

익산지역 강수의 계절별 산성도와 화학성상 Seasonal Variations of Acidity and Chemistry of Precipitation in Iksan Area

강 공 언 · 오 인 교 · 김 회 강¹⁾

원광보건대학 환경공업과

¹⁾전국대학교 환경공학과

(1998년 10월 23일 접수, 1999년 7월 6일 채택)

Gong Unn Kang, In Kyo Oh and Hui Kang Kim¹⁾

Dept. of Environmental Industry, Wonkwang Health Science College

¹⁾*Dept. of Environmental Engineering, Konkuk University*

(Received 23 October 1998, accepted 6 July 1999)

Abstract

Precipitation samples were collected by the wet-only sampling method in Iksan in the northwest of Chonbuk from March 1995 to February 1997. These samples were analyzed for the concentration of ion components, in addition to pH and electrical conductivity. The annual mean pH of precipitation was 4.8 and the seasonal trend of pH was shown to be low in Fall and Winter (4.5), middle-ranged in Spring (4.7) and high in Summer (5.0). The frequency of pH below 5.6 was about 71%. The seasonal pattern of pH frequency was found to be different in each season. In the case of the pH less than 5.0, the frequency was higher in Spring, Fall and Winter than in Summer, especially higher in Fall than in other seasons. The concentrations of analysed ions showed a pronounced seasonal pattern. However, major ion species for all seasons were NH_4^+ , Ca^{2+} and Na^+ among cations and SO_4^{2-} , Cl^- and NO_3^- among anions. The major acidifying species appeared to be nss-SO_4^{2-} and NO_3^- , and the main bases responsible for the neutralization of precipitation acidity were nss-Ca^{2+} and NH_4^+ . The potential acidity of precipitation, pAi, was found to be between 3.0 and 5.0 for total samples, while the measured pH was approximately between 3.9 and 7.8. The seasonal trend of pAi showed a decreasing order: Summer (4.3), Winter (4.0), Spring and Fall (3.8). During the Fall, both pAi and pH were especially very low, which indicated that during this period the potential acidity of precipitation was high but the neutralizing capacity was low. For Spring, pAi was very low but pH was slightly high. This was likely due to the large amount of CaCO_3 in the soil particles transported over a long range from the Chinese continent that were incorporated into the precipitation, and then neutralized the acidifying species with its high concentration.

Key words : precipitation, potential acidity, acidifying species, neutralization process

1. 서 론

산성비의 피해가 심각한 지역으로는 북미의 북동부와 북유럽 그리고 동북아시아로 알려져 있으나 최근 동북아시아 지역은 높은 인구 밀도와 경제성장으로 대기오염물질의 배출량이 급속도로 증가되고 있어 더욱 많은 관심의 대상이 되고 있다(CREPI, 1994). 동북아시아 지역에서 인위적 발생원에 의하여 배출되는 SO_2 의 연간 배출량은 11.5×10^6 ton S로 이것은 산성강하물에 의해 심각한 생태계 피해를 초래한 유럽과 북미의 발생량인 16×10^6 ton S과 12×10^6 ton S에 큰 차이를 보이지 않는 것으로 밝혀졌다. 우리 나라의 경우 연간 배출량은 0.5×10^6 ton S로 동북아시아의 4개국중 4.6%를 차지하며 이 지역 배출량의 87%를 차지하는 중국의 5% 수준이다. 또한 NO_x 의 연간 배출량은 3.3×10^6 ton N으로 동북아시아의 4개국중 8%를 점유하며 중국과 일본에서 각각 약 70%와 15%를 배출하는 것으로 나타났다(강공언, 1997; CREPI, 1992) 따라서, 우리 나라는 주변국가로부터 상당한 영향을 받는 것으로 추정되며 특히 동북아시아의 SO_2 와 NO_x 배출량의 거의 대부분을 차지하고 있는 중국이 우리나라 풍상측에 위치하고 있어 산성물질의 강하량 증가의 가능성이 제기된 바 있다(강공언, 1997; 박경윤 등, 1994; 강동근 등, 1993; 정용승 등, 1993; 홍민선 등, 1992; 전종갑, 1991). 최근 비오염지역으로 예상되었던 농촌이나 해안 및 섬지역에서도 산성비가 내리는 것으로 밝혀지고 있으나(이근준과 정용승, 1996; 강공언 등, 1995; 심상규 등, 1994; 송기형 등, 1992). 지금까지 이에 대한 연구는 대부분이 서울을 중심으로 한 중부지역과 대도시를 중심으로 진행되었으며(강공언 등, 1997; 강공언 등, 1996; 구자공과 박경렬, 1993; 박성배 등, 1989; 신용배 등, 1986), 지리적으로 중국에서 배출된 대기오염물질의 장거리 이동에 의한 피해가 클 것으로 예상된 서해안 지역에 대한 연구는 그 중요성에 비해 상대적으로 부족한 실정이다.

본 연구에서는 지리적으로 한반도 남서부의 서해안 내륙지역에 위치하고 있는 전북 익산지역을 연구대상지역으로 하여 강수의 pH와 이온성분의 농도를 측정하였다. 또한 이 지역 강수의 산성 및 중

화 원인물질을 규명하고 계절별 산성도와 그 화학적 특성을 파악함으로써 향후 서해안 개발에 따른 대기오염 현황에 대한 비교자료를 얻고자 하였다. 더구나 이 지역은 김제 · 만경평야 등의 곡창지대에 둘러싸여 있어 이에 대한 연구가 매우 중요하다고 하겠다. 현재 익산시에는 2개의 공단(익산 1·2 공단; 2공단은 수출자유지역으로 귀금속단지 등이 조성되어 있음)과 3개의 농공단지가 조성되어 있으며 또한 3공단 조성 계획이 수립되어 있어 공해배출업소는 더욱 증가할 것으로 예상된다. 더욱이 새만금 간척사업으로 조성될 군장산업단지와 서해안 고속도로 등으로 개발이 가속화되고 있는 시점에서 익산지역에서의 대기오염은 점차 심화될 것으로 예상된다.

