

필터팩을 이용한 춘천과 서울의 건성강하물의 농도 측정(1997)

김만구 · 박기준 · 강미희
강원대학교 환경학과

Measurement of Dry Deposition in Chunchon and Seoul by Using Filter Pack Method(1997)

Man Goo Kim, Ki Jun Park and Mi Hee Kang

Department of Environment Science, Kangwon National University
Hyoja-dong, Chunchon, Kangwon-do, 200-701, KOREA

Quantitative data on dry deposition fluxes and atmospheric concentration is need to evaluate patterns and trends in total deposition and to support model evaluation and ecosystem effect studies. In this study, atmospheric concentrations of acidic pollutants were measured by filter pack method at Chunchon and Seoul during January 1997 ~ December 1997. The sample was collected during 24 hours from wednesday 10 AM every week with 10 l/min of sample flow.

Dry deposition flux was calculated by using the reported deposition velocity of pollutant and measured concentration of pollutants. The dry deposition velocity used in this study for SO₂, SO₄²⁻, HNO₃, NO₃⁻ and NH₃ were 0.29 cm/s, 0.15 cm/s, 2.08 cm/s, 0.20 cm/s and 1.00 cm/s respectively. In Chunchon, annual sulfur flux originated from SO₄²⁻ and SO₂ were 632 kg/km². Deposition of SO₂ accounts for the majority of dry sulfur flux in Chunchon. Dry deposition of sulfur occupied 52% in total sulfur deposition in Chunchon. In Chunchon, annual nitrogen flux originated from NO₃⁻ and HNO₃ were 235 kg/km². Dry deposition of nitrogen occupied 50% in total sulfur deposition in Chunchon. In Seoul, annual nitrogen flux originated from NO₃⁻ and HNO₃ were 289 kg/km². Dry deposition of nitrogen occupied 37% in total sulfur deposition in Seoul.

Key words : filter pack method, dry deposition, flux, chemical composition, HNO₃, SO₂, NH₃, particulate matter, Chunchon, Seoul.

1. 서 론

산성 강하물은 대기로부터 배출된 오염물질이 강수에 의하여 지상으로 강하하거나 기체 혹은 입자 상태로 지상으로 강하하는 물질을 총칭한다. 발생원으로부터 배출된 대기중의 1차 오염물질은 배출 직후부터 확산, 충돌, 중력 침강에 의해 지표면의 토양, 식물, 지표수 및 건축물 등에 쌓이게 되며, 이러한 과정을 건성 강하라 일컫는다. 동시에 기상여건에 따라 수 km~수천 km까지 이동하면서 대기중에서 다양한 물리·화학적 과정을 통해서 2차 오염물질로 변환된다. 이렇게 발생된 대기중의 2차 오염물질은 건성 강하하거나, 구름이나 안개 생성시

내부로 녹아 들어가거나, 비가 내릴 때 녹아 들어가 구름, 안개, 비 중에 많은 양이 존재하며, 이러한 습성 강하의 형태로 다시 지표로 돌아와 쌓이는 과정을 통해 대기로부터 제거된다. 이러한 건성 강하와 습성 강하는 지표의 오염원으로부터 대기로부터 배출된 오염물질이 다시 지표로 돌아오는 주된 메커니즘이다. 이러한 산성 강하물은 대기중에서 지표면으로 내려와 식물, 하천수, 호수, 토양, 건축물 등에 영향을 주고 있다.¹⁾

토양, 호수, 대기 등 우리를 둘러싸고 있는 환경의 산성화에 대한 이해를 위해서는 빗물을 통한 습성 강하뿐 아니라 분진이나 가스상 물질의 의한 건성 강하에 대한 이해가 병행되어야만 한다. 이제까

지 비, 눈, 안개 등에 의해서 제거되는 습성 강하에 관해서는 많은 연구결과가 축적되어 어느 정도 연구방법이 규격화되어 생산된 결과를 비교할 수 있게 되었다. 그러나 건성 강하물은 총 강하물 중에서 N과 S의 경우 각각 0.3, 0.5 정도의 비중을 차지한다. 건성 강하물질들인 이들 기체상 및 입자상 산성물질은 산성비의 형성 및 pH 세기 그리고 빗물의 화학조성과 연관이 있다. 대기중의 기체 및 입자상의 산성물질의 농도는 또한 지역 배출원 자료와 매우 밀접한 연관을 갖고 있으며, 이러한 배경농도 자료는 그 지역의 배출원 자료와 함께 지역 규모 산성 강하량 예측모형 및 광화학 산화물 추정모형의 입력 자료로서도 유용하게 이용된다.

