

# 서해안 대기 분진의 화학 조성 및 기원에 대한 연구(1)

## Chemical Composition and Sources of Atmospheric Particulates Collected on the West Coast of Korea

최 만 식\*, 조 성 록\*, 이 동 수\*  
Man-Sik Choi Sung-Rock Cho Dong-Soo Lee

### ABSTRACT

Twenty-five atmospheric particulates were collected using a high volume aerosol sampler from September to December, 1988 on a site located on the West coast of Korea and analysed for twelve elements (Na, Mg, Al, Mn, Fe, Cu, Co, Ni, Zn, Ag, Cd, and Pb) by AAS. The particles being mainly crustal minerals, large quantity of spherical fly ashes were also observed. In order to identify the origin of trace metals in atmospheric particulates, enrichment factor, interelemental correlation and factor analysis were performed. Based upon these analysis, the twelve elements can be classified into three groups; the elements dominantly present in soil particles (Al, Mn, Fe, Co, and Ni), those in sea salt aerosols (Na and Mg), and those in air pollution-derived particles (Cu, Cd, Pb, Ag and Zn).

### 1. 서 론

대기를 통한 물질의 이동이 그 물질의 지화학적 순환(Geochemical cycle)에 매우 중요한 경로임이 최근에 호수<sup>1)</sup>, 연안 해역<sup>2)</sup> 및 대양<sup>3)</sup> 등의 수환경에서 확인되었다. 특히 건조한 사막이 있는 대륙의 주변 해역으로는 바람에 의해 막대한 량의 광물 입자들이 공급되고 이러한 광물 입자들은 대양의 표층 퇴적물을 구성하는 중요한 부분<sup>3,4)</sup>이 될 뿐만 아니라 해수

중 Al<sup>5)</sup>, Fe<sup>6)</sup> 및 Mn<sup>7)</sup> 등의 금속 물질의 중요 공급원이 된다. 또한 산업 활동이 활발한 지역에서 발생하는 Pb, Sn 등의 무기 오염물질 및 방사성 핵종들이 대기를 통해 다량 해양으로 유입되어 해양 환경내에서 물질의 생지화학적 순환(biogeochemical cycle)에 큰 영향을 준다. 실제로 북해(North Sea)에서는 Pb과 Zn<sup>2)</sup>가, 미국의 오대호(Great Lakes)에서는 지역과 원소에 따라 차이는 있으나 Cd, Cu, Pb, Ni, 및 Zn<sup>1)</sup>가 주로 대기를 통해 공급된다.

\* 한국과학기술연구원 해양연구소(KORDI, KIST)

해양 대기 분진은 대륙에서 이동되어 온 토양물질, 해수표면에서 기공 파열(Bubble bursting)로 발생된 염분입자, 지표로부터 저온에서 휘발되는 물질(Low temperature volatiles), 생명 현상과 연관되어(Biological mobilization) 발생하는 물질 및 화산활동에 의한 배출물 등의 자연현상으로 발생하는 물질들과 산업활동(화석연료 연소, 폐기물 소각, 시멘트 공장 및 여러 공장에서의 배출 등) 과정에서 발생하는 인위적인 오염물질로 구성되어 있다.<sup>8)</sup> 이 중에서 Al, Sc, Mn, Fe, Co 등의 원소를 지배하는 토양물질, Na, Mg, Cl, Br 등의 원소를 주로 포함하는 해염 입자와 Pb, Zn, Cu 및 Se 등이 농축된 오염 물질이 일반적인 구성물질이고<sup>9)</sup> 나머지는 특정한 지역에서 국부적으로 영향을 준다. 특히 특정 오염원(도시 또는 공단지역 등)에 인접한 곳에 선 Fe, Mn, Ni, V 등의 토양 기원 원소들이 화석 연료의 연소로 대량 배출될 수 있으며<sup>10)</sup>, 또한 오염 물질 기원원소들도 배출원의 종류에 따라 크게 달라질 수 있다.

한반도 주변 해역은 매년 봄철에 중국의 건조한 지역(타클라마칸, 고비 및 오르도스사막과 남부의 황토(Loess deposits) 지역 등)에서 편서풍에 의해 이동되는 황사 현상으로 막대한량의 광물 입자를 공급받고 있으며 이 황사는 북태평양 비생물 기원 표층퇴적물 중 75-95%<sup>11)</sup>를 차지한다. 또한 이 해역은 최근 인접 국가들에서의 인구 증가, 대규모 임해 공업 단지 조성 및 급속한 산업 발전 등의 과정에서 필연적으로 발생하는 대기 오염 물질이 공급되어 오염이 급속하게 진행되는 곳이다. 특히 세계 석탄 소비량의 19.8%<sup>11)</sup>를 소비하는 중국은 황해 연안에 대규모 화력 발전소를 건설하여 석탄 연소에 따른 대기 오염 물질을 방출하며 이에 대한 적절한 규제책이 미비하여 한반도 및 주변 해역에 큰 영향을 주리라 예상된다.

이제까지 국내에서 수행된 대기 분진의 화학적 특성에 대한 연구는 주로 도시 지역에 한정되어 있었으며<sup>12,13)</sup> 농촌이나 해양의 대기 분진의 화학적 특성에 대한 연구는 이제까지 보고된 바 없다.

본 연구는 i) 대기를 통해 해양으로 유입되는 대기 분진의 물리, 화학적 특성을 파악하고 ii) 이 물질들의 기원을 구분하며 iii) 화학성분의 연중 변화 양상을 규명하여 대기를 통해 황해로 공급되는 물질의 특성과 총량을 파악하는데 목적이 있다. 연구의 첫 단계로 황사가 공급되지 않는 가을 및 겨울철에 대기 분진의 화학적 특성을 조사하고, 이 물질들의 기원을 농축인자(Enrichment factor) 계산, 원소 상호간의 상관관계, 및 인자 분석(Factor analysis)을 통하여 살펴 보았다.

