

국내 주요지역의 대기 중 납성분에 대한 분포특성 조사

김기현* · 정수연

The distribution characteristics of airborne lead in the major monitoring locations in Korea

K. H. Kim* · S. Y. Jung

국문요약

납은 우리나라를 위시한 많은 국가에서 대기환경 기준으로 설정하여 규제하고 있는 중금속물질이다. 본 연구에서는 납에 대한 농도분포특성을 시공간적인 기준으로 비교분석을 시도하고, 이를 통해 농도분포의 장주기적인 변화추이를 파악하고자 하였다. 이를 위해, 1998년 1월부터 2003년 12월까지 환경부의 대기 중금속 측정망으로부터 관측한 국내 주요 도시지점들(서울, 부산, 대구, 인천, 광주, 대전, 울산, 수원, 안산, 원주, 춘천, 여수, 포항)로부터 확보한 자료를 분석하였다. 그 결과, 납농도는 지난 6년간 공업지대를 포함한 고농도 관측점들을 중심으로 일정 수준 경감한 것으로 나타났다. 그러나 이는 공업지역에 국한되어 나타나는 결과로 그 외 지역에는 그러한 변화가 보다 불규칙한 경향으로 나타났다. 계절적 변화 역시 과거로부터 꾸준히 봄과 겨울기간에 고농도가 나타나는 경향이 지속하였다. 납은 공간적 기준에서 분포특성을 비교할 경우, 최고농도를 기록한 지역이 여타 지역에 비해 최저 2.3배에서 최고 12배까지 높게 나타났다. 아직까지 본 연구에서 확인한 것과 같이 수 십 ng m^{-3} 대의 저농도 지역조차 국외에서 관측한 배경농도보다 10여배 정도 더 오염되었다는 점이 확인된다. 아직까지 인위적활동의 유형이나 강도에 납성분의 농도분포가 큰 영향을 받는다는 것을 감안하면, 보다 지속적인 관점에서 납성분에 대한 관리대책을 제시하는 것이 중요하다.

주제어 : 대기, 납, 중금속 측정망, 공업지역, 공간적인, 농도분포

ABSTRACT

Because of its strong potential for health hazards, the concentration levels of airborne lead (Pb) have been circumscribed by environmental laws in many countries. In this study, we made a comparative study on the environmental behavior of Pb for the acquisition of its distribution characteristics using data sets collected from major cities in Korea for a period of 6 years (1998 through 2003). According to this study, Pb concentration decreased slowly in most industrialized cities of Koreathroughout the whole study period. In contrast, such temporal signals were not evident in data sets collected from residential, commercial, and grassland areas. Although seasonal patterns generally exhibited the occurrences of high Pb concentration during the spring, results appear to reflect the influence of Asian Dust (AD) in the springtime. The results of our study clearly indicate that Pb distribution is strongly influencedby source types in relation to their land use patterns. Comparison of our Pb data sets with that of other countries indicates that Pb concentration levels obtained from relatively cleaner districts of Korea are still significantly higher than other countries. The results of this analysis generally indicate that Pb concentrations in most areas are affected by the type and strength of man-made activities.Considering that most areas are affected by a variety of pollutants, continuous efforts are needed to control Pb concentrations in the atmosphere.

Keywords : Lead (Pb), Atmospheric, Industrial area, Spatial, Concentration distribution

I. 서론

비록 인위적 기원을 통해 다량의 방출이 이루어지기도 하지만, 납은 원래 자연환경계에 존재하는 주요한 중금속 성분에 해당한다. 비록 극미량 수준이지만, 납은 공기, 물, 토양을 위시한 모든 환경생태계 내에서 발견할 수 있다. 여타 중금속들과 마찬가지로, 납성분은 원래 함유되었던 화합물로부터 분해되어도 그 독성이 사라지지 않고 잔존하는 특성을 보인다. 특히 이러한 성분이 대기환경을 매체로 여러 가지 환경계를 전이한다는 특성 때문에, 우리나라를 위시한 많은 국가에서 납성분에 대한 대기환경기준을 설정하고 엄격하게 규제하는 실정에 있다.

UN과 같은 국제적 기관에서도 납 함유제품에 대한 무역제한을 추진하고 있는 추이를 감안할 때, 우리도 정책개발, 교육, 캠페인 등을 통해 보다 활발하게 대응해야 할 시점에 있다. 국내의 경우, 대기 중 납오염의 문제는 1940년대부터 사에칠납($(C_2H_5)_4Pb$)을 녹킹방지제로 휘발유에 첨가하기 시작하면서 급속도로 진전하였다. 그 후 대기오염 저감방안의 일환으로 87년 7월 1일부터 무연휘발유를 공급하기 시작하여, 1993년 초부터 유연휘발유의 공급이 전면 중단 됨에 따라 자동차에 의한 배출이 현저하게 저감되었다(조준호 외, 1998). 그러나 가공 및 색깔 조성이 쉽다는 납의 이점 때문에, 페인트 안료, 도자기 유약, 포장지 등과 같이 산업 전반에 걸쳐 폭 넓게 사용되고 있다.

본 연구에서는 환경부에서 국내 주요지역을 대상으로 운용 중인 관측망을 통해 확보한 납 성분의 측정자료를 토대로 전국 주요 관측점들에 대한 납 성분의 시공간적 농도분포특성을 비교분석하였다. 이를 통해, 납 성분의 분포특성을 포괄적으로 평가하고, 농도분포의 장주기적인 경향성을 판단하고자 시도하였다. 본 연구는 환경부가 구축한 전국 주요 지점의 관측망들의 관측결과를 지속적이고 포괄적으로 취합하여 분석하였다는 점에서 기존의 연구결과들과는 상당히 차별이 가능하다고 볼 수 있다. 따라서 본 연구는 기존의 선행연구들에서 제시한 좁은 공간규모로 금속성분의 분포특성을 비교분석하는데 따른 제한성을 초월하였다는 부분에서 중요한 의미를 지니는 연구결과라고 분류할 수 있다.

II. 연구방법

환경부 및 지방자치단체에서는 대기오염의 실태를 파악하고 대기질 개선을 유도하기 위한 대책 수립을 목적으로, 대기 중금속 측정망을 설치운용하고 있다. 도시지역 또는 공단 인근지역에 대한 중금속 오염실태를 파악하기 위한 목적으로 설치한 측정망은 전국 13개 시의 50여

개 지점에 달한다<표 1>. 전국에 산재한 측정소에서 관측한 자료들은 측정소의 관할 구역 ((지방)환경청)으로 전송된다. 이들 자료는 1차 검색 후, 환경부내의 주전산망으로 전송된다. 이 자료들은 기본적인 통계분석 등을 위하여 국립환경연구원의 전산시스템으로 전송되고, 여기서 데이터베이스의 형태로 저장된다.

