

## 황사 에피소드 발생시 대기먼지의 농도 특성과 인체 영향

강공언<sup>†</sup>

원광보건대학 의무행정과

(2009. 1. 12. 접수/2009. 1. 28. 수정/2009. 2. 13. 채택)

# Concentration Characteristics and Health Effect Assessment of Atmospheric Particulate Matters During Asian Dust Storm Episodes

Gong-Unn Kang<sup>†</sup>

Department of Medical Administration, Wonkwang Health Science University

(Received January 12, 2009/Revised January 28, 2009/Accepted February 13, 2009)

### ABSTRACT

The Asian dust storms which originated in the deserts of Mongolia and China transported particles to Korea and led to a high concentration of atmospheric particulate matters (PM) of more than 1000  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  throughout the country in the spring, of 2007. Public concern, in Korea, about the possible adverse effects of these dust events has increased, as these dust storms can contain various air pollutants emitted from heavily industrialized eastern China. The objectives of this study were to understand the concentration characteristics of PM as a function of particle size between the Asian dust storm episodes and non-Asian dust period and to consider the mass size distribution of PM in the Asian dust storms and their water soluble ion species on the potential, possible effects on deposition levels in the three regions (nasopharyngeal, tracheobronchial, and alveolar) of the human respiratory system. The size distribution of PM mass concentration during the Asian dust storms showed a peak in the coarse particle region due to the long-range transport of soil particles from the deserts of Mongolia and China, which was identified by HYSPLIT-4 model for backward trajectory analysis of air arriving in the sampling site of Iksan. During the non-Asian dust period, there were two different types in PM size distribution: bimodal distribution when low concentrations of  $\text{PM}_{2.5}$  were observed, while unimodal distribution having a peak in fine particle region when high concentrations of  $\text{PM}_{2.5}$  were showed. This unimodal distribution with high concentrations of fine particulate and secondary air pollutants such as  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$  was found to be due to the long-range transport of air pollutants from industrialized eastern China. During the Asian dust storms, the mean concentrations of PM that can be deposited in the nasopharyngeal, tracheobronchial, and alveolar region were 128.8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 216.5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , and 89.6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , respectively. During the non-Asian dust period, the mean concentrations of PM that can be deposited in the nasopharyngeal, tracheobronchial, and alveolar region were 8.4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 9.5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , and 38.5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , respectively.

**Keywords:** Asian dust storms,  $\text{PM}_{2.5}$ , human respiratory system, size distribution, backward trajectory analysis

## I. 서 론

황사는 주로 봄철에 중국과 몽골의 사막지역(타클라마칸, 고비, 오르도스, 만주 등) 또는 황하중류의 황토 지역에서 발생하여 풍하층에 인접해 있는 우리나라와 일본을 비롯한 동북아시아에 가장 큰 영향을 주고, 자

유대기까지 상승한 황사입자의 경우 편서풍을 타고 북태평양으로 흘러가며 때때로 북미대륙에까지 도달하기도 한다(Husar *et al.*, 2001). 최근에는 중국내 건조지역의 확대로 내몽골고원과 북경 북서쪽의 훈센다크사막 등도 황사발원지로 주목받고 있다(Kim *et al.*, 2003). 2001년 이후 우리나라에서 관측된 황사의 경우 그 발원지가 내몽골고원 39%, 고비사막 23%, 만주 16%, 황토고원 14%, 타클라마칸사막 8%로서 내몽골고원이 주 발원지로 밝혀졌다. 최근에는 만주지역의 황사 발생횟수가 크게 증가하고 있으며, 이 경우 12시간 이

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

내에 서해 또는 북한을 거쳐 우리나라로 빠르게 도달한다. 고비사막과 내몽골고원에서 발원한 황사의 경우도 발해만과 서해중북부를 거쳐 우리나라 전역에 영향을 주며, 24시간 내에 도달하는 것으로 보고 있다 (Asian dust center, 2009).

대기 중의 황사입자는 태양복사에너지와 지표복사에너지를 산란하거나 흡수하여 지구의 열수지에 직접적인 영향을 주기도 하며, 구름 응결핵으로 작용하여 간접적인 영향을 주는 것으로 알려져 있다(IPCC, 2001). 또한 중국대륙에서 배출된 대기오염물질과 대기 중 수송과정에서 반응을 일으켜 대기 에어로졸의 화학적 조성변화에 기여함으로써 황사발원지에서 장거리에 위치한 지역의 시정 및 대기질 악화에도 중요한 원인이 되고 있다. 대기 중 고농도의 먼지입자는 각종 재산상의 피해와 식물의 생태계에도 심각한 영향을 초래하고, 인체의 호흡기와 눈에 직접적인 영향을 주어 호흡기 질환과 눈병 등의 질환을 증가시키고 있다. 1995년부터 1998년까지 서울시에서 발생한 황사와 일별 사망자 수의 관련성에 대한 최근 연구(Kwon *et al.*, 2002)에 따르면 황사가 있었던 날에 사망위험(death risk)이 전체 사망자의 경우 1.7% 증가되었으며, 65세 이상의 경우 2.2%, 심장질환이나 폐질환으로 경우 4.1% 증가되었다. 대만에서도 타이페이(Taipei)시 주민들의 사망자료를 이용하여 1995년부터 2000년까지 황사로 인한 사망 위험을 추정하였는데(Chen *et al.*, 2004) 호흡기 질환으로 인한 사망위험이 황사발생 후 약 7% 증가한 것으로 나타났다.

최근에는 국내의 황사 발생빈도가 중국의 산업화와 건조지대의 기온 증가 및 강수량 감소로 인한 사막화 현상, 산림감소 등의 영향으로 계속 증가하고 있다. 2002년 3월에는 매우 강한 황사가 발생하여 초등학교 휴교, 항공기 결항, 호흡기 질환자의 급증, 반도체 등 정밀산업체의 일시적 공장 휴업 등 심각한 피해가 발생하였다. 이에 따라 정부는 황사로 인한 피해를 기상재해로 인식하여 기상청에서는 2002년 4월에 황사특보제를 신설하여 시행하고 있다. 황사강도의 예보기준은 황사로 인한 1시간 평균 미세먼지의 농도를 기준으로 하여 약한 황사( $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$  미만), 강한 황사( $400\sim 800 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 매우 강한 황사( $800 \mu\text{g}/\text{m}^3$  이상)로 구분하고 있다. 황사로 인해 1시간 평균 미세먼지농도가  $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$  이상이 2시간 이상 지속될 것으로 예상될 때 황사주의보를 그리고  $800 \mu\text{g}/\text{m}^3$  이상이 2시간 이상 지속될 것으로 예상될 때 황사경보 등의 특보를 발령하고 있다(Asian dust center, 2009).

황사발원지의 풍하측에 위치한 국가나 지역사회에서

황사가 갖는 정치·경제적 및 보건학적 영향의 중요성 때문에 지금까지 이에 대한 연구가 지속적으로 이루어지고 있으며, 국민건강에 대한 황사의 보건학적 문제는 매우 중요한 관심의 대상이 되고 있다. 국내에서 황사에 의한 건강영향에 관한 역학연구로는 초등학생을 대상으로 한 일별 건강자각증상 연구(Moon *et al.*, 2003), 천식환자들을 대상으로 한 연구(Chang *et al.*, 2001), 서울시의 일사망을 연구(Kwon *et al.*, 2002) 등이 있으나 여전히 미흡한 실정이다. 황사입자의 물리화학적 특성에 의한 건강과의 관련성에 대한 연구의 경우 대부분이  $\text{PM}_{10}$  자료를 기준으로 하고 있어 황사의 건강피해를 바로 이해하기는 어려운 점이 있다. 대기 중 먼지입자에 의한 건강장애는 호흡기계 부위별 침착률과 입자의 독성에 의해 결정되는데 호흡기계 침착률은 입자의 크기와 밀접한 관련이 있다. 일반적으로  $2.5 \mu\text{m}$  이하의 미세입자의 경우 호흡기 깊숙이 침입하여 폐에 염증을 일으키고 2차적으로 혈액에 영향을 주어 호흡기 및 심장질환을 초래하거나 조기사망 등 여러 가지 건강장애를 초래하는 것으로 알려져 있다. 따라서 황사발생에 따른 인체 영향을 평가하기 위해서는 무엇보다도 폐포 부위에 침착 가능한 미세 황사입자의 정량적인 크기분포가 매우 중요하게 된다. 입자의 크기가 미세할수록 기관지나 세기관지의 섬모에 의해 쉽게 제거되지 않고 폐포 깊숙이 유입되며, 높은 침착률을 나타내는데(Nag *et al.*, 2005; Heyder, 2004; Svartengren *et al.*, 1989; Hinds, 1982), 호흡기내에서 먼지입자는 관성충돌(impaction), 중력침강(gravity settling), 브라운 운동에 의한 확산(diffusion/Brownian motion), 직접차단(interception) 등에 의해 입자의 크기 및 특성과 호흡기 상태에 따라 침착부위와 기여도도는 다르게 된다(Hinds, 1982).

최근 2007년 4월 1일을 전후에서는 근래에 보기 드문 매우 강한 황사현상이 전국적으로 관측되었으며, 국민보건과 관련하여 황사경보가 발령되었다. 황사발생시 대기 중 먼지농도의 강도에 따라 국민의 보건수칙이 지정되어 있으나, 황사입자의 건강유해성을 보다 정확하게 이해하기 위해서는 황사입자의 크기분포와 그 화학조성이 매우 중요하게 된다. 또한 대기먼지의 입경별 농도 측정에 사용되고 있는 Cascade Impactor(일명 Andersen Sampler)의 경우 입자의 크기분포에 따라 9개의 단으로 분급포집이 이루어지기 때문에 기존 연구에서는 주로 약 2일에서 1주일을 주기로 하여 측정이 이루어졌다(Kim *et al.*, 1999; Lee and Kim, 1985). 그러나 황사는 기상조건에 따라 일시적으로 발생한 후 소멸되기 때문에 황사발생시점을 고려하여 측정주기를

짧게 할 필요가 있다. 이 경우 지역대기질 및 건강에 미치는 황사의 영향에 대한 보다 세부적인 해석이 가능하게 된다.

