

연구논문

기기중성자방사화분석을 이용한 대전 3, 4 공단지역의 호흡성입자의 특성

임종명 · 이진홍

충남대학교 환경공학과

(2006년 9월 18일 접수, 2006년 11월 14일 승인)

Characteristics of Respirable Particulate Matter from the Third and Fourth Industrial Complex Area of Daejeon City using Instrumental Neutron Activation Analysis

Joung-Myoung Lim · Jin-Hong Lee

Department of Environmental Engineering, Chungnam National University

(Manuscript received 18 September 2006; accepted 14 November 2006)

Abstract

Instrumental neutron activation analysis was used to measure the concentrations of 27 elements associated with respirable particulate matter (PM10) that were collected from the Third and Fourth Industrial Complex Area of Daejeon City. The distribution patterns of elements were clearly distinguished with their concentrations varying across more than four orders of magnitude. The mean for Al were recorded to be the highest value of 1,527 ng/m³, while that for In showed the lowest value of 0.1 ng/m³. If compared in terms of enrichment factors, it was found that certain elements (e.g., As, Br, Cl, Cr, I, In, Sb, Se, and Zn) are enriched in PM10 samples of the study site. The results of factor analysis indicated six factors with statistical significance, which may exert dominant controls on regulating the elemental concentration levels in the study area.

Key words : Trace Elements, Respirable Particulate Matter, Industrial Complex Area,
Instrumental Neutron Activation Analysis

1. 서론

도시환경 내 호흡성입자인 PM10(aerodynamic equivalent diameter, AED, less than 10 μm)은 다양한 오염원에서 배출된 독성 미량원소들(As, Cd, Cr, Cu, Mn, Pb, Se, Zn)과 동반 작용하여 인간의 호흡기 계통에 미치는 영향이 매우 크다(Natusch *et al.*, 1974; Dockery and Pope, 1994). 역학연구들에 따르면 PM10 농도가 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가하면 일일 전체 사망률이 약 1% 증가하고(Lippmann, 1998), 호흡기 계 사망률은 3~6% 증가하는 것으로 평가되었다(Ostro *et al.*, 1999). 또한 PM10에 의해 2003년 경기도에서 발생된, 의료비 증가, 노동력상실, 사망률 증가 등에 따른 사회적 비용은 지역 내 연간 총 생산의 5.2%(약 5조원)에 달하는 것으로 보고된바(경기개발연구원, 2003) 사회적 관심이 더욱 커져가고 있다.

대기입자 중 미량원소들은 토양, 자동차, 화석연료의 연소, 생활폐기물 소각로 또는 금속제련 등의 다양한 오염원에서 발생되어 발생원 주변뿐만 아니라 장거리를 이동하여 환경에 영향을 주고 있다. 장기적인 모니터링을 통해 확보한 미량원소의 화학적 특성은 인체 위해도 평가, 오염원 확인 및 기여도 평가, 오염원의 장거리 추적 평가, 비용-효과적인 대기오염 관리 등을 위해 필수적인 정보로 기능한다. 현재까지 대기입자 시료의 미량원소 분석에 FAAS(Flame Atomic Absorption Spectrometry), GFAAS(Graphite Furnace Atomic Absorption Spectrometry), ICP-MS/AES(Inductively Coupled Plasma-Mass/Atomic Emission Spectrometry) 등 주로 파괴분석법이 많이 이용되어 왔다. 이 중 ICP-MS는 다른 분석 방법에 비해 검출한계가 낮고, 따라서 저 농도 분석에 적합하며 동시에 여러 가지 원소를 분석할 수 있기 때문에 파괴분석법 중 가장 유용한 방법으로 평가 받아 왔다(ORD, 1999; 이진홍 등, 2002). ICP-MS는 미량원소 분석에 매우 뛰어난 검출효율과 신속한 분석 능력의 장점을 지니지만, 이가이온과 polyatomic 이온에 의한 spectral interference를 갖고 있다. 이러한 polyatomic spectral interference는 plasma

gas(Ar), matrix components, 전처리 과정 중의 solvent acid에 의해 발생하고, 검출한계와 바탕값(BEC: Background Equivalent Concentration)을 크게 높이는 역할을 한다(Thomas, 2002). 중요한 독성금속들인 As, Cr, Mn, Se, V, Zn 등의 원소들에 대해서 polyatomic 이온에 의한 스펙트럼 방해영향이 상대적으로 크게 작용하여 정확한 농도분석에 어려움이 있다. 이를 해결하기 위한 방법으로 외국에서 많이 이용하는 방법 중 하나가 기기중성자 방사화분석(INAA: Instrumental Neutron Activation Analysis)인데, 이 방법의 장점과 특징은 높은 감도와 다원소 및 비파괴분석능력 뿐만 아니라 대기입자에 대해 실질적인 매질효과가 없다는 점이다(Landsberger, 1999; Salma and Zemplén-Papp, 1999). 따라서 본 연구는 대전지역 중 독성금속을 비롯한 미량원소의 농도 준위가 상당히 높으리라 예상되는 대전 3, 4공단지역의 호흡성입자를 기기중성자방사화분석으로 정량하여 그 화학적 특성을 파악하고, 이 자료를 이용하여 이 지역의 주요 오염원을 추정하고자 한다.

