

목포, 여천지역 강수의 무기이온 성분농도와 거동에 관한 연구

A Study on Ion Distribution and Behavior of Acidrain in Mokpo and Yeochon Area

吳吉泳·梁守仁¹⁾·李浣辰

全南大學校 精密化學科, ¹⁾全羅南道保健環境研究院

(1998년 5월 16일 접수, 1999년 8월 16일 채택)

Gil Young Oh, Soo In Yang¹⁾ and Wan-Jin Lee

Department of Fine Chemical Engineering, Chonnam University

¹⁾Chollanam-Do Health and Environment Institute

(Received 16 May 1998; accepted 16 August 1999)

Abstract

This study was carried out to investigate the constituents of inorganic ions of precipitation in Mokpo and Yeochon area from Jan. 1996 to Dec. 1997. The volume-weighted mean pH of precipitation was 5.7 (4.8~7.8) at Mokpo, and 5.6 (5.1~7.4) at Yeochon area, respectively. The non-seasalt (nss) anion concentrations were found in order of $nss-SO_4^{2-} > NO_3^- > nss-Cl^-$ at two areas. The portion of $nss-SO_4^{2-}$ and NO_3^- was 71~84% out of anions. The non-seasalt cation concentrations were found in order of $NH_4^+ > nss-Ca^{2+} > nss-Mg^{2+} > nss-K^-$ at two areas. The portion of NH_4^+ and $nss-Ca^{2+}$ was 85~92% out of cations.

Compared regionally the year concentration of $nss-SO_4^{2-}$, the result of Yeochon was 3 times higher than that of Mokpo in 1996, while the results of two regions were almost similar in 1997. The reason was that Yeochon was restricted area of the use of 0.5% sulfur B-C oil, controlled air pollution emission area, controlled semitotal amounts of air pollution emission area and partial operating of factories in 1997.

There were no ions having high correlation with H^+ , but $nss-SO_4^{2-}$, NO_3^- , NH_4^+ and $nss-Ca^{2+}$ showed high correlation coefficient each other. It seems that these ions have little correlation with H^+ because they are washed out on binding state. Factor analysis showed that the first factor was complicated factor containing anthropogenic and soil resource, the second factor was sea-salt resource and the third factor was independent behavior of hydrogen at Mokpo. While, the first factor was complicated factor containing anthropogenic and sea-salt resource, the second factor was $Ca(NO_3)_2$ salt and the third factor was NH_4^+ and SO_4^{2-} synergized by resource and combination at Yeochon.

Key words : acidrain, ion constituent, correlation, factor-analysis

1. 서 론

모든 환경문제는 여러 동·식물과 궁극적으로 인간에게까지 미치는 유해성 때문에 관측되고 관리되어야 한다. 환경문제에 있어서 대기오염문제는 심각성의 경중을 떠나 광역성과 포괄성(Galloway *et al.*, 1987)을 생각할 때 어떤 오염원보다 시급한 관측·관리가 필요하다. 대기오염물질은 대기 중에 부유하면서 직접적인 피해를 주기도 하지만 비, 눈 등의 강수 현상시 강수의 응결핵, 세척효과 등으로 강수의 기본적인 산도를 변화시켜 심각한 오염원으로써 부각되고 있다(Kreidenweis and Seinfeld, 1988). 이에 산성우는 대기오염의 지표로써 중요할 뿐만 아니라 2, 3차 오염문제의 심각성으로 인해 특히 문제가 되고 있다.

산성우는 석탄, 석유 등 화석연료 사용량이 증가함에 따라 발생하는 대기오염물질인 황산화물(SO_x), 질소산화물(NO_x) 등이 대기 중에서 산화반응과정을 거쳐 강산으로 변하여 강수시 혼입되어 생성되는 것으로 알려져 있다(Irwin and Williams, 1988). 산성화된 강수는 수권, 토양권을 산성화하여 식물생육에 미치는 영향이 크고, 석조건축물, 조형물 등 문화재의 손실, 상·하수도에 대한 피해 및 피부 발적, 눈 자극과 같이 인체에도 직접적인 영향을 주는 등 거의 모든 환경문제에 관여하고 있다(Katzenstein, 1986; Gorham, 1982). 산성우는 오염발생원 주변지역 뿐만 아니라, 기상조건에 따라 장거리 수송됨으로써 그 피해는 국가간의 문제로 확대되고 있기 때문에 세계각국이 공동으로 대처하고 있다. 따라서 산성강하물에 대한 적절한 대책 및 정책수립을 위해서는 무엇보다도 대상지역 강수의 오염도에 대한 정확한 현황파악과 장기적인 경향분석이 중요하고, 산성우의 구성인자 등에 대한 지속적인 연구가 필요하다.

