

제주지역 강하 먼지의 조성에 관하여 -
1. 화학적 조성 및 침적량

A Study on Chemical Composition of Dustfall Samples
in Cheju Area -

1. Chemical composition and deposition

이기호 · 허철구 · 송문호¹⁾ · 박용이²⁾

제주대학교 환경공학과

¹⁾서귀포기상관측소

²⁾제주산업정보대학 환경공학과

(1998년 7월 23일 접수, 1999년 1월 9일 채택)

Ki-Ho Lee, Chul-Goo Hu, Moon-Ho Song¹⁾ and Yong-Yi Park²⁾

Dept. of Environmental Engineering, Cheju National University

¹⁾*Sogyipo Weather Observation Station*

²⁾*Dept. of Environmental Engineering, Cheju College of Technology*

(Received 23 July 1998; accepted 9 January 1999)

Abstract

This study is carried out to investigate the chemical composition of atmospheric deposition in Cheju Island, Korea. For this purpose, dustfall matter samples are collected by dust jar from August, 1995 to July, 1996 at five sampling sites and total suspended particulate matters (TSP) and rain are also collected at one site from October, 1995 to July, 1996. All the samples collected are analyzed, and then the information of the 19 chemical species and deposition amount of each species is obtained.

These data are used to determine the regional trends in dustfall chemistry and deposition, and compare the characteristics of chemical compositions between dustfall, TSP and rainwater.

Key words : dustfall, TSP, rain, Cheju area, deposition, chemical compositions

1. 서 론

대기 침적물에 관한 연구는 미국, 캐나다 등을 비롯한 많은 국가에서 다양한 연구가 진행되고 있다. Al-Momani *et al.* (1995)은 연안의 산업지역 부근에

대한 침적물의 화학적 조성을 통해서 습성 및 건성 침적물을 연구했고, West와 Feagley (1995)는 강수중의 수용성 성분의 화학적 조성 분석을 통해 그 발생기원을 밝히고 있으며, Scudlark *et al.* (1994)은 강수중의 중금속 물질의 습성 침적량을, Poissant와 Beron (1994)은 도시 지역 강수중의 수용성 및 중금

속 성분들에 대한 모델화를, Zhang, *et al.*(1993)은 중국에서 dust storm을 대상으로 중금속의 건성침적 특성을 평가하고 있으며 Wu *et al.*(1994)은 에어로졸 입자중 중금속 원소들의 발생원과 건성 침적물에 대한 연구를 실시한 바 있다.

이처럼 대기 침적물에 관한 연구는 건성 침적물과 습성 침적물에 대해서 실시되고 있으며, 이 양자의 기여정도는 시간과 공간, 그리고 기후 여건에 따라서 큰 차이를 보인다. 특히, 우리 나라와 같이 삼면이 바다로 둘러 싸여 있고, 전 국토의 70% 이상이 산악으로 형성되어 있는 지역은 기상 현상이 다양할 뿐만 아니라 계절에 따른 강우량의 변화가 심한 기상여건을 지니고 있어 대기 침적물 성상을 파악함에 있어서 단순히 건성 또는 습성 침적물 중 어느 하나만으로는 그 특성을 정확하게 파악할 수가 없다(최재천 등, 1997).

강하 먼지는 각종 금속성분이나 유기물 등을 함유하고 있어서 인체 및 생활에 직·간접적으로 영향을 미칠 수가 있다. 강하 먼지를 측정한다는 것은 일반적으로 특정한 오염원을 대상으로 하기보다는 일정한 지역에서 침강하는 대기 침적물질의 평균적인 침적량을 측정하는 것으로서 그 지역의 대기오염도를 파악하는 간접적인 평가인자로서 활용될 수 있는 비교적 간편한 방법이며, 건성 침적물과 습성 침적물을 동시에 포집할 수 있는 장점이 있다(최재천 등, 1995; 王置元則, 1990). 이런 강하 먼지의 침적량은 지형적인 특성과 기상학적인 특성에 따라서 지역별로 큰 차이를 보이게 되며, 오염원의 지리적인 분포에도 영향을 받게 된다(윤훈주와 김동술, 1997).

이러한 강하 먼지에 관한 국내의 연구를 보면, 서울, 광주 대구 지역 등과 같이 주로 대도시 지역을 중심으로 이루어져 왔고, 배출원 인근에서 수용모델을 이용하여 강하 먼지 오염원을 양적으로 추정하고자 하는 시도와 GIS 기법을 이용한 금속원소의 공간적 분포를 해석하려는 시도도 있었다(윤훈주와 김동술, 1997; 이종훈, 1994; 류재부, 1993; 강병욱 등, 1992; 이병호, 1990; 김동술 등, 1990). 이처럼 국내의 연구는 주로 대기오염이 비교적 심한 지역을 대상으로 실시되었으며, 인위적인 배출원이 거의 없는 청정한 지역에서의 연구는 아직도 미흡한 실정이다. 특히 우리 나라의 제주도를 대상으로 실시한 강

하 먼지에 관한 연구는 최재천 등(1995)에 의해 제주도내 단 1개 지점에서 1년간(1993~1994) 관측한 보고 외에는 아직까지 전무한 실정이다.

따라서 본 연구는 제주도 지역을 대상으로 대기 침적물의 특성을 평가함과 동시에 주목할 만한 인위적인 오염원이 거의 없이 청정한 대기질을 나타내는 지역에서의 대기 침적물에 관한 기초적 자료를 제공하는데 그 목적이 있다. 이런 목적을 이루기 위해 여기서는 우선 강하 먼지의 침적량 및 화학적 조성 특성을 평가하고 이를 부유먼지와 강수의 조성과 비교하고자 한다.