본 연구에서는 전국적으로 황사경보가 발령된 2007년 봄의 황사 에피소드를 중심으로 황사를 포함한 대기 중 먼지입자가 보건학적인 관점에서 호흡기에 미치는 인체 영향을 파악할 수 있도록 익산지역에서 입자의 크기분포에 따른 대기 중 먼지입자의 중량농도와 수용성 이온성분의 농도를 측정·분석하여 입도분포에 따른 일별 먼지농도 및 주요 수용성 이온성분의 농도 특성을 해석하였다. 대기먼지농도에 따른 사례별로 공기 역학적 분석을 실시하여 기류의 이동경로에 따른 지역 대기질의 주요 오염원을 추정하였다. 또한 황사입자가 인체에 미치는 잠재적인 영향을 평가하기 위하여 인체 호흡기내 먼지입자의 주요부위별 침착 가능성을 고려한 후 입자의 크기분포에 따른 먼지입자의 주요 호흡기 부위별 침착농도를 산출하였으며, 이들 자료를 토대로 황사와 비황사시 인체의 건강상태에 대한 정량적인 평가를 시도하였다.

## II. 시료채취 및 분석방법

### 1. 시료채취 및 분석방법

시료채취는 익산시 북쪽의 신용동에 위치하고 있는 원광보건대학 캠퍼스(위도 35°58'11", 경도 126°57'30") 내 학림관 건물의 3층(지상 약 9 m)에서 이루어졌다. 봄철 대기 중 먼지입자의 개략적인 입경분포를 파악할 수 있도록 PM<sub>2.5</sub>(2.5 μm 이하의 미세입자), PM<sub>10-2.5</sub>(2.5~10 μm의 조대입자), PM<sub>over-10</sub>(10 μm 이상의 먼지입자)를 동시에 측정할 수 있는 MCI 샘플러(multi-nozzle cascade impactor, Tokyo Dylec. Inc., Japan)를 사용하여 2007년 3월 28일부터 4월 21일까지 1일 2회 대기에어로졸을 포집하였다. MCI 샘플러에 의한 농도 산출방법과 일부 측정자료에 대해서는 선행연구(Kang *et al.*, 2008)에서 제시된 바와 같다. 황사입자의 인체 영향에 대한 보다 세부적인 이해가 가능하도록 인체 호흡기 구조에 따른 부위별 침착 가능한 대기 중 먼지입자의 입경별 농도는 Cascade Impactor(Koritsu Instruments Co.)를 사용하여 측정하였다. 이것은 인체의 호흡기 침착부위에 따른 대기먼지의 침착수준을 정량화 할 수 있도록 포집유량이 28.3 l/min인 상태에서 입자의 공기동력학적 직경과 인체의 호흡기 침착부위를 고려하여 설계되었기 때문에 측정된 입경별 농도 자료는 호흡기에 미치는 건강상태를 평가하는데 있어 매우 유용한 정보를 제공하게 된다.

**Table 1.** Various stages of cascade impactor which simulates human respiratory

Impactor stages	Size of particulate matter (μm)	Respiratory tract region	Remark
Stage 0	11~30		
Stage 1	7~11	Nasopharyngeal NP	
Stage 2	4.7~7.0	Nasopharyngeal NP	
Stage 3	3.3~4.7	Tracheobronchial	TB
Stage 4	2.1~3.3	Tracheobronchial	TB
Stage 5	1.1~2.1	Alveolar	AL
Stage 6	0.65~1.1	Alveolar	AL
Stage 7	0.43~0.65	Alveolar	AL
Backup stage	0.08~0.43	Alveolar	AL

Cascade Impactor는 다단의 시료포집부와 순간유량계, 적산유량계 및 펌프로 구성되는데 공기 중의 먼지입자는 Table 1에서와 같이 입자의 운동특성에 따른 공기동력학적인 직경에 따라 다단의 시료포집부에 분급 포집된다. 공기 중의 먼지시료가 유입되는 최상부의 0단에서 아래쪽으로 내려갈수록 미세입자가 포집되는데 0단에는 11 μm보다 큰 입자, 1단에는 7~11 μm, 2단에는 4.7~7 μm, 3단에는 3.3~4.7 μm, 4단에는 2.1~3.3 μm, 5단에는 1.1~2.1 μm, 6단에는 0.65~1.1 μm, 7단에는 0.43~0.65 μm가 포집되고, 가장 아래쪽 단의 Backup 필터에는 0.43 μm 보다 작은 입자가 포집되도록 설계되어 있다. 각 단에 포집된 먼지시료는 입자의 호흡기내 침착부위와 관련하여 비인두(nasopharyngeal region, NP), 기관 및 기관지(tracheobronchial region, TB), 폐포(alveolar/pulmonary region, AL) 부위로 나눌 수 있다(Sutherland, 2007; Nag *et al.*, 2005; Hinds, 1982). 여기에서 1~2단에 포집된 4.7~11 μm의 먼지입자는 비인두 부위(NP)에 침착하는 것으로 분류하였으며, 3~4단에 포집된 2.1~4.7 μm의 먼지입자는 기관지 부위(TB)에 그리고 5단에서 Backup 단에 포집된 2.1 μm 이하의 먼지입자는 폐포 부위(AL)에 침착하는 것으로 분류하였다. 또한 1단에서 Backup단까지 포집된 11 μm 이하의 입자에 대해서는 흡입성 먼지(inhalable particles, IN)로 명명하였다.

대기 중 먼지입자의 시료채취는 가능한 짧은 주기로 측정하고자 낮 시료의 경우 오전 8시 전후에서 시작하여 저녁 7시 전후로 하였으며, 그 이후부터 다음 날 8시 전후까지 포집한 경우 밤 시료로 하였다. 그러나 대기 중 먼지입자의 농도를 고려하여 시료채취시간을 조정하였으며, 1일 또는 2일 동안 측정된 시료의 경우 오전 8시 전후에서 시작하여 다음 또는 그 다음 날 오전 8시 전후까지 측정할 것을 의미한다. 또한 매회 측정시

9장의 필터가 사용되었는데, 0~7단에는 직경이 80 mm 인 Polyethylene Sheet가 그리고 Backup 단에는 직경이 80 mm이고 공극이 0.45  $\mu\text{m}$ 인 석영필터(quartz fiber filter, Pallflex Products Co., Japan)가 사용되었다. 각 입경별 미세입자 중 수용성 이온성분의 분석은 선행연구(Kang 등, 2007)에서 제시된 바와 같다.

## 2. 역궤적 분석(backward trajectory analysis)

대기 중 고농도 먼지농도가 관측된 황사 에피소드 발생시 기류의 발원지 및 이동경로를 파악하기 위하여 역궤적 분석을 실시하였다. 또한 황사 에피소드 및 비황사시 기류가 지역 대기질에 미치는 영향을 비교·평가할 수 있도록  $\text{PM}_{2.5}$  농도를 기준으로 비황사시의 고농도 및 저농도 사례에 대해서도 공기의 역궤적을 조사하였다.

기류의 역궤적 분석은 미국해양대기국(NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration)에서 제공하는 HYSPLIT-4(Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) 모델을 이용하였다(Draxler and Rolph, 2003; Rolph, 2003). 역궤적 분석에 사용된 기상자료(풍향, 풍속)는 NOAA의 GDAS1 자료이며, 120시간 동안의 공기 이동경로를 분석하였다. 측정지점의 좌표는 익산시 북쪽에 위치한 원광보건대학 캠퍼스(35.94524°N, 126.95578°E)로 설정하였다.

## III. 결과 및 고찰

### 1. 황사와 비황사시 입경별 대기먼지의 농도분포

Fig. 1은 2007년 봄철 황사에피소드의 규모를 파악할

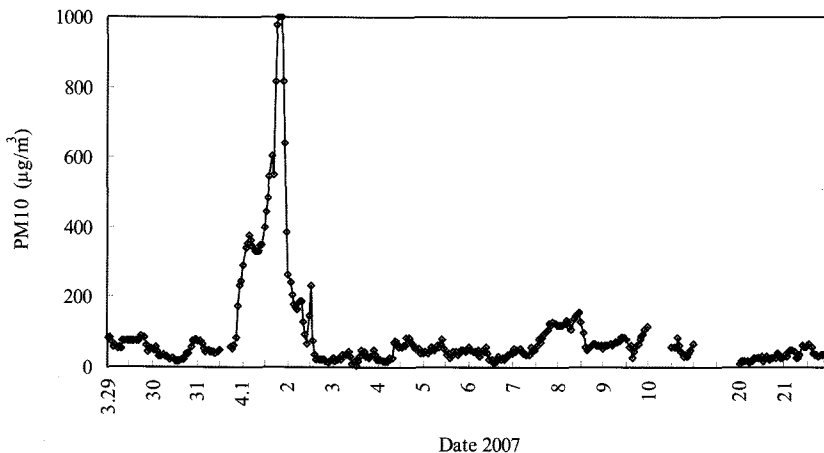
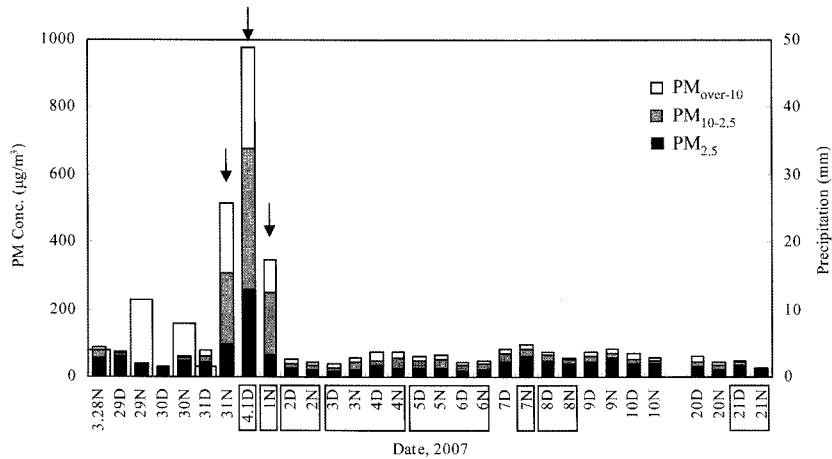


Fig. 1. Temporal variation of  $\text{PM}_{10}$  mass concentration optically measured at the air quality monitoring station of Namjung-dong, which indicate the air quality automatic monitoring data obtained on the rooftop of main building of Iksan city hall.

