

수원지역 강하분진의 화학조성 및 공간분포 분석

Chemical Compositions and Spatial Distribution Analysis of Fall-Out Particles in Suwon Area

김 현 섭 · 이 태 정 · 김 동 술
경희대학교 환경학과 및 환경연구소

(1998년 8월 26일 접수, 1998년 10월 23일 채택)

Hyun-Sup Kim, Tae-Jung Lee, and Dong-Sool Kim

*Department of Environmental Science and Institute of Environmental Studies,
Kyung-Hee University*

(Received 26 August 1998; accepted 23 October 1998)

Abstract

Deposition is one of the important removal mechanisms for the ambient aerosol, and it also leads to adverse environmental and economic impacts. The purpose of this study was to investigate chemical compositions and spatial distributions of fall-out aerosols. A total number of 340 samples were collected at 35 sampling sites in Suwon area from January to November, 1996. Twelve inorganic elements (Al, Ba, Cd, Cr, K, Pb, Sb, Zn, Cu, Fe, Ni, and V) and eight ionic components (F^- , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , Na^+ , NH_4^+ , Mg^{2+} , and Ca^{2+}) were analyzed by AAS and IC, respectively. The monthly variation showed that the flux of fall-out particles was increased in the spring season (March, April, and May) and decreased from August to October. Arithmetic mean flux of fall-out particles was $176.8 \text{ kg/km}^2/\text{day}$ during the study period. The fluxes of each chemical species were SO_4^{2-} 12.414, Ca^{2+} 7.368, NO_3^- 5.812, Cl^- 3.566, NH_4^+ 3.176, Fe 3.107 $\text{kg/km}^2/\text{day}$, and so on. By using a kriging analysis, spatial distribution pattern of those fluxes was intensively studied. Total fluxes estimated in Suwon city were 8424.72 t/y of fall-out particles, 519.27 t/y of SO_4^{2-} , 336.79 t/y of Ca^{2+} , 267.34 t/y of NO_3^- , 155.36 t/y of Cl^- , 147.79 t/y of Fe.

Key words : fall-out particles, inorganic elements, ionic components, kriging analysis

1. 서 론

강하분진은 입경과 무관하게 최종적으로 지표면에 침착되는 분진을 의미하며, 주로 $100 \mu\text{m}$ 이상의 거대분진이 주종을 이루고 있다. 강하분진의 침착은 대기 중 입자상 물질의 제거기작과 깊은 관련이 있

으며, 두 가지 기본 경로로 대별할 수 있다(김성천과 김동술, 1996). 즉, 강수의 영향 없이 중력, 충돌, 확산과정에 의해 직접 지면으로 이동하는 건식침착(dry deposition)과 대기 중 오염물질이 강수, 안개, 응축 등에 의해 소멸되는 습식침착(wet deposition)이 있다.

최근 유럽을 비롯한 미국 북동부지역 및 세계각

국의 대도시에서는 산성물질 침착(acidic deposition)으로 막대한 피해를 입고 있다(Knotkova and Barton, 1992; Smirnioudi and Siskos, 1992). 산성침착물 중 산성우에 대한 연구가 폭넓게 이루어지고 있으며, 건식물질도 육상 및 해상 생태계의 산성화를 통해 생물체를 위협하고 있어 관심이 증대되고 있다(Geigert *et al.*, 1994; Meyers *et al.*, 1991). 특히, 분진이 강수의 산도에 영향을 미치는 우리 나라에서는 강수의 pH보다는 입자상 물질 중 이온의 농도 및 총량에 더 큰 의미를 두고 연구가 진행되어야 한다(심상규, 1996). 산성침착물의 피해는 주로 생태계를 파괴하는 형태로 나타난다. 인체에 미치는 영향으로는 눈의 점막을 상하게 하거나 머리를 탈색시킬 수 있으며, 미세 산성입자에 노출되었을 경우 호흡기관이 손상될 수 있다(Brauser *et al.*, 1991). 하지만, 최근까지 산성침착물의 영향에 대한 찬반논의가 진행되고 있다.

현재 강하분진에 대한 연구는 화학성분별 침착량의 추정뿐만 아니라, 공간분포 분석에 관한 연구도 활발히 진행되고 있다(Vyas and Christakos, 1997; Christakos and Thesing, 1993). 강하분진의 침착량은 지형적 특성과 기상학적 특성에 따라 지역별로 차이가 있으며, 오염원의 지리적 위치에 따라 커다란 영향을 받는다(Pruppacher *et al.*, 1983). 따라서, 강하분진의 공간적 거동을 파악하기 위해서는 대기 중에 배출된 오염물질들의 지역적 분포를 면밀히 검토해야 한다. 공간분석법(spatial analysis)이란 동일 시간에 지역적으로 상이한 수용체위치에서 측정된 자료를 평면상에서 시각적으로 평가하는 방법이다. 최근까지 공간분석법에서 가장 선호되고 있는 내삽 방법으로는 거리반비례 평균법(inverse distance weighted averaging method)과 kriging 기법 등이 있다(윤훈주와 김동술, 1997).

본 연구는 수원지역을 대상으로 강하분진을 포집하고 분진 중의 무기원소 및 이온성분의 침착량 분포변화를 파악하고자 하였다. 또한, 지리정보 시스템(geographic information system : GIS)을 이용하여 강하분진과 화학성분의 공간분포를 분석하고, 이를 바탕으로 일정지역의 총침착량 산정을 위한 체계적인 방법론을 제시하고자 하였다.

2. 실험 및 분석방법

2.1 시료포집 방법

본 연구는 수원시 전역과 수원시 외곽의 경기도 지역을 대상으로 1996년 1월부터 1996년 11월까지(7월 제외) 강하분진을 포집하였다. 연구지역을 3×3km 격자형을 원칙으로 수원시 14개, 용인시 11개, 화성군 8개, 오산시 1개, 분당구 1개 지점 등 총 35개 지점을 측정지점으로 선정하였다(그림 1). 수원 지역의 대기질에 영향을 미치는 요인들로는 화석연료 연소 및 생산활동에 의하여 오염물질을 배출하는 공장, 취사 및 난방연료를 사용하는 주택단지과 같은 고정 배출원과 고속도로, 국도, 지방도로 등 도로를 통행하는 차량에 의한 이동 배출원이 있다. 최근에는 지역 내 도처에서 이루어지고 있는 택지개발사업, 불법소각, 장거리운송 등과 같은 불특정 배출원이 존재하고 있다.

