

碩士學位論文

제주도 고산지역과 한라산 1100 고지
대기 에어로졸의 특성 비교



濟州大學校 大學院

化學科

高 僖 徹

2003年 12月

碩士學位論文

제주도 고산지역과 한라산 1100 고지
대기 에어로졸의 특성 비교



濟州大學校 大學院

化學科

高 僖 徹

2003年 12月

제주도 고산지역과 한라산 1100 고지 대기 에어로졸의 특성 비교

指導教授 姜 昌 禧

高 僖 徹

이 論文을 理學 碩士學位 論文으로 提出함



高僖徹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

2003年 12月

Comparison of Characteristics for Atmospheric
Aerosols between Gosan Site and 1100 Site
in Mt. Halla, Jeju Island

Hee-Chul Ko

(Supervised by professor Chang-Hee Kang)



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

2003. 12.

DEPARTMENT OF CHEMISTRY
GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

ABSTRACT	i
List of Tables	ii
List of Figures	iv
I. 서 론	1
II. 실 험	5
1. 측정소 설비 및 측정기기	5
1) 측정소 설비	5
2) 측정기기	5
2. 에어로졸 시료의 채취 및 분석	7
1) 에어로졸 시료 채취	7
2) 수용성 성분 분석	7
3) 금속 및 황 성분 분석	9
III. 결과 및 고찰	11
1. 동북아지역의 대기오염물질의 배출현황특성	11
1) 동북아 국가의 대기오염물질 배출현황	11
2) 중국의 에너지 생산 및 소비현황	13
2. 에어로졸 분석 결과	15
1) 수용성 성분 분석 결과	15
2) 연도별 NO_3^- 와 nss-SO_4^{2-} 경향 비교	20
3) 금속 성분 분석결과	24
3. 계절별 농도 비교	31
1) 수용성 성분의 계절별 농도 비교	31
2) 금속 성분의 계절별 농도 비교	32
4. 황사시 농도 비교	52
5. 성분들 간의 상관관계 비교	65

6. 토양 및 해양의 영향	69
1) 토양의 영향	69
2) 해양의 영향	70
7. 오염물질의 발생 기원	73
8. 풍향별 농도 비교	80
IV. 결 론	88
V. 참 고 문 헌	91

ABSTRACT

Aerosol samples have been collected from high volume tape samplers installed at the Gosan Site and the 1100 Site of Mt. Halla in Jeju island from 1997 to 2002, and sulfur and metals as well as water soluble components have been analyzed. The mean concentrations of water soluble components were $\text{nss-SO}_4^{2-} > \text{Na}^+ > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{NH}_4^+ > \text{nss-Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+}$ at the Gosan Site, and $\text{nss-SO}_4^{2-} > \text{NH}_4^+ > \text{NO}_3^- > \text{nss-Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Cl}^- > \text{Mg}^{2+}$ at the 1100 Site. The mean concentrations of sulfur and metals were $\text{S} > \text{Na} > \text{K} > \text{Al} > \text{Ca} > \text{Fe} > \text{Mg} > \text{Zn} > \text{Pb} > \text{Ti} > \text{Mn} > \text{V} > \text{Ba} > \text{Sr} > \text{Cu} > \text{Ni} > \text{Cr} > \text{Mo} > \text{Cd} > \text{Co}$ at the Gosan Site, and $\text{S} > \text{Ca} > \text{Al} > \text{Mg} > \text{K} > \text{Fe} > \text{Na} > \text{Zn} > \text{Pb} > \text{Ti} > \text{Mn} > \text{Ni} > \text{Cu} > \text{V} > \text{Ba} > \text{Sr} > \text{Cr} > \text{Mo} > \text{Co} > \text{Cd}$ at the 1100 Site. The concentrations of nss-SO_4^{2-} , NO_3^- , and S originated from anthropogenic source showed the higher, followed by nss-Ca^{2+} , Na, K, Al, Ca, and Fe originated from soil sources, at both sites. Seasonal concentration variation showed the soil components of nss-Ca^{2+} , Al, Fe, Ca, K, Na, Mg and the anthropogenic components of nss-SO_4^{2-} , NO_3^- , S had high concentrations in spring season. The study of Yellow Sand effect showed that the ratios of concentrations in Yellow Sand and Non Yellow Sand days of nss-Ca^{2+} , nss-SO_4^{2-} , NO_3^- , S, Al, Fe, Ca were, respectively, 8.2, 1.4, 2.4, 1.8, 13.6, 9.9, and 12.1 at the Gosan Site, and those at the 1100 Site were 7.0, 1.3, 3.7, 2.0, 13.1, 9.5, and 9.8, respectively. From the soil and seawater enrichment factor study, it has been shown that Cd, Ti, K, Mg as well as Ca and Fe are mostly delivered from soil, but the Cl^- and Mg^{2+} seemed to be delivered from ocean. The atmospheric aerosols in Jeju area have been found to be influenced largely by soil source, from the factor analysis resulted that the order of components origins is soil > anthropogenic > sea-salt at the Gosan Site and soil > sea-salt > anthropogenic at the 1100 Site. The concentration variations of aerosol components by wind direction showed the concentrations of most components increased in northwest wind direction, indicating the possibility of large influence of pollutants transported with long distance from China and Korean peninsula.

List of Tables

Table 1. Detection limit(ppb) and RSE for IC analysis	8
Table 2. Instrument conditions and detection limit(ppm) for ICP-AES analysis	10
Table 3. Trend of SO ₂ and NO ₂ concentrations(ppb) in China	12
Table 4. Trend of TSP concentrations(ppb) in China	13
Table 5. Air pollutants emissions(10 ³ ton) in North-east Asia	13
Table 6. Annual mean concentrations($\mu\text{g}/\text{m}^3$) of water-soluble components at Gosan Site and 1100 Site between 1997 and 2002	17
Table 7. Annual mean concentrations of sulfur and metal components in 1998 ~ 2002	27
Table 8. Comparison of seasonal mean concentrations($\mu\text{g}/\text{m}^3$) of water-soluble components at Gosan and 1100 Sites	35
Table 9. Comparison of seasonal mean concentrations($\mu\text{g}/\text{m}^3$) of water-soluble components at Gosan Site	36
Table 10. Comparison of seasonal mean concentrations($\mu\text{g}/\text{m}^3$) of water-soluble components at 1100 Site in Mt. Halla	37
Table 11. Comparison of seasonal mean concentrations(ng/m^3) of metal components at Gosan Site	40
Table 12. Comparison of seasonal mean concentrations(ng/m^3) of metal components at Gosan Site	41
Table 13. Comparison of seasonal mean concentrations(ng/m^3) of metal components at Gosan Site	42
Table 14. Comparison of seasonal mean concentrations(ng/m^3) of metal components at 1100 Site of Mt. Halla	43
Table 15. Comparison of seasonal mean concentrations(ng/m^3) of metal	

components at 1100 Site of Mt. Halla	44
Table 16. Comparison of seasonal mean concentrations(ng/m^3) of metal components at 1100 Site of Mt. Halla	45
Table 17. Comparison of water-soluble components concentrations($\mu\text{g}/\text{m}^3$) between Yellow Sand and Non-Yellow Sand days at Gosan Site	56
Table 18. Comparison of water-soluble components concentrations($\mu\text{g}/\text{m}^3$) between Yellow Sand and Non-Yellow Sand days at Gosan Site	56
Table 19. Cross correlation for aerosol components at Gosan Site	67
Table 20. Cross correlation for aerosol components at 1100 Site in Mt. Halla	68
Table 21. Annual and seasonal comparison of soil enrichment factor	72
Table 22. Annual and seasonal comparison of seawater enrichment factor	72
Table 23. Results of factor analysis for aerosol components between 1998 and 2002	77
Table 24. Results of factor analysis for aerosol components during Yellow Sand days	78
Table 25. Results of factor analysis for aerosol components during Non-Yellow Sand days	79

List of Figures

Figure 1. Comparison of annual mean concentrations($\mu\text{g}/\text{m}^3$) of water-soluble components at Gosan Site between 1997 and 2002 ..	18
Figure 2. Comparison of annual mean concentrations($\mu\text{g}/\text{m}^3$) of water-soluble components at 1100 Site of Mt. Halla between 1997 and 2002	18
Figure 3. Comparison of annual mean concentrations of water-soluble components at Gosan Site	19
Figure 4. Comparison of annual annual mean concentrations of water-soluble components at 1100 Site of Mt. Halla	19
Figure 5. Trend of annual mean concentrations of NO_3^- at Gosan Site	22
Figure 6. Trend of annual mean concentrations of SO_4^{2-} at Gosan Site	22
Figure 7. Trend of annual mean concentrations of NO_3^- at 1100 site of Mt. Halla	23
Figure 8. Trend of annual mean concentrations of SO_4^{2-} at 1100 Site of Mt. Halla	23
Figure 9. Comparison of annual mean concentrations($\mu\text{g}/\text{m}^3$) of sulfur and metal components at Gosan Site in 1998 ~ 2002	28
Figure 10. Comparison of annual mean concentrations(ng/m^3) of metal components at Gosan Site in 1998 ~ 2002	28
Figure 11. Comparison of annual mean concentrations(ng/m^3) of metal components at Gosan Site in 1998 ~ 2002	29
Figure 12. Comparison of annual mean concentrations($\mu\text{g}/\text{m}^3$) of sulfur and metal components at 1100 Site of Mt. Halla in 1998 ~ 2002	29
Figure 13. Comparison of annual mean concentrations($\mu\text{g}/\text{m}^3$) of metal components at 1100 Site of Mt. Halla in 1998 ~ 2002	30

Figure 14. Comparison of annual mean concentrations($\mu\text{g}/\text{m}^3$) of metal components at 1100 Site of Mt. Halla in 1998 ~ 2002	30
Figure 15. Comparison of water-soluble component concentrations between Gosan and 1100 Sites in spring	38
Figure 16. Comparison of water-soluble component concentrations between Gosan and 1100 Sites in summer	38
Figure 17. Comparison of water-soluble component concentrations between Gosan and 1100 Sites in fall	39
Figure 18. Comparison of water-soluble component concentrations between Gosan and 1100 Sites in winter	39
Figure 19. Comparison of metal component concentrations between Gosan and 1100 Sites in spring	46
Figure 20. Comparison of metal component concentrations between Gosan and 1100 Sites in spring	46
Figure 21. Comparison of metal component concentrations between Gosan and 1100 Sites in spring	47
Figure 22. Comparison of metal component concentrations between Gosan and 1100 Sites in summer	47
Figure 23. Comparison of metal component concentrations between Gosan and 1100 Sites in summer	48
Figure 24. Comparison of metal component concentrations between Gosan and 1100 Sites in summer	48
Figure 25. Comparison of metal component concentrations between Gosan and 1100 Sites fall	49
Figure 26. Comparison of metal component concentrations between Gosan and 1100 Sites in fall	49
Figure 27. Comparison of metal component concentrations between Gosan and 1100 Sites in fall	50
Figure 28. Comparison of metal component concentrations between	

Gosan and 1100 Sites in winter	50
Figure 29. Comparison of metal component concentrations between Gosan and 1100 Sites in winter	51
Figure 30. Comparison of metal component concentrations between Gosan and 1100 Sites in winter	51
Figure 31. Comparison of water soluble component concentrations between Yellow Sand and Non-Yellow Sand days at Gosan Site	57
Figure 32. Comparison of water soluble component concentrations between Yellow Sand and Non-Yellow Sand days at 1100 Site of Mt. Halla	57
Figure 33. Comparison of metal component concentrations between Yellow Sand and Non-Yellow Sand days at Gosan Site	58
Figure 34. Comparison of metal component concentrations between Yellow Sand and Non-Yellow Sand days at Gosan Site	58
Figure 35. Comparison of metal component concentrations between Yellow Sand and Non-Yellow Sand days at Gosan Site	59
Figure 36. Comparison of metal component concentrations between Yellow Sand and Non-Yellow Sand days at 1100 Site of Mt. Halla	59
Figure 37. Comparison of metal component concentrations between Yellow Sand and Non-Yellow Sand days at 1100 Site of Mt. Halla	60
Figure 38. Comparison of metal component concentrations between Yellow Sand and Non-Yellow Sand days at 1100 Site of Mt. Halla	60
Figure 39. Variations of cation component concentrations at Gosan Site shown with Yellow Sand dates	61
Figure 40. Variations of anion component concentrations at Gosan site shown with Yellow Sand dates	61



Figure 41. Variations of cation component concentrations at 1100 site of Mt. Halla shown with Yellow Sand dates	62
Figure 42. Variations of anion component concentrations at 1100 site of Mt. Halla shown with Yellow Sand dates	62
Figure 43. Variations of metal and sulfur component concentrations at Gosan site shown with Yellow Sand dates	63
Figure 44. Variations of metal component concentrations at Gosan site shown with Yellow Sand dates	63
Figure 45. Variations of metal and sulfur component concentrations at 1100 site of Mt. Halla shown with Yellow Sand dates	64
Figure 46. Variations of metal component concentrations at 1100 site of Mt. Halla shown with Yellow Sand dates	64
Figure 47. Variations of NH_4^+ , Na^+ , K^+ , nss-Ca^{2+} , nss-SO_4^{2-} , and NO_3^- concentration($\mu\text{g}/\text{m}^3$) as a function of the wind direction at Gosan Site	82
Figure 48. Variations of NH_4^+ , Na^+ , K^+ , nss-Ca^{2+} , nss-SO_4^{2-} , and NO_3^- concentration($\mu\text{g}/\text{m}^3$) as a function of the wind direction at 1100 site in Mt. Halla	83
Figure 49. Variations of Al, Fe, Ca, K, Ti and V concentration(ng/m^3) as a function of the wind direction at Gosan Site	84
Figure 50. Variations of Pb, Zn, Cu, Mn, Cr and Cd concentration(ng/m^3) as a function of the wind direction at Gosan Site	85
Figure 51. Variations of Al, Fe, Ca, K, Ti and V concentration(ng/m^3) as a function of the wind direction at 1100 site in Mt. Halla	86
Figure 52. Variations of Pb, Zn, Cu, Mn, Cr and Cd concentration(ng/m^3) as a function of the wind direction at 1100 site in Mt. Halla	87

I. 서 론

대기 오염물질은 확산 영역이 넓고 기상 조건에 따라 장거리 이동(long range transport)이 가능하기 때문에 대기오염현상은 대단히 광역적으로 나타나고, 한 국가의 오염원 방출이 결국은 주변국에 광범위하게 영향을 미칠 수 있다. 이러한 이유로 대기 오염 현상은 국지적이고 단기적인 측정에서 벗어나 보다 광범위하고 장기적인 대기질 변화를 측정하기 위한 연구에 관심이 집중되고 있다. 이러한 대기오염물질의 장거리 이동 현상을 규명하기 위한 연구는 1970년대 후반 이후 주로 미국을 비롯한 선진국을 중심으로 진행되어 왔고, 북미와 유럽에서 약 15년 이상 국가 간 이해관계의 쟁점으로 부각되기도 했다. 대기오염물질의 장거리이동 현상은 대기오염 측정을 통한 장래 예측과 정량적인 분석, modeling과 대기오염 측정망을 통한 monitoring 등에 의해 이루어지고 있으며, 다양한 경제적, 기술적 분석을 거쳐 이해관계에 있는 국가들의 정책수립에 반영되고 있다.

미국과 캐나다 간에는 동북부 지역을 중심으로 산성우 문제에 대한 책임 소재와 방지 대책을 둘러싼 논쟁이 벌어져 1978년 대기오염 장거리 이동에 대한 연구그룹(The Bilateral Research Consultation Group on Long-Range Transport of Air Pollution : LRTAP)을 결성하여 연구를 수행하였다. 이들의 연구 결과에 의하면 캐나다에서 발생하는 산성우의 약 50% 이상이 미국으로부터, 또 미국 산성우의 15% 정도는 캐나다로부터 비롯되는 것으로 조사되었다. 또 유럽에서는 국제공동 연구과제인 EUREKA (European Research Coordination Research)의 일환으로 EUROTRAC (European Experiment on Transport and Transformation of Environmentally Relevant Trace Constituents in the Troposphere over Europe)라는 대기분야 연구과제가 1988년부터 1995년까지 진행되었다. EUROTRAC은 17개 국가와 유럽연합(EU)이 참여하여 현장측정, 실험실연구, 포괄적인 대기모델 시뮬레이션과 실험실, 지상 및 항공기 측정을 위한 진보된 기기의 개발 등에 주력하고 있고, 여러 전문분야 연구자들이 참여하고 있다.

또한 최근 NASA에서 진행한 연구에서는 사하라 사막에서 발생한 먼지 폭풍이 대

서양을 지나서 멕시코만 까지 이동하며 연안에서 적조를 유발한다는 사실을 밝힌 바 있다(신혜정 등, 2002). 아시아에서는 중국과 몽고의 사막지역이나 황하중류의 황토지역 등에서 발생한 황사(Yellow sand)가 북태평양을 건너 북아메리카까지 이동한 것으로 조사되었다(Duce et al., 1980; Zhang et al., 2003; Hayami et al., 1997; Gregory et al., 1996).

동북아 지역에서는 일본이 장거리이동에 의한 대기오염물질의 양을 정량화하기 위한 연구를 1980년대 초부터 지속해 오고 있다. 1990년대에는 IGAC (International Global Atmospheric Chemistry)이 주도하는 APARE (East Asia-North Pacific Regional Experiment), NASA를 중심으로 한 PEM-WEST (Pacific Exploratory Mission-West) 와 PEACAMPOT (Perturbation of East Asian Continental Air Mass to Pacific Oceanic Troposphere)에 적극적으로 참여하여 항공기 관측과 지상 관측을 진행하였다. 그 외에도 일본의 자원환경총합연구소, 일본 전력중앙연구소 등 여러 기관에서 대기 오염의 장거리 이동에 대한 연구를 지속적으로 수행하고 있다(국립환경연구원보고서, 1997).

우리나라의 경우 1980년대 후반부터 동북아시아 지역에서의 대기오염물질 장거리 이동에 대해 부분적으로 연구가 이루어지기 시작했다. 그러나 아직은 지속적인 연구가 수행되지 못하고, 단편적이고 산발적인 측정에 머무르고 있는 형편이다. 최근 들어서 우리나라에서도 오염물질의 장거리 이동에 관한 국제적인 관심도가 높아지면서 ACE (Aerosol Characterization Experiment)에 적극적으로 참여하고 있다. ACE는 대기오염 물질의 장거리 이동 현상을 규명하고, 대기 에어로졸이 기후변화에 미치는 영향을 집중적으로 조사하기 위한 국제공동연구로 IGAC이 주도 하에 연구가 진행되고 있다 (Huebert *et al.*, 1998). ACE 연구는 이미 1995년과 1997년에 태평양 지역과 대서양 지역에서 각각 ACE-1과 ACE-2 연구를 수행하여 남반구와 유럽 대륙의 인위적 에어로졸 및 아프리카 사막 먼지의 유출에 대한 조사를 끝낸 상태이다. 그리고 2001년 초부터는 최근에 대기오염이 급진전되고 있는 동아시아와 북서태평양 지역에서 에어로졸의 집중 관측과 연구를 위한 ACE-Asia 연구가 수행 중이다(Kim et al., 2004; Huebert and Bates, 1998). ACE-Asia 국제공동연구는 동아시아에서 태평양까지의 사막먼지와 인위적인 에어로졸 유출에 초점을 맞추고 있다. 특히 동아시아와 북서 태평양에서의 인위적 대기 에어로졸의 특성과 복사 강제력에 대한 관련성을 추정하기 위

하여 동아시아와 북서태평양 지역에서 에어로졸의 물리적, 화학적, 복사적 특성 및 구름 핵 응결 특성을 결정하고 이들 특성간의 관련성을 연구하고 있다. 이를 위해서 비행기, 선박을 이용한 항공 및 해상 측정이 이루어지고, 동시에 지상에 측정소를 설치하여 각종 대기오염물질의 농도를 측정하기 위한 집중적인 연구가 이루어지고 있으며, 이미 2001년 3월부터 5월까지 1차 집중측정을 끝낸 상태이다.

동아시아 지역에서 대기오염물질의 장거리 이동 현상을 규명하기 위한 지상 관측소는 여러 면에서 제주도가 아주 적합한 것으로 평가되고 있다. 대기오염물질의 장거리 이동 현상을 규명하기 위해서는 지역적인 오염 영향을 최소화시켜야 하기 때문에 도시 지역보다는 자체 오염원이 없고 오염원으로부터 멀리 격리된 청정지역에서의 측정이 필요하다(He et al., 2003). 제주도는 산업시설이 거의 없고 인구밀도가 낮을 뿐만 아니라 자체오염원이 거의 없는 국내에서 가장 청정한 지역이기 때문에 이러한 조건을 잘 만족시키고 있다. 또 지리적으로도 인접한 일본과 중국 사이에 위치하고 있어 이들 인접국, 특히 중국으로부터의 장거리 이동에 의해 유입되는 오염물질의 영향을 평가하는데 입지적으로 아주 적합한 지역이다.

이러한 이유로 본 연구가 수행된 제주도 북제주군 한경면 고산리 소재 수월봉은 ACE-Asia 연구를 위한 최적지로 지정되어 2001년 3월부터 5월까지 국내외 26개 연구팀이 참가하여 집중측정을 수행하였고, 지금도 일부 주요 오염물질들에 대한 측정이 지속적으로 이루어지고 있다. 또 대기오염물질의 장거리 이동 현상을 규명하기 위해서는 지상은 물론 상층부의 대기질 변화를 동시에 측정하는 것이 바람직하다. 일반적으로 상층부 대기질 자료는 황사 등과 같은 월경성 대기오염물질의 이동경로인 지상 1~3 km 이상에서 항공 측정을 통하여 얻고 있으나 이 경우 상시 측정은 고비용 등의 문제로 거의 불가능한 실정이다. 본 연구에서 측정소로 지정한 한라산 1100 고지는 해발 1100 m에 위치하고 있어 대기 경계층 상부를 통해 이동되는 대기오염물질의 거동을 비교적 수월하게 관찰할 수 있는 지역이다(강창희 등, 1999).

본 연구에서는 제주도 고산지역과 한라산 1100고지의 두 청정지역에서 high volume air sampler를 설치하여 대기 에어로졸을 지속적으로 채취하고, 각종 성분들을 분석하였다. 그리고 분석 결과로부터 청정지역의 대기오염 배경농도 측정, 제주지역 저지대와 고지대 대기 에어로졸의 조성 비교, 오염원의 발생기원 등을 다양하게 조사하였다. 이러한 연구 결과는 주변국가로부터 유입된 오염물질의 영향을 평가하고 한반도에 영

향을 미칠 수 있는 대기오염원과 그 이동 경로 등을 규명하기 위한 기초 자료로 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.



II. 실험

1. 측정소 설비 및 측정 기기

1) 측정소 설비

본 연구를 위한 측정소는 제주도 북제주군 한경면 고산리 소재 수월봉(33°28' N, 127°17' E)과 제주도 한라산 중턱의 해발고도 1100 m 지점(33°21' 23" N, 126°27' 46" E)에 위치해 있으며 각 측정소에 컨테이너를 설치하여 마련하였다. 고산 측정소는 바다와 바로 인접해 있으며 산업시설이 거의 없고 인구밀도가 낮을 뿐 아니라 이동오염원도 상대적으로 낮아 자체오염원이 거의 없는 청정지역으로, 제주 고층 레이더 기상대로부터 서쪽 방향으로 약 300 m 떨어져 있는 해발 72 m의 언덕위에 설치되어 있다. 한라산 1100 고지 측정소는 제2횡단도로에서 서쪽으로 약 500 m 떨어진 곳에 위치해 있으며, 측정소 주변에는 한국 통신망 운영국과 군 파견대가 있으나 이곳의 상주 인원이 소수이고, 이동오염원과 점오염원, 면오염원에 의한 영향을 매우 적게 받고 있는 청정지역에 속하는 곳이다. 각 측정소 컨테이너 내부에 측정 기기를 탑재하고 기기 작동에 적합한 온도와 습도 등을 유지시키면서 장기간 동안 측정 기기를 원활하게 가동시키기 위해 실내에 에어컨과 제습기를 설치하여 항온, 항습을 유지하였다. 또한 전원은 AVR을 사용하여 안정한 전원을 공급시켰다.

2) 측정기기

(1) High Volume Tape Sampler

대기 중의 총 부유분진(TSP) 시료는 일본 KIMOTO Electric사에서 제작한 high volume air sampler(model 195A)를 사용하여 채취하였다. 이 sampler는 roll type의 테프론 필터(PTFE)를 사용하여 연속적으로 시료를 채취할 수 있는 자동시스템이며, 시료의 채취시간을 임의로 조절할 수 있는 장점을 갖고 있다. 각 컨테이너 내부에 탑재한 흡입관은 고산 측정소(길이 7 m, 내경 38 mm인 flexible hose, 지상 6 m 높이)와 한라산 1100 고지(길이 6 m, 내경 38 mm인 flexible hose, 지상 5 m 높이) 컨테이너의

천장 측면을 관통시켜 에어로졸이 효과적으로 포집될 수 있도록 고정시켰다.

(2) Inductively Coupled Plasma Spectrophotometer

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

(3) Atomic Absorption Spectrophotometer

에어로졸의 수용성 양이온 성분은 원자흡수분광도계(GBC사, model Avanta-P)를 사용하여 분석하였고, atomizer는 10 cm와 5 cm slot length의 burner head를 사용하였으며, Na, K, Ca, Mg용 single hollow cathode lamp를 사용하였다.

(4) Microwave Digestion System

에어로졸의 금속성분은 에어로졸 필터를 혼산용액에 침적시켜 마이크로파 분해장치로 용출시켰으며, 마이크로파 분해장치는 미국 CEM사의 model MAR-5를 사용하였다.

(5) Ion Chromatograph

에어로졸의 주요 양이온 및 음이온 성분들은 DIONEX사의 model DX-500 ion chromatograph와 Metrohm사의 Modula Ion Chromatograph를 사용하여 분석하였다. 이 때 분리용 컬럼은 음이온 분석에 Ionpac AG4A-SC 및 Metrohm Metrosep A-SUPP-4 분리관을 양이온 분석에는 Metrohm Metrosep Cation 1-2-6 분리관을 사용하였고, 검출기는 conductivity detector를 사용하여 분석하였다.

(6) UV-Visible Spectrophotometer

수용성 양이온 성분 중 NH_4^+ 은 indophenol법과 ion chromatography법을 병행하여 분석하였고, indophenol법을 위해 스위스 KONTRON사의 model UVIKON860 UV-Visible spectrophotometer를 사용하였다.

2. 에어로졸 시료의 채취 및 분석

1) 에어로졸 시료 채취

에어로졸 시료는 high volume tape sampler와 PTFE(polytetrafluoroethylent) 필터를 사용하여 24시간 단위로 1997년 3월부터 2002년 12월까지 고산지역과 한라산 1100 고지에서 동시에 채취하였으며 이 중 각 측정소에서 채취날짜가 같은 시료를 가지고 비교하였다. 수용성 성분인 경우 1999년 12월부터 2000년 4월까지 한라산 1100 고지에서 채취된 에어로졸이 없어 이 기간의 에어로졸은 논문에서 제외시켰다. 고산에서는 1997년에 99개, 1998년에 130개, 1999년에 92개, 2001년에 63개, 2002년에 69개로 연구기간동안 총 453개의 시료를 비교하였으며, 한라산 1100 고지에서 1997년에는 97개, 1998년에는 130개, 1999년에 92개, 2001년에 63개, 2002년에 69개로 연구기간동안 총 451개의 시료를 비교하였다. 금속의 경우 고산과 1100 고지 모두 249개의 시료를 취하여 분석하였으며 각각 1998년에는 52개, 1999년에는 59개, 2001년에는 69개, 2002년에는 69개의 시료를 비교 분석하였다. 시료 채취용 필터는 테프론 재질(PTFE)의 롤 테이프형(100 mm × 10 m)으로 한 개의 롤 테이프가 완전히 감길 때마다 sampler로부터 필터를 분리하여 그 중 반은 수용성 성분을, 나머지 반은 금속 및 황 성분을 분석하는데 사용하였다. 또한 시료 채취시 공기의 유속은 대략 170 L/min이 되도록 조절하였으며, 총 공기의 유량은 기록계의 기록지에 표시된 유속 및 시간을 대조하여 계산하였다.

2) 수용성 성분 분석

(1) 시료의 전처리

에어로졸을 채취한 PTFE 필터는 시료가 채취된 필터의 원형부분을 잘라낸 뒤 다시 2등분하여 이 중 한 개는 수용성 성분, 나머지 한 개는 금속 성분 분석에 이용하였다. 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 μ m필터(Whatman, PVDF syringe filter, 13 mm)로 불용성 입자를 거른 후 여액을 양이온 및 음이온 분석용 시료로 이용하였다.

(2) 수용성 성분 분석

분진 중의 수용성 성분은 초순수를 사용하여 용출시켰다. 시료에 초순수 50 mL를 가하고, 초음파세척기에서 30분간, 다시 vortex mixer에서 약 5 ~ 10분간 진탕하여 수용성 성분을 용출시킨 후 용액을 0.45 μm membrane filter로 여과하여 이온성분 분석용 시료로 이용하였다. Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} 양이온은 원자흡수분광도법(GBC, model Avanta-P)으로, NH_4^+ 는 indophenol법으로 분석하였다. 또 SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^- 음이온은 ion chromatography법(Dionex, model DX-500)으로 분석하였고, 분석조건은 IonPac AG4A-SC/IonPac AS4A-SC column, 1.0 mL/min flow rate, 50 μL injection volume, 2.4 mM Na_2CO_3 / 2.25 mM NaHCO_3 eluent이다. 그리고 2001년 이후의 시료에 대한 모든 양이온과 음이온을 ion chromatography법(Metrohm, model Modula IC)으로 동시에 분석하였다. 이 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 column, 1.0 mL/min flow rate, 20 μL injection volume, 4.0 mM tartaric acid / 1.0 mM pyridine-2,6-dicarboxylic acid eluent의 조건으로 분석하였다. 또 SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^- 음이온은 Metrohm Modula IC를 사용하여 Metrohm Metrosep A-SUPP-4 column, 1.0 mL/min flow rate, 100 μL injection volume, 1.8 mM NaHCO_3 / 1.7 mM Na_2CO_3 eluent, 0.1 % H_2SO_4 suppressor solution의 조건으로 분석하였다. 이 때 수용성 이온성분을 분석하기 위한 IC의 검출한계와 상대표준오차(RSE)는 Table 1과 같다.

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

Component	NH_4^+	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	SO_4^{2-}	NO_3^-	Cl^-
DL(ppb)	0.19	0.13	1.62	2.42	1.47	0.40	0.32	0.89
RSE	0.025	0.025	0.090	0.064	0.103	0.054	0.042	0.130

3) 금속 성분 분석

(1) 시료의 전처리

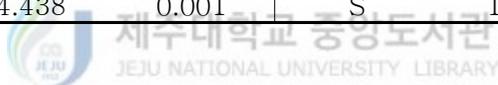
에어로졸 시료가 채취된 필터는 비닐봉지에 밀봉하여 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 냉동고에 보관하였고, 대략 3개월 간격으로 동시에 분석하였다. 에어로졸의 금속 및 황 성분은 EPA Method 3051A의 방법으로 마이크로파 분해장치를 사용하여 혼산 용액으로 용출시켰다. 시료가 채취된 필터를 테프론 vessel에 넣고 진한 질산 9 mL와 진한 염산 3 mL를 가한 후 마이크로파를 조사하여 5.5분 동안 온도를 $175\text{ }^{\circ}\text{C}$ 로 올리고, 다시 이 온도에서 4.5분간 유지시킨 후 10분간 서서히 온도를 떨어뜨려 분해하였다. 마이크로파 분해를 거친 용액은 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 필터로 여과하여 불용성 입자를 거른 후 초순수를 사용하여 최종적으로 용량플라스크에서 50 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 분석시 표준용액은 AccuStandard사의 ICP용 1000 ppm 용액을 초순수와 혼산용액으로 희석하여 조제하였다. 이 때 희석용매는 매트릭스 효과를 최소화시키기 위하여 시료의 전처리 과정과 동일한 비율로 HNO_3 과 HCl을 혼합한 용액을 사용하였다. 검량선 작성시 사용한 표준용액은 시료의 농도에 따라 고농도 성분들은 $0.01\sim 5.0\text{ }\mu\text{g/mL}$, 저농도 성분들은 $0.01\sim 1.0\text{ }\mu\text{g/mL}$ 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	0.0002
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. 동북아시아지역 대기오염물질의 배출현황 특성

1) 동북아 국가의 대기오염물질 배출현황

동북아시아 지역은 급속한 산업화와 생활수준의 향상 등으로 인해 대기오염 물질의 배출량이 급격하게 증가하고 있는 실정이다(Gregory et al., 2003, 2002; Wang et al., 2002). 특히 중국의 영향은 가장 커서, 아시아 전체 이산화황과 질소산화물 배출량의 70~80 % 이상을 차지하고 있다(Yao et al., 2003; Ye et al., 2003; Yao et al., 2003; 김용표, 1999). 특히 우리 나라는 중국에서 공업화가 가장 빠른 북동부 해안 공업지대와 거리가 가깝고, 또한 편서풍 지역에 위치하고 있어서 중국의 공업화 영향을 가장 직접적으로 받고 있는 것으로 알려져 있다(김용표 등, 2000; 문길주 등, 1999; 한진석, 1999).

동아시아 국가 중 중국은 에너지 구조에 있어서 아직도 석탄 사용이 70 %가 넘는 것으로 알려지고 있으며, 이러한 이유로 세계 3위의 황산화물 배출국으로 널리 알려져 있다. 이러한 중국 도심지역에서의 아황산가스의 농도는 1990년대 들어서 감소하고 있는 것으로 나타났다. Table 3에 보는 바와 같이 1980년대의 중국 남부와 북부에서의 아황산가스의 농도는 대체로 40 ppb와 45 ppb 전후였으나, 1995년에는 두 지역 모두 31 ppb를 보이고 있다. 그러나 이 농도는 우리 나라와 일본의 대도시의 평균농도에 비하면 여전히 매우 높은 값으로, 특히 중국에서 배출된 SO₂의 총량은 31백만톤으로 우리 나라의 1.5백만톤에 비해 20배 이상 많으며(김용표, 1999), 우리나라에 침적되는 SO₂ 총량은 18만톤(1992년 기준)으로, 이 중 12%에 해당하는 2.2만톤이 중국으로부터 장거리 이동된 것으로 추정되고 있다(Carmichael et al., 1995).

질소산화물 농도는 1980년대 초부터 지금까지 큰 변화 없이 중국 남부에서는 22 ppb 전후를, 중국 북부에서는 30 ppb 전후를 유지하고 있다. 이는 우리 나라 대도시의 연평균 농도인 20 ~ 30 ppb와 비슷하고, 일본의 평균 농도인 16 ~ 18 ppb 보다는 약간 높은 값이다(김용표, 1999).

Table 3. Trend of SO₂ and NO₂ concentrations(ppb) in China.

Year	SO ₂				NO ₂			
	Southern China		Northern China		Southern China		Northern China	
	Range	Mean	Range	Mean	Range	Mean	Range	Mean
1981	8~172	42	8~145	46	5~43	21	11~48	32
1985	3~193	38	5~86	42	7~45	22	12~50	31
1990	1~161	44	5~94	31	6~38	20	4~69	25
1991	2~134	34	5~106	35	6~55	20	8~340	29
1992	1~177	34	4~116	39	6~57	21	10~81	31
1993	3~172	37	3~83	39	5~58	21	12~78	31
1994	-	32	-	34	-	21	-	29
1995	1~162	31	2~81	31	-	22	-	28

중국환경연감(1995, 1996), Estimation based on 1 atm, 25 °C

Table 4에서 보는 바와 같이 중국의 총 부유 분진의 오염도는 매우 심각하다. 중국 남부에서는 1980년대 초 400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 넘는 농도가 1990년대 중반에는 250 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 대로 낮아졌으나, 여전히 우리 나라나 일본에 비해서는 매우 높은 값이다. 중국 북부가 남부에 비해 총 부유분진의 농도가 높은 것은 토양성분의 차이뿐만 아니라, 황사 등의 토양입자의 이동이 더욱 빈번한 것에도 원인으로 지적되고 있다. Table 5에는 동아시아 주요 국가들의 황산화물 배출량을 비교한 것이다. 1990년을 기준으로 중국의 황산화물 배출량은 한국의 9배가 넘는 것으로 나타났으며, 총 부유분진(TSP)은 한국의 약 50배에 이르는 것으로 보고되었다. 결국 대기 오염물질의 배출량 급증 현상으로 인하여 청정 지역에서의 오염물질 농도상승에 따른 지구환경 변화를 야기시킬 수 있으며, 오염물질의 장거리 이동으로 인한 국가간 분쟁의 야기될 소지를 내포하고 있다.

Table 4. Trend of TSP concentrations(ppb) in China.

Year	Southern China		Northern China	
	Range	Mean	Range	Mean
1981	160 ~ 850	410	370 ~ 2770	930
1985	224 ~ 821	444	333 ~ 1767	740
1990	64 ~ 800	268	138 ~ 844	475
1991	80 ~ 376	225	709 ~ 1433	729
1992	90 ~ 474	250	134 ~ 663	400
1993	108 ~ 721	252	142 ~ 815	406
1994	-	250	-	407
1995	-	242	-	392

중국환경연감(1995, 1996), Estimation based on 1 atm, 25 °C

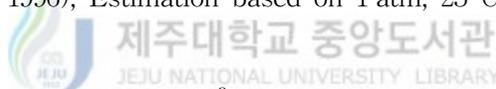


Table 5. Air pollutants emissions(10^3 ton) in North-east Asia.

