

서울시 일부 지역의 대기 중 미세먼지에 관한 연구

김성연 · 정문호 · 손부순*† · 양원호** · 최경호

서울대학교 보건대학원 환경보건학과, *순천향대학교 환경보건학과,
**대구가톨릭대학교 산업보건학과

A Study on Airborne Particulate Matter of a Local Area in Seoul

Sung-Yeon Kim · Mooh-Ho Chung · Bu-Soon Son*† · Won-Ho Yang** · Kyung-Ho Choi

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

*Department of Environmental Health Science, Soonchunhyang University

**Department of Occupational Health, Catholic University of Daegu

(Received June 3, 2005; Accepted July 21, 2005)

ABSTRACT

The purpose of this study was to characterize mass concentration of PM_{10} , $PM_{2.5}$ and metallic composition using Minivol Portable Sampler from May 2003 to May 2004 in metropolitan city, Seoul. Annual average concentration of PM_{10} were $57.67(\pm 28.20) \mu\text{g}/\text{m}^3$ and $PM_{2.5}$ were $42.06(\pm 20.23) \mu\text{g}/\text{m}^3$. The concentration was the highest in winter because persistent thermal inversion and in spring, particulate matter concentration was high because of yellow-sand events. The average $PM_{2.5}/PM_{10}$ ratio was 0.73. This indicated $PM_{2.5}$ fraction played a significant role in air pollution. The atmospheric metallic elements in the PM_{10} , $PM_{2.5}$ came different emission sources such as soil, traffic, industry and resuspended particles. The results showed that average PM_{10} composition order as $\text{Fe} > \text{Zn} > \text{Pb} > \text{Cu} > \text{Mn}$. The metallic elements Zn and Fe were the largest composition in the $PM_{2.5}$.

Keywords: PM_{10} , $PM_{2.5}$, $PM_{2.5}/PM_{10}$, metallic elements, Seoul, Korea

I. 서 론

현대사회에 산업이 발달되면서 여러 가지 산업 활동, 교통과 연소과정에 의해서 다양한 오염물질의 영향이 심각해지고 있다. 특히 우리나라는 중국의 공해지역에 위치하고 있어 중국에서 배출되는 대기오염물질의 이동 및 강하에 의해 영향을 받을 가능성이 있다.¹⁾ 또한 시정장애감소와 호흡기질환 등을 유발하여 주요 문제로 대두하고 있다.

총부유먼지는 $10 \mu\text{m}$ 이상의 조대입자와 $10 \mu\text{m}$ 이하의 미세입자로 나누어진다. 조대입자는 코와 후두내 난류에 의한 관성력에 의해 흡입시에 제거되는 반면 미세입자는 폐포까지 침투하여 기관지에 남아있게 된다. 미세입자는 입자의 크기에 따라 공기역학적 직경이 10

μm 이하인 PM_{10} 과 $2.5 \mu\text{m}$ 이하인 $PM_{2.5}$ 로 나누어진다. PM_{10} 은 바람에 의한 먼지 등 자연적인 오염원과 자동차, 도로의 비산먼지에 의해 발생되며 토양과 관련된 Al, Si, Ca, Ti와 Fe 등이 많이 포함되어 있다.²⁾ 반면 $PM_{2.5}$ 는 산업, 운송, 주거활동 등에 의한 연소과정, 자동차 배기가스로부터 직접 배출되거나, 1차 가스상 오염물질의 화학적 변환 등에 의해 생성된다. 따라서 황산염, 질산염, 암모니아 등의 이온성분과 금속 화합물, 탄소화합물 그리고 수분 등으로 이루어져 있으며 S, K, Ni, Br, Pb와 같은 인위적인 활동에 의한 물질이 많다.³⁾

일반적으로 $PM_{2.5}$ 는 PM_{10} 의 30~70%를 차지한다. $PM_{2.5}/PM_{10}$ ratio가 낮으면 PM_{10} 의 대부분이 토양입자로 이루어져있음을 의미한다.

또한 최근 역학연구에 따르면 미세먼지의 입경에 따라 인체에 미치는 영향이 다르다. 대부분의 도시지역에서 사망률은 $PM_{2.5}$ 증가시에 17% 높아지며 PM_{10} $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가시 0.5% 증가한다고 보고되었다. 이밖에

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

도 PM_{10} 은 호흡계 질환에, $PM_{2.5}$ 은 심장박동수가 증가하는 등 심혈관계 질환과 암, 조기사망에 영향을 주는 것으로 알려져 있으며⁴⁾ PM_{10} 에 비해 $PM_{2.5}$ 의 독성이 더욱 강하다.⁵⁾

본 연구는 사람들의 인체에 대한 건강영향을 파악하기 위해 측정기를 설치하여 인체에 흡입될 수 있는 미세먼지의 양을 간접적으로 측정하여 미세먼지에 대한 노출 평가를 하여 위해성 평가의 기초 자료로 사용하고자 한다. 또한 계절적 변화에 따른 미세먼지 농도의 변화를 파악하고자 하며 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 의 화학적 조성을 규명하기 위해 각각의 중금속 성분 농도를 알아보고, 상관관계를 살펴보고 배출원을 규명하고자 한다.

