

## 전주, 군산, 남원지역 강수의 Sr, Pb 동위원소 지화학

전서령 · 정재일

전북대학교 지구환경과학과

### The Sr and Pb Isotopic and Geochemical Properties of the Atmospheric Bulk Deposition of Jeonju, Gunsan, and Namweon Areas

Jeon Seo-Ryeong and Chung Jae-il

Department of Earth and Environmental Sciences, Chonbuk National University, Jeonju 561-781, Korea

The Sr and Pb isotopic ratios and chemical composition were measured for atmospheric bulk deposition samples collected in the Jeonju, Gunsan and Namweon areas over a period of one year. Acidity of deposition ranged pH 4~7 with little higher in dry season, and around pH 5.0 in rainy season. The EC and TDS of rainy season was low showing dilution effect, and increased during dry season. Sulfate (SO<sub>4</sub>) and NO<sub>3</sub> are atmospheric aerosols largely of anthropogenic origin in winter. Sodium was concentrated in winter deposition, Ca was concentrated in spring to summer deposition. Namweon has lower EC and TDS than those of other, and Jeonju has higher. Namweon was concentrated in HCO<sub>3</sub> and Gunsan was concentrated in Cl. Aluminium, Cu, and Zn show good correlation index with TDS, indicating of their origin atmospheric. <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr ratios of bulk deposition ranged from 0.7109 to 0.7128. The isotopic variations are correlated with mixing of isotopic compositions of local soils, road deposit and biogenic aerosol. In order to constrain further the origin of aerosols in rainwater, it will be necessary to collect additional Sr isotopic data for aerosols. Lead isotope ratios for all areas were similar and belonged to Pb isotope ratios of Seoul's aerosols, but little different with Beijing's aerosols. It showing that Pb in the Korea mainly derived from the gasoline combustion, not exclusively from the Beijing.

**Key words :** bulk deposition, aerosols, anthropogenic, Sr isotope, Pb isotope

전북의 전주, 군산, 남원지역에서 주기적으로 채수된 강수(bulk deposition)를 지화학적으로 고찰하고 Sr과 Pb 동위원소의 환경추적인자로서의 적용 여부를 알아보고자 하였다. 강수는 pH 4~7의 약산성내지 산성을 띠며, 건기에는 높고, 우기에는 자연산성도 수준인 5.0수준을 유지한다. 강수에 의한 희석작용으로, 우기이후의 강수는 TDS 및 EC도 낮아지나 다시 건기에 들어서면서 상승한다. 겨울철에는 난방연료의 연소에 의해 SO<sub>4</sub>과 NO<sub>3</sub>이 높은 함량을 보이며, 여름철은 CO<sub>2</sub>가스의 영향으로 탄산농도가 약간 높은 경향을 보인다. 양이온은 겨울철에 Na의 함량이 높고, 봄부터 여름철에는 Ca의 함량이 높게 나타난다. 지리산에 인접한 남원이 전반적으로 낮은 EC 및 TDS값을 가지고 인구밀집과 도시화가 심한 전주지역은 대체로 높다. 남원지방은 다량의 수목의 호흡작용에 의한 대기중 이산화탄소의 함량이 높아 여름철 탄산 농도가 타 지역에 비해 높다. 군산지역은 해염의 영향으로 대기중 Cl의 함량이 높다. Al, Cu, Zn은 TDS와 상관계수 0.5이상의 양호한 상관관계를 보여 이들 원소가 미량원소 중 강수의 화학적 성상에 영향을 미치는 원소들 이라고 볼 수 있다. <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 값은 0.7109-0.7128으로 세 지역 모두 유사하며, 해수보다 다소 높은 값을 보이고 있어 주변의 토양입자, 꽃가루, 기타 인위기원의 에어로졸 등의 영향이 있음을 암시하나 지역 전반에 걸친 자세한 동위원소적 고찰이 있어야만 보다 정확한 해석이 가능할 것으로 생각된다. 강수의 Pb 동위원소 조성도 세 지역 모두 유사하며, 서울 에어로졸의 Pb 동위원소 조성 범위내에 포함되고 북경의 에어로졸 범위에서는 약간 벗어나 있다. 이는 한반도내의 대기 중에 함유되어 있는 Pb은 모두 유사한 기원으로 휘발유의 연소에서 발생하는 것으로 생각되며, 중국으로부터 기원한 Pb의 존재 가능성은 내포하고 있으나 그 기여율은 적을 것으로 보인다.

**주요어 :** 강하물, 에어로졸, 인위기원, Sr 동위원소, Pb 동위원소

## 1. 서 론

대기 중에 존재하는 에어로졸(aerosols)은 강수에 의해 씻겨 내려오면서 강수의 주된 화학성분을 결정 하는 근원물질이며, 이러한 에어로졸(dry deposition)이나 강수(wet deposition)는 인근 하천의 용융물질의 주된 근원이 되기도 한다(Gibbs, 1970; Stallard and Edmond, 1981; Sarin *et al.*, 1989; Negrel *et al.*, 1993; Negrel and Roy, 1998). 강수에 용융된 물질은 크게 3가지 성분으로 (1)해염(sea salt aerosols), (2)유역의 토양에서 발생한 분진(soil dust)이나 식물의 꽃가루 등 생물기원 물질(biological emissions), (3)산업이나 농업활동, 화석 연료의 연소 등으로 발생한 인위기원(anthropogenic source)의 물질이 있다. 토양에서 발생하는 분진과 같은 경우는 인근에서 발생한 것이나 원거리로부터 이동되어 온 경우(황사)도 있다. 인위적인 발생 물질도 근거리나 원거리로부터 이동되어 오는 경우가 있으며 그 근원을 밝히는 것은 매우 어려운 일이다. 그러나, Sr이나 Pb 동위원소를 이용함으로써 이들 에어로졸의 근원을 밝히는 데 중요한 단서가 되고 있다. 다른 기원의 에어로졸 속에 함유되어 있는 Sr은 서로 다른  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  비를 가지기 때문에 에어로졸의 기원을 밝히는 데 기여한다(Dash, 1969; Wickman and Åberg, 1987).

대기 중의 납의 기원은 석탄이나 유연회발유의 연소에서 발생하고 있다. Mukai 등(1994)은 아시아 지역의 대기 에어로졸의 납 동위원소 조성이 일본의 경우 풍향에 의해 변하는 것으로 보고한 바 있다. 납은 유기

물 및 토양광물(철산화물, 점토광물 등)에 강하게 흡착되며 토양층에 축적되어 있는 인위기원의 납이 대기로 재분산되고 있는 예도 있다(Chiaradia *et al.*, 1997). 또한 토양으로부터 식물에 흡수되어 먹이사슬에 의해 동물의 체내에 축적되기도 한다. 인체에 함유된 납 등에 관해서도 납동위원소를 환경 추적자로 이용한 연구가 보고 되어 있다(Gulson *et al.*, 1996).

본 연구는 전북지역의 전주, 군산, 남원지역에 내린 강수를 대상으로 주기적으로 채수된 강수(bulk deposition)의 물리, 화학적 특성을 조사하여 계절변화에 따른 각 지역 대기환경 변화의 차이를 지구화학적 으로 고찰하고 Sr과 Pb 동위원소의 환경추적인자로서의 적용 여부를 알아보고자 하였다. 이를 토대로 향후 대기환경 연구에 있어 기초자료로 활용되어질 수 있기를 기대한다.

## 2. 연구방법

### 2.1. 연구지역의 특성

연구지역은 전라북도 내의 지형 및 기후 특성을 고려하여 전주시와 군산시, 남원시로 선정하였다(Fig. 1). 전주시는 전라도의 행정, 교통, 산업의 중심지로서 기후는 월별 강수량 차는 적고, 습도는 대체로 낮다. 연평균 기온은 12.9°C로서 인근지역 보다 높은 편이며, 연평균 강수량은 1296 mm로서 인근지역 보다 적은 편이다. 군산시는 전북서해안지방의 북단에 위치하고 대부분 충적평야와 구릉지로 되어 있으며 서해에는 고군

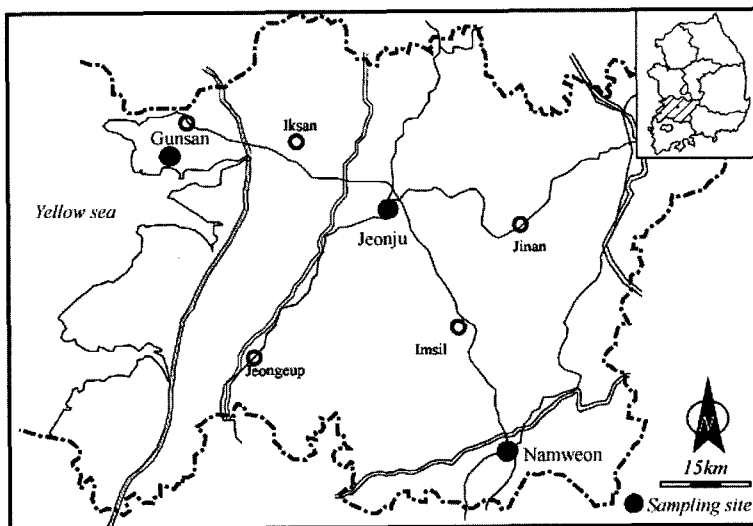


Fig. 1. Location map of sampling sites on the Jeonbuk area.

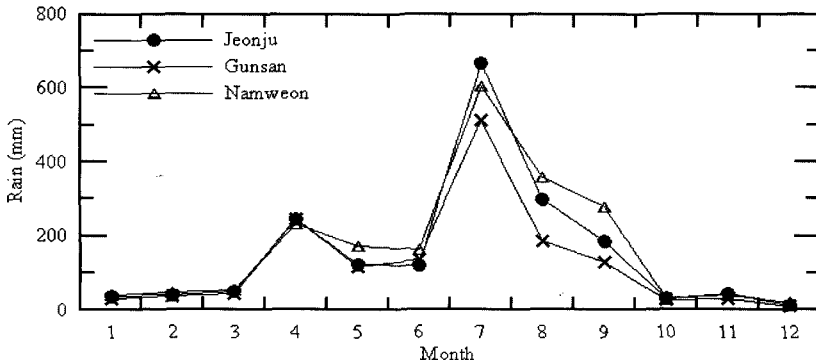


Fig. 2. The record of precipitation from Korea Meteorological Administration (in 2003).

산군도가 자리한다. 강수량이 비교적 적고, 습도는 높으며, 바람이 강하다. 연평균강수량은 1190 mm, 연평균기온은 12.5°C, 해안지역이라 안개가 자주 발생하고 해양성 기후특성을 보인다. 남원시는 전북지방 최고 고원지대를 형성하며, 주변에 지리산이 위치하고 분지형 기후를 나타낸다. 월별 강수량차가 적고 산악의 영향을 받아 기온의 연교차가 크다. 남원지방의 평균강수량은 1340 mm이며 연평균기온은 12.2°C이다.

