

## PIXE 분석법을 이용한 대기분진 중 함유원소 분석

### PIXE Analysis for Elemental Analysis in Aerosol

김덕경 · 최한우 · 우형주 · 김영석 · 홍 완 · 김낙배 · 이진홍<sup>1)</sup>

한국자원연구소, 분석연구부

<sup>1)</sup>충남대학교, 환경공학과

(원고접수; 1993. 12. 1)

Duk Kyung Kim, Han Woo Choi, Hyung Joo Woo, Young Suk Kim  
Wan Hong, Nak Bae Kim, Jin Hong Lee<sup>1)</sup>

Analysis Research Division, Korea Institute of Geology, Mining and Materials

<sup>1)</sup>Department of Environmental Engineering, Chungnam National University

(Received 1 December 1993)

#### Abstract

PIXE(Proton Induced X-ray Emission) analysis has been applied to the analysis of aerosol for the purpose of pollution monitoring. Coarse and fine particle fractions were sampled selectively, using Nuclepore filter in stacked filter units, once a month from February to September in 1993 at urban and rural sites. Concentration of 9 elements, Si, S, K, Ca, Mn, Fe, Cu, Zn and Pb was determined without pretreatment of samples. Comparison of data between urban and rural site revealed higher elemental concentration level in urban aerosol. From April to May aerosol sampling was carried out daily to observe the effect of Yellow Sand on the composition of aerosol in the Korean Peninsula. During the Yellow Sand period, Si, Ca, Fe content level in aerosol became more than 5 times higher than normal. The elemental concentration of the aerosol samples of Daejeon City was compared with that of two foreign cities. S and Pb (which are fuel-derived elements) levels in Daejeon City aerosol appeared to be lower than those of foreign cities. And it may be due to the leaded-fuel restriction policy of Korean government since 1987.

#### 1. 서 론

도시의 산업화가 진전되면서 윤택한 생활을 위한 산업의 발전이 오히려 생활환경을 오염시켜 인간의 생존권을 위협하는 시기에 도달하게 되어 최적 생활환경 수호를 위한 기본자료로서의 분석은 날로 그 중요성을 더해가고 있다. 한편 산업화에 의한 대기오염에 관한 연구로서 대기 중 발암물질의 유포 상황 분석 등 유기물의 분석에 대한 연구는 상당히 활발하게 진행되어 왔으나, 인체에 치명적인 영향을 주는 중금속 등 무기물에 대한 분석은 분석기기의

분석감도 등이 그에 미치지 못하는 이유 등으로 인하여 상대적으로 경시되어 온 듯 하다. 그러나 대기 중의 분진 중 무기원소는 비록 미량 함유량이라 하더라도 호흡을 통하여 끊임없이 인체 내에 축적될 가능성이 있기 때문에 현재 대기중의 함유량 상태에 대한 분석 및 상태비교 작업은 결코 경시할 수 없을 것이다.

대기분진 중 무기원소의 분석에 주로 사용되는 분석법으로는 NAA(Neutron Activation Analysis), PIXE(Proton Induced X-ray Emission spectrometry), XRF(X-Ray Fluorescence), AAS(Atomic

Absorption Spectrometry), ICP(Inductively Coupled Plasma spectrometry) 및 ICP-MS 등이 있다. 이중 NAA, PIXE, XRF 등은 비파괴 분석방법이며, 또한 다원소 동시분석적 특성을 지니고 있다. 정량가능한 원소수는 NAA의 경우 30-40개, PIXE나 XRF의 경우 15-20개 정도가 되나, PIXE나 XRF의 경우 상대적으로 분석이 신속하게 이루어진다는 장점이 있다. 이와 비교하여 AAS는 원소분석 시 시료를 용액상태로 만들어야 하며 일대일 대응식의 분석작업이 행해져야 하고, ICP 또는 ICP-MS 방법 등의 경우도 유사하다. 분석에 필요한 소오 시료량의 관점에서 본다면 용액시료를 필요로 하는 분석법의 적용시 최소 필요 시료소요량은 수십 mg 이상이 되며, NAA의 경우 수 mg 정도, XRF의 경우는 0.1-1mg 정도이고, PIXE 분석법의 경우는 소오량이 가장 적어 10-100 $\mu$ g 정도로도 충분하며, 분석하고자 하는 표적원소의 절대량이 pg 정도만 있어도 분석이 가능하다(Johansson, et al., 1976).