강하분진의 포집을 위해 개조된 British deposit gauge를 자체제작하였다. 강하분진 포집기는 해당지역을 대표할 수 있고, 주위 건물이나 국부적인 배출원의 영향을 받지 않는 지상 및 건물 옥상에 설치하였다. 포집기는 개구면의 직경이 30 cm (706.9 cm²)인 깔때기와 깔때기 하부에 5l PVC용기를 연

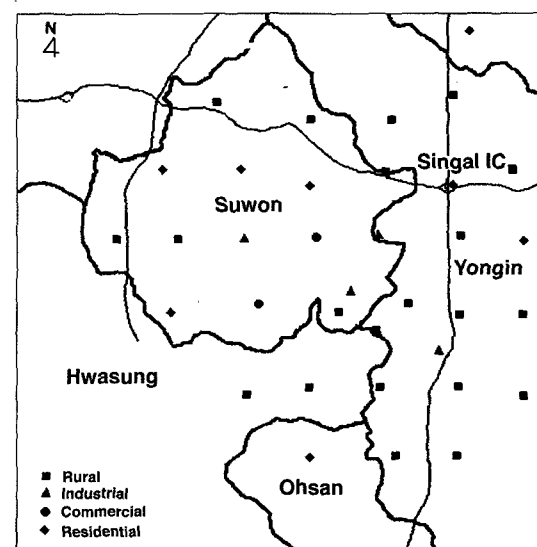


Fig. 1. Location of sampling sites for this study.

결한 것으로, 난류의 영향을 최소화하기 위하여 1.5 m 높이의 지지대에 고정시켰다. 사용된 깔때기는 폴리에틸렌 재질이며, 상부에는 새, 곤충 등에 의한 이물질의 유입을 방지하고자 망을 덮었으며, 부식방지를 위해 스테인레스 스틸 재질을 사용하였다. 각 지점에서의 동시 측정기간은 강수량을 고려하여 매 회 약 3~4주 동안 공기 중에 노출시켰으며, 시료포집은 전식강하물과 습식강하물을 동시에 포집하는 일괄채취법(bulk sampling method)을 이용하였다. 강하본질 시료는 수거 즉시 분석하였다.

포집된 시료는 이물질을 제거한 후 용기 벽면에 부착된 분진을 분리수거하기 위하여 policemen을 사용하였으며, 증류수를 분출하여 완전히 수거하였다. 강하본질 시료를 불용성 성분과 수용성 성분으로 분류하기 위하여 진공펌프가 부착된 여과장치에 막여지(membrane filter, pore size 1.0 μm, diameter 47 mm, Whatman Co.)를 사용하여 흡입 여과하였으며 여지상의 잔류물은 불용성으로, 여액은 수용성으로 분류하였다. 막여지는 흡입 전에 20°C, 50% 항온, 항습 조건하에서 최소 48시간 방치한 후 칭량하였다. 여지상의 불용성 성분은 건조오븐 내에서 105°C로 2시간 동안 완전히 건조하고 데시케이터에서 방냉한 후, 0.1 mg의 감도를 가진 전자저울(A&D Co. Model HM-201)로 칭량하여 무게의 전·후 차로 불용성 성분의 양을 구하였다. 불용성 성분에 대한 분석을 수행하기 이전까지 페트리 접시(petri-dish)에 밀봉하여 데시케이터 내에서 보관하였다. 또한, 여지를 통과한 수용성 성분은 100 ml 분취하여 가열판(hot plate) 상에서 105°C로 수용액을 증발시킨 후, 건조오븐 내에서 완전히 건조시킨 다음 방냉하여 칭량하였다. 수용성 성분의 양은 분취한 100 ml 내의 수용성 성분의 양을 메스실린더로 측정된 시료의 총액량으로 환산하여 산출하였다.

2.2 시료분석 방법

강하본질 중 무기원소는 불용성 및 수용성 성분으로 나누어 분석하였으며, 이온성분의 분석을 포함한 전체적인 분석 흐름도는 그림 2에 나타났다.

무기원소 중 불용성 성분의 전처리 방법으로 미국 EPA에서 1992년 고시한 CWA(Clean Water Act)의 microwave 전처리장치(U.S.A., Questron Co., Model Q-15 MicroPrep)를 사용한 질산 전처리법을

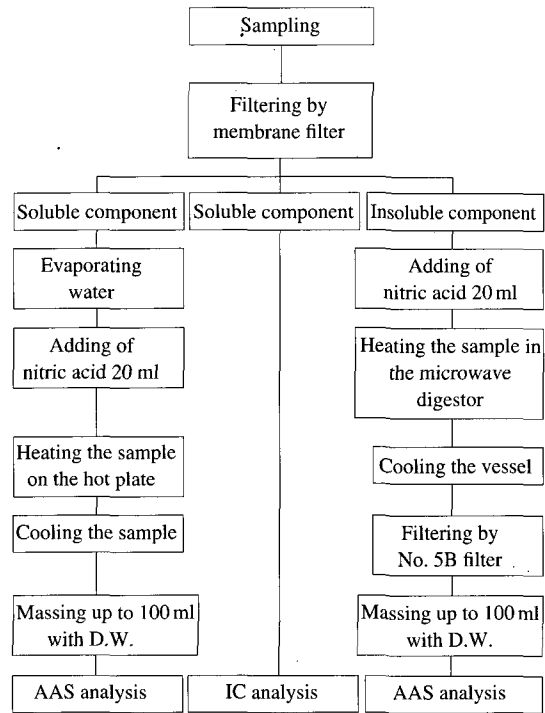


Fig. 2. Procedure for the analysis of inorganic and ion species.

