

서울·아산지역 호흡성먼지의 금속함량에 관한 연구

최윤나¹ · 전용택¹ · 장봉기¹ · 양원호² · 염윤기³ · 손부순^{1*}
순천향대학교 환경보건학과, 대구가톨릭대학교 산업보건학과,
순천향대학교 의과대학 임상약리학과

Comparison of Metal Contents in Respirable Particulate Mass by Particle Size and Season in Seoul and Asan City

Yun-Na Choi¹ · Yong-Taek Jeon¹ · Bong-Ki Jang¹ · Won-Ho Yang² · Yoon-Ki Yom³ ·
Bu-Soon Son^{1*}

Dept. of Environmental Health Science, Soonchunhyang University

Department of Occupational Health, Catholic University of Daegu, Korea1)

Dept. of Clinical Pharmacology, Medical College, Soonchunhyang University2)

Abstract

The purpose of this study was to characterize background mass concentration of PM₁₀, PM_{2.5} and metallic composition from June 2004 to June 2005 in comparison with Seoul and Asan city.

The results were as follows:

1. Annual mean of PM₁₀ concentrations in Seoul and Asan were 56.95(±25.63)μg/m³, 57.02(±27.22)μg/m³ respectively.
2. Annual mean of PM_{2.5} concentrations in Seoul and Asan were 46.97(±40.36)μg/m³, 42.16(±21.79)μg/m³ respectively.
3. The average PM_{2.5}/PM₁₀ ratio was 0.82 in Seoul and 0.74 in Asan city.
4. The concentration of PM₁₀, PM_{2.5} were the highest in spring and the lowest in summer. Asan was higher than Seoul in spring and summer.
5. The results showed that average PM₁₀ composition order as Si>Fe>Pb>Zn>Mn in Seoul and Si>Fe>Zn>Pb>Mn in Asan. The concentration of metals in PM₁₀ of Seoul that Cr, Cu, Fe, Mn were high in spring and Zn was low in Fall. Fe, Mn were high in spring of Asan.
6. The results showed that average PM_{2.5} composition order as Si>Pb>Fe>Zn>Mn in Seoul and Si>Fe>Pb>Zn>Cr in Asan. The concentration of metals in PM_{2.5} of Seoul that Cr was high in spring.
7. The result showed that relation between Cr and Cu, Cu and Fe, Fe and Mn, Mn and Zn, Zn and Si in Seoul, Cr and Zn, Cu and Pb, Zn and Pb, Pb and Mn in Asan.

The result showed that PM₁₀ concentration exceeding 50μg/m³(US-EPA Standard) and PM_{2.5} concentration exceeding 15μg/m³(US-EPA Standard).

In urban area, the monitoring of PM_{2.5} permits the anthropogenic sources and the interference of natural sources with respect to PM₁₀ measurements.

Key words : Metals, PM_{2.5}, Urban area, Average.

* Corresponding author E-mail : sonbss@sch.ac.kr

I. 서론

인구증가, 도시화, 산업화 및 자동차 증가 등의 영향으로 대기오염이 심화하고 있으며, 오염물질의 종류가 다양해지고 농도도 증가하여 자연 생태계를 파괴하고 인류의 건강을 위협하고 있다^{1,2)}. 특히 우리나라는 중국의 풍하지역에 위치하고 있어서 중국에서 배출되는 대기오염물질의 장거리이동으로 인한 산성강하물 증가, 황사 등의 피해에 직면하고 있다³⁾.

대기오염물질은 입자상물질과 가스상물질로 대별되며, 입자상물질은 가벼워서 대기 중에 오랫동안 체류하는 부유먼지와 무거워서 지표에 강하하는 강하먼지로 구분된다. 총부유먼지(TSP; total suspended particulate)는 먼지의 크기, 모양, 성분 등에 무관하게 공기 중에 떠돌아다니는 먼지의 총량을 말하며, 입자직경은 0~100 μm 범위이다.

부유먼지 중에서 공기역학적 직경이 10 μm 미만으로서 인체호흡기에 침착되거나 혈액에 흡수되어 건강에 영향을 미치는 먼지를 호흡성먼지라고 하는데, 비표면적이 커서 유해성 금속이나 가스상 오염물질이 잘 흡착되고, 유해성 물질과 함께 흡입되어 폐암 등의 질병을 일으킬 가능성이 높다⁴⁾.

호흡성먼지는 입자직경이 2.5~10 μm 범위인 조대먼지(이하 PM₁₀)와 2.5 μm 미만인 미세먼지(이하 PM_{2.5})로 나누어진다. PM₁₀은 화산활동, 토양 먼지의 비산, 해염비말, 꽃가루 등 자연계에서 발생하는 것이 대부분이고, 토양과 관련된 Al, Si, Ca, Ti, Fe 등이 많이 포함되어 있으며, 인체흡입 시코와 후두내의 난류에 의한 관성력 등 방어 기전에 의해서 제거된다.

반면 PM_{2.5}는 대부분 인위적 활동에서 배출되는데, 산업, 운송, 주거활동 등의 연소과정에서 직접 배출되거나, 대기 중에서 가스상 물질과 가스, 또는 가스상 물질의

화학적, 광화학적 반응 등에 의해 생성되며, 황산염, 질산염, 염화물, 암모늄염 등의 이온성분과 K, Ni, Pb 등의 금속화합물, S, Br, C화합물 등의 유기물과 virus, 조류, 곰팡이 등 미생물 외에도 다환방향족탄화수소(polycyclic aromatic hydrocarbon ; PAH)와 같은 발암성 물질이 포함되어 있다⁵⁾.

주기율표 원소 중 중금속은 약 80종이며, 그 중 약 30종이 사람에게 독성을 발현하고, 일부는 발암성이 있는데, 나⁶⁾ 등은 호흡성먼지의 금속성분이 대부분 독성물질이라고 보고한 바 있다.

호흡성먼지는 사망률 증가, 호흡기 및 심혈관계 질환 관련 외래 환자 증가, 천식 증상 악화, 호흡기 질환 증상발현, 폐기능 저하 등과 같은 건강영향과 유의한 상관성이 있다고 보고되고 있다⁷⁻¹¹⁾. 특히 미세입자 중의 탄소화합물은 연소과정에서 생성되어 대기로 배출되며 도시지역 시정장애를 유발하는 주요 물질중 하나이다.

호흡성먼지의 인체영향은 입경에 따라 다르다. 즉 도시지역 사망률은 PM₁₀이 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가할 때 0.5% 증가한 반면, PM_{2.5}는 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가할 때 17% 증가하고, PM₁₀은 호흡기계 질환, PM_{2.5}는 심장박동수 증가 등 심혈관계, 암, 조기사망 등에 영향을 미치며, PM₁₀보다 PM_{2.5}의 독성이 더욱 강하다고 보고된 바 있다¹²⁾.

우리나라는 1983년 환경정책기본법을 제정하여 총부유먼지의 대기환경기준을 마련하였고, 1993년에는 PM₁₀의 환경기준을 연평균 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 설정하였다. 2001년부터 총부유먼지 관련기준을 삭제하고, PM₁₀의 환경기준을 연 평균치는 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 24시간 평균치는 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 제정하여 관리해오고 있다.

미국 EPA는 PM₁₀ 환경기준을 연 평균치는 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 24시간 평균치는 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM_{2.5} 환경기준을 연 평균치는 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 24시간 평균치는 65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 규정하고 있어

서, 우리나라 환경기준과 비교할 때 PM₁₀의 연평균치는 훨씬 엄격하고, 24시간 평균치는 같지만 PM_{2.5}관련 규정이 우리나라에 마련되어 있지 않음을 알 수 있다.

PM_{2.5}는 빛을 산란시켜 가시도를 저하하고 체감오염도를 증가시킨다¹³⁾. Shendrikar¹⁴⁾ 등은 미세먼지의 S함량이 높아서 가시도가 감소하고, PM_{2.5}농도와 습도가 높아서 가시도가 감소하였다고 보고하였다..

최¹⁵⁾ 등은 황사의 입경을 조사하여 3 μ m이하 입자의 점유율이 51.4%로서 비황사시기보다 62.4% 높다고 보고하였는데, 황사가 PM₁₀농도뿐만 아니라 PM_{2.5}농도에도 영향을 미침을 알 수 있다.

한편 Harvard six cities study¹⁶⁾는 8,111명을 대상으로 성별, 연령, 흡연, 교육수준, 체지방, 오염물질의 노출에 대하여 연구한 결과, PM_{2.5}농도가 높아짐에 따라 폐기능이 저하되어 천식과 심혈관계질환의 발병율이 증가하였다고 보고하였다.