본 연구에서는 산성우에 대한 피해사례가 국내·외적으로 대두됨에 따라 지역의 실태파악과 원인규명을 위하여 도시지역으로 목포시지점, 공업지역으로 대단위 석유화학단지가 위치한 여천시지점의 강수를 채취하여 pH, 전기전도도 및 무기이온 성분농도를 비교 분석 후 pH 변화에 관여가 큰 성분 및 무기이온들의 분포특성을 알아보고, 강수로 세척되

기 전의 대기 중 오염물질의 존재형태 추정을 위해 통계적인 접근을 시도하였다. 또한, 강수의 전반적인 설명을 위해 공통요인을 분류하였다.

2. 실험 및 분석방법

1996년 1월부터 1997년 12월까지의 강수시료를 채취 분석하였다. 조사지점은 그림 1과 같이 목포와 여천을 대상으로 하였다. 목포의 경우 위도 34°48', 경도 126°23', 표고 18m인 용당1동 목포시청 옥상(지상고 12m)에 강수자동측정기를 설치하였다. 목포시는 삼면이 바다로 둘러싸여 있으며, 생활기반은 중소규모의 상업지역으로 인구는 약 240,000명의 중소도시이다(목포시, 1996). 여천의 경우는 위도 34°49', 경도 127°44', 표고 50m인 삼암동사무소 옥상(지상고 3m)에 강수자동측정기를 설치하였다. 북동쪽으로 약 6km 떨어진 곳에 광양만이 위치하고, 북동쪽에서 남서쪽으로 뻗어있는 영취산(표고 510m)이 있으며, 광양만과 영취산 사이에 북동~남서로 이어지는 대단위 석유화학단지가 위치하고, 인구는 약 250,000명이다(여천시, 1996).

본 연구에서 시료채취는 우수자동측정기(AQUA, RM8300, Japan)를 이용하였으며, 1회 강수를 일괄 채취하여 기본단위로 하였다. 시료는 채취 즉시 실험실로 운반, pH와 전기전도도를 측정 후 4°C 냉장

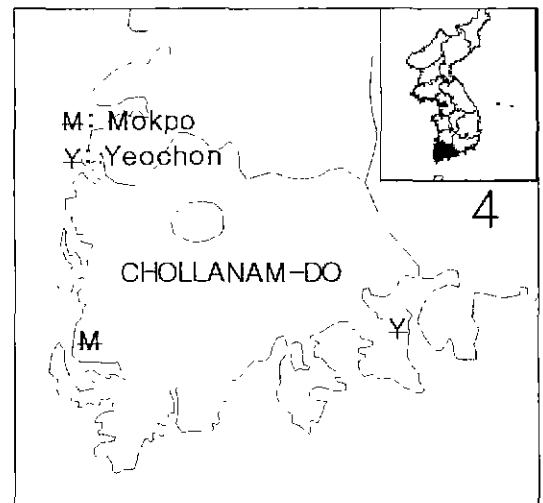


Fig. 1. Sampling sites.

Table 1. Methods and instruments of precipitation analysis.

Items	Method	Instrument
Precipitation(mm)	Gauge	AQUA, Model RM8300
Conductivity	Electrode	AQUA, Model RM8300
pH	pH meter	Fisher, Model 50
SO ₄ ²⁻ , NO ₃ ⁻ , Cl ⁻	Ion chromatography method	DX-100 Ion Chromatograph
NH ₄ ⁺	Indophenol method	Shimadzu, Model UV-1201
Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Na ⁺ , K ⁺	Ion chromatography method	DX-100 Ion Chromatograph
	Inductively coupled plasma-atomic emission spectroscopy	Jovin Yvon, Model 138

Table 2. Chemical properties of precipitation.

Site	season	No. of sample	Rain fall (mm)	pH	Con. (μS/cm)	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	NH ₄ ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	nss-SO ₄ ²⁻	nss-Cl ⁻	NO ₃ ⁻ /nss-SO ₄ ²⁻
						(μeq/l)										
Mokpo	spi	24	364.9	5.8	17.2	70.9	15.5	26.4	39.7	44.2	9.8	4.2	22.2	68.3	4.2	0.23
	sum.	28	831.6	5.7	10.7	37.1	11.0	21.1	31.5	13.4	5.1	2.3	15.0	35.3	3.8	0.31
	fall	22	296.4	5.5	13.4	41.0	13.0	40.6	23.1	17.2	10.1	3.1	31.8	37.2	5.7	0.35
	win.	12	138.4	5.3	24.5	66.2	16.5	80.2	32.2	28.7	19.4	6.7	62.8	58.6	10.5	0.28
	'96	52	812.7	5.6	11.2	39.6	13.4	22.7	20.3	21.9	7.5	2.6	20.2	37.2	2.1	0.36
'97	34	818.6	5.8	16.4	56.0	12.3	38.9	43.4	22.6	9.1	3.9	27.2	52.8	7.5	0.23	
annual	86	1631.3	5.7	13.8	47.8	12.8	30.9	31.9	22.3	8.3	3.2	23.7	45.0	4.8	0.29	
Yecheon	spr	17	279.6	5.7	24.8	123.1	15.8	29.2	77.6	48.5	12.4	4.2	28.0	119.8	1.2	0.13
	sum.	26	755.8	5.6	11.9	53.3	7.6	13.8	43.5	8.5	3.4	1.6	10.1	52.1	2.7	0.15
	fall	15	350.3	5.7	23.5	116.4	12.4	35.9	89.5	21.4	8.4	3.0	27.4	113.1	5.0	0.11
	win.	9	116.1	5.4	35.9	137.8	12.7	98.4	81.6	25.3	53.2	9.6	63.3	130.2	29.0	0.10
	'96	37	848.7	5.6	19.7	104.6	14.8	15.4	72.8	25.9	6.9	2.3	15.0	102.8	0.9	0.14
'97	30	653.1	5.7	17.8	65.4	5.2	45.2	51.4	13.0	14.2	4.0	30.2	61.7	10.3	0.08	
annual	67	1501.8	5.6	18.9	87.6	10.6	28.4	63.5	20.2	10.1	3.0	21.6	85.0	5.0	0.13	

