

강하분진의 침적 특성파악을 위한 통계학적 해석과 공간분포 분석

A Statistical Analysis and Spatial Distribution Analysis for Deposition Characteristics of Fall-out Particles

주 재 희 · 황 인 조*

대구대학교 환경공학과

(2012년 2월 1일 접수, 2012년 3월 9일 수정, 2012년 4월 5일 채택)

Jae-Hee Ju and InJo Hwang*

Department of Environmental Engineering, Daegu University

(Received 1 February 2012, revised 9 March 2012, accepted 5 April 2012)

Abstract

The objective of this study is to estimate the chemical compositions and to identify qualitative sources of fall-out particles in study area. Also, this study used a spatial analysis to estimate spatial distributions and average deposition flux. In this study, the chemical compositions of fall-out particle samples collected at Muncheon lake from May 2010 to January 2011 were analyzed by ICP and IC. The monthly trend of deposition fluxes for fall-out particles showed highest in June (107.61 kg/km²/day) and lowest in October (22.22 kg/km²/day). The average fluxes of Fe, Si, Al, Zn and Ba are 0.44, 0.24, 0.20, 0.17, 0.09 kg/km²/day, respectively. Also, the average fluxes of NO₃⁻, SO₄²⁻, NH₄⁺, Ca²⁺, and Na⁺ are 6.48, 5.01, 4.96, 1.75, 1.37 kg/km²/day, respectively. A Factor analysis identified four sources such as 1) nonferrous metal, motor vehicle, and agriculture, 2) soil, 3) field burning, incineration, and 4) road dust and oil burning. The IDW (inverse distance weighting) spatial analysis method was used to estimate spatial distribution and average deposition flux for fall-out particles. A total average deposition fluxes estimated in Muncheon lake were 936.15 kg/month. The spatial distribution trend of deposition flux showed higher at site 1 and 2 than at site 3, 4 because local road is adjacent to the site 1 and 2.

Key words : Fall-out particle, Deposition flux, Factor analysis, Spatial analysis, Inverse distance weighting

1. 서 론

대기 중으로 배출된 각종 오염물질들은 기상조건

에 따라 확산 및 이동하면서 최종적으로 지표면으로 침적(deposition)하게 된다. 대기 중에 존재하는 입자상 물질의 입자 크기는 매우 다양하며, 강하분진은 입자의 크기와 관계없이 여러 요인에 의해 최종적으로 지표면으로 침적되는 입자상 물질을 의미한다. 일반적으로 침적은 대기 중의 대기오염물질이 지표면

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)53-850-6695, E-mail : ihwang@daegu.ac.kr

과 수계 표면으로 이동하는 모든 과정을 의미하며 건식(dry) 및 습식(wet) 침적으로 분류한다(Sakata *et al.*, 2008; Valigura *et al.*, 1996).

강하분진은 자체 하중 또는 강수에 흡수되어 결국 지상으로 낙하하지만 대기 중에 존재할 때 대기질과 수질에 영향을 미칠 수 있으며, 인체에 미치는 영향은 PM₁₀ 및 PM_{2.5} 등에 비해 적지만 인간이 느끼는 체감오염과 관련이 매우 크다고 할 수 있다(삼성전자, 1997). 강하분진에는 여러 성분들이 포함되어 있는데 그중에서도 호소, 토양 및 산림 생태계를 산성화시키는 산성물질들의 강하가 현재 여러 나라에서 문제가 되고 있으며, 강하분진의 침적 연구에 대한 관심은 침적된 다양한 오염물질이 환경에 미치는 여러 영향 때문에 꾸준히 증가하고 있다(Dolislagar *et al.*, 2012; Sakata *et al.*, 2008; Balestrini *et al.*, 2000; Noll *et al.*, 1990). 강하분진과 강하분진에 포함된 다양한 오염물질들의 침적은 대기 중 입자상 물질의 농도 변화에 직접적으로 관련이 있으며, 이러한 침적은 대기 중 입자상 물질의 확실한 제거 과정이지만 반면 토양, 호소, 그리고 해양 생태계의 산성화 및 부영양화에 잠재적으로 영향을 미치는 중요한 2차 오염 과정이기도 하다(Inomata *et al.*, 2009; Caffrey *et al.*, 1998).

강하분진의 습식 침적(wet deposition)은 강수에 의한 대류권 강하분진의 제거 과정을 의미한다. 즉, 강하분진이 강우, 안개, 응축 등에 의해 지표면으로 이동하여 제거되는 과정이다. 습식 침적은 rain-out과 wash-out으로 구분할 수 있는데, rain-out은 구름 내에서 입자가 응축핵으로 작용하여 입자로서의 형태가 소실되어 대기 중으로부터 제거되거나 가스상 오염물질인 경우는 구름입자에 흡수 및 흡착되어 제거되는 과정을 의미하며, wash-out은 비 또는 눈 등의 강하 시 충돌, 간섭, 흡수 및 흡착 등에 의해 오염물질이 제거되는 과정을 의미한다(Inomata *et al.*, 2009; Sopauskiene and Budvytyte, 1994; Jaenicke, 1988). 반면에 건식 침적(dry deposition)은 대기 중 가스상, 입자상 오염물질이 직접 지표면과 수계 표면으로 이동하는 것을 의미한다. 건식 침적은 입자의 브라운 운동, 중력 침강, 확산, 충돌 과정 등에 의해 발생한다. 또한 대기 중 오염물질의 건식 침적은 기상 조건과 지역적 오염물질의 배출 특성 등에 큰 영향을 받는다(Sabin and Schiff, 2008; Tammet *et al.*, 2001; Wesely and Hicks, 2000).

일반적으로 총 침적물(total deposition)은 습식 및 건식 강하물을 총칭한다. 대기 중으로 배출되는 황산화물 및 질소산화물 등은 강수에 의한 습식 침적으로 제거되거나 입자상물질로 변환되어 건식 침적으로 제거되기도 한다. 대기 중 오염물질의 침적 연구는 산성우, 시정, 오염물질의 장거리 이동 연구, 지역적 규모에서의 오염물질 저감 정책의 효율 검증 등에서 기본이 되는 연구 분야이다. 또한, 대기 중 오염물질이 지표면 및 수계에 침적되어 토양, 수계 및 동식물 생태계와 재산상에 미치는 영향을 파악하는 연구도 필수적으로 수행되어야 할 연구 분야이다(Sakata *et al.*, 2008; Wai *et al.*, 2005; Balestrini *et al.*, 2000; Karakas and Tuncel, 1997).

본 연구에서는 연구지역(호수)으로 유입되는 강하분진 및 강하분진에 포함되어 있는 무기원소와 이온성분의 습식 및 건식 침적량을 파악하고자 하였다. 또한 침적량 자료를 이용한 통계학적 분석을 통하여 강하분진의 오염원 추정 및 공간분포 분석을 통하여 강하분진의 공간적 침적 분포 및 침적량을 파악하고자 하였다.

