

## 서울시 (초)미세먼지 중의 중금속 분포 특성

기후대기팀

신윤미 · 엄정훈 · 양혜란 · 심미희 · 이원영  
박세영 · 오석률 · 이만호 · 어수미

## Distribution Characteristics of Heavy Metals in Ambient PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> in Seoul, Korea

*Climate and Air Quality Research Team*

Yoon-mi Shin, Jung-hoon Uhm, Hye-ran Yang,  
Mi-hee Shim, Won-young Lee, Se-young Park,  
Suk-ryul Oh, Man-ho Lee and Soo-mi Eo

### Abstract

This study compared the concentrations of heavy metals in PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>, and evaluated the behavior and effects of heavy metals. The concentrations of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> were the lowest during the summer. The mass concentration of PM<sub>10</sub> was highly correlated with Mn, Pb, and Fe, and the correlation between Fe and Mn was also high. The mass concentration of PM<sub>2.5</sub> showed a high correlation with Pb and Cd. It may be concluded that because the correlations of Pb, Cd, and As are high, their distribution characteristics are similar. The ratio of AD/NAD concentration in PM<sub>10</sub> showed that element of soil origin have higher rates of increase than those of artificial origin. Pb, Cd, Ni and As were contained more in the PM<sub>2.5</sub> and Fe was contained more in the PM<sub>10</sub> as a result of analyzing the ratio of the heavy metal by the mass concentration ratio of PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub>.

**Key words :** PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, Asian dust, Heavy metal distribution, Correlation analysis

### 서론

최근 대기오염문제가 사회적 문제로 부각되면서 (초)미세먼지 내 유해중금속에 대한 건강유해성에

관한 사회적 관심도가 높아지고 있다. 현재는 PM<sub>10</sub>(미세먼지) 내의 Pb에 대한 대기환경기준치가 설정되어 있으며, 다른 유해중금속에 대한 기준치는 없는 실정이다. 중금속은 발생원 및 배출원을 추적할 수 있는 중요한 성분으로 국내 및 해

외에서 (초)미세먼지의 중금속 분포특성, 황사와 비황사시의 비교, 계절별 및 지역별 농도의 특성에 대한 연구를 기반으로 성분분석에 따른 발생원 파악에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다(1~3, 10~11).

일부 중금속은 원소형태의 오염 물질 중 가장 해로운 물질로 알려져 있다(12). 미국 EPA에서는 33가지의 유해성분을 지정하였는데 그 중 금속성분은 8항목이며, As, Cd, Cr, Pb는 인체유해성과 관련이 있다고 알려져 있다. As의 경우 발암물질로 미국 EPA에서 지정한 3가지의 발암물질 중 하나이다(2). Pb은 헤모글로빈의 합성방해 및 중추, 말초신경계와 신장에 악영향을 미치는 것으로 알려져 있으며 Cd은 고혈압, 신장손상과 같은 심각한 질병을 야기시킨다(13).

지각성분, 즉 토양기원 원소인 Al, Si, Ca, Fe 등은 비산먼지 및 건설활동에 의해 주로 발생하며, As, Se, V의 경우 석탄연소 및 중유연소의 지표이며 As는 주로 PM<sub>2.5</sub>의 영역에 존재하는 것으로 알려져 있다(2~3). Pb은 석탄연소, 쓰레기 소각, 가솔린 첨가제, 타이어 마모 분진과 관련이 있다고 알려져 있으며, Cu는 차량 배기가스, 디젤 연소 및 브레이크 라이닝 마모가 발생원으로 알려져 있다(4).

본 연구에서는 인체 유해성이 더 크다고 알려진 PM<sub>2.5</sub>(초미세먼지)내 중금속과 중금속 측정망 자

료를 활용한 PM<sub>10</sub>(미세먼지) 중의 중금속 농도를 비교하고, (초)미세먼지 내 중금속의 거동과 영향을 평가하여 서울시의 특성에 맞는 맞춤형 대기환경개선을 위한 기초자료 제공과 시민의 건강증진에 기여하고자 하였다.

