

서울시 대기 중 초미세먼지 중금속 분포 특성

대기질통합분석센터 기후대기팀

신윤미 · 양혜란 · 엄정훈 · 전명진 · 이원영 · 박세영 · 권승미 · 신진호

Distribution Characteristics of Heavy Metals in Ambient PM_{2.5} in Seoul

Climate and Air Quality Research Team

**Yoon-mi Shin, Hye-ran Yang, Jung-hoon Uhm, Myoung-Jin Jeon,
Won-young Lee, Se-young Park, Seung-mi Kwon and Jin-ho Shin**

Abstract

This study compared the concentrations of heavy metals in PM_{2.5} and evaluated the behavior and effects of heavy metals. In 2018~2019, the concentration of heavy metals was shown to be in the order Zn > Pb > Cu > Mn > Ba; this order excluded elements originating in the soil, such as, Al, Ca, Mg, and Fe. The seasonal PM_{2.5} concentrations order was winter > spring > autumn > summer. The Pb, Cd, Ba, Mn concentrations order was winter > autumn > spring > summer. Ni and V behave differently than other heavy metals because they do not show the lowest concentration in summer.

The mass concentration of PM_{2.5} showed a high correlation with Fe, Pb, Zn, Mn, and Cd. Regarding the correlation coefficient between different metals, Fe was highly correlated with Mn ($r=0.888$). Fe - Zn, Fe - Ba, Zn - Cd, Pb - Cd, Pb - As, and As - Cd also showed a high correlation coefficient ($r=0.600\sim0.748$). The correlation coefficient between Ni and V was high ($r=0.641$), but the correlation coefficient with Ni and V and other elements was low. Heavy metals can be a useful tool for evaluating the source of PM_{2.5} through long-term data.

Key words : PM_{2.5}, heavy metal distribution, correlation analysis

서 론

최근 초미세먼지로 인한 대기오염문제에 관심이 높아지고 있다. 초미세먼지 주의보 발령횟수와 발령일수는 점차 증가하고 있는 추세로 2013년도 10월부터 초미세먼지 경보제가 실시되고 있는데 2014, 2015년도에는 각 6회씩 발령되었지만 2018년도에는 8회, 2019년도에는 15회로 발령횟수가 증가하였으며 발령일수 또한 증가추세에 있다(1). 초미세먼지 경보의 경우 2019년도에 처음으로 발령횟수 2회, 발령일수 4일로 나타나 점차 심각해지는 상황이다(1). 이로 인해 초미세먼지 내 중금속의 유해성에 관한 관심 또한 높아지고 있다. 현재 PM_{10} 내의 Pb에 대한 대기환경기준치가 설정되어 있으나 다른 유해중금속에 대한 기준치는 없으며 $PM_{2.5}$ 내의 중금속에 대한 기준치는 아직 없는 실정이다.

$PM_{2.5}$ 의 국내 및 해외에서 초미세먼지 등의 중금속 분포특성, 계절별 및 지역별 농도의 특성에 대한 연구를 기반으로 성분분석에 따른 발생원 파악에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다(2~7). 특히 대기 중 중금속은 발생원파악에 유용한 도구로 사용될 수 있다. $1\sim 2.5\mu m$ 사이의 입경은 주로 유기탄소, 이온성분, 중금속 등의 성분으로 구성되어 있는데 Pb, Ni, V과 같은 중금속은 입경이 미세할수록 더 큰 분포를 나타낸다는 연구결과가 있다(4). 또한 화석연료에 포함되어 있는 중금속들은 As, Cd, Cu, Ni, Pb, Zn, V 등으로 산화물 또는 염화물 형태로 배출되는데 대부분의 저휘발성 중금속들은 입자 표면에 흡착되어 배출가스의 미세한 입자에 농축되는 것으로 알려져 있다(5). As는 화산활동이나 화석연료의 연소 등으로 발생하는데 대기 중에서는 유기화합물의 형태로 존재하며 Cd은 화산활동과 쓰레기 소각, 아연제련 등이 발생원으로 대기 중에서 장거리 이동이 가능하다고 알려져 있다(8). Pb은 쓰레기 소각, 석탄 연소 등으로 인해 발생하며 체류시간에 따라 건식 또는 습식 퇴적물 형태로 공기 중에서 제거되는 것으로 알려져 있다(8).

