

제주도 고산지역 TSP, PM2.5 대기 에어로졸의 조성 및 오염 특성

이순봉 · 강창희* · 정덕상 · 고희정 · 김행범 · 오용수 · 강혜림

제주대학교 화학과

(2010. 7. 6. 접수, 2010. 7. 21. 승인)

Composition and pollution characteristics of TSP, PM2.5 atmospheric aerosols at Gosan site, Jeju Island

Soon-Bong Lee, Chang-Hee Kang*, Duk-Sang Jung, Hee-Jung Ko, Haeng-Bum Kim,
Yong-Soo Oh and Hae-Lim Kang

Department of Chemistry, Jeju National University, Jeju 690-756, Korea

(Received July 6, 2010; Accepted July 21, 2010)

요 약: 제주도 고산지역에서 TSP (total suspended particulate), PM2.5 (particulate matter, below 2.5 μm particle size) 대기 에어로졸을 채취, 분석하여 에어로졸의 조성 및 오염 특성을 조사하였다. 고산지역 대기 에어로졸에서 $\text{nss}(\text{non-sea salt})\text{-SO}_4^{2-}$ 과 NH_4^+ 은 다른 국내 청정지역 및 도시지역에 비해 높은 조성비를 보이고 NO_3^- 는 상대적으로 낮은 조성비를 나타내었다. 에어로졸 성분의 입경별 분포를 비교해 본 결과, 인위적 기원의 nss-SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+ 성분들은 대체적으로 미세입자에, 토양기원의 nss-Ca^{2+} 과 해양기원의 Na^+ , Cl^- , Mg^{2+} 은 상대적으로 조대입자에 많이 분포하고 있는 것으로 확인되었다. 계절별로는 봄철에 nss-Ca^{2+} , Al, Fe, Ca, NO_3^- 성분의 농도가 크게 상승하고, nss-SO_4^{2-} 은 여름과 봄철에 높은 농도를 나타내었다. 인자분석 결과, 에어로졸은 대체적으로 인위적 발생원의 영향을 많이 받고, 다음으로 해양 및 토양 영향을 많이 받았다. 또한 역계 분석법으로 에어로졸 성분의 유입경로를 조사해 본 결과, nss-SO_4^{2-} , NO_3^- , Pb, nss-Ca^{2+} 성분들은 대체적으로 기류가 중국대륙으로부터 제주지역으로 이동할 때 훨씬 더 높은 농도를 나타낸 반면, 북태평양에서 제주지역으로 이동할 때 상대적으로 낮은 농도를 나타내었다.

Abstract: TSP and PM2.5 atmospheric aerosols have been collected at Gosan site of Jeju Island, and their compositions were analyzed to understand the pollution characteristics. The composition ratios of $\text{nss}(\text{non-sea salt})\text{-SO}_4^{2-}$ and NH_4^+ were higher in Gosan site than those in other Korean background and urban sites. However the composition ratio of NO_3^- was conversely lower in Gosan site. From the study of aerosol components according to particle sizes, the anthropogenic nss-SO_4^{2-} , NO_3^- and NH_4^+ components were mostly existed in the fine particles. But the nss-Ca^{2+} , Na^+ , Cl^- and Mg^{2+} originated from soil and marine sources were distributed relatively in the coarse particles. In the seasonal comparison, the concentrations of nss-Ca^{2+} , Al, Fe, Ca and NO_3^- increased in spring season, and nss-SO_4^{2-} showed higher concentration in summer and spring seasons.

★ Corresponding author

Phone : +82-(0)64-754-3545 Fax : +82-(0)64-756-3561

E-mail : changhee@jeju.ac.kr

Based on the factor analysis, the atmospheric aerosols in Gosan site have been found to be influenced largely by anthropogenic sources, and next by marine and soil sources. The backward trajectory analyses showed that the concentrations of nss-SO_4^{2-} , NO_3^- , Pb and nss-Ca^{2+} increased when the air mass moved from Chinese continent to Jeju area. On the other hand, their concentrations decreased when the air mass moved in from the North Pacific Ocean.

Key words: atmospheric aerosols, TSP, PM2.5, aerosol composition, particle size, Gosan site

1. 서 론

대기층 하부에 존재하는 산성 침적물이나 광화학 산화물 등은 평균 체류시간이 1~7일 정도로 알려져 있으며 이러한 오염물질들은 보통 수백~수천 km까지 기류를 따라 이동한다. 이러한 오염물질들의 장거리 이동 현상은 인접 국가들 간에 민감한 분쟁 요인으로 부각되고 있다. 최근 동북아 국가들의 급속한 산업화는 이 지역의 대기오염을 심화시키고 있고 대기오염 물질의 장거리 이동 현상은 인접 국가들 간의 환경문제로 확대되고 있다.^{1,2} 아시아 대륙의 동쪽 끝 지점에 위치한 우리나라는 편서풍에 의한 대기오염물질의 장거리 이동 영향을 많이 받고 있는 것으로 확인되고 있다. 특히 인접한 중국에서 이동하는 월경성(trans-boundary) 대기오염물질의 영향이 큰 것으로 나타나고 있고, 이를 평가, 관리하기 위한 연구에 관심이 집중되고 있다. 이를 위해 우리나라에서도 한·중·일 장거리 이동 대기오염물질 공동연구사업(LTP, Long-range Transboundary Air Pollutants in Northeast Asia)을 통해 동북아지역에서 대기오염물질 장거리 이동 현상을 규명하고, 이를 공동으로 관리하기 위한 연구를 수행 중에 있다.³

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. 대기에 에어로졸은 입자크기에 따라 물리·화학적 특성이 다르고 대기질, 인체 건강에 대한 영향도 다르게 나타난다.⁴ 일반적으로 입자크기는 2.5 μm 을 기준으로 조대입자(coarse particle)와 미세입자(fine particle)로 분류된다. 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 일

반적으로 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 성분은 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.⁵ 또한 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.^{6,7}

이러한 대기 에어로졸의 오염영향을 집중적으로 관측한 대표적인 연구로는 미국 NASA와 IGAC (International Global Atmospheric Chemistry)이 공동으로 주관한 1991년의 PEM (Pacific Exploratory Mission)-West A와 1994년의 PEM-West B를 들 수 있다. PEM-West A는 동아시아와 북태평양 지역에서 에어로졸을 비롯한 각종 대기오염물질의 장거리 이동을 파악하기 위한 목적으로 수행되었고, PEM-West B는 북반구의 내륙 여러 나라에서 발생하여 태평양으로 장거리 이동하는 인위적 오염물질의 영향을 조사하기 위한 목적으로 실시되었다.⁸ 또한 최근에 IGAC의 주관 하에 대기 에어로졸의 복사 강제력과 기후변화에 미치는 영향을 평가하기 위한 목적으로 ACE (Aerosol Characterization Experiment) 프로그램이 수행되었다. 1995년에 실시한 ACE-1 프로그램에서는 남반구 해양 에어로졸의 특성을 집중적으로 측정하였고, 1997년에 실시한 ACE-2 프로그램에서는 아프리카 북부 사하라 사막지역과 유럽의 인위적인 에어로졸의 영향을 집중

적으로 연구하였다. 그리고 2001년에 수행한 ACE-Asia 프로그램에서는 아시아 지역에서 발생한 에어로졸의 영향을 집중적으로 측정하였다.⁹ 이 프로그램에서는 황사를 비롯한 아시아지역 대기 에어로졸의 크기 분포, 화학 조성, 광학적 특성을 규명하고, 아시아 에어로졸이 지구온난화 효과를 어느 정도 억제할 수 있는가를 밝히기 위한 목적으로 수행되었다. 그리고 2005년부터는 남아시아 지역에서 발생하는 대기오염 물질의 장거리 이동 현상을 평가하기 위한 목적으로 ABC (Atmospheric Brown Cloud) 프로젝트가 UNEP의 주관 하에 진행 중에 있고, 이 연구는 약 10년간 지속될 예정이다.¹⁰

동북아시아 지역에서 대기오염물질 장거리 이동 현상을 규명하기 위한 지상 관측 지점으로는 제주도가 아주 적합한 것으로 인식되고 있다.¹¹ 이는 제주도가 국지 오염원의 방해가 적고 인구밀도가 낮은 청정지역이기 때문에 순수하게 장거리 이동되는 대기오염물질의 영향을 측정하기에 적합하기 때문이다. 그리고 한반도, 중국, 일본의 중앙에 위치하여 동북아시아에서 이동하는 오염물질을 평가하는데 아주 유리한 지리적 조건을 갖추고 있다. 특히 본 연구를 수행한 고산측정소는 제주도 서쪽 끝 지점에 위치한 청정지역으로 아시아대륙에서 편서풍을 타고 이동하는 대기오염물질의 영향을 평가하기에 적합한 조건을 갖추고 있다. 그리고 PEM-West A 및 B, ACE-Asia, ABC 프로그램에서 지상관측소로 지정되어 이미 여러 차례 대기오염물질 장거리 이동 연구를 수행한 지역이다.