## 시료채취 및 분석방법

### 1. 시료채취

PM<sub>10</sub>은 서울시 총 5개의 지점(구로, 마포, 광진, 송파, 양재동)에 설치한 중금속 측정망을 활용하여 매월 둘째 주에 각 지점에서 24시간씩 5회 시료채취를 하였다. 본 연구에서는 광진측정소(구의 아리수 정수센터)와 양재동(서울시보건환경연구원 본관건물 옥상) 두 지점을 선정하여 진행하였으며(그림 1), 황사 시에는 양재동에서 시료채취를 하였다. High volume air sampler(DHA-80, Digital, Switzerland)를 이용하여 석영여지(PALL社)에 유량 1,130 L/min으로 24시간 동안 포집하였으며, 2015년 9월부터 2017년 8월까지 최근 2년간 채취하여 분석하였고, 대상 시료의 개수는 황사일이었던 2017년 5월 8일을 제외하고 광진, 양재 각각 119개이었다.

PM<sub>2.5</sub>는 광진측정소에서 low volume air sampler(KN-L25P1, KNJ, Korea)를 이용하여



Fig. 1. Sampling site at GwangJin and YangJae.

테플론여지(Whatman社)에 유량 16.7 L/m<sup>3</sup>으로 24시간 동안 포집하였으며, 2015년 9월부터 2016년 8월까지 1년간 채취한 시료를 분석하였다. 대상 시료의 개수는 2016년 4월 22일 황사일이었던 날을 제외하고 102개(봄, 여름, 가을, 겨울 각각 24개, 19개, 29개, 30개)이며, 그 중 광진측정소에서 미세먼지와 초미세먼지를 동시에 채취한 시료의 개수는 30개이었다.

## 2. 실험방법

### 1) 시료의 전처리

먼지를 포집한 여지는 24시간 항량하여 무게를 측정 후, 공정시험법에 따라 전처리를 실시하였다. PM<sub>10</sub> 시료의 경우 석영여지의 일정면적을 편칭하여 전처리 용기에 넣은 후 혼합산(16.7% 염산 + 5.5% 질산)을 10 mL 주입, 마이크로웨이브(Qwave 2000, QUESTRON Technologies CORP.)를 이용하여 추출한 후 PVDF 주사기 필터로 여과하고, 산(8% 염산 + 3% 질산) 용액 5 mL로 전처리 용기를 세척하여 합한 후 최종용액이 25 mL이 되도록 하였다(5). PM<sub>2.5</sub>의 경우 테플론여지 전체를 테플론가위로 4등분 한 후 위와 같은 방법으로 전처리하였다.

### 2) 시료의 분석

PM<sub>10</sub>의 분석은 총 11항목으로 8개 성분(Pb, Cd, Cr, Cu, Mn, Fe, Ni, As)은 중금속 측정방법

의 분석항목이며, Al, Ca, Mg의 경우 황사 시에만 측정하였으나 2016년 5월 이후에는 평시에도 측정하도록 추가된 항목이다. Al, Ca, Mg, Fe의 경우 ICP-OES(CIROS VISION, Spectro, Germany), 나머지 성분들은 ICP-MS(iCAP Q, Thermo SCIENTIFIC, Germany)로 분석하였다(6). 황사 시에는 11개의 성분 분석을 하였다. PM<sub>2.5</sub>의 분석은 Pb, Cd, Cu, Mn, Fe, Ni, As, Al, Ca, Mg 등 총 10개 성분으로 Ca는 ICP-OES, 나머지 성분은 ICP-MS로 분석을 실시하였다. 그림 2에 전처리 방법 및 분석방법을 나타내었다.

