

碩士學位論文

제주도 고산지역 라돈 및 대기
에어로졸의 농도 특성



濟州大學校 大學院

化學科

高 希 政

2005年 12月

제주도 고산지역 라돈 및 대기 에어로졸의 농도 특성

指導教授 姜 昌 禧

高 希 政

이 論文을 理學 碩士學位 論文으로 提出함



2005年 12月

高希政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

2005年 12月

Concentration Characteristics of Radon and
Atmospheric Aerosols in Gosan Area, Jeju Island

Hee-Jung Ko

(Supervised by professor Chang-Hee Kang)

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE
REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF MASTER OF
NATURAL SCIENCE

2005. 12.

DEPARTMENT OF CHEMISTRY
GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

List of Tables	iii
List of Figures	v
ABSTRACT	ix
I. 서 론	1
II. 실 험	4
1. 측정소 설비 및 측정기기	4
1) 측정소 설비	4
2) 측정기기	4
2. 라돈 농도 모니터링	5
3. 대기 에어로졸 시료의 채취 및 분석	5
1) 대기 에어로졸 시료의 채취	5
2) 수용성 성분 분석	6
3) 금속 및 황 성분 분석	7
III. 결과 및 고찰	9
1. 라돈 농도특성	9
1) 연도별, 계절별 농도비교	9
2) 월별, 시간별 농도비교	12
3) 라돈 농도에 따른 역궤적 분석	14
2. 대기 에어로졸 농도특성	21
1) 연도별 농도 비교	21
2) 계절별 농도 비교	33
3) 월별 농도 비교	50
4) 토양 및 해양의 영향	56
5) 성분들 간의 상관성 조사	59

6) 오염물질의 발생 기원	61
7) 풍향별 농도 비교	63
8) 대기 에어로졸 성분의 역궤적 분석	67
IV. 결론	73
V. 참고문헌	75



List of Tables

Table 1. Detection limit(ppb) and RSE for IC analysis	7
Table 2. Instrument conditions and detection limit(ppm) for ICP-AES analysis	8
Table 3. Yearly ²²² Rn concentrations(mBq/m ³) during the year of 2001 and 2003	10
Table 4. Seasonal comparison of ²²² Rn concentrations(mBq/m ³)	10
Table 5. Monthly mean concentrations of radon at Gosan site	13
Table 6. Annual mean concentrations of Water-soluble components during the year of 2001 and 2004	25
Table 7. Annual mean concentrations of sulfur and metal components during the year of 2001 and 2004	26
Table 8. Annual mean concentrations of sulfur and metal components during the year of 2001 and 2004	27
Table 9. Annual mean concentrations of sulfur and metal components during the year of 2001 and 2004	28
Table 10. Seasonal mean concentrations of water-soluble components	36
Table 11. Seasonal mean concentrations of metal components	37
Table 12. Seasonal mean concentrations of metal components	38
Table 13. Seasonal mean concentrations of metal components	39
Table 14. Monthly mean concentrations of water-soluble components	52
Table 15. Monthly mean concentrations of sulfur and metal components	53
Table 16. Seasonal comparison of seawater enrichment factors for water-soluble components	58
Table 17. Seasonal comparison of soil enrichment factors for metal elements	58

Table 18. Cross correlation between TSP aerosol components 60
Table 19. Results of varimax factor analysis for aerosol components 62



List of Figures

Figure 1. Three-year daily radon concentrations between January, 2001 and December, 2003	11
Figure 2. Yearly comparison of radon concentrations between 2001 and 2003	11
Figure 3. Seasonal comparison of ^{222}Rn concentrations between 2001 and 2003	12
Figure 4. Monthly comparison of radon concentrations at Gosan site	13
Figure 5. Hourly comparison of radon concentrations at Gosan site	14
Figure 6. Back trajectories corresponding to high and low 10 % of radon concentrations in spring	17
Figure 7. Back trajectories corresponding to high and low 10 % of radon concentrations in summer	18
Figure 8. Back trajectories corresponding to high and low 10 % of radon concentrations in fall	19
Figure 9. Back trajectories corresponding to high and low 10 % of radon concentrations in winter	20
Figure 10. Comparison of annual total concentrations of water-soluble components during the year of 2001 and 2004	29
Figure 11. Comparison of annual mean concentrations of water-soluble components during the year of 2001 and 2004	29
Figure 12. Comparison of annual mean concentrations of S, Al, Fe, Ca, Na, K and Mg components during the year of 2001 and 2004	30
Figure 13. Comparison of annual mean concentrations of Ti, Mn, Ba, Zn, Sr, V and Pb components during the year of 2001 and 2004	30
Figure 14. Comparison of annual mean concentrations of Cr, Cu, Ni, Co, Mo and Cd components during the year of 2001 and 2004	31

Figure 15. Comparison of annual mean concentrations of metal components during the year of 2001 and 2004	31
Figure 16. Comparison of annual mean concentrations of metal components during the year of 2001 and 2004	32
Figure 17. Comparison of annual mean concentrations of metal components during the year of 2001 and 2004	32
Figure 18. Comparison of seasonal mean concentrations of water-soluble components	40
Figure 19. Comparison of concentrations of water-soluble components in spring	40
Figure 20. Comparison of concentrations of water-soluble components in summer	41
Figure 21. Comparison of concentrations of water-soluble components in fall	41
Figure 22. Comparison of concentrations of water-soluble components in winter	42
Figure 23. Comparison of seasonal Al, Fe, Ca, Na, K, Mg and S concentrations	42
Figure 24. Comparison of seasonal Ti, Mn, Ba, Sr, Zn, V and Pb concentrations	43
Figure 25. Comparison of seasonal Cr, Cu, Ni, Co, Mo and Cd concentrations	43
Figure 26. Comparison of Al, Fe, Ca, Na, K, Mg and S concentrations in spring.	44
Figure 27. Comparison of Ti, Mn, Ba, Sr, Zn, V and Pb concentrations in spring	44
Figure 28. Comparison of Cr, Cu, Ni, Co, Mo and Cd concentrations in spring	45
Figure 29. Comparison of Al, Fe, Ca, Na, K, Mg and S concentrations in	

summer	45
Figure 30. Comparison of Ti, Mn, Ba, Sr, Zn, V and Pb concentrations in summer	46
Figure 31. Comparison of Cr, Cu, Ni, Co, Mo and Cd concentrations in summer	46
Figure 32. Comparison of Al, Fe, Ca, Na, K, Mg and S concentrations in fall	47
Figure 33. Comparison of Ti, Mn, Ba, Sr, Zn, V and Pb concentrations in fall	47
Figure 34. Comparison of Cr, Cu, Ni, Co, Mo and Cd concentrations in fall	48
Figure 35. Comparison of Al, Fe, Ca, Na, K, Mg and S concentrations in winter	48
Figure 36. Comparison of Ti, Mn, Ba, Sr, Zn, V and Pb concentrations in winter	49
Figure 37. Comparison of Cr, Cu, Ni, Co, Mo and Cd concentrations in winter	49
Figure 38. Variations of monthly mean concentrations of water-soluble components	54
Figure 39. Variations of monthly mean concentrations of Al, Fe, Ca, Na, K, Mg and S components.	55
Figure 40. Variations of monthly mean concentrations of Ti, Mn, Ba, Sr, Zn, V and Pb components	55
Figure 41. Variations of monthly mean concentrations of Cr, Cu, Ni, Co, Mo and Cd components	56
Figure 42. Variations of K^+ , $nss-Ca^{2+}$, $nss-SO_4^{2-}$ and NO_3^- concentrations($\mu g/m^3$) as a function of the wind direction	64
Figure 43. Variations of Al, Fe, Ca, K, Ti and V concentrations(ng/m^3) as a function of the wind direction	65

Figure 44. Variations of S, Pb, Zn, Mn, Ba and Cr concentrations(ng/m^3) as a function of the wind direction	66
Figure 45. Back trajectories corresponding to high and low 25 % of sulfate concentrations	69
Figure 46. Back trajectories corresponding to high and low 25 % of nitrate concentrations	70
Figure 47. Back trajectories corresponding to high and low 25 % of calcium concentrations	71
Figure 48. Back trajectories corresponding to high and low 25 % of aluminum concentrations	72



ABSTRACT

The real-time radon(^{222}Rn) monitoring has been carried out to evaluate the background level concentration of atmospheric radon in Gosan site, Jeju Island, for three years between January 2001 and December 2003. In addition, the atmospheric TSP aerosols have been sampled for four years between January 2001 and December 2004, and then their ionic and metallic components were analyzed to understand the characteristics as well as the background level of air pollution.

The daily mean concentration of radon were 2010 ± 1065 mBq/m³, and the seasonal concentrations were 1834, 1925, 2129 and 2159 mBq/m³ respectively for spring, summer, fall and winter seasons. In monthly comparison, the radon showed the highest concentration in November and the lowest in May. The hourly concentrations have increased during the nighttime with showing 2439 mBq/m³ at 7 a.m., and relatively decreased during the daytime with showing 1577 mBq/m³ at 2 p.m. From the back trajectory analyses, the radon concentrations showed higher values when the air masses were moved from the China continent to Jeju area, on the other hand, it showed lower values when from the North Pacific Ocean.

The concentrations of ionic components of atmospheric TSP aerosols were in the order of $\text{nss-SO}_4^{2-} > \text{Na}^+ > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{NH}_4^+ > \text{nss-Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+}$, and those of metal elements and sulfur were in the order of $\text{S} > \text{Na} > \text{K} > \text{Al} > \text{Ca} > \text{Fe} > \text{Mg} > \text{Zn} > \text{Pb} > \text{Ti} > \text{Mn} > \text{V} > \text{Ba} > \text{Cu} > \text{Ni} > \text{Sr} > \text{Cr} > \text{Mo} > \text{Cd} > \text{Co}$. On the comparison of yearly mean concentrations, the major components of aerosols such as nss-SO_4^{2-} , NO_3^- , S, Al and Ca were in the order of $2002 > 2001 > 2004 > 2003$. Seasonally, the concentrations of nss-SO_4^{2-} , NO_3^- , S, nss-Ca^{2+} , Al, Ca, Fe, Ti and K, which were mostly originated from anthropogenic and soil sources, showed higher values with the order of $\text{spring} > \text{winter} > \text{fall} > \text{summer}$, and those of soil components largely increased in spring more than other seasons. But the concentrations of Pb and Zn were in the order of $\text{winter} > \text{spring} > \text{fall} > \text{summer}$, and $\text{spring} > \text{winter} \approx \text{fall}$

> summer for those of Cr and Cd. From the comparison of monthly concentrations, most of aerosol components showed the highest concentrations in March, and the lowest concentrations in July. Whereas the concentrations of nss-Ca^{2+} , Al, Fe, Ca, Ti, Ba and Sr increased in April as well as in March, and those of nss-SO_4^{2-} and S were higher in June. Meanwhile in the heavy metals, the concentration were higher in January for Pb, and in March for Ni, Cr and Cu. Due to the enrichment factors, the Na^+ , Cl^- and Mg^{2+} were mostly originated from seasalt particles, and the Al, Ca and Fe were from soil particles, however the other components of aerosols were originated from another sources. On the basis of factor analysis, the TSP aerosols at Gosan area are largely influenced by soil sources, and next by anthropogenic sources and marine sources. From the study of the concentration variations by wind direction, the concentrations of nss-Ca^{2+} , K^+ , NO_3^- and nss-SO_4^{2-} were higher when the wind came from westerly wind ($210^\circ \sim 330^\circ$), and similarly those of Al, Fe, Ca and Ti increased in northwesterly wind ($270^\circ \sim 330^\circ$), but relatively decrease in southeasterly wind. In the result of back trajectory analyses, the concentrations of nss-SO_4^{2-} , NO_3^- , Al and Ca were higher when the air masses came from China continent to Jeju area, on the other hand, their concentrations were lower when from the North Pacific Ocean.

I. 서 론

최근 심화되는 대기오염의 영향으로 인접 국가들 간의 월경성(transboundary) 대기 오염물질의 장거리 이동에 대한 관심이 크게 고조되고 있다. 대기오염물질의 장거리 이동 연구는 1970년대 후반 이후 주로 미국을 비롯한 선진국을 중심으로 진행되어 왔다. 특히 미국과 캐나다간의 산성비 절감을 위한 NAPAP(National Acid Precipitation Assessment Program), NASA가 주도한 PEM(Pacific Exploratory Mission), IGAC(International Global Atmospheric Chemistry)의 APARE(East Asia/North Pacific Regional Experiment)와 ACE(Aerosol Characterization Experiment) 등은 이러한 장거리 이동 현상을 규명하기 위한 대표적인 연구이며, 또한 유럽에서는 1988년부터 1995년까지 EUROTRAC(EUREKA-project on the Transport and Chemical Transformation of Environmentally Relevant Trace Constituents in the Troposphere over Europe)연구 과제를 수행하여 월경성 대기오염물질의 이동과 그 피해를 조사하였다(Jiyoung Kim et al., 2005; <http://abc-gosan.snu.ac.kr/mtg.html>).

2000년 7월에는 제1차 태평양횡단 대기오염물질에 관한 연구 회의가 미국 시애틀에서 개최되었다. 이 회의에서는 미국, 캐나다, 일본, 중국 및 한국의 과학자들이 태평양 횡단 대기오염물질에 관한 과학적인 연구 설정, 관계 전문가와 기구 간의 네트워크 구성 등에 대한 논의가 이루어졌다. 또 이 회의에서 발표된 주요 내용들을 요약하면 다음과 같다. 첫째, 서태평양의 대기오염 모니터링 결과를 근거로 여름이나 겨울보다는 봄과 가을에 아시아 대륙의 오염물질이 빠른 속도로 멀리까지 영향을 주고, 황사, 유기물질, 황산염 등이 장거리 수송과정 중에서 광화학적, 기후적으로 중요한 역할을 하는 것으로 나타났다. 둘째, 극지방과 청정지역의 모니터링 결과, 극지방의 동식물이나 호수, 토양 등에서 PCBs와 같은 난분해성 유기화합물이 상당량 검출되고 있고, 유라시아 및 북미로부터 먼지나 오염물질이 이동 가능성이 있는 것으로 조사되었다. 셋째, 북동태평양에서의 모니터링 결과, 아시아오염물질의 수송은 에피소드 적으로 관측되고 있으며, 장거리 수송이 가능한 기상조건이 형성되면 아시아에서 배출된 오염물질은 약 5일 전후에 미국 서해안까지 도달할 가능성이 있는 것으로 발표되었다. 이처럼 태평양 연안지역에서는 오염물질 장거리 이동 현상에 대한 과학적인 증거들이 발표되

고 있으며, 이러한 경향은 향후 국가적인 분쟁으로 대두될 가능성을 내포하고 있다. 아시아 지역에서 대기오염물질 장거리 이동 현상을 집중적으로 연구하기 위하여 수행된 대표적인 국제공동연구로는 APARE/PEACAMPOT(Perturbation of East Asian Continental Air Mass to Pacific Oceanic Troposphere), PEM-West, ACE-Asia, 그리고 2005년부터 측정을 시작한 ABC(Atmospheric Brown Cloud) 등을 들 수 있다(Xiao H. Y, et al., 2002; Jiyoun Kim et al., 2005).

이러한 국가 간 장거리 이동 오염물질의 관측 및 평가를 위해 우리나라에서도 중국, 일본과 함께 동북아시아 지역에서의 장거리 이동오염물질에 대한 연구를 활발히 진행하고 있다. 2004년 10월에는 동북아시아의 대기오염물질 장거리 이동현상을 규명하고, 이에 대한 협력방안을 논의하기 위한 제 7차 한·중·일 장거리이동 대기오염물질에 관한 전문가 회의가 중국 샤먼(廈門)에서 개최되었다. 이 회의에서는 한·중·일 장거리 이동 대기오염물질 공동연구사업(LTP, Long-range Transboundary Air Pollutants in Northeast Asia)에 대한 결과가 발표되었다. 이 사업은 중국 대련, 일본 오키, 제주도 고산 등 3국이 합의한 8개 지점과 서해안 지역에서 지표 및 상층의 대기오염물질(SO₂, NO₂, O₃, PM₁₀, PM_{2.5})들을 공동으로 측정하기 위한 것으로, 이 회의에서는 각국에서 수행한 대기오염 측정 및 모델링 결과가 발표되었다. 이에 따르면 1998년 한 해 동안 우리나라에 침적되는 전체 황산화물 465,000톤 중 약 20%에 해당하는 93,500톤 정도가 중국으로부터 이동한 것으로 나타나고 있다(환경부, 2004).

동아시아 지역에서 대기오염물질의 장거리 이동현상을 규명하기 위한 지상관측소는 여러면으로 제주도가 적합한 것으로 평가되고 있다. 그 이유는 제주도가 자체 오염원의 방해가 없는 국내 청정지역이기 때문에 순수하게 장거리 이동되는 오염물질의 양을 측정하기에 적합하고, 특히 중국과 일본의 중앙에 위치하고 있어서 동북아시아에서 장거리 이동되는 대기오염물질의 영향을 평가하는데 아주 유리한 위치에 있기 때문이다(Topping D. et al, 2004; Zhang M. et al, 2004). 최근 제주도 지역에서 측정이 이루어진 국제공동연구로는 1991년 9월에 PEM-West A, 1994년 2에 PEM-West B, 그리고 최근 대기 에어로졸이 기후변화에 미치는 영향을 조사하기 위한 목적으로 수행된 ACE-Asia 등이 있다(ACE-Asia Project Prospectus, 2001). 이 중 IGAC 주도로 이루어지고 있는 ACE-Asia 국제공동연구는 동아시아와 북서 태평양에서의 인위적 대기 에어로졸의 특성과 복사 강제력에 대한 관련성을 추정하기 위하여 대기 에어로졸

의 물리, 화학 및 복사 특성, 그리고 구름 핵 응결 특성을 결정하고, 이들 특성간의 관련성을 연구하는데 그 목적을 두고 있다. 그리고 2005년 3월부터는 남아시아 지역에서 발생하는 대기오염물질의 장거리 이동을 연구하기 위한 ABC 프로젝트가 UNEP가 주관 하에 진행 중에 있다.

본 연구는 국내 청정지역인 제주도 고산 지역에서 실시간으로 라돈(^{222}Rn) 농도를 모니터링하고, 대기 에어로졸을 채취, 분석한 결과이다. 또 이러한 측정 결과를 이용하여 라돈과 대기 에어로졸 성분의 배경농도 측정은 물론 대기오염물질의 농도변화 특성을 조사하였고, 장거리 이동에 의해 주변국가로부터 유입된 오염물질의 영향을 평가하였다. 이러한 연구는 한반도에 영향을 미칠 수 있는 대기오염원과 그 이동경로를 규명하는데 중요한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 보인다.



II. 실험

1. 측정소 설비 및 측정기기

1) 측정소 설비

본 연구를 위한 측정소는 제주도 북제주군 한경면 고산리 소재 수월봉(33°28' N, 127°17' E)에 컨테이너를 설치하여 마련하였다. 제주도 서쪽 끝 지점에 위치한 이 지역은 바다와 바로 인접해 있으며 자체오염원이 거의 없는 청정지역이다. 측정설비는 제주 고층 레이더 기상대로부터 서쪽 방향으로 약 300 m 떨어져 있는 해발 72 m의 언덕위에 위치하고 있다. 측정 장비 탑재를 위한 컨테이너 내부에는 에어컨, 제습기, AVR 등을 설치하여 기기작동에 적합한 온도, 습도 및 안정된 전원을 공급하였다.

2) 측정기기

(1) Radon(²²²Rn) Detector System

라돈 검출기는 배경농도 측정을 위한 고감도 장비로 호주 ANSTO (Australian Nuclear Science and Technology Organisation)에서 자체적으로 설계, 제작하였다. 이 라돈 검출기의 감도(sensitivity)는 $0.21 \text{ counts} \cdot \text{sec}^{-1}/\text{Bqm}^{-3}$ 이고, 검출한계(lower limit of detection)는 90 mBq/m^3 이다.

(2) High Volume Tape Sampler

대기 중의 에어로졸 시료는 일본 KIMOTO Electric사에서 제작한 high volume tape sampler(model 195A)를 사용하여 채취하였다. 이 sampler는 roll type의 PTFE (polytetrafluoroethylene) 필터(sumitomo Electric, 100mm × 10m)를 사용하여 연속적으로 시료를 채취할 수 있는 자동시스템이며, 시료의 채취시간을 임의로 조절할 수 있는 timer가 부착되어 있다. High Volume Tape Sampler는 측정소의 컨테이너 내부에 탑재하여 흡입관(길이 7 m, 내경 38 mm인 flexible hose)은 컨테이너의 측면을 관통시켜 지상 6m 높이의 에어로졸이 포집될 수 있도록 설치하였다. 이 때 흡입 공기의 유

속은 초고속도가 대략 170L/min이 되도록 조정하였다.

(3) 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.

(4) Microwave Digestion System

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

(5) Ion Chromatograph

에어로졸의 주요 양이온 및 음이온 성분들은 Metrohm사의 Modula Ion Chromatograph를 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 사용하여 분석하였다.

2. 라돈 농도 모니터링

라돈 농도는 Radon(²²²Rn) Detector System에 컴퓨터를 연결하여 실시간으로 모니터링 하였고, 2001년 1월부터 2003년 12월까지 총 3년간 30분 간격으로 연속하여 측정하였다. 이렇게 측정된 데이터는 28일 간격으로 실시한 표준물질의 농도와 연 1회(2~3 일정도) 측정한 배경농도 측정 자료를 이용하여 검정 후 최종 농도를 산출하였다(Whittlestone S. et al., 1998; Wlodek Zahorowski et al., 2005)

3. 대기 에어로졸 시료의 채취 및 분석

1) 대기 에어로졸 시료 채취

에어로졸 시료는 high volume tape sampler를 사용하여 24시간 단위로 2001년 1월부터 2004년 12월까지 4년간 채취하였다. 시료 채취용 필터는 테프론 재질(PTFE, polytetrafluoroethylene)의 롤 테이프형(100 mm × 10 m)으로 한 개의 롤 테이프가 완전히 감길 때마다 sampler로부터 필터를 분리하여 대기 에어로졸을 분석하였다. PTFE 필터는 시료가 채취된 부분을 원형으로 잘라낸 뒤, 이를 2등분하여 한 개는 수용성 성분, 나머지 한 개는 금속 성분 분석에 이용하였다. 또한 시료 채취시 공기의 유속은 대략 170 L/min이 되도록 조절하였으며, 총 공기의 유량은 기록계의 기록지에 표시된 유속 및 시간을 대조하여 계산하였다(Min Ha Park et al., 2004).

2) 수용성 성분 분석

(1) 시료의 전처리

수용성 성분 분석용 필터는 에탄올 0.2 mL로 침적시킨 후 초순수 50 mL를 가하여 초음파 세척기에서 30분간 수용성 성분을 용출시키고, 재차 진탕기(shaker)에서 1시간 동안 수용성 성분들을 완전히 용출시켰다. 이 때 용기는 125 mL 용량의 PE병을 사용하였다. 용출액은 0.45 μm 필터(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 Cation 1-2-6 컬럼, 1.0 mL/min 유속, 20 μL 주입량, 4.0 mM tartaric acid / 1.0 mM pyridine-2,6-dicarboxylic acid 용리액의 조건으로 분석하였다. 또 SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^- 음이온은 Metrohm Modula IC를 사용하여 Metrohm Metrosep A-SUPP-4 컬럼, 1.0 mL/min 유속, 100 μL 주입량, 1.8 mM NaHCO_3 / 1.7 mM Na_2CO_3 용리액, 0.1% H_2SO_4 썬프래서 용액의 조건으로 분석하였다. 이 때 수용성 이온성분을 분석하기 위한 IC의 검출한계와 상대표준오차(RSE)는 Table 1과 같다.

Table 1. Method detection limit(ppb) and RSE for IC analysis.

	NH ₄ ⁺	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻
MDL	0.19	0.13	1.62	2.42	1.47	0.40	0.32	0.89
RSE	0.03	0.03	0.09	0.06	0.10	0.05	0.04	0.13

3) 금속 및 황 성분 분석

(1) 시료의 전처리

대기 에어로졸 시료가 채취된 필터는 비닐봉지에 밀봉하여 -20 °C 냉동고에 보관하였고, 대략 3개월 간격으로 동시에 분석하였다. 에어로졸의 금속 및 황 성분은 EPA Method 3051A의 방법으로 마이크로파 분해 장치를 사용하여 혼산 용액으로 용출시켰다. 시료가 채취된 필터를 테프론 용기에 넣고 진한 질산 9 mL와 진한 염산 3 mL를 가한 후 마이크로파를 조사하여 5.5분 동안 온도를 175 °C로 올리고, 다시 이 온도에서 4.5분간 유지시킨 후 10분간 서서히 온도를 떨어뜨려 분해하였다. 마이크로파 분해를 거친 용액은 0.45 μm 필터로 여과하여 불용성 입자를 거른 후 초순수를 사용하여 최종적으로 용량플라스크에서 25 mL로 표충하여 ICP분석용 시료로 사용하였다.

(2) 금속 및 황 성분 분석

전처리를 거친 에어로졸의 금속 성분들은 ICP법으로 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 ppm 용액을 초순수와 혼산 용액으로 희석하여 조제하였다. 이 때 희석용매는 매트릭스 효과를 최소화시키기 위하여 시료의 전처리 과정과 동일한 비율로 HNO₃과 HCl을 혼합한 용액을 사용하였다. 검량선 작성 시 사용한 표준용액은 시료의 농도에 따라 고농도 성분들은 0.01~5.0 μg/mL, 저 농도 성분들은 0.01~1.0 μg/mL 범위로 조제하였다. 이 때 19종의 금속 성분과 황을 분석하기 위한 ICP-AES의 조건 및 검출한계는 Table 2와 같다.

Table 2. Instrument conditions and detection limit(ppm) for ICP-AES analysis.

Instrument		Thermo Jarrel Ash, Model IRIS-DUO			
Operation Mode	Simultaneous mode	RF Power	1150 W		
Plasma Type	Radial, Axial	Ar Flow Rate	Outer = 16.0 L/min Inner = 0.5 L/min Nebulizer = 28, 35 psi		
RF Frequency	40.68 MHz	Pump Rate	130 rpm		
Element	Detection Wavelength (nm)	Detection Limit (ppm)	Element	Detection Wavelength (nm)	Detection Limit (ppm)
Al	396.152	0.044	Fe	259.837	0.009
Ca	317.933	0.021	Na	588.995	0.028
K	766.490	0.068	Mg	202.582	0.012
Ti	334.941	0.001	Mn	257.610	0.000 ₂
Ba	233.527	0.002	Sr	346.446	0.003
Zn	213.856	0.001	V	309.311	0.001
Cr	267.716	0.003	Pb	220.353	0.021
Cu	324.754	0.003	Ni	221.647	0.002
Co	228.616	0.001	Mo	202.030	0.002
Cd	214.438	0.001	S	182.034	0.031



Ⅲ. 결과 및 고찰

1. 라돈 농도특성

1) 연도별, 계절별 농도 비교

라돈(^{222}Rn)은 자연계에 널리 분포하는 자연 방사성 물질로 주로 암석이나 토양 등에 존재하는 우라늄(^{238}U), 라듐(^{226}Ra) 등의 붕괴과정에서 발생된다. 불활성 기체인 라돈은 반응성이 거의 없지만 α 붕괴에 의해 3.82일의 반감기로 붕괴한다. 붕괴과정에서 ^{218}Po , ^{214}Po , ^{214}Bi 등의 딸원소(radon daughters)를 생성하고, 최종적으로 납(^{210}Pb)으로 변한다. 라돈은 붕괴과정에서 α -선을 발생하기 때문에 호흡 시 폐에 흡입되면 인체 세포를 죽이거나 염색체를 손상시킬 수 있으며, 폐암의 발생률을 높이는 것으로 보고되고 있다(OECD/NEA, 1983, ICRP, 1987).

또 라돈은 기체상으로 존재하고 반응성이 없기 때문에 대기 중에서 기류를 타고 멀리 이동할 수 있다. 그리고 공기궤(air mass)의 발원 조건에 따라 큰 농도차를 나타낸다. 즉, 발생기원이 지각물질이기 때문에 해양에서 이동한 공기궤에 비해 대륙에서 생성된 공기궤에서 2~3배 더 높은 농도를 보이는 것으로 조사되고 있다. 특히 라돈은 비교적 수명이 짧은 NO_x , SO_2 , CO , O_3 등의 대기오염물질들과 비슷한 반감기를 갖고 있고, 대기 에어로졸의 체류시간과도 유사한 반감기를 나타내기 때문에, 이들 물질들의 대기 중에서의 이동경로를 추적하기 위한 추적자(tracer)로 아주 적합한 것으로 알려져 있다(Wlodek Zahorowski et al., 2005; Zahorowski W. et al., 2004).

본 연구는 2001년 1월부터 2003년 12월까지 총 3년간 장기적으로 라돈농도를 실시간으로 모니터링 하였고, 그 결과를 Table 3 ~ Table 4와 Figure 1 ~ Figure 3에 나타내었다. 먼저 3년 연구 기간 동안의 연도별 농도(Table 3)와 전체 농도 변화(Figure 1~2)를 보면, 2001년에 1909 mBq/m^3 , 2002년에 1999 mBq/m^3 , 2003년에 2124 mBq/m^3 로 농도가 지속적으로 약간씩 증가하여 2003년도에 가장 높은 농도를 보인 것으로 조사되었다. 그림에서 박스는 50%의 집중된 농도의 데이터를 표시하고였고, 이 범위를

1.5배 이상 벗어난 수치는 정밀성이 떨어지므로 제외하였다. 또 이 기간 중 일별 평균 농도는 $2010 \text{ mBq/m}^3 \pm 1065 \text{ mBq/m}^3$ 이고, 2003년 2월 25일에 가장 높은 6448 mBq/m^3 의 농도를 나타냈으며, 2001년 6월 18일에 가장 낮은 87 mBq/m^3 의 농도를 보였다.

또한 측정기간 중에 라돈농도를 계절별로 비교해본 결과(Table 4와 Figure 3), 봄철에는 1834 mBq/m^3 , 여름철에 1925 mBq/m^3 , 가을철에 2129 mBq/m^3 , 겨울철에 2159 mBq/m^3 로 겨울에 가장 높은 농도를 보였고, 다음으로 가을, 여름 순이었으며, 봄에 가장 낮은 농도를 나타내었다. 이러한 계절별 변화는 Takao Iida에 의해 조사된 일본의 Nagoya, Kasugai, Taki 지역의 측정 결과와 일치하는 경향을 보였다(Takao Iida, 1996).

Table 3. Yearly ^{222}Rn concentrations(mBq/m^3) during the year of 2001 and 2003.

2001			2002			2003		
Mean±SD	Max	Min	Mean±SD	Max	Min	Mean±SD	Max	Min
1909±1050	5470	87	1999±1056	6355	169	2124±1082	6448	145

Table 4. Comparison of seasonal ^{222}Rn concentrations(mBq/m^3).

Spring			Summer			Fall			Winter		
Mean±SD	Max	Min	Mean±SD	Max	Min	Mean±SD	Max	Min	Mean±SD	Max	Min
1834±942	5298	169	1925±1158	5509	87	2129±981	5470	145	2159±1135	6448	304

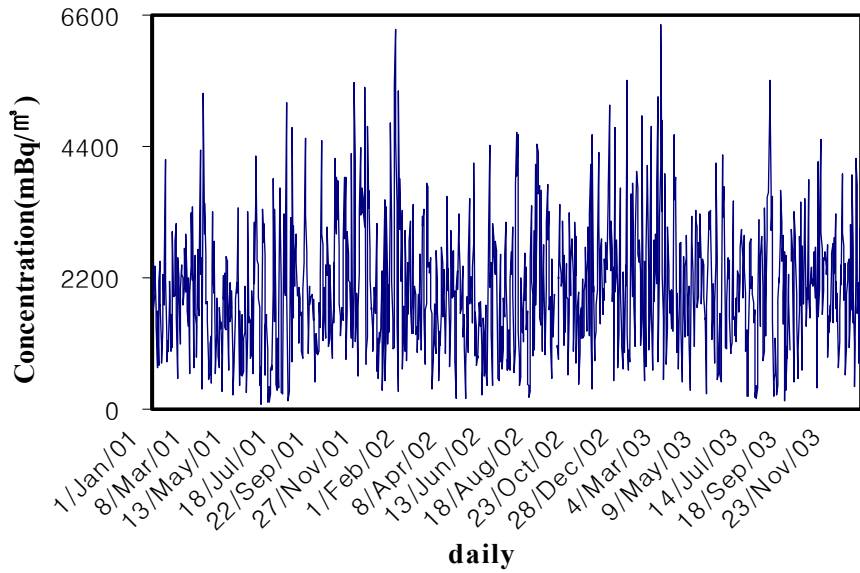


Figure 1. Three-year daily radon concentrations between January, 2001 and December, 2003.