2003년도 기상청이 보고한 각 지역별 강수량 변화를 살펴보면, 1~3월, 10~12월은 강수량이 저조하고 장마철인 7월의 강수량이 현저하며, 지역적으로는 전주, 남원, 군산의 순으로 많은 강수량을 보인다(Fig. 2). 장마가 시작되는 6월보다 8월, 9월의 강수량이 높게 나타나는 것은 장마가 8월로 이어져 강수횟수가 늘어났으며, 이 시기에 집중된 태풍의 영향도 있다.

**2.2. 시료의 채취 및 분석방법**

강수 채수장치는 주변으로부터 인위적 오염물질의 유입을 최대한 막을 수 있는 장소를 선정하여 빗방울이 건물의 외벽 또는 수목 등에 접촉하여 유입되지 않도록 직접 낙하되는 강수만을 채수하기 위해 건물의 옥상 등에 지면으로부터 1.5 m 이상 높이의 수동 채수장치를 제작하여 설치하였으며, 각 지역에서 2003년 1월부터 12월까지 15일 간격으로 한 달에 두 번 강수를 채수하였다. 1월과 2월, 12월에는 강설의 기록도 있었으며, 채수방법의 특성상 각 날짜에 채수된 강수는 그 시기의 강우뿐만 아니라 정해진 채수기간 동안에 강하된 대기 중의 건성 및 습성 강하물(bulk deposition)의 이온 특성이 될 것으로 기대한다.

채수한 강수는 현장에서 pH, EC(Electronic Conductivity), TDS(Total Dissolved Solid)를 측정 한 후, 플라스틱병에 보관하여 실험실로 운반하였다. 운반된

시료는 실험실에서 0.45 μm의 박막여과지를 이용하여 여과하고 양이온 및 미량원소 분석을 위한 시료는 농질산을 가하여 pH 2이하로 산성화시키고, 음이온 분석용은 여과만 하여 분석 전까지 냉장보관 하였다. 동위원소용 시료는 충분한 시료의 확보를 위하여 월 2회 채수한 시료를 합하여 월 1회로 제한하였으며, 200 ml 이상을 여과한 후 농질산을 가하여 산성화시켜 플라스틱병에 담아 분석전까지 실온 보관하였다.

탄산농도(HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) 측정은 묽은 황산과 Methyl Red-Bromocresol Green 혼합용액을 사용한 적정법을 이용하여 분석하였으며, 음이온(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup>, F<sup>-</sup>) 분석은 전북대학교 공동실험실습관에 설치된 IC(DX 500)를 이용하여 분석하였고, 양이온 및 미량원소 분석은 전북대학교 공동실험실습관에 설치된 ICP-MS(PE SCIEX Elan 6000)를 이용하였다. 분석 대상 원소는 Na, Mg, K, Ca, Rb, Sr, Ba, Al, Fe, Mn, Cu, Zn, Ni, Co, Li, Cd, Cs, Cr, Ga, As, V, Pb 등 주원소 및 미량원소, 중금속 원소 등을 분석하였다. IC 및 ICP-MS 분석에는 표준시료를 이용하여 표준용액을 제작하였으며, 분석기기의 검량선 보정은 표준용액을 이용하여 중복 체크하여 r<sup>2</sup>값이 0.9 이상인 상태를 유지하도록 하여 미지시료에 대해 ±5%이내의 오차를 얻었다.

Sr과 Pb 동위원소분석은 한국기초과학지원연구원 동위원소 분석실의 질량분석기(VG 54-30, VG Isotech, UK)를 이용한 동위원소 분석을 의뢰하였다. Sr은 양이온 교환 칼럼을 이용하여 농축된 Sr을 추출하였으며, Pb은 음이온 교환칼럼을 이용하였다. Sr은 국제적 표준시료인 NBS987을 이용하여 보정하였으며, NBS987에 대한 평균 분석값은 <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr=0.710217±0.000009(N=16, 2σ)이었다. Pb 동위원소는 NBS981을 표준시료로 하여 반복 분석하여 ±0.1%이내의 오차를 얻었다.

### 3. 연구결과 및 토의

#### 3.1. 강수의 물리, 화학적 특성

각 지역에서 채수된 강수의 분석 결과를 Table 1~3에 나타내었다. 2003년 1월 30일의 강수에 대한 분석결과는 채수장치의 동결로 인하여 전 지역에서 결

**Table 1.** Physical and chemical properties of bulk deposition samples from Jeonju.

Date	pH	EC ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	(mg/l)								
			TDS	HCO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>	Cl	NO <sub>3</sub>	Ca	Mg	Na	K
15 Jan.	4.06	134.0	54.6	N.D.	5.64	12.20	4.75	1.19	0.86	5.55	0.73
15 Feb.	5.72	37.0	13.3	2.78	5.02	2.31	2.99	0.94	0.15	1.46	0.18
28 Feb.	4.86	34.0	15.1	2.78	5.23	1.14	3.88	0.78	0.11	0.75	0.16
15 Mar.	6.33	29.1	12.9	2.78	3.36	0.89	3.94	1.04	0.11	0.86	0.15
30 Mar.	5.46	57.4	29.0	1.85	10.46	1.65	8.12	1.53	0.18	1.08	0.45
15 Apr.	6.47	16.7	8.5	2.78	1.84	0.66	2.16	0.49	0.08	0.45	0.15
30 Apr.	5.61	10.3	5.5	0.93	1.35	0.22	1.10	N.D.	0.04	0.31	0.06
15 May	5.13	16.2	8.1	0.93	1.66	0.31	1.41	N.D.	0.04	0.24	0.20
30 May	5.44	9.0	4.8	2.78	0.89	0.38	1.01	N.D.	0.05	0.31	0.10
15 Jun.	6.07	10.7	5.8	1.85	1.35	0.34	1.58	N.D.	0.04	0.27	0.05
30 Jun.	5.47	10.3	5.6	1.85	1.30	0.33	1.13	N.D.	0.04	0.32	0.11
15 Jul.	5.28	6.8	3.8	1.85	0.69	0.08	0.49	N.D.	0.02	0.18	N.D.
30 Jul.	5.55	6.4	3.9	1.85	0.87	0.20	0.55	N.D.	0.03	0.27	0.03
15 Aug.	5.12	13.2	6.9	1.85	2.66	0.83	1.57	0.31	0.07	0.40	0.34
30 Aug.	5.09	10.6	5.4	1.85	1.97	0.84	1.37	0.26	0.07	0.46	0.32
15 Sep.	4.92	13.1	6.5	0.93	2.22	0.83	1.29	0.20	0.07	0.42	0.30
30 Sep.	5.37	4.6	2.3	1.85	1.28	0.84	0.58	0.26	0.08	0.44	0.39
15 Oct.	5.04	20.8	9.3	1.85	3.49	1.31	2.34	0.84	0.12	0.74	0.38
30 Oct.	5.01	49.4	23.0	0.93	8.43	3.17	5.44	1.57	0.25	1.55	0.74
15 Nov.	5.17	49.3	15.5	0.44	5.41	3.02	4.39	0.76	0.20	2.00	0.63
30 Nov.	5.04	70.1	20.8	0.44	8.45	5.96	4.43	1.77	0.33	3.24	0.73
15 Dec.	4.84	83.0	27.9	0.44	10.69	4.10	7.24	1.50	0.30	2.57	1.01
Date	(μg/l)										
	Rb	Sr	Ba	Al	Fe	Mn	Cu	Zn	Pb	Co	
15 Jan.	1.1	1.7	2.4	321	269	25	4.3	163	6.6	1.1	
15 Feb.	1.5	1.9	2.0	126	N.D.	23	2.1	535	2.2	1.5	
28 Feb.	1.5	1.8	2.1	72	N.D.	25	2.1	495	2.5	1.5	
15 Mar.	1.5	2.0	1.8	26	N.D.	25	2.0	169	2.0	1.5	
30 Mar.	1.6	2.2	2.5	69	N.D.	32	2.3	779	2.5	1.5	
15 Apr.	1.5	1.8	1.8	20	N.D.	22	2.0	277	2.0	1.5	
30 Apr.	1.5	1.6	1.6	27	N.D.	18	2.0	196	2.1	1.5	
15 May	1.5	1.6	1.7	34	N.D.	20	2.0	256	2.1	1.5	
30 May	1.5	1.7	1.9	96	N.D.	20	2.0	332	2.1	1.5	
15 Jun.	1.5	1.7	1.7	21	N.D.	20	1.9	296	2.0	1.5	
30 Jun.	1.5	1.6	1.7	24	N.D.	17	2.1	216	2.1	1.5	
15 Jul.	1.5	1.6	1.5	19	N.D.	16	1.9	96	2.0	1.5	
30 Jul.	1.5	1.6	1.5	23	N.D.	17	2.0	115	2.1	1.5	
15 Aug.	1.7	2.0	2.0	16	63	3	1.3	207	4.8	1.6	
30 Aug.	1.7	1.9	2.3	14	84	2	0.9	142	4.1	1.5	
15 Sep.	1.6	1.8	1.3	16	60	2	1.1	197	3.4	1.6	
30 Sep.	1.6	1.8	0.9	5	85	3	0.9	202	0.6	1.6	
15 Oct.	1.9	3.6	7.9	22	53	9	2.5	613	3.3	1.6	
30 Oct.	2.6	6.5	18.1	132	98	52	6.3	1813	13.1	1.8	
15 Nov.	1.8	4.0	11.8	95	71	10	5.2	883	12.3	1.7	
30 Nov.	2.0	7.1	15.7	91	66	41	4.7	633	8.8	1.8	
15 Dec.	2.6	8.0	16.3	191	120	40	10.1	1484	79.8	1.8	

