

비무장지대에 인접한 경기도 농촌지역 강수의 화학적 성분에 관한 기초 연구

박 국 태 · 김 창 호 · 홍 현 복 · 류 오 현 · 양 일 호 · 임 광 수 · 민 덕 식
한국교원대학교 화학교육과
(1997년 8월 7일 접수)

A Preliminary Study on the Chemical Compositions of Precipitation in the Rural Area of Kyunggi Province near Demilitarized Zone

Kuk-Tae Park, Chang-Ho Kim, Hyun-Bok Hong, Oh-Hyeon Ryu,
Il-Ho Yang, Kwang-Su Lim, and Duck-Sik Min
Dept. of Chemical Education, Korea National University of Education, Chungbuk 363-791, Korea
(Manuscript received 7 August 1997)

A preliminary study on the chemical compositions of forty seven precipitations from March 1994 to May 1995 in Yeoncheon-gun, which is adjacent to the southern boundary of demilitarized zone (DMZ) in the northernmost tip of Kyunggi province has been performed. The metal cation and anion concentrations were measured by atomic absorption spectrometer and ion chromatography, respectively. pH/Ion meter and direct nesslerization method were used for the concentration measurements of H^+ ion and NH_4^+ ions, respectively. Based on the data, the quantitative orders of the cation and anion average concentrations were $Ca^{2+} > NH_4^+ > Na^+ > K^+ > Mg^{2+} > H^+$ and $SO_4^{2-} > Cl^- > NO_3^-$, respectively. The ratio of average total anion concentration to average total cation concentration was 0.97. The average pH value of the precipitations was 5.60. These results, correlation coefficients between the ion concentrations, and monthly variations of pH value and precipitation amount are used for chemical analysis on the environmental pollution and pollutant sources in Yeoncheon-gun of Kyunggi province near DMZ.

Key words : Demilitarized zone (DMZ), Chemical compositions, Environmental pollution.

1. 서 론

현대 산업사회의 급속한 발달로 인구의 증가, 생활수준의 향상, 그리고 도시화와 공업화의 확대 등에 따른 인위적인 환경오염 중에서, 산성강수(acid precipitation)에 의한 자연환경 및 생태계의 파괴가 심각한 문제로 대두되고 있다. 산성강수는 인간의 생활 및 산업 활동에 의해 배출되는 황산화물과 질소산화물 등이 대기 중에서 화학반응을 일으키면서 발생원으로부터 멀리 떨어진 곳까지 이동하다가 강수나 눈과 함께 지상에 내리는 것으로서, 자연 생태계를 파괴하고, 농작물 및 산림에 피해를 주며, 사람의 건강에까지 심각한 영향을 미치고 있을 뿐만 아니라, 국경을 넘어 피해를 주게 되어 국가간 분쟁이 야기되기도 한다.

산성강수는 전나무, 가문비나무 등 식물의 광합성 작용을 하는 엽록소를 파괴해 탄수화물을 만들지 못하게 함으로써, 식물의 성장과 생산력을 떨어뜨리는 작용을 한다. 산성강수로 토양중의 칼륨, 칼슘, 마그네슘, 나트

륨 등 식물 생태계에 중요한 무기물질이 먼저 유실되고, 음이온인 질산이온(NO_3^-)과 염화이온(Cl^-)도 쉽게 유실되어 토양의 산성화를 초래해 식물의 생산성이 크게 감소하게 된다. 일반적으로 산성강수의 피해가 광범위하게 나타난 것은 1960년대 이후 소위 높은 굴뚝 정책에 의해서인데, 굴뚝을 높이면서 상층의 빠른 바람이 대기오염 물질을 먼 거리까지 운반시켜서, 산성강수의 피해가 광범위하게 나타나는 원인이 되었다(심상규, 1992).

최근 대기오염 물질의 장거리 이동 현상으로 산성강수 문제가 많은 관심의 대상이 되고 있는데, 대표적인 것은 중국 대륙으로부터 매년 봄에 우리 나라로 이동되어 오는 황사 현상이다. 황사는 반응성이 전혀 없는 입자상 물질로 육안으로도 관측되고 있다. 그리고 중국의 북동쪽에 자리잡고 있는 대규모 공단 등지에서 배출되는 가스상 물질은 일정하지 않은 기류의 경로를 따라 이동하면서 물리적 또는 화학적인 변화를 일으키므로, 유입량이나 피해 정도를 단언하기는 매우 어려운 일이다

(과학기술처, 1989, 1990). 그러나 중국에서는 황의 함량이 1%가 넘는 석탄을 연료로 많이 사용하고 있어, 황산화물이 황해를 지나 한반도에 상륙하는 저기압에 수렴되어 내리기 때문에 우리 나라 산성강수의 큰 원인이 되고 있다(정용승과 김태군, 1991).

1기압 25 °C에서 순수한 물의 pH는 7.00이며, pH가 7.00보다 작을 때를 산성이라고 한다. 그러나 대기중의 이산화탄소(약 355 ppm)가 물에 녹아 평형을 이룰 때의 pH는 5.67이 된다(Bacastow and Keeling, 1981). 즉, 오염되지 않은 자연 대기 상태에서 CO₂가 물에 용해되면 pH 5.67의 약산성을 나타낸다. 그러나 인위적인 발생원에서 대기중에 방출되는 황산화물과 질소산화물 등의 산성물질에 의해 강수의 pH가 5.6보다 낮게 되는데, 이러한 강수를 산성비(acid rain)라고 하였다(O'Neil, 1993).

