

海岸地域 大氣浮游粒子狀 物質의 특성에 關한 研究

강공언* · 우상윤 · 강병욱 · 김희강

건국대학교 환경공학과, *원광보건전문대학 환경공업과

A Study on the Characteristics of Ambient Suspended Particulate Matter at Coastal Area, Kangwha

Gong Unn Kang*, Byung Wook Kang, Sang Yoon Woo and Hui Kang Kim

Department of Environmental Engineering, Kon-Kuk University

*Department of Environmental Industry, Wonkwang Public Health Junior College

ABSTRACT

In order to investigate the regional level of air pollutants at Kangwha island situated on the western coast in Korea, the suspended particulate matter samples were collected by using the low volume air sampler on ten interval from March 1992 to February 1993 and the mass concentration of suspended particulate matter (SPM) and the chemical composition of water-soluble major ionic components in SPM samples were measured. During the sampling period, the average concentration of SPM under diameter 10 μm was found to be 48 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (± 12). The seasonal concentration of SPM was showed in order of spring>fall>winter>summer. It was considered that higher concentration on spring than other season was affected by the long-range transport of Yellow sand particulate from China continent and lower concentration on summer by the washout and rainout effect of large rainfall. The content of water-soluble component in SPM samples was founded to be about 31% (14.69 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) and 65% was unknown or unanalyzed. The content of cationic component showed in order of NH_4^+ (44.6%)> Na^+ (21.2%)> K^+ (14.7%)> Ca^{2+} (13.6%)> Mg^{2+} (5.9%) and the content of anionic component SO_4^{2-} (62.5%)> NO_3^- (22.3%)> Cl^- (15.2%), respectively. This fact indicates that ammonium and sulfate ion of water-soluble component in SPM sample were dominant in this region. From the chemical composition of water-soluble component, the most of Na^+ , Mg^{2+} and Cl^- were originated from seawater source but K^+ , Ca^{2+} and SO_4^{2-} were originated from other non-marine source. The contribution of seasalt to the composition of precipitation was 23%.

Keywords : Suspended particulate matter (SPM), water-soluble major ionic components, long-range transport, ammonium and sulfate.

I. 서 론

환경대기 중에 존재하는 입자상물질(particulate matter)은 태양에너지, 바람, 비, 눈 등의 자연에너지에 의해 수반되는 지각운동, 지형변화에 의한 토양입자, 해염입자, 화산재, 꽃가루 등의 자연발생원에 기인하는 것과 연소, 폐기물처리, 산업공정, 자동차 배출가스 및 건설·토목공사, 교통수단에 의한 타이어와 아스팔트 노면의 마찰 등의 인위적인 활동에

의해 발생하는 것으로 크게 분류할 수 있으며, 이중 지구 전체적인 규모로 볼 때 자연적인 것이 69%이고 인위적인 것이 31%라고 보고되어 있다.^{1,3)} 이와 같이 입자상물질은 그 발생원이 다양하기 때문에 그것이 갖는 물리적, 화학적 성질도 다르게 된다. 특히, 입자상물질의 크기는 입경 0.002 μm 정도의 분자응집체로부터 입경 500 μm 정도의 굵은 모래와 같은 입자상 또는 입자상이라고 해석할 수 있는 고체 또는 액체상태로 환경대기 중에 존재하게 된다.⁴⁾

더욱이 이것은 입경의 크기에 따라 환경대기 중에 수 초로부터 수 개월간 체류하는 것으로 알려져 있다.^{1,4)} 이러한 입자상물질이 환경에 미치는 영향으로는 광화학스모그 발생시 시정장애, 불쾌감의 증가, 물적재산 손상의 가속화, 인체 호흡기능에 대한 악영향 및 호흡기 질환 유발 등이 있고 이외에 가스상 오염물질과의 상호작용 및 발암성 유발작용 등으로 국내·외적으로 이것이 미치는 영향에 대하여 크게 관심을 기울이고 있다.⁵⁻⁹⁾

입자상물질은 그 생성과정에 따라 1차 입자(primary particle)와 2차 입자(secondary particle)로 분류하기도 하며 입경 $2.1 \mu\text{m}$ 를 경계로 양측에 피크(peak)를 나타내는 이산형분포(bimodal distribution)를 가지는데, 이때 입경 $2.1 \mu\text{m}$ 이하인 입자를 미세 입자(fine particle)로 그리고 입경 $2.1 \mu\text{m}$ 이상인 입자를 조대입자(coarse particle)로 분류한다. 1차 입자는 발생원으로부터 대기중에 직접 배출되므로서 생성되는데 인위적 배출원으로는 자동차의 배출가스, 화석연료의 연소시설, 각종 폐기물의 소각 및 산업공정 등이 해당되며, 자연적 배출원으로는 토양입자, 해양입자, 화산재, 식물 등이 있다.¹⁷⁻¹⁹⁾

