

제주도 고산에서 수용성 에어로졸의 화학적 성분 분석

Chemical Analysis of Water Soluble Aerosols at Kosan, Cheju Island

이호근 · 박경윤 · 서명석 · 장광미 · 강창희¹⁾ · 허철구¹⁾

한국과학기술연구원/시스템공학연구소

¹⁾제주대학교

Ho-Geun Lee, Kyoung-Yoon Park, Myoung-Seok Suh, Kwang-Mi Jang,

¹⁾Chang-Hee Kang, ¹⁾Chul-Goo Hu

*Systems Engineering Research Institute/
Korea Institute Science and Technology,*

¹⁾*Cheju National University*

Abstract

Atmospheric aerosols were collected by a High Volume Tape Sampler from March 1992 to December 1993 at Kosan, Cheju, Korea. The water soluble ion concentrations in aerosol were analyzed. The concentrations of cations(Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , NH_4^+) were determined by an Inductively Coupled Plasma(ICP) or an Atomic Absorption Spectrometer(AAS), and those of anions(Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-}) were analyzed by the capillary electrophoresis method.

The Ca^{2+} , SO_4^{2-} and NO_3^- concentrations in spring were higher than those in other seasons. The lowest concentrations of these elements were found in summer, largely due to scavenging by frequent rains. Especially the Ca^{2+} concentration on April was three to four times higher than the annual mean concentration.

The enrichment factor(E.F.) of each element was calculated. The annual mean E.F. values of the Ca^{2+} , Mg^{2+} and Cl^- in 1992 were the same as those in 1993 except K^+ and SO_4^{2-} . The correlation formula between all cations and anions for the whole period was $\text{Anions} = 0.759 \times \text{Cations} + 0.066$.

1. 서 론

에어로졸의 입경 분포에 따라 다르지만 에어로졸 입자 중의 약 50% 정도가 수용성이고, 이들은 다시 양이온 및 음이온으로 구분된다. 양이온은 암모니아, 알칼리 금속, 알칼리 토금속과 같은 원소이고, 음이온은 황산염, 질산염 및 할로젠 화합물 등 이다(Warneck, 1988). 수용성 무기염중 SO_4^{2-} 및 NO_3^- 는 대기 중으로 방출된 SO_2 및 NO_x 기체의 heterogeneous(gas-particle) 또는 homogeneous(gas or aqueous) phase oxida-

tion에 의해 형성된다. 황산염과 질산염은 각각 H_2SO_4 , NH_4HSO_4 , $(\text{NH}_4)_3\text{H}(\text{SO}_4)_2$, HNO_3 , HNO_2 와 같은 2차 오염 물질로 이루어져 있고 강우시 물에 용해되어 내리면서 여러가지 화학 반응을 거쳐 산성비를 유발, 구름의 생성, 성장 과정에서 응결핵의 역할을 한다(Warneck, 1988).

에어로졸은 대기중에서 기류를 타고 이동할 수 있기 때문에 오염농도 변화는 지역적인 영향을 많이 받는 대도시 지역 보다는 오염원으로 부터 격리된 지역(이하 청정 지역)에서의 측정이 필요하다. 특히 인접한 중국의 대기 오염물질 배출량은 산업화된 인근 동아시아 지역보다 많

을 뿐만아니라 매년 계속 증가하고 있기 때문에(Akimoto and Narita, 1994) 우리나라의 청정지역에서 에어로졸에 대한 측정은 아주 중요하다.

청정 지역에서 수행된 에어로졸에 대한 연구는 선진국 중에서도 미국에서 가장 활발히 진행되고 있다. 특히, 미국해양기상청(NOAA)에서는 장기적으로 대기오염 물질을 연구하기 위하여 1972년 부터 Geophysical Monitoring for Climate Changes(GMCC)를 수행하면서 총부유분진농도(Total Suspended Particulates, TSP) 및 다양한 종류의 오염물질을 측정하고 있다(Robinson et al., 1988). 국내 연구로는 최만식 등(1989)이 서해안 태안반도(해안가)에서 1989년 9월 부터 12월 까지 4개월간 미량 광물질 성분을 중심으로 에어로졸을 분석한 경우가 있지만 에어로졸에 대한 현재까지의 연구는 청정지역이 아닌 대도시 지역에서 TSP, 입경 분석, 황사의 TSP 및 성분 분석 등 정량적인 연구가 수행되었다(Nishikawa, 1991; 신은상 등, 1992; 김필수 등, 1986; 손동현 등, 1986). 본 연구팀은 국지적인 오염원이 없는 제주도 고산에 장기적인 오염물질 모니터링 측정소를 1991년에 설치하여 오염물질 배경농도를 측정하고 있다(박경윤 등, 1993).