보관한 다음 가능한 빠른 시간내에 강수의 SO₄²⁻, NO₃⁻, Cl⁻, NH₄⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺를 측정하였다 (표 1). 이온들의 배출원 및 대기 중 또는 강수중의 전체적인 분포특성을 파악, 설명하기 위해 SPSS/PC⁺를 사용하여 단순·편상관관계, 다중회귀분석, 요인분석 등을 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

1996년 1월부터 1997년 12월까지 목포와 여천지점에서 채취된 강수의 연간 pH, 전기전도도, 이온당량농도 등을 표 2에 나타내었다. 강수빈도는 목포지점이 87회였고 여천지점이 68회였다. 이온비와 전기전도도비를 이용한 신뢰성 검토 결과, 신뢰성 평가기준인 0.8~1.2범위 안에 존재하는 시료(권우택

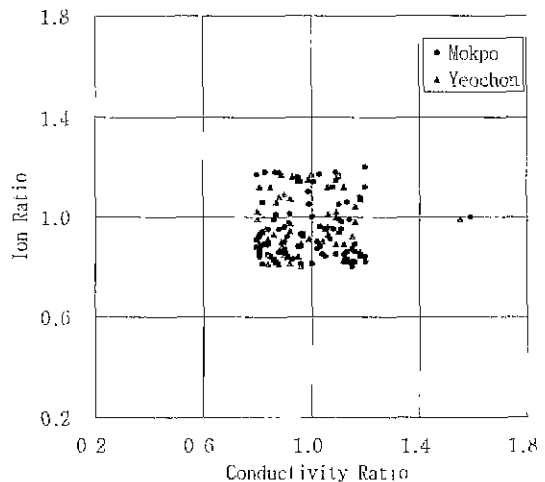


Fig. 2. Ion balance and conductivity balance.

등, 1996)는 목포지점에서 87개 시료 중 86개, 여천 지점에서 68개 시료 중 67개로 나타났다

그림 2의 신뢰도 검토 결과 범위를 벗어난 두 개의 시료는 96년 4월 중순에 황사현상을 동반한 강수로 이온구성비에서 Ca^{2+} 이 차지하는 비율이 37~43%로 평상시에 비해 매우 높아 이온비가 목포 1.59, 여천 1.55로 양이온 쪽으로 크게 벗어나고 있었다. 또 이때의 이온조성이 평상시와 아주 상이하나, 두 지점에서 비슷하게 나타난 것으로 보아 평소의 지역대기가 아닌 외부에서 일시에 유입된 대기가 washout 되었음을 알 수 있다.

3.1 강수의 산도

조사기간 중 월별 강수량 가중평균 pH는 5.1~6.1 범위였으며, 연평균 pH는 목포와 여천에서 각각 5.7과 5.6으로 1990년 충청북도 청원군 5.21(정용승과 김태근, 1992), 태백산 고산지역 5.26, 백두산 5.38(최재천 등, 1994) 보다는 약간 높은 편이고, 1995~1996년 제주도 5.6(이기호와 허철구, 1996)과 비슷하며 1987년 중국남부지역 4.0~5.0보다는 높고, 중국북부지역 6.5 보다는 낮은 상태였다(Zhao et al., 1988) 1980년대 유럽 및 일부 북미대륙에서 pH 3.0 이하의 강수가 출현하였고, 미국과 캐나다 동부지역은 pH 4.0~4.5 그리고 극지방에서도 산성비가 측정(Cogbill and Linkens, 1974)되었던 것에 비해 두 지점의 산성화 정도는 심하지 않은 상태였다.

pH가 가장 낮은 계절은 두 지점 모두 겨울철(5.3, 5.4)로 나타나 계절적으로 난방연료 사용량 증가와 낮은 강수빈도 때문으로 생각된다.