2. 실험방법

2.1 시료채취 및 분석

시료채취는 1995년 3월부터 1997년 2월까지 익산시(경도 $127^{\circ}08' \sim 126^{\circ}51'$, 위도 $35^{\circ}5.2' \sim 36^{\circ}09'$)에 소재한 원광보건대학 제1학술관 건물의 옥상(지상 약 20m)에서 하였다. 이곳은 익산시의 북쪽에 위치하고 있으며 그 위쪽으로는 30여호의 민가가 산재해 있고 주위는 논으로 이루어져 있다. 남쪽으로는 원광대학이 그리고 서쪽으로는 원불교 중앙총부가 위치하고 있다. 익산시는 전라북도의 서북단에 위치하며 호남, 전라, 군산선이 교차하고 호남고속도로가 동부를 지나고 있다. 또한 10여개의 국·지방도가 있어 교통의 요충지 역할을 하고 있으며 인구는 약 33만명 정도로 연평균 약 2.4%씩 증가하고 있다(익산시, 1996).

시료채취장치는 자동강수채취장치를 사용하였으며 비와 눈 등의 강수만 포집하였다(한국과학재단, 1995) 이때 강수시료는 강수시 비가 내리는 처음부터 비가 그치는 순간까지 전량채취하여 그것을 하나의 분석시료로 하는 것을 원칙으로 하였다(酸性雨調査法研究會, 1993).

채취된 강수시료는 실험실로 운반하여 바로 pH(692 pH/Ton Meter, Metrohm Inc.)와 전기전도도(Model SC 82, Yokogawa Electric Corp.)를 측정한 후 공극이 0.45 m인 밀티포아필터(HAWP 04700, Millipore Corp.)로 여과하여 수용성 이온성분의 농

도 분석시까지 4°C의 냉장고에서 보관하였다. 수용성 이온성분의 농도는 양이온의 경우 CG 12와 CS 12 칼럼 (IonPac Column, Dionex Inc.)이 그리고 음이온의 경우 AG 10와 AS 10 칼럼 (IonPac Column; Dionex Inc.)이 장착된 이온크로마토그래프 (DX-100, Dionex Inc.)를 사용하여 분석하였다. 양이온중 NH₄⁺는 흡광광도계 (UV-160L, Shimadzu Inc.)를 사용하여 인도페놀법 (indophenol blue method)으로 측정하였다.

2.2 분석자료의 신뢰성 검토와 자료의 해석방법

시료채취기간 동안에 0.5 mm 이상의 강수가 발생한 경우는 121회였으나 이중 24회는 소량으로 측정이 곤란하여 총 97개의 시료만이 분석되었다. 분석자료의 신뢰성 확보를 위하여 이온 및 전기전도도 밸런스를 검토한 결과 5개 시료가 신뢰성에 문제가 있는 것으로 추정되었다. 따라서, 이를 제외한 92개 시료의 분석자료만을 사용하여 이 지역 강수의 계절별 산성도와 화학성상을 해석하였다

분석자료의 요약치는 강수량으로 가중한 평균치 (volume-weighted arithmetic mean; VWM)로 산출하였다 여기서 계절별 평균치는 먼저 각 분석시료로부터 월평균치를 구한 후 이것을 계절별로 분류하여 산출하였으며, 연평균치는 다시 계절별 평균치로부터 산출하였다. 단, 강수의 산성도를 나타내는 pH의 강수량 가중치는 실측 pH를 H⁺의 몰중량농도로 환산한 후 이것을 다시 강수량으로 가중한 H⁺의 산술평균농도를 구하고 최종적으로 pH로 환산하여 산출하였다. 강수의 계절별 산성도와 화학성

상은 봄, 여름, 가을, 겨울의 사계절로 구분하여 해석하였는데, 봄은 3~5월, 여름은 6~9월, 가을은 10~11월 그리고 겨울은 12월부터 그 다음 해의 2월까지로 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 강수의 pH와 이온성분

표 1은 측정기간 동안 계절별 강수의 분석자료와 연평균치를 나타낸 것이다. 강수의 연평균 pH는 4.8이었으며 계절별로는 여름(5.1) > 봄(4.7) > 가을, 겨울(4.5) 순이었다. 발생빈도분포는 그림 1과 같이 붐우리가 왼쪽으로 치우친 좌향왜곡분포(left skewed distribution)를 하는 것으로 나타났다 여기에서 종축의 pH는 3.5에서 8.5까지 나타내었으며 한 구간을 0.5로 하여 그 중간값을 표시하였다 각 구간별 발생빈도를 살펴보면 산성우 평가시 중요한 pH 5.6 이하의 발생빈도는 약 71%이었으며 이중 pH 4.5~5.0의 강수시료가 약 30%로 가장 높은 발생빈도를 나타내었다 또한 pH 4.0 이하인 경우와 pH 7.5~8.0의 약염기성인 강수시료도 관측되었다. 그림 2는 측정기간 동안 강수의 pH 발생빈도를 계절별로 나타낸 것이다. 여기에서 계절별 pH 발생빈도는 서로 다른 경향을 보이는데 즉, 여름은 pH 5.5를 중심으로 거의 정규분포 형태를 나타내고 있으나 봄에는 삼산형 분포(trimodal distribution)를 그리고 가을과 겨울에는 이산형 분포(bimodal distribution)를 나타내었다 또한 pH 5.0 이하의 저 pH 발생빈도의 경우 여름(25%)에 비해 가을(81%), 겨울(50%) 및 봄(44%)에 높게 나타났으며, 특히 가을에 매우 높은

Table 1. Analytical results of chemical composition in precipitation samples in each season (n=92).

