

AAS를 이용한 환경시료의 분석 - 대기 분진 중 납 성분의 분석 사례연구: 국내 및 아시아권을 중심으로

최배진 · 김원형* · 강창희* · 최여진** · 오상인** · Vinit Mishra** · 김기현****

동국대학교 화학과, *제주대학교 기초과학연구소*화학과,
세종대학교 지구환경과학과, *경희대학교 환경연구센터

A Case Study on the Analysis of Airborne Lead using AAS Techniques with the Focus on Korea and Asian Countries

BJ Choi, Won-Hyung Kim*, Chang-Hee Kang*, YJ Choi**, SI Oh**,
Vinit Mishra** and KH Kim****

Dept. Of Chemistry, Dongguk University, Seoul

**Research Institute for Basic Sciences and Department of Chemistry, Cheju National University*

***Dept. of Earth & Environmental Sciences, Sejong University*

****Center for Environmental Studies, Kyung Hee University*

In order to investigate the environmental distribution characteristics of airborne Pb, we made a comparative analysis of Pb data reported in Korea and major Asian countries in recent years. The results of our analysis generally indicate that the Pb levels in most Asian countries are compatibly high relative to those generally observed in western countries, despite significant reductions acquired in recent years induced by strong governmental regulations in many Asian countries. Using our data sets of Pb in many different countries and time periods, we attempted to describe the general aspects of methodological approaches used, mainly in terms of relationships with AAS technique.

Key words : AAS Techniques, Airborne Pb, Methodological Approaches

1. 서 론

지구환경계는 사람들의 활동과 오염물질의 배출 증가 등이 복합적으로 어우러진 효과로 인해, 기후변조와 같이 여러 가지 자연현상이 왜곡되는 양상이 증가하는 것을 두드러지게 경험하게 되었다. 지표 환경상에 존재하는 다양한 인위적 배출원들은 기존 지구환경계에 존재하는 여러 가지 자연적 배출원들과 함께 여러 경로를 통해 대기 환경계로 오염물질을 유입시키고 있다. 이들 성분들이 대기환경계로 유입이 되면, 궁극적으로 (다시 건조침적이나 습윤침적의 과정을 통해) 지표환경으로 재반입 과정에 종속된다. 따라서 이러한 반복적인 유입과 제거의 과정은 이들의 환경거동을 조절하는 복잡한 순환과정의 기본적인 메커니즘으로 작용한다.

대기 중으로 배출이 된 여러 오염 성분들이 대기 중에 체류하면서 경험하는 순환 현상은 각 성분별로 다양한 양상을 취하게 된다. 일반적으로 수은과 같이 휘발성이 강한 금속은 입자상으로 존재하기 보다는 대부분 가스상의 형태로 존재하기 때문에 다른 금속성분들이 보여주는 순환의 형태와는 뚜렷하게 차별화를 이룬다. 그런데 이와 같은 예외적인 경우를 제외하면, 대부분의 금속성분은 분진에 결합된 상태로 대기 중에 체류한다. 따라서 이들 성분의 분포특성은 개별 금속성분 각각에 고유하게 내재된 물리화학적 특성과 함께 부유분진이 환경학적 또는 기상학적 작용을 통해 대기-지표 환경계간을 순환하는 작용에 동시에 영향을 받게 된다.

여러 가지 금속성분들 중에서 납과 같은 성분은 인체에 미치는 위해도가 크기 때문에 많은 국가에서

특별한 관리대상으로 취급되고 있다. 본 연구에서는 AAS 기기를 응용한 환경시료 분석의 실질적인 사례를 제시하기 위한 목적으로, 이러한 응용이 가장 활발하게 이루어진 연구분야로 간주할 수 있는 대기 분진 시료 중의 납성분에 대한 분석결과를 집중적으로 조명하고자 하였다. 본 연구에서는 비교적 최근 간에 국내 및 주요 아시아 국가 등에서 발표된 납성분에 대한 농도분포 자료를 포괄적으로 활용하여, 납성분의 분포특성에 대한 진단과 함께 이를 분석하는 기술의 일반적인 특성을 동시에 비교해 보곤 하였다.

2. 연구방법

본문에서는 주로 국내는 물론 국외에서 도심이나 비도심 환경권역을 중심으로 (1) PM2.5와 같은 “미세 입자(fine particle)의 영역”은 물론 (2) PM10과 같이 “미세+조대입자(fine plus coarse particle) 영역”의 합을 채취한 후, 이들 분진에 함유된 납성분의 농도를 관측한 비교적 최근의 연구사례를 중심으로 모든 비교대상 결과들에 대한 분석을 시도하였다(Table 1). 그리고 이러한 비교에 있어, 비교적 최근에 이루어진 다수의 연구들은 상당수가 비교적 최근에 개발된 첨단기기를

Table 1. An overall compilation of airborne Pb analysis made in Korea, other Asian countries, and America/Europe.

Site	Period	Mean	SD	Range	N	Type	Instrument	Area type	Source
1. Asia(Korea)									
Taegu	6/90~3/91	190	109		96	TSP	ICP-AES	Urban	Baek <i>et al.</i> (1997) ²⁾
Taegu	6/90~3/91	134	87		73	TSP	ICP-AES	Suburban	
Pohang	6/90~3/91	120	47.8		68	TSP	ICP-AES	Urban	Baek <i>et al.</i> (1997) ²⁾
		165	64.8		69	TSP	ICP-AES	Suburban	
Won Ju city	2/91~8/95	326	307		52	TSP	AAS	Industrial	Kim and Song(1997) ¹⁰⁾
		157	104		50	TSP	AAS	Commercial	
		149	102		53	TSP	AAS	Residential	
		88	60		47	TSP	AAS	Grassland	
Suwon	11/89~10/94	244	119	34~526	56	PM 11	XRF	Urban	Kim <i>et al.</i> (1997) ¹¹⁾
Seoul	3/01~5/01	107			29	PM 2.5	ICP-AES	Urban AD	Kim <i>et al.</i> (2003) ¹³⁾
		90.9			29	PM 2.5		Urban NAD	
	23.5			28	PM 25.5~10		Urban AD		
	32.6			28	PM 2.5~10		Urban NAD		
	133			28	PM 10		Urban AD		
	3/01~5/01	120			28	PM 10		Urban NAD	
Taejon city	97~99	243	135	41.7~593	89	PM 10/TSP	ICP-AES	Urban	Kim <i>et al.</i> (2002) ¹²⁾
2. Asia(Hong Kong)									
All districts	10/99~3/00	88.1	61.6	8.2~201.6	30	PM 2.5	PIXE	Indoor urban	Chao and Wong(2002) ³⁾
		104.8	69.1	7.5~267.7	30	PM 10		Indoor urban	
		103.6	70.1	14.8~183.0	30	PM 2.5		Outdoor urban	
		145	82.8	16.8~254.4	30	PM 10		Outdoor urban	
Hong Hom	11/00~2/01	76.86	33.9		70	PM 2.5	ICP-MS	High Traffic	Ho <i>et al.</i> (2002) ⁸⁾
		98.74	48.64		70	PM 10			
Kwon Tong	11/00~2/01	91.62	50.11		70	PM 2.5	ICP-MS	Industrial	Ho <i>et al.</i> (2003) ⁸⁾
		100.52	48.95		70	PM 10			
Hok Tsui	11/00~2/01	60.13	17.67		70	PM 2.5	ICP-MS	Rural	Ho <i>et al.</i> (2003) ⁸⁾
		62.75	19.1		70	PM 10			
3. Asia(Taiwan)									
Tunghai	6/98~9/98							suburban	Fang <i>et al.</i> (1999) ⁴⁾
(a) Day		86	20		10	PM 2.5	AAS		
		105	40		10	PM 10			
(b) Night		21	20		10	PM 2.5	AAS		
		28	30		10	PM 10			

