

익산지역에서 황사발생시 PM_{2.5}, PM₁₀, TSP의 농도 특성

강공언*,**† · 김남송** · 김경숙** · 김미경** · 이현주**

*원광보건대학 의무행정과, **원광대학교 의과대학 예방의학교실
(2007. 10. 11. 접수/2007. 10. 26. 채택)

Concentration Characteristics of Atmospheric PM_{2.5}, PM₁₀, and TSP during the Asian Dust Storm in Iksan Area

Gong-Unn Kang*,**† · Nam-Song Kim** · Kyung-Suk Kim** ·
Mi-Kyung Kim** · Hyun-Ju Lee**

*Department of Medical Administration, Wonkwang Health Science College
**School of Preventive Medicine, Wonkwang University
(Received October 11, 2007/Accepted October 26, 2007)

ABSTRACT

The concentration characteristics of atmospheric particle matters (PM) including PM_{2.5}, PM₁₀, and TSP were evaluated through the measurement data of PM_{2.5} (fine particulate), PM_{10-2.5} (coarse particulate), and PM_{over-10} collected using a MCI (multi-nozzle cascade impactor) sampler of a three-stage filter pack in spring of 2006 in Iksan area. During the sampling period of 10-15 March and 24 days from 8 April to 2 May, 32 samples for PM of each size fractions were collected, and then measured for PM mass concentrations and water-soluble inorganic ion species. Average concentrations of PM_{2.5}, PM₁₀, TSP were 57.9 ± 44.1 mg/m³, 96.6 ± 89.1 mg/m³, and 114.8 ± 99.7 mg/m³, respectively. Water-soluble inorganic ion fractions to PM mass were found to be 36.5%, 18.0%, and 11.1% for PM_{2.5}, PM_{10-2.5}, and PM_{over-10}, respectively. By showing the high concentrations of PM samples during Asian dust events, those three fractions of PM were distinguished between the samples of Asian dust event and the samples of no event. However, the increase of PM concentrations observed during Asian dust events showed a different pattern for some Asian dust events. The differences of those three fractions in the size distribution may depend on differences on place of occurrence of Asian dust storm and course of transport from China continent to Iksan area in Korea. However, the extent of PM mass contribution during Asian dust events was generally dominated by the coarse particles rather than the fine fraction of PM. The variations of water-soluble inorganic ion species concentration in those three PM fractions between the samples of Asian dust event and the samples of no event were also discussed in this study.

Keywords: PM_{2.5}, PM₁₀, TSP, Asian dust, MCI sampler, water-soluble inorganic ion species

I. 서 론

환경대기 중의 미세한 입자상 물질은 대기 중에 부유하면서 생활환경뿐만 아니라 만성 호흡기질환이나 심혈관계 질환의 환자에게 유해하며, 만성적으로는 조기 사망을 일으키는 큰 위험요인으로 밝혀지고 있다(강 등, 2006; 김 등, 2006; 서 등, 2006; Pino *et al.*, 2004; 이 등, 2001). 또한 시정을 악화시키고, 지구의

복사에너지 수지에도 영향을 주는 것으로 알려져 있으며, 재산상으로도 건축물과 문화재 등에 피해를 초래하고 있다(김 등, 2006; Kim and Kim, 2003; Seinfeld, 1986). 따라서 많은 국가에서 미세먼지를 대기환경기준 물질로 설정하여 자동측정망(automatic monitoring network)을 운영하고 있으며, 미세먼지의 물리적 특성에서부터 화학조성과 발생원 해석, 영향평가 및 저감대책 수립 등의 연구를 수행하고 있다.

우리나라는 1983년부터 환경대기 중 총부유먼지(total suspended particulate, TSP)를 대기환경기준(24시간 평균 300 µg/m³, 연평균 150 µg/m³)으로 설정하였으며, 1995년부터는 공기역력학적인 직경(aerodynamic

†Corresponding author : Department of Medical Administration, Wonkwang Health Science College
Tel: 011-9629-7700, Fax: 82-63-840-1289
E-mail : gukang@wkhc.ac.kr

diameter)이 10 μm 이하인 PM10 환경기준(24시간평균 150 μg/m³, 연평균 80 μg/m³)이 추가되었다. TSP의 경우 정부의 에너지 정책과 배출시설의 규제강화로 농도가 크게 개선되어 2001년에는 대기환경기준 항목에서 삭제되었으며, PM10의 연평균 기준이 70 μg/m³으로 강화되었다(강공인 등, 2007a). 그러나 대기환경기준의 강화 및 새로운 항목 설정의 필요성이 제기되었는데, 2006년 환경정책기본법 시행령이 개정되면서 2007년부터는 PM10과 NO₂의 대기환경기준이 더욱 강화되었으며, 벤젠(benzene)의 대기환경기준(연평균 5 μg/m³, 2010년부터 적용 예정)이 새롭게 추가되었다. 여기에서 PM10의 경우 연평균치와 24시간 평균치가 각각 50 μg/m³와 100 μg/m³으로 강화되었다(환경부, 2007). 대기환경 중 미세먼지는 인체에 미치는 영향이 큰 것으로 알려져 있어 효율적인 관리 및 저감대책이 요구되고 있으나, 일부 대도시 지역의 경우 증가 추세에 있거나 장·단기기준을 초과하는 사례도 점차 증가하고 있다. 더욱이 우리나라는 지리적으로 동북아시아 지역에 위치하고 있어 중국대륙에서 발생하는 황사(黃砂, Asian dust)의 직접적인 영향권에 놓여 있는데 봄철에 고농도 미세먼지가 관측되면서 황사현상은 사회적으로 커다란 이슈가 되고 있다. 또한 미세먼지의 정성 및 정량적인 오염도 평가에 있어 매우 중요한 의미를 갖게 된다. 국내에서 미세먼지의 주배출원은 주로 자동차에 의한 것으로 인식된 가운데 환경부 자료에 따르면 서울의 경우 배출사업장을 중심으로 산정하였을 때 경유차의 기여율이 전체 미세먼지의 66%인 것으로 나타났다. 추가적으로 중국에서 장거리 이동된 오염물질과 2차 생성물질, 도로비산먼지, 불법소각 등을 고려할 경우 자동차의 기여율은 30~35% 수준인 것으로 보고 있다. 그러나 최근 미세먼지 발생원에 대한 다른 연구결과에 따르면 자동차에 의한 미세먼지 기여율이 모두 약 15% 이내인 것으로 밝혀지고 있어(국립환경과학원, 2006), 중국에서 장거리 이동된 황사입자와 미세먼지의 기여에 대한 연구는 매우 중요한 의미를 갖게 된다.

황사는 중국과 몽고의 사막지역(타클라마칸, 오르도스, 고비, 만주 등) 또는 황하중류의 황토지역(loess area) 등에서 저기압이 통과할 때 발생하는 바람이나 지형에 의해 만들어진 난류 등의 영향으로 상층으로 불려 올라가 공중에 부유하거나 장거리 수송되는 먼지(Asian dust)를 총칭하거나 현상(Asian dust storm)을 말한다(한국대기환경학회, 2006; Lin, 2001). 우리나라에서 발생하는 황사현상의 발원지는 일반적으로 유라시아 대륙의 중심부인 중국대륙에 위치한 서부건조지역의 타클라마칸 사막과 고비 사막 등으로 알려져 있

으나, 중국내 건조지역의 확대로 내몽고 고원과 북경 북서쪽의 훈센다크 사막지역 등도 발원지로 주목받고 있다(김 등, 2003; 인 등, 2002). 황사가 우리나라에 도달하는 시간은 발원지의 위치와 대기상층부의 풍속에 따라 달라지는데, 타클라마칸 사막의 경우 한반도로 부터 약 5천km 이상 떨어져 있어 4~8일 정도 소요되며, 중국 북부 사막지역의 경우 3~5일, 황토지대 2~4일, 만주지역의 경우 1~3일이 소요되는 것으로 알려져 있다(기상청 황사센터, 2007). 또한 중국의 사막지역은 매우 한랭 건조한 기후조건이 유지되기 때문에 강한 바람에 의한 모래폭풍이 발생하게 되는데, 이때 많은 양의 먼지가 대기 중에 유입되어 강한 편서풍의 기류를 타고 황사입자가 우리나라를 거쳐 일본 등의 동아시아 지역은 물론 태평양 상공을 거쳐 북미까지 이동하는 것으로 보고되었다(Zhang *et al.*, 2001; Duce *et al.*, 1980). 우리나라에 황사현상이 발생되기 위한 조건으로는 발원지에서 먼지 유입량이 많고, 황사가 이동할 수 있도록 강한 편서풍이 불어야 하며, 대기 상층부의 황사가 지표면에 낙하할 수 있도록 하강기류가 발생해야 한다. 먼지폭풍은 사시사철 발생되고 있으나, 여름에는 비가 내리고 더욱이 가을까지는 식물이 땅에 뿌리를 내리고 있지만, 봄에는 겨울 내내 얼었던 건조한 토양이 녹으면서 잘게 부서져 공기 중에 부유하기 쉬운 20 μm 이하의 먼지가 다량 발생하게 된다. 이러한 이유로 발원지에서 멀리 떨어져 있는 우리나라에 영향을 줄 정도의 대규모 황사가 주로 봄철에 발생하게 된다(기상청 황사센터, 2007; 전, 1996). 우리나라의 황사 발생일수는 1년에 3~6일 정도로 주로 4월에 관측되고 있다(김 등, 2003; 신, 2001). 그러나 최근 들어 황사 발생일수는 큰 차이로 증가추세를 보이고 있으며, 이례적으로 겨울에도 황사현상이 관측되고 있다(김 등, 2003; 전 등, 2000). 이것은 황사 발원지의 사막화로 인한 건조현상이나 전 지구적인 기상이변 등의 영향으로 보고 있다(김 등, 2003; 신, 2001).