이러한 대기질 감시 자료 그 자체가 환경오염의 한 지표가 되고, 산성비 모델의 검증에도 필수적이기 때문에 외국에서도 건성 강하에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 미국과 캐나다는 1979년부터 1988년까지 NAPAP(National Acid Precipitation Assessment Program)을 통하여 필터팩을 이용하여 건성 강하에 대한 연구를 진행시켰으며 일본도 NASN(National Air Pollution Surveillance Network)을 통하여 지속적인 연구를 진행시키고 있다.²⁾

건성 강하량의 추정은 크게 세 가지 방법으로 나눌 수 있다. 첫째로 건성 오염물질의 농도와 강하 속도를 측정하는 방법이며, 둘째로 건성 오염물질의 강하속도를 측정하고 알려져 있는 오염물질의 농도를 이용하는 방법으로서 와상관법과 경도법 등을 들 수 있다. 와상관법은 순간 순간의 수직적인 풍속과 농도의 곱에 대한 평균으로부터 강하량을 추정하는 방법으로서, 특히 CO₂, NO_x, O₃ 등 에어로졸 입자들의 강하량을 측정하는데 이용된다. 경도법은 각 물질의 평균농도 자료와 기상탑을 설치하여 두 층에서 측정된 기상자료로부터 오염물질의 강하량을 산출하는 방법이다. 셋째로 보고된 오염물질의 건성 강하속도를 이용하고 오염물질의 농도를 측정하는 방법으로서 디뉴더법과 필터팩 방법이 쓰이고 있다.²⁾

필터팩을 이용하여 입자상 질산염과 기체상 질산을 측정할 경우 디뉴더를 이용한 방법과의 차이는 대상 지역에 따라서 10~30% 정도인 것으로 보고되고 있다.³⁾ 이는 필터에 입자를 채취하여 측정

할 경우 필터에 모인 입자들과 거름종이를 통과하는 기체와의 산·염기반응에 의한 오차로서, 입자상 물질의 농도는 실제보다 높게, 기체상 오염물질의 농도는 실제보다 낮게 나타나는 경향이 있다. 그리고 입자상 물질이 휘발되어 기체상 물질의 농도가 실제보다 높아질 수도 있다. 이러한 오차들은 서로 상쇄되기도 하는데 3단 필터팩 방법으로 측정된 질산의 값을 Transition Flow Reaction Tube법, Tuneable diode laser absorption spectroscopy법, 그리고 건성 강하물 농도측정에 표준 방법으로 사용되는 FT-IR법과 상호 비교한 결과 1~2시간 동안 채취한 시료에 대해서는 FT-IR 방법보다 7% 정도 높게 나타났으나, 4~8시간 동안 채취한 시료에 대해서는 큰 차이가 나타나지 않았다는 보고도 있다.⁴⁾

우리 나라에서 건성 강하물에 대한 연구는 이용근⁵⁾ 등은 이단 필터 샘플러를 이용하여 대기 부유분진의 계절별 거동을 연구하였으며 홍민선⁶⁾ 등과 김용표⁷⁾ 등은 필터팩을 이용하여 제주도 고산에서의 대기 부유분진의 이온 조성 등을 연구하였으며 천만영⁸⁾ 등은 서울에서의 질산암모늄의 농도를 필터팩으로 측정하였다.

이학성⁹⁾ 등은 디뉴더를 이용하여 여름철 청주시의 입자상과 가스상 산성오염물질을 측정하고 분석하였고 김성천¹⁰⁾ 등은 Cascade Impactor를 이용하여 대기중의 부유분진을 채취하여 분석하였으며 각 금속원소의 건성 강하 속도를 추정하였다. 또한 홍민선¹¹⁾ 등은 동북아 지역의 SO₂의 배출량 자료를 이용하여 모델을 모사 하여 SO₂의 건성 강하량을 추정하였다. 김정식¹²⁾은 초음파 풍속온도계를 이용한 난류측정을 통하여 SO₂의 건성강하량을 산출하였다. 이와 같이 국내에 있어서는 각각의 입자상 또는 가스상 물질의 측정분석은 활발히 이루어지고 있으나 지속적인 오염물질의 측정이나 건성 강하량의 추정은 미약한 실정이다.

본 연구에서는 춘천과 서울에서 필터팩을 이용한 지속적인 모니터링을 통하여 1997년 대기 중 기체상 물질(HNO₃, SO₂, NH₃)과 입자상 물질(SO₄²⁻, NO₃⁻)의 농도를 측정하고 문헌상의 건성 강하 속도를 대입하여 건성 강하량을 추정하며 습식 강하량을 구하여 총산성 강하량을 추정하여 보았다.

2. 실험방법

시료 채취는 춘천시내에 위치한 강원대학교 자연과학대학 2호관 옥상(북위 37° 54', 동경 127° 44', 해발고도 74.0m)과 서울에 위치한 연세대학교 이과대학 옥상(북위 37° 34', 동경 126° 58', 해발고도 85.5m)에서 채취하였다. 춘천은 수도권 지역에서 약 90 km 떨어진 풍하측에 위치하고 사방이 500 m 높이의 산으로 둘러싸인 분지지형이며 3 개의 큰 호수(소양호, 춘천호, 의암호)가 있다. 그래서 수도권으로부터 오염물질의 유입이 예상되며, 자체에서 발생한 오염물질도 쉽게 확산되어 나가기 힘든 지형이다.

서울의 시료 채취지점은 부심지로서 서울서부에 위치하고 왕복 10차선 거리에서 500 m 떨어진 건물의 6층 옥상이며 이곳으로부터 남쪽으로 4~5 km 지점에 당임리 화력발전소가 위치하며 남서쪽 6 km 지점에 목동 쓰레기 소각장이 위치하고 있다.

시료 채취의 재현성을 위하여 서울의 시료채취용 필터팩은 춘천에서 제작하였으며 오염을 방지하기 위하여 필터팩 자체를 랩에 싸서 2주에 한번씩 운반하였다. 또한 운반시의 오염을 측정하기 위하여 바탕농도 측정용 필터팩을 동봉하였다. 채취한 시료는 수거 후 오염을 방지하기 위하여 필터팩 자체를 랩에 싸서 보관 후 2주에 한 번씩 화학 분석을 위하여 강원대학교로 운반하였다.

