

대기 분진 중 중금속 성분의 공간적 농도분포 특성 비교: 서울시 7개 관측점을 중심으로

최배진 · 김기현*

동국대학교 화학과

*세종대학교 지구환경과학과

(2003. 2. 4 접수, 2003. 3. 18 승인)

The metallic composition of airborne particles in seven locations of Seoul city, Korea

Bae-Jin Choi and Ki-Hyun Kim*

Dept. of Chemistry, Dongguk University, Seoul 100-715, Korea

*Dept. of Earth & Environmental Sciences, Sejong University, Seoul 143-747, Korea

(Received Feb. 4, 2003, Accepted Mar. 18, 2003)

요 약 : 서울시에 소재한 7개 측정점으로부터 입자상물질에 결합된 금속성분의 농도를 약 1년여 기간동안 관측하였다 (2001년 3월~2002년 5월). 본 관측자료를 토대로 공간적 요인이 금속성분의 분포특성에 어떠한 방식으로 영향을 미치는 가를 조사하였다. 이러한 분석을 위해, 변이계수, 시간적 변이성, 상관성 발생의 빈도 등과 같은 기준을 활용하였다. 본 연구 결과에 의하면, 금속성분의 농도분포가 상당히 다양한 요인들의 영향에 종속된다는 사실이 확인되었다. 특히 Fe, Mn, Pb 등의 성분들은 이질적인 지역들간에도 대단히 강한 유사성을 보이는데 반해, Cu와 같은 성분은 이러한 경향을 전혀 찾기가 어려웠다. 이러한 공간적 요인의 특성을 상세하기 설명하기 위해서는 개별 성분의 지화학적 요인을 발생/소멸현상과 연계하여 설명하는 것이 중요하다.

Abstract : In the present study, we made measurements of PM-bound metal concentrations from seven different urbanized locations in Seoul for the period covering March 2001 through May 2002. The measurement data were analyzed to explore the possible influences of spatial factors on metal distribution characteristics. To check for the importance of such aspects on metal distribution characteristics, the measured data were compared between different metals and between different sites by several criteria including (1) coefficient of variation (CV) values; (2) temporal variability; and (3) the abundance of strongly correlated pairs. The overall results of our study indicate strong diversity in the distribution characteristics of different metals. It is found that some metals (like Fe, Mn, and Pb) tend to exhibit strong compatibility among different study sites. However, no such compatibility appears to exist for certain metals like Cu. To account for the importance of spatial factors, complex relationships between

★ Corresponding author

Phone : +82+(0)2-3408-3233 Fax : +82+(0)2-499-2354

E-mail : khkim@sejong.ac.kr

source/sink processes and geochemical characteristics of a given metallic component may have to be examined in a systematic manner.

Key words : particulate matter, metal, distribution, concentration, urban air, spatial factor

1. 서 론

대기 중의 오염물질은 지표 환경에 존재하는 다양한 인위적 또는 자연적 배출원으로부터 생성, 배출을 통해 유입된다.¹ 일단 대기환경으로 유입이 되면, 이들 성분은 궁극적으로 (다시 건조침적이나 습윤침적의 과정을 통해) 지표환경으로 재반입 과정에 종속된다. 따라서 이러한 과정은 이들의 환경거동을 결정짓는 복잡한 순환과정의 기본적인 골격으로 작용하게 된다. 그런데 이들 성분이 보여주는 순환 현상은 각 성분별로 다양한 양상을 취하게 된다. 수은과 같이 휘발성이 강한 금속은 입자상으로 존재하기 보다는 대부분 가스상의 형태로 존재하기 때문에 다른 금속성분들이 보여주는 순환의 형태와는 뚜렷하게 차별화를 이룬다.² 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.³

아직까지 많은 국가에서 대기질을 평가하는 중요한 척도로 대기 중 중금속 성분의 절대적 농도수준을 활용한다. 따라서, 분진과 결합된 일부 중금속 성분, 예를 들어 납과 같은 금속성분의 농도분포는 가장 우선적인 관심의 대상으로 취급되기도 한다.⁴ 특히 도심환경에서 발견되는 금속성분의 농도분포는 여러 가지 다양한 인위적인 배출원의 영향을 역으로 유추할 수 있는 근거를 제공하기 때문에, 지금도 많은 연구의 주요한 소재로 다루어지고 있다. 대체로 이들의 농도분포는 산업화가 급속하게 이루어지는 단계에서 빠른 속도로 증가하지만, 여러 가지 형태로 대기질에 대한 관리가 이루어지면, 그와 같은 노력의 정도에 따라 어느 정도 개선되는 양상을 보여 주기도 한다.⁵ 이러한 점을 감안하면, 비교적 빠른 속도로 산업화가 이루어지고 있는 동아시아권 지역의 경우, 금속성분에 대한 분포특성의 연구는

