

대전 3, 4 공단지역의 미세분진에 대한 화학적 특성과 오염원 연구

임종명 · 이진홍* · 정용삼¹

충남대학교 공과대학 환경공학과, ¹한국원자력연구소 하나로이용기술개발부
(2006. 9. 8. 접수, 2007. 1. 22. 승인)

Chemical characteristics and sources of fine ambient particulate matter from the third and fourth industrial complex area of Daejeon city, Korea

Jong-Myoung Lim, Jin-Hong Lee* and Yong-Sam Chung¹

Chungnam National University, Department of Environmental Engineering, 220 Gung-dong,
Yuseong-gu, Daejeon 305-764, Korea

*HANARO Center, Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon 305-600, Korea

(Received September 8, 2007; Accepted January 22, 2007)

요 약: 대전시 3, 4 공단지역의 대기 중 미세분진을 대상으로 기기 중성자방사화분석법을 이용하여 유해금속을 포함한 약 27종의 미량원소를 분석하였다. 원소분석에 대한 정확도를 평가하기 위해 NIST SRM 2783(air particulate on filter media)을 사용하여 동일한 조건에서 분석한 결과, Sb, Mn, V, Mg, Na, K, Ti, Co, Zn, Sm은 상대오차 5% 이내의 매우 정확한 분석결과를 보였고 Cr, Fe, Ba, Th, Ce, Al, Cu는 10% 이내로 나타났다. 유해금속인 As, Mn, Se, V, Zn의 농도는 각각 3.26 ± 2.72 , 9.86 ± 4.71 , 2.18 ± 1.25 , 4.91 ± 2.41 , 158 ± 78 ng/m³로 나타났고 인자분석 결과 연구대상지역의 미세분진에 대한 오염원은 6개로 추정되었다.

Abstract: This study centered on the quantitative analysis of about 27 trace elements including toxic ones using instrumental neutron activation analysis of fine ambient particulate matter in the third and fourth industrial complex area of Daejeon city, Korea. For analytical quality control, the certified reference material (NIST, the National Institute of Standards and Technology, U.S.A., SRM 2783, air particulate on filter media) was used. The errors relative to SRM values of Sb, Mn, V, Mg, Na, K, Ti, Co, Zn, and Sm fell below 5%, while those of Cr, Fe, Ba, Th, Ce, Al, and Cu were less than 10%. From the results of the quantitative analysis, the concentration of toxic metals such as As, Mn, Se, V, and Zn were 3.26 ± 2.72 , 9.86 ± 4.71 , 2.18 ± 1.25 , 4.91 ± 2.41 , 158 ± 78 ng/m³, respectively. And the results of factor analysis indicated that there are no more than six factors of sources of fine ambient particulate with statistical significance in the study area.

Key words: fine ambient particulate matter, industrial complex area, instrumental neutron activation analysis, relative errors, factor analysis

★ Corresponding author

Phone : +82-(0)42-823-7546 Fax : +82-(0)42-822-5610

E-mail: jinlee@cnu.ac.kr

1. 서 론

인체에 유해한 영향을 끼치는 대기 오염물질에는 아황산가스, 질소산화물, 분진, 오존 등 기준성 오염물질(criteria pollutants)뿐 아니라, 대기 중으로 배출되는 수많은 유해 대기오염물질(hazardous air pollutants)이 있다. 특히, 급속한 산업화, 도시화로 인한 수 백 여종의 유해화학물질에 의한 영향은 생태계에서의 잔류성으로 더욱 문제의 중요성이 강조되고 있으며, 특히, 이 중 인간의 건강에 유해한 영향을 미칠 수 있는 오염물질에 대한 관리는 시급한 실정이다. 도시 대기 중의 분진은 입경분포에 따라 공기 역학적 직경 $2.5 \mu\text{m}$ 를 기준으로 미세입자(fine particles)와 거대입자(coarse particles)로 나누어지는 쌍극 분포(bimodal distribution)를 보인다.¹ 미세입자는 주로 화석연료의 연소, 자동차의 배기가스 등과 같은 인위적 발생원에 의한 것이며, 거대입자는 토사의 재비산, 해염 등과 같은 자연적 발생원에 의한 것이다. 미세입자는 오염된 도심지역 분진수의 90~99%에 이르는 높은 비율을 보이고 있고,² 폐 깊숙이 침투하여 폐질환을 일으킬 수 있다. 더욱이, 동일 질량의 분진인 경우 입자의 크기가 감소함에 따라 미세입자의 표면적은 급증하기 때문에 각종 유해금속을 비롯한 독성물질을 쉽게 흡착하여 미세입자가 인체에 미치는 영향은 거대입자에 비하여 매우 크다.^{3,5} 미국 연방환경청(US EPA: Environmental Protection Agency)은 PM10(aerodynamic equivalent diameter, AED, less than $10 \mu\text{m}$)에 대한 규제를 1987년부터 시작하였으며, 1997년에는 PM2.5(AED less than $2.5 \mu\text{m}$)에 대한 기준을 추가하여 PM10과 함께 규제하고 있다. 이러한 추세에 부응하여 국내 대기환경기준도 기존의 PM10 기준에 추가하여 PM2.5 기준을 도입할 필요성이 크고, 이를 위해 국내 대기 중 PM2.5 내 유해금속을 포함한 미량원소들에 대한 화학적 특성을 비롯한 제반 선행연구가 필수적이다.

