

降水中 化學成分 分析資料의 解析

강공언 · 전종남 · 김희강*

원광보건전문대학 환경공업과

*건국대학교 환경공학과

Interpretation of Chemistry Analytical Data in Precipitation

Gong-Unn Kang, Chong-Nam Chun, Hui-Kang Kim*

Dept. of Environmental Industry, Wonkwang Public Health Junior College

*Dept. of Environmental Engineering, Kon-Kuk University

ABSTRACT

Precipitation samples were collected by the wet-only event sampling method at Seoul from September 1991 to April 1995. Concentrations of samples for the ion components(NO_3^- , NO_2^- , SO_4^{2-} , Cl^- , F^- , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , and NH_4^+) were measured in addition to pH and electric conductivity. During the sampling period, 182 samples were collected, but only 163 samples were identified as valid. The pH, calculated from the volume-weighted H^+ concentration, was found to be 4.7, indicating a relatively intensive acidity compared with data from other regions of the world, where acid deposition was known to be a problem. Above all, the concentration of non-seasalt sulfate was $84 \mu\text{eq/L}$, which was the highest compared to that measured in other regions of the world. The major acidifying ions in the precipitation at Seoul were identified as sulfate and nitrate except for chloride, because the Cl/Na ratio in the precipitation was close to the ratio in seawater. If all of the non-seasalt sulfate and nitrate existed in the form of sulfuric and nitric acids, respectively, the average pH in the precipitation was calculated as 3.7, lower than the measured value. Consequently, the difference between the calculated and measured pH suggest that the acidity of precipitation was neutralized by alkaline species, not due to the low contribution of an anthropogenic air pollutants to the precipitation. The equivalent concentration ratio of sulfate to nitrate was 3.5, which indicated that the contributions of sulfuric and nitric acids to the precipitation acidity were 78% and 22%, respectively.

Keywords : Precipitation samples, ion components, acidity, non-seasalt sulfate and nitrate.

I. 서 론

산성비 피해는 광역적이기 때문에 측정망을 중심으로 한 공간적인 연구가 필요하게 되는데, 전세계적으로 이에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있으며,¹⁻⁶⁾ 국내에서도 1978년에 서울, 울산지역의 강수중 pH 측정을 시작으로 1980년부터 환경부에서 서울 20개 지역에 그리고 1983년부터 전국 49개소에 산성우채취기를 설치하여 빗물의 산성도를 측정하고 있다.⁷⁾ 그 후 산성비 원인물질의 규명을 위한 연구의 일환으로써 빗물의 pH 이외에 이온성분의 분석을 시작하였으며, 지금까지 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.⁸⁻¹⁰⁾ 그러나, 산성

강하물에 대한 적절한 대책 및 정책수립을 위해서는 무엇보다도 대상지역 빗물의 오염도에 대한 정확한 현황파악과 장기적인 경향분석이 중요하게 되는데 이를 위해서는 이에 대한 지속적인 연구가 필요하다고 하겠다. 즉, 빗물의 오염도에 대한 정확한 현황파악은 대상지역 강수를 장기간 측정하여 다량의 분석자료가 확보되어 있고 그 신뢰성이 확보되어 있을 경우 측정기간 동안 강수의 전반적인 화학성상을 나타낼 수 있는 대표값(central tendency value)을 산출하여 이를 국내 및 국외 측정지점에서의 분석자료와 비교, 분석함으로써 가능하기 때문이다. 따라서 강수분석자료의 대표값 산출은 중요하게 되는데, 우리나라의 경우 대부

분이 일정기간 동안에 한정된 결과이거나 그 산출 방법이 상이하여 빗물의 오염도에 대한 정확한 현황 파악에 상당한 문제가 있는 것으로 드러나고 있다.^{12,19)}

본 연구에서는 서울지역에서 1991년 9월부터 1995년 4월까지 총 44개월 동안에 내린 강수를 채취하여 그 pH 및 주요이온성분의 농도를 측정 및 분석한 후 강수의 화학성상에 대한 대표값 산출하였으며, 산성도 해석방법에 대한 문제점을 지적하였다. 또한 이 지역 강수 오염도의 현황파악을 위해서 이를 산성강하물이 문제가 되고 있는 세계의 다른지역 자료와 비교·분석하였다.