그러나 대기중에는 자연 발생원으로부터 방출되는 암모니아나 CaCO₃ 등의 염기성 가스나 에어로졸(aerosol)도 존재한다. 이러한 염기성 물질들은 자연 상태 강수중에 존재하는 어떤 산의 일부를 중화하여 pH 값을 올리게 된다(Khemani, 1987). 즉 자연 상태의 강수에서도 pH가 5.6 이하인 것도 있고 5.6 이상인 것도 있다. 그래서 pH 5.6이라는 기준도 자연 상태 강수중의 CO₂ 농도 효과에 의한 것이라고 단적으로 결론지어 말할 수 없다. 그러므로 산성강수는 pH 5.6 이하라는 일반적인 기준은 더 이상 사용할 수 없게 되었다. 따라서 산성강수의 pH 기준은 측정지역의 대기 조성이나 지역적인 특성에 따라 각각 다르게 정해져야 될 것이다. 미국 NAPAP (National Acid Precipitation Assessment Program)의 대상이 되는 미국과 캐나다에서는 pH 5.0 이하인 강수를 산성강수라고 정의하고 있으며(Godish, 1988), 영국에서는 pH 4.2를, 그리고 스칸디나비아 반도에서는 pH 4.4를 산성강수의 기준으로 보고 있다(Freemantle, 1995). 아직까지 우리나라에서는 산성강수에 대한 기준으로 pH 5.6을 일반적으로 사용하고 있으나, 본 논문에서는 최근에 전 세계적으로 통용되고 있는 산성강수의 pH 기준인 5.0(Baird, 1995; Freemantle, 1995)을 사용하기로 한다.

대기중에 존재하는 산성물질은 강수, 눈, 안개 등의 습윤침적(wet deposition)이나 기체나 고체 형태로 지표 부근에 있는 풀, 나무, 토양, 그리고 건물 등에 건조침적(dry deposition)한다. 가스상 물질(SO₂, NO₂, HCl 등)은 흡착 및 흡수되고, H₂SO₄ 연무(mist)와 같은 입자상 물질은 확산, 관성충돌, 그리고 중력낙하에 의하여 침적된다. 대기중에서 모든 입자상 물질의 20% 정도가 건조침적에 의해 제거된다(O'Neil, 1993).

대기중에서 1차 오염 물질인 SO₂와 NO_x는 화학 반응으로 2차 오염 물질인 황산과 질산을 생성하는데, 1차 오염 물질의 기체 상태와 액체 상태에서의 화학 반응은 서로 다르게 일어난다(Durham, 1984). 산성강수에 포함되어 있는 주요 이온 성분들(H⁺, NH₄⁺, SO₄²⁻, NO₃⁻)은 구름 내부와 대기중에서 여러가지 복잡한 화학 반응 경로에 의하여 생성되는데, SO₂와 NO_x의 광화학 반응과 NH₃의 H₂SO₄나 HNO₃와의 중화 반응이 중요한 반

응 경로로 생각된다. 그리고 SO₂와 NO_x의 산화는 OH⁻와 H₂O₂ 그리고 O₃ 등과 같은 대기중에 존재하는 산화제의 농도에 의하여 비선형적(nonlinear)으로 증가하는데(Calvert and Stockwell, 1984), 이들 산화제의 농도는 온도와 상대습도, 그리고 태양 복사의 강도 등에 따라 일별과 월별 그리고 계절별로 변한다(Richard et al., 1983).

한국에서 1960년대 이후 급속한 공업화로 화석 연료와 자동차 사용이 급증하여 SO₂와 NO_x의 배출량이 증가하고 있다. 이러한 현상은 도시 지역에만 국한된 것이 아니고 농촌 지역까지 확산되고 있어, 광범위한 지역에서 산성강수가 내릴 수 있는 것이다. 그동안 국내에서 강수의 화학적 성분과 산성강수의 지역적인 특성에 대한 연구들이 있었다(이기호와 허철구, 1996; 박국태 외, 1995; 송기형 외, 1992; 이민희, 1990; 김양근, 1989, 1990). 산성강수가 심한 지역에서는 생태계의 변화도 수반되는데, 대기 오염이 심각하거나 토양이 산성인 경우에 미국 자리공 식물 등이 잘 자라 군락을 이룬다는 보고가 있었다(이창기, 1992).

본 연구에서는 인위적인 환경 오염원이 거의 없어 자연 생태계가 잘 보존되어 있을 것으로 생각되어 지는 휴전선 비무장지대의 자연 환경 상태를 간접적으로 추정해 보기 위하여, 비무장지대 남방한계선과 인접하고 있는 경기도 연천군 청산중학교에서 1994년 3월부터 1995년 5월까지의 기간동안에 수집된 39개의 빗물과 4개의 눈 그리고 3개의 진눈개비의 화학적 성분들을 정량적으로 분석하여 이온들의 평균 농도의 크기 순서, 이온 농도들간의 상관 관계, 그리고 강수들의 월별 평균 pH 값과 강수량의 변화 등으로부터 비무장지대에 인접한 경기도 농촌지역의 환경오염 실태 및 환경오염 물질의 발생원과 유입 경로를 추적해 보고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1 강수 수집 장소

1994년 3월부터 1995년 5월까지의 연구기간 동안 강수는 비무장지대 남방한계선과 인접해 있는 경기도 연천군 청산면 궁평리 청산중학교 옥상에서 수집되었다. 경기도 연천군은 경기도 최북단에 위치하여 비무장지대 남방한계선과 인접해 있고, 추가령 지구대로서 동쪽은 광주 산맥의 여백이 내부로 뻗어 고대산(해발 832.1 m)과 지장산(해발 877.2 m)으로 둘러 쌓여 있으며, 동북부는 마식령 산맥의 지맥이 내부로 뻗어 고왕산(해발 355.5 m) 등 해발 350 m 내지 800 m의 급경사로 이루어진 산으로 둘러 쌓여 있다. 황해도 금천군 북한땅으로부터 남북으로 흘러내리는 임진강은 연천군 중앙부를 중단하여, 동남부에서 한탄강과 합류하며, 서남부의 임진강 유역은 평야와 산지 및 구릉지대로 되어 있다. 연천군은 대한민국의 수도인 서울과는 60 km, 북한의 개성과는 50 km, 그리고 비무장지대 민통선과는 20 km 떨어져 있다. 그리고 청산중학교는 동쪽으로 군부대와 300 m, 북서쪽으로 비무장지대 남방한계선과 14 km, 서쪽으로 전곡읍과 약 2 km, 남쪽으로 궁평리 마을과 약 500 m, 북쪽으로 한탄강과는 약 100 m 떨어

진 농촌마을에 위치하고 있다.