본 연구의 대상지역은 대전 3, 4 공단지역인데, 이 지역은 39개의 조립금속 업체들을 비롯하여 총 135개 업체가 있으며 한밭 공동화사업 협동조합 등 인근지역의 업체를 포함할 경우 총 279개 업체가 입주하고 있다. 그리고 3, 4 공단지역과 인접한 금동동 지역에 대규모의 대전시 생활폐기물 매립시설 및 음식물 처리시설이 있고, 인근 송강동 지역에는 대규모의 대덕 첨단산업단지가 조성될 계획인바, 대전시에서 가장 환경적으로 중요하게 관리되어야 할 지역이다. 따라서 본 연구는 대전 3, 4 공단지역의 대기 중 인체에 특히,

유해한 PM2.5를 집중적으로 채취하고 기기 중성자방사화분석법(INAA: Instrumental Neutron Activation Analysis)을 이용하여 유해금속을 포함한 약 27종의 미량원소를 정량하여 이 지역의 미세분진의 화학적 특성과 오염원을 추정하고자 한다.

2. 실 험

2.1 시료 채취

대기 중 PM2.5는 공단의 동쪽 끝에 위치한 대전 목상초등학교의 3층 옥상(지상 12m)에 설치한 Gent SFU air sampler를 약 18 L/min으로 운전하여 시료당 공기량이 약 26 m^3 가 유지되도록 채취하였다. 여지는 기계적 강도가 강하고 미량원소에 대해 화학적으로 매우 적은 바탕농도를 갖고 있어 미량원소의 분석에 효율적이며 미세영역의 입자의 채취에 효율적인 polycarbonate membrane 여지($\Phi 47 \text{ mm}$, $0.4 \mu\text{m}$ pore size, Nuclepore)를 사용하였다. Low-volume Gent SFU sampler의 유량은 Gillian Gilibrator 2 Calibration System(Sensidyne, Inc.)을 사용하여 보정하였다. 분진을 채취한 여지는 항온(25°C), 항습상태(50%)의 저장고에서 1일간 보관한 후 전기적 하전을 중화시키기 위해 ^{210}Po 선원을 넣어 둔 저울(readability: $1 \mu\text{m}$, Mettler Co.)에서 칭량한 후, 시료분석 전까지 테시케이터에 보관하였다. 시료는 2002년 5월 21일부터 2002년 12월까지 24시간씩 총 60개를 채취하였다.

2.2 분석 방법

INAA는 원자로의 열외중성자(thermal neutron)에 시료를 조사할 때 표적내 일부 핵이 방사성 동위원소로 변환할 것이라는 사실에 기초한다. 방사성 동위원소는 특정 에너지와 세기의 지발전이 감마선(delayed transition gamma-rays)을 방출하면서 특정 속도로 붕괴하는데 이 감마선을 측정하여 미량원소를 정성, 정량 분석하는 방법이다. 분석시료의 방사화를 위하여 한국 원자력연구소의 연구용원자로(HANARO)의 중성자 조사시설(NAA hole #1)인 기송관(PTS, $\Phi_{th} = 2.95 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$) 조사장치를 이용하였다. 모든 시료는 조사시간 동안의 중성자속 차이 등에 영향을 받지 않게 동일한 기하학적 조건에서 조사하여 분석오차를 최소화시켰으며, 정확한 중성자속과 변동을 측정하기 위하여 Al-Au activation wire(Al 99.99%, Reactor Exp.)를 사용하였다. 방사능 계측에 사용한 고순도 게르마늄 반도체