II. 실험방법

시료채취는 서울특별시 광진구 모진동에 위치하고 있는 건국대학교 공과대학의 옥상(지상 약 17 m)에서 하였다. 시료는 건성강하물의 영향을 받지 않도록 비와 눈 등의 강수만 포집하는 습성일괄방식(wet-only sampling method)을 사용하여 채취하였으며, 강수시 비가 내리는 처음부터 비가 그치는 순간까지 전량 채취하여 그것을 하나의 분석시료로 하는 것을 원칙으로 하였다.²⁰⁾

채취된 강수시료는 실험실로 운반하여 바로 pH와 전기전도도를 측정하고 공극이 0.45 μm 인 밀리포아필터(HAWP 04700)로 여과하여 분석시까지 4°C의 냉장고에서 보관하였다. 강수의 화학성상분석을 위하여 pH와 전기전도도 이외에 음이온인 SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^- , F^- , NO_2^- 의 농도와 양이온인 NH_4^+ , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} 의 농도를 여러가지 기기(IC, UV, AAS)를 사용하여 분석하였다. 이들 이온성분 농도의 분석방법 및 기기는 Table 1과 같다.

III. 결과 및 고찰

1. 강수 분석자료의 신뢰성 검토

시료채취기간 동안에 포집한 시료수는 총 182개였는데, 분석자료의 신뢰성 확보를 위한 QA (quality assurance) 및 QC (quality control) 방법에 의해 자료를 검토한 후 재분석 등을 실시한 결과 이중 5% 정도가 그 신뢰성에 문제가 있는 것으로 파악되었다.¹²⁾ 그리고 여기에서 강수시료의 채취량이 소량이어서 pH와 전기전도도 측정이 불가능한 시료는 이온밸런스 및 전기전도도에 의한 분석자료의 신뢰성 검토가 곤란하므로 신뢰성 검토자료에 포함시키지 않았다.^{12,21)} 그 결과 163개의 시료가 신뢰성이 있는 것으로 추정되어 여기에서는 이들 시료의 분석자료만을 사용하여 해석하였다.

2. 강수 분석자료의 요약치 산출

Table 1은 분석자료의 신뢰성 검토결과 얻은 강수의 pH, 전기전도도 및 주요이온성분의 농도에 대한 분석결과를 년평균치로 요약하여 나타낸 것이다. 이때 각 분석항목의 대표값으로는 강수량으로 가중한 산술평균치(volume-weighted arithmetic mean; VWM)와 강수량을 고려하지 않는 단순산술평균치(arithmetic mean; AM)로 각각 산출하여 나타내었는데, 이것은 먼저 각 분석항목의 월평균치를 산출한 다음 다시 년평균을 구하는 방식으로 산출되었으며 그 계산식은 (1)식 및 (5)식과 같다. 그런데, 강수의 산성도를 나타내는 pH의 경우 이 값이 H⁺의 몰중량농도에 의한 대수값으로 정의되기 때문에 (2)식과 같이 먼저 pH를 H⁺의 몰중량농도로 환산한 후 이것을 다시 강수량으로 가중한 H⁺의 산술평균농도로 구하고 최종적으로 pH로 환산하여 그 강수량가중평균치를 산출하였다. pH의 단순산술평균치중

Table 1. Analytical parameter, method and instrument for chemical analysis of precipitation samples.

Analytical parameter	Method	Instrument
pH	Electrode method	pH/ion analyser-250, Corning Inc.
Electric conductivity	Electrode method	Conductivity meter SC-17A, Suntex Inc.; CM-20S, TOA Inc.
SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^- , F^- , NO_2^-	Ion chromatography	ICA-3000, TOA Inc.
NH_4^+	Indophenol blue method;	UV-240, Shimadzu Inc.;
	Ion chromatography	
Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}	Atomic absorption spectrophotometry;	GBC 901, GBC Inc.;
	Ion chromatography	AA 6500, Shimadzu Inc.;
		Dionex 100, Dionex Inc.

