

태안지역 강우의 화학성분 특성

이종식* · 정구복 · 김진호 · 김원일 · 윤순강 · 임재철¹⁾

농업과학기술원 환경생태과, ¹⁾태안군농업기술센터

(2001년 11월 13일 접수, 2001년 12월 13일 수리)

Volume-Weighted Ion Concentration of Rainwater in Taean Area

Jong-Sik Lee*, Goo-Bok Jung, Jin-Ho Kim, Won-Il Kim, Sun-Gang Yun, and ¹⁾Jae-Cheal Im (National Institute of Agricultural Science and Technology, RDA, Suwon 441-707, Korea, ¹⁾Taean Agricultural Technology & Extension Center, Taean 357-900, Korea)

Abstract : This study was carried out to investigate the chemical properties of rainwater in Taean area. Rainwater was collected during seven months from April to October in 2000, and analyzed for its chemical composition. The pH of rainwater at April and May were higher than those from June to September. Occurrence rate of rain above pH 5.6 was 42.1%, which showed the highest ratio from rainwater samples during investigation periods. Those of pH 5.0~5.6 and 4.5~5.0 range were 21.1 and 31.6%, respectively. The major cations in rainwater were Ca^{2+} and NH_4^+ , and SO_4^{2-} was more than 50% of total anion composition. Monthly variation of acidity neutralization capacity by Ca^{2+} and NH_4^+ was decreased during rainy season. The $nss-SO_4^{2-}/NO_3^-$ ratio was 2.0 which means SO_4^{2-} contributed to acidity of rainwater two times more than NO_3^- .

Key words : precipitation, acidity, chemical composition, $nss-SO_4$ (non-sea salt sulfate), rainwater

서 론

산성비 (acid rain)는 환경오염의 직접적인 결과로서 그 영향은 풍향과 풍속에 따라 차이는 있으나 장거리 이동으로 오염원으로부터 떨어져 있는 주변국가에도 직접 또는 간접으로 영향을 주는 등 그 피해가 광범위하며¹⁾, 발생원이 제거된 뒤에도 그 영향이 오래 지속되기 때문에 오존층 파괴^{2,3)}, 온실효과^{4,5)} 및 토양 사막화⁶⁾ 등과 함께 국제적 차원의 환경문제로 대두되었고, 현재 세계 각국은 산성비 피해에 대하여 공동으로 대처하고 있다. 대기 중에 배출된 아황산가스와 질소산화물은 복잡한 광화학반응을 거쳐 산성물질이 형성되어⁷⁾, 지표상으로 직접 강하되기도 하지만 강우의 산성도를 증가시켜 산성비로 강하하여 자연 및 생활환경에 심각한 악영향을 초래하게 된다.

우리 나라의 산성비 관련 연구는 1970년대 말 서울과 울산지역 강수의 pH를 조사한 이후 강수의 화학적 특성, 각 성분간의 통계적 해석, 원인물질 구명, 산성비 모델 개발, 산성비 발원지 추적 및 농작물 피해에 관한 연구 등 연구 범위가 넓어지고 있다.

우리 나라에서도 이미 대도시 및 공업단지 주변에서는 pH 4.5 이하의 산성비가 내리고 있고, 1989년 이후 연간 1,400만톤의 분

진과 1,500만 톤의 아황산가스를 배출하고 있는 중국의 영향을 받는 우리 나라의 경우에는 무엇보다도 지속적인 강우의 산성도와 성분의 변화에 관한 연구가 필요하다.

산성비에 대한 대책 수립을 위해서는 무엇보다 강우의 화학적 조성을 평가하는 것이 중요하다. 따라서 본 연구는 우리 나라 서해안에 위치하고 있는 태안 지역의 영농기중 강우 특성을 구명하기 위하여 2000년 4월부터 10월까지의 빗물을 채취하여 화학성분을 분석하였으며, 강우량을 고려한 가중평균치로 각 성분의 월별 변화를 조사하였다. 또한 측정 pH와 이론식에 의해 구한 이론 pH값의 차이를 비교하여 월별 산성도 증화력 변화를 살펴보았다.