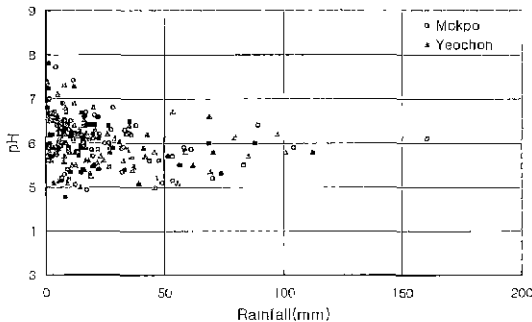


Fig. 3. The distribution of pH on rainfall.

그림 3은 강수량에 따른 pH 변화를 나타낸다. 강수량이 약 20 mm 이하인 경우 pH가 4.8~7.8로 pH 변이가 큰 반면, 강수량이 증가함에 따라 pH는 6.0 전후에서 어느 정도 일정한 값에 수렴하는 경향을 볼 수 있다. 이는 초기강수(양적으로나 시간적으로나)때 대기 중의 오염물질을 대부분 washout함으로써 강수 당시의 대기상황에 따라 변동이 심하다가 후반으로 갈수록 washout의 영향은 감소하고 rain-out 효과만 반영되기 때문으로 전도도 변동에서도 같은 경향을 볼 수 있다(백성욱 등, 1987) 물론 지속적으로 배출되는 지역대기오염물질에 의한 wash-out 효과는 지역별 강수의 특성으로 나타날 것이다.

pH에 따른 강수중 이온성분 농도분포를 그림 4에 나타내었다 강수는 함유하는 이온성분의 농도가 낮기 때문에 산에 대한 중화능력이 약해서 미량의 강산성 물질로도 쉽게 산성화된다. 산성우에 의한 낙하지역의 환경도 마찬가지이다. pH 5.6 이하의 산

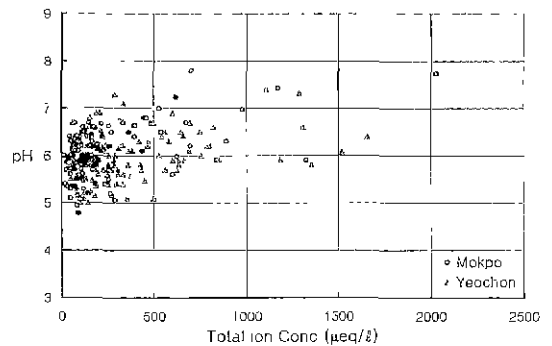


Fig. 4. The distribution on pH on the total ion concentration.

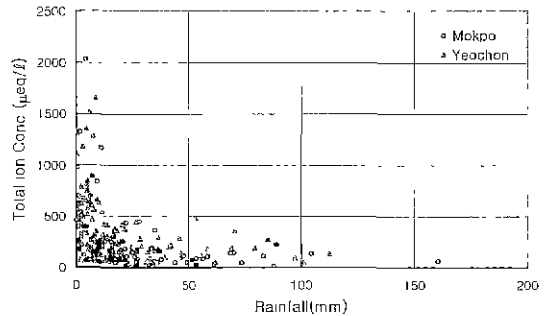


Fig. 5. Total ions distribution on rainfall.

성우라도 함유하는 총성분농도가 적으면 낙하지역 환경이 약간의 중화력만 있어도 그 피해는 최소화할 수 있지만, pH 6.0 이상의 강수라도 강수 중 함유 이온양이 많을 때는 강수산도에 의한 초기피해는 적을지라도 낙하지역에 잔류하면서 질산화반응(H⁺ 공여)과 같은 2, 3차 반응을 거쳐 더 많은 피해를 줄 수 있다(김석진 등, 1994). 본 연구에서도 통상적으로 산성우의 기준이 되는 pH 5.6 이하의 강수보다 그 이상에서 이온들의 농도가 훨씬 높아 이러한 현상을 생각해 볼 수 있다. 그러나 그림 5에서 볼 때, 강수량의 증가에 따라 총 이온농도는 급격히 낮아지는 것으로 나타나고 pH 7.0 이상의 시료가 20mm 이하의 강수였음을 감안하면 본 연구결과에 대한 해석은 강수량과의 관계가 고려되어야 할 것이다. 향후 동일 강수량에 대해 검토가 가능할 정도의 data가 축적되면 보다 명확한 해석이 가능할 것이다. 즉 지역에 따라 강수는 자기 특성을 갖기 때문에 강수의 pH 값만으로 그 지역의 산성우 영향을 판단하기는 어렵다(강공언 등, 1995). 따라서 일률적인 산성우 기준은 적용하기 어렵고 지역별 배경농도 및 지역환경(토양, 수생생태계 등)의 완충능을 고려한 지역별 산성우 판단방법이 모색되어야 하며, 측정결과 및 환경에의 영향을 종합적으로 평가하여 대기환경기준 설정항목이 아니더라도 환경에 미치는 영향이 큰 대기오염물질에 대해서는 지역대기측정망 운영시 추가로 측정하고, 해당배출시설의 규제 기준도 강화할 필요가 있다고 사료된다.