II. 연구 방법

1. 시료 채취

본 연구의 대상지역인 3, 4 공단지역은 조립금속, 전자, 화학, 제지, 음식료, 섬유, 목재 등 279개 업체가 입주하고 있고 열병합발전소, 대전시 소각장, 폐기물 소각장 등의 환경기초시설이 가동되고 있는 곳이다. 그리고 동쪽 경계에 경부고속도로와 공단을 가로지르는 8차선도로(48,000대/일)와 공단 내의 연결도로 등에서의 차량 통행량이 많은 곳으로 대전 지역에서 대기 중 미량원소의 농도가 상당히 높을 것으로 예상되는 지역 중의 하나이다. 대기 중 PM10은 공단의 동쪽에 위치한 대전 목상초등학교의 3층 옥상(지상 12 m)에 설치한 high-volume air sampler(Kimoto Model-121FT)를 약 0.85 m^3/min 으로 운전하여 시료 당 공기량이 약 1,220 m^3 가 유지되도록 채취하였다. 여지는 기계적 강도

가 강하고 압력강하가 작은 cellulose-fiber 여지(Whatman 41, 20×25 cm)를 사용하였는데, 이 여지는 미량원소에 대해 화학적으로 매우 적은 바탕농도를 갖고 있어 미량원소의 분석에 효율적이다. High-volume air sampler의 유속 변화에 따른 공기 흡입량은 채취 시작 일에 orifice calibrator (GMW-25)를 이용하여 보정하였으며 500시간 경과 후 motor brush를 교환할 때마다 orifice calibrator (GMW-25)를 이용하여 유속을 보정하였다. 입자를 채취한 여지는 실험실에서 건조시켜 평량하고 무게를 잰 후, 시료분석 전까지 데시케이터에 보관하였다. 시료의 채취는 2002년 5월부터 2002년 12월까지 24시간마다 한 개, 총 60개의 시료를 채취하여 INAA로 분석하였다.

2. INAA

INAA를 위한 시료 전처리는 ICP-MS와 같은 파괴분석에 비하여 분석과정이 매우 간단한데, 그 과정은 아래와 같다. PM10을 채취한 cellulose-fiber 여지를 반으로 절단하고 그 반의 중심을 집중적으로 펀칭(1 cm diameter)하여 50여개를 채취한 후, 단반감기 원소의 조사용 시료는 5장(0.2~2.5 mg), 장반감기 원소의 조사용 시료는 25장(1~10 mg)을 준비한다. 시료의 중성자 방사화를 위하여 한국원자력연구소의 연구용원자로(HANARO)의 중성자 조사

시설인 기송관(PTS, $\Phi_{th} = 2.95 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$) 조사장치를 이용한다. 단반감기 목적 핵종(Al, Ba, Cl, I, In, Mg, Mn, Na, Ti, V)은 2분, 장반감기 목적 핵종(As, Br, Ce, Co, Cr, Cs, Fe, Hf, K, La, Rb, Sb, Sc, Se, Sm, Th, Zn)은 4시간 동안 중성자 조사를 한다. 모든 시료는 조사시간동안의 중성자속의 차이 등에 영향을 받지 않도록 동일한 기하학적 조건에서 조사하여 분석오차를 최소화 시켰으며, 조사된 시료의 특정 방사성 핵종으로부터 방출되는 특성 감마선을 반감기에 따라 구분된 일정시간 동안 계측하여 각 원소의 방사능 계수율을 측정한다. 방사능 계측에 사용한 고순도 게르마늄 반도체 검출기(EG&G ORTEC)는 25% relative efficiency, ^{60}Co 의 1332 keV에서 1.9 keV FWHM, Peak to compton ratio가 45 : 1 이며, 10 cm 두께의 납으로 차폐시켜 자연 방사능 및 외부 방사선의 영향을 최소화 하였다. 감마선 계측을 위한 검출효율 검증 및 피이크 분석을 위하여 Gamma vision(EG&G ORTEC)을 사용하였으며 함량계산은 개발된 코드(Power NAA)를 사용하였다. INAA의 분석 조건과 과정은 그림 1에 나타나 있다. 그리고 INAA로 수행한 미량원소 분석결과의 정도관리(QA/QC)를 위해 대기입자 인증표준물질(NIST SRM 1648, urban particulate matter)을 시료와 동일한 분석조건에 따라 분석하였다. INAA의 정확도를 평가한 결과,