연천군의 기후는 내륙에 위치하고 있는 관계로 대륙성 기후의 특징을 나타내고 있어 연평균 기온이 10 °C 내외이며, 가장 추운 1월의 평균 기온이 영하 7 °C 내외이다. 그리고 가장 더운 8월의 평균 기온은 26 °C 정도 로써, 한서(寒暑)의 차이는 33 °C나 되어 계절적 평균 기온 차이가 극심한 편이며, 겨울은 길고 결빙일(結氷日)이 139일이며, 봄은 비교적 짧은 편이다. 연평균 강수량은 1100~1400 mm이며, 강수 일수는 100일 내외가 된다. 겨울철에는 시베리아 대륙 기후권의 영향을 많이 받아 북서풍의 차가운 바람이 내습하나, 삼한사온(三寒四溫)의 특징을 갖는다. 그리고 여름철에는 필리핀 동부에서 발생하여 극동으로 내습하는 열대성 저기압의 영향권에 있게 되어, 고온 다습한 남서풍이 분다.

2.2 강수의 pH 측정과 이온 분석

(1) 강수의 pH 측정

강수는 중성세제로 세척하고 증류수로 헹군 뒤 건조시킨, 직경이 30 cm, 높이가 20 cm인 고밀도 polyethylene 용기에 수집하였으며, 부유물질이 있는 경우에는 Whatman qualitative 2 여과지에 통과시켜 500 mL 고밀도 polyethylene 수집병에 담아 실험실에서 pH를 측정하였다.

하루내에 종결되는 강수는 강수 종결시 바로 수집하였으며, 2일 이상 비가 지속적으로 내리는 경우는 다음날 오전 9시를 기준으로 각각 구분하여 수집하였다. 가을철에는 비와 눈을 분리하여 수집하였으며, 눈은 고밀도 polyethylene 수집병에 담아 실온에서 녹인 다음 pH를 측정하였다.

강수의 pH 측정을 위하여 digital pH/Ion meter 인 DMS Model DP-215를 사용하였다. pH/Ion meter는 사용 전에 pH 4.00과 pH 10.00의 표준 완충용액으로 보정한 다음, 강수의 pH 값을 3번 측정하고, 이들을 산술 평균하여 pH 값으로 취하였다. pH 값이 측정된 강수는 250 mL 고밀도 polyethylene 용기에 넣어 차후의 양이온과 음이온 분석을 위하여 5 °C 냉장고에 보관하였다.

(2) 강수의 양이온 및 음이온 분석

1994년 3월부터 1995년 5월까지의 기간에 수집된 39개의 빗물과 4개의 눈 그리고 3개의 진눈깨비가 양이온 및 음이온 분석에 사용되었다.

양이온 중에서 Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} 분석은 한국과학기술연구소(KAIST) 분석실의 Perkin-Elmer 5000 atomic absorption spectrophotometer (AAS), 그리고 NH_4^+ 양이온 분석은 ASTM (American society for testing and materials) D 1426 Method B 즉, direct nesslerization method에 의하여 수행되었다. 강수의 음이온 Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} 분석은 한국과학기술연구소 분석실의 Water-Associates ion chromatography를 이용하여 수행되었다.

3. 결과 및 고찰

경기도 최북단의 비무장지대 남방한계선과 인접하고 있는 연천군 청산면 궁평리 청산중학교 옥상에서 1994년 3월부터 1995년 5월까지의 기간에 수집된 39개의 빗물과 4개의 눈 그리고 3개의 진눈깨비의 화학적 성분을 분석한 결과와 pH 값들이 표 1에 제시되어 있으며, 월 평균 pH 값과 강수량이 표 2에 나타나 있다. 표 1에서 농도의 단위는 μM 이며, 각 양이온과 음이온의 당량을 고려하여 양이온의 농도 총량 Σ^+ 는 $[\text{H}^+] + [\text{Na}^+] + [\text{K}^+] + 2[\text{Ca}^{2+}] + 2[\text{Mg}^{2+}] + [\text{NH}_4^+]$ 값을, 음이온의 농도 총량 Σ^- 는 $[\text{Cl}^-] + [\text{NO}_3^-] + 2[\text{SO}_4^{2-}]$ 값을, 그리고 양이온과 음이온들의 총 이온 농도 Total은 $\Sigma^+ + \Sigma^-$ 값을 의미한다.

3.1 양이온과 음이온 농도에 대한 고찰

본 연구에서 1994년 3월부터 1995년 5월까지 수집된 39개의 빗물과 4개의 눈 그리고 3개의 진눈깨비의 화학적 성분을 분석한 결과들이 제시된 표 1을 살펴보면, 양이온들의 평균 농도 크기는 $\text{Ca}^{2+} > \text{NH}_4^+ > \text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{H}^+$ 의 순서이며, 음이온들의 평균 농도 크기는 $\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$ 의 순서이다. 이러한 양이온들의 평균 농도들 중에서는 Ca^{2+} 이온 농도가, 그리고 음이온들의 평균 농도들 중에서는 SO_4^{2-} 이온 농도가 가장 많이 존재하고 있음을 알 수가 있는데, 이것은 비무장지대에 인접한 경기도 농촌지역 강수의 양이온은 토양 구성 성분의 영향을, 그리고 음이온은 화석 연료 사용의 영향을 많이 받고 있음을 나타내 주는 것이다.

