

서울 송파지역의 초미세먼지 중 중금속 특성 및 발생원 평가

대기측정관리팀

임윤석 · 조석주 · 박창호 · 이용민 · 조성호 · 노승근 · 김정연 · 어수미

Characteristics and Source Evaluation of Heavy Metals in PM_{2.5} Observed at a Songpa Monitoring Site in Seoul, Korea

Atmospheric Measurement and Management Team

**Yun-seok Im, Seog-ju Cho, Chang-ho Park, Yong-min Lee,
Sung-ho Cho, Seung-geun Rho, Jung-yeon Kim and Soo-mi Eo**

Abstract

Springtime ambient concentrations of trace metals in PM_{2.5} in Seoul were measured using a near-real time trace metal analyzer. Using this data, the characteristics of trace metals in haze episodes were investigated. The total mean concentration of 23 trace metals was 1.21 mg/m³, which was about 4% of PM_{2.5} mass concentration(30.80 mg/m³). Among trace metals, the sum of Si, K, and Fe concentrations accounted for 83% of total trace metal concentrations. The concentrations of trace metals in haze episodes were compared with those in days when PM_{2.5} concentrations were lower than the mean PM_{2.5} concentration. The concentrations of Se, As, Cr, Pb, Zn, Mn in haze episodes were 2.78~5.1 times higher than from merely increasing the PM_{2.5} mass concentration, which led to a concentration 2.63 times higher. These trace metals showed the highest correlation with CO, which is a representative vehicle emission gas. A conditional probability function(CPF) analysis with wind directions indicated that the high concentrations of these trace metals in haze episodes were associated with roads in the southeast and northeast directions. Therefore, the results from this study indicate that haze episodes with high trace metals were related to particular gaseous pollutants emitted from vehicles.

Key words : PM_{2.5}, trace metals, CPF analysis, haze

서 론

대기 중 중금속은 인체의 독성과 발암성 등 유해성 때문에 많은 연구의 관심대상이 되어왔다. 중금속물질은 주로 대기 중 부유하는 미세먼지에 포함되어 호흡을 통해 인체에 노출되는데, Pb, Cd, As, Mn, Zn, Cr 등은 인체에 흡수되어 활성 산소를 생성하며, 호흡기 및 순환기계에 질환을 야기시키며, 발암위해도를 증가시킨다는 연구결과들이 보고되고 있다(1, 2).

대기 중 중금속은 토양, 해염, 화산활동 등의 자연적 발생원과 각종 산업시설, 화석연료의 연소 및 자동차 배기가스 등의 인위적 발생원으로부터 발생되며, 이렇게 배출된 대기 중 중금속은 독성과 생물학적 축적에 의해서 인체에 유해성을 나타낸다. 중금속이 전체 미세먼지 질량에 차지하는 비율은 크지 않지만, 다른 구성성분에 비해 인체의 유해성이 크고, 발생원에 따른 중금속의 농도 분포 특성을 이용해 미세먼지의 배출원별 기여율을 규명하는 표지물질(Mark Species)로도 널리 이용되기 때문에 많은 연구의 대상이 되어왔다(3).

대기 중 중금속 측정방법으로 미세먼지를 여지에 24시간 포집하고, 유도결합플라즈마 질량분광법(ICP-MS : inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry), 원자흡수분광도계(AAS : atomic absorption spectroscopy) 등을 이용한 분석법이 널리 이용되어왔다. 그러나 이러한 분석법은 비실시간 분석법이며, 화학적 전처리 과정에 시간과 비용이 많이 드는 단점이 있다(4, 5). 최근에는 측정기술의 발전으로 실시간 분석이 가능한 X-선 형광분광법(XRF : x-ray fluorescence spectrometry)이 이용되고 있는데, 이 방법은 X-선을 조사받은 원소가 방출하는 형광선을 검출하여 각 원소를 정량/정성 분석하는 비파괴 분석방법으로, 전처리과정 없이 신속한 분석이 가능하다. 기존의 많은 연구들이 비실시간 분석법을 이용해 황사 및 미세먼지 고농도사례를 중심으로 시 공간적 분포 특성 등을 연구하였지만, 실시간 중금속 측정을 이용한 연구는 많지 않았다(6, 7). 중금속의 실시간 분석은 기상 조건에 따른 배출원의 특성에 좀 더 자세한 정보

를 제공하기 때문에 기상 및 가스상 오염물질과의 인과성도 파악해 볼 수 있다.

