



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

碩士學位論文

2010년 봄철 제주지역 황사의
입경별 화학조성 특성



濟州大學校 大學院

化學科

吳容壽

2011年 2月

2010년 봄철 제주지역 황사의 입경별 화학조성 특성

指導教授 姜 昌 禧

吳 容 壽

이 論文을 理學 碩士學位 論文으로 提出함

2011年 2月

吳容壽의 理學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 _____ ㉠

委 員 _____ ㉠

委 員 _____ ㉠

濟州大學校 大學院

2011年 2月

Characteristics of Chemical Composition of
Size-segregated Asian Dusts Particles at Jeju
Island in Spring 2010

Yong-Soo Oh
(Supervised by professor Chang-Hee Kang)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement
for the degree of Master of Science

2011. 2.

This thesis has been examined and approved.

DEPARTMENT OF CHEMISTRY
GRADUATE SCHOOL

JEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

ABSTRACT	iii
List of Tables	iv
List of Figures	v
I. 서 론	1
II. 연구 방법	4
1. 측정소 설비 및 측정기기	4
1) 측정소 설비	4
2) 측정기기	4
2. 대기 에어로졸 시료의 채취 및 분석	7
1) 대기 에어로졸 시료 채취	7
2) 수용성 성분 분석	9
3) 원소 성분 분석	10
III. 결과 및 고찰	12
1. 황사의 발생 및 영향	12
1) 황사의 발생 및 영향	12
2) 2010년 봄철의 황사 발생	14
2. 대기 에어로졸 이온성분의 농도	18
1) 이온성분의 농도 및 조성	18
2) 황사와 비황사 입자의 이온 농도 비교	22
(1) TSP 에어로졸의 황사, 비황사 이온농도 비교	22
(2) PM ₁₀ 에어로졸의 황사, 비황사 이온농도 비교	27
(3) PM _{2.5} 에어로졸의 황사, 비황사 비교	36
3. 황사 에어로졸의 입경별 조성 특성	41
1) 황사입자의 입경별 이온성분 농도	41

2) 황사와 비황사 이온성분 농도 비교	53
4. 에어로졸의 수농도 측정	61
1) 에어로졸의 수농도 특성	61
2) 황사와 비황사 시 에어로졸 수농도 비교	62
IV. 결 론	67
V. 참 고 문 헌	69



Abstract

The size-segregated atmospheric aerosols have been collected at Jeju island during March to May of 2010, and analyzed in order to investigate the characteristics as well as their composition changes during Asian Dust and Non-Asian Dust events. It was identified that the heaviest Asian dust occurred on the 20th of March and it had moved in Jeju area after originated in Mogolian desert and passed through the eastern China. During the Asian dust event on March 20~21, the nss-Ca²⁺ concentration in TSP aerosols was 7.72 µg/m³ which was 10.8 times higher compared to those of Non-Asian dust periods. And the concentrations of nss-Ca²⁺, NO₃⁻, Al, Ca, Fe in PM₁₀ were 17.5, 1.8, 9.3, 8.6, 8.6 times higher, showing 11.08, 8.68, 11.91, 4.42, 9.89 µg/m³, respectively. Furthermore, the concentrations of nss-Ca²⁺, nss-SO₄²⁻, NO₃⁻ in PM_{2.5} increased 16.3, 1.1, 2.1 times showing 1.11, 7.47, 4.70 µg/m³, respectively. From the comparison of size-segregated aerosol compositions, the concentration ratios of anthropogenic nss-SO₄²⁻, NO₃⁻, and S between Asian dust and Non-Asian dust events were 1.0, 2.7, 1.4 in fine particles, and 8.4, 2.9, 13.3 in coarse particles, respectively. Meanwhile, those of soil originated nss-Ca²⁺, Al, Ca, Fe were 5.3, 3.8, 12.4, 14.2 in fine particles, and 49.0, 15.2, 10.2, 15.0 in coarse particles, respectively. The number concentrations of 0.8~6.5 µm ranged particles increased highly during the first Asian dust event, even though those of 0.25~0.8 µm ranged particles did not show a noticeable change. During the second Asian dust event, the number concentrations of 0.25~0.28 µm ranged particles increased 1.6 times and those of 20.0~25.0 µm increased 30.2 times compared to those during other Non-Asian dust events.

List of Tables

Table 1. Instrumental detection limit (IDL) and coefficient of variation (CV) for ion chromatography analysis.	10
Table 2. Instrumental condition and instrumental detection limits (IDL) for ICP-OES analysis.	11
Table 3. Concentration of ionic components of TSP, PM ₁₀ and PM _{2.5} aerosols during the spring season of 2010.	20
Table 4. Concentration of ionic components in TSP aerosols during the spring season of 2010.	25
Table 5. Concentration of ionic components of PM ₁₀ aerosols during the spring season of 2010.	29
Table 6. Concentration of elemental components of PM ₁₀ aerosols during the spring season of 2010.	33
Table 7. Concentration of elemental components of PM _{2.5} aerosols during the spring season of 2010.	38
Table 8. Concentrations of size-segregated Asian Dust particles during the first Asian Dust event (March 13~15, 2010).	47
Table 9. Concentrations of size-segregated Asian Dust particles during the second Asian Dust event (March 20~21, 2010).	48
Table 10. Component concentrations of Asian Dust and Non-Asian Dust particles <i>period</i>	57
Table 11. Number concentration of size-segregated atmospheric aerosols during Asian Dust and Non-Asian Dust event periods.	64

List of Figures

Figure 1. 5-Day backward trajectories for the first Asian Dust event on March 15, 2010 in Jeju.	15
Figure 2. 5-Day backward trajectories for the second Asian Dust event on March 20, 2010 in Jeju.	16
Figure 3. Satellite Photograph for the second Asian Dust event on March 20, 2010 in Jeju.	17
Figure 4. Comparison of ionic concentrations in TSP, PM ₁₀ and PM _{2.5} aerosols.	21
Figure 5. Composition ratio of ionic components in TSP, PM ₁₀ and PM _{2.5} aerosols.	21
Figure 6. Comparison of ionic concentrations in TSP aerosols for HAD, AD and NAD periods.	26
Figure 7. Composition ratio of ionic components in TSP aerosols.	26
Figure 8. Comparison of ionic concentrations in PM ₁₀ aerosols for HAD, AD and NAD periods.	30
Figure 9. Composition ratio of ionic components in PM ₁₀ aerosols.	30
Figure 10. Comparison of elemental concentrations in PM ₁₀ aerosols for HAD, AD and NAD periods.	34
Figure 11. Comparison of ionic concentrations in PM _{2.5} aerosols.	39
Figure 12. Composition ratio of ionic components in PM _{2.5} aerosols.	39
Figure 13. Size distribution of mass and ionic concentrations of size-segregated particles during the first Asian Dust event (March 13~15, 2010).	49
Figure 14. Size distribution of elemental concentrations of size-segregated particles during the first Asian Dust event (March 13~15, 2010).	

.....	50
Figure 15. Size distribution of mass and ionic concentrations of size-segregated particles during the second Asian Dust event (March 20~21, 2010).	51
Figure 16. Size distribution of elemental concentrations of size-segregated particles during the second Asian Dust event (March 20~21, 2010).	52
Figure 17. Size distribution of mass and ionic concentrations of size-segregated particles for Asian Dust and Non-Asian Dust periods.	58
Figure 18. Size distribution of elemental concentrations of size-segregated particles for Asian Dust and Non-Asian Dust periods.	59
Figure 19. Size distribution of composition concentrations in atmospheric aerosols for the first Asian Dust period.	60
Figure 20. Size distribution of composition concentrations in atmospheric aerosols for the second Asian Dust period.	60
Figure 21. Size distribution of composition concentrations in atmospheric aerosols for Non-Asian Dust period.	60
Figure 22. Number concentrations of size-segregated Asian Dust and Non-Asian Dust particles.	65
Figure 23. Size distribution of number concentrations of size-segregated Asian Dust and Non-Asian Dust particles.	65
Figure 24. Mass concentrations of PM ₁₀ , PM _{2.5} and PM _{1.0} aerosols calculated from the number concentrations during Asian Dust and Non-Asian Dust periods.	66

I. 서 론

황사는 연강수량 400 mm 이하이고, 사막이 대부분인 중국의 서북 건조지역에서 발원된다. 황사는 주로 중국의 타클리마칸, 고비, 알라산 사막과 황하강 유역의 황토고원 등에서 발생되고 있으며, 직경 0.002~0.05 mm의 작은 모래먼지가 강한 바람에 실려 100~200만톤씩 비산된 후 편서풍을 타고 이동하는 현상이다(전영신 등, 1999). 황사는 대기 중에서 응결핵과 빙정핵으로 작용하여 구름물리에 영향을 주고, 태양 복사선을 흡수, 산란시켜 일사량을 감소시키거나 직접적으로 식물의 기도를 막아 광합성을 방해한다(Arao and Ishizaka, 1986). 그리고 기관지염, 천식, 안질, 알레르기 등의 질환을 유발하며, 다양한 오염물질이나 중금속 등을 흡착할 수 있고, 아황산가스를 산화시키는 촉매 역할을 할 수도 있다.

황사현상은 주로 3월과 5월 사이에 일어나며 4월중에 1/3~1/2의 빈도로 발생하고, 1990년대 말 이후에는 12월과 1월에도 자주 관측되고 있다. 이 때 지표면에서의 풍속은 12~20 m/s 정도이고, 40~50 m/s 제트기류도 황사를 운반하는데 크게 기여하고 있는 것으로 알려져 있다. 황사현상은 대개 1~3일 정도 지속된 후 양쯔강 부근에서 생긴 이동성 고기압이나 북태평양에서 확장된 고기압에 밀려 소멸되며, 심한 경우 일주일 이상 지속되기도 한다.

최근에 황사가 심화되고 있는 원인을 살펴보면, 첫째로 기상 이변에 대한 측면을 생각해 볼 수 있다. 우선 지구 온난화 현상에 따른 기온 상승으로 겨울철 토양의 해동 시간이 빨라지고, 토양 수분 증발의 가속화로 표토 층이 건조해지고 있다. 또한 중국 북방 지역의 강수량 감소로 인해 토양이 그대로 바람에 노출되고 있다. 그리고 내몽고에서 동북 일대에 이르는 온대 편서풍이 현저히 증가하여 토양이 쉽게 강풍에 비산되는 결과를 초래하고 있다. 둘째로는 도시먼지이다. 도시의 건축 시공, 지면 노출, 흙모래 퇴적 등은 강풍의 작용과 차량 운행으로 인해 먼지를 발생한다. 더욱이 석탄 연소와 자동차 배기가스로 인한 연기와 분진 등이 황사 오염을 가중시키고 있다. 셋째는 토지 사막화를 중심으로 하는 생태계 파괴이다. 물론 황사를 야기하는 직접적 요인은 기상 이변에서 찾을 수 있겠지만, 그 심층적 원인은 중국 서북과 화북 지역의 무분별한 삼림 벌채, 그리고 과

도한 자원 개발과 방목 등으로 인한 토지 사막화의 확대에 있다고 보인다. 즉, 토지 사막화의 만연과 확장은 바로 황사의 끊이지 않는 원천이며, 최근 들어 황사의 빈번한 발생은 나날이 심각해지는 중국 서북 지역의 사막화에서 그 근본적 원인을 찾을 수 있다(원동욱, 2001). 특히 중국의 경우 목축 및 경작 등의 인간활동으로 인한 사막화가 1950년대부터 1980년대까지 급격하게 진행되어 왔다. 1990년대의 사막화 저지 운동으로 부분적인 감소 추세를 보였으나 최근 일부지역에서 다시 증가하고 있다(이강원 등, 2005). Wang .(2004)의 연구에 의하면, 중국에서 50년간 발생한 황사일수가 1950년대에는 평균 5회이었으나 1990년대에는 23회로 급증한 것으로 나타나고 있다(Wang *et al.*, 2004).

우리나라에서도 황사 발생이 꾸준히 증가하고 있으며, 특히 중부지방에서 강한 황사의 빈도 증가하고 있다(이승호 등, 2006). 2002년 3월에는 매우 강한 황사가 발생하여 초등학교 휴교, 항공기 결항, 호흡기 질환 급증, 반도체 등 정밀산업체 공장의 휴업 등과 같은 심각한 피해가 발생하였다. 특히 2010년 3월에는 최근 들어 가장 강한 황사현상이 나타났고, 수도권에서 20일 오후 19시에 PM₁₀ 미세먼지의 시간 최고농도가 523 $\mu\text{m}/\text{m}^3$, 남부권에서는 20일 오후 22시에 1,865 $\mu\text{m}/\text{m}^3$ 까지 상승하였다(국립환경과학원, 2010).

기상청에서는 이러한 황사에 대비하기 위하여 2002년 4월에 황사특보제를 신설하여 시행하고 있다. 황사예보 기준은 약한 황사(400 $\mu\text{m}/\text{m}^3$ 미만), 강한 황사(400~800 $\mu\text{m}/\text{m}^3$), 매우 강한 황사(800 $\mu\text{m}/\text{m}^3$ 이상)로 구분하고 있다. 그리고 1시간 평균 PM₁₀ 미세먼지농도가 400 $\mu\text{m}/\text{m}^3$ 이상으로 2시간 이상 지속되면 황사 주의보, 800 $\mu\text{m}/\text{m}^3$ 이상으로 2시간 이상 지속되면 황사경보 등의 특보를 발령하고 있다(Asian dust center, 2009). 이처럼 황사 현상은 직접적으로 인체 건강 및 산업 활동에 영향을 줄 뿐만 아니라 시정, 지구기후변화에도 크게 영향을 미치는 것으로 나타나고 있어서 집중적인 연구 및 관리가 필요하다.

중국과 몽골의 사막 지대에서 발생한 황사는 장거리 이동하여 우리나라, 일본에 직접적인 영향을 주고 있으며, 최근에는 북미대륙까지 이동하는 것으로 밝혀져 범지구적인 문제로 부각되고 있다(최순호 등, 2009; Husar, 2001). 특히 미세먼지는 대기 중에 장기간 체류하기 때문에 발생원으로부터 수백~수천 km까지 장거리 이동(long-range transport)이 가능하다. 이와 같이 황사의 발생과 그 피

해에 대한 관심이 고조되면서 황사의 장거리 이동현상을 체계적으로 규명하기 위한 연구들이 집중적으로 이루어지고 있다(Fang *et al.*, 2002; Chun *et al.*, 2001). 동아시아 지역에서 대기오염물질의 장거리 이동현상을 규명하기 위한 지상관측소로 국내에서는 제주지역이 적합한 것으로 평가되고 있다. 제주도는 자체 오염원의 방해가 없는 국내 청정지역이라서 순수하게 장거리 이동되는 오염물질의 양을 측정하기에 적합하기 때문이다. 최근에 황사를 비롯한 대기 입자상 물질의 장거리 이동과 관련하여 제주도에서 수행된 국제연구로는 2001년에 수행된 'ACE(Aerosol Characterization Experiment)-Asia'가 있다(Huebert *et al.*, 2003; ACE-Asia Project Prospectus, 2001). 또 2005년 3월부터는 남아시아 지역에서 발생하는 대기오염물질의 장거리 이동을 연구하기 위한 ABC 프로젝트가 UNEP의 주관 하에 진행 중에 있다(Atmospheric Brown Clouds Gosan Campaign, 2007; 강창희 등, 2007; 송미정 등, 2006; 문광주 등, 2006).

본 연구에서는 제주도 배경지역에서 황사를 입자크기별로 채취하여 구성 성분을 분석함으로써 황사의 입경별 화학조성을 확인하고, 오염특성을 조사하고자 하였다. 이를 위해 2010년 봄철에 발생한 강한 황사를 사례로 대기 입자상 물질을 입자크기별로 채취하였고, 이들의 입경별 화학조성을 분석하였다. 그리고 분석 결과로부터 황사와 비황사 입자의 화학 조성을 비교하였고, 황사의 입경별 오염 특성을 다양한 방법으로 조사하였다. 이러한 연구는 장거리 이동에 의해 아시아 대륙으로부터 한반도로 유입되는 황사와 여러 오염물질의 영향을 평가하는데 필요한 중요한 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

II. 연구 방법

1. 측정소 설비 및 측정 기기

1) 측정소 설비

측정소는 제주도 북제주군 한경면 고산리 소재 수월봉(33°28' N, 127°17' E)에 컨테이너를 설치하여 마련하였다. 고산 측정소는 바다와 바로 인접해 있으며 제주 고층 레이다 기상대로부터 서쪽 방향으로 약 300 m 떨어져 있는 해발 72m의 언덕위에 설치되어 있다. 측정소 컨테이너 내부에 측정 기기를 탑재하고 기기작동에 적합한 온도와 습도 등을 유지시키면서 장기간 동안 측정 기기를 원활하게 가동시키기 위해 실내에 에어컨과 제습기를 설치하여 항온, 항습을 유지하였다. 또한 전원은 AVR을 사용하여 안정한 전원을 공급시켰다. Cascade Impactor 시료와 수농도는 부분적으로 제주대학교 자연과학대학 건물 옥상(33°26' N, 126°33' E, 해발 330m)에서 채취하였다.

2) 측정기기

(1) High Volume Tape Sampler

대기 중의 TSP 시료는 일본 KIMOTO Electric사에서 제작한 high volume air sampler(KIMOTO Electric CO., 모델 195A, Japan)를 사용하여 채취하였다. 이 sampler는 롤테입 테프론 필터(Sumitomo Electric, PTFE, 100 mm × 10 m)를 사용하여 연속적으로 시료를 채취할 수 있는 자동시스템이며, 시료의 채취시간을 임의로 조절할 수 있다. High Volume Tape Sampler 는 측정소의 컨테이너 내부에 탑재한 흡입관(길이 7 m, 내경 38 mm flexible hose) 컨테이너의 천장 측면을 관통시켜 지상 6 m 높이의 에어로졸이 효과적으로 포집될 수 있도록 설치하였다. 이 때 흡입 공기의 유속은 초기속도가 대략 170 L/min이 되도록 조정하였다.

(2) PM₁₀ Air Sampler

입자크기가 10 μm 이하인 PM₁₀ 미세입자는 PM₁₀ Sequential Air Sampler를 사용하여 채취하였다. PM₁₀ Sequential Air Sampler는 국내 APM Engineering사에서 제작한 모델 PMS-102를 사용하였고, 고산 측정소에 설치한 컨테이너 옥상에 설치하여 가동하였다. PM₁₀ 미세입자 시료 채취 시 공기 유속은 MFC가 부착된 자동 시스템을 사용하여 초기부터 종료 시까지 지속적으로 16.7 L/min을 유지하였다.

(3) PM_{2.5} Air Sampler

입자크기가 2.5 μm 이하인 PM_{2.5} 미세입자는 PM_{2.5} Sequential Air Sampler를 사용하여 채취하였다. PM_{2.5} Sequential Air Sampler는 국내 APM Engineering사에서 제작한 모델 PMS-103를 사용하였고, 고산 측정소에 설치한 컨테이너 옥상에 설치하여 가동하였다. PM_{2.5} 미세입자 시료 채취 시 공기 유속은 MFC가 부착된 자동 시스템을 사용하여 초기부터 종료 시까지 지속적으로 16.7 L/min을 유지하였다.

(4) Cascade Impactor

Cascade Impactor는 8-stage non-viable type (Thermo Andersen, 모델 20-800, USA)을 사용하였다. Cascade Impactor는 입자크기에 따라 inlet (9.0 μm 이상), 1단(5.8~9.0 μm), 2단(4.7~5.8 μm), 3단(3.3~4.7 μm), 4단(2.1~3.3 μm), 5단(1.1~2.1 μm), 6단(0.65~1.1 μm), 7단(0.43~0.65 μm)의 총 8단계로 분리, 채취할 수 있도록 구성되어 있다. 그리고 시료채취 시 유량은 28.3 L/min이다.

(5) Aerodynamic Particle Sizer Spectrometer

에어러솔 수농도는 공기역학계수기(APS, Aerodynamic Particle Sizer Spectrometer)를 사용하여 5분 간격으로 실시간 측정하였다. APS (Grimm Aerosol Technik GmbH & Co., 모델 #179/#365 Spectrometer, Germany)는 입경범위 0.25~32 μm , 31-channel, 수농도 범위 0.1~1,500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 측정이 가능한 광산란 분광기 방식의 수농도 측정기이다.

(6) Ion Chromatograph

주요 이온 성분들은 Metrohm사의 Ion Chromatograph (모델 Modula IC)을 사용하여 분석하였다. 이 때 주요 양이온(NH_4^+ , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) 분석에는 Metrohm Metrosep Cation C-4-150 분리관, 음이온(SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^-) 분석에는 Metrohm Metrosep A-SUPP-5 분리관을 사용하였다.

(7) Inductively Coupled Plasma Spectrophotometer

에어로졸의 원소 성분(Al, Fe, Ca, Na, K, Mg, S, Ti, Mn, Ba, Sr, Zn, V, Cr, Pb, Cu, Ni, Co, Mo, Cd)은 ICP-OES(Thermo Jarrell Ash, model IRIS-DUO)를 사용하여 분석하였다. ICP-OES는 simultaneous mode 가능형, radial/axial plasma 선택형이고, 40.68 MHz의 RF frequency를 조사할 수 있도록 구성되어 있다.

(8) Microwave Digestion System

에어로졸의 원소성분은 에어로졸 필터를 혼산용액에 침적시켜 마이크로파 분해 장치로 용출시켰으며, 마이크로파 분해 장치는 미국 CEM사의 model MAR-5를 사용하였다.

2. 대기 에어로졸 시료의 채취 및 분석

1) 대기 에어로졸 시료 채취

(1) TSP 에어로졸 시료 채취

TSP 에어로졸 시료는 고산측정소에서 High Volume Tape Sampler(KIMOTO Electric Co., 195A, Japan)와 롤(roll)테이프형 테프론필터(Sumitomo Electric Co., PTFE 100 mm×10 m, Japan)를 사용하여 2010년 3월부터 2010년 5월까지 24시간 단위, 3일(또는 1일) 간격으로 총 32개를 채취하였다. 이 중 강우량이 3 mm 이상인 시료 2개 제외한 30개 시료를 대상으로 분석하였고, TSP 시료 중 황사(Asian Dust) 발생일은 2010년 3월 20~21일, 2010년 5월 9~11일로 두 차례이다. 시료 채취 시 공기 유속은 대략 170 L/min이 되도록 조절하였으며, 총 공기의 유량은 기록계의 기록지에 표시된 유속 및 시간을 대조하여 계산하였다. 시료 채취용 롤테이프형 PTFE 필터는 한 개의 롤필터가 완전히 감길 때마다 샘플러로부터 필터를 분리하여 수용성 성분 분석에 이용하였다.

(2) PM₁₀ 미세먼지 시료 채취

PM₁₀ 미세먼지 시료는 제주도 고산측정소에 PM₁₀ air sampler를 설치하고 테프론 필터 (Pall Co., Zefluor™, PTFE 47 µm, 2.0 µm, USA)를 사용하여 2010년 3월부터 2010년 5월까지 24시간 단위로 총 32개를 채취하였고, 이 중 강우량이 3 mm 이상인 시료 2개 제외한 30개 시료를 대상으로 분석하였다. PM₁₀ 채취 시료 중 황사 발생일은 2010년 3월 20~21일과 2010년 5월 9~11일 두 차례이다. 시료 채취 시 공기 유속은 MFC가 부착된 자동 시스템을 사용하여 초기부터 종료 시까지 지속적으로 16.7 L/min을 유지하였다. 시료를 채취한 필터는 현장에서 air sampler와 분리하여 플라스틱 페트리디쉬 (SPL life Science, PS, 52.7x12.6 mm)에 넣어 밀봉한 후 실험실로 옮겨 건조 후 무게를 측정하였다. 이를 다시 2등분하여 이 중 한 개는 수용성 성분, 나머지 한 개는 원소성분 분석에 이용하였다.

(3) PM_{2.5} 미세먼지 시료 채취

PM_{2.5} 미세먼지 시료는 제주도 고산측정소에 PM_{2.5} air sampler를 설치하여 테프론 필터 (Pall Co., Zefluor™, PTFE 47 μm, 2.0 μm, USA)를 사용하여 2010년 3월부터 2010년 5월까지 24시간 단위로 총 32개를 채취하였다. 그리고 강우량이 3 mm 이상인 시료 1개 제외한 31개 시료를 대상으로 분석하였다. 이 중 황사 발생일은 2010년 3월 20~21일과 2010년 5월 9~11일로 두 차례이다. 시료 채취 시 공기 유속은 MFC가 부착된 자동 시스템을 사용하여 초기부터 종료 시까지 지속적으로 16.7 L/min을 유지하였다. 시료를 채취한 필터는 현장에서 air sampler와 분리하여 플라스틱 페트리디쉬 (SPL life Science, PS, 52.7x12.6 mm)에 넣어 밀봉한 후 실험실로 옮겨 건조 후 무게를 측정하였다.

(4) Cascade Impactor 에어로졸 시료 채취

입경별 에어로졸 시료는 8-Stage Cascade Impactor와 membrane filter (SIBATA, TF filter T60A20, 80 mm ø)를 사용하여 제주대학교 자연과학대학 옥상에서 황사 현상이 나타난 2010년 3월 13일~15일과 3월 21~22일, 두 차례에 걸쳐 채취하였다. 그리고 비황사(Non-Asian Dust) 시료는 2009년 4월 15일~17일, 4월 20일~22일, 4월 22일~24일에 제주도 고산측정소에서 채취한 자료를 활용하였다.

(5) 에어로졸 수농도 측정

대기 에어로졸 수농도는 Grimm Aerosol Technik GmbH & Co.의 모델 #179 분광기를 사용하여 2010년 1월 19일부터 3월 24일까지 제주대학교 자연과학대학 옥상에서 측정하였다. 수농도는 입경범위가 0.1~1,500 μg/m³이며, 총 30개 channel로 분리하여 측정하였다. APS 장비는 야외 현장에서 측정이 가능하도록 연속측정 수분제어시스템 (Environ Check In stainless steel outdoor housing, Grimm, Model #365)을 부착하였고, 0.25~32.0 μm 크기의 입자를 30개 구간으로 분리하여 단계별 수농도를 측정하였다. 이렇게 측정한 데이터는 수농도는 입경(D_p)에 대한 수농도(dN/dlogD_p) 값으로 나타내었다.

(6) 질량농도 측정

에어로졸의 질량은 시료채취 전후에 필터를 데시케이터에서 48시간(수분이 많은 경우 96시간) 동안 건조시킨 후 항량이 되었을 때 무게를 달아 그 차이를 측정하였다. 질량농도는 측정 전과 측정 후의 무게 차와 시료채취 유량을 이용하여 환산하였다. 이 때 무게측정용 저울은 ± 0.01 mg 정밀도의 미량저울(Ohaus, 모델 US/XE-610, USA)을 사용하였다.

2) 수용성 성분 분석

(1) 시료의 전처리

대기 에어로졸의 경우, 필터를 에탄올 0.2 mL로 침적시킨 후 초순수 30~50 mL를 가하여 용해시켰다. 초순수를 가한 시료 용액은 초음파 세척기에서 30분간 수용성 성분을 용출시키고, 재차 진탕기(shaker)에서 1시간 동안 수용성 성분들을 완전히 용출시켰다. 이 때 용기는 125 mL 용량의 HDPE병을 사용하였다. 용출액은 주사기필터(Whatman, PVDF syringe filter, 0.45 μ m, 13 mm)로 불용성 입자를 거른 후 여액을 양이온 및 음이온 분석용 시료로 이용하였다.

(2) 수용성 성분 분석

대기 에어로졸 수용성 성분은 이온크로마토그래피(Metrohm, Modula IC)법을 이용하여 양이온과 음이온으로 분류하여 동시에 분석하였다. NH_4^+ , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} 양이온은 Metrohm Modula IC (818 IC pump, 819 IC detector)를 사용하여 Metrohm Metrosep Cation C-4-150 컬럼, 0.9 mL/min 이하 유속, 100 μ L 주입량, 4.0 mM Nitric acid 용리액의 조건으로 분석하였다, 그리고 SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^- 음이온은 Metrohm Modula IC를 사용하여 Metrohm Metrosep A-SUPP-5 컬럼, 0.7 mL/min 유속, 100 μ L 주입량, 1.8 mM NaHCO_3 /1.7 mM Na_2CO_3 용리액, 0.2% H_2SO_4 썬프래서 용액의 조건으로 분석하였다. 본 연구에서 수용성 이온성분 분석에 사용한 IC의 검출한계와 상대표준편차(RSD%)는 Table 1 과 같다.