본 연구에서는 인체 유해성이 더 크다고 알려진 $PM_{2.5}$ 내 중금속의 연간, 계절별 특성을 파악하고

자 하였으며 상관분석을 통해 중금속의 거동을 알아보고자 하였다. 또한 고농도 초미세먼지 발생 시 중금속 농도 특성을 파악하여 서울시의 대기환경개선을 위한 기초자료로 제공하고자 하였다.

시료채취 및 분석방법

1. 시료채취

본 연구에서는 광진측정소(구의 아리수 정수센터)를 시료채취지점으로 선정하여 진행하였다. 저용량공기시료채취기(Low volume air sampler: KN-L25P1, KNJ, Korea 및 LV-250, Sibata, Japan)를 이용하여 테프론(PTFE, 46 mm, $2\mu m$, GVS Life Sciences, USA)여지에 유량 $16.7 L/min$ 으로 24시간 동안 초미세먼지를 포집하였으며, 2018년 1월부터 2019년 12월까지 2년간 채취한 시료를 사용하여 분석하였다.



Fig. 1. Sampling devices at GwangJin.

2. 실험방법

1) 시료의 전처리

초미세먼지를 포집하기 전 깨끗한 테프론 여지를 24시간 향량하고 로봇칭량시스템을 이용하여 무게를 측정해두고, 먼지를 포집한 여지 또한 24시간 향량 후 무게를 측정하여 초미세먼지의 질량 농도를 산출하였다. 질량농도의 산출이 끝난 여지를 이용하여 공정시험법에 따라 전처리를 실시하

였다(9). 초미세먼지가 포집된 테프론여지 전체를 테프론 가위로 4등분하여 산분해를 위한 테프론 용기에 넣은 후 혼합산(16.7% 염산 + 5.5% 질산)을 10 mL을 주입하고 마이크로웨이브를 이용하여 추출한 후 PVDF필터를 장착한 주사기로 여과하여 다시 산(8% 염산 + 3% 질산)용액 5 mL로 주사기를 세척하여 합하고 테프론 용기의 벽면 또한 세척하여 합한 후 최종용액이 25 mL이 되도록 하였다.

2) 시료의 분석

초미세먼지의 질량농도 분석은 중량농도법을 적용하였으며 온도는 20°C, 상대습도 35% 하에서 24시간 이상 항량 후 미세먼지 로봇칭량 시스템 ((주)C2K)을 이용하여 분석하였다.

초미세먼지의 분석항목은 총 15항목(Mg, Al, V, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, As, Sr, Cd, Ba, Pb, Ca, S)으로 Ca과 S은 ICP-OES((2018년: CIROS VISION, Spectro, Germany), (2019년: CIROS BLUE, Spectro, Germany)) 나머지 항목은 ICP-MS(iCAP Q, Thermo SCIENTIFIC, Germany)로 분석을 실시하였다. 그림 2에 전체 리 방법에 대해 나타내었다.

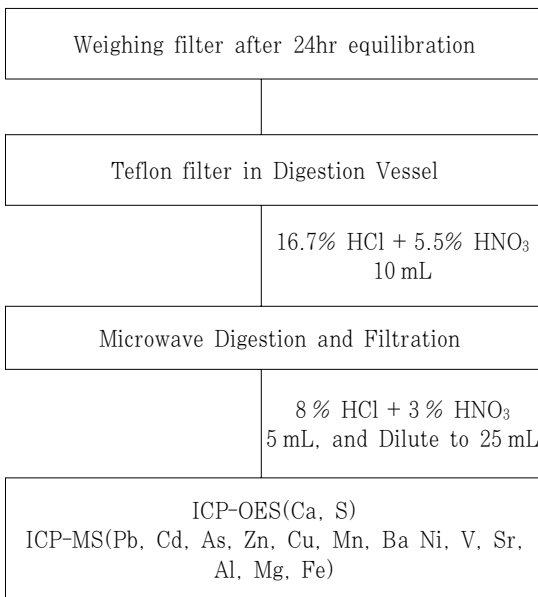


Fig. 2. Pretreatment and analytical procedure.