수행하였다. 이 장치는 용매를 고온으로 진공가압하는 장치로서 기존의 시계접시법(watch glass method)을 이용한 산분해 전처리와 비교하여 전처리 시간을 단축할 수 있다. 여지에 걸러진 불용성 성분을 여지와 함께 PFA liner에 넣은 후 질산(유해중금속 측정용, 61%) 20 ml를 가하여 power 8에서 10분, power 6에서 10분 동안 전처리장치를 가온·가압하였다. 무기원소를 추출한 뒤 No. 5B 여지(Toyo Roshi Kaisha, Ltd.)로 시료의 잔재물을 여과하였으며, 증류수를 첨가하여 100 ml로 조정하였다.

무기원소 중 수용성 성분의 전처리 방법으로 시계접시법을 이용하였다. 수용성 성분의 무게를 측정하기 위하여 수용액을 증발시킨 비이커에 질산(유해중금속 측정용, 61%) 20 ml를 가하여 시계접시를 덮고 가열판 상에서 가열하였다. 방냉한 후 증류수를 첨가하여 100 ml로 조정하였다. 전처리가 끝난 시료는 AAS(atomic absorption spectrophotometer, Japan, Hitachi, Model Z-6100)를 사용하여 Al, Ba,

Cd, Cr, K, Pb, Sb, Zn, Cu, Fe, Ni, V 등 총 12개 항목을 분석하였다. 한편, 이온성분의 분석을 위해 따로 분취한 수용성 성분은 폴리에틸렌 병 (Nalgene Co.)에 담아 분석 시까지 4°C의 냉암소에 보관한 후, 이온크로마토그래피 (U.S.A., Dionex Co., Model DX-400)를 이용하여 분석하였다. 수용성 이온성분의 분석은 F⁻, Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻, Na⁺, NH₄⁺, Mg²⁺, Ca²⁺ 등 총 8개 항목으로 이루어졌다.

3. 결과 및 고찰

3.1 강하분진의 침착량 분포

강하분진 침착량의 산술평균과 산술평준편차, 기하평균과 기하표준편차, 최소값과 최대값을 표 1에 제시하였다. 강하분진 침착량은 불용성 성분의 침착량과 수용성 성분의 침착량을 합산한 것이다. 총 340 개 강하분진 시료에 대한 산술평균은 176.8, 기하평균은 151.3, 중앙값 (median)은 161.4 kg/km²/day 였다. 산술평균은 기하평균에 비해 계산 및 해석이 용이하며, 편중성이 없는 (unbiased) 자료 및 농도를 나타낼 때 탁월한 대표성을 보인다 (Parkhurst, 1998). 따라서, 본 연구에서의 침착량은 35개 지점의 산술 평균값을 사용하였다. 침착량 변화경향은 3월 303.5 kg/km²/day로 가장 높았으며, 9월 96.0 kg/km²/day로 최소 침착량을 나타낼 때까지 감소하다가 10월부터 다시 증가하는 경향을 보였다. 강수량이 매우 적었던

2월의 낮은 침착량은 강수량이 비교적 많았던 9월과 10월의 낮은 침착량과 대조를 이룬다. 이것은 강수량 등의 기상요소와 함께 대기 중 분진농도도 강하분진 침착량에 영향을 준다고 사료되며, 특히 여름철의 많은 강수량이 분진의 제거 메커니즘에 큰 영향을 미치는 것으로 여겨진다. 강하분진량의 월별변화 경향은 그림 3에 제시하였다.

강하분진에 대한 340개 시료를 대상으로 침착량 빈도분포를 조사하였다. 비등급별 자료를 등급별 자료로 변환하기 위해서는 우선 등급의 수와 등급의 간격을 결정해야 한다. 측정수에 따라 등급의 수를 결정하는 방법으로는 Sturges의 식을 많이 사용하고 있다 (윤일홍과 이시영, 1997).

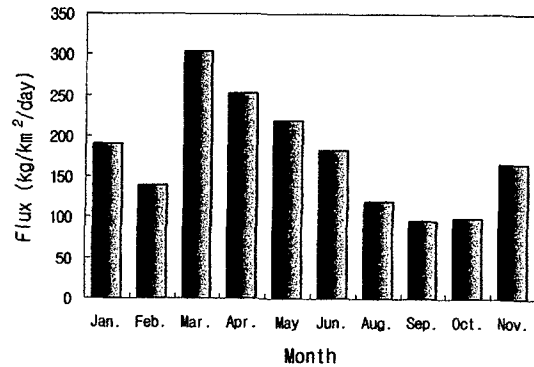


Fig. 3. Monthly variation of fall-out particles in the study area in 1996.

Table 1. Monthly fall-out particles fluxes statistics in 1996.

Month	No. of Samples	Flux (kg/km ² /day)					
		AM	ASD	GM	GSD	Min.	Max.
Jan.	34	190.4	58.2	182.5	1.34	100.8	323.8
Feb.	35	138.2	51.5	129.6	1.44	45.8	293.7
Mar.	35	303.5	65.9	297.3	1.22	179.6	508.9
Apr.	35	253.0	61.0	246.3	1.26	154.4	395.3
May	34	219.0	93.2	201.8	1.49	113.0	460.9
Jun.	35	182.6	58.7	174.0	1.36	97.8	316.7
Aug.	35	120.0	83.0	100.4	1.77	41.9	405.7
Sep.	35	96.0	47.0	86.0	1.60	36.8	213.1
Oct.	33	98.6	62.9	80.0	1.97	16.1	263.0
Nov.	29	166.4	88.0	145.5	1.70	49.7	418.0
Total	340	176.8	93.5	151.3	1.17	16.1	508.9

