

ORIGINAL ARTICLE

인자분석을 이용한 광주지역 미세먼지(PM₁₀)의 특성 연구

이세행* · 서광엽 · 윤상훈 · 양윤철 · 김선정 · 조영관 · 배석진

광주광역시보건환경연구원 환경연구부

Characteristics of PM₁₀ in Gwangju Using Factor Analysis

Se-Haeng Lee*, Gwang-yeop Seo, Sang-Hoon Yoon, Yoon-Cheol Yang, Sun-Jung Kim,
Young-gwan Cho, Seok-Jin Bae

Gwanju Metropolitan Health & Environment Research Institute Department of Environmental Engineering, Gwangju
61986, Korea

Abstract

The objective of this study was to estimate air quality trends in the study area by surveying monthly and seasonal concentration trends. To do this, the mass concentration of PM₁₀ samples and the metals, ions, and total carbon in the PM₁₀ were analyzed. The mean concentration of PM₁₀ was 33.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. The composition of PM₁₀ was 39.2% ionic species, 5.1% metallic species, and 26.6% carbonic species (EC and OC). Ionic species, especially sulfate, ammonium, and nitrate, were the most abundant in the PM₁₀ and had a high correlation coefficient with PM₁₀. Seasonal variation of PM₁₀ showed a similar pattern to those of ionic and metallic species, with high concentration during the winter and spring seasons. PM₁₀ showed high correlation with the ionic species NO_3^- and NH_4^+ . In addition, NH_4^+ was highly correlated with SO_4^{2-} and NO_3^- . We obtained four factors through factor analysis and determined the pollution sources using the United States Environmental Protection Agency (U.S. EPA) pollution profile. The first factor accounted for 51.1% of PM₁₀ from complex sources, that is, soil, motor vehicles, and secondary particles; the second factor indicated marine sources; the third factor, industry-related sources; and the last factor, heating-related sources. However, the pollution profile used in this study may be somewhat different from the actual situation in Korea because it was from US EPA. Therefore, to more accurately estimate the pollutants present, it is necessary to create a pollution profile for Korea.

Key words : PM₁₀, Ionic species, Metallic species, Factor analysis, Pollution profile

1. 서론

최근 세계 각국에서는 대기오염물질을 저감시키기 위해 많은 노력을 하고 있지만 미세먼지 등 각종 대기 오염물질로 인해 대기의 질은 지속적으로 악화되고

있다. 우리나라의 경우도 끊임없는 대기질 개선의 노력으로 SO₂, CO, Pb은 매년 개선되고 있으나, 미세먼지, O₃, NO₂의 경우는 조금씩 악화되는 경향을 보이고 있다. 특히 미세먼지 오염도는 2000년대 이후 지속적으로 개선되는 추세였으나, 2013년부터 정체됐고

Received 24 January, 2018; Revised 17 February, 2018;

Accepted 23 March, 2018

*Corresponding author: Se-Haeng Lee, Gwangju Metropolitan Health & Environment Research Institute, Gwangju 61986, Korea
Phone : +82-62-613-7581
E-mail : sehang@korea.kr

The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

국민들이 실생활에서 체감하는 오염도는 오히려 높아지고 있다(Lee et al., 2008; Park et al., 2010).

미세먼지는 크기가 작아 공기 중에 떠다니는 부유물질로 여러 가지 복합적인 성분으로 구성되어 있다. 주로 연소, 자동차 배기 등이 미세먼지 발생의 주원인으로 지적되고 있으며, 인체의 건강에 미치는 영향은 미세먼지 입자의 크기와 화학적 조성이 어떠한가에 따라 달라지는 것으로 알려져 있다. 특히 입자의 크기가 10 μm 이하의 작은 먼지 입자들은 폐와 혈관에 유입될 수 있고, 심한 경우 사망에 이르도록 하는 중요한 원인이 될 수 있다고 알려져 있다(Hyon, 2015).

또한 미세먼지는 오염원에서 직접 배출하는 1차 미세먼지와 대기 중에서 응집, 응축, 가스상 물질의 화학반응에 의해 생성된 2차 미세먼지로 나누어지며, 이 2차 미세먼지가 인체 및 시정에 직접적인 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 도시 대기 중에 2차 미세먼지가 상당량을 차지하고 있으며, 2차 미세먼지의 30%에서 60% 정도가 이온성분으로 구성되어 있다(Hu et al., 2002; Kang et al., 2004; Park et al., 2006; Won et al., 2010; Lee et al., 2015). 2차 미세먼지는 황산염, 질산염, 암모늄염이 주로 차지하는 것으로 알려져 있으며, 황산이온, 질산이온, 암모늄이온의 배출로 인해 형성된다고 보고되고 있다. 이온성분 이외에도 미세먼지에는 금속성분, 탄소성분이 함유되어 있으며, 이러한 화학적 조성을 이용하여 발생원 추적 및 저감방안 도출에 활용하고 있다(Yao et al., 2002).