2. 실험방법

2.1 측정 지점

제주지역 강하 먼지 중의 수용성 성분을 조사하기 위한 시료채취는 그림 1에서 보는 바와 같이, 제주도의 동, 서, 남, 북 네 방향의 해안에 가까이 위치하고 있는 4곳의 기상 관측소를 설정하였으며, 비교 지점으로서 한라산 북측 사면의 중산간 해발 300m에 위치한 제주대학교에 1개소를 선정하였다.

시료 채취 지점 중 S1 지점과 S2 지점은 비교적 도시화된 지역에 위치하고 있으면서, 해안으로부터 각각 300m, 500m 정도 떨어진 곳이다. S3 지점은 주변이 대부분 녹지 지역으로서 인근에 약간의 농경지가 산재하고 있으며, 해안에서 서쪽으로 400m 정도 이격되어 위치하고 있다. 그리고, S4 지점은 해안가에 위치하고 있고, 주변에 농경지 및 목초지가 넓게 산재하고 있다. 비교지점인 S5 지점은 제주시

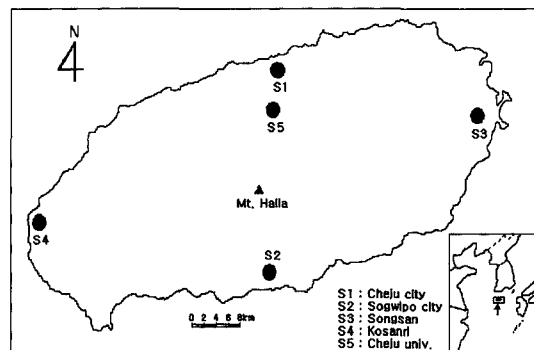


Fig. 1. The location of sampling sites.

지역에 속하며 해발 300m이고 주변이 산림으로 둘러싸여 있으며, 해안으로부터 7km 이상 떨어져 있다.

2.2 시료의 채취

강하 먼지의 채취에는 개구 직경 21.4 cm, 높이 16.0cm인 dust jar를 사용했고, 각 측정지점에 설치된 jar는 바닥 면에서 1.5 m 상부에 고정 설치하였고, 습성 및 건성 침적물이 함께 포집되는 일괄처리 방식으로 채취하였다. 매 지점에서 1회 포집 기간은 30±3일이었고 이를 30일 기준으로 환산한 자료를 이용하였다. 본 연구에서의 강하 먼지 포집 기간은 1995년 8월부터 1996년 7월까지 1년간 실시하였다. 이로써 각 지점별로 12개씩 총 60개의 강하 먼지 시료를 얻을 수 있었다.

대기 중 부유먼지의 채취에는 고용량 먼지 채취기 (high volume air sampler)를 이용하여 1회 포집은 24시간 단위로 먼지를 포집하였다. 먼지의 포집시 흡인유량은 1.2 m³/min으로 등속 흡인하였으며, 유량은 수은 마노미터를 이용하여 교정하였다. 이 때에 여지는 사각 유리섬유를 이용하였다. 먼지시료는 측정지점 S5에서만 채취하였고, 채취기간은 1995년 10월부터 1996년 7월이고, 월별로 2~5회씩 실시하여 총 30개의 부유먼지 시료를 얻었다.

강수의 채취는 강우 발생 시마다 증류수로 세척한 직경 20 cm의 유리 채취구를 사용하여 500 ml 용량의 폴리에틸렌 채수병에 먼저 포집되고 bypass되는 강수는 1l 용량의 폴리에틸렌 채수병으로 전량을 채수하였다. 무강우시에는 에어로졸의 건성 침적을 막기 위해 포집구가 닫혀있으며 강우 시에는 개방되도록 제작하였다. 강수의 채취는 매 강우 시마다 오전 9시에서 다음 날 9시까지를 기준으로 채취하였다. 24시간을 기준으로 채취된 우수의 총량이 30 ml 이상인 경우에만 분석 가능한 시료로서 수거

하였으며, 그렇지 못한 경우에는 다음 24시간 동안 더 많은 우수가 계속적으로 포집되도록 하였다. 강수의 측정지점 및 기간은 부유먼지의 경우와 같으며, 총 시료수는 37개였다.

2.3 시료의 분석

Dust jar를 이용하여 채취한 강하 먼지 시료는 각종 분석에 임하기 전에 우선 큰 헤파물들이 포함된 경우에는 20 mesh의 체로써 여과한 후 총 액량을 측정하였다. 다음으로 시료 전량을 Glass Microfiber Filter (0.45 μm)로 여과한 후 여과액은 수용성 성분의 분석에 이용하고 여지상의 물질은 불용성 성분의 분석에 이용하였다. 여과액중 일부를 취하여 표 1에 나타난 방법으로 수용성 성분의 분석을 행하였다. 그리고 나머지 여과액은 수분을 증발, 건조시켜 방냉한 후 무게를 달고 액량을 보정하여 수용성 성분의 무게로 하였다. 여과지상에 남은 잔류물은 무게를 달아서 불용성 성분의 무게를 파악하고, 표 1의 방법으로서 분석하여 각 원소의 성분을 분석하였다. 불용성 침적물중 금속 성분은 토양기원으로 알려진 원소와 인위 기원으로 알려진 원소를 고려하여 총 10가지 성분을 선정하였다.

부유먼지의 경우 포집이 완료된 여지는 즉시 회수하여 항량하여 무게를 측정하여 부유먼지량을 구하고 흡인 유량을 보정하여 부유먼지 농도를 산출하였다. 부유먼지 중에 함유된 각종 성분의 분석을 위해서 여과지를 중량비로 절반이 되게 절단하여 한 부분은 수용성 성분의 분석에 그리고 나머지 부분은 불용성 성분의 분석에 각각 이용하였다.