수 있도록 익산지역의 대기 중  $\text{PM}_{10}$  농도를 나타낸 것이다. 이것은 본 연구가 이루어진 시료채취지점으로부터 남동쪽으로 약 3 km 떨어져 있는 익산시청(익산시 남중동 소재)의 본관건물 옥상에서 측정된 자동측정망의 1시간 평균자료로 익산지역의 경우 4월 1일 19~21시 사이에 약 1000  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 고농도 피크를 갖는 황사에피소드가 발생하였다. 환경부 발표자료(MOE, 2009)에 따르면 2007년 3월 30일부터 4월 2일 오전까지 내몽골과 고비사막에서 발원한 강한 황사가 한반도 상공에 전국적으로 영향을 준 것으로 보고하였다. 여기에서 주요 도시의  $\text{PM}_{10}$  농도는 시간당 평균 1355~2718  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 지역별로는 울산이 최고 2718  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (4월 1일 21시)을 기록하였으며, 서울(1355  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 부산(1799  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 대구(2067  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 대전(1450  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 등으로 평소보다 10~20배 높게 관측되었다.

Fig. 2는 황사 에피소드를 중심으로 MCI 샘플러에 의해 측정된 대기 중 먼지입자의 입경분포를 강수량과 함께 나타낸 것이다. 여기에서  $\text{PM}_{10}$ 의 농도는  $\text{PM}_{2.5}$ 와  $\text{PM}_{10-2.5}$ 의 농도를 합한 것이 되며, 다시 이 농도에  $\text{PM}_{\text{over-10}}$ 를 더하면 대기 중에 존재하는 총부유먼지(TSP)의 농도가 되는데, 이것은 그림에서 전체 막대의 높이에 해당한다. 대기 중 먼지입자의 입경별 농도분포를 살펴보면 황사 발생시를 제외할 경우 모든 시료에서 미세입자인  $\text{PM}_{2.5}$ 가 측정기간 동안 전반적으로 높은 농도 경향을 보이고 있으나, 황사 발생시에는 미세입자의 농도도 증가하지만 조대입자의  $\text{PM}_{10-2.5}$ 와 입경 10  $\mu\text{m}$  이상의  $\text{PM}_{\text{over-10}}$  농도가 매우 뚜렷하게 증가하였다. 황사 발생 후 일상적인 대기질 상태를 보인 비황사시의 경우  $\text{PM}_{2.5}$ ,  $\text{PM}_{10-2.5}$ ,  $\text{PM}_{\text{over-10}}$  평균농도는 각각 34.6,

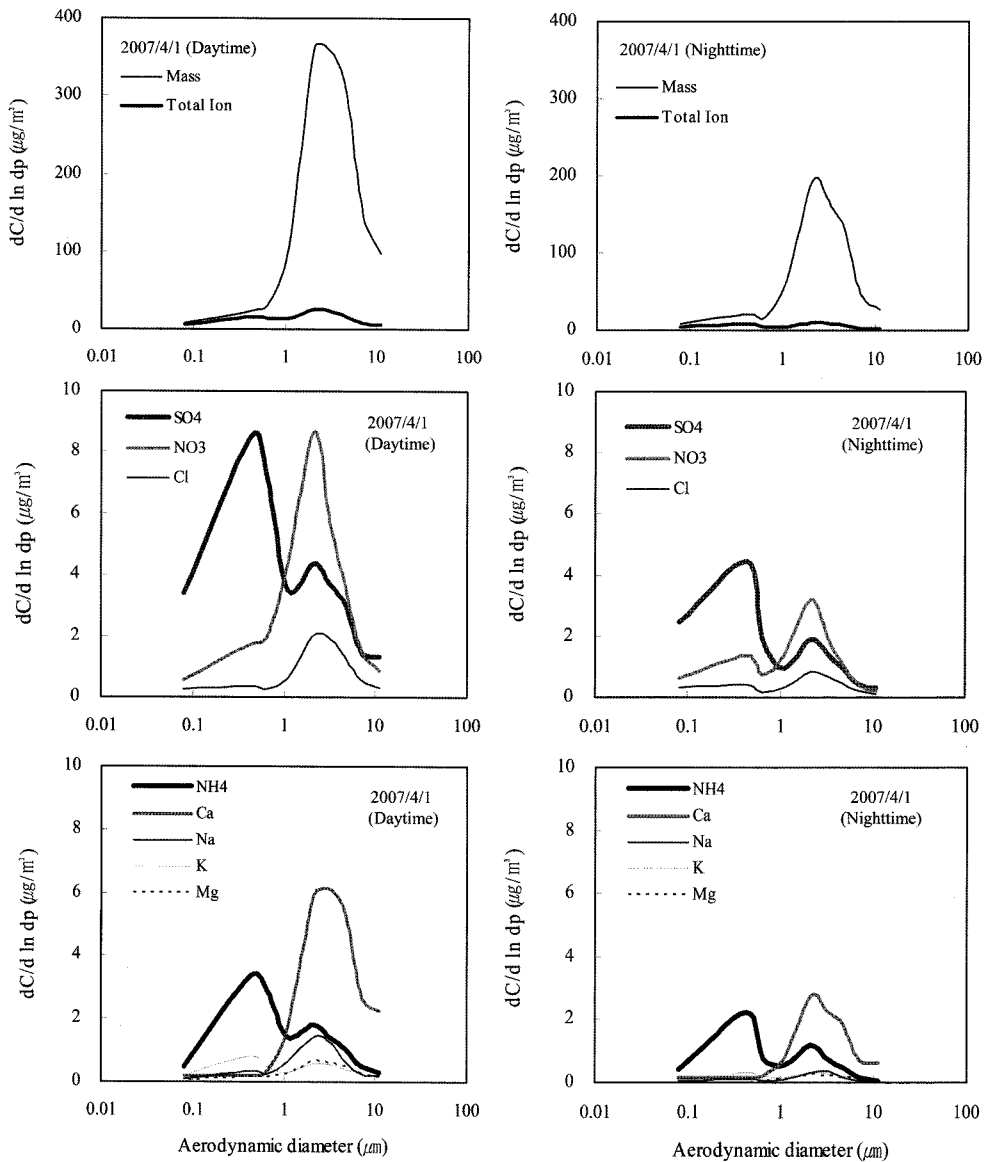


**Fig. 2.** Temporal variations of mass concentrations for atmospheric particulate matters (PM) in Iksan. Total height of bar means the concentration of TSP, the sum of coarse and fine PM indicates the concentration of PM<sub>10</sub> and lower black bar presents the concentration of PM<sub>2.5</sub> with a d<sub>50</sub> of less than 2.5 µm for the atmospheric particles. Dates in the rectangular boxes stand for days of measuring the mass size distribution of PM.

17.6, 12.8 µg/m<sup>3</sup>이었으며, PM<sub>10</sub>과 TSP의 평균농도는 각각 52.2 µg/m<sup>3</sup>과 65.0 µg/m<sup>3</sup>이었다. 여기에서 PM<sub>2.5</sub>의 농도는 PM<sub>10</sub>의 66.2% 수준이었으며, 입경별 변이계수는 약 39.3%로 PM<sub>10-2.5</sub>와 PM<sub>over-10</sub>의 33.0%와 34.1%보다 높게 나타났다. 이것은 비황사시의 경우 주로 인위적인 기원의 미세입자가 익산지역 대기질에 중요하게 작용하고, 지역 대기질의 먼지 오염도에 미치는 영향이 PM<sub>10-2.5</sub>와 PM<sub>over-10</sub>의 경우보다 다소 유동적임을 의미한다. MCI 샘플러의 일별농도분포를 살펴보면 2007년 3월 31일 저녁, 4월 1일 낮과 밤의 시료에서 황사입자가 포집된 것으로 나타났는데(Fig. 2), 이중 고농도 피크를 보인 2007년 4월 1일 낮 시료(4.1D)의 경우 PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10-2.5</sub>, PM<sub>over-10</sub>의 농도는 각각 258.2, 419.6, 300.9 µg/m<sup>3</sup>로 PM<sub>10-2.5</sub> > PM<sub>over-10</sub> > PM<sub>2.5</sub> 순이었으며, PM<sub>10</sub>과 TSP의 평균농도는 각각 677.8 µg/m<sup>3</sup>과 978.7 µg/m<sup>3</sup>이었다. 여기에서 인체에 보다 중요한 영향을 초래하는 PM<sub>2.5</sub>는 PM<sub>10</sub>의 38.1% 수준으로 비황사시(66.2%)보다 낮은 반면, PM<sub>10-2.5</sub>의 경우 PM<sub>10</sub>의 61.9%를 점유하였다. 또한 PM<sub>over-10</sub>의 경우 오늘날 대기먼지의 오염도 기준인 PM<sub>10</sub>의 모니터링에서는 정량화되지 않는데, 본 연구결과 비황사시에 비해 약 23.5배 높은 농도를 기록하였다. 대규모의 고강도 황사가 발생한 4월 1일 낮 시료의 먼지농도를 비황사시의 평균농도와 비교해 보면 PM<sub>2.5</sub>와 PM<sub>10-2.5</sub>의 경우 약 7.5배와 23.8배 높게 나타났으며, PM<sub>10</sub>과 TSP는 각각 13.0배와 15.1배 고농도를 기록하였다. 황사가 시작된 2008년 3월 31일 밤 시료(31N)의 경우 입경별 농도는

PM<sub>10-2.5</sub> (212.7 µg/m<sup>3</sup>) > PM<sub>over-10</sub> (205.5 µg/m<sup>3</sup>) > PM<sub>2.5</sub> (96.6 µg/m<sup>3</sup>) 순이었으며, 4월 1일 저녁시료(4.1N)의 경우 PM<sub>10-2.5</sub> (184.3 µg/m<sup>3</sup>) > PM<sub>over-10</sub> (95.3 µg/m<sup>3</sup>) > PM<sub>2.5</sub> (67.7 µg/m<sup>3</sup>) 순으로 나타났다. 결과적으로 측정기간 동안 황사먼지의 입경분포는 PM<sub>10-2.5</sub> > PM<sub>over-10</sub> > PM<sub>2.5</sub> 순으로 나타났으며, 이것은 황사발생시 토양입자 등 자연적인 기원의 조대입자가 익산지역 대기질에 중요하게 작용하고 있음을 의미한다.