Sampling season	Lab. pH	Lab. EC (μS/cm)	Rain -fall ¹⁾ (mm)	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	F ⁻	NO ₂ ⁻	T-C	T-A ²⁾	C/A
				(μeq/l)										(meq/l)		
Spring(20) ³⁾	4.71	30.3	352.0	103.3	14.1	5.6	30.6	85.1	29.8	26.5	132.5	7.5	0.0	0.26	0.20	1.31
Summer(31)	4.97	12.6	1290.0	9.8	5.3	2.7	14.8	35.0	12.0	17.9	37.7	5.1	0.1	0.08	0.07	1.08
Fall(21)	4.50	43.4	293.8	53.1	24.7	7.2	74.6	97.5	45.7	93.2	140.4	14.5	0.1	0.29	0.29	0.98
Winter(20)	4.48	39.6	127.0	43.3	38.3	7.5	121.0	74.3	31.9	173.2	91.3	14.7	0.1	0.32	0.31	1.02
VWM ⁴⁾	4.78	21.7	515.7	34.0	11.6	4.2	32.6	54.9	21.1	39.7	71.8	7.5	0.1	0.15	0.14	1.10
STD	0.23	13.7	524.9	38.7	14.2	2.2	47.8	27.0	13.8	72.0	47.0	4.9	0.0	0.11	0.11	0.15

1) Total rainfall of each season for two years
 2) T-C Total concentration of cations, T-A Total concentration of anions
 3) Number of samples for two years
 4) Volume-weighted arithmetic mean

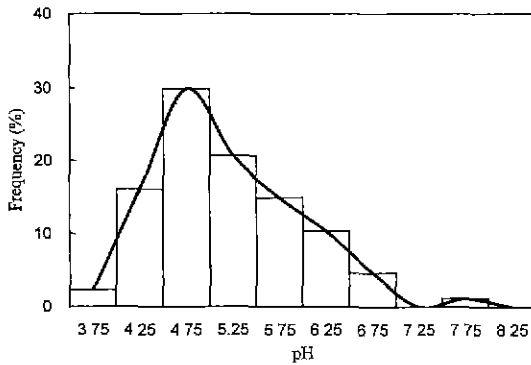


Fig. 1. Frequency distribution of pH.

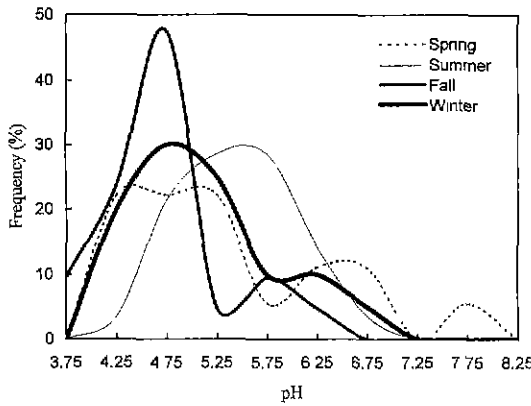


Fig. 2. Seasonal variation of pH frequency.

발생빈도를 나타내었다.

강수중 이온성분의 연평균농도를 살펴보면 양이온의 경우 NH_4^+ 가 약 40.1%로써 가장 높은 점유율을 나타냈으며 다음으로 Ca^{2+} 와 Na^+ 가 각각 대략 24.4%와 24.0%를 점유하였다. 음이온의 경우 SO_4^{2-} 가 약 51.0%로 가장 높은 점유율을 나타냈으며 다음으로 Cl^- 가 28.5% 그리고 NO_3^- 가 15.1%를 점유하였다. 그림 3은 강수중 수용성 이온성분의 계절별 분포를 파악하기 위하여 그 평균농도를 양이온과 음이온으로 분류하여 나타낸 것이다. 여기에서 양이온과 음이온의 총농도는 모두 겨울 > 가을 > 봄 > 여름 순으로 나타났으며 이온성분에 따라 계절별 뚜렷한 차이를 보여주고 있지만 전반적으로 양이온의 경우 NH_4^+ , Ca^{2+} 및 Na^+ 가 그리고 음이온

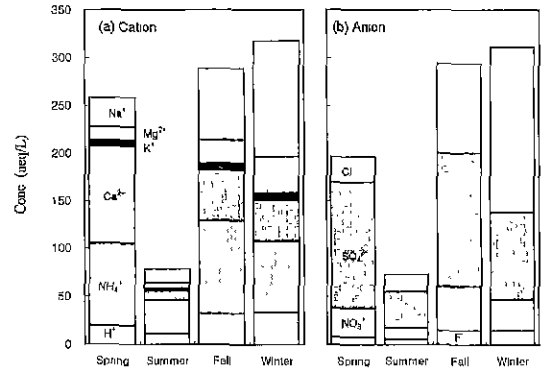


Fig. 3. Mean conc. of (a) cation and (b) anion in precipitation during the each season.

의 경우 SO_4^{2-} , Cl^- 및 NO_3^- 가 주성분인 것으로 나타났다. 여기에서 Na^+ 와 Cl^- 성분의 경우 계절별 농도가 상호 비슷한 경향을 보이고 있으며 시료채취 지점이 지리적으로 서해안에 인접한 내륙지역에 위치하고 있어 자연발생원중 해염기원에 의한 발생 가능성이 높은 것으로 추정되었다.

