

한라산 1100 고지 대기 에어로졸의 오염 특성 연구

강창희, 김원형

제주대학교 자연과학대학 화학과

1. 서 론

대기 중에 부유되어 있는 에어로졸 입자들은 직접적으로는 빛의 산란, 흡수 등에 의해 지구의 복사평형에 영향을 미치며, 간접적으로는 구름의 응결핵으로 작용하여 알베도와 구름의 수명에 영향을 주어 결과적으로 기후 변화에 매우 큰 영향을 미치게 된다. 또 에어로졸은 성분, 조성이나 입자 크기에 따라 인간의 건강이나 식물의 생육에도 크게 영향을 미치고, 다양한 종류의 대기오염물질을 흡착한 상태로 부유되기 때문에 더욱 중요한 대기오염 물질중의 하나로 분류되고 있다. 에어로졸은 발생기원에 따라 입자의 크기, 밀도, 흡습성 등의 물리적 특성이 다르고, 중금속, 수용성 성분의 함량 등 화학적 조성이 다른 특성을 보인다. 최근 이러한 에어로졸의 물리적, 화학적 특성을 규명하기 위한 연구가 활발히 이루어지고 있다(Huebert *et al.*, 1998; Kim *et al.*, 1998a, 1998b, 2000; Chul-Un Ro, 2001). 에어로졸은 기체상 오염물질과 함께 오염 정도를 확인하는데 아주 중요한 요소이며 에어로졸은 대기 중에서 기류를 타고 이동할 수 있기 때문에 오염농도 변화는 지역적인 영향을 많이 받는 대도시보다는 오염원으로부터 격리된 청정

지역에서의 측정이 필요하다(Akimoto and Narita, 1994). 제주도는 산업시설이 거의 없고 인구밀도가 낮을 뿐 아니라 이동오염원도 상대적으로 낮아 국내에서 자체오염원이 거의 없는 가장 청정지역이다. 또한 지리적으로도 인접한 일본과 중국의 중앙에 위치하여 이들 인접국들로부터 장거리 이동에 의해 유입되는 오염물질의 영향을 평가하는데 입지적으로 아주 주요한 지역(홍민선 등, 1992; 박경윤 등, 1994; 심상규 등, 1994; 이호근 등, 1995; 서명석 등, 1995; 장광미 등, 1996; Akimoto *et al.*, 1996; Carmichael *et al.*, 1996, 1997; 김기현 등, 1997; Chen *et al.*, 1997; 문길주 등, 1998, 1999)이다. 따라서 제주도 청정지역에서의 대기오염 측정 관련 연구는 제주지역의 자체 오염도 측정은 물론 대기환경의 장기적 변화에 대한 연구나 인접 국가들의 영향을 평가하기 위하여 필요하다. 본 연구는 국내에서 가장 청정한 지역인 한라산 1100 고지에서 대기 에어로졸을 지속적으로 채취하고, 수용성 성분을 분석하여 에어로졸의 특성을 다각도로 조사한 결과이다. 이러한 연구는 고지대의 청정지역에서 시료를 채취하였기 때문에 인위적인 오염원의 영향을 최소화시켜 청정지역 대기의 배경농도를 측정할 수 있다. 또 장거리 이동에 의해 주

변국가로부터 유입된 오염물질의 영향을 평가(Arndt *et al.*, 1998)하고, 한반도에 영향을 미칠 수 있는 대기오염원과 그 이동경로를 규명하기 위한 중요한 자료로 활용 될 수 있다.

2. 실험 방법

2.1 에어로졸 시료의 채취

1100고지 측정소는 인가와 멀리 떨어진 한라산 중턱의 해발고도 1100 m 지점(33°21'23"N, 126°46'46"E)에 위치해 있으며 제2횡단도로에서 서쪽으로 약 500 m 떨어져 있다. 측정소 주변에는 한국통신망운영국과 군 파견대가 있으나 이 곳의 상주 인원이 소수이고, 이동오염원, 점오염원, 면오염원에 의한 영향을 비교적 적게 받고 있는 제주도에서도 가장 청정한 지역에 속하는 곳이다. 측정소 현장에는 측정기기를 탑재하고 작동에 적합한 온도, 습도 등을 유지시키면서 장기간 동안 측정기기를 원활히 가동시키기 위해 실내면적이 3평 정도인 소형 컨테이너와 5 kw의 전원 설비를 갖추고 있다(강창희 등, 1999). 시료 채취를 위한 high volume air sampler (Kimoto Electric, Model 195A)는 컨테이너 내부에 설치하였다. 또 컨테이너 내부는 측정 장비의 습기, 온도에 의한 기기고장 및 기기 오작동을 방지하기 위하여 에어컨 및 제습기를 사용하여 항상, 항상 습 조건을 유지하였으며, AVR을 사용하여 안정한 전원을 공급하였다. 총부유분진(TSP, total suspended particulate) 시료는 high volume air sampler와 PTFE (poly tetra fluoro ethylene) 필터를 사용하여 1996년 8월부터 1999년 5

월까지 1100 고지에서 총 454개를 채취하였다. 채취 방법은 매회 24시간 단위로 3일 간격으로 채취하였고, 1997년과 1998년 봄철(3~5월)에는 황사의 영향을 조사하기 위하여 매일 채취하였다. PTFE 필터는 100 mm × 10 m 크기의 롤테이프형으로 한 개의 롤테이프가 완전히 감길 때마다 sampler로부터 필터를 분리하여 수용성 성분을 분석하였다. 또한 시료 채취시 공기의 유속은 대략 160 L/min이 되도록 조절하였으며, 총 공기의 유량은 기록계의 기록지에 표시된 유속 및 시간을 대조하여 계산하였다.

2.2 에어로졸 시료의 분석

2.2.1 시료의 전처리

PTFE 필터는 에어로졸이 채취된 부분을 원형으로 잘라낸 뒤 수용성 이온 분석에 사용하였다. 그러나 일부 봄철에 채취한 시료는 필터들은 2등분하여 이 중 한 개를 수용성 성분 사용하였다. 수용성 이온 분석용 필터는 에탄올 0.5 mL로 침적시킨 후 초순수 50 mL를 가하여 초음파세척기에서 30분간 수용성 성분을 용출시키고 재차 진탕기(shaker)에서 1시간 동안 수용성 성분들을 용출시켰다. 이 때 용기는 125 mL용량의 PE병을 사용하였다. 용출액은 0.45 μm 필터로 불용성 입자를 거른 후 여액을 양이온 및 음이온분석용 시료로 이용하였다.