<표 1> 본 연구에서 Pb 성분의 분석 대상으로 설정한 전체 50개의 관측지점

Order	도시	S-no	지점	Order	도시	S-no	지점
1	서울시	A1*	관악산(주거)	26	광주시	E3	서동(녹지)
2		A2	구로동	27		E4	일곡동(공업)
3		A3*	문래동(공업)	28	대전시	F1	구성동(녹지)
4		A4	방이동	29		F2	대흥동(상업)
5		A5	방학동	30		F3	유천동(주거)
6		A6*	불광동(주거)	31		F4	읍내동(공업),
7		A7	성수동	32	울산시	G1	덕신리
8		A8*	시청앞(상업)	33		G2	신정동
9		A9	양재동	34		G3	아음동(주거)
10		A10*	잠실동(주거)	35		G4	여천동(공업)
11		A11	화곡동	36	수원시	H1	신평동(상업)
12	부산시	B1	감전동(공업)	37	안산시	I1	원시동(공업)
13		B2	덕천동(주거)	38	원주시	J1*	명륜동(주거)
14		B3	범천동(상업)	39		J2*	우산동(공업)
15		B4	운천동(녹지)	40		J3*	중앙동(주거)
16	대구시	C1	대명동(주거)	41		J4*	학성동(상업)
17		C2*	삼덕동(상업)	42		J5*	행구동(녹지)
18		C3	수창동(상업)	43	춘천시	K1	신복읍
19		C4	이현동(공업)	44		K2	요선동
20		C5	지산동(주거)	45		K3	효자동
21	인천시	D1	논현동	46		K4	후평동
22		D2	부평동(상업)	47	여주시	L1	삼일동(공업)
23		D3	승의동(주거)	48		L2	쌍봉동(주거)
24	광주시	E1	농성동(상업)	49	포항시	M1	장흥동(공업)
25		E2	두암동(주거)	50		M2	죽도동(상업)

* 연구 시작 시점에는 관측이 이루어졌으나, 연구 종료시점을 기준으로 볼 때 관측이 이루어지지 않고 있는 지점들

본 연구에서는 총 13개의 국내 주요 도시지점들(서울, 부산, 대구, 인천, 광주, 대전, 울산, 수원, 안산, 원주, 춘천, 여수, 포항)에 산재한 50여개의 측정점들로부터 98년 1월부터 2003년

12월까지 측정된 금속성분의 결과를 취합하였다. 그리고 이들 중에서 납성분의 분석자료를 이용하여, 다양한 통계분석을 시도하였다. 50여개 관측점으로부터 확보한 월별 분석자료를 이용하여 각 관측점들이 속한 도시의 평균농도값을 월 단위로 산출하였다. 이때 개별 도시를 대표하는 평균값은 다음과 같이 계산하였다. 한 개 이상 복수의 관측지점을 둔 도시의 경우, 그 도시의 모든 관측지점의 정보를 취합하여 월평균을 산출하는 방식으로 그 지역의 대표값을 결정하였다. 그러나 한 지점에서 확보한 전체 자료가 1년 미만인 경우, 그 지점을 삭제하고 통계분석에 이용하지 않았다. 또한 측정값 중 검출한계 이하로 판단되는 0으로 표시된 농도자료는 통계처리에서 기본적으로 배제시켰다. 그러나 전체적인 자료분포의 특성을 이해하기 위해, 이들 변이 자료의 규모는 참고용으로 제시하였다<표 2>.

<표 2> 대기 중 Pb 성분의 농도자료에 대한 전체 관측지점의 기본 통계자료

	STN No	Study period		Pb summary without zero data					
		Start	End	Mean	SD	Min	Max	N	N (with zero)*
Seoul	A1*	98.1	01.12	65.8	48.3	2.60	235	47	48
	A2	01.9	03.12	60.1	28.4	14.0	134	27	27
	A3*	98.1	02.5	124	74.1	3.20	379	48	48
	A4	01.9	03.12	60.8	31.9	16.1	116	25	25
	A5	01.5	03.12	63.1	28.6	14.9	120	31	31
	A6*	98.1	01.4	84.6	48.1	12.8	228	39	40
	A7	02.6	03.12	59.2	29.0	19.5	109	19	19
	A8*	98.1	01.4	96.9	46.6	15.4	207	39	40
	A9	02.6	03.12	69.4	36.1	19.7	138	18	18
	A10*	98.1	02.5	85.0	42.6	7.10	185	53	53
	A11	01.5	03.12	82.6	43.5	22.5	164	32	32
	A(all)			81.6	34.1	9.45	160	72	72
Busan	B1	98.1	03.12	152	125	37.7	971	72	72
	B2	98.1	03.12	59.2	33.8	13.1	217	71	71
	B3	98.1	03.12	84.8	49.8	26.7	310	72	72
	B4	98.1	03.12	45.3	22.7	16.1	126	72	72
		B(all)			85.4	43.4	26.4	263	72
Daegu	C1	98.1	03.12	38.9	23.3	5.30	128	72	72
	C2*	98.1	99.5	52.3	30.3	30.0	156	17	17
	C3	99.6	03.12	63.4	33.1	13.2	171	55	55
	C4	98.1	03.1	49.9	24.4	10.0	107	61	61
	C5	98.1	03.12	36.3	19.3	7.50	123	72	72
		C(all)			46.7	22.3	10.7	124	72
Incheon	D1	02.1	03.12	131	49.1	21.3	258	24	24
	D2	98.1	03.12	114.3	57.2	15.8	283	71	71
	D3	98.1	03.12	123.6	55.8	6.38	318	71	71
		D(all)			121.9	51.2	12.3	279	71

〈표 2〉 계속

	STN No	Study period		Pb summary without zero data					
		Start	End	Mean	SD	Min	Max	N	N (with zero)*
Gwangju	E1	98.1	03.12	25.9	20.7	0.20	75.5	65	71
	E2	98.1	03.12	24.3	20.3	0.20	75.2	61	71
	E3	98.1	03.12	29.2	22.1	0.10	93.0	68	71
	E4	98.1	03.12	38.2	27.9	1.00	108	68	71
	E(all)			28.0	21.0	0.10	78.2	71	71
Daejeon	F1	98.1	03.12	46.5	25.2	10.8	129	72	72
	F2	98.1	03.12	50.6	28.3	6.70	138	72	72
	F3	98.1	03.12	53.1	34.6	10.3	133	72	72
	F4	98.1	03.12	133	87.5	10.0	369	72	72
	F(all)			70.8	35.1	11.9	151	72	72
Ulsan	G1	03.1	03.12	70.0	31.3	23.9	122	12	12
	G2	03.1	03.12	43.4	29.1	17.0	127	12	12
	G3	98.1	03.12	50.7	32.0	8.80	166	71	72
	G4	98.1	03.12	79.7	46.2	11.9	222	71	72
	G(all)			65.2	31.8	10.6	146	71	72
Suwon	H1	98.1	03.12	81.3	53.3	6.30	236	71	72
Ansan	I1	98.1	03.12	282	198	70.1	995	71	71
Wonju	J1*	98.1	02.12	38.9	27.5	3.80	110	57	58
	J2*	98.1	02.12	49.1	36.7	2.60	188	60	60
	J3*	00.1	02.12	44.4	28.2	12.6	160	36	36
	J4*	98.1	99.12	42.3	25.2	2.40	89.0	24	24
	J5*	98.1	02.12	33.4	24.8	0.20	112	60	60
	J(all)			41.4	23.4	2.25	106	60	60
Chuncheon	K1	03.1	03.12	41.3	22.8	12.1	95.5	12	12
	K2	03.1	03.12	68.2	30.9	18.7	127	12	12
	K3	03.1	03.12	65.4	29.3	22.8	135	12	12
	K4	03.1	03.12	66.4	27.2	27.7	112	12	12
	K(all)			60.3	26.3	20.3	117	12	12
Yeosu	L1	98.1	03.12	24.8	23.9	0.40	116	56	70
	L2	98.1	03.12	24.7	22.2	0.20	90.1	50	70
	L(all)			23.6	22.3	0.40	93.9	56	70
Pohang	M1	98.1	03.12	89.3	48.3	15.8	239	71	71
	M2	98.1	03.12	30.5	21.9	0.10	101	69	71
	M(all)			60.6	31.0	17.6	165	71	71

