

## 제주지역 TSP의 기류 유입경로별 조성 변화

### Variation of TSP Compositions in Accordance with the Pathways of Inflowing Air Mass at Jeju Island

고희정 · 김원형 · 이민영 · 송정민 · 강창희\* · 김용표<sup>1)</sup>

제주대학교 화학과, <sup>1)</sup>이화여자대학교 환경공학과

(2011년 5월 18일 접수, 2011년 5월 31일 수정, 2011년 5월 31일 채택)

Hee-Jung Ko, Won-Hyung Kim, Min-Young Lee, Jung-Min Song,  
Chang-Hee Kang\* and Yong-Pyo Kim<sup>1)</sup>

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

<sup>1)</sup>*Department of Environmental Science and Engineering, Ewha Womans University,  
Seoul 120-750, Korea*

(Received 18 May 2011, revised 31 May 2011, accepted 31 May 2011)

#### Abstract

The TSP aerosols were collected at Gosan site of Jeju Island between 2003 and 2007, and their aerosol components were analyzed to examine the variations of chemical compositions with the corresponding pathways of inflowing air parcels. According to the comparison of seasonal aerosol compositions, the soil-originated components showed remarkably high concentrations during spring season. On the other hand, the concentrations of anthropogenic components were somewhat high in spring and summer seasons, but low in fall season. Based on the comparison of TSP compositions in relation to the pathways of inflowing air mass, the concentrations of anthropogenic components ( $\text{nss-SO}_4^{2-}$ , S,  $\text{NO}_3^-$ ), soil-originated components ( $\text{nss-Ca}^{2+}$ , Al, Fe, Ca), and the heavy metals (e.g., Mn, Zn, Cr, Pb, Cu, Cd, etc.) have relatively increased with the air mass moving from China continent into Jeju area. Meanwhile, the marine-originated components showed an increasing trend with the air mass coming from North Pacific Ocean. In the seasonal and sectional comparison, the  $\text{nss-SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{nss-Ca}^{2+}$ , and Al showed comparatively high concentrations when the air mass moved from China continent during all seasons. Especially, the  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{nss-Ca}^{2+}$ , and Al concentrations were somewhat high when the air mass moved from Korean Peninsula during summer season. It was also recognized that the  $\text{Na}^+$  concentration were high, when the air mass moved from Pacific Ocean through all seasons.

**Key words** : TSP composition, Aerosol, Gosan site, Air mass pathway

---

\*Corresponding author.

Tel : +82-(0)64-754-3545, E-mail : changhee@jejunu.ac.kr

## 1. 서 론

대기 중의 입자상물질은 발생 기원에 따라 입자의 크기, 밀도, 흡습성 등 물리적 특성이 다르고, 중금속이나 수용성 성분의 함량 등 화학적 조성이 다른 특징을 나타낸다. 그리고 응축 핵으로 작용하여 구름 형성에 관여함은 물론 빛의 흡수와 산란에 의해 지구 복사평형에도 영향을 미친다(Takamura *et al.*, 2007; Kim *et al.*, 2006). 또 입자크기에 따라서 물리, 화학적 특성이 차이를 보이고 인체 건강에 대한 영향도 다르게 나타난다(Kim *et al.*, 2000). 이처럼 대기 입자상물질은 직접적으로 인체 건강 및 산업 활동에 영향을 줄 뿐만 아니라 시정, 지구기후변화에도 크게 영향을 미치는 것으로 나타나고 있어서 집중적인 연구와 관리가 필요하다.

TSP 에어로졸은 대체적으로  $50\mu\text{m}$  이하의 입자들이 주류를 이루고 있고, 비교적 입경이 큰 초대입자는 비산된 토양입자, 해염입자 등과 같이 대부분 자연적 발생원에 의해 생성된다. 반면에 미세입자는 화석연료의 연소, 자동차 배출가스, 화학물질 제조과정 등과 같이 인위적 발생원에 의해 생성된 물질과 기체상 물질이 입자상으로 전환된 2차 오염물질들로 구성되어 있다. 이러한 미세입자들의 화학성분은 주로  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ , 유기탄소(OC), 원소탄소(EC) 등으로, 이 중에서도  $\text{SO}_4^{2-}$ 와 유기탄소의 농도가 높은 것으로 보고되고 있다. 특히 이러한 미세입자는 기체상 물질인  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{O}_3$ , CO, VOCs 등과 반응성이 크고, 인체에 대한 피해도 크게 나타난다(Lighty *et al.*, 2000). 특히  $0.1\sim 2.0\mu\text{m}$ 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(Kim *et al.*, 2008; Seinfeld and Pandis, 1998).

동북아시아 지역에서는 급속한 산업발달과 인구증가, 그리고 생활수준의 향상으로 많은 양의 오염물질이 배출되고 있다. 그리고 최근 대기오염물질의 배출량 증가와 함께 화석연료의 사용량 증가로 비소, 카

드뎀, 베릴륨, 수은, 납 등의 중금속 등도 배출되고 있다. 이렇게 대기로 방출된 오염물질들은 대기부유입자에 흡착된 상태로 주변지역으로 확산될 수 있다. 특히 장거리 이동 현상에 의해 오염물질이 200~300 km 이상 확산되는 월경(trans-boundary)성 대기오염물질의 영향은 인접국가들 간에 큰 분쟁의 소지로 비화될 가능성이 있다.

우리나라의 경우 봄, 가을철에는 주로 서풍 계열의 바람이 불고, 겨울철에는 북서풍이 주류를 이루고 있으며, 여름철에는 남풍 또는 남서풍의 바람이 많이 부는 것으로 나타나고 있다. 이는 동북아 지역에서 배출되는 대기오염물질이 주로 봄, 가을, 겨울에 편서풍 풍하에 위치한 한반도로 이동하여 대기질에 영향을 미칠 수 있음을 의미한다(선우영, 2005). 그리고 이러한 장거리 이동 오염원의 영향을 확인하기 위해서는 기류 이동경로를 확인하고 이 시기의 오염물질 농도 변화를 비교할 필요가 있다. 그리고 이로부터 기류이동에 따른 각종 대기오염물질의 조성변화를 관측함으로써 그 배출원을 추정하고 장거리 이동 오염물질의 영향을 파악할 필요가 있다.

