광주지역 먼지 특성에 관한 연구

서광엽[†] · 김승호 · 이경석 · 민경우 · 서희정 · 강영주 · 백계진 · 문용운 · 신대윤*

광주광역시보건환경연구원 환경연구부, *조선대학교 환경공학부
(2010. 3. 9. 접수/2010. 3. 29. 수정/2010. 4. 19. 채택)

Characteristics of Ambient Particulate Matter in Gwangju

Gwangyeob Seo[†] · Seungho Kim · Kyoungseok Lee · Kyoungwoo Min · Heejeong Seo ·
Yeongju Kang · Kejin Paik · Youngwoon Moon · Daeyewn Shin*

Environmental Research Department, Public Health and Environment Institute of Gwangju

*Department of Environmental Engineering Chosun University

(Received March 9, 2010/Revised March 29, 2010/Accepted April 19, 2010)

ABSTRACT

In this study, ambient particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀) levels were measured and their chemical and physical properties were characterized. Two sites in Gwangju were sampled once a month from December 2008 to November 2009. The annual mean concentrations of PM_{2.5} and PM₁₀ were 26.9 µg/m³ and 46.3 µg/m³, respectively, in Nongseong-dong and 26.1 µg/m³ and 44.8 µg/m³, respectively, in Duam-dong. PM_{2.5} levels were 1.8 times higher than the USA Environmental Protection Agency (EPA) national ambient air quality standard for PM_{2.5} (15 µg/m³). The average PM_{2.5}/PM₁₀ ratio of 0.58 suggested that PM_{2.5} is a significant component of the ambient particle pollution. The order of concentration of metallic elements in PM_{2.5} and PM₁₀ was Si > Al > Fe > Zn > Pb > Cu > Mn. Cd was not detected. The earth crustal enrichment factors for Cr, Cu, Pb and Zn in PM_{2.5} were higher than those in PM₁₀. When the earth crustal enrichment factors for Cr, Cu, Pb and Zn were higher than 10, this suggested influence from anthropogenic sources. The soil contribution ratios for PM_{2.5} and PM₁₀ were 11.3% and 16.4%, respectively, and were higher in the fall and winter. Anions (SO₄²⁻, NO₃⁻, and Cl⁻) comprise 28.7% of PM_{2.5} and 21.4% of PM₁₀. The correlation coefficient of Zn-Fe, Mn-Cu, Fe-Cu and Fe-Mn in PM_{2.5} was high in the sampling sites, and metallic elements were primarily from anthropogenic sources such as fuel combustion and vehicle emissions.

Keywords: PM_{2.5}, PM₁₀, crustal enrichment factor, soil contribution ratio, metallic element, anion

I. 서 론

현대사회는 인구, 사업, 경제활동이 도시에 집중되어 지속적인 경제성장을 위한 에너지 소비량 증가와 주거 및 생활문화의 서구화로 인한 자동차 및 각종 화학물질의 소비량 증가로 인해 현재 대도시의 미세먼지 등이 대기오염의 문제로 대두되고 있다.¹⁾ 그 중 미세먼지에 의한 오염은 도심지역의 시정장애 감소와 호흡기질환 등을 유발하는 주요 원인 물질이다.

대기오염물질 중 하나인 입자상물질(particulate matter; PM)은 대기환경에서 입자의 크기에 따라 공기

역학적 직경이 10 µm 이하인 PM₁₀과 2.5 µm 이하인 PM_{2.5}로 구분한다. PM₁₀은 바람에 의한 먼지 등 자연적인 오염원과 자동차, 도로의 비산먼지 등에 의해 발생되며 토양과 관련된 Al, Si, Ca, Ti와 Fe 등이 많이 포함되어 있다.²⁾ PM_{2.5}는 산업, 운송, 주거활동 등에 의한 연소과정과 자동차 배기가스로부터 직접 배출되거나, 1차 가스상 오염물질의 화학적 변환 등에 의해 생성된다. 따라서 황산염, 질산염, 암모니아 등의 이온성분과 금속화합물, 탄소화합물 그리고 수분 등으로 이루어져 있으며 S, K, Ni, Br, Pb와 같은 인위적인 활동에 의한 물질이 많다.³⁾

입경 2.5 µm 미만의 미세입자(fine particle)는 대기 중 체류시간이 길어 특히 대도시의 시정악화와 인체 호흡기 및 호흡기계통에 미치는 영향은 매우 크며, 특히 황산염(sulfate), 질산염(nitrate) 및 염화물(chlorate) 같은

[†]Corresponding author : Environmental Research Department, Public Health and Environment Institute of Gwangju
Tel: 82-62-613-7620, Fax: 82-62-613-7619
E-mail : sky521@korea.kr

산성물질과 다환방향족탄화수소(PAHs; polycyclic aromatic hydrocarbons) 같은 독성이 강한 유기물질을 다량 함유하고 있어 인체와 환경에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.⁴⁾ 또한 대기 중 $PM_{2.5}$ 의 농도가 높으면 폐렴, 폐 기능손실, 병원 이용률, 천식 및 다른 호흡기 문제뿐만 아니라 심장혈관 및 암과 관련한 사망의 위험성 증가와 관련이 있음을 보고하였다.⁵⁾