* 검출한계 이하로 나타난 자료의 수를 감안한 통계량

각 개별 도시별로 확보한 월별 평균농도 자료들은 도시전체의 평균과 그 도시의 계절평균을 산출하는데 활용하였다<표 3>. 그리고 도시별 비교에 덧붙여 개별 측정소의 농도 자료도 직접 비교분석에 활용하였다. 단 이때는 납의 농도크기를 기준으로 상위 5개 지점 (H(=high):

H1~H5)과 하위 5개 지점 (L(=low): L1~L5)을 골라, 각각의 자료로 월평균과 계절평균을 산출하고, 다른 지역들에 대비하는 방식으로 납농도의 변화양상을 평가하였다<표 4>. 이들 상위 5개 및 하위 5개 지점은 도시규모 대신 측정소 규모별 경향을 세밀하게 비교하는 정보를 제공할 수 있기 때문에 토지용도 등과 연계하여 납성분의 분포 특성을 좀 더 정확하게 분석하도록 하였다.

<표 3> 조사대상 도시별 납성분의 통계자료

	STN No	Pb summary					
		Mean	SD	Min	Max	N	SE
Seoul	A	81.6	34.1	9.45	160	72	4.02
Busan	B	85.4	43.4	26.4	263	72	5.12
Daegu	C	46.7	22.3	10.7	124	72	2.63
Incheon	D	122	51.2	12.3	279	71	6.08
Gwangju	E	28.0	21.0	0.10	78.2	71	2.49
Daejeon	F	70.8	35.1	11.9	151	72	4.13
Ulsan	G	65.2	31.8	10.6	146	71	3.77
Suwon	H	81.3	53.3	6.30	236	71	6.32
Ansan	I	282	198	70.1	995	71	23.5
Wonju	J	41.4	23.4	2.25	106	60	3.02
Chuncheon	K	60.3	26.3	20.3	117	12	7.59
Yeosu	L	23.6	22.3	0.40	93.9	56	2.98
Pohang	M	60.6	31.0	17.6	165	71	3.68

<표 4> 농도 분포에 따른 고농도 및 저농도 5개 지점들에 대한 그룹별 통계자료

	지점	토지용도	N	Mean	SD	Min	Max	
Stations with high Pb concentrations	1	안산 (I1)	공업	71	282	198	70.1	995
	2	부산 (B1)	공업	72	152	125	37.7	971
	3	대전 (F4)	공업	72	133	87.5	10.0	369
	4	인천 (D1)	공업	24	131	49.1	21.3	258
	5	서울 (A3*)	공업	48	124	74.1	3.20	379
Stations with low Pb concentrations	1	대구 (C5)	주거	72	36.3	19.3	7.50	123
	2	원주 (J5*)	녹지	60	33.4	24.8	0.20	112
	3	포항 (M2)	상업	69	30.5	21.9	0.10	101
	4	여수 (L2)	주거	50	24.7	22.2	0.20	90.1
	5	광주 (E2)	주거	61	24.3	20.3	0.20	75.2

Ⅲ. 결과 및 토론

1. 지역적 납의 분포

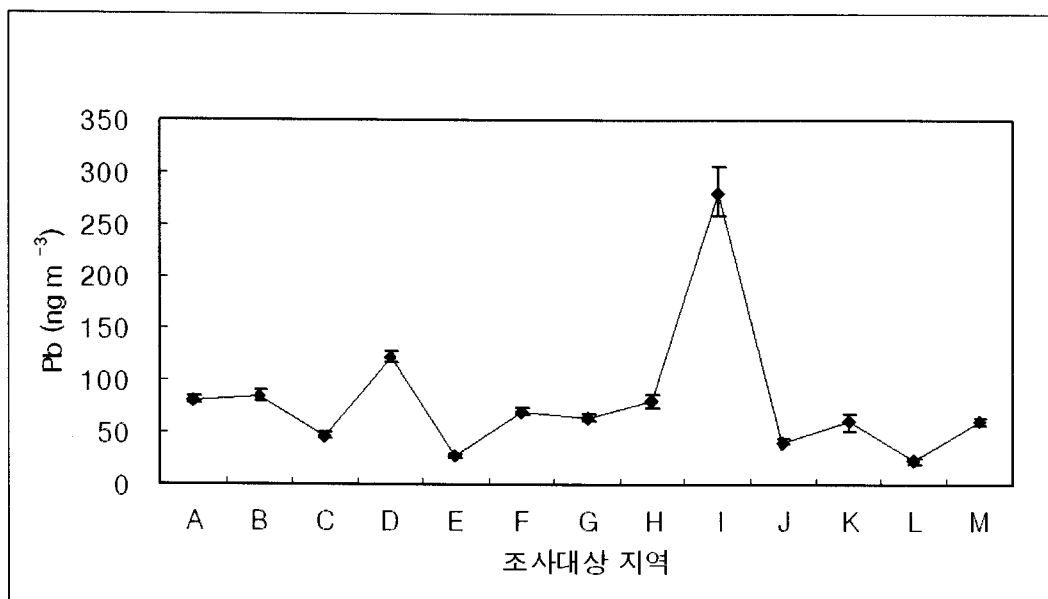
본 조사에서 나타난 지역별 대기 중 납농도의 개략적인 분포를 <그림 1>에서 확인할 수 있다. 그리고 각 관측점들에 대한 상세한 통계량 정보는 <표 1>에 제시하였다. 전체 13개 지역 중 안산(282 ng m^{-3})과 인천(121 ng m^{-3})이 눈에 띄는 고농도를 보인다. 특히, 안산의 경우 다른 지역에 비해 최소 2.3배에서 최대 12배 정도로 높은 농도를 유지하는 것으로 나타났다. 이들은 모두 산업활동이 왕성하게 이루어지고 있는 도시지역을 대표한다. 그 다음으로는 부산, 서울, 수원, 대전 등 비교적 큰 도시들이 그보다 조금 낮은 납의 농도 분포(평균 72.2 ng m^{-3})를 보였다. 그리고 대구, 원주, 광주, 여수 등 지방의 작은 도시나 비교적 공업시설이 드문 곳에서 가장 낮은 농도대(평균 34.9 ng m^{-3})를 유지하는 것으로 나타났다. 과거의 연구 사례에서도 이 같은 결과를 찾아볼 수 있는데, 최배진 등 (2003)의 연구에서 지역간 비교결과로 도심과 비도심간의 농도분포가 이처럼 대조를 이루고 있음을 확인할 수 있다. 이를 통하여 지역간 납농도 분포의 특성은 지역의 환경과 규모 등에 따라 비슷한 지역끼리 매우 유사하게 나타나고 있음을 알 수 있다.