## 결과 및 고찰

### 1. 미세먼지 중 중금속 농도 특성

표 1은 2015년 9월부터 2017년 8월까지 광진측정소와 양재동 두 지점에서 중금속 및 질량농도의 계절별 및 연평균 농도를 나타낸 것으로, 2015년 9월부터 2016년 4월까지의 추가된 항목(Al, Ca, Mg)의 자료가 없어서 추가항목을 제외한 8개의 성분을 대상으로 결과를 나타내었다. PM<sub>10</sub> 질량농도는 모두 봄철에 가장 높게, 여름철에 가장 낮게 나타났다. PM<sub>10</sub> 중 중금속 농도는 두 지점 모두 Fe이 가장 큰 농도를 나타내었고, Cd가 가장 낮은 농도를 나타내었다. 또한 양재동이 Cd을 제외한 항목에서 1.1~1.4배 높게 나타났다. 두 지점 모두 겨울철(12월~2월)과 봄철(3월~5월)에 As가 고농도로 나타났는데, As는 석탄연소의 직접적 지표로 알려져 있어 난방으로 인한 화석연료의 사용과 관련있는 것으로 판단된다(2~3). Pb의 경우 양재동이 광진측정소보다 겨울철에는 최고 1.8배 정도 높게 나타났으며 Cu는 양재동이 광진보다 4계절 모두 높게 나타났다. Cd, Ni, As와 같은 인위적 기원원소는 광진측정소와 양재동의 연간 평균값이 비슷한 값을 보였다.

표 2는 광진측정소에서 채취한 시료를 대상으로 상관분석을 한 결과로 PM<sub>10</sub> 질량농도와 Mn(0.813)이 가장 높은 상관관계를 보였고, Pb(0.770), Fe(0.726)과도 높은 상관성을 보였다. Fe와 Mn(0.837)과의 상관관계 또한 높게 나타나 2013년

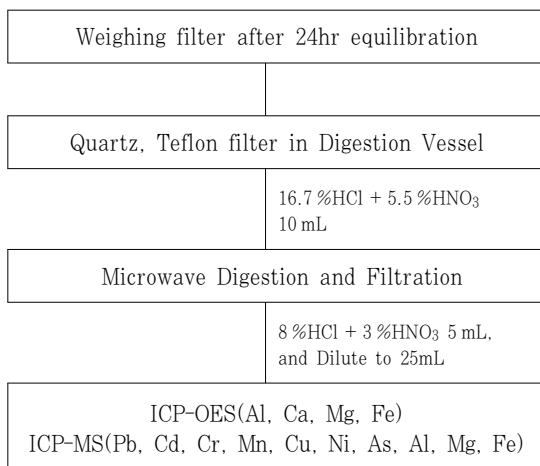


Fig. 2. Pretreatment and analytical procedure.

에서 2014년 사이 경기도 중금속 측정망 자료를 비교분석한 결과와 유사한 결과를 보였다(8). Pb와 Cd간 상관관계(0.753)도 높게 나타났다.

표 3은 2017년 5월 8일에 발생한 황사시료와 2015년 9월부터 2017년 8월까지 비황사 시의 양재에서 채취한 PM<sub>10</sub> 내의 중금속 농도를 비교한 결과로, As를 제외한 성분의 농도가 증가하였다. PM<sub>10</sub> 질량농도는 3.6배 증가하였고, 토양기원원소인 Al, Ca, Mg, Fe의 경우 황사 시에 4.6~11.2배 증가하였으며 측정된 중금속성분 중 98.5%를 차지하였다. Mn의 경우 4.3배 증가하였고, 인위적 기원원소인 Cd의 경우 증가폭이 1.2배로 평상시와 차이를 보이지 않았으며, 다른 인위적 기원원소인 Pb, Cu, Cr, Ni은 1.5~2.7배 증가하

는 것으로 나타났다. 최규훈 등이 2001년 서울에서 황사기간 발생한 시료를 분석한 결과에서는 토양기원 원소의 AD/NAD비가 유해 금속성분인 Cr, Pb, Cu, Cd의 AD/NAD비 보다 높게 나타나 본 연구와 유사한 결과를 나타내었으며, 유해 금속성분은 황사의 발생이 이들의 함량에 큰 영향을 미치지 않는 것이라고 보고하였다(7).

