

1994 ~ 1997년 중부지방에 내린 강수의 화학적 특성에 관한 연구

A Study on Chemical Characterization of Precipitation in the Central Part of Korea from 1994 to 1997

조하만 · 최재천 · 김지영 · 전영신 · 김 산*

기상연구소 응용기상연구실

*기상연구소 배경대기관측소

(1998년 6월 30일 접수, 1998년 10월 23일 채택)

Ha-Man Cho, Jae-Cheon Choi, Ji-Young Kim
Young-Sin Chun and San Kim*

Applied Meteorology Research Lab., METRI

**Background Atmosphere Observation Station, METRI*

(Received 30 June 1998; accepted 23 October 1998)

Abstract

This study was conducted to investigate the chemical characteristics of precipitation at Seoul, Yangpyong, Hongchon and Inje in the central part of Korean peninsula during the period from March 1994 to November 1997. The precipitation samples were collected by automatic wet-only sampler. The samples were analyzed for major anions (SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^- , F^-) and cations (NH_4^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+), in addition to acidity and electrical conductivity. The analytical instrument for water soluble ionic components was ion chromatography. The volume-weighted mean pH were 4.73, 4.87, 4.89 and 4.81 at Seoul, Yangpyong, Hongchon and Inje, respectively. The sums of cation concentrations was slightly greater than the sums of anion concentrations. Also, the highest ion component was SO_4^{2-} in anions and NH_4^+ in cations. The mean equivalent ratios of SO_4^{2-} to NO_3^- were found by 2.96, 2.71, 2.43 and 2.25 at Seoul, Yangpyong, Hongchon and Inje, respectively. The factor analysis was conducted in order to make the large and diverse data set as manageable levels and to qualitatively examine the relationship between the variables. It showed that major sources of pollutants in precipitation were from the anthropogenic in Seoul, the natural in Hongchon, and the anthropogenic and natural in Yangpyong and Inje.

Key words : automatic wet-only sampler, ion chromatography, Factor analysis

1. 서 론

오염원으로부터 배출된 다량의 황 산화물이나 질

소 산화물 등은 대기 중에 부유하다가 강수와 함께 지표면에 도달함으로써 인간에게 직·간접적으로 많은 피해를 주고 있다. 이러한 현상은 산업이 발달하고 인구가 증가하면서 필연적으로 뒤 따르는 것

으로서 과거의 종교, 이념 등의 지역적인 국가 분쟁과는 달리 전 세계적인 차원에서 다루어져야 할 새로운 국제 문제로 부각되었다.

특히 산성비는 수중 생태계의 파괴, 농작물의 생산성 저하, 산림의 고사, 건축물의 부식 등에 막대한 피해를 미치므로 1970년대 이후 북유럽이나 북미로부터 여러 학자들에 의하여 지속적으로 연구되었고 현재도 활발히 진행 중이다 (Astrid S. *et al.*, 1996; Semra G.T and S. Ungor, 1996; Baron J. *et al.*, 1993; Camareo L. *et al.*, 1993; Isaac *et al.*, 1987; Lacaux J.P. *et al.*, 1987). 국내에서는 1980년대 중반을 전후로 몇몇 관심있는 학자들에 의해 간헐적으로 연구되었으며, 1990년대 이후로는 국·공립연구소나 대학 등에서 광범위하고 심도있게 연구되고 있다. 현재까지 국내에서 산성비에 대한 연구 동향을 보면, 원인 물질 및 배출원 (나출기와 정제일, 1997), 장기적인 경향 분석 (강공언 등, 1997), 오염도 평가 (이승일 등, 1996; 강공언 등, 1994), 이동 경로 분석 (전영신 등, 1994; 김정수 등, 1992; 정용승과 김태군, 1991), 모델 개발 (구자공 등, 1989), 통계적 분석 (이민희 등, 1986), 피해 영향 (이경재, 1993) 등의 연구가 진행되었으나 아직까지는 외국에 비하여 다소 부족한 점이 많다. 또한, 국내 산성비 연구의 대부분은 인위적인 오염원이 많은 도시 위주로 실시되었으며 (구자공과 박경렬, 1993; 신용배 등, 1986; 손동현과 양성철, 1985), 농촌 지역 (송기형 등, 1992), 섬 지역 (최재천 등, 1997a; 심상규 등, 1994), 고산 지역 (최재천 등, 1997b, 1994), 해안 지역 (강공언 등, 1992) 등에서의 연구는 매우 미흡할 뿐만 아니라 대부분의 연구 사업이 짧은 기간 (1년 또는 2년)을 대상으로 실시하였으므로 연변화 경향 분석이 곤란하였으며, 동일 기간에 여러 지점을 동시에 관측한 사례도 없으므로 지점간의 비교 특성 결과도 매우 부족한 실정이다. 또한, 우리 나라는 연중 편서풍이 불며, 세계 최대의 오염 배출국인 중국이 풍상측에 위치하므로 오염 물질의 영향을 받을 가능성이 매우 높다. 그리고 향후 인접 국가 (중국, 일본, 러시아 등) 간에 발생할 가능성이 충분히 내재된 환경 분쟁 (Samara *et al.*, 1992)에 대비한 장기간의 충실한 자료 축적은 그 자체만으로도 매우 유용하리라 사료되며, 동일 위도상에 관측 지점을 선정하므로써 오염원의 이동 경로를 연구하는데에도 기초 자료로 활용된다면 많

은 도움이 되리라 사료된다. 또한, 세계적인 도시인 서울을 관측 지점으로 선정하므로써 도시와 농촌간의 강수 화학 성분 특성을 직접적으로 비교 분석할 수가 있다.

따라서 본 연구에서는 1994년 봄철부터 1997년 가을철까지 중부 지방을 대상으로 서에서 동쪽으로 4개 (서울, 양평, 홍천, 인제) 지점에 내린 강수의 화학적 특성을 고찰하였으며, 통계 프로그램을 이용하여 해당 지점의 오염원을 추정 및 각 이온간의 상관성을 고찰하였다.