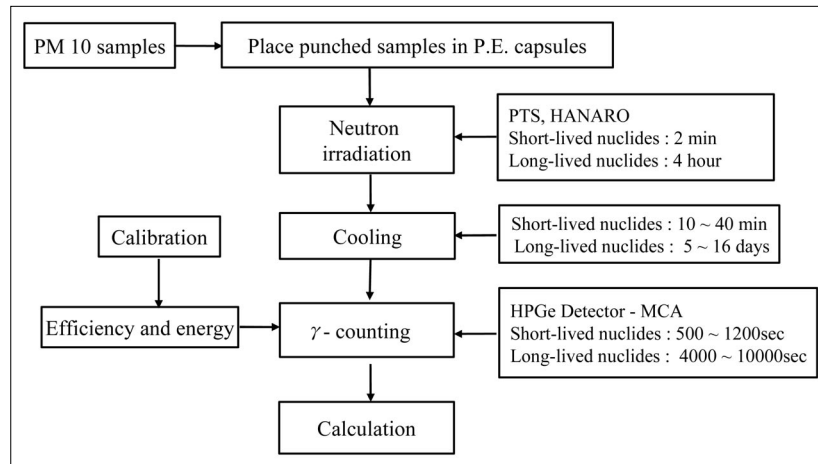


Fig. 1. Analytic condition and procedure of INAA

Al, Ba, Br, Cl, Co, Cr, Cs, K, Mg, Mn, Na, Rb, Th, Ti, V은 상대오차 5% 이내, Fe와 Zn는 10% 이내의 매우 정확한 분석결과를 보였다. 그리고 Ce, Hf, La, Sb, Sc, Se은 20% 이내, As과 Sm은 30% 이내의 상대오차를 보였다.

III. 결과 및 고찰

1. PM10과 원소농도

2002년에 대전 3, 4공단 지역에서 측정된 PM10의 평균농도(N=60)는 $66.7 \pm 14.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 였고 최저는 $40.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 최고는 $93.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 국내 24시간 환경기준치인 $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 연평균 기준인 $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 모두 만족하는 수준이었다. 이 결과는 Lim *et al.* (2005)이 대전 1, 2공단지역에서 조사한 $85.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 낮으며 김병화 등(2000)이 수원에서 조사한 $69.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 비슷한 수준이었다. 그리고 인구밀집지역인 서울($89.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$)과 인천($94.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$)의 측정결과(박진수와 김신도, 2005) 보다는 낮은 수준이며 배경지역인 제주도 고산 지역(Han *et al.*, 2005)에서 비황사시에 조사된 $44.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 높은 수준이다. 측정된 PM10 농도의 빈도분포를 보면 $60 \sim 70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 범위에서 35%로 가장 높은 빈도를 보였고 $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상은 전체의 37%로 나타났다. PM10 농도를 자료가 있는 월별로 보면(그림 2), 5, 6월과 11, 12월에 높은 농도를 보여 7, 8, 10월의 농도와 차이를 보였다($p < 0.01$). 이러한

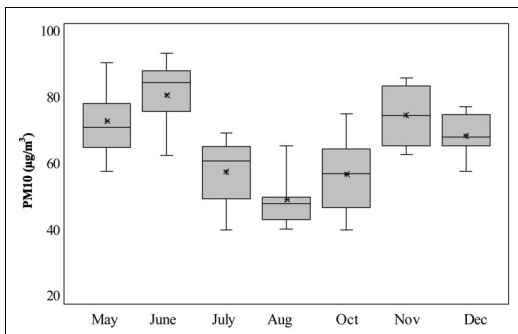


Fig. 2. Monthly distribution of PM10 in the third and fourth industrial complex area of Daejeon city

결과는 대부분 국내 도시 대기 중 PM10 농도가 봄과 겨울철에 높은 상대적으로 높은 농도를 보이고 있는 현상과 비슷하다.