Table 1. Continued

Site	Period	Mean	SD	Range	N	Type	Instrument	Area type	Source
Taichung	6/98~9/98						AAS	Rural	Fang <i>et al.</i> (1999) ⁴⁾
(a) Day		27	20		10	PM 2.5			
		30	30		10	PM 10			
(b) Night		10	20		10	PM 2.5			
		15	20		10	PM 10			
Taichung	6/98~8/98	53			8	PM 2.5	AAS	Suburban	Fang <i>et al.</i> (2002) ⁵⁾
		66			8	PM 10		Suburban	
(a) Autumn	2/11/00~30/11/00	34			7	PM 2.5		Traffic	
		36			7	PM 10			
		44			7	TSP			
(b) Winter	6/12/00~4/1/00	40			5	PM 2.5		Traffic	
		50			5	PM 10			
		89			5	TSP			
Taichung							AAS		Fang <i>et al.</i> (2002) ⁵⁾
(a) Autumn	25/8/98~4/10/98	20			9	PM 2.5		Rural	
		25			9	PM 10			
(b) Winter	14/1/01~6/2/01	26			11	PM 2.5		Rural	
		29			11	PM 10			
4. Asia(Others)									
Bombay, India	1992			210~680		TSP	AAS	Urban	Sharma and Patil(1992a, b) ¹⁹⁾
Shanghai, China								Urban	Ye <i>et al.</i> (2003) ²⁵⁾
(a) Tongji University	20/3/99~27/3/00	270	60~630	52	PM 2.5	XRF			
(b) Hainan Road	5/5/99~20/3/00	280	80~590	45	PM 2.5	XRF			
5. Europe									
Barcelona, Spain	6/99~2/2000	130		24~392	63	PM 2.5	ICP-AES	Urban	Querol <i>et al.</i> (2001) ¹⁸⁾
		149		22~467	115	PM 10			
Thessaloniki, Greece	6/94~5/95	127		32~386	45	PM 3	AAS	Urban	Manoli <i>et al.</i> (2002) ¹⁴⁾
		29		7~58	45	PM 3~10			
Dundee, UK	1/2000~12/2000	21	38	0~133	89	PM 10	AAS	Urban	Qin and Oduyemi(2003) ¹⁷⁾
Kuopio, Finland	1/94~4/94	10	6.5	0.3~32	38	PM 10	ICP-MS	Urban	Hosiokangas <i>et al.</i> (1999) ⁷⁾
Cairo, Egypt	21/2/99~3/3/99			100~26800	15	PM 2.5	XRF	Urban	Allaban <i>et al.</i> (2002) ¹⁾
				100~33700	15	PM 10			
Maxico city, Mexico	96~98	150		bdl*~1000	90	TSP	ICP-AES	Urban	Mugica <i>et al.</i> (2002) ¹⁶⁾
				bdl~960	90	PM 10			
6. America									
New York, USA							ICP-MS		Mugica <i>et al.</i> (2002) ⁶⁾
	1/98~7/99	6.6	6.5		58	PM 2.5		Coastal	
	1/98~12/99	4.9	3.6		60	PM 2.5		Suburban	
	10/98~1/00	7.9	5.4		44	PM 2.5		Industrial	
Los Angeles, USA									Singh <i>et al.</i> (2002) ²¹⁾
(a) Downey	9/00~1/01	10.75		bdl~6.58	19	PM 2.5	XPF	Urban	
		12.5		bdl~17.01	19	PM 10			
(b) Riverside	2/01~6/01	4.09		bdl~13.34	22	PM 2.5		Suburban	
		7.06		bdl~18.28	22	PM 10			

*bdl denotes below detection limits

응용한 사례가 많으므로, 본 연구에서는 그러한 사례도 동시에 비교의 대상으로 첨가시켰다. 또한 비교분석의 가장 핵심적인 내용은 아시아 권역을 대표할 수 있는 한국을 중심으로 일부 아시아 국가들로 그 범위를 국한시킨 상태에서 시도하고자 하였다. 그러나 이러한 비교가 극단적으로 아시아 권역에 제한되는 것을 피하기 위하여, 일부 유럽 및 미주지역의 결과도 제한적 범위 내에서 동시에 활용하고자 하였다.

3. 결 과

3.1. 지역별 연구결과의 비교: 한국을 중심으로

한국의 경우, 비교적 많은 연구사례를 쉽게 발견할 수 있다. 그리고 정부에서 80년대 후반 이후 유연휘발유의 사용을 금지한 이래, 대기 중 납성분의 농도가 상당히 저하되고 있는 추세를 여러 연구자들의 연구결과로부터 확인할 수 있다. 90년대 초반, Baek *et al.* (1997)²⁾은 ICP-AES 방법을 사용하여 대구와 포항 등지의 도심과 전원지역을 중심으로 TSP에 결합된 납성분의 농도를 관측하였다. 대구의 도심지역의 납성분의 농도는 $190 \pm 109 \text{ ng m}^{-3}$ (N=96)로 관측되었는데, 이는 전원지역에서 관측한 결과보다 약 1.7배 가량 높은 수준으로 나타났다. 반면에 대구의 근접생활권 지역인 포항에서는 전원지역의 납성분 농도($165 \pm 64.8 \text{ ng m}^{-3}$)가 도심지역보다 1.4배 가량 더 높은 것으로 나타나, 대구의 관측결과와는 뚜렷하게 대조를 이루었다. 그러나 포항의 관측결과는 대체로 타 연구에서 발견되는 도심과 비도심지역간의 농도분포 결과들에 비해 상당히 이례적인 것으로 볼 수 있다. 포항의 의외적인 결과는 비도심권 관측지점에 어떤 특정한 오염원이 존재하였을 가능성이 높은 것으로 사료된다. Kim과 Song¹⁰⁾은 원주지역에서 주거와 산업형태에 따라 도심과 비도심지역을 보다 명확하게 구분하여 납성분의 배경농도를 각각 제시하고 있다. 앞서 대구와 포항에서와 마찬가지로 TSP에 결합된 납성분의 농도를 관측하였으며, 상대적으로는 AAS 방법을 사용하여 분석하였다는 점에서 비교가 될 수 있다. 원주의 국지적 관측권역의 구분은 공업지역, 상업지역, 거주지역, 초지지역으로 이루어졌으며, 특별히 공업지역과 초지지역을 비교해 보았을 때, 약 3.7배 가량 공업지역에서 납성분의 농도가 높은 것으로 나타났다. 아울러 원주의 공업지역과 초지지역을 제외하고, 상업과 거주지역의 납성분 농도를 대구와 포항지역과 비교해 보았을 때, 농도분포의

특성이 매우 유사한 수준임을 알 수 있다. 그러나 원주의 관측개시 시기가 대구와 포항의 관측종료 시기에 뒤이어 이루어졌다는 점에서 직접적으로 두 연구지역을 비교하는 데에는 다소 어려움이 있는 것으로 사료된다.