PIXE 분석법의 원리는 고에너지의 이온빔(주로 양성자)을 시료에 조사시켜 시료 내 원자들을 여기시켜 내각전자를 방출하게 만들고, 뒤 이온 안정화 과정에서 내각전자 궤도를 외각전자들이 채울 때 발생하는 함유원소들의 특성 X-선을 검출하여 분석에 이용하는 것이다. 특성 X-선은 각 원소마다 고유의 에너지를 지니고 있으며, 원자번호의 증가에 따라 발생하는 X-선의 에너지도 높아진다. 입사된 양성자의 에너지가  $E_{\text{ion}}$ 일 때 검출되는 특성 X-선의 관계식은 다음과 같이 주어진다(Maenhaut, 1987).

$$Y(Z) = 6.241 \times 10^6 N_A / M(Z) \cos\theta \sigma_x(Z, E_{\text{ion}}) \left[ \frac{\Omega}{4\pi} \epsilon_R(E_x) T(E_x) \right] \text{Abs}(E_{\text{ion}}, E_x, mtx) Qm(Z)/A \dots\dots\dots(1)$$

여기에서  $Y(Z)$ 는 원자번호  $Z$ 인 원소에서 방출되는 특성 X-선 피크의 계측수,  $N_A$ 는 Avogadro수,  $M(Z)$ 는 원소  $Z$ 의 원자량,  $\theta$ 는 표적물의 법선과 빔 방향간의 각도,  $\sigma_x(Z, E_{\text{ion}})$ 는 특성 X-선의 발생 반응단면적( $\text{cm}^2$ ),  $\Omega$ 는 검출기의 입체각,  $\epsilon_R(E_x)$ 는 X-선 에너지  $E_x$ 에 대한 Si(Li) 검출기의 검출효율,  $T(E_x)$ 는 표적과 검출기 사이의 X-선 흡수막을 투과하는 X-선의 투과율,  $\text{Abs}(E_{\text{ion}}, E_x, mtx)$ 는 시료 매질내에서의 양성자 에너지 감소와 시료 매질내에서의 X-선 감쇄를 포함하는 매질흡수계수,  $Q$ 는 시료에 조사된 총하전량( $\mu\text{C}$ ),  $m(Z)$ 는 시료에 포함된 목적원소  $Z$ 의 질량( $\mu\text{g}$ ) 그리고  $A$ 는 시료의 면적( $\text{cm}^2$ )이다. 이때 고정 가능한 파라메타들의 조합인 검량인자  $C(\text{count}/\mu\text{C}/\mu\text{g cm}^{-2})$ 를 다음과 같이 표현할 수 있으므로,

$$C(Z, E_{\text{ion}}, E_x) = 6.241 \times 10^6 N_A / M(Z) \cos\theta \sigma_x(Z, E_{\text{ion}}) \left[ \frac{\Omega}{4\pi} \epsilon_R(E_x) T(E_x) \right] \dots\dots\dots(2)$$

식 (1)은 다음과 같이 나타낼 수 있게 된다.

$$Y(Z) = C(Z, E_{\text{ion}}, E_x) \text{Abs}(E_{\text{ion}}, E_x, mtx) Qm(Z)/A \dots\dots\dots(3)$$

이때 검량인자는 물리적인 파라메타들을 수집하여 절대적인 방법으로 구할 수도 있지만 개개의 원소로 도표된 박막 표준시료를 계측하는 상대적인 방법으로 구한 값을 쓰는 것이 방법상으로 쉽고 계산상의 오차를 없앨 수도 있다. PIXE 분석법을 적용하기 위한 대기분진시료의 경우 포집된 시료의 양이 보통 필터 전체에서 수백  $\mu\text{g}$  이내의 양이기 때문에 매우 적으므로 시료의 매질보정항은 무시가능하며, 조사된 양성자의 총누적전하량은 계측시 전류계분계를 통하여 알 수 있기 때문에 발생 X-선의 양은 시료에 함유된 목적원소의 질량  $m(Z)$ 으로 바로 환산 가능하게 된다.

PIXE 분석법의 경우 시료포집에 소요되는 시간이 적으며, 시료 전처리 과정이 필요없고, 분석에 소요되는 시간이 극히 짧다는 장점은 있으나, 주요 장비로 고가의 MV급 가속기를 필수로 하고 있기 때문에 일반 연구실에서는 이 분석법의 도입이 쉽지 않다. 한국자원연구소에서는 1988년 중반에 중심전압 1.7MV급의 tandem식 VDG 가속기를 도입하여 PIXE 및 RBS 분석 전용으로 활용하고 있으며, 연구소 자체의 분석시료 외에 외부의뢰 시료의 경우에도 분석에 응하고 있다.

본 연구에서는 PIXE 분석법을 이용하여 대기분진중 함유원소량 측정을 하기 위한 적용목적으로 시료 포집 시스템을 설계 제작하였고, 계측용 시료로서 한반도에 황사가 불어오는 기간인 4월부터 5월의 시기에는 하루 1회씩 대전의 연구단지내에서, 그리고 그외의 기간에는 한달에 1회씩 대전시내의 교통량이 많은 곳과 교통량이 없는 전북지역의 오지에서 각각 분진시료 포집을 하여 분석한 결과를 시기별, 지역별로 비교해 보았다.