동북아시아 지역에서 황사현상은 공중보건학적인 측면에서 매우 중요한 관심의 대상이 되고 있으며, 국가 간의 중요한 환경문제로 인식되어 한·중·일 3국을 비롯하여 전 세계적인 공동연구가 진행되고 있다. 한·중·일을 위시한 동아시아 권역에서의 입자상 물질의 순환, 배출 및 침적규모, 대기환경 및 기후환경에 미치는 영향을 비롯하여 입자상 물질과 지구환경과의 관계를 규명하기 위해 ACE-ASIA(Aerosol Characterization Experiment in ASIA) 연구사업이 국제적 규모의 연구팀들에 의해 수행되고 있으며, 다양한 계층이 이루어지고 있다(김 등, 2002). 또한 아시아 지역에 넓게 퍼져

있는 황사입자와 대기오염물질을 연구하기 위하여 다국간 국제공동연구인 갈색구름(Atmospheric Brown Cloud, ABC) 관측프로그램의 일환으로 제주도 고산지역에서 집중측정이 이루어지는 ABC-EAREX(East Asian Regional Experiment) 프로젝트가 수행되고 있다(문 등, 2005; ABC-EAREX, 2007). 이외에도 수도권이나 대도시 지역을 중심으로 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으나(국립환경과학원, 2006; 김 등, 2005; Ryu *et al.*, 2004; 박 등, 2006; Kim and Kim, 2003; 허 등, 2004), 본 연구가 이루어진 익산 지역은 한반도 남서부 지역에 위치하고 있어 지리적으로 국내 다른 지역에 비해 풍상 측의 중국대륙으로부터 장거리 이동된 황사뿐만 아니라 대기오염물질의 강한 영향권 내에 위치하고 있지만 황사 및 미세먼지에 대한 연구는 매우 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 익산지역에서 황사현상이 공기 중 먼지 농도 분포에 미치는 영향을 정량화하고, 황사 발생시 수용성 이온성분의 농도분포 특성을 파악하고자 하였다. 이를 위하여 2006년 봄 동안 환경대기중의 공기동력학적인 입자직경이 $2.5\ \mu\text{m}$ 이하인 미세입자($\text{PM}_{2.5}$)와 입자의 직경이 $2.5\ \mu\text{m}$ 에서 $10\ \mu\text{m}$ 사이의 입경분포를 갖는 조대입자($\text{PM}_{10-2.5}$) 그리고 $10\ \mu\text{m}$ 보다 큰 입자($\text{PM}_{\text{over-10}}$)의 중량농도와 입경별 주요 수용성 이온성분의 농도를 측정·분석하였다. 또한 분석자료를

토대로 입경별 먼지의 분포 특성을 비교하여 황사 발생시 $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} , TSP의 농도 특성과 황사가 익산지역 대기 중 먼지농도에 미치는 영향을 해석하였다.

II. 시료채취 및 분석방법

1. 시료채취

본 연구가 이루어진 익산시는 지리적으로 한반도 남서부 지역에 있는 전라북도의 서북단 내륙에 위치하고 있으며, 김제·만경평야 등의 곡창지대에 둘러싸여 있다. 인구는 2005년 기준 약 32만 명으로 전년도에 비해 1.2% 감소하였지만 등록차량의 수는 102,179대로 약 2.4% 증가추세에 있다.

시료채취는 2006년 3월과 4-5월 중에 익산시 북쪽의 신용동에 위치하고 있는 원광보건대학 캠퍼스내 학림관 건물의 3층(지상 약 9 m)에서 이루어졌다. 이곳은 Fig. 1과 같이 서해안으로부터 동쪽으로 약 35 km 내륙에 위치하고 있으며, 시내 중심부에 위치하고 있는 익산시청(익산시 남중동 소재)으로부터 북서쪽으로 약 3 km 떨어져 있다. 시료채취지점 주변의 지리적인 특성은 강 등(2007b)과 Kang and Lee(2005)의 연구에 보다 자세히 기술되어 있다. 익산시청 건물의 옥상에는 대기오염 자동측정망(automatic monitoring station)이 설치·운영되고 있는데, 여기에서 얻어진 환경대기질 기준 항목의 측

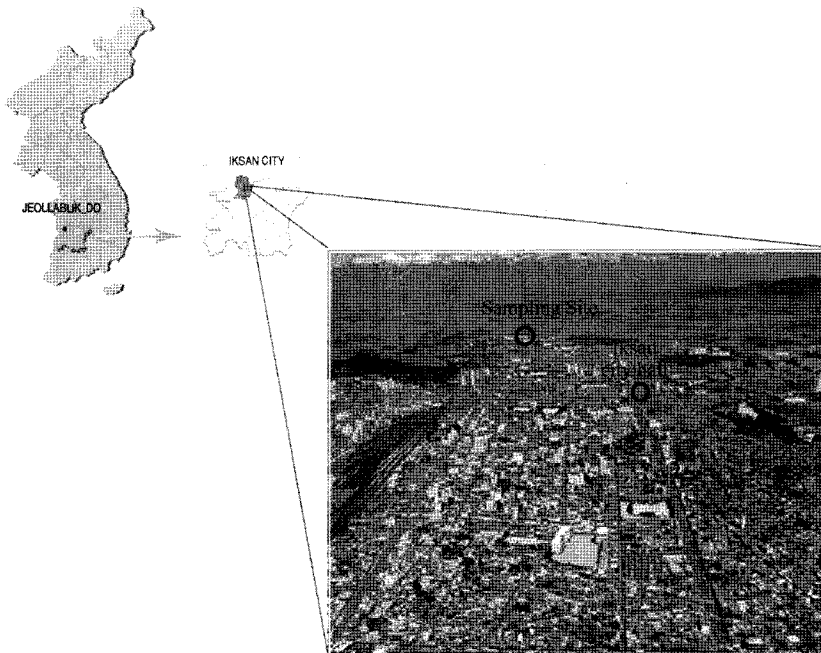


Fig. 1. Location of Iksan city in Korean peninsula and the sampling site of Wonkwang Health Science College.

정 자료 중 PM₁₀ 농도의 경우 본 연구의 측정치에 대한 정도관리 및 자료해석에 활용되었다.

환경대기 중 먼지시료 포집에 사용된 장치는 Tokyo Dylec사의 MCI 샘플러(multi-nozzle cascade impactor sampler, Japan)로 측정기간 동안 20 l/min의 유량으로 채취하였다. 시료채취는 하루를 주기로 측정하는 것을 원칙으로 하였으나, 고농도의 먼지농도가 예상된 경우 낮과 밤으로 나누어 1일 2회 측정하였다. MCI 샘플러는 3개의 필터가 장착될 수 있도록 3단으로 구성된 필터팩(3 stage filter pack)으로 이루어져 있다. 여기에서 위쪽의 1단과 2단의 시료 포집판(collection plate)에는 관성충돌(inertial impaction)에 의해 공기동력학적인 직경이 10 µm보다 큰 먼지(PM_{over-10})와 2.5~10 µm의 조대입자(PM_{10-2.5})가 분리 포집될 수 있도록 설계되어 있으며, 이들 먼지시료는 모두 직경이 47 mm인 Nuclepore 필터(Whatman, USA)를 사용하여 포집하였다. 3단에는 직경이 47 mm인 석영필터(quartz filter 2500QAT-UP, Pallflex Products Co., Japan)가 장착되어 공기동력학적인 직경이 2.5 µm 이하인 미세입자(PM_{2.5})를 포집하였다. 먼지시료 포집에 사용된 모든 필터는 시료 포집 전후에 자동 Dry Keeper(Sanpla Corp., Japan)에 의해 항량으로 하여 검출한계가 10 µg인 전자저울(Satorius CP225D, Japan)로 칭량하였으며, 일별 포집유량을 고려하여 각각의 먼지시료에 대한 중량농도(µg/m³)를 산출하였다.

시료채취는 황사 발생시 미세먼지의 농도 특성을 파악할 수 있도록 2006년 봄 기간인 3월 10일 오전부터

3월 15일 오전까지 5일 동안 8회의 시료를 그리고 4월 8일 오후부터 5월 2일 오전까지 24회를 연속적으로 포집하였다. 그러나 4월 10일부터 11일 낮 동안 포집된 시료의 경우 시료채취과정에서 MCI 샘플러의 유량계 안으로 빗물이 유입되어 폐기하였다. 본 연구기간 동안 성공적으로 측정이 완료된 시료는 각 단별로 총 32개 이었다. 각 단별 포집된 먼지시료에 대해서 황사 발생시 미세먼지의 입자 크기별 농도 특성을 파악할 수 있도록 Fig. 2에서와 같이 PM_{2.5}, PM₁₀, TSP의 농도를 각각 산출하였다. 즉, PM_{2.5}의 농도는 MCI 샘플러 필터팩의 가장 하단부의 먼지시료로부터 직접 정량이 이루어졌으나, PM₁₀의 경우 필터팩의 두 번째와 세 번째 단의 측정치의 합으로부터 산출하였다. 또한 TSP의 농도는 이 값에 첫 번째 단의 10 µm 보다 큰 먼지 농도(PM_{over-10}) 측정치를 합하여 산출하였다.

시료가 포집된 필터는 무게칭량을 하고 나서 적당량의 탈이온교환수(deionized water)를 가해 30분간 Branson사의 초음파세정기(ultrasonic cleaner 5510DTH, USA)로 추출한 후 직경 13 mm, 공극 0.45 µm인 시린지 필터(SLHV013NL, Millipore, USA)를 사용하여 수용성 이온성분의 분석이 가능하도록 불용성 성분을 여과하였으며, 시료용액은 수용성 이온성분의 농도 분석시까지 4°C의 냉장고에 보관하였다.