결과 및 고찰

1. 연도별 초미세먼지 중 중금속 농도 특성

본 연구에 사용한 2018년도 시료는 79개, 2019년도 시료는 148개이며, 2년간 총 시료의 개수는 227개이다. 표 1에 2018년 1월~12월, 2019년 1월~12월까지 초미세먼지와 중금속의 연간평균, 최소, 최대값을 나타내었다. 여기서 초미세먼지의 농도단위만 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이며 중금속 농도의 단위는 ng/m^3 이다. 초미세먼지의 농도 평균은 2018년도에는 $23.44 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 2019년도에는 $28.35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 증가하였는데 이는 2019년도 1월부터 3월까지 겨울에서 봄으로 넘어가는 시점에 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상인 고농도 사례일이 19일로 집중되어 있기 때문이다. 19일의 고농도 사례일에는 2019년 1월 12일, 19일, 2월 22일, 24일, 28일, 3월 6일, 27일까지 총 7회의 초미세먼지 주의보 발령일과 2019년 3월 5일 초미세먼지 경보 발령일이 포함되어 있다. 2018년과 2019년 모두를 평균한 값을 보면 S을 제외한 중금속 농도는 $\text{Fe} > \text{Ca} > \text{Al} > \text{Zn} > \text{Pb} > \text{Cu} > \text{Mn} > \text{Ba}$ 의 순으로 나타났으며 토양기원원소인 Al, Ca, Fe을 제외하고 Zn의 농도가 제일 높게 나타났다. 2015~2016년에 서울연구원에서 연구한 결과에서도 토양기원 원소를 제외한 원소별 농도는 $\text{Zn} > \text{Pb} > \text{Cu} > \text{Mn}$ 의 순서로 나타나 본 연구와 같은 결과를 나타내었다(2). Zn의 발생원은 가솔린 배출가스와 타이어 마모이며 Cu의 발생원은 디젤 엔진 연소와 브레이크 라이닝 마모로 이동오염원과 관련되어 있는데 이들 원소의 농도 순서가 높은 이유는 서울의 교통량과 연관이 있는 것으로 판단된다(2, 6).

쓰레기 소각과 난방, 발전과 관련이 있는 Pb, Cd, As와 같은 인위적 기원 원소의 평균농도는 2018년에 각각 $13.54 \text{ ng}/\text{m}^3$, $0.57 \text{ ng}/\text{m}^3$, $2.75 \text{ ng}/\text{m}^3$ 이었으며 2019년도에는 각각 $17.88 \text{ ng}/\text{m}^3$, $0.62 \text{ ng}/\text{m}^3$, $3.71 \text{ ng}/\text{m}^3$ 로 증가하였다(8). Al, Ca, Mg, Fe과 같은 토양기원원소는 2018년보다 2019년도에 감소한 것으로 나타났다. 중유 연소와 관련 있다고 알려진 Ni, V의 농도 또한 2019년도에 소폭 감소한 것으로 나타났다(4). Sr은 불꽃반응에서 붉은색으로 발색되며 폭죽놀이 불꽃화약의

재료로 알려져 있는 금속이다(10). 2018년~2019년 평균값이 0.75 ng/m^3 으로 대기에 미량으로 존재하며 2019년도 2월 21일에 최대값인 7.55 ng/m^3 으로 나타나 평상시보다 10배 증가한 사례가 있었는데 이는 중국에서 원소철(음력정월대보름으로 2019년 2월 19일) 폭죽놀이 행사 후 폭죽 연소 산물이 국내에 유입되어 고농도로 나타난 것으로 추정된다. 2013년 김이 광주광역시에서 중국 춘절기간에 불꽃놀이로 발생한 대기오염물질의 유입에 관한 연구에 따르면 에어로졸 광학적 두께의 변화를 분석한 결과 중국에서 발생한 오염물질이 장거리 이동하여 국내에 영향을 미치는 것으로 판단하였으며 입자에 중금속이 섞여있을 가능성이 있다고 보고하였다(11). Zn, Ba, Mn, S은 연도별 증감이 미미하였다.