Table 1. Instrumental detection limit (IDL) and coefficient of variation (CV) for ion chromatography analysis.

Species	NH ₄ ⁺	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻
IDL (µg/L)	0.19	0.13	1.62	2.42	1.47	0.40	0.32	0.89
CV (%)	0.025	0.025	0.090	0.064	0.103	0.054	0.042	0.130

3) 원소 성분 분석

(1) 시료의 전처리

대기 에어로졸 시료가 채취된 필터는 비닐봉지에 밀봉하여 -20 °C 냉동고에 보관하였고, 대략 3개월 간격으로 동시에 분석하였다. 에어로졸의 원소 성분은 US EPA 'Compendium of methods for the determination of inorganic compounds in ambient air (Method IO-3)'의 방법으로 마이크로파 분해장치를 사용하여 혼산용액으로 용출시켰다. 시료가 채취된 필터를 테프론(PFA) 용기에 넣고 5.55% HNO₃ / 16.75% HCl 혼산 10 mL를 가한 후 마이크로파를 조사하여 10분 동안 온도를 180 °C로 올리고, 다시 이 온도에서 10분간 유지시킨 후 10분간 서서히 온도를 떨어뜨려 분해하였다. 마이크로파 분해를 거친 용액은 0.45 µm 필터로 여과하여 불용성 입자를 거른 후 초순수를 사용하여 최종적으로 용량플라스크에서 25 mL로 표충하여 ICP-OES 분석용 시료로 사용하였다.

(2) 원소 성분 분석

전처리를 거친 에어로졸의 원소 성분들은 ICP/OES법으로 S, Al, Fe, Ca, Mg, K, Na, Zn, Pb, Mn, Ti, Ba, Cu, Sr, V, Ni, Cr, Mo, Cd, Co 등의 원소 성분을 분석하였다. ICP 분석 시 표준용액은 AccuStandard사의 ICP용 1000 ppm 용액을 초순수와 혼산용액으로 희석하여 조제하였다. 이 때 희석용매는 매트릭스 효과를 최소화시키기 위하여 시료의 전처리 과정과 동일한 비율로 HNO₃과 HCl을 혼합한 용액을 사용하였다. 검량선 작성시 사용한 표준용액은 시료의 농도에 따라 고농도 성분들은 0.01~5.0 µg/mL, 저농도 성분들은 0.01~1.0 µg/mL 범위로 조제하였다. 이 때 20종의 원소 성분을 분석하기 위한 ICP-OES의 조건 및 검출한계는 Table 2와 같다.

Table 2. Instrumental condition and instrumental detection limits (IDL) for ICP-OES analysis.

Instrument: Thermo Jarrel Ash, Model IRIS-DUO					
RF power: 1150 W					
RF Frequency: 40.68 MHz					
Ar Flow: Carrier = 0.5 L/min, Auxiliary = 1.5 L/min, Coolant = 16.0 L/min					
Pump Rate: 100 rpm					
Operation Mode: Simultaneous or Sequential Mode					
Nublizer: Ultrasonic Nublizer (CETAC Tech., U-5000AT)					
Element	Wavelength (nm)	IDL ($\mu\text{g/L}$)	Element	Wavelength (nm)	IDL ($\mu\text{g/L}$)
Al	396.152	~1.2	Fe	259.940	~0.6
Ca	396.847	~1.8	Na	589.592	~12.9
K	766.490	~1.8	Mg	279.553	~0.9
Ti	334.941	~1.8	Mn	259.030	~0.6
Ba	233.527	~0.3	Sr	216.604	~3.9
Zn	206.200	~2.4	V	292.402	~0.6
Cr	357.869	~1.2	Pb	220.353	~1.8
Cu	324.754	~0.9	Ni	231.604	~0.6
Co	228.616	~0.6	Mo	202.032	~0.6
Cd	226.502	~1.2	S	182.034	~2.4

Ⅲ. 결과 및 고찰

1. 황사의 발생 및 영향

1) 황사의 발생 및 영향

황사는 황하유역, 중국과 몽고사막 등에서 봄철 기온이 따뜻해지면 강한 한랭 전선을 동반한 저기압이 발달할 때 그 전선 후면에 강풍과 함께 발생한 토양먼지가 편서풍을 타고 1,500~2,000 km 이상의 거리를 이동하여 우리나라, 일본 및 하와이까지 이동된다. 그러나 최근에는 일부가 태평양 상공을 통과하여 북미 내륙까지 진출하는 것으로 조사되고 있다(Lee *et al.*, 2006; Kurosaki and Mikami, 2003, 2004; Husar *et al.*, 2001; Lee *et al.*, 2006). 발원지에서 배출된 황사는 보통 30%가 발원지에서 침강되고, 20%는 주변지역으로 이동하며, 한국, 일본, 태평양에 침강되는 양은 약 50% 정도로 추정되고 있다.

우리나라에 영향을 주는 황사의 발원지는 중국의 황하유역, 오르도스사막, 타클라마칸 사막과 몽고의 고비사막, 알라산사막이나 황토고원, 내몽골고원 등이다. 이러한 흙먼지 발원지의 넓이는 사막이 48만 Km², 황토고원이 30만 km²이고 인근 모래땅까지 합하면 한반도 면적의 약 4배나 된다. 우리나라에는 주로 황토고원이나 내몽골고원에서 부유된 흙먼지가 영향을 주고 있고, 타클라마칸 사막은 한반도와 멀리 떨어져 있어서 한반도에 미치는 영향은 적은 편이다.

황사는 대기 중에서 응결핵과 빙정핵으로 작용하여 구름물이에 영향을 주고, 태양 복사선을 흡수, 산란시켜 일사량을 감소시키거나 직접적으로 식물의 기도를 막아 광합성을 방해한다(Arao and Ishizaka, 1986). 그리고 기관지염, 천식, 안질, 알레르기 등의 질환을 유발하며, 다양한 오염물질이나 중금속 등을 흡착할 수 있고, 아황산가스를 산화시키는 촉매 역할을 할 수도 있다(전영신 등, 1999).

우리나라에서는 주로 3~5월의 봄철에 황사가 관측되고 있으나 최근에는 기상변화의 영향으로 겨울, 가을철에도 황사현상이 나타나고 있다. 특히 2007년의

IPCC 보고서에 의하면 최근 100년간 북반구 고위도 지역의 기온상승이 두드러진 것으로 나타나고 있고(IPCC, 2007), 지구 온난화로 인한 황사의 발생 빈도는 더욱 증가 할 수 있을 것으로 예측되고 있다(김선영 등, 2009). 황사가 발생하면 평소에 $10\sim 50 \mu\text{m}/\text{m}^3$ 정도인 먼지농도가 $100\sim 500 \mu\text{m}/\text{m}^3$ 로 증가하며, 황사의 주성분인 Si, Al, Ca, K, Na 등의 농도가 상승한다. 일본에서 채취된 황사의 화학 조성 연구 결과를 보면, 황사는 주로 조암광물인 석영, 장석, 및 점토 광물인 이라이트로 구성되어 있다. 그리고 미조바다케, 마무로, 오오사카에서 채취한 황사 에어로졸의 입경별 원소 조성을 중성자 방사화 분석법에 의해 측정된 결과를 보면, Na, Al, K, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Rb, Cs, Ba, La, Ce, Sm, Eu, Yb, Lu, Hf, Ta, Th 등의 원소성분 농도가 황사 시에 급상승하고, Cl, Zn, As, Se, Br, Sb 등은 크게 변하지 않는 것으로 보고하고 있다. 또 이온성분들은 Cl^- 은 거의 변화가 없지만, NO_3^- , SO_4^{2-} 의 농도가 증가하는 경향을 보이고, 미세입자 중의 농도는 큰 변화가 없는데 비해 조대입자에서 농도가 증가하는 경향을 보이고 있다(http://www.metrice.kr/appliweb/res_grp/yellowsand/seminar/chun.htm).

한반도를 포함한 동북아시아 지역은 공단에서 배출되는 오염물질과 농경지 소각, 황사 등 다양한 배출원이 복합적으로 공존하기 때문에 대기 중 에어로졸의 분포가 매우 복잡하다(Bates *et al.*, 2004). 그리고 중국대륙의 풍하측에 위치한 우리나라는 황사의 영향에 따라 대기질의 특성이 크게 달라지게 된다. 이러한 대기 중 미세먼지의 효율적인 관리를 위해서는 우선적으로 그 발생원을 규명하고, 대기먼지 농도의 정량적인 측정은 물론 에어로졸의 입경분포, 화학조성 등과 같이 대기오염에 영향을 미치는 주요 인자들을 종합적으로 검토할 필요가 있다(강공언 등, 2008).

2) 2010년 봄철의 황사 발생

2010년 봄철에 제주지역에서는 전부 3차례의 황사가 발생하였다. 발생일은 3월 13~15일 (1차), 3월20~21일 (2차), 5월 9~11일 (3차)로 모두 3회이다. 이 중 3월 13~15일에 발생한 1차 황사는 3월 15일 22시에 PM_{10} 기준으로 평균 $360 \mu g/m^3$ 의 최대 질량농도를 나타내었다. 이 시기의 황사는 Figure 1의 역궤적 결과와 같이 14일에 고비사막과 중국 북부지방에서 발원하여 기압골 통과 후 북서기류를 타고 유입되었다. 이 때 역궤적 분석은 미국해양대기국(NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration)에서 제공하는 HYSPLIT4(Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory) 모델을 사용한 결과이다. 역궤적 분석에 사용한 풍향, 풍속 자료는 NOAA의 GDAS (Global Data Assimilation System)를 이용하였고, 역궤적 분석의 모사시간은 5일(120시간)로 설정하였다. 그리고 측정 지점의 좌표는 고산($33.28^{\circ}N$, $127.17^{\circ}E$)을 기점으로 선정하였고, 출발점 고도는 850 mb 면인 1500 m로 설정하였으며, 출발시간은 해당 날짜의 매 00 UTC로 정한 결과이다(국립환경과학원, 2007).

또한 3월 20일에 발생한 2차 황사는 3월 19일에 몽골에서 발원하여 남동진하는 저기압 영향으로 고비사막, 중국 북부지방과 황토고원 등을 거쳐 우리나라로 이동하였다. Figure 2는 3월 20일에 고산지역을 기점으로 기류의 이동을 앞서와 동일한 방법으로 5일간 역궤적 분석한 결과이다. 그리고 Figure 3은 기상청에서 제공한 위성사진을 나타낸 그림으로 황사가 몽골지역부터 중국 동쪽지역까지 길게 위치해 있음을 알 수 있다. 이 황사의 이동경로를 보면 20일 새벽 발해만과 중국 중부지방을 거쳐 이 날 오후에 백령도와 전남 지역을 시작으로 전국에 영향을 미쳤다. 중부와 남부지방에서도 매우 짙은 황사가 발생하였고 서울·경기지방을 시작으로 빠르게 남동진하여 전국적으로 확대되었다. 이 시기에 발생한 황사는 기상 관측 이후 최고농도를 기록하였고, 흑산도에서 역대 최고인 시간평균 $2,712 \mu g/m^3$ (3월 20일 20시)를 기록하였고, 지난 2006년 4월 8일 백령도에서 발생한 $2,371 \mu g/m^3$ 수준을 초월하였다. 본 연구를 수행한 제주도 고산지역에서는 3월20일 22시에 시간 최대 $1,789 \mu g/m^3$ 를 기록하여 기상기록 이후 최고의 농도를 나타내었다 (기상청 2010, 보도자료-2321).

또 5월 9~11일에 발생한 황사는 몽골과 내몽골에서 발생하여 북서풍을 타고

이동하여 9일부터 1일 까지 영향을 주었다. 그리고 이 때 황사의 최고농도는 11일 19시에 PM₁₀ 기준으로 시간평균 104 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 질량농도를 나타내었다.

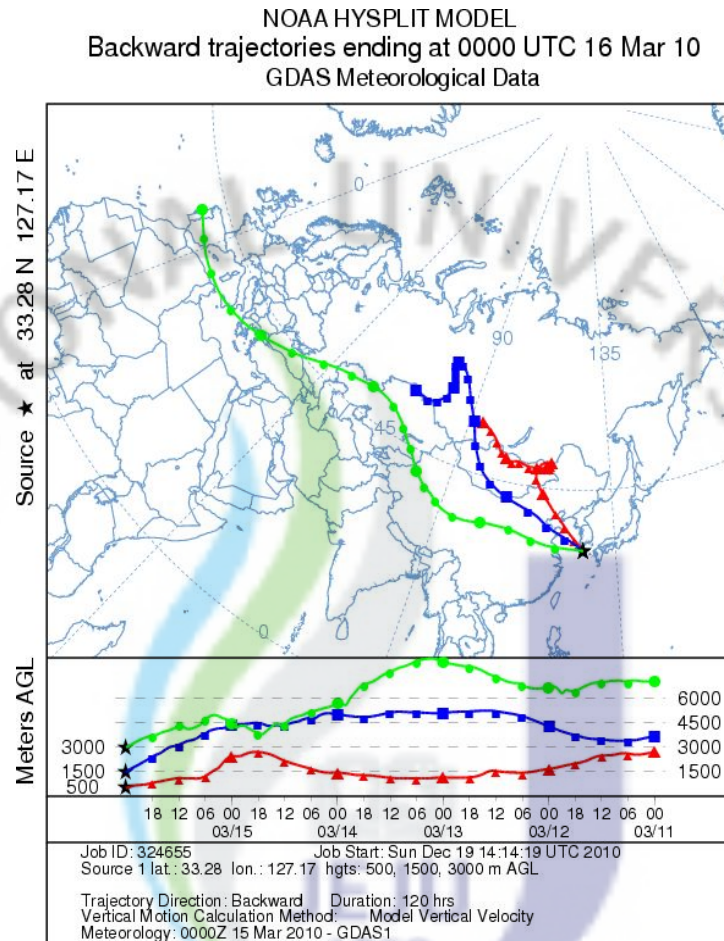


Figure 1. 5-Day backward trajectories for the first Asian Dust event on March 15, 2010 in Jeju.

NOAA HYSPLIT MODEL
 Backward trajectories ending at 0000 UTC 21 Mar 10
 GDAS Meteorological Data

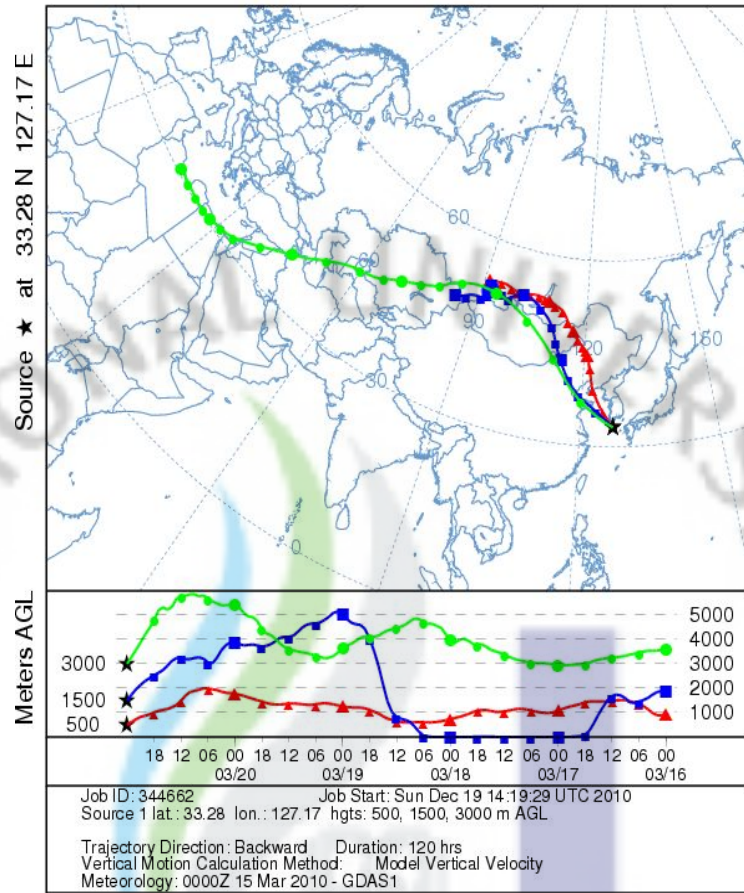


Figure 2. 5-Day backward trajectories for the second Asian Dust event on March 20, 2010 in Jeju.

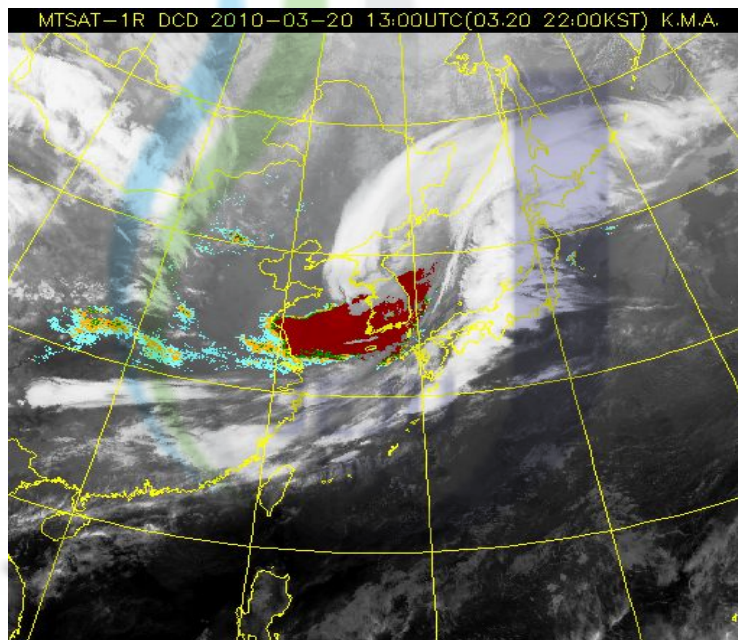
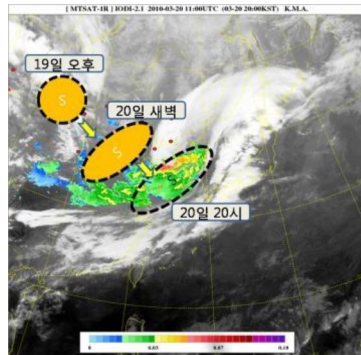


Figure 3. Satellite Photograph for the second Asian Dust event on March 20, 2010 in Jeju.

2. 대기 에어로졸 이온성분의 농도

1) 이온성분의 농도 및 조성

2010년 3월부터 5월까지 봄철 동안에 TSP, PM₁₀, PM_{2.5} 에어로졸 시료를 각각 32개씩 채취하여 수용성 이온성분을 분석하였다. 그리고 그 결과를 Table 3과 Figure 4~5에 나타내었다. 분석결과에서 SO₄²⁻의 농도는 측정지점이 해안지역인 점을 고려하여 수용성 성분 중 해염입자의 농도를 뺀 비해염 성분(non-sea salt)의 농도로 계산하였다. 이 때 수용성 이온성분 중에서 Na⁺은 전적으로 해염에서 유래된다고 가정하고 이 성분을 지표물질로 이용하였다. 표에서 nss-SO₄²⁻는 비해염 SO₄²⁻의 농도로 SO₄²⁻의 총 농도에서 해염의 유입에 기인한 SO₄²⁻의 농도를 뺀 ' $[nss-SO_4^{2-}] = [SO_4^{2-}] - [Na^+] \times 0.251$ '의 식에 의해 계산하였다. 이러한 nss-SO₄²⁻ 농도는 대체적으로 해양 영향을 배제한 다른 발생기원의 SO₄²⁻ 농도로 볼 수 있으며, 주로 인위적 요인에 의해 발생하는 것으로 알려져 있다. nss-Ca²⁺ 역시 비해염 Ca²⁺의 농도로 ' $[nss-Ca^{2+}] = [Ca^{2+}] - [Na^+] \times 0.04$ '의 식에 의해 계산된 농도이다(Ho *et al.*, 2003; Nishikawa *et al.*, 1991).

Table 3의 결과와 같이 TSP 에어로졸의 수용성 성분 농도는 nss-SO₄²⁻ > NO₃⁻ > Cl⁻ > Na⁺ > NH₄⁺ > nss-Ca²⁺ > Mg²⁺ > K⁺ 순으로 높은 농도를 나타내었다. 그리고 PM₁₀ 에어로졸의 이온성분 농도는 nss-SO₄²⁻ > NO₃⁻ > Na⁺ > Cl⁻ > NH₄⁺ > nss-Ca²⁺ > Mg²⁺ > K⁺, PM_{2.5}의 이온성분 농도는 nss-SO₄²⁻ > NH₄⁺ > NO₃⁻ > Na⁺ > Cl⁻ > K⁺ > nss-Ca²⁺ > Mg²⁺ 순으로 높은 농도를 나타내었다.

TSP, PM₁₀, PM_{2.5} 에어로졸 모두에서 수용성 성분들 중에는 nss-SO₄²⁻이 가장 높은 농도를 나타내었고, 각각 7.27, 7.37, 6.94 µg/m³이었다. 또 전체 SO₄²⁻ 중 nss-SO₄²⁻이 차지하는 비율은 각각 92.2, 87.2 97.8%로 이는 고산 지역이 해안가에 위치하고 있음에도 불구하고 SO₄²⁻에 대한 해염성분의 기여도가 그리 크지 않은 것으로 조사되었다. SO₄²⁻ 성분은 주로 대기 중으로 배출된 1차 오염물질 SO₂가 대기 중에서 화학적인 변환을 거쳐 생성된 2차 오염물질이며, 부분적으로

해양의 영향을 받고 있다고 알려져 있다(Arimoto *et al.*, 1996). 제주지역의 SO₂의 배출은 난방이 22.9%, 산업활동 13.2%, 수송 8.0%, 화력발전이 55.9%로 기여하고 있는 것으로 조사되고 있지만, 해양기원의 SO₂는 대기 중에 존재하는 전체 황 화합물 중 자연적인 발생원에 의한 양은 인위적 오염원에 의한 양의 약 40% 정도이고, 주로 해양 및 토양 미생물의 성장 대사과정에서 발생하는 높은 휘발성 물질인 것으로 알려져 있다(박경운 등, 1994).

다음으로 높은 농도를 보인 NO₃⁻은 봄철 평균농도가 TSP, PM₁₀, PM_{2.5} 에어로졸에서 각각 3.80, 5.06, 2.28 µg/m³이었다. NO₃⁻ 역시 1차 오염물질인 NO_x가 산화 과정을 거쳐 생성된 2차 오염물질로 SO₄²⁻와 마찬가지로 대부분 인위적 요인에 의해 발생된다. NO₃⁻의 경우 토양중의 NH₄⁺이 질화 세균에 의해서 NO₃⁻으로 전환되어 토양 입자가 대기 중으로 유입되면서 에어로졸에 유입될 수도 있다. 또 낙화나 산불(biomass burning)등에 의해 자연발생적으로 대기 중에 유입되기도 한다. 그러나 NO₃⁻의 발생은 대부분 화석연료의 사용과 관련이 크고, 난방, 자동차, 산업활동 등의 영향으로 발생하는 대표적인 인위적 오염물질이다(Han *et al.*, 2006; 김나경 등, 2004; Anardenne *et al.*, 1999). 제주지역의 경우 도시지역에 비해 산업 시설이 거의 없고 인구밀도도 훨씬 낮은 지역이다. 그리고 측정소는 주변 민가와도 많이 떨어져 있는 제주도 내에서도 청정지역이기 때문에 국지 오염원의 영향은 크지 않을 것으로 판단된다. 또한 NH₄⁺의 평균 농도는 TSP, PM₁₀, PM_{2.5} 에어로졸에서 각각 1.99, 2.48, 2.77 µg/m³의 값을 보였다. 일반적으로 내륙지방에서는 인위적 오염물질인 NH₄⁺가 Na⁺보다 훨씬 높은 농도를 나타낸다. 그러나 본 연구에서는 NH₄⁺보다 오히려 Na⁺가 더 큰 농도를 보였고, NH₄⁺은 주로 인위적 기원, Na⁺은 대부분 해양기원의 성분임을 감안하면, 도시지역에 비해 비교적 오염도가 낮은 영향을 보이고 있다.

Na⁺의 경우, TSP, PM₁₀, PM_{2.5} 에어로졸에서 각각 2.52, 4.14, 0.57 µg/m³를 나타내었고, Cl⁻은 각각 2.77, 3.26, 0.32 µg/m³로 이들 성분들은 대체적으로 SO₄²⁻와 NO₃⁻ 다음으로 높은 농도를 나타내었다. 그러나 nss-Ca²⁺은 TSP, PM₁₀, PM_{2.5} 에어로졸에서 각각 1.20, 1.37, 0.14 µg/m³의 값을 보였고, 특히 PM_{2.5}에서는 TSP, PM₁₀에 비해 훨씬 더 낮은 농도를 나타내었다.

또한 고산지역 대기 에어로졸의 이온성분의 조성을 확인해 본 결과, TSP에서

인위적 기원의 성분은 각각 nss-SO_4^{2-} 36.3%, NH_4^+ 9.9%, NO_3^- 18.8% K^+ 1.5%로 전체 조성의 65.5%를 차지하였다. 그리고 PM_{10} 에어로졸에서 이들 성분들은 각각 nss-SO_4^{2-} 29.7%, NH_4^+ 10.1%, NO_3^- 20.6% K^+ 1.4%로 전체 조성의 61.8%를 차지하였다. 또 $\text{PM}_{2.5}$ 에어로졸에서는 각각 nss-SO_4^{2-} 52.3%, NH_4^+ 20.9%, NO_3^- 17.3% K^+ 1.2%로 전체 조성의 91.7%를 차지하였고, 미세입자인 $\text{PM}_{2.5}$ 에서 가장 높은 비율을 나타내었다. 반면에 토양기원의 nss-Ca^{2+} 은 TSP, PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ 에서 각각 5.9, 5.4, 1.1%의 조성을 나타내어 $\text{PM}_{2.5}$ 미세입자에서 가장 낮은 조성을 보였다. 해양기원의 Na^+ , Cl^- , Mg^{2+} 조성은 TSP 에어로졸에서 각각 Na^+ 12.2%, Cl^- 13.4, Mg^{2+} 1.9%로 전체 조성의 27.5%를 차지하였다. 그리고 PM_{10} 에서 이들 성분의 조성은 각각 Na^+ 17.2%, Cl^- 14.0, Mg^{2+} 1.5%로 전체의 32.7%를 차지하였고, $\text{PM}_{2.5}$ 에서는 각각 Na^+ 4.4%, Cl^- 2.4, Mg^{2+} 0.5%로 전체의 7.3%를 차지하였다. 이들 해양 성분들 역시 nss-Ca^{2+} 과 마찬가지로 $\text{PM}_{2.5}$ 에서의 조성이 낮고 이에 비해 TSP, PM_{10} 에서 상대적으로 더 높은 조성을 나타내는 것으로 조사되었다. 이를 종합하면 인위적 기원 성분들의 조성은 $\text{PM}_{2.5}$ 에서 상대적으로 높고, 토양 및 해양 기원 성분들은 TSP, PM_{10} 에서 더 높은 조성을 나타내는 것으로 확인되었다.

Table 3. Concentration of ionic components of TSP, PM_{10} and $\text{PM}_{2.5}$ aerosols during the spring season of 2010.