강수의 분석과정은 우선 총 채수량을 확인한 다음 일정량을 취하여 폴리에틸렌 병에 넣어서 냉암소에 보관하였으며, 성분의 분석직전에 0.45 μm Green filter를 사용하여 여과하고 이 여과액을 분석용 시료로 사용하였다. 이상의 전처리 과정을 통해

Table 1. Analytical components and methods used in this study.

Species	Analytical Method	Instrument
Soluble Species	NH ₄ ⁺	Indophenol Blue Method
	Na ⁺ , K ⁺ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺	Atomic Absorption Spectrophotometry
	SO ₄ ²⁻ , NO ₃ ⁻ , Cl ⁻ , F ⁻	Ion Chromatography
Insoluble Species	Al, Fe, Mn, Ni, Ca, Zn, Cr, Cu, Pb, Cd	Atomic absorption spectrophotometry

서 얻어진 분석용 시료는 표 1에 나타난 분석방법을 이용하여 양이온 성분과 음이온 성분을 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 강하 먼지의 침적량

제주지역의 강하 먼지량을 파악하기 위해 1995년 8월부터 1996년 7월까지 1년간 1개월 단위로 시료를 포집하여 얻은 결과를 지점별로 구분하여 표 2에 나타냈다. 표 2에서 보면 제주지역의 연평균 강하 먼지량은 4.94 t/km²/month으로 나타났다. 각 지점별 연평균 침적량을 보면 제주의 서부지역인 S4 지점이 10.89 t/km²/month으로 전체 평균치보다 2배 이상 높은 먼지량을 나타냈고 제주의 북부지역인 S1 지점은 5.67 t/km²/month으로서 전체 평균치보다 높은 값을 보였다. 그리고 나머지 지점의 강하 먼지량은 2.49~2.83 t/km²/month의 범위로 서로 비슷한 수준을 보였다. 이런 결과로 볼 때 제주지역에서의 강하 먼지량은 지역에 따라서 많은 차이가 나타남을 알 수 있다. 특히 제주지역에서 가장 도시화되어 있어서 인위적인 오염원의 영향을 많이 받을 것으로 판단되는 S1 지점보다는 주변이 목초지와 경작지로 이루어진 S4 지점에서의 강하 먼지량이 많음을 알 수 있다. 이는 제주지역에서의 강하 먼지량은 인위적인 오염원에 기인해 2차적으로 생성된 입자상물질보다는 토양 입자의 비산 등에 의한 자

연적인 발생원에 지배적인 영향을 받기 때문으로 생각된다.

계절별로 보면 전체 측정지점에서 봄철에는 전반적으로 강하 먼지량이 증가하는 경향을 보였고, 겨울철에는 가장 도시화된 S1 지점보다는 목초지와 경작지로 이루어진 지역에 위치한 S4 지점에서의 강하 먼지량의 증가가 현저함을 알 수 있다. 이런 계절별 강하 먼지량의 변화를 보면 서울지역이 경우 봄, 여름, 겨울, 가을의 순인데 비해 제주지역은 겨울, 봄, 가을, 여름의 순으로 나타났다. 이런 변화 경향의 차이를 보이는 것은 서울의 경우 나대지 상태의 표토가 비교적 적어 토양 입자의 비산에 의한 직접적인 영향보다는 주변의 오염원의 영향과 봄철에 나타나는 황사나 화분 등의 영향이 크게 작용하는 반면에 제주지역의 경우에는 강수가 적고 상대 습도가 낮아 표토가 건조하고 바람이 강한 계절일수록 토양 입자의 비산에 지배적인 영향을 받기 때문에 강하 먼지량이 증가하는 것으로 생각된다.

표 2에서 보는 바와 같이 강하 먼지중 수용성 성분의 연평균 총침적량은 2.05 t/km²/month으로써 총 강하 먼지량의 41.4%를 차지하고 있다. 이는 서울지역의 20.7~25.3%, 광주지역의 38.3%에 비해서 수용성 성분의 침적량의 기여율이 높은 것을 알 수 있다(이중훈, 1994; 강병욱, 1992; 류재부, 1993). 이는 제주지역의 경우 강하 먼지량이 절대적으로 적은 반면에 해안지역에서의 특징인 해염 입자의 영향도 크게 받을 뿐 아니라 강수량이 많아서 강수

Table 2. Deposition amount of dustfall in Cheju area. (unit : t/km²/month)

Season	Item	This Study							Seoul	
		S1	S2	S3	S4	S5	Mean	SC/TD (%)	Mean	SC/TD (%)
Spring	TD	6.45	3.79	3.67	11.12	4.11	5.83	36.0	12.67	16.2
	SC	3.70	1.21	1.96	2.24	1.32	2.10			
Summer	TD	2.48	2.25	2.20	3.60	2.06	2.52	47.1	7.45	15.7
	SC	1.10	1.22	1.24	1.50	0.87	1.19			
Fall	TD	5.45	2.41	2.15	7.70	2.92	4.13	52.4	10.43	21.5
	SC	3.09	1.34	1.75	2.38	2.26	2.16			
Winter	TD	8.42	2.86	1.94	21.14	2.16	7.30	37.5	9.14	47.9
	SC	5.37	1.57	1.32	4.09	1.36	2.74			
Mean	TD	5.70	2.83	2.49	10.89	2.81	4.94	41.4	9.92	25.3
	SC	3.33	1.33	1.57	2.55	1.45	2.05			