또한 입자상물질은 부유먼지(suspended dust), 강하먼지(dustfall), 부유입자상물질(suspended particulate matter; SPM) 등으로 나눌 수 있는데 부유먼지는 대기중에 부유하는 모든 입경의 입자상물질을 총칭하는 것을 의미하며, 강하먼지는 대기중의 입자상물질중 중력, 강우 등에 의해 강하된 먼지를 말한다. 그리고 부유입자상물질은 대기중에 부유하는 입자상물질중 입경 $10 \mu\text{m}$ 이하의 먼지로 정의하고 있다. 특히, 대기중에 부유하는 입경 $10 \mu\text{m}$ 이하의 부유입자상물질은 호흡작용에 의하여 폐포에 침착하므로써 그 중요성은 더욱 크다고 하겠다.^{10,11)} 따라서 최근에 환경처는 대기환경기준을 선진국 수준으로 강화하는 것을 골자로 하는 환경정책기본법시행령 개정안을 마련하여 입법예고기로 하였다.¹²⁾ 부유먼지에 대한 현재 우리나라 환경보전법상의 기준은 총부유먼지(년 평균 $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하, 24시간 평균 $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하)를 대상으로 하고 있으나 강화된 대기환경기준은 24시간 평균치가 $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 낮춰지고, 환경대기중의 먼지총량외에 인체의 호흡기로 흡수되는 입자의 크기가 $10 \mu\text{m}$ 이하인 미세먼지의 기준(년 $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$)을 신설했다. 그러나 우리나라에 있어서 이제까지의 부유먼지에 대한 연구는 주로 대도시를 중심으로 이루어져 어떤 특정지역의 먼지에 의한 대기오염도를 객관적으로 비교, 평가하기는 어려운 문제인 것으로 생각된다.

다.¹³⁻¹⁶⁾

따라서 본 논문에서는 인위적인 오염발생원이 없는 우리나라의 서해안에 위치한 강화도 지역에서 부유입자상물질을 측정, 분석하여 그 특성을 파악함으로써 입자상물질에 의한 이 지역의 대기오염도를 조사하였으며, 향후 $10 \mu\text{m}$ 이하의 부유입자상물질에 의한 대기환경기준에 의한 평가시 비교자료로 활용될 수 있도록 하였다.

II. 실험 및 분석방법

1. 실험방법

1) 시료채취

본 연구는 서울에서 서쪽으로 약 60 km 떨어진 우리나라 서해안에 위치한 청정지역인 강화도 지역에서 1992년 3월부터 1993년 2월까지 12개월 동안 수행하였다. 시료채취지점은 강화군 화도면 장화리 장화국민학교 앞 하천부지로 풍하측에 10여호의 민가가 산재해 있는 것을 제외하면, 주위에 특정 오염원이 없는 곳으로 국지적인 오염발생원의 영향을 받지 않도록 고려하여 선정하였다(Fig. 1). 시료채취 장치는 하천부지에 세워진 지상 4m 정도 높이의 철탑위에 설치되어 있으며, 해안가로부터 약 150m 떨어져 있고 주위는 논과 밭으로 둘러싸여 있다.

Table 1은 시료채취기간 동안의 기상조건을 나타낸 것으로 이것은 강화 측후소에서 측정된 자료를 참고하였다.²⁰⁾ 측정기간 동안 이 지역은 대체로 계절변화가 심한 온대성이며, 바람은 '92년 3월, 4월의 북서풍과 '93년 1월의 북풍을 제외하면 주로 서쪽으로부터 불어오고 봄철에 특히 강하게 분다. 이

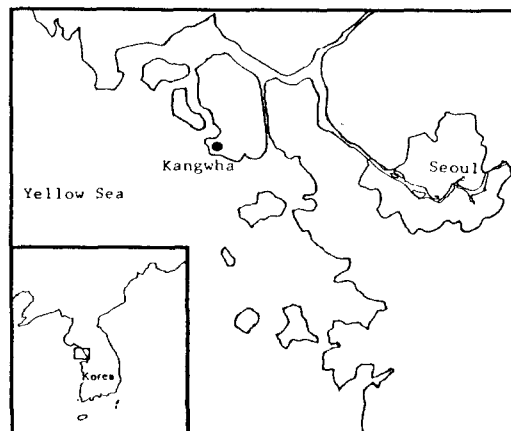


Fig. 1. A map of sampling site.

Table 1. Weather conditions during the sampling period

Year/Month	Them. (°C)	Relative humidity (%)	Wind speed (m/s)	Wind direction	Rainfall (mm)
92/3	6.1	65	2.0	NWN	17.7
92/4	10.4	67	2.3	NWN	44.5
92/5	14.7	73	2.4	W	170.5
92/6	19.1	76	2.2	W	137.5
92/7	23.5	89	2.1	W	195.0
92/8	23.8	84	1.8	W	223.0
92/9	19.6	79	1.8	W	196.5
92/10	12.6	79	1.7	W	29.5
92/11	5.0	77	2.0	W	63.0
92/12	0.3	77	1.8	W	73.0
92/1	-3.2	72	1.7	N	3.0
93/2	-0.3	72	2.3	W	43.8

Table 2. Analytical parameters, methods and instruments of samples

Parameters	Methods	Instruments
SPM*	Weighting method	Model-2434, Sartorius Inc.
SO ₄ ²⁻	Glycerol-alcohol-acid method	UV-240, Shimadzu Inc.
NO ₃ ⁻	Salicylic acid method	"
Cl ⁻	Mercury(II) thiocyanate method	"
NH ₄ ⁺	Indophenol method	"
Na ⁺ , K ⁺	A.A.S. method	GBC 901, GBC Inc.
Ca ²⁺ , Mg ²⁺		

*SPM : Suspended particulate matter.

지역의 월평균 기온은 여름에 19.1~23.8°C 그리고 겨울에 -3.2~0.3°C 범위이다. 강우는 봄, 여름, 가을 및 겨울에 각각 17.7~170.5 mm, 137.5~223.0 mm, 29.5~196.5 mm 및 3.0~73.0 mm로 변화가 심하고 간헐적으로 내리며, 년평균 강우량은 1197 mm이었다. 상대습도는 여름 동안에 최고치(76~89%)를 봄 동안에 최저치(65~73%)를 기록하였다.