Table 1. Analytical results of chemical composition in the precipitation samples(n=163).

pH	ECobs	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	Cl ⁻	F ⁻	SO ₄ ²⁻	
	(μS/cm)	(μeq/L)										
VWM*	4.71	24.4	30.3	6.2	7.2	22.7	55.2	24.1	0.4	19.4	1.5	86.6(83.9) ⁶⁾
STD*	1.47	8.3	8.1	1.7	2.6	8.3	17.8	7.9	0.1	5.7	0.7	29.3(28.4)
MAx	5.85	29.6	83.5	13.2	10.5	32.4	76.4	33.2	1.1	40.3	5.1	121.8(117.9)
MIN	4.48	16.5	24.0	4.9	4.8	15.3	41.5	17.9	0.0	16.0	0.2	58.4(56.6)
AM*	5.37(4.74) [§]	50.1	94.6	19.9	16.6	55.5	113.6	55.0	0.8	57.3	5.9	190.2(183.6)
STD	0.54	10.1	31.0	5.5	4.0	15.8	12.4	15.7	0.5	15.4	4.6	38.3(38.1)
MAX	6.29	58.4	151.4	28.4	21.9	79.7	125.7	81.1	82.9	82.9	13.7	232.3(224.9)
MIN	4.71	30.6	57.4	12.0	11.6	37.3	90.2	35.6	39.4	39.4	0.2	120.6(116.2)

* VWM : volume-weighted arithmetic mean

$$\text{VWM of analytical parameter except pH} = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (X_i P_i)}{\sum_{i=1}^n P_i} \right] \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{VWM of pH} = -\log \left[\frac{\sum_{i=1}^n (H_i^+ \times P_i)}{\sum_{i=1}^n P_i} \right] \dots\dots\dots (2)$$

$${}^{6)} \text{ nss} - \text{SO}_4^{2-} = (\text{SO}_4^{2-})_p - \left(\frac{\text{SO}_4^{2-}}{\text{Na}^+} \right)_{\text{seawater}} \times (\text{Na}^*)_p \dots\dots\dots (3)$$

* STD : volume-weighted standard deviation

$$\text{STD} = \left[\frac{\sum_{i=1}^n P_i^2 [X_i]^2 - \left(\sum_{i=1}^n P_i [X_i] \right)^2}{\left(\sum_{i=1}^n P_i \right)^2 (n-1)} \right]^{1/2} \dots\dots\dots (4)$$

$${}^* \text{ AM : arithmetic mean} \quad \text{AM of analytical parameter} = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (X_i)}{n} \right] \dots\dots\dots (5)$$

$${}^{\S} (4.74) : \text{AM of pH} = -\log \left[\left(\frac{\sum_{i=1}^n (H_i^+)}{n} \right) \right] \dots\dots\dots (6)$$

Here, n : the number of valid sample H_i⁺ : H⁺ concentration of event i ; (mole/L)
 P_i : rainfall of event i ; (mm) X_i : analytical parameter of event i ; (μeq/L)

(4.74)는 (6)식과 같이 각각의 강수시료의 pH로부터 H⁺의 몰중량농도를 구한 후 이것을 단순산술평균하여 다시 pH로 환산하여 나타낸 것이다. 여기에서 n은 신뢰성이 있는 것으로 추정되는 각각의 시료수를 의미하고, H_i⁺는 각 시료의 pH로부터 산출한 H⁺의 몰중량농도(mole/L)를, P_i는 각 시료의 강수량(mm)을 그리고 X_i는 각 시료중 이온성분의 당량농도(μeq/L)를 의미한다. 그리고 강수의 화학조성에 대한 분석결과 해석시 SO₄²⁻ 경우 그 상당량이 자연발생원인 해염에서 유래하는 것으로 알려져 있어 비해염기원의 SO₄²⁻양(nss-SO₄²⁻)을 (3)식과 같이 산출하여 나타내었다.²²⁾

또한 분석결과치의 자료분포 상태를 파악하기 위하여 각 분석항목의 년평균치에 대한 표준편차(standard deviation; STD)와 최대값(maximum;

MAX) 및 최소값(minimum; MIN)을 각각 산출하여 나타내었는데 강수량 가중여부에 따른 년평균산출방법에 따라 각각 그 분산도를 구하였다. 여기에서, 측정기간 동안의 년평균치에 대한 표준편차에서 강수량가중치의 경우는 (4)식과 같이 산출하여 나타낸 것이다.²³⁻²⁴⁾

3. 강수의 산성도

측정기간 동안 서울지역 강수의 산성도 및 그 화학성상에 대한 분석결과의 요약치는 Table 1과 같이 그 산출방법에 따라 상당한 차이를 갖는 것으로 나타났는데, 이는 이들 요약치 해석시 그 산출과정을 신중하게 고려해야 된다는 것을 의미한다. 특히, 대표값은 측정기간 동안 내린 대상지역 강수의 화학적 성상에 대한 지표가 되기 때문에 그 산출과정은 더욱