이들 성분과 배출원의 관계를 규명할 수 있는 여러 가지 단초를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구에서는 여러 가지 금속성분의 공간적 분포특성을 평가하기 위한 목적으로, 서울시를 한강을 기준으로 남북으로 구분하고, 도심을 중심으로 다시 동서로 구분하여, 각 구역별 1 또는 2개 지점을 포함하는 총 7개의 측정점들을 택하였다. 본 연구에서 설정한 7개 측정지점은 서울시의 동서남북 방향으로 고르게 분포하고 있다. 따라서 서울과 같은 초대규모의 도시에서 금속성분의 공간적 환경거동을 다양한 환경학적 관점에서 고찰할 수 있는 기회를 제공할 것으로 기대된다. 이들 7대 관측점을 중심으로 2001년 봄기간부터 2002년 봄기간까지 약 1년 여의 기간동안 TSP 시료를 채취하였다. 그리고 이들 시료로부터 Pb, Cu, Mn, Cd, Ni, Cr, Fe를 포함하는 7개의 금속성분에 대한 농도분포를 관측하였다. 이들 분석결과를 토대로 동일한 성분의 공간적 분포 특성이 어떠한 요인들의 영향에 종속되는가를 분석하고자 하였다. 그리고 이들 성분에 대한 관측 결과를 이용하여, 이들의 분포특성에 결정적인 영향을 미칠 수 있는 다양한 환경요인들과의 관계를 통계학적 기법을 응용하여 설명하고자 하였다.

2. 연구 방법

금속성분을 분석하기 위한 TSP시료의 채취는 서울시를 동서남북으로 구분한 4대 구역내의 1개 또는 2개의 측정점으로 부터 이루어졌다. 이러한 분류를 위해, 편의상 서울의 북동쪽 지역을 A, 남동지역을 B, 남서지역을 C, 북서지역을 D구역으로 나누었다. (1) A지역에서는 한 개의 측정점인 방학동을 A1, (2) B지역은 잠실과 방이동을 각각 B1과 B2, (3) C지역은 구로동과 화곡동 지점을 각각 C1과 C2, (4) D지역은 남가좌동과 한남동 지점을 각각 D1과 D2로 지정하였다. 각 측정점에서 시료 채취의 시작은 2001년 3-5월 기간 중에, 종료 또한 마찬가지로 1년이 경과한 2002년 3-5

월 기간 중에 이루어졌다.

시료는 각 관측점에서 실험의 종료 시점까지 매월 간격으로 대략 두 번째 주의 월요일 오전 9시부터 매 24시간 간격으로 토요일까지 연속적으로 관측하였다. 가능한 모든 지점에서의 시료채취는 동일한 시간대에 하는 것을 원칙으로 하였으나, 기기의 문제나 여타 사정으로 인하여 이러한 원칙을 지키지 못한 경우도 가끔씩 발생하였다. 그 결과 지점별로 관측횟수에 어느 정도 차이가 발생하였다. 전체적으로 가장 먼저 관측을 시작하여 (2001. 3) 가장 늦게 종료한 (2002. 5), B1 지점에서는 최대 72회로 가장 많은 관측이 이루어졌다. 반면 가장 측정횟수가 작은 A1 지점에서는 최소인 40회까지 관측이 이루어졌다.

모든 시료는 기본 일단위 (24시간)로 1.2~1.7 m³/min의 유속 조건에서 Hi-vol sampler 를 이용하여 채취하였다. 여지는 주로 EPM 2000 (Glass) 필터를 사용하였다. 채취된 여지는 실험실에서 건조시켜 평량하고 무게를 잰 후, 시료 분석 전까지 데시케이터에 보관하였다. 시료가 채취된 필터는 다음과 같은 순서로 전처리 과정을 거쳤다. 우선 1차적으로 세라믹 편침을 이용하여, 전체의 23%를 취하였다. 이를 세라믹가위로 잘게 자른 후, 질산 50% 희석액 30 ml와 과산화수소수 5 mL를 가하였다. 이를 다시 "가열과 여과"의 반복적인 과정을 거친 후, 최종적으로 농축 처리 후 분석하였다. 최종시료는 원자흡광분석기 (Polarized atomic absorption spectrophotometer Z-8100, Hitachi사: 이하 AA)를 이용하여 7가지 성분 (Pb, Cu, Mn, Cd, Ni, Cr, Fe)에 대한 농도분석을 실시하였다. 이와 같은 기본적인 분석 외에도 황사시에 주요 지각 구성성분들의 농도변화를 관측하기 위해, Al, Ca, Mg 성분에 대한 분석도 간헐적으로 실시하였다. 이들 시료의 분석시 AA의 기기조건 및 각 성분들의 검출한계를 반복분석한 최저 분석가능 농도값의 3 sd으로 정의한 결과는 성분별로 다음과 같이 정리할 수 있다: Cd의 경우 0.5 µg, Pb, Cu, Cr, Mn, Ni의 경우 2~10 µg, Fe의 경우 50 µg 이상의 수준을 보였다.

3. 결과 및 토론

3.1 전체 결과에 대한 평가

본 연구에서는 앞서 설명과 같이, 서울시에 산재한

7대 관측점들을 중심으로 2001년 3-5월 기간에서 2002년 3-5월 기간까지 측정점 별로 약 12 개월의 기간동안 TSP에 결합된 금속성분의 농도를 관측하였다. Table 1에는 모든 금속성분들의 농도분포에 대한 통계량을 요약하여 제시하였다. 이러한 통계량의 제시에 있어, 검출한계 이하로 관측된 농도자료는 모두 0으로 가정한 후 처리하였다. 전체 자료의 수에 대비하여, 이와 같이 0으로 처리된 자료수의 비율은 성분별로 큰 편차를 보였다. 예를 들어, Mn, Fe가 0%, Pb, Cu가 2%, Cr이 4%, 그리고 Ni, Cd가 각각 11, 14%로 나타났다. 따라서 이러한 비교결과는 금속성분들 간에 어느 정도 기기적인 검출성의 차이에 의한 오차가 존재한다는 것을 의미한다.