Species	Concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		
	TSP	PM_{10}	$\text{PM}_{2.5}$
NH_4^+	1.99±1.76	2.48±2.26	2.77±2.46
Na^+	2.52±1.98	4.14±2.69	0.57±0.36
K^+	0.31±0.28	0.35±0.28	0.16±0.13
Mg^{2+}	0.39±0.27	0.37±0.29	0.07±0.05
NO_3^-	3.80±3.36	5.06±3.89	2.28±0.86
Cl^-	2.77±1.98	3.26±1.83	0.32±0.08
nss-Ca^{2+}	1.20±0.55	1.37±0.58	0.14±0.07
nss-SO_4^{2-}	7.27±6.28	7.37±6.30	6.94±5.56

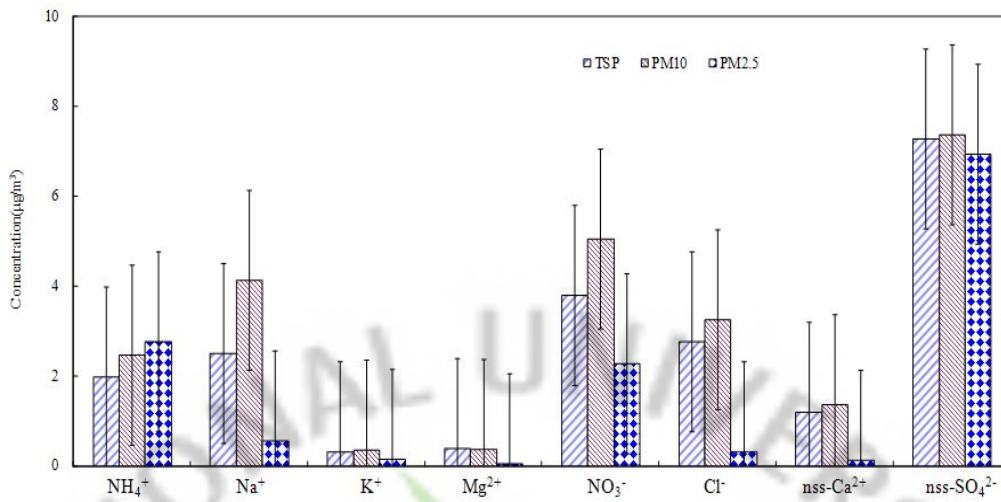


Figure 4. Comparison of ionic concentrations in TSP, PM₁₀ and PM_{2.5} aerosols.

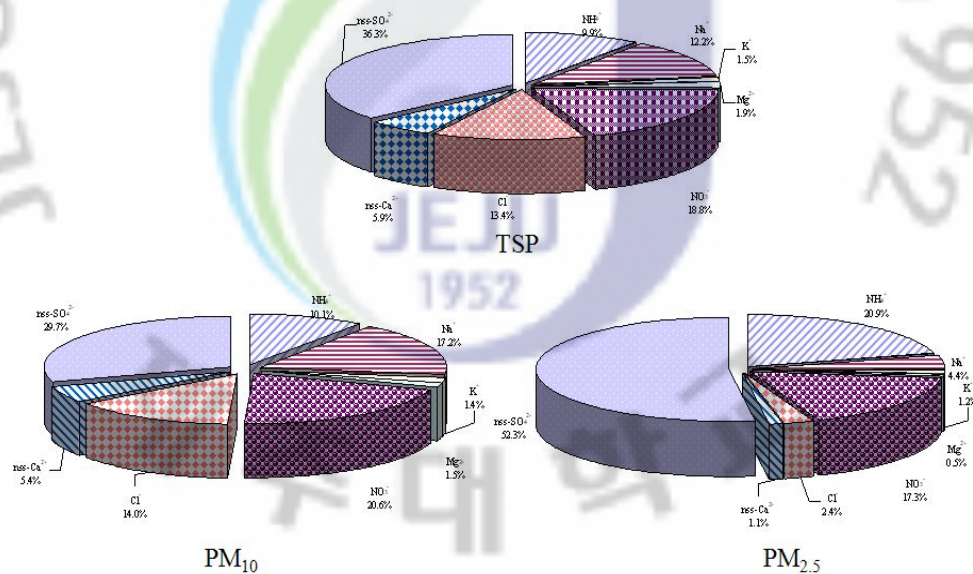


Figure 5. Composition ratio of ionic components in TSP, PM₁₀ and PM_{2.5} aerosols.

2) 황사와 비황사 입자의 이온 농도 비교

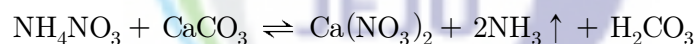
(1) TSP 에어로졸의 황사, 비황사 이온농도 비교

연구기간에 제주도 고산지역에서 채취한 TSP 에어로졸을 황사와 비황사 시료로 분류하여 각각의 이온성분 농도를 비교하였다. TSP의 시료의 경우, 전체 3회의 황사일 중에서 1차(3월 13~15일) 시료는 측정에서 누락되었기 때문에 나머지 2회의 측정 결과만을 이용하였다. 그리고 황사 기간 중 황사의 농도가 기상기록상 가장 높았던 2010년 3월 20~21일의 2차 시료를 별도로 분류(고농도 황사)하고, 2010년 3월 20~21일의 2차 시료와 5월 9~11일의 3차 시료를 평균하여 이를 황사시료로 분류(황사)하였다. 그리고 3월부터 5월까지 채취한 총 32개 시료에서 강우량 3 mm 이상, 그리고 황사 시료 4개를 제외한 나머지 모든 시료의 이온농도를 평균하여 이를 비황사 시료로 분류하였다. 이렇게 분류한 고농도 황사, 황사, 비황사 기간의 이온성분 분석 결과를 Table 4에 수록하였고, 각 성분별 농도를 Figure 6~7에 비교하였다.

Table 4의 결과와 같이 TSP 에어로졸의 이온성분 농도는 3월 20~21일에 발생한 고농도 황사 시 이들의 농도가 $nss-SO_4^{2-} > Cl^- > NO_3^- > Na^+ > nss-Ca^{2+} > Mg^{2+} > NH_4^+ > K^+$ 순으로 높게 나타났다. 그리고 2차와 3차의 황사 시료에서 측정된 이온농도를 평균한 결과는 $nss-SO_4^{2-} > NO_3^- > Cl^- > Na^+ > nss-Ca^{2+} > NH_4^+ > Mg^{2+} > K^+$ 순으로 높은 농도를 나타내었다. 반면에 나머지 시료를 평균한 비황사 이온의 농도는 $nss-SO_4^{2-} > NO_3^- > Cl^- > Na^+ > NH_4^+ > nss-Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^+$ 순서로 높은 농도를 보였고, 비황사에 비해 황사 시에 $nss-Ca^{2+}$ 농도가 더 높은 경향을 나타내었다.

또 각 이온성분들의 농도를 보면 3월 20~21일의 고농도 황사(HAD, High Concentration Asian Dust), 3월 20~21일과 5월 9~11일의 황사(AD, Asian Dust), 비황사(NAD, Non-Asian Dust) 시의 $nss-SO_4^{2-}$ 농도가 각각 11.47, 8.57, 7.07 $\mu g/m^3$ 로 고농도 황사 시에 가장 높은 농도를 나타내었다. 그리고 고농도 황사와 비황사시의 농도를 비교해 보면, HAD/NAD 농도비가 1.6배, 황사와 비황사시의 농도비(AD/NAD)가 1.2배로 고농도 황사 시에 $nss-SO_4^{2-}$ 농도가 가장 많이 상승하였고, 황사 시에 농도비가 높았던 것으로 조사되었다. 또한 NO_3^- 의 농도는 $nss-SO_4^{2-}$ 에 이어 두 번째로 높은 농도를 나타내었고, 고농도 황사, 황사, 비황사

시의 농도가 각각 9.99, 7.37, 3.25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 이 역시 황사 시에 훨씬 더 높은 농도를 나타내었다. 그리고 HAD/NAD, AD/NAD 농도비는 각각 3.1, 2.3배 비율로 황사 시에 농도가 더 높았음을 알 수 있었다. 그러나 NH_4^+ 의 평균 농도는 고농도 황사, 황사, 비황사 시에 각각 0.74, 1.13, 2.12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 값을 보여, 고농도 황사에 오히려 농도가 감소한 결과를 나타내었다. 그리고 HAD/NAD와 AD/NAD 농도비는 0.3배, 0.5배로 황사 시에 농도가 크게 감소한 것으로 조사되었다. NH_4^+ 은 주로 대기 중에서 H_2SO_4 , HNO_3 , HCl 과 같은 산성물질과 NH_3 의 중화반응으로 생성되며, 입자표면에서 NH_4NO_3 , $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, NH_4Cl 등과 같은 산성염을 생성한다. 이 때 암모늄염의 안정성은 온도, 상대습도 등 기상상태에 따라 영향을 받는다. 이 중 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 이 가장 안정적인 반면, NH_4Cl 은 휘발성이 강해서 NH_3 와 H_2SO_4 의 반응에 의해 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 를 생성한다. 또 조대입자에서 해양염분과 산성물질의 반응에 의해 생성되기도 한다(Yeatman *et al.*, 2001). 본 연구에서 NH_4^+ 의 황사/비황사 농도비가 낮은 것은 NH_4^+ 이 에어로졸에서 산성염 상태($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, NH_4NO_3 등)로 존재하고 있고, 이러한 산성염이 다음의 반응 예와 같이 황사입자의 염기성 물질(CaCO_3 , MgCO_3 등)과 중화반응을 일으키면서 이 때 생성된 NH_3 가 기화될 수 있을 것으로 판단된다(고희정, 2010).



그러나 일반적으로 황사와 비황사의 농도 차는 주로 이러한 NH_3 의 휘발에 기인한 것으로 본 연구에서처럼 큰 차이를 보이지 않는 것이 일반적이다. 그런데도 본 연구에서 큰 차이를 나타내는 것은 이 시기의 비황사일에 집중적으로 발생한 연무와 박무 등의 기상변화에 그 원인이 있는 것으로 판단된다. 이 시기의 비황사일인 4월 13일에는 연무와 박무가 동시에 발생하였다. 그리고 이 때 NH_4^+ 의 농도는 평소 수준보다 2.7배 정도 증가하였다. 또 4월 30일과 5월 19일에도 박무가 발생하면서 NH_4^+ 농도가 평소 수준보다 각각 1.9배, 2.5배 정도 증가한 것으로

로 조사되었다. 이러한 결과로 인해 HAD/NAD와 AD/NAD 농도비가 크게 낮은 것으로 추정되며, 원인 규명을 위해서 더 다각적인 검토가 이루어져야 할 것으로 보인다.

한편 토양의 지표 성분인 $nss-Ca^{2+}$ 의 경우, 고농도 황사, 황사, 비황사 시의 평균농도가 각각 7.72, 4.36, 0.71 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타나 큰 차이를 보였다. 그리고 HAD/NAD, AD/NAD 농도비가 각각 10.8, 6.1배로 수용성 이온성분들 중에서 가장 큰 차이를 나타내었다. 그리고 인위적 기원과 토양 기원이 혼재되는 경향을 보이는 것으로 알려진 K^+ 은 고농도 황사, 황사, 비황사 시 농도가 각각 0.68, 0.46, 0.29 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, HAD/NAD, AD/NAD 농도비가 각각 2.4, 1.6배 비율로 황사 시에 농도가 상승하였다. 또한 해양기원의 Na^+ , Cl^- , Mg^{2+} 농도를 보면, 고농도 황사, 황사, 비황사 시 Na^+ 농도가 각각 8.00, 4.99, 2.14 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 이 역시 황사 시에 더 높은 농도를 나타내었다. 그리고 HAD/NAD, AD/NAD 농도비는 각각 3.7, 2.3배 비율로 비교적 크게 상승하였다. Cl^- 의 경우 고농도 황사, 황사, 비황사 시 각각 10.66, 6.61, 2.18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도를 나타내어 이 역시 황사 시에 더 높았고, HAD/NAD, AD/NAD 농도비는 각각 4.9, 3.0배 비율을 나타내었다. Mg^{2+} 역시 고농도 황사, 황사, 비황사 시 농도가 각각 1.14, 0.74, 0.34 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, HAD/NAD와 AD/NAD 농도비는 3.4배와 2.2배 비율로 황사 시에 증가하였다.

또한 고산지역 TSP 에어로졸의 이온성분 조성비를 조사하였고, 그 결과를 Figure 8에 비교하였다. 먼저 인위적 기원 성분들의 조성을 살펴보면, 3월 20~21일의 고농도 황사 에어로졸에서는 이들의 조성비가 $nss-SO_4^{2-}$ 22.8%, NH_4^+ 1.5%, NO_3^- 19.8% K^+ 1.4%로 전체 조성의 45.5%를 차지하였다. 그리고 2010년 3월 20~21일의 2차 시료와 5월 9~11일의 3차 시료를 평균한 황사 에어로졸의 조성비는 이들 성분들이 각각 $nss-SO_4^{2-}$ 25.0%, NH_4^+ 3.3%, NO_3^- 21.5% K^+ 1.3%로 전체 조성의 51.1%를 차지하였다. 반면에 비황사 에어로졸에서는 이들 성분들이 각각 $nss-SO_4^{2-}$ 39.1%, NH_4^+ 11.7%, NO_3^- 18.0% K^+ 1.6%의 조성비를 나타내었고 전체 조성의 70.4%를 차지하였다.

또한 토양기원의 $nss-Ca^{2+}$ 성분 조성비는 고농도 황사 시에 15.3%, 황사 시 12.7%, 비황사 시 3.9%의 조성을 보였고, 황사 시에 농도가 크게 상승한 것으로 확인되었다. 또 해양기원 성분들의 조성비는 고농도 황사 시에 Na^+ 15.9%, Cl^-

21.1, Mg^{2+} 2.3%로 전체의 39.3%를 차지하였고, 황사 시에는 각각 Na^+ 14.6%, Cl^- 19.3, Mg^{2+} 2.2%로 전체의 36.1%를 차지하였다. 반면에 비황사 시에는 이들 성분들이 Na^+ 11.8%, Cl^- 12.0, Mg^{2+} 1.9%의 조성비를 보였고 전체의 25.7%를 차지하였다. 그리고 이러한 결과로부터 TSP 이온성분만을 기준으로 고산지역 대기 에어로졸의 조성을 비교해 보면, 각 성분들의 절대농도는 NH_4^+ 을 제외한 모든 성분들이 대체적으로 황사 시에 훨씬 더 높았다. 그러나 황사 시에 토양기원 성분의 조성비가 크게 증가하고 비황사 시에는 상대적으로 인위적 성분의 조성비가 상승하는 경향을 나타내고 있다.

Table 4. Concentration of ionic components in TSP aerosols during the spring season of 2010.

Species	Concentration ($\mu g/m^3$)			HAD /NAD	AD /NAD
	High Conc. Asian Dust (HAD) ¹⁾	Asian Dust (AD) ²⁾	Non-Asian Dust (NAD)		
NH_4^+	0.74	1.13	2.12	0.3	0.5
Na^+	8.00	4.99	2.14	3.7	2.3
K^+	0.68	0.46	0.29	2.4	1.6
Mg^{2+}	1.14	0.74	0.34	3.4	2.2
NO_3^-	9.99	7.37	3.25	3.1	2.3
Cl^-	10.66	6.61	2.18	4.9	3.0
nss- Ca^{2+}	7.72	4.36	0.71	10.8	6.1
nss- SO_4^{2-}	11.47	8.57	7.07	1.6	1.2

¹⁾HAD: 2010. 3. 20 ~21, ²⁾AD: 2010. 3. 20~21 and 5. 9~11

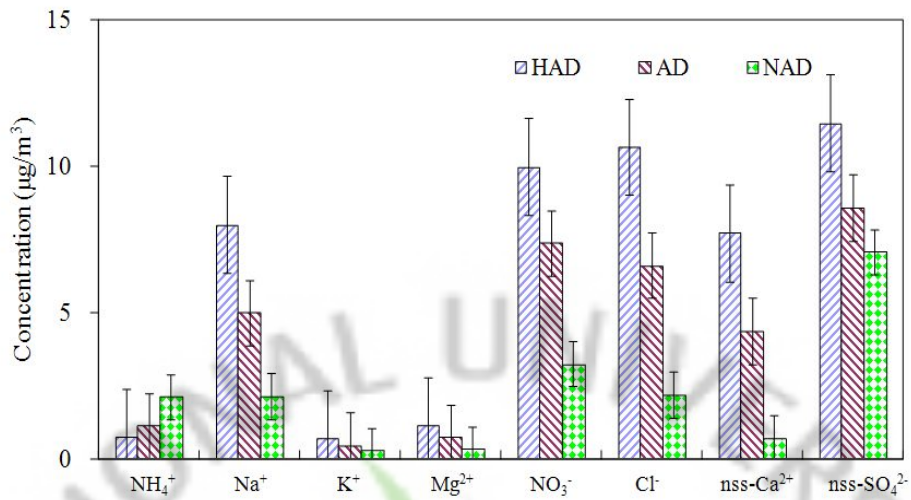


Figure 6. Comparison of ionic concentrations in TSP aerosols for HAD, AD and NAD periods.

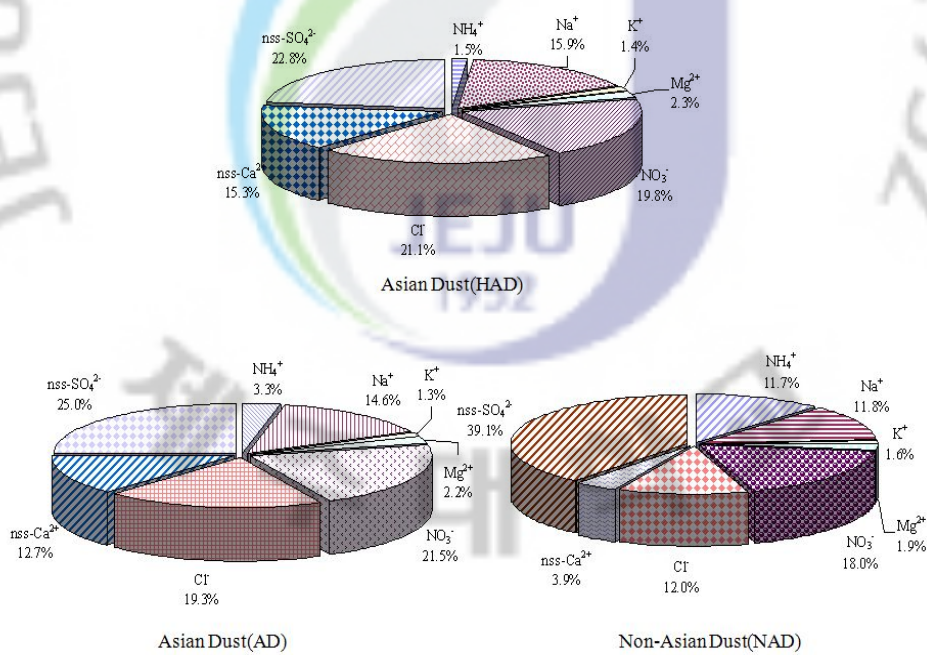


Figure 7. Composition ratio of ionic components in TSP aerosols.

(2) PM₁₀ 에어로졸의 황사, 비황사 이온농도 비교

연구기간에 제주도 고산지역에서 채취한 PM₁₀ 에어로졸 시료를 황사와 비황사 입자로 분류하여 각각의 이온성분 농도를 비교하였다. PM₁₀ 에어로졸은 전체 3회의 황사일 중에서 시료채취가 누락된 1차(3월 13~15일) 시료를 제외한 나머지 2회의 측정 결과를 이용하였다. 그리고 황사 기간 중 황사의 농도가 기상기록 상 가장 높았던 2010년 3월 20~21일의 2차 시료를 별도로 분류(고농도 황사)하고, 2010년 3월 20~21일의 2차 시료와 5월 9~11일의 3차 시료를 평균하여 이를 황사시료로 분류(황사)하였다. 그리고 3월부터 5월까지 채취한 총 32개 시료에서 강우량이 3 mm 이상, 그리고 황사 시료 5개를 제외한 나머지 모든 시료의 이온 농도를 평균하여 이를 비황사 시료로 분류하였다. 이렇게 분류한 고농도 황사, 황사, 비황사 기간의 이온성분 분석 결과를 Table 5에 수록하였고, 각 성분별 농도를 Figure 8~9에 비교하였다.

Table 5의 결과와 같이 PM₁₀ 에어로졸의 이온성분 농도는 3월 20~21일에 발생한 고농도 황사 시 가장 높은 농도를 나타내었고, $\text{Na}^+ > \text{Cl}^- > \text{nss-Ca}^{2+} > \text{nss-SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{NH}_4^+$ 순으로 높게 나타났다. 그리고 2차와 3차 황사의 이온농도를 평균한 결과에서는 $\text{Na}^+ > \text{nss-SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^- > \text{nss-Ca}^{2+} > \text{NH}_4^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ 순으로 높은 농도를 나타내었다. 반면에 나머지 시료를 평균한 비황사 이온의 농도는 $\text{nss-SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{Na}^+ > \text{NH}_4^+ > \text{Cl}^- > \text{nss-Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+}$ 순서로 높은 농도를 보였다.

또 각 이온성분들의 농도를 앞의 TSP와 같이 3월 20~21일의 고농도 황사, 3월 20~21일과 5월 9~11일의 황사, 나머지를 비황사로 분류하여 각 성분의 농도를 비교하였다. 먼저 nss-SO_4^{2-} 농도를 보면 고농도 황사(HAD), 황사(AD), 비황사(NAD) 시에 각각 10.57, 7.92, 7.26 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 고농도 황사 시에 가장 높은 농도를 나타내었다. 그리고 고농도 황사와 비황사시의 nss-SO_4^{2-} 농도는 HAD/NAD 농도비가 1.5배, AD/NAD가 1.1배로 고농도 황사 시에 nss-SO_4^{2-} 농도가 가장 많이 상승하였고, 다음으로 황사 시에 농도비가 높았던 것으로 조사되었다. 또한 NO_3^- 의 농도는 nss-SO_4^{2-} 에 이어 두 번째로 높은 농도를 나타내었고, 고농도 황사, 황사, 비황사 시의 농도가 각각 8.68, 6.63, 4.75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 이 역시 황사 시에 훨씬 더 높은 농도를 나타내었다. 그리고 HAD/NAD, AD/NAD 농도비는 각각

1.8배, 1.4배 비율로 황사 시에 농도가 더 높음을 알 수 있었다. 그러나 NH_4^+ 의 평균 농도는 고농도 황사, 황사, 비황사 시에 각각 0.76, 1.57, 2.66 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 값을 보여, 고농도 황사에 오히려 농도가 감소하는 결과를 나타내었다. 그리고 HAD/NAD와 AD/NAD 농도비는 0.3배, 0.6배로 황사 시에 농도비가 크게 감소한 것으로 조사되었다. NH_4^+ 의 경우 TSP와 마찬가지로 황사 시에 지나치게 농도가 낮은 경향을 보이고 있는데 이 원인은 앞 절의 TSP 에어로졸에서 기술한 바와 같이, 크게 NH_3 의 휘발과 기상 요인에 의한 원인으로 판단된다. 이 시기의 비황사일에는 여러 번의 연무와 박무 현상이 발생하였다. 특히 4월 13일, 4월 30일, 5월 19일 등에는 심한 연무와 박무가 발생하였고, 이 때 NH_4^+ 의 농도는 평소 수준보다 훨씬 더 높게 증가한 것으로 조사되었다. 따라서 HAD/NAD와 AD/NAD 농도비가 크게 낮아진 것은 비황사에 나타난 NH_4^+ 의 고농도 현상 때문에 상대적으로 황사 시의 농도가 낮은 값을 보이고 있는 것으로 추정되며, 더 자세한 원인은 분석 데이터, 기상 요인 등을 좀 더 세밀히 검토하여 확인해야 할 것으로 판단된다. 한편 토양의 지표 성분인 nss-Ca^{2+} 의 경우, 고농도 황사, 황사, 비황사 시의 평균농도가 각각 11.08, 5.07, 0.63 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타나 큰 차이를 보였다. 그리고 HAD/NAD, AD/NAD 농도비가 각각 17.5배, 8.0배로 황사 시에 농도가 크게 증가하고 이온성분들 중에서 가장 큰 차이를 나타내었다. 그리고 인위적 기원과 토양 기원을 동시에 나타내는 K^+ 은 고농도 황사, 황사, 비황사 시 농도가 각각 0.82, 0.52, 0.32 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, HAD/NAD, AD/NAD 농도비가 각각 2.6, 1.6배 비율로 이 성분 역시 황사 시에 농도가 상승하였다. 또한 해양기원의 Na^+ , Cl^- , Mg^{2+} 농도를 보면, 고농도 황사, 황사, 비황사 시 Na^+ 농도가 각각 20.71, 10.00, 2.96 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 이 역시 황사 시에 더 높은 농도를 나타내었다. 그리고 HAD/NAD, AD/NAD 농도비는 각각 7.0, 3.4배 비율로 비교적 크게 상승하였다. Cl^- 은 고농도 황사, 황사, 비황사 시 각각 13.32, 6.65, 2.58 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도를 나타내어 이 역시 황사 시에 더 높았고, HAD/NAD, AD/NAD 농도비는 각각 5.2 2.6 배 비율을 나타내었다. Mg^{2+} 역시 고농도 황사, 황사, 비황사 시 농도가 각각 1.45, 0.78, 0.29, HAD/NAD와 AD/NAD 농도비는 5.0배와 2.7배 비율로 황사 시에 증가하였다. 이상과 같이 황사 시 PM_{10} 에어로졸의 이온성분 농도를 비교한 결과는 TSP 경우와 유사한 경향을 보였고, 특히 황사 발생 시 토양기원 성분의

농도가 현저하게 상승하는 것으로 조사되었다.

한편 고산지역 PM₁₀ 에어로졸의 이온성분의 조성비를 조사하여 이를 Figure 9에 비교하였다. 그림에서 3월 20~21일의 고농도 황사의 경우를 보면, 인위적 기원 성분들의 조성비가 nss-SO₄²⁻ 15.7%, NH₄⁺ 1.1%, NO₃⁻ 12.9% K⁺ 1.2%로, 전체 조성의 30.9%를 차지하였다. 그리고 2010년 3월 20~21일의 2차 시료와 5월 9~11일의 3차 시료를 평균한 황사 에어로졸의 조성비는 이들 성분들이 각각 nss-SO₄²⁻ 20.2%, NH₄⁺ 4.0%, NO₃⁻ 16.9% K⁺ 1.3%로 전체 조성의 42.4%를 차지하였다. 반면에 비황사 에어로졸에서는 이들 성분들이 각각 nss-SO₄²⁻ 33.8%, NH₄⁺ 12.4%, NO₃⁻ 22.1% K⁺ 1.4%의 조성비를 나타내었고 전체 조성의 69.7%를 차지하였다.

또한 토양기원의 nss-Ca²⁺ 성분 조성비는 고농도 황사 시에 16.4%, 황사 시 13.0%, 비황사 시 3.0%의 조성을 보였고, 황사 시에 농도가 크게 상승한 것으로 확인되었다. 또 해양기원 성분들의 조성비는 고농도 황사 시에 Na⁺ 30.7%, Cl⁻ 19.8, Mg²⁺ 2.2%로 전체의 52.7%를 차지하였고, 황사 시에는 각각 Na⁺ 25.6%, Cl⁻ 17.0, Mg²⁺ 2.0%로 전체의 44.6%를 차지하였다. 반면에 비황사 시에는 이들 성분들이 Na⁺ 13.8%, Cl⁻ 12.0, Mg²⁺ 1.4%의 조성비를 보였고 전체의 27.2%를 차지하였다. 그리고 이러한 결과로부터 PM₁₀ 이온성분만을 기준으로 고산지역 대기 에어로졸의 조성을 비교해 보면, 각 성분들의 절대농도는 NH₄⁺을 제외한 모든 성분들이 대체적으로 황사 시에 훨씬 더 높았다. 그러나 황사 시에 토양기원 성분의 조성비가 크게 증가하고 비황사 시에는 상대적으로 인위적 성분의 조성비가 상승하는 경향을 나타내었다.

Table 5. Concentration of ionic components of PM₁₀ aerosols during the spring season of 2010.