	Korea ^a	China ^a	Japan ^b	Taiwan ^c	USA ^b
SOx	1,610	14,940	835	34	20,700
TSP	420	21,050	101	-	6,900

a : 1990, b : 1988, c : 1986

2) 중국의 에너지 생산 및 소비 현황

중국은 현재 10억2300 만톤 (표준탄 환산기준)의 에너지를 소비하고 있다. 이는 실제 생산이 10억4700만톤에 달하기 때문에 에너지 자급자족이 이루어지고 있다고 볼 수 있다. 이러한 중국의 에너지 소비량은 1988년 UN 에너지 연감에 의하면 전 세계 에너지 소비량의 9.3 %에 해당하며, 이 같은 비중은 급속한 경제성장과 함께 계속 증가하고 있다. 특히 중국의 산업구조는 화석연료에 대한 에너지 의존도가 95.7 %로서 매우 높은 특징을 지니고 있어, 심각한 환경오염물질의 배출증가가 예상되고 있다. 중국은

대부분의 에너지를 화석연료 중에서도 특히 석탄에 의존하고 있다. 1991년 현재 중국의 주 에너지원은 소비기준으로 볼 때, 전체 에너지 소비의 76.0 %가 석탄이고, 그 다음이 석유 17 %, 수력발전 5.0 %, 그리고 가스 2.0 %의 의존도를 나타내고 있다(국립환경연구원보고서, 1997).

1990년대 중국의 에너지 생산 및 소비 목표는 석탄의 경우 1990년대 연간 2.4 %, 후반기에는 2.6 %의 생산증가를 목표로 하고 있다. 석유의 경우, 1990년대에 걸쳐 1 % 생산증가, 전력의 경우는 1990년대 전반과 후반에 각각 5.7 %와 6.3 %의 생산증가를 목표로 잡았다. 이에 따라 에너지 총 생산량은 1995년에 1,182백만톤 SCE, 2000년에는 1,394백만톤 SCE를 생산할 계획으로 되어 있다. 주목해야 할 것은 총 에너지 생산 중 석탄이 차지하는 비율이다. 총 에너지 생산량 중 석탄이 차지하는 비중은 1990년 74.1 %에서 2000년에도 역시 74.1 %로 당분간은 석탄 계속해서 중국의 주 에너지원으로 이용될 것으로 보인다(국립환경연구원, 1997).



2. 에어로졸 분석 결과

1) 수용성 성분 분석 결과

에어로졸 입자 의존성은 입경에 따라 다르지만 약 50% 정도가 수용성이고, 이들은 다시 양이온 및 음이온으로 구분된다. 주로 양이온은 암모니아, 알칼리 금속, 알칼리 토금속과 같은 원소이고, 음이온은 황산염, 질산염 및 할로젠 화합물 등이다(Warneck, 1991). 본 연구에서는 1997년과 2002년에 걸쳐 고산과 1100 고지 두 지역에서 채취한 904개의 시료에 대해 수용성 성분들을 분석하였고 그 결과를 Table 6 그리고 Figure 1과 Figure 2에 나타내었다. 결과에서 보는 바와 같이 수용성 성분들의 평균농도는 고산에서 $nss-SO_4^{2-} > Na^+ > NO_3^- > Cl^- > NH_4^+ > nss-Ca^{2+} > K^+ > Mg^{2+}$, 1100 고지에서 $nss-SO_4^{2-} > NH_4^+ > NO_3^- > nss-Ca^{2+} > Na^+ > K^+ > Cl^- > Mg^{2+}$ 의 순위를 보였다. 본 연구에서 에어로졸 시료를 채취한 고산 측정소는 바람이 많은 해안가에 근접해 있어 해양의 영향을 비교적 크게 받으며, 해염 입자의 유입으로 1100 고지보다 고산에서 Na^+ , Cl^- 성분의 농도가 높게 나타났다. 이에 반해 1100 고지에서는 해양의 영향을 비교적 덜 받는 반면, 인위적 및 토양 발생 기원의 성분들(NH_4^+ , NO_3^- , $nss-Ca^{2+}$)이 상대적으로 높은 농도를 보이는 것으로 조사되었다. 그러나 절대농도는 1100 고지보다 고산지역에서 훨씬 더 높아 1.1~10.9배의 차이를 보였다. 수용성 성분 중 SO_4^{2-} 및 NO_3^- 는 주로 대기 중으로 방출된 SO_2 및 NO_x 기체에 의해 형성된다. 황산염과 질산염은 각각 H_2SO_4 , NH_4HSO_4 , $(NH_4)_3H(SO_4)_2$, HNO_3 , HNO_2 와 같은 2차 오염물질로 이루어져 있고 강우 시 물에 용해되어 내리면서 여러 가지 화학반응을 거쳐 산성비를 유발할 뿐만 아니라, 구름의 생성과 성장과정에서 응결핵의 역할을 한다(Warneck, 1991). 이들 성분 중 가장 높은 농도를 나타낸 성분인 $nss-SO_4^{2-}$ 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, $[nss-SO_4^{2-}] = [SO_4^{2-}] - [Na^+] \times 0.251$ 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 고산에서 1997년 $6.46 \mu g/m^3$, 1998년 $6.53 \mu g/m^3$, 1999년 $5.86 \mu g/m^3$, 2001년 $4.73 \mu g/m^3$, 2002년 $6.47 \mu g/m^3$ 로 조사되었다. 연구기간의 $nss-SO_4^{2-}$ 평균 농도는

6.12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 값을 나타내었으며 연도별로는 1998년에 가장 높은 농도를 보였고, 이에 반해 2001년에 가장 낮은 농도를 보였다. 1100 고지에서는 1997년 5.17 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 1998년 4.57 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 1999년 5.68 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 2001년 3.51 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 2002년 4.21 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 조사되었고, 전체평균 농도는 4.75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 나타내었다. 1100 고지에서는 고산지역과는 달리 1999년에 가장 높은 농도를 보였고 2001년에는 고산과 마찬가지로 가장 낮은 농도를 나타내었다. 그러나 2001년 자료에서는 분석된 시료 성분의 평균농도에 크게 영향을 미치는 황사기간 시료가 빠져 있어 황사 발생 일수가 많았던 2001년의 실질적인 평균농도는 이보다 더 증가할 것으로 추정된다.

본 연구 기간에 측정된 NO_3^- 의 농도는 고산지역에서 전체평균 1.69 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 나타내었고, 1997년 1.21 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 1998년 1.88 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 1999년 1.90 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 2001년 1.35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 2002년 2.08 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 nss- SO_4^{2-} 의 농도가 1998년에 가장 높은 농도를 보였던 것과는 달리 NO_3^- 농도는 2002년에 가장 높은 농도를 나타내었고 가장 낮은 농도 역시 nss- SO_4^{2-} 와는 달리 NO_3^- 는 1997년에 가장 낮은 농도를 나타내었다. 또 1100 고지에서 평균농도는 1997년 0.83 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 1998년 0.84 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 1999년 0.83 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 2001년 0.46 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 2002년 1.04 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 조사되었다. 1100 고지에서 역시 2002년에 가장 높은 농도를 나타내었고, 2001년에 가장 낮은 농도를 보여 nss- SO_4^{2-} 와 유사한 경향을 보였다.

nss- SO_4^{2-} 와 마찬가지로 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 경우 대표적인 토양의 지표성분으로 주로 토양입자의 유입에 의해 대기 에어로졸에 유입된다. 지표성분인 nss- Ca^{2+} 은 고산에서 1997년 0.38 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 1998년 0.55 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 1999년 0.37 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 2001년 0.18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 2002년 0.63 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 나타냈으며, 전체 농도는 0.44 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 값을 보였다. 반면, 1100 고지에서는 1997년 0.30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 1998년 0.49 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 1999년 0.57 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 2001년 0.16 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 2002년 0.43 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 나타내었다. nss- Ca^{2+} 성분은 연구기간 동안 황사의 발생빈도가 높은 해에 높은 농도를 보였다. 2001년에는 황사 발생 빈도가 가장 많았지만 대부분의 다른 성분들과 마찬가지로 황사기간에 채취된 시료가 빠져 있어 가장 낮은 농도를 나타냈다고 추정된다.

NH_4^+ 성분은 고산에서 1997년 1.40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 1998년 1.50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 1999년 1.26 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 2001년 1.17 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 2002년 1.67 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 보였고 전체농도는 1.41 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 나타내었다. 그리고

1100고지에서 1997년 $1.36 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 1998년 $1.11 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 1999년 $1.26 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 2001년 $1.13 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 2002년 $1.18 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 보였고 $1.21 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 전체 평균농도를 나타내었다.

또한 고산지역과 1100 고지에서의 주요 이온 성분들에 대한 농도 변화를 연도별로 비교하여 Figure 3 ~ Figure 4에 나타내었다. 연도별로 고산과 1100 고지 주요 이온성분들을 비교해 볼 때 NH_4^+ , nss-Ca^{2+} , K^+ 성분들은 각각 고산이 $1.41 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.44 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이고 1100 고지는 각각 $1.21 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.41 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.27 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 두 측정소 간에는 큰 차이를 보이지 않았으나 해염성분의 영향으로 인해 Na^+ 성분과 Cl^- 성분은 고산지역이 각각 $1.79 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $1.64 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 1100 고지가 각각 $0.32 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 고산지역과 1100 고지 해염 성분은 큰 차이를 보였다. 그리고 nss-SO_4^{2-} , NO_3^- , Mg^{2+} 성분들은 고산과 1100 고지에서 다소의 농도 차로 고산이 1100 고지보다 약간 높은 농도를 보임을 확인할 수 있었다.

Table 6. Annual mean concentrations($\mu\text{g}/\text{m}^3$) of water-soluble components at Gosan Site and 1100 Site between 1997 and 2002.

Component	Gosan Site						1100 Site					
	1997	1998	1999	2001	2002	Mean	1997	1998	1999	2001	2002	Mean
NH_4^+	1.40	1.50	1.26	1.17	1.67	1.41	1.36	1.11	1.26	1.13	1.18	1.21
Na^+	1.41	1.82	1.76	2.39	1.81	1.79	0.21	0.39	0.35	0.26	0.39	0.32
K^+	0.51	0.44	0.37	0.24	0.36	0.40	0.33	0.28	0.29	0.14	0.26	0.27
nss-Ca^{2+}	0.38	0.55	0.37	0.18	0.63	0.44	0.30	0.49	0.57	0.16	0.43	0.41
Mg^{2+}	0.21	0.26	0.27	0.25	0.31	0.26	0.07	0.09	0.10	0.05	0.08	0.08
nss-SO_4^{2-}	6.46	6.53	5.85	4.73	6.47	6.12	5.17	4.57	5.68	3.51	4.21	4.75
NO_3^-	1.21	1.88	1.90	1.35	2.08	1.69	0.83	0.84	0.83	0.46	1.04	0.81
Cl^-	1.27	1.61	1.77	1.85	1.84	1.64	0.21	0.13	0.10	0.12	0.19	0.15

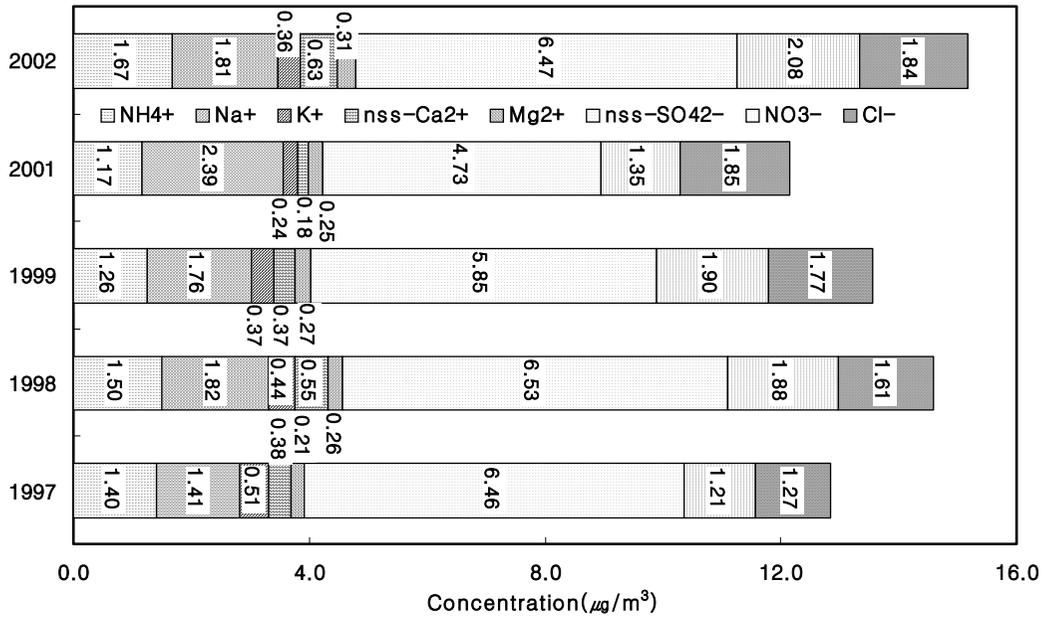


Figure 1. Comparison of annual mean concentrations of water-soluble components at Gosan Site between 1997 and 2002.

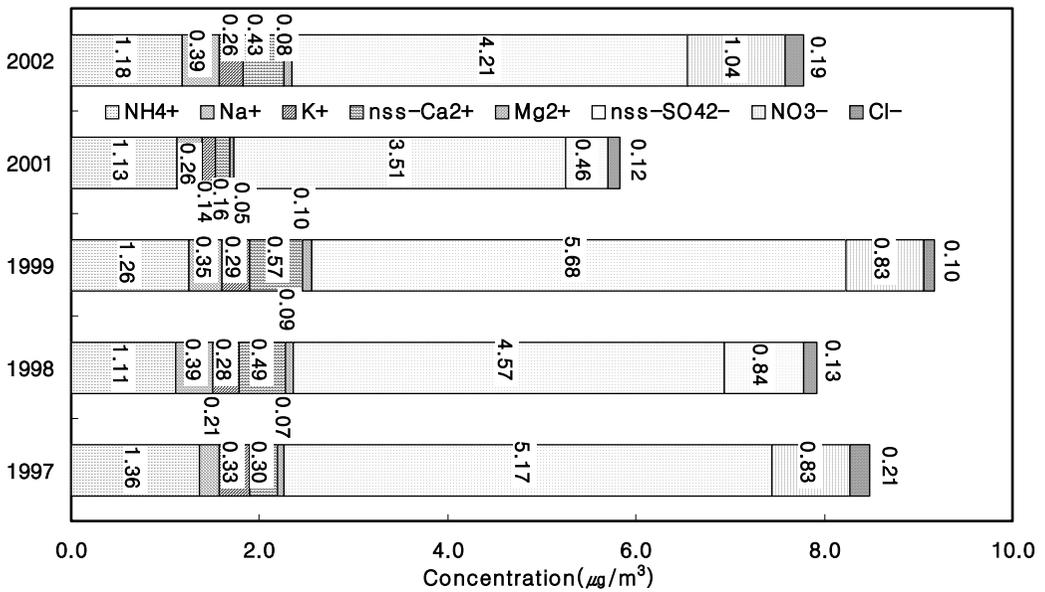


Figure 2. Comparison of annual mean concentrations of water-soluble components at 1100 Site of Mt. Halla between 1997 and 2002.

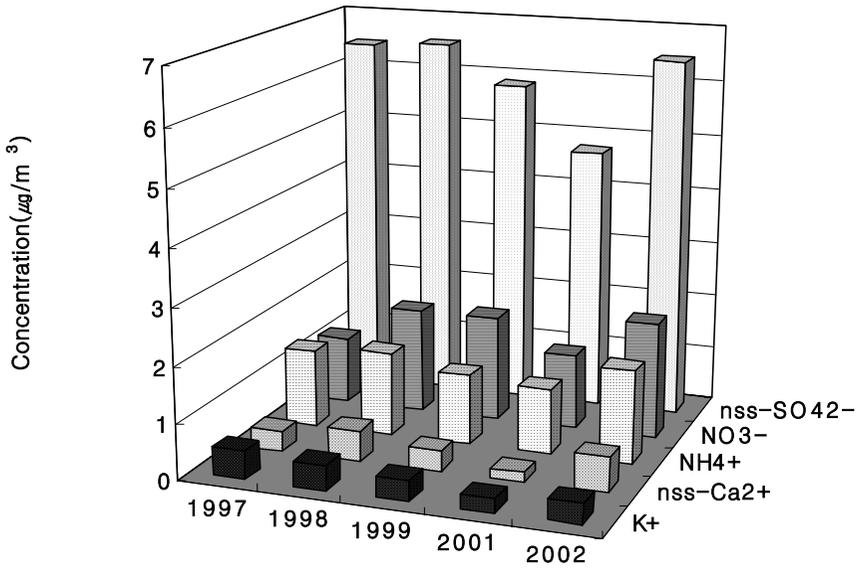


Figure 3. Comparison of annual mean concentrations of water-soluble components at Gosan Site.

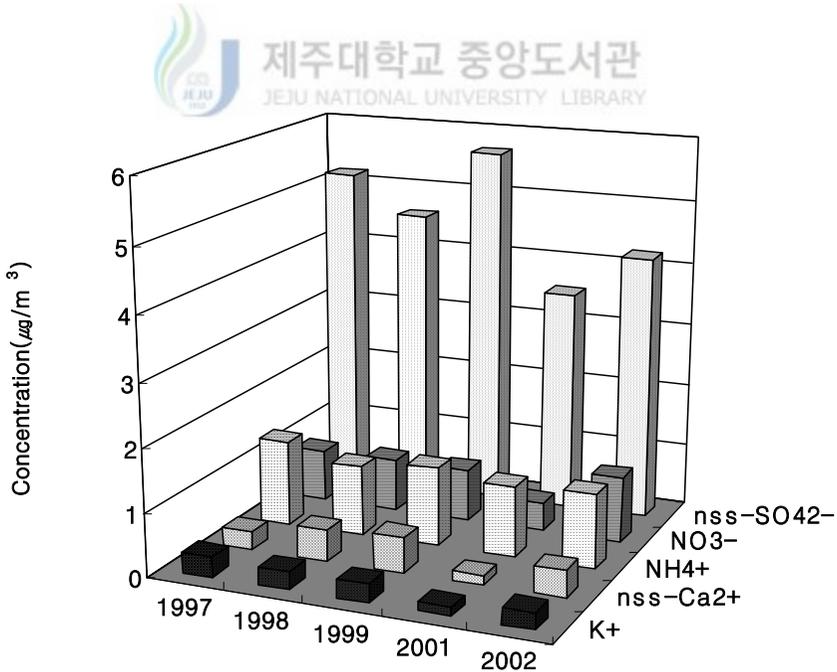


Figure 4. Comparison of annual mean concentrations of water-soluble components at 1100 Site of Mt. Halla.

2) 연도별 NO_3^- 와 nss-SO_4^{2-} 경향 비교

동북아 국가들은 1980년대 이후 10년 동안 약 7%의 경제성장을 이루었으며, 이에 따라 화석연료 소비량 또한 급격히 증가하였고, 인위적 대기오염물질(SO_2 , NO_x 등)의 배출량도 앞으로 계속 증가될 것으로 전망되고 있다. 특히 중국에서 1995년에 배출된 SO_2 총량은 31백만톤으로 우리 나라의 1.5백만톤에 비해 20배 많으며, 우리 나라에 침적되는 SO_2 총량은 18만톤(1992년 기준)이며, 이 중 12%에 해당되는 2.2만톤이 중국으로부터 장거리 이동된 것으로 추정되고 있다(Zhang and Iwasaka, 1999; 김용표, 1999). 에어로졸에서 해양 입자와 토양입자의 양을 뺀 나머지 성분은 주로 인위적 요인에 의해 발생되며, 인위적 요인에 의해 발생하는 대표적인 대기오염 성분으로는 SO_4^{2-} 과 NO_3^- 를 들 수 있다(Yao et al., 2002). nss-SO_4^{2-} 는 화산 폭발이나 자연발생적 요인에 의해, 또 NO_3^- 는 낙뢰, 녹색식물의 연소 등의 자연발생적 요인에 의해서 대기 중에 존재하기도 하지만 대체적으로 이들 두 성분은 대부분 인위적 요인에 의해 발생되고 있다. SO_4^{2-} 와 NO_3^- 발생의 인위적 요인으로는 주로 자동차와 난방 연료의 사용에 기인하고 있다. SO_4^{2-} , NO_3^- 는 대부분 기체상 대기오염물질이 입자로 전환되는 과정에서 생성되는 2차 입자이며, 미세 에어로졸 중에 많이 함유되는 것으로 알려져 있다. 도시지역 에어로졸의 경우 미세입자 중 황산염, 질산염 등과 같은 2차 입자의 비율이 전체 입자의 40 ~ 50%를 점유하고 있는 것으로 보고되고 있다(Zhuang et al., 1999). 특히 이들 성분들은 0.1 ~ 1.0 μm 의 미세 에어로졸에 많이 함유되어 있고 이러한 미세 입자들은 시계감소에 직접적인 영향을 줄 뿐만 아니라 물론 호흡 기관을 통과할 수 있기 때문에 적절한 관리가 필요한 것으로 지적되고 있다(김나경 등, 1998). 이러한 성분들은 계절적인 농도 변동 폭이 크며, 봄철의 황사현상, 여름철의 광화학 반응, 겨울철의 고농도 배출 등 기상상태나 지역적 특성에 따라 대기 중의 전환과정에 영향을 많이 받게 된다.

본 연구에서는 고산지역과 1100 고지에서 두 성분의 당량 농도에 따른 연도별 경향성을 비교해 보았으며, 이 결과를 Figure 5 ~ Figure 8에 나타내었다. 먼저 고산의 경우, 2000년을 제외한 최근 5년간 NO_3^- 이온 성분의 추세를 살펴본 결과 0.0019의 기울기 값으로 점차 증가하고 있는 경향을 나타내었고, SO_4^{2-} 성분인 경우는 -0.0037의 값의 기울기로 점차 감소하고 있는 경향을 나타내었다. 1100 고지에서 NO_3^- 성분은 0.00005의 기울기로 거의 일정한 값을 유지하였으나, 이는 황사현상이 가장 심했던

2001년 3~4월의 시료가 누락되었기 때문에 연평균농도가 전체적으로 낮게 나타난 것으로 추정된다. 또한 1100 고지에서 SO_4^{2-} 인 경우를 살펴보면, 1997년부터 2002년도에 걸친 경향은 -0.0062의 기울기 값으로 고산에서와 유사하게 미소한 감소세를 나타내었다. 이 결과로 고산과 1100 고지에서 두 성분의 연도별 농도 변화는 SO_4^{2-} 성분인 경우 미소하나 감소하는 경향을 보였고, 이에 반해 NO_3^- 인 경우 연도별로 점차 증가하는 경향을 보이는 것으로 확인되었다(박민하 등, 2002).



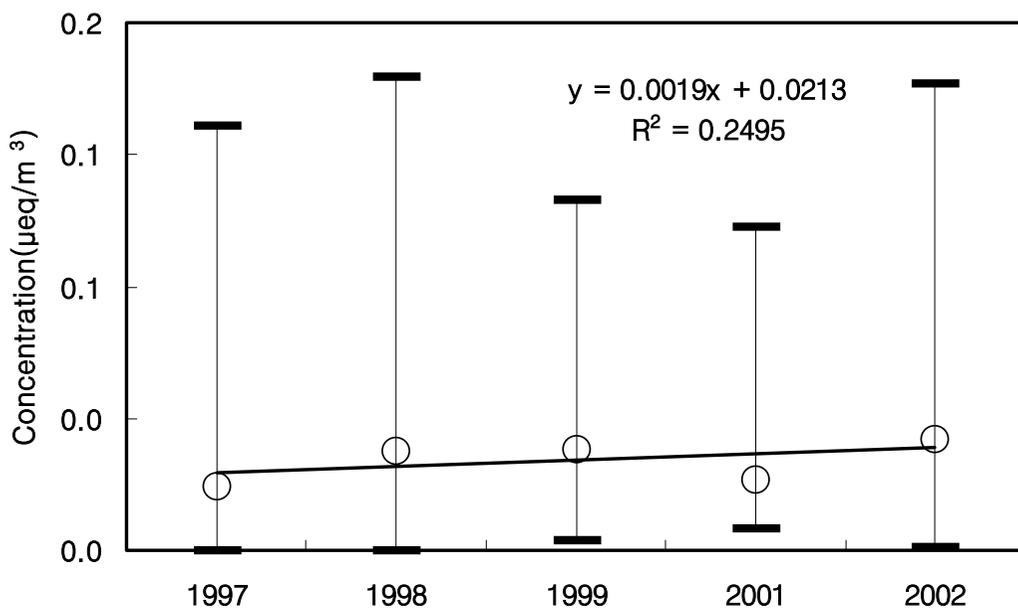


Figure 5. Trend of annual mean concentrations of NO₃⁻ at Gosan Site.

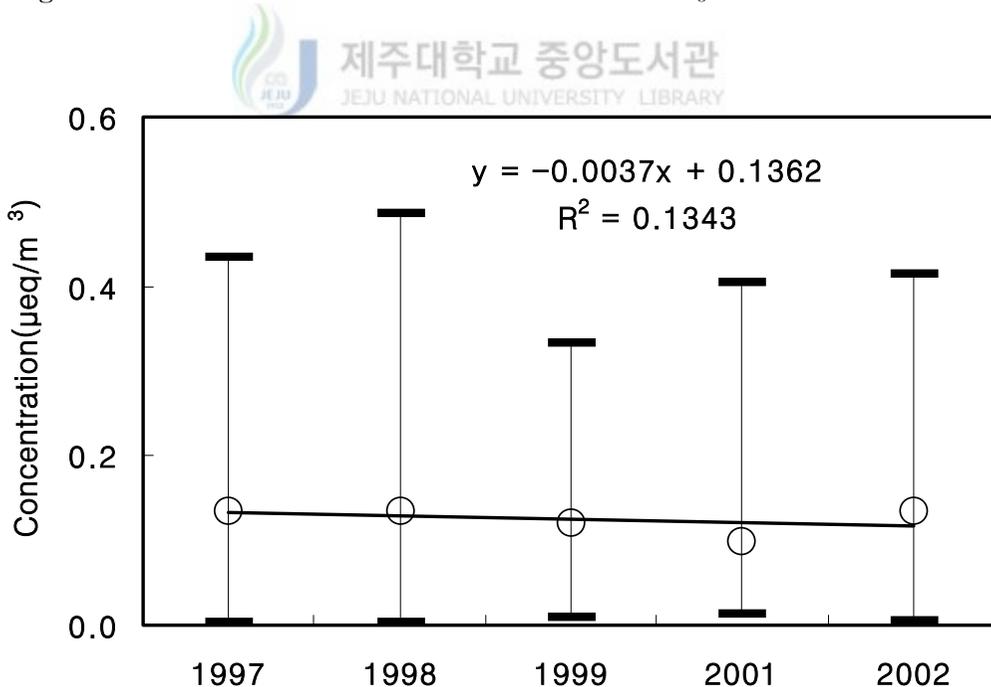


Figure 6. Trend of annual mean concentrations of SO₄²⁻ at Gosan Site.

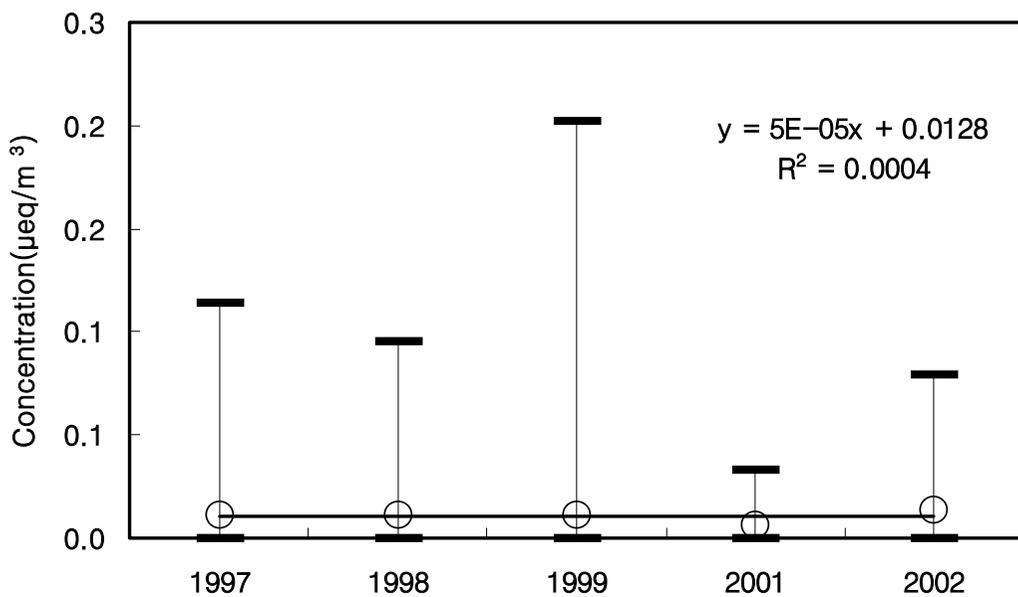


Figure 7. Trend of annual mean concentrations of NO₃⁻ at 1100 site of Mt. Halla.

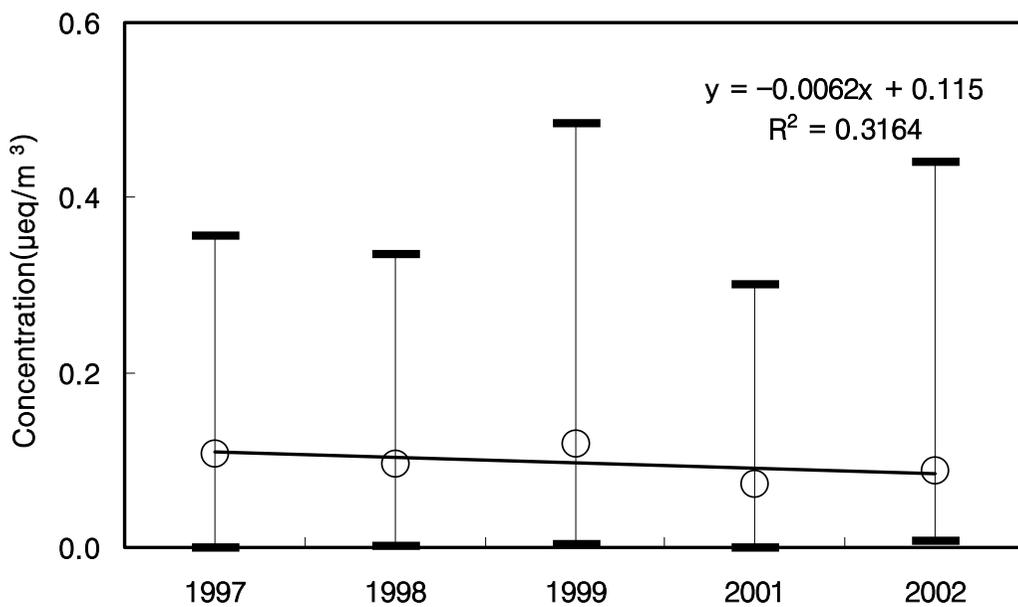


Figure 8. Trend of annual mean concentrations of SO₄²⁻ at 1100 Site of Mt. Halla.

3) 금속 성분 분석결과

금속 물질은 수중에서 이온, 대기 중에서 증기, 암석과 흙 속에서는 염, 광물 등의 형태로 존재할 수 있고, 유기 또는 무기물질과 결합하거나 대기 중에서 입자에 부착될 수 있다. 또한 유기오염물질이 지방 조직에 주로 축적되는데 반하여 중금속은 단백질 조직이나 뼈에 축적된다. 인체에서 허용치 이상으로 흡수될 때 중금속은 각각 특정 부위에 축적되는 경향이 있는데, 그 예로 카드뮴은 콩팥에, 수은은 간에, 납은 뼈에 축적되어 만성적 독성을 일으키게 된다(김영성, 2003). 이러한 중금속은 대기 중에 부유하고 있는 에어로졸 입자들에 흡착되어 성분, 조성이나 입자 크기에 따라 인간의 건강이나 식물의 생육에도 크게 영향을 미치고 있다. 또 에어로졸은 발생기원에 따라 입자의 크기, 밀도, 흡습성 등의 물리적 특성이 다르고, 중금속과 수용성 성분의 함량 등 화학적 조성이 다른 특성을 보인다. 일반적으로 입자상 대기오염물질 중의 중금속 성분들은 이온성분, 탄소성분과 함께 주요한 구성성분이다. 특히, 주로 인위적 오염물질에서 배출되는 미세입자 중 금속성분들은 체류시간이 길고, 인체 내에 흡입되어 큰 피해를 주는 것으로 알려져 있다. 또 입자상 물질 중 금속성분은 입자상 물질의 발생원을 추정하고 각 발생원별 기여율을 산정하는데 있어서 중요한 정보를 제공하게 된다. 대기 중의 부유분진은 토양의 먼지 및 해염 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 유럽에서는 1990년대 Pb의 인위적 배출이 60% 감소하였으나 1995년 이후는 감소 추세가 둔화되고 있다. 1990년대 Cd 배출은 40% 감소하였으며 1999년 현재 자연적 배출 비중은 Cd 58%, Pb 36%로 추정하고 있다. 자동차에 의해 배출되는 Pb의 배출분포가 비교적 균일한데 비해, Cd은 비금속 야금 및 연료사용 지역에서 많은 배출형태를 보이고 있다(김영성, 2003).

본 연구에서는 고산과 1100 고지에서 채취한 총 249개 시료에 대해 에어로졸에 포함된 19종의 금속 성분들과 황 성분을 분석하였고, 그 결과를 Table 7와 Figure 9 ~ Figure 14에 나타내었다. 우선 이들 각 성분들의 4년간 평균농도를 비교해 본 결과 고산에서 $S > Na > Al > Ca > Fe > K > Mg > Zn > Pb > Ti > Mn > V > Ba > Sr >$

Cu > Ni > Cr > Mo > Cd > Co의 순으로 주로 인위적 발생기원을 나타내는 S 농도가 가장 높고, 다음으로 Na, Al, Ca, Fe, K, Mg 등의 해염 및 토양 성분들이 대체적으로 높은 농도를 보였다. 연도별로 각 성분들의 농도를 비교해 본 결과 고산에서 1998년에는 S > Na > Al > Ca > Fe > K > Mg > Zn > Ti > Pb > Mn > V > Ba > Sr > Cu > Ni > Cr > Mo > Co > Cd, 1999년에는 S > Na > Ca > Al > Fe > Mg > K > Pb > Zn > Ti > Mn > V > Ba > Sr > Cu > Cr > Ni > Mo > Cd > Co, 2001년에는 S > Na > Al > Ca > K > Fe > Mg > Zn > Pb > Ti > Mn > V > Cu > Ni > Ba > Sr > Cr > Cd > Mo > Co, 2002년에는 S > Na > Al > Ca > Fe > K > Mg > Zn > Pb > Ti > Mn > Ba > V > Ni > Sr > Cu > Cr > Cd, Co > Mo의 순으로 높은 농도를 보였다.

또한 1100 고지에서 연도별 각 성분들의 농도를 분석한 결과, 평균 농도는 S > Ca > Al > Mg > K > Fe > Na > Zn > Pb > Ti > Mn > Ni > Cu > V > Ba > Sr > Cr > Mo > Co > Cd를 보였고, 연도별 농도는 1998년에 S > Ca > Mg > Al > Na > K > Fe > Zn > Pb > Cu > Ti > Ni > V > Sr > Ba > Mn > Cr > Mo > Co > Cd, 1999년에 S > Ca > K > Na > Mg > Al > Fe > Zn > Pb > Ni > Ti > V > Mn > Ba > Cu > Sr > Cr > Mo > Co > Cd, 2001년에는 S > K > Mg > Ca > Al > Fe > Na > Pb > Zn > Mn > Ti > Ni > Sr > Ba > Cu > Cr > V > Co > Mo > Cd, 2002년에는 S > Ca > Al > Fe > Mg > K > Na > Pb > Zn > Mn > Ti > Ni > Ba > Sr > Cr > V > Cu > Mo > Co > Cd의 농도를 나타내었다.

이 중 비교적 농도가 높은 S와 Al, Ca, Fe, Na, Mg 농도를 비교해 보면, S는 고산에서 1998년, 1999년, 2001년, 2002년에 각각 $1.96 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $1.71 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $1.39 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $2.33 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 2002년에 가장 높은 농도를 보였다. 또 토양의 지표성분 중 Al은 1998년, 1999년, 2001년, 2002년에 각각 $1.12 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.42 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.37 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $1.03 \mu\text{g}/\text{m}^3$, Ca은 각각 $0.94 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.24 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.95 \mu\text{g}/\text{m}^3$, Fe은 각각 $0.79 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.38 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.21 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.78 \mu\text{g}/\text{m}^3$, K은 각각 $0.62 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.25 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.22 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.57 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로, 대체적으로 이들 성분들이 1998년과 2002년에 높은 농도를 보였고 1999년과 2001년에 비교적 낮은 농도를 나타내었다. 2001년에는 측정기간 중에 황사가 많이 발생했음에도 농도가 낮게 나타났는데 이는 수용성 성분과 마찬가지로 황사발생시기인 봄철 3~4월에 시료의 채취가 이루어지지 않아 2001년 연평균농도가 크게 낮아졌을 것이라 여겨진다. 해염의 주요 성분

인 Na과 Mg의 농도는 1998년, 1999년, 2001년, 2002년에 Na가 각각 $1.35 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $1.23 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $1.24 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $1.65 \mu\text{g}/\text{m}^3$, Mg는 각각 $0.49 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.32 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.20 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 1998년과 2002년이 높고 1999년과 2001년에 상대적으로 낮게 나타났다. 반면 1100 고지에서는 S의 연평균농도가 1998년, 1999년, 2001년, 2002년에 각각 $1.21 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.95 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.68 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $1.16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로, 2002년에 가장 높은 농도를 보였던 고산과는 다른 경향으로 1999년에 가장 높은 농도를 보였다. 토양지표성분 중에서 Al은 1998년, 1999년, 2001년, 2002년에 $0.58 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.22 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.56 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 보였고 연평균농도는 $0.36 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 나타내었다. Ca는 1998년, 1999년, 2001년, 2002년에 각각 $0.88 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.34 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.15 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.62 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 보였고, 연평균농도는 $0.50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 값을 나타내었다. Fe는 1998년, 1999년, 2001년, 2002년에 각각 $0.35 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.19 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.54 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 보였고, 연평균농도는 $0.29 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 나타내었다. K는 $0.38 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.28 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.28 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 보였고, 연평균농도는 $0.31 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 나타내었다. 1100 고지에서도 토양성분들의 농도는 고산지역과 비슷한 경향을 보이며 1998년에 가장 높은 농도 경향을 보였고, 2002년에도 1998년과 1999년에 비해 상대적으로 높은 농도를 보였다. 또한 해염의 주요 성분인 Na과 Mg의 농도는 1100고지에서 1998년, 1999년, 2001년, 2002년에 Na가 각각 $0.41 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.25 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.07 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.28 \mu\text{g}/\text{m}^3$, Mg는 각각 $0.65 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.23 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.16 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.38 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 1998년에 가장 높은 농도를 나타내었고 2001년에 가장 낮은 농도를 나타내었다.