이 연구는 2016년 5월 12일에서 6월 16일 사이에 서울남동지역에 위치한 송파구 대기측정소에서 진행된 한-미 대기질 공동조사 캠페인(KORUS-AQ)의 일환으로 진행되었다.

서울 송파지역은 서울에서 인구 밀집도가 가장 높은 지역이며, 한강을 따라 서쪽으로부터 불어들어오는 바람길에 위치하여, 서울의 대기질의 특징을 반영한다.

한 지역의 대기오염은 지역 내 오염발생원으로부터 내부영향과 주변지역으로부터의 외부영향을 포함하기 때문에, 이번 연구에서 서울송파지역의 고농도 PM_{2.5} 발생시 그 발생원을 내부영향과 외부영향을 조사하였다.

따라서 이번 연구에서는 서울송파지역 봄철 PM_{2.5}의 중금속 농도의 분포특성과, 고농도 연무 사례시, 미세먼지 중금속의 농도 변화를 실시간 중금속 분석기(XRF625, Cooper Corp., USA)로 측정하여, 그 특성을 통해서 배출원과의 관련성을 평가하였다.

2 연구방법

1) 측정기간 및 장소

본 연구는 2016년 5월 12일부터 6월 16일까지 36일간 송파구 도시대기 측정소에서 측정된 자료를 사용하였다. 그림 1과 같이 송파구 도시대기측정소는 서울 한강이남 동쪽의 올림픽 공원 내에 위치하고 있는데, 북서쪽 1 km 위로 한강이 흐르고, 주변지역은 도심 및 주거지역으로 둘러싸여 있다.

2) 측정항목 및 측정방법

PM₁₀과 PM_{2.5}의 질량농도는 베타선 흡수법의 자동연속 측정장비(Thermo Sci., FH62C14)를 이용하여 1시간 간격으로 측정하였고, 가스상 오염물질(NO_x, CO, O₃, SO₂)과 기상항목(풍향, 풍속, 온도, 습도)도 1시간 간격으로 연속 모니터링 하였다. 서울시 도시대기측정망을 이용하였으며, 대기 오염공정시험기준에 준하여 측정되었다. PM_{2.5}

내의 중금속 성분은 X선 형광스펙트럼방식의 Online-XRF625(Cooper Environmental Services, 이하 CES, USA)를 사용하여 23종의 원소성분 (Si, K, Fe, Zn, Ca, Sn, Pb, Cu, Mn, Ti, Ag, Cd, V, Ba, As, Ni, Hg, Se, Cr, Co, Tl, Sb, Ga)에 대해 1시간 간격으로 측정 하였다. Online-XRF625는 16.7 L/min의 유량으로 PM_{2.5} 임팩터를 이용하여 미세먼지를 분리한 후, Teflon 필터에 포집하고, 여기에 고에너지 X선을 조사 하여, 각 금속원소들이 들떴다가 안정화되면서 방출되는 형광선을 파장대별로 검출하는 방식으로, 각 원소의 농도를 연속적으로 측정한다. 측정농도 범위는 0~100 µg/m³이고, 검출한계는 10 pg/m³이었다. 본 측정에 앞서 CES에서 제공된, 각 원소별로 알려진 농도가 코팅된 표준필름을 이용하여 교

정을 하였다.

3. 결과 및 고찰

1) 기상 및 PM_{2.5} 내 중금속 농도

그림 2는 측정기간 중 바람의 속도와 빈도를 나타낸 바람장미로, 주 풍향은 남동남풍 및 남풍이었으며, 풍속은 평균 2.08 m/s로 대부분 3 m/s 이하의 풍속이 주를 이루었다.

측정기간 동안의 입자상 및 가스상 오염물질의 농도와 풍속, 온도, 상대습도의 평균값과 표준편차를 표 1에 나타내었다. PM₁₀과 PM_{2.5}는 각각, 50.33 µg/m³ 과 30.80 µg/m³이었으며, 풍속, 온도와 상대습도는 각각 2.08 m/s, 21.94°C, 50.91%로 관측되었다.

