

碩士學位論文

대기 유입경로별 배경지역 TSP
에어로졸의 화학조성 비교



濟州大學校 大學院

化學科

李旻英

2009年 2月

대기 유입경로별 배경지역 TSP 에어로졸의 화학 조성 비교

指導教授 姜 昌 禧

李 旻 英

이 論文을 理學 碩士學位 論文으로 提出함

2009年 2月

李旻英의 理學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 _____ (印)

委 員 _____ (印)

委 員 _____ (印)

濟州大學校 大學院

2009年 2月

Comparison of Chemical Compositions of TSP
Aerosols Corresponding to Inflow Pathway of
Air Parcels in Background Area

Min-Young Lee
(Supervised by professor Chang-Hee Kang)

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

2009. 2.

This thesis has been examined and approved.

.....
.....
.....
.....
Date

DEPARTMENT OF CHEMISTRY

GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

List of Tables	iii
List of Figures	v
ABSTRACT	viii
I. 서 론	1
II. 연구 방법	3
1. 측정소 설비 및 측정기기	3
1) 측정소 설비	3
2) 측정기기	3
2. 시료의 채취 및 분석	4
1) 대기 에어로졸 시료 채취	4
2) 수용성 성분 분석	5
3) 금속 및 황 성분 분석	6
4) 역궤적 분석	7
III. 결과 및 고찰	8
1. TSP 에어로졸의 조성	8
1) TSP 에어로졸 성분의 농도	8
2) 해양 및 토양의 영향	15
3) 성분들 간의 상관성	17
4) 에어로졸 성분의 발생기원	20
5) 황사와 비황사시의 조성 특성	23
6) 에어로졸 성분의 계절별 농도비교	36
2. 3개의 유입경로별 화학 조성 비교	43
1) 3개의 유입경로별 조성 비교	43
2) 해양 및 토양의 영향	49

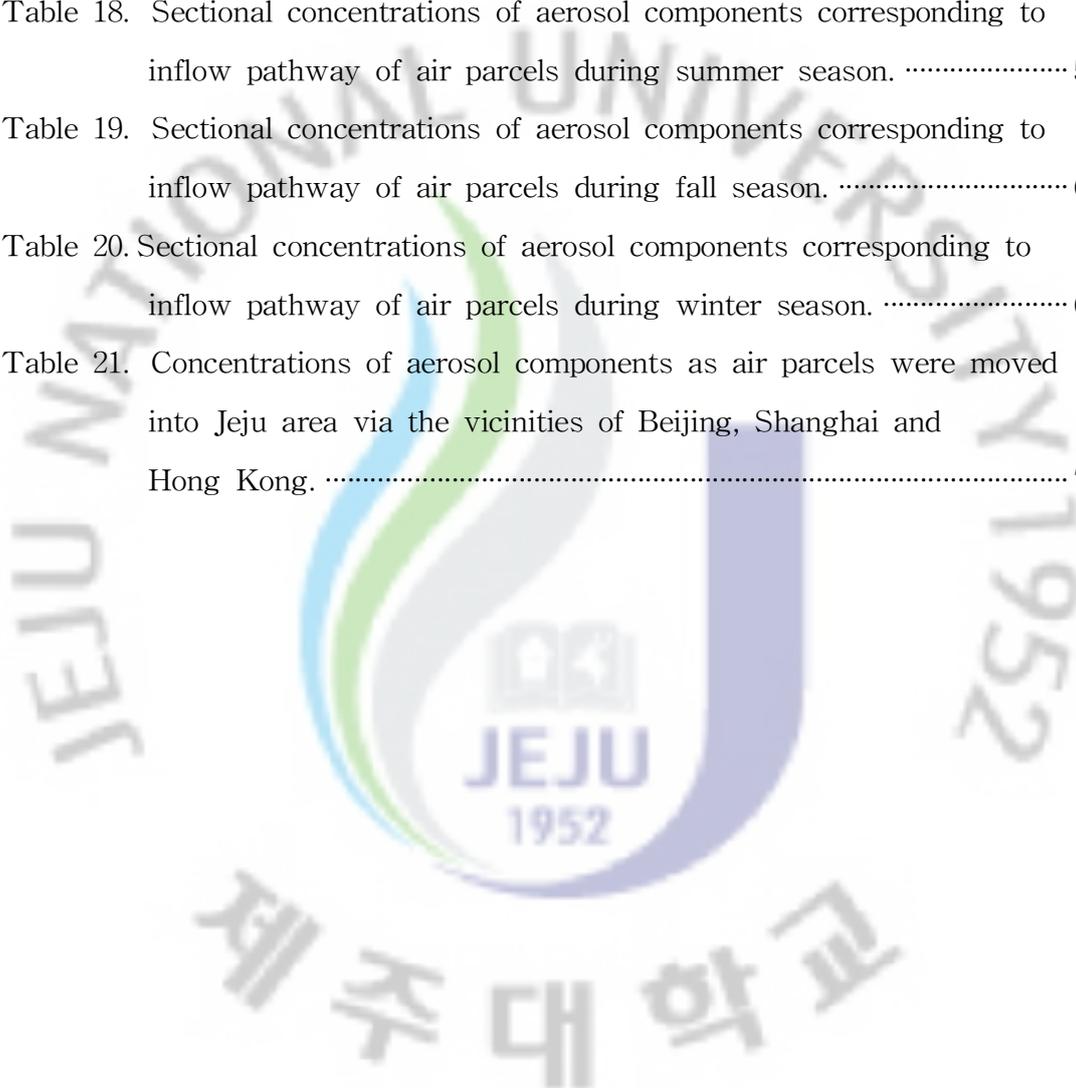
3) 유입경로별 에어로졸 성분의 발생기원	51
4) 계절에 따른 유입경로별 조성 비교	54
5) 공기 이동구역별 조성 비교	70
IV. 결 론	74
V. 참 고 문 헌	76



List of Tables

Table 1. Method detection limit and RSD for IC analysis. (n=5)	5
Table 2. Instrumental conditions and detection limit(ppm) for ICP-AES analysis.	7
Table 3. Concentrations of TSP aerosols components.	11
Table 4. Cross correlation between TSP aerosol components.	19
Table 5. Factor analysis for TSP aerosol components.	22
Table 6. Concentrations ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) of water-soluble components during Asian Dust and Non-Asian Dust storm periods.	26
Table 7. Concentrations (ng/m^3) of metal and sulfur elements during Asian Dust and Non-Asian Dust storm periods.	27
Table 8. Cross correlation between aerosol components during Asian dust storm periods.	32
Table 9. Cross correlation between aerosol components during Non-Asian dust storm periods.	33
Table 10. Comparison of factor analysis for TSP aerosol components between Asian dust and Non-Asian Dust storm periods.	35
Table 11. Seasonal concentrations ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) of water-soluble components in TSP aerosols.	39
Table 12. Seasonal concentrations (ng/m^3) of metal and sulfur elements in TSP aerosols.	40
Table 13. Sectional concentrations of TSP aerosol components corresponding to the inflow pathway of air parcels.	46
Table 14. Sectional comparison of sea-salt enrichment factors for water-soluble components of TSP aerosols.	50
Table 15. Sectional comparison of soil enrichment factors for metal elements	

of TSP aerosols.	50
Table 16. Sectional comparison of factor analysis for aerosol components.	53
Table 17. Sectional concentrations of aerosol components corresponding to inflow pathway of air parcels during spring season.	58
Table 18. Sectional concentrations of aerosol components corresponding to inflow pathway of air parcels during summer season.	59
Table 19. Sectional concentrations of aerosol components corresponding to inflow pathway of air parcels during fall season.	60
Table 20. Sectional concentrations of aerosol components corresponding to inflow pathway of air parcels during winter season.	61
Table 21. Concentrations of aerosol components as air parcels were moved into Jeju area via the vicinities of Beijing, Shanghai and Hong Kong.	71



List of Figures

Figure 1. Comparison of concentrations of water-soluble components in TSP aerosols.	12
Figure 2. Comparison of concentrations of sulfur and metal elements in TSP aerosols.	12
Figure 3. Comparison of concentrations of metal elements in TSP aerosols.	13
Figure 4. Composition ratios of water-soluble components in TSP aerosols.	13
Figure 5. Composition ratios of sulfur and metal elements in TSP aerosols.	14
Figure 6. Sea-salt enrichment factors for water-soluble components in TSP aerosols.	16
Figure 7. Soil enrichment factors for metal elements in TSP aerosols.	17
Figure 8. Composition ratios of aerosol components during Asian Dust storm periods.	28
Figure 9. Composition ratios of aerosol components during Non-Asian Dust storm periods.	29
Figure 10. Seasonal comparison of concentrations of water-soluble components in TSP aerosols.	41
Figure 11. Seasonal comparison of concentrations of sulfur and metal elements in TSP aerosols.	41
Figure 12. Seasonal comparison of concentrations of metal elements in TSP aerosols.	42
Figure 13. Seasonal comparison of aerosol compositions by emission sources.	42

Figure 14. Three sectional classification of Northeast Asia for backward trajectory analysis starting from Gosan aera.	45
Figure 15. Comparison of sectional inflow pathway of air parcels moving into Gosan area.	45
Figure 16. Sectional comparison of concentrations of TSP aerosol components corresponding to the inflow pathway of air parcels.	47
Figure 17. Sectional comparison of concentrations of TSP aerosol components corresponding to the inflow pathway of air parcels.	48
Figure 18. Sectional comparison of sea-salt enrichment factors for water-soluble components of TSP aerosols.	51
Figure 19. Sectional comparison of soil enrichment factors for metal elements of TSP aerosols.	51
Figure 20. Seasonal comparison of sectional inflow pathways of air parcels moving into Gosan area.	57
Figure 21. Sectional comparison of concentrations of aerosol components corresponding to inflow pathway of air parcels in spring.	62
Figure 22. Sectional comparison of concentrations of aerosol components corresponding to inflow pathway of air parcels in spring.	63
Figure 23. Sectional comparison of concentrations of aerosol components corresponding to inflow pathway of air parcels in summer.	64
Figure 24. Sectional comparison of concentrations of aerosol components corresponding to inflow pathway of air parcels in summer.	65
Figure 25. Sectional comparison of concentrations of aerosol components corresponding to inflow pathway of air parcels in fall.	66
Figure 26. Sectional comparison of concentrations of aerosol components corresponding to inflow pathway of air parcels in fall.	67
Figure 27. Sectional comparison of concentrations of aerosol components corresponding to inflow pathway of air parcels in winter.	68
Figure 28. Sectional comparison of concentrations of aerosol components	

corresponding to inflow pathway of air parcels in winter. 69

Figure 29. Comparison of concentrations of aerosol components as air parcels were moved into Jeju area via the vicinities of Beijing, Shanghai and Hong Kong. 72

Figure 30. Comparison of concentrations of aerosol components as air parcels were moved into Jeju area via the vicinities of Beijing, Shanghai and Hong Kong. 73



ABSTRACT

The TSP aerosols have been collected at Gosan site, which is one of the background sites in Korea, from 2003 to 2007, and their aerosol components have been analyzed to understand the characteristics of chemical compositions corresponding inflow pathway of air parcels. The concentrations of water-soluble components of TSP aerosols were in the order of $\text{nss-SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{NH}_4^+ > \text{Na}^+ > \text{Cl}^- > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{nss-Ca}^{2+}$, and those of metal and sulfur elements were in the order of $\text{S} > \text{Na} > \text{Al} > \text{Ca} > \text{K} > \text{Fe} > \text{Mg} > \text{Zn} > \text{Pb} > \text{Ti} > \text{Mn} > \text{Ba} > \text{V} > \text{Cu} > \text{Ni} > \text{Sr} > \text{Cr} > \text{Mo} > \text{Cd} > \text{Co}$. Based on the sea-salt and soil enrichment factors, it was found that Cl^- and Mg^{2+} were mostly originated from sea salt particles, but Ca and Fe were delivered from soil particles. From the factor analysis, the TSP aerosols in Gosan area have been estimated to be influenced largely by soil sources, and next by anthropogenic and marine sources. The concentrations of soil-originated nss-Ca^{2+} , Mg^{2+} , Al, Ca, Fe, Mg, Ti, Mn, Ba and Sr were 3.6, 3.1, 4.9, 3.4, 4.4, 3.1, 3.4, 3.2, 3.2, 3.3 times higher during Asian Dust periods than those during Non-Asian Dust storm periods. The concentrations of anthropogenic nss-SO_4^{2-} , NH_4^+ , NO_3^- , K^+ and S were 1.4, 1.3, 2.1, 1.6, 1.7 times higher during Asian Dust storm periods. In the results of seasonal comparison of aerosol compositions, the soil-originated components showed remarkably higher concentrations during spring season, and lower in summer. On the other hand, the concentrations of anthropogenic components were somewhat higher in spring and summer seasons, and lower in fall season. The inflow pathways of air parcels into Gosan area have contributed 13.1, 65.3, 15.0%, respectively from Korean Peninsular (Sector I), China Continent (Sector II), and Japan-Pacific Ocean (Sector III), during the study. The concentrations of anthropogenic nss-SO_4^{2-} , S, NO_3^- as well as

soil-originated nss-Ca^{2+} , Al, Fe, Ca components have relatively increased, when the air parcels moved from China Continent (Sector II) to Gosan area. The marine-originated components showed higher concentrations in the sector of Japan-Pacific Ocean (Sector III). Meanwhile in the results of seasonal and sectional comparison of aerosol compositions, the soil-originated and anthropogenic components showed higher concentrations when the air parcels moved from China Continent (Sector II), during all seasons except summer, but those concentrations were higher in the sector of Japan-Pacific Ocean (Sector III) during the summer season.



I. 서 론

대기, 부유분진은 먼지, 매연, 검댕, 액적 등의 고체상 또는 액체상 물질로 구성되어 있고, 조성이나 입자 크기에 따라 인간의 건강이나 식물의 생육에 크게 영향을 미친다. 그리고 발생기원에 따라 입자의 크기, 밀도, 흡습성 등 물리적 특성이 다르고, 중금속이나 수용성 성분의 함량 등 화학적 조성이 다른 특징을 나타낸다. 또 빛의 산란, 흡수 등 지구의 복사평형에 영향을 주기 때문에 기후 변화에도 큰 영향을 미친다(Takamura et al., 2007).

TSP (Total Suspended Particulate) 에어로졸은 대기 중에 부유된 입자상 물질의 총량을 의미하며 대체적으로 50 μm 이하의 입자들이 주류를 이루고 있고, 0.001~10 μm 직경의 미세입자들은 환경오염 측면에서 중요한 의미를 갖는다. 그리고 TSP 에어로졸 중에서 비교적 입경이 큰 조대입자는 비산된 토양입자, 해양입자 등과 같이 대부분 자연적 발생원에 의해 생성된다. 그러나 조대입자는 일반적으로 대기 중에서 체류시간이 짧고, 호흡할 때 비강에서 걸러지기 때문에 인체에 대한 피해는 상대적으로 적은 편이다. 반면에 2.5 μm 이하의 미세입자는 화석연료의 연소, 자동차 배출가스, 화학물질 제조과정 등과 같이 인위적 발생원에 의해 생성된 물질과 기체상 물질이 입자상으로 전환된 2차 오염물질로 구성되어 있다. 이러한 미세입자들의 화학성분은 주로 SO_4^{2-} , NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- , 유기탄소, 원소탄소 등으로, 이 중에서도 SO_4^{2-} 과 유기탄소의 농도가 높은 것으로 보고되고 있다. 특히 이러한 미세입자는 기체상 물질인 SO_2 , NO_2 , O_3 , CO , VOCs(volatile organic compounds) 등과의 반응성이 크고, 폐포 모세혈관으로 유입되어 간, 골수, 심장 등의 기관장애를 일으키는 원인이 되기도 한다(Lighty et al., 2000).

동북아시아 지역에서는 급속한 산업발달과 인구증가, 그리고 생활수준의 향상으로 많은 양의 오염물질이 배출되고 있다. 특히 중국은 많은 양의 대기오염물질을 배출하고 있고, 주 연료원인 석탄의 연소로 인해 비소, 카드뮴, 베릴륨, 수은, 납 등의 중금속도 함께 배출되고 있다. 이렇게 대기로 방출된 오염물질들은 대기 부유입자에 흡착된 상태로 주변지역으로 확산될 수 있다.

대기오염물질의 장거리 이동 (long-range transport) 현상이란 자연적 혹은 인위적인 오염물질이 자국 영토를 벗어나거나 최소한 200~300 km 이상 이동하여 타 지역에 영향을 미치는 현상이다. 최근에 동북아 지역을 중심으로 대기오염물질의 장거리 이동 현상을 조사하기 위한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 대기오염물질 장거리 이동 연구를 위한 측정소는 자체 오염원의 방해가 없는 청정지역에서 각종 대기오염물질의 농도변화를 측정해야 한다. 이러한 연구 수행을 위한 국내 지상관측소로는 제주도 ‘고산 (Gosan)’ 지역이 아주 적합한 여건을 갖추고 있는 것으로 알려져 있다. 제주도는 중국과 일본의 중간 지점에 위치하고 있고 자체 오염원이 거의 없는 청정지역이다. 그리고 ‘고산’ 지역은 제주도 서쪽 끝 지점에 위치하고 있고 국지 오염원의 영향이 거의 없어서 한반도 주변국가에서 장거리 이동된 오염물질의 영향을 보다 효율적으로 측정할 수 있는 조건을 갖추고 있다 (Zhang et al., 2004; Carmichael et al., 1997). 최근에 이러한 ‘고산’ 지역에서 수행된 장거리 이동 연구로는 1991년 9월의 PEM-West (Pacific Exploratory Mission)-West A, 1994년 2월의 PEM-West B, 2001년 3월의 ACE (Aerosol Characterization Experiment)-Asia, 2005년 3월의 ABC (Atmospheric Brown Cloud) 등이 대표적이다.

우리나라는 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(국립환경과학원, 2005). 그리고 이러한 영향을 확인하기 위해서는 오염물질의 농도변화와 이 시기의 대기 (air mass) 이동경로를 비교하는 방법으로 대기오염물질의 배출원을 추정하고 유입경로를 파악할 필요가 있다(공부주, 2006).

본 연구에서는 국내 배경농도 지역인 제주도 ‘고산’ 지역에서 장기적으로 TSP 대기 에어로졸을 채취하여 에어로졸을 구성하는 각종 성분들을 분석하였다. 그리고 역궤적 분석 (backward trajectory analysis)을 실시하여 권역별 기류의 이동경로에 따른 대기 에어로졸의 화학성분 조성을 비교함으로써 배출원 특성 및 오염물질의 유입경로를 조사하였다.

II. 연구 방법

1. 측정소 설비 및 측정 기기

1) 측정소 설비

본 연구를 위한 측정소는 제주도 북제주군 한경면 고산리 소재 수월봉(33°28' N, 127°17' E)에 컨테이너를 설치하여 마련하였다. 고산 측정소는 해발 72 m의 해안가 언덕에 위치하고 있고, 제주고층레이다기상대로부터 서쪽 방향으로 약 300 m 떨어져 있다. 측정소에는 내부에 측정기기를 탑재할 수 있는 5평 크기의 컨테이너를 설치하고, 내부에 기기작동에 필요한 에어컨, 제습기, AVR 전원공급 장치를 설치하였다.

2) 측정기기

(1) High Volume Tape Sampler

총부유분진 (TSP, Total Suspended Particulate) 시료는 일본 KIMOTO Electric사에서 제작한 High Volume Tape Sampler (model 195A)를 사용하여 채취하였다. 이 Sampler는 roll type의 PolyTetraFluoroEthylene (PTFE) 필터 (polytetrafluoroethylene, 100 mm × 10 m)를 사용하여 연속적으로 시료를 채취할 수 있는 자동시스템이며, 시료의 채취시간을 임의로 조절할 수 있는 timer가 부착되어 있다. Sampler는 측정소의 컨테이너 내부에 탑재하였고, 흡입관(길이 7 m, 내경 38 mm인 flexible hose)은 컨테이너의 측면을 관통시켜 지상 6 m 높이의 에어로졸이 포집될 수 있도록 설치하였다. 이 때 흡입 공기의 유속은 초기속도가 대략 170 L/min이 되도록 조절하였다.

(2) Inductively Coupled Plasma Spectrophotometer

에어로졸의 금속 및 황 성분(Al, Fe, Ca, Na, K, Mg, S, Ti, Mn, Ba, Sr, Zn, V, Cr, Pb, Cu, Ni, Co, Mo, Cd)은 ICP-AES (Thermo Jarrell Ash, model

IRIS-DUO)를 사용하여 분석하였다. ICP-AES는 simultaneous mode 가능형, radial/axial plasma 선택형이고, 40.68 MHz의 RF frequency를 조사할 수 있도록 구성되어 있다.

(3) Microwave Digestion System

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

(4) Ion Chromatograph

에어로졸의 주요 양이온 및 음이온 성분들은 Ion Chromatograph(Metrohm사, Modula IC)를 사용하여 분석하였다. 이 때 분리용 컬럼은 음이온 분석에 Metrohm Metrosep A-SUPP-4 분리관을, 양이온 분석에는 Metrohm Metrosep Cation 1-2-6 분리관을 사용하였고, 검출기는 Conductivity Detector를 사용하였다.

2. 대기 에어로졸 시료의 채취 및 분석

1) 대기 에어로졸 시료 채취

에어로졸 시료는 High Volume Tape Sampler와 PTFE (polytetrafluoroethylene) 필터를 사용하여 2003년 1월부터 2007년 12월까지 3일 간격 24시간 단위로, 총 692개를 채취하였다. 시료 채취용 필터는 테프론 재질의 롤테이프형(100 mm × 10 m)으로 한 개의 롤 테이프가 완전히 감길 때마다 sampler로부터 필터를 분리하여 그 중 반은 수용성 성분을, 나머지 반은 금속 및 황 성분을 분석하는데 사용하였다. 또한 시료 채취 시 공기의 유속은 대략 170 L/min이 되도록 조절하였으며, 총 공기의 유량은 기록계의 기록지에 표시된 유속 및 시간을 대조하여 계산하였다.

2) 수용성 성분 분석

(1) 시료의 전처리

수용성 성분 분석용 시료는 TSP 에어로졸 필터를 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. 이 때 용기는 125 mL 용량의 HDPE병 (Nalgene)을 사용하였다. 용출액은 0.45 µm필터(Whatman, PVDF syringe filter, 13 mm)로 불용성 입자를 거른 후 여액을 양이온 및 음이온 분석용 시료로 이용하였다.

(2) 수용성 성분 분석

대기 에어로졸의 시료의 수용성 성분은 ion chromatography (IC)법으로 동시에 분석하였다. IC는 2개의 Metrohm Modula IC와 autosampler를 동시에 연결시킨 시스템으로 시료를 1회 주입하여 양이온과 음이온을 동시에 분석할 수 있도록 구성되어 있다. NH_4^+ , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} 양이온은 Metrohm Modula IC (907 IC pump, 732 IC detector)를 사용하여 Metrohm Metrosep C 2 150 column, 1.0 mL/min flow rate, 100 µL injection volume, 2.0 mM Nitric acid eluent의 조건으로 분석하였다. 또 SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^- 음이온은 Metrohm Modula IC를 사용하여 Metrohm Metrosep A-SUPP-4 column, 1.0 mL/min flow rate, 20 µL injection volume, 1.8 mM NaHCO_3 /1.7 mM Na_2CO_3 eluent, 0.2% H_2SO_4 suppressor solution의 조건으로 분석하였다. 이 때 이온성분 분석을 위한 IC의 검출한계와 상대표준편차(RSD)는 Table 1과 같다.

Table 1. Method detection limit and RSD for IC analysis. (n=5)

Species	NH_4^+	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	SO_4^{2-}	NO_3^-	Cl^-
MDL(µg/L)	2.4	1.8	7.8	4.8	8.8	9.6	10.5	4.8
RSD (%)	4.3	1.6	5.4	0.9	1.4	4.9	1.6	3.8

3) 금속 및 황 성분 분석

(1) 시료의 전처리

TSP 에어로졸 시료가 채취된 필터는 비닐봉지에 밀봉하여 -20°C 냉동고에 보관하였고, 대략 3개월 간격으로 동시에 분석하였다. 에어로졸의 금속 및 황 성분은 2003년~2005년까지는 EPA Method 3051A의 방법으로 마이크로파 분해 장치를 사용하여 혼합산 용액으로 용출시켰다. 2006년 이후에는 EPA Compendium of methods for the determination of inorganic compounds in ambient air (Method IO-3)의 방법으로 마이크로파 분해장치를 사용하여 혼합산 용액으로 용출하였다. 시료가 채취된 필터를 테프론 (PFA, polyfluoroalkoxy) 용기에 넣고 5.55% HNO_3 / 16.75% HCl 혼합산 10 mL를 가한 후 마이크로파를 조사 (1200 W)하였다. 이 때 온도는 10분 동안 180°C 로 상승하고, 이 온도에서 10분간 유지시킨 후 서서히 상온으로 냉각하였다. 마이크로파 분해를 거친 용액에 3% HNO_3 / 8% HCl 혼합산 5 mL를 넣고 $0.45\ \mu\text{m}$ 필터로 불용성 입자를 거른 후 초순수를 사용하여 용량플라스크에서 25 mL가 되도록 희석하였다.

(2) 금속 및 황 성분 분석

전처리를 거친 에어로졸의 금속 성분들은 ICP-AES법으로 Al, Fe, Ca, Mg, K, Na, Zn, Pb, Mn, Ti, Ba, Cu, Sr, V, Ni, Cr, Mo, Cd, Co 등의 금속 성분과 황 성분을 분석하였다. ICP 분석 시 표준용액은 AccuStandard사의 ICP용 1000 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 용액을 초순수와 혼산 용액으로 희석하여 조제하였다. 이 때 희석용매는 매트릭스 효과를 최소화시키기 위하여 시료의 전처리 과정과 동일한 비율로 HNO_3 과 HCl 을 혼합한 용액을 사용하였다. 검량선 작성 시 사용한 표준용액은 시료의 농도에 따라 고농도 성분들은 $0.01\sim 5.0\ \mu\text{g}/\text{mL}$, 저 농도 성분들은 $0.01\sim 1.0\ \mu\text{g}/\text{mL}$ 범위로 조제하였다. 이 때 19종의 금속 및 황 성분을 분석하기 위한 ICP-AES의 조건 및 검출한계는 Table 2와 같다.

Table 2. Instrumental conditions and detection limit for ICP-AES analysis.

Instrument: Thermo Jarrel Ash, Model IRIS-DUO					
RF power: 1150 W					
RF Frequency: 40.68 MHz					
Ar Flow: Coolant = 16.0 L/min, Auxiliary = 1.5 L/min, Nebulizer = 28-32 psi					
Pump Rate: 100 rpm					
Operation Mode: Simultaneous or Sequential Mode					
Nublizer: Ultrasonic Nublizer (CETAC Tech., U-5000AT)					
Element	Detection Wavelength (nm)	Detection Limit (µg/mL)	Element	Detection Wavelength (nm)	Detection Limit (µg/mL)
Al	396.152	~0.0015	Fe	259.940	~0.0012
Ca	396.847	~0.0006	Na	588.995	~0.0012
K	766.490	~0.0033	Mg	279.553	~0.0006
Ti	334.941	~0.0006	Mn	257.610	~0.0009
Ba	455.403	~0.0006	Sr	346.446	~0.0006
Zn	202.548	~0.0018	V	309.311	~0.0009
Cr	267.716	~0.0003	Pb	220.353	~0.0009
Cu	324.754	~0.0009	Ni	231.604	~0.0009
Co	237.862	~0.0006	Mo	202.030	~0.0006
Cd	226.502	~0.0003	S	180.731	~0.0042

4) 역궤적 분석

일반적으로 대기오염물질은 1.5~4 km 고도를 통해 이동하고, 특히 황사의 경우 대체적으로 500 mb 면의 아래층에서 이동되며, 주로 700 mb 면이나 850 mb 면의 하층 바람에 의해 수송되는 것으로 알려져 있다. 또 700 mb와 850 mb 기압면에 대한 역궤적은 일기도를 이용하여 직접작성이 가능하고, 대기 경계층 이동을 보다 잘 묘사하는 중층개기의 바람 이동을 살펴 볼 수 있는 장점을 지니고 있다. 따라서 본 연구에서도 역궤적 분석을 위한 출발점 고도를 850 mb 면인 1500 m 로 설정하였고, 출발시간은 해당 날짜의 매 00 UTC를 이용 하였다. 역궤적 분석은 미국해양대기국 (NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration)에서 제공하는 HYSPLIT4 (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) 모델을 이용하였다.

III. 결과 및 고찰

1. TSP 에어로졸의 조성

1) TSP 에어로졸 성분의 농도

본 연구에서는 2003년 1월부터 2007년 12월까지 채취한 총 692개의 TSP 에어로졸 시료에 대해 이온 성분, 금속과 황 성분을 분석하였다. 그리고 이 중 강우일 (3 mm 이상)을 제외한 나머지 574개 에어로졸 시료의 분석 결과를 Table 3 과 Figure 1~3에 나타내었다. 표에서 nss-SO₄²⁻는 비해염(non-sea salt) SO₄²⁻의 농도로, SO₄²⁻의 총 농도에서 해염의 유입에 기인한 SO₄²⁻의 농도를 뺀, '[nss-SO₄²⁻] = [SO₄²⁻] - [Na⁺] × 0.251'의 식에 의해 계산하였다. nss-Ca²⁺역시 비해염 Ca²⁺의 농도로 nss-SO₄²⁻의 경우와 유사하게 '[nss-Ca²⁺] = [Ca²⁺] - [Na⁺] × 0.04'의 식에 의해 계산된 농도이다(Ho et al, 2003).

Table 3의 결과에서 보는 바와 같이 수용성 성분들의 평균 농도는 nss-SO₄²⁻ > NO₃⁻ > NH₄⁺ > Na⁺ > Cl⁻ > K⁺ > Mg²⁺ > nss-Ca²⁺의 순으로 높은 농도를 나타내었다. 그리고 TSP 에어로졸의 수용성 성분 조성은 인위적 기원 성분 (nss-SO₄²⁻, NO₃⁻, NH₄⁺) 함량이 전체의 70.4%를 차지하였고, 다음으로는 해염 기원 성분 (Na⁺, Cl⁻, Mg²⁺)이 25.6%, 토양기원 성분 (nss-Ca²⁺)이 1.7%를 차지하였다. 따라서 수용성 성분만을 기준으로 한 고산 지역 TSP 에어로졸의 조성은 인위적 기원 성분들의 농도가 가장 크고, 그 다음으로 해양과 토양의 함량이 큰 것으로 추정된다(Figure 4.).