2.2.2 시료의 분석

NH_4^+ , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} 등의 수용성 양이온 분석에는 앞에서 전처리를 거친 시료용액을 4°C 냉장실에 보관한 상태로 사용

하였다. Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} 양이온은 원자흡광광도법(GBC사, Model Avanta-P)으로 분석하였다. 이 중 Na^+ , K^+ , Mg^{2+} 성분은 아세틸렌과 공기의 혼합 불꽃(10 cm slot length) 상에서 각각 589.0 nm, 766.5 nm, 585.2 nm 파장의 광원으로, 또 Ca^{2+} 은 아세틸렌과 N_2O 의 혼합 불꽃(5 cm slot length) 상에서 422.7 nm 파장의 광원을 이용하여 분석하였다. 이 때 검량선 작성용 표준용액은 MERCK사의 1,000 ppm 표준용액을 초순수로 묽혀 필요한 농도로 조제하였다. 또 NH_4^+ 은 indophenol법으로 분석하였다. 시료용액 5 mL를 정확히 취하고 여기에 phenol nitrop-russide용액 2.5 mL, sodium hypochloride용액 2.5 mL를 가하여 발색시킨 후 자외-가시선분광광도계(KONTRON사, Model UVIKON 860)를 사용하여 640 nm파장에서 흡광도를 측정하여 정량분석하였다. 이 때 검량선 작성시 사용한 표준용액은 Aldrich사의 1차 표준급 시약(NH_4)₂SO₄과 초순수를 사용하여 조제하였다. SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^- 음이온은 앞의 방법으로 전처리를 거친 시료용액을 4℃ 냉장실에 보관한 상태에서 소량 분취하여 Ion Chromatography(DIONEX사, Model DX-500)법으로 동시에 분석하였다. Ion Chromatography에 의한 이들 음이온의 분석 조건은 IonPac AG4A-SC / IonPac AS4A-SC 분리관, 2.4 mM Na₂CO₃ 2.25 mM NaHCO₃ 용리액, 25 μL 시료 주입량 등이며, ASRS Suppressor와 Conductivity Detector를 이용하여 검출하였다. 이 때 검량선 작성시 사용한 표준용액은 Aldrich 사의 1차 표준급시약 (NH_4)₂SO₄, KNO₃, NaCl과 초순수를 사용하여 실험실에

서 조제하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 분석 데이터의 신뢰도 조사

일반적으로 에어로졸의 수용성 성분 분석 데이터는 이온수지(ion balance)를 비교하여 그 신뢰도를 평가한다. 즉, 에어로졸의 모든 수용성 성분을 분석하고, 그 결과로부터 수용성 음이온 당량농도의 합과 양이온 당량농도의 합간의 상관계수를 구했을 때 그 값이 1에 가까울수록 분석 신뢰도가 높다고 볼 수 있다(심상규 등, 1994; 강창희 등, 1999). 본 연구에서 수행한 에어로졸 분석 결과들에 대해 이와 같은 방법으로 두 양간의 상관계수를 구하고, 또 % imbalance를 구하여 Table 1에 수록하였다. 분석 데이터의 상관계수(r)는 0.954로 비교적 높은 상관관계를 보였다. 또 1996년부터 1999년까지 전체 분석 데이터를 계절별로 나누어 두 양간의 상관계수를 구한 결과에서도 봄, 여름, 가을, 겨울에 각각 0.950, 0.937, 0.948, 0.984로 분석 결과가 비교적 높은 신뢰도를 나타내고 있음을 확인할 수 있었다. 또 모든 시료의 분석 결과들에 대해 양이온 당량농도 합과 음이온 당량농도 합간의 불균형(imbalance) 정도(Ayers and Manton, 1991)를 조사해 본 결과 전체 45개의 시료 중에 약 96 %의 데이터가 50 % imbalance 이하의 값을 보였으며 나머지 4 %가 50 % imbalance 이상의 값을 나타내고 있음을 알 수 있었다.

Table 1. Data quality control parameters and % Imbalance.

Regression results		% Imbalance*	
Number of point	454	< 10 % Imbalance	146
Slope	0.9510	10 ~ 20 % Imbalance	127
Intercept	0.0076	20 ~ 50 % Imbalance	162
Correl. coefficient(r)	0.954	> 50 % Imbalance	19

* % Imbalance = $(T_{\text{Cation}} - T_{\text{Anion}}) \times 100 / 0.5 \times (T_{\text{Cation}} + T_{\text{Anion}})$

3.2 에어로졸 시료의 분석 결과

1996년 8월부터 1999년 5월까지 계절별로 채취한 총 454개의 시료들에 대해 주요 수용성 성분을 분석하였다. 그리고 그 결과를 제주도 고산지역, 우리나라와 일본의 청정지역, 중국의 대도시 지역에서 측정된 데이터와 비교하여 Table 2에 수록하였다. 분석 결과를 살펴보면 에어로졸의 농도는 전체적으로는 SO_4^{2-} > NH_4^+ > NO_3^- > Ca^{2+} > Na^+ > K^+ > Cl^- > Mg^{2+} 순으로 나타났다. 이 중 NH_4^+ 의 농도는 $1.12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 전체 양이온 성분의 51%를 차지하였고, SO_4^{2-} 의 농도는 $4.56 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 전체 음이온 성분의 83%를 차지하여 수용성 양이온과 음이온 중에서 가장 높은 농도를 보였다. 또 에어로졸의 주요 성분인 SO_4^{2-} , NH_4^+ , NO_3^- 의 함량이 각각 60%, 15%, 10%로 전체 성분의 85%를 차지했

다. 또 이러한 결과를 제주도 서쪽 끝 지점인 고산 지역의 에어로졸과 비교해 본 결과 모든 성분들이 고산 지역에 비해 대략 1.7배 정도 낮은 농도를 보이고 있는 것으로 조사되었다. 특히 해염 성분인 Na^+ , Mg^{2+} , Cl^- 은 1100 고지에 비해 고산 지역에서 2.4~8.6배 정도 높게 나타나 1100 고지의 대기 에어로졸은 해염 영향을 훨씬 적게 받는 것으로 조사되었다. 또 국내에서 비교적 청정지역으로 꼽히고 있는 강화도 지역과 일본의 청정지역인 가고시마(Kagoshima), 쓰시마(Tsushima) 지역(Carmichael *et al.*, 1997)에 비해서도 훨씬 낮은 농도를 보였다. 특히 중국의 산업도시인 Nanjing에 비하면 nss-SO_4^{2-} 와 NO_3^- 의 농도가 각각 4.5, 33.6배 더 낮은 것으로 확인되었다.

Table 2. Mean concentrations($\mu\text{g}/\text{m}^3$) of water-soluble components.

Site	NH_4^+	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	SO_4^{2-}	NO_3^-	Cl^-	nss-SO_4^{2-}
1100Site	1.12	0.31	0.25	0.39	0.10	4.56	0.74	0.17	4.50
Kosan*	1.22	1.50	0.50	0.57	0.24	7.01	1.67	1.46	6.64
Kangwha**	2.03	1.40	1.50	1.08	0.34	6.86	3.99	2.04	6.51
Kogoshima**	2.28	1.99	0.36	0.87	0.41	9.48	1.65	2.19	8.98
Tsushima**	1.73	2.18	0.35	0.60	0.27	7.46	1.98	2.14	6.91
Jinan**	2.53	0.94	2.08	5.71	0.35	12.90	10.83	1.22	12.66
Nanjing**	3.13	1.60	4.15	10.33	0.81	20.97	24.85	3.23	20.57

* 한지숙 (1998) 제주지역 대기 에어로졸의 분석에 관한 연구, 제주대학교대학원 석사학위논문.