그러나 그동안 국내 연구의 대부분 분석항목이 원소성분이나 이온성분 등 제한적으로 이루어져 미세먼지의 정확한 구성을 평가하기가 어려웠다. 이에 국내 및 국제적으로 미세먼지에 대한 정확한 구성성분을 규명하기 위해 다양한 관점에서의 연구를 진행하고 있으며, 미세먼지를 효율적으로 제어하고 관리방안을 마련하기 위해서는 미세먼지가 어디에서 오는지, 어떻게 생성하는지 등을 상세히 알아야 적절한 대책을 강구할 수 있다. 따라서 미세먼지에 대한 중량농도 뿐만 아니라 구성성분에 대한 정성·정량분석이 선행되어야 하며, 이를 위해 수용체(receptor)에서 오염물질의 물리·화학적 특성을 분석한 후 오염원의 확인 및 오염원의 정량적 기여도를 평가하는 수용모델을 이용한 연구가 늘어나고 있는 추세이다(Hwang et al.,

2001; Park et al., 2010; Hwang et al., 2013).

이에 본 연구에서는 미세먼지(PM₁₀)의 구성 성분별 농도, 배출원 및 배출원의 기여도 등을 파악하고 정량하기 위해 주기적으로 시료 채취·분석하여 미세먼지 구성성분의 농도 변화 추이를 알아보고, 분석 자료를 바탕으로 인자분석을 실시하여 미세먼지 농도 변화에 미치는 주요 영향인자를 파악하고 발생원을 추정하고자 하였다.

2. 실험 및 방법

2.1. 채취지점 및 방법

본 연구에서는 건국동 테크노파크 옥상과 농성동 종합대기측정소 옥상, 두암동 주민센터 옥상에서 미세먼지를 채취하였으며, 이 세 지점은 대기오염물질과 기상을 상시 측정하는 대기오염자동측정소로 Fig. 1과 같다. 건국동 지점은 광주의 북쪽에 있으며, 연구시설과 침단시설을 갖춘 공장이 밀집되어 있는 공업지역으로 동쪽 1 km 지점에는 광주 담양간 빛고을대로 6차선 도로가 놓여 있다. 광주의 중심에 위치한 농성동 지점은 주거지역으로 주변에 공원이 있으며, 북서쪽으로 아파트 신축 공사가 진행중에 있다. 두암동은 광주의 동쪽에 있으며, 주거지역으로 동쪽 0.6 km 부근에는 제2순환도로, 북서쪽 1.1 km 부근에는 호남고속도로가 있다.



Fig. 1. The locations of the sampling sites in Geonguk (a), Nongsung (b) and Duam (c).

시료채취는 광주지역 도시대기측정소 3개지점(건국동, 농성동, 두암동)을 대상으로 2016년 9월부터 2017년 8월까지 매월 3일-5일 연속으로 채취하였으며,

Table 1. Sampling and analytical methods

Classification	Measuring equipment	Chemical components
Sampling	High Volume air sampler (HVS16, MCZ)	PM ₁₀
Ion analysis	Ion Chromatography (850 Professional IC, Metrohm)	- Anion : NO ₃ , SO ₄ ²⁻ , Cl ⁻ - Cation : NH ₄ ⁺ , Ca ²⁺ , K ⁺ , Na ⁺ , Mg ²⁺
Inorganic analysis	Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometer (Optima 8300, Perkinelmer)	Fe, Al, Zn, Pb, Mn, Cu, V, Ni, As, Cr, Mg, K, Na
Carbon analysis	Thermal Optical Transmittance (Semi-continuous OCEC/Model 4, Sunset)	- OC (organic carbon) - EC (elemental carbon)

채취 시간은 당일 00:00부터 익일 00:00까지 24시간 연속채취하였다. 채취한 시료는 현장에서 PTFE (polytetrafluoroethylene) 재질의 테이프를 밀봉한 다음 실험실로 운반 후 항온 항습 데시케이터에 시료를 24시간 동안 보관한 뒤 분석을 실시하였다.