대기시료채취는 직경 47 mm 필터팩(Savillex Corp.)을 이용하여 유속 10 l/min으로 채취하였으며 재질은 테플론과 PVC로 구성되어 있다. 1단에는 입자상물질을 채취하기 위해 1 μm pore size의 테플론 필터(Savillex, USA)를 사용하였으며, 2단에는 질산을 채취하기 위해 1 μm pore size의 나일론 필터(Gelman Sciences Inc., USA)를 사용하였다. 3단에는 아황산가스(SO₂)를 채취하기 위해 2% Na₂CO₃(G.R, Wako, Japan)와 2% Glycerin(G.R, Shinyo, Japan)용액, 암모니아(NH₃)를 채취하기 위해 25% citric acid(G.R, Shinyo, Japan)와 2% Glycerin 용액을 각각 셀룰로오즈 필터(Whatman Quantitative 41, USA)에 함침시켜 사용하였다. 함침시킨 셀룰로오즈 필터는 항온항습기에서 건조시켜 보관하였으며 2주 내에 사용하였다.

시료 채취시 강우나 강설로 인한 피해를 방지하

기 위하여 필터팩 위에 직경 24 cm의 플라스틱 깔때기를 설치하였으며, 최대유량 24 l/min의 유량계(R6-15-A, Matheson, USA), 최대 유량 40 l/min인 블로아형 펌프(VP0625-A1003-A, Nitto Kohki, Japan), 적산 유량계는 사용 최대 유량 3 m³/h의 dry gas meter(LG산전, Korea)를 사용하였다. 각각의 연결은 실리콘 관을 사용하였으며 가로 40 cm, 세로 30 cm, 두께 1 cm의 판자에 고정시켰으며 2 mm 두께의 앵글로 가로 40 cm, 세로 30 cm, 높이 150 cm의 사각형 프레임을 제작하여 장착하였다.

춘천은 96년 10월, 서울은 96년 11월부터 시료채취를 시작하였으며, 주 1회 매주 수요일 오전 10시부터 목요일 오전 10시까지 24시간 동안 채취하였다. 춘천 지역은 아황산가스(SO₂)와 암모니아(NH₃)를 모두 채취하기 위하여 4단 필터팩을 사용하였고 서울지역은 3단 필터팩을 사용하여 암모니아(NH₃)만을 채취하였다.

채취한 시료필터는 2등분하여 한쪽은 마개가 있는 10 ml 원심분리관에 넣고 10 ml 초순수를 가하고, 상온에서 10분간 초음파 세척기(SH-200, Sae Han Ultrasonic Co., Korea)로 추출한 후 분석 전까지 냉장보관 하였고 다른 부분은 47 mm 페트리접시에 넣어 항온항습기에 보관하였다. 분석은 이온 크로마토그래프(DX-100, Dionex, USA)를 사용하였으며, 분석 전 0.2 μm PTFE 실린지 필터(Whatman, USA)로 여과하였다. 이온 성분 분석에 사용한 이온 크로마토그래프의 분석조건은 음이온 성분(SO₄²⁻, NO₃⁻)은 분리컬럼 AS4A컬럼(Dionex, USA), 용리액은 1.8mM Na₂CO₃ + 1.7mM NaHCO₃(G.R, Wako, Japan), Suppressor는 25 mN H₂SO₄(G.R, Matsunoen, Japan)를 사용하였고, 양이온성분(NH₃)은 분리컬럼 CS12컬럼(Dionex, USA), 용리액은 20 mM MSA(Methane sulfonic acid, G.R, Aldrich, USA), 그리고 Suppressor는 SRS(Self regenerant system, Dionex, USA)를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 춘천과 서울의 산성 강하물 농도 비교

Table 1은 1997년의 춘천지역과 서울지역의 건성

강하물의 농도를 비교한 것으로 평균값과 표준편차 및 최대, 최소값을 나타내었다. 춘천과 서울지역의 대기 중 황산염 농도를 비교하여 보면 춘천지역이 평균 $6.95 \pm 5.48 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 서울지역이 $5.75 \pm 4.73 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로, 춘천이 서울에 비하여 입자상 물질 중 황산염의 농도가 약 21% 높게 측정되었다. 그러나 대기 중 질산염은 춘천지역이 평균 $3.91 \pm 3.64 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 서울이 $4.66 \pm 4.80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로서, 춘천이 약 19% 낮게 측정되었다. 대기 중 가스상 물질은 춘천과 서울이 질산은 평균 $0.44 \pm 0.45 \text{ ppb}$, $0.54 \pm 0.59 \text{ ppb}$, 암모니아는 평균 $4.66 \pm 3.26 \text{ ppb}$, $6.29 \pm 3.44 \text{ ppb}$ 로서 춘천지역에 비하여 각종 배출업소, 일반가정 등 고정오염원과 자동차 등의 이동오염원 등이 많은 서울지역이 약 23~35% 기량 높게 측정되었다. 또한 춘천지역에서만 측정된 이산화황의 농도는 $4.00 \pm 4.76 \text{ ppb}$ 를 나타내었다.

Table 1. The mean concentration of gaseous and particulate matters in Chunchon and Seoul on 1997.