따라서, 이 지역 강수의 화학성상에 미치는 해염의 영향을 파악하기 위하여 그림 4에 Na^+ 성분을 해염기원의 지표로 하여 해염기원 가능성이 있는 Cl^- , SO_4^{2-} , Mg^{2+} , K^+ 및 Ca^{2+} 성분의 농도를 직선좌표에 나타내었다 (Tsitouridou *et al.*, 1993; Samara *et al.*, 1992; Kasahara *et al.*, 1984). 여기에서 가는 실선은 해수중에서 Na^+ 농도에 대한 이들 이온성분 농도의 대응관계를 나타낸 것이다. 그 결과 이들 이온성분의 농도가 모두 Na^+ 와 유의할만한 상관성을 갖는 것으로 나타나 해염에 의한 영향을 받는 것으로 사료되며, 특히 Cl^- 와 Mg^{2+} 경우 Na^+ 에 대한 농도비가 해수와 거의 같은 경향을 보이는 것으로 나타나 이들 이온성분의 대부분이 해염기원에 의한 것으로 판단된다. 그리고 강수중 Ca^{2+} , K^+ 및 SO_4^{2-} 성분은 그 농도비가 해수보다 다소 높지만 거의 비슷한 경우와 상대적으로 높은 농도비를 나타내는 두 가지 대응관계를 보이는데 이러한 사실은 이들 이온성분이 부분적으로 해염에 의한 영향을 강하게 받는 경우도 있지만 해염 이외의 다른 발생원에 의한 영향을 상대적으로 많이 받고 있음을 의미한다. 특히 Ca^{2+} 성분의 경우 해염기원의 지표인 Na^+ 에 비해 매우 높은 농도를 나타낸 경우도 있는데 이것

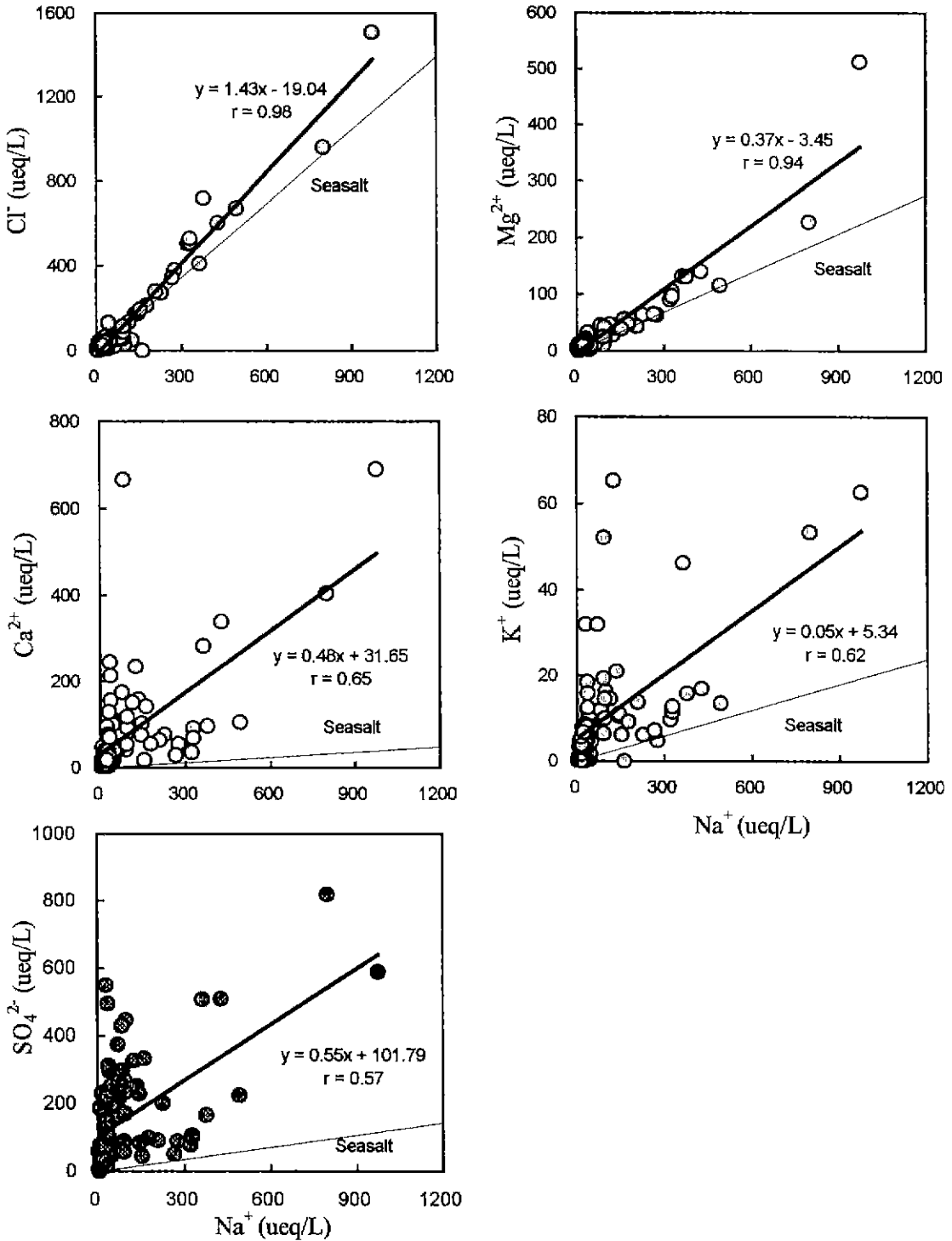


Fig. 4. Variation of major ion conc. originated from the sea with respect to Na⁺ conc. in precipitation.