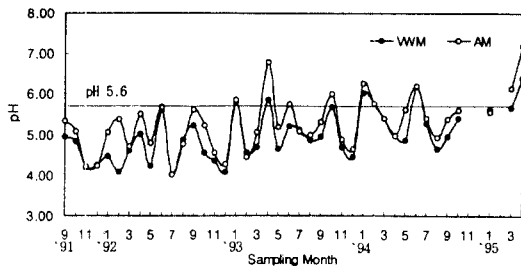


Fig. 1. Monthly variation of pH according to VWM and AM in precipitation samples.

중요하다고 하겠다. 여기에서 강수의 산성도 지표가 되고 있는 pH의 경우 강수량가중평균치(VWM)는 4.71로 나타났으며 강수량으로 가중하지 않은 단순 산술평균치(AM)는 5.37로 그리고 각 시료의 pH로부터 H⁺의 몰중량농도를 구한 후 이것을 단순산술평균하여 다시 pH로 환산하였을 경우는 4.74로 그 산출방법에 따라 상당한 차이를 나타내었다. 더욱이, pH를 수소이온의 몰중량농도로 환산하였을 경우 강수량가중평균치는 단순산술평균치보다 약 5배 크게 되어 그 차이는 더욱 커지게 된다. Fig. 1은 측정기간 동안 강수의 월평균 pH를 그 산출과정에 따라 나타낸 것으로 강수량가중치가 단순산술평균치에 비해 낮은 경향을 보이는 것을 알 수 있었다. 또한 월별 pH의 대부분이 강수의 자연산성도인 pH 5.6 이하로 나타났다.

Fig. 2는 측정기간 동안 서울지역 강수의 pH 발생빈도(%)를 통계처리(polynominal fit statistics)한 후 그 최적곡선(frequency distribution curve)으로 나타낸 것이다. 이 지역 강수의 pH 발생빈도는 최빈치를 중심으로 정규분포 형태를 갖는 것으로 나타났으나 pH 7~9 범위의 경우 길게 치우친 곡선형태의 발생빈도를 보이는 것으로 나타나 측정기간 동안 이 지역에 그 발생빈도는 크지 않지만 알칼리성의 빗물이 내리고 있음을 알 수 있었다. 이것은 주로 매년 봄철에 발생하는 황사현상에 의한 것으로 알칼리성의 황사입자가 강수에 혼입되어 강수의 산성도를 중화시키기 때문인 것으로 판단된다.^{25,26)} 서울지역 강수의 pH 발생빈도를 인위적인 오염발생원이 없는 동해안에 위치한 양양지역의 경우와 비교해 본 결과 서울지역은 pH 5.1의 최빈값(mode value)을 중심으로 높은 발생빈도를 나타내는 양양지역보다 그 최빈값 뿐만 아니라 발생빈도가 낮았으며, 발생빈도분포의 폭은 더 큰 것으로 나타났다. 특히, 서울지역의 경우

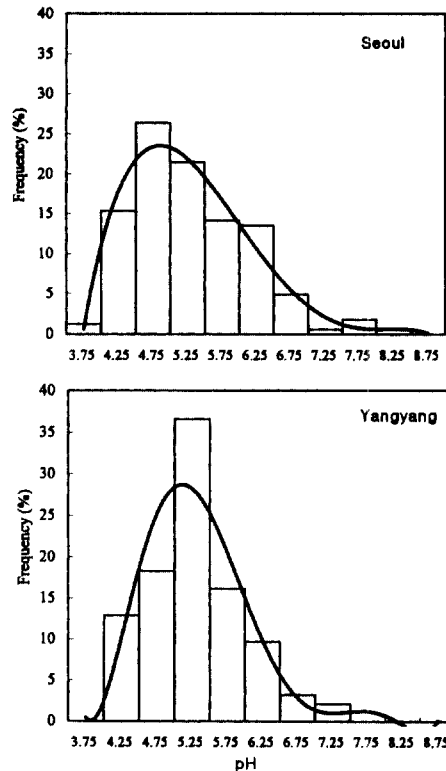


Fig. 2. Frequency distribution curve of pH by the polynominal fit statistics treatment.