도시지역에서 PM_{2.5}, 오존 등 2차 대기오염물질의 오염도는 지속적으로 증가하여 다른 국가들의 기준치를 크게 초과하고, PM_{2.5}가 시정거리를 짧게 하여 체감오염도를 증가시킬 뿐만 아니라, PM_{2.5}에 함유된 중금속과 유독성 물질이 인체에 직접 영향을 유발한다¹⁷⁾는 점에서 관리대책이 마련되어야 할 것으로 생각된다.

본 연구에서는 대도시인 서울지역과 중소도시인 아산지역의 대기오염을 조사하고, 미세먼지에 대한 노출평가를 실시하여 비교하고, 위해성 평가의 기초 자료로서 제공하고자 한다. 이를 위하여 두 지역의 PM₁₀과 PM_{2.5}를 포집하여 금속함량을 분석하고, 계절별 변화양상과 금속간의 상관관계를 파악하여, 미세먼지의 노출평가를 실시하였다.

II. 연구방법

1. 시료의 포집

미세먼지의 농도 및 중금속을 측정·분석하기 위한 시료는 서울지역은 서울대학교 보건대학원 옥상, 아산지역은 순천향대학교 자연과학대학 옥상에서 채취하였다.

채취장치는 유량이 5 ℓ /min인 Mini-volume portable air sampler (MiniVol, Airmetrics사)를 사용하고, 필터는 pallflex membrane filter(47mm, Gelman sciences사)를 사용하였다..

시료채취는 2004년 6월부터 1년 동안 한 달에 2주씩 화~금요일(3일), 금~화요일(4일)로 두 번에 나누어 포집하였다.

2. 시료의 분석방법

2.1. 미세먼지 농도

시료포집 전후 여지를 테시케이터에 24시간 이상 보관하여 항량이 되게 한 후, 0.01mg까지 측정하는 electronic auto balance를 사용하여 칭량한 후 질량농도를 산출하였다.

$$\begin{aligned} & \text{질량농도 } C(\mu\text{g}/\text{m}^3) \\ &= \frac{\text{먼지무게 } (\mu\text{g})}{\text{시료채취총유량 } (\text{m}^3)} \\ &= \frac{\text{측정후여지무게 } (\mu\text{g}) - \text{측정전여지무게 } (\mu\text{g})}{\text{시료채취유량 } (\ell/\text{min}) \times \text{시료채취시간 } (\text{min})} \end{aligned}$$

2.2. 금속성분 농도

포집여지의 금속추출은 대기오염공정시험법의 질산-염산 혼합액에 의한 초음파 추출법을 이용하였다¹⁸⁾. 즉 포집여지를 마개달린 시험관에 넣고 1.03M 질산과 2.23M 염산 - 1:1 혼합액 15ml를 가한 후 마개를 닫은 다음 28kHz의 초음파 추출기에 넣고 100 $^{\circ}$ C로 유지하며 2시간동안 추출하였다. 시험관의 시료용액을 시린지로 꺼내어 여과하여 최종액량이 10ml가 되도록 조정하여 전처리하였으며, 같은 방법으로 바탕시험용액을 조제하였다.

용액 중의 Si, Fe, Zn 등 일반금속 3종과 As,

Mn, Cr, Cu, Cd, Pb 등 중금속 6종을 ICP-AES (Inductively coupled plasma - Atomic emission spectrometry)를 이용하여 분석하였다. 단, Cd 은 모든 시료에서 검출한계 이하로 측정되어 결과 및 고찰에서 제외시켰다.

분석된 금속농도는 공시료 값에 대하여 보정하고, 다음 식을 이용하여 계산하였다.

$$C(\mu\text{g}/\text{m}^3) = \frac{W_s \times V_s}{V \times L}$$

Ws : 시료 중 분석농도

Vs : 시료의 최종용액 부피

V : 공기채취유량(ℓ/min)

L : 총포집시간(min)

2.3. 통계분석

통계분석은 Excel 2002와 SPSS 12.0을 사용하였다. 두 지역의 미세먼지와 금속농도 비교는 비모수 통계방법인 Mann-Whitney U test를 이용하여 분석하였고, 계절별 미세먼지 농도는 Kruskal-Wallis H test를 실시하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 미세먼지 농도

1.1. PM10농도

연평균 PM10농도는 서울지역 $56.95(\pm 25.63) \mu\text{g}/\text{m}^3$, 아산지역 $57.02(\pm 27.22) \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로서 두 지역이 비슷하다. 우리나라 PM10의 연평균 기준인 $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에는 미달되나, 미국기준 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 은 초과하고 있으며, 나⁶⁾등이 산업도시인 울산에서 측정한 결과와 유사하다.

월 최고농도는 서울과 아산지역이 4월에 각각 $81.16(\pm 32.58)$, $78.41(\pm 12.64) \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 이것은 측정기간 중에 발생한 황사의 영향이 크다고 본다.

월 최저농도는 서울과 아산지역이 8월에 각각 $23.34(\pm 3.44)$, $30.64(\pm 4.50) \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 이는 여름철 장마와 태풍의 영향을 많이 받았기 때문이라고 판단된다.

6, 8, 12월에는 두 지역의 농도가 비슷하고, 9월에는 서울이 아산지역보다 2배 정도 높았다. 또한 10월에는 아산이 서울지역보다 3배 높게 나타났는데, 서울지역 시료가 한 개 뿐이었기 때문에 신뢰도는 약하다.

Table 1. PM10 concentration in Seoul and Asan by months.

(unit : $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

	Seoul		Asan	
	No.	Mean \pm S.D. (Range)	No.	Mean \pm S.D. (Range)
January	-	-	4	59.02 ± 42.62 (32.64~122.22)
February	-	-	1	60.52 ± 0.00 (60.52~60.52)
March	-	-	3	63.53 ± 23.56 (46.87~90.48)
April	2	81.16 ± 32.58 (58.12~104.19)	2	78.41 ± 12.64 (69.47~87.35)
May	4	58.77 ± 8.38 (47.82~68.23)	-	-
June	3	64.26 ± 18.92 (44.28~81.91)	5	59.54 ± 22.36 (40.41~87.04)
July	-	-	-	-
August	3	23.34 ± 3.44 (20.13~26.97)	3	30.64 ± 4.50 (25.69~34.48)
September	2	52.83 ± 53.58 (14.94~90.71)	2	22.56 ± 7.33 (17.38~27.74)
October	1	25.84	4	75.17 ± 38.41 (37.96~115.08)
November	2	84.79 ± 10.30 (77.51~92.07)	2	48.79 ± 4.18 (45.83~51.74)
December	3	59.23 ± 9.85 (48.97~68.61)	3	58.84 ± 15.35 (41.32~69.91)
Total	20	56.95 ± 25.63 (14.94~104.19)	29	57.02 ± 27.22 (17.38~122.22)

* 서울지역 1, 2, 3, 7월과 아산지역 5, 7월은 여지가 훼손되어 누락됨

일 최고농도는 1월에 아산지역의 122.22 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 이것은 김¹⁹⁾이 보고한 바와 같이 1월 초에 중국에서 발생한 대륙성 고기압이 남서풍을 타고 이동하여 해양의 수증기를 유입하여 안개, 대기 하층의 역전층과 약 2 m/s 이하의 미풍과 침강 역전층, 300m 이하의 복사역전층을 동시에 형성하였고, 이로 인하여 대기의 확산 및 수송 능력이 감소함으로써 오염물질이 정체되고 안개의 영향이 중첩되었기 때문이다.

본 연구의 PM₁₀농도가 다소 높은 것은 측정지역이 주상복합단지여서 인구밀도가 높고 교통이 혼잡하기 때문이다. 이러한 결과는 Chan²⁰⁾등이 고층건물이 많고 거주, 상업, 산업지역이 혼재되어 있는 경우 PM₁₀농도가 높았다는 보고와 일치한다. 포집지역의 지형과 도로관리 상태가 대기분산에 영향을 미칠 수 있다.

PM₁₀농도를 요약하면 연평균 농도는 서울과 아산지역이 각각 56.95, 57.02 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로서 비슷하고, 우리나라 PM₁₀의 연평균 기준인 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에는 미달되나, 미국기준 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 은 초과하였으며, 월 최고농도와 월 최저농도는 서울과 아산지역 모두 4월과 8월에 나타났다.