2) 시료채취장치

대기중의 부유입자상물질의 채취는 테프론 여지(AFO7P, pore size 0.45 μm, 住友電子(株)製)가 장착된 로우볼륨에어샘플러(low-volume air sampler, model DY-1300)을 사용하였다. 부유입자상물질을 채취하기 위하여 1회 채취시간은 10일로 하였으며, 시료채취속도는 밀도가 1g/m³이고 직경 1 μm인 구형입자가 중력에 의해 침강하는 속도와 같은 2l/min으로 하였는데, 이때 직경이 10 μm이상인 입자는 분립장치에 의하여 제거되도록 하였다. 시료채취 후 필터홀더(filter holder)은 양쪽 구멍을 마개로 밀봉한 후 실험실로 운반하였다.

2. 분석방법

1) 부유입자상물질의 중량농도 측정

10 μm이하의 부유입자상물질의 중량농도 측정을 위하여 먼저 시료채취에 사용되는 테프론 여지를 시료채취 전에 데시케이터에서 24시간 이상 건조시킨 후 0.01 mg까지 판독이 가능한 직시분석저울(model-2434, Sartorius사제)로 무게를 칭량하였으며, 시료채취 후에도 동일한 방법으로 여지의 무게를 칭량하여 시료포집 전후의 여지 무게차이를 구하고 이것을 시료채취기간 동안 흡입한 측정유량으로 나누어 부유입자상물질의 중량농도(μg/m³)를 구하였다.

2) 부유입자상물질중 수용성 이온성분의 농도측정

부유입자상물질을 포집한 여지는 칭량을 끝낸 후 테프론 여지를 50 ml 비이커에 일정한 크기로 절단하여 넣고 이온교환수(ion exchange water) 25 ml를 넣어 초음파 추출한 후 0.45 μm의 밀리포어지(HAWP 04700 millipore filter, Millipore Inc.)로 여과하여 얻은 여액(filtrate)을 분석시료로 하여 부유입자상물질중 수용성 주요이온성분인 NH₄⁺, Na⁺,

Table 3. Analytical results of suspended particulate matter samples collected at Kangwha (1992. 3.~1993. 2)

Sampling Month	SPM*	NH ₄ ⁺	Ca ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	
	(μg/m ³)									
'92. 3	43	1.66	0.97	4.04	0.31	1.15	3.18	7.86	1.70	
	4	80	2.03	0.91	2.34	0.24	1.29	4.37	2.08	
	5	46	1.95	0.87	1.68	0.14	1.24	2.83	1.16	
	6	47	1.24	0.21	0.66	0.07	0.87	2.45	1.09	
	7	44	1.64	0.13	1.13	0.04	1.24	2.43	1.40	
	8	30	0.95	0.08	0.43	0.08	0.65	0.65	3.40	0.76
	9	54	1.58	0.93	1.01	0.21	0.94	2.51	7.73	0.37
	10	36	1.19	0.45	0.52	0.10	0.77	1.93	4.28	0.45
	11	57	2.54	0.73	0.94	0.21	1.39	4.73	7.72	1.59
	12	35	1.08	0.49	0.37	0.06	0.76	1.74	2.87	0.82
	'93. 1	50	2.58	0.56	0.77	0.17	0.74	4.03	7.14	0.64
		2	49	1.78	0.45	0.54	0.20	1.17	3.10	5.58
Mean	48	1.68	0.57	1.20	0.15	1.02	2.83	6.13	1.10	
STD	12	0.51	0.31	1.02	0.08	0.25	1.11	1.82	0.50	
Max	80	2.58	0.97	4.04	0.31	1.39	4.73	8.77	2.08	
Min	30	0.95	0.08	0.37	0.04	0.65	0.65	2.87	0.37	

*SPM : Mass concentration of suspended particulate matter.

Ca²⁺, K⁺, Mg²⁺, NO₃⁻, SO₄²⁻ 및 Cl⁻ 의 8개 성분을 분석하였다. 수용성 이온성분 분석시 NO₃⁻, SO₄²⁻, Cl⁻ 의 음이온은 흡광광도계(model U.V.-240, Shimadzu사제)로 Na⁺, Ca²⁺, K⁺, Mg²⁺의 양이온은 원자흡광광도계(model GBC AAS 201., GBC사제)로 각각 측정하였다. 그리고 양이온중 NH₄⁺는 인도페놀법으로 측정하였다. 시료의 분석항목, 분석방법 및 분석기기를 Table 2에 요약하여 나타내었다.

III. 결과 및 고찰

1. 부유입자상물질의 분석결과

인위적인 오염발생원이 없는 청정지역으로서 우리나라의 서해안에 위치하고 있는 강화지역에서 1992년 3월부터 1993년 2월까지 1년 동안에 걸쳐 대기중의 부유입자상물질의 중량농도 및 그 성분농도에 대한 분석결과를 Table 3에 나타내었다.