Table 7. Annual mean concentrations of sulfur and metal components in 1998 ~ 2002.

Component	Gosan Site					1100 Site					
	1998	1999	2001	2002	Mean	1998	1999	2001	2002	Mean	
$\mu\text{g}/\text{m}^3$	Al	1.12	0.42	0.37	1.03	0.74	0.58	0.22	0.10	0.56	0.36
	Fe	0.79	0.37	0.21	0.78	0.54	0.35	0.19	0.10	0.54	0.29
	Ca	0.94	0.50	0.24	0.95	0.66	0.88	0.34	0.15	0.62	0.50
	Na	1.35	1.23	1.24	1.65	1.37	0.41	0.25	0.07	0.28	0.25
	K	0.62	0.25	0.22	0.57	0.42	0.38	0.28	0.28	0.30	0.31
	Mg	0.49	0.32	0.20	0.50	0.38	0.65	0.23	0.16	0.38	0.35
	S	1.96	1.71	1.38	2.33	1.85	1.21	0.95	0.68	1.16	1.00
ng/m^3	Ba	7.5	4.4	2.5	8.5	5.7	7.0	5.2	1.9	6.5	5.1
	Cd	0.7	0.6	0.7	1.0	0.7	0.4	0.6	0.9	0.9	0.7
	Co	0.8	0.6	0.3	1.0	0.6	1.1	0.8	1.0	1.2	1.0
	Cr	2.4	3.0	1.5	3.4	2.6	2.6	1.7	1.5	3.2	2.3
	Cu	3.5	3.4	2.9	4.7	3.6	18.4	3.8	1.6	2.4	6.5
	Mn	24.4	15.7	9.8	28.9	19.7	5.9	6.6	5.8	21.2	9.9
	Mo	1.2	1.0	0.6	0.8	0.9	2.4	1.4	1.0	1.5	1.6
	Ni	3.4	2.7	2.6	5.2	3.5	15.9	12.9	3.0	6.6	9.6
	Pb	37.7	42.2	22.8	47.1	37.4	20.3	28.9	28.4	47.1	31.2
	Sr	6.2	3.4	2.4	5.1	4.3	7.2	3.1	2.8	6.3	4.8
	Ti	40.0	33.0	15.2	36.0	31.1	16.6	11.2	5.6	19.3	13.2
	V	8.9	7.5	4.1	7.7	7.0	10.5	10.5	1.3	3.1	6.3
	Zn	46.9	34.9	29.4	57.2	42.1	54.8	35.3	26.3	30.6	36.8

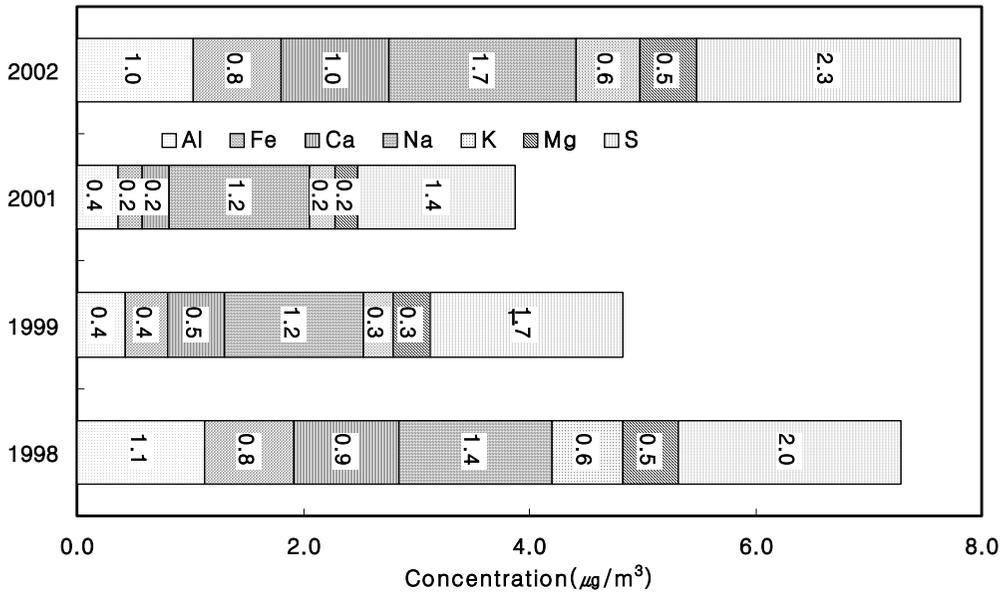


Figure 9. Comparison of annual mean concentrations of sulfur and metal components at Gosan Site in 1998 ~ 2002.

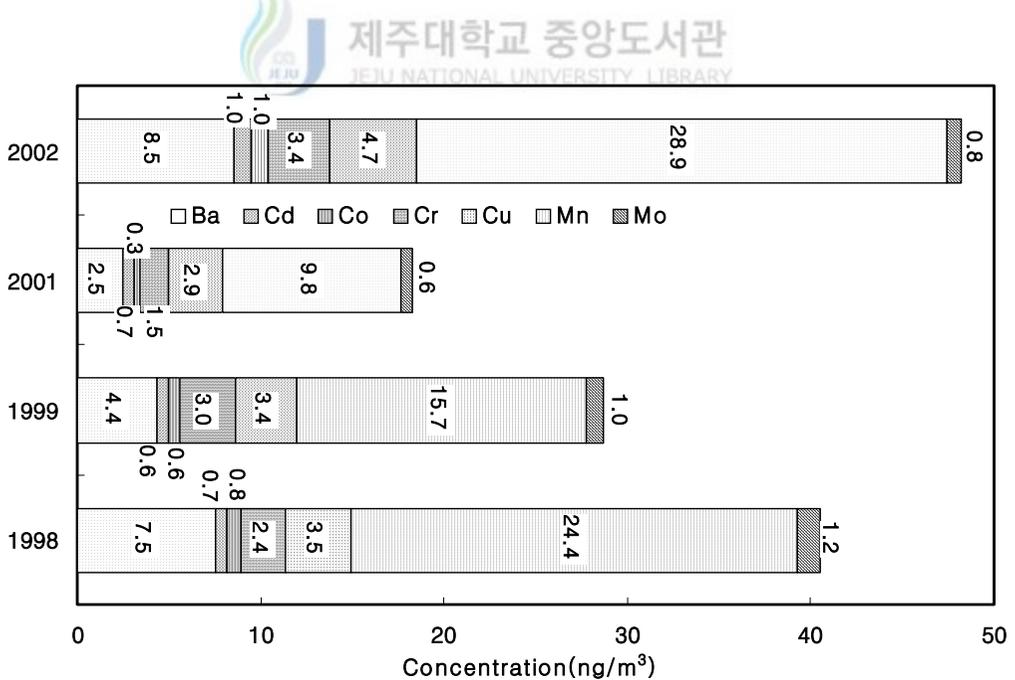


Figure 10. Comparison of annual mean concentrations of metal components at Gosan Site in 1998 ~ 2002.

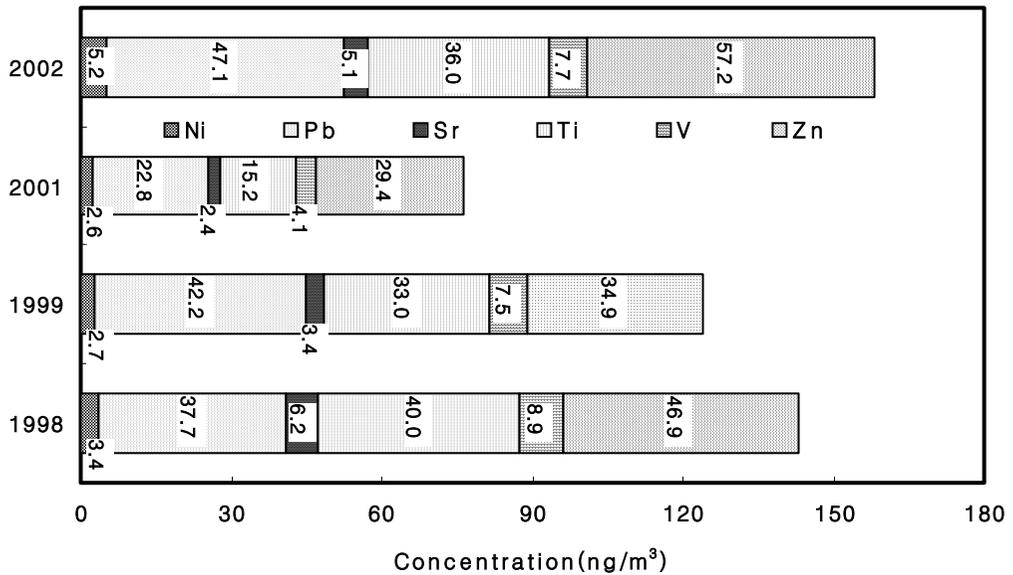


Figure 11. Comparison of annual mean concentrations of metal components at Gosan Site in 1998 ~ 2002.

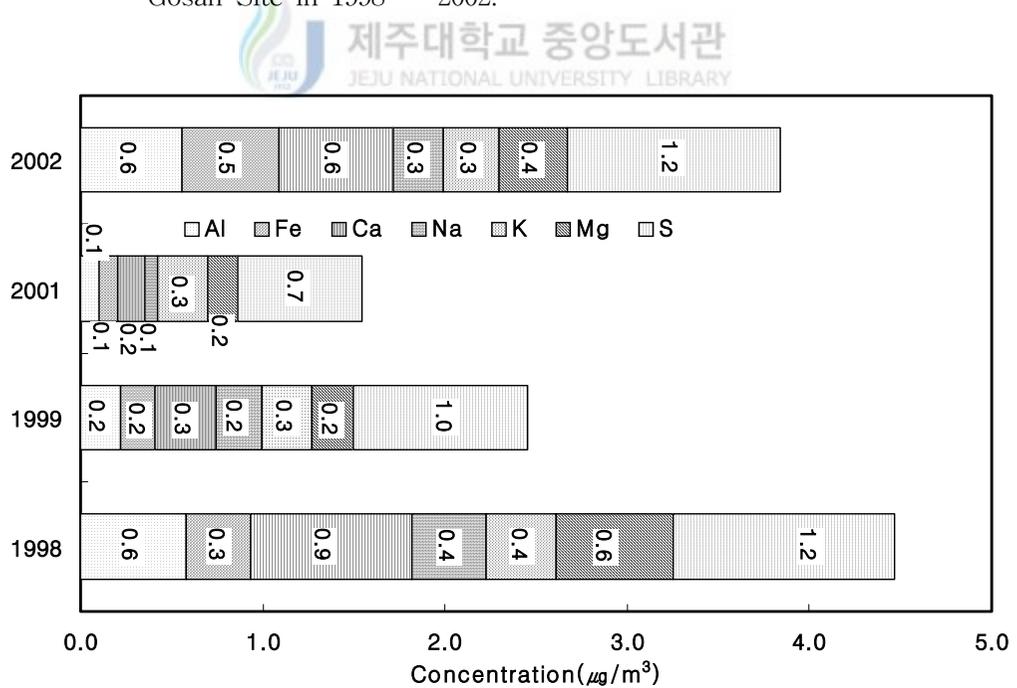


Figure 12. Comparison of annual mean concentrations of sulfur and metal components at 1100 Site of Mt. Halla in 1998 ~ 2002.

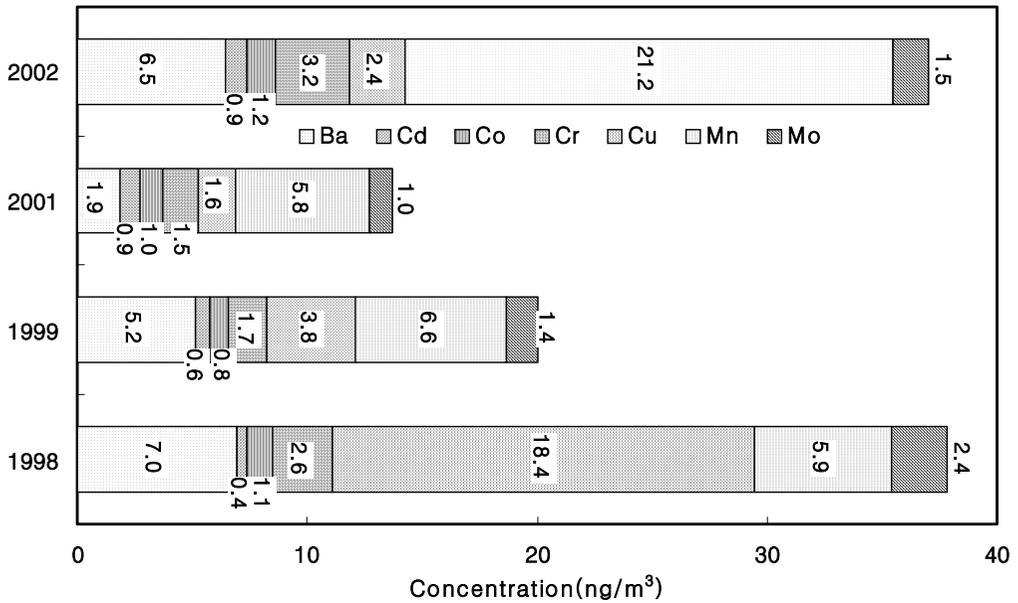


Figure 13. Comparison of annual mean concentrations of metal components at 1100 Site of Mt. Halla in 1998 ~ 2002.

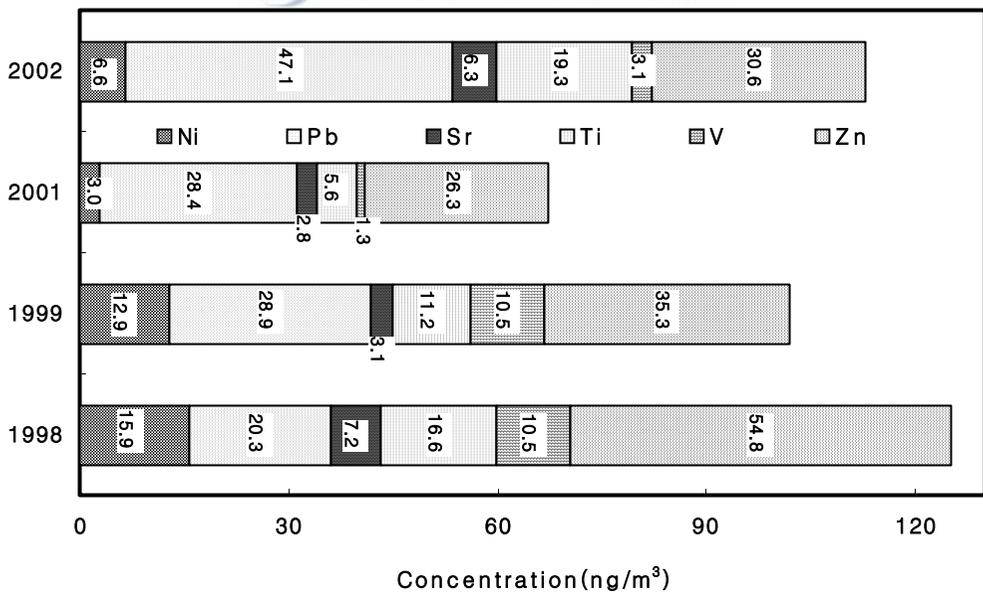
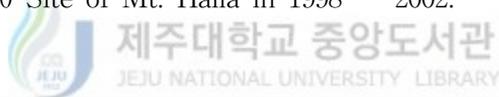


Figure 14. Comparison of annual mean concentrations of metal components at 1100 Site of Mt. Halla in 1998 ~ 2002.

3. 계절별 농도 비교

1) 수용성 성분의 계절별 농도 비교

고산지역과 1100 고지 대기 에어로졸 성분의 계절별 특성을 알아보기 위해 수용성 성분의 농도를 계절별로 비교하여 그 결과를 Table 8 ~ Table 10과 Figure 15 ~ Figure 18에 수록하였다(Hu et al., 2002). 두 측정소에서 우선 양이온 성분 중 가장 많은 차이를 보이는 성분은 Na^+ 성분으로 각 계절별 비율은 4.3배 ~ 9.3배의 차이를 나타내었다. 또한 계절별 수용성 성분들을 살펴보면 nss-Ca^{2+} 을 제외한 대부분의 성분들이 1100 고지에서 보다 고산에서 비교적 높은 농도 값을 나타내었다. Na^+ 농도는 가을과 겨울철에 평균농도가 고산에서는 $2.24 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $1.98 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 봄과 여름에 비해 높은 값을 보였다. 이에 반해 해염의 영향을 덜 받는 1100 고지에서는 가장 낮은 농도를 보이는 여름을 제외한 다른 계절에서는 비슷한 농도를 나타내었다. NH_4^+ 의 농도는 봄, 여름, 가을, 겨울에 고산이 각각 $1.66 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $1.18 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $1.37 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $1.29 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 봄철에 가장 높은 농도를 보였으며, 1100 고지에서 NH_4^+ 의 농도는 각각 $1.36 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $1.25 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $1.11 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.94 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 봄철에 가장 높은 농도를 나타내었다. 일반적으로 NH_4^+ 성분은 동물의 배설물, 비료, 식물의 부식 등에 의해 주로 배출되며 이 중 약 80% 정도가 동물의 배설물에 의해 발생하는 것으로 알려져 있다. 또 봄철에는 비료의 사용으로 여름에는 동물의 배설물이나 식물의 부패가 높은 기온의 영향으로 활발히 이루어지면서 NH_3 의 농도가 상승하는 것으로 알려져 있다(강창희 등, 2003). nss-Ca^{2+} 의 농도는 봄, 여름, 가을, 겨울철에 고산에서는 각각 $0.68 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.13 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.43 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.39 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 보였고 1100 고지에서는 $0.76 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.12 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.29 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.28 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 고산과 1100 고지에서 모두 봄철에 높은 농도를 보이며 여름철에 가장 낮은 농도를 나타내었다. 황사의 영향에 기인하는 것으로 보이는 토양의 지표 성분인 nss-Ca^{2+} 이 황사의 영향을 크게 받는 봄철에 큰 농도 증가를 보였다. 이와 같이 봄철 nss-Ca^{2+} 농도의 증가는 제주 지역의 대기질이 중국의 영향을 크게 받고 있음을 의미하며, 봄철에 중국에서 발생한 황사가 다량으로 제주 지역 대기 부유분진에 유입되고 있음을 잘 뒷받침해 주고 있다(Hayami et al., 1998; Gregory et al., 1986). K^+ 의 경우 봄, 여름, 가을, 겨울철에 고산에서의 농도는 $0.47 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.25 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.47 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.38 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 보였고, 1100 고지에서 농도는 $0.32 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.18 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.27 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.21 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 보였다. Mg^{2+} 인 경우에 각각 고산

이 $0.26 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.20 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.28 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 보였고 1100 고지가 $0.10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.04 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.08 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.07 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 나타내었다. 고산에서와 1100 고지에서 K^+ 성분과 Mg^{2+} 모두 봄에 높은 농도를 나타내었고 여름에 낮은 농도를 나타내었으며 Mg^{2+} 의 고산지역 농도는 가을과 겨울에도 높은 값을 보였다.

본 연구에서 음이온 성분 중 nss-SO_4^{2-} 는 고산에서 봄, 여름, 가을, 겨울철에 각각 $7.11 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $5.16 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $6.02 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $5.58 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 높게 나타났으며, 1100 고지에서는 봄, 여름, 가을, 겨울철에 각각 $5.86 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $4.23 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $4.31 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $3.74 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 1100 고지역시 고산지역처럼 봄철에 농도가 가장 높게 나타내었다. nss-SO_4^{2-} 와 같이 인위적 오염 기원인 NO_3^- 의 계절별 농도는 고산에서 각각 $2.17 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $1.17 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $1.55 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $1.67 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 보였고, 1100 고지에서는 각각 $1.50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.21 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.53 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.66 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 나타내었다. 인위적인 성분인 NO_3^- 도 봄철에 가장 높은 농도를 보이는 것으로 보아 봄철에 발생빈도가 많은 황사의 영향을 받았을 것이라 추정된다. nss-SO_4^{2-} 와 NO_3^- 의 농도 증가와 더불어 Ca^{2+} 성분도 다른 계절에 비해 봄에 크게 증가하는 것으로 보아 황사현상이 나타났을 때 황사에 의한 영향으로 이들 성분들이 동시에 증가하는 것으로 판단된다. 에어로졸의 수용성 성분 중 주요 산성 음이온은 nss-SO_4^{2-} 와 NO_3^- 이고, 염기 성분은 NH_3 와 CaCO_3 인 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 nss-SO_4^{2-} 와 NH_4^+ 이 비슷한 농도변화를 보이고 있는데, 이는 두 성분이 서로 중화반응을 일으키기 때문이라고 판단된다.

2) 금속 성분의 계절별 농도 비교

에어로졸의 구성 성분 중에서 황 성분과 19종의 주요 금속 성분들에 대한 계절별 평균농도를 Table 11 ~ Table 16와 Figure 19 ~ Figure 30에 수록하였다. 이들의 조성을 계절별로 비교해 본 결과 농도는 봄철에 고산에서 $\text{S} > \text{Na} > \text{Al} > \text{Ca} > \text{Fe} > \text{K} > \text{Mg} > \text{Zn} > \text{Ti} > \text{Pb} > \text{Mn} > \text{V} > \text{Ba} > \text{Sr} > \text{Cu} > \text{Ni} > \text{Cr} > \text{Mo} > \text{Co} > \text{Cd}$, 여름에 $\text{S} > \text{Na} > \text{Al} > \text{K} > \text{Ca} > \text{Fe} > \text{Mg} > \text{Zn} > \text{Pb} > \text{Ti} > \text{Mn} > \text{V} > \text{Ni} > \text{Cu} > \text{Ba} > \text{Cr} > \text{Sr} > \text{Cd} > \text{Mo} > \text{Co}$, 가을에 $\text{S} > \text{Na} > \text{Al} > \text{Ca} > \text{Fe} > \text{K} > \text{Mg} > \text{Zn} > \text{Pb} > \text{Ti} > \text{Mn} > \text{V} > \text{Ba} > \text{Cu} > \text{Sr} > \text{Ni} > \text{Cr} > \text{Mo} > \text{Cd} > \text{Co}$, 그리고 겨울에 $\text{S} > \text{Na} > \text{Ca} > \text{K} > \text{Al} > \text{Mg} > \text{Fe} > \text{Pb} > \text{Zn} > \text{Ti} > \text{Mn} > \text{Ba} > \text{Cu} > \text{Ni} > \text{Sr} > \text{V} > \text{Cr} > \text{Cd} > \text{Mo} > \text{Co}$ 의 순으로 나타났고, 1100 고지에서 금속성분의 계절별 농도는 봄

철에 S > Ca > Al > Mg > Fe > Na > K > Zn > Pb > Ti > Ni > Mn > V > Cu > Ba > Sr > Cr > Mo > Co > Cd, 여름에 S > K > Mg > Ca > Al > Fe > Na > Zn > Pb > Ti > Mn > Ni > Sr > Cr, Ba > Cu > V > Mo > Cd > Co, 가을에 S > K > Ca > Al > Fe > Mg > Na > Zn > Pb > Ti > Mn > V > Ba > Cu > Sr > Ni > Cr > Mo > Cd > Co, 그리고 겨울에 S > K > Ca > Mg > Al > Fe > Na > Pb > Zn > Mn > Ti > Ni > Sr > Ba > Cr > Cu > V > Mo > Cr > Cu > V > Mo > Co > Cr > Cu > V > Mo > Co > Cd를 나타내었다. 고산과 1100 고지 모두 계절별로 S이 가장 높은 농도를 보였으며 Na, Al, Ca, Fe, K, Mg 성분이 비교적 높은 농도를 나타내었다. 이들 20종의 성분들 중에서는 황 성분이 전 계절에 걸쳐 고산과 1100 고지에서 각각 1588.0 ~ 2070.1 ng/m³, 734.2 ~ 1217.3 ng/m³ 범위로 가장 높은 농도를 보였다. 이를 계절별로 보면 고산이 봄, 여름, 가을, 겨울철 평균농도가 각각 2070.1 ng/m³, 1593.6 ng/m³, 1588.0 ng/m³, 1837.2 ng/m³로 봄철이 가장 높고 여름과 가을에 가장 낮은 농도를 보이고 있다. 1100고지의 봄, 여름, 가을, 겨울철 평균농도는 각각 1217.3 ng/m³, 843.1 ng/m³, 828.5 ng/m³, 734.2 ng/m³로 대체적으로 고산과 1100 고지 모두 봄에 가장 높은 농도를 보이고 있는 반면, 고산에서는 가을에 가장 낮은 농도를 보였고, 1100 고지에서는 겨울철에 가장 낮은 농도를 보이고 있는데, 1100 고지의 경우 황 성분의 시료수가 봄, 여름, 가을, 겨울철에 각각 111개, 66개, 55개, 37개로 겨울철 시료수가 적게 분석되어 겨울철 1100 고지 Data는 타 계절에 비해 Data의 대표성이 결여된다고 판단된다. 일반적으로 모든 성분들이 봄철에 가장 높고, 여름철에 가장 낮은 경향을 보이고 있으나 S의 경우 조금 다른 결과를 나타내고 있다. 이러한 이유에 대해서는 시료 채취시의 국지적인 영향, 대기의 이동, 기상 조건 등 여러 인자들을 종합적으로 검토해야 좀 더 확실한 원인을 규명할 수 있을 것으로 보인다. 토양의 지표 성분인 Al은 고산에서 봄, 여름, 가을, 겨울에 평균농도가 각각 1093.6 ng/m³, 383.1 ng/m³, 509.4 ng/m³, 350.6 ng/m³로 봄철에 가장 높은 값을 보였으며, 다른 계절에 비해 봄철에 2.1~3.1배 정도 더 큰 농도를 나타내었다. 다른 Ca, Fe, K 등의 토양 기원의 성분들 역시 봄에 가장 높은 농도를 보였다. 1100고지에서는 Al의 계절별 평균농도가 각각 561.7 ng/m³, 89.7 ng/m³, 291.3 ng/m³, 163.5 ng/m³로 봄철에 가장 높은 값을 보였으며, 다른 계절에 비해 1.9 ~ 6.2배로 고산과 달리 계절별 편차가 크게 나타났다. Ca의 경우 고산에서 봄, 여름, 가을, 겨울의 평균농도가 각각 1004.9 ng/m³, 178.0 ng/m³, 470.5 ng/m³, 416.5 ng/m³로 여름

에 비해 붐철의 농도가 5.6배 더 높은 것으로 나타나 계절별 편차가 가장 큰 것으로 조사되었다. 1100 고지에서는 $763.8\text{ng}/\text{m}^3$, $155.5\text{ng}/\text{m}^3$, $329.8\text{ng}/\text{m}^3$, $251.1\text{ng}/\text{m}^3$ 로 고산과 같은 경향을 나타냈다. 이들 성분들에 비해 비교적 농도가 낮은 금속들 중 토양 기원의 Ti은 고산에서 봄, 여름, 가을, 겨울의 평균농도가 각각 $43.0\text{ng}/\text{m}^3$, $13.8\text{ng}/\text{m}^3$, $24.8\text{ng}/\text{m}^3$, $21.5\text{ng}/\text{m}^3$ 로 붐철에 가장 높고 여름철에 가장 낮은 농도를 나타내었다. 1100 고지에서 $19.7\text{ng}/\text{m}^3$, $5.5\text{ng}/\text{m}^3$, $9.9\text{ng}/\text{m}^3$, $7.1\text{ng}/\text{m}^3$ 로 역시 고산과 동일한 경향을 나타내었다. 인위적 기원인 성분들의 농도를 계절별로 비교해 보면 고산에서 Pb는 봄, 여름, 가을, 겨울에 각각 $40.8\text{ng}/\text{m}^3$, $20.6\text{ng}/\text{m}^3$, $37.6\text{ng}/\text{m}^3$, $46.6\text{ng}/\text{m}^3$ 로 나타났고, Zn 농도는 봄, 여름, 가을, 겨울에 각각 $47.2\text{ng}/\text{m}^3$, $30.2\text{ng}/\text{m}^3$, $39.0\text{ng}/\text{m}^3$, $46.1\text{ng}/\text{m}^3$ 로 나타났다. 1100 고지에서 Pb는 봄, 여름, 가을, 겨울에 각각 $30.6\text{ng}/\text{m}^3$, $22.6\text{ng}/\text{m}^3$, $34.1\text{ng}/\text{m}^3$, $44.8\text{ng}/\text{m}^3$ 로 나타났고, Zn 농도는 봄, 여름, 가을, 겨울에 각각 $44.3\text{ng}/\text{m}^3$, $27.3\text{ng}/\text{m}^3$, $30.9\text{ng}/\text{m}^3$, $26.8\text{ng}/\text{m}^3$ 로 나타났다. V은 고산에서 봄, 여름, 가을, 겨울에 각각 $10.2\text{ng}/\text{m}^3$, $4.2\text{ng}/\text{m}^3$, $4.9\text{ng}/\text{m}^3$, $3.4\text{ng}/\text{m}^3$ 로 나타났고 1100 고지에서 봄, 여름, 가을, 겨울에 각각 $11.2\text{ng}/\text{m}^3$, $1.2\text{ng}/\text{m}^3$, $2.0\text{ng}/\text{m}^3$, $1.4\text{ng}/\text{m}^3$ 로 나타나 고산에서는 겨울철에 가장 낮은 농도를 나타낸 V를 제외하고 붐철에 가장 높고 여름철에 가장 낮은 농도를 보였으며, 1100 고지에서는 겨울철에 가장 낮은 농도를 보인 Zn을 제외하고는 고산과 동일하게 붐철이 높고 여름철에 가장 낮은 농도를 나타내었다. 이처럼 인위적 기원의 성분들은 토양 기원의 성분들과는 약간씩 다른 계절별 경향을 보였다. 그러나 대체적으로 붐철에 가장 높은 농도를 나타내고 있고, 이들 성분들 역시 붐철에 높은 농도를 보이는 것으로 보아 서풍을 타고 황사와 함께 중국으로부터 상당량 이동되고 있는 것으로 추정된다.

Table 8. Comparison of seasonal mean concentrations($\mu\text{g}/\text{m}^3$) of water-soluble components at Gosan and 1100 Sites.

Component	Gosan Site				1100 Site			
	spring	summer	fall	winter	spring	summer	fall	winter
NH_4^+	1.66	1.18	1.37	1.29	1.36	1.25	1.11	0.94
Na^+	1.51	1.65	2.24	1.98	0.35	0.18	0.42	0.35
K^+	0.47	0.25	0.47	0.38	0.36	0.18	0.27	0.21
nss- Ca^{2+}	0.68	0.13	0.43	0.39	0.76	0.12	0.29	0.28
Mg^{2+}	0.26	0.20	0.28	0.30	0.12	0.04	0.08	0.07
nss- SO_4^{2-}	7.11	5.16	6.02	5.58	5.86	4.23	4.31	3.74
NO_3^-	2.17	1.17	1.55	1.67	1.50	0.21	0.53	0.66
Cl^-	1.54	1.22	1.87	2.16	0.22	0.05	0.18	0.10

Table 9. Comparison of seasonal mean concentrations($\mu\text{g}/\text{m}^3$) of water-soluble components at Gosan Site.

Season	Statistics	NH_4^+	Na^+	K^+	nss- Ca^{2+}	Mg^{2+}	nss- SO_4^{2-}	NO_3^-	Cl^-
Spring	Mean	1.66	1.51	0.47	0.68	0.26	7.11	2.17	1.54
	Median	1.01	1.20	0.37	0.35	0.22	5.37	1.71	0.72
	Max	5.52	10.39	2.19	6.93	1.40	23.18	8.91	17.17
	Min	BDL	0.08	BDL	BDL	0.01	0.21	0.11	0.05
	S.D.	1.36	1.21	0.40	1.09	0.20	5.05	1.87	2.18
Summer	Mean	1.18	1.65	0.25	0.13	0.20	5.16	1.17	1.22
	Median	0.76	1.28	0.17	0.10	0.18	4.44	0.95	0.55
	Max	5.86	8.85	1.36	0.69	1.18	19.92	6.60	8.85
	Min	0.07	0.01	BDL	BDL	BDL	0.15	BDL	BDL
	S.D.	1.13	1.38	0.23	0.13	0.16	4.06	0.93	1.56
Fall	Mean	1.37	2.24	0.47	0.43	0.28	6.02	1.55	1.87
	Median	1.08	1.83	0.39	0.28	0.24	5.61	1.32	0.83
	Max	7.28	6.40	2.73	4.49	0.79	23.40	7.76	9.83
	Min	0.21	0.36	0.01	BDL	0.02	0.65	BDL	0.04
	S.D.	1.19	1.41	0.36	0.57	0.16	3.98	1.13	2.08
Winter	Mean	1.29	1.98	0.38	0.39	0.30	5.58	1.16	2.16
	Median	1.01	1.58	0.28	0.20	0.24	4.66	1.28	1.26
	Max	3.93	5.84	1.50	3.19	0.93	18.14	6.09	9.81
	Min	0.22	0.36	0.03	BDL	0.06	0.73	0.06	0.05
	S.D.	0.88	1.39	0.34	0.52	0.21	3.85	1.22	2.38

BDL : Below Detection Limit

Table 10. Comparison of seasonal mean concentrations($\mu\text{g}/\text{m}^3$) of water-soluble components at 1100 Site in Mt. Halla.

Season	Statistics	NH_4^+	Na^+	K^+	nss- Ca^{2+}	Mg^{2+}	nss- SO_4^{2-}	NO_3^-	Cl^-
Spring	Mean	1.36	0.35	0.36	0.76	0.12	5.86	1.50	0.22
	Median	1.01	0.24	0.23	0.34	0.09	4.64	0.84	0.10
	Max	5.51	3.07	1.63	12.18	0.80	23.34	15.03	1.75
	Min	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	0.05	BDL	BDL
	S.D.	1.21	0.42	0.38	1.36	0.12	5.13	1.97	0.29
Summer	Mean	1.25	0.18	0.18	0.12	0.04	4.23	0.21	0.05
	Median	1.03	0.13	0.09	0.04	0.03	3.49	0.09	0.03
	Max	6.57	0.98	1.16	1.51	0.15	21.15	4.27	0.50
	Min	0.05	BDL	BDL	BDL	BDL	0.13	BDL	BDL
	S.D.	1.13	0.17	0.25	0.21	0.03	3.68	0.45	0.07
Fall	Mean	1.11	0.42	0.27	0.29	0.08	4.31	0.53	0.18
	Median	0.86	0.29	0.18	0.10	0.06	3.89	0.29	0.05
	Max	5.81	2.11	1.41	5.18	0.36	16.12	3.54	1.84
	Min	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	0.02	BDL	0.01
	S.D.	0.88	0.42	0.27	0.65	0.07	2.90	0.60	0.34
Winter	Mean	0.94	0.35	0.21	0.28	0.07	3.74	0.66	0.10
	Median	0.64	0.24	0.11	0.11	0.05	2.62	0.40	0.05
	Max	3.64	1.91	1.07	2.82	0.29	15.10	5.43	1.00
	Min	0.22	0.01	BDL	BDL	BDL	0.65	BDL	BDL
	S.D.	0.80	0.35	0.24	0.44	0.06	2.98	0.89	0.16

BDL : Below Detection Limit

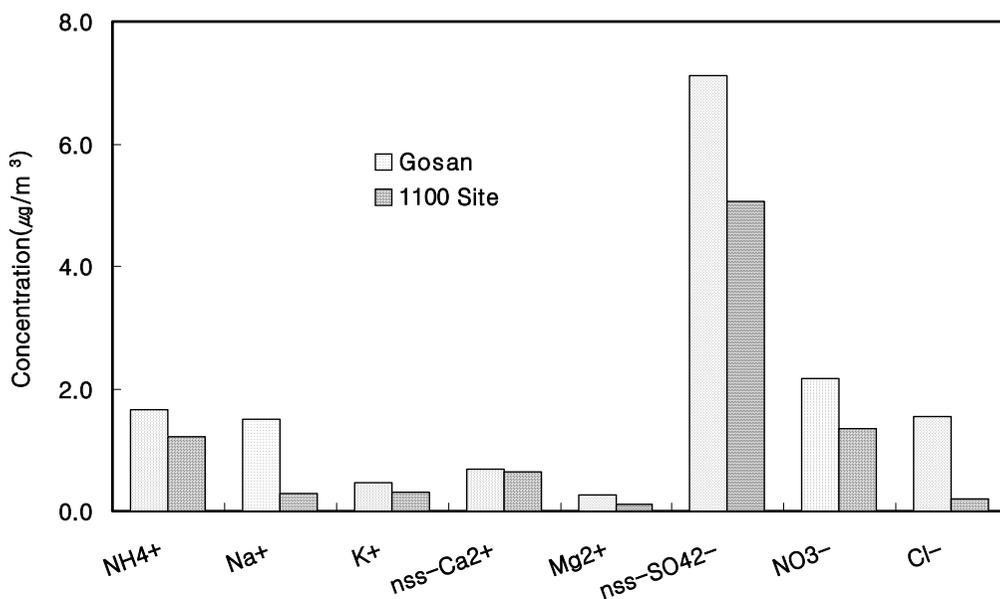


Figure 15. Comparison of water-soluble component concentrations between Gosan and 1100 Sites in spring.

