

해안지역과 도시지역 강수의 화학적 성상에 관한 연구

A Study on the Comparison of Chemical Components in Rainwater at Coastal and Metropolitan areas

강 공 언 · 강 병 옥 · 김 회 강

건국대학교 환경공학과
(원고접수 : 1992. 7. 21)

Gong Unn Kang, Byung Wook Kang, Hui Kang Kim

Dept. of Environmental Engineering, Kon-Kuk University
(Received 21 July 1992)

Abstract

In order to investigate the chemical components of acid precipitation at Kangwha near the Yellow Sea and Seoul in Korea, the precipitation samples were collected by wet-only precipitation sampler from February 1991 to January 1992, and pH, electric conductivity(E. C.) and major water-soluble ionic components were analyzed. Strong negative linear correlations were observed between the rainfall amount and the sum of major ionic components in $\mu\text{eq}/\ell$ at two sites. The sum of major ionic components also correlated negatively with rain intensity. The analytical results of precipitation samples at two sites were compared each other. Average values of volume-weighted pH were found to be 5.21 at Kangwha and 5.09 at Seoul. The cationic abundance ($\mu\text{eq}/\ell$) in rainwater showed the general trend $\text{NH}_4^+ > \text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{H}^+ > \text{K}^+$ at Kangwha and $\text{NH}_4^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{H}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ at Seoul. The anionic abundance showed the general trend $\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$ at Kangwha and $\text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^-$ at Seoul. The concentrations of seasalt such as Na^+ and Cl^- were higher at Kangwha than Seoul. The concentrations of nss- SO_4^{2-} , nss- Cl^- and NO_3^- which are acid composition were higher at Seoul ($96.3 \mu\text{eq}/\ell$) than Kangwha ($69.0 \mu\text{eq}/\ell$). The contribution of seasalt to the composition of precipitation were higher at Kangwha (34.1%) than Seoul (15.7%). Ammonia and calcium species in rainwater at Kangwha and Seoul are interpreted to have 91% of neutralizing capacity of the original sulfuric and nitric acids. Provided that the precipitation acidity originates primarily from sulfate and nitrate, sulfate was found to contribute about 73-75% of the free precipitation acidity.

1. 서 론

최근 대기오염물질의 장거리이동 현상으로 산성우 문제는 더욱 더 많은 관심의 대상이 되고 있다

(Hiroshi Hara et al., 1990; Veerabhadra R. Kotamarthi et al., 1990). 우리나라에서 장거리이동 현상으로 나타나는 것은 중국대륙으로부터 매년 봄에 이동되어온 황사현상이며, 육안으로도 뚜렷하

게 관측되고 있다. 그러나 중국의 북동쪽에 자리 잡고 있는 대규모 공단 등지에서 배출되는 가스상 물질은 일정하지 않은 기류의 경로를 따라 이동되고 더구나 물리적, 화학적 및 광화학적 변화를 일으키므로 우리나라에의 유입량이나 피해정도를 단언하기는 매우 어려운 일이다(Kang, I. G. et al., 1990). 특히 중국은 황 함유량이 높은 유연탄과 증유를 주 에너지원으로 사용하고 있고, 배출원이 북경을 중심으로한 산동반도 부근과 상해 및 강서성 등 황해연안에 집중되어, 중국에서 배출된 대기 오염물질이 편서풍의 영향하에 있는 우리나라로 장거리 이동될 가능성이 매우 높다(Chung, Y. S. et al., 1990; Chang, S. G. et al., 1991).

이러한 배경아래에서 본 연구는 우리나라의 해안지역과 도시지역 강수의 산성도에 대한 성분특성을 비교·연구하기 위하여 서해안에 위치한 강화지역과 대도시인 서울지역에서 강수시료를 측정, 분석하였다.

2. 실험 및 분석방법

2.1 시료채취

시료채취지점은 그림 1과 같이 우리나라의 서해안에 위치하고 있는 강화지역과 서해안으로부터 동쪽방향으로 약 60km거리에 위치한 대도시인 서울지역으로, 두 지점 모두 국부적인 오염발생원의 영향을 받지 않도록 고려하여 선정하였다. 강화지역에서는 경기도 강화군 화도면 장화리 장화국교 앞에 위치한 하천부지에 세운 지상 4m정도의 높이를 갖는 철탁위에 설치되어 있는 강수채취장치에서 시료를 채취하였다. 시료채취용 철탁은 해안가로부터 약 150m 떨어져 있고 주위는 논과 밭으로 둘러싸여 있다. 서울지역은 서울특별시 성동구 모진동에 위치하고 있는 건국대학교 공과대학 건물의 옥상(지상에서 약 17m 높이)에서 채취하였다.