이와 같이 대기 중에 존재하는 입자상 물질은 그 크기에 따라 인체, 재산, 대기 및 자연환경에 미치는 영향이 다르고, 배출원 또한 다르기 때문에 입경분포에 대한 연구는 보건학적인 측면에서 뿐만 아니라 입자상 물질의 배출원 해석이나 관리대책수립에도 중요하다.⁶⁾ 또한 임의의 지역에서 유발되고 있는 입자상 물질로 인한 대기오염의 원인과 정도를 파악하고 그에 대한 관리 대책의 수립 및 배출원 규제를 수행하기 위해서는 사전에 오염원에 대한 정량 정성분석이 선행되어야 하며, 이들 각 발생원이 어느 정도 오염도에 기여를 하고 있는가에 대한 정량적인 평가의 필요성이 무엇보다 중요하게 인식되어 미세먼지에 대한 연구가 이루어지고 있다.⁷⁾

미국 EPA(environmental protection agency)에서는 PM_{10} (24 hr 평균기준 $150 \mu g/m^3$)과 $PM_{2.5}$ (연평균기준 $15 \mu g/m^3$, 24 hr 평균기준 $35 \mu g/m^3$)에 대한 대기환경기준을 설정 적용하고 있다.⁸⁾ 환경부에서는 $PM_{2.5}$ 의 다양한 환경적 문제를 인식하고 2010년 $PM_{2.5}$ 의 대기환경기준이 공포될 예정이며 2013년 시행을 위해 준비 중이다.¹⁾

본 연구에서는 광주지역을 대상으로 2008년 12월부터 2009년 11월까지 광주지역의 대기환경 중 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 의 지역적, 계절적 분포의 특성을 파악하였다. 또한 미세먼지에 함유된 각종 화학성분 분석 자료를 통계분석기법에 적용하여 미세먼지의 농도변화에 영향을 미치는 주요 영향인자를 해석하여 광주지역의 미세먼지의 특성을 발생원과 연관하여 평가하고자 하였다. 이에 미세먼지의 다양한 물리·화학적 특성에 대한 각종 평가 및 해석을 근거로 광주지역의 미세먼지 특성을 평가하여 인근 주요 배출원에 대한 향후 관리방안을 마련하기 위한 과학적 정보를 제공하고자 한다. 또한 환경부 $PM_{2.5}$ 대기환경기준 설정에 계획에 따라 광주지역의 지역대기환경기준 설정을 위한 기초 자료를 확보하고자 한다.

II. 재료 및 방법

1. 조사지역

본 연구에서는 미세먼지의 농도 분포 특성을 파악하

Fig. 1. Locations of sampling sites in Gwangju.

기 위해서 광주지역의 주거지역을 대상으로 도시대기 측정망이 설치되어 있는 농성동(농성1동 사무소 옥상), 두암동(두암2동 사무소 옥상) 2개 측정지점을 선정하였다(Fig. 1).

두 지점 모두 반경 500 m 이내에 저층의 빌라 및 단독주택건물이 밀집한 주거공간으로 특별한 대기오염 배출시설이 없다. 농성동의 경우 시료채취지점 반경 1.1 km 이내에 고속버스터미널이 위치하여 자동차에서 발생하는 오염물질 배출량이 많을 것으로 추정된다. 또한 두암동 측정지점의 경우 주변도로는 왕복 2차선으로 차량통행이 농성동 측정지점에 비해 적은 편이다.

2. 시료채취 및 기간

대기 중의 미세먼지($PM_{2.5}$, PM_{10})를 포집하기 위하여 ACCU(automatic cartridge collection unit, R&P, USA)와 PMS-102(APM Eng. Co., Korea)를 사용하여 시료를 채취하였다. 시료 채취시 포집유량은 ACCU의 경우 13.7 l/min , PAS-102의 경우 16.7 l/min 으로 하였으며, 포집시간은 24시간을 원칙으로 하였다. 포집여지는 pallflex membrane filter(47 mm, Pall gelman science, USA)를 사용하였다.

시료채취 기간은 2008년 12월~2009년 11월까지 매 월 둘째 주를 기준으로 3일 연속 시료를 채취하였다. $PM_{2.5}$ 와 PM_{10} 이 포집된 시료 수는 농성동, 두암동 각각 36개로 총 144개 시료를 채취하였다.

3. 분석방법

1) 미세먼지 질량농도

미세먼지 질량농도를 측정하기 위하여 여과지를 항온(20°C), 항습(50%) 상태의 데시케이터에서 24시간 이상 보관하여 0.001 mg 까지 측정 가능한 microbalance (Sartorius M2P, Germany)를 이용하여, 먼지시료 채취

전·후의 무게를 칭량한 후 중량 차에 의해 먼지 농도를 계산하였다.

2) 이온성분

시료 채취한 여지의 1/2에 초 순수 10 m/를 가하여 초음파추출기를 이용하여 약 120분 정도 추출하였다. 추출액을 Ion Chrom 0.2 μm filter(Gelman, USA)로 여과하여 Ion Chromatograph(Dionex-600, USA)를 이용하여 수용성 음이온성분(SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^- , F^-)을 분석하였다.

