

통계분석을 이용한 경기도 대기 중 미세먼지 및 중금속 분포 특성

Distribution Characteristics of PM₁₀ and Heavy Metals in Ambient Air of Gyeonggi-do Area using Statistical Analysis

김종수 · 홍순모 · 김명숙 · 김요용* · 신은상¹⁾

경기도보건환경연구원, ¹⁾동남보건대학교 환경보건과

(2014년 4월 29일 접수, 2014년 5월 27일 수정, 2014년 5월 27일 채택)

Jong Soo Kim, Soon Mo Hong, Myoung Sook Kim,
Yo Yong Kim* and Eun Sang Shin¹⁾

Gyeonggi-do Institute of Health and Environment

¹⁾*Department of Environmental Health, DongNam Health College*

(Received 29 April 2014, revised 27 May 2014, accepted 27 May 2014)

Abstract

This study was conducted to evaluate the distribution characteristics of PM₁₀ and heavy metals concentrations in the ambient air of Gyeonggi-do area by region and season from February, 2013 to March, 2014. The regression model for the prediction of formation characteristics and contamination degree of PM₁₀ and heavy metals by correlation analysis and regression analysis for using the multivariate statistical analysis was also established. The main wind direction during the investigation period was South East (SE) and West South West (WSW) winds, and the concentration of SO₂ at Ansan with industrial region showed 1.6 times higher than Suwon, Euiwang with residential region. The concentrations (median) of Pb, Cu and Ni at Ansan showed 3.2~4.5, 1.9~2.2 and 1.7~2.6 times respectively higher than those at Suwon. By the seasonal concentration variation, the concentrations of PM₁₀, Pb, Fe and As in winter and spring (December to May) showed 1.7, 1.9, 1.9 and 2.7 times respectively higher than those in summer and fall (June to November). As, Fe and PM₁₀ had a big difference by the seasonal factors, and Cu and Ni were evaluated to be influenced by the regional factors. From the results of correlation analysis among the target items, the correlation coefficient of PM and Mn had 0.82 ($p < 0.01$) and that of Fe and Mn had 0.82 ($p < 0.01$), which showed high correlation. And the correlation coefficients for SO₂ and Pb, CO and PM₁₀ were 0.66 ($p < 0.01$) and 0.62 ($p < 0.01$) respectively. The multiple linear regression models for PM₁₀, Pb, Cu, Cr, As, Ni, Fe and Mn were established by independent variables of CO, SO₂ and meteorological factors (wind speed, relative humidity). In the regression models, independent variable SO₂ was in cause-and-effect relationship with all dependent variables, and PM₁₀, Fe and Mn were influenced by CO and wind speed, and Pb, Cu, Ni and As had a main factor of SO₂.

Key words : PM₁₀, Heavy metals, Correlation analysis, Multiple linear regression model

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)32-250-2651, E-mail : koyoyo@gg.go.kr

1. 서 론

경기도를 포함한 수도권은 인구, 자동차, 산업시설이 집중되고 활발한 경제 활동으로 인하여 미세먼지를 비롯한 대기오염물질 배출이 증가하는 추세이고, 이와 함께 중국발 미세먼지와 황사의 영향으로 악화되는 대기환경질 개선을 위해 많은 노력을 기울이고 있다.

경기도는 면적이 10,190 km²로 전체 국토면적의 10.2%에 불과하지만 대기오염을 유발할 수 있는 인구는 24%인 1,211만 명이고, 자동차는 4,402천대(2012년 기준), 대기오염 배출시설은 33.2% (2011년 기준)인 15,512개소 등 대기오염물질 배출이 서울을 제외한 타 도지역보다 많은 지역이다. 이와 관련하여 환경부에서는 경기도를 포함한 수도권 대기오염을 줄이고자 “수도권 대기환경 개선에 관한 특별법”을 시행하게 되었고, 시행 이후 경기도 미세먼지 (PM₁₀) 농도가 특별법 시행되기 전 68 µg/m³ (2003년)에서 49 µg/m³ (2012년)으로 처음으로 대기환경기준 (50 µg/m³) 이내였으나, 2013년 경기도 미세먼지 농도는 54 µg/m³으로 연간평균치 대기환경기준을 초과한 것으로 나타났다 (G.I.H.E, 2012).

대기오염물질 중 미세먼지는 토양의 비산먼지, 황사, 해염입자, 화분 등과 같은 자연적 발생원과 산업시설, 자동차 배출가스, 가정의 난방 등과 관련된 인위적 발생원으로부터 주로 발생되는데 발생원에 따라 미세먼지 중에 함유된 중금속 종류, 농도분포가 다르게 나타나는 특징이 있다 (Liu and Smith, 1995; Rebert *et al.*, 1994). 이와 같은 중금속 농도 분포 특성은 여러 가지 다양한 인위적 배출원의 영향을 역으로 유추할 수 있는 근거를 제공하고 있어 대기환경 개선을 위한 중요한 자료로 이용되고 있다 (Choi and Kim, 2003).