1.2. PM_{2.5}농도

연평균 PM_{2.5}농도는 서울과 아산지역이 각각 46.97(\pm 40.36), 42.16(\pm 21.79) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로서 두 지역이 비슷하다. 이 농도는 미국의 연평균 PM_{2.5}기준 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 3배 정도 높고, Clayton²¹⁾등이 캐나다 토론토에서 측정한 연평균 PM_{2.5}농도 28.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 훨씬 높은 농도이다.

월 최고농도는 10월에 서울과 아산지역이 각각 71.97(\pm 101.78), 59.96 (\pm 32.68) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로서, 서울이 아산지역보다 11.91 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 높고, 월 최저농도는 서울지역이 6월에 35.78(\pm 31.08) $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 아산지역이 9월에 13.57(\pm 3.07) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로서, 서울이 아산지역보다 22.21 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 높았다.

본 연구의 PM_{2.5}농도가 높은 것은 조사지역이 도로에 인접하고 있어서 교통오염의 영향이 크기 때문이라고 판단된다. 도시지역의 교통오염은 PM_{2.5}의 주요 오염원이므로 교통오염을 규제하는 것이 PM_{2.5}관리대책으로서 매우 중요하다. 교통오염은 자동차 타이어 마모, 연료의 연소, 공사, 토양의 재비산 등으로 구분되며, 미국에서는 디젤 배출가스의 입자상 물질 중 98% 이상이 PM_{2.5}로 알려졌다²²⁾.

Table 2. PM_{2.5} concentration in Seoul and Asan by months. (unit : $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

	Seoul		Asan	
	No.	Mean \pm S.D. (Range)	No.	Mean \pm S.D. (Range)
January	-	-	4	46.64 \pm 29.48 (23.96~88.89)
February	-	-	1	49.21
March	-	-	3	36.02 \pm 7.26 (28.13~42.43)
April	2	56.12 \pm 38.49 (28.90~83.33)	2	28.20 \pm 19.92 (14.11~42.28)
May	4	41.87 \pm 5.85 (33.43~46.89)	-	-
June	3	35.78 \pm 31.08 (0.00~56.03)	5	49.65 \pm 20.07 (22.57~78.77)
July	-	-	-	-
August	4	46.60 \pm 68.47 (7.49~149.15)	2	41.22 \pm 25.18 (23.41~59.03)
September	-	-	2	13.57 \pm 3.07 (11.40~15.73)
October	2	71.97 \pm 101.78 (0.00~143.94)	4	59.96 \pm 32.68 (30.00~94.69)
November	1	42.87	2	30.96 \pm 2.05 (29.51~32.41)
December	4	44.79 \pm 18.93 (32.59~72.99)	3	40.21 \pm 9.33 (33.93~50.93)
Total	20	46.97 \pm 40.36 (0.00~149.15)	28	42.16 \pm 21.79 (11.40~94.69)

* 서울지역 1, 2, 3, 7월과 아산지역 5, 7월은 여지가 훼손되어 누락됨

PM_{2.5}농도를 요약하면 연평균 농도는 서울과 아산지역이 각각 46.97(\pm 40.36), 42.16

(± 21.79) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로서 두 지역이 비슷하나, 미국의 연평균 $\text{PM}_{2.5}$ 기준 $15\mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 3배 정도 높다. 월 최고농도는 서울과 아산지역 모두 10월, 월 최저농도는 서울지역 6월, 아산지역은 9월에 나타났다.

2. 계절별 미세먼지농도 변화

2.1. 계절별 PM_{10} 농도

계절별 PM_{10} 농도는 서울지역은 봄 $66.23(\pm 19.70)\mu\text{g}/\text{m}^3$, 여름 $43.80(\pm 25.50)\mu\text{g}/\text{m}^3$, 가을 $60.21(\pm 37.00)\mu\text{g}/\text{m}^3$, 겨울 $59.23(\pm 9.85)\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이고, 아산지역은 봄 $69.48(\pm 19.59)\mu\text{g}/\text{m}^3$, 여름 $48.70(\pm 22.69)\mu\text{g}/\text{m}^3$, 가을 $55.42(\pm 34.44)\mu\text{g}/\text{m}^3$, 겨울 $59.14(\pm 29.09)\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다.

계절별 농도가 높은 순서는 서울지역은 봄>가을~겨울>여름 순이고, 아산지역은 봄>겨울>가을>여름 순이므로 두 지역이 비슷한 양상이다.

두 지역의 계절별 PM_{10} 농도편차는 봄에는 아산지역이 $3.25\mu\text{g}/\text{m}^3$ 높아서 $p<0.001$ 의 유의한 차이, 여름에는 아산지역이 $4.9\mu\text{g}/\text{m}^3$ 높아서 $p<0.05$ 의 유의한 차이, 가을에는 서울지역이 $4.79\mu\text{g}/\text{m}^3$ 높아서 $p<0.05$ 의 유의한 차이, 겨울에는 두 지역이 비슷하여 유의한 차이를 보이지 않았다.

봄에 두 지역 모두 PM_{10} 농도가 연중 가장 높은 이유는 미세먼지 발생기전은 활성화되어 활동하기에 알맞은 기후로 인하여 실외활동 시간이 확장되고, 농경지 농사준비, 채석작업, 토목공사 등 토목 관련 활동이 활발해지고, 겨울에 얼어있었던 표토가 해빙되어 토양기원 미세먼지 발생량이 많고, 꽃가루 발생량이 매우 많고, 황사 등과 같이 다른 지역으로부터 이동해오는 미세먼지가 많은 반면, 미세먼지 제거기전은 미미하여 자연계에 풀, 나무 등 식생량이 적어서 건성침착에 의한 제거효과가 낮고, 풍속이 약하고 풍량이 적으며, 강수횟수가 적고 강수량이 적기 때문이다.

여름에 PM_{10} 농도가 두 지역 모두 연중 가

장 낮은 것은 여름에는 강수횟수와 강우량이 많아서 대기 중에서 제거되는 wash-out효과가 크고, 산과 들에 식생이 우거져서 토양기원 발생량이 적으며, 풀, 나무 등 식생이 최대로 활착되어 건성침착에 의한 제거효과가 높기 때문이다²³⁾.

가을에 두 지역 모두 PM_{10} 농도가 여름보다 높은 것은 활동하기에 알맞은 기후로 인하여 실외활동 시간이 확장되고, 채석작업, 토목공사 등 토목 관련 사업이 활발해지고, 농경지 작물이 수확되어 나대지가 늘어나 토양기원 미세먼지 발생량이 많고, 산과 들에 풀, 나무가 낙엽이 지거나 말라서 건성침착에 의한 제거효과가 낮고, 일교차가 커서 이슬, 서리 등에 의한 wash-out효과가 크고, 풍속이 약하고 풍량이 적으며, 강수횟수가 적고 강수량이 적기 때문이다. 그러나 미세먼지의 인위적 발생량이 많은 지역에서 풍속이 약하거나 무풍일 경우에는 미세먼지 농도가 매우 높게 나타날 수 있다²⁴⁾.

겨울에 PM_{10} 농도가 두 지역 모두 가을과 비슷한 이유는 기온이 낮아서 실외활동이 위축되고, 일조시간이 짧아서 근로시간이 단축되며, 바람과 눈이 많기 때문에 wash-out효과가 연중 가장 크고, 표토가 결빙되어 토양기원 미세먼지 발생량이 적기 때문이다.

계절별 PM_{10} 농도를 요약하면 서울지역은 봄>가을~겨울>여름 순이고, 아산지역은 봄>겨울>가을>여름 순이며, 두 지역의 계절별 편차는 봄, 여름에는 아산지역이 각각 3.2 , $4.95\mu\text{g}/\text{m}^3$ 높아서 $p<0.001$, $p<0.05$ 의 유의한 차이를 나타내고, 가을에는 서울지역이 $4.79\mu\text{g}/\text{m}^3$ 높아서 $p<0.05$ 의 유의한 차이를 나타내고, 겨울에는 두 지역이 비슷하여 유의한 차이를 보이지 않았다.

2.2. 계절별 $\text{PM}_{2.5}$ 농도

계절별 $\text{PM}_{2.5}$ 농도는 서울지역은 봄 $46.62(\pm 19.26)\mu\text{g}/\text{m}^3$, 여름 $41.96(\pm 51.95)\mu\text{g}/\text{m}^3$, 가을 $62.27(\pm 73.91)\mu\text{g}/\text{m}^3$, 겨울 $44.79(\pm 18.93)\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이고, 아산지역은 봄 $32.89(\pm 12.00)\mu\text{g}/\text{m}^3$

m³, 여름 47.24(±19.77)μg/m³, 가을 41.11 (±30.14) μg/m³, 겨울 44.55(±20.27)μg/m³이었다.