2. 계절별 중금속 농도 특성

2018년, 2019년도를 합한 계절별 초미세먼지와 중금속의 농도를 그림 3에 나타내었다. 봄(3~5월), 여름(6~8월), 가을(9~11월), 겨울(12~2월)의 시료는 각각 65개, 50개, 51개, 61개이다. 초미세먼지의 평균농도는 겨울 $34.31 \mu\text{g/m}^3$, 봄 $30.41 \mu\text{g/m}^3$, 가을 $21.30 \mu\text{g/m}^3$, 여름 $17.81 \mu\text{g/m}^3$ 의 순서로 나타났으며 전체평균농도는 $26.64 \mu\text{g/m}^3$ 이었다. 이는 국립환경과학원에서 2008년 11월부터 2009년 11월까지 채취한 시료로 연구한 초미세먼지의 계절별 농도의 순서와 일치하였다(3).

Pb, Cd, Ba, Mn의 농도는 겨울>가을>봄>여름의 순서로 나타났으며 Zn은 겨울>봄>가을>여름의 순서였는데 봄과 가을의 농도 차이가 크게 나타나지는 않았다. As와 Fe은 가을>겨울>

Table 1. Annual mean concentration of PM_{2.5} and heavy metal at Gwangjin

| | [unit : $\mu\text{g/m}^3(\text{PM}_{2.5})$, $\text{ng/m}^3(\text{metal})$] | | | | | | |
|-------------------|--|--------|---------|-------------|--------|---------|--------------|
| | 2018(n=79) | | | 2019(n=148) | | | Total(n=227) |
| | Mean | Min | Max | Mean | Min | Max | Mean |
| Pb | 13.54 | 1.70 | 41.38 | 17.88 | 2.06 | 66.31 | 16.37 |
| Cd | 0.57 | 0.11 | 1.48 | 0.62 | 0.10 | 1.70 | 0.60 |
| As | 2.75 | 0.33 | 16.67 | 3.71 | 0.40 | 16.96 | 3.38 |
| Zn | 48.33 | 6.77 | 119.07 | 48.49 | 6.18 | 165.87 | 48.43 |
| Cu | 10.76 | 2.23 | 26.08 | 8.45 | 0.45 | 37.98 | 9.25 |
| Mn | 8.83 | 1.64 | 24.01 | 8.51 | 1.52 | 28.80 | 8.62 |
| Ba | 8.59 | 2.25 | 22.22 | 8.39 | 1.71 | 42.04 | 8.46 |
| Ni | 1.87 | 0.25 | 8.11 | 1.77 | 0.15 | 12.86 | 1.80 |
| V | 1.99 | 0.10 | 7.68 | 1.89 | 0.10 | 9.50 | 1.93 |
| Sr | 0.66 | 0.16 | 2.20 | 0.79 | 0.12 | 7.55 | 0.75 |
| Al | 106.74 | 17.41 | 295.96 | 68.97 | 10.26 | 398.47 | 82.12 |
| Ca | 95.31 | 17.61 | 207.73 | 88.82 | 22.62 | 271.56 | 91.08 |
| Fe | 179.17 | 38.76 | 392.29 | 158.32 | 37.14 | 437.61 | 165.58 |
| S | 1443.09 | 330.99 | 6871.14 | 1456.76 | 203.70 | 6394.27 | 1452.00 |
| PM _{2.5} | 23.44 | 7.76 | 74.71 | 28.35 | 6.12 | 107.68 | 26.64 |