Table 1. Analytical condition of INAA

HANARO	Irradiation hole	Neutron Flux			R _{ed}
		Thermal, Φ _{th}	Epithermal, Φ _e	Fast, Φ _f	
	NAA #1	2.95×10 ¹³	2.13×10 ¹⁰	3.78×10 ¹⁰	250
	Irradiation facility	Irradiation time	Decay time	Counting time	Element
Short-1st Detection	PTS	3 min	10 min	500 sec	Al, Cu, Mg, Ti, V
Short-2nd Detection			40 min	1200 sec	Ba, Cl, Dy, I, In, Mn, Na
Long-1st Detection	PTS	4 hour	3~5 day	5000 sec	As, Br, K, La, Sm
Long-2nd Detection			10~16 day	10000 sec	Ce, Co, Cs, Fe, Hf, Sb, Sc, Se, Th, Zn

검출기(EG&G ORTEC)는 25% relative efficiency, ⁶⁰Co의 1332keV에서 1.85 keV FWHM, peak to Compton ratio가 45 : 1이며, 10 cm 두께의 납으로 차폐시켜 자연 방사능 및 외부 방사선의 영향을 최소화하였고, 데이터 수집 및 해석을 위해 16K-Multichannel Analyzer (MCA)와 PC(personal computer)에 연결하였다. 또한 에너지 및 검출효율을 교정해주기 위해 NEN사의 디스크형 표준 복합선원(에너지 교정 표준불확도: < 0.1%, 검출효율 표준불확도: < 3%)을 사용하였으며 지발감마선의 측정 및 분석, 에너지와 검출효율 검정을 위해 Gamma Vision(EG&G ORTEC) 프로그램을 사용하였다. 특성 피이크의 계측 방사능은 Covell법에 의해 감마선 스펙트럼상에 나타나는 총 피이크 면적에서 백그라운드 면적을 감한 알파 피이크 면적에 의해 계산되고 피이크의 통계적 계측오차는 오차과급법(error propagation)에 따라 계산되었으며 검출한계(detection limit)는 Currie의 정의⁶에 따라 계산되었다. 이 과정은 각 핵종의 핵데이터와 절대법

(absolute method)의 기본 방사능 생성식을 내장한 INAA용 통합 전산 프로그램(Power-NAA, Labview)을 사용하였다.^{7,9} 통계적 오차를 줄이기 위해 계측시간을 알맞게 조절하였으며, 불감시간은 5% 이하로 유지하였다. 분석에 적용한 시료의 조사시간 (T_i), 냉각시간 (T_d) 및 계측시간 (T_c)은 시료에 따른 각 원소의 함량조성 및 중성자속에 따라 조절될 수 있으므로 함량이 알려진 표준시료를 이용한 예비실험을 행하여 최적의 조건을 표 1과 같이 결정하고 측정에 적용하였다. INAA로 수행한 미량원소 분석결과의 정도관리(QA/QC)를 위해 대기분진 인증표준물질(NIST SRM 2783, air particulate on filter media)을 시료와 동일한 분석조건에 따라 분석하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 분석정확도 평가