Table 3. PM₁₀ concentration in Seoul and Asan by season. (unit : μg/m³)

	Seoul		Asan		p ¹⁾
	No.	Mean±S.D. (Range)	No.	Mean±S.D. (Range)	
Spring	6	66.23±19.70 (47.82~104.19)	5	69.48±19.59 (46.87~90.48)	0.006
Summer	6	43.80±25.50 (20.13~81.91)	8	48.70±22.69 (25.69~87.04)	0.003
Fall	5	60.21±37.00 (14.94~92.07)	8	55.42±34.44 (17.38~115.08)	0.610
Winter	3	59.23±9.85 (48.97~9.85)	8	59.14±29.09 (32.64~122.22)	0.683
Total	20	56.95±25.63 (14.94~104.19)	29	57.02±27.22 (17.38~122.22)	0.776
p ²⁾	0.579		0.325		p1)

: Mann-Whitney U test between concentrations of particles of Asan and Seoul

p2) : Kruskals-Wallis H test among concentrations of particles by season

계절별 PM_{2.5}농도가 높은 순서는 서울지역은 가을>봄>겨울>여름 순이고, 아산지역은 여름>겨울>가을>봄 순으로서 경향이 다르고, 계절별 PM₁₀농도변화와 비교할 때도 서울지역은 봄>가을~겨울>여름 순서이고, 아산지역은 봄>겨울>가을>여름 순서이므로, 입경별로도 일정한 경향을 찾기 어렵다.

계절별 PM_{2.5}농도의 두 지역 편차는 봄에는 서울지역이 13.732μg/m³ 높아서 p<0.006의 유의한 차이, 여름에는 아산지역이 5.28μg/m³ 높아서 p<0.025의 유의한 차이, 가을에는

서울지역이 20.16μg/m³ 높아서 p=0.683이었으며, 겨울에는 두 지역이 비슷하여 유의한 차이를 보이지 않았다.

계절별 PM_{2.5}농도를 요약하면 서울지역은 가을>봄>겨울>여름 순이고, 아산지역은 여름>겨울>가을>봄 순으로서 두 지역의 경향이 달랐다. 두 지역의 계절별 편차는 봄, 가을에는 서울지역이 각각 13.732, 20.16μg/m³ 높고, 여름에는 아산지역이 5.28μg/m³ 높으며, 겨울에는 비슷하였다.

Table 4. PM_{2.5} concentration in Seoul and Asan by season. (unit : μg/m³)

	Seoul		Asan		p ¹⁾
	No.	Mean±S.D.(Range)	No.	Mean±S.D.(Range)	
Spring	6	46.62±19.26(28.90~83.33)	5	32.89±12.00(14.11~42.43)	0.006
Summer	7	41.96±51.95(0.00~149.15)	7	47.24±19.77(22.57~78.77)	0.025
Fall	3	62.27±73.91(0.00~143.94)	8	41.11±30.14(11.40~94.69)	0.683
Winter	4	44.79±18.93(32.59~72.99)	8	44.55±20.27(23.96~88.89)	1.000
Total	20	46.97±40.36(0.00~149.15)	28	42.16±21.79(11.40~94.69)	0.967
p ²⁾	0.887		0.549		

p1) : Mann-Whitney U test between concentrations of particles of Asan and Seoul

p2) : Kruskals-Wallis H test among concentrations of particles by season

3. PM_{2.5}/PM₁₀비

PM_{2.5}/PM₁₀비는 서울지역이 0.82, 아산지역이 0.74로서 서울지역이 약간 높다. 이러한

결과는 최²⁵⁾등이 서울을 비롯한 수도권 대도시에서 2002년부터 1년 동안 측정된 PM_{2.5}/PM₁₀비의 평균치인 0.71과 비교할 때 서울지역은 높고 아산지역은 비슷하다.

일반적으로 PM₁₀중 PM_{2.5}의 점유율은 30~70%로 알려져 있으며, PM_{2.5}/PM₁₀비가 낮으면 PM₁₀구성성분이 토양입자로 이루어졌음을 의미한다.

Artinano²⁶⁾등은 대도시에서 교통량이 많은 출퇴근시각에 PM_{2.5}/PM₁₀비가 높다고 보고하였고, Querol²⁷⁾등은 미세입자 중에 황화합물이 많고, 침강하였던 조대입자가 재비산할 경우 PM_{2.5}/PM₁₀비가 높다고 보고하였다. 또 Namdeo²⁸⁾는 도시지역에서 교통량이 증가함에 따라 타이어 마모, 브레이크 라이닝 마모 도로 갓길에 쌓인 먼지의 재비산 등에 의하여 PM_{2.5}/PM₁₀비가 증가하였다고 보고하였다.

본 연구에서 서울지역의 PM_{2.5}/PM₁₀비가 높은 것은 교통오염의 영향을 많이 받고, 아산지역이 낮은 것은 지표토양의 영향을 많이 받기 때문이라고 판단된다.

농도별로는 서울지역이 아산지역보다 일반 금속은 Fe은 138.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 높고, Si, Zn은 각각 194.7, 64.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 씩 낮으며, 중금속은 Pb, Cu는 각각 124.3, 2.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 씩 높고, Cr, Mn, As는 각각 4.5, 3.5, 0.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 씩 낮게 나타났다.

Si과 Fe은 암석의 풍화 등 토양에 기인하여 자연적으로 발생되거나, 석탄, 중유의 연소, 산화철의 비산 등 인위적 오염원에서 발생되는데, 두 지역 모두 Si과 Fe함량이 높게 나타나 토양 입자 등 자연적인 오염원과 자동차 배출가스의 영향이 있는 것으로 판단된다.

Zn은 암석, 토양 등 자연계에서 발생되거나, 기름이나 윤활유와 같은 자동차 배출가스, 타이어 마모 등에 의해 발생되므로 교통오염물질의 일종이며³⁰⁾, 폐기물소각장에서도 배출된다고 알려져 있다³¹⁾. 아산지역의 Zn이 교통량이 많은 서울지역보다 유의하게 높게 측정된 것은(각각, p<0.05) 도시규모가 작아서 자연계의 영향을 많이 받기 때문이라고 판단된다.

Pb은 연료의 연소, 제련 등 여러 산업공정에서 발생되며, 1988년 이전까지 자동차 안티노킹제로서 4-에틸납과 4-메틸납이 사용되어 교통오염물질로 분류되어 왔다. Pb이 아산지역보다 서울지역에서 유의하게(p<0.01) 높은 이유는 과거에 사용된 유연휘발유와 산업체 배출가스의 영향이라고 판단된다.

PM₁₀의 금속함량을 종합하면 서울지역은 Si>Fe>Pb>Zn>Mn>Cu>Cr순이고, As는 검출한계 이하이며, 아산지역은 Si>Fe>Pb>Zn>Mn>Cr>Cu>As순으로, 두 지역이 비슷하다. 지역별로는 서울이 아산지역보다 일반금속은 Fe은 138.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 높고, Si, Zn은 각각 194.7, 64.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 낮으며, 중금속은 Pb, Cu는 각각 124.3, 2.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 높고, Cr, Mn, As는 각각 4.5, 3.5, 0.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 낮게 나타났다. 계절별로는 서울지역은 Cr, Cu, Fe, Mn이 봄에, Zn이 가을에 유의하게 높고, 아산지역은 Fe, Mn이 봄에 유의하게 높았다(각각, p<0.01).

Table 5. PM_{2.5}/PM₁₀ ratio by area.(unit : $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Seoul	Asan	Total	p ¹⁾
0.82	0.74	0.78	0.227

p1) : t-test between PM_{2.5}/PM₁₀ ratio of Asan and Seoul

4. 미세먼지의 금속함량

4.1. PM₁₀의 금속함량

4.1.1. 금속성분의 농도

PM₁₀의 금속함량은 서울지역의 일반금속은 Si>Fe>Zn, 중금속은 Pb>Mn>Cu>Cr순이고, As는 검출한계 이하이었다. 아산지역의 일반금속은 Si>Fe>Zn, 중금속은 Pb>Mn>Cr>Cu>As순으로서 서울지역과 유사하나 Cr과 Cu보다 많은 점이 다르다. 이러한 결과는 이²⁹⁾가 광주시 교통혼잡지역에서 1995~1996년에 측정한 결과와 비슷하다.

