

제주지역 강하먼지의 조성에 관하여 : 2. 오염원 추정

A Study on Chemical Composition of Dustfall Sampled in Cheju Area : 2. Identification of Source

이 기 호 · 허 철 구

제주대학교 환경공학과

(1998년 7월 23일 접수, 1999년 1월 9일 채택)

Ki-Ho Lee and Chul-Goo Hu

Dept. of Environmental Engineering, Cheju National University

(Received 23 July 1998; accepted 9 January 1999)

Abstract

In previous study, the local trends in dustfall chemistry and deposition were determined and the characteristics of chemical compositions among dustfall, TSP and rainwater were also compared. Based on the previous results, in this study, the effects of sea salts and soil on the chemical composition of dustfall were studied and then the sources of dustfall in Cheju area were tentatively identified by principal component analysis (PCA).

Key words : dustfall, TSP, rain, Cheju area, soil, sea salt, Sources of dustfall

1. 서 론

강하먼지는 각종 금속성분이나 유기물 등을 함유하고 있어서 인체 및 생활에 직·간접적으로 영향을 미칠 수가 있다. 강하먼지의 측정은 통상 특정한 오염원을 대상으로 하기보다는 일정한 지역에 침강하는 대기 침적물질의 평균적인 침적량을 측정하는 것으로서 그 지역의 대기오염 정도를 파악하기 위한 간접적인 평가인자로서 활용되는 비교적 간단한 방법이며, 전성 침적물과 습성 침적물을 동시에 포집할 수 있는 장점이 있다(최제천 등, 1995; 玉置元則, 1990). 이런 강하 먼지의 침적량은 지형적인 특성과 기상학적인 특성에 따라서 지역별로 큰 차이

를 나타내며, 오염원의 분포 형태에도 영향을 받게 된다(윤훈주와 김동술, 1997).

이러한 강하먼지에 관한 국내의 연구는 주로 대기오염이 비교적 심한 지역을 대상으로 실시되었으나(윤훈주와 김동술, 1997; 이종훈, 1994; 류재부, 1993; 강병욱 등, 1992; 김동술 등, 1990; 이병호, 1990), 인위적인 배출원들이 거의 존재하지 않거나 그 영향을 무시할 수 있는 청정한 지역에서의 연구는 거의 없는 실정이다. 특히 우리 나라에서 청정한 대기를 지닌 것으로 알려지고 있는 제주도를 대상으로 실시한 강하 먼지에 관한 연구는 최제천 등(1995)에 의해 제주도내 단 1개 지점에서 1993년 중반부터 1년간 관측한 보고 외에는 여태까지 전무한 실정이다.

따라서 본 연구자들은 제주도 지역을 대상으로 대기 침적물의 특성을 평가함과 동시에 주목할 만한 인위적인 오염원이 거의 없이 청정한 대기질을 나타내는 지역에서의 대기 침적물에 관한 기초적 자료를 제공하기 위해 1995년 8월부터 1996년 7월 까지 1년간 제주도내 5개 지점에서 강하먼지를 포함하여 강하먼지량, 수용성 및 불용성 성분을 포함하여 모두 19개 성분을 측정, 분석하여 전보에서 이미 보고한 바 있다. 그 결과에서 보면, 제주 지역 내에서도 측정지점간에 강하먼지량의 차이는 있으나 서울이나 광주 등 타 지역에 비해 월등히 낮은 수준이었다. 그리고 수용성 성분의 비율이 타 도시 지역에 비해 높게 나타났으며, 제주도가 도시지역인 관계로 해염의 영향이 전반적으로 나타남을 알 수 있었다. 강하먼지중 금속 성분의 조성을 보면 부유먼지와는 달리 일반적으로 토양기원으로 알려진 성분들의 조성비율이 높은 것으로 파악되었다. 따라서 제주 지역에서 강하먼지의 조성특성을 보다 명확하게 파악하기 위해서는 해염입자 및 토양입자의 기여 및 각 성분의 기원을 밝힐 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 앞서 보고된 분석 자료를 토대로 해염입자와 토양입자의 기여율을 정량적으로 추정함과 아울러 주성분 분석을 통한 각 성분들의 기원을 평가하고자 한다.

2. 실험 및 연구 방법

2.1 측정 및 분석

시료 채취 지점에 관해서는 전보에 이미 구체적으로 설명하였다(이기호 등, 1999). 즉 시료 채취는 제주도내 5개 지점에서 실시하였으며, 그 중 S1 지점과 S2 지점은 비교적 도시화된 지역에 위치하며 해안으로부터 각각 300m, 500m 정도 떨어진 곳이다. S3 지점은 주변이 대부분 녹지 지역으로서 인근에 약간의 농경지가 산재하고 있으며, 해안에서 400m 정도 떨어져 위치하고 있다. 그리고, S4 지점은 해안가에 위치하고 있고, 주변에 농경지 및 목초지가 넓게 산재하고 있다. 비교지점인 S5 지점은 제주 시 지역에 속하며 해발 약 300m 정도이고 주변은 산림으로 둘러싸여 있으며, 해안으로부터 7km 이상 떨어져 있다.

그외 시료의 채취방법 및 시료의 분석 방법 등에

관해서는 전보에서 밝힌 바와 동일하다.

2.2 연구 방법

이미 보고된 측정자료를 근거로 토양입자가 대기 중의 에어로졸 성분에 미치는 영향을 평가하기 위해서 널리 적용되고 있는 지각 농축계수(enrichment factor: E.F.)를 산출하였다. 이는 지각에 많이 함유되어 있는 Al이나 Fe 등을 기준물질로 이용하여 지각에서의 이들 기준물질에 대한 각 성분들의 농도비와 입자중의 농도비를 비교한 값이다. 이 농축계수법은 화학 구성중의 구성비 변화에 의해서 기준 오염원의 영향 정도를 파악할 수 있는 오염원 할당법으로서 여러 가지 복합적인 오염원의 영향을 받는 지역에서는 그 평가 결과의 신뢰성이 낮아질 우려가 있다. 그러나 본 연구 대상지역인 제주도는 존재하는 인위적 오염원의 형태가 비교적 단순할 뿐 아니라 배출량 또한 무시할 수 있을 정도로 비교적 청정한 해안 지역이므로 이 농축계수법을 적용하는데 큰 무리가 없다고 판단된다. 농축계수법의 적용 시 일반적으로 기준물질로서 Al이 널리 적용되고 있으나 본 연구에서는 강하 먼지 중 Al 농도의 변동폭이 대단히 크고 때로는 검출한계 이하로 나타나는 경우도 있어 보다 일관되고 신뢰성 있는 결과를 도출하기 위해서 본 연구에서는 토양기원을 파악하는 기준물질로는 Fe를 채택하였다. 지각농축계수는 다음 식(1)과 같이 산출하였다.

$$E.F. = \frac{(X_i/Fe)_{sample}}{(X_i/Fe)_{crust}} \quad (1)$$

여기서 (X_i/Fe) 는 시료(강하먼지 또는 부유먼지) 또는 지각 중의 Fe 농도에 대한 각 성분의 농도비를 의미한다.

