

익산지역 가을철 대기 중 호흡성 및 흡입성 먼지입자의 화학조성

강공언[†]

원광보건대학 의무행정과

(2010. 1. 10. 접수/2010. 1. 29. 수정/2010. 2. 16. 채택)

Chemical Composition of Respirable PM_{2.5} and Inhalable PM₁₀ in Iksan City during Fall, 2004

Gong-Unn Kang[†]

Department of Medical Administration, Wonkwang Health Science University

(Received January 10, 2010/Revised January 29, 2010/Accepted February 16, 2010)

ABSTRACT

Intensive measurements of airborne respirable PM_{2.5} and inhalable PM₁₀ were conducted in the downtown area of Iksan city. The PM_{2.5} and PM₁₀ samples were collected twice a day in the Iksan city of Korea from October 17 to November 1, 2004. The purpose of the study was to determine the inorganic water-soluble components and trace elements of PM_{2.5} and PM₁₀ in the atmospheric environment and estimate the contribution rate of major chemical components from a mass balance of all measured particulate species. The chemical analysis for PM samples was conducted for water-soluble inorganic ions using ion chromatography and trace elements using PIXE analysis. The mean concentrations of respirable PM_{2.5} and inhalable PM₁₀ were 51.4±29.7 and 79.5±39.6 µg/m³, respectively, and the ratio was 0.62. The ion species of NO₃⁻, SO₄²⁻, and NH₄⁺ were abundant in both PM₁₀ and PM_{2.5}. These components predominated in respirable PM_{2.5} fraction, while Na⁺, Mg²⁺, Ca²⁺ mostly existed in coarse particle mode. Elemental components of S, Cl, K, and Si were abundant in both PM_{2.5} and PM₁₀. These elements, except for Si, were considered to be emitted from anthropogenic sources, while Si, Al, Fe, Ca existed mainly in coarse particle mode and were considered to be emitted from crustal materials. The averaged mass balance analysis showed that ammonium nitrate, ammonium sulfate, crustal component, and other trace elements were composed of 18.4%, 13.2%, 4.8%, 3.5% for PM_{2.5} and 17.0%, 11.6%, 13.7%, 4.4% for PM₁₀, respectively.

Keywords: respirable PM_{2.5}, inhalable PM₁₀, inorganic ions, elemental components, anthropogenic sources

I. 서 론

환경대기 중 입자상 물질은 1~3 µm를 경계로 이산형 질량분포(bimodal distribution)를 나타내는데, 여기에서 1~3 µm 이하의 입자를 미세입자(fine particles), 이보다 큰 입자를 조대입자(coarse particles)라 한다.¹⁾ 조대입자는 토양입자나 해염입자 등 자연발생원에 의한 입자가 주가 되며, 도로주행에서 발생하는 먼지나 인위적으로 대기 중에 직접 배출된 1차입자(primary particles)가 더해진다. 미세입자의 경우 주로 인위적 오염발생원

로부터 배출되거나 가스상 물질이 대기 중에서 입자화된 2차입자(secondary particles)로 구성된다.^{2,3)}

그러나 대기환경모니터링에서는 인체 건강상의 영향 평가라는 관점에서 입자상 물질에 대한 호흡기계로의 침착부위를 고려하여 PM_{2.5}와 PM₁₀에 대한 측정이 이루어지고 있다.^{4,8)} 여기에서 PM_{2.5}는 환경대기 중의 공기동력학적인 직경(aerodynamic diameter)이 2.5 µm 이하인 입자상 물질로 호흡과정에서 인체 폐포부(alveolar region)에 침착할 수 있어 호흡성 입자(respirable particles)라 한다.⁹⁾ PM₁₀은 그 직경이 10 µm 이하인 입자상 물질로 체내로 흡입된 후 기관지나 폐포부 모두 침착될 수 있기 때문에 흡입성 입자(inhalable particles)라 불린다.^{10,11)} 우리나라에서는 1995년부터 환경정책기본법에 의거 PM₁₀을 대기환경기준으로 설정하

[†]Corresponding author : Department of Medical Administration, Wonkwang Health Science University
Tel: 82-11-9629-7700, Fax: 82-63-840-1289
E-mail : gukang@wkhc.ac.kr

였는데, 그 기준은 연평균과 24시간 평균이 각각 $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 이후 2001년에 연평균 기준이 $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 강화되었으며, 2006년에는 연평균과 24시간 평균이 각각 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 재설정되었다. 그러나 $\text{PM}_{2.5}$ 의 경우 대기 중 농도가 증가하면 호흡기계 및 심혈관계 질환에 따른 사망 위험도가 증가하는 등 인체에 미치는 영향이 크다.¹²⁻¹⁴⁾ PM_{10} 에 대한 농도 점유율이 약 41~77% 수준으로 나타나 국내에서도 이에 대한 환경기준 설정의 필요성이 제기되고 있다.¹⁵⁾ 미국과 WHO 등에서는 이미 $\text{PM}_{2.5}$ 의 대기환경 기준이 설정되어 있으며, 최근에는 그 기준이 강화되고 있는 실정이다. 2006년에 미국에서는 대기 중 먼지입자의 인체 유해성을 고려하여 PM_{10} 의 연평균기준 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 삭제한 반면 $\text{PM}_{2.5}$ 의 단기기준인 24시간 평균을 $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 설정하였다.¹⁶⁾

이러한 시점에서 우리나라 중소도시에서의 $\text{PM}_{2.5}$ 에 대한 실태 파악 및 화학조성에 대한 연구는 매우 중요한 의미를 갖는다. 더욱이 본 연구가 이루어진 익산지역의 경우 전라북도의 서해안 내륙지역에 위치하고 있는 인구 30만의 중규모 도시인데, 대기오염자동측정망의 PM_{10} 자료¹⁷⁾에 따르면 전주나 군산 등 도내 다른 도시지역에 비해 고농도가 관측되고 있어 이에 대한 원인 규명이 필요한 실정이다. 아직까지 그 이유는 불분명하지만, 익산시 북쪽으로 인접한 황등, 함열, 삼기 등에 석재채굴 및 가공단지가 산재해 있고, 동쪽으로는 제1·2산업단지가 조성되어 있으며, 교통의 중심지로서의 지리적인 여건이 지역 내 먼지입자의 주요 발생원으로 고려될 수 있을 것이다. 이외에도 익산지역은 서쪽으로 약 12 km 지점에 남북을 가로지르는 서해안 고속도로가 개통되어 차량증가와 더불어 지역개발이 가속화될 전망이다. 더욱이 새만금 방조제의 몰락이 이음공사가 완료되어 방조제 안쪽의 노출갯벌에 의한 비산 먼지의 발생이 예상되고 있어 먼지입자의 오염도는 더욱 증가할 것으로 예상된다. 따라서 이 지역에서의 호흡성 및 흡입성 먼지입자인 $\text{PM}_{2.5}$ 와 PM_{10} 에 대한 실태 파악과 정성 및 정량적인 분석을 통해 대기먼지입자의 구성물질을 규명하는 연구는 대기질 관리뿐만 아니라 보건학적인 관점에서도 중요한 의미를 갖는다고 하겠다.