3.2 강수중 무기이온성분

연평균농도는 공단지역으로 배출원이 많은 여천지점이 목포지점보다 더 높게 나타났다. 해안에 위치한 이유로 두 지점에서 해염이온 농도가 높게 나타났다. 특히 북서계절풍의 영향이 큰 겨울에 높은 농도를 보였고, 목포지점에서 두드러졌다.

비해염기원 음이온은 두 지점 모두 nss-SO₄²⁻ > NO₃⁻ > nss-Cl⁻ 순이었으며, nss-SO₄²⁻이 전체의 74~82%로 큰 비중을 차지하였다. NO₃⁻, nss-Cl⁻ 양은 두 지점에서 거의 비슷하였다. nss-SO₄²⁻ 양이 여천지점이 목포지점보다 약 2배 높음에도 불구하고 비슷한 pH를 보인 것은 NH₄⁺ 역시 여천지점에서 약 2배 높아 이의 중화작용으로 생각된다. NH₄⁺ 배출원은 크게 자연적인 발생과 비료제조공장 등의

화학공장을 생각할 수 있는데 여천공단내 화학공장의 기여가 컸을 것으로 생각된다. 타 논문에서도 강수산도의 중화물질로 NH₄⁺는 중요한 위치를 차지하고 있다(최재천 등, 1994). 특히 nss-SO₄²⁻은 97년 목포지점 56.0 μeq/l, 여천지점 65.4 μeq/l로 비슷하게 나타나 여천지점이 목포지점보다 약 3배 높았던 96년 결과와는 큰 차이를 나타내었다. 이는 분명하지는 않지만, 목포지점은 연료중 황함유량이 97년 7월 1일부터 3~4%에서 1.0% 이하로 조절된 반면 여천지점은 저유황연료사용 고시지역으로 96년 7월 1일부터 1.6% 이하에서 1.0% 이하로, 97년 7월 1일부터는 1.0% 이하에서 0.5% 이하로 더욱 강화된 효과라고 생각된다. 그리고 여천지점은 대기오염특별대책 지역으로 지정되어 배출허용기준이 강화되었고 대기오염물질 배출시설개선 효과와 공장의 부분가동도 하나의 원인으로 생각된다.

개별강수의 특성을 살펴보면 nss-Cl⁻의 양이 “-”가 나오는 시료가 많이 관찰되었는데 이는 소위 “chlorine loss” 영향 뿐만 아니라 Na⁺에 의한 해염 성분 구분방법상 토양에서 비산된 Na₂SO₄, Na₂CO₃ 등에서 유래한 Na⁺이 해염기준으로 일괄 계산된 때문으로 보여(한진석과 김신도, 1996) 보다 정확한 구분 방법이 모색되어야 할 것으로 사료된다.

비해염기원 양이온은 두 지점 모두 NH₄⁺ > nss-Ca²⁺ > nss-Mg²⁺ > nss-K⁺ 순이었으며, NH₄⁺와 nss-Ca²⁺이 전체 비해염 양이온의 85~92%를 차지하고 있어, 이 두 양이온이 산성분을 중화시키는 주요인으로 작용하고 있음을 알 수 있다

전체적으로 nss-SO₄²⁻, NH₄⁺, nss-Ca²⁺의 농도가 높아 발생원적인 요인뿐만 아니라 대기 중 결합형태로서 (NH₄)₂SO₄, CaSO₄ 등을 생각해 볼 수 있어 가능성 있는 대기 중 존재형태, pH에 미치는 영향 및 공통요인 등을 찾아보기 위해 단순·편상관계, 다중회귀분석, 요인분석을 실시하였다. 강수의 산성화는 비해염성분에 기인한 것으로 알려져(Gorham, 1982) 있어 비해염성분간의 단순·편상관 관계를 표 3에 나타내었다.

상관분석결과는 북미지역의 강수(Lee et al., 1993)와는 다른 경향을 나타내었다. 두 지점 모두 H⁺와 유의할만한 상관을 보이는 이온성분은 없었는데 이러한 사실은 강수에 녹아든 산성원인물질인 SO₄²⁻,

Table 3. Correlation matrix for non-seasalt (nss) components at Mokpo & Yeochon.

	nss-SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	H ⁺	nss-Ca ²⁺
Mokpo	nss-SO ₄ ²⁻	1.0000			
	SO ₄ ²⁻	.7579 ^{††}	1.0000		
	NO ₃ ⁻	(.3393 ^{†*})			
	NH ₄ ⁺	.7887 ^{††}	.6210 ^{†††}	1.0000	
	H ⁺	(.8661 ^{†*})	(-.0468)		
Yeochon	nss-SO ₄ ²⁻	1.0000			
	SO ₄ ²⁻	.1890	1.0000		
	NO ₃ ⁻	(-.3636 ^{†*})			
	NH ₄ ⁺	.6713 ^{†††}	.3481 ^{†††}	1.0000	
	H ⁺	(-.0145)	(-.0142)	(-.1187)	