II. 방 법

1. 시료의 포집

미세먼지의 농도와 미세먼지에 흡착되어 있는 중금속 성분의 조성을 알아보기 위하여 포집장소는 서울 종로구 혜화동에 위치한 서울대학교 보건대학원 옥상으로 선정하였으며 포집기간은 2003년 5월말부터 2004년 5월말이다. 계절에 따른 미세먼지의 농도 변화를 살펴보기 위해서 봄은 3~5월, 여름은 6~8월, 가을은 9~11월, 겨울은 12~2월로 분류하였다.⁶⁾ 포집필터는 pallflex membrane filter(47 mm, Gelman science사)를 이용하였으며 시료포집 전, 후에 항온, 항습상태의 데시케이터 내에서 48시간 이상 보관하여 항량이 되도록 하였다. 측정 후에는 impactor를 n-Hexane으로 세척하여 건조시킨 후 grease(ApizonM사)를 도포하였다. PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 의 측정기는 5 l/min 유량의 Mini-Volume Portable Air Sampler(MiniVol, AIRmetrics)를 이용하였다. 또한 여과지 교체 전 후에 bubble meter를 이용하여 유량을 보정하였다.

2. 시료의 분석방법

1) 미세먼지 농도

측정기로 포집한 시료를 항온, 항습 상태인 데시케이터에서 24시간 이상 보관한 후 0.01 mg까지 측정가능한 electronic auto balance(Sartorius research)를 이용하여 여과지무게를 측정하여 질량농도를 분석하였다.

2) 금속성분 농도

미세먼지에 흡착되어있는 중금속성분을 추출하기 위하여 대기공정시험방법에 기준한 질산, 염산 혼합액에 의한 초음파 추출법을 이용하였다.⁷⁾ 시료를 포집한 여과지를 100 ml 비이커에 넣고 1.03 M 질산과 2.23 M 염산을 1:1로 혼합하여 30 ml를 가한 후 sealing film

으로 비이커를 밀봉하였다. 초음파 추출기(BRANSON 3210)에 100°C 물을 비이커 내의 시료가 잠길 정도로 채운 후에 28 kHz의 초음파 추출기로 2시간 동안 추출하였다. 초음파 처리가 끝나면 비이커에서 여과지를 꺼내어 식힌 후 깔대기를 이용하여 비이커 속의 시료 용액을 여과하였다. 증류수로 여과지를 세척하여 메스 플라스크로 옮겨 최종액량이 50 ml가 되도록 조정하였다. 또한 별도로 공 여과지에 대하여 같은 조작을 하여 바탕시험용액을 제조하였다.

전처리후에 ICP-OES(Inductively Coupled Plasma Emission Spectrometry, Optima 3000DV, PerkinElmer사)를 이용하여 PM_{10} , $PM_{2.5}$ 에 흡착되어 있는 As, Mn, Fe, Cr, Cu, Cd, Pb, Zn, Hg의 9가지 금속성분 농도를 분석하였다. 분석된 금속농도는 분석된 공시료 값에 대하여 보정하였으며 공기 중 금속농도의 계산은 다음 식을 이용하였다.

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

Ws : 시료 중 분석농도

Vs : 시료의 최종용액 부피

V : 공기채취유량(l/min)

L : 총포집시간(min)

3) 통계분석

통계분석은 Excel 2002와 SPSS 12.0을 사용하였다. 미세먼지와 금속성분의 농도는 일원분산분석을 실시하였고, 미세먼지의 계절적 변화는 Tukey's Honestly Significant Difference(HSD)의 다중비교를, 금속성분의 상관성은 상관분석을 이용하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 미세먼지의 농도

1) PM_{10} 의 농도

PM_{10} 의 연평균농도는 $57.67(\pm 28.20) \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 1992년~1997년에 서울에서 측정된 $59.6(\pm 25.7) \mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 비슷한 농도 수준을 나타내었다(Table 1).⁸⁾ 우리나라 PM_{10} 연평균기준치인 $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 만족하였으나 미국 PM_{10} 연평균기준치인 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하였다. 이밖에도 산업도시인 울산에서 측정된 결과인 $57.86 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 유사하게 나타났으나⁹⁾ 산업도시의 특성을 고려해보면 본 연구의 포집지역 오염도가 심각한 것으로 판단된다. 또한 PM_{10} 포집시료의 46.7%가 미국 PM_{10} 연평균기준치인 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하였다.

PM_{10} 의 월별농도를 살펴보면 겨울철인 1~2월에 높은

Table 1. PM₁₀ concentration in Seoul by month

	N	Mean ± S.D (Range)	95% confidence limit	
			Lower	Upper
January	4	84.11 ± 29.74 (46.76~108.01)	36.79	131.43
February	3	96.17 ± 28.20 (75.75~128.35)	26.11	166.23
March	4	71.31 ± 29.77 (42.98~109.06)	23.95	118.68
April	4	82.31 ± 17.20 (60.98~96.87)	54.95	109.68
May	2	49.37 ± 0.66 (48.91~49.84)	43.48	55.27
June	4	61.74 ± 9.64 (51.24~71.47)	46.41	77.08
July	4	33.53 ± 12.73 (19.84~46.92)	13.26	53.79
August	4	30.57 ± 10.11 (19.36~41.63)	14.49	46.66
September	4	38.10 ± 27.96 (7.22~73.88)	-6.39	82.58
October	4	35.54 ± 19.38 (11.41~57.60)	4.70	66.37
November	4	59.69 ± 27.61 (25.81~93.30)	15.75	103.62
December	4	55.12 ± 17.87 (39.49~80.77)	26.68	83.57
Total	45	57.67 ± 28.20 (7.22~128.35)	49.20	66.15

All concentrations expressed in µg/m³.