TD : Total amount of dustfall
SC : Amount of Soluble compound

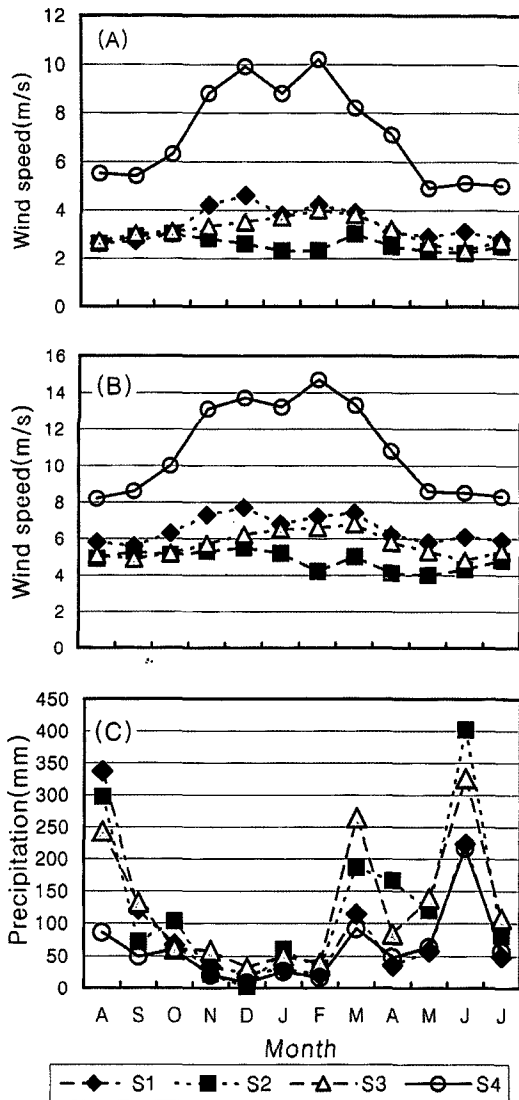


Fig. 2. Meteorological data observed at each sampling site; (a) Monthly mean wind speed, (b) Monthly mean of max. wind speed and (c) precipitation.

중에 함유된 수용성 성분의 영향도 크기 때문으로 생각된다. 측정지점별로 보면, S1 지점의 수용성 성분의 침적량이 3.33 t/km²/month으로써 강하 먼지량이 월등히 많은 S4 지점의 2.55 t/km²/month보다도 오히려 높은 값을 나타냈고, 나머지 지점에서는 1.33~1.57 t/km²/month으로 비교적 낮은 수준을 보

였다. 특히 S4 지점에서의 강하 먼지량에 대한 수용성 성분의 기여율이 23.4%로 다른 측정지점에 비해 훨씬 낮은 특징을 보임을 알 수 있다. 이를 그림 2에 조사기간동안의 각 측정지점의 기상관측 자료와 비교해 보면, S4 지점에서는 조사기간 중 평균풍속이 7.1 m/s로써 다른 지점의 평균풍속 2.6~3.4 m/s보다 훨씬 크면서 강수량은 비교적 적고, 또한 주변지역이 나대지 또는 경작지로 이루어져 있어 토양 입자의 비산으로 인한 영향이 다른 지점에 비해 상대적으로 크기 때문으로 판단된다.

3.2 강하 먼지의 화학적 조성

강하 먼지 중 수용성 이온성분의 조성을 파악하기 위해 주요 수용성 성분의 농도를 측정된 결과를 지점별로 구분하여 표 3에 나타냈다. 표 3에서 보면, 전반적으로 저농도로 존재하는 이온성분의 농도 변화는 표준편차가 평균치보다 클 정도로 농도변동이 심하지만, 고농도로 존재하는 이온성분의 농도변동은 상대적으로 적게 나타남을 볼 수 있다. 총 수용성 성분에 대한 각 이온 성분의 점유율을 보면, SO₄²⁻와 Cl⁻이 전체의 65% 이상을 차지하는 뚜렷한 음이온 과잉 현상을 보였다. 광주지역에서 측정된 결과(류재부, 1993)에서는 Cl⁻의 점유율이 8.3%인데 비해, 본 연구에서는 27.3% 정도로 월등히 높게 나타나고 있다. 이는 제주도가 해양으로 둘러싸인 도서지역이라는 지리적인 특성이 반영된 결과라고 판단된다.

비교적 도시화된 지역에 위치한 지점(S1, S2, S5 지점)의 결과와 교외지역에 해당하는 지점(S3 및 S4)의 결과를 비교해 보면, 비교적 도시화가 이루어진 지점이 그렇지 못한 지역에 비해 SO₄²⁻ 이온의 점유율은 높은 반면에 Cl⁻ 이온의 비율은 상대적으로 낮은 경향을 보임을 알 수 있다. 해염 입자에서 주로 유래되는 대표적인 성분인 Cl⁻ 이온과 Na⁺ 이온의 점유율을 보면, S3 및 S4 지점이 타 측정지점에 비해서 월등히 높게 나타남을 볼 수 있다. 특히 해안 변에 위치한 S4 지점에서는 이들 이온성분의 점유율이 52% 이상을 차지하지만 해안에서 7 km 이상 떨어진 S5 지점에서는 28.8%로 크게 낮음을 볼 수 있다. 이로써 볼 때 인위적인 배출원이 상대적으로 적고 해안에 가까운 지점에서는 해염의 영향이 상대적으로 크게 작용하는 것으로 생각된다.

Table 3. Content of water soluble ions in dustfall sampled in Cheju area. (unit : mg/g)