Table 1. Average concentrations of particulate and gas pollutants and meteorological conditions during the study

	PM ₁₀ (µg/m ³)	PM _{2.5} (µg/m ³)	NO (ppb)	NO ₂ (ppb)	NO _x (ppb)	CO (ppb)	O ₃ (ppb)	SO ₂ (ppb)	WS* (m/s)	TEMP* (°C)	RH* (%)
Average	50.33	30.80	12.18	34.24	46.42	472.10	38.48	4.72	2.08	21.94	56.91
S.D.	22.96	15.58	13.10	16.69	25.99	142.82	25.82	1.22	0.40	4.71	18.42

* WS : Wind Speed, TEMP : Temperature, RH : Relative Humidity.

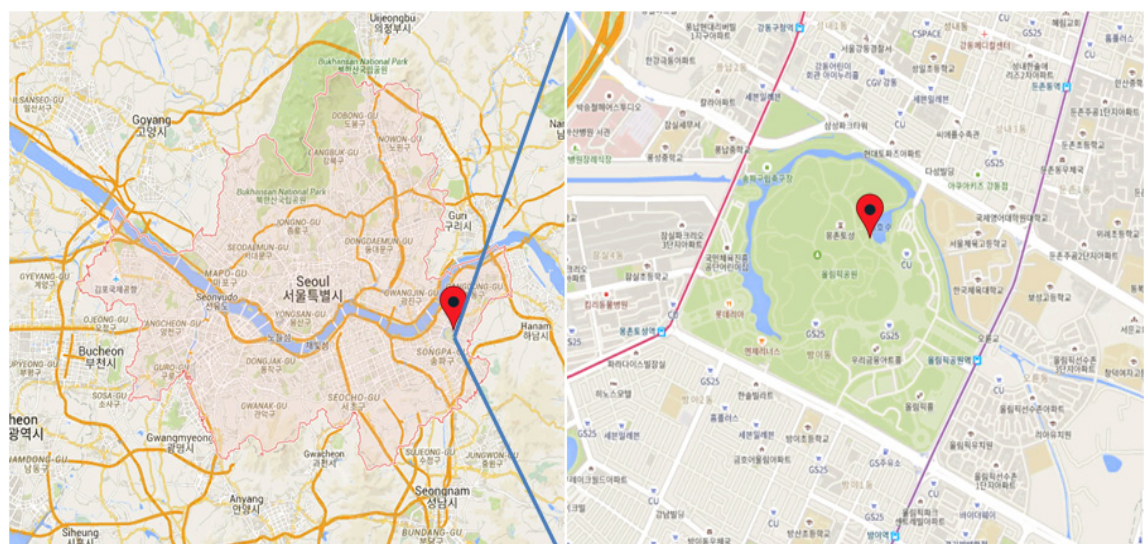


Fig. 1. Monitoring site(Olympic park).

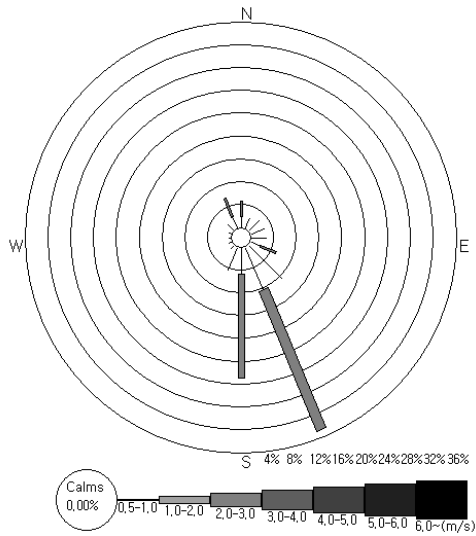


Fig. 2. The wind rose during the study.

표 2와 그림 3은 측정기간 PM_{2.5} 내 중금속의 평균농도 및 분포를 보여준다. Ga은 측정기간 중 검출한계 내에서 검출되지 않아 제외하였다. 총 중금속의 농도는 1.21 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 전체 PM_{2.5} 질량 농도(30.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)의 약 3.93%를 차지했으며, 표 2의 22종의 중금속 중에서 Si, K, Fe이 각각 47%, 20%, 16%의 질량분율로 가장 높은 농도를 보였다.