대기분진 중의 원소분석에 대한 INAA의 정확도

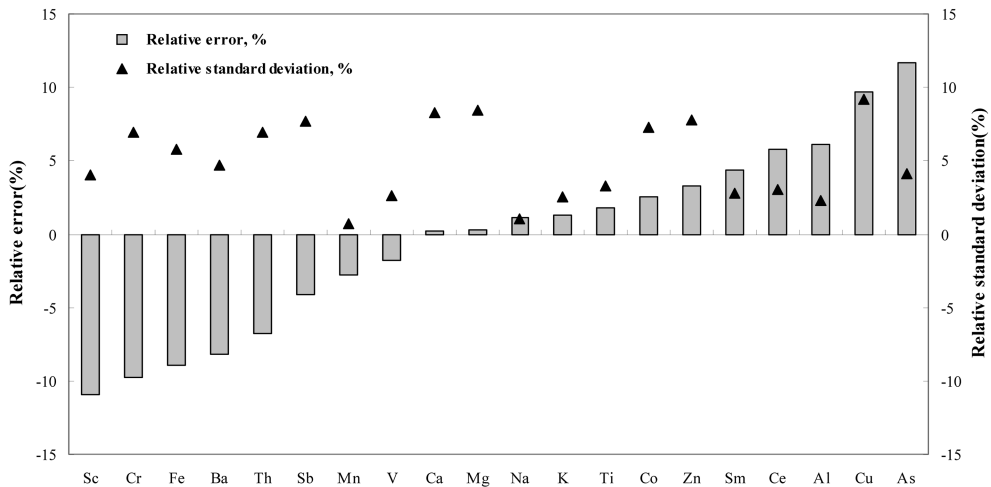


Fig. 1. Analytical results of NIST SRM 2783 using INAA.

를 평가하기 위해 채취한 시료와 시료매질이 거의 유사한 NIST SRM 2783을 사용하여 동일한 조건에서 분석한 결과, 인증값이 있는 20개의 분석원소에서 상대 표준편차값이 10% 미만으로 안정적인 결과값을 나타내었다(그림 1). 원소 중 Sb, Mn, V, Mg, Na, K, Ti, Co, Zn, Sm은 상대오차 5% 이내의 매우 정확한 분석결과를 보였고, Cr, Fe, Ba, Th, Ce, Al, Cu는 10% 이내, Sc과 As은 12% 정도의 상대 오차값을 보였다.

3.2 PM2.5의 화학적 특성

2002년에 총 60일에 걸쳐 채취한 PM2.5의 최소, 평균, 최대농도는 각각 10.9, 23.7, 46.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 평균농도가 미국의 24시간 평균 기준치인 65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 초과하지는 않지만, 연평균 기준치인 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 는 초과하는 것으로 나타났다. 미량원소에 대한 분석결과와 신뢰성을 높이기 위해 다음과 같이 두 단계로 농도자료의 선별작업(screening)을 시도하였다.¹⁰ 일차적으로 각각의 원소들이 지닌 검출특성이 매우 다양하다는 점을 감안하여, 이들 자료에 대한 분석의 불확실성을 어느 정도 국한하기 위해 현장시료로부터 관측된 농도가 실험실에서 측정 한 바탕농도(blank concentration)의 2 배 이하인 자료는 제외하였다. 이런 방법에 의해 7.3%의 자료만이 제외되었는데, 이는 nucleopore polycarbonate membrane 여지에 대한 기기 중성자방사화분석법이 상당히 안정적임을 보여주고 있다. 이차적으로 농도자료의 해석에서 소수의 극단적인 자료들에 의해 전체 결과가 왜곡되는 것을 방지하기 위해, 평균으로부터 3배 표준편차를 벗어나는 자료를 outlier(OL)로 간주하고 배제하였다. 2단계 선별과정에서는 1.3%의 자료가 추가로 제외되었다.

표 2는 PM2.5 내 화학성분의 평균을 보여주는데, 지각에 기인한 Al, Cl, Fe, K, Na 농도가 높게 나타났으며, 유해금속인 As의 산술평균은 $3.26 \pm 2.72 \text{ ng}/\text{m}^3$, Mn는 $9.86 \pm 4.71 \text{ ng}/\text{m}^3$, Se은 $2.18 \pm 1.25 \text{ ng}/\text{m}^3$, V은 $4.91 \pm 2.41 \text{ ng}/\text{m}^3$, Zn는 $158 \pm 78 \text{ ng}/\text{m}^3$ 이다. 분석대상 원소별 농도분포 특성을 쉽게 조감하기 위해, 모든 원소의 농도대별 분포양상을 로그스케일로 비교하였다(그림 2). 산술 평균값으로 비교해 보면, Sc, In, Hf, Th이 $10^{-2} \text{ ng}/\text{m}^3$ 이하, Sm, Cs, La, Co, Ce 이 $10^{-1} \text{ ng}/\text{m}^3$ 이하, Se, As, Rb, V, I, Ba, Mn, Ti이 $10^0 \text{ ng}/\text{m}^3$ 이하, Sb, Cu, Br, Mg이 $10^1 \text{ ng}/\text{m}^3$ 대의 영역, Na, Al, Zn, Fe, K, Cl이 $10^2 \text{ ng}/\text{m}^3$ 대의 영역에서 나타나서, 최소농도와 최대농도 간에는 대략 10^4 이상으로 차이가