이를 좀 더 자세히 알아보기 위하여 납농도의 상, 하위 각각 5개 관측점들을 비교해 본 결과를 <표 4>에 제시하였다. 상위 5개 지점을 대표하는 H그룹의 특징을 보면, (<표 4>에서 나타나듯이) 모두 대도시임을 알 수 있다. 또한 이들 지점의 토지용도는 모두 예외없이 공업단지 지역에 포함된 것을 알 수 있다. 반면에 하위 5개 지점인 L그룹의 경우 지방도시와 비도심지역으로 이루어져 있다. 이들의 토지용도는 주거, 녹지, 상업지역 등을 포함하는 양상을 보이는 점에서도 H 그룹과 대조를 이루고 있다. 여기서 두 그룹간 농도차이도 100 ng m^{-3} 이 상씩으로 확연한 차이를 보이고 있다. 최근의 연구 중 원주시와 같이 다양한 환경조건을 갖춘 지역에 대한 Kim and Song(1997)의 연구를 보면, 납의 농도가 초지지역에서 88 ng m^{-3} , 산업단지 지역에서 326 ng m^{-3} 수준으로 현저한 차이의 존재를 보고한 바 있다. 이와 같은 결과는 최배진 등(2003)의 연구결과 중에서도 확인할 수 있다. 이들의 연구에 의하면 대구 도심지역의 경우, 납 성분이 전원지역에서 관측한 결과보다 약 1.7배 가량 높은 수준인 것을 알 수 있다. 또한 Kim and Song(1997)의 원주지역에 대한 연구결과에서도 공업, 상업, 거주, 초지지역으로 납성분을 나눠 비교한 결과 공업지역이 초지지역보다 3.7배 가량 높은 것을 알 수 있다. 그리고 상업과 거주지역의 경우 농도분포의 특성이 매우 유사한 수준임을 알 수 있었다. 이렇게 토지 용도에 따른 납농도의 크기 차이가 확실하게 나타나는 것을 보면, 납의

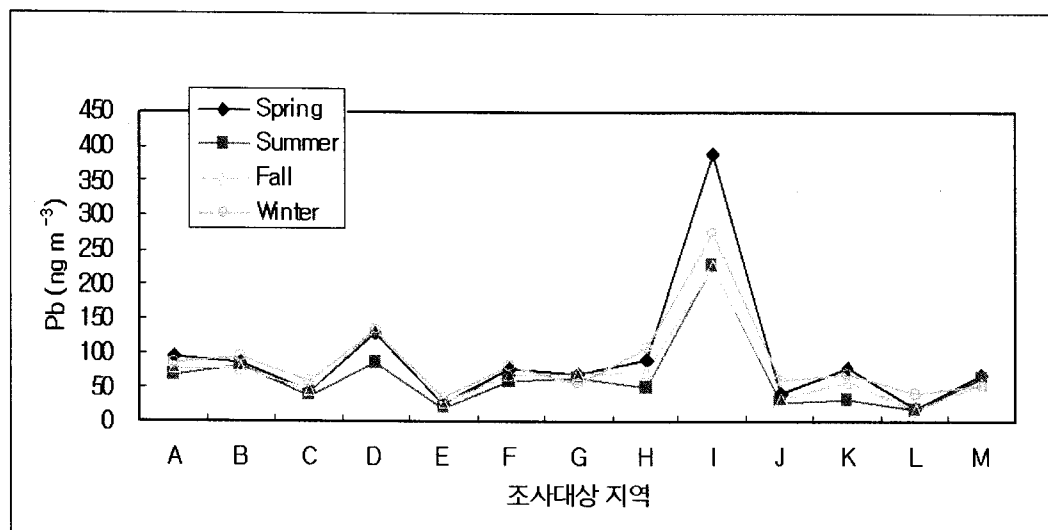
발생에 특정한 오염원이 중요하게 작용한다는 것을 추측해 볼 수 있다.

<그림 1> 지역별 Pb 농도의 분포 특성 : 평균 농도를 이용한 비교

A. 전체 자료의 비교



B. 계절별 자료의 비교



좀 더 구체적인 비교를 위해 납 농도의 상하위 지점과 그 지점들이 속한 도시의 자료를 비교해 보았다. 먼저 고농도 지점의 경우 <표 3, 4>에 제시한 것과 같이 도시 측정지점이 한 곳인 안산을 제외하고는, 각 지점들 보다 그것이 속한 도시평균이 상당히 낮은 결과를 보인다. H그룹의 납 농도는 $124\sim 152\text{ ng m}^{-3}$ 에 분포하지만 그 지점이 속한 도시의 전체 평균은 이보다 많이 낮은 $70.8\sim 85.4\text{ ng m}^{-3}$ 수준의 농도를 보인다. 그러나 공업지역이 없는 L그룹에서는 그 지점과 도시의 전체 평균농도와의 차이가 H그룹에 비해 크지 않았다. 이러한 비교결과를 감안하면, 공업지역을 포함한 도시들의 경우 그러한 지점들의 납농도가 도시의 전체평균농도를 상승시키는데 일조하였다는 것을 알 수 있다. 모든 지점의 납 농도를 제시한 <표 2>에서 볼 수 있듯이, 공업지역을 제외한 지점에서는 납의 농도가 대체로 낮고 고르게 분포한다는 특징을 보인다. 그러나 이와 같이 납의 농도가 고르게 분포한다는 경우도 한 도시 내의 상황일 뿐이고, <표 3>에 제시한 결과와 같이 도시들 간에는 어느 정도 차이가 존재한다. 실제 이러한 경향은 국내외에서 시도한 다수의 연구결과에서도 확인할 수 있다. 예를 들어, Allaban et al.(2002)가 이집트의 공업지역을 대상으로 조사한 결과에서도 납의 농도는 $100\sim 26,800\text{ ng m}^{-3}$ 수준에서 관측된 바 있다. Mugica et al.(2002)이 멕시코의 공업지역을 조사한 결과, 150 ng m^{-3} 수준의 평균농도를 확인하였고, Ho et al.(2003)이 홍콩의 공업지역에서 100 ng m^{-3} 전후의 평균농도를 보고한 바 있다. 그러나 이와 달리 청정한 배경지역들을 대상으로 조사한 결과에서는 본 연구에서 확인한 가장 저농도 수준인 수십 ng m^{-3} 영역보다 10배 정도 작은 수 ng m^{-3} 수준의 농도가 발견되는 것을 쉽게 확인할 수 있다. Injuk et al. (1998)이 북해 지역을 조사한 결과를 보면, $3\sim 7\text{ ng m}^{-3}$ 수준으로 납이 관측되었고, 인근지역을 Wang et al. (2000)에 조사한 결과에서도 3 ng m^{-3} 수준의 평균값을 보고하면서, 그러한 경향이 유지되었다는 것을 보고하였다. 뉴욕-뉴저지항에 인근한 북미지역의 일부를 조사한 Gao et al (2002)의 결과를 보면, 연안지역에서 6.6 ng m^{-3} 리고 공업시설들의 영향이 있는 지역에서도 7.9 ng m^{-3} 수준의 농도를 관측한 것으로 보고하고 있다.