봄철(2016년 5~6월) 서울 남동지역의 PM_{2.5} 중금속 농도와 서울 및 주변 도시의 중금속 농도를 표 3에 비교하였다. PM₁₀의 중금속 농도 자료와 달리, PM_{2.5}의 대기 중 중금속은 자료가 충분치 않아 시기와 장소가 다른 데이터로 제한적으로 비교를 하였다. 표 3의 데이터가 22종의 모든 중

금속항목을 측정하진 않았지만, 측정된 항목 중에서는 K와 Fe이 가장 큰 비율을 차지하였으며, 이는 이번 연구와 비교할 만하다. Cd를 제외하고는 이번연구의 대부분의 중금속 농도는 표 3에 비교된 자료들보다 낮거나 비슷한 경향을 보였다. Fe은 PM_{2.5} 농도가 가장 낮았던 제주(PM_{2.5}:18.77)에 비해서도 낮은 농도를 나타냈고, 특히 Ca은 3~13배 정도 낮은 특징을 보였다. 2001년 3~4월 서울지역의 자료(8)는 황사시기를 포함한 자료이며, 2012년 2월 광주 자료와 2009년 6~11월 천안, 인천, 군산 제주 자료(10)는 다른 도시의 다른 시기의 자료이지만, 제한된 자료 내에서 서울 남동지역의 2016년 봄철 PM_{2.5} 중금속 농도는 비슷하거나 낮은 것으로 보인다.

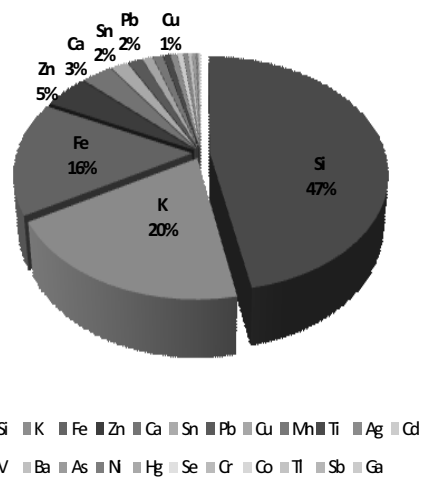


Fig. 3. Relative concentrations of trace metals in PM_{2.5}.

Table 2. Concentrations of trace metals in PM_{2.5} during the study (unit : ng/m³)

	Total	Si	K	Fe	Zn	Ca	Sn	Pb	Cu	Mn	Ti
Average	1211.20	577.95	241.94	193.14	58.54	41.16	22.83	19.39	13.64	13.11	9.35
S.D.*	369.26	121.75	118.49	98.50	42.98	21.54	9.04	13.20	10.61	8.52	4.68
	Ag	Cd	V	Ba	As	Ni	Hg	Se	Cr	Co	
Average	8.92	7.55	7.02	5.59	5.58	2.55	1.72	1.48	1.14	0.13	
S.D.	4.28	3.51	4.99	6.57	4.64	1.74	0.81	1.38	0.99	0.24	

* S.D.: Standard Deviation.

2) 고농도 PM_{2.5} 사례시 중금속 농도 특성

PM_{2.5} 고농도 사례시 중금속의 성분특성을 평가하기 위해, 측정기간 중 PM_{2.5} 농도가 50 µg/m³ 이상의 고농도 연무일(Case_{Haze}, 5월 25일~27일)의 중금속 농도를 PM_{2.5} 농도가 측정기간 평균농도(30.80 µg/m³) 이하인 날들(Case_{Low}, 5월 12일~14일, 18일~21일, 24일, 6월 1일~2일, 8일~9일, 12일, 15일~16일)의 평균 중금속 농도와 비교하였다(표 4). Case_{Haze} 시의 PM_{2.5} 농도는 57.73 µg/m³으로 Case_{Low} 농도 21.97 µg/m³ 보다 2.63배 높았다. 표 3과 같이, Case_{Haze}의 중금속 중 Se, As, Cr, Pb, Zn, Mn가 Case_{Low}와 비교할