1994년 3월부터 1995년 5월까지의 기간에 수집된 강수들의 양이온 농도의 총량(Σ^+) 평균에 대한 음이온 농도의 총량(Σ^-) 평균의 비(평균 Σ^-/Σ^+)는 0.97로써, 이론적인 값인 1.00에 매우 가까우나 강수의 양이온 농도 총량이 음이온 농도 총량보다 조금 많음을 알 수 있다. 이러한 음이온 농도 총량이 양이온 농도 총량에 비하여 조금 적음으로써 생긴 불균형은 아마도 본 연구에서 검출되지 않은 극히 소량의 다른 음이온들이 강수중에 존재하기 때문일 것으로 생각된다.

일반적인 바닷물의 Cl^- 이온 농도에 대한 Na^+ 이온 농도의 비 $[\text{Na}^+]/[\text{Cl}^-]$ 가 0.86으로 보고되어 있으므로(송기형 외, 1992), 강수들의 바닷물 영향을 알아보기 위하여 표 1로 부터 Cl^- 이온 평균 농도에 대한 Na^+ 이온 평균 농도의 비 $[\text{Na}^+]/[\text{Cl}^-]$ 를 계산해 보면, 평균 $[\text{Na}^+]/[\text{Cl}^-]$ 값이 0.55로 Cl^- 이온이 바닷물에 비해서 훨씬 더 많이 포함되어 있다. 이것은 경기도 연천군이 내륙에 위치하고, 추가령 지구대의 분지로 바다로부터 멀리 떨어져 바닷물의 영향을 거의 받지 않고 있음을 나타내 주고 있는데, 강수의 Cl^- 이온 상당량은 토양의 구성 성분인 CaCl_2 , MgCl_2 , KCl , NH_4Cl 등과 같은 화합물들에 기인되기 때문일 것으로 생각된다.

3.2 이온 농도들간의 상관 관계

1994년 3월부터 1995년 5월까지의 기간에 수집된 강수들의 각 이온 농도들간의 상관 계수(correlation coefficient)가 표 3에 나타나 있다. 표 3에서 H^+ 이온 농도와 의미있는 상관 관계를 갖고 있는 이온은 없다.

Table 1. Chemical compositions in precipitation of Yeoncheon-gun, Kyunggi province from 3/1994 to 5/1995, μM