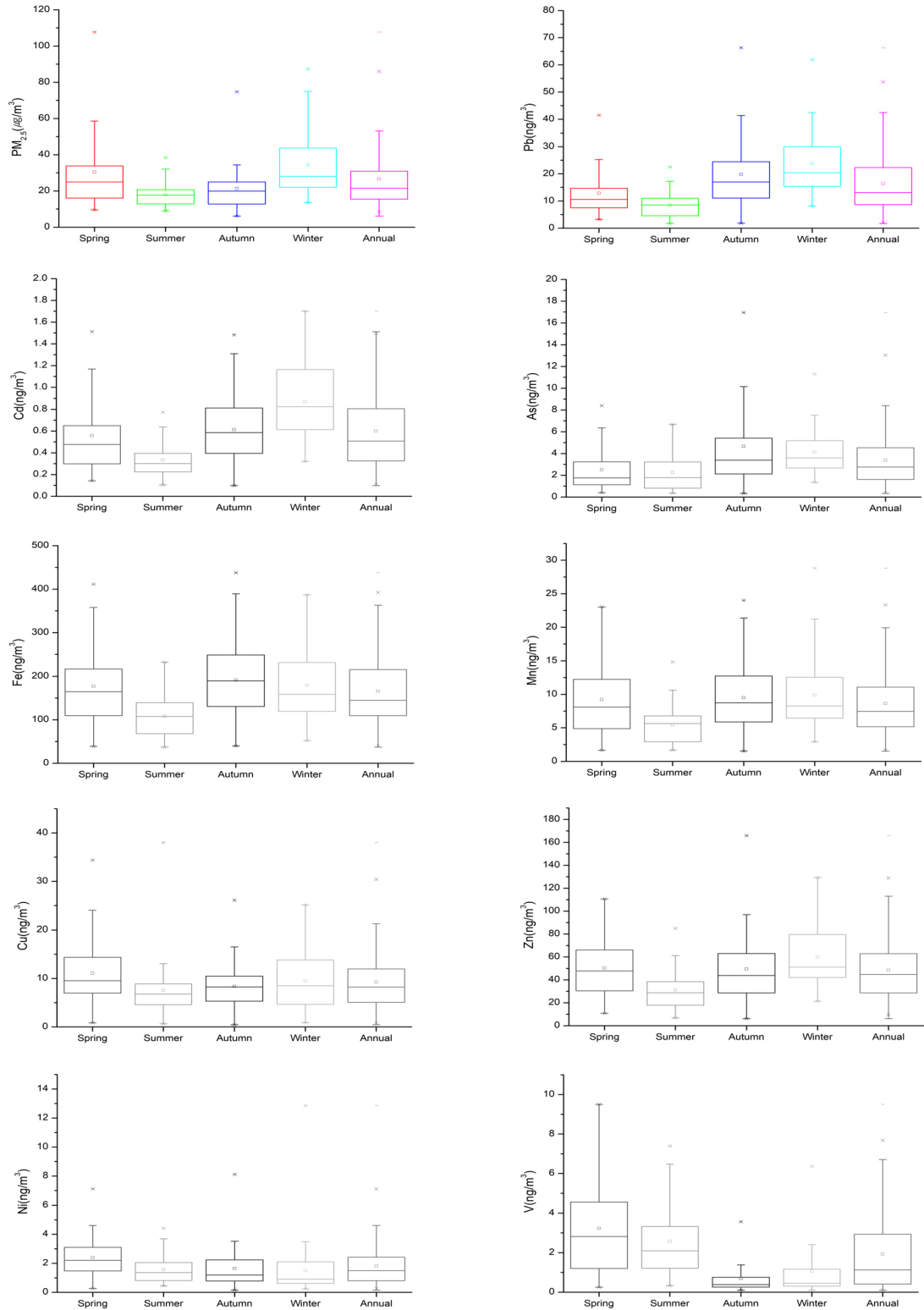


Fig. 3. Box plot of seasonal and annual heavy metal concentration.

봄>여름의 순서를 보였는데 As는 난방을 주로 하는 시기인 겨울과 가을의 농도가 비슷한 수준을 보였으며 Fe은 겨울과 봄의 농도가 비슷한 수준을 보였다. 대부분의 중금속은 여름철에 가장 낮은 농도를 보였는데 Ni의 경우 봄>가을>여름>겨울의 순서를 보였고, V은 봄>여름>가을>겨울의 순서를 보여 이들 두 원소는 다른 중금속과는 상이한 거동을 보이는 것으로 판단된다.