납은 거대 입자군에 비해 미세 입자군에서 그 농도가 3~4배 밀집하기 때문에 다른 중금속에 비해 상대적으로 긴 체류시간을 유지할 수 있다. 이런 안정성으로 인해 납의 농도는 광역적으로도 비교적 균질한 상태를 보인다고 할 수 있다(최배진 등, 2003). Kim et al.(2003)의 연구에서도 납은 조대입자보다 미세입자 영역에서 높은 농도분포를 보인다고 보고하였다. 미세입자는 주로 인위적 기원으로부터 발생하기 때문에, 납의 오염원 역시 인위적인 발생원이 큰 비중을 차지한다고 볼 수 있다. 위의 연구결과도 이러한 납의 분포특성으로 인해 나타난 것으로 생각해 볼 수 있을 것이다. 실제 이러한 특성은 납의 농도가 비도심지역보다는 도심지역에서, 비공업지역보다는 공업지역에서 높게 나타나는 것을 통해 확인할 수 있다. H그

룹과 L그룹의 토지용도가 공업단지와 주거, 상업, 녹지대로 구성되어 확연한 차이를 보이듯이, 공업지역이나 도심지역이 상업, 거주지역이나 비도심지역에 비해 납의 고농도를 보이는 이 같은 결과는 최배진 등(2003)의 연구결과에서도 제시된 바 있다.

2. 시간적 납의 분포

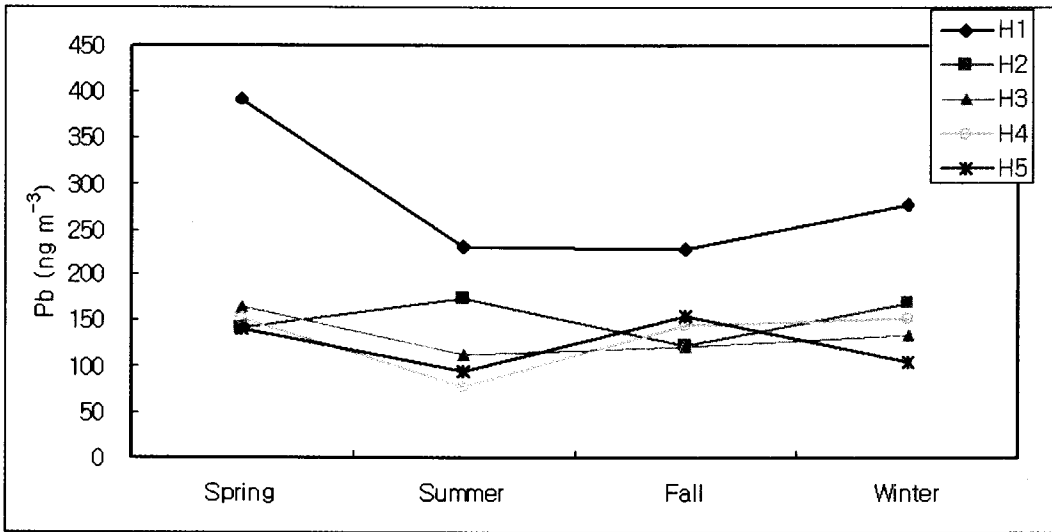
납농도는 주로 동고하저의 계절적 분포 형태를 보인다고 알려져 있다(Kim et al., 1997). 과거 납재철 등(1994)의 연구에서도 납의 농도분포는 여름에 가장 낮고 겨울에 가장 높게 나타났다. 또한 Kim and Song(1997)의 연구에서도 납의 농도는 여름에 가장 낮았고, 가을이 여름보다 높게 나타났다. 그렇지만, 겨울과 봄에 비해선 매우 낮은 농도를 보이는 것으로 제시하였다. 본 연구의 자료결과에서도 위와 비슷한 분포 특성을 확인할 수 있다. 시간적 납분포의 결과를 전체도시의 계절별 농도 분포 <그림 1B>라는 기준으로 비교하면 다음과 같다. 먼저 전체도시의 계절별 농도분포 결과를 보면 봄 (93.8 ng m^{-3}), 겨울 (89.4 ng m^{-3}), 가을 (74.7 ng m^{-3}), 여름 (64.6 ng m^{-3}) 순으로 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 우선 봄철 납의 농도가 높게 측정되었는데 그 이유 중 하나로 과거부터 꾸준히 황사의 영향을 지적할 수 있다. 과거 연구들에 의해서 황사의 영향이 납농도를 증가시키는 요인 중 하나로 확인되고 있는 것도 사실이다. 최재천 등(1999)의 연구에서는 납의 농도를 황사와 비황사시로 구분하여 제시하였다. 그 결과에 의하면 황사시엔 91 ng m^{-3} , 비황사시엔 63.5 ng m^{-3} 으로, 황사시 그 농도가 약 1.42배 증가하는 것으로 나타났다. 또한 월별 자료의 비교에서 3, 4, 5월 중 4월에 고농도를 보이는 것을 인접국가로부터 장거리 수송된 황사입자의 영향이 크게 작용한 것으로 보고하고 있다. 그러나 이러한 결과도 환경 기준치($1.5 \mu\text{g m}^{-3}$)에는 훨씬 못미치는 낮은 수준이다. 최배진 등(2003)의 연구 또한 황사기간에 나타난 납성분의 농도가 비황사기간보다 일정수준 높게 분포해 황사발생시 납성분의 유입이 상당 수준 이루어질 수 있다고 보고한 바 있다.