본 연구에서는 국내 배경지역인 제주도 고산지역에서 TSP와 PM2.5 대기 에어로졸을 채취하여 주요 성분들을 분석하였다. 그리고 분석 결과로부터 대기 에어로졸의 화학 조성 및 시계열 특성을 비교하고, 오염물질의 입경 분포, 발생기원, 유입경로 등의 오염 특성을 다양한 방법으로 조사하였다.

2. 연구방법

2.1. 대기 에어로졸 시료 채취

국내 배경지역인 제주도 고산측정소(33° 28' N, 127° 17' E)에서 TSP와 PM2.5 대기 에어로졸 시료를 채취하였다. 고산측정소는 제주도 서쪽 끝 지점의 해발 72 m의 해안가 언덕에 위치해 있고, 제주고층레이다기상대로부터 서쪽 방향으로 약 300 m 떨어져 있다. TSP 시료는 high volume tape sampler (KIMOTO Electric Co., 195A, Japan)와 롤테이프 프론필터(Sumitomo

Electric, PTFE 100 mm×10 m, Japan)를 사용하여 자동으로 채취하였다. 샘플러는 고산측정소에 설치된 트레일러 내부에 탑재하였고, 공기 흡입관(7 m length, 38 mm Ø)은 트레일러 측면을 관통시켜 지상 6 m 높이의 대기 에어로졸이 포집될 수 있도록 설치하였다. 이 때 흡입 공기의 유속은 초기속도가 대략 160~170 L/min이 되도록 조절하였고, TSP 시료는 2005년 1월부터 2006년 12월까지 24시간 단위로 총 255개를 채취하였다. TSP 에어로졸 필터는 시료가 채취된 부분을 원형으로 잘라낸 뒤, 이를 2등분하여 한 개는 수용성 성분, 나머지 한 개는 금속 성분의 분석에 이용하였다. PM2.5 에어로졸 시료는 PM2.5 air sampler와 테프론필터(Pall Co., Zefluor™, PTFE 47 µm, 2.0 µm, USA)를 사용하여 채취하였다. PM2.5 air sampler는 사이클론(URG, URG-2000-30EH, USA), 3단 테프론필터팩(Savillex Co., 47 mm, USA), 40 Lpm 공기흡입 펌프(MeDO, VP0625, Japan)을 조합하여 제작하였다. 이 때 공기의 유량은 임계오리피스(critical orifice, BGI, DO-10, USA)를 사용하여 초기유속이 16.7 L/min이 되도록 조절하였고, PM2.5 에어로졸 시료는 2005년 1월부터 2006년 7월까지 24시간 단위로 총 120개를 채취하였다.¹²

2.2. 대기 에어로졸 성분 분석

2.2.1. 수용성 성분 분석

수용성 이온성분은 에어로졸 필터에 에탄올 0.2 mL를 가하여 적신 후 초순수 일정량을 가하여 초음파세척기에서 30분, 다시 진탕기에서 1시간 동안 용출시켰다. 이 때 초순수는 TSP 에어로졸의 경우, 50 mL, PM2.5 에어로졸은 30 mL에 용출하였고, 용출액은 주사기필터(Whatman, PVDF syringe filter, 0.45 µm, 13 mm)로 불용성 입자를 거른 후 여액을 양이온 및 음이온 분석에 이용하였다. 수용성 이온성분은 ion chromatography (IC)로 분석하였고, 2대의 IC와 autosampler를 조합한 시스템을 사용하여 양이온과 음이온을 동시에 분석할 수 있도록 구성하였다. NH₄⁺, Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ 양이온은 IC (Metrohm, Modula IC, 907 pump, 732 detector)를 사용하여 Metrohm Metrosep C2 150 분리관, 1.0 mL/min 유속, 100 µL 주입부피, 2.0 mM tartaric acid/1.0 mM pyridine-2,6-dicarboxylic acid 용리액의 조건으로 분석하였다. 또 SO₄²⁻, NO₃⁻, Cl⁻ 음이온은 Metrohm Metrosep A-SUPP-4 분리관, 1.0 mL/min 유속, 20 µL injection volume, 1.8 mM NaHCO₃/1.7 mM Na₂CO₃ 용리액, 0.2% H₂SO₄ 써프러서 용액의 조건으로

Table 1. Instrumental detection limit (IDL) and variation coefficient (CV) for IC analysis

(n = 7)

Species	NH ₄ ⁺	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻
IDL (µg/L)	2.4	1.8	7.8	4.8	8.8	9.6	10.5	4.8
CV (%)	4.3	1.6	5.4	0.9	1.4	4.9	1.6	3.8

분석하였다. 이 때 이온성분 분석을 위한 IC의 기기검출한계(IDL)와 변동계수(CV)는 Table 1과 같다.

2.2.2. 원소성분 분석

대기 에어로졸을 채취한 시료 필터는 지퍼백에 밀봉하여 -20 °C 냉동고에 보관한 상태에서 대략 3개월 간격으로 분석하였다. 에어로졸의 금속 및 황 원소 성분은 EPA 방법(Compendium of methods for the determination of inorganic compounds in ambient air, Method IO-3)에 따라 혼합산용액을 사용하여 마이크로파 분해장치(CEM, 모델 MARS-5, USA)로 용출시켰다. 에어로졸 시료가 채취된 필터를 테프론 용기(PFA, polyfluoroalkoxy)에 넣고 5.55% HNO₃/6.75% HCl 혼합산 10 mL를 가한 후 마이크로파를 조사(1200 W)하였다. 이 때 온도는 10분 동안 180 °C로 상승시키고, 이 온도에서 10분간 유지시킨 후 서서히 상온으로 냉각하였다. 마이크로파 분해를 거친 용액에 혼합산(3% HNO₃/8% HCl) 5 mL를 가하여 주사기 필터(Whatman, PVDF syringe filter, 0.45 µm, 13 mm)로 불용성 입자를 거른 후 초순수를 사용하여 용량플라스크에서 25 mL가 되도록 희석하였다. 이러한 방법으로 전처리를 거친 시료용액을 사용하여 19종의 금속 원소와 황 원소의 농도를 ICP-OES (Thermo Jarrel Ash, 모델 IRIS-DUO)로 분석하였다. ICP-OES 분석용 표준용액은 AccuStandard사의 ICP용 1000 µg/mL 용액을 초순수와 혼합 용액으로 희석하여 조제하였다. 희석용액은 매트릭스 효과를 최소화시키기 위하여 시