저 pH 발생빈도가 양양지역에 비해 높게 나타났는데, 이것은 두 지역 강수의 산성도에 영향을 미치는 오염물질의 발생원 종류나 그 특성이 서로 다르기 때문으로 추정된다. 즉, 서울지역의 경우 양양지역에 비해 강수의 산성도에 영향을 주는 오염발생원이 다양하고 그 발생량이 상대적으로 크기 때문에 pH의 최빈값이 낮고 그 발생빈도분포의 폭이 큰 것으로 사료된다. 또한 서울지역 pH 발생빈도의 분포곡선으로부터 강수시료의 산성도에 대한 대표값의 하나인 최빈값을 산출할 수 있는데, 이것은 측정기간 동안 그 발생빈도가 가장 큰 pH값으로 약 4.8인 것으로 나타났다. 그런데, 이 값은 대표값 산출방법중 단순산술평균치의 pH 5.4와 상당한 차이를 보이기 때문에 대상지역 강수의 산성도 지표에 대한 대표값으로 단순산출평균치를 사용한다는 것은 타당하지 않는 것으로 판단된다.

pH를 제외한 다른 수용성 이온성분 농도의 경우도 단순산술평균치가 강수량가중평균치에 비해 대

부분 약 2배 이상의 고농도를 나타내므로써 그 산출 과정에 따라 상당한 차이를 보이고 있음을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 분석자료의 대표값 산출방법에 따라 강수의 화학성상의 차이가 통계적으로 유의한지 알아보기 위하여 측정기간 동안의 년평균 분석자료를 강수량으로 가중한 계산치와 단순산술치의 두 그룹으로 분류한 후 통계적 검정방법중 모수적 통계방식인 T-검정을 실시하였는데 그 결과는 Table 2와 같다. 여기에서 유의수준을 0.05로 할 때 이 지역 강수중 미량으로 존재하는 것으로 밝혀진 F와 NO₂를 제외한 다른 모든 이온성분의 농도가 통계적으로 유의한 차이를 보이고 있음을 알 수 있었다. 즉, 이것은 동일한 대상지역에서 같은 기간에 측정된 분석자료라 할지라도 그 자료의 대표값 산출방법에 따라 결과치가 완전히 상이하게 됨을 의미한다. 이는 대표값 산출특성상 강수량에 의한 보정을 하기 때문으로 산출과정에 따라 그 차이가 발생한다는 것은 이 지역 강수의 화학적 특성이 강수량에 의한 영향을 상당히 강하게 받고 있음을 의미한다. 즉, 강수량에 따른 이 지역 강수의 화학적 특성에 의하면, 강수량이 적을수록 낮은 산성도 및 고농도 이온의 강수가 발생하고 있는 반면에 강수량이

많을수록 높은 산성도 및 저농도 이온의 빗물이 내리고 있는 것으로 나타났다.^{8,12)} 결과적으로 대상지역 강수의 화학성상 및 그 강하량을 정확하게 규명하기 위해서는 시료의 채취 및 분석, 분석자료의 QA 및 QC 뿐만 아니라 대표값 산출 및 그 해석방법 또한 중요하다고 하겠다.

본 연구에서는 측정기간 동안에 내린 이 지역 강수의 화학적 특성을 보다 잘 요약하여 나타낼 수 있는 것으로 판단되는 강수량가중평균치를 강수의 화학적 성상에 대한 대표값으로 하여 그 해석을 시도하였다.¹⁰⁾

4. 세계 다른지역과의 화학성상 비교

Table 3은 서울지역 강수의 화학성상에 대한 현황을 파악하기 위하여 측정기간 동안 이 지역 분석자료의 대표값을 산성강하물이 문제가 되고 있는 세계 다른 지역의 경우와 함께 나타낸 것이다. 여기에서 pH와 주요이온성분의 농도는 일정기간 동안 대상지역 강수의 화학적인 특성을 잘 요약할 수 있으며, 시료채취지점별 상호 비교분석이 가능하도록 모두 강수량가중평균치로 산출하여 나타낸 것이다. 먼저 강수의 산성도를 나타내는 pH를 살펴보면 서

Table 2. T-test results of annually analytical data according to the computation methods of central tendency value in the chemical components of precipitation.