<그림 2>에는 가장 고농도를 기록한 H와 가장 저농도를 이용 L지점들과 같이 개별 관측점들의 자료들을 이용하여, 각 지역들에 대한 계절별 평균값을 동일한 방식으로 비교하였다. H그룹에서는 H2 지점을 제외하고는 여름철에 가장 낮은 농도를 보이고, 봄 또는 겨울철에 납의 농도가 가장 높게 나타나는 유사한 계절적 분포경향을 보인다. 보다 인위적 배출원의 영향이 약한 L그룹들에서도 이와 유사한 경향이 확인된다. 보다 구체적으로 L3를 제외하면, 모두 겨울에 가장 높은 납 농도를 보이며, 여름철에 상대적으로 낮은 농도를 보인다. 이처럼 개별 지역들의 계절적 경향성도 전체 도시지점에서 발견되는 경향과 크게 차이가 없다는 점

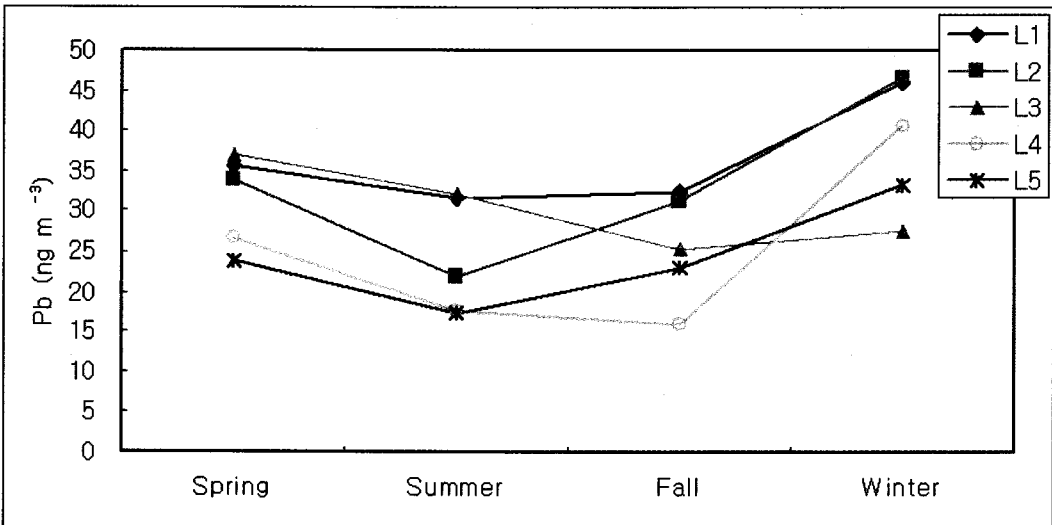
을 감안하면, 농도의 고저나 주요 배출원들의 차이와 같은 요인들에 상관없이 납성분의 농도 분포는 대체로 유사하게 계절적인 변화를 보이는 것을 확인할 수 있다. Fang et al.(2002)은 교통량이 많고 오염이 심한 지역에서도 계절에 따른 농도변화의 폭이 크게 나타날 수 있다고 보고한 바 있다.

<그림 2> 주요 고농도 및 저농도 관측지점들에 대한 Pb 농도의 계절평균 비교

A. 5대 고농도 관측지점의 계절평균 Pb 농도



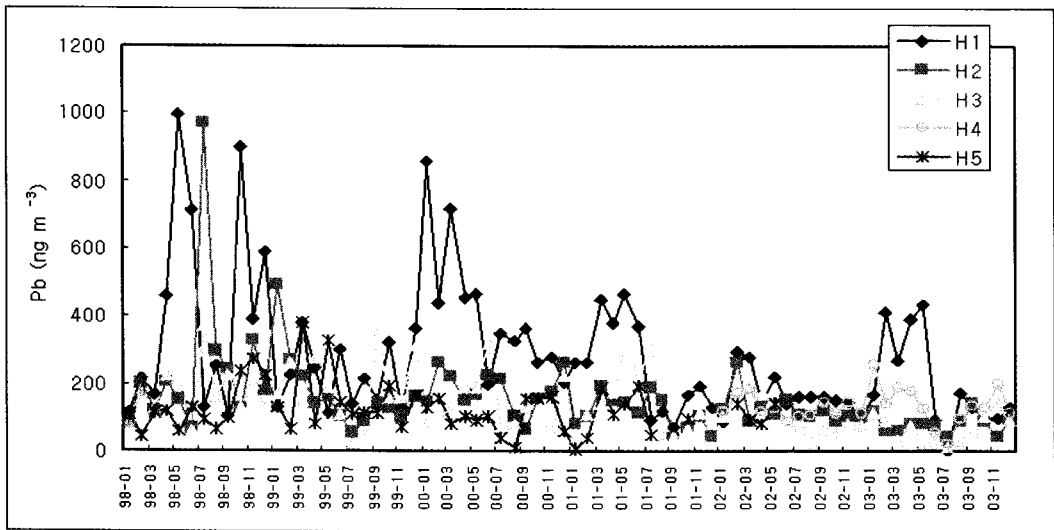
B. 5대 저농도 관측지점의 계절평균 Pb 농도



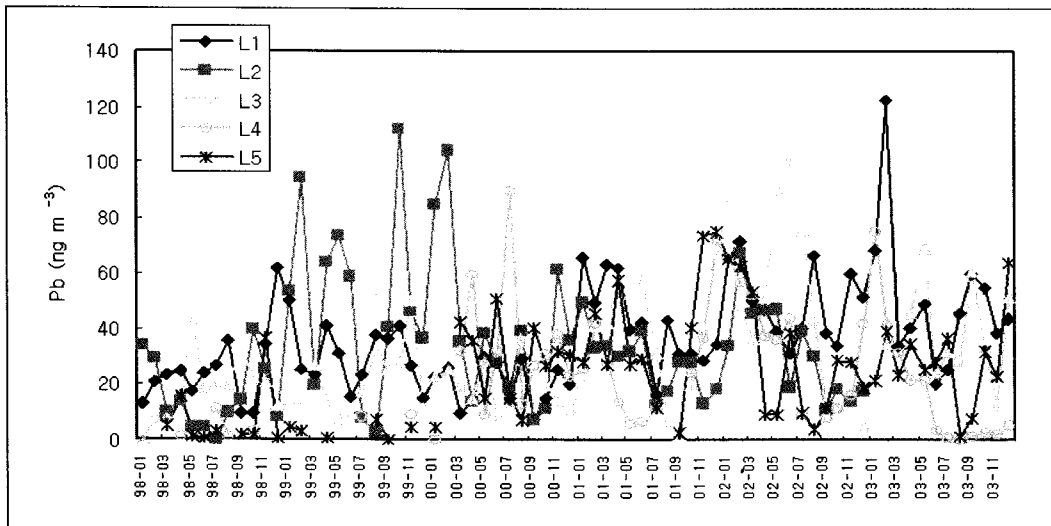
관측지점들 간의 장기적 농도변화 추이를 평가하기 위해, 농도분포의 경향성에 차이가 H와 L그룹의 자료들을 이용하여 비교를 시도해 보았다. 이를 위해, 월평균 농도자료를 이용하여, 전체 연구기간인 6년 동안 월별 농도분포를 비교하는 방식으로 제시하였다. 이렇게 그룹별 특징을 보면, 납분포의 차이가 좀 더 뚜렷하게 나타난다. <그림 3>을 보면 지난 6년간 납농도의 전체적인 추세를 살펴볼 수 있다.

<그림 3> 월별 Pb 농도자료를 이용한 전체 연구기간 중 Pb 농도의 장주기적 변화경향 비교

A. 5대 고농도 Pb 관측지점들의 경향 비교



B. 5대 저농도 Pb 관측지점들의 경향 비교



H 그룹의 경우, 농도분포가 비교적 복잡한 양상을 보인다. 공업지역의 경우, 여러 가지 배출원들의 영향이 복합적으로 작용하고, 그러한 영향이 지속적으로 유지되었으리라 추정할 수 있을 것이다. 그런데 특히 유의할 점은 H1이나 H2와 같은 지점들의 경우, 90년대 후반에 상당히 고농도들이 관측되었지만, 2000년대에 접어 들어 그러한 고농도의 발현이 현저하게 줄어든 것을 알 수 있다. 이에 반해, L지점들의 경우 상당히 낮은 농도대에 존재함에도 불구하고, 전체 연구기간의 경향성에는 상당한 불규칙적 면이 존재한다는 것을 알 수 있다.