그리고 지각농축계수로서는 토양 또는 토양 외의 기원에서 기인하여 시료 중에 잔류하고 있는 정도를 정량적으로 평가할 수가 없으므로 식(2)에 의해 토양 이외의 기원에 기인하는 성분(i)의 질량분율을 다음과 같은 식(2)로서 산출했다(Wu, 1994).

$$f_{i,noncrustal} = 1 - (C_{Fe}/C_i)_{sample} \cdot (C_i/C_{Fe})_{crust} \quad (2)$$

또한 대기 중의 입자상 물질에 대한 토양입자의 영향을 파악하기 위해 토양입자의 기여율을 이용하기도 하는데, 이때 토양입자의 기여율은 다음 식

(3)과 같이 산출하였다.

$$CR_{soil}(\%) = \frac{C_{soil}}{C_{sample}} \times 100 = \frac{C_{Fe}/0.05}{C_{sample}} \times 100 \quad (3)$$

여기서, C_{soil} 은 시료 중 토양입자의 함유량, C_{sample} 은 시료의 총량(또는 침적량)이며, C_{Fe} 는 시료 중의 Fe 함유량이고 0.05는 지각 중의 Fe의 질량 농도비를 의미한다(Mason과 Moore, 1982).

대기 중의 에어로졸 성분에 대한 해염입자의 영향을 평가하기 위해서 일반적으로 해염입자의 기여율을 널리 이용하는데 해염 입자의 기여율을 평가하는 방법으로는 여러 접근법이 제시되고 있으나 일반적으로는 해염이외의 인위적 오염원은 없다고 가정된 Na 성분을 기준물질로 널리 이용하고 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 해염입자의 기여율을 다음과 같이 구하여 적용하였다(문승택, 1992).

$$CR_{SS}(\%) = \left(\frac{\sum C_{i,SS}}{\sum C_{i,t}} \right) \times 100 \quad (4)$$

여기서 $C_{i,SS}$ 는 해염입자로부터 기인한 각 이온 성분들의 농도를 의미하고, $C_{i,t}$ 는 시료 중 각 수용성 성분들의 농도를 의미한다. 따라서

$$\begin{aligned} \sum C_{i,SS} &= [Na^+] + [SS-SO_4^{2-}] + [SS-Cl^-] + \\ & \quad [SS-K^+] + [SS-Ca^{2+}] + [SS-Mg^{2+}] \\ \sum C_{i,t} &= [F^-] + [Cl^-] + [NO_3^-] + [SO_4^{2-}] + [K^+] + \\ & \quad [Ca^{2+}] + [Na^+] + [Mg^{2+}] + [NH_4^+] \end{aligned}$$

그리고 해염입자로부터 기인한 각 이온성분의 농도 $C_{i,SS}$ 는 Na 성분을 기준물질로 이용하여 다음과 같이 구한다.

$$C_{i,SS} = (\text{해수 중의 } i\text{성분의 질량농도} / \text{해수 중 } Na^+ \text{의 질량농도}) (\text{시료 중 } Na^+ \text{의 질량농도})$$

주성분 분석의 주 목적은 원래 자료의 통계적 속성을 최대한 유지한 소수의 독립적인 변수들을 도출하는 것인데, 이 과정에서 도출된 새로운 변수들(주성분)의 해석이 쉽지 않은 경우가 실제로는 많이 나타난다. 따라서 도출된 주성분의 해석을 용이하게 하기 위해서 좌표축 회전기법이 흔히 적용되고 있는데, 본 연구에서는 varimax 기법을 채택하였다. 이 방법은 주성분 부하량이 양극화(1과 -1에

접근)되도록 좌표축을 직교 변환해 나가는 방법으로서 가장 널리 이용되고 있는 방법이다(백승욱과 황승민, 1992; 정대연, 1992; 奥野忠一 등, 1981).

그리고 이 분석에서는 결국 주성분의 수를 결정하는 것이 중요한데, 이를 결정하는 방법에는 여러 방법들이 있으나 어느 것이 절대적으로 우위를 차지한다고 단정할 수는 없다. 따라서 본 연구에서는 고유치에 근거를 하여 varimax 회전 후 그 값이 1 이상으로 유지되는 주성분을 선정하였다. 본 연구에서는 자료의 처리와 주성분 분석에는 SPSS (release 6.1)을 이용하였다(SPSS, 1994).

3. 결과 및 고찰

3.1 강하먼지의 조성 특성

제주지역의 강하먼지량을 파악하기 위해 1995년 8월부터 1996년 7월까지 1년간 1개월 간격으로 시료를 채취하여 분석한 결과를 타 지역의 자료와 비교하여 표 1에 나타내었다. 표 1에서 보면 각 지점 별로 큰 차이는 있으나, 제주지역의 연평균 강하먼지량은 4.944 ton/km²/month으로 나타나 WHO의 기준이나 타 지역에 비해 아주 낮은 수준을 보였다. 또한 연평균 수용성 강하먼지량은 2.046 ton/km²/month로써 총 강하먼지량의 41.4%를 차지하고 있

Table 1. Deposition amount of dustfall sampled in Cheju area.