Site	Particulate matter ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		Gaseous matter (ppb)			
	SO_4^{2-}	NO_3^-	HNO_3	SO_2	NH_3	
Chunchon	Mean	6.95	3.91	0.44	4.00	4.66
	Maximum	22.24	18.57	2.52	32.37	11.95
	Minimum	0.20	0.23	0.04	0.93	0.06
	Standard deviation	5.48	3.64	0.45	4.76	3.26
	Standard error	0.82	0.54	0.07	0.70	0.49
	Seoul	Mean	5.75	4.66	0.54	6.29
Maximum		21.19	22.18	2.86		16.85
Minimum		0.24	0.13	0.07		1.07
Standard deviation		4.73	4.80	0.59		3.44
Standard error		0.68	0.69	0.08		0.49

춘천과 서울지역간의 측정 자료를 비교하기 위하여 같은 날짜의 자료로 paired t-test를 실시하였으며 그 결과는 Table 2에 나타내었다. 자유도가 45일 때 95% 신뢰수준의 t값 2.014, 자유도가 40일 때 95% 신뢰수준의 t값 2.021과 t-test 결과값을

비교하여 보면 황산염, 질산염과 질산의 경우는 각각 1.427, 1.458, 1.802로서 춘천과 서울의 측정자료 사이에는 유의차가 없음을 알 수 있고, 암모니아의 t-test 결과값은 3.911로 춘천과 서울 대기 중 암모니아의 농도는 서로 유의차가 있음을 확인할 수 있었다.

Table 2. Calculated t value for particulate and gaseous matters between Chunchon and Seoul on 1997.

	Chunchon and Seoul	
	t-value	Degree of freedom
SO_4^{2-}	1.427	42 ¹⁾
NO_3^-	1.458	43 ¹⁾
HNO_3	1.802	40 ²⁾
NH_3	3.911	40 ²⁾

¹⁾ When degree of freedom is 45, the t value is 2.014 at the 95% confidence level.

²⁾ When degree of freedom is 40, the t value is 2.021 at the 95% confidence level.

3.2. 건성 강하량의 추정

최근까지 오염물질의 건성 강하량을 정량화 할 때 운동학 이론을 활용하고 있지만, 표준측정법은 확립되지 않았다. 이는 건성 강하 과정이 지표면의 거칠기, 지형, 기상학적 조건과 입자의 특성 등에 영향을 받기 때문이며 이로 인해 강하 속도가 시공간적으로 크게 변화하기 때문이다.

이러한 영향인자로 인해 강하량은 시·공간적으로 크게 변화할 수 있다. 건성 강하는 분진이나 가스의 대기 중 체류시간과 관련한 소멸과정의 하나이기 때문에, 측정변수를 이용하여 강하 속도를 결정하는 일이 중요하다. 건성 강하에 대한 확고한 연속 측정방법은 최근까지 존재하지 않지만, 간접적 측정기술은 실험적으로 개발된 바 있다.¹³⁾ 또한, 각종 논문은 실험적으로 다음과 같은 건성 강하 속도식을 사용하고 있다.

$$F = V_d \cdot C$$

여기서, F는 강하량 또는 flux($\mu\text{g}/\text{cm}^2/\text{sec}$)이며, V_d 는 강하 속도(cm/sec), C는 시료채취 지역에서 대상물질의 농도($\mu\text{g}/\text{cm}^3$)이다. 강하속도 V_d 는 대

상물질에 대한 중력 강하 속도와 사용된 각종 유사 경험변수들에 많은 가정들이 내재되어 정확한 건성강하속도를 산출하는데 어려움이 있다.

본 연구에서는 문헌상의 건성강하속도를 이용하여 건성강하량을 추정하였다. 각 물질에 대해 적용한 문헌상의 건성강하속도를 Table 3에 나타내었다. SO₂, SO₄²⁻, HNO₃의 강하속도는 Clarke¹⁴⁾ 등의 자료를 사용하였다. 이 지역은 위도가 39° 03' 으로서 춘천 37° 54', 서울 37° 34' 과 비슷한 위치에 있으며 해발고도도 세 지역이 90 m 이하로 비슷하다. 또한 지형은 세지역 모두 분지로서 평평한 지형이며 도시지역이다. 서울과 춘천지역의 강하 표면은 도시-농작 형태로 간주하였다. NO₃⁻ 와 NH₃의 강하속도는 우리나라와 위도와 경도가 비슷하고 환경조건이 비슷한 일본의 Oishi¹⁵⁾ 등의 데이터를 사용하여 건성강하량을 추정하여 보았다. 이상의 방법으로 추정한 춘천과 서울의 건성강하량을 다음 Table 4에 나타내었다.

Table 3. Dry deposition velocity of acidic pollutants reported in the literatures.

Deposition material	Deposition surface	Deposition velocity, cm/sec	Reference
SO ₂	Urban-Agric.	0.29	Clarke et al.(1993)
SO ₄ ²⁻	Urban-Agric.	0.15	Clarke et al.(1993)
	Agricultural	0.15	
HNO ₃	Urban-Agric.	2.08	Clarke et al.(1993)
	Agricultural	2.13	
NO ₃ ⁻	Mixed-forest	0.20	Oishi et al.(1994)
NH ₃	Mixed-forest	1.0	Oishi et al.(1994)

Table 4. The dry deposition flux in Chunchon and Seoul on 1997.