Kim 등¹¹⁾이 수원의 도심지역을 대상으로 실시한 연구결과는 관측시기 및 기간이 원주지역과 대체로 유사하여 지역간의 비교연구에 어느 정도 유의성을 확인할 수 있을 것으로 사료된다. 수원의 경우 PM11까지 결합된 납성분을 XRF를 이용하여 분석하였다. 수원의 도심권에 근접한 경희대 주변 지역의 납성분 농도는 $244 \pm 119 \text{ ng m}^{-3}$ (N=56)로 나타났으며, 이는 원주의 도심주거지역에 비하여 1.5배, 약 90 ng m^{-3} 가량 더 높은 것으로 간주할 수 있다. 이들 두 지역에서의 연구가 서로 다른 분석방법으로 시행되었다는 점을 감안하더라도, 두 지역간의 농도차이는 어느 정도 구분이 이루어지는 것으로 볼 수 있을 듯 하다. 참고로 동일한 연구지역 내에서 동일한 방법으로 분석한 도심과 비도심지역 간에 나타나는 농도차이는 54(대구) ~ 89 ng m^{-3} (원주)으로 나타나 원주와 수원간의 납성분 농도차이와 유사한 수준으로 나타났다. Kim 등¹²⁾은 대전지역의 충남대 인근지역을 중심으로 ICP-AES 및 MS를 연계한 분석 시스템을 사용하여 TSP 및 PM10에 결합된 납성분의 분석을 수행하였다. 관측기간동안 측정된 대전 도심지역의 납성분 농도는 243 ng m^{-3} (N=135)으로 나타났으며, 수원의 도심지역과 매우 유사한 수준으로 나타났다. 뿐만 아니라 평균농도에 대한 편차와 농도범위 또한 매우 잘 일치하는 것으로 나타났다. 비교적 최근에 Kim 등¹³⁾은 서울의 도심지역에서 황사(Asian Dust)가 집중되는 봄철 기간동안 PM2.5와 PM10을 각각 채취하여, 이에 결합된 납성분을 황사와 비황사 기간으로 구분한 후, 각 기간대에 대비한 농도분포를 살펴 보았다(참고로 이 연구에서도 납성분의 분석에 ICP-AES 방법을 사용하였다.). Kim 등¹³⁾의 연구결과에 따르면, PM2.5와 PM10은 황사(AD)기간에 나타난 납성분의 농도가 107과 133 ng m^{-3} 로 비황사(NAD)기간의 농도 90.9와 120 ng m^{-3} 보다 일정 수준 높게 분포하여, 황사발생시 납성분의 유입이 어느 정도 이루어질 수 있다는 가능성을 시사하였다.

3.2. 지역별 연구결과의 비교: 한국을 제외한 아시아 권역의 연구사례-홍콩

한국을 제외한 아시아 권역에서도 활발하게 연구가

이루어졌음을 확인할 수 있다. 우선 이러한 사례의 가장 첫 번째 예로서, 홍콩에서 이루어진 2개의 연구 사례를 비교대상으로 활용하였다. 첫번째로 Chao와 Wong³⁾이 홍콩의 다수 지역에 걸쳐 1999년 10월에서 2000년 3월까지 indoor와 outdoor의 환경권역에 존재하는 PM속에 함유된 Pb농도를 비교분석하는데 치중하였다. 이들의 연구는 여러 가지 비교의 대상으로 활용된 연구논문 가운데 유일하게 비파괴방식의 분석기법인 PIXE를 사용하였다는 점이 특이하다. 그 결과를 보면 indoor의 경우, PM10에 함유된 Pb의 농도는 $104.8 \pm 69.1 \text{ ng m}^{-3}$ (Range: 7.5~267.7, N=30), PM2.5에서는 $88.1 \pm 61.6 \text{ ng m}^{-3}$ (Range: 8.2~201.6, N=30)의 농도차를 보였다. 반면, outdoor에서는 PM10에서 $145 \pm 82.8 \text{ ng m}^{-3}$ (Range: 16.8~254.4, N=30), PM2.5에서는 $103.6 \pm 70.1 \text{ ng m}^{-3}$ (Range: 14.8~183.0, N=30)의 농도를 보이는 것으로 나타났다. 이러한 연구의 결과에 따르면, indoor에서보다 outdoor에서의 농도가 확연하게 더 높음을 확인할 수 있었다. Ho 등⁸⁾은 2000년 11월부터 2001년 2월까지 약 4개월에 걸쳐 홍콩의 Hunghom(high traffic), Kwontong(industrial), Hoktsui(rural)의 3개 지역을 비교 대상으로 설정한 후, ICP-MS를 이용하여 PM에 함유된 Pb성분의 농도를 산출하였다. 먼저 교통량이 많은 Hunghom 지역의 Pb농도는 $98.74 \pm 48.64 \text{ ng m}^{-3}$ (N=70), PM2.5에서는 $76.86 \pm 33.9 \text{ ng m}^{-3}$ (N=70), 공업지역인 Kwontong지역은 PM10에서는 $100.52 \pm 48.95 \text{ ng m}^{-3}$ (N=70), PM2.5에서는 $91.62 \pm 50.11 \text{ ng m}^{-3}$ (N=70), 도심외각지역인 Hoktsui지역은 PM10에서는 $62.75 \pm 19.1 \text{ ng m}^{-3}$ (N=70), PM2.5에서는 $60.13 \pm 17.67 \text{ ng m}^{-3}$ (N=70)의 결과를 보였다. 공업지역과 도심지역의 농도차이는 미미한 반면, 도심의 외각지역에서 발견되는 농도는 상당히 구분된다는 것을 알 수 있다.