수용성 성분들 중에서는 nss-SO₄²⁻가 6.96 µg/m³로 가장 높은 농도를 나타내었다. 또 전체 SO₄²⁻ 중에서 nss-SO₄²⁻이 차지하는 비율은 92.8%로 nss-SO₄²⁻이 대부분을 차지하였다. 이는 고산 지역이 해안에 위치하고 있음에도 불구하고 SO₄²⁻에 대한 해염성분의 기여도가 낮고, 대부분 외부에서 유입된 인위적 오염원의 영향이 큼을 의미하는 결과이다. SO₄²⁻성분은 대부분 화석연료의 연소에 의해 발생한 SO₂가 대기 중 화학반응을 통해 SO₄²⁻형태로 산화되며, 일사량 및 유기

산화물, 탄소, 암모니아 등의 타 오염물질의 농도에 따라 영향을 받는 것으로 알려져 있다 (강병욱, 1998). 또 대기 중으로 방출된 황 화합물은 황산염으로 변화되어 산성우와 건성침착 등의 형태로 주변지역의 생태계와 자연환경, 인체 건강에 해로운 영향을 미치고, 대기 분진 생성에 중요한 역할을 한다. 또한 황산염은 입자상 에어로졸 상태로 존재하여 직접적으로 빛을 산란 혹은 흡수시키고, 간접적으로는 구름의 응결핵으로 작용하여 지구복사에 영향을 미친다. 그리고 SO₂는 NO_x과 함께 산성비의 주요 원인물질로서 토양, 호수, 하천의 산성화에 영향을 미치며, 시정장애를 일으키는 미세먼지의 주요 원인물질이기도 하다(대기환경연보, 2006).

이외에도 인위적 기원의 NO₃⁻과 NH₄⁺ 역시 각각 2.08, 2.07 µg/m³로 nss-SO₄²⁻와 함께 높은 농도를 나타내었다. NO₃⁻역시 1차 오염물질인 NO_x가 산화과정을 거쳐 생성된 2차 오염물질로 SO₄²⁻과 마찬가지로 대부분 인위적 요인에 의해 발생된다. NO₃⁻의 발생은 대부분 석유의 사용과 관련이 크고, 난방, 자동차, 산업 활동 등의 영향으로 발생하는 대표적인 인위적인 오염물질이다(Han et al., 2006; 김나경 등, 2004; Aardenne et al., 1999).

고산에서 채취한 총 574개의 TSP 에어로졸 시료에 대한 황과 19종의 금속 성분들의 농도(ng/m³) 는 S(1900.1) > Na(1091.0) > Al(398.4) > Ca(321.1) > K(311.2) > Fe(288.5) > Mg(220.8) 등의 순서로 나타났다. 그 외에 Zn, Pb, Ti, Mn, Ba, V, Cu, Ni, Sr, Cr, Mo, Cd, Co의 원소들은 상대적으로 낮은 농도를 나타내었다(Table 3, Figure 2~3). 이 중 주로 인위적 발생기원을 나타내는 S의 농도가 가장 높고, 다음으로는 해염성분인 Na, 그리고 Al, Ca, Fe 등의 토양성분들이 대체적으로 높은 농도를 보였다. 그리고 이들 조성을 발생원별로 비교해 보면, 인위적 기원의 S, Pb, Zn이 42.5%, 대표적 토양기원 성분인 Al, Fe, Ca이 21.6%, 해염 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(Figure 5).

금속 성분들의 발생기원을 보면, 일반적으로 Al, Ca, Fe, Mn, Mg 등은 주로 토양의 비산에 의해 대기에어로졸에 유입된다. 그리고 Fe은 부유된 비산먼지나

지각물질 중에 주로 포함되어 있고, Si는 토양의 비산이나 도시지역의 경우 자동차운행으로 인한 도로면에서의 발생과 밀접한 관계가 있다. 또 Ni, V 등은 연료의 연소 과정, Pb는 자동차의 배출가스, Cu, Cd, Zn, Cr 등은 소각 과정, Na, K, Mg 등은 해염에 의해 발생하는 것으로 알려져 있다 (Fang et al., 2005; Oraviisjarvi et al., 2003; Huang et al., 1994). 환경 중의 Pb 농도는 다양한 배출원에 의해 영향을 받는다. 유연 휘발유 연소 시 배출이 되며, 제철, 철강 산업, 용광로, 화산폭발, 페인트의 연소, 화석연료인 석탄, Pb를 사용하는 자동차 배터리, 그리고 페인트나 안료 등이 포함된다. 그리고 많은 양의 납 또한 토양 중 Pb 화합물에 의하여 크게 영향을 받는다. 이는 이미 배출된 Pb 화합물이 대기 중에 부유하다가 주변지역의 토양이나 지표면에 침강하기 때문이다. Zn는 염소 등과 같은 다른 화학물질과 결합되어 공기와 물, 토양에 존재하며, 각종 산업공정에 이용된다. Zn의 주요 배출원은 화석연료의 연소와 비철금속 산업공정 등의 인위적 배출원이며, 자연적 배출원으로 화산폭발 및 먼지도 대기중 Zn 농도 증가에 영향을 미친다. 또한 Cu는 생물체내의 미량 성분으로 자연계에 널리 분포되고 있고, 토양, 천연수, 해수, 생물기원인 석탄, 석유 등에도 농축되어 있다. Cd은 특히 섬아연광(ZnS) 및 맥아연광(ZnCO₃)에 함유되어 있으며 이를 다량 섭취할 경우 신장장애와 골 연화 현상을 일으킬 수 있고, 심할 경우 폐부종이나 영구적인 폐의 손상을 입을 수도 있다(안승구 등, 2001). 그리고 Cr은 지각 중에 0.01% 정도 함유되어 있고, 자연계에는 주로 크롬철광(FeOCr₂O₃)으로 존재한다(신찬성, 2003). 금속 물질은 대부분 수중에서는 이온으로, 대기 중에서는 증기 상태로, 그리고 암석과 흙에서는 염, 광물 등의 형태로 존재한다. 또 유기물질이나 무기물질과 결합하거나, 대기 중에서는 입자에 흡착된 상태로 존재할 수 있다. 일반적으로 유기오염물질이 주로 지방 조직에 축적되는데 반해 중금속은 단백질 조직이나 뼈에 축적되는 특성을 보인다. 특히 Hg, Cd, Pb, Cu, Zn, As, Cr, Ni 등의 중금속은 인체에 허용치 이상으로 흡수되면 특정 부위에 축적되는 경향이 있다. 그 예로 카드뮴은 콩팥, 수은은 간, 납은 뼈에 축적되어 만성적 독성을 일으키게 된다(김영성, 2003). 이러한 중금속은 대기 중에 부유하고 있는 에어로졸 입자들에 흡착되어 성분, 조성이나 입자 크기에 따라 인간의 건강이나 생물의 생육에 크게 영향을 미치고 있다(Huang et al., 1994).

Table 3. Concentrations of TSP aerosol components.

Species	Mean	S.D.	Median	Max	Min
	Concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)				
NH_4^+	2.07	1.95	1.55	16.62	0.12
Na^+	2.05	1.35	1.70	7.71	0.18
K^+	0.37	0.32	0.28	0.96	BDL
nss- Ca^{2+}	0.27	0.32	0.18	2.72	BDL
Mg^{2+}	0.34	0.42	0.23	6.00	BDL
nss- SO_4^{2-}	6.96	5.93	5.46	40.93	BDL
NO_3^-	2.08	1.64	1.62	10.66	0.05
Cl^-	1.64	1.92	0.80	11.04	0.06
Concentration (ng/m^3)					
Al	398.3	533.6	245.8	6099.2	10.2
Fe	288.5	384.8	192.9	4981.2	BDL
Ca	321.1	384.4	196.6	4781.5	BDL
Na	1091.0	804.2	899.2	5795.2	11.1
K	311.2	312.6	205.9	2114.9	9.5
Mg	220.8	201.2	171.0	2296.3	3.4
S	1900.1	1526.8	1533.1	10818.0	61.1
Ti	19.57	22.89	12.03	167.01	BDL
Mn	15.18	16.73	9.95	153.97	BDL
Ba	5.33	12.24	2.47	203.09	BDL
Sr	2.79	2.93	1.87	30.68	BDL
Zn	48.60	55.93	33.93	489.81	BDL
V	5.11	6.53	3.18	74.74	BDL
Pb	46.25	83.42	20.38	931.31	BDL
Cr	1.83	2.32	1.09	20.32	BDL
Cu	4.52	7.19	3.16	107.57	BDL
Ni	3.77	8.79	2.23	156.32	BDL
Co	0.59	1.11	0.26	12.55	BDL
Mo	0.98	0.98	0.62	10.58	BDL
Cd	0.80	0.95	0.58	15.95	BDL

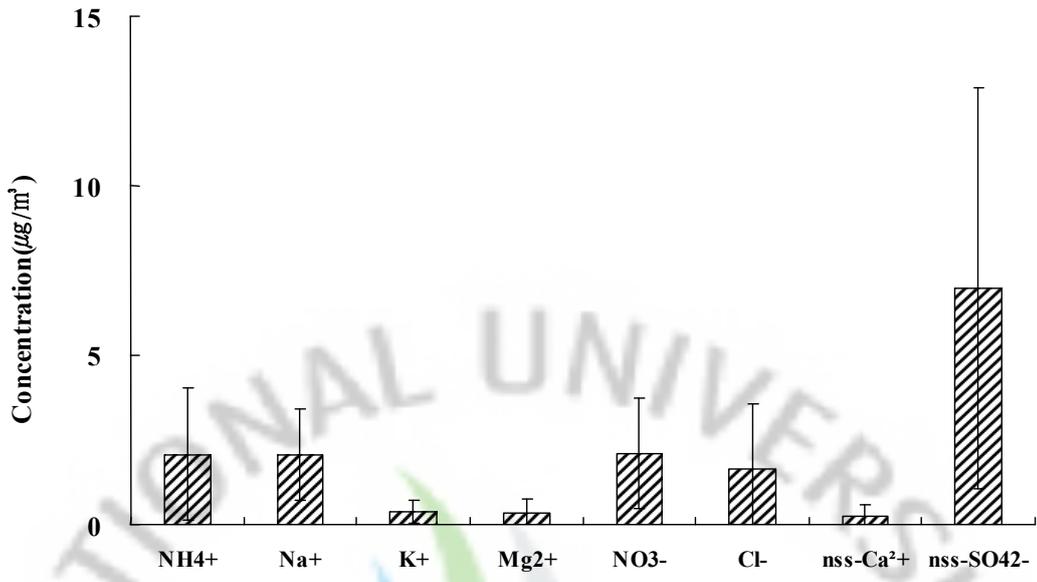


Figure 1. Comparison of concentrations of water-soluble components in TSP aerosols.

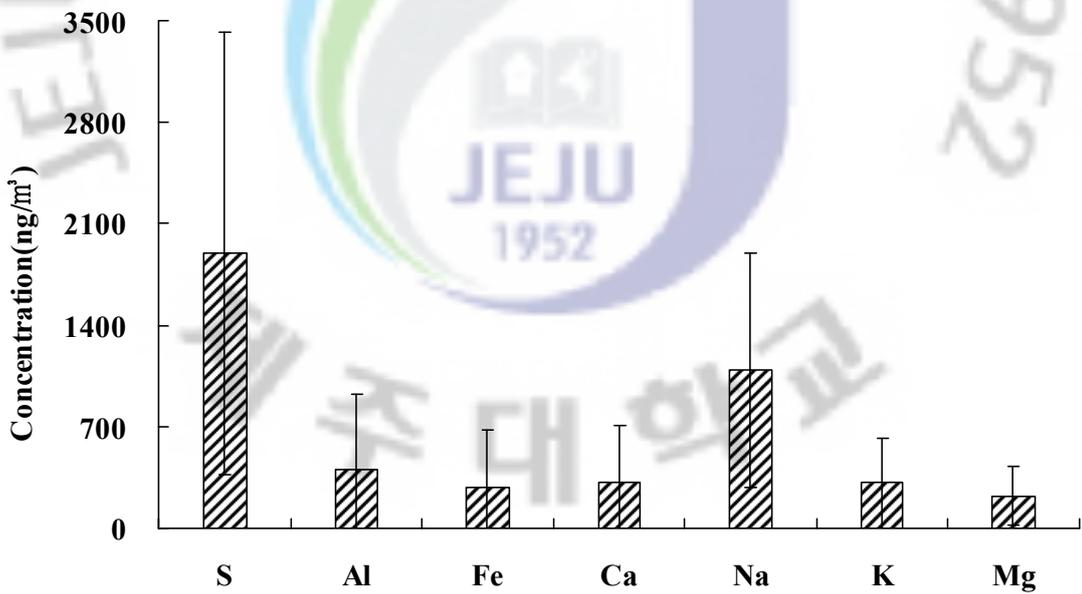


Figure 2. Comparison of concentrations of sulfur and metal elements in TSP aerosols.

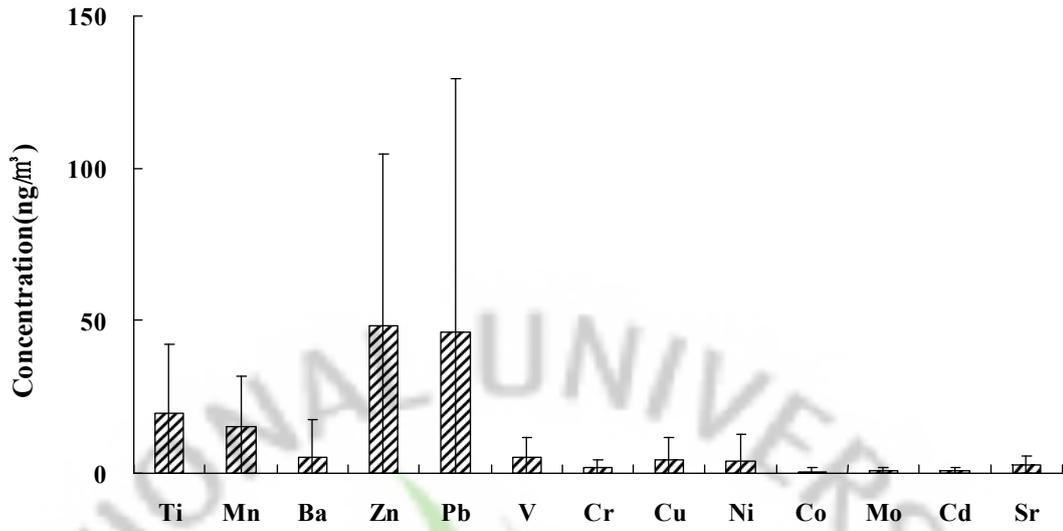


Figure 3. Comparison of concentrations of metal elements in TSP aerosols.

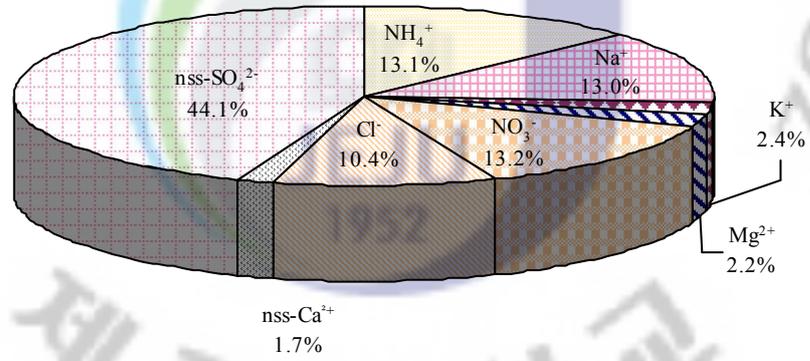


Figure 4. Composition ratio of water-soluble components in TSP aerosols.

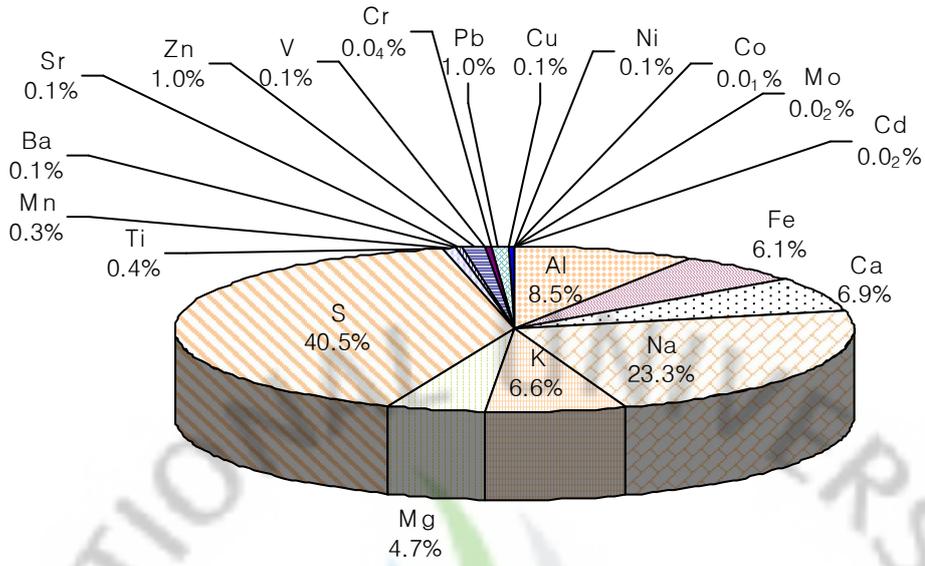


Figure 5. Composition ratio of sulfur and metal elements in TSP aerosols.

2) 해양 및 토양의 영향

대기에어로졸의 구성 성분은 발생기원에 따라 차이가 있지만 크게 해양, 토양, 오염 기원의 성분들로 나눌 수 있다. 그리고 이러한 입자들이 어떤 기원으로부터 유입되는지를 판단하는 방법 중의 하나로 농축인자 (enrichment factor, EF)를 이용한다. 농축인자는 각 기원에 대해 상대적인 농축 정도를 판단하는 방법으로, 지표 성분을 중심으로 상대 농도비를 비교함으로써 가능하다. 대기 에어로졸은 주로 토양, 해양, 검댕, 비산재 등이 주성분이며, 이외에 각종 성분들이 흡착 또는 반응된 상태로 대기 중에 부유된다. 제주지역 에어로졸의 경우 일반적으로 토양과 해양 성분이 상당량 함유되어 있으며, 특히 해양 영향이 아주 큰 것으로 조사되고 있다. 본 연구에서도 이러한 해양영향과 토양영향을 확인하기 위해 Na^+ 과 Al을 지표성분으로 다음의 식에 의해 농축계수를 구하였다(김원형 등, 2003).

$$EF = (C_x/C_{\text{Na}^+})_{\text{Aerosol}} / (C_x/C_{\text{Na}^+})_{\text{Seawater}} \quad (1)$$

$$EF = (C_x/C_{\text{Al}})_{\text{Aerosol}} / (C_x/C_{\text{Al}})_{\text{Crust}} \quad (2)$$

식 (1)에서 $(C_x/C_{\text{Na}^+})_{\text{Seawater}}$ 는 해수 중의 Na^+ 과 각 성분의 농도비를 나타내며, $(C_x/C_{\text{Na}^+})_{\text{Aerosol}}$ 는 분석한 대기에어로졸 중의 Na^+ 과 각 성분의 농도비를 나타낸다. 또한 식 (2)에서 $(C_x/C_{\text{Al}})_{\text{Crust}}$ 는 토양 중 Al과 각 성분의 농도비로 Taylor와 McLennan (1985)이 분석한 지각 성분의 조성을 기준으로 계산하였다. 여기서 $(C_x/C_{\text{Al}})_{\text{Aerosol}}$ 은 대기 에어로졸 중 Al과 각 성분의 농도비이다. 두 가지 방법으로 농축계수를 구했을 때 그 값이 1에 가까울수록 각 기원에 따른 유입이 크음을 의미한다. 그리고 농축계수가 1보다 커질수록 각 기원보다는 다른 요인에 의해 에어로졸에 유입되고 있음을 의미한다. 그러나 일반적으로 각 성분들에 대해 구한 EF 값은 지표성분에 따라 다소 차이를 보이기 때문에 일반적으로 EF 값이 3~5 이하의 성분들은 지표성분과 같은 기원을 갖고, 그 이상의 값을 나타내면 다른 기원에 의해 유래된 것으로 추정하고 있다.

연구기간 중 측정된 각 성분들의 농도와 대기 유입경로별 평균농도로부터 구

한 농축인자를 Figure 6~7에 나타내었다. 본 연구에서 분석한 수용성 성분들을 대상으로 Na^+ 을 기준으로 구한 해염 농축계수를 보면, Cl^- 은 0.4 정도를 나타내어 주로 해양의 영향을 많이 받고 있음을 알 수 있다. 또 Mg^{2+} 의 농축계수 역시 1.7의 값을 나타내어 다른 성분들에 비해 상대적으로 해양의 영향을 받은 것으로 추정된다. 그러나 Ca^{2+} , K^+ , SO_4^{2-} 의 EF 값은 각각 5.6, 6.4, 21.7 로 해염보다는 다른 요인에 의해 대기 에어로졸에 유입이 되었다는 것을 알 수 있다.

또한 Al을 기준으로 구한 토양 농축계수를 살펴보면, Ca, Fe, K이 각각 2.5, 2.0, 3.0 으로 비교적 낮은 EF 값을 나타내었고, 이로부터 이들 성분들은 주로 토양에서 유래되고 있음을 알 수 있었다. 반면에 Na, Zn, V, Pb, Ni, Co 등은 각각 14, 193.9, 26.5, 806.8, 84.1, 21.7의 EF 값을 나타내었다. 따라서 이들 성분들은 토양보다는 다른 요인들에 의해 대기 에어로졸에 유입되었을 가능성이 큰 것으로 추정된다.

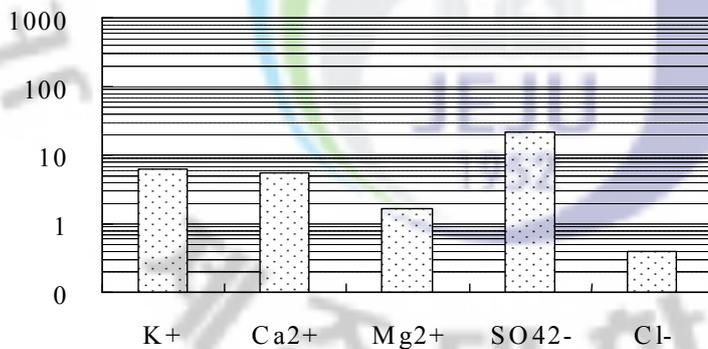


Figure 6. Sea-salt enrichment factors for water-soluble components in TSP aerosols.

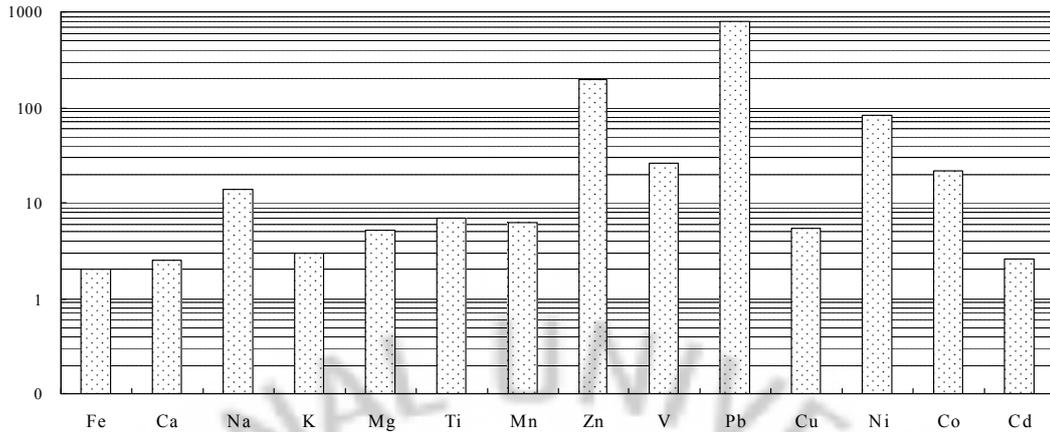


Figure 7. Soil enrichment factors for metal elements in TSP aerosols.

3) 성분들 간의 상관성

대기에어로졸 성분들의 발생기원과 조성 특성을 살펴보기 위하여 구성성분들 간의 상관 상관계수를 구하였다. SPSS 통계프로그램을 이용하여 연구기간에 측정된 수용성 성분과 금속 및 황 성분들 간의 상관계수(r)를 구하고, 그 결과를 Table 4에 나타내었다.

수용성 성분들 간의 상관성은 해염성분인 Na^+ 과 Cl^- 의 상관계수가 0.80로 가장 높은 상관성을 나타내었다. 이는 Na^+ 과 Cl^- 가 주로 NaCl 형태로 대기에어로졸에 존재하고 있음을 의미한다. 또 인위적 기원의 nss-SO_4^{2-} 과 양이온 성분들 (NH_4^+ , Na^+ , K^+ , nss-Ca^{2+} , Mg^{2+}) 간의 상관성을 조사해 본 결과, 이들 중에는 NH_4^+ 과의 상관계수가 0.93으로 가장 큰 값을 나타내었다. 이러한 결과로 보아 이들 두 성분은 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, NH_4HSO_4 등과 같은 염 형태로 대기에어로졸에 존재하고 있을 가능성이 큰 것으로 추정된다. 그리고 nss-SO_4^{2-} 과 K^+ 의 상관성 역시 0.67로 비교적 큰 값을 보여 이들 두 성분은 K_2SO_4 등의 염 형태로 대기에어로졸에 존재하고 있을 것으로 추정된다.

한편 금속 및 황 성분들 간의 상관성을 살펴보면, 토양의 주요 성분들인 Al, Fe, Ca, K, Mg, Ti, Mn, Sr들 간에는 상호 높은 상관관계를 보이지만 이들과 나머지 S, Zn, V, Pb, Cr, Cu, Ni, Co, Mo, Cd 성분들과의 상관성은 상대적으로 낮

은 경향을 보이는 것으로 조사되었다. 특히 토양의 지표성분인 Al, Fe, Ca과 다 성분들과의 상관성을 비교해 보면, Al은 Fe, Ca, K, Mg, Ti, Mn, Sr과의 상관계수가 각각 0.89, 0.77, 0.69, 0.83, 0.70, 0.72, 0.84로 높은 경향을 나타내었다. 그리고 Fe는 Ca, K, Mg, Ti, Mn, Sr과의 상관계수가 각각 0.81, 0.71, 0.85, 0.70, 0.74, 0.85로 높고, Ca 역시 K, Mg, Mn, Sr과 각각 0.71, 0.75, 0.76, 0.87로 비교적 높은 상관성을 보였다. 이는 토양의 주요 성분인 Al, Fe, Ca, K, Mg, Ti, Mn, Sr 성분들이 모두 동일한 발생기원으로 유래되어 대기에어로졸에 유입되었을 가능성이 크다는 것을 의미한다.

반면에 S은 NH_4^+ , K^+ , K, Zn, Pb 성분들과의 상관계수가 각각 0.80, 0.67, 0.71, 0.67, 0.66으로 인위적인 발생기원을 나타내는 성분들끼리 상호 높은 상관성을 보였다. 그리고 나머지 Cr, Cu, Ni, Co, Mo, Cd 등의 중금속들의 경우를 보면, Co만 Al, Fe, Mg, Ti, Sr 등의 토양기원 성분들과 비교적 큰 상관성을 나타내었고, 나머지 성분들은 대부분 상호 낮은 상관성을 나타내는 것으로 확인되었다.

Table 4. Cross correlation between TSP aerosol components.