** Carmichael *et al.* (1997) Aerosol composition at Cheju island, Korea, *J. Geophys. Res.*, 102(D5), 6047-6053.

3.3 계절별 농도 변화

1996년 8월부터 1999년 5월까지의 데이터를 계절별로 분류하여 각 계절별 평균농도를 Table 3에 수록하였다. 수용성 양이온의 조성을 계절별로 비교해 본 결과 대체적으로 양이온 함량은 $\text{NH}_4^+ > \text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$ 의 순으로 NH_4^+ 이 가장 높은 농도를 보였다. 그러나 봄철의 에어로졸 조성은 $\text{NH}_4^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+}$ 의 순으로 토양기원의 Ca^{2+} , K^+ 성분이 크게 증가하는 경향을 보였다. 특히 1998년 가을에는 이전과는 달리 가을철인데도 그 함량이 $\text{NH}_4^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K} > \text{Mg}^{2+}$ 순으로 Ca^{2+} 의 농도가 크게 증가하는 결과를 나타내었다. 이러한 원인을 기상청에서 촬영한 위성사진을 통해 확인해 본 결과 1998년 11월 3일에는 가을철인데

도 심한 황사현상이 나타났었고, 에어로졸의 Ca^{2+} 농도는 $5.24 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 연구기간의 전체 평균농도 $0.38 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 비해 약 13.8배 정도 더 높은 농도를 보였다. 이러한 결과로 1998년 가을에 Ca^{2+} 농도가 크게 증가하는 요인이 되었으며, 이외의 나머지 기간에는 예년과 비슷한 농도를 나타내었다. 또한 월별 농도 변화를 비교해 본 결과 NH_4^+ 와 SO_4^{2-} 가 서로 비슷한 농도 변화를 나타내었고, 해염 성분인 Na^+ , Mg^{2+} , Cl^- 가 아주 유사한 월별 농도 변화 경향을 보이는 것으로 조사되었다. 또 Ca^{2+} 과 NO_3^- 가 봄철과 겨울철에 높은 농도를 보이면서 아주 유사한 변화 경향을 보였고, 특히 이러한 경향은 봄철에 아주 높은 농도를 유지하면서 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있었다.

Table 3. Seasonal comparison of ion concentrations($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Year	Season	NH_4^+	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	SO_4^{2-}	NO_3^-	Cl^-
1996	Summer	1.16	0.23	0.13	0.05	0.13	4.07	0.07	0.21
	Fall	0.84	0.39	0.13	0.08	0.22	3.24	0.32	0.24
	Winter	1.32	0.53	0.32	0.30	0.36	5.86	1.37	0.45
1997	Spring	1.47	0.23	0.32	0.41	0.09	5.17	1.21	0.30
	Summer	1.14	0.17	0.22	0.19	0.04	4.41	0.16	0.09
	Fall	0.88	0.15	0.25	0.13	0.04	3.74	0.16	0.05
1998	Winter	0.79	0.22	0.16	0.15	0.05	3.55	0.39	0.08
	Spring	1.06	0.30	0.30	0.86	0.11	5.03	1.22	0.10
	Summer	1.19	0.30	0.19	0.07	0.04	4.02	0.10	0.04
1999	Fall	1.32	0.62	0.38	0.49	0.10	5.56	0.62	0.25
	Winter	1.09	0.42	0.26	0.44	0.09	4.79	0.98	0.13
	Spring	0.86	0.31	0.22	0.57	0.09	4.48	0.80	0.09
1996	Spring	1.21	0.28	0.29	0.61	0.09	4.95	1.13	0.19
	Summer	1.13	0.23	0.19	0.12	0.06	4.09	0.12	0.10
1999	Fall	1.03	0.39	0.27	0.25	0.11	4.28	0.38	0.17
	Winter	1.02	0.36	0.23	0.29	0.13	4.42	0.80	0.17

대체적으로 양이온 중에는 NH_4^+ 이 가장 높은 농도를 나타내었다. NH_4^+ 이온의 농도는 연구기간 동안 계절별 평균이 0.89~1.49 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 다른 양이온들에 비해 훨씬 높은 값을 보였다. 그러나 다른 성분들에 비해 비교적 계절별로 큰 차이를 보이지는 않았다. 계절별 평균 농도를 보면 봄과 여름철에 각각 1.21 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 1.13 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 서로 비슷한 농도를 보였고, 가을과 겨울철에는 1.03 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 1.02 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 약간 낮은 값을 나타내었다. 일반적으로 NH_4^+ 성분은 동물의 배설물, 비료, 식물의 부식 등에 의해 주로 배출되며 이중 약 80% 정도가 동물의 배설물에 의해 발생하는 것(Howells, 1995)으로 알려져 있다. 또 NH_3 의 발생량을 결정하는 가장 중요한 인자는 생물학적 활성과 온도(Pio, *et al.*, 1996)이다. 봄철에는 비료의 사용량 증가로 NH_3 의 농도가 상승(Carmichael *et al.*, 1996)하고 여름에는 동물의 배설물이나 식물의 부패가 높은 기온의 영향으로 활발히 이루어지면서 NH_3 의 발생량이 증가한다. 본 연구 결과에서도 1996년 겨울과 1998년 가을을 제외하면 대체적으로 이러한 경향을 보였다. 그러나 더 중요한 요인으로 빗물의 세정효과를 들 수 있으며 이러한 모든 원인을 종합적으로 고려하면 1996년 겨울과 1998년 가을의 예외적인 NH_4^+ 농도 상승 원인도 규명이 가능할 것으로 보인다.

Ca^{2+} 의 농도는 봄, 여름, 가을, 겨울철에 각각 0.61 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0.12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0.25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0.29 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 봄에 그 농도가 크게 증가하고 있음을 알 수 있다. 이는 황사의 영향으로 토양 미립자가 제주지역 대기 중으로 다량 유입

되고 있음을 나타낸다. 이처럼 황사시기인 봄철에 Ca^{2+} 농도가 크게 증가하는 것은 제주지역 대기질이 중국의 영향(Okada *et al.*, 1987; Okada *et al.*, 1990; Kotamarthi and Carmichel, 1993; Iwasaka *et al.*, 1998)을 많이 받고 있고, 서풍 계열의 바람이 불 때는 다른 여러 가지 대기오염물질들도 다량으로 장거리 이동될 수 있음을 의미한다.

SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^- 의 수용성 음이온 분석 결과 농도는 대체로 $\text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^-$ 의 순으로 나타났다. 이 중 SO_4^{2-} 는 4.16~4.88 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 다른 성분들에 비해 가장 높은 농도를 보였으며, 봄과 겨울철에 가장 높고 여름철에 상대적으로 낮은 경향을 보였다. NO_3^- 의 농도 범위는 0.11~1.07 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었고 특히 봄과 겨울철에 각각 1.13 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0.80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 여름과 가을의 0.12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0.38 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 비해 크게 증가함을 알 수 있다. 이 역시 Ca^{2+} 와 마찬가지로 북서 계열의 풍향이 우세한 봄과 겨울에 농도가 크게 증가되는 것으로 보아 중국의 영향에 의한 것으로 판단된다. Cl^- 은 0.14~0.26 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 사계절 모두 비슷한 농도 분포를 나타내었고 전체적으로 아주 낮은 농도를 보였다. 또 Cl^- 뿐만 아니라 해염입자의 주요 성분인 Na^+ , Mg^{2+} 역시 도내 다른 지역의 에어로졸에 비해 대체적으로 낮게 나타났다. 이는 제주도 고산 지역의 에어로졸 조성과는 많이 상이한 결과로 해발 1100 m의 고지대에서는 해염입자의 양이 많이 감소하고 있음을 알 수 있다.