## 2. 초미세먼지 중 중금속 농도 특성

2015년 9월부터 2016년 8월까지 광진측정소에서 채취한 PM<sub>2.5</sub> 시료(n=102개)를 대상으로 PM<sub>2.5</sub>의 질량농도 단위는  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 중금속의 농도는  $\text{ng}/\text{m}^3$ 으로 나타내었다. 조사기간 동안 PM<sub>2.5</sub> 질량농도는 봄, 가을, 겨울, 여름 순으로 나타났으

**Table 1.** Seasonal and annual mean concentration of PM<sub>10</sub> and heavy metal at Gwangjin and Yangjae (unit :  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

	Pb	Cd	Cr	Cu	Mn	Fe	Ni	As	PM10
Spring (n=29)	0.0215	0.0008	0.0032	0.0251	0.0254	0.8733	0.0051	0.0066	54.49
Summer (n=30)	0.0197	0.0007	0.0032	0.0301	0.0218	0.5852	0.0042	0.0041	38.59
Autumn (n=30)	0.0101	0.0006	0.0023	0.0212	0.0147	0.5274	0.0019	0.0024	42.99
Winter (n=30)	0.0229	0.0012	0.0023	0.0213	0.0191	0.6768	0.0022	0.0068	45.90
Annual (mean±SD)	0.0204 ±0.0116	0.0009 ±0.0005	0.0028 ±0.0015	0.0250 ±0.0145	0.0232 ±0.0123	0.6758 ±0.3537	0.0032 ±0.0026	0.0055 ±0.0066	45.42 ±21.24
Spring (n=29)	0.0250	0.0008	0.0031	0.0292	0.0317	0.9820	0.0046	0.0065	55.58
Summer (n=30)	0.0194	0.0007	0.0031	0.0327	0.0200	0.5525	0.0042	0.0038	40.08
Autumn (n=30)	0.0195	0.0009	0.0037	0.0410	0.0249	0.9031	0.0032	0.0043	45.48
Winter (n=30)	0.0404	0.0012	0.0031	0.0302	0.0245	0.7315	0.0023	0.0082	51.03
Annual (mean±SD)	0.0261 ±0.0173	0.0009 ±0.0006	0.0032 ±0.0016	0.0333 ±0.0173	0.0252 ±0.0120	0.7907 ±0.3962	0.0036 ±0.0026	0.0057 ±0.0034	47.98 ±20.90

며, 여름철에 강우가 집중되는 현상에 의한 세정 효과로 인해 여름철 농도가 가장 낮은 것으로 판단된다(8). 국립환경과학원에서 2008년 11월부터 2009년 11월까지 PM<sub>2.5</sub> 농도의 계절적 변동을 조사하였는데, 전국 평균이 겨울, 봄, 가을, 여름 순으로 나타나 본 연구와 순서가 달랐으나 여름철 농도가 가장 낮게 나타나는 것은 일치하였다(2)(표 4). 시료채취기간 중 PM<sub>2.5</sub>의 질량농도가 고농도(50 µg/m<sup>3</sup> 이상)인 날은 총 15일이었고 10월 하순부터 11월 상순 중 고농도 기간이 6일로 이 기간동안 집중되었으며, Pb, Cd, As의 경우 여름철 농도가 제일 낮게 나타났다. 조사기간 중 Fe > Pb

> Cu > Mn > As > Ni > Cd 순으로 나타났으며, 2009년 광진측정소에서 6월부터 9월까지 조사했던 결과는 Fe > Cu > Pb의 순서였으나, 본 연구의 동일시기의 결과는 Fe > Mn > Pb > Cu > As > Ni > Cd의 순으로 나타났다(9).