3) 금속성분

금속성분 분석을 위한 시료 전처리는 대기공정시험방법에 기준한 질산-염산 혼합액에 의한 초음파 추출법을 이용하였다.⁹⁾ 포집된 여지의 1/2을 비이커에 넣고,

Table 1. Analytical conditions for IC and ICP-MS

IC (Dionex-600, USA)	Column	Guard Ionpac AS14A-SC (4 mm)
	Column	Ionpac AS14A-SC
	Eluent	3.5 mM Na_2CO_3 , 1 mM NaHCO_3 (1.2 ml/min)
	Item	F^- , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-}
ICP-MS (Agilent 7500, USA)	Nebulizer	Babington nebulizer
	Spray chamber	Quartz type
	Interface	Sampling cone : Ni cone Skimmer cone : Ni cone
	Ion lens	Omega lens Omega (+) : 15 V, Omega (-) : 5 V
	Detector	Electron multiplier (Dual Mode)
	Mass analyzer	Quadrupole

1.03 M 질산과 2.23 M 염산 혼합액(1:1) 7.5 m/를 가한 다음, 2시간 동안 초음파 추출(28 kHz)하였다. 초음파 전처리가 끝난 용액은 여과(Whatman, No. 5A, USA) 후 증류수를 사용하여 최종부피가 25 m/가 되도록 하였다. 전처리 한 시료용액을 ICP-MS(Agilent 7500, USA)로 금속성분(Al, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Si, Zn)을 정량분석 하였다. 기기 분석조건은 Table 1에 나타내었다.

III. 결과 및 고찰

1. 먼지 농도분포

각 시료채취지점별 먼지 농도의 결과는 Table 2, Fig. 2에 나타내었다. 대기 중 $\text{PM}_{2.5}$ 의 농도는 농성동의 연간 평균치 $26.9 \pm 18.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 두암동 지역이 $26.1 \pm 17.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타나 두 지역이 주거지역에 위치하여 비슷한 농도를 보였다. 이와 같은 결과는 경북 포항 지역($30.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$)과 부산지역($29.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$)에 비해 낮게 나타났다.^{10,11)} 외국의 경우, 미국과 유럽 대부분의 지역에서 $\text{PM}_{2.5}$ 농도는 대략 $15 \sim 20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 수준으로 우리나라의 50% 정도이고 중국의 경우에는 주요도시 연평균이 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상이며, 아시아 주요 도시들은 $40 \sim 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 수준으로 알려져 있다.¹⁾

계절별로는 두 지점 모두 봄철에 가장 높은 농도를 보였으며, 다음으로 여름철, 겨울철, 가을철 순으로 나타났다. 8월 14일~15일 시료채취 기간은 막무와 연무 현상으로 인한 $\text{PM}_{2.5}$ 농도가 가을보다 여름이 높게 나타났다. 또한 여름철의 경우 $\text{PM}_{2.5}$ 농도는 광화학 반응 등으로 미세입자의 생성을 촉진하여 $\text{PM}_{2.5}$ 의 농도가 증가 되는 것으로 알려져 있다.¹²⁾

본 연구기간 내에 측정된 광주지역의 $\text{PM}_{2.5}$ 농도는

Table 2. Concentrations of $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} at Nongseong-dong and Duam-dong sampling sites in Gwangju (unit : $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Season		Nongseong-dong		Duam-dong	
		Mean $\pm$ S.D.	Range	Mean $\pm$ S.D.	Range
Spring	$\text{PM}_{2.5}$	38.4 $\pm$ 27.1	9.0~77.0	38.2 $\pm$ 26.1	11.0~75.0
	PM_{10}	57.4 $\pm$ 32.5	19.0~100.0	57.2 $\pm$ 33.7	19.0~104.0
Summer	$\text{PM}_{2.5}$	25.8 $\pm$ 15.3	9.0~57.0	24.6 $\pm$ 14.0	9.0~53.0
	PM_{10}	36.4 $\pm$ 19.5	16.0~74.0	34.9 $\pm$ 17.5	15.0~67.0
Fall	$\text{PM}_{2.5}$	20.8 $\pm$ 8.3	10.0~33.0	20.5 $\pm$ 6.2	12.0~29.0
	PM_{10}	36.4 $\pm$ 10.2	22.0~52.0	35.4 $\pm$ 8.4	22.0~46.0
Winter	$\text{PM}_{2.5}$	22.4 $\pm$ 16.1	8.0~59.0	20.3 $\pm$ 13.7	7.0~52.0
	PM_{10}	54.7 $\pm$ 36.2	23.0~144.0	50.6 $\pm$ 33.6	22.0~135.0
Annual	$\text{PM}_{2.5}$	26.9 $\pm$ 18.6	8.0~77.0	26.1 $\pm$ 17.7	7.0~75.0
	PM_{10}	46.3 $\pm$ 27.4	16.0~144.0	44.8 $\pm$ 26.8	15.0~135.0

미국 EPA의 $PM_{2.5}$ 일평균국가대기환경기준(national ambient air quality standard, NAAQS)인 $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상으로 측정된 분포율을 보면, 농성동 22.2%, 두암동 지점 13.9%로 나타났으며 미국 EPA의 $PM_{2.5}$ 연평균 기준인 $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 2배 정도 높게 나타나 $PM_{2.5}$ 의 발생원에 대한 저감대책이 필요하다.

PM_{10} 의 연평균 농도는 농성동 $46.3 \pm 27.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 두암동 $44.8 \pm 26.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 측정되었다. 각 지점별 PM_{10} 의 농도를 살펴보면 농성동의 경우 평균적으로 두암동보다 다소 높게 나타났다. 이는 유동차량의 수가 많은 지역적 특성으로 자동차에서 배출되는 미세입자로 인한 영향으로 중량농도가 높게 나타난 것으로 판단된다. 광주지역의 PM_{10} 은 서울의 $57.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 약 13% 정도 낮게 나타났으며 우리나라의 대기환경기준 PM_{10} 연평균기준치 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 초과하지 않았다.