## 2. 실험방법

### 2.1 대기분진 포집

도시지역의 대기분진은 생성원인에 따라 대략 지름 1-2 $\mu\text{m}$ 를 경계로 조대입자군과 미세입자군으로 나눌 수 있으며(Butcher, et al., 1973), 호흡을 통한 대기의 흡입 후 분진입자가 인체내에서 미치는 영향은 미세입자의 경우가 거친입자의 경우보다 높으

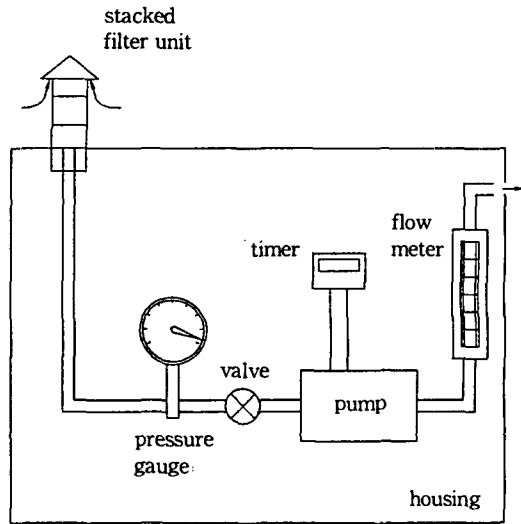


Fig. 1. Schematic diagram of the two stage aerosol sampler.

므로(Natusch et al., 1974), 본 연구에서는 2단 포집기를 사용하여 입자크기별 분리포집을 시도하였다.

그림 1에 2단 포집장치의 개략도가 나타나 있다. 시료 포집기는 이동가능형으로 설계, 제작되었으며(우형주 등, 1992), 12V-90 AH 용량의 자동차용 축전기를 전원으로 사용하여 격막펌프를 작동시키도록 하였고, 타이머가 설치되어 있다. 이 포집기에 전단필터로서 조대입자의 포집을 위한 필터로는 8  $\mu$ m의 미세구멍이 있고 표면에 Apiezon이 발라져 있는 Nuclepore 필터를, 나머지 미세입자의 포집을 위한 후단필터로는 0.4  $\mu$ m의 미세구멍이 있는 Nuclepore 필터를 사용하였다. 필터와 펌프 사이에는 진공압력계가 설치되어 있어 압력강하에 대한 고려를 할 수 있도록 하였으며, 유속은 대기압 상태에서 유속보정을 거친 유량계를 사용하였다. 분진포집기의 상부에는 외부바람 및 큰 먼지 등의 영향을 줄이기 위하여 샷갓모양의 흡입구를 만들어 주었다. 사용 포집필터의 폭은 20mm였으며, 2L/min의 유속으로 분진포집을 하였다.

분진 포집지역으로 대기오염도가 비교적 심하다고 생각되는 지점으로서 대전지역의 중심가인 원동 4거리를 선택하였고, 오염도가 낮은 지역으로서 전북 진안군 현암면 송풍리 소재의 산골마을을 선택하여 매월 1회씩 분진포집을 하였으며, 대전 원동 지역의 경우 3시간 30분씩, 전북 산골지역의 경우 6시간씩 분진포집 하였다. 한편 국내에 미치는 황사의 영향을 파악하기 위하여 대전시 유성구 연구단

지에 소재한 한국자원연구소의 정문에서 하루 7시간씩 4월부터 5월에 걸쳐 분진포집을 하였다. 포집된 분진시료는 필터위에 분진입자들이 가속충돌하여 쉽게 필터로부터 분리되지 않는 상태로 남아 있으며, 육안상으로 필터위에 약간의 포집흔적만이 관찰되는 정도의 양이 포집되었다.

2.2 분진시료 계측

포집된 분진시료는 그림 2에 나타나 있는 형태의 PIXE 표적함에 넣어져 2.428MeV로 가속된 양성자빔으로 조사되었다. PIXE 표적함은 한번에 20개의 시료가 장착된 후 진공상태로 양성자빔 조사가 이루어 지도록 되어 있으며, X-축 517Hz, Y-축 54Hz의 주파수로 흔들어서 균질 이온빔 상태로 된 양성자빔이 시료에 조사되는 폭은 8mm이다. 분진에 함유된 원소의 절대량 측정시에는 시료에 조사된 양성자빔의 양을 정확히 알아야 하기 때문에 정밀측정을 위하여 표적함 전체를 Faraday칩으로 사용하였으며, 이 경우 2차전자의 유출 등으로 발생될 수 있는 전류적분상의 오차소지를 없앨 수 있다.