대기 중 중금속 농도 분포특성 관련 선행연구를 보면 황사와 비황사 기간의 중금속 농도분포특성 (Choi *et al.*, 2003)과 2003년 봄철 서울의 총부유분진과 미세먼지의 황사, 비황사, 연무 시 중금속 농도 발생특성은 황사 발생 시 토사 영향으로 Al, Fe, Ca, Mg 농도가 높게 나타나고, 비황사인 연무발생시에는 자동차, 산업시설 등에서 주로 발생하는 Pb, Cr, Cd, As, Cu, Ni 등이 높게 나타나는 특징이 있다고 발표하였고

(Kim *et al.*, 2004), 춘천지역 부유분진 및 대기 중금속의 시·공간적 분포특성 연구에서도 비슷한 연구 결과가 발표되었다 (Lim *et al.*, 2006). 또한 산업도시인 울산시에서 특성이 다른 5개 지역 녹지, 주거, 교통밀집, 기계공단, 화학 및 비철금속 공단 지역으로 구분하여 PM₁₀과 중금속의 지역별, 계절별 평균농도와 오염물질 발생원을 알아보고자 상관성을 평가한 연구결과를 발표하였고 (Na and Lee, 2000), 수원시 대기질 관리방안을 목적으로 수원지역 PM_{2.5}와 PM₁₀ 중의 중금속원소 7종을 분석하여 이들 자료와 기상정보를 이용하여 상관분석, t-test, 오염장미 방법으로 평가하는 등 미세먼지 중 중금속 농도특성과 상관성에 관한 연구가 지속적으로 이루어지고 있다 (Kim and Kim, 2000). 그러나 그동안 추진되었던 연구들 대부분이 PM₁₀과 중금속에 대한 지역별, 계절별 특성과 중금속 항목 간 상관성에 대한 연구가 대부분으로 기상조건 및 가스상 오염물질과의 상관성이나 인과관계를 평가한 연구는 부족한 형편이었다.

따라서 본 연구에서는 경기도에서 운영 중인 중금속 측정망 자료를 분석하여 지역별, 계절별 미세먼지와 중금속 농도 분포특성을 평가함과 동시에 다변량 통계기법을 이용하여 기상 및 가스상 오염물질과 미세먼지, 중금속 농도와와의 상관성과 인과 관계를 분석하여 중금속의 발생특성과 오염도 예측을 위한 회귀모형을 토출하고자 하였다.

2. 연구 방법

2.1 조사대상 지점 및 측정자료 (항목)

조사대상 지점과 지역별 용도지역 및 Transverse Mercator 좌표는 표 1과 같다. 측정자료(항목)는 2013년 2월부터 2014년 3월까지 중금속측정망 운영지침에 따라 PM₁₀과 중금속 9항목을 매월 5회(1회 측정

Table 1. Use district and TM coordinate of the sampling sites.

| Site | Use district | TM | |
|---------|--------------|--------|--------|
| | | TMX | TMY |
| Ansan | Industrial | 179954 | 423220 |
| Suwon | Residential | 200824 | 420257 |
| Euiwang | Residential | 197620 | 426612 |
| Sungnam | Industrial | 215143 | 438062 |

시 24시간 연속채취) 측정된 자료와 동일한 지점에서 동일한 시간대에 대기오염 자동측정소에서 측정된 기상항목(온도, 상대습도, 풍속, 풍향)과 가스상 오염물질(SO₂, NO₂, CO) 시간단위 자료를 이용하였다.

2.2 PM₁₀ 및 중금속 측정방법

PM₁₀은 High volume air sampler (Model: Digitel DHA-80, Switzerland) 1.2 m³/min 유량으로 채취하였다. 여지는 Quartz fibre filter (PALL사)를 사용하였다. PM₁₀의 농도는 채취된 먼지필터의 채취전후 무게차로 질량농도를 계산한 후 PM₁₀ 중의 중금속 성분분석을 위하여 먼지 필터 전체면적의 1/4을 절취하여 50 mL용 캡튜브(Pyrex사)에 넣은 후 질산·염산(1:1) 혼합액(질산 1.03 M, 염산 2.23 M) 30 mL를 가하여 초음파 추출기(Elma S300H)에서 80~100°C로 2시간 동안 추출하였다. 초음파 추출이 끝난 추출액은 Filter paper 5A (Adventec사)를 사용하여 여과하였으며, 별도의 공 여과지에 대해서도 같은 방법으로 전처리하여 바탕시험액으로 사용하였다. 분석항목은 Pb, Fe, Mn, Cr, Cd, As, Cu, Ni, Be 등 9개 항목을 분석하였으며, 분석 장비는 ICP (Inductively coupled plasma, Perkin-Elmer 5300)를 이용하였다.

2.3 통계분석방법

본 연구에서는 통계분석을 위해 표 2와 같이 시간대별 측정 자료를 동일한 일평균 단위로 변환하여 Statistical Package for the Social Science (SPSS) Ver

18.0로 상관분석과 회귀분석을 실시하였다.

회귀분석은 PM₁₀과 중금속 항목을 종속변수로 하고 풍속, 온도, 상대습도, SO₂, CO, NO₂ 등 항목을 독립변수로 하였으며, 독립변수 선택방법은 새로운 변수를 모형에 추가할 때 이미 모형에 포함된 변수에 대한 유의성 검정을 통해 유의하지 않으면 모형에서 제거하는 단계선택 (Stepwise)방법으로 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 기상 및 대기오염 현황

그림 1은 풍향별 횡수를 전체 풍향 횡수로 나누어 풍향별 빈도분포를 바람장미로 표시한 결과로 측정기간 동안 주 풍향은 남동풍과 서남서풍으로 나타났다.

그림 2는 가스상 오염물질의 농도를 나타낸 것으로 공단이 있는 안산지역의 SO₂ 농도가 주거지역보다 약 1.6배 정도 높은 것으로 나타났으나, NO₂, CO는 주거지역이 조금 높은 것으로 조사되었다.

표 3은 조사기간 동안의 기상 및 가스상 오염물질 평균농도를 나타낸 것으로 기상항목은 지역별로 차이가 거의 나타나지 않았다.