관측된 자료들의 세부적인 경향성을 비교해 보면, Fe와 같은 주요 지각 성분의 농도는 동시에 관측된 극미량 성분들에 비해 작게는 수 십배 크게는 수 백배 이상으로 농도차를 보인다는 점을 확인할 수 있다. 본 연구에서 관측된 금속별 평균농도를 기준으로 각 성분들에 대한 농도크기 별로 비교하면, Fe >> Cu > Mn~Pb > Ni > Cr > Cd 등의 순서로 구분이 된다. 이와 같은 금속간 농도 크기는 이미 여러 선행연구들의 결과에서 확인한 바와 상당히 유사하다. 유럽과 미국의 도시들에서 관측한 농도자료를 이용하여 도심환경권의 일반적인 금속성분들의 농도를 발표한 Lantzy and Mackenzie⁶의 결과에 비교하면, 본 연구에서 관측한 Cu나 Cd와 같은 성분의 농도가 최고 두 배 가까이 높게 나타나는데 반해, 기타 성분들의 농도는 대략 절반 또는 그 이하의 수준으로 낮게 나타난다. 또 다른 각도에서 금속의 오염정도를 평가하기 위해, Taylor and McLennan⁷의 지구 규모의 지표잔존 농도를 기준으로 부화계수 (enrichment factor: EF)를 평가하였다.⁸ 부화계수의 산출은 주로 Fe, Al 성분의 농도자료를 이용하는 데, 본 연구에서는 Al 성분을 측정하지 않았기 때문에 Fe를 이용하였다. 이러한 기준으로 산출된 결과는 EF값의 크기에 따라 자연적 (또는 지각 기원의) 발생원에 대비하여 인위적 발생원의 상대적인 기여도를 개략적으로 평가할 수 있다. 본 연구의 결과에 의하면 두 가지 유형이 발견되었다. Cd, Cu, Pb의 순서로 EF값이 수천 또는 백까지의 크기로 인위적의 오염원이 강하게 작용하였을 가능성을 시사하였다. 반면, Ni, Cr, Mn의 농도는 최대 10여배 의 수준으로 지각에서 발견되는 수준에 근접하게 나타났다. 이와 같이 6개 금속별 EF

Table 1. A statistical summary of PM-bound metal concentrations measured from seven stations located within the Seoul metropolitan area in Korea during March 2001 through May 2002. All concentrations in ng m⁻³

	Pb	Cu	Mn	Cd	Ni	Fe	Cr
I. All							
Mean	77.0	208	79.7	3.10	19.0	2397	15.0
II. Individual Sector							
A1							
Mean±SD	65.2±77.8	47.1±72.4	65.1±147	2.63±2.30	15.2±17.5	2257±5052	10.8±12.0
Range (N)	4.1~435 (40)	5.3~336 (40/1)*	2.9~925 (40)	0.36~11.3 (40/4)*	1.4~92.5 (40/5)*	171~31863 (40)	1.8~58.4 (40/3)*
B1							
Mean±SD	81.5±65.3	384±251	117±184	3.55±2.64	17.1±18.3	3623±4728	19.1±16.8
Range (N)	7.1~424 (72/2)*	38~1481 (72/4)*	10.1~1208 (72/1)*	0.39~12.8 (72/7)*	1.4~82.3 (72/9)*	332~31719 (72)	2.1~104 (72/1)*
B2							
Mean±SD	74.1±53.9	157±124	62.1±51.6	3.24±2.55	13.6±15.5	2139±1736	13.5±10.1
Range (N)	2.0~237 (49/1)*	13.9~731 (49/1)*	3.5~209 (49)	0.49~11.1 (49/1)*	2.3~72.5 (49/6)*	247~8181 (49)	1.5~38.7 (49/1)*
C1							
Mean±SD	87.7±65.1	308±388	88.9±113	3.04±3.17	21.5±22.4	2534±2711	16.1±11.1
Range (N)	7.0~246 (45)	19.2~1835 (45/1)*	10.4~669 (45)	0.3~15.7 (45/5)*	2.7~121 (45/4)*	385~15177 (45)	3.1~47.2 (45/3)*
C2							
Mean±SD	78.6±78.0	87.8±46.9	56.6±49.1	3.13±4.85	22.1±64.1	1773±1512	12.1±11.3
Range (N)	9.5~483 (54/1)*	20.9~214 (54/2)*	8.8~224 (54)	0.6~33.0 (54/9)*	3.5~475 (54/10)*	295~7164 (54)	1.5~70.8 (54/1)*
D1							
Mean±SD	70.9±43.9	192±162	82.2±148	3.49±3.02	21.9±42.3	2219±2010	16.6±14.4
Range (N)	5.8~193 (59/3)*	4.4~1105 (59)	3.5~1116 (59)	0.69~11.8 (59/9)*	1.1~311 (59/4)*	237~13274 (59)	1.1~66.6 (59/3)*
D2							
Mean±SD	81.2±75.2	283±185	86.4±188	2.65±2.68	21.5±20.6	2235±2483	16.6±13.4
Range (N)	8.0~428 (42)	18.4~690 (42)	8.2~1232 (42)	0.43~9.40 (42/9)*	1.2~78.4 (42/3)*	160~15483 (42)	2.7~68.8 (42/1)*

*Left and right numbers in the parenthesis denote the number of total measurements and of cases with below DL, respectively. One next to DL is shown as the minimum value of range for each case.