## 2. 시료 채취와 분석 방법

### 2.1 시료의 채취

해양에서 대기를 통해 유입되는 물질의 특성을 조사하기 위해선 인근 주변 영향이 적은 암석으로만 구성된 도시 지역이 적절하지만, 계속적으로 전원 공급이 되어야 하고 사람에 의해 시료 채취기가 운영이 되어야 하므로, 본 연구에서는 대기 분진 채취 장소로 대전에서 서쪽으로 약 60 km 떨어진 충남 태안군 소원면 파도리(북위 36° 45' 52", 동경 126° 07' 06")를 선택하였다(그림 1).

시료 채취 지점은 해면보다 약 15미터 높은 해변 벼랑이었으며 그 위에 높이 4미터의 철탑을 세우고 대기 분진 채취기를 설치하였다. 조사기간은 1988년 9월부터 12월까지 4개월 동안이었으며 매주 1-2회씩 총 25개의 대기 분진 시료를 채취하였다(표1)

대기 분진 채취에는 미국 로드아일랜드 대학에서 제작한 High volume aerosol sampler

Table 1. Sampling period, flow rate of sampler and total air volume

Sample No.	Period	Flow rate (m <sup>3</sup> /hr)	Total volume (m <sup>3</sup> )
3	Sep. 1- 9	46.1	8637
4	9-16	42.7	7135
5	16-23	47.0	7914
6	23-27	51.1	4866
7	Sep.27-Oct.4	44.6	8749
8	Oct. 5- 9	52.8	5263
9	10-11	55.3	1284
10	13-14	55.8	1344
11	17-18	51.6	1190
12	20-21	54.3	1291
13	25-28	47.3	3381
14	Oct. 31 - Nov. 1	55.0	1332
15	Nov. 3- 4	53.8	1249
17	9-10	57.0	1401
18	12-15	44.9	3476
19	17-18	53.3	1217
20	21-22	49.5	1200
21	23-28	50.1	6036
22	28-29	56.3	1357
23	Dec. 1- 2	52.0	1261
24	5- 6	59.2	1401
25	8- 9	57.3	1362
26	12-15	48.6	3501
27	15-16	57.5	1356
28	19-20	56.1	1211

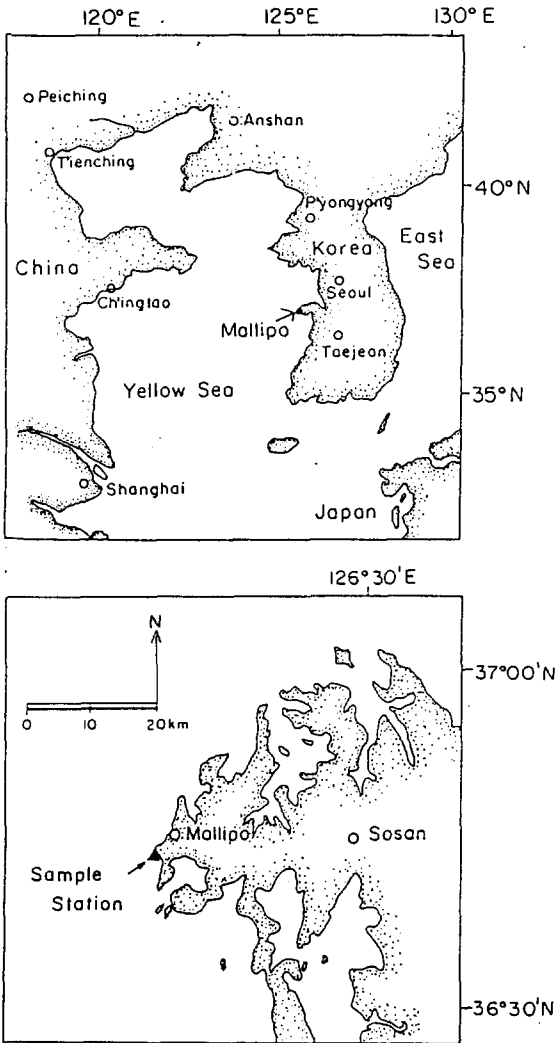


Fig. 1 Index map showing aerosol sample station

Model 400이 사용되었고 이 채취기의 평균 유량은 빈여과지를 올려 놓았을 때 약 60 m<sup>3</sup>/hr였으며, 부유 분진의 종류, 량, 그리고 채취 시간의 길이에 따라 점차 감소하였다. 분진의 채취에는 8" × 10" 크기의 Whatman 41 여과지가 사용되었으며 시료 채취시 인위적인 오염을 최대한 방지하기 위하여 실내의 청결 벤취와 시료 채취기에 부착 가능한 여과지 케이스를 이용하였다. 시료 채취가 끝나면 이 케이스

를 시료 채취기로부터 분리하여 플라스틱 통에 넣은 후 실내의 청결 벤취에서 여과지를 두번 접어 비닐 봉투에 넣은 후 분석할 때까지 냉장고에서 보관하였다. 공시험을 위한 시료는 펌프를 작동시키지 않고 위와 같은 방법으로 24시간 동안 대기에 노출시킨 후 채취하였다.

## 2.2 분석방법

### 2.2.1 화학 분석

#### 2.2.1.1 시료의 용해

시료의 기기분석에는 산을 이용해서 시료를 용액 상태로 만드는 전처리 과정이 필요하다. 이 전처리 단계에서 외부로부터 시료의 오염방지를 위하여 모든 처리를 Class-100 청결 벤취에서 하였고 또 사용한 산(염산, 질산, 불화수소)은 미리 테프론 증류 장치를 이용하여 정제하였다. 사용한 증류수는 고순도 이온교환수지를 2회 통과시킨 이온교환수였으며 사용된 용기 중 테프론은 왕수에 하루동안 담근 후 증류수로 세척하고 다시 1:5 염산용액에 3일동안 담근 후 증류수로 세척하였으며 폴리에틸렌 용기는 1:5 염산용액에 3일 동안 담근 후 증류수로 세척한 후 사용하였다. 시료의 산 용해 방법은 여러가지가 있으나 본 연구에서는 정제된 염산, 질산, 불화수소등의 혼합산을 이용하여 시료를 용해하였으며 용해 과정은 다음과 같다.