※N.D.; not detected

**Table 2.** Physical and chemical properties of bulk deposition samples from Gunsan.

Date	pH	EC ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	TDS	$\text{HCO}_3$	$\text{SO}_4$	Cl	$\text{NO}_3$	Ca	Mg	Na	K
15 Jan.	4.77	109.0	46.7	N.D.	8.94	19.47	5.55	1.24	1.49	11.12	0.90
15 Feb.	5.33	47.6	22.2	N.D.	5.05	5.99	3.00	1.10	0.69	4.52	0.52
28 Feb.	4.43	55.0	23.7	0.93	5.77	2.48	5.92	1.01	0.21	2.05	0.20
15 Mar.	5.36	23.9	10.7	0.93	2.80	2.16	2.17	1.01	0.18	2.02	0.15
30 Mar.	4.48	56.0	27.2	0.93	7.20	1.53	7.46	1.57	0.29	1.50	0.22
15 Apr.	5.21	19.8	10.6	0.93	2.50	0.80	1.76	0.89	0.12	0.93	0.11
30 Apr.	5.32	9.6	5.0	0.93	1.44	0.31	0.36	0.39	0.06	0.50	0.07
15 May	5.42	14.2	7.2	0.93	2.89	0.32	0.51	0.81	0.07	0.51	0.28
30 May	5.08	16.7	7.8	2.78	1.79	0.37	0.50	0.49	0.06	0.53	0.22
15 Jun.	5.85	17.8	9.9	1.85	3.36	0.52	1.37	1.13	0.07	0.56	0.25
30 Jun.	5.92	24.6	12.8	2.78	1.52	3.28	0.99	0.55	0.04	0.56	0.46
15 Jul.	5.29	7.4	3.9	1.85	0.99	0.09	0.53	0.32	0.03	0.46	0.17
30 Jul.	5.33	9.9	5.2	1.85	1.41	0.28	0.47	0.41	0.04	0.55	0.12
15 Aug.	5.21	12.9	6.6	1.85	2.81	0.87	1.48	0.58	0.05	0.44	0.25
30 Aug.	5.21	13.0	6.6	1.85	2.79	0.86	1.36	0.52	0.05	0.42	0.10
15 Sep.	4.79	16.4	8.6	0.05	2.67	0.88	1.58	0.30	0.04	0.41	0.03
30 Sep.	4.59	19.3	9.3	0.93	2.82	1.08	1.68	0.35	0.07	0.58	0.06
15 Oct.	4.84	18.6	8.6	0.93	2.57	1.56	1.79	0.45	0.09	0.89	0.12
30 Oct.	5.94	44.5	13.2	1.85	6.15	3.96	3.79	1.10	0.17	1.76	0.34
15 Nov.	5.08	34.4	10.4	0.93	3.99	3.05	2.80	0.59	0.24	0.16	0.08
30 Nov.	5.62	64.8	20.4	0.93	6.51	9.88	4.43	1.01	0.68	4.41	0.78
15 Dec.	4.65	119.7	45.2	0.93	14.06	12.07	9.98	1.27	0.84	5.10	0.95
Date	Rb	Sr	Ba	Al	Fe	Mn	Cu	Zn	Pb	Co	
	(mg/l)										
15 Jan.	1.1	2.0	2.3	134	192	27	4.2	1121	4.6	1.1	
15 Feb.	1.8	2.1	2.1	8	39	28	4.2	621	4.3	1.5	
28 Feb.	1.7	2.0	2.1	9	69	26	4.2	773	4.6	1.5	
15 Mar.	1.7	2.0	1.9	4	21	25	4.0	364	4.1	1.6	
30 Mar.	1.7	2.1	2.6	117	100	37	4.3	579	4.8	1.6	
15 Apr.	1.7	1.9	1.7	50	8	26	4.1	417	4.2	1.5	
30 Apr.	1.7	1.8	1.5	29	13	18	4.0	107	4.2	1.5	
15 May	1.7	1.8	1.6	33	15	23	4.0	246	4.2	1.5	
30 May	1.7	1.7	1.5	37	7	22	4.0	127	4.2	1.5	
15 Jun.	1.7	1.8	1.4	72	9	24	4.0	88	4.1	1.5	
30 Jun.	1.7	1.7	1.5	22	4	17	3.9	45	4.1	1.5	
15 Jul.	1.7	1.7	1.6	22	4	18	4.0	41	4.1	1.5	
30 Jul.	1.7	1.7	1.6	26	30	17	4.0	53	4.4	1.5	
15 Aug.	1.7	2.6	5.4	84	47	6	0.4	69	4.3	1.9	
30 Aug.	1.7	2.5	4.7	59	31	5	0.5	70	4.6	1.9	
15 Sep.	1.6	2.3	5.4	38	18	7	1.0	61	4.3	1.9	
30 Sep.	1.6	2.6	6.5	6	N.D.	8	1.3	92	3.4	1.9	
15 Oct.	1.9	3.1	4.9	6	2	46	2.0	100	2.2	2.0	
30 Oct.	2.6	6.3	5.8	21	N.D.	65	2.3	189	3.8	2.1	
15 Nov.	1.8	5.4	5.9	59	58	104	4.5	209	5.8	2.1	
30 Nov.	2.0	7.5	10.0	107	110	76	3.0	901	7.0	2.1	
15 Dec.	2.6	8.9	14.8	287	188	82	8.3	950	86.0	2.2	

\*N.D.; not detected

**Table 3.** Physical and chemical properties of bulk deposition samples from Namweon.

Date	pH	EC ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	TDS	$\text{HCO}_3^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	Cl	$\text{NO}_3^-$	Ca	Mg	Na	K										
												(mg/l)									
15 Jan.	4.65	45.3	14.7	N.D.	2.70	5.43	5.64	0.74	0.52	3.35	0.83										
15 Feb.	5.03	33.8	15.7	1.85	1.63	0.84	1.45	1.11	0.18	1.69	0.31										
28 Feb.	5.08	28.5	12.4	0.93	3.65	1.85	3.29	1.03	0.15	1.36	0.22										
15 Mar.	5.73	19.1	8.6	0.93	2.54	0.87	3.10	0.93	0.10	1.01	0.26										
30 Mar.	4.89	35.9	18.0	0.93	6.26	0.79	3.92	1.36	0.14	0.95	0.38										
15 Apr.	5.46	9.54	4.8	N.D.	1.42	0.42	0.97	0.73	0.07	0.43	0.11										
30 Apr.	4.95	10.30	5.2	0.93	1.14	0.20	1.02	0.38	0.04	0.42	0.11										
15 May	5.63	8.82	4.6	2.78	1.58	0.19	0.48	0.59	0.06	0.43	0.30										
30 May	5.99	2.50	1.3	2.78	0.23	0.11	0.12	0.25	0.04	0.45	0.10										
15 Jun.	6.21	9.00	4.8	3.71	1.10	3.20	0.96	0.87	0.06	0.56	0.18										
30 Jun.	5.96	8.82	4.6	2.78	1.55	0.13	0.94	0.64	0.04	0.34	0.15										
15 Jul.	4.96	10.47	5.7	0.93	1.37	0.08	0.85	0.31	0.02	0.26	0.08										
30 Jul.	5.17	8.72	4.9	1.85	1.19	0.13	0.60	0.31	0.03	0.41	0.12										
15 Aug.	5.46	8.19	4.3	1.85	1.99	0.74	1.28	0.34	0.06	0.42	1.10										
30 Aug.	5.52	8.14	4.0	2.78	1.96	0.76	1.28	0.31	0.03	0.40	0.23										
15 Sep.	5.57	4.86	2.4	2.78	1.51	0.72	0.62	0.24	0.04	0.41	0.24										
30 Sep.	5.98	3.23	1.4	2.78	1.16	0.70	0.56	0.22	0.04	0.41	0.44										
15 Oct.	5.92	7.46	3.5	1.85	1.95	0.89	0.58	0.49	0.08	0.52	0.43										
15 Nov.	5.46	30.70	8.5	0.93	4.71	2.03	1.55	0.73	0.13	1.25	0.50										
30 Nov.	5.31	34.80	11.5	0.93	8.32	2.67	2.33	0.59	0.14	1.41	0.43										
15 Dec.	5.23	38.90	13.9	0.93	5.46	3.17	2.97	0.59	0.17	1.75	0.61										
Date	Rb	Sr	Ba	Al	Fe	Mn	Cu	Zn	Pb	Co											
												(μg/l)									
15 Jan.	1.0	1.4	1.7	71	77	17	3.9	42	4.2	1.1											
15 Feb.	1.5	1.8	2.4	65	38	23	4.1	258	4.6	1.4											
28 Feb.	1.4	1.7	2.2	54	41	2	4.0	218	4.5	1.4											
15 Mar.	1.4	1.8	2.2	37	36	22	4.0	173	4.3	1.4											
30 Mar.	1.5	2.0	2.6	62	71	27	4.2	193	4.9	1.4											
15 Apr.	1.4	1.6	2.2	28	21	18	4.1	52	4.5	1.4											
30 Apr.	1.4	1.5	1.8	31	15	16	4.0	31	4.3	1.4											
15 May	1.4	1.6	1.8	25	14	20	4.1	26	4.3	1.4											
30 May	1.4	1.5	1.5	21	19	15	3.9	19	4.2	1.4											
15 Jun.	1.4	1.6	2.0	23	15	18	4.0	32	4.2	1.4											
30 Jun.	1.4	1.5	2.1	21	5	15	3.9	59	4.2	1.3											
15 Jul.	1.4	1.5	1.8	23	14	14	3.9	67	4.5	1.3											
30 Jul.	1.4	1.5	1.7	25	20	15	3.9	49	4.4	1.4											
15 Aug.	1.8	2.2	6.7	N.D.	270	8	0.2	74	1.5	1.9											
30 Aug.	1.9	2.2	6.4	N.D.	34	8	0.3	73	1.5	1.9											
15 Sep.	1.8	2.0	9.1	N.D.	46	7	0.2	33	1.5	1.9											
30 Sep.	1.8	2.3	2.3	N.D.	93	7	0.4	37	1.5	1.9											
15 Oct.	1.9	3.8	5.8	N.D.	83	11	2.3	113	1.5	1.9											
15 Nov.	2.3	5.9	22.4	89	95	39	2.3	235	1.5	2.0											
30 Nov.	2.4	5.5	16.2	111	534	33	5.2	329	5.1	2.0											
15 Dec.	2.5	5.4	15.6	129	460	28	5.6	830	1.6	2.4											

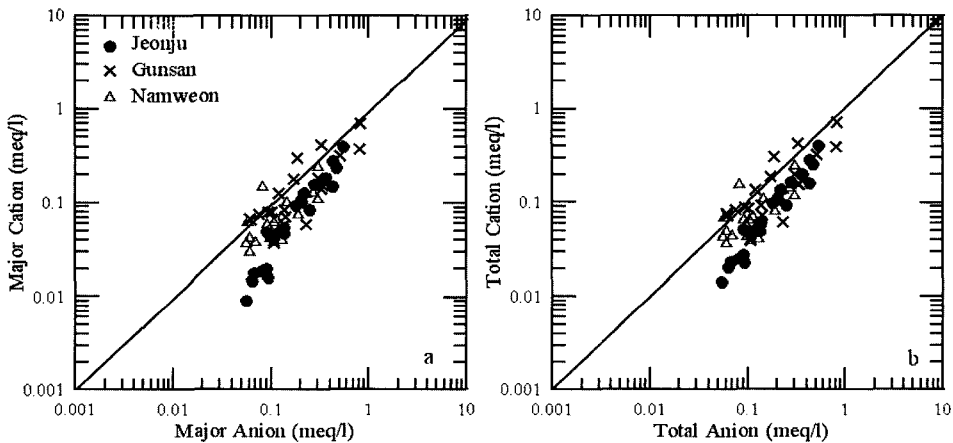
N.D.; not detected

여되었으며, 지역에 따라 강수량이 적은 시기에는 충분한 양이 채수되지 못해 분석되지 못한 곳도 있다. ICP 분석에서 다양한 원소를 분석하였으나 검출한계