3.3. 지역별 연구결과와 비교: 한국을 제외한 아시아 권역의 연구사례-대만

Fang 등⁴⁾은 1998년 6월부터 1998년 9월까지 대만의 준도심지역인 Tunghai와 외각지역인 Taichung지역에서 연구를 실시하였다. 이 연구에서는 AAS를 사용하여 Pb 농도를 분석하였는데, 특이한 점은 주야간의 농도차를 비교하였다는 점을 들 수 있다. 먼저 준도심지역에서의 농도를 보면 PM10에서는 주간대에 $105 \pm 40 \text{ ng m}^{-3}$ (N=10), 야간대에는 $28 \pm 30 \text{ ng m}^{-3}$ (N=10)이었으며

PM2.5에서는 주간대에 $86 \pm 20 \text{ ng m}^{-3}$ (N=10), 야간대에는 $21 \pm 20 \text{ ng m}^{-3}$ (N=10)의 농도분포로 주야간대에 현격한 농도차이가 존재함을 시사하였다. 또한 외각지역에서의 농도는 PM10의 경우 주간대에는 $30 \pm 30 \text{ ng m}^{-3}$ (N=10), 야간대엔 $15 \pm 20 \text{ ng m}^{-3}$ (N=10), PM2.5에서는 주간대에 $27 \pm 20 \text{ ng m}^{-3}$ (N=10), 야간대에는 $10 \pm 20 \text{ ng m}^{-3}$ (N=10)의 농도를 보였다. 준도심지역에서도 뚜렷하게 주야간대의 농도차이를 보이는데, 이와 같은 결과는 주간대에 Pb의 발생이 더 활발하게 이루어질 가능성을 시사하는 것으로 보인다. 또한 준도심지역에서의 주간대에 따른 농도차이가 외각지역에서 보다 더 큰 것을 확인할 수 있었다.

Fang 등⁵⁾은 PM에 함유되어 있는 Pb성분의 계절별 특성을 추가적으로 비교하려 하였다. 이 연구에서는 교통이 많은 도로가와 외각지역에서의 PM농도를 측정 후 AAS를 이용하여 Pb의 계절별 농도특성을 제시하였다. 교통이 많은 지역의 경우 겨울철의 농도는 TSP, PM10, PM2.5에서의 농도가 각각 89, 50, 40 ng m^{-3} 이었고, 가을철의 경우 44, 36, 34 ng m^{-3} 이었다. 반면에 외각지역에서의 겨울철 농도는 PM10, PM2.5에서 각각 25, 20 ng m^{-3} 이고 가을철의 경우는 29, 26 ng m^{-3} 이었다. 이들의 연구결과에 따르면, 교통량이 많고 오염이 많은 지역일수록 계절에 따른 농도의 변화가 큰 것을 확인할 수 있었다.

3.4. 기타 아시아권역의 연구결과

한국이나 홍콩/대만을 제외한 다른 아시아권의 나라에서 진행되었던 연구결과를 비교하였다. Ye 등²⁵⁾은 중국의 상하이 지역의 Tongji University와 Hainan road에서 1999년에서 2000년에 걸쳐 XRF방식을 사용하여 PM2.5에 함유된 Pb의 농도만을 산출하였다. 그 결과를 보면 Tongji University에서는 270 ng m^{-3} (Range: 60~630, N=52), Hainan road에서는 280 ng m^{-3} (Range: 80~590, N=45)의 나타났다. 연구대상지역이 비교적 최근에 도시화가 집중적으로 이루어진 지역이어서, 여타 아시아권에서 확인되는 PM2.5의 농도에 비해 상당히 높은 수준임을 확인할 수 있었다. 또한 인도의 도심지역인 Bombay에서 1992년 진행되었던 연구를 보면 TSP속에 함유되어 있는 Pb의 농도가 210~680 ng m^{-3} 의 농도수준을 보이는 것을 확인할 수 있었다. 이 연구에서는 아시아권에서 주로 많이 사용되고 있는 AAS방법을 활용한 것으로 확인할 수 있었다.¹⁹⁾

3.5. 지역별 연구결과와의 비교: 유럽 및 미주지역의 연구사례

본 연구에서는 앞서 언급한 바와 같이 비교적 아시아권에서 진행되었던 연구를 집중적으로 분석하고자 하였다. 그러나 이처럼 아시아권에서 발견되는 농도의 절대적 또는 상대적 의미를 파악하기 위하여, 비교적 최근에 발표된 유럽과 미국지역의 연구사례들과 간단한 비교를 시도해 보았다. 비록 이러한 비교가 광범위하게 포괄적인 수준은 아니지만, 이들 지역에서 발견되는 납 농도의 수준은 대체로 아시아권에서 확인된 결과들보다 낮은 수준의 농도를 보이는 것으로 나타났다. 먼저 유럽지역의 경우, 5개의 연구사례를 선정하여 비교에 활용해 보았다. Querol 등¹⁸⁾은 ICP-AES 방법을 사용하여 1999년 6월부터 2000년 2월 까지 약 9개월간에 걸쳐 스페인의 수도인 Barcelona에서 관측을 시행하였다. PM10에 함유된 Pb의 농도는 149 ng m^{-3} (Range: 22~467, N=115)이고 PM2.5에서 Pb의 농도는 130 ng m^{-3} (Range: 24~392, N=63)로 나타났다. 이들이 활용한 방법과 동일한 분석방법인 ICP-AES을 이용하여 멕시코의 수도인 Mexico city에서 1996년에서 1998년까지 TSP/PM10 속에 함유된 Pb농도를 분석한 결과, 150 ng m^{-3} (Range: bdl~1000, bdl: below detection limits) 정도의 농도수준을 보이며 이것은 스페인에서의 연구와 비슷한 결과를 보인다.¹⁶⁾ Manoli 등¹⁴⁾은 그리스의 도심지역인 Thessaloniki 지역에서 PM3과 PM3~PM10에서의 Pb농도를 비교하였다. 분석방법은 AAS를 활용하였으며, 1994년 6월부터 1995년 5월까지의 관측을 시도하였다. 이 연구결과에서는 PM3에서의 Pb의 농도가 127 ng m^{-3} (Range: 32~386, N=45)로써, PM3~PM10에서의 농도 29 ng m^{-3} (Range: 7~58, N=45)보다 더 높게 존재한다는 것을 확인할 수 있었다. 영국의 도심지역인 Dundee 지역을 중심으로 한 Qin와 Odyemi¹⁷⁾의 연구에서도, AAS의 분석방법을 택하여 분석을 시행하였다. 이 연구에서는 2000년 1월부터 12월 사이에 PM10만을 선정하여 함유되어 있는 Pb농도를 측정하였다. 이 연구결과에 따르면, Pb의 농도는 $21 \pm 38 \text{ ng m}^{-3}$ (Range: 0~133, N=89)의 수준을 보이며, 이러한 농도는 유럽의 다른 지역인 스페인이나 멕시코보다 7배정도 낮은 수준임을 확인할 수 있었다. 또한 Hosiokangas 등⁷⁾이 ICP-MS를 사용하여 핀란드의 Kuopio 도심지역에서의 1994년 1월에서 3월까지 약 3개월간 행한 연구결과에서도, 마찬가지로 도심지역에서 $10 \pm 6.5 \text{ ng m}^{-3}$ (Range: 0.3

~32, N=38) 정도로 매우 낮은 수준으로 Pb가 존재할 수 있음을 확인할 수 있었다. Allaban 등¹⁾이 XRF를 이용하여 1999년 중동권, 이집트의 Cairo 지역에서 시도한 연구결과를 보면, 상당히 이례적인 결과라고 할 수 있다. 이 연구에서 XRF를 이용하여 분석한 결과 PM10에서의 농도는 $100 \sim 33700 \text{ ng m}^{-3}$ (N=15)로 극단적으로 높은 농도를 보이고, PM2.5의 농도에서도 역시 $100 \sim 26800 \text{ ng m}^{-3}$ (N=15)으로 앞서와 같이 이례적으로 높은 수준의 농도가 확인되었다. 이러한 결과는 1999년 2월 21일부터 3월 3일까지의 단 10여 일간의 측정자료로써 이집트지역의 전체적인 대표성을 띄기는 어려우나, 상당히 높은 수준의 농도가 확인되었다는 점에서 대단히 놀라운 사실이다.