2. 연구방법 및 내용

2.1 시료채취 및 분석방법

강하분진의 침적 특성파악을 위하여 대구대학교 인근에 위치한 문천지 호수를 4개의 구역으로 나누어 각 지점마다 강하분진 채취기(deposition gauge)를 설치하였으며, 그림 1에 채취 장소의 위치를 나타내었다.

강하분진의 채취를 위해 개조된 영국식 강하분진 채취기(British deposition gauge)를 자체 제작하였다. 강하분진 채취기는 개구면의 직경이 30.0cm(706.9cm²)인 깔때기와 5L PVC 용기를 연결하여 철제 basket에 고정한 것으로 난류의 영향을 최소화하기 위하여 1.5m 지지대 위에 설치하였다. 깔때기는 폴리에틸렌(polyethylene) 재질이며, 깔때기 상부에는 새, 곤충, 낙엽 등에 의한 이물질의 유입을 방지하기 위하여 격자 크기가 0.5cm인 스테인레스 스틸(stainless steel) 재질의 그물망을 덮고 스프링을 이용하여 망과 깔때기를 basket에 고정시켰다. 강하분진의 채취기간은 1개월 간격으로 매월 5일을 기준으로 매회 30±1일 동안 대기 중에 노출시켰으며, 기상상태 및

채취기의 이상 유무는 수시로 점검하였다. 시료채취는 건성 강하물과 습성 강하물을 동시에 채취하는 일괄 채취법(bulk sampling method)으로 하였으며, 강하

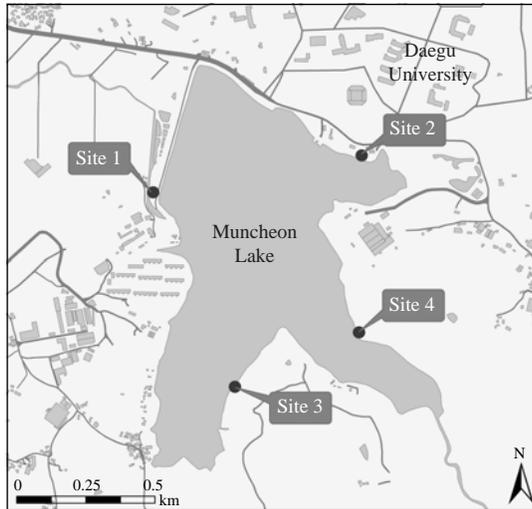


Fig. 1. Location of the sampling sites for fall-out particles.

분진 시료는 수거 즉시 분석을 실시하였고, 강수량이 많았던 장마철에는 PVC 용기가 넘치기 전에 용기를 교체 후 수거하여 분석 전까지 4°C에 냉장 보관하였다. 시료의 채취는 2010년 5월 5일~2011년 1월 5일까지 8개월 동안 진행하였으며, 4곳의 측정장소에서 총 32개의 시료를 채취하였다. 연구기간 중 강수가 있을 때는 총 침적으로, 강수가 없을 때는 건식 침적으로 간주하였으나, 모든 채취기간 중 강수가 있어 건식 침적 연구는 수행되지 않았다.

강하분진 시료의 모든 분석과정을 그림 2에 나타내었다. 강하분진 시료는 이물질 제거 후 용기 벽면과 바닥에 부착된 분진을 분리수거하기 위하여 증류수를 수회 분출하여 완전히 수거하였다. 강하분진 시료를 불용성과 수용성으로 분류하기 위하여 진공 펌프를 이용한 여과장치에 막여지(membrane filter, pore size 1.0 μm, diameter 47 mm, GF/B, Whatman Co.)를 사용하여 진공 흡입 여과하였으며, 여지상의 잔류물은 불용성으로, 여액은 수용성으로 분류하였다. 막여지는 여과 전에 25°C, 40%의 항온, 항습 조건하에서 최소 72시간 방치한 후 칭량하였다.

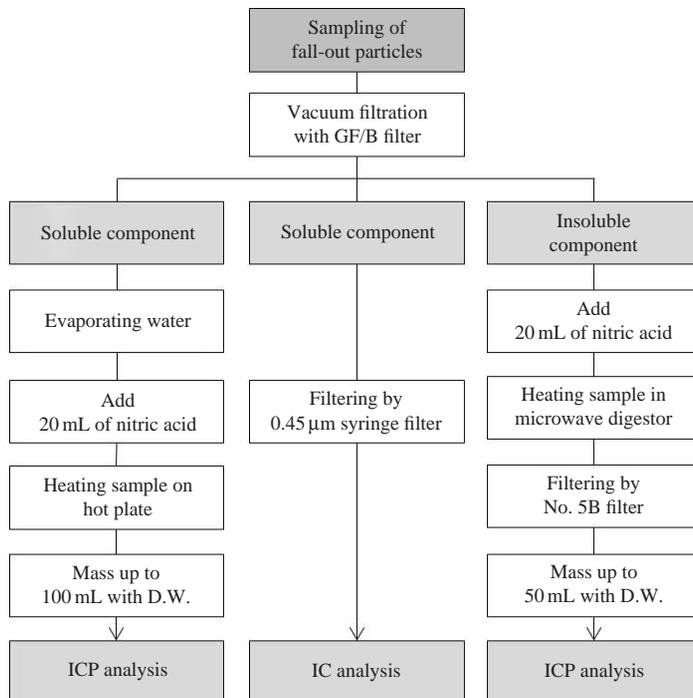


Fig. 2. Procedure of analytical method for elemental and ionic species.

여지상의 불용성 성분은 건조오븐(dry oven) 내에서 완전히 건조시키고 데시케이터(desiccator) 내에서 충분히 방냉한 후 0.01 mg의 감도(sensitivity)를 가진 전자저울(model CPA-225D, Sartorius)로 칭량하여 무게의 전·후 차로 불용성 성분의 양을 계산하였다. 여지를 통과한 수용성 성분은 여액 중 100 mL를 분취하여, 가열판(hot plate) 위에서 수용액을 증발시켰으며, 건조오븐 내에서 완전히 건조시킨 후 방냉하여 칭량하였다. 수용성 성분의 침적량은 분취한 100 mL 내의 수용성 성분의 양을 메스실린더(mess cylinder)로 측정할 시료의 총액 양으로 환산하여 산출하였다(Kim *et al.*, 1999). 칭량을 마친 시료는 이물질의 유입을 방지하기 위해 즉시 무기원소와 이온 성분 분석을 위한 전처리 작업을 수행하였다. 강하분진의 총 침적량은 불용성 성분의 침적량과 수용성 성분의 침적량을 합산하여 계산하였다.