Table 6. Concentration of metals PM10 of Seoul and Asan. (unit : $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

	Seoul		Asan		F
	No.	Mean \pm S.D. (Range)	No.	Mean \pm S.D. (Range)	
As	20	Not detected	29	0.53 \pm 1.30 (0.00~5.38)	3.327
Cr	20	2.89 \pm 2.39(0.00~8.07)	29	7.35 \pm 8.23(0.00~34.10)	5.511*
Cu	20	5.62 \pm 5.98(0.00~17.98)	29	3.37 \pm 4.26(0.00~14.97)	2.389
Mn	20	16.22 \pm 10.12(0.02~39.47)	29	19.68 \pm 10.80(6.40~49.10)	1.279
Pb	20	162.32 \pm 121.32(25.19~586.25)	29	38.01 \pm 25.61(0.00~119.54)	10.306**
Zn	20	21.37 \pm 27.07(0.00~88.54)	29	85.46 \pm 37.43(33.92~190.72)	4.770*
Fe	20	539.61 \pm 309.27(0.51~1006.25)	29	401.31 \pm 229.29(38.89~1176.09)	3.235
Si	20	1675.13 \pm 1610.75(1.67~7874.11)	29	1869.76 \pm 1161.40(652.59~7546.11)	0.170

* : $p < 0.05$, ** : $p < 0.01$

4.1.2. 계절별 금속농도

계절별 PM10의 금속함량은 서울지역은 일반금속 Si, Fe, Zn은 봄, 가을에 높고, 중금속 Cr, Cu, Mn은 봄, Pb은 겨울에 높으며, 아산지역은 일반금속 Si는 여름, Fe은 봄, Zn은 겨울에 높고, 중금속 As는 가을, Cr은 봄, 가을, Cu는 가을~겨울, Mn은 겨울~봄, Pb은 겨울에 높게 나타났다.

이와 같이 두 지역의 금속농도가 봄, 가을에 높은 것은 기후가 활동하기에 적당하여 일

상생활과 산업활동이 활발히 이루어지고, 계절적으로 장거리 이동하는 타 지역 대기오염 물질의 영향을 많이 받기 때문이라고 사료된다.

Si, Fe, Mn 등이 두 지역 모두 봄에 높은 농도를 나타내었는데 이는 주변 토양과 황사의 영향이라고 판단된다. 이는 양³²⁾등이 서울 지역의 황사현상 시 Si, Fe, Mn이 비황사시 보다 높게 나타났다는 보고와 일치한다.

Table 7. Concentration of metals PM10 of Seoul by season. (unit : ng/m^3)

	Spring (n=6)	Summer (n=6)	Fall (n=5)	Winter (n=3)	F
	Mean \pm S.D(Range)	Mean \pm S.D(Range)	Mean \pm S.D(Range)	Mean \pm S.D(Range)	
Cr	5.83 \pm 1.36 (4.30~8.07)	1.80 \pm 1.08 (0.07~2.98)	2.41 \pm 1.40 (0.49~4.37)	-	19.83***
Cu	10.29 \pm 4.41 (3.44~15.15)	2.68 \pm 3.26 (0.00~8.80)	6.92 \pm 7.79 (0.00~17.98)	0.01 \pm 0.01 (0.00~0.02)	3.88*
Mn	26.30 \pm 7.25 (18.27~39.47)	14.30 \pm 4.70 (8.15~19.74)	16.14 \pm 6.21 (5.37~20.36)	0.02 \pm 0.00 (0.02~0.03)	14.33***
Pb	140.55 \pm 24.16 (77.05~265.27)	127.78 \pm 5.43 (74.52~163.29)	137.97 \pm 27.84 (25.19~307.43)	315.51 \pm 247.88 (99.72~586.25)	2.27
Zn	24.20 \pm 71.19 (7.31~69.90)	4.07 \pm 33.09 (0.00~13.25)	51.53 \pm 103.18 (28.20~88.54)	0.04 \pm 0.01 (0.03~0.06)	6.71**
Fe	795.70 \pm 139.13 (636.66~962.27)	496.86 \pm 147.57 (266.43~696.63)	607.00 \pm 279.72 (245.44~1006.25)	0.64 \pm 0.15 (0.51~0.80)	13.35***
Si	2000.11 \pm 284.64 (1478.32~2213.09)	1352.22 \pm 197.99 (1156.30~1663.13)	2676.69 \pm 2916.29 (1015.48~7874.11)	1.74 \pm 0.11 (1.67~1.86)	2.26

* : $p < 0.05$, ** : $p < 0.01$, *** : $p < 0.001$

Pb의 경우 두 지역 모두 겨울에 높은 농도를 나타내었는데, 이것은 과거에 배출된 자

동차오염물질과 연소관련 시설의 영향이라고 판단된다.

Zn의 경우 황사기간과 비황사기간의 농도차가 크지 않은 것은 최³³⁾가 서울시 북동지역에서 측정한 결과와 일치한다.

계절별 PM₁₀의 금속함량을 종합하면, 서울지역은 Si, Fe, Zn은 봄, 가을, Cr, Cu, Mn은 봄, Pb은 겨울에 높으며, 아산지역은 Fe은

봄, Cr은 봄, 가을, Si는 여름, As는 가을, Cu는 가을~겨울, Zn, Pb은 겨울, Mn은 겨울~봄에 높게 나타났다. 또 서울지역은 Cr, Fe, Mn이 계절에 따라 유의한 차이를 보였고 (p<0.001), 아산지역은 Fe, Mn이 유의한 차이를 보였다(p<0.01).

Table 8. Concentration of metals in PM10 of Asan by season. (unit : ng/m3)

	Spring (n=5)	Summer (n=8)	Fall (n=8)	Winter (n=8)	F
	Mean±S.D(Range)	Mean±S.D(Range)	Mean±S.D(Range)	Mean±S.D(Range)	
As	0.38±0.74 (0.00~1.69)	0.54±1.49 (0.00~4.24)	0.68±1.89 (0.00~5.36)	0.48±0.77 (0.00~1.93)	0.06
Cr	10.20±13.54 (1.86~34.10)	4.70±5.10 (0.00~15.27)	10.21±10.29 (1.74~33.93)	5.36±2.52 (2.01~8.58)	0.95
Cu	1.75±1.68 (0.00~3.41)	2.94±4.09 (0.00~9.92)	4.00±4.77 (0.00~11.78)	4.17±5.31 (0.00~14.97)	0.39
Mn	26.72±11.49 (15.75~44.71)	10.13±2.17 (8.01~14.97)	18.62±9.16 (6.40~34.84)	25.88±10.83 (13.78~49.10)	5.48**
Pb	42.19±4.94 (36.17~46.93)	20.61±19.37 (0.00~54.37)	36.23±26.18 (7.86~89.28)	54.58±29.56 (32.50~119.54)	2.89
Zn	86.59±20.26 (69.93~115.10)	71.86±24.90 (33.92~97.82)	87.93±41.27 (38.18~167.38)	95.87±52.00 (56.95~190.72)	0.54
Fe	617.02±348.97 (312.48~1176.09)	222.93±90.02 (38.89~331.04)	366.68±151.49 (155.05~573.75)	479.49±178.05 (249.44~705.09)	4.91**
Si	1382.11±444.47 (986.50~2147.65)	3138.33±2820.50 (821.89~7546.12)	1480.91±831.58 (766.45~3464.02)	1453.40±492.14 (652.59~2190.11)	2.19

** : p<0.01

4.2. PM_{2.5}의 금속함량

4.2.1. 금속성분의 농도

PM_{2.5}의 금속함량은 서울지역의 일반금속은 Si>Fe>Zn, 중금속은 Pb>Mn>Cu>Cr>As 순이고, 아산지역의 일반금속은 Si>Fe>Zn, 중금속은 Pb>Cr>Mn>Cu>As 순으로서 서울지역과 유사하나 Cr가 Mn, Cu보다 높은 점이 다르다. PM₁₀의 함량순서와는 아산지역의 Cr이 Mn보다 높아진 것만 차이가 난다.

서울지역이 아산지역에 비해 일반금속은 Si 1049.8, Fe 30.5, Zn 17.5ng/m³씩 낮고, 중금속은 Pb은 186ng/m³ 높고, Cr 24, As 3.2, Cu 2, Mn 0.5ng/m³ 씩 낮음으로써 Pb을 제외한 모든 항목이 낮게 나타났다.