값의 양분 경향은 이미 아르헨티나의 La Plata 시에서 Bilos *et al.*⁹이 발견한 결과와 거의 구분하기 어려운 정도로 유사하다. 이러한 결과는 전자 그룹의 농도에 영향을 미치는 오염원들의 영향이 본 연구대상 지역들에 더 직접적으로 작용하였으리라고 짐작하게 한다.

3.2 농도크기를 이용한 금속성분별 공간적 농도 분포의 차이

대부분의 크미량성분들은 최대 관측횟수와 동일한 수준으로 농도가 결정되었다. Table 1에 제시된 것과 같이 전체적인 분석결과를 비교해 보면, 각 성분들간에 실제로 큰 농도차가 존재한다는 점을 명확하게 확

인할 수 있다. 또한 Fig. 1에는 각 개별 금속성분들에 대해 모든 지역을 대표하는 평균값을 산출하고, 이를 이용하여 성분별 농도의 비값을 지역별로 비교하였다.

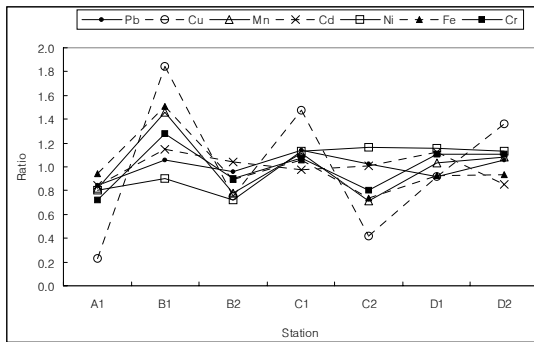


Fig.1. Comparison of normalized concentrations of each metal among seven study sites. The mean concentration of a given metal computed to represent seven sites was used to derive normalized ratios.

이 결과는 Table 1에 제시된 금속성분의 절대적 농도분포 특성을 상대적 관점에서 용이하게 비교할 수 있게 한다. 이러한 비교의 결과에 의하면, Cu와 같은 성분은 다른 금속들에 비해 상대적으로 공간적 분포의 가변성이 두드러진다는 것을 확인할 수 있다.

개별 금속성분의 농도가 관측이 이루어진 7개 지점에서 개별성분의 농도분포가 얼마나 가변적으로 분포하는가를 평가하기 위한 또 하나의 척도로 다음과 같은 비교도 시도해 보았다. 일반적으로 표준편차가 평균값을 초과할 경우, 자료의 산포가 불규칙하다는 점을 감안하여, Table 1에 제시된 7개 지점의 7개 성분의 요약결과에서 표준편차/평균비가 1.0을 초과하는 경우들을 비교해 보았다. 49개 (7개 지점 x 7개 성분)의 총 비교 대상구 중에서 31개 대상구에서 비값이 1.0이하로 나타나, 상대적으로 균질도가 높은 대상구가 전체의 63%로 더 지배적이라는 것을 알 수 있다. 이러한 비교를 더 확대하여, 개별 금속성분들간의 산포특성을 다음과 같은 기준으로도 비교해 보았다. 먼저 7개의 각 측정지점을 대표하는 평균 농도들만을 이용하여, 전체 7개 지점을 대표하는 평균값, 표준편차, 변이계수 (coefficient of variation: CV)를 산출하였다. 여기에서 변이계수는 평균값에 대비한 표준편차의 비로서 자료들간의 상대적인 산포도를 비교하는 기준으로 활용할 수 있다. 이와 같은 단순한 비교방

식에 준하면, 다음과 같은 평가가 가능하다. 예를 들어, 변이계수가 작으면, 작을수록 농도분포가 균질하다고 할 수 있다. (물론 반대로, 변이계수가 클수록 농도분포는 비균질하다고 볼 수 있다.) 이러한 비교에 의하면, $Pb < Cd < Ni < Cr < Fe < Mn < Cu$ 등의 순서로 서열이 구분되었다. 특히 앞의 4가지 성분들은 CV 값이 20% 이하로 비교적 낮은 수준을 보이는데 반해, Fe, Mn은 20%를 초과하고, Cu는 60%에 근접하는 가장 극단적인 수준이다. 단순히 변이계수를 이용한 비교로 보면, 구리와 같은 성분의 농도분포는 대단히 불균일하다는 것을 알 수 있다. 일반적으로 토양성분의 분석 등에서도 구리와 같은 성분의 농도가 지역적으로 큰 편차를 띠는 경향이 발견된다는 점을 감안하면, 이러한 토양분포특성은 입자분포특성과도 밀접한 연관성을 취하는 것이 아닌가 사료된다.¹⁰