시료채취기간은 두 지역 모두 1991년 2월부터 1992년 1월까지 12개월 동안으로 강수(rain and snow)만 채취하는 방법을 사용하여 1회 10일 간격으로 채취하였다.

강화지역의 시료채취는 자동강수시료채취장치(automatic acid precipitation sampler, Metec사제, M1-014)를 사용하였는데, 이것은 비나 눈이 내리면 강수감지장치에 의해 시료채취장치의 개구부에 설치된 뚜껑이 자동으로 열리고 그치면 자동으로 단척 건성침착물(dry deposition)의 영향을 받지 않도록 설계되어 있다. 강수는 채수장치내에 설치된 5ℓ 폴리에틸렌병에 포집되며, 겨울철에는 눈

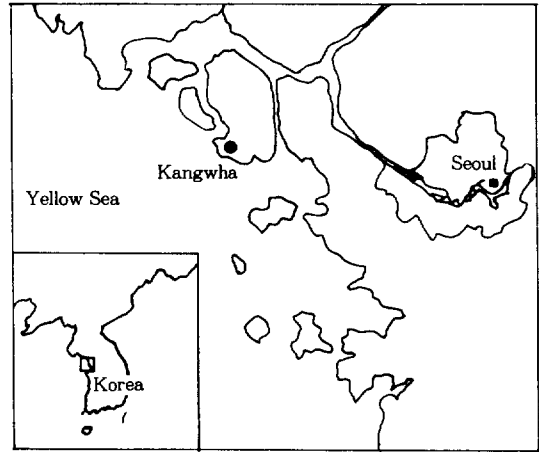


Fig. 1. A map of sampling sites.

이나 비가 얼지 않도록 시료채취장치의 개구부에 설치된 전기가열장치로 가열하였다. 또한 이 채취장치에는 강수량계와 강수시간계가 부착되어 있으며 강수량은 0.5mm단위로 측정된다.

서울지역의 시료채취는 미국에서 산성우 간이조사법(National Audubon Society Acid Rain Monitoring Network)으로 사용하고 있는 것과 같이 비가 내리기 시작할때 폴리에틸렌비닐봉지를 미리 설치한 통에 장착시킨 다음 비가 그칠때까지 받는 수동적인 방법을 택하였다(Dorene Bolze and Jan Beyea, 1989). 이때 채취통은 건물 옥상에서 1.5m 높이에 설치하였으며 강수량과 강수시간에 대한 자료는 기상대에서 측정된 자료를 사용하였다(中央氣象臺, 1991. 2-1992. 1).

2.2 분석방법

채취된 강수시료는 pH와 전기전도도를 pH전극(pH/Ion Analyser-250, Corning사제)과 전기전도도계(Electric Conductivity Meter SC-17A, Suntlet사제)를 사용하여 측정후 Millipore Filter (HAWP 04700, 0.45 μ m pore size)로 여과하였다. 이때 강수중의 입자상물질이 제거된 여액을 수용성 성분의 분석시료로 사용하였다. 수용성 음이온인 SO_4^{2-} , NO_3^- 및 Cl^- 는 흡광광도계(U. V.-240, Shimadzu사제)로, 수용성 양이온인 Na^+ , K^+ , Ca^{2+} 및 Mg^{2+} 은 원자흡광광도계(GBC 901, GBC사제)로 각각 측정하였으며 NH_4^+ 는 인도페놀법(indophenol blue method)으로 분석하였다. 그리고 원자흡광광도법으로 Ca^{2+} 을 분석시 Si, Al염등의 공존물질에 의한 방해를 막기 위해서 $LaCl_3$ (500 μ g/

ml) 2ml를 첨가하였으며(環境酸性雨土壤植生影響研究會, 1990), 원자흡광광도법에서 각 성분의 표준용액은 시판하는 AA용 1000ppm용액을 희석하여 사용하였다.

값으로 다음과 같이 계산하였다(Azhari F. M. Ahmed and Ral P. Singhet al., 1990).

$$V. W. AVG. (mg/\ell) = \sum_{i=1}^n (PiCi/Pi)$$

3. 결과 및 고찰

3.1 강수시료의 분석결과

강수시료중 각 성분의 월평균농도를 강화지역과 서울지역으로 나누어 각각 표 1과 표 2에 나타내었다. 여기에서 평균농도는 단위 강수량당의 평균농도(volume-weighted average concentration; mg/ℓ, 이하에서는 V. W. AVG.)로서 측정기간 동안에 내린 모든 강수를 하나로 합했을 때의 농도

여기에서 Pi는 i번째 강수량(mm)이고 Ci는 이때의 농도(mg/ℓ)이다. pH의 평균치도 강수량을 고려하여 pH를 가중 평균한 것이다.