Species	NH ₄ ⁺	Na ⁺	K ⁺	nss-Ca ²⁺	Mg ⁺	nss-SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	Al	Fe	Ca	Na	K	Mg	S	Ti	Mn	Ba	Sr	Zn	V	Pb	Cr	Cu	Ni	Co	Mo	Cd	
NH ₄ ⁺	1.00																												
Na ⁺	-0.06	1.00																											
K ⁺	0.62	0.13	1.00																										
nss-Ca ₂ ⁺	0.28	0.18	0.56	1.00																									
Mg ⁺	0.24	0.37	0.38	0.22	1.00																								
nss-SO ₄ ²⁻	0.93	0.01	0.67	0.33	0.36	1.00																							
NO ₃ ⁻	0.24	0.41	0.51	0.49	0.47	0.20	1.00																						
Cl ⁻	-0.19	0.80	-0.04	0.13	0.26	-0.24	0.30	1.00																					
Al	0.30	0.17	0.39	0.61	0.62	0.37	0.47	0.11	1.00																				
Fe	0.31	0.10	0.45	0.62	0.60	0.37	0.44	0.08	0.89	1.00																			
Ca	0.33	0.14	0.52	0.57	0.70	0.44	0.51	0.09	0.77	0.81	1.00																		
Na	-0.01	0.75	0.18	0.23	0.41	0.07	0.47	0.60	0.29	0.25	0.32	1.00																	
K	0.45	0.16	0.69	0.58	0.46	0.52	0.49	0.07	0.69	0.71	0.71	0.36	1.00																
Mg	0.21	0.42	0.35	0.54	0.65	0.28	0.54	0.35	0.83	0.85	0.75	0.58	0.69	1.00															
S	0.80	0.06	0.67	0.34	0.52	0.87	0.33	-0.15	0.55	0.54	0.58	0.25	0.71	0.51	1.00														
Ti	0.24	0.31	0.38	0.59	0.46	0.29	0.42	0.25	0.70	0.70	0.55	0.37	0.51	0.61	0.40	1.00													
Mn	0.42	0.16	0.60	0.64	0.55	0.51	0.51	0.06	0.72	0.74	0.76	0.30	0.69	0.66	0.63	0.67	1.00												
Ba	0.22	0.01	0.29	0.25	0.28	0.27	0.21	-0.03	0.37	0.38	0.38	0.13	0.34	0.33	0.38	0.27	0.35	1.00											
Sr	0.37	0.28	0.58	0.65	0.69	0.47	0.58	0.20	0.84	0.85	0.87	0.46	0.79	0.84	0.65	0.68	0.81	0.43	1.00										
Zn	0.53	0.07	0.64	0.38	0.43	0.61	0.42	-0.10	0.43	0.48	0.56	0.22	0.60	0.41	0.67	0.43	0.68	0.33	0.62	1.00									
V	0.32	0.17	0.34	0.49	0.40	0.36	0.40	0.06	0.77	0.66	0.45	0.20	0.54	0.63	0.49	0.58	0.51	0.29	0.59	0.36	1.00								
Pb	0.54	0.01	0.46	0.10	0.45	0.57	0.29	-0.10	0.27	0.32	0.51	0.20	0.46	0.32	0.66	0.19	0.55	0.29	0.48	0.66	0.11	1.00							
Cr	0.32	0.04	0.32	0.24	0.43	0.37	0.33	-0.04	0.43	0.46	0.47	0.23	0.39	0.41	0.47	0.35	0.48	0.33	0.52	0.49	0.35	0.55	1.00						
Cu	0.37	0.04	0.35	0.24	0.29	0.38	0.28	-0.05	0.38	0.40	0.38	0.11	0.40	0.33	0.46	0.30	0.41	0.19	0.41	0.41	0.28	0.36	0.29	1.00					
Ni	0.11	0.03	0.08	0.05	0.08	0.13	0.04	-0.03	0.10	0.16	0.09	0.01	0.10	0.06	0.14	0.10	0.10	0.03	0.09	0.11	0.17	0.07	0.14	0.19	1.00				
Co	0.24	0.22	0.31	0.58	0.29	0.22	0.43	0.17	0.69	0.61	0.34	0.24	0.47	0.62	0.34	0.59	0.48	0.28	0.55	0.31	0.80	0.05	0.30	0.22	0.03	1.00			
Mo	0.23	-0.07	0.28	0.08	0.22	0.31	0.09	-0.14	0.19	0.23	0.28	0.01	0.30	0.14	0.40	0.09	0.30	0.24	0.29	0.45	0.13	0.46	0.31	0.21	0.04	0.01	1.00		
Cd	0.39	0.04	0.47	0.26	0.30	0.42	0.32	-0.07	0.33	0.36	0.42	0.17	0.51	0.31	0.51	0.28	0.51	0.23	0.46	0.56	0.27	0.52	0.35	0.29	0.10	0.24	0.34	1.00	

4) 에어로졸 성분의 발생기원

에어로졸 성분의 발생기원 및 특성을 확인하기 위하여 통계 프로그램 (SPSS)을 이용하여 요인분석 (factor analysis)을 실시하였다. 요인분석은 변수들 간의 상관관계를 이용하여 서로 유사한 변수들끼리 묶어주는 방법으로 대기분진 구성 물질의 기원을 분별하고 유추하는데 매우 유용하게 사용된다(강창희 등, 2003; Oravisjärvi et al., 2003). 요인분석은 일련의 관측된 변수에 근거하여 직접 관찰할 수 없는 요인을 확인하기 위한 것이다. 또한 요인 분석은 수많은 변수들을 적은 수의 몇 가지 요인으로 묶어줌으로써 그 내용을 단순화하는 것이 그 목적이며 구체적으로 다음과 같은 목적으로 이용된다. 첫째, 변수들의 축소로써 여러 개의 관련 있는 변수들이 하나의 요인으로 묶여지므로 많은 변수들이 적은 수의 요인으로 줄어들게 된다. 둘째, 불필요한 변수들의 제거로써, 요인에 포함되지 않거나 포함되더라도 중요도가 낮은 변수들을 찾을 수 있으므로 불필요한 변수를 제거한다. 셋째, 변수들의 특성파악으로써, 관련된 변수들이 묶여져 요인을 이루고 이들 요인들은 상호 독립적인 특성을 가지게 되므로 변수들의 특성이 밝혀진다. 넷째, 측정도구의 타당성 판정으로써, 하나의 특성을 측정하기 위해 관측된 변수들은 하나의 요인으로 묶여진다. 따라서 이 같은 특성을 이용하여 묶여지지 않는 변수들은 다른 특성을 가진다고 판단된다(김나경 등, 2004, 2003). 대개 여러 변수들 간의 상관 matrix에서 인자 적재치가 클수록 변수들 간의 발생원이 유사하다고 추론 할 수 있다.

본 연구에서는 연구기간 중 채취한 에어로졸 분석결과에 대해 요인분석을 실시하였다. 이때 최적인자의 수는 고유값 (eigenvalue) 1 이상으로 3개의 인자를 추출하였고 베리맥스 (varimax) 회전법을 이용하여 산출한 요인분석 결과를 Table 5 에 수록하였다. 요인분석결과 전체 인자 중 62.3%의 설명력을 보였다. 이 중 첫 번째 인자는 26.1%의 설명력을 보였고, nss-Ca²⁺, Al, Fe, Ca, K, Mg, Ti, Mn, Sr, V, Co 성분이 비교적 높은 적재값을 나타내었다. 이들 성분들은 대부분 토양입자의 구성 성분들로 이러한 요인분석 결과는 대기 에어로졸이 토양 성분들의 유입에 의해 크게 영향을 받고 있음을 의미한다. 두 번째 인자는 24.4%의 설명력을 보였고, NH₄⁺, K⁺, nss-SO₄²⁻, S, Zn, Pb, Cd의 적재값이 높게

나타났다. 이들 성분들은 대부분 자동차, 난방연료, 산업체 등의 발생기원을 나타내는 성분들로 이는 인위적 오염의 영향이 비교적 크게 작용하고 있음을 의미한다. 세 번째 인자에서는 대표적인 해염성분들인 Na^+ , Cl^- , Na 성분의 적재값이 높게 나타나 대기에어로졸이 해양의 영향을 받은 것으로 보인다.

따라서 이상과 같은 요인분석 결과를 전체적으로 종합해 보면, 고산 지역의 TSP 대기에어로졸은 토양의 영향을 가장 많이 받고 있고, 다음으로 인위적 영향, 그 다음으로 해양의 영향을 많이 받고 있는 것으로 추정된다.



Table 5. Factor analysis for TSP aerosol components.

Species	factor 1	factor 2	factor 3
NH ₄ ⁺	0.15	0.77	-0.15
Na ⁺	0.09	-0.06	0.90
K ⁺	0.33	0.69	0.09
nss-Ca ²⁺	0.73	0.18	0.09
Mg ²⁺	0.41	0.42	0.46
nss-SO ₄ ²⁻	0.19	0.82	-0.10
NO ₃ ⁻	0.43	0.29	0.48
Cl ⁻	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
Cummulative(%)	26.1	50.5	62.3

5) 황사와 비황사시의 조성 특성

(1) 황사와 비황사 농도 비교

중국의 급속한 산업화와 산림개발로 사막화가 급속히 진행되면서 황사의 발생빈도가 점진적으로 증가하는 경향을 보이고 있다. 중국의 사막화 속도는 60년대 이전에는 매년 1,560 km²이었으나 21세기 들어 2,460 km²로 가속화되고 있으며 (국립환경연구원, 2002), 타클라마칸과 고비사막, 그리고 황토고원을 포함하는 지역에서 연간 발생하는 PM₁₀ 양은 1년에 각각 0.38, 0.24, 0.05 t/ha에 달하고 있다(Jie et al., 2002). 황사의 발생은 발원지의 주변국가인 한국이나 일본에만 영향을 미치는 것이 아니라 최근에는 강한 서풍의 기류를 타고 북태평양을 지나 북미지역까지 이동하고 있어서 심각한 환경오염현상으로 인식되고 있다(David et al., 2001; McKendry et al., 2001). 그리고 황사의 발생과 그 피해에 대한 관심이 높아지면서 황사의 장거리 이동현상을 체계적으로 규명하기 위한 연구들이 한국을 비롯한 여러 아시아 국가에서 80년대 이래 집중적으로 이루어지고 있다(Fang et al., 2002; Chun et al., 2001a; Lin, 2001; Chung et al., 1996).

2002년 봄에 한반도에서는 황사로 인해 서울의 시간평균 PM₁₀ 농도가 2,000 µg/m³까지 상승하면서, 대규모 휴교사태와 더불어 황사경보시스템까지 도입하는 등 사회전반에 커다란 영향을 미쳤다 (추장민 등, 2003). 이와 같이 대기 에어로졸 성분은 지역적 발생기원 외에도 황사와 같이 장거리 이동되어오는 입자상 물질의 영향을 받고 있으며, 특히 한반도 지역의 경우, 황사기간에 대기 에어로졸의 성분 및 농도에 큰 변화가 발생한다.

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 과도한 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).

이처럼 황사는 발생 기간이 짧고 산발적이며 발생 지역인 중국의 사막지역이 급속히 변화하고 있어서 황사의 발생, 이동, 영향 등을 전반적으로 예측할 수 있는 체계적인 연구를 수행하는 것이 쉽지만은 않은 실정이다. 황사의 발생 및 영향을 좀 더 정확히 파악하기 위해서는 한·중 간의 지속적인 협조와 공동연구가 필수적이며, 이를 위해 필요한 기초 자료들을 지속적으로 축적해 나가야 한다(신선아 등, 2005).

본 연구에서는 제주도 고산지역에서 채취한 대기 에어로졸을 황사와 비황사로 나누어 조성을 비교함으로써 제주지역 대기질에 미치는 황사의 영향을 조사하였다. 이를 위해 연구기간에 채취한 TSP 에어로졸 성분의 농도를 황사와 비황사 기간으로 분류하여 비교하였고, 그 결과를 Table 6~7, Figure 8~9 에 나타내었다.

먼저 수용성 성분의 농도를 비교한 결과, 표에서 보는 바와 같이 황사 시에는 모든 성분들의 농도가 1.3~3.6배로 증가하였고, $nss-SO_4^{2-} > NO_3^- > Cl^- > Na^+ > NH_4^+ > Mg^{2+} > nss-Ca^{2+} > K^+$ 의 농도 순서를 보였다. 그러나 비황사 시에는 대체적으로 농도가 낮고, $nss-SO_4^{2-} > NH_4^+ > Na^+ > NO_3^- > Cl^- > K^+ > Mg^{2+} > nss-Ca^{2+}$ 의 순서를 보였다. 그리고 황사 시에 다른 성분들에 비해 상대적으로 $nss-Ca^{2+}$ 과 NO_3^- 의 농도가 증가하고 NH_4^+ 은 오히려 감소하는 특징을 보이는 것으로 조사되었다.

특히 황사 시에는 토양기원의 $nss-Ca^{2+}$ 과 Mg^{2+} 이 황사/비황사 농도비가 각각 3.6과 3.1배로 농도가 현저하게 증가하는 경향을 보였다. 반면에 수용성 성분들 중에서 가장 높은 농도를 보이고 있는 $nss-SO_4^{2-}$ 의 경우, 황사 시에 $9.34 \mu g/m^3$, 비황사 시에 $6.86 \mu g/m^3$ 으로 황사 시에 1.4배 정도 더 높게 나타났다. 다음으로

NO_3^- 은 황사 시에 $4.24 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 비황사 시에 $1.99 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 황사 시에 2.1배 정도 더 증가한 것으로 확인되었다. 이 두 성분은 모두 대표적인 인위적 기원의 성분으로 nss-SO_4^{2-} 은 화석연료, 특히 석탄의 사용량과 관련이 크고, NO_3^- 는 에너지 사용량과 큰 관련성을 나타낸다.

이처럼 황사 시에 토양기원의 성분들의 농도는 크게 증가하나 이에 비해 인위적 기원 성분들은 상대적으로 더 낮은 농도 증가율을 나타내었다. 또한 황사 시에 nss-Ca^{2+} 과 NO_3^- 의 농도가 동시에 증가하는 이유는 질소산화물이 에어로졸 표면에서 화학반응을 일으키거나 흡착된 상태로 장거리 이동된 결과로 보이며, 탄산칼슘과 질산이 서로 중화반응을 일으켜 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 등의 염을 생성하기 때문인 것으로 추정 된다(김나경 등, 2004; Park et al., 2003; Arimoto et al., 1996).

금속 및 황 성분의 분석 결과를 보면, 황사 시에 $\text{S} > \text{Al} > \text{Na} > \text{Fe} > \text{Ca} > \text{K} > \text{Mg} > \text{Zn} > \text{Pb} > \text{Ti} > \text{Mn} > \text{V} > \text{Ba} > \text{Sr} > \text{Cu} > \text{Ni} > \text{Cr} > \text{Co} > \text{Cd} > \text{Mo}$ 의 농도 순을 보였다. 그리고 비황사 시에는 $\text{S} > \text{Na} > \text{Al} > \text{K} > \text{Ca} > \text{Fe} > \text{Mg} > \text{Zn} > \text{Pb} > \text{Ti} > \text{Mn} > \text{Ba} > \text{V} > \text{Cu} > \text{Ni} > \text{Sr} > \text{Cr} > \text{Mo} > \text{Cd} > \text{Co}$ 의 순으로 높은 농도를 나타내었다. 주요 성분들의 농도를 보면, 황사 시에는 토양의 지표 성분인 Al, Fe, Ca의 농도가 현저하게 증가하는 경향을 보였다. Al, Fe, Ca의 농도는 황사 시에 각각 $1693.1, 1117.0, 1000.1 \text{ ng}/\text{m}^3$, 비황사 시에 각각 $344.3, 254.0, 292.8 \text{ ng}/\text{m}^3$ 로, 황사 시에 이들 성분들은 각각 4.9배, 4.4배, 3.4배 정도 더 높은 농도이다. 또한 해양과 토양의 동일 기원을 나타내는 것으로 알려진 Na과 Mg은 황사 시에 각각 $1625.5, 627.3 \text{ ng}/\text{m}^3$, 비황사시에 각각 $1068.7, 203.9 \text{ ng}/\text{m}^3$ 로 Na는 1.5배, Mg는 3.1배 정도 증가하였다. 그리고 절대 농도는 낮지만 주로 토양으로부터 유래되는 것으로 알려진 Ti, Mn, Ba, Sr 등은 황사 시에 각각 $60.4, 45.1, 15.5, 8.5 \text{ ng}/\text{m}^3$, 비황사시에 각각 $17.9, 13.9, 4.9, 2.6 \text{ ng}/\text{m}^3$ 로 각각 3.4, 3.2, 3.2, 3.3배의 증가를 보였다.

반면에 S의 농도는 황사 시에 $3201.6 \text{ ng}/\text{m}^3$, 비황사 시에 $1845.8 \text{ ng}/\text{m}^3$ 로 황사 시에 1.7배 정도 더 증가하여 토양성분들보다는 낮은 증가율을 나타내었다. S은 대표적인 인위적 기원의 성분으로 황사와는 발생기원이 전혀 다르다. 그러나 황사 시에 S의 농도가 증가하는 것은 황산화물이 에어로졸 입자에 흡착 또는 반응한 황산염이 황사와 함께 장거리 이동한 것으로 판단된다(김원형 등, 2008). 타

연구 결과를 보면, 황사기간에 인위적 기원의 NH_4^+ , nss-SO_4^{2-} , NO_3^- , S 등의 농도가 조대입자(coarse particle) 영역에서 증가하는 것으로 나타나고 있다. 국내 다른 배경농도 지역인 서해안의 덕적도와 제주도 고산 지역에서 측정된 결과를 보면(선우영, 2007), NH_4^+ , nss-SO_4^{2-} , S 등이 황사기간에 조대입자 영역에서 농도가 증가하는 것으로 보고되고 있다. 이는 황사 때 NH_3 가 조대입자에서 산성 물질과 반응을 일으키거나 NH_4NO_3 , NH_4HSO_4 , $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 등이 응고, 배기와 같은 물리적 과정을 통해 조대입자로 이동되기 때문인 것으로 추정하고 있다 (Yeatman et al., 2001). 또한 산성 물질이 토양 성분인 CaCO_3 과 반응하여 황산염 또는 질산염을 생성하기 때문에 황사입자에서는 토양 성분과 함께 조대입자에서 이들의 농도가 증가하는 것으로 보인다(김원형 등, 2008).

Table 6. Concentrations ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) of water-soluble components during Asian Dust and Non-Asian Dust storm periods.

Species	Asian Dust					Non-Asian Dust					AD / NAD
	Mean	Median	Max	Min	S.D.	Mean	Median	Max	Min	S.D.	
NH_4^+	2.60	1.66	6.99	0.12	2.11	2.05	1.54	16.62	0.25	1.94	1.3
Na^+	2.95	2.57	7.71	0.34	1.90	2.01	1.68	7.60	0.18	1.32	1.5
K^+	0.57	0.46	1.23	0.08	0.35	0.36	0.28	1.96	0.00	0.32	1.6
nss-Ca^{2+}	0.88	0.63	2.72	0.10	0.76	0.25	0.17	2.07	0.00	0.26	3.6
Mg^{2+}	0.97	0.55	6.00	0.18	1.33	0.32	0.23	2.45	0.00	0.30	3.1
nss-SO_4^{2-}	9.34	7.29	31.87	1.80	7.67	6.86	5.35	40.93	0.00	5.83	1.4
NO_3^-	4.24	3.62	10.36	1.38	2.47	1.99	1.59	10.66	0.05	1.53	2.1
Cl^-	3.21	1.86	11.04	0.24	3.15	1.57	0.79	10.61	0.06	1.82	2.0

Table 7. Concentrations (ng/m³) of metal and sulfur elements during Asian Dust and Non-Asian Dust storm periods.

Species	Asian Dust					Non-Asian Dust					AD/ NAD
	Mean	Median	Max	Min	S.D.	Mean	Median	Max	Min	S.D.	
Al	1693.1	1060.1	6099.2	192.5	1650.8	344.3	239.7	2711.7	10.2	338.5	4.9
Fe	1117.0	516.9	4981.2	123.9	1238.7	254.0	187.8	1980.4	0.0	250.9	4.4
Ca	1000.1	731.8	4781.5	174.1	1001.4	292.8	189.3	2309.8	0.0	306.1	3.4
Na	1625.5	1412.0	4496.6	455.1	936.3	1068.7	874.1	5795.1	11.1	791.3	1.5
K	736.1	485.7	2078.6	89.1	607.1	293.5	200.3	2114.9	9.5	281.4	2.5
Mg	627.3	363.0	2296.3	106.0	592.2	203.9	166.4	1246.0	3.4	144.8	3.1
S	3201.6	2347.5	9842.8	682.8	2609.9	1845.8	1509.6	10818.0	61.1	1443.0	1.7
Ti	60.4	43.9	167.0	7.4	49.2	17.9	11.4	149.6	0.0	19.4	3.4
Mn	45.1	40.1	136.2	3.9	32.5	13.9	9.5	154.0	0.0	14.5	3.2
Ba	15.5	9.9	45.1	2.2	12.5	4.9	2.4	203.1	0.0	12.1	3.2
Sr	8.5	6.1	30.7	1.4	6.9	2.6	1.8	18.4	0.0	2.4	3.3
Zn	107.8	76.2	351.0	4.5	102.5	46.1	33.7	489.8	0.0	51.8	2.3
V	19.2	10.9	74.7	0.0	21.3	4.5	3.1	31.6	0.0	4.2	4.2
Cr	4.5	3.1	15.0	0.3	3.8	1.7	1.0	20.3	0.0	2.2	2.6
Pb	73.4	25.9	476.9	8.3	125.4	45.1	20.3	931.3	0.0	81.2	1.6
Cu	7.6	6.9	24.6	0.5	6.8	4.4	3.1	107.6	0.0	7.2	1.7
Ni	5.6	4.4	12.6	0.4	3.5	3.7	2.2	156.3	0.0	8.9	1.5
Co	2.8	1.4	12.5	0.1	3.7	0.5	0.2	5.7	0.0	0.7	5.7
Mo	1.1	0.6	10.6	0.0	2.2	1.0	0.6	7.0	0.0	0.9	1.2
Cd	1.2	0.8	4.5	0.1	1.1	0.8	0.6	16.0	0.0	0.9	1.6

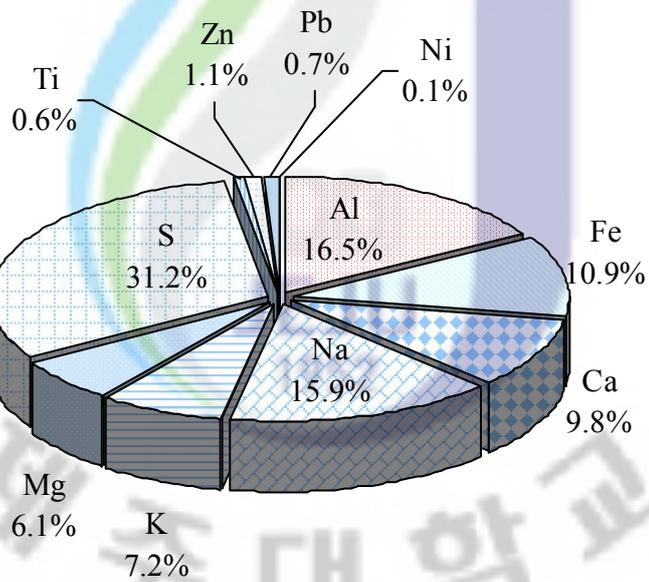
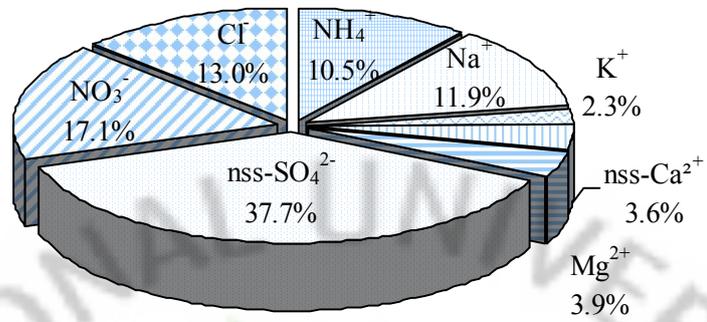


Figure 8. Composition ratios of aerosol components during Asian Dust storm periods.

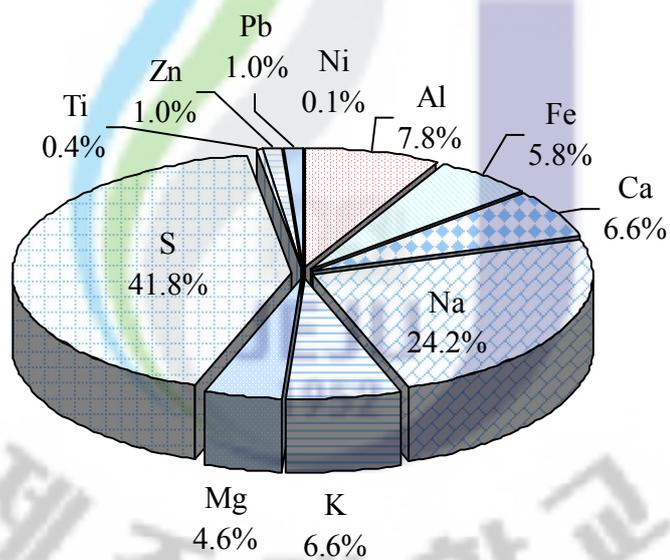
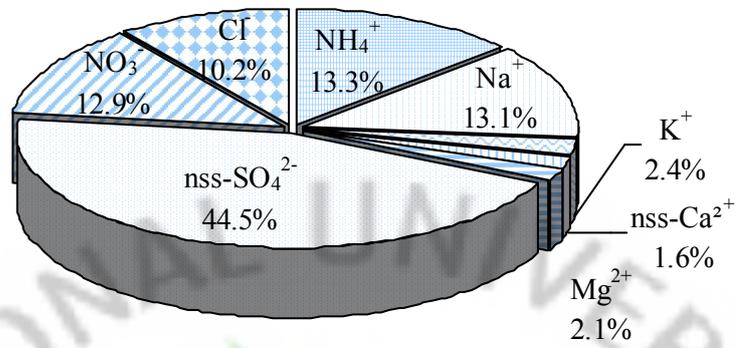


Figure 9. Composition ratios of aerosol components during Non-Asian Dust storm periods.

(2) 성분들 간의 상관성

황사와 비황사 기간에 에어로졸 구성 성분의 발생기원과 특징을 살펴보기 위하여 각 성분들의 상관계수를 구하였다. SPSS 통계프로그램을 이용하여 연구기간에 측정된 수용성 성분과 금속 및 황 성분들 간의 상관계수(r)를 구하였고, 그 결과를 Table 8~9에 나타내었다.

우선 황사 기간에 주요 수용성 성분들의 상관성을 조사해 본 결과, 해염성분인 Na^+ 과 Cl^- 의 상관계수가 0.92로 높은 상관관계를 나타내었다. 이는 상당량의 NaCl 이 염 형태로 대기 에어로졸에 유입되고 있음을 입증하는 결과이다. 또 인위적 기원의 nss-SO_4^{2-} 과 양이온 성분들(NH_4^+ , Na^+ , K^+ , nss-Ca^{2+} , Mg^{2+}) 간의 상관성을 조사해 본 결과, 이들 중에는 NH_4^+ 과의 상관계수가 0.89로 가장 큰 상관성을 보였다. 이러한 결과로 보아 이들 두 성분은 앞에서 언급한 바와 같이 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, NH_4HSO_4 등과 같은 염 상태로 대기 에어로졸에 존재하고 있는 것으로 추정된다. 또 NO_3^- 은 nss-Ca^{2+} 과의 상관계수가 0.57로 비교적 높게 나타났다. 일반적으로 NO_3^- 은 주로 인간 활동에 기인한 인위적 기원 성분인 반면 nss-Ca^{2+} 은 대표적인 토양 기원의 성분으로 두 물질의 발생기원은 전혀 다르다. 그러나 이처럼 발생기원이 전혀 다른 두 성분이 큰 상관성을 나타내는 것은 두 성분이 동일한 경로로 대기 중에 유입되고 있음을 의미한다. 따라서 이는 중국에서 발생한 질소산화물이 이동 중에 산화되어 산성 물질을 생성하고, 이러한 산성 물질이 염기성 토양성분과 반응하여 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 과 같은 질산염을 생성했을 가능성이 큰 것으로 추정된다(Ro et al., 2001a).

또한 비황사 기간에는 Na^+ 과 Cl^- 의 상관계수가 0.79로 황사기간보다는 낮은 상관성을 보였다. 이처럼 황사기간에 비해 상관성이 낮은 것은 비황사 기간이 비교적 측정기간이 길고, 또 온도가 높은 여름철 측정이 포함되어 있기 때문에 이 시기에 염소손실(chlorine loss)이 발생했을 가능성이 커 보인다(송정민, 2008). 반면에 nss-SO_4^{2-} 과 NH_4^+ 의 상관계수는 0.93으로, 황사 시와 유사한 값을 보였다. 또한 NO_3^- 과 nss-Ca^{2+} 과의 상관계수는 0.42로 황사 시의 0.57에 비해 상대적으로 낮은 상관성을 나타내었다. 이처럼 비황사 시 이들 두 성분의 상관성이 더 낮은 것은 중국의 영향을 더 적게 받기 때문인 것으로 추정된다. 즉, 황사 시에는 대기가 중국에서 직접 유입되기 때문에 중국에서 발생한 질소산화물의 영향을 크

계 받지만 비황사 시에는 중국을 거치지 않은 경우가 많기 때문에 상대적으로 그 영향을 적게 받은 것으로 추측된다(송정민, 2008).

한편 금속원소 성분들 간의 상관성을 살펴보면, 황사 시에 토양성분인 Al, Fe, Ca, K, Mg, Ti, Mn, Ba, Sr 들 간에 높은 상관관계를 보였다. Al의 경우 Fe, Ca, K, Mg, Ti, Mn, Ba, Sr과의 상관계수가 각각 0.95, 0.74, 0.94, 0.94, 0.88, 0.91, 0.93, 0.94로 이들 모든 성분들과 비교적 높은 상관성을 나타내었다. Fe 역시 Ca, K, Mg, Ti, Mn, Ba, Sr과의 상관계수가 각각 0.81, 0.94, 0.97, 0.83, 0.93, 0.93, 0.98로 아주 높고, Ca는 K, Mg, Ti, Mn, Ba, Sr과 각각 0.68, 0.75, 0.52, 0.79, 0.73, 0.83의 상관성을 보였다. 이는 토양성분인 Al, Fe, Ca, K, Mg, Ti, Mn, Ba, Sr 금속성분들은 모두 동일한 발생기원으로 유래되어 대기 중으로 유입되었을 가능성이 크다는 것을 의미한다.

또한 인위적 기원의 S 성분 역시 Al, Fe, Ca, K, Mg, Ti, Mn, Ba, Sr, Zn, V, Cr, Cu, Ni, Cd 등과 $r = 0.63$ 이상의 비교적 높은 상관관계를 나타내고 있다. 이는 황화합물이 토양 성분들과 함께 유입되고 있음을 의미한다. 즉, 황사 시에 TSP 대기어로졸에 유입된 황화합물이 고산지역의 국지적인 영향보다는 황사입자와 동일한 경로로 대륙으로부터 제주지역으로 유입되었음을 의미하는 결과이다. 반면에 Pb는 S과는 달리 토양성분들과 상대적으로 낮은 상관성을 보여 이들 성분들과는 다소 다른 발생기원을 보이는 것으로 보인다.

또 비황사 기간에 각 성분의 상관성을 비교해 본 결과, 이 역시 토양의 주성분인 Al, Fe, Ca, K, Mg, Ti, Mn, Ba, Sr 등이 높은 상관관계를 나타내었다. Al을 예로 보면, Fe, Ca, K, Mg, Ti, Mn, Ba, Sr과의 상관계수가 각각 0.78, 0.75, 0.61, 0.67, 0.57, 0.63, 0.29, 0.77로 황사기간에 비해서는 낮지만 여전히 높은 상관성을 보이고 있다. 그러나 S은 황사 기간에 높은 상관성을 유지했던 토양성분들과는 훨씬 낮은 상관성을 보인 반면, K, Zn, Pb과는 각각 0.68, 0.66, 0.67의 상관계수를 나타내어 대체적으로 인위적 기원의 성분들 간에 큰 상관성을 나타낸 것으로 확인되었다. 이러한 결과들을 종합해 보면, 황사 시에는 인위적 기원성분들과 토양 성분들의 유입경로가 일치하지만, 비황사 시에는 이들 성분들이 서로 다른 경로를 통해 유입되고 있음을 의미한다.

Table 8. Cross correlation between aerosol components during Asian Dust storm periods.