3.3 관측지점들간의 시간적 분포특성의 비교를 통한 공간적 균질성

Fig. 2에는 각 성분별로 7개 지점에서 관측된 결과를 평균하여, 시간의 함수로 제시하였다. 그림에 제시된 각 지점별 자료의 상대표준오차를 비교하면, 다른 성분들과는 달리 Fe, Mn 등에서는 비교적 변화가 없는 것을 확인할 수 있다. 성분들에 따라 차이는 있지만, 다수의 금속성분들은 대체로 일정한 시간적 농도분포를 취하는 경향을 지닌다. 본 연구는 약 1년여 기간에 걸쳐 분진시료를 채취, 분석하였기 때문에, 이들 자료의 시간적 분포특성의 균질성 여부를 기준으로 7개 측정지점의 공간적 분포특성을 비교할 수 있는 또 하나의 척도로 활용하는 것이 가능할 것이다. 한반도 지역을 중심으로 이루어진 과거의 선행연구결과들에 의하면, 일반적으로 분진이나 분진에 종속된 원소들은 대체로 봄 (또는 겨울)에 고농도를 취하고, 여름 (또는 가을)에 낮은 농도를 취하는 것으로 알려져 있다.⁸ Fig. 2에 제시된 전체 연구기간동안 개별 성분의 평균농도를 이용한 시간적 변화추이 경향을 비교해 보면, Fe, Mn, Pb와 같은 성분들은 2001년과 2002년의 봄기간대에 거의 규칙적으로 고농도를 보이는 것으로 나타났다. 이와 같이 두 해에 걸쳐 이들 성분의 농도가 봄 기간대에 상승하는 현상은 봄, 겨울철에 이들의 농도가 증가하기 쉬운 일반적인 환경여건 외에도 황사와 같은 현상의 영향도 어느 정도 작용하였을 것으로 기대된다. Ni, Cr, Cd 같은 성분도 어느 정도 불규칙하지만, 2002년의

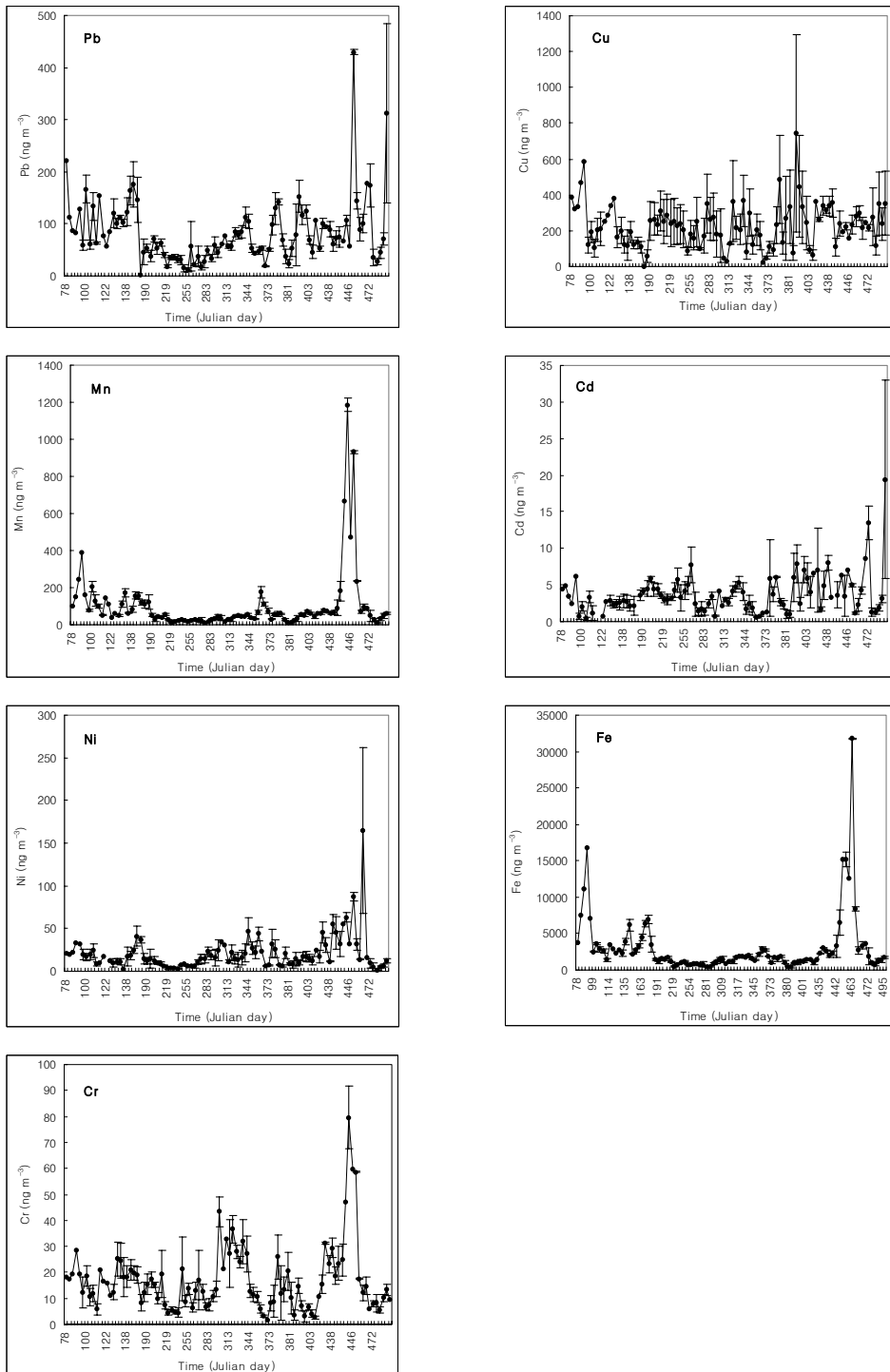


Fig. 2. Time series plots of metallic components determined across the whole study period of March 2001 through May 2002.