계절별로는 두 지점 모두 봄철에 가장 높은 농도를 보였으며, 다음으로 겨울철, 여름철, 가을철 순으로 나타났다. 봄철인 4~5월에 광주지역의 황사가 관측되지 않았으나, 봄철의 고농도 먼지현상은 국내의 전반적인 공통현상으로써 확인되지 않은 약한 황사의 영향이 있거나 기온의 일교차가 심하고 건조한 대기 조건하에서 토사나 도로먼지, 야적장 등으로부터 비산먼지 영향이 상대적으로 크게 나타났을 것으로 추정된다.

질량농도비 평균값은 0.58로 나타났다. 이것은 $PM_{2.5}$ 의 농도가 PM_{10} 의 약 30~70%를 차지한다고 보고한 미국의 선행 연구와 비교해 볼 때 다소 상한치에 수렴하는 수준을 보이고 있다.⁽¹⁴⁾ 계절별 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 비(Ratio)는 농성동의 경우 봄철 0.62, 여름철 0.69, 가을철 0.55, 겨울철 0.40으로 나타났다. 두암동의 경우 봄철 0.64, 여름철 0.69, 가을철 0.57, 겨울철 0.40로

측정되었다. 박무, 연무와 같은 기상현상의 영향으로 겨울철에 PM_{10} 이 증가하여 상대적으로 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 이 감소하는 경향을 보여주었다. 이탈리아 Milan시에서 측정된 결과(여름철 0.63, 겨울철 0.77)와 비교해 보면 약간의 차이를 보였으며 베이징의 교통밀집지역인 대학가에서 측정한 결과를 살펴보면 여름철 0.45, 겨울철 0.73으로 측정되었다.^(15,16)

농성동과 두암동 두 측정지점 간에 $PM_{2.5}$, PM_{10} 농도 변동의 유사성을 확인하기 위하여 시료채취 기간 중 동시에 채취된 먼지농도를 대하여 상관관계를 분석해 보면 $PM_{2.5}$, PM_{10} 농도에 대한 시료채취지점 간의 상관관계수가 0.99로 비교적 높게 나타났다. 각 지점별로 국지적인 오염원의 영향을 간과할 수는 없으나, 두 지점은 직선거리로 약 5 km 떨어져 있음에도 불구하고 황사현상과 같은 오염물질의 장거리 이동에 의한 영향을 거의 유사하게 받고 있을 뿐만 아니라 두 측정지점이 근거리 내에 존재하는 각종 대기배출원에서 배출된 오염물질의 확산 영향권 내에 속해 있음을 추정할 수 있다.⁽¹⁰⁾

2. $PM_{2.5}$, PM_{10} 중 중금속성분

1) 중금속농도

미세먼지 중 중금속농도를 요약한 결과를 Fig. 3에 나타내었다. $PM_{2.5}$ 중 중금속농도 성분의 순서를 살펴보면 $\text{Si} > \text{Al} > \text{Fe} > \text{Zn} > \text{Pb} > \text{Cu} > \text{Mn}$ 으로 측정되었다. Si와 Al이 높은 이유는 토양에 기인하는 자연적인 발생의 영향을 받고 있는 것으로 사료된다. Zn는 자동차 등의 인위적인 오염원의 영향이 크며 Fe 역시 다른 중금속성분보다 높게 측정되어 토양입자의 영향도 있다고 판단되어진다.⁽¹³⁾ Pb의 경우 PM_{10} 에 함유된 비율(0.057)

Fig. 2. Distribution patterns of the $PM_{2.5}$ and PM_{10} mass concentrations in Gwangju (N: nongseong-dong, D: duam-dong).

Fig. 3. The box plot of elements concentrations at the sampling sites.

보다 $PM_{2.5}$ 의 비율(0.082)이 더 많이 포함되어, Fang 등의 연구 결과인 PM_{10} 의 함유된 비율(0.467)보다 $PM_{2.5}$ 에 함유된 비율(0.661)이 높은 것과 같이 일치하였다.¹⁷⁾

PM_{10} 중 금속성분 농도는 $Si > Al > Fe > Zn > Pb > Cu > Mn$ 순으로 $PM_{2.5}$ 와 비슷한 경향을 보이고 있다.

Table 3은 본 연구에서의 PM_{10} 중 금속성분들과 타 지역의 연구결과를 비교한 것이다. Cr, Ni, Pb 및 Zn은 인위적 기원으로서 연구지역의 대기오염을 평가하는데 중요한 지표로 활용한다. Cr은 부산지역과 서울지역 보다는 높게 나타났으며, 대구지역보다는 낮게 나타났다. Ni, Pb는 다른 지역에 비하여 인위적인 오염원의 영향을 적게 받아 낮은 농도를 보였다. 차량의 타이어나 라이닝의 마모에 기인하는 Zn의 평균 농도는 서울

및 부산지역과 유사한 농도분포를 보였으나, 대구지역 보다는 높게 나타났다.¹⁸⁾

2) 지각 농축계수

대기부유먼지 중 각 원소의 농도를 기준으로 각 원소의 지각농축계수를 계산하여 나타낸 것이다. 기준물질을 Al로 하고 각 원소의 지각 구성비는 식 (1)을 사용하여 구하였다.