2. 자 료

2.1 관측 기간 및 지점

본 연구의 관측 기간은 1994년 3월부터 1997년 11월까지 약 4년간이며, 관측 지점으로서 우리나라의 중부 지방을 중심으로 서쪽에서 동쪽으로 4개 지점을 선정하였다 (그림 1). 4개 관측 지점의 지리적 환경은 다음과 같다. 서울 (서울시 종로구 와룡동 2번지, 국립서울과학관 옥상)은 세계적인 규모의 도시로서 인구 및 산업이 밀집되어 있어 각종 오염원 (공장, 자동차 등)으로부터 배출된 대기 오염 물질로 인하여 피해가 심각하리라 사료되나 환경부 (1996)에 자료에 의하면 아황산 가스 농도는 최근으로 오면서 감소한다고 보고되었다. 양평군 (경기도

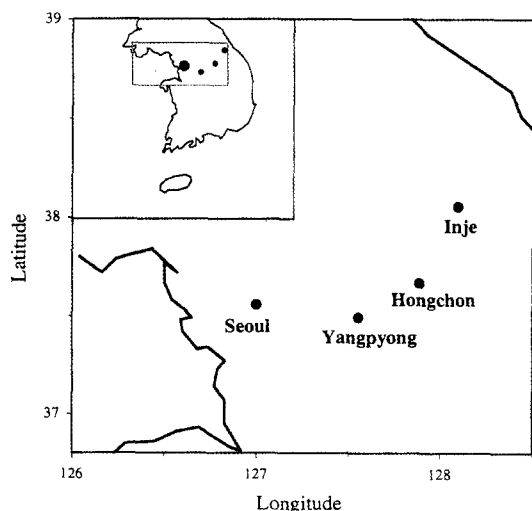


Fig. 1. Location of sampling stations.

양평군 양평읍 양근리 192-25, 양평기상관측소)은 용문산(1,157m)을 중심으로 험준한 산지로 이루어져 있으며 임야 면적이 전체의 약 75%에 이른다. 그리고 농경지는 전체 면적의 약 16%에 불과하나 인구의 약 63%가 농업에 종사하고 있다. 홍천군(강원도 홍천군 홍천읍 연봉리 466-9, 홍천기상관측소)은 태백 산맥의 서쪽 사면에 위치하며, 약 87%가 산지로 형성되어 있다. 그리고 인제군(강원도 인제군 인제읍 남북리 426-1, 인제기상관측소)은 사면이 산지로 둘러싸인 전형적인 분지 형태를 이루고 있다. 그리고 양평군과 홍천군은 인구가 약 8~9만, 인지는 약 4.5만명이 거주하며, 대규모의 공단 지역이나 인근 지역에 차량 통행량이 많은 고속도로는 없다(기상연구소, 1992).

2.2 강수 채수 방법

강수는 비가 내리는 시점부터 끝나는 시점까지 시료를 전량 채취하는 것을 원칙으로 하였으며, 24시간 지속 또는 단속적으로 내릴 경우에는 당일 09시부터 익일 09시까지를 당일 시료로 취급하였다. 그리고 대기 중에 부유하는 전성 오염 물질의 유입을 방지하기 위하여 비가 내리면 뚜껑이 열리고 비가 끝나면 자동적으로 뚜껑이 닫히는 자동 강수 채수기를 자체 제작하여 강수 시료를 수거하였으며, 폴리에틸렌 재질의 비닐 백을 주문 제작하여 사용함으로써 인위적인 오염을 가급적 배제하였다. 또한, 강수 자동 채수기는 서울을 제외하고는 잔디밭으로 형성된 관측 노장에서 지면으로부터 약 1.2m에 설치하였다. 그리고 강수 중의 이온 성분을 분석하기 위해서는 적정량의 시료가 필요하므로 강수량이 5mm 이상인 날만을 수거하여 분석하였다.

2.3 분석 방법

시간이 경과하면 변하기 쉬운 강수의 pH와 전기 전도도(Ciba Corning mate 90 pH/Cond. meter)는 시료 수거 후 현지에서 즉시 측정하였다. pH는 표준 용액(pH 4.0과 pH 7.0)으로 기기를 보정하였으며, 전기 전도도는 1.28mS의 표준 용액을 희석하여 기기를 보정한 후, 강수 시료를 측정하였다. 그러나 이온 성분은 즉시 분석이 어려우므로 4°C의 냉암소에 보관 후 가급적 빠른 시일에 분석을 실시하였다. 강수 중의 이온 성분은 이온 크로마토그래피(Dionex

4000i와 DX 500)를 이용하여 분석하였으며, 분석 조건은 최재천 등(1994, 1997a)이 제시한 방법과 같다. 또한, 분석된 자료는 통계 프로그램인 SPSS/PC+ version 2 (statistical package for the social science)를 이용하여 요인 분석(factor analysis)을 실시하였으며, 요인 분석은 백성옥과 황승만(1992)이 적절하다고 평가한 Varimax 회전기법을 사용하였다. 그리고 우리 나라는 삼면이 바다로 형성되어 있어 바다에서 유입되는 해양 기원 성분을 제거하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 강수 중에 함유되어 있는 Na⁺ 양은 모두 해양 기원으로 간주하고 해양 유래의 성분 농도 비율은 해양-대기(구름)-강수 중으로 변화하지 않는다는 가정에서 산출하였다(산성우조사법, 1996).

3. 결과 및 고찰

세계 기상 기구(World Meteorological Organization; WMO)는 지구 대기 환경 감시를 위하여 전 세계적으로 약 300여개의 지구 대기 감시소(Global Atmosphere Watch; GAW)를 설립하여 운영하고 있다. GAW에서는 대기 혼탁도, 부유 분진, 가스상 오염 물질, 산성비 등의 관측 및 분석 업무를 수행하고 있으며, 특히 산성비는 화학적 분석을 수행하므로 자료의 신뢰성을 요구하고 있다. 따라서 본 연구에서도 GAW에서 권장하고 있는 이온 수지법을 적용하여 각각의 시료에 대한 신뢰성 검토를 수행하였다(WMO/GAW No. 102). 이 방법은 최재천 등(1997b)이 "1991~1995년 소백산 지역에 내린 강수의 화학 조성에 관한 연구"에 자세히 기술되어 있으므로 생략하였다.