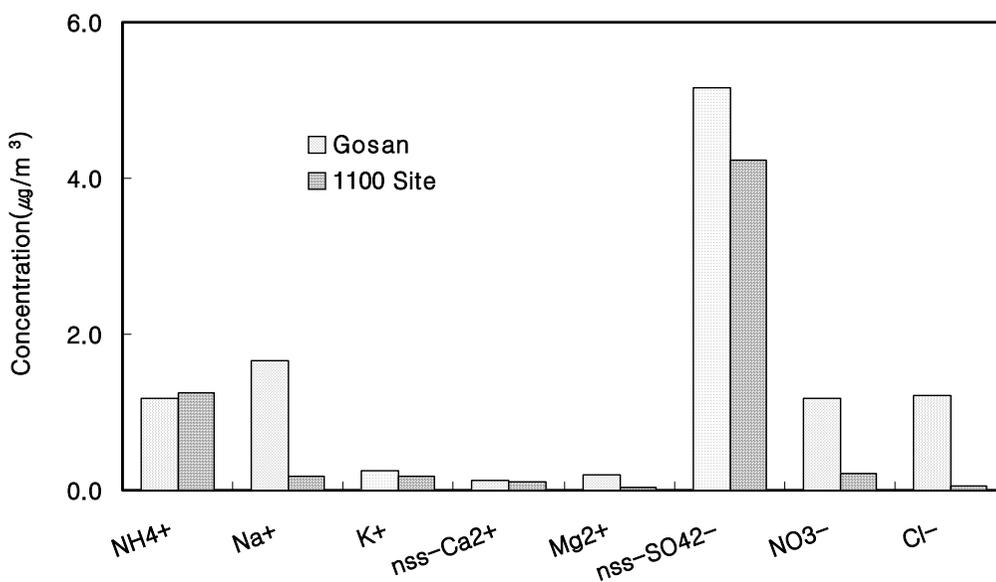


Figure 16. Comparison of water-soluble component concentrations between Gosan and 1100 Sites in summer.

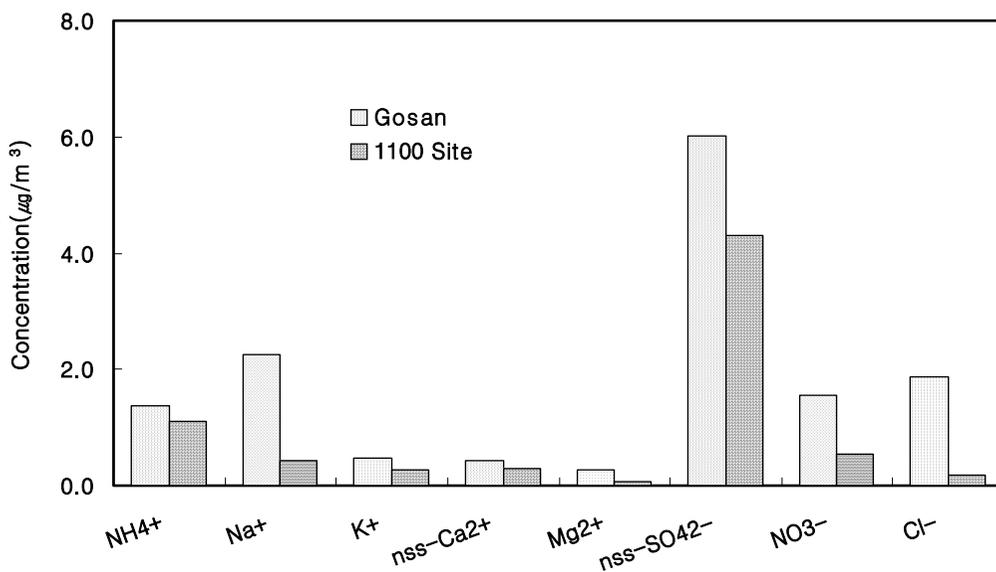


Figure 17. Comparison of water-soluble component concentrations between Gosan and 1100 Sites in fall.

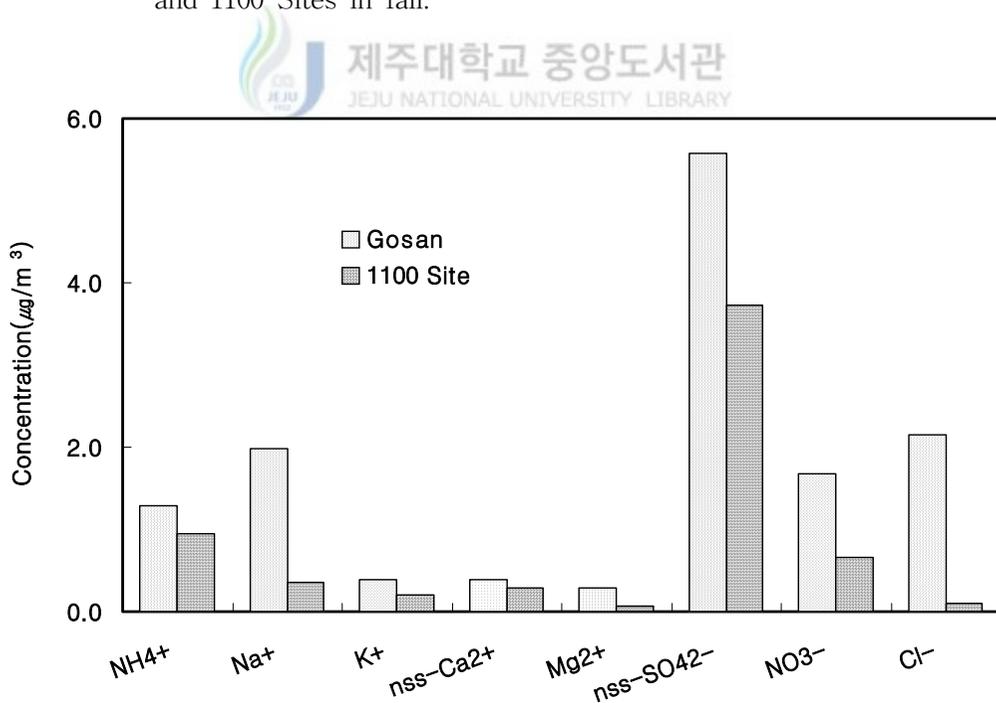


Figure 18. Comparison of water-soluble component concentrations between Gosan and 1100 Sites in winter.

Table 11. Comparison of seasonal mean concentrations(ng/m^3) of metal components at Gosan Site.

Season	Statistics	Al	Fe	Ca	Na	K	Mg	S
Spring	Mean	1093.6	812.7	1004.9	1419.5	534.9	505.3	2071.7
	Median	396.0	336.5	342.6	1180.0	282.5	237.1	1441.5
	Max	13235.7	8168.4	10910.4	5153.2	4780.4	4060.0	11726.6
	Min	BDL	BDL	33.3	BDL	BDL	BDL	17.8
	S.D.	2289.1	1396.1	1892.9	1022.7	801.9	748.7	1711.8
Summer	Mean	383.1	161.8	178.0	993.6	209.0	161.5	1593.6
	Median	285.7	109.9	141.5	889.3	74.4	163.7	1065.8
	Max	1789.6	798.0	848.0	2058.9	1757.1	452.5	5944.5
	Min	29.9	BDL	15.1	107.7	BDL	14.2	129.9
	S.D.	329.4	182.1	163.7	522.0	346.5	91.6	1472.2
Fall	Mean	509.4	394.0	470.5	1263.3	335.7	299.8	1589.6
	Median	381.1	259.0	304.6	1154.3	258.4	228.2	1380.4
	Max	5740.5	5073.7	4498.3	3485.5	1530.3	2034.5	5044.1
	Min	22.8	BDL	BDL	120.4	0.3	12.6	131.0
	S.D.	777.3	692.8	670.4	794.7	283.6	300.3	1036.7
Winter	Mean	350.6	317.6	416.5	1886.3	394.0	349.2	1856.6
	Median	235.7	220.6	308.9	1711.0	316.3	302.9	1544.6
	Max	1567.5	1315.1	2199.3	4252.3	1651.0	961.5	5722.0
	Min	90.2	69.9	38.7	329.4	71.9	70.7	423.3
	S.D.	324.1	271.6	465.9	997.1	349.4	205.6	1144.6

BDL : Below Detection Limit

Table 12. Comparison of seasonal mean concentrations(ng/m^3) of metal components at Gosan Site.

Season	Statistics	Ba	Cd	Co	Cr	Cu	Mn	Mo
Spring	Mean	8.0	0.8	0.8	3.3	4.0	26.6	1.0
	Median	3.4	0.7	0.4	1.8	3.3	12.8	0.8
	Max	73.0	3.3	5.6	26.1	17.5	242.2	3.6
	Min	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL
	S.D.	12.5	0.6	1.0	4.6	3.5	37.3	0.8
Summer	Mean	2.0	0.7	0.3	1.7	2.7	8.4	0.5
	Median	1.4	0.6	0.2	1.5	1.9	5.9	0.4
	Max	8.8	2.2	0.7	4.0	10.2	36.4	2.0
	Min	0.1	BDL	BDL	0.2	0.1	0.9	BDL
	S.D.	2.0	0.4	0.2	0.9	2.4	7.8	0.4
Fall	Mean	4.8	0.6	0.6	2.5	3.7	17.2	1.0
	Median	3.2	0.6	0.5	1.8	3.7	12.6	0.8
	Max	50.2	2.1	2.8	13.9	11.1	164.8	2.8
	Min	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	0.1	0.3
	S.D.	7.0	0.4	0.4	2.5	2.4	23.1	0.6
Winter	Mean	4.3	0.9	0.6	1.8	3.7	15.7	0.8
	Median	3.0	0.7	0.6	1.5	3.3	12.6	0.6
	Max	20.9	3.1	1.4	8.8	9.0	66.9	1.9
	Min	BDL	BDL	0.2	BDL	1.1	2.6	BDL
	S.D.	4.9	0.8	0.3	1.6	2.2	12.9	0.5

BDL : Below Detection Limit

Table 13. Comparison of seasonal mean concentrations(ng/m^3) of metal components at Gosan Site.

Season	Statistics	Ni	Pb	Sr	Ti	V	Zn
Spring	Mean	3.8	40.8	5.7	43.0	10.2	47.2
	Median	3.0	27.4	3.3	21.5	6.3	31.4
	Max	15.4	231.1	37.9	254.4	82.0	259.3
	Min	BDL	BDL	BDL	0.4	0.2	BDL
	S.D.	2.9	46.4	7.2	49.8	12.0	49.1
Summer	Mean	2.8	20.6	1.7	13.8	4.2	30.2
	Median	1.5	7.5	1.6	7.2	4.1	12.8
	Max	13.8	127.7	4.4	70.8	10.8	147.5
	Min	BDL	0.4	BDL	0.7	0.2	BDL
	S.D.	2.9	27.9	1.0	15.9	2.1	36.7
Fall	Mean	3.5	37.6	3.7	24.8	4.9	39.0
	Median	2.9	23.8	3.1	19.1	4.0	33.1
	Max	14.1	145.0	21.5	171.5	18.8	147.6
	Min	BDL	BDL	0.6	0.3	0.7	0.1
	S.D.	2.8	34.9	3.2	26.2	3.0	23.0
Winter	Mean	3.6	46.6	3.5	21.5	3.4	46.1
	Median	3.0	29.4	2.9	12.8	2.8	39.8
	Max	11.2	218.7	13.1	93.2	9.7	166.7
	Min	0.6	5.1	0.5	7.7	1.1	BDL
	S.D.	2.6	48.9	2.8	18.6	2.0	33.8

BDL : Below Detection Limit

Table 14. Comparison of seasonal mean concentrations(ng/m^3) of metal components at 1100 Site of Mt. Halla.

Season	Statistics	Al	Fe	Ca	Na	K	Mg	S
Spring	Mean	561.7	438.9	763.8	402.5	331.1	504.9	1217.3
	Median	178.5	167.1	216.9	167.8	260.9	328.5	893.9
	Max	5827.7	3281.4	6605.0	3020.2	1283.5	1933.5	5654.1
	Min	1.2	2.1	0.6	BDL	3.2	4.8	BDL
	S.D.	916.4	626.2	1209.0	541.6	253.0	432.8	1156.5
Summer	Mean	89.7	88.6	155.5	50.9	183.1	174.2	843.1
	Median	28.9	11.6	49.6	29.0	157.5	65.1	396.1
	Max	870.2	1061.5	1486.3	464.5	673.1	1369.2	7422.2
	Min	0.3	BDL	6.0	1.6	BDL	6.9	19.5
	S.D.	157.7	191.6	298.2	78.3	141.2	283.3	1293.6
Fall	Mean	291.3	276.8	329.8	167.0	362.6	236.3	828.5
	Median	59.5	59.1	105.0	68.3	253.5	138.6	588.7
	Max	9080.8	8070.9	6894.4	3832.8	1226.5	2143.4	3686.3
	Min	1.9	BDL	6.3	3.0	33.5	7.6	11.3
	S.D.	1224.1	1092.9	956.3	519.5	314.7	337.7	819.6
Winter	Mean	163.5	143.7	251.1	101.3	305.0	188.4	734.2
	Median	65.0	30.0	78.4	50.4	147.6	121.1	459.3
	Max	1957.1	2121.7	2716.3	1111.1	1659.6	1097.5	3178.3
	Min	9.4	1.4	9.9	3.9	19.5	17.2	14.9
	S.D.	327.5	353.6	477.9	185.1	351.6	224.1	750.7

BDL : Below Detection Limit

Table 15. Comparison of seasonal mean concentrations(ng/m^3) of metal components at 1100 Site of Mt. Halla.

Season	Statistics	Ba	Cd	Co	Cr	Cu	Mn	Mo
Spring	Mean	7.9	0.6	1.2	2.7	11.0	12.7	2.1
	Median	4.6	0.5	1.0	2.3	6.2	3.3	1.4
	Max	45.2	2.3	4.7	12.6	48.5	122.8	12.5
	Min	0.1	BDL	0.1	0.1	BDL	0.1	BDL
	S.D.	8.8	0.4	0.9	2.2	12.6	23.4	2.3
Summer	Mean	1.9	0.8	0.6	1.9	1.7	4.8	1.0
	Median	1.0	0.7	0.4	1.0	1.3	2.2	0.9
	Max	11.7	2.4	1.7	13.5	8.3	38.8	3.9
	Min	0.1	0.2	BDL	0.1	0.1	BDL	0.1
	S.D.	2.4	0.4	0.5	2.6	1.6	7.3	0.8
Fall	Mean	3.3	0.8	0.8	2.1	1.8	11.0	0.9
	Median	1.2	0.8	0.5	1.4	1.5	4.5	0.8
	Max	62.1	1.7	3.9	13.2	7.6	208.0	2.6
	Min	BDL	BDL	BDL	0.1	0.2	BDL	BDL
	S.D.	8.5	0.4	0.7	2.8	1.3	28.4	0.6
Winter	Mean	2.8	1.0	1.3	2.0	1.7	8.9	1.4
	Median	1.0	0.9	1.5	1.7	1.2	4.4	1.6
	Max	35.4	6.2	3.3	6.0	5.5	77.8	3.4
	Min	0.1	0.2	BDL	0.5	0.3	0.3	0.1
	S.D.	5.9	1.0	0.8	1.4	1.4	14.2	0.9

BDL : Below Detection Limit

Table 16. Comparison of seasonal mean concentrations(ng/m^3) of metal components at 1100 Site of Mt. Halla.

Season	Statistics	Ni	Pb	Sr	Ti	V	Zn
Spring	Mean	15.0	30.6	6.7	19.7	11.2	44.3
	Median	16.1	18.7	3.1	9.8	9.1	37.2
	Max	37.8	171.5	53.6	180.0	47.9	309.7
	Min	0.3	0.2	0.1	BDL	0.1	1.1
	S.D.	8.1	31.0	9.7	28.6	11.6	40.3
Summer	Mean	2.9	22.6	2.8	5.5	1.2	27.3
	Median	2.1	11.7	1.7	2.4	1.0	16.6
	Max	11.6	121.0	29.3	36.4	4.8	126.8
	Min	0.6	BDL	0.3	BDL	0.2	3.1
	S.D.	2.2	25.9	4.3	7.5	0.9	24.6
Fall	Mean	5.3	34.1	3.1	9.9	2.0	30.9
	Median	3.6	23.8	2.1	4.7	1.3	27.5
	Max	19.1	170.3	32.6	172.5	31.8	91.2
	Min	0.3	BDL	BDL	0.4	0.3	4.0
	S.D.	4.6	32.6	4.4	23.6	4.2	19.6
Winter	Mean	4.1	44.8	3.9	7.1	1.4	26.8
	Median	2.7	32.2	2.6	3.0	1.0	15.1
	Max	20.2	260.5	31.6	76.7	9.9	127.2
	Min	1.0	5.9	BDL	0.6	0.2	3.2
	S.D.	3.7	46.2	5.4	12.8	1.6	26.0

BDL : Below Detection Limit

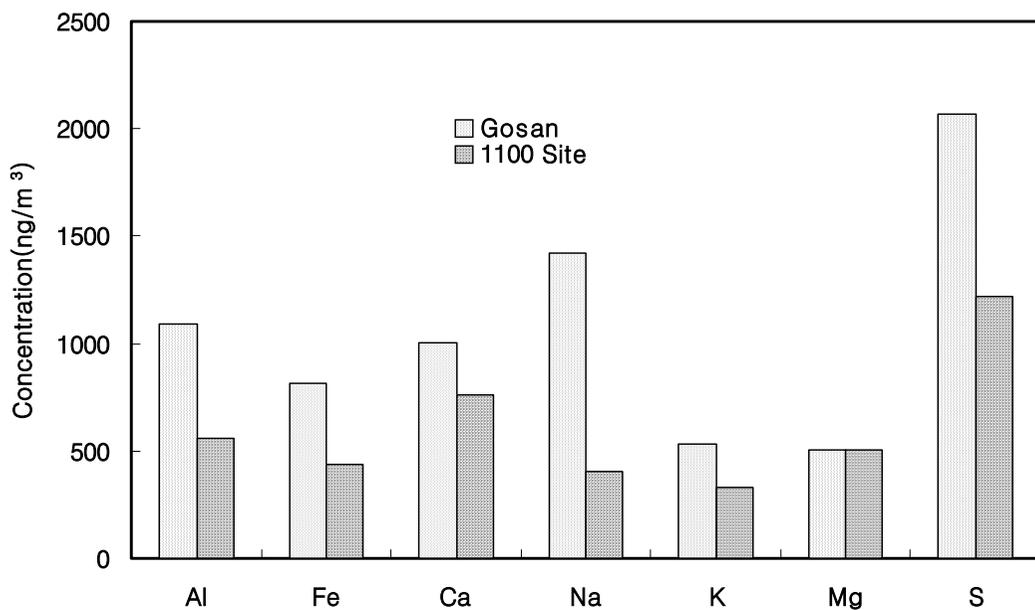


Figure 19. Comparison of metal component concentrations between Gosan and 1100 Sites in spring.

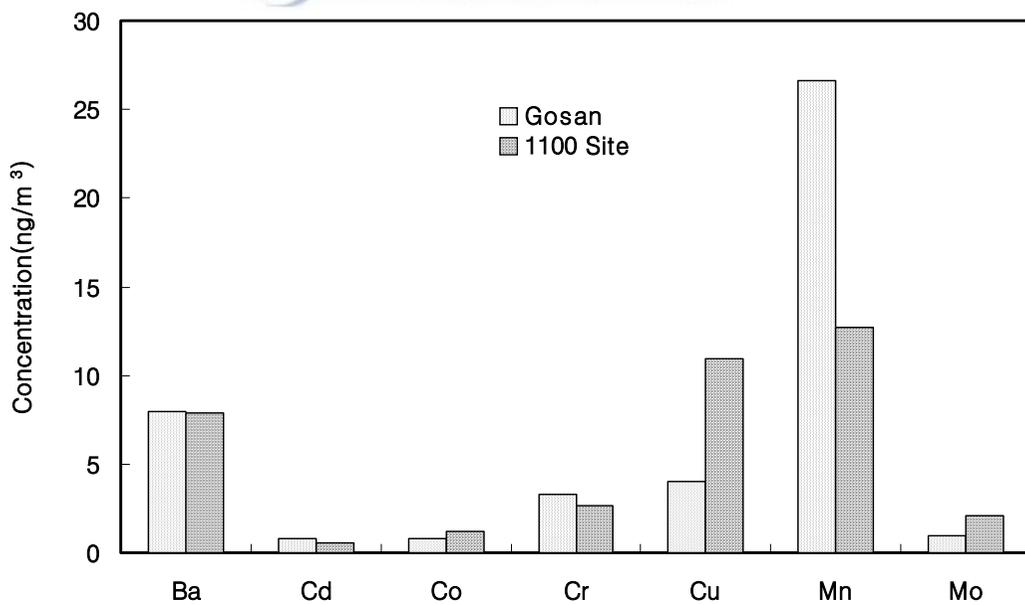


Figure 20. Comparison of metal component concentrations between Gosan and 1100 Sites in spring.

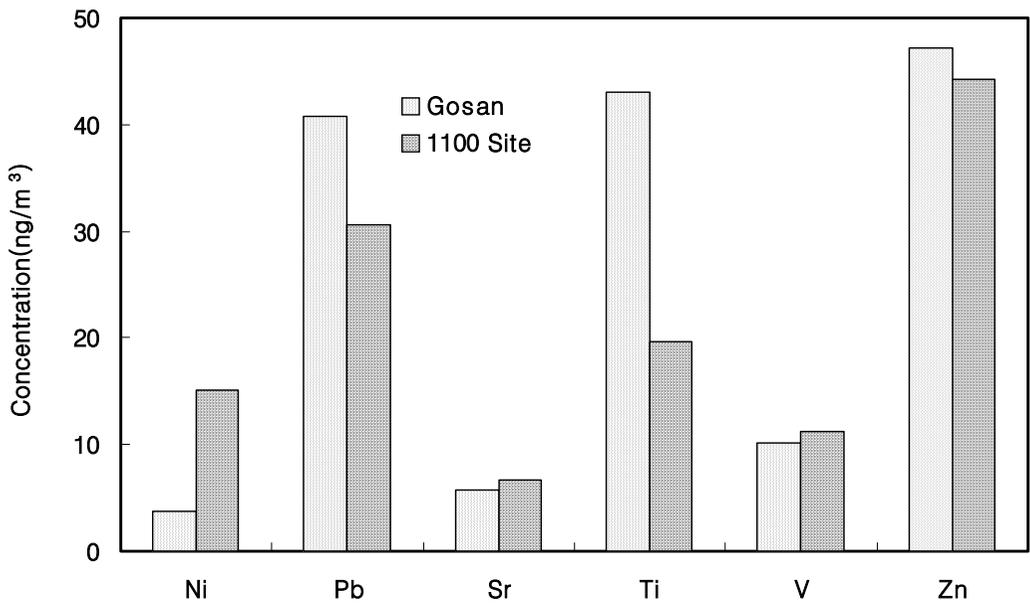


Figure 21. Comparison of metal component concentrations between Gosan and 1100 Sites in spring.

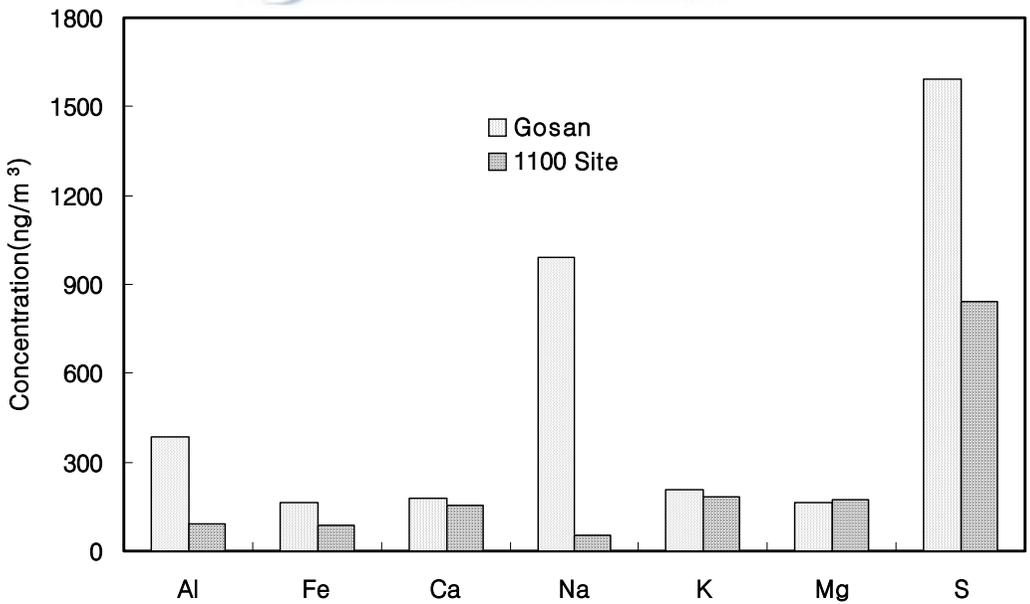


Figure 22. Comparison of metal component concentrations between Gosan and 1100 Sites in summer.

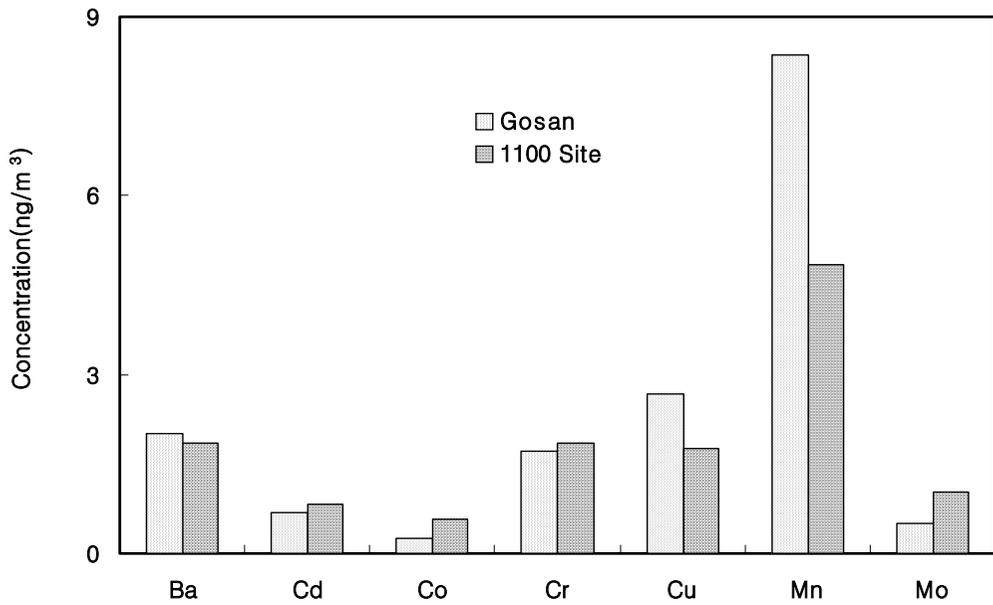


Figure 23. Comparison of metal component concentrations between Gosan and 1100 Sites in summer.

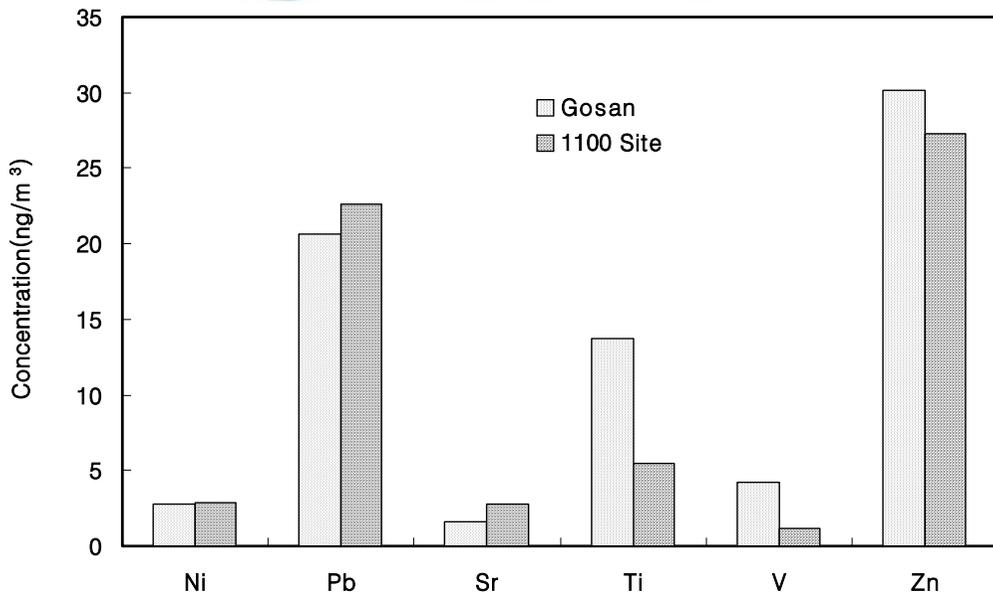


Figure 24. Comparison of metal component concentrations between Gosan and 1100 Sites in summer.

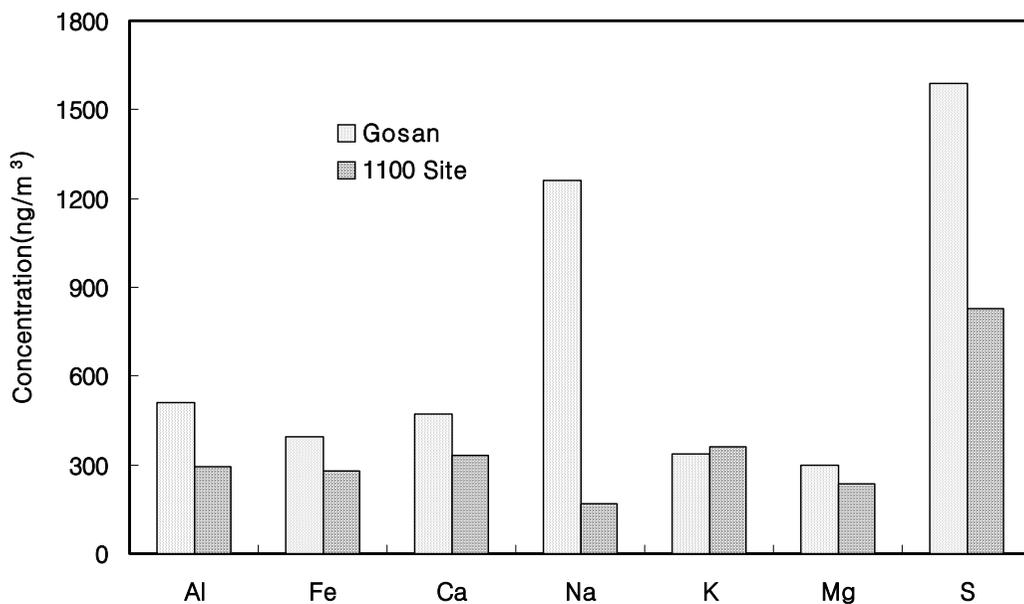


Figure 25. Comparison of metal component concentrations between Gosan and 1100 Sites in fall.

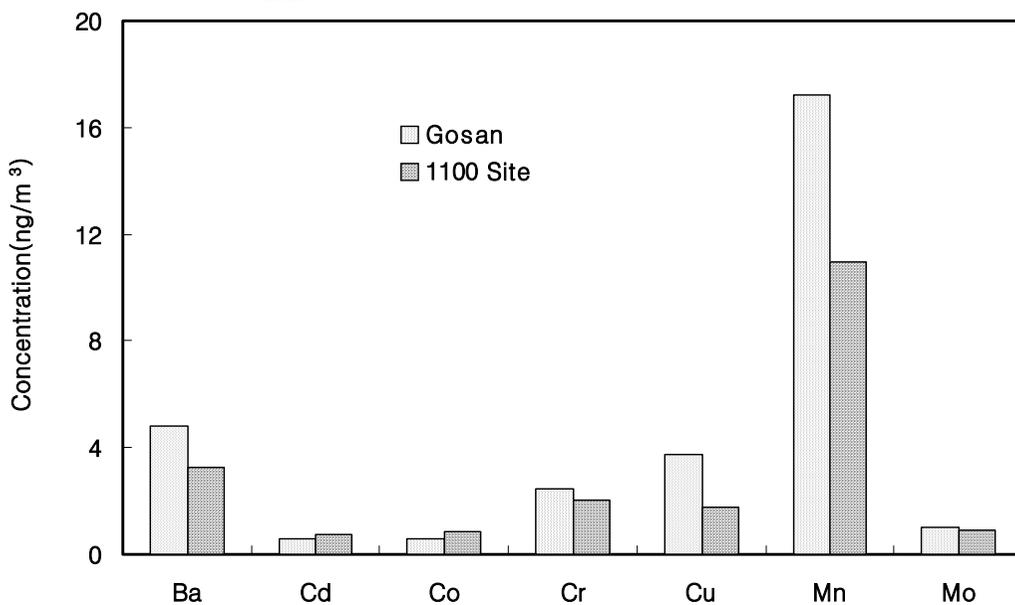


Figure 26. Comparison of metal component concentrations between Gosan and 1100 Sites in fall.

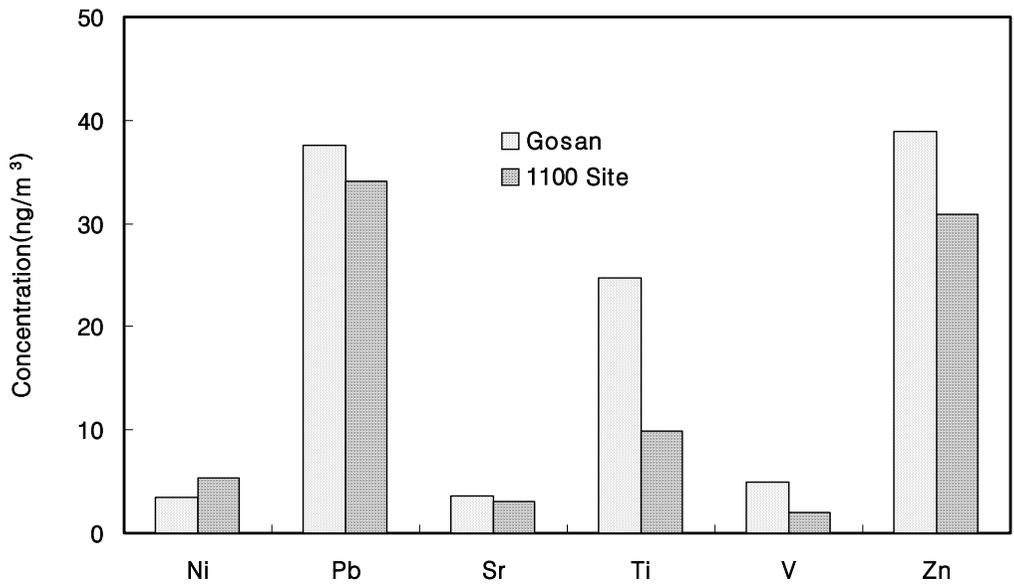


Figure 27. Comparison of metal component concentrations between Gosan and 1100 Sites in fall.

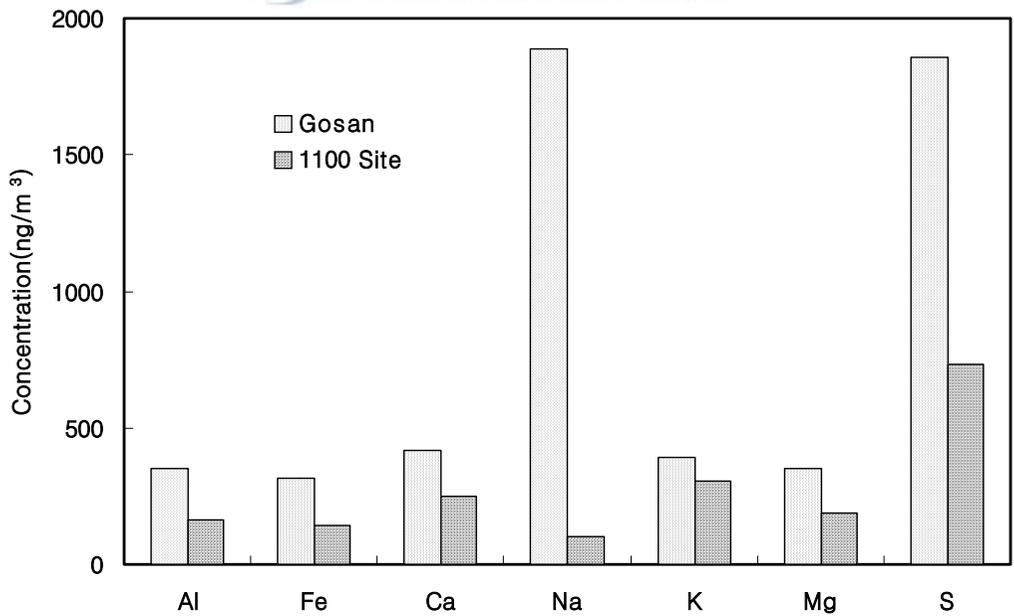


Figure 28. Comparison of metal component concentrations between Gosan and 1100 Sites in winter.

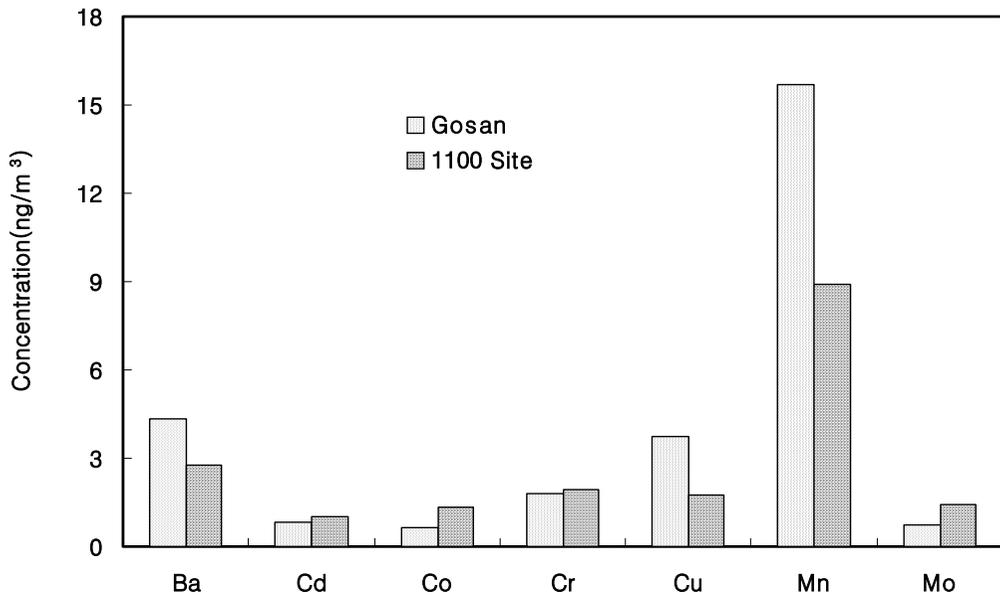


Figure 29. Comparison of metal component concentrations between Gosan and 1100 Sites in winter.