$$EF = \frac{[x/Al]_{sample}}{[x/Al]_{crust}} \quad (1)$$

여기서, $[x/Al]$ 은 대기부유먼지 중 또는 토양 중의 원소 x와 Al의 농도비를 나타냈다. EF(enrichment factor) 값이 1~10의 범위에 있을 경우는 지역토양의 화학구성과

Table 3. A comparison of metal concentration in PM_{10} in various cities (unit : ng/m^3)

Elements	This study		Busan ^{a)}	Daegu ^{b)}	Seoul ^{c)}
	Nongseong-dong	Duam-dong			
Al	584.9	579.3	759.2	326.3	1,322
Cd	0.0	0.0	2.7	3.0	-
Cr	12.9	13.5	5.5	41	6.3
Cu	22.9	23.1	-	-	-
Fe	465.0	450.0	749.8	530.5	1,001
Mn	18.6	19.3	17.2	13.5	34.5
Ni	1.8	2.0	8.6	32.0	33.6
Pb	25.9	25.6	39.1	58.3	248
Si	1,043.6	1,111.1	362.0	-	2,761
Zn	394.0	386.7	302.6	118.5	323

^{a)}Hwang and Jeon (2003), mean of 14 samples (PM_{10}) during the annual.

^{b)}Choi and Song (2000), mean of 84 samples (PM_{10}) during the annual.

^{c)}Shin *et al.* (2002), mean of 60 samples (PM_{10}) during the annual.

Table 4. A comparison of crustal enrichment factors between $PM_{2.5}$ and PM_{10}

Elements	This study (Nongseong-dong)		This study (Duam-dong)		Busan ^{a)}		Daegu ^{b)}
	$PM_{2.5}$	PM_{10}	$PM_{2.5}$	PM_{10}	$PM_{2.5}$	PM_{10}	PM_{10}
Al	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Cd					1,547.8	1,266.9	3,696.2
Cr	27.3	17.9	24.7	18.9	15.9	12.8	10,303.9
Cu	88.2	57.9	82.7	58.9	84.8	76.8	
Fe	1.5	1.3	1.5	1.3	2.0	2.1	2.4
Mn	4.6	2.7	4.4	2.8	7.0	6.4	3.6
Ni	3.4	3.2	4.3	3.7	26.0	22.5	106.7
Pb	610.4	276.3	589.9	275.6	785.6	636.1	1,175.3
Si	0.7	0.5	0.6	0.6	0.1	0.1	
Zn	1025.5	781.4	983.1	774.3	615.4	533.9	426.5

^{a)}Jeon *et al.* (2005), Busan, E.F. of 87 samples (PM_{10} and $PM_{2.5}$)

^{b)}Choi and Song (2000), Daegu, E.F. of 84 samples (PM_{10})

비교지질의 구성성분간의 차이에 기인하여 부하되지 않았다고 고려되며, 10~100의 범위 경우는 moderately enriched로 분류하고, 100이상이면 highly enriched로 분류하며 인간 활동에 기인하여 매우 오염되었음을 나타내며, EF 값이 높을수록 인위적인 발생원에서 유래된 원소라고 할 수 있다.¹⁸⁾

Table 4는 PM_{2.5}와 PM₁₀으로부터 구해진 각종 금속성분들의 지각농축계수를 부산 및 대구지역과 비교하였다. PM₁₀ 중 Ni의 경우 대구지역보다 50배, 부산지역보다 5배 낮게 나타났다. PM_{2.5} 중 Cu는 부산지역과 비슷하였다. 10이상의 지각농축계수를 보인 인위적 기원인 Cr, Cu, Pb 및 Zn은 PM₁₀보다 PM_{2.5}에서 높게 나타났으며, 미세입자 영역에서 높은 화학적 조성을 보였다고 지적한 전 등(2005)의 연구와 일치하였다.¹¹⁾

3) 토양입자 기여율

대기 중 미세먼지에 대한 토양입자의 기여율을 정량적으로 평가하기 위하여 AI를 기준 물질로 적용하여 식(2)를 이용하였다.¹⁹⁾

$$CR_{soil}(\%) = \frac{C_{soil}}{C_{sample}} \times 100 = \frac{C_{AI}/0.0813}{C_{sample}} \times 100 \quad (2)$$

Fig. 4는 계절별 토양입자 기여율을 나타내었다. PM_{2.5}의 경우 가을철(13.7%), 겨울철(11.9%), 여름철(10.9%), 봄철(8.9%) 순으로 조사되었으며, 평균 기여율은 11.3%로 나타났다. PM₁₀의 경우 가을철(17.0%), 겨울철(16.9%), 봄철(16.9%), 여름철(15.4%) 순으로 조사되었으며, 평균 기여율은 16.4%로 나타났다.