이러한 결과들을 토대로 보면 납의 시간에 따른 평균적인 농도 분포양상은 비교 주기에 따라 여러 가지 가능성을 예측할 수 있다. 최소한 계절적인 주기를 기준으로 보면, 배출원의 종류나 강도에 관계없이 대체로 유사한 상대적인 경향성을 유지한다고 볼 수 있을 것 같다. 그러나 이보다 더 긴 시간적인 주기, 예를 들어 연도별 변화 경향 등을 보면, 이보다는 보다 더 긴 시간적 인자들의 영향을 확연하게 감지할 수 있다. 이미 조준호 등(1998)의 선행연구 결과에서, 과거 서울대기 중 납농도의 연도별 변화양상이 유연휘발유의 소모양상과 유사하다는 것을 보고한 바 있다. 이러한 사실로부터 서울대기중 납이 대부분 국내 유연휘발유 자동차에서부터 배출되는 것으로 추정했다. 그러나 유연휘발유 사용이 금지된 후 12년이 지난 지금은 자동차의 배출 영향은 상당히 줄어든 것으로 보인다. 그러나 여전히 자동차의 운행은 납의 배출에 일정 부분 영향을 미칠 것으로 보인다. 그러나 이보다는 납을 사용하는 산업시설과 같은 여타 배출원의 영향이나 역할이 훨씬 심각한 수준으로 증대하였을 것이라고 생각할 수 있다.

3. 지역간 납농도 분포에 대한 상관성 조사

본 연구를 통해 분석을 시도한 여러 도시지점들간의 납의 분포특성을 좀 더 포괄적으로 해석하기 위해 모든 도시지점, 고농도 상, 하위 각각 5지점 들의 자료를 이용하여 다양한 관점에서 상관성의 강약을 분석하였다. 구체적으로 도시의 규모나 토지용도 등의 기준에 따라 납의 농도가 비슷한 특성을 지닌 지역들에 대한 상관성의 강도를 통계분석한 결과를 <표 5>에 제시하였다.

우선 <표 5>의 상단에는 A에서 M까지 각 도시를 대표하는 평균자료들을 이용하여 상관 분석을 한 결과를 제시하였다. 통계적인 의미에서 대응을 이루는 전체 78개 비교대상 짝들의 결과를 다시 상관성의 강약을 기준으로 I그룹(유의수준 95%, $P < 0.05$)과 II그룹(유의수준 99%, $P < 0.01$)로 구분하였다. 그 결과 전체의 23% 수준인 18개의 대응짝들에서 강한 상관성을 띄는 것으로 나타났다. 주로 대도시 지역들 중에서 인접한 지역들과 또는 공업활동이

강한 지역들 간에 짝을 이룬 경우, 강한 상관성을 보이는 것을 쉽게 확인할 수 있다. 서울과 수원($r = 0.553, p < 0.01$), 안산($r = 0.385, p < 0.01$)이, 부산과 대전($r = 0.700, p < 0.01$), 울산($r = 0.413, p < 0.01$) 등에서 다른 지역들의 짝에 비해 상대적으로 높은 상관성을 쉽게 확인할 수 있다. 이와는 달리 전체 평균농도가 가장 낮은 수 십 ng m^{-3} 의 농도영역에 포함되지만, 인접하게 위치한 광주와 여수 같은 지역에서도 높은 상관계수가 나타나는 것을 확인할 수 있다($r = 0.647, p < 0.01$).

<표 5> 납농도를 이용한 관측지점들 간의 상관성 분석결과

A. 도시별 평균자료를 이용한 상관 분석

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
A	1	.274(*)	0.038	0.197	0.052	.302(**)	0.075	.553(**)	.385(**)	0.094	0.44	0.032	0.169
B		1	0.146	0.176	0.053	.700(**)	.413(**)	0.07	0.028	0.096	0.026	0.025	.367(**)
C			1	0.141	0.192	0.215	0.017	0.034	0.216	0.228	0.158	.320(*)	.365(**)
D				1	0.084	.286(*)	.344(**)	.246(*)	0.046	.265(*)	.591(*)	0.235	0.003
E					1	0.067	0.057	0.046	0.11	0.049	0.385	.647(**)	0.065
F						1	.348(**)	0.21	0.154	0.098	0.32	0.134	.347(**)
G							1	0.057	0.038	0.068	0.35	0.082	0.015
H								1	.559(**)	0.11	0.249	0.078	0.039
I									1	0.081	0.366	0.187	0.061
J										1		0.094	0.003
K											1	0.386	0.208
L												1	0.197

* 상관계수는 0.05 수준(양쪽)에서 유의함; ** 상관계수는 0.01 수준(양쪽)에서 유의함

B. 5대 고농도 관측지점들 간의 상관분석

	H1	H2	H3	H4	H5
H1	1	0.008	0.084	0.284	0.173
H2		1	.524(**)	0.143	0.017
H3			1	.504(*)	0.01
H4				1	0.097

C. 5대 저농도 관측지점들 간의 상관분석

	L1	L2	L3	L4	L5
L1	1	0.131	.336(**)	0.18	0.2
L2		1	0.007	0.012	0.039
L3			1	0.168	.298(*)
L4				1	.431(**)

다시 농도의 고저에 따라 그룹별로 구분한 H와 L 자료군들 간의 상관성을 분석한 결과를 보면, 각 그룹 내에서 뚜렷하게 강한 상관성의 발생빈도가 현저하게 줄어든 것을 볼 수 있다. 우선, H그룹의 경우, 부산과 대전($r = 0.524, p < 0.01$), 대전과 인천($r = 0.504, p < 0.05$) 같은 지점에서 서로 높은 상관성이 확인되었다. 이에 반해, L그룹의 경우, 대구(주거)와 포항(상업)($r = 0.336, p < 0.01$), 여수(주거)와 광주(주거) ($r = 0.431, p < 0.01$)와 같은 쪽에서 높은 상관성을 볼 수 있다. 반면에 두 그룹을 결합시킨 H와 L 간에 대응을 이룬 짝들의 경우, 대부분 뚜렷한 상관성을 찾아볼 수 없다. 결과적으로 H 지역이나 L 지역 모두 상관성이 강한 짝들이 드물게 나타난다는 사실은 배출원의 강약에 상관없이 서로 다양하게 이질적인 배출원들의 영향을 받고 있다는 것을 간접적으로 시사한다. 비교적 강한 배출원들이 산재한 H 지역에서 상관성이 드문 것과 마찬가지로 L지역에서 Pb가 발생하는 조건도 단순하지 않을 것이란 점을 추정할 수 있다.