3.4 성분들 간의 상관관계 비교

에어로졸의 수용성 성분들의 발생기원을

확인하고 에어로졸 특성을 조사하기 위하여 각 성분들 상호간의 상관성을 비교하였다. 각 성분들에 대한 상관계수를 SPSS 통계프로그램을 이용하여 구하였고, 그 결과를 Table 4에 수록하였다. 연구 기간 동안 채취한 에어로졸 성분 중 주요 오염물질인 SO_4^{2-} 의 경우 다른 성분들에 비해 농도가 가장 높게 나타났고 이러한 상승 요인을 상관계수를 구하여 검토하였다. SO_4^{2-} 성분과 양이온들 즉 NH_4^+ , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} 과의 상관관계를 조사한 결과 NH_4^+ 과 0.859로 가장 큰 상관성을 보였다. 이는 SO_4^{2-} 가 $(NH_4)_2SO_4$ 상태로 존재하고 있음을 의미하는 것이다. NH_3^+ 는 대기중에서 H_2SO_4 와의 반응성이 아주 커서 $H_2SO_4-H_2O$ 의 이성분 시스템에 빠른 속도로 염을 생성하여 기후에 영향을 줄 뿐만 아니라 구름의 알베도에도 영향 (Zhuang and Huebert, 1996)을 미치는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서 채취한 제주지역 에어로졸 역시 이러한 $(NH_4)_2SO_4$ 가 에어로졸의 주요 성분(Sutton *et al.*, 1998; Querol *et al.*, 1998)으로 존재하고 있음을 알 수 있었다. 다음으로 SO_4^{2-} 와의 상관성이 큰 성분은 K^+ 로 0.864로 비교적 높은 상관관계를 보였고, 대기중에 SO_4^{2-} 상당량이 K_2SO_4 상태로 존재하고 있음을 알 수 있었다. NO_3^- 는 주로 석탄, 석유와 같은 화석연료의 연소에 의하여 생성된 NO_2 가 2차입자로 전환되어 에어로졸로 유입되며 이러한 NO_3^- 의 생성량은 화석연료의 연소에 의해 생성된 NO_x 가 복잡한 여러 반응을 거쳐 가스상 질산(HNO_3)과 입자상 질산(NO_3^-)으로 전환되며, 질산의 생성은 일사량, 기온, 습도, HNO_3

와 NH_3 의 대기중 농도, 부유분진의 성분에 따라 달라진다(Stelson and Seinfeld, 1982; 천만영과 김희강, 1995; Hayami and Carmichael, 1998). 질산은 에어로졸 또는 습식, 건식 강하물로 지면으로 이동하여 인체와 동식물에 피해를 줄 뿐만 아니라 토양과 수계의 산성화를 촉진시키고 각종 구조물을 부식시키며 시정을 감소시키는 등 다양한 형태 (Zhuang *et al.*, 1996)로 피해를 주고 있다. 입자상 질산(NO_3^-)은 대부분 HNO_3 와 NH_3 의 반응에 의해 생성된 NH_4NO_3 또는 NO_2 , HNO_3 와 알칼리성 토양입자나 해염입자와의 반응에 의해 금속염 형태로 존재하는 것으로 알려져 있다. 본 연구의 분석결과로 부터 NO_3^- 성분과 양이온들과의 상관관계를 조사한 결과 Ca^{2+} 과 0.656으로 비교적 높은 상관성을 나타냈으며, Mg^{2+} 과도 0.588로 비교적 상관성이 크게 나타났다. 이러한 결과로부터 NO_3^- 성분은 토양성분과의 상관성이 높고, 상당량이 토양 입자에 흡착 또는 반응된 형태로 존재할 수 있음을 확인할 수 있었다. 일반적으로 에어로졸의 NO_3^- 는 NH_4^+ 과의 상관성이 큰 것으로 알려져 있으나 본 연구의 결과에서는 이와는 조금 다른 양상을 보이는 것으로 조사되었다. 반면에 Cl^- 은 Na^+ , Mg^{2+} 과 높은 상관성을 보였고 해염성분은 주로 $NaCl$, $MgCl_2$ 의 형태로 유입되는 것으로 확인되었다.

3.5 해염입자의 영향

에어로졸 입자에는 일반적으로 해염성분이 상당량 함유되어 있으며, 제주지역 에어로졸의 경우 그 영향이 클 것으로 예상된다.

Table 4. Linear correlation coefficients for aerosol components.

	NH ₄ ⁺	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	nss-SO ₄ ²⁻
NH ₄ ⁺	1								
Na ⁺	0.168	1							
K ⁺	0.770	0.310	1						
Ca ²⁺	0.178	0.454	0.518	1					
Mg ²⁺	0.307	0.633	0.452	0.483	1				
SO ₄ ²⁻	0.859	0.347	0.864	0.496	0.484	1			
NO ₃ ⁻	0.393	0.481	0.549	0.656	0.588	0.481	1		
Cl ⁻	0.120	0.602	0.220	0.360	0.606	0.181	0.532	1	
nss-SO ₄ ²⁻	0.861	0.327	0.864	0.490	0.474	1.000	0.474	0.169	1

이를 정량적으로 확인하기 위하여 Na⁺을 지표성분으로 농축계수(enrichment factor, EF)를 다음의 식(Davis, 1972; Chesselet *et al.*, 1972; Nishikawa *et al.*, 1986; 이호근 등, 1995)에 의해 계산하였다.

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

Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, SO₄²⁻, Cl⁻ 등의 해염 성분들 중 Na⁺을 지표 성분으로 각 성분들에 대해 농축계수를 계산하여 각 계절별로 에어로졸에 유입된 해염입자의 양을 확인하고 그 결과를 Table 5에 요약하였다. 일반적으로 각 성분들에 대해 구한 EF 값이 1에 가까울수록 그 원소의 기원은 지표성분과 같음을 의미한다. EF 값이 지표성분에 따라 다소 차이를 보이기 때문에 일반적으로 EF 값이 3~5 이하의 원소들은 지표성분과 같은 기원을 갖고 그 이상의 값을 나타내면 다른 기원(최만식 등, 1989)에 의해 유래된

원소라고 볼 수 있다. SO₄²⁻의 경우 EF 값이 121.8~313.6으로 해염 영향 보다는 다른 요인에 의해 대기중으로 유입되고 있음을 알 수 있다. 또한 Ca²⁺의 EF 값을 보면 29.9~63.3으로 큰 값을 나타내었다. 이는 Ca²⁺가 해염보다는 주로 다른 요인에 의해 대기중으로 유입되고 있음을 보여주고 있다. 특히 봄철의 에어로졸 시료에서 Ca²⁺의 EF 값이 63.3으로 큰 값을 보이고 있는데 이는 봄철의 황사현상에 의해 중국에서 장거리 이동된 미세 토양입자가 제주지역 대기부유분진에 다량으로 유입되고 있음을 잘 반증해 주는 결과이다. 반면에 Cl⁻는 1에 가까운 값을 나타내었고 해염입자에 의해 대기중으로 유입되고 있는 것으로 조사되었다. 또 Mg²⁺는 EF 값이 2.5~5.5의 값을 나타내었고, 해염외에 일부 다른 요인에 의해서도 대기 에어로졸에 유입되고 있는 것으로 판단된다.