채수한 강수시료의 분석결과에 대한 신뢰성 검토는 강수중에 존재하는 양이온의 총합과 음이온의 총합의 비로 나타내는 이온밸런스와 그리고 전기전도도의 실측치와 계산치의 비(EC_{obs}/EC_{cal})의 두가지 방법을 사용하였다. 전기전도도의 계산치는 다음식에 의하여 구하였다(原 宏, 1991).

Table 1. pH and major chemical components in rainwater at Kangwha.

Month	pH	E.C.obs	NH ₄ ⁺	Ca ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	
		μS/cm									mg/ℓ
'91.	2	5.12	22.4	0.93	0.66	0.17	0.13	0.59	1.59	4.09	0.75
	3	5.89	23.3	0.78	1.10	0.63	0.16	0.88	1.52	3.60	2.05
	4	4.91	19.5	1.00	0.31	0.16	0.05	0.24	1.58	3.12	0.47
	5	5.85	19.2	1.30	0.47	0.14	0.09	0.52	1.63	3.45	1.06
	6	5.51	18.2	1.34	0.09	0.07	0.05	0.45	1.13	2.99	0.89
	7	5.06	13.7	0.73	0.10	0.08	0.05	0.51	0.86	1.91	0.96
	8	5.51	7.7	0.42	0.14	0.09	0.03	0.22	0.34	1.45	0.40
	9	4.92	14.7	0.51	0.15	0.09	0.04	0.33	0.47	2.03	0.54
	10	4.88	29.2	0.69	0.55	0.24	0.22	1.95	1.56	2.82	3.09
	11	5.02	48.0	1.45	0.79	0.40	0.36	2.86	2.48	4.82	4.99
	12	4.56	32.7	1.27	0.58	0.21	0.09	0.64	3.00	4.29	0.78
	'92.	1	4.34	40.3	1.61	0.45	0.51	0.14	0.28	3.12	4.87
	MAX	5.89	48.0	1.61	1.10	0.63	0.36	2.86	3.12	4.87	4.99
	MIN	4.34	7.7	0.42	0.09	0.07	0.03	0.22	0.34	1.45	0.40
	V.W.AVG.	5.21	17.6	0.86	0.28	0.15	0.08	0.59	1.11	2.55	1.10
	STD	0.46	11.1	0.37	0.30	0.18	0.09	0.77	0.85	1.07	1.32

Table 2. pH and major chemical components in rainwater at Seoul.

Month	pH	E.C.obs	NH ₄ ⁺	Ca ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	
		μS/cm									mg/ℓ
'91.	2	4.28	56.1	1.92	1.13	0.49	0.26	0.45	1.91	9.74	1.29
	3	4.73	22.7	0.64	0.62	0.31	0.13	0.12	0.90	3.99	0.34
	4	4.91	25.4	1.20	0.86	0.25	0.11	0.22	1.35	5.08	0.72
	5	5.23	19.5	0.94	0.59	0.18	0.07	0.17	1.17	3.48	0.58
	6	5.72	14.2	1.26	0.23	0.05	0.03	0.08	1.32	2.74	0.39
	7	5.23	14.5	1.00	0.18	0.07	0.04	0.18	0.93	2.47	0.50
	8	5.42	18.5	0.92	0.73	0.20	0.10	0.38	1.78	3.03	0.90
	9	4.97	17.6	0.89	0.38	0.12	0.06	0.25	1.26	2.68	0.54
	10	4.96	28.8	1.16	1.27	0.20	0.07	0.46	1.61	5.02	0.85
	11	4.24	75.9	2.44	1.80	0.68	0.40	1.19	3.81	11.46	2.20
	12	4.25	51.1	1.32	1.27	0.42	0.20	0.53	1.95	8.61	0.99
	'92.	1	4.20	56.2	1.59	1.19	0.55	0.11	0.70	2.25	8.56
	MAX	5.72	75.9	2.44	1.80	0.68	0.40	1.19	3.81	11.46	2.20
	MIN	4.20	14.2	0.64	0.18	0.05	0.03	0.08	0.90	2.47	0.34
	V.W.AVG.	5.09	20.8	1.06	0.45	0.15	0.08	0.24	1.21	3.52	0.60
	STD	0.49	19.9	0.48	0.47	0.19	0.10	0.30	0.76	3.03	0.49

$$EC_{cal} = \{ [349.81[H^+] + 73.55[NH_4^+] + 59.50[Ca^{2+}] + 73.50[K^+] + 53.05[Mg^{2+}] + 50.10[Na^+] + 71.46[NO_3^-] + 80.02[SO_4^{2-}] + 76.35[Cl^-]] \} \times 10^{-3}$$

여기에서 전기전도도의 단위는 $\mu S/cm$ 이고, []는 각 이온성분의 당량농도 ($\mu eq/l$)이다.