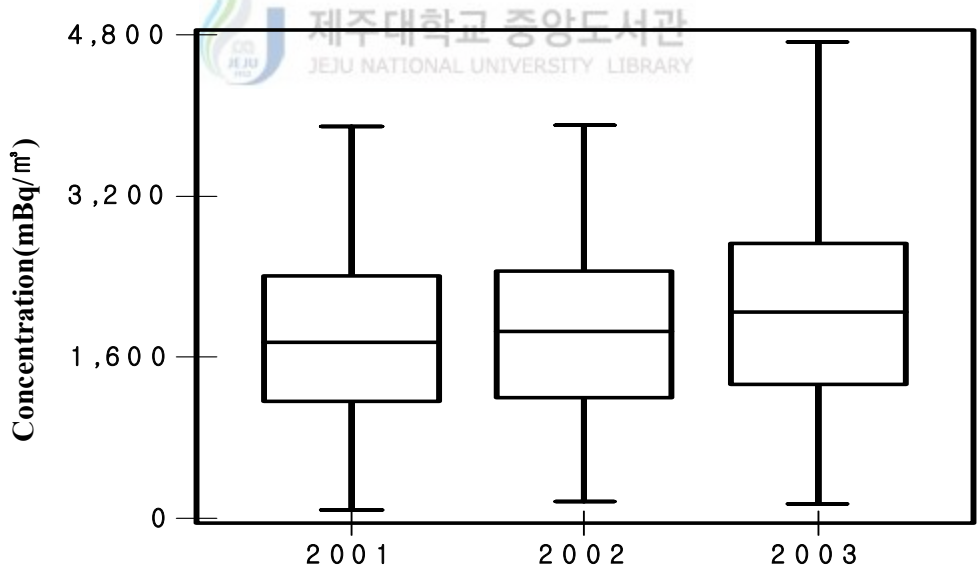


Figure 2. Comparison of yearly radon concentrations between 2001 and 2003.

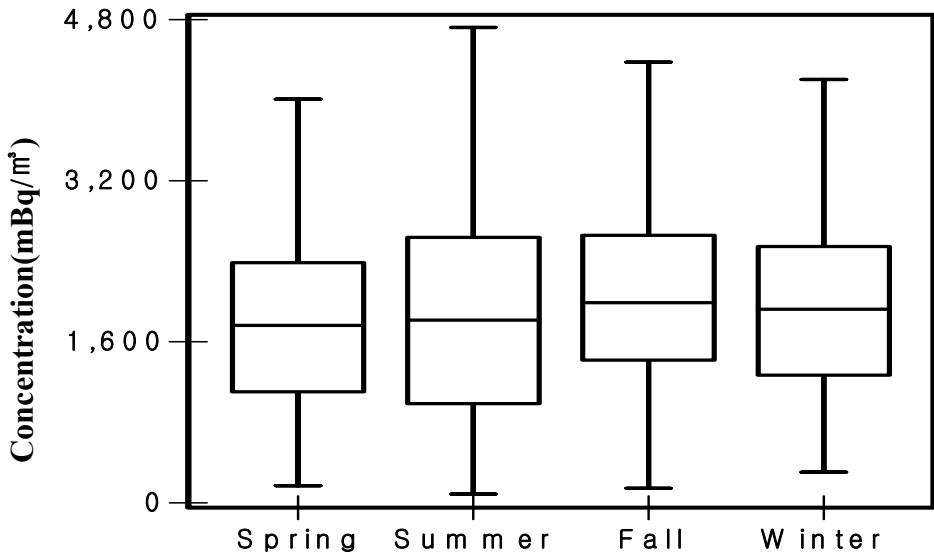


Figure 3. Seasonal comparison of ^{222}Rn concentrations between 2001 and 2003.



2) 월별, 시간별 농도 비교

연구 기간 동안 월별 농도변화를 Figure 4에 나타내었다. 그림에서 막대그래프는 3년간의 일별평균농도를 기준으로 이를 다시 월별로 평균한 농도이고, 꺾은선그래프는 시간별 농도를 기준으로 월별로 평균한 농도이다. 이러한 월별 비교에서 전체적으로는 $\text{Nov} > \text{Feb} > \text{Jan} > \text{Oct} > \text{Aug} > \text{Dec} > \text{Mar} > \text{Jun} > \text{Sep} > \text{Apr} > \text{Jul} > \text{May}$ 의 순으로 높은 농도를 보였고, 11월에 2312 mBq/m^3 로 가장 높으며, 5월에 1651 mBq/m^3 로 가장 낮은 값을 나타내었다. 또 3년간의 전체농도를 각 시간대별로 평균하여 그 결과를 Figure 5에 비교하였다. 결과, 오전 7시에 2439 mBq/m^3 로 하루 중 가장 높은 농도를 보였고, 14시경에 1577 mBq/m^3 로 가장 낮은 농도를 보였다. 그리고 전체적으로는 대체로 야간에 높고 야간에 낮은 농도를 나타내는 것으로 확인되었다. 그 경향을 보면 아침 시간부터 서서히 농도가 낮아지기 시작하여 오후 2시경까지 감소하다가 다시 저녁 시간에 농도가 상승하기 시작하여 밤이 되면 점차로 농도가 상승하는 추세를 보였다. 이러한 경향은 김윤신 등이 서울지역에서 측정 한 결과와도 잘 일치하는 결과로, 해의

일출과 일몰에 따른 대기 중 온·습도 등의 변화에 따른 것으로 추정된다(김윤신 외, 2004). 즉, 야간에 차가워진 공기가 낮 시간에 기온이 상승하면서 대류의 이동이 활발해지고, 대기확산에 의해 지표면의 공기가 이동하면서 주로 지표면에 존재하던 라돈이 확산되기 때문인 것으로 추측되어 진다.

Table 5. Monthly mean concentrations of radon at Gosan site.

	Concentration (mBq/m ³)					Concentration (mBq/m ³)					
	Mean	Median	SD	Max	Min	Mean	Median	SD	Max	Min	
Jan	2172	1825	1269	6355	304	Jul	1695	1630	1163	5124	111
Feb	2251	2053	1087	6448	505	Aug	2155	2046	1232	5509	200
Mar	1991	1900	1046	5298	330	Sep	1912	1879	872	4494	145
Apr	1860	1884	828	3570	169	Oct	2155	2030	925	4522	355
May	1651	1581	912	4254	232	Nov	2312	2132	1099	5470	341
Jun	1925	1863	1032	4422	87	Dec	2063	1968	1035	5098	322

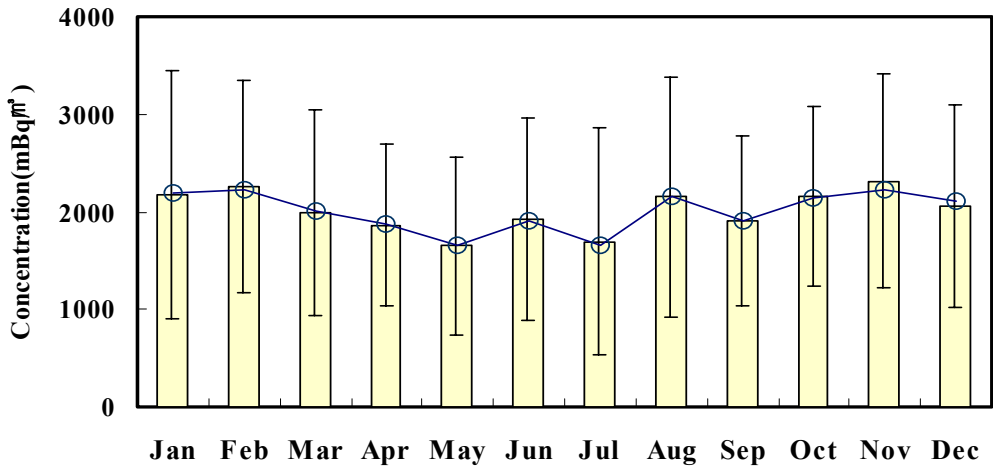


Figure 4. Comparison of monthly radon concentrations at Gosan site; The circles represent mean values based on all hourly data, whereas the bars represent mean values based on daily concentrations.

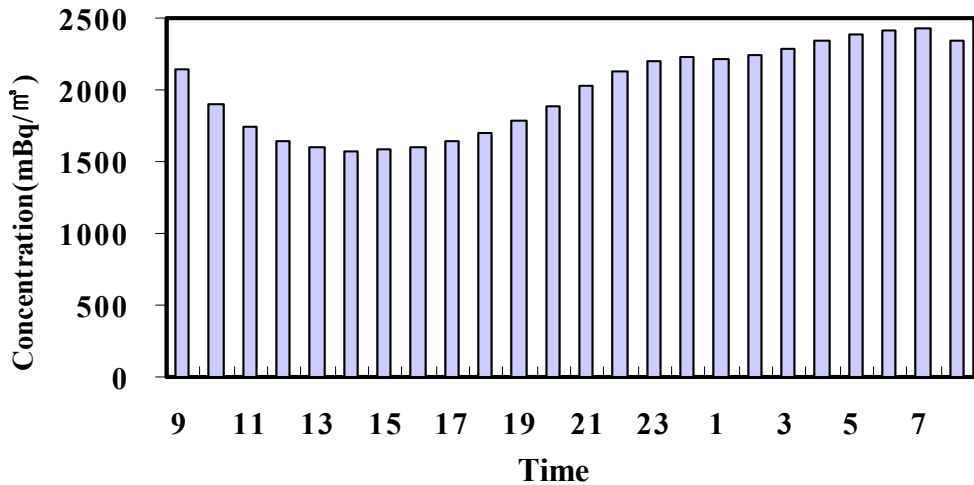


Figure 5. Comparison of hourly radon concentrations at Gosan site.

3) 라돈 농도에 따른 역궤적 분석

본 연구 기간동안에 측정된 라돈 농도를 중심으로 역궤적 분석(back trajectory analysis)을 실시하여 계절별로 이들의 유입 경로를 추적하였다. 2001년 1월부터 2003년 12월까지의 라돈데이터를 이용하여, 각 계절별로 농도가 높은 상위 10%와 상대적으로 농도가 낮은 하위 10%를 선택한 후 각각에 대해 역궤적 분석을 실시하였다. 각 계절별로 일평균 농도가 가장 높은 10%와 가장 낮은 10%를 선정하여 이 시기에 공기계의 이동 궤적을 추적, 비교함으로써, 발원지에서 측정지점까지 유입되는 기류의 경로를 상호 비교하였다.

역궤적 분석에 대한 선행 연구결과들을 보면, 대개 대기오염물질은 1.5 ~ 4 km 고도를 통해 이동되는 것으로 알려져 있다. 특히 황사의 경우 대체적으로 500 mb 면의 아래층에서 이동되며, 특히 700 mb 면이나 850 mb 면의 하층 바람에 의해 주로 수송되는 것으로 알려져 있으며, 700과 850의 기압면에 대한 역궤적은 일기도를 이용하여 직접 작성이 가능하고, 대기 경계층 이동을 보다 잘 묘사하는 중층개기의 바람 이동을 살펴 볼 수 있는 장점을 지니고 있기 때문에 역궤적 분석에 많이 이용되고 있다. 본 연구에서는 역궤적 분석을 위한 출발점 고도를 850 mb 면인 1500 m로 설정하였고, 출발시간

은 해당 날짜의 매 00 UTC 로 하였다. 또 공기 궤적의 연속 추적이 가능한 물질 면인 등온위면을 선택 조건으로 하여 역궤적 분석을 실시하였다. 역궤적 분석은 미국해양대기국(NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration)에서 제공하는 HYSPLIT4(HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory)모델을 이용하였다. 또한 역궤적 분석에 사용한 풍향, 풍속 자료 역시 NOAA의 북반구 FNL(FiNaL run at NCEP)자료를 이용하였다. FNL자료의 수평격자는 위도와 경도 각각 190.5 km이며, 연직 구조는 지표부터 20 hPa 까지 14층으로 구성되어 있다. 또 중국 대륙에서 발생한 대기오염물질의 경우 대략 4일 이내에 한반도에 도달하는 것으로 알려져 있어서, 이를 감안하여 역궤적 분석의 모사시간은 5일(120시간)로 설정하였다(국립환경연구원, 2005).

본 연구 기간에 측정된 일평균 라돈데이터 중 계절별로 각 상위 10%와 하위 10%를 발췌하였고, 봄철에 276개, 여름철에 276개, 가을철에 243개, 겨울철에 270개의 데이터를 선정하였다. 그리고 이 일자를 기준으로 한 역궤적 분석 결과를 그림 Figure 6 ~ Figure 9에 나타내었다. 결과에서 보듯이 라돈 농도는 전체적으로 공기궤가 대륙에서부터 제주지역으로 이동할 때 높은 농도를 나타낸 반면, 북태평양의 해양으로부터 제주지역으로 이동할 때 상대적으로 낮은 농도를 나타내고 있다. 특히 이러한 현상은 여름철에 가장 두드러진 경향을 보였고, 주로 북서풍이 우세한 겨울철에 상대적으로 덜 뚜렷한 경향을 나타내고 있다.

또한 제주도를 중심으로 주변지역을 임의로 I(중국대륙), II(한국 및 시베리아 지역), III(일본 및 북태평양지역)의 세 구역으로 나누고, 역궤적 분석 결과를 이용하여 제주도로 이동한 공기궤의 발원지를 조사하였다. 측정 기간 동안 대부분의 경우에 공기의 궤적을 보면 중국대륙을 거쳐 북서풍을 타고 한반도로 이동되었음을 알 수 있었다. 이를 계절별로 조사해 본 결과, 봄철에는 농도가 높은 상위 10%일 때, 약 82.2%가 중국대륙에서 발원한 공기궤가 제주도 고산지역으로 유입되었지만, 반면에 농도가 낮은 하위 10%일 때에는 57.2% 정도가 중국대륙에서 발원하였고, 나머지 35.7%는 일본지역과 북태평양지역에서 발원한 공기궤가 제주도 고산지역으로 이동되었음을 확인할 수 있었다. 여름철에는 상위 10% 고농도 라돈 시기에 약 57.2% 정도가 중국대륙, 32.1%가 일본 및 북태평양지역, 10.7%가 우리나라 및 시베리아 지역에서 발원된 반면 저농도 라돈 시기에는 약 25.0%가 중국대륙, 71.4%가 일본 및 북태평양지역,

3.6%가 우리나라 및 시베리아 지역에서 발원하여 제주도 고산지역으로 공기궤가 이동되었음을 알 수 있었다. 또 가을철의 경우 고농도 라돈 시기에 공기궤의 87.5% 정도가 중국대륙지역에서 이동했고, 8.3%가 일본 및 북태평양지역, 4.2% 정도가 우리나라 및 시베리아 지역으로부터 공기궤가 이동한 반면, 저농도 라돈 시기에는 약 66.6% 정도가 중국대륙, 29.2% 정도가 일본 및 북태평양지역, 4.2%가 우리나라 및 시베리아지역에서 발원되어 제주도 고산지역에 이동된 것으로 조사되었다. 그러나 겨울철의 경우 다른 계절들과는 조금 다른 경향을 보였고, 고농도 라돈 시기에 공기궤의 96.3% 정도, 저농도 라돈 시기에 77.8% 정도로, 다른 계절에 비해 상대적으로 저농도 시에도 중국대륙에서의 발원 빈도가 큰 것으로 조사되었다. 이처럼 겨울철에 다른 계절과 다른 경향을 보이고 있는 것은 겨울철 풍향이 대부분 북서풍이고, 다른 방향의 풍향이 거의 나타나지 않았기 때문이다. 그러나 겨울철의 경우 하위 10%의 라돈 농도가 타 계절에 비해 더 높게 나타나고 있어서 제주지역의 대기질은 모든 계절에 걸쳐서 중국의 영향을 크게 받고 있는 것으로 추정된다.



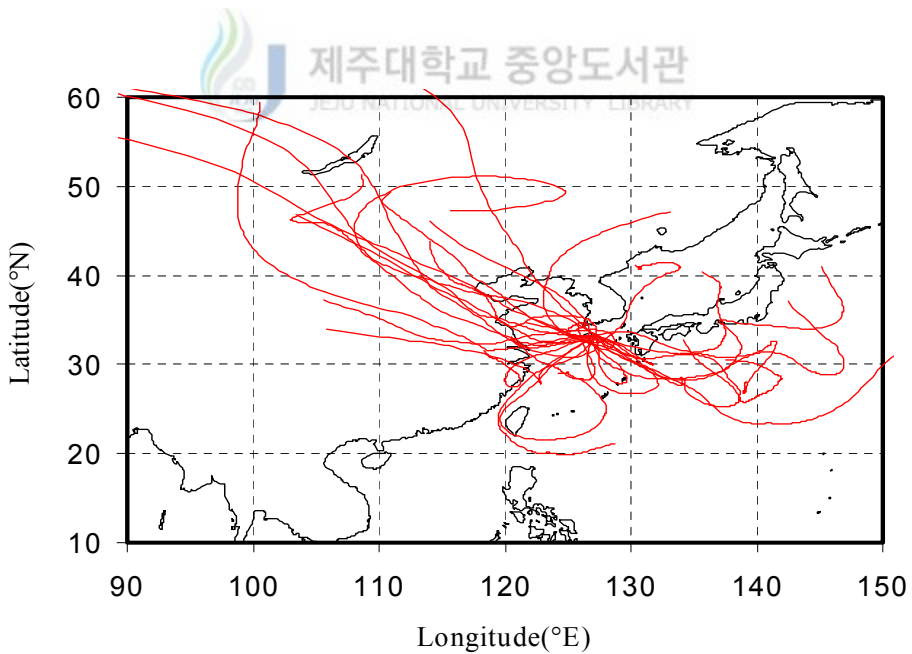
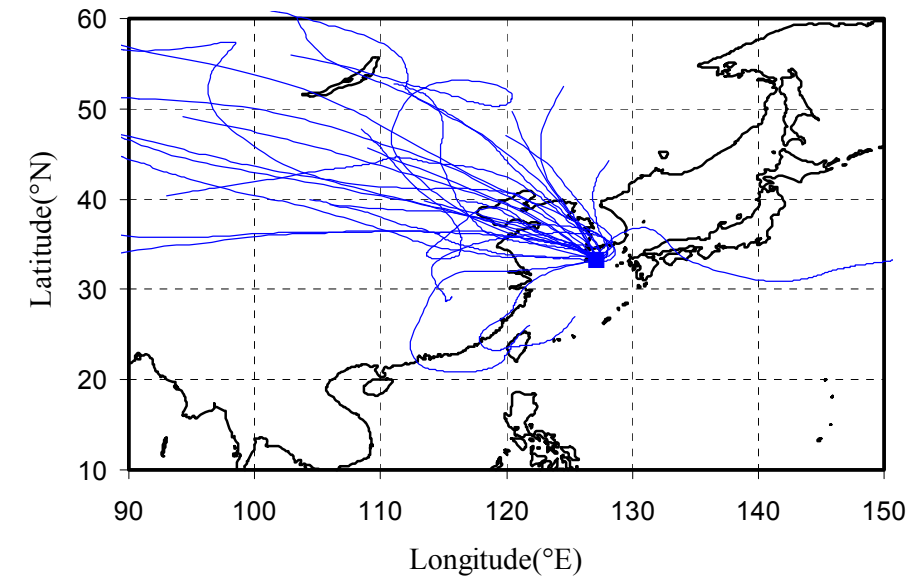


Figure 6. Back trajectories corresponding to high(upper) and low (lower) 10 % of radon concentrations in spring.

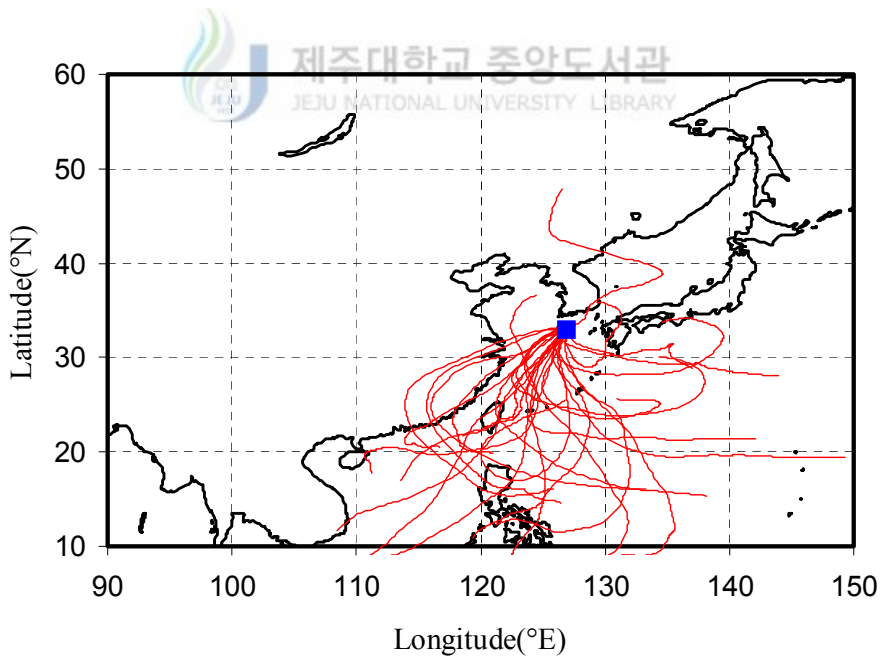
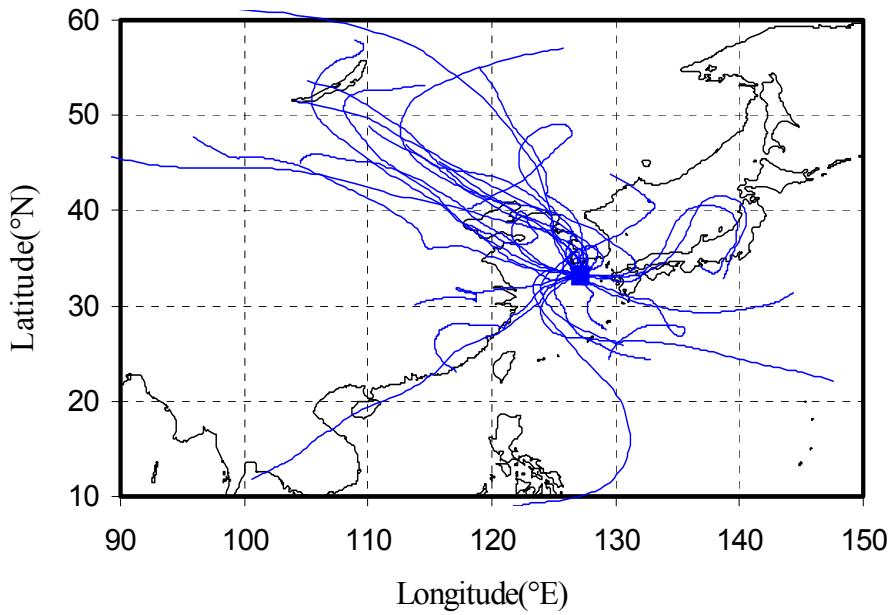


Figure 7. Back trajectories corresponding to high(upper) and low (lower) 10% of radon concentrations in summer.

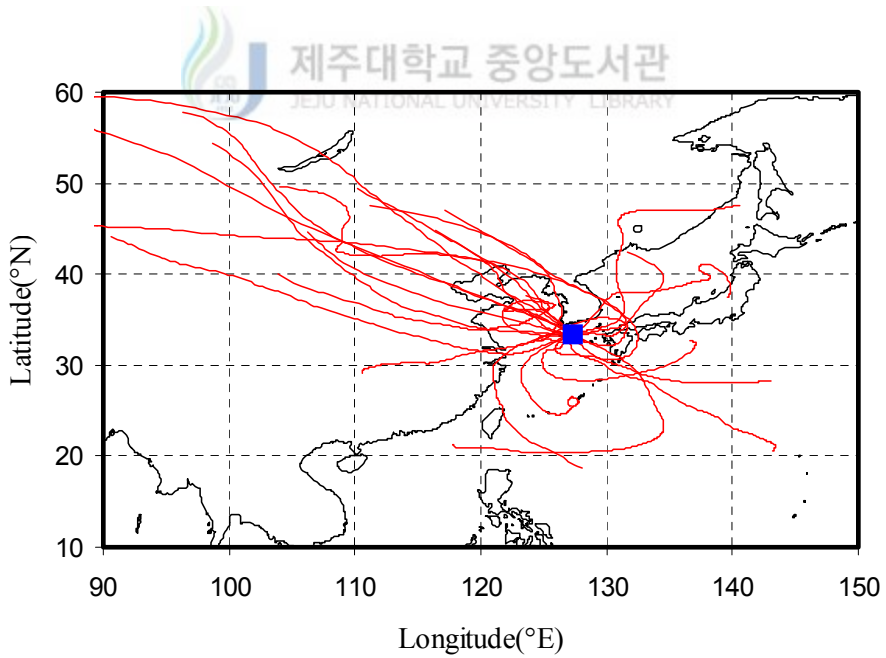
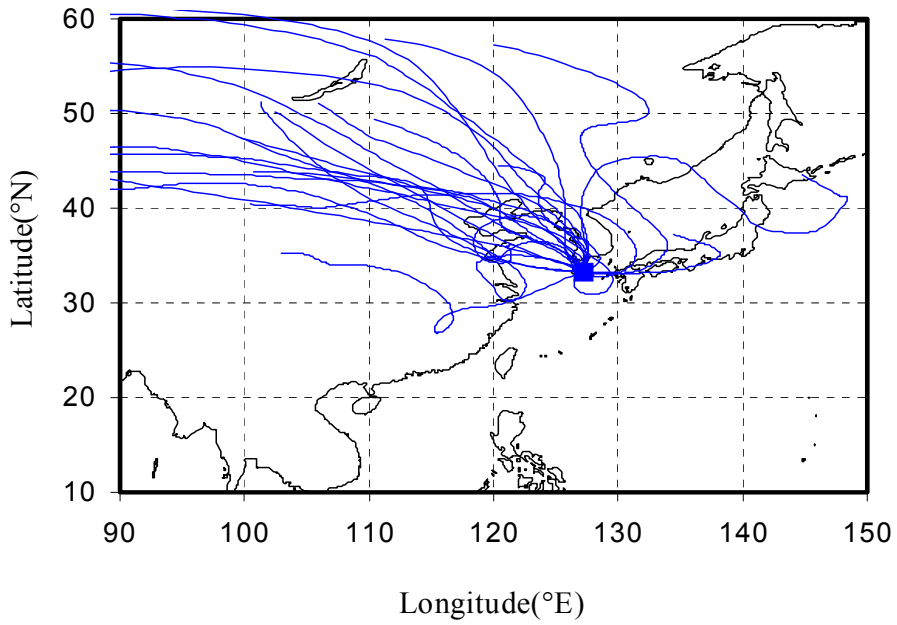


Figure 8. Back trajectories corresponding to high(upper) and low (lower) 10% of radon concentrations in fall.

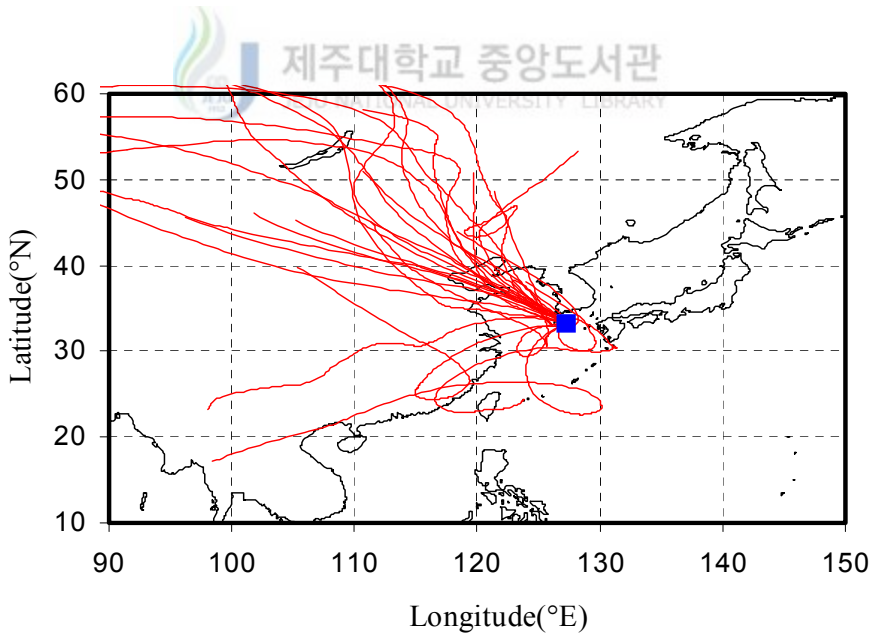
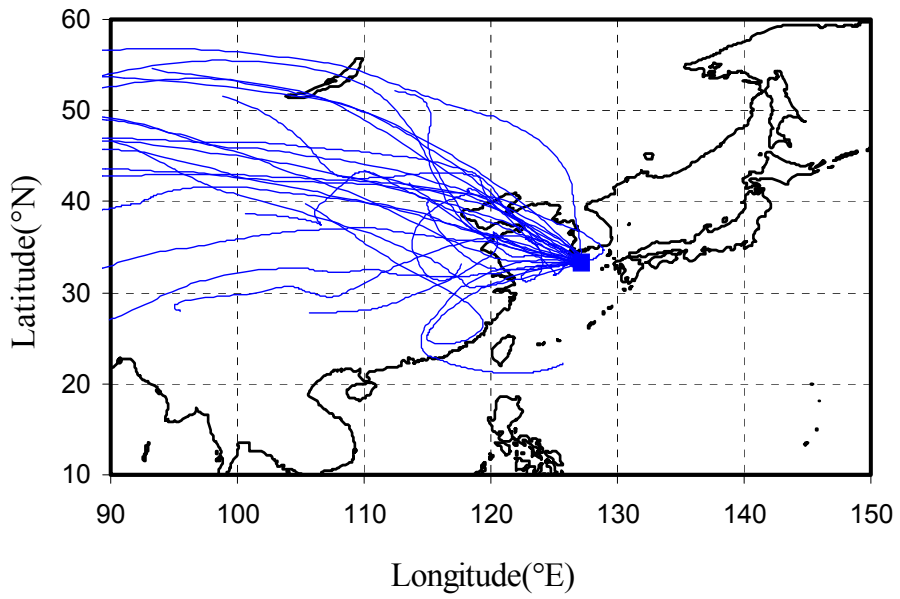


Figure 9. Back trajectories corresponding to high(upper) and low (lower) 10% of radon concentrations in winter.

2. 대기 에어로졸 농도 특성

1) 연도별 농도 비교

최근 동북아시아에서는 급속한 산업화로 인한 대기오염물질의 배출량이 빠르게 증가하고 있고, 이미 북미, 유럽과 함께 3 대 축을 형성하는 단계에 이르렀다. 특히 중국은 다량의 대기 오염물질을 배출하여 그 기여도가 가장 큰 것으로 조사되고 있다 (Mckendry et al., 2001; Perry et al.; 1999; 김용표 외, 1996). 동아시아 지역의 SO₂의 배출량은 1996년에 정점을 나타냈고 여전히 많은 양이 배출되고 있다(한진석 외, 2004; Street et al., 2003). 2000년을 기준으로 아시아 지역의 SO₂ 총배출량은 34,940 Gg이며, 특히 중국의 배출량은 20,753 Gg으로 아시아 전체 배출량의 60%, 동아시아 지역 배출량의 90%를 차지하고 있다(Carmichael, 2003).