중부 지방 4개 지점에 내린 강수에 대하여 신뢰성 검토를 해 본 결과, 수소 이온 농도를 포함한 양이온과 음이온의 총합 범위에 따라 허용하는 오차 범위는 차이가 있으나 대부분의 시료는 GAW의 허용 오차 범위를 만족시켰고 자료의 신뢰성은 양호한 것으로 나타났다.

강수의 pH 값을 표현하는 방법에는 pH 그 자체를 평균하는 것과 H⁺ 농도로 변환 후 평균해서 pH로 재 변환하는 2가지 방법이 있으나 본 연구에서는 선진국 등에서 가장 적절한 방법이라 권장하고 있는 강수량을 고려한 가중 평균값을 이용하였다.

Table 1. The variation of volume weighted mean pH and electrical conductivity value by annual mean at 4 stations in the central part of Korea during the period from 1994 to 1997.

Year	Seoul			Yangpyong			Hongchon			Inje		
	No.	pH	Cond.	No.	pH	Cond.	No.	pH	Cond.	No.	pH	Cond.
1994	21	4.58	19.3	23	4.63	25.5	27	4.85	10.6	23	5.01	31.0
1995	12	5.19	16.1	28	4.97	-	27	5.17	11.8	35	5.19	11.2
1996	14	4.72	26.9	25	4.82	-	23	4.92	24.0	29	4.85	13.7
1997	26	4.75	29.2	22	5.08	20.3	19	4.67	32.1	24	4.56	20.0
Total	73			98			96			111		
Mean	4.73			22.9			4.87			19.6		
	4.73			4.87			4.89			19.6		
	4.81			19.0			4.81			19.0		

이 방법은 해당 시료의 pH 값을 수소 이온 농도로 환산 후, 해당 시료의 강수량을 곱하고, 이를 pH 값으로 다시 환산하는 것으로서 본문에 제시된 모든 pH 값은 이러한 과정으로 산출한 값이다. 표 1은 중부 지방 4개 지점에서 1994년 3월부터 1997년 11월까지 내린 강수 시료를 지점별, 연도별로 강수량을 고려한 가중 평균 pH 값(Volume Weighted Mean; VWM-pH)과 평균 전기 전도도 값을 제시한 것이다. 서울의 평균 pH는 가뭄이 극심했던 '94년에 pH 4.58로 가장 낮은 값을 보인 반면에 '95년에 pH 5.19로 비교적 높은 값을 보였으며, 전기 전도도는 '97년에 29.2 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로 가장 높게 나타났다. 그리고 '95년에는 16.1 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로 가장 낮은 값을 보였다. 양평에서는 '97년에 pH 5.08, 홍천과 인제에서는 '95년에 각각 pH 5.17, pH 5.19로 가장 높게 나타나 양평을 제외하고는 세 지점 모두 '95년에 높은 값을 보이는 특성을 보였다. 그리고 pH 값이 가장 낮은 값을 보인 연도는 서울과 양평에서는 '94년에, 홍천과 인제에서는 '97년으로 나타났다. '94~'97년(약 4년간)의 평균 pH는 인위적인 오염원이 많은 서울에서 pH 4.73으로 가장 낮은 값을 보였으며, 양평, 인제, 홍천에서는 각각 4.87, 4.89, 4.81로 서울보다는 다소 높은 값을 보이는 하나 큰 차이는 없는 것으로 나타났다. 전기 전도도 값은 서울(22.9 $\mu\text{S}/\text{cm}$), 홍천(19.6 $\mu\text{S}/\text{cm}$), 인제(19.0 $\mu\text{S}/\text{cm}$)순으로 나타났으며, 양평에서는 측정이 누락된 자료가 많아 평균값을 산정하지 않았다.

표 2는 중부 지방 4개 지점에서의 '94년 3월부터 '97년 11월까지(약 4년간)의 주요 이온간의 조성 범위 및 평균 조성비를 보인 것이다. 산업 활동의 부산물인 SO_4^{2-} 와 자동차의 기원으로 보고된 바 있

는 NO_3^- (Collett *et al.*, 1993; Haider and Liaquat, 1990)의 조성비 범위 및 평균 조성비를 보면, 서울의 경우에는 2.32~3.63으로 타 지점에 비하여 변동 폭이 가장 크게 나타난 반면에 인제에서는 1.91~2.40으로 변동 폭이 가장 작게 나타났다. 또한, '94~'97년까지의 당량 농도비를 SO_4^{2-} 와 NO_3^- 만의 백분율로 환산하여 보면, 변동 폭이 가장 큰 서울에서 72.3:27.7%로 질소 산화물의 농도가 가장 높게 나타난 반면에 인제에서 79.0:21.0%로 타 지역에 비하여 가장 낮게 나타났다. 이러한 결과는 Liljstrand and Morgan (1981)과 U.S. EPA (1983)가 연구한 SO_4^{2-} 와 NO_3^- 의 조성 변동 폭(2.29~2.80) 및 평균 값(2.49)과 비교하여 볼 때 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 그리고 우리 나라 중부 지방의 오염 형태는 공장이나 산업 시설에서 배출되는 황 산화물이 지배적인 것으로 나타났고 자동차의 지표 물질로 판단되는 질소 산화물은 약 25%로 나타났다. 그리고 4년간의 평균 당량 농도비는 서울(2.96), 양평(2.71), 홍천(2.43), 인제(2.25)순으로 나타난 점으로 보아 우리 나라 중부 지방의 오염 패턴은 서쪽에서 동쪽으로 갈수록 농도의 차이는 있으나 황산염 계통의 오염 물질이 상대적으로 감소하는 경향을 보임으로써 산업 및 인구 밀도가 적은 지점일수록 농도비의 차이가 감소하는 특징을 보여 주었다. 음이온 중에서 가장 고농도인 SO_4^{2-} 와 양이온 중에서 가장 고농도인 NH_4^+ 의 당량 농도비 범위를 보면, 서울은 0.94~1.16, 양평은 0.90~1.10, 홍천은 0.82~1.16 그리고 인제는 0.96~1.27로서 최소 값과 최대 값의 차이가 서울과 양평이 비슷한 반면에 홍천과 인제가 서로 비슷하게 나타나는 특징을 보였다. 그리고 평균 농도비는 서울, 양평, 홍천, 인제가 각각

Table 2. The ratio of ion concentrations at 4 stations in the central part of Korea during the period from 1994 to 1997. The values in the parenthesis denote the mean.