Species	Concentration (ug/m ³)			HAD /NAD	AD /NAD
	High Conc. Asian Dust (HAD) ¹⁾	Asian Dust (AD) ²⁾	Non-Asian Dust (NAD)		
NH ₄ ⁺	0.76	1.57	2.66	0.3	0.6
Na ⁺	20.71	10.00	2.96	7.0	3.4
K ⁺	0.82	0.52	0.32	2.6	1.6
Mg ²⁺	1.45	0.78	0.29	5.0	2.7
NO ₃ ⁻	8.68	6.63	4.75	1.8	1.4
Cl ⁻	13.32	6.65	2.58	5.2	2.6
nss-Ca ²⁺	11.08	5.07	0.63	17.5	8.0
nss-SO ₄ ²⁻	10.57	7.92	7.26	1.5	1.1

¹⁾HAD: 2010. 3. 20 ~21, ²⁾AD: 2010. 3. 20 ~21, 5. 9~11

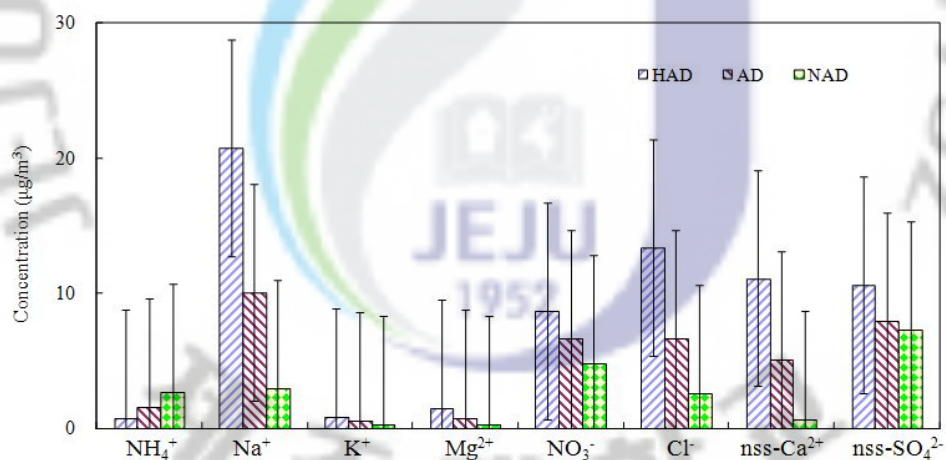


Figure 8. Comparison of ionic concentrations in PM₁₀ aerosols for HAD, AD and NAD periods.

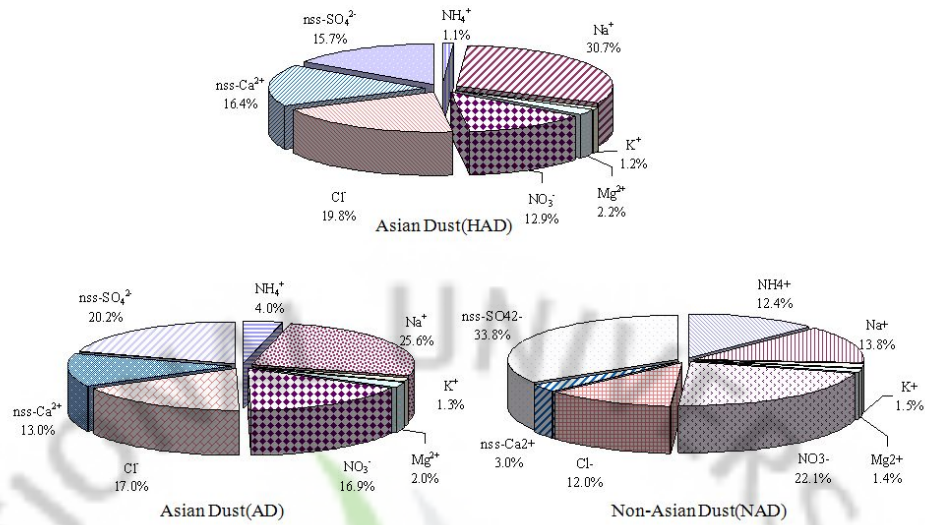


Figure 9. Composition ratio of ionic components in PM₁₀ aerosols.

또 PM₁₀ 에어로졸에 대해 주요 20종의 원소성분을 분석하였고, 이들의 농도를 비교하여 Table 6과 Figure 10에 나타내었다. 원소성분의 농도는 고농도 황사 시에 Al > Fe > Na > S > Ca > K > Mg >> Ti > Pb > Zn > Mn > Co > Cu > Ba > Sr > Ni > Cr > V > Mo > Cd 순을 보였다. 그리고 황사 시에는 Al > Fe > Na > S > Ca > K > Mg >> Ni > Pb > Cr > Mn > Zn > Co > Ti > Cu > Mo > V > Ba > Sr > Cd 순으로 높은 농도를 나타내었다. 또 비 황사 시에는 S > Al > Na > Fe > Ca > K > Mg >> Pb > Ni > Zn > Mn > Cr > Co > Ti > Mo > Cu > Ba > V > Sr > Cd 순으로 높은 농도를 나타내었다.

대기 에어로졸 성분은 토양 먼지나 해염 등과 같이 자연적 발생기원의 물질과 연료의 연소, 자동차 배출가스 등과 같이 인위적 기원에 의해 발생하는 물질, 그리고 대기 중에서 광화학 반응에 의해 생성되는 2차 오염물질 등으로 구성된다. 이렇게 대기 중에 부유하고 있는 에어로졸 입자들은 성분, 조성이나 입자 크기에 따라 인간의 건강이나 식물의 생육에도 크게 영향을 미치고, 다양한 종류의 대기 오염물질을 흡착한 상태로 부유된다. 일반적으로 각 성분별 발생기원을 보면 Al,

Ca, Fe, Zn, Mn, Mg 등은 토양 혹은 먼지의 비산에 의해 발생되고, Fe은 광산의 철광석에서의 용출, 갯내 용수, 선광공정, 폐석, 폐광 등의 폐수 중에서, 제철공업에서는 산세공정에서 금속철이 Fe^{2+} 으로 용출하여 산성폐수나 세정폐수에 혼입 된다. Mn은 지각 중에 널리 존재하고, Zn은 섬아연광(ZnS), 홍아연광(ZnO), 맥아연광($ZnCO_3$) 등으로 각종 암석에 함유되어 있으며 동식물에도 널리 분포되어 있다(정분식, 2000). Ni, V 등은 연료의 연소 과정에서도 생성되며, V의 경우는 퇴적암 속에 널리 분포되어 있다. Pb는 중금속 중 비교적 다량이 지각에 함유되어 있는 원소로 주로 토양 중에 존재한다. 그러나 대기 중의 Pb 성분은 주로 자동차의 배출가스에서 발생되어 대부분 유기금속 화합물로 존재하고, Pb를 포함한 Cu, Cd, Zn, Cr 등은 소각 과정에서 발생되기도 한다. Cu는 식물 및 동물의 필수 원소로서 생물체내의 미량 성분으로 자연계에 널리 분포되어 있고, 토양, 천연수, 해수, 그리고 생물기원의 석탄, 석유등에도 농축되어 있다. Cd은 특히 섬아연광(ZnS) 및 맥아연광($ZnCO_3$)에 함유되어 있고, Zn과 함께 자연계에 널리 분포되어 있다(안승구 등, 2001). Cr은 지각 중에 0.01% 정도 함유되어 있고, 자연에는 주로 크롬철광($FeOCr_2O_3$)으로 산출된다(<http://here.cb21.net/report-94-4.html>). Mo는 Pb와 거의 같은 정도로 지각에 함유되어 있으며, 생물체내에 미량으로 존재하고 바닷물 속에도 소량 존재한다.

이러한 여러 에어로졸의 원소성분 농도를 3월 20~21일의 고농도 황사(HAD, High Concentration Asian Dust), 3월 20~21일과 5월 9~11일의 황사(AD, Asian Dust), 비황사(NAD, Non-Asian Dust)로 구분하여 이 시기의 농도를 상호 비교하였다. 먼저 S 농도는 고농도 황사, 황사, 비황사 시에 각각 4.78, 0.94, 1.37 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 고농도 황사 시에 가장 높은 농도를 나타내었다. 그리고 고농도 황사와 비황사시의 농도를 비교해 보면, HAD/NAD 농도비가 3.5배, 황사와 비황사시의 농도비(AD/NAD)가 0.7배로 고농도 황사 시에 S 농도가 가장 많이 상승하였다. S는 토양에는 거의 존재하지 않는 인위적 발생 기원의 성분으로 황사 입자 표면에 흡착된 황산염의 성분으로 판단된다. 따라서 이러한 농도 증가는 황사가 중국으로부터 장거리 이동되는 과정에서 다량의 황화합물을 흡수 또는 반응한 상태로 제주 지역 대기에 유입되었을 가능성이 크다. 또한 이 중 비교적 농도가 높은 토양의 지표성분인 Al, Ca, Fe, K 농도를 비교해 보면, Al의 농도는 고

농도 황사, 황사, 비황사 시의 농도가 각각 11.91, 1.47, 1.28 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 그리고 HAD/NAD, AD/NAD 농도비가 각각 9.3배, 1.1배로 황사 시에 농도가 훨씬 더 높았음을 알 수 있었다. Ca 농도도 고농도 황사, 황사, 비황사 시의 농도가 각각 4.42, 0.65, 0.52 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, HAD/NAD, AD/NAD 농도비는 각각 8.6배, 1.3배로 특히 고농도 황사 시에 농도가 크게 상승했던 것으로 확인되었다. 마찬가지로 Fe의 농도 역시 고농도 황사, 황사, 비황사 시의 농도가 각각 9.89, 1.15, 0.86 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, HAD/NAD, AD/NAD 농도비는 각각 8.6, 1.3배 비율로 황사 농도가 현저하게 더 높았다. K의 농도 역시 고농도 황사, 황사, 비황사 시의 농도가 각각 3.73, 0.40, 0.36 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, HAD/NAD, AD/NAD 농도비는 각각 10.4, 1.1배 비율로 황사 시에 농도가 더 높았다. 이처럼 토양의 지표성분인 Al, Ca, Fe, K은 모두 황사 시에 농도가 크게 증가하는 경향을 보였고, 특히 3월 20일의 고농도 황사 시에 현저한 증가율을 나타내었다.

또한 해양기원의 Na과 Mg 농도를 비교해 보면, Na의 농도는 고농도 황사, 황사, 비황사 시의 농도가 각각 7.77, 1.01, 0.99 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, HAD/NAD, AD/NAD 농도비는 각각 7.9, 1.0배 비율로 이 성분들 역시 고농도 황사 시에 농도가 상승하였다. 마찬가지로 Mg의 농도도 고농도 황사, 황사, 비황사 시의 농도가 3.29, 0.40, 0.33 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, HAD/NAD, AD/NAD 농도비가 각각 10.0배, 0.7배로 황사 시에 높았다. 그러나 대기 에어로졸에서 비교적 극미량으로 존재하는 Ni, Mo, Cd 성분들은 황사와 비황사 시에 큰 차이를 보이지 않았다.

Table 6. Concentration of elemental components of PM₁₀ aerosols during the spring season of 2010.

Species	High Conc. Asian Dust (HAD) ¹⁾	Asian Dust (AD) ²⁾	Non-Asian Dust (NAD)	HAD/NAD	AD/NAD
Concentrations ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)					
Al	11.91	1.47	1.28	9.30	1.10
Fe	9.89	1.15	0.86	11.50	1.30
Ca	4.42	0.65	0.52	8.60	1.30
Na	7.77	1.01	0.99	7.90	1.00
K	3.73	0.40	0.36	10.40	1.10
Mg	3.29	0.40	0.33	10.00	1.20
S	4.78	0.94	1.37	3.50	0.70
Concentrations (ng/m^3)					
Ti	294.56	23.95	19.16	15.40	1.30
Mn	223.08	39.95	29.69	7.50	1.30
Ba	83.77	6.28	7.43	11.30	0.80
Sr	80.84	4.97	4.28	18.90	1.20
Zn	224.81	36.81	37.95	5.90	1.00
V	31.01	6.64	5.16	6.00	1.30
Pb	34.30	41.83	26.72	1.30	1.60
Cr	284.89	47.27	66.40	4.30	0.70
Cu	114.42	23.22	15.69	7.30	1.50
Ni	34.83	68.92	51.31	0.70	1.30
Co	129.95	28.08	20.42	6.40	1.40
Mo	10.93	22.59	17.72	0.60	1.30
Cd	0.63	0.84	0.83	0.80	1.00

¹⁾HAD: 2010. 3. 20 ~21, ²⁾AD: 2010. 3. 20 ~21, 5. 9~11

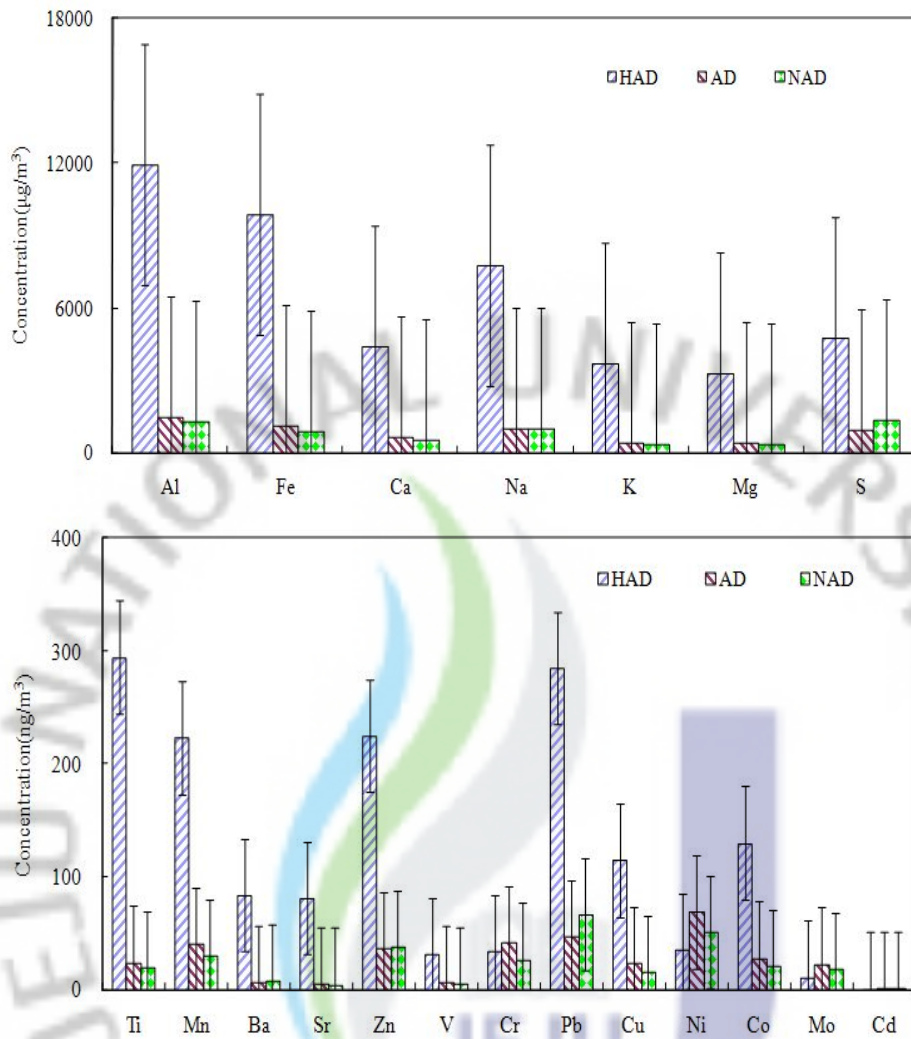


Figure 10. Comparison of elemental concentrations in PM₁₀ aerosols for HAD, AD and NAD periods.

(3) PM_{2.5} 에어로졸의 황사, 비황사 비교

입자 크기가 2.5 μm 이하의 PM_{2.5} 미세입자는 화석연료의 연소, 자동차 배출가스, 화학물질 제조과정 등과 같이 인위적 발생원에 의해 발생된 오염물질과 기체상 오염물질이 입자상으로 전환된 2차 오염물질로 구성되어 있다. 때문에 황산(SO₄²⁻), 질산(NO₃⁻), 암모늄(NH₄⁺), 원소탄소(EC), 유기탄소(OC)등 인위적 기원 성분들의 농도가 상대적으로 높아 주요 위해성 대기 오염물질로 지목되고 있다(Lee and Kang, 2001). 그리고 이러한 미세입자는 폐렴, 폐 기능 손실, 천식 등 호흡기 질환뿐만 아니라 심장혈관, 암 발생과도 크게 관련이 있는 것으로 보고되고 있다. 이처럼 미세입자는 인체에 대한 위해도가 조대입자에 비해 매우 높을 뿐 아니라 먼 거리까지 이동하여 넓은 지역으로 확산되는 경향을 보인다. 또 시정장애에도 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 대기 중에서 시정장애에 주로 영향을 미치는 입자는 0.1~1.0 μm인 미세입자로 입자에 함유된 황산염, 질산염 및 탄소성분이 시정장애에 크게 기여하는 것으로 보고되고 있다(윤순창과 이강웅, 1998; 백남준 등, 1996; Conner *et al.*, 1991).

연구기간에 제주도 고산지역에서 채취한 PM_{2.5} 에어로졸을 황사와 비황사 시료로 분류하여 각각의 이온성분 농도를 비교하였다. 전체 3회의 황사일 중에서 PM_{2.5} 시료는 2010년 3월 20~21일의 2차와 5월 9~11일의 3차의 측정 결과만을 이용하였다. 그리고 앞에서와 마찬가지로 황사 기간의 시료를 2010년 3월 20~21일의 '고농도 황사', 2010년 3월 20~21일과 5월 9~11일의 2~3차 시료를 평균하여 이를 '황사' 시료로 분류하였다. 그리고 3월부터 5월까지 채취한 총 32개 시료에서 강우량 3 mm 이상과 황사 시료 4개를 제외한 나머지 모든 시료의 이온농도를 평균하여 이를 '비황사' 시료로 분류하였다. 이렇게 분류한 고농도 황사, 황사, 비황사 기간의 이온성분 분석 결과를 Table 7에 수록하였고, 각 성분별 농도를 Figure 11~12에 비교하였다.

Table 7의 결과와 같이 PM_{2.5} 에어로졸의 이온성분 농도는 3월 20~21일의 고농도 황사 시 이온 농도가 nss-SO₄²⁻ > NO₃⁻ > Cl⁻ > Na⁺ > NH₄⁺ > nss-Ca²⁺ > K⁺ > Mg²⁺ 순으로 높게 나타났다. 그리고 2차와 3차 황사를 평균한 이온 농도 nss-SO₄²⁻ > NO₃⁻ > NH₄⁺ > Na⁺ > Cl⁻ > nss-Ca²⁺ > K⁺ > Mg²⁺ 순으로 높고, 나머지 시료를 평균한 비황사 이온의 농도는 nss-SO₄²⁻ >

$\text{NH}_4^+ > \text{NO}_3^- > \text{Na}^+ > \text{Cl}^- > \text{K}^+ > \text{nss-Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$ 순으로 높은 농도를 보였다. 이렇게 비교한 $\text{PM}_{2.5}$ 미세먼지의 특징은 nss-Ca^{2+} 성분의 농도가 황사 시에도 그다지 크게 상승하지 않았고, 이보다 큰 입경의 TSP, PM_{10} 입자와는 다른 특징을 나타내었다.

또 $\text{PM}_{2.5}$ 이온성분들의 농도를 3월 20~21일의 고농도 황사(HAD), 3월 20~21일과 5월 9~11일의 황사(AD), 비황사(NAD)로 구분하여 비교하였다. 이러한 비교에서 고농도 황사, 황사, 비황사 시에 nss-SO_4^{2-} 농도는 각각 7.47, 6.58, 6.98 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 그리고 고농도 황사와 비황사 시의 HAD/NAD 농도비는 1.1배, 황사와 비황사 시의 AD/NAD 농도비가 0.9배로 고농도 황사 시에 nss-SO_4^{2-} 농도가 다소 상승하는 것으로 조사되었다. 그러나 이러한 상승률은 앞의 TSP, PM_{10} 보다는 상대적으로 더 낮은 특징을 보였다. 그리고 $\text{PM}_{2.5}$ 에어로졸에서 SO_4^{2-} 중 nss-SO_4^{2-} 이 차지하는 비율은 고농도 황사, 황사, 비황사 시에 각각 92.3, 95.5, 98.5%로, 해염에서 유래된 SO_4^{2-} 의 양은 아주 미미한 것으로 확인되었다. 이는 앞의 TSP 에어로졸에서 85.1, 87.3 92.9%에 비해 훨씬 더 낮은 해염 기여도를 나타내는 결과이다. 그리고 TSP 에어로졸보다 $\text{PM}_{2.5}$ 에어로졸에서 nss-SO_4^{2-} 가 차지하는 비율이 더 높은 것은 비해염 황산염이 조대입자에 비해 미세입자에서 상대적으로 더 높게 분포하고 있음을 의미한다.

다음으로 높은 농도를 보이고 있는 NO_3^- 은 고농도 황사, 황사, 비황사 시에 각각 4.70, 2.34, 2.27 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 이 역시 황사 시에 훨씬 더 높고, HAD/NAD, AD/NAD 농도비가 각각 2.1, 1.0배 비율을 보여 특히 고농도 황사 시에 농도가 크게 상승한 것으로 확인되었다. 또 NH_4^+ 농도는 고농도 황사, 황사, 비황사 시에 각각 2.29, 2.20, 2.87 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 값을 보였고, HAD/NAD와 AD/NAD 농도비가 모두 0.8배로 오히려 황사 시에 농도가 다소 감소한 것으로 조사되었다. 이러한 원인은 앞의 TSP 경우에서와 마찬가지로 산성염인 암노늄염이 황사입자의 염기성 물질과 부분적으로 중화반응을 일으켜 NH_3 가 기화되기 때문인 것으로 판단된다(고희정, 2010).

한편 토양의 지표 성분인 nss-Ca^{2+} 의 경우, 고농도 황사, 황사, 비황사 시의 농도가 각각 1.11, 0.48, 0.07 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타나 큰 차이를 보였다. 그리고 HAD/NAD, AD/NAD 농도비가 각각 16.3 7.0배로 수용성 이온성분들 중에서 가

장 큰 차이를 나타내었다. 그리고 생체소각(biomass burning)과 토양 기원을 나타내는 K^+ 은 고농도 황사, 황사, 비황사 시 농도가 각각 0.34, 0.21, 0.15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, HAD/NAD, AD/NAD 농도비가 각각 2.4, 1.4배 비율로 이 역시 황사 시에 농도가 상승하였다. 또한 해양기원의 Na^+ , Cl^- , Mg^{2+} 농도를 보면, 고농도 황사, 황사, 비황사 시 Na^+ 농도가 각각 2.47, 1.23, 0.45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, HAD/NAD, AD/NAD 농도비는 5.5, 2.7배로 이 역시 황사 시에 상승하였다. Cl^- 의 경우 고농도 황사, 황사, 비황사 시 각각 2.64, 1.08, 0.17 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, HAD/NAD, AD/NAD 농도비는 15.1, 6.2배 비율을 나타내었다. Mg^{2+} 역시 고농도 황사, 황사, 비황사 시 농도가 각각 0.30, 0.14, 0.05 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, HAD/NAD와 AD/NAD 농도비는 5.9, 2.8배 비율로, 해양기원의 Na^+ , Cl^- , Mg^{2+} 성분들은 모두 황사 시에 농도가 증가하였다.

또한 고산지역 $\text{PM}_{2.5}$ 에어로졸의 이온성분 조성비를 조사하였고, 그 결과를 Figure 15에 비교하였다. 먼저 인위적 기원 성분들의 조성을 살펴보면, 3월 20~21일의 고농도 황사 에어로졸에서는 이들의 조성비가 nss-SO_4^{2-} 35.0%, NH_4^+ , 10.7%, NO_3^- 22.0%, K^+ 1.6%로 전체 조성의 69.3%를 차지하였다. 그리고 2010년 3월 20~21일의 2차 시료와 5월 9~11일의 3차 시료를 평균한 황사 에어로졸의 조성비는 이들 성분들이 각각 nss-SO_4^{2-} 46.2%, NH_4^+ 15.4%, NO_3^- 16.4%, K^+ 1.4%로 전체 조성의 79.4%를 차지하였다. 반면에 비황사 에어로졸에서는 이들 성분들이 각각 nss-SO_4^{2-} 53.6%, NH_4^+ 22.0%, NO_3^- 17.5%, K^+ 1.1%의 조성비를 나타내었고 전체 조성의 94.2%를 차지하였다. 이처럼 $\text{PM}_{2.5}$ 미세입자에서는 상대적으로 인위적 기원 성분들이 황사보다 비황사 시에 훨씬 더 높은 조성비를 나타내는 특징을 보였다.

반면에 토양기원의 nss-Ca^{2+} 조성비는 고농도 황사 시에 5.2%, 황사 시 3.3%, 비황사 시 0.5%로 황사 시에 그 비율이 크게 증가하는 것으로 확인되었다. 또 해양기원 성분들의 조성비는 고농도 황사 시에 Na^+ 11.6%, Cl^- 12.4%, Mg^{2+} 1.4%로 전체의 25.4%를 차지하였고, 황사 시에는 각각 Na^+ 8.6%, Cl^- 7.6%, Mg^{2+} 1.0%로 전체의 17.2%를 차지하였다. 반면에 비황사 시에는 이들 성분들이 Na^+ 3.5%, Cl^- 1.3%, Mg^{2+} 0.4%의 조성비를 보였고 전체의 5.2%를 차지하였다. 이처럼 해양 성분들 역시 nss-Ca^{2+} 와 유사하게 황사 시에 그 비율이 더 상승하는 결과를 보였다.

그리고 이러한 결과들을 기초로 고산지역 대기 에어로졸의 조성 특성을 보면, PM_{2.5} 에어로졸의 이온성분은 NH₄⁺을 제외한 모든 성분들의 농도가 대체적으로 황사 시에 더 높았고, 특히 고농도 황사 시에 두드러진 상승을 나타내었다. 그리고 황사에 비해 비황사 시에 상대적으로 인위적 기원 성분들의 조성비가 상승하는 경향을 나타내었다. 또한 PM_{2.5} 에어로졸에서 토양기원 및 해양기원 성분들은 TSP, PM₁₀에 비해 상대적으로 황사와 비황사 간 큰 차이를 보이지 않았다. 그리고 기상기록 이래 가장 높은 농도를 나타낸 3월 20~21일의 고농도 황사의 경우, TSP, PM₁₀, PM_{2.5} 에어로졸 모두에서 대부분의 이온성분들이 훨씬 더 높은 농도를 나타낸 것으로 확인되었다.

Table 7. Concentration of elemental components of PM_{2.5} aerosols during the spring season of 2010.

Species	Concentration (ug/m ³)			HAD /NAD	AD /NAD
	High Conc. Asian Dust (HAD) ¹⁾	Asian Dust (AD) ²⁾	Non-Asian Dust (NAD)		
NH ₄ ⁺	2.29	1.95	2.87	0.8	0.7
Na ⁺	2.47	0.37	0.45	5.5	0.8
K ⁺	0.34	0.11	0.15	2.4	0.8
Mg ²⁺	0.30	0.05	0.05	5.9	0.9
NO ₃ ⁻	4.70	0.87	2.27	2.1	0.4
Cl ⁻	2.64	0.05	0.17	15.1	0.3
nss-Ca ²⁺	1.11	0.11	0.07	16.3	1.7
nss-SO ₄ ²⁻	7.47	5.42	6.98	1.1	0.8

¹⁾HAD: 2010. 3. 20 ~21, ²⁾AD: 2010. 3. 20 ~21, 5. 9~11

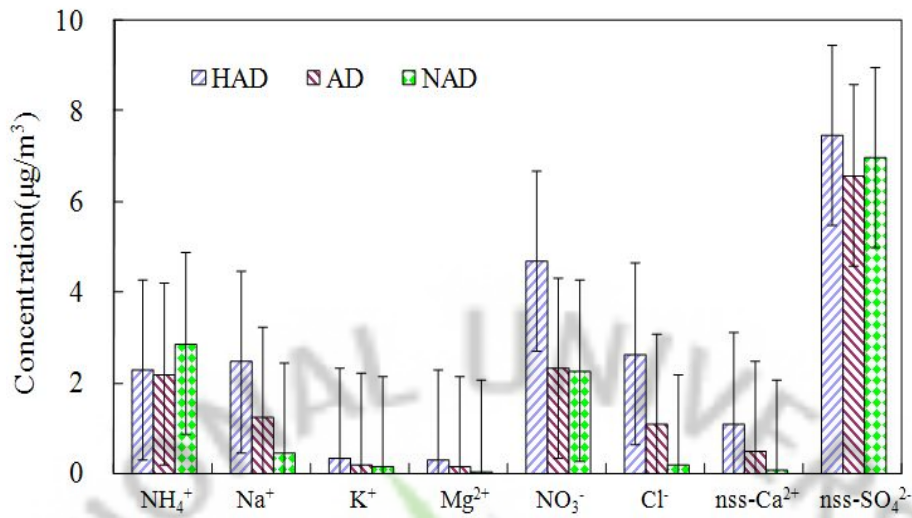


Figure 11. Comparison of ionic concentrations in PM_{2.5} aerosols.