미국의 경우 뉴욕(NY)과 로스앤젤레스(LA)의 두 지역에서 시행된 연구결과를 주비교대상 자료로 활용하였다. 먼저 NY의 coastal, suburban, industrial의 3가지 지역을 선정하여 Gao 등⁶⁾은 1998년 1월부터 2000년 1월까지에 걸쳐 연구를 시행하였으며, 분석방법으로는 ICP-MS 방식을 활용하였다. 이 연구에서는 PM2.5에서의 농도를 산출하는데 국한하였다. 이들의 연구결과에 따르면, industrial지역에서의 PM2.5 속에 함유된 Pb의 농도가 $7.9 \pm 5.4 \text{ ng m}^{-3}$ (N=44)의 농도로 가장 높았으며, 다음으로 $6.6 \pm 5.8 \text{ ng m}^{-3}$ (N=58)으로 coastal 지역으로 나타났다. 그리고 suburban 지역이 가장 낮은 수준인 $4.9 \pm 3.6 \text{ ng m}^{-3}$ (N=60)의 농도수준으로 나타났다. 이들 지역에서 관측된 농도분포의 경향은 앞서 아시아나 유럽지역의 일반적인 지역에서 확인된 농도보다, 미주지역이 상당히 낮은 농도수준을 유지할 가능성을 시사한다. 실제로 이와 유사한 결과가, Singh 등²¹⁾에 의해서도 확인이 된다. 이들은 2000년 9월부터 2001년 6월까지 LA의 urban지역과 suburban지역에서의 Pb의 농도를 비교하였다. XRF 방법을 이용한 이 연구의 결과는 먼저 urban 지역에서 PM10 중 12.5 ng m^{-3} (Range: bdl~17.01, N=19), PM2.5에서 10.75 ng m^{-3} (Range: bdl~6.58, N=19)의 농도를 보이는 것으로 나타났다. 반면, suburban 지역에서는 PM10에 7.06 ng m^{-3} (Range: bdl~18.28, N=22), PM2.5 4.09 ng m^{-3} (Range: bdl~13.34, N=22)의 농도를 보였다. 이러한 두 연구논문의 결과는 미국과 같이 오염원에 대한 통제가 잘 이루어지는 지역의 Pb 농도가 아시아나 유럽의 농도보다 낮은 수준을 유지할 가능성을 뚜렷하게 확인할 수 있다.

4. 토 론

4.1. 지역적 농도분포의 특성에 대한 비교

먼지 등에 결합된 형태로 대기 중에 배출되는 납은 상당히 독특한 분포 특징을 띄게 된다. 물리화학적 관점에서 보면, 입자의 크기가 작아질수록, 표면적이 상대적으로 증가하여 각종 중금속과 유해 대기오염물질과의 흡착이 용이해진다. 따라서 거대 입자군에 비해 미세 입자군에 납과 같은 중금속 성분의 농도가 상대적으로 농축되기가 용이하다. 따라서 화학적으로 높은 안정성을 보이는 원소성 수은과 같은 가스상 중금속물질처럼 여타 중금속에 비해 훨씬 긴 대기체류시간을 유지할 수 있다. 그러므로 납의 농도변화가 어떤 환경적 요인들에 의해 조절되는 가를 객관적으로 이해하기 위해서는 우선 이들 납이 함유된 PM의 환경거동과 연계하여 납 농도의 분포특성을 설명하려는 노력이 중요하다.

PM에서의 Pb성분의 입경크기별 분포특성을 객관적으로 평가하기 위하여, 앞서 Table 1에 열거한 선행연구들에서 관측한 각 지역별 Pb농도자료들을 이용하여, PM10과 PM2.5에 함유된 납성분의 농도수준을 절대적 및 상대적 관점에서 비교하는 것도 중요한 의미를 지닌다고 할 수 있다. 이를 위하여, Fig. 1~3에서는 이들 결과를 한국, 아시아권, 구미/유럽지역적으로 구분하여 도식화한 후, 전반적인 농도분포 수준을 평가해 보고자 하였다. 특히 이와 같은 비교에서는 최근 10여년간 국내관측점들은 물론이고, 대만과 홍콩을 위시한 주요 아시아권의 관측지점들에서 확보된 Pb 결과를 일괄적으로 비교할 수 있다는 의미를 내포한다. 단 이와 같은 비교를 단순화하기 위하여, urban, industrial,

commercial, residential은 모두 urban으로 단순화 하였다. 그리고 suburban, grassland, rural 등으로 분류된 지역은 모두 rural로 단순화 하였다. 먼저 국내 주요 관측점들로부터 확보된 Pb농도자료를 이용하여 Pb농도의 공간적 분포 특성을 비교하기 용이하게 Fig. 1에 입경별 및 지역별 기준으로 결과를 제시하였다.

국내에서는 PM2.5에 대한 관측자료가 상대적으로 부족한 관계로 PM2.5에 대한 Pb농도의 분포 특성을 규정하기가 상대적으로 곤란하였다. 비록 제한적이기는 하나 2001년 봄철 황사가 빈번한 서울지역을 중심으로 이루어진 연구결과에 따르면 PM10에 함유된 Pb의 농도는 133 ng m^{-3} 으로 PM2.5의 107 ng m^{-3} 보다 근소하게 높은 것이 확인되었다. 이러한 결과는 황사시기는 물론이고 비황사 시기에도 거의 유사하게 나타났다. 비록 제한적이기는 하지만 이러한 연구결과는 Pb와 같은 중금속이 주로 미세입자 영역(fine particle fraction)에 존재하고 있다는 것을 잘 확인하여 준다. 한국에서 PM10영역의 Pb농도분포결과를 보면, 대부분의 urban 지역에서는 $100\sim 250 \text{ ng m}^{-3}$ 수준으로 비교적 균질한 분포특성을 띤다는 것을 확인할 수 있다. 그러나 대구나 포항지역의 경우, urban이나 rural지역간에 농도차이가 일관성있게 구분이 이루어지지 않는다는 점이다. 대구지역은 교외지역의 농도가 낮게 나타나지만, 포항지역의 결과는 오히려 정반대로 나타났다. 그런데 원주지역의 경우 납성분에 대한 관측이공단지역, 상업지역, 주거지역, 초지 등에서 고르게 관측이 되었는데, 일반적으로 예측할 수 있는 오염의 수준이 납 농도의 크기에서도 거의 일관성있게 반영된다는 점이 특이하다. Fig. 2는 한국을 제외한 아시아 전역에서의 관측한 Pb농도를 비교 것이다. 전체적으로 PM10에서 Pb 농도가 PM2.5