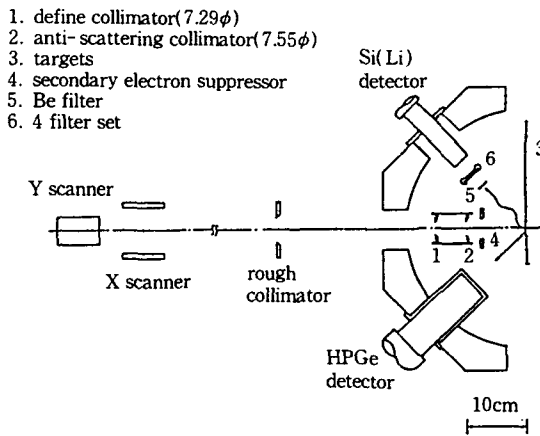


Fig. 2. Schematic diagram of the PIXE beam line and end station.

기본적으로 필터 자체에 함유되어 있는 불순원소의 양을 실제 시료의 정량시에 보정해 주기 위하여 분진시료의 계측 전에 전 후단 필터 각각에 대하여 미리 10개씩의 백그라운드 계측을 하여 이들의 평균값을 보정치로 사용하였다. 시료에 조사된 양성자빔의 총 조사량은 30nA의 조건에서 24 $\mu$ C이었으며, 이는 계측시간상으로 약 13분 정도에 해당한다. 계측된 각 시료의 스펙트럼은 다음 단계의 스펙트럼 해석을 위하여 자동으로 MCA에서 micro-VAXII

컴퓨터로 저장된다.

### 2.3 스펙트럼 해석 및 정량

발생 X-선 스펙트럼 전부를 에너지 분산형의 Si(Li)검출기로 검출하는 경우 피크들 간의 중첩이 심하고 또한 발생 2차전자 및 이온들로 인한 제동복사 효과에 의하여 백그라운드의 영향이 매우 복잡하게 나타나는 양상을 띤다(Ishii, et al., 1984). 그러므로 PIXE 분석법에서는 얻어진 스펙트럼으로부터 함유원소의 X-선 피크를 정확히 분리해 내는 것이 중요한 문제가 된다.

본 실험에서는 비선형 최소자승법을 사용하는 AXIL프로그램(Espen et al., 1977)을 사용하여 PIXE 스펙트럼을 해석하였다. 표 1에 AXIL 프로그램의 사양이 나타나 있다. AXIL 프로그램에서는 Gaussian 분포의 X-선 피크와 피크클림, 백그라운드에 관계되는 선형 다항식과 멱급수 등의 성분이 포함되는 수식의 상수항 부분들에 대한 비선형 최소자승법 맞추기(fitting)를 거치는 방식으로 복합 X-선 스펙트럼을 해석하여 각기 원소의 피크에 대한 계측수를 계산한다. 이 경우 맞추기에 소요되는 시간은 원소의 갯수, 초기 입력자료의 정확도 등에 의해 약간씩 좌우되어 약 1~5분 정도 된다.

Table 1. Specification of AXIL program.

classification	function
fitting procedure	non-linear least squares
background model	polynomial, exponential, exponential with absorption mode
peak shape model	Gaussian+numerical correction
other peaks in spectrum model	escape+pileup
running language	Fortran 77
program mode	interactive or automatic batch
size of code	80 kB
computer configuration	micro-VAX II under VMS
CPU time	for 10-20 elements : about 1 min.
max. no. of elements for 1 run	48 elements

AXIL 프로그램을 거쳐 나온 데이터는 각각의 X-선 피크에 대한 계측수로 출력되어 나온다. 이 수치를 계측에 소요된 이온빔의 누적전하량( $\mu\text{C}$ )으로

보정한 뒤 각각의 원소에 대하여 결정되어 있는 시스템 검량인자값  $C(\text{count}/\mu\text{C}/\mu\text{g cm}^{-2})$ 를 사용하여(식(2) 참조) 최종적으로 필터에 포집된 각각의 원소량을 산출하게 된다.

시스템의 검량인자 산출시에는 Micromatter사의 박막 표준시료를 구입 계측하여 결정하였으며, 인자값의 정확도를 높이기 위하여 박막시료에 도포된 원소의 보증값을 가속 헬륨입자를 사용하는 RBS분석법으로 재정량하여 도포두께에 대한 오차값을 2-3% 이하로 낮추었다(김낙배 등, 1990).