지금까지 이 지역에서 이루어진 대기질관련 연구의 경우 주로 먼지입자의 크기분포 해석 및 이온성분을 중심으로 한 농도 특성을 다루고 있다.¹⁸⁻²⁰⁾ 그러나 먼지입자의 세부적인 오염도 특성과 인체 유해성을 파악하고 발생원에 따른 대기질 관리를 위해서는 이온성분 이외에 미량의 원소성분에 대한 정성 및 정량적인 평가

가 요구되지만, 익산지역을 포함한 한반도 남서부 지역에서 이에 대한 연구는 매우 미흡한 실정이다. 대기먼지 중 미량의 금속성분들은 오염발생원에서 직접 배출되기 때문에 그 발생원 해석에 매우 중요한 정보를 제공할 뿐만 아니라 중금속 성분의 경우 인체에 유해한 것으로 알려져 있어 대상물질의 건강 유해도 평가에 있어 중요한 단서가 되고 있다. 더욱이 유해금속성분은 호흡기를 통하여 지속적으로 유입될 경우 생물학적인 농축현상에 의해 체내에 축적될 수 있기 때문에 보건학적인 측면에서 매우 중요하게 된다.^{21,22)} 최근에는 익산시의 도심지 인근에 생활폐기물 소각장이 설치·운영됨으로써 대기질관련 민원 발생이 예상되는데, 중금속 등의 원소성분에 대한 분석자료는 향후 대기오염물질의 발생원 해석에 있어 중요한 지표로 활용될 수 있을 것이다.

본 연구에서는 한반도 남서부에 위치하고 있는 익산지역에서 환경대기 중 호흡성 및 흡입성 먼지입자인 $\text{PM}_{2.5}$ 와 PM_{10} 을 측정하여 각각의 중량농도 특성을 해석하고자 하였다. 또한 이들 먼지입자 중 수용성 이온성분과 원소성분을 측정하여 그 화학조성을 비교·분석한 후 주요 구성물질의 기여율을 정량하고자 하였으며, 우선적으로 자료의 정도관리를 통해 신뢰성 있는 유효한 실측자료 확보에 노력하였다.

II. 시료채취 및 분석방법

1. 시료채취

시료는 전라북도 익산시의 중심가에 위치하고 있는 익산상공회의소 건물(위도 35.9455, 경도 126.9556)의 옥상(지상 20 m 이상)에서 채취하였으며, 시료채취지점과 그 주변여건은 선행연구에서 제시한 바와 같다.¹⁹⁾ 시료채취는 2004년 10월 17일부터 11월 2일까지 오전 8시 전후와 오후 6시 전후를 기점으로 해서 1일 2회 주·야간으로 나누어 이루어졌으며, 측정기간 동안 총 32회에 걸쳐 $\text{PM}_{2.5}$ 와 PM_{10} 의 대기먼지시료가 포집되었다. 이들 시료의 포집에는 직경이 47 mm인 Zeflour 필터($0.2 \mu\text{m}$ pore size, Pall Corporation, USA)가 장착된 미국 URG사의 사이클론 필터팩(cyclone filter pack, University Research Glassware, USA)이 사용되었으며, 포집유량은 $16.7 \text{ l}/\text{min}$ 이었다.²³⁾ 시료가 포집된 필터는 페트리디쉬에 보관한 후 파라필름으로 밀봉하여 실험실로 운반하였다. 사용된 모든 필터는 자동 Dry Keeper(Sanpla Corp., Japan)에서 항량으로 한 후 시료 포집 전·후의 여지 무게차를 전자저울(Sartorius CP225D, Japan)로 칭량하였다. 그 무게차를 이용하여

대기 중 PM_{2.5}와 PM₁₀의 중량농도(μg/m³)를 산출하였으며, 이들의 농도 차로부터 다시 조대입자인 PM_{2.5-10}의 농도를 구하였다.

2. 분석방법 및 정도관리

무게 칭량이 끝난 여지는 1/2로 절단한 후 한쪽은 수용성 이온성분의 분석에 그리고 그 나머지는 미량의 원소성분 분석에 사용하였다. 수용성 이온성분의 분석은 미국 다이오넥스사의 DX-100 IC(Ion Chromatograph)를 사용하여 분석하였으며, 구체적인 분석조건은 선행 연구에서 제시한 바와 같다.¹⁹⁾

대기먼지시료 중 미량의 원소성분은 PIXE(proton-induced X-ray emissions)법으로 분석하였다. 이 분석법은 고에너지의 양성자 빔을 시료에 조사시켜 시료 내 원자들을 여기시켜 내각전자를 방출시키고, 이완과정에서 빈 내각전자궤도를 외각전자들이 채울 때 발생하는 원소의 특성 X선 세기를 Si(Li) 검출기에 의해 검출하여 시료중의 원소성분을 정성 및 정량 분석하는 일종의 X선 형광분광법(X-ray fluorescence, XRF)이다. 특성 X선은 각 원소마다 고유의 에너지를 지니고 있으며, 나트륨부터 우라늄까지 72개 원소를 동시에 측정할 수 있는 장점이 있다. 본 연구에서 PIXE 분석은 미국의 전문분석기관인 EAI(Elemental Analysis Inc.)에 의뢰하여 이루어졌으며, 분석에는 양성자의 조사량이 수 nA~십 nA를 조사시킬 수 있는 4MV 가속기가 사용되었다.²⁵⁾ 측정항목은 Na부터 U까지 40개의 원소성분이다. 원소성분의 정량은 공시료(blank filter) 분석에 의하

여 검출된 원소의 농도를 보정한 후 시료의 포집유량과 필터포집면적을 고려하여 대기 중 단위체적당 농도로 산출(μg/m³)하였다.

분석과정 중 정도관리 차원에서 수용성 이온성분의 경우 일정한 주기로 시료의 농도수준과 비슷한 Multi-component 표준용액(AccuStandard Inc., USA)과 초순수를 주입하여 IC 분석기기의 일관성 있는 분석조건을 확인하였다. 또한 분석자료의 불확실도(uncertainties) 평가를 위하여 선행연구에서 제시한 바와 같이 일정한 주기로 재주입한 시료(replicate samples)의 농도로부터 각 이온성분의 상대표준편차(relative standard deviation, RSD)를 산출하였다.^{21,24)} PIXE에 의한 미량의 원소성분에 대해서는 IC와 동시에 분석이 이루어진 항목에 대한 정량적인 농도 비교를 통해 분석자료의 신뢰성을 검토하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 분석자료의 불확실도 평가 및 분석방법에 따른 농도 비교

대기먼지시료의 수용성 이온성분 농도에 대한 분석자료의 신뢰성 확보를 위하여 일정한 주기로 재주입한 시료의 농도로부터 산출한 각 이온성분의 상대표준편차(RSD)는 Table 1과 같다. 여기에서 RSD는 시료를 반복하여 분석할 때 자료의 변동을 나타내는 정밀도(precision)를 나타내는 척도로서 이 값이 클수록 분석자료의 불확실도는 커지게 된다. 본 연구에서 재주입한 시료의 평균농도(pooled mean)는 0.07~5.26 ppm으로

Table 1. Uncertainties of water-soluble ion species for replicate samples of atmospheric aerosols

Species	Pooled mean conc. (ppm)	Pooled STD ^a	Number of data set(N _s)	Number of samples (N)	RSD(%) ^b
Cl ⁻	1.270	0.014	12	24	1.11
NO ₃ ⁻	5.263	0.145	12	24	2.75
SO ₄ ²⁻	3.396	0.072	12	24	2.11
Na ⁺	0.394	0.006	3	6	1.56
NH ₄ ⁺	2.393	0.075	3	6	3.13
K ⁺	0.298	0.014	3	6	4.76
Mg ²⁺	0.070	0.003	3	6	4.74
Ca ²⁺	0.228	0.017	3	6	7.60

^aPooled Standard Deviation (S_{pooled})

$$S_{pooled} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_1} (x_i - \bar{x}_1)^2 + \sum_{j=1}^{N_2} (x_j - \bar{x}_2)^2 + \sum_{k=1}^{N_3} (x_k - \bar{x}_3)^2 + \dots}{N_1 + N_2 + N_3 + \dots + N_5}}$$

^bRelative Standard Deviation (RSD)

$$RSD(\%) = \left(\frac{S_{pooled}}{\bar{X}_{all}} \right) \times 100$$

이온성분에 따라 큰 농도 차이를 보이지만, RSD의 경우 Ca^{2+} 는 7.6%이고 나머지는 모두 5% 이하로 나타났다. 이러한 결과로 미루어 볼 때 수용성 이온성분의 분석자료는 모두 양호한 수준의 신뢰성이 확보된 것으로 판단된다.