Ratio	SO ₄ ²⁻	SO ₃ ²⁻	SO ₄ ⁻	NO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	NH ₄ ⁺
Station	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	H ⁺	NH ₄ ⁺	H ⁺	NH ₄ ⁺	Cl ⁻	Na ⁺	Na ⁺	Na ⁺	Na ⁺	H ⁺
Seoul	2.32~3.63 (2.96)	2.42~4.78 (3.82)	2.14~7.00 (3.61)	0.94~1.16 (1.03)	0.59~2.18 (1.23)	0.26~0.46 (0.36)	1.04~1.78 (1.30)	0.38~1.25 (0.91)	0.09~0.52 (0.27)	0.23~3.04 (1.67)	0.05~0.36 (0.23)	2.24~6.02 (3.38)
Yangpyong	2.48~3.04 (2.71)	0.69~2.05 (1.37)	2.31~3.19 (2.69)	0.90~1.10 (0.99)	0.76~1.29 (1.01)	0.32~0.44 (0.37)	0.28~0.69 (0.49)	0.73~2.03 (1.42)	0.26~1.14 (0.63)	0.10~1.50 (0.62)	0.01~0.25 (0.10)	2.36~3.53 (2.73)
Hongchon	2.06~2.78 (2.43)	1.48~2.89 (2.59)	1.88~3.77 (2.68)	0.82~1.16 (1.01)	0.81~1.46 (1.11)	0.36~0.51 (0.42)	0.72~1.60 (1.04)	0.31~1.63 (0.94)	0.08~0.38 (0.23)	0.71~1.23 (0.90)	0.08~0.23 (0.16)	2.09~3.77 (2.67)
Inje	1.91~2.40 (2.25)	1.60~3.40 (2.51)	1.15~3.05 (2.22)	0.96~1.27 (1.13)	0.49~1.29 (0.98)	0.41~0.59 (0.50)	0.84~1.41 (1.10)	0.41~1.19 (0.83)	0.07~0.44 (0.27)	0.32~1.47 (0.84)	0.03~0.26 (0.12)	1.20~2.63 (1.93)

1.03, 0.99, 1.01, 1.13으로서 양평을 제외하고는 암모늄보다는 황산염이 다소 높은 값을 보였다. 또한, 양평과 인제에서는 암모늄과 황산염의 농도가 거의 동일함을 알 수 있었다. NH₄⁺와 H⁺의 당량 농도비는 서울에서 2.24~6.02로서 타 지점에 비하여 변동 폭이 매우 크게 나타났으며 양평에서 2.36~3.53으로 가장 작게 나타났다. 평균 당량 농도비는 서울(3.38), 양평(2.73), 홍천(2.67), 인제(1.93)순으로 서에서 동으로 갈수록 암모늄 농도가 상대적으로 감소함을 알 수 있었다.

표 3은 통계 프로그램인 SPSS PC+ version 2를 이용하여 각 이온간의 상관 관계를 제시한 것으로 H⁺와 F⁻는 전 지점에서 분석된 어느 이온과도 상관성이 0.5 이하로 낮게 나타나므로 표에서는 제시하지 않았다. 서울과 인제에서는 전기 전도도와 이온간의 상관 관계가 0.60~0.69 사이에 분포하는 경우가 각각 3개, 2개로 나타난 반면에 양평과 홍천에서는 전혀 나타나지 않았다. 또한, 상관 관계가 0.70~0.79 사이에서도 양평과 인제에서는 나타나지 않았다. 각 이온간의 상관 관계가 0.8 이상인 경우만의 특성을 고찰하여 보면, 양평과 홍천에서는 SO₄²⁻:NO₃⁻, Ca²⁺:Mg²⁺의 두 경우만 동일한 지점 특성을 보인 반면에 서울과 인제의 경우에는 NH₄⁺:SO₄²⁻가 높은 상관성을 보였다. 특히, 인제는 서울, 양평, 홍천에서 상관성이 0.8 이상을 모두 포함하고 있으며, 타 지점에서는 전혀 나타나지 않은 Mg²⁺:NO₃⁻도 상관성이 매우 높은 것으로 나타났다. 그리고 상관 관계 분석에서 가장 두드러진 특징은 서울을 비롯한 세 지점 모두 토양에 근원을 둔 Ca²⁺와

Table 3. The correlation coefficients between the ion components in precipitation samples.