### 3. 결과 및 고찰

그림 3에 9월달에 대전시내에서 포집한 분진필터에 대한 PIXE 스펙트럼이 나타나 있으며, 1993년 2월부터 9월에 걸친 계절별 대기중 원소함유량의 변화를 살펴보기 위하여 Si, S, K, Ca, Mn, Fe, Cu, Zn 그리고 Pb의 9종 원소의 함량에 대하여 조대입자에 대한 분석결과를 표 2에 미세입자에 대한 분석결과를 표 3에 각각 나타내었으며, 여기서 원소함유량의 단위는 기준 대기부피당의  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이다. 각각의 표에는 대전 중심지와 교통량이 없는 전북 진안군 산골지역에서의 분석결과가 대비되어 나타

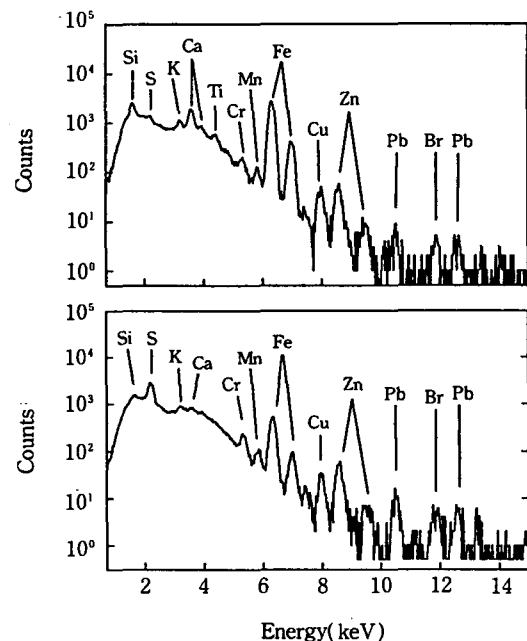


Fig. 3. PIXE spectra of the aerosol samples collected from the downtown of Daejeon City in September, 1993.(upper : coarse particle; lower : fine particle).

나 있다. 한편 Ti, Cr, Br 등의 원소들은 그림 3의 X-선 스펙트럼상에는 나타나 있으나, 여타 시기, 지역별 분진필터 분석에서 나타나지 않는 것도 있고, 필터자체에 함유되어 있는 양과 비교되어 무시 가능한 성분 등도 있어 정량을 하지 않았다.

표 2와 표 3을 살펴보면 대기중의 함유원소들은 계절별로는 겨울과 봄에, 그리고 지역별로는 대체로 분진의 발생원이 밀집된 도심지역의 대기 중에서 높은 함량을 나타냄을 알 수 있다. 특히 Fe, Zn 그

리고 Pb 등의 중금속류는 대전시내 지역의 경우가 전북의 산골 지역에 비하여 수배 이상의 대기 중 함유량을 나타내고 있다. 한편 조대입자의 경우 대전시내 지역과 진안군의 경우 모두 토양성분으로부터 파생된 Si, K, Ca, Fe의 함량이 미세입자중의 함량 보다 높은 수치를 나타내고 있고, 반면 미세입자중의 S와 Pb의 함량은 조대입자중의 함량보다 4 배 이상 높은 수치를 나타내고 있다.

Table 2. Analytical result of coarse particle aerosols by PIXE.(unit :  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

element	Daejeon City				Jinan-gun			
	win.	spr.	sum.	aut.	win.	spr.	sum.	aut.
Si	6.43	8.14	4.24	1.87	2.47	3.57	1.41	1.34
S	1.16	0.68	0.48	0.38	0.45	0.35	0.20	0.087
K	1.17	1.34	0.77	0.36	0.41	0.62	0.31	0.44
Ca	2.28	2.79	1.49	0.72	0.98	1.28	0.32	0.26
Mn	0.061	0.064	0.051	0.032	0.021	0.029	0.019	0.021
Fe	2.11	2.58	2.84	0.88	0.59	0.93	0.31	0.22
Cu	0.064	0.29	0.050	0.037	0.047	0.021	0.097	0.020
Zn	0.12	0.11	0.11	0.22	0.010	0.014	0.0057	0.0024
Pb	0.046	0.030	0.035	0.015	-	0.0054	0.0024	0.0085

Table 3. Analytical result of fine particle aerosols by PIXE.(unit :  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

element	Daejeon City				Jinan-gun			
	win.	spr.	sum.	aut.	win.	spr.	sum.	aut.
Si	1.53	1.88	0.90	0.76	0.99	1.12	0.60	0.38
S	2.67	2.79	3.09	2.86	2.55	2.20	2.83	1.90
K	0.61	0.63	0.35	0.24	0.50	0.37	0.33	0.22
Ca	0.51	0.54	0.27	0.18	0.30	0.31	0.13	0.17
Mn	0.063	0.031	0.047	0.034	0.017	0.020	0.015	0.027
Fe	0.51	0.05	0.40	0.31	0.22	0.23	0.11	0.11
Cu	0.050	0.029	0.027	0.021	0.043	0.018	0.072	0.014
Zn	0.22	0.072	0.184	0.090	0.025	0.023	0.019	0.020
Pb	0.18	0.052	0.057	0.058	0.030	0.027	0.013	0.030