Table 5. Seawater enrichment factors calculated from aerosol analytical data.

Ratio	$(C_x/C_{Na^+})_{Seawater}$	$(C_x/C_{Na^+})_{Aerosol} / (C_x/C_{Na^+})_{Seawater}$			
	Seawater	spring	summer	fall	winter
SO_4^{2-}/Na^+	0.25	122.0	121.8	228.5	313.6
Cl^-/Na^+	1.80	1.2	1.1	1.0	0.3
Mg^{2+}/Na^+	0.12	4.0	2.5	4.9	5.5
Ca^{2+}/Na^+	0.04	63.3	51.1	29.9	31.4
K^+/Na^+	0.04	46.8	34.5	53.2	47.7

3.6 토양입자의 영향

대기 에어로졸의 성분으로는 크게 해염, 비산회, 검댕 등을 들 수 있고 이외에도 토양입자가 상당량 포함되어 있다. 또 Ca^{2+} , Al, Fe는 토양의 주요 성분으로 이들 세 성분은 동일한 발생기원을 갖는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 토양성분으로부터 유래된 입자들이 에어로졸에 어느 정도 함유되어 있는지를 확인하기 위하여 Ca^{2+} 을 지표성분으로 각 이온들과 Ca^{2+} 의 농도비를 측정하여 토양입자의 유입정도를 확인하였다. Ca^{2+} 을 지표 성분으로 다음의 식에 의해 SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- , NH_4^+ , Na^+ , Mg^{2+} , K^+ 성분들에 대한 농축계수(EF)를 계산(Nishikawa *et al.*, 1986; Carmichael *et al.*, 1997)하고, 그 결과를 Table 6에 수록하였다.

$$EF = (C_x/C_{Ca^{2+}})_{Aerosol} / (C_x/C_{Ca^{2+}})_{Crust}$$

식에서 $(C_x/C_{Ca^{2+}})_{Crust}$ 는 토양성분의 성분비이고, C_x 에서 X는 SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- , NH_4^+ , Na^+ , Mg^{2+} , K^+ 의 평균농도이다. 해염입자 영향에서와 마찬가지로 이들 성분들의 EF

값이 1에 가까울수록 토양입자의 유입이 많은 것으로 볼 수 있으며, 이 값이 클수록 다른 요인에 의해 대기 에어로졸에 유입되었음을 의미한다. 결과에서 보듯이 SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- , NH_4^+ 성분들의 EF 값은 각각 6343.3~21093.3, 314.3~720.1, 894.6~1105.8, 2235.3~7086.8의 범위를 보였다. 이처럼 EF 값이 크게 나타나는 것으로 보아 이들 성분들은 토양 영향보다는 다른 요인에 의해 대기 중으로 유입되고 있는 것으로 보인다. 반면에 Na^+ , Mg^{2+} , K^+ 성분은 비교적 낮은 EF 값을 나타내었고, 이들 성분들은 상당 부분이 토양입자들로부터 유래되고 있음을 알 수 있었다.

3.7 요인 분석

에어로졸 성분의 특성 및 발생기원을 확인하기 위하여 통계 프로그램(SPSS)을 이용하여 요인 분석(factor analysis)을 실시하였다. 우선 최적 인자의 수를 결정하기 위하여 고유값(eigenvalue), 누적기여율 등을 고려하여 고유값이 0.7 이상, 누적기여율이 86% 이상인 3개의 인자수를 결정(김종수 등, 1996;

Table 6. Soil enrichment factors calculated from aerosol analytical data.

Ratio	$(C_x/C_{Ca^{2+}})_{Crust}$	$(C_x/C_{Ca^{2+}})_{Aerosol}/(C_x/C_{Ca^{2+}})_{Crust}$			
	Soil	spring	summer	fall	winter
SO_4^{2-}/Ca^{2+}	0.004	6343.4	21093.3	13847.7	9286.2
Cl^-/Ca^{2+}	0.004	502.5	720.1	522.0	314.3
NO_3^-/Ca^{2+}	0.004	1105.8%	903.5	894.6	1027.3
NH_4^+/Ca^{2+}	0.004	2411.6	7068.8	3569.9	2235.3
Na^+/Ca^{2+}	0.76	1.7	6.4	4.6	3.6
Mg^{2+}/Ca^{2+}	0.33	1.0	4.6	3.8	2.4
K^+/Ca^{2+}	0.66	1.9	4.1	4.0	1.8

황인조와 김동술, 1998)하였다. 여기서 고유값은 스크리검정(Scree test)의 결과에 따라 0.7을 기준으로 정하였다. 최적인자의 수를 결정한 후 각 인자에 대한 물리적 해석을 용이하게 하기 위해 Varimax 회전법을 이용하여 인자 적재값(factor loading)을 산출하여 그 결과를 Table 7에 수록하였다.

일반적으로 에어로졸의 성분 중 Na^+ , Cl^- 은 해염입자의 주요 성분이며, Ca^{2+} 은 주로 토양입자의 지표물질이다. 또한 SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+ 등은 인위적 요인에 의한 발생기원을 갖고 있으며 이 중 특히 NH_4^+ 와 NO_3^- 는 동물의 배설물이나 비료 성분의 지표 물질이기도 하다.

본 연구의 경우 3개의 인자를 추출했을 때 전체변이의 84.5%의 설명력을 보였다. 표에

서 보는 것처럼 첫 번째 인자는 40.1%의 설명력을 나타냈고, NH_4^+ , SO_4^{2-} , K^+ 등과 같이 인위적 발생기원의 성분들이 큰 인자 적재값을 갖는 것으로 보아 주로 인위적 오염 성분들에 의한 영향으로 판단된다. 두 번째는 해염 인자인 Na^+ , Mg^{2+} , Cl^- 이 높은 인자 적재값을 보였고 전체 변이의 26.9% 설명력을 보였다. 또 세 번째는 Ca^{2+} 과 NO_3^- 만이 높은 인자 적재값을 나타내어 토양에 의한 영향으로 해석된다. 이상과 같이 인자 분석을 실시한 결과, 1100 고지의 에어로졸은 인위적 오염원의 영향이 가장 크고, 다음으로 토양 및 해염의 영향을 많이 받고 있는 것으로 조사되었다.

Table 7. Results of varimax factor matrix for aerosol.