Site	Range	0.60~0.69	0.70~0.79	0.80≤
Seoul	Cl ⁻ : Cond.			
	NO ₃ ⁻ : Cl ⁻			
	SO ₄ ²⁻ : Cond.			
	SO ₄ ²⁻ : Cl ⁻		NO ₃ ⁻ : Cond.	
	NH ₄ ⁺ : Cond.		SO ₄ ²⁻ : NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺ : SO ₄ ²⁻
Yangpyong	NH ₄ ⁺ : SO ₄ ²⁻		Mg ²⁺ : NO ₃ ⁻	
	Mg ²⁺ : NH ₄ ⁺		Mg ²⁺ : SO ₄ ²⁻	SO ₄ ²⁻ : NO ₃ ⁻
	Ca ²⁺ : NH ₄ ⁺		Ca ²⁺ : NO ₃ ⁻	Ca ²⁺ : Mg ²⁺
			Ca ²⁺ : SO ₄ ²⁻	
Hongchon	Na ⁺ : Cl ⁻		NH ₄ ⁺ : NO ₃ ⁻	
	NH ₄ ⁺ : SO ₄ ²⁻		K ⁺ : Cl ⁻	SO ₄ ²⁻ : NO ₃ ⁻
	Mg ²⁺ : SO ₄ ²⁻		Mg ²⁺ : Cl ⁻	Ca ²⁺ : Mg ²⁺
	Ca ²⁺ : Cl ⁻		Mg ²⁺ : K ⁺	
	Ca ²⁺ : Na ⁺		Ca ²⁺ : NO ₃ ⁻	
Inje	NO ₃ ⁻ : Cond.		SO ₄ ²⁻ : Cond.	
	NO ₃ ⁻ : Cl ⁻		Na ⁺ : Cl ⁻	SO ₄ ²⁻ : NO ₃ ⁻
	NH ₄ ⁺ : Cond.		NH ₄ ⁺ : NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺ : SO ₄ ²⁻
	Mg ²⁺ : K ⁺		Mg ²⁺ : Cl ⁻	Mg ²⁺ : NO ₃ ⁻
	Ca ²⁺ : Cl ⁻		Ca ²⁺ : NO ₃ ⁻	Ca ²⁺ : Mg ²⁺

Mg²⁺가 0.8 이상의 높은 상관성을 보였으며, 이는 우리 나라 중부 지방의 오염 형태가 자연적인 오염원의 영향보다는 인위적인 오염원의 영향을 많이 받고 있음을 의미한다. 그러나 대기 중의 각종 오염물질은 매우 다양하고 강수 중의 농도에 직·간접

Table 4. The results of varimax factor matrix for precipitation sample.

	Factor 1	Eigen. value	Culm. value	Factor 2 percent	Eigen. value	Culm. percent	Factor 3	Eigen. value	Culm. percent
Seoul	NO ₃ ⁻ (0.7822) NH ₄ ⁺ (0.7353) SO ₄ ²⁻ (0.7247) H ⁺ (0.6255)	5.6412	47.0	Ca ²⁺ (0.8311) Mg ²⁺ (0.8183) Cl ⁻ (0.7688) K ⁺ (0.6741)	1.5093	59.6	F ⁻ (0.9408)	1.0198	68.1
Yangpyong	NO ₃ ⁻ (0.9231) SO ₄ ²⁻ (0.8807) Mg ²⁺ (0.8632) Ca ²⁺ (0.8358) NH ₄ ⁺ (0.8030)	4.8623	40.5	Cl ⁻ (0.7529) H ⁺ (0.7030) K ⁺ (0.6631)	1.3424	51.7	F ⁻ (0.7642)	1.0775	60.7
Hongchon	Cl ⁻ (0.8809) Ca ²⁺ (0.8698) Mg ²⁺ (0.8683) K ⁺ (0.8125) Na ⁺ (0.7493)	5.5493	46.2	NH ₄ ⁺ (0.7709) NO ₃ ⁻ (0.7101) SO ₄ ²⁻ (0.6123) F ⁻ (0.5665)	1.4302	55.2	H ⁺ (0.8612)	1.1828	68.0
Inje	SO ₄ ²⁻ (0.9259) NH ₄ ⁺ (0.8711) NO ₃ ⁻ (0.8025) Ca ²⁺ (0.6208) K ⁺ (0.5366)	5.7099	47.6	Cl ⁻ (0.8799) Na ⁺ (0.8007) Mg ²⁺ (0.6825)	1.5168	60.2	H ⁺ (0.7912) F ⁻ (0.6347)	1.1567	69.6

적으로 영향을 미치며, 시료 채수 기간 동안의 기상 요소(풍향, 풍속 등)와 시료 채수 지점의 주변 환경 등도 강수 화학 농도에 큰 변화 요인으로 작용하므로 단순 상관 관계로 모든 사실을 규명하기는 어려움이 있으며, 보다 많은 자료가 축적되어야 여러 현상들을 복합적으로 규명할 수 있을 것으로 보인다.

강수 중에 함유된 수용성 오염 물질의 오염원을 추정하는 방법에는 상층 기상 자료를 이용하여 역 궤적(backward trajectory)하거나 통계 프로그램(SPSS, SAS 등)을 이용하는 방법 등이 있으나 본 연구에서는 통계적인 방법을 이용하여 오염원을 추정하였다. Crawley *et al.* (1986)과 Olsen *et al.* (1990)은 강수의 화학 성분을 통계 프로그램을 이용하여 요인 분석을 실시한 결과를 크게 3가지로 구분하여 오염 물질의 기원을 설명하였다. 첫째, 해양 기원의 지표 물질은 Na⁺로서 Cl⁻, Mg²⁺와 상관성이 높으며, 둘째, 토양과 도로 먼지의 지표 물질은 Ca²⁺로서 K⁺, NH₄⁺, NO₃⁻와 상관성이 높으며, 특히 NH₄⁺와 NO₃⁻는 동물의 배설물이나 비료 성분의 지표 물질이기도 하다. 셋째, 산업 배출 기원의 지표 물질은 H⁺로서 NO₃⁻, SO₄²⁻와 상관성이 높다. 따라서 본 연구에서도 요인 분석을 실시하여 1994년부터 1997