2. 분석방법 및 정도관리

추출된 시료용액 중 수용성 이온성분의 농도는 Dionex사의 DX-100 이온크로마토그래프(ion chromatography)

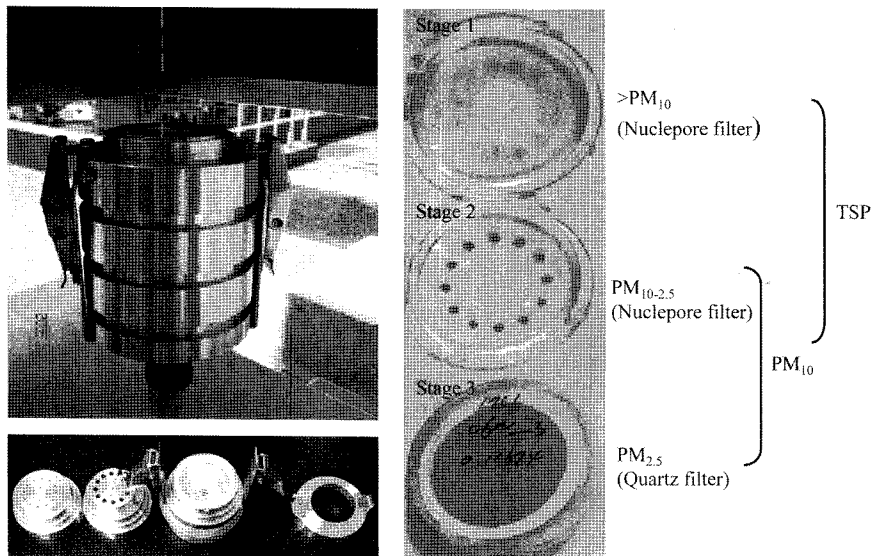


Fig. 2. Specification of the MCI sampler and size segregation of atmospheric particles collected on each collection stage.

graph, USA)를 사용하여 분석하였다. 구체적인 분석조건은 강 등(2005)의 연구에 제시된 바와 같다. 또한 수용성 이온성분의 농도에 대한 정도 높은 분석자료 확보를 위하여 자료의 정도관리 및 확인(quality control and quality assurance)을 수행하였으며, 이에 대한 구체적인 내용은 강 등(2006)의 연구에 제시된 바와 같다.

본 연구에서 수용성 이온성분의 농도에 대한 불확실도(uncertainties) 평가를 위하여 산출된 상대표준편차(relative standard deviation, RSD)는 양이온의 경우 Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} 가 각각 5.44, 7.95, 2.50, 3.17, 4.07%이었으며, 음이온의 경우 Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} 가 각각 5.03, 5.58, 6.43%이었다. 여기에서 RSD 산출에 사용된 자료는 IC 분석시 일정한 주기로 채주입한 먼지시료의 농도 측정치로 그 평균농도는 양이온의 경우 Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} 가 각각 2.60, 0.84, 0.39, 0.72, 2.48 ppm이었으며, 음이온의 경우 Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} 가 각각 1.83, 9.96, 13.50 ppm이었다. 결과적으로 각 이온성분의 재분석에 따른 재현성을 설명하는 RSD의 경우 모두 8% 이하의 값을 나타냄으로써 본 연구에서 측정된 이온성분의 분석자료에 관한 신뢰수준은 양호한 것으로 평가된다.

III. 결과 및 고찰

1. 측정기간 중 기상조건

익산지역에서 봄철 시료측정이 이루어진 3월 10일부터 15일의 5일 동안 기온과 풍속의 평균치는 2.5°C와 2.0 m/sec이었으며, 4월 8일부터 5월 2일까지는 각각 10.8°C와 2.1 m/sec를 기록하였다. 측정기간 동안 익산지역에서의 풍향과 풍속은 Fig. 3에서 보는 바와

같다. 여기에서 3월의 경우 주로 서풍이 우세한 것으로 나타났으며, 4~5월에는 서풍에서 남서풍 계열의 바람이 부는 것으로 나타났다. 서풍이 우세한 것으로 미루어 볼 때 익산지역 대기질에 상당 부분 풍상측에 위치하고 있는 중국대륙으로부터 배출된 대기오염물질의 장거리 유입에 의한 영향이 있었을 것으로 예상된다. 이들 기상자료는 시료채취지점에서 남동쪽으로 약 5 km 떨어진 지점의 전라북도농업기술원에 설치된 무인기상관측기로부터 얻은 AWS 자료를 나타낸 것이다.

2. 자동측정망과 MCI 샘플러에 의한 먼지의 중량농도 비교

Fig. 4는 측정기간 동안 환경대기 중의 공기동력학적인 직경이 10 μm 이하인 PM_{10} 농도와 익산 시청의 건물옥상에서 측정된 자동측정망의 PM_{10} 농도 측정치(automatic monitoring data, AMD; 본 연구에서의 실측치 자료와 쉽게 비교할 수 있도록 입자의 크기를 나타내는 숫자 10을 첨자가 아닌 일반 글씨체로 표기)의 일별 농도를 강수량과 함께 나타낸 것이다. 자동측정망에서의 PM_{10} 농도는 β 선 흡수법에 의해 연속 측정이 이루어지는데, 그 결과는 TMS를 통하여 전라북도보건환경연구원의 전산센터에 자동 저장된다. 이에 대한 기학적 및 분석학적 특성은 김 등(2002)의 연구에 제시된 바와 같다. Fig. 4에서 종축은 시료포집일을 나타낸 것으로 D의 경우 해당일의 낮 동안(오전 9시부터 오후 6시) 포집되었음을 의미하며, N의 경우 해당일의 밤 동안(오후 6시부터 다음 날 오전 9시)에 포집되었음을 의미한다. 자동측정망 자료의 경우 시간별 농도를 평균한 것으로 MCI 샘플러에 의한 포집시간과 동일한 시간 동안의 평균농도로 산출하였다. 그림에서 실선은 PM_{10}

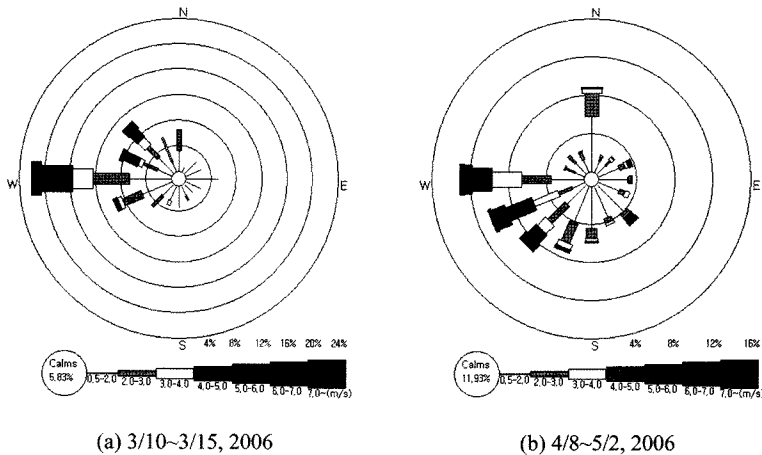


Fig. 3. Wind rose during the sampling period of March (a) and April-May (b) 2006 in Iksan.

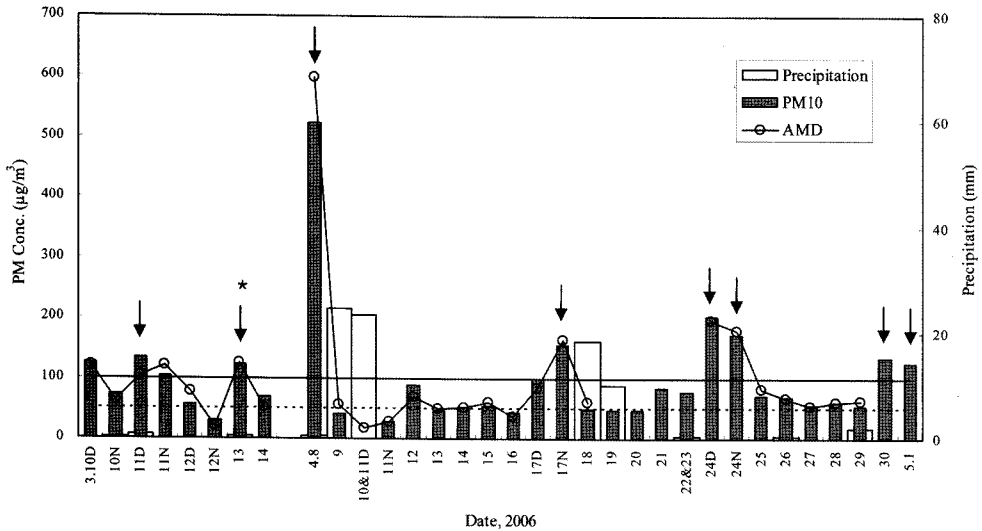


Fig. 4. Temporal variation of PM mass concentration and precipitation in Iksan. The solid horizontal line indicates 24 hr Korean National Ambient Air Quality Standard (NAAQS) for PM₁₀ of 100 µg m⁻³ and the dashed horizontal line means annual NAAQS for PM₁₀ of 50 µg m⁻³, respectively. Symbols of D and N on the x-axis indicate daytime and nighttime, respectively. AMD indicates the air quality automatic network monitoring data of Korean government agency (Ministry of Environment). The arrows mean dates that the Asian dust storms have been observed according to the official announcement of Korea Meteorological Administration (KMA). The asterisk symbols (*) also mean date that snow has fallen with the snow depth of about 2 cm from the surface.