	NH ₄ ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	F ⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻
	μeq/L									
VWM (N=5)	59.5	7.5	40.5	7.7	23.4	1.9	25.8	0.4	93.3	23.3
AM (N=5)	113.6	16.6	94.6	19.9	55.5	5.9	55.0	0.8	190.2	57.3
Prob> T	0.000*	0.004*	0.021*	0.005*	0.005*	0.143	0.008*	0.283	0.002*	0.005*

* Prob<0.05

Table 3. Comparison of volume-weighted average concentration of major ions in the precipitation.

	pH	(μeq/L)							
		Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻ (nss-SO ₄ ²⁻)*
Albany, New York [Ⓚ]	4.1	10	3	6	5	27	45	8	68 (67)
Ontario, Canada [Ⓢ]	5.3	13	3	1	3	17	11	5	64 (64)
Hebden Bridge, U.K. [Ⓜ]	4.3	18	18	3	69	60	42	99	84 (76)
Japan [Ⓝ]	4.7	26	21	5	86	22	16	108	55 (45)
Seoul [Ⓟ]	4.7	30	6	7	23	55	24	19	87 (84)

* : $nss - SO_4^{2-} = (SO_4^{2-})_p - (\frac{SO_4^{2-}}{Na^+})_{seawater} \times (Na^+)_{precipitation}$

[Ⓚ]: Khwaja and Husain (1990); [Ⓢ]: Zeng and Hopke (1989); [Ⓜ]: Lee and Longhurst (1992)

[Ⓝ]: Tamaki et al. (1991); [Ⓟ]: This study

울지역의 경우 뉴욕의 Albany와 영국의 Hebden Bridge보다는 높지만 캐나다의 Ontario보다는 낮은 것으로 나타나 이 지역 강수의 산성도가 산성강하물이 문제가 되고 있는 뉴욕의 Albany와 영국의 Hebden Bridge보다는 낮지만 캐나다의 Ontario보다는 산성화 정도가 심각한 것을 알 수 있었다. 또한 일본의 경우와 비교해 본 결과 측정기간 동안 서울지역 강수의 산성도가 일본과 비슷한 수준임을 알 수 있었다. 강수중에 존재하는 주요이온성분중 SO_4^{2-} 와 NO_3^- 는 가장 대표적인 산성원인물질로 알려져 있는데 SO_4^{2-} 의 경우 그 상당량이 자연발생원인 해염기원으로 알려져 있기 때문에 본 연구에서는 강수중의 Na^+ 성분을 해염기원의 지표물질로 사용하여 비해염기원에 의한 SO_4^{2-} (nss- SO_4^{2-})를 산출하여 해석하였다.²²⁾ 여기에서 Na^+ 성분의 경우 해염기원의 지표물질로 사용할 수 있도록 인위적인 발생원 및 토양기원(soil origin)에 의한 양을 무시할 수 있는 것으로 가정하였다. 그 결과 nss- SO_4^{2-} 경우 서울지역에서 84 $\mu\text{eq/L}$ 로써 가장 높은 농도를 기록하였으며, NO_3^- 는 뉴욕의 Albany와 영국의 Hebden Bridge보다는 낮지만 캐나다의 Ontario와 일본보다는 높은 농도를 나타내었다. 그런데 특이할만한 사실은 서울지역 강수의 경우 산성원인물질의 농도가 높음에도 불구하고 그 산성도가 세계 다른 지역에 비해 유사하거나 낮는데 이는 서울지역 강수에 영향을 미치는 인위적인 산성오염물질의 발생원에 의한 기여정도가 적어서가 아니라 상대적으로 알칼리성 성분이 운적이나 떨어지는 빗물중에 유입되어 빗물의 산도가 중화되기 때문으로 판단된다.²⁷⁾ 만약 서울지역 강수중에 측정된 nss- SO_4^{2-} 와 NO_3^- 가 모두 H_2SO_4 와 HNO_3 의 형태로 존재한다면 강수의 pH는 평균 3.7이 될 것이다. 강수중 이들의 상대적 기여율은 다양하지만 최근까지 SO_4^{2-} 가 산도의 70% 정도를 그리고 나머지 30%가 HNO_3 에 의한 것으로 알려져 있다.²⁸⁻²⁹⁾ 서울지역의 경우 nss- $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$ 의 비는 3.5였는데 이것은 강수의 산도에 대한 H_2SO_4 와 HNO_3 의 최대기여율이 각각 78%와 22%임을 의미한다. 시료채취지점별 H_2SO_4 의 상대적 기여율을 비교해 보면 서울지역의 경우 일본보다는 약간 높지만 뉴욕의 Albany와 영국의 Hebden Bridge보다는 훨씬 높은 것으로 나타났으며, 반면에 캐나다의 Ontario보다는 그 기여율이 낮은 것으로 나타났다. 그러나 H_2SO_4 가 강수의 산성도에 기여하는 정도는 최근 점점 감소하고 있는 반면