Table 2. A statistical summary of the elemental concentration concentrations of PM2.5 samples collected in the 3rd and 4th industrial complex area of Daejeon city, Korea^A. All concentration units in ng/m^3

Element	Mean	Median	SD	Min	Max	N	N ^B
Al	142	132	86.8	16.1	379	60	60
As	3.26	2.30	2.72	0.21	10.5	59	60
Ba	9.29	8.70	4.49	1.98	20.5	55	57
Br	37.1	29.7	22.0	8.9	87.8	59	60
Ce	0.33	0.32	0.15	0.11	0.63	42	43
Cl	732	336	1080	187	5024	59	60
Co	0.29	0.25	0.14	0.12	0.60	49	50
Cs	0.16	0.13	0.09	0.03	0.42	55	56
Cu	23.6	20.0	12.1	6.18	56.2	58	59
Fe	315	238	187	63	832	60	60
Hf	0.05	0.05	0.02	0.02	0.10	39	40
I	8.50	7.72	4.70	1.38	23.9	59	60
In	0.05	0.03	0.04	0.00	0.17	58	59
K	586	294	639	14.4	2487	60	60
La	0.28	0.15	0.26	0.04	1.01	56	56
Mg	57.3	47.9	43.7	8.18	244	55	55
Mn	9.86	9.35	4.71	0.62	21.8	59	60
Na	129	129	62.3	30.0	340	57	59
Rb	3.63	3.30	1.80	0.73	8.33	39	39
Sb	11.6	11.1	6.92	0.87	40.8	58	60
Sc	0.04	0.03	0.03	0.00	0.10	60	60
Se	2.18	2.02	1.25	0.49	6.23	56	56
Sm	0.11	0.08	0.13	0.01	0.75	56	58
Th	0.06	0.06	0.02	0.03	0.11	36	36
Ti	9.94	8.83	6.98	1.42	43.5	60	60
V	4.91	4.73	2.41	0.18	10.3	58	59
Zn	158	154	78.0	20.7	365	60	60
PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	23.7	22.1	9.37	10.9	46.2	60	60

^ATotal number of samples=60; averaging time = 24 h.

^BNumbers of data prior to removing the OL data sets; the OLs were determined on the basis of $\pm 3\sigma$ from the mean.

벌려져 있다는 것을 알 수 있다.

3.3 오염원 확인

원소의 분포특성을 비교한 과거의 연구들을 보면, 주로 부화계수(enrichment factor: EF)를 사용하여 인위적 오염의 정도를 비교한 것을 볼 수 있다. EF는 Al, Fe, Si와 같은 원소가 지각을 구성하는 주요 성분이라는 전제하에 Taylor와 McLennan이 발표한 지표 토양권역을 대표하는 개별 원소성분의 포괄적 농도자료¹¹를 이용하여 아래와 같이 대상 물질들 간의 상대적인 농도비를 비교하는 기준으로 활용할 수 있다.