농도가 나타났다. 1월에 측정된 PM₁₀은 84.11(±29.74) µg/m³으로 중국 대륙성 고기압의 영향과 해양 수증기의 유입으로 안개가 발생하고 약 2 m/s 이하의 미풍, 침강 역전층, 300 m 이하에 복사 역전층의 형성으로 높게 측정되었다. 2월에는 96.17(±28.20) µg/m³으로 고기압 정체로 인해 환기효과가 약해지고 두 차례의 황사에 의해 고농도를 나타낸 것으로 파악되며 봄철인 3월, 4월에도 역시 황사현상으로 인하여 높은 농도로 측정되었다. 9월은 대체로 양호한 상태를 나타내었으나 중순에 이르러 고기압상태로 되면서 풍속이 약해져 오염물질의 정체현상으로 고농도현상이 일어났다. 11월, 12월 역시 대체로 양호했으나 강한 스모그 발생으로 인해 고농도현상이 일시적으로 나타났다.¹⁰⁾ PM₁₀이 높은 것은 디젤 연료를 사용하는 자동차의 영향이 크며

Table 2. PM_{2.5} concentration in Seoul by month

	N	Mean ± S.D (Range)	95% confidence limit	
			Lower	Upper
January	4	50.73 ± 26.60 (15.08~72.16)	8.4	93.05
February	3	76.61 ± 19.03 (62.64~98.29)	29.34	123.89
March	4	49.03 ± 17.02 (29.32~69.46)	21.94	76.11
April	4	51.78 ± 15.07 (39.89~73.86)	27.8	75.76
May	2	35.83 ± 23.18 (19.44~52.22)	-172.42	244.08
June	4	53.21 ± 12.01 (40.82~65.28)	34.1	72.32
July	4	23.82 ± 7.50 (13.64~30.71)	11.88	35.75
August	4	19.84 ± 9.11 (7.65~27.91)	5.35	34.33
September	3	35.37 ± 18.97 (19.08~56.21)	-11.76	82.51
October	2	30.44 ± 4.8 (27.05~33.83)	-12.66	73.53
November	4	38.14 ± 17.01 (19.37~60.69)	11.08	65.21
December	4	37.95 ± 13.01 (27.00~56.75)	17.24	58.65
Total	42	42.06 ± 20.23 (7.65~98.29)	35.76	48.36

All concentrations expressed in µg/m³.

PM₁₀은 자연적 오염원의 영향을 주로 받는 입자크기로 황사가 발생했을 때에도 농도가 높게 나타났다.¹¹⁾

우리나라는 2001년에 비황사시 89.1 µg/m³이었으나 황사시 654.3 µg/m³으로 약 7.4배 증가하여 황사의 대부분이 조대입자로 구성되어 있음을 알 수 있다.¹²⁾ 또한 고층건물이 많고 거주지역, 상업지역, 산업지역이 혼합되어 있는 지역의 경우에 높게 측정된다.¹³⁾ 그러므로 본 연구의 포집지역이 인구가 밀집되어있고 교통이 혼잡한 지역으로 상업적 특성과 거주지가 혼합되어 있어서 미세먼지의 농도가 높게 측정된 것으로 판단된다.

2) PM_{2.5}의 농도

PM_{2.5}의 연평균농도는 42.06(±20.23) µg/m³으로 2002년 타이완에서 측정된 42.8 µg/m³과 유사한 결과를 나타내고 있다(Table 2). 미국 PM_{2.5} 연평균기준치인

15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 3배 정도 높게 측정되었으며 포집시료의 95%가 $\text{PM}_{2.5}$ 연평균기준치를 초과하였다. 월별 농도를 살펴보면 2월에 연료사용의 증가와 황사현상으로 76.61(± 19.03) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가장 높게 나타났다. 또한 여름임에도 불구하고 6월에는 포집지역 주변의 도로공사와 광화학반응 등으로 미세입자의 생성을 촉진하여 $\text{PM}_{2.5}$ 의 농도가 증가한 것으로 판단된다. 전체적으로 $\text{PM}_{2.5}$ 의 농도는 역전층 형성, 황사현상 등으로 인해 PM_{10} 의 농도변화경향과 유사하게 나타났으며 이러한 경향은 최급찬 등에 의한 연구결과와 일치하였다.¹⁴⁾ 도시 지역에서 도로교통은 미세입자와 중금속의 중요한 오염원으로 교통에 의한 오염원을 규제하는 것이 관리대책의 하나로 매우 중요하다. 이러한 도로교통에 의한 오염원은 타이어마모, 연료의 연소, 공사, 토양의 재비산 등이 있다. 그러므로 본 연구의 포집지역은 도로와 인접하고 있어 차량의 영향이 크다. 미국에서는 디젤배출가스의 입자상 물질 중 98% 이상이 $\text{PM}_{2.5}$ 로 알려져 있으며¹⁵⁾ 디젤연료를 사용하는 차량과 포집지역 주변에서 이루어진 공사로 인해 농도가 높게 측정된 것으로 판단된다. 또한 우리나라에서 1990년부터 2000년까지 황사의 입자크기를 분석한 결과 3 μm 이하의 입자가 전체 황사먼지의 51.4%를 차지하였으며 비황사시기와 비교하여 62.4% 증가하는 것으로 나타났다.¹⁶⁾ 그러므로 황사가 $\text{PM}_{2.5}$ 에도 영향을 준다는 것을 알 수 있다. 본 연구의 결과를 살펴보면 $\text{PM}_{2.5}$ 에 의한 오염도가 매우 심각하므로 $\text{PM}_{2.5}$ 의 구체적인 대책과 지속적인 관리가 필요하다.