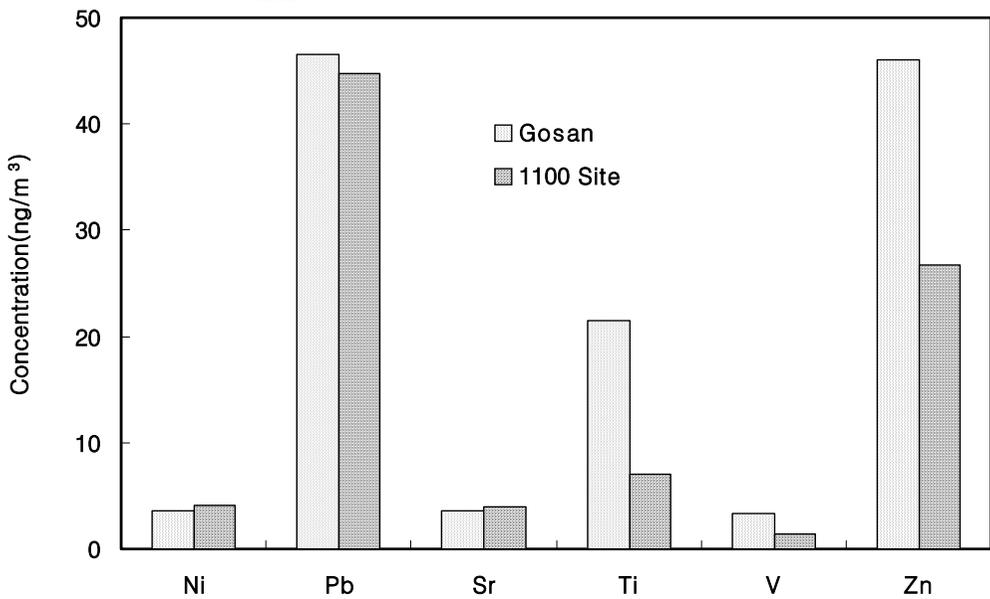


Figure 30. Comparison of metal component concentrations between Gosan and 1100 Sites in winter.

4. 황사시 농도 비교

중국의 사막화 면적은 이미 262만 2000 km²에 달하며, 중국 전 국토 면적의 27.3%를 차지하고 있다. 이 중에서 중국 전체 면적의 약 13%를 차지하고 있는 중국의 사막은 황사의 주요 발생원이다. 이 지역은 75°E에서 125°E까지, 35°N에서 50°N까지의 온대 건조지역에 포함된다. 풍식(바람에 의해 토양이 깎이는 현상)이 발생하는 주요 지역은 황하강 분지와 고비 사막과 함께 중국 서부 및 북서부의 건조지역이다. 타클라마칸 사막은 중국에서 가장 큰 사막으로, 면적이 32.74 × 10⁴ km²이다. 타클라마칸 지역의 17개 관측소로부터 30년간(1961~1990년) 시정 자료를 분석한 결과, 모래바람의 연간 일수가 사막 주변에서 약 20일이며, 타클라마칸 사막에서는 일년에 33회 정도에 이른다(국립환경연구원보고서, 1999).

사막 지역에서 강한 바람은 많은 양의 먼지를 대기로 유입시키며, 상승된 먼지가 사막으로 다시 침적된다 해도, 상당한 비율이 훨씬 동쪽으로 수송되며, 황하강 계곡을 따라 황토고원(Loess Plateau)에 침적된다. 또한 강한 편서풍은 이 지역에서 수천 km 떨어진 태평양 상공까지 먼지를 수송한다. 황사가 발생하기 위해서는 먼지를 부양시킬 수 있는 상승기류가 있어야 하고, 황사 발원지의 강수량이 적고, 증발이 잘 되며, 풍속이 강해야 하는 등의 기후적 특성이 충족되어야 한다. 또한, 봄철 해빙기에 토양이 잘 부서져 부유하기 적당한 20 μm 이하 크기의 먼지가 다량으로 배출되도록 지표면에 식물이 거의 없어야 한다(원동욱, 2001).

중국의 대기 오염은 아직 세계 최고 수준으로 평가되고 있으며 1998년 4월에 이어 2001년 중국에서 발생한 황사가 미국 서해안에 도달하는 모습이 수차례 위성 관측되면서 중국의 오염에 대한 경각심은 동북아시아를 넘어 세계적으로 크게 확산되고 있다(신혜정 등, 2002). 중국에서 발생하는 이러한 황사의 원인을 살펴보면 첫째로 기상 이변에 대한 측면을 생각해 볼 수 있다. 우선 지구 온난화 현상에 따른 기온상승으로 겨울철 토양의 해동 시간이 이전에 비해 빨라지고 있고 이는 토양의 수분 증발을 가속화하여 표토층의 건조를 가져오고 있다. 또한 중국 북방 지역의 강수량 감소로 인해 토양이 그대로 바람에 노출되어 있으며, 차가운 공기의 빈번한 활동과 강풍의 연속적 출현으로 내몽고에서 동북 일대에 이르는 온대 편서풍이 현저히 증가하여 토양이 쉽게 강풍에 날리는 결과를 초래하고 있다. 둘째로는 도시먼지이다. 도시의 건축 시공·

지면노출·흙모래 퇴적 등은 강풍의 작용과 차량 운행으로 인해 먼지를 발생하여, 석탄 연소와 자동차 배기가스로 인한 연기와 분진 등이 황사 오염을 가중시킨다. 셋째는 토지 사막화를 중심으로 하는 생태 파괴이다. 물론 황사를 야기하는 직접적 요인은 기상 이변에서 찾을 수 있겠지만, 오히려 그 심층적 원인은 중국 서북과 화북 지역의 무분별한 삼림 벌채, 그리고 과도한 자원 개발과 방목 등으로 인한 토지 사막화의 확대에 있다고 보여진다. 즉 토지 사막화의 만연과 확장은 바로 황사의 끊이지 않는 원천이며, 최근 들어 황사의 빈번한 발생은 나날이 심각해지는 중국 서북 지역의 사막화에서 그 근본적 원인을 찾을 수 있다(원동욱, 2001).

중국의 이산화황 배출량은 동북아시아에서 가장 높은 비율로 배출되고 있는 것으로 추산된다(김용표 등, 1999). 장거리 이동되는 황사의 성상은 발원지에서의 토양성분 이외에도 이동과정 중에서 가스상 물질인 이산화황이나 질소산화물이 입자표면에 흡착되어 황산염이나 질산염들이 많이 생성되는 것으로 조사되었다(박민하 등, 2002). 이 중 에어로졸 생성에 중요한 역할을 하는 주도적인 물질인 황 화합물은 대류권 하부에 주로 2일에서 1주일정도 체류하면서 보통 수백에서 수천 km까지 이동이 가능하다. 대기 중에 배출된 SO₂는 장거리이동 과정 중에서 황산염인 입자상으로 변환하여 에어로졸 상태로 존재하면서 직접적으로 빛을 산란 혹은 흡수시키며, 간접적으로 구름의 응결핵으로 작용하여 구름 내 물리현상에 영향을 주고, 결국에는 지구복사 체계를 변화시키게 된다(김원형 등, 2003). 이밖에도 SO₂에서 황산염으로 변환된 에어로졸은 대기 중에 부유하면서 아시아 몬순지역의 강우 패턴을 변화시키거나 농작물의 감소, 산성화된 물질의 침적으로 인한 수산 어획고의 감소, 아시아 기후변화, 산성화된 미세 입자의 증가, 그리고 시정 장애현상 유발 등의 광범위한 영역에 걸쳐 대류권 화학 메커니즘에 영향을 미치고 있는 것으로 보고되고 있다(Huebert et al., 1998). 그 외에도 여러 오염물질들이 에어로졸에 흡착되어 중국으로부터 편서풍에 의해 이동되고 있으며 황사 분진은 대략 20 m/s를 초과하는 서풍을 타고 광역적 규모로 분산, 이동된다(Kim et al., 2003). 또한 이렇게 발생하는 황사는 매년 대기 중으로 대략 800Tg 정도의 분진을 유입시킨다. 이중 30%는 발원지 주변에서 재 침적되며, 20%는 정도는 발원지에서 국지적인 규모로 이동하는 것으로 알려져 있다. 그리고 나머지 50%정도가 북동아시아 지역을 위시하여 대륙규모의 장거리 이동에 종속되어 광역적인 환경오염 현상으로 진행되고 있다(Zhang et al., 1993).

본 연구에서 이러한 황사에 의한 제주도 고산과 한라산 1100 고지의 대기 에어로졸에 대한 영향을 조사하기 위하여 황사시 대기 에어로졸의 농도와 비황사시 대기 에어로졸의 농도를 비교하였다. 우선 수용성 성분의 황사와 비황사시의 농도를 비교한 결과를 Table 17과 Table 18 그리고 Figure 31과 Figure 32에 나타내었는데, 고산의 경우 황사시에는 $nss-SO_4^{2-} > NO_3^- > Cl^- > nss-Ca^{2+} > Na^+ > NH_4^+ > K^+ > Mg^{2+}$ 의 순, 비황사시에는 $nss-SO_4^{2-} > Na^+ > NO_3^- > Cl^- > NH_4^+ > K^+ > nss-Ca^{2+} > Mg^{2+}$ 의 순으로 나타났고, 각 성분의 농도비는 비황사시에 비해 0.8~9.9배의 차이를 보였다. 1100 고지에서는 황사시에는 $nss-SO_4^{2-} > NO_3^- > nss-Ca^{2+} > NH_4^+ > Na^+ > Cl^- > K^+ > Mg^{2+}$ 의 순, 비황사시에는 $nss-SO_4^{2-} > NH_4^+ > NO_3^- > nss-Ca^{2+} > Na^+ > K^+ > Cl^- > Mg^{2+}$ 의 순으로 나타났다. 이 성분들 중 가장 높은 차이를 보이는 성분은 $nss-Ca^{2+}$ 로 고산에서는 비황사시 채취한 시료에 비해 9.9배의 높은 비를 보였고, 1100 고지에서는 7.3배의 높은 비를 나타내었다. 인위적 오염 기원인 NO_3^- 성분의 황사와 비황사시의 농도비는 고산과 1100 고지에서 각각 2.5배와 2.8배를 보였고, $nss-SO_4^{2-}$ 성분의 농도비는 고산과 1100 고지에서 각각 1.5배와 1.3배로 황사시 높은 경향을 보였다. 이에 반해 Na^+ 와 NH_4^+ 의 황사시와 비황사시 농도비는 고산에서 각각 1.0 배와 0.8 배이고, 1100 고지에서 0.6배, 1.9 배로 NH_4^+ 은 황사시에 큰 영향을 받지 않는 반면, Na^+ 은 고산과는 1100 고지에서 황사시에 높은 경향을 보였다. 이로 종합해 보면 대체적으로 황사시 고산과 1100 고지 수용성 성분은 Ca^{2+} , SO_4^{2-} , NO_3^- 성분들이 황사일에 농도가 증가하는 경향을 보였고, 이들 중에서도 Ca^{2+} 와 NO_3^- 의 농도가 크게 증가하는 것으로 조사되었다.

황과 금속 성분의 분석 결과를 Figure 33 ~ Figure 35에 나타내었는데 고산에서 인위적 오염 기원의 S 농도는 황사와 비황사시에 각각 $3.27 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $1.79 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 비황사시에 비해 황사 시에 1.8배 정도 더 높은 농도를 보이는 것으로 조사되었다. S는 토양에는 거의 존재하지 않는 성분으로 주로 황사 입자 표면에 흡착된 황산염의 성분으로 판단된다. 따라서 이러한 농도 증가는 황사가 중국으로부터 장거리 이동되는 과정에서 다량의 황 화합물을 흡수 또는 반응한 상태로 제주 지역 대기에 유입되고 있음을 보여주는 결과이다. 고산에서 토양의 주요 성분인 Al, Ca, Fe, K의 농도를 비교해 보면 황사시에 각각 $6.51 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $5.42 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $3.84 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $2.02 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 비황사시에 각각 $0.48 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.45 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.39 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.34 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 Al은 13.6 배, Ca은 12.1배, Fe은 9.9 배, K은 5.9 배 정도 비황사시에 비해 황사시에 크게 증가한 것으로 나타났다(Zhang et al., 2003). 반

면에 대체적으로 해양의 기여가 큰 Na와 Mg 성분은 고산에서 황사시에 각각 $2.12 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $2.29 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 비황사시에 각각 $1.34 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.29 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 Na는 1.61배, Mg는 7.8 배 정도 증가하여 토양 성분들에 비해 상대적으로 낮은 증가 경향을 나타내었다. 또한 이들 성분들에 비해 농도가 낮은 금속 성분들 중 토양 기원의 Ti, Ba, Sr은 황사시에 각각 $136.2 \text{ ng}/\text{m}^3$, $35.9 \text{ ng}/\text{m}^3$, $23.4 \text{ ng}/\text{m}^3$, 비황사시에 각각 $25.9 \text{ ng}/\text{m}^3$, $4.4 \text{ ng}/\text{m}^3$, $3.4 \text{ ng}/\text{m}^3$ 로 Ti가 5.3배, Ba가 8.2배, Sr이 6.9배의 증가를 보였다. 반면에 인위적 기원의 Pb, Zn, V, Cd, Cr 등은 각각 1.4배, 1.7배, 6.1배, 1.5배, 5.3배의 농도 증가를 보여 토양 성분들에 비해서는 증가율이 낮으나 비황사시 보다 황사시에 농도가 증가하는 것으로 확인되었다.

한편, 1100 고지에서 황과 금속성분간 분석결과를 Figure 36 ~ Figure 38에 나타내었는데, 1100 고지에서 인위적 오염 기원의 S 농도는 황사와 비 황사 시에 각각 $1.87 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.95 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 비 황사 시에 비해 황사 시에 2.0배 정도 더 높은 농도를 보이는 것으로 조사되었다. 고산과 비교하여 1100 고지에서 토양의 주요 성분인 Al, Ca, Fe, K의 농도를 비교해 보면 황사시에 각각 $3.13 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $3.45 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $2.08 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.65 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 비황사시에 각각 $0.24 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.35 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.22 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.29 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 Al은 13.1배, Ca은 9.8 배, Fe은 9.5배, K은 2.2배 정도로 K를 제외하고는 모두 크게 증가한 것으로 나타났다. 황사시 고산과 1100 고지 금속 성분별 농도비를 비교해 보면 S, Al, Ca, Fe, K이 각각 1.8, 2.1, 1.6, 1.8, 3.1배로 고산이 1.6 ~ 3.1배의 높은 농도를 보임을 확인할 수 있었다. 비황사시 금속성분별 농도비는 1.9, 2.0, 1.3, 1.8, 1.2배로 황사시와 비황사시에 나타나는 농도비가 K를 제외하고는 황사시와 비황사시에 금속성분들이 비교적 비슷한 형태로 증가하는 것으로 확인되었다. 1100 고지에서 해양의 기여를 나타내는 Na와 Mg 성분은 황사시에 각각 $1.55 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $1.24 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 비황사시에 각각 $0.19 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 Na는 8.3배, Mg는 4.1배 정도 증가하여 비황사보다 많은 해양성분이 유입되는 것으로 확인되었다. 농도가 낮은 금속 성분들 중 토양 기원의 Ti, Ba, Sr은 황사시에 각각 $78.7 \text{ ng}/\text{m}^3$, $26.3 \text{ ng}/\text{m}^3$, $24.5 \text{ ng}/\text{m}^3$, 비황사시에 각각 $10.3 \text{ ng}/\text{m}^3$, $4.1 \text{ ng}/\text{m}^3$, $3.9 \text{ ng}/\text{m}^3$ 로 Ti가 7.7배, Ba가 6.4배, Sr이 6.2배의 증가를 보였다. 반면에 인위적 기원의 Pb, Zn, V, Cd, Cr 등은 각각 1.6배, 1.4배, 2.5배, 0.7배, 3.2배의 농도 증가를 보였다. 또한 연구기간 동안의 황사시 에어로졸 성분들의 농도변화를 Figure 39 ~ Figure 46에 나타내었다.

Table 17. Comparison of water-soluble components concentrations($\mu\text{g}/\text{m}^3$) between Yellow Sand and Non-Yellow Sand days at Gosan Site.

Component	Gosan Site										Y/N
	Yellow Sand(Y)					Non-Yellow Sand(N)					
	Mean	Median	Max	Min	SD	Mean	Median	Max	Min	SD	
NH_4^+	1.08	1.20	1.88	BDL	0.64	1.42	0.98	7.28	0.07	1.22	0.76
Na^+	1.76	1.50	4.09	0.60	1.08	1.79	1.42	10.39	0.01	1.36	0.98
K^+	0.56	0.46	1.31	0.30	0.29	0.40	0.30	2.73	BDL	0.36	1.41
nss- Ca^{2+}	3.56	2.78	6.93	0.69	2.13	0.36	0.20	5.06	BDL	0.50	9.91
Mg^{2+}	0.45	0.42	0.69	0.28	0.12	0.25	0.21	1.40	BDL	0.18	1.77
nss- SO_4^{2-}	8.81	8.64	19.47	2.20	5.02	6.05	5.06	23.40	0.15	4.42	1.46
NO_3^-	4.09	3.89	7.66	0.59	2.58	1.64	1.29	8.91	BDL	1.38	2.50
Cl^-	3.61	2.69	10.40	0.54	2.93	1.59	0.74	17.17	BDL	2.02	2.27

BDL : Below Detection Limit

Table 18. Comparison of water-soluble components concentrations($\mu\text{g}/\text{m}^3$) between Yellow Sand and Non-Yellow Sand days at Gosan Site.

Component	1100 Site										Y/N
	Yellow Sand(Y)					Non-Yellow Sand(N)					
	Mean	Median	Max	Min	SD	Mean	Median	Max	Min	SD	
NH_4^+	0.75	0.53	3.13	0.10	0.83	1.22	0.92	6.57	BDL	1.07	0.62
Na^+	0.62	0.52	1.45	0.28	0.34	0.32	0.20	3.07	BDL	0.37	1.94
K^+	0.44	0.40	0.97	0.09	0.28	0.26	0.14	1.63	BDL	0.31	1.66
nss- Ca^{2+}	2.59	2.54	4.96	0.30	1.38	0.36	0.11	12.18	BDL	0.84	7.28
Mg^{2+}	0.24	0.25	0.36	0.11	0.08	0.07	0.05	0.80	BDL	0.08	3.26
nss- SO_4^{2-}	5.97	5.40	14.42	1.28	3.58	4.70	3.59	23.34	BDL	4.11	1.27
NO_3^-	2.79	2.92	5.98	0.92	1.51	0.77	0.31	15.03	BDL	1.34	3.65
Cl^-	0.57	0.42	1.84	0.07	0.54	0.14	0.05	1.75	BDL	0.24	4.06

BDL : Below Detection Limit

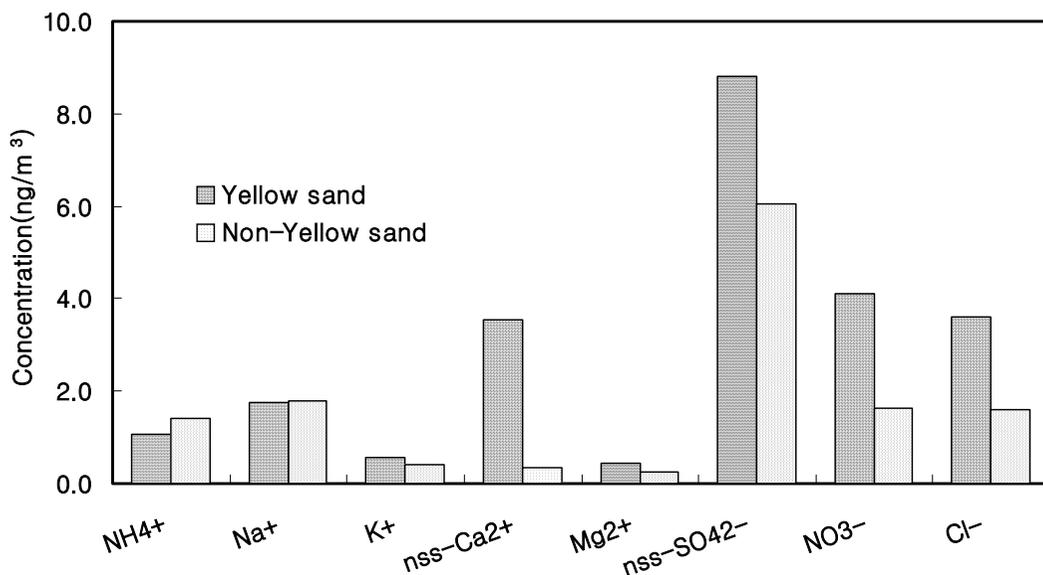


Figure 31. Comparison of water soluble component concentrations between Yellow Sand and Non-Yellow Sand days at Gosan Site.

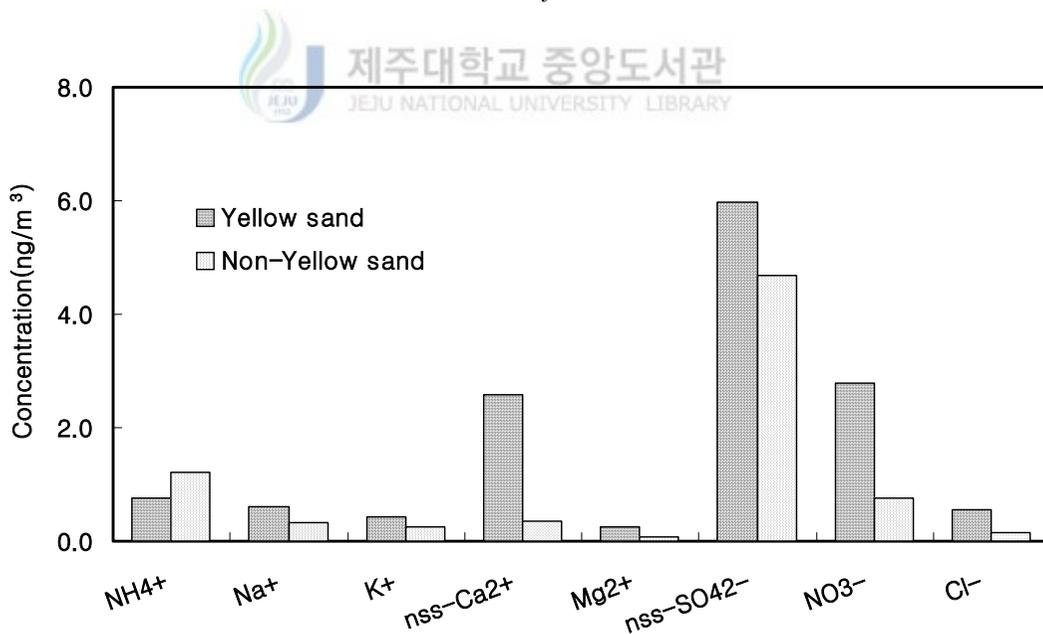


Figure 32. Comparison of water soluble component concentrations between Yellow Sand and Non-Yellow Sand days at 1100 Site of Mt. Halla.

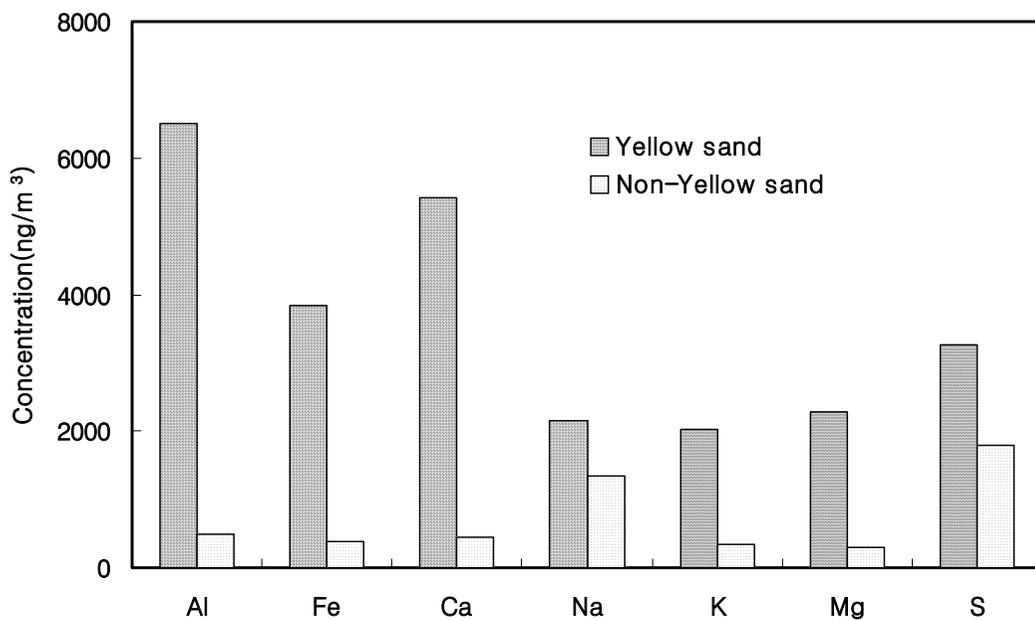


Figure 33. Comparison of metal component concentrations between Yellow Sand and Non-Yellow Sand days at Gosan Site.

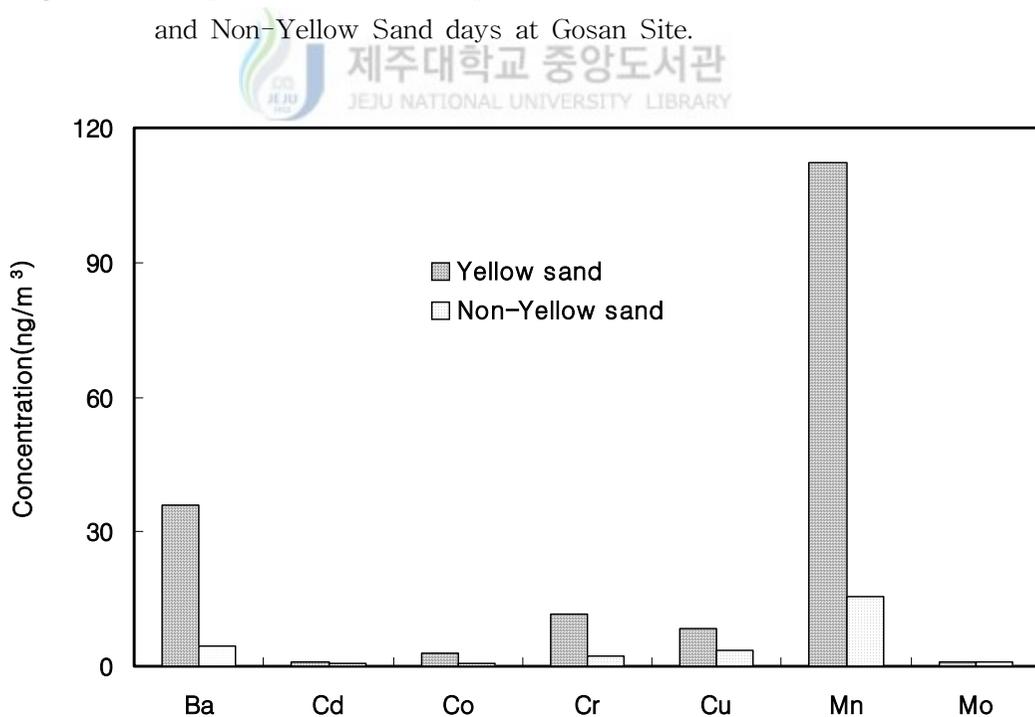


Figure 34. Comparison of metal component concentrations between Yellow Sand and Non-Yellow Sand days at Gosan Site.

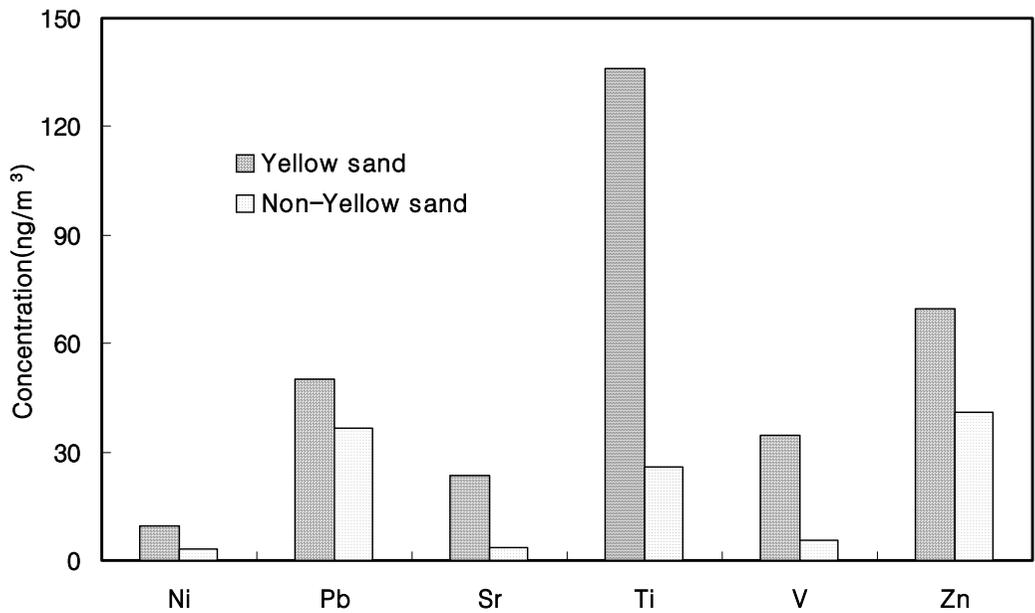


Figure 35. Comparison of metal component concentrations between Yellow Sand and Non-Yellow Sand days at Gosan Site.

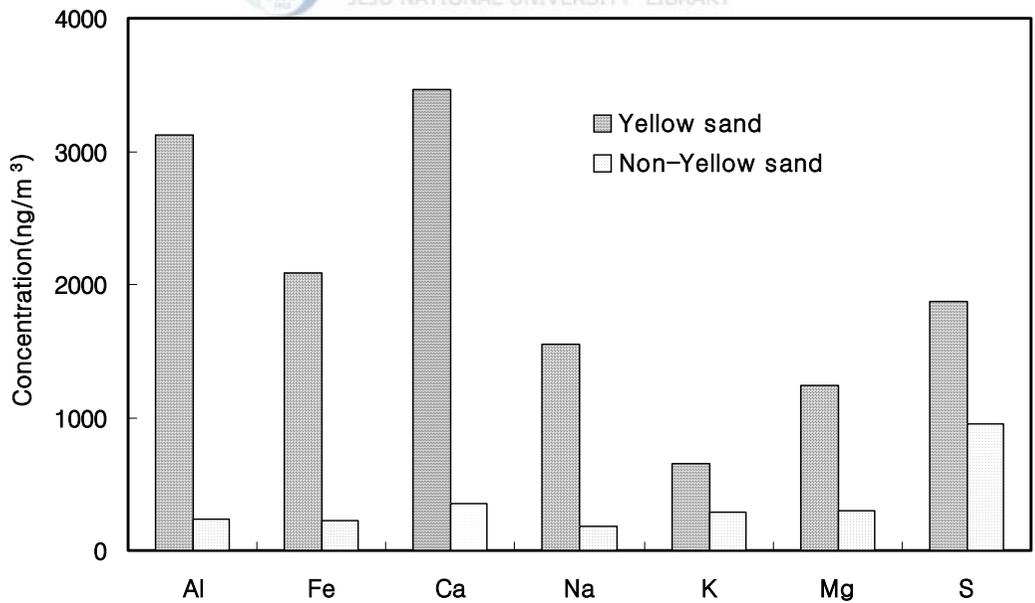


Figure 36. Comparison of metal component concentrations between Yellow Sand and Non-Yellow Sand days at 1100 Site of Mt. Halla.

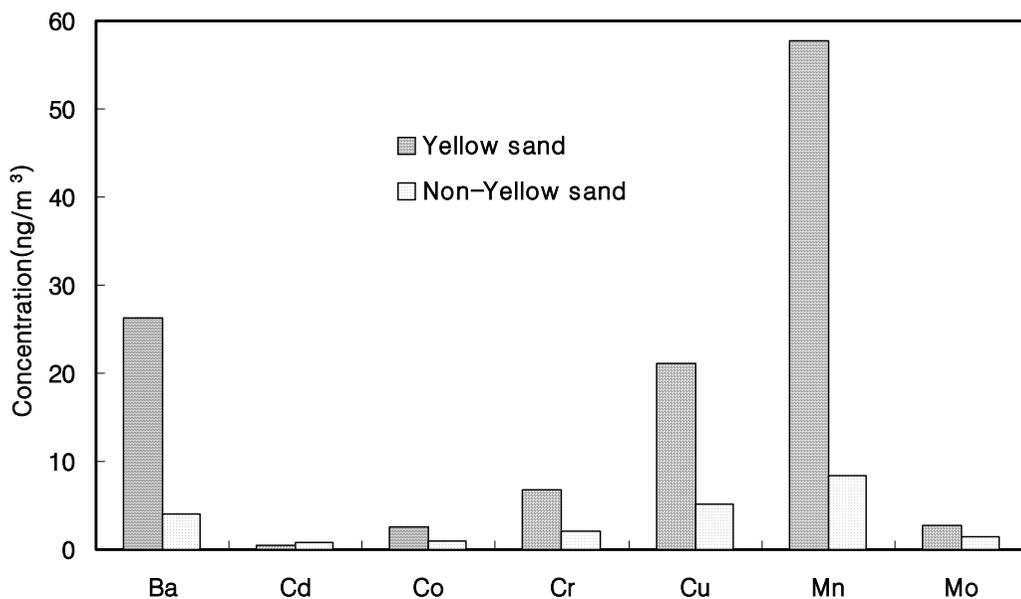


Figure 37. Comparison of metal component concentrations between Yellow Sand and Non-Yellow Sand days at 1100 Site of Mt. Halla.

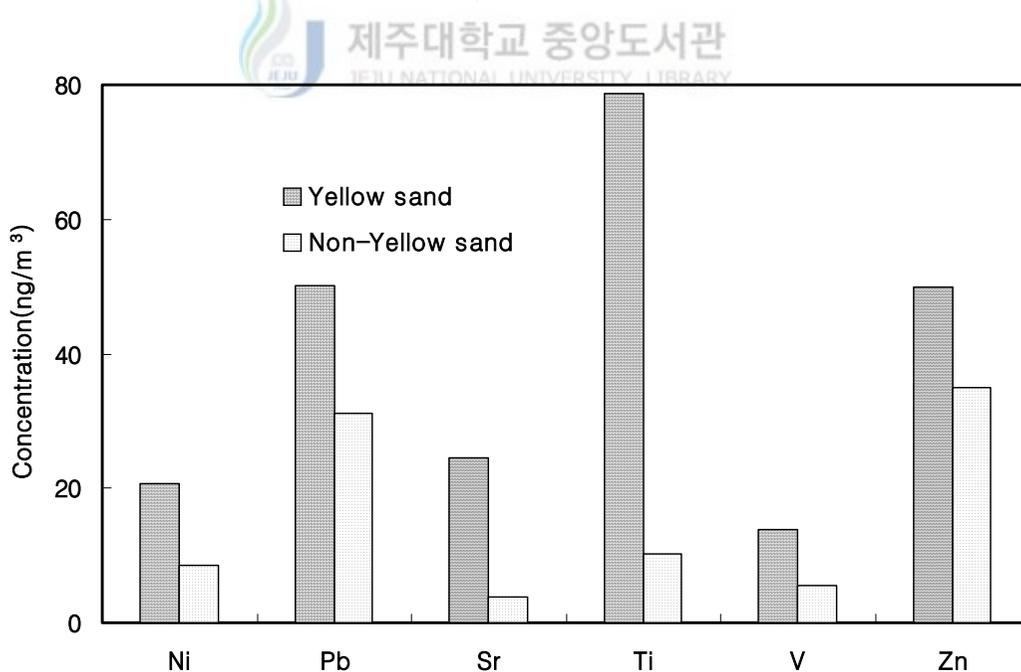


Figure 38. Comparison of metal component concentrations between Yellow Sand and Non-Yellow Sand days at 1100 Site of Mt. Halla.

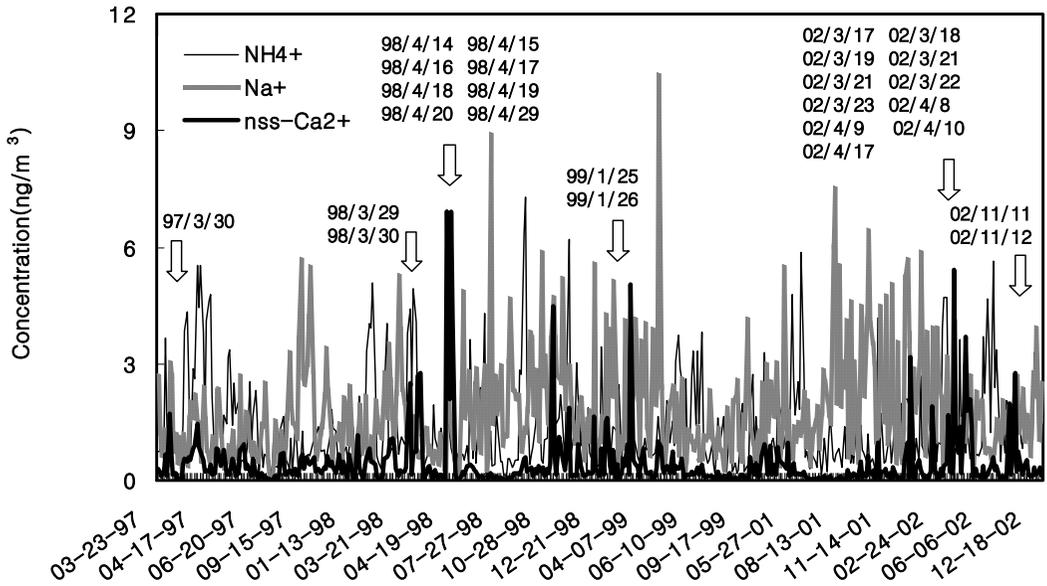


Figure 39. Variations of cation component concentrations at Gosan Site shown with Yellow Sand dates.