	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	HNO ₃	SO ₂	NH ₃
	kg/km ² /year		kg/km ² /year		
Chunchon	329	246	803	1044	1116
Seoul	272	294	1004		1506

춘천지역 건성강하량 중 황산염은 329 kg/km²/year, 황산염에서 기인한 황은 110 kg/km²/year, 질산염은 246 kg/km²/year, 질산염에서 기인한 질소는 56 kg/km²/year으로 추정되었다. 또한 질산은 803 kg/km²

/year, 질산에서 기인한 질소는 179 kg/km²/year, 아황산가스는 1044 kg/km²/year, 아황산가스에서 기인한 황은 522 kg/km²/year, 암모니아는 1116 kg/km²/year로 추정되었다.

서울지역 건성강하량 중 황산염은 272 kg/km²/year, 황산염에서 기인한 황은 91 kg/km²/year, 질산염은 294 kg/km²/year, 질산염에서 기인한 질소는 66 kg/km²/year으로 추정되었다. 또한 질산은 1004 kg/km²/year, 질산에서 기인한 질소는 223 kg/km²/year, 암모니아는 1506 kg/km²/year로 추정되었다.

황산염은 춘천지역이 서울지역보다 약 21% 더 많은 건성강하량을 나타내었고, 질산염, 질산, 암모니아는 서울지역이 춘천지역에 비하여 20%, 25%, 35% 가량 더 많은 건성강하량을 보였다.

1997년 춘천지역의 황산염과 아황산가스에 의해 기인된 황의 총량은 632 kg/km²/year 로서 전체 황의 건성강하량 중 황산염에 기인한 황이 차지하는 비율은 17%이며 아황산가스에 기인한 황이 차지하는 비율은 83%로서 황의 건성강하량 중 대부분은 가스상으로 강하함을 알 수 있다. 또한 질산염과 질산에 의해 기인된 질소의 총량은 235 kg/km²/year 으로서 전체 질소의 건성강하량 중 질산염에 기인한 질소가 차지하는 비율은 24%이며 질산에 기인한 질소가 차지하는 비율은 76%로서 질소의 건성강하량 중 대부분은 가스상으로 강하함을 알 수 있다.

1997년 서울지역의 질산염과 질산에 의해 기인된 질소의 총량은 289 kg/km²/year 으로서 전체 질소의 건성강하량 중 질산염에 기인한 질소가 차지하는 비율은 23%이며 질산에 기인한 질소가 차지하는 비율은 77%로서 질소의 건성강하량중 대부분은 가스상으로 강하함을 알 수 있다.

3.3. 산성강하량의 계산

Table 5와 Table 6에 춘천과 서울 지역의 1997년 강우의 이온들에 대한 총 습식 강하량을 나타내었다. 춘천과 서울의 습식강하량은 필터팩을 채취한 장소에 같이 위치하고 있는 wet only sampler를 이용하여 채취하였다. 채취기의 전원은 AC 220V와 110V 겸용이다. 채취부분의 내경은 26 cm

의 플라스틱 bucket을 사용하였다. bucket의 채취 가능량은 일일강우량으로 약 200 mm 이다. 빗물은 bucket에 직접 채취되지 않고 bucket 위에 비닐봉투를 씌워 채취하였다. 센서는 1 mm 간격으로 배치된 금선이 코팅되어 있는 기관이 사용되었으며 채취는 일강우 단위로 채취하였다. 춘천지역은 겨울철 동안의 강설은 채취하지 않았다. 계산된 이온은 음이온 3종(Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-})과 양이온 6종(H^+ , Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+})이다.

1997년 춘천지역의 채취된 총 강우량은 982 mm이며 황산염의 총 습식강하량은 1714 kg/km²/year이

며 황산염에 기인하는 황은 571 kg/km²/year로 나타났다. 질산염의 총 습식강하량은 1074 kg/km²/year이며 질산염에 기인하는 질소는 239 kg/km²/year로 나타났다. 총 습식강하량은 3960 kg/km²/year이며 황산염은 43%, 질산염은 27%로 전체 습식강하량 중 70%를 차지하는 것으로 나타났다.

1997년 서울지역의 채취된 총 강우량은 949 mm이며 황산염의 총 습식강하량은 3547 kg/km²/year이며 황산염에 기인하는 황은 1182 kg/km²/year로 나타났다. 질산염의 총 습식강하량은 2169 kg/km²/year이며 질산염에 기인하는 질소는 482 kg/km²/year로

Table 5. Amount of wet deposition at Chunchon on 1997.