† : P < 0.05 †† : P < 0.001
 () Partial coefficient

NO₃⁻ 및 Cl⁻이 북미지역의 주 형태인 H₂SO₄, HNO₃ 및 HCl 등이 아닌 H⁺ 이외의 다른 양이온에 의해 중화된 형태로 혼입되었다는 것을 의미한다. 또 이 이온들간의 상관분석결과 고도로 유의한 상관성을 갖는 것으로 나타나 이러한 이온들이 서로 결합한 상태로 강수에 혼입되어 이미 산성도가 중화되어 있어 H⁺와 유의한 상관성을 갖지 않는 것으로 생각된다. 이와 같이 두 지점에서 채취한 강수의 경우 산성원인물질인 SO₄²⁻, NO₃⁻ 및 Cl⁻이 산성도를 나타내는 H⁺와 유의한 상관성이 인정되지 않아 강수의 오염도를 pH만으로 단정지어 평가한다는 것은 타당하지 않다고 생각된다. 국내·국외의 경우도 강수중 H⁺와 SO₄²⁻, NO₃⁻ 및 Cl⁻의 산성원인물질 사이에 유의한 상관성이 인정되지 않는 것으로 일부 보고되고 있다(강공연 등, 1995; Dikaiakos, 1990). 또 양이온과 음이온 서로간의 상관보다는 교차상관이 높은 것으로 보아 발생원적인 상관보다는 이온결합에 기초하는 (NH₄)₂SO₄, NH₄NO₃ 등의 암모늄염과 CaSO₄ 염상태의 존재 형태적인 상관임을 추정해 볼 수 있다. 구례지점에서 (NO₃⁻:NH₄⁺)의 편상관이 낮은 것은 NH₄NO₃ 형태의 직접적인 관계가

아니라 (NH₄)₂SO₄, Ca(NO₃)₂, CaSO₄ 형태로 존재하는 염들 사이의 다중공선성(Multicollinearity)의 영향으로 생각된다.

[Mokpo]

$$[H^+] = 2.952 + 0.025[nss-SO_4^{2-}] - 0.032[NO_3^-] - 0.012[nss-Ca^{2+}] - 0.034[NH_4^+]$$

R²=0.11

[Yeochon]

$$[H^+] = 2.526 - 2.755 \times 10^{-4}[nss-SO_4^{2-}] - 1.103 \times 10^{-3}[NO_3^-] - 5.558 \times 10^{-3}[nss-Ca^{2+}] - 3.986 \times 10^{-3}[NH_4^+]$$

R²=0.10

중회귀분석결과를 살펴보면 여천지점은 유의도 5% 수준에서 유의할만한 결과는 나타나지 않아 단 순상관에서도 마찬가지로 산성강수를 유발시키는 주요 음이온들이 H⁺와 결합하지 않은 상태로 강수에 혼입됨을 알 수 있으며, 특히 β값을 볼 때 pH와 비례음이온들과의 일차적 해석에는 다소 거리가 있음이 뚜렷하다. 그래서 여천지점의 H⁺는 nss-SO₄²⁻, nss-Ca²⁺, NH₄⁺의 양변화에 의해 직접적인 영향을 받지 않는다고 볼 수 있다. 반면 목포지점은 F(4, 81)값에서 통계적 유의수준 5% 이상으로 다중회귀식이 통계학적으로 의미 있는 추정임을 알 수 있다. 따라서 목포지점의 H⁺는 nss-SO₄²⁻에 의해서 증가하고 nss-Ca²⁺, NH₄⁺에 의해서 중화되어 감소한다고 볼 수 있으나 결정계수를 볼 때 그 의미는 크지 않다.

강수중 이온들의 전체적인 설명을 위해 요인분석을 R-type, PCA (principle component analysis), varimax방식으로 행하였다. 요인추출은 보통 eigenvalue가 1.0 이상인 요인을 인정하거나 연구자의 추정에 의하여 요인수를 지정하는 방법을 사용하고 있다. 본 연구에서는 데이터 손실을 최대한 방지하고 기존의 연구결과들을 검토한 결과 두 방법을 절충하여 eigenvalue 1.0 이상과 1.0에 가까운 요인까지 모두 3가지씩의 요인을 인정하였다 두 지점에서 추출된 요인과 회전 후 요인적재량을 표 4에 나타내었다.

목포지점에서는 제 1요인이 적재량 3.412로 37.9%, 제 2요인이 적재량 3.247로 36.0%, 제 3요인이 적재량 1.029로 11.4%, 총 전체변이의 85.4%를 설명

Table 4. Factor loading and rotated communality at Mokpo & Yeochon.