대기먼지시료 중 미량의 원소성분에 대해서는 분석자

료의 신뢰성을 검토하고자 Fig. 1에 IC와 PIXE에 의해 분석이 이루어진 대기먼지시료의 측정항목에 대한 분석결과를 나타내었다. 여기에서 종축은 PIXE에 의해 분석된 각 원소성분의 대기 중 농도를 그리고 횡축은 IC로 분석된 수용성 이온성분의 대기 중 농도를 의미한다. 다만, 황(S) 성분의 경우 IC 분석시 SO_4^{2-} 의 농

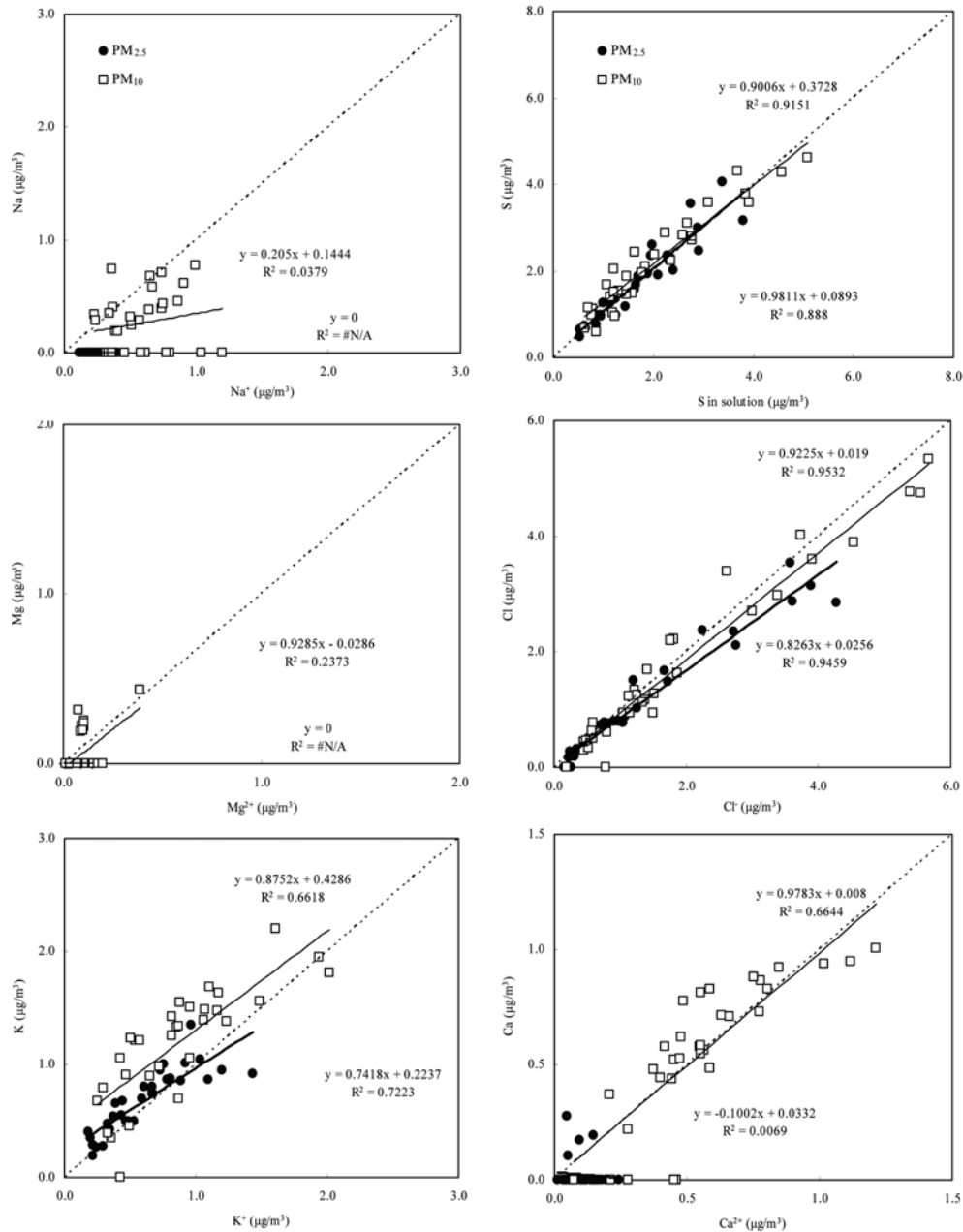


Fig. 1. Comparisons of chemical species concentrations in $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} according to the analysis methods of IC and PIXE.

도로 측정되었기 때문에 PIXE에 의한 분석결과와 상호 비교가 가능하도록 원소상의 S 농도로 환산하였다. 그림에서 점선의 대각선은 두 분석방법에 따른 농도가 상호 일치함을 의미하며, 이 점선의 위쪽에 존재하는 경우 수용성 이온성분에 비해 이에 대응하는 원소성분이 고농도로 검출되었음을 의미한다. 분석방법에 따른 농도분포를 살펴보면 S, Cl, K 성분의 경우 PM_{2.5}와 PM₁₀ 모두 비교적 양호한 선형적인 대응관계를 나타내었는데, 이것은 IC와 PIXE 분석결과 모두 정량적인 측면에서 일관성 있는 자료가 확보되었음을 의미한다. 특히 S와 Cl 성분의 경우 매우 양호한 선형적인 대응관계를 보이고 있는데, 이것은 이들 물질이 초순수를 이용한 시료추출과정에서 대부분이 용해되어 이온상태로 존재하고 있음을 의미한다. 반면에 K의 경우 PIXE에 의한 원소성분의 농도가 IC에 의한 이온성분보다 높게 나타났는데, IC 분석시 초순수에 의한 시료추출과정에서 부분적으로 불용성 상태로 존재하고 있을 개연성이 높다. 더욱이 이러한 농도분포는 PM_{2.5}보다 PM₁₀의 대기먼지시료에서 더욱 뚜렷한 경향을 보이고 있다. 이것은 K 성분이 조대입자 영역에 존재하는 경우 부분적으로 불용성인 반면, 미세입자 영역에 존재하는 경우 대부분이 용해되어 수용성 이온성분으로 존재하고 있음을 시사한다. Na, Mg, Ca 성분은 PM_{2.5}와 PM₁₀에 따라 각각 다른 농도 분포를 보이고 있다. 즉, 알칼리금속인 Na의 경우 수용성 이온성분은 일정한 수준의 농도 이상으로 검출되고 있으나 원소성분은 PM_{2.5}에서 모두 불검출되고 PM₁₀에서도 불검출 또는 과소평가된 것으로 나타났다. 이러한 결과는 이론적인 모순점을 갖기 때문에 PIXE에 의한 Na 분석은 PM_{2.5}와 PM₁₀의 대기먼지시료에서 모두 유효하지 않는 것으로 생각된다. Ca 성분의 경우 PM₁₀에서는 대기 중 농도가 0.5 µg/m³ 이상일 때 대부분이 선형적인 대응관계를 보이고 있으며, 더욱이 수용성 이온보다 원소상태에서 고농도를 나타냄으로써 이론적인 예측수준을 잘 반영하는 것으로 나타났다. 이것은 Ca이 주로 토양에 기인하는 알칼리토금속(alkaline earth metal)으로서 IC 분석시 초순수에 의한 시료추출과정에서 일부 불용성 상태로 존재하기 때문으로 생각된다. 그러나 PM_{2.5}에서는 이온성분의 경우 일정수준의 농도가 검출되고 있으나, 원소성분은 대부분 불검출됨으로써 PIXE 분석에 의한 Ca의 경우 일정 수준의 농도 이상에서만 유효한 자료 확보가 가능한 것으로 생각된다. 결과적으로 대기먼지시료의 정량적인 분석에서 알칼리금속성분인 Na, Mg, Ca의 경우 저농도 범위에서 특히 PM_{2.5}의 경우 불검출 또는 과소평가되는 것으로 나타나 이들 분석항목에 대해서는 IC