황사 발생시 인체 영향에 대한 보다 세부적인 이해를 위하여 MCI 샘플러에 의한 집중측정기간 중 총 7회에 걸쳐 Cascade Impactor에 의한 입경별 농도 측정이 이루어졌는데 시료채취일시는 Fig. 2의 황축에 표기한 바와 같다. MCI 샘플러의 경우 밤과 낮으로 나누어 1일 2회 측정이 이루어졌으나 Cascade Impactor의 경우 대기먼지 시료가 9개의 단에 나누어 포집되기 때문에 시료포집 당시의 대기질 상태를 고려하여 시료채취시간을 다르게 설정하였다. 즉, 황사 발생시의 경우 낮과 밤으로 구분하여 포집하였으며, 4월 2일 시료는 낮과 밤 동안 포집하였다. 이후에는 4월 3~4일, 5~6일에 각각 연속하여 포집한 후 하나의 시료로 하였다. PM<sub>2.5</sub>의 농도가 상대적으로 높은 4월 7일의 경우 밤에만 포집하였으며, 이후 4월 8일과 21일의 경우 낮과 밤 동안 포집하여 하나의 시료로 하였다. 여기에서 4월 1일 낮과 밤 시료의 경우 황사발생에 따른 농도 특성을 반영하고 있으며, 나머지 5회에 걸친 시료의 경우 비황사시의 대기먼지 특성을 반영한다고 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이들 자료를 토대로 대기먼지 및 주요 수

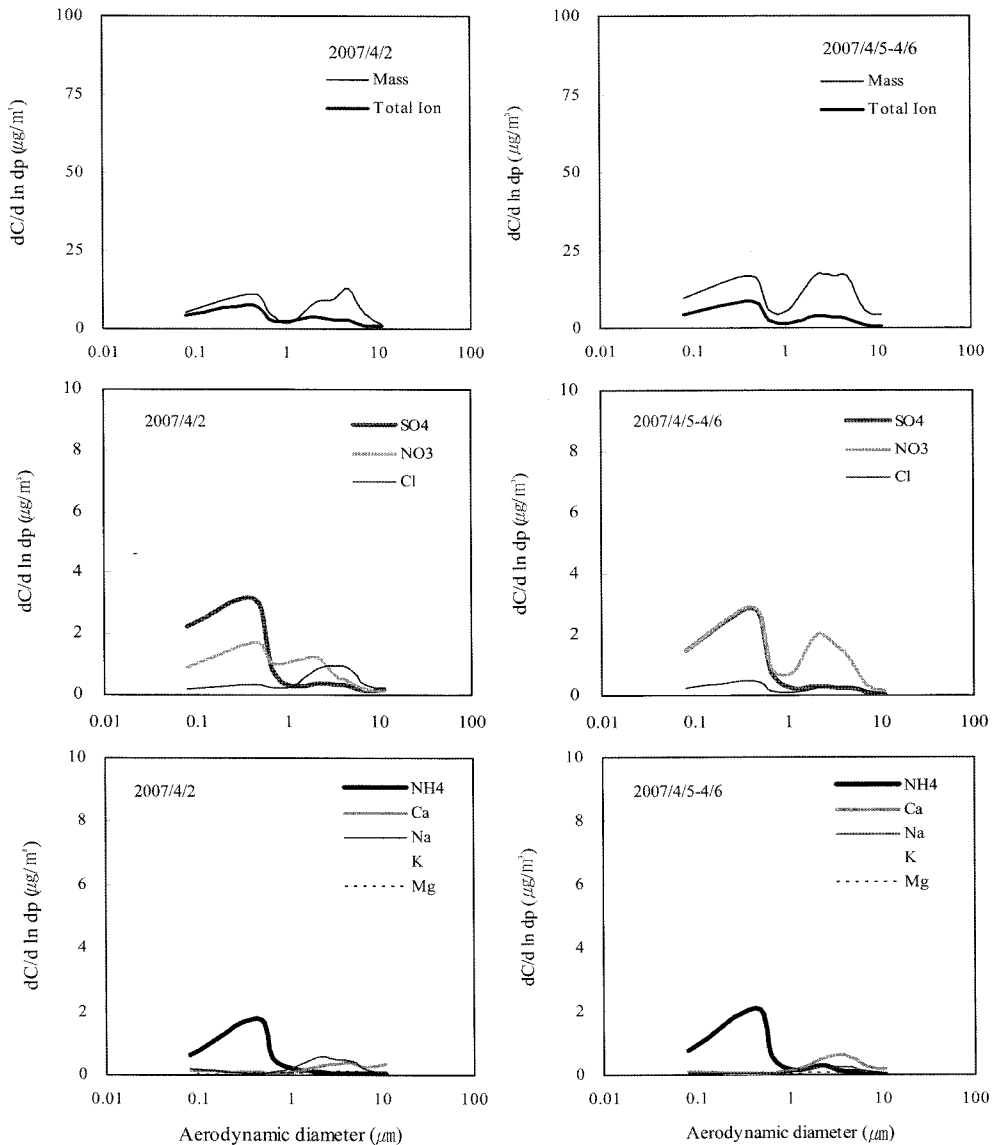


**Fig. 3.** Size distribution of mass and ion species concentrations for atmospheric particulate matters of PM<sub>2.5</sub> during the period of 2007 Asian dust storm episodes in Iksan.

용성 이온성분에 대한 입경별 농도 특성과 인체의 호흡기 부위별 대기먼지입자의 침착특성을 해석하였다.

Fig. 3은 황사가 관측된 4월 1일 낮과 밤 시료의 대기 중 먼지농도와 수용성 이온성분의 농도에 대한 입경분포를 나타낸 것이다. 또한 그림 상단에 위치한 먼지농도의 입경분포에는 Cascade Impactor의 각 단에서 포집된 대기먼지 중 수용성 이온성분의 전체 농도에 대한 입경분포를 함께 나타내었다. 또한 비행사시에 대해서는 황사시를 제외한 나머지 시료 중 PM<sub>2.5</sub>

의 농도분포에 따라 다시 2가지 유형으로 구분하였는데, 비행사시 저농도 사례에 대한 입경분포를 Fig. 4에 그리고 고농도 사례에 대한 입경분포를 Fig. 5에 나타내었다. 황사 에피소드가 발생한 4월 1일의 낮과 밤 시료의 입경분포를 살펴보면 먼지입자는 미세입자에 비해 조대입자 영역에서 상대적으로 높은 농도를 나타내었으나, 수용성 이온성분에 대한 전체 농도의 경우 1~2 μm를 경계로 이산형의 낮은 피크를 보이고 있다. 조대입자 영역의 경우 먼지농도와 수용성 이온성



**Fig. 4.** Size distribution of atmospheric particulate matters with low mass concentration of PM<sub>2.5</sub> during the period of the Asian-dust storm in spring 2007 in Iksan.

분의 농도분포 사이에 큰 차이를 나타내었는데, 이것은 중국대륙에서 장거리 이동된 황사입자의 경우 그 대부분이 조대입자 영역의 불용성 광물입자 등으로 구성되었기 때문으로 사료된다. 수용성 이온성분 중 음이온에서는 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>의 경우 미세입자와 조대입자에서 피크를 갖는 이산형 분포를 나타내었으나 대부분이 미세입자 영역에 존재하는 것으로 나타난 반면, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>와 Cl<sup>-</sup>의 경우 조대입자 영역에 존재하는 것으로 나타났다. 여기에서 이들 음이온 성분(특히 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>의 경우)의

경우 비황사시의 입경분포에 비해 조대입자 영역의 피크가 상대적으로 증가하는 경향을 나타내었는데 이것은 가스상의 이들 선구물질이 대기 중의 수송과정에서 황사입자와 반응하기 때문으로 황사입자와 대기 에어로졸에 관한 기존연구(Kang *et al.*, 2007, 2008; Nakamura *et al.*, 2005, Cheng *et al.*, 2000; Wakamatsu *et al.*, 1996)에서 제시된 반응 메커니즘에 의해 설명이 가능하다. 양이온에서는 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>와 K<sup>+</sup>의 경우 미세입자와 조대입자에 피크를 갖는 이산형 분포