AM = arithmetic mean; ASD = arithmetic standard deviation
GM = geometric mean; GSD = geometric standard deviation

$$k = 1 + \frac{\log n}{\log 2} \quad (1)$$

여기서, k 는 등급의 수이며, n 은 측정수이다. 또한, 등급의 간격 w 는 측정치의 범위를 등급의 수로 나누면 구할 수 있다. 이와 같은 방식으로 강하분진 시료를 등급화하면 등급의 수는 10개 ($k=9.41$), 등급의 간격은 $50 \text{ kg/km}^2/\text{day}$ ($w=49.3$)가 적당한 것으로 계산되었다. 가장 높은 빈도분포를 보이는 침착량 범위는 $100 \sim 150 \text{ kg/km}^2/\text{day}$ 로 총 340개 시료 중 81개로 23.8%를 차지하였으며, $50 \sim 100$, $150 \sim 200 \text{ kg/km}^2/\text{day}$ 침착량 범위도 각각 17.1, 17.4%로 높은 빈도분포를 나타냈다. $450 \text{ kg/km}^2/\text{day}$ 이상의 높은 침착량은 3월과 5월에 관찰되었다. 빈도분포의 비대칭 정도를 나타내는 비대칭도(skewness)는 0.61로 오른쪽으로 꼬리가 긴 양의 비대칭분포(positively skewness)를 나타냈으며, 분포의 뾰족한 정도를 알 수 있는 첨도(kurtosis)는 -0.08 로 정규분포곡선과 매우 유사한 모습을 보였다. 침착량의 구성비는 불용성 성분이 56.6%, 수용성 성분이 43.4%를 차지하고 있어, 각 성분의 강하분진 총량에 대한 기여도는 유사한 것으로 분석되었다.

3.2 무기원소의 침착량 분포

무기원소 12개 항목(Al, Ba, Cd, Cr, K, Pb, Sb, Zn, Cu, Fe, Ni, V)의 침착량은 수용성 성분과 불용성 성분을 합산한 것이며, 35개 지점의 산술평균값을 표 2에 제시하였다. 무기원소 중 높은 침착량을 보인 원소는 Fe, Al, K으로, 평균침착량은 각각 3.107, 1.871, 1.464 $\text{kg/km}^2/\text{day}$ 였다. 또한, Ba 0.565, Zn 0.274, Sb 0.164, Pb 0.092, V 0.092 $\text{kg/km}^2/\text{day}$ 로 비교적 높은 평균 침착량을 기록하였다. 반면, Cu 0.049, Ni 0.041, Cr 0.034, Cd 0.003 $\text{kg/km}^2/\text{day}$ 로 낮은 평균 침착량으로 조사되었다.

각 무기원소에 대하여 월별 침착량의 변화경향이 유사한 양상을 보이는 항목을 그룹화하여 그림 4에 나타냈다. Fe, Al, K, V 그룹은 봄철인 4월에 침착량이 높았으며, 대체적으로 10월까지 감소하다가 11월부터 다시 증가하는 경향을 나타냈다. Fe은 4월 $5.595 \text{ kg/km}^2/\text{day}$ 로 최대 침착량을 보였으며, 10월까지 감소한 후 11월에는 급격히 증가하였다. Al은 4월 $4.917 \text{ kg/km}^2/\text{day}$ 로 최대 침착량을 보였으며, 10

월까지 대체적으로 감소추세를 보이고 있으나 8월에 일시적 증가를 보였다. K은 4월 $2.254 \text{ kg/km}^2/\text{day}$ 로 최대 침착량을 보였으며, 10월까지 감소하다 11월부터 다시 증가하는 추세를 나타냈다. V은 4월과 11월 0.275 , $0.315 \text{ kg/km}^2/\text{day}$ 로 높은 침착량을 기록하였다. Fe, Al, K은 토양기원 성분으로서(Finlayson Pitts and Pitts, 1986), 황사, 토양의 해빙, 식물개화에 의한 화분 비산 등의 영향으로 봄철의 침착량이 높게 나타났다. V은 주로 미세분진의 기름관련 오염원에서 배출되는 원소지만, 강하분진 내에서는 토양 성분과 유사한 거동을 보였다.

Pb, Cu, Ni 그룹은 1월과 3월에 높은 침착량을 보였다. Pb는 1월 $0.211 \text{ kg/km}^2/\text{day}$ 로 다른 달에 비해 월등히 높았으며, 2월에 급격히 감소하다 3월에 다시 증가하여 11월까지 감소하는 경향이 나타났다. Cu는 1월과 3월 각각 0.107 , $0.123 \text{ kg/km}^2/\text{day}$ 로 침착량이 높았으며, 4월부터 10월까지 감소추세를 보인 후 11월에 약간 증가하는 것으로 나타났다. Ni은 1, 3, 4월 각각 0.070 , 0.074 , $0.081 \text{ kg/km}^2/\text{day}$ 로 높은 침착량을 기록하였으며, 9월까지 감소추세를 보이다가 10월부터 약간 증가하는 경향을 보였다. Pb, Cu, Ni 그룹은 난방 등으로 인한 유류소비가 많은 겨울철인 1월에 높은 침착량을 보이고 있으나, 같은 겨울철인 2월의 침착량은 1월에 비해 상대적으로 낮았다. 이것은 2월의 강수량이 4.4 mm 로 1월의 강수량 22.2 mm 에 비해 매우 적어, 침착량이 낮아진 것으로 사료된다.

Ba, Sb, Cr 그룹은 3월과(Sb 제외) 10월에 높은 침착량 경향을 보였으며, 6월에 최소값을 나타냈다. Ba은 3월과 10월 각각 1.252 , $1.299 \text{ kg/km}^2/\text{day}$, Cr은 3월과 10월 각각 0.089 , $0.073 \text{ kg/km}^2/\text{day}$ 로 높은 침착량을 보였으며, 6월에 가장 낮은 침착량이 나타나는 쌍극분포를 형성하였다. Sb은 6월의 일시적 감소를 보이는 것 외에는 1월에서 10월까지 증가하다가 11월에 다시 감소하는 경향을 보였다. Ba, Sb, Cr 그룹이 높게 조사된 3월과 10월의 강수량은 각각 64.3 , 69.1 mm 로 다른 달에 비해 많은 강수량을 기록하였다. 특히, 10월의 기상현상은 연구기간 중 최대 강수량과 최저풍속(0.9 m/s)을 기록하여 다른 달과 상이한 양상을 띄고 있다. 따라서, Ba, Sb, Cr 그룹은 강수량과 같은 기상현상의 영향을 많이 받는 것으로 여겨진다.