Component Site	deposits (ton/km ² /month)		ID/TD ⁴⁾ (%)	SD/TD [*] (%)
	Total	Soluble		
S1	5.699	3.326	41.6	58.4
S2	2.827	1.334	52.8	47.2
S3	2.493	1.567	37.1	62.9
S4	10.889	2.553	76.6	23.4
S5	2.811	1.453	48.3	51.7
Mean	4.944	2.046	58.6	41.4
Seoul ¹⁾	10.335	2.142	79.3	20.7
Kwangju ²⁾	7.671	2.940	61.7	38.3
Pohang city ³⁾	23.6	-	-	-
Youngilgun ⁴⁾	14.5	-	-	-
WHO	15.0	-	-	-

Sampling period

1) Mar., 1992~Feb., 1993 (이종훈, 1994)

2) Jul., 1992~Dec., 1992 (류재부, 1993)

3) May, 1987~Oct., 1987 (최재영, 1987)

4) May, 1987~Oct., 1987 (최재영, 1987)

* SD/TD : Soluble component/Total deposition of dustfall

** ID/TD : Insoluble component/Total deposition of dustfall

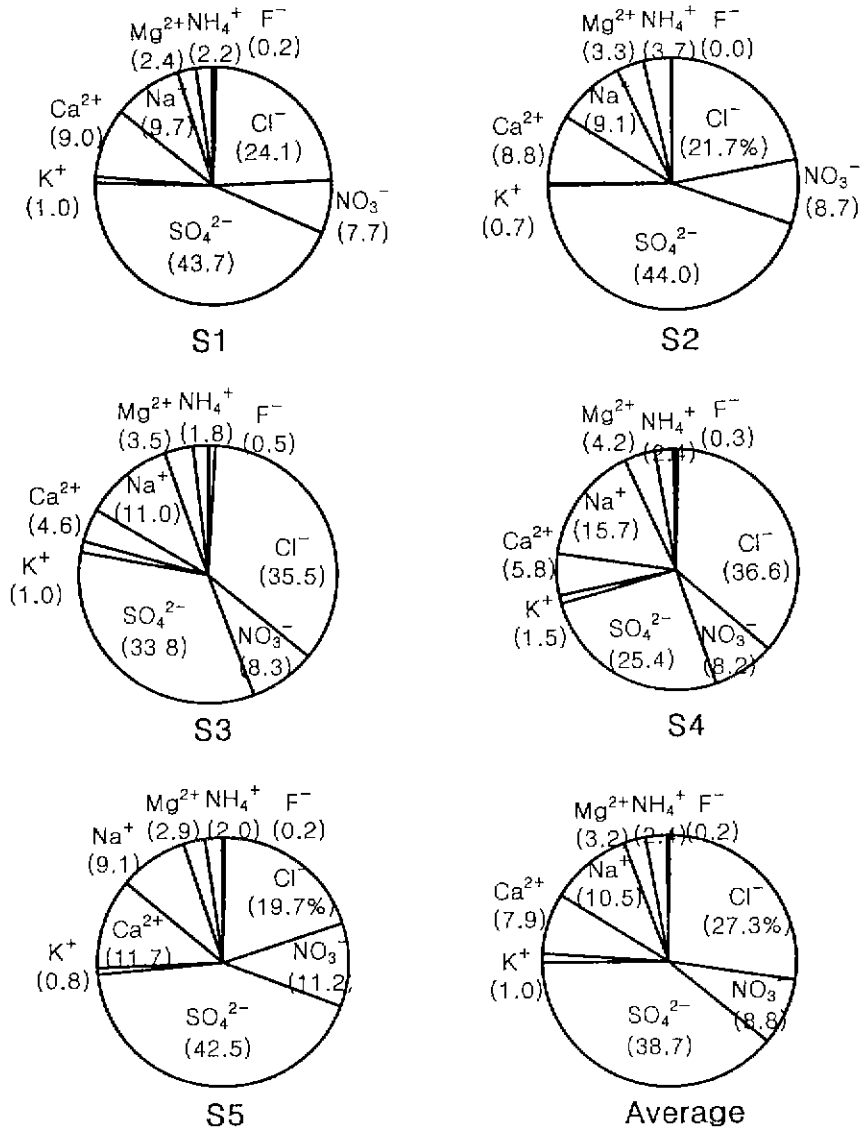


Fig. 1. Mass fraction of water-soluble species in dustfall sampled in Cheju area (unit : %).

어 서울이나 광주 등 타 지역에 비해 수용성 강하 먼지량의 기여율이 다소 높음을 알 수 있다.

강하먼지 중 수용성 이온성분의 조성특성을 지점 별로 비교해 보기 위해서 분석 대상이 된 총 9개의 수용성 성분만을 대상으로 질량 농도비를 계산하여 지점별로 구분하여 그림 1에 나타냈다. 그림에서 보면, 전체 측정지점에서 Cl⁻의 질량 농도비가 광주지

역(류재부, 1993)의 8.3%에 비해 월등히 높게 나타남을 알 수 있다. 이와 같이 제주지역은 해양으로 둘러싸인 섬이라는 지리적인 특성과 측정지점이 해안에 가까이 위치하고 있다. 여기서 채취된 강하먼지 중의 수용성 성분에 대한 해염 입자의 영향이 전반적으로 미치고 있는 것으로 예상되므로 강하먼지의 화학적 조성을 설명하기 위해서는 해염 입자

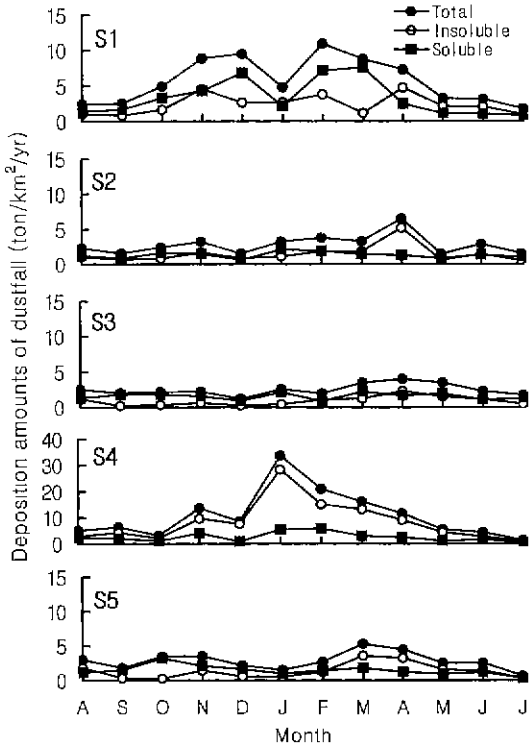


Fig. 2. Monthly variation of the deposition amount of dustfall, soluble and insoluble components in dustfall in Cheju area.