때 각각 5.1, 5.09, 3.7, 3.01, 2.98, 2.78배로, PM_{2.5}의 증가율(2.63)보다 높게 나타났다. 이들 중금속의 배출원이 PM_{2.5}의 고농도 발생과 관련성이 있다고 추정된다. Se은 석탄 연소 시에 주로 발생하는 입자에서 특징적으로 발생하는 특성(11)을 가지며, Cr과 As는 금속가공 공정에서 주로 발생하는 금속(12)이며, Mn, Fe, Pb은 제철 및 금속공정의 주요 발생 금속이다(12). Co, Si, Cd, Sn, Ba 등은 PM_{2.5}의 변화와 무관하게 Case_{Low}와 Case_{Haze}에서 10%이내의 차이로 비슷한 농도를 보였다. 토양성분을 대표하는 Si는, 토양의 주요 구성성분으로 황사 시에 높게 측정이 되지만, 이

Table 3. Comparison of trace metal concentrations in other studies (unit : ng/m³)

Year		2001 ⁽⁸⁾	2012 ⁽⁹⁾	2009 ⁽¹⁰⁾			
Month	This Study	3~4	2	6~11			
Area		서울	광주	천안	인천	군산	제주
PM _{2.5}	30.8	49.3	-	35.28	29.95	24.11	18.77
Si	577.95						
K	241.94	435	732				
Fe	193.14	743	293	761	947	237	216
Zn	58.54	163	103	237	253	113	160
Ca	41.16	565	122				
Sn	22.83						
Pb	19.39	96.4	49	29	50	55	17
Cu	13.64	27.8	15.5	14	44	29	35
Mn	13.11	39	24	22	43	22	17
Ti	9.35	33.7	8.7				
Ag	8.92						
Cd	7.55	4.62					
V	6.17	7.62	4.6				
Ba	5.06	20.8	52				
As	4.63		9.6				
Ni	2.55	19.6	3.8	5	6	13	4
Hg	1.72						
Se	1.48						
Cr	0.95	13.7		6	48	2	22
Co	0.13	2.09					
Tl	0.006695						
Sb	0.0039						
Ga	0						

번 연구에서는 PM_{2.5} 농도와 상관계수 0.1156로 PM_{2.5} 농도의 변동과 관계없이 일정한 농도를 보였으며, 이번 고농도 연무에 대한 토양 발생원의 기여는 미미하였다고 보여진다.

PM_{2.5} 고농도시 높은 증가율을 보였던 중금속 성분 및 PM_{2.5}와 주요 가스상 오염물질(NO_x, CO, O₃, SO₂)의 상관성을 알아보기 위해, 표 5와 같이 상관분석을 하였다. 표 3에서 PM_{2.5} 고농도시 높은 증가율을 보였던 중금속들과 PM_{2.5}와의 상관계수는 Se(0.7742), As(0.6748), Cr(0.5841), Pb(0.6950), Zn(0.6760), Mn(0.7020)으로 높은 상관성을 보여, 이들 중금속 배출원과 PM_{2.5} 고농도

와의 관련성이 있다고 보여진다.

PM_{2.5} 농도와 가스상 오염물질과의 상관계수는 CO(0.7026) > SO₂(0.2924) > NO_x(0.2446) > O₃(-0.0331) 순으로 CO와 상관성이 가장 높았으며, O₃과는 음의 상관성을 보였다. CO는 난방 및 자동차 배기가스등의 연소과정에서 주로 배출되며, 이번 연구에서는, 송파구 도시대기측정소가 왕복 12차로의 양재대로와 강동대로에 둘러싸여 있는 위치상의 조건 등을 고려할 때 자동차 배기가스가 PM_{2.5}농도의 증감의 영향과 높은 상관성이 있다고 보여진다. NO_x도 자동차 배기가스를 주요 배출원으로 하지만, PM_{2.5}와의 상관성이 낮은 이유는

Table 4. Comparison on mean concentrations of PM_{2.5} and trace metal concentrations during the haze(Case_{Haze}) and the days(Case_{Low}) when the PM_{2.5} concentrations were lower than mean concentration(30.80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