Table 2. Arithmetic mean fluxes of each inorganic element in 1996.

(unit : kg/km²/day)

	Al	Ba	Cd	Cr	K	Pb	Sb	Zn	Cu	Fe	Ni	V
Jan.	1.777	0.428	0.005	0.022	1.206	0.211	0.012	0.243	0.107	4.193	0.070	0.051
Feb.	1.668	0.204	0.001	0.039	1.126	0.091	0.043	0.162	0.034	3.319	0.014	0.020
Mar.	2.375	1.252	0.002	0.089	1.746	0.146	0.094	0.258	0.123	4.111	0.074	0.088
Apr.	4.917	0.404	0.005	0.016	2.254	0.126	0.089	0.303	0.065	5.595	0.081	0.275
May	2.692	0.328	0.002	0.021	1.593	0.110	0.170	0.479	0.032	3.063	0.027	0.030
Jun.	1.054	0.154	0.001	0.004	1.179	0.050	0.029	0.240	0.022	2.633	0.016	0.024
Aug.	1.824	0.552	0.004	0.019	1.029	0.050	0.156	0.191	0.022	2.093	0.017	0.036
Sep.	0.597	0.475	0.001	0.031	1.191	0.054	0.273	0.434	0.029	1.421	0.022	0.037
Oct.	0.653	1.299	0.005	0.073	1.163	0.043	0.577	0.199	0.016	0.891	0.049	0.049
Nov.	1.150	0.560	0.002	0.026	2.153	0.039	0.199	0.227	0.037	3.751	0.036	0.315
Mean	1.871	0.565	0.003	0.034	1.464	0.092	0.164	0.274	0.049	3.107	0.041	0.092

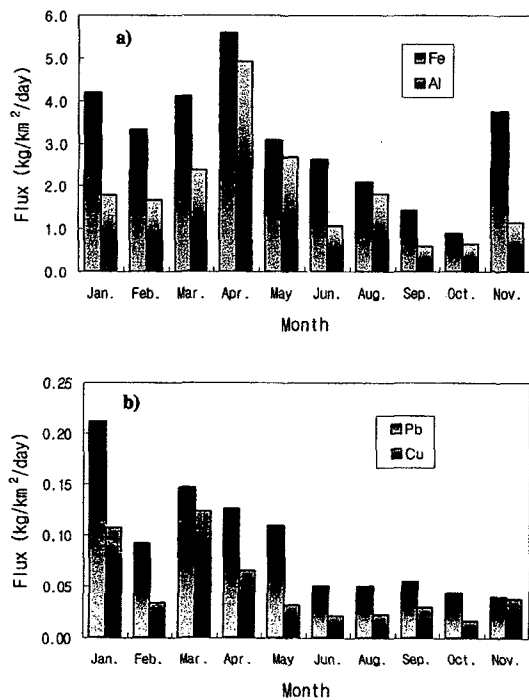


Fig. 4. Monthly variation of various inorganic elements in 1996.

Zn는 5월과 9월 각각 0.479, 0.434 kg/km²/day로 침착량이 높았으며, 2월에 최소 침착량을 나타냈다. Cd는 연구기간 동안 0.005 kg/km²/day 이하의 낮은 침착량을 나타낸 것으로 조사되었다.

무기원소의 침착량 중 수용성 성분이 차지하는 비율이 높은 원소는 Sb, Cd, Ba으로 각각 0.83, 0.78,

0.74의 비율을 보였다. Ni, Zn, V, K의 수용성 비율도 각각 0.67, 0.66, 0.66, 0.62로 비교적 높았으며, Cu는 0.53, Cr은 0.50, Pb는 0.44로 나타났다. Al과 Fe은 각각 0.26, 0.12로 매우 낮은 수용성 비율을 보였다.

3.3 이온성분의 침착량 분포

이온성분 8개 항목(F⁻, Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻, Na⁺, NH₄⁺, Mg²⁺, Ca²⁺)에 대한 침착량은 35개 지점의 산술평균값으로 표 3에 제시하였다. 이온성분 중 가장 높은 침착량을 보였던 성분은 SO₄²⁻로 평균침착량은 12.414 kg/km²/day였다. 또한, Ca²⁺ 7.368, NO₃⁻ 5.812, Cl⁻ 3.566, NH₄⁺ 3.176 kg/km²/day로 비교적 높았으며, Na⁺ 1.627, Mg²⁺ 0.679, F⁻ 0.228 kg/km²/day로 낮은 평균침착량을 나타냈다.

각 이온성분에 대하여 월별 침착량의 변화경향이 유사한 양상을 보이는 항목을 그룹화하여 그림 5에 나타냈다. 이온성분은 봄철인 3, 4월과 11월에 높은 침착량을 보였다. SO₄²⁻, NH₄⁺, F⁻ 그룹은 3월에 최대 침착량을 보인 후, 10월까지 감소하다 11월에 급격히 증가하는 경향을 보였다. SO₄²⁻와 NH₄⁺은 3월에 각각 22.384와 8.871 kg/km²/day로 가장 높았으며, 10월까지 감소한 후 11월에 급격히 증가하는 양상을 띠었다. F⁻도 3월 0.434 kg/km²/day로 최대, 10월까지 감소, 다시 11월 0.357 kg/km²/day로 급격히 증가하였다.