이러한 이유로 동아시아 지역의 대기오염물질 장거리 이동 문제는 국가간의 중요한 현안과제이며 이에 대한 현황 파악 및 정밀 조사가 요구되고 있다. 일본의 경우 1990년 초반부터 서해상 및 동해를 중심으로 대기오염물질의 장거리 이동현상에 관한 연구가 지속적으로 수행되고 있다(Hatakeyama et al., 2001, 1997, 1995). 또한 1990년 중반에 수행된 NASA의 PEM-West A와 B(Pacific Exploratory Missions West)의 측정 결과에 따르면 북태평양 상공의 대기가 동아시아로부터 장거리 이동하는 SO₂에 의해 오염되고 있음을 보여주고 있다(Thornton et al., 1999, 1997, 1996). 또 SO₂와 황산염입자들의 수송, 생성과 변환을 비롯한 대기오염물질의 장거리이동과 관련하여 주변지역의 대기질 및 생태계의 산성화 문제, 지구복사 수지에 대한 대기 에어로졸의 영향 등을 조사하기 위하여 ACE-Asia를 비롯한 INDOEX, TRACE-P, ABC 등의 연구 사업들이 진행 중에 있다(Huebert et al., 2003; Tu et al., 2003; Bates et al., 2002).

본 연구에서는 국내 대기오염 배경농도 측정은 물론 한반도 주변 지역에서 발생하는 대기오염물질의 장거리 현상을 조사하기 위한 목적으로 청정지역인 제주도 고산 지역에서 대기 에어로졸을 채취, 분석하였다. 2001년 1월부터 2004년 12월에 걸쳐 4년간 총 547개의 시료를 채취하여 주요 수용성 및 금속 성분들을 분석하였다. 그리고 그 결과를 Table 6 ~ Table 9과 Figure 10 ~ Figure 17에 나타내었다.

이 기간 중 대기 에어로졸의 수용성 성분 농도는 $nss-SO_4^{2-}$ ($5.42 \mu g/m^3$) > Na^+ (2.00

$\mu\text{g}/\text{m}^3$) > NO_3^- ($1.96 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > Cl^- ($1.86 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > NH_4^+ ($1.37 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > nss-Ca^{2+} ($0.44 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > K^+ ($0.33 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > Mg^{2+} ($0.30 \mu\text{g}/\text{m}^3$)의 순으로 나타났다. 연도별 평균농도는 2001년에 nss-SO_4^{2-} > Na^+ > Cl^- > NO_3^- > NH_4^+ > nss-Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^+ , 2002년에 nss-SO_4^{2-} > NO_3^- > Cl^- > Na^+ > nss-Ca^{2+} > NH_4^+ > K^+ > Mg^{2+} , 2003년에 nss-SO_4^{2-} > NO_3^- > Na^+ > Cl^- > NH_4^+ > K^+ > Mg^{2+} , 2004년에 nss-SO_4^{2-} > NO_3^- > Na^+ > Cl^- > NH_4^+ > Mg^{2+} > K^+ > nss-Ca^{2+} 의 순으로 거의 유사한 경향을 보였다.

여기서 nss-SO_4^{2-} 는 비해염(non-sea salt) SO_4^{2-} 의 농도로, SO_4^{2-} 의 총 농도에서 해염의 유입에 기인한 SO_4^{2-} 의 농도를 뺀, $[\text{nss-SO}_4^{2-}] = [\text{SO}_4^{2-}] - [\text{Na}^+] \times 0.251$ 의 식에 의해 계산된 농도이다(Ho *et al.*, 2003; Nishikawa *et al.*, 1991; Yoshizumi *et al.*, 1986; Lester *et al.*, 1980). 이러한 nss-SO_4^{2-} 농도는 대체적으로 해양 영향을 배제한 인위적 요인의 SO_4^{2-} 농도로 볼 수 있으며, nss-SO_4^{2-} 농도는 2001년 $5.56 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 2002년 $6.28 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 2003년 $4.53 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 2004년 $5.36 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다. 4년간의 nss-SO_4^{2-} 농도는 $5.42 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이며, 연도별로는 2002년도에 가장 높은 농도를 보였고, 반면에 2003년도에는 가장 낮은 농도를 보였다.

SO_4^{2-} 성분은 대부분 화석연료의 연소에 의해 발생한 SO_2 가 대기 중 화학반응을 통해 SO_4^{2-} 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 변환되어 산성우와 건성침착 등의 형태로 주변지역의 생태계와 자연환경, 주민건강에 해로운 영향을 미치고, 대기에어로졸 생성에 중요한 역할을 한다. 또한 황산염입자는 입자상 에어로졸 상태로 존재하여 직접적으로 빛을 산란 혹은 흡수시키고, 간접적으로는 구름의 응결핵으로 작용하여 지구복사 체계를 변화시키며, 장거리 이동이 가능한 것으로 알려져 있다(Koch, 2001; Charlson *et al.*, 1991; Prospero, 1999).

NO_3^- 는 SO_4^{2-} 와 마찬가지로 대부분 인위적 요인의 발생기원을 나타내고, 1차오염물질인 NO_x 가 산화과정을 거쳐 생성되는 2차 오염물질이다. NO_3^- 의 경우 토양 중의 NH_4^+ 성분이 질화 세균에 의해서 NO_3^- 로 전화되어 토양입자가 대기 중으로 유입되면서 에어로졸에 유입될 수도 있다. 또 낙뢰나 산불 등에 의해 자연발생적으로 대기 중에 유입되기도 한다. 그러나 NO_3^- 의 발생은 대부분 화석 연료의 사용과 관련이 크고, 난방, 자동차, 산업 활동 등의 영향으로 발생하는 대표적인 인위적인 오염물질이다(박경

윤 외, 1994). 본 연구 기간에 측정된 NO_3^- 의 전체 평균 농도는 $1.96 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 나타내었다. 4년간 NO_3^- 의 농도를 보면, 2001년 $1.96 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 2002년 $2.23 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 2003년 $1.70 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 2004년 $1.96 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 2002년도에 가장 높고, 2003년이 가장 낮은 농도를 보였다. 이것은 nss-SO_4^{2-} 농도와 같은 경향을 보이고 있다.

Na^+ 와 Cl^- 의 평균 농도는 각각 2.00 , $1.86 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 값을 나타내었다. 이수치는 내륙 지방에 비해 상대적으로 높고, 고산 측정소의 위치가 해안가에 인접해 있기 때문에 해양 영향이 크게 미친 것으로 보인다(Gordan, 1997).

nss-Ca^{2+} 는 비해염 Ca^{2+} 의 농도로, $[\text{nss-Ca}^{2+}] = [\text{Ca}^{2+}] - [\text{Na}^+] \times 0.04$ 의 식에 의해 계산된 농도이다(Ho *et al.*, 2003; Nishikawa *et al.*, 1991; Yoshizumi *et al.*, 1986; Lester *et al.*, 1980). nss-Ca^{2+} 의 4년간 평균 농도는 $0.44 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이며, 2001년 평균농도는 $0.72 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 2002년 $0.65 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 2003년 $0.20 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 2004년에는 $0.21 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 값을 나타내었다. 2001년 nss-Ca^{2+} 의 농도가 가장 높은 이유는 황사의 일수가 다른 해에 비해 많았고, 황사의 농도도 높았기 때문인 것으로 보인다.

NH_4^+ 성분은 4년 전체적으로 $1.37 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 평균농도를 보였다. 또 NH_4^+ 성분의 연도별 농도를 보면 2001 ~ 2004년에 각각 1.24 , 1.58 , 1.32 , $1.32 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 값을 보였고, 2002년도에 가장 높은 농도를 보인 것으로 조사되었다.

또한 대기 에어로졸의 금속 및 황 성분 분석 결과를 Table 7 ~ 9, Figure 12 ~ 17에 비교하였다. 금속 물질은 수중에서 이온, 대기 중에서 증기, 암석과 흙 속에서는 염·광물 등의 형태로 존재 할 수 있고, 유기나 무기물질과 결합하거나 대기 중 입자에 부착될 수 있다. POPs 등 유기오염물질이 지방 조직에 주로 축적되는데 반하여, 중금속은 단백질 조직이나 뼈에 축적된다. 인체에서 배출될 수 있는 이상 흡수될 때 중금속은 각각 특정 부위에 축적되는 경향이 있는데, 카드뮴은 콩팥에, 수은은 간에, 납은 뼈에 축적되어 만성적 독성을 일으키게 된다(김영성, 2003). 특히, 주로 인위적 오염물질에서 배출되는 미세입자 중 금속성분들은 체류시간이 길고, 인체 내에 흡입되어 큰 피해를 주는 것으로 알려져 있으며, 입자상 물질의 발생원을 추정하고 각 발생원별 기여율을 산정하는데 있어서 중요한 정보를 제공하게 된다. 대기 에어로졸은 토양의 먼지 및 해양 등에 의해 발생하는 자연적인 것과 연료의 연소, 자동차 배출가스 등에 의해 방출되는 인위적, 그리고 대기 중의 광화학 반응에 의해 생성되는 2차 생성입자 등으로 구성된다. 일반적으로 각 성분별 발생기원을 보면, Al, Ca, Fe, Zn, Mn, Mg 등은

토양 혹은 먼지의 비산에 의해, Ni, V 등은 연료의 연소 과정에서, Pb는 자동차의 배출가스에서, Cu, Cd, Zn, Cr, Pb 등은 소각 과정에서, Na, K, Mg 등은 해염에 의해 발생하는 것으로 알려져 있다(Huang *et al.*, 1994).

우선 이들 각 성분들의 4년간 평균농도를 비교해 본 결과 $S > Na > K > Al > Ca > Fe > Mg > Zn > Pb > Ti > Mn > V > Ba > Cu > Ni > Sr > Cr > Mo > Cd > Co$ 의 순으로 주로 인위적 발생기원을 나타내는 S의 농도가 가장 높고, 다음으로 Na, K, Al, Ca, Fe, Mg 등의 해염 및 토양 성분들이 대체적으로 높은 농도를 보였다. 연도별로 비교해 본 결과 2001년에는 $S > Na > Al > Ca > Fe > K, Mg > Ti > Zn > Pb > Mn$ 의 순으로 높게 나타났으며, 2002년에 $S > Na > Al > Ca > Fe > K > Mg > Zn > Pb > Ti > Mn$, 2003년에 $S > K > Mg > Al > Ca > Fe > Na > Zn > Pb > Ti > Mn$, 2004년에 $S > K > Al > Ca > Mg > Fe > Na > Zn > Pb > Mn > Ti$ 의 농도 순서를 나타내었다. 반면에 이를 제외한 나머지 성분들은 모두 비교적 낮은 수준의 농도를 보였다.

이 중 비교적 함량이 큰 S와 Al, Ca, Fe, K, Na, Mg의 농도를 비교해 보면, S의 경우 2001 ~ 2004년에 각각 1.65, 2.24, 1.55, 1.58 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 2002년에 가장 높고 2003년에 상대적으로 낮은 농도를 나타내었다. 또한 토양의 지표성분들 중 Al은 2001 ~ 2004년에 각각 0.87, 1.27, 0.27, 0.31 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Ca은 각각 0.76, 1.23, 0.26, 0.27 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다. 연도별 비교 결과, S, Al, Ca 세 성분 모두 2002년 > 2001년 > 2004년 > 2003년의 순으로 높은 경향을 나타내었다. Fe성분은 각각 0.75, 1.03, 0.23, 0.18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 해염의 주요 성분인 Na과 Mg의 농도는 2001 ~ 2004년에 Na가 각각 1.53, 1.91, 0.22, 0.14 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Mg은 각각 0.45, 0.63, 0.33, 0.22 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 값을 나타내었다. 대체적으로 이들 성분들 역시 2002년 > 2001년 > 2003년 > 2004년의 순으로 2002년과 2001년에 높은 경향을 나타내었다. 그러나 K 성분의 경우 2001 ~ 2004년에 각각 0.45, 0.66, 1.28, 0.74 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로, 2003년 > 2004년 > 2002년 > 2001년의 농도 순을 나타내어 다른 성분들과는 다른 경향을 보이고 있는 것으로 조사되었다.

Table 6. Annual mean concentrations of Water-soluble components during the year of 2001 and 2004.

Year	Statistics	Concentration($\mu\text{g}/\text{m}^3$)							
		NH_4^+	Na^+	K^+	Mg^{2+}	NO_3^-	Cl^-	nss-Ca^{2+}	nss-SO_4^{2-}
2001	Mean	1.24	2.63	0.32	0.33	1.96	2.38	0.72	5.56
	Median	0.94	2.02	0.22	0.24	1.37	1.11	0.17	4.40
	SD	1.03	1.84	0.31	0.25	1.85	2.81	1.55	4.35
	Max	5.86	9.17	1.41	1.29	10.60	14.15	9.37	22.40
	Min	0.16	0.18	0.01	0.02	0.40	0.04	0.00	0.68
2002	Mean	1.58	2.01	0.38	0.34	2.23	2.18	0.65	6.28
	Median	1.10	1.64	0.28	0.25	1.63	1.07	0.23	4.77
	SD	1.24	1.38	0.37	0.31	2.14	2.47	1.10	4.50
	Max	6.18	7.66	2.28	2.21	13.46	14.57	5.49	19.94
	Min	0.00	0.13	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.24
2003	Mean	1.32	1.60	0.28	0.21	1.70	1.37	0.20	4.53
	Median	1.07	1.41	0.19	0.18	1.39	0.70	0.13	3.50
	SD	0.90	0.97	0.28	0.13	1.17	1.53	0.31	3.32
	Max	4.21	4.83	1.96	0.71	7.43	7.94	2.48	16.56
	Min	0.28	0.18	0.00	0.00	0.16	0.09	0.00	0.47
2004	Mean	1.32	1.83	0.33	0.34	1.96	1.58	0.21	5.36
	Median	1.02	1.59	0.27	0.21	1.64	0.81	0.15	4.59
	SD	1.03	1.18	0.29	0.38	1.58	1.60	0.21	3.49
	Max	5.67	6.17	1.61	1.87	10.66	7.38	1.65	17.78
	Min	0.00	0.08	0.01	0.03	0.14	0.10	0.00	0.06

Table 7. Annual mean concentrations of sulfur and metal components during the year of 2001 and 2004.

Year	Statistics	Concentration($\mu\text{g}/\text{m}^3$)						
		Al	Fe	Ca	Na	K	Mg	S
2001	Mean	0.87	0.75	0.76	1.53	0.45	0.45	1.65
	Median	0.37	0.23	0.24	1.12	0.22	0.22	1.35
	SD	1.68	1.69	1.66	1.30	0.78	0.75	1.37
	Max	10.43	10.89	10.41	7.86	4.38	4.68	8.95
	Min	0.02	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.02
2002	Mean	1.27	1.03	1.23	1.91	0.66	0.63	2.24
	Median	0.34	0.28	0.36	1.54	0.33	0.29	1.72
	SD	3.75	3.02	3.19	1.37	1.19	1.39	1.65
	Max	25.97	23.36	22.82	8.69	9.21	12.20	11.73
	Min	0.04	0.02	0.04	0.09	0.02	0.03	0.18
2003	Mean	0.27	0.23	0.26	0.22	1.28	0.33	1.55
	Median	0.21	0.16	0.18	0.18	1.18	0.20	1.36
	SD	0.27	0.28	0.32	0.15	0.58	0.36	1.05
	Max	2.05	2.34	2.44	1.07	3.61	2.11	8.48
	Min	0.02	0.01	0.01	0.01	0.06	0.03	0.05
2004	Mean	0.31	0.18	0.27	0.14	0.74	0.22	1.58
	Median	0.20	0.14	0.15	0.13	0.60	0.16	1.46
	SD	0.38	0.19	0.36	0.09	0.59	0.20	0.87
	Max	2.71	1.67	2.31	0.53	3.38	1.19	4.82
	Min	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01

Table 8. Annual mean concentrations of sulfur and metal components during the year of 2001 and 2004.

Year	Statistics	Concentration(ng/m ³)						
		Ti	Mn	Ba	Sr	Zn	V	Pb
2001	Mean	42.02	22.76	6.73	5.40	37.33	8.97	31.88
	Median	18.23	10.89	2.69	2.69	21.84	4.55	20.89
	SD	65.34	33.84	11.92	7.86	47.51	12.87	38.34
	Max	275.89	185.24	70.33	45.07	357.70	83.70	247.88
	Min	0.60	0.42	0.00	0.00	0.00	0.66	0.38
2002	Mean	38.07	34.62	9.17	5.92	56.12	9.52	48.02
	Median	18.88	12.90	3.07	2.87	36.98	3.72	34.03
	SD	72.77	74.29	20.48	11.53	53.54	22.87	54.57
	Max	605.48	506.09	133.13	104.51	339.92	177.04	323.45
	Min	1.37	0.99	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05
2003	Mean	14.35	10.12	3.41	2.25	44.17	3.92	26.69
	Median	10.67	7.63	2.11	1.90	29.97	3.24	19.90
	SD	14.05	10.26	4.38	1.79	51.19	2.43	26.13
	Max	78.93	74.17	26.78	13.14	405.52	13.79	193.11
	Min	0.51	0.55	0.00	0.00	0.00	0.90	0.00
2004	Mean	11.44	12.01	2.87	2.03	33.58	4.15	17.92
	Median	8.98	8.18	1.62	1.39	26.04	2.97	10.99
	SD	10.11	12.35	3.64	2.22	30.78	4.03	19.96
	Max	68.34	85.25	22.39	18.42	167.80	28.67	98.96
	Min	0.13	0.25	0.02	0.08	0.40	0.06	0.00

Table 9. Annual mean concentrations of sulfur and metal components during the year of 2001 and 2004.

Year	Statistics	Concentration(ng/m ³)					
		Cr	Cu	Ni	Co	Mo	Cd
2001	Mean	2.78	3.73	4.21	0.58	0.79	0.89
	Median	1.68	2.84	2.58	0.29	0.65	0.63
	SD	3.42	3.97	4.48	0.94	0.69	0.81
	Max	20.37	25.44	21.68	7.89	4.87	4.77
	Min	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00
2002	Mean	4.16	4.80	5.30	1.00	0.79	1.00
	Median	2.18	3.57	4.26	0.57	0.65	0.72
	SD	7.10	4.74	4.45	1.61	0.53	1.03
	Max	48.68	26.54	34.08	11.59	2.62	5.60
	Min	0.00	0.19	0.49	0.00	0.00	0.00
2003	Mean	1.34	3.90	3.38	0.21	0.96	0.74
	Median	1.09	2.76	2.26	0.17	0.70	0.59
	SD	1.13	4.81	3.03	0.20	0.71	0.59
	Max	6.22	50.17	13.29	1.41	3.06	4.54
	Min	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2004	Mean	0.76	3.22	2.61	0.13	1.37	0.57
	Median	0.46	2.18	2.24	0.09	1.70	0.39
	SD	0.85	3.07	1.65	0.13	0.87	0.56
	Max	6.41	17.28	9.77	0.89	3.61	2.62
	Min	0.00	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00

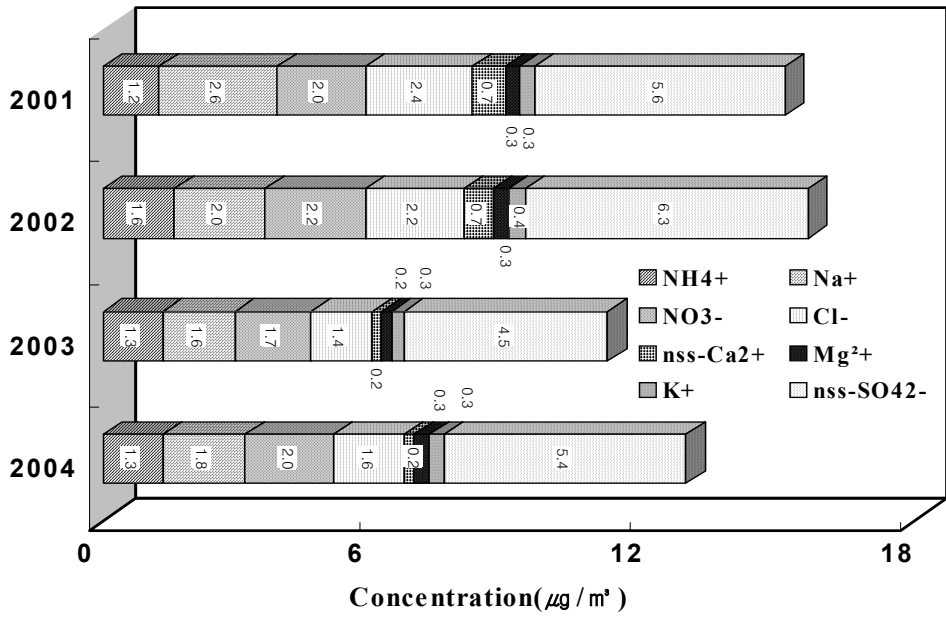


Figure 10. Comparison of annual total concentrations of water-soluble components during the year of 2001 and 2004.

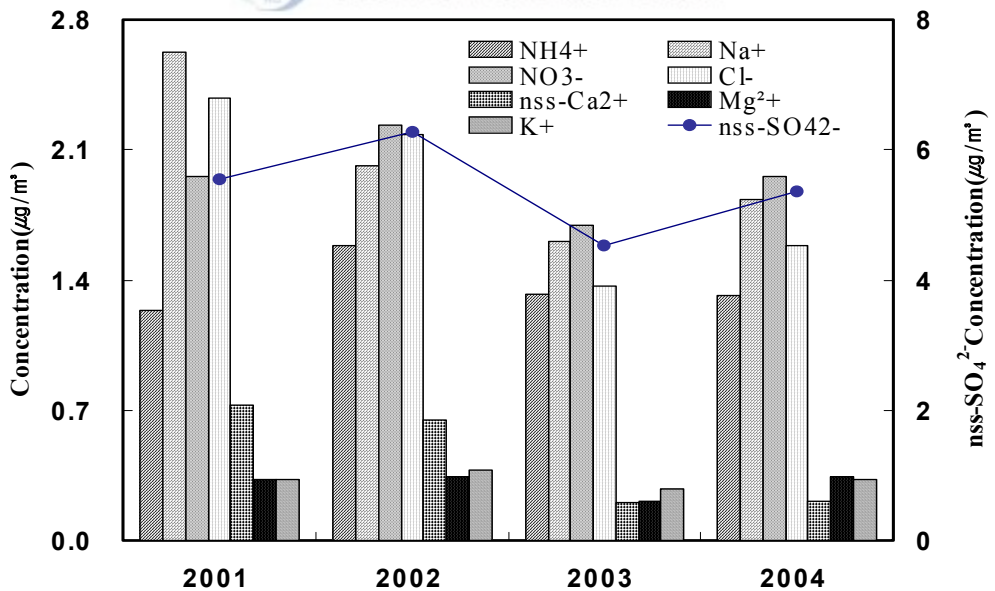


Figure 11. Comparison of annual mean concentrations of water-soluble components during the year of 2001 and 2004.

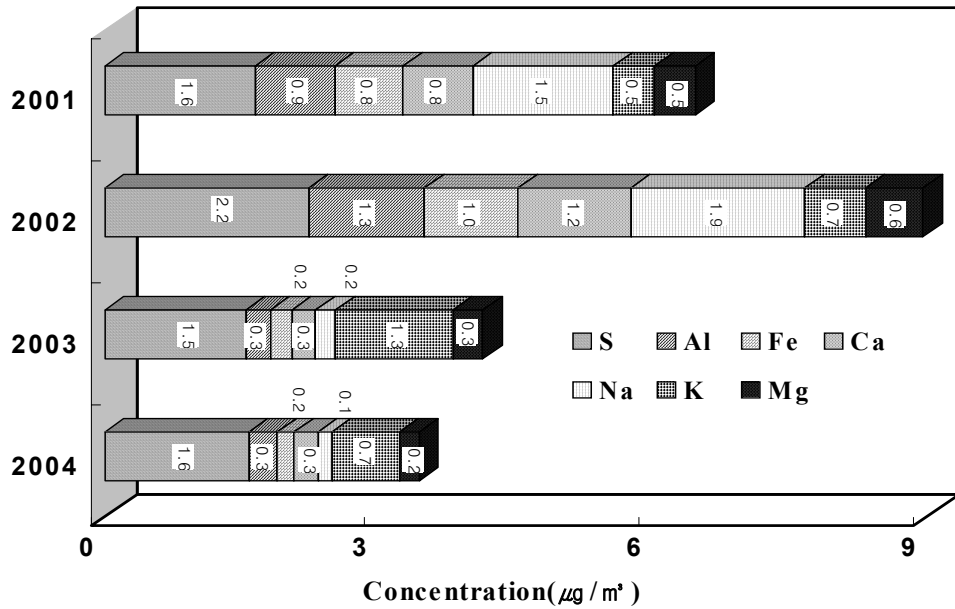


Figure 12. Comparison of annual mean concentrations of S, Al, Fe, Ca, Na, K and Mg components during the year of 2001 and 2004.

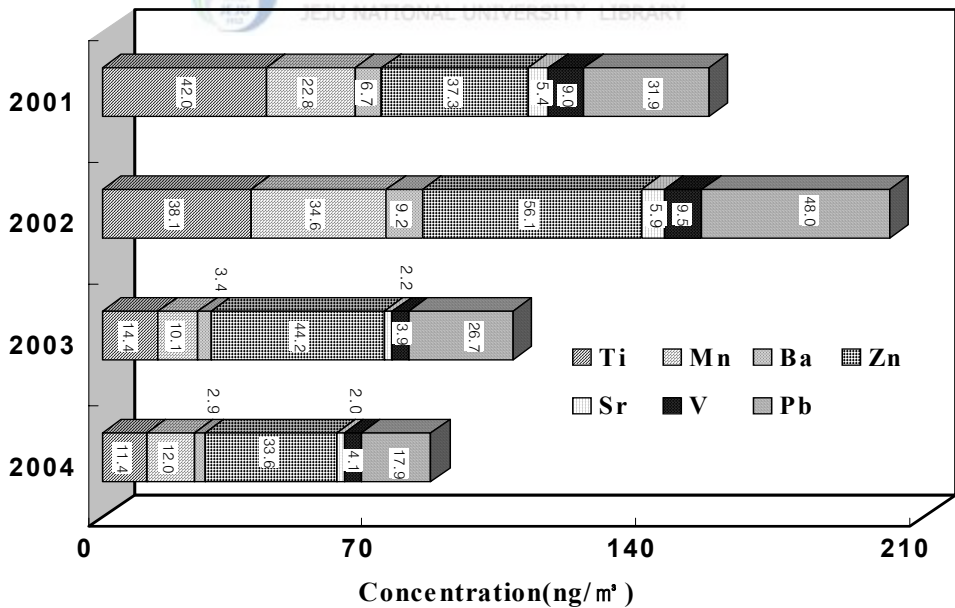


Figure 13. Comparison of annual mean concentrations of Ti, Mn, Ba, Zn, Sr, V and Pb components during the year of 2001 and 2004.

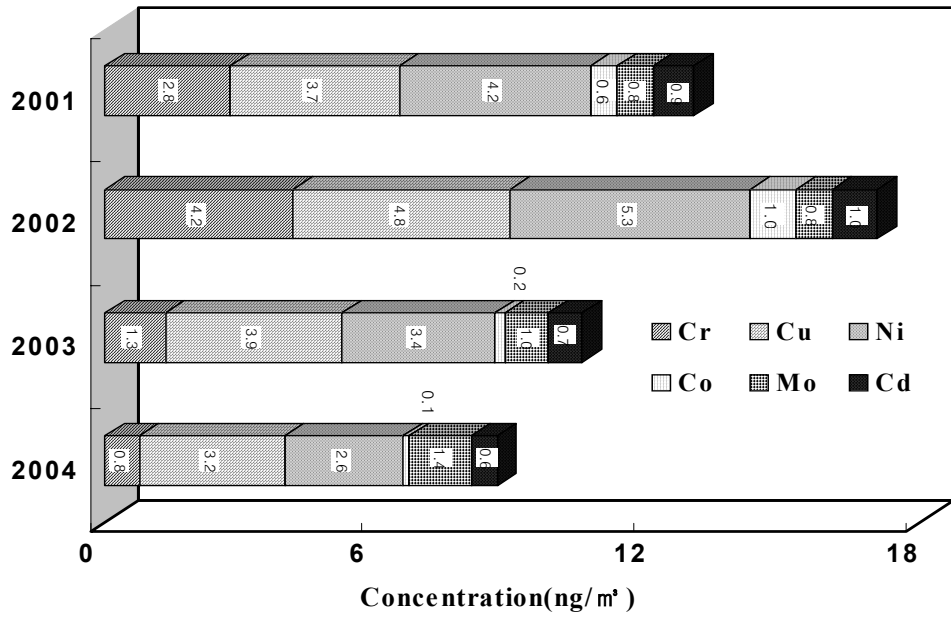


Figure 14. Comparison of annual mean concentrations of Cr, Cu, Ni, Co, Mo and Cd components during the year of 2001 and 2004.

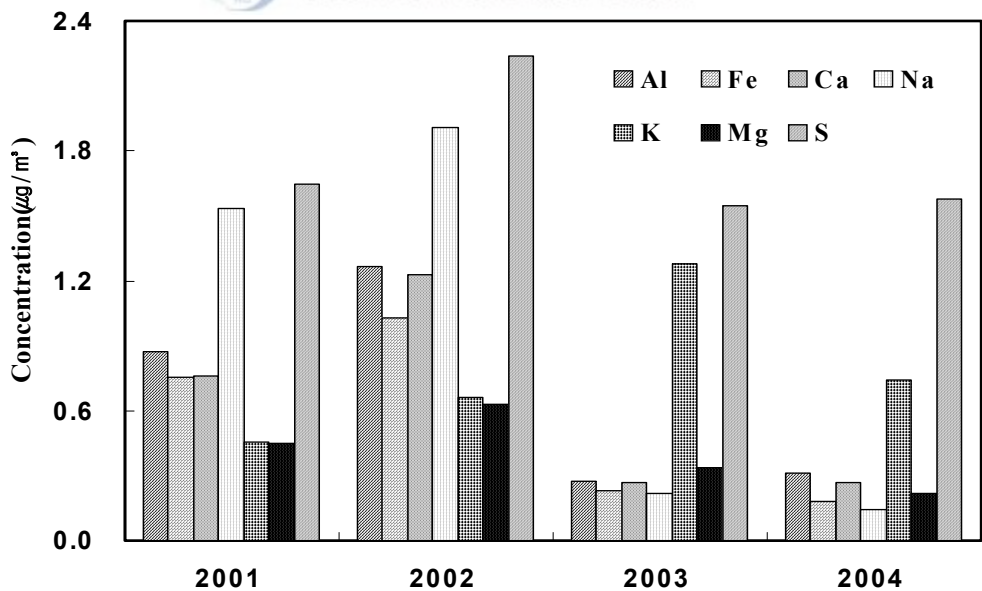


Figure 15. Comparison of annual mean concentrations of metal components during the year of 2001 and 2004.

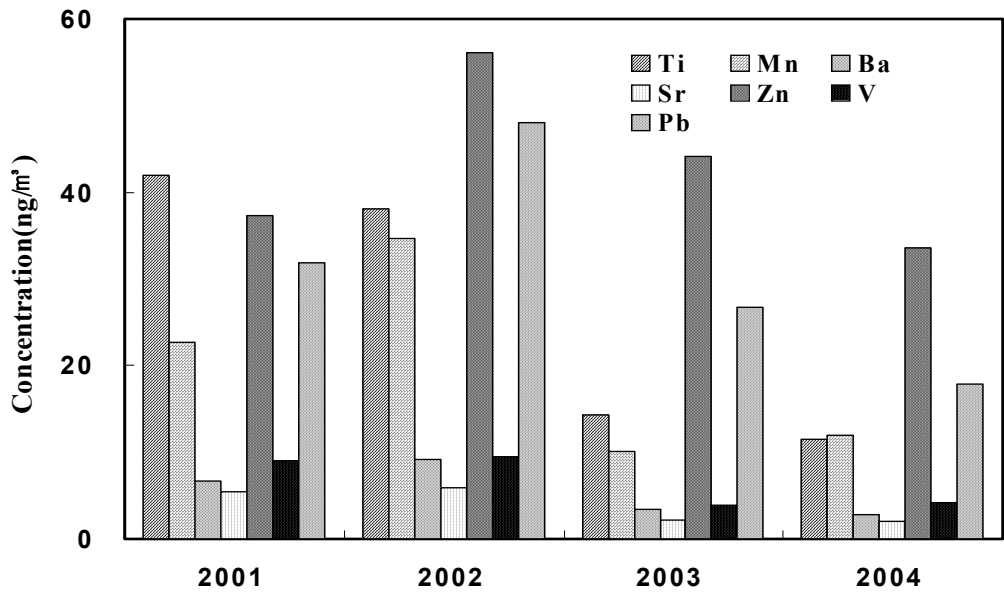


Figure 16. Comparison of annual mean concentrations of metal components during the year of 2001 and 2004.