표 1의 PM10 내 원소농도의 통계량을 보면, 지각과 토양에서 기원되는 Al, Cl, Fe, K, Na의 농도가 높고 분석된 원소의 총 질량은 PM10 질량의 9.7%를 점유한다. 평균농도를 기준으로 최소농도를 보이는 In($0.1 \text{ ng}/\text{m}^3$)과 최대농도를 보이는 Al($1,527 \text{ ng}/\text{m}^3$) 간에는 10^4 이상의 농도 차이로 미량원소들이 매우 넓은 농도범위를 보이고 있다. 연구지역에서의 미량원소의 농도는 $\text{In} < \text{Co} < \text{Se} < \text{As} < \text{I} < \text{V} < \text{Cr} < \text{Sb} < \text{Mn} < \text{Br} < \text{Ba} < \text{Zn}$ 의 순으로 높게 나타났다. 독성금속 중 As, Cr, Mn, Se, V, Zn의 농도는 각각 $5.67 \pm 3.82 \text{ ng}/\text{m}^3$, $15.7 \pm 8.48 \text{ ng}/\text{m}^3$,

Table 1. Statistical summary of the elemental concentrations of PM10 samples collected in the third and fourth industrial complex area of Daejeon city^a

	Mean	SD	Min	Max	N
Al	1527	676	287	3301	60
As	5.67	3.82	0.37	17.8	60
Ba	48.0	21.2	14.9	112	58
Br	43.5	25.0	1.8	96.7	59
Ce	1.63	0.80	0.67	4.67	51
Cl	1329	823	531	5734	59
Co	0.80	0.46	0.15	3.23	60
Cr	15.7	8.48	5.35	46.2	53
Cs	0.38	0.27	0.03	2.09	60
Fe	1016	663	193	2774	60
Hf	0.16	0.07	0.03	0.46	58
I	10.0	4.23	1.22	20.9	59
In	0.10	0.08	0.00	0.37	58
K	1057	633	175	2822	60
La	0.91	0.68	0.09	4.79	58
Mg	331	151	108	792	58
Mn	33.5	16.6	3.4	93.8	60
Na	665	227	309	1501	49
Rb	6.91	3.75	0.88	18.1	59
Sb	15.8	12.7	1.8	61.8	58
Sc	0.18	0.09	0.03	0.49	59
Se	2.66	1.88	0.17	8.37	60
Sm	0.67	0.42	0.04	1.94	58
Th	0.30	0.19	0.02	1.33	58
Ti	63.4	30.1	9.10	150	59
V	11.6	4.57	2.42	26.5	60
Zn	201.5	111.6	21.97	547	60
PM10	66.7	14.2	40.1	93.3	60

^a All elemental concentrations are expressed in ng/m^3 , while PM10 in $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

33.5±16.6 ng/m³, 2.66±1.88 ng/m³, 11.6±4.6 ng/m³, 202±112 ng/m³였다. 이러한 결과는 대전 1,2공단지역(Lim *et al*, 2005)에서 조사된 대부분의 독성금속의 농도와 비슷한 농도 수준이었으나, As, V, Zn의 경우 대전 1, 2 공단지역보다 높은 수준의 농도를 보였고(p<0.01), 수원(황인조와 김동술, 2003)과 서울(조용성 등, 2003)에서 조사된 독성금속의 농도보다는 낮은 수준이었다. 물론, 이러한 비교 뒤에는 각 연구에서 사용한 분석법의 원소별 적합성과 분석정확도 등에 대한 고려가 필수적이다.

2. 부화계수와 인자분석

연구대상 지역에서의 원소들의 인위적 오염 정도를 조사하기 위해 부화계수(EF: Enrichment Factor)를 산출하였다. 부화계수는 Al, Fe, Si와 같은 주요 지각 구성성분을 기준으로 미량원소의 농도를 이중 비교하는 것이다(EF = $[X/Al]_{sample} / [X/Al]_{crust}$). 지각구성성분의 농도는 Taylor와 McLennan(1985)이 발표한 지표 토양권역을 대표하는 개별 원소성분의 포괄적 농도자료를 이용하였다. 그림 3은 이와 같은 비교결과를 보여 주는데, 각 원소의 EF값의 극단치를 배제하기 위해 90 분위수(90th percentile), 10 분위수(10th percentile)와 평균값을 함께 나타내었다. 대략 EF 값이 수 십 또는 수 백을 초과할 때, 부화의 정도가 심각하다고 할 수 있다. 평가 결과, EF 값의 10 분위수 값이 10을 초과하는 경우를 모아 보면, Cr, In, Zn, As, Cl, Br, I, Se, Sb와 같은 9개 성분

이다. 이러한 원소들은 자동차(Br, Cl, Sb), 화석연료의 연소(As, Cl, I, Se, Zn), 생활폐기물 소각로(Cl, Cr, In, Sb, Zn) 또는 금속제련(As, I, Se, Zn) 등의 다양한 오염원으로부터 발생된다(Huang *et al*, 1994; Zhao and Hopke, 2004). 이러한 인위적 오염원의 원소들은 EF값의 평균을 기준으로 약 30~4,600 정도의 높은 값을 보여 이 지역이 산업 활동에 의해 상당히 오염되어 있음을 알 수 있다.