Month	Rainfall	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	H^+	Na^+	NH_4^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	NO_3^- -N	SO_4^{2-} -S
	mm											
Feb.	29	5.1	52.3	97.5	1.1	3.0	22.8	2.5	0.6	13.1	11.6	32.5
Mar.	15	3.0	22.8	45.3	0.3	2.0	11.3	2.1	0.5	7.9	5.1	15.1
Apr.	42	10.1	175.6	221.1	0.5	6.8	70.9	8.5	3.9	48.2	39.0	73.7
May	251	8.5	183.1	301.8	2.2	12.9	129.7	11.8	1.9	20.1	40.7	100.6
Jun.	102	5.2	111.1	183.0	0.7	2.8	86.1	9.7	0.6	14.4	24.7	61.0
Jul.	150	3.6	87.2	152.8	0.9	3.5	69.9	4.6	0.1	4.1	19.4	50.9
Aug.	155	30.5	169.9	219.1	1.5	21.7	72.4	7.2	2.5	24.6	37.7	73.0
Sep.	96	9.4	71.5	138.2	2.6	17.6	32.8	8.5	1.0	15.8	15.9	46.1
Oct.	29	19.7	125.0	227.2	1.0	30.6	71.8	18.5	3.8	49.4	27.8	75.7
Nov.	84	1.2	54.1	87.0	0.9	30.3	25.1	6.3	0.9	8.4	12.0	29.0
Dec.	29	0.4	25.0	41.0	0.5	15.1	9.5	7.6	0.4	5.1	5.6	13.7
Total	982	96.6	1073.7	1714.1	12.3	146.2	602.3	87.2	16.2	211.1	238.6	571.4

Table 6. Amount of wet deposition at Seoul on 1997.

Month	Rainfall	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	H^+	Na^+	NH_4^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	NO_3^- -N	SO_4^{2-} -S
	mm											
Jan.	11	38.1	81.3	205.9	0.1	17.8	41.7	6.0	5.5	64.7	18.1	68.6
Feb.	5	2.7	12.9	19.6	0.3	0.3	0.5	0.2	0.2	1.4	2.9	6.5
Mar.	14	3.8	12.6	39.2	0.4	1.3	6.7	0.5	0.3	4.0	2.8	13.1
Apr.	45	28.8	164.4	245.8	1.1	7.1	32.3	8.7	8.4	66.9	36.5	81.9
May	210	48.9	256.5	661.3	5.5	18.2	127.2	16.4	9.6	75.6	57.0	220.4
Jun.	89	20.3	139.7	266.7	1.2	3.3	180.5	1.0	0.2	57.7	31.0	88.9
Jul.	247	119.5	799.9	932.7	8.7	50.6	449.1	22.2	15.9	104.6	177.8	310.9
Aug.	103	119.4	198.0	321.5	1.8	50.8	163.7	15.6	15.3	111.4	44.0	107.2
Sep.	72	139.5	161.5	264.5	1.5	22.5	51.9	6.1	4.4	39.0	35.9	88.2
Oct.	45	72.1	195.0	374.3	1.0	36.5	103.3	19.8	10.3	81.8	43.3	124.8
Nov.	77	32.2	126.6	177.4	1.2	13.4	60.1	9.1	5.8	74.6	28.1	59.1
Dec.	32	28.9	20.9	38.6	1.1	10.9	25.2	2.3	2.7	20.9	4.6	12.9
Total	949	653.5	2169.4	3547.4	23.9	232.7	1242.1	107.9	78.5	702.7	482.1	1182.5

나타났다. 총 습식강하량은 8758 kg/km²/year이며 황산염은 41%, 질산염은 25%로 전체 습식강하량 중 66%를 차지하는 것으로 나타났다.

위의 결과로, 총 습식강하량은 황산염과 질산염이 주종을 이루고 있음을 알 수 있다.

Fig. 1은 1997년 춘천지역의 습식강하량 중 황산염에 기인하는 황의 습식강하량과 건성강하량에 기인하는 황을 월별로 나타내었다. 춘천지역은 강수량이 많았던 5월과 8월에 가장 많은 습식강하량을 보인다. 이러한 황의 습식강하량을 황의 건성강하량과 비교하여 보면 건성강하에 기인하는 황이 강수량이 적은 겨울철에 대부분을 차지하며 습식강하량에 기인하는 황이 강수량이 많은 여름철에 대부분을 차지함을 알 수 있다.

춘천지역에서 1997년 기간 중 건성강하량에 기인하는 황의 양은 632 kg/km²으로 추정되며 습식강하량에 기인하는 황의 양은 572 kg/km²을 나타냈다. 따라서 춘천지역 황의 건성강하량과 습식강하량의 비는 1 : 0.9로 나타나며 춘천에서 황의 총 강하량 중 건성강하가 차지하는 비율은 52%로 나타났다.

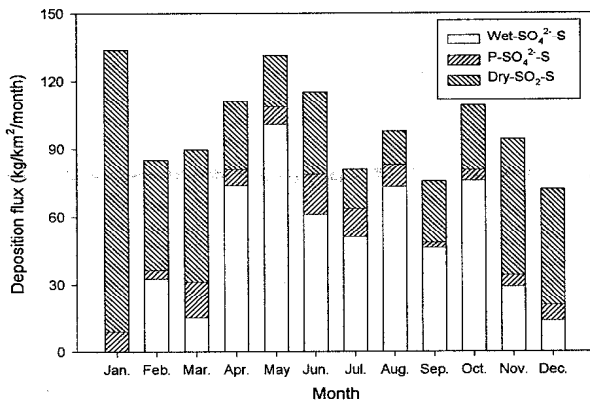


Fig. 1. Deposition flux of total sulfur in Chunchon on 1997.

Fig. 2는 1997년 춘천지역의 습식강하량 중 질산염에 기인하는 질소의 습식강하량과 건성강하량에 기인하는 질소를 월별로 나타내었다. 춘천지역은 강수량이 많았던 5월과 7월에 가장 많은 습식강하량을 보인다. 이러한 질소의 습식강하량을 질소의 건성강하량과 비교하여 보면 질소의 경우 황과는 달리 여름철에도 습식강하에 비해 건성강하가 많은 비중을 차지하고 있음을 알 수 있다.