2. 부유입자상물질의 농도

강화지역에서 측정된 부유입자상물질의 년평균농도는 48 μg/m³(± 12)로 나타났는데 이는 우리나라 대기환경기준인 10 μm이하의 부유입자상물질의 년평균기준치 80 μg/m³보다 상당히 낮았다. 부유입자상물질의 월평균농도를 살펴보면 황사현상이 관측된 1992년 4월에 80 μg/m³로서 가장 높게 나타났으며, 1992년 8월에 평균 30 μg/m³로 최저치를 기록하였

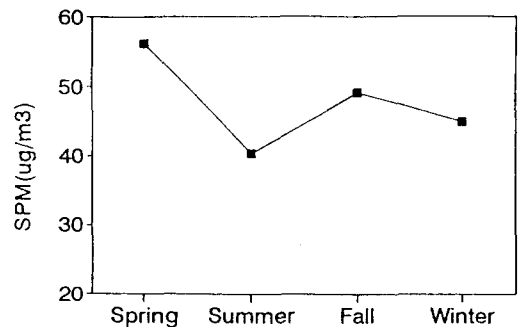


Fig. 2. Seasonal variations of mass concentration of suspended particulate matter.

으며, 황사가 관측된 1992년 4월 이외에는 전반적으로 큰 차이를 나타내고 있지 않았다. Fig. 2는 부유입자상물질의 계절별 평균농도를 나타낸 것으로 봄, 여름, 가을 및 겨울에 각각 56, 40, 49 μg/m³ 및 45 μg/m³으로 측정되어 봄 > 가을 > 겨울 > 여름 순의 계절별 농도변화를 나타내었다. 이와같이, 봄에 부유입자상물질의 농도가 다른 계절에 비해 높은 것은 중국에서 우리나라로 편서풍을 타고 장거리 이동한 황사의 영향을 받은 것으로 생각되며, 여름에는 화석연료의 사용량이 다른 계절에 비해 상대적으로 감소함으로써 부유입자상물질의 발생량이 줄어드는 이외에 Fig. 3에서와 같이 다른 계절에 비하여 강우

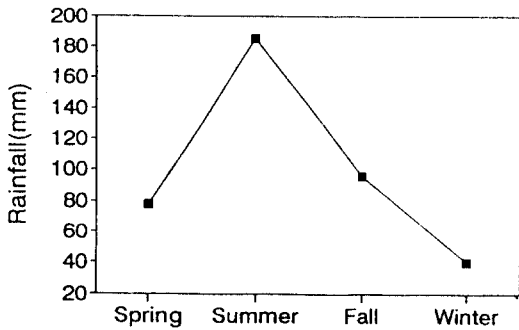


Fig. 3. Seasonal variations of rainfall at Kangwha.

량이 많기 때문에 강우에 의한 제거효과(rainout and washout effects)의 영향을 받아 낮은 농도를 나타낸 것으로 추정된다.

3. 부유입자상물질중 수용성 이온성분의 농도

강화지역에서 측정된 부유입자상물질중 수용성 양이온인 NH_4^+ 의 년평균 농도는 $1.68 \mu\text{g}/\text{m}^3 (\pm 0.51)$ 이었다. NH_4^+ 의 월별농도 최대치는 '93년 1월에 평균 $2.58 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타났으며, 최소치는 '92년 8월에 평균 $0.95 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 나타내었다. 계절별 평균농도는 봄, 여름, 가을 및 겨울에 각각 1.88, 1.28, 1.77 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 및 1.81 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로서 봄>겨울>가을 >여름의 순으로 나타났으나 봄, 가을 및 겨울의 평균치는 비슷한 수준이었다. Matsumoto는 대기 중에서 NH_3 와 NH_4^+ 농도를 측정하였는데, NH_3 농도는 여름에 높고 겨울에 낮으며 계절변동이 큰 반면, NH_4^+ 농도는 겨울에 약간 높지만 그 변동은 적은 것으로 보고하였다.¹⁸⁾

Ca^{2+} 의 년평균농도는 $0.57 \mu\text{g}/\text{m}^3 (\pm 0.31)$ 이었으며 최대치는 '92년 3월에 평균 $0.97 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타났고, 최소치는 '92년 8월에 평균 $0.08 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 나타내었다. Ca^{2+} 의 월평균농도를 나타낸 것으로 5, 6, 7월의 여름철 농도가 각각 0.21, 0.13, 0.08 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타나 다른 계절에 비하여 아주 낮은 것을 알 수 있었다. 또한 봄철의 농도분포는 거의 일정한 농도치를 나타낸 반면 가을과 겨울철에는 봄철보다 낮은 농도를 나타내며 월별변화가 다소 있는 것을 알 수 있었다. Ca^{2+} 의 계절별 평균농도는 봄, 여름, 가을 및 겨울에 각각 0.92, 0.14, 0.70 및 0.50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로서 봄>가을>겨울>여름의 순으로 나타났는데 이는 부유입자상물질의 계절별 농도변화와 같은 경향을 보여 주었다.

K^+ 의 년평균농도는 $1.20 \mu\text{g}/\text{m}^3 (\pm 1.02)$ 이었으며,

최고치는 '92년 3월에 평균 $4.04 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타났고, 최소치는 '92년 12월에 평균 $0.37 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 기록하였다. K^+ 의 월평균농도는 3월 가장 높은 농도를 기점으로 점차적으로 감소하여 6월 이후 일정한 농도분포를 나타내었다. 계절별 평균농도는 봄, 여름, 가을 및 겨울에 각각 2.69, 0.74, 0.82 및 0.56 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로서 봄>가을>여름>겨울의 순으로 여름, 가을 및 겨울이 서로 비슷한데 비해 봄은 다른 계절에 비해 높은 농도를 나타내었다.