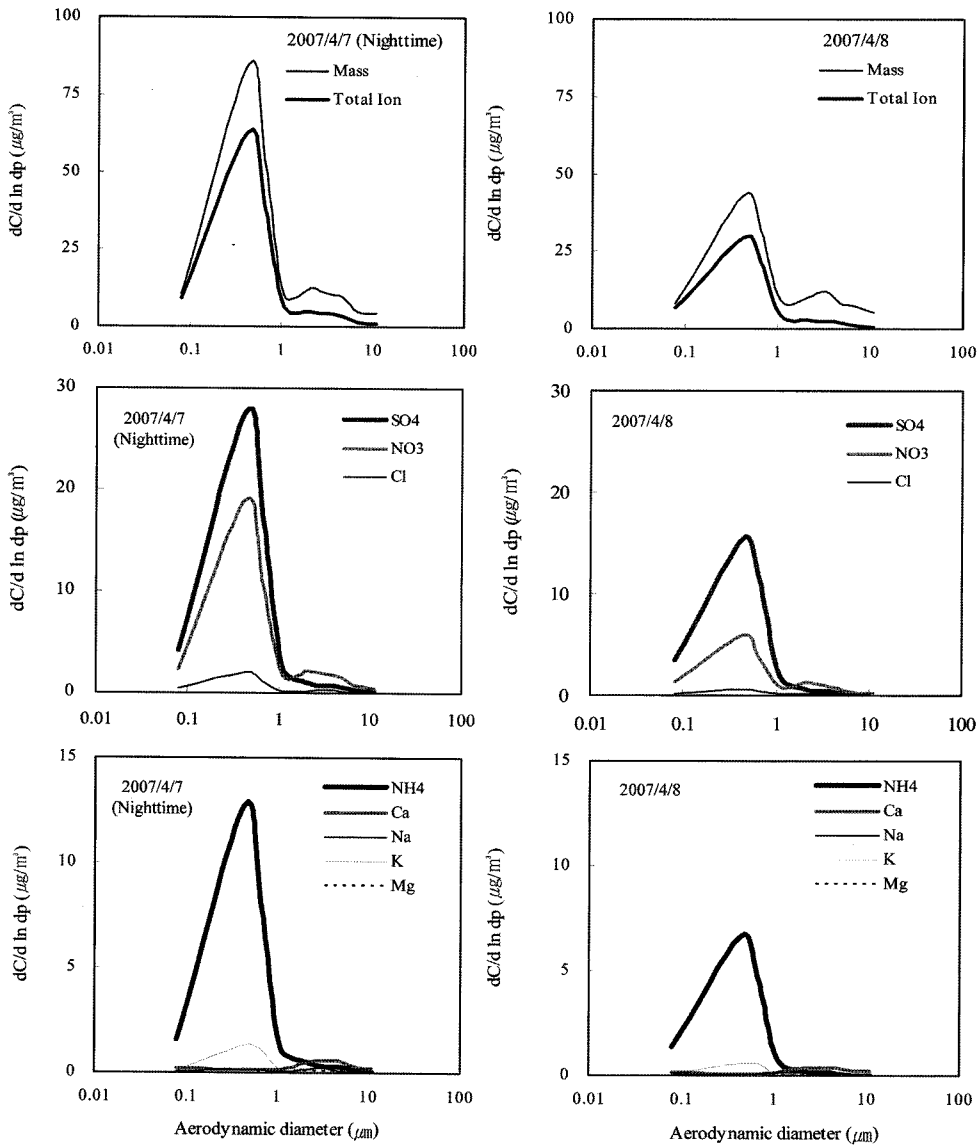
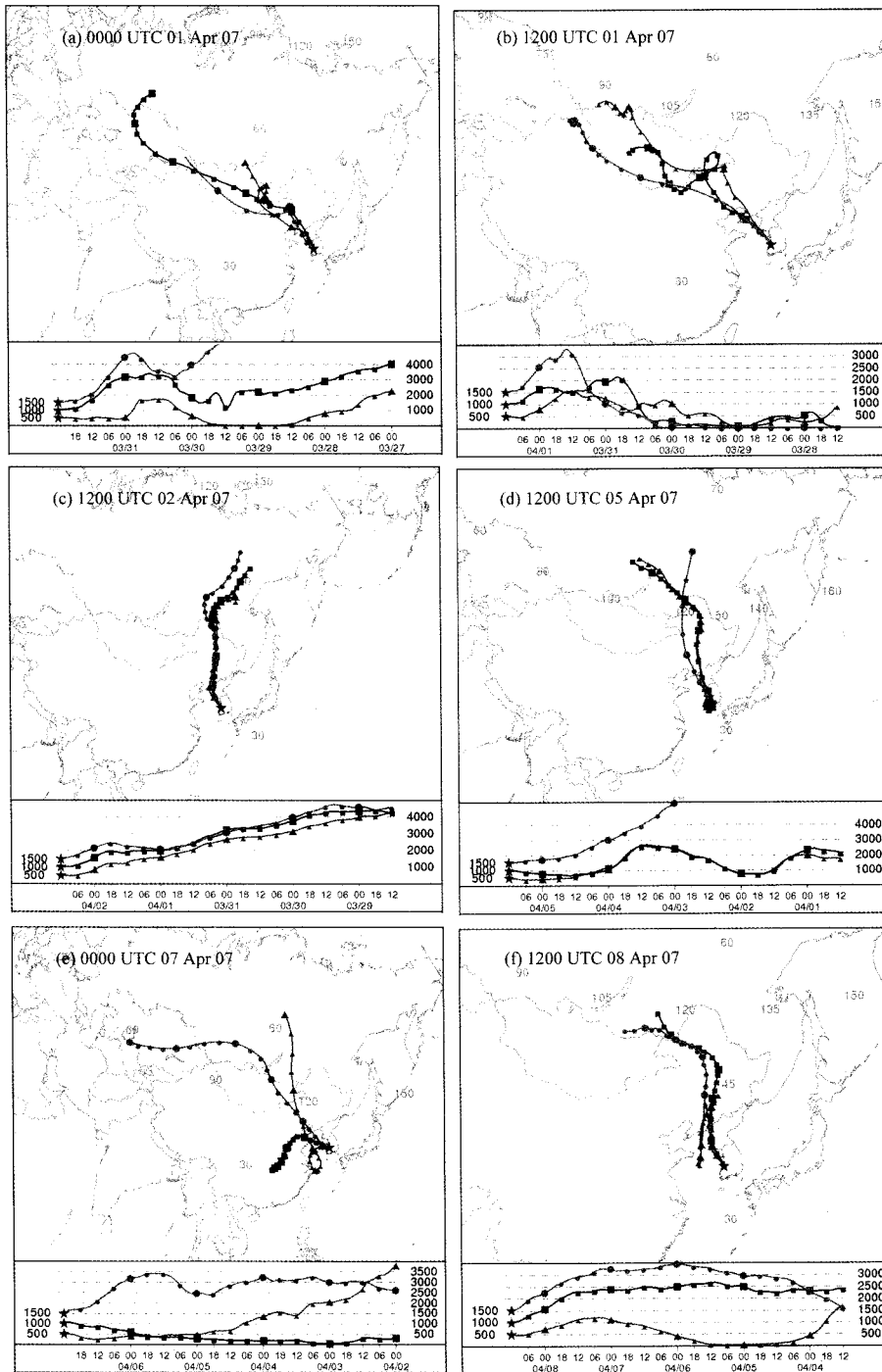


Fig. 5. Size distribution of atmospheric particulate matters with high mass concentration of PM<sub>2.5</sub> during the period of the Asian-dust storm in spring 2007 in Iksan.

를 나타내었으나 주로 미세입자 영역에 존재하는 것으로 나타난 반면, Ca<sup>2+</sup>는 조대입자 영역에서 피크를 나타내었으며 비황사시에 비해 매우 뚜렷한 양적 증가를 나타내었다. 비황사시의 저농도 사례에 해당하는 4월 2일과 4월 5일~6일 시료의 경우 먼지농도와 수용성 이온성분의 농도는 미세입자와 조대입자에서 거의 비슷한 피크를 갖는 이산형 분포를 나타내었으며, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>와 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>가 주성분으로 모두 미세입자 영역에 존재하는 것으로 나타났다. 비황사시 고농도 사례에 해당하

는 4월 7일 밤과 4월 8일 시료의 경우 먼지농도와 수용성 이온성분은 모두 미세입자 영역에서 상대적으로 고농도 피크를 나타내었으며, 이들 사이의 농도분포의 경우 황사 에피소드와 달리 그 차이가 크지 않은 것으로 나타났다. 여기에서 특이할만한 사실은 인체의 호흡기에 보다 치명적인 영향이 예상되는 미세입자의 경우 황사가 관측된 경우보다 비황사시에 상대적으로 고농도 피크를 보이고 있는데(Fig. 5), 이것은 먼지농도 분포와 미세입자 영역에서 고농도를 보이고 있는





**Fig. 6.** Backward trajectories corresponding to the Asian dust storm episodes (a, b) and the sampling dates of low concentration (c, d) and high concentration (e, f) of  $PM_{2.5}$  in Iksan. Symbols are used along each trajectory to indicate the position of the air parcel. The vertical view at the bottom of the map shows the height of the air parcel measured at these corresponding tick marks. The height of the air parcel is measured in meters above model ground level (AGL).

$\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$  등의 입경분포를 고려해 볼 때 인위적인 오염발생원에 기인한 2차입자의 영향에 의한 것으로 판단된다. 또한 이러한 입경별 농도분포로부터 황사가 관측되지 않은 경우라 하더라도 인체에 보다 심각한 건강장해를 초래하는 미세입자가 고농도로 존재하고 있어 일반 대기먼지의 인체영향에 관한 유효성을 평가할 때 입경분포와 입자의 조성을 고려하는 등 보다 세심한 주의가 필요한 것으로 생각된다.