의 국내 대기환경기준인 연평균값(100 µg/m³)을 의미하고, 점선은 일평균값(50 µg/m³)을 나타낸 것이다. 또한 화살표는 기상청(Korea Meteorological Administration, KMA)에 의해 발표된 황사 발생일을 나타낸 것으로, 측정기간 동안 총 8회(3.11D, 3.13, 4.8, 4.17N, 4.24D, 4.24N, 4.30, 5.1)의 황사가 관측되었다. 3월 13일에는 이례적으로 황사와 더불어 약 2 cm의 눈이 내렸다.

본 연구에서 측정된 농도와 자동측정망의 일별농도를 살펴보면 4월 8일을 제외한 나머지 시료의 경우 농도 분포가 거의 유사한 것으로 나타났으며, 이들 농도의 상관계수(correlation coefficient)는 0.99인 것으로 나타났다. 4월 8일에는 MCI 샘플러와 자동측정망에서 각각 523.9 µg/m³와 598.8 µg/m³으로 측정기간 동안 최고 농도를 기록하였는데, 이것은 이 기간 동안 익산지역에 중국대륙으로부터 고농도의 황사가 유입되었음을 의미한다. 또한 그 농도 차이가 다른 시료에 비해 상대적으로 큰 것은 강한 황사발생으로 대기 중 고농도의 먼지시료가 필터팩내의 석영필터에 포집되면서 압력강하가 발생하게 되고, 그 결과 흡인유량의 감소로 실측 농도가 과소평가되었기 때문으로 사료된다. 즉, MCI 샘플러의 시료포집부는 Fig. 2에서와 같이 3개의 필터가 장착된 필터팩으로 구성되는데 첫 번째와 두 번째 단의 경우 대기 중의 먼지 시료가 관성충돌에 의해 필터 포집면 위

에 쌓이지만, 세 번째 단의 경우 직경이 47 mm인 석영 필터의 포집면을 통과하면서 여과작용에 의해 입자가 가스흐름으로부터 분리되기 때문에 고농도의 먼지가 포집될 경우 시간이 경과할수록 강한 압력부하가 발생하게 되어 흡인유량이 감소하게 된다. 그러나 도심지에서 측정된 자동측정망 자료(PM₁₀)나 익산시 도심부의 변두리에 위치하고 있는 지역의 먼지농도(PM₁₀)가 측정기간 동안 전반적으로 거의 유사한 농도분포를 보이는 것으로 나타났는데, 이것은 익산지역 봄철 대기 중 먼지 오염도 수준이 국지적인 오염원(local sources)에 의한 영향보다 다른 지역에서 이동된 대규모 기단(air parcel)의 대기질 특성에 의한 영향이 강하게 반영되고 있음을 의미한다. 더욱이 황사 관측시마다 두 지역 모두 고농도 피크를 나타내고 있어 봄철 황사현상 발생 유무는 풍하측 지역의 대기 중 먼지농도 수준을 결정짓는 가장 중요한 변수로 작용하고 있음을 알 수 있다.

2006년 봄에 익산지역에서 측정된 먼지농도의 오염도 현황을 파악하기 위하여 국내 대기환경기준이 설정되어 있는 PM₁₀ 농도와 비교할 수 있도록 MCI 샘플러에 의해 포집된 PM_{2.5}와 PM_{10.2.5}로부터 PM₁₀ 농도를 산출한 결과 96.6±89.1 µg/m³이었다(Table 1). 이것은 측정 당시 국내 연평균 환경기준(70 µg/m³)을 초과하였으며, 24시간 환경기준(150 µg/m³)과 비교했을 때 측정

기간 동안 4회 초과하였다. 인체에 보다 직접적인 영향을 주는 것으로 알려진 PM_{2.5}의 경우 아직 국내 대기 질 기준이 설정되어 있지 않아 미국 EPA의 환경기준과 비교해 보면 측정기간 중 10회가 24시간기준인 65 µg/m³를 초과하였으며, 연평균기준(15 µg/m³)보다 약 3.9배 높은 것으로 나타났다. 국내의 환경기준과의 농도 차이는 PM₁₀보다 미세먼지에서 큰 것으로 나타났으며, 기준치 초과횟수도 미세먼지인 PM_{2.5}에서 높게 나타났다. 이러한 사실은 인체에 보다 유해한 것으로 알려진 2.5 µm 이하의 미세먼지의 오염이 조대입자의 먼지에 비해 심각한 수준임을 의미한다.

3. 환경대기 중 입경별 먼지와 수용성 이온성분의 농도 분포

익산지역에서 2006년 봄의 측정기간 동안 대기 중

입경별 먼지농도(PM_{2.5}, PM_{10-2.5}, PM_{over-10})와 수용성 이온성분의 농도는 Table 1과 같다. 여기에서 nss-Ca²⁺와 nss-SO₄²⁻는 비해염(non-sea salt) 기원의 Ca²⁺와 SO₄²⁻의 농도를 나타낸 것으로 다음 식과 같이 산출하였다. 이들 이온성분의 단위는 중량농도(µg/m³)를 의미하며, 수식에서 상수 값은 해수 중의 Na⁺에 대한 Ca²⁺와 SO₄²⁻의 농도비를 나타낸다(강 등, 2007; Nakamura *et al.*, 2005).

$$nss-Ca^{2+} = Ca^{2+} - 0.038 Na^{+} \tag{1}$$

$$nss-SO_4^{2-} = SO_4^{2-} - 0.251 Na^{+} \tag{2}$$

측정기간 동안 PM_{2.5}, PM_{10-2.5}, PM_{over-10}의 입경별 평균농도는 각각 57.9±44.2 µg/m³, 38.7±47.0 µg/m³, 18.2±17.6 µg/m³으로 공기동력학적인 직경이 2.5 µm 이하인 미세입자(PM_{2.5})가 가장 고농도를 나타내었다.

Table 1. Summary of PM mass and inorganic ion species concentrations in the PM samples and mass ratio of PM_{2.5} and PM_{10-2.5} to PM₁₀ collected in Iksan during the sampling period of spring, 2006

	PM	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	nss-SO ₄ ²⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	nss-Ca ²⁺	
	µg m ⁻³											
PM _{2.5}	Mean	57.9	1.03	5.81	8.42	8.29	0.51	4.21	0.36	0.13	0.63	0.61
	Median	47.3	0.77	4.65	6.04	5.94	0.38	3.29	0.31	0.10	0.37	0.35
	STD	44.2	1.37	3.92	5.71	5.66	0.68	2.46	0.21	0.07	0.61	0.61
	Max	264.6	8.20	18.14	25.64	25.57	4.06	10.12	0.85	0.36	2.57	2.56
	Min	23.8	0.10	0.65	2.32	2.28	0.13	0.93	0.07	0.04	0.07	0.06
PM _{10-2.5}	Mean	38.7	0.93	2.52	1.13	0.94	0.78	0.36	0.09	0.17	0.99	0.96
	Median	21.9	0.70	1.70	0.81	0.62	0.76	0.19	0.07	0.15	0.69	0.66
	STD	47.0	0.92	2.38	0.85	0.83	0.58	0.41	0.07	0.11	0.86	0.85
	Max	259.3	3.76	10.36	3.57	3.51	2.58	1.38	0.41	0.40	3.92	3.89
	Min	5.2	0.03	0.17	0.26	0.18	0.05	0.02	0.03	0.03	0.18	0.14
PM _{over-10}	Mean	18.2	0.30	0.44	0.37	0.31	0.22	0.07	0.03	0.06	0.53	0.52
	Median	11.8	0.18	0.21	0.29	0.23	0.18	0.04	0.03	0.05	0.38	0.38
	STD	17.6	0.35	0.50	0.35	0.35	0.20	0.09	0.02	0.03	0.44	0.44
	Max	76.9	1.54	2.34	2.00	1.96	0.84	0.48	0.08	0.13	1.76	1.75
	Min	1.6	0.02	0.03	0.09	0.07	0.01	0.01	0.00	0.01	0.10	0.10
PM ₁₀	Mean	96.6	1.96	8.33	9.55	9.22	1.29	4.58	0.45	0.30	1.62	1.57
	Median	70.3	1.67	7.60	6.81	6.49	1.09	3.59	0.38	0.27	1.14	1.09
	STD	89.1	1.73	5.31	6.38	6.35	1.07	2.75	0.27	0.17	1.38	1.37
	Max	523.9	9.38	22.60	29.21	29.08	5.53	11.47	1.25	0.71	5.76	5.70
	Min	29.0	0.21	0.82	2.91	2.80	0.22	0.95	0.11	0.09	0.31	0.30
TSP	Mean	114.8	2.26	8.76	9.92	9.54	1.52	4.65	0.48	0.36	2.15	2.09
	Median	81.0	1.80	7.78	7.17	6.71	1.29	3.68	0.41	0.34	1.57	1.45
	STD	99.7	1.93	5.64	6.64	6.61	1.19	2.80	0.28	0.19	1.71	1.71
	Max	563.0	9.60	23.32	31.21	31.04	5.77	11.95	1.30	0.76	7.27	7.20
	Min	33.7	0.25	0.90	3.13	3.00	0.23	0.96	0.13	0.10	0.46	0.44
PM _{2.5} / PM ₁₀	0.60	0.53	0.70	0.88	0.90	0.40	0.92	0.80	0.43	0.39	0.39	
PM _{10-2.5} / PM ₁₀	0.40	0.47	0.30	0.12	0.10	0.60	0.08	0.20	0.57	0.61	0.61	