Cl⁻, Na⁺, Mg²⁺ 그룹은 3월과 11월에 침착량이 높았으며, 여름철에 최소값을 나타냈다. Cl⁻는 3월과 11월 각각 6.857, 6.579 kg/km²/day로 높은 침착량을

Table 3. Arithmetic mean fluxes of each ionic component in 1996. (unit : kg/km²/day)

	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
Feb.	0.220	3.663	3.593	10.651	1.602	2.464	0.460	4.339
Mar.	0.434	6.857	6.548	22.384	3.175	8.871	0.866	9.636
Apr.	0.262	3.227	8.227	18.022	1.058	3.890	0.695	12.780
May	0.197	2.979	-	14.175	0.884	3.940	0.560	6.402
Jun.	0.230	1.409	-	9.822	0.608	2.075	0.429	5.889
Aug.	0.069	1.362	5.466	4.923	1.660	1.537	0.433	5.369
Sep.	-	-	-	-	0.858	1.343	0.563	5.288
Oct.	0.058	2.449	3.557	4.407	0.867	1.117	0.618	4.733
Nov.	0.357	6.579	7.484	14.926	3.930	3.343	1.482	11.873
Mean	0.228	3.566	5.812	12.414	1.627	3.176	0.679	7.368

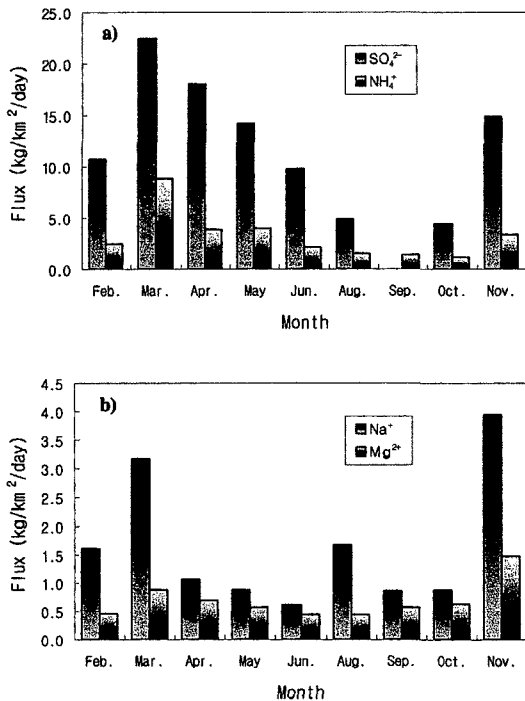


Fig. 5. Monthly variation of various ionic components in 1996.

보였다. Na⁺은 3월 3.175 kg/km²/day, 11월 3.930 kg/km²/day로 높은 침착량을 보였으며, 6월 0.608 kg/km²/day로 최소를 나타냈다. Mg²⁺은 3월 0.866 kg/km²/day로 높은 침착량을 보였으며, 6월까지 감소하다가 11월 1.482 kg/km²/day로 최대침착량을 보일 때까지 점진으로 증가하였다.

Ca²⁺과 NO₃⁻ 그룹은 4월과 11월에 높은 침착량

을 보였다. Ca²⁺은 4월 12.780 kg/km²/day로 최대 침착량을 기록하였으며, 10월까지는 점진적으로 감소하다 11월에 급격히 증가하는 양상을 나타냈다. NO₃⁻의 자료는 결측치로 인해 전반적인 침착량의 경향 파악은 어려웠으며, 4월과 11월 각각 8.227, 7.484 kg/km²/day로 높은 침착량을 보였다.

강하분진양을 100%로 설정하였을 때, 측정된 화학성분의 총량은 24.1%을 차지하였다. 또한 전체 측정항목을 100%로 설정하였을 때, 각 측정항목의 질량분율은 SO₄²⁻와 Ca²⁺이 각각 29.1%, 17.3%로 전체 측정항목의 절반 가량을 차지했으며, NO₃⁻ 13.6%, Cl⁻ 8.4%, NH₄⁺ 7.5%, Fe 7.3%, Al 4.4%의 비율을 차지하였다.

3.4 강하분진 및 화학성분의 공간분포 분석

지리정보 시스템의 공간분석법 중 하나인 kriging 기법을 이용하여 강하분진 침착량의 공간분포 분석을 수행하였으며, 그림 6에 강하분진의 분포도를 나타냈다. 내삽관측법에 있어서 비교적 최근의 수리통계학적 기법인 kriging 기법은 Matheron (1971)에 의해 개발되었으며, 가중치를 이용하여 미지점의 농도를 예측하는 방법으로 기본수식은 다음과 같다.

$$\hat{Y} = \sum_{i=1}^m \lambda(Y_i) \tag{2}$$

여기서, λ = kriging 가중치

\hat{Y} = 추정 flux

Y_i = 측정된 flux

λ는 주변의 농도값들에 의해 Gaussian 분포, logarithmic 분포, exponential 분포 등의 분포특성을 가

지며, 분포특성은 평균, 거리, 분산 등과 같은 통계치에 의해 결정된다. 따라서, 연속공간에서 특정한 분포특성을 갖는 통계치를 최우선으로 파악해야 하며, 본 연구에서는 거리만을 독립변수로 사용하였다. 만약 λ 에 대한 확률분포함수를 $Z(X_i)$ 라고 한다면, 특정지점에 대한 추정농도의 함수는 지점 X_i 와 X_k 간의 거리 h 로 표현된 확률분포특성을 가질 수 있다. 즉,

$$Z(X_i), \dots, Z(X_k) = f(Z(X_i+h), \dots, Z(X_k+h)) + E(Z(X_i), \dots, Z(X_k)) \quad (3)$$

여기서, $E(Z(X))$ 는 변이도(variogram)이며, 확률분포함수의 오차항이다. 만약 X_1 지점과 X_2 지점간의 거리를 h 라 한다면, 변이도는 $Z(X_1)$ 과 $Z(X_2)$ 의 공분산(covariance)으로 표현될 수 있다. 또한, 변이도의 함수로 표현되는 준변이도(semi-variogram)는 비편중추정자(unbiased estimator)로 주어진 응용조건에 따라 여러 가지 모델로 설명할 수 있으며, 본 연구

에서는 kriging 기법에서 보편적으로 사용되고 있는 spherical model을 사용하였다. 준변이도 함수인 spherical model은 식 4와 같다. 여기서, C 와 a 는 상수이다.

$$Y(h) = C \left[\frac{3}{2} \frac{|h|}{a} - \frac{1}{2} \frac{|h|^3}{a^3} \right] \quad (|h| \leq a)$$

$$Y(h) = C \quad (|h| > a) \quad (4)$$

Kriging 기법은 환경분야에서 산성우의 공간적 분포 및 대기에서 SO_x 와 NO_x 의 분포 등에 적용된 바 있으며(Akula, 1988), 최근에는 강하분진 내 금속 원소의 침착량 추정에 우수한 기법으로 알려져 있다(윤훈주와 김동술, 1997). 공간분석 소프트웨어인 Sufer 5.02 (Golden Software)를 이용하였으며, 격자형의 31개 지점을 대상으로 하여 연구기간의 평균침착량을 입력치로 사용하였다.