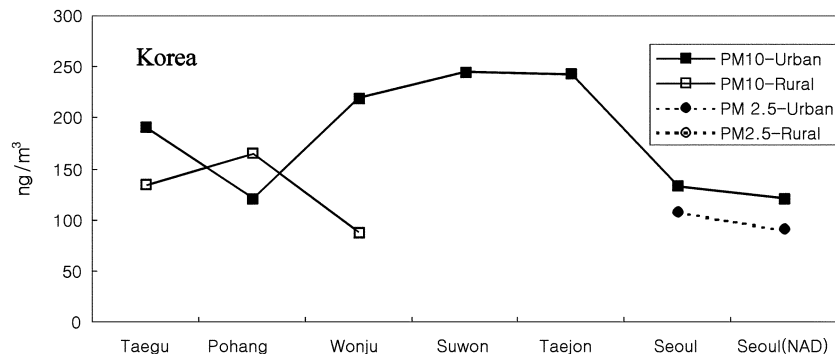


Fig. 1. Pb levels in Korea. Data are compared in terms of particle size (between PM10 and PM2.5) and of geographical location (between urban and rural).

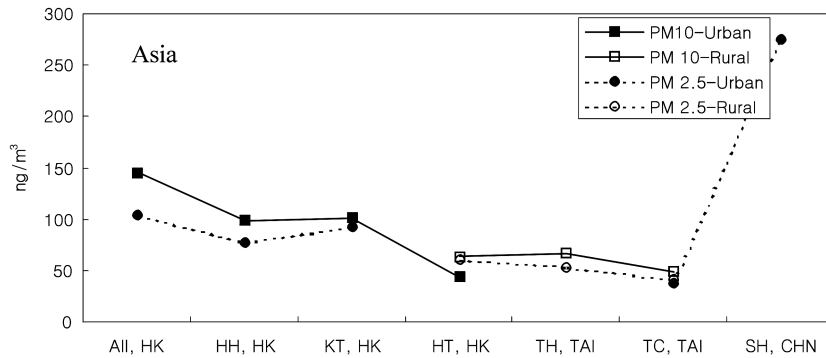


Fig. 2. Pb levels in other Asian regions. Data are compared in terms of particle size (between PM10 and PM2.5) and of geographical location (between urban and rural).

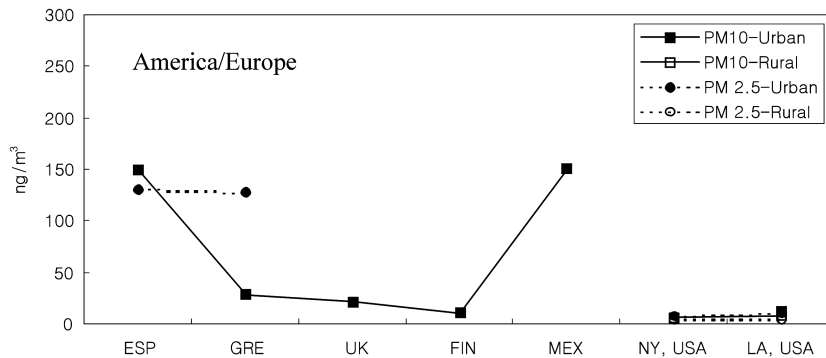


Fig. 3. Pb levels in America/Europe. Data are compared in terms of particle size (between PM10 and PM2.5) and of geographical location (between urban and rural).

에서보다 일정수준 이상 높은 것으로 나타났다. 이와 같은 차이는 이미 한국에서 확인한 결과와 유사한 수준이다. 2000년에서 2001년까지 약 1년의 기간동안 홍콩의 도심지역인 Hunghum과 Kwontong지역에서 관측된 자료에서 PM10의 농도는 각각 98.7, 100.5 ng m⁻³ 이고 PM2.5의 농도는 76.9, 91.9 ng m⁻³로써 PM10의 농도가 미세하게 더 높은 것을 확인할 수 있었다. 대만의 준도심지역인 Tunghai와 Taichung에서 관측된 Pb농도의 관측결과에서도 대체로 유사한 수준의 차이를 확인할 수 있었다. 또한 두 지역에서 주야간의 농도 비교를 해본 결과 Tunghai지역에서의 PM10과 PM2.5에서의 Pb농도차이가 낮에는 19%, 밤에는 25%로 낮보다 밤에 농도차가 더 큰 것을 알 수 있었다. 이러한 결과는 Taichung에서도 낮에는 10%, 밤에는 33%차이가 유지되는 것으로 확인되었다. Fig. 2에 제시된 기타 아시아권의 결과에서 특이한 점은 중국지역의 농도가 홍콩이나 대만의 결과들에 비해 현저하게 높다는 점이다. 중국과 대만/홍콩간의 농도차이가 얼마만큼 실질적

인 의미를 지니는가를 확인하기 위해서는, 추가적인 연구가 필요할 것이다.

아시아뿐만 아니라 미주와 유럽에서도 PM10과 PM2.5에서의 Pb 농도특징을 알아보기 위하여, Fig. 3을 제시하였다. 스페인의 도심지역인 Barcelona에서 1999년부터 2000년까지 약 9개월에 걸친 실험결과는 아시아권에서 확인했던 것과 비슷하게 PM10의 Pb농도가 PM2.5보다 근소하게 높음을 확인할 수 있다. 그러나 그리스의 도심지역인 Thessaloniki에서 관측된 결과에서는 상반되는 결과를 보인다. PM2.5에서의 농도는 127 ng m⁻³으로 PM10에서의 농도인 29 ng m⁻³보다 4배정도 높은 것으로 나타났다. 이러한 결과는 정확하게 설명하기는 어렵지만, 대단히 특이한 환경조건의 영향을 반영한 것으로 사료된다.