년까지 중부 지방의 4개 지점에 내린 강수의 오염 물질 기원을 고찰하였다. 표 4는 중부지방 4개 지점에서의 3개의 요인을 선택한 분석 결과로서 여기에서, E.V.는 고유값(Eigenvalue)이며, C.P.는 누적 빈도(Cumulative of percent)이다. 중부 지방 4개 지점에서 선택된 3개 요인의 설명력은 서울, 양평, 홍천 그리고 인제가 각각 68.1, 60.7, 68.0% 그리고 69.6%로서 인제에서 가장 높은 설명력을 보였으며 양평에서 가장 낮은 설명력을 보였다. 인구와 산업 밀집 지역인 서울에서는 첫 번째 요인은 전체 변이 중 47.0%의 설명력을 보이며 NO₃⁻, NH₄⁺, SO₄²⁻ 그리고 H⁺가 포함된 것으로 보아 자동차, 공장 등에서 배출되는 인위적인 대기 오염 물질이 가장 크게 작용된 것으로 사료되며, 두 번째 요인은 전체 변이의 8.5%의 설명력을 가지며 Ca²⁺, Mg²⁺ 등이 포함된 것으로 보아 건물, 도로 등에서 바람 또는 차량의 통행에 의한 비산된 먼지 즉, 자연적인 영향이 작용된 것으로 판단된다. 대부분이 농경지인 양평에서는 첫 번째 요인이 전체 변이 중 40.5%의 설명력을 보이며 NO₃⁻, Mg²⁺, Ca²⁺, SO₄²⁻, NH₄⁺가 포함된 것으로 보아 자동차, 공장 등에서 배출되는 인위적인 대기 오염 물질과 토양에서 배출된 자연적인 오염원

이 복합적으로 작용된 것으로 사료되며, 두 번째 요인은 인자 부하량(factor loading)의 차이는 있으나 전체 변이의 11.2%의 설명력을 보였다. 그리고 홍천에서는 첫 번째 요인이 46.2%의 설명력을 보이며 Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ 등이 포함된 것으로 보아 자연적인 오염원의 영향이 크게 작용된 것으로 보이며, 11.9%의 설명력을 가진 두 번째 요인은 NO_3^- , SO_4^{2-} 등이 포함된 점으로 보아 인위적인 오염이 상대적으로 낮게 나타난 것으로 사료된다. 또한 인제에서는 첫 번째 요인이 47.6%의 설명력으로 타 지점에 비하여 설명력의 차이는 작지만 가장 높은 것으로 나타났으며, 양평과 마찬가지로 인위적인 오염과 자연적인 오염이 복합적으로 나타났다. 그리고 F^- 는 전 지점에서 세 번째 요인에 포함되어 있고 설명력도 낮으므로 정확한 오염원을 추정할 수 없었다. 그러나 요인 분석에 의한 중부 지방 4개 지점의 강수

중에 가장 영향을 미치는 요인은 지점에 따라 차이가 있는데 서울에서는 인위적인 오염이, 홍천에서는 자연적인 오염이, 그리고 양평과 인제에서는 인위적인 오염과 자연적인 오염이 복합적으로 나타나는 특성을 보였다.

그림 2는 최근 4년간의 지점에 따라 강수 중에 함유된 각 이온의 평균 농도 값을 보인 것이다. 음이온 중 F^- 는 전 지점에서 가장 저농도를 보였으며, 지점에 따라 거의 농도 값의 차이는 보이지 않았다. Cl^- 는 양평에서 $32.0 \mu eq/l$ 로 서울과 홍천보다는 약 2.2배, 인제보다는 약 2.8배 높은 농도 값을 보였다. 그리고 자동차와 산업장 등에서 배출되며, 산성비의 주 원인 물질이라고 보고된 바 있는 NO_3^- 와 SO_4^{2-} 는 서울에서 가장 고농도를 보이며, 동쪽으로 갈수록 서서히 감소하는 경향을 보였다. 그리고 인제에서는 분석된 음이온(F^- , NO_3^- , NO_3^- , $NSS-SO_4^{2-}$)이

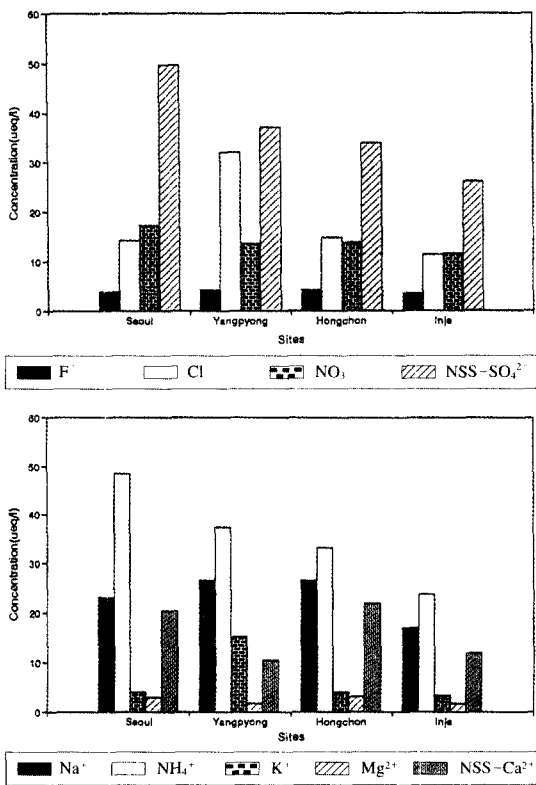


Fig. 2. Mean equivalent concentration of ion components at 4 stations in the central part of Korea during the period from 1994 to 1997.

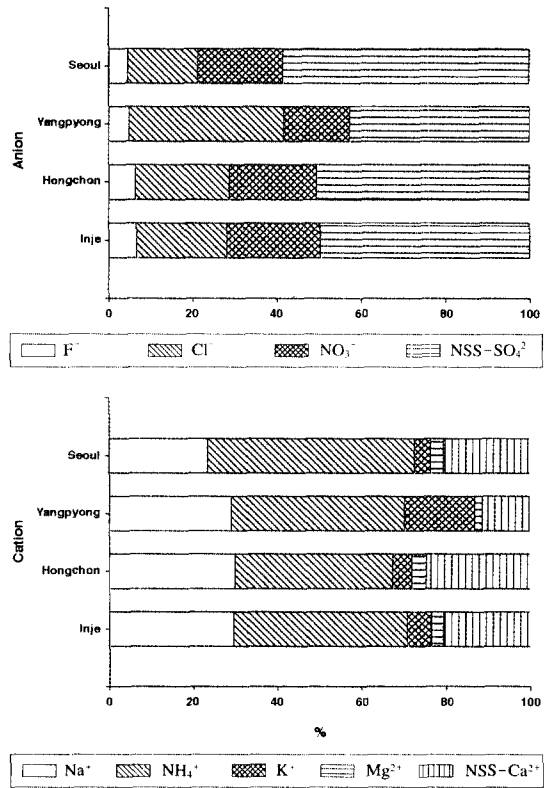


Fig. 3. The composition ratio of anion and cation at 4 stations in the central part of Korea during the period from 1994 to 1997.