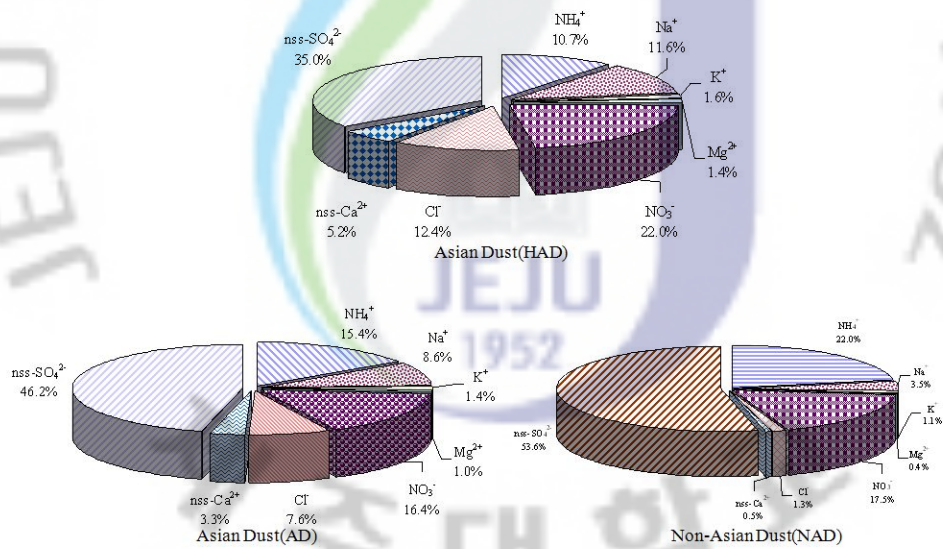


Figure 12. Composition ratio of ionic components in PM_{2.5} aerosols

3. 황사 에어로졸의 입경별 조성 특성

1) 황사입자의 입경별 이온성분 농도

대기 중의 먼지입자가 인체 호흡기의 각 부위에 도달하는 정도는 입자의 크기에 따라 달라지기 때문에 위해도를 평가하는데 있어 입자크기(입경)는 중요한 요소이다(강공연 등, 2008). 입자상 대기오염물질인 에어로졸은 직접적으로 인체 건강 및 산업 활동에 영향을 줄 뿐만 아니라 시정, 지구기후변화에도 크게 영향을 미치는 것으로 나타나고 있어서 집중적인 연구 및 관리가 필요하다. 그리고 발생 기원에 따라 입자의 크기, 밀도, 흡습성 등 물리적 특성이 다르고, 중금속이나 수용성 성분의 함량 등 화학적 조성이 다른 특징을 나타낸다. 또 빛의 흡수와 산란에 의해 지구 복사평형에 영향을 미치고, 응축 핵으로 작용하여 구름 형성에도 관여한다(Takamura *et al.*, 2007; 김평래 등, 2009; Kim *et al.*, 2006).

또한 대기에어로졸은 입자크기에 따라 물리·화학적 특성이 다르고 대기질, 인체 건강에 대한 영향도 다르게 나타난다(김성천 등 2000). 일반적으로 입자크기는 2.5 μm 을 기준으로 조대입자(coarse particle)와 미세입자(fine particle)로 분류하고 있다. 입자크기가 10 μm 이하인 대기에어로졸은 장거리 이동이 가능하며, 표면적이 크기 때문에 각종 유해성분을 다량 함유하고 있어서 환경보건학적 중요성이 매우 크다(박찬구 등, 2001; Monn *et al.*, 1997). 특히 5 μm 이상의 입자들은 대부분 호흡 시 코 점막에 의해 제거되지만, 2.5 μm 미만의 미세입자들은 호흡 시 쉽게 폐속으로 침투된다(Berico *et al.*, 1997).

일반적으로 조대입자는 비산된 토양입자, 해염 등과 같이 기계적 분쇄과정을 거쳐 생성되며 대부분 자연적 발생원에 의해 생성된다. 이러한 조대입자는 주로 화석연료의 불연소 성분, 광공업 시설에서 배출되는 금속 성분, 지각기원 성분, 해수 성분 등을 포함한다. 그리고 일반적으로 대기 중에서의 체류시간이 짧고, 호흡 시 비강에서 걸러지기 때문에 인체에 대한 피해는 상대적으로 적은 편이다. 그러나 2.5 μm 이하의 미세입자는 화석연료의 연소, 자동차 배출가스, 화학물질 제조과정 등과 같이 주로 인위적 발생원에 의해 생성된 물질과 기체상 물질이 입자상으로 전환된 2차 오염물질로 구성되어 있다. 이러한 미세입자의 화학 성분

은 주로 H^+ , SO_4^{2-} , NH_4^+ , OC (organic carbon), EC (elemental carbon) 등으로 특히 OC, SO_4^{2-} 농도가 높아 기관장애 등 인체에 직접적인 피해를 일으킨다 (Lighty *et al.*, 2000). 또한 주로 0.1~2.0 μm 의 미세입자에 주로 포함된 황산암모늄염, 질산암모늄염 등은 빛의 산란, 흡수, 방출을 통해 시정장애를 유발하고 지구복사 수지에 영향을 미쳐 기후변화에 영향을 주기도 한다. 더욱이 이러한 미세입자는 대기 중에 장기간 체류하기 때문에 발생원으로부터 수백~수천 km까지 장거리 이동하여 국지적인 오염이 주변지역으로 넓게 광역화되는 경향을 보인다(김병곤, 2008; Seinfeld and Pandis, 1998).

이처럼 대기 에어로졸은 크기에 따라 입자의 특성이 다르게 나타나고, 또 인체 위해도도 달라지기 때문에 이를 입경별로 분리하여, 그 구성 성분과 조성 특성을 조사하는 것은 큰 의미가 있다.

본 연구에서는 에어로졸의 입경별 특성을 조사하기 위하여, 2010년 봄철에 제주지역에서 8단 Cascade Impactor를 사용하여 황사입자를 입경별로 채취하였다. 이 Cascade Impactor는 입자크기에 따라 inlet (9.0 μm 이상), 1단(5.8~9.0 μm), 2단(4.7~5.8 μm), 3단(3.3~4.7 μm), 4단(2.1~3.3 μm), 5단(1.1~2.1 μm), 6단(0.65~1.1 μm), 7단(0.43~0.65 μm)의 총 8단계로 분리, 채취할 수 있도록 구성되어 있다. 제주지역의 봄철 1차 황사는 2010년 3월 13~15일, 2차 황사는 2010년 3월 20~21일에 발생하였고, 특히 2차 황사는 지금까지 제주지역에서 발생한 황사 중에서 가장 강한 것으로 드러나 사례 분석을 통해서 그 특성을 좀 더 집중적으로 조사해 볼 필요가 있다. 본 연구에서는 1~2차 황사 시에 에어로졸 시료를 입경별로 채취하여 주요 이온성분과 원소성분을 분석하였다. 그리고 그 결과를 Table 8~9에 수록하였고, 각 성분들의 입경별 농도를 Figure 13~16에 비교하였다. 그림에서 입경은 공기역학적 입경(aerodynamic diameter)으로 나타내었다. 일반적으로 대기입자는 중력침강속도를 이용하여 크기를 정의하는 방법이 많이 이용된다. 이는 실제 입자가 대부분 구형이 아니기 때문에 비구형 입자를 중력침강속도가 동일한 구로 환산하여 입자의 크기를 정의하는 방법이다. 이 때 실제 입자와 같은 밀도를 갖는 구의 직경을 스톱스 입경(Stokes diameter)이라고 하고, 실제 입자와는 다르나 밀도가 1 g/cm^3 인 구의 직경을 공기 역학적 입경(aerodynamic diameter)이라고 한다. 임팩터의 경우 입자의 공기역학적 특성을 이용하기 때문

에 입자의 크기를 주로 공기역학적 입경으로 나타낸다(지준호, 2001). 또 각 성분의 농도는 질량농도를 입폭터 각 단의 입자 분급폭 ($\log D_p = \log D_1 - \log D_2$)으로 나눈 'dC/d log Dp'를 산출하여 나타내었다(Lyons *et al.*, 1993).

먼저 대기 에어로졸의 질량농도를 보면, 1차 황사 시 입경별 질량농도는 3.2~12.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 범위를 나타내었고, 전체 질량농도는 7.20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 값을 보였다. 그리고 2차 황사에서는 7.5~192.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 범위를 나타내었고, 전체적인 질량농도는 73.33 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 또 황사 시 질량농도는 1차, 2차 모두에서 미세입자(9.94 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)보다는 상대적으로 조대입자(58.46 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 영역에 더 많이 분포하는 것으로 나타났다.

또한 수용성 이온성분들의 농도를 입경별로 비교하였다. 먼저 SO_4^{2-} 의 농도 분포를 보면, 일반적으로 SO_4^{2-} 은 가스상 SO_2 가 상변환으로 인해 생성되기 때문에 대부분 직경 1 μm 이하인 미세입자에 존재하고, 특히 도시나 내륙에서 SO_4^{2-} 은 극미세입자에 많이 분포하는 것으로 알려져 있다(Wall *et al.*, 1988). 본 연구에서 nss- SO_4^{2-} 은 1차 황사 시에 2.1 μm 이하의 미세입자 영역에서 2.52 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 2.1 μm 이상의 조대입자에서 1.40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도 분포를 나타내었다. 또 2차 황사 시에는 미세입자 영역에서 8.07 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 조대입자에 10.39 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도 분포를 보였고, 1차와 2차 모두 미세입자에 더 많이 분포되는 경향을 보였다. 그리고 nss- SO_4^{2-} 은 1차 황사 시에 조대입자보다는 미세입자 영역에 더 많이 분포되는 경향을 보였고, 2차 황사 시에는 상대적으로 조대입자에 많이 분포되어 이산형을 나타내는 것으로 조사되었다.

NH_4^+ 은 1차 황사 시에 2.1 μm 이하의 미세입자 영역에서 1.21 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 2.1 μm 이상의 조대입자에서 0.61 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도 분포를 나타내었다. 그리고 2차 황사 시에는 미세입자 영역에서 5.75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 조대입자에서 3.97 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도를 나타내어 주로 조대입자보다는 미세입자에 많이 분포하는 것으로 조사되었다. 일반적으로 NH_4^+ 은 NH_3 와 가스상 산성물질의 반응으로 생성되어 NH_4NO_3 , $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, NH_4Cl 등의 염 형태로 주로 미세입자에 분포하는 것으로 알려져 있다. 본 연구 결과에서 NH_4^+ 역시 SO_4^{2-} 과 마찬가지로 주로 미세입자에 분포하는 경향을 보였다.

NO_3^- 은 1차 황사 시 2.1 μm 이하의 미세입자 영역에서 0.33 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 2.1 μm 이

상의 조대입자에서 $1.82 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도 분포를 나타내었다. 그리고 2차 황사 시에는 미세입자 영역에서 $3.39 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 조대입자 영역에서 $7.74 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도 분포를 나타내어 NO_3^- 은 1차, 2차 황사 모두 주로 $2.1\sim 5.8 \mu\text{m}$ 의 미세와 조대입자 영역에 분포하는 경향을 보였다. 보통 미세입자에서 NO_3^- 은 인위적인 오염원에 의한 영향으로 보고 있다. 즉, 미세입자 영역에서는 주로 HNO_3 과 NH_3 가 반응하여 생성된 NH_4NO_3 으로 존재한다. 반면에 조대입자에서는 부분적으로 해염입자와 반응하여 NaNO_3 로 존재한다고 알려져 있다. 따라서 미세입자의 NH_4NO_3 은 휘발성이 커서 낮은 습도와 높은 온도 하에서 쉽게 가스상인 HNO_3 과 NH_3 로 전환된다. 그러나 해염성분의 농도가 높으면 HNO_3 은 NaCl 과 반응하여 조대입자에서 안정한 NaNO_3 을 생성하거나(Wall *et al.*, 1988), 다른 해염 성분인 MgCl_2 , CaCl_2 와 반응하기도 한다(Andreae and Crutzen, 1997). 또 HNO_3 은 토양입자의 CaCO_3 과 반응하여 조대입자에서 질산염을 생성한다고 알려져 있다(Yao *et al.*, 2003; Zhuang *et al.*, 1999; Plate and Schulz, 1997; Pakkanen *et al.*, 1996). 이러한 이유로 NO_3^- 은 보통 미세입자와 조대입자 영역에서 이산형 분포를 보이는 것이 일반적이다. 그러나 본 연구에서는 이러한 경향과는 다소 다른 결과를 나타내었다.

한편 토양기원의 nss-Ca^{2+} 은 1차 황사 시에 $2.1 \mu\text{m}$ 을 기준으로 미세입자 영역에서 $0.17 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 조대입자 영역에서 $1.09 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도 분포를 나타내었다. 그리고 2차 황사 시에서는 미세입자 영역에서 $1.18 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 조대입자 영역에서 $14.89 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도 분포를 나타내어 1차와 2차 황사 모두 미세입자보다는 조대입자 영역에서 훨씬 더 높은 농도 분포를 보이는 것으로 조사되었다. 그리고 해염 성분인 Na^+ 과 Cl^- 을 보면 Na^+ 은 1차 황사 시 미세입자 영역에서 $0.17 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 조대입자에서 $0.68 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도 분포를 나타내었다. 그리고 2차 황사 시에는 미세입자 영역에서 $0.64 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 조대입자에서 $5.27 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도 분포를 나타내었다. Cl^- 역시 1차 황사 시 미세입자 영역에서 $0.06 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 조대입자에서 $1.03 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도를 나타내었고, 2차 황사 시에는 미세입자 영역에서 $0.40 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 조대입자에서 $5.32 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도 분포를 나타내었다. 따라서 이들 해염 성분 역시 황사 시에는 미세입자보다는 조대입자 영역에 더 많이 분포하는 것으로 판단된다. 또한 상대적으로 미량 농도인 Mg^{2+} , K^+ 의 경우를 보면, Mg^{2+} 은 1차 황사 시 미세입자 영역에서 $0.03 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 조대입자에서 $0.18 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 2차 황사 시에는 미세입자

영역에서 $0.17 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 조대입자에서 $1.31 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도 분포를 나타내어 미세입자보다는 조대입자 영역에 더 많이 분포하는 경향을 보였다. 그리고 K^+ 은 1차 황사 시 미세입자 영역에서 $0.31 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 조대입자 영역에서 $0.51 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도 분포를 보였고, 2차 황사 시에는 미세입자 영역에서 $0.95 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 조대입자에서 $1.38 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도 분포를 나타내어 황사 시에 조대입자 영역에서 더 큰 분포를 나타내었다. 일반적으로 K^+ 은 토양에서 유래된 경우에는 조대입자 영역에 분포하지만, 인위적 오염원이나 생체소각에 의해 배출되면 미세입자 영역에 더 많이 분포하는 것으로 조사되고 있다(Fang *et al.*, 2005; Maenhant *et al.*, 2002). 따라서 본 연구에서 K^+ 이 이처럼 1차와 2차 황사 모두 조대입자 영역에서 더 큰 분포를 보이는 것은 K^+ 이 다른 요인보다는 주로 토양에 의해 유입되었음을 의미하는 결과이다.

이처럼 이온성분들의 농도를 입경별로 분류하여 비교한 결과들을 종합해 보면, 에어로졸의 수용성 이온성분들 중에서 nss-SO_4^{2-} , NH_4^+ 등의 인위적 기원 성분들은 주로 미세입자 영역에 많이 분포하나 NO_3^- 은 미세입자와 조대입자에 동시에 분포하는 것으로 조사되었다. 반면에 토양기원 성분(nss-Ca^{2+})과 해양기원 성분(Na^+ , Cl^- , Mg^{2+})은 대부분 조대입자 영역에 분포하는 경향을 나타내었다.

또한 입자크기별로 채취한 대기 에어로졸에서 20종의 원소성분을 분석하였고, 이를 입경별로 분류하여 농도를 비교하였다(Table 8~9). 먼저 토양에서 유래하는 Al, Fe, Ca 성분을 보면 Al은 1차 황사 시 $2.1 \mu\text{m}$ 이하의 미세입자 영역에서 $0.92 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $2.1 \mu\text{m}$ 이상의 조대입자 영역에서 $1.59 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도 분포를 나타내었다. 그리고 2차 황사 시에는 미세입자 영역에서 $0.45 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 조대입자 영역에서 $4.75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도 분포를 나타내었다. 또 Fe은 1차 황사 시 미세입자에서 $0.85 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 조대입자에서 $2.16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도를 나타내었고, 2차 황사 시에는 미세입자에서 $0.64 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 조대입자에서 $2.93 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도 분포를 나타내었다. Ca 역시 1차 황사 시에 미세입자 영역에서 $0.98 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 조대입자에서 $1.42 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도 분포를 나타내었고, 2차 황사 시에 미세입자에서 $1.13 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 조대입자에서 $2.54 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도 분포를 나타내었다. 이와 같이 이들 Al, Fe, Ca 성분은 1차와 2차 황사 시에 모두 미세입자보다는 조대입자 영역에 훨씬 더 많이 분포하는 경향을 보이는 것으로 확인되었다. 또한 해양기원의 Na, Mg 성분의 농도는 Na이

1차 황사 시에 미세입자 영역에서 $1.08 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 조대입자에서 $1.84 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도 분포를 보였고, 2차 황사 시에는 미세입자에서 $0.40 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 조대입자에서 $2.88 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도 분포를 나타내었다. 그리고 Mg은 1차 황사 시 미세입자 영역에서 $0.63 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 조대입자에서 $1.65 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 2차 황사 시에는 미세입자 영역에서 $0.10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 조대입자에서 $1.76 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도 분포를 보였다. 이들 해염성분들 역시 토양 지표성분들과 마찬가지로 조대입자 영역에서 높은 농도를 보이는 것으로 확인되었다.

반면에 인위적 발생기원의 S, Pb, Zn 성분들의 입경별 농도 분포를 살펴보면, S은 1차 황사 시 미세입자 영역에서 $2.03 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 조대입자에서 $2.37 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 2차 황사 시에는 미세입자 영역에서 $0.35 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 조대입자에서 $9.32 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도 분포를 나타내었다. Pb은 1차 황사 시 미세입자 영역에서 $0.11 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 조대입자에서 $0.04 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 2차 황사 시에는 미세입자 영역에서 $0.07 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 조대입자에서 $0.56 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도 분포를 나타내었다. 또 Zn은 1차 황사 시 미세입자 영역에서 $0.30 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 조대입자에서 $0.27 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 2차 황사 시에는 미세입자 영역에서 $0.32 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 조대입자에서 $1.10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도를 보였다. 이처럼 S, Pb, Zn 등은 주로 미세입자에 많이 분포하지만 황사 시에는 조대입자에서도 농도가 증가하는 이산형 분포를 나타내었다. 이 중 S과 Pb은 주로 인위적 기원으로 발생되고 있으나 Zn은 자연발생적 기원과 인위적 기원을 동시에 나타내는 물질로 분류되고 있다. 이는 Zn이 일반적으로 토양입자에도 다량으로 존재하고, 제철업 등의 산업시설에서도 다량으로 발생하기 때문이다. Zn의 입경별 농도만으로 보면, 고산지역에 어로줄은 인위적인 영향 또는 자연발생적 영향을 동시에 받았던 것으로 판단된다. 또한 비교적 낮은 농도를 나타내는 원소성분들 중에서 Ti, Cr, Mn, Co, Mo, Cd 등은 대부분 조대입자 영역에 분포하는 것으로 조사되었다. 반면에 Ba, Sr, Cu은 대부분 미세입자영역에서 높은 농도를 나타내었다.

Table 8. Concentrations of size-segregated Asian Dust particles during the first Asian Dust event (March 13~15, 2010).

Species	Concentration (ng/m ³)							
	Particle size (μm)							
	0.43~0.65	0.65~1.1	1.1~2.1	2.1~3.3	3.3~4.7	4.7~5.8	5.8~9.0	9.0 Up
Mass	3188.4	4068.0	4617.7	9565.3	12753.7	6816.6	10664.7	5937.1
NH ₄ ⁺	421.6	637.6	149.5	172.2	148.9	81.4	78.4	127.1
Na ⁺	15.7	28.1	123.7	94.3	221.5	138.0	83.6	147.4
K ⁺	94.3	103.6	114.3	79.3	98.7	113.5	91.2	129.2
Mg ²⁺	0.0	5.9	27.0	32.9	51.3	38.6	32.4	22.9
NO ₃ ⁻	42.1	55.6	234.0	432.1	513.6	327.7	278.5	265.6
Cl ⁻	2.7	15.6	43.4	147.2	243.5	141.8	248.3	247.6
nss-Ca ²⁺	5.2	34.3	133.4	206.8	297.5	228.5	208.6	152.0
nss-SO ₄ ²⁻	704.0	1179.1	638.9	287.4	327.4	215.3	284.0	288.3
Al	310.3	457.9	154.9	298.9	84.8	471.5	530.7	204.3
Fe	218.3	249.1	382.5	565.7	747.1	452.0	310.9	80.3
Ca	186.6	411.7	384.4	248.7	145.1	253.4	660.9	107.4
Mg	183.2	170.7	273.1	343.2	425.7	161.7	446.0	277.6
Na	144.7	288.3	648.4	772.8	353.9	345.4	235.2	127.8
K	319.4	825.4	621.9	197.9	237.4	192.2	472.1	64.4
S	640.1	799.6	594.9	492.9	544.0	420.7	472.7	439.2
Ti	3.1	2.5	4.1	21.3	19.7	1.9	12.5	6.6
Mn	3.4	4.2	7.7	11.9	15.5	8.5	13.3	7.4
Ba	18.6	5.6	16.3	36.2	10.1	2.2	11.3	1.1
Sr	6.5	10.5	29.1	26.2	31.8	5.7	20.5	18.8
Zn	64.0	120.6	115.1	76.8	38.3	57.9	55.1	37.9
V	1.8	1.6	1.5	1.7	2.2	1.7	2.7	2.0
Cr	13.7	13.2	17.0	13.7	18.7	13.8	13.6	13.7
Pb	7.3	89.4	15.3	2.8	5.1	7.3	10.2	13.0
Cu	0.8	1.0	2.4	0.4	2.5	3.0	6.2	3.4
Ni	8.6	7.7	21.3	14.5	8.5	8.1	5.6	8.4
Co	1.2	0.2	0.5	0.0	0.3	0.3	1.2	1.4
Mo	9.0	9.7	9.1	9.8	10.3	10.5	20.0	13.8
Cd	0.2	0.3	0.0	0.2	0.5	0.7	1.7	0.3

Table 9. Concentrations of size-segregated Asian Dust particles during the second Asian Dust event (March 20~21, 2010).

Species	Concentration (ng/m ³)							
	Particle size (μm)							
	0.43~0.65	0.65~1.1	1.1~2.1	2.1~3.3	3.3~4.7	4.7~5.8	5.8~9.0	9.0 Up
Mass	7534.7	8611.0	31645.6	68888.3	100964.4	56187.0	119908.7	192887.3
NH ₄ ⁺	1007.1	2055.6	2687.6	766.2	901.0	347.4	804.2	1146.8
Na ⁺	44.9	4.1	591.9	1019.3	1218.1	511.2	1100.6	1425.4
K ⁺	258.9	288.1	401.2	313.3	264.8	244.4	283.8	273.8
Mg ²⁺	9.1	22.4	138.9	313.4	307.6	148.0	227.9	312.4
NO ₃ ⁻	319.0	1012.1	2056.5	2464.4	2090.2	815.9	1339.6	1026.7
Cl ⁻	3.1	49.1	346.6	828.1	1045.9	499.9	1196.2	1752.9
nss-Ca ²⁺	85.2	115.2	978.5	3181.0	3304.7	1960.3	3118.2	3333.8
nss-SO ₄ ²⁻	1348.2	3042.3	3678.4	2151.1	2107.3	1246.5	2455.8	3197.8
Al	183.6	80.6	185.8	1330.9	1239.6	704.7	496.9	976.4
Fe	44.7	109.1	484.9	347.0	891.4	745.7	668.4	277.3
Ca	205.2	106.5	822.5	1158.7	483.3	255.6	102.2	535.6
Mg	27.3	55.2	22.0	82.9	194.3	328.2	537.9	616.0
Na	33.2	99.7	264.5	292.7	222.4	759.1	863.9	739.9
K	687.5	699.0	529.1	517.6	913.7	1079.9	217.3	210.9
S	509.1	1401.0	1585.1	1766.5	1870.0	1560.8	1992.7	2133.3
Ti	0.6	1.8	32.8	15.7	36.5	10.5	130.4	268.1
Mn	2.3	6.9	15.0	73.2	102.7	53.7	113.1	170.0
Ba	46.0	24.5	184.0	122.7	30.0	9.6	19.8	12.1
Sr	4.2	2.2	16.5	32.2	115.3	69.9	47.5	56.5
Zn	70.9	125.6	126.0	178.9	592.0	51.1	155.3	121.4
V	1.2	0.9	2.9	9.6	11.7	8.4	14.1	20.0
Cr	2.9	6.9	34.4	34.1	30.8	43.8	39.2	43.7
Pb	22.2	10.6	40.0	129.1	89.5	106.1	117.6	117.6
Cu	0.6	3.3	11.0	13.9	12.1	46.6	11.2	15.8
Ni	11.2	1.7	97.3	94.8	8.3	27.6	4.5	17.5
Co	0.2	0.5	2.9	2.8	2.7	2.8	4.0	4.2
Mo	1.4	2.8	2.4	23.9	24.8	28.2	22.0	16.9
Cd	0.2	0.5	1.1	1.7	3.5	0.4	1.6	2.5

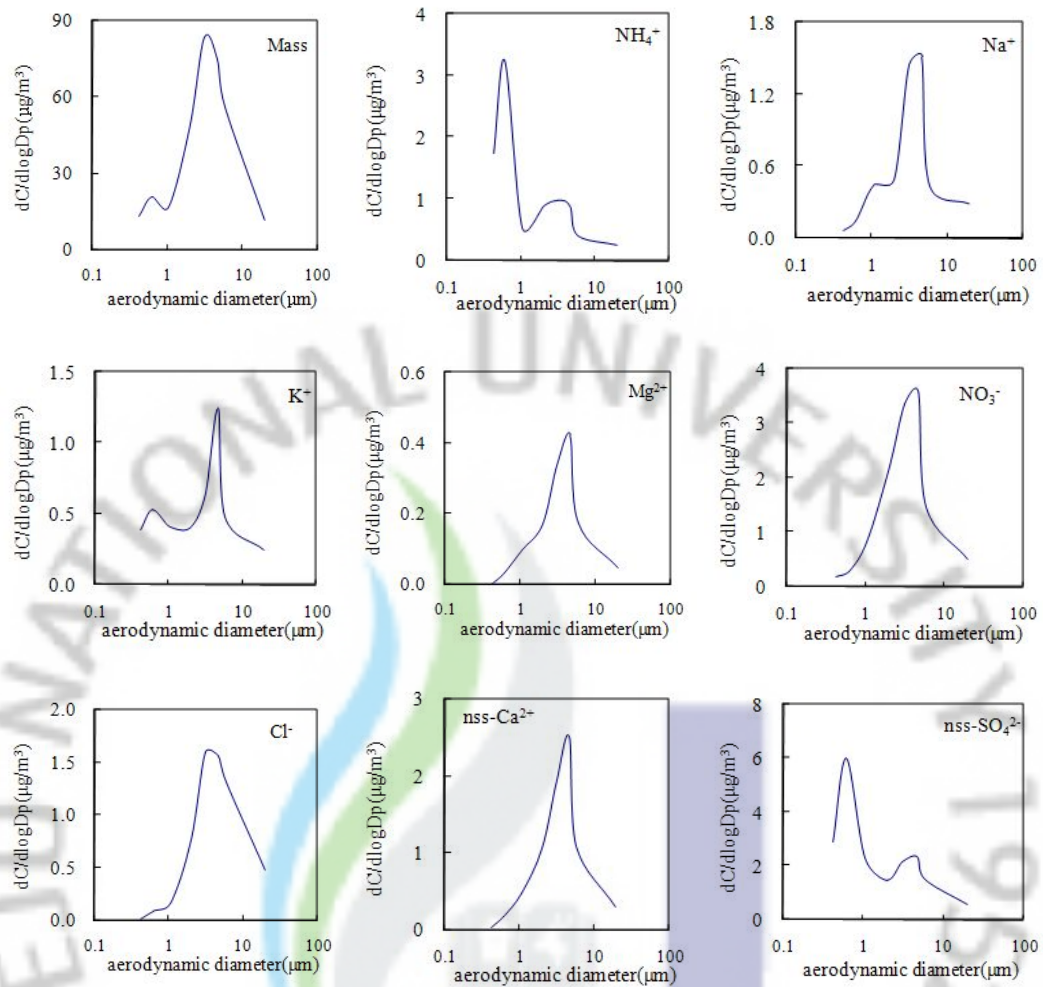


Figure 13. Size distribution of mass and ionic concentrations of size-segregated particles during the first Asian Dust event (March 13~15, 2010).