두 지역 PM_{2.5}의 Si와 Fe농도가 높은 것은 PM₁₀과 마찬가지로 토양 등 자연오염원의 영

향으로 판단된다. 아산지역 Si농도가 서울지역보다 1.5배 정도 높은 것은 아산지역의 도로포장율이 낮고 도시규모가 작아서 산과 들에 노출된 토양, 암석 등 지면의 영향을 많이 받기 때문이다.

서울지역 Pb농도가 아산지역보다 3배정도 높은 것은 과거에 배출된 자동차오염물질에 기인하며, 오염원을 제거하더라도 오염토양은 단기간에 복원되지 않음을 알 수 있다. 또한 서울지역 Cr농도가 아산지역보다 20배 정도 낮은 것은 아산지역 산업체에서 배출된데 기인한다고 생각된다.

PM_{2.5}의 금속함량을 PM₁₀과 비교하면 서울지역은 일반금속인 Zn이 21.2ng/m³ 높고, Fe, Si는 각각 303.3, 46.8ng/m³씩 낮으며, 중금속은 Pb, As는 각각 108, 0.4ng/m³씩 높고, Mn, Cu, Cr은 각각 4.9, 4.6, 2.3ng/m³씩

낮았다. 아산지역은 일반금속인 Si가 808.3 ng/m³ 높고, Fe과Zn이 각각 134.5, 25.4ng/m³ 씩 낮으며, 중금속은 Pb, Cr, As는 각각 46.3, 17.2, 3.1ng/m³씩 높고, Mn, Cu는 각각 7.9, 0.4 ng/m³씩 낮았다.

일반적으로 미세먼지의 중금속함량은 PM_{2.5}가 PM₁₀보다 높다고 알려져 있는데, 서울지역의 경우 Pb는 훨씬 높고, As, Mn은 비슷하며, Cu, Cr은 훨씬 낮다. 또 아산지역은 Pb, Cr, As는 훨씬 높고, Cu는 비슷하며, Mn은 훨씬 낮

게 나타났다.

이와 같이 PM_{2.5}의 중금속함량이 PM₁₀보다 낮은 원인을 규명하기 위해서는 지역의 지화학적 특성, 오염물질 배출량, 장거리 이동, 대기화학 및 기상현상 등에 대한 종합적이고 장기적인 연구가 수행되어야 한다고 사료된다.

한편 Pb함량은 PM_{2.5}가 PM₁₀보다 더 높다고 보고한 Fang³⁴⁾등의 연구결과와 일치하였다.

Table 9. Concentration of metals PM2.5 of Seoul and Asan. (unit : ng/m³)

	Seoul		Asan		F
	No.	Mean±S.D. (Range)	No.	Mean±S.D. (Range)	
As	20	0.47± 1.98 (0.00~8.85)	28	3.62± 5.57 (0.00~27.68)	5.855*
Cr	20	0.64± 1.08 (0.00~3.94)	28	24.58± 16.63 (0.00~72.13)	41.075***
Cu	20	1.02± 2.16 (0.00~6.96)	28	2.96± 4.39 (0.00~16.07)	3.319
Mn	20	11.28± 8.05 (0.62~31.72)	28	11.79± 5.97 (3.85~31.32)	0.062
Pb	20	270.26± 269.26 (23.44~934.91)	28	84.32± 37.09 (26.94~184.85)	13.116***
Zn	20	42.58± 35.88 (0.73~141.92)	28	60.11± 29.10 (17.88~154.32)	3.484
Fe	20	236.32± 151.32 (79.73~711.53)	28	266.82± 124.59 (61.90~581.17)	0.585
Si	20	1628.31± 743.32(851.49~3658.72)	28	2678.13± 1214.70(1034.08~5645.66)	11.662***

* : p<0.05, ** : p<0.01, *** : p<0.001

PM₁₀과 비교하면 서울지역은 일반금속인 Zn는 높고, Fe, Si는 낮으며, 중금속은 Pb는 훨씬 높고, As, Mn은 비슷하며, Cu, Cr은 훨씬 낮다. 아산지역은 일반금속인 Si가 높고, Zn, Fe이 낮으며, 중금속은 Pb, Cr, As는 훨씬 높고, Cu는 비슷하며, Mn은 훨씬 낮게 나타났다.

PM_{2.5}의 금속함량을 요약하면, 서울지역 일반금속은 Si>Fe>Zn, 중금속은 Pb>Mn>Cu>Cr>As순이고, 아산지역은 서울지역과 Cr이 Mn, Cu보다 높은 점만 다르며, PM10의 금속함량순서와는 아산지역의 Cr이 Mn보다 높아진 것만 차이가 난다. 서울지역이 아산지역에 비해 Pb를 제외한 모든 항목이 낮게 나타났다.

4.2.2. 계절별 PM_{2.5}의 금속함량

계절별 PM_{2.5}의 금속함량은 서울지역은 Cr만 유의한 차이를 보이고(p<0.001), 아산지역

은 유의한 차이를 보인 항목이 없었다.

계절별 PM_{2.5}의 금속함량은 서울지역은 일반금속은 Fe은 봄, Zn은 가을~봄, Si는 가을에 높고, 중금속은 전 항목이 봄에 높게 나타났으며, 아산지역은 일반금속은 Si는 여름~가을, Zn은 가을~겨울, Fe은 겨울에 높고, 중금속은 As는 봄~여름, Cu는 여름, Pb는 여름~겨울, Cr, Mn은 겨울에 높게 나타났다.

이와 같이 서울지역 PM_{2.5}의 중금속 전 항목이 봄에 높고, 아산지역이 항목별로 여름~겨울에 높은 이유는 두 지역의 오염물질 발생, 확산 및 제거메커니즘이 다르고 특히 황사와 같은 중국에서 월경하는 장거리 물질의 영향 때문이라고 사료된다.

서울지역의 경우 Fe, Mn 등이 봄에 높은 농도를 나타낸 반면, 아산지역에서는 겨울철에 높은 농도를 나타내고 있다. 이것은 서울지역은 봄철에 황사의 영향이 있었고, 아산지

역은 겨울철에 황사의 영향을 더 많이 받은 것으로 생각된다. 수원시에서도 일반 거주 지역에서 봄과 겨울에 Fe이 높게 측정되어 본 연구 결과와 일치하였다³⁵⁾.

한편 계절별 서울지역 PM_{2.5}와 PM₁₀의 금

속함량을 비교하면, 일반금속은 세 항목 모두 봄, 가을에 높고, 중금속은 PM_{2.5}의 Cu는 여름, Pb는 여름~겨울, Cr, Mn은 겨울에 높고, PM₁₀의 Cr, Cu, Mn은 봄, Pb은 겨울에 높다.

Table 10. Concentration of metals in PM2.5 of Seoul by season. (unit : ng/m3)

	Spring (n=6)	Summer (n=7)	Fall (n=3)	Winter (n=4)	F
	Mean±S.D(Range)	Mean±S.D(Range)	Mean±S.D(Range)	Mean±S.D(Range)	
As	-	-	2.95±5.11 (0.00~8.85)	0.11±0.23 (0.00~0.45)	2.22
Cr	1.98±1.15 (0.59~3.94)	0.03±0.09 (0.00~0.24)	0.13±0.22 (0.00~0.38)	0.06±0.12 (0.00~0.25)	12.12***
Cu	1.91±3.06 (0.00~6.96)	-	0.11±0.19 (0.00~0.33)	2.15±2.72 (0.00~5.66)	1.52
Mn	15.96±8.07 (10.50~31.72)	6.35±4.40 (0.62~12.33)	12.35±12.10 (2.43~25.84)	12.09±7.92 (6.02~23.74)	1.78
Pb	437.80±315.75 (79.50~934.91)	231.74±318.04 (23.44~886.19)	175.48±69.25 (129.14~255.10)	157.44±44.35 (103.94~201.96)	1.22
Zn	48.94±35.24 (10.38~106.07)	25.19±20.17 (0.73~65.67)	57.86±72.83 (13.62~141.92)	52.02±24.38 (34.52~87.03)	0.87
Fe	324.70±191.57 (228.15~711.53)	151.76±54.96 (79.73~225.32)	217.57±169.14 (95.57~410.64)	265.78±157.90 (183.91~502.61)	1.62
Si	1541.61±613.93 (933.98~2721.68)	1705.60±728.19 (851.49~2622.38)	2114.97±1347.35 (1175.87~3658.72)	1258.13±389.72 (865.22~1698.92)	0.78