료의 전처리 과정과 동일한 비율로 HNO₃과 HCl을 혼합한 용액을 사용하였다. 검정곡선 작성용 표준용액은 시료의 농도에 따라 고농도 성분들은 0.01~5.0 µg/mL 범위, 저농도 성분들은 0.01~1.0 µg/mL 범위로 조제하였다. 이 때 원소 분석을 위한 ICP-OES의 기기조건은 1150W RF power, 40.68 MHz RF 주파수, Ar 유속; 0.5 L/min (nebulizer), 1.5 L/min (auxiliary), 16 L/min (coolant) 등이다. 그리고 일부 극미량 금속 원소들은 시료용액을 Ultrasonic Nebulizer (CETAC Tech., U-5000AT, USA)로 농축시켜 분석하였다. 또한 ICP-OES의 기기검출한계(IDL)는 검정곡선 작성에 사용한 최소농도 표준용액으로 각 원소들에 대해 7회 반복 분석한 표준편차(SD)에 3.14를 곱한 값으로 측정하였다. 이렇게 측정한 ICP-OES 분석의 기기검출한계는 원소별, 측정시기별로 약간의 차이를 보였고, 대체적으로 0.3~4.2 µg/L의 범위를 나타내었다. 그리고 Cd와 Cr이 가장 낮고, S가 가장 높은 저검출한계(lower limit of detection)를 보였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. TSP와 PM2.5 대기 에어로졸의 조성

제주도 고산측정소에서 2005~2006년에 채취한 TSP와 PM2.5 시료들에 대해 주요 수용성 성분과 금속 성분들을 분석한 결과를 Fig. 1-2에 수록하였다. 분석결과에서 SO₄²⁻, Ca²⁺ 농도는 측정지점이 해안가인 점을 고려하여 해염에서 유입된 농도를 뺀 비해염(nss,

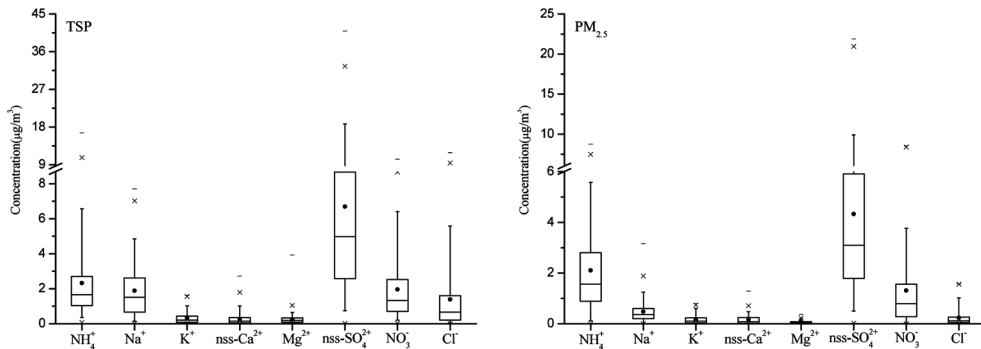


Fig. 1. Concentrations of water-soluble ionic components in TSP and PM2.5 aerosols.

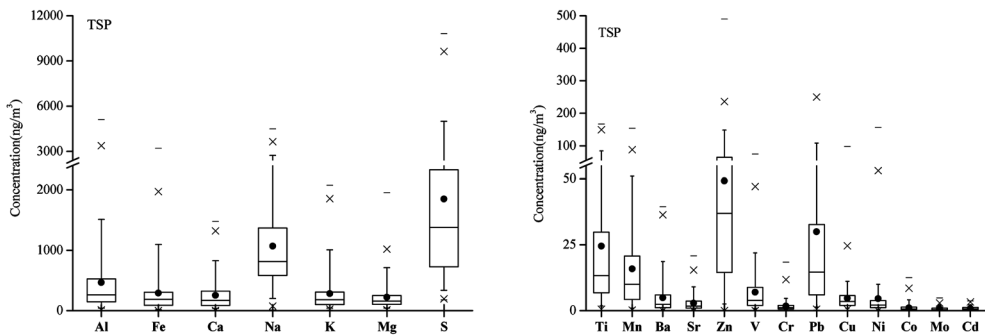


Fig. 2. Concentrations of sulfur and metal element in TSP aerosols.

non-sea salt) 농도로 환산하여 나타내었다. 비해염 농도는 Na^+ 을 지표물질로 해수 조성비에 따라 다음과 같이 계산하였다. 비해염 nss-SO_4^{2-} 농도는 SO_4^{2-} 총농도에서 해염 SO_4^{2-} 농도를 뺀, $[\text{nss-SO}_4^{2-}] = [\text{SO}_4^{2-}] - [\text{Na}^+] \times 0.251$ 의 식에 의해 계산하였다. 또 비해염 nss-Ca^{2+} 농도는 $[\text{nss-Ca}^{2+}] = [\text{Ca}^{2+}] - [\text{Na}^+] \times 0.04$ 의 식으로 계산하였다.^{13,14}

연구기간의 TSP 수용성 성분 평균농도는 $\text{nss-SO}_4^{2-} > \text{NH}_4^+ > \text{Na}^+ > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{K}^+ > \text{nss-Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$ 순으로 이 중 nss-SO_4^{2-} 이 $7.57 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높은 농도를 나타내었다. 그리고 SO_4^{2-} 중 nss-SO_4^{2-} 이 차지하는 비율은 92.8%로 nss-SO_4^{2-} 이 대부분을 차지하여 고산지역이 해안에 위치하고 있음에도 불구하고 SO_4^{2-} 에 대한 해염성분의 기여도는 크지 않은 것으로 확인되었다. SO_4^{2-} 성분은 대부분 화석연료의 연소에 의해 발생한 SO_2 가 대기 중에서 산화반응을 통해 SO_4^{2-} 형태로 전환된 2차 오염물질이며, 일사량, 유기 산화물, 탄소, 암모니아 등 타 오염물질의 양에 따라 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 또 황산염은 주로 미세입자에 분포되어 직접적으로 빛을 산란 혹은 흡수시킴으로써 시정장애를 일으키고, 간접적으로는 구름의 응결핵으로 작용하여 지구복사에 영향을 미치는 것으로 조사되고 있다.¹⁵ 또한 연구 기간 동안 고산지역 TSP 에어로졸의 수용성 성분들은 인위적 기원 성분(nss-SO_4^{2-} , NH_4^+ , NO_3^-)들이 약 70%로 가장 높은 조성비를 나타내었다. 그리고 해염기원의 Na^+ , Cl^- , Mg^{2+} 은 26%, 토양 기원의 nss-Ca^{2+} 은 2%의 조성비를 나타내었다.

고산에서 2005년 1월부터 2006년 7월까지 채취한 총 120개의 PM2.5 에어로졸 시료에 대해 주요 수용성 성분의 농도를 분석한 결과, 평균농도는 $\text{nss-SO}_4^{2-} > \text{NH}_4^+ > \text{NO}_3^- > \text{Na}^+ > \text{Cl}^- > \text{K}^+ > \text{nss-Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$ 순으로 높게 나타났다. 그리고 TSP와 동일하게 nss-SO_4^{2-}

이 $4.33 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높은 농도를 나타내었고, SO_4^{2-} 중 nss-SO_4^{2-} 이 차지하는 비율은 97.3%로 해염에서 유래된 SO_4^{2-} 의 양은 TSP보다 더 낮은 것으로 확인되었다. 또 PM2.5 수용성 성분의 조성은 nss-SO_4^{2-} , NH_4^+ , NO_3^- 성분이 약 87%, Na^+ , Cl^- , Mg^{2+} 이 약 9%, nss-Ca^{2+} 은 약 2%로, TSP에 비해 상대적으로 인위적 기원 성분의 조성은 더 높고 해염기원 성분의 조성비는 더 낮은 경향을 보였다. 또 PM2.5 에어로졸의 질량농도에 대한 수용성 성분의 비율은 39.7%를 나타내었고, 이 중 nss-SO_4^{2-} , NH_4^+ , NO_3^- 의 2차 오염물질 비율이 34.8%를 차지하여 PM2.5 에어로졸에서는 이러한 인위적 기원 성분들의 비율이 가장 큰 것으로 확인되었다. 특히 nss-SO_4^{2-} 의 비율이 19.4%로 모든 성분들 중에서 가장 높은 기여율을 나타내었고, NH_4^+ 과 NO_3^- 은 각각 9.4%, 5.9%로 nss-SO_4^{2-} 보다는 낮지만 다른 성분들보다는 상대적으로 높은 경향을 보였다.