그림 4에 Si, S, Ca, Fe, Zn 그리고 Pb의 대기 중 함유량의 월별 함량변화 추이를 나타내었다. 그림에서 가로축은 시료가 포집된 월별 표시, 세로축은 함량이며, 상부의 그림은 거친입자의 경우이고 하부의 그림은 미세입자의 경우이다. 또 각 그림별로 열린 원으로 표시된 것은 대전시내 원동에서 포집한 시료의 결과이고 닫힌 원으로 표시된 것은 전북 산골지역의 결과이다. 함유원소별로 거친입자와 미세입자 대비 변화 추이는 월별로 유사한 경향을 보이고 있다. 여기에서 특이한 것은 Pb의 월별 함

량변화 추이이다. Pb 함량의 경우 기온과 관계되어 난방용 기름의 소비가 많은 추운계절에는 높은 대기 중 함량을 나타내고 날씨가 더운 여름의 대기 중 함량은 낮게 나타내고 있음을 알 수 있다. Pb의 대기 중 함량이 기름의 소비와 관계된다고 생각되는 근거로서, 전북 산골지역의 경우 날씨가 추운계절에도 기름의 소비가 없는 지역으로 이 지역의 대기분진 중에서는 계절에 관계 없이 Pb의 함량이 거의 무시될 정도 밖에는 검출되지 않고 있다는 점도 들 수 있을 것이다. 이러한 양상은 10월 이후에 대

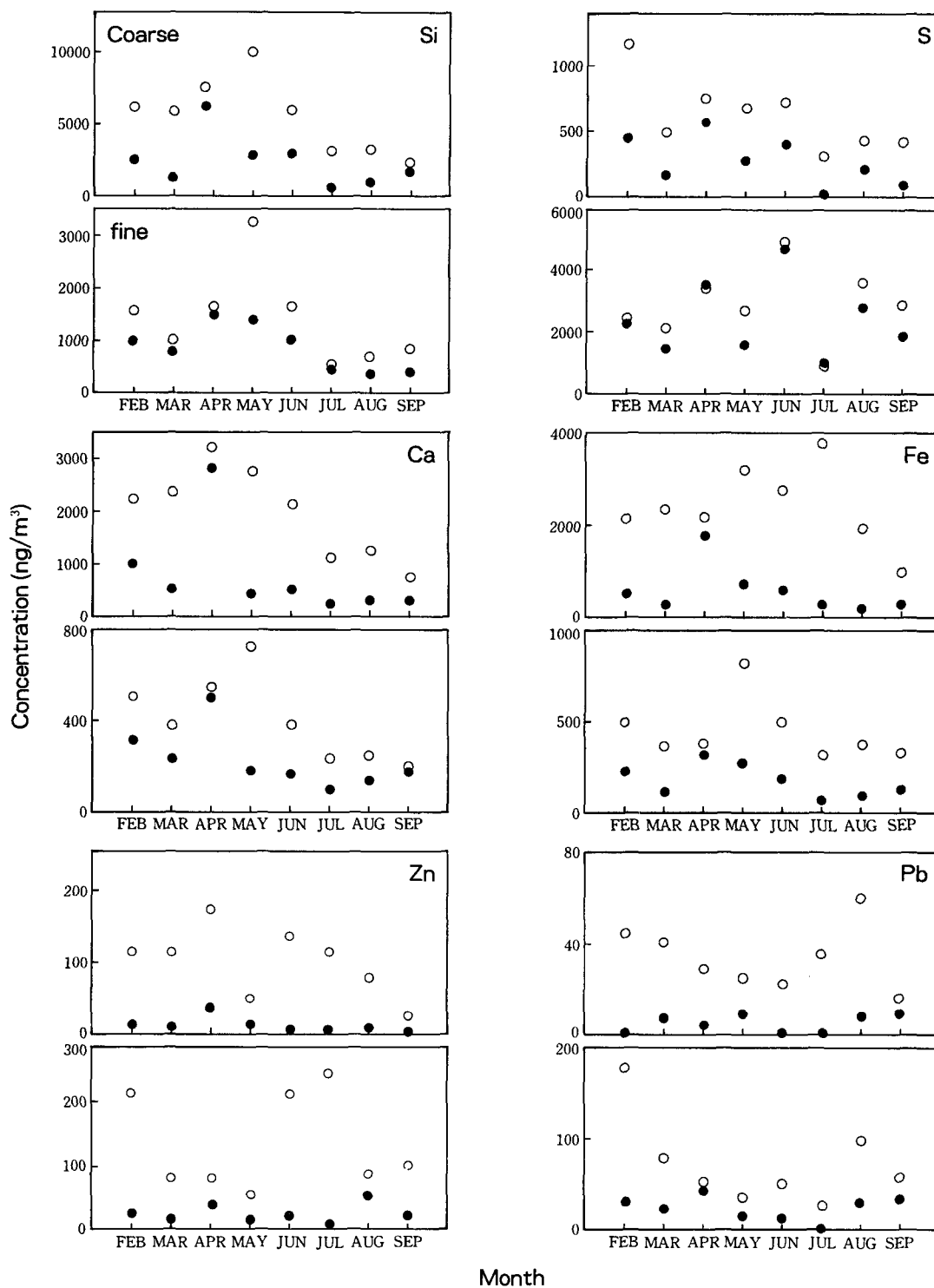


Fig. 4. The monthly variation of elemental concentration( $\text{ng}/\text{m}^3$ ) at the sampling sites of Daejeon City( open circle) and Jinan- gun( closed circle).