*** : p < 0.001

Table 11. Concentration of metals in PM2.5 of Asan by season. (unit : ng/m3)

	Spring (n=5)	Summer (n=7)	Fall (n=8)	Winter (n=8)	F
	Mean±S.D(Range)	Mean±S.D(Range)	Mean±S.D(Range)	Mean±S.D(Range)	
As	1.15±1.77 (0.00~4.24)	5.11±10.33 (0.00~27.68)	5.27±3.21 (0.03~10.63)	2.22±2.06 (0.00~5.83)	0.89
Cr	13.94±9.70 (4.56~27.34)	25.81±18.08 (0.00~56.53)	18.64±8.16 (5.75~32.14)	36.09±19.79 (12.44~71.13)	2.77
Cu	0.78±1.02 (0.00~2.10)	4.09±6.39 (0.00~16.07)	3.12±3.76 (0.00~11.38)	3.19±4.47 (0.00~13.51)	0.55
Mn	10.48±5.07 (3.92~18.08)	10.08±5.64 (5.61~22.25)	10.73±5.55 (3.85~21.63)	15.16±6.82 (9.33~31.32)	1.23
Pb	59.50±21.63 (26.94~80.63)	89.18±33.78 (37.67~130.92)	88.49±38.37 (37.16~156.30)	91.40±45.24 (58.34~182.85)	0.91
Zn	43.96±17.07 (17.88~60.83)	56.80±44.00 (29.28~154.32)	65.89±25.22 (32.40~101.38)	67.31±22.57 (44.40~109.81)	0.79
Fe	261.21±129.02 (128.01~470.85)	277.03±164.72 (61.90~581.17)	207.12±70.52 (111.15~327.82)	321.11±120.69 (207.95~577.36)	1.16
Si	2247.37±1438.06 (1034.08~4471.73)	2995.16±1540.83 (1493.58~5645.65)	2869.66±1318.42 (1158.14~5078.33)	2518.06±758.13 (1489.64~3562.11)	0.43

또 계절별 아산지역 PM_{2.5}와 PM₁₀의 금속 함량을 비교하면, PM_{2.5}의 일반금속은 Si는 여름~가을, Zn은 가을~겨울, Fe은 겨울에 높고, PM₁₀은 Fe은 봄, Si는 여름, Zn은 겨울

에 높으며, PM_{2.5}의 중금속은 As는 봄~여름, Cu는 여름, Pb는 여름~겨울, Cr, Mn은 겨울에 높고, PM₁₀은 Cr은 봄, 가을, Si는 여름, As는 가을, Cu는 가을~겨울, Zn, Pb은 겨울,

Mn은 겨울~봄에 높게 나타났다.

계절별 PM_{2.5}의 금속함량을 요약하면, 서울지역 일반금속은 Fe은 봄, Zn은 가을~봄, Si는 가을에 높고, 중금속은 전 항목이 봄에 높으며, 아산지역 일반금속은 Si는 여름~가을, Zn은 가을~겨울, Fe은 겨울에 높고, 중금속은 As는 봄~여름, Cu는 여름, Pb는 여름~겨울, Cr, Mn은 겨울에 높게 나타났다.

4.3. 금속성분의 상관성

4.3.1. 서울지역 금속성분의 상관성

서울지역 금속성분간의 상관성은 Cr과 Cu, Cu와 Fe, Fe와 Mn, Mn과 Zn, Zn과 Si가 유의하게 높다. Zn과 Mn, Si의 유의한 상관성을 통해 도로교통, 토양입자, 유류 등에 의한 오염임을 추정할 수 있다¹⁹⁾.

Table 12. Correlations matrix among metals of Seoul.

	Cr	Cu	Mn	Zn	Pb	Fe
Cu	0.672**					
Mn	0.735**	0.720**				
Zn	-0.017	0.062	0.403**			
Pb	-0.146	-0.122	0.051	0.229		
Fe	0.805**	0.680**	0.860**	0.195	-0.156	
Si	0.225	0.015	0.367*	0.546**	0.156	0.512**

* : p<0.05, ** : p<0.01

4.3.2. 아산지역 금속성분의 상관성

아산지역 금속성분의 상관성은 Cr과 Zn, Cu와 Pb, Pb와 Zn, Pb과 Mn이 유의하게 높은 양의 상관성을 나타내었다.

Zn과 Pb의 상관성을 통해 자동차에 의한

오염임을 추정할 수 있다. 가솔린 연소과정에서 배출되는 Mn, Cu, Pb의 상관성이 높음으로써 석탄, 가솔린, 디젤이 주요 오염원임을 알 수 있으며, 이러한 결과는 정³⁶⁾등이 서울시 신촌지역에서 측정한 결과와 일치한다.

Table 13. Correlations matrix among metals of Asan.

	Cr	Cu	Mn	Zn	Pb	Fe
Cu	-0.110					
Mn	0.002	0.271*				
Zn	0.358**	0.419**	0.332*			
Pb	-0.006	0.643**	0.568**	0.631**		
Fe	0.134	0.109	0.904**	0.172	0.352**	
Si	0.218	0.035	-0.157	0.402**	0.240	-0.072

* : p<0.05, ** : p<0.01

IV. 결론

서울과 아산지역에서 2004년 6월부터 1년 동안 PM₁₀ 및 PM_{2.5}를 포집하여 금속함량 분석, 계절별 변화양상, 금속간의 상관관계를 조사하고 미세먼지의 노출평가를 실시하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 연평균 PM₁₀농도는 서울지역 56.95(±25.63) $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 아산지역 57.02(±27.22) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로서 두 지역이 비슷하고, 우리나라 PM₁₀의 연평균 기준인 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에는 미달되나, 미국 기준 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 은 초과하였으며, 월 최고농도와 월 최저농도는 두 지역 모두 4월과 8월에 나타났다.

2. 연평균 PM_{2.5}농도는 서울과 아산지역이 각각 46.97(±40.36), 42.16(±21.79)μg/m³로서 두 지역이 비슷하나, 미국의 연평균 PM_{2.5}기준 15μg/m³보다 3배 정도 높다. 월 최고농도는 서울과 아산지역 모두 10월, 월 최저농도는 서울지역은 6월, 아산지역은 9월에 나타났다.
3. 계절별 PM₁₀농도는 두 지역이 서울지역은 봄>가을~겨울>여름 순으로 비슷하고, 두 지역의 계절별 편차는 봄, 여름에는 아산지역이 각각 3.2, 4.95μg/m³ 높고, 가을에는 서울지역이 4.79μg/m³ 높으며, 겨울에는 두 지역이 비슷하였다.
4. 계절별 PM_{2.5}농도는 서울지역은 가을>봄>겨울>여름 순이고, 아산지역은 여름>겨울>가을>봄 순으로서 두 지역의 경향이 다르다. 두 지역의 계절별 편차는 봄, 가을에는 서울지역이 각각 13.732, 20.16μg/m³ 높고, 여름에는 아산지역이 5.28μg/m³ 높으며, 겨울에는 비슷하였다.
5. PM_{2.5}/PM₁₀비는 서울과 아산지역이 각각 0.82, 0.74이었다.
6. PM₁₀의 금속함량은 서울지역은 Si>Fe>Pb>Zn>Mn>Cu>Cr>As순이고, 아산지역은 Cr>Cu인 점만 다르다. 지역별 중금속 함량은 서울이 아산지역보다 Pb, Cu는 각각 124.3, 2.2μg/m³ 높고, Cr, Mn, As는 각각 4.5, 3.5, 0.5μg/m³ 낮게 나타났다. 계절별로는 서울지역의 Cr, Cu, Mn이 봄에 유의하게 높았다.
7. PM_{2.5}의 금속함량은 서울지역은 Si>Pb>Fe>Zn>Mn>Cu>Cr>As순이고, 아산지역은 Si>Fe>Pb>Zn>Cr>Mn>Cu>As순으로서 서울은 Pb, 아산지역은 Cr이 많다. 서울이 아산지역에 비해 Pb를 제외한 모든 항목이 낮았다
8. 계절별 PM₁₀의 금속함량은 서울지역은 Si, Fe, Zn은 봄, 가을, Cr, Cu, Mn은 봄, Pb은 겨울에 높고, 아산지역은 Fe은 봄, Cr은 봄, 가을, Si는 여름, As는 가을, Cu는 가을~겨울, Zn, Pb은 겨울, Mn은 겨울~

- 봄에 높았다. 계절별로는 서울지역은 Cr, Fe, Mn이 p<0.001의 유의한 차이, 아산지역은 Fe, Mn이 p<0.01의 유의한 차이를 보였다.
9. 계절별 PM_{2.5}의 금속함량은 서울지역 일반금속은 Fe은 봄, Zn은 가을~봄, Si는 가을에 높고, 중금속은 전 항목이 봄에 높으며, 아산지역 일반금속은 Si는 여름~가을, Zn은 가을~겨울, Fe은 겨울에 높고, 중금속은 As는 봄~여름, Cu는 여름, Pb는 여름~겨울, Cr, Mn은 겨울에 높게 나타났다.
 10. 금속간의 상관성은 서울지역은 Cr과 Cu, Cu와 Fe, Fe와 Mn, Mn과 Zn, Zn과 Si가 높은 상관성을 나타내고, 아산지역은 Cr과 Zn, Cu와 Pb, Zn과 Pb, Pb과 Mn이 높은 상관성을 나타내었다.