봄철에는 상대적인 고농도가 나타나는 경향이 확인된다. 그러나 Cu의 경우, 전혀 계절적인 경향성을 확인하기 어려운 불규칙적 성향이 뚜렷하다.

관측지점들 간에 존재하는 이러한 시간적 경향성의 차이를 뚜렷하게 구분하기 위하여, 성분별로 봄, 여름, 가을, 겨울의 대표농도를 관측지점별로 비교하였다. 앞서 관측한 경향성의 추이는 이와 같은 비교에서 더욱 뚜렷하게 확인된다. 앞서 언급한 바와 같이 봄철기간대에 고농도가 존재하는 지점의 숫자를 비교하면, 성분별 경향성의 추이를 다른 관점에서 확인할 수 있다. 예를 들어, Fe와 Mn은 관측대상 7개 지점 중 각각 6개 지점에서 4계중 봄철에 최고농도를 기록하는 것으로 나타났다. 그 뒤를 따라 Pb가 5 지점, Cr이 4지점, Cu가 3지점, Ni가 2지점이 봄철최고농도를 기록하는 것으로 확인이 된다. 이와 같은 비교 결과는 앞서 단순하게 비교한 계절적 주기성의 경향과 잘 일치한다. 특히 그와 같은 경향성이 이질적인 관측점들 간의 상대적인 관계에서도 다시 한 번 확인된다는 것은 금속 성분별 분포특성이 단순히 시간적 요인에 의해 지배되는 것만이 아니라, 공간적 요인의 영향을 다양한 방식으로 반영한다고 할 수 있다.

3.4 개별 성분의 농도자료를 이용한 지점과 지점간 상관성 강도의 비교

본 연구에서 수행한 금속성분의 농도분포에 대한 관측은 동일한 기간대에 동시에 이루어졌다. 따라서 결측이 발생한 경우를 제외하면, 한 개의 금속성분에 대해서 최대 7개 지점의 농도가 연속적으로 확보되었다. 이러한 점을 감안하여, 한 개의 금속성분에 대하여 관측이 이루어진 모든 지점들간의 상관성을 분석해보았다. Table 2에는 성분별 상관분석의 결과를 임의로 설정한 상관성이 존재하지 않을 확률구간에 의하여 3단계로 구분지어 주었다. 각 금속성분별로 강한 상관성이 존재하는 짝의 수는 최고 21개의 경우가 발생하는데, 이들 결과를 비교해 보면 성분별로 현저한 차이가 존재하는 것을 확인할 수 있다. Mn의 경우, 20개의 짝에서 이런 결과가 확인되어, 전체 비교 대상구 중 95.2%가 강한 상관성을 보이는 것으로 확인된다. 즉, 이와 같은 결과는 대부분의 관측점들이 서울 시내에 일정한 간격을 두고 떨어져 있음에도 불구하고, 이들 관측점들에서 발견되는 Mn의 농도분포가 대단히 균질한 요인들에 의해 조절되고 있음을 시사한다. 그 다음

으로, Fe가 16개 짝 (76.2%), Pb가 14 개 짝 (66.7%)으로 뒤를 이은 반면, 나머지 성분들에서는 이러한 관계가 현저히 약하게 나타난다. 예를 들어, Cr은 7개, Cd와 Ni는 4개, Cu는 한 개의 경우에만 이러한 관계의 존재를 확인할 수 있다. 따라서 금속성분들 간에 존재하는 이러한 공간적 상관성의 세기는 거의 극단적인 차이를 보인다는 점을 확인할 수 있다.

특히 이러한 비교결과는 앞서 사용한 비교기준인 CV를 이용한 비교 또는 시간적 주기성의 차이를 이용한 비교 등에 대비하여 설명할 필요가 있다. 예를 들어, 농도값의 지역간 변이성을 평가하기 위해 단순히 통계량인 CV값을 이용하여 비교하였을 때, Pb의 변이성이 가장 작고 Mn 이나 Fe와 같은 성분이 가장 큰 것으로 분류된 바 있다. 그런데 이와 같이 통계량적 관점에서 변이가 큰 Mn, Fe 등의 경우, 관측지점별 연계성을 비교한 상관분석에서는 가장 밀접한 연계성을 띠는 것으로 나타났다. 따라서 개별 성분이 지닌 농도의 단순한 물리적 크기의 변화보다는 이러한 농도분포를 조절하는 요인들의 작용이 이들의 상대적 분포특성을 결정짓는 데 훨씬 더 중요한 작용을 한다는 점을 유추할 수 있다. 결국 이러한 요인들의 차이는 이들 성분의 시간적 분포특성의 차별화에서도 어느 정도 일관성있게 작용하는 것으로 사료된다. 이들 성분들의 분포특성이 어느 정도 복잡하게 조절되는데 반해, Cu의 결과는 모든 비교기준 방식에서 상대적으로 대단히 강한 일관성을 유지하는 것으로 나타난다. 예를 들어, Cu의 경우 가장 큰 CV 값을 보였고, 시간적인 주기성을 발견하기가 곤란하고, 상관성이 있는 경우도 거의 전무한 상태에 가깝다는 것을 확인할 수 있다.