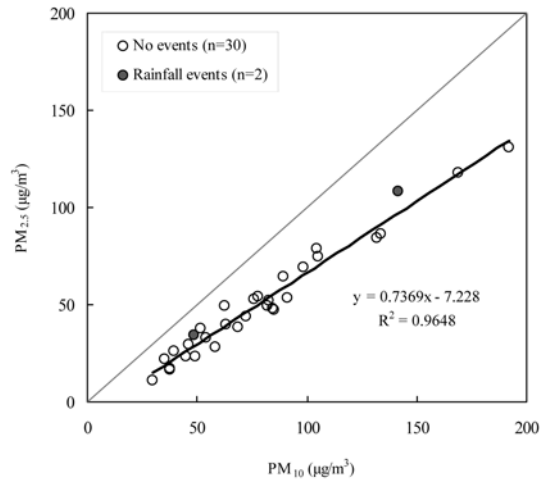


Fig. 2. Scatter plot of PM_{2.5} and PM₁₀ mass concentrations during the sampling period of fall, 2004 in Iksan city.

분석자료가 보다 유효한 것으로 판단되며, 이러한 농도 차이는 각각의 분석방법이 갖는 검출한계 및 분석능의 차이에 기인한 것으로 사료된다.

2. 호흡성 및 흡입성 대기먼지의 중량농도

Fig. 2는 익산지역에서 가을철에 포집한 32개의 호흡성 및 흡입성 대기먼지시료의 중량농도를 나타낸 것이다. 여기에서 2개 시료의 경우(11월 1일 낮과 저녁) 2.5 mm와 17.4 mm의 강수가 발생된 상태에서 포집되었다. 그림에서 실선의 대각선은 PM_{2.5}와 PM₁₀ 농도가 서로 일치하게 되는 것을 의미하며, 이때 직선의 기울기는 1이 된다. 대기먼지시료의 농도분포를 살펴보면 전반적으로 매우 양호한 직선성을 갖는 것으로 나타났는데, 흡입성 먼지농도를 독립변수로 하고 호흡성 먼지농도를 종속변수로 하여 선형회귀분석(regression analysis)한 결과 회귀식의 기울기는 0.74, 절편은 -7.2이었으며, 그 설명계수(R²)는 0.96이었다. 이러한 결과는 익산지역에서 흡입성 먼지입자의 중량농도가 호흡성 먼지입자에 의해 주도되고 있음을 의미한다. 환경대기 중 이들 먼지입자의 농도분포는 지역대기질의 오염도 특성을 반영하는데 일반적으로 도시지역의 경우 인위적인 오염원에 의한 영향으로 미세입자의 발생량이 많아 상대적으로 호흡성 먼지입자의 구성비가 높아 기울기는 1에 근접하게 되는 반면, 교외지역의 경우 자연적인 오염원에 의한 영향으로 조대입자의 발생량이 많아 그 기울기는 낮아지는 것으로 알려져 있다. 국립환경과학원의 대도시 대기질 관리방안 조사연구(2006)에 따르면 서울시 방이동과 정동의 경우 그 기울기가 각

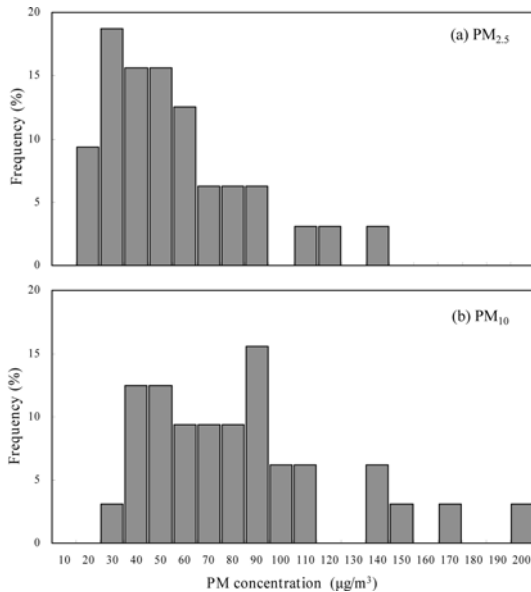


Fig. 3. Frequency distribution of $PM_{2.5}$ and PM_{10} mass concentrations during the sampling period of fall, 2004 in Iksan city.

각 0.71과 0.79로 나타나 전형적인 도시지역의 농도 특성을 나타내었다. 그러나 경기도 양평에 위치한 국수리의 경우 교외지역임에도 불구하고 0.61로 나타났는데, 이것은 이 지역이 수도권의 풍하지역에 위치하기 때문에 도심지에서 발생한 미세입자의 이동에 따른 영향을 받았을 것으로 보고하였다.¹⁵⁾

Fig. 3은 흡입성 및 호흡성 대기먼지의 보다 세부적인 특성을 파악하기 위하여 $PM_{2.5}$ 와 PM_{10} 중량농도의 발생빈도를 나타낸 것이다. 여기에서 중측은 대기먼지의 중량농도를 나타낸 것으로 한 구간을 10으로 하여 그 최대값을 표기하였다. 즉, 중량농도가 30으로 표기된 경우 먼지농도가 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상에서 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 미만을 의미하며, 이 범주에 해당하는 대기먼지농도의 빈도(%)를 산출하여 횡축에 나타내었다. 그림에서 $PM_{2.5}$ 의 경우 측정기간 동안 10.9~130.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도가 관측되었으나, 20~30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 가장 높은 발생빈도(18.8%)를 기록하였다. 또한 20~60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도가 62.5%를 점유하였다. PM_{10} 의 경우 농도는 29.9~192.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으나 80~90 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 15.6%의 가장 높은 발생빈도를 나타내었으며, 40~90 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도가 68.8%를 점유하였다.

Table 2. The mass concentrations and mass ratio of respirable $PM_{2.5}$, coarse $PM_{2.5-10}$, and inhalable PM_{10} during the sampling period of fall, 2004 in Iksan city. Arithmetic mean and standard deviations except for the ratios in right column are presented in $\mu\text{g}/\text{m}^3$

	$PM_{2.5}$	$PM_{2.5-10}$	PM_{10}	$PM_{2.5}/PM_{10}$		
				Avg	Max	Min
Mass	51.35±29.70	28.14±11.81	79.49±39.58	0.62±0.10	0.79	0.36
Cl^-	1.26±1.21	0.66±0.46	1.93±1.61	0.60±0.17	0.87	0.26
NO_3^-	7.33±7.90	3.14±3.01	10.47±10.74	0.65±0.11	0.88	0.44
SO_4^{2-}	4.73±2.61	1.43±0.98	6.17±3.52	0.78±0.06	0.91	0.69
Na^+	0.24±0.07	0.34±0.21	0.57±0.25	0.46±0.16	0.93	0.22
NH_4^+	4.62±4.06	1.26±1.42	5.88±5.40	0.81±0.09	0.99	0.62
K^+	0.61±0.32	0.23±0.19	0.85±0.46	0.73±0.08	0.89	0.53
Mg^{2+}	0.02±0.03	0.08±0.04	0.10±0.06	0.20±0.09	0.43	0.07
Ca^{2+}	0.10±0.06	0.47±0.21	0.56±0.26	0.17±0.05	0.28	0.09
Na	Not detected	0.26±0.26	0.26±0.26	-	-	-
Mg	Not detected	0.06±0.12	0.06±0.12	-	-	-
Al	0.17±0.11	0.63±0.31	0.80±0.39	0.20±0.12	0.39	0.00
Si	0.59±0.25	1.97±0.93	2.56±1.14	0.25±0.06	0.36	0.18
S	1.64±0.91	0.59±0.36	2.23±1.11	0.74±0.14	1.21	0.56
Cl	1.07±1.03	0.73±0.61	1.79±1.52	0.52±0.24	0.91	0.00
K	0.68±0.28	0.50±0.27	1.17±0.50	0.59±0.16	1.19	0.28
Ca	0.02±0.07	0.55±0.30	0.56±0.31	0.02±0.06	0.21	0.00
Ti	Not detected	0.03±0.05	0.03±0.05	-	-	-
Fe	0.23±0.09	0.52±0.27	0.75±0.32	0.34±0.16	0.87	0.00
Zn	0.04±0.05	0.04±0.05	0.06±0.07	-	-	-