2. 미세먼지의 계절적 농도 변화

1) PM_{10} 의 계절적 농도 변화

계절에 따른 PM_{10} 평균농도는 Table 3과 같으며, 계

절별 평균 PM_{10} 농도는 유의한 차이를 나타내었다 ($p < 0.001$). 이러한 결과는 1999년에 대구에서 측정된 봄 75(± 14) $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 여름 49(± 11) $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 가을 47(± 5) $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 겨울 76(± 29) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 결과와 유사하였다.¹⁷⁾ 또한 Tukey's HSD를 이용하여 다중비교를 하여 계절간의 농도변화를 알아보았다(Table 3). 봄은 겨울과 유사하게 나타났으며 가을과 비교하여 유의하게 농도 차이가 나타나는 것을 알 수 있다. 반면에 여름은 가을과 유사하게 나타났다.

PM_{10} 의 농도는 주로 봄, 겨울에 높게 나타났으며 신은상, 선우영 등이 서울지역에서 측정된 PM_{10} 의 계절적 변화와 유사한 결과를 보였다.⁸⁾ 봄에는 황사현상으로 인하여 PM_{10} 의 농도가 높게 나타나는 것으로 보고되어 있으며 본 연구에서 봄철에 높게 측정된 것 역시 황사현상에 의한 것으로 판단되어진다. 일반적으로 여름에는 강우량의 영향으로 대기 중에서 제거되는 wash-out 현상에 의해 PM_{10} 의 농도가 낮게 측정되는 반면¹⁹⁾ 5월말부터 6월 중순까지 포집지역 주변의 도로포장공사로 인해 다소 높은 농도가 나타났다. 또한 일반적으로 가을에는 농도가 낮게 나타나는데 본 연구에서는 9월에 풍속이 약해지면서 대기오염물질의 정체현상으로 여름보다 높게 측정되었다. 겨울에는 강우량의 감소로 인해 유출량이 줄어들고 혼합도가 낮아져 미세먼지의 농도가 높게 나타나며 역전층 형성으로 PM_{10} 의 농도가 더욱 높게 측정되었다.

2) $\text{PM}_{2.5}$ 의 계절적 농도 변화

계절에 따른 $\text{PM}_{2.5}$ 평균농도는 Table 4와 같으며, 계절별 평균 $\text{PM}_{2.5}$ 농도는 유의한 차이를 나타내었다 ($p < 0.001$). 또한 농도변화를 유의하게 나타내는 계절을 알아보기 위해서 다중비교를 해보았으나 계절간의 농도차이는 유의하지 않은 것으로 나타났다. 하지만 겨

Table 3. PM_{10} concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) in Seoul by season

	N	Mean \pm S.D (Range)	95% Confidence limit	
			Lower	Upper
Spring	10	71.33 \pm 23.56 ^{ac} (42.98~109.06)	54.47	88.18
Summer	12	41.95 \pm 17.69 ^b (19.36~71.47)	30.71	53.19
Fall	12	44.44 \pm 25.52 ^{bc} (7.22~93.30)	28.22	60.66
Winter	11	76.86 \pm 29.02 ^a (15.08~98.29)	49.2	66.15
p*		0.001*		

*: ANOVA.

Table 4. $\text{PM}_{2.5}$ concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) in Seoul by season

	N	Mean \pm S.D (Range)	95% Confidence limit	
			Lower	Upper
Spring	10	47.49 \pm 16.48 (19.44~73.86)	35.7	59.27
Summer	12	32.29 \pm 17.86 (7.65~65.28)	20.94	43.63
Fall	9	35.51 \pm 14.54 (19.08~60.69)	24.33	46.68
Winter	11	53.14 \pm 24.40 (15.08~98.29)	36.75	69.5
p*		0.044*		

울, 봄, 가을, 여름의 순서로 농도가 낮게 나타나는 계절간의 농도변화 경향은 알 수 있었다. PM_{2.5}는 봄과 겨울에 높게 측정되었으며 이 결과는 2001~2002년에 Milan에서 겨울철에 측정된 58.6(±29.5) µg/m³보다 약간 낮게 나왔다. 하지만 Milan은 거주지역으로 교통량이 많으며 화학공장, 발전소가 있는 지점임을 고려해야 한다.²¹⁾ 반면에 Milan에서 여름에 측정된 결과인 27.2(±14.1) µg/m³보다 약간 높은 수치를 나타내었다. 여름에는 불안정한 대기 상태에 의해 빗방울을 형성하는 응축핵으로 작용하여 제거되는 rain-out 현상에 의해 낮은 농도를 나타내었다.²²⁾ 가을에는 태풍의 영향으로 중국으로부터 오염물질의 장거리 이동과 정체성고기압의 형성으로 오염물질이 희석되지 못하여 높게 측정되었다.