Species	NH ₄ ⁺	Na ⁺	K ⁺	nss-Ca ²⁺	Mg ⁺	nss-SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	Al	Fe	Ca	Na	K	Mg	S	Ti	Mn	Ba	Sr	Zn	V	Pb	Cr	Cu	Ni	Co	Mo	Cd
NH ₄ ⁺	1.00																											
Na ⁺	-0.27	1.00																										
K ⁺	0.76	-0.29	1.00																									
nss-Ca ₂ ⁺	0.34	0.00	0.68	1.00																								
Mg ⁺	0.17	0.20	0.18	-0.04	1.00																							
nss-SO ₄ ²⁻	0.89	-0.31	0.74	0.32	0.49	1.00																						
NO ₃ ⁻	0.28	0.22	0.51	0.57	0.04	0.15	1.00																					
Cl ⁻	-0.46	0.92	-0.42	-0.08	0.12	-0.49	0.05	1.00																				
Al	0.42	0.06	0.57	0.47	0.69	0.60	0.35	-0.05	1.00																			
Fe	0.50	-0.02	0.65	0.49	0.75	0.70	0.33	-0.11	0.95	1.00																		
Ca	0.34	-0.14	0.53	0.25	0.79	0.65	0.08	-0.17	0.74	0.81	1.00																	
Na	-0.09	0.82	-0.11	0.09	0.31	-0.12	0.48	0.62	0.26	0.18	0.03	1.00																
K	0.55	0.03	0.72	0.62	0.55	0.64	0.48	-0.09	0.94	0.94	0.68	0.25	1.00															
Mg	0.48	0.15	0.58	0.46	0.75	0.65	0.40	0.02	0.94	0.97	0.75	0.36	0.95	1.00														
S	0.66	0.01	0.60	0.25	0.72	0.79	0.29	-0.20	0.80	0.85	0.65	0.26	0.82	0.86	1.00													
Ti	0.27	0.19	0.47	0.59	0.54	0.39	0.42	0.10	0.88	0.83	0.52	0.39	0.83	0.81	0.65	1.00												
Mn	0.50	-0.01	0.72	0.60	0.66	0.67	0.40	-0.12	0.91	0.93	0.79	0.22	0.90	0.88	0.79	0.87	1.00											
Ba	0.46	-0.06	0.68	0.51	0.63	0.60	0.38	-0.13	0.93	0.93	0.73	0.16	0.94	0.89	0.81	0.83	0.95	1.00										
Sr	0.48	0.07	0.65	0.47	0.79	0.69	0.38	-0.04	0.94	0.98	0.83	0.27	0.92	0.96	0.86	0.82	0.96	0.94	1.00									
Zn	0.73	-0.29	0.73	0.28	0.33	0.74	0.32	-0.40	0.48	0.54	0.43	-0.12	0.52	0.46	0.68	0.37	0.66	0.65	0.60	1.00								
V	0.32	0.13	0.41	0.43	0.31	0.31	0.39	0.04	0.81	0.67	0.30	0.28	0.82	0.71	0.63	0.71	0.62	0.75	0.64	0.31	1.00							
Pb	0.45	-0.38	0.42	-0.10	0.49	0.63	-0.11	-0.39	0.28	0.43	0.52	-0.23	0.28	0.33	0.52	0.14	0.48	0.48	0.47	0.74	-0.04	1.00						
Cr	0.63	-0.23	0.58	0.14	0.59	0.74	0.25	-0.34	0.68	0.72	0.58	0.05	0.64	0.66	0.80	0.55	0.76	0.78	0.76	0.87	0.43	0.80	1.00					
Cu	0.78	-0.15	0.80	0.57	0.29	0.73	0.53	-0.29	0.71	0.72	0.41	0.05	0.79	0.68	0.77	0.64	0.77	0.78	0.72	0.85	0.67	0.39	0.76	1.00				
Ni	0.52	-0.36	0.70	0.32	0.37	0.60	0.27	-0.36	0.65	0.68	0.65	-0.20	0.67	0.56	0.63	0.57	0.72	0.74	0.67	0.69	0.48	0.47	0.66	0.73	1.00			
Co	0.36	0.20	0.42	0.56	0.17	0.27	0.47	0.07	0.71	0.60	0.10	0.35	0.76	0.65	0.56	0.72	0.58	0.68	0.57	0.32	0.93	-0.08	0.40	0.69	0.32	1.00		
Mo	0.35	-0.36	0.39	-0.11	0.24	0.39	-0.08	-0.32	0.14	0.27	0.27	-0.25	0.19	0.17	0.39	0.06	0.35	0.42	0.31	0.73	-0.01	0.89	0.71	0.38	0.42	0.01	1.00	
Cd	0.57	-0.23	0.58	0.21	0.39	0.59	0.17	-0.31	0.57	0.61	0.38	-0.03	0.59	0.54	0.70	0.53	0.70	0.76	0.64	0.86	0.47	0.76	0.90	0.75	0.62	0.51	0.81	1.00

Table 9. Cross correlation between aerosol components during Non-Asian Dust storm periods.

Species	NH ₄ ⁺	Na ⁺	K ⁺	nss-Ca ²⁺	Mg ⁺	nss-SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	Al	Fe	Ca	Na	K	Mg	S	Ti	Mn	Ba	Sr	Zn	V	Pb	Cr	Cu	Ni	Co	Mo	Cd
NH ₄ ⁺	1.00																											
Na ⁺	-0.06	1.00																										
K ⁺	0.62	0.14	1.00																									
nss-Ca ₂ ⁺	0.29	0.17	0.57	1.00																								
Mg ⁺	0.28	0.43	0.46	0.20	1.00																							
nss-SO ₄ ²⁻	0.93	0.02	0.67	0.33	0.37	1.00																						
NO ₃ ⁻	0.23	0.41	0.50	0.42	0.58	0.19	1.00																					
Cl ⁻	-0.19	0.79	-0.03	0.11	0.28	-0.24	0.29	1.00																				
Al	0.37	0.15	0.43	0.57	0.45	0.40	0.48	0.07	1.00																			
Fe	0.35	0.07	0.49	0.61	0.37	0.37	0.44	0.05	0.78	1.00																		
Ca	0.36	0.15	0.55	0.60	0.61	0.43	0.56	0.08	0.75	0.79	1.00																	
Na	-0.01	0.74	0.18	0.21	0.46	0.07	0.45	0.60	0.30	0.26	0.36	1.00																
K	0.46	0.14	0.69	0.51	0.39	0.51	0.44	0.05	0.61	0.64	0.69	0.35	1.00															
Mg	0.19	0.50	0.33	0.45	0.51	0.23	0.55	0.43	0.67	0.70	0.70	0.71	0.60	1.00														
S	0.82	0.04	0.67	0.32	0.48	0.88	0.30	-0.18	0.52	0.48	0.56	0.23	0.68	0.41	1.00													
Ti	0.24	0.30	0.37	0.51	0.35	0.27	0.36	0.22	0.57	0.59	0.47	0.36	0.38	0.44	0.32	1.00												
Mn	0.44	0.14	0.61	0.58	0.46	0.51	0.47	0.01	0.63	0.65	0.71	0.29	0.62	0.52	0.60	0.56	1.00											
Ba	0.21	-0.01	0.26	0.18	0.22	0.24	0.16	-0.06	0.29	0.30	0.33	0.11	0.25	0.24	0.33	0.17	0.26	1.00										
Sr	0.40	0.28	0.61	0.62	0.59	0.46	0.58	0.19	0.77	0.76	0.86	0.49	0.74	0.75	0.61	0.56	0.74	0.36	1.00									
Zn	0.53	0.08	0.63	0.35	0.45	0.60	0.39	-0.10	0.38	0.44	0.56	0.23	0.58	0.35	0.66	0.40	0.66	0.29	0.60	1.00								
V	0.41	0.14	0.38	0.39	0.31	0.45	0.35	-0.04	0.60	0.49	0.40	0.16	0.39	0.42	0.47	0.44	0.37	0.20	0.45	0.34	1.00							
Pb	0.54	0.03	0.46	0.12	0.50	0.56	0.33	-0.08	0.32	0.35	0.55	0.22	0.49	0.35	0.67	0.18	0.59	0.27	0.52	0.65	0.16	1.00						
Cr	0.30	0.03	0.29	0.18	0.36	0.33	0.28	-0.05	0.32	0.35	0.40	0.23	0.30	0.29	0.40	0.25	0.38	0.27	0.43	0.41	0.26	0.53	1.00					
Cu	0.35	0.03	0.32	0.20	0.33	0.36	0.25	-0.05	0.43	0.44	0.40	0.10	0.37	0.32	0.44	0.27	0.39	0.15	0.41	0.38	0.26	0.35	0.25	1.00				
Ni	0.10	0.04	0.07	0.02	0.07	0.11	0.03	-0.03	0.08	0.18	0.07	0.01	0.08	0.05	0.13	0.07	0.07	0.02	0.06	0.09	0.20	0.06	0.12	0.18	1.00			
Co	0.26	0.22	0.32	0.49	0.20	0.22	0.38	0.15	0.52	0.45	0.31	0.21	0.30	0.45	0.24	0.45	0.34	0.20	0.43	0.25	0.58	0.06	0.21	0.17	0.00	1.00		
Mo	0.23	-0.04	0.28	0.12	0.23	0.30	0.11	-0.12	0.24	0.25	0.29	0.04	0.33	0.13	0.41	0.10	0.31	0.23	0.30	0.40	0.21	0.40	0.25	0.20	0.03	-0.01	1.00	
Cd	0.37	0.05	0.46	0.26	0.31	0.40	0.32	-0.07	0.35	0.39	0.45	0.17	0.51	0.30	0.49	0.25	0.50	0.19	0.46	0.54	0.26	0.50	0.29	0.27	0.09	0.21	0.30	1.00

(3) 오염물질의 발생 기원

황사 시 대기 에어로졸 성분들이 주로 어떤 배출원과 연계되어 있는지를 요인 분석법으로 조사하였다. 이 때 최적인자의 수는 고유값 1 이상으로 각각에 대해 3개의 인자를 추출하였고, 베리맥스 회전법을 이용하여 요인분석을 실시하였다. 그리고 그 결과를 Table 10에 수록하였다.

먼저 황사 시의 요인분석 결과를 보면, 3개의 인자를 추출했을 때 전체적으로 79.9%의 설명력을 보였다. 첫 번째 인자는 36.5%의 설명력을 보였고, $nss-SO_4^{2-}$, Mg^{2+} , Al, Fe, Ca, Mg, S, Mn, Ba, Sr, Cr, Pb, Cd 등이 높은 적재값을 나타내었다. 이들 성분들은 주로 토양 기원의 성분들과 일부 인위적 기원의 $nss-SO_4^{2-}$, S, Pb 등이 혼재된 것으로 황사 시에 토양과 인위적 기원 성분들이 제주지역 TSP 에어로졸에 영향을 크게 미치는 것으로 추정된다. 두 번째 인자는 25.2%의 설명력을 보였고, K^+ , $nss-Ca^{2+}$, NO_3^- , K, Ti, V, Cu, Co 등의 성분들이 비교적 높은 적재값을 나타내었다. 이들 성분들 중에서 $nss-Ca^{2+}$, Ti, Co 등은 토양기원의 성분들이지만 이를 제외한 나머지 성분들은 대체적으로 인위적 발생기원의 요소가 큰 성분들이다. 반면에 세번째 인자는 18.2%의 설명력을 보였고, Na^+ , Cl^- , Na 등의 해양기원 성분들이 상대적으로 큰 음의 적재값을 나타내어 이들 성분들은 토양과 인위적 성분들과는 무관하게 대기 에어로졸 구성에 영향을 미치는 것으로 추정된다. 이러한 요인분석 결과는 비황사 시와는 크게 다른 경향으로 황사 시에 토양 입자와 함께 인위적 성분들의 유입이 크고, 해양기원의 성분들은 이와 무관하게 에어로졸 구성에 영향을 미치고 있는 것으로 추정된다.

반면에 비황사 시에는 3개의 인자를 추출했을 때 전체적으로 58.7%의 설명력을 보였고, 황사 시와는 달리 뚜렷한 발생원의 특성을 나타내었다. 첫 번째 인자는 25.0%의 설명력을 보였고, NH_4^+ , K^+ , $nss-SO_4^{2-}$, S, Zn, Pb 등과 같은 성분들이 높은 적재값을 나타내었다. 이들 성분들은 모두 인간 활동에 의해 발생하는 대표적인 인위적 기원의 성분들이다. 두 번째 인자는 20.4%의 설명력을 보였고, $nss-Ca^{2+}$, Al, Fe, Ca, Ti, Sr, V, Co 등 전형적인 토양기원 성분들이 높은 적재값을 나타내고 있다. 세 번째 인자는 13.3%의 설명력을 보였고 Na^+ , Cl^- , Na, Mg 등과 같은 해양기원 성분들이 높은 적재값을 보이고 있다. 이러한 요인분석 결과를 종합해 보면 비황사 시의 고산지역 TSP 대기 에어로졸은 인위적 발생기

원의 성분들의 영향이 가장 크고, 다음으로 토양과 해양 기원의 성분들이 크게 영향을 미치고 있는 것으로 추정된다.

Table 10. Comparison of factor analyses for TSP aerosol components between Asian Dust and Non-Asian Dust storm periods.

Species	Asian Dust			Non-Asian Dust		
	fator 1	factor 2	factor 3	fator 1	factor 2	factor 3
NH ₄ ⁺	0.33	0.43	0.60	0.75	0.22	-0.18
Na ⁺	0.09	0.11	-0.85	-0.06	0.08	0.87
K ⁺	0.35	0.63	0.55	0.66	0.40	0.09
nss-Ca ²⁺	0.01	0.83	0.10	0.16	0.76	0.09
Mg ²⁺	0.93	-0.05	-0.21	0.51	0.17	0.57
nss-SO ₄ ²⁻	0.60	0.29	0.54	0.81	0.23	-0.13
NO ₃ ⁻	0.04	0.72	-0.06	0.29	0.42	0.51
Cl ⁻	0.02	-0.04	-0.85	-0.26	0.05	0.82
Al	0.75	0.59	-0.04	0.33	0.79	0.17
Fe	0.81	0.52	0.07	0.35	0.79	0.13
Ca	0.81	0.12	0.11	0.53	0.60	0.30
Na	0.25	0.27	-0.72	0.12	0.16	0.86
K	0.65	0.72	0.06	0.59	0.49	0.20
Mg	0.79	0.55	-0.09	0.24	0.57	0.62
S	0.81	0.40	0.18	0.87	0.27	0.02
Ti	0.60	0.66	-0.16	0.16	0.66	0.25
Mn	0.78	0.55	0.13	0.59	0.54	0.19
Ba	0.77	0.56	0.15	0.33	0.22	0.02
Sr	0.86	0.48	0.03	0.53	0.64	0.39
Zn	0.55	0.28	0.65	0.76	0.25	0.12
V	0.38	0.75	-0.11	0.25	0.65	-0.02
Cr	0.79	0.20	0.45	0.51	0.15	0.15
Pb	0.70	-0.27	0.58	0.85	-0.02	0.19
Cu	0.46	0.70	0.43	0.44	0.29	0.04
Ni	0.54	0.39	0.46	0.12	0.10	-0.05
Co	0.26	0.82	-0.10	0.01	0.73	0.10
Mo	0.51	-0.22	0.60	0.53	0.02	-0.01
Cd	0.66	0.25	0.49	0.59	0.21	0.09
Eigenvalue	10.2	7.0	5.1	7.0	5.7	3.7
Variance(%)	36.5	25.2	18.2	25.0	20.4	13.3
Cummulative(%)	36.5	61.7	79.9	25.0	45.3	58.7

6) 에어로졸 성분의 계절별 농도 비교

TSP 에어로졸의 수용성 성분 농도를 계절별로 비교하여 그 결과를 Table 11 과 Figure 10 에 나타내었다. 결과에서 보듯이 nss-SO_4^{2-} 가 가장 높은 농도를 나타내었고, 봄, 여름, 가을, 겨울철에 각각 8.12, 7.13, 5.83, 6.82 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 봄과 여름철에 더 높은 농도를 나타내었다. SO_4^{2-} 은 대부분 화석연료의 연소에 의해 발생한 SO_2 가 대기 중 화학반응을 통해 SO_4^{2-} 형태로 산화되며, 일사량 및 유기산화물, 탄소, 암모니아 등의 타 오염물질의 농도에 따라 영향을 받는다(강병옥, 1998). 오염 지역의 경우 화석 연료 사용에 의해 겨울철에 nss-SO_4^{2-} 의 농도가 가장 상승하는 것이 일반적인 경향이다. 그러나 청정지역인 고산 지역 대기 에어로졸의 경우 봄, 여름철에 비슷한 경향을 보여, 도시지역과는 다른 경향을 보이고 있다. 이처럼 봄철에 농도가 상승하는 것은 편서풍이 우세한 봄철에 중국의 영향을 많이 받기 때문인 것으로 추정된다. 또 여름철에 nss-SO_4^{2-} 의 농도가 상승하는 것은 해양 영향과 빠른 2차입자로의 전환과 관계가 있는 것으로 보인다. 해수 중에는 DMS가 상당량 함유되어 있으며 자연적 발생원에 의해 방출되는 전체 황의 90~95% 이상을 차지하고 있고, 이렇게 해수면에서 방출되는 DMS는 광화학 반응으로 SO_4^{2-} 을 생성하며 특히 자외선 양이 많은 여름철에 농도가 크게 증가한다(김기현 등, 1997; Pio et al., 1996). 본 연구 결과 nss-SO_4^{2-} 의 농도가 봄과 여름철에 높게 나타나는 것은 이러한 이유에 기인하는 것으로 보인다.

NH_4^+ 의 농도는 봄, 여름, 가을, 겨울철에 각각 2.36, 2.07, 1.87, 1.98 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 봄과 여름에 조금 높은 농도를 나타내었다. 이처럼 봄과 여름철에 농도가 높은 이유는 계절적 요인으로 비료의 사용량 증가 및 높은 기온과 관련이 있는 것으로 보인다. NH_3 의 발생량을 결정하는 가장 중요한 인자는 생물학적 활성(biological activity)과 온도이다(Pio, et al., 1996). 일반적으로 NH_3 은 비료의 사용량 증가에 따른 인위적 영향으로 봄철에 높은 농도를 나타낸다(Carmichael et al., 1997). 반면에 여름철의 경우 동물의 배설물이나 식물의 부패가 높은 기온의 영향으로 활발히 이루어지면서 NH_3 의 발생량이 증가하는 것으로 판단된다.

NO_3^- 의 계절별 평균 농도는 봄, 여름, 가을, 겨울철에 각각 2.93, 1.17, 1.74, 2.37 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 보였는데, nss-SO_4^{2-} 과 유사하게 봄철에 가장 높은 농도를 나타내

었다. 이러한 봄철의 농도 상승은 편서풍에 의한 중국의 오염 영향을 직접적으로 받기 때문인 것으로 판단된다. 그리고 다음으로는 겨울철에 농도가 상승하였다. 겨울철에 NO_3^- 의 농도가 상승하는 것은 난방 연료 등의 에너지 사용량과 관련이 큰 것으로 보인다. 또 NO_3^- 은 nss-SO_4^{2-} , NH_4^+ 와 함께 대표적인 이차 생성 성분으로 nss-SO_4^{2-} 와는 달리 여름철에 온도가 높아짐에 따라 입자상으로 존재하기 보다는 주로 전구물질인 HNO_3 가스상으로 이동하는 특성이 있다(김원형 등, 2008). 또 한 NO_3^- 의 농도가 같은 인위적 기원의 성분인 nss-SO_4^{2-} , NH_4^+ 보다는 발생기원이 다른 nss-Ca^{2+} 과 유사한 농도 변화를 나타내는 것은 TSP에서의 질산염이 주로 토양성분과 NO_x 이 반응한 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 등의 염을 생성하기 때문인 것으로 추정 된다(김나경 등, 2004; Park et al., 2003; Arimoto et al., 1996).

nss-Ca^{2+} 의 평균 농도는 봄, 여름, 가을, 겨울철에 각각 0.42, 0.14, 0.24, 0.27 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 봄철에 훨씬 높은 농도를 나타내었다. 봄철의 농도는 여름철에 비해서 3배 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 우세한 봄과 겨울철에 이처럼 nss-Ca^{2+} 농도가 증가하는 것은 이러한 풍향과 상관성이 큰 것으로 보인다. 특히 황사 영향을 크게 받는 봄철에 이와 같이 nss-Ca^{2+} 농도가 증가하는 것은 제주지역의 대기질이 중국의 영향을 크게 받고 있음을 의미하며, 봄철에 중국에서 발생한 황사가 다량으로 제주 지역 대기 부유 분진에 유입되고 있음을 잘 뒷받침해 주고 있다(박민하 등, 2001; Chun et al., 2001b; Husar et al., 2001).

또한 금속과 황의 주요 20종 원소성분들의 농도를 계절별로 비교하여 그 결과를 Table 12와 Figure 11~12 에 나타내었다. 전체적으로 각 성분들 중에서는 S가 가장 높은 농도를 보였으며, 다음으로 Na, Al, Ca, Fe, K, Mg 등이 비교적 높은 농도를 나타내었다. 그리고 이외의 다른 성분들은 이들에 비해 상대적으로 낮은 농도를 나타내고 있다.

먼저 토양기원 성분들에 대한 계절별 변화를 보면, Al은 봄, 여름, 가을, 겨울철에 평균 농도가 각각 705.9, 295.9, 264.9, 306.0 ng/m^3 로 봄철에 가장 높은 값을 보였으며, 다른 계절에 비해 봄철에 2배 정도 더 큰 농도를 나타내었다. Ca은

봄, 여름, 가을, 겨울철의 평균 농도가 각각 496.8, 164.0, 239.9, 365.4 ng/m³로 여름철에 비해 봄철의 농도가 3배 더 높은 것으로 조사되었다. 또 Fe 역시 봄, 여름, 가을, 겨울철에 각각 494.4, 159.9, 208.0, 285.6 ng/m³로 여름철에 비해 봄철의 농도가 3.1배 더 높은 것으로 조사되었다. 이 외에 토양 기원의 Ti, Sr, Ba 등도 모두 봄철에 가장 높고 여름철에 가장 낮은 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 토양의 지표성분인 Al, Ca, Fe, Ti, Ba, Sr등이 황사가 집중된 봄철에 이와 같이 농도가 증가하는 것은 한반도 대기질이 중국의 영향을 많이 받고 있음을 반증하는 것이며, 대기 에어로졸에 토양입자가 다량으로 유입되고 있음을 잘 뒷받침해 주고 있다(국립환경연구원, 2005).

또한 인위적 기원 성분들의 농도를 계절별로 비교해 보면, S의 농도가 봄, 여름, 가을, 겨울철에 각각 2292.3, 1778.0, 1605.0, 1918.7 ng/m³로, 봄철이 가장 높고 가을철에 가장 낮은 농도를 보이고 있다. 앞에서 언급한 바와 같이 S은 토양과는 무관한 인위적 기원의 성분으로 황사와는 발생기원이 다르다. 그러나 황사 때에 농도가 증가하는 것은 에어로졸에 흡착 또는 반응한 황산염이 황사와 함께 장거리 이동한 것으로 판단된다. 봄철에 S의 농도가 상승하는 것은 이처럼 황사와 봄철에 주류를 이루고 있는 북서풍의 영향으로 추정된다. 또 Pb의 농도는 봄, 여름, 가을, 겨울철에 각각 61.5, 20.4, 37.6, 63.4 ng/m³로 봄철에 가장 높은 농도를 보였다. 그리고 부분적으로 인위적 영향을 받고 있는 Zn의 농도는 봄, 여름, 가을, 겨울철에 각각 64.9, 28.7, 39.8, 59.1 ng/m³로 나타났고, V 또한 봄, 여름, 가을, 겨울철에 각각 9.2, 4.9, 2.5, 3.7 ng/m³로 봄철에 가장 높은 농도를 보였다. 이처럼 인위적 기원의 성분들은 대체적으로 4계절 중 봄철에 가장 높은 경향을 보이고 있다. 그러나 나머지 기간에는 수용성 성분들과는 달리 뚜렷한 계절적 특징을 보이지 않고 있다.

인체에 대한 위해성이 큰 중금속 성분인 Cr, Cd의 계절별 농도를 보면, Cr은 봄, 여름, 가을, 겨울철에 각각 2.77, 1.14, 1.13, 2.22 ng/m³, Cd은 각각 0.99, 0.56,

0.73, 0.91 ng/m³의 농도를 나타내었다. 그리고 두 성분 모두 봄과 겨울철에 높은 농도를 보였고 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 겨울철의 농도 상승은 건조한 대기 상태, 화석연료 사용량, 이 시기에 주류를 이루고 있는 북서풍 풍향 등의 요인에 의한 것으로 사료된다.

Figure 13은 수용성 성분과 금속 원소 성분의 농도를 종합하여 발생원별 조성을 계절별로 비교한 결과이다. 먼저 인위적 발생기원 성분들의 조성을 보면, 봄, 여름, 가을, 겨울에 각각 66.2, 66.1, 61.9, 64.8%로 상대적으로 봄과 여름에 다소 높고, 가을에 가장 낮은 조성을 나타내었다. 봄과 여름에는 앞에서 언급 하였던 듯이 nss-SO₄²⁻와 NH₄⁺의 농도가 높아서 인위적 기원 성분의 조성이 큰 값을 보이는 것으로 추정할 수 있다. 해양기원의 성분들은 봄, 여름, 가을, 겨울 각각 25.7, 29.5, 32.5, 29.5%로 가을에 가장 높았고, 봄에 낮았지만 계절별로 뚜렷한 차이를 보이지 않았다. 토양기원의 성분들은 봄, 여름, 가을, 겨울 각각 8.0, 4.4, 5.6, 5.7%로 봄에 현저하게 높고, 이 시기에 황사의 유입이 크게 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다.

Table 11. Seasonal concentrations ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) of water-soluble components in TSP aerosols.

Components	Spring	Summer	Fall	Winter
NH ₄ ⁺	2.36±18.9	2.07±1.86	1.87±2.36	1.98±1.49
Na ⁺	2.16±1.44	1.89±1.41	1.94±1.18	2.20±1.37
K ⁺	0.45±0.31	0.24±0.27	0.33±0.32	0.45±0.33
nss-Ca ²⁺	0.42±0.44	0.14±0.15	0.24±0.27	0.27±0.27
Mg ²⁺	0.50±0.65	0.21±0.14	0.26±0.25	0.38±0.33
nss-SO ₄ ²⁻	8.12±6.44	7.13±6.37	5.83±6.10	6.82±4.30
NO ₃ ⁻	2.93±2.00	1.17±0.86	1.74±1.09	2.37±1.73
Cl ⁻	1.70±1.91	1.27±1.75	1.67±1.89	1.86±2.07

Table 12. Seasonal concentrations (ng/m³) of metal and sulfur elements in TSP aerosols.

Elements	Spring	Summer	Fall	Winter
Al	705.9±868.4	295.9±268.9	264.9±196.9	306.0±325.0
Fe	480.6±619.4	171.6±225.9	203.1±182.9	282.4±222.2
Ca	496.8±563.1	164.0±163.5	239.9±214.0	365.4±354.4
Na	1266.6±941.5	954.5±576.8	973.0±689.5	1158.8±900.3
K	404.0±385.0	215.5±264.9	296.1±311.1	314.4±227.7
Mg	322.5±322.8	155.0±92.7	176.8±109.8	220.0±123.4
S	2292.3±1786.4	1778.0±1221.9	1605.0±1688.7	1918.7±1146.9
Ti	33.7±33.0	11.8±12.7	14.6±13.1	16.9±18.3
Mn	22.6±21.1	6.7±6.7	12.5±15.1	17.9±15.3
Ba	10.1±21.3	2.7±5.1	2.8±2.5	5.4±7.5
Sr	4.1±4.2	1.6±1.8	2.2±1.7	3.2±2.6
Zn	64.9±71.4	28.7±30.6	39.8±38.0	59.1±64.2
V	9.2±10.7	4.9±3.5	2.5±1.8	3.7±3.1
Pb	61.5±117.0	20.4±23.4	37.6±49.1	63.4±97.8
Cr	2.8±3.1	1.1±1.3	1.1±1.3	2.2±2.5
Cu	5.9±9.7	3.0±3.0	4.6±8.8	4.4±3.4
Ni	4.0±3.0	6.0±17.8	2.1±1.8	3.3±3.4
Co	1.1±1.9	0.4±0.5	0.4±0.6	0.4±0.5
Mo	1.2±1.3	1.0±0.9	0.7±0.6	1.1±0.9
Cd	1.0±0.8	0.6±0.6	0.7±1.3	0.9±0.8

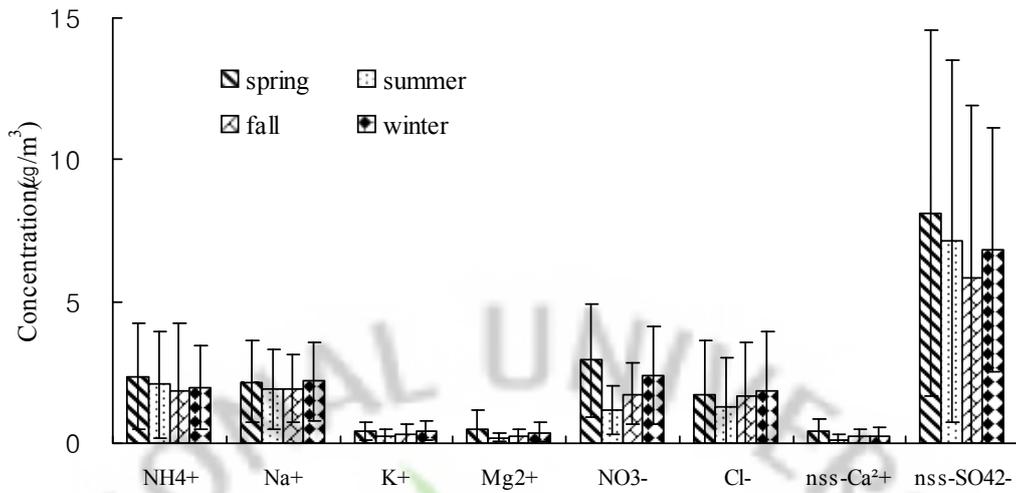


Figure 10. Seasonal comparison of concentrations of water-soluble components in TSP aerosols.

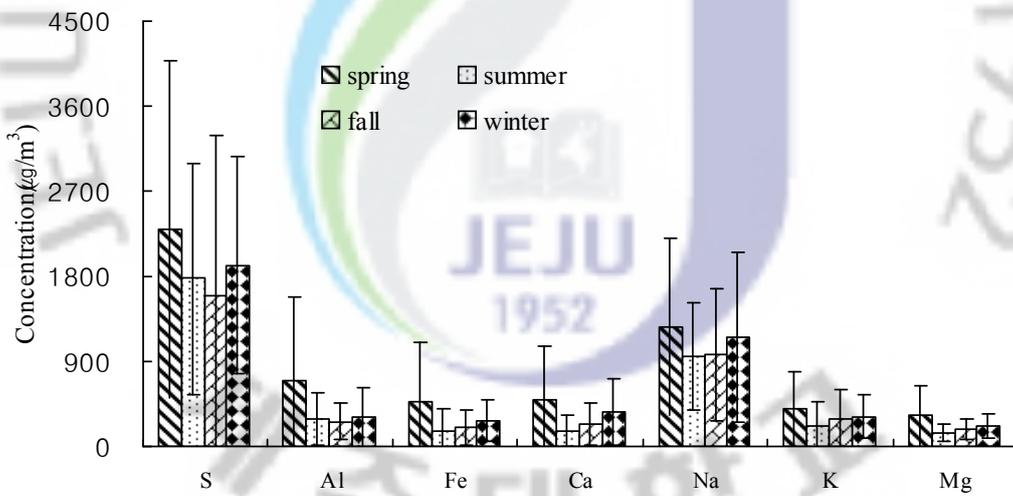


Figure 11. Seasonal comparison of concentrations of sulfur and metal elements in TSP aerosols.