본 연구에서는 제주도 고산 측정소에서 최근(1992 및 1993년) 2년간 에어로졸에 포함되어 있는 주요 수용성(양이온 및 음이온) 성분 농도를 분석하여 각 이온들간의 상관관계, 계절적 변동을 분석하였고 특히, 각 이온 성분들의 농축계수(Enrichment Factor; E.F.)값의 변화 경향을 분석하였다.

2. 측정방법

2.1 측정소 환경

본 연구자료의 대기오염 에어로졸 시료는 제주도 북제주군 한경면 고산리에 위치한 대기오염 배경농도 측정소에서 채취하였다. 측정소의 지리적 위치는 제주도 서측

해안가로써 북위 33.17°, 동경 126.10°이고, 해발고도는 약 71m이다. 측정소 근처는 초지로 둘러싸여 있고, 북동쪽 방향으로 70m에 고산 고층레이다 기상대가 있고, 차량 통행도로나 인근 부락과도 상당히 격리되어 있다. 측정소 주변의 주요 오염원을 조사한 결과 북제주군의 대기오염부하량은 12ton/km²year(서울: 1,460ton/km²year, 부산: 641ton/km²year)으로 서울 및 부산 지역에 비해 현저히 적은량이고, 측정소로부터 약 2km 떨어진 곳에는 국도 12번이 있어 하루에 평균 3000대의 자동차가 운행되는 것으로 나타났다(박경윤 등, 1993). 따라서 이 정도의 오염농도는 주변에 의한 대기오염원이 극미한 것으로 타 지역에 비해 청정한 곳으로 판단된다.

2.2 측정 기기 및 방법

대기오염 에어로졸을 채취하기 위하여 사용한 sampler는 High Volume Tape Sampler(Kimoto, Model 195A)이고, 시료 공기 흡입구는 지상 10m에 위치하게 했다. 시료는 1992년 3월 21일 부터 1993년 12월 10일까지 약 2년에 걸쳐 자동으로 채취하였다. 시료채취 시간 간격은 6, 12, 24시간으로 사용자가 임의로 조정할 수 있어 황사와 같은 특별한 시기에는 6시간 간격으로 조정하였지만 보통 24시간 간격으로 하였고 유량은 150~180L/min으로 유지 시켰다. 시료를 직접 포집하는 필터는 Roll 타입의 polytetrafluoroethylene(PTFE) 테이프 2개를 겹으로 사용 하였다. 유량의 기록은 기기 가동시간에 맞추어 연속적으로 기록하였고 이들의 운영일수 및 시간은 부록 1에 나타내었다. 각 월별 측정일수와 측정시간이 일치하지 않는 것은 정전이나 sampler의 수리 등으로 측정하지 못한 날들이 있거나 1일에 4회 측정은 했지만 실험실에서 일부 분석에 실패한 것이 있기 때문이다.

시료의 분석은 포집된 PTFE 테이프에서 에어로졸 시료를 원형으로 절단하여 초순수(17~18M Ω) 50mL

Table 1. Analysis Ions and Instruments.

Ions	Instruments(Maker, Model)
Na ⁺	Atomic Absorption Spectrometer(Perkin-Elmer, 3030B)
K ⁺	Atomic Absorption Spectrometer(Perkin-Elmer, 3030B)
Ca ²⁺	Inductively Coupled Plasma Method(Seiko, SPS1200A)
Mg ²⁺	Inductively Coupled Plasma Method(Seiko, SPS1200A)
NH ₄ ⁺	Ion Chromatograph(Dionex, DX-100)
Cl ⁻	Capillary Electrophoresis System(Quanta TM , 4000)
NO ₃ ⁻	Capillary Electrophoresis System(Quanta TM , 4000)
SO ₄ ²⁻	Capillary Electrophoresis System(Quanta TM , 4000)

에 침적시키고 초음파 세척기로 진탕시켜 수용성 성분을 용출시켰다. 용출액은 기공이 0.45 μ m인 멤브레인 필터로 여과하여 불용성 입자를 거른후 여액을 시료 용액으로 하여 양이온 및 음이온을 분석 하였다. 검량선 작성시 표준용액의 농도는 초순수 증류수를 사용하여 필요한 농도로 희석시켜 조제하였다. 양이온 중에서 Na⁺, K⁺, Ca²⁺ 및 Mg²⁺은 Hayashi Pure Chemical사의 1000 ppm 용액(stock solution)을 사용하였고 NH₄⁺는 Aldrich사의 1차 표준급 시약((NH₄)₂SO₄, 순도: 99.999%)을 조제하여 사용하였다. 음이온의 표준용액도 양이온과 동사의 제품((NH₄)₂SO₄, 순도 99.999%; KNO₃, 순도 99.99%; NaCl, 순도 99.99%)을 사용하였다.

포집된 시료로부터 분석된 양이온 및 음이온의 종류 및 측정 분석 방법은 Table 1에 나타내었다.