강하분진의 무기원소 중 불용성 성분의 전처리 방법으로는 미국 EPA에서 1992년 고시한 CWA(Clean Water Act)의 microwave 전처리장치(Model Q-15 MicroPrep, USA, Questron Co.)를 사용한 질산 전처리법을 수행하였고(USA EPA, 2011a), 수용성 성분의 전처리 방법으로는 시계 접시법을 이용하였다. 전처리가 끝난 시료는 ICP(Direct Reading Echelle ICP, LEEMAN Co.)를 사용하여 Al, Ba, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Si, Ti, V, Zn 등 총 13개 항목에 대한 분석을 수행하였다. 또한 수용성 이온 성분의 농도를 분석하기 위하여 IC(Model DX-500, Dionex Co., USA)를 이용하였다. 여과된 수용성 성분을 폴리에틸렌 병(Nalgene Co.)에 담아 분석 시까지 4°C의 냉암소에 보관하였으며, 시린지 여지(syringe filter, pore size 0.45 µm, Pall Co.)로 여과한 후 Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} , Na^+ , NH_4^+ 등 총 8개 항목을 분석하였다.

2.2 통계학적 분석방법

강하분진 중 무기원소 및 이온성분 자료를 이용하여 강하분진의 오염원을 추정하기 위하여 다변량 통계분석 기법 중 인자분석(factor analysis)을 이용하였다. 인자분석은 상관(혹은 공분산)행렬의 구조에 관한 통계적 모형을 구축하고 그와 같은 구조를 생성시키는 소수의 인자를 유도하여 이들을 해석하는 변수들 간의 공분산 내지 상관 중심의 통계기법이다. 변수들 중의 일부가 상관계수라는 척도를 통해 그룹화

가 가능하다면 변수들 사이의 복잡한 구조는 단순화시킬 수 있다. 그룹이라 함은 그룹 내의 변수들은 높은 상관관계, 다른 그룹의 변수들은 상대적으로 낮은 상관성을 가지도록 변수들을 집단화하는 개념이다.

인자분석의 기본적인 논리는 상관계수에서부터 출발한다. 각 상관계수의 제곱값을 구하여 1차로 공통인자를 구하고 이 공통인자를 기초로 다시 2차 공통인자를 구한다. 이러한 과정을 반복함으로써 최적의 상태에 이르게 되면 반복의 과정을 멈추고 공통인자가 구해진다. 인자의 개수를 고정시킨 상태에서 초기 인자패턴행렬을 인자에 대한 해석이 쉬운 단순한 구조로 변경시키기 위해서 인자의 회전(rotation)단계를 거쳐야 한다(Hwang and Kim, 1998).

2.3 공간분석(spatial analysis)

강하분진 및 강하분진에 포함된 각 화학성분의 공간분포를 분석하기 위하여 공간분석을 수행하였다. 공간분석법 중 가장 널리 사용되는 방법은 거리반비례평균법(inverse distance weighting; IDW), kriging법, 다항회귀분석법(polynomial regression analysis) 등이 있으며, 이러한 공간분석법들은 다양한 환경분야 연구에 사용된 바 있다(Kim and Hwang, 2009). 전술한 바와 같이 공간분석법 중 일반적으로 널리 사용되는 IDW 방법과 kriging 방법 중에서 본 연구의 경우는 IDW 방법을 사용하였는데, 그 이유는 위치정보가 많을 경우 kriging법이 더 좋은 결과를 나타내는 것으로 알려져 있지만, 본 연구와 같이 측정 장소의 수가 적을 경우는 두 가지 방법의 결과가 큰 차이가 없기 때문이다(Ju and Hwang, 2011).

각각의 시료채취 장소에서 측정된 강하분진 자료를 바탕으로 미측정 장소(unsampled location)의 농도값을 추정하여 각 농도값들의 공간적 패턴(또는 공간적 분포)을 파악하기 위하여 IDW 방법을 이용하였으며, 이에 대한 자세한 내용은 다음의 문헌을 참고할 수 있다(Ju and Hwang, 2011; Kim and Hwang, 2009).

3. 결과 및 고찰

3.1 총 강하분진의 침적

강하분진 시료 채취장소에서 2010년 5월부터 2011년 1월까지 채취한 강하분진의 월별 불용성 및 수

용성 침적량과 총 침적량(불용성+수용성 침적량), 표준편차, 최소, 최대 침적량을 표 1에 나타내었다. 총 32개 시료에 대한 평균 강하분진 총 침적량은 56.89 kg/km²/day로 조사되었다. 연구기간 중 총 강하분진의 6월 평균 침적량은 107.61 kg/km²/day로 연구기간 중 가장 높은 침적량을 나타내었으며 특히, site 1에서는 6월 총 강하분진 침적량이 130.64 kg/km²/day로 조사되어 가장 높은 침적량을 나타내었다. 반면에 10월의 경우에는 22.22 kg/km²/day로 연구기간 중 가장 낮은 침적량으로 조사되었고, site 4에서는 17.17 kg/km²/day로 연구기간 중 가장 낮은 침적량을 나타내었다. 총 침적량은 5월 및 6월에 높은 침적량을 나타내었으며, 장마철과 10월까지의 감소하다가 11월부터 증가하는 경향을 보이고 있다. 이러한 결과는 기상조건 특히, 강수량이 총강하분진의 침적량에 영향을 미치는 것으로 사료된다(그림 3). 즉, 여름 장마철의 많은 강수

량이 대기 중 입자상물질의 제거 메커니즘으로서 큰 영향을 미칠 뿐만 아니라 강하분진의 총침적량에도 영향을 주는 것을 의미한다. 그러나 본 연구의 경우, 일반적으로 강수량이 많았던 7, 8, 9월의 경우는 침적량이 작았지만 강수량이 연구기간 중 가장 적었던 11월(4 mm)의 경우는 5, 6월 등에 비해 상대적으로 침적량은 작은 것으로 조사되었다(그림 3). 이러한 원인의 파악을 위해서는 추후 지속적인 연구가 필요한 것으로 사료된다.

강하분진의 총 침적량 중 불용성 성분의 비율은 5, 6, 11, 12월에 50% 이상(57.3~62.1%)을, 반면에 7, 8, 9, 10월에는 50% 이하(24.3~38.3%)인 것으로 조사되었다. 7~10월은 다른 달에 비해 상대적으로 강수량이 많았으며, 불용성 성분의 토양 성분이 상대적으로 적게 침적되었기 때문으로 사료된다. 특히, 8월의 경우에는 수용성 성분의 비율이 75.7%인 것으로 조사되었는데, 8월은 연구기간 중 가장 많은 강수량(292.5 mm)을 나타내었다. 이러한 결과는 삼성전자(1997)의 결과와 비교하여 8월을 제외하고 유사한 분율을 나타내었다.