Mg^{2+} 의 년평균농도는 $0.15 \mu\text{g}/\text{m}^3 (\pm 0.08)$ 이었으며, 최고치는 '92년 3월에 평균 $0.31 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타났고 최소치는 '92년 7월에 평균 $0.04 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 기록하였다. Mg^{2+} 의 월평균농도는 3월에 가장 높은 농도를 나타낸 후 점차 일정하게 감소한 후 8월에 다시 증가하기 시작하여 '93년 1월까지 불규칙한 농도분포를 나타내었다. 계절별 평균농도는 봄, 여름, 가을 및 겨울에 각각 0.23, 0.06, 0.17 및 0.14 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타내어 봄>가을>겨울>여름의 순으로 Ca^{2+} 의 계절별 농도변화와 같은 경향을 보여 주었다.

Na^+ 의 년평균농도는 $1.02 \mu\text{g}/\text{m}^3 (\pm 0.25)$ 이었으며, 최고치는 '92년 11월에 평균 $1.39 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타났고 최소치는 '92년 8월에 평균 $0.65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 기록하였다. Na^+ 의 계절별 평균농도는 봄>가을>여름>겨울의 순으로 각각의 농도는 1.23, 1.03, 0.92 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 그리고 0.89 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다.

수용성 음이온중 NO_3^- 의 년평균농도는 $2.83 \mu\text{g}/\text{m}^3 (\pm 1.11)$ 이었으며, 최고치는 '92년 11월에 평균 $4.73 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타났으며 최소치는 '92년 8월에 평균 $0.65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 기록하였으며, 월별 농도변화가 큰 것으로 나타났다. 계절별 NO_3^- 의 평균농도는 봄>가을>겨울>여름의 순으로 각각 3.46, 3.06, 2.96 및 1.84 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다.

SO_4^{2-} 의 년평균농도는 $6.14 \mu\text{g}/\text{m}^3 (\pm 1.82)$ 이었으며, 최고치는 '92년 4월에 평균 $8.77 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타났으며 최소치는 '92년 12월에 평균 $2.87 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 기록하였다. SO_4^{2-} 의 월평균농도는 봄철의 3, 4, 5월에는 일정한 농도경향을 나타낸 반면 다른 계절에는 월별농도가 다소 크게 나타났다. 계절별 SO_4^{2-} 의 평균농도는 봄, 여름, 가을 및 겨울에 각각 7.91, 4.85, 6.58 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 및 5.20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 NO_3^- 농도와 같은 봄>가을>겨울>여름의 순으로 각각 나타났다.

Cl^- 의 년평균농도는 $1.10 \mu\text{g}/\text{m}^3 (\pm 0.50)$ 이었으며, 최고치는 '92년 4월에 평균 $2.08 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타났으며 최소치는 '92년 9월에 평균 $0.37 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 기록하였다. Cl^- 의 월평균농도를 살펴보면 봄철의 3, 4월에 높은 농도를 나타낸 반면 가을철에는 다른

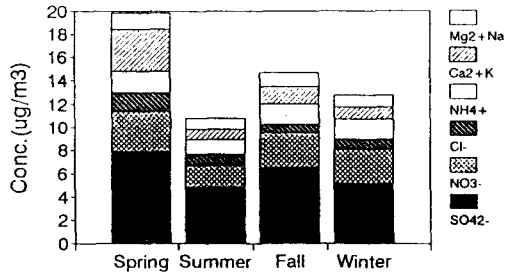


Fig. 4. Seasonal mean concentration of water-soluble ion components in SPM samples.

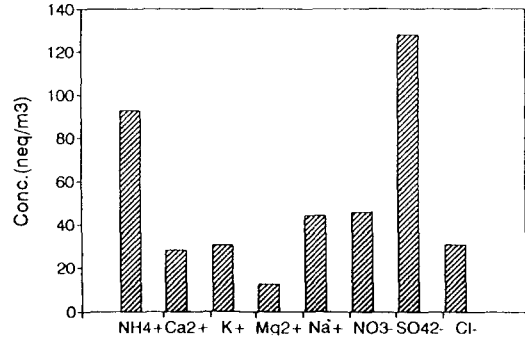


Fig. 6. Mean concentrations of water-soluble ion components in SPM samples.

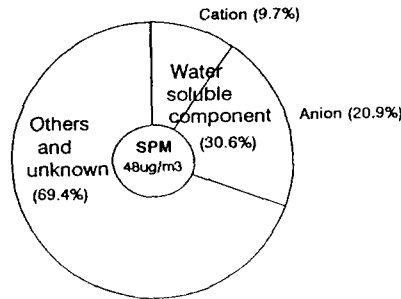


Fig. 5. Content of water-soluble components in SPM samples.

계절에 비하여 다소 낮은 농도를 나타내었다. 계절별 Cl⁻의 평균농도는 봄, 여름, 가을 및 여름에 각각 1.64, 1.08, 0.80 및 0.89 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타나 봄>여름>겨울>가을의 순으로 나타났다. Fig. 4는 부유입자상물질중 주요 수용성 이온성분의 농도를 계절별로 요약하여 나타낸 것으로 봄>가을>겨울>여름의 순으로 나타났으며 이는 부유입자상물질의 계절별 농도와 같은 경향을 나타내었다.

Fig. 5는 부유입자상물질중의 수용성 이온성분의 함량을 알아보기 위하여 부유입자상물질의 중량농도의 평균치에 대한 수용성 이온성분의 중량농도 평균치의 비를 구하여 이것을 백분율로 나타낸 것으로 총부유입자상물질중 30.6%(14.69 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)가 수용성 이온성분으로 나타났으며, 69.4%(33.31 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)가 미확인된 또는 분석되지 않은 것으로 밝혀졌다. 또한 수용성 이온성분중 양이온과 음이온의 함유율은 각각 9.7%(4.61 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)와 20.9%(10.07 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)로 나타나 음이온의 중량농도가 2배 정도 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 수용성 이온성분에 대한 각 이온성분의 중량농도의 함량은 SO₄²⁻ (41.8%)>NO₃⁻ (19.3%)>NH₄⁺ (11.5%)>K⁺ (8.2%)>Na⁺ (6.9%)>Ca²⁺

(3.9%)>Mg²⁺ (1.0%)의 순으로 수용성 이온성분중에 SO₄²⁻가 가장 높은 함량을 나타내었다.