Site	Item	Water Soluble Anions				Water Soluble Cations				
		F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	K ⁺	Ca ²⁺	Na ⁺	Mg ²⁺	NH ₄ ⁺
Cheju Area	Range	0.00~ 20.23	3.77~ 366.02	0.73~ 116.22	0.00~ 487.53	0.00~ 11.06	0.00~ 129.26	0.08~ 140.22	0.00~ 46.53	0.00~ 71.81
	Mean	0.91	105.17	33.97	149.28	3.69	30.48	40.50	12.28	9.40
	S.D*	2.88	88.67	26.09	101.28	3.166	23.11	30.86	8.19	11.90
	Fraction (wt,%)	0.24	27.27	8.81	38.70	0.96	7.90	10.50	3.18	2.44
S1	Mean	0.65	93.54	29.92	169.59	3.89	34.78	37.69	9.16	8.53
	Fraction (wt,%)	0.17	24.12	7.72	43.74	1.00	8.97	9.72	2.36	2.20
S2	Mean	0.13	93.67	37.65	190.24	3.01	37.92	39.20	14.09	16.10
	Fraction (wt,%)	0.03	21.68	8.72	44.03	0.70	8.78	9.07	3.26	3.73
S3	Mean	2.64	180.71	42.17	172.12	5.11	23.30	55.74	17.69	9.31
	Fraction (wt,%)	0.52	35.52	8.29	33.83	1.00	4.58	10.95	3.48	1.83
S4	Mean	0.59	85.99	19.34	59.58	3.44	13.65	36.85	9.75	5.74
	Fraction (wt,%)	0.25	36.60	8.23	25.36	1.47	5.81	15.69	4.15	2.44
S5	Mean	0.54	72.07	40.82	155.26	3.01	42.77	33.13	10.71	7.35
	Fraction (wt,%)	0.15	19.71	11.16	42.46	0.82	11.70	9.06	2.93	2.01

* S.D : Standard deviation

Table 4. Equivalent ratio of SO₄²⁻ and NO₃⁻ ([SO₄²⁻]/[NO₃⁻]) over Cheju area.

Season	This Study						Seoul*
	S1	S2	S3	S4	S5	Mean	Mean
Spring	6.95	6.25	4.12	3.32	4.44	5.09	14.78
Summer	7.45	6.39	5.61	4.20	6.13	5.89	4.48
Fall	5.61	7.07	6.48	4.02	5.18	5.67	21.15
Winter	13.46	6.34	5.09	4.43	3.98	5.84	13.05
Mean	4.91	6.52	5.27	3.98	4.91	5.68	12.97

*: 강병욱 등, 1992

수용성 이온성분중 SO₄²⁻ 이온과 NO₃⁻ 이온의 당량비를 서울지역(강병욱 등, 1992)의 자료와 비교하여 표 4에 나타냈다. 제주지역에서의 평균 [SO₄²⁻]/[NO₃⁻] 비는 5.68로서 서울지역의 12.97에 비해서 월등히 낮은 값을 보였으며, 계절별 변화도 거의 보이지 않았다. 그렇지만 제주 지역내에서 도시화가 진행된 지역이 그렇지 못한 지역보다 [SO₄²⁻]/[NO₃⁻] 비가 증가하는 경향임을 알 수 있다. 이는 제주지역이 서울지역에 비해 인위적인 오염원이 대단히 적을 뿐 아니라 일정 지역내 오염원에서의 배출강도

가 낮고 오염원들의 집중화도 심하지 않기 때문인 것으로 생각된다.

강하 먼지 중 수용성 성분의 월별 변동특성을 파악하기 위해 각 측정지점에서 수용성 성분 중 음이온과 양이온의 월별 측정결과를 그림 3에 나타냈다.

그림 3(a)에서 보는 바와 같이 음이온인 경우 F⁻는 전체적으로 월별 극미량 농도를 보이고 있으며 황산이온과 염소이온은 농도가 높을 뿐 아니라 월별 변동폭 또한 크게 나타나고 있음을 볼 수 있다.

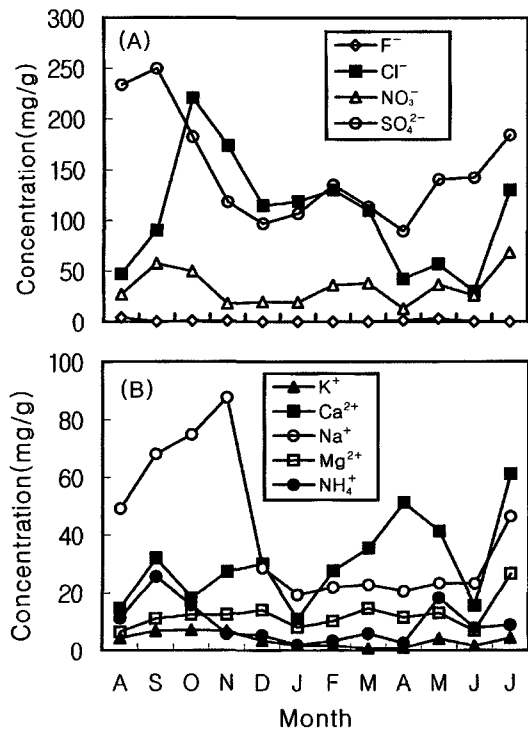


Fig. 3. Monthly variation of the concentration of ion in dustfall sampled in Cheju area; (a) Anions, (b) Cations.

그리고 각 음이온 성분의 월별 변화 경향을 비교해 보면 SO₄²⁻와 NO₃⁻성분은 서로 비슷한 변화경향을 나타내는 반면에 Cl⁻성분은 이들 성분과는 다른 변화 경향을 보이고 있다. 이는 SO₄²⁻와 NO₃⁻성분은 같은 범주의 기원에서 유래하지만 Cl⁻성분과는 다른 기원으로부터 유래하기 때문으로 생각된다.

그림 3(b)에서 보면, 수용성 양이온 중 Na⁺과 Ca²⁺성분은 다른 성분에 비해 농도가 높고 변화폭도 아주 크게 나타났으나 나머지 양이온 성분들은 농도도 낮고 변화폭도 크지 않은 월별 변동 특성을 보였다. NH₄⁺성분은 기온이 낮은 늦가을부터 초봄까지 지속적으로 낮은 농도를 보이는데 이 결과를 볼 때 NH₄⁺의 주발생원이 토양으로 따뜻한 계절에는 토양 중의 NH₃ 생성 박테리아의 활동이 왕성하여 대기 중에는 NH₃ 농도가 높고 동계에는 기온이 낮아 NH₃ 생성 박테리아의 활동이 저하되어 대기 중의 NH₃ 농도가 낮기 때문인 것으로 판단된다(천

만영 등, 1993a, b).