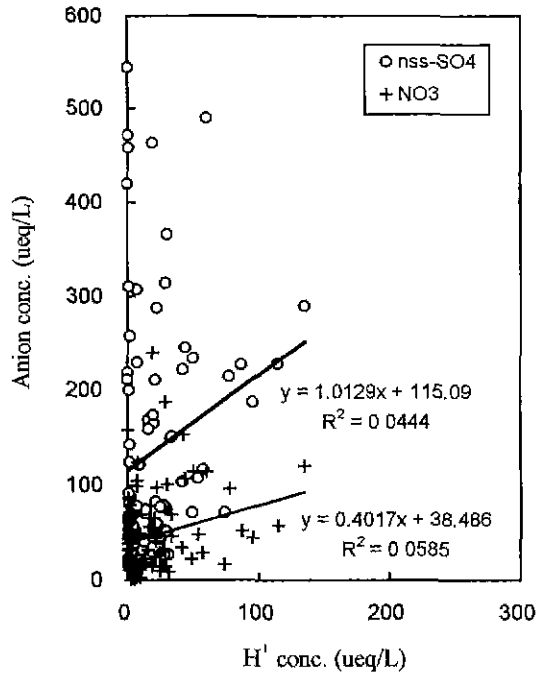


Fig. 5. The linear regression between H^+ and $nss-SO_4^{2-}$ and NO_3^- concentration.

은 황사현상이 발생한 1996년 4월 16~17일에 채취한 시료로 중국대륙으로부터 장거리 이동한 토양 기원의 $CaCO_3$ 가 강수에 다량 유입되었기 때문으로 판단된다(강공언, 1999; 강공언, 1997; Al-Momani et

al., 1995)

이상의 결과로부터 자연발생원인 해염기원 성분을 제외할 경우 이 지역 강수의 화학적 특성을 결정짓는 주성분은 NH_4^+ , $nss-Ca^{2+}$, $nss-SO_4^{2-}$ 및 NO_3^- 인 것으로 판단되며 이중 $nss-SO_4^{2-}$ 와 NO_3^- 는 이 지역 강수의 산성화에 기여하는 주요 원인물질로 추정된다. 여기에서 $nss-Ca^{2+}$ 와 $nss-SO_4^{2-}$ 는 비해염기원(non-seasalt origin)의 Ca^{2+} 와 SO_4^{2-} 양을 의미한다(Stumm and Morgan, 1990). 그런데 이들 산성원인물질은 그림 5에서와 같이 강수의 산성도를 나타내는 H^+ 와 유의할만한 상관성을 나타내지 않아 강수의 산성도에 직접 기여하지 못하고 강수 중에 유입된 알칼리성 성분에 의해 중화되는 것으로 추정된다. 따라서 이들 산성물질에 의한 강수의 잠재적인 산성도(potential acidity)를 산출하여 강수의 산성화 가능성과 중화능(neutralizing capacity)을 중심으로 계절별 강수의 화학적 특성에 대한 해석을 시도하였다.

3.2 강수의 잠재적인 산성도와 중화능

그림 6은 측정기간 동안 강수의 잠재적인 산성도와 중화능 평가를 위하여 분석자료로부터 산출한 pAi와 실측 pH를 나타낸 것이다. 여기에서 pAi는 산성우의 가장 중요한 척도가 되고 있는 pH와 비교, 평가할 수 있도록 산성원인물질의 당량농도(eq/l)를 유입산성도(input acidity)로 하여 다음 식과

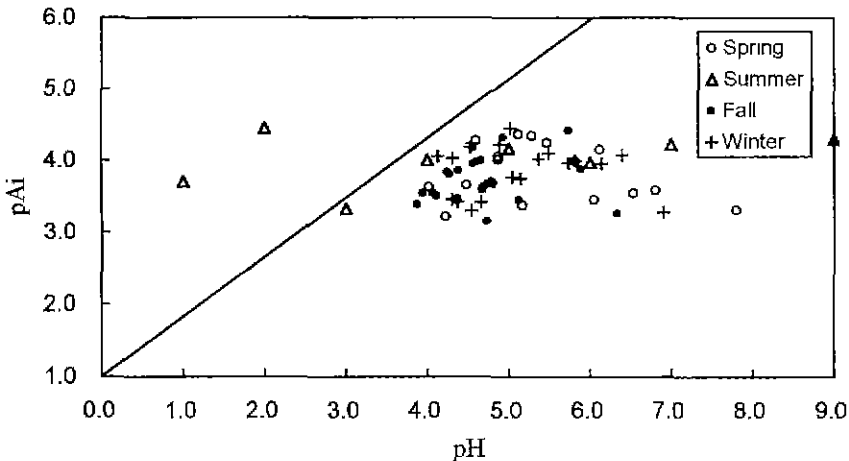


Fig. 6. Relationship between pAi and pH in the precipitation.

Table 2. Mean concentration of ions in rain and snow samples in Winter.

		pH	EC _{obs}	NH ₄ ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	F ⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	T-C	T-A
			μS/cm	μeq/l											
Rain	VWM	4.44	41.1	93.1	9.3	53.4	25.1	76.8	16.2	44.1	0.0	130.4	91.6	0.29	0.28
	STD	0.43	69.6	119.7	16.2	120.2	65.7	227.4	13.6	75.8	0.5	224.3	283.7	0.52	0.55
Snow	VWM	5.24	68.1	97.3	10.4	80.9	87.3	285.5	9.4	44.1	0.1	111.2	417.8	0.57	0.58
	STD	0.74	78.4	74.7	15.6	175.8	127.6	223.5	16.9	46.3	1.0	152.4	382.7	0.56	0.50

같이 정의되는데 (Hara, 1992), 이 값이 작을수록 강수의 잠재적인 산성도는 크게 된다.

$$pAi = -\log([nss-SO_4^{2-}] + [NO_3^-])$$

측정기간 동안 pAi는 실측 pH의 3.9~7.8 보다 낮은 3.0~5.0 범위인 것으로 나타나 산성원인물질에 의한 강수의 산성화 가능성이 큰 것을 알 수 있었다. 또한 그림에서 실선은 강수중의 산성원인물질이 중화되지 않는 형태의 H₂SO₄와 HNO₃로 존재할 경우 예상되는 pH로써 이 실선으로부터 멀리 떨어질수록 중화작용에 의한 영향을 강하게 받았음을 의미하는데 본 연구에서는 실선에 근접해 있는 것부터 실선 아래쪽으로 멀리 떨어져 위치하는 것까지 그 분포가 폭넓게 나타났다. 즉, 강수의 잠재적인 산성도를 나타내는 pAi가 동일하더라도 실측 pH 값은 아주 상이한 분포를 나타내었는데 이것은 강수시료의 중화능 크기가 서로 다르기 때문으로 판단된다. 여기에서 pAi에 비해 실측 pH가 높은 것일수록 유입산성도에 대한 알칼리성 성분의 중화능은 크게 된다.