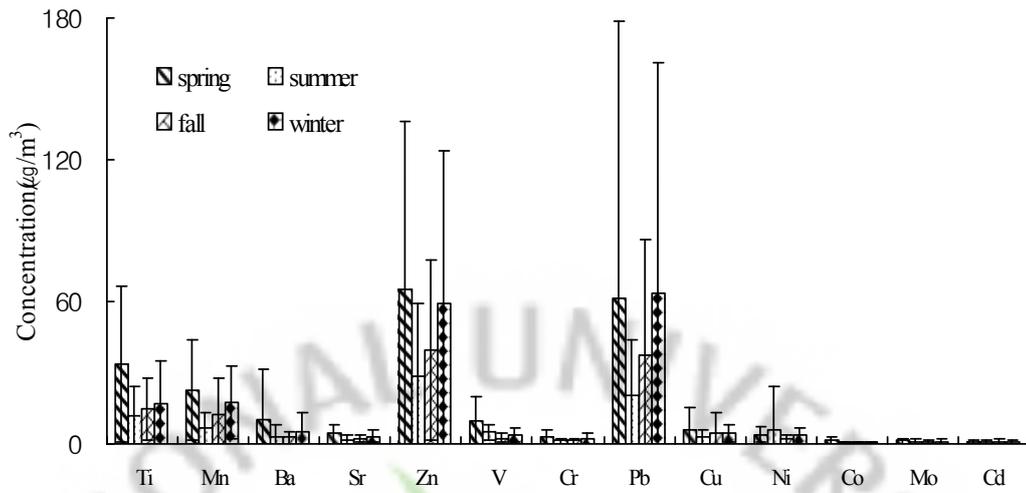


Figure 12. Seasonal comparison of concentrations of metal elements in TSP aerosols.

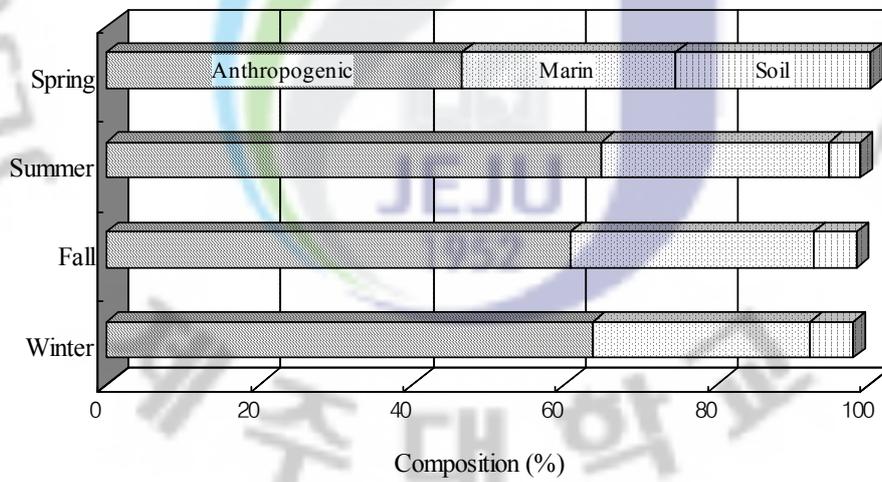


Figure 13. Seasonal comparison of aerosol compositions by emission sources.

2. 공기 유입경로별 화학 조성 비교

1) 공기 유입경로별 조성 비교

Kim 등 (1998)은 1994년 봄철에 제주도 고산을 중심으로 동북아시아 지역을 5개 권역으로 나누어 공기덩어리(air parcel)의 이동경로별로 에어로졸 조성을 비교하였다. 또 김용표 등(1996a)은 1994년 3월~4월에 고산에서 TSP 에어로졸을 분석하고 역궤적 분석을 통해 에어로졸 성분들이 대부분 중국대륙으로부터 유입되고 있음을 확인하였다. 그리고 이 지역에서 여름에 측정된 TSP 및 PM_{2.5} 입자는 한반도 및 일본을 경유한 오염된 공기와 북태평양에서 발원한 깨끗한 공기에 의해 수송(transport)되고 있음을 규명하였다(김용표 등, 1996b). 또 강창희 등(2007)도 제주지역을 중심으로 주변 지역을 세 구역으로 나누고 역궤적 분석을 통해 대기 에어로졸 성분의 발원 및 이동경로를 비교한 바 있다.

본 연구에서는 공기의 이동경로에 따른 에어로졸의 조성 변화를 조사하기 위한 목적으로 유입경로를 3개의 구간으로 나누어 각 구간별로 그 조성을 비교하였다. 공기의 이동경로는 한반도 및 시베리아 지역 (I 영역), 중국대륙 (II영역), 일본 및 북태평양 지역 (III영역)으로 분류하고, 역궤적 분석을 통해 공기덩어리의 이동경로를 추적하였다. 이 때 역궤적 분석은 HYSPLIT4 모델 (NOAA)을 이용하여 시료채취 시기를 기준으로 모사시간을 5일(120시간)로 설정하였다.

3개의 구간으로 분류하여 영역별로 공기의 이동경로를 비교해 본 결과, 그 빈도는 I 영역 13.1%, II영역 65.3%, III영역 15.0%, 그 외의 영역 6.6%로, 연구기간에 중국대륙으로부터 공기의 유입이 가장 많았던 것으로 조사되었다(Figure 14~15). 그리고 각 영역별로 TSP 에어로졸 성분의 농도를 비교해 본 결과, 해염 성분(Na⁺, Cl⁻)을 제외한 나머지 대부분의 성분들이 II영역에서 가장 높은 농도를 나타내었다.

또한 주요 에어로졸 성분들의 농도를 구간별로 비교해 본 결과, 인위적 기원의 nss-SO₄²⁻과 S 농도는 I 영역에서 두 성분이 각각 6.83, 1.79 µg/m³, II영역에서 7.65, 2.09 µg/m³, III영역에서는 3.73, 1.09 µg/m³로, 이들 성분들은 II영역에서 가장 높은 농도를 나타내었다. 반면에 III영역에서는 II영역에 비해 2배 정도 더 낮은 농도를 나타내었다. 그리고 NO₃⁻ 농도는 I 영역에서 1.89 µg/m³, II영역에

서 $2.28 \mu\text{g}/\text{m}^3$, III영역에서 $1.47 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로, NO_3^- 역시 nss-SO_4^{2-} , S과 마찬가지로 II영역에서 가장 높고 III영역에서 가장 낮은 농도를 나타내었다.

또 주요 토양기원 성분인 nss-Ca^{2+} , Al, Fe, Ca의 농도는 I영역에서 각각 $0.23, 0.40, 0.27, 0.26 \mu\text{g}/\text{m}^3$, II영역에서 $0.33, 0.45, 0.34, 0.39 \mu\text{g}/\text{m}^3$, III영역에서 $0.10, 0.20, 0.10, 0.12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도를 나타내어 이 역시 앞의 인위적 성분들과 마찬가지로 II영역에서 가장 높은 경향을 보였다. 그리고 Mn, Zn, Cr, Pb, Cu, Cd 등의 주요 중금속 성분들 농도 역시 I영역에서 각각 $15.2, 38.7, 1.9, 36.4, 4.3, 0.8 \text{ ng}/\text{m}^3$, II영역에서 $18.0, 59.4, 2.1, 56.6, 5.1, 0.9 \text{ ng}/\text{m}^3$, III영역에서 $5.0, 17.3, 0.9, 13.8, 2.7, 0.4 \text{ ng}/\text{m}^3$ 로 앞의 인위적 및 토양 성분들과 마찬가지로 II영역에서 높고 III영역에서 가장 낮은 농도를 나타내는 것으로 확인되었다. 그러나 해염의 지표 성분인 Na^+ 과 Cl^- 는 I영역에서 각각 $1.84, 1.40 \mu\text{g}/\text{m}^3$, II영역에서 $2.08, 1.67 \mu\text{g}/\text{m}^3$, III영역에서 $2.31, 2.01 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로, III영역에서 오히려 높은 값을 보여 앞의 인위적 및 토양 기원의 성분들과는 상반된 경향을 나타내었다.

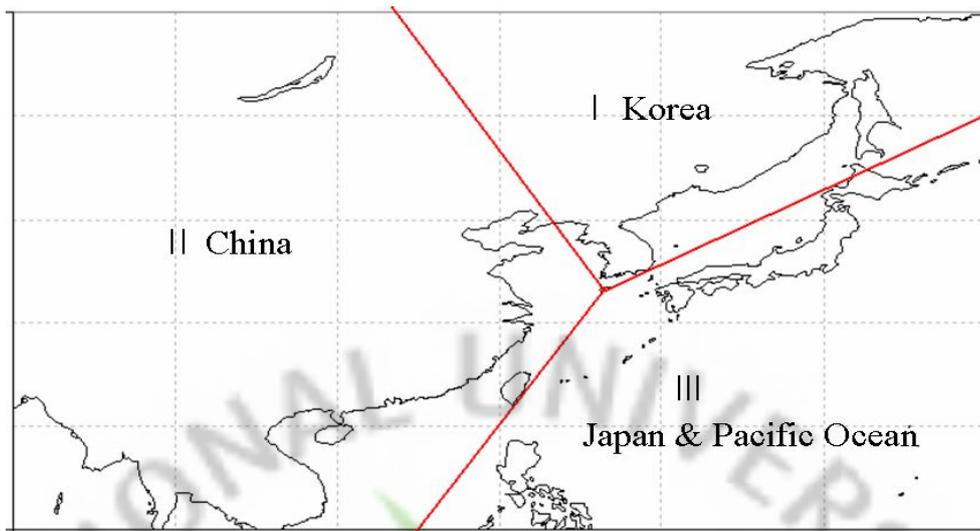


Figure 14. Three sectional classification of Northeast Asia for backward trajectory analysis starting from Gosan area.

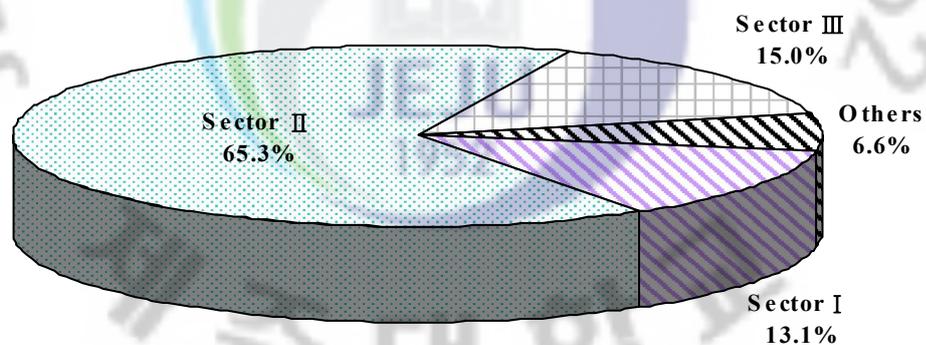


Figure 15. Comparison of sectional inflow pathways of air parcels moving into Gosan area.

Table 13. Sectional concentrations of TSP aerosol components corresponding to the inflow pathway of air parcels.

Species	Sector I	Sector II	Sector III
	Concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		
NH_4^+	2.03±1.70	2.24±2.00	1.11±1.06
Na^+	1.84±1.24	2.08±1.39	2.31±1.42
K^+	0.34±0.25	0.43±0.35	0.16±0.16
nss- Ca^{2+}	0.23±0.16	0.33±0.37	0.10±0.10
Mg^{2+}	0.27±0.23	0.39±0.49	0.23±0.13
nss- SO_4^{2-}	6.83±6.09	7.65±6.13	3.73±2.91
NO_3^-	1.89±1.41	2.28±1.79	1.47±1.11
Cl^-	1.40±1.63	1.67±1.96	2.01±2.20
	Concentration (ng/m^3)		
Al	400.1±314.6	451.6±625.4	199.3±140.9
Fe	271.1±213.4	341.1±444.7	98.5±89.4
Ca	258.5±242.3	389.6±440.7	118.8±77.7
Na	1080.1±747.9	1123.5±861.0	1086.7±663.5
K	299.0±226.7	358.3±338.0	138.6±188.6
Mg	205.4±162.1	243.5±228.8	159.5±85.3
S	1791.5±1018.9	2091.2±1644.7	1089.3±650.6
Ti	20.9±17.2	22.0±25.9	8.5±6.3
Mn	15.2±18.8	18.0±17.7	5.0±5.2
Ba	4.0±4.4	6.6± 14.5	1.3±1.2
Sr	2.3±1.8	3.3±3.3	1.3±0.7
Zn	38.7±26.3	59.4±63.8	17.3±24.5
V	5.3±4.9	5.5±7.5	3.4±2.4
Cr	1.9±2.6	2.1±2.4	0.9±1.2
Pb	36.4±46.0	56.6±97.3	13.8±27.3
Cu	4.3±3.7	5.1±8.2	2.6±5.5
Ni	5.0±17.9	3.8±6.5	2.9±6.3
Co	0.4±0.7	0.7±1.3	0.3±0.4
Mo	0.9±0.7	1.1±1.1	0.8±0.8
Cd	0.8±0.6	0.9±1.1	0.4±0.4

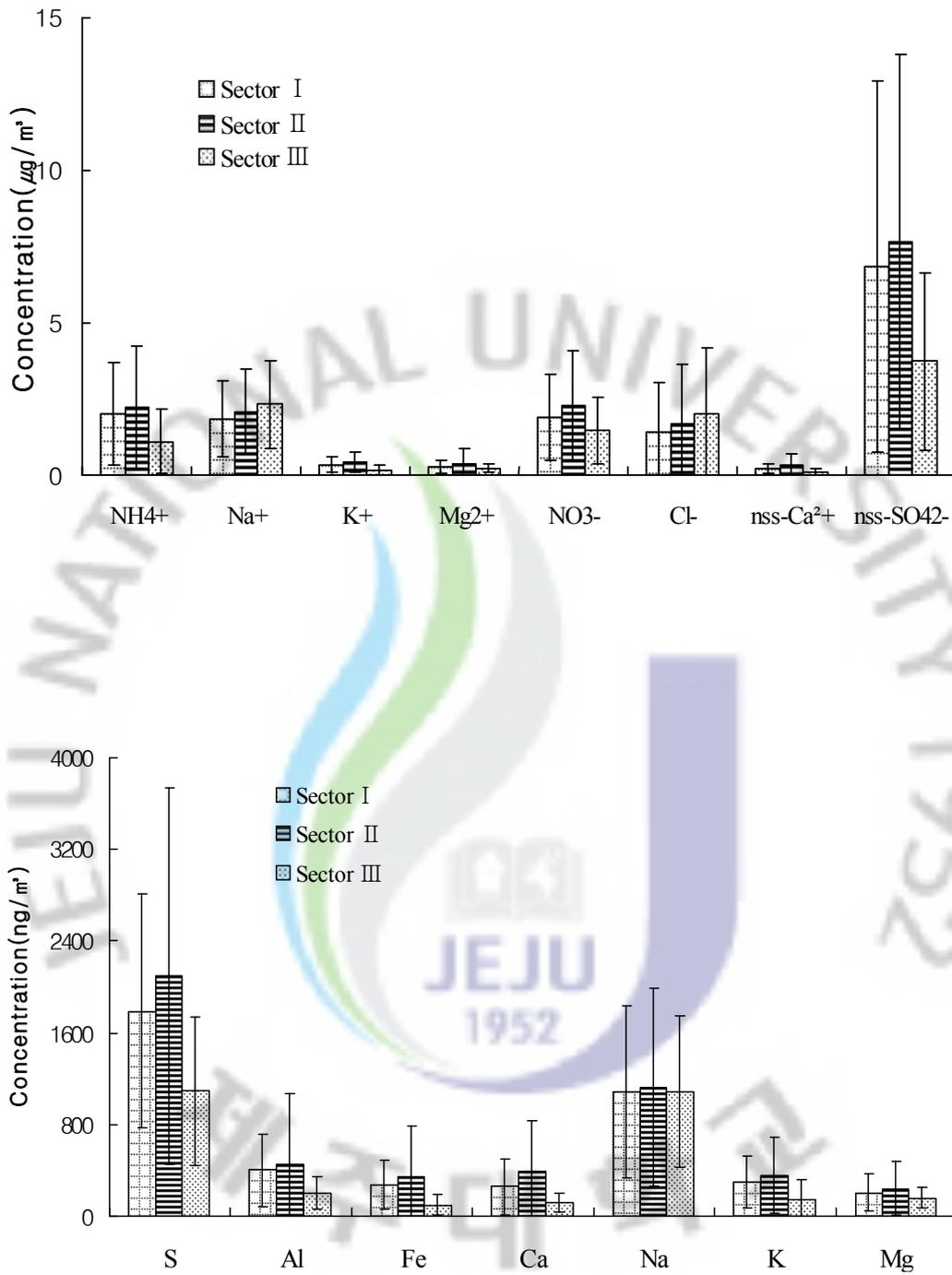


Figure. 16. Sectional comparison of concentrations of TSP aerosol components corresponding to the inflow pathway of air parcels.

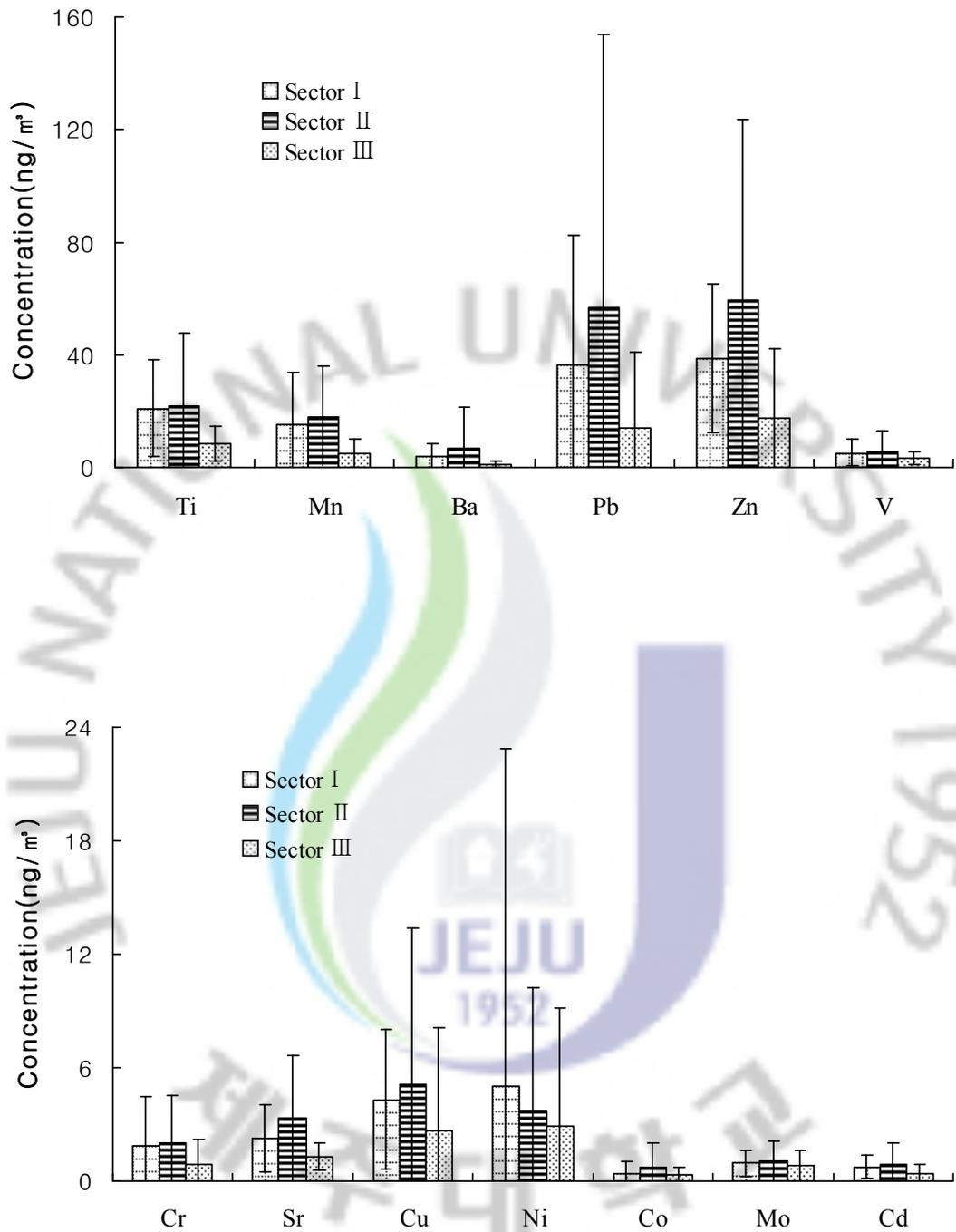


Figure. 17. Sectional comparison of concentrations of TSP aerosol components corresponding to the inflow pathway of air parcels.

2) 해양 및 토양의 영향

연구기간에 측정된 각 성분들의 농도와 공기 유입경로별 평균농도를 이용하여 해양 농축인자와 토양 농축인자를 구하고 그 결과를 Table 14~15와 Figure 18~19에 수록하였다. 먼저 유입경로별로 Na^+ 을 기준으로 해양 농축인자를 구한 결과를 보면, Cl^- 는 I, II, III영역에서 모두 0.4 정도의 값을 보여 TSP 에어로졸의 염소 성분은 대부분 해양에서 유래되는 것으로 나타났다. 그리고 Mg^{2+} 은 I영역 1.5, II영역 1.9, III영역 0.9로, III영역의 경우 대부분 해양에서 유래되고 이에 비해 I, II영역에서는 다소 다른 영향을 받은 것으로 추정된다. 또 Ca^{2+} , K^+ 의 농축인자는 I영역에서 각각 5.5, 6.9, II영역에서 6.5, 7.3, III영역에서 2.4, 2.1로 대체적으로 해양의 영향을 적게 받고, I, II영역보다 III영역에서 상대적으로 해양의 영향을 많이 받은 것으로 나타났다. 반면에 SO_4^{2-} 의 해양 농축인자는 10.7~25.0으로 비교적 큰 값을 나타내어 SO_4^{2-} 은 해양의 영향보다는 다른 요인들에 의해 대기 에어로졸에 유입되고 있음을 알 수 있었다.

또한 Al을 기준으로 토양 농축인자를 구하고 이를 유입경로별로 비교해 본 결과, Ca, Fe, K, Mg, Ti, Mn, Cu, Cd 등이 이 각각 2.1~2.7, 1.4~2.2, 2.8~3.0, 4.2~7.7, 5.7~7.5, 3.9~7.0, 4.6~5.9, 1.9~2.8의 범위를 보였다. 이처럼 이들 성분들이 대체적으로 낮은 농축인자를 나타내는 것으로 보아, 이들 성분들은 주로 토양에서 유래되고 있음을 알 수 있었다. 반면에 Na, Zn, V, Pb, Ni, Co 등은 비교적 큰 농축인자를 보였고, 이들 성분들은 토양보다는 다른 요인들에 의해 에어로졸에 유입되고 있는 것으로 추정된다.

Table 14. Sectional comparison of sea-salt enrichment factors for water-soluble components of TSP aerosols.

Species (X)	Crust ratio	$(C_x/C_{Na^+})_{\text{Aerosol}} / (C_x/C_{Na^+})_{\text{Seawater}}$			
		Sector I	Sector II	Sector III	overall
K ⁺	0.04	6.9	7.3	2.1	6.4
Mg ²⁺	0.12	1.5	1.9	0.9	1.7
Cl ⁻	1.80	0.4	0.4	0.4	0.4
Ca ²⁺	0.04	5.5	6.5	2.4	5.6
SO ₄ ²⁻	0.25	25.0	23.2	10.7	21.7

Table 15. Sectional comparison of soil enrichment factors for metal elements of TSP aerosols..

Species (X)	Crust ratio	$(C_x/C_{Al})_{\text{Aerosol}} / (C_x/C_{Al})_{\text{Crust}}$			
		Sector I	Sector II	Sector III	overall
Fe	0.4353	1.8	2.2	1.4	2.0
Ca	0.3731	2.1	2.7	2.3	2.5
Na	0.3595	11.6	12.7	23.8	14.0
K	0.3483	2.8	3.0	2.9	3.0
Mg	0.1654	4.2	4.9	7.7	5.2
Ti	0.0093	6.9	7.5	5.7	7.0
Mn	0.0075	5.7	7.0	3.9	6.2
Zn	0.0009	143.8	219.8	142.9	193.9
V	0.0007	22.5	25.6	35.4	26.5
Pb	0.0002	606.4	925.5	499.2	806.8
Cu	0.0003	4.6	5.6	5.9	5.5
Ni	0.0002	68.6	83.7	88.6	84.1
Co	0.0001	11.8	24.4	22.0	21.7
Cd	0.0012	1.9	2.8	2.6	2.6

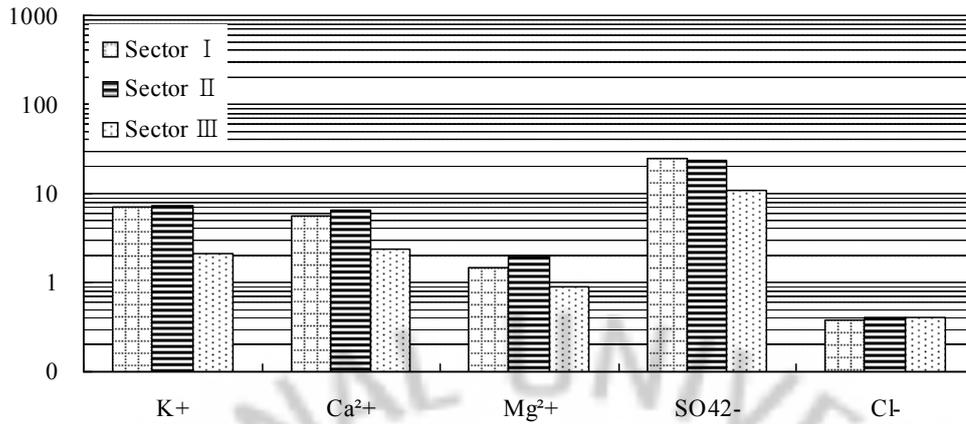


Figure 18. Sectional comparison of sea-salt enrichment factors for water-soluble components of TSP aerosols.

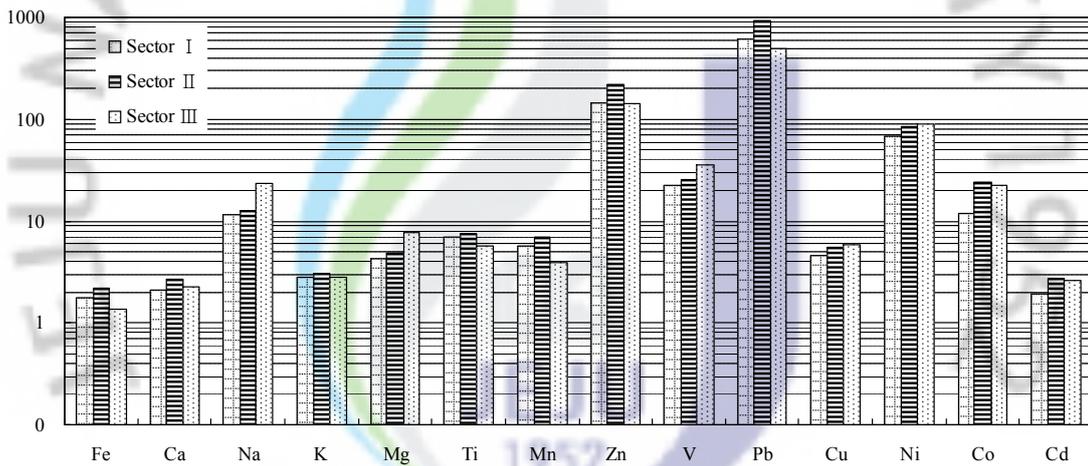


Figure 19. Sectional comparison of soil enrichment factors for metal elements of TSP aerosols.

3) 유입경로별 에어로졸 성분의 발생기원

공기의 이동경로에 따른 TSP 에어로졸 성분의 발생기원을 파악하기 위하여 앞에서 구분한 3개 구간에 대해 각각 요인분석을 실시하였다. 이 때 최적인자의 수는 고유값 1 이상으로 각각 4개의 인자를 추출하였고, 베리맥스회전법을 이용하였다. 그리고 이렇게 구한 요인분석 결과를 Table 16에 수록하였다.

표의 결과와 같이 I 영역의 경우, 4개의 인자를 추출했을 때 전체적으로 66.1%의 설명력을 보였다. 그리고 첫 번째 인자는 26.4%의 설명력을 보였고, Mg^{2+} , NO_3^- , Fe, Ca, K, Mg, Ba, Sr, Zn, Pb, Cd 등이 비교적 높은 적재값을 나타내었다. 이들 성분들은 대체적으로 토양 기원의 성분들이고 일부 인위적 성분이 서로 혼재되어 나타나고 있다. 두 번째 인자는 17.2%의 설명력을 보였고, Na^+ , Cl^- , Na 등이 높은 적재값을 나타내는 것으로 보아 해양 성분이 유입되었을 가능성을 의미한다. 세 번째 인자는 13.7%의 설명력을 보였고 대표적인 인위적 기원 성분인 NH_4^+ , $nss-SO_4^{2-}$, S이 높은 적재값을 나타내었다. 네 번째 인자는 8.7%의 설명력을 보이고 Cu, Ni만이 높은 적재값을 나타내었다. 이러한 요인분석 결과를 종합해 보면, 한반도와 시베리아 지역(I 영역)에서 제주지역으로 공기가 유입되었을 때 대기 에어로졸은 토양 성분의 영향을 가장 많이 받고, 다음으로 해염과 인위적 기원 성분들의 영향을 많이 받는 것으로 추정된다.

II 영역의 인자분석 결과에서는 전체적으로 68.2%의 설명력을 보였다. 그리고 첫 번째 인자는 25.0%의 설명력을 보였고, $nss-Ca^{2+}$, Al, Fe, K, Mg, Ti, Mn, Sr, V, Co 성분이 높은 적재값을 나타내었다. 이들 성분들은 대표적인 토양 성분들로 토양 입자의 유입에 의한 영향을 많이 받고 있음을 의미한다. 두 번째 인자는 17.6%의 설명력을 보였고 NH_4^+ , K^+ , $nss-SO_4^{2-}$, S, Zn이 높은 적재값을 내었으며, 이들은 모두 대표적인 인위적 기원의 성분들이다. 그리고 세 번째와 네 번째 인자는 각각 14.3%와 11.3%의 설명력을 보였고, Mg^{2+} , Cr, Pb, Mo과 Na^+ , Cl^- , Na이 높은 적재값을 나타내었으며, 이들 성분들은 대부분 해양 기원의 성분들이다.