본 연구의 결과, 여러 가지 금속성분들간의 분포특성을 공간적인 요인에 기준하여 비교할 경우, 금속성분별로 현저한 차이를 나타낸다는 것을 확인할 수 있다. 특히 Fe, Mn, Pb 등의 성분들은 공간적으로 높은 연계성을 띠며 분포하는데 반해, Cu와 같은 성분은 이러한 경향성을 확인하는 것이 거의 불가능한 것으로 나타난다. 이러한 차이는 Fe, Mn, Pb 등의 성분들이 분진내부에서 생성 또는 결합 또는 소멸되는 과정이, Cu와 같은 성분들과는 현저하게 다른 기능들에 의해 조절될 가능성을 강하게 시사한다.

Table 2. Results of correlation analysis for a given metallic component among seven different study sites investigated in this study

		A1	B1	B2	C1	C2	D1	D2										
		Pb							Cu									
A1	r	(40)*							(39)									
	P																	
B1	r	0.698 ^{III} **	(70)						-0.295	(68)								
	P	8.8E-06							1.0E-01									
B2	r	0.052	0.562 ^I	(48)					-0.105	-0.289	(48)							
	P	8.0E-01	1.9E-04						6.2E-01	7.5E-02								
C1	r	-0.092	0.489 ^I	0.696 ^{III}	(45)				0.089	-0.160	0.129	(44)						
	P	6.8E-01	6.1E-03	2.8E-05					6.9E-01	4.0E-01	5.0E-01							
C2	r	0.251	0.604 ^{III}	0.706 ^{III}	0.331	(53)			0.084	0.269	0.201	-0.189	(52)					
	P	1.9E-01	3.0E-05	1.5E-06	6.9E-02				6.6E-01	8.9E-02	2.5E-01	3.2E-01						
D1	r	0.151	0.644 ^{III}	0.763 ^{III}	0.579 ^{II}	0.711 ^{III}	(58)		0.100	0.289	-0.268	0.121	0.534 ^{II}	(59)				
	P	4.3E-01	3.3E-06	3.1E-08	4.2E-04	3.4E-08			6.0E-01	6.0E-02	1.1E-01	5.0E-01	1.9E-04					
D2	r	0.534	0.770 ^{III}	0.571 ^I	0.482	0.554 ^I	0.659 ^{III}	(42)	-0.148	-0.268	0.278	-0.353	-0.166	-0.341	(42)			
	P	2.7E-02	2.5E-07	1.2E-03	2.7E-02	2.2E-03	9.3E-06		5.7E-01	1.4E-01	1.4E-01	1.2E-01	4.1E-01	3.9E-02				
		Mn							Cd									
A1	r	(40)							(40)									
	P																	
B1	r	0.975	(72)						0.639 ^{III}	(72)								
	P	0.0E+00							8.2E-05									
B2	r	0.779 ^{III}	0.962 ^{III}	(49)					0.435	0.266	(46)							
	P	4.5E-06	1.2E-16						4.3E-02	1.1E-01								
C1	r	0.741 ^{III}	0.641 ^{II}	0.646 ^{II}	(45)				0.366	0.443	-0.041	(43)						
	P	8.1E-05	1.3E-04	1.5E-04					1.1E-01	1.6E-02	8.4E-01							
C2	r	0.831 ^{III}	0.909 ^{III}	0.889 ^{III}	0.625 ^{II}	(54)			-0.023	0.244	0.446 ^I	0.227	(53)					
	P	2.4E-08	9.4E-17	1.8E-16	1.7E-04				9.1E-01	1.3E-01	9.3E-03	2.4E-01						
D1	r	0.846 ^{III}	0.969 ^{III}	0.822 ^{III}	0.568 ^{II}	0.869 ^{III}	(59)		0.736 ^{III}	0.218	0.410	-0.086	0.231	(54)				
	P	7.6E-09	7.4E-17	1.4E-11	5.7E-04	5.8E-17			5.4E-06	1.8E-01	1.8E-02	6.6E-01	1.3E-01					
D2	r	0.901 ^{III}	0.987 ^{III}	0.858 ^{III}	0.921 ^{III}	0.905 ^{III}	0.984 ^{III}	(42)	0.474	0.410	0.353	0.045	0.716 ^{III}	0.442	(39)			
	P	7.9E-07	1.1E-16	2.7E-09	3.5E-09	3.8E-11	1.6E-16		5.5E-02	2.2E-02	7.7E-02	8.6E-01	2.7E-05	1.3E-02				
		Ni							Fe									
A1	r	(39)							(40)									
	P																	
B1	r	0.704 ^{III}	(66)						0.992	(72)								
	P	4.1E-05							0.0E+00									
B2	r	0.735 ^{III}	0.174	(45)					0.935 ^{III}	0.946 ^{III}	(49)							
	P	1.5E-04	3.2E-01						1.1E-10	1.2E-16								
C1	r	-0.094	0.587 ^I	0.011	(44)				0.629 ^I	0.722 ^{III}	0.611 ^{II}	(45)						
	P	6.9E-01	2.0E-03	9.6E-01					1.7E-03	6.7E-06	4.3E-04							
C2	r	0.068	-0.018	0.034	0.369	(47)			0.848 ^{III}	0.896 ^{III}	0.899 ^{III}	0.812 ^{III}	(54)					
	P	7.4E-01	9.2E-01	8.6E-01	6.3E-02				6.3E-09	9.4E-17	1.8E-16	3.0E-08						
D1	r	0.059	0.093	0.093	0.362	0.982 ^{III}	(56)		0.837 ^{III}	0.898 ^{III}	0.904 ^{III}	0.605 ^{II}	0.920 ^{III}	(60)				
	P	7.7E-01	5.7E-01	6.0E-01	4.9E-02	1.4E-16			1.5E-08	7.4E-17	1.8E-16	1.9E-04	5.8E-17					
D2	r	0.094	0.491 ^I	0.113	0.447	0.166	0.198	(42)	0.870 ^{III}	0.930 ^{III}	0.849 ^{III}	0.942 ^{III}	0.901 ^{III}	0.873 ^{III}	(42)			
	P	7.3E-01	5.9E-03	5.7E-01	4.2E-02	4.6E-01	2.5E-01		5.7E-06	1.4E-14	6.0E-09	2.9E-10	6.1E-11	1.6E-16				
		Cr																
A1	r	(39)																
	P																	
B1	r	0.649 ^{III}	(71)															
	P	7.9E-05																
B2	r	-0.045	0.615 ^{III}	(49)														
	P	8.4E-01	4.0E-05															
C1	r	0.072	0.087	0.201	(45)													
	P	7.6E-01	6.5E-01	3.0E-01														
C2	r	0.175	0.353	0.366	0.188	(53)												
	P	3.7E-01	2.8E-02	2.8E-02	3.1E-01													
D1	r	0.469	0.631 ^{III}	0.586 ^{II}	0.426	0.115	(58)											
	P	1.2E-02	7.5E-06	2.2E-04	1.4E-02	4.6E-01												
D2	r	0.138	0.762 ^{III}	0.812 ^{III}	0.504	0.274	0.719 ^{III}	(42)										
	P	6.1E-01	4.0E-07	8.9E-08	2.0E-02	1.6E-01	7.3E-07											