2. 3 기상자료 조사

제주도 고산 기상대에서 관측된 일기상 자료를 분석한 결과 1992 및 1993년 모두 연평균 해면기압은 각각 1015.59 및 1015.62hPa 이었고, 연평균 기온은 각각 15.68 및 15.03°C 이었다. 연별 강수일수 및 총강수량

은 각각 1992년에 109일 및 1107.60mm 이었고, 1993년에 116일 및 1151.40mm 이었다. 관측 기간중의 연평균 일사량도 1992년 및 1993년에 각각 0.43 및 0.40MJ/m²으로 비슷하였고, 계절평균값의 크기 순서도 봄>여름>가을>겨울로 같게 나타났다. 그러나, 연평균 풍속은 1992년보다 1993년이 약 1m/sec 증가 하였다. 측정기간중 자세한 연평균 기상요소는 Table 2에 나타내었다.

3. 측정 결과 및 고찰

3. 1 에어로졸의 수용성 성분 농도

고산 지역의 자료와 다른 지역(서해안 태안 및 강화도 지역)의 자료간의 측정기간이 정확하게 일치하는 것은 아니지만 비교적 장기간에 걸쳐 측정되었고 또한, 해안가에서 측정되었기 때문에 본 연구에서 분석한 자료와 비교하기 위하여 Table 3에 제시하였다. 에어로졸 각 성분의 평균 농도값은 전반적으로 고산의 값이 태안지역 보다는 높고 강화지역 보다는 낮은 값을 나타내고 있다. 이온 농도중에서 nss-SO₄²⁻는 non sea salt sulfate 로써 SO₄²⁻ 농도중에서 해양성 부분을 제외한 농도이고

Table 2. Annually Averaged Meteorological Paramters at Kosan, Cheju Island.

Year	Temp. (°C)	Rainfall* (mm)	Wind Speed (m/sec)	RH (%)	Dew Point (°C)	IR (MJ/m ²)	sea P. (hPa)
1992	15.68	1107.60	5.76	77.65	11.67	0.43	1015.59
1993	15.03	1151.40	6.75	78.11	11.03	0.40	1015.62

* summation

- RH: Relative Humidity
- IR : Irradiance

Table 3. Mean Concentrations(μ g/m³) of Aerosol Components at Kosan, Taeon and Kanghwa.

Ions	Kosan Avg.	STD*	n	Ranges	Taeon Avg.	n	Kanghwa Avg.	n
Na ⁺	1.53	0.60	404	0.77~3.36	1.49	29	2.20	33
K ⁺	0.40	0.37	404	0.06~1.92	0.14	29	0.26	33
Ca ²⁺	0.44	0.40	404	0.07~1.90	0.38	29	0.66	33
Mg ²⁺	0.25	0.11	404	0.05~0.56	0.16	29	0.23	33
NH ₄ ⁺	1.36	0.29	404	0.64~2.03	0.84	29	1.46	33
Cl ⁻	1.88	1.46	375	0.31~6.29	-	-	-	-
NO ₃ ⁻	1.07	0.48	397	0.28~2.18	0.89	29	1.44	33
SO ₄ ²⁻	6.91	1.28	399	3.21~9.13	4.56	29	7.27	33
nss-SO ₄ ²⁻	6.53	1.26	397	2.69~8.65	-	-	-	-

* STD: Standard Deviation

n: Number of Samples

Measuring Periods: Taeon and Kanghwa(7.'88~3.'89) by Kang et al.(1991)

$nss-SO_4^{2-} = [SO_4^{2-}] - [Na^+] \times 0.252$ 로 계산된다(Warneck, 1988), 제주도 고산지역의 $nss-SO_4^{2-}$ 농도를 계산한 결과 SO_4^{2-} 농도의 약 95%를 차지하고 있다.

이들 각 이온들의 월별 변동 경향은 Fig. 1에 나타나 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 K^+ 농도는 봄과 겨울철('92년 10~12월 및 '93년 1~4월)에 높았고(최고 $2\mu g/m^3$), 여름철(7~9월)에는 낮은 계절적인 변화를 볼 수 있었다. Ca^{2+} 이온의 성분은 연간 변동 폭은 크지 않았으나 황사의 시기인 1992년 4월 Ca^{2+} 의 농도는 연평균치에 비해 약 3배 높았고, 황사가 심했던 1993년에는 연평균치에 비해 약 4배나 높았다. 즉, 황사시 토양성분에 기인된 Ca^{2+} 농도가 비 황사시에 비해 더 많이 증가하였다.

Mg^{2+} 이온 농도의 변화는 1992년 3~6월까지는 작은 농도로 변화 하였으나 7월 이후 약간씩 증가하다가 1993년 2월말~3월초 사이에는 평균치의 약 2배까지 증가함을 보였다. 이는 에어로졸의 성분중에서 Na^+ 와 Cl^- 과 비슷한 경향을 보인다. 즉 Mg^{2+} 이온이 봄 및 여름철에 농도가 낮은 이유는 제주도의 육지쪽에서 불어오는 바람(남동풍)으로 인한 육지성 에어로졸의 영향이고, 겨울철에 농도가 높은 이유는 그와는 반대로 해양쪽에서 불어오는 바람(북동풍)에 의한 해양성 에어로졸의 영향 때문인것으로 판단된다.