Component	Factor 1	Factor 2	Factor 3
NH ₄ ⁺	0.950	0.001	-0.001
Na ⁺	0.135	0.814	0.207
K ⁺	0.848	0.152	0.347
Ca ²⁺	0.220	0.252	0.904
Mg ²⁺	0.308	0.772	0.246
SO ₄ ²⁻	0.931	0.173	0.257
NO ₃ ⁻	0.298	0.458	0.646
Cl ⁻	0.002	0.881	0.132
Eigenvalue	5.0	1.9	0.7
Variance %	56.1	20.8	8.0
Cumulative %	56.1	76.9	84.9

3.8 풍향별 농도 변화

1996년 8월부터 1999년 5월까지의 에어로졸 성분들에 대해 풍향에 따른 농도 변화를 비교하였다. 이 때 풍향은 850 hPa 즉, 고도 약 1500 m 내외의 고층기상자료를 이용하였다. 이처럼 바람 방향에 따라 농도 변화를 비교해 본 결과 NH₄⁺, Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺의 농도는 대체적으로 북풍 및 서풍 계열의 풍향일 때 그 농도가 증가하고 남동풍 계열의 풍향일 때 농도가 감소하는 경향을 보였다. 이 중에서도 특히 Ca²⁺의 경우 서풍 계열의 바람이 불 때 크게 농도가 증가하는 현상을 보였으며 해염 성분인 Na⁺은 330° 근처의 북풍 계열에서 가장 높은 농도를 나타내었다. 또 대륙쪽과 해양 및 일본쪽 풍향일 때 각 성분의 농도비를 구해 본 결과 NH₄⁺, Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺에 대해 각각 1.3, 1.0, 1.9, 2.9, 1.3으로 대체적으로 중국과 한반도를 포함한 대륙쪽에서 바람이 불 때 그 농도가 증가하고 해양 및 일본쪽에서 바람이 불 때 감소하는 현상을 보였다. 특히 토양의 지표

성분인 Ca²⁺의 농도가 약 3배 정도의 가장 현저한 차이를 나타내었다. 또 SO₄²⁻, NO₃⁻, Cl⁻ 성분들 역시 양이온과 마찬가지로 북풍 및 서풍 계열의 바람이 불 때 농도가 증가하고 상대적으로 남동풍 계열의 바람이 불 때 농도가 감소하는 경향을 보였다. 특히, 오염 기원의 SO₄²⁻과 NO₃⁻ 성분은 대체적으로 남동풍 계열의 풍향일 때에 비해 북~서풍 계열일 때의 농도가 각각 1.5배, 2.3배 정도 증가하였다. 반면에 해염 기원의 Cl⁻은 북풍 계열일 때 가장 높은 농도를 나타내었다.

또한 제주도를 중심으로 풍향을 6개의 방향으로 분류하여 각 풍향별로 수용성 성분의 평균 농도를 구하고, 그 결과를 Table 8과 Figure 1~Figure 2에 나타내었다. 이 때 6개의 방향은 한반도 방향(Korean Peninsula, 350°~40°), 동해 방향(East Sea, 40°~80°), 규슈 방향(Kyushu, 80°~140°), 남쪽 해양 방향(Marine-South, 140°~210°), 남중국 방향(South-China, 210°~270°), 북중국 방향(North-China, 210°~350°)이다(Carmichael et

al., 1997). 풍향별로 각 성분에 대한 농도를 비교해 본 결과 대체적으로 대부분의 성분들이 대륙 쪽에서 바람이 불 때 농도가 증가하는 경향을 보였다. 우선 양이온 중에는 NH_4^+ 가 가장 높은 농도를 보였고, 중국 쪽 풍향일 때 ($1.10 \mu\text{g}/\text{m}^3$)가 해양 쪽(East Sea, Kyushu, marine-south) 풍향일 때에 비해 ($0.86 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 비교적 높은 농도를 나타내고 있다. 또 Ca^{2+} 은 중국 쪽 풍향일 때 $0.41 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 해양 쪽 풍향일 때 $0.14 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 중국 쪽 풍향일 때가 약 3배 정도 높게 나타났다. K^+ 역시 중국 쪽 풍향일 때($0.25 \mu\text{g}/\text{m}^3$)가 해양 풍향일 때($0.14 \mu\text{g}/\text{m}^3$)보다 약 2배 정도 높은 농도를 나타내었다. 특히 황사기간에는 Ca^{2+} 농도가 대략 8배 정도 상승하는 것으로

조사되었다(Iwasaka et al., 1988; Okada et al., 1990; Kotamarthi and Carmichael, 1993; Husar et al., 2001; Youngsin Chun et al., 2001). 그러나 해염 성분인 Na^+ , Mg^{2+} , Cl^- 성분들은 풍향별로 큰 차이를 보이지 않았다. 또한 SO_4^{2-} 의 농도는 중국 쪽 풍향일 때 $4.69 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 해양 쪽 풍향일 때 $3.36 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 비슷한 경향을 나타내고 있다. 반면에 NO_3^- 성분의 농도는 중국 쪽 풍향일 때가 $0.75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이고 해양 쪽 풍향일 때가 $0.33 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 중국 쪽 풍향일 때 약 2배 가량 높은 농도를 보였다. 특히 봄과 겨울철에 비교적 높은 수치를 나타내고 있는데, 이러한 경향은 Ca^{2+} 의 농도 변화와 잘 일치하는 결과이다.

Table 8. Comparison of mean concentration($\mu\text{g}/\text{m}^3$) of aerosol components for six flow wind directions.

Wind Direction	NH_4^+	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	SO_4^{2-}	NO_3^-	Cl^-
Korea Peninsula	1.33	0.48	0.30	0.40	0.14	5.43	0.81	0.29
East Sea	0.83	0.34	0.15	0.16	0.10	3.27	0.50	0.12
Kyushu	0.98	0.36	0.17	0.15	0.10	3.75	0.37	0.17
Marine south	0.76	0.29	0.11	0.14	0.08	3.11	0.30	0.10
South China	1.05	0.27	0.27	0.49	0.09	4.72	0.59	0.15
North China	1.01	0.26	0.22	0.30	0.10	4.12	0.60	0.12

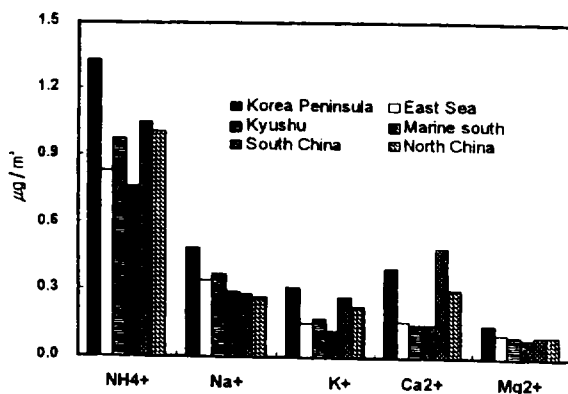


Figure 1. Comparison of mean concentrations of cationic aerosol components for six flow wind directions.

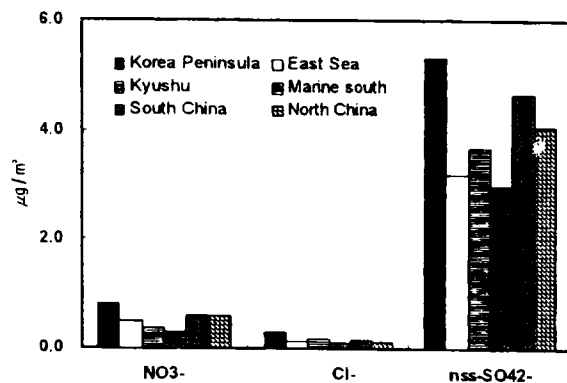


Figure 2. Comparison of mean concentration of anionic aerosol components for six flow wind directions.