원소농도의 월별변화를 파악하기 위해 EF 계산 결과에 따라 자연기원(Al, Ba, Ce, Cs, K, La, Mn, Th, Ti, V)과 인위적기원의 원소(As, Br, Cl, Cr, I, In, Sb, Se, Zn)로 분류하여 보았다. 원소농도의 변화 폭을 쉽게 조감하기 위해 각 원소의 평균농도를 이용하여 정규화(normalizing)시켰다(그림 4). 이 그림을 보면 자연기원의 원소들은 7, 8월에 가장 낮은 농도를 보였는데, 이는 여름철에 rainout과 washout 현상에 의해 입자가 대기 중으로부터 활발히 제거되기 때문이다. 한편, As, Br, Cl, Cr, I, In, Sb, Se, Zn와 같은 인위적 오염원에서 발생된

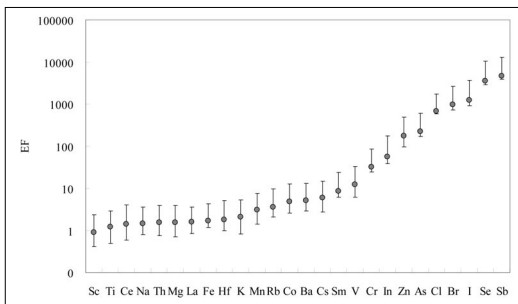
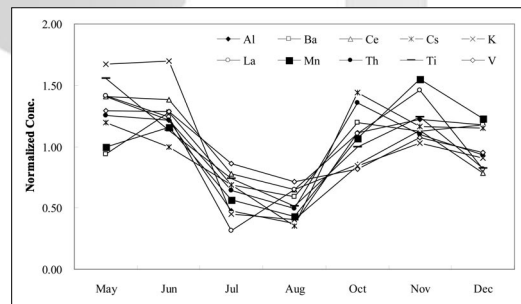
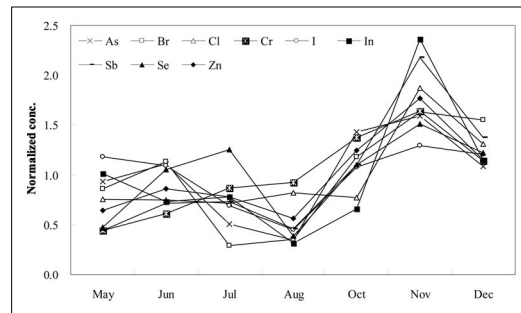


Fig. 3. Enrichment factor value for each element using Al as a reference element. Error bars are used to show both the 10th and 90th percentiles of EF values for each specific element



(a) Elements of crustal origin



(b) Elements of anthropogenic origin

Fig. 4. Monthly variations of elemental concentrations after normalization by the mean concentrations for all period

원소들은 10, 11, 12월에 높은 농도를 보였는데, 이는 공단지역에서 배출된 인위적기원의 원소들이 다른 계절과 달리 겨울철에는 지표 역전과 건조한 대기상태로 인해, 그리고 화석연료의 사용량 증가 등의 요인에 의해 고농도를 보이는 것으로 판단된다.

인자분석(factor analysis)은 주어진 자료 변수들의 상관성과 변동성을 이용해 통계적으로 유의한 주요 공통인자를 추출하는 다변량 통계기법의 하나이다. 대기환경 분야에서 인자분석은 주로 수용지점에서 측정된 입자의 화학성분 자료를 바탕으로 주요 오염원을 확인하는 목적으로 많이 이용되고 있다 (Hopke *et al.*, 1976; Roscoe *et al.*, 1982; Braga *et al.*, 2005). 본 연구에서는 연구대상지역에서 관측되는 원소성분들의 농도분포를 결정짓는 주요 발생원을 확인하기 위해 통계프로그램 SPSS(version 12.0)를 이용하여 요인분석을 수행하였고, 그 결과 6개의 주요 공통인자가 추출되었다. 공통인자는 그 고유치(eigenvalue)가 1을 넘는 것만을 추출하였고 추출된 인자의 통계적 유의성을 Kaiser-Meyer-Olkin test, Bartlett's test, anti-image correlation matrix를 통해 조사하여 유의한 인자만을 대상으로 해석하였다. 인자분석 결과로 직교회전(varimax rotation)된 인자부하량은 표 2와 같고, 추출된 6개 인자는 총 분산(explained variance)의 80.6%를 설명할 수 있었다. 첫 번째 인자는 EF 계산 결과 자연기원으로 분류되며 지각 구성을 대표하는 원소들(Mg, Sc, K, Ti, Fe, Th, Al)로 구성되어 있어 soil dust의 재비산(Watson and Chow, 2001)에 의해 발생된 것으로 총 분산의 21%를 차지한다. 두 번째 인자는 Sb, Zn, In 등이 높은 인자부하량을 보였는데, Chueinta *et al.* (2000)은 Sb, Zn, As를, Huang *et al.*(1994)은 Ag와 In을 소각로에서 발생하는 분진의 대표 원소로 사용한 바 있다. 따라서, 두 번째 인자는 공단 경계 지역에 위치하고 있는 대형 폐기물소각장 및 공단 내 산재되어 있는 중소규모의 소각시설에서 배출되고 있는 소각로 오염원으로 판단되며, 이는 총 분산의 15%를 설명한다. 세 번째 인자는 이동오염원에