① 분진이 포집된 여과지를 세라믹 가위로 1"×6" 만큼 길이방향으로 자른 후 여러 겹 접어서 뚜껑이 있는 30ml 테프론 용기에 넣고 진한 질산 2ml, 6N 염산 6ml, 불화 수소 1ml를 가한 다음 뚜껑을 닫고 약 70°C의 가열판에서 8시간 동안 가열한 후 뚜껑을 열어 건조 직전까지 가열시켰다.

② 냉각 후 다시 같은 양의 산을 가해 ①과 같이 처리한 후 증발 건조시켰다.

③ 건조 후 바닥에 남은 찌꺼기를 진한 질산 3ml로 녹이고 증류수를 가해 30ml로 묽힌 다음 폴리에틸렌 용기(60ml)에 옮겨 분석할 때까지 보관하였다. 시료가 완전 용해되지 않아서 찌꺼기가 남은 시료는 폴리프로필렌 원심분리관에 옮겨 원심 분리한 뒤 투명한 상층액을 취하였다.

#### 2.2.1.2 금속의 정량

Al, Fe, Mn, Na, Mg은 Varian AA Model 875 불꽃 원자 흡광분광기로 정량되었는데, Al 정량에는 N<sub>2</sub>O/Acetylene 불꽃을, 나머지는 Air/Acetylene 불꽃을 분무하여 사용하였다. 그리고 Cu, Ni, Co, Pb, Cd, Ag는 위 기기에 CRA-90 atomizer와 ASD-53 시료 자동 주입기를 부착한 비불꽃 원자 흡광분광법으로 정량되었다. 이때 시료는 2%(v/v) 질산으로 2-50배 희석한 후 사용되었으며 몇개 시료에 대해 표준물 첨가법(Standard addition method)으로 매트릭스에 의한 오차 발생의 유무를 확인하였다.

#### 2.2.2 통계 분석

분석된 자료는 IBM PC용 SAS 통계 프로그램을 이용하여 선형회귀 분석 및 상관 계수 계산, Varimax회전법에 의한 인자 분석(Factor analysis)을 하였다. 인자 분석은 일단 기본 인자 분석(Principle factor analysis)을 한 다음 원하는 수의 Eigenvalue를 선택하고 이에 대해 Varimax 회전법으로 R-mode 인자 분석을 수행하였다.

## 3. 결 과

조사 기간 중 채취된 대기 분진은 전자 현미경 관찰에 의하면 주로 광물질 입자와 fly ash로 판단되는 구형 입자들로 구성되어 있으며, 입자들의 크기는 0.5-40 $\mu$ m 사이로 넓은 범위에 걸쳐 분포하였다.

시료 채취 지점의 지상 풍향은 9월에 남서풍이 우세하였고, 10월에는 남동과 북동풍이, 11월은 초순에 북서, 중순에 남서, 하순에 북동풍이 우세하였으며 겨울철이 되면서 풍속이 강해졌다.

대기 분진 중의 금속의 농도는 일반적으로

로그 정규 분포(Log-normal distribution)를  
 보이므로<sup>14)</sup>, 각 금속의 농도 평균값은 기하 평

균으로 하였고, 표준 편차는 각 농도의 로그  
 값의 표준편차로 나타내었다(표2).

Table 2. Concentrations of trace metals in the Padori  
 aerosol samples

Sample	Na <sup>1</sup>	Mg <sup>1</sup>	Al <sup>1</sup>	Mn <sup>2</sup>	Fe <sup>1</sup>	Cu <sup>2</sup>	Co <sup>2</sup>	Ni <sup>2</sup>	Cd <sup>2</sup>	Zn <sup>2</sup>	Ag <sup>2</sup>	Pb <sup>2</sup>
3	0.72	0.18	0.82	12.1	0.59	6.93	0.28	2.37	0.58	84.3	0.11	116
4	2.47	0.36	0.66	11.2	0.49	11.9	0.26	2.65	0.65	87.8	0.08	126
5	1.71	0.37	0.84	22.5	0.80	10.5	0.35	3.50	0.81	125	0.10	140
6	1.37	0.34	1.24	14.8	0.75	3.80	0.35	2.57	0.45	56.9	0.07	69.2
7	1.77	0.34	1.31	20.4	0.86	11.3	0.40	3.05	0.64	84.3	0.10	163
8	4.31	0.52	0.80	11.5	0.48	6.49	0.26	1.69	0.47	75.7	0.07	55.0
9	0.45	0.12	1.80	29.3	0.94	4.71	0.73	3.34	1.69	113	0.34	654
10	8.44	1.15	1.14	14.7	0.38	1.30	0.33	0.98	0.14	44.1	0.02	10.9
11	7.02	1.28	3.23	26.1	2.37	6.17	1.33	4.42	0.55	83.0	0.09	61.4
12	0.73	0.17	1.79	38.1	1.09	13.5	0.61	3.14	1.09	94.7	0.09	105
13	3.47	0.78	2.08	41.1	1.75	12.9	0.37	3.22	1.82	167	0.27	391
14	1.95	0.50	1.73	27.6	0.77	3.23	0.65	2.39	0.59	31.6	0.09	46.8
15	3.34	0.55	1.85	25.5	0.88	1.65	0.61	1.86	1.54	24.1	0.10	125
17	13.8	1.65	2.71	38.1	1.50	2.59	0.88	2.92	0.34	20.3	0.02	16.3
18	5.64	1.44	4.32	52.7	2.43	5.09	1.24	4.32	0.56	50.9	0.09	69.6
19	3.16	0.49	1.16	26.0	0.95	9.25	0.73	3.19	1.38	81.1	0.14	188
20	1.86	0.81	3.76	59.9	1.92	9.09	1.26	5.97	0.19	105	0.30	208
21	7.21	0.85	1.35	27.1	1.32	1.58	0.62	2.43	0.41	28.7	0.02	22.9
22	5.01	0.76	0.54	8.25	0.44	1.93	0.53	0.70	0.34	22.0	0.06	37.9
23	1.08	0.27	1.32	40.4	1.36	6.43	0.83	5.41	1.44	112	0.21	118
24	2.55	0.68	1.79	20.9	0.91	4.16	0.47	1.97	0.56	16.1	0.04	26.7
25	10.2	1.35	1.13	15.5	0.75	2.23	0.72	2.14	0.33	14.6	0.06	30.2
26	15.4	1.38	2.28	27.1	1.63	4.46	0.71	2.64	0.22	49.4	0.06	84.2
27	6.09	0.84	0.64	10.4	0.45	2.97	0.40	1.20	0.22	19.2	0.06	53.0
28	3.22	0.49	1.16	20.6	0.64	2.48	0.54	1.54	0.32	33.7	0.11	94.9
Mean <sup>3</sup>	3.10	0.57	1.43	22.6	0.92	4.68	0.55	2.50	0.55	52.0	0.08	78.0
S.D. <sup>4</sup>	0.39	0.30	0.23	0.22	0.23	0.30	0.20	0.22	0.30	0.31	0.33	0.40