또한 국내 타 배경 측정소의 경우를 보면, 수용성 성분들이 질량농도에 미치는 비율이 강화도 41%, 태안 60%로 나타나고 있고, nss-SO_4^{2-} 의 비율은 강화도 16.1%, 태안 18.3% 정도인 것으로 조사되었다. 또 NH_4^+ 은 강화도에서 8.3%, 태안에서 17.4%, NO_3^- 은 강화도에서 12.0%, 태안에서 15.5%의 비율을 나타내고 있다.^{16,17} 이를 고산 지역과 비교해 보면, 강화도와 태안에 비해 nss-SO_4^{2-} 이 NH_4^+ , NO_3^- 보다 상대적으로 높은 비율을 보이고 있다. 반면에 도시 지역인 서울의 PM2.5 조성을 보면, 질량농도에 대한 SO_4^{2-} , NH_4^+ , NO_3^- 의 비율이 각각 17.4, 7.8, 12.9%, 청주에서 각각 21.5, 8.0, 5.3%로 나타나고 있다.¹⁸ 이러한 결과들을 종합해 보면, 고산 지역은 대체적으로 다른 국내 청정 지역은 물론 서울 등 도시지역에 비해 nss-SO_4^{2-} 과 NH_4^+ 이 높은 조성비를 보이고 NO_3^- 은 상대적으로 낮은 조성비를 나타내는 것으로 확인되었다. NO_3^- 은 대

기 중의 질소산화물(NO_x)의 산화반응에 생성된 2차 오염물질이고, 이들 질소산화물은 주로 자동차와 에너지 사용량과 상관성이 큰 물질이다. 따라서 고산지역에서 SO_4^{2-} 농도비가 높고 상대적으로 NO_3^- 의 농도비가 낮은 것은 이러한 에너지 사용과 관련이 크고, 주변에 오염물질 배출원이 거의 없는 점을 고려하면 이들 성분들은 주로 장거리 이동에 의해 유입되었을 가능성이 큰 것으로 추정된다.

한편 TSP 에어로졸의 원소성분들은 $\text{S} > \text{Na} > \text{Al} > \text{Fe} > \text{K} > \text{Ca} > \text{Mg} > \text{Zn} > \text{Pb} > \text{Ti} > \text{Mn} > \text{V} > \text{Ba} > \text{Cu} > \text{Ni} > \text{Sr} > \text{Cr} > \text{Co} > \text{Cd} > \text{Mo}$ 순으로 높은 농도를 보였다. 그리고 이 중에서도 인위적 기원의 S 농도가 가장 높고, 다음으로 해염 성분인 Na, 그 다음으로 Al, Fe, Ca 등의 토양 성분이 대체적으로 높은 농도를 나타내었다. 또 황과 금속 성분들의 조성을 비교해 본 결과, S이 41%, Al, Fe, Ca이 각각 12, 7, 6%로 전체 조성의 25%를 차지하여 이들 네 가지 성분들이 전체의 66%를 차지하였다. 그 다음으로는 Na이 23%의 함량을 보여, TSP 에어로졸은 인위적 기원, 토양 기원, 해염기원 성분들이 주류를 이루고 있는 것으로 조사되었다. 이러한 원소성분들의 발생기원을 보면, 일반적으로 Al, Ca, Fe, Zn, Mn, Mg 등은 주로 토양의 비산에 의해 대기분진에 유입되며, Ni, V 등은 연료의 연소 과정, Pb는 자동차의 배출가스, Cu, Cd, Zn, Cr 등은 소각 과정, Na, K, Mg 등은 해염에 의해 발생되는 것으로 알려져 있다.¹⁹⁻²¹ 따라서 고산지역 TSP 에어로졸의 조성을 원소성분 기준으로 비교해 보면, S을 중심으로 인위적 기원 성분, 그리고 토양, 해염 기원 성분들이 상대적으로 많은 분포를 나타내는 것으로 조사되었다.

3.3. 입경별 농도 비교

대기 에어로졸은 입자크기에 따라 조성, 물리·화학적 특성이 다르기 때문에 이를 분리하여 비교할 필요가 있다. 일반적으로 $2.5 \mu\text{m}$ 이상의 입경을 갖는 조대입자는 토양, 해염 등의 자연발생 기원의 성분들의 조성비가 상대적으로 높은 경향을 보인다. 그러나 $2.5 \mu\text{m}$ 미만의 미세입자는 화석연료의 연소, 자동차 배출가스 등 인위적 발생원에 의해 생성된 물질과 기체상 물질이 입자상으로 전환된 2차 오염물질의 조성비가 상대적으로 높은 경향을 나타낸다. 본 연구에서는 에어로졸의 주요 수용성 성분을 분석하였고, 그 결과로부터 TSP와 PM2.5 성분의 조성비를 Table 2에 상호 비교하였다. 먼저 TSP/PM2.5 농도비는 NH_4^+ 1.1, Na^+

Table 2. Comparison of ion concentrations in coarse and fine particles

Species	Concentrations ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		(TSP-PM2.5)/(PM2.5) Ratio
	TSP	PM2.5	
NH_4^+	2.40±2.28	2.10±1.68	0.14
Na^+	2.35±1.51	0.47±0.46	4.00
K^+	0.38±0.35	0.17±0.19	1.23
nss- Ca^{2+}	0.31±0.40	0.16±0.20	0.93
Mg^{2+}	0.31±0.33	0.07±0.07	3.42
nss- SO_4^{2-}	7.57±6.56	4.33±3.73	0.74
NO_3^-	2.13±1.86	1.31±1.63	0.62
Cl^-	1.78±2.70	0.23±0.31	6.73

5.0, K^+ 2.3, nss- Ca^{2+} 2.0, Mg^{2+} 4.6, nss- SO_4^{2-} 1.7, NO_3^- 1.6, Cl^- 7.7로, 성분들 중 Cl^- 이 가장 높고 NH_4^+ 가 가장 낮은 농도비를 나타내었다. 또한 조대입자(TSP-PM2.5)와 미세입자(PM2.5)에서 각 성분들의 농도비를 비교해 보면, 성분별 (TSP-PM2.5)/(PM2.5) 농도비가 NH_4^+ 0.14, Na^+ 4.00, K^+ 1.23, nss- Ca^{2+} 0.93, Mg^{2+} 3.42, nss- SO_4^{2-} 0.74, NO_3^- 0.62, Cl^- 6.73으로 나타났다. 여기서 농도비가 클수록 이들 성분들은 조대입자에 많이 분포하고 농도비가 작을수록 미세입자에 더 많이 분포하고 있음을 의미한다. 먼저 인위적 기원 성분들의 농도비를 보면, nss- SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+ 의 농도비가 0.14~0.74로 이들 성분들은 대체적으로 조대입자보다는 미세입자에 분포하고 있는 것으로 나타났다. 그리고 토양기원의 nss- Ca^{2+} 역시 농도비가 0.93로 비교적 미세입자에 분포되는 경향을 보였다. 반면에 해염기원의 Na^+ , Cl^- , Mg^{2+} 성분들의 농도비는 3.42~6.73으로 이들 성분들은 대부분 조대입자에 많이 분포하고 있는 것으로 확인되었다.