강하분진은 수원시의 남쪽과 남동쪽을 중심으로 높은 침착량 분포를 보였다. 수원시 남쪽의 높은 침

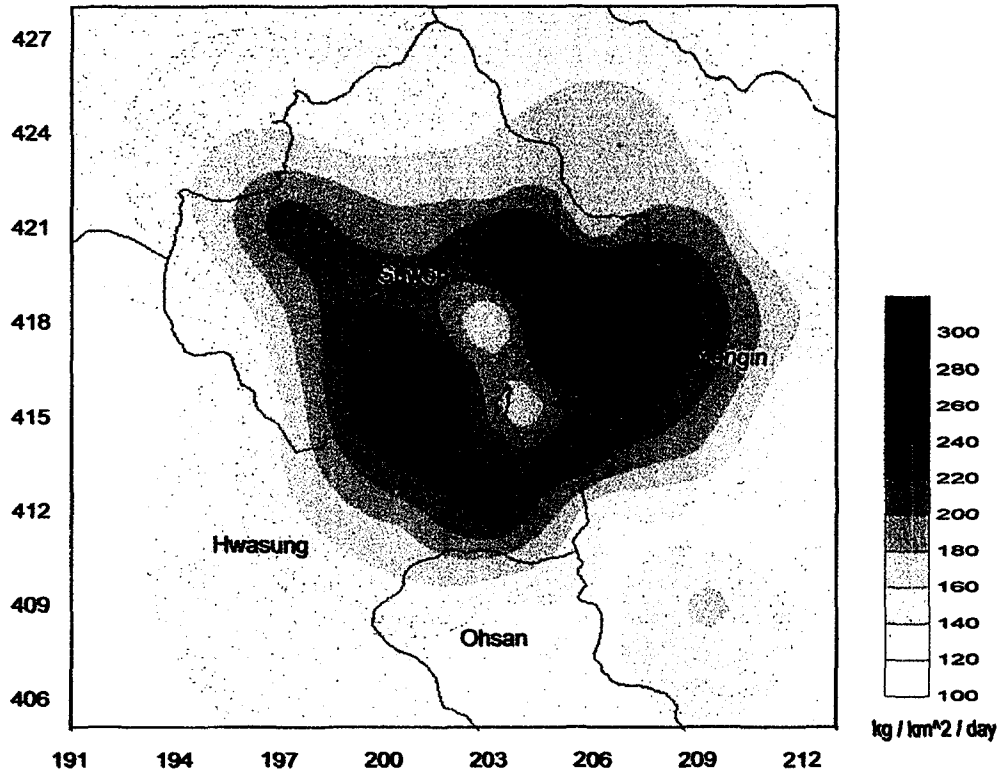


Fig. 6. Spatial distribution of fall-out particles in the study area.

착량은 넓게 분포되어 있는 눈, 발 및 각종 공장의 영향 때문인 것으로 사료되며, 수원시 남동쪽은 대규모 주택단지사업 및 인근 공업지역의 영향으로 높은 침착량을 보였다. 특히, 수원시 남동쪽에 위치한 특정지점의 침착량은 319.8 kg/km²/day로 31개 지점 중 가장 높게 나타나 이 지점을 중심으로 강하분진 저감대책이 요구된다.

연구지역 중 수원시를 대상으로 하여 강하분진의 침착량 분포는 21개 등급, 화학성분은 11~16개의 등급으로 구분하였다. 등급의 수는 각 등급이 차지하는 넓이가 일정 등급에 치우치지 않도록 조정하였다. 강하분진 및 화학성분의 침착량 범위, 등급의 간격, 등급의 수, 평균침착량, 총침착량을 표 4에 제시하였다. 각 등급이 차지하는 넓이는 Paint Shop Pro 5.0 (Jasc Software) 및 Image Tool 1.25 (The University of Texas Health Science Center in San Antonio)를 이용하여 계산하였다. 즉, 각 등급이 차지하는 공간을 차례로 분리하여 화소(pixel)수를 측정하였으며, 일련의 과정을 거쳐 전체화소수를 구하였다. 각 등급의 화소수를 전체 화소수로 나누어 각 등급이 차지하는 분율을 산정하였으며, 여기에 수원지역 넓이 121.22 km²를 곱하여 수원지역의 넓이로 환

산하였다. 등급의 중앙값과 등급이 차지하는 면적을 곱하여 등급의 침착량을 구하였으며, 각 등급의 침착량을 모두 합하여 수원시의 총침착량을 산출하였다. 평균침착량은 총침착량을 수원시의 넓이로 나누어 구하였다. 수원시의 강하분진 총침착량은 8,424.72 t/y로 나타났으며, 평균침착량은 190.4 kg/km²/day로 연구지역의 평균침착량인 176.8 kg/km²/day보다 다소 높게 나타났다. 수원시에 높은 총침착량을 보이는 화학성분은 SO₄²⁻, Ca²⁺, NO₃⁻, Cl⁻, Fe로 각각 519.27, 336.79, 267.34, 155.36, 147.79 t/y로 나타났다.

4. 결 론

본 연구는 수원지역을 대상으로 강하분진 중 화학성분의 침착량 및 화학적 조성을 파악하고, 지리정보시스템을 이용하여 강하분진 및 화학성분의 공간분포를 분석함으로써 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

첫째, 강하분진의 평균 침착량은 176.8 kg/km²/day로 나타났으며, 토양비산 등의 영향으로 인해 봄철에 높은 침착량을 보였다. 측정된 화학성분 중 높은

Table 4. Spatial distribution of measured species flux in Suwon city.