재료 및 방법

본 조사는 영농기인 4월부터 10월 사이의 강우를 태안군 농업기술센터내에 설치된 강우 자동채취기를 이용하여 채수하였다. 강우채취기의 작동원리는 강우가 시작되어 빗물이 감지판 (rain sensor)에 떨어지면 뚜껑이 자동으로 열려서 빗물을 받게 되는 wet sampling 방식의 강우 자동채취기를 사용하였으며, 빗물의 화학성분은 수질오염공정시험법과 Standard Methods에 준하여 분석하였다. pH와 EC는 각각 Orion사 (USA)의 EA 940 ion analyzer와 Model 162 conductivity meter를 사용하여 측정하였다.

*연락처:

Tel: +82-31-290-0210 Fax: +82-31-290-0277

E-mail: jongslee@rda.go.kr

Table 1. Chemical composition of rainwater in Taean area in year 2000

Date	pH	EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	NH_4	Ca	Mg	K	Na	SO_4	NO_3	Cl	Wind	Rainfall
											Dir.	(mm)
4. 19.	6.2	76	86.7	724.1	78.2	21.6	130.0	301.3	103.9	162.4	NNE	36.0
4. 22.	5.9	56	162.2	177.2	29.9	10.8	80.6	247.3	112.2	75.5	WSW	1.5
4. 26.	6.6	139	223.3	289.8	58.5	24.4	156.1	601.7	249.5	118.1	WNW	1.0
5. 9.	6.1	28	71.9	69.6	15.9	11.8	57.7	173.1	46.5	48.0	SW	18.0
5. 15.	5.9	73	620.0	93.0	22.8	24.4	50.3	310.3	70.1	48.4	SSW	3.0
5. 19.	6.7	146	554.3	636.7	75.5	36.5	92.1	708.8	279.3	80.0	SSW	0.5
6. 25.	5.8	26	227.6	13.2	1.4	12.6	32.1	159.7	60.2	16.6	SW	39.5
6. 26.	4.8	15	80.6	9.8	4.5	14.3	22.5	10.0	22.3	20.7	NNE	39.0
7. 10.	4.9	16	92.8	9.6	3.8	12.7	15.7	41.8	21.4	21.3	SE	3.5
7. 23.	4.2	24	76.3	15.7	6.4	10.3	17.5	38.7	44.1	24.3	SW	40.0
7. 29.	4.8	62	225.7	93.4	41.3	16.0	93.2	219.8	165.9	78.4	NE	3.5
8. 4.	4.6	17	75.2	17.5	6.1	5.8	12.4	34.5	35.4	19.1	SSE	8.0
8. 8.	5.1	30	178.4	16.7	9.0	8.3	26.6	75.0	100.8	26.2	ESE	3.0
8. 16.	4.9	11	67.1	7.6	0.8	5.7	13.1	17.4	27.0	19.2	NE	41.0
8. 20.	4.7	10	40.8	8.0	4.4	6.8	21.1	16.6	10.8	25.8	WNW	48.0
8. 23.	5.2	2	20.4	2.2	2.2	9.1	12.8	15.8	2.2	12.4	SSE	41.5
9. 12.	5.1	12	28.3	7.0	10.7	6.1	66.2	12.2	5.2	59.0	NNE	8.5
10. 3.	5.1	24	102.3	31.0	17.7	8.4	44.5	57.2	43.7	37.9	NNW	7.5
10. 5.	5.8	17	72.9	16.0	11.8	15.1	43.4	25.4	11.4	34.2	SW	5.5

NH_4^+ 는 차아염소산 이온의 공존하에서 페놀과 반응하여 생성되는 청색의 indophenol을 640 nm에서 측정하는 Indophenol법, SO_4^{2-} 는 BaCl_2 에 의한 비탁법, NO_3^- 는 1N-HCl로 hydroxide와 carbonate에 의한 영향을 제거하고 흡광도를 측정하는 자외선 흡광도법, Cl은 치오시안산 제2수은법을 사용하여 정량하였으며, 기타 양이온들은 ICP (GBC Integra XMP, Australia)를 이용하여 측정하였다.