1;  $\mu\text{g}/\text{m}^3$

2;  $\text{ng}/\text{m}^3$

3; geometric mean

4; standard deviation of log-transformed data

## 4. 고찰

### 4.1 대기 분진중의 금속 농도 분포

대기 분진 중의 금속 농도는 채취 지점에 따라 큰 차이를 보인다. 특히 육지와 해양이 접한 연안에서는 바람의 방향과 세기에 따라 대륙성과 해양성 분진의 특성을 함께 나타낸다. 본 조사 결과 얻어진 금속별 평균 농도와 농도 범위를 다른 지역과 비교하기 위하여 대조군으로 우리나라 서울 대기분진<sup>13)</sup>, 임해 공업 단지에서 32-48km 떨어진 해발 600미터 지점에서 채취된 미국 연안 분진<sup>15)</sup>, 그리고 태평양<sup>9)</sup>과 대서양<sup>3)</sup>에서 채취한 분진을 선택하여 그 결과를 표3에 나타내었다. 이 중 서울분진의 자료<sup>13)</sup>

는 산술 평균값(Arithmetic mean)이며 그외에는 기하 평균값(Geometric mean)이다. 각 원소들의 농도를 분포 양상이 유사한 원소들끼리 그룹지어 타 지역의 것과 비교 기술하면 아래와 같다.

#### 4.1.1 Al, Mn, Fe, Co, Ni

만리포 대기분진의 금속 농도를 서울의 분진과 비교해 보면 Al, Mn, Fe이 4.5-6배 낮고 Ni은 13.7배 낮은 것으로 나타났다. 그러나 이 값은 미국의 연안과는 1-2배 차이만을 보이고 있으며 대서양 보다는 10배, 태평양보다는 50-100배 높은 값이다(표3).

Table3. Comparison of metal contents in the aerosols from various places

	This study 1	Urban Road 2	Urban Coast 3	Pacific island 4	Tropical Atlantic 5
Na, ug*	3.10(0.39)		0.51	5.2	
Mg, ug	0.57(0.30)		0.73	0.65	
Al, ug	1.43(0.23)	7.46(1.69)	1.6	0.021	0.16
Mn, ng	22.6(0.22)	101(39.4)	32	0.29	2.2
Fe, ug	0.92(0.23)	5.59(0.99)	1.7	0.018	0.1
Co, ng	0.55(0.2)		0.97	0.0076	0.083
Ni, ng	2.50(0.22)	34.3(7.9)			0.64
Cu, ng	4.68(0.30)	95.1(30.0)	50	0.044	0.79
Zn, ng	52.0(0.31)	529.(236)	120	0.18	4.3
Ag, ng	0.08(0.33)			0.0041	0.027
Cd, ng	0.55(0.30)	1.39(0.42)	3	0.0035	
Pb, ng	78.0(0.40)	224(100)	170	0.12	9.9

\* : Per cubic meter

1 : Geometric mean conc. of 25 samples. Figures in parenthesis are one standard deviation of log transformed data.

2 : Lee et al. (1988) Seoul, Korea. Arithmetic mean conc. of 4 samples

3 : Young et al. (1975)

4 : R.A.Duce et al. (1983) Enewatek Atoll, North Pacific. Geometric mean conc. of 55 samples

5 : P. Buat-Menard and R. Chesselet (1979) Tropical Northeastern Atlantic Geometric mean conc. of 36 - 58 samples

#### 4.1.2 Na과 Mg

조사 정점의 대기 분진 중 Na농도는 태평양에 비하여 1.7배, Mg은 1.1배 낮다. 그러나 농도 범위는 본 연구의 경우 Na이 0.45-15.4 ug/m<sup>3</sup>, Mg이 0.18-1.65ug/m<sup>3</sup>로 변화 폭이 매우 큰데 반해 태평양의 경우 년중 Na 3.8-7.7 ug/m<sup>3</sup>, Mg 0.43-1.00ug/m<sup>3</sup>으로 비교적 일정한 값을 보여준다. 이는 해풍의 영향 여하에 따라 이러한 원소들의 농도가 크게 달라짐을 의미한다.

#### 4.1.3 Cu, Zn, Ag, Cd, Pb

Cu, Zn, Cd, Pb의 농도는 서울 분진보다 각각 20배, 10배, 2.5배, 2.9배 낮으나 태평양 보다는 Cu, Zn, Ag, Cd, Pb이 20배에서 650배 높은 값인데 이는 이들 원소들이 주로 인간 활동에 의해 대기로 유입되는 것이기 때문이다.

4.2 대기분진 및 분진에 함유된 금속의 기원  
각 원소들의 기원을 알아보기 위하여 가능한 기원에 대한 기준 원소를 정하고 이에 대한 농축인자(Enrichment factor)를 계산하였고 각 원소간의 선형 회귀 분석에 의한 상관 관계를 구하였으며, 인자 분석을 하였다.