성분들 중 이차 오염물질인 nss- SO_4^{2-} 과 NO_3^- 의 주요 전구물질은 SO_2 와 NO_x 로 이들 두 물질의 배출원은 서로 다른 기원을 나타낸다. 선행 연구를 보면, $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$ 의 성분비는 국내 도시지역인 서울, 청주, 광주에서 각각 1.65, 1.51, 1.16 정도로 조사되고 있다.²² 또 중국 베이징과 상하이에서는 $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$ 의 성분비가 각각 1.38, 1.74로 나타나고 있다.²³ 본 연구에서 고산지역의 $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$ 성분비는 TSP와 PM2.5에서 각각 3.24, 3.57로 이들 대도시 지역에 비해 훨씬 더 높은 값을 나타내고 있다. 일반적으로 도시지역에서 $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$ 의 성분비가 낮은 것은 자동차 운행 등 에너지 사용에 따른 NO_x 의 배출이 높기 때문이다. 그리고 질산염이 황산염에 비해 쉽게 휘발되기 때문에 기온이 높은 여름에 특히 질산염의 농도가 감소하여

SO₄²⁻/NO₃⁻가 증가하는 경향을 보인다.²⁴ 그러나 이와 달리 고산지역에서 SO₄²⁻/NO₃⁻ 성분비가 큰 값을 보이는 것은 에너지 사용에 기인한 인위적 오염물질의 영향을 도시지역에 비해 훨씬 적게 받고 국지오염원의 직접적인 영향을 받지 않기 때문인 것으로 추정된다. 또 NO₃⁻의 경우, 일반적으로 NH₄⁺, SO₄²⁻에 비해 조대입자에서 더 큰 농도비를 나타낸다. 이는 기체상 질산 등이 조대 입자에 존재하는 알칼리성 토양 성분들과 중화반응을 일으키기 때문이다. 따라서 중화된 상태의 NO₃⁻은 Ca²⁺, Mg²⁺ 등과 염을 생성하기 때문에 NO₃⁻은 미세입자보다는 비교적 조대입자에 많이 분포하는 경향을 보인다.²⁵ 그러나 본 연구에서는 NO₃⁻의(TSP-PM2.5)/(PM2.5) 성분비가 0.62로 비교적 낮은 값을 보여 이러한 일반적인 추세와는 다소 다른 경향을 나타내었다.

3.4. 계절별 농도 비교

고산지역 대기 에어로졸 성분의 농도를 계절별로 비교하여 그 특성을 조사하였고, 이 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 먼저 수용성 성분들의 농도를 비교해 본 결과, 농도가 가장 높은 nss-SO₄²⁻은 TSP에서 봄, 여름, 가을, 겨울철에 각각 7.97, 7.72, 7.11, 7.37 µg/m³로 봄에 높고 가을에 낮은 경향을 보였다. 그리고 PM2.5의 경우 봄, 여름, 가을, 겨울철에 각각 4.77, 5.26, 2.93, 3.81 µg/m³로 TSP 에어로졸과는 달리 여름철에 더 높고 가을철에 낮은 농도를 나타내었다. 일반적으로 도시지역의 경우 화석 연료 사용량 증가로 겨울철에 nss-SO₄²⁻의 농도가 상승하는 경향을 보인다. 그러나 고산지역 대기 에어로졸은 이러한 도시지역과는 다른 경향을 보이고 있다. 이처럼 봄철에 농도가 상승하는 것은 편서풍이 우세한 봄철에 국지적인 오염보다는 대륙에서 이동하는 오염물질의 영향을 많이 받았기 때문인 것으로 추정된다. 또 여름철에 nss-SO₄²⁻의 농도가 상승하는 것은 해양 영향과 전구물질의 빠른 2차입자로의 전환과 관계가 있는 것으로 보인다. 해수 중에는 DMS(dimethyl sulfide)가 상당량 함유되어 있어서 자연적 발생원에 의해 방출되는 전체 황의 약 90~95%를 차지하고 있고, 해수면에서 배출된 DMS는 광화학반응을 통해 SO₄²⁻으로 산화되는 과정을 거친다. 특히 이러한 광산화반응은 자외선 양이 많은 시기에 활발하게 일어나는 것으로 보고되고 있다.²⁶ 본 연구에서 고산지역 에어로졸의 nss-SO₄²⁻ 농도가 여름철에 높게 나타나는 것은 이러한 원인으로 추정된다. 특히

월별로는 6월에 가장 높은 농도를 보이고 있는데, 이는 이 시기에 박무(mist) 빈도가 높고, 또 기온 상승으로 인해 대기 중의 SO₂가 빠르게 2차 입자로 전환되기 때문인 것으로 판단된다. 또 봄철에 nss-Ca²⁺과 NO₃⁻의 농도가 TSP와 PM2.5 모두 가장 높은 농도를 나타내었다. 이러한 봄철의 농도 상승은 편서풍에 의한 중국의 오염 영향을 직접적으로 받기 때문인 것으로 판단된다. 그리고 겨울철에 비교적 NO₃⁻ 농도가 상승하는 것은 난방연료 등의 에너지 사용량 증가와 관련이 큰 것으로 보인다. 특히 nss-Ca²⁺의 봄철 농도는 여름철에 비해서 TSP와 PM2.5에서 각각 4.9배, 1.8배 정도 상승하였다. 제주지역의 계절별 주 풍향을 보면 대체적으로 봄철에는 북서 계열의 풍향이 주류를 이루고 있고, 여름철에는 남동 계열, 가을철에는 북동 계열, 그리고 겨울철에는 북풍이 주류를 이루고 있다. 주로 북서 계열의 풍향이 우세하고 황사 영향을 크게 받는 봄철에 이처럼 nss-Ca²⁺ 농도가 증가하는 것은 이러한 풍향과 상관성이 크고, 봄철에 중국에서 발생한 황사가 다량으로 제주 지역 대기 부유분진에 유입되고 있음을 의미한다.²⁷

또한 황과 금속 원소들의 계절별 변화를 보면, S 농도가 봄, 여름, 가을, 겨울철에 각각 2.10, 1.65, 1.88, 1.69 µg/m³로, 봄철에 가장 높고 여름철에 가장 낮은 농도를 보이고 있다. 그리고 대표적 토양기원의 성분인 Al, Ca, Fe 농도가 봄철에 가장 높은 농도를 보였으며 다른 계절에 비해 2.4~3.2배 정도 더 높은 농도를 나타내었다. 이처럼 봄철에 토양 성분들의 농도가 크게 증가하는 것은 황사 영향으로 추정된다. 황사입자를 구성하고 있는 황토입자의 주성분은 장석, 석영 등으로 주로 SiO₂, Al₂O₃, FeO, MgO, Na₂O, CaCO₂ 등을 포함하고 있다. 이중 가장 많이 분포되어 있는 원소는 Si > Ca > Al > Fe의 순인 것으로 알려져 있다. 특히 봄철에 토양의 지표성분인 Al, Ca, Fe, Ti, Ba, Sr 등의 농도가 크게 상승하는 것은 황사의 영향으로 에어로졸에 토양입자가 다량으로 유입되고 있음을 입증하는 결과이다. 또 위해성 중금속 성분인 Cr, Cd의 계절별 농도를 보면, Cr은 봄, 여름, 가을, 겨울철에 각각 2.20, 0.98, 1.43, 2.35 ng/m³, Cd은 각각 1.02, 0.69, 0.69, 0.88 ng/m³의 농도를 나타내었다. 그리고 두 성분 모두 봄과 겨울철에 높은 농도를 보이고 여름에 낮은 농도를 나타내었다. 이러한 결과들로 유추해 보면, 중금속 성분들 역시 그 차이는 상대적으로 낮지만 황사가 영향을 미치는 봄철에 다른 성분들과 함께 농도가 상승하는 것으로 판단된다. 그리고 겨울