에어로졸 성분중 주요 오염물질의 하나인 SO_4^{2-} 의 농도는 측정된 다른 이온에 비해 큰 값을 나타내었고 그 변화폭도 크게 나타났다. 또한, SO_4^{2-} 는 NH_4^+ 의 농도

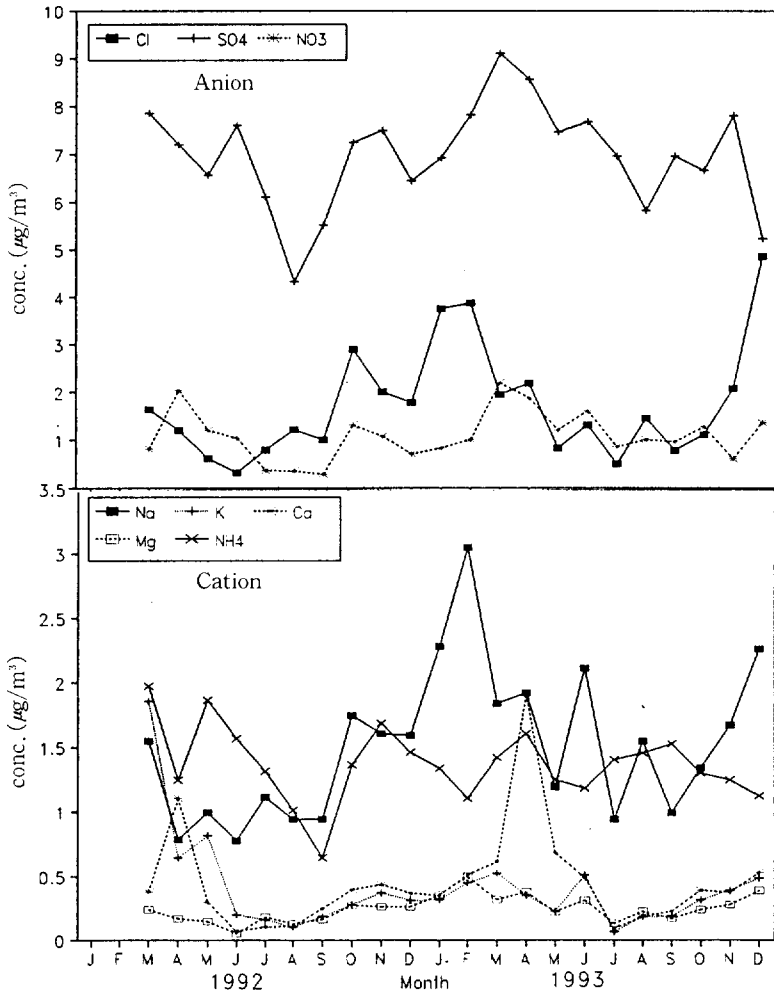


Fig. 1. Variations of Monthly Averaged Ion Concentrations.

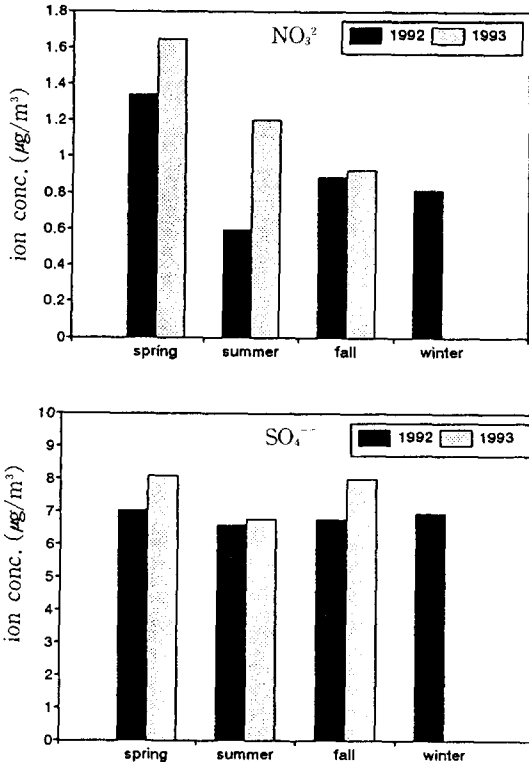


Fig. 2. Seasonal Means of SO₄²⁻ and NO₃⁻ Concentration.