이하로 존재하거나 검량선이 불량한 원소(Ni, Li, Cd, Cs, Cr, Ga, As, V)들에 대해서는 기재하지 않았다. Table 4에는 각 지역 강수 데이터를 이용하여 통계분

**Table 4.** Correlation index table for bulk deposition.

	pH	EC	TDS	AlK.	Cl	NO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>	Na	Mg	K	Ca	Rb	Sr	Ba	Al	Fe	Mn	Cu	Zn	Pb	Co	
pH	1.00																					
EC	-0.50	1.00																				
TDS	-0.52	0.98	1.00																			
AlK.	0.64	-0.50	-0.47	1.00																		
Cl	-0.34	0.86	0.83	-0.43	1.00																	
NO <sub>3</sub>	-0.42	0.84	0.83	-0.41	0.61	1.00																
SO <sub>4</sub>	-0.38	0.84	0.81	-0.41	0.64	0.90	1.00															
Na	-0.37	0.84	0.83	-0.49	0.96	0.60	0.62	1.00														
Mg	-0.40	0.85	0.85	-0.49	0.97	0.63	0.63	0.98	1.00													
K	-0.25	0.68	0.61	-0.34	0.67	0.59	0.65	0.65	0.64	1.00												
Ca	-0.25	0.71	0.71	-0.32	0.50	0.76	0.77	0.54	0.53	0.53	1.00											
Rb	-0.09	0.31	0.21	-0.15	0.21	0.38	0.58	0.11	0.12	0.41	0.28	1.00										
Sr	-0.14	0.53	0.39	-0.30	0.42	0.53	0.72	0.32	0.33	0.58	0.45	0.88	1.00									
Ba	-0.16	0.39	0.26	-0.28	0.27	0.37	0.59	0.21	0.19	0.55	0.34	0.75	0.86	1.00								
Al	-0.49	0.89	0.86	-0.42	0.69	0.71	0.75	0.65	0.68	0.57	0.58	0.35	0.50	0.43	1.00							
Fe	-0.35	0.34	0.39	-0.26	0.18	0.45	0.40	0.24	0.25	0.17	0.32	0.12	0.08	0.11	0.38	1.00						
Mn	-0.17	0.24	0.31	-0.22	0.24	0.20	0.19	0.33	0.33	0.01	0.36	0.03	-0.06	-0.17	0.16	0.55	1.00					
Cu	-0.27	0.56	0.52	-0.39	0.38	0.51	0.56	0.40	0.39	0.40	0.58	0.31	0.48	0.36	0.60	0.23	0.34	1.00				
Zn	-0.29	0.65	0.63	-0.35	0.51	0.72	0.78	0.54	0.52	0.58	0.61	0.47	0.62	0.55	0.60	0.32	0.21	0.56	1.00			
Pb	-0.26	0.55	0.47	-0.24	0.37	0.57	0.64	0.32	0.33	0.52	0.35	0.64	0.67	0.54	0.63	0.10	0.00	0.68	0.54	1.00		
Co	0.04	0.05	-0.05	-0.02	0.02	0.12	0.32	-0.10	-0.08	0.21	0.00	0.85	0.71	0.66	0.07	0.05	-0.13	-0.11	0.19	0.32	1.00	



**Fig. 3.** Ion balance between cations and anions in bulk deposition samples.

석을 통한 상관관계지수를 만들어 나타냈다.

주요 이온의 이온발란스는 Fig. 3a에서 보는 바와 같이 1:1의 선상에서 음이온 쪽으로 치우친 것을 볼 수 있다. 실제 이온발란스는 -56~31% 까지 폭넓은 변화를 보이며 평균 -29%로 전체적으로 음이온의 함량이 훨씬 많다. 이는 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>나 다른 양이온이나 미량 원소의 존재에 따른 것으로 생각된다. 여기에 미량으로 존재하는 중금속원소 등을 첨가하여 재계산하면 전체적으로 이온발란스 값이 평균 -24%로 약간 상승한다(Fig. 3b).

그러나 여전히 음이온의 함량이 높은 것은 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>를 고려해 놓지 않은 탓으로 생각된다. Jaffrezo (1987)과 Colin (1988)의 논문에서 의하면 프랑스 내륙에서 채취한 강수의 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>함량이 전체 양이온의 40%이상을 차지한 것으로 보고 되어 있으며, Negrel and Roy (1988)는 강수 중 양이온 함량이 적게 나타나는 것은 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>이외에 또 다른 원인으로 아세테이트와 포름산염(formate), 부식산(humic acid) 등의 유기물질과 H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>에 의한 것으로 보고한 바 있다.

강수는 전체적으로 pH 4~7의 약산성내지 중성을

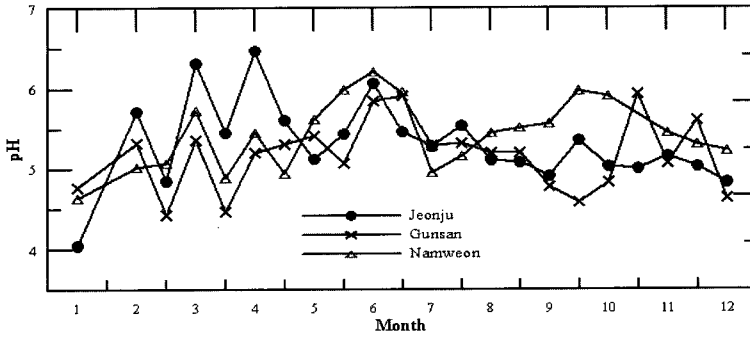


Fig. 4. The variation of pH for bulk depositions collected from the study area during 2003.

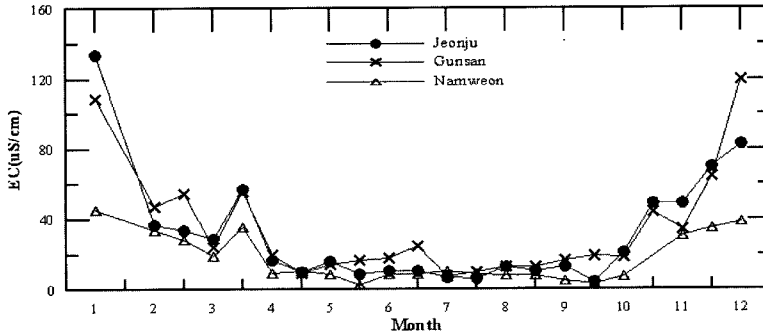


Fig. 5. The variation of EC for bulk depositions from each area during 2003.

보이며, 이 시기의 환경청에서 보고한 강수의 pH 4.1~6.8에 유사한 값을 보여 주기적 채수로 인한 산도의 변화는 크지 않은 것으로 생각된다. 계절 변화에 따른 강수의 pH 변화는 각 지역이 유사하며, 전주를 제외한 두 지역은 6월에 최고 값을 보이고 장마가 시작되면서 낮아져 12월과 1월에 최저 값을 보여준다 (Fig. 4). 강수량이 많았던 7, 8월에 채수된 강수의 경우 자연산성도인 pH 5를 보이고 있다. 이는 강수에 의한 희석작용이라고 생각되며, 장마철인 7, 8월에 많은 양의 강수가 내리면서 대기 중에 존재하던 분진 등이 씻겨 내려 8월 이후의 강수에서는 TDS의 함량도 낮아지며 건기로 접어든 10월 이후에 다시 상승한다. 또한 전주지방은 타 지역에 비해 겨울철에 낮은 pH를 보여 도시화와 인구집중 등으로 인한 대기오염이 타 지역에 비해 심한 것으로 생각된다.

오진만과 김득수(2001), 이민희 등(1989)의 보고에 의하면 황사가 발생하는 봄철에 황사에 포함되어 있는 지각성분에 의한 완충작용에 의하여 다른 계절보다 pH가 높게 나타나는 것으로 보고하고 있으나 금번 연구 기간에는 황사 발생이 적었으며, 황사가 발생했던 3월

말의 경우 오히려 pH가 감소하고 있다. 기상청 기록상으로 2003년에 황사는 3월 27일만이 기록되어 있어 황사 발생시 강수의 화학적 특성에 대한 관찰은 불가능하였다.

계절에 따른 EC의 변화는 지역별로 유사하며, 강수량이 높은 7, 8월을 전후해서 낮아지고 10월 이후는 높아지며 1월에 가장 높은 값을 보인다(Fig. 5). 또한, 황사 발생기록이 있었던 3월 말경의 EC값이 각 지역에서 다소 높게 나타난다. 오진만과 김득수(2001), 나춘기와 정재일(1997)에 의한 군산지역과 전주지역의 부유 분진 및 강수를 통한 계절적 농도변화를 관찰한 결과에서는 황사현상과 꽃가루의 날림이 심한 봄철에 전체적인 이온함량이 높은 것으로 보고한 것과 유사하다.

지역적으로는 남원이 전반적으로 낮은 EC값을 가지며 전주지역은 대체로 높다. 이는 남원은 산간지역이며, 채수장치가 도심에서 떨어진 지역에 설치되어 있어 비교적 청정지역이며, 전주지역은 도심 한복판에 채수장치가 설치되어 있어 용존이온의 함량이 높은 것으로 생각된다.

각 지역별 TDS값은 EC와 유사하게 강우량이 많은



여름철에 낮고 겨울철에 높다(Table 1-3). 이는 강수에 의한 희석작용과 겨울철 난방기 사용이나 무강수 일수의 증가에 따른 국지 오염원의 농축현상에 의한 것으로도 해석할 수 있다(Saylor *et al.*, 1992; Camarero and Catalan, 1993; 나춘기와 정재일, 1997). 전체 지역에서 pH의 변화에 따른 이온함량의 변화를 TDS함량과 비교하면 TDS와 pH는 음의 상관관계(-0.52; Table 4)를 보이고 있어, 산성화된 강수에서 높은 TDS 함량을 보이는 것으로 볼 수 있다(Fig. 6).

전주지역 강수는 겨울철(1, 2, 11, 12월)에 높은 이온 함량을 보인다. 특히 황사 발생시기가 포함된 3월

하순의 강수는 Ca과 SO<sub>4</sub>의 함량이 높게 나타난다(Fig. 7). 황사에 포함되어 있는 것으로 알려진 탄산염 광물(CaCO<sub>3</sub>)이나 석회석(CaSO<sub>4</sub> · 2H<sub>2</sub>O)의 영향으로 Ca과 SO<sub>4</sub>의 함량이 높아지는 것으로 생각되나 HCO<sub>3</sub>의 농도는 오히려 저조한 것으로 보아 석회석성분의 영향으로 볼 수 있다(오진만과 김득수, 2001; 강공언 등, 1999a). 음이온의 경우 겨울철에는 SO<sub>4</sub>과 NO<sub>3</sub>이 높고, 여름철에는 HCO<sub>3</sub>이 다소 높은 것은 겨울철은 난방연료의 연소에 의해 SO<sub>4</sub>과 NO<sub>3</sub>이, 여름철은 CO<sub>2</sub>가스가 주요 대기오염원임을 알 수 있다. 그러나 이들 음이온의 함량이 높아도 양이온에 의한 중화작용으로 인해 강수의 산도가 낮아지는 것은 아닌 것으로 알려져 있다(강공언 등, 1999b). 양이온은 Na과 Ca이 대체적으로 높은 함량을 보인다. 겨울철에 Na이 높은 함량을 보이는 것은 시베리아 내륙지방에서 발생하는 시베리아 기단의 영향으로 우리나라는 북서계절풍을 맞으며 강한 바람을 형성하여 서해안으로부터 날아오는 다량의 해염을 뿌릴 가능성이 있으며, 2003년 1월의 경우에는 적설량(평균 15.3cm)이 많아 제설용 염화칼륨대신 염화나트륨이 다량 사용되어 이들이 분진형태로 대기 중으로 부유되어 강수 중에 용존 되었을 가능성도 있다.