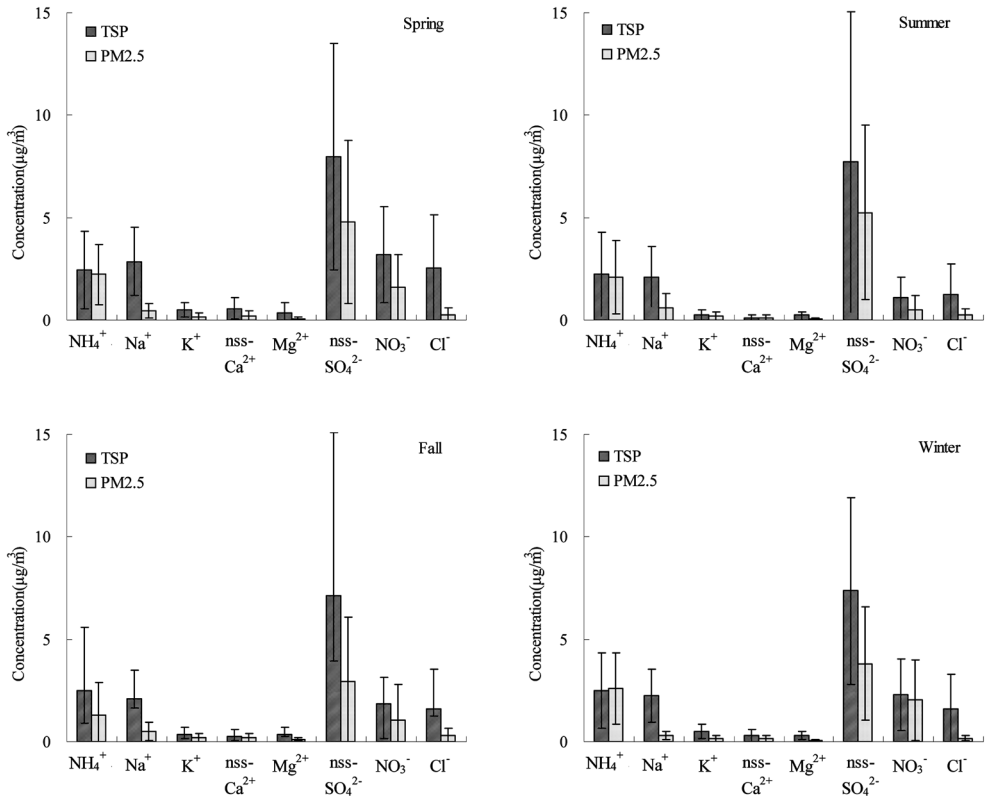


Fig. 3. Seasonal comparison of mean concentration of water-soluble components in TSP and PM2.5 aerosols.

철의 농도 상승은 건조한 대기 상태, 화석연료 사용량, 이 시기에 주류를 이루고 있는 북서풍의 영향 등이 주요 요인인 것으로 추정된다.

3.5. 대기 에어로졸 성분의 발생기원

고산지역대기 에어로졸 성분의 배출원 특성을 확인하기 위하여 통계 프로그램(SPSS)을 이용하여 요인분석(factor analysis)을 실시하였다. 요인분석에서 최적 인자의 수는 고유값 1 이상으로 각각에 대해 3개의 인자를 추출하였고, 베리맥스 회전법을 이용하여 산출한 요인분석 결과를 Table 3에 수록하였다. 고산 대기 에어로졸의 수용성 성분들을 대상으로 요인분석을 실시한 결과, 전체 인자 중 TSP는 84.6%, PM2.5는 80.4%의 설명력을 보였다. 먼저 TSP 성분을 보면, 첫 번째 인자는 30.9%의 설명력을 보였고, NH_4^+ , K^+ , nss-SO_4^{2-} 성분이 높은 적재값을 나타내었다. 이들 성분들은 대부분 자동차, 난방연료, 산업체 등의 발생기원을 나타내는 성분들로 이는 인위적 오염의 영향이 비교적 크게 작용하고 있음을 의미한다. 두 번째 인자

에는 해양기원의 Na^+ , Cl^- , Mg^{2+} 성분들이 높은 적재값을 나타내었고, 30.3%의 설명력을 보였다. 또 세 번째 인자는 23.5%의 설명력을 보였고 nss-Ca^{2+} 과 NO_3^- 이 상대적으로 높은 적재값을 나타내었다. 그러나 nss-Ca^{2+} 은 전형적인 토양기원의 성분인 반면, NO_3^- 은 대표적인 인위적 기원의 성분으로 이들 두 성분은 발생기원이 서로 전혀 다른 물질이다. 그러나 이들 두 성분이 동일한 인자에 적재되는 것은 앞에서 기술한 바와 같이 기체상 질산이 에어로졸 입자에 흡수될 경우, 알칼리성인 토양입자와 중화반응을 일으켜 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 와 같은 염을 생성하기 때문에 NO_3^- 이 nss-Ca^{2+} 과 동일한 인자에 적재되는 것으로 추정된다.²⁵

또한 PM2.5 에어로졸 성분들을 보면, 첫 번째 인자에는 NH_4^+ , K^+ , nss-SO_4^{2-} , NO_3^- 등이 높은 적재값을 나타내며 35.6%의 설명력을 보였다. 이들 성분들은 모두 대표적인 인위적 발생기원의 성분들로 PM2.5 에어로졸은 인위적 오염원과 밀접한 관계가 있는 것으로 해석 된다. 두 번째 인자에는 해양 기원의 Na^+ , Cl^- 성분이 높은 적재값을 나타내었고 24.0%의 설명

Table 3. Results of Varimax factor analyses for TSP and PM2.5 aerosol components

Species	TSP			PM2.5		
	factor1	factor2	factor3	factor1	factor2	factor3
NH ₄ ⁺	0.95	-0.03	0.15	0.94	-0.18	0.06
Na ⁺	-0.08	0.90	0.20	0.07	0.92	0.01
K ⁺	0.65	0.10	0.64	0.78	0.26	0.10
nss-Ca ²⁺	0.15	0.14	0.91	0.29	-0.10	0.89
Mg ²⁺	0.32	0.80	0.08	0.03	0.35	0.87
nss-SO ₄ ²⁻	0.96	-0.02	0.13	0.87	-0.17	0.07
NO ₃ ⁻	0.14	0.48	0.71	0.70	0.13	0.22
Cl ⁻	-0.27	0.84	0.24	-0.07	0.89	0.18
Eigenvalue	2.5	2.4	1.9	2.9	1.9	1.7
Variance (%)	30.9	30.3	23.5	35.6	24.0	20.7
Cumulative (%)	30.9	61.1	84.6	35.6	59.7	80.4

력을 보였다. 또한 세 번째 인자는 20.7%의 설명력을 보였고 nss-Ca²⁺, Mg²⁺ 성분이 높은 적재값을 나타내어 이들 성분들은 주로 토양 입자에서 유래되고 있는 것으로 추정된다. 그리고 TSP와 달리 PM2.5에서 Mg²⁺은 해염보다는 토양으로부터 유래되고 있는 것으로 추정된다. 이와 같이 인자분석을 통하여 고산지역 TSP와 PM2.5 에어로졸 성분들의 발생기원 특징을 조사해 본 결과, 대체적으로 인위적 발생원의 영향을 많이 받고 있고, 다음으로 해양 영향, 그 다음으로 토양 영향을 많이 받는 것으로 판단된다. 그러나 성분들 중 NO₃⁻은 TSP에서 기원이 다른 nss-Ca²⁺과 동일한 인자에 적재되어 이들 성분들은 제주지역으로 대기 중 유입되는 과정에서 중화반응을 일으킨 것으로 추정된다.