변화 경향과도 유사하고 측정 기간에 분석된 두 이온의 상관관계수(R)는 0.503이었다. 8월을 전후로 SO₄²⁻의 농도가 최저치(4.34µg/m³)를 보인 것은 8, 9월에 증가된 강수량(159.9~161.8mm)에 의한 세정(scavenging) 효과가 있다는 것을 알 수 있다. 강수에 의한 습식강하(wet deposition)량은 강수일수 및 량에 따라 다르다. 강수 특성은 1992년에는 109일의 비가 내렸고, 1월을 제외한 비온 날의 평균 SO₄²⁻ 농도는 맑은 날의 7.58µg/m³의 농도에 비해 약 1.81µg/m³ 농도가 감소하였고,

1993년에는 116일간 비가 내렸고, 맑은 날의 8.04µg/m³에 비해 약 1.08µg/m³가 감소 하였다. 이는 맑은 날에 에어로졸중에 화학적으로 생성된 SO₄²⁻가 비오는 날 강수 현상에 의해 washout 되는 것을 나타내는 것이다 (Warneck, 1988; 홍민선 등, 1992).

한편, SO₄²⁻의 계절적 변화는 도시의 경우 겨울철에 난방 연료 등 화석 연료의 사용에 의해 농도가 증가하는 현상이 뚜렷한 반면 청정 지역중의 하나인 본 측정소에서는 최고치의 농도가 봄철과 겨울철에 비슷한 수준으로 나타났다. 그러나 Fig. 2에서 보는 것처럼 여름과 겨울에 농도 평균값의 차이가 1992년에 0.37µg/m³으로 그 차이가 크지는 않다. 그리고 질산이온(NO₃⁻)의 월별 평균 농도 변화폭은 Fig. 1에서 보듯이 비교적 완만하나 1992년 4월과 10월 및 1993년 4월에 각각 높았다. 1992년 및 1993년 매년 4월에 NO₃⁻ 이온 농도가 높은 것은 지역적인 영향 보다는 4월중 우리나라까지 날아오는 대기 중 황사의 영향으로 추정되지만 이에 대한 확실한 결론은 장기적인 변화 경향으로 판단되어야 한다. 또한, 계절적인 변동은 Fig. 2에서 보는 것처럼 1992년과 1993년이 다르게 나타났다. 1992년 여름에 감소 현상이 뚜렷하였지만 1993년에는 오히려 봄철보다는 감소 하였지만 가을 보다는 높았다. 따라서 청정 지역에서의 에어로졸에 대한 오염물질 농도는 장기간에 걸친 연구가 계속 되어야 한다.

3. 2 이온들간의 상관관계

에어로졸에 포함된 이온들의 상관 관계를 matrix로 표현하면 Table 4와 같다. 각 이온간의 상관 계수가 0.5 이상 나타난 것은 Na⁺:Mg²⁺, Na⁺:Cl⁻, Ca²⁺:NO₃⁻, Mg²⁺:Cl⁻, NH₄⁺:SO₄²⁻이다. 특히, Na⁺:Mg²⁺의 상관 계수는 0.967로 가장 높고 상관식으로 표현하면 [Mg²⁺]=0.333[Na⁺]-0.001이다.

에어로졸의 이온 성분 중에서 SO₄²⁻ 및 NO₃⁻의 결합 형태에 따라 황산이나 질산과 같은 강산성의 오염물질이

Table 4. Correlation Matrix between the Ions.

	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	NH ₄ ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻
Na ⁺	1							
K ⁺	0.091	1						
Ca ²⁺	0.231	0.150	1					
Mg ²⁺	0.967	0.109	0.393	1				
NH ₄ ⁺	0.057	0.467	0.032	0.014	1			
Cl ⁻	0.806	0.007	0.095	0.814	0.015	1		
SO ₄ ²⁻	0.143	0.242	0.361	0.123	0.503	0.310	1	
NO ₃ ⁻	0.199	0.115	0.699	0.265	0.106	0.042	0.249	1

되기도 한다. 본 연구에서는 수소 이온 농도를 측정하지 못하였기 때문에 수소이온 농도와와의 결합 정도는 알수 없었다. 그러나 Table 4에 따르면 이들의 결합 형태는 주로 SO_4^{2-} 는 $MgSO_4$ 및 Na_2SO_4 보다는 $(NH_4)_2SO_4$ 및 $CaSO_4$ 로, NO_3^- 이온은 $Ca(NO_3)_2$ 및 $Mg(NO_3)_2$ 이다.

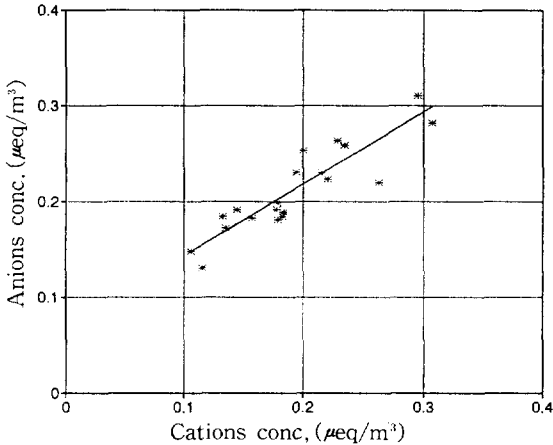


Fig. 3. Correlations between Total Anion and Cation Concentrations.