서울지역의 단위 강수량당의 월별 평균농도 ($\mu eq/l$)에서 양이온의 총합과 음이온의 총합의 비를 평균한 결과 강화와 서울지역에서 각각 1.05와 1.03으로 나타났으며, 그리고 전기전도도의 실측치와 계산치의 비($E.C. obs/E.C cal$)를 평균한 결과 두 지역 모두 0.95로 나타나 분석 결과치가 비교적 신뢰성을 갖는 것으로 판단된다.

3.2 강수량에 따른 농도변화

강수중의 H^+ 농도를 제외한 주요 용존이온성분의 총 당량농도는 그림 2와 같이 강수량과 역상관관계 (강화 $r = -0.62$, 서울 $r = -0.85$)를 보여주었다. 강수중의 용존이온성분은 강수초기에 대기중에서 대부분 제거되며 강수가 계속될 경우 이때 내린 비는 희석효과를 갖게 되어 결국 용존이온성분의 총 당량농도는 감소하게 된다(Azhari F. M. Ahmed and Ral P. Singhet al., 1990). 그

러나 강수량이 소량임에도 불구하고 강수시료중의 용존이온성분의 농도가 낮아지는 경우도 있는데, 이러한 이유로는 여름철과 같이 계속해서 자주 비가 내릴 경우와 그림 3과 같이 강수강도(Rain Intensity, mm/hr)가 비교적 큰 경우를 생각할 수 있다. 또한 강수강도가 적을수록 용존이온의 농도는 높아지는데, 이는 대기중에 빗방울이 오랫동안 체류하여 흡착 및 흡수작용에 의한 washout 효과에 의해 대기중에 존재하는 오염물질을 충분히 제거하기 때문인 것으로 생각된다.

수소이온의 농도지수인 pH는 그림 4와 같이 비교적 강수량이 적은 범위에서 넓은 폭의 값을 갖는 것으로 나타나지만 강수가 계속될 경우 일정한 값을 유지하는 경향이 있다. 이것은 강수 초기에 낮은 pH에서 높은 pH가 되는 것과 높은 pH에서 낮은 pH가 되는 두가지로 나누어 생각할 수 있다. 전자의 경우는 강수중의 산성물질인 SO_4^{2-} 와 NO_3^- 가 강수자체의 희석효과에 의하여 강수의 pH가 우량에 따라 일정 pH까지 상승한 후 평형을 유지하게 된다. 또한 후자는 구름속에 존재하는 산성물질인 SO_4^{2-} 와 NO_3^- 가 수적 생성시 rainout 작용에 의해 응축핵이 되는데, 이것이 성장함에 따라 빗방울로 떨어지면서 대기중의 알칼리성물질인 NH_3 와 Ca^{2+} 성분을 흡수, 흡착하여

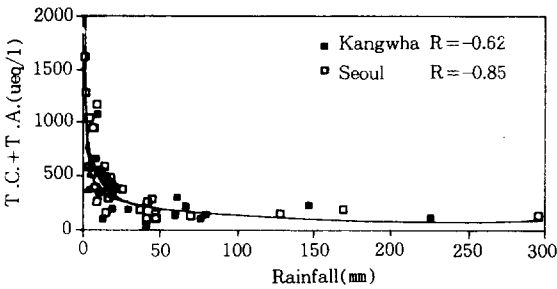


Fig. 2. Total cation and anion in rainwater versus rainfall.

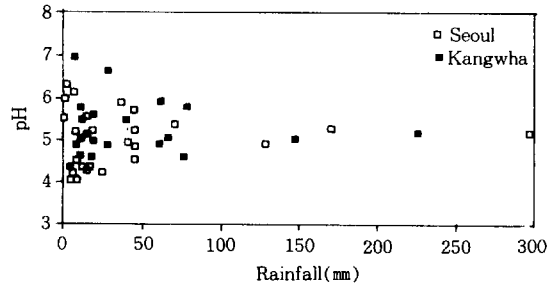


Fig. 4. pH in rainwater versus rainfall at each sampling site.

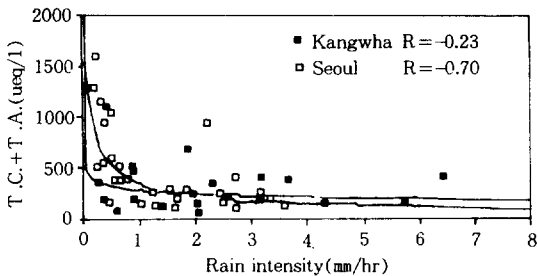


Fig. 3. Total cation and anion in rainwater versus rain intensity.