3.6. 대기 에어로졸 성분의 유입 경로

제주도 대기질은 장거리 이동 오염물질, 특히 아시아 대륙에서 이동하는 월경성 대기오염물질의 영향을 많이 받고 있는 것으로 나타나고 있다. 따라서 주요 대기 에어로졸 성분들의 장거리 이동 및 유입 경로를 파악하는 것은 의미가 있다. 본 연구에서는 역궤적 분석을 통해 기류의 이동궤적을 추적함으로써 에어로졸 성분들의 유입경로를 조사하였다. 이를 위해 고산지역 TSP 에어로졸 분석 결과를 기초로 인위적 기원의 nss-SO₄²⁻, NO₃⁻, Pb 성분과 토양 지표성분인 nss-Ca²⁺을 대상으로 역궤적 분석을 실시하여 이들 성분들의 유입경로를 추적하였다. 이들 전체 분석데이터 중에서 상대적으로 농도가 높은 상위 25%와 농도가 낮은 하위 25% 시료의 채취 일자를 기준으로 이 시기의 기단(air mass) 이동궤적을 역궤적 분석법으로 추적함으

로써 각 성분들의 유입경로를 조사하였다. 역궤적 분석은 미국해양대기국(NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration)에서 제공하는 HYSPLIT4 (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) 모델을 이용하였다. 또한 역궤적 분석에 사용한 풍향, 풍속 자료는 NOAA의 북반구 FNL(FiNaL run at NCEP) 자료를 이용하였다. 또 중국대륙에서 발생한 대기오염물질의 경우, 대략 4일 이내에 한반도에 도달한다는 점을 감안하여 역궤적 분석의 모사시간은 5일(120시간)로 설정하였고, 측정 지점의 좌표는 고산(33.28 °N, 127.17 °E)을 기점으로 선정하였다.^{3,12}

본 연구 기간에 측정된 총 255개의 TSP 시료 중에서 nss-SO₄²⁻, NO₃⁻, Pb, nss-Ca²⁺ 네 성분 각각의 농도가 상대적으로 높은 64개(25%)와 반대로 농도가 낮은 64개(25%)를 선정하여 역궤적 분석을 실시하였고, 그 결과를 Fig. 4-5에 수록 하였다. 그리고 제주도를 중심으로 주변지역을 임의로 구간I(중국대륙), 구간II(한반도), 구간III(북태평양)의 세 구간으로 나누어 측정 지점으로 이동한 기류의 이동경로를 비교하였다.

먼저 인위적 기원의 nss-SO₄²⁻ 경우를 보면, 25% 고농도 시에는 기류의 약 81% 정도가 구간I에서 고산 지역으로 이동하였고, 14% 정도가 구간II에서 고산 지역으로 이동하였다. 반면에 25% 저농도 시에는 기류의 50% 정도가 구간I에서 제주지역으로 이동하였고, 30% 정도는 구간III, 나머지 20% 정도는 구간II에서 발원되어 고산지역으로 이동한 것으로 나타났다. 그리고 NO₃⁻ 역시 고농도 시에는 86% 정도가 구간I로부터 기류가 유입되었으나 저농도 시에는 48% 정도가 구간I, 31% 정도가 구간III, 21% 정도가 구간II에서

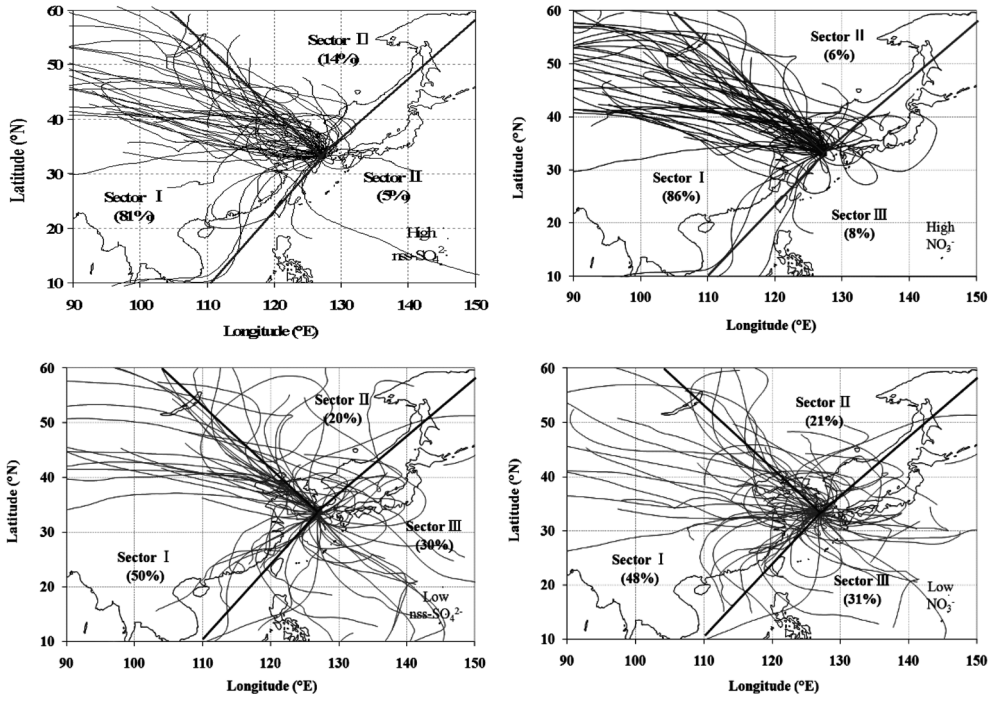


Fig. 4. 5-Day backward trajectories corresponding to high and low 25% of nss-SO_4^{2-} and NO_3^- concentrations.

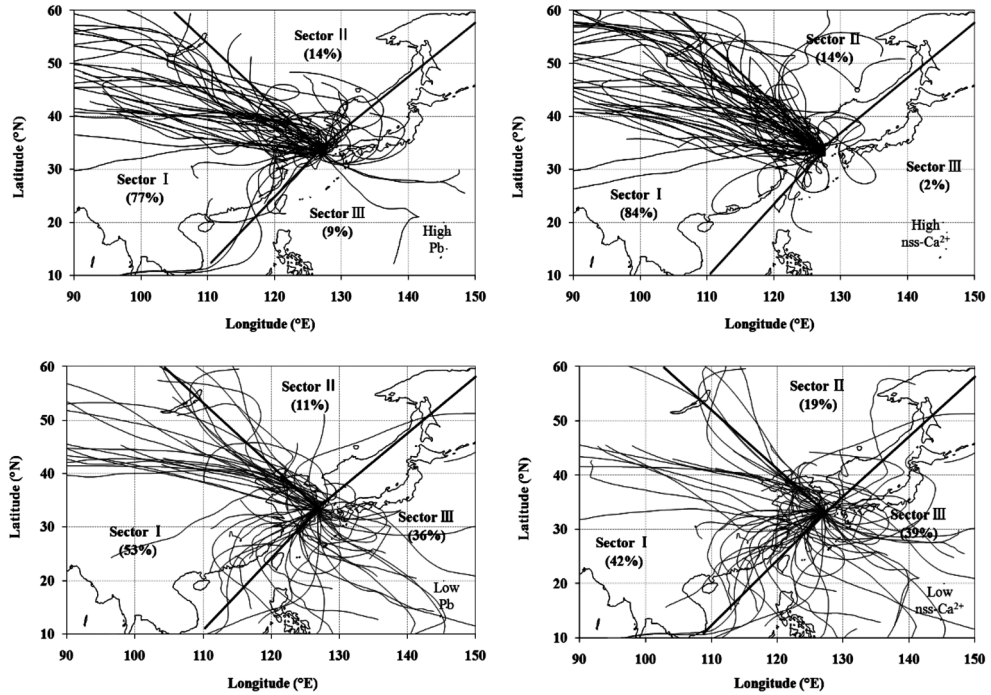


Fig. 5. 5-Day backward trajectories corresponding to high and low 25% of Pb and nss-Ca^{2+} concentrations.

발원되어 제주지역으로 이동한 것으로 조사되었다. 마찬가지로 Pb를 기준으로 고농도와 저농도 시 기류의 이동경로를 보면, 다른 성분들과는 다소 차이가 있지만 대체적으로 고농도 시에는 77% 정도가 구간I로부터, 9% 정도가 구간III, 14% 정도가 구간II로부터 이동하였다. 그러나 저농도 시에는 53% 정도가 구간I, 36% 정도는 구간III, 11%는 구간II에서 기류가 이동한 것으로 확인되었다. 또한 토양기원인 nss-Ca²⁺을 기준으로 기류의 이동경로를 비교해 보면, 상위 25%일 때는 약 84%가 구간I에서 제주지역으로 유입되었고, 반면에 하위 25%일 때에는 42% 정도가 구간I, 39% 정도는 구간III에서 발원한 공기가 유입되었음을 확인할 수 있었다. 따라서 이러한 역학적 분석 결과를 종합해 보면, nss-SO₄²⁻, NO₃⁻, Pb, nss-Ca²⁺ 성분들은 대체적으로 기류가 중국대륙으로부터 제주지역으로 이동할 때 훨씬 더 높은 농도를 나타낸 반면, 북태평양의 기류가 제주지역으로 이동할 때 상대적으로 낮은 농도를 나타내었다. 그리고 제주지역 대기질은 중국대륙에서 장거리 이동한 대기오염물질의 영향을 크게 받고 있음을 확인할 수 있었다.