4. 결 론

한라산 1100고지에 high volume air sampler를 설치하여 1996년 8월부터 1999년 5월 까지 총 454개의 에어로졸 시료를 채취하고, 에어로졸의 수용성 성분을 분석하였다. 분석 결과로부터 대기 에어로졸의 오염 특성을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 분석 데이터들에 대해 양이온 당량농도의 합과 음이온 당량농도의 합간의 상관계수를 구해 본 결과 0.944로 분석 데이터의 신뢰도는 비교적 양호한 것으로 확인되었다.

2) 수용성 성분의 평균농도는 $\text{SO}_4^{2-} > \text{NH}_4^+ > \text{NO}_3^- > \text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Cl}^- > \text{Mg}^{2+}$ 의 순으로 나타났으며, SO_4^{2-} , NH_4^+ , NO_3^- 의 함량이 각각 60%, 15%, 10%로 전체 성분의 85%를 차지하였다.

3) 각 성분들간의 상관성을 비교한 결과 SO_4^{2-} 은 NH_4^+ , K^+ 과의 상관계수가 각각 0.859, 0.864로 큰 상관성을 나타내었다. 또 NO_3^- 은 Ca^{2+} , Mg^{2+} 과의 상관계수가 각각 0.656, 0.588로 NO_3^- 성분은 토양성분과의 상관성이 높고, 상당량이 토양 입자에 흡착 또는 반응된 형태로 존재할 수 있음을 확인할 수 있었다. 일반적으로 에어로졸의 NO_3^- 은 NH_4^+ 과의 상관성이 큰 것으로 알려져 있으나 본 연구의 결과에서는 이와는 조금 다른 양상을 보이는 것으로 조사되었다. 반면에 Cl^- 은 Na^+ , Mg^{2+} 와 높은 상관성을 보였고 해염성분은 주로 NaCl , MgCl_2 의 형태로 유입되는 것으로 확인되었다.

4) 농축계수를 구하여 해염 영향을 조사한

결과 Mg^{2+} , Cl^- 성분은 주로 해염의 영향으로 대기 중에 유입되고 있으나, K^+ , Ca^{2+} , SO_4^{2-} 성분은 다른 요인에 의해 대기 중으로 유입되고 있음을 알 수 있었다. 또한 토양입자의 영향을 조사한 결과 Mg^{2+} , K^+ 성분은 주로 토양으로부터 유입되고 있으나 SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- , NH_4^+ 성분들은 다른 요인으로 대기에 유입되고 있음을 알 수 있었다.

5) 수용성 성분의 기원을 확인하기 위하여 인자분석을 수행한 결과 한라산 1100 고지의 에어로졸은 인위적 오염원의 영향이 가장 크고, 다음으로 토양 및 해염의 영향을 많이 받고 있는 것으로 나타났다.

6) 풍향별로 수용성 성분들의 농도를 비교한 결과 거의 모든 성분들이 남동풍보다는 북서풍 계열의 바람이 불 때 농도가 증가하는 경향을 보였다. 특히 Ca^{2+} 과 NO_3^- 은 북서풍 계열의 바람이 불 때 각각 약 3배와 2배 정도로 농도가 증가하였다.

참 고 문 헌

- 강창희, 김원형, 홍상범, 이기호, 홍민선, 심상규 (1999) 청정지역 강우의 분석 : 1997-1998년 한라산 1100 고지와 제주도 강우의 특성, 한국대기환경학회지, 15(5), 555-566.
- 김기현 · 이강웅 · 허철구 · 강창희 (1997) 제주도 연안해역을 중심으로 한 DMS 농도의 관측, 「한국대기보전학회지」, 13(2), 161-170
- 문길주등 (1998) 동북아 대기오염 장거리이동과 환경보전협력방안에 관한 조사

- 연구(III),국립환경연구원.
- 문길주등 (1999) 동북아 대기오염 장거리이동과 환경보전협력방안에 관한 조사연구(IV),국립환경연구원.
- 박경윤, 이호근, 서명석, 장광미, 강창희, 허철구 (1994) 제주도 고산 측정소에서 의 대기오염 배경농도 측정 및 분석, 한국대기보전학회지, 10(4), 252-259.
- 서명석, 박경윤, 이호근, 장광미, 강창희, 허철구, 김영준 (1995) 청정지역과 도시 지역의 오존농도 특성 연구, 한국대기보전학회지, 11(3), 253-262.
- 심상규, 강창희, 김용표 (1994) 제주도에서의 빗물이온 농도 분석, 한국대기보전학회지, 10(2), 98-104.
- 이호근, 박경윤, 서명석, 장광미, 강창희, 허철구 (1995) 제주도 고산에서 수용성 에어로졸의 화학적 성분분석, 한국대기보전학회지, 11(3), 245-252
- 장광미, 이호근, 서명석, 박경윤, 강창희, 허철구, 심상규 (1996) 1994년 자료에 나타난 제주도 고산에서의 SO₂ 농도 변화특성, 한국대기보전학회지, 12(5), 541-554.
- 천만영, 김희강 (1995) 생성메카니즘에 따른 부유분진 중 입자상 Nitrate 농도, 한국대기보전학회지, 11(1), 37-44
- 최만식, 조성록, 이동수 (1989) 서해안 분진의 화학적 조성 및 기원에 대한 연구(I), 한국대기보전학회지, 5(2), 72-83.
- 홍민선, 이상훈, 이동섭, 강창희, 박경윤 (1992) 제주도고산에서의 대기오염물질 측정 및 분석에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 8(4), 257-261.
- 황인조, 김동술 (1998) Submicron 부유분진의 화학적 조성 및 분포에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 14(1), 11-23.
- Akimoto 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 A, J. Geophys. Res., 101(D1), 2011-2023
- Akimoto R., and H. Natria (1994) Distribution of SO₂, NO_x and CO₂ emissions from fuel combustion and industrial activities in Asia with 1°×1° resolution, Atmospheric Environment, 28(2), 213-225.
- Arndt R. L., G. R. Carmichael, and J. M. Roorda (1998) Seasonal source-receptor relationships in asia, Atmospheric Environment, 32(8), 1397-1406.
- Ayers G.P.andM.J.Manton(1991)RainwatercompositionastwoBAPMoN regional stations in SE Australia, Tellus, 43B, 379-389.
- Carmichael G. R. , M. S. Hong, H. Ueda, L. L. Chen, K. Murano, J. K. Park, H. Lee, Y. Kim, C. Kang, and S. Shim (1997) Aerosol composition at Cheju Island, Korea, J. Geophys. Res., 102(D5), 6047-56061.
- Carmichael G. R.,Y. Zhang, L.L.Chen, M.S. Hong,and H.Ueda (1996) Seasonal va-