PM_{2.5}의 경우 두 지역 모두 봄철에 가장 낮은 토양입자의 기여율을 보였다. 두암동 PM₁₀의 경우 토양입자의 기여율(17.8%)이 겨울철에 가장 높게 나타났다. 박

정호와 최(1999)은 rainout과 washout에 의한 대기 에어로졸 입자의 입경별 세정 특성은 거의 입경 2 μm 이상의 조대입자 영역에서만 일어나고 미세입자 영역에서는 강수가 강하여도 세정효과가 없음을 지적하였다.²⁰⁾ 또한 도시구조와 지형적인 특성 및 기상인자에 의한 대기 유동장에 따른 미세먼지의 농도의 차이가 발생하는 것으로 생각되며, PM₁₀이 PM_{2.5}보다 토양입자의 기여율이 크므로 토양입자의 영향을 많이 받고 있음을 알 수 있다.¹⁹⁾

3. 이온성분(수용성 음이온성분 농도)

Fig. 5는 측정기간 중 PM_{2.5}와 PM₁₀ 중 음이온 각 성분별 농도 분포를 나타내었다. 농성동 PM_{2.5}의 경우 SO₄²⁻(8.63 μg/m³) > NO₃⁻(0.66 μg/m³) > Cl⁻(0.16 μg/m³) 순으로, 농성동 PM₁₀의 경우 SO₄²⁻(8.84 μg/m³) > NO₃⁻(0.79 μg/m³) > Cl⁻(0.26 μg/m³) 순으로 나타났다. 두암동 PM_{2.5}의 경우 SO₄²⁻(7.54 μg/m³) > NO₃⁻(0.46 μg/m³) > Cl⁻(0.12 μg/m³) 순으로, 두암동 PM₁₀의 경우 SO₄²⁻(8.65 μg/m³) > NO₃⁻(0.59 μg/m³) > Cl⁻(0.24 μg/m³) 순으로 나타났다. 농성동과 두암동의 경우 모두 이온성분 농도가 유사한 수준을 보였다. 그리고 이온성분 농도가 여름철이 가을철과 겨울철보다 높게 나타났는데 이는 여름철 시료채취 기간에 기상조건이 연무와 박무에 의한 영향으로 판단되어진다. 이전 연구에서 Cl⁻의 도심지역에서의 대기 중 평균농도는 약 0.2~6.3 μg/m³, SO₄²⁻는 10~30 μg/m³의 범위에 있다고 보고하고 있다.^{21,22)} 1999년 부산지역에서 측정된 PM_{2.5}의 SO₄²⁻, NO₃⁻, Cl⁻의 평균 농도 12.83, 3.7, 1.6 μg/m³, PM₁₀의 SO₄²⁻, NO₃⁻, Cl⁻의 평균 농도 14.41, 5.82, 2.47 μg/m³과 비교해 보면 낮은 농도 수준을 보이고 있으며, 이는 지역 오염원, 도로의 차량, 석유 및 석탄연료 사용, 공업지역의 보일러 등 배출원의 차이에 의해 두

Fig. 4. Predicted rates of soil contribution to PM_{2.5} and PM₁₀ in Gwangju.

Fig. 5. The box plot of anion concentrations at sampling sites.

지역의 이온농도 차이가 있는 것으로 사료된다.²³⁾

Table 5는 미세먼지(PM_{2.5}, PM₁₀) 중 수용성 음이온 성분이 차지하는 비율을 나타내었다. 농성동 PM_{2.5}의 경우 SO₄²⁻(27.2%) > NO₃⁻(1.7%) > Cl⁻(0.7%) 순으로, 농성동 PM₁₀의 경우 SO₄²⁻(18.2%) > NO₃⁻(1.4%) > Cl⁻(0.7%) 순으로 나타났다. 두암동 PM_{2.5}의 경우 SO₄²⁻(26.2%) > NO₃⁻(1.4%) > Cl⁻(0.6%) 순으로, 두암동 PM₁₀의 경우 SO₄²⁻(18.4%) > NO₃⁻(1.1%) > Cl⁻(0.7%) 순으로 나타났다. 음이온 성분인 SO₄²⁻, NO₃⁻, Cl⁻가 차지하는 비율은 PM_{2.5}의 경우 28.7%, PM₁₀의 경우

21.4%으로 나타났다. 2차입자의 화학적 조성 중 음이온 성분인 SO₄²⁻, NO₃⁻, Cl⁻가 차지하는 비율이 높은 것으로 알려져 있는데, 미국의 도시지역들에 대해 2차입자 등 SO₄²⁻, NO₃⁻의 질량 농도비가 40~50%를 점유하고 있음을 보고하고 있다.²⁴⁾ 광주지역에 NO₃⁻ 및 SO₄²⁻의 자동차, 보일러 등에서 발생하는 인위적 오염원이 존재하기 때문에 이 성분들의 기여도가 높게 나타난 것으로 판단되며, SO₄²⁻의 경우에서 PM_{2.5} 중에 존재하는 비율이 PM₁₀에서 보다 높은 것으로 나타났고 이와 같은 결과는 Wall 등에 의한 연구 결과와도 잘

Table 5. Composition percentages of anion components in PM_{2.5} and PM₁₀

Item	Nongseong-dong			Duam-dong		
	Cl ⁻ (%)	NO ₃ ⁻ (%)	SO ₄ ²⁻ (%)	Cl ⁻ (%)	NO ₃ ⁻ (%)	SO ₄ ²⁻ (%)
PM _{2.5}	0.73 (0.01~2.19)	1.67 (0.49~4.98)	27.15 (7.40~53.64)	0.59 (0.03~3.63)	1.43 (0.38~3.46)	26.19 (9.61~61.10)
PM ₁₀	0.70 (0.04~1.76)	1.44 (0.52~3.97)	18.15 (4.62~35.17)	0.73 (0.08~3.21)	1.11 (0.45~2.98)	18.40 (5.30~37.91)