의 영향을 정량적으로 고려할 필요가 있다고 판단된다.

제주지역의 강하먼지 중의 수용성, 불용성, 총 강하먼지량의 월별 변동 특성을 각 측정지점별로 그림 2에 나타냈다. 그림 2에서 볼 수 있듯이 각 측정지점의 총 강하먼지량, 불용성 및 수용성 강하먼지량의 월별 변동특성은 각 지점간에 특징적인 경향은 보이지 않으나, 강하먼지량이 비교적 많은 S1 지점과 S4 지점을 비교해 보면, S1 지점은 총 강하먼지량과 수용성 강하먼지량의 월별 변화경향이 비교적 잘 일치하는 반면에 S4 지점에서는 총 강하먼지량과 불용성 강하먼지량의 월별 변화경향이 유사한 특징을 보이고 있다. 이 결과로 볼 때 비교적 도시화가 이루어진 곳에 위치한 S1 지점은 수용성 성분이 그리고 주변이 목초지와 경작지로 이루어진 곳에 위치하고 있는 S4 지점은 불용성 성분이 강하먼지량에 크게 기여를 하고 있음을 알 수 있다. 나머

지 지점에서도 전반적으로는 강하먼지량에 대한 불용성 성분의 의존도가 비교적 높게 나타남을 알 수 있다.

강하먼지 중 금속성분의 조성특성을 지점별로 비교하기 위해 분석 대상인 총 10개의 금속 성분만을 대상으로 질량 농도비를 제시하여 그림 3에 나타냈다. 그림 3에서 볼 수 있듯이 토양기원의 기준물질으로 알려져 있는 Al과 Fe 성분은 다른 성분에 비해 월등히 높은 비율을 나타낸 반면에 인위기원으로 널리 알려진 Cd 등은 극미량 농도를 나타냈다. 이로써 제주지역의 강하먼지는 토양입자의 비산으로 인한 영향을 크게 받고 있다고 예상할 수 있었다. 따라서 토양입자의 영향을 보다 정량적으로 파악할 필요가 있다.

3.2 강하먼지 중 해염 입자의 기여율

본 연구에서는 각 이온성분에 대한 해염입자의 영향을 평가하기 위해 해염 입자의 조성이 해수의 조성과 같다고 가정하고 해수 중에서의 Na⁺에 대한 각 이온성분의 질량 농도비와 강하먼지 중의 Na⁺에 대한 각 이온성분의 농도비를 측정지점별로 산출하여 표 2에 나타냈다. 여기서 NO₃⁻와 NH₄⁺, F⁻는 모두 비해염기원 성분으로 가정하였다.

표 2에서 보면 해염입자(sea salt)로부터 유래될 수 있는 주요 수용성 성분의 Na⁺에 대한 질량농도비가 해수 중에서의 질량농도비 보다 대부분 높게 나타나는 것으로 보아 강하먼지 중 수용성 성분의 조성은 해염기원과 비해염기원(non sea salt)의 영향

Table 2. Mass concentration ratio of each ion to Na⁺ in dustfall.

Ion Species	(C _i /C _{Na}) _{sea} ¹⁾	(C _i /C _{Na}) _{dust} ²⁾				
		S1	S2	S3	S4	S5
F ⁻	-	0.017	0.003	0.047	0.016	0.016
Cl ⁻	1.797	2.482	2.390	3.242	2.334	2.175
NO ₃ ⁻	-	0.794	0.960	0.757	0.525	1.232
SO ₄ ²⁻	0.252	4.500	4.853	3.088	1.617	4.686
K ⁺	0.037	1.103	0.077	0.092	0.093	0.091
Ca ²⁺	0.038	0.923	0.967	0.418	0.370	1.291
Na ⁺	1	1	1	1	1	1
Mg ²⁺	0.120	0.243	0.359	0.317	0.265	0.323
NH ₄ ⁺	-	0.226	0.411	0.167	0.156	0.222