결과 및 고찰

Table 1은 조사 기간중 채취된 강우 시료의 이온 함량과 탁도, 풍향 및 강우량을 나타낸 것으로 조사 지역에 강우 pH는 편서풍의 영향을 받은 4월과 5월이 6월부터 9월 사이에 비해 높게 나타나 계절적 특성을 보였다. 빗물중에 함유된 이온의 총량을 표시하는 EC 농도도 6월 이후 크게 낮아졌으며, 각 이온별로는 Ca^{2+} 와 Mg^{2+} 의 함량 변화가 두드러지게 나타났다.

태안 지역에 내린 강우의 pH 분포는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 pH 5.6 이상이 전체 조사 강우중 42.1%를 차지하여 가장 많은 분포를 보였다. 이 결과는 pH 4.5~5.0 범위의 강우가 전체 조사강우의 42.9%로 가장 많은 분포를 보였던 1998년 결과⁹⁾와 상이

한 결과로 본 연구의 조사기간이 4월부터 10월까지이었던 반면 1998년도에는 비교적 강우의 pH가 높은 4월이 제외된 5월부터 10월까지의 조사 결과였기 때문으로 판단된다. 따라서 본 연구의 조사 강우중 4월의 강우를 제외한 5월부터 10월까지 동일 기간을 대상으로 강우 pH 분포를 보면 pH 4.5~5.0 범위의 강우분포가 37.5%로 1998년도와 같이 가장 높은 비율을 차지하였다. 또한, pH 5.0~5.6 및 4.5~5.0의 강우가 각각 21.1과 31.6% 발생하였다. pH 4.0~5.0 범위의 강우가 농업생태계에 미치는 영향으로는 토양중 Al의 가용량 증가⁹⁾, 작물의 광합성 저해¹⁰⁾ 및 작물 잎 모용(毛茸, trichome)의 피해¹¹⁾ 등이 알려져 있다. 한편 작물의 생육저해 및 가시적 피해한계인 pH 4.0~3.2 범위¹²⁾의 강우는 측정되지 않았다.

조사 기간중 태안 지역에 내린 강우의 월별 화학성분 조성변화를 Table 2에 나타내었다. 월별 강우 pH는 6월에서 9월 사이에 4.2~5.1로 5월 이전에 비해 산성도가 10배 가량 높았다. 조사기간 평균 pH 4.8을 나타냈는데 이는 1998년도 영농기의 태안 지역 평균 강우 pH 4.6와 유사한 결과이며, 작물의 생육저해 및 가시적 피해한계인 pH 4.0~3.2 범위¹²⁾ 보다 높은 수준으로 작물에 직접적인 피해는 우려되지 않는다. Fig. 1에 나타난 강우의 pH 분포가 5.6 이상이 전체 강우의 42.1%로 가장 많았던 결과에 비해 평

Table 2. Monthly variation of ion concentrations of rainwater in Taean area in year 2000

Month	pH	EC μS/cm	μeq/L								
			NH ₄	Ca	Mg	K	Na	SO ₄	NO ₃	Cl	
Apr.	6.2	77	93.2	691.5	75.8	21.2	128.7	307.0	108.0	157.9	
May	6.1	37	159.6	86.0	18.3	14.1	57.5	204.7	55.2	48.8	
Jun.	5.0	20	154.6	11.5	3.0	13.4	27.3	85.3	41.1	18.6	
Jul.	4.2	27	88.7	21.0	8.8	10.9	23.0	52.4	51.5	28.1	
Aug.	4.9	9	47.3	6.9	2.9	7.1	16.0	18.9	16.3	19.6	
Sep.	5.1	12	28.3	7.0	10.7	6.1	66.2	12.2	5.2	59.0	
Oct.	5.3	21	89.8	24.7	15.2	11.2	44.0	43.7	30.0	36.3	
Ave.	4.8	24	90.2	91.0	13.4	11.2	36.8	82.4	39.5	39.2	