최근에 동북아 지역을 중심으로 이러한 대기오염물질의 장거리 이동 현상을 조사하기 위한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 동북아시아 지역에서 대기오염물질 장거리 이동 현상을 규명하기 위한 지상 관측 지점으로는 제주도가 아주 적합한 것으로 인식되고 있다. 이는 제주도가 국지 오염원의 방해가 적고 인구밀도가 낮은 청정지역이기 때문에 순수하게 장거리 이동되는 오염물질의 영향을 측정하기에 적합하기 때문이다. 그리고 한반도와 100 km, 중국과 500 km, 일본과는 250 km 이상 떨어져 있고 중국과 일본의 중앙에 위치하고 있어서 동북아시아에서 장거리 이동되는 대기오염물질의 영향을 평가하는 데 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(Kim *et al.*, 2005). 이러한 이유로 최근 제주도 고산 지역에서는 대기오염물질의 장거리 이동을 관측하기 위한 국제공동연구가 수행되어 왔다. 대표적인 연구로는 1991년의 PEM (Pacific Exploratory Mission)-West A, 1994년의 PEM-West B, 2001년의 ACE (Aerosol Characterization Experiment)-

Asia, 2005년부터 진행된 ABC (Atmospheric Brown Cloud) 등을 들 수 있다(Nakajima and Yoon, 2007; Zhang *et al.*, 2004; Huebert *et al.*, 2003; Carmichael *et al.*, 1997; Chen *et al.*, 1997).

본 연구는 국내 배경지역인 제주도 고산 지역에서 장기간 TSP 에어로졸을 채취하여 에어로졸의 주요 이온 및 원소 성분을 분석한 결과이다. 그리고 이러한 분석 결과를 기초로 기류의 이동경로별 에어로졸 조성을 비교하고 오염물질의 유입경로와 배출원 특성을 조사하였다. 또한 기류의 유입경로에 따른 에어로졸 조성 변화를 상호 비교함으로써 주변국가에서 발생하여 한반도로 장거리 이동하는 대기오염물질의 영향을 평가하고자 하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1 TSP 시료 채취

TSP 에어로졸 시료는 제주도 ‘고산’ 측정소(33° 28'N, 127° 17'E)에서 high volume tape sampler (KIMOTO Electric Co., 195A, Japan)를 사용하여 2003년 1월부터 2007년 12월까지 대략 3일 간격, 24시간 단위로 총 692개를 채취하였다. 이 샘플러는 롤(roll)테이프형 테프론필터(Sumitomo Electric Co., PTFE 100 mm × 10 m, Japan)를 사용하여 연속적으로 시료를 채취할 수 있는 자동시스템이며, 시료의 채취시간을 임의로 조절할 수 있는 타이머가 부착되어 있다. 샘플러는 측정소의 컨테이너 내부에 탑재하였고, 공기 흡입관(길이 7 m, 내경 38 mm인 flexible hose)은 컨테이너의 측면을 관통시켜 지상 약 6 m 높이의 에어로졸이 포집될 수 있도록 설치하였다. 이때 흡입 공기의 유속은 초기속도가 대략 170 L/min이 되도록 조절하였다(Kang *et al.*, 2009). 시료를 채취한 필터는 대략 3개월 간격으로 샘플러로부터 분리하여 냉동고에 보관한 상태에서 에어로졸 성분을 분석하였다. 필터는 시료가 채취된 부분을 원형으로 잘라낸 뒤 이를 이등분하여 반쪽은 수용성 이온성분, 나머지 반쪽은 원소 성분 분석에 이용하였다.

### 2.2 TSP 성분 분석

#### 2.2.1 수용성 성분 분석

TSP 에어로졸 시료는 대략 3개월 간격으로 회수하

여 분석 전까지 -20°C 냉동고에 밀봉한 상태로 보관하였다. 수용성 성분 분석용 시료는 총부유분진 시료를 에탄올 0.2 mL로 침적시킨 후 초순수 50 mL를 가하여 용출하였다. 초순수를 가한 시료 용액은 초음파 세척기에서 30분간 초음파를 조사한 후, 재차 진탕기(shaker)에서 1시간 동안 흔들어 수용성 성분들을 용출하였다. 이때 용기는 폴리에틸렌병(Nalgene, HDPE, 125 mL)을 사용하였다. 용출액은 주사기필터(Whatman, PVDF syringe filter, 0.45 μm pore size, 13 or 25 mm diameter)로 불용성 입자를 거른 후 여액을 이온 분석용 시료로 이용하였다. NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> 양이온은 Metrohm Modula IC (907 IC pump, 732 IC detector)와 Metrohm Metrosep Cation 1-2-6 분리관을 사용하여 유속 1.0 mL/min, 시료주입량 20 μL, 4.0 mM tartaric acid/1.0 mM pyridine-2,6-dicarboxylic acid 용리액 조건, 또는 Metrohm Metrosep C 2-150 분리관, 1.0 mL/min 유속, 100 μL 시료주입량, 2.0 mM Nitric acid 용리액의 조건으로 분석하였다. 또한 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup> 음이온은 Metrohm Modula IC와 Metrohm Metrosep A-SUPP-4 또는 Metrohm Metrosep A-SUPP-5 분리관을 사용하여 유속 0.7~1.0 mL/min, 시료주입량 20 μL, 1.8 mM NaHCO<sub>3</sub>/1.7 mM Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 용리액, 0.2% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 썬드레스 용액의 조건으로 분석하였다(Ko *et al.*, 2010). 이때 기기검출한계(IDL)는 IC 분석용 표준용액(최소농도)을 사용하여 7회 반복 분석 후 측정하였고 정밀도는 측정된 각 값들이 재현성을 측정하여 변동계수(CV)로 비교하였다. 이온성분 분석을 위한 IC의 평균 기기검출한계(98% 신뢰수준)와 변동계수는 표 1과 같다.

**Table 1. Instrumental detection limit (IDL) and variation of coefficient (CV) for ion chromatography analysis (n=7).**

Species	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>
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

#### 2.2.2 원소 성분 분석

에어로졸의 원소 성분은 마이크로파 분해 장치를 사용하여 혼합산 용액으로 용출하였고, 2003~2005년까지는 EPA Method 3051A 방법으로 2006년 이후에는 US EPA의 ‘Compendium of methods for the determination of inorganic compounds in ambient air (Me-

**Table 2. Instrumental detection limit (IDL) for ICP-OES analysis (n=7).**

Element	S	Al	Ca	K	Fe	Na	Mg	Ti	Ba	Zn
IDL ( $\mu\text{g/L}$ )	4.2	1.5	0.6	3.3	1.2	1.2	0.6	0.6	0.6	1.8
Element	Cr	Cu	Co	Cd	Mn	Sr	V	Pb	Ni	Mo
IDL ( $\mu\text{g/L}$ )	0.3	0.9	0.6	0.3	0.9	0.6	0.9	0.9	0.9	0.6

thod IO-3) 방법으로 전처리하였다. 시료가 채취된 필터를 테프론(PFA, polyfluoroalkoxy) 용기에 넣고 5.55%  $\text{HNO}_3$ /16.75%  $\text{HCl}$  혼합산 10 mL를 가한 후 마이크로파를 조사(1,200 W)하였다. 이때 온도는 10 분 동안 180°C로 상승하였고, 이 온도에서 10분간 유지시킨 후 서서히 상온으로 냉각하였다. 마이크로파 분해를 거친 용액에 3%  $\text{HNO}_3$ /8%  $\text{HCl}$  혼합산 5 mL를 넣고 주사기 필터로 불용성 입자를 거른 후 초순수를 사용하여 용량플라스크에서 25 mL가 되도록 희석하였다(Nguyen *et al.*, 2009).