군산지역도 겨울철에 이온 함량이 높으며, 강수량이 많았던 7, 8월에 최저를 보인다. 타 지역에 비해 겨울철에 Cl의 함량이 높은 것이 특징이며, 특히 1월에는

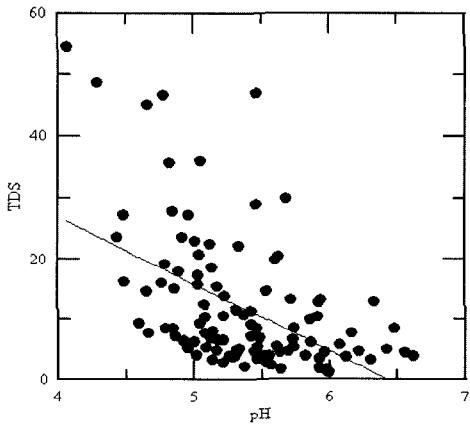


Fig. 6. Correlation between TDS and pH in bulk depositions.

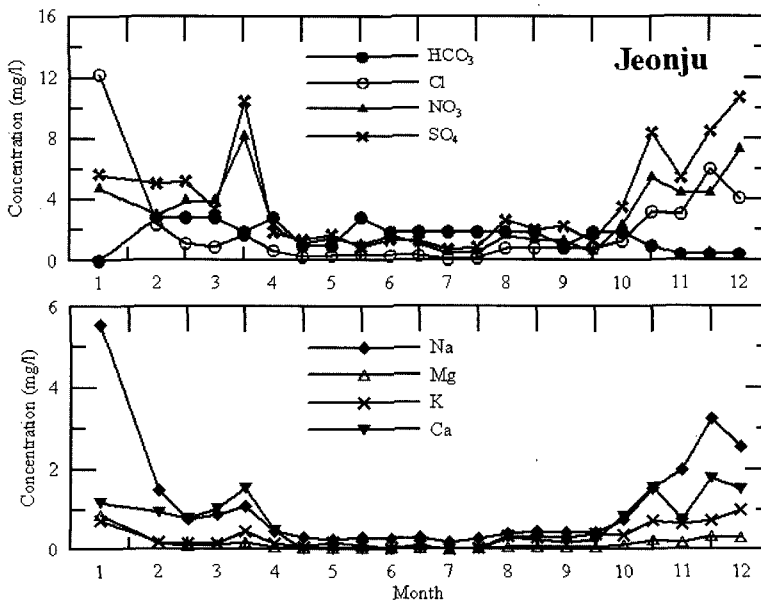


Fig. 7. The variation of major cations and anions for bulk depositions from the Jeonju during 2003.

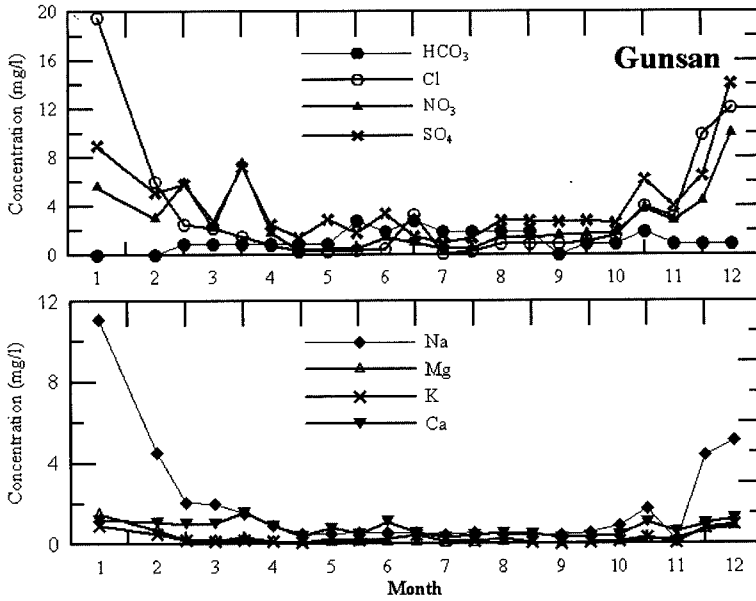


Fig. 8. The variation of major cations and anions for bulk depositions from the Gunsan during 2003.

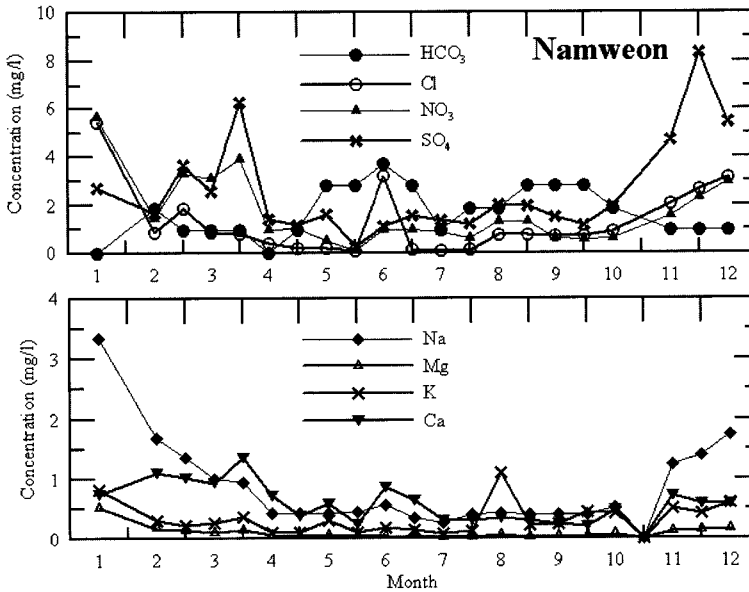


Fig. 9. The variation of major cations and anions for bulk depositions from the Namweon during 2003.

최고치를 기록하고 있다(Fig. 8). 이시기에는 양이온중 에도 Na의 함량이 높은 것은 해양성 기후의 영향으로 강수 중에 용존된 해염의 양이 많을 것으로 생각된다. 음이온 중 Cl 다음으로는 SO<sub>4</sub>과 NO<sub>3</sub> 순으로 높은 함량을 보이고 탄산농도는 저조하다. 양이온은 Na>Ca >K, Mg의 순으로 높게 나타나며, 이는 오진만과 김득

수(2001)의 군산지역 대기 부유 분진에서 조사된 양이 온의 원소함량이 Na>Ca>K>Mg 순으로 나타나는 것 과도 유사하다.

남원지방은 전주나 군산지역에 비해 SO<sub>4</sub>과 NO<sub>3</sub>의 함량이 비교적 낮다. 같은 겨울철에도 1월은 NO<sub>3</sub>과 Cl 의 농도가 높은 반면, 11, 12월에는 SO<sub>4</sub>의 농도가 상

대적으로 높게 나타나며, 4월부터 9월까지의 탄산 농도가 높게 나타난다(Fig. 9). 탄산의 농도가 높게 나타나는 것은 대기중의 이산화탄소의 농도가 비교적 높은 것을 의미하며 이는 지리산을 인접한 관계로 다량의 수목의 호흡작용에 의한 영향도 고려해 볼 수 있다. 양이온은 겨울철인 1, 2월과 11, 12월에는 Na의 함량이 높고, 봄부터 여름철에는 Ca의 함량이 높게 나타난다.

연구지역 강수의 화학성상에 미치는 해염의 영향을 파악하기 위하여 Fig. 10에 해염 기원의 가능성이 있는 Cl에 대한 Na, Mg, K, Ca의 강수 중의 함량을 그래프로 나타내 해염과 비교하였다. 그래프에서 점선은 해염(해수) 중의 Cl에 대한 각 원소의 함량관계를 나타낸 것이다. Na과 Mg은 각각 0.96과 0.97의 높은 비례관계를 보이며 점선에 인접하고 있어 대부분이 해염 기원임을 짐작할 수 있으며, K과 Ca는 비해염 기원에서 오는 양이 많음을 알 수 있다. 비해염 기원으로는 대기중의 분진으로 존재하는 토양입자이나 기타 인위적인 오염물질을 들 수 있다. Na-Cl의 그래프에서 Cl의 농도가 해염의 선상에서 벗어나 Cl 쪽으로 치우친 것은

해염이외의 기원이 되는 Cl의 존재를 암시한다.

Mg은 대부분 해염의 선상에 놓여있어 Mg의 대부분이 해염기원으로 생각되나, 토양분진 중에서 오는 Mg의 존재 가능성도 고려해 넣어야 할 것으로 생각된다. K와 Ca은 해염의 성분선을 크게 벗어나 있어 이들 원소는 비해염 기원 즉 지각구성물질 중에서 오는 양이 많음을 짐작할 수 있다. 내륙지방 강수 중 비해염 기원인 규산염광물이나 탄산염 성분 토양분진으로부터 오는 K의 함량은 일반적인 것으로 보고되어 있다(Berner-Kay and Berner, 1987). 또 다른 기원은 농업활동에서 사용하는 비료나 농약에서도 올 수 있다. 전주를 제외한 기타 지역은 주변에 농지가 다수 분포하고 있어 그로 인한 영향을 배제할 수 없으나 정확한 파악은 힘든 실정이다.