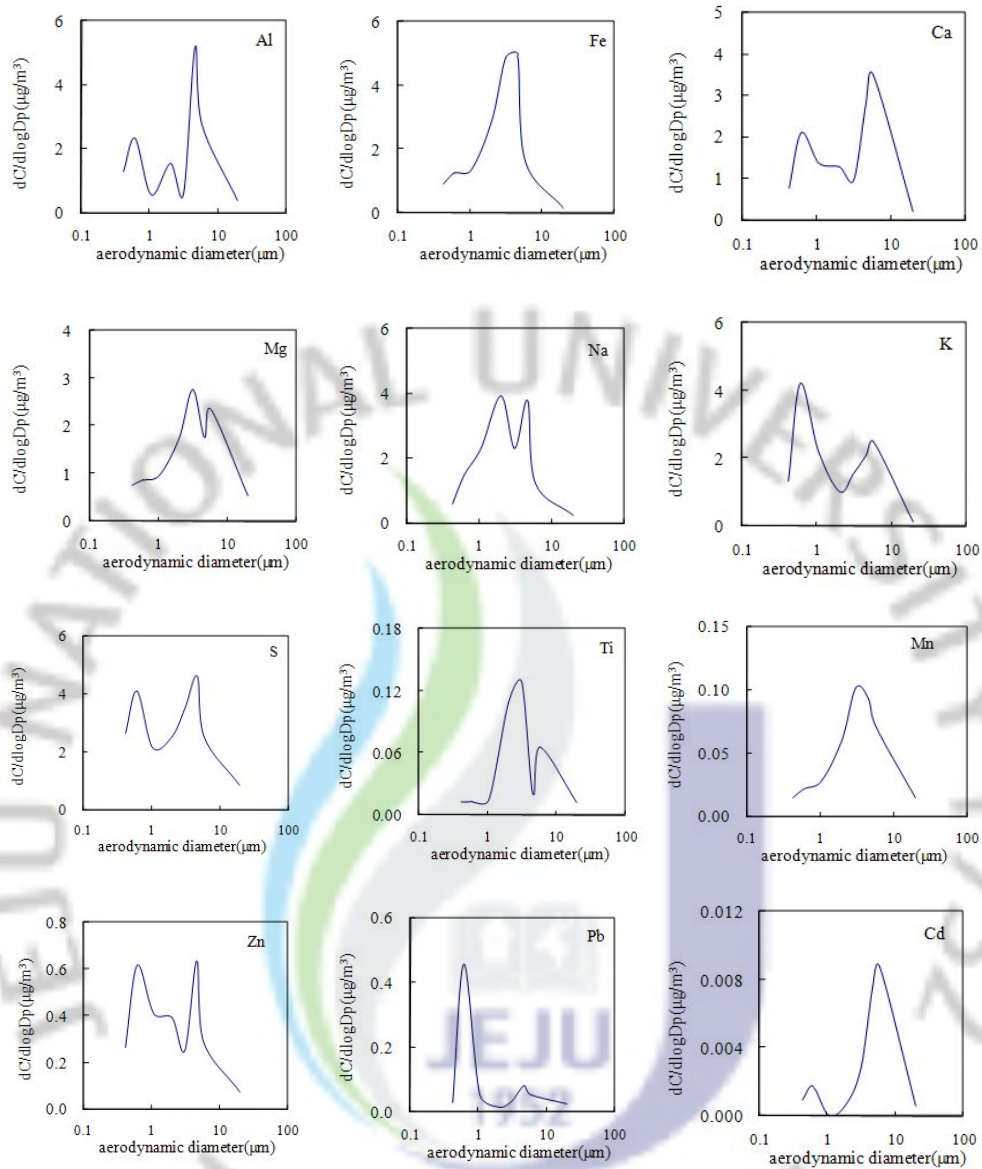


Figure 14. Size distribution of elemental concentrations of size-segregated during the first Asian Dust event (March 13~15, 2010).

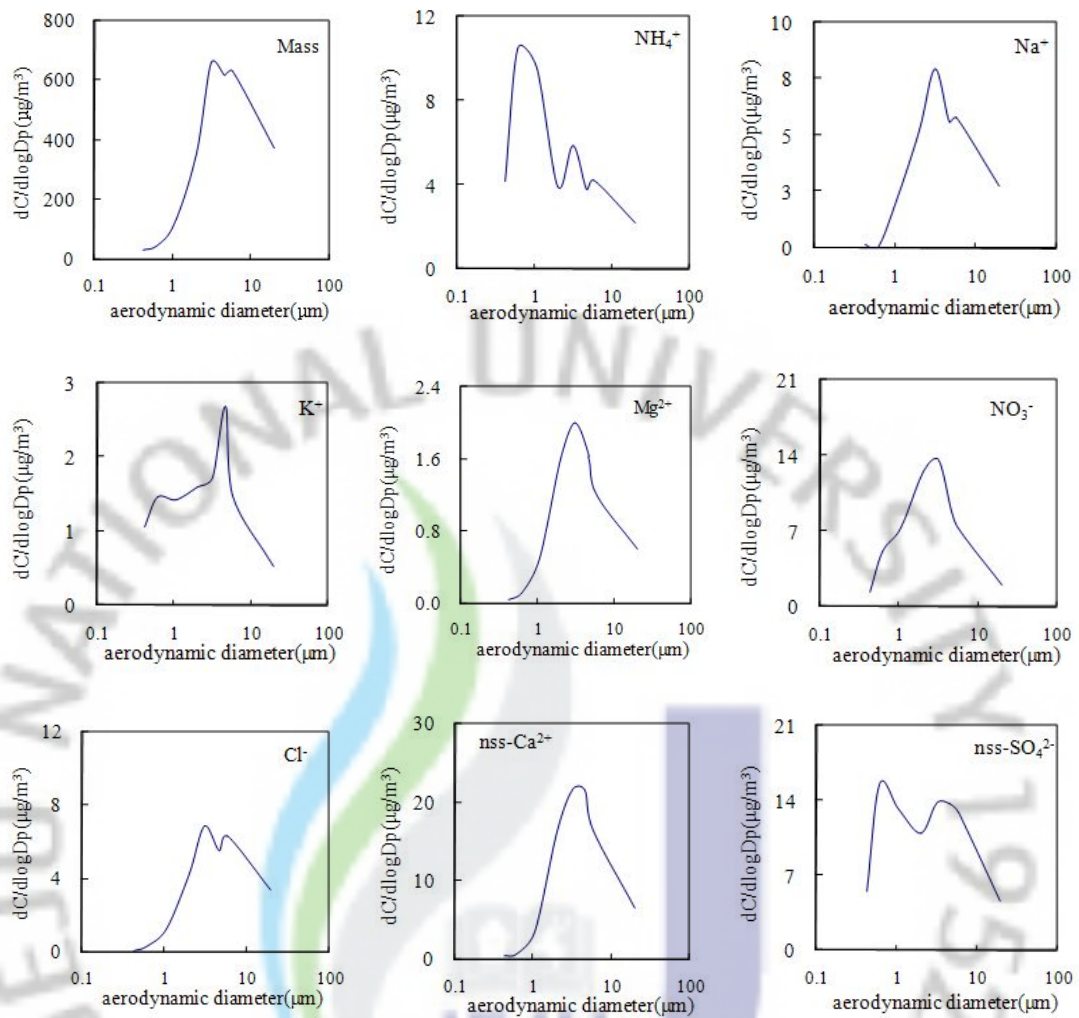


Figure 15. Size distribution of mass and ionic concentrations of size-segregated particles during the second Asian Dust event (March 20~21, 2010).

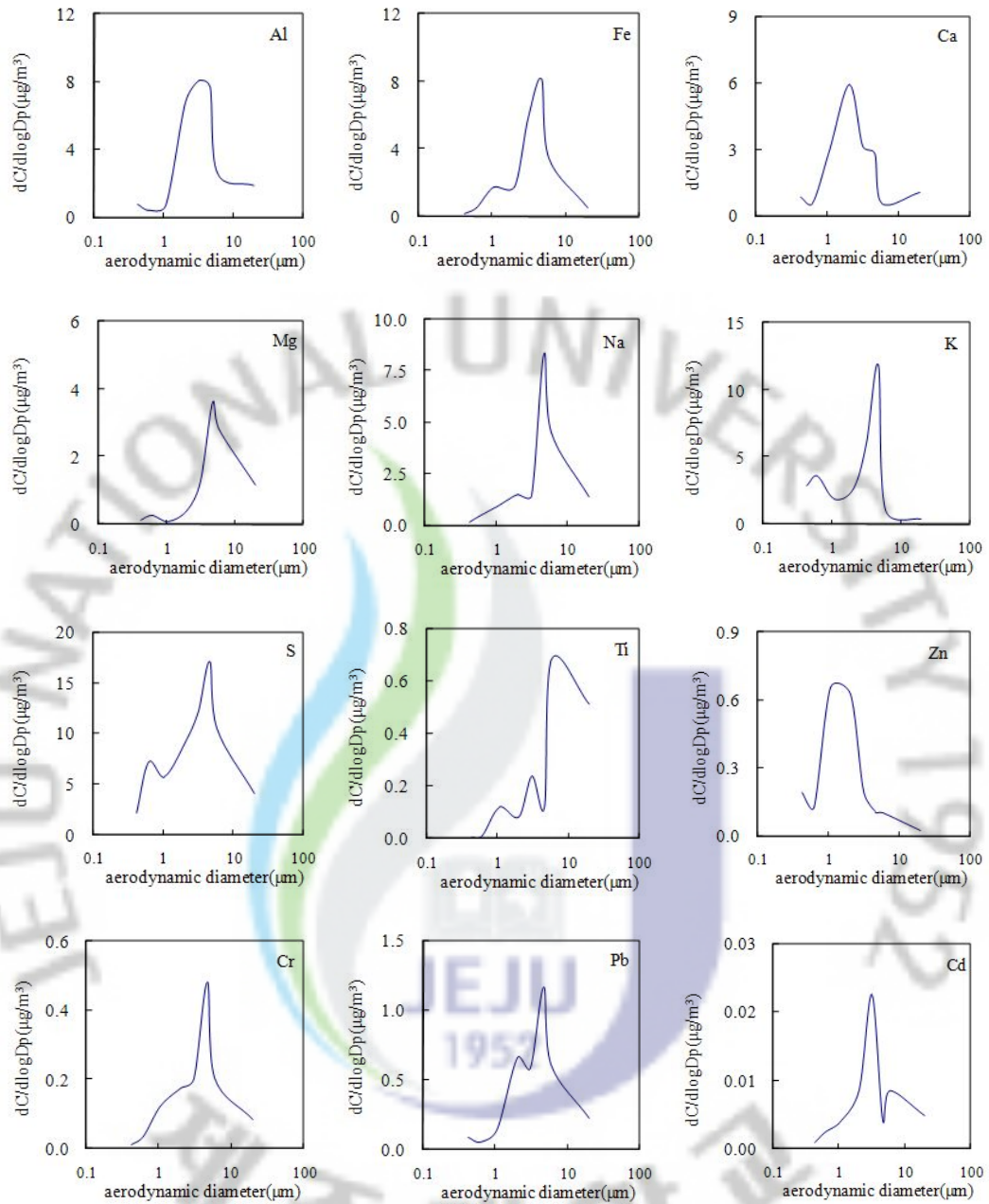


Figure 16. Size distribution of elemental concentrations of size-segregated particles during the second Asian Dust event (March 20~21, 2010).

2) 황사와 비황사 이온성분 농도 비교

황사가 발생하면 대기 에어로졸 조성이 크게 변화하고, 보통 $10\sim 50 \mu\text{m}/\text{m}^3$ 정도인 미세먼지 농도도 $100\sim 500 \mu\text{m}/\text{m}^3$ 로 증가한다. 그리고 황사의 화학 조성이 주로 석영, 장석, 이라이트 등으로 구성되어 있고 다양한 원소성분을 포함하고 있기 때문에 주성분인 Si, Al, Ca, K, Na 등의 농도가 상승한다. 또 이온성분들 중에서는 nss- Ca^{2+} 을 비롯하여 NO_3^- , SO_4^{2-} 등의 농도도 상승하는 것으로 나타나고 있다. 이처럼 대기 에어로졸은 크기에 따라 입자의 특성이 다르고, 또 인체 위해성도 달라지기 때문에 이를 입경별로 분리하여, 그 구성 성분과 조성을 확인할 필요가 있다.

본 연구에서는 황사와 비황사 입자를 채취하여 분석한 결과로부터 에어로졸의 입경별 조성 특성을 조사하였다. 이를 위해 2010년 봄철에 8단 Cascade Impactor를 사용하여 2010년 3월 13~15일에 채취한 황사(1차 황사)와 2010년 3월 20~21일에 채취한 황사(2차 황사), 그리고 비황사 입자의 화학조성을 상호 비교하였다. 이 때 비황사 입자는 2009년 4월에 동일한 Cascade Impactor를 사용하여 3회에 걸쳐 채취, 분석한 에어로졸의 조성을 평균하여 이용하였다. 이렇게 1차 황사, 2차 황사, 비황사로 구분한 각 성분의 농도를 입자크기 $2.1 \mu\text{m}$ 을 기준으로 조대입자(coarse)와 미세입자(fine)로 분류하여 Table 10에 수록하였다. 또 이 때 황사와 비황사 입자 성분의 입경별 분포를 Figure 17~21에 비교하였다. 먼저 대기 에어로졸의 질량농도를 보면 황사 시에 조대입자 영역에서 농도가 크게 증가하는 결과를 보이는 반면 비황사 시에는 오히려 미세입자 영역에서 농도가 상승하였다. 그리고 전체 질량농도는 2차 황사 시에 농도가 훨씬 높으나 1차 황사 시에는 오히려 비황사 시보다도 낮은 농도를 나타내었다. 2차 황사는 앞에서 기술한 바와 같이 최근에는 물론 기상기록 이후에 가장 강한 황사로 이 시기에 질량농도가 $586,627 \text{ ng}/\text{m}^3$ 까지 상승한 것으로 확인되었다.

이온성분들의 농도는 1차 황사 시에 $\text{nss-SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{NH}_4^+ > \text{nss-Ca}^{2+} > \text{Cl}^- > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$, 2차 황사 시에 $\text{nss-SO}_4^{2-} > \text{nss-Ca}^{2+} > \text{NO}_3^- > \text{NH}_4^+ > \text{Na}^+ > \text{Cl}^- > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ 순으로 높은 농도를 나타내었다. 그리고 2차 황사에서는 1차에 비해 nss- Ca^{2+} 농도가 크게 상승한 것으로 확인되었다. 그러나 비황사 시에는 $\text{nss-SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{NH}_4^+ > \text{K}^+ > \text{Na}^+ > \text{Cl}^- > \text{nss-Ca}^{2+} >$

Mg²⁺ 순으로 1차 황사와 거의 유사한 농도 순서를 보여 1차 황사는 강도가 비교적 낮았던 것으로 조사되었다.

이 중 2차 황사와 비황사 시에 가장 큰 차이를 보인 성분은 nss-Ca²⁺으로 1차 황사 시 1.27 µg/m³, 2차 황사 시 16.08 µg/m³, 비황사시 0.53 µg/m³으로 황사와 비황사 농도비(AD/NAD)가 1차 황사 시에 2.4배, 2차 황사 시에 30.3배의 차이를 보였다. 그리고 가장 높은 농도를 보이고 있는 nss-SO₄²⁻의 경우, 1차 황사 시 3.92 µg/m³, 2차 황사 시 19.22 µg/m³, 비황사시 9.03 µg/m³로 AD/NAD는 1차, 2차 황사 시에 각각 0.4, 2.0의 비율을 나타내었다. 이 결과와 같이 nss-SO₄²⁻은 2차 황사 시에는 비황사보다 농도가 상승하였지만 1차 황사에서는 오히려 비황사보다도 농도가 감소한 것으로 조사되었다. 다음으로 NO₃⁻은 1차 황사 시 2.15 µg/m³, 2차 황사 시 11.12 µg/m³, 비황사 시에 3.93 µg/m³로 AD/NAD 농도비는 각각 0.5, 2.8배 정도 더 증가한 것으로 확인되었다. 일반적으로 nss-SO₄²⁻은 화석 연료, 특히 석탄 사용량과 관련이 크고, NO₃⁻은 자동차, 산업활동 등 각종 에너지 사용량과 가장 큰 관련성을 갖고 있다. 따라서 이들의 농도변화만을 기준으로 보면, 1차 황사에서는 그 영향이 거의 없었으나 2차 황사 시에는 황사와 함께 이들 성분들도 유입되어 제주지역 대기질에 영향을 미친 것으로 추정된다. 또한 NH₄⁺은 1차 황사 시 1.82 µg/m³, 2차 황사 시 10.76 µg/m³, 비황사 시에 3.03 µg/m³로 AD/NAD 농도비는 앞의 nss-SO₄²⁻, NO₃⁻와 유사한 패턴으로 1차와 2차 황사 시에 각각 0.6, 3.2배 정도 상승한 결과를 나타내었다.

이들 성분들의 농도를 입경별로 비교해 보면, NH₄⁺, nss-SO₄²⁻ 성분의 농도는 1차 황사와 비황사 시에 대체로 미세입자에 분포하는 경향을 보이지만 2차 황사에서는 조대입자 영역에서도 다소 농도가 증가하는 이산형에 가까운 분포를 나타내었다. 이는 앞에서 논의된 바와 같이 황사 시 NH₃가 조대입자에서 산성물질과 반응을 일으키거나 NH₄NO₃, NH₄HSO₄, (NH₄)₂SO₄ 등이 응고, 배기와 같은 물리적 과정을 통해 조대입자로 이동된 것으로 추정된다(Yeatman *et al.*, 2001). 이러한 현상은 배경농도 지역인 서해안의 덕적도와 제주도 고산 지역에서도 관찰되었고 국립환경과학원의 연구에서도 이와 동일하게 NH₄⁺, nss-SO₄²⁻, S 등이 황사기간에 조대입자 영역에서 농도가 증가하는 것으로 보고되었다(국립환경과학원 연구보고서, 2007). 반면에 NO₃⁻ 성분은 1차와 2차 황사, 비황사 기간에 모

두 2.1~5.8 μm 범위의 조대입자 영역에서 가장 높은 농도를 나타내는 것으로 조사되었다. 이러한 원인은 앞에서 기술한 바와 같이 토양입자의 CaCO_3 과 산성 물질의 중화반응에 의해 조대입자에서 질산염을 생성했기 때문인 것으로 판단된다.

또한 원소성분 분석 결과에서는 1차 황사 시 $\text{S} > \text{Fe} > \text{K} > \text{Na} > \text{Al} > \text{Ca} > \text{Mg} > \text{Zn} > \text{Pb} > \text{Sr} > \text{Cr} > \text{Ba} > \text{Mo} > \text{Ni} > \text{Mn} > \text{Ti} > \text{Cu} > \text{V} > \text{Co} > \text{Cd}$ 순으로 높은 농도를 보였다. 그리고 2차 황사에서는 $\text{S} > \text{Al} > \text{K} > \text{Ca} > \text{Fe} > \text{Na} > \text{Mg} > \text{Zn} > \text{Pb} > \text{Mn} > \text{Ti} > \text{Ba} > \text{Sr} > \text{Ni} > \text{Cr} > \text{Mo} > \text{Cu} > \text{V} > \text{Co} > \text{Cd}$ 의 농도 순을 보였다. 반면에 비황사 시에는 $\text{S} > \text{Na} > \text{Al} > \text{Mg} > \text{Ca} > \text{K} > \text{Fe} > \text{Zn} > \text{Ba} > \text{Cr} > \text{Pb} > \text{Sr} > \text{Ti} > \text{Mn} > \text{V} > \text{Ni} > \text{Cu} > \text{Mo} > \text{Co} > \text{Cd}$ 순으로 높은 농도를 나타내었다. 주요 성분들의 농도는 인위적인 기원인 S가 가장 높고, 특히 2차 황사 시에 토양 지표 성분인 Al, Ca, Fe 등이 높은 농도를 나타내었고, 반면에 비황사 시에는 상대적으로 Na, Mg 등의 해양기원의 성분들이 더 높은 농도를 나타내었다.

원소성분의 농도는 S 농도가 1차 황사 시 $4.40 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 2차 황사 시 $12.82 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 비황사 시의 $3.20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 비해 AD/NAD 농도비가 각각 1.4, 4.0배 더 증가한 것으로 조사되었다. 그리고 입경별 분포를 보면, 비황사 시에는 대부분 미세입자에 분포하고 있으나 1차와 2차 황사 시에는 조대입자에서 오히려 더 큰 분포를 나타내는 것으로 확인되었다. S은 토양기원과 무관한 인위적 기원 성분으로 황사와는 발생기원이 다르다. 그러나 황사 시에 농도가 증가하는 것은 에어로졸에 흡착 또는 반응한 황산염이 황사와 함께 장거리 이동한 것으로 판단된다. 그리고 농도 분포가 조대입자에서 증가하는 것은 토양입자에 황산염이 흡착되었거나 토양입자의 염기성 물질과 황산의 반응에 의해 황사염을 생성한 결과로 추정된다.

반면에 토양의 주성분인 Al, Ca, Fe를 살펴보면, Al의 농도는 1차 황사 시 $2.51 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 2차 황사 시 $5.20 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 비황사시 $0.43 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 AD/NAD 농도비가 1차, 2차 황사 시에 각각 5.8, 12.0배 정도 더 증가한 것으로 확인되었다. Ca의 농도는 1차 황사 $2.40 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 2차 황사 $3.67 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 비황사 $0.34 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 AD/NAD 농도비가 1차, 2차 황사에서 각각 7.1, 10.8배 정도 더 증가한 것으로

확인되었다. Fe의 농도 역시 1차 황사 시 $3.00 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 2차 황사 시 $3.57 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 비황사시 $0.24 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 AD/NAD 농도비가 1차, 2차 황사 시에 각각 12.5, 14.9배 정도 더 증가하였다. 그리고 이들 토양기원 성분들의 입경별 농도는 대부분 조대입자에서 높게 나타났고, 특히 황사 시에 이러한 경향은 더 두드러진 것으로 확인되었다. 절대농도는 낮지만 주로 토양으로부터 유래되는 것으로 알려진 Ti, Mn, Ba, Sr 등을 살펴보면, Ti의 농도는 1차 황사 시 $0.072 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 2차 황사 시 $0.497 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 비황사 시 $0.012 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 AD/NAD는 1차, 2차 황사 각각 61, 42.2배 정도 더 증가하였다. Mn의 농도는 1차 황사 시 $0.072 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 2차 황사 시 $0.537 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 비황사 시 $0.011 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 AD/NAD는 1차, 2차 황사 각각 64, 47.5배 정도 더 증가하였다. Ba의 농도는 1차 황사 시 $0.101 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 2차 황사 시 $0.449 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 비황사 시 $0.011 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 AD/NAD 농도비는 1차, 2차 황사 각각 1.2, 5.4배 정도 더 증가하였고, Sr의 농도 역시 1차 황사 시 $0.149 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 2차 황사 시 $0.344 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 비황사 시 $0.013 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 AD/NAD 농도비는 1차, 2차 황사에서 각각 11.6, 26.9배 정도 더 증가한 것으로 확인되었다.

또한 해양과 토양의 기원을 동시에 나타내는 Na과 Mg의 농도를 살펴보면 Na의 농도는 1차 황사 시 $2.92 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 2차 황사 시 $3.28 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 비황사시 $0.93 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 AD/NAD 농도비가 1차, 2차 황사에서 각각 3.1, 3.5배 정도 더 증가하였다. Mg의 농도는 1차 황사 시 $0.07 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 2차 황사 시 $0.54 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 비황사시 $0.01 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 AD/NAD 농도비는 1차, 2차 황사에서 각각 7.2, 5.9배 정도 더 증가한 것으로 확인되었다. 따라서 이들 성분들은 해염보다는 오히려 토양의 영향을 더 많이 받는 것으로 보이며, 입경별 농도 역시 대체적으로 조대입자 영역에 분포하는 경향을 보였다.

Table 10. Component concentrations of Asian Dust and Non-Asian Dust particles.