2.2. 분석방법

미세먼지(PM₁₀)는 고용량 시료채취장치(high volume air sampler)를 사용하여 평균 1.13 m³/min의 유량으로 24시간 시료채취를 하였으며, 시료채취에 사용된 여지는 수정섬유여지(quartz micro fiber filter, QM-A)를 사용하였다. 여지는 시료채취 전후 3일간 항온, 항습상태의 데시케이터내에 보관하여 항량시킨 후 0.01 mg의 감도를 갖는 전자저울로 칭량하였다. 칭량 전후의 무게차를 미세먼지의 무게로 간주하였으며 이를 유량으로 나누어 미세먼지 농도를 계산하였다.

미세먼지(PM₁₀)을 채취한 여지는 금속성분 및 이온성분을 분석하기 위해 여지를 각각 1/4로 절취하여 금속성분과 이온성분을 분석하였으며, 탄소성분은 900℃에서 열처리된 석영필터를 사용하여 탄소성분을 분석하였다.

Table 1에 시료채취방법 및 주요 분석기기를 간략히 나타내었으며, 미세먼지 중 이온성분을 분석하기 위해 여지를 추출용기에 넣고 초순수 30 mL를 가한 후 초음파 추출기(model 324149, Bo Sung Ultrasonics Co.)에 넣어 2시간 동안 추출하였다. 추출한 용액은 여과지(5A)와 멤브레인 필터(13 mm syringe filter with 0.45 µm PVDF)로 여과한 후 IC (model 850 Professional IC, Metrohm)를 이용하여 5개의 양이온(NH₄⁺, Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺)과 3개의 음이온

(SO₄²⁻, NO₃⁻, Cl⁻)을 분석하였다.

금속성분은 대기오염공정시험기준 환경대기 중 금속화합물-유도결합플라즈마 분광법으로 분석하였으며, 전처리방법은 질산-염산 혼합액에 의한 초음파추출법으로 1.03M 질산과 2.23M 염산의 혼합액(1:1)을 30 mL 가한 다음 초음파 추출기에 2시간 동안 추출하였다. 추출한 용액은 여과지(5A)로 여과한 후 ICP-AES (model Optima 8300, Perkinelmer)을 이용하여, 총 13개의 금속성분(Fe, Al, Zn, Pb, Mn, Cu, V, Ni, As, Cr, Mg, K, Na)을 분석하였다.

탄소성분은 열광학적 투과도법(Thermal Optical Transmission : TOT)으로써 NIOSH (national institute for occupational safety and health) Method 5040 Parameter를 사용한 OC/EC Analyzer (model semi-continuous OCEC/model 4, Sunset)를 이용하여 OC와 EC의 농도를 분석하였다.

2.3. 자료분석

본 연구에서는 미세먼지의 측정지점별, 월별 농도를 산출하여 평균, 표준편차, 최소값, 최대값 등을 기술통계량을 산출하였으며, 각 성분별 농도를 산출하여 함유율, 변화추이를 분석하였다. 또한 미세먼지와 각 성분별 관계를 분석하기 위해 통계프로그램인 SPSS 20.0을 이용해 상관분석, 회귀분석을 실시하였으며, 미세먼지의 오염원을 추정하기 위해 인자분석을 실시하였다.

인자분석법은 분석의 대상이 되는 변수의 수가 많은 경우 이들 사이의 상호 관련성을 이용하여 변수 속에 내재된 인자라고 부르는 소수의 공통적인 새로운 변수를 찾아내어 이들이 지니고 있는 특성으로 전체

자료가 가지고 있는 특성을 설명하고자 하는 통계적 분석방법이다. 주로 복잡하고 방대한 환경자료에 대한 해석에 사용되며, 오염원의 기여도를 정량적으로 추정할 수는 없으나 오염원 분류표(source profile)가 없을 때 오염원의 추정에 이용되는 통계기법으로서 국내 · 외에 보편적으로 사용되고 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 미세먼지 농도 및 구성성분

Table 2는 미세먼지와 이온, 금속, 탄소성분의 각 지점별 농도 분포를 나타낸 것으로 측정기간 중 미세

먼지의 평균농도는 $33.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 이온성분은 $13.306 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 중금속은 $1.737 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 탄소성분은 $9.040 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로, 이온성분은 미세먼지의 39.2%, 중금속은 5.1%, 탄소성분은 26.6% 차지하는 것으로 나타났다. 이는 서울, 인천지역의 PM_{10} 의 성분을 조사한 연구결과와 같이 이온성분이 가장 높은 비중을 차지하고 다음이 탄소, 중금속 순으로 나타났다(Ryu et al., 2008; Park et al., 2010; Lee et al., 2014; Lee et al., 2015).