Date	pH	[H ⁺]	[Na ⁺]	[Mg ²⁺]	[Ca ²⁺]	[K ⁺]	[NH ₄ ⁺]	[Cl ⁻]	[NO ₃ ⁻]	[SO ₄ ²⁻]	Σ^{+a}	Σ^{-b}	Total ^c	Type
94.03.22	5.50	3.16	183.12	22.63	168.66	220.98	170.75	394.98	112.89	406.01	960.59	1319.80	2280.39	rain
94.03.24	5.31	4.90	31.32	9.05	64.37	356.79	121.96	423.10	80.64	655.86	661.81	1815.46	2477.27	snow
94.04.12	5.87	1.35	18.70	4.94	42.91	1906.73	145.25	648.75	17.74	41.64	2167.73	749.77	2917.50	rain
94.05.03	5.53	2.95	28.71	9.46	83.58	589.54	124.73	423.10	32.26	65.59	932.01	586.54	1518.55	rain
94.05.10	5.52	3.02	29.58	8.64	59.63	30.95	80.38	169.24	32.26	104.10	280.47	409.70	690.17	rain
94.05.14	5.27	5.37	6.09	2.06	23.95	40.16	28.83	200.27	9.68	15.62	132.47	241.19	373.66	rain
94.05.24	4.81	15.49	11.31	2.88	22.46	24.04	32.15	110.00	14.51	29.15	133.67	182.81	316.48	rain
94.06.22	5.56	2.75	47.41	20.57	174.15	14.58	98.12	81.80	41.93	197.80	552.30	519.33	1071.63	rain
94.06.25	5.75	1.78	26.10	4.94	46.16	22.76	105.88	220.01	67.74	208.21	258.72	704.17	962.89	rain
94.06.30	5.79	1.62	61.77	0.82	5.74	24.55	92.58	220.01	19.35	55.18	193.64	349.72	543.36	rain
94.07.01	5.19	6.46	48.28	0.66	6.74	19.95	73.18	110.00	12.90	36.44	162.67	195.78	358.45	rain
94.07.05	5.27	5.37	23.92	3.62	20.46	6.65	102.00	129.75	38.71	51.01	186.10	270.48	456.58	rain
94.07.06	5.48	3.31	13.48	1.65	9.98	9.97	85.93	56.41	12.90	31.23	135.95	131.77	267.72	rain
94.07.31	5.94	1.15	60.90	7.82	58.13	6.39	125.29	62.05	56.45	90.57	325.63	299.64	625.27	rain
94.08.09	5.98	1.05	9.57	2.51	15.72	29.92	54.33	166.42	8.06	9.37	131.33	193.22	324.55	rain
94.08.16	5.80	1.58	24.79	4.28	34.93	5.63	93.69	22.57	16.13	49.97	204.11	138.64	342.75	rain
94.08.25	5.03	9.33	11.74	1.56	14.47	3.32	37.70	11.28	9.68	22.90	94.15	66.76	160.91	rain
94.08.28	5.11	7.76	9.13	1.32	12.23	2.30	34.93	5.64	8.06	12.49	81.22	38.68	119.90	rain
94.09.02	5.44	3.63	44.37	0.58	6.24	5.63	41.58	14.10	8.06	34.35	108.85	90.86	199.71	rain
94.09.05	5.82	1.51	121.79	17.44	73.10	6.65	287.73	50.77	111.28	281.08	598.76	724.21	1322.97	rain
94.10.02	5.32	4.79	80.91	4.77	31.94	5.37	95.91	112.83	30.64	67.67	260.40	278.81	539.21	rain
94.10.12	5.35	4.47	30.88	0.37	5.74	1.53	28.27	31.03	29.03	56.22	77.37	172.50	249.87	rain
94.10.16	4.96	10.96	33.93	0.82	7.49	2.05	27.16	14.10	4.84	16.66	90.72	52.26	142.98	rain
94.10.20	5.23	5.89	33.06	5.92	33.93	5.88	106.99	14.10	4.84	26.03	231.52	71.00	302.52	rain
94.11.10	5.60	2.51	990.87	226.29	926.40	38.88	668.57	462.58	677.37	957.76	4006.21	3055.47	7061.68	rain
94.11.14	5.69	2.04	196.17	39.58	221.31	14.09	287.72	132.57	149.99	468.47	1021.80	1219.50	2241.30	rain
94.11.17	5.54	2.88	49.15	1.77	16.22	9.46	87.59	174.88	12.90	41.64	185.06	271.06	456.12	rain
94.11.18	4.93	11.75	61.77	4.20	27.67	7.42	87.59	16.92	22.58	67.67	232.27	174.84	407.11	rain
94.11.24	4.27	53.70	167.47	14.40	73.35	26.09	320.43	115.65	98.38	385.19	743.19	984.41	1727.60	rain
94.12.04	5.42	3.80	250.98	30.12	180.14	9.97	485.07	222.83	193.53	562.16	1170.34	1540.68	2711.02	snow
94.12.08	5.23	5.89	103.09	12.51	108.03	6.14	190.70	59.23	59.67	249.85	546.90	618.60	1165.50	rain
95.01.03	6.73	0.19	177.47	33.04	385.02	18.67	226.74	166.42	177.41	249.85	1259.19	843.53	2102.72	snow
95.02.15	6.67	0.21	245.33	41.51	491.02	40.92	246.70	191.80	193.53	395.60	1598.22	1176.53	2774.75	snow
95.02.25	6.35	0.45	130.93	14.48	192.12	42.71	105.33	141.03	156.44	145.75	692.62	588.97	1281.59	rain+snow
95.02.28	6.62	0.24	138.22	27.11	249.50	12.79	120.85	59.23	66.12	124.93	825.32	375.21	1200.53	rain+snow
95.03.10	5.88	1.32	77.43	35.38	190.12	23.28	51.56	95.35	41.77	186.35	604.59	509.82	1114.41	rain+snow
95.03.16	5.81	1.55	191.40	43.61	169.16	102.83	110.32	275.29	63.06	266.51	831.64	871.37	1703.01	rain
95.03.24	5.59	2.57	111.36	48.14	415.67	37.09	90.37	150.62	70.48	282.12	1169.01	785.34	1954.35	rain
95.03.31	6.02	0.95	49.59	46.90	102.79	201.05	10.53	400.52	30.48	73.81	561.50	588.62	1150.12	rain
95.04.21	5.69	2.04	76.12	54.72	362.27	38.37	107.55	290.52	131.44	319.60	1058.06	1061.16	2119.22	rain
95.04.22	5.76	1.74	77.43	62.10	365.52	42.21	179.62	1052.08	105.15	479.92	1156.24	2117.07	3273.31	rain
95.04.25	5.57	2.69	183.57	33.32	236.03	56.02	105.33	171.77	89.03	209.25	886.31	679.30	1565.61	rain
95.05.02	5.83	1.48	126.58	50.19	197.60	104.88	188.49	259.49	126.60	308.15	917.01	1002.39	1919.40	rain
95.05.09	6.08	0.83	83.52	30.03	125.25	24.55	58.51	115.64	41.61	147.83	477.67	452.91	930.58	rain
95.05.13	5.79	1.62	123.97	56.37	529.94	46.56	95.35	171.77	85.32	299.82	1440.12	856.73	2296.85	rain
95.05.20	5.92	1.20	36.10	23.04	87.57	84.67	27.16	138.21	28.06	105.15	370.35	376.57	746.92	rain
Average	5.60	4.59	100.86	23.22	145.12	94.15	131.47	186.01	73.95	193.42	667.74	646.81	1314.55	
St. Dev.	0.47	8.08	149.71	35.75	181.44	292.29	121.80	191.12	105.52	199.66	681.13	599.06	1220.24	

^a $\Sigma^{+} = [\text{H}^{+}] + [\text{Na}^{+}] + [\text{K}^{+}] + 2[\text{Ca}^{2+}] + 2[\text{Mg}^{2+}] + [\text{NH}_4^{+}]$, ^b $\Sigma^{-} = [\text{Cl}^{-}] + [\text{NO}_3^{-}] + 2[\text{SO}_4^{2-}]$, ^c $\text{Total} = \Sigma^{+} + \Sigma^{-}$.

이것은 강수의 산성도가 어느 한가지 이온에 의해서 결정되는 것이 아니라 여러가지 이온들간의 복합적인 작용으로 결정된다는 것을 의미하는 것이다.

표 3을 살펴보면, Na⁺ 이온 농도는 Mg²⁺ 이온 농도 (r=0.9048), NH₄⁺ 이온 농도 (r=0.8403), NO₃⁻ 이온 농도(r=0.9616)와, Mg²⁺ 이온 농도는 Ca²⁺ 이온 농도

(r=0.8949), NO₃⁻ 이온 농도(r=0.9025)와, Ca²⁺ 이온 농도는 NO₃⁻ 이온 농도(r=0.8331)와, 그리고 NH₄⁺ 이온 농도는 NO₃⁻ 이온 농도(r=0.8630)와 매우 높은 양의 상관 관계를 가지고 있다. 이러한 이온 농도 상호간의 매우 높은 양의 상관 관계는 이들 이온들이 동일한 발생 원으로부터 유입된 물질들에 기인된 것임을 나타내 주

Table 2. Monthly variations of pH value and precipitation amount from 3/1994 to 5/1995 in Yeoncheon-gun of Kyunggi province