3. PM_{2.5}와 PM₁₀의 비

PM_{2.5}/PM₁₀ ratio는 Table 5와 같으며 평균 PM_{2.5}/PM₁₀ ratio는 0.73으로 서울을 비롯한 수도권 대도시에서 2002년부터 2003년까지 3차에 걸쳐서 측정된 PM_{2.5}/PM₁₀ ratio 평균치 0.71과 유사하게 나왔다.²³⁾ 유럽에서는 포집장소의 형태에 따라 다양하게 측정되었으며 도시의 배경지역에서 0.4~0.5, 0.8까지, 외곽지역에서 0.6~0.8로 측정되었다.²⁴⁾

월별로 따른 PM_{2.5}/PM₁₀ ratio는 0.60(1월)부터 0.93(9월)의 범위로 매우 높은 ratio를 나타내며 편차가 크다. 높은 PM_{2.5}/PM₁₀ ratio는 PM₁₀ 내에 황화합물이 많이 포함되어있고 재부유된 조대입자의 침전에 의한 영향에 의한 것이다.²⁵⁾ 또한 스페인의 대도시에서도 일변

화를 살펴보았을 때 교통량이 증가하는 시간에 PM_{2.5}/PM₁₀ ratio가 높게 나타났다.²⁶⁾ Namdeo는 도시지역 도로면에서는 교통량증가에 의해 타이어마모, 브레이크 라이닝 마모와 먼지의 재비산으로 PM_{2.5}/PM₁₀ ratio가 증가함을 보고했다.²⁷⁾

본 연구의 포집지역도 차량이 많이 왕래하는 도로와 인접해 있기 때문에 교통량, 공사 등의 영향으로 상대적으로 PM_{2.5}/PM₁₀이 높게 나온 것으로 판단되어진다. 또한 PM₁₀내에 PM_{2.5}가 평균 73% 정도 포함되어있고 포집시기에 따라 PM_{2.5}가 최고 93%까지 포함되어있으므로 PM_{2.5}의 규제와 관리의 필요성이 제기된다.

4. PM_{2.5}/PM₁₀ ratio의 계절적 변화

계절별 PM_{2.5}/PM₁₀ ratio는 봄 0.69, 여름 0.74, 가을 0.81, 겨울 0.69로 측정되었다. 황사현상 등 자연적인 오염원의 영향을 받는 PM₁₀에 의해 봄과 겨울에 PM₁₀이 증가하여 상대적으로 PM_{2.5}/PM₁₀이 감소하는 경향을 보여주었다. Milan에서 측정된 결과(여름 0.63, 겨울 0.77)와 비교해보면 약간의 차이를 보였으며³¹⁾ 베이징의 교통밀집지역인 대학가에서 측정된 결과를 살펴보면 여름에 0.45, 겨울에 0.73으로 측정되었다.³⁰⁾ 또한 캘리포니아에서는 PM_{2.5}가 PM₁₀내에 약 50~70%으로 여름보다 가을에 높게 측정되어 본 연구의 결과와 일치하였다.³¹⁾

5. 미세먼지내의 금속성분 분석

1) PM₁₀ 내의 금속성분 분석

(1) 금속성분의 농도

PM₁₀ 시료 중 4개의 시료 손실이 발생하여 41개 시료 중의 금속성분을 분석하였으며 결과는 Table 6과 같다.

As와 Cd은 검출한계 이하로 측정되었으며(As: 0.0056 mg/l, Cd: 0.003 mg/l) Cd의 오염원은 비철금속

Table 5. Monthly variations of PM_{2.5}/PM₁₀ ratio

Month	PM _{2.5}	PM ₁₀	PM _{2.5} /PM ₁₀ ratio
	Mean ± S.D	Mean ± S.D	
January	50.73 ± 26.60	84.11 ± 29.74	0.60
February	76.61 ± 19.03	96.17 ± 28.20	0.80
March	49.03 ± 17.02	71.31 ± 29.77	0.69
April	51.78 ± 15.07	82.31 ± 17.20	0.63
May	35.83 ± 23.18	49.37 ± 0.66	0.73
June	50.43 ± 13.04	61.74 ± 9.64	0.86
July	31.36 ± 18.08	33.53 ± 12.73	0.71
August	19.84 ± 9.11	30.57 ± 10.11	0.65
September	35.37 ± 18.97	38.10 ± 27.96	0.93
October	30.44 ± 4.8	35.54 ± 19.38	0.86
November	38.14 ± 17.01	59.69 ± 27.61	0.64
December	37.95 ± 13.01	55.12 ± 17.87	0.69
Total	42.06 ± 20.23	57.67 ± 28.20	0.73

All concentrations expressed in µg/m.