Table 1. Summary of the monthly fall-out particles fluxes at four different sampling sites.

Month	Flux (kg/km ² /day)					
	Insoluble	Soluble	Total	S.D.	Min.	Max.
May	53.85	36.88	90.73	18.30	71.30	107.00
June	62.01	45.60	107.61	16.22	93.64	130.64
July	16.74	32.57	49.31	7.52	39.62	56.53
Aug.	14.37	44.73	59.10	8.04	51.39	68.55
Sep.	11.08	23.03	34.11	9.73	19.84	41.47
Oct.	8.52	13.70	22.22	6.05	17.17	30.16
Nov.	30.10	18.37	48.47	23.19	26.20	70.19
Dec.	24.97	18.62	43.59	15.98	20.52	57.05
AVG.	27.70	29.19	56.89	13.13	42.46	70.20

3.2 무기원소 및 이온성분의 침적

연구기간 동안 각 채취장소에서 채취된 강하분진 중 무기원소 13개 항목(Al, Ba, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Si, Ti, V, Zn)의 평균 침적량(불용성+수용성)을 표 2에 나타내었다. 또한 각 무기원소에 대한 월별 평균 침적량의 변화 경향이 유사한 항목들을 그룹화하여 그림 4에 나타내었다. 무기원소 중 높은 침적

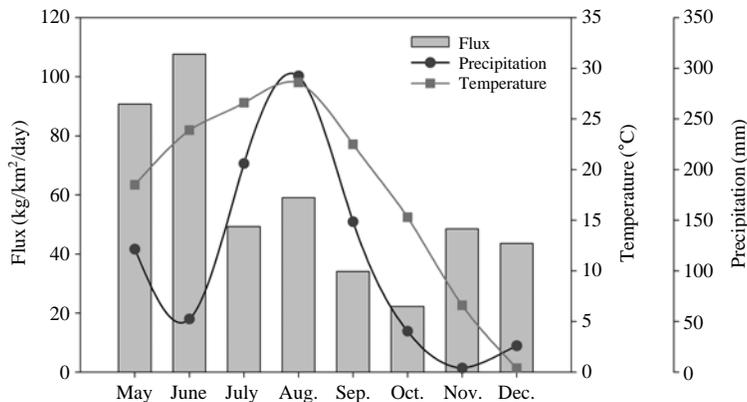


Fig. 3. Comparison of monthly average flux, precipitation, and temperature in the sampling areas.

Table 2. The monthly average fluxes of inorganic species in sampling sites. (unit: kg/km²/day)

Month	Al	Ba	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Si	Ti	V	Zn
May	0.618	0.393	0.003	0.040	0.015	1.196	0.053	0.048	0.034	0.568	0.011	0.002	0.273
June	0.124	0.057	0.002	0.042	0.008	0.565	0.039	0.009	0.018	0.218	0.004	0.003	0.201
July	0.090	0.087	0.014	0.067	0.025	0.248	0.025	0.062	0.030	0.175	0.086	0.014	0.326
Aug.	0.265	0.095	0.061	0.146	0.038	0.674	0.089	0.067	0.137	0.412	0.142	0.070	0.271
Sep.	0.066	0.053	0.008	0.013	0.009	0.126	0.011	0.090	0.033	0.196	0.003	0.022	0.098
Oct.	0.051	0.009	0.001	0.008	0.004	0.081	0.013	0.020	0.008	0.087	0.001	0.006	0.114
Nov.	0.088	0.010	0.003	0.004	0.004	0.360	0.016	0.001	0.009	0.100	0.005	0.002	0.037
Dec.	0.275	0.019	0.008	0.005	0.008	0.247	0.033	0.003	0.020	0.128	0.005	0.013	0.056
AVG.	0.197	0.090	0.013	0.041	0.014	0.437	0.035	0.037	0.036	0.236	0.032	0.016	0.172
S.D.	0.191	0.127	0.020	0.048	0.012	0.369	0.026	0.034	0.042	0.169	0.053	0.023	0.110

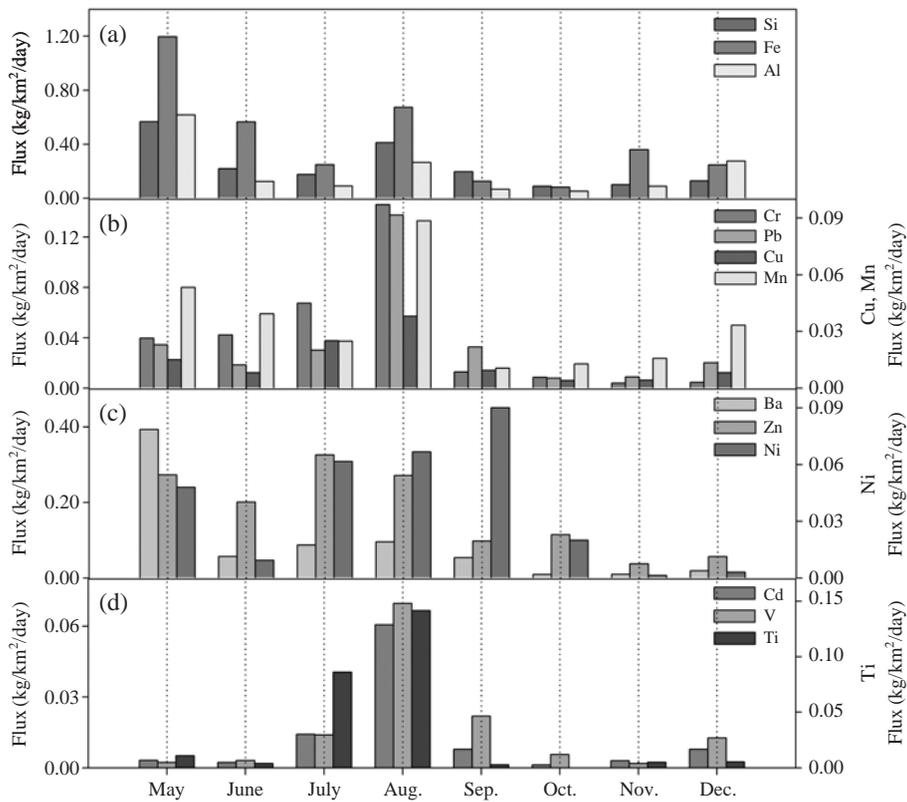


Fig. 4. Monthly average flux of elemental species in the sampling areas.