HNO_3 의 경우는 증가하고 있는데, 이것은 SO_2 의 엄격한 규제로 그 배출량이 감소한데 비해서, NO_x 배출량의 경우 엄격하게 규제되고 있지 않기 때문으로 알려져 있다.^{27,30)}

IV. 결 론

서울지역에서 1991년 9월부터 1995년 4월까지 총 44개월 동안에 내린 강수를 채취하여 그 화학성분을 측정 및 분석하여 이 지역 강수의 화학성상에 대한 대표값을 산출하였다. 또한 이들 대표값을 산성강하물이 문제가 되고 있는 세계의 다른지역 자료와 비교·분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 측정기간 동안 강수의 평균 pH는 4.71로 나타났으며, 서울지역 강수의 화학성상에 대한 대표값을 세계의 다른지역과 상호 비교한 결과 비교적 산성화 정도가 심각한 것으로 나타났다. 특히, 가장 대표적인 산성원인물질로 알려져 있는 nss- SO_4^{2-} 의 경우 가장 높은 농도를 기록하였으나 상대적으로 강수의 산성도는 알칼리성 성분에 의해 중화되어 낮은 것으로 나타났다.

2. 강수중 nss- SO_4^{2-} 와 NO_3^- 가 모두 H_2SO_4 와 HNO_3 의 형태로 존재한다면 강수의 평균 pH는 3.7이 되는 것으로 추정되었다. 강수중 nss- $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$ 의 비는 3.5였는데 이것은 강수의 산도에 대한 H_2SO_4 와 HNO_3 의 최대 기여율이 각각 78%와 22%임을 의미한다.

감사의 글

본 연구의 일부는 96년도 교내연구비 지원에 의하여 이루어졌으며 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) Lynch J. A., Grimm J. W. and Bowersox V. C. : Trends in Precipitation Chemistry in the United States : A National Perspective, 1980-1992, **29**(11), 1231-1246, 1995.
- 2) Hedin L. O., Granat L., Likens G. E., Buishand T. A., Galloway J. N., Butler T. J. and Rodhe H. : Steep declines in atmospheric base cations in regions of Europe and North America. *Nature* **367**, 351-354, 1994.
- 3) CRIEPI Report : Acidic Deposition in East Asia- International Workshop on Acidic Deposition in