전처리를 거친 에어로졸의 금속 성분들은 ICP-OES (Thermo Jarrel Ash, Model IRIS-DUO, USA)로 20종의 금속 및 황 원소 성분을 분석하였다. 분석 시 표준용액은 AccuStandard사의 ICP용 1,000  $\mu\text{g/mL}$  용액을 초순수와 혼산 용액으로 희석하여 조제하였다. 이때 희석용액은 매트릭스 효과를 최소화시키기 위하여 시료의 전처리 과정과 동일한 비율로  $\text{HNO}_3$ 과  $\text{HCl}$ 을 혼합한 용액을 사용하였다. 검정곡선 작성 시 사용한 표준용액은 시료의 농도에 따라 고농도 성분들은 0.01~5.0  $\mu\text{g/mL}$ , 저농도 성분들은 0.01~1.0  $\mu\text{g/mL}$  범위로 조제하였다(Kang *et al.*, 2009, 2007). 원소 성분 분석을 위한 ICP-OES의 분석조건은 RF power=1,150 W, RF Frequency=40.68 MHz이며, Ar 유속은 Carrier=0.5 L/min, Auxiliary=1.5 L/min, Coolant=16.0 L/min이다. 그리고 극미량의 금속원소들은 Ultrasonic Nublizer (CETAC Tech., model U-5000AT, USA)를 사용하여 대략 10배 정도 농축하여 분석하였다. 이러한 방법으로 수회에 걸쳐 분석한 금속원소들의 평균 기기검출한계(IDL)는 표 2와 같이 금속원소들은 0.3~3.3  $\mu\text{g/L}$ , S은 4.2  $\mu\text{g/L}$ 이었다.

### 2.2.3 역궤적 분석

대기오염물질은 일반적으로 1.5~4 km 고도를 통해 이동한다. 그리고 700 mb와 850 mb 기압면에 대한 역궤적은 일기도를 이용하여 직접 작성이 가능하고, 대기 경계층 이동을 보다 잘 묘사하는 중층개기

의 바람 이동을 살펴 볼 수 있는 장점을 지니고 있다. 따라서 본 연구에서는 역궤적 분석을 위한 출발점 고도를 850 mb 면인 1,500 m로 설정하였고, 출발 시간은 해당 날짜의 매 00 UTC를 이용하였다. 역궤적 분석은 미국해양대기국(NOAA)에서 제공하는 HYSPLIT4 (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) 모델을 이용하였다. 그리고 고산지역(33°28'N, 경도 127°17'E)을 도착지점으로 5일간의 역궤적 경로를 모사하였고, 기상 자료는 미국 NCEP (National Center for Environmental Prediction)의 중 규모 기상모델(MRF)인 GDAS (global data assimilation system) 데이터를 이용하였다(NOAA, 2009).

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 TSP 에어로졸의 조성

2003년 1월부터 2007년 12월까지 채취한 총 692 개 TSP 시료에 대해 주요 이온 및 원소 성분을 분석하였다(Park *et al.*, 2004). 이 중에서 채취 시 강수량이 3 mm 이상인 경우를 제외한 나머지 574개 시료에서 이온과 원소 성분의 농도를 그림 1에 비교하였다. 그림에서 box는 4분위 범위와 표준편차, box 내부의 ‘—’는 중앙값, ‘·’는 평균값을 나타내며, ‘—’는 최대값과 최소값을 의미한다. 그리고  $\text{nss-O}_4^{2-}$ 과  $\text{nss-Ca}^{2+}$  농도는 측정지점이 해안지역인 점을 고려하여 비해염(non-sea salt) 질량으로 환산하여 나타내었다(Kang *et al.*, 2007; Ho *et al.*, 2003). 연구기간의 이온 성분 농도는  $\text{nss-SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{NH}_4^+ > \text{Na}^+ > \text{Cl}^- > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{nss-Ca}^{2+}$  순으로  $\text{nss-SO}_4^{2-}$  농도가 가장 높게 나타났다. 이들 성분들의 발생기원별 조성비를 비교해 보면, 인위적 기원의 성분들( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{nss-SO}_4^{2-}$ )이 70.4%로 가장 높은 함량을 나타내었고, 다음으로는 해염 기원 성분들( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ )이 25.6%, 토양 기원 성분( $\text{nss-Ca}^{2+}$ )이 1.7%의 함량을 보였다. 또한 원소 성분의 농도(그림 2)는  $\text{S} > \text{Na} > \text{Al} > \text{Ca}$

>K>Fe>Mg>Zn>Pb>Ti>Mn>Ba>V>Cu>Ni>Sr>Cr>Mo>Cd>Co 순으로 높게 나타났다. 이들의 함량을 발생기원별로 비교해 보면, 인위적 기원의 S, Pb, Zn이 42.5%, 주요 토양기원의 Al, Fe, Ca 이 21.6%, 해양 기원인 Na, Mg이 28.0% 이었다. 따라서 이들 성분들만을 기준으로 본 고산 지역 TSP 에어로졸의 조성은 인위적 기원 성분들의 농도가 가장 높고, 다음으로 해양과 토양 성분의 함량이 높게 나타나는 경향을 보이고 있다.

3.2 계절별 농도 비교

대기 에어로졸 조성은 기상상태에 따라 화학조성이 큰 차이를 보이기 때문에 이들의 계절별 차이를 비교해 볼 필요가 있다. 특히 제주도 고산지역은 국

지적인 오염원이 적고 외부에서 유입되는 오염물질의 영향을 많이 받는 것으로 알려져 있어서 주 풍향이 다른 계절별로 그 조성을 비교하는 것은 의미가 있다. 제주지역의 계절별 주 풍향을 보면 대체적으로 봄에는 북서 계열의 풍향이 주류를 이루고 있고, 여름에는 남동 계열, 가을에는 북동 계열, 그리고 겨울에는 북풍이 주류를 이루고 있다(Carmichael *et al.*, 1997). 이러한 변화를 파악하기 위하여 에어로졸 성분의 농도를 계절별로 비교하였다.