초미세먼지 대비 중금속의 함량은 Fe, As, Pb, Zn, Ba, Mn의 경우 가을에 가장 높은 비율로 나타났다으며, V의 비율은 여름과 봄에 가을과 겨울보다 4배 이상 높은 비율로 나타났다. 초미세먼지의 농도가 겨울과 봄에 높게 나타난 반면에 대부분의

중금속의 비율은 겨울과 봄이 아닌 가을에 높게 나타났는데, 이는 초미세먼지의 농도가 높아질수록 이온이나 탄소와 같은 다른 화학적 성분들이 더 많이 증가하였기 때문이라고 판단된다.

3. 초미세먼지 내 중금속의 상관관계 분석

IBM SPSS Statistics 24 프로그램을 이용하여 초미세먼지와 중금속, 중금속과 중금속 간의 상관관계를 분석한 결과를 표 2에 나타내었다. 상관분석에 사용한 데이터의 갯수는 2018년과 2019년도 를 합한 227개이다. 초미세먼지와 중금속과의 상관성을 먼저 살펴보면 Fe, Pb, Zn, Mn, Cd와의 상관계수가 0.602~0.732로 높은 상관성을 보였

Table 2. Pearson correlation coefficients between the concentrations of PM_{2.5} and heavy metals and between the concentrations of heavy metals(2018~2019, n = 227)

| | PM _{2.5} | Mg | Al | V | Mn | Fe | Ni | Cu | Zn | As | Cd | Ba | Pb | Ca | S | Sr |
|-------------------|-------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----|
| PM _{2.5} | 1 | | | | | | | | | | | | | | | |
| Mg | 0.262** | 1 | | | | | | | | | | | | | | |
| Al | 0.251** | 0.475** | 1 | | | | | | | | | | | | | |
| V | 0.305** | 0.179** | 0.104 | 1 | | | | | | | | | | | | |
| Mn | 0.725** | 0.433** | 0.345** | 0.306** | 1 | | | | | | | | | | | |
| Fe | 0.602** | 0.531** | 0.450** | 0.161* | 0.888** | 1 | | | | | | | | | | |
| Ni | 0.426** | 0.204** | 0.178** | 0.641** | 0.445** | 0.376** | 1 | | | | | | | | | |
| Cu | 0.508** | 0.278** | 0.376** | 0.338** | 0.571** | 0.588** | 0.367** | 1 | | | | | | | | |
| Zn | 0.709** | 0.336** | 0.307** | 0.268** | 0.817** | 0.748** | 0.472** | 0.568** | 1 | | | | | | | |
| As | 0.451** | 0.200** | 0.144* | -0.104 | 0.423** | 0.403** | 0.112 | 0.165* | 0.439** | 1 | | | | | | |
| Cd | 0.732** | 0.260** | 0.275** | -0.004 | 0.709** | 0.651** | 0.173** | 0.433** | 0.723** | 0.600** | 1 | | | | | |
| Ba | 0.548** | 0.350** | 0.396** | -0.031 | 0.626** | 0.707** | 0.174** | 0.544** | 0.595** | 0.364** | 0.611** | 1 | | | | |
| Pb | 0.626** | 0.201** | 0.150* | -0.104 | 0.573** | 0.543** | 0.158* | 0.313** | 0.664** | 0.703** | 0.773** | 0.484** | 1 | | | |
| Ca | 0.175** | 0.655** | 0.426** | 0.088 | 0.405** | 0.554** | 0.115 | 0.342** | 0.320** | 0.115 | 0.249** | 0.300** | 0.181** | 1 | | |
| S | 0.669** | 0.148** | 0.142* | 0.531** | 0.420** | 0.294** | 0.385** | 0.327** | 0.379** | 0.168* | 0.309** | 0.221** | 0.234** | 0.021 | 1 | |
| Sr | 0.485** | 0.551** | 0.472** | 0.093 | 0.398** | 0.451** | 0.227** | 0.368** | 0.428** | 0.245** | 0.408** | 0.723** | 0.398** | 0.355** | 0.267** | 1 |