¹⁾ (C_i/C_{Na})_{sea}: mass concentration ratio of each ion to Na⁺ in sea water

²⁾ (C_i/C_{Na})_{dust}: mass concentration ratio of each ion to Na⁺ in dustfall

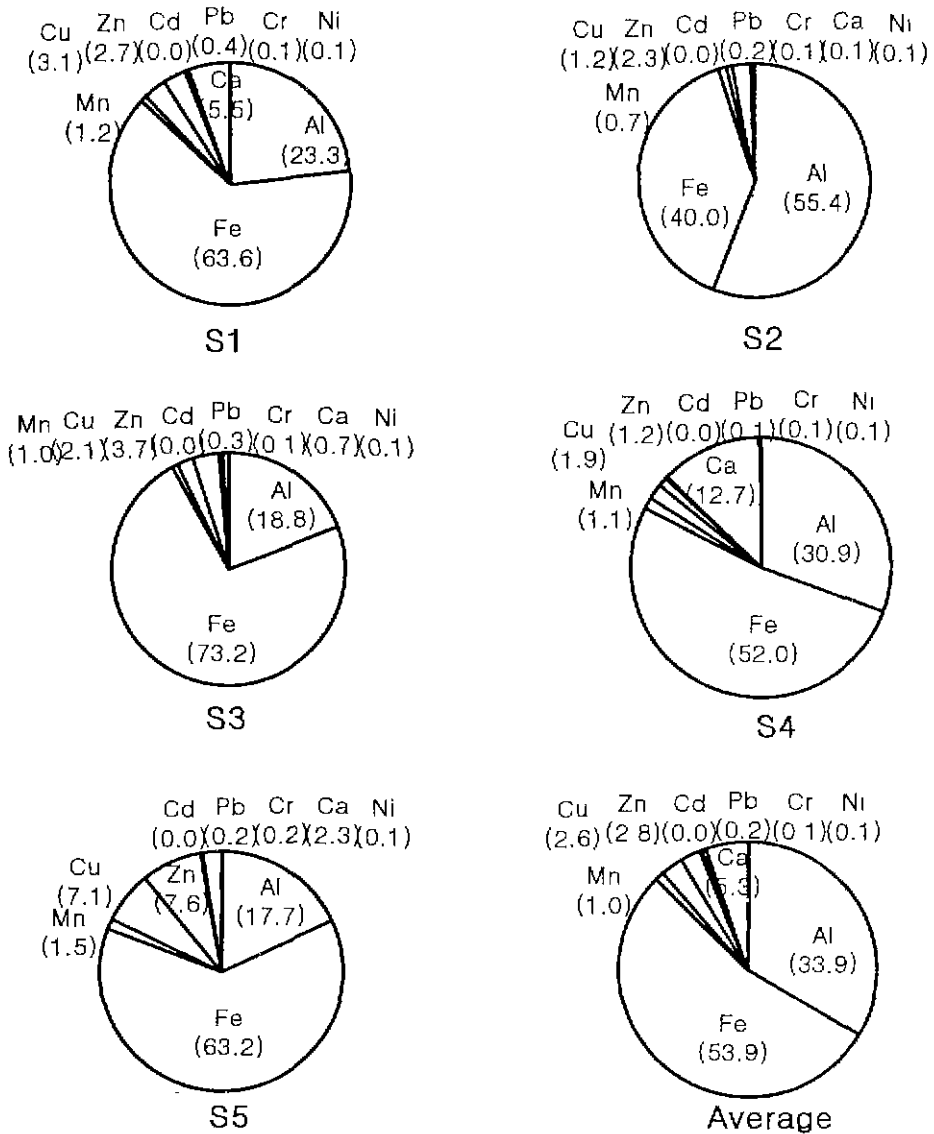


Fig. 3. Mass fraction of metal elements in dustfall sampled in Cheju area (unit : %).

을 동시에 받고 있는 것으로 생각된다. 성분별로는 SO_4^{2-} 와 Ca^{2+} 성분의 질량 농도비는 해수 중에서의 질량농도비보다 20~30배 정도 높게 나타나는 반면에 Cl^- 성분은 1.2~1.8배 그리고 K^+ 와 Mg^{2+} 성분의 질량 농도비는 2~3배 정도의 비교적 낮은 값을 나타냄을 알 수 있다. 이 결과로 볼 때 강하먼지의 수용성 이온 성분 중 SO_4^{2-} 와 Ca^{2+} 성분은 비해

염 기원으로부터 유래되는 양이 해염기원으로부터 유래되는 양보다 훨씬 많으며 Cl^- 성분은 대부분 해염기원으로부터 유래되고 K^+ 와 Mg^{2+} 성분은 해염기원과 비해염기원의 영향을 비슷한 정도로 받고 있는 것으로 생각된다.

강하먼지 중 수용성 이온성분 전체에 대한 해염 입자의 기여율을 파악하기 위해 식(4)와 같은 일련

Table 3. Predicted contributions of sea salt to soluble components in dustfall.

Site	Seasonal contribution (%)				Average contribution (%)
	Spring	Summer	Fall	Winter	
S1	21.2	18.3	40.2	41.2	30.2
S2	19.6	36.6	38.1	15.4	27.4
S3	29.6	34.0	55.9	20.0	34.9
S4	32.8	39.3	72.5	21.9	41.6
S5	15.8	36.6	38.2	16.1	26.7
Average	23.8	33.0	49.0	22.9	32.2

의 계산과정을 거쳐 각 측정지점에서의 해염입자 기여율을 추정하여 표 3에 정리하여 나타냈다. 표에서 보면 제주지역 강하먼지 중 수용성 이온성분에 대한 해염입자의 기여율은 평균적으로 32.2% 정도로서 타 내륙지방에서 조사된 부유먼지에 대한 해염기여율(10%)보다는 월등히 높고 강화, 양양 등의 해안지역에서 조사된 결과와는 비슷한 값을 보였다(문승택, 1992; 신은상, 1990). 측정 지점별 해염 기여율을 비교해 보면 S4 지점에서의 해염 기여율은 약 42%로 다른 지점에 비해 월등히 높으며 해안으로부터 가장 멀리 떨어진 S5 지점이 가장 낮았다. 그리고 비교적 도시화된 지역에 위치한 S1, S2 지점이 그렇지 못한 S3, S4 지점보다 훨씬 낮은 기여율을 나타내고 있음을 알 수 있다.

이와 같이 S4 지점에서 해염입자의 기여율이 높게 나타나는 것은 이 지점이 바람이 강해 비산해염 발생량이 많을 뿐 아니라 해염 이외의 다른 기원으로부터 유래한 수용성 이온성분량이 상대적으로 적기 때문으로 생각된다. 반면에 S1, S2 지점은 인위기원으로부터 유래하여 2차적으로 생성된 입자들에 의한 수용성 성분들의 유입이 S3, S4 지점보다 상대적으로 많아 해염 기여율이 낮은 것으로 추정된다. 그리고 계절적으로는 각 측정지점별로 다소 차이가 있긴 하지만 전체적으로 여름과 가을철이 높고 봄과 겨울에는 다소 낮게 나타났다. 이는 그림 4에 나타낸 강수량, 풍속, 해풍빈도 등과 개별적으로는 뚜렷한 관련성을 보이지 않는 것으로 보아서, 이는 각 지점에서의 계절별 주풍향, 풍속 그리고 강수 등 각종의 요인들에 의한 대기 중의 해염입자 세정효과 등이 복합적으로 작용하여 나타난 결과로 생각된다.