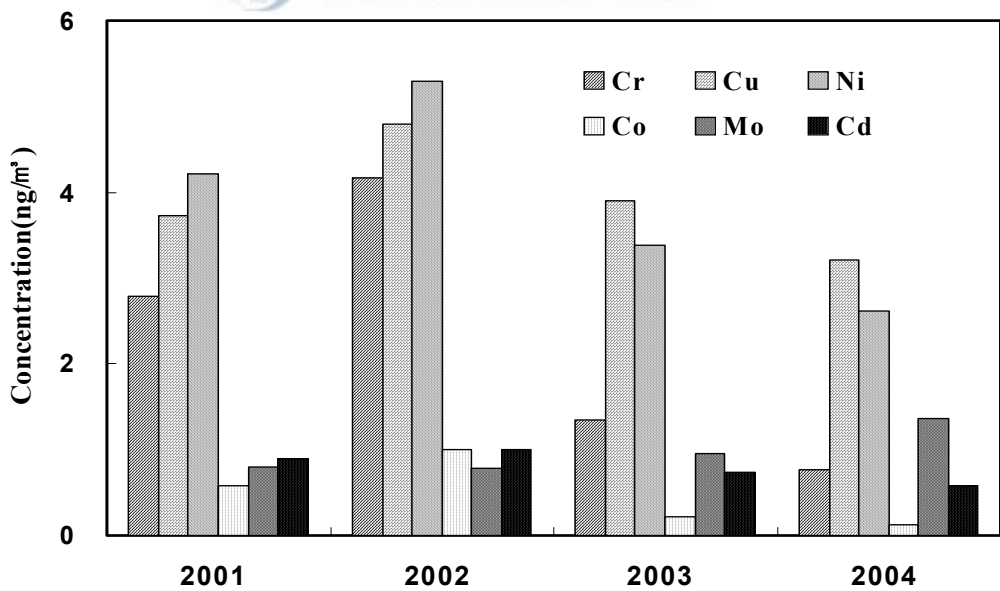


Figure 17. Comparison of annual mean concentrations of metal components during the year of 2001 and 2004.

2) 계절별 농도 비교

고산지역 대기 에어로졸 성분의 계절별 특성을 알아보기 위해 수용성 성분의 농도를 계절별로 비교하여 그 결과를 Table 10과 Figure 18~ Figure 22에 수록하였다. 수용성 양이온의 조성을 계절별로 비교해 본 결과 대체적으로 양이온 함량은 $\text{Na}^+ > \text{NH}_4^+ > \text{nss-Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+}$ 의 순으로 대체적으로 양이온 중에서는 Na^+ 의 농도가 가장 높고, 다음으로 NH_4^+ 의 농도가 높았다.

제주지역의 계절별 주 풍향을 보면 주로 봄철에는 북서풍 계열의 바람이 많이 불고, 여름에는 이와 반대로 남동풍 계열의 바람이 많고 겨울에는 북풍계열의 바람이 많이 부는 것으로 나타나고 있다(Carmichael *et al.*, 1997). Na^+ 농도는 가을, 겨울 > 봄 > 여름 순으로 북풍이 우세한 가을, 겨울철이 가장 높고, 남동풍이 부는 여름철이 가장 낮게 나타났다. 일반적으로 NH_4^+ 는 동물의 배설물, 비료, 식물의 부식 등에 의해 주로 배출되며 이중 약 80% 정도가 동물의 배설물에 의해 발생하는 것으로 알려져 있다(Howells, 1995). 또 NH_3 의 발생량을 결정하는 가장 중요한 인자는 생물학적 활성과 온도, 그리고 비료의 사용량 등인 것으로 알려져 있다(Pio *et al.*, 1996; Carmichael *et al.*, 1996). NH_4^+ 는 봄, 여름, 가을, 겨울에 각각 1.47, 1.39, 1.10, 1.51 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도를 보여, 겨울 > 봄 > 여름 > 가을의 순으로 높은 농도를 나타내었다. nss-Ca^{2+} 의 농도는 봄, 여름, 가을, 겨울에 각각 0.97, 0.11, 0.24, 0.37 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 봄철에 높은 농도를 보였고, 다른 성분들에 비해 계절별로 아주 큰 차이를 나타내었다. 이와 같이 특히 봄철에 nss-Ca^{2+} 농도가 크게 상승하는 것은 황사의 유입에 기인한 것으로 보이며, 제주 지역의 대기질이 중국의 영향을 크게 받고 있음을 의미한다(Hayami *et al.*, 1998; Gregory *et al.*, 1996). 또 K^+ 은 겨울 > 봄 > 가을 > 여름, Mg^{2+} 은 봄 > 겨울 > 가을 > 여름 순으로, 대체적으로 겨울과 봄철에 농도가 상승하는 경향을 보였다.

음이온 성분 중 인위적 발생기원의 2차 입자인 SO_4^{2-} 과 NO_3^- 은 산성비, 시정악화 등 대기 환경이나 인체에 주는 영향이 매우 크다. 특히 SO_4^{2-} , NO_3^- 입자는 0.1~1.0 μm 입경범위에 대한 기여가 가장 크며, 호흡기 질환은 물론 대기의 시계감소에 직접적인 영향을 주는 것으로 알려져 있다(Appel, 1978). 이들 2차 입자의 농도는 계절적인 변동 폭이 크며, 봄철의 황사현상이나 여름철의 광화학반응, 겨울철의 고농도현상 등 지역적인 기상 등 대기 중의 전환과정에 의한 영향을 많이 받게 된다. SO_4^{2-} 는 발생기원

에 따라 해염입자 중에는 Na_2SO_4 로, 토양 입자 중에는 CaSO_4 등의 1차 발생원과 SO_2 의 산화에 의한 2차 입자가 혼합된 형태로 존재하나, 미세입자에서는 주로 2차 입자의 생성에 기인하는 것으로 알려져 있다(Whitby, 1978). 또한 NO_3^- 입자는 대기 중에서 계절적으로 큰 변화는 없으나 다른 이온성분보다 온도와 습도에 영향을 크게 받는 것으로 알려져 있다. 따라서 NO_3^- 입자는 기온이 높은 여름철에는 가스상으로 존재하고 있다가 Na 등과 반응하여 NaNO_3 을 형성하여 거대입자영역에 주로 나타나지만, 기온이 낮은 겨울철에는 입자상의 NO_3^- 로 전환된 후 SO_4^{2-} 입자와 함께 미세입자영역에서 증가하는 경향을 보인(최금찬 외, 1994). 또 Cl^- 는 소각 등의 연소과정에서 HCl 가스로 대기 중에 방출된 후, 가스상의 NH_3 과 반응하여 NH_4Cl 의 2차 입자를 생성하고, 겨울철에 미세입자에서 농도가 증가 한다고 알려져 있다(原, 1983).

본 연구에서 분석한 음이온들의 경우, 대체로 $\text{nss-SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^-$ 의 순으로, 이 중 nss-SO_4^{2-} 이 가장 높은 농도를 나타내었다. nss-SO_4^{2-} 의 계절별 농도를 보면, 봄, 여름, 가을, 겨울철에 각각 6.16, 5.12, 4.56, 5.78 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 봄철에 농도가 가장 높고, 다음으로 겨울, 여름, 가을의 순으로 나타났다. 또 NO_3^- 는 봄, 여름, 가을, 겨울철에 각각 2.68, 1.19, 1.67, 2.22 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 nss-SO_4^{2-} 과 마찬가지로 봄철에 가장 높고, 다음으로 겨울, 가을, 여름의 순으로 높은 농도를 보였다. 또한 Cl^- 의 농도는 1.44 ~ 2.23 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 범위를 보였으며, 겨울에 2.23 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높은 농도를 보여, 해염 기원의 Na^+ 과 일치하는 경향을 나타내었다.

한편 에어로졸 성분 중에서 19종의 금속과 황 성분에 대한 계절별 평균농도를 Table 11 ~ Table 13 와 Figure 23 ~ Figure 37에 수록을 하였다. 이들의 조성을 계절별로 비교해 본 결과, 대체적으로 모든 성분들이 봄철에 가장 높고, 여름철에 가장 낮은 경향을 보이고 있으나 S의 경우만 조금 다른 결과를 나타내었다. 농도는 봄철에 $\text{S} > \text{Al} > \text{Ca} > \text{Fe} > \text{Na} > \text{K} > \text{Mg} > \text{Ti} > \text{Zn} > \text{Mn} > \text{Pb} > \text{V} > \text{Ba} > \text{Sr} > \text{Ni} > \text{Cu} > \text{Cr} > \text{Cd} > \text{Co} > \text{Mo}$, 여름철에 $\text{S} > \text{Na} > \text{K} > \text{Al} > \text{Mg} > \text{Ca} > \text{Fe} > \text{Zn} > \text{Pb} > \text{Ti} > \text{Mn} > \text{V} > \text{Ni} > \text{Cu} > \text{Ba} > \text{Sr} > \text{Cr} > \text{Mo} > \text{Cd} > \text{Co}$, 가을철에 $\text{S} > \text{Na} > \text{K} > \text{Al} > \text{Mg}, \text{Ca} > \text{Fe} > \text{Zn} > \text{Pb} > \text{Ti} > \text{Mn} > \text{Cu} > \text{Ba} > \text{V} > \text{Ni} > \text{Sr} > \text{Cr} > \text{Mo} > \text{Cd} > \text{Co}$, 겨울철에 $\text{S} > \text{Na} > \text{K} > \text{Ca} > \text{Al} > \text{Mg}, \text{Fe} > \text{Zn} > \text{Pb} > \text{Ti} > \text{Mn} > \text{Ba} > \text{V} > \text{Cu} > \text{Ni} > \text{Sr} > \text{Cr} > \text{Mo} > \text{Cd} > \text{Co}$ 의 순으로 나타났다. 이 성분들 중에서는 S와 Na, Al, Ca, Fe, K, Mg이 상대적으로 높은 농도를 나타내었다.

황은 전 계절에 걸쳐 가장 높은 1.47 ~ 2.02 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 범위를 보였고, 계절별 비교 결과 봄, 여름, 가을, 겨울의 평균농도가 각각 2.02, 1.60, 1.47, 1.90 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 봄철이 가장 높고, 가을철이 가장 낮은 농도를 보이고 있다.

토양의 지표 성분인 Al은 봄, 여름, 가을, 겨울철의 평균 농도가 각각 1.60, 0.28, 0.34, 0.38 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 봄철에 가장 높고, 여름철에 가장 낮은 농도를 보였으며, 여름에 비해 5.7배정도 더 높은 농도를 나타내었다. Ca, Fe, K의 계절별 농도를 보면, Ca의 경우 1.51, 0.15, 0.30, 0.44 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이며, 여름에 비해 봄철에 약 10배 정도 더 큰 농도를 보였다. Fe 역시 봄, 여름, 가을, 겨울철의 평균농도가 각각 1.35, 0.13, 0.25, 0.34 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 다른 토양지표 성분들과 마찬가지로 봄철에 가장 높고 여름철에 낮은 경향을 보였다. 또 Fe은 여름철에 비해 봄철이 약 10.4배정도 높은 농도를 보였다. K은 계절별로 각각 1.08, 0.55, 0.72, 0.82 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 농도를 나타내어, 여름철에 비해 봄철에 약 2배정도 높은 것으로 조사되었고, 다른 토양 성분들에 비해서는 상대적으로 낮은 비율을 나타내었다. 이들에 비해 비교적 농도가 낮은 금속들 중 토양기원의 Ti은 봄, 여름, 가을, 겨울철의 평균농도가 각각 54.25, 10.77, 16.02, 19.98 ng/m^3 로 앞서와 마찬가지로 봄철에 가장 높고 여름철에 가장 낮은 농도를 나타내었다. 황사입자를 구성하고 있는 황토입자의 주성분은 장석, 석영 등으로 주로 SiO_2 , Al_2O_3 , FeO, MgO, Na_2O , CaCO_3 등을 포함하고 있고, 이중 가장 많이 분포되어 있는 원소는 $\text{Si} > \text{Ca} > \text{Al} > \text{Fe}$ 의 순인 것으로 알려져 있다. 특히 토양의 지표성분인 Al, Ca, Fe, Ti, Ba, Sr 등이 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).

인위적 기원의 Pb, Zn, V 농도를 계절별로 비교해 보면, Pb는 봄, 여름, 가을, 겨울철에 각각 34.81, 17.97, 28.14, 42.97 ng/m^3 로 토양 성분들과는 달리 오히려 겨울철에 가장 높은 농도를 보였다. Zn역시 계절별로 각각 50.65, 27.54, 37.75, 55.03 ng/m^3 로 Pb와 마찬가지로 겨울철에 가장 높고 여름철에 가장 낮은 농도를 보였으며, 약 2배 정도의 농도차를 보였다. 반면에 V은 계절별로 각각 14.16, 4.06, 2.98, 4.32 ng/m^3 로 다른 인위적인 성분과는 다르게 봄철에 가장 높고 가을철에 가장 낮은 농도를 보였다. 이처럼 인위적 기원의 성분들은 토양기원의 성분들과는 좀 다른 계절별 경향을 보였다.

그리고 위해성 중금속 성분인 Cr, Cd의 계절별 농도 보면, Cr은 봄, 여름, 가을, 거

울철에 각각 3.92, 1.28, 1.91, 1.69 ng/m³, Cd은 각각 1.07, 0.52, 0.66, 0.91 ng/m³로, 두 성분 모두 봄철에 가장 높고 여름철에 가장 낮으며, 여름철에 비해 봄철에 약 3.1배, 2.1배 더 높은 농도를 보였다. 이러한 봄철의 농도 상승은 황사에 기인했을 가능성이 있으며, 이를 규명하기 위한 추가적인 조사가 필요한 것으로 판단된다.

Table 10. Seasonal mean concentrations of Water-soluble components.

Season	Statistics	Concentration($\mu\text{g}/\text{m}^3$)							
		NH_4^+	Na^+	K^+	Mg^{2+}	NO_3^-	Cl^-	nss-Ca^{2+}	nss-SO_4^{2-}
Spring	Mean	1.47	1.87	0.37	0.41	2.68	1.94	0.97	6.16
	Median	1.15	1.45	0.29	0.28	2.08	0.81	0.29	4.87
	SD	1.00	1.42	0.31	0.39	2.12	2.50	1.65	4.01
	Max	4.79	7.98	1.39	2.21	10.60	14.15	9.37	19.40
	Min	0.00	0.08	0.00	0.03	0.13	0.06	0.00	0.76
Summer	Mean	1.39	1.81	0.23	0.21	1.19	1.44	0.11	5.12
	Median	0.96	1.47	0.13	0.17	1.05	0.65	0.07	3.86
	SD	1.22	1.37	0.26	0.15	0.69	1.64	0.12	4.37
	Max	5.86	7.47	1.61	1.18	4.54	8.34	0.69	22.40
	Min	0.00	0.10	0.00	0.00	0.14	0.09	0.00	0.06
Fall	Mean	1.10	2.16	0.30	0.22	1.67	1.82	0.24	4.56
	Median	0.82	1.82	0.24	0.19	1.45	1.07	0.17	3.39
	SD	0.92	1.39	0.26	0.15	1.03	1.93	0.33	3.63
	Max	5.67	9.17	1.96	0.79	6.38	11.10	2.78	19.94
	Min	0.13	0.29	0.01	0.00	0.37	0.04	0.00	0.34
Winter	Mean	1.51	2.16	0.39	0.36	2.22	2.23	0.37	5.78
	Median	1.14	1.87	0.29	0.27	1.66	1.37	0.19	4.85
	SD	1.07	1.43	0.39	0.31	2.11	2.45	0.54	3.72
	Max	6.18	7.66	2.28	1.87	13.46	14.57	3.19	18.14
	Min	0.25	0.13	0.01	0.00	0.06	0.00	0.00	0.87

Table 11. Seasonal mean concentrations of metal components.

Season	Statistics	Concentration($\mu\text{g}/\text{m}^3$)						
		Al	Fe	Ca	Na	K	Mg	S
Spring	Mean	1.60	1.35	1.51	1.25	1.08	0.75	2.02
	Median	0.43	0.35	0.39	0.48	0.67	0.29	1.61
	SD	3.87	3.24	3.37	1.62	1.33	1.48	1.56
	Max	25.97	23.36	22.82	7.86	9.21	12.20	11.73
	Min	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02
Summer	Mean	0.28	0.13	0.15	0.67	0.55	0.20	1.60
	Median	0.20	0.09	0.10	0.33	0.26	0.13	1.39
	SD	0.25	0.14	0.13	0.71	0.56	0.23	1.15
	Max	1.79	0.80	0.85	3.76	2.25	1.56	5.94
	Min	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
Fall	Mean	0.34	0.25	0.30	0.75	0.72	0.30	1.47
	Median	0.24	0.18	0.20	0.23	0.59	0.20	1.18
	SD	0.52	0.46	0.45	0.95	0.53	0.35	1.23
	Max	5.74	5.07	4.50	5.35	3.05	2.11	8.48
	Min	0.02	0.01	0.02	0.04	0.02	0.01	0.13
Winter	Mean	0.38	0.34	0.44	1.02	0.82	0.34	1.90
	Median	0.24	0.23	0.28	0.40	0.63	0.28	1.64
	SD	0.40	0.33	0.47	1.27	0.66	0.25	1.10
	Max	2.71	1.67	2.66	8.69	3.38	1.19	6.06
	Min	0.05	0.01	0.04	0.05	0.00	0.03	0.34

Table 12. Seasonal mean concentrations of metal components.

Season	Statistics	Concentration(ng/m ³)						
		Ti	Mn	Ba	Sr	Zn	V	Pb
Spring	Mean	54.25	38.47	11.55	7.32	50.65	14.16	34.81
	Median	20.21	15.19	4.07	2.93	31.85	5.79	24.10
	SD	88.16	73.74	21.65	12.79	52.18	24.20	36.69
	Max	605.48	506.09	133.13	104.51	357.70	177.04	247.88
	Min	0.31	0.34	0.06	0.00	0.00	0.23	0.19
Summer	Mean	10.77	6.53	1.57	1.41	27.54	4.06	17.97
	Median	7.47	4.53	0.95	1.30	16.35	3.67	8.64
	SD	11.53	6.38	1.84	0.90	28.82	2.26	23.94
	Max	70.84	36.36	8.78	5.30	147.45	13.50	127.73
	Min	0.13	0.25	0.00	0.00	0.00	0.06	0.05
Fall	Mean	16.02	12.68	3.25	2.50	37.75	2.98	28.14
	Median	10.92	8.50	2.17	1.98	26.93	2.57	18.19
	SD	18.92	16.71	5.10	2.41	37.65	2.08	33.12
	Max	171.49	164.84	50.16	21.47	204.55	18.79	195.44
	Min	0.65	0.59	0.00	0.25	0.00	0.65	0.00
Winter	Mean	19.98	19.31	4.99	3.79	55.03	4.32	42.97
	Median	13.43	12.96	3.18	2.75	39.96	2.91	25.65
	SD	17.95	24.71	5.23	3.29	59.23	3.49	51.58
	Max	94.34	238.49	26.78	18.42	405.52	20.43	323.45
	Min	1.05	0.83	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02

Table 13. Seasonal mean concentrations of metal components.

Season	Statistics	Concentration(ng/m ³)					
		Cr	Cu	Ni	Co	Mo	Cd
Spring	Mean	3.92	4.90	5.75	1.04	0.99	1.07
	Median	1.81	3.06	4.37	0.42	0.73	0.77
	SD	6.28	5.30	4.98	1.75	0.80	0.99
	Max	42.17	26.54	34.08	11.59	4.87	5.60
	Min	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
Summer	Mean	1.28	2.38	2.71	0.18	1.03	0.52
	Median	1.01	1.81	1.98	0.14	0.70	0.36
	SD	1.25	2.00	2.44	0.13	0.75	0.60
	Max	7.56	10.20	13.76	0.74	3.02	4.54
	Min	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00
Fall	Mean	1.91	4.04	2.95	0.24	0.84	0.66
	Median	1.10	2.90	2.15	0.17	0.59	0.51
	SD	4.61	5.00	3.12	0.29	0.64	0.52
	Max	48.68	50.17	22.28	2.80	3.06	2.74
	Min	0.00	0.17	0.00	0.00	0.00	0.01
Winter	Mean	1.69	4.21	3.86	0.40	1.08	0.91
	Median	1.27	3.48	3.07	0.29	0.87	0.73
	SD	1.46	3.23	2.70	0.35	0.75	0.80
	Max	8.83	21.81	11.42	1.85	3.61	4.71
	Min	0.00	0.19	0.17	0.00	0.00	0.00

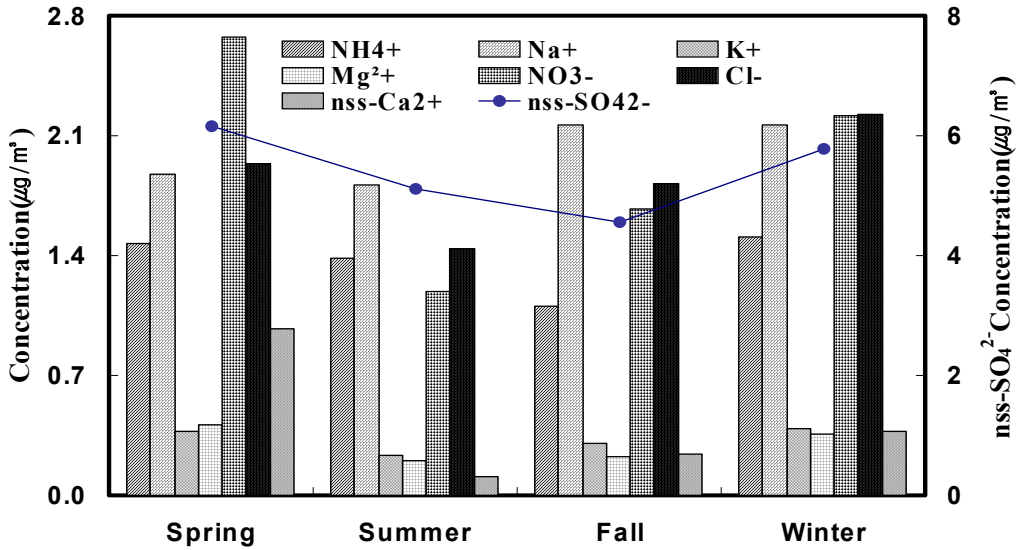


Figure 18. Comparison of seasonal mean concentrations of water-soluble components.

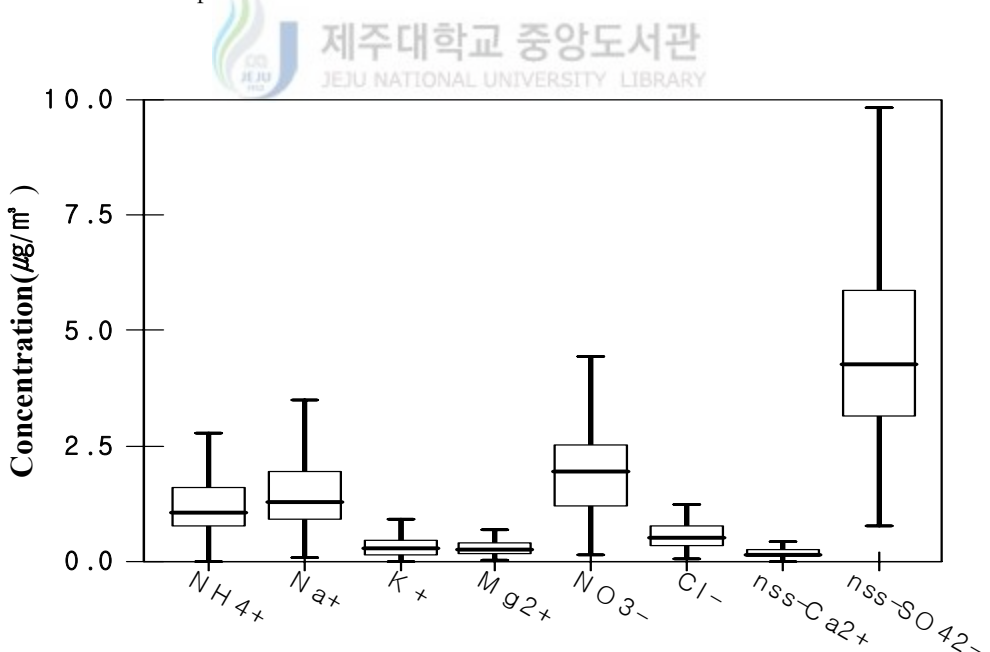


Figure 19. Comparison of concentrations of water-soluble components in spring.

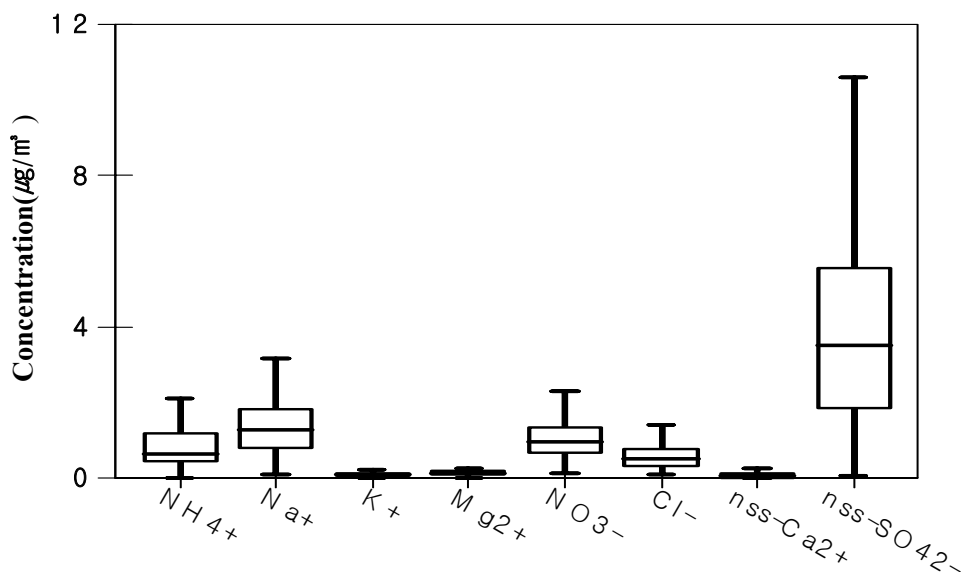


Figure 20. Comparison of concentrations of water-soluble components in summer.

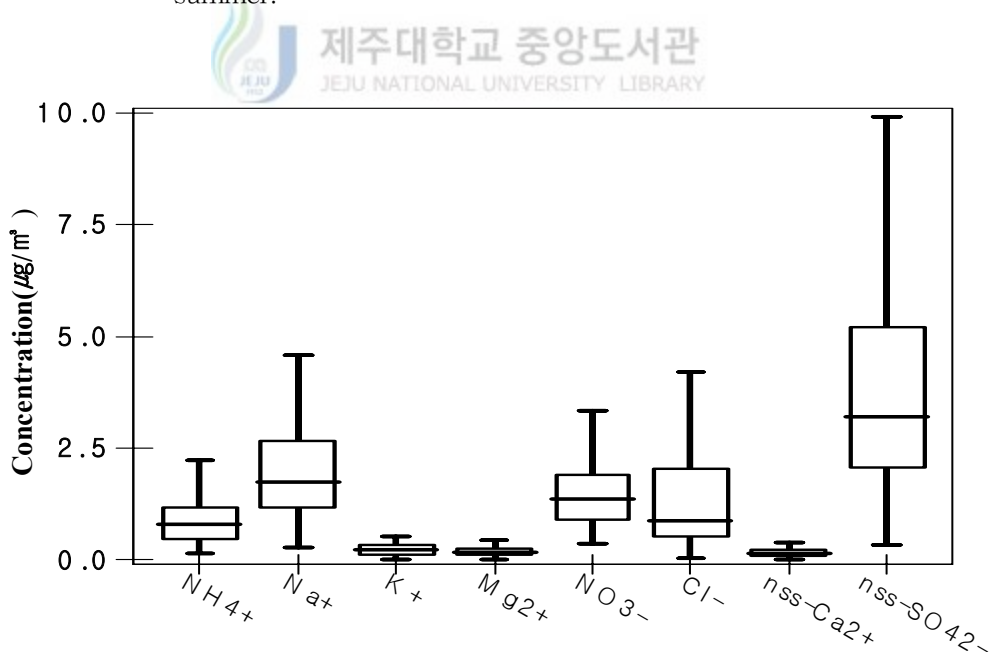


Figure 21. Comparison of concentrations of water-soluble components in fall.

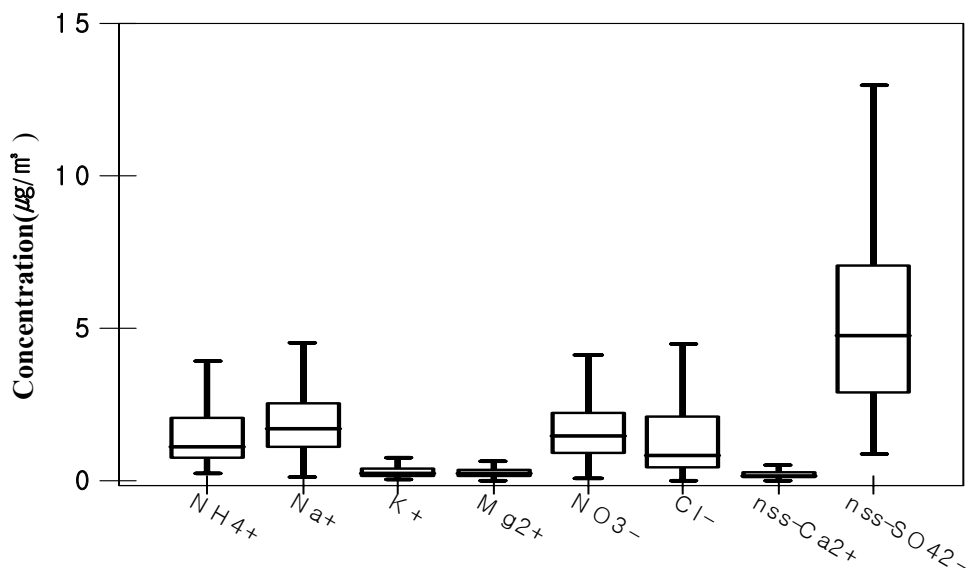


Figure 22. Comparison of concentrations of water-soluble components in winter.

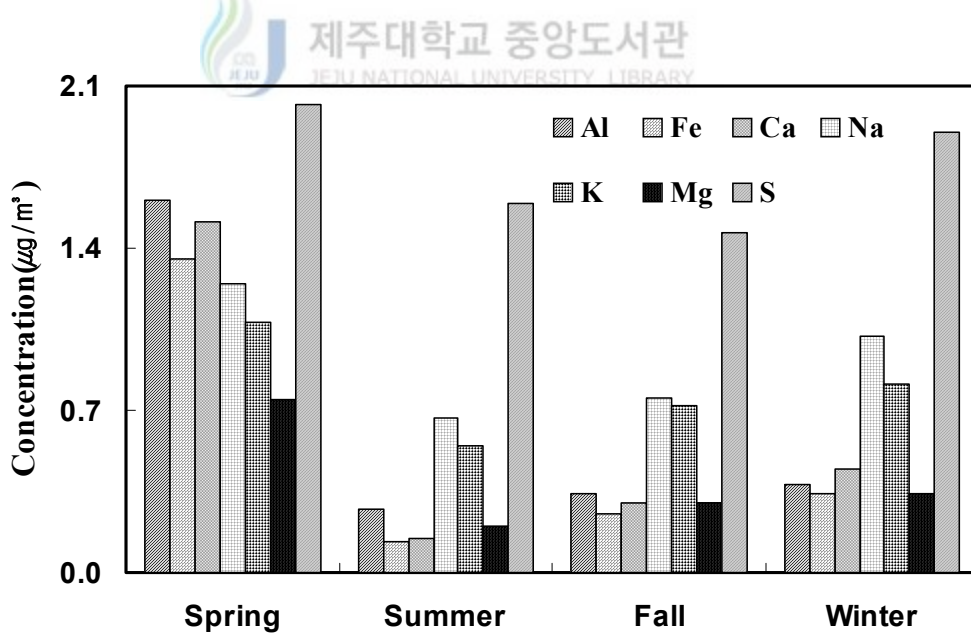


Figure 23. Comparison of seasonal Al, Fe, Ca, Na, K, Mg and S concentrations.