$[Cl^-]/[Na^+]$ 비는 약 1.2로 정상적인 해양 에어로졸의 1.3과 유사한 수치이지만 바닷물, 황사 및 만리포

(Apr. ~May, '89) 에어로졸의 1.8, 1.8 및 1.74 보다는 작은 값이다(Warneck, 1988; Gao et al., 1992). 이는 Table 3에서 알 수 있듯이 Cl^- 이온이 적은것 보다는 Na^+ 가 상대적으로 많았기 때문이다.

측정된 각 이온 농도들의 값을 당량 농도로 환산하고 측정 시료 별로 양이온 총당량에 대한 음이온 총당량의 상관 관계식은 $Anions = 0.759 \times Cations + 0.066$ ($R = 0.893$) 이었다(Fig. 3). 이론적으로는 음이온과 양이온이 1:1 당량 결합을 하지만 음이온 및 양이온 모든 성분을 분석하지 못한 결과로 정확한 이온 평형이 나타나지 않았다고 하겠다.

3. 3 오염물질 농축계수(Enrichment Factor: E.F.)의 변화

각 원소들의 농축정도를 알아보기 위하여 농축계수(Enrichment Factor, E.F.)를 구하였다. E.F. 값을 구하기 위해서는 먼저 기준물질을 정하여야 한다. 일반적으로 지각 구성 물질에 대한 기준원소로는 Si나 Al가 주로 이용되지만 해양성분이 영향을 미치는 곳에서는 Na를 기준으로 한다(최만식 등, 1989; 이민희 등, 1993; Gao et al., 1992). 따라서 본 측정소가 바닷가에 인접해 있기 때문에 에어로졸의 농축계수(E.F.)는

$$E.F. = [X/Na] \text{ aerosol} / [X/Na] \text{ seawater}$$

으로 표현될 수 있다. 여기서 X는 각 이온 성분 농도이

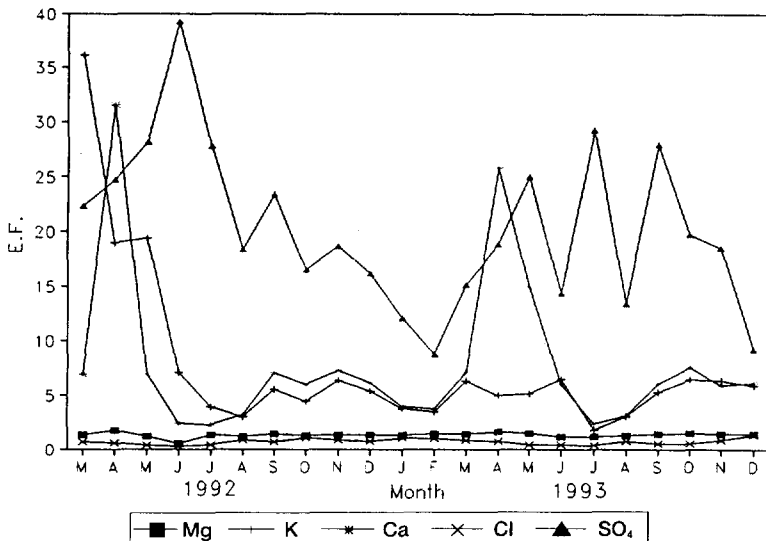


Fig. 4. Variations of Monthly Averaged Ion Enrichment Factors.

Table 5. Comparison of E.F. values in aerosols at various locations.

Ions	Kosan	Taeon	Kanghwa	Oki Is.	Thushima	Okinawa	Tee-side
K ⁺	7.06	2.54	3.19	2.61	4.39	0.93	10.08
Ca ²⁺	7.49	6.64	7.81	8.18	5.58	1.34	34.43
Mg ²⁺	1.37	0.90	0.88	0.89	0.98	1.01	4.27
Cl ⁻	2.38	-	-	0.36	0.37	0.90	1.50
SO ₄ ²⁻	16.96	12.14	13.11	3.35	6.96	3.16	46.41

- Taeon and Kanghwa: 7.'88~3.'89(kang et al., 1991)
- Oki Island, Thushima, and Okinawa: 10.'91(Hatakeyama, 1993)
- Tee-side : 6~10.'67(Warneck, 1988)

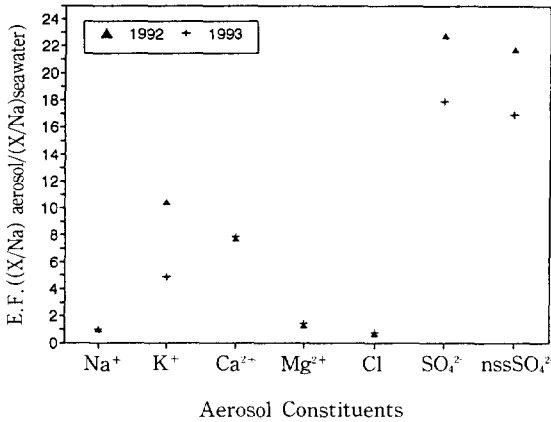


Fig. 5. Annualy Averaged Enrichment Factors of Ions Related to Seawater.