국내의 대기환경기준인 PM₁₀과 비교해 보면 시료의 약 71.9%가 연평균 기준인 50 µg/m³을 초과하였으며, 24시간 기준치인 100 µg/m³을 초과한 경우도 21.9%이었다. PM_{2.5}의 경우 아직 국내 대기질 기준이 설정되어 있지 않아 미국 EPA의 24시간 평균치인 35 µg/m³과 비교해 보면 34.4%가 기준치를 초과하였다.¹⁶⁾

Table 2는 입자의 크기분포에 따른 먼지입자의 중량 농도와 화학조성 및 농도비를 나타낸 것이다. 여기에서 호흡성 미세먼지(PM_{2.5})와 조대입자인 PM_{2.5-10}의 평균농도는 각각 51.4±29.7 µg/m³과 28.1±11.8 µg/m³이었다. 흡입성 먼지입자인 PM₁₀의 평균농도는 79.5±39.6 µg/m³이었으며, 국내 연평균 대기환경기준인 50 µg/m³보다는 약 1.6배 높게 나타났다. 특히 인체에 보다 유해한 것으로 알려진 호흡성의 미세먼지인 PM_{2.5}의 농도는 PM₁₀의 약 62% 수준이었다. 미국의 PM_{2.5} 대기환경기준과 비교해 보면 익산지역의 경우 약 3.4배 높은 것으로 나타났다. 또한 우리나라 배경농도지역으로 알려진 강화도, 태안, 제주도의 고산 등에서 PM₁₀의 평균농도는 약 39 µg/m³이었으며, PM_{2.5}의 경우 약 22 µg/m³인 것으로 보고되었는데,¹⁵⁾ 익산지역 PM₁₀과 PM_{2.5}의 경우 이들 배경농도보다는 약 2.0배와 2.3배 높게 나타났다. 미국 대륙 내 비오염지역에서 PM₁₀ 농도는 5~25 µg/m³이며, PM_{2.5}의 경우 3~17 µg/m³인 것으로 알려져 있는데,¹⁾ 이들 자료와 비교해 보면 익산지역 PM₁₀의 중량농도는 3~16배 그리고 PM_{2.5}의 경우 3~17배의 높은 농도 차이를 보이는 것으로 나타났다.

결과적으로 익산지역의 경우 PM_{2.5}와 PM₁₀ 중량농도 분포에서 회귀직선의 기울기가 수도권 대도시 지역과 거의 유사한 기울기를 나타내는데다 국내의 대기환경

기준 및 다른 비오염지역에 비해 높은 농도 차이를 나타낸 것으로 미루어 볼 때 인위적인 오염발생원의 영향을 강하게 받고 있으며, 인체에 보다 유해한 영향을 주는 것으로 알려진 호흡성 먼지입자의 경우 상대적으로 높은 오염도 수준임을 알 수 있었다.

3. 호흡성 및 흡입성 대기먼지의 화학조성

대기 중 호흡성 및 흡입성 대기먼지의 크기분포에 따른 수용성 이온성분의 화학조성에 대한 농도 특성을 파악할 수 있도록 PM₁₀에 대한 PM_{2.5}의 농도비를 Table 2에 나타내었다. 여기에서 입자의 크기분포에 따른 수용성 이온성분을 살펴보면 NH₄⁺, SO₄²⁻, K⁺가 각각 0.81, 0.78, 0.73으로 가장 높은 농도비를 나타내었으며, 다음으로 NO₃⁻와 Cl⁻이 각각 0.65와 0.60이었다. 그러나 Na⁺, Mg²⁺, Ca²⁺는 각각 0.46, 0.20, 0.17로 다른 이온성분에 비해 낮은 것으로 나타났다. 이러한 사실은 NO₃⁻, SO₄²⁻, Cl⁻, NH₄⁺ 및 K⁺ 등은 그 대부분이 2.5 µm 이하의 미세입자 영역에 존재하는 반면에 Na⁺, Mg²⁺ 및 Ca²⁺의 경우 주로 조대입자 영역에 존재하고 있음을 의미한다. 여기에서 미세먼지 영역에 존재하는 성분들의 경우 주로 인위적인 발생원이나 화학적인 반응에 의해 생성되지만, 조대입자 영역의 이온성분들은 자연적인 발생원이나 물리적인 반응에 기인하는 것으로 알려져 있다.^{1,18,24)}

Fig. 4는 호흡성 및 흡입성 대기먼지에 대한 보다 세부적인 화학조성을 이해할 수 있도록 수용성 이온성분과 함께 원소성분의 농도분포를 나타낸 것이다. 여기에서 각각의 수용성 이온성분은 IC에 의해 분석된 평균 농도를 의미하며, 원소성분은 PIXE에 의해 분석된 모

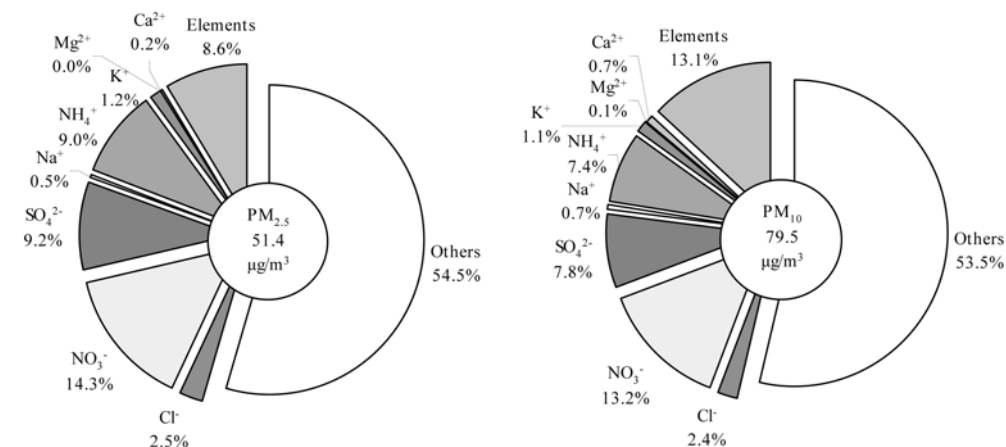


Fig. 4. Chemical composition of water-soluble ion species and elements in PM_{2.5} and PM₁₀ and during the sampling period of fall, 2004 in Iksan city.

든 원소의 농도를 합한 것이다. 그림에서 측정기간 동안 대기먼지입자에 대한 수용성 이온성분의 점유율은 $PM_{2.5}$ 와 PM_{10} 에서 각각 36.8%와 33.4%이었으며, PIXE에 의한 원소성분들의 경우 각각 8.6%와 13.1%이었다. 이러한 사실은 본 연구에서 이루어진 이온성분과 원소성분의 분석에 의해 익산지역 가을철 대기 중 호흡성 및 흡입성 먼지입자의 45.5%와 46.5%가 정량화되었음을 의미한다. 다만, 수용성 이온성분과 원소성분의 경우 동시에 분석이 이루어진 항목이 있어 이를 고려할 경우 부분적으로 과대평가될 수 있다.