먼저 이온성분의 농도를 보면, nss-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>가 가장 높은 농도를 나타내었고, 봄, 여름, 가을, 겨울철에 각각 8.12, 7.13, 5.83, 6.82 µg/m<sup>3</sup>로 봄과 여름철에 더 높은 농도를 나타내었다. 봄철에 농도가 상승하는 것은 편서풍이 우세한 봄철에 중국의 영향을 많이 받기 때문인 것으로 추정된다. 또 여름철, 특히 6월에 nss-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 농도가 상승하였고 이러한 원인은 아황산가스의 빠른 2차입자로의 전환과 해양에서 발생한 DMS의 영향으로 보인다. 자연적 발생원에 의해 방출되는 전체 황의 90~95% 정도가 해양에서 유래되고 있고, DMS의 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>로의 전환은 주로 광화학 반응에 의해 일어나고 있으며, 특히 자외선 양이 많은 여름철에 활발한 것으로 조사되고 있다. 또 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 역시 봄과 여름에 다소 더 높은 농도를 나타내고 있다. 일반적으로 NH<sub>3</sub>의 발생량을 결정하는 가장 중요한 인자는 생물학적 활성과 온도인 것으로 보고되고 있다(Pio *et al.*, 1999; Kim *et al.*, 1997). 여름철의 경우 높은 기온의 영향으로 동물의 배설물이나 식물의 부패가 활발히 이루어지면서 NH<sub>3</sub>의 발생량이 증가하는 것으로 알려져 있다. 고산지역에서 봄과 여름에

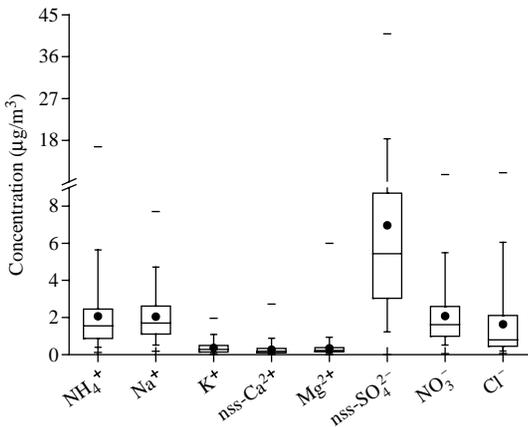


Fig. 1. Comparison of ion concentrations at Gosan site.

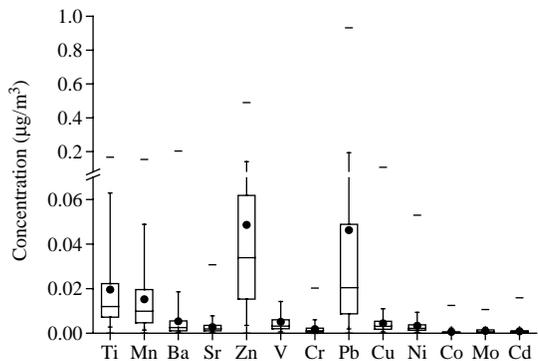
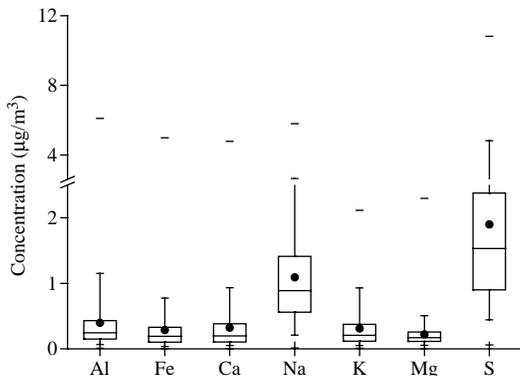


Fig. 2. Comparison of element concentrations at Gosan site.

NH<sub>4</sub><sup>+</sup>이 상승하는 원인 역시 이러한 온도 상승과 관련이 있는 것으로 판단된다. 또 고산지역에서 NH<sub>3</sub> 농도 상승은 비료 사용과도 관계가 있을 것으로 추정된다. 거리가 다소 떨어져 있기는 하지만 고산측정소 주변이 대부분 농경지이기 때문에 이에 의한 영향을 무시할 수 없고 이로 인해 NH<sub>3</sub> 농도가 상승할 수도 있을 것으로 추정된다.

또한 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>의 계절별 평균 농도는 봄, 여름, 가을, 겨울철에 각각 2.93, 1.17, 1.74, 2.37 μg/m<sup>3</sup>를 보였고, 특히 봄철에 농도가 상승하는 것은 주 풍향이 편서풍인 봄철에 중국의 오염 영향을 직접적으로 받았기 때문인 것으로 추정된다. 다음으로 겨울철에 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 농도가 상승하는 것은 난방 연료 등의 에너지 사용량과 관련이 있어 보인다. nss-Ca<sup>2+</sup> 농도는 봄, 여름, 가을, 겨울철에 각각 0.42, 0.14, 0.24, 0.27 μg/m<sup>3</sup>으로 봄철에 훨씬 높은 농도를 나타내었고 여름철에 비해 3배 정도 상승하였다. 주로 북서 계열의 풍향이 우세한 봄과 겨울, 가을철에 nss-Ca<sup>2+</sup> 농도가 상승하는 것은 풍향과 관련이 있으며, 특히 봄철에 농도가 상승하는 것은 황사의 영향이 크고, 이 시기에 토양입자가 다량으로 유입되고 있음을 암시하는 결과이다.

원소 성분들의 농도는 S가 가장 높고 다음으로 Na, Al, Ca, Fe, K, Mg 등이 비교적 높은 농도를 나타내었다. 그리고 이외의 다른 성분들은 이들에 비해 상대적으로 훨씬 낮은 농도를 나타내었다. 이 중 S는 봄, 여름, 가을, 겨울철에 각각 2.33, 1.76, 1.53, 1.91 μg/m<sup>3</sup>로 봄철이 가장 높고 가을철에 가장 낮은 농도를 나타내었다. 또한 Al은 봄, 여름, 가을, 겨울에 각각 0.72, 0.29, 0.26, 0.31 μg/m<sup>3</sup>로 봄철에 2배 이상 더 높았다. Ca, Fe 역시 Al과 유사하게 봄철의 농도가 약 3배 정도 더 높은 것으로 조사되었다. 또 토양 기원의 Ti, Sr, Ba 등도 모두 봄철에 가장 높고 여름철에 가장 낮은 농도를 나타내었다. 일반적으로 황사입자를 구성하고 있는 황토입자의 주성분은 장석, 석영 등으로 주로 SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, FeO, MgO, Na<sub>2</sub>O, CaCO<sub>3</sub> 등을 포함하고 있다. 이 중 가장 많이 분포되어 있는 원소는 Si, Ca, Al 등인 것으로 알려져 있다(김양균 등, 1990). 원소 성분들 중에서 Al, Ca, Fe, Ti, Ba, Sr 등의 토양기원 성분의 농도가 봄철에 상승하는 것은 이러한 황사입자의 유입에 의해 영향을 받고 있음을 의미하는 결과이다(선우영, 2005). 이들 성분들 외에도 인위적 기원의 Pb, Zn, V 또한 대체적으로 봄철에 높

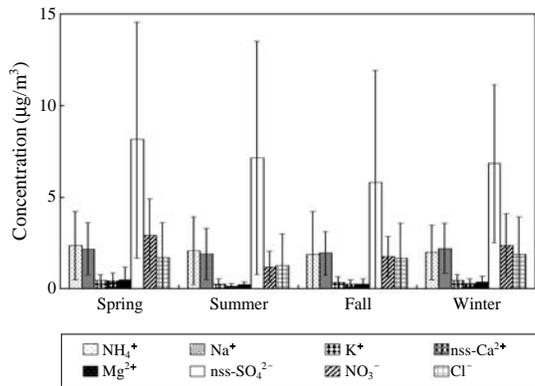


Fig. 3. Seasonal comparison of ion concentrations in TSP aerosols.