Table 2. Unit, measure interval and abbreviation of the target items.

| Item | Unit | Measure interval | Measure instrument | Abbreviation |
|-------------------|-------------------|------------------|-------------------------------|--------------|
| Wind speed | m/s | 1 hr | Air quality monitoring system | WS |
| Wind direction | - | 1 hr | " | WD |
| Air temperature | °C | 1 hr | " | Temp |
| Relative humidity | % | 1 hr | " | RH |
| SO ₂ | PPM | 1 hr | " | - |
| NO ₂ | PPM | 1 hr | " | - |
| CO | PPM | 1 hr | " | - |
| PM ₁₀ | µg/m ³ | 24 hr | High volume air sampler | - |
| Heavy metal | µg/m ³ | 24 hr | High volume air sampler+ICP | - |

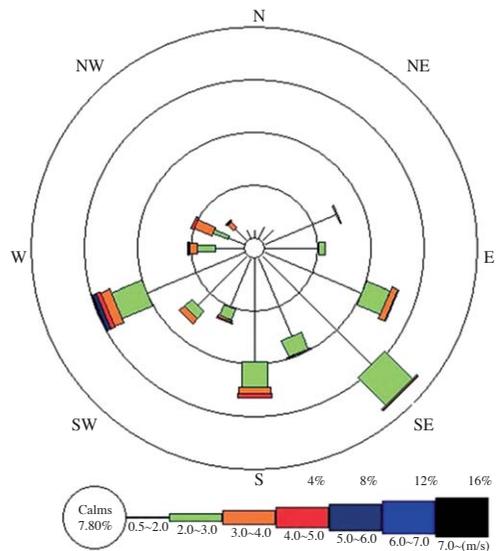


Fig. 1. The wind roses of wind direction frequency and wind speed.

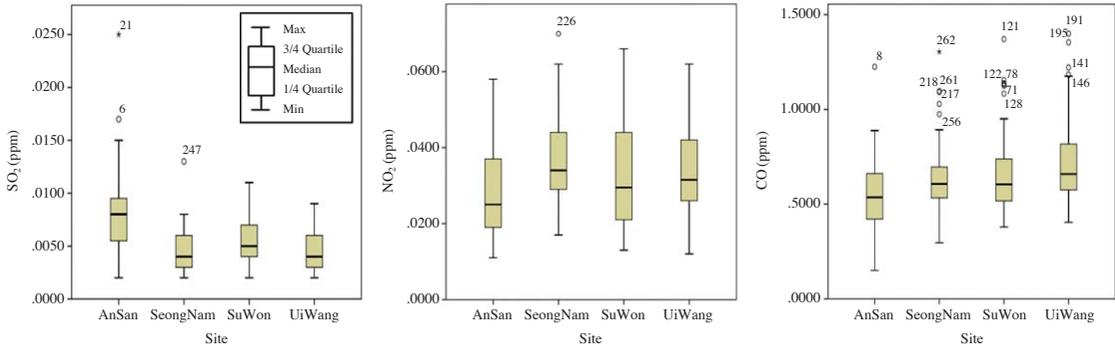


Fig. 2. Concentration distribution of gaseous pollutants by site.

Table 3. Weather condition and mean concentrations of air pollutants (2013. 2~2014. 3).

| Site | | SO ₂ (ppm) | NO ₂ (ppm) | CO (ppm) | WIND (m/sec) | TEMP (°C) | RH (%) |
|----------|------|-----------------------|-----------------------|----------|--------------|-----------|--------|
| Ansan | Mean | 0.008 | 0.029 | 0.549 | 1.6 | 13.2 | 50.7 |
| | SD | 0.004 | 0.013 | 0.191 | 0.5 | 11.4 | 16.2 |
| Suwon | Mean | 0.006 | 0.033 | 0.660 | 1.9 | 11.6 | 54.4 |
| | SD | 0.002 | 0.014 | 0.213 | 0.7 | 10.8 | 17.0 |
| Uiwang | Mean | 0.005 | 0.033 | 0.722 | 1.6 | 11.8 | 56.3 |
| | SD | 0.002 | 0.012 | 0.208 | 0.5 | 10.9 | 15.5 |
| Seongnam | Mean | 0.005 | 0.036 | 0.636 | 1.3 | 12.4 | 56.0 |
| | SD | 0.002 | 0.012 | 0.176 | 0.7 | 10.7 | 17.5 |

3. 2 PM₁₀과 중금속 농도분포 특성

3. 2. 1 지역별 PM₁₀과 중금속 농도분포

그림 3은 PM₁₀과 중금속의 지역별 농도분포를 최댓값/최소값, 4분위수, Median을 나타낸 상자도표이다. 대기오염물질은 지역, 계절, 기상요인, 점오염원 등에 의해 이상값들이 많이 측정되어 본 연구에서는 Median으로 평가하였다. 조사지역의 PM₁₀ 농도범위는 15~176 µg/m³으로 나타났고, 지역별 PM₁₀ Median은 공단지역인 안산이 47 µg/m³으로 주거지역인 수원 40 µg/m³, 의왕 42 µg/m³, 공단지역인 성남 44 µg/m³보다 조금 높게 나타났으며, 성남은 주거지역 수준의 농도를 보이고 있다. 이는 성남 측정장이 1990년에 용도지역을 공업지역으로 분류되었으나 현 상황은 대기오염 배출원인 공단은 거의 이전을 하였고 현재는 주로 아파트형 공장이 대부분인 관계로 공업지역으로서의 특성이 없어진 상태로 추후 중금속 측정망의 개편시 고려해야 할 대상지역으로 판단되고 있다.