표 5는 PM<sub>2.5</sub>와 금속간의 상관성 결과로서, PM<sub>2.5</sub>와 Pb(0.785), PM<sub>2.5</sub>와 Cd(0.765), PM<sub>2.5</sub>와 As(0.687) 순으로 높은 상관관계를 보였는데, PM<sub>2.5</sub>는 주로 인위적 기원원소와 높은 상관성을 보였다. As의 경우 PM<sub>10</sub>보다 PM<sub>2.5</sub>에서 높은 상관관계를 보였는데, 이는 As가 주로 PM<sub>2.5</sub>에서 분포한다고 알려진 것과 관련이 있다고 판단된다(2).

**Table 2.** Pearson correlation coefficients between PM<sub>10</sub> and heavy metal concentration at Gwangjin (n=119)

	PM <sub>10</sub>	Pb	Cd	Cr	Cu	Mn	Fe	Ni	As
PM <sub>10</sub>	1								
Pb	0.770**	1							
Cd	0.670**	0.753**	1						
Cr	0.655**	0.634**	0.547**	1					
Cu	0.511**	0.525**	0.406**	0.769**	1				
Mn	0.813**	0.697**	0.535**	0.737**	0.614**	1			
Fe	0.726**	0.587**	0.544**	0.703**	0.553**	0.837**	1		
Ni	0.632**	0.570**	0.302**	0.756**	0.520**	0.657**	0.588**	1	
As	0.077	0.224*	0.190*	0.226*	0.462**	0.253**	0.165	0.086	1

\* correlation is significant at the 0.05level(2-tailed).

\*\* correlation is significant at the 0.01level(2-tailed).

**Table 3.** Concentration of heavy metal in Asian Dust(AD) at Yangjae

(unit : µg/m<sup>3</sup>)

일시	항목	Pb	Cd	Cr	Cu	Mn	Fe	Ni	As	Al	Ca	Mg	PM10
2017.5.8.~9.	AD	0.0397	0.0011	0.0054	0.0614	0.1072	3.6391	0.0096	0.0050	2.3477	6.4905	2.5329	174.86
2015.9~2017.8	NAD Mean	0.0261	0.0009	0.0032	0.0333	0.0252	0.7907	0.0036	0.0057	0.3171	0.6467	0.2253	47.98
	AD/NAD	1.5	1.2	1.7	1.8	4.3	4.6	2.7	0.9	7.4	10.0	11.2	3.6

※ AD(Asian Dust), NAD(Non-Asian Dust)

PM<sub>2.5</sub>와 Fe의 경우 0.560으로 PM<sub>10</sub>과 Fe의 상관 계수인 0.726보다 상대적으로 낮게 나타났다. 중금속 간의 상관관계에서 Fe과 Mn이 0.900으로 가장 높은 상관성을 보였으며, Pb과 Cd(0.885),

Pb과 As(0.872), Cd과 As(0.797)간에도 0.7이상의 높은 상관성을 보여 인위적 원소 간에 거동이 비슷하게 나타나는 것을 유추할 수 있었다. 또한 국립환경과학원에서 2009년에 조사한 결과에

**Table 4.** Seasonal and annual average concentration of PM<sub>2.5</sub> and heavy metal at Gwangjin(n=102)  
[unit :  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (PM<sub>2.5</sub>),  $\text{ng}/\text{m}^3$ (metal)]

		Pb	Cd	Cu	Mn	Fe	Ni	As	PM2.5
G w a n g j i n	Spring (n=24)	20.25	0.75	12.52	11.18	166.26	2.87	4.01	39.12
	Summer (n=19)	11.38	0.47	10.41	15.24	172.12	2.62	2.52	22.17
	Autumn (n=29)	20.17	0.99	13.69	11.28	195.91	2.77	5.15	34.42
	Winter (n=30)	20.58	0.79	13.79	8.66	143.99	1.91	3.83	28.65
	Annual (mean±SD)	18.66 ±12.46	0.78 ±0.57	12.83 ±8.54	11.22 ±11.12	169.26 ±106.57	2.51 ±1.79	4.00 ±2.88	31.47 ±20.91