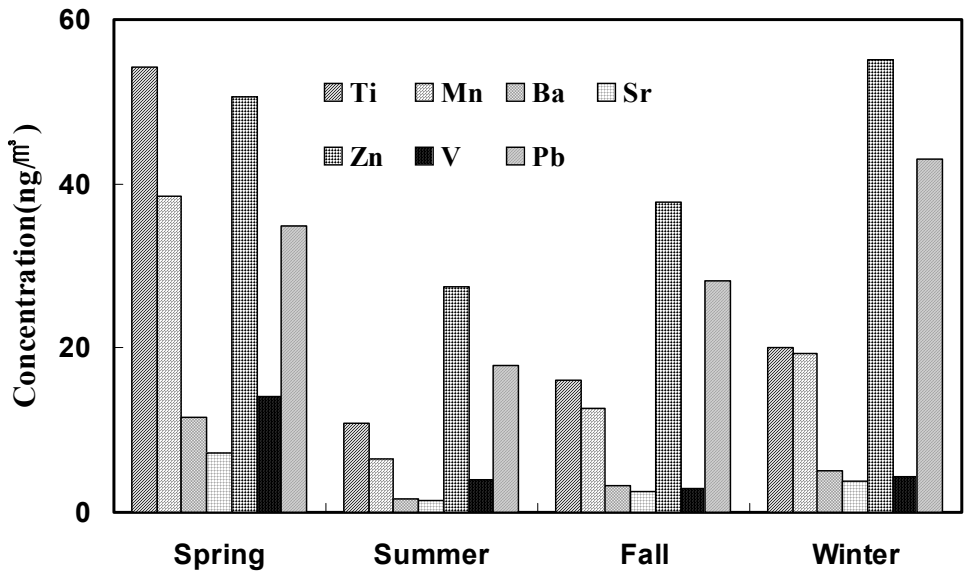


Figure 24. Comparison of seasonal Ti, Mn, Ba, Sr, Zn, V and Pb concentrations.

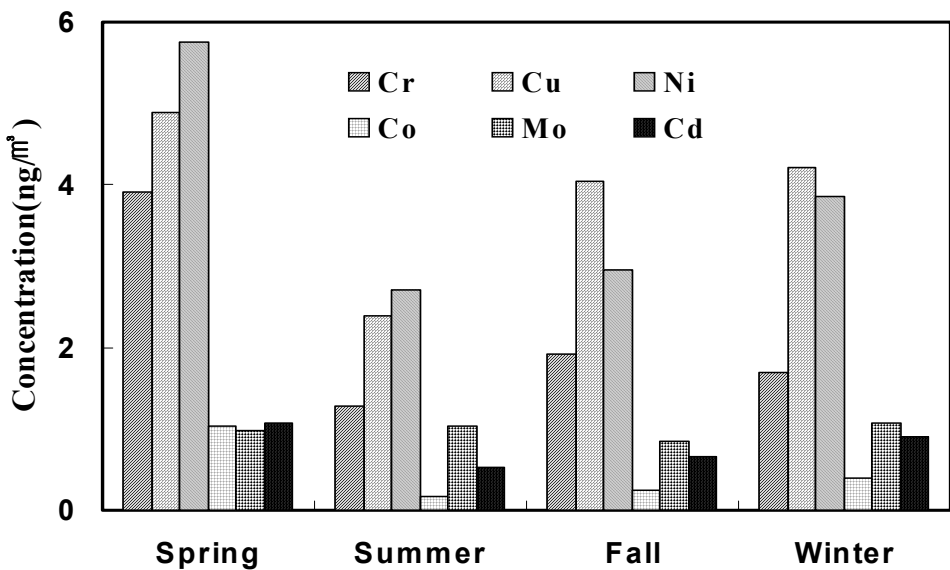


Figure 25. Comparison of seasonal Cr, Cu, Ni, Co, Mo and Cd concentrations.

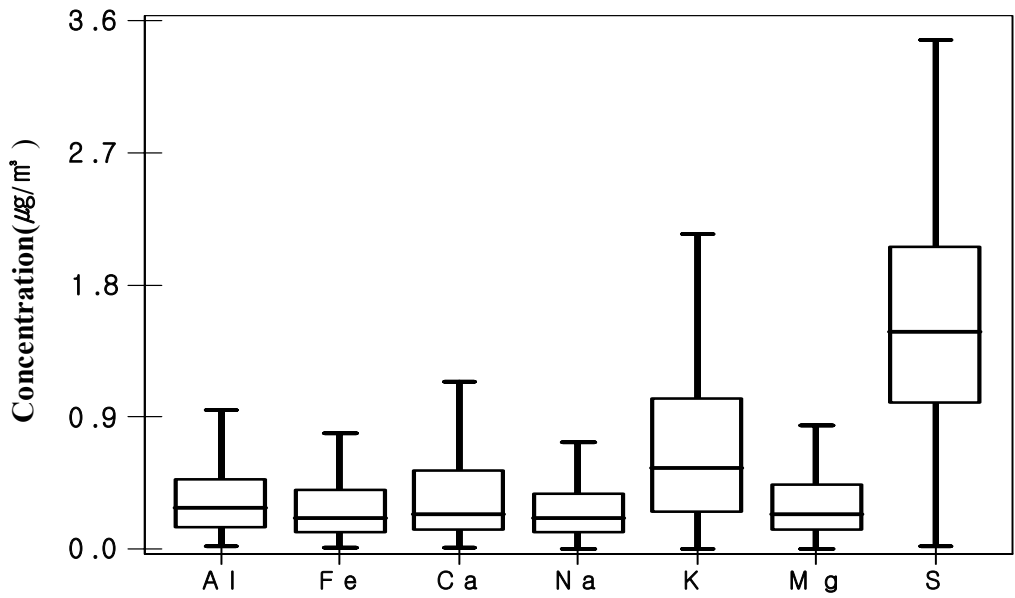


Figure 26. Comparison of Al, Fe, Ca, Na, K, Mg and S concentrations in spring.

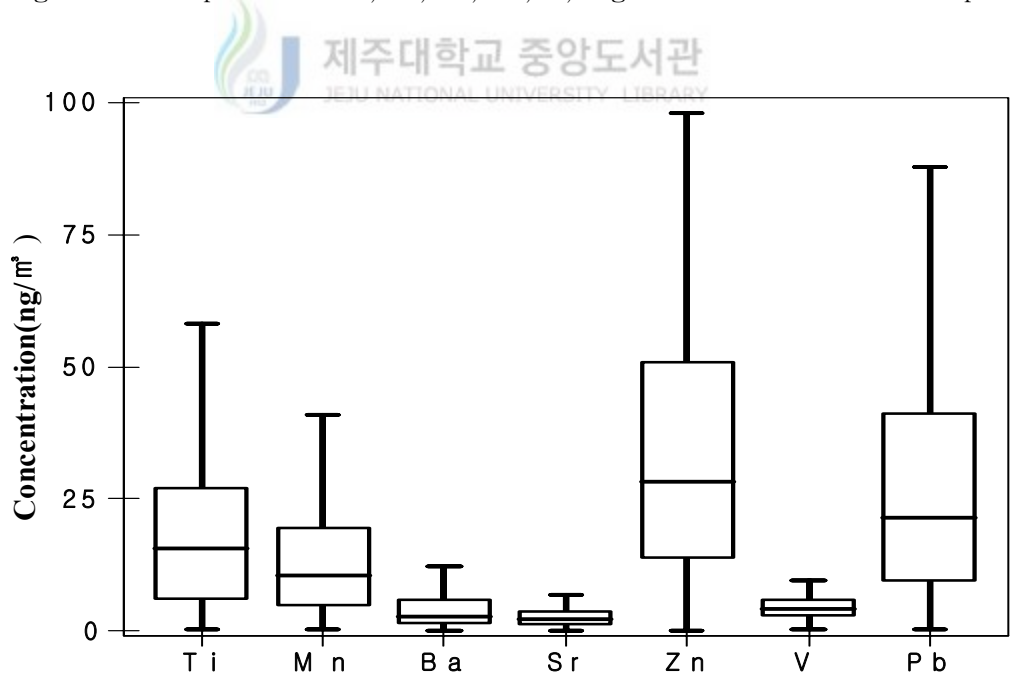


Figure 27. Comparison of Ti, Mn, Ba, Sr, Zn, V and Pb concentrations in spring.

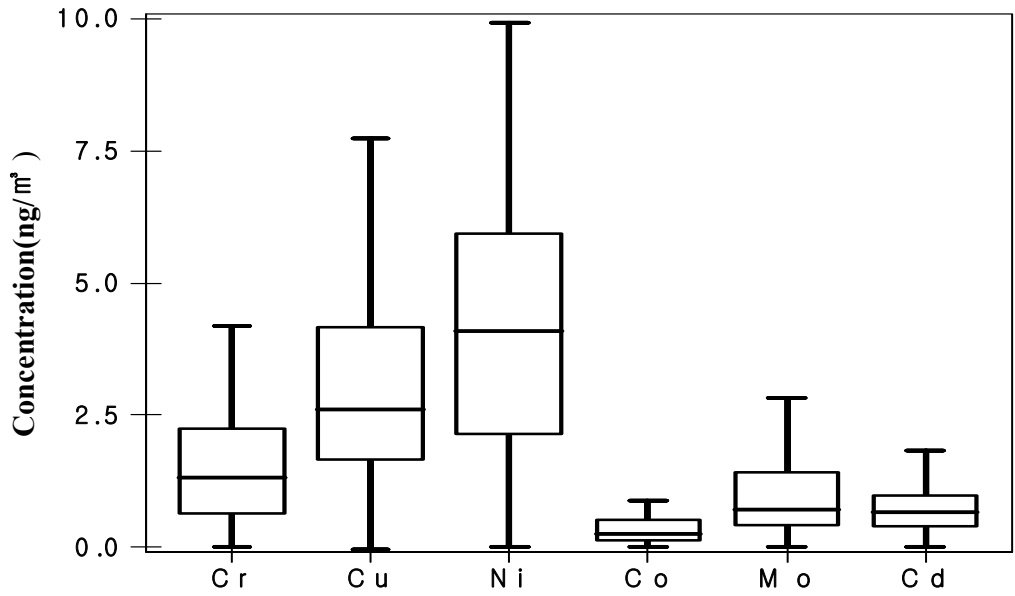


Figure 28. Comparison of Cr, Cu, Ni, Co, Mo and Cd concentrations in spring.

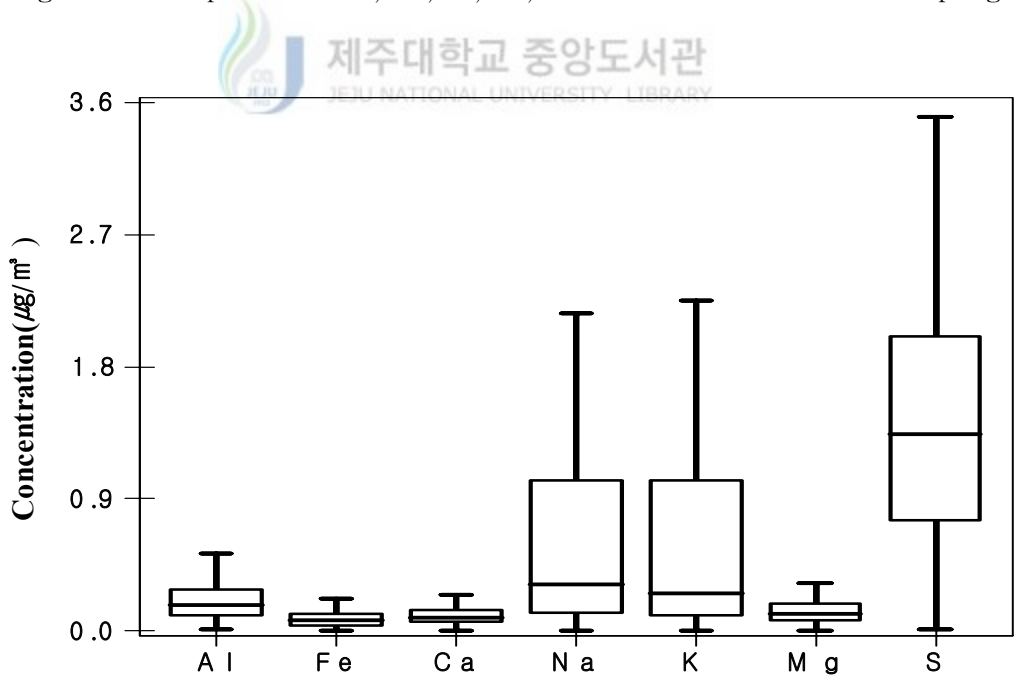


Figure 29. Comparison of Al, Fe, Ca, Na, K, Mg and S concentrations in summer.

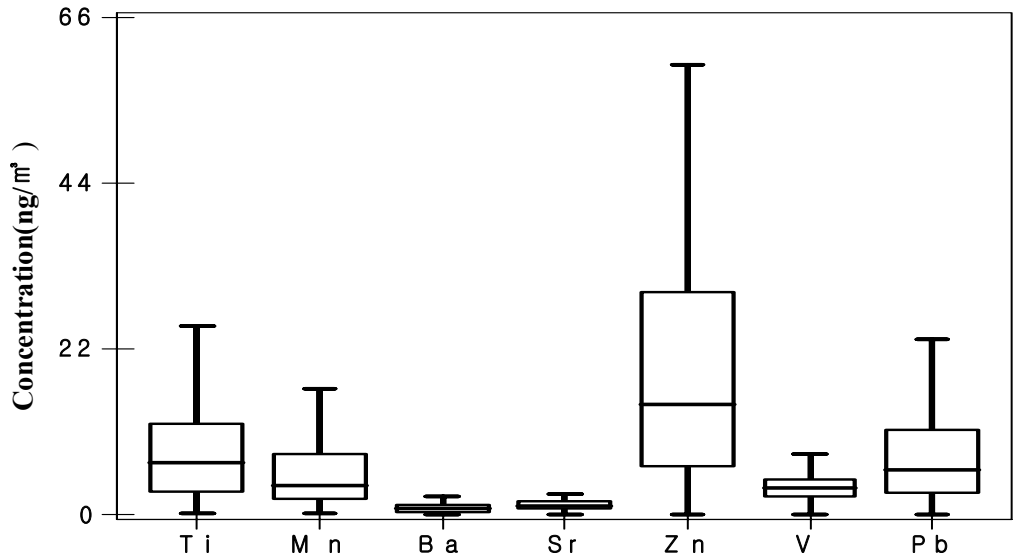


Figure 30. Comparison of Ti, Mn, Ba, Sr, Zn, V and Pb concentrations in summer.

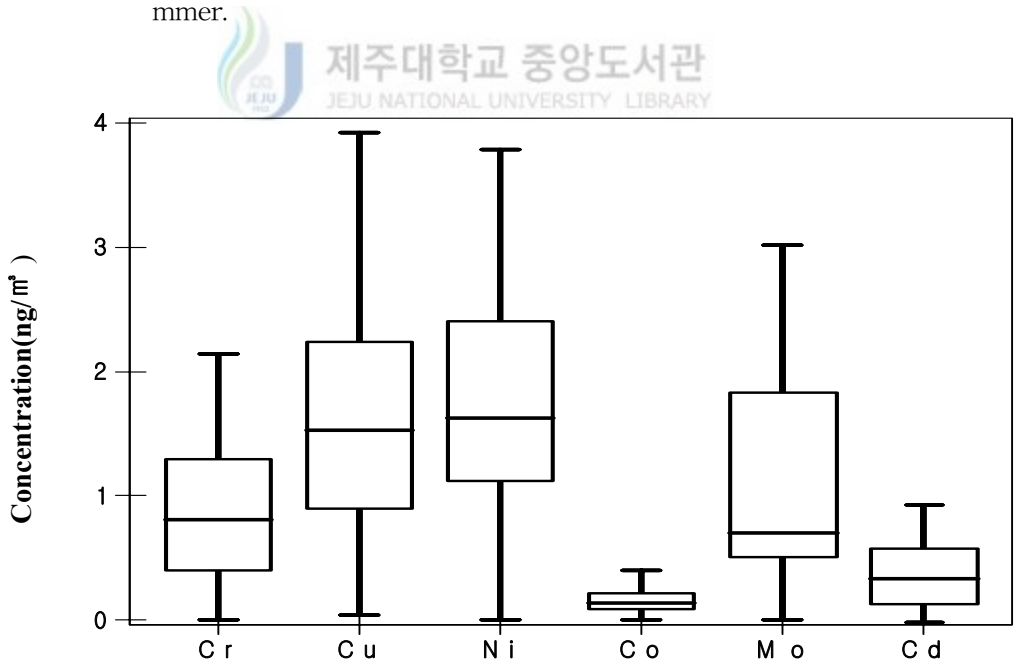


Figure 31. Comparison of Cr, Cu, Ni, Co, Mo and Cd concentrations in summer.

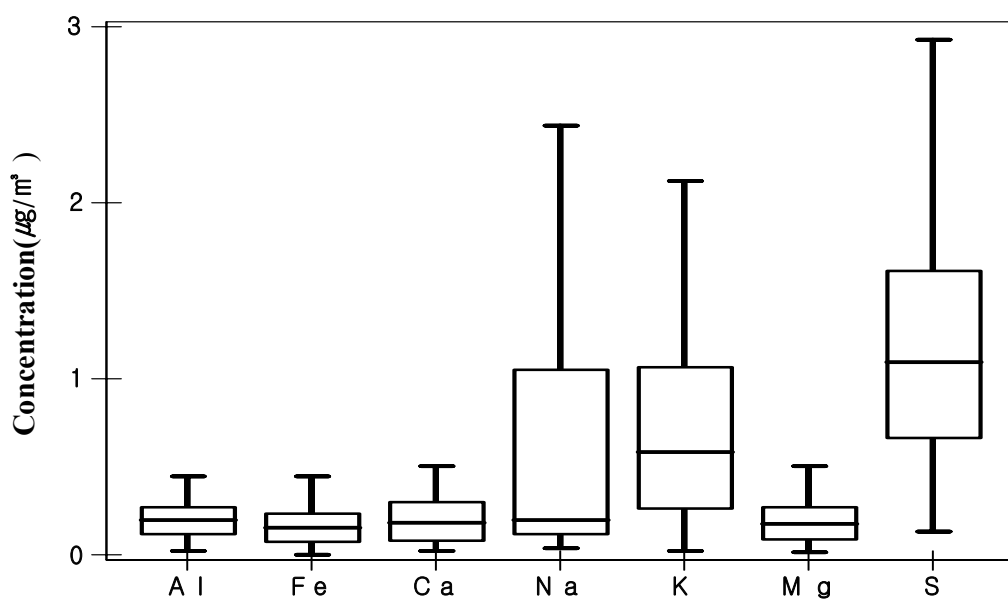


Figure 32. Comparison of Al, Fe, Ca, Na, K, Mg and S concentrations in fall.

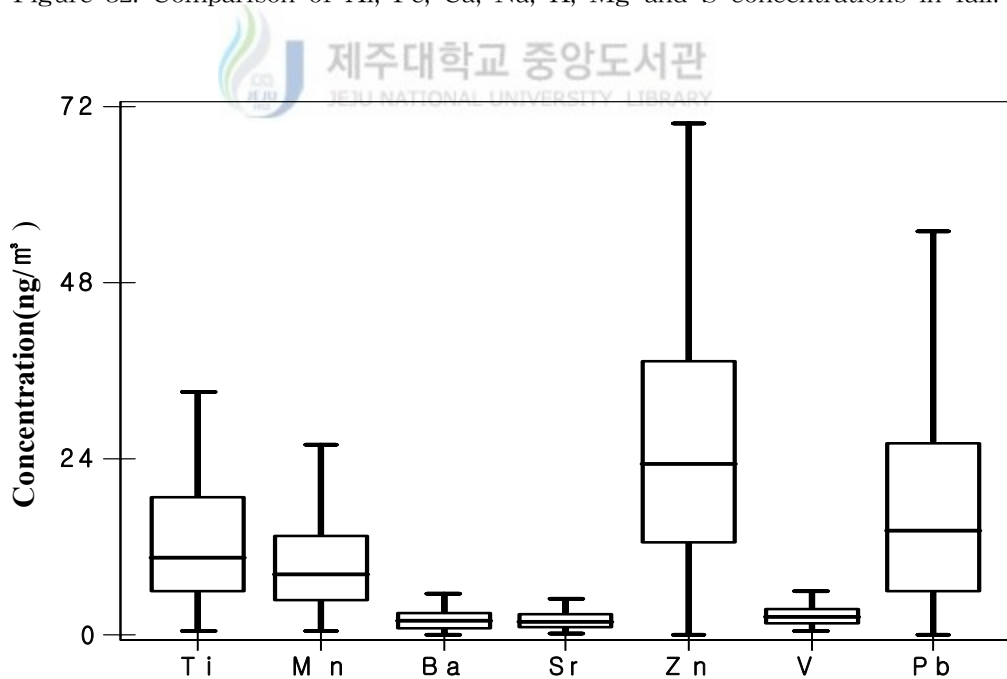


Figure 33. Comparison of Ti, Mn, Ba, Sr, Zn, V and Pb concentrations in fall.

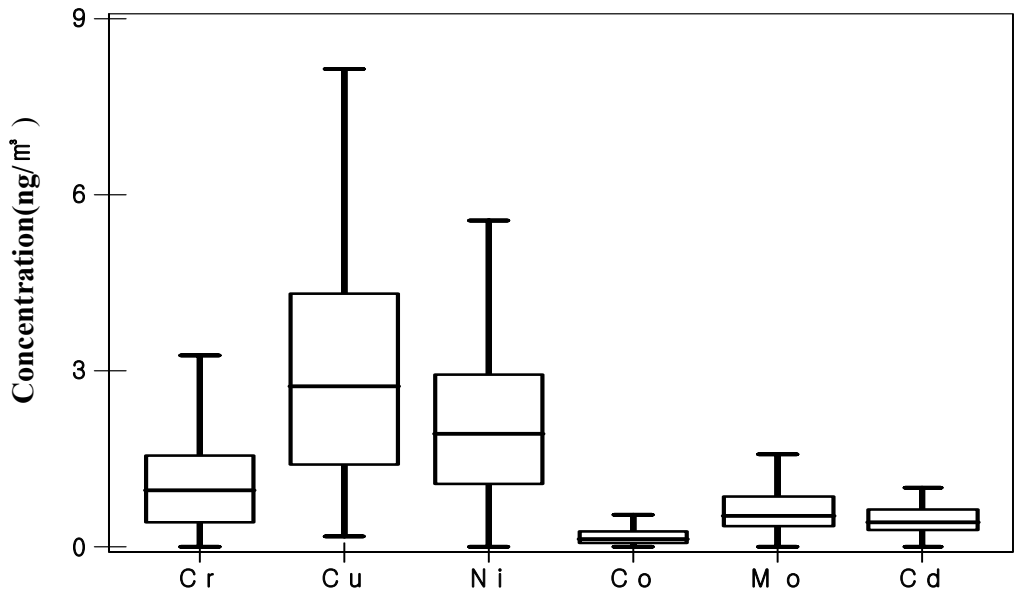


Figure 34. Comparison of Cr, Cu, Ni, Co, Mo and Cd concentrations in fall.

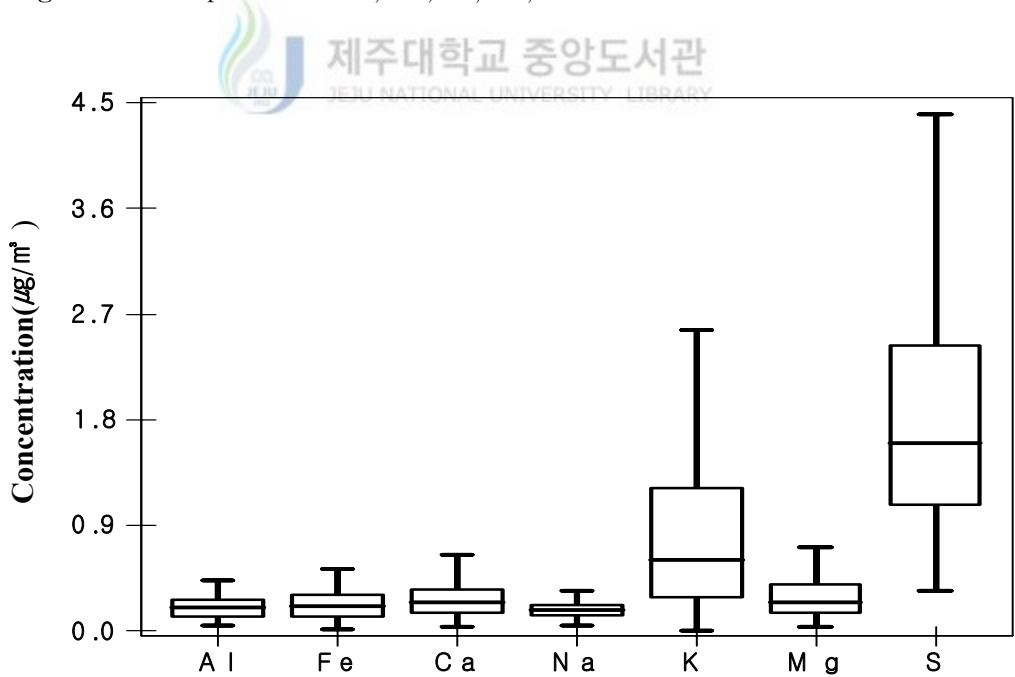


Figure 35. Comparison of Al, Fe, Ca, Na, K, Mg and S concentrations in winter.

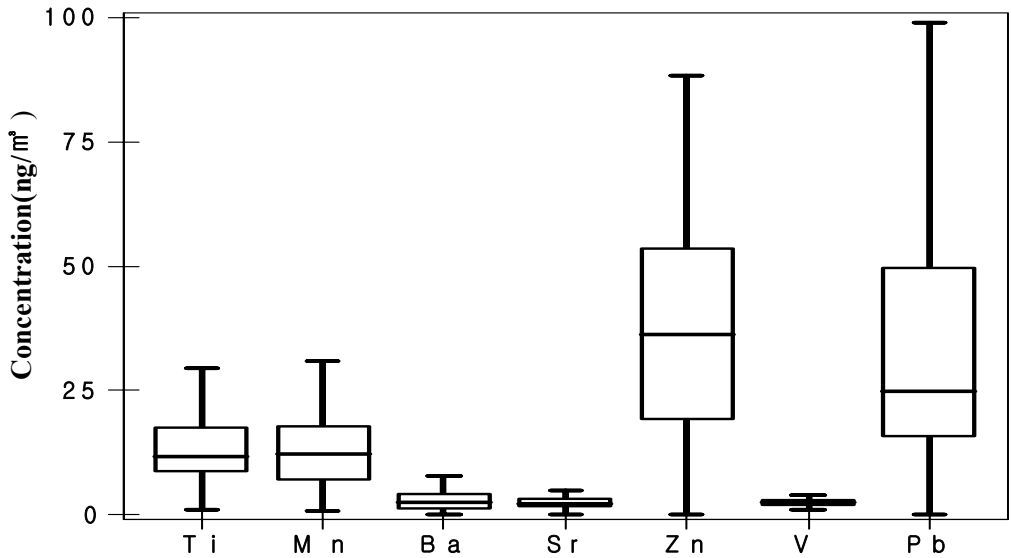


Figure 36. Comparison of Ti, Mn, Ba, Sr, Zn, V and Pb concentrations in winter.

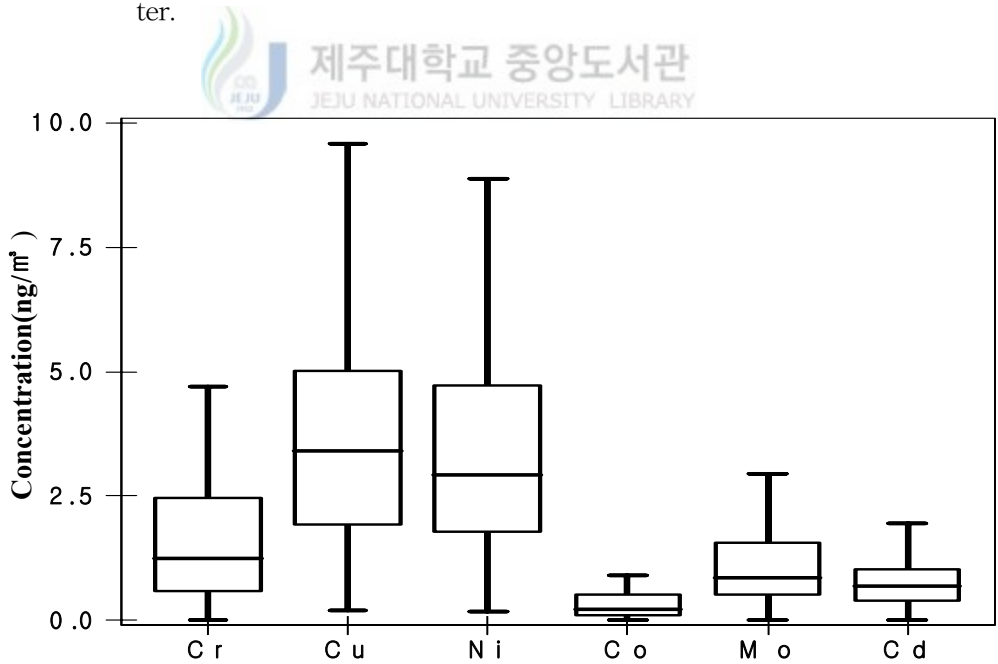


Figure 37. Comparison of Cr, Cu, Ni, Co, Mo and Cd concentrations in winter.

3) 월별 농도 비교

2001년 1월부터 2004년 12월까지 채취한 에어로졸 성분 분석 결과를 Table 14 ~ Table 15 과 Figure 38 ~ Figure 41에 수록하였다. 이중 수용성 성분의 월별 평균농도는 Mar > Jan > Apr > Feb > Jun > Oct > Dec > Nov > May > Aug > Sep > Jul 순으로 3월에 가장 높은 농도를 보인 반면에 7월에 가장 낮은 농도를 보였다.

nss-SO₄²⁻의 월별 농도를 보면 Jun > Mar > Apr > Jan > Feb > May > Dec > Oct > Sep > Nov > Aug > Jul 순으로 6월에 가장 높은 농도를 보였으며, 7월에 가장 낮은 농도를 나타내었다. 일반적으로 기온이 높은 여름철에는 광화학 반응이 활발하여 SO₄²⁻ 입자의 생성이 다른 계절에 비해 빠르며, 승화성이 높은 NH₄NO₃ 등의 물질이 가스상으로 휘산 된 후, 가스상의 NH₃는 결합력이 강한 SO₄²⁻와 결합하여 미세입자에서 (NH₄)₂SO₄를 생성한다. 반면 봄철에는 CaSO₄의 형태로 조대 입자인 토양성분과 결합하고 있는 것으로 알려져 있다(Sirois and Fricke, 1992). 각 연도별로 6월의 평균 농도는 2001년에 6.72 µg/m³, 2002년에 9.32 µg/m³, 2003년에 6.74 µg/m³, 2004년에 6.92 µg/m³로, 특히 2002년 6월이 가장 높은 농도를 나타내었다. 월별 비교에서 6월에 이처럼 SO₄²⁻농도가 상승하는 것은 국지적인 영향, 대기의 이동, 기상조건 등 여러 요인들을 좀 더 종합적으로 검토해볼 필요가 있지만, 주 원인은 6월 중에 빈도가 높은 박무현상과 온도 상승으로 인해 대기 중의 SO₂ 가스가 2차 입자로의 활발한 전환되기 때문인 것으로 판단된다. 또한 NO₃⁻는 Mar > Apr > Jan > Feb > Oct > Dec > Nov > May > Jun > Sep > Aug > Jul 순으로, 3월에 3.00 µg/m³로 가장 높은 농도를 보였으며, 7월에 1.15 µg/m³로 가장 낮은 농도를 보였다. Na⁺, Cl⁻의 월평균 농도를 보면, Na⁺인 경우 Jan > Mar > Aug > Oct > Nov > Sep > Dec > Feb > Jul > Apr > May > Jun 순이며, Cl⁻는 Mar > Jan > Aug > Nov > Feb > Oct > Dec > Apr > Sep > Jul > May > Jun 순으로 나타났다. Na⁺, Cl⁻성분은 북풍계열의 바람이 많이 부는 봄, 겨울철인 1, 3월에 가장 높은 농도를 보였으며, 남동풍 계열의 바람이 많이 부는 여름철인 6월에 가장 낮은 농도를 나타냈다. NH₄⁺성분은 봄철에는 비료의 사용으로 여름에는 동물의 배설물이나 식물의 부패가 높은 기온의 영향으로 활발히 이루어지면서 NH₃의 농도가 상승하는 것으로 알려져 있다(강창희 외, 2003). 본 논문에서는 NH₄⁺성분은 6월에 가장 높고, 8월에 가장 낮은 농도를 나타냈다. 그러나 대체적으로 다른 성분들에 비해 월별 편차가 낮은 것으로 조

사가 되었다. nss- Ca^{2+} 인 경우, 월별로 농도를 비교해본 결과 $\text{Apr} > \text{Mar} > \text{Jan} > \text{Feb} > \text{Oct} > \text{Dec}, \text{May} > \text{Nov} > \text{Sep} > \text{Jun} > \text{Aug} > \text{Jul}$ 순이며, 이와 같이 북서 계열이 우세한 봄과 겨울에 Ca^{2+} 의 농도가 이처럼 크게 증가하는 것은 이러한 풍향과 상관성이 큰 것으로 보인다. 특히 황사 영향을 크게 받는 봄철에 이와 같이 토양의 지표물질인 Ca^{2+} 농도가 크게 증가하는 것은 제주지역의 대기질이 중국의 영향을 많이 받고 있음을 의미하며, 황사가 다량으로 대기 부유분진에 유입되고 있음을 뒷받침해 주고 있다(Chun et al., 2001; Husar et al., 2001). K^+ 와 Mg^{2+} 인 경우 두 성분 모두 3월에 가장 높은 농도를 보였으나 K^+ 인 경우는 7월이 가장 낮은 농도를 보였으며, Mg^{2+} 인 경우 6월이 가장 낮은 농도를 보였다.