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

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

으며 초미세먼지와 지각구성성분으로 알려진 Al, Ca, Mg과는 0.175~0.262로 상관성이 낮게 나타났다. 중금속과 중금속 간의 상관관계의 경우 Fe과 Mn의 상관계수는 0.888로 중금속 간의 상관계수 중에 제일 높은 값을 나타내었으며 Fe과 Zn은 0.748, Fe과 Ba은 0.707로 높은 상관성을 보여 주었다. Zn과 Cd, Pb과 Cd, Pb과 As, As와 Cd 또한 0.600~0.723으로 높은 상관성을 나타내었다. Ni과 V의 경우 다른 원소와의 상관성은 낮게 나타난 반면에 이들 원소 상호 간의 상관계수는 0.641로 비교적 높은 상관관계가 나타나는 특징을 보여 두 금속이 비슷한 거동을 하는 것으로 추정된다. 대전에서 수행한 Lee의 연구에서는 Fe과 Mn의 상관계수가 0.84로 중금속 간의 상관계수 중 제일 높은 값을 보여 본 연구와 비슷하였으나 Fe과 Zn의 경우 0.49, Pb과 As는 0.53으로 본 연구보다 상대적으로 낮은 상관관계를 보였다 (12). 이러한 차이는 교통량, 인구밀도 등과 같은 지역별 발생원의 특징과 차이로 인한 것으로 판단된다.

4. 고농도 초미세먼지 발생 시 중금속 특성

초미세먼지의 농도가 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상인 고농도 사례는 연구 기간 중에 2018년도 총 4일, 2019년 총 20일 발생하였으며 2019년 1월부터 3월 사이에 고농도 사례가 19일로 밀집되어 있었다. 그 중 2019년 1월 7일부터 13일까지의 사례를 분석해 보았다. 표 3에 사례일의 초미세먼지와 중금속의 농도를 나타내었다. 1월 7일부터 9일까지는 초미세먼지의 농도가 평균 $25.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 보통인 날이었으며 1월 10일에 $42.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 11일~13일까지의 평균이 $68.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 점차적으로 증가하였다.

Pb, Cd, As, Ba의 경우 초미세먼지와 같은 패턴으로 농도가 증가하는 특징을 보인 반면, V과 Ni 그리고 Fe, Zn, Mn의 경우 1월 10일에 제일 높은 농도를 나타내고 11~13일에는 농도가 줄어드는 경향을 보였다. 석탄연소 및 화력발전과 관련되어 있는 Pb, As의 경우 외부유입과 대기정체로 인한 누적이 발생하여 지속적으로 농도가 증가한 것으로 추정되며, 중유연소와 관련있는 V과 Ni 농도의 증가는 1월 10일 경 새로운 발생원에서 단기간에 외부유입이 발생하였고 그 후 희석효과로 인해 11일~13일에는 농도가 감소한 것으로 판단된다. 그리고 Pb의 동위원소는 오염원 및 발생원이 어느 곳인지 파악할 수 있는 도구로 활용될 수 있으므로 향후 추가 연구가 필요하다(13).

결론

1. 초미세먼지의 농도는 2018년보다 2019년에 다소 증가하였는데 2019년 초에 고농도 사례일이 다수 포함되어 있기 때문이며, 2018년과 2019년 전체 중금속 농도의 평균값을 살펴보면 토양기원 원소인 Fe, Ca, Al를 제외한 중금속의 농도는 $\text{Zn} > \text{Pb} > \text{Cu} > \text{Mn} > \text{Ba}$ 의 순으로 나타났다.
2. 계절별 초미세먼지의 농도는 겨울 > 봄 > 가을 > 여름의 순서로 나타났으며 Pb, Cd, Ba, Mn의 농도는 겨울 > 가을 > 봄 > 여름의 순서로 나타났다. Zn은 겨울 > 봄 > 가을 > 여름의 순서였으며 As와 Fe은 가을 > 겨울 > 봄 > 여름의 순서를 보였다. 대다수의 중금속과는 다르게 Ni과 V은 여름철에 가장 낮은 농도를 보이지 않