Date	pH	강수량 (mm)	월별 평균 pH	월별 강수량 (mm)	Date	pH	강수량 (mm)	월별 평균 pH	월별 강수량 (mm)				
94. 3.22	5.50	6.9	5.41	12.5	94. 11.10	5.60	2.7	5.21	29.1				
3.24	5.31	5.6			11.14	5.69	3.2						
94. 4.12	5.87	29.5	5.87	29.5	11.17	5.54	6.1						
	5.87	29.5	5.87	29.5	11.18	4.93	11.5						
					11.24	4.27	5.6						
94. 5. 3	5.53	30.8	5.28	143.8	94. 12.4	5.42	3.6	5.33	6.5				
5.10	5.52	18.4			12.8	5.23	2.9						
5.14	5.27	38.5			95. 1. 3	6.73	2.5	6.73	2.5				
5.24	4.81	56.1											
94. 6.22	5.56	15.0	5.70	77.8	95. 2.15	6.67	2.0	6.55	8.2				
6.25	5.75	26.5			2.25	6.35	3.8						
6.30	5.79	36.3			2.28	6.62	2.4						
94. 7.1	5.19	65.8	5.47	170.5	95. 3.10	5.88	12.8	5.83	27.8				
7.5	5.27	46.2			3.16	5.81	5.3						
7.6	5.48	13.0			3.24	5.59	6.5						
7.31	5.94	45.5			3.31	6.02	3.2						
94. 8.9	5.98	70.3	5.48	254.0	95. 4.21	5.69	14.5			5.67	27.5		
8.16	5.80	21.6			4.22	5.76	9.8						
8.25	5.03	85.1			4.25	5.57	3.2						
8.28	5.11	77.0											
94. 9.2	5.44	19.3	5.56	27.8	95. 5.2	5.83	1.8	5.91	36.9				
9.5	5.82	8.5											
94. 10.2	5.32	16.7	5.22	136.7						5.9	6.08	20.1	
	10.12	5.35								61.5	5.13	5.79	3.5
	10.16	4.96								52.0	5.20	5.92	11.5
	10.20	5.23			6.5								

는 것이다(Brewer, 1975). 즉, NO_3^- 이온 농도가 Na^+ 이온 농도, Mg^{2+} 이온 농도, Ca^{2+} 이온 농도, NH_4^+ 이온 농도와 매우 높은 양의 상관 관계가 있다는 것은 NO_3^- 이온이 주로 NaNO_3 , $\text{Mg(NO}_3)_2$, $\text{Ca(NO}_3)_2$, NH_4NO_3 형태로 유입된 것임을 의미하는 것이다. 그리고 Cl^- 이온 농도가 Na^+ 이온 농도($r=0.2252$)보다 Mg^{2+} 이온 농도($r=0.4030$), Ca^{2+} 이온 농도($r=0.3600$), K^+ 이온 농도($r=0.4907$)와 의미있는 상관 관계가 있는 것은 이 지역이 바다와 멀리 떨어진 내륙 지방이므로 Cl^- 이온 상당량이 NaCl 형태보다는 KCl , MgCl_2 , CaCl_2 형태로 유입된 것임을 나타내 주는 것이다(박용남과 송기형, 1993).

3.3 계절별 이온들의 평균 농도 크기 순서

1994년 3월부터 1995년 5월까지의 기간에 수집된 강수들의 계절별 평균 pH 값 및 이온 농도들의 값을 표 4에 나타내었다. 표 4에서 계절별 양이온들과 음이온들의 평균 농도 크기 순서는 다음과 같다.

계절별 양이온들의 평균 농도 크기 순서

- 94년 봄: $\text{K}^+ > \text{NH}_4^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{H}^+$
- 94년 여름: $\text{NH}_4^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{H}^+$
- 94년 가을: $\text{NH}_4^+ > \text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{H}^+$
- 94년 겨울: $\text{Ca}^{2+} > \text{NH}_4^+ > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{H}^+$

95년 봄: $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{NH}_4^+ > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{H}^+$

계절별 음이온들의 평균 농도 크기 순서

- 94년 봄: $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^-$
- 94년 여름: $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^-$
- 94년 가을: $\text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^-$
- 94년 겨울: $\text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^-$
- 95년 봄: $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^-$

계절별 양이온들과 음이온들의 평균 농도 크기 순서가 자연 환경 및 환경오염 물질 발생 정도와 깊은 연관이 있음을 잘 나타내 주고 있다. 계절별 양이온들의 평균 농도들 중에서 94년 봄은 K^+ 이온, 94년 여름과 가을은 NH_4^+ 이온, 94년 겨울과 95년 봄은 Ca^{2+} 이온이, 그리고 음이온들의 평균 농도들 중에서 94년 봄과 여름, 95년 봄은 Cl^- 이온, 94년 가을과 겨울은 SO_4^{2-} 이온이 많이 존재하고 있다. 이것은 이 지역이 농촌이면서 군사 작전 지역이므로 군용 차량과 탱크의 이동으로 인하여, 토양의 구성 성분인 KCl , NH_4Cl , $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, CaCl_2 , CaSO_4 등이 강수에 많이 유입되었음을 나타내 주는 것이다. 그리고 모든 계절에 걸쳐 SO_4^{2-} 이온 평균 농도가 NO_3^- 이온 평균 농도보다 크다는 것을 알 수 있다.