또한 에어로졸의 주요 금속 및 황 성분의 월평균 농도를 보면, 전체적으로는 $\text{Mar} > \text{Apr} > \text{Jan} > \text{Feb} > \text{Dec} > \text{Jun} > \text{Nov} > \text{Oct} > \text{May} > \text{Sep} > \text{Aug} > \text{Jul}$ 순으로 수용성 성분과 마찬가지로 3월이 가장 높고, 7월이 가장 낮은 농도를 나타내었다.

이 중 S의 농도는 $\text{Mar}, \text{Jun} > \text{Apr} > \text{Jan} > \text{Dec} > \text{Feb} > \text{Sep} > \text{Oct} > \text{May} > \text{Aug}, \text{Nov} > \text{Jul}$ 순으로 3월과 6월에 $2.22 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높은 농도를 보였으며, 7월에 $1.29 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 낮은 농도를 나타냈다. S 역시 nss- SO_4^{2-} 와 마찬가지로 6월에 대체적으로 높은 농도를 보였고, 특히 2002년 6월이 가장 높다. 이러한 이유 역시 마찬가지로 빈도가 높은 박무현상과 온도 상승으로 인해 대기 중의 SO_2 가스가 2차 입자로의 활발한 전환되기 때문인 것으로 추정된다. Al, Fe, Ca, Ti, Ba, Sr 등 토양기원의 성분을 보면, 3월과 4월에 가장 높은 농도를 보이고, 7월에 가장 낮은 농도를 나타내었다. 그리고 가장 큰 농도 편차를 보여, Al의 경우 그 농도차가 9.8배, Fe은 24.9배, Ca은 21.3배로 나타났다. 또 Ti, Ba, Sr의 경우 각각 9.3배, 19.6배, 9.4배의 농도차를 보였다. 반면에 해양 기원의 Na, K, Mg은 모두 3월에 가장 높고, Na는 5월, K, Mg은 7월에 가장 낮은 농도를 나타내었다. 또 인위적 기원의 Pb, Ni, V, Cr, Cu 등의 경우 Pb는 1월, Ni, Cr, Cu는 3월에, V는 4월에 가장 높은 농도를 보였다.

Table 14. Monthly mean concentrations of water-soluble components.

Month	Concentration($\mu\text{g}/\text{m}^3$)							
	NH_4^+	Na^+	K^+	Mg^{2+}	$\frac{\text{nss}^-}{\text{Ca}^{2+}}$	NO_3^-	Cl^-	$\frac{\text{nss}^-}{\text{SO}_4^{2-}}$
Jan	1.73	2.66	0.43	0.42	0.49	2.25	3.14	6.21
Feb	1.70	1.92	0.41	0.42	0.42	2.63	1.84	6.07
Mar	1.53	2.58	0.43	0.49	1.15	3.00	3.21	6.53
Apr	1.39	1.68	0.37	0.46	1.20	2.96	1.62	6.24
May	1.57	1.29	0.29	0.20	0.25	1.63	0.84	5.46
Jun	2.13	1.05	0.39	0.18	0.17	1.23	0.56	7.40
Jul	1.13	1.71	0.12	0.19	0.06	1.15	1.47	4.05
Aug	0.96	2.56	0.19	0.25	0.11	1.19	2.17	4.09
Sep	1.19	1.97	0.25	0.20	0.18	1.20	1.54	4.77
Oct	1.11	2.45	0.36	0.24	0.29	1.93	1.79	4.87
Nov	1.03	2.02	0.28	0.22	0.24	1.77	2.06	4.10
Dec	1.20	1.93	0.35	0.26	0.25	1.90	1.78	5.24

Table 15. Monthly mean concentrations of sulfur and metal components.

Component	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Al	0.43	0.45	2.06	1.90	0.36	0.39	0.21	0.23	0.31	0.32	0.37	0.28
Fe	0.40	0.41	1.60	1.74	0.21	0.23	0.07	0.10	0.17	0.25	0.32	0.26
Ca	0.52	0.53	1.86	1.92	0.19	0.20	0.09	0.15	0.23	0.31	0.35	0.33
$\mu\text{g}/\text{m}^3$												
Na	1.41	0.72	1.68	1.37	0.41	0.48	0.64	0.86	0.77	0.67	0.83	0.94
K	0.89	0.88	1.24	1.15	0.71	0.58	0.51	0.55	0.59	0.75	0.78	0.71
Mg	0.37	0.35	0.99	0.84	0.21	0.30	0.13	0.19	0.23	0.32	0.34	0.31
S	1.86	1.98	2.22	2.21	1.37	2.22	1.29	1.32	1.67	1.46	1.32	1.88
Ti	25.10	23.50	65.39	65.32	15.91	17.25	7.00	8.50	12.52	16.13	18.62	13.39
Mn	23.79	18.40	47.25	46.62	9.44	10.46	3.97	5.37	9.16	12.28	15.81	16.41
Ba	4.88	7.55	14.07	14.14	2.68	2.82	0.72	1.25	2.30	3.16	4.10	3.26
Sr	4.34	4.46	9.63	8.50	1.66	1.49	1.00	1.71	1.94	2.57	2.87	2.88
Zn	58.52	65.88	65.46	52.00	27.22	43.17	19.73	20.89	27.74	38.46	44.80	44.49
V	4.84	5.72	14.19	18.45	5.25	5.44	3.84	3.07	3.37	2.82	2.83	2.89
ng/m^3												
Pb	49.62	39.15	47.11	35.67	15.92	27.50	12.41	14.65	25.93	27.71	30.29	40.44
Cr	1.68	2.04	4.98	4.48	1.27	1.49	1.26	1.11	2.91	1.35	1.70	1.44
Cu	3.97	4.12	5.99	5.38	2.37	3.36	1.96	1.91	2.99	5.39	3.47	4.47
Ni	4.61	4.41	7.20	5.64	3.94	4.18	2.34	1.76	3.17	2.73	3.00	2.87
Co	0.49	0.41	1.20	1.32	0.25	0.25	0.12	0.17	0.19	0.21	0.31	0.32
Mo	1.04	0.94	1.10	0.98	0.85	1.08	0.93	1.07	1.02	0.78	0.76	1.20
Cd	0.93	0.90	1.17	1.20	0.66	0.69	0.36	0.52	0.50	0.74	0.71	0.91

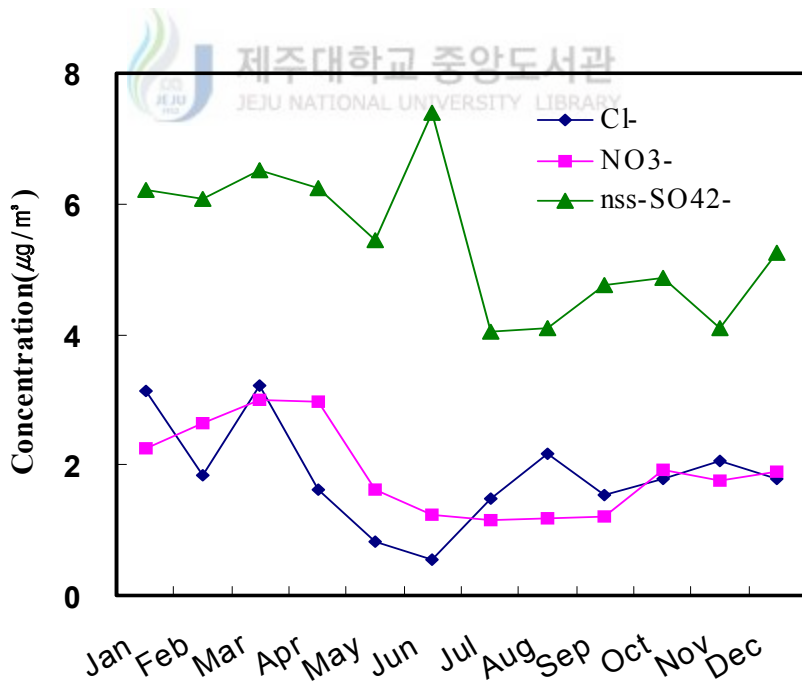
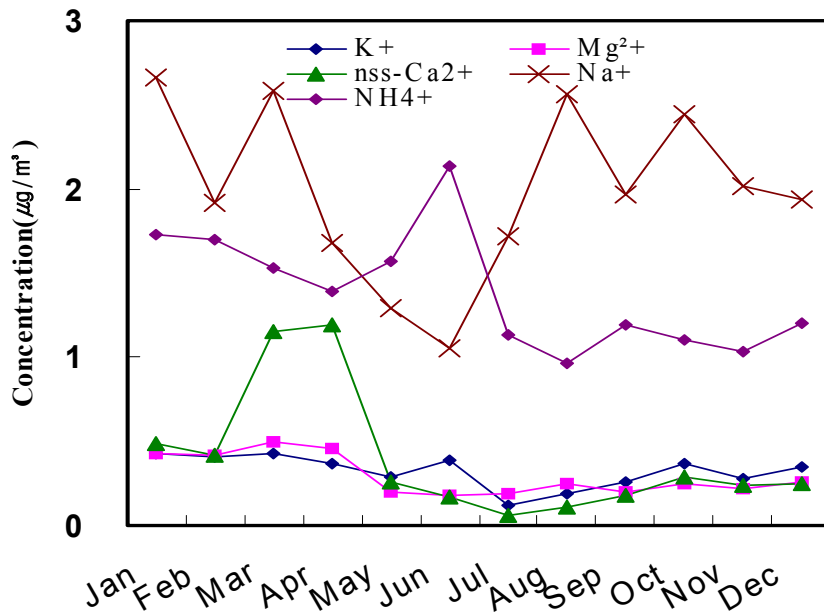


Figure 38. Variations of monthly mean concentrations of water-soluble components.

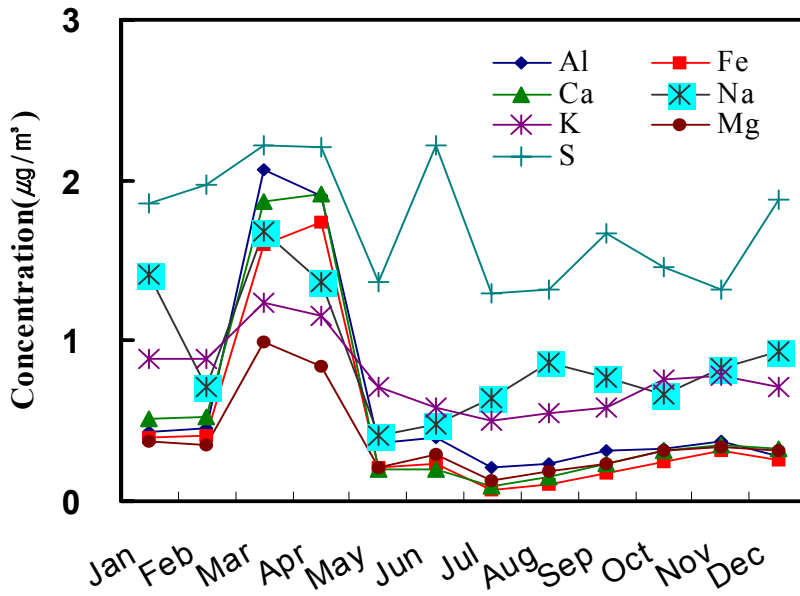


Figure 39. Variations of monthly mean concentrations of Al, Fe, Ca, Na, K, Mg and S components.

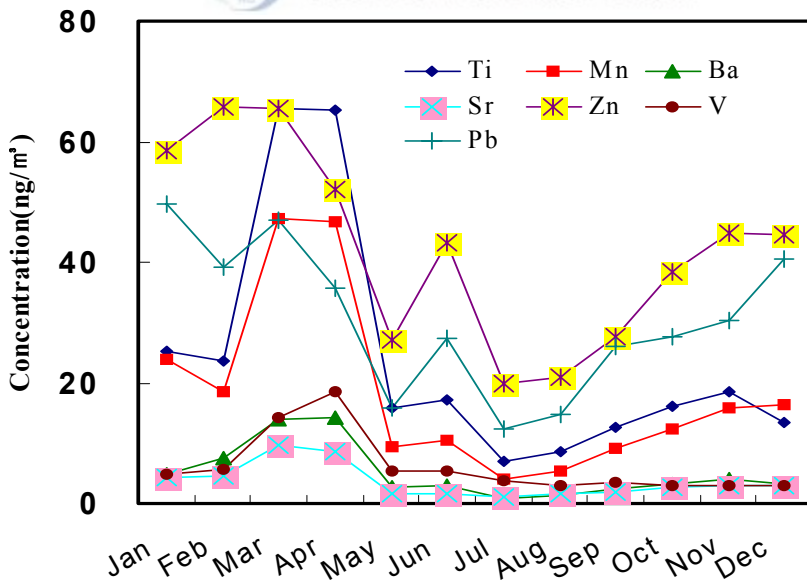


Figure 40. Variations of monthly mean concentrations of Ti, Mn, Ba, Sr, Zn, V and Pb components.

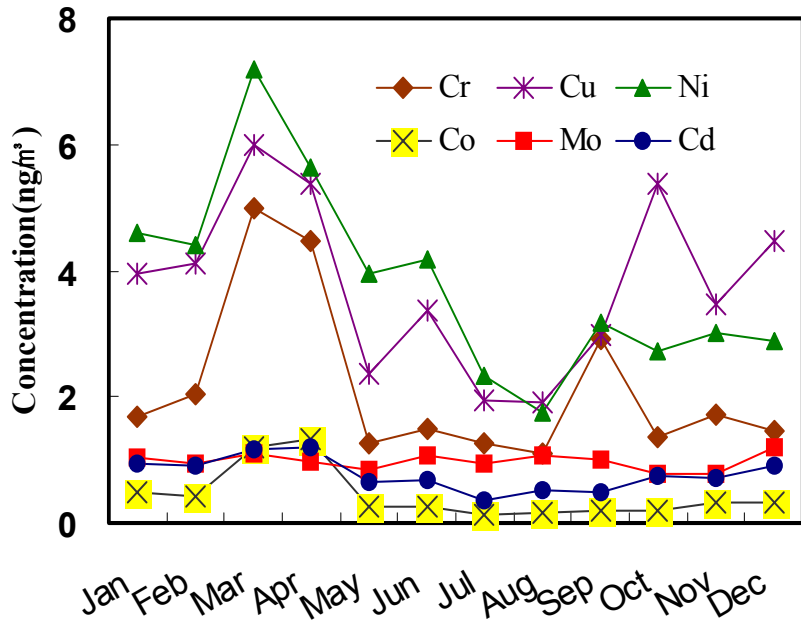


Figure 41. Variations of monthly mean concentrations of Cr, Cu, Ni, Co, Mo and Cd components.

4) 토양 및 해염의 영향

대기 에어로졸들의 구성 성분은 발생기원에 따라 차이가 있지만 해염, 토양 및 오염기원 입자들로 나눌 수 있다. 그리고 이러한 입자들이 어떤 기원 입자에 속하는지를 판단하는 방법은 각 기원의 농축인자(enrichment factor, E.F.)를 계산하여 각 기원(토양 혹은 해염)에 대해 상대적인 농축 정도를 갖고 판단하는 것이다. 또한 각 기원의 지시성분과의 상관 계수를 살펴봄으로써 가능하다. 대기 에어로졸은 주로 토양, 해염, 검댕, 비산재 등이 주성분이며, 이외에 각종 성분들이 흡착 또는 반응된 상태로 대기 중에 부유된다. 제주지역 에어로졸의 경우 일반적으로 토양 및 해염 성분이 상당량 함유되어 있으며, 특히 해양 영향이 아주 큰 것으로 조사되고 있다. 본 연구에서도 이러한 해염영향과 토양영향을 확인하기 위해 Na^+ 과 Al을 지표성분으로 다음의 식에 의해 농축계수를 구하였다(김원형 외, 2003).

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

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

식 (1)에서 $(C_x/C_{Na^+})_{Seawater}$ 는 해수 중의 Na^+ 과 각 성분의 농도비를 나타내며, $(C_x/C_{Na^+})_{Aerosol}$ 는 분석한 대기 에어로졸 중의 Na^+ 과 각 성분의 농도비를 나타낸다. 또한 식(2)의 $(C_x/C_{Al})_{Crust}$ 는 토양 중 Al과 각 성분의 농도비로 Taylor와 McLennan (1985)가 분석한 지각 성분의 조성을 기준으로 계산하였고, $(C_x/C_{Al})_{Aerosol}$ 는 대기 에어로졸 중 Al과 각 성분의 농도비이다. 두 농축계수는 그 값이 1에 가까울수록 각 기원에 유입이 큼을 의미하고 1보다 클수록 각 기원 보다는 다른 요인에 의해 에어로졸에 유입되고 있음을 의미한다. 그러나 최만식 외(1989)에 의하면 일반적으로 각 성분들에 대해 구한 EF값은 지표성분에 따라 다소 차이를 보이기 때문에 일반적으로 EF값이 3~5이하의 성분들은 지표성분과 같은 기원을 갖고 그 이상의 값을 나타내면 다른 기원에 의해 유해된 것으로 추정하고 있다.

연구기간 중 각 성분들의 전체 평균농도와 계절별 평균농도로부터 구한 농축인자를 Table 16 ~ Table 17에 수록하였다. 본 연구의 해염 농축계수를 보면, Cl^- 의 농축계수는 0.4 ~ 0.5의 범위를 보였고, Mg^{2+} 은 0.9 ~ 2.2의 범위를 나타내고 있어 이들 성분들은 주로 해양의 영향을 많이 받고 있음을 알 수 있다. 반면에 SO_4^{2-} , Ca^{2+} , K^+ 의 EF 값은 그 범위가 13.2 ~ 22.1, 3.6 ~ 14.6, 4.9 ~ 6.6로 비교적 큰 값을 나타내며, 이러한 성분들은 해염이 아닌 다른 요인들에 의해 대기 에어로졸에 유입되고 있음을 의미한다. 특히 다른 계절에 비해 봄철에 가장 높은 EF 값을 보이는 것은 이 시기에 상대적으로 많이 유입되었음을 의미한다.

또한 토양 농축계수를 살펴보면, Ca와 Fe가 각각 1.7 ~ 3.4, 1.2 ~ 2.3으로 이들 성분들이 대체적으로 토양에서 유입되고 있음을 알 수 있다. 그러나 Cd을 제외한 나머지 성분들은 높은 EF 값을 보이고 있어 토양보다는 다른 요인에 유입되고 있을 가능성이 큰 것으로 생각되며, 계절별로 비교해본 결과, 대체적으로 겨울철에 EF 값이 높게 나타나, 이 시기에 이들 성분들의 유입이 큰 것으로 추정된다.

Table 16. Seasonal comparison of seawater enrichment factors for water-soluble components.

X	Seawater	$(C_x/C_{Na^+})_{Aerosol}/(C_x/C_{Na^+})_{Seawater}$				
		Annual	Spring	Summer	Fall	Winter
SO ₄ ²⁻	0.26	17.6	22.1	19.3	13.2	18.3
Ca ²⁺	0.04	7.6	14.6	3.6	4.7	6.6
K ⁺	0.04	5.8	6.6	5.0	4.9	6.6
Mg ²⁺	0.13	1.4	2.2	1.1	0.9	1.6
Cl ⁻	1.80	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4

Table 17. Seasonal comparison of soil enrichment factors for metal elements.

X	Crust	$(C_x/C_{Al})_{Aerosol}/(C_x/C_{Al})_{Crust}$				
		Annual	Spring	Summer	Fall	Winter
K	0.3483	10.1	7.5	9.6	12.9	11.1
Na	0.3595	8.5	5.0	11.2	7.8	10.3
Mg	0.1654	6.2	4.5	6.1	6.9	7.4
Fe	0.4353	1.8	2.0	1.2	1.7	2.9
Ca	0.3731	2.6	2.9	1.7	2.4	3.4
Co	0.0001	12.1	14.0	10.0	10.1	14.4
Ti	0.0093	5.6	5.4	4.9	5.5	6.5
Mn	0.0075	5.3	4.6	3.4	5.6	7.9
Ni	0.0002	66.7	54.8	70.6	65.5	77.4
V	0.0007	24.9	26.8	31.7	19.8	21.5
Pb	0.0002	493.2	339.8	395.9	498.1	753.0
Zn	0.0009	171.4	114.1	146.5	185.8	244.1
Cd	0.0012	2.3	2.0	2.0	2.4	2.8
Cu	0.0003	4.7	3.2	3.7	6.2	5.8

5) 성분들간의 상관성 조사

에어로졸 성분들 즉 수용성 이온 성분 및 금속 성분들의 발생기원을 확인하고, 에어로졸 특성을 조사하기 위하여 각 성분들 상호간의 상관성을 비교하였다. 각 성분들에 대해 상관계수를 구하고 그 결과를 Table 19에 수록하였다. 주요 수용성 성분들 간의 상관성을 확인 해 본 결과 Na^+ 과 Cl^- 의 상관계수가 0.85로 높은 상관관계를 나타내었다. 이는 해수중의 NaCl이 상당량 대기 부유분진으로 유입되고 있으며 고산지역 대기 에어로졸이 해수의 영향을 많이 받고 있음을 입증하는 결과이다. 수용성성분 중 주요 인위적 기원 물질인 SO_4^{2-} 과 양이온 성분들 즉, NH_4^+ , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} 등과의 상관성을 조사해 본 결과 이들 중에는 NH_4^+ 와의 상관계수가 0.85로 가장 큰 상관성을 보였으며, SO_4^{2-} 의 상당량이 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 등과 같은 염 물질 상태로 존재할 가능성이 큰 것으로 보인다.

또한 금속 성분들 간의 상관성을 조사해 본 결과 가장 양호한 상관관계를 보인 성분들은 Al, Fe, Ca로 Al과 Fe간의 상관계수는 0.97, Al과 Ca간의 상관계수는 0.97, Fe와 Ca와의 상관계수는 0.98의 아주 큰 상관성을 나타내었다. 이 성분들은 동일한 토양 기원의 대표적인 성분들로 세 성분이 모두 다른 요인 없이 대부분 토양으로부터 유래되고 있음을 의미하는 결과이다. 이들 세 성분들 간의 상관성만큼은 크지 않지만 Al, Fe, Ca과 Ba, K, Mg, Sr, Ti, Mn, V, Cr, Co 등과의 상관성도 모두 상관계수가 0.7이상으로 비교적 크게 나타났다. 이들 Ba, K, Mg, Sr, Ti, Mn, V, Cr, Co성분들 중 인위적 기원의 V와 위해성 금속인 Cr을 제외하면 대부분 토양성분들로 이들의 상관성이 큰 것은 발생 기원이 동일하기 때문인 것으로 보인다. 반면에 V와 Cr은 다른 기원의 성분이나 토양성분들과 큰 상관성을 나타내는 것으로 보아 토양입자와 동일한 경로로 에어로졸에 유입된 것으로 보이며, 토양입자와 함께 장거리 이동한 성분일 가능성이 크다. 또 수용성 성분과 금속 성분들을 종합한 전체 성분들 간의 상관성을 조사해 본 결과 이들 중 Ca^{2+} 과 Al, Fe, Ca, Mn, Ba, Sr간의 상관계수가 0.62 ~ 0.74로 가장 높은 상관성을 보였다. 이는 모두 토양성분으로 동일한 발생기원을 갖는다는 것을 의미한다.

Table 18. Cross correlation between TSP aerosol components.

Components	NH ₄ ⁺	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	Ca ²⁺	nss-Ca ²⁺	SO ₄ ²⁻	nss-SO ₄ ²⁻	Al	Fe	Ca	Na	K	Mg	S	Ti	Mn	Ba	Sr	Zn	V	Pb	Cr	Cu	Ni	Co	Mo	Cd	
NH ₄ ⁺	1.00	-0.12	0.65	0.11	0.29	-0.19	0.09	0.85	0.02	0.03	0.07	0.64	0.07	0.12	0.09	0.06	0.46	0.06	0.55	0.03	0.32	0.23	0.04	0.19	0.32						
Na ⁺	-0.12	1.00	0.24	0.53	0.33	0.85	0.28	0.05	0.16	0.17	0.18	0.17	0.18	0.53	0.26	0.24	0.11	0.25	0.16	0.16	0.23	0.13	0.14	0.15	0.14	0.11	0.19	0.17	0.02	0.16	
K ⁺	0.65	0.24	1.00	0.44	0.61	0.12	0.44	0.77	0.19	0.23	0.24	0.24	0.24	0.24	0.26	0.32	0.70	0.26	0.32	0.31	0.33	0.66	0.23	0.78	0.23	0.49	0.43	0.23	0.26	0.58	
Mg ²⁺	0.11	0.53	0.44	1.00	0.57	0.53	0.47	0.29	0.46	0.45	0.49	0.45	0.44	0.44	0.47	0.38	0.51	0.48	0.50	0.50	0.50	0.35	0.53	0.27	0.38	0.32	0.41	0.43	0.05	0.39	
NO ₃ ⁻	0.29	0.33	0.61	0.57	1.00	0.29	0.59	0.35	0.39	0.42	0.44	0.34	0.34	0.34	0.45	0.43	0.38	0.45	0.50	0.49	0.50	0.56	0.45	0.53	0.38	0.51	0.48	0.41	0.09	0.50	
Cl ⁻	-0.19	0.85	0.12	0.53	0.29	1.00	0.38	-0.13	0.24	0.25	0.26	0.55	0.29	0.51	0.46	0.85	0.41	0.68	0.70	0.71	0.74	0.49	0.67	0.45	0.60	0.55	0.65	0.66	0.13	0.52	
nss-Ca ²⁺	0.09	0.28	0.44	0.47	0.59	0.38	1.00	0.36	0.63	0.67	0.69	0.51	0.17	0.13	0.22	0.81	0.21	0.27	0.25	0.25	0.25	0.25	0.57	0.20	0.68	0.17	0.44	0.40	0.18	0.25	0.48
nss-SO ₄ ²⁻	0.85	0.05	0.77	0.29	0.35	-0.13	0.36	1.00	0.15	0.17	0.18	0.17	0.17	0.17	0.13	0.35	0.85	0.94	0.95	0.91	0.91	0.36	0.94	0.17	0.78	0.55	0.62	0.91	0.09	0.51	
Al	0.02	0.16	0.19	0.46	0.39	0.24	0.63	0.15	1.00	0.96	0.97	0.55	0.68	0.94	0.35	0.85	0.94	0.85	0.94	0.95	0.94	0.36	0.94	0.17	0.78	0.55	0.62	0.91	0.09	0.51	
Fe	0.03	0.17	0.23	0.45	0.42	0.25	0.67	0.17	0.96	1.00	0.98	0.57	0.68	0.95	0.37	0.85	0.94	0.85	0.94	0.95	0.94	0.39	0.93	0.21	0.77	0.56	0.64	0.92	0.10	0.53	
Ca	0.03	0.18	0.24	0.49	0.44	0.26	0.69	0.18	0.97	0.98	1.00	0.58	0.69	0.95	0.39	0.84	0.95	0.96	0.94	0.94	0.94	0.41	0.94	0.23	0.78	0.58	0.64	0.95	0.10	0.55	
Na	0.02	0.53	0.24	0.45	0.34	0.55	0.51	0.17	0.55	0.57	0.58	1.00	0.26	0.80	0.36	0.61	0.55	0.57	0.64	0.31	0.54	0.31	0.54	0.34	0.52	0.36	0.50	0.62	-0.02	0.42	
K	0.03	0.26	0.26	0.44	0.45	0.29	0.46	0.13	0.68	0.68	0.69	0.26	1.00	0.69	0.36	0.60	0.66	0.69	0.66	0.69	0.66	0.42	0.67	0.27	0.52	0.50	0.49	0.59	0.13	0.46	
Mg	0.07	0.24	0.32	0.47	0.43	0.31	0.65	0.22	0.94	0.95	0.95	0.60	0.69	1.00	0.44	0.80	0.91	0.92	0.95	0.95	0.95	0.45	0.87	0.28	0.77	0.59	0.66	0.89	0.13	0.56	
S	0.64	0.11	0.70	0.38	0.38	0.00	0.41	0.81	0.35	0.37	0.39	0.36	0.36	0.36	0.44	1.00	0.38	0.44	0.45	0.43	0.65	0.65	0.39	0.73	0.33	0.55	0.54	0.39	0.31	0.59	
Ti	0.07	0.25	0.26	0.51	0.45	0.32	0.68	0.21	0.85	0.85	0.84	0.61	0.60	0.80	0.38	1.00	0.85	0.88	0.82	0.82	0.36	0.89	0.25	0.71	0.53	0.67	0.83	0.10	0.56		
Mn	0.12	0.16	0.32	0.48	0.50	0.23	0.70	0.27	0.94	0.94	0.94	0.55	0.55	0.66	0.91	0.44	0.85	1.00	0.95	0.92	0.47	0.91	0.32	0.76	0.61	0.67	0.90	0.11	0.58		
Ba	0.09	0.16	0.31	0.50	0.49	0.23	0.71	0.25	0.95	0.95	0.96	0.57	0.69	0.92	0.45	0.88	0.95	1.00	0.94	0.48	0.94	0.30	0.78	0.63	0.70	0.92	0.92	0.12	0.59		
Sr	0.06	0.29	0.33	0.50	0.50	0.35	0.74	0.25	0.91	0.94	0.94	0.64	0.66	0.95	0.43	0.82	0.92	0.94	1.00	0.94	0.47	0.87	0.33	0.77	0.59	0.73	0.91	0.11	0.57		
Zn	0.46	0.13	0.66	0.35	0.56	0.09	0.49	0.57	0.36	0.39	0.41	0.31	0.42	0.45	0.65	0.36	0.47	0.48	0.47	1.00	0.38	0.77	0.37	0.66	0.52	0.40	0.28	0.28	0.66		
V	0.06	0.14	0.23	0.53	0.45	0.22	0.67	0.20	0.94	0.93	0.94	0.54	0.67	0.87	0.39	0.89	0.91	0.94	0.87	0.38	1.00	0.20	0.75	0.55	0.62	0.89	0.09	0.09	0.55		
Pb	0.55	0.15	0.78	0.27	0.53	0.07	0.45	0.68	0.17	0.21	0.23	0.34	0.27	0.28	0.73	0.25	0.32	0.30	0.33	0.33	0.77	0.20	1.00	0.26	0.57	0.49	0.26	0.26	0.67		
Cr	0.03	0.14	0.23	0.38	0.38	0.21	0.60	0.17	0.78	0.77	0.78	0.52	0.52	0.77	0.33	0.71	0.76	0.78	0.77	0.77	0.37	0.75	0.26	1.00	0.51	0.76	0.77	0.05	0.47		
Cu	0.32	0.11	0.49	0.32	0.51	0.09	0.55	0.44	0.55	0.56	0.58	0.36	0.50	0.59	0.55	0.53	0.61	0.63	0.59	0.66	0.55	0.57	0.51	1.00	0.56	0.57	0.19	0.63	0.19	0.63	
Ni	0.23	0.19	0.43	0.41	0.48	0.23	0.65	0.40	0.62	0.64	0.64	0.50	0.49	0.66	0.54	0.67	0.67	0.70	0.73	0.52	0.62	0.49	0.76	0.56	1.00	0.64	0.13	0.55	0.13	0.55	
Co	0.04	0.17	0.23	0.43	0.41	0.24	0.66	0.18	0.91	0.92	0.95	0.62	0.59	0.89	0.39	0.83	0.90	0.92	0.91	0.40	0.89	0.26	0.77	0.57	1.00	0.64	1.00	0.09	0.57	0.13	0.57
Mo	0.19	0.02	0.26	0.05	0.09	-0.04	0.13	0.25	0.09	0.10	0.10	-0.02	0.13	0.13	0.31	0.10	0.11	0.12	0.11	0.28	0.09	0.26	0.05	0.19	0.13	0.09	1.00	0.09	1.00	0.32	
Cd	0.32	0.16	0.58	0.39	0.50	0.11	0.52	0.48	0.51	0.53	0.55	0.42	0.46	0.56	0.59	0.56	0.58	0.59	0.57	0.66	0.55	0.67	0.47	0.63	0.55	0.57	0.32	1.00	0.32	1.00	