Table 2. Result of factor analysis after varimax rotation

	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Mg	0.81					
Sc	0.76		0.54			
K	0.74				0.35	
Ti	0.71					
Fe	0.65		0.54			
Th	0.65		0.69			
Al	0.61		0.65			
V	0.60				0.70	
Cr	0.50	0.54				
Ce	0.43			0.80		
As					0.79	
Ba			0.71			
Br		0.46				0.80
Cl		0.60		0.43		0.59
Co		0.58		0.63		
Cs			0.87			
I					0.41	
In		0.62				
Mn		0.44		0.55		0.43
Na		0.64				
Sb		0.69				0.53
Se		0.50	0.34		0.46	
Zn		0.66	0.53	0.30	0.31	
Variance(%)	21	15	16	12	8.5	8.0
Source	Soil dust	Incinerator	Road dust	Industrial process	Fossil fuel combustion	Vehicle exhaust

의해 포장 및 비포장 도로에서 재비산되는 road dust(Cs, Ba, Th, Al, Zn, Se)인데, 이것은 이동오염원의 배기가스, 타이어 및 브레이크 라이닝의 마모, 기타 오일류 등의 배출물이 도로에 침적되어 있던 soil dust와 결합하여 재비산되는 기작으로 발생된다(Kim and Henry, 2000). Ba는 디젤차량의 매연억제와 윤활류의 첨가원소로 Monaci *et al.*(1987)와 Ondov *et al.*(1982)는 대기 중 Ba의 대부분이 차량에 의해서 발생되고 있음을 증명하였으며 Zn는 차량의 운행중 타이어의 마모에 의해 발생된다. 따라서, road dust는 Ba, Zn, Sb 등 차량 기원 원소와 Al, Cs, Th 등 지각기원의 원소들로 구성된다. 네 번째 인자는 공단 내에서의 생산공정(Ce, Co, Mn, Cl, Zn)에 의해 발생되고 있는 것으로 판단되지만 특정 오염원으로 분류할 수 있는 확실한 정보가 없다. 추후 탄소성분, 이온성분 등 본 연구에서 분석되지 않은 주요원소의 분석이 이루어지면 보다 정확한 오염원이 확인될 수 있을 것이다. 다섯 번

째 인자는 석탄의 연소과정(As, Se)과 난방유의 연소과정(V, Se, Zn)의 대표원소로 이미 오래전부터 사용되어온 As, V, Se, Zn의 인자부하량이 높게 나타나 공단 내와 주변 주거지역에서 사용되는 화석연료의 연소에 의해 발생된 것으로 판단된다(Hopke, 1985; Juichang *et al.*, 1995; Galbreath *et al.*, 2000; 한진석 등, 2004; Vallius *et al.*, 2005). 유연휘발류를 사용함에 따라 Pb의 대부분이 자동차가 아닌 소각로 등의 다른 오염원에서 발생하고 있어 (Pirrone and Keeler, 1996; Huang *et al.*, 1994; Eisenreich *et al.*, 1986) Pb은 자동차 오염원의 대표원소로서 사용이 어려워졌다. 따라서, 새로운 marker에 대한 연구가 많이 이루어졌는데 Br, Sb, REEs가 자동차 배기가스의 marker로써 입증되고 있다(Huang *et al.*, 1994). Sb은 자동차 배기가스의 새로운 marker로써 부각되고 있는 원소로 전술된 바와 같이 refuse incinerator에서도 많이 발생되기도 한다. Huang *et al.*(1994)는 Sb가 자동차의 배기가스를 충분히 대표할 수 있다는 것을 입증하였고, 도로변에서의 거리에 따른 Sb 농도의 감소를 잘 정량화한 Dietl(1997)의 연구 결과는 Sb를 marker로써 이용하는데 대한 유용한 정보를 준다. 그러므로 Br, Sb, Cl, Mn이 높은 인자부하량을 보이는 여섯 번째 인자는 이동 오염원 중 차량의 배기가스가 직접 에어로졸의 형태로 존재하는 것으로 사료된다 (Cohen *et al.*, 2004; Polissar *et al.*, 2001; Chueinta *et al.*, 2000).