먼지입자의 전반적인 화학조성을 살펴보면 수용성 이온성분의 경우 미세입자인 $PM_{2.5}$ 에서 높게 나타났으나, 원소성분은 조대입자인 $PM_{2.5-10}$ 에서 약 2.5배 높은 것으로 나타났다. 이온성분은 입자의 크기분포에 관계없이 $PM_{2.5}$, PM_{10} , $PM_{2.5-10}$ 모두 2차입자로 알려진 NO_3^- , SO_4^{2-} , NH_4^+ 가 주성분인 것으로 나타났다. 그러나 이들 이온성분의 점유율은 조대입자에서 모두 감소하는 경향을 나타낸 반면, 토양기원의 Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} 의 경우 모두 증가하는 경향을 나타내었다. 원소성분은 입자의 크기분포에 따라 그 조성분포가 다르게 되는데(Table 2), 호흡성 미세입자($PM_{2.5}$)의 경우 $S > Cl > K > Si > Fe > Al > Zn > Ca$ 순이었으며, 흡입성 대기먼지(PM_{10})의 경우 $Si > S > Cl > K > Al > Fe > Ca > Na > Mg$, $Zn > Ti$ 순으로 나타났다. 이와 같이 호흡성 및 흡입성 대기먼지에 따라 원소성분이 정성 및 정량적으로 차이를 보이는 것은 이들 원소성분의 발생원 및 그 기여도가 차이를 나타내기 때문으로 생각된다.

원소성분의 발생원 해석을 위하여 PM_{10} 에 대한 $PM_{2.5}$ 의 농도비(Table 2)를 살펴보면 S, Cl, K의 경우 0.5~0.7이었는데 이것은 이들 원소성분들이 주로 미세입자 영역에 존재하고 있음을 의미하며, 인위적인 오염 발생원에 기인한 것으로 판단된다. 반면에 Si, Al, Fe, Ca의 경우 모두 0.3 이하로 나타났는데 이것은 이들 성분들이 주로 조대입자 영역에 존재하고 있음을 의미하며, 지각기원의 자연발생원에 의한 것으로 판단된다. 대기먼지 중 금속원소의 발생원 추정을 위하여 본 연구에서는 지각농축계수법(crustal enrichment factor method)을 사용하였다. 이것은 각 기원의 지표금속성분과 그 금속성분의 비율을 이용한 농축계수(enrichment factor, EF)를 계산하여 토양 또는 해염 등의 기원에 대해 상대적인 농축정도를 해석함으로써 가능하게 된다. 본 연구에서는 지각과 비지각(non-crust) 발생원의 강도를 평가하기 위해 Al 원소를 지각구성물질의 지표로 하여 다음 식 (1)과 같이 흡입성 및 호흡성 대기먼지 중 각 원소성분의 지각농축계수(enrichment factor

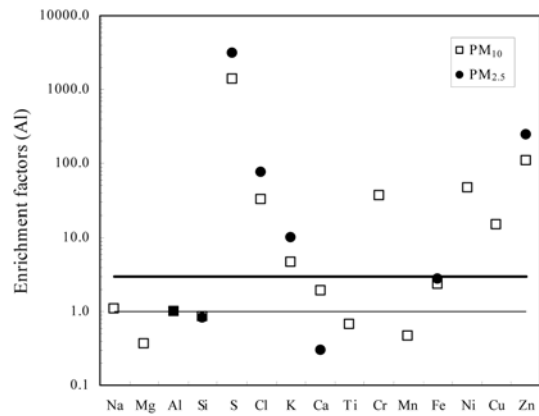


Fig. 5. Enrichment factors of Al for the elements of $PM_{2.5}$ and PM_{10} during the sampling period of fall, 2004 in Iksan city.

for crust)를 산출하여 Fig. 5에 나타내었다. 여기에서, $(C_x/C_{Al})_{PM}$ 은 측정된 미세입자 중 Al 농도에 대한 X성분 농도의 비를 의미하며, $(C_x/C_{Al})_{Crust}$ 는 대표적인 지각의 평균조성비 중에서 Al 농도에 대한 X성분 농도의 비를 의미한다. 지각에서 이온성분의 조성비는 Talyer의 지각 평균조성비를 이용하였다.²⁶⁾

$$EF = \frac{(C_x/C_{Al})_{PM}}{(C_x/C_{Al})_{Crust}} \quad (1)$$

Fig. 5에서 지각농축계수 EF값이 1에 가까우면 그 금속성분들은 지각기원 배출원이 지배적이라고 할 수 있으며, 큰 값을 가질수록 지각기원이 아닌 인위적인 배출원일 가능성이 높다. Biegalski 등(1998)은 이러한 구분을 지각기원의 경우는 EF값이 3 이하이고, 인위적 기원의 경우는 EF값이 50 이상으로 하였다.²⁶⁾ 본 연구에서는 원소성분 중 EF 값이 3 이하인 금속성분들은 호흡성 먼지인 $PM_{2.5}$ 의 경우 Al, Si, Ca, Fe 등으로 나타났으며, 흡입성 먼지인 PM_{10} 에서는 Al, Si, Ca, Ti, Mn, Fe 등으로 나타났다. 여기에서 이들 성분은 지각기원 즉, 토양기원의 영향을 강하게 받는 것으로 볼 수 있다. 반면에, S의 지각농축계수는 $PM_{2.5}$ 와 PM_{10} 에서 각각 3063과 1407이었으며, Zn의 경우 244와 110이었다. 이것은 이들 성분들이 지각기원보다는 인위적인 발생원에 의한 영향이 지배적임을 의미한다. 또한 지각농축계수가 PM_{10} 보다 $PM_{2.5}$ 에서 상대적으로 높은 값을 나타냄으로써 인체에 보다 심각한 영향을 주는 것으로 알려진 호흡성 먼지의 경우 지각기원물질보다 인위적인 기원의 영향을 강하게 받는 것으로 보인다. 그런데 Cl, K의 경우 $PM_{2.5}$ 에서는 각각 74, 10이

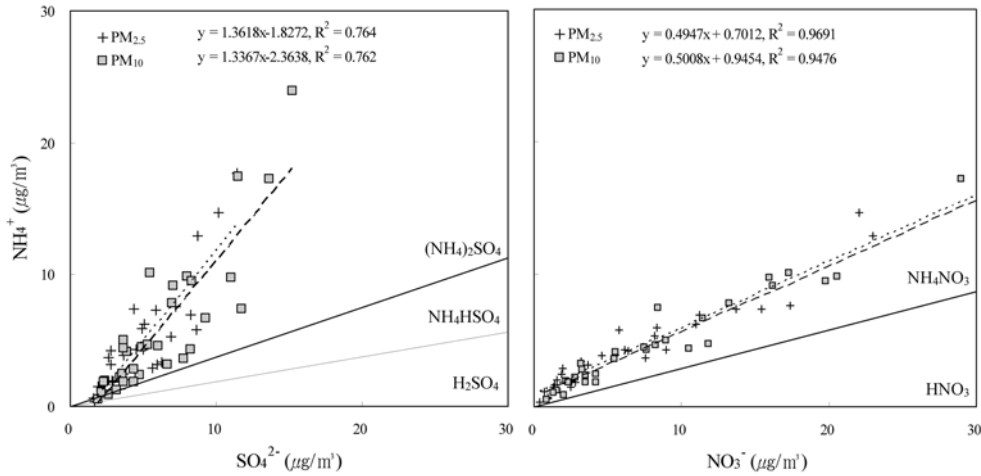


Fig. 6. Relationship between particulate ammonium, nitrate, and sulfate in PM_{2.5} and PM₁₀ during the sampling period of fall, 2004 in Iksan city.

었으며, PM₁₀에서는 각각 33, 4.7이었다. 또한 PM₁₀에서만 검출된 Cr과 Ni의 경우 37과 47이었다. 이들 원소의 경우 자연 혹은 인위적 기원의 영향을 동시에 받는 것으로 보인다.