**Table 5.** Pearson correlation coefficients between PM<sub>2.5</sub> and heavy metal concentration in Gwangjin (n=102)

	PM <sub>2.5</sub>	Pb	Cd	Cu	Mn	Fe	Ni	As
PM <sub>2.5</sub>	1							
Pb	0.785**	1						
Cd	0.765**	0.885**	1					
Cu	0.537**	0.553**	0.526**	1				
Mn	0.381**	0.439**	0.371**	0.352**	1			
Fe	0.560**	0.642**	0.593**	0.550**	0.900**	1		
Ni	0.594**	0.507**	0.440**	0.562**	0.510**	0.649**	1	
As	0.687**	0.872**	0.797**	0.413**	0.376**	0.573**	0.479*	1

\* correlation is significant at the 0.05 level(2-tailed).

\*\* correlation is significant at the 0.01 level(2-tailed).

**Table 6.** Concentration of heavy metal in Asian Dust(AD) at Gwangjin

[unit :  $\mu\text{g}/\text{m}^3(\text{PM}_{2.5})$ ,  $\text{ng}/\text{m}^3(\text{metal})$ ]

일 시	항 목	Pb	Cd	Cr	Cu	Mn	Fe	Ni	As	Al	Ca	Mg	PM <sub>2.5</sub>
2016.4.22~23. AD		29.70	0.91	6.21	17.84	19.99	322.14	8.93	4.73	152.95	237.22	85.78	62.83
2015.9~2016.8 AD Mean		18.65	0.78	7.53	12.83	11.22	169.26	2.51	4.01	72.88	146.77	36.35	31.47
AD/NAD		1.6	1.2	0.8	1.4	1.8	1.9	3.6	1.2	2.1	1.6	2.4	2.0

※ AD(Asian Dust), NAD(Non-Asian Dust)

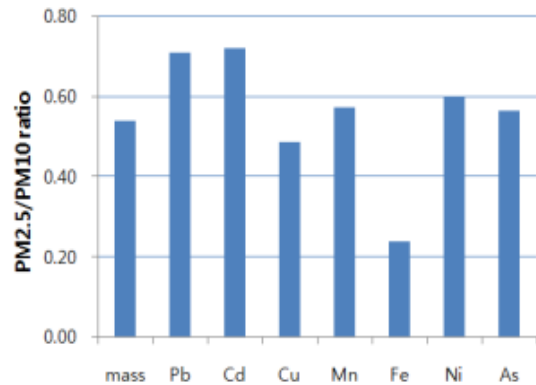
서도 Pb와 As의 상관성이 높게 나타나 본 연구와 유사한 결과를 보였다(2).

2016년 4월 22일 발생한 황사 시 광진측정소에서 채취한 시료 분석 결과는 표 6에 나타내었다. PM<sub>2.5</sub>는 비황사시 보다 2배 증가하였으며, 토양기원 원소(Al, Ca, Mg, Fe)의 경우 증가폭이 1.6~2.4배로 표 3의 미세먼지 내 중금속의 분포와 비교하였을 때 상대적으로 낮은 증가폭을 보였다. 토양기원 원소는 조사대상 전체 중금속의 90%를 차지하여, 미세먼지에서 황사 시 토양기원 원소가 차지하는 비율인 98.5%에 비해 상대적으로 낮은 분포를 보였다. Pb, Cd, As의 경우 황사/비황사시의 비율이 1.2~1.6으로 미세먼지의 황사/비황사 비율인 0.9~1.5와 큰 차이가 없었다.