Fig. 6은 부유입자상물질중에 존재하는 수용성 이온성분의 각 중량농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$)를 당량농도(neq/m³)로 환산하여 나타낸 것으로 SO₄²⁻>NH₄⁺>>NO₃⁻, Na⁺>K⁺, Ca²⁺, Cl⁻>Mg²⁺의 순으로 SO₄²⁻와 NH₄⁺농도가 각각 93.3 neq/m³과 127.9 neq/m³으로 현저하게 높은 농도를 나타내어 앞에서 서술한 각 이온성분의 중량농도의 함량과 다른 경향을 나타내었다. 수용성 이온성분의 함량분포를 좀 더 구체적으로 파악하기 위하여 각 이온성분의 함량을 양이온과 음이온으로 분류하여 각각 백분율로 구한 결과 양이온의 경우 NH₄⁺ (44.6%)>Na⁺ (21.2%)>K⁺ (14.7%)>Ca²⁺ (13.6%)>Mg²⁺ (5.9%)로 그리고 음이온의 경우 SO₄²⁻ (62.5%)>NO₃⁻ (22.3%)>Cl⁻ (15.2%)와 같은 순서로 나타나는 경향을 각각 나타내었다. 이와 같이 부유입자상물질중에 존재하는 수용성 이온성분중 NH₄⁺와 SO₄²⁻가 양이온과 음이온의 45%와 63%를 점유하여 가장 중요한 성분임을 알 수 있었다.

4. 해염입자의 기여율

강화지역에서 측정된 부유입자상물질중 수용성 주요이온성분에 대한 측정된 각 이온성분의 해염에 의한 기여율을 추정하기 위하여 Na⁺를 해염 이외의 인위적인 발생원이 없으며, 강수중 해염입자의 조성이 해수의 조성과 일치한다는 가정하에 해수의 지표물질로 사용하였다.²¹⁾ 부유입자상 물질의 시료와 해수중의 Cl⁻/Na⁺, K⁺/Na⁺, Mg²⁺/Na⁺, Ca²⁺/Na⁺ 및 SO₄²⁻/Na⁺의 당량농도비를 구한 결과가 Table 4와 같았다.²²⁻²⁴⁾ 부유입자상 물질의 시료와 해수중의 각 이온농도비를 비교한 결과 Mg²⁺/Na⁺는 0.28

Table 4. Concentration ratio of Cl^- , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} and SO_4^{2-} to Na^+ concentration (neq/m^3) in SPM samples and seawater

	$\text{Cl}^- / \text{Na}^+$	K^+ / Na^+	$\text{Mg}^{2+} / \text{Na}^+$	$\text{Ca}^{2+} / \text{Na}^+$	$\text{SO}_4^{2-} / \text{Na}^+$
Kangwha	0.70	0.69	0.28	0.64	2.89
Sea water	1.16	0.02	0.23	0.04	0.12

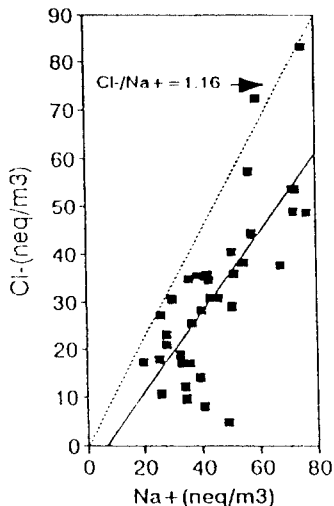
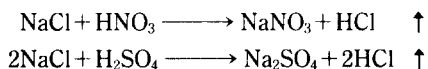


Fig. 7. Correlation between Cl^- concentration and Na^+ concentration in SPM samples.

로 해수의 비인 0.23과 거의 유사하게 나타나 해염이 주발생원인 것으로 추정된다. 그러나 부유입자상물질중의 Cl^-/Na^+ 비는 0.70으로 해수의 1.16보다 상당히 낮은 값을 갖는 것으로 나타났는데 이는 다음의 반응식에 의하여 해염입자의 형태로 존재하는 Cl^- 가 가스형태의 HCl 로 대기 중으로 손실되기 때문인 것으로 추정된다.²⁵⁾



그러나 Fig. 7에서와 같이 Cl^- 와 Na^+ 의 상관계수가 0.7512($p < 0.001$)로 서로 강한 정의 상관성을 나타내어 Cl^- 또한 해양에어로솔의 지표물질인 Na^+ 와 동일한 기원을 갖는 것으로 생각된다. 따라서 부유입자상물질중에 존재하는 Na^+ , Mg^{2+} , Cl^- 는 해염이 주발생원인 것으로 추정된다. 그러나 부유입자상물질중 K^+ , Ca^{2+} 및 SO_4^{2-} 는 Table 4에서 알 수 있는 바와 같이 Na^+ 에 대한 농도비가 해수중의 농도비보다 훨씬 커 해염이외의 다른 발생원이

