry, Wiley, New York, 1985.
 26. Mizohata A and Mamuro T: Balances and identification of air pollution sources in Sakai Osaka, J. Japan Soc. Air Pollut, 15, 198-206, 1980.
 27. Shareef GS, Bravo LA: Air emissions species manual Vol. 2 particulate matter species profiles, EPA-450, 1988.