일반적으로 Ca²⁺은 토양에 많이 존재하는 알칼리 금속성분으로서 기후가 건조한 농사철에 지면으로부터 비산되어 대기 중에 존재하다가 다시 지표로 강하하거나 강수에 섞여 강하하여 이 기간중의 강하 먼지에 다량 포함되며 이와는 반대로 동계에는 토양의 동결로 인해 Ca²⁺비산이 억제되어 강하 먼지중의 Ca²⁺ 농도가 낮아진다고 보고되고 있으나(이중훈, 1994), 제주 지역은 동절기에도 표토가 동결되는 경우가 거의 없기 때문에 그러한 월별 변화 경향은 보이지 않은 것으로 생각된다. 한편 각 수용성 양이온의 성분별 변화 경향을 보면 Na⁺의 월별 변화경향은 Cl⁻, Mg²⁺ 등과 유사한 변화경향을 나타내며 NH₄⁺성분은 NO₃⁻, SO₄²⁻ 등과 유사한 변화 경향을 나타낸 반면 Ca²⁺성분은 다른 이온 성분과는 유사성이 거의 없는 변화 특성을 보였다.

표 5는 본 측정기간 중 제주지역 강하 먼지중 금속 성분의 함량을 분석한 결과를 나타낸 것이다. 표 5에서 알 수 있듯이 제주지역 강하 먼지 중의 금속 성분의 농도범위는 대부분이 매우 크게 나타났으며 토양기원의 지표 성분으로 알려진 Al과 Fe성분은 다른 성분에 비해 월등히 높은 농도를 보이는 반면에 인위기원으로 알려진 Cd은 극 미량의 농도를 나타냈다.

그리고 강하 먼지량이 많을수록 금속성분의 농도가 다소 높은 경향인 듯하지만 측정지점간에는 매우 큰 변동폭을 나타내며 뚜렷한 경향성을 찾을 수 없었다.

3.3 대기 침적물간의 조성비교

강하 먼지, 부유먼지 및 강수 등과 같이 대기로부터 침적될 수 있는 침적 형태에 따른 화학적 조성 특성을 비교, 평가하기 위해 S5 지점에서 동일한 기간동안(1995년 10월~1996년 7월)내에 채취된 강하 먼지, 부유먼지 및 강수 시료를 분석한 총 9개의 이온 성분만을 대상으로 수용성 성분의 이온 조성비를 구하여 그림 4에 나타냈다. 그리고 이들 9개의 이온 성분을 대상으로 해염 기원의 평가에 이용되는 지표성분인 Na⁺ 이온에 대한 각 이온 성분의 질량 농도비를 계산하여 표 6에 나타냈다. 여기서 전체적인 이온 성분의 조성비를 비교해 보면, 강하 먼지는 부유먼지와 강수의 중간 정도되는 조성 특성

Table 5. Content of heavy metals in dustfall sampled in Cheju area. (unit : mg/g)

Item	Heavy Metals										
	Al	Fe	Mn	Cu	Zn	Cd	Pb	Cr	Ca	Ni	
Cheju Area	Range	0.000 ~ 158.905	1.999 ~ 53.481	0.000 ~ 0.976	0.000 ~ 12.789	0.000 ~ 8.536	0.000 ~ 0.022	0.000 ~ 0.243	0.000 ~ 0.136	0.000 ~ 43.775	0.000 ~ 0.101
	Mean	8.294	13.194	0.253	0.625	0.697	0.001	0.051	0.029	1.299	0.024
	S.D.*	21.032	8.586	0.231	1.954	1.454	0.004	0.072	0.038	5.845	0.027
S1	Range	0.039 ~ 15.848	2.310 ~ 20.870	0.013 ~ 0.788	0.002 ~ 3.448	0.000 ~ 1.785	0.000 ~ 0.022	0.000 ~ 0.203	0.000 ~ 0.129	0.000 ~ 9.790	0.000 ~ 0.044
	Mean	3.847	10.481	0.200	0.511	0.438	0.003	0.066	0.024	0.900	0.021
S2	Range	0.046 ~ 158.905	7.673 ~ 25.115	0.057 ~ 0.624	0.004 ~ 4.451	0.000 ~ 5.881	0.000 ~ 0.008	0.000 ~ 0.220	0.000 ~ 0.134	0.000 ~ 0.331	0.000 ~ 0.053
	Mean	19.724	14.208	0.255	0.416	0.814	0.001	0.065	0.026	0.039	0.022
S3	Range	0.000 ~ 15.294	2.442 ~ 18.265	0.000 ~ 0.660	0.001 ~ 1.672	0.000 ~ 2.206	0.000 ~ 0.004	0.000 ~ 0.243	0.000 ~ 0.077	0.000 ~ 1.180	0.000 ~ 0.036
	Mean	2.558	9.985	0.141	0.287	0.500	0.000	0.037	0.019	0.098	0.008
S4	Range	2.934 ~ 25.923	1.999 ~ 53.481	0.185 ~ 0.976	0.004 ~ 5.721	0.000 ~ 3.824	0.000 ~ 0.015	0.000 ~ 0.122	0.004 ~ 0.107	0.000 ~ 43.775	0.005 ~ 0.096
	Mean	12.392	20.841	0.427	0.742	0.475	0.002	0.045	0.046	5.073	0.049
S5	Range	0.108 ~ 17.262	2.672 ~ 17.815	0.002 ~ 0.603	0.000 ~ 12.789	0.000 ~ 8.536	0.000 ~ 0.001	0.000 ~ 0.228	0.000 ~ 0.130	0.000 ~ 2.107	0.000 ~ 0.101
	Mean	2.928	10.429	0.240	1.170	1.257	0.000	0.040	0.029	0.386	0.019