고 바닷물의 농도는 Wilson(1975)이 제시한 결과를 사용하였다.

농축 계수가 1에 가까우면 그 원소의 기원은 기준원소의 것과 같음을 의미한다. E.F. 값이 기준물질에 따라 다소 차이를 보이기 때문에 일반적으로 E.F. 값이 3~5 이하의 원소들은 기준원소와 같은 기원을 갖는 것으로, 그 이상의 값은 인위적 발생원에 유래된 원소라고 간주한다(최만식 등, 1989).

1992년 및 1993년 대기 분진 중의 K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Cl⁻ 및 SO₄²⁻의 월평균 E.F. 값의 변동을 Fig. 4. 연평균 값을 Fig. 5에 각각 나타내었다. Fig. 5에서 K⁺ 이온의 1992년 E.F. 값이 높은 이유는 Fig. 4에서 볼 수 있듯이 '92년 7월 이후의 평균값이 '93년의 것과 비슷하였지만 '92년 3~6월 사이에 7.0에서 36.2까지의 높은 값을 나타내었기 때문이다. 또한 SO₄²⁻의 E.F. 값이 '92년에 증가한 원인으로 '92년 5~7월 사이에 SO₄²⁻의 E.F.가 상대적으로 많았기 때문이다.

SO₄²⁻ 이온의 계절적 변화는 봄철에 증가하고 겨울철

에 감소하였다. 봄철은 우리나라에 황사가 오는 시기인 4~5월도 포함되어 있고 Ca²⁺의 변화 경향과도 잘 일치함을 보이고 있지만 8월에는 강수량의 증가에 의한 일시 감소현상을 나타내고 가을과 겨울철인 10~12월 및 1~3월 사이는 감소하는 경향을 나타내었다. 기타 육지의 지각성분 및 해양의 성분인 K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ 및 Cl⁻들의 E.F. 값의 연별 평균값의 차이는 거의 없었다.

제주도 고산에서 측정된 E.F. 값, 국내의 청정 해안 지역에서 측정된 E.F. 값, GTE/PEM-West(Global Tropospheric Experiment/Pacific Exploratory Mission-West) A 기간(10.'91)중에 일본에서 측정된 에어로졸 자료와 유럽지역의 해안 근처에서 측정된 에어로졸 성분에 대한 E.F. 값을 Table 5에 나타내었다.

여기서 K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ 및 Cl⁻의 E.F. 값은 지각 및 대양에 기인된 원소이다. 해양 기원인 Cl⁻의 E.F.는 2.38로 제주도가 타 지역에 비해 높다. 그리고, 인위적으로 화석 연료의 사용에 의해 오염될 가능성이 가장 높은 SO₄²⁻는 일본 섬지역의 3~6보다 제주도 지역이 높지만 Cl⁻를 기준으로 볼때 고산이 7.13(16.96/2.38) 일본 Oki섬의 9.31(3.35/0.36) 보다 작은 값을 보였다. 또한, 영국의 북동해안가 Middlesbrough의 산업도시인 Tee-side와는 1/3 정도 작은 값을 나타냈다.

또한, 지각 및 해양의 구성성분인 Ca²⁺의 E.F. 값이 클수록 해양성보다는 육지성 에어로졸의 영향을 받은 것으로 제주도 지역은 일본의 Okinawa를 제외하고 일본 및 국내 지역의 값인 6~8의 범위에 속했다.

4. 결 론

본 연구에서는 국지적인 오염원이 거의 없는 제주도 고산에서 1992년 3월에서 1993년 12월까지 약 2년간 측정된 에어로졸의 화학적 성분 농도를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 제주도 고산에서 측정된 에어로졸에 포함된 각 이

온들의 농도는 다음과 같다. 양이온 중 Na^+ 는 $1.53\mu\text{g}/\text{m}^3$, K^+ 는 $0.40\mu\text{g}/\text{m}^3$, Ca^{2+} 는 $0.44\mu\text{g}/\text{m}^3$, Mg^{2+} 는 $0.25\mu\text{g}/\text{m}^3$, NH_4^+ 는 $1.36\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었고, 음이온 중 Cl^- 는 $1.88\mu\text{g}/\text{m}^3$, SO_4^{2-} 는 $6.91\mu\text{g}/\text{m}^3$, NO_3^- 는 $1.07\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다.