위 사항을 요약하면 서울과 아산지역의 PM₁₀농도는 우리나라 연 평균기준인 70μg/m³에는 미달되나 미국 연 평균기준 50μg/m³을 초과하고, PM_{2.5}농도는 미국 연 평균기준 15μg/m³를 3배 정도 초과하므로, 우리나라에서도 PM_{2.5}가 국민의 건강과 환경에 미치는 영향을 고려하여 제도적으로 관리하는 것이 바람직하다고 생각한다.

감사의 글

본 논문은 순천향대학교 학술연구조성비 일반연구과제로 지원을 받아 수행하였으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

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. European Respiratory Journal, 9: 1029-

- 1054, 1996.
3. 하재성, 김유정, 한진석, 김조천, 선우영 : 강화도 지역 PM2.5의 봄철/겨울철 화학적 특성. 한국대기환경학회 추계학술대회, 2004.
 4. 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.
 5. Salvador, P., Artinano, B., Alonso, D. G., Querol, X. and Alstuey, A. : Identification and characterization of sources of PM₁₀ in Madrid (Spain) by stastical methods. *Atmospheric Environment*, 38, 435-447, 2004.
 6. 나덕재, 이병규 : 산업도시 대기 중 PM₁₀의 농도 및 금속원소 성분의 특성 연구. 한국 대기환경학회지, 16(1), 23-35, 2000.
 7. Whittemore AS, Korn EL. : Asthma and air pollution in the Los Angeles area. *American Journal of Public Health*, 70, 687-696, 1980.
 8. Ostro BD, Lipsett MJ, Wiener MB, Selner JC : Asthmatic response to airborne acid aerosols. *American Journal of Public Health*, 81, 694-702, 1991.
 9. Schwartz, J. : Air pollution and hospital admissions for the elderly in Birmingham. *American Journal of Epidemiology*, 139, 589-598, 1994.
 10. Pope CA III, Dockery DW. : Acute health effects of PM₁₀ pollution on symptomatic and asymptomatic children. *American Review of Respiratory Disease*, 145, 1123-1128, 1995.
 11. Borja-Aburto, V. H., Loomis, D. P., Bangdiwala, S. I., Shy, C. M. and Rascon-Pacheco, R. A. : Ozone, suspended particulates, and daily mortality in Mexico city. *American Journal of Epidemiology*, 45, 258-268, 1997.
 12. Schwartz, J., Norris, G., Larson, T., Sheppard, L., Claiborne, C. and Koenig, J. : Episodes of high coarse particle concentrations are not associated with increased mortality. *Environmental Health Perspect*, 107, 339-342, 1999.
 13. 강공언, 박진수, 김신도, 김태식, 서충렬 : 대도시 지역 환경대기에서 미세먼지의 농도 및 이온성분의 화학적 특성. 한국대기환경학회 추계학술대회 초록집, 2003.
 14. Shendrikar, A. D. and Steinmetz, W. K. : Integrating nephelometer measurements for the airborne fine particulate matter (PM_{2.5}) mass concentrations. *Atmospheric environment*, 37, 1383-1392, 2003.
 15. 최성우, 송형도 : 대구지역 부유분진 중 미량금속성분의 발생원 특성연구. 한국대기환경학회지, 16, 469-476, 2000.
 16. Dockery, DW., Pope, CA., Xu, X., Spengler, J. D., Ware, JH., Fay, M. E., Ferris, B. G. and Speizer, F. E., : An association between air pollution and mortality in six US cities. *New England Journal Medicine*, 329, 1753-1759, 1993.
 17. 박진수, 김신도, 최금찬, 김종호, 김태식 : 수도권 대기 중 미세먼지의 특성 파악에 관한 연구. 대한환경공학회 춘계학술연구 발표회 논문집, 쪽 605-607, 2003.
 18. 환경부 : 대기오염공정시험방법. 환경부 고시, 2004.
 19. 김성연 : 서울시 일부 지역의 대기 중 미세먼지에 관한 연구. 석사학위논문, 서울대학교 보건대학원, 2005.
 20. Chan, L. Y. and Kwok, W. S. : Vertical dispersion of suspended particulates in urban area of Hong Kong. *Atmospheric*

- Environment, 34, 4403-4412, 2000.
21. 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.
 22. Tucker, W. G. : An overview of PM_{2.5} sources and control strategies. Fuel Processing Technology, 65-66, 379-392, 2000.
 23. Gidhagen, L., Kahelin, H., Schmidt-Thome, P. and Johansson, C. : Anthropogenic and natural levels of arsenic in PM₁₀ in Central and Northern Chile. Atmospheric Environment, 36, 3803-3817, 2002.
 24. 진윤하, 구해정, 김봉만, 김용표, 박순웅 : 한반도 11개 도시의 1995-2000년 PM₁₀ 농도변화 경향. 한국대기환경학회지, 19, 231-245, 2003.
 25. 최금찬, 김종호, 김태식, 강공언, 강창희, 김신도 : 미세먼지 분야 측정분석 자료의 해석. 한국대기환경학회 춘계학술대회, 2003.
 26. Artinano, B., Salvador, P., Alonso, D. G., Querol, X. and Alastuey, A. : Influence of traffic on the PM₁₀ and PM_{2.5} urban aerosol fractions in Madrid (Spain). The Science of Total Environment, 2004.
 27. Querol, X., Alastuey, A., Rodriguez, S., Plana, F., Carmen, R., Ruiz, Cots, N. and Massague G. and Puig O. : PM₁₀ and PM_{2.5} source apportionment in the Barcelona Metropolitan area, Catalonia, Spain. Atmospheric Science, 35, 6407-6419, 2001.
 28. Namdeo, A. K., Colls, J. J., and Baker, C. J. : Dispersion and re-suspension of fine and coarse particulates in an urban street canyon. The Science of Total Environment, 235, 3-13, 1999.
 29. 이세행 : 공사장 및 교통 혼잡지역의 PM₁₀과 먼지입경별 중금속 농도분포에 관한 연구. 석사학위논문, 조선대학교 대학원, 1998.
 30. 신은상, 최민유, 선우영, 정용삼 : 서울 지역의 PM₁₀ 중 미량원소의 특성 평가. 한국대기환경회지, 18, 363-372, 2002.
 31. Sternbeck, J., Sjodin, A. and Andreasson, K. : Metal emissions from road traffic and the influence of resuspension - results from two tunnel studies. Atmospheric Environment, 36, 4735-4744, 2002.
 32. 양원호, 손부순, 김윤신, 최경호, 손종렬, 이종대 : 아산 및 서울 일부 지역의 대기 중 PM₁₀의 농도 및 금속원소 성분의 특성 연구. 한국환경위생학회지, 30(2), 123-132, 2004.
 33. 최규훈 : 2001년 황사기간 중 서울시 북동부지점에서 관찰한 중금속 성분의 농도 분포. 석사학위논문, 세종대학교 대학원, 2002.
 34. Fang, G., Chang, C., Chu, C., Wu, Y., Fu, P. P. C., Yang, I. L. and Chen M. H. : Characterization of particulate, metallic elements of TSP, PM_{2.5} and PM aerosols at a farm sampling site in Taiwan, Taichung. The Science of Total Environment, 308, 157-166, 2004.
 35. 경기도 보건환경연구원 : 대기오염평가보고서. 2003.
 36. 정용, 장재용, 정의조 : 도시 대기 중 중금속에 관한 연구 - 서울시 신촌지역을 중심으로 -. 한국대기보전학회지, 3, 18-26, 1987.