*Numbers in the parenthesis denote the total cases of matching pairs.

**Superscripts I, II, and III denote the cases of which probability of no correlation are less than 10⁻², 10⁻³, and 10⁻⁴, respectively.

4. 결 론

대도시지역에서 금속의 분포특성이 공간적 요인에 따라 어떤 식으로 조절되는가를 평가하기 위한 목적으로 서울시내에 산재한 7개 측정점으로부터 1년 여에 걸쳐 관측한 금속성분들의 농도자료를 비교분석하였다. 이들 지점으로부터 관측한 7개 금속성분의 농도 자료를 통계적인 변이계수, 시간적 분포특성의 차이, 측정지점 간 상관성의 강도와 같은 기준으로 그 특성을 중심으로 비교해 보았다. 이러한 분석결과에 따르면, 금속성분들 간에는 뚜렷하게 공간적 농도분포의 차이가 존재하며, 이러한 차이들은 일정 수준 이상 일관성있게 상대적인 질서를 유지한다는 것을 알 수 있다. 특히 비교 대상으로 선정된 7대 금속성분들 중에서, Fe, Mn, Pb가 공간적으로 높은 균질성을 유지하는데 반해, Cu와 같은 성분은 거의 규칙성을 확인하는 것이 곤란할 정도로 복잡한 경향성을 취하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 금속성분들의 공간적 농도분포를 보다 체계적으로 이해하기 위해서는 이들의 발생원과 소멸원의 관계, 개별성분들이 지닌 대기화학적 특성과의 관계를 보다 면밀하게 진단할 수 있는 체계적인 연구가 수반되어야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구과제는 한국과학재단의 선도과학자 연구과제의 지원으로 이루어졌습니다.

참고 문헌

1. K.D. Perry, T.A. Cahill, R. C. Schnell, J. M. Harris, *J. Geophys. Res.*, 104(D15), **18**, 521(1999).
2. K.-H. Kim, M. Y. Kim, *Atmos. Environ.* 36/4, 663 (2002).
3. S. M. Charlesworth, J. A. Lees, *Chmosphere*, **39**, 833(1999).
4. K.-H. Kim, D.-S. Kim, T.-J. Lee, *Atmos. Environ.*, **31**, 3449(1997).
5. W. H. Schroeder, J. Munthe, *Atmos. Environ.*, **32**, 809(1998).
6. R.J. Lantzy, F. T. Mackenzie, *Geochim. Cosmochim. Acta* **43**, 511(1979).

7. S. R. Taylor, S. M. McLennan, *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*, Blackwell Sci., Cambridge, Mass., p. 312(1985).
8. K.-H. Kim, J.-H. Lee, M.-S. Jang, *Environ. Pollut.*, **118**, 41(2002).
9. C. Bilos, J.C. Colombo, C.N. Skorupka, M.J. Rodriguez Presa, *Environ. Pollut.*, **111**, 149(2001).
10. K.-H. Kim, S.-H. Kim, *Water, Air and Soil Pollut.*, **111**, 109(1999).