가장 낮은 농도를 나타냈고, 본 연구 대상 지역 중에서는 배경 중도 측정 지역으로 가장 적절한 것으로 판단된다. 양이온 중 Na^+ 는 양평과 인제에서 모두 $26.5 \mu\text{eq/l}$ 의 농도로 타 지점에 비하여 가장 높은 농도를 보이며, NH_4^+ 는 관측 지점 중 서쪽에 위치한 서울에서부터 가장 동쪽에 위치한 인제로 이동할수록 감소하는 경향이 뚜렷하게 나타났다. 그러나 토양이나 암석이 기원이라 보고 있는 K^+ 와 Mg^{2+} 는 저농도로써 뚜렷한 경향을 보이지 않았다. Ca^{2+} 는 서울과 홍천에서 각각 $20.4, 21.9 \mu\text{eq/l}$ 로 거의 비슷한 농도를 보인 반면에 양평과 인제에서는 각각 $10.4, 11.9 \mu\text{eq/l}$ 로 차이가 거의 없는 것으로 나타났다. 그림 3은 각 지점에서 음이온과 양이온으로 구분하여 각각에 대하여 백분율로 환산하여 제시한 것이다. 음이온의 경우, 홍천과 인제는 거의 유사한 조성비를 보였으며, 양평은 Cl^- 가 36.8%로서 타 지점과 상이한 조성비를 보였다. 그리고 양이온의 경우, Na^+ 는 서울을 제외하고 세 지점 모두 약 30%로 나타난 반면에 K^+ 는 양평이 타 지점에 비하여 약 10% 이상 높게 나타났다.

그림 2와 그림 3을 종합하여 고찰해 보면, 우리나라 중부 지방은 서에서 동으로 갈수록 인위적인 오염인 황산염과 질산염은 감소하는 추세가 뚜렷한 반면에 암모늄을 제외한 자연적인 오염은 뚜렷한 경향을 보이지 않았다. 그리고 전 지점에서 음이온 중에서는 황산염이 양이온 중에서는 암모늄이 가장 높은 조성비를 보였다.

4. 결 론

우리나라 중부 지방을 대상으로 1994년 3월부터 1997년 11월까지 약 4년 동안에 내린 강수를 분석·고찰해 본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. '94~'97년(약 4년간)의 강수량을 고려한 평균 pH는 서울 : 4.73, 양평 : 4.87, 홍천 : 4.89, 인제 : 4.81로서 관측 지점간의 큰 차이는 없으나 대도시인 서울의 경우에 가장 낮은 값을 보였다.

2. 주요 산성 오염 물질인 SO_4^{2-} 와 NO_3^- 의 평균 조성비($\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$)는 서울 : 2.96, 양평 : 2.71, 홍천 : 2.43, 인제 : 2.25로서 서쪽에서 동쪽으로 갈수록 값이 작아지는 것을 보였다. 따라서 황산염 계통의 오염 물질이 질산염 계통의 오염 물질에 비해 상대적으로

으로 많이 감소함을 알 수 있었다.

3. 상관 분석 결과, 토양에 근원을 둔 Ca^{2+} 와 Mg^{2+} 가 서울, 양평, 홍천, 인제에서 0.8 이상의 높은 상관성을 보인 반면에 H^+ 와 F^- 는 전 지점에서 어느 이온과도 상관성이 거의 없는 것으로 나타났다. 그리고 요인 분석 결과, 중부 지방 4개 지점의 강수 중에 가장 영향을 미치는 요인은 서울의 경우에는 인위적인 오염이, 홍천의 경우에는 자연적인 오염이, 그리고 양평과 인제의 경우에는 자연적인 오염과 인위적인 오염이 복합적으로 작용한 것으로 나타났다.

4. 우리나라의 중부 지방에서 서에서 동으로 갈수록 황산염과 질산염은 감소하였으나 암모늄을 제외한 자연적인 오염 물질은 뚜렷한 경향을 보이지 않았다. 그리고 전 지점에서 음이온 중에서는 황산염이, 양이온 중에서는 암모늄이 가장 높은 조성비를 보였다.

5. 인제는 대부분의 이온이 타 지점에 비하여 가장 저농도를 보임으로써 선정된 4개 지점 중에서 가장 적절한 배경 농도 지역으로 판단되었다.

감사의 글

이 연구는 기상연구소 기본연구과제인 "도시지역 대기 중 에어로졸의 광화학적 특성 연구(MR970A 24)"의 일환으로 이루어졌다. 강수 시료 샘플링에 많은 협조를 주신 강화, 양평, 홍천, 인제기상관측소 직원 여러분께 감사드린다.