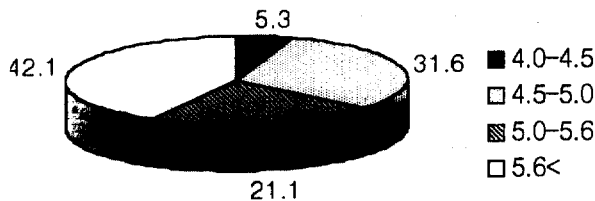


Fig. 1. Distribution rate of pH range of rainwater in Taean area in year 2000.

균 pH가 낮은 이유는 본 조사가 강우량을 고려한 가중평균치 (volume weighted mean)를 나타내었기 때문이다. 즉 강우의 pH가 낮았던 장마기의 강우량보다 6월 이전과 9월 이후의 강우량이 강우 횟수에 비해 상대적으로 적어 전체 강우의 평균 pH가 강우별 pH 분포 빈도에 비해 낮게 나타났다. 빗물중에 함유된 이온의 총량을 표시하는 EC 농도도 4월과 5월이 조사기간 평균치 24 μS/cm 보다 높은 77 및 37 μS/cm을 나타내어 계절적 특성을 보였다.

빗물의 화학적 조성을 보기 위하여 전체 이온함량에 대한 각 이온의 구성비를 구하여 Fig. 2에 나타내었다. 태안지역 빗물의 양이온 구성은 Ca²⁺ ≥ NH₄⁺ > Na⁺ > H⁺ > Mg²⁺ > K⁺의 순으로 익산지역 강우 조성¹³⁾과 유사하였으며, Ca²⁺와 NH₄⁺ 두 이온이 전체 양이온의 70% 가량을 차지하였다. 본 결과는 1998년도 조사 결과⁹⁾에 비해 NH₄⁺가 차지하는 비율이 감소한 반면, Ca²⁺의 비율이 증가하였다. 이러한 변화는 Ca 배출원이 석회질 토양, 굴뚝으로부터 배출되는 알칼리물질 및 석회질 건축자재 사용 등으로 볼 때, 본 조사 기간중 조사지역 인근 도로확장 공사의 영향이 Ca²⁺ 증가에 영향을 미친 것으로 판단된다. 음이온의 경우는 SO₄²⁻ > NO₃⁻ ≥ Cl⁻ 순이었으며, SO₄²⁻가 전체 음이온의 50% 이상을 차지하였고 해안 지역의 특성으로 다른 지역에 비해 Cl⁻의

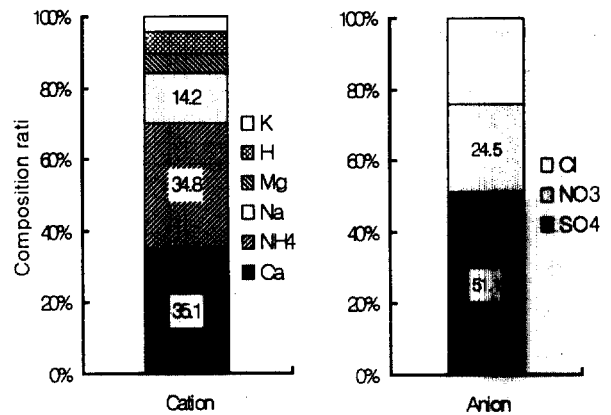


Fig. 2. Ion composition ratio of rainwater in Taean area in year 2000.

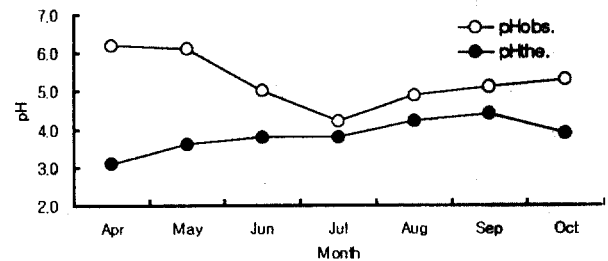


Fig. 3. Monthly pH change of rainwater in Taean area in year 2000.