4.2. Pb 분석의 주요 기기 사용 현황: AAS와 기타 분석기기

대기 중의 금속성분들은 대부분 입자상 화합물로 분

진에 흡착 또는 혼합된 형태로 존재한다. 따라서 여과지에 진공을 걸어줌으로써, 흡인 여과하는 방식으로 시료를 채취할 수 있다. 여과지에 채취된 분진 시료는 적절한 전처리 과정을 거쳐 용액 상태로 전환한 후에 분석하는 것이 일반적인 추세였다. 그러나 최근에 이루어진 분석기술의 발전은 비파괴 방식으로 분진상태의 습식처리 없이 직접적인 분석이 가능하다(예를 들어, PIXE 또는 INAA). 금속성분들 중 대기오염과 관련성이 큰 일부 경금속 원소와 중금속 원소의 분석에는 대체적으로 원자흡수 분광광도법(AAS)과 유도결합플라즈마 분광광도법(ICP)이 가장 많이 이용되고 있다. 그러나 이 외에도 목적에 따라, X-선 형광 분광법(XRF), 중성자 방사화 분석법(INAA), 양성자 유도 X-선 방출 분광법(PIXE), 자외-가시선 분광광도법(UV-VIS), 플라로그래피법(polarography), 크로마토그래피법(chromatography) 등 금속 성분의 분석에 적용할 수 있는 방법은 무척 다양하다.^{9,15,22-24} 이러한 방법은 시료의 전처리 방법과 표준화하여 정량 하는 방법에서 각각 장단점을 내포하고 있다.

Table 1에 제시된 바와 같이, 본 연구에서 주로 비교 대상이 된 분석방법들은 AAS, ICP-AES, ICP-MS, XRF, PIXE의 5가지 방법으로 요약된다. 비교의 대상으로 선정된 모든 연구자료는 임의로 선정되었고, 같은 기간대에 이루어진 모든 연구나 또는 같은 지역을 대상으로 연구한 모든 결과를 대표할 수는 없다. 그러나 이들 자료를 바탕으로 연구결과들에 대한 간략한 통계적인 비교를 시도하므로써, 아래에 열거한 바와 같이 사용기기의 주종 또는 분석기법의 변화 등을 지역적 또는 시간적 기준으로 간략하게 비교결과를 도출하는 것이 가능하다.

국내 지역들을 중심으로 시도된 연구결과에서 주로 활용된 분석방법으로는 AAS 1회, XRF 1회인 반면, ICP-AES는 4회로 가장 많았다. 따라서 국내 지역의 경우, 전반적으로 ICP-AES 방식의 활용이 두드러진 것으로 나타났다. 아시아권에서는 AAS가 3회, ICP-MS 3회로 가장 빈번하게 사용되었으며, 그 외에도 XRF와 PIXE가 각각 1회씩 사용된 것을 확인할 수 있었다. 유럽에서는 AAS, ICP-AES가 각각 2회씩 그리고 ICP-MS, XRF가 1회씩 활용된 것으로 나타났다. 미국에서는 ICP-MS와 XRF가 한번씩 활용되었다. ICP-MS나 PIXE와 같은 최신 분석방법들이 많이 소개되고 도입되었지만, 아직까지 아시아권에서는 AAS가 비교적 활발하게 사용되는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는, Pb

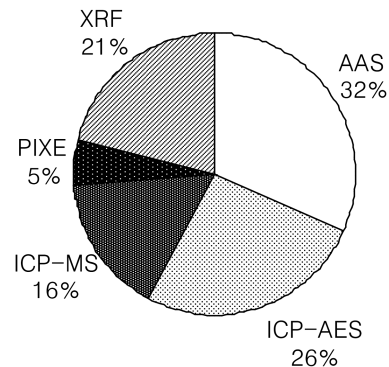


Fig. 4. Comparison of different analytical procedures used for the metal-bound Pb analysis compiled in Table 1. Relative percentage is computed for each individual experimental method.

와 같이 주요 기준성 오염물질의 분석에는 AAS와 같은 고전적인 기기의 활용도 중요한 의미를 지닌다는 것으로 해석할 수 있다.

Fig. 4에 본 연구의 비교대상으로 활용된 모든 기기별 사용빈도를 일괄적으로 비교하였다. AAS와 ICP-AES가 각각 32, 26%로써 전체 기기 사용빈도의 절반을 차지하는 것을 알 수 있었다. 또한 XRF도 21%로 비교적 많이 사용되고 있음을 알 수 있었다. 그 밖에 다른 기기들로는 ICP-MS가 16%를 차지하였으며 PIXE는 5%의 사용빈도를 나타내고 있다. PIXE 분석법의 경우 시료 채취에 소요되는 시간이 적으며, 시료 전처리 과정이 필요 없고, 분석에 소요되는 시간이 극히 짧은 장점을 지니고 있다. 그러나 이러한 장점들에도 불구하고 고가의 MV급 가속기를 갖추어야 한다는 점 때문에, 일반 연구실에서는 이 분석법의 도입이 쉽지 않다. 따라서 다른 분석기기에 비해 상대적으로 사용빈도가 낮다.

Fig. 5에는 비교대상이 된 연구자료들로부터 연도별 기기 사용경향을 도식화한 결과이다. 과거 90년대 초반에는 주로 AAS방식을 사용하였고 간간히 XRF와 ICP-AES의 방법이 사용된 것을 확인할 수 있다. 그러나 최근 들어 이들의 사용방법이 훨씬 더 다양한 면모를 취하고 있음을 알 수 있다. 앞으로 ICP-MS와 PIXE와 같은 최신기기의 사용이 더 증가할 것이라 예측된다. 본 비교에서 활용된 연구자료들은 모두 다른 조건과 다른 장소에서의 실험 결과이므로, 어떠한 절대적인 의미를 부여하기는 곤란하지만, Pb성분을 분석하는데 사용되는 다양한 분석기법과 이들로부터 도출된 결

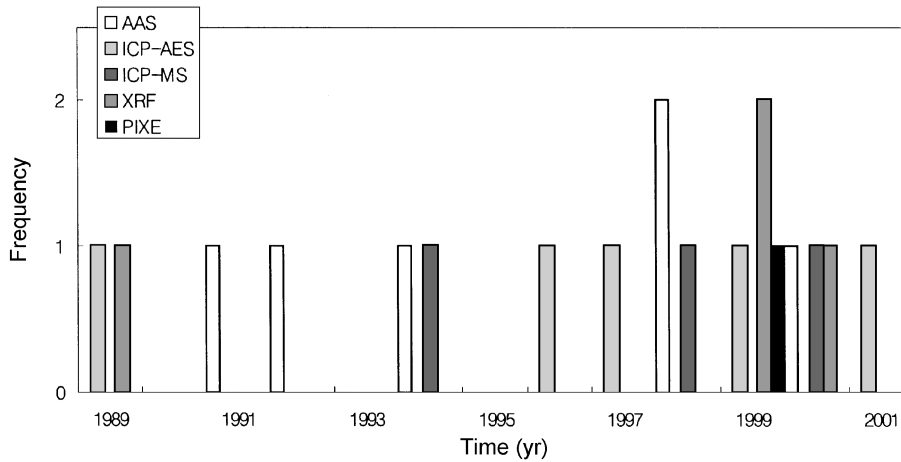


Fig. 5. Comparison of different analytical procedures used for the metal-bound Pb analysis compiled in Table 1. Annual patterns of instrumental usage are compared among five different methods.

과를 의미있게 비교할 수 있는 좋은 기회를 제공한 것으로 사료된다.