참 고 문 헌

- 강공언, 강병욱, 김희강(1992) 해안지역과 도시지역 강수의 화학적 성상에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 8(3), 191-197.
- 강공언, 강병욱, 김희강(1995) 강화지역 강수의 오염도 평가에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 11(1), 57-68.
- 강공언, 이주희, 김희강(1996) 서울지역 강수중 이온성분 분석 자료의 해석, 한국대기보전학회지, 12(3), 323-332.
- 강공언, 임재현, 김희강(1997) 서울지역 강수 산성도의 경향 분석, 한국대기보전학회지, 13(1), 9-18.
- 기상연구소(1993) 산성비에 관한 연구(II) - 산성비 침적

- 특성 조사 - , MR 93A-004, pp. 3-4.
- 김정수, 강인구, 장성기 (1992) 세정이론을 통한 산성비의 평가와 발원지 추적, 한국대기보전학회지, 8(2), 121-127.
- 구자공, 고석오, 김민영 (1989) 고도별 강우율 변화를 고려한 산성비 모델의 개발, 한국대기보전학회지, 5(1), 43-51.
- 구자공, 박경렬 (1993) 대전지역 산성강우의 화학적 특성에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 9(2), 147-153.
- 나춘기, 정재일 (1997) 전주에서 채수된 강수의 화학적 조성, 한국대기보전학회지, 13(5), 371-382.
- 백성욱, 황승만 (1992) 주성분/중회기 분석을 이용한 대구 지역 대기 중 부유분진의 발생원별 특성 평가, 한국대기보전학회지, 8(3), 179-190.
- 산성우조사법 (1996) 酸性雨調査法, 337-343pp.
- 손동현, 양성철 (1985) 서울시의 산성물질 강하현상에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 1(1), 33-42.
- 송기형, 박용남, 정용승 (1992) 충청북도 농촌 지역의 강수의 산성도에 대한 기초 조사, 한국대기보전학회지, 8(1), 38-44.
- 신용배, 이상권, 안규홍 (1986) 서울시 산성비의 원인 물질에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 2(2), 66-74.
- 심상규, 강창희, 김용표 (1994) 제주도에서의 빗물 이온 농도 분석, 한국대기보전학회지, 10(2), 98-104.
- 이경재 (1993) 대기오염과 산성비가 생태계에 미치는 영향, 한국대기보전학회지, 9(1), 11-18.
- 이민희, 한의정, 원양수, 신찬기 (1986) 습성 대기성분에 대한 통계적 분석, 한국대기보전학회지, 2(1), 41-54.
- 이민희, 한의정, 신찬기, 한진석 (1987) 우수채수기가 우수 성분에 미치는 영향, 한국대기보전학회지, 3(2), 53-61.
- 이승일, 김승호, 조기철, 김희강 (1996) 삼척지역 우수의 이온성분 농도에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 12(1), 23-28.
- 전영신, 조하만, 권원태 (1994) 한반도 중부지방에서 관측된 1992-1993년 산성비의 특성과 이동 경로 분석, 한국대기보전학회지, 10(3), 175-182.
- 정용승, 김태군 (1991) 한국 서해안에서 관측된 산성비의 발원지 추적 연구, 한국대기보전학회지, 7(3), 203-207.
- 최재천, 이민영, 이선기 (1994) 도시 지역과 배경 지역간의 강수 화학 성분 특성 비교, 기상연구논문집, 11(1), 111-123.
- 최재천, 이민영, 이선기 (1994) 고산지역 강수의 화학 성분 특성에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 10(1), 64-72.
- 최재천, 이민영, 김 산 (1997a) 제주도 성산포지역에 내린 빗물의 계절별 화학적 특성, 기상연구논문집, 14(1), 8-14.
- 최재천, 이민영, 김산, 김성군 (1997b) 1991~1995년 소백산 지역에 내린 강수의 화학조성에 관한 연구, 한국기상학회지, 33(3), 477-486.
- 환경부 (1996) 환경통계연감 제9호, pp. 4-5.
- Astrid, S., H. Wortham., M. Millet, and P. Mirabel (1996) Chemical composition of rainwater in eastern France, Atmos. Environ., 30(1), 59-71.
- Baron, J. and S. Denning (1993) The influence of mountain meteorology on the precipitation chemistry at low and high elevations of the Colorado front range. Atmos. Environ., 27A(15), 2337-2349.
- Camareo, L. and J. Catalan (1993) Chemistry bulk precipitation in the central and eastern Pyrenees North Spain. Atmos. Environ., 27A(1), 83-94.
- Collett, J.J., B. Oberholzer, and J. Staehelin (1993) Cloud chemistry at Mt. Ridge, Switzerland : Dependence on drop size and relationship to precipitation chemistry, Atmos. Environ., 27A(1), 33-42.
- Crawley, J. and H. Sieveering (1986) Factor analysis of the MAP3S/RAINE precipitation chemistry network : 1976-1980, Atmos. Environ., 20, 1001-1013.
- Haider, A.K. and H. Liaquat (1990) Chemical characterization of acid precipitation in Albany New York, Atmos. Environ., 23A(7), 1869-1882.
- Issac, G.A. and P.H. Daum (1987) A winter study, air, cloud and precipitation chemistry in Ontario, Canada, Atmos. Environ., 21(7), 1587-1600.
- Lacaux, J.P., J. Servant, and J.G. Baudet (1987) Acid rain in the tropical forests of the Ivory Coast, Atmos. Environ., 21(12), 2643-2647.
- Liljestrang, H. and J. Morgan (1981) Spatial variations of acid precipitation in Southern California. Environ. Sci. Tech., 15, 330-338.
- Olsen, A.R., E.C. Voldner, D.S. Bigelow., W.H. Chan., T.L. Clark, M.A. Lulis, P.K. Misra, and R.J. Vet (1990) Unified wet deposition data summaries for North America : data summary procedures and results for 1980-1986, Atmos. Environ., 24A, 661-672.
- Samara, C., R. Tsitouridou, and C. Balafoutis (1992) Chemical composition of rain in Thessaloniki, Greece, In relation to meteorological conditions, Atmos. Envi-

- ron., 26B, 359-367.
- Semra, G.T. and S. Ungor (1996) Rainwater chemistry in Ankara, Turkey, Atmos. Environ., 26(15), 2721-2727.
- U.S. EPA (1983) Acidity nutrient and minerals in atmospheric precipitation over Florida deposition patterns, mechanisms and ecological effects, EPA-600/3-83-004.
- WMO/GAW (1996) Report of the workshop precipitation chemistry laboratory techniques, No. 102, 14-16.