IV. 결론

본 연구는 대전 3, 4 공단지역의 호흡성입자(PM10)를 대상으로 기기중성자방사화분석을 이용하여 As, Cr, Mn, Se, V, Zn 등의 독성금속을 포함한 27종의 원소를 정량하고 이 자료에 바탕하여 이 지역의 주요 오염원을 추정하고자 하였다. 연구대상 지역의 원소 중 지각과 토양에서 기원되는 Al, Cl, Fe, K, Na의 농도가 높았고 평균농도를 기준으로 최소농도를 보이는 In(0.1 ng/m³)과 최대농도를 보

이는 Al(1,527 ng/m³) 간에는 10⁴ 이상의 농도 차이로 미량원소들이 매우 넓은 농도범위를 보였다. 원소들의 인위적 오염 정도를 조사하기 위해 수행한 부화계수분석은 Cr, In, Zn, As, Cl, Br, I, Se, Sb와 같은 원소들이 약 30~4,600 정도의 높은 값을 보여 이 지역이 산업활동에 의해 상당히 오염되어 있음을 보여 주었다. 그리고 인자분석은 이 지역의 주요 오염원으로 soil dust, incinerator, road dust, industrial process, fossil fuel combustion, vehicle exhaust의 6개 오염원을 추출하였는데, 이는 총 분산(explained variance)의 80.6%를 설명할 수 있었다.

사 사

본 연구는 대전환경기술개발센터의 2001년도 연구개발사업 지원에 의해 이루어진 것이며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 경기개발연구원, 2003, 경기도지역 대기오염의 사회적 비용추정 및 적정 수준 달성 방안, 경기개발연구원.
- 김병화, 김동술, 2000, 수원지역 대기 중 PM2.5와 PM10의 환경거동에 관한 연구, 한국대기환경학회지, 16(2), 89-101.
- 박진수, 김신도, 2005, 서울과 인천지역 PM10과 PM2.5 중 2차생성 탄소성분 추정, 한국대기환경학회지, 21(1), 131-140.
- 이진홍, 장미숙, 임종명, 2002, 다양한 통계기법을 이용한 대전 1, 2 공단지역의 미량금속원소의 특성연구, 한국대기환경학회지, 18(2), 95-112.
- 조용성, 이홍석, 김윤신, 이종태, 박진수, 2003, 서울 성동구 지역 미세먼지의 화학적 조성에 관한 연구, 한국환경과학회지, 12(6), 665-676.
- 한진석, 문광주, 공부주, 류성윤, 김영준, 2004, 인

- 자분석을 통한 대기 입자상 물질의 입경별 발생원 추정-Drum impactor를 이용한 2002년 5월 제주도 고산지역 측정을 중심으로, *한국대기환경학회지*, 20(5), 685-695.
- 황인조, 김동술, 2003, PMF 모델을 이용한 대기 중 PM-10 오염원의 확인, *한국대기환경학회지*, 19(6), 701-717.
- Braga, C. F., Teixeira, E. C., Meira, L., Wiegand, F., Yoneama, M. L., and Dias, J. F., 2005, Elemental composition of PM10 and PM2.5 in urban environment in South Brazil, *Atmospheric Environment*, 39, 1801-1815.
- Chueinta, W., Hopke, P. K., and Paatero, P., 2000, Investigation of source of atmospheric aerosol at urban and suburban residential areas in Thailand by positive matrix factorization, *Atmospheric Environment*, 34, 3319-3329.
- Cohen, D. D., Gulson, B. L., Davis, J. M., Stelcer, E., Garton, D., Hawas, O., and Taylor, A., 2005, Fine-particle Mn and other metals linked to the introduction of MMT into gasoline in Sydney, Australia: Results of a natural experiment, *Atmospheric Environment*, 39, 6885-6896.
- Dockery, D. W. and Pope III, C. A., 1994, Acute respiratory effects of particulate air pollution, *Annual Review of Public Health*, 15, 107-132.
- Eisenreich, S. J., Metzger, N. A., and Urban, N. R., 1986, Response of atmospheric lead to decreased use of lead in gasoline, *Environ. Sci. and Technol.*, 20, 171-174.
- Galbreath, K. C., Toman, D. I., Zygarićke, C. J., Huggins, F. E., Huffman, G. P., and Wong, J. L., 2000, Nickel speciation of residual oil fly ash and ambient particulate matter using X-ray absorption spectroscopy, *Journal of the Air and Waste Management Association*, 50, 1876-1886.
- Han, J. S., Moon, K. J., Lee, S. J., Kim, J. E., and Kim, Y. J., 2005, Size distribution characteristics of particulate mass and ion components at Gosan, *J. Kosae*, 21(1), 1-11.
- Hopke, P. K., Gladney, E. S., Gordon, G. E., Zoller, W. H., and Jones, A. G., 1976, The use of multivariate analysis to identify sources of selected elements in the Boston urban aerosol, *Atmospheric Environment*, 10, 1015-1025.
- Hopke, P. K., 1985, Receptor modeling in environmental chemistry, P. 319, John Wiley & Sons, New York, NY.
- Huang, X. C., Ilhan, O., and Namik, A. K., 1994, Emissions of trace elements from motor vehicles: Potential marker elements and source composition profile, *Atmospheric Environment*, 28, 1385-1391.
- Juichang, R., Freedman, B., Coles, C., Zwicker, B., Holzbecker, J., and Chatt, A., 1995, Vanadium contamination of lichens and tree foliage in the vicinity of 3 oil-fired power plants in eastern Canada, *Journal of the Air and Waste Management Association*, 45, 461-464.
- Kim, B. M. and Henry, R. C., 2000, Application of SAFER model to the Los Angeles PM10 data, *Atmospheric Environment*, 34, 1747-1759.
- Landsberger, S., 1999, Trace element determination of airborne particles by Neutron Activation Analysis, in *Elemental analysis of airborne particles*, p. 323, Gordon and Breach, Malaysia.