1994년 봄철에 K^+ 이온 평균 농도가 다른 계절에 비

Table 3. Correlation coefficients between the ion concentrations in precipitation of Yeoncheon-gun, Kyunggi province from 3/1994 to 5/1995

	[H ⁺]	[Na ⁺]	[Mg ²⁺]	[Ca ²⁺]	[K ⁺]	[NH ₄ ⁺]	[Cl ⁻]	[NO ₃ ⁻]	[SO ₄ ²⁻]
[H ⁺]	1.0000								
[Na ⁺]	-0.0215	1.0000							
[Mg ²⁺]	-0.1490	0.9048	1.0000						
[Ca ²⁺]	-0.2025	0.7992	0.8949	1.0000					
[K ⁺]	-0.0851	-0.0903	-0.0616	-0.0791	1.0000				
[NH ₄ ⁺]	0.1244	0.8403	0.6883	0.6233	0.0077	1.0000			
[Cl ⁻]	-0.1686	0.2252	0.4030	0.3600	0.4907	0.2722	1.0000		
[NO ₃ ⁻]	-0.0700	0.9616	0.9025	0.8331	-0.0744	0.8630	0.3047	1.0000	
[SO ₄ ²⁻]	0.0248	0.7629	0.7554	0.7395	-0.0477	0.8146	0.4583	0.8248	1.0000

Table 4. Seasonal average pH value and ion concentrations in precipitation of Yeoncheon-gun, Kyunggi province from 3/1994 to 5/1995

Month/Year	pH	[H ⁺]	[Na ⁺]	[Mg ²⁺]	[Ca ²⁺]	[K ⁺]	[NH ₄ ⁺]	[Cl ⁻]	[NO ₃ ⁻]	[SO ₄ ²⁻]	Σ ⁺ ^a	Σ ⁻ ^b	Total ^c
3, 4, 5 / 94	5.40	5.18	44.12	5.82	66.51	452.74	100.58	338.48	42.85	188.28	752.68	757.89	1510.57
6, 7, 8 / 94	5.54	3.38	30.64	4.52	36.25	13.27	82.15	98.72	26.54	69.56	211.43	264.38	475.81
9, 10, 11 / 94	5.29	9.47	164.58	28.74	129.40	11.19	185.41	103.59	104.54	218.43	686.93	644.99	1331.92
12, 1, 2 / 94	6.17	1.80	174.34	26.46	267.64	21.87	229.23	140.09	141.12	288.02	1015.44	857.25	1872.69
3, 4, 5 / 95	5.81	1.64	103.37	43.98	252.90	69.23	93.16	283.75	73.91	243.96	861.16	845.58	1706.74

^aΣ⁺ = [H⁺] + [Na⁺] + [K⁺] + 2[Ca²⁺] + 2[Mg²⁺] + [NH₄⁺].

^bΣ⁻ = [Cl⁻] + [NO₃⁻] + 2[SO₄²⁻].

^cTotal = Σ⁺ + Σ⁻.

해서 큰 것은 집중적인 사격 훈련 등으로 화약의 주요 구성 성분인 칼륨 화합물이 특히 강수에 많이 유입되었기 때문일 것으로 생각된다.

3.4 강수량과 총 이온 농도와의 관계

1994년 3월부터 1995년 5월까지의 기간에 수집된 강수들 중 본 연구에서 분석된 강수들의 pH 값과 강수량, 양이온과 음이온의 농도 총량, 그리고 총 이온 농도들이 나타나 있는 표 1과 2를 살펴보면, 대체적으로 강수량이 적은날의 총 이온 농도는 강수량이 많은 날의 총 이온 농도보다 많음을 알 수 있다. 이것은 대기중에 축적되어 있던 1차 및 2차 오염물질들이 강수에 용해되어 하강할 때, 강수의 강수량이 많은 경우에는 오염물질의 농도가 감소하는 씻김효과(scavenging effect)에 의한 것으로 생각되어 진다(Fiedler, 1990; Lindberg, 1982).

씻김효과라는 것은 대기중에 축적되어 있던 오염물질들을 강수가 씻어 내리어, 강수의 강수량이 증가함에 따

라 대기중 오염물질의 농도가 감소되는 효과를 말하는 것이다. 따라서 강수중 이온들의 농도는 대기중에 축적되어 있던 오염물질들의 이온 농도뿐만 아니라, 강수량과 강수의 강도, 그리고 강수의 지속시간 등과 연관이 있다.

3.5 강수의 pH 값과 월별 평균 pH 값 변화

1994년 3월부터 1995년 5월까지의 기간에 수집된 강수의 pH 값과 월별 평균 pH 값이 표 2에 나타나 있다. pH 5.00 이하인 산성강수가 전체 강수의 8.7%인 반면에, pH 5.00 이상인 강수는 91.3%이다. 94년 7월 5일부터 7월 6일까지 2일간 지속된 강수중에서 7월 6일에 수집한 강수의 pH는 5.48로 7월달 평균 pH 값인 5.47 보다 약간 높게 나타나 있으며, 또한 95년 4월 21일부터 4월 22일까지 연속 2일 지속된 강수중에서 4월 22일에 수집한 강수의 pH는 5.76로 95년 4월달 평균 pH 값인 5.67 보다 높게 나타나 있다. 이러한 결

과들은 씻김효과에 의한 것으로 생각되어 진다.

표 2에서 95년 1월과 2월의 평균 pH 값이 각각 6.73과 6.55로 중성에 가까운 pH 값을 나타내고 있다. 이러한 결과들은 겨울철에는 다른 계절에 비해서 pH 값이 낮은 강수가 내릴 것이라는 일반적인 예상과 상반된 것인데, 이것은 아마도 이 지역이 인위적인 환경 오염원이 거의 없는 비무장지대에 인접한 농촌지역이면서 군사 작전 지역이므로, 군용 차량과 탱크의 이동으로 발생하는 흙먼지로 인하여, 염기성의 토양 구성 성분들이 눈과 진눈깨비에 유입되었기 때문으로 추정된다.

본 연구 기간에 수집된 강수들의 평균 pH 값은 5.60이었으며, pH 값이 가장 낮은 것은 94년 11월 24일 강수로 pH 4.27이었고, pH 값이 가장 높은 것은 95년 1월 3일의 강수로 pH 6.73이었다. 한편, 월별 평균 pH 값들 중에서 94년 11월달의 평균 pH 값이 5.21로 가장 낮았고, 95년 1월달의 평균 pH 값이 6.73으로 가장 높았다.