Fig. 6은 측정기간 중 흡입성 및 호흡성 먼지입자의 구성물질을 파악하기 위하여 SO₄²⁻와 NO₃⁻ 농도에 대한 NH₄⁺ 농도의 대응관계를 나타낸 것으로 회귀직선(점선)과 설명계수를 함께 나타내었다. 그림에서 실선은 SO₄²⁻와 NH₄⁺ 그리고 NO₃⁻와 NH₄⁺의 몰농도비로, 먼지입자 중 예상되는 구성물질을 설명할 수 있다. 즉, 농도 분포가 각 실선의 위쪽에 위치할 경우 실선위에 기재된 입자상 물질의 중화형태로 존재하고 있음을 의미한다. 그림의 농도분포를 살펴보면 흡입성 및 호흡성 먼지입자 중 SO₄²⁻와 NO₃⁻는 모두 대응성분으로 충분한 양의 NH₄⁺가 존재함으로써 모두 중화된 염의 형태로 존재하는 것으로 나타났다. 여기에서 SO₄²⁻는 NH₄HSO₃ 또는 (NH₄)₂SO₄의 중화된 염으로 그리고 NO₃⁻는 NH₄NO₃의 중화된 염으로 존재하는 2차입자로써 흡입성 및 호흡성 대기먼지에서 중요한 구성물질임을 알 수 있다. 따라서 이들 구성물질을 산이온성분에 의한 2차입자로 정량화하기 위하여 먼지입자 중의 SO₄²⁻와 NO₃⁻의 농도를 황산암모늄(ammonium sulfate)과 질산암모늄(ammonium nitrate)으로 환산하여 산출하였다.

환경대기 중 입자상 물질의 구성물질에 대한 보다 정확한 이해를 위해서는 탄소성분(OC/EC)의 정량적인 고려가 이루어져야 하지만 본 연구에서는 이에 대한 분석이 이루어지지 않는 관계로 수용성 이온성분과 미량의 원소성분에 의한 분석결과를 토대로 입자의 크기분

포에 따른 대기먼지의 주요 구성물질에 대한 정량적인 평가를 시도하였다. 여기에서 시료포집 전후의 농도차에 의해 계산된 먼지의 중량농도와 그 구성물질들의 농도 합은 이론적으로 같기 때문에 본 연구에서 측정된 구성물질들의 합에서 먼지의 중량농도를 감해 주면 그 차이를 확인이 되지 않은 성분(unidentified components)으로 평가할 수 있어 미세먼지를 구성하고 있는 성분들에 대한 정량적인 계산이 가능하게 된다. 따라서 본 연구에서는 먼지입자의 주요 구성물질을 황산암모늄(ammonium sulfate), 질산암모늄(ammonium nitrate), 지각기원성분(crustal components), 기타 미량의 원소성분(trace elements), 그리고 정성 및 정량적으로 확인이 되지 않은 성분(unidentified components)으로 분류하였다. 여기에서 대기먼지 중 지각기원 원소성분의 경우 Si, Al, Fe, Ca, Ti 등을 들 수 있는데 이들은 대부분 산소와 결합한 형태(oxide)나 다른 원소성분과 다양한 형태로 결합하고 있다.²⁷⁾ 따라서 이들 원소성분을 지각을 이루는 주요 구성물질로 가정하여 다음 식과 같이 대기먼지 중 지각기원성분을 산출하였다.⁶⁾ 이외에 PIXE 분석 자료에서 지각기원성분을 제외한 원소성분의 농도 합을 기타 미량의 원소성분으로 분류하였다.¹⁵⁾

$$\text{Crustal} = 2.20\text{Al} + 2.49\text{Si} + 1.63\text{Ca} + 2.42\text{Fe} + 1.94\text{Ti} \quad (2)$$

Fig. 7은 측정기간 동안 입자의 크기분포에 따른 대기먼지 중 주요 구성물질의 농도와 그 조성분포를 나타낸 것이다. 이들 구성물질에 의해 조대입자인 PM_{2.5-10}의 경우 약 59.5%가 정량화되었으며, 호흡성 먼지입자인 PM_{2.5}와 흡입성 먼지입자인 PM₁₀의 경우 각각 약

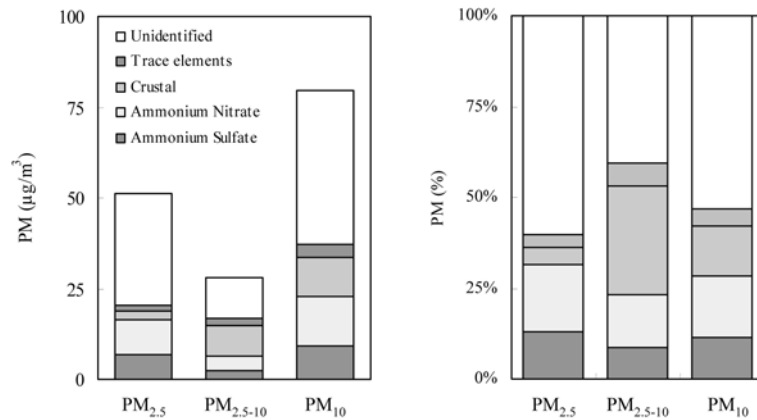


Fig. 7. Chemical composition of major components in size-segregated particulate matters during the sampling period of fall, 2004 in Iksan city.

39.8%와 46.7%가 설명이 가능하게 되었다. 여기에서 호흡성 먼지입자인 PM_{2.5}의 구성물질로는 NH₄NO₃ 9.5 µg/m³, (NH₄)₂SO₄ 6.8 µg/m³, 지각기원성분 2.4 µg/m³, 기타 미량의 원소성분 1.8 µg/m³이었으며, 그 점유율은 각각 18.4%, 13.2%, 4.8% 그리고 3.5%인 것으로 나타났다. 흡입성 먼지입자인 PM₁₀의 경우 NH₄NO₃ 13.5 µg/m³, (NH₄)₂SO₄ 9.2 µg/m³, 지각기원성분 10.9 µg/m³, 기타 미량의 원소성분 3.5 µg/m³이었으며, 그 점유율은 각각 17.0%, 11.6%, 13.7% 그리고 4.4%인 것으로 나타났다. 반면에 조대입자인 PM_{2.5-10}에서는 지각기원성분이 30.2%로 가장 높은 점유율을 나타내었으며, 다음으로 NH₄NO₃, (NH₄)₂SO₄, 기타 미량의 원소성분이 각각 14.4%, 8.7%, 6.3%를 점유하였다. 국립환경과학원의 대도시 대기질 관리방안 조사연구(2006)에 따르면 인천 용현동과 서울 전농동에서 겨울철 PM_{2.5}의 구성물질은 NH₄NO₃ 6.9, 9.0 µg/m³, (NH₄)₂SO₄ 8.1, 7.1 µg/m³, 지각기원성분 4.8, 3.4 µg/m³이었으며, PM₁₀의 경우 NH₄NO₃ 13.3과 14.5 µg/m³, (NH₄)₂SO₄ 14.5, 11.1 µg/m³, 지각기원성분 13.1, 11.1 µg/m³인 것으로 나타났다.¹⁵⁾ 익산지역의 경우 2차입자인 NH₄NO₃와 (NH₄)₂SO₄는 모두 이들 지역과 비슷하였으나, 지각기원성분은 다소 낮은 수준임을 알 수 있었다.

결과적으로 본 연구가 이루어진 익산지역의 경우 지리적으로 한반도 남서부에 위치한 인구 30만의 중도시 규모임에도 불구하고 인위적인 오염발생원에 기인하는 것으로 알려진 2차입자의 경우 호흡성 및 흡입성 먼지입자 모두 대도시 지역과 유사한 오염도 수준인 것으로 조사되었으며, 향후 이에 대한 정확한 실태파악이 가능하도록 보다 세부적인 연구와 함께 적절한 대기질 관리 및 저감대책 수립이 필요할 것으로 사료된다.