비율이 높아 NO₃⁻와 비슷한 양이 존재하였다.

측정된 강우의 pH는 대기중에 존재하는 염기들에 의해 중화된 후의 수소이온 농도이므로 측정된 H⁺에 NH₄⁺와 Ca²⁺ 농도를 합한 것이 실제산성도에 가깝다고 보고¹⁴⁾된 바 있다. 우리나라 강우의 특성 중 하나는 높은 SO₄²⁻ 함량에 비해 산성도가 낮게 나타나는 것으로 이는 NH₄⁺와 같은 염기가 대기중에 다량 함유되어 있기 때문으로 생각되며, 이러한 것은 중국 북부의 강우 특성¹⁴⁾과 유사한 것이다. 월별 측정 pH값과 이론식에 의해 구해진 이론 pH값의 변화를 나타낸 Fig. 3을 보면 측정치 (pH_{obs})는 6월에서 9월 사이에 낮아진 반면, 이론치 (pH_{the})는 같은 기간에 증가하여 대기중의 알칼리성 이온들에 의한 중화력이 다른 기간에 비해 낮았음을 보였다.

Table 3은 조사 기간중 월별 강우의 비해염 sulfate 함량과 nss-SO₄/NO₃비 변화를 나타낸 것으로 인위적인 발생원에서 배출된 nss-SO₄²⁻ (non-sea salt sulfate)는 sulfate 농도중 해염에서 기인된 부분을 제외한 농도로 nss-SO₄²⁻=[SO₄²⁻]-[Na⁺]×0.121로 계산된다. Na⁺는 해염 이외의 인위적인 발생원이 없고 해염입자의 조성이 해수의 조성과 일치한다는 가정하에 지표물질로 사용하였으며¹⁵⁾, 0.121은 해수의 [Na⁺]/[SO₄²⁻]의 당량비이다. 태안지역 빗물중에 함유된 sulfate 함량중 nss-SO₄²⁻ 함량은 약 95%로 대부분이

Table 3. Monthly change of nss-SO₄²⁻/NO₃⁻ ratio of rainwater in Taean area in year 2000

Anion	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Ave.
SO ₄ (μeq/L)	307.0	204.7	85.3	52.4	18.9	12.2	43.7	82.4
nss-SO ₄ ^a (μeq/L)	291.4	197.8	82.0	49.6	16.9	4.2	38.4	78.0
NO ₃ (μeq/L)	108.0	55.2	41.1	51.5	16.3	5.2	30.0	39.5
nss-SO ₄ / NO ₃	2.7	3.6	2.0	1.0	1.0	0.8	1.3	2.0

^a non-sea salt SO₄²⁻ = [SO₄²⁻] - [Na⁺] × 0.121

인위적인 발생원에서 기인된 것이다. 또한 빗물의 산성도에 큰 영향을 주는 nss-SO₄²⁻와 NO₃⁻ 두 음이온의 비는 평균 2.0으로 nss-SO₄²⁻가 NO₃⁻에 비해 2배 정도 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타나 저유황 연료 사용의 확대에도 불구하고 강우 산성도에 미치는 sulfate의 영향이 큼을 보였다.

요 약

태안지역 강우의 화학적 특성을 알아보기 위하여 2000년 영농기 (4월~10월) 동안 태안지역에 내린 강우의 화학적 성분조성과 강우량 가중평균 (volume-weighted mean) 이온농도 변화를 조사한 결과는 다음과 같다.