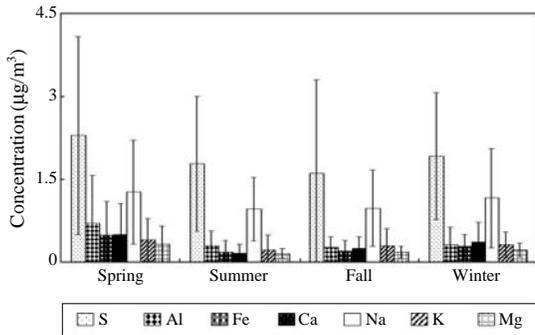


Fig. 4. Seasonal comparison of major element concentrations in TSP aerosols.

은 농도를 보였고 나머지 기간에는 뚜렷한 계절적 차이를 나타내지 않는 것으로 확인되었다.

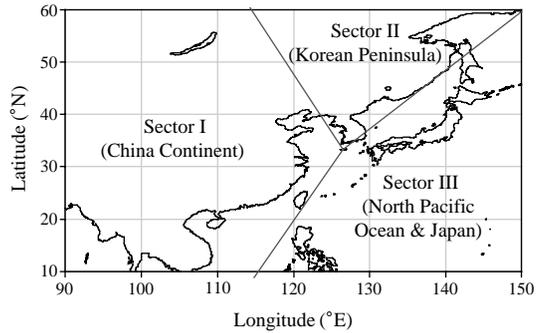
### 3.3 에어로졸 성분의 발생기원

에어로졸 성분의 발생기원 및 특성을 확인하기 위하여 SPSS 통계프로그램으로 요인분석을 실시하였다. 요인분석은 주성분분석을 통해 요인의 수를 결정하였고 베리맥스(Varimax) 회전법에 의해 산출한 결과로부터 모두 3개의 요인을 추출하였다. 표 3과 같이 요인분석 결과에서는 전체 인자 중 62.3%의 설명력을 보였다. 이 중 첫 번째 인자는 26.1%의 설명력을 보였고, nss-Ca<sup>2+</sup>, Al, Fe, Ca, K, Mg, Ti, Mn, Sr, V, Co 성분이 비교적 높은 적재값을 나타내었다. 이들 성분들은 대부분 토양입자의 구성 성분들로 이들이 높은 적재값을 나타내는 것은 대기 에어로졸이 토

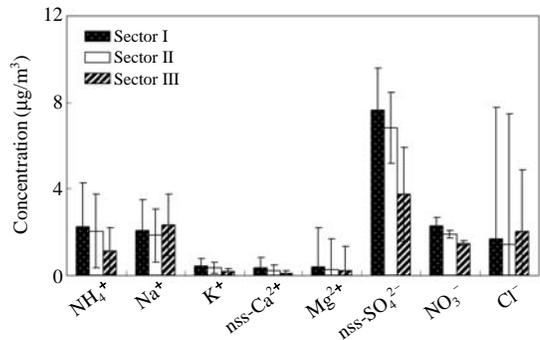
**Table 3. Result of Varimax rotated factor analysis for TSP components.**

Species	Fator 1	Factor 2	Factor 3
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0.15	0.77	-0.15
Na <sup>+</sup>	0.09	-0.06	0.90
K <sup>+</sup>	0.33	0.69	0.09
nss-Ca <sup>2+</sup>	0.73	0.18	0.09
Mg <sup>2+</sup>	0.41	0.42	0.46
nss-SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.19	0.82	-0.10
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.43	0.29	0.48
Cl <sup>-</sup>	0.09	-0.26	0.84
Al	0.89	0.26	0.12
Fe	0.86	0.32	0.10
Ca	0.63	0.50	0.24
Na	0.18	0.11	0.85
K	0.60	0.56	0.18
Mg	0.76	0.24	0.45
S	0.34	0.84	0.04
Ti	0.73	0.18	0.25
Mn	0.63	0.56	0.18
Ba	0.34	0.33	0.00
Sr	0.73	0.49	0.33
Zn	0.29	0.77	0.10
V	0.81	0.15	0.00
Cr	0.31	0.52	0.12
Pb	0.00	0.84	0.15
Cu	0.28	0.46	0.01
Ni	0.10	0.13	-0.04
Co	0.81	0.02	0.07
Mo	0.00	0.56	-0.03
Cd	0.20	0.62	0.09
Eigenvalue	7.3	6.8	3.3
Variance (%)	26.1	24.4	11.9
Cumulative (%)	26.1	50.5	62.3

양입자의 유입에 의해 크게 영향을 받고 있음을 의미한다. 두 번째 인자는 24.4%의 설명력을 보였고, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, nss-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, S, Zn, Pb, Cd 등의 적재값이 높게 나타났다. 이들 성분들은 대체적으로 자동차, 난방 연료, 산업체 등으로부터 발생하는 성분들로 인위 오염원의 영향도 비교적 크게 작용하고 있음을 알 수 있다. 세 번째 인자에서는 대표적인 해염성분인 Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, Na 등의 적재값이 높게 나타나 대기 에어로졸 조성이 해양의 영향을 받고 있음을 의미한다. 따라서 이상과 같은 요인분석 결과를 전체적으로 종합해 보면, 고산 지역의 TSP 대기 에어로졸은 토양의 영향을 가장 많이 받고 있고, 다음으로 인위적 영향, 그 다음으로 해양의 영향을 많이 받고 있는 것으로 추정된다.