몇몇 연구에서는 강수 중의 Na과 Mg모두가 비해염 기원에 의해 영향을 받고 있음을 밝힌 바 있다(Ichikuni, 1978; Keene *et al.*, 1986; Suzuki and Tsunogai, 1988). 지형적 특성이나 계절의 차이에 따른 증발과 대기 중에 함유된 다양한 분진의 형태에 따라

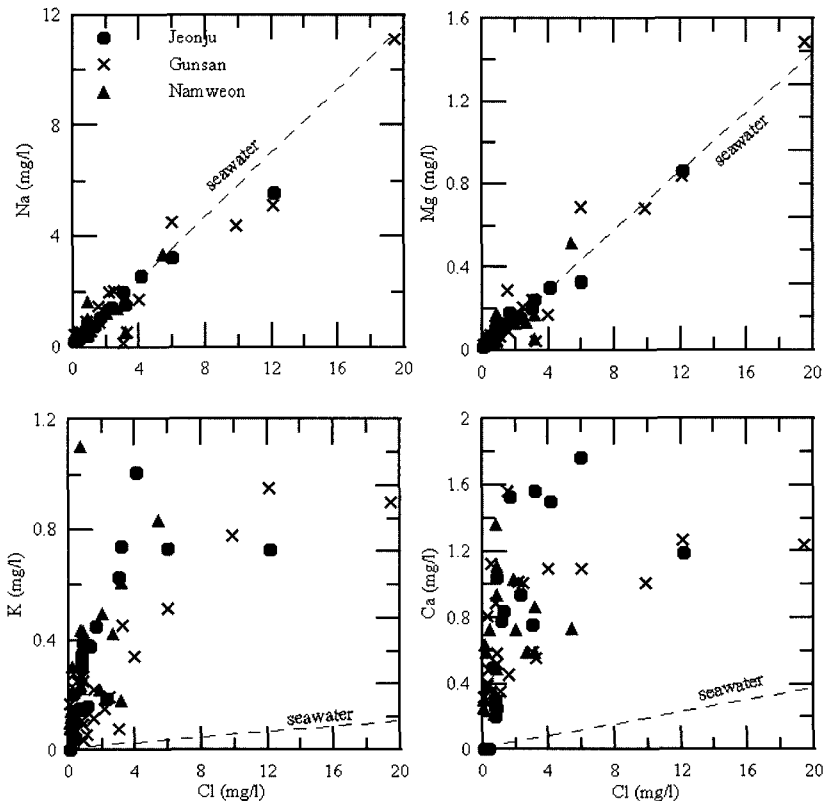


Fig. 10. Contribution of the major cations from rocks. Dashed line presents the seawater composition. Symbols are same as in Fig. 3.

차이가 있을 수 있으며, Na이나 Mg은 해염 기원에 대한 가장 좋은 추적자가 되는 것으로 알려져 있다 (Keene *et al.*, 1986). Fig. 11에서 Na과 Mg은 양호한 비례관계(0.96)를 보이며 대부분 해수의 성분선상에 놓여있다. 그러나 Mg이 해염을 지시하는 선상에서 다소 벗어나 있어 Mg의 일부가 비해염 기원에서 오고 있음을 암시한다.

강수에 존재하는 SO<sub>4</sub>을 해염과 그 함량비를 비교하면(Fig. 12), SO<sub>4</sub>의 대부분은 비해염에서 오고 있으며, 인위적 기원의 SO<sub>4</sub>은 화석연료의 연소에서 생성되는 것으로 알려져 있다. 강수 중 질소성분도 인위적 기원에서 오는 양이 많으며, 대기 중에서 화학반응을 일으켜 질산을 생성하게 된다. 즉, 강수 중 함유된 SO<sub>4</sub>과 NO<sub>3</sub>은 오염물질의 유입을 의미한다고 할 수 있다.

강수 중에 미량으로 존재하는 Al을 포함한 중금속

중에는 Al, Fe, Mn, Cu, Zn이 높은 함량을 보이며, 그 외의 원소는 미량이거나 검출한계이하로 함유되어 있다. Losino *et al.* (1991)은 일반적으로 Al, Zn과 같은 금속이온은 pH의 변화에 의해 컨트롤되는 것으로 보고한바 있다. 그러나 Spokes *et al.* (1994)은 도심의 강수 중 pH와 금속원소 사이의 관계는 매우 복잡 다양한 것으로 복합적인 인자에 의해 결정된다고 주장하고 있다.

본 연구에서 강수 중 미량원소와 pH는 Co를 제외하면 대부분 음의 상관관계를 보여주고 있어 산성화된 강수에 중금속 함량도 높아지는 것을 알 수 있다 (Table 3). 그러나 그 관계지수가 Al(-0.49), Fe(-0.35)를 제외하면 -0.3이상의 그다지 양호한 값을 보이지 않아 pH 이외의 또 다른 인자의 작용이 있을 것으로 생각된다. 또한 TDS와 Al, Cu, Zn은 상관계수 0.5이상의 양호한 상관관계를 보여 이들 원소가 미량원소들 중에 강수의 화학적 성상에 영향을 미치는 원소라고 볼 수 있다. 도심에서 지각구성물질이외의 이들 원소의 기원이 될 수 있는 것으로는 겨울철에도 발생하는 것으로 알려진 황사성분이나 자동차 배기가스 및 도로 주변에 쌓이는 먼지나 콘크리트물질, 아스팔트 입자 등의 인위적 기원의 오염물질을 들 수 있다.

강수 중 미량원소의 지역적 함량 차를 보면 전체적으로 전주지역이 높은 TDS와 높은 미량원소 함량을 보인다. 전주의 경우는 채수장치가 설치된 곳이 도심 지역으로 자동차 매연에서 발생하는 중금속의 영향도 배제할 수 없을 것으로 본다. 이러한 영향으로 전주지역에서 채수된 강수는 타 지역에 비해 유해 중금속의 함량이 특히 높을 것으로 기대하였으나, 그 차이는 크지 않았다.

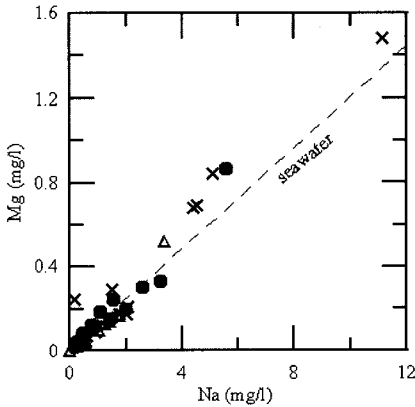


Fig. 11. The relationship between Na and Mg of bulk deposition samples. Dashed line presents the seawater composition. Symbols are same as in Fig. 3.

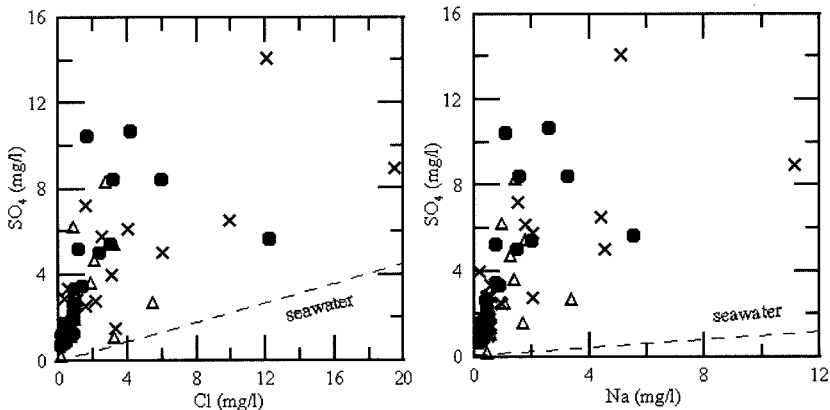


Fig. 12. The relationship between SO<sub>4</sub> vs. Mg and Na of bulk deposition samples. Dashed line presents the seawater composition. Symbols are same as in Fig. 3.

군산지역 내에는 군산항 주변에 형성된 군산자유무역지역 및 군장국가산업단지, 국가산업단지, 지방산업단지, 농공단지가 있어 그로 인한 영향인지 Pb의 함량이 타 지역에 비해 대체로 높게 나타난다. Pb이 As, Cd, Cu, Zn은 산업에 주로 이용되는 금속이며, 특히 Pb은 휘발유의 첨가제로 널리 이용되어 왔다. 이들 유해 중금속 물질은 대기 중을 떠다니다 발생원으로부터 멀리 떨어진 지역까지 이동되어 인간에게 피해를 입히는 대기오염물질로 작용하게 된다.

**3.2. 강수의 Sr, Pb 동위원소 특성**

강하물의 Sr 및 Pb 동위원소 분석결과를 Table 5에 나타내었다. 월 2회 채수한 강수의 양이 동위원소 분석에 충분치 못한 경우가 있어 월 2회 채수한 강수를 합하여 하나의 분석시료로 하였다. 강수량이 적었던 겨울철의 1월과 12월의 시료는 분석되지 못하였다.

해수의  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  값은 0.7091로 알려져 있으며 (Faure, 1986), 대부분의 문헌에서 강수 중의  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  값은 해수의 그것과 유사한 것으로 보고 되어 있다

(Dash, 1969; Wickman and Åberg, 1987; Graustein, 1989). 그러나 에어로졸의 수용성 성분의 첨가로 그 값은 지역에 따라 다소 차이를 보인다. 미국 뉴멕시코지방의 강수는  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  값이 1.7088(Graustein and Armstrong, 1983)과 0.7200(Gosz and Moore, 1989)이며, 스웨덴 중부지방의 대기 강하물은 0.711-0.717의 다양한 값을 보이며(Åberg *et al.*, 1989), 스칸디나비아의 눈은 0.7098-0.7194으로 보고 되어 있다(Anderson *et al.*, 1990). 중국의 사막에서 유래한 황사 중 수용성성분의 Sr 동위원소 조성은  $0.712\pm 0.001$ 으로, 이는 일본의 화산암이 가지는  $0.705\pm 0.001$ 에 비해 현저히 높아 봄철 일본 지방 강수의 Sr 동위원소 조성이 상승하는 것은 중국에서 기인한 황사성분이 원인인 것으로 보고 되어 있다(中野 등, 1998). Kanayama *et al.* (2002)도 황사가 발생할 시기의 일본의 규슈(九州)지방의 해안지역은 내륙에 비해서 높은  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  값을 보이며 이는 대기 중의 에어로졸에 함유된 황사의 영향인 것으로 보고한 바 있다. 황사의  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  값은 0.710보다 높은 것으로 알려졌으며(Gallet *et al.*, 1996; Liu *et al.*,

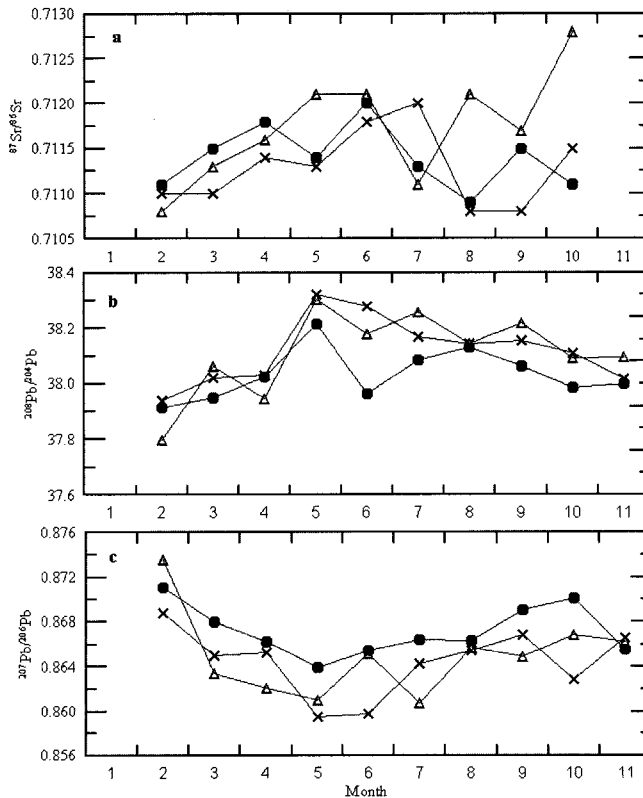


Fig. 13. The variation of pH for bulk depositions from each area during 2003y. Symbols are same as in Fig. 4.