수용성 이온성분의 농도를 살펴보면 PM_{2.5}에서는 SO₄²⁻가 8.42±5.71 µg/m³으로 가장 높았고, 다음으로 NO₃⁻ 5.81±3.92 µg/m³, NH₄⁺ 4.21±2.46 µg/m³이었다. 이들 이온성분들의 경우 전체 수용성 이온성분의 87.4%를 점유하였으며, PM_{2.5} 중량농도의 약 27.2%를 차지하였다. 조대입자 영역인 PM_{10-2.5}의 경우 NO₃⁻가 2.52±2.38 µg/m³로 가장 높았고, 다음으로 SO₄²⁻ 1.13±0.85 µg/m³, Ca²⁺ 0.99±0.86 µg/m³, Cl⁻ 0.93±0.92 µg/m³이었다. 여기에서 NO₃⁻가 단일성분으로 수용성 이온성분의 36.1%를 점유하여 조대입자의 주성분인 것으로 나타났다. 조대입자보다 큰 PM_{over-10}에서는 Ca²⁺가 0.53±0.44 µg/m³으로 가장 높았고, 다음으로 NO₃⁻가 0.44±0.50 µg/m³이었다. 각 입경별 수용성 이온성분의 총 농도는 각각 PM_{2.5} 21.1 µg/m³, PM_{10-2.5} 7.0 µg/m³, PM_{over-10} 2.0 µg/m³이었으며, 먼지의 평균중량농도에 대한 수용성 이온성분의 총 점유율은 PM_{2.5}, PM_{10-2.5}, PM_{over-10}에서 각각 36.5%, 18.0%, 11.1%로 미세입자 영역에서 높게 나타났다. 이러한 사실은 2006년 봄에 익산지역에서 측정된 미세입자의 경우 정량적으로 본 연구에서 측정된 수용성 무기이온성분이 약 37%를 점유하고 있으며, 나머지는 토양성분과 탄소, 유기화합성분, 중금속, 기타 미량물질로 구성됨을 의미한다. 또한 수용성 이온성분의 점유율이 입자의 크기 분포에 따라 다른 것은 입경별로 서로 다른 발생원의 영향을 받기 때문으로, 입자의 크기가 클수록 수용성 무기이온성분

의 점유율은 감소한 반면 상대적으로 본 연구에서 측정되지 않은 성분의 점유율이 증가하는 것으로 나타났다. 먼지는 크기에 따라 주요 발생원이 다르게 되는데, 일반적으로 공기동력학적 직경이 2.5~10 µm의 조대입자인 PM_{10-2.5}는 바람에 의한 비산먼지, 해염입자 등의 자연발생원이나 인위적인 발생원에서 직접 배출되는 1차 오염물질이 주가 된다(강 등, 2005; Godish, 1985).

Table 1에 제시된 PM₁₀에 대한 미세입자 영역(PM_{2.5})과 조대입자 영역(PM_{10-2.5})의 농도비를 살펴보면 환경대기 중 입자의 크기분포에 따른 먼지의 농도 및 수용성 이온성분의 평균적인 분포특성을 파악할 수 있다. 여기에서 이 비가 클수록 해당물질은 미세입자 영역에 존재하고 있음을 의미한다. 본 연구에서 PM₁₀에 대한 PM_{2.5}의 먼지 중량농도비는 0.60이었는데, 이는 10 µm 이하의 먼지 중 60%가 2.5 µm 이하의 미세입자 영역에 존재하고 있음을 의미한다. 각 이온성분의 농도비를 살펴보면 NH₄⁺, SO₄²⁻, K⁺, NO₃⁻의 경우 그 비가 약 0.7 이상이였으며, Cl⁻는 0.5, 나머지 Na⁺, Mg²⁺와 Ca²⁺는 각각 0.4 수준이었다. 이러한 사실은 NH₄⁺, SO₄²⁻, K⁺, NO₃⁻의 경우 주로 미세입자 영역에 존재하고 있고, Cl⁻는 미세입자와 조대입자 영역에, 그리고 Na⁺, Mg²⁺와 Ca²⁺는 주로 조대입자 영역에 존재하고 있음을 의미한다. 이와 같이 수용성 이온성분의 조성은 미세입자 영역과 조대입자 영역에 따라 정성 및 정량적으로

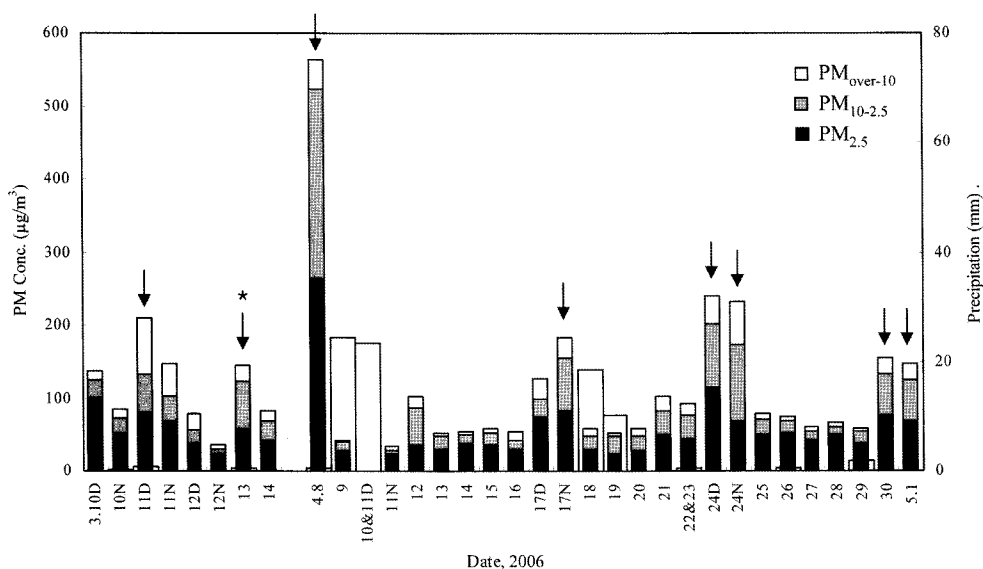


Fig. 5. Temporal variations of PM mass concentrations in Iksan. Total height of bar means the concentration of TSP, the sum of coarse and fine PM indicate the concentration of PM₁₀, and the bar of fine PM present the concentration of PM_{2.5} with a d₅₀ of less than 2.5 µm for the atmospheric particles.

뚜렷한 차이를 보이는 것으로 나타났는데, 이러한 결과로 미루어 입자의 크기 분포에 따라 해당 오염물질의 배출원 뿐만 아니라 대기 중의 생성 반응 메커니즘이 상이함을 알 수 있다.

4. 황사 발생시 입경별 먼지와 수용성 이온성분의 농도 분포

Fig. 5는 황사 발생시 먼지의 세부적인 농도분포 특성을 파악할 수 있도록 측정기간 동안 대기 중 먼지농도(PM mass concentration)를 시료채취일정에 따라 나타낸 것이다. 이것은 익산지역 환경대기 중 입경별 먼지분포($2.5\ \mu\text{m}$ 이하의 미세입자인 $\text{PM}_{2.5}$, $2.5\sim 10\ \mu\text{m}$ 의 조대입자인 $\text{PM}_{10-2.5}$ 그리고 $10\ \mu\text{m}$ 보다 큰 입자인 $\text{PM}_{\text{over-10}}$)를 파악하는데 있어 매우 중요한 정보를 제공하게 된다. 여기에서 PM_{10} 의 농도는 $\text{PM}_{2.5}$ 와 $\text{PM}_{10-2.5}$ 의 농도를 합한 것이 되며, 다시 이 농도에 $10\ \mu\text{m}$ 보다 큰 입자의 먼지농도($\text{PM}_{\text{over-10}}$)를 더하면 대기 중에 존재하는 총부유먼지(TSP, total suspended particulate)의 농도가 되는데, 그림에서 전체 막대의 높이를 의미하게 된다.

측정기간 동안 입자의 크기별 농도분포를 살펴보면 황사 발생일을 제외할 경우 $\text{PM}_{2.5}$ 가 전반적으로 높은 농도경향을 나타내었으며, $\text{PM}_{10-2.5}$ 는 $\text{PM}_{2.5}$ 와 $\text{PM}_{\text{over-10}}$ 의 중간수준이었다. 황사발생시 이들 먼지농도는 모두 증가하는 경향을 나타내었다. 특히 $\text{PM}_{10-2.5}$ 는 미세입자의 농도와 거의 유사한 수준까지 증가하였으며, $\text{PM}_{\text{over-10}}$ 의 경우도 크게 증가하는 경향을 나타내었다. 그러나 이러한 증가경향은 시료채취일에 따라 상이한 것으로 나타났는데, 이것은 익산지역 대기 중에 황사현상이 관측되었다 할지라도 시료채취일에 따라 이 지역 대기 중의 먼지농도에 영향을 미치는 황사입자의 입경 특성이 상이함을 의미한다. 이에 대한 원인은 불명확하지만, 황사의 발원지 또는 황사입자의 대기 중 장거리 이동과정에서 물리적 및 화학적 반응의 차이에 기인한 것으로 사료된다.