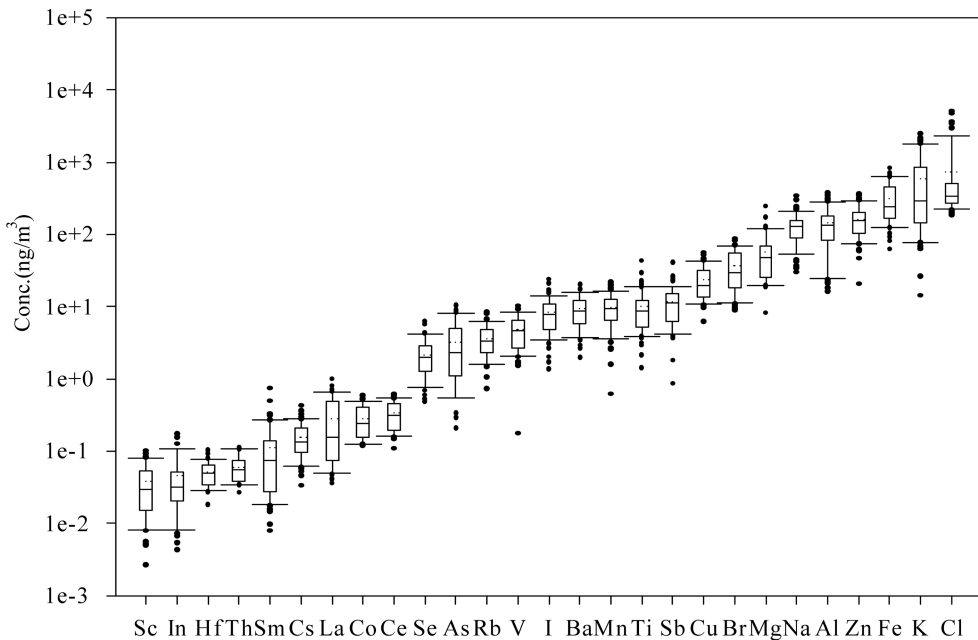


Fig. 2. A logarithmic plot of elemental concentration distributions observed from this study. The bottom of the box indicates the 25th percentile, a line within the box marks the median, a dotted line marks the mean, and the top of the box indicates the 75th percentile. Whiskers (error bars) above and below the box indicate the 90th and 10th percentiles, respectively.

$$EF = \frac{\{X/Al\}_{\text{sample}}}{\{X/Al\}_{\text{crust}}}$$

여기서 X는 비교의 중심이 되는 관심대상 원소성분의 농도를 의미한다. 표 3은 이와 같은 비교결과를 보여 주는데, 대략 EF 값이 수 십 또는 수 백을 초과할 때, 부화의 정도가 심각하다고 인정할 수 있다. 이런 점을 감안하여, EF 값이 100을 초과하는 경우를 모아 보면, In, Cu, As, Zn, Cl, Br, I, Se, Sb과 같은 9개 정도의 성분 에 국한되는데 이러한 원소들은 모두 인위적인 발생원을 갖고 있는 것으로써 300~45000의 매우 높은 값을 보였다. 이 결과는 산업활동에 의해 이 지역이 상당히 오염되어 있음을 알려 준다. 그 외의 성분들의 경우, EF 값이 평균 50 미만으로 앞의 9 가지 성분과 달리 특별히 부화의 정도가 심각하지는 않은 것으로 보인다.

연구 대상지역의 오염원을 분류하기 위해 통계 프로그램 SPSS(version 12.0)를 사용하여 varimax rotation factor analysis¹²⁻¹⁴를 수행하였다. 결측 자료는 그 원소의 나머지 측정 자료들 중 최소값의 1/2을 주어 통계 처리하였다. 표 4는 varimax 회전된 성분행렬이다. 인자분석을 수행한 결과, 6개의 인자가 추출되었는데 이 6개 인자는 총 분산(explained variance)의 79%를 설명

하고 있다. 첫 번째 인자는 공단 내의 소각로로 판단 되는데, 이는 총 분산의 17.8%를 설명한다. 두 번째와 다섯 번째 인자는 연구대상지역의 이동오염원에 의한 것으로 판단되는데, 이러한 자동차의 통행에 의한 오염원은 배기가스가 직접 aerosol 형태로 존재하는 vehicular exhaust와 배기가스, 타이어 및 브레이크 라이닝의 마모, 기타 오일류 등의 배출물이 도로에 침적되어 있던 soil dust와 결합하여 생성되는 road dust로 분류할 수 있다.¹⁵ Vehicular exhaust의 경우 Br, Cl, Sb 등의 원소에서 높은 인자부하량이 나타나며, road dust는 Al, Ba, Co, Fe, Sc, Ti, Zn 등의 원소에서 높은 인자부하량을 보인다. Ba는 디젤차량의 매연 억제, 윤활유의 마모방지를 위해서 첨가되는 원소로써, Monaci *et al.*¹⁶과 Ondov *et al.*¹⁵의 연구 결과는 Ba과 Pb가 강한 상관관계를 갖고 있고 Ba의 대부분이 차량에 의해서 발생한다는 것을 보여주고 있어 Ba이 road dust의 주요 지표원소임을 알 수 있다. 세 번째의 인자는 Al, Fe, Mg, Mn, Sc, Th, Ti 등 지각에 많이 존재하는 원소들이 높은 인자부하량을 보여 자연기원의 오염원 중 soil dust인 것으로 판단되며 총분산의 16.8%를 설명하고 있다. 네 번째 인자는 중질류의 연