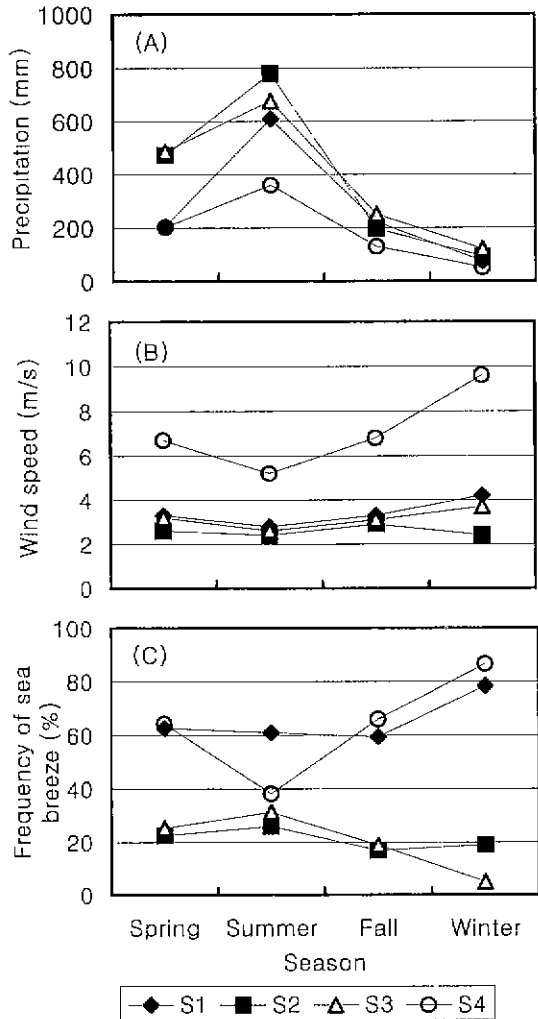


Fig. 4. Seasonal variations of meteorological elements; (A) precipitation, (B) wind speed and (C) frequency of sea breeze.

3.3 토양입자의 기여율

강하먼지 중에 함유된 각 중금속 성분의 기원을 추정하기 위해 각 성분별 지각농축계수(enrichment factor, E.F)를 구하여 표 4에 정리하여 나타냈다. 지각 농축계수는 지각중의 기준물질에 대한 각 성분의 농도비를 강하먼지 중의 기준물질에 대한 각 성분의 농도비로 표현할 수 있는데, 이 값이 클수록 인위기원으로부터 유래한 비율이 높다는 것을 의미한다. 본 연구에서는 기준물질로서 Fe를 이용하였

Table 4. Enrichment factor of each metal element in dustfall deposited on Cheju area.

Element	X _i /Fe _n in crust	Enrichment Factor					Average Enrichment Factor
		S1	S2	S3	S4	S5	
Al	1.626	0.226	0.854	0.158	0.366	0.173	0.355
Fe	1	1	1	1	1	1	1
Mn	0.019	1.004	0.945	0.743	1.078	1.211	0.996
Cu	1.1 × 10 ⁻³	44.323	26.618	26.130	32.366	101.988	46.285
Zn	1.4 × 10 ⁻³	29.850	40.923	35.768	16.280	86.092	41.783
Cd	4.0 × 10 ⁻⁶	71.558	17.596	-	23.991	-	22.629
Pb	2.6 × 10 ⁻⁴	24.220	17.596	14.252	8.305	14.752	15.825
Cr	2.0 × 10 ⁻³	1.145	0.915	0.951	1.104	1.390	1.10
Ca	0.726	0.118	0.004	0.014	0.335	0.051	0.103
Ni	1.5 × 10 ⁻³	1.336	1.032	0.534	1.567	1.215	1.137

* Mass concentration ratio of each metal element to Fe in crust (Mason and Moore, 1982)

다.

표 4에서 보면 Mn, Cr, Ni에 대한 지각농축계수는 거의 1에 가까운 값을 보이고 Cu, Zn, Cd, Pb는 매우 큰 지각농축계수를 나타내며 Al과 Ca의 지각농축계수는 1보다 훨씬 낮은 값을 보임을 알 수 있다. 이 결과로 볼 때 Mn, Cr, Ni은 토양 입자로부터 유래한 것으로 판단되는 반면에 Cu, Zn, Cd, Pb은 토양이외의 인위적 배출원에서 유래한 것으로 추정된다. 한편 Ca 성분의 지각농축계수가 0.1 정도로 낮게 나타나는 것은 Ca 성분의 대부분이 용해되어 수용성 이온 형태로 존재하기 때문으로 생각된다. 이는 이미 언급한 표 2의 결과를 잘 반영하고 있다.

한편 강하먼지량에 대한 토양입자의 영향을 정량적으로 파악하기 위해 Fe를 기준물질로 이용하여 식(1)로부터 각 측정지점에서의 강하먼지에 대한 토양입자의 기여율을 추정하여 계절별로 정리하여 표 5에 나타냈다. 표 5에서 보면 제주지역의 총 강하먼지량에 대한 토양입자의 기여율은 평균 26.4% 정도 되는 것으로 추정되며 측정지점별로는 S4지점의 토양 입자 기여율이 41.7%로 다른 4개 지점보다 월등히 높게 나타나는데, 이는 S4 측정지점의 지역적 특성을 잘 반영하고 있는 결과라고 생각된다.

그리고 계절적으로는 토양입자의 기여율이 큰 차이를 나타내지는 않으나 황사현상의 영향을 받는 봄철과 건조하고 바람이 다소 강한 겨울철이 타 계절에 비해 다소 높게 나타났는데, 부유먼지에 대한 토양입자의 기여율은 신은상(1990)의 연구결과에서

Table 5. Predicted contributions of soil to dustfall deposited on Cheju area.

Site	Contribution of soil (%)				Annual average contribution of soil (%)
	Spring	Summer	Fall	Winter	
S1	22.8	34.6	18.5	7.9	20.9
S2	34.8	25.3	27.3	26.3	28.4
S3	27.9	11.2	7.8	33.0	20.0
S4	34.0	33.0	56.5	43.2	41.7
S5	27.8	15.3	11.9	28.3	20.9
Average	29.5	23.9	24.4	27.7	26.4

도 이와 유사한 계절적 변동 특성이 있는 것으로 보고된 바 있다.

3. 4 강하먼지와 부유먼지 및 빗물의 비교

강하먼지, 부유먼지, 빗물 등 대기로부터 침적될 수 있는 침적형태에 따른 화학적 조성 특성을 비교 평가하기 위해 S5 지점에서 강하먼지와 함께 부유먼지 및 우수를 채취하여 이들의 화학적조성을 분석한 결과는 이미 전보에서 밝힌 바와 같이 강하먼지를 습성 침적물과 건성 침적물을 동시에 채취하는 일괄채취 방식으로 채취하므로써 대기 중의 입자상 물질과 빗물의 영향을 동시에 받고 있기 때문에 강하먼지는 부유먼지와 빗물의 중간 정도되는 화학적 조성특성을 보였다.