량을 보이는 원소는 Fe > Si > Al > Zn > Ba 등의 순으로, 연구기간 평균 침적량은 각각 0.44, 0.24, 0.20, 0.17, 0.09 kg/km²/day로 조사되었다. 그림 4(a)의 Si, Fe, Al 등은 봄철인 5월에 가장 높은 침적량(0.57, 1.20, 0.62

kg/km²/day)을 나타내었는데, 이들 원소는 지각원소로 알려져 있으며 봄철의 황사 및 강한 바람에 의한 먼지의 비산 등에 의한 영향으로 판단된다. 그림 4(b)의 Cr, Pb, Cu, Mn 등은 8월에 가장 많은 침적량(각

Table 3. The monthly average fluxes of ionic species in sampling sites. (unit: kg/km²/day)

Month	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺
May	1.14	4.83	4.30	2.62	1.39	0.39	1.72	5.74
June	0.91	5.09	5.35	1.54	0.57	0.20	1.26	5.64
July	1.36	10.43	7.53	1.22	0.69	0.24	1.66	6.61
Aug.	1.29	14.32	9.02	2.10	1.25	0.47	3.02	9.88
Sep.	1.25	7.31	4.85	1.20	0.54	0.28	0.55	5.95
Oct.	0.96	3.51	2.83	1.38	1.24	0.39	0.53	2.11
Nov.	1.34	2.11	3.05	1.61	0.81	0.27	0.88	1.85
Dec.	1.82	4.22	3.16	2.34	0.64	0.37	1.33	1.92
AVG.	1.26	6.48	5.01	1.75	0.89	0.33	1.37	4.96
S.D.	0.28	4.06	2.24	0.54	0.35	0.09	0.81	2.83

각 0.15, 0.14, 0.04, 0.09 kg/km²/day)을 나타낸 후 가을철에는 감소하는 경향을, 그리고 12월에는 다시 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이러한 결과는 이전 연구 결과(Kim *et al.*, 1999)와 다른 경향을 보이고 있는데, 이 항목들의 경우는 수용성 성분이 불용성 성분에 비해 높은 침적량을 나타내고 있으며 상대적으로 강수량이 많았던 8월에 Cr, Pb, Cu, Mn을 포함한 많은 양의 분진이 강우세정된 결과로 사료된다. 추후 입자상물질(PM₁₀ 및 PM_{2.5})에 집중적인 연구 및 이에 대한 오염원의 확인 등과 같은 연구가 병행되어 진행되어야 할 것으로 사료된다. 그림 4(c)의 Ba는 5월에 0.39 kg/km²/day로 가장 높은 침적량을 나타내었으며 12월까지 거의 일정한 침적량을 나타내는 것으로 조사되었다. 기름 연소에 의해 주로 배출되는 Ni의 경우는 5, 7, 8, 9월 등이 높은 침적량을 나타내었으며, 이에 대한 오염원 확인이 시급한 것으로 판단된다. 마지막으로, 그림 4(d)의 Cd, V, Ti 등의 경우는 연구기간 동안 전반적으로 매우 낮은 침적량을 나타내었지만 8월의 경우는 상대적으로 높은 침적량을 나타내는 것으로 조사되어 그림 4(b)의 항목들과 동일한 원인인 것으로 사료된다. 무기원소의 수용성 성분 전체 평균은 73.1%로 조사되었는데, 주로 토양기원 원소들인 Fe (31.4%), Al (57.7%), Si (67.2%), Ti (67.3%) 등이 낮은 수용성 비율을 나타내었다. 반면에 인위적 오염원에서 주로 배출되는 Ni, Cd, V 등은 각각 89.9%, 86.9%, 84.6%로서 높은 수용성 비율을 나타내었다. 이러한 결과는 삼성전자(1997)의 연구 결과와 유사한 결과이며, 무기원소의 월별 수용성 성분의 경우도 전술한 바와 같이 강하분진의 총 침적

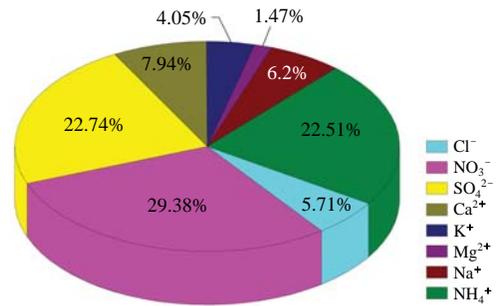


Fig. 5. Total average flux of ionic species during the sampling periods.

량 중 수용성 비율 결과와 동일한 원인으로 사료된다. 즉, 강수량이 상대적으로 많았던 7~10월의 경우는 무기원소 중 수용성 성분이 더 높은 것으로 조사되었다.

강하분진 중 수용성 이온성분의 4개 측정 지점에 대한 월별 평균 침적량을 표 3에 나타내었다. 수용성 이온성분의 침적량 분포는 NO₃⁻ > SO₄²⁻ > NH₄⁺ > Ca²⁺ > Na⁺의 순이며, 평균 침적량은 각각 6.48, 5.01, 4.96, 1.75, 1.37 kg/km²/day로 조사되었다. 수용성 이온 성분 중 많은 침적량을 나타내고 있는 NO₃⁻, SO₄²⁻, NH₄⁺의 경우는 8개 수용성 이온성분의 침적량에서 약 75% (각각 29.4%, 22.7%, 22.5%) 정도를 차지하는 것으로 조사되었다(그림 5). 또한 강수량이 가장 많았던 8월에 가장 높은 침적량을 보였으며, 가을철에는 감소 후 12월에는 다시 증가하는 경향을 나타내었다. SO₄²⁻의 경우는 7월과 8월에 각각 7.53, 9.02 kg/km²/day의 침적량으로서, 화석연료의 연소 등에 의해 배출된 SO₂가 광화학 반응에 의하여 H₂SO₄로 변환되어 SO₄²⁻를 생성하기 때문으로 사료된다(US EPA, 1999). NO₃⁻ 역시 여름철(7월과 8월에 10.43, 14.32 kg/km²/day의 침적량)에 높은 침적량을 나타내었는데, 일반적으로 NO₃⁻의 경우는 기온이 낮고 습도가 높은 겨울철에 농도가 증가한다고 알려져 있다(Hwang and Kim, 1998). 이러한 결과는 겨울철에 대한 충분한 시료의 부족 및 인접 오염원의 배출에 직접적으로 영향을 받기보다는 장거리 이동에 의한 영향으로 사료되며 지속적인 연구가 필요할 것으로 판단된다. 다음으로 Ca²⁺, K⁺, Mg²⁺의 경우는 이온성분 전체 침적량 중 각각 7.9%, 4.0%, 1.5%를 차지하는

것으로 조사되었으며, 주로 5월에 높은 침적량을 나타내는 것으로 조사되었다. Ca^{2+} , K^+ 의 경우는 봄철(최대 침적량 5월 2.62, 1.39 kg/km²/day)에 높은 침적량을 나타내었는데, 토양 기원 원소 및 불법 소각 등에 의한 것으로 사료된다. 마지막으로 Na^+ 와 Cl^- 는 이온성분 전체 침적량 중 각각 6.2%와 5.7%를 차지하는 것으로 조사되었다. 월별 침적량의 경우 특별한 변화없이 일정한 침적량을 나타내었지만 Na^+ 의 경우는 가을철(최소 침적량 10월 0.53 kg/km²/day)이 다른 계절에 비해 상대적으로 낮은 침적량을 나타내는 것으로 조사되었다.