조사기간중 강우 pH는 편서풍의 영향을 받는 기간인 4월과 5월이 6월~9월에 비해 높게 나타나 계절적 특성을 보였다. 강우 시료에 대한 pH별 강우분포는 pH 5.6 이상이 42.1%로 가장 많았으며, pH 5.6~5.0 및 4.5~5.0 범위의 강우가 각각 21.1%와 31.6%를 차지하였다. 빗물의 조성은 SO₄가 음이온의 50% 이상을 차지하였고 전체 양이온 함량의 약 70%가 NH₄⁺와 Ca₂⁺로 구성되어 있다. 월별 강우 pH는 측정치 (pH_{obs})는 6월에서 9월 사이에 낮은 반면, 이론치 (pH_{the})는 같은 기간에 증가하여 대기중의 알칼리성 이온들에 의한 중화력이 다른 기간에 비해 낮았다. 또한 강우중 비해염 sulfate는 총sulfate 함량의 약 97%이었다. 강우의 산성도 기여율 (nss-SO₄²⁻/NO₃⁻)은 평균 2.0으로 비해염 SO₄²⁻에 의한 기여율이 NO₃⁻ 보다 2배 높았다.

참 고 문 헌

1. Charron, A., Plaisance, H., Sauvage, S., Coddeville, P., Galloo, J. C. and Guillermo, R. (2000) A study of the

source-receptor relationships influencing the acidity of pre-precipitation collected at a rural site in France, *Atmospheric Environment* 34, 3665-3674.

2. Farman, J. C. (1990) Ozone depletion, *World guide to environmental issues and organizations*, Longman Current Affairs, p.125-132.

3. Kondo, J. (1991) The ozone hole problems. *Proceedings of the 2nd IUAPPA regional conference on air pollution* (Vol. 1), p.17-22.

4. Brackley, P. (1990) The greenhouse effect and global warming. *World guide to environmental issues and organizations*, Longman Current Affairs, p.52-65.

5. Sullivan, K. M. (1991) The management of energy to minimize greenhouse emissions, *Proceedings of the 2nd IU-APPA regional conference on air pollution* (Vol. 2), p.133-140.

6. Walker, B. W. (1990) Land degradation and desertification *World guide to environmental issues and organizations*. Longman Current Affairs, p.66-78.

7. Volker, A. M. (1988) The challenge of acid rain, *Scientific American* 259(2), 14-22.

8. Lee, J. S., Jung, Y. K. and Lee, K. S. (1999) Chemical composition of rainwater in Taean area. *Korean J. of Environmental Agriculture* 18(3), 204-208.

9. Takuya, K., Yoshishisa, K. and Keiichi, N. (1992) The effects of simulated acid rain on the uptake of mineral elements in soybean plants, *J. Agr. Met.* 48(1), 11-18.

10. Taniyama, T. and Saito, H. (1981) Effects of acid rain on apparent photosynthesis and grain yield of wheat, barley and rice plant. *Rept. Environmental Sci. Mie Univ.* 6, 87-101.

11. Lee, J. S., Kim, B. Y., Woo, K. D. and Jung, G. B. (1993) Study on histological perturbations of leaves of sesame after exposure to simulated acid rain, *J. of Korean Society of Soil Science and Fertilizer* 26(4), 308-313.

12. Johnston, J. W., Jr. Shriner, D. S., Klarer, C. I. and Lodge, D. M. (1982) Effect of rain pH on senescence, growth, and yield of bush bean, *Environmental and Experimental Botany* 22(3), 329-337.

13. Kang, J. G., Shim, H. K., Lee, J. S., Kim, J. G., Lee, J. K. and So, J. D. (1995) Survey on the precipitation component in Iri area of Chonbuk Province, *The Korean J. of Environmental Agriculture* 14(1), 15-22.

14. Galloway, J. N., Zhao, D., Xiong, J., and Likens, G. E. (1987) Acid rain : China, United States, and a remote area, *Science* 236, 1559-1562.

15. Kang, G. U., Kang, B. W., and Kim, H. K. (1992) A study on the comparison of chemical components in rainwater at coastal and metropolitan areas, *J. of Korean Air Pollution Research Association* 8(3), 191-197.