1994), Svensson *et al.* (2000)의 그린랜드 얼음 시추 공(ice core)에서 측정된 아시아로부터의 기원 물질에 대한  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  값이 0.715-0.727로 보고 된 바 있다. 일본은 대부분이 백악기 이후로 비교적 젊은 암석으로 구성되어  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  값도 낮게 나타나나, 황사는 중국의 내륙에서 발생한 물질로 특히 중국의 지질특성이 일본과는 확연히 다른 특성을 가지고 있기 때문에 구별이 가능하다. 그러나 우리나라의 경우 중국과 유사하게 선캠브리아기부터 현재에 이르기까지 다양한 지질특성을 가지고 있어서 사실상 중국과의 차이를 Sr으로 구분하기는 어려운 실정이다.

각 지역별 Sr 동위원소 조성의 차이를 살펴보면 세 지역 모두 유사한 0.7109-0.7128의  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  값을 보인다(Fig. 13a). 해수의  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  값인 0.7091보다는 다소 높은 값을 보여 해수 이외의 다른 기원이 있음을 암시하나 그 기원에 대한 것을 알기 위해서는 에어로졸의 구성물질이 될 수 있는 지역별 토양구성물질, 주변의 인위적 기원의 에어로졸 등에 대한 자세한 동위원소적 고찰이 있어야만 보다 정확한 해석이 가능할 것으로 생각된다.

대기 중에 남은 인위기원의 것이 해염과 같은 자연적 기원으로부터 오는 것보다 훨씬 많이 함유되어 있다. Patterson과 그의 동료 연구자들은 환경에서 인위기원 납의 주된 근원은 납이 첨가된 휘발유의 연소에서 발생한다고 보고하였다(Murozummi *et al.*, 1969; Settle and Patterson, 1982; Settle *et al.*, 1982; Flegal and Patterson, 1983; Schaule and Patterson,

1983). Chiaradia *et al.* (1997)에 의하면 호주 시드니에서도 대기 중 납의 90% 이상이 휘발유에서 기인한다고 보고하고 있으며, Mukai *et al.* (1993)는 아시아의 대부분의 도시에서 여전히 에어로졸 중 납의 기원은 휘발유 성분이 우세함을 보고하였다. Gallon *et al.* (2005)은 캐나다 순상지 호수(Canadian shield lake)의 퇴적물에서 인위기원의 Pb는 석탄과 휘발유의 연소과정에서 기인한 것으로 분류하였으며, 석탄이 산업에 이용된 이래 인위기원의 납은 휘발유에만 국한된 것은 아니지만, 석탄 기원의 Pb는 30%를 넘지 못하였고, 1970년대에 휘발유 기원의 납은 최고에 달하였다고 보고하였다.

미국에서는 1970년대 납으로 인한 대기오염이 최고에 달하였으며 그 후 대기환경 개선을 위한 노력으로 휘발유에 첨가되던 납의 사용을 법적으로 제한하기도 하였다. 이 노력에 의해 실제 대기뿐만 아니라 곡류 속에 함유된 납의 함량도 줄일 수 있었다한다(Nriagu, 1979).

본 연구에서 얻어진 Pb 동위원소 조성은, 각 지역마다 유사한 값을 보여주고 있다. 계절적 변화를 Fig. 13b,c에서 살펴보면, 지역별로 유사한 변화를 보이며, 겨울과 여름은 다소 차이를 보인다. Fig. 14에서 각 지역의 강수의 납동위원소 조성을 살펴보면, Mukai *et al.* (1993)이 보고한 서울지역의 대기 에어로졸의 Pb 동위원소값 내에 모두 포함됨을 알 수 있다. 이는 Jeon (2000)의 논문에서 보고한 내용과도 유사한 것으로서, 한반도내의 대기 중에 함유되어 있는 Pb는 휘발유의 연소에서 발생하는 것으로 생각된다. 또한 중국 북경의

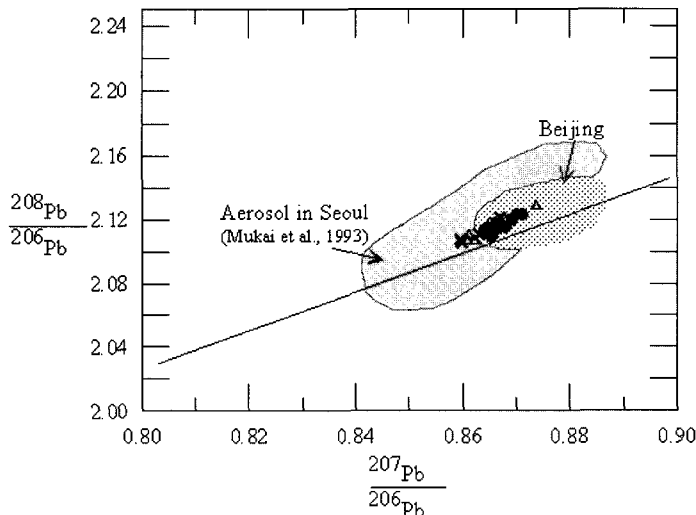


Fig. 14. Comparison of Pb isotopic ratios ( $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  and  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ) of bulk depositions. Shaded area indicates data of the Seoul and Beijing aerosols from Mukai *et al.* (1993). Symbols are same as the Fig. 3.

**Table 5.** Pb and Sr isotopic properties of bulk deposition samples of Jeonju, Gunsan, and Namweon areas.

Area	month	<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr	<sup>206</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb	<sup>207</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb	<sup>208</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	<sup>208</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb
Jeonju	Feb. '03	0.7111	17.859	15.557	37.916	0.8711	2.1231
	Mar.	0.7115	17.939	15.570	37.949	0.8680	2.1155
	Apr.	0.7118	17.967	15.563	38.023	0.8662	2.1162
	May	0.7114	18.082	15.620	38.216	0.8639	2.1135
	Jun.	0.7120	18.000	15.577	37.963	0.8654	2.1091
	Jul.	0.7113	18.015	15.607	38.085	0.8664	2.1143
	Aug.	0.7109	18.019	15.610	38.129	0.8663	2.1159
	Sep.	0.7115	17.951	15.601	38.063	0.8691	2.1203
	Oct.	0.7111	17.894	15.569	37.986	0.8701	2.1228
	Nov.		17.971	15.553	38.000	0.8655	2.1146
	Gunsan	Feb. '03	0.7110	17.899	15.551	37.940	0.8688
Mar.		0.7110	17.981	15.554	38.020	0.8650	2.1145
Apr.		0.7114	17.985	15.563	38.033	0.8653	2.1148
May		0.7113	18.183	15.628	38.322	0.8595	2.1074
Jun.		0.7118	18.178	15.630	38.280	0.8598	2.1058
Jul.		0.7120	18.069	15.617	38.170	0.8643	2.1126
Aug.		0.7108	18.037	15.610	38.145	0.8654	2.1149
Sep.		0.7108	17.984	15.590	38.156	0.8669	2.1216
Oct.		0.7115	18.057	15.582	38.111	0.8629	2.1106
Nov.			17.951	15.556	38.017	0.8666	2.1178
Namweon		Feb. '03	0.7108	17.754	15.510	37.799	0.8736
	Mar.	0.7113	18.022	15.559	38.063	0.8634	2.1120
	Apr.	0.7116	18.003	15.520	37.947	0.8621	2.1078
	May	0.7121	18.143	15.622	38.303	0.8610	2.1110
	Jun.	0.7121	18.051	15.618	38.179	0.8652	2.1149
	Jul.	0.7111	18.155	15.628	38.259	0.8608	2.1074
	Aug.	0.7121	18.030	15.609	38.146	0.8657	2.1157
	Sep.	0.7117	18.037	15.601	38.217	0.8649	2.1188
	Oct.	0.7128	17.965	15.574	38.093	0.8669	2.1204
	Nov.		17.985	15.579	38.095	0.8662	2.1181

대기 에어로졸의 Pb 동위원소 값이 서울의 대기 에어로졸 값에 유사하지만, 본 연구에서 얻어진 Pb 동위원소는 북경의 에어로졸 범위에서 다소 벗어나 있어, 중국으로부터 기원한 Pb의 존재 가능성은 내포하고 있으나 그 기여율은 적을 것으로 보인다.

보다 장기간에 걸친 강수의 Pb 동위원소적 연구와 각 지역별 지각구성물질들에 대한 보다 다각적인 동위원소적 고찰을 통해서만이 한반도 내에서 발생 가능한 Pb의 오염에 대한 정량적 추적이 가능할 것으로 기대된다.

#### 4. 결 론

전북의 주요도시인 전주, 군산, 남원의 3지역에 강수 채수장치를 설치하여 주기적으로 한달에 두 번씩 1년(2003년)간 강수를 채수하여 물리, 화학적 및 Sr과 Pb

동위원소 특성을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 강수는 pH 4~7의 약산성내지 산성을 띄며, 장마 전 6월에 최고 값을 보이고 장마가 시작되면서 낮아져 자연산성도 수준인 5.0수준을 유지하다 가을에 다소 상승하며, 12월과 1월은 겨울철 난방기 사용의 영향으로 최저 값을 보인다. 강수에 의한 희석작용으로, 장마철인 7, 8월에 많은 양의 강수가 내리면서 대기 중에 존재하던 부유 분진 등이 씻겨 내려 8월 이후의 강수에서는 TDS의 함량도 낮아지나 다시 전기에 들어서면서 상승한다.

2) 겨울철에는 난방연료의 연소에 의해 SO<sub>4</sub>과 NO<sub>3</sub>이 높은 함량을 보이며, 여름철은 CO<sub>2</sub>가스의 영향으로 탄산농도가 약간 높은 경향을 보인다. 양이온은 겨울철에 Na의 함량이 높고, 봄부터 여름철에는 Ca의 함량이 높게 나타난다.

3) 남원이 전반적으로 낮은 EC 및 TDS값을 가지고

전주지역은 대체로 높다. 군산지역 강수는 겨울철 서해안에서 불어오는 기단의 영향으로 대기중 해염의 함량이 높다. 남원지방은 지리산을 인접한 관계로 다량의 수목의 호흡작용에 의한 대기중 이산화탄소의 함량이 높아 여름철 탄산 농도가 타 지역에 비해 높다.

4) Al, Cu, Zn은 TDS와 상관계수 0.5이상의 양호한 상관관계를 보여 이들 원소는 미량원소들 중에 강수중의 화학적 성상에 영향을 미치는 원소들 이라고 볼 수 있다.