표 6에는 강하먼지, 부유먼지 및 빗물의 수용성 성분에 대한 해염입자의 기여율을 나타냈다. 표에서 보는 바와 같이 전반적으로 수용성 성분에 대한 해

Table 6. Predicted contributions of sea salt to soluble components in dustfall, TSP and rain at site S5.

Item	Dustfall	TSP	Rain
Contribution of sea salt (%)	26.7	29.2	44.3

Table 7. Enrichment factors and mass fractions of each metal element in dustfall and TSP relative to crustal composition at site S5.

Element	Dustfall		TSP	
	E.F.	$f_{1,noncrustal}$	E.F.	$f_{1,noncrustal}$
Al	0.172		0.234	
Fe	1		1	
Mn	1.279	21.8	1.889	47.1
Cu	110.422	99.1	58.792	98.3
Zn	78.890	98.7	70.106	98.6
Cd	-	-	72.914	99.9
Pb	15.350	93.5	203.867	99.5
Cr	1.388	28.0	4.628	78.4
Ca	0.030	*	0.490	*
Ni	1.272	21.4	5.241	80.9

Table 8. Predicted contribution of soil to dustfall and TSP at site S5.

Item	Dustfall	TSP
Contribution of soil (%)	23.5	15.8

염입자의 기여율은 빗물이 44.3%로 가장 높고 강하면지와 부유먼지에 대한 기여율은 큰 차이는 없으나 부유먼지가 다소 높게 나타나고 있다.

강하면지와 부유먼지 중의 금속성분에 대한 지각 농축계수를 산출하여 표 7에 나타냈다. 표 7에서 보면 강하면지 중 Mn, Cr 및 Ni 성분은 대부분 토양기원에서 유래한 것으로 추정되지만 부유먼지에 대해서는 인위기원으로부터 유래한 성분이 상당히 많은 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 식(2)에 의해서 토양이외의 기원에 의해 유입되어 잔류하고 있는 성분(비토양 기여성분)의 비율을 보면, 강하면지에서는 Cu와 Zn은 98% 이상 그리고 Pb는 93% 이상으로서 이들 성분은 주로 토양이외의 기원에 의해서 유래된 것으로 나타났고, Mn, Cr, Ni이 20%~30% 범위로서 비토양 기여성분의 비율이 낮음을 알 수 있었다. 부유먼지에서 Cu, Zn, Cd 및 Pb은

Table 9. Result of varimax-rotated PCA for dustfall data sampled in Cheju area.

Variable	PC 1	PC 2	PC 3	PC 4	PC 5	PC 6	Communality
Cl ⁻	0.59	-0.15	0.08	-0.15	0.51	-0.20	0.70
SS-SO ₄ ²⁻	0.96	0.01	0.17	-0.03	-0.00	-0.04	0.96
SS-Ca ²⁺	0.96	0.02	0.17	-0.02	0.01	-0.04	0.96
Na ⁺	0.96	0.01	0.17	-0.03	-0.00	-0.05	0.96
K ⁺	0.84	-0.15	0.17	0.05	-0.06	-0.02	0.77
NO ₃ ⁻	0.21	-0.15	0.68	0.29	0.41	0.01	0.78
NH ₄ ⁺	0.33	-0.08	0.78	0.01	-0.07	-0.03	0.73
NSS-SO ₄ ²⁻	0.17	-0.24	0.78	0.08	0.12	0.18	0.75
Cd	0.19	0.25	0.55	-0.24	-0.27	-0.08	0.54
Al	-0.14	0.71	-0.21	0.06	-0.18	0.39	0.76
Fe	-0.10	0.73	-0.17	-0.20	0.32	0.06	0.73
Mn	-0.03	0.66	-0.28	0.21	-0.14	0.29	0.67
Ni	0.13	0.75	0.03	0.36	-0.10	-0.08	0.72
Cr	-0.13	0.64	0.36	-0.00	-0.34	-0.01	0.67
Cu	-0.02	0.17	0.00	0.86	0.18	-0.010	0.80
Zn	-0.07	0.04	0.06	0.87	-0.09	0.21	0.82
NSS-Ca ²⁺	-0.21	-0.01	0.27	0.12	0.30	0.76	0.80
Pb	0.03	0.33	-0.09	-0.01	-0.23	0.82	0.84
Ca	0.25	0.18	0.08	0.06	-0.55	0.01	0.40
Mg ²⁺	0.31	0.07	0.18	0.33	0.66	0.04	0.68
Eigenvalue	5.34	3.22	2.36	1.72	1.30	1.11	
Pct of Var	26.7	16.1	11.8	8.6	6.5	5.5	
Cum Pct	26.7	42.8	54.6	63.2	69.7	75.2	

98% 이상이 비토양 기여성분인 것으로 나타났고, Ni은 80%, Mn은 47% 이상으로 토양이외의 기원에서 유래된 비율이 강하면지에 비해 크게 높은 것으로 나타났다.

이는 토양입자의 기여율을 산출하여 나타낸 표 8에서도 확인할 수 있다. 즉, 전반적으로 강하면지에 대한 토양입자의 기여율은 23.5% 정도인 반면에 부유먼지에 대한 토양입자의 기여율은 이보다 훨씬 낮은 15.8% 정도밖에 되지 않는 것으로 추정되었다. 이로써 보면, 강하면지 중에는 토양기원 금속성분들의 조성비가 높고 부유먼지 중에는 인위기원 원소로 알려진 금속 성분들의 조성비가 상대적으로 높게 나타남을 알 수 있다.

3.5 주성분 분석 (principle component analysis : PCA)

제주지역 5개 지점에서 채취한 총 60개의 강하면지 시료에 대한 수용성 이온성분과 금속성분의 분석결과를 토대로 주성분 분석(PCA)을 행한 결과

를 표 9에 나타냈다. 총 20개 변수에 대해 고유값(eigenvalue) 1.0 이상을 기준으로 할 때, 6개의 주성분 군이 선정되었으며, 이들 주성분 군에 의해서 전체 분산의 75.2%를 설명할 수 있었다.