IV. 결론

본 연구에서는 98년 1월부터 2003년 12월까지 확보한 환경부의 납성분 측정자료를 이용하여, 납성분의 농도분포 특성을 시간적 및 공간적 관점에서 다양하게 평가하고자 시도하였다. 우선적으로 대기 중 납농도의 지역적 평균치를 산출하여 비교하였다. 대도시 또는 공업시설이 많은 지역에서 수 백 ng m^{-3} 의 농도대가 존재하는 것과 달리 강한 배출원의 영향으로부터 자유로운 소규모 도시에서는 수 십 ng m^{-3} 의 농도대가 존재하는 것을 동시에 확인할 수 있었다. 각 지역별 평균값을 비교하는 방식에 덧붙여, 개별 관측점의 자료들 중에서 가장 고농도를 띄는 H 영역과 가장 저농도를 취하는 L 영역으로 구분하여, 세부적인 통계분석을 동시에 시도하였다.

시간적 분포양상을 비교한 결과, 납농도의 고저에 상관없이 대부분의 지역에서 유사한 계절적 경향을 유지하는 것을 확인할 수 있다. 납의 계절적인 변화경향이 비슷하며 과거로부터 계속된 연구 결과와 마찬가지로 봄, 겨울에 높고 여름에 낮은 특성을 보이고 있다. H와 L 지역에서 개별적으로 확보한 월평균 농도들을 이용하여 장기적인 경향성을 개략적으로 비교한 결과, 고농도 지역들의 경향에서는 어느 정도 큰 변화의 증거가 확인되기도 하였다. 예를 들어, 일부 높은 평균농도를 기록한 지점들에서는 90년대 후반에 고농도 자료의 발생이 빈번하게 일어난데 반해, 2000년대에 들어 그러한 빈도가 현저하게 줄어든 것을 확인할 수 있다. 반면 저농도 지역들의 경우, 비교적 낮은 농도대가 형성됨에도 불구하고, 뚜렷한 경향성을 확인하기 어려울 정도로 경향성을 찾기가 쉽지 않다.

공간적인 분포 경향에서는 도심의 공업지역과 그렇지 않은 지역의 확연한 차이를 확인하였다. 비록 환경 기준치에 훨씬 못 미치는 농도이기는 하지만 대도시나 공업지역의 납농도가 평균 농도와 비교하여 훨씬 높다는 점을 감안하면, 각종 산업활동을 통해 배출되는 납이 중요한 배출원으로 작용한다고 볼 수 있을 것이다. 비록 유연연료의 사용중지와 함께 납의 농도가 수 십 또는 수 백배 이상 감소하여 수 십 ng m^{-3} 대로 감소한 것이 사실이지만, 아직까지 이러한 결과는 인위적인 오염원의 영향을 상당 부분 반영하는 결과라고 볼 수 있다. 이러한 배출원들의 영향을 거의 완전하게 배제하여야, 비교적 청정한 공기질을 유지하는 대부분의 유럽지역에서와 같이 수 ng m^{-3} 의 수준의 저감 효과를 발견할 수 있을 것이다. 특히 현재까지 공기질 기준을 간신히 만족하는 수준이지만, 수 백 ng m^{-3} 수준의 농도를 쉽게 초과하는 것으로 확인되는 일부 수도권에 속한 공업지역들의 경우, 특별한 관리대상으로 설정하여 장기적인 관점에서 대기질을 향상시키기 위한 대책을 수립할 필요성에 대해 주목할 필요가 있다. 특히, 수도권대기질 관리대책과 같은 새로운 정책을 실시하고 평가하는 부분에 있어서도, 납과 같은 유해성분의 관리에 대한 계획을 충분히 감안하고 반영하여야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구의 일부는 극지연구소 (Korea Polar Research Institute)의 '남극 세종기지 주변 인간 활동으로 인한 환경변화모니터링' 연구사업 (PE05005)의 지원으로 이루어졌습니다.

참고문헌

- 조준호 · 박석환 · 정문식. 1998. "서울시 도로변 대기 중 납, 아연 및 철 농도에 관한 조사연구." 한국위생학회지. 제 24권 2호. 110~117.
- 최배진 외 6인. 2003. "AAS를 이용한 환경시료의 분석 대기 분진 중 납 성분의 사례 연구: 국내 및 아시아권을 중심으로." 한국환경분석학회지. 제 6권 2호. 77~87.
- Allaban, M.A., A.W. Gertler and D.H. Lowenthal. 2002. "A preliminary apportionment of the sources of ambient PM10, PM2.5, and VOCs in Cairo." Atmospheric Environment. Vol. 36. pp. 5549~5557.
- Fang, G.C., C.N., Chang, Y.S. Wu, P.P.C. Fu, C.J. Yang, C.D. Chen, and S.C. Chang. 2002. "Ambient suspended particulate matters and related chemical species study in central Taiwan, Taichung during 1998~2001." Atmospheric Environment. Vol. 36. pp. 1921~1928.
- Gao, Y., E.D. Nelson, M.P. Field, Q. Ding, H. Li, R.M. Sherrell, C.L. Giglotti, D.A. Ry Van, T.R. Glenn and S.J. Eisenreich. 2002. "Characterization of atmospheric trace elements on PM2.5 particulate matter over the New York-New Jersey harbor estuary." Atmospheric Environment. Vol. 36. pp. 1077~1086.
- Ho, K.F., S.C. Lee, C.K. Chan, J.C. Yu, J.C. Chow and X.H. Yao. 2003. "Characterization of chemical species in PM2.5 and PM10 aerosol in Hong Kong." Atmospheric Environment. Vol. 37. pp. 31~39.
- Injuk, J., van R. Greieken, de G. Leeuw. 1998. "Deposition of atmospheric trace elements into the north sea: coastal, ship, platform measurements and model predictions." Atmospheric Environment. Vol. 32. pp. 3011~3025.
- Kim, K. H., D. S. Kim and T. J. Lee. 1997. "The temporal variabilities in the concentrations of airborne lead and its relationship to aerosol behavior." Atmospheric Environment. Vol. 31. pp. 3449~3458.
- Kim, K. H. and D. W. Song. 1997. "The concentrations of lead in urban and nonurban atmospheres of Won Ju city, Korea." Water, Air and Soil Pollution. Vol. 98. pp. 225~273.
- Kim, K. H., G. H. Choi, C. H. Kang, J. H. Lee, J. Y. Kim, Y. H. Youn and S. R. Lee. 2003. "The chemical composition of fine and coarse particles in relation with the Asian Dust events." Atmospheric Environment. Vol. 37. pp. 753~765.
- Mugica, V., M. Maubert, M. Torres, J. Munoz and E. Rico. 2002. "Temporal and spatial

variation of content in TSP and PM10 in Mexico City during 1996 and 1998.” J. Aerosol Science. Vol. 33. pp. 91~102.

Wang, C., W. Zhu, Z. Wang and R. Guicherit. 2000. “Rare earth elements and other metals in the atmospheric particulate matter in the western part of the Netherlands.” Water, Air and Soil Pollut. Vol. 121. pp. 109~118.