환경대기 중의 먼지농도는 황사나 강수의 발생에 따라 중량농도에 큰 차이를 보이기 때문에 황사가 익산지역 대기 중의 먼지농도에 미치는 영향을 보다 정확하게 정량화하기 위해서 Fig. 5에 제시된 32개 시료에 대한 일별 농도자료를 황사와 강수의 발생여부에 따라 황사현상이 관측된 경우(Asian dust), 강수가 발생한 경우(rain), 그리고 이를 제외한 나머지 경우(no event)의 3개 그룹으로 분류하였다. 여기에서 황사와 강수의 영향을 배제할 경우 평상시 불철 익산지역 대기 중의 먼지 농도에 대한 정량이 가능하게 된다. Fig. 6은 이들

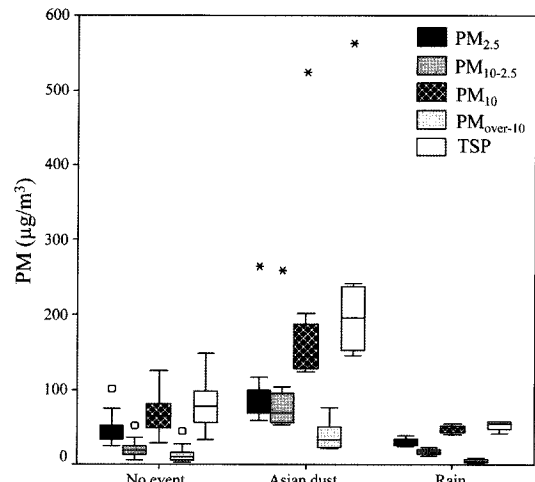


Fig. 6. Box-whisker plot of PM mass concentration for the samples of no event group ($n=20$), Asian dust group ($n=8$), and rain group ($n=4$) during the sampling period of spring in Iksan.

그룹별 대기 중 입경별 먼지농도를 박스-휘스커 그림으로 나타낸 것이다. 여기에서 사각형 박스의 위쪽과 아래쪽은 분석자료의 25% 백분율과 75% 백분율 값을 의미하며, 상자안의 실선은 50% 백분율인 중앙값(median)을 나타낸다. 그리고 박스 위쪽과 아래쪽 직선의 끝선은 분석결과에서 이상치(outlier)가 아닌 측정값 중 최대치와 최소치를 의미한다. 이상치는 그림 안의 작은 원(circle)으로 표시하였는데, 상자 위쪽의 작은 원은 75% 백분율과 25% 백분율 값의 차(inter-quartile range, IQR)에 1.5를 곱한 후 다시 75% 백분율 값을 더했을 때 이 범위 내에서 측정값의 최대치이며, 아래쪽의 작은 원은 IQR 값에 1.5를 곱한 후 이 값을 25% 백분율 값에서 차감했을 때 이 범위 내에서 측정값의 최소치를 의미한다. 이상치에서도 많이 벗어난 자료를 특이치(singularity, *로 표기)라 하며, 황사발생시 $10\ \mu\text{m}$ 보다 큰 입자영역을 제외한 입경별 농도에서 각각 1회씩 관측되었다.

강수와 황사현상이 관측된 시료를 제외한 시료(no event)에서 $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} 및 TSP의 평균농도는 각각 45.7 ± 18.7 , 66.6 ± 24.6 및 $79.2 \pm 31.6\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 인 반면에, 황사현상이 관측된 시료(Asian dust)의 경우 각각 101.8 ± 67.9 , 195.9 ± 135.3 및 $234.8 \pm 137.7\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 강수가 발생한 시료(rain)의 경우 이들 먼지의 평균농도는 각각 30.5 ± 5.7 , 48.0 ± 6.1 및 $52.5 \pm 7.7\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. TSP에 대한 $\text{PM}_{2.5}$ 와 PM_{10} 의 점유율은 no event의 경우 평균 57.7%와 84.0%이었으나, 황사 관측

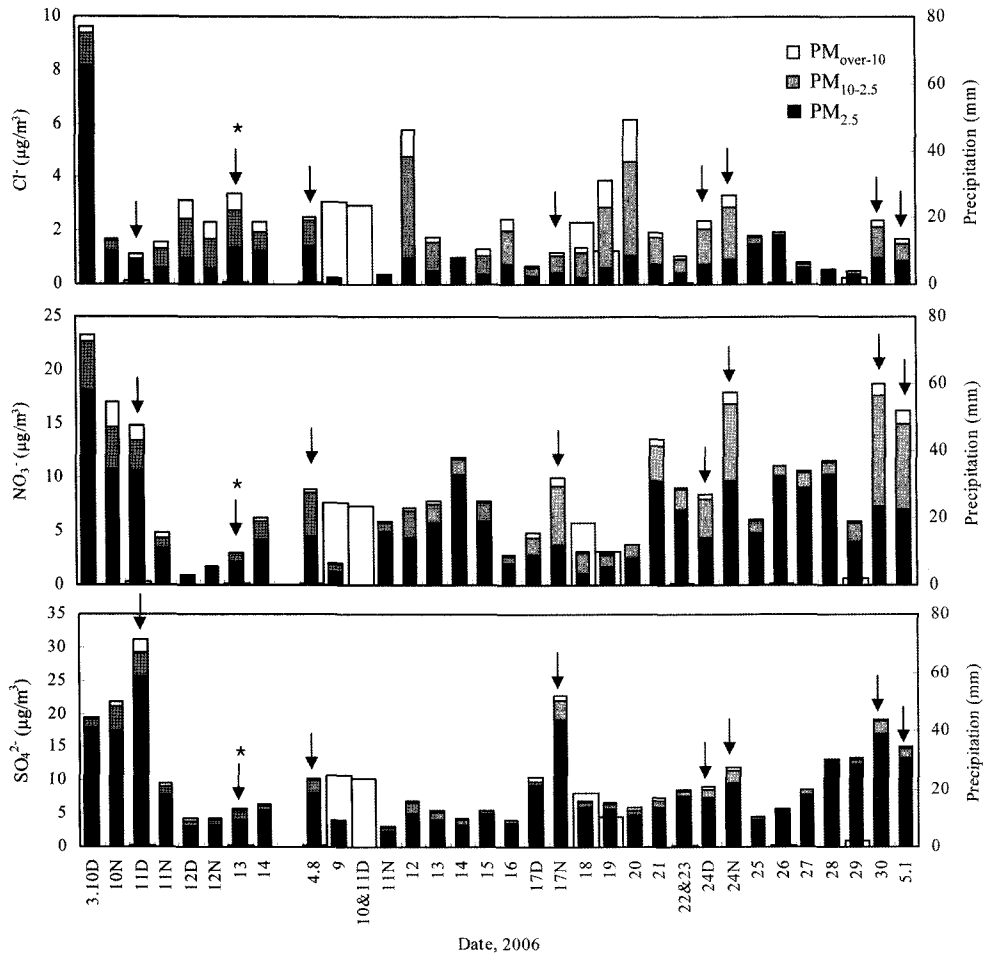


Fig. 7. Temporal variations of anion concentrations in atmospheric PM samples during the sampling period.

시에는 각각 43.4%와 83.4%인 것으로 나타났다. 또한 황사와 비황사시 이들 먼지농도를 비교하면 PM_{2.5}는 황사발생시 약 2배 이상의 농도 차이를 보인 반면에 PM₁₀과 TSP는 3배 정도의 농도 차이를 나타내었다. 이러한 결과를 토대로 2006년 봄철 중국대륙으로부터 장거리 이동된 황사입자는 익산지역 대기 중의 PM_{2.5}, PM₁₀ 및 TSP에 적어도 평균 2배 이상의 농도 차이를 유발하며, 그 영향은 미세입자보다 조대입자에서 큰 것으로 나타났다.

Fig. 7과 Fig. 8은 황사 발생시 수용성 이온성분의 세부적인 농도 특성을 파악할 수 있도록 시료채취일에 따른 입경별(PM_{2.5}, PM_{10-2.5}, PM_{over-10}) 이온성분의 농도를 나타낸 것이다. 먼저 음이온 성분에 대해 살펴보면 Cl⁻의 경우 황사발생에 따른 입경별 농도분포가 뚜렷한 경향을 보이지 않았다. 이것은 그 발생원이 황사의 영

향을 받기 보다는 주로 자연발생원인 해염의 영향을 강하게 받기 때문으로 사료되며, 측정 당시의 온·습도 등의 기상조건하에서 가스상으로 휘발되어 대기 중으로 손실되는 것으로도 알려져 있다. NO₃⁻는 전반적으로 미세입자의 PM_{2.5}에서 고농도로 존재하였으나, 황사발생시 조대입자인 PM_{10-2.5}와 10 µm보다 큰 입자에서 증가하는 경향을 나타내었다. 여기에서 NO₃⁻는 가스상의 암모니아와 질소산화물의 반응으로 생성될 때 미세입자 영역에 존재하지만, 다음 반응식과 같이 해염이나 황사입자 등과 반응하는 경우 조대입자 영역의 질산염이 생성되는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서 황사발생시 조대입자에서 고농도를 나타내는 것은 중국대륙으로부터 장거리 이동된 황사입자와 반응하여 식 (4)와 같이 생성되기 때문으로 추정되며, 이것은 입자상 NO₃⁻의 농도가 가을보다 대기 중에 광물입자(mineral