중금속 항목별 Median은 공단지역인 안산이 Pb 0.068 µg/m³, Cu 0.071 µg/m³, Ni 0.007 µg/m³으로 주거지역인 수원, 의왕, 성남보다 Cu 3.2~4.5배, Pb 1.9~2.2배, Ni 1.7~2.6배 높았으나, Fe, Mn, Cr, Cd는 1.2~1.5배로 다소 높게 나타났고 As는 지역 간 농도차가 거의 없는 것으로 나타났다. Cu가 다른 항목보다 지역적으로 큰 차이를 보였는데 이는 서울시 7개 관측점을 중심으로 한 중금속 성분의 공간적 농도분포 특성에서 Cu가 다른 중금속에 비해 공간적 가변성이 두드러진다는 연구결과와 일치하는 것으로 나타났다(Choi and Kim, 2003). 또한 지역별 중금속 항목별 농도분포를 비교해 보면 수원, 의왕, 성남 지역은 Fe>Pb>Cu>Mn>Cr>Ni>As>Cd 순으로 나타났으나, 안산지역은 Fe>Cu>Pb>Mn>Cr>Ni>As>Cd 순으로 다르게 나타났는데, 그 원인은 철강, 철합금, 도금공장 등 중소기업 공장들이 산재하고 있어 주거지역과는 다른 특성을 보인 것으로 판단된다. 수원, 성남, 의왕 지역은 Na and Lee (2000) 측정한

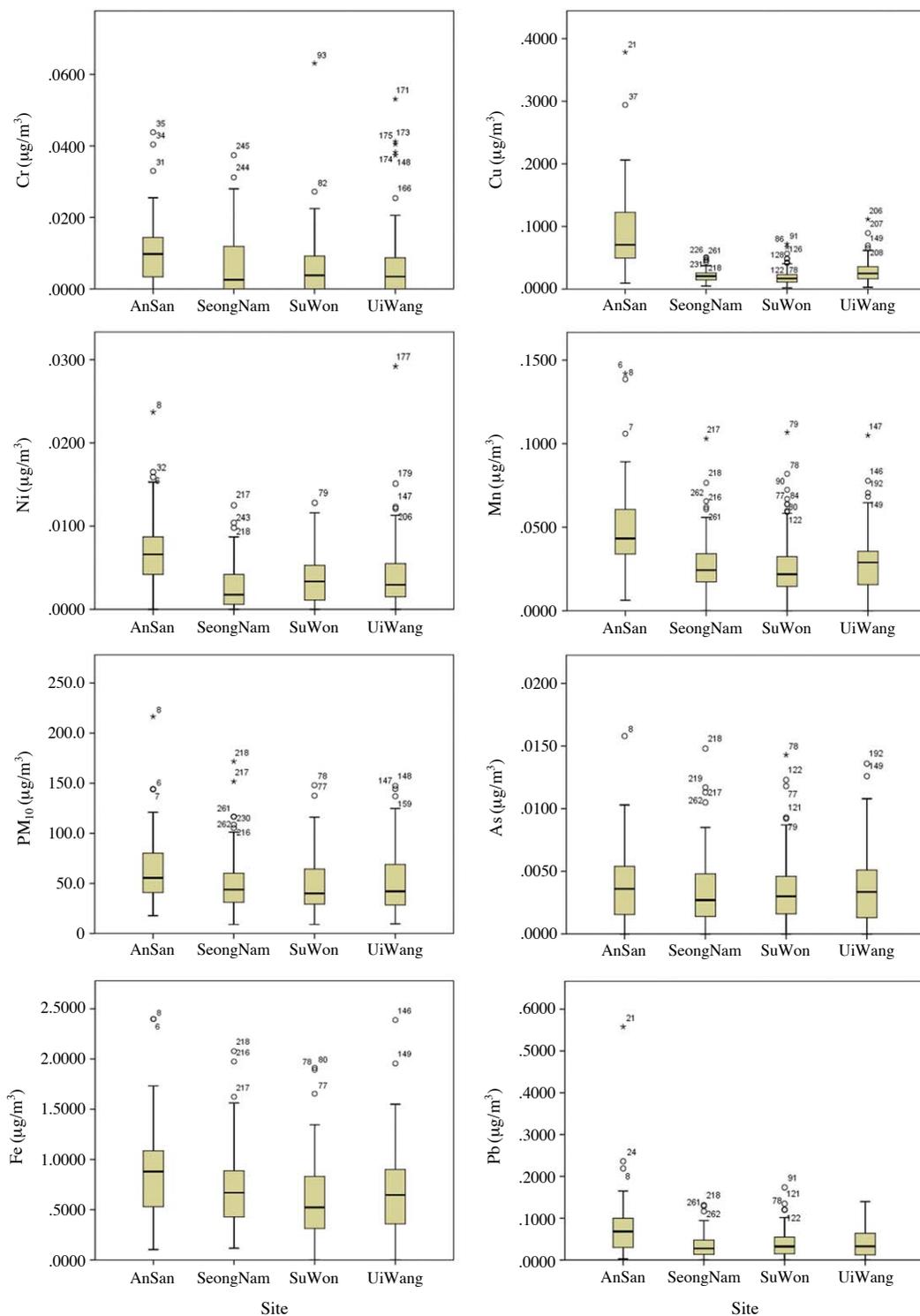


Fig. 3. Concentration distribution of PM₁₀ and heavy metals by site.

결과와 같았으나, 안산지역은 춘천지역 대기 중 중금속 농도 분포인 $Fe > Cu > Pb$ 와 같은 경향으로 나타났다 (Lim *et al.*, 2006).

3.2.2 월별 PM_{10} , 중금속 농도변화

그림 4는 PM_{10} 과 중금속의 월별 농도를 나타낸 것으로 계절별 특성을 분석한 결과 겨울, 봄철(12~5월)의 PM_{10} Median은 $55 \mu g/m^3$ 이고 여름, 가을(6~11월) Median은 $32 \mu g/m^3$ 으로 겨울, 봄철이 1.7배 높은 것으로 나타났다.