Fig. 6은 대기 중 고농도 먼지농도가 관측된 황사 에피소드 발생시 그 발원지 및 기류의 이동경로를 파악하기 위하여 시료채취지점에서 공기의 역계적 분석결과를 나타낸 것이다. 여기에는 비황사시 기류의 발원지를 분석하여 지역 대기질의 오염도 특성을 이해할 수 있도록 비황사시의 고농도 및 저농도에 대한 2가지 사례의 분석결과를 함께 나타내었다. 고농도 황사 에피소드가 발생한 4월 1일의 공기역계적 분석결과에 따르면 중국내륙에서 발생한 기류가 내몽골과 고비사막을 경유하여 한반도 상공에 영향을 준 것으로 나타났는데, 특히 하층기류가 이들 황사발원지의 지표면을 장시간 경유하면서 상층기류와 함께 다량의 황사입자를 대기 중으로 들어 올려 풍하층의 한반도 상공에 영향을 준 것으로 보인다. 비황사시 저농도 사례에 해당하는 4월 2일과 5일의 경우 청정한 시베리아 대륙의 상층부 기류가 한반도의 서해안 상공을 거쳐 유입되어진 것으로 나타났다. 반면에 비황사시  $\text{PM}_{2.5}$ 의 고농도 사례에 해당하는 4월 7일의 경우 중국 산둥반도에서 배출된 대기오염물질이 함유될 수 있도록 지표면에 인접한 하층부의 기류가 서해안 상공을 경유하여 익산지역에 유입된 것으로 나타났다. 결과적으로 익산지역에서 4월 7일에 미세먼지와  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$  등의 2차 입자가 고농도로 관측된 것은 중국내륙에서 배출된 대기오염물질이 장거리 유입되어 지역대기질에 영향을 주었기 때문으로 사료된다.

## 2. 호흡기 침착부위에 따른 대기먼지의 농도 평가

인체의 호흡기계는 호흡 경로에 따라 비인두 부위(nasopharyngeal region, NP), 기관 및 기관지 부위(tracheobronchial region, TB), 폐포 부위(alveolar/pulmonary region, AL)로 나누어진다(Sutherland, 2007). 비인두 부위는 머리 부분의 상기도로 코, 입, 인두, 후두를 포함하고, 기관지 부위는 하기도의 기관, 기관지, 세기관지를 포함한다. 그리고 폐포 부위는 폐포 조직으로 구성되며, 산소와 이산화탄소의 가스교환에 의한 호흡작용이 일어난다. 여기에서 대기 중 먼지입자는 호흡기의 구조에 따라 침착량은 다르게 되는데, Cascade

Impactor의 경우 인체의 호흡기 침착부위를 고려하여 설계되었기 때문에 입경별 먼지농도를 정량화 한 후 비인두, 기관지 및 폐포 부위로 나누어 산출할 수 있다. Table 2는 황사에 의한 인체 영향을 평가할 수 있도록 황사와 비황사시로 구분하여 인체 호흡기 구조에 다른 신체 부위별 침착 가능한 대기 중 먼지입자와 수용성 이온성분의 평균농도를 나타낸 것이다. 대기먼지의 침착부위별 크기분포를 살펴보면 황사가 발생한 4월 1일 낮과 밤 시료(4.1D, 1N)의 경우 기관 및 기관지 부위에 침착할 수 있는 먼지입자의 평균농도는  $216.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, 이것은 호흡기로 유입되는 흡입성 먼지(Cascade Impactor의 1단에서 Backup단까지 포집된  $11 \mu\text{m}$  이하의 먼지입자, IN으로 표기)의 49.8%에 해당한다. 폐포 부위에 침착할 수 있는 먼지입자의 경우  $89.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, 그 점유율은 20.6%이었다. 반면에 비황사기간의 경우 상기도의 비인두 부위와 기관 및 기관지 부위에 침착할 수 있는 먼지농도는  $8.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 과  $9.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 비슷한 수준이었다. 그러나 폐포 부위에 침착할 수 있는 먼지입자는  $38.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 흡입성 먼지농도의 68.2%를 점유하였으며, 비인두와 기관 및 기관지 부위보다 상대적으로 높은 점유율을 나타내었다. 또한 이것은 일별 뚜렷한 농도 차이를 보이면서 흡입성 먼지의 농도분포를 주도하는 것으로 나타났다. 특히 4월 7일 밤 동안에 포집된 먼지시료의 경우 85.0% 이상이 인체의 폐포 부위까지 도달할 수 있는 미세입자인 것으로 나타났다.

인체의 침착부위에 따른 수용성 이온성분의 경우 모두 비황사시에 비해 황사시에 인체 호흡기 부위(특히 비인두와 기관 및 기관지)에 침착할 수 있는 농도가 증가하였다. 보다 세부적인 내용을 살펴보면 황사 발생시 인체 호흡기로 흡입 가능한 수용성 이온의 평균농도는  $43.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 여기에서,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ 의 농도가 각각 15.0, 9.6,  $6.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 수용성 이온의 34.8, 22.2, 16.1%를 점유하는 주성분이었다. 호흡기 침착부위에 따른 농도분포를 살펴보면 비인두의 상기도 부위에 침착 가능한 이온의 경우 평균농도는  $6.42 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며,  $\text{Ca}^{2+}$ 와  $\text{NO}_3^-$ 의 농도가 각각  $2.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 과  $1.37 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 수용성 이온의 33.8%와 21.3%의 높은 점유율을 나타내었다. 기관 및 기관지 부위에 침착 가능한 이온성분의 평균농도는  $13.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 상기도보다 약 2.1배 높은 것으로 나타났다. 이온성분별로는  $\text{NO}_3^-$ 와  $\text{Ca}^{2+}$ 가  $4.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 과  $3.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 수용성 이온의 30.1%와 25.8%를 점유하였다. 폐포에 침착 가능한 이온성분의 평균농도는  $23.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, 이것은 흡입성의 전 입경 범위에 존재하는 이온의 54.1%에 이

**Table 2.** PM mass and water-soluble ion concentration in atmospheric particulate matters that can deposit into the nasopharyngeal region (NP), tracheobronchial region (TB), and alveolar region (AL) of human respiratory tract

	PM										Σ Ion
		Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>		
		μg m <sup>-3</sup>									
Asian Dust Event	NP	128.8± 80.6	0.52±0.32	1.37±1.03	1.21± 0.91	0.23±0.19	0.45±0.26	0.21±0.10	0.25±0.16	2.17±1.60	6.42± 4.57
	TB	216.5±102.4	1.11±0.67	4.00±2.65	2.31± 1.36	0.67±0.55	1.05±0.37	0.34±0.17	0.39±0.23	3.44±1.99	13.31± 8.00
	AL	89.6± 23.8	1.03±0.04	4.19±1.87	11.46± 5.50	0.55±0.44	3.53±1.58	0.80±0.42	0.40±0.21	1.33±0.53	23.29±10.58
	IN	435.0±206.8	2.66±1.03	9.57±5.56	14.98± 7.76	1.46±1.18	5.02±2.21	1.34±0.69	1.05±0.60	6.94±4.12	43.02±23.15
	AL/IN	0.21	0.39	0.44	0.76	0.38	0.70	0.59	0.39	0.19	0.54
non-Asian Dust Event	NP	8.4± 3.9	0.24±0.17	0.50±0.26	0.20± 0.09	0.12±0.08	0.06±0.05	0.01±0.02	0.07±0.02	0.32±0.13	1.53± 0.37
	TB	9.5± 2.1	0.46±0.39	1.16±0.33	0.39± 0.18	0.34±0.24	0.16±0.09	0.04±0.01	0.09±0.02	0.39±0.19	3.04± 0.72
	AL	38.5± 27.8	0.95±0.66	6.45±6.32	12.08±10.29	0.33±0.11	5.08±4.52	0.52±0.48	0.14±0.06	0.37±0.13	25.92±21.97
	IN	56.5± 26.9	1.65±0.62	8.11±6.77	12.67±10.52	0.80±0.36	5.30±4.63	0.58±0.47	0.30±0.09	1.08±0.36	30.49±22.17
	AL/IN	0.68	0.57	0.80	0.95	0.42	0.96	0.90	0.46	0.34	0.85

른다. 폐포 부위에 영향을 줄 수 있는 이온성분은 단위체적의 공기량을 기준으로 할 때 상기도와 기관 및 기관지 부위에 비해 각각 약 4배와 2배 많은 것으로 나타났다. 이온성분별로는  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$  및  $\text{NH}_4^+$ 의 평균 농도가 각각 11.5, 4.2 및 3.5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 수용성 이온의 49.2%, 18.0% 및 15.2%를 점유하는 주성분이었으며, 이것은 호흡기로 유입되는 농도의 76.5%, 43.8% 및 70.3%에 해당하였다.

비행사 발생시 인체 흡입성 이온성분의 평균농도는 30.5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ 의 농도가 각각 12.7, 8.1, 5.3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 수용성 이온의 41.6, 26.6, 17.4%를 점유하는 주성분이었다. 호흡기 침착부위에 따른 농도분포를 살펴보면 비인두의 상기도 부위에 침착 가능한 이온성분의 경우 평균농도는 1.53  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며,  $\text{NO}_3^-$ 와  $\text{Ca}^{2+}$ 의 농도가 각각 0.5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 0.3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 수용성 이온의 32.7%와 20.9%의 높은 점유율을 나타내었다. 기관 및 기관지 부위에 침착 가능한 이온성분의 평균농도는 3.0  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 상기도보다 약 2배 높은 것으로 나타났다. 이온성분별로는  $\text{NO}_3^-$ 와  $\text{Cl}^-$ 가 1.2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 0.5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 수용성 이온의 38.2%와 15.1%를 점유하였다. 그러나 폐포에 침착 가능한 이온성분의 평균농도는 25.9  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, 이것은 흡입성의 전입경범위에 존재하는 이온의 85.0%에 이른다. 이것은 단위체적의 공기량을 기준으로 할 때 상기도와 기관 및 기관지 부위에 비해 각각 약 17배와 9배 높은 수준이었다. 이온성분별로는  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$  및  $\text{NH}_4^+$ 의 평균농도가 각각 12.1, 6.5 및 5.1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 수용성 이온의 46.6, 24.9 및 19.6%를 점유하는 주성분이었으며, 이것은 호흡기로 유입되는 수용성 이온의 95.3, 79.5 및 95.8%인 것으로 파악되었다.  $\text{K}^+$ 의 경우 0.52  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 수용성 이온의 2.0%로 미량이지만 폐포에 침착 가능량이 89.7%로 높은 점유율을 나타내었다. 여기에서 폐포 부위에 고농도를 나타내는  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$  및  $\text{NH}_4^+$ 와 미량이지만 폐포 부위에서 상대적으로 높은 점유율을 보인  $\text{K}^+$ 의 경우 공통적인 발생원 특성을 갖는다. 즉, 이들 이온성분들의 경우 대부분이 화석연료의 연소와 같은 인위적인 오염발생원과 토양 등의 자연발생원에서 배출된 기체상의 1차 대기오염물질이 대기중에서 입자상 대기오염물질로 전환되어 생성되는 것으로 알려져 있다(Park et al., 2004; Seinfeld, 1986; Godish, 1985). 미세입자 영역의  $\text{K}^+$ 는 바이오매스 연소(biomass burning)에 의한 것으로 보고되었다(Artaxo et al., 1990; Cooper, 1980). 반면에  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ 의 경우 폐포에 침착 가능한 농도도 낮고 점유율 또한 다른 이온성분에 비해 미비한 수준인 것으로 나타났는데, 이들