3.3 다변량 통계분석

연구기간 동안 채취한 강하분진 중 각 항목들 사이의 연관성을 파악하고 동질의 변화성(common variability)을 갖는 변수들을 그룹화하여 본 연구지역의 주요 오염패턴을 분류하기 위하여 인자분석을 수행하였다. 최적의 인자 수를 결정하기 위하여 고유치(eigenvalue), 누적 기여율 등을 고려하여 고유치 1.0 이상, 누적 기여율이 70% 이상에서 최적의 인자 수를 4개로 결정하였다. 인자분석의 적합성 여부를 판단하기 위하여 sphericity 값과 KMO (Kaiser-Meyer-Olkin) 값을 사용하였으며, 각각 921.8, 0.66로 계산되어 적합한 분석임이 통계적으로 확인되었다(Hwang and Kim, 1998). 인자에 대한 해석이 용이한 구조로 변경시키기 위해 Varimax 직교회전을 수행하여 인자 부하량을 산출하였으며, 그 결과를 표 4에 나타내었다. 각 인자들은 동일 오염원에서 배출된 강하분진의 생성 특성을 반영하는 것으로, 특정 오염원의 영향을 대변할 수 있다.

첫 번째 인자의 경우 Cd, Ti, Cr, NO_3^- , V, SO_4^{2-} , Pb, Cu, Mn, NH_4^+ , Na 등과 같은 항목이 높은 인자 부하량을 나타내었다. 따라서 인자-1의 경우는 비철 금속 관련 산업 활동, 자동차(경유 및 휘발유 차량), 축산 및 농업 활동 등에서 배출된 것으로 추정하였다. 인자-1의 경우는 여러 오염원이 독립된 인자로 분리되는 것이 바람직하지만 하나의 인자로 분류되었다. 이러한 이유는 입력된 변수 수에 대하여 상대적으로 측정된 자료의 수가 적기 때문으로 사료되며, 장기간에 걸친 연구의 진행을 통해 충분한 자료의 수를 확보하면 좀 더 정확한 인자분석 즉, 연구지역의

Table 4. The result of factor loadings using factor analysis for 21 species.

	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4
Cd	0.952	0.051	0.154	-0.067
Ti	0.914	0.034	0.088	0.140
Cr	0.907	0.226	0.004	0.225
NO_3^-	0.901	-0.011	0.104	0.314
V	0.899	-0.073	0.174	-0.091
SO_4^{2-}	0.815	0.043	0.108	0.363
Pb	0.764	0.130	0.025	0.154
Cu	0.736	0.279	-0.074	0.250
Mn	0.723	0.548	0.227	-0.120
NH_4^+	0.716	0.145	0.207	0.481
Na^+	0.539	0.249	0.390	0.247
Fe	0.124	0.909	0.093	0.039
Al	-0.006	0.891	0.194	0.037
Ba	-0.052	0.805	0.058	0.430
Si	0.410	0.713	0.043	0.042
Mg^{2+}	0.284	0.146	0.870	-0.110
Ca^{2+}	0.020	0.476	0.782	-0.138
Cl^-	-0.023	-0.218	0.717	0.079
K^+	0.139	0.261	0.679	0.109
Zn	0.255	0.241	-0.034	0.805
Ni	0.499	-0.029	0.013	0.609

Implication	Nonferrous metal motor vehicle agriculture	Soil	Field burning incineration	Road dust oil burning
-------------	--	------	----------------------------	-----------------------

강하분진 농도에 기여하는 다양하고 정확한 오염원의 확인이 가능할 것으로 판단된다. Cd, Ti, Cr, V, Cu, Mn 등은 비철금속 관련 산업 활동 오염원, NO_3^- , SO_4^{2-} , Pb 등은 자동차 관련 오염원에서 배출된 것으로 분류하였다(US EPA, 2011b; US EPA, 1999; Hopke, 1985). 그리고 NH_4^+ 의 경우는 농약 및 질소 비료 등에 다량 함유되어 있으며, 토양에 시비되면 탈질작용 등에 의해 대기 중으로 배출되는 것으로 알려져 있어(Han *et al.*, 1997) 축산 및 농업 활동 등에서 배출된 것으로 분류하였다. 상기의 오염원들은 본 연구지역 근처의 경산 제1산업단지외 주변 축산농가 및 경작지에 의한 영향으로 사료된다.

두 번째 인자의 경우는 Fe, Al, Ba, Si 등이 높은 인자 부하량을 나타내는 것으로 조사되었다. 이러한 성분들은 대표적인 토양 기원 성분들로서, 인자-2는 토양 오염원으로부터 배출된 강하분진으로 추정하였다.

인자-3의 경우는 Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- , K^+ 등이 높은 인자 부하량을 나타내어 불법 소각 및 소각에 의한 오

염원으로 결정하였다. 이러한 성분들은 해염(sea salt)의 주요 성분(Hopke, 1985)이지만 연구지역이 내륙이며, 해염의 가장 중요한 성분인 Na^+ 가 제외되어 소각 관련 오염원으로 결정하였다. 연구지역의 특성상 봄철 및 겨울철(늦은 가을 포함)에 생체 소각(biomass burning) 등이 빈번하며 이러한 영향으로 사료된다.

마지막 인자의 경우는 Zn, Ni 등의 항목이 높은 인자 부하량을 나타내어 도로먼지 및 기름연소에 의한 배출로 추정하였다. 시료채취 지역에 인접한 지방도로 및 고속도로를 주행하는 자동차의 타이어 마모에 의해 Zn가 주로 배출되는 것으로 사료되며(US EPA, 1999), Ni은 V과 더불어 기름 연소에 의해 배출되는 것으로 알려져 있다(Hwang and Hopke, 2011).

3. 4 공간분포 분석

연구대상 지역의 강하분진 공간분포 특성 및 평균 침적량을 파악하기 위하여 연구대상 지역 4개 지점에서 조사된 강하분진의 월별 침적량 자료를 이용하여 연구지역 근처의 미측정 지점의 침적량을 추정하는 공간분포 분석을 수행하였다. 공간분석은 대표적인 지리정보 시스템(GIS: geographic information system) 프로그램인 ArcGIS(ver. 9.3, ESRI Inc.)를 이용하였으며, 거리반비례평균법(IDW: inverse distance weighting)으로 계산된 각 항목들의 침적량 분포도를 수치 지도에 중첩시켜 공간분석을 수행하였다(Ju and Hwang, 2011).