또한 중금속 항목별 농도변화를 보면 겨울, 봄철(12~5월) Pb, Fe, As의 Median은 $0.053 \mu g/m^3$, $0.848 \mu g/m^3$, $0.0044 \mu g/m^3$ 으로 여름, 가을철(6~11월) Median은 Pb $0.015 \mu g/m^3$, Fe $0.435 \mu g/m^3$, As $0.0013 \mu g/m^3$ 으로 Pb 3.5배, Fe 1.9배, As 3.4배 높게 나타났다. 그러나 Cu, Mn, Ni은 큰 차이가 없었으며 Cr은 오히려 여름, 가을철(6~11월)이 조금 높은 것으로 나타났다. 이와 같이 겨울, 봄철에 Pb, Fe, As이 고농도를 보인 것은 화석연료 사용증가와 봄철 황사의 영향으로 유입되는 오염물질이 원인으로 사료되고, 여름, 가을철은 강수에 의한 세정효과(washout)로 인해 낮게 나타난 것으로 판단된다. 또한 Cu, Cr, Ni 측정값은 전체의 기간에서 고농도 구간의 상위값 이상치(상자도표의 “°”, “*”)가 많이 나타나고 있음을 볼 수 있는데 이는 점오염원에 의한 일시적 현상으로 해석된다. 중금속 항목의 월별 농도변화 특성을 보면 Fe, Mn, As는 항목 간 비슷한 추세를 보였고 특히 3월과 12월에 농도변화가 유사 하였으며, Pb와 Cu는 연중 농도분포가 비슷한 추세로 나타났고, Cr, Cd는 9~12월에 아주 낮은 농도로 나타나 오염 배출원이 비슷하고 항목 간 상관성이 있을 것으로 사료된다. 또한 중금속 항목의 시·공간적 특성을 보면 Pb, As, Fe은 시간적(계절적) 특성에 영향을 받으나 Cu, Ni은 공간적(지역적) 특성에 더 영향을 받는 것으로 나타났다.

3.3 PM_{10} , 중금속 상관분석 및 회귀분석

3.3.1 상관분석

PM_{10} 과 중금속 오염도는 기상인자, 점오염원에서 배출되는 가스상 오염물질과 지역적, 계절적 특성 등 여러 가지 요인에 의해 오염도가 달라지므로 본 연구에서는 기상인자, 가스상 오염물질과 PM_{10} , 중금속

등 측정항목 간 상관성을 SPSS (Ver 18.0) 통계프로그램의 Pearson correlation analysis를 실시하였으며, 그 결과를 표 4, 5에 나타내었다. 표 4를 보면 PM_{10} 과 Mn의 상관계수가 0.82 ($p < 0.01$)로 가장 높은 상관성을 보였고, As (0.78), Fe (0.77), Ni (0.61), Pb (0.60) 항목과도 상관성이 높은 것으로 나타났다. 또한 월별 농도변화 특성이 비슷하였던 Fe과 Mn 0.82 ($p < 0.01$), Fe과 As 0.78 ($p < 0.01$)로 높은 상관관계를 보였고, Pb와 Cu 0.65 ($p < 0.01$)도 상관성이 높았다. 그러나 여름철에 가장 높은 농도를 보였던 Cr과 연중 저농도로 나타난 Cd는 상관성이 낮은 것으로 나타났다.

표 5는 기상인자, 가스상 오염물질과 PM_{10} , 중금속 상관분석 나타낸 것으로 가스상 오염물질인 SO_2 와 Pb는 0.66 ($p < 0.01$), CO는 PM_{10} 과 0.62 ($p < 0.01$)로 상관성이 높게 나타났고, 특히 SO_2 는 Cr을 제외한 모든 중금속 항목과 유의한 상관성을 보여 주었다. 기상인자인 풍속과 기온은 중금속 항목과 상관성 없었으며 특히 기온은 As (-0.36), Fe (-0.29), PM_{10} (-0.13) 등과 풍속은 PM_{10} (-0.05), Cu, Pb 항목과 음의 상관성을 보였다. 상대습도는 상관성이 낮은 것으로 나타났다.

3.3.2 회귀분석

상관분석결과(표 5) 가스상물질과 PM_{10} , 중금속과의 상관성이 있는 것으로 나타나 이에 대한 인과관계와 인위적 오염원에 대한 영향을 알아보고자 회귀분석을 실시하였다. 본 연구에서는 중속변수와 둘 이상의 독립변수를 이용하므로 다중선형회귀분석법을 이용하여 회귀식을 도출하였다. 다중선형 회귀식은 아래의 식(1)과 같이 나타낸다. 계수(β)의 추정은 잔차의 최소제곱법에 의해 구해진다.

독립성 검정을 위해 D-W (Durbin-Watson) 검정과 독립변수 간의 다중공선성(collinearity) 검정을 실시한다. 다중공선성은 회귀식의 독립변수 사이의 공선성으로 인하여 발생하는 분산값의 팽창 정도를 측정하는 분산팽창요인(VIF; Variance inflation factor)을 구하여 평가하며, VIF 값이 10 이상이면 다중공선성을 의심한다.