계절별 분포를 살펴보면 봄에는 다른 계절에 비하여 pAi 값이 3.2~4.4로 낮아 강수의 높은 잠재적인 산성도를 나타내나 실측 pH는 4.0~7.8로 넓은 범위에 존재하는 것으로 나타났다. 여기에서 강수의 잠재적인 산성도를 나타내는 pAi값에 비해 실측 pH가 높은 것은 봄철에 주로 발생하는 황사현상과 바람에 의해 대기 중에 불어 올려진 토양입자가 강수의 산성도를 중화하기 때문으로 판단된다. 여름에 pAi는 3.3~5.0이었으나 실측 pH는 4.5~6.7에 범위에서 pH 5.0을 중심으로 분포하는 것으로 나타나 이 기간의 pH 발생빈도가 다른 계절과 달리 최빈치 5.0을 중심으로 한 정규분포 형태를 보이는 것으로 판단된다. 가을과 겨울에 pAi는 3.0~4.4와 3.3~4.5

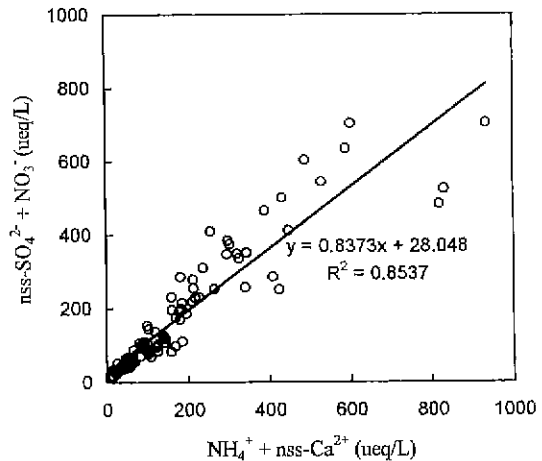


Fig. 7. The linear regression between (nss-SO₄²⁻ + NO₃⁻) and (NH₄⁺ + nss-Ca²⁺).

로 그리고 pH는 3.9~6.3과 4.1~6.9로 나타났다. 여기에서 가을의 경우 다른 계절에 비해 pAi와 pH가 가장 낮은 것으로 나타났는데 이것은 다른 계절에 비해 강수의 잠재적인 산성도가 높은 반면 상대적으로 그 중화능이 낮음을 의미한다. 이러한 사실은 가을에 저 pH 강수의 발생빈도가 다른 계절에 비해 높게 되는 것을 설명한다.

강수의 계절별 pAi와 pH 분포에서 특이할만한 사실은 겨울에 북서계절풍의 영향으로 중국대륙으로부터 장거리 이동한 대기오염물질의 침착 가능성이 가장 높아 강수의 잠재적인 산성도가 클 것으로 예상되었으나 오히려 봄이나 가을보다 낮게 나타났다는 것이다. 그 원인 분석을 위하여 겨울철 강수시료를 살펴본 결과 총 28개 중 절반 이상이 강설(snow)로 채취되었음을 알 수 있었다. 강설이 겨울철 강수의 화학적 특성에 미치는 영향을 분석하기

위하여 이 기간 동안의 시료를 강우와 강설로 분류하여 그 화학조성에 대한 평균치를 표 2에 나타내었다. 여기에서 강설의 경우 강우보다 양이온과 음이온의 총농도가 약 2배 정도 높은 것으로 나타났으며 이온조성별로는 Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , Cl^- 등이 강설에서 높은 농도를 나타내었다. 특히 그 대부분이 해염에서 유래하는 것으로 밝혀진 Mg^{2+} , Na^+ , Cl^- 는 모두 4배 정도의 차이를 보이는 것으로 나타났다. 반면에 F^- 와 SO_4^{2-} 는 강설보다 강우시에 높은 농도를 기록하였으며 NH_4^+ , K^+ , NO_3^- , NO_2^- 등은 뚜렷한 농도 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다. 또한 이 기간 동안 강우와 강설의 평균 pH는 4.4와 5.2로 강설의 경우 강우보다 낮은 산성도를 보이고 있는데 이 때문에 겨울에 강수의 실측 pH가 봄이나 가을보다 높은 것으로 생각된다. 결과적으로 익산지역 강수의 경우 계절적으로 강수의 잠재적인 산성도와 중화능에 차이가 있는 것으로 나타났지만 알칼리성 성분에 의한 중화작용으로 모든 계절에서 실측 pH가 높게 나타난 것으로 판단된다.

일반적으로 강수의 산성도를 중화시키는 중요 원

인물질로는 NH_3 와 $CaCO_3$ 인 것으로 알려져 있다. 이들 성분에 의한 중화능을 평가하고자 그림 7에 산성원인물질로 밝혀진 $nss-SO_4^{2-}$ 및 NO_3^- 와 NH_4^+ 및 $nss-Ca^{2+}$ 의 농도에 대한 상관관계를 나타내었다. 이들 이온성분간에는 매우 높은 상관성을 나타내는 것으로 나타났으며 이러한 사실은 강수중에 유입된 산성물질의 대부분이 NH_3 와 $CaCO_3$ 와 같은 알칼리성 물질에 의해 중화되고 있음을 의미한다고 하겠다.