공간분포 분석은 연구지역인 호수의 수면 1.304 km^2 를 공간분포 분석 대상지역으로 설정하고, 강하분진의 침적량을 9개의 등급으로 나누어 각 등급이 차지하는 분율, 넓이, 침적량 등을 계산하였다. 즉, 각 등급이 차지하는 넓이는 Photoshop(ver. CS3, Adobe Inc.)을 이용하였는데, 각 등급이 차지하는 영역의 화소(pixel) 수를 전체 화소수로 나누어 각 등급의 분율을 산정하고 공간분포 분석 대상지역의 넓이를 곱하여 환산하였다. 다음으로 각 등급의 중앙값과 등급이 차지하는 면적을 곱하여 각 등급의 침적량을 계산하였으며, 각 등급의 침적량을 모두 합하여 연구지역의 강하분진 총 침적량을 계산하였다(Kim *et al.*, 1999). 연구기간 동안의 무기원소 및 이온성분들에 대한 평균 침적량을 그림 6에 제시하였으며, 강하분진의 평균 침적량 분포 및 등급의 간격, 각 등급의 분율과

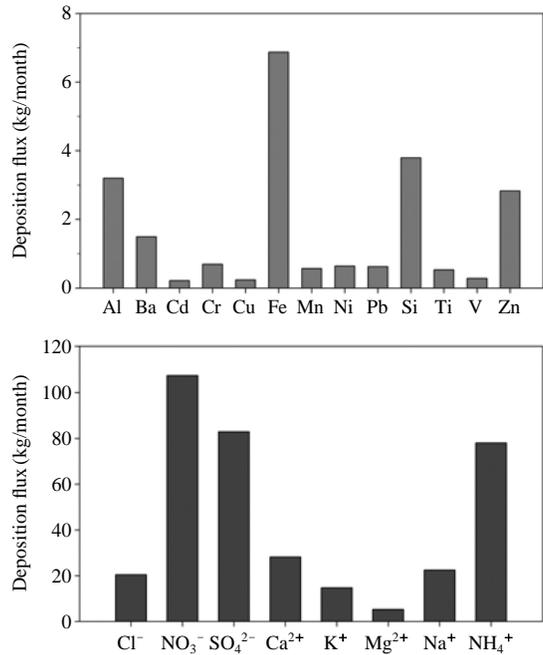


Fig. 6. Deposition flux of elemental species and ionic species on the Muncheon Lake using the spatial analysis.

면적, 그리고 평균 침적량을 표 5와 그림 7에 나타내었다.

무기원소의 경우에 높은 침적량을 나타내는 성분은 Fe, Si, Al, Zn, Ba 등으로, 각각 6.87, 3.80, 3.20, 2.83, 1.50 kg/month의 침적량을 나타내었다. 또한 이온성분의 경우는 무기원소의 침적량에 비해 매우 높은 침적량을 나타내는 것으로 조사되었는데, 특히 NO_3^- , SO_4^{2-} , NH_4^+ 등이 각각 107.52, 82.94, 78.03 kg/month로서 다른 이온성분들에 비해 높은 침적량을 나타내었다. 연구기간 동안 연구지역인 호수로 강하하는 강하분진의 평균 총 침적량은 936.15 kg/month로 계산되었다. 월별 침적량의 경우는 6월과 5월이 각각 1808.91, 1527.43 kg/month로 계산되어 다른 월에 비해 높은 침적량을 나타내었다. 한편 10월에는 381.75 kg/month로서 침적량이 가장 적었던 것으로 조사되었다. 강하분진의 침적량은 site 3과 4에 비해 site 1과 2에서 상대적으로 높은 침적량을 나타내었다. 이러한 결과는 연구기간 동안의 주풍향은 북동풍이 우세하며, site 1과 2는 차량 통행이 빈번한 지방도로와

Table 5. Spatial distributions classified by flux range for fall-out particles on the Muncheon Lake.

Flux range (kg/km ² /day)	Ratio (%)	Area (km ²)	Total flux (kg/month)
0.00~7.27	6.45	0.0841	9.47
7.28~14.55	15.20	0.1983	67.09
14.56~21.82	28.85	0.3762	212.12
21.83~29.09	23.52	0.3067	242.04
29.10~36.36	12.92	0.1685	170.98
36.37~43.64	7.46	0.0973	120.70
43.65~50.91	3.83	0.0500	73.28
50.92~58.18	1.22	0.0160	26.99
58.19~65.46	0.54	0.0070	13.48
Total	100	1.304	936.15

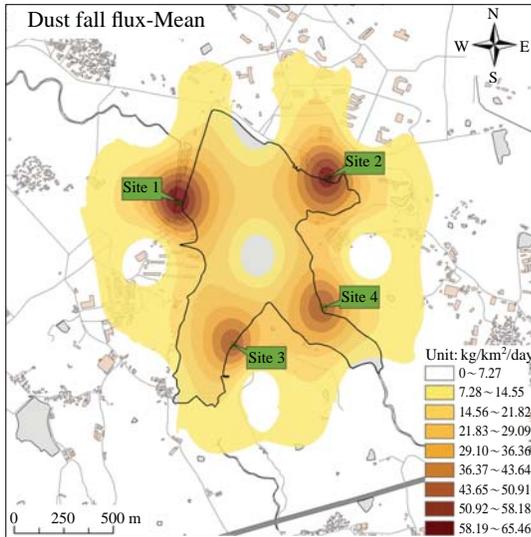


Fig. 7. Spatial distribution of average deposition flux for fall-out particles on the Muncheon Lake.

바로 인접해 있어 비산먼지의 영향을 많이 받는 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 연구지역인 호수로 유입되는 강하분진 및 강하분진에 포함된 화학 성분들에 대한 침적량을 파악하고자 강하분진 채취기를 이용하여 2010년 5월부터 2011년 1월까지 강하분진을 채취하였다.

또한 분석된 자료를 다변량 통계분석을 이용하여 강하분진의 오염원을 추정하고자 하였으며, 공간분포 분석을 이용하여 강하분진의 공간적 침적 분석 특성과 침적량을 파악하고자 하였다. 본 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

연구기간 중 총 강하분진의 침적량은 6월에 가장 높은 침적량(107.61 kg/km²/day)을, 10월에는 가장 낮은 침적량(22.22 kg/km²/day)을 나타내는 것으로 조사되었다. 강하분진의 계절별 침적량 변화 경향은 봄철>여름철>겨울철>가을철의 순으로 조사되었다. 강하분진에 포함된 무기원소 중 높은 침적량을 보이는 원소는 Fe, Si, Al, Zn, Ba 등으로 조사되어, 주로 토양 기원의 원소들이 높은 침적량을 나타내었다. 또한 수용성 이온성분의 경우는 무기원소에 비해 상대적으로 높은 침적량을 나타내었는데 NO₃⁻, SO₄²⁻, NH₄⁺, Ca²⁺, Na⁺ 등이 높은 침적량을 나타내는 것으로 조사되었다.