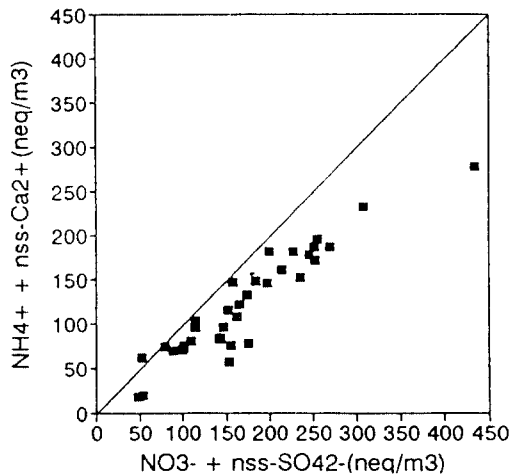
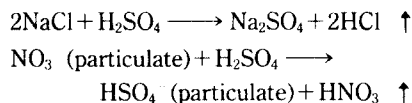


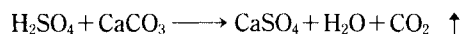
Fig. 8. Correlation between $\text{NH}_4^+ + \text{nss-Ca}^{2+}$ concentration and $\text{NO}_3^- + \text{nss-SO}_4^{2-}$ concentration in SPM samples.

있음을 알 수 있었다. 강화지역에서 부유입자상물질중 수용성 이온성분에 대한 해염의 총기여율을 구하기 위하여 부유입자상물질 시료와 해수중의 각 이온 농도비를 이용하여 이온성분의 농도를 해염기원과 비해염기원의 농도로 분류하여 해염기원의 총이온농도를 해염과 비해염기원의 총이온성분으로 나누어 총해염기여율을 구한 결과 22.6%로 나타났다.

부유입자상물질중 NH_4^+ 에 대한 SO_4^{2-} 의 당량비는 약 0.6이었는데 이것은 부유입자상물질중에 존재하는 SO_4^{2-} 가 NH_4^+ 에 의해 완전히 중화되지 않고 부분적으로 H_2SO_4 로 존재하는 것을 의미한다.^{9,25)} 이것은 위에서 언급하고 있는 것처럼 부유입자상물질중에 존재하는 Cl^- 과 NO_3^- 손실의 원인이 되기도 한다.



그런데 Na^+ 와 SO_4^{2-} 사이의 상관계수가 0.17로 유의할만한 상관관계를 나타내지 못하고 있는데 이는 다음 식으로 설명되어진다.



즉, 부유입자상물질중의 SO_4^{2-} 는 NH_4^+ 이외에 Ca^{2+} 와 반응함으로써 해염입자와의 반응으로 인한 Cl^- 손실을 방해하는 것을 알 수 있다. 특히 주목할만한

사실은 위의 반응에 의해 대기중으로 방출된 CO₂는 온실효과의 하나의 원인이 되고 있다는 것이다.²⁶⁾

Fig. 8은 비해염기원 이외의 발생원에서 배출되는 주요 산성원인물질로 알려진 음이온인 nss-SO₄²⁻ + NO₃와 알칼리성의 양이온인 nss-Ca²⁺ + NH₄⁺의 농도 관계를 나타낸 것으로 분포특성이 그림에서와 같이 실선의 아래쪽으로 분포되어 있어 산성원인물질인 nss-SO₄²⁻와 NO₃가 알칼리성의 양이온인 nss-Ca²⁺와 NH₄⁺ 이외의 다른 양이온과 결합하여 존재할 가능성을 보여주었다.²⁷⁾ 그런데 부유입자상물질중에 존재하는 총음이온성분은 204.5 neq/m³이었으며, 총양이온성분은 209.1 neq/m³로서 부유입자상물질중의 양이온과 음이온의 비가 1.02로 거의 1에 가까워 이 지역의 부유입자상물질이 중성의 형태로 존재함을 알 수 있었다.²⁷⁾

IV. 결 론

인위적인 오염발생원이 없는 청정지역으로서 우리나라의 서해안에 위치하고 있는 강화도 지역에서 1992년 3월부터 1993년 2월까지 1년 동안에 걸쳐 대기중의 부유입자상물질의 중량농도 및 그 성분농도를 측정된 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- ① 부유입자상물질의 년평균농도는 48 µg/m³(± 12)로 나타났는데 이는 우리나라 대기환경기준인 부유입자상물질의 년평균기준치 80 µg/m³보다 상당히 낮았다. 월별로 보면 황사현상이 관측된 1992년 4월에 80 µg/m³로서 가장 높게 나타났으며, 1992년 8월에 평균 30 µg/m³로 가장 낮은 값을 보였다. 계절별 평균농도는 봄>가을>겨울>여름의 순으로 나타났다.
- ② 부유입자상물질중 주요 수용성 이온성분의 계절별 농도도 부유입자상물질의 농도와 같은 봄>가을>겨울>여름의 순으로 나타났다.
- ③ 부유입자상물질중의 수용성 이온성분의 함량은 30.6%(14.69 µg/m³)로 나타났으며, 69.4%(33.31 µg/m³)가 미확인된 또는 분석되지 않은 것으로 밝혀졌다.
- ④ 수용성 이온성분의 함량은 양이온의 경우 NH₄⁺ (44.6%)>Na⁺ (21.2%)>K⁺ (14.7%)>Ca²⁺ (13.6%)>Mg²⁺ (5.9%)로 그리고 음이온의 경우 SO₄²⁻ (62.5%)>NO₃ (22.3%)>Cl (15.2%)와 같은 순서로 나타나는 경향을 각각 보여주어 NH₄⁺와 SO₄²⁻가 양이온과 음이온의 45%와 63%를 점유하여 가장 중요한 성분으로 나타났다.
- ⑤ 부유입자상물질중에 존재하는 수용성 이온성분중

Na⁺, Mg²⁺, Cl⁻는 해염이 주발생원인 것으로 그리고 K⁺, Ca²⁺ 및 SO₄²⁻는 해염 이외의 다른 발생원이 있는 것으로 추정된다. 그리고 강화지역에서 부유입자상물질중 수용성 이온성분에 대한 해염의 총기여율은 약 22.6%인 것으로 나타났다.