Table 6. Correlation matrix of metallic elements and ions in PM_{2.5}

	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Pb	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
Cr	1									
Mn	0.414**	1								
Fe	0.172	0.580**	1							
Ni	0.303*	0.426**	0.405**	1						
Cu	0.179	0.694**	0.566**	0.212	1					
Zn	0.178	0.620**	0.726**	0.336**	0.661**	1				
Pb	0.432**	0.665**	0.451**	0.461**	0.789**	0.526**	1			
Cl ⁻	0.292	0.518**	0.478**	0.004	0.146	0.457**	0.110	1		
NO ₃ ⁻	0.240	0.725**	0.387**	0.148	0.832**	0.566**	0.905**	0.295*	1	
SO ₄ ²⁻	0.253	0.588**	0.236	0.147	0.856**	0.395**	0.875**	-0.016	0.800**	1

*P<0.05, **P<0.01.

Table 7. Correlation matrix of metallic elements and ions in PM₁₀

	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Pb	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻²
Cr	1									
Mn	0.603**	1								
Fe	0.428**	0.698**	1							
Ni	0.171	0.386**	0.238	1						
Cu	0.494**	0.671**	0.732**	0.326**	1					
Zn	0.501**	0.754**	0.855**	0.123	0.806**	1				
Pb	0.557**	0.592**	0.663**	0.423**	0.785**	0.626**	1			
Cl ⁻	0.141	0.346*	0.428**	-0.125	0.056	0.372*	-0.112	1		
NO ₃ ⁻	0.586**	0.549**	0.690**	0.203	0.834**	0.701**	0.935**	0.064	1	
SO ₄ ⁻²	0.518**	0.402**	0.436**	0.339*	0.828**	0.558**	0.868**	-0.243	0.775**	1

*P<0.05, **P<0.01.

부합된다.²⁵⁾

4. 상관관계

SPSS를 이용하여 이온성분 및 금속성분을 인자로 통계분석한 결과를 Table 6, 7에 나타내었다. PM_{2.5}의 성분간의 상관관계 Zn와 Fe(0.726), Mn과 Cu(0.694), Fe와 Cu(0.566), Fe와 Mn(0.580)의 상관성이 높게 나타났다는데, 이들의 발생원이 디젤 연료나 가솔린에 의한 것으로 판단되어진다.²⁶⁾

PM₁₀의 성분간 상관성을 살펴보면 Fe, Zn, Cu, NO₃⁻, SO₄⁻² 상관성이 높게 나타나 이들의 발생원이 토양입자나 자동차 등으로 유사한 것으로 판단되어진다. 하지만 대기 중의 중금속과 각종 대기오염물질의 배출원이 매우 다양하고, 그들의 대기 중 농도는 기상, 지형, 계절, 배출시설의 규모와 같은 많은 변수들의 영향을 받기 때문에 단순히 상관관계로만 모든 사실을 규명하기는 어렵다.

IV. 결 론

본 연구에서는 광주지역 대기환경 중 PM_{2.5}와 PM₁₀에 대한 오염도 측정과 물리·화학적 성분 분석을 통하여 미세먼지의 오염특성을 평가하고자 하였으며, 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1. PM_{2.5}의 연간평균농도는 농성동 26.9±18.6 µg/m³, 두암동 26.1±17.7 µg/m³로 나타났고, PM₁₀은 농성동 46.3±27.4 µg/m³, 두암동 44.8±26.8 µg/m³로 나타났다.

2. PM_{2.5}/PM₁₀ 질량농도비는 평균 0.58을 나타내었으며, PM₁₀내에 PM_{2.5}가 차지하는 비율이 높으므로 PM_{2.5}도 규제 관리가 필요하다.

3. PM_{2.5}와 PM₁₀ 중 금속성분 농도는 Si > Al > Fe >

Zn > Pb > Cu > Mn 순으로 나타났으며, Cd은 검출되지 않았다.

4. 지각농축계수가 10이상인 Cr, Cu, Pb 및 Zn은 PM_{2.5}가 PM₁₀보다 높게 나타났으며, 이것은 인위적인 오염물질 영향으로 보인다.

5. PM_{2.5}와 PM₁₀의 토양입자의 평균기여율은 각각 11.3%와 16.4%였으며 계절별로 가을 및 겨울철에 높게 나타났다.

6. 미세먼지 입자의 수용성 음이온성분인 SO₄⁻², NO₃⁻, Cl⁻가 차지하는 비율은 PM_{2.5}의 약 28.7%, PM₁₀의 약 21.4%를 차지하였다.