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_p x_p + e_i, e_i \sim N(0, \sigma^2) \quad (1)$$

여기서

y_i : i 번째 종속변수의 값

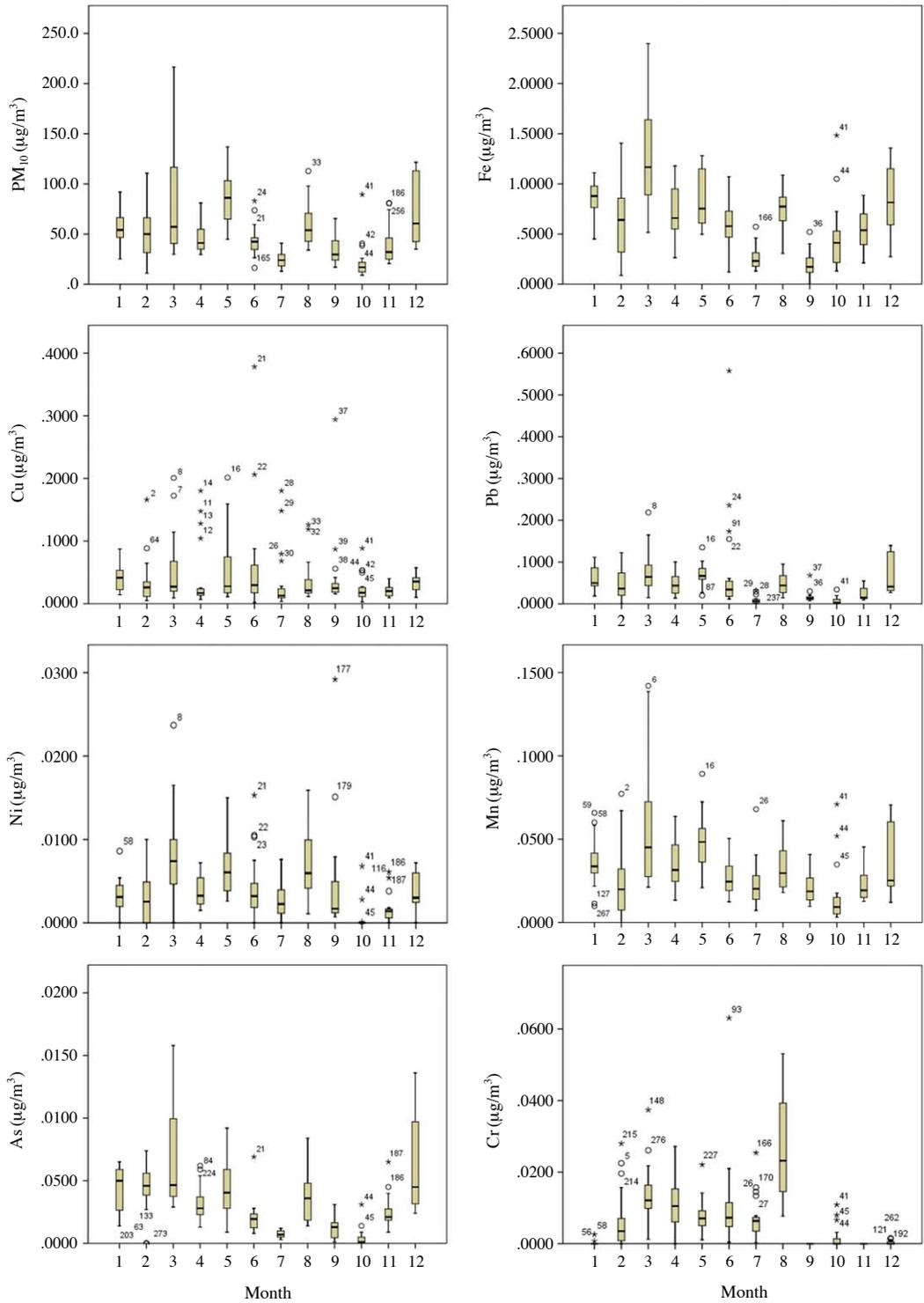


Fig. 4. Concentration distribution of PM₁₀ and heavy metals by month.

Table 4. Pearson correlation coefficient among PM₁₀ and heavy metals.

| | PM ₁₀ | Pb | Cd | Cr | Cu | Mn | Fe | Ni | As |
|------------------|------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----|
| PM ₁₀ | 1 | | | | | | | | |
| Pb | 0.60** | 1 | | | | | | | |
| Cd | 0.41** | 0.49** | 1 | | | | | | |
| Cr | 0.28** | 0.22** | 0.29** | 1 | | | | | |
| Cu | 0.33** | 0.65** | 0.43** | 0.16** | 1 | | | | |
| Mn | 0.82** | 0.60** | 0.49** | 0.30** | 0.45** | 1 | | | |
| Fe | 0.77** | 0.54** | 0.44** | 0.38** | 0.28** | 0.82** | 1 | | |
| Ni | 0.61** | 0.57** | 0.53** | 0.34** | 0.53** | 0.70** | 0.52** | 1 | |
| As | 0.78** | 0.60** | 0.42** | 0.18** | 0.22** | 0.71** | 0.75** | 0.51** | 1 |

** : Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed)

Table 5. Results of correlation analysis for meteorological factors, gaseous pollutants, PM₁₀ and heavy metals.

| | PM ₁₀ | Pb | Cd | Cr | Cu | Mn | Fe | Ni | As |
|-----------------|------------------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|---------|
| SO ₂ | 0.45** | 0.66** | 0.29** | 0.08 | 0.59** | 0.50* | 0.39** | 0.44** | 0.38** |
| NO | 0.45** | 0.30** | -0.00 | -0.06 | 0.06 | 0.23** | 0.37** | 0.07 | 0.29** |
| CO | 0.62** | 0.35** | 0.04 | -0.05 | 0.01 | 0.36* | 0.39** | 0.22** | 0.54** |
| WS | -0.05 | -0.01 | 0.09 | 0.04 | -0.03 | 0.08 | 0.11 | 0.07 | 0.18** |
| TEMP | -0.13* | -0.14* | -0.07 | 0.25** | 0.06 | -0.10 | -0.29** | 0.06 | -0.36** |
| RH | 0.11 | 0.16 | 0.32 | 0.05 | 0.28 | 0.10 | 0.32 | 0.06 | 0.07 |

* : Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed)

** : Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed)

β_0 : 회귀식의 절편, 상수항

β_p : 선형회귀계수

x_p : 독립변수의 값

e_i : i 번째 측정된 종속변수의 오차항

σ^2 : e_i 의 분산

회귀식의 진단방법으로는 유의성을 검정하는 F-검정과 선형성을 설명하는 결정계수값 (R^2) 통해 회귀식의 유의성을 검증하였다. 식 (2, 3)의 F-검정은 회귀식에 의해 설명되는 변동(MSR)과 회귀식에 의해 설명되지 않는 변동(MSE)의 비로서 그 값이 커질수록 회귀식의 신뢰도가 높고, 유의확률 (p -값)이 유의수준 0.05보다 작을 때 회귀식은 유의하다고 평가한다.

$$\sum_{i=0}^{i=n} (y_i - \bar{y})^2 = \sum_{i=0}^{i=n} (\hat{y}_i - \bar{y})^2 + \sum_{i=0}^{i=n} (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (2)$$

$$SST = SSR + SSE$$

$$F = \frac{\text{회귀선에 의해 설명되는 변동}}{\text{회귀선에 의해 설명되지 않는 변동}} = \frac{MSR}{MSE} = \frac{(n-p-1) \times SSR}{p \times SSE} \quad (3)$$

여기서 MSR: mean square regression

MSE: mean square error

SST: sum of square total

SSR: sum of square regression

SSE: sum of square error

n : degree of freedom

p : No. of independent variables in regression model

다중선형회귀분석 결과 회귀모형의 계수값과 검정값은 표 6, 7과 같이 구해졌다. PM₁₀는 CO, SO₂, RH, WS를 Pb는 CO, SO₂를 독립변수로 하는 회귀식이 도출되었다. 회귀식의 유의성을 설명하는 F-value 값이 PM₁₀은 83.336, Pb는 120.0으로 유의한 수준이었으며, 선형성을 설명하는 결정계수 (R^2)가 PM₁₀은 0.487, Pb는 0.476으로 그 의미는 추정된 회귀식으로부터 PM₁₀ 농도의 48.7%, Pb 농도의 47.6%를 설명할 수 있다는 것을 의미한다. PM₁₀과 Pb의 회귀모형식을 표현하면 식 (4)와 같이 표현된다.

Table 6. Coefficients of independent variables in regression model for PM₁₀ and heavy metals (No. 270).

| Regression model | Constant | SO ₂ (ppm) | CO (ppm) | Temp (°C) | RH (%) | WS (m/s) |
|---------------------------------------|----------|-----------------------|----------|-----------|--------|----------|
| PM ₁₀ (µg/m ³) | -33.935 | 3549.313 | 92.190 | - | -0.463 | 4.996 |
| Pb (µg/m ³) | -0.046 | 10.658 | 0.051 | - | - | - |
| Cu (µg/m ³) | -0.12 | 10.419 | - | - | - | - |
| Mn (µg/m ³) | -0.016 | 3.302 | 0.034 | - | - | 0.005 |
| Fe (µg/m ³) | 0.527 | 37.474 | 0.822 | - | -0.010 | 0.207 |
| Ni (µg/m ³) | -0.002 | 0.616 | 0.003 | - | - | - |
| As (µg/m ³) | -0.006 | 0.234 | 0.009 | - | - | - |

Table 7. Assessment results of regression model for PM₁₀ and heavy metals.

| Regression model | F-test | | R ² | D-W | VIF |
|------------------|---------|---------|----------------|-------|-------|
| | F-value | p-value | | | |
| PM ₁₀ | 83.336 | 0.000 | 0.487 | 0.779 | 1.181 |
| Pb | 120.020 | 0.000 | 0.476 | 1.208 | 1.058 |
| Cu | 55.389 | 0.000 | 0.387 | 1.303 | 1.093 |
| Mn | 43.869 | 0.000 | 0.334 | 0.978 | 1.181 |
| Fe | 56.044 | 0.000 | 0.390 | 0.996 | 1.092 |
| Ni | 28.399 | 0.000 | 0.245 | 1.456 | 1.093 |
| As | 75.146 | 0.000 | 0.462 | 1.319 | 1.101 |

$$PM_{10} (\mu g/m^3) = -33.935 + 3549.313 \times SO_2 (ppm) + 92.190 \times CO (ppm) - 0.463 \times RH (\%) + 4.996 \times WS \quad (4)$$

$$Pb (\mu g/m^3) = -0.046 + 10.658 \times SO_2 (ppm) + 0.051 \times CO (ppm) \quad (5)$$

표 6 회귀식의 독립변수별 계수값을 각각의 종속 변수의 Median값으로 나누어 표준화된 독립변수 계 수값으로 종속변수에 영향을 미치는 정도를 비교하 여 평가한 결과 PM₁₀, Fe, Mn은 특징적으로 CO와 풍속에 영향을 받고, Pb, Cu, Ni, As는 SO₂가 주요인 으로 나타났다. 즉 PM₁₀, Fe, Mn 농도는 화석연료의 불완전연소와 바람으로 인한 토양의 비산으로부터 배출되는 CO, WS에 영향을 받고, Pb, Cu, Ni, As 농 도는 화석연료 연소와 금속용융, 황산제조, 석유정제 등 산업공정에서 배출되는 SO₂ 농도에 더 큰 인과관 계가 있는 것으로 평가되었다.