* S.D : Standard deviation

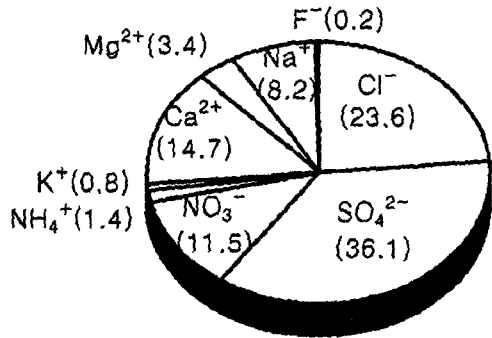
을 보이는데 이는 본 연구에서 강하 먼지를 습성 침적물과 건성 침적물을 동시에 채취하는 일괄 채취방식으로 채취하였으므로 대기 중의 입자상 물질의 조성과 강수의 조성에 대한 영향을 동시에 받고 있기 때문에 판단된다.

그림 4에서 부유 먼지 중 Na⁺ 이온의 조성비가 강하 먼지보다 더 높은 것으로 보아 해염 입자의 영향을 크게 받는 것으로 생각됨에도 불구하고 표 6에서 보듯이 부유먼지 중의 Na⁺에 대한 Cl⁻의 질량 농도비는 강하 먼지 중의 질량 농도비보다도 훨씬 낮게 나타남을 알 수 있다. 이런 현상은 부유먼지는 강하 먼지보다도 대기 중에서의 체류시간이 길어 chlorine loss 현상이 나타났기 때문으로 생각할 수 있다(Ottley와 Harrison, 1992; Ohta와 Okita, 1990; Willison, 1989). 그림 4에서 보듯이 인위기원 성분으로 알려진 NO₃⁻는 부유먼지 중에 다소 많이 함유되어 있고 SO₄²⁻ 성분은 강수에 비해 부유먼지 중의 농도비가 월등히 높은 특징을 보이는데, 이는

Table 6. Mass concentration ratio of each ion to Na⁺ in dustfall, TSP and rain at site S5.

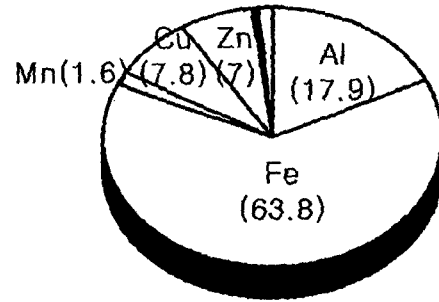
Ion Species	Seawater	Dustfall	TSP	Rain
F ⁻	-	0.025	0.010	-
Cl ⁻	1.797	2.865	0.991	2.074
NO ₃ ⁻	-	1.404	2.529	1.277
SO ₄ ²⁻	0.252	4.487	5.755	2.192
K ⁺	0.037	0.095	0.139	0.151
Ca ²⁺	0.038	1.787	0.445	0.446
Na ⁺	1	1	1	1
Mg ²⁺	0.120	0.416	0.169	0.181
NH ₄ ⁺	-	0.173	0.092	0.355

대기 중의 부유먼지는 해염 이외에 인위기원이나 토양 입자로부터 유래된 부분도 상당히 영향을 받기 때문으로 생각된다. 그리고 Ca²⁺ 성분은 부유먼지와 강수에 비해 강하 먼지 중에 다량 함유되어 있는데 이 결과는 강하 먼지는 토양 입자의 직접적인 영향을 상대적으로 많이 받아 토양중에 함유된

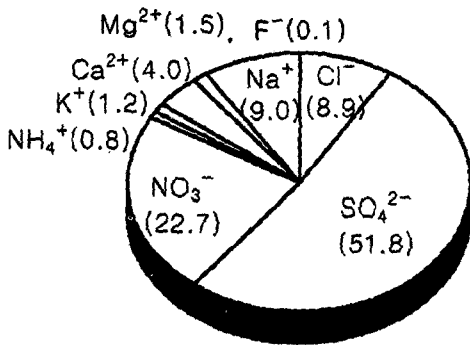


Dustfall

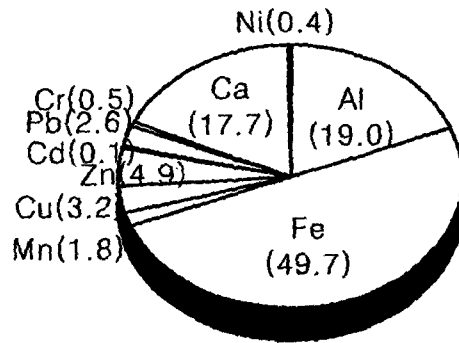
Cd Pb Cr Ca Ni
(0) (0.3)(0.2)(1.4)(0.1)



Dustfall

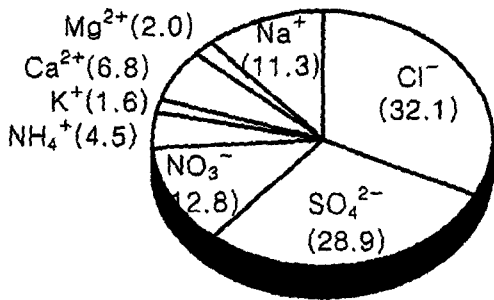


TSP



TSP

Fig. 5. Composition ratio of each metal element to total metal content measured in dustfall and TSP at site S5. (unit : %)



Rain

Fig. 4. Composition ratio of each ion to total soluble content measured in dustfall, TSP and rain at site S5. (unit : %)

Ca 성분이 용해되었기 때문으로 생각된다.

본 연구에서 분석한 금속 성분을 대상으로 강하 먼지와 부유먼지 중 금속성분의 조성비를 그림 5에 나타냈는데, 이를 보면 강하 먼지 중에는 토양기원으로 알려진 금속 성분들의 조성비가 높고 부유먼

지 중에는 인위기원으로 알려진 금속 성분들의 조성비가 상대적으로 높게 나타남을 알 수 있다.