**Fig. 5. Sectional classification of Northeast Asia for backward trajectory analysis based on the Gosan site.**



**Fig. 6. Inflow pathway sectional comparison of ion concentrations.**

### 3. 4 기류 유입경로별 에어로졸 조성 비교

기류의 이동경로에 따른 에어로졸의 조성 변화를 알아보기 위하여 기류의 유입경로를 3개의 구간으로 나누어 각 구간별로 그 조성을 비교하였다. 공기의 이동경로는 중국대륙(I구간), 한반도(II구간), 북태평양 및 일본(III구간) 구간으로 분류하였고(그림 5 참조), 역궤적 분석을 통해 기류의 이동경로를 추적하였다. 이때 역궤적 분석은 NOAA의 HYSPLIT4 모델을 이용하여 시료채취 시기를 기준으로 모사시간을 5일로 설정하였다. 3개의 구간으로 분류하여 구간별로 기류의 이동경로를 비교해 본 결과, 그 빈도는 I구간 65.3%, II구간 13.1%, III구간 15.0%, 그 외에 중복 구간 6.6%로 연구기간 동안에 중국대륙으로부터 기류의 유입 빈도가 가장 많았던 것으로 조사되었다. 그리고 각 구간별로 TSP 에어로졸 성분의 농도를 비교해 본 결과, 해염성분(Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>)을 제외하

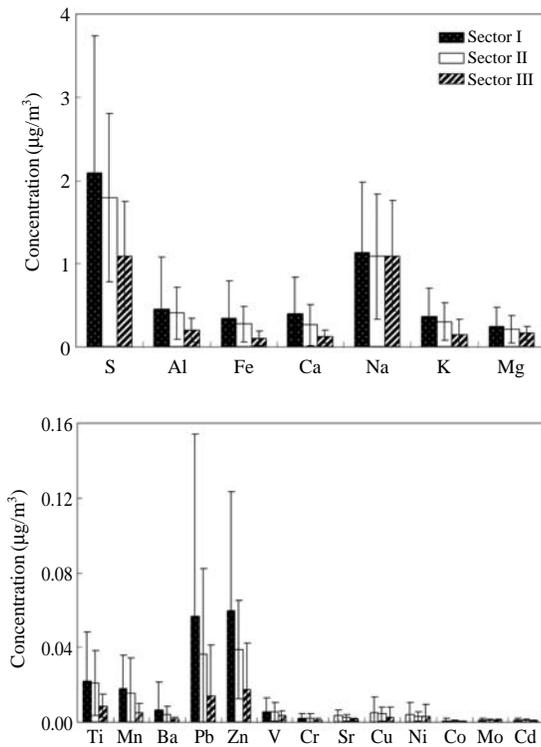


Fig. 7. Inflow pathway sectional comparison of element concentrations.

나머지 대부분의 성분들이 I구간에서 가장 높은 농도를 나타내었다. 이러한 경향은 Kang *et al.* (2007)이 라돈 및 TSP 에어로졸을 대상으로 조사한 결과와 Kim *et al.* (1996)이 1994년에 고산에서 TSP 에어로졸을 대상으로 실시한 결과에서도 유사한 패턴을 보이고 있다(Kang *et al.*, 2007; Kim *et al.*, 1996).

또한 주요 에어로졸 성분들의 농도를 구간별로 비교해 본 결과, 인위적 기원의  $nss-SO_4^{2-}$  농도는 I구간에서  $7.65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , II구간에서  $6.83 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , III구간에서  $3.73 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 I구간에서 가장 높고, 이에 비해 III구간에서는 2배 정도 더 낮은 농도를 나타내었다. 그리고  $NO_3^-$  농도는 I~III구간에서 각각 2.28, 1.89,  $1.47 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로,  $NO_3^-$  역시  $nss-SO_4^{2-}$  과 마찬가지로 I구간에서 가장 높고 III구간에서 가장 낮은 농도를 나타내었다. 그리고 주요 토양기원 성분인  $nss-Ca^{2+}$ , Al, Fe, Ca 농도는 I구간에서 각각 0.33, 0.45, 0.34,  $0.39 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , II구간에서 0.23, 0.40, 0.27,  $0.26 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , III구간에서 0.10, 0.20, 0.10,  $0.12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도를 나타내어 이 역

시 앞의 인위적 성분들과 마찬가지로 I구간에서 가장 높은 경향을 보였다. 그리고 Mn, Zn, Cr, Pb, Cu, Cd 등의 주요 중금속 성분들 농도 역시 I구간에서 각각 18.0, 59.4, 2.1, 56.6, 5.1,  $0.9 \text{ ng}/\text{m}^3$ , II구간에서 15.2, 38.7, 1.9, 36.4, 4.3,  $0.8 \text{ ng}/\text{m}^3$ , III구간에서 5.0, 17.3, 0.9, 13.8, 2.7,  $0.4 \text{ ng}/\text{m}^3$ 로 앞의 인위 및 토양 성분들과 마찬가지로 I구간에서 가장 높고 III구간에서 낮은 농도를 나타내는 것으로 확인되었다. 그러나 해양의 지표 성분인  $Na^+$ 과  $Cl^-$ 는 I구간에서 각각 2.08,  $1.67 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , II구간에서 1.84,  $1.40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , III구간에서 2.31,  $2.01 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로, III구간에서 오히려 높은 값을 보여 앞의 성분들과는 상반된 경향을 나타내었다.

이러한 결과들을 종합해 보면, 고산지역 TSP 대기 에어로졸 조성은 인위적 기원의  $nss-SO_4^{2-}$ , S,  $NO_3^-$ , 토양 기원의  $nss-Ca^{2+}$ , Al, Fe, Ca, 중금속 Mn, Zn, Cr, Pb, Cu, Cd 등이 기류가 중국대륙으로부터 유입되었을 때 더 높은 농도를 보이고, 이들 성분들은 중국의 오염 영향을 더 많이 받는 것으로 추정된다. 그러나 해양 기원 성분들은 기류가 일본 및 북태평양 지역에서 유입되었을 때 오히려 더 높은 농도를 나타내어 위의 성분들과는 다른 변화 추세를 보였다.

### 3.5 기류 유입경로별 계절 조성 비교

기류 유입경로에 따른 조성변화를 각 계절별로 분류하여 비교해 보았다. 계절별로 분류한 기류의 이동 경로는 봄철에 I~III구간에서 각 75.4, 19.7, 4.9%, 여름철에 각 49.2, 10.0, 40.8%의 빈도를 나타내었다. 그리고 가을철에는 각 63.1, 18.4, 18.4%, 겨울철에는 각각 93.2, 4.5, 2.3%의 빈도를 나타내었다. 이러한 결과로 보아 대체적으로 본 연구 기간에 기류의 이동은 봄, 가을, 겨울철에는 주로 중국대륙에서 유입되었고, 이에 비해 여름철에는 상대적으로 일본 및 북태평양 지역에서의 유입 빈도가 높은 경향을 보였다.