7. PM_{2.5}의 Zn와 Fe, Mn과 Cu, Fe와 Cu, Fe와 Mn의 상관성이 두 지역 모두 높게 나타났으며, 이들의 발생원이 디젤 연료나 가솔린에 의한 것으로 판단되어진다.

8. PM₁₀의 Fe, Zn, Cu, NO₃⁻, SO₄⁻² 상관성이 높게 나타나, 이들은 토양입자나 자동차 등의 발생원에서 배출되는 것으로 판단되어진다.

참고문헌

1. National Institute of Environmental Research : Study on the Composition of PM_{2.5} in the Yellow Sand and Fine Particle. 1-111, 2008.
2. Marazzan, 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 The Total Environment*, **317**(1-3), 137-147, 2003.
3. Salvador, P., Artinano, B., Alonso, D. G., Querol, X. and Alastuey, A. : Identification and characterization of sources of PM₁₀ in Madrid (Spain) by statistical methods. *Atmospheric Environment*, **38**(3), 435-447, 2004.
4. Chun, M. Y., Cho, K. C. and Yae, H. G. : Characteristics of anion concentration distributions in airborne

- fine particles in urban atmosphere. *Journal of Korea Air Pollution Research Association*, **13**(1), 1-7, 1997.
5. U.S. EPA : National Air Quality and Emissions Trends Report, 1996. EPA-454/R-97-013, 1998.
 6. Kang, G.-U. and Lee, S.-B. : Daily concentration measurements of water-soluble inorganic ions in the atmospheric fine particulate for respiratory deposition region. *Korean Journal of Environmental Health*, **31**(5), 387-397, 2005.
 7. Hwang, I.-J. and Kim, D.-S. : Source identification of ambient PM-10 using the PMF model. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, **19**(6), 701-717, 2003.
 8. U.S. EPA : Air quality criteria for particulate matter. EPA 600/P-99/002aF-bF, 2004.
 9. Ministry of Environment Republic of Korea : Methods of air pollution, 2008.
 10. Baek, S.-O., Heo, Y.-K. and Park, Y.-H. : Characterization of concentration of fine particulate matter in the atmosphere of Pohang Area. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, **30**(3), 302-313, 2008.
 11. Jeon, B.-I., Hwang, Y.-S., Lee, H.-W., Yang, A.-R., Kim, H.-J., Seol, J.-H., Kang, Y.-J., Kim, T.-H. and Jang, H.-S. : Characteristics of metallic elements concentration of fine particles (PM₁₀, PM_{2.5}) at Busan in 2004. *Journal of Korean Earth Science Society*, **26**(6), 573-583, 2005.
 12. Kim, B.-H. and Kim, D.-S. : Studies on the environmental behaviors of ambient PM_{2.5} and PM₁₀ in Suwon Area. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, **16**(2), 89-101, 2000.
 13. Kim, S.-Y., Chung, M.-H., Son, B.-S., Yang, W.-H. and Choi, K.-H. : A study on airborne particulate matter of a local area in Seoul. *Korean Journal of Environmental Health*, **31**(4), 301-308, 2005.
 14. Chow, J. C., Watson, J. G., Lu, Z., Lowenthal, D. H., Frazier, C. A., Solomon, P. A., Thuillier, R. H. and Magliano, K. : Descriptive analysis of PM_{2.5} and PM₁₀ at regionally representative locations during SJVAQS/AUSPEX. *Atmospheric Environment*, **30**(12), 2079-2112, 1996.
 15. Vecchi, R., Marcazan, G., Valli, G., Ceriani, M. and Antoniazzi, C. : The role of atmospheric dispersion in the seasonal variation of PM₁₀ and PM_{2.5} concentration and composition in the urban area of Milan (Italy). *Atmospheric Environment*, **38**(27), 4437-4446, 2004.
 16. Sun, Y., Zhuang, G., Wang, Y., Han, L., Guo, J., Dan, M., Ahang, W., Wang, A. and Hao, Z. : The air borne particulate pollution in Beijing-concentration, composition, distribution and sources. *Atmospheric Environment*, **38**(35), 5991-6004, 2004.
 17. Fang, G., Chang, C., Chu, C., Wu, Y., Fu, P. P., Yang, I. and Chen, M. : Characterization of particulate, metallic elements of TSP, PM_{2.5} and PM_{2.5-10} aerosols at a farm sampling site in Taiwan, Taichung. *The science of The Total Environment*, **308**(1-3), 157-166, 2004.
 18. Hwang, Y.-S. and Jeon, B.-I. : PM₁₀ concentration and chemical composition in western area of Busan. *Journal of the Environmental Sciences*, **12**(6), 627-633, 2003.
 19. Hwang, Y.-S. : A study on the characteristics of chemical composition and atmospheric environment of dustfall in Busan. *Pusan National University doctoral thesis*, 2003.
 20. Park, J.-H. and Choi, K.-C. : A theoretical study on wet scavenging of atmospheric aerosols by rain drops. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, **15**(1), 1-11, 1999.
 21. Daisey, J. M., Miguel, A. H., de Andrade, J. B., Pereira, P. A. and Tanner, R. L. : An overview of the Rio de Janeiro aerosol characterization study. *Journal of the Air Pollution Control Association*, **37**(1), 15-23, 1987.
 22. Chevone, B. I., Herzfeld, D. E., Krupa, S. V. and Chappelka, A. H. : Direct effects of atmospheric sulfate deposition on vegetation. *Journal of the Air Pollution Control Association*, **36**(7), 813-815, 1986.
 23. Kim, S.-Y., Cheong, J.-P. and Yi, S.-M. : Characteristics of PM_{2.5} and PM₁₀ concentration in Pusan Area. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, **22**(6), 1159-1170, 2000.
 24. U.S. EPA : Compendium of methods for the determination of inorganic compounds in ambient air. EPA-625/R-96/010a, 1999.
 25. U.S. EPA : Air Quality Criteria for particulate matter. EPA-600/P-95/001aF, 1996.
 26. Kim, S.-Y. : A study on airborne particulate matter of a local area in Seoul. *Seoul National University Master's Thesis*, 2005.