Species	Concentration (ng/m ³)								
	1st Asian Dust			2nd Asian Dust			Non-Asian Dust		
	Coarse	Fine	Overall	Coarse	Fine	Overall	Coarse	Fine	Overall
Mass	45737.4	11874.1	57611.5	538835.8	47791.3586627.1	68419.278437.2	146856.4		
NH ₄ ⁺	608.0	1208.7	1816.7	3965.4	5750.3	9715.7	40.1	2991.6	3031.6
Na ⁺	684.9	167.4	852.3	5274.7	640.8	5915.5	2103.7	194.0	2297.7
K ⁺	511.9	312.2	824.1	1380.1	948.3	2328.4	340.6	2235.3	2575.9
Mg ²⁺	178.1	32.9	211.0	1309.2	170.4	1479.6	260.4	66.9	327.3
NO ₃ ⁻	1817.4	331.7	2149.2	7736.8	3387.6	11124.4	2696.8	1232.3	3929.1
Cl ⁻	1028.5	61.7	1090.2	5323.0	398.7	5721.7	1836.2	106.0	1942.1
nss-Ca ²⁺	1093.5	172.8	1266.3	14897.9	1178.8	16076.7	304.3	223.0	527.2
nss-SO ₄ ²⁻	1402.3	2522.0	3924.3	10391.7	8069.0	18460.6	1239.6	7788.0	9027.6
Al	1590.3	923.1	2513.4	4748.4	450.1	5198.5	312.5	118.9	431.4
Fe	2156.1	849.9	3006.0	2929.7	638.6	3568.4	195.0	44.9	239.8
Ca	1415.6	982.7	2398.3	2535.5	1134.2	3669.7	248.4	91.6	340.0
Mg	1654.2	627.0	2281.1	1759.2	104.4	1863.7	263.2	55.0	318.2
Na	1835.1	1081.5	2916.6	2878.0	397.4	3275.4	796.4	134.6	931.0
K	1164.0	1766.7	2930.7	2939.3	1915.7	4855.0	142.8	171.5	314.3
S	2369.5	2034.6	4404.1	9323.4	3495.2	12818.6	701.8	2494.3	3196.1
Ti	62.0	9.7	71.7	461.3	35.3	496.6	7.8	3.9	11.8
Mn	56.6	15.4	72.0	512.7	24.1	536.8	5.6	5.7	11.3
Ba	60.8	40.5	101.4	194.3	254.6	448.8	64.2	18.7	82.8
Sr	103.0	46.0	149.1	321.4	22.9	344.3	4.6	8.2	12.8
Zn	266.0	299.7	565.7	1098.7	322.6	1421.3	96.8	54.5	151.3
V	10.3	4.8	15.2	63.8	5.0	68.8	4.6	6.3	10.9
Cr	73.5	43.8	117.3	191.7	44.2	235.9	33.9	13.9	47.7
Pb	38.4	112.0	150.5	559.7	72.8	632.6	11.8	21.0	32.7
Cu	15.5	4.2	19.7	57.6	15.0	72.5	6.4	4.1	10.5
Ni	45.2	37.5	82.7	152.7	110.2	262.9	5.9	4.1	10.0
Co	3.3	1.8	5.1	16.5	3.6	20.1	3.3	2.2	5.6
Mo	64.4	27.4	91.8	115.9	6.6	122.6	6.2	3.7	9.8
Cd	3.1	0.7	3.8	7.9	3.5	11.4	3.3	2.3	5.6

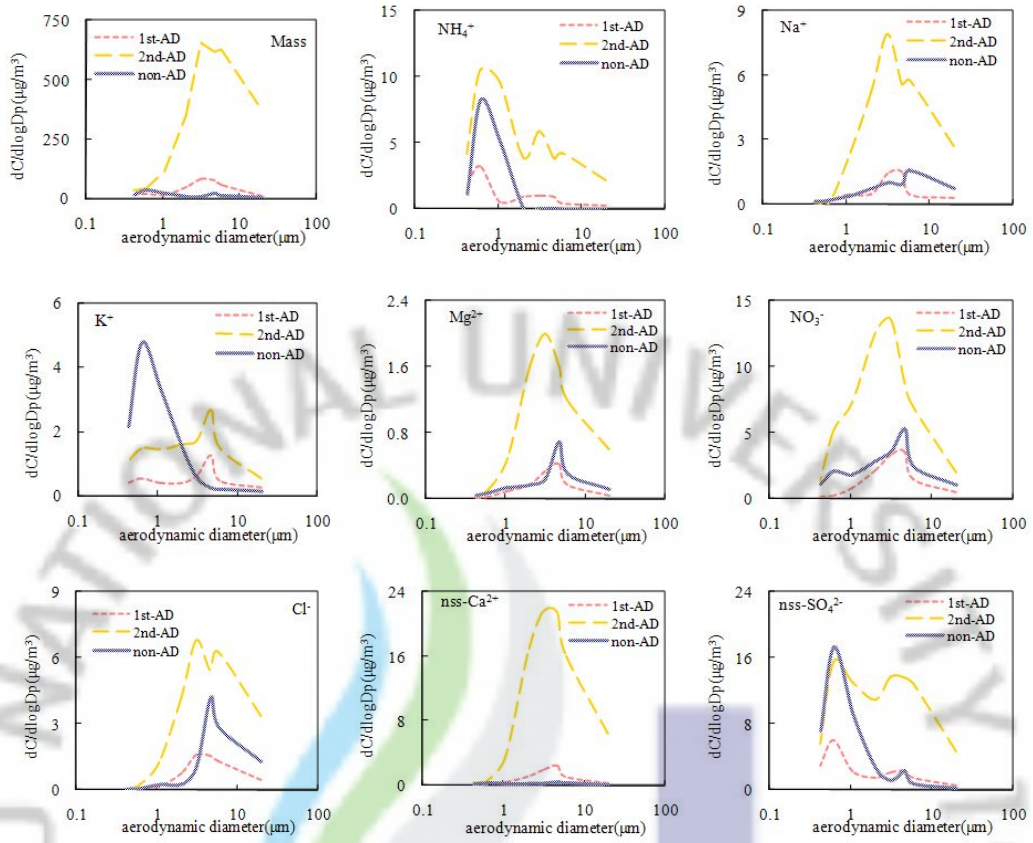


Figure 17. Size distribution of mass and ionic concentrations of size-segregated particles for Asian Dust and Non-Asian Dust periods.

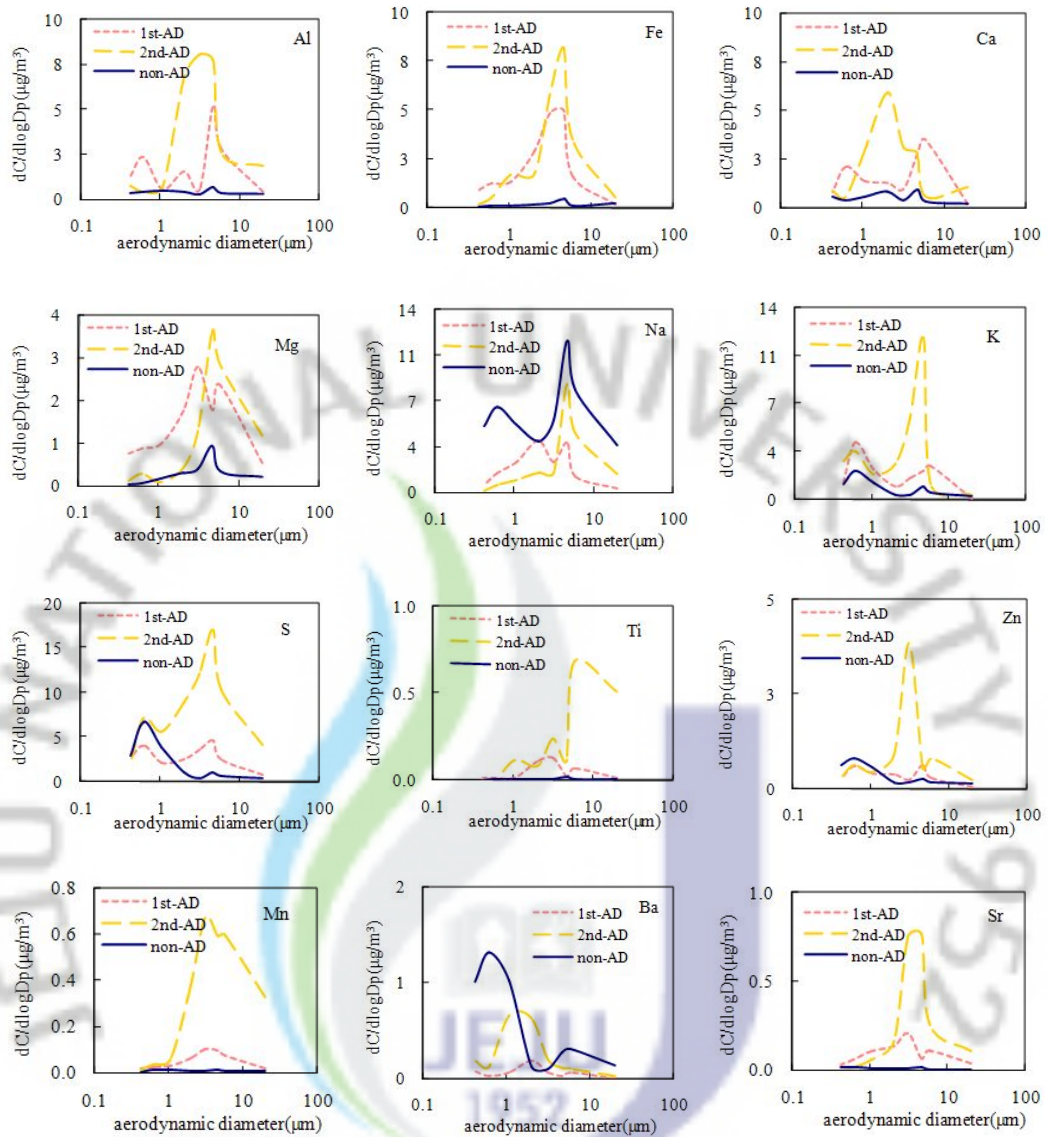


Figure 18. Size distribution of elemental concentrations of size-segregated particles for Asian Dust and Non-Asian Dust periods.

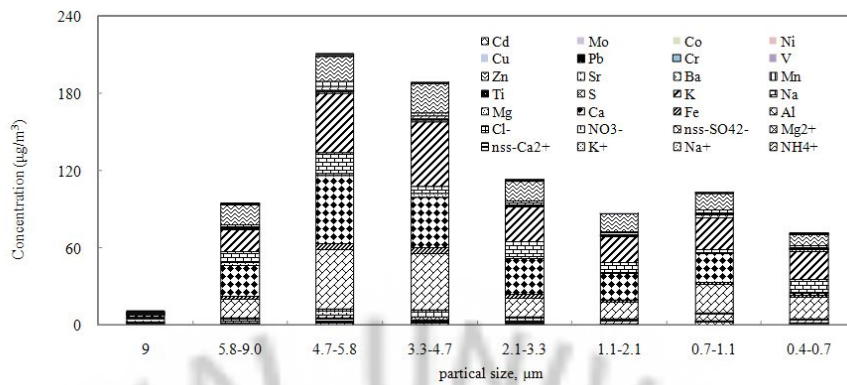


Figure 19. Size distribution of composition concentrations in atmospheric aerosols for the first Asian Dust period.

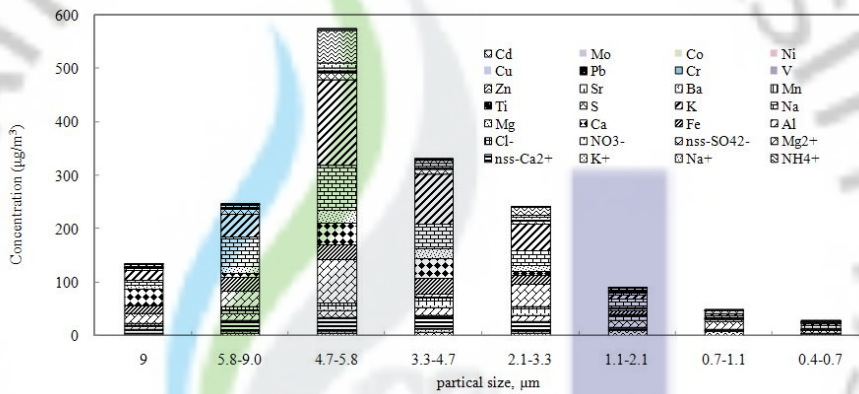


Figure 20. Size distribution of composition concentrations in atmospheric aerosols for the second Asian Dust period.

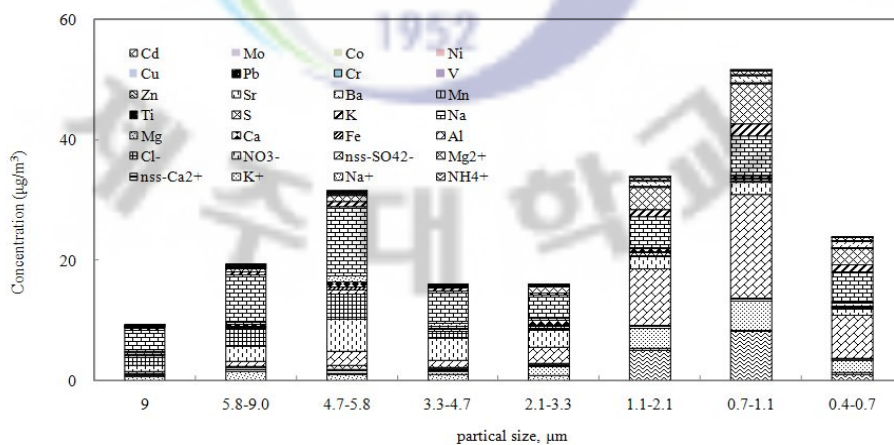


Figure 21. Size distribution of composition concentrations in atmospheric aerosols for Non-Asian Dust period.

4. 에어로졸의 수농도 측정

1) 대기 에어로졸의 수농도 특성

대기 에어로졸의 체류 기간은 가스상태의 대기오염물질이 수개월 내지 수년 동안 대기 중에 체류하는 것과는 달리 수일~일주일 정도로 짧기 때문에 시·공간적 분포 편차가 크게 나타난다. 에어로졸이 대기 중 체류시간이 짧은 다른 이유는 중력낙하와 강수에 의한 세정효과 때문이다. 에어로졸은 과포화상태에서 구름의 응결핵 역할을 하면서 구름방울로 활성화될 수 있고, 강수에 의해 씻겨 제거되기도 한다. 또한 건조 상태로 지면으로 전이되는 건성침적도 에어로졸 제거 과정중의 하나의 요인이다. 특히 에어로졸 크기 중에서 0.1~1 μm 크기의 대핵(accumulation mode) 에어로졸은 대표적인 인위적인 에어로졸로써, 고농도 가스상 물질들의 핵화(nucleation), 가스상 물질이 에어로졸에 달라붙는 응결(condensation), 작은 크기의 입자들끼리 달라붙어 성장하는 응고(coagulation) 등의 과정을 거쳐 생성, 성장한다. 이들은 대기 중에 부유하여 태양빛을 효과적으로 산란시킬 뿐만 아니라 구름의 주요 응결핵 역할을 한다(Seinfeld and Pandis, 1998). 그리고 대기 에어로졸은 토양, 해염, 화산재 등의 자연 기원 물질과 인위적 기원의 황산염, 질산염, 검댕 등 발생원이 매우 다양하며, 입자의 크기도 0.001~100 μm 의 범위로 매우 광범위하다(Willeke and Baron, 1993; Seinfeld and Pandis, 1998). 이처럼 대기 에어로졸은 대도시 스모그, 대기오염물질의 장거리 이동, 황사, 지구기후 변화 등의 문제와 직접적으로 관련되며, 이러한 현상을 정확히 규명하기 위해서는 에어로졸의 수농도와 입경분포에 대한 정보가 필요하다(배귀남 등, 2002). 또 관측지점의 주변 환경에 따라 분포가 매우 불규칙하기 때문에 물리적·광학적 특성, 변화 경향 등을 종합적으로 평가하려면 장기적인 실시간 측정이 필요하다.

대기 에어로졸의 입경별 수농도를 측정하는 방법으로는 Electrical Aerosol Analyzer(EAA), Optical Particle Counter(OPC), Scanning Mobility Particle Sizer(SMPS), 공기역학적 입자계수기(Aerodynamic Particle Sizer Spectrometer, APS) 등이 주로 이용되고 있다. 그리고 이러한 방법으로 측정한 입경별 대기 에어

로졸 수농도에 대한 연구들로 대도시, 해양, 전원지역, 극지방의 에어로졸 입경분포 특성에 대해서도 많은 조사가 이루어지고 있다(김병곤 등, 2008).

공기역학적 입자계수기(APS)는 입자가속노즐과 광학산란장치를 조합하여 공기역학적 입경(aerodynamic diameter)을 측정하는 시스템이다. 입자가속 노즐과 OPC의 광학산란장치를 조합하여 흡입구를 통해 유입된 입자들을 가속시켰을 때 입자의 크기에 따라 가속되는 차이를 이용하여 입경별 수농도를 측정하며, 입자에 의해 레이저가 산란시키는 빛의 pulse 간격을 측정함으로써 공기역학적 입경을 측정하는 원리이다. 수농도는 입자의 모양(화학적 특성)에 상관없이 동일한 가속도를 갖는 입자는 같은 크기로 측정된다. 그리고 공기역학적 입경은 측정하고자 하는 입자와 같은 침강속도를 갖는 밀도 1인 구형입자의 직경을 의미하며, APS의 작은 입자를 포함한 공기는 노즐을 통과하면서 빠른 속도로 가속될 때 입자의 가속되는 양은 입자의 크기에 따라 다르게 되는 원리를 이용한다.

본 연구에서는 2010년 1월 19일부터 3월 24일까지는 제주대학교 자연과학대학 옥상에, 그리고 3월 24일 이후에는 고산측정소에 입자계수기(APS)를 설치하여 5분 단위로 수농도를 측정하였다. 이 때 에어로졸 수농도는 입자의 측정범위가 $0.25\sim 32\ \mu\text{m}$ 이고 수농도 범위가 $0.1\sim 1,500\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이며, 입경 측정 구간별로는 $0.25\sim 1.0\ \mu\text{m}$ 구간에서 11개, $1.0\sim 2.5\ \mu\text{m}$ 에서 4개, $2.5\sim 10.0\ \mu\text{m}$ 에서 8개, $10.0\sim 32.0\ \mu\text{m}$ 에서 7개로 총 30-channel로 세분하여 측정하였다. 그리고 그 결과로부터 대기 에어로졸의 수농도 특성을 조사하였다.

2) 황사와 비황사 에어로졸 수농도 비교

한반도를 포함한 동북아시아 지역은 공단에서 배출되는 오염물질 및 농경지 소각, 황사 등 다양한 배출원이 복합적으로 공존하기 때문에 대기 중 에어로졸의 분포가 매우 복잡하다(Bates *et al.*, 2004). 특히 봄철(3월~5월)에 중국내륙에서 발원한 먼지 폭풍이 한국과 일본등 이웃한 국가뿐만 아니라 태평양을 가로질러 미국에 까지 영향을 줌으로서 황사의 환경 및 기후변화에 미치는 영향에 대해 많은 관심을 불러일으키고 있다(Sun *et al.*, 2001; Jaffe *et al.*, 2003). 최근 국내에서는 자연 환경 자체에 의한 대기 오염도 심각한데 그 중 하나가 황사현상이다. 황사는 기상학적인 이유로 건조기인 봄철에 주로 발생하며 한반도는 황사의

주요 피해국으로, 크기가 큰 입자들은 발원지나 주변에 머물고 국내에 유입되는 황사의 크기는 대개 10 μm 이하의 미세먼지(PM_{10})이다. 미세먼지는 대기 중에서 물리·화학적 반응으로 생성되어 가시거리 감소 및 광산란 등 대기 환경에 직·간접적으로 영향을 미칠 뿐만 아니라 인체에도 호흡기 질환 등의 건강에 유해한 영향을 준다. 특히 10 μm 이하의 미세 분진은 인간의 호흡 기관을 통해 체내에 흡입되기 쉬우며, 표면적이 크고, 각종 유해 성분을 다량 함유하고 있고 환경 보건학적 중요성이 매우 크다(백광욱 등, 2004).

본 연구에서는 APS를 사용하여 2010년 봄철에 3개월 간 수농도를 측정하였고, 이 시기의 황사, 비황사 시의 수농도 변화를 조사하였다. 제주지역에서 3월 13~15일(1차 황사)에는 아주 약한 황사가 발생하였고, 3월 20~21일(2차 황사)에 아주 강한 황사가 발생하였다. 이 시기의 수농도 측정 결과를 1차 황사, 2차 황사, 비황사로 분류하여 농도를 상호 비교하였다. Figure 22~23와 Table 11에 나타난 결과와 같이 1차 황사의 경우, 0.25~0.8 μm 범위에서는 수농도가 황사와 비황사 시에 별다른 차이를 보이지 않지다. 그러나 0.8~6.5 μm 범위의 입자들은 황사 시에 상대적으로 수농도가 크게 증가하는 경향을 보이고 있다. 그리고 2차 황사의 경우, 수농도가 비황사보다 적게는 0.25~0.28 μm 범위에서 1.6배 증가하였고, 20.0~25.0 μm 범위에서 최대 30.2배 증가하는 것으로 나타나 모든 입경 구간에서 황사 시 농도가 크게 증가한 것으로 확인되었다.

또한 APS로 측정된 수농도 데이터를 기초로 이를 Grimm사에서 개발한 소프트웨어를 이용하여 PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, $\text{PM}_{1.0}$ 질량농도로 환산하였고, 그 결과를 그림 Figure 24 에 나타내었다. 그림의 결과와 같이 1차 황사 기간의 PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, $\text{PM}_{1.0}$ 평균농도는 각각 78.9, 31.9, 14.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났고, 2차 황사 기간의 PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, $\text{PM}_{1.0}$ 평균농도는 각각 665.4, 198.8, 57.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다. 비황사 기간의 PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, $\text{PM}_{1.0}$ 평균농도는 각각 48.5, 29.5, 19.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다. 그리고 결과에서 보듯이 1차와 2차 황사시에 PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ 에서 수농도가 비황사시보다 증가하는 것을 알수 있었고, 특히 PM_{10} 에서 2차 황사의 수농도는 급격히 증가하는 것으로 확인 되었다. 대체적으로 수농도를 질량농도로 환산한 PM_{10} 농도는 기상청(KMA)에서 β 선 흡수법으로 고산지역에서 측정된 PM_{10} 농도보다 더 큰 값을 나타내었다. 특히 황사가 가장 심하게 나타났던 3월 20일 22시 경에 기

상청(KMA) β 선 흡수법의 PM₁₀ 측정 결과는 시간 최대 1,789 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 질량농도를 나타내었다. 그리고 본 연구에서 APS 측정 수농도를 소프트웨어로 환산한 PM₁₀ 질량농도는 이 시점에 이보다도 더 높은 농도로 상승하였다.

Table 11. Number concentration of size-segregated atmospheric aerosols during Asian Dust and Non-Asian Dust event periods.

Size (μm)	Number Concentration (particles/cm ³)								
	1 st Asian Dust			2 nd Asian Dust			Non-Asian Dust		
	Mean \pm SD	Max	Min	Mean \pm SD	Max	Min	Mean \pm SD	Max	Min
0.25~0.28	57.85 \pm 35.57	131.05	0.75	115.53 \pm 73.09	281.36	40.38	70.88 \pm 44.45	302.70	0.51
0.28~0.30	33.19 \pm 22.26	79.03	0.37	84.16 \pm 66.63	250.58	22.46	42.70 \pm 33.04	253.67	0.28
0.30~0.35	27.22 \pm 18.89	65.71	0.29	87.70 \pm 75.78	284.11	19.50	38.71 \pm 34.13	272.92	0.27
0.35~0.40	16.37 \pm 12.11	47.78	0.18	70.89 \pm 65.83	241.55	11.82	25.90 \pm 26.88	208.33	0.13
0.40~0.45	8.20 \pm 6.65	30.13	0.12	46.05 \pm 43.91	157.26	6.27	13.69 \pm 15.56	129.06	0.05
0.45~0.50	2.56 \pm 2.12	9.84	0.04	17.63 \pm 16.31	56.46	2.03	4.19 \pm 4.88	41.06	0.01
0.50~0.58	3.06 \pm 2.56	13.84	0.06	20.96 \pm 18.70	63.03	2.58	4.74 \pm 5.25	44.50	0.02
0.58~0.65	1.97 \pm 1.57	7.04	0.04	15.39 \pm 13.44	37.97	1.78	2.58 \pm 2.53	18.74	0.01
0.65~0.70	0.70 \pm 0.58	2.05	0.01	5.72 \pm 5.69	18.52	0.59	0.72 \pm 0.64	4.94	0.00
0.70~0.80	0.93 \pm 0.83	3.18	0.01	7.76 \pm 8.69	29.13	0.71	0.80 \pm 0.67	5.01	0.01
0.80~1.0	0.72 \pm 0.74	2.89	0.01	6.25 \pm 7.69	25.62	0.51	0.54 \pm 0.45	3.13	0.00
1.0~1.3	0.61 \pm 0.67	2.59	0.01	5.14 \pm 6.57	21.71	0.39	0.42 \pm 0.36	2.58	0.00
1.3~1.6	0.39 \pm 0.43	1.62	0.00	3.08 \pm 3.97	13.11	0.23	0.26 \pm 0.23	1.66	0.00
1.6~2.0	0.41 \pm 0.46	1.78	0.00	3.18 \pm 4.26	13.97	0.20	0.25 \pm 0.23	1.76	0.00
2.0~2.5	0.54 \pm 0.64	2.49	0.00	4.34 \pm 6.24	20.02	0.21	0.26 \pm 0.28	2.34	0.00
2.5~3.0	0.27 \pm 0.34	1.33	0.00	2.29 \pm 3.44	10.97	0.08	0.11 \pm 0.13	1.07	0.00
3.0~3.5	0.18 \pm 0.25	0.96	0.00	1.57 \pm 2.42	7.86	0.04	0.07 \pm 0.09	0.75	0.00
3.5~4.0	0.10 \pm 0.14	0.56	0.00	0.90 \pm 1.41	4.63	0.03	0.04 \pm 0.05	0.47	0.00
4.0~5.0	0.13 \pm 0.19	0.68	0.00	1.07 \pm 1.74	5.77	0.03	0.05 \pm 0.06	0.65	0.00
5.0~6.5	0.07 \pm 0.13	0.72	0.00	0.40 \pm 0.67	2.29	0.01	0.02 \pm 0.02	0.31	0.00
6.5~7.5	0.02 \pm 0.05	0.28	0.00	0.11 \pm 0.18	0.62	0.00	0.00 \pm 0.01	0.10	0.00
7.5~8.5	0.01 \pm 0.02	0.11	0.00	0.03 \pm 0.06	0.20	0.00	0.00 \pm 0.00	0.04	0.00
8.5~10.0	0.01 \pm 0.01	0.07	0.00	0.03 \pm 0.04	0.15	0.00	0.00 \pm 0.00	0.03	0.00
10.0~12.5	0.00 \pm 0.01	0.03	0.00	0.02 \pm 0.03	0.12	0.00	0.00 \pm 0.00	0.02	0.00
12.5~15.0	0.00 \pm 0.00	0.00	0.00	0.01 \pm 0.02	0.05	0.00	0.00 \pm 0.00	0.01	0.00
15.0~17.5	0.00 \pm 0.00	0.00	0.00	0.01 \pm 0.01	0.03	0.00	0.00 \pm 0.00	0.00	0.00
17.5~20.0	0.00 \pm 0.00	0.00	0.00	0.00 \pm 0.01	0.02	0.00	0.00 \pm 0.00	0.00	0.00
20.0~25.0	0.00 \pm 0.00	0.00	0.00	0.00 \pm 0.01	0.02	0.00	0.00 \pm 0.00	0.00	0.00
25.0~30.0	0.00 \pm 0.00	0.00	0.00	0.00 \pm 0.00	0.01	0.00	0.00 \pm 0.00	0.00	0.00
30.0~32.0	0.00 \pm 0.00	0.00	0.00	0.00 \pm 0.00	0.00	0.00	0.00 \pm 0.00	0.00	0.00

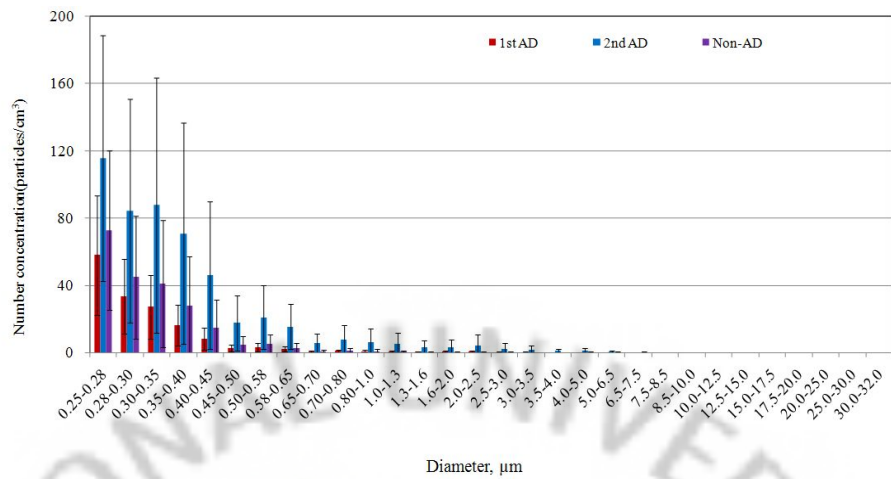


Figure 22. Number concentrations of size-segregated Asian Dust and Non-Asian Dust particles.