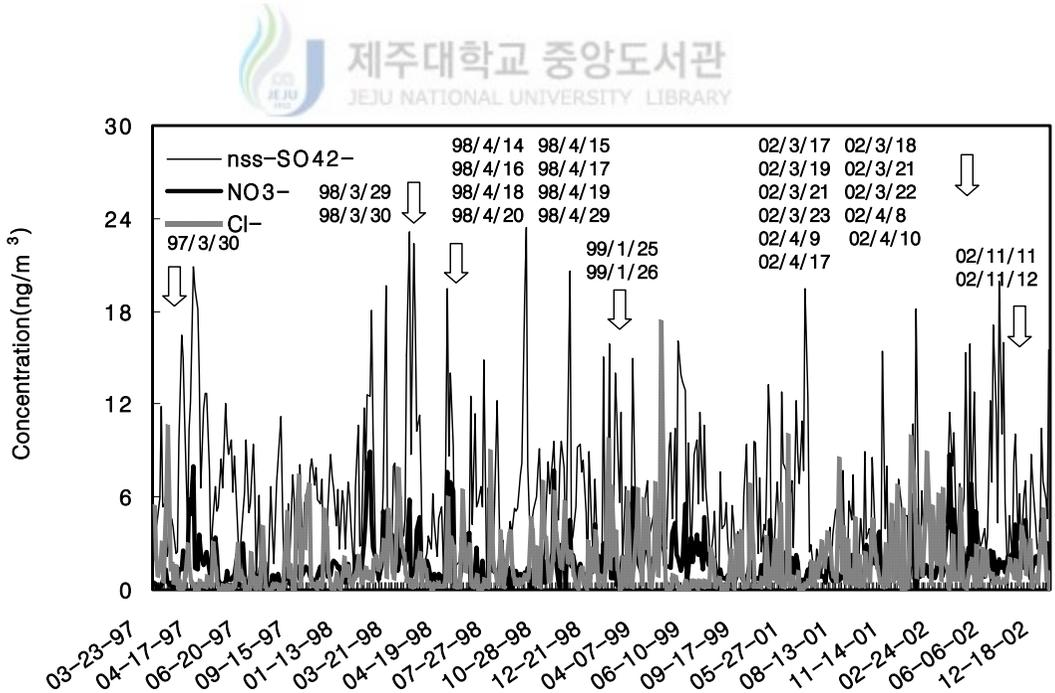


Figure 40. Variations of anion component concentrations at Gosan site shown with Yellow Sand dates.

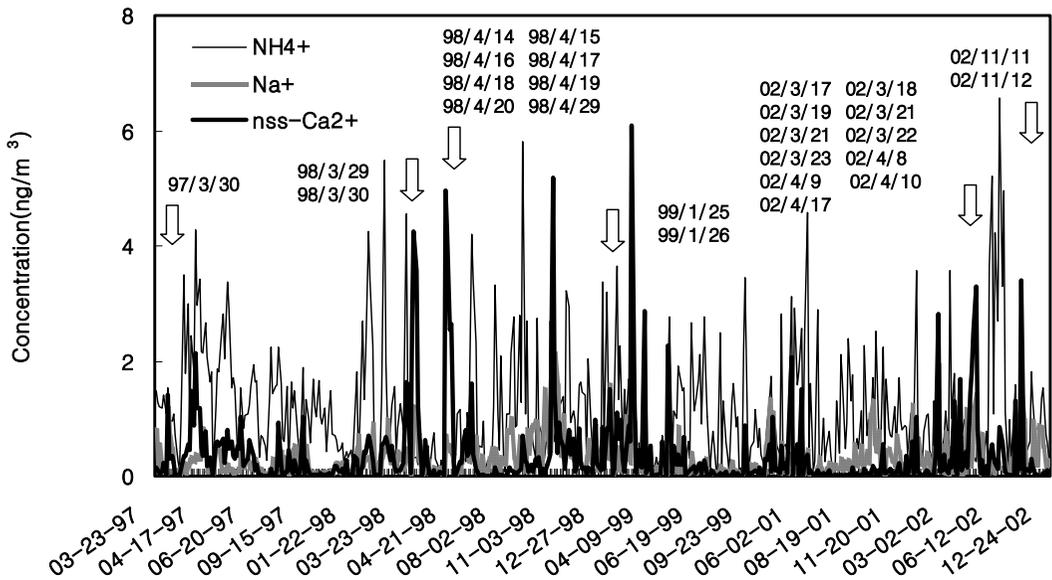


Figure 41. Variations of cation component concentrations at 1100 site of Mt. Halla shown with Yellow Sand dates.

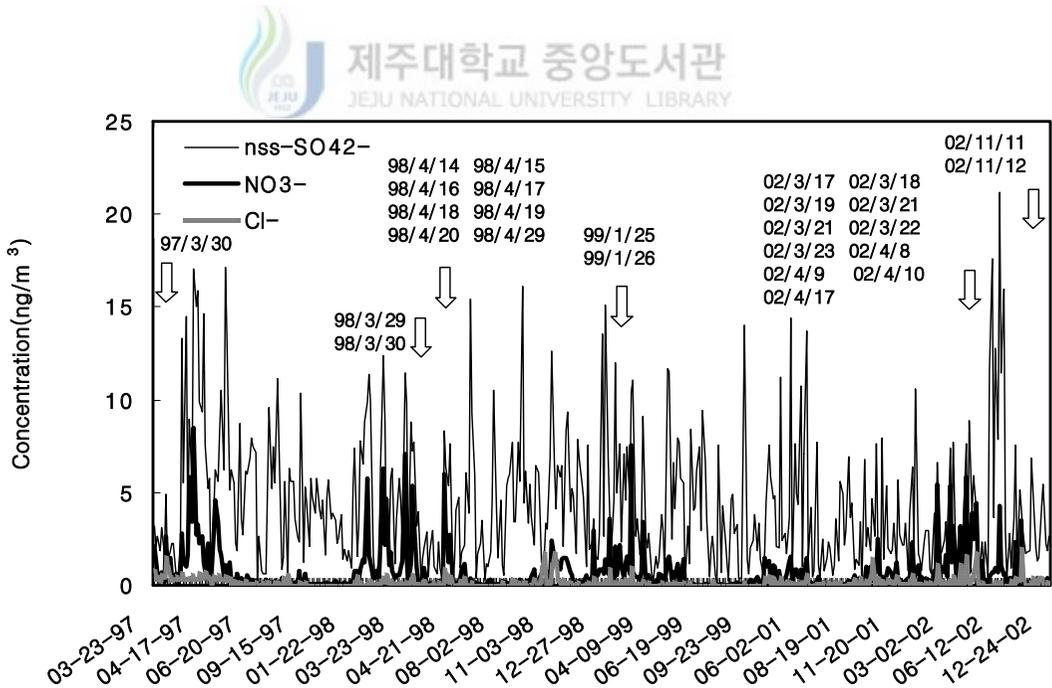


Figure 42. Variations of anion component concentrations at 1100 site of Mt. Halla shown with Yellow Sand dates.

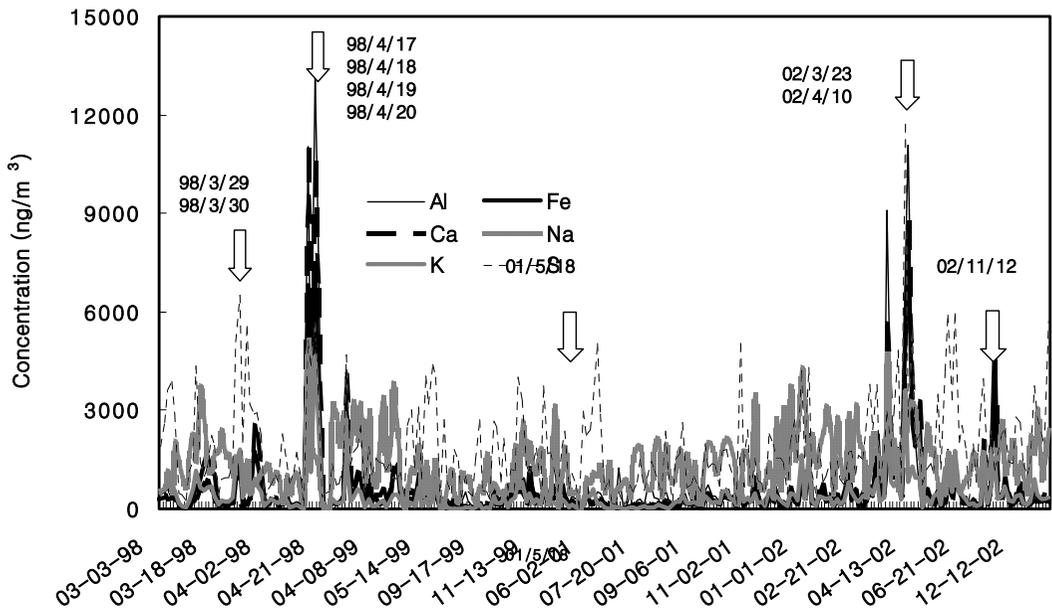


Figure 43. Variations of metal and sulfur component concentrations at Gosan site shown with Yellow Sand dates.

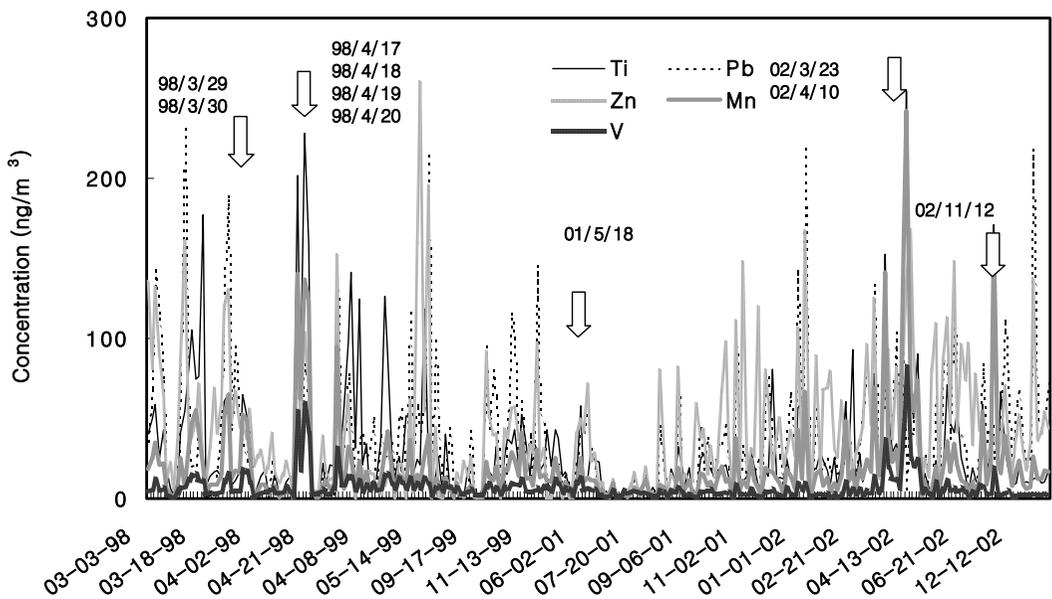


Figure 44. Variations of metal component concentrations at Gosan site shown with Yellow Sand dates.

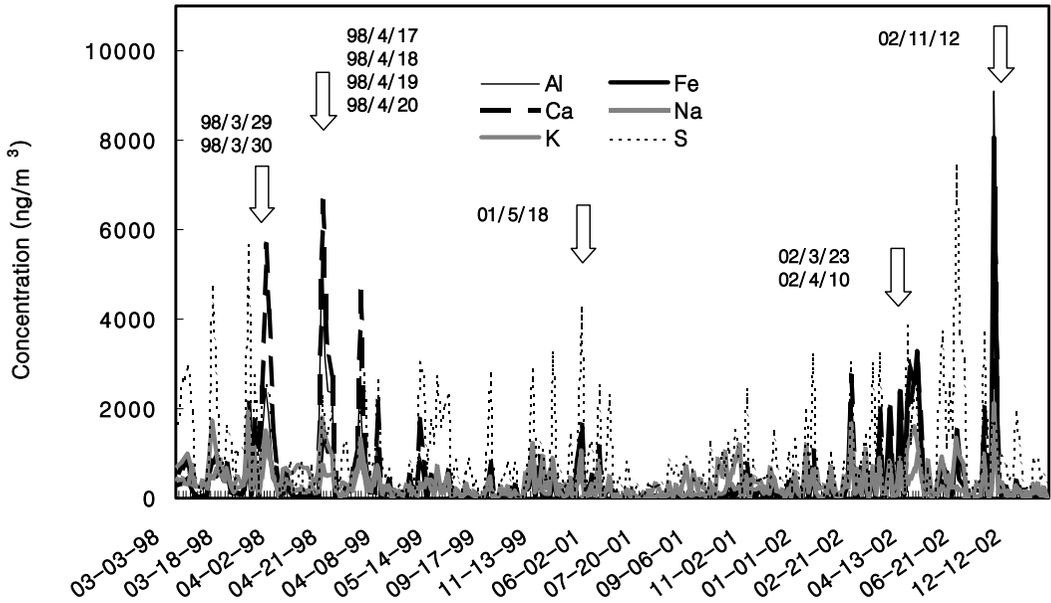


Figure 45. Variations of metal and sulfur component concentrations at 1100 site of Mt. Halla shown with Yellow Sand dates.

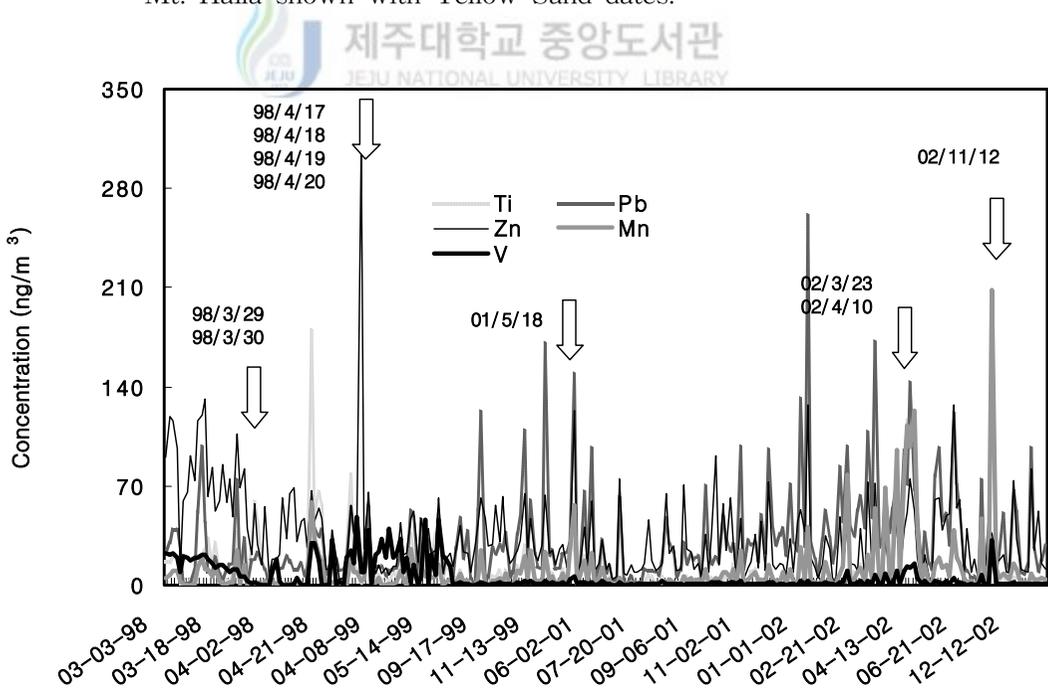


Figure 46. Variations of metal component concentrations at 1100 site of Mt. Halla shown with Yellow Sand dates.

5. 성분들 간의 상관관계 비교

고산에서와 1100 고지 대기 에어로졸을 구성하고 있는 각각의 성분들 간의 관계를 살펴보기 위해서 각 성분들마다 상관성을 알아보고 에어로졸 구성 성분들간 발생기원과 특성을 살펴보기 위한 상관계수를 Table 19 ~ Table 20에 나타내었다.

우선 고산에서 수용성 이온들의 상관성을 확인해 본 결과 해염성분인 Na^+ 과 Cl^- 의 상관계수는 0.85으로 높은 상관관계를 나타내었다. 이는 고산에서 NaCl인 해염성분이 상당량 고산의 대기 중으로 유입되고 있음을 나타내고 있다. 또한 수용성 성분 중 대표적인 인위적 오염물질인 nss-SO_4^{2-} 와 NH_4^+ 의 상관계수는 0.85의 높은 상관관계를 나타내면서, 이들 성분이 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 상태로 존재하여 서로를 중화시키고 있음을 증명하고 있다. 1100 고지에서의 수용성 이온들 간의 상관성을 확인해 보면, 해염성분인 Na^+ 과 Cl^- 의 상관계수는 0.73의 상관성을 나타내었다. 이는 고산에서 나타난 상관성에 비해 낮은 상관성을 보였다. 이는 고산보다는 1100 고지가 해안에서 꽤 떨어져 있으며 고지대에 위치에 있어 고산에 비해 낮은 해염성분의 상관성을 나타내었다고 추정된다. 그리고 1100 고지에서 nss-SO_4^{2-} 와 NH_4^+ 의 상관계수는 0.85로 고산과 같은 상관성을 보여, 1100 고지 역시 대기 중에서 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 상태로 존재하고 있음을 보여준다.

고산에서 금속성분들 간의 상관계수를 살펴보면, 토양성분인 Al, Fe, Ca, K, Mg, Ti, Mn, Ba, Sr 금속성분들 사이에 높은 상관관계를 보였다. Al인 경우 Fe, Ca, K, Mg, Ti, Mn, Ba, Sr와의 상관계수는 각각 0.92, 0.96, 0.84, 0.95, 0.81, 0.89, 0.91, 0.88의 높은 상관성을 보였고, Fe인 경우 Ca, K, Mg, Ti, Mn, Ba, Sr와 상관계수는 0.95, 0.80, 0.89, 0.85, 0.94, 0.93, 0.88로 모두 높은 상관성을 나타내었다. Ca인 경우 K, Mg, Ti, Mn, Ba, Sr와 상관계수는 0.86, 0.95, 0.81, 0.91, 0.92, 0.93으로 높은 상관성을 보였고, K인 경우 Mg, Ti, Mn, Ba, Sr와 상관계수는 0.85, 0.71, 0.79, 0.81, 0.85으로 높은 상관관계를 나타내었다. Mg인 경우 Ti, Mn, Ba, Sr와 상관계수는 0.84, 0.89, 0.90, 0.94으로 높은 상관관계를 나타내었고, Ti인 경우 Mn, Ba, Sr와 0.84, 0.83, 0.82의 높은 상관관계를 나타내었다. Mn인 경우 Ba와 Sr과의 상관계수는 0.97, 0.90의 상관성을 나타내었으며, Ba와 Sr 성분간 상관계수는 0.91로 고산에서 금속성분간의 상관계수로 보아 토양성분인 Al, Fe, Ca, K, Mg, Ti, Mn, Ba, Sr 성분들은 모두 동일한 발원지인 토양에서 대기 중으로 유입되었다는 것을 보여준다. 또한 1100 고지에서 Al, Fe, Ca, Ti,

Mn, Ba, Sr 금속성분들 사이에서 상관관계는 Al인 경우 Fe, Ca, Ti, Mn, Ba, Sr와의 상관계수는 각각 0.91, 0.92, 0.94, 0.84, 0.92, 0.81의 높은 상관성을 보였고, Fe인 경우 Ca, Ti, Mn, Ba, Sr와 상관계수는 0.79, 0.86, 0.94, 0.88, 0.69로 양호한 상관성을 보이는 Sr을 제외하고는 모두 높은 상관성을 나타내었다. Ca인 경우 Ti, Mn, Ba, Sr와 상관계수는 0.90, 0.70, 0.91, 0.93으로 높은 상관성을 보였고, Ti인 경우 Mn, Ba, Sr와 0.85, 0.94, 0.83의 높은 상관관계를 나타내었다. Mn인 경우 Ba와 Sr과의 상관계수는 0.84, 0.63의 상관성을 나타내었으며, Ba와 Sr 성분간 상관계수는 0.84로 나타내었다. 이러한 높은 상관계수는 1100 고지 역시 토양성분들 간에 상관성은 고산과 비슷한 경향을 보인다는 것을 보여주고 있다.

Table 19. Cross correlation for aerosol components at Gosan Site.

Component	NH ₄ ⁺	Na ⁺	K ⁺	nss- Ca ²⁺	Mg ²⁺	nss- SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	Al	Fe	Ca	Na	K	Mg	S	Ti	Mn	Ba	Sr	Zn						
NH ₄ ⁺	1.00																									
Na ⁺	-0.17	1.00																								
K ⁺	0.65	0.09	1.00																							
nss- Ca ²⁺	0.10	0.02	0.49	1.00																						
Mg ²⁺	0.08	0.70	0.38	0.39	1.00																					
nss- SO ₄ ²⁻	0.85	-0.11	0.81	0.43	0.23	1.00																				
NO ₃ ⁻	0.23	0.17	0.52	0.54	0.41	0.33	1.00																			
Cl ⁻	-0.20	0.85	0.02	0.14	0.69	-0.21	0.21	1.00																		
Al	0.00	0.02	0.30	0.86	0.36	0.28	0.46	0.15	1.00																	
Fe	0.05	-0.01	0.37	0.84	0.39	0.32	0.51	0.12	0.92	1.00																
Ca	0.02	0.03	0.38	0.93	0.39	0.33	0.50	0.16	0.96	0.95	1.00															
Na	-0.10	0.69	0.22	0.32	0.70	0.03	0.35	0.69	0.34	0.33	0.37	1.00														
K	0.27	0.03	0.61	0.86	0.46	0.55	0.51	0.12	0.84	0.80	0.86	0.36	1.00													
Mg	-0.02	0.19	0.36	0.90	0.53	0.28	0.53	0.32	0.95	0.89	0.95	0.54	0.85	1.00												
S	0.68	-0.08	0.74	0.49	0.37	0.86	0.33	-0.15	0.44	0.49	0.48	0.19	0.69	0.46	1.00											
Ti	0.08	0.13	0.39	0.74	0.45	0.31	0.51	0.26	0.81	0.85	0.81	0.46	0.71	0.84	0.45	1.00										
Mn	0.12	0.00	0.46	0.85	0.42	0.37	0.52	0.11	0.89	0.94	0.91	0.36	0.79	0.89	0.55	0.84	1.00									
Ba	0.09	-0.01	0.43	0.87	0.38	0.35	0.52	0.11	0.91	0.93	0.92	0.34	0.81	0.90	0.51	0.83	0.97	1.00								
Sr	0.09	0.10	0.48	0.95	0.46	0.40	0.59	0.22	0.88	0.88	0.93	0.44	0.85	0.94	0.51	0.82	0.90	0.91	1.00							
Zn	0.54	-0.09	0.69	0.42	0.18	0.65	0.42	-0.15	0.33	0.37	0.37	0.15	0.52	0.34	0.65	0.33	0.46	0.43	0.43	1.00						
V	0.05	-0.01	0.38	0.83	0.39	0.34	0.51	0.10	0.92	0.94	0.93	0.34	0.75	0.89	0.50	0.84	0.91	0.91	0.87	0.38	1.00					
Cr	0.01	0.03	0.31	0.71	0.32	0.24	0.43	0.13	0.76	0.68	0.74	0.28	0.65	0.76	0.38	0.65	0.71	0.72	0.70	0.30	0.38	1.00				
Pb	0.60	-0.04	0.88	0.42	0.24	0.74	0.43	-0.11	0.24	0.29	0.32	0.15	0.58	0.30	0.74	0.31	0.41	0.38	0.42	0.72	0.38	0.38	1.00			
Cu	0.39	-0.06	0.61	0.62	0.28	0.55	0.54	-0.07	0.58	0.58	0.60	0.26	0.65	0.58	0.66	0.57	0.70	0.68	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	1.00		
Ni	0.32	-0.02	0.51	0.68	0.32	0.49	0.50	0.04	0.61	0.61	0.62	0.31	0.70	0.64	0.63	0.65	0.72	0.69	0.70	0.52	0.52	0.52	0.52	1.00		
Co	0.05	-0.02	0.33	0.76	0.34	0.28	0.46	0.11	0.78	0.82	0.82	0.33	0.68	0.79	0.44	0.72	0.83	0.83	0.81	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	1.00	
Mo	0.34	-0.02	0.63	0.36	0.23	0.47	0.41	-0.04	0.24	0.30	0.28	0.13	0.46	0.28	0.49	0.29	0.35	0.35	0.37	0.59	0.59	0.59	0.59	0.59	1.00	
Cd	0.26	0.01	0.43	0.37	0.23	0.38	0.26	-0.05	0.35	0.39	0.40	0.19	0.43	0.36	0.47	0.32	0.45	0.43	0.38	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	1.00

Table 20. Cross correlation for aerosol components at 1100 Site in Mt. Halla.

Component	NH ₄ ⁺	Na ⁺	K ⁺	nss- Ca ²⁺	Mg ²⁺	nss- SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	Al	Fe	Ca	Na	K	Mg	S	Ti	Mn	Ba	Sr	Zn	
NH ₄ ⁺	1.00																				
Na ⁺	0.14	1.00																			
K ⁺	0.72	0.48	1.00																		
nss- Ca ²⁺	0.15	0.67	0.60	1.00																	
Mg ²⁺	0.30	0.80	0.71	0.87	1.00																
nss- SO ₄ ²⁻	0.85	0.44	0.87	0.55	0.68	1.00															
NO ₃ ⁻	0.30	0.68	0.62	0.80	0.82	0.52	1.00														
Cl ⁻	-0.01	0.73	0.30	0.61	0.63	0.22	0.65	1.00													
Al	0.00	0.47	0.34	0.66	0.64	0.26	0.56	0.72	1.00												
Fe	0.06	0.46	0.33	0.52	0.59	0.26	0.48	0.71	0.91	1.00											
Ca	0.06	0.54	0.46	0.80	0.75	0.38	0.67	0.67	0.92	0.79	1.00										
Na	0.08	0.73	0.32	0.49	0.64	0.28	0.58	0.57	0.50	0.48	0.56	1.00									
K	0.30	0.42	0.60	0.58	0.64	0.47	0.59	0.51	0.74	0.71	0.81	0.54	1.00								
Mg	0.06	0.65	0.47	0.85	0.82	0.41	0.72	0.74	0.93	0.83	0.95	0.59	0.76	1.00							
S	0.71	0.40	0.79	0.45	0.60	0.79	0.50	0.26	0.38	0.41	0.51	0.43	0.74	0.47	1.00						
Ti	0.11	0.52	0.45	0.69	0.69	0.36	0.63	0.69	0.94	0.86	0.90	0.53	0.77	0.89	0.49	1.00					
Mn	0.13	0.44	0.38	0.44	0.55	0.27	0.45	0.71	0.84	0.94	0.70	0.43	0.67	0.72	0.44	0.85	1.00				
Ba	0.13	0.60	0.53	0.76	0.79	0.43	0.70	0.73	0.92	0.88	0.91	0.58	0.82	0.94	0.55	0.94	0.84	1.00			
Sr	0.04	0.54	0.41	0.76	0.72	0.33	0.66	0.64	0.81	0.69	0.93	0.58	0.74	0.87	0.48	0.83	0.63	0.84	1.00		
Zn	0.41	-0.15	0.46	0.22	0.31	0.41	0.32	0.13	0.19	0.20	0.26	0.23	0.50	0.24	0.54	0.24	0.23	0.32	0.24	1.00	
V	0.13	0.26	0.34	0.37	0.40	0.28	0.39	0.25	0.36	0.31	0.33	0.18	0.38	0.43	0.23	0.36	0.26	0.45	0.24	0.27	
Cr	0.22	0.44	0.46	0.53	0.56	0.38	0.59	0.55	0.68	0.63	0.66	0.48	0.66	0.67	0.51	0.71	0.63	0.71	0.60	0.33	
Pb	0.49	0.32	0.63	0.26	0.40	0.50	0.30	0.26	0.25	0.32	0.33	0.32	0.52	0.26	0.69	0.38	0.50	0.39	0.36	0.43	
Cu	-0.10	0.07	0.10	0.29	0.20	0.05	-0.17	0.12	0.29	0.14	0.32	0.13	0.43	0.32	0.10	0.22	0.06	0.28	0.27	0.11	
Ni	0.02	0.27	0.28	0.41	0.44	0.26	0.36	0.24	0.35	0.30	0.40	0.27	0.41	0.44	0.26	0.39	0.23	0.45	0.35	0.25	
Co	-0.08	0.38	0.18	0.43	0.45	0.11	0.39	0.52	0.58	0.51	0.53	0.39	0.44	0.56	0.18	0.57	0.54	0.60	0.56	0.08	
Mo	0.03	0.13	0.21	0.29	0.23	0.15	0.23	0.14	0.20	0.11	0.23	0.14	0.38	0.23	0.17	0.22	0.13	0.26	0.23	0.11	
Cd	0.40	0.07	0.35	0.04	0.06	0.29	0.05	-0.02	-0.03	-0.04	0.02	0.07	0.11	-0.02	0.35	0.04	0.09	0.03	0.07	0.22	



6. 토양 및 해양의 영향

1) 토양의 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. 이 중 토양의 영향은 토양의 주요 성분인 Al, Ca, Fe을 기준으로 토양 농축인자를 구하여 확인할 수 있다. 본 연구에서는 Al을 토양의 지표성분으로 이용하여 다음의 식으로부터 토양 농축인자를 구하였다(김원형 등, 2003).


$$EF = \frac{\left(\frac{C_x}{C_{Al}}\right)_{\text{Aerosol}}}{\left(\frac{C_x}{C_{Al}}\right)_{\text{Crust}}}$$

식에서 $(C_x/C_{Al})_{\text{Crust}}$ 는 Taylor와 McLennan(1985)가 분석한 지각 성분의 조성을 기준으로 계산하였다. 이렇게 계산된 농축인자는 그 값이 1에 가까울수록 토양으로부터 유입이 큼을 의미하고 1보다 클수록 토양보다는 다른 요인에 의해 에어로졸에 유입되고 있음을 의미한다. 그러나 최만식 등(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 유래된 것으로 추정하고 있다. 연구기간 중 각 금속 성분들의 전체 평균농도 및 계절별 평균농도로부터 구한 농축인자를 비교한 결과를 Table 21에 나타내었다. 고산에서 토양 발생기원의 Ca와 Fe가 각각 2.4, 1.6를 나타내었고, 1100 고지인 경우에는 각각 3.6과 1.8로 이들 성분들이 대체적으로 토양에서 유입되고 있음을 알 수 있다. 계절별 비교에서는 농축계수가 Ca인 경우 고산에서 1.2~3.2의 범위를 나타내었고, 1100

고지에서는 3.0 ~ 4.6 범위로 1100 고지에 비해 고산이 대체적으로 토양에서 유입된 성분의 영향이 높게 나타남을 알 수 있었다. Fe인 경우 고산에서 0.9 ~ 2.0의 범위를 나타내었고, 1100 고지에서는 1.7 ~ 2.2으로 Ca에 비해 대체적으로 토양에서 보다 많은 영향을 받았다. 계절별 비교에서는 고산인 경우 여름에 토양의 영향을 가장 많이 받는 반면에, 1100 고지는 타 계절에 비해 토양이 영향을 덜 받는 것으로 나타났으며 가을과 겨울철에는 고산과 1100 고지 모두 비슷한 토양의 영향을 보였다. Cd, K의 성분들이 비교적 낮은 EF 값을 나타내는 반면, Na, Mn, Co, Ni, Zn, Pb, Cu, V등은 큰 EF 값을 보이고 있어 토양보다는 다른 요인에 의해 유입되고 있을 가능성이 큰 것으로 추정된다. 계절별로 비교한 결과에서 대부분의 성분들이 겨울철에 큰 EF 값을 나타내었다. 이는 본 연구가 이루어진 고산 측정소가 청정한 지역이면서 해안가에 근접하고 있어서, 겨울철에 강한 북풍의 영향으로 타 계절에 비해 해양의 영향을 많이 받은 원인으로 추정되며, 1100 고지 역시 겨울철 강한 북풍의 영향으로 타 계절에 비해 해양의 영향을 많이 받았으리라 추정된다.

2) 해양의 영향



에어로졸 입자에는 일반적으로 해염성분이 상당량 함유되어 있으며, 제주지역 에어로졸의 경우 그 영향이 클 것으로 예상된다. 이를 보다 정량적으로 확인하기 위하여 Na^+ 을 지표성분으로 하여 주요 수용성 성분들에 대하여 해양농축계수를 다음의 식에 의해 계산하였다(김원형, 2003).

$$EF = \frac{\left(\frac{C_x}{C_{\text{Na}^+}} \right)_{\text{Aerosol}}}{\left(\frac{C_x}{C_{\text{Na}^+}} \right)_{\text{Seawater}}}$$

식에서 $(C_x/C_{\text{Na}^+})_{\text{Seawater}}$ 는 해수 중 Na^+ 와 SO_4^{2-} , Cl^- , Mg^{2+} , Ca^{2+} , K^+ 의 농도비이고, $(C_x/C_{\text{Na}^+})_{\text{Aerosol}}$ 는 에어로졸 중의 Na^+ 와 SO_4^{2-} , Cl^- , Mg^{2+} , Ca^{2+} , K^+ 의 농도비이다. 토양 농축계수와 마찬가지로 이렇게 계산된 농축인자는 그 값이 1에 가까울수록 SO_4^{2-} , Cl^- , Mg^{2+} , Ca^{2+} , K^+ 성분들이 해염으로부터 유입되고, 1보다 클수록 이들 성분들이 해염보

다는 다음 요인에 의해 에어로졸에 유입되고 있음을 의미한다. 이 식에서 계산된 해양 농축계수를 Table 22에 수록하였다. 본 연구의 경우 고산에서 Cl^- 의 농축계수는 0.4 ~ 0.6의 범위를 보였고, 1100 고지에서는 0.2 ~ 0.9의 범위를 보였다. Mg^{2+} 은 고산에서 1.0 ~ 1.5의 범위를 나타내고, 1100 고지에서 1.5 ~ 2.8의 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 고산에서 각각 10.7 ~ 18.8, 1.9 ~ 11.3, 3.7 ~ 7.8로 비교적 큰 값을 나타내고 있고, 1100 고지에서 각각 40.8 ~ 94.6, 16.2 ~ 54.2, 14.6 ~ 25.5로 고산보다 더 큰 값을 나타내었다. SO_4^{2-} , Ca^{2+} , K^+ 성분인 경우 다른 계절에 비해 봄철에 가장 높은 EF값을 보이고 있는데, 이는 봄철 황사가 유입되면서 토양입자의 영향을 크게 받기 때문인 것으로 여겨진다.



Table 21. Annual and seasonal comparison of soil enrichment factor.

X	Crust ratio	$(C_x/C_{Al})_{\text{Aerosol}} / (C_x/C_{Al})_{\text{Crust}}$									
		Gosan Site					1100 Site				
		Annual	Spring	Summer	Fall	Winter	Annual	Spring	Summer	Fall	Winter
Na	0.3595	5.3	3.6	7.2	6.9	15.0	1.9	2.0	1.6	1.6	1.7
Mg	0.1654	3.1	2.8	2.5	3.6	6.0	5.7	5.4	11.7	4.9	7.0
Ca	0.3731	2.4	2.5	1.2	2.5	3.2	3.6	3.6	4.6	3.0	4.1
Fe	0.4353	1.6	1.6	0.9	1.7	2.0	1.8	1.7	2.2	2.1	1.9
Mn	0.0075	3.6	3.2	2.9	4.5	6.0	3.9	3.0	7.2	5.0	7.2
Co	0.0001	8.8	7.6	6.8	11.3	18.2	29.3	22.0	64.3	28.7	82.0
Ni	0.0002	24.3	17.3	36.8	34.3	51.9	126.9	133.9	160.9	91.5	125.1
Zn	0.0009	64.7	48.0	87.4	85.0	146.1	111.2	87.6	338.3	117.7	181.9
Cd	0.0012	0.9	0.6	1.5	1.0	2.0	1.7	0.9	7.6	2.2	5.1
K	0.3483	1.6	1.4	1.6	1.9	3.2	2.5	1.7	5.9	3.6	5.4
Pb	0.0002	257.5	186.6	269.1	368.9	664.7	450.0	272.2	1259.2	586.1	1369.3
Cu	0.0003	16.9	12.3	23.3	24.4	35.5	54.9	65.0	65.0	20.1	35.6
Ti	0.0093	4.5	4.2	3.9	5.2	6.6	3.9	3.9	6.5	3.6	4.7
V	0.0007	13.6	13.3	15.6	13.7	13.7	23.6	28.5	18.7	9.9	12.6

Table 22. Annual and seasonal comparison of seawater enrichment factor.