4. 요약 및 결론

제주도 고산지역에서 TSP, PM2.5 대기 에어로졸 시료를 채취하여 주요 성분들을 분석하고, 이로부터 대기 에어로졸의 조성 및 오염 특성을 조사한 결과는 다음과 같다.

고산지역 TSP 에어로졸의 수용성 성분은 인위적 기원 성분들이 가장 높은 조성비를 나타내었고 다음으로 해양 및 토양 기원 성분들이 높은 조성비를 나타내었다. 그리고 다른 국내 청정지역 및 도시지역에 비해 nss-SO₄²⁻과 NH₄⁺이 높은 조성비를 보이고 NO₃⁻는 상대적으로 낮은 조성비를 나타내는 것으로 확인되었다. 에어로졸 성분의 입경별 분포는 nss-SO₄²⁻, NO₃⁻, NH₄⁺ 성분들은 대체적으로 미세입자에, 토양기원의 nss-Ca²⁺과 해염기원의 Na⁺, Cl⁻, Mg²⁺은 상대적으로 조대입자에 많이 분포하고 있는 것으로 확인되었다. 또 에어로졸 성분의 계절별 농도는 봄철에 토양기원의 nss-Ca²⁺, Al, Fe, Ca와 인위적 기원의 NO₃⁻ 성분 농도가 크게 증가하였고, NH₄⁺, nss-SO₄²⁻은 봄과 여름철에 높은 농도를 나타내었다. 그리고 TSP와 PM2.5 에어로졸 성분들의 발생기원을 조사해 본 결과, 대체적으로 인위적 발생원의 영향을 많이 받고 있고, 다음으로 해양 영향, 그 다음으로 토양 영향을 많이 받는

것으로 판단된다. 그러나 성분들 중 NO₃⁻은 TSP에서 기원이 다른 nss-Ca²⁺과 동일한 발생기원을 보여 제주지역으로 대기로 유입되는 과정에서 중화반응을 일으킨 것으로 추정된다. 또한 역학적 분석을 통해 대기 에어로졸 성분의 유입경로를 조사해 본 결과, nss-SO₄²⁻, NO₃⁻, Pb, nss-Ca²⁺ 성분들은 대체적으로 기류가 중국대륙으로부터 제주지역으로 이동할 때 훨씬 더 높은 농도를 나타낸 반면, 북태평양의 기류가 제주지역으로 이동할 때 상대적으로 낮은 농도를 나타내었다.

이러한 연구를 통해 제주지역 대기질은 중국대륙에서 장거리 이동한 대기오염물질의 영향을 많이 받고 있음을 확인할 수 있었다. 그리고 본 연구 결과는 국내 배경지역의 대기오염물질 추정 자료로 이용됨은 물론 향후 동아시아 지역의 대기질 개선을 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 보인다. 또 한반도로 유입되는 대기오염물질의 장거리 이동 현상을 평가하는데 필요한 연구 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2006년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었습니다(KRF-2006-311-C00614).

참고문헌

1. 한진석, 김영미, 안준영, 공부주, 최진수, 이상욱, 이석조, 한국대기환경학회지, **22**(1), 99-106(2006).
2. S. Hatakeyama, K. Mukai, F. Sakamaki, H. Murano. H. Bandow and Y. Komazaki, *Water Air Soil Pollut.*, **130**, 373-378(2001).
3. 강창희, 고희정, Wlodek Zahorowski, 한국대기환경학회지, **23**(5), 612-624(2007).
4. 김성천, 강달선, 차영희, 한국대기환경학회지, **26**(2), 108-115(2000).
5. J. S. Lighty, J. M. Veranth and A. F. Sarofim, *J. Air Waste Manag. Assoc.*, **50**(9), 1565-1618(2000).
6. J. H. Seinfeld and S. N. Pandis, 'Atmospheric Chemistry and Physics; From Air Pollution to Climate Change', 529, Wiley & Sons, New York, U.S.A., 1998.
7. 신흠중 이태정, 김동술, 한국대기보전학회지, **12**(1), 67-77(1996).
8. J. M. Hoell, D. D. Davis, S. C. Liu, R. Newell, M.

- Shipham, H. Akimoto, R. J. McNeal, R. J. Bendura and J. W. Drewry, *J. Geophys. Res.*, **101**(D1), 1641-1653 (1996).
9. B. J. Huebert, T. Bates, P. B. Russell, G. Shi, Y. J. Kim, K. Kawamura, G. Carmichael and T. Nakajima, *J. Geophys. Res.*, **108**(D23), 8633(2003).
 10. T. Nakajima, S. C. Yoon, V. Ramanathan, G. Y. Shi, T. Takemura, A. Higurashi, T. Takamura, K. Aoki, B. J. Sohn, S. W. Kim, H. Tsuruta, N. Sugimoto, A. Shimizu, H. Tanimoto, Y. Sawa, N. H. Lin, C. T. Lee, D. Goto and N. Schutgens *J. Geophys. Res.*, **112**(D24S91), 23(2007).
 11. M. Zhang, I. Uno, Y. Yoshida, Y. Xu, Z. Wang, H. Akimoto, T. Bates, T. Quinn, A. Bandy and B. Blomquist, *Atmos. Environ.*, **38**, 6947-6959(2004).
 12. 김원형, 강창희, 홍상범, 고희정, 이 원, 분석과학, **20**(5), 383-392(2007).
 13. K. F. Ho, S. C. Lee, C. K. Chan, J. C. Yu, J. C. Chow and X. H. Yao, *Atmos. Environ.*, **37**(1), 31-39(2003).
 14. M. Nishikawa and S. Kanamori, *Anal. Sci.*, **7**, 1127-1130(1991).
 15. D. Koch, *Atmos. Environ.*, **35**, 739-746(2001).
 16. 국립환경연구원연구보고서, '배경농도지역 장거리 이동 오염물질 집중 조사(V)', 국립환경과학원, 301(2005).
 17. 최민규, 여현규, 임종억, 조기철, 김희강, 한국대기환경학회지, **16**(6), 573-583(2000).
 18. 이학성, 강충민, 강병욱, 김희강, 한국대기환경학회지, **15**(2), 113-120(1999).
 19. G. C. Fang, Y. S. Wu, S. H. Huang and J. Y. Rau, *Atmos. Environ.*, **39**, 3003-3013(2005).
 20. K. Oravisjarvi, K. L. Timonen, T. Wiikinkoski, A. R. Ruuskanen, K. Heinanen and J. Ruuskanen, *Atmos. Environ.*, **31**(8), 1013-1022(2003).
 21. X. Huang, I. Olmez, N. K. Aras and G. E. Gorden, *Atmos. Environ.*, **28**(8), 1385-1391(1994).
 22. 이보경, 김영훈, 하재윤, 이동수, 한국대기환경학회지, **21**(4), 439-458(2005).
 23. Y. Wang, G. Zhuang, X. Zhang, K. Huang, C. Xu, A. Tang, J. Chen and Z. An, *Atmos. Environ.*, **40**(16), 2935-2952(2006).
 24. H. Minoura, K. Takahashi, J. C. Chow and J. G. Watson, *Atmos. Environ.*, **40**(14), 2478-2487(2006).
 25. V. M. Kerminen, T. A. Parkkanen and R. E. Hillamo, *Atmos. Environ.*, **31**(17), 2753-2765(1997).
 26. 김기현, 이강웅, 허철구, 강창희, 한국대기보전학회지, **13**(2), 161-170(1997).
 27. 박민하, 김용표, 강창희, 한국대기환경학회지, **17**(6), 487-492(2001).