계절별로 주요 TSP 성분의 농도를 비교해 보면, 표 4의 결과와 같이 봄철  $nss-SO_4^{2-}$  농도가 I~III구간에서 각각 9.10, 5.97,  $3.78 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 I구간이 III구간에 2.4배 정도 더 높은 농도를 나타내었다. 또  $NO_3^-$  은 각 구간에서 3.09, 2.49,  $2.88 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 I구간에서 높고 II구간에서 낮아  $nss-SO_4^{2-}$  과는 다소 다른 경향을 보였다. 또  $nss-Ca^{2+}$  과 Al은 I구간에서 각각 0.48,  $0.81 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , II구간에서 0.27,  $0.51 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , III구간에서 0.13,  $0.27 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도를 나타내어 이 역시 앞의 성

**Table 4. Inflow pathway sectional concentrations ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) of major TSP components in each season.**

Species	Spring			Summer		
	Sec I	Sec II	Sec III	Sec I	Sec II	Sec III
$\text{NH}_4^+$	2.61	1.83	1.07	2.74	2.70	1.07
$\text{nss-SO}_4^{2-}$	9.10	5.97	3.78	9.82	8.39	3.56
$\text{NO}_3^-$	3.09	2.49	2.88	1.13	1.49	1.17
$\text{nss-Ca}^{2+}$	0.48	0.27	0.13	0.16	0.21	0.10
$\text{Na}^+$	2.23	1.88	2.70	1.85	1.01	2.29
Al	0.81	0.51	0.27	0.33	0.41	0.22
Fe	0.55	0.35	0.17	0.19	0.29	0.09
Ca	0.58	0.34	0.19	0.19	0.20	0.11
Zn	0.08	0.05	0.03	0.04	0.04	0.01
Pb	0.07	0.04	0.02	0.03	0.03	0.01

Species	Fall			Winter		
	Sec I	Sec II	Sec III	Sec I	Sec II	Sec III
$\text{NH}_4^+$	2.07	1.32	0.99	1.92	2.44	1.43
$\text{nss-SO}_4^{2-}$	6.51	4.48	3.40	6.70	7.60	6.12
$\text{NO}_3^-$	1.81	1.66	1.62	2.44	1.51	1.86
$\text{nss-Ca}^{2+}$	0.32	0.21	0.07	0.28	0.16	0.15
$\text{Na}^+$	1.85	2.06	2.33	2.24	1.80	2.14
Al	0.29	0.30	0.14	0.32	0.18	0.20
Fe	0.25	0.20	0.08	0.29	0.20	0.18
Ca	0.29	0.21	0.10	0.38	0.20	0.20
Zn	0.05	0.03	0.02	0.06	0.04	0.03
Pb	0.04	0.03	0.02	0.06	0.08	0.02

분들과 마찬가지로 I구간에서 가장 높은 경향을 보였다. 그러나  $\text{Na}^+$ 은 I~III구간에서 각각 2.23, 1.88,  $2.70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 III구간에서 높아 앞의 성분들과는 상반된 경향을 보였다.

여름철  $\text{nss-SO}_4^{2-}$  농도는 I~III구간에서 각 9.82, 8.39,  $3.56 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 봄과 마찬가지로 I구간에서 더 높고 III구간과 2.8배 정도의 차이를 보였다.  $\text{NO}_3^-$ 은 이들 구간에서 각각 1.13, 1.49,  $1.17 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 II구간에서 더 높은 농도를 나타내어  $\text{nss-SO}_4^{2-}$ 와는 다소 다른 경향을 보였다. 또  $\text{nss-Ca}^{2+}$ 과 Al은 I구간에서 각  $0.16, 0.33 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , II구간에서  $0.21, 0.41 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , III구간에서  $0.10, 0.22 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도를 나타내어 이 역시 앞의 성분들과 마찬가지로 II구간에서 가장 높은 경향을 보였다. 이러한 결과로 보아 여름에는 대부분 성분들이 중국대륙보다는 한반도에서 발생한 오염원의 영향이 더 크게 영향을 미친 것으로 추정된다. 그러나  $\text{Na}^+$ 은 다른 성분들과 달리 III구간에서 가장 큰 농도를 나타내었다.

가을철  $\text{nss-SO}_4^{2-}$  농도는 I~III구간에서 각각 6.51,

$4.48, 3.40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 I구간에서 상승하였고,  $\text{NO}_3^-$  역시 각 1.81, 1.66,  $1.62 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로  $\text{nss-SO}_4^{2-}$ 과 유사한 결과를 보였다. 또  $\text{nss-Ca}^{2+}$ 과 Al은 I구간에서 각각 0.32,  $0.29 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , II구간에서 0.21,  $0.30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , III구간에서  $0.07, 0.14 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도를 나타내어  $\text{nss-Ca}^{2+}$ 은 I구간, Al은 II구간에서 높은 농도를 보였다. 그러나  $\text{Na}^+$ 은 III구간에서 가장 높게 나타났다.

겨울철에는  $\text{nss-SO}_4^{2-}$  농도가 각 구간에서 6.70, 7.60,  $6.12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $\text{NO}_3^-$ 은 각 구간에서 2.44, 1.51,  $1.86 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로  $\text{nss-SO}_4^{2-}$ 은 II구간,  $\text{NO}_3^-$ 은 I구간에서 더 높은 농도를 나타내어 서로 다른 양상을 보였다. 또  $\text{nss-Ca}^{2+}$ 과 Al은 I구간에서 각  $0.28, 0.32 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , II구간에서  $0.16, 0.18 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , III구간에서  $0.15, 0.20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도를 나타내어 I구간에서 가장 높은 경향을 보였다. 그리고  $\text{Na}^+$ 은 이들 구간에서 각각 2.24, 1.80,  $2.14 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 I구간에서 더 높아 앞의 봄, 여름, 가을철과는 다른 경향을 나타내었다.

#### 4. 결 론

제주도 고산지역에서 2003~2007년에 채취한 TSP의 성분을 분석하여 대기 에어로졸의 조성구성과 기류의 유입경로별 조성 특성을 조사하였다. 연구기간의 고산 지역 에어로졸 조성은 대체적으로 인위적 기원 성분들의 농도가 가장 높고, 다음으로 해양과 토양 성분의 함량이 높게 나타나는 경향을 보였다. 계절별 대기 에어로졸 조성은 인위적 기원의 성분들은 봄과 여름에 높은 경향을 보였고, 토양 기원 성분들은 봄에 현저하게 높은 것으로 조사되었다. 그리고 대부분의 성분들이 여름에 가장 낮은 농도를 나타내었고, 해양 기원 성분들은 계절별로 뚜렷한 차이를 보이지 않았다. 요인분석에 의해 대기 에어로졸 성분의 발생 기원을 조사해 본 결과, 고산 지역의 대기 에어로졸은 토양의 영향을 가장 많이 받고 있고, 다음으로 인위적 영향, 그 다음으로 해양의 영향을 많이 받고 있는 것으로 조사되었다.

연구기간 중 기류는 65.3% 정도가 중국대륙으로부터 유입되었다. 기류 이동경로별로 에어로졸 조성을 비교해 본 결과, 고산지역 TSP는 인위적 기원의  $\text{nss-SO}_4^{2-}$ , S,  $\text{NO}_3^-$ , 토양 기원의  $\text{nss-Ca}^{2+}$ , Al, Fe, Ca, 중금속 Mn, Zn, Cr, Pb, Cu, Cd 등이 중국의 오염 영향

을 더 많이 받는 것으로 조사되었다. 그러나 해양 기원 성분들은 기류가 일본 및 북태평양 지역에서 유입되었을 때 오히려 더 높은 농도를 나타내어 이들 성분들과는 다른 변화를 나타내었다.