#### 4.2.1 농축 인자(Enrichment factor)

일반적으로 농축인자는 해수에 대해선 Na을 기준 원소로 하며 이때 한 원소 X에 대한 농축인자 EF(sea)는

$EF(sea) = (X/Na)_{air} / (X/Na)_{sea}$  로 정의되며

여기서 (X/Na)<sub>air</sub>와 (X/Na)<sub>sea</sub>는 대기와 해수에서 원소 X와 Na 농도의 비를 나타낸다.

지각 구성 물질에 대한 기준 원소로는 Si이

적당하나 분석 방법이 보다 간단한 Al이 주로 많이 이용된다. 지각구성물질 기원에 대한 원소 X의 농축인자 EF(crust)는

$EF(crust) = (X/Al)_{air} / (X/Al)_{crust}$  로 정의된다.

어떤 원소의 농축인자가 1에 가까우면 그 원소의 기원은 기준 원소의 것과 같음을 의미한다. 그러나 (X/Al)<sub>sea</sub>와 (X/Al)<sub>crust</sub>는 각각 기준 물질에서의 기준 원소와의 비율이므로 지역에 따라 다소 차이를 보이기 때문에 일반적으로 농축인자 3-5 이하의 원소들은 기준원소와 같은 기원을 갖는 것으로 간주된다.

그림 2에는 만리포 대기분진 중의 금속에 대한 지각구성물질 및 해수에 대한 농축인자를 계산하고 그 범위와 평균값을 나타내었다. 여기서 지각중의 원소의 평균농도는 평균 지각물질의 값<sup>16)</sup>을 그리고 해수에서의 각 원소 농도는 Na, Mg, Al, Mn, Fe, Co, Ag에 대해선 Duce(1983)<sup>9)</sup>가 사용한 값을 Cu, Zn, Cd, Pb는 KORDI(1984, 1985)<sup>17)</sup>에서 조사된 황해 표층수의 농도를 각각 사용하였다. 이로 부터 Na과 Mg은 해수 기원임을 Al, Mn, Fe, Co, Ni은 지각구성물질 기원임을 각각 알 수 있다. 그러나 Cu, Zn, Ag, Cd, Pb는 두 기원 어느 것으로도 설명할 수 없는 농축된(Enriched)원소들로서 주로 인간활동에 의해 유입된 것으로 추정된다.

표 4는 지각구성물질에 대한 농축인자를 다른 지역의 것(서울 분진, 임해공업단지주변, 태평양, 대서양)과 비교한 값들인데 Mn, Fe, Co, Ni은 공통적으로 지각구성물질을 그 기원으로 하고 있음을 알 수 있고 Cu와 Zn는 서울 대기분진보다는 농축인자가 작고 대양보다는 컷으나 Cd과 Pb은 서울 및 태평양보다는 크고 미국 임해공업단지 주변이나 대서양보다는 그

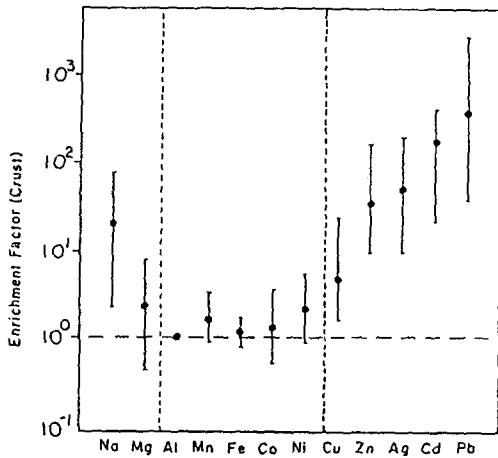


Fig. 2a Enrichment factors calculated relative to crustal material their range and geometric mean

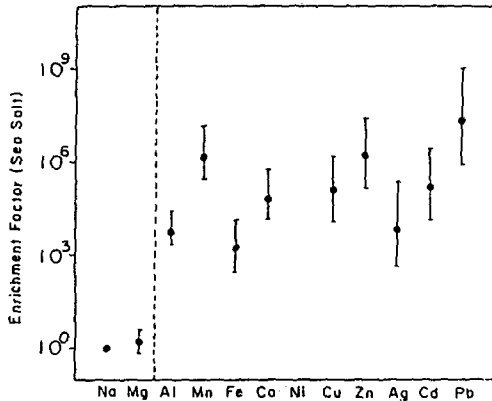


Fig. 2b Enrichment factors calculated relative to sea water, their range and geometric mean

인자가 작았다. 일반적으로 인간 활동에 의해 유입되는 Cd와 Pb는 미세한 입자에 농축되어 있으므로 대기분진이 근원에서 떨어질수록 이들의 농축인자는 더욱 커지게 된다. 미국 연안이나 대서양의 높은 농축인자는 이로 설명되어진다. 한편 태평양에서의 낮은 농축인자는 이해역이 오염원에서 매우 멀리 떨어져 있어서 비교적 오염이 덜된 분진들에 의해 희석된 것으로 해석된다. 그리고 서울의 경우 Cd와 Pb의 농축인자는 만리포에 비해서 낮는데 이것은 서울의 대기 분진이 자동차들에 의해 비산된

Table 4. Comparison of enrichment factors calculated relative to average crustal material\* for the aerosol samples

	This study	Urban Road 1	Urban Coast 2	Pacific island 3	Tropical Atlantic 4
Na	18.1			1800	
Mg	2.18			300	
Mn	1.60	1.35	1.4	0.96	1.1
Fe	1.11	1.27	1.2	0.84	0.9
Co	1.25		1.8	0.93	1.6
Ni	2.00	4.9			4
Cu	4.84	18.5	21	3.2	7
Zn	43	80.9	200	13	28
Ag	67		200	340	200
Cd	158	74.5	340	130	
Pb	358	193	1800	40	390

\* : S.R. Taylor (1964)

1 : Lee et al. (1988)

2 : Young et al. (1975)

3 : R.A. Duce et al. (1983)

4 : P. Buat-Menard and R. Chesselet (1979)

지각구성물질을 많이 함유하고 있음에 기인된 것 같다. 한편 Cu와 Zn는 Cd 및 Pb과 마찬가지로 인간 활동에 의해 유입되나 Cd이나 Pb의 경우와는 반대로 그 농축인자가 만리포에서 크게 줄어들었는데, 이는 이들을 함유한 입자가 비교적 커서 보다 빠른 속도로 제거됨에 연유된 것 같다.