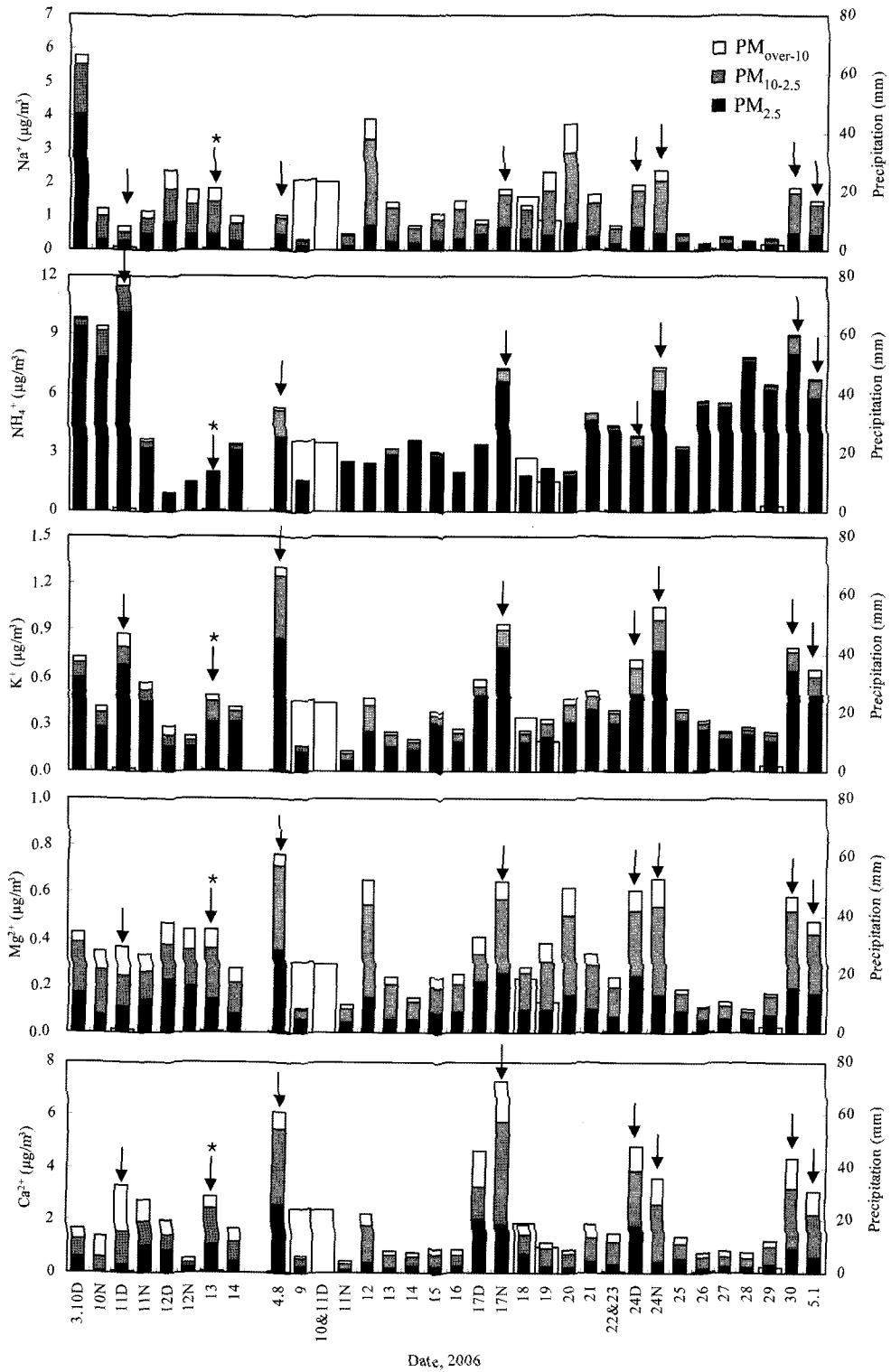
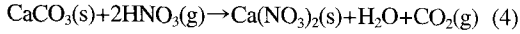
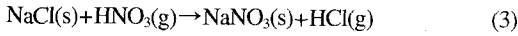


Fig. 8. Temporal variations of cation concentrations in the atmospheric PM samples during the sampling period.

particles)가 풍부한 봄에 높은 이유로도 설명되고 있다 (Nakamura *et al.*, 2005).



먼지에서 수용성 이온성분 중 가장 고농도로 존재하고 있는 SO₄²⁻의 경우 대부분이 미세입자인 PM_{2.5}에 존재하는 것으로 나타났다. 그러나 황사발생시 조대입자인 PM_{10-2.5}에서의 농도 분포가 다소 증가하는 경향을 보이고 있는데, 이것은 NO₃⁻와 마찬가지로 황산염의 전구물질이 황사 등의 광물입자와 반응하여 조대입자 영역의 SO₄²⁻가 생성되기 때문으로 판단된다.

양이온 성분 중 NH₄⁺는 대기 먼지 중 고농도로 존재하고 있는데, 그 대부분이 SO₄²⁻의 경우와 마찬가지로 미세입자인 PM_{2.5}에 존재하는 것으로 나타났다. 이것은 그 전구물질이 가스상의 NH₃에 의해 생성되기 때문이다. 그러나 황사발생시 미세입자 이외에 조대입자 영역에서도 농도가 증가하는 경향을 보이고 있는데, 이것은

황사입자 자체가 가스상의 암모니아를 입자상 암모늄염으로의 반응을 촉진하기 때문으로 생각된다. Na⁺와 Mg²⁺는 다소 예외적인 사례도 있지만 전반적으로 Ca²⁺와 같이 대부분이 PM_{10-2.5}에서 고농도 분포를 보이고 있으며, 황사발생시 모든 입경범위에서 증가하는 경향을 나타내었다. 특히 Ca²⁺의 경우 다른 이온성분에 비해 황사발생시 모든 입경범위에서 뚜렷한 농도증가를 보이고 있어 황사발생의 중요한 지표가 되는 것으로 나타났다. 반면에 Na⁺와 Mg²⁺의 경우 Ca²⁺와 다소 다른 농도 분포를 보이는 것은 이들 발생원이 지각 성분 이외에 해염에 의한 영향을 강하게 받기 때문으로 사료된다.

이와 같이 수용성 이온성분의 경우도 황사와 강수 발생일 등에 따라 상대적으로 큰 농도 차이를 보이기 때문에 황사발생시의 평균적인 농도 분포특성을 파악할 수 있도록 Fig. 6의 먼지농도와 마찬가지로 황사 및 강수발생 여부에 따라 각 그룹별로 나타낼 필요가 있다. Fig. 9는 먼지 중 주요이온성분인 NO₃⁻, nss-SO₄²⁻,

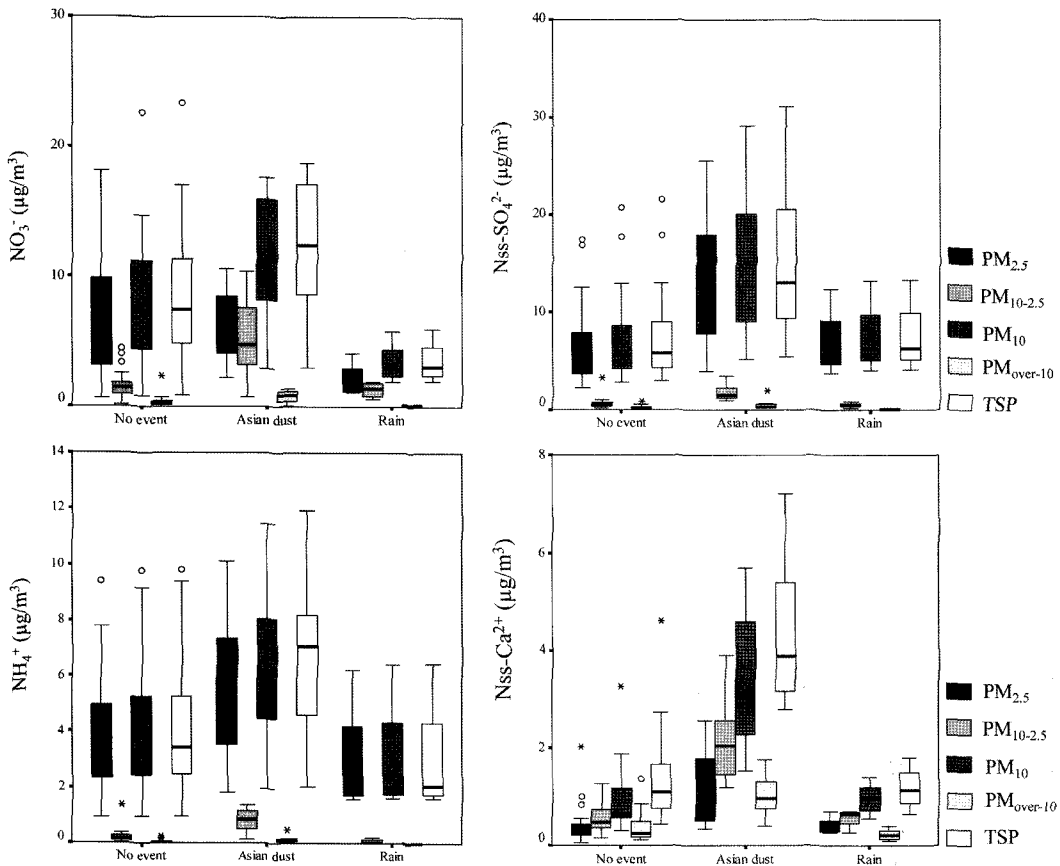


Fig. 9. Box-whisker plot of major ion species concentrations in the atmospheric PM of Iksan in spring, 2006.

NH_4^+ , nss-Ca^{2+} 의 각 그룹별 농도를 나타낸 것으로, 이온성분의 입경별 농도 특성을 요약하고 있다. 즉, NO_3^- 의 농도는 $\text{PM}_{2.5}$ 의 경우 황사시와 비황사시 유사한 수준이었지만 PM_{10} 과 TSP의 경우 황사 발생시에 증가하였다. 그리고 nss-SO_4^{2-} , NH_4^+ , nss-Ca^{2+} 의 경우 $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} , TSP 모두 비황사시보다 황사시에 증가하는 경향을 나타내었다.