춘천지역에서 1997년 기간 중 건성강하량에 기인하는 질소의 양은 235 kg/km²으로 추정되며 습식강하량에 기인하는 질소의 양은 239 kg/km²을 나타냈다. 따라서 춘천지역 질소의 건성강하량과 습식강하량은 거의 같으며 춘천에서 질소의 총 강하량 중 건성강하가 차지하는 비율은 50%로 나타났다.

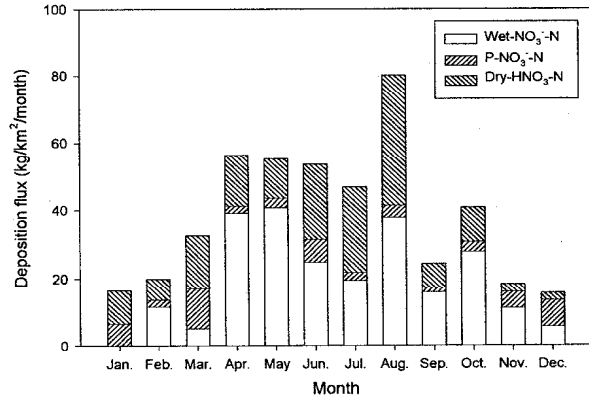


Fig. 2. Deposition flux of total nitrogen in Chunchon on 1997.

Fig. 3은 1997년 서울지역의 습식강하량 중 질산염에 기인하는 질소의 습식강하량과 건성강하량에 기인하는 질소를 월별로 나타내었다. 서울지역 또한 강수량이 많았던 5월과 8월에 가장 많은 습식강하량을 보인다.

서울지역에서 1997년 기간 중 건성강하량에 기인하는 질소의 양은 289 kg/km²으로 추정되며 습식강하량에 기인하는 질소의 양은 482 kg/km²을 나타냈다. 따라서 춘천지역 황의 건성강하량과 습식강하량의 비는 1 : 1.7로 나타나며 서울에서 질소의 총 강하량 중 건성강하가 차지하는 비율은 37%로 나타났다.

총 산성강하량 중 질소는 1997년의 경우 서울지역은 춘천지역에 비하여 습식강하량이 차지하는 비율이 약 1.7배 가량 높았다.

Table 7은 Clarke¹⁴⁾ 등의 1992년 미국 NDDN (National Dry Deposition Network)의 총황과 총질소를 나타낸 것이며 1997년 춘천의 총황과 총질소의 양과 비교하여 보았다. 또한 황/질소의 비율을 조사하였다. 춘천지역의 경우 총황은 12.0 kg/ha이며 총질소는 4.7 kg/ha 로서 황/질소의 비율은 2.55

로 나타났다. 미국 NDDN 지점과 춘천지역을 비교하여 볼 때 총황에 있어 건성강하가 차지하는 비율은 52%로 다른 지역에 비하여 가장 높았으며 총질소에 있어 건성강하가 차지하는 비율은 50%로 다른 지역과 비슷하였다. 황/질소의 비율은 미국 NDDN 지점들이 0.75~3.17로 나타났는데 CC State Park, WV, Alhambra, IL, 두 지점을 제외한 다른 지점보다는 황/질소의 비율이 높음을 알 수 있다. 이는 춘천지역에 있어 황이 차지하는 인위적인 오염원의 근원이 질소가 차지하는 인위적인 오염원의 근원보다 많음을 나타낸다.

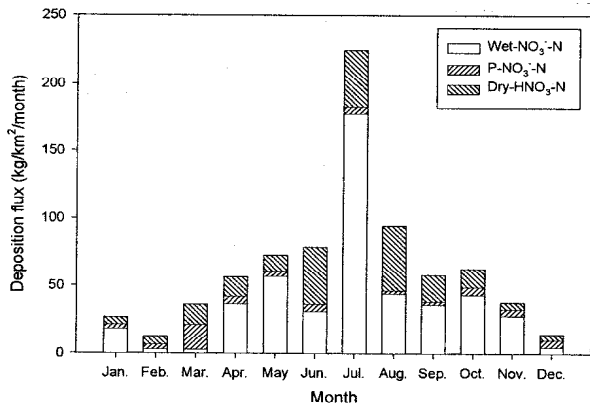


Fig. 3. Deposition flux of total nitrogen in Seoul on 1997.

4. 결 론

본 연구에서는 1997년 춘천과 서울지역의 건성 산성물질의 농도를 측정하였으며 다른 문헌으로부터 건성강하속도를 대입하여 건성강하량을 추정하여 보았다. 또한 습식강하량을 구하여 총 산성강하량을 추정하여 보았다.

건성 강하물 중 입자상 SO₄²⁻와 NO₃⁻의 농도는 춘천은 각각 평균 6.95, 3.91 μg/m³이었으며, 서울은 각각 평균 5.75, 4.66 μg/m³이었다. 춘천이 서울보다 더 높게 나타난 것은 수도권지역으로부터 오염물질이 유입된 것으로 생각된다.