#### 4.2.2 각 원소들간의 상관 관계

표 5에 나타나 있는 바와 같이 Al, Fe, Mn, Co, Ni은 서로 상관관계가 좋고 Al과 정의직선 관계에 있으며(그림3) 그 기울기가 평균 지각 성분과 거의 일치하므로 그 기원이 공통적으로 토양임을 알 수 있었다. Na은 Mg과 유일하게 상관성이 높았으며( $r=0.88$ ), Mg/Na 비율은 해수에서의 성분비와 비슷한 0.10이었다. Cu은 Zn와 Pb은 Cd, Ag 및 Zn와 상관성이 높았다. Pb, Cu, Cd, Zn는 대개 서로 상관성이 높는데 반해<sup>18)</sup>, 이 지역에서는



Table 5. Matrix of correlation coefficients

	Na	Mg	Al	Mn	Fe	Co	Cu	Ni	Zn	Ag	Cd	Pb
Na		<b>0.88</b>	0.22	-0.03	0.25	0.23	-0.46	-0.22	-0.48	-0.48	-0.47	-0.40
Mg			0.52	0.22	0.50	0.49	-0.42	-0.01	-0.43	-0.37	-0.48	-0.40
Al				<b>0.83</b>	<b>0.90</b>	<b>0.84</b>	0.04	<b>0.64</b>	0.09	0.27	-0.01	0.10
Mn					<b>0.80</b>	<b>0.72</b>	0.28	<b>0.79</b>	0.37	0.52	0.28	0.28
Fe						<b>0.82</b>	0.18	<b>0.74</b>	0.27	0.29	0.12	0.12
Co							-0.10	<b>0.68</b>	-0.02	0.26	-0.03	0.03
Cu								0.48	<b>0.81</b>	0.41	0.41	0.37
Ni									0.60	0.60	0.29	0.32
Zn										<b>0.72</b>	<b>0.59</b>	<b>0.66</b>
Ag											<b>0.61</b>	<b>0.86</b>
Cd												<b>0.69</b>
Pb												

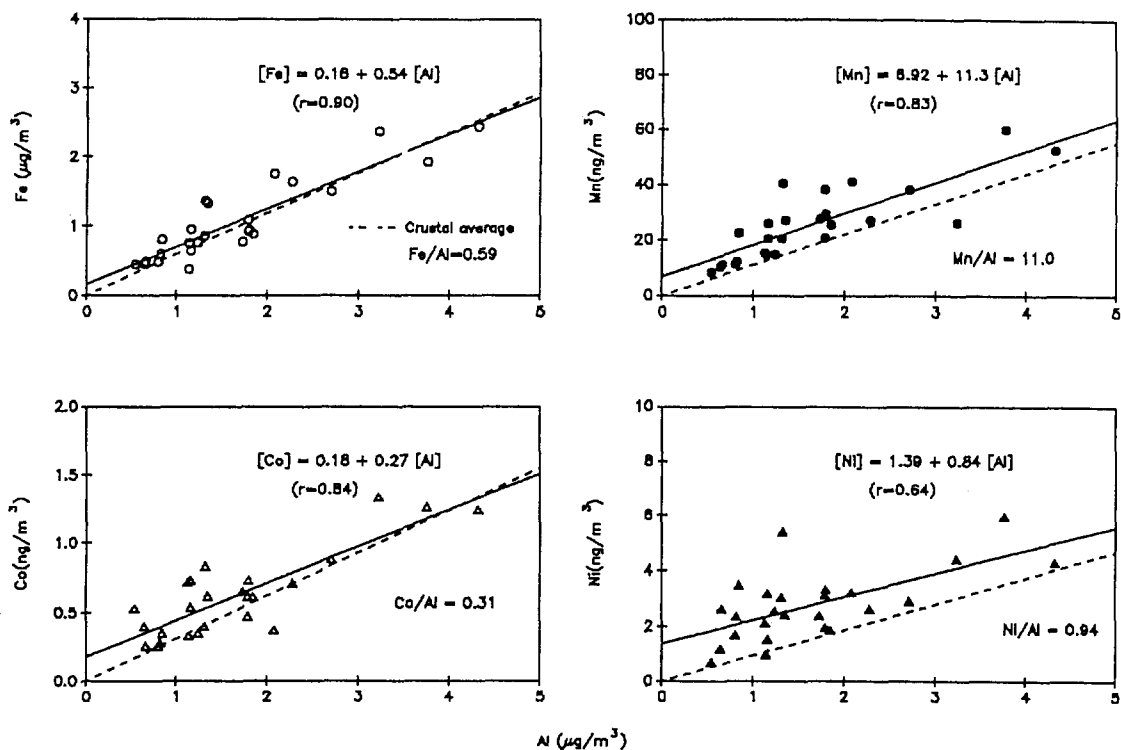


Fig. 3a Interrelationships between Al and crustal elements. Dotted lines designate the concentration ratios of metal/Al in earth crust.