- Lim, J. M., Lee, J. H., and Chung, Y. S., 2005, The distribution characteristics of trace elements in airborne particulates from an urban industrial complex area of Korea using instrumental neutron activation analysis, *Nuclear Engineering and Technology*, 37(5), 503-510.
- Lippmann, M., 1998, The 1997 USEPA standards for particulate matter and ozone. In: Hester, R.E., Harrison, R.M. (Eds.), *Issues in Environmental Science and Technology*, Vol. 10. Royal Society of Chemistry, UK, pp. 75-99.
- Monaci, F. and Bagagli, R., 1987, Barium and other trace metals as indicators of vehicle emissions, *Water, Air, and Soil Pollution*, 100, 89-98.
- Natusch, D. F. S., Wallace, J. R., and Evans C. A. Jr., 1974, Toxic trace elements: Preferential concentration in respirable particles, *Science*, 183, 202-204.
- Ondov, J. M., Zoller, W. H., and Gordon, G. E., 1982, Trace element emission on aerosols from motor vehicles, *Environ. Sci. Technol.*, 16, 318-328.
- ORD, 1999, Compendium of methods for the determination of inorganic compounds in ambient air, Center for Environmental Research Information, USEPA, Office of Research and Development.
- Ostro, B. D., Hurley, S., and Lipsett, M. J., 1999, Air pollution and daily mortality in the Coachella Valley, California: A study of PM10 dominated by coarse particles, *Environmental Research*, A81, 231-238.
- Pirrone, N. and Keeler, G. J., 1996, A preliminary assessment of the urban pollution in the Great Lakes region, *The Science of the Total Environment*, 189/190, 91-98.
- Polissar, A. V., Hopke, P. K., and Poirot, R. L., 2001, Atmospheric aerosol over Vermont: Chemical composition and sources, *Environ. Sci. Technol.*, 35, 4604-4621.
- Roscoe, B. A., Hopke, P. K., Dattner, S. L., and Jenks, M., 1982, The Use of Principal component factor analysis to interpret particulate compositional data sets, *J. of the Air Pollution Control Association*, 32, 637-642.
- Salma, I. and Zemplén-Papp, E., 1999, Instrumental neutron activation analysis for studying size fractionated aerosols, *Nucl. Instrum. Meth. in Phys. Reser.*, A435, 462-472.
- Thomas, R., 2002, A beginner's guide to ICP-MS; Part IX-mass analyzer: collision/reaction cell technology, *Spectroscopy*, 17(2), 42-48.
- Vallius, M., Janssen, N. A. H., Heirich, J., Hoek, G., Ruuskanen, J., Cyrus, J., Grieken, R. V., Hartog, J. J., Kreyling, W. G., and Pekkanen, J., 2005, Sources and elemental composition of ambient PM2.5 in three European cities, *Science of the Total Environment*, 337, 147-162.
- Watson, J. G. and Chow, J. C., 2001, Source characterization of major emission source in the Imperial and Mexicali valleys along the US/Mexico boarder, *Science of the Total Environment*, 276, 33-47.
- Zhao, W. and P. K. Hopke, 2004, Source apportionment for ambient particles in the San Gorgonio wilderness, *Atmospheric Environment*, 38, 5901-5910.