표 7은 회귀식의 검정값을 나타낸 것으로 시간 변 화에 따른 자기상관을 나타내는 D-W값이 “0”, “4” 에 가까우면 자기상관이 존재하여 시계열분석을 실 시해야한다. 본 연구에서는 PM₁₀ (0.779), Fe (0.996), Mn (0.978) 등 항목이 1 이하로 자기상관이 존재하여

시계열분석이 필요한 것으로 나타났는데 시계열 특 성을 분석하기 위해서는 장기적인 조사 자료를 확보 하여 평가해야 한다. 향후에 경기도에서 운영하는 중 금속측정망 (PM₁₀)의 장기간의 조사 자료가 축적되 면 시계열분석 통한 좀 더 정확한 중금속 농도변화 를 평가할 수 있을 것으로 사료된다. 또한 VIF값이 10 이상이면 공선성 의심되나 본 연구에서는 2 이하 로 독립변수 간 다중공선성이 존재하지 않았다.

4. 결 론

본 연구는 2013년 2월부터 2014년 3월까지 경기 도내 중금속 측정망에서 측정한 미세먼지와 중금속 오염도를 지역별, 계절별 농도분포 특성을 평가하고, 다변량 통계기법을 이용하여 기상 및 가스상 오염물 질과의 통계분석을 실시하여 중금속 발생특성과 오 염도 예측을 위한 회귀모형을 도출하고자 하였다.

1. 기상항목은 지역별 차이가 크지 않았으며, 주 풍 향은 남동풍과 서남서풍 이었다. 가스상 오염물질 중 SO₂는 공단이 있는 안산지역이 주거지역보다 약 1.6 배 정도 높았으나, NO₂, CO는 주거지역이 조금 높은 것으로 조사되었다.

2. 지역별 PM₁₀ Median은 공단지역인 안산이 47 µg/m³으로 주거지역인 수원 40 µg/m³, 의왕 42 µg/m³ 보다 조금 높게 나타났다. 중금속항목별 Median은 공 단지역인 안산이 Pb 0.068 µg/m³, Cu 0.071 µg/m³, Ni 0.007 µg/m³으로 주거지역인 수원, 의왕지역과 성남지 역보다 Cu 3.2~4.5배, Pb 1.9~2.2배, Ni 1.7~2.6배 높았으나 As는 지역 간 농도차가 거의 없는 것으로 나타났다.

3. PM₁₀과 중금속의 계절적 변화특성을 보면 겨울, 봄철 (12~5월)의 PM₁₀, Pb, Fe, As의 Median은 55

$\mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.053 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.848 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.0044 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 여름, 가을(6~11월) Median보다 PM_{10} 은 1.7배, Pb 3.5배, Fe 1.9배, As 3.4배 높게 것으로 나타났다. Pb, As, Fe은 시간(계절) 요인에 따라 농도차이가 컸고, Cu, Ni은 공간(지역) 요인에 의한 농도 차이가 큰 것으로 평가되었으며, 상위농도의 이상값 출현도 많았다.

4. PM_{10} 과 중금속항목 상관분석 결과 PM_{10} 과 Mn이 0.82 ($p < 0.01$), Fe과 Mn이 0.82 ($p < 0.01$)로 높은 상관성을 보였으나, 여름철에 가장 높은 농도를 보였던 Cr은 상관성은 낮게 나타났다. 기상인자와 가스상 오염물질과의 상관성은 SO_2 와 Pb는 0.66 ($p < 0.01$), CO는 PM_{10} 과 0.62 ($p < 0.01$)로 상관성이 높게 나타났고 특히 SO_2 는 모든 중금속 항목(Cr 제외)과 유의한 상관성을 보여 주었다.

5. PM_{10} , Pb, Cu, Cr, As, Ni, Fe, Mn은 기상항목(풍속, 습도)과 SO_2 , CO를 독립변수로 한 다중선형회귀모형을 도출하였다. 회귀모형에서 독립변수 SO_2 는 모든 종속변수와 인과관계가 있었고, PM_{10} , Fe, Mn은 특징적으로 CO와 풍속에 영향을 받고 있으며, Pb, Cu, Ni, As는 SO_2 가 주요인으로 나타났다.

References

- Choi, B.J. and K.H. Kim (2003) The Metallic composition of airborne particles in seven location of Seoul city, Journal of Analytical Science & Technology, 16(2), 143-151. (in Korean with English abstract)
- Choi, G.H., K.H. Kim, C.H. Kang, and J.H. Lee (2003) 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. (in Korean with English abstract)
- Gyeonggi-do Institute of Health & Environment (2012) Gyeonggi-do Air Pollution Evaluation Report.
- Kim, B.H. and D.S. Kim (2000) Studies on the Environmental Behaviors of Ambient $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} in Suwon Area, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 16(2), 89-101. (in Korean with English abstract)
- Kim, H.T., Y.S. Chun, and S.S. Lee (2004) Characteristics of TSP and PM_{10} Concentrations in Seoul in the Spring-time of 2003, Korean Journal of the Atmospheric Sciences, 40(5), 587-602. (in Korean with English abstract)
- Lim, B.C., W.J. Weon, and S.S. Woo (2006) The Specific Character of Temporal and Spatial Distribution by Total Suspended Particle (TSP) and Heavy Metals in Chuncheon Air Quality, Report of Gangwon-do Institute of Health & Environment, 17, 74-87. (in Korean with English abstract)
- Liu, C. and M.h. Smith (1995) Urban and rural aerosol particle properties, Journal of Atmospheric Environment, 29, 3293-3301.
- Na, D.J. and B.K. Lee (2000) A Study on the Characteristics of PM_{10} and Air-borne Metallic Elements Produced in the industrial City, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 16(1), 23-35. (in Korean with English abstract)
- Rebert, J.F., P.R. Welsing, and C. Rozzi (1994) PM_{10} and ozone control strategy to improve visibility in the Los Angeles basin, Journal of Atmospheric Environment, 19, 539-545.