6) 오염물질의 발생 기원

고산지역 대기 에어로졸 성분의 발생기원을 확인, 성분의 특성을 조사하기 위하여 통계 프로그램(SPSS)을 이용하여 요인분석(factor analysis)을 실시하였다. 요인분석은 변수들 간의 상관관계를 이용해 서로 유사한 변수들끼리 묶어주는 방법으로 대기분진 구성 물질의 기원을 분별하고 유추하는데 매우 유용하게 사용되며(강창희 외, 2003), 일련의 관측된 변수에 근거하여 직접 관찰할 수 없는 요인을 확인하기 위한 것이다. 또한 요인분석은 수많은 변수들을 적은 수의 몇 가지 요인으로 묶어줌으로써 그 내용을 단순화하는 것이 그 목적으로 다음과 같이 이용된다. 첫째, 변수들의 축은 수의 요인으로 줄어들게 된다. 둘째, 불필요한 변수들의 제거로써, 요인에 포함되지 않거나 포함되더라도 중요도가 낮은 변수들을 찾을 수 있으므로 불필요한 변수를 제거한다. 셋째, 변수들의 특성과약으로써, 관련된 변수들이 묶어져 요인을 이루고 이들 요인들은 상호독립적인 특성을 가지게 되므로 변수들의 특성이 밝혀진다. 넷째, 측정도구의 타당성을 판정함으로써, 하나의 특성을 측정하기 위해 관측된 변수들은 하나의 요인으로 묶여진다. 따라서 이 같은 특성을 이용하여 묶여지지 않은 변수들은 다른 특성을 가진다고 판단된다(김나경 외, 2003, 2004). 대개 여러 변수들 간의 상관 matrix에서 인자 적재치가 클수록 변수들 간의 발생원이 유사하다고 추론 할 수 있다. 요인분석에서는 최적인자의 수는 고유값(eigenvalue)을 1이상으로 결정하는 것이 일반적이고, 스크린 검정이나 선행 이론법에 의할 경우 고유값이 1이하일지라도 어느 정도 유의성을 나타낼 수 있다. 본 연구의 경우 4개의 인자가 추출하였고, 이 경우 전체인자 중 78.8%의 설명력을 보였다. 최적인자의 수를 결정하고 각 인자에 대한 물리적 해석을 용이하게 하기 위하여 Varimax회전법을 이용하여 산출한 요인분석 결과를 Table 19에 수록하였다. Table 20의 결과와 같이 첫 번째 인자는 52.2%의 설명력을 보였고, nss-Ca²⁺, Al, Fe, Ca, K, Mg, Ti, Mn, Ba, Sr, V, Cr, Ni, Co성분이 높은 적재치를 나타내었다. 이들 성분들은 대부분 토양입자의 구성성분들로 고산지역 대기 에어로졸이 토양성분들의 유입에 의해 크게 영향을 받고 있음을 의미한다. 두 번째 인자는 14.9%의 설명력을 보였고, NH₄⁺, K⁺, nss-SO₄²⁻, S, Zn, Pb, Cu, Cd 등이 높은 적재치를 나타내었다. 이들 성분들은 모두 자동차, 난방 연료, 산업체, 비료 등 대부분이 인위적 오염기원의 성분들로, 고산 지역 대기 에어로졸에 대한 인위적 오염원의 영향이 비교적 큼을

의미한다. 세 번째 인자는 8.2%의 비교적 낮은 설명력을 보였고, Na^+ , Mg^{2+} , Cl^- , Na만이 큰 적재치를 나타내고 있으며, 이들 성분들은 전형적인 해염의 지표 성분들이다. 마지막으로 네 번째 인자는 3.6%의 비교적 낮은 설명력을 보였고, Mo만이 비교적 큰 적재치를 나타내었다. 이상과 같은 인자분석 결과를 기초로 고산 지역의 대기 에어로졸은 토양영향을 가장 많이 받고, 다음으로 인위적인 오염, 해양 순으로 영향을 많이 받고 있는 것으로 추정된다.



Table 19. Results of varimax factor analysis for aerosol components.

Component	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4
NH ₄ ⁺	-0.056	0.841	-0.189	-0.125
Na ⁺	0.053	0.031	0.930	0.044
K ⁺	0.105	0.866	0.228	0.104
Mg ²⁺	0.380	0.277	0.617	-0.015
NO ₃ ⁻	0.347	0.498	0.412	0.096
Cl ⁻	0.163	-0.106	0.920	0.002
nss-Ca ²⁺	0.642	0.335	0.323	0.053
nss-SO ₄ ²⁻	0.077	0.916	-0.056	-0.066
Al	0.968	0.063	0.085	0.040
Fe	0.967	0.090	0.099	0.051
Ca	0.968	0.109	0.118	0.052
Na	0.526	0.178	0.541	-0.208
K	0.657	0.127	0.205	0.314
Mg	0.919	0.166	0.169	0.071
S	0.294	0.819	0.025	0.079
Ti	0.861	0.151	0.215	0.003
Mn	0.930	0.214	0.101	0.041
Ba	0.953	0.198	0.107	0.063
Sr	0.912	0.193	0.233	0.037
Zn	0.319	0.721	0.116	0.273
V	0.940	0.120	0.098	0.027
Pb	0.126	0.853	0.155	0.171
Cr	0.817	0.147	0.096	-0.057
Cu	0.541	0.524	0.045	0.201
Ni	0.653	0.424	0.164	-0.206
Co	0.932	0.126	0.110	0.014
Mo	0.033	0.221	-0.046	0.843
Cd	0.487	0.563	0.123	0.325
Eigenvalue	14.6	4.2	2.3	1.0
Variance(%)	52.2	14.9	8.2	3.6
Cumulative(%)	52.2	67.1	75.2	78.8

7) 풍향별 농도 비교

대기오염물질은 대기 중에서 기류에 따라 이동할 수 있기 때문에 각 성분의 농도 변화를 풍향에 따라 비교해 볼 필요가 있다. 이를 위해 제주도 고산지역에서 2001년부터 2004년까지 총 547개의 시료들에 대한 수용성 성분과 중금속 성분의 농도 변화를 풍향별로 비교하여 Figure 42~ Figure 44에 나타내었다. 이때의 풍향은 00 UTC, 850 hPa, 즉, 고도 약 1500m 내외의 고층기상자료를 사용하여 나타내었다. 제주 지역의 연간 풍향을 보면 주로 봄철에는 북서풍계열의 바람이 많이 불고, 여름철에는 이와 반대로 남동풍 계열이 우세한 것으로 나타나고 있다. 또 가을철에는 북동풍 계열의 바람이 많으며, 겨울철에는 북풍 계열의 바람이 많이 부는 것으로 나타난다고 알려져 있다(Carmichael et al., 1997). 그리고 연간 전체적으로 편서풍의 영향으로 북서풍 계열의 가장 많은 것으로 조사되었다.

본 연구의 수용성 성분 분석 결과로부터 풍향별 농도 비교를 해보면 $nss-Ca^{2+}, K^{+}$ 의 경우 $150^{\circ} \sim 310^{\circ}$ 의 서풍 계열 풍향일 때 농도가 크게 증가하는 경향을 보였다. 이와 비슷하게 NO_3^{-} 성분 역시 서풍 계열의 바람이 불 때 그 농도가 훨씬 높은 것으로 조사되었다. 그리고 $nss-SO_4^{2-}$ 성분 역시 주로 $210^{\circ} \sim 310^{\circ}$ 의 북서풍 계열일 때 남풍 ~ 동풍 계열의 풍향에 비해 농도가 증가하는 경향을 나타냈다. 또한 에어로졸의 주요 금속 성분들에 대해 풍향별 농도비교를 조사해본 결과 토양의 주요 성분인 Al, Fe, Ca, Ti 등이 주로 대부분 $210^{\circ} \sim 330^{\circ}$ 의 서풍 계열의 풍향일 때 농도가 크게 증가하는 경향을 보였다. 그리고 인위적 기원으로 알려진 Pb, Zn, V 등과 토양과 인위적 기원을 동시에 나타내는 K, Mn 성분들은 대체적으로 남동풍의 풍향일 때 비해 서풍 계열일 때 높은 농도를 나타내는 것으로 확인되었다. 이러한 결과를 종합해 보면 대체적으로 서풍 및 북풍 계열일 때가 농도가 증가하고, 남동풍 풍향일 때 농도가 감소하는 경향을 보였다. 즉, 중국과 한반도를 포함한 대륙 쪽에서 바람이 불 때 그 농도가 증가하고, 북태평양 및 일본 쪽에서 바람이 불 때 상대적으로 농도가 감소하는 경향을 보였다. 이러한 결과를 보면, 제주도 고산 지역에서의 대기 에어로졸은 자체적인 오염보다는 타 지역에서 장거리 이동된 오염물질들이 상당량 대기 중에 유입되고 있는 것으로 보인다. 특히 북태평양 쪽에서 이동하는 남풍일 때에 비해 중국과 한반도의 대륙 쪽에서 이동하는 북서풍 계열의 풍향일 때 여러 대기오염물질들이 장거리 이동되어 제주지역

대기질에 크게 영향을 미치는 것으로 판단된다.

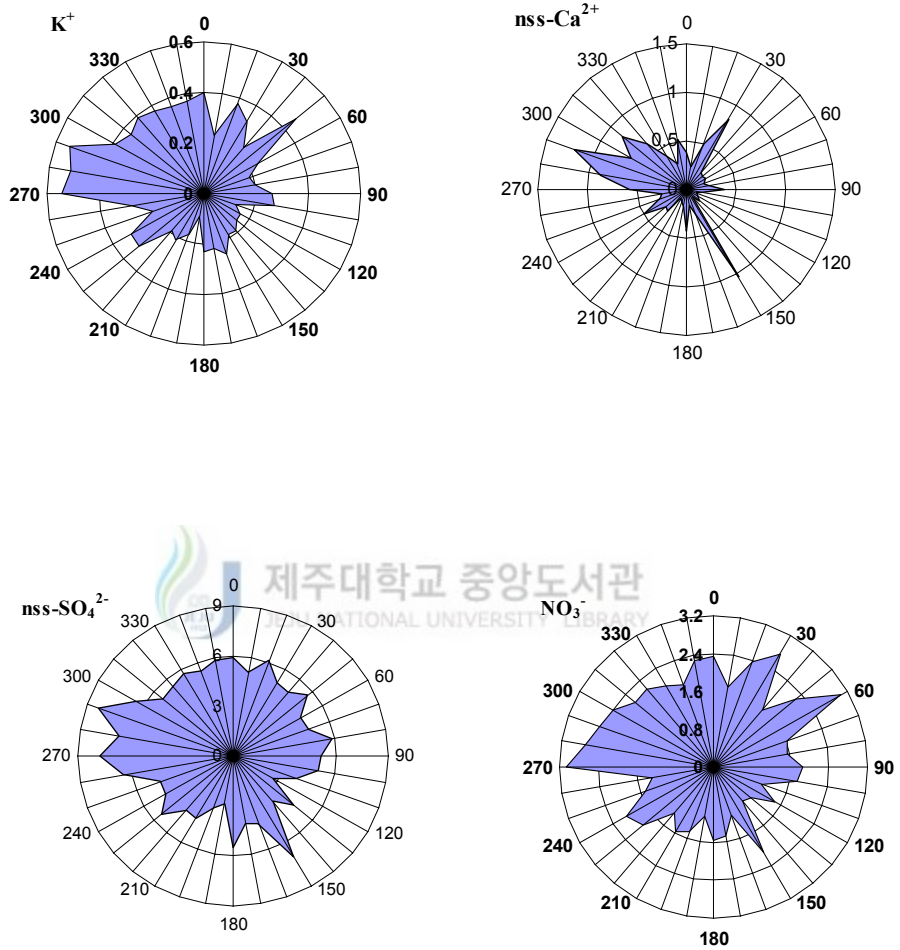


Figure 42. Variations of K^+ , nss-Ca^{2+} , nss-SO_4^{2-} and NO_3^- concentrations ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) as a function of the wind direction.

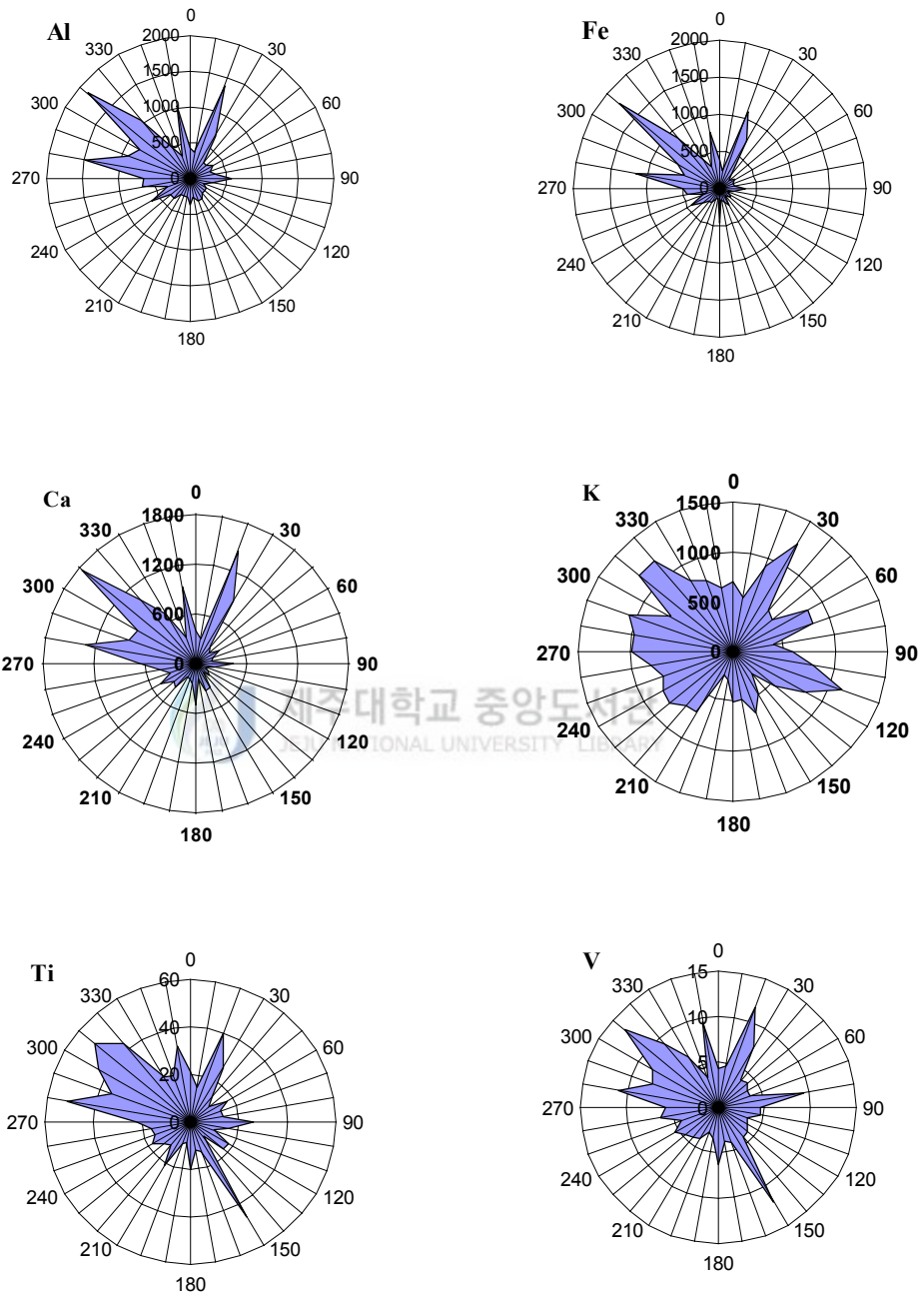


Figure 43. Variations of Al, Fe, Ca, K, Ti and V concentrations(ng/m^3) as a function of the wind direction.

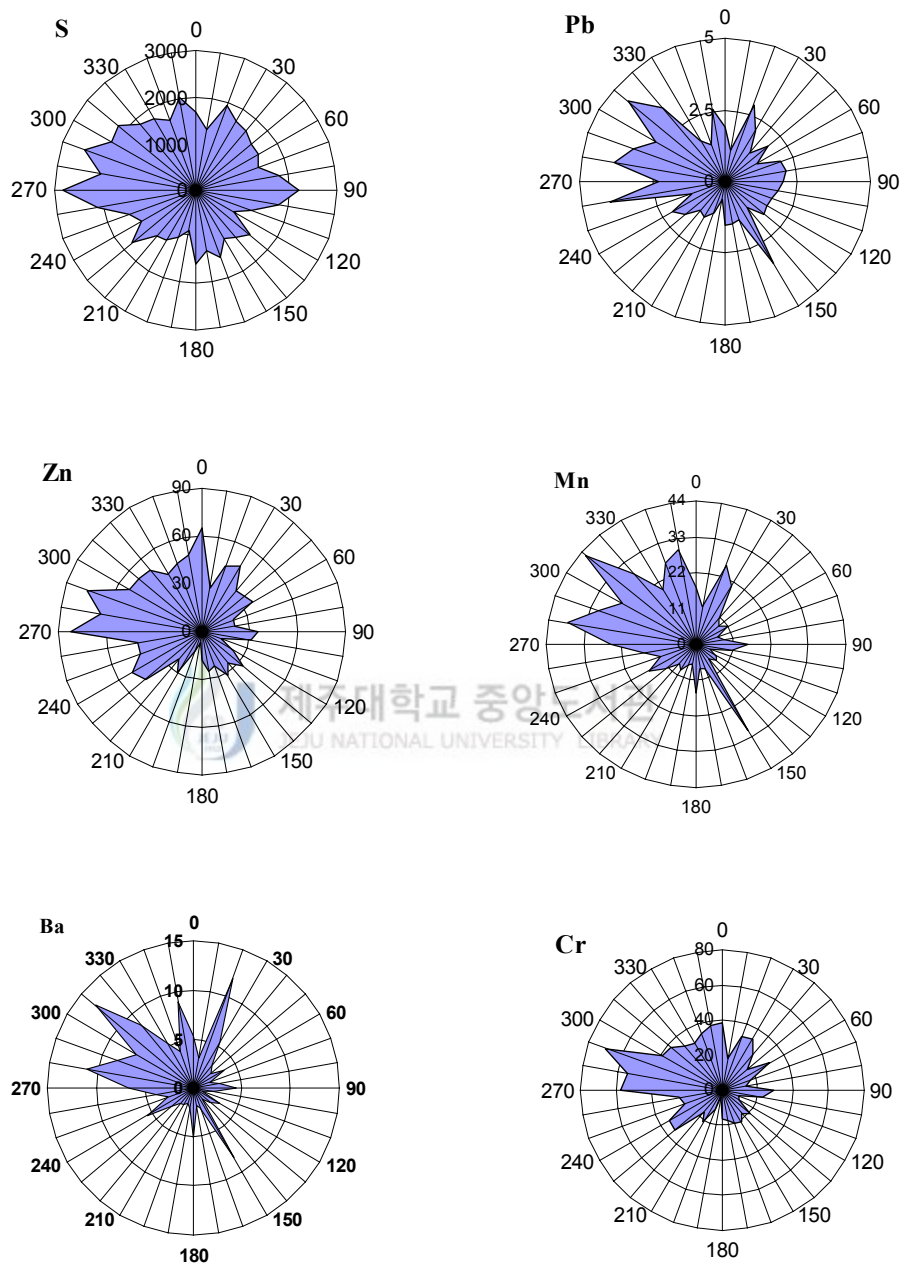


Figure 44. Variations of S, Pb, Zn, Mn, Ba and Cr concentrations(ng/m^3) as a function of the wind direction.

8) 대기 에어로졸성분의 역궤적 분석

본 연구에서 분석한 대기 에어로졸 성분 중 인위적 기원의 nss-SO_4^{2-} 과 NO_3^- 그리고 토양의 지표성분인 Al과 Ca의 네 성분을 대상으로 역궤적 분석을 실시하여 이들 성분들의 유입 경로를 추적하였다. 2001년 1월부터 2004년 12월까지의 547개 시료의 분석 데이터를 이용하여, nss-SO_4^{2-} , NO_3^- , Al, Ca 네 성분의 농도가 높은 순서대로 상위 25%와 농도가 낮은 순서로 하위 25%를 선택한 후 각각에 대해 역궤적 분석을 실시하였다. 또 그 결과로부터 대기 에어로졸 성분의 농도가 가장 높은 25%와 낮은 25%에 대한 공기궤의 이동궤적을 추적, 비교함으로써, 이들 각 성분이 발원지에서 제주지점까지 유입 경로를 상호 비교하였다.

에어로졸 성분의 역궤적 분석 역시 라돈의 경우와 마찬가지로 출발점 고도를 850 mb 면인 1500 m로 설정하였고, 출발시간은 해당 날짜의 매 00 UTC로 하였다. 역궤적 분석은 미국해양대기국 (NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration)에서 제공하는 HYSPLIT4(Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) 모델을 이용하였고, 또 역궤적 분석에 사용한 풍향, 풍속 자료 역시 NOAA의 북반구 FNL(FiNaL run at NCEP)자료를 이용하였다. 또 역궤적 분석의 모사시간은 5일(120 시간)로 설정하였다(국립환경연구원, 2005).

본 연구 기간동안에 측정된 대기 에어로졸 시료의 수는 총 547개이다. 이들의 분석 결과들 중, 앞의 네 성분에 대해 농도가 상대적으로 높은 상위 25%(137개), 또 농도가 낮은 하위 25%(137개)의 데이터를 선정하고, 이를 기준으로 역궤적 분석을 실시하여, 그 결과를 그림 Figure 45 ~ Figure 48에 나타내었다. 결과에서 보듯이 인위적 기원의 nss-SO_4^{2-} 과 NO_3^- 성분, 그리고 토양기원의 Al과 Ca성분의 농도는 전체적으로 공기궤가 대륙에서부터 제주지역으로 이동할 때 더 높은 농도를 나타낸 반면, 북태평양의 해양으로부터 제주지역으로 이동할 때 상대적으로 낮은 농도를 나타내고 있음을 알 수 있다.

또한 제주도를 중심으로 주변지역을 임의로 I(중국대륙), II(한국 및 시베리아 지역), III(일본 및 북태평양지역)의 세 구역으로 나누고, 역궤적 분석 결과를 이용하여 제주도로 이동한 공기궤의 발원지를 조사하였다. 그림에서 보듯이 측정 기간의 기류 이동을 보면 대부분이 중국대륙을 거쳐 북서풍을 타고 한반도로 이동되고 있음을 알

수 있다. 먼저 nss-SO_4^{2-} 농도를 기준으로 상위 25%와 하위 25%에 해당하는 공기케의 이동 경로를 비교해 보면, nss-SO_4^{2-} 의 농도가 높을 때 약 80.3%가 중국대륙에서 발원한 공기케가 제주도 고산지역으로 유입되었지만, 반면에 농도가 낮을 때에는 65.0% 정도가 중국대륙에서 발원한 공기케이며, 25.5% 정도는 일본지역과 북태평양지역에서 발원한 공기케가 제주도 고산지역으로 유입되었다. 또 NO_3^- 의 경우를 보면, 고농도 시 약 86.9% 정도가 중국대륙에서 발원된 공기케가 제주지역으로 이동하였고, 8.8%가 일본 및 북태평양지역, 4.4%가 우리나라 및 시베리아 지역에서 발원되어 제주지역으로 이동하였다. 반면에 저농도 시에는 약 67.9% 정도가 중국대륙에서 발원된 공기케가 제주지역으로 이동하였고, 20.4%가 일본 및 북태평양지역, 11.7%가 우리나라 및 시베리아 지역에서 발원되어 제주지역으로 공기케가 유입되었음을 알 수 있다. 토양기원의 Ca 역시 고농도 시에 89.1% 정도가 중국대륙지역으로부터 공기케가 유입이 되었고, 5.1%가 일본 및 북태평양지역, 5.8% 정도가 우리나라 및 시베리아 지역으로부터 이동하였다. 그러나 저농도 시에는 61.3% 정도가 중국대륙에서 발원된 공기케가 이동해 왔으며, 29.9% 정도가 일본 및 북태평양지역에서, 8.8% 정도가 우리나라 및 시베리아지역에서 발원되어 제주지역에 유입되었음을 알 수 있었다. 마찬가지로 Al의 경우에도 다른 성분들보다는 적은 차이를 나타내지만 고농도 시에는 79.6% 정도가 중국대륙지역으로부터, 9.5%가 일본 및 북태평양지역, 10.9% 정도가 우리나라 및 시베리아 지역으로부터 이동하였다. 그러나 저농도 시에는 70.1% 정도가 중국대륙에서 발원된 공기케가 이동해 왔으며, 22.6% 정도가 일본 및 북태평양지역에서, 7.3% 정도가 우리나라 및 시베리아지역에서 발원되어 제주지역에 유입되었음을 알 수 있었다.

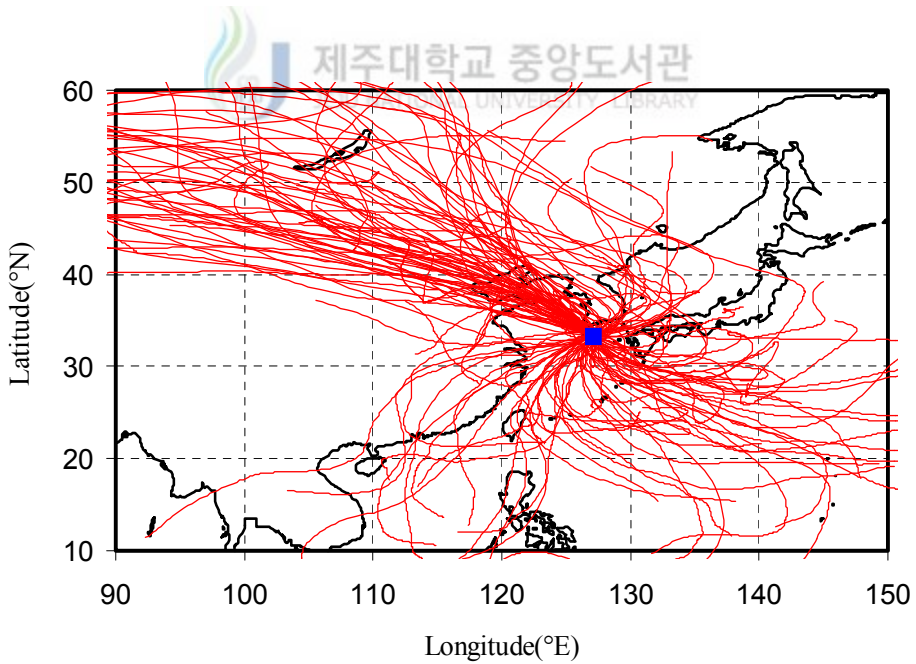
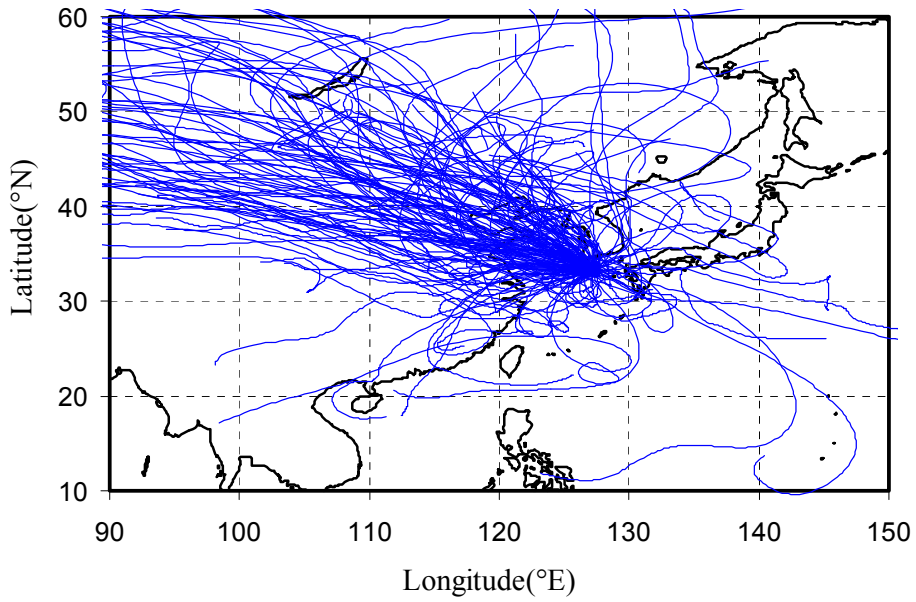


Figure 45. Back trajectories corresponding to high(upper) and low (lower) 25 % of sulfate concentrations.

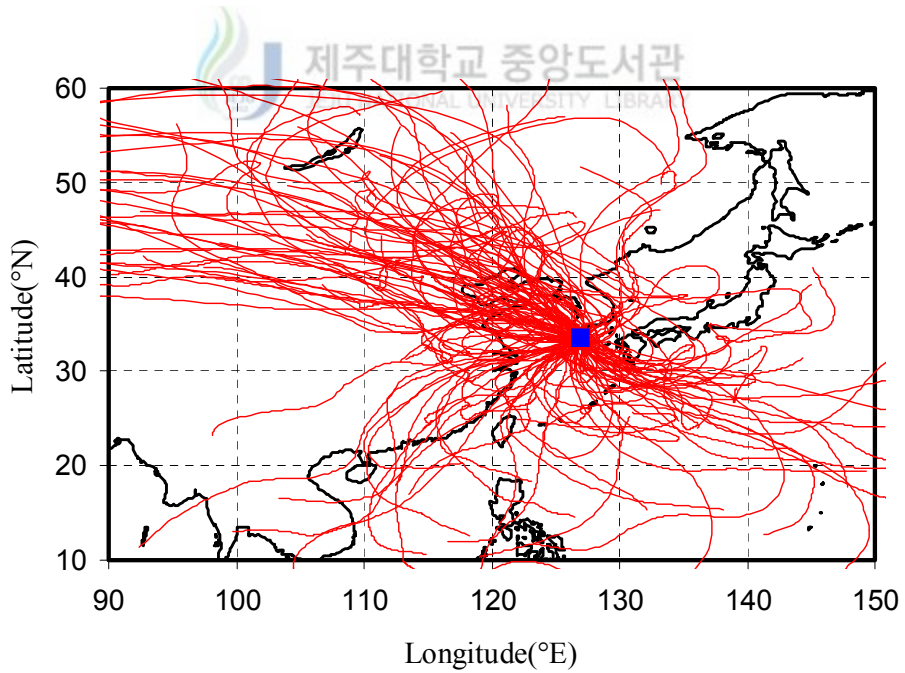
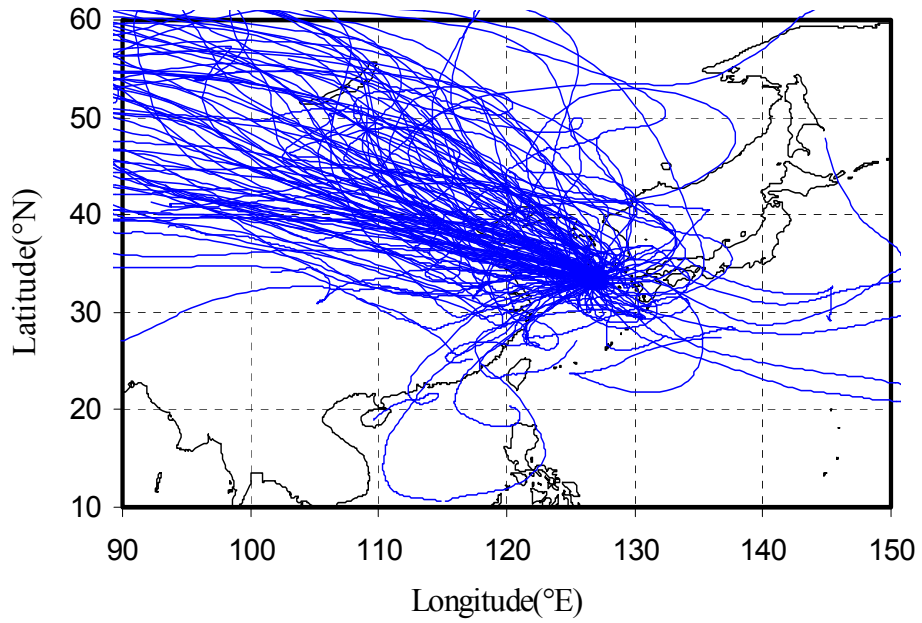


Figure 46. Back trajectories corresponding to high(upper) and low (lower) 25 % of nitrate concentrations.