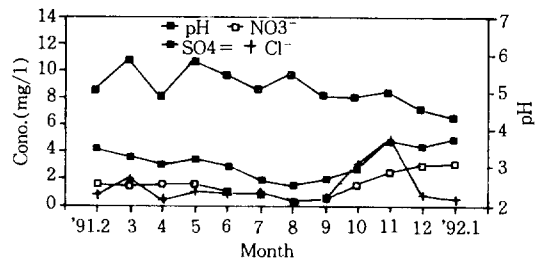


Fig. 5. Monthly variations of anion composition at Kangwha.

중화되므로서 강수초기의 pH는 증가하나 이러한 washout작용이 빨리 끝나므로서 우량이 증가할수록 일정 pH까지 감소한 후 평형을 유지하게 되는 것으로 사료된다(Azhari F. M. Ahmed and Ral P. Singhet al., 1990; 玉置元則, 1991).

3.3 강수의 화학조성

표 1과 표 2에 나타낸 바와같이 pH는 강화와 서울지역이 각각 평균 5.21(4.34-5.89)과 5.09(4.20-5.72)로서 강화지역은 뚜렷한 월별 변화를 보이지 않지만 서울지역은 대체로 겨울철에 낮고 여름철에 높은 계절별 변화를 보이고 있다. 전기전도도는 강화와 서울지역이 각각 평균 17.6 μ S/cm(7.7-48.0 μ S/cm)와 20.8 μ S/cm(14.2-75.9 μ S/cm)로서 서울이 강화보다 1.2배 정도 높게 나타났으며, 계절별로는 겨울철이 여름철보다 높은 경향을 보였다.

그림 5와 같이 강화지역 강수중의 SO_4^{2-} 와 NO_3^- 은 비슷한 월별 농도 경향을 보이나 주로 해염기원인 Cl^- 은 다른 경향을 나타내었다. 그러나 서울지역은 그림 6과 같이 SO_4^{2-} , NO_3^- 및 Cl^- 모두 늦가을(11월)과 겨울철(12-2월)에 높고 여름철에 낮은 농도 경향을 나타내었다. 이와같이 서울지역에서 늦가을과 겨울철에 음이온의 농도가 높은 이유는 난방에 의한 석탄 및 석유연료 소비량의 증가로 설명할 수 있을 것이다.

NH_4^+ 의 농도는 강화지역에서 8월달에 최소치(0.42mg/l)를 기록하였으며 봄철과 겨울철에 높은 농도를 나타내었다. 서울지역에서 NH_4^+ 은 3월달(0.64mg/l)에 가장 낮고 겨울철에 대체로 높은 농도를 나타냈으며, 특히 11월달(2.44mg/l)에 가장 높은 최대치를 기록하였다. 그런데 NH_4^+ 는 주로 토양 유기물의 분해시 발생하는 것으로 알려져 있는데, 유기물의 분해가 활발한 여름철보다 겨울철에 높은 농도를 나타낸 것으로 보아 토양이외의 다른 발생원이 있는 것으로 추정되어진다. 주로 토양에서 발생하는 Ca^{2+} 는 강화지역에서 3월달에 1.10mg/l로서 그리고 서울지역에서 11월달에 1.80mg/l로서 가장 높은 농도를 기록하였다. 또한 강화지역에서는 6월(0.09mg/l), 7월(0.10mg/l), 8월(0.14mg/l) 및 9월(0.15mg/l)에 그리고 서울지역에서는 6월(0.23mg/l), 7월(0.18mg/l) 및 9월(0.38mg/l)에 낮은 농도를 나타내는데 이는 월별 강우량에 의한 영향을 받기 때문인 것으로 사료된다.

강수의 화학조성에 관한 전반적인 형태를 구체적으로 파악하기 위하여 표 1과 표 2에 제시한

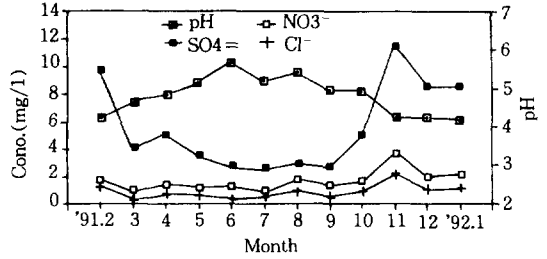


Fig. 6. Monthly variations of anion composition at Seoul.