기본진 시료에 대한 추가 포집 및 분석이 행하여질 경우 더욱 확연히 드러날 것으로 보인다.

한반도에 미치는 황사의 영향을 살펴보기 위하여 4월부터 5월에 걸쳐 대전 한국자원연구소 정문에서 좀더 빈번한 시료채취를 하여 원소분석을 하였다. 그림 5의 상부에 Si, Ca, Fe 그리고 하부에 S, Zn, Pb 원소의 날짜별 원소함량 변화 추이를 나타내었다. 그림에서는 가로축이 날짜를 세로축이 함량을 나타내며, 이들 그림은 조대입자와 미세입자 결과의 합산 값으로 나타낸 결과이다. 그림에서 보면 Si, Ca, Fe의 원소함량이 급격히 증가한 날들이 있는데 이는 대전지역이 황사의 영향을 받았던 기간과 일치하고 있으며, 현재 황사에 의해 한반도의 대기중으로 직접적으로 유입되는 주요 원소는 Si, Ca, Fe 라는 것을 알 수 있으며, 황사기간중의 대기 중 이들 원소의 함량은 평소보다 5배 이상이 될 수 있다는 것을 알 수 있다. 하부 그림에 나타난 S, Zn, Pb의 함량변화에서 특이한 점은 황사가 불어왔던 시기로 부터 7일-10일 정도의 시간후에 갑자기 대기중 함량이 높아지는 것이며, 그 양은 평소보다 3 배 정도까지 높은 수치를 보이고 있다. 이러한 함량 변화의 특이성은 현재는 규명이 곤란하고 다음 해의 황사기간 중 보충분석을 행한 후에야 보다 정확한 경향 파악이 가능할 것 같다.

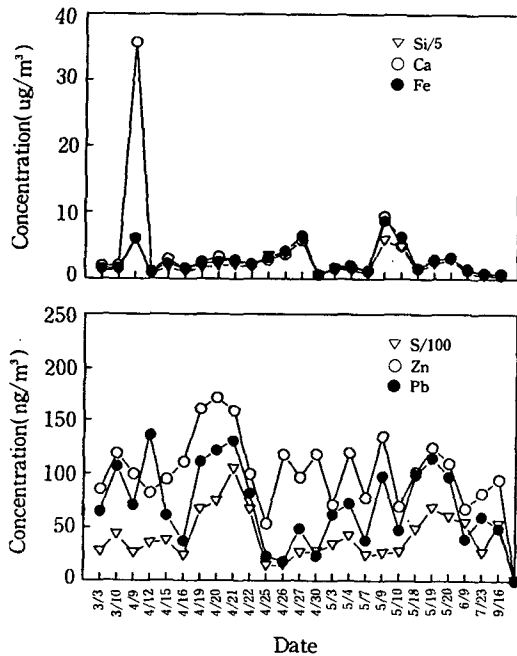


Fig. 5. Daily trend of elemental concentration in air collected during the Yellow Sand period.

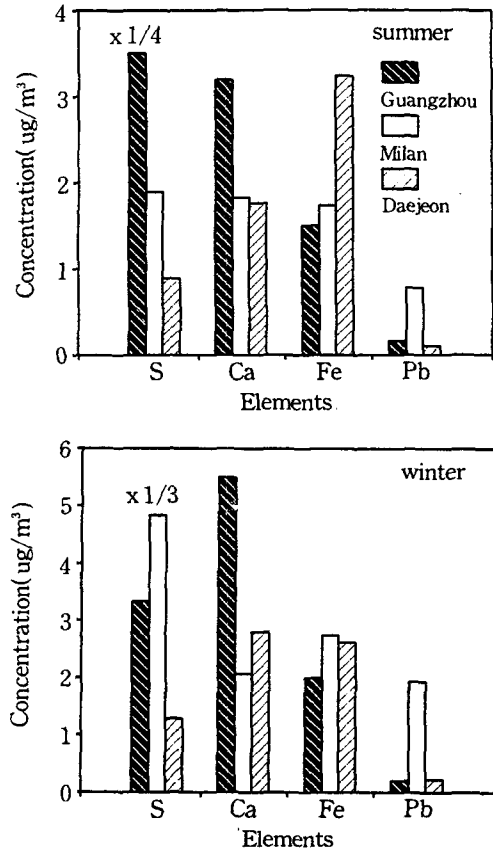


Fig. 6. Comparison of some elemental concentration in city aerosols.