4. 결 론

청정한 대기질을 보이는 제주지역에서 강하 먼지의 화학적 조성을 파악하기 위하여 5개 지점에서 1995년 8월부터 1996년 7월까지 강하 먼지를 채취하여 주요 성분을 분석하여 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 제주지역에서 연평균 강하 먼지량은 4.94 t/km²/month로 추산되었으며, 이 중 수용성 성분이 총 강하 먼지량의 41.4% 정도으로써 타 도시지역보다 높음

을 알 수 있었다.

2. 강하 먼지중의 총 수용성 성분에 대한 각 이온 성분의 비율은 SO_4^{2-} 이 38.7%, Cl^- 가 27.27%로 전체 이온성분의 약 65% 이상을 차지해 뚜렷한 음이온 과잉현상을 보였다. 그리고 제주 지역에서 도시화가 비교적 이루어진 지역은 그렇지 못한 지역에 비해 SO_4^{2-} 이온의 점유율이 높은 반면 Cl^- 이온의 비율은 상대적으로 낮은 경향을 보였다.

3. $[\text{SO}_4^{2-}]/[\text{NO}_3^-]$ 당량비는 5.68 정도로 서울지역에 비해 아주 낮은 값을 보였고 계절적 변동도 거의 보이지 않았으나 도시화된 지역에서는 증가하는 경향을 보였다.

4. 강하 먼지 중 수용성 이온성분의 월별 변동 특성은 음이온인 경우 SO_4^{2-} , Cl^- , 양이온인 경우 Na^+ , Ca^{2+} 성분이 다른 성분에 비해 농도가 높고 변화폭도 아주 크게 나타남을 알 수 있었다. 금속성분은 대체로 그 농도의 변동폭이 매우 커서 뚜렷한 경향을 볼 수 없었다.

5. 본 연구에서 측정된 성분만을 기준으로 조성비를 비교할 때, 수용성 성분의 경우에는 강하 먼지는 부유먼지와 강수의 중간 정도 되는 조성특성을 지님을 알 수 있었다. 그리고 금속 성분의 조성을 보면 강하 먼지 중에는 토양기원으로 알려진 성분이 그리고 부유먼지 중에는 인위기원으로 알려진 성분들의 조성비가 높게 나타남을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- 강병욱, 강공언, 김민영 (1992) 서울시 강하분진 중 수용성 성분의 강하량, 한국대기보전학회지, 8(4), 240-246.
- 김동술, 김희강, 김신도, 김태오 (1990) 수용모델을 이용한 강하분진의 농도분포에 관한 연구, 대한환경공학회지, 12(1), 1-9.
- 류재부 (1993) 광주시 강하분진에 관한 연구, 조선대학교 산업대학원 석사학위논문.
- 윤훈주, 김동술 (1997) GIS를 이용한 강하분진 중 금속원소의 공간분포 분석, 한국대기보전학회지, 13(6), 463-474.
- 이병호 (1990) 대구시 중심업무지역의 강하분진량 측정, 영남대학교 환경대학원 석사학위논문.
- 이종훈 (1994) 서울지역에서의 강하분진의 거동 및 특성에 관한 연구, 건국대학교 일반대학원 석사학위논문.
- 천만영, 이영재, 김희강 (1993a) 도시 대기 중에서 $\text{NH}_4\text{NO}_3(\text{s}, \text{aq}) - \text{HNO}_3(\text{g}) - \text{NH}_3(\text{g})$ 의 평형에 관한 연구 (II), 한국대기보전학회지, 9(2), 154-159.
- 천만영, 이영재, 김희강 (1993b) 환경대기 중에서 Nitrate의 생성에 관한 연구 (II), 한국대기보전학회지, 9(3), 216-221.
- 최재천, 김 산, 이민영, 이선기 (1995) 제주도과 울릉도의 강하분진 중 수용성 성분에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 11(4), 331-337.
- 玉置元則 (1990) 地球規模大氣汚染に關連する簡易測定法, 環境技術, 19(4), 218-231.
- Al-Momani, I.F., O.Y. Ataman, M.A. Anwari, S. Tuncel, C. Kose and G. Tuncel (1995) Chemical Composition of precipitation near an industrial area at Izmir, Turkey, Atmos. Environ., 29(10), 1131-1143.
- Ohta, S., T. Okita (1990) A chemical characterization of atmospheric aerosol in Sapporo, Atmos. Environ., 24A(4), 815-822.
- Poissant, L. and P. Beron (1994) Parameterized rainwater quality model in urban environment, Atmos. Environ., 28(2), 305-310.
- Scudlark, J.R., K.M. Conko and T.M. Church (1994) Atmospheric wet deposition of trace elements to Chesapeake Bay: CBAD Study year 1 Results, Atmos. Environ., 28(8), 1487-1498.
- West, L.M. and Feagley, S.E. (1995) The Chemical Composition of Atmospheric Deposition Collected From six Loulslana sites From 1983 to 1992, Atmos. Environ., 29(11), 1211-1217.
- Willison, M.J. (1989) Chloride aerosol in central Northern England, Atmos. Environ., 21(12), 2231-2239.
- Wu, Z.Y., M. Han, Z.C. Lin, and J.M. Ondov (1994) CBAD Study, Year 1: Sources and Dry deposition of selected elements in Aerosol particles, Atmos. Environ., 28(8), 1471-1486.
- Zhang, X., R. Arimoto, Z. An, T. Chen, G. Zhang, G. Zhu, and X. Wang (1993) Atmospheric trace elements over source regions for Chinese dust: Concentrations, sources and atmospheric deposition on the loess plateau, Atmos. Environ., 27A(13), 2051-2067.