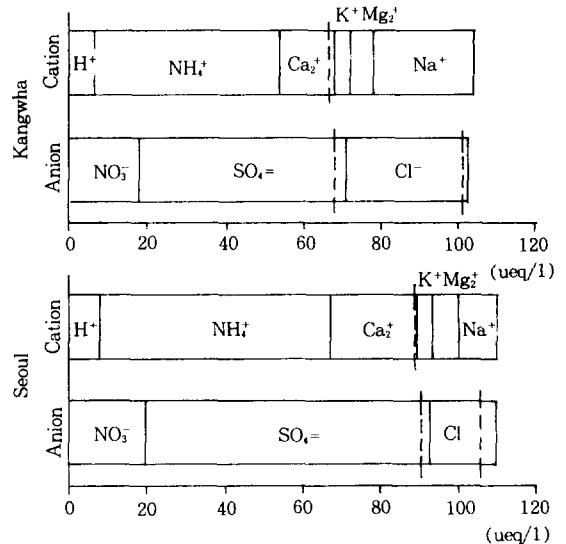


Fig. 7. Mean ionic composition of rainwater at Kangwha and Seoul.

주요이온의 평균농도(V. W. AVG.)를 당량농도(μ eq/l)로 환산하여 그림 7에 나타내었다. 강수중에 존재하는 양이온의 함량은 강화지역이 $NH_4^+ > Na^+ > Ca^{2+} > Mg^{2+} > H^+ > K^+$ 그리고 서울지역이 $NH_4^+ > Ca^{2+} > Na^+ > H^+ > Mg^{2+} > K^+$ 와 같은 순서로 각각 나타났다. 음이온의 함량은 강화지역이 $SO_4^{2-} > Cl^- > NO_3^-$ 그리고 서울지역이 $SO_4^{2-} > NO_3^- > Cl^-$ 와 같은 순서로 나타나는 경향을 보여주었다. 이와같이 해안지역인 강화의 경우 해염입자에서 유래하는 Na^+ 와 Cl^- 의 구성비가 내륙지역인 서울보다 높음을 알 수 있었다.

그림 7에서 Ca^{2+} , SO_4^{2-} 및 Cl^- 는 해염입자에서 상당량이 유래하므로 해염입자의 지표물질인 Na^+ 를 사용하여 해염으로부터 유래한 $ss-Ca^{2+}$, $ss-SO_4^{2-}$ 및 $ss-Cl^-$ 의 양을 구할 수 있다(原 宏,

1991). 따라서 비해염기원의 $nss-Ca^{2+}$, $nss-SO_4^{2-}$ 및 $nss-Cl^-$ 는 강수중에 함유된 각 성분의 총 농도중에서 해염으로부터 유래한 $ss-Ca^{2+}$, $ss-SO_4^{2-}$ 및 $ss-Cl^-$ 의 양을 뺀 것이다. Na^+ 는 해염이외의 인위적인 발생원이 없으며, 해염입자의 조성이 해수의 구성과 일치한다는 가정하에 해염입자의 지표물질로 사용하였다(William H. McDowell, 1990; Christian E. Junge, 1963).

그림 7에서 Ca^{2+} , SO_4^{2-} 및 Cl^- 의 박스안에 있는 점선은 강수중에 존재하는 총 Ca^{2+} , SO_4^{2-} 및 Cl^- 를 비해염기원과 해염기원으로 분리하여 나타낸 것이다. 여기에서 K^+ 이온이 단지 소량으로 양이온에 기여하므로 양이온에서 점선의 왼쪽 부분을 비해염기원으로 그리고 오른쪽 부분을 해염기원으로 생각할 수 있다. 또한 음이온에서 SO_4^{2-} 의 박스안에 있는 점선의 오른쪽 부분과 Cl^- 의 박스안에 있는 점선의 왼쪽 부분이 전부 해염에서 유래한다고 하면 점선의 오른쪽과 왼쪽 부분을 해염기원으로 생각할 수 있다(Hiroshi Hara et al., 1990). 따라서 각 점선으로 구분한 해염기원의 이온성분($ss-Ca^{2+}$, K^+ , Mg^{2+} , Na^+ , $ss-SO_4^{2-}$ 그리고 $ss-Cl^-$)의 당량농도의 합을 양이온과 음이온의 전체 이온성분의 당량농도의 합으로 나누어 해염성분의 기여율을 구한 결과 서해안의 강화지역은 34.1%였으며, 대도시인 서울지역은 15.7%로 나타났다. 즉, 해안가에 위치한 강화지역이 해안으로부터 상당히 떨어진 서울지역보다 2배 정도 해염입자의 영향을 많이 받는 것으로 추정되어진다.