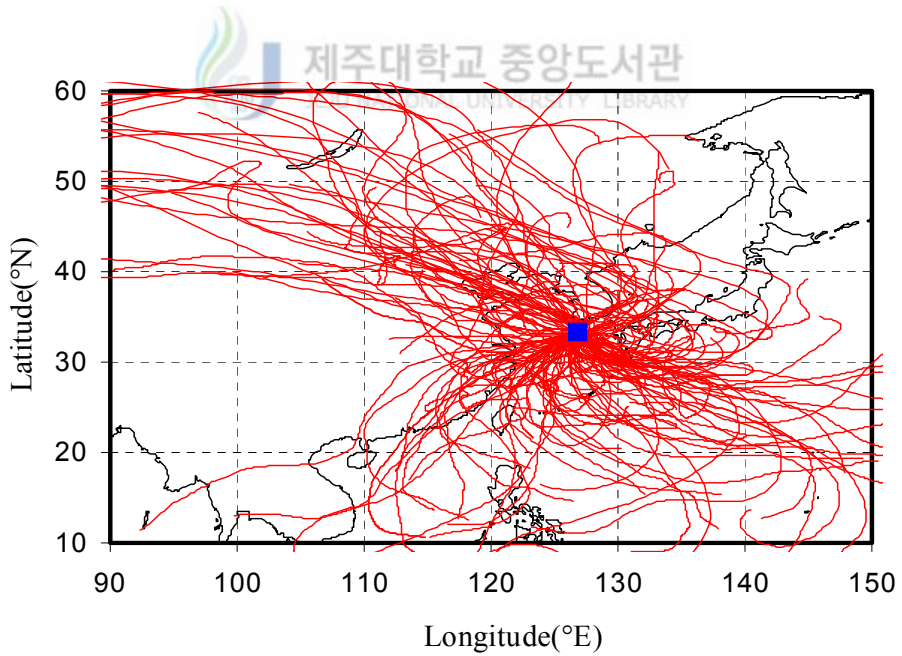
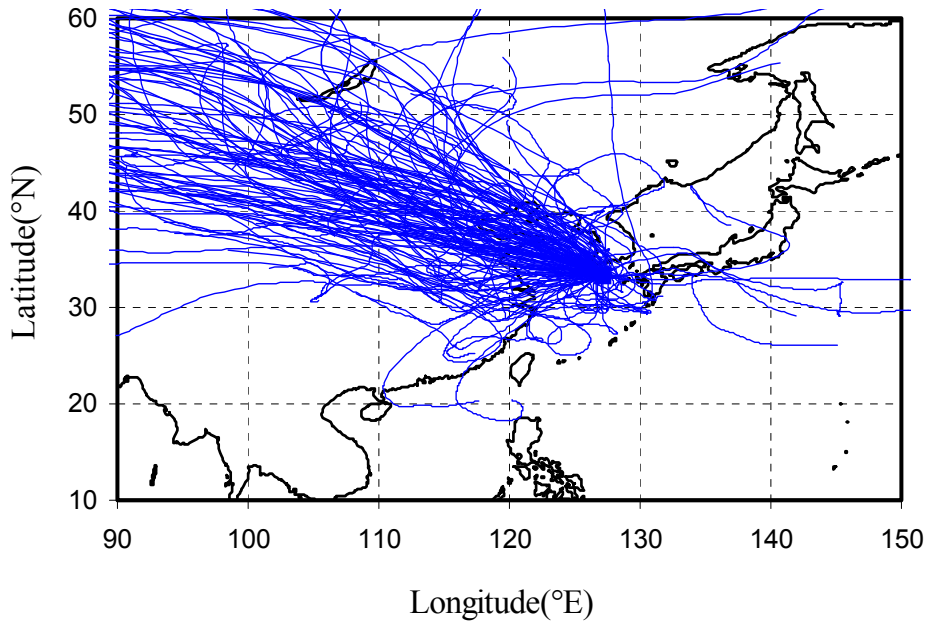


Figure 47. Back trajectories corresponding to high(upper) and low (lower) 25 % of calcium concentrations.

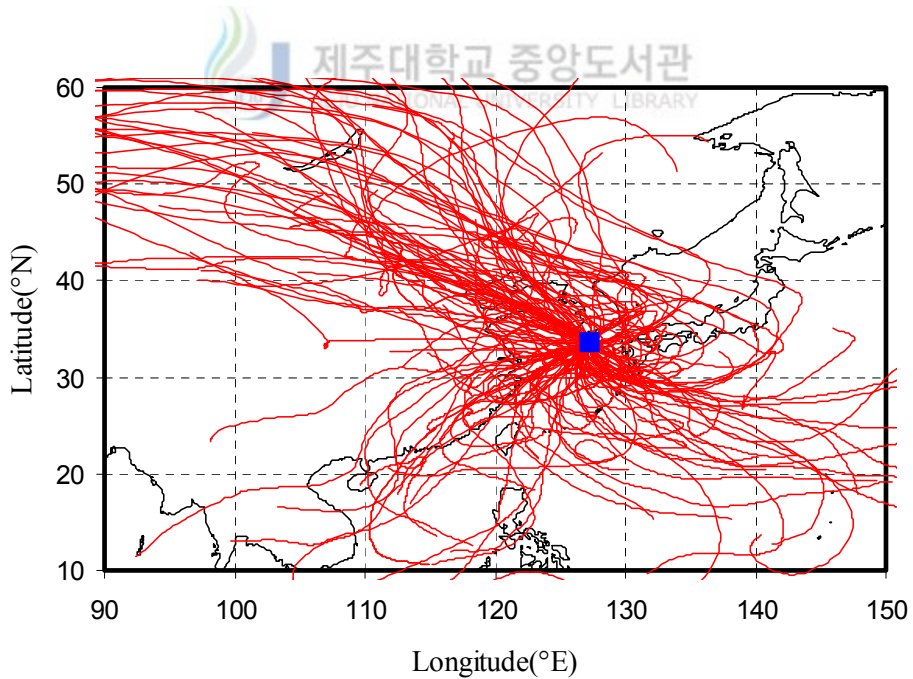
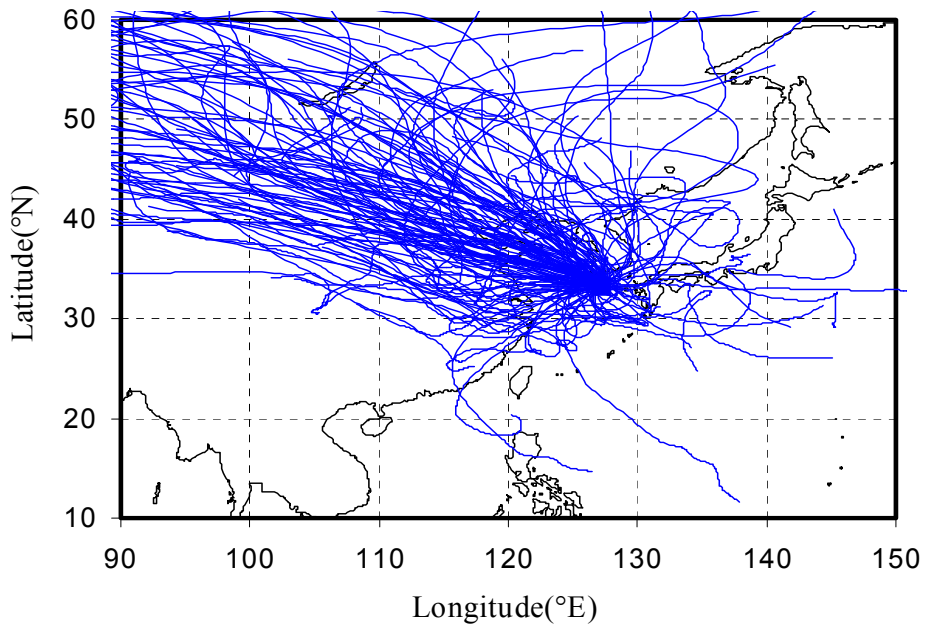


Figure 48. Back trajectories corresponding to high(upper) and low (lower) 25 % of aluminum concentrations.

IV. 결 론

배경농도 지역인 제주도 고산 측정소에 radon detector system과 high volume air sampler를 설치하여 라돈 농도를 모니터링하고, 대기 에어로졸을 채취, 분석하였다. 그 결과로부터 라돈과 대기 에어로졸의 성분의 농도 특성을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 고산지역의 라돈(^{222}Rn) 일별 농도는 $2010 \pm 1065 \text{ mBq/m}^3$ 을 나타내었고, 연도별 농도는 2003년에 가장 높았으며, 계절별 농도는 봄에 1834 mBq/m^3 , 여름에 1925 mBq/m^3 , 가을에 2129 mBq/m^3 , 겨울에 2159 mBq/m^3 로 겨울에 가장 높은 농도를 나타내었다.
2. 월별 농도는 11월에 가장 높고, 5월에 가장 낮았으며, 시간대별 농도는 오전 7시에 2439 mBq/m^3 로 하루 중 가장 높은 농도를 보였고, 14시경에 1577 mBq/m^3 로 가장 낮은 농도를 보였다. 그리고 전체적으로는 대체로 야간에 높고 야간에 낮은 농도를 나타내는 것으로 확인되었다.
3. 역궤적 분석 결과 라돈 농도는 전체적으로 공기궤가 대륙에서부터 제주지역으로 이동할 때 높은 농도를 나타낸 반면, 북태평양의 해양으로부터 제주지역으로 이동할 때 상대적으로 낮은 농도를 나타내었다. 이러한 현상은 여름철에 가장 두드러진 경향을 보였고, 주로 북서풍이 우세한 겨울철에 상대적으로 덜 뚜렷한 경향을 나타내었다.
4. 고산 지역 대기 에어로졸의 수용성 성분 농도는 $\text{nss-SO}_4^{2-} > \text{Na}^+ > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{NH}_4^+ > \text{nss-Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+}$, 금속 및 황 성분의 농도는 $\text{S} > \text{Na} > \text{K} > \text{Al} > \text{Ca} > \text{Fe} > \text{Mg} > \text{Zn} > \text{Pb} > \text{Ti} > \text{Mn} > \text{V} > \text{Ba} > \text{Cu} > \text{Ni} > \text{Sr} > \text{Cr} > \text{Mo} > \text{Cd} > \text{Co}$ 의 순이었다. 또 연도별 비교 결과, nss-SO_4^{2-} , NO_3^- , S, Al, Ca 등 주요 에어로졸 성분들의 농도가 대체적으로 2002년 > 2001년 > 2004년 > 2003년의 순으로 높게 나타났다.
5. 대기 에어로졸 성분을 계절별로 비교한 결과 인위적 기원의 nss-SO_4^{2-} , NO_3^- , S 성분과 토양 기원의 nss-Ca^{2+} , Al, Ca, Fe, Ti, K 성분들이 모두 봄 > 겨울 > 가을 > 여름의 순으로 높은 농도를 보였고, 특히 토양성분들은 다른 성분들에 비해 봄철에

- 아주 큰 농도차를 나타내었다. 또 Pb과 Zn은 겨울 > 봄 > 가을 > 여름, Cr과 Cd은 봄 > 겨울 ≈ 가을 > 여름의 순으로 높은 농도를 나타내었다.
6. 에어로졸 성분의 농도는 대체적으로 3월에 가장 높은 농도를 보인 반면에 7월에 가장 낮은 농도를 보였다. 그러나 $nss-SO_4^{2-}$ 과 S의 농도는 6월에 가장 높게 나타났고, $nss-Ca^{2+}$, Al, Fe, Ca, Ti, Ba, Sr 등 토양기원의 성분들은 3월과 4월에 가장 높은 농도를 보이고, 7월에 가장 낮은 농도를 나타내었다. 반면에 Pb는 1월, Ni, Cr, Cu는 3월, V는 4월에 가장 높은 농도를 보였다.
 7. 해염 및 토양 농축인자를 측정한 결과 Cl^- , Mg^{2+} 은 주로 해염으로부터, Ca, Fe은 주로 토양으로부터 유입되고 있으나, 나머지 성분들은 이를 제외한 다른 요인에 의해 대기 에어로졸에 유입되고 있음을 알 수 있었다.
 8. 에어로졸 성분들 간의 상관성을 확인 해 본 결과, Na^+ 과 Cl^- , SO_4^{2-} 과 NH_4^+ 간에 가장 큰 상관성을 보였고, 또 토양 기원의 $nss-Ca^{2+}$, Al, Fe, Ca, Ba, K, Sr, Ti들 간에 비교적 큰 상관성을 나타내는 것으로 조사되었다.
 9. 요인분석에 의해 대기 에어로졸 성분의 발생기원을 조사해 본 결과, 첫 번째 인자에는 $nss-Ca^{2+}$, Al, Fe, Ca, Mg, Ti, Mn, Ba, Sr, V, Cr, Ni and Co, 두 번째 인자에는 NH_4^+ , K^+ , $nss-SO_4^{2-}$, S, Zn, Pb, Cu and Cd 성분들로, 세 번째 인자에는 Na^+ , Mg^{2+} , Cl^- , Na, 성분들이 큰 적재값을 나타내었고, 이러한 결과로부터 고산 지역의 대기 에어로졸은 토양기원 > 인위적 기원 > 해염기원의 순으로 영향을 많이 받고 있음을 알 수 있었다.
 10. 에어로졸 성분의 풍향별 농도변화를 비교해 본 결과 $nss-Ca^{2+}$, K^+ , NO_3^- , $nss-SO_4^{2-}$ 성분의 경우 $210^\circ \sim 330^\circ$, Al, Fe, Ca, Ti 등은 $270^\circ \sim 330^\circ$ 의 북서풍 계열의 풍향일 때 농도가 크게 증가하는 경향을 보였다. 반면에 대부분의 성분들이 대체적으로 남동풍의 풍향일 때 상대적으로 더 낮은 농도를 나타내었다.
 11. $nss-SO_4^{2-}$, NO_3^- , Al, Ca 성분을 대상으로 역궤적 분석을 실시하여 이들의 유입 경로를 추적한 결과, 공기궤가 대륙에서부터 제주지역으로 이동할 때 높은 농도를 나타낸 반면, 북태평양의 해양으로부터 제주지역으로 이동할 때 상대적으로 낮은 농도를 나타내었다. 즉, 25% 고농도 시에는 약 79.6 ~ 89.1%가 중국대륙에서 발원한 공기궤가 제주지역으로 이동한 반면, 25% 저농도 시에는 공기궤의 약 61.3 ~ 70.1% 정도가 중국대륙으로부터 유입된 것으로 조사되었다.

V. 참 고 문 헌

- 1) 原 宏 外(1983) 大氣中の鹽化物および硝酸イオンエアロゾルの粒徑分布の季節變動, 日本化學學會誌, 8, 1221-1225.
- 2) 장병욱(1998), 수용모델을 이용한 PM_{2.5}의 배출원 추정-청주지역을 중심으로-, 건국대학교 박사학위 청구논문.
- 3) 강창희, 김원형, 한진석, 선우영, 문길주 (2003) 1997 ~ 2001년 제주도 고산지역 PM_{2.5} 미세분진의 오염특성, 한국대기환경학회지, 19(3), 263-273.
- 4) 김나경, 김용표, 강창희, 문길주 (2003) 고산에서 측정된 PM_{2.5} 이온 농도 특성: 1998 ~ 2002년 측정자료, 한국대기환경학회지, 19(3), 333-343.
- 5) 김나경, 김용표, 강창희, 문길주 (2004) 고산에서 측정된 입자상 질산염 농도 특성: 1998~2002년 PM_{2.5}와 TSP 측정자료, 한국대기환경학회지, 20(1), 119-128..
- 6) 김영성, 김진영, 진현철, 문길주, 김연제, 한진석, 김영준, 김상우, 윤순창, 강창희 (2002) 2001년 11월 제주도 고산에서의 대기 중 잔류성 유기오염물질 농도 변화, 한국대기환경학회 춘계학술대회 논문집, 83-90.
- 7) 김영성 (2003) 대기 중 잔류성 유기오염물질과 중금속의 특성과 현황, 한국대기환경학회지, 19(2), 113-132.
- 8) 김용표, 김성주, 진현철, 백남준, 이종훈, 김진영, 심상규, 강창희, 허철구 (1996) 제주도 고산에서의 1994년 여름 측정: (I) 입자 이온 조성, 한국대기보전학회지, 12(3), 297-306
- 9) 김윤신, 이철민, 김현탁, 이홍석, 박태슬 (2000) 서울시 일부 대기 중 라돈농도의 분포에 관한 연구, 환경과 산업의학, 9(1), 49-53.
- 10) 김윤신, 전형진, 이철민, 장은숙, Weihai ZHUO, Takao lida (2004) 서울시와 동해시 대기중 라돈농도의 시계열적 특성에 관한 연구, 한국대기환경학회 2004 춘계 학술대회 논문집, 479-480.
- 11) 김원형, 강창희, 신찬성, 고선영, 홍민선 (2003) 제주도 한라산 1100고지 대기 에어로졸의 조성 및 특성, 한국대기환경학회지, 19(2), 145-156.

- 12) 박경윤, 이호근, 서명석, 장공미, 강창희, 허철구(1994) 제주도 고산 측정소에서의 대기오염 배경농도 측정 및 분석, 한국대기보전학회지, 10(4), 252-259
- 13) 배경농도지역 장거리 이동 오염물질 집중 조사 v, 최종보고서, (2005) 국립환경연구원 301pp
- 14) 신혜정, 김지영, 최병철, 오성남, Jianzhen Yu, Keith Bower (2002) ACE-Asia 집중관측기간에 제주고산에서 측정한 대기오염물질의 농도 분포특성, 한국대기환경학회지, 18(6), 487-501.
- 15) 원대현, 정성원 (1999) 한글 SPSS 아카데미, 고려정보산업, p370-375.
- 16) 이철민, 김윤신, 권성안, 김현탁, 문성균, T. lida, K. Yoshioka (1999) 국내대기중 라돈 농도의 특성, 한국대기환경학회 1999 추계학술대회 논문집, 50-51.
- 17) 최금찬, 박정호, 임경택 (1994) 대기 에어로졸 중 음이온성분에 대한 입경분포의 변화 특성, 한국대기보전학회지, 10(2), 124-129.
- 18) 최만식, 박은주 (1999) 제주도 대기 분진 중 미량금속의 농도 특성, 한국대기환경학회지, 15(6), 772-738.
- 19) 한직석, 안준영, 홍유덕, 공부주, 이석조, 선우영(2004) 한반도 서해상으로 장거리 이동하는 SO₂의 농도 및 연직분포 특징, 한국대기환경학회지 20(5), 671-683
- 20) 환경부 (2004) 우리나라에 쌓이는 대기오염물질 20%가 중국에서 날아와, 뉴스레터, 제 23호, 2004.11.19.
- 21) ACE-Asia Project Prospectus, Feb 26, 2001(http://saga.pmel.noaa.gov/aceasia/prospectus_022601.html).
- 22) AMAP(Arctic Monitoring and Assessment Programme) (2001) Persistent organic pollutants URL <http://www.amap.no/assess/soaer6.htm>; Heavy metals URL <http://www.amap.no/assess/soaer7.htm> (accessed in December 2001).
- 23) Appel, B.R., *et al* (1978) Sulfate and nitrate data from the california aerosol characterization experiment(ACHEX), Environ, Sci. & Tech, 12(4), 418-425
- 24) Bates, T. S., D. J. Coffman, D. S. Covert, and P. Q. Patricia(2002) Regional marine boundary layer aerosol size distributions in the Indian, Atlantic, and Pacific Oceans; A comparison of InDoEX measurements with ACE-1, ACE-2. and Aerosols99, Journal of Geophysical Research, 107, INX 25-1-25-15.

- 25) Carmichael, G.R.(2003) Emission data, http://www.cgrruowa.edu/people/carmichael/ACCESS/Emissiondata_main.html, University of Iowa.
- 26) Carmichael G.R., Y. Zhang, L.L. Chen, M.S. Hong, and H. Ueda (1996) Seasonal variation of aerosol composition at Cheju Island, Korea, *Atomspheric Enviroment*, 30(13), 2407-2416.
- 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) Carmichael G.R., G. Calori, H. Hiroshi, I. Uno, S.Y. Cho, M. Engardt, S.B. Kim, Y. Ichikawa, Y. Ikeda, J.H. Woo, H. Ueda, M. Amann (2002) The MICS-Asia study: model intercomparison of long-range transport and sulfur deposition in East Asia, *Atomspheric Enviroment*, 36(2), 175-199.
- 29) Charlson, R.J., Lagner, H. Rodhe, C.B.L. Eovy, and S. G. Warren(1991) Perturbation of the northern hemisphere radiative balance by backscattering from anthropogenic aerosols, *Tellus*, 43AB, 152-163.
- 30) Chun Youngsin, Kyung- On Boo, Jiyoung Kim, Soon-Ung Park, and Meehye Lee(2001) Synopsis, transport, and physical characteristics of Asian dust in Korea, *J. Geophys. Res.*, 106(D16), 18461-18469
- 31) Dueñas, C. M.C. Fernández, J. Carretero, E. Liger, S. Cañete (2004) Long-term variation of the concentrations of long-lived Rn descendants and cosmogenic ⁷Be and determination of the MRT of aerosols, *Atomspheric Enviroment*, 38, 1291-1301.
- 32) Gordan C. M., E. C. Jones, R. E. Larson(1977) *J. Geophys. Res.*, 82(6). 988-990
- 33) Gregory R. Carmichael, Yang Zhang, Li-Ling Chen, Min-Sun Hong and Hiromasa Ueda (1996) Seasonal Variation Of Aerosol Composition At Cheju Island, Korea, *Atomspheric Enviroment*, 30(13), 2407-2416.
- 34) Hatakeyama, S., K. Murano. H. Bandow, F. Sakamaki, M. Yamati, S. Tanaka, and Akimoto(1995) The 1991 PEACAMPOT aircraft obseration of ozonc, NOx,

- and SO₂ over the East Sea, Yellow Sea, and the Sea of Japan, *Journal of Geophysical Research*, 100, 12143-12151.
- 35) Hatakeyama, S., K. Murano. H. Mukai, F. Sakamaki, H. Bandow, I. Watanbe, M. Yamato, S. Tanaka, and H. Akimoto(1997) SO₂ and sulfate aerosols over the Seas between Japan and the Asian continent, *Journal of Geophysical Research*, 12, 91-95
- 36) Hatakeyama, S., K. Mukai, F. Sakamaki, H. Murano. H. Bandow, and Y. Komazaki(2001) Transport of atmospheric pollutants from East Asia. *Water, Air and Soil Pollution*, 130, 373-378.
- 37) Hayami H. and Carmichael G.R. (1998) Factors influencing the seasonal variation in particulate nitrate at Cheju island, South Korea, *Atmospheric Environment*, 32(8), 1427-1434.
- 38) 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.
- 39) <http://abc-gosan.snu.ac.kr/mtg.html>
- 40) Huang, X., I. Olmez, N. K. Aras and G. E. Gordon(1994) Emissions of trace elements from motor vehicles: potential marker elements and source composition profile, *Atmos. Environ.*, 28(8), 1385-1391
- 41) Huebert. B., T. Bates, P. Russell, J. Seinfeld, M. Wang, M. Uematsu, and Y. J. Kim(2003) An overview of ACE-Asia: Strategies for quantifying the relationships between Asian aerosols and their climatic impacts, *Journal of Geophysical Research*, 108, 18361-18370.
- 42) Husar, R.B. et al.(2001) Asian dust event of April 1998, *J. Geophys. Res.*, 106, 18317-18330.
- 43) International Commission on Radiological Protection(1987), "Lung cancer risk from indoor exposure to radon and radon daughters", ICRP publication 50, *Annals of the ICRP* 17(1)
- 44) Iskandar, D. T. Iida, H. Yamazawa, J. Moriizumi, J. Koarashi, K. Yamasoto,

- K. Yamasoto, K. Yamasaki, M. Shimo, T. Tsujimoto, S. Ishikawa, M. Fukuda, H. Kojima (2005) The transport mechanism of ^{222}Rn in soil at Tateishi as an anomaly spot in Japan, *Applied Radiation and Isotopes* 63, 401-408.
- 45) Jiyoung Kim, Soon-Chang Yoon, Anne Jefferson, Wlodek Zahorowski, Chang-Hee Kang (2005) Air mass characterization and source region analysis for the Gosan super-site, Korea, during the ACE-Asia, 2001 field campaign, *Atmospheric Environment*, 39, 6513-6523.
- 46) Kim Ki-Hyun, Gyoo-Hoon Choi, Chang-Hee Kang, Jin-Hong Lee, J.Y. Kim, Y.H. Youn, S.R. Lee (2003) The chemical composition of fine and coarse particles in relation with the Asian Dust events, *Atmospheric Environment*,
- 47) Koch, D(2001) Transport and direct radiative forcing of carbonaceous and sulfate aerosols in the GISSGCM, *Journal of Geophysical Research*, 106, 20311-20332.
- 48) Lester, L., Spiller, E. William, Wilson (1980) Sulfuric acid aerosols and HCl release in coastal atmospheres ; Evidence of rapid formation of sulfuric acid particulates, *Atmospheric Environment*, 14(8), 165-182.
- 49) Nishikawa, M. and S. Kanamori (1991) Chemical composition of Kosa aerosol(Yellow sand dust) collected in Japan. *Analytical Science*, 7, 1127-1130.
- 50) Nuclear Energy Agency/ Organization for Economic Co-Operation and Development, (1983), "Dosimetry aspects of exposure to radon and thoron daughter products", report by a group of experts, NEA/OECD, Paris
- 51) 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
- 52) Min Ha Park, Yong Pyo Kim, Chang-Hee Kang and Shang-Gyu Shim (2004) Aerosol Composition Change between 1992 and 2002 at Gosan, Korea, *Journal of Geophysical Research*, 109(D19S13), 1-7
- 53) Perry, K. D, T.A. Cahill, R. C, Schnell and J. M. Cahill(1999) Long-range

- transport of anthropogenic aerosols to the National Oceanic and Atmospheric administration baseline station at Mauna Loa Observatory, *Hawaii Journal of Geophysical Research*, 104(D15), 18521–18533
- 54) Pio C. A., M. A. Cerqueira, L. M. Castro, and M. L. Salgueiro(1999) Sulfur and nitrogen compounds variable marine/continental air masses at the southwest european coast, *Atmos. Environ.*, 30(18), 3115–3127
- 55) Prosero, J. M. (1999) Long-term measurements of the transport of African mineral dust to the southeastern United States; Implications for regional air quality, *Journal of Geophysical Research*, 104, 15917–15927.
- 56) Sirois. A. and W. Fricke (1992) Regionally representative daily air concentration of acid-related substances in Canada, *Atmospheric Environment*, 26A(4), 593–607
- 57) Streets. D(2003) An inventory of gaseous and primary aerosol emissions in Asia in the year 2000, *Journal of Geophysical Research*, 108
- 58) Takao Iida, Y. Ikebe, K. Suzuki, K. Ueno, Z. Wang, Y. Jin(1996), Continuous Measurements of Outdoor Radon Concentrations at Various Locations in East Asia, *Environment International*, Vol. 22, Suppl. I, pp. S139–S147
- 59) Topping D. , H. Coe, G. McFiggans, R. Burgess, J. Allan, M.R. Alfarra, K. Bower, T.W. Choularton, S. Decesari, M.C. Facchini (2004) Aerosol chemical characteristics from sampling conducted on the Island of Jeju, Korea during ACE Asia, *Atmospheric Environment*, 38, 2111–2123.
- 60) Tu, F. H., D. C. Thornton, A. R. Bandy, M. S. Kim, G. R. Carmichael, Y. Tang, L. Thornhill, and G. Sachse(2003) Dynamics and transport of sulfur dioxide over the Yellow Sea during TRACE-P, *Journal of Geophysical Research*, 108, 8790.
- 61) Whilby, K.T(1978) The Physical characteristics of sulfur aerosols, *Atmos. Environ.*, 12, 135–159
- 62) Whittlestone S. and Zahorowski W. (1998) Baseline radon detectors for shipboard use: Development and deployment in the First Aerosol

- Characterization Experiment (ACE 1), JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, 103(D13), 16743-16751.
- 63) Wlodek Zahorowski, Scott Chambers, Tao Wang, Chang-Hee Kang, Itsushi Uno, Steven Poon, Sung-Nam Oh, Sylvester Werczynski, Jiyoung Kim and Ann Henderson-Sellers (2005) Radon-222 in boundary layer and free tropospheric continental outflow events at three ACE-Asia sites, *Tellus B*, 57(2), 124-140.
- 64) Yoshizumi, K., K. Asakoko (1986) Characterization of atmospheric aerosols in chichi of the Ogasawara(Bonin) Islands, *Atmospheric Environment*, 20(1), 151-155.
- 65) Xiao H. Y, and C. Q. Liu (2002) Sources of nitrogen and sulfur in wet deposition at Guiyang, southwest China, *Atmospheric Environment*, 36, 5121-5130 Yao,
- 66) Zahorowski W., Chambers S.D., Henderson-Sellers A (2004) Ground based radon-222 observations and their application to atmospheric studies, *Journal of Environmental Radioactivity* 76, 3-33.
- 67) Zhang M., I. Uno, Y. Yoshida, Y. Xu, Z. Wang, H. Akimoto, T. Bates, T. Quinn, A. Bandy, 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.

감사의 글

이 논문을 완성하기까지 부족한 저를 이끌어 주시고 도움을 주신 모든 분들, 특히 4년의 학부 과정과 2년의 석사과정 동안 세심한 지도와 배려로 이끌어 주신 강창희, 김원형 교수님께 머리 숙여 감사드립니다. 그리고 여러모로 미흡하기만 한 저에게 화학에 대한 흥미를 일깨워 주신 화학과 한성빈, 정덕상, 김덕수, 변종철, 이선주, 이남호 교수님의 가르치심에 깊이 감사드립니다.

또 실험실 생활을 하면서 고락(苦樂)을 함께해 준 신찬성선생님, 선영언니, 수연언니, 희철오빠, 종현오빠, 진욱오빠, 희곤오빠, 순봉오빠, 정민오빠, 용주, 은경이 등 실험실 선·후배 모든 분들께 고마운 마음 전합니다.

아울러 항상 사랑과 포용으로 감싸 준 정아언니, 은숙언니, 은미언니, 정은언니, 그리고 대학원 생활을 하면서 어려움을 함께 한 여러 선배님, 후배님들에게도 감사의 말씀을 드립니다. 또 옆에서나 멀리서 언제나 제 힘이 되는 내 친구 은이, 혜정, 혜인, 경미, 수경 등 나를 알고 있는 모든 친구들과 항상 만나면 힘이 나는 초등학교 동창들, 대학교 동기들 정말 고맙고, 사랑합니다.

끝으로 저에 대한 무한한 사랑과 희생으로 모든 고통을 감내하고 계시는 부모님께, 육지에서 혼자 열심히 공부에 매진하고 있는 동생에게 이 모든 영광을 드립니다.