첫 번째 PC는 전체분산의 26.7%를 설명할 수 있는데, Cl^- , Na^+ , K^+ , $SS-SO_4^{2-}$, $SS-Ca^{2+}$ 등과 높은 상관(0.61~0.96)을 나타내고 있어 동일한 기원에서 유래한 것으로 판단할 수 있는데 이들 성분의 일반적인 기원과 앞 절에서 설명된 바와 같이 해염 입자 기여율 등을 종합적으로 고려할 때 해염과 연관된 변수로 판단할 수 있다.

두 번째 PC는 Al, Fe, Mn, Ni, Cr 등의 중금속 성분들과 상관을 나타내고 있으며, 이는 화학적 조성 특성에서 산정한 지각 농축계수 등을 함께 고려해 볼 때 토양에서 유래한 성분들과 연관된 변수로 판단된다. 그리고 세 번째 PC는 전체분산에 11.8%를 설명할 수 있고 NO_3^- , $NSS-SO_4^{2-}$, NH_4^+ , Cd 등과 0.55~0.79 정도의 상관을 나타내고 있는데 이 성분들은 해염입자 또는 토양입자 등의 자연적 기원의 기여율이 크지 않은 성분들으로써 인위기원과 관련된 변수인 것으로 추정된다.

한편 나머지 세 개의 주성분은 Cu, Zn과 Ca, Mg^{2+} 그리고 Pb, $NSS-Ca^{2+}$ 성분으로 분류되는데 이 그룹들은 각각 전체 분산의 5.5~8.6% 정도를 설명할 수 있는 주성분 군들으로써 이들은 국지적인 특정기원으로부터 유래한 것으로 추정되지만 본 연구범위로서는 구체적인 기원을 판단할 수 없었다.

4. 결 론

1995년 8월부터 1996년 7월까지 1년간 제주지역에서 포집한 강하먼지에 대한 해염 및 토양입자의 기여정도 그리고 주성분 분석을 통한 각 성분들의 기원을 평가한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 강하먼지 중 수용성 성분에 대한 해염입자의 기여율은 32.2% 정도로 나타났고, 계절적으로는 측정지점별로 다소 차이를 보였으나 전반적으로 여름과 가을철이 높고, 봄과 겨울철에는 낮아지는 경향을 보였다.

2. 강하먼지 중에 함유된 각종 금속성분들의 지각 농축계수를 기준물질 Fe에 대해서 산출했을 때 Mn, Cr, Ni은 1에 가까운 값을 보인 반면 Cu, Zn,

Cd, Pb는 매우 높은 값을 보였다. 그리고 토양의 기여율은 평균 26.4% 정도인 것으로 평가되었다. 그리고 토양 기여율은 계절적으로 큰 차이는 보이지 않았으나 봄철과 겨울철에 다소 높게 나타났다.

3. 강하먼지, 부유먼지, 빗물에 대한 해염의 기여율은 빗물에서 가장 높게 나타났고, 부유먼지가 강하먼지보다 약간 높게 나타났다. 토양의 기여율은 강하먼지가 23.5%인 반면 부유먼지에서는 15.8%에 지나지 않았다. 또한 분석대상이 된 각 금속성분 중 토양이외의 기원에서 유래되어 잔류하는 비율을 보면 부유먼지보다는 강하먼지가 낮음을 알 수 있었다.

4. 총 20개의 성분원소에 대해서 고유값 1.0 이상을 기준으로 6개의 주성분 군을 선정할 수 있었고, Cl^- , Na^+ , K^+ , $ss-SO_4^{2-}$, $ss-Ca^{2+}$ 등은 해염과 관련된 변수로, Al, Fe, Mn, Ni, Cr 등은 토양과 관련된 변수로, 그리고 NO_3^- , $nss-SO_4^{2-}$, NH_4^+ , Cd 등은 해염 또는 토양과 같은 자연적인 기원이 아닌 인위적인 기원에 관련된 변수로 추정할 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, 대한환경 공학회지, 12(1), 1-9.
- 류재부(1993) 광주시 강하분진에 관한 연구, 조선대학교 산업대학원 석사학위논문.
- 문승택(1992) 부유입자상 물질에 대한 해염 입자의 기여율에 관한 연구, 건국대학교 대학원 공학석사학위논문.
- 백승욱, 황승만(1992) 주성분/중회귀분석을 이용한 대구지역 대기 중 부유분진의 발생원별 특성평가, 한국대기보전학회지, 8(3), 179-190.
- 신은상(1990) 대기부유분진에 대한 토양 입자의 기여율에 관한 연구, 건국대학교 대학원 공학석사학위논문.
- 윤훈주, 김동술(1997) GIS를 이용한 강하분진 중 금속원소의 공간분포 분석, 한국대기보전학회지, 13(6), 463-474.
- 이기호, 허철구, 송문호, 박용이(1999) 제주지역 강하먼지의 조성에 관하여-1. 화학적 조성 및 침적량, 한국대기환경학회지, 15(1), 13-22.

- 이병호(1990) 대구시 중심업무지역의 강하분진량 측정, 영남대학교 환경대학원 석사학위논문
- 이종훈(1994) 서울지역에서의 강하분진의 거동 및 특성에 관한 연구, 건국대학교 일반대학원 석사학위논문
- 정대연(1992) 사회통계학, 백산서당, 637-693
- 최재영(1987) 한국 동해안 지역의 도시와 농촌에서 대기로부터의 강하분진량 측정에 관하여, 영남대학교 환경대학원 석사학위논문
- 최재천, 김 산, 이민영, 이선기(1995) 제주도과 울릉도의 강하분진중 수용성 성분에 관한 연구. 한국대기보전학회지, 11(4), 331-337.
- 奥野忠一, 久米均, 芳賀敏郎, 吉澤正(1981) 多變量分析法(改訂版), 159-258.
- 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.
- Mason, B. and C.B. Moore(1982) Principles of geochemistry, Smith Wyllyie intermediate geology series, 42-51.
- 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
- SPSS(1994) SPSS Advanced Statistics 6.1.