춘천지역의 가스상 HNO₃와 SO₂, NH₃의 농도는 각각 평균 0.44, 4.00, 4.66 ppb이었으며, 서울지역의 가스상 HNO₃와 NH₃는 각각 평균 0.54, 6.29 ppb로

Table 7. Total Sulfur and Total Nitrogen deposition for NDDN sites and Chunchon measuring Wet and Dry Deposition for 1992 (NDDN) and 1997(Chunchon).

Site Name	Total Sulfur (S)		Total Nitrogen (N)		S/N ratio
	kg/ha	%Dry	kg/ha	%Dry	
Chunchon (This study)	12.0	52	4.7	50	2.55
Prince Edward, VA	9.2	41	4.7	55	1.96
Connecticut Hill, NY	15.7	40	8.7	51	1.80
Speedwell, TL	9.7	35	4.0	47	2.43
DC State Park, OH	14.3	41	6.7	48	2.13
Ann Arbor, MI	10.7	34	6.7	48	1.60
CC State Park, WV	15.3	31	5.4	24	2.83
Lykens, OH	16.0	37	7.5	48	2.13
Unionville, MI	9.6	26	5.0	30	1.92
Candor, NC	8.7	34	4.8	52	1.81
Cranberry, NC	12.8	23	6.3	51	2.03
Arendtsville, PA	15.5	44	7.2	48	2.15
Perkinstown, WI	6.2	22	3.9	40	1.59
Sumatra, FL	7.3	25	3.3	43	2.21
Alhambra, IL	11.1	39	3.5	41	3.17
Gothic, CO	1.0	23	1.0	49	1.00
Uinta, UT	1.2	27	1.6	57	0.75
Chiricahua, AZ	2.8	40	1.8	60	1.56

Source : EPA/600/R-95/086

서울지역이 더 높게 측정되었다.

춘천지역에서 건성 강하에 기인하는 황의 양은 632 kg/km²로, 습식 강하에 기인하는 황의 양은 572 kg/km²로 나타났다. 따라서 춘천지역에서 황의 총강하량 중 건성 강하가 차지하는 비율은 52%로 나타났다.

또한 춘천지역의 건성 강하에 기인하는 질소의 양은 235 kg/km²로, 습식 강하에 기인하는 질소의 양은 239 kg/km²로 나타났다. 따라서 춘천에서 질소의 총강하량 중 건성 강하가 차지하는 비율은 50%로 나타났다. 춘천지역의 S/N 비는 0.43으로 황보다 질소의 강하량이 더 높게 나타났다.

그리고, 서울지역의 건성 강하에 기인하는 질소의 양은 289 kg/km²로, 습식 강하에 기인하는 질소의 양은 482 kg/km²로 나타났다. 따라서 서울에서 질소의 총강하량 중 건성 강하가 차지하는 비율은 37%로 나타났다.

황의 강하량은, 석탄의 소비가 줄고 저유황 연료로 전환된 우리나라의 연료변환 실태를 잘 나타내주고 있다. 그리고 질소는 자동차의 증가로 인해 질소화합물의 대기중 농도가 증가하였고, 질소의 총강하량은 전년에 비해 서울은 6% 감소하였고, 춘천은 31% 증가하였다.

총강하량 중에서 건성 강하량이 차지하는 비율은 전년에 비해 황과 질소 모두 49%, 15% 낮아졌는데 이는 98년도의 강우가 전년도에 비해 83% 늘어난 것에 기인한다.

참 고 문 헌

- 1) NAPAP, *1990 Integrated Assessment Report*, 1991.
- 2) NAPAP, *Acidic deposition : State of science and technology*, 1990.
- 3) R. M. Harrison and Kitto A. -M. N., *Atmospheric Environment*, 1990, 24A(10), 2633-2640.
- 4) K. G. Anlauf, D. C. Mactavish and H. A. Wiebe, *Atmospheric Environment*, 1988, 22(8), 1579-1586.
- 5) 이용근, 김남훈, 명노승, 황규자, *한국대기보전학회지*, 1988, 4(2), 20-27.
- 6) 홍민선, 이상훈, 이동섭, 강창희, 박경윤, *한국대기보전학회지*, 1992, 8(4), 257-261.
- 7) 김용표, 김진영, 박세욱, 김성주, 심상규, 문길주, 박경윤, 허철구, *한국대기보전학회지*, 1996, 12(1), 91-99.
- 8) 천만영, 이영재, 김희강, *한국대기보전학회지*, 1993, 9(3), 216-221.
- 9) 이학성, 강병욱, *한국대기보전학회지*, 1996, 12(4), 441-448.
- 10) 김성천, 김동술, *한국대기보전학회지*, 1996, 12(1), 101-112.
- 11) 홍민선, 김순태, 이동섭, *한국대기보전학회지*, 1997, 13(3), 231-241.
- 12) 김정식, *초음파풍속온도계의 난류측정에 의한 SO₂의 건성침적량 산출*, 1996, 강원대학교 대학원 석사학위논문.
- 13) B. B. Hicks, M. L. Wesley and J. L. Durham, *Critique of methods to measure dry deposition; Workshop Summary*, 1980, U.S. EPA Report EPA-600/9-80-050 (NTIS PB81-126443).
- 14) J. F. Clarke and E. S. Edgerton, *Dry deposition flux calculations for the National Dry Deposition Network*, 1993, U.S. EPA report EPA/600/R-93/065 (PB93-178242).
- 15) Oishi et al., *일본 대기오염학회 강연요지집*, 1995.