Table 3. A statistical summary of enrichment factor (EF) values

Element	Mean	Median	SD	Min	Max	N
Sc	2.3	1.6	1.8	0.4	9.9	60
Ti	2.4	1.7	1.9	0.4	11.5	60
Mg	3.1	2.2	2.8	0.7	14.6	55
Th	3.2	2.6	1.9	1.1	9.67	36
Na	3.3	2.4	3.1	0.7	16.8	57
Ce	4.6	2.7	5.4	1.0	27.5	42
La	5.3	3.0	4.3	1.0	23.1	56
Fe	6.8	4.9	5.6	1.0	33.6	60
Hf	8.4	6.2	8.4	1.3	39.1	39
K	12.0	6.8	11.5	1.8	53.1	60
Mn	12.3	9.7	9.6	2.8	57.7	59
Ba	13.6	9.3	12.0	3.5	63.1	55
Rb	20.3	17.4	11.7	4.0	47.2	39
Sm	22.0	11.2	32.7	1.4	177	56
Co	23.1	17.2	24.6	4.5	139	49
Cs	32.0	24.2	28.1	6.6	134	55
V	66.1	48.2	58.7	10.8	351	58
In	308	205	260	22	1342	58
Cu	749	553	614	113	2810	58
As	1308	956	996	288	5135	59
Zn	1745	1471	1245	222	6037	60
Cl	3978	1764	4669	553	22978	59
Br	10267	9185	5617	1767	29346	59
I	12458	10230	9031	3666	50838	59
Se	33097	27284	26911	4553	165086	56
Sb	44419	36620	32711	6952	169726	58

소에 의해 발생되는 Se, V, Zn 등의 원소에서 높은 인자부하량이 나타나 연료 연소에 의한 것으로 판단된다. 그리고 여섯 번째 인자는 Ce, La, Cs, Sc, Sm과 같은 희토류원소(REEs: Rare Earth Elements)들이 상대적으로 높은 인자부하량을 보이는데, 희토류원소들의 주요 발생원은 조대입자에서 지각 내에서의 발원이 주가 되며 미세입자에서는 주로 무연휘발류를 사용하는 자동차 배기가스의 NOx, CO, HCs의 제어를 위해 사용되는 삼원촉매장치와 oil-fired power plant, refinery가 주된 오염원이다.¹²⁻¹⁴ 연구대상지역의 경우 주로 삼원촉매장치에서 발생된 것으로 판단된다. 인자 분석으로 주요 오염원을 추출하였지만, 이 과정에서 보완되어야 할 점은 오염원 분류에 사용되는 대표원소 중 Si, S, Pb, Ni 등이 기기 중성자방사화분석법으로 정량하기 어려워 다른 분석법을 추가로 보완하여 이용하고, PM2.5의 큰 부분을 구성하고 있는 탄소성분(organic and elemental carbon)과 이온성분(NH₄⁺, SO₄²⁻, NO₃⁻)이 미량성분과 더불어 분석될 필요가 있다.

4. 결 론

본 연구는 대전시 3, 4 공단지역의 대기 중 미세먼진을 대상으로 기기 중성자방사화분석법을 이용하여 유해금속을 포함하여 약 27종의 미량원소를 분석하였고 이 자료를 이용하여 이 지역의 주요 오염원을 파악하고자 하였다. 원소분석에 대한 정확도를 평가하기 위해 NIST SRM 2783(air particulate on filter media)를 사용하여 동일한 조건에서 분석한 결과, Sb, Mn, V, Mg, Na, K, Ti, Co, Zn, Sm의 상대오차는 5% 이내의 매우 정확한 분석결과를 보였고 Cr, Fe, Ba, Th, Ce, Al, Cu는 10% 이내로 나타났다. PM2.5 내 화학성분은 지각에 기인한 Al, Cl, Fe, K, Na 농도가 높게 나타났으며, 유해금속인 As, Mn, Se, V, Zn의 농도는 각각 3.26 ± 2.72 , 9.86 ± 4.71 , 2.18 ± 1.25 , 4.91 ± 2.41 , 158 ± 78 ng/m³로 나타났다. 그리고 인자분석 결과, 연구대상지역의 미세먼진에 대한 오염원으로 incinerator, road dust, soil dust, fossil fuel combustion, vehicle

Table 4. Factor loadings (F), communalities (h²) and standard deviations of the loading (SD) after varimax rotation. For clarity, factor loadings less than two SDs are ignored.