기류 유입경로에 따른 에어로졸 조성을 계절별로 분류하여 비교해 본 결과, 봄, 가을, 겨울철에는 대체적으로  $\text{nss-SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{nss-Ca}^{2+}$ , Al 성분이 모두 중국대륙에서 기류가 이동했을 때 더 높은 농도를 나타내었다. 그러나 여름철에는 한반도에서 기류가 유입되었을 때  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{nss-Ca}^{2+}$ , Al의 농도가 다소 더 높은 특징을 보였다. 반면에  $\text{Na}^+$ 은 계절에 무관하게 북태평양 지역에서 기류가 유입되었을 때 농도가 상승하는 결과를 나타내었다.

## 감사의 글

이 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2008-313-C00934).

## 참고 문헌

- 김양균(1990) 대기오염물질의 장거리 이동과 산성비 강하에 관한 연구(II), 과학기술처 연구보고서, 122pp.
- 선우영(2005) 배경농도지역 장거리 이동 오염물질 집중 조사(V), 국립환경과학원 연구보고서.
- Carmichael, G.R., M.S. Hong, H. Ueda, L.L. Chen, K. Murano, J.K. Park, H. Lee, Y. Kim, C. Kang, and S. Shin (1997) Aerosol composition at Cheju Island, Korea, *J. Geophys. Res.*, 102(D5), 6047-6053.
- Chen, L.L., G.R. Carmichael, M.S. Hong, H. Ueda, S. Shim, C.H. Song, Y.P. Kim, R. Arimoto, J. Propero, D. Savoie, K. Murano, J.K. Park, H.G. Lee, and C.H. Kang (1997) Influence of continental outflow events on the aerosol composition at Cheju Island, South Korea, *J. Geophys. Res.*, 102(D23), 28551-28574.
- Ho, K.F., S.C. Lee, C.K. Chan, J.C. Yu, J.C. Chow, and X.H. Yao (2003) Characterization of chemical species in  $\text{PM}_{2.5}$  and  $\text{PM}_{10}$  aerosols in Hong-Kong, *Atmospheric Environment*, 37(1), 31-39.
- 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, *J. Geophys. Res.*, 108(D23), 8633, doi:10.1029/2003JD003550.
- Kang, C.H., H.J. Ko, and W. Zahorowski (2007) Radon and TSP concentrations in the ambient air of Gosan area, Jeju Island between 2001 and 2004, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 23(5), 612-624.
- Kang, C.H., W.H. Kim, H.J. Ko, and S.B. Hong (2009) Asian Dust effects on Total Suspended Particulate (TSP) compositions at Gosan in Jeju Island, Korea, *Atmospheric Research*, 94(2), 345-355.
- Kim, B.G., Y.J. Kim, and S.H. Eun (2008) An analysis of aerosol optical properties around Korea using AERONET, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 24(6), 629-640.
- Kim, J.Y., S.C. Yoon, A. Jefferson, W. Zahorowski, and C.H. Kang (2005) Air mass characterization and source region analysis for the Gosan super-site, Korea, during the ACE-Asia 2001 field campaign, *Atmospheric Environment*, 39(35), 6513-6523.
- Kim, K.H., G.W. Lee, C.G. Hu, and C.H. Kang (1997) Dimethylsulfide (DMS) in the coastal areas of the Cheju Island, Korea, *J. Korea Air Pollution Research Association*, 13(2), 161-170.
- Kim, S.C., D.S. Kang, and Y.H. Cha (2000) Study on characteristics by aerodynamic diameter of airborne suspended particulate matters, *Kor. J. Env. Hlth. Soc.*, 26(2), 108-115.
- Kim, Y.J., K.W. Kim, B.K. Lee, and J.S. Han (2006) Fine particulate matter characteristics and its impact on visibility impairment at two urban sites in Korea: Seoul and Incheon, *Atmospheric Environment*, 40, S593-S605.
- Kim, Y.P., S.O. Park, J.Y. Kim, S.G. Shim, K.C. Moon, H.G. Lee, K.M. Jang, K.Y. Park, and C.H. Kang (1996) Measurement study at Kosan, Cheju Island during March-April, 1994: (I) Transport of ambient aerosol, *J. Korea Air Pollution Research Association*, 12(1), 79-90.
- Ko, H.J., C.H. Kang, W.H. Kim, S.B. Lee, and H.S. Kang (2010) Long-term variation of ionic constituent concentrations in TSP at Jeju Island, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 26(4), 420-431.
- Lighty, J.S., J.M. Veranth, and A.F. Sarofim (2000) Combustion aerosol: Factors governing their size and composition and implications to human health, *J. Air Waste Manag. Assoc.*, 50(9), 1565-1618.
- Nakajima, T. and S.C. Yoon (2007) Atmospheric Brown Clouds

- (ABC) Gosan Campaign: East Asian Regional Experiment 2007, <http://abc-gosan.snu.ac.kr/>.
- Nguyen, H.T., C.H. Kang, C.J. Ma, K.C. Choi, J.S. Kim, J.H. Lee, and K.H. Kim (2009) Evidence of long-range transport of pollutants from the size-fractionated ionic composition of aerosols in the Jeju Island of Korea, *Water, Air & Soil Pollution*, 196, 225-243.
- NOAA, Air Resources Laboratory (2009) HYSPLIT4 (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) model, [http://www.arl.noaa.gov/HYSPLIT\\_info.php](http://www.arl.noaa.gov/HYSPLIT_info.php), Silver Spring, MD USA.
- Park, M.H., Y.P. Kim, C.H. Kang, and S.G. Shim (2004) Aerosol composition change between 1992 and 2002 at Gosan, Korea, *J. Geophys. Res.*, 109(D19S13), 1-7.
- Pio, C.A., M.A. Cerqueira, L.M. Castro, and M.L. Salgueiro (1999) Sulfur and nitrogen compounds variable marine/continental air masses at the southwest european coast, *Atmospheric Environment*, 30(18), 3115-3127.
- Seinfeld, J.H. and S.N. Pandis (1998) *Atmospheric Chemistry and Physics: From air pollution to climate change*, John Wiley & Sons Inc., 1326pp.
- Takamura, T., N. Sugimoto, A. Shimizu, A. Uchiyama, A. Yamazaki, K. Aoki, T. Nakajima, B.J. Sohn, and H. Takenaka (2007) Aerosol radiative characteristics at Gosan, Korea, during the Atmospheric Brown Cloud East Asian Regional Experiment 2005, *J. Geophys. Res.*, 112(D22S36), doi: 10.1029/2007JD008506. 1-12.
- Zhang, M., I. Uno, Y. Yoshida, Y. Xu, Z. Wang, H. Akimoto, T. Bates, T. Quinn, A. Bandy, and B. Blomquist (2004) Transport and transformation of sulfur compounds over East Asia during the TRACE-P and ACE-Asia campaigns, *Atmospheric Environment*, 38, 6947-6959.