	Mean concentration		Case _{Haze} / Case _{Low}
	Case _{Low}	Case _{Haze}	
		(unit : PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), trace metals(ng/m^3))	
PM _{2.5}	21.97	57.73	2.63
Se	0.76	3.86	5.10
As	2.21	11.27	5.09
Cr	0.60	2.22	3.70
Pb	12.35	37.20	3.01
Zn	37.40	111.35	2.98
Mn	8.95	24.89	2.78
K	171.34	424.61	2.48
Fe	148.17	291.44	1.97
Ni	2.05	3.67	1.79
V	4.81	8.32	1.73
Hg	1.40	2.36	1.68
Cu	10.97	18.19	1.66
Ti	7.82	10.53	1.35
Ca	37.08	46.24	1.25
Ag	8.48	10.22	1.21
Co	0.15	0.16	1.07
Si	545.50	581.69	1.07
Cd	7.40	7.75	1.05
Sn	22.80	23.14	1.01
Ba	4.87	3.40	0.70
Tl	0.01	0.00	-
Sb	0.01	0.00	-

CO와 달리 NO_x는 대기중에서 지속적으로 광화학 반응을 일으켜 농도가 변화하고, 그에 따른 2차 에어로졸 형성으로 PM_{2.5}농도에 영향을 주는데 시차가 있어 CO에 비해 상관성이 낮은 것으로 보인다.

PM_{2.5} 고농도시 높은 증가율을 보였던 중금속 성분들에 대한 가스상 오염물질들과의 상관성 또한 CO와 가장 높은 상관성을 보였다(Se(0.6366), As(0.4922), Cr(0.5146), Pb(0.6809), Zn(0.6507), Mn(0.7139)). German Informative Inventory Report(13)에 따르면 자동차 운행에 따른 자동차 타이어 및 브레이크 패드 마모로 의한 비산먼지의 발생으로 Pb, Hg, Cd, As, Cr, Cu, Ni, Se, Zn 등의 중금속이 배출되는 것으로 알려져 있다. CO와 중금속 모두 자동차 운행시 배출되는 오염원이며, 대기 중에서 2차 반응이 상대적으로 적거나 무시할만하다는 점에서 상관성이 높게 나온 것으로 사료된다.

3) CPF분석을 통한 발생원 분석

CPF(Conditional Probability Function)분석을 이용해 풍향에 따른 중금속 오염 발생원의 위치를 평가 하였다. CPF는 특정 풍향에서 특정 오

염물질이 한계농도를 초과할 확률을 나타내며 다음과 같이 계산된다.

$$CPF_{\Delta\theta} = \frac{m_{\Delta\theta}}{n_{\Delta\theta}}$$

m_{Δθ}는 풍향구간 Δθ에서 오염물질의 농도가 한계농도이상인 경우의 수, n_{Δθ}는 풍향구간 Δθ의 유효 풍향(1 m/s이상)의 총 수를 나타낸다. 이번 연구에서는 16방위의 풍향 데이터를 사용하였으며, 각 물질의 한계농도는 측정기간 중 각 중금속 농도의 75분위(percentile) 값으로 하였다. 고농도 연무와 상관성이 있는 Se, As, Cr, Pb, Zn, Mn에 대한 CPF도를 그림 4에 나타내었다. 그림 4에 따르면, Se, As, Cr, Pb, Zn, Mn 발생원은 상대적으로 남동 및 북동쪽에 위치할 확률이 높은 것으로 분석되었다. 송파구 도시대기 측정소의 남동 및 북동쪽에는 수백미터 거리에 왕복 12차로의 강동대로와 양재대로가 위치해 있다. 측정소 주변 도로 중 가장 가까운 도로방향에서 높은 CPF 확률을 보인 것은 이들 중금속의 고농도 발생이 차량 운행으로 인한 오염물질의 배출로 인한 것으로 평가된다. 따라서, 앞서 Se, As, Cr, Pb, Zn, Mn

Table 5. Correlation coefficients of trace metals and gas pollutants(NO_x, CO, O₃, SO₂)