### 3. (초)미세먼지 내 중금속의 분포 비교

광진측정소에서 동일한 날에 채취한 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub> 시료 각각 30개를 대상으로(봄 : 8개, 여름 : 6개, 가을 : 9개, 겨울 : 7개) PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub>의 비와 PM<sub>2.5</sub> 중 금속/PM<sub>10</sub> 중 금속 비를 이용하여 중금속이 어느 입자영역에 더 많이 분포하는지 분석하였다.

그림 3은 각 원소별 PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub>의 비율로서 질량농도비는 0.54로 나타났는데, 이를 기준으로 중금속농도의 PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub>은 Pb, Cd, Ni, As의 경우 0.56~0.72로 나타나 이들 원소는 PM<sub>2.5</sub>영역에 더 많이 포함되어 있는 것을 유추할 수 있었다. Fe



**Fig. 3.** The ratio of heavy metal concentration in PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>.

의 경우 0.24로 PM<sub>10</sub>영역에 더 많이 포함되어 있다고 판단되며, 전병일 등이 2014년에 부산에서 PM<sub>10</sub>/PM<sub>2.5</sub>의 비를 기준으로 금속별로 비율을 산출하였는데 Pb를 제외한 성분(Cd, Ni)이 PM<sub>10</sub>영역에 더 많이 함유한 결과(12)를 발표하여 본 연구와 차이가 있었다. 또한 김기현 등이 서울에서 2001년부터 2004년까지 먼지채취 후 분석한 결과, Pb의 경우 미세입경영역(PM<sub>2.5</sub>)이 초대입경영역(PM<sub>10</sub>-PM<sub>2.5</sub>)보다 더 높은 수준의 농도를 보인다고 보고하여 본 연구와 비슷한 결과를 보였다(14). 본 연구에서는 원소별 PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub>의 비율을 단순 비교한 것으로, PM<sub>10</sub>-PM<sub>2.5</sub>의 영역은 시료채취장비의 한계로 인해서 비교분석하는데 어려움이 있었다. 따라서 앞으로도 지속적인 모니터링 및 시료 채취장비 확보를 통해 입자입경과 중금속 분포와

의 관계에 대한 조사가 이루어져야 할 것이다.

## 결론

- 1) PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub> 모두 봄철(3월~5월)의 질량농도가 높게, 여름철(6월~8월)의 질량농도가 가장 낮게 나타났다. 여름철의 강수량이 높은 우리나라의 특성으로 인해 여름철의 질량농도가 가장 낮게 나타난 것으로 판단된다.
- 2) PM<sub>10</sub> 내 중금속의 4계절 평균농도는 양재동이 광진측정소보다 Cd를 제외한 항목에서 1.1~1.4배 높게 나타났으며, 두 지점 모두 겨울과 봄에 As의 농도가 높았는데 화석연료의 사용과 관련이 있을 것으로 판단된다. PM<sub>10</sub>의 질량농도는 Mn, Pb, Fe의 순으로 높은 상관성을 보였으며, Fe과 Mn의 상관성 또한 높게 나타났다. 황사/비황사(AD/NAD)의 농도비는 토양기원원소가 인위적기원원소보다 더 높은 증가율을 나타냈다.
- 3) PM<sub>2.5</sub>의 질량농도는 Pb, Cd와 높은 상관관계를 보였고, Pb, Cd, As 세 원소 간의 상관관계가 높게 나타나 거동이 비슷할 것으로 판단되며, 황사/비황사(AD/NAD)의 농도비는 PM<sub>10</sub> 내 중금속에 비해 토양기원원소가 상대적으로 낮은 증가폭을 나타내었다.
- 4) PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub>의 질량농도비를 기준으로 중금속별 비율을 분석한 결과 Pb, Cd, Ni, As는 PM<sub>2.5</sub>영역에, Fe은 PM<sub>10</sub>영역에서 더 높게 나타났다.
- 5) 본 연구에서 PM<sub>2.5</sub>와 PM<sub>10</sub>의 동시 시료채취 기간이 1년으로 시료 개수가 30개로 한정되어 해석에 한계가 있었으나, 향후 장기간 동안 기상인자, 외부요인, 황사, 금속별 다양한 배출원 파악 등을 고려하여 본 연구에서 다룬 중금속 외에도 더 많은 중금속에 대한 분포 특성 파악을 지속적으로 이어가야 할 것이다.