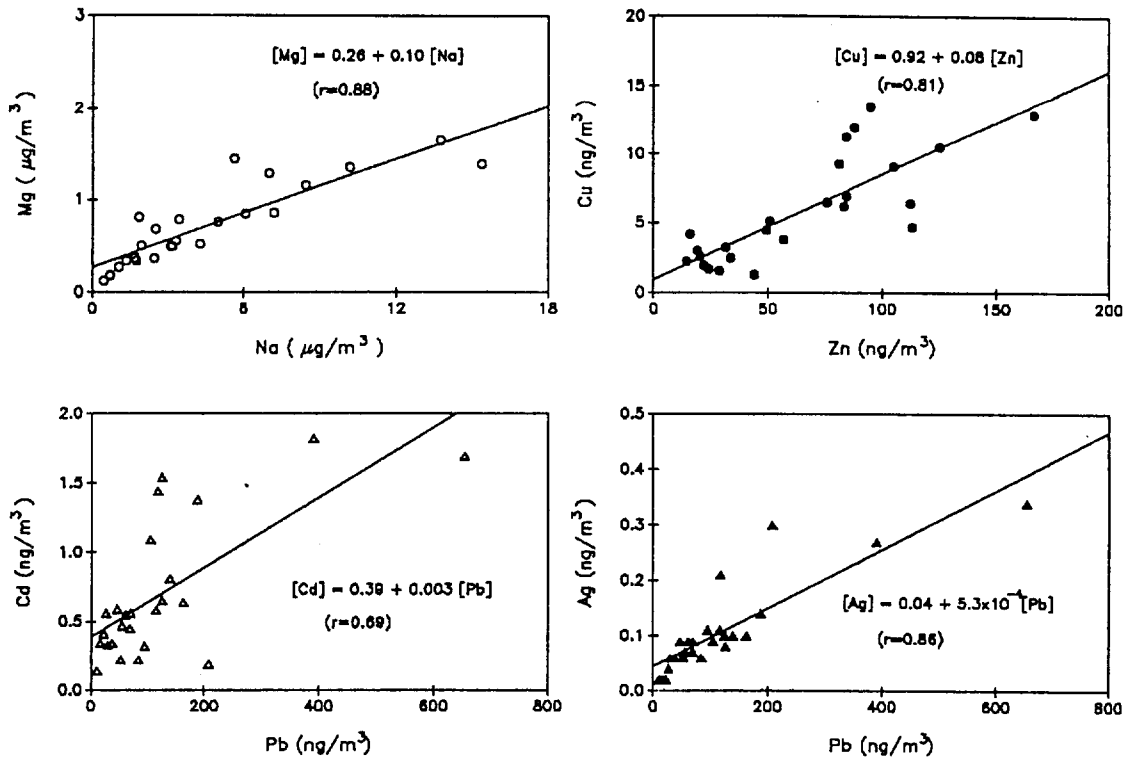


Fig. 3b Correlations between Na and Mg, and among air-pollution derived elements (Cu, Zn, Cd, Ag, and Pb)

Cu와 Zn, 그리고 Pb, Cd, 및 Ag로 나누어지고 있는데 이는 근원지(Source area)의 차이이거나 입자들의 물리, 화학적 특성 차이에 연유된 것 같다.

해염 입자(인자 3), 그리고 대기 중에 농축된 원소들인 Pb, Cd, Ag, Zn 및 Cu가 두개의

#### 4.2.3 인자 분석(factor analysis)

대기 분진 구성 성분의 기원을 분별 및 유추하는데 인자 분석(factor analysis)이 유용하다.<sup>19)</sup>

본 인자 분석에 사용된 인자로는 총 Eigenvalue가 90% 이내인 4개의 인자를 선택하였으며 Varimax회전법으로 각 금속의 4개 인자에 대한 인자 기여도를 계산하였다(표6). 인자 분석의 결과에 의하면 만리포 대기 분진은 Al, Mn, Fe, Co 및 Ni이 포함되는 토양 기원 물질(인자 1), Na과 Mg이 기여되는 悵

Table 6. Varimax rotated factor loading

Elements	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4
Na	0.079	-0.283	0.908	-0.212
Mg	0.385	-0.317	0.813	-0.227
Al	0.928	0.033	0.207	-0.019
Mn	0.881	0.234	-0.009	0.164
Fe	0.897	0.080	0.284	0.181
Co	0.925	0.007	0.119	-0.190
Cu	0.082	0.195	-0.227	0.919
Ni	0.812	0.201	-0.202	0.398
Zn	0.157	0.551	-0.192	0.755
Ag	0.351	0.813	-0.284	0.176
Cd	0.028	0.785	-0.221	0.220
Pb	0.066	0.943	-0.109	0.147

Factor	Eigenvalue	Cumulative %
1	5.12	42.7
2	4.01	76.1
3	0.95	84.0
4	0.74	90.2

인자(인자2, 4)를 구성하였다. 인자 2와 4에 속한 원소들은 주로 인위적인 오염에 의해 배출되는 원소들이나 농축인자와 원소 상관 관계에서도 볼 수 있듯이 근원지가 다르거나 같은 근원지라도 입자 크기의 차이에 의해 이동 과정 중의 변화에 기인한 것으로 추정된다.

## 5. 결 론

1988년 9월부터 12월까지 서해안 만리포 해안에서 25개의 대기 분진시료를 채취하고 Na, Mg, Al, Mn, Fe, Co, Zn, Pb, Cd 및 Ag 등 12개 원소를 정량하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 조사기간동안 만리포 대기분진중 금속들의 농도범위는 Al, Fe, Mn, Ni, Co가 각각  $0.54-4.32\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $0.45-2.43\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $8.3-52.7\text{ng}/\text{m}^3$ ,  $1.20-5.97\text{ng}/\text{m}^3$ ,  $0.26-1.33\text{ng}/\text{m}^3$  이었고 각각의 평균값(기하평균)은  $1.43\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $0.92\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $22.6\text{ng}/\text{m}^3$ ,  $2.50\text{ng}/\text{m}^3$ ,  $0.55\text{ng}/\text{m}^3$  이었다. Na과 Mg은 각각  $0.45-15.4\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $0.12-1.65\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 범위를 보이며 평균값은  $3.10\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $0.57\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. Cu, Zn, Ag, Cd, Pb는 조사기간중 각각 1.30-13.5, 16.1-166.8, 0.02-0.34, 0.14-1.82, 10.9-654.2  $\text{ng}/\text{m}^3$ 의 농도 범위를 보였으며 평균 농도는 각각 4.68, 52.0, 0.08, 0.55, 78 $\text{ng}/\text{m}^3$ 이었고, 이 값들은 서울 분진에 비해 2.5-20배 낮았으나 태평양보다는 75-650배 높은 값이었다.