이온성분의 경우 주로 토양이나 해양기원에 의한 1차 오염물질에 기인한 것으로 알려져 있다(Park et al.,

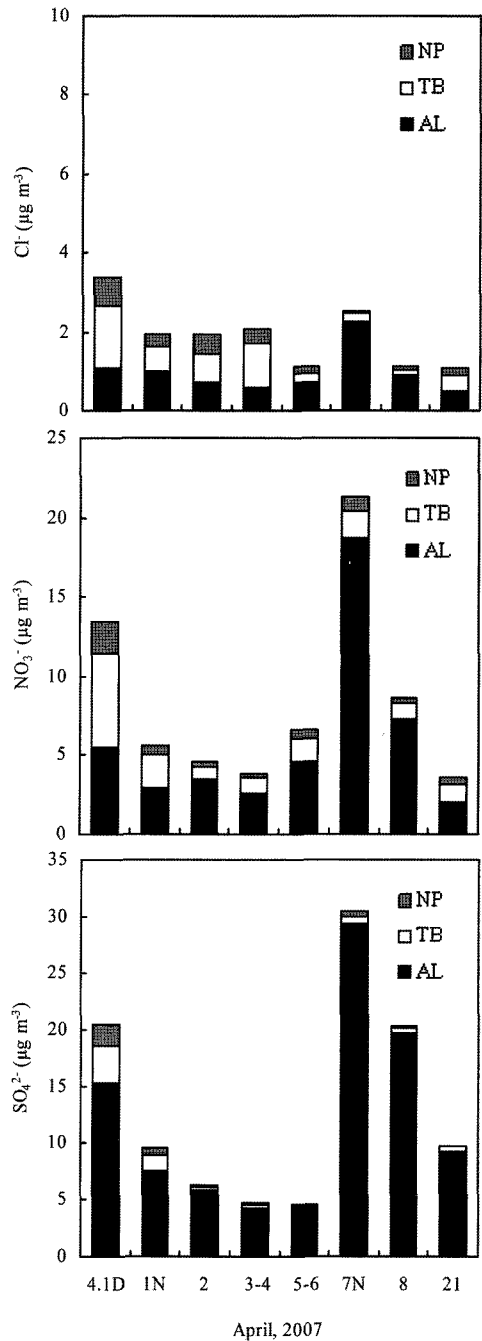
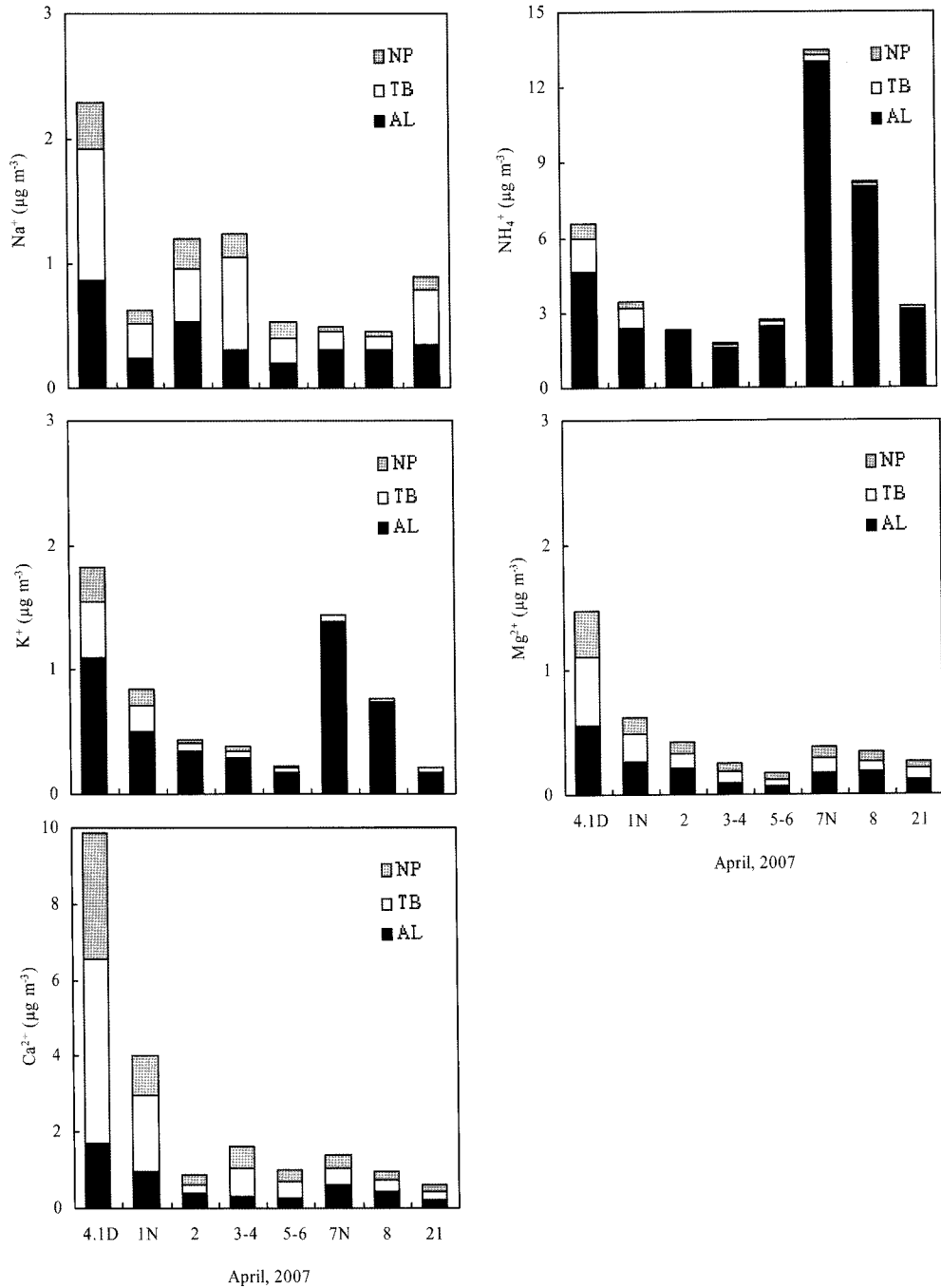


Fig. 7. Temporal variation of anion concentrations of PM samples that can deposit in the nasopharyngeal region (NP), tracheobronchial region (TB), and alveolar region (AL) of human respiratory tract.



**Fig. 8.** Temporal variation of cation concentrations of PM samples that can deposit in the nasopharyngeal region (NP), tracheobronchial region (TB), and alveolar region (AL) of human respiratory tract.

2004; Seinfeld, 1986; Godish, 1985).

Fig. 7과 Fig. 8은 호흡기 침착부위에 따른 대기 중 음이온 성분과 양이온 성분의 농도분포를 시료채취일

에 따라 나타낸 것이다. 여기에서 호흡기 침착부위에 따른 이온성분들의 농도분포는 황사와 비황사시에 따라 뚜렷한 차이를 보이고 있다. 황사시에는 모든 이온

성분이 비인두와 기관 및 기관지 부위에 침착할 수 있는 영역에서 점유율이 증가하였으나, 비황사시의 경우 그 점유율이 감소한 반면 상대적으로 폐포 부위에 침착할 수 있는 미세입자 영역은 증가하였다. 비황사시 음이온 성분에서는  $Cl^-$ 와  $NO_3^-$ 의 경우 대부분이 호흡기 전 영역에 걸쳐 침착이 가능한 입경분포를 보이고 있으나,  $SO_4^{2-}$ 의 경우 그 대부분이 폐포 부위에 침착할 수 있는 미세입자 영역에 존재하는 것으로 나타났다. 양이온 성분에서는  $Na^+$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ 의 경우 기관 및 기관지 부위를 중심으로 비인두와 폐포 부위에 침착하는 것으로 나타났다. 그러나  $NH_4^+$ 와  $K^+$ 의 경우  $SO_4^{2-}$ 와 같이 미세입자로 존재하기 때문에 그 대부분이 폐포 부위에 침착하는 것으로 나타났다. 또한 이들 이온 성분의 경우 일별 농도 차이가 뚜렷하고, 인위적인 오염발생원과 밀접한 관련이 있는  $SO_4^{2-}$ 의 일별 농도변화 와도 유사한 추이변화를 나타내었다. 인위적인 오염발생원에 기인한 미세입자로서 주로 폐포 부위에 침착하는 것으로 나타난  $SO_4^{2-}$ ,  $NO_3^-$ ,  $NH_4^+$ ,  $K^+$ 의 경우 황사 에피소드가 발생한 경우보다 고농도  $PM_{2.5}$ 가 관측된 4월 7일에 모두 최고농도를 기록하였는데, 이것은 대기 오염물질의 인체 영향을 평가하는데 있어 매우 중요한 내용이라 하겠다. 즉, 황사현상과 같은 에피소드가 관측되지 않은 경우라 하더라도 유입되는 기류의 발원지 및 이동경로의 특성에 따라 주로 폐포 부위에 침착할 수 있는 유해한 미세입자가 다양 함유될 수 있어 비황사의 일상적인 시점에서도 환경보건학적인 관점에서 인체영향을 최소화 할 수 있는 정책적인 노력과 지속적인 대기질 관리가 필요함을 시사하고 있다.