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	SD	h ²
Al	0.16	0.42	0.59		0.37	0.26	0.07	0.76
As	0.80			0.22		0.19	0.07	0.75
Ba	0.25	0.59	0.35		0.38	0.22	0.07	0.74
Br	0.13	0.26	0.20	0.11	0.88		0.04	0.91
Ce			0.21			0.59	0.10	0.43
Cl		0.41			0.55		0.10	0.51
Co	0.29	0.72	0.32	0.15		0.19	0.07	0.76
Cs	0.67	0.25		0.20		0.51	0.06	0.82
Fe	0.16	0.67	0.50		0.15	0.40	0.04	0.92
I	0.34	0.64		0.29			0.08	0.66
K	0.85		0.15	0.23			0.06	0.81
La	0.70	0.24	0.23		0.19	0.52	0.04	0.91
Mg	0.20	0.15	0.86	0.12	0.13	0.12	0.05	0.85
Mn		0.28	0.77	0.25	0.20	0.21	0.06	0.83
Na			0.19	0.80			0.08	0.69
Sb	0.79	0.13		0.11	0.57		0.02	0.99
Sc		0.64	0.59		0.20	0.36	0.03	0.94
Se	0.38		0.11	0.77	0.17	0.25	0.05	0.85
Sm	0.58	0.23				0.38	0.09	0.58
Th		0.52	0.79			0.08	0.04	0.91
Ti		0.61	0.56		0.28		0.06	0.78
V	0.51		0.33	0.68			0.05	0.85
Zn		0.72	0.24	0.45	0.13	0.29	0.05	0.88
Variance	4.1	4.0	3.9	2.3	2.0	1.8	-	18.1
Variance(%)	17.8	17.4	16.8	10.2	8.8	7.7	-	78.9
Source	Incinerator	Road dust	Soil dust	Fuel oil combustion	Vehicular emission	REEs		

emission, REEs의 6개 오염원을 추출하였는데, 이는 총 분산(explained variance)의 약 80%를 설명할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 대전환경기술개발센터의 2002년도 연구개발사업 지원에 의해 이루어진 것이며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

1. A. C. Stern, "Air Pollution", 3rd Vol., Academic Press, Inc., 1986.
2. D. A. Lundgren and H. J. Paulus, *J. Air Pollution Control Association*, **25**, 1227-1231(1975).

3. G. M. Hindy, *J. Air Pollution Control Association*, **25**, 1106-1114(1975).
4. W. E. Wilson and H. H. Suh, *J. Air Waste Management Association*, **47**, 1238-1249(1999).
5. J. Schwartz, D. W. Dockery, L. M. Leas, *J. Air Waste Management Association*, **46**, 927-936(1996).
6. L. A. Currie, *Anal. Chem.*, **40**, 586-591(1968).
7. J. Tolgyessy and E. H. Klehr, "Nuclear Environmental Chemical Analysis, Ellis Horwood Series in Analytical Chemistry", John Wiley and Sons, New York, 1987.
8. G. Erdtmann, "Neutron Activation Tables Vol. 6", New York, 1976.
9. IAEA, "Handbook on Nuclear Activation Analysis Data", IAEA Tec. Rep. No. 273, 1987.
10. K. H. Kim, J. H. Lee, and M. S. Jang, *Environmental*

- Pollution*, **118**, 41-51(2002).
11. S. R. Taylor and S. M. McLennan, "The Continental Crust : Its Composition and Evolution", Blackwell Sci., 1985.
 12. P. K. Hopke, E. S. Gladney, G. E., Gordon, W. H. Zoller, and A. G. Jones, *Atmospheric Environment*, **10**, 1015-1025(1976).
 13. B. A. Roscoe, P. K. Hopke, S. L. Dattner, and M. Jenks, *J. of the Air Pollution Control Association*, **32**, 637-642(1982).
 14. N. Z. Heidam, *Atmospheric Environment*, **16**, 1923-1931(1982).
 15. J. M. Ondov, W. H. Zoller, and G. E. Gordon, *Environ. Sci. Technol.*, **16**, 318-328(1982).
 16. F. Monaci and R. Bagagli, *Water, Air, and Soil Pollution*, **100**, 89-98(1987).
 17. A. Mizohata, *J. Aerosol Res.*, **1**, 274-279(1986).
 18. X. Huang, I. Olmez, and N. K. Aras, *Atmospheric Environment*, **28**, 1385-1391(1994).
 19. M. E. Kitto, D. L. Anderson, G. E. Gordon, and I. Olmez, *Environ. Sci. Technol.*, **26**, 1368-1375(1992).