III 영역은 전체적으로 63.6%의 설명력을 보였다. 그리고 첫 번째 인자는 26.6%의 설명력을 보였고, NH_4^+ , K^+ , $nss-SO_4^{2-}$, K, S, Mn, Ba, Zn, Pb, Cd 성분이 높은 적재값을 나타내어 인위적 오염의 영향이 비교적 크게 작용하고 있음을 알 수 있었다. 두 번째 인자는 18.9%의 설명력을 보였고, 해염성분의 Na^+ , Mg^{2+} , Cl^- , Na, Mg, Sr의 적재값이 높게 나타났다. 세 번째와 네 번째 인자는 Al, Fe, Ti, V 과 $nss-Ca^{2+}$ 의 적재값이 높게 나타났고 이 성분들 대부분 토양입자의 구성 성분들로 토양 성분들의 유입에 의한 영향을 받고 있음을 의미한다.

Table 16. Sectional comparison of factor analyses for aerosol components.

Species	Sector I				Sector II				Sector III			
	fator 1	factor 2	factor 3	factor 4	fator 1	factor 2	factor 3	factor 4	fator 1	factor 2	factor 3	factor 4
NH ₄ ⁺	0.06	-0.11	0.92	0.02	0.14	0.89	0.10	-0.07	0.68	-0.25	0.15	0.06
Na ⁺	0.09	0.84	-0.08	-0.10	0.11	0.05	-0.04	0.93	-0.07	0.88	-0.04	-0.01
K ⁺	0.40	0.00	0.57	0.03	0.32	0.79	0.08	0.13	0.86	0.23	0.04	0.11
nss-Ca ²⁺	0.27	0.63	0.31	0.09	0.75	0.31	-0.12	0.12	0.36	0.18	0.19	0.64
Mg ²⁺	0.70	0.46	-0.06	-0.11	0.36	0.11	0.62	0.37	0.01	0.87	0.08	-0.08
nss-SO ₄ ²⁻	0.08	-0.03	0.93	0.02	0.16	0.87	0.24	-0.04	0.74	-0.25	0.27	0.23
NO ₃ ⁻	0.64	0.45	-0.01	-0.05	0.44	0.29	0.11	0.49	0.50	0.48	-0.29	-0.09
Cl ⁻	0.04	0.73	-0.35	-0.12	0.14	-0.19	-0.10	0.85	-0.31	0.81	-0.16	-0.05
Al	0.48	0.39	0.26	0.23	0.87	0.13	0.37	0.10	0.04	0.15	0.60	-0.17
Fe	0.77	0.33	0.14	0.42	0.84	0.12	0.42	0.05	0.65	0.05	0.66	-0.01
Ca	0.85	0.38	0.03	0.06	0.58	0.24	0.59	0.15	0.48	0.49	0.38	0.44
Na	0.43	0.67	-0.22	-0.03	0.16	0.08	0.20	0.84	0.06	0.88	0.20	-0.02
K	0.69	0.09	0.14	0.14	0.63	0.47	0.32	0.17	0.76	0.31	0.03	0.07
Mg	0.71	0.59	-0.02	0.00	0.75	0.08	0.40	0.37	0.10	0.88	0.14	0.09
S	0.43	-0.05	0.78	0.23	0.31	0.74	0.44	0.07	0.68	-0.10	0.40	0.42
Ti	0.12	0.68	0.04	0.17	0.72	0.16	0.17	0.28	0.16	0.19	0.74	0.10
Mn	0.44	0.14	0.27	-0.02	0.64	0.43	0.46	0.16	0.69	0.17	0.40	0.12
Ba	0.62	0.22	0.35	0.15	0.29	0.10	0.42	-0.07	0.70	0.23	0.23	-0.34
Sr	0.79	0.50	0.01	0.11	0.70	0.31	0.49	0.26	0.48	0.73	0.24	0.12
Zn	0.85	-0.03	0.27	0.20	0.22	0.65	0.45	0.06	0.87	0.08	0.13	0.06
V	0.03	0.28	0.58	0.48	0.82	0.17	0.09	0.05	0.14	0.06	0.76	0.04
Cr	0.29	0.10	0.02	0.37	0.26	0.25	0.63	0.07	0.54	-0.09	0.23	0.09
Pb	0.81	-0.10	0.14	-0.04	-0.09	0.55	0.69	0.07	0.78	-0.05	-0.06	0.01
Cu	0.22	0.05	0.19	0.83	0.25	0.39	0.28	0.01	0.33	-0.03	0.17	0.03
Ni	-0.04	-0.07	0.00	0.85	0.08	0.10	0.13	0.10	0.25	-0.16	0.56	-0.09
Co	-0.02	0.74	0.27	0.22	0.82	0.14	-0.08	0.11	0.12	0.04	0.09	-0.52
Mo	0.49	-0.33	0.08	0.13	-0.05	0.28	0.62	-0.13	0.14	-0.02	-0.05	0.50
Cd	0.62	-0.07	0.22	0.36	0.14	0.49	0.37	0.04	0.63	0.21	0.23	-0.44
Eigenvalue	7.4	4.8	3.8	2.4	7.0	4.9	4.0	3.2	7.4	5.3	3.3	1.8
Variance(%)	26.4	17.2	13.7	8.7	25.0	17.6	14.3	11.3	26.6	18.9	11.8	6.4
Cummulative(%)	26.4	43.6	57.3	66.1	25.0	42.6	56.9	68.2	26.6	45.5	57.3	63.6

4) 계절 및 유입경로별 조성 비교

(1) 봄철의 유입경로별 조성 비교

연구기간 중 봄철에 공기의 이동경로는 I 영역 19.7%, II영역 75.4%, III영역 4.9%의 빈도를 나타내었다(Figure 22). 그리고 봄철의 TSP 에어로졸 조성을 유입경로별로 나누어 상호 비교해 본 결과, 인위적 기원의 $nss-SO_4^{2-}$ 과 S 농도는 I 영역에서는 두 성분이 각각 $5.97, 1.79 \mu g/m^3$, II영역에서 $9.10, 2.54 \mu g/m^3$, III영역에서 $3.78, 1.31 \mu g/m^3$ 로, II영역에서 가장 높은 농도를 보였고 III영역에서는 II영역에 비해 2배 정도 낮은 농도를 나타내었다. 또 NO_3^- 은 I 영역에서 $2.49 \mu g/m^3$, II영역에서 $3.09 \mu g/m^3$, III영역에서 $2.88 \mu g/m^3$ 로, II영역에서 가장 높은 농도를 보였지만 I 영역에서 가장 낮아 $nss-SO_4^{2-}$, S과는 다소 다른 경향을 나타내었다. 또한 대표적인 토양기원의 $nss-Ca^{2+}$ 과 Al은 I 영역에서 각각 $0.27, 0.51 \mu g/m^3$, II영역에서 $0.48, 0.81 \mu g/m^3$, III영역에서 $0.13, 0.27 \mu g/m^3$ 의 농도를 나타내어 이 역시 앞의 성분들과 마찬가지로 II영역에서 가장 높은 경향을 보였다. 그러나 해염 성분인 Na^+ 은 I 영역에서 $1.88 \mu g/m^3$, II영역에서 $2.23 \mu g/m^3$, III영역에서 $2.70 \mu g/m^3$ 로, III영역에서 가장 높은 값을 보여 앞의 인위적 및 토양기원의 성분들과는 상반된 경향을 나타내는 것으로 조사되었다(Table 17). 이러한 결과들을 종합해 보면, 봄철에는 인위적 성분들과 토양성분들이 주로 중국대륙에서 유입되어 제주지역 대기질에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

(2) 여름철 유입경로별 조성 비교

여름철 공기의 유입경로는 I 영역 12.5%, II영역 46.7%, III영역 40.8%의 빈도를 나타내어 봄철에 비해 III영역에서의 빈도가 높은 경향을 보였다(Figure 22). 그리고 에어로졸 성분의 농도를 세 개의 이동 구간별로 비교해 본 결과, 인위적 기원의 $nss-SO_4^{2-}$ 과 S 농도는 I 영역에서 각각 $12.59, 2.67 \mu g/m^3$, II영역에서 $8.77, 2.11 \mu g/m^3$, III영역에서 $3.56, 1.02 \mu g/m^3$ 로, I 영역에서 가장 높고 이에 비해 III영역에서는 아주 낮은 농도를 보였다. NO_3^- 은 I 영역에서 $1.32 \mu g/m^3$, II영역에서 $1.15 \mu g/m^3$, III영역에서 $1.17 \mu g/m^3$ 로 I 영역에서 가장 높은 농도를 나타내었고 II영역에서 낮은 농도를 나타내었다. 또한 대표적인 토양기원의 $nss-Ca^{2+}$ 과 Al은 I 영역에서 각각 $0.22, 0.44 \mu g/m^3$, II영역에서 $0.15, 0.32 \mu g/m^3$,

Ⅲ영역에서 0.10, 0.22 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도를 나타내어 이 역시 앞의 성분들과 마찬가지로 I 영역에서 가장 높은 경향을 보였다. 이러한 결과로 보아 여름에는 중국대륙의 영향보다는 한반도, 즉 우리나라 자체 오염원의 영향을 더 많이 받고 있는 것으로 추정된다. 그러나 해염 성분인 Na^+ 은 I 영역에서 1.33 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, II영역에서 1.80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, III영역에서 2.29 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로, III영역에서 가장 높은 값을 보여 앞의 인위적 및 토양 기원의 성분들과는 상반된 경향을 나타내는 것으로 조사되었다 (Table 18).

(3) 가을철 유입경로별 조성 비교

가을철 공기의 유입경로는 I 영역 18.4%, II영역 63.1%, III영역 18.4%의 빈도를 나타내어 II영역에서의 빈도가 가장 높은 것으로 나타났다(Figure 22). 구간별 TSP 성분의 농도를 비교해 본 결과, 인위적 기원의 nss-SO_4^{2-} 과 S 농도는 I 영역에서는 각각 4.48, 1.31 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, II영역에서는 6.51, 1.77 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, III영역에서는 3.40, 0.93 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 II영역에서 가장 높은 농도를 보였고 III영역에서 낮은 농도를 보였다. 그리고 NO_3^- 은 I 영역에서 1.66 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, II영역에서 1.81 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, III영역에서 1.62 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 II영역에서 가장 높은 농도를 나타내었고 III영역에서 낮은 농도를 나타내었다. 또 대표적인 토양기원인 nss-Ca^{2+} 과 Al은 I 영역에서 각각 0.21, 0.30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, II영역에서 0.32, 0.29 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, III영역에서 0.07, 0.14 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도를 나타내어 nss-Ca^{2+} 은 II영역에서, Al은 I 영역에서 가장 높은 경향을 보였다. 그러나 해염 성분인 Na^+ 은 I 영역에서 2.06 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, II영역에서 1.85 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, III영역에서 2.33 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로, III영역에서 가장 높은 값을 보여 앞의 인위적 및 토양 기원의 성분들과는 상반된 경향을 나타내었다(Table 19).

(4) 겨울철 유입경로별 조성 비교

겨울철 공기의 유입경로는 I 영역 3.8%, II영역 93.2%, III영역 3.0%의 빈도를 나타내어 겨울철에는 거의 대부분 II영역에서 공기가 이동한 것으로 조사되었다(Figure 22). TSP 성분의 농도를 비교해 본 결과, 인위적 기원의 nss-SO_4^{2-} 과 S 농도는 I 영역에서는 각각 6.65, 1.66 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, II영역에서 6.70, 1.92 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, III영역에서 7.91, 1.89 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로, nss-SO_4^{2-} 는 III영역에서 가장 높고, S는 II와 III

영역에서 비슷한 수준의 농도를 보였다. 또 NO_3^- 은 I 영역 1.56 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, II 영역 2.44 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, III영역 1.69 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 II영역에서 가장 높은 농도를 나타내었고 I 영역에서 낮은 농도를 나타내었다. 또한 대표적인 토양기원의 nss-Ca^{2+} 과 Al은 I 영역에서 각각 0.17, 0.19 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, II영역에서 0.28, 0.32 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, III영역에서 0.14, 0.19 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도를 나타내어 II영역에서 가장 높은 경향을 보였다. 여기서 인위적 기원인 NO_3^- 이 전혀 발생기원이 다른 토양 성분들과 같은 경향을 보이는 것은 특이한 현상이다. 이러한 원인은 NO_3^- 이 토양 기원의 에어로졸 성분들과 반응하거나 흡착된 상태로 한반도로 이동했기 때문인 것으로 판단된다. 그리고 해염 성분인 Na^+ 은 I 영역에서 1.96 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, II영역에서 2.24 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, III영역에서 1.81 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로, II영역에서 가장 높은 값을 보였다. 김나경 (2004)은 TSP의 질산염의 경우 Na^+ , Cl^- 등의 해염성분과 함께 농도가 증가한다고 보고하였고, Ro et al. (2001b)은 고산에서 많은 양의 질산염이 해염입자와 반응하여 NaNO_3 등의 형태로 존재한다고 보고하였다. 또 Zhuang et al.(1999)은 홍콩에서 조대입자 중 많은 양의 질산염이 해염입자와의 반응에 의해 생성되는 것으로 보고하였다. 이러한 선행 연구 결과들을 감안하면, II영역에서 Na^+ 농도가 높게 나타난 것은 NO_3^- 와의 반응에 의해 질산염이 생성된 원인 때문으로 추정해 볼 수도 있다 (Table 20).

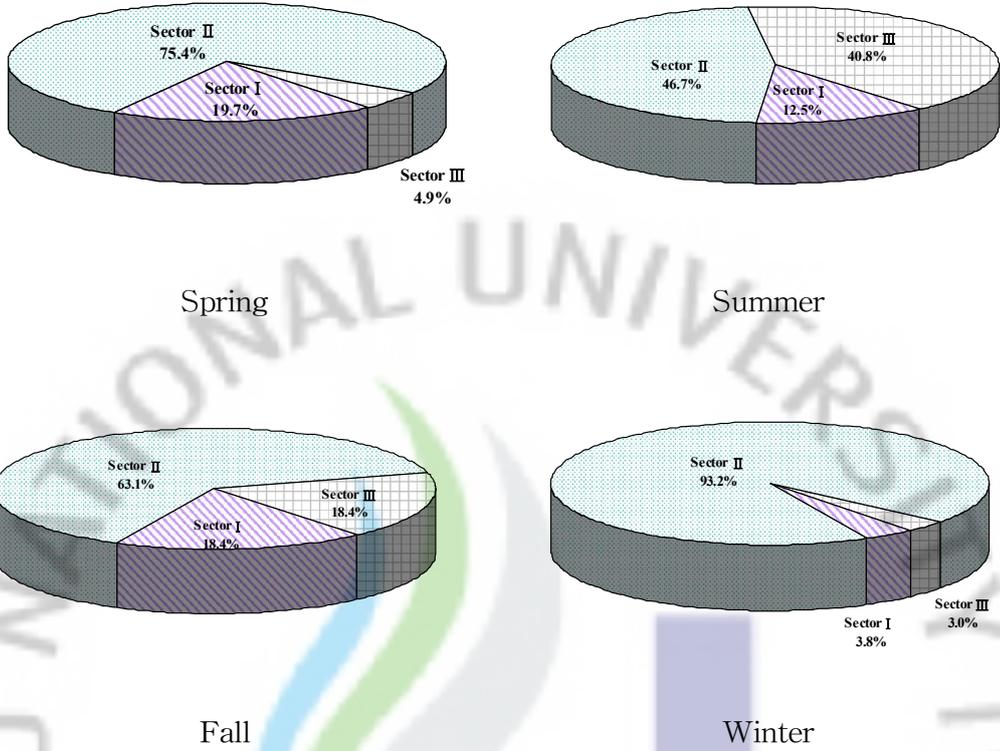


Figure 20. Seasonal comparison of sectional inflow pathways of air parcels moving into Gosan area.

Table 17. Sectional concentrations of aerosol components corresponding to inflow pathway of air parcels during spring season.

Species	Overall	Sector I	Sector II	Sector III
	Concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)			
NH_4^+	2.36 ± 1.89	1.83 ± 0.66	2.61 ± 2.14	1.07 ± 0.26
Na^+	2.16 ± 1.44	1.88 ± 1.49	2.23 ± 1.50	2.70 ± 0.93
K^+	0.45 ± 0.31	0.33 ± 0.17	0.51 ± 0.34	0.26 ± 0.21
nss- Ca^{2+}	0.42 ± 0.44	0.27 ± 0.21	0.48 ± 0.49	0.13 ± 0.07
Mg^{2+}	0.50 ± 0.65	0.35 ± 0.34	0.57 ± 0.75	0.35 ± 0.13
nss- SO_4^{2-}	8.12 ± 6.44	5.97 ± 2.62	9.10 ± 7.24	3.78 ± 1.50
NO_3^-	2.93 ± 2.00	2.49 ± 1.89	3.09 ± 2.13	2.88 ± 1.28
Cl^-	1.70 ± 1.91	1.46 ± 1.84	1.79 ± 2.01	2.23 ± 1.76
Concentration (ng/m^3)				
Al	705.9 ± 868.4	514.6 ± 411.5	808.8 ± 989.3	274.3 ± 109.1
Fe	480.6 ± 619.4	351.1 ± 287.0	552.4 ± 70.0	170.6 ± 85.8
Ca	496.8 ± 563.1	344.1 ± 362.2	579.4 ± 625.0	189.3 ± 78.4
Na	1266.6 ± 941.5	1126.9 ± 914.4	1265.2 ± 968.8	2149.3 ± 786.6
K	404.0 ± 385.0	302.7 ± 200.9	459.8 ± 432.1	254.9 ± 164.9
Mg	322.5 ± 322.8	248.3 ± 244.9	354.1 ± 357.2	293.2 ± 96.8
S	2292.3 ± 1786.4	1794.2 ± 82.1	2537.2 ± 2025.3	1309.8 ± 482.0
Ti	33.69 ± 33.01	28.36 ± 19.26	37.34 ± 37.00	14.88 ± 10.62
Mn	22.61 ± 21.10	16.81 ± 11.86	26.05 ± 23.38	8.40 ± 3.72
Ba	10.06 ± 21.33	5.37 ± 5.33	12.34 ± 24.95	2.87 ± 1.63
Sr	4.06 ± 4.20	2.86 ± 2.66	4.67 ± 4.67	2.29 ± 0.76
Zn	64.90 ± 71.40	46.52 ± 32.76	75.32 ± 80.81	30.27 ± 21.84
V	9.23 ± 10.67	6.85 ± 5.50	10.49 ± 12.07	3.21 ± 1.31
Cr	2.77 ± 3.11	2.57 ± 3.80	2.91 ± 3.05	1.20 ± 0.74
Pb	61.45 ± 116.97	37.86 ± 52.88	74.12 ± 134.59	17.41 ± 13.37
Cu	5.86 ± 9.69	4.36 ± 2.38	6.74 ± 11.36	2.69 ± 0.99
Ni	4.01 ± 2.96	2.98 ± 1.53	4.36 ± 3.27	3.16 ± 2.59
Co	1.12 ± 1.86	0.64 ± 0.98	1.33 ± 2.10	0.33 ± 0.43
Mo	1.23 ± 1.30	1.19 ± 0.69	1.34 ± 1.47	0.60 ± 0.27
Cd	0.99 ± 0.83	0.98 ± 0.66	1.03 ± 0.91	0.90 ± 0.37

Table 18. Sectional concentrations of aerosol components corresponding to inflow pathway of air parcels during summer season.

Species	Overall	Sector I	Sector II	Sector III
	Concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)			
NH_4^+	2.07 ± 1.86	3.67 ± 2.78	2.48 ± 1.80	1.07 ± 0.98
Na^+	1.89 ± 1.41	1.33 ± 1.03	1.80 ± 1.45	2.29 ± 1.46
K^+	0.24 ± 0.27	0.48 ± 0.41	0.29 ± 0.29	0.11 ± 0.08
nss- Ca^{2+}	0.14 ± 0.15	0.22 ± 0.12	0.15 ± 0.18	0.10 ± 0.12
Mg^{2+}	0.21 ± 0.14	0.18 ± 0.11	0.23 ± 0.16	0.22 ± 0.11
nss- SO_4^{2-}	7.13 ± 6.37	12.59 ± 10.32	8.77 ± 5.87	3.56 ± 2.84
NO_3^-	1.17 ± 0.86	1.32 ± 1.02	1.15 ± 0.87	1.17 ± 0.85
Cl^-	1.27 ± 1.75	0.42 ± 0.35	0.85 ± 1.20	2.12 ± 2.25
Concentration (ng/m^3)				
Al	295.9 ± 268.9	437.1 ± 205.6	316.2 ± 327.7	223.6 ± 162.1
Fe	171.6 ± 225.9	281.1 ± 190.6	187.7 ± 236.8	91.1 ± 90.3
Ca	164.0 ± 163.5	204.6 ± 102.8	190.7 ± 215.2	114.8 ± 75.9
Na	954.5 ± 576.8	906.0 ± 587.2	935.8 ± 635.7	1023.6 ± 524.5
K	215.5 ± 264.9	361.8 ± 326.8	250.6 ± 275.3	103.1 ± 55.6
Mg	155.0 ± 92.7	156.6 ± 72.2	162.5 ± 113.1	148.9 ± 72.3
S	1778.0 ± 1221.9	2672.8 ± 1250.1	2112.4 ± 1269.5	1075.4 ± 647.7
Ti	11.78 ± 12.69	15.87 ± 9.15	11.66 ± 13.07	8.52 ± 5.64
Mn	6.65 ± 6.69	12.40 ± 6.88	7.21 ± 7.08	4.05 ± 4.70
Ba	2.69 ± 5.07	4.45 ± 5.98	3.74 ± 6.63	1.02 ± 1.05
Sr	1.65 ± 1.85	1.65 ± 0.66	2.12 ± 2.61	1.13 ± 0.49
Zn	28.74 ± 30.61	40.99 ± 20.61	40.23 ± 36.48	12.47 ± 16.80
V	4.91 ± 3.47	9.03 ± 4.82	4.90 ± 2.95	3.75 ± 2.79
Cr	1.14 ± 1.26	1.40 ± 1.07	1.14 ± 1.18	0.97 ± 1.34
Pb	20.41 ± 23.43	26.96 ± 19.62	29.16 ± 28.23	7.30 ± 8.68
Cu	2.96 ± 3.00	6.03 ± 6.42	3.11 ± 2.06	1.71 ± 1.16
Ni	6.04 ± 17.76	14.89 ± 39.26	5.80 ± 14.87	3.38 ± 8.06
Co	0.43 ± 0.48	0.35 ± 0.24	0.49 ± 0.55	0.37 ± 0.47
Mo	0.97 ± 0.92	1.18 ± 0.81	1.05 ± 0.96	0.85 ± 0.91
Cd	0.56 ± 0.60	0.83 ± 0.55	0.74 ± 0.72	0.29 ± 0.33

Table 19. Sectional concentrations of aerosol components corresponding to inflow pathway of air parcels during fall season.

Species	overall	Sector I	Sector II	Sector III
	Concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)			
NH_4^+	1.87 ± 2.36	1.32 ± 0.86	2.07 ± 2.52	0.99 ± 1.08
Na^+	1.94 ± 1.18	2.06 ± 1.10	1.85 ± 1.13	2.33 ± 1.53
K^+	0.33 ± 0.32	0.29 ± 0.19	0.40 ± 0.38	0.18 ± 0.21
nss- Ca^{2+}	0.24 ± 0.27	0.21 ± 0.13	0.32 ± 0.32	0.07 ± 0.08
Mg^{2+}	0.26 ± 0.25	0.25 ± 0.13	0.27 ± 0.30	0.21 ± 0.15
nss- SO_4^{2-}	5.83 ± 6.10	4.48 ± 2.74	6.51 ± 6.65	3.40 ± 2.81
NO_3^-	1.74 ± 1.09	1.66 ± 0.67	1.81 ± 1.20	1.62 ± 1.25
Cl^-	1.67 ± 1.89	1.83 ± 1.67	1.66 ± 1.92	1.92 ± 2.36
Concentration (ng/m^3)				
Al	264.9 ± 196.9	304.9 ± 214.9	290.6 ± 199.3	135.2 ± 83.5
Fe	203.1 ± 182.9	199.1 ± 88.4	249.2 ± 216.3	75.9 ± 69.7
Ca	239.9 ± 214.0	211.6 ± 101.9	293.7 ± 244.0	95.0 ± 69.7
Na	973.0 ± 689.5	1133.2 ± 708.7	975.4 ± 691.1	952.2 ± 678.5
K	296.1 ± 311.1	282.5 ± 198.3	352.3 ± 338.7	160.8 ± 316.1
Mg	176.8 ± 109.8	192.4 ± 75.9	186.0 ± 123.7	141.3 ± 81.0
S	1605.0 ± 1688.7	1309.6 ± 698.1	1772.2 ± 1808.1	933.3 ± 569.4
Ti	14.57 ± 13.11	18.35 ± 17.47	16.07 ± 12.99	6.50 ± 5.01
Mn	12.53 ± 15.09	15.73 ± 28.66	14.54 ± 11.18	4.22 ± 4.53
Ba	2.84 ± 2.49	2.59 ± 1.31	3.47 ± 2.80	1.03 ± 0.91
Sr	2.18 ± 1.66	2.10 ± 0.77	2.55 ± 1.89	1.13 ± 0.84
Zn	39.75 ± 38.00	30.57 ± 17.09	50.03 ± 42.14	18.76 ± 33.05
V	2.52 ± 1.81	2.06 ± 1.05	2.38 ± 1.63	2.87 ± 1.90
Cr	1.13 ± 1.32	1.18 ± 1.22	1.29 ± 1.45	0.75 ± 1.19
Pb	37.56 ± 49.11	34.23 ± 28.94	42.77 ± 54.09	16.53 ± 26.78
Cu	4.55 ± 8.80	3.59 ± 2.70	5.16 ± 10.39	4.27 ± 9.70
Ni	2.08 ± 1.83	1.97 ± 1.34	2.17 ± 1.83	1.93 ± 2.45
Co	0.38 ± 0.60	0.30 ± 0.34	0.48 ± 0.75	0.17 ± 0.17
Mo	0.65 ± 0.60	0.56 ± 0.50	0.68 ± 0.57	0.71 ± 0.81
Cd	0.73 ± 1.33	0.55 ± 0.42	0.86 ± 1.70	0.54 ± 0.53

Table 20. Sectional concentrations of aerosol components corresponding to inflow pathway of air parcels during winter season.

Species	Overall	Sector I	Sector II	Sector III
	Concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)			
NH_4^+	1.98 ± 1.49	1.93 ± 1.98	1.92 ± 1.42	2.45 ± 2.08
Na^+	2.20 ± 1.37	1.96 ± 0.82	2.24 ± 1.42	1.81 ± 1.00
K^+	0.45 ± 0.33	0.29 ± 0.25	0.46 ± 0.34	0.39 ± 0.21
nss- Ca^{2+}	0.27 ± 0.27	0.17 ± 0.06	0.28 ± 0.28	0.14 ± 0.11
Mg^{2+}	0.38 ± 0.33	0.22 ± 0.17	0.39 ± 0.34	0.20 ± 0.06
nss- SO_4^{2-}	6.82 ± 4.30	6.65 ± 6.62	6.70 ± 4.22	7.91 ± 4.06
NO_3^-	2.37 ± 1.73	1.56 ± 1.15	2.44 ± 1.78	1.69 ± 0.57
Cl^-	1.86 ± 2.07	1.73 ± 1.65	1.94 ± 2.13	0.78 ± 0.72
Concentration (ng/m^3)				
Al	306.0 ± 325.0	185.9 ± 147.2	319.1 ± 338.5	188.0 ± 42.1
Fe	282.4 ± 222.2	181.0 ± 122.1	293.1 ± 230.3	211.2 ± 80.5
Ca	365.4 ± 354.4	197.3 ± 115.2	384.4 ± 368.3	199.7 ± 20.5
Na	1158.8 ± 900.3	1066.9 ± 411.5	1193.0 ± 935.9	873.0 ± 285.3
K	314.4 ± 227.7	196.3 ± 145.0	323.3 ± 235.5	225.6 ± 72.1
Mg	220.0 ± 123.4	183.9 ± 54.7	225.8 ± 127.8	173.3 ± 35.4
S	1918.7 ± 1146.9	1664.3 ± 1233.0	1924.5 ± 1169.2	1887.8 ± 968.0
Ti	16.87 ± 18.28	9.61 ± 6.34	17.64 ± 19.05	11.08 ± 6.86
Mn	17.89 ± 15.35	11.86 ± 12.82	18.49 ± 15.85	15.25 ± 4.06
Ba	5.38 ± 7.52	2.51 ± 1.96	5.18 ± 5.77	2.91 ± 1.32
Sr	3.16 ± 2.56	1.80 ± 0.76	3.30 ± 2.66	2.07 ± 0.57
Zn	59.13 ± 64.17	31.81 ± 32.51	61.10 ± 66.87	45.08 ± 25.38
V	3.71 ± 3.06	2.54 ± 2.30	3.77 ± 3.13	3.46 ± 2.62
Cr	2.22 ± 2.50	2.68 ± 2.20	2.28 ± 2.57	1.11 ± 1.29
Pb	63.37 ± 97.82	62.12 ± 99.18	63.97 ± 100.06	69.96 ± 93.03
Cu	4.44 ± 3.37	3.09 ± 1.94	4.55 ± 3.50	3.44 ± 0.55
Ni	3.35 ± 3.37	2.81 ± 3.00	3.44 ± 3.48	2.88 ± 1.56
Co	0.38 ± 0.51	0.29 ± 0.33	0.39 ± 0.53	0.21 ± 0.13
Mo	1.07 ± 0.85	0.85 ± 0.81	1.08 ± 0.86	0.66 ± 0.46
Cd	0.91 ± 0.77	0.51 ± 0.54	0.94 ± 0.80	0.71 ± 0.34

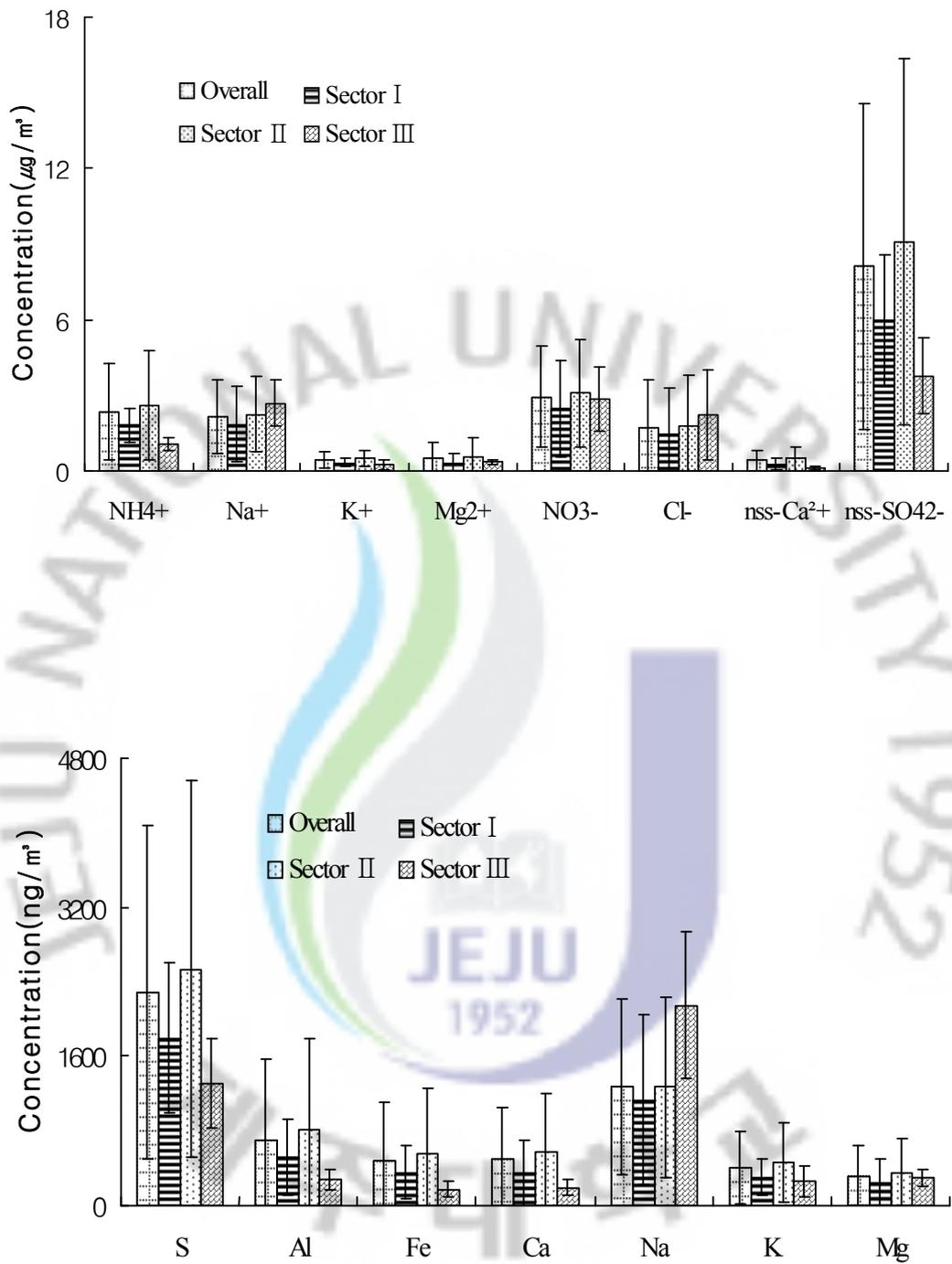


Figure 21. Sectional comparison of concentrations of aerosol components corresponding to inflow pathway of air parcels in spring.