- riation of aerosol composition at Cheju Island, Korea, *Atmospheric Environment*, 30(13), 2407-2416.
- Chen L. L., G. R. Carmichael, M. S. Hong, H. Ueda, S. Shim, Chul H. Song, Y. P. Kim, R. Arimoto, J. Prospero, Dennis-Savoie, K. Murano, J. K. Park, H. Lee, and C. Kang (1997) Influence of continental outflow events on the aerosol composition at Cheju Island, South Korea, *J. Geophys. Res.*, 102(D23), 28551-28574.
- Chesselet R., J. Morelli, and P. Buat-Menard (1972) Variations in Ionic Ratios between Reference Sea Water and Marine Aerosols, 77(27), 5116-5131.
- Chul-Un Ro, Keun-Young Oh, Hyekeyeong Kim, Yong Pyo Kim, Chong Bum Lee, Ki-Hyun Kim, Chang Hee Kang, Janos Osan, Johan De Hoog, Anna Worobiec, and Rene Van 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.
- Davis R. A. (1972) Principles of oceanography; Part III, Chemical oceanography, Addison-Wesley, p134-145. Hayami H. and G. R. Carmichael (1998) Factors influencing the seasonal variation in particulate nitrate at Cheju island, South Korea, *Atmospheric Environment*, 32(8), 1427-1434.
- Howells G. (1995) Acid rain and acid waters (2nd Ed.), Ellis Horwood, p110.
- Huebert B. and T. Bates (1998) ACE-Asia (Asian Pacific Regional Aerosol Characterization Experimental); project prospectus, The 2nd ACE-Asia planning meeting, Nov. 10-13, Cheju.
- Husar R. B., D. M. Tratt, B. A. Schichtel, S. R. Falke, F. Li, D. Jaffe, S. Gass, T. Gill, N. S. Laulainen, F. Lu, M. C. Reheis, Y. Chun, D. Westphal, B. N. Holben, C. Gueymard, I. McKendry, N. Kuring, G. C. Feldman, C. McClain, R. J. Frouin, J. Merrill, D. DuBois, F. Vignola, T. Murayama, S. Nickovic, W. E. Wilson, K. Sassen, N. Sugimoto, and W. C. Malm (2001) Asian dust event of April 1998, 106(D16), 18,317-18,330.
- 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*, 40B, 494-503.
- Kim Y. P., Shim S. G., Moon K. C., Hu C. G., Kang C. H., and Park K. Y. (1998a) Monitoring of air pollutants at Kosan, Cheju Island, Korea during March-April, 1994, *J. Applied Meteorology*, 37(10), 1117-1126.
- Kim Young Pyo, Lee Jong Hoon, Baik Nam Jun, Kim Jin Young, Shim Shang Gyoo,

- and Kang Chang Hee (1998b) Summer-time Characteristics of Aerosol composition at Cheju Island, Korea, *Atmospheric Environment*, 32(22), 3905-3915.
- Kim Y. P., K.-C. Moon, S.-G. Shim, J.H. Lee, J.Y. Kim, K. Fung, G.R. Carmichael, C. H. Song, C.H. Kang, H.-K. Kim, J.B. Lee (2000) Carbonaceous species at the background sites in Korea between 1994 and 1999, *Atmospheric Environment*, 34(29), 5053-5060.
- Kotamarthi V.R. and Gregory R. C. armichael (1993) A modeling study of the long-range transport of Kosa using particle trajectory methods, *Tellus*, 45B, 426-441.
- Nishikawak M., Y. Ambe and S. Chubachi (1986) Concentrations of trace elements in surface snow in the area near Syowa Station, Antarctica, *Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue*, 47-55.
- Okada K., A.kobayashi, Y.Iwasaka, H.Naruse, T.Tanaka, and O.Nemoto (1987) Features of Individual Asian Dust-storm Particles Collected at Nagoya, Japan, *J. Meteor. Soc. Japan*, 65(3), 515-521.
- Okada K., Hiroshi Naruse, Toyooki Tanaka, Osamu Nemoto, Yasunobu Iwasaka, Pei-Ming Wu, akira Ono, Robert A. Duce, Mitsuo 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.
- Pio C. A., M. A. Cerqueira, L. M. Castro, and M. L. Salgueiro (1996) Sulphur and nitrogen compounds variable marine/continental air masses at the southwest european coast, *Atmospheric Environment*, 30(18), 3115-3127.
- Querol X., Andres Alastuey, Jose A. Puigercus, Mantilla, C. R. Ruiz, A. Lopez-Soler, F. Plana and R. Juan (1998) Seasonal evolution of suspended particles around a large coal-fired power station: Chemical characterization, *Atmos. Environ.*, 32 (4), 719-731.
- Stelson W. and John H. Seinfeld (1982) Relative humidity and pH dependence of the vapor pressure of ammonium nitrate-nitric acid solutions at 25°C, *Atmospheric Environment*, 16(5), 993-1000.
- Sutton M. A., D. S. Lee, G. J. Donnard and D. Fowler (1998) Introduction atmospheric ammonia: Emission, deposition and environmental impacts, *Atmospheric Environment*, 32(3), 269-271.
- Young sin Chun, Kyung-On Boo, Jiyong Kim, Soon-Ung Park, and Meehye Lee (2001) Synopsis, transport, and physical characteristics of Asian dust in Korea, *106(D16)*, 18,461-18,469.
- Zhuang L. and B. J. Huebert (1996) Lagrangian analysis of the total ammonia budget during Atlantic Stratocumulus Transition Experiment/Marine Aerosol

and Gas Exchange, J. Geophys. Res.,
101(D2), 4341-4350.

Pollution Characteristics of Atmospheric Aerosols Collected at 1100 Site of Mt. Halla

Chang-Hee Kang and Won-Hyung Kim

Department of Chemistry, College of Natural Sciences, Cheju National University

Abstract

The atmospheric aerosols have been collected with a high volume tape sampler installed at the 1100m Site located at the Halla mountain from August, 1996 to May, 1999. The compositions of water-soluble components have been analyzed in order to investigate the variations of aerosol compositions and the characteristics of aerosols. The mean concentrations of water-soluble components have been found in the order of $\text{SO}_4^{2-} > \text{NH}_4^+ > \text{NO}_3^- > \text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+}$, and the compositions of SO_4^{2-} , NH_4^+ , NO_3^- were 60%, 15%, 10%, respectively. From the investigation of the sea salt enrichment factors, the SO_4^{2-} , Ca^{2+} and K^+ components were thought to be introduced into the atmospheric aerosols due to the non-sea salt effect, on the other hand, Mg^{2+} and Cl^- were introduced due to the sea salt effect. From the investigation of the soil enrichment factors, the SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^- and NH_4^+ were thought to be introduced into the atmospheric aerosols through the non-soil pathways, but Mg^{2+} and K^+ were found to be mainly from the soil sources. Based on the factor analysis by SPSS program, the emission sources were found to be anthropogenic sources, sea salt and soil, respectively. The concentration variation of aerosol components as a function of wind direction was investigated. From the result, most of all the components were increased in the northwest direction rather than the southeast direction, and especially, the concentrations of Ca^{2+} and NO_3^- were increased about three times and twice respectively in the northwest wind direction.

Key words : atmospheric aerosol, enrichment factor, factor analysis, wind direction, emission sources