5)  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  값은 0.7109~0.7128으로 세 지역 모두 유사하다. 해수보다 다소 높은 값을 보이고 있어 해수 이외의 다른 기원이 있음을 암시하나 지역 전반에 걸친 자세한 동위원소적 고찰이 있어야만 보다 정확한 해석이 가능할 것으로 생각된다.

6) 강수의 Pb 동위원소 조성은 세 지역 모두 유사하며, 서울 에어로졸의 Pb 동위원소 조성 범위 내에 포함된다. 이는 한반도내의 대기 중에 함유되어 있는 Pb는 모두 유사한 기원으로 휘발유의 연소에서 발생하는 것으로 생각된다. 또한 중국 북경의 대기 에어로졸의 Pb 동위원소 값이 서울의 대기 에어로졸 값에 유사하지만, 본 연구에서 얻어진 Pb 동위원소는 북경의 에어로졸 범위에서 다소 벗어나 있어, 중국으로부터 기원한 Pb의 존재 가능성은 내포하고 있으나 그 기여율은 적을 것으로 보인다.

## 사 사

연구 수행을 위해 시료채취와 분석에 도움을 준 전북대학교 지구환경과학과 석사 김대현을 비롯한 2004년 지화학실 학부 졸업생 여러분들에게 감사드립니다. 또한, 분석에 도움을 주신 기초과학지원연구소 동위원소 분석실의 정연중 박사님과 전북대학교 공동실험실 습관 ICP 분석실의 한연수 선생님께서 감사의 말씀을 전합니다. 본 연구는 2003년도 전북지역환경기술개발센터에서 시행한 환경기술연구개발사업(03-2-40-41)의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

강공언, 신대윤, 김희강 (1999a) 익산지역에서 봄철 강수의 화학성상과 중화능. 대한환경과학회지, v. 21, p. 197-206.  
 강공언, 오인교, 김희강 (1999b) 익산지역 강수의 계절별 산성도와 화학성상. 한국대기환경학회지, v. 15, p. 393-402.

나춘기, 정재일 (1997) 전주시에서 채수된 강수의 화학적 조성. 한국대기보전학회지, v. 13, p. 371-381.  
 오진만, 김득수 (2001) 군산지역 부유분진의 계절적 농도 변화와 화학적 조성에 대한 연구. 한국대기환경학회지, v. 17, p. 475-485.  
 이민희, 한진숙, 한의정, 신찬기 (1989) 황사현상시 강수의 화학적 성분에 관한 연구. 한국대기보전학회지, v. 5, p. 1-11.  
 中野孝教, 横尾頼子, 田 瑞鈴 (1998) 酸性雨研究におけるストロンチウム, 鉛安定同位體. 分析 v. 10, p. 77-82.  
 Åberg, G., Jacks G. and Hamilton P.J. (1989) Weathering rates and  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratios: an isotopic approach. J. Hydro., v. 109, p.65-78.  
 Anderson, P., Lofvendahl R. and Åberg G. (1990) Major element chemistry, 2H, 18O and  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  in a snow profile accross Central Scandinavia. Atmos. Envir., v. 24A, p. 2601-2608.  
 Berner-Kay, E. and Berner R.A. (1987) The global water cycle. Geochemistry and Environment. Prentice-Hall, 394p.  
 Camarero, L. and Catalan J. (1993) Chemistry of bulk precipitation in the central and eastern Pyrenees, northeast Spain, Atmos. Environ, v. 27A, p. 83-94.  
 Chiaradia, M., Gulson B.L., James M., Jameson C.W. and Johnson D. (1997) Identification of secondary lead sources in the air of an urban environment. Atmos. Environ, v. 31, p. 3511-3521.  
 Colin, J.L. (1988) Variabilité des concentrations des especes minerales dans les précipitations humides en relation avec l'aerosols atmospherique. Ph.D. Thesis, Univ. Paris VII.  
 Dasch, E.J. (1969) Strontium isotopes in weathering profiles, deep-sea sediments, and sedimentary rocks. Geochim. Cosmochim. Acta, v. 33, p. 1521-1552.  
 Faure, G. (1986) Principles of Isotope Geology, John Wiley, New York. 589p  
 Flegal, A.R. and Patterson C.C. (1983) Vertical concentration profiles of lead in the Central Pacific at 15N and 20S. Earth Planet. Sci. Lett., v. 64, p. 19-32.  
 Gallet, S., Jahn B.M. and Torii M. (1996) Geochemical characterization of the Luochuan Loess-paleosol sequence, China, and paleoclimatic implications. Chem. Geology, v. 133, p. 67-88.  
 Gallon, C., Tessier A., Gobeil C., and Beaudin L. (2005) Sources and chronology of atmospheric lead deposition to a Canadian Shield lake; Inferences from Pb isotopes and PAH profiles. Geochim. Cosmochim. Acta, v. 69, p. 3199-3210.  
 Gibbs, R.J. (1970) Mechanisms controlling world water chemistry. Science, v. 170, p. 1088-1090.  
 Gosz, J.R. and Moore D.I. (1989) Strontium isotope studies of atmospheric inputs to forested watersheds in New Mexico. Biogeochem., v. 8, p. 115-134.  
 Graustein, W.C. (1989)  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratios measure the sources and flow of strontium in terrestrial ecosystems. In Ecological Studies 68. Stable Isotopes in Ecological Research (edited by Rundel P.W., Ehleringer, J.R. and Nagy, K.A.). Springer Verlag, New York, p. 491-512.  
 Graustein, W.C. and Armstrong, R.L. (1983) The use of  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratios to measure atmospheric transport into forested watershed. Science, v. 219, p. 298-392



- Gulson, B.L., Mizon, K.J., Korsch, M.J. and Howarth, D. (1996) Importance of monitoring family members in establishing sources and pathways of lead in blood. *Science total Environment*, v. 188, p. 173-182
- Ichikuni, M. (1978) Calcite as a source of excess Ca in rainwater. *J. Geophys. Res.*, v. 83, p. 6249-6252.
- Jaffrezo, J. L. (1987) Etude du lessivage des aerosols atomospheriques par les precipitations en milieu urbain. Ph.D. Thesis, Univ. Paris VII.
- Jeon, S.R. (2000) Environmental Geochemistry of the Abandoned Dongjin Au-Ag-Cu Mine Area, Korea. Ph.D. Thesis, University of Tsukuba. p. 144
- Kanayama, S., Yabuki, S., Yanagisawa, F, and Motoyama, R. (2002) The chemical and strontium isotope composition of atmospheric aerosols over Japan: the contribution of long-range-transported Asian dust (Kosa). *Atmos. Envir.*, v. 36, p. 5159-5175.
- Keene, W.C., Pszeny, A.A.P, Galloway, J. and Hawley, M.E. (1986) Sea-salt corrections and interpretation of constituent ratios in marine precipitation. *J. Geophys. Res.*, v. 91, p. 6647-6658.
- Liu, C.Q., Masuda, A., Okada, A., Yabuki, S., and Fan, Z.L. (1994) Isotope geochemistry of Quaternary deposits from the arid lands in northern China. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 127, p. 25-38.
- Losno, R, Bergametti, G., Carlier, P and Mouvier, G. (1991) Major ions in marine rainwater with attention to sources of alkaline and acidic species. *Atmos. Envir.*, v. 25A, p. 763-770.
- Mukai, H., Naoki, F, Fuhii, T, Ambe, Y, Sakamoto, K., and Hashimoto, Y. (1993) Characterization of sources of lead in the urban air of asia using ratios of stable lead isotopes. *Environ. Sci. Technol.*, v. 27, p. 1347-1356.
- Mukai, H., Tanaka, A., Fujii, T, and Nakao, M. (1994) Lead isotope ratios of airborne particulate matter as tracers of long-rang transport of air pollutants around Japan. *J. Geophys. Res.*, v. 99, p. 3717-3726.
- Murozumi, M., Chow, T.H. and Patterson, C. (1969) Chemical concentrations of pollutant lead aerosols, terrestrial dusts and sea salts in Greenland and Antarctic snow strata. *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 33, p. 1247-1294.
- Negrel, P. and Roy, S. (1998) Chemistry of rainwater in the Massif Central (France): a strontium isotope and major element study. *Appl. Geochem.*, v. 13, p. 941-952.
- Negrel, Ph., Allegre, C.J., Dupre, B. and Lewin, E. (1993) Erosion sources determined from inversion of major trace element ratios and strontium isotopic ratio in river water, thecongo Basin case. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 120, 59-76.
- Nriagu, J.O. (1979) Global inventory of natural and anthropogenic emissions of trace metals to the atmosphere. *Nature*, v. 279, p. 409-411.
- Sarin, M.M., Krishnaswami, S., Dillil, K., Somayajulu, B.L. and Moore W.S. (1989) Major ion chemistry of the Ganga-brahmaputra river system, weathering processes and fluxes to the bay of Bengal. *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 53, p. 997-1009.
- Saylor, R.D., Butt, K.N., and Peters, L.K. (1992) Chemical characterization of precipitation from a monitoring network in the lower Ohio river valley, *Atmos. Environ.*, v. 26A, p. 1147-1156.
- Schaule, B.K. and Patterson, C.C. (1983) Perturbations of the natural lead depth profile in the Sargasso Sea by Industrial Lead. In *Trace Metals in Seawater* (ed. C.S. Wong *et al.*), p. 487-504. Plenum.
- Settle, D.M. and Patterson, C.C. (1982) Magnitudes and sources of precipitation and dry deposition fluxes of industrial and natural leads to the North Pacific at Enewetak, *J. Geophys. Res.*, v. 87, p. 8857-8869.
- Settle, D.M., Patterson, C.C., Turekian, K.K., and Cochran, J.K. (1982) Lead precipitation fluxes at tropical oceanic sites determined from Pb-210 measurements. *J. Geophys. Res.*, v. 87, p. 1239-1245.
- Spokes, L.J., Jickells, T.D., and Lim, B. (1994) Solubilization of aerosol trace metals by cloud processing: A laboratory study. *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 58, p. 3281-3287.
- Stallard, R.F. and Edmond, J.M. (1981) Geochemistry of the Amazon. *Precipitation chemistry and the marine contribution to the dissolved load at the time of peak discharge*. *J. Geophys. Res.*, v. 86, p. 9844-9858.
- Suzuki, T. and Tsunogai, S. (1988) Origin of calcium in aerosols over the Western North Pacific. *Atmos. Chem.*, v. 6, p. 363-374.
- Svensson, A., Biscaye, P., and Grousset, F. (2000) Characterization of late glacial continental dust in the Greenland Ice Core Project ice core. *J. Geophys. Res.*, v. 105(D4), p. 4637-4656.
- Wickman, F.E. and Åberg, G. (1987) Variations in the  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratio in lake waters from Central Sweden. *Nordic Hydrology*, v. 18, p. 21-32.