강수의 성분중 비해염기원의 음이온($nss-SO_4^{2-} + nss-Cl^- + NO_3^-$)의 농도는 강화와 서울지역에서 각각 $69.0\mu eq/\ell$ 와 $96.3\mu eq/\ell$ 로서 대도시인 서울이 해안지역인 강화보다 높게 나타났는데, 이는 서울이 경인공업지역과 서울시내지역에서의 화석연료의 연소 및 자동차 배출가스등 인위적인 오염배출원의 영향을 강하게 받았기 때문인 것으로 생각된다. 그러나 인위적인 오염배출원이 없는 강화지역도 상당히 높은 농도를 나타내는데 이것은 수도권 및 중국으로부터 대기오염물질의 영향을 받았을 가능성을 보여주는 것으로 추정된다. 양이온중 Ca^{2+} 는 해염에서 발생하는 $ss-Ca^{2+}$ 와 토사(soil dust)에서 발생하는 비해염기원의 $nss-Ca^{2+}$ 로 나눌 수 있다. 토양에서 발생하는 $nss-Ca^{2+}$ 는 강화와 서울에서 각각 $12.9\mu eq/\ell$ 와 $22.0\mu eq/\ell$ 로서 대도시인 서울지역이 해안지역보다 2배 정도 높는데 이는 서울지역이 차량통행 등에 의해 토양입자가 대기중으로 쉽게 비산되어

강수에 흡착되었기 때문인 것으로 추정된다. 또한 NH_4^+ 의 농도도 강화와 서울지역이 각각 $47.8\mu eq/\ell$ 과 $58.9\mu eq/\ell$ 로서 서울이 강화보다 약간 높은 것으로 나타났는데 이것의 발생원이 주로 토양입을 고려해 볼 때 서울지역이 내륙에 위치하고 있기 때문인 것으로 추정된다.

Ca^{2+} 와 NH_4^+ 와 같은 양이온에 의한 강수 pH의 중화능력을 알아보기 위하여 비해염기원의 이온밸런스($H^+ + NH_4^+ + nss-Ca^{2+} / (NO_3^- + nss-SO_4^{2-} + nss-Cl^-)$)의 평균당량비를 구한 결과 강화와 서울이 각각 0.97와 0.93로 거의 1에 가까운 것을 알 수 있었다. 이러한 근거에 의하여 $(H^+) / (NO_3^- + nss-SO_4^{2-} + nss-Cl^-)$ 의 당량비를 구한 결과 0.090과 0.084로서 이것은 강수중의 산성물질이 암모니아나 칼슘화합물에 의해 두 지역 모두 거의 91%정도 중화되는 것으로 생각된다. Hiroshi Hara(1990)등에 의하면 일본의 Shimane지역에서 강수중 산성물질의 거의 70%가 Ca^{2+} 와 NH_4^+ 에 의하여 중화되었다고 보고하였다. 이것을 우리나라의 중화능과 비교해 보면 우리나라 지역이 일본 지역보다 Ca^{2+} 와 NH_4^+ 의 알칼리성 물질에 의한 중화의 정도가 상당히 높은 것을 알 수 있다.

인위적인 발생원에서 유래한 황산염, 질산염 및 염산염이 강수의 산성도 즉 pH에 어느 정도 기여하는지 알아보기 위하여 비해염기원의 산성물질($nss-SO_4^{2-} + NO_3^- + nss-Cl^-$)중 $nss-SO_4^{2-}$, NO_3^- 및 $nss-Cl^-$ 의 상대적인 비를 구하였더니 강화지역이 각각 0.725, 0.259 및 0.016였으며 서울지역이 각각 0.749, 0.202 및 0.049로 나타났다. 즉 강수의 산성도에 대한 황산의 상대적 기여율은 강화와 서울이 각각 72.5%와 74.9%로서 도시지역인 서울이 해안지역인 강화보다 약간 높게 나타났다. 질산과 염산이 강수의 산성도에 기여하는 정도는 강화지역이 25.9% 및 1.6% 그리고 서울지역이 20.2% 및 4.9%정도인 것으로 추정되었다. 이는 1985년 서울시 산성비의 원인물질에 관한 연구(Shin, E. B. et al., 1986)에서 강수의 산성도에 황산, 질산 및 염산이 각각 84%, 8% 및 8%가 기여한다고 보고한 바와 같이 아직까지 강수의 산성도에 가장 큰 영향을 미치는 것은 황산으로 생각된다. 그러나 본 연구결과 강수의 산성도에 대한 황산의 비중은 점차 감소한 반면 질산의 기여도는 상대적으로 크게 증가하였다는 것을 알 수 있다. 이것은 최근의 에너지 정책에 따른 석탄연료의 감소와 상대적으로 도시 교통량의 증가로 인해 차량등에서 배출되는 질소산화물의 양이 증가하기 때문인 것으로 사료된다.