	Flux Range (kg/km ² /day)	Class Interval (kg/km ² /day)	No. of Class	Mean Flux (kg/km ² /day)	Total Flux (ton/year)
Particle	110.0~320.0	10.00	21	190.409	8,424.72
Al	1.50~2.70	0.10	12	1.943	86.98
Ba	0.40~0.74	0.03	12	0.545	24.13
Cd	0.0015~0.0085	0.0005	14	0.003	0.14
Cr	0.018~0.054	0.003	12	0.033	1.45
K	1.06~2.18	0.08	14	1.438	63.64
Pb	0.075~0.130	0.005	11	0.091	4.04
Sb	0.09~0.25	0.01	16	0.162	7.16
Zn	0.22~0.52	0.02	15	0.302	13.37
Cu	0.035~0.095	0.005	11	0.055	2.43
Fe	2.00~7.50	0.50	11	3.340	147.79
Ni	0.026~0.062	0.003	12	0.042	1.86
V	0.040~0.105	0.005	13	0.071	3.14
F ⁻	0.06~0.38	0.02	16	0.185	8.21
Cl ⁻	2.40~5.60	0.20	16	3.511	155.36
NO ₃ ⁻	4.20~7.50	0.30	11	6.042	267.34
SO ₄ ²⁻	7.00~20.00	1.00	13	11.736	519.27
Na ⁺	0.80~2.20	0.10	14	1.474	65.23
NH ₄ ⁺	1.00~7.50	0.50	13	2.654	117.44
Mg ²⁺	0.40~1.05	0.05	13	0.647	28.64
Ca ²⁺	3.00~19.00	1.00	16	7.612	336.79

침착량을 보였던 성분은 SO_4^{2-} , Ca^{2+} , NO_3^- , Cl^- , NH_4^+ , Fe로 각각 12.414, 7.368, 5.812, 3.566, 3.176, 3.107 kg/km²/day였다. 무기원소 중 Fe, Al, K, V 그룹은 4월에, Pb, Cu, Ni 그룹은 1월에, Ba, Sb, Cr 그룹은 3월과 10월에 높은 침착량을 보였으며, 이온성분은 봄철인 3월과 4월에 높은 침착량을 보였다.

둘째, 지리정보 시스템의 공간분석법을 이용하여 강하분진의 공간분포를 파악할 수 있었으며, 강하분진과 화학성분의 수원시 총침착량을 산출할 수 있었다. 수원시의 강하분진 총침착량은 8,424.72 t/y였으며, 화학성분은 SO_4^{2-} 519.27, Ca^{2+} 336.79, NO_3^- 267.34, Cl^- 155.36, Fe 147.79 t/y로 나타났다.

본 연구를 토대로 강하분진에 대한 연구시 고려해야 할 사항으로는 포집효율, 재비산, 외류를 고려한 포집기의 신뢰도 검증 등을 들 수 있다. 이와 함께 건식, 습식, 건·습식형태의 강하분진 동시측정을 통한 각 침착형태의 특성, 포집기간 동안의 화학적 변환, 기상자료의 영향에 대한 연구도 이루어져야 할 것이다. 이러한 연구개선 대책의 수행을 통해 우리나라 지형 및 기후에 적합한 강하분진 공정시험법 제정 및 규제방안이 요구된다.

사 사

본 연구는 삼성전자(주)의 SAMP(Suwon Aerosol Monitoring Program)의 일환으로 수행되었으며, 이에 도움을 주신 임직원께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 김성천, 김동술(1996) 한국에서 분진 및 금속원소의 건식 침착속도 추정에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 12(1), 101-112.
- 심상규(1996) 우리나라 산성비 특성과 감시망 현황, 첨단 환경기술, 4(8), 2-9.
- 윤일홍, 이시영(1997) 현대통계학, 삼영사, 382-384pp.
- 윤훈주, 김동술(1997) GIS를 이용한 강하분진 중 금속원소의 공간분포분석, 한국대기보전학회지, 13(6), 463-474.
- Akula, V. (1988) On the use of kriging in the spatial analysis of acid precipitation data, Atmospheric Environment, 22, 1963-1975.
- Brauser, M., P. Koutrakis, G.J. Keeler, and J.D. Spengler (1991) Acidic aerosol, Journal of the Air and Waste Management Association, 41, 171-181.
- Christakos, G. and G.A. Thesing(1993) The intrinsic random field model and its application in the study of sulfate deposition data, Atmospheric Environment, 27, 1521-1540.
- Geigert, M.A., N.P. Nikoladis, D.R. Miller, and J. Heitert (1994) Deposition rates for sulfur nitrogen to a hardwood forest in Northern Connecticut, U.S.A., Atmospheric Environment, 4, 2633-2640.
- Knotkova, D. and K. Barton(1992) Effect of acid deposition on corrosion of metals, Atmospheric Environment, 26, 3169-3177.
- Matheron, G. (1971) *The Theory of Regionalized Variables and Its Applications*, Ecole des mines de Paris : Fontainebleau, France.
- Meyers, T.P., B.B. Hicks, R.P. Hosker, J.J. Womack, and L.C. Satterfield (1991) Dry deposition inferential measurement techniques II : Seasonal and annual deposition rates of sulfur and nitrate, Atmospheric Environment, 25, 2361-2370.
- Parkhurst, D.F. (1998) Arithmetic versus geometric means for environmental concentration data, Environmental Science & Technology, 32(3), 92-98.
- Pitts, F.B.J. and J.N. Pitts (1986) *Atmospheric Chemistry*, John Willy & Sons, New York, 783-786pp.
- Pruppacher, H.R., R.G. Semonin, and W.G. Slinn (1983) *Vol I. precipitation scavenging, dry deposition, and re-suspension*, Elsevier Science Publishers, New York, 729pp.
- Smirioudi, V.N. and P.A. Siskos (1992) Chemical composition of wet and dust deposition in Athens, Greece, Atmospheric Environment, 26B, 483-490.
- Vyas, V.M. and G. Christakos (1997) Spatiotemporal analysis and mapping of sulfate deposition data over eastern U.S.A., Atmospheric Environment, 31, 3623-3633.