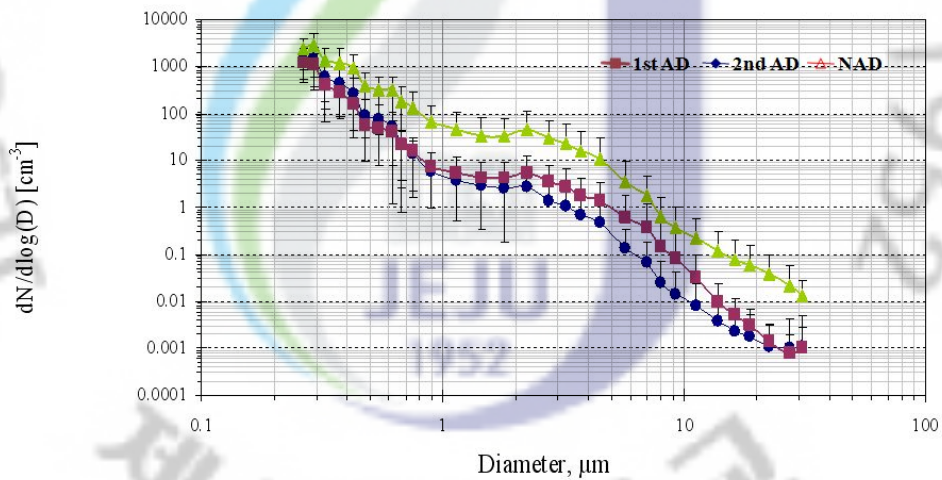


Figure 23. Size distribution of number concentrations of size-segregated Asian Dust and Non-Asian Dust particles.

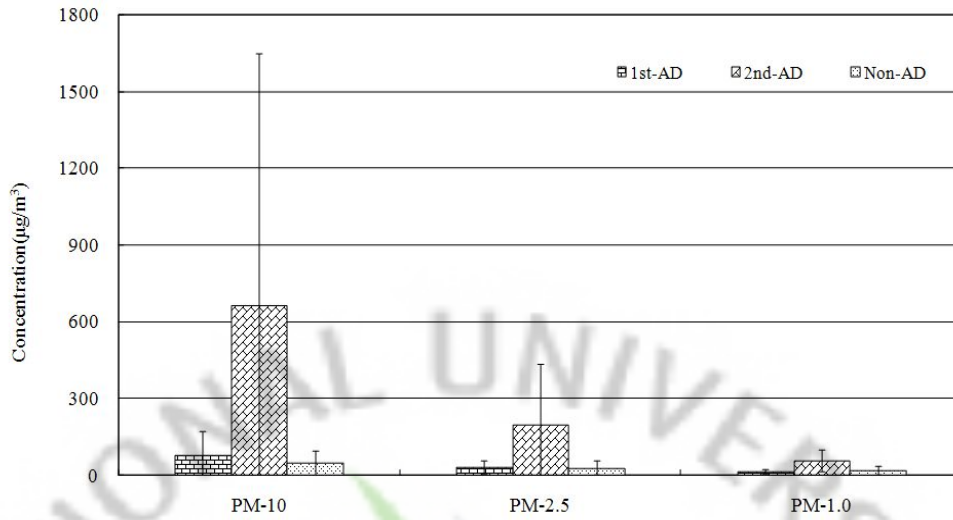
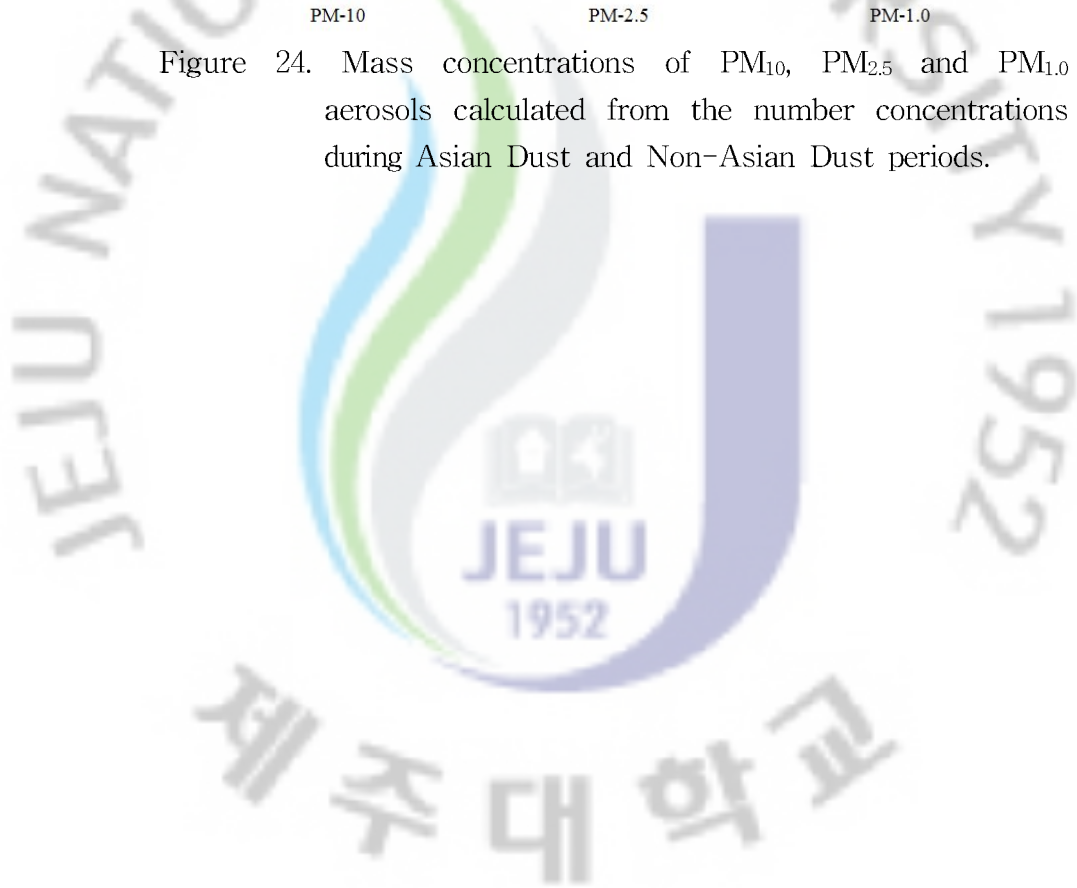


Figure 24. Mass concentrations of PM_{10} , $PM_{2.5}$ and $PM_{1.0}$ aerosols calculated from the number concentrations during Asian Dust and Non-Asian Dust periods.



IV. 결 론

제주지역에서 2010년 봄철에 대기 에어로졸을 입자크기별로 채취, 분석하여 황사와 비황사 입자의 입경별 화학조성 특성을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 2010년 봄철에 제주지역에서 발생한 황사 중에서 3월 20일의 황사가 가장 강하게 나타났으며, 유입경로는 몽골고원에서 발원하여 중국 동부를 지나 제주도로 이동한 것으로 확인되었다.
- 2) TSP 에어로졸의 이온성분 농도는 3월 20~21일에 발생한 고농도 황사 시 $nss-SO_4^{2-} > Cl^- > NO_3^- > Na^+ > nss-Ca^{2+} > Mg^{2+} > NH_4^+ > K^+$ 순으로 높았고, 비황사 시에는 $nss-SO_4^{2-} > NO_3^- > Cl^- > Na^+ > NH_4^+ > nss-Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^+$ 순으로 높은 농도를 보였으며, 황사 시에 $nss-Ca^{2+}$ 농도가 $7.72 \mu g/m^3$ 로 10.8배 상승하였다.
- 3) PM_{10} 에어로졸의 이온성분 농도는 3월 20~21일의 고농도 황사 시에 $Na^+ > Cl^- > nss-Ca^{2+} > nss-SO_4^{2-} > NO_3^- > Mg^{2+} > K^+ > NH_4^+$, 비황사 시 $nss-SO_4^{2-} > NO_3^- > Na^+ > NH_4^+ > Cl^- > nss-Ca^{2+} > K^+ > Mg^{2+}$ 순으로 높은 농도를 보였다. 원소성분의 농도는 고농도 황사 시 $Al > Fe > Na > S > Ca > K > Mg \gg Ti > Pb > Zn > Mn > Co > Cu > Ba > Sr > Ni > Cr > V > Mo > Cd$, 비황사 시 $S > Al > Na > Fe > Ca > K > Mg \gg Pb > Ni > Zn > Mn > Cr > Co > Ti > Mo > Cu > Ba > V > Sr > Cd$ 순으로 높았고, 토양기원의 $nss-Ca^{2+}$, NO_3^- , Al, Ca, Fe 등이 각각 11.08, 8.68, 11.91, 4.42, 9.89 $\mu g/m^3$ 로 1.8, 9.3, 8.6, 8.6배 상승하였다.
- 4) $PM_{2.5}$ 에어로졸의 이온성분 농도는 고농도 황사 시 $nss-SO_4^{2-} > NO_3^- > Cl^- > Na^+ > NH_4^+ > nss-Ca^{2+} > K^+ > Mg^{2+}$, 비황사 시 $nss-SO_4^{2-} > NH_4^+ > NO_3^- > Na^+ > Cl^- > K^+ > nss-Ca^{2+} > Mg^{2+}$ 순으로 높았고, 황사 시에 $nss-Ca^{2+}$, $nss-SO_4^{2-}$, NO_3^- 등이 각각 1.11, 7.47, 4.70 $\mu g/m^3$ 로 각각 16.3, 1.1, 2.1배 상승하였다.
- 5) 대기 에어로졸의 농도를 입경별로 비교해 본 결과, 질량농도는 1차 황사 시에

3.2~12.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 2차 황사 시 7.5~192.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 범위를 나타내었고, 미세입자 보다는 상대적으로 조대입자 영역에서 훨씬 더 상승하였다. 그리고 2차 황사 시 황사/비황사 비는 인위적 기원의 nss-SO_4^{2-} , NO_3^- , S이 미세입자에서 8.1, 3.4, 0.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 조대입자에서 10.4, 7.7, 9.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 미세입자에서 1.0, 2.7, 1.4 배 상승하였고, 조대입자에서 8.4, 2.9, 13.3배 상승하였다. 토양기원의 nss-Ca^{2+} , Al, Ca, Fe 등은 미세입자에서 1.2, 0.5, 1.1, 0.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 조대입자에서 14.9, 4.8, 2.5, 2.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 미세입자에서 5.3, 3.8, 12.4, 14.2배 상승하였고, 조대입자에서 49.0, 15.2, 10.2, 15.0배 상승하였다.

- 6) 대기 에어로졸의 수농도를 측정된 결과, 1차 황사 시 0.25~0.8 μm 범위의 입자는 별다른 차이를 보이지 않았으나 0.8~6.5 μm 범위의 입자들은 상대적으로 크게 증가하는 경향을 보였다. 2차 황사 시의 수농도는 비황사보다 0.25~0.28 μm 범위에서 1.6배, 20.0~25.0 μm 범위에서 30.2배 더 증가한 것으로 확인되었다.

V. 참고문헌

- 1) 강공언 (2009) 황사 에피소드 발생시 대기먼지의 농도 특성과 인체 영향, 한국환경보건학회지, 35(1), 21-35.
- 2) 강공언, 김남송, 이현주 (2008) 익산지역에서 봄철 비황사기간 중 입경별 대기먼지농도와 이온조성, 한국환경보건학회지, 34(4), 300-310.
- 3) 강창희, 고희정, Wlodek Zahorowski (2007) 제주도 고산지역의 라돈 및 TSP 에어로졸 농도 특성: 2001-2004년 측정, 한국대기환경학회지, 23(5), 612-624.
- 4) 고희정, 강창희, 김원형, 이순봉, 강화숙 (2010) 제주지역 TSP 이온성분 농도의 장기 변화, 한국대기환경학회지, 26(4), 420-431.
- 5) 김병곤, 김유준, 은승희 (2008) 지상원격관측 (AERONET)을 통한 한반도 주변 에어로솔 광학특성 분석, 한국대기환경학회지, 24(6), 629-640.
- 6) 김병곤, 권태영 (2006) 지상원격탐사를 이용한 에어로솔 간접효과 연구, 한국대기환경학회지, 22(2), 235-247.
- 7) 김선영, 이승호 (2006) 한국의 황사 발생 빈도 분포와 변화 분석, 대한지리학회 2006연례학술대회, 93-94.
- 8) 김선영, 이승호 (2009) 한국의 황사 출현에 영향을 미치는 요인에 관한 연구, 대한지리학회지, 44(6), 675-690.
- 9) 김원형, 강창희, 정덕상, 고희정, 이 원 (2008) 한라산 1100 고지 총부유분진(TSP)의 조성 및 오염 특성, 분석과학, 한국분석과학회, 21(4), 304-315.
- 10) 김영성 (2003) 대기 중 잔류성 유기오염물질과 중금속의 특성과 현황, 한국대기환경학회지, 19(2), 113-132.
- 11) 김영성, 김진영, 진현철, 문길주, 김연제, 한진석, 김영준, 김상우, 윤순창, 강창희(2002) 2001년 11월 제주도 고산에서의 대기 중 잔류성 유기오염물질 농도 변화, 한국대기환경학회 춘계학술대회 논문집, 83-90.
- 12) 김지영, 최병철 (2002) 한반도에서 측정된 에어로솔의 크기 분포와 지역별

- 특성, 한국기상학회지, 38, 95-104.
- 13) 국립환경과학원 황사피해 최소화를 위한 대응대책 세미나, 국립환경연구원 /시민환경연구소, 8pp, (2002).
 - 14) 국립환경과학원, 황사 발생 특성 분석 결과, (2010년 3월 29일 보도자료).
 - 15) 국립환경과학원 장거리이동 입자상물질의 화학적 특성과 거동에 관한 연구(Ⅲ), (2007).
 - 16) 문길주 등 동북아 대기오염 장거리 이동과 환경보전협력방안에 관한 조사 (Ⅲ) 국립환경연구원 연구보고서(BSG0557-6191-9, 1998).
 - 17) 박경운, 이호근, 서명석, 장광미. 강창희, 허철구 (1994) 제주도 고산 측정소에서 대기오염 배경농도 측정 및 분석, 한국대기보전학회지, 10(4), 252-259.
 - 18) 박민하, 김용표, 강창희 (2002) 비해염 황산염에 대한 질산염의 비로 살펴본 대기오염물질의 변화: 1992~1999년 고산 측정자료, 한국대기환경학회지, 18(3), 247-252.
 - 19) 박순웅 산성비 감시 및 예측기술 개발, 제2단계 1차년도 보고서, 서울대학교(1997).
 - 20) 배귀남, 김민철, 임득용, 문길주, 백남준 (2002) 2001년 겨울철 서울 대기 에어로졸의 입경별 수 농도 특성, 한국대기환경학회지, 19(2), 167-177.
 - 21) 이순봉, 강창희, 정덕상, 고희정, 김행범, 오용수, 강혜림 (2010) 제주도 고산지역 TSP, PM_{2.5} 대기 에어로졸의 조성 및 오염 특성, 분석과학, 한국분석과학회, 23(4), 371-382.
 - 22) 이승호, 김선영 (2006) 한국의 황사 발생 빈도 분포와 변화 분석, 환경영향평가, 15(3), 207-215.
 - 23) 이영곤, 조천호, 김명수 (2008) Aerodynamic Particle Sizer (APS)를 이용한 고농도 PM₁₀ 사례 중 황사 판별기법 개발, Atmosphere, 18(1), 25-32.
 - 24) 원동욱 (2001) 중국 황사 문제와 동북아 환경 협력의 과제, 환경과생명, (28), 192-193.
 - 25) 전영신, 김지영, 최재천, 신도식 (1999) 황사시 서울과 안면도의 대기중 에어로졸 수중농도 특성, 한국대기환경학회지, 15(5), 575-586.

- 26) 전영신, 부경은, 김지영, 이미혜, 최재천, 신도식, 정관영, 김남욱, 이영복, 박기준, 민희경, 조경숙 (1999) 황사현상과 관련된 에어로솔 특성 연구, 기상연구소(MR990A20).
- 27) 최순호, 최용주, 김영성, 군집분석을 이용한 1997~2005년 7개 도시 황사일의 역계적 분석(2009), 한국대기환경학회 2009 춘계학술대회 논문집, 633-634
- 28) Ackerman, A.S., O.B. Toon, D.E. Stevens, A.J. Heymsfield, V. Ramanathan, and E.J. Welton (2000) Reduction of tropical cloudiness by soot, *Science*, 288, 1042-1047.
- 29) Ackerman, A.S., M.P. Kirkpatrick, D.E. Stevens, and O.B. Toon (2004) The impact of humidity above the stratiform clouds on indirect aerosol climate forcing, *J. Atmos. Sci.*, 61(23/30), 1014-1017.
- 30) Asian dust center (2009), http://www.kma.go.kr/dust_02_01.jsp.
- 31) Andreae, M.O. and P.J. Crutzen (1997) Atmospheric aerosols: biogeochemical sources emissions to the atmosphere from natural sources. *J. Atmos. Chem.*, 14, 315-337.
- 32) Arimoto R., R. A. Duce, D. L. Savoie, J. M. Prospero, R. Talbot, J. D. Cullen, U. Tomza, N. F. Lewis, and B. J. Ray (1996) Relationships among aerosol constituents from Asia and the North Pacific during PEM-West, *A. J. Geophys. Res.*, 101, 2011-2023.
- 33) Berico M., A. Luciani, and M. Formignani (1997) Atmospheric aerosols in urban area measurements of TSP and PM₁₀ standards and pulmonary deposition assessments, *Atmospheric Environment*, 31(21), 3659-3665.
- 34) Chang-Hee Kang, Won-Hyung Kim, Hee-Jung Ko, Sang-Bum Hong (2009) Asian Dust effects on Total Suspended Particulate (TSP) compositions at Gosan in Jeju Island, Korea, *Atmospheric Research*, 94(2), 345-355.
- 35) Chung, C.E., V. Ramanathan, D. Kim, and I.A. Podgorny (2005) Global anthropogenic aerosol direct forcing derived from satellite and

- ground-based observations, *Journal of Geophysical Research*, 110(D24207), doi:10.1029/2005JD006356.
- 36) Fang, G.C., Y.S. Wu, S.H. Huang and J.Y. Rau (2005) Review of atmospheric metallic elements in Asia during 2000–2004, *Atmospheric Environment*, 39, 3003–3013.
- 37) Hong Zhuang, Chak. Chan, Ming Fang, Anthony S. Wexler (1999) Size distributions of particulate sulfate, nitrate, ammonium at a coastal site in Hong Kong, *Atmos. Environ.*, 33, 843–853.
- 38) Husar, R.B., D.M. Tratt, B.A. Schichtel, S.R. Falke, F. Li, D. Jaffe, S. Gassó, T. Gill, N.S. Laulainen, F. Lu, M.C. Reheis, Y. Chun, D. Westphal, B.N. Holben, C. Gueymard, I. McKendry, N. Kuring, G.C. Feldman, C. McClain, R.J. Frouin, J. Merrill, D. DuBois, F. Vignola, T. Murayama, S. Nickovic, W.E. Wilson, K. Sassen, N. Sugimoto, W.C. Malm. (2001) Asian dust event of April 1998, *Journal of Geophysical Research*, 106(D16), 18317–18331.
- 39) Huebert, B.J., T. Bates, P.B. Russell, G. Shi, Y.J. Kim, K. Kawamura, G. Carmichael and T. Nakajima (2003) An overview of ACE–Asia: strategies for quantifying the relationships between Asian aerosols and their climatic impacts, *Journal of Geophysical Research*, 108(D23), 8633, 10.1029/ 2003JD003550.
- 40) IPCC, Climate change 1995. The science of climate change, edited by J. H. Houghton *et al.*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 572, (1995).
- 41) IPCC, Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996pp, (2007)
- 42) IPCC, Climate change 1995. The science of climate change, edited by J. H. Houghton *et al.*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 572,

- (1995)
- 43) In .H.J, S.U. Park (2002) A simulation of long-rang transport of Yellow Sand observed in April 1998 in Korea, *Atmospheric Environment*, 36, 4173-4187.
- 44) Iwasaka Y., M. Yamato, R. Imasu, and A. Ono (1988) Transport of Asian dust (KOSA) particles; importance of weak KOSA events on the geochemical cycle of soil particles, *Tellus, Ser.*, 40B, 494-503.
- 45) Joussaume. S (1990) Three-dimensional simulations of th atmospheric cycle of desert dust particle using a general circulation mode. *J. Geophy. Res.*, 95(D2). 1909-1941.
- 46) Kato, N and H. Akimoto (1992) Anthropogenic emissions of SO₂ and Nox in Asia, emissions inventories, *Atmospheric Environment*, 26A, 2996-3017.
- 47) Kaneyasu Naoki, Koji Takenchi, Masayasu Hayashi, Shin-ichi Fujita, Itsushi Uno, and Hidetaka Sasaki (2000) Outflow patterns of pollutants from East Asia to the North Pacific in the winter monsoon, *Journal of Geophysical Research*, 105(D13), 17361-17377.
- 48) Kato, N and H. Akimoto (1992) Anthropogenic emissions of SO₂ and Nox in Asia, emissions inventories, *Atmospheric Environment*, 26A, 2996-3017.
- 49) Kim. B.G, S.U. Park (2001) Transport and evolution of a winter-time Yellow sand observed in Korea, *Atmospheric Environment*, 35, 3191-3201.
- 50) Kim, B.G., M.A. Miller, S.E. Schwartz, Y. Liu, and Q. Min (2008) The role of adiabaticity in the aerosol first indirect effect, *Journal of Geophysical Research*, 113(D05210), doi:10.1029/2007JD008961.
- 51) Kim, Y.P., S.G. Shim K.C. Moon, C.G. Hu, C.H. Kang and K.Y. Park, (1998) Monitoring of air pollutants at Kosan, Cheju Island, Korea, during March - April 1994. *J. Appl. Meteor.*, 37, 1117-1126.

- 52) Kim. K.H, G.H. Choi, C.H. Kang, J.H. Lee, J.Y. Kim, Y.H. Youn, S.R. Lee (2003) The chemical composition of fine and coarse particle in relation with the Asian Dust events, *Atmospheric Environment*, 37, 753-765.
- 53) Liu, C and M.H. Smith, (1995) Urban and rural aerosol particle optical properties, *Atmos, Environ*, 29(22), 3293-3301.
- 54) Lee. J.H, Y.P. Kim, K.C. Moon, H.K. Kim, C.B. Lee (2001) Fine particle measurements at two background sites in Kosa between 1996 and 1997, *Atmospheric Environment*, 35, 635-643.
- 55) Macpherson, J.I., R.L. Desjardins. O.H. Schuepp, and R. Pearson(1995) Aircraft-measured ozone deposition in the San Joaquin Valley of California, *Atmospheric Environment*, 29(21), 3133-3145.
- 56) Ma Chang-jin, Mikio Kasahara, Robert Holler, Tomihiro Kamiya (2001) Characteristic of single particle sampled in japan during the Asian dust-storm period, *Atmospheric Environment*, 35, 2707-2714.
- 57) Monn C.H., V. Carabias, M. Junker, R. Waeber, M. Karrer and H.U. Wanner, (1997) Small-scale spatial variability of particulate matter < 10 μm (PM10) and nitrogen dioxide. *Atmos, Environ.*, 31(15), 2243-2247.
- 58) Mori Ikuko, Masataka Nishikawa, Hao Quan, Masatoshi Morita (2002) Estimation of the concentration and chemical composition of kosa aerosol at their origin, *Atmospheric Environment*, 36, 4569-4575.
- 59) Murayama Toshiyuki , Nobuo Sugimoto, Itsushi Uno, Kisei Kinoshita, Kazuma Aoki, Naseru hagiwara, Zhaoyan Liu, Ichiro Matsui, Tetsu Sakai, Takashi Shibata, Kimio Arao, Byung-ju Sohn, Jae-Gwang Won, Soon-Chang Yoon, Tao Li, Jun Zhou, Huanling Hu, Makoto Abo, Kengo Iokibe, Ryuji Koga, and Yasunobu Iwasaka (2001) Ground-based network observation of Asian dust events of April 1998 in east Asia, *Journal of Geophysical Research*, 106(D16), 18345-18359.
- 60) Maenhaut, W., De Ridder, D.J.A., Fernandez-Jimenez, M.T., Hooper,

- M.A., Hooper, B., Nurhayati, M. (2002) Long-term observations of regional aerosol composition at two sites in Indonesia. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 189, 259-265.
- 61) Nishikawa, M. and S. Kanamori (1991) Chemical composition of Kosa aerosol (Yellow sand dust) collected in Japan. *Analytical Science*, 7, 1127-1130.
- 62) Plate, E., Schulz, M. (1997) Coarse nitrate formation in a coastal area of the North Sea, *Journal of Aerosol Science* 28(Suppl.1), S333-S334.
- 63) Seinfeld, J.H., and S.N. Pandis, (1998) *Atmospheric chemistry and physics-From air pollution to climate change*. John Wiley & Sons, Inc. 1326.
- 64) Yoo Jung Kim, Jung-Hun Woo, Young-Il Ma, Suhyang Kim, Jung Sik Nam, Hakyoung Sung, Ki-Chul Choi, Jihyun Seo, Jeong Su Kim, Chang-Hee Kang, Gangwoong Lee, Chul-Un Ro, Duk Chang, Young Sunwoo (2009) Chemical characteristics of long-range transport aerosol at background sites in Korea, *Atmospheric Environment*, 43(34), 5443-5578.
- 65) Yeatman, S.G., L.J. Spokes, and T.D. Jickells (2001) Comparisons of coarse-mode aerosol nitrate and ammonium at two polluted coastal sites, *Atmospheric Environment*, 35, 1321-1335.
- 66) Yao, X., Lau, A.P.S., Fang, M., Chan, C.K., H, M. (2003) Size distributions and formation of ionic species in atmospheric particulate pollutants in Beijing, China: 1-ionorganic ions. *Atmospheric Environment*, 37, 2991-3000.
- 67) Zang (1983) Analysis of dust rain in the historic time of china *KEXUE TONGBAO*, 28(3), 361-366.
- 68) Zhang D. and Y. Iwasaka (1999) Nitrate and sulfate in individual Asian dust-storm particle in Beijing, china in spring of 1995 and 1996, *Atmospheric Environment*, 33, 3213-3223.

감사의 글

어느덧 대학원 시절을 마무리 하면서, 이렇게 무사히 졸업을 할 수 있도록 주변에서 많은 도움을 주신 분들께 지면을 통해서 감사의 말씀 전해드립니다.

먼저 끝까지 저를 지도 해주시고 논문 수정까지 너무나 고생하신 우리 강창희 교수님에게 고개 숙여 깊은 감사의 말씀 드립니다. 또한 학과장 업무로 바쁘신 가운데서도 많은 조언을 해주시고, 논문심사까지 해주신 김덕수 교수님과 저에게 항상 웃음을 보여 주시고 논문심사도 해주신 이선주 교수님, 저에게 많은 가르침을 주신 정덕상 교수님, 변종철 교수님, 김원형 교수님, 이남호 교수님에게 진심으로 감사드립니다.

그리고 대학원 생활을 하면서 많은 도움을 준 순봉이형, 희정이누나, 나와 같이 대학원에 들어와 고생 많이 했던 행범이형, 혜림이, 앞으로 대학원 생활 열심히 할 승희, 승훈, 준오, 은영, 현아 에게 고마운 마음을 전하며, 항상 저에게 격려와 충고를 아끼지 않았던 증훈 선생님, 종석 선생님, 지혁 선생님, 희정 선생님, 태현 선생님, 희철 선생님, 정아 선생님 에게도 감사의 말씀 드립니다.

아울러 내 생활에서 스트레스를 풀어주고, 뒤에서 나를 응원해주며, 나에게 힘을 주었던 정훈, 현석, 무한, 지원, 동훈, 경란, 윤희, 지연, 은숙 에게 고맙고 사랑한다는 말을 전합니다.

그리고 논문이 완성 될 때까지 옆에서 힘들어 할 때, 짜증날 때, 나를 지켜주고, 곁에서 나에게 힘과 용기를 주며, 끝까지 나에게 힘을 주었던 사랑하는 나의 반쪽 진숙이 에게 너무나 고맙고 사랑한다고 전하고 싶습니다.

끝으로 우리 사랑하는 가족, 어머니, 누나, 형에게 고맙고 사랑한다는 말을 전하며, 이 논문을 완성하기 까지 도와주신 모든 분에게 감사의 말씀 드리고 이 영광을 바칩니다.