Table 3. PM_{2.5} and heavy metal concentration during haze episode

| | [unit: $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (PM _{2.5}), ng/m^3 (metal)] | | | | | | | | | | |
|-------------|---|------|-------|--------|------|-------|--------|------|------|-------|-------|
| | PM _{2.5} | V | Mn | Fe | Ni | Cu | Zn | As | Cd | Ba | Pb |
| 19.01.07~09 | 25.22 | 0.39 | 8.96 | 168.22 | 0.40 | 7.40 | 53.70 | 3.50 | 0.83 | 8.05 | 21.31 |
| 19.01.10 | 42.74 | 5.27 | 21.24 | 250.86 | 3.01 | 20.90 | 129.34 | 4.53 | 1.15 | 10.22 | 31.51 |
| 19.01.11~13 | 68.72 | 0.81 | 13.87 | 237.68 | 1.06 | 12.58 | 80.63 | 6.94 | 1.48 | 13.12 | 46.80 |

- 는 특징이 있었는데 이들 두 원소는 다른 중금속과는 상이한 거동을 보이는 것으로 판단된다.
3. 초미세먼지와 중금속과의 상관성은 Fe, Pb, Zn, Mn, Cd와의 상관계수가 0.602~0.732로 높은 상관성을 보였으며 초미세먼지와 Al, Ca, Mg과는 0.175~0.262로 상관성이 낮게 나타났다. Fe과 Mn의 상관계수는 0.888로 중금속 간의 상관계수 중에 제일 높은 값을 나타내었으며 Fe과 Zn, Fe과 Ba, Zn과 Cd, Pb과 Cd, Pb과 As, As와 Cd 또한 높은 상관성을 나타내었다. Ni과 V의 경우 다른 원소와의 상관성은 낮게 나타난 반면에 이들 원소 상호 간의 상관성은 0.641로 상대적으로 높게 나타나 비슷한 거동을 하는 것으로 판단된다.
 4. 고농도 사례에서 중금속별 농도의 증감이 특징적으로 나타났는데 기상상황, 풍향, 다른 화학성분을 이용하여 종합적으로 분석해야 하며 장기적 데이터 수집을 통해 중금속을 초미세먼지의 발생원을 평가하는 유용한 도구로 활용할 수 있을 것이다.

참고문헌

1. <https://cleanair.seoul.go.kr/>
: 서울특별시 대기환경정보
2. 서울특별시 : 초미세먼지(PM_{2.5})배출원 인벤토리 구축 및 상세모니터링 연구, 2016.
3. 국립환경과학원 : PM_{2.5} 물리·화학적 특성에 관한 연구, 2009
4. 장하나, 김성현, 이주형, 황규원, 유종익, 석정희, 서용칠 : 중유 연소 시 발생하는 미세입자 및 니켈과 바나듐의 대기 중 배출특성, 한국대기환경학회지, 22(3):353~360, 2006.
5. 주중호, 문영훈, 이아영, 권도형, 김영희, 석광설, 송금주 : 석탄화력발전시설에서의 납, 카드뮴 분포특성, 한국환경분석학회지, 19(4): 216~224, 2016.
6. 전혜리, 최수현, 임지영, 박희진, 홍은주, 손부순 : 대기 중 PM_{2.5}의 중금속 성분의 화학적 특성, 한국환경보건학회지, 38(3):233~240, 2012.
7. 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 PM₁₀ and PM_{2.5} in an Intergrate Iron and Steel Industry Zone Compared with a Background Site : Aerosol and Quality Research, 15:875~887, 2015.
8. <https://www.atsdr.cdc.gov/> : ASTDR(Agency for Toxic Substances and Disease Registry)
9. 환경부 : 대기오염공정시험방법. ES 01700.2, 2016.
10. 안명석, 이진호, 신창용 : 불꽃놀이의 환경오염 측면에 관한 연구, 대한화약발과공학회지, 26(2):45~51, 2008.
11. 김관철 : 춘절 기간 중국 불꽃놀이로 발생된 대기 오염물질의 한반도 유입, 한국대기환경학회지, 34(6):841~848, 2018.
12. Jin-Hong Lee, Jin-Hee Jeong and Joung-Myung Lim : Toxic Trace and Earth Crustal Elements of Ambient PM_{2.5} Using CCT-ICP-MS in an Urban Area of Korea. Environ. Eng. Res. 18(1): 3~8, 2013.
13. 조완근, 이현철, 김모근 : PM₁₀내 납의 동위원소와 농도를 활용한 산업도시지역 대기 중 납 오염원 평가, 대한환경공학회지, 33(3): 174~182, 2011.