X	Crust ratio	$(C_x/C_{Na^+})_{\text{Aerosol}} / (C_x/C_{Na^+})_{\text{Seawater}}$									
		Gosan Site					1100 Site				
		Annual	Spring	Summer	Fall	Winter	Annual	Spring	Summer	Fall	Winter
SO ₄ ²⁻	0.25	14.6	18.8	12.5	10.7	11.3	58.3	66.9	94.6	40.8	42.2
Cl ⁻	1.80	0.5	0.6	0.4	0.5	0.6	0.3	0.4	0.9	0.2	0.2
Mg ²⁺	0.12	1.2	1.5	1.0	1.0	1.2	2.0	2.8	1.6	1.5	1.6
Ca ²⁺	0.04	7.1	11.3	1.9	4.8	4.9	30.2	54.2	16.2	17.3	19.8
K ⁺	0.04	5.6	7.8	3.7	5.3	4.8	20.9	25.5	25.4	16.1	14.6

7. 오염물질의 발생 기원

대기 중 부유하는 에어로졸은 지구 대기 환경과 기후, 그리고 인체 건강에 영향을 미치는 까닭에 에어로졸을 효과적으로 분석하여 그 특성을 규명하는 연구는 매우 중요하다. 그 예로 매년 봄, 주로 3월과 5월 사이에 중국의 중앙아시아 사막지대에서 발원하여 동북부 아시아로 이동하는 황사 현상은 한국과 일본 등지에서 매우 중요한 관심 대상이다. 황사는 동북아시아 지역인 한국, 일본뿐만 아니라 멀리 태평양과 미국 서부해안까지 장거리를 이동한다는 사실이 잘 알려져 있다. 황사 입자는 중국의 대규모 공업단지인 중국 북동부지역을 거쳐 장거리 이동을 하면서 황산염이나 질산염, 해염입자와 반응하는 것으로 추정되고 있는데 이들이 한국이나 일본, 태평양으로 이동될 수 있다는 점에서 특히 중요하게 여겨진다(Hayami et al., 1997). 이러한 황사의 대기 중 장거리 이동에 따른 에어로졸의 연구대상 관측 지역 중 청정지역인 제주도 고산과 한라산 1100 고지에서 채취한 시료에서 에어로졸 성분들이 주로 어떤 배출원과 연계되어 있는가의 여부를 파악하는 것은 대단히 중요한 일이며, 이러한 배출원과의 연계를 파악하기 위한 방법으로 통계 프로그램(SPSS)을 이용하여 요인분석(factor analysis)을 수행하였다. 요인분석은 변수들 간의 상관관계를 이용하여 서로 유사한 변수들끼리 묶어주는 방법으로 대기분진 구성 물질의 기원을 분별하고 유추하는데 매우 유용하게 사용된다(Oravisjärvi et al., 2003; 강창희 등, 2003). 요인분석은 일련의 관측된 변수에 근거하여 직접 관찰할 수 없는 요인을 확인하기 위한 것이다. 또한 요인 분석은 수많은 변수들을 적은 수의 몇 가지 요인으로 묶어줌으로써 그 내용을 단순화하는 것이 그 목적이며 구체적으로 다음과 같은 목적으로 이용된다. 첫째, 변수들의 축소로써 여러 개의 관련 있는 변수들이 하나의 요인으로 묶여지므로 많은 변수들이 적은 수의 요인으로 줄어들게 된다. 둘째, 불필요한 변수들의 제거로써, 요인에 포함되지 않거나 포함되더라도 중요도가 낮은 변수들을 찾을 수 있으므로 불필요한 변수를 제거한다. 셋째, 변수들의 특성파악으로써, 관련된 변수들이 묶여져 요인을 이루고 이들 요인들은 상호 독립적인 특성을 가지게 되므로 변수들의 특성이 밝혀진다. 넷째, 측정도구의 타당성 판정으로써, 하나의 특성을 측정하기 위해 관측된 변수들은 하나의 요인으로 묶여진다. 따라서 이 같은 특성을 이용하여 묶여지지 않는 변수들은 다른 특성을 가진다고 판단된다. 이로써 그 특성의 측정도구가 타당한가를 판정할 수 있다(김나

경 등, 2000). 대개 이러한 여러 변수들 간의 상관 matrix에서 상관계수 (r)가 크면 높은 상관성을 갖고 각 변수들 간의 발생원이 유사하다고 추론할 수 있다. 요인분석은 변수들 간의 상관관계를 이용하여 서로 유사한 변수들끼리 묶어주는 방법으로 대개 여러 변수들 간의 상관 matrix에서 인자 적재값이 클수록 변수들 간의 발생원이 유사하다고 추론할 수 있다. 이 때 최적인자의 수는 주로 최소 고유값을 기준으로 하여 고유값 1 이상으로 결정하는 것이 일반적이고, 스크리 검정이나 선행 이론법에 의할 경우 고유값이 1 이하일지라도 어느 정도 유의성을 나타낼 수 있다(원태현과 정성원, 1999). 본 연구에서는 에어로졸 분석결과에 대해 연구기간 전체와 계절별로 분류하여 그 각각에 대한 요인분석을 실시하였고, 최적인자의 수는 고유값(eigenvalue) 1 이상으로 각각에 대해 3개의 인자를 추출하였다. Varimax 회전법을 이용하여 산출한 전체 및 황사, 비황사로 구분하여 통계프로그램을 실시하였다.

본 연구에 대한 전체, 황사, 비황사의 요인분석 결과를 토대로 하여 고산과 1100 고지의 대기 에어로졸에 영향을 미치는 주요 요인은 3가지로 구분하였고, 이를 Table 23 ~ Table 25에 수록하였다. 전체 데이터에 대한 요인 분석 결과 전체 인자 중 고산에서는 78.0%의 설명력을 보였고, 1100 고지에서는 68.6%의 설명력을 보였다. 황사시에는 고산과 1100 고지에서 각각 87.0%와 85.2%의 설명력을 보였으며, 비황사시에는 고산과 1100 고지에서 각각 73.6%, 67.1%의 설명력을 보였다. 우선 Table 23에 나타내 보인 전체 데이터에 해석 요인분석 결과를 살펴보면, 우선 고산지역에서 요인 분석 중 첫 번째 인자는 52.9%의 설명력을 보였고, nss-Ca²⁺, Al, Fe, Ca, K, Mg, Ti, Mn, Ba, Sr, V, Cr, Co 성분이 높은 적재값을 나타내었다. 이들 성분들은 대부분 토양입자의 구성 성분들로 고산지역 대기 에어로졸이 토양 성분들의 유입에 의해 크게 영향을 받고 있음을 의미한다. 두 번째 인자는 NH₄⁺, K⁺, nss-SO₄²⁻, S, Zn, Pb, Mo 등이 높은 적재값을 나타내었고, 15.1%의 설명력을 보였다. 이들 성분들은 대부분 자동차, 난방연료, 산업체 등의 발생기원을 나타내는 성분들로 이는 인위적 오염의 영향이 비교적 크게 작용하고 있음을 의미한다. 세 번째 인자로는 대표적인 해염성분인 Na⁺, Mg²⁺, Cl⁻, Na 성분이 10.0%의 설명력을 보였다. 1100 고지에서 첫 번째 인자는 49.1%의 설명력을 보였고, nss-Ca²⁺, Al, Fe, Ca, Mg, Ti, Mn, Ba, Sr, Cr 등이 높은 적재값을 나타내었다. 이들 역시 고산에서처럼 대부분의 구성 성분들이 토양입자로서 1100 고지 대기 에어로졸의 특성도 토양 성분들의 유입에 의해 크게 영향을 받고 있음을

나타내었다. 두 번째 인자는 NH_4^+ , K^+ , nss-SO_4^{2-} , S, Pb 성분이 높은 적재값을 나타내었고, 12.6%의 설명력을 보였다. 1100 고지에서 두 번째 요인으로는 인위적 오염의 영향이 비교적 크게 작용하고 있음을 의미한다. 세 번째 인자로는 Cu, Ni 성분이 6.8%의 적재값을 나타내었다. 이와 같이 고산과 한라산 1100고지 대기 에어로졸의 특성을 비교해보면 대체적으로 토양에 의한 유입이 가장 크고, 그 다음으로 인위적 오염과 해염의 영향 순으로 작용하고 있는 것으로 조사되었다.

Table 24에 나타난 바와 같이 황사시의 결과를 보면, 고산에서 첫번째 인자는 62.0%의 설명력을 보였고, Al, Fe, Ca, Mg, Ti, Mn, Ba, Sr, Zn, V, Cr, Cu, Co, Cd 등이 높은 적재값을 나타내었다. 이들 성분들은 대부분 토양입자의 구성 성분들로 황사시 고산지역 대기 에어로졸이 토양 성분들의 유입에 의해 크게 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 두 번째 인자는 NH_4^+ , K^+ , nss-SO_4^{2-} , NO_3^- , K, S, Zn, Pb 등이 높은 적재값을 나타내었고, 14.4%의 설명력을 보였다. 이들 성분들은 대부분 자동차, 난방연료, 산업체 등의 발생기원을 나타내는 성분들로 이것으로 보아 황사시에는 토양에 이어 인위적 오염의 영향이 크게 나타남을 나타낸다. 세 번째 인자로는 대표적인 해염성분인 Na^+ , Mg^{2+} , Cl^- , Na이 큰 적재값을 나타내었고 10.6%의 설명력을 보였다. 1100 고지에서 황사 발생시 첫 번째 인자는 46.2%의 설명력을 보였고, Na^+ , Mg^{2+} , Cl^- , Al, Fe, Ca, Mg, Na, K, Ti, Mn, Ba, Sr, V, Cr 등이 높은 적재값을 나타내었다. 이는 고산과는 다른 양상으로 1100 고지에서 첫 번째 요인은 토양성분과 해염성분이 같은 경향으로 1100 고지 대기 에어로졸에 영향을 주는 것으로 추정된다. 두 번째 인자는 NH_4^+ , K^+ , nss-SO_4^{2-} , S, Zn, Pb 성분이 높은 적재값을 나타내었고, 23.7%의 설명력을 보였다. 1100고지에서 두 번째 요인은 첫 번째 요인과는 대조적으로 고산과 비슷한 결과인 인위적 오염의 영향이 비교적 크게 작용하고 있는 것으로 나타났다. 세 번째 인자로는 Cu, Mo, Cd 성분이 15.3%이 설명력을 나타내었다. 고산에서의 황사시 요인분석 결과는 전체 시료에 대한 결과와 비슷한 경향을 나타낸 반면, 1100 고지에서는 첫 번째 요인이 두 가지 발생원에서 나타나는 특성을 나타내었다. 이는 고산에 비해 상대적으로 해염성분의 영향을 크게 받지 않는 1100 고지 지역이 황사 발생시에 토양성분과 함께 해염 성분이 대거 유입되면서 나타난 현상이라고 추정된다.

마지막으로 Table 25에 보인 바와 같이 비황사시 각 성분들의 발생기원을 조사해보면, 고산에서 대기 에어로졸 요인 중 첫 번째 인자에서는 nss-Ca^{2+} , Al, Fe, Ca, K,

Mg, Ti, Mn, Ba, Sr, V, Co 성분이 높은 적재값을 나타냈으며, 이들 성분들은 대부분이 토양의 발생기원을 나타내며 50.8%의 설명력을 보였다. 두 번째 인자에는 14.3%의 설명력을 나타내었고, NH_4^+ , K^+ , nss-SO_4^{2-} , S, Pb, Cu, Mo 성분이 높은 적재값을 나타내어 두 번째 요인은 고산의 대기 에어로졸이 인위적인 영향을 받고 있음을 보여준다. Na^+ , Mg^{2+} , Cl^- , Na 성분이 세 번째 요인으로 나타나며, 해염성분의 영향을 받고 있음을 확인하였다. 1100 고지에서 대기 에어로졸이 직접적인 영향을 받는 세 가지 요인을 살펴보면, 첫 번째 요인으로 nss-Ca^{2+} , Al, Fe, Ca, Mg, Ti, Mn, Ba, Sr 성분 등이 49.0%의 설명력을 보였고 고산에서와 같이 토양성분이 주 영향을 주고 있음을 확인하였고, NH_4^+ , nss-SO_4^{2-} , S 성분이 10.7%의 설명력을 보여 두 번째 요인으로 1100 고지가 인위적인 영향을 받고 있음을 확인하였다. 세 번째로는 Cu, Ni가 7.3%의 설명력을 보였다.

이러한 요인분석 결과를 토대로 하여 연구기간 중에 전체적인 요인과 황사와 비황사시 요인을 종합해 보면, 고산에서는 첫 번째 요인으로는 토양성분이 영향이 가장 크게 나타났고, 다음으로는 인위적인 영향, 그 다음으로는 해양성분이 주를 이루고 있음을 확인하였다. 또한 한라산 1100 고지 역시 대부분의 요인이 황사시 첫 번째 요인으로 토양성분과 해염성분이 함께 나타난 것을 제외하고는 고산지역과 비슷한 결과로서, 토양성분에 이어 인위적 요인이 주를 이루고 있음을 확인하였고, 세 번째 요인만이 고산지역과 다른 경향을 보이고 있음을 확인할 수 있었다.

Table 23. Results of factor analysis for aerosol components between 1998 and 2002.

Component	Gosan Site			1100 Site		
	fator 1	factor 2	factor 3	factor 1	factor 2	factor 3
NH ₄ ⁺	-0.118	0.829	-0.118	-0.074	0.891	0.001
Na ⁺	-0.067	-0.067	0.941	0.637	0.276	0.119
K ⁺	0.215	0.882	0.167	0.305	0.841	0.234
nss-Ca ²⁺	0.876	0.280	0.096	0.675	0.280	0.409
Mg ²⁺	0.295	0.232	0.813	0.694	0.439	0.334
nss-SO ₄ ²⁻	0.169	0.887	-0.071	0.202	0.854	0.225
NO ₃ ⁻	0.456	0.395	0.288	0.626	0.380	0.323
Cl ⁻	0.096	-0.183	0.914	0.836	0.032	0.035
Al	0.955	0.102	0.073	0.932	0.017	0.174
Fe	0.938	0.167	0.064	0.902	0.065	0.018
Ca	0.957	0.162	0.095	0.883	0.155	0.274
Na	0.305	0.068	0.815	0.630	0.209	0.106
K	0.767	0.468	0.135	0.672	0.411	0.369
Mg	0.927	0.139	0.283	0.904	0.133	0.316
S	0.356	0.812	-0.003	0.351	0.829	0.139
Ti	0.830	0.186	0.226	0.911	0.155	0.170
Mn	0.916	0.275	0.082	0.864	0.167	-0.094
Ba	0.932	0.239	0.063	0.908	0.218	0.271
Sr	0.899	0.269	0.192	0.841	0.153	0.217
Zn	0.262	0.776	-0.037	0.123	0.564	0.223
V	0.930	0.175	0.059	0.253	0.125	0.583
Cr	0.771	0.149	0.076	0.672	0.285	0.197
Pb	0.177	0.895	0.036	0.310	0.725	-0.154
Cu	0.569	0.609	0.000	0.110	-0.099	0.786
Ni	0.623	0.486	0.064	0.265	0.054	0.715
Co	0.842	0.176	0.057	0.613	-0.026	0.247
Mo	0.188	0.658	0.069	0.104	0.109	0.565
Cd	0.322	0.500	0.035	-0.010	0.580	-0.288
Eigenvalue	14.8	4.2	2.8	13.7	3.5	1.9
Variance(%)	52.9	15.1	10.0	49.1	12.6	6.8
Cummulative(%)	52.9	68.1	78.0	49.1	61.7	68.6

Table 24. Results of factor analysis for aerosol components during Yellow Sand days.

Component	Gosan Site			1100 Site		
	factor 1	factor 2	factor 3	factor 1	factor 2	factor 3
NH ₄ ⁺	-0.441	0.602	-0.518	-0.244	0.947	-0.108
Na ⁺	-0.019	0.021	0.936	0.827	-0.175	-0.258
K ⁺	0.398	0.829	0.186	0.160	0.862	0.427
nss-Ca ²⁺	0.550	0.653	0.481	0.610	0.041	0.675
Mg ²⁺	0.283	0.393	0.740	0.778	0.497	0.027
nss-SO ₄ ²⁻	-0.049	0.990	0.011	-0.121	0.894	0.233
NO ₃ ⁻	0.686	0.606	-0.155	0.685	-0.012	0.355
Cl ⁻	0.273	0.284	0.861	0.852	-0.188	-0.230
Al	0.841	0.346	0.356	0.979	-0.093	0.015
Fe	0.899	0.310	-0.080	0.807	-0.043	-0.529
Ca	0.802	0.536	0.242	0.897	-0.090	0.313
Mg	0.351	0.278	0.746	0.952	-0.127	0.041
Na	0.395	0.725	0.438	0.798	-0.221	-0.267
K	0.755	0.434	0.479	0.943	0.135	0.176
S	0.280	0.809	0.080	-0.051	0.921	0.006
Ti	0.943	0.183	0.243	0.899	-0.040	0.168
Mn	0.933	-0.104	0.256	0.813	0.110	-0.458
Ba	0.922	0.016	0.374	0.985	0.022	0.001
Sr	0.734	0.521	0.347	0.721	-0.170	0.540
Zn	0.814	0.378	0.296	-0.021	0.968	0.171
V	0.920	0.262	0.049	0.785	-0.006	0.362
Cr	0.725	0.191	0.539	0.888	-0.044	0.088
Pb	0.109	0.789	0.567	-0.204	0.901	-0.092
Cu	0.741	0.023	0.585	0.074	-0.051	0.923
Ni	0.564	0.127	0.719	-0.245	-0.781	0.528
Co	0.808	0.072	0.132	0.682	-0.113	0.389
Mo	0.091	0.569	0.316	0.056	0.176	0.805
Cd	0.780	0.040	0.398	-0.158	0.560	0.748
Eigenvalue	17.4	4.0	3.0	12.9	6.6	4.3
Variance(%)	62.0	14.4	10.6	46.2	23.7	15.3
Cummulative(%)	62.0	76.4	87.0	46.2	69.9	85.2

Table 25. Results of factor analysis for aerosol components during Non-Yellow Sand days.

Component	Gosan Site			1100 Site		
	fator 1	factor 2	factor 3	factor 1	factor 2	factor 3
NH ₄ ⁺	-0.008	0.847	-0.098	-0.027	0.905	0.045
Na ⁺	-0.053	-0.064	0.937	0.735	0.160	0.138
K ⁺	0.245	0.879	0.168	0.340	0.819	0.212
nss-Ca ²⁺	0.728	0.412	0.094	0.713	0.226	0.339
Mg ²⁺	0.381	0.159	0.802	0.753	0.365	0.318
nss-SO ₄ ²⁻	0.177	0.886	-0.077	0.270	0.818	0.233
NO ₃ ⁻	0.265	0.440	0.351	0.684	0.312	0.307
Cl ⁻	-0.006	-0.190	0.917	0.822	-0.004	0.026
Al	0.881	0.178	0.084	0.938	0.187	0.130
Fe	0.953	0.199	0.091	0.872	0.233	0.056
Ca	0.920	0.234	0.118	0.874	0.253	0.170
Na	0.255	0.018	0.839	0.880	0.200	0.315
K	0.694	0.592	0.122	0.634	0.147	0.086
Mg	0.808	0.183	0.492	0.565	0.530	0.313
S	0.471	0.753	-0.025	0.399	0.826	0.110
Ti	0.689	0.177	0.292	0.887	0.285	0.074
Mn	0.886	0.398	0.087	0.778	0.311	-0.141
Ba	0.871	0.353	0.041	0.867	0.318	0.255
Sr	0.761	0.406	0.296	0.871	0.158	0.047
Zn	0.243	0.782	-0.045	0.131	0.572	0.226
V	0.892	0.215	0.058	0.154	0.169	0.653
Cr	0.502	0.175	0.052	0.514	0.393	0.161
Pb	0.288	0.869	0.020	0.382	0.700	-0.244
Cu	0.482	0.661	-0.043	0.012	-0.071	0.705
Ni	0.534	0.513	0.045	0.259	0.075	0.712
Co	0.741	0.192	0.039	0.534	-0.028	0.110
Mo	0.299	0.613	0.048	0.136	0.110	0.449
Cd	0.362	0.455	-0.004	0.044	0.582	-0.404
Eigenvalue	14.2	4.0	2.4	13.7	3.0	2.0
Variance(%)	50.8	14.3	8.5	49.0	10.7	7.3
Cummulative(%)	50.8	65.1	73.6	49.0	59.8	67.1

8. 풍향별 농도 비교

대기오염물질은 대기 중에서 기류를 타고 이동할 수 있기 때문에 장거리 이동 현상을 규명하기 위해서는 국지적인 영향을 많이 받는 대도시 지역보다는 오염원으로부터 격리된 청정지역에서의 측정이 필요하다. 제주도의 고산과 한라산 1100 고지는 청정지역으로 자체 오염원의 영향을 거의 받지 않는 지역이다. 따라서 각 에어로졸 성분의 농도를 풍향별로 비교하면 대기오염물질의 이동경로를 파악할 수 있다. 연구 기간 동안 고산과 1100 고지에서 채취한 각 453개, 451개의 시료들에 대한 수용성 성분과 금속 성분의 농도변화를 풍향별로 비교하여 Figure 47~Figure 52에 나타내었다. 이 때의 풍향은 00 UTC, 850 hPa 즉, 고도 약 1500 m 내외의 고층기상자료를 사용하여 나타내었다. 주요 수용성 성분들의 풍향별 농도변화를 살펴 본 결과 대체적으로 중국과 한반도를 포함한 내륙 쪽에서 바람이 불어올 때 농도가 증가하고, 상대적으로 북태평양 및 일본 쪽에서 바람이 불 때 농도가 감소하는 현상을 보였다. 먼저 고산지역 에어로졸 성분의 풍향별 농도변화를 보면 토양의 주요 성분인 $nss-Ca^{2+}$ 의 경우 $210^{\circ} \sim 300^{\circ}$ 서풍 계열 풍향일 때 농도가 크게 증가하는 경향을 보였다. 이와 비슷하게 NO_3^- 성분 역시 $210^{\circ} \sim 320^{\circ}$ 의 북서풍 계열의 바람이 불 때 그 농도가 훨씬 높게 증가하는 것으로 조사되었다. 그리고 $nss-SO_4^{2-}$ 성분 역시 주로 $220^{\circ} \sim 330^{\circ}$ 의 북서풍 계열일 때 남풍 ~ 동풍 계열의 풍향에 비해 농도가 증가하는 경향을 나타내었다. 그러나 NH_4^+ 의 경우 풍향별로 큰 농도 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다. 1100 고지 에어로졸의 경우 $nss-Ca^{2+}$ 는 $200^{\circ} \sim 330^{\circ}$ 서풍 계열 풍향일 때 농도가 크게 증가하는 경향을 보였다. 이와 유사하게 NO_3^- 성분 역시 $240^{\circ} \sim 320^{\circ}$ 의 북서풍 계열의 바람이 불 때 그 농도가 높게 나타나는 것으로 조사되었다. 그리고 $nss-SO_4^{2-}$ 성분 역시 주로 $210^{\circ} \sim 330^{\circ}$ 의 북서풍 계열일 때 고산에서보다 뚜렷한 농도 증가 추세를 보이는 것으로 나타났다. 반면에 NH_4^+ 은 고산에서와 마찬가지로 풍향별로 큰 농도 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다. 에어로졸의 주요 금속 성분들에 대해 풍향별 농도 변화를 조사해 본 결과 고산에서는 토양의 주요 성분인 Al, Fe, Ti, Ca 등이 주로 $220^{\circ} \sim 300^{\circ}$ 의 서풍 계열의 풍향일 때 농도가 크게 증가하는 경향을 보였다. 그리고 인위적 기원으로 알려진 Pb, Zn, V의 경우 $220^{\circ} \sim 320^{\circ}$ 의 서풍계열에서 높은 농도를 보이고 있으며, 다만 Zn은 풍향에 의한 뚜렷한 변화는 보이고 있지 않지만, 서풍계열일 때 보다 높은

농도를 나타내고 있는 것으로 조사되었다. 1100 고지에서 토양의 주요 성분인 Al, Fe, Ti, Ca 등이 주로 220° ~ 310°의 서풍 계열의 풍향일 때 농도가 크게 증가하는 경향을 보였다. 인위적 기원인 Pb, Zn, V 성분은 220° ~ 330°의 서풍계열에서 높은 농도를 보이고 있으며, 다만 Zn은 풍향에 의한 뚜렷한 변화를 보이고 있지 않는 것으로 나타났다. 이러한 풍향별 농도 변화 결과로 볼 때 제주도 고산지역의 대기 에어로졸과 1100 고지 대기 에어로졸은 자체 오염원보다는 타 지역에서 장거리 이동된 오염물질들이 상당량 대기 중에 유입되는 것으로 여겨진다.



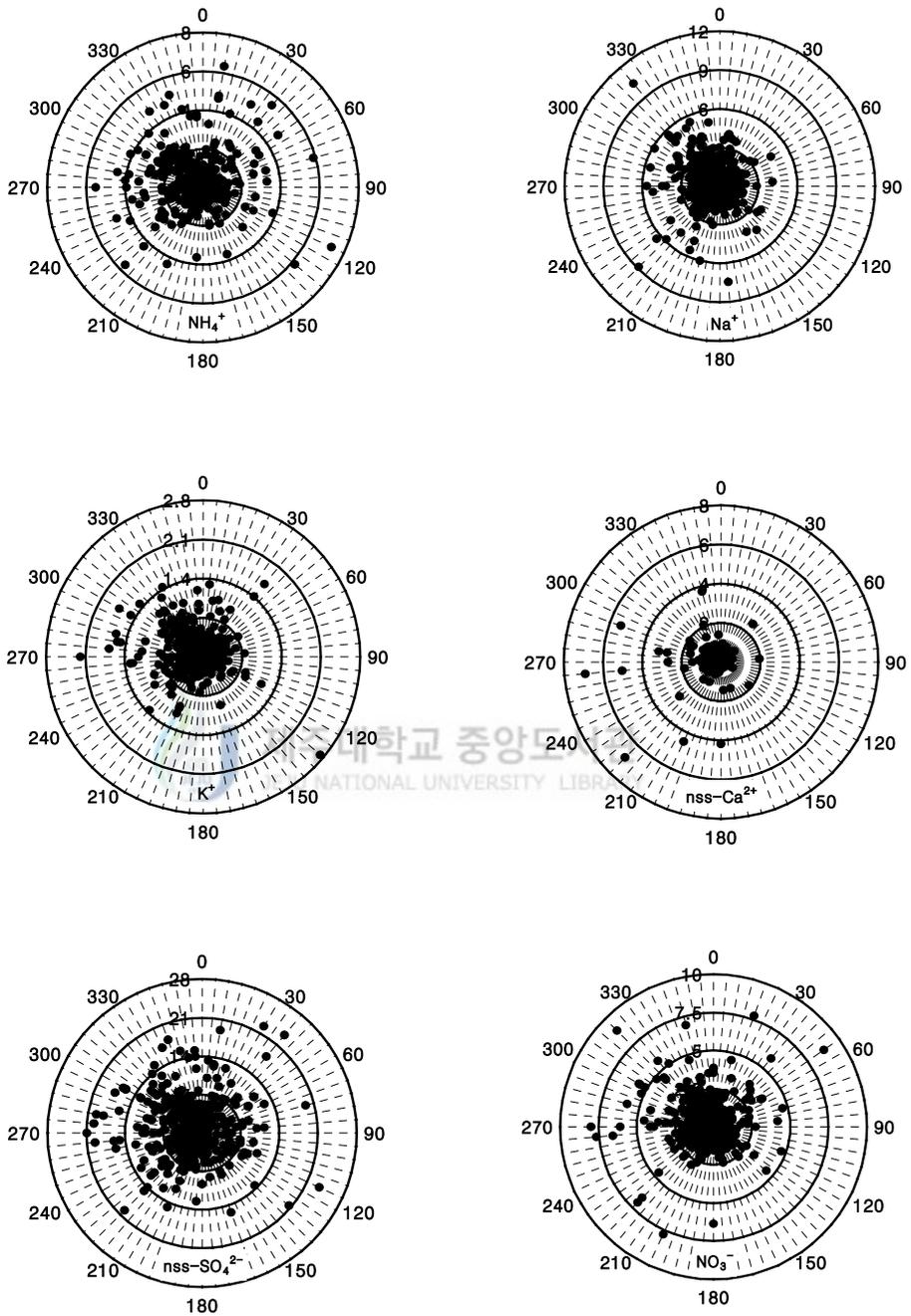


Figure 47. Variations of NH_4^+ , Na^+ , K^+ , nss-Ca^{2+} , nss-SO_4^{2-} , and NO_3^- concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) as a function of the wind direction at Gosan Site.

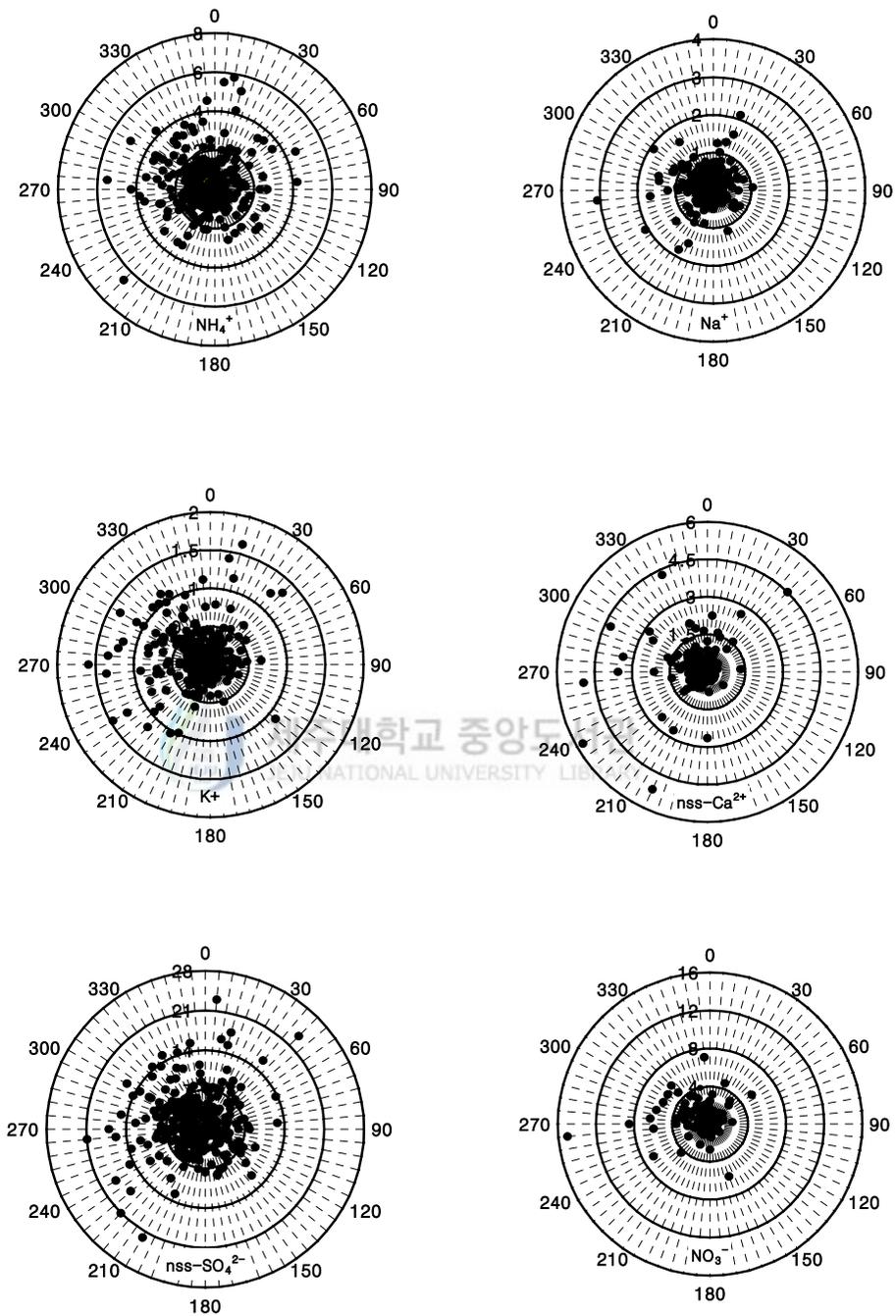


Figure 48. Variations of NH_4^+ , Na^+ , K^+ , nss-Ca^{2+} , nss-SO_4^{2-} , and NO_3^- concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) as a function of the wind direction at 1100 site in Mt. Halla.

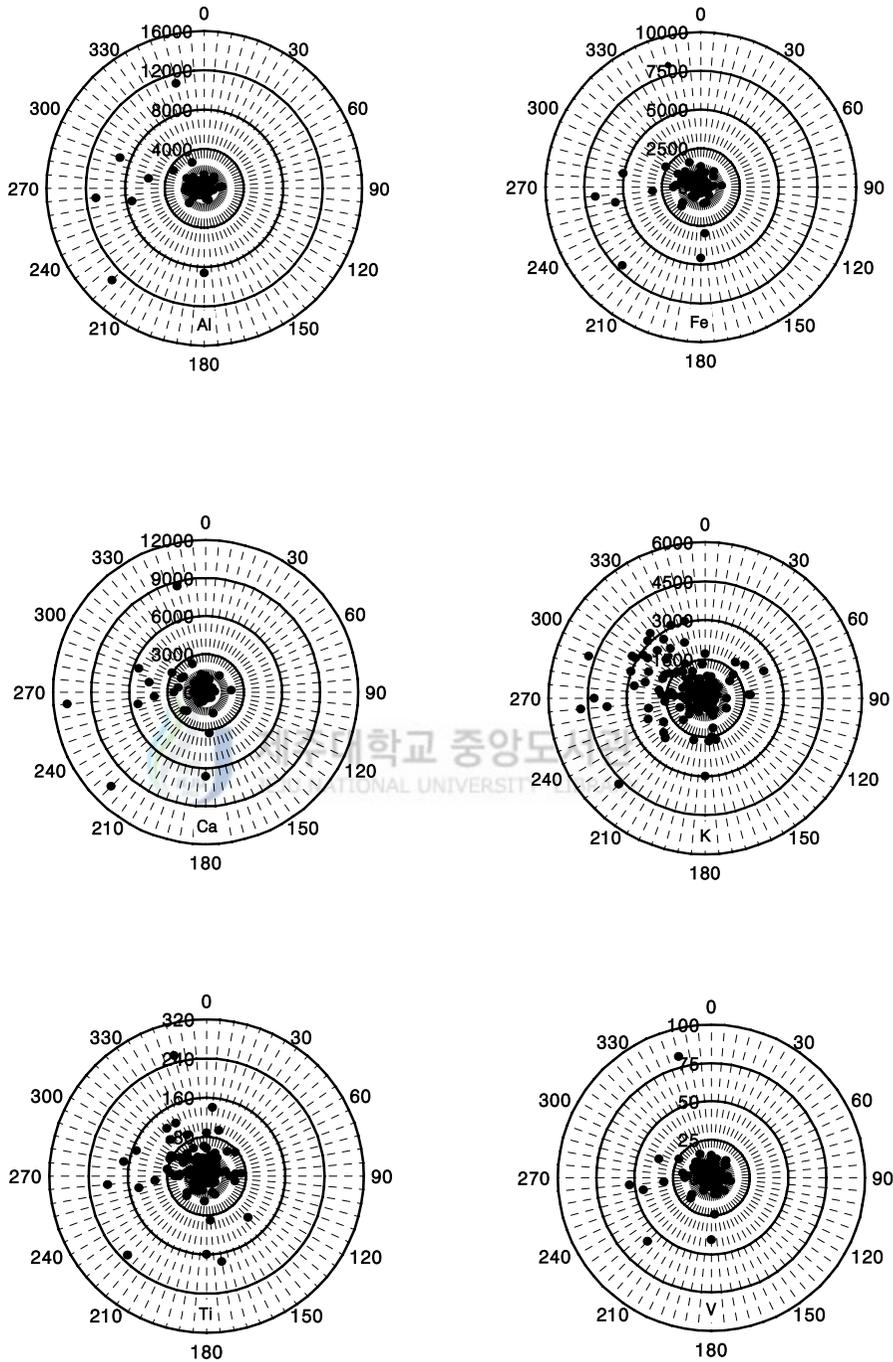


Figure 49. Variations of Al, Fe, Ca, K, Ti and V concentration(ng/m^3) as a function of the wind direction at Gosan Site.

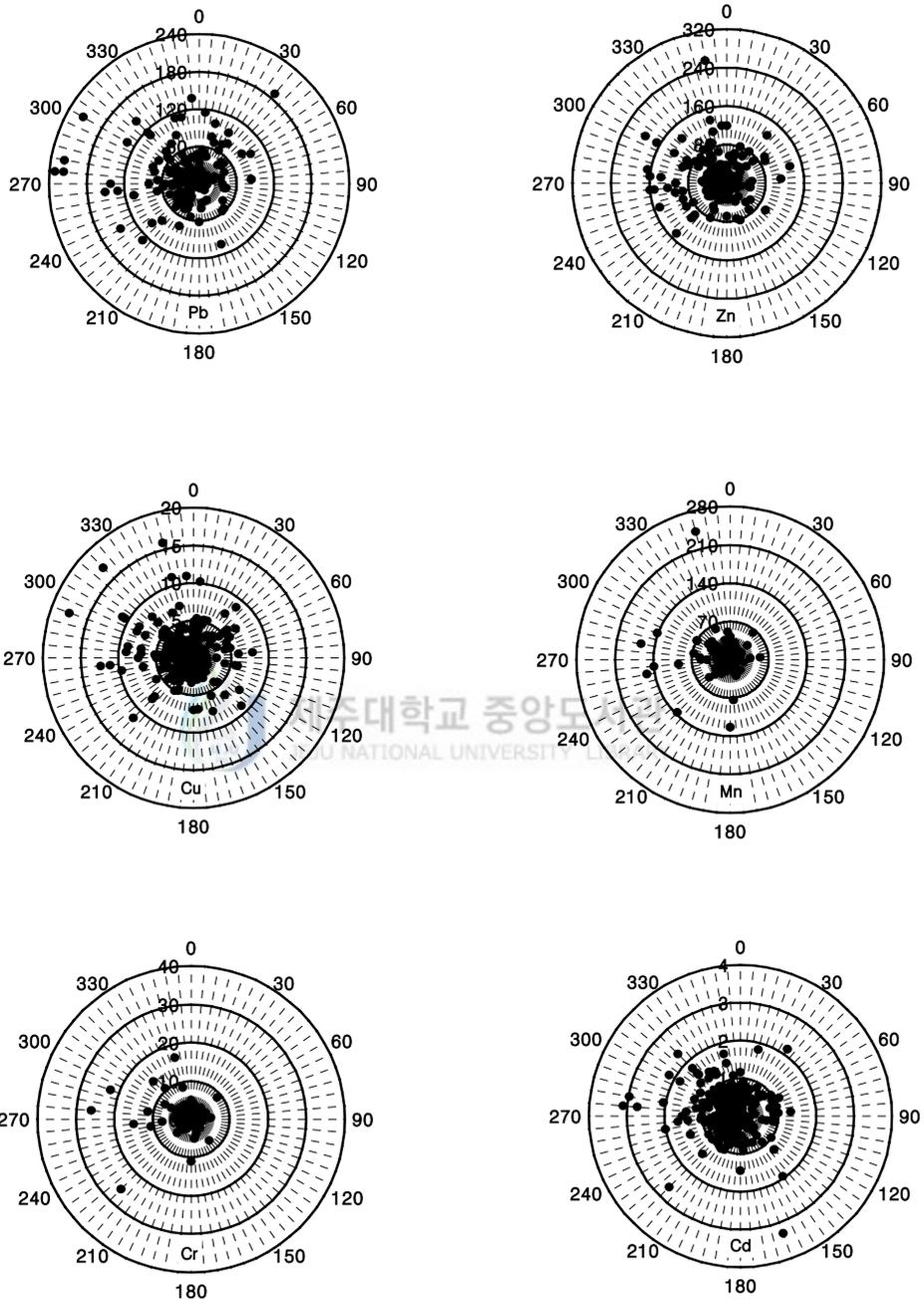


Figure 50. Variations of Pb, Zn, Cu, Mn, Cr and Cd concentration(ng/m^3) as a function of the wind direction at Gosan Site.