분석된 자료를 다변량 통계분석인 인자분석을 이용하여 강하분진의 오염원을 파악하고자 하였다. 본 연구지역의 강하분진 오염원으로 비철금속 관련 산업 활동, 자동차, 축산 및 농업 활동 오염원, 토양 오염원, 불법 소각 및 소각 오염원, 도로먼지 및 기름연소 오염원 등으로 추정되었다.

강하분진의 공간분포 특성 및 침적량을 파악하기 위하여 공간분포 분석을 수행하였으며, 연구지역인 호수로 강하하는 강하분진의 평균 총 침적량은 936.15 kg/month로 계산되었다. 또한 site 3과 4에 비해 site 1과 2에서 상대적으로 높은 침적량을 나타내는 공간분포 특성을 보이고 있었다.

이러한 연구 결과는 향후 대기오염과 강하분진과의 상관성 연구 및 강하분진과 토양오염과의 상관성 연구 등과 같은 연구에 활용될 수 있을 것으로 생각된다. 또한 연구대상 지역이 호수라는 점 때문에 향후 호수로 유입되는 강하분진에 의한 수질오염 저감 및 관리방안을 마련하는 데 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2010년 경북녹색환경지원센터 환경기술 연구개발사업 지원 과제 (과제 번호: 10-2-30-33-6) 및

2011년도 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 기본연구지원사업 지원과제(과제 번호: 2010-0023344)의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 삼성전자(1997) 수원지역 분진오염의 화학적 분석 및 발생원 조사, 경희대학교.
- Balestrini, R., L. Galli, and G. Tartari (2000) Wet and dry deposition at prealpine and alpine sites in northern Italy, *Atmospheric Environment*, 34, 1455-1470.
- Caffrey, P.E., J.M. Ondov, M.J. Zufall, and C.I. Davidson (1998) Determination of size-dependent dry deposition velocities with multiple intrinsic elemental traces, *Environ. Sci. Technol.*, 32(11), 1615-1622.
- Dolislagar, L.J., R. VanCuren, J.R. Pederson, A. Lashgari, and E. McCauley (2012) A summary of the Lake Tahoe atmospheric deposition study (LTADS), *Atmospheric Environment*, 46, 618-630.
- Han, K.W., J.Y. Cho, and Y.S. You (1997) Effect of diazinon application on ammonia volatilization in submerged incubation soil, *J. Korean Soc. Soil. Fert.*, 30(4), 328-333. (in Korean with English abstract)
- Hopke, P.K. (1985) Receptor Modeling in Environmental Chemistry, John Wiley & Sons, USA, pp. 267-314.
- Hwang, I.J. and D.S. Kim (1998) Studies on the chemical compositions and distributions of ambient submicron aerosols, *Journal of Korea Air Pollution Research Association*, 14(1), 11-23. (in Korean with English abstract)
- Hwang, I.J. and P.K. Hopke (2011) Comparison of source apportionment of PM_{2.5} using PMF2 and EPA PMF version 2, *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 5(2), 86-96.
- Inomata, Y., Y. Igarashi, M. Chiba, Y. Shinoda, and H. Takahashi (2009) Dry and wet deposition of water-insoluble dust and water-soluble chemical species during 2007 in Tsukuba, Japan, *Atmospheric Environment*, 43(29), 4503-4512.
- Jaenicke, R. (1988) Aerosol physics and chemistry, in Landolt-Bornstein Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology New Series Group V: Geophysics and Space Research, 4(b). Edited by G. Fischer, Springer, Berlin, 391-457.
- Ju, J.H. and I.J. Hwang (2011) A study for spatial distribution of principal pollutants in Daegu area using air pollution monitoring network data, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 27(5), 545-557. (in Korean with English abstract)
- Karakas, S.Y. and S.G. Tuncel (1997) Chemical characteristics of atmospheric aerosols in a rural site of northwestern Anatolia, *Atmospheric Environment*, 31(18), 2933-2943.
- Kim, H.S., T.J. Lee, and D.S. Kim (1999) Chemical compositions and spatial distribution analysis of fall-out particles in Suwon area, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 15(1), 23-32. (in Korean with English abstract)
- Kim, T.O. and I.J. Hwang (2009) The study for characteristics and spatial distribution of carbonyl compounds at electronic industrial complex, *Korean Journal of Odor Research and Engineering*, 8(4), 179-187. (in Korean with English abstract)
- Noll, K.E., P.F. Yuen, and K.Y.P. Fang (1990) Atmospheric coarse particulate concentrations and dry deposition fluxes for ten metals in two urban environments, *Atmospheric Environment*, 24A(4), 903-908.
- Sabin, L.D. and K.C. Schiff (2008) Dry atmospheric deposition rates of metals along a coastal transect in southern California, *Atmospheric Environment*, 42(27), 6606-6613.
- Sakata, M., Y. Tani, and T. Takagi (2008) Wet and dry deposition fluxes of trace elements in Tokyo Bay, *Atmospheric Environment*, 42(23), 5913-5922.
- Sopauskiene, D. and D. Budvytyte (1994) Chemical characteristics of atmospheric aerosol in rural site of Lithuania, *Atmospheric Environment*, 28(7), 1291-1296.
- Tammet, H., V. Kimmel, and S. Israelsson (2001) Effect of atmospheric electricity on dry deposition of airborne particles from atmosphere, *Atmospheric Environment*, 35(20), 3413-3419.
- U.S. EPA (1999) Air quality criteria for particulate matter, Volume I, EPA/600/P-99/002a.
- U.S. EPA (2011a) Federal Register Part III, 40 CFR Part 136, Guidelines establishing test procedures for the analysis of pollutants.
- U.S. EPA (2011b) SPECIATE ver. 4.3.
- Valigura, R.A., T.L. Winston, R.S. Artz, and B.B. Hicks (1996) Atmospheric nutrient input to coastal areas-reducing the uncertainties, NOAA Coastal Ocean Program Decision Analysis Series No. 9, NOAA Coastal Ocean Office, Silver Spring, MD.

- Wai, K.M., P.A. Tanner, and C.W.F. Tam (2005) 2-year study of chemical composition of bulk deposition in a south China coastal city: Comparison with east Asian cities, *Environ. Sci. Technol.*, 39(17), 6542-6547.
- Wesely, M.L. and B.B. Hicks (2000) A review of the current status of knowledge on dry deposition, *Atmospheric Environment*, 34, 2261-2282.