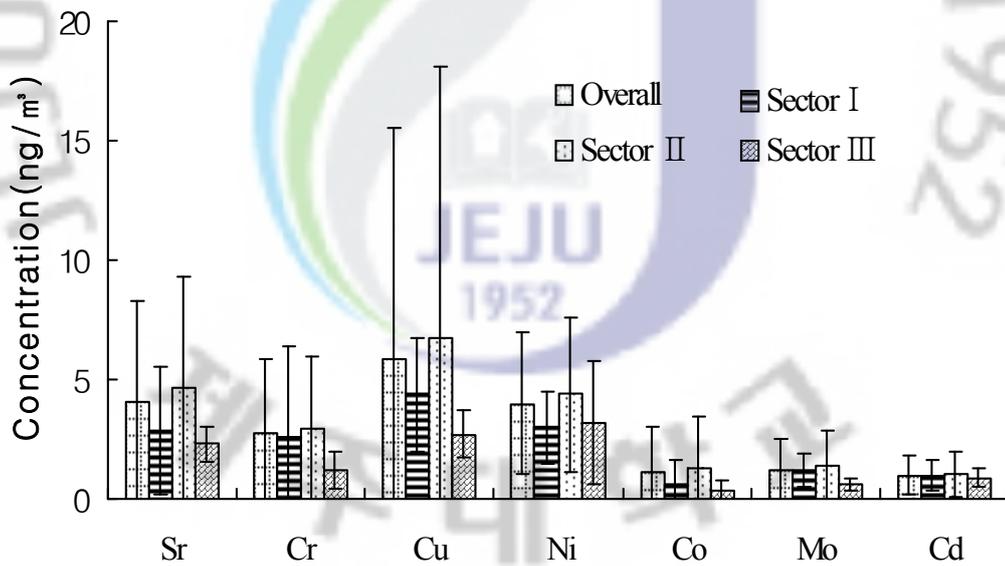
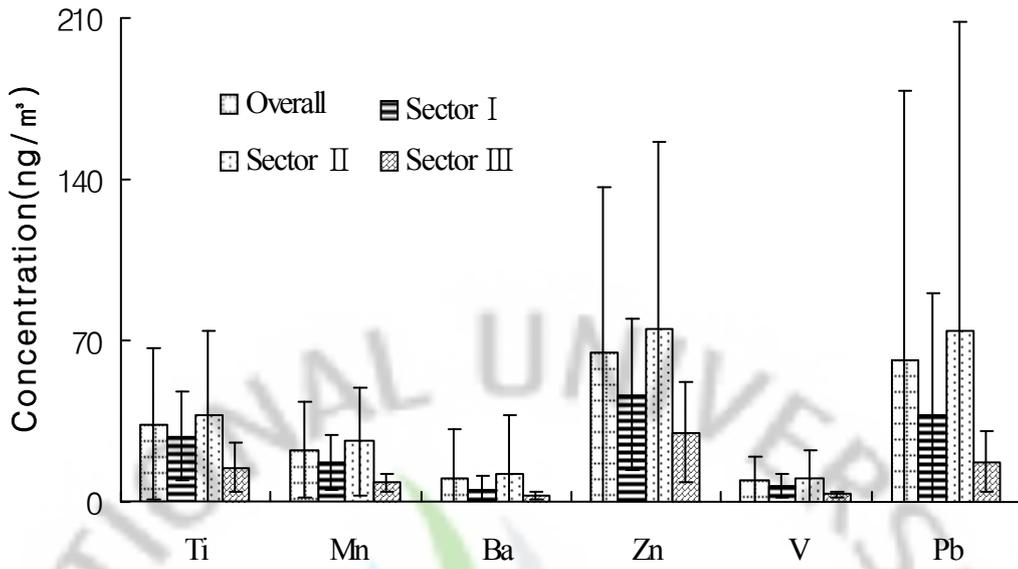


Figure 22. Sectional comparison of concentrations of aerosol components corresponding to inflow pathway of air parcels in spring.

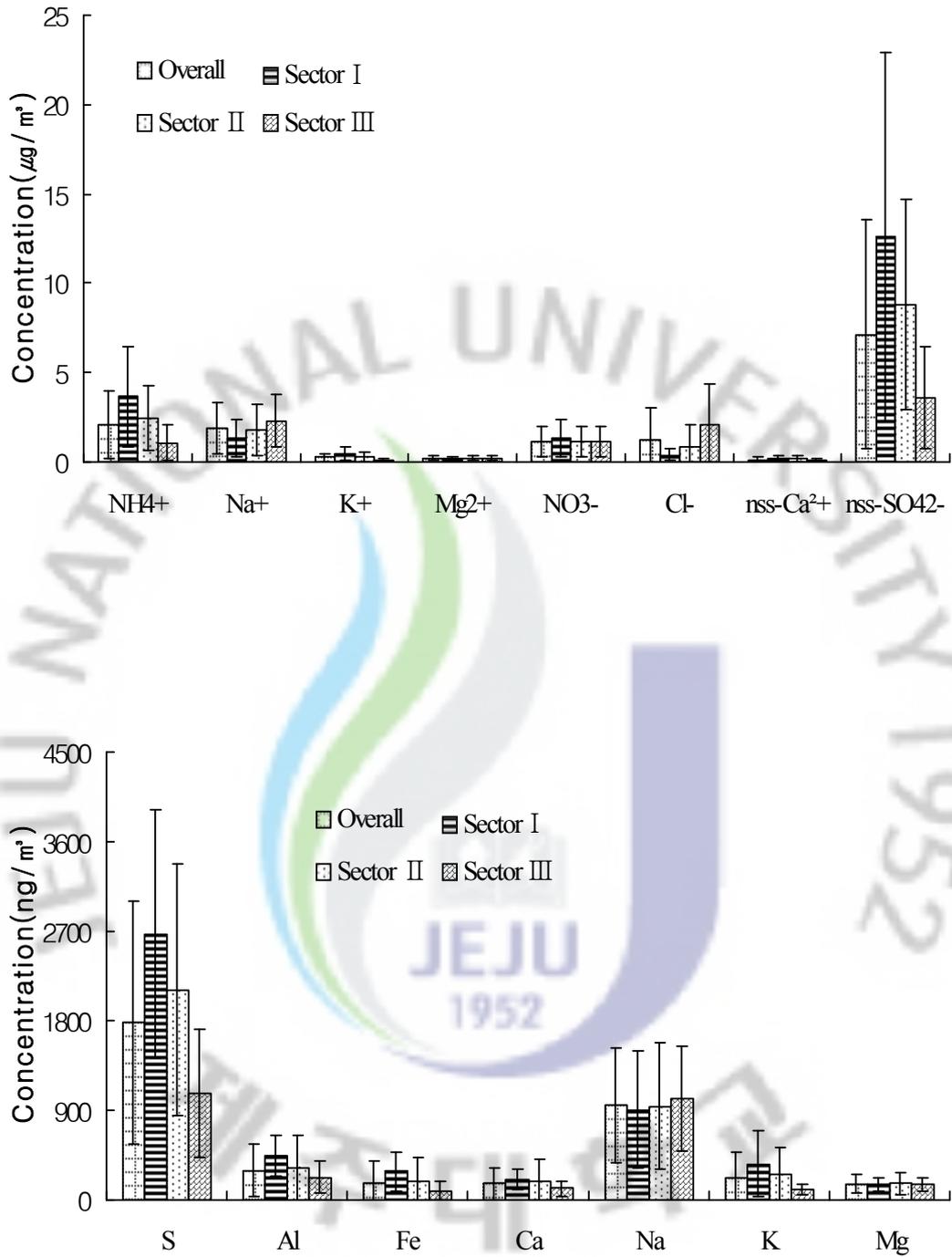


Figure 23. Sectional comparison of concentrations of aerosol components corresponding to inflow pathway of air parcels in summer.

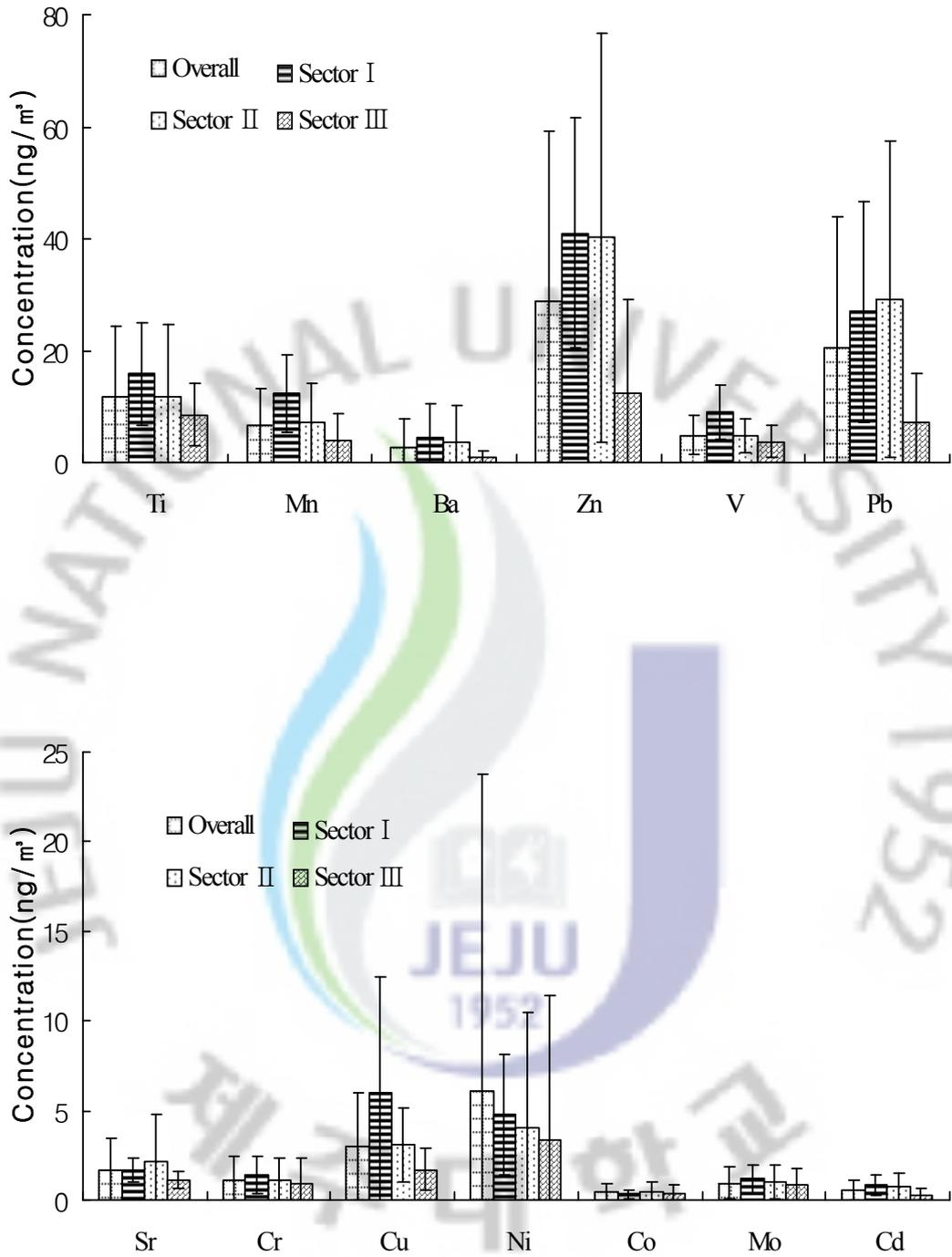


Figure 24. Sectional comparison of concentrations of aerosol components corresponding to inflow pathway of air parcels in summer.

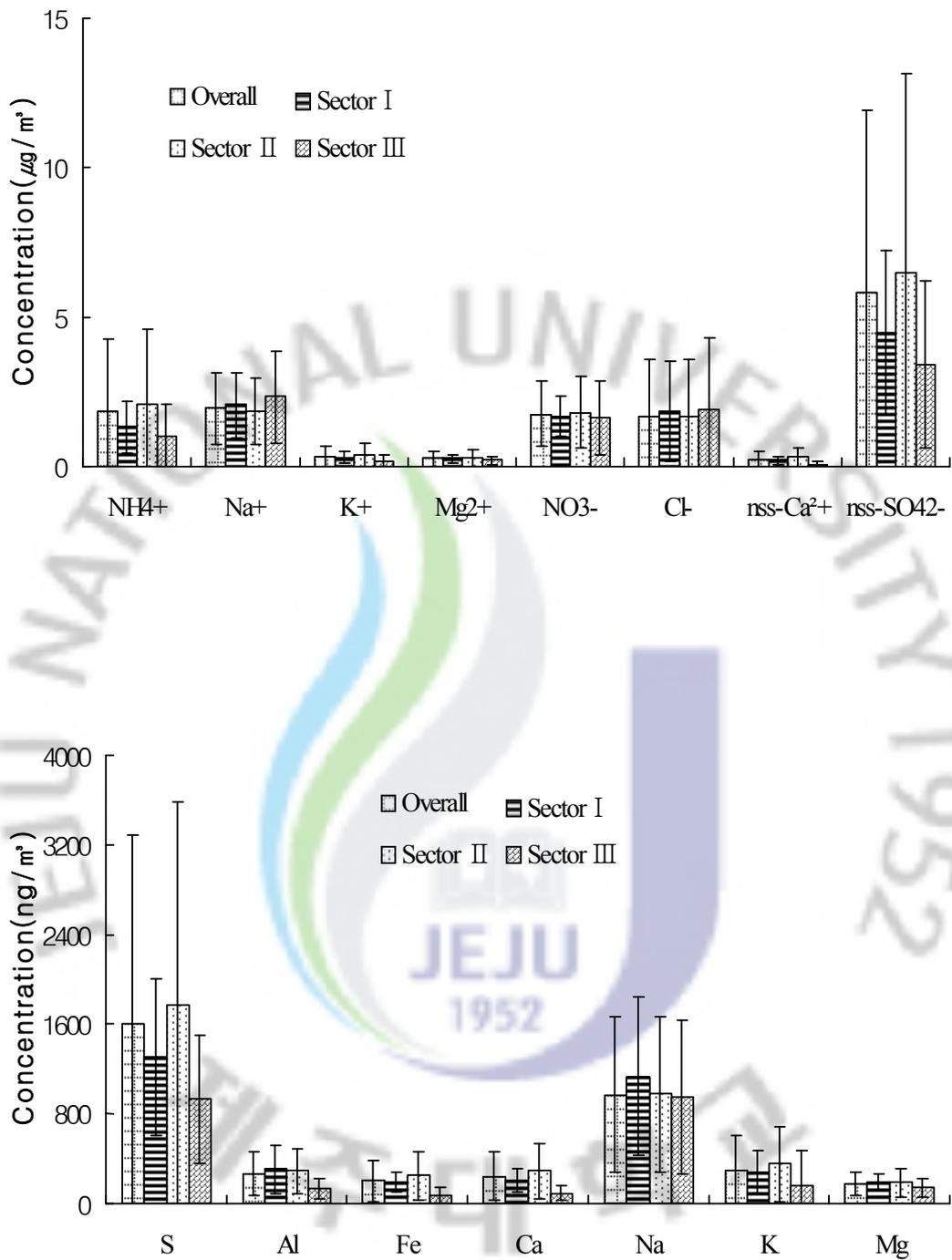


Figure 25. Sectional comparison of concentrations of aerosol components corresponding to inflow pathway of air parcels in fall.

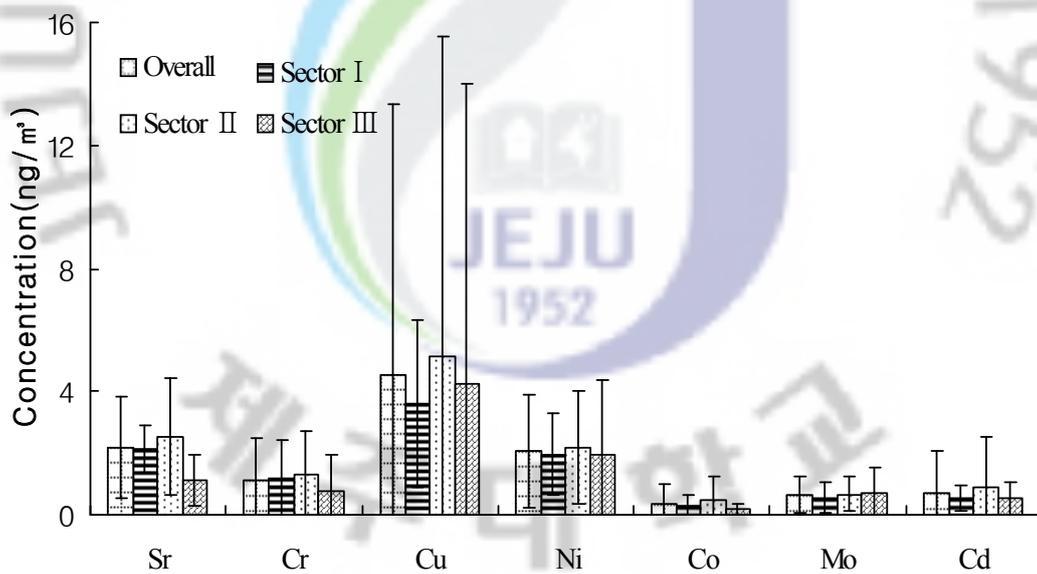
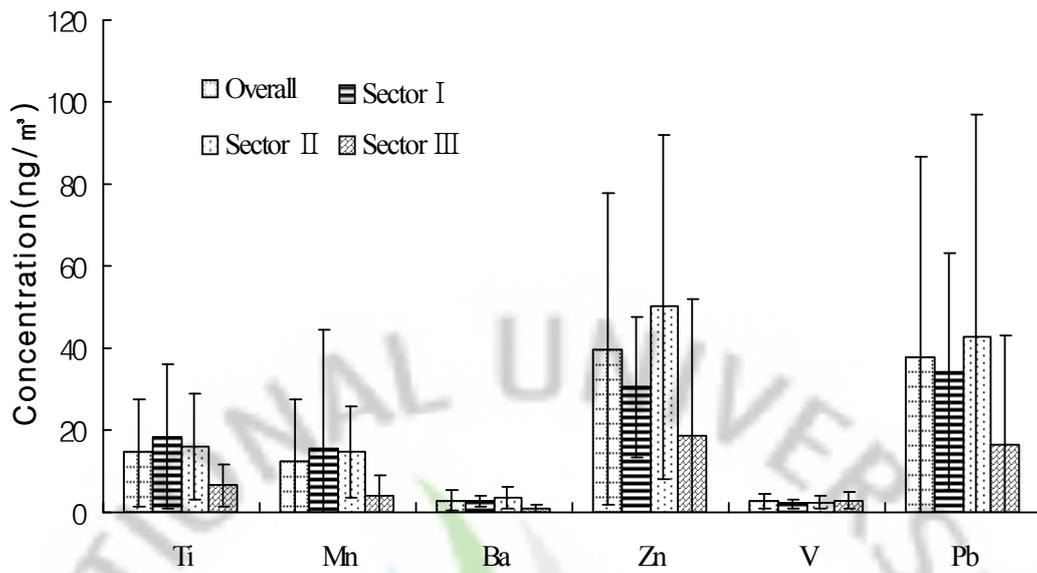


Figure 26. Sectional comparison of concentrations of aerosol components corresponding to inflow pathway of air parcels in fall.

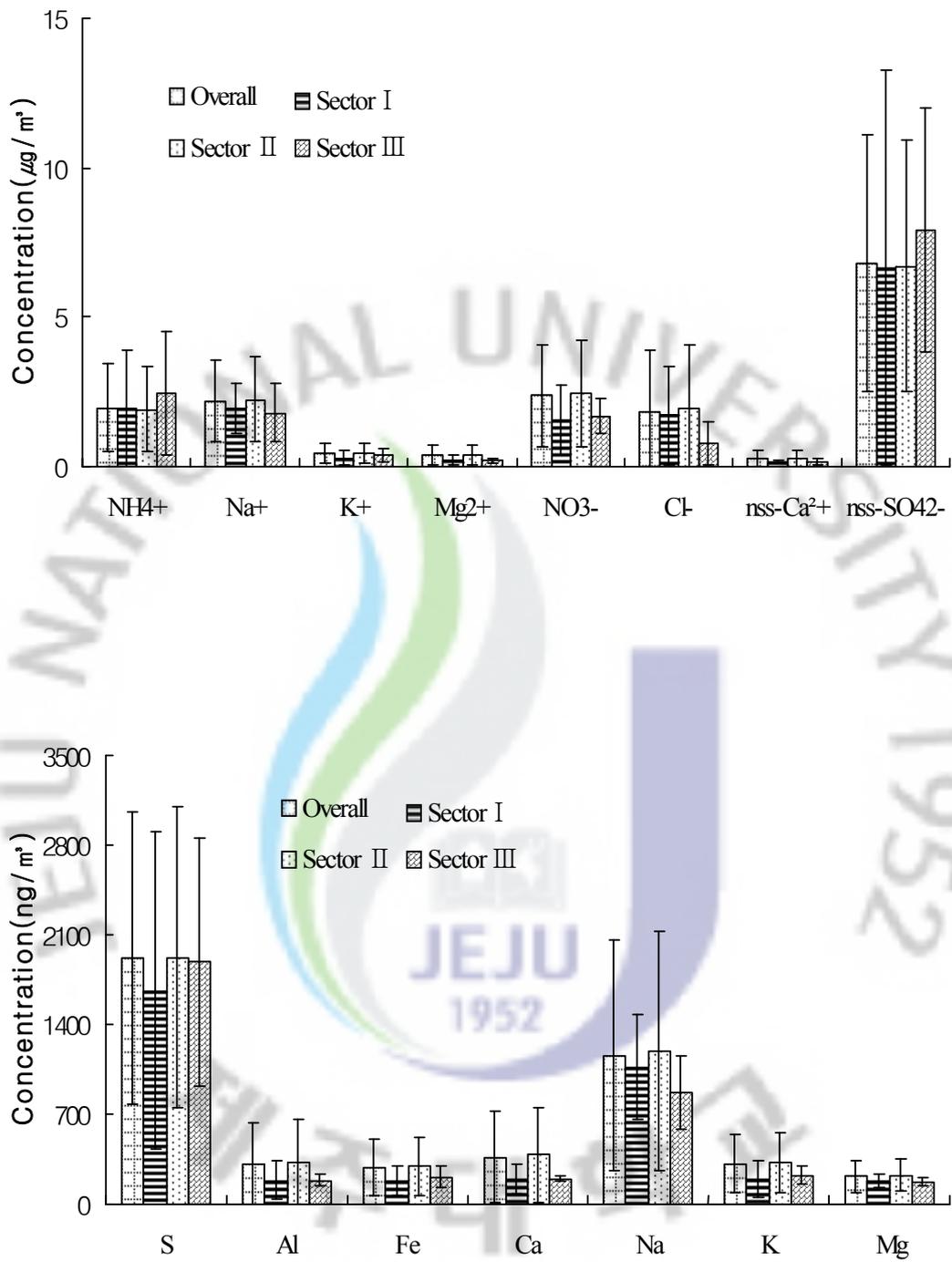


Figure 27. Sectional comparison of concentrations of aerosol components corresponding to inflow pathway of air parcels in winter.

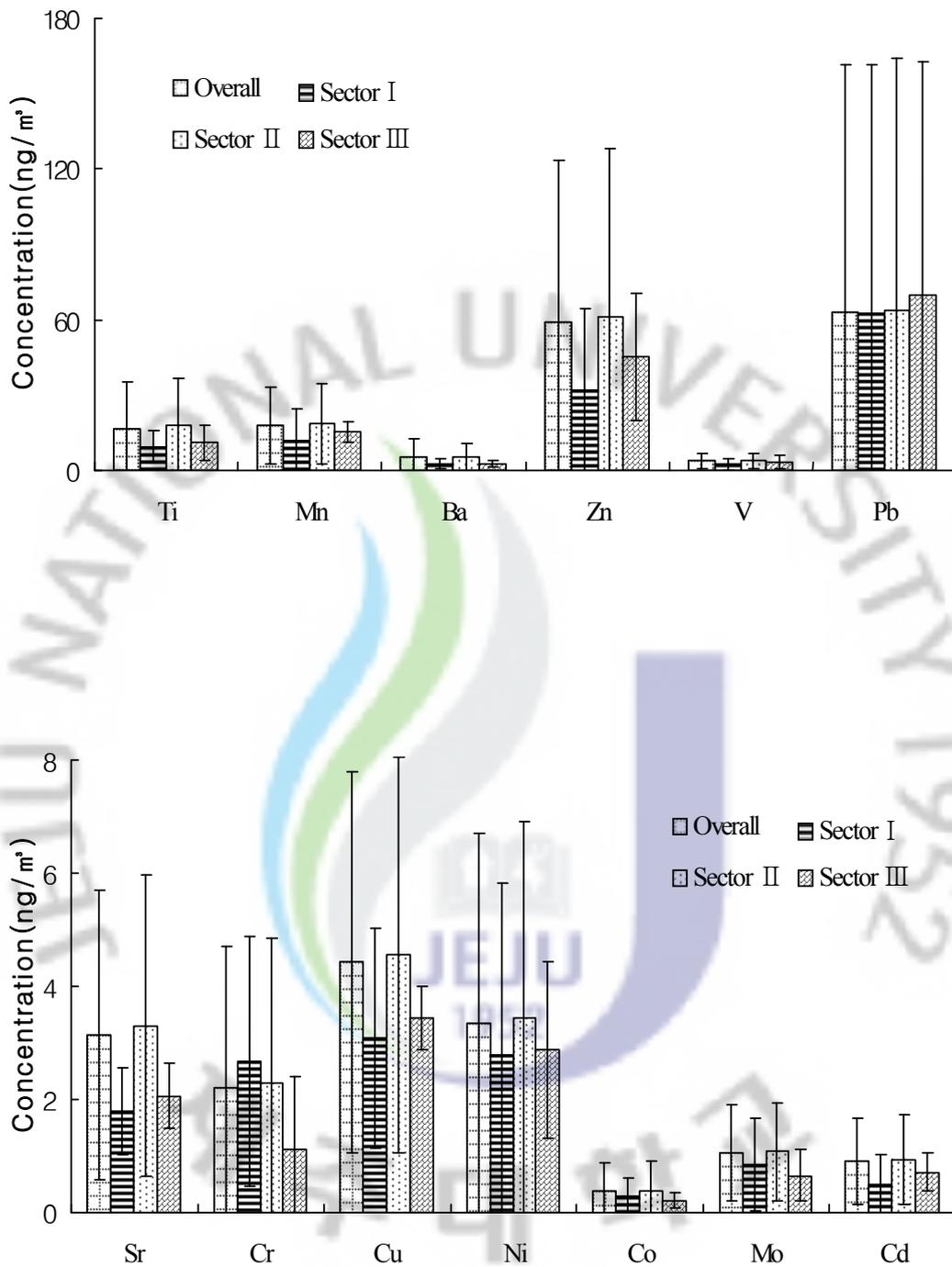


Figure 28. Sectional comparison of concentrations of aerosol components corresponding to inflow pathway of air parcels in winter.