그림 8은 강수의 계절별 pH, pAi 및 N/A 비의 평균치를 나타낸 것이다. 여기에서 N/A비는 강수의 중화능에 대한 상대적인 기여율을 파악하기 위하여 비해염기원의 산성원인물질에 대한 중화원인물질인 NH_4^+ 와 $nss-Ca^{2+}$ 의 당량농도비를 산출하여 나타낸 것이다(강공언, 1997). 계절별 평균 pAi는 여름 > 겨울 > 봄, 가을 순으로 나타났는데, 이는 이 지역 강수의 잠재적인 산성화 가능성이 여름에 낮고 봄과 가을에 큼을 의미한다. 그러나, 강수의 실측 pH는 가을에 비해 상대적으로 봄에 높게 나타났는데, 이것은 강수중 $nss-SO_4^{2-}$ 와 NO_3^- 의 산성원인물질

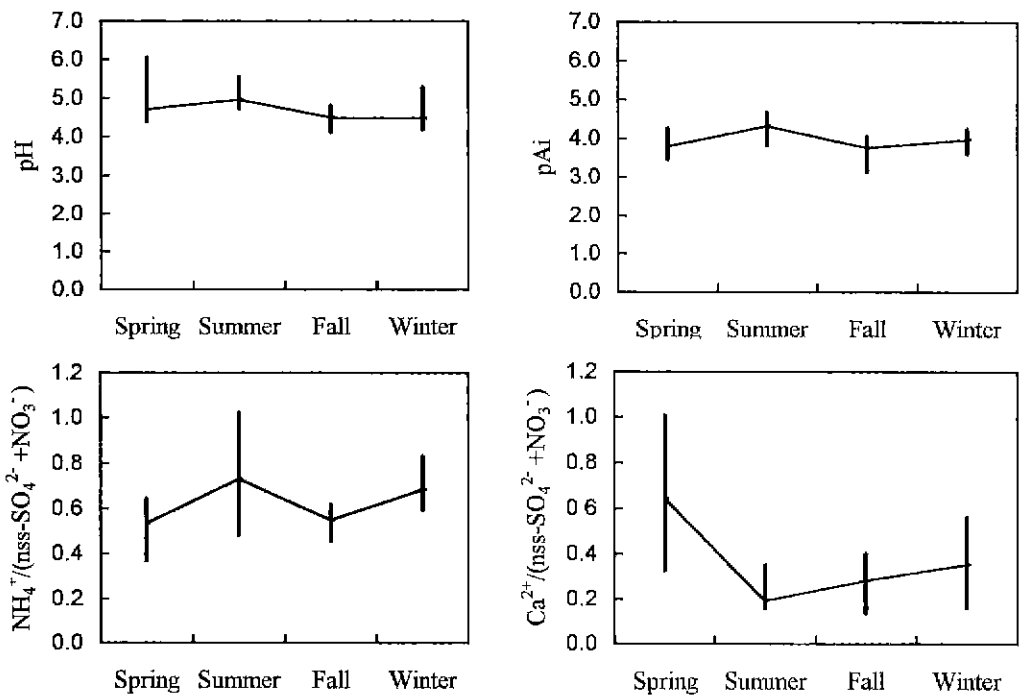


Fig. 8. Seasonal variation of pH, pAi and N/A ratio.

이 봄에 중국 대륙으로부터 장거리 이동한 토양 기원의 CaCO_3 가 빗물에 흡입되어 다량의 Ca^{2+} 에 의해 상대적으로 많이 중화되기 때문인 것으로 판단된다. 가을에 강수의 산성화가 심각한 것은 고농도의 nss-SO_4^{2-} 와 NO_3^- 에 의해 강수의 잠재적인 산성도가 가장 높을 뿐만 아니라 다른 계절에 비해 강수의 중화능이 상대적으로 약하기 때문으로 판단된다.

4. 결 론

중국으로부터 대기오염물질의 장거리 이동에 의한 영향이 클 것으로 예상된 서해안 내륙지역인 전북 익산지역에서 2년 동안 강수를 측정하여 계절별 강수의 산성도와 화학성상을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 강수의 연평균 pH는 4.8이었으며 계절별로는 여름(5.0) > 봄(4.7) > 가을, 겨울(4.5) 순이었다. pH 발생빈도는 5.6 이하가 약 71%이었으며 계절별로는 서로 다른 형태를 나타내었는데 pH 5.0 이하의 경우 가을에 가장 높은 발생빈도를 나타내었다.
- 2) 강수중 이온성분의 연평균 조성은 양이온의 경우 NH_4^+ 가 약 40%를 그리고 Ca^{2+} 와 Na^+ 가 각각 약 24%를 점유하였다. 음이온의 경우 SO_4^{2-} 가 약 51%를 그리고 Cl^- 와 NO_3^- 가 각각 29%와 15%를 점유하였다. 양이온과 음이온 성분의 농도는 그 종류에 따라 계절별 뚜렷한 차이를 보여주었다.
- 3) 강수중 Na^+ , Mg^{2+} 및 Cl^- 는 그 대부분이 해수에서 기원하는 것으로 나타났으며 Ca^{2+} , K^+ 및 SO_4^{2-} 는 부분적으로 해염의 영향을 받는 경우도 있지만 상대적으로 다른 발생원에 의한 영향을 강하게 받는 것으로 나타났다. 해염기원 성분을 제외할 경우 강수의 화학적 특성을 결정하는 주성분은 NH_4^+ , nss-Ca^{2+} , nss-SO_4^{2-} 및 NO_3^- 이었으며 이중 nss-SO_4^{2-} 와 NO_3^- 가 강수의 산성화에 기여하는 주요 원인물질로 그리고 NH_4^+ 와 nss-Ca^{2+} 가 이들 성분에 대한 주요 중화원인물질로 나타났다.
- 4) 강수의 pAi는 실측 pH의 3.9~7.8 보다 낮은 3.0~5.0이었다. 계절별 평균 pAi는 여름 > 겨울 > 봄, 가을 순으로 봄과 가을에 강수의 산성화 가능성이 큰 것으로 나타났다. 특히, 가을에는 실측 pH 또한 낮게 측정되었는데 이것은 이 기간에 강수의 잠재적인 산성도는 높은 반면 상대적으로 그 중화능이 낮음을 의미한다. 봄에는 강수의 산성화 가능성이 큼에도 불구하고 강수의 실측 pH는 높으며, 이것은 강수중의 산성원인물질이 토양기원의 CaCO_3 가 빗물에 흡입되어 발생하는 다량의 Ca^{2+} 에 의해 중화되기 때문인 것으로 판단된다. 겨울에는 북서계절풍에 의해 중국대륙으로부터 장거리 유입된 대기오염물질의 침착 가능성이 커 pAi가 낮을 것으로 예상되었으나 해염기원의 이온성분이 다량 함유된 강설이 빈번하게 내려 다른 두 계절에 비해 오히려 높게 나타났다.