	PM _{2.5}	Se	As	Cr	Pb	Zn	Mn	NO	NO ₂	NO _x	CO	O ₃	SO ₂
PM _{2.5}	1												
Se	0.7762	1											
As	0.6748	0.7562	1										
Cr	0.5841	0.5382	0.5160	1									
Pb	0.6950	0.7902	0.8603	0.5676	1								
Zn	0.6769	0.7361	0.7604	0.6949	0.8347	1							
Mn	0.7020	0.7649	0.7067	0.8089	0.7896	0.8196	1						
NO	0.0222	-0.0917	-0.0440	-0.0092	0.1738	0.1329	0.0974	1					
NO ₂	0.3645	0.0938	0.1073	0.3292	0.3200	0.3407	0.4036	0.5090	1				
NO _x	0.2446	0.0096	0.0403	0.1908	0.2914	0.2824	0.3028	0.8339	0.8995	1			
CO	0.7026	0.6366	0.4922	0.5146	0.6809	0.6507	0.7139	0.2941	0.5716	0.5158	1		
O ₃	-0.0331	0.1567	0.1439	0.0088	-0.0099	0.0510	0.0742	-0.4611	-0.5614	-0.5940	-0.2154	1	
SO ₂	0.2924	0.4158	0.3270	0.3343	0.4418	0.4585	0.5150	0.0697	0.1924	0.1587	0.3433	0.1267	1

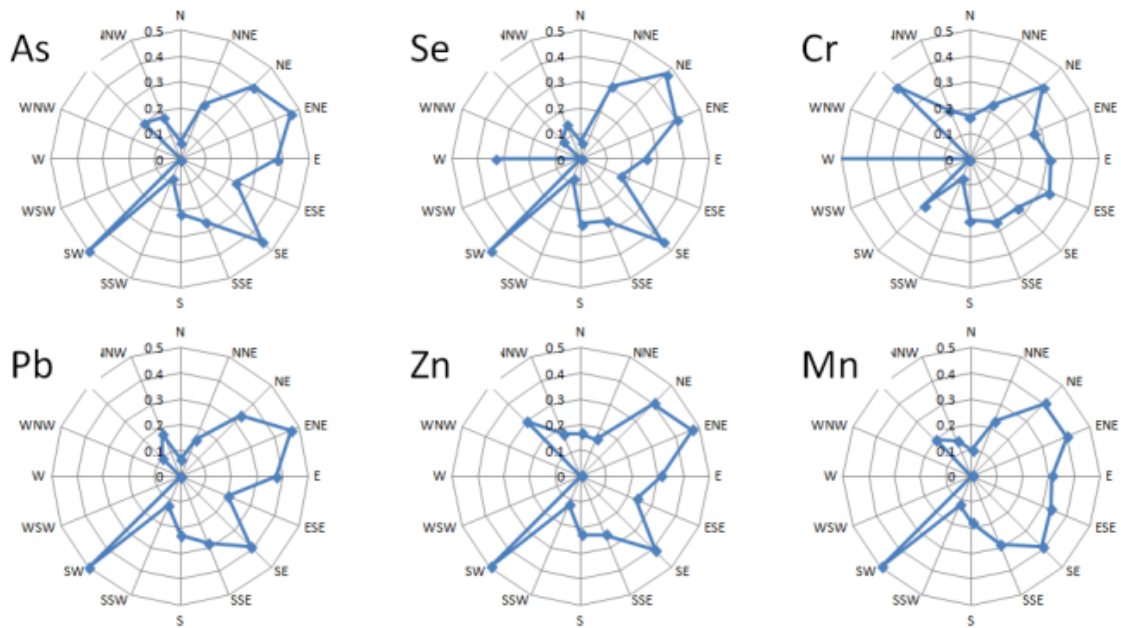


Fig. 4. PCF plots for the 75th percentile of As, Se, Cr, Pb, Zn, Mn with wind directions.

이 자동차 배출오염원인 CO와 높은 상관성을 보인 것과 함께 CPF 분석결과도 5월 25일~27일간 발생한 고농도 연무 및 중금속 농도 증가가 자동차운행 배출원과 관련이 있는 것으로 보인다.

결론

서울지역 봄철(2016. 5. 12.~2016. 6. 16.)에 PM_{2.5} 중 중금속 농도를 실시간 중금속 분석기(XRF625, Cooper Corp., USA)로 측정하여, 1) PM_{2.5} 내 중금속 분포특성과 2) PM_{2.5} 고농도 사례시 중금속농도의 특성과 발생원 분석을 하였다.

측정기간 중 중금속의 평균농도는 1.21 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 전체 PM_{2.5} 질량농도(30.80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)의 약 4%를 차지하였으며, Si, K, Fe 이 전체 금속중 83%로 가장 많았으며, 국내 다른 도시 및 이 지역의 다른 시기의 농도에 비해 상대적으로 비슷하거나 낮은 편이었다.