	Variable	FACTOR 1	FACTOR 2	FACTOR 3	
Mokpo	SO ₄ ²⁻	.93663	.27930	-.05899	
	NO ₃	.83673	.11923	-.14610	
	Ca ²⁺	.78251	.17403	.02660	
	NH ₄ ⁺	.77557	.15406	-.18694	
	Na ⁺	.08022	.97801	-.07147	
	Cl ⁻	.15516	.97760	-.06979	
	Mg ²⁺	.44699	.87392	-.07133	
	K ⁺	.60478	.64275	-.09194	
	H ⁺	-.15581	-.10927	.97227	
		Mg ²⁺	.99120	.07792	.01925
Yeochon		Na ⁺	.99102	.10138	.02799
		Cl ⁻	.98965	.10073	.01978
		K ⁺	.97667	.16588	.06651
		SO ₄ ²⁻	.72647	.16214	.63944
		NO ₃	-.04767	.87293	.14363
		Ca ²⁺	.35148	.81007	.03889
		H ⁺	-.07280	-.40239	-.31916
		NH ₄ ⁺	-.05112	.18232	.96430

할 수 있었다 첫 번째 요인은 인위적인 오염배출 성분인 SO₄²⁻, NO₃⁻에 큰 부하값을 보였고, 유기물이 부패하면서 주로 생성되는 암모니아가 포함된 것으로 보아 인위배출과 토양유래의 복합적인 요인으로 사료되며 이들 이온들이 대기 중에서 SO₄²⁻, NO₃⁻, NH₄⁺들의 조합으로 이루어진 염상태로 존재한다고 생각된다. 두 번째 요인은 Na⁺와 Cl⁻에 큰 부하량을 보여 해염에 기인하는 발생원적 요인으로 생각된다. 세 번째 요인은 H⁺ 단일성분으로 분류되어 다른 이온들과는 독립적인 수소이온의 거동을 나타내는 것으로 생각되며, 이는 각 이온들과 H⁺와의 상관관계가 없었던 결과와도 잘 일치하고 있다.

여천지점은 제 1요인이 적재량 4.554로 50.7%, 제 2요인이 적재량 1.694로 18.8%, 제 3요인이 적재량 1.469으로 16.3%, 총 전체변이의 85.8%를 설명할 수 있었다. 목포지점과는 달리 첫번째 요인은 SO₄²⁻, Na⁺, Cl⁻에 큰 부하량을 보여 해안가에 위치하기 때문에 해염의 영향이 크고, 오염부하량이 큰 공단 지대라는 지역적 특성으로 해염발생이온들이 인위 배출이온들과 섞여 washout되기 때문에 해염발생원과 인위배출원에 의한 복합적인 요인으로 생각된다. 두 번째 요인은 상대적으로 적은 농도인 NO₃⁻과 토양기원이 우세하다고 알려진 Ca²⁺의 부하량이

크게 나타나고, 이온결합형태의 추정을 위해 살펴본 중회귀분석과도 잘 일치하는 것으로 보아 Ca(NO₃)₂ 형태의 형태적 요인으로 생각된다. 세번째 요인은 자연발생이 아니라 공단에서 주로 배출될 것으로 예상되는 NH₄⁻ 단일성분으로 분류되었고, 제 1요인으로 분류된 SO₄²⁻에도 큰 부하량을 보여 SO₄²⁻과 NH₄⁺의 발생원의 동일성과 두 이온의 화학적 결합력으로 인해 대기 중에서 결합 후 강수에 혼입됨을 시사하고 있다. 이는 1984년 Pratt *et al.*이 행한 미국 미네소타주의 에어로졸 요인분석에서도 유사한 결과를 보였다.

4. 결 론

1996년 1월부터 97년 12월까지 목포시와 여천시의 강수산성도와 무기이온 성분을 측정된 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 강수의 평균 pH는 목포지점이 5.7(4.8~7.8), 여천지점이 5.6(5.1~7.4)이었다.

2) 비혜염기원 음이온은 두 지점에서 nss-SO₄²⁻ > NO₃⁻ > nss-Cl⁻이었으며, nss-SO₄²⁻와 NO₃⁻이 전체 음이온의 74~82%를 차지하였다.

3) 비혜염기원 양이온은 두 지점에서 NH₄⁺ > nss-Ca²⁺ > nss-Mg²⁺ > nss-K⁺이었으며, NH₄⁺와 nss-Ca²⁺이 전체 양이온의 85~92%를 차지하였다.

4) 97년 nss-SO₄²⁻의 농도는 두 지점에서 비슷하게 나타나, 여천지점이 목포지점보다 약 3배 높았던 96년 결과와는 큰 차이를 보였다. 이는 여천지점의 유류중황함유량 고시지역 변경(97년 1월부터 0.5%), 대기오염특별대책지역으로 인한 배출허용기준의 강화, 대기오염물질 준중량규제 실시(97. 1), 공장 부분가동 등 때문으로 생각된다.