5) 공기 이동구역별 조성 비교

연구기간 중 공기덩어리가 중국대륙을 거쳐 제주도로 유입되는 경우의 빈도는 65.3% 정도로, 중국의 오염이 제주지역 대기 에어로졸 구성에 크게 영향을 미칠 수 있을 것으로 추정된다. 이 때 중국에서 이동하는 공기의 50.4% 정도가 북부에 위치한 베이징, 중부 공업지역의 동쪽에 위치한 상하이, 남부의 홍콩 등지를 거쳐 제주도로 이동하는 것으로 나타났다. 그리고 제주도 고산지역으로 이동하는 공기는 이들 도시와 근접지역의 오염 영향을 받고 있을 것으로 추정된다. 그리고 이러한 공기의 이동구역 차이에 따라 에어로졸 구성이 어떠한 변화를 보이는지 서로 비교해 볼 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 중국대륙을 크게 베이징 중심의 북부, 상하이 중심의 중부, 홍콩에 근접한 남부 지역으로 나누고 공기가 이들 세 도시 및 근접 지역을 통과하여 제주로 유입되었을 때의 에어로졸 조성을 상호 비교하였다.

먼저 이 경우의 $nss-SO_4^{2-}$ 과 S 농도를 비교해 보면, 베이징을 경유했을 때 두 성분의 농도는 각각 $7.46, 2.10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 상하이 경유 시 $7.50, 1.93 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 홍콩 경유 시 $4.18, 0.83 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로, 북부의 베이징이나 중부의 상하이를 경유할 때 더 높은 농도를 나타내었다. 또 NO_3^- 은 베이징 경유 시 $2.37 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 상하이 경유 시 $1.85 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 홍콩 경유 시 $2.07 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로, 중부지역을 통과했을 때가 가장 높은 농도를 보였다. 또한 대표적 토양기원의 $nss-Ca^{2+}$ 과 Al은 베이징 경유 시 각각 $0.35, 0.48 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 상하이 경유 시 $0.19, 0.27 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 홍콩 경유 시 $0.03, 0.09 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로, 이 역시 NO_3^- 과 동일하게 중부지역을 경유할 때 가장 높은 농도를 나타내었다. 반면에 해염 성분인 Na^+ 은 베이징 경유 시 $2.06 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 상하이 경유 시 $2.19 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 홍콩 경유 시 $2.59 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로, 오히려 중국 남부지역 경유 시에 더 높은 농도를 보여 앞의 인위적 및 토양 기원의 성분들과는 상반된 경향을 나타내는 것으로 조사되었다(Table 21).

이러한 결과들을 종합해 보면, 대체적으로 인위적 기원의 $nss-SO_4^{2-}$, NO_3^- , NH_4^+ 은 중국의 북부지역과 중부지역을 경유했을 때 높은 농도를 보이고 남부지역을 통과했을 때 상대적으로 낮은 경향을 보이고 있다. 그리고 토양 기원의 성분들은 주로 중부지역을 경유했을 때 그 농도가 가장 높게 나타나는 것으로 조

사되었다.

Table 21. Concentrations of aerosol components as air parcels were moved into Jeju area via the vicinities of Beijing, Shanghai and Hong Kong.

Species	North (Beijing)	Mideast (Shanghai)	South (Hong Kong)
	Concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		
NH_4^+	2.28 ± 2.54	2.01 ± 1.25	1.18 ± 0.72
Na^+	2.06 ± 1.33	2.19 ± 1.72	2.59 ± 2.47
K^+	0.41 ± 0.31	0.29 ± 0.22	0.12 ± 0.11
nss- Ca^{2+}	0.35 ± 0.42	0.19 ± 0.18	0.03 ± 0.02
Mg^{2+}	0.38 ± 0.44	0.29 ± 0.27	0.29 ± 0.27
nss- SO_4^{2-}	7.46 ± 7.28	7.50 ± 4.61	4.18 ± 2.76
NO_3^-	2.37 ± 1.88	1.85 ± 1.43	2.07 ± 1.20
Cl^-	1.77 ± 2.03	1.26 ± 1.58	1.75 ± 2.06
	Concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		
Al	475.8 ± 669.0	267.7 ± 227.2	96.5 ± 33.1
Fe	343.9 ± 441.1	236.9 ± 225.9	36.4 ± 17.8
Ca	388.1 ± 400.7	239.7 ± 238.0	56.3 ± 19.2
Na	1124.7 ± 825.7	1249.4 ± 1066.2	550.9 ± 207.8
K	392.2 ± 380.6	222.8 ± 190.4	$50. \pm 17.7$
Mg	250.0 ± 236.7	195.5 ± 119.3	98.6 ± 37.7
S	2096.0 ± 1007.1	1928.4 ± 1062.7	828.9 ± 497.4
Ti	21.44 ± 24.80	18.40 ± 31.27	2.71 ± 2.41
Mn	17.74 ± 17.43	11.97 ± 12.24	2.09 ± 1.95
Ba	6.00 ± 7.64	5.00 ± 11.28	0.30 ± 0.34
Sr	3.28 ± 3.18	2.29 ± 1.86	0.64 ± 0.16
Zn	56.95 ± 66.22	51.11 ± 49.54	19.34 ± 12.59
V	5.84 ± 9.66	5.24 ± 4.69	2.71 ± 1.00
Cr	1.97 ± 2.08	1.64 ± 1.40	0.22 ± 0.10
Pb	54.38 ± 100.23	46.48 ± 61.68	6.21 ± 5.24
Cu	5.37 ± 9.13	3.96 ± 3.46	2.16 ± 1.60
Ni	3.70 ± 4.03	4.84 ± 9.46	27.91 ± 51.07
Co	0.70 ± 1.55	0.47 ± 0.68	0.09 ± 0.05
Mo	0.97 ± 0.94	0.74 ± 0.84	1.21 ± 1.16
Cd	0.91 ± 1.42	0.73 ± 0.62	0.35 ± 0.50

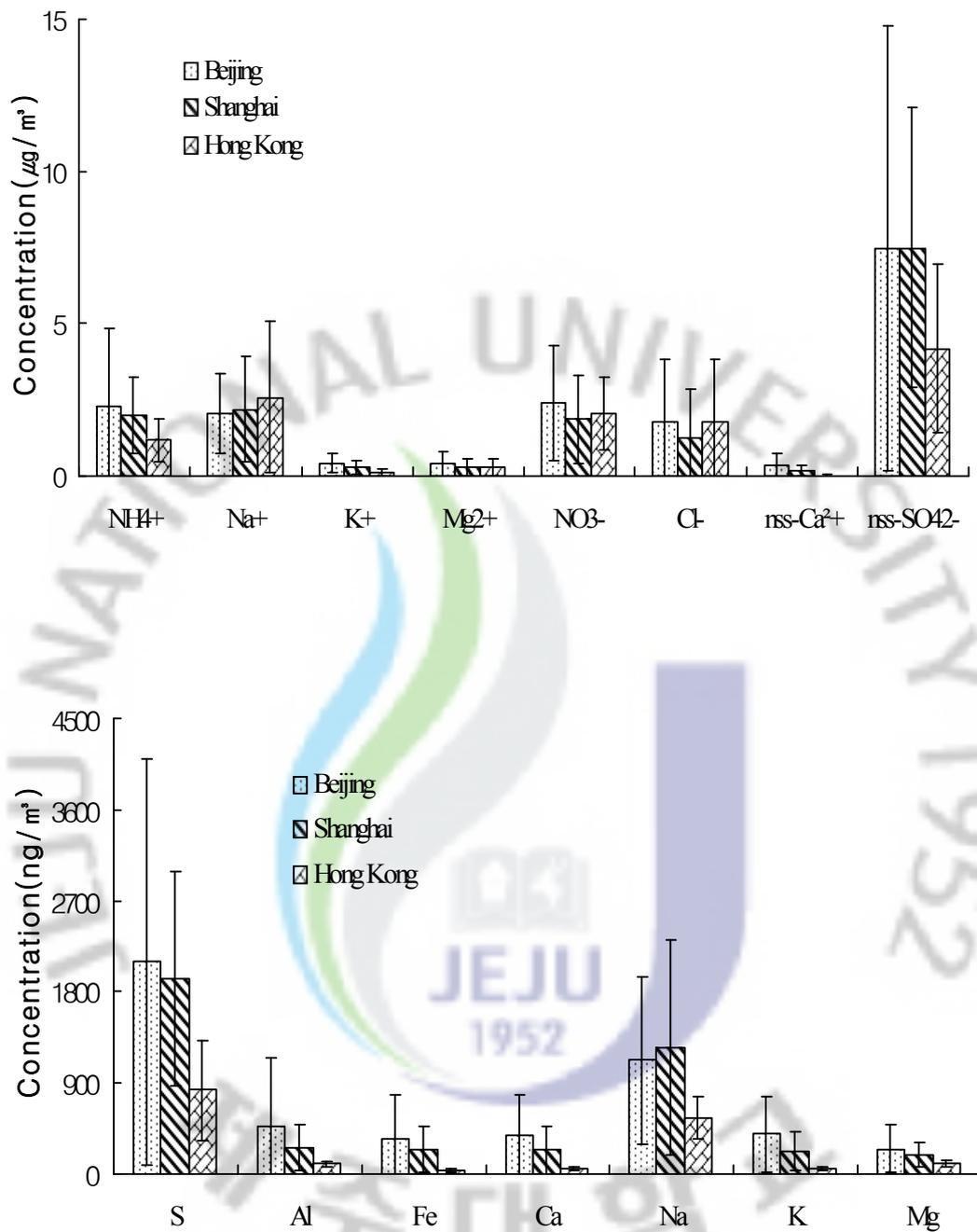


Figure 31. Comparison of concentrations of aerosol components as air parcels were moved into Jeju area via the vicinities of Beijing, Shanghai and Hong Kong.

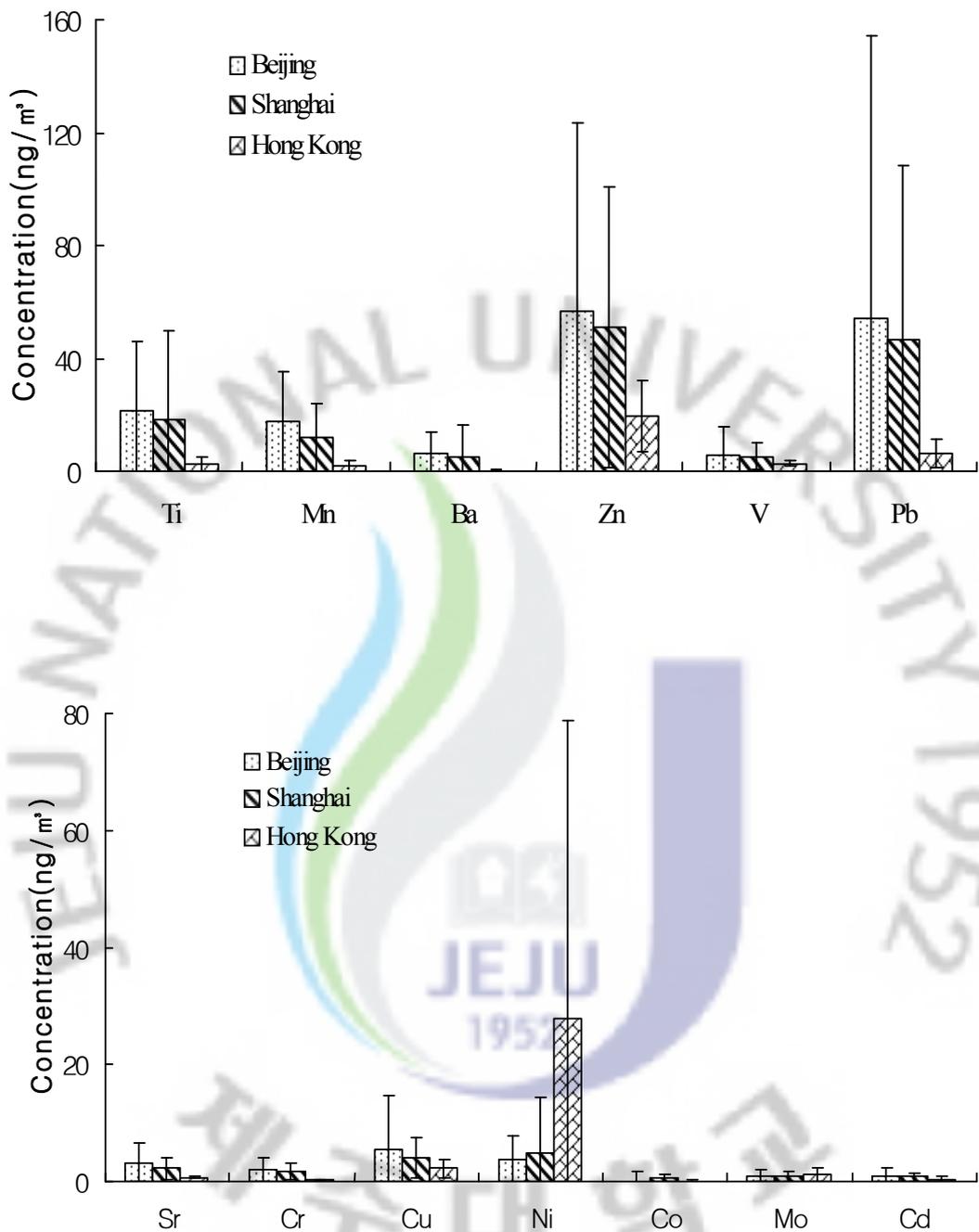


Figure 32. Comparison of concentrations of aerosol components as air parcels were moved into Jeju area via the vicinities of Beijing, Shanghai and Hong Kong.

IV. 결 론

국내 배경지역인 제주도 고산측정소에 TSP air sampler를 설치하여, 2003년 1월부터 2007년 12월까지 총 692개의 TSP 에어로졸 시료를 채취, 분석하였다. 분석 결과로부터 대기 에어로졸의 조성과 유입경로별 조성 특성을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. TSP 대기 에어로졸의 수용성 성분은 $nss-SO_4^{2-} > NO_3^- > NH_4^+ > Na^+ > Cl^- > K^+ > Mg^{2+} > nss-Ca^{2+}$ 의 순으로 높은 농도를 보였고, 원소 성분은 $S > Na > Al > Ca > K > Fe > Mg > Zn > Pb > Ti > Mn > Ba > V > Cu > Ni > Sr > Cr > Mo > Cd > Co$ 순으로 높은 농도를 나타내었다.
2. 농축인자를 구해 본 결과, 수용성 성분에서 Cl^- , Mg^{2+} 등은 주로 해양으로부터 유래되나 SO_4^{2-} , Ca^{2+} , K^+ 등은 다른 배출원의 영향을 받고 있는 것으로 나타났다. 또 Ca , Fe 등 성분들은 토양으로부터 유래되나, Na , Mg , Ti , Mn , Zn , V , Pb , Cu , Ni , Co 등은 토양 외의 다른 요인에 의해 대기 에어로졸에 유입되는 것으로 조사되었다.
3. 요인분석에 의해 대기 에어로졸 성분의 발생기원을 조사해 본 결과, 고산 지역의 TSP 대기 에어로졸은 토양의 영향을 가장 많이 받고 있고, 다음으로 인위적 영향, 그 다음으로 해양의 영향을 많이 받고 있는 것으로 조사되었다.
4. 황사와 비황사의 농도를 비교한 결과, 황사 시에 토양 기원의 $nss-Ca^{2+}$, Mg^{2+} , Al , Ca , Fe , Mg , Ti , Mn , Ba , Sr 성분의 농도가 각각 3.6, 3.1, 4.9, 3.4, 4.4, 3.1, 3.4, 3.2, 3.2, 3.3배 증가하였다. 반면에 인위적 기원의 $nss-SO_4^{2-}$, NH_4^+ , NO_3^- , K^+ , S 은 각각 1.4, 1.3, 2.1, 1.6, 1.7배 증가하여 토양 성분들보다는 상대적으로 낮은 증가율을 나타내었다.
5. 계절별로 대기 에어로졸 조성을 비교해 본 결과, 토양 기원의 성분들은 봄에 현저히 높고 여름에 낮은 농도를 보였고, 인위적 기원의 성분들은 봄과 여름에 다소 높고 가을에 낮은 조성을 나타내었다. 그러나 해양 기원의 성분들은 계절

별로 뚜렷한 차이를 보이지 않았다.

6. 연구기간 중 공기의 이동은 중국대륙에서 발원되어 제주지역으로 유입된 경우가 65.3%로 가장 많았다. 그리고 이동경로별로 에어로졸 성분의 조성을 비교해 본 결과, 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 중국대륙(Ⅱ영역)으로부터 유입되었을 때 더 높은 농도를 나타내었다. 그러나 해양 기원의 성분들은 일본 및 북태평양(Ⅲ영역)으로부터 유입되었을 때 더 높은 농도를 보였다.
7. 계절 및 공기 이동구간별로 에어로졸 조성을 비교해 본 결과, 봄, 가을, 겨울철에는 대체적으로 인위적 성분과 토양 성분들이 중국대륙(Ⅱ영역)으로부터 유입되었을 때 더 높은 농도를 나타내었다. 그러나 여름철에는 한반도 및 시베리아 지역 (Ⅰ영역)에서 공기가 이동했을 때 더 높은 농도를 나타내었다.
8. 중국대륙을 통과한 공기의 이동 경로를 구역별로 비교해 본 결과, 대체적으로 인위적 기원의 nss-SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+ 은 중국의 북부지역과 중부지역을 경유했을 때 높은 농도를 보이고, 토양 기원의 성분들은 주로 중부지역을 경유했을 때 그 농도가 가장 높게 나타나는 것으로 조사되었다.

V. 참 고 문 헌

- 1) 강병욱 (1998) 수용모델을 이용한 $PM_{2.5}$ 의 배출원 추정-청주지역을 중심으로, 건국대학교 박사학위 청구논문.
- 2) 강창희, 고희정, Wlodek Zahorowski (2007) 제주도 고산지역의 라돈 및 TSP 에어로졸 농도 특성: 2001~2004년 측정.
- 3) 강창희, 김원형, 한진석, 선우영, 문길주 (2003) 1997 ~ 2001년 제주도 고산지역 $PM_{2.5}$ 미세분진의 오염특성, 한국대기환경학회지, 19(3), 263-273.
- 4) 공부주 (2006) 한반도 배경지역의 미세입자 특성 및 PMF 수용모델을 이용한 발생원 추정, 서울시립대학원 박사학위 청구논문.
- 5) 국립환경과학원 (2005) 대도시대기질 관리방안 조사연구 - 미세먼지 생성과정 규명과 저감대책 수립.
- 6) 국립환경연구원 (2005) 배경농도지역 장거리 이동 오염물질 집중 조사 v, 최종보고서
- 7) 국립환경연구원 (2002) 황사피해 최소화를 위한 대응대책 세미나, 국립환경연구원 & 시민환경연구소, 8pp.
- 8) 김기현, 이강웅, 허철구, 강창희(1997) 제주도 연안해역을 중심으로 한 DMS 농도의 관측, 한국대기보전학회지, 13(2), 161-170
- 9) 김나경, 김용표, 강창희, 문길주 (2004) 고산에서 측정한 입자상 질산염 농도 특성; 1998~2002년 $PM_{2.5}$ 와 TSP 측정자료, 한국대기환경학회지, 20(1),119-128.
- 10) 김나경 (2004) 고산에서 측정한 입자상 질산염 농도특성, 이화여자대학교 과학기술대학원 석사학위 청구논문
- 11) 김나경, 김용표, 강창희, 문길주 (2003) 고산에서 측정한 $PM_{2.5}$ 이온 농도 특성: 1998~2002년 측정자료, 한국대기환경학회지, 19(3), 333-343.
- 12) 김영성 (2003) 대기 중 잔류성 유기오염물질과 중금속의 특성과 현황, 한국대기환경학회지, 19(2), 113-132.
- 13) 김용표, 박세욱, 김진영, 심상규, 문길주, 이호근, 장광미, 박경윤, 강창희 (1996a) 고산에서의 1994년 3월~4월 측정연구: (I) 입자상 오염물질의 이동,

- 한국대기보전학회지, 12(1), 79-90.
- 14) 김용표, 김성주, 진현철, 백남준, 이종훈, 김진영, 심상규, 강창희, 허철구 (1996b) 제주도 고산에서의 1994년 여름 측정: (I) 입자 이온 조성, 한국대기보전학회지, 12(3), 297-305.
 - 15) 김원형, 강창희, 정덕상, 고희정, 이원 (2008) 한라산 1100 고지 총부유분진 (TSP)의 조성 및 오염 특성,
 - 16) 김원형, 강창희, 신찬성, 고선영, 홍민선 (2003) 제주도 한라산 1100 고지 대기 에어로졸의 조성 및 특성, 한국대기환경학회지, 19(2), 145-156.
 - 17) 박민하, 김용표, 강창희 (2001) 황사/비황사의 입자 조성 변화: 1993~1996년 봄철고산 측정자료, 한국대기환경학회지, 17(6), 487-492.
 - 18) 선우영, '장거리이동 입자상 물질의 화학적 특성과 거동에 관한 연구(Ⅲ)', 국립환경과학원보고서, p166, 2007
 - 19) 송정민 (2008) 2006년 한라산 1100 고지 대기 에어로졸의 입경별 조성 특성, 제주대학교 석사학위 청구논문.
 - 20) 신선아, 한진석, 홍유덕, 안준영, 문광주, 이석조, 김신도 (2005) 2000~2002년 우리나라에서 관측된 황사의 화학 조성 및 특성, 21(1), 119-129
 - 21) 신찬성 (2003) 제주 배경농도지역 대기 에어로졸 조성의 장기 변동 및 특성에 관한 연구, 제주대학교 박사학위 청구논문.
 - 22) 안승구, 김경남, 김무훈, 동종인, 명소영, 박대원, 원양수, 정종태, 조완근, 차준석, '최신환경화학', 동아출판사, p277, 2001.
 - 23) 원동욱 (2001) 중국 황사 문제와 동북아 환경 협력의 과제, 환경과생명, 통권 (28), p192-193.
 - 24) 추장민, 정희성, 강광규, 유난미, 김미숙 (2003) '동북아지역의 황사 피해 분석 및 피해저감을 위한 지역 협력방안 I', 한국환경정책·평가연구원
 - 25) Aardenne, J. A., G. R. Carmichael, H. Levyl, D. Streers and L. Hordijk (1999) Anthropogenic NO_x emissions in Asia in the period 1990-2020, Atmospheric Environment, 33, 633-646.
 - 26) Arimoto, R. A., D. L. Duce, S. J. M. Prospero., R. Talbot, J. D. Cullen, U. N. Tomza, F. Lewis and B. J. Ray, J. Geophys. Res., 101(D1),

2011-2023(1996).

- 27) 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.
- 28) Chun, Y.S., J.Y. Kim, J.C. Choi, K.O. Boo, S.N. Oh, and M.H. Lee (2001a) Characteristic number size distribution of aerosol during Asian dust period in Korea, *Atmospheric Environment*, 35, 2715-2721.
- 29) Chun Youngsin, Kyung-On Boo, Jiyoung Kim, Soon-Ung Park, and Meehye Lee (2001b) Synopsis, transport, and physical characteristics of Asian dust in Korea, *J. Geophys. Res.*, 106(D16), 18461-18469.
- 30) Chung, Y.S. and M.B. Yoon (1996) On the occurrence of Yellow Sand and atmospheric loading, *Atmospheric Environment*, 30(13), 2387-2397.
- 31) David, M.T., J.F. Robert, and L.W. Douglas (2001) April 1998 Asian dust event: A southern California perspective, *Journal of Geophysical Research*, 106(D16), 18371-18379.
- 32) Fang, G.-C., C.-N. Chang, Y.-S. Wu, S.-C. Lu, P. P.-C. Fu, S.-C. Chang, C.-D. Cheng, and W.-H. Yuen (2002) Concentration of atmospheric particulates during a dust storm period in central Taiwan, Taichung, *The Science of the Total Environment*, 287, 141-145.
- 33) 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.
- 34) Han, Z., H. Ueda and T. Sakurai (2006) Model study on acidifying wet deposition in East Asia during wintertime, *Atmospheric Environment*, 40(13), 2360-2373.
- 35) Ho, K.F., S.C. Lee, C.K. Chan, J.C. Yu, J.C. Chow, X.H. Yao (2003) Characterization of chemical species in PM_{2.5} and PM₁₀ aerosols in Hong-Kong, *Atmospheric Environment*, 37(1), 31-39.
- 36) Huang, X., I. Olmez, N. K. Aras and G. E. Gorden (1994) Emissions of

trace elements from motor vehicles: Potential marker elements and source composition profile, *Atmospheric Environment*, 28(8), 1385-1391.

- 37) 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, *J. Geophys. Res.*, 106(D16), 18317-18330.
- 38) Jie, Xuan and Irina N. Sokolik (2002) Characterization of sources and emission rates of mineral dust in Northern China, *Atmos. Environ.*, 36(131), 4863-4876.
- 39) Kim, Y. P., S.-G. Shin, 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, *Journal of Applied Meteorology*, 37, 1117-1126.
- 40) Lighty, J. S., J. M. Veranth and A. F. Sarofim, *J. Air waste Manag. Assoc.*, 50, 1565-1618(2000).
- 41) Lin. T.-H. (2001) Long-range transport of yellow sand to Taiwan in spring 2000: observed evidence and simulation, *Atmospheric Environment*, 35, 5873-5882.
- 42) McKendry, I.G., J.P. Hacker, R. Stull. S. Sakiyama, D. Mignacca, and K. Reid (2001) Long-range transport of Asian dust to the Lower Fraser Valley, British Columbia, Canada, *Journal of Geophysical Research*, 106(D16), 18361-18370.
- 43) Oravisjarvi, K., K. L. Timonen, T. Wiikinkoski, A. R. Ruuskanen, K. Heinanen and J. Ruuskanen, (2003) Source contributions to PM_{2.5} particles in the urban air of a town situated close to a steel works, *Atmospheric Environment*, 37(8), 1013-1022.
- 44) Park, M. H., Y. P. Kim and C. H. Kang (2003) Aerosol Composition Change due to Dust Storm : Measurements between 1992 and 1999 at

- Gosan, Korea, *Water, Air, & Soil Pollution: Focus*, 3(2), 117-128.
- 45) Pio C. A., M. A. Cerqueira, L. M. Castro, and M. L. Salgueiro(1996) Sulfur and nitrogen compounds variable marine/continental air masses at the southwest european coast, *Atmos. Environ.*, 30(18), 3115-3127
- 46) Ro C. U., K.Y. Oh, H.K. Kim, Y. Chun, J. Osan, J. Hoog, and R. Grieken (2001a) Chemical speculation of individual atmospheric particles using low-Z electron probe X-ray microanalysis: characterizing Asian Dust deposited with rainwater in Seoul, Korea, *Atmospheric Environment*, 35, 4995-5005.
- 47) Ro C. U., K.Y. Oh, H.Y. Kim, Y. P. Kim, C. B. Lee, K. H. Kim, C. H. Kang, J. Osan, J. D. Hoog, A. Worobiec, and R. V. Grieken (2001b) Single-Particle Analysis of Aerosols at Cheju Island, Korea, using low-Z Electron probe X-ray microanalysis: A Direct Proof of Nitrate Formation from Sea Salts, *Environmental Science and Technology*, 35, 4487-4494..
- 48) Takamura, T., N. Sugimoto, A. Shimizu, A. Uchiyama, A. Yamazaki, K. Aoki, T. Nakajima, B.J. Sohn and H. Takenaka, *J. Geophys. Res.*, 112(D22S36), doi: 10. 1029/2007JD008506. 1-12(2007).
- 49) Yeatman, S. G., L. J. Spokes and T. D. Jikells (2001) Comparisons of coarse-mode aerosol nitrate and ammonium at two polluted coastal sites, *Atmospheric Environment*, 35, 1321-1335.
- 50) 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.
- 51) Zhuang, H., C. K. Chan, M. Fang, A. S. Wexler (1999) Formation of nitrate and non-sea-salt sulfate on coarse particles, *Atmospheric Environment*, 33, 4223-4233.

감사의 글

결코 쉽지 않았던 대학원 생활을 잘 마무리 하게 도와주신 많은 분들께 감사의 말씀을 전합니다.

먼저 그동안 바쁘신 데도 많은 격려와 배려로 저를 언제나 후원해주시는 강창희 교수님, 정말 감사합니다. 호탕한 웃음으로 언제나 절 반겨주시던 정덕상 교수님, 따끔한 충고로 저를 이끌어주신 김덕수 교수님, 처음 실험실 생활을 접하게 해주신 변종철 교수님, 환한 미소로 저를 지켜봐주시던 이선주 교수님, 언제나 편안하게 많은 이야기를 들려주시던 김원형 교수님, 항상 웃음으로 대해주시던 이남호 교수님께도 깊은 감사의 말씀을 올립니다.

그리고 묵묵히 절 지켜봐주신 홍상범선생님, 논문 때문에 고생 많이 한 희정언니, 힘든 조교생활 시작한 순봉오빠, 살이 너무 많이 빠져서 안쓰러운 정민오빠, 힘들 때마다 격려해준 언니 같은 은경이, 언제나 행복한 헤림이, 사람 좋은 희곤오빠 그리고 앞으로 고생 많이 할 행범오빠, 용수오빠와 승희, 효정에게도 감사의 말을 전합니다.

아울러 귀찮으실 법도 한데 별말 없이 아침마다 카풀해주는 진석선생님과 정미선생님, 같이 조교생활하며 힘들었을 은숙언니, 힘들 때마다 말없이 웃어주는 경범오빠, 정말 많은 도움을 주신 미연언니, 상훈오빠, 짓궂은 장난에도 웃음으로 화답하는 주희, 이 외에도 일일이 나열하지는 못했지만 많은 힘이 되어주신 선배님들과 후배님들 정말 감사합니다.

또한 언제나 나의 편이 되어주는 서윤이, 승정이, 밋지만 미워할 수 없는 보철오빠, 규진오빠, 용주오빠, 창현오빠, 진성오빠, 승우오빠, 석봉오빠, 신길오빠, 자주보진 못하지만 멀리서나마 나에게 힘이 되어주는 지영이, 수진이, 도영이, 육지에서 맘고생 많이 했을 하나, 순심이 모두모두 고맙습

니다.

그리고 온갖 짜증도 다 받아주고 언제 언제어디서나 항상 날 걱정하며 지켜봐주는 성현오빠 사랑합니다.

끝으로 저에게 언제나 믿음과 사랑을 주시고 물심양면으로 많은 도움을 주신 엄마, 아빠, 누나를 많이 아끼고 사랑해주는 용범이, 바쁘다고 많이 챙겨주지 못해 항상 미안한 예쁜 우리 민경이에게 이 모든 영광을 바칩니다.