사 사

본 연구의 일부는 1999년도 원광보건대학 교내 연구비 지원에 의하여 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

강공언, 강병욱, 김희강(1995) 강화지역 강수의 오염도 평가에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 11(1), 57-68.

강공언, 이주희, 김희강(1996) 서울지역 강수중 이온성분 분석자료의 해석, 한국대기보전학회지, 12(3), 323-332.

강공언, 임제현, 김희강(1997) 서울지역 강수 산성도의 장기적 경향분석, 한국대기보전학회지, 13(1), 9-18.

강공언(1997) 酸性降水物の 濕性沈着特性-韓半島를 中心으로-, 건국대학교 대학원 박사학위논문, 103-131

강공언(1999) 익산지역에서 봄철 강수의 화학성상과 중화능, 대한환경공학회지, 21(1), 197-206.

강동근, 김선태, 김정욱(1993) 동북아시아 대기오염물질의 장거리 이동에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 9(4), 329-339

구자공, 박경렬(1993) 대전지역 신성강우의 화학적특성에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 9(2) 147-153.

박경윤, 이호근, 시명석, 장광미, 강창희, 허철구, 김영준(1994) 제주도 고산 측정소에서의 대기오염 배경농도 측정 및 분석, 한국대기보전학회지, 10(4), 252-259.

박성배, 박상현, 김민영, 김희관, 김영광, 이상열(1989) 서울 지역의 산성강우현상에 관한 연구, 한국대기보

- 전학회지, 5(2), 42-54.
- 손동현, 양성칠 (1985) 서울시의 산성물질 강하현상에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 1(1), 33-41
- 송기형, 박용남, 정용승, 박국태 (1992) 충청북도 농촌지역의 강수의 산성도에 관한 기초 연구, 한국대기보전학회지, 8(1), 38-44
- 신응배, 이상권, 안규홍 (1986) 서울시 산성비의 원인물질에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 2(2), 66-74.
- 심상규, 강창희, 김용표 (1994) 제주도에서의 빗물 이온 농도 분석, 한국대기보전학회지, 10(2), 103.
- 이근준, 정용승 (1996) 충남 웅천에서 관측된 강수의 산성도 연구, 한국대기보전학회지, 12(2), 179-188
- 익산시 (1996) 환경백서, 15-21
- 전종갑 (1991) 대기오염물질 수송과 관련된 동부 아시아 상층대기의 순환특성에 관한 연구, 한국 기상학회지, 27(2), 180-195.
- 정용승 등 (1993) 한국의 태안반도에서 관측된 이산화탄소의 배경농도에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 9(1), 61-68.
- 홍민선, 이상훈, 이동섭, 강창희, 박경운 (1992) 제주도 고산에서의 대기오염물질 측정 및 분석에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 8(4), 257-261.
- 한국과학재단 (1995) 대기오염물질의 장거리 이동에 따른 산성강하물의 침착에 관한 연구, 한국과학재단 보고서.
- 全國公害研協議會 (1996) 第2次酸性雨全國調査報告書, 全國公害研會誌, 21 (4), 179-221.
- Al-Momani, I F, O Y. Atman, M A. Anwari, S. Tuncel, C. Kose, and G. Tuncel (1995) Chemical composition of precipitation near an industrial area at Izmit, Turkey, Atmos Environ., 29(10), 1131-1143.
- CRIEPI (1992) Acidic deposition in Japan. CRIEPI Report 5-36
- CRIEPI (1994) Acidic deposition in East Asia - International Workshop on Acidic Deposition in East Asia -, Central Research Institute of Electric Power Industry, CRIEPI Report.
- Hara, H (1992) Acid deposition chemistry in Japan, International Symposium on the Air Pollution Control Policy and Strategy Chongqing '92, 27-29 October 1992. Chongqing, China, 37-41.
- Kasahara, M., K. Takahashi and M. Shimada (1984) Identification and apportionment of release sources of particulate matters in the atmosphere. J Japan Soc Air Pollut., 19(5), 337-358.
- Pruppaxher, H R., R.G. Semonn, and W.G. Stinn (1983) Precipitation scavenging, dry deposition, and resuspension, New York, Elsevier Science Publishing Co. Vol. I, pp 729.
- Samara, C. R. Tsstouridou, and Ch. Balafoutis (1992) Chemical composition of Rain in Thessaloniki, Greece, in relation to meteorological conditions, Atmos. Environ., 26B (3), 369-367
- Stumm, W. and J.J. Morgan (1990) Aquatic chemistry: an introduction emphasizing chemical equilibria in natural waters, 2nd Ed. John Wiley & Sons, New York
- Tstouridou, R. and C. Samara (1993) First results of acidic and alkaline constituents determination in air particulates of Thessaloniki, Greece. Atmos. Environ., 27B (3), 315.