5) 상관분석결과 두 지점 모두 각 이온들과 H⁺ 사이에 유의할 만한 상관성을 보이지 않았다. 이것은 SO₄²⁻과 NO₃⁻이 NH₄⁻, Ca²⁺과 고도로 유의한 상관성을 보여 이들 이온들이 서로 결합한 상태로 강수에 혼입되어 H⁺와 유의할 만한 상관성을 갖지 않는 것으로 생각된다.

6) 강수의 요인분석결과 두 지점의 강수는 다음과 같이 설명할 수 있었다.

목포지점에서 첫번째 요인은 인위배출과 토양유래의 복합적인 요인으로 사료되며, 두번째 요인은

해염에 기인하는 발생원적요인으로 생각된다. 세번째 요인은 H^+ 단일성분으로 분류되어 다른 이온들과는 독립적인 수소이온의 거동을 보였으며 상관관계 결과와도 잘 일치하였다. 여천지점은 목포지점과는 달리 첫번째 요인은 해염발생원과 인위배출원에 의한 복합요인으로 생각되며, 두번째 요인은 $Ca(NO_3)_2$ 형태의 존재형태요인으로, 세번째 요인은 NH_4^- 의 발생원적요인으로 생각된다.

참 고 문 헌

강몽언, 강병욱, 김희강(1995) 강화지역 강수의 오염도 평가에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 57.

권석진, M. Krieger, 정재춘, 정형근(1994) 산성강수와 물의 순환, 한국대기보전학회지, 163.

권우택, 김선태, 나춘기, 박기학, 이남훈, 이주삼, 홍지형, 황갑성(1996) 산성비조사법, 동화기술, 374.

백성욱, 권중철, 박상근(1987) 대구 및 인근지역 강수의 산성도와 무기이온농도에 관한 연구, 영남대학교 환경연구소, 12, 47

손동현(1985) 서울시의 산성물질 강하현상에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 2(1), 23

신응배, 이상권, 안규홍(1986) 서울시 산성비의 원인물질에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 2(2), 66.

이기호, 허철구(1996) 제주시 강우의 화학적 조성 특성에 관하여 한국대기보전학회지, 5(6), 739.

이민희, 한의정, 원량수, 신찬기(1988) 황사현상시 분진의 입도 분포와 화학조성에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 4(2), 49.

이민희, 한의정, 원량수(1986) 황사현상이 우리나라에 미치는 영향, 한국대기보전학회지, 2(3), 34.

이민희, 한의정, 원량수, 신찬기(1986) 습성대기성분에 대한 통계적해석, 한국대기보전학회지, 2(1), 41.

정용승, 김태근(1991) 한국 서해안에서 관측된 산성비의 발원지 추적 연구, 한국대기보전학회지, 7(3), 57.

최재천, 이민영, 이선기(1994) 고산지역 강수의 화학성분 특성에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 10(11),

64.

한진석, 김신도(1996) 서울시 대기 중 입자상오염물질의 조성에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 12(4), 389.

Cogbill, C V. and G E. Linkens(1974) Acid Precipitation the Northern United States, Water Resource Research, 10(6), 231

Dikaiakos, J.G. (1990) Rainwater composition in Athens, Greece. Atmos. Environ., 27(13), 1993.

Galloway, J.N, Z Dianwu, X Jiling and G.E. Likens(1987) Acid rain : China, United States, and remote area. Science. 236(4808), 1559.

Gorham, E. (1982) What to do about acid rain, Technology review, 85(7), 59

Irwin, J G. and M L. Williams(1988) Acid rain chemistry and transport. Environ. pollut., 50(1-2), 29.

Katzenstein, A.W (1986) Acid rain—a further look at the evidence. Power engineering, 90(3), 32.

Kreidenweis, S M and J H Semfeld (1988) Nucleation of sulfuric acid-water and methanesulfonic acid-water solution particles : implications for the atmospheric chemistry of organosulfur species, Atmos Environ., 22(2), 283.

Lee, M H and S.J. Lee (1988) Longrange transport of air pollution focussing on acid rain and yellow sand phenomena. The 1st Korea-Japan Environmental science and Technology Symposium, pp 13.

Lee H.S., A.W. Richard and P A. Scheff(1993) Measurement and evaluation of acid air pollutants in Chicago using an annular denuder system. Atmos Environ , 27A(4), 543.

Parungo, F C Nagamoto and R. Madel(1987) Study of the mechanisms of acid rain formation, J. Atmos. Sci., 44(21), 3162.

Pratt, G.C. and S V. Krupa (1984) Aerosol chemistry in Minnesota and Wisconsin and its relation to rainfall chemistry, Atmos Environ , 19(6), 961.

Zhao, D, J Xiong, Y Xu and W H Chan (1988) Acid rain southwestern china, Atmos Environ , 22(2), 349.