(2) 각 원소들은 토양 입자(Al, Mn, Fe, Co, Ni), 해염 입자(Na, Mg) 그리고 산업 활동에 따른 대기 오염 입자(Pb, Cd, Cu, Zn, Ag)들에 지배 받는다.

(3) 대기중에 농축된 원소 중 Cu와 Zn, Pb

과 Cd 및 Ag가 서로 상관성이 좋았으며 Pb과 Cd은 서울과 비교하여 농축 인자가 2배 크고 Cu와 Zn는 2-3배 작으므로 Pb과 Cd은 주로 미세입자로 존재하여 먼 거리까지 이동될 수 있음을 보여준다. 인자 분석의 결과도 마찬가지로 Cu와 Zn는 Pb, Cd 및 Ag와 다른 인자에 속하였는데 이는 근원지의 차이이거나 같은 근원지라도 물리, 화학적 성질이 달라 이동 과정 중에 변화가 있었으리라 추정된다.

## 6. 요 약

1988년 9월부터 12월까지 서해안 만리포에서 25개의 대기 분진시료를 채취하여 12개 원소(Na, Mg, Al, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Cd, Ag, 및 Pb)의 농도를 원자 흡수 분광법으로 측정하였다. 이 지역 대기 분진은 주로 지각 구성 물질인 광물 입자로 구성되었으며 구형의 fly ash 입자들도 관찰되었다. 대기 분진 및 금속들의 기원을 농축 인자 및 상관 계수 계산, 그리고 Varimax회전법에 의한 인자 분석을 통하여 살펴보았다. Al, Mn, Fe, Co, 및 Ni은 주로 토양 입자에 Mg과 Na은 해염 입자에, 그리고Cu, Zn, Cd, Ag, 및 Pb은 대기 오염물질에 포함되어 있는 것으로 나타났다. Cd과 Pb의 농축인자는 서울보다 2배 컸으며, Cu와 Zn의 농축 인자는 2-3배 작았다. Cu는 Zn와, Pb은 Cd 및 Ag와 상관 관계가 좋았다. 농축인자, 상관 관계 및 인자 분석의 결과 대기 오염 기원 원소 중 Cu와 Zn는 Pb, Cd, 및 Ag와는 다른 양상을 보이는데 이는 근원지의 차이나 혹은 각 원소들의 입도 특성의 차이에 기인된 것으로 추정된다.

이 연구는 과학 기술처의 기본 연구사업의 일환으로 수행되었다.

(원고접수 '89. 9.16)

## 참 고 문 헌

- 1) Nriagu-JO, (1986), What fraction of the total metal flux into lakes is retained in the sediments? *Water Air Soil Pollut.*, 31, 3-4, 999-1006.
- 2) Klomp R., J.A.V. Pagee, P.C.G. Glas, (1985), An integrated approach to analyse the North Sea ecosystem behaviour in relation to waste disposal, presented at: NATO Advanced Research Workshop on Scientific Basis for the Role of the Oceans as a Waste Disposal Option, Vilamoura, Algarve, Portugal.
- 3) Buat-Menard P., R. Chesselet, (1979), Variable influence of the atmospheric flux on the trace metal chemistry of oceanic suspended matter, *Earth & Planet. Sci. Lett.*, 42, 399-411.
- 4) Blank M.L., J.M. Prospero, (1985), Major Asian aeolian inputs indicated by the mineralogy of aerosols and sediments in the western North Pacific, *Nature*, 314, 84-86.
- 5) Maring H.B., R.A. Duce (1987), The impact of atmospheric aerosols on trace metal chemistry in open ocean surface seawater, 1. Aluminum, *Earth & Planet. Sci. Lett.*, 84, 381-392.
- 6) Moore R.M., J.E. Milley, A. Chatt, (1984), The potential for biological mobilization of trace elements from aeolian dust in the ocean and its importance in the case of iron, *Oceanologica Acta*, 7, 2, 221-228
- 7) Statham P.J., R. Chester, (1988), Dissolution of manganese from marine atmospheric particulates into seawater and rainwater, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 52, 2433-2437.
- 8) National Academy of Sciences, The tropospheric transport of pollutants and other substances to the oceans, Washington, D.C., 1978.
- 9) Duce R.A. et al., (1983), Atmospheric trace elements at Enewetak Atoll : 1, concentrations, sources, and temporal variability, *J. Geophys. Res.*, 88, 5321-5342.
- 10) Van Loon J.C., (1985), Selected methods of trace metal analysis; Biological and Environmental samples, John Wiley & Sons.
- 11) Statistical Yearbook, (1987), Chap III Statistics of basic economic activity, UN, New York
- 12) 정 용, 장재연, 주의근, (1987), 도시대기 중 중금속에 관한 연구 -서울시 신촌지역을 중심으로-, *한국대기보전학회지*, 3, 2, 18-26.
- 13) 이용근 외 3인, (1988), 이단 필터 샘플러에 의한 대기 부유분진의 포집 및 금속 성분의 계절별 거동에 관한 연구, *한국대기보전학회지* 4, 2, 20-27.
- 14) Benarie M.M., (1980), Urban air pollution modelling, Chap. 14, The MIT Press
- 15) Young J.A. et al., (1975), The use of elemental concentration ratios to distinguish between the plumes of different northeastern cities, *Ann. Rep.*, Battelle Northwest Laboratories, Richland, Wash
- 16) Taylor S.R., (1964), Abundance of chemical elements in the continental crust: A new table, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 28, 1273-1285.
- 17) 해양연구소, (1984, 1985), 한국 해역 종합 해양환경도 작성연구 -황해-
- 18) Moyers J.L., et al, (1977), Evaluation of particulate trace species in Southwestern desert atmosphere, *Environ. Sci. & Technol.* 11, 8, 789-795
- 19) Chen L., R.A. Duce, (1983), The source of sulfate, vanadium and mineral matter in aerosol particles over Bermuda, *Atmos. Environ.* 17(10).