## 참고문헌

1. 서울특별시 : 초미세먼지(PM<sub>2.5</sub>)배출원 인벤토리 구축 및 상세모니터링 연구, 2016.
2. 국립환경과학원 기후대기연구부 대기환경연구과 : PM<sub>2.5</sub> 물리·화학적 특성에 관한 연구, 2009.
3. 이영재, 홍유덕, 이민도, 공부주, 김정훈, 안준영, 최원준, 김현재, 강현정, 박종성, 정부전, 정선아, 조미라, 김선정, 이민희 : 도시와 교외지역의 PM<sub>2.5</sub> 성분 분석에 관한 연구, 국립환경과학원, 2013.
4. Qi-Li Dai, Xiao-Hui Wu, Yu-Fen Zhang, Jing Wang, Hong Xu, Lin Yao, Li Jiao, Yin-Chang Feng : Characterization and Source Identification of Heavy metals in Ambient PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> in an Intergrate Iron and Steel Industry Zone Compared with a Background Site : Aerosol and Quality Research, 15:875~887, 2015.
5. 환경부 : 대기오염공정시험방법. ES 01450.2, 2007.
6. U.S. EPA : Compendium Method IO-3.5 : DETERMINATION OF METALS IN AMBIENT PARTICULATE MATTER USING INDUCTIVELY COUPLED SPECTROMETRY(ICP/MS), June 1999.
7. 최규훈, 김기현, 강창희, 이진홍 : 황사와 비황사기간의 중금속 농도분포 특성: 2001년 황사기간에 대한 비교연구, 한국대기환경학회지, 19(1):45~56, 2003.
8. 김종수, 홍순모, 김명숙, 김요용, 신은상 : 통계분석을 이용한 경기도 대기 중 미세먼지 및 중금속 분포 특성, 한국대기환경학회지, 30(3):281~290, 2014.
9. 오윤희, 정영림, 김순근, 최원, 박현희, 손종렬 : 2009년 서울지역 PM<sub>2.5</sub> 중 중금속 농도 특성, 한국대기환경학회 2010 춘계학술대회 논문집, p.649~650, 2010.
10. 전혜리, 최수현, 임지영, 박희진, 홍은주, 손부순 : 대기 중 PM<sub>2.5</sub>의 중금속 성분의 화학적 특성, 한국환경보건의학회지, 38(3):233~



- 240, 2012.
11. HUANG Hong, LEE Shun-cheng, CAO Jun-Ji, ZOU Chang-wei, CHEN Xin-geng, FAN Shao-jia : Characteristics of indoor/ PM<sub>2.5</sub> and elemental components in generic urban, roadside and industrial plant areas of Guangzhou City, China : Journal of Environmental Science, 19:35~43, 2007.
  12. 전병일, 황용식 : 부산지역 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub> 중의 금속 농도와 이온농도 특성 : 한국환경과학회지, 23(5):819~827, May 2014.
  13. STANLEY E. MANAHAN, 김동수, 김만구, 이대운, 정형근, 최용욱 공역: 환경화학, 제 6판, 자유아카데미, p.173~177, 566~567, 2000.
  14. 김기현, 강창희, 이진홍, 최금찬, 윤용훈 : 봄철 황사의 발생과 대기 중 중금속 성분의 농도 변화-납성분을 이용한 사례 연구. 한국대기환경학회지, 20(6):833~838, 2004.