4. 결 론

이상과 같이 인위적인 환경 오염원이 거의 없어 자연 생태계가 잘 보존되어 있을 것으로 생각되어 지는 휴전선 비무장지대의 자연 환경 상태를 간접적으로 추정해 보기 위한, 1994년 3월부터 1995년 5월까지 비무장지대에 인접한 경기도 농촌지역 강수의 화학적 성분에 관한 기초 연구로부터 양이온 평균 농도 크기는 $Ca^{2+} > NH_4^+ > Na^+ > K^+ > Mg^{2+} > H^+$ 의 순서였으며, 음이온 평균 농도 크기는 $SO_4^{2-} > Cl^- > NO_3^-$ 의 순서였고, pH 5.00 이하인 산성강수는 전체 강수의 8.7%이었다. 이러한 결과들과 이온 농도들간의 상관 관계 그리고 계절별 이온들의 평균 농도 크기 순서 등으로 비무장지대 남방한계선 주변 농촌지역의 환경오염 실태를 어느 정도 파악할 수 있었을 뿐만 아니라, 비무장지대의 자연 환경 보존상태도 간접적으로 추정해 볼 수가 있는 것이다. 그러나 아직까지 인위적인 외부 환경 오염원에 거의 노출되어 있지 않은 비무장지대의 자연 환경 생태계를 잘 보존하기 위하여, 이러한 강수의 화학적 성분에 관한 연구를 비무장지대에 인접한 지역을 통한 간접적인 연구를 지속적으로 수행함은 물론, 앞으로는 비무장지대에서 직접적으로 남북한 학자들이 공동으로 연구를 수행하는 것이 더욱 필요한 것이다.

감사의 글

본 연구의 일부는 1995년도 한국고원대학교 기성회계 학술연구비에 의하여 수행되었습니다.

참 고 문 헌

과학기술처, 1989, 대기오염 물질의 장거리 이동과 산성비 강하에 관한 연구(I).
 과학기술처, 1990, 대기오염 물질의 장거리 이동과 산성비 강하에 관한 연구(II).
 김양균, 1989, 대기오염 물질의 장거리 이동과 산성비 강하에 관한 연구(II), 국립환경연구원, 168pp.
 김양균, 1990, 대기오염 물질의 장거리 이동과 산성비

강하에 관한 연구(II), 국립환경연구원, 253pp.
 박국태, 문경언, 허정구, 홍현복, 1995, 경기도 성남시, 인천시, 강원도 강릉시, 충북 청원군 강수의 화학적 성분에 관한 비교 연구, 한국환경과학회지, 4(3), 285-294.
 박용남, 송기형, 1993, 충북 청원군의 강수중의 이온들 간의 상관관계, 한국환경과학회지, 2(4), 337-346.
 송기형, 박용남, 정용승, 박국태, 1992, 충청북도 농촌 지역의 강수 산성도에 관한 기초 연구, 한국대기보전학회지, 8(1), 38-44.
 심상규, 1992, 산성비, 화학세계, 대한화학회, 32(7), 640-646.
 이기호, 허철구, 1996, 제주도 강우의 화학적 조성 특성에 관하여, 한국환경과학회지, 5(6), 739-748.
 이민희, 1990, 산성비 강하 물질 분석, 대기오염 물질의 장거리 이동과 산성비 강하에 관한 연구(III), 국립환경연구원, 59-110.
 이창기, 1992, 환경오염에 의한 생태계 영향 평가 기법 연구, 국립환경연구원, 85pp.
 정용승, 김태군, 1991, 한국 서해안에서 관측된 산성비 발원지 추적 연구, 한국대기보전학회지, 7(3), 203-207.
 Bacastow, R. B.; Keeling, C. D., 1981, Atmospheric Carbon Dioxide Concentration and the Observed Airbone Fraction, Global Carbon Cycle Modelling, SCOPE Report 16, John Wiley and Sons, Chichester.
 Baird, C., 1995, Environmental Chemistry, W. H. Freeman and Company, New York, Chapter 3, pp 90-94.
 Brewer, P. G., 1975, Minor Elements in Sea Water, *Chemical Oceanography*, 1, 417pp.
 Calvert, J. G.; Stockwell, W. R., 1984, The Mechanisms and Rates of the Gas Phase Oxidations of Sulfur Dioxide and Nitrogen Oxides in the Atomsphere in SO₂, NO₂, Oxidation Mechanisms, In Atomspheric Considerations, Calvert J. G., Ed.; Butterworld, Boston, U.S.A. pp 1-62.
 Durham, J. L., 1984, Chemistry of Particles, Fogs and Rain, Butterworth Publishers.
 Fiedler, R. P., 1990, On the Relationship between Precipitation Amount and Wet Deposition of Nitrate and Ammonium, *Atmospheric Environment*, 24A, 3061-3065.
 Freemantle, M., 1995, The Acid Test For Europe, *Chem. Eng. News*, 73(18), 10-17.
 Godish, T., 1988, Air Quality, Lewis Publishers Inc.
 Khemani, L. T., 1987, Influence of Alkaline Particulates on pH of Cloud and Rain Water in India, *Atmospheric Environment*, 21(5), 1137-1145.
 Lindberg, S. E., 1982, Factors Influencing Trace

- Metal, Sulfate and Hydrogen Ion Concentrations in Rain, *Atmospheric Environment*, 16, 1701-1709.
- O'Neil, P., 1993, Environmental Chemistry, Chapman and Hall, London, UK, Chapter 6.
- Richard, L. W.; Anderson, J. A.; Blumenthal, D. L.; McDonald, J. A.; Kok, G. L.; Lazrus, A. L., 1983, Hydrogen Peroxide and Sulfur(IV) in Los Angeles Cloud Water, *Atmospheric Environment*, 17, 911-914.