5. 결 론

본 연구에서는 비교적 최근 시점에 이루어진 대기 중 납농도 분포자료를 한국 및 아시아 권역을 중심으로 비교해 보았다. 본 연구결과에 의하면, 한국을 위시한 아시아 주요 국가들에서 확인되는 납오염의 추세가 대체로 유사한 경향을 띄고 있다는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 이들 자료를 일부 제한적이기는 하지만, 주요 서방국가들의 결과와 비교하였을 때, 아시아권의 오염이 더 두드러질 가능성이 크다는 것을 확인할 수 있었다. 비록 제한적인 자료조사이기는 하지만, 이들 자료를 토대로 납성분의 분석에 활용되는 분석기기들의 사용경향성을 동시에 비교해 보았다. 이러한 연구결과에 의하면, 금속성분의 분석에 가장 초기에 활용되었던 AAS 방식은 아직도 많은 연구에서 효과적으로 활용되고 있다는 사실을 확인할 수 있었다.

사 사

본 연구는 2002년 한국과학재단의 세계적 선도과학자 연구지원과제에 의하여 이루어졌습니다.

참고문헌

1. Allaban, M.A., Gertler, A.W., Lowenthal, D.H., A

preliminary apportionment of the sources of ambient PM 10, PM 2.5, and VOCs in Cairo. *Atmospheric Environment*, **2002**, 36, 5549-5557.

2. Baek, S.O., Choi, J.S., Hwang, S.M., A quantitative estimation of source contribution of source contributions to the concentrations of atmospheric suspended particulate matter in urban, suburban, and industrial areas of Korea, *Environment International*, **1997**, 2, 205-213.

3. Chao, Y.C. and Wong, K.K., Residential indoor PM10 and PM2.5 in Hong Kong and the elemental composition, *Atmospheric Environment*, **2002**, 36, 265-277.

4. Fang, G.C., Chang, C.N., Wu, Y.S., Fu, P.P.C., Yang, D.G., Chu, C.C., Characterization of chemical species in PM 2.5 and PM 10 aerosols in suburban and rural sites of central Taiwan. *The Science of Total Environment*, **1999**, 234, 203-212.

5. Fang, G.C., Chang, C.N., Wu, Y.S., Fu, P.P.C., Yang, C.J., Chen, C.D. and Chang S.C., Ambient suspended particulate matters and related chemical species study in central Taiwan, Taichung during 1998-2001. *Atmospheric Environment*, **2002**, 36, 1921-1928.

6. Gao, Y., Nelson, E.D., Field, M.P., Ding, Q., Li, H., Sherrell, Gigliotti, C.L., Ry, D.A.V., Glenn, T.R., Eisenreich, S.J., Characterization of atmospheric trace elements on PM2.5 particulate matter over the New York-New Jersey harbor estuary. *Atmospheric Environment*, **2002**, 36, 1077-1086.

7. Hosiokangas, J., Ruuskanen, J. and Pekkanen, J., Effect of soil dust episodes and mixed fuel sources on source apportionment of PM10 particles in Kuopio, Finland. *Atmospheric Environment*, **1999**, 33, 3821-

- 3829.
8. Ho, K.F., Lee, S.C., Chan, C.K., Yu, J.C., Chow, J.C., Yao, X.H., Characterization of chemical species in PM 2.5 and PM 10 aerosol in Hong Kong, *Atmospheric Environment*, **2003**, 37, 31-39.
 9. Ingle, J. D., Crouch, S. R., **1998**. *Spectrochemical Analysis*, Prentice-Hall, Inc., Engle Cliffs, New Jersey, 1998.
 10. Kim, K.H. and Song, D.W., The concentration of lead in urban and non urban atmospheres of Won Ju city, Korea. *Water, Air and soil Pollution*, **1997**, 98, 255-273.
 11. Kim, K.H., Kim, D.S., Lee, T.J., The temporal variability's in the concentrations of airborne lead and its relationship to aerosol behavior. *Atmospheric Environment*, **1997**, 31, 3449-3458.
 12. Kim, K.H., Lee, J.H., Jang, M.S., Jang, M.S., Metals in airborne particulate matter from the first and second industrial complex area of Taejon city, Korea. *Environmental Pollution*, **2002**, 118, 41-51.
 13. Kim, K.H., Choi, G.H., Knag, C.H., Lee, J.H., Kim, J. Y., Youn, Y.H., Lee, S.R., The Chemical composition of fine and coarse particles in relation with the Asian Dust events, *Atmospheric Environment* **2003**, 37, 753-765.
 14. Manoli, E., Voutsas, D., Samara, C., Chemical characterization and source Identification/apportionment of fine and coarse air particles in Thessaloniki, Greece, *Atmospheric Environment*, **2002**, 36, 949-961.
 15. Market, B., *Environmental Sampling for the trace Analysis*, VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim, Germany, **1994**, 126.
 16. Mugica, V., Maubert, M., Torres, M., Munoz, J., Rico, E., Temporal and spatial variation of metal content in TSP and PM10 in Mexico City during 1996-1998. *Journal of Aerosol Science*, **2002**, 33, 91-102.
 17. Qin, Y., Oduyemi, K., Atmospheric aerosol source identification and estimates of source contribution to air pollution in Dundee, UK. *Atmospheric Environment*, **2003**, 37, 1799-1809.
 18. Querol, X., Alastuey, A., Rodriguez, S., Plana, F., Ruiz, C.R., Cots, N., Massague, G., Puig, O., PM10 and PM2.5 source apportionment in the Barcelona Metropolitan area, Catalonia, Spain, *Atmospheric Environment*, **2001**, 35, 6407-6419.
 19. Sharma, V.K., Patil, R.S., Chemical composition and source identification of Bombay aerosol. *Environmental Technology*, **1992a**, 13, 1043-1045.
 20. Sharma, V.K., Patil, R.S., Size distribution of atmospheric aerosol and their source identification using factor analysis in Bombay, India. *Atmospheric Environment*, **1992b**, 26B, 136-140.
 21. Singh, M., Jaques, P.A., Sioutas, C., Size distribution and diurnal characteristics of particle-bound metals in source and receptor sites of the Los Angeles Basin, *Atmospheric Environment*, **2002**, 36, 1675-1689.
 22. Taylor, L. R., Papp, R. B., Pollard, B. D., *Instrumental Methods for Determining Elements*, VCH Publishers, Inc., **1994**, New York.
 23. Thompson, M., Walsh, J. N., *Handbook of Inductively Coupled Plasma Spectrometry*, Blackie & Son Ltd., **1983**, New York, 133pp.
 24. Willard H. H., L. L., Dean, J. A., Settle, F. A., *Instrumental Methods of Analysis*, 6th Ed., D. Van Nostrand, **1981**, New York, 268pp.
 25. Ye, B., Ji, X., Yang, H., Yao, X., Chan, C.K., Cadle, S.H., Chan, T., Mulawa, P.A., Concentration and chemical composition of PM 2.5 in Shanghi for a 1 year period *Atmospheric Environment*, **2003**, 37, 499-510.