- ⑥ 부유입자상물질중의 SO₄²⁻는 NH₄⁺이외에 Ca²⁺와 반응함으로써 해염입자와의 반응으로 인한 Cl 손실을 방해하는 것으로 나타났다.
- ⑦ 부유입자상물질중의 양이온과 음이온의 비는 1.02로 이 지역의 부유입자상물질이 중성의 형태로 존재하는 것으로 추정된다.

참고문헌

- 1) 朝來野國彦：浮遊粒子狀物質に關する文獻學的調査. 社團法人日本科學技術情報センター, 1-2, 1982.
- 2) Junge, C. E. : The Cycle of Atmospheric Gases-Natural and Man-made. *Quart. J. R. Met. Soc.*, **98**, 711-729, 1972.
- 3) Perkins, H. C. : Air Pollution. N. Y. McGraw Hill Inc., 43-52, 1974.
- 4) 鈴木武夫 編：大氣汚染の機構と解析－環境科學概論－. 産業圖書, 111-114, 1980.
- 5) Hatch, T. F. : Proc. of the Pneumoconiosis Conf. Johannesburg. J & A. Churchill Ltd., London, 113, 1959.
- 6) Appel, B. R., Tokiwa, Y., HSU, J., Kothny, E. L. and Hann, E. : Visivility as related to Atmospheric Aerosol Constituents. *Atmos. Environ.*, **19**(9), 201, 1985.
- 7) Roger, L. Tanner, Brian, P. Leaderer and John, D. Spengler : Acidity of Atmospheric Aerosols. *Environ. Sci. & Technol.*, **15**(10), 1150-1153, 1981.
- 8) Hatch, T. F. : Proc. of the Pneumoconiosis Conf., Johannesburg. J & A. Churchill Ltd., London, 113, 1959.
- 9) Roger, L. Tanner, Brian, P. Leaderer and John, D. Spengler : Acidity of Atmospheric Aerosols. *Environmental Science & Technology*, **15**(10), 1150-1153, 1981.
- 10) Stern, A. C. : Air Pollution-Volume I, II. N. Y., Academic Press Inc., 1977.
- 11) Task Group on Lung Dynamics : *Health Phys.*, **12**, 173, 1966.
- 12) 동아일보, 1993년 9월 21일자 2면.
- 13) 이민희, 한의정, 한진석, 정해동, 한자경 : 대기중 Aerosol동태에 관한 조사연구. 국립환경연구원, 18-

- 23, 1986.
- 14) 이민희, 신찬기, 김양균, 한의정, 원양주, 조연순, 윤혁식, 한자경 : 대기중 부유분진의 성분에 관한 조사연구(II). 국립환경연구원, 17-38, 1983.
 - 15) 손동헌 : 도시대기중 부유분진과 미량유해물질에 관한 연구. 한국학술진흥재단, 26-28, 1987.
 - 16) 이민희, 한의정, 신찬기, 한진석, 정해동, 사원희 : 대기중 부유입자상물질의 생성 및 동태에 관한 연구. 국립환경연구원보, 9, 27-41, 1987.
 - 17) Thad Godish : Air Quality, Lewis Publishers Inc., 39-44, 1985.
 - 18) 笠原三紀夫 等 : 大氣中粒子狀物質の同定と寄與率の推定. 大氣保全學會誌, 19(5), 337-358, 1984.
 - 19) 坂本和彦 : 浮遊粒子狀物質の生成と舉動. 公害と對策, 25(14), 6-12, 1989.
 - 20) 중앙기상대 : 기상월보, 1992. 3~1993. 2.
 - 21) Willison, M. J., Clarke A. G. and Zeki E. M. : Chloride Aerosols in Central Northern England. *Atmospheric Environment*, 23(10), 2231-2239, 1989.
 - 22) Khemani, L. T. : Influence of Alkaline Particulates on pH of Cloud and Rain water in India. *ibid.*, 21(5), 1137-1145, 1987.
 - 23) Chandrakant, M. Bhumralkar : Meteorological Aspects of Acid Rain, Butterworth Publishers, 159-160, 1984.
 - 24) Charles, D. Hendrg and Patrick, L. Brezonik : Chemistry of Precipitation at Gainesville. *Florida, Environ. Sci. Technol.*, 14(7), 843-849, 1980.
 - 25) Hitoshi Mukai, Yoshiari Ambe and Keiko Shibata : Long-term variation of chemical composition of atmospheric aerosol on the Oki islands in the sea of Japan. *Atmospheric Environment*, 24 A(6), 1379-1390, 1990.
 - 26) Ronald Sequeira : On the Large-Scale Impact of Arid Dust on Precipitation Chemistry of the Continental Northern Hemisphere, 27(10), 1553-1565, 1993.
 - 27) Pio, C. A., Santos, I. M., Anacleto, T. D. and Nunes, T. V. : Particulate and gaseous air pollutant levels at the Portuguese west coast. *Atmospheric Environment*, 25(3/4), 669-680, 1991.