Table 6. Concentration (µg/m) of metallic elements in PM₁₀

	Mean ± S.D	Min	Max
As		N.D	
Cd		N.D	
Cr	0.0032 ± 0.0197	0.0000	0.1262
Cu	0.0400 ± 0.0249	0.0066	0.1419
Fe	0.7531 ± 0.4439	0.1467	2.2091
Mn	0.0350 ± 0.0318	0.0039	0.1827
Pb	0.0820 ± 0.0755	0.0000	0.4019
Zn	0.2236 ± 0.1218	0.0356	0.5778
Hg	0.2236 ± 0.0002	0.0000	0.0014

산업과 철강산업이므로 포집지역에서는 검출한계 이하로 측정된 것으로 판단되어진다. 금속농도성분은 Fe>Zn>Pb>Cu>Mn으로 금속성분의 순위가 1995년~1996년에 광주 교통 혼잡지역의 결과와 일치하였으며³²⁾ 지각에 많이 함유되어있는 Fe의 함량이 높으며 토양 입자 등 자연적 오염원의 영향을 많이 받는다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 안산시와 수원시에서 측정된 결과와 일치하며 Fe이 안산시에서는 3.4~383배, 수원시에서는 1.5~100배 높은 농도로 나타나 대기 중 중금속 성분의 대부분을 차지하고 있는 것으로 나타났다.¹²⁾ 그리고 Cu가 Mn보다 다소 높게 나타난 결과 역시 광주의 교통혼잡지역에서 측정된 결과와 일치하여 자동차의 영향이 있음을 추정할 수 있다.³²⁾ 반면에 인위적 오염원에 의해 많이 발생하는 Pb, Mn은 적게 포함되어 있다.

(2) 계절적 변화에 따른 금속성분 농도변화

계절적 변화에 따른 금속성분의 농도변화는 유의한 차이는 나타내지 않았으며 특히 Zn이 황사기간이나 비황사기간의 농도차이가 크지 않다는 것은 서울시 북동 지역에서 측정된 결과와 일치하였다.³³⁾

(3) 금속성분의 상관성

금속성분간의 상관성은 Fe와 Cu, Fe와 Zn, Zn과 Pb가 높은 양의 상관성을 나타냈으며 Hg와 Cr, Hg와 Fe는 음의 상관성을 나타내고 있다(Table 7).

Zn과 Pb의 상관관계를 통해 자동차 오염원으로 분류할 수 있으며 Zn과 Fe, Pb가 상관성을 통해 연료의 연소나 자동차의 영향인 것으로 추정할 수 있다. 또한 Fe와 Zn, Cu의 상관성을 통해 도로나 토양입자, 유류 등의 발생원에 의한 것임을 알 수 있다.

2) PM_{2.5} 내의 금속성분 분석

(1) 금속성분의 농도

PM_{2.5} 시료 중 1개의 시료 손실이 발생하여 41개 시료 중의 금속 성분을 분석하였으며 결과는 Table 8과 같다.

Table 8. Concentration (µg/m³) of metallic elements in PM_{2.5}

	Mean ± S.D	Min	Max
As		N.D	
Cd		N.D	
Cr	0.0002 ± 0.0011	N.D	0.007
Cu	0.0208 ± 0.0119	0.0055	0.0525
Fe	0.1457 ± 0.1196	N.D	0.5495
Mn	0.0159 ± 0.0099	0.003	0.0414
Pb	0.0875 ± 0.0933	N.D	0.4655
Zn	0.1743 ± 0.0994	0.0395	0.4647
Hg		N.D	

As와 Cd는 검출한계 이하로 측정되었으며(As: 0.0056 mg/l, Cd: 0.003 mg/l) 포집장소주변에 제련소 등의 산업장이 존재하지 않기 때문인 것으로 판단되어진다. 금속농도성분의 순서를 살펴보면 Zn>Fe>Pb>Cu>Mn으로 측정되었다. Zn이 가장 높게 측정되어 자동차 등의 인위적인 오염원의 영향이 크며 Fe 역시 다른 금속성분보다 높게 측정되어 토양입자의 영향도 있다고 판단되어진다. Pb는 PM₁₀보다 PM_{2.5}에 더 많이 포함되어있는 것으로 알려져 있으며 본 연구의 결과와 일치하였다.³⁴⁾ 이러한 결과를 통하여 포집 지역은 자동차와 토양의 영향을 많이 받고 있음을 알 수 있다.

(2) 계절적 변화에 따른 금속성분 농도변화

계절적 변화에 따른 금속성분의 농도변화는 Cu, Fe, Mn, Zn이 통계적으로 유의하였으며, 특히 봄과 겨울에 Fe와 Zn이 높게 나타났다. 수원시의 일반거주지역에서는 봄과 겨울에 Fe이 높게 측정되어 본 연구의 결과와 일치하였다.¹²⁾ 또한 Zn이 높게 나타난 것은 2001년도에 측정된 미세먼지의 중금속 결과와 일치하였다.³³⁾ 이것은 Fe와 Zn이 토양입자의 영향을 많이 받는 성분으로 봄과 겨울에 발생한 황사현상에 의해서 토양 성분의 유입이 증가했기 때문이라고 추정할 수 있다.

Table 7. Correlations matrix among metallic elements in PM₁₀

	Cr	Cu	Fe	Mn	Pb	Zn	Hg
Cr	1						
Cu	0.069	1					
Fe	0.260	0.770**	1				
Mn	0.035	0.343*	0.382*	1			
Pb	0.182	0.280	0.392*	0.170	1		
Zn	0.041	0.656**	0.750**	0.292	0.538**	1	
Hg	-0.026	0.145	-0.007	-0.031	0.229	0.450**	1

*p<0.05, **p<0.01.