IV. 결 론

본 연구에서는 2004년 가을철에 한반도 남서부의 내륙에 위치한 익산지역에서 호흡성 및 흡입성 대기먼지의 중량농도와 주요 수용성 이온성분 및 원소성분의 농도를 측정하여 입자의 크기분포에 따른 농도 특성을 비교하였으며, 먼지입자의 주요 구성물질을 정량화한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 대기 중 호흡성 먼지입자(PM_{2.5})와 흡입성 먼지입자(PM₁₀)의 평균농도는 51.4 µg/m³과 79.5 µg/m³이었으며, 호흡성 먼지는 흡입성 먼지의 약 62% 수준이었다. 또한 흡입성 먼지농도를 독립변수로 하고 호흡성 먼지농도를 종속변수로 했을 때 회귀식의 기울기는 0.74이었으며, 설명계수(R²)는 0.96이었다.

2. 대기먼지 중 수용성 이온성분의 경우 NH₄⁺, SO₄²⁻, K⁺는 그 대부분이 미세입자 영역의 호흡성 먼지입자에 존재하는 반면, 알칼리금속이온인 Na⁺, Mg²⁺, Ca²⁺는 조대입자에 존재하는 것으로 나타났다. 원소성분은 호흡성 먼지입자의 경우 S > Cl > K > Si > Fe > Al > Zn > Ca 순으로 나타났으며, 흡입성 먼지입자의 경우 Si > S > Cl > K > Al > Fe > Ca > Na > Mg, Zn > Ti 순으로 나타났다. 여기에서 Al, Si, Ca, Ti, Mn, Fe 등은 주로 지각기원이었으나, S와 Zn의 경우 모두 인위적인 발생원에 기인한 것으로 나타났다.

3. 수용성 이온성분과 원소성분에 의해 정량 가능한 구성물질은 호흡성 먼지입자와 흡입성 먼지입자에서 각각 39.8%와 59.5%이었다. 여기에서 호흡성 먼지입자의 경우 질산염 18.4%, 황산염 13.2%, 지각성분 4.8%, 기타 미량의 원소성분 3.5%이었으며, 흡입성 먼지입자의 경우 질산염 17.0%, 황산염 11.6%, 지각성분

13.7%, 기타 미량의 원소성분 4.4%이었다.

감사의 글

본 연구는 2009학년도 원광보건대학 교내연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- Seinfeld, J. H., Pandis, S. N. : Atmospheric chemistry and physics From air pollution to climate change. John Wiley & Sons, Inc., A Wiley-Interscience publication, 431-435, 1998.
- Godish, T. : Air quality. Lewis Publishers, Inc., 39-44, 1985.
- Oh, M. S., Lee, T. J., Kim, D. S. : Characteristics of ionic components in size-resolved particulate matters in Suwon area. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, **25**(1), 46-56, 2009.
- Clean Air Hamilton. Available from: <http://www.cleanair.hamilton.ca/default.asp?id=22>. Accessed January 10, 2008.
- Evangelopoulos, V., Zoras, S., Triantafyllou, A. G., Albanis, T. A. : PM₁₀-PM_{2.5} time series and fractal analysis. *Global Nest Journal*, **8**(3), 234-240, 2006.
- Ho, K. F., Lee, S. C., Chow, J. C., Watson, J. G. : Characterization of PM₁₀ and PM_{2.5} source profiles for fugitive dust in Hong Kong. *Atmospheric Environment*, **37**, 1023-1032, 2003.
- Lee, H., Oh, S. : Characterization of PM₁₀ and PM_{2.5} in Cheonan area using a dust monitor. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, **24**(3), 367-375, 2008.
- Wang, G., Wang, H., Yu, Y., Gao, S., Feng, J., Gao, S., Wang, L. : Chemical characterization of water-soluble components of PM₁₀ and PM_{2.5} atmospheric aerosols in five locations of Nanjing, China. *Atmospheric Environment*, **37**, 2893-2902, 2003.
- QUARG : Airborne particulate matter in the UK, 3rd Report of the QUARG(Quality of Urban Air Review Group), 1996.
- Maraziotis, E., Sarotis, L., Marazioti, C., Marazioti, P. : Statistical analysis of inhalable (PM₁₀) and fine particles (PM_{2.5}) concentrations in urban region of Patras, Greece. *Global NEST Journal*, **10**(2), 123-131, 2008.
- Paoletti, L., Berardis, B. D., Diociaiuti, M. : Physico-chemical characterisation of the inhalable particulate matter (PM₁₀) in an urban area: an analysis of the seasonal trend. *The Science of The Total Environment*, **292**(3), 265-275, 2002.
- Nag, S., Gupta, A. K., Mukhopadhyay, U. K. : Size distribution of atmospheric aerosols in Kolkata, India and the assessment of pulmonary deposition of particles mass. *Indoor and Build Environment*, **14**(5), 381-389, 2005.
- Pino, P., Walter, T., Oyarzun, M., Villegas, R., Romieu, I. : Fine particulate matter and wheezing illnesses in the first year of life. *Epidemiology*, **15**(6), 702-208, 2004.
- Pope, C., Burnett, R., Thun, M., Calle, E., Krewski, D., Ito, K., Thurston, G. : Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. *Journal of the American Medical Association*, **28**(9), 1132-1141, 2002.
- National Institute of Environmental Research, Report of air quality management plan in the metropolitan area. 25-37, 2006.
- Ministry of Environment. Available from: <http://www.me.go.kr/>. Accessed January 10, 2008.
- Jellabukdo Institute of Health Environmental Research. Available from: <http://jihe.jeonbuk.go.kr/>. Accessed March 20, 2008.
- Kang, G. U., Lee, J. H. : Comparison of PM_{2.5} and PM₁₀ in a suburban area in the Korea during April, 2003. *Water, Air, and Soil Pollution*, **5**, 71-87, 2005.
- Kang, G. U., Lee, S. B. : Daily concentration measurements of water-soluble inorganic ions in the atmospheric fine particulate for respiratory deposition region. *Journal of Environmental Health Sciences*, **31**(5), 387-397, 2005.
- Elemental Analysis, Inc. Available from: <http://www.elementalanalysis.com/>. Accessed March 15, 2004.
- Kupchella, C. E., Hyland, M. C. : Environmental Science - Living within the system of nature (2nd). Allyn and Bacon, 296-299, 1989.
- Seinfeld, J. H., Pandis, S. N. : Atmospheric chemistry and physics From air pollution to climate change. John Wiley & Sons, Inc., A Wiley-Interscience publication, 107, 1998.
- U.S. EPA : Compendium of methods for the determination of inorganic compounds in ambient air. EPA/625/R-96/010a, 1999.
- Kang, G. U., Kim, N. S., Rhim, K. H. : Seasonal size distribution of atmospheric particles in Iksan, Korea. *Korean Journal of Environmental Health*, **32**(6), 543-555, 2006.
- Kang, G. U., Kim, N. S., Jeon, S. B. : Deposition characteristics of water-soluble inorganic ions in the Iksan ambient air during Fall, 2004. *Journal of Environmental Health Sciences*, **32**(4), 359-372, 2006.
- Taylor S. R., McLennan, S. M. : The Continental Crust: Its Composition and Evolution. Blackwell: Oxford, 312, 1985.
- Biegalski, S. R., Landsberger, S., Hoff, R. M. : Source-receptor modeling using trace metals in aerosols collected at three rural Canadian Great Lakes sampling stations. *Journal of Air & Waste Management Association*, **48**, 227-237, 1998.
- Rudnick, R., Fountain, D. M. : Nature and composition of the continental crust: a lower crustal perspective. *Reviews of Geophysics*, **33**(3), 267-309, 1995.