2) Ca^{2+} , SO_4^{2-} 및 NO_3^- 농도의 계절 평균값의 최고치가 봄철에 나타났고, SO_4^{2-} 및 NO_3^- 의 경우 강수에 의한 세정효과가 있었다. 황사 시기인 4월에 Ca^{2+} 의 농도 증가가 연평균값에 비해 '92년에는 3배, '93년에는 약 4배로 증가 하였다.

3) 총당량에 대한 음이온 및 양이온과의 상관 관계식은 $\text{Anion} = 0.759 \times \text{Cation} + 0.066$ ($R = 0.893$) 이었고, 이온들의 상관관계표(Correlation Matrix)로 분석한 SO_4^{2-} 및 NO_3^- 의 주요 결합 형태는 각각 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, CaSO_4 , $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 및 $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ 이었다.

4) 1992년 및 1993년 평균 E.F. 값은 K^+ 및 SO_4^{2-} 을 제외하고 Ca^{2+} , Mg^{2+} 및 Cl^- 는 거의 일치하였다. 또한, E.F. 값에 대한 SO_4^{2-} 이온의 계절 평균값의 변화는 봄철에 증가하였고 겨울철에 감소하였다.

감사의 글

측정소의 기기를 무료로 대여해주신 일본 국립환경연구소의 Dr. Murano에게 깊은 감사를 드리고 본 측정소가 원만히 운영될 수 있도록 많은 협조를 해주신 제주도 고층레이다 기상대 직원, 제주대학교 학생들 그리고 아주대학교 홍민선 교수님에게도 감사드립니다. 본 연구는 과기처 지원 "인공위성에 의한 황사의 이동추적 및 청정대기 감시체계 구축에 관한 연구" 과제 의 일부로 수행된 것이다.

참 고 문 헌

강인구 외 다수(1991) 대기오염물질의 장거리 이동과 산성비 강하에 관한 연구(III), 국립환경연구원, 과학기술처 연구보고서.
 김필수, 김윤장, 이양호, 조숙현, 안승태(1986) 도시 대기 Aerosol의 입자 직경 0.01~1.0 μm 범위의 농도 변화 특성, 한국대기보전학회, 2(2), 41-50.
 박경윤 외 다수(1991; 1992; 1993) 지구대기환경조사 및 장기변화예측(I), (II), (III), 한국과학기술연구원, 과학기술처 연구보고서.
 신은상, 김희강(1992) 서울시에서의 대기부유먼지에 대한 황사의 영향, 한국대기보전학회, 8(1),

52-57.
 손동현, 허문영(1986) 도시대기중 부유입자상물질, 염화물, 질산염 및 황산염 농도화 입경분포, 한국대기보전학회, 2(3), 27-33.
 이민희, 한의정, 신찬기, 한진석, 김상균(1993) 황사 현상시 에어로졸 중무기물질의 동태, 9(3), 230-235.
 최만식, 조성록, 이동수(1989) 서해안 분진의 화학조성 및 기원에 대한 연구(1), 한국대기보전학회, 5(2), 72-83.
 홍민선, 이상훈, 이동섭, 강창희, 박경윤(1992) 제주도 고산에서의 대기오염물질 측정 및 분석에 관한 연구, 한국대기보전학회, 8(4), 257-261.
 Akimoto, H. and H. Narita(1994) Distribution of SO_2 , NO_x and CO_2 Emissions from Fuel Combustion and Industrial Activities in Asia with $1^\circ \times 1^\circ$ Resolution, Atmos. Environ. 28(2), 213-225.
 Gao, Y., R. Arimoto, R.A. Duce, D.S. Lee, and M.Y. Zhou(1992) Relationship Between the Dust Concentrations Over Eastern Asia and the Remote North Pacific, Journal of Geophysical Research, 97 (D9), 9867-9872.
 Hatakeyama, S.(1993) '91 IGAC/APARE/PEA-CAMPOT 항공기 지상관측 자료집, 일본 환경청 국립환경연구소.
 Nishikawa, M., Satoru Kanamori, Nobuko Kanamori and Tsuguo Mizoguchi(1991) Kosa Aerosol as Eolian Carrier of Anthropogenic Material, The Science of the Total Environment, 107, 13-27.
 Robinson, E., B.A. Bodhaine, W.D. Komhyr and S.J. Oltmans(1988) Long-Term Air Monitoring at the South Pole by the NOAA Program Geophysical Monitoring for Climate Change. Review of Geophysics, 26, 63-80.
 Warneck, P.(1988) Chemistry of the Natural Atmosphere, Academic Press, Inc. 334-339.
 Wilson, T.R.S.(1975) Salinity and Major Elements of Sea Water. In "Chemical Oceanography"(J.P. Reley and G. Skirrow, eds.), 2'nd ed., Academic Press, London, 365-413,