IV. 결 론

2006년 봄에 한반도 남서부의 내륙에 위치한 익산지역에서 $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} , TSP의 중량농도와 주요 수용성 이온성분의 농도를 측정하여 입자의 크기분포에 따른 농도 특성을 비교하였으며, 황사발생시 입도분포에 따른 먼지 및 수용성 이온성분의 농도 특성을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 측정기간 동안 미세입자인 $\text{PM}_{2.5}$ 의 평균농도는 $57.9 \pm 44.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었고, PM_{10} 과 TSP의 농도는 각각 $96.6 \pm 89.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 $114.8 \pm 99.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 환경대기질 기준과 비교해 볼 때 인체에 보다 유해한 것으로 알려진 $2.5 \mu\text{m}$ 이하의 미세먼지($\text{PM}_{2.5}$)의 오염이 PM_{10} 에 비해 심각한 수준인 것으로 나타났다. 수용성 이온성분의 점유율은 $\text{PM}_{2.5}$, $\text{PM}_{10-2.5}$, $\text{PM}_{\text{over-10}}$ 에서 각각 36.5%, 18.0%, 11.1%로 입자의 크기분포에 따라 뚜렷한 차이를 나타내었다. 수용성 이온성분의 함량이 가장 높은 미세입자 영역의 $\text{PM}_{2.5}$ 에서는 SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+ 가 각각 $8.42 \pm 5.71 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $5.81 \pm 3.92 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $4.21 \pm 2.46 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 수용성 이온성분의 87.4%를 점유하였으며, $\text{PM}_{10-2.5}$ 의 경우 NO_3^- 가 $2.52 \pm 2.38 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 다른 이온성분에 비해 상대적으로 높은 약 36.1%의 점유율을 나타내었다. 조대입자보다 큰 영역의 $\text{PM}_{\text{over-10}}$ 에서는 Ca^{2+} 가 26.2%의 가장 높은 점유율을 기록하였으나 실측농도는 $0.53 \pm 0.44 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 $\text{PM}_{2.5}$ 와 $\text{PM}_{10-2.5}$ 에서의 농도보다 낮은 수준이었다.

2. 대기 중 입경별 먼지농도는 황사발생일을 제외할 경우 미세입자 영역의 $\text{PM}_{2.5}$ 가 전반적으로 높은 농도경향을 나타내었으며, 조대입자 영역의 $\text{PM}_{10-2.5}$ 는 $\text{PM}_{2.5}$ 와 $\text{PM}_{\text{over-10}}$ 의 중간수준이었다. 2006년 봄에 중국대륙에서 익산지역으로 장거리 이동된 황사입자는 익산지역 대기 중의 $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} 및 TSP에 평균 2배 이상의 농도 차이를 유발하였으며, 미세입자보다 조대입자에 보다 강한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 반면에 입자의 크기 분포에 있어 일정한 농도 증가 경향은 보이지 않았는데, 이것은 익산지역에 유입된 황사입자의 입경별 농도 특성이 다르기 때문으로 발원지 및 대기의 물

리, 화학적 특성에 기인한 것으로 추정된다. 황사 발생에 따른 추가적인 먼지시료 측정에 의한 충분한 자료 확보와 기상조건 등을 분석할 경우 보다 정확한 원인 분석이 가능할 것으로 판단된다.

3. $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} , TSP에서 주요 수용성 이온성분인 nss-SO_4^{2-} , NH_4^+ , nss-Ca^{2+} 의 평균농도는 모두 비황사시보다 황사시에 증가하는 경향을 나타내었다. NO_3^- 의 경우 $\text{PM}_{2.5}$ 에서는 황사와 비황사시 모두 유사한 수준이었으나 PM_{10} 과 TSP의 경우에는 황사 발생시에 증가하였다.

감사의 글

본 논문은 2007학년도 원광보건대학 교내연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 강공언, 김남송 이상복 : 환경보건학, 고려의학 p.105, 2007a.
2. 강공언, 김남송, 오경재, 신대윤, 유두철, 김삼백 : 강설이 겨울철 강수의 화학적 특성에 미치는 영향. 대한환경공학회지, **29**(1), 113-125, 2007b.
3. 강공언, 김남송, 전선복 : 가을철 대기환경 중 수용성 이온성분의 침적특성. 한국환경보건학회지, **32**(4), 359-372, 2006.
4. 강공언, 이상복 : 호흡기 침착부위에 따른 미세먼지 중 수용성 이온성분의 일별 농도 특성. 한국환경보건학회지, **31**(5), 387-393, 2005.
5. 강충민, 박성균, 선우영, 강병욱, 이학성 : 서울시 미세입자($\text{PM}_{2.5}$)의 호흡기질환 사망과의 연관성 연구. 한국대기환경학회지, **22**(5), 554-563, 2006.
6. 국립환경과학원 : 대도시 대기질 관리방안 조사연구: 미세먼지 생성과정 규명 및 저감대책 수립 보고서, 2006.
7. 기상청 황사센터 : http://www.kma.go.kr/dust/dust_03_02.jsp, 2007.
8. 김기현, 김민영, 신재영, 최규훈, 강창희 : $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} , TSP의 시간대별 관측결과에 기초한 황사기간 중 분진의 분포특성에 대한 고찰: 서울시의 4대 관측점을 중심으로 한 2001년 봄철 황사 기간에 대한 사례연구. 한국대기환경학회지, **18**(5), 419-426, 2002
9. 김기현, 김용표, 이강웅, 김조천, 김득수, 구윤서, 강공언, 이정주, 이병규, 김종호 : 대기환경학, 향문사, p.60-62, 2006.
10. 김민영, 조석주, 김광래, 이민환 : 황사기간 중 $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} , TSP 농도 특성에 관한 연구. 한국지구과학회지, **24**(4), 315-324, 2003.
11. 김성연, 정문호, 손부순, 양원호, 최경호 : 서울시 일부지역의 대기 중 미세먼지에 관한 연구. 한국환경보건학회지, **31**(4), 301-308, 2005.
12. 문광주, 한진석, 공부주, 이민도, 정일록 : ABC-EAREX2005 기간 동안 제주도 고산지역 대기 중 가

- 스상 및 입자상 물질의 분포특성. 한국대기환경학회지, **21**(6), 675-687, 2005.
13. 박지연, 임호진 : 대구지역 겨울철과 봄철 미세먼지의 수용성 이온성분 특성. 한국대기환경학회지, **22**(5), 627-641, 2006.
 14. 서주희, 하은희, 이보은, 박혜숙, 김 호, 홍윤철, 이윅희 : 서울지역의 미세먼지가 호흡기계 질환으로 인한 병원입원에 미치는 영향. 한국대기환경학회지, **22**(5), 564-573, 2006.
 15. 신은상 : 서울지역의 황사발생시 대기부유분진 중 미량원소의 특성 평가. 건국대학교 대학원, 공학박사 학위논문, 2001.
 16. 이영주, 이종태, 주영수, 신동천, 임형준, 조수현 : 서울지역 대기오염이 호흡기계질환에 미치는 단기영향에 관한 환자교차연구. 예방의학지, **34**(3), 253-261, 2001.
 17. 인희진, 이은희, 박순용 : 2002년 봄철에 관측된 황사 사례에 대한 수치모의. 한국대기환경학회 추계학술대회논문집, 91-92, 2002.
 18. 전영신 : 황사 발원지의 배출조건을 고려한 황사의 장거리 수송 사례 연구. 서울대학교 대학원, 이학박사학위논문, 1996.
 19. 전영신, 김지영, 부경은, 김남욱 : 겨울철 황사의 특징. 한국대기환경학회지, **16**(5), 487-497, 2000.
 20. 한국대기환경학회 : 대기환경사전(Korean Encyclopedia of Atmospheric Environment). (사)한국대기환경학회, p.174, 2006.
 21. 허종배, 이용미, 서용석, 김현선, 김승희, 이승목 : 서울시 대기 중 미세먼지(PM_{2.5})와 구성성분의 분포특성. 한국대기환경학회 추계학술대회논문집, 224-225, 2004.
 22. 환경부 : <http://www.me.go.kr/>, 2007.
 23. ABC-EAREX : <http://abc-gosan.snu.ac.kr/>, 2007.
 24. Duce, R.A., Unni, C. K., Ray, B. J., Prospero, J. M, and Merrill, J. T. : Long-range atmospheric transport of soil dust from asia to the tropical north pacific: temporal variability. *Science*, **209**, 1522-1524, 1980.
 25. Godish, T. : Air Quality, Lewis Publidhers Inc., 39-44, 1985.
 26. Kang, G. U. and Lee, J. H. : Comparison of PM_{2.5} and PM₁₀ in a suburban area in Korea during April, 2003. *Water, Air, and Soil Pollution* **5**, 71-87, 2005.
 27. Kim, Y. J. and Kim, K. W. : Visibility impairment by atmospheric fine particles in an urban area. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, **19**(E3), 99-120, 2003.
 28. Lin, T. H. : Long-range transport of yellow sand to Taiwan in Spring 2000: observed evidence and simulation. *Atmospheric Environment*, **35**, 5873-5882, 2001.
 29. Nakamura, T., Matsumoto, K. and Uematsu, M. : Chemical characteristics of aerosols transported from Asia to the East China Sea: an evaluation of anthropogenic combined nitrogen deposition in autumn. *Atmospheric Environment*, **39**, 1749-1758, 2005.
 30. Pino, P., Walter, T., Oyarzun, M., Villegas, R. and Romieu, I. : Fine particulate matter and wheezing illnesses in the first year of life. *Epidemiology*, **15**(6), 702-708, 2004.
 31. Ryu, S. Y., Kim, J. E., Zhuanshi, H., Kim, Y. J. and Kang, G. U. : Chemical composition of post-harvest biomass burning aerosols in Gwangju, Korea. *Journal of Air & Waste Management Association*, **54**, 1124-1137, 2004.
 32. Seinfeld, J. H. : Atmospheric chemistry and physics of air pollution. Wiley Interscience, New York, NY, 1986.
 33. Zhang, X. Y., Arimoto, R., Cao, J. J., An, Z. S. and Wang, D. : Atmospheric dust aerosol over the Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research*, **106**, 18471-18476, 2001.