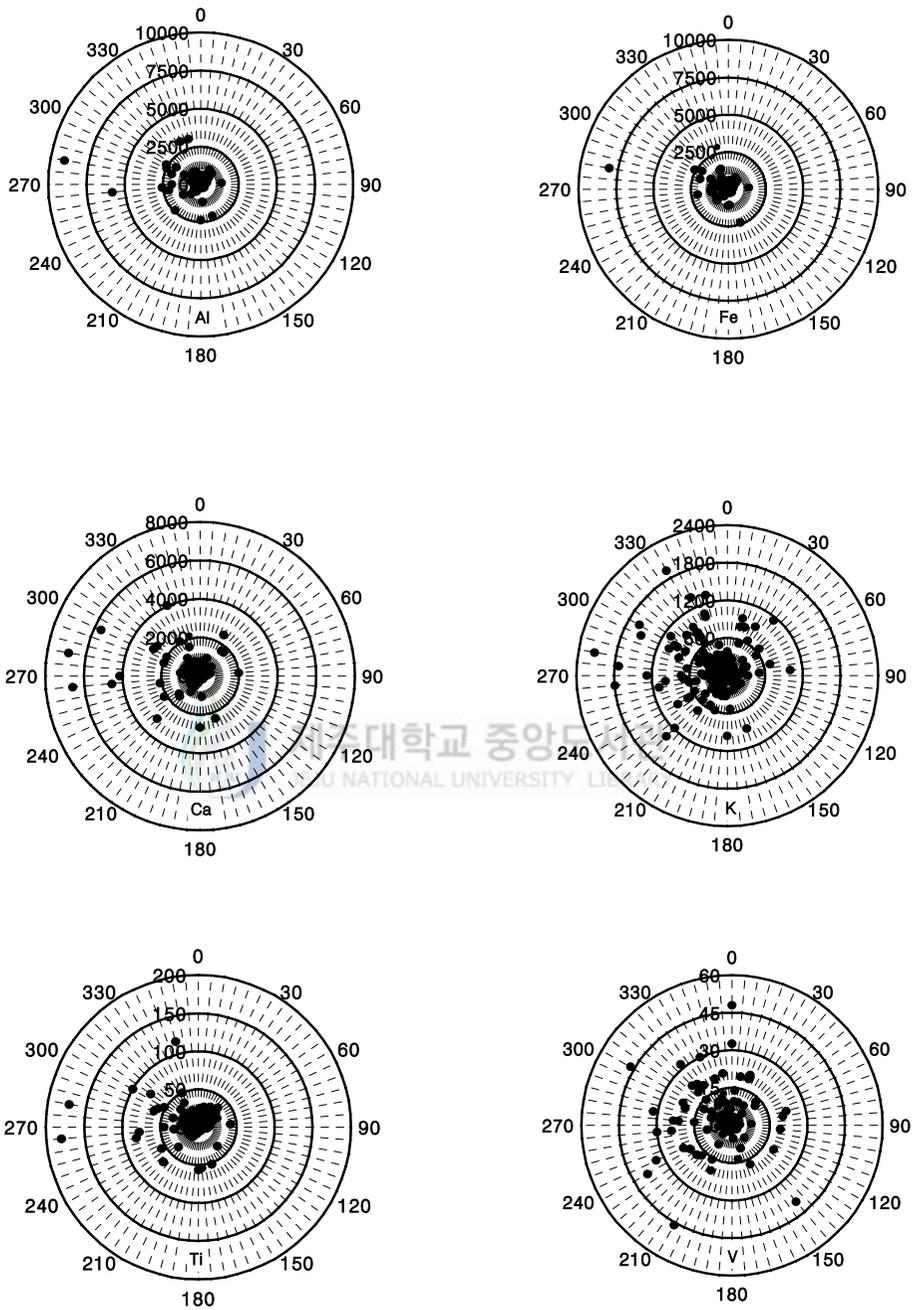


Figure 51. Variations of Al, Fe, Ca, K, Ti and V concentration(ng/m^3) as a function of the wind direction at 1100 site in Mt. Halla.

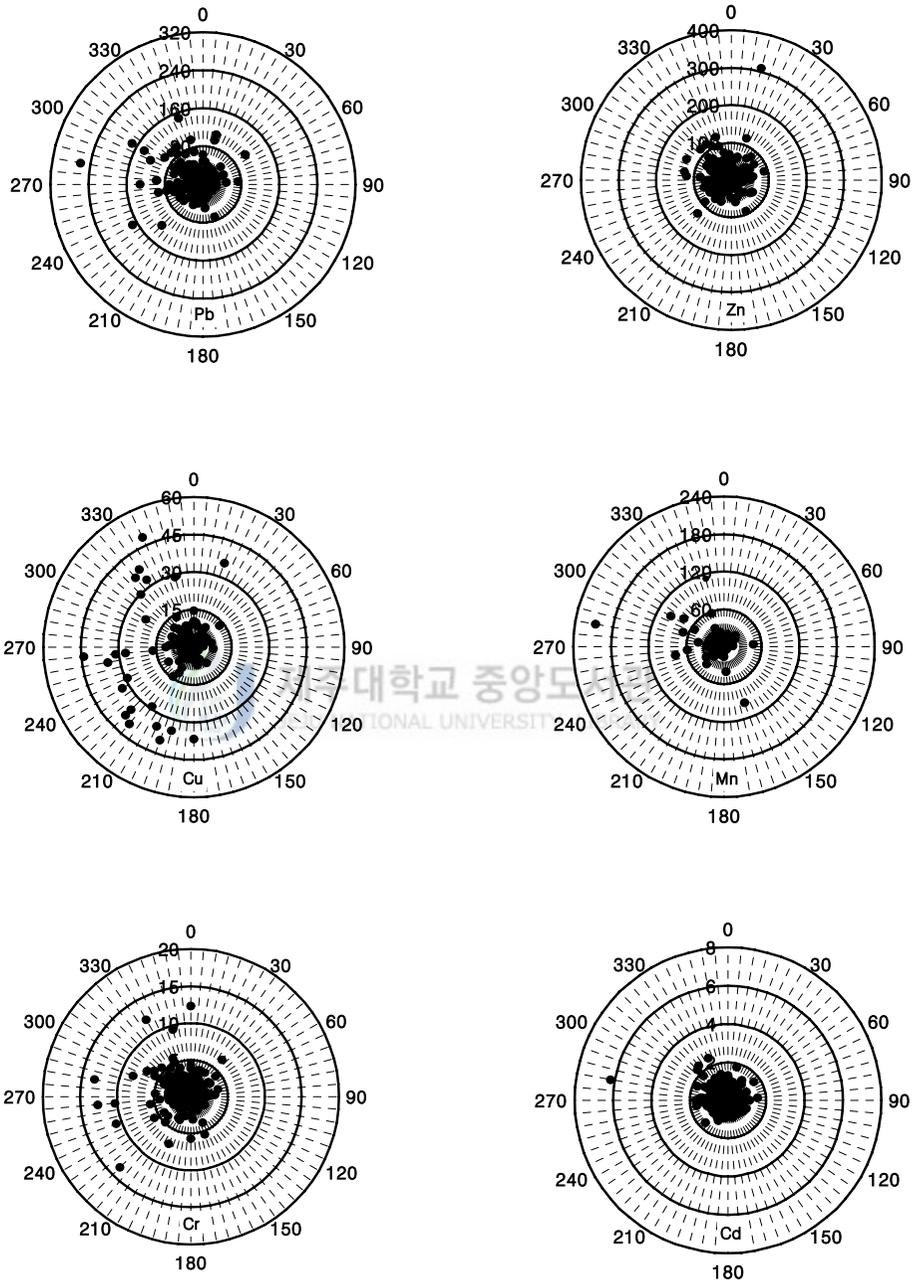


Figure 52. Variations of Pb, Zn, Cu, Mn, Cr and Cd concentration(ng/m^3) as a function of the wind direction at 1100 site in Mt. Halla.

IV. 결 론

제주도 고산 측정소와 한라산 1100 고지 측정소에 high volume air sampler를 설치하여 1997년 3월부터 2002년 12월까지 고산에서 총 453개, 한라산 1100 고지에서 총 451개의 에어로졸 시료를 채취하여 수용성 성분 및 금속 성분을 분석하였다. 분석 결과로부터 고산과 1100 고지 대기 에어로졸의 특성을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 제주 지역 대기 에어로졸의 수용성 성분 평균농도는 고산에서 $nss-SO_4^{2-} > Na^+ > NO_3^- > Cl^- > NH_4^+ > nss-Ca^{2+} > K^+ > Mg^{2+}$, 1100 고지에서 $nss-SO_4^{2-} > NH_4^+ > NO_3^- > nss-Ca^{2+} > Na^+ > K^+ > Cl^- > Mg^{2+}$ 의 순위를 보였다. 가장 높은 농도를 나타낸 $nss-SO_4^{2-}$ 의 연간 평균 농도는 고산에서 $6.12 \mu g/m^3$ 값을 나타내었고, 1100 고지에서 $4.75 \mu g/m^3$ 를 나타내었다. 또한 해염성분인 Na^+ , Cl^- 의 경우 1100 고지보다 고산에서 높게 나타났다. 1100고지에서는 해양의 영향을 비교적 덜 받는 반면, 인위적 및 토양 발생 기원의 성분들(NH_4^+ , NO_3^- , $nss-Ca^{2+}$)이 상대적으로 높은 농도를 보이는 것으로 조사되었다. 연구기간 동안의 SO_4^{2-} 와 NO_3^- 를 살펴본 결과 최근으로 올수록 SO_4^{2-} 는 감소하는 경향을 보였고, NO_3^- 는 점차 증가하는 경향을 보였다.
2. 금속 및 황 성분의 연평균 농도를 비교해 본 결과 고산에서는 $S > Na > K > Al > Ca > Fe > Mg > Zn > Pb > Ti > Mn > V > Ba > Sr > Cu > Ni > Cr > Mo > Cd > Co$ 의 순으로 나타났으며, 1100 고지에서는 $S > Ca > Al > Mg > K > Fe > Na > Zn > Pb > Ti > Mn > Ni > Cu > V > Ba > Sr > Cr > Mo > Co > Cd$ 의 순으로 고산과 1100고지 두 곳 모두 주로 인위적 발생기원을 나타내는 S의 농도가 가장 높고, 다음으로 Na, K, Al, Ca, Fe, Mg 등의 해염 및 토양 성분들이 대체적으로 높은 농도를 보였다.
3. 계절별 농도를 비교해 본 결과 $nss-Ca^{2+}$ 의 농도는 봄, 여름, 가을, 겨울철에 고산

에서는 각각 $0.68 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.13 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.43 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.39 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 보였고 1100고지에서는 $0.76 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.12 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.29 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.28 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 고산과 1100고지에서 모두 봄철에 높은 농도를 보이며 여름철에 가장 낮은 농도를 나타내었다. 인위적 기원의 nss-SO_4^{2-} 는 봄, 여름, 가을, 겨울철에 고산에서 각각 $7.11 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $5.16 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $6.02 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $5.58 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 1100고지에서 각각 $5.86 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $4.23 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $4.31 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $3.74 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 1100고지 역시 고산지역과 비슷한 계절별 경향을 나타내었다. NO_3^- 의 계절별 농도는 고산에서 각각 $2.17 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $1.17 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $1.55 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $1.67 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 1100고지에서는 각각 $1.50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.21 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.53 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.66 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 나타내었다. 인위적 성분인 NO_3^- 도 봄철에 가장 높은 농도를 보였고 여름에 가장 낮은 농도를 보였다. 그리고 S 성분 역시 고산에서 각각 $2070.1 \text{ ng}/\text{m}^3$, $1593.6 \text{ ng}/\text{m}^3$, $1588.0 \text{ ng}/\text{m}^3$, $1837.2 \text{ ng}/\text{m}^3$, 1100고지에서 각각 $1217.3 \text{ ng}/\text{m}^3$, $843.1 \text{ ng}/\text{m}^3$, $828.5 \text{ ng}/\text{m}^3$, $734.2 \text{ ng}/\text{m}^3$ 로 황사가 발생하는 봄철에 높은 농도를 보이고 있으며, Na, Al, Ca, Fe, K, Mg의 토양기원 성분들도 고산과 1100고지 모두 봄철 농도가 높은 경향을 보였다.

4. 황사와 비황사시 고산과 1100고지에서 에어로졸 성분별 농도 차이를 조사해 본 결과, 황사시 고산과 1100고지 수용성 성분을 비교해 보았을 때 대체적으로 Ca^{2+} , SO_4^{2-} , NO_3^- 성분은 고산에서 각각 9.91배, 1.46배, 2.50배, 1100고지에서 각각 7.28배, 1.27배, 2.79배로 황사일에 농도가 증가하는 경향을 보였고, 이들 중에서도 Ca^{2+} 와 NO_3^- 의 농도가 크게 증가하는 것으로 조사되었다. 고산에서 S 농도는 황사와 비황사 시에 각각 $3.27 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $1.78 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 비 황사 시에 비해 황사 시에 1.8배 정도 더 높은 농도를 보이는 것으로 조사되었고, 1100 고지에서는 황사와 비황사 시에 각각 $1.87 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.95 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 비 황사 시에 비해 황사 시에 2.0배 정도 더 높은 농도를 보이는 것으로 조사되었다. 토양 기원의 Al, Ca, Fe, K 성분은 황사시 고산에서 Al은 13.6배, Ca은 12.1배, Fe은 9.9배 K은 5.9배 정도 증가하였고, 1100고지에서 Al은 13.1배, Ca은 9.8배, Fe은 9.5배, K은 2.2배 정도 증가한 것으로 나타났다.

5. 고산과 한라산 1100고지에서 풍향에 따른 각 성분들의 농도 변화를 조사해 본 결과 대부분의 성분들의 농도가 북서풍 바람일 때 증가하는 경향을 보였고, 특히 북태평양 쪽에서 불어오는 남동풍일 때에 비해 중국과 한반도의 대륙 쪽에서 불어오는 북

서풍 계열의 풍향일 때 대기 오염물질들이 장거리 이동되어 제주지역 대기질에 큰 영향을 미치는 것으로 추정된다.

6. 에어로졸 성분들의 발생기원을 계절별로 확인해 본 결과 토양 발생기원인 경우 고산에서 Ca와 Fe의 토양 농축인자는 각각 2.4, 1.6을 나타내었고, 1100고지인 경우에는 각각 3.6과 1.8로 이들 성분들이 대체적으로 토양에서 유입되고 있다고 조사되었다. 해양 발생기원인 경우 고산에서 Cl^- 의 해양 농축계수는 0.4 ~ 0.6의 범위를 보였고, 1100고지인 경우 0.2 ~ 0.9의 범위를 보였다. Mg^{2+} 의 해양 농축계수는 고산에서 1.0 ~ 1.2의 범위를 나타내고, 1100고지에서 1.5 ~ 2.8의 범위를 보여 이들 성분들은 주로 해양의 영향을 많이 받고 있음을 알 수 있었다.

7. 에어로졸 성분들 간의 상관관계를 조사한 결과 수용성 성분들은 Na^+ 와 Cl^- , $nss-SO_4^{2-}$ 과 NH_4^+ 간의 상관계수가 높게 나타났고, 금속 성분들 간에는 토양 성분들인 Al, Fe, Ca, Ti, Mn, Ba, Sr들이 서로 높은 상관성을 보인 것으로 보아 이들 성분들이 동일한 발원지인 토양에서 제주지역 대기 중으로 유입되고 있는 것으로 보인다.

8. 에어로졸 성분들의 발생기원을 확인하기 위해 요인분석을 실시한 결과 연구기간 전체에 대한 요인과 황사 그리고 비황사시 요인을 종합해 보면, 고산에서는 에어로졸 성분들의 발생기원에 대한 첫 번째 요인으로는 토양성분의 영향이 가장 크게 나타났고, 다음으로는 인위적인 영향, 그리고 해양성분이 주를 이루고 있음을 확인 하였다. 또한 한라산 1100고지 역시 황사시의 첫 번째 요인으로 토양성분과 해양성분이 함께 나타난 것을 제외하고는 대부분의 요인이 고산지역과 비슷한 경향으로, 토양성분에 이어 인위적 요인이 주를 이루고 있음을 확인하였다.

V. 참 고 문 헌

- 1) 강창희, 김원형, 홍상범, 이기호, 홍민선, 심상규 (1999) 청정지역 강우의 분석: 1997-1998년 한라산 1100고지와 제주시 강우의 특성, 한국대기환경학회지, 15(5), 555-566.
- 2) 강창희, 김원형, 변경희, 허철구, 심상규 (2000) 1993 - 1999년 제주도 고산 지역 강우의 산성화 및 중화 요인 분석, 한국대기환경학회 추계학술대회 논문집, 336-338.
- 3) 강창희, 김원형, 한진석, 선우영, 문길주 (2003) 1997 ~ 2001년 제주도 고산지역 $PM_{2.5}$ 미세분진의 오염특성, 한국대기환경학회지, 19(3), 263-273.
- 4) 김기현, 김민영, 신재영, 최규훈, 강창희 (2002) $PM_{2.5}$, PM_{10} , TSP의 시간대별 관측 결과에 기초한 황사기간 중 분진의 분포특성에 대한 고찰: 서울시의 4대 관측점을 중심으로 한 2001년 봄철 황사 기간에 대한 사례연구, 한국대기환경학회지, 18(5), 419-426.
- 5) 김나경, 김용표, 강창희, 문길주 (2003) 고산에서 측정된 $PM_{2.5}$ 이온 농도 특성: 1998 ~ 2002년 측정자료, 한국대기환경학회지, 19(3), 333-343.
- 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, 배귀남, 지준호, 진현철, 문길주 (1999) 제주도 고산에서의 에어로솔 입경분포별 조성: 1998년 4월 측정 연구, 한국대기환경학회지, 15(5), 677-685.
- 9) 김용표, 이종훈, 문길주, 김희강, 정장표, 이종범 (2000) 1996/1997년 겨울 우리나라 배경측정소에서의 대기오염 물질 특성, 한국대기환경학회지, 16(4), 415-420.
- 10) 김원형, 강창희, 신찬성, 고선영, 홍민선 (2003) 제주도 한라산 1100 고지 대기 에어로졸의 조성 및 특성, 한국대기환경학회지, 19(2), 145-156.
- 11) 문길주, 김용표 (1997) 동북아 대기오염 장거리이동과 환경보전협력방안에 관한 조

- 사(Ⅱ), 국립환경연구원보고서(BSG0549-5940-9).
- 12) 문길주, 김용표 (1999) 동북아 대기오염 장거리이동과 환경보전협력방안에 관한 조사(Ⅳ), 국립환경연구원보고서(BSG0549-5940-9).
 - 13) 박민하, 김용표, 강창희 (2001) 황사/비황사의 입자 조성 변화: 1993~1996년 봄철 고산 측정자료, 한국대기환경학회지, 17(6), 487-492.
 - 14) 박민하, 김용표, 강창희 (2002) 비해염 황산염에 대한 질산염의 비로 살펴본 대기오염물질의 변화: 1992~1999년 고산 측정자료, 한국대기환경학회지, 18(3), 247-252.
 - 15) 박민하, 김용표, 강창희, 김원형 (2003) 고산에서 측정된 TSP 농도 특성: 통계적 해석, 한국대기환경학회지, 19(1), 93-100.
 - 16) 신혜정, 김지영, 최병철, 오성남, Jianzhen Yu, Keith Bower (2002) ACE-Asia 집중관측기간에 제주고산에서 측정된 대기오염물질의 농도 분포특성, 한국대기환경학회지, 18(6), 487-501.
 - 17) 원태현, 정성원 (1999) 한글 SPSS 아카데미, 고려정보산업, p370-375.
 - 18) 이기호, 허철구, 송문호, 박용이 (1999a) 제주지역 강하먼지의 조성에 관하여: 1. 화학적 조성 및 침적량, 한국대기환경학회지, 15(1), 13-22.
 - 19) 이기호, 허철구 (1999b) 제주지역 강하먼지의 조성에 관하여: 2. 오염원 추정, 한국대기환경학회지, 15(2), 101-111.
 - 20) 이민희, 한의정, 신찬기, 한진석 (1988) 황사 현상시 분진의 입도 분포와 화학 조성에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 4(2), 20-27.
 - 21) 이승복, 배귀남, 김용표, 진현철, 윤용석, 문길주 (2002) 황해상 덕적도의 대기 에어로졸 특성, 한국대기환경학회지, 18 (4), 305-316.
 - 22) 이용기, 김종찬, 최승석, 임홍빈, 최양희, 이수문 (2002) 황상현상에 의한 대기오염물질의 농도분포 특성에 관한 연구, 한국대기환경학회지, 17(2), 71-78.
 - 23) 이종훈, 김용표, 문길주, 김희강 (1999) 우리 나라 청정지역에서의 황과 질소 농도비의 특성, 한국대기환경학회추계학술대회논문집, 139-140.
 - 24) 이호근, 박경윤, 서명석, 장광미, 강창희, 허철구 (1995) 제주도 고산에서 수용성 에어로졸의 화학적 성분 분석, 한국대기보전학회지, 11(3), 245-252.
 - 25) 최규훈, 김기현, 강창희, 이진홍 (2002) 황사와 비황사기간의 중금속 농도분포 특성, 한국대기환경학회지, 1(2003), 45-46.

- 26) 최만식, 조성록, 이동수 (1989) 서해안 대기 분진의 화학 조성 및 기원에 대한 연구(I), 한국대기보전학회지, 5(2), 72-83.
- 27) 한진석 (1999) 동북아시아에서의 대기오염물질 장거리이동과 침적현상 연구현황 및 향후전망, 한국대기환경학회 추계학술대회 논문집, 338-345.
- 28) 황인조, 김동술 (1998) Submicron 부유분진의 화학적 조성 및 분포에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 14(1), 11-23.
- 29) 황희진, 김혜경, 노철언 (2003) 단일입자분석(Low-Z Electron Probe X-ray Microanalysis)을 이용한 2000년, 2001년에 발생한 황사 입자의 특성분석, 한국대기환경학회지, 19(4), 415-425.
- 30) Al-Momani, I.F (2003) Trace elements in atmospheric precipitation at Northern Jordan measured by ICP-MS : acidity and Possible sources, *Atmospheric Environment*, 37(32), 4507-4515.
- 31) Arimoto R., R.A. Duce, D.L. Savoie, J.M. Prospero, R. Talbot, J.D. Cullen, U. Tomza, N.F. Lewis, B.J. Ray (1996) Relationships among aerosol constituents from Asia and the North Pacific during PEM-West, *J. Geophys. Res.*, 101(D1), 2011-2023.
- 32) Arndt R. L., G. R. Carmichael, and J.M. Roorda (1998) Seasonal source-receptor relationships in asia, *Atmospheric Environment*, 32(8), 1397-1406.
- 33) Carmichael G.R., Y. Zhang, L.L. Chen, M.S. Hong, and H. Ueda (1996) Seasonal variation of aerosol composition at Cheju Island, Korea, *Atmospheric Environment*, 30(13), 2407-2416.
- 34) 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.
- 35) 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, *Atmospheric Environment*, 36(2), 175-199.
- 36) Chebbi, A., P. Carlier (1996) Carboxylic acids in the Troposphere, Occurrence,

- sources, and sinks: A review, *Atmospheric Environment*, 30(24), 4233-4249.
- 37) Chen, L.L., G.R. Carmichael, M.S. Hong, H. Ueda, S. Shim, C.H. Song, Y.P. Kim, R. Arimoto, J. Propero, D. Savoie, K. Murano, J.K. Park, H.G. Lee, and C.H. Kang (1997) Influence of continental outflow events on the aerosol composition at Cheju Island, South Korea, *J. Geophys. Res.*, 102(D23), 28551-28574.
- 38) Chen, T.J., and H.J. Chen (1987) Study on large-scale features of dust storm system in East Asia, *Meteorol. Res.*, 10(1), 57-79.
- 39) Chung, K.Y., S.U. Park (1995) Characteristic synoptic features associated with the transport of Asian dust to Korea, *Korean J. Atmos. Sci.*, 31(1), 45-63.
- 40) Duce, R.A., C.K. Unni, B.J. Ray, J.M. Prospero, and J.T. Merrill (1980) Long-range atmospheric transport of soil dust from Asia to the tropical North Pacific : Temporal variability, *Science*, 209, 1522-1524.
- 41) Guttikunda, S.K., G.R. Carmichael, G. Calori, C. Eck, J.H. Woo (2003) The contribution of megacities to regional sulfur pollution in Asia, *Atmospheric Environment*, 37(1), 11-22.
- 42) Gregory R. Carmichael, Yang Zhang, Li-Ling Chen, Min-Sun Hong and Hiromasa Ueda (1996) Seasonal Variation Of Aerosol Composition At Cheju Island, Korea, *Atmospheric Environment*, 30(13), 2407-2416.
- 43) Hayami H. and Carmichael G.R. (1997) Analysis of aerosol composition at Cheju island, Korea, Using a two-bin gas-aerosol equilibrium model, *Atmospheric Environment*, 31(20), 3429-3439.
- 44) 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.
- 45) He, Z., Y.J. Kim, K.O. Ogunjobi, C.S. Hong (2003) Characteristics of PM_{2.5} species and long-range transport of air masses at Taean background station, South Korea, *Atmospheric Environment*, 37(2), 219-230.

- 46) 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.
- 47) Hu Min, Ling-Yan He, Yuan-Hang Zhang, Min Wang, Yong-Pyo Kim, K.C. Moon (2002) Seasonal variation of ionic species in fine particles at Qingsao, China, *Atmospheric Environment*, 36(38), 5853-5859.
- 48) Huebert B. and T. Bates (1998) ACE-Asia (Asian Pacific Regional Aerosol Characterization Experimental); project propectus, The 2nd ACE-Asia planning meeting, Nov. 10-13, Cheju.
- 49) Iwasaka Y., M. Yamato, R. Imasu, and A. Ono (1988) Transport of Asian dust (KOSA) particles; importance of weak KOSA events on the geochemical cycle of soil particles, *Tellus, Ser.*, 40(B), 494-503.
- 50) James, R.A., P.R. Ruseck, T.L. Patterson, R. Arimoto (1996) Charcaterization of the Bermuda tropospheric aerosol by combined individual-particle and bulk-aerosol analysis, *Atmospheric Environment*, 30(2), 319-338.
- 51) Joussaume, S (1990), Three dimensional simulations of the atmospheric cycle of desert dust particles using a general circulation model, *J. Gophys*, 95(D2) 1909-1941.
- 52) Kim, B.G., J.S Han and S.U. Park (2001) Transport of SO₂ and aerosol over the Yellow sea, *Atmospheric Environment*, 35(4), 727-737.
- 53) 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*,
- 54) Kim, K.H., H. Swan, Z.H. Shon, G.W. Lee, J. Kim, C.H. Kang (2004) Monitoring of reduced sulfur compounds in the atmosphere of Gosan, Jeju Island during the Spring of 2001, *Atmospheric Environment*, 54(4), 515-526.37(6), 753-765.
- 55) Kim, Y.P., J.H. Lee, N.J. Baik, J.Y. Kim, S.G. Shin and C.H. Kang (1998a) Summertime characteristics of aerosol composition at Cheju island, Korea,

- Atmospheric Environment*, 32(22), 3905-3915.
- 56) Kim Yong-Pyo, Jong-Hoon Lee, Nam-Jun Baik, Jin-Young Kim, Shang-Gyoo Shim, Chang-Hee Kang (1998b) Summertime Characteristics of Aerosol composition at Cheju Island, Korea, *Atmospheric Environment*, 32(22), 3905-3915.
- 57) 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.
- 58) Lee, J.H., Y.P. Kim, K.C. Moon, H.K. Kim and C.B. Lee (2001) Fine particle measurements at two background sites in Korea between 1996 and 1997, *Atmospheric Environment*, 35(4), 635-643.
- 59) Ma, C.J., M. Kasahara, K.C. Hwang, K.C. Choi, S.B. Choi and J.J. Lee (2000) Physicochemical characteristics of single Asian dust storm particles, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 16(E), 29-38.
- 60) Ma, C.J., M. Kasahara, R. Holler (2001) Tomihiro Kamiya, Characteristics of single particles sampled in Japan during the Asian dust-storm period, *Atmospheric Environment*, 35(15), 2707-2714.
- 61) Mori, I., M. Nishikawa, T. Tanimura and H. Quan (2003) Change in size distribution and chemical composition of kosa(Asian Dust) aerosol during long-range transport, *Atmospheric Environment*, 37(30), 4253-4263.
- 62) Nishikawa, M. and S. Kanamori (1991) Chemical composition of Kosa aerosol (Yeollow sand dust) collected I Japan. *Analytical Science*, 7, 1127-1130.
- 63) Okada K., Hiroshi Naruse, Toyoaki Tanaka, Osamu Nemoto, Yasunobu Iwasaka, Pei-Ming Wu, Akira Ono, Robert A. Duce, Metsuo Uematsu, and John T. Merrill (1990) X-ray Spectrometry of Individual Asian Dust-storm Particles over the Japanese Islands and the North Pacific Ocean *Atmospheric Environment*, 24A(6), 1369-1378.
- 64) Oravisjärvi, K., K.L. Timonen, T. Wiikinkoski, A.R. Ruuskanen, K. Heinänen, J. Ruuskanen (2003) Source contributions to PM_{2.5} particles in the urban air of a

- town situated close to a steel works, *Atmospheric Environment*, 31(8), 1013-1022.
- 65) Richard L. Arndt, Gregory R. Carmichael and Jolynne M. Roorda (1998), Seasonal Source-Receptor Relationships in Asia, *Atmospheric Environment*, 23(8), 1397-1406.
- 66) To, C.U., N.Y. Oh, H. Kim, Y.P. Kim, C.B. Lee, K. H. Kim, C.H. Kang, J. Osan, J.D. Hoog. A. Worobiec, and R.V. Grieken (2001) Single-Particle Analysis of Aerosols at Cheju Island, Korea, Using Low-Z Electron Probe X-ray Microanalysis : A Direct Proof of Nitrate Formation from Sea Salts, *Environmental Science and Technology*, 35(22), 4487-4494.
- 67) Lee Seung-Bok, Gwi-Nam Bea, Kil-Choo Moon, Yong-Pyo Kim (2002) Characteristics of TSP and PM_{2.5} measured at Tokchok Island in the Yellow Sea, *Atmospheric Environment*, 36(35), 5427-5435.
- 68) Shi Z., L. Shao, T.P. Jones, A.G. Whittaker, S. Lu, K.A. Berube, T. He, R.J. Richards (2003) Characterization of airborne individual particles collected in an urban area, a satellite city and a clean air in Beijing, 2001, *Atmospheric Environment*, 37(29), 4097-4108.
- 69) Shim, S.K., C.H. Kand, and Y.P. Kim (1994) analysis of Rainwater Samples in Cheju, J. KAPRA, 10(2), 98-104.
- 70) Streets, D.G., N.Y. Tsai, H. Akimoto, and K. Oka (2000) Sulfur dioxide emissions in Asia in the period 1985-1997, *Atmospheric Environment*, 34(26), 4413-4424.
- 71) Tanner, P.A. (1999) Analysis of Hong Kong daily bulk and wet deposition data from 1994 to 1995, *Atmospheric Environment*, 33, 1757-1766.
- 72) Wang, G., L. Huang, S. Gao, S. Gao, L. Wang (2002) Characterization of water-soluble species of PM₁₀ and PM_{2.5} aerosols in urban area in Nanjing, China, *Atmospheric Environment*, 36(8), 1299-1307.
- 73) Wang, X. and Z. Guanghua (1996) Some characteristics of the aerosol in Beijing, *International J. of PIXE* 6, 361-365.
- 74) Yao, X., C.K. Chan, M. Fang, S. Cadle, T. Chan, P. Mulawa, K. He, B. Ye (2002) The Water-soluble ionic composition of PM_{2.5} in Shanghai and Beijing,

- China, *Atmospheric Environment*, 36(26), 4223-4234.
- 75) Yao, X., A.P.S. Lau, M. Fang, C.K. Chan, M. Hu (2003) Size distributions and formation of ionic species in atmospheric particulate pollutants in Beijing, China : 2-dicarboxylic acids, *Atmospheric Environment*, 37(21), 3001-3007.
- 76) Ye, B., X. Ji, H. Yang, X. Yao, C.K. Chan, S.H. Cadle, T.Chan, P.A. Mulawa (2003) Concentration and chemical composition of PM_{2.5} in Shanghai for a 1-year period, *Atmospheric Environment*, 37(4), 499-510.
- 77) Yoshizumi, K., K. Asakoko (1986) Characterization of atmospheric aerosols in chichi of the Ogasawara(Bonin) Islands, *Atmospheric Environment*, 20(1), 151-155.
- 78) Zhang, D., Y. Iwasaka (1999) Nitrate and sulfate in individual Asian dust-storm particles in Beijing, China in spring of 1995 and 1996, *Atmospheric Environment*, 33(19), 3213-3223.
- 79) Zhang Daizhou , Jiaye Zang, Guangyu Shi, Yasunobu Iwasaka, Atsushi Matsuki Dmitri Trochkine (2003) Mixture state of individual Asian dust particles at a coastal site of Qingdao, China, *Atmospheric Environment*, 37(28), 3895-3901.
- 80) Zhang, D., J. Zang, G. Shi, Y. Iwasaka, H. Matsuki, D. Trochkine (2003) Mixture state of individual Asian dust particles at a coastal site of Qingdao, China, *Atmospheric Environment*, 37(28), 3895-3901.
- 81) Zhang X.Y., S.L. Gong, R. Arimoto, Z.X. Shen, F.M. Mel, D. Wang and Y. Cheng(2003) Characterization and Temporal Variation of Dust Aerosol from a Site in the Northern Chinese Deserts, *Journal of Atmospheric Chemistry*, 44(3), 241-257.
- 82) Zhang, X.Y., H. Swan, Z.H. Shon, G.W. Lee, J.Y. Kim, C.H. Kang (2004) Monitoring of reduced sulfur compounds in the atmosphere of Gosan, Jeju Island during the Spring of 2001, *Atmospheric Environment*, 54(4), 515-526.
- 83) Zhuang, H., C. Chan, M Fang, A.S. Wexler (1999) Size distributions of particulate sulfate, nitrate, ammonium at a coastal site in Hong Kong, *Atmospheric Environment*, 33(6), 843-853.

감사의 글

각자의 만족보다는 서로의 만족에 더 즐거워하는 그런 사람이고 싶습니다. 고맙다는 말보다는 아무말 없이 미소로 답할수 있고 둘 보다는 하나라는 말이 더 잘 어울리며 상대방보다 미안하다는 말을 먼저 할 수 있는 그런 사람이고 싶습니다.

결코 길지도 짧지도 않았던 대학원 생활도 어느덧 종착역을 앞에 두고 있는 것 같습니다. 미흡함이 많았던 대학원 생활이었지만 꾸짖음 보다 격려의 말로 이끌어 주셨던 분들이 많았었기에 제가 이렇게나마 이 자리에 설수 있게 된 것 같습니다. 먼저 그동안 바쁘신데도 격려와 지도로 여기 까지 올수 있게 이끌어주신 강창희 교수님께 깊은 감사를 드립니다. 그리고 논문이 나오기까지 논문심사를 해주신 김원형 교수님과 김덕수 교수님께도 깊은 감사를 드립니다. 그리고 학부 생활을 비롯한 대학원 생활 동안 지식과 삶에 대한 교훈을 들려주시던 한성빈 교수님, 정덕상 교수님, 변종철 교수님, 이선주 교수님, 이남호 교수님께도 이 고마움을 올립니다. 또한 실험실 생활을 하는데 많은 도움을 주었던 신찬성 선생님, 선영이 그리고 진욱, 수연, 희정, 희곤에게도 고마운 마음을 전합니다. 그리고 논문을 쓰는데 배려와 격려를 보내주신 김세재 소장님께 감사드리며 김기욱 박사님, 정완석 박사님, 문상욱 박사님, 박지권 박사님, 현근희 선생님, 수영이형, 영준이형, 은옥이, 지웅이, 성민이, 명옥이, 미경이, 다래에게도 감사드립니다. 또한 모든 대학원 선배님들과 후배님께도 고마움을 표합니다. 마지막으로 제 가장 든든한 후원자이신 부모님과 할머니님 그리고 가족들에게 감사드립니다.

새해에도 모두 건강하시고 하시는 일에 미소를 잃지 않는 한 해가 됐으면 합니다.

2003년 12월

석사 생활 마지막의 아쉬움을 설레임을 뒤로하며