그림 6에 대전 시내에서 채취한 시료중의 S, Ca, Fe, Pb의 분석치와 중국 Guangzhou 시내에서의 분석치(Zhaohui, et al., 1987) 그리고 이탈리아 Milan 시내에서의 분석치(Marcazzan et al., 1987)가 비교되어 나타나 있다. 이 그림에서 S와 Pb는 자동차의 주행 그리고 석탄 및 유류소비 산업과 관계가 있는 원소이고, Ca와 Fe는 별개의 원소라 생각하여 함께 비교하여 보았다. 중국과 이탈리아의 경우는 1986년도에 포집한 시료에 대한 결과이며, 대전의 경우 1993년도에 실험한 결과이기 때문에 바로 대비하기에는 무리가 있을 것이나, S와 Pb의 경우 대전지역에서 낮은 분석치를 나타냈으며, 특히 Pb의 경우 그 함량이 Milan지역의 10% 이하로 확연히 대비되어 나타났다. 이는 아마도 한국의 경우 1987년 이래로 시행되어 온 유연 휘발유의 사용에 대한 규제책으로 인하여 현재 거의 대부분의 자동차가 무연 휘발유를 사용하고 있기 때문에, 교통이

빈발한 도심지역이라도 대기중 Pb함량이 낮게 나타났으리라 생각되며, 사용연료에 대한 환경규제책 등이 효과를 발휘하여 S 등의 함량 수치도 낮게 검출되었다고 생각된다.

#### 4. 결 론

이상과 같은 PIXE 분석용 대기분진 시료의 포집 및 분석실험으로부터 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

1. PIXE 분석법을 이용하여 대기분진 분석을 하는 경우 2단 포집기를 사용하여 조대입자와 미세입자를 분리포집한 시료에 대하여 포집필터에 대한 전처리 없이 Si, S, K, Ca, Mn, Fe, Cu, Zn 그리고 Pb 등의 9종 원소에 대한 정량이 가능하였다.

2. 교통량이 많은 대전시내 지역과 전북 산골지역의 분석치를 대비하여 본 결과 분석된 원소 9종 전 부에서 분진의 발생원이 밀집된 대전시내의 대기중 함유 원소량이 많은 것으로 나타났다.

3. 국내에 미치는 황사 영향에 대한 분석 결과 4월부터 5월 사이에 황사의 영향을 받고있던 기간중에 특히 Si, Ca, Fe의 대기중 함유량이 높게 나타났으며, 그 양은 평소보다 5배 이상 되는 결과를 나타냈다.

4. 1993년도 대전시내 대기분진의 분석치와 1986년도 중국 Guangzhou시 그리고 이탈리아의 Milan 시에서의 대기분진의 분석치와 비교해 본 결과, 자동차 그리고 석탄 및 유류 소비산업 유발 오염원소인 S, Pb 등의 원소함량치에서 1986년 외국의 함량값이 높게 나타났으며, 이는 현재 한국정부의 유연휘발유 및 환경오염 유발 연료에 대한 규제정책이 성과를 거둔 영향으로 보인다.

#### 참 고 문 헌

김낙배, 박금식, 우형주, 김덕경, 김준곤, 최한우, 홍

- 완, 이정화 (1990) PIXE 분석법 연구. 동력자원부 출연연구사업 보고서, KR-90-3C-4.
- 우형주, 박금식, 김낙배, 김덕경, 최한우, 이정화 (1992) 대기분진 분석기술 연구. 과학기술처 기본연구개발사업 보고서, KR-92-(B)-32.
- Butcher, S.S. and Charson, R.J.(1973) An introduction to air chemistry. Academic Press, New York.
- Espen, P.V., Nullens, H. and Adams, F.(1977) A Method for the accurate description of the full-energy peaks in non-linear least-squares analysis of X-ray spectra. Nucl. Instr. and Meth., 145, 579-582.
- Ishii, K. and Morita, S.(1984) Continuum X-rays produced by a few MeV proton bombardment. Nucl. Instr. and Meth., B3, 57-61.
- Johansson, S.A.E. and Johansson, T.B.(1976) Particle induced X-ray emission. Nucl. Instr. and Meth., 137, 473-516.
- Maenhaut, W.(1987) Particle induced X-ray emission spectrometry : an accurate technique in the analysis of biological, environmental and geological samples. Anal. Chim. Acta, 195, 125-140.
- Marcazzan, G.M.B., Caruso, E. et al.(1987) The CISE PIXE system for aerosol characterization in several Italian sites. Nucl. Instr. and Meth., B22, 305-314.
- Natusch, A.F.S. and Wallace, J.R.(1974) Urban aerosol toxicity : the influence of particle size. Science, 186, 695-699.
- Zhaohui, H., Ming, Z. et al.(1987) PIXE analysis of aerosol from the southern city of Guangzhou. Nucl. Instr. and Meth., B22, 283-288.