#### IV. 결 론

2007년 봄 익산지역의 황사 에피소드를 중심으로 입자의 크기분포에 따른 대기먼지의 중량농도와 수용성 이온성분을 측정하고 기류의 역학적 분석을 실시하여 황사와 비황사시 대기먼지의 입경별 농도 특성을 해석 하였다. 또한 황사 에피소드와 비황사시에 대기먼지의 입경분포에 따른 잠재적인 건강영향을 평가하고자 인체 호흡기내 주요 부위별 침착가능성을 고려하여 먼지 입자의 크기분포에 따른 침착부위별 대기먼지농도를 산출하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 황사 발생시 입경별 대기먼지 농도는  $PM_{10-2.5} > PM_{over-10} > PM_{2.5}$  순으로  $PM_{2.5}$ 가  $PM_{10}$ 의 38.1%이었으나, 비황사시에는  $PM_{2.5} > PM_{10-2.5} \approx PM_{over-10}$  순으로  $PM_{2.5}$ 가  $PM_{10}$ 의 66.2%를 점유하였다. 황사 에피소드가 관측된 4월 1일 낮 시료의  $PM_{2.5}$ 는 비황사시의 8배 수

준이었으며,  $PM_{10-2.5}$ 와  $PM_{over-10}$ 의 경우 비황사시의 24 배 수준이었다.

2. 황사 발생시 대기먼지의 입경분포는 미세입자에 비해 조대입자 영역에서 상대적으로 높은 피크를 보이고 있으나, 수용성 이온성분의 경우 1~2  $\mu m$ 를 경계로 비교적 뚜렷한 이산형 분포를 나타내었다.  $SO_4^{2-}$ ,  $NH_4^+$ ,  $K^+$  등은 미세입자 영역에서 상대적으로 높은 피크를 갖는 반면,  $NO_3^-$ ,  $Cl^-$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $Mg^{2+}$  등은 조대입자 영역에서 높은 피크를 나타내었다. 비황사시 경우  $PM_{2.5}$ 의 농도수준에 따라 서로 다른 입경분포를 나타내었는데, 저농도의 경우 먼지입자와 주요 이온성분은 모두 이산형 분포를 보이고 있으나, 고농도의 경우 모두 미세입자 영역에서 상대적으로 높은 피크를 나타내었다. 미세먼지 영역의 고농도 발생은 공기의 역학적 분석결과 중국에서 장거리 이동된 대기오염물질에 의한 영향으로 나타났다.

3. 인체의 침착부위별 크기분포에 따른 대기 중 먼지 입자는 황사발생시의 경우 기관 및 기관지 부위에 침착할 수 있는 크기분포가 약 50%로 가장 높은 점유율을 보인 반면, 비황사시의 경우 주로 폐포 부위에 침착할 수 있는 대기먼지가 인체 호흡기내 침착특성을 주도하는 것으로 나타났다. 수용성 이온성분은 비황사시의 경우 폐포 부위에 침착할 수 있는 크기분포가 주도 하였으나, 황사발생시에는 비인두와 기관 및 기관지 부위에 침착할 수 있는 크기분포가 비황사시에 비해 상대적으로 증가하는 경향을 나타내었다.

#### 감사의 글

본 연구는 2008학년도 원광보건대학 교내연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 논문에 사용된 역학적 분석은 READY website(<http://www.arl.noaa.gov/ready.html>)의 HYSPLIT-4 모델에 의한 것으로 이를 제공한 NOAA Air Resources Laboratory(ARL)에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- Artaxo, P., Maenhaut, W., Storms, H. and van Grieken, R. : Aerosol characteristics and sources for the Amazon basin during the wet season. *Journal of Geophysical Research* **95**, 16971-16985, 1990.
- Asian dust center, [http://www.kma.go.kr/dust/dust\\_02\\_01.jsp](http://www.kma.go.kr/dust/dust_02_01.jsp), 2009.
- Chang, J. H., Chu, J. K., Lee, K. E., Han, J. Y., Kim, C. W., Park, J. W., Hong, C. S., Min, P. K. and Yun, Y. J. : Effects of yellow sand on respiratory symptoms

- and diurnal variation of peak expiratory flow in patients with bronchial asthma. *Journal of Asthma Allergy Clinical Immunology*, **21**(6), 1179-1186, 2001.
- Chen, Y. S., Sheen, P. C., Chen, E. R., Wu, T. N. and Yang, C. Y. : Effects of Asian dust storm events on daily mortality in Taipei, Taiwan. *Environmental Research*, **95**(2), 151-155, 2004.
- Cheng, Z. L., Lam, K. S., Chan, L. Y., Wang, T. and Cheng, K. K. : Chemical characteristics of aerosols at coastal station in Hong Kong. I. Seasonal variation of major ions, halogens and mineral dusts between 1995 and 1996. *Atmospheric Environment*, **34**, 2771-2783, 2000.
- Cooper, J. A. : Environmental impact of residential wood combustion emissions and its implications. *Journal of Air Pollution Control Association*, **8**, 855-861, 1980.
- Draxler, R. R. and Rolph, G. D. : HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) Model access via NOAA ARL READY Website (<http://www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html>). NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD, 2003.
- Godish, T. : Air Quality, Lewis Publishers Inc., 39-44, 1985.
- Heyder, J. : Deposition of inhaled particles in the human respiratory tract and consequences for regional targeting in respiratory drug delivery. *Proceedings of the American Thoracic Society*, **1**, 315-320, 2004.
- Hinds, W. C. : Aerosol technology-properties, behavior, and measurement of airborne particles, John Wiley & Sons, 211-232, 1982.
- Husar, R. B., Tratt, D. B., Schichtel, B. A., Falke, S. R., Li, F., Jaffe, D., Gasso, S., Gill, T., Laulainen, N. S., Lu, F., Reheis, M. C., Chun, Y., Westphal, D., Holben, B. N., Gueymard, C., McKendry, I., Kuring, N., Feldman, G. C., McClain, C., Frouin, R. J., Merrill, J., DuBois, D., Vignola, F., Murayama, T., Nickovic, S., Wilson, W. E., Sassen, K., Sugimoto, N. and Malm, W. C. : Asian dust events of April 1998. *Journal of Geophysical Research*, **106**, 18316-18330, 2001.
- IPCC : Climate Change 2001, The Scientific Basis. Cambridge Univ. Press., Report of the IPCC., 2001.
- Kang, G. U., Kim, N. S. and Lee, H. J. : Mass concentration and ion composition of size-segregated particulate matter during the non-Asian dust storm of spring 2007 in Iksan. *Journal of Environmental Health Sciences*, **34**(4), 300-310, 2008.
- Kang, G. U., Kim, N. S., Kim, K. S., Kim, M. K. and Lee, H. J. : Concentration characteristics of atmospheric PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, and TSP during the Asian dust storm in Iksan area. *Korean Journal of Environmental Health*, **35**(5), 408-421, 2007.
- Kim, M. Y., Cho, S. J., Kim, K. R., and Lee, M. H. : The behaviour of dust concentrations during sand storm in Seoul area. *Journal of Korean Earth Science Society*, **24**(4), 315-324, 2003.
- Kim, Y. P., Bae, G. N., Ji, J. H., Jin, H. C. and Moon, K. C. : Aerosol size distribution and composition at Kosan, Cheju island: Measurements in April 1998. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, **15**(5), 677-685, 1999.
- Kwon, H. J., Cho, S. H., Chun, Y., Lagarde, F. and Pershagen, G. : Effects of the Asian dust events on daily mortality in Seoul, Korea. *Environmental Research Section A* **90**, 1-905, 2002.
- Lee, Y. J. and Kim, H. K. : A study on the coarse particles burden to aerosol in Seoul area, *Journal of Korea Air Pollution Research Association*, **1**(1), 71-82, 1985.
- Moon, J. S., Kim, Y. S., Hong, S. C., Lee, C. M., Park, W. S. and Jeon, H. J. : A study of health effect on elementary school students of during the Asian dust. Proceeding of the 36th meeting of Korean Society for Atmospheric Environment, **3A2**, 193-194, 2003.
- MOE homepage, [http://www.me.go.kr/kor/notice/notice\\_02.jsp](http://www.me.go.kr/kor/notice/notice_02.jsp), 2009.
- Nag, S., Gupta, A. K. and 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.
- 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.
- Park, S. H., Song, C. B., Kim, M. C., Kwon, S. B. and Lee, K. W. : Study on size distribution of total aerosol and water-soluble ions during dust storm event at Jeju island, Korea. *Environmental Monitoring and Assessment*, **93**, 157-183, 2004.
- Rolph, G. D. : Real-time Environmental Applications and Display System (READY) Website (<http://www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html>). NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD, 2003.
- Seinfeld, J. H. : Atmospheric chemistry and physics of air pollution, Wiley Interscience, New York, NY, 1986.
- Sutherland, J. W. : <http://www.mfg.mtu.edu/cyberman/index.html>, 2007.
- Svartengren, M., Anderson, M., Philipson, K. and Camner, P. : Human lung deposition of particles suspended in air or in helium/oxygen mixture. *Experimental Lung Research*, **15**(4), 575-585, 1989.
- Wakamatsu, S., Utsunomiya, A., Han, J. S., Mori, A., Uno, I. and Uehara, K. : Seasonal variation in atmospheric aerosols concentration covering northern Kyushu, Japan and Seoul, Korea. *Atmospheric Environment*, **30**, 2343-2354, 1996.