Table 9. Correlations matrix among metallic elements in PM_{2.5}

	Cr	Cu	Fe	Mn	Pb	Zn
Cr	1					
Cu	0.379*	1				
Fe	0.541**	0.673**	1			
Mn	0.412**	0.814**	0.694**	1		
Pb	0.132	0.521**	0.367*	0.494**	1	
Zn	0.25	0.717**	0.641**	0.690**	0.25	1

*p<0.05, **p<0.01.

(3) 금속성분의 상관성

금속성분간의 상관성은 Zn과 Fe, Mn과 Cu, Fe와 Cu, Fe와 Mn의 상관성이 높게 나타났다(Table 9). 가솔린의 연소과정에서 주로 배출되는 Fe와 Mn, Mn과 Cu의 상관성이 높게 측정된 것은 석탄과 가솔린, 디젤이 주요 오염원이라는 것을 알 수 있으며 신촌지역에서 측정된 결과와 일치한다.³⁹⁾ 또한 Zn, Fe, Cu의 상관성을 통해 발생원이 교통과 연소과정에 의한 것이다. 그러므로 포집지역은 가솔린, 디젤을 이용하는 차량과 연소과정에서 발생하는 오염원의 영향을 받고 있다.

IV. 결 론

본 연구는 2003년 5월부터 2004년 5월까지 서울시 일부지역에서 시료를 포집하여 PM₁₀과 PM_{2.5}를 실측하였으며 인체에 흡입가능한 양을 간접적으로 측정하였다. 또한 화학적 조성을 규명하기 위해 중금속 성분 농도를 알아보고, 상관관계를 살펴보아 배출원 규명하여 위해성 평가의 노출평가 자료로 이용하고자 한다.

1. PM₁₀의 연평균 농도는 57.67(±28.20) µg/m³, PM_{2.5}의 연평균 농도는 42.06(±20.23) µg/m³이었다. 미세먼지의 EPA 연간 기준치를 초과하였으며 인체에 흡입될 수 있는 양이 많다는 것을 알 수 있었다.

2. PM₁₀의 계절별 농도를 살펴보면 유의한 차이를 나타내었으며(p<0.001) Tukey's HSD를 이용한 다중비교를 하여 봄은 겨울과 유사하게 나타났으며 가을과 비교하여 유의하게 농도 차이가 나타나는 것을 알 수 있다. 반면에 여름은 가을과 유사하게 나타났다. 봄에는 황사현상으로 인하여, 겨울에는 중첩된 역전층의 영향으로 인하여 높은 오염도를 나타내었다.

3. PM_{2.5}의 계절별 농도를 살펴보면 봄과 겨울에 높게 나타났으며 계절별 PM_{2.5} 농도는 유의한 차이를 나타내었다(p<0.001).

4. PM_{2.5}/PM₁₀ ratio는 평균 0.73을 나타내었으며

PM₁₀ 내에 PM_{2.5}가 차지하는 비율이 높으므로 PM₁₀ 뿐만 아니라 PM_{2.5}의 규제, 관리가 필요하다고 생각된다.

5. PM₁₀의 금속성분 분석 결과 지각에 많이 함유되어 있는 Fe의 함량이 가장 높게 나타나 토양 입자 등 자연적 오염원의 영향과 Zn을 통해 자동차의 영향을 받고 있는 것으로 나타났다. 또한 금속성분의 상관성을 살펴본 결과 Fe, Zn, Cu의 상관성이 높게 나타나 이들의 발생원이 토양입자나 자동차 등으로 유사한 것으로 판단된다.

6. PM_{2.5}의 금속성분 분석 결과 Zn과 Fe이 높게 측정되어 디젤, 가솔린을 사용하는 자동차와 토양입자의 영향을 받고 있는 것으로 판단되어진다. 금속성분은 계절적 변화에 따라 Cu, Fe, Mn, Zn는 유의한 차이가 나타났다. 또한 Zn과 Fe, Mn과 Cu, Fe와 Cu, Fe와 Mn의 상관성이 높게 나타났으며 이들의 발생원이 디젤 연료나 가솔린에 의한 것으로 판단되어진다.

참고문헌

1. 하재성, 김유정, 한진석, 김조천, 선우영 : 강화도 지역 PM_{2.5}의 봄철/겨울철 화학적 특성. 한국대기환경학회 추계학술대회. 2004.
2. Marazzani, G. M., Ceriani, M., Valli, R. and Vecchi, R. : Source apportionment of PM₁₀ and PM_{2.5} in Milan (Italy) using receptor modeling, *The Science of Total Environment*, 2003.
3. Salvador, P., Artinano, B., Alonso, D. G., Querol, X. and Alstuey, A. : Identification and characterization of sources of PM₁₀ in Madrid (Spain) by statistical methods. *Atmospheric Environment*, **38**, 435-447, 2004.
4. 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.
5. 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.
6. 김성천, 송재중, 임성호, 강달선 : 군산 지역에서 PM₁₀의 농도 및 성분 특성에 관한 연구. 한국환경위생학회, **26**, 18-24, 2000.
7. 대기공정시험법. 동화기술, 537-544, 1998.
8. 신은상, 최민유, 선우영, 정용삼 : 서울 지역의 PM₁₀ 중 미량원소의 특성 평가. 한국대기환경학회지, **18**, 363-372, 2002.
9. 나덕재, 이병규 : 산업도시 대기 중 PM₁₀의 농도 및 금속원소 성분의 특성연구. 한국대기환경학회지, **16**, 23-35, 2000.
10. 강공언, 박진수, 김신도, 김태식, 서충렬 : 대도시 지역 환경대기에서 미세먼지의 농도 및 이온성분의 화학적 특성. 한국대기환경학회 2003 추계학술대회. 2003.