4. 결 론

우리나라의 서해안에 위치한 강화와 인접한 내륙지역의 대도시인 서울지역에서 내린 산성우의 현황과 특성을 파악하기 위하여 1991년 2월부터 1992년 1월까지 강수 시료를 채취하여 pH, 전기전도도 및 주요용존이온성분을 측정·분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 우리나라의 강화와 서울지역에서 측정된 강수의 강수강도 및 강수량과 주요용존이온성분의 총당량농도간에는 역상관관계를 나타내었다. 그러나 수소이온의 농도지수를 나타내는 pH는 강수량이 적은 범위에서 넓은 폭의 값을 갖는 것으로 나타나지만 강우가 계속될 경우 일정한 값으로 되는 경향이 관측되었다.

2. 강수량에 의한 pH의 년가중평균치는 강화와 서울지역이 각각 5.21과 5.09로서 서울지역이 해안지역인 강화지역보다 높은 산성도를 나타내었다.

3. 강수중에 존재하는 양이온의 함량은 강화지역이 $NH_4^+ > Na^+ > Ca^{2+} > Mg^{2+} > H^+ > K^+$ 그리고 서울지역이 $NH_4^+ > Ca^{2+} > Na^+ > H^+ > Mg^{2+} > K^+$ 와 같은 순서로 각각 나타났다. 음이온의 함량은 강화지역이 $SO_4^{2-} > Cl^- > NO_3^-$ 그리고 서울지역이 $SO_4^{2-} > NO_3^- > Cl^-$ 와 같은 순서로 나타나는 경향을 보여주었다. 이와같이 해염입자에서 유래하는 Na^+ 와 Cl^- 의 구성비는 내륙지역인 서울보다 해안지역인 강화가 높게 나타났다.

4. 강수의 성분중 비해염기원의 음이온($nss-SO_4^{2-} + nss-Cl^- + NO_3^-$)은 주로 인위적인 오염발생원에서 방출되는 산성물질로 강화와 서울지역에서 각각 $69.0\mu eq/l$ 와 $96.3\mu eq/l$ 로서 대도시인 서울이 해안지역인 강화보다 높게 나타났다.

5. 강수의 화학조성에 대하여 해염이 기여하는 정도는 강화와 서울지역이 각각 34.1%와 15.7%로서 해안가에 위치한 강화지역이 내륙지역인 서울보다 2배 정도 해염입자의 영향을 많이 받는 것으로 추정되어진다.

6. 강화와 서울지역에서 강수중의 산성물질이 암모니아나 칼슘화합물에 의해 91%정도 중화되는 것으로 사료된다.

7. 강수의 산성도에 대한 황산과 질산의 기여도는 강화지역이 72.5% 및 25.9% 그리고 서울지역이 74.9% 및 20.2%인 것으로 추정된다.

참 고 문 헌

環境廳酸性雨土壤植生影響研究會 (1990) 酸性雨

(土壤·植生への影響), 公害研究對策センター.

中央氣象臺 (1991. 2-1992. 1) 氣象月報.
 玉置元則 (1991) 酸性雨, 環境技術, 20(11), 704-714.
 原 宏 (1991) 酸性雨(酸性雨のデータをどうみるか), 大氣汚染學會誌, 26(3), A51-A59.
 Azhari F. M. Ahmed and Ral P. Singh et al. (1990) Chemistry of Atmospheric Precipitation at the Western Arabian Gulf Coast, Atmos. Environ., 24A(12), 2927-2934.
 Chang, S. G. et al., (1991) On the Observation of Yellow Sand, Total Suspended Particulates and Acid Rain in Korea, The Report of Ministry of Science and Technology of ROK(III), 35-36.
 Christian E. Junge (1963) Air Chemistry and Radioactivity, Academic Press, 327-330.
 Chung, Y. S. et al. (1990) On the Observation of Yellow Sand, Total Suspended Particulates and Acid Rain in Korea, The Report of Ministry of Science and Technology of ROK(II), 225-235.
 Dorene Bolze and Jan Beyea (1989) The Citizens' Acid Rain Monitoring Network, Environ. Sci. Technol., 23(6), 645-646.
 Hiroshi Hara et al. (1990) Analysis of Two-Year Results of Acid Precipitation Survey within Japan, Bulle. Chem. Soc. Japan. 63(9), 2691-2697.
 Kang, I.G. et al. (1990) On the Observation of Yellow Sand, Total Suspended Particulates and Acid Rain in Korea, The Report of Ministry of Science and Technology of ROK(II), 35.
 Shin, E.B. et al. (1986) Investigation on Source Strength to Acid Rain in the Seoul Area, J. Korean Air Pollut. Res. Assoc., 2(2), 66-74.
 Veerabhadra R. Kotamarthi et al. (1990) The Long Range Transport of Pollutants in the Pacific Rim Region, Atmos. Environ., 24A(6), 1521-1534.
 William H. McDowell et al. (1990) Influence of Sea Salt Aerosols and Long Range Transport on Precipitation Chemistry at El verde, Puerto Rico, ibid, 24A(11), 2813-2821.