- East Asia-, Central Research Institute of Electric Power Industry, 1994.
- 4) Tomoyuki Ito: Present Status of WMO Background Air Pollution Monitoring Network (BAMPoN) in East Asian Region, International Workshop on Acid Rain in East Asia-Monitoring, Transport and Evaluation-, Organized by National Institute for Environmental Studies and Kitakyushu city Government, 1991.
 - 5) Schaug J. : UMEP-European Monitoring and Evaluation Programme and some related activities, Presented at 31. Annual Meeting of Japan Society of Air Pollution, 1 Nov. 1990, Kanazawa, Japan, Norwegian Institute for Air Research, 1990.
 - 6) Chemical Co-Ordinating Centre : Manual for Sampling and Chemical Analysis. Co-operative Programme for Monitoring and Evaluation of the Long Range Transmission of Air Pollutants in Europe. Lillestrøm, NILU(EMEP/Chem 3/77), 1977.
 - 7) 대기연구부 : 酸性雨現象에 관한 考察, 國立環境研究所 大氣研究部, 1983.
 - 8) 강공언, 강병욱, 김희강 : 해안지역과 도시지역 강수의 화학적 성상에 관한 연구, 한국대기보전학회지, **8**(3), 191-197, 1992.
 - 9) 강공언 : 강수분석자료의 신뢰성 검토에 관한 연구, 대한위생학회지, **10**(3), 85-98, 1995.
 - 10) 강공언, 강병욱, 김희강 : 강화지역 강수의 오염도 평가에 관한 연구, 한국대기보전학회지, **11**(1), 57-68, 1995.
 - 11) 강공언, 조기철, 김희강 : 서해안과 동해안 지역 강수의 화학적·화학적 성상에 관한 연구, 한국대학교 대학원 학술논문집, **42**, 419-429, 1995.
 - 12) 강공언, 이주희, 김희강 : 서울地域 降水中 이온成分 分析資料의 解析, 한국대기보전학회지, **12**(3), 323-332, 1996.
 - 13) 구자공, 박경렬 : 대전지역 산성강우의 화학적특성에 관한 연구, 한국대기보전학회지, **9**(2), 147-153, 1993.
 - 14) 김희강, 조기철, 강공언 : 降水의 化學的 特性 比較, 대한환경공학회지, **18**(6), 669-682, 1996.
 - 15) 김주형, 유명진, 박성배 : 산성비 원인물질 규명을 위한 우수중의 이온분석에 관한 연구, 대한환경공학회지, **10**(3), 19-27, 1988.
 - 16) 박성배, 박상현, 김민영, 강희곤, 김영광, 이상열 : 서울지역의 산성강우현상에 관한 연구, 한국대기보전학회지, **5**(2), 42-54, 1989.
 - 17) 손동현, 양성철 : 서울시의 산성물질 강하현상에 관한 연구, 한국대기보전학회지, **1**(1), 33-41, 1985.
 - 18) 심상규, 강창희 : 김용표, 제주도에서의 빗물 이온 농도 분석, 한국대기보전학회지, **10**(2), 103, 1994.
 - 19) 김희강, 강병욱, 강공언, 조기철, 이종훈, 임재현, 이주희 : 대기오염물질의 장거리 이동에 따른 산성강하물의 침착특성에 관한 연구, 한국과학재단 보고서, 10-50, 1995.
 - 20) 酸性雨調査法研究會 : 酸性雨調査法-試料採取, 成分分析とデータ整理の手引き-, 酸性雨調査法研究會, 179-259, 1993.
 - 21) Miles L. J. and Yost A. R. : *Atmos. Environ.*, **18**, 2889, 1984.
 - 22) Stumm W. and Morgan J. J. : Aquatic chemistry: an introduction emphasizing chemical equilibria in natural waters, 2nd Ed. John Wiley & Sons, New York, 1990.
 - 23) Donald F. G. and Luther S. : The Standard Error of A Weighted Mean Concentration-I. Bootstrapping vs Other Methods. *Atmospheric Environment*, **29**(11), 1185-1193, 1995.
 - 24) Uri D., John M. M., William C. K. and James N. G. : An Analysis of Precipitation Chemistry Data from Alaska. *Atmospheric Environment*, **19**(4), 651-657, 1985.
 - 25) 박인호 : 淸淨地域에서 黃砂와 非黃砂時 雨水의 特性, 建國大學校 碩士學位論文, 1994.
 - 26) 이민희, 한진석, 한의정, 신찬기 : 황사현상시 강수의 화학적 성분에 관한 연구, 한국대기보전학회지, **5**(2), 1~11, 1989.
 - 27) Al-Momani I. F., Atman O. Y., Anwari M. A., Tuncel S., K se C. and Tuncel G. : Chemical composition of precipitation near an industrial area at Izmir, Turkey, *Atmos. Environ.*, **29**(10) 1131-1143, 1995.
 - 28) Amaguchi K., Tatano T., Tanaka F., Nakao M. and Gomyoda M. : An analysis of precipitation chemistry measurements in Shimane, Japan. *Atmos. Environ.* **25A**, 285-291, 1991.
 - 29) NRC : Acid Deposition, Atmospheric Processes in Eastern North America. A report prepared by the Committee on Atmospheric Transport and Chemical Transformations in Acid Precipitation, National Academy Press, Washington, District of Columbia, 375, 1983.
 - 30) Gwyneth H. : Acid rain and acid waters. Ellis Horwood, 39-43, 1990.
 - 31) Tamaki T., Katou T., Sekiguchi K., Kitamura M., Taguchi K., Oohara M., Mori A., Wakamatsu S., Murano K., Okita T., Yamanaka Y. and Hara H. : Acid precipitation chemistry over Japan, *Jr. Chem. Soc. Jpn.*, **5**, 667-674, 1991.