11. Artinano, B., Salvador, P., Diana G., Alonso, Querol, X. and Alastuey, A. : Anthropogenic and natural influence on the PM₁₀ and PM_{2.5} aerosol in Madrid (Spain). Analysis of high concentration episodes: *Environmental Pollution*, **125**, 453-465, 2003.
12. 대기오염평가보고서, 경기도보건환경연구원, 2003.
13. Chan, L. Y. and Kwok, W. S. : Vertical dispersion of suspended particulates in urban area of Hong Kong: *Atmospheric Environment*, **34**, 4403-4412, 2000.
14. 최금찬, 김중호, 김태식, 강공언, 강창희, 김신도 : 미세먼지 분야 측정분석 자료의 해석. 한국대기환경학회 춘계학술대회. 한국대기환경학회, 2003.
15. Tucker, W. G. : An overview of PM_{2.5} sources and control strategies. *Fuel Processing Technology*, 65-66, 379-392, 2000.
16. 최성우, 송형도 : 대구지역 부유분진 중 미량금속성분의 발생원 특성연구. 한국대기환경학회지, **16**, 469-476, 2000.
17. Chan, L. Y. and Kwok, W. S. : Vertical dispersion of suspended particulates in urban area of Hong Kong: *Atmospheric Environment*, **34**, 4403-4412, 2000.
18. 신은상, 최민유, 선우영, 정용삼 : 서울 지역의 PM₁₀ 중 미량원소의 특성 평가. 한국대기환경학회지, **18**, 363-372, 2002.
19. 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.
20. 진윤하, 구해정, 김봉만, 김용표, 박순용 : 한반도 11개 도시의 1995~2000년 PM₁₀ 농도 변화 경향. 한국대기환경학회지, **19**, 231-245, 2003.
21. Vecchia, R., Marcazzani, G., Vallia, G., Ceriania, M. and Antoniazzi, C. : The role of atmospheric dispersion in the seasonal variation of PM₁ and PM_{2.5} concentration and composition in the urban area of Milan (Italy). *Atmospheric Environment*, **38**, 4437-4446, 2004.
22. 김병화, 김동술 : 수원지역 대기중 PM_{2.5}와 PM₁₀의 환경거동에 관한 연구. 한국대기환경학회지, **16**, 89-101, 2000.
23. 최금찬, 김중호, 김태식, 강공언, 강창희, 김신도 : 미세먼지 분야 측정분석 자료의 해석. 한국대기환경학회 춘계학술대회. 한국대기환경학회, 2003.
24. Querol, X., Alastuey, A., Ruiz, C. R., Artinano, B., Hansson, H. C., Harrison, R. M., Buringh, E., Ten Brink, H. M., Lutz, M., Bruckmann, P., Straehl, P. and Schneider, J. : Speciation and origin of PM₁₀ and PM_{2.5} in selected European cities. *Atmospheric Environment*, **38**, 6547-6555, 2004.
25. Querol, X., Alastuey, A., Rodriguez, S., Plana, F., Carmen, R., Ruiz, Cots, N., 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.
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. 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.
28. 박정호, 정기일 : 진주시 대기중 PM₁₀ 및 PM_{2.5} 입자상 물질의 농도 특성. 산업과학기술연구소보, **7**, 159-164.
29. Vecchia, R., Marcazzani, G., Vallia, G., Ceriania, M. and Antoniazzi, C. : The role of atmospheric dispersion in the seasonal variation of PM₁ and PM_{2.5} concentration and composition in the urban area of Milan (Italy). *Atmospheric Environment*, **38**, 4437-4446, 2004.
30. Suna, Y., Zhuang, G., Wang, Y., Han, L., Guo, J., Dan, M., Zhang, W., Wang, Z. and Hao, Z. : The air-borne particulate pollution in Beijing concentration, composition, distribution and sources. *Atmospheric Environment*, **38**, 5991-6004, 2004.
31. Chow, J. C., Watson, J. G., Fujita, E. M., Lu, Z., Lawson, D. R. and Lowell, L. A. : Temporal and spatial variations of PM_{2.5} and PM₁₀ Aerosol in the southern California air quality study. *Atmospheric Environment*, **28**, 206-2080, 1994.
32. 이세행 : 공사장 및 교통 혼잡지역의 PM₁₀과 먼지입경별 중금속 농도분포에 관한 연구, 조선대학교 대학원 석사학위논문, 1998.
33. 최규훈 : 2001년 황사기간 중 서울시북동부지역에서 관찰한 중금속 성분의 농도 분포. 세종대학교 대학원 석사학위논문, 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, Taiwan: *The Science of Total Environment*, **308**, 157-166, 2004.
35. 정 용, 장재용, 정의조 : 도시 대기 중 중금속에 관한 연구 서울시 신촌지역을 중심으로. 한국대기보전학회지, **3**, 18-26, 1987.