고농도 연무(5월 25일~27일) 발생시, 중금속 성분의 특성을 파악하기 위해, 측정기간 평균농도(30.80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 이하인 날들과 비교를 한 결과, 중

금속 Se, As, Cr, Pb, Zn 그리고 Mn의 농도 증가율이 PM_{2.5} 농도 증가율보다 높았다. PM_{2.5}와 가스상 오염물질, 중금속 성분의 상관분석결과, PM_{2.5}농도는 자동차 배기가스의 주요성분인 CO와 가장 높은 상관성(상관계수 0.7026)을 보였으며, 자동차 타이어와 브레이크 패드 마모로부터 배출과 관련있는 중금속 성분(Se, As, Cr, Pb, Zn, Mn) 또한 CO와 높은 상관성을 보였다. CPF 발생원 분석에서는, 수백미터 이내에 왕복12차로의 강동대로와 양재대로가 있는 남동 및 북동쪽의 오염발생원과 중금속 농도의 증가가 관련성이 있는 것으로 분석되었다. 이를 통해 이번 연구 기간 중 고농도 연무는 자동차 운행시 발생하는 입자상 및 가스상 오염물질과 상관성이 있는 것으로 사료된다.

참고문헌

1. Kumar, D and Jugdutt, BI : Apoptosis and oxidants in the heart. Journal of Laboratory and Clinical Medicine 142: 288~297, 2003.

2. Park, EJ, Kang, MS, You, DE, Kim, DS, Yu, SD, Chung, KH and Park, KS : Health Risk Assessment of Heavy Metals in Fine Particles Collected in Seoul Metropolitan Area, *Journal of Environmental Toxicology*, 20(2):179~186, 2005.
3. Choi, BJ and Kim, KH : The Metallic composition of airborne particles in seven location of Seoul city. *Journal of Analytical Science & Technology*, 16(2): 143~151, 2003.
4. Sun, Y, Zhuang, G, Wang, Y, Zhao, X, Li, J, Wang, Z, and An, Z : Chemical composition of dust storms in Beijing and implications for the mixing of mineral aerosol with pollution aerosol on the pathway. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 110:1~11, 2005.
5. Mori I, Nishikawa M, Tanimura T and Quan H : Change in size distribution and chemical composition of kosa (Asian dust) aerosol during long-range transport. *Atmospheric Environment* 37:4253~4263, 2003.
6. Choi GH, Kim KH, Kang CH, Lee JH : The influence of the Asian Dust on the Metallic Composition of Fine and Coarse Particle Fractions, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 19(1):45~56, 2003.
7. Kim, JS, Hong, SM, Kim, MS, Kim, YY and Shin, ES : Distribution Characteristics of PM₁₀ and Heavy metals in Ambient Air of Gyeonggi-do Area using Statistical Analysis, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 30(3):281~290, 2014.
8. Kim KH, Choi GH, and Kang CH : The metallic composition of PM_{2.5} and PM₁₀ in a northeast region of Seoul during the spring 2001, *J. Korean Earth Science Society*, 23(6):514~525, 2002.
9. Park, SS, Cho, SY, Jo, MR, Gong, BJ, Park, JS, and Lee, SJ : Field evaluation of a near - real time elemental monitor and identification of element sources observed at an air monitoring supersite in Korea *Atmospheric Pollution Research* 5(1):119~128, 2014.
10. Jeon, HL, Choi, SH, Im, JY, Park, HJ, Hong, EJ and Son, BH : Chemical Characteristics of Heavy Metals of PM_{2.5} in Atmosphere, *J Environ Health Sci*, 38(3):233~240, 2012.
11. Morawska, L and Zhang, JF : Combustion sources of particles. 1. Health relevance and source signatures. *Chemosphere*, 49:1045~1058, 2002.
12. Pancras JP, Ondov JM, Poor N, Landis MS, and Stevens RK : Identification of sources and estimation of emission profiles from highly time - resolved pollutant measurements in Tampa, FL *Atmospheric Environment*, 40:S467~S481, 2006.
13. IIR ED, German Informative Inventory Report, 2012, <http://iir-de.wikidot.com/1-a-3-b-vi-emissions-from-tyre-and-brake-wear>.