지점별로 미세먼지와 각 성분의 농도를 살펴보면 건국동은 미세먼지가 $35.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 이온성분이 $12.617 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 중금속은 $1.647 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 탄소성분은 $9.267 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 이온성분은 미세먼지의 35.7%, 중금속은 4.7%,

Table 2. The variation of PM_{10} , ion, metal and carbon in the ambient air

(unit: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Item	Total		Geonguk		Nongsung		Duam		
	Mean±S.D.	Range	Mean±S.D.	Range	Mean±S.D.	Range	Mean±S.D.	Range	
PM_{10}	33.9±17.0	8.2~105.8	35.3±16.1	11.4~100.6	33.2±18.4	8.2~105.8	33.3±16.7	10.1~103.3	
Ion	Cl^-	0.566±0.670	N.D.~2.315	0.598±0.670	0.003~2.248	0.570±0.678	N.D.~2.315	0.530±0.672	N.D.~2.294
	NO_3^-	4.158±5.000	0.014~29.277	3.856±4.750	0.223~24.748	4.514±5.325	0.110~29.277	4.108±4.975	0.014~25.305
	SO_4^{2-}	5.085±3.013	0.208~14.616	4.847±2.730	1.145~12.086	5.439±3.301	1.351~13.455	4.973±3.006	0.208~14.616
	Na^+	0.466±0.345	0.058~1.557	0.446±0.338	0.062~1.537	0.486±0.350	0.058~1.557	0.467±0.352	0.059~1.399
	NH_4^+	2.390±1.613	0.077~9.859	2.257±1.486	0.168~8.461	2.533±1.667	0.302~8.753	2.382±1.698	0.077~9.859
	Total	13.306±8.579	0.419~56.174	12.617±7.901	2.860~47.781	14.261±9.278	3.273~56.174	13.053±8.575	0.419~49.240
Metal	Pb	0.015±0.012	0.001~0.063	0.016±0.011	0.003~0.051	0.016±0.013	0.001~0.063	0.014±0.011	0.001~0.061
	Cr	0.001±0.001	N.D.~0.004	0.001±0.001	N.D.~0.004	0.001±0.001	N.D.~0.004	0.001±0.001	N.D.~0.004
	Cu	0.007±0.007	N.D.~0.038	0.005±0.005	N.D.~0.029	0.008±0.008	N.D.~0.038	0.007±0.007	N.D.~0.037
	Mn	0.013±0.010	N.D.~0.052	0.016±0.011	0.003~0.052	0.014±0.011	N.D.~0.043	0.010±0.007	N.D.~0.034
	Ni	0.001±0.002	N.D.~0.012	0.001±0.001	N.D.~0.005	0.001±0.002	N.D.~0.011	0.001±0.002	N.D.~0.012
	As	0.002±0.002	N.D.~0.016	0.003±0.003	N.D.~0.016	0.001±0.002	N.D.~0.006	0.002±0.002	N.D.~0.006
	Fe	0.363±0.252	0.060~1.258	0.348±0.224	0.073~1.071	0.397±0.286	0.062~1.258	0.345±0.243	0.060~1.168
	Al	0.146±0.157	N.D.~1.034	0.139±0.161	N.D.~0.837	0.164±0.182	0.003~1.034	0.135±0.121	N.D.~0.482
	Ca	0.377±0.367	N.D.~2.981	0.329±0.301	N.D.~1.593	0.449±0.478	0.024~2.981	0.353±0.286	0.018~1.282
	Mg	0.145±0.101	0.022~0.470	0.138±0.099	0.024~0.371	0.156±0.109	0.022~0.470	0.142±0.096	0.033~0.420
	Zn	0.065±0.050	0.002~0.273	0.065±0.048	0.016~0.195	0.065±0.045	0.002~0.199	0.066±0.057	0.005~0.273
	K	0.203±0.108	0.017~0.609	0.207±0.093	0.074~0.488	0.211±0.123	0.017~0.593	0.191±0.107	0.033~0.609
	Ti	0.007±0.007	N.D.~0.039	0.006±0.006	N.D.~0.039	0.008±0.008	N.D.~0.029	0.007±0.006	N.D.~0.023
	V	0.003±0.003	N.D.~0.020	0.003±0.002	N.D.~0.011	0.004±0.004	N.D.~0.020	0.003±0.002	N.D.~0.011
	Total	1.737±1.070	0.391~5.774	1.647±0.963	0.449~4.278	1.904±1.235	0.391~5.774	1.661±0.990	0.397~4.290
Carbon	OC	6.077±2.825	0.132~15.634	6.540±2.849	0.132~13.666	6.085±3.206	1.902~15.634	5.593±2.406	2.209~12.720
	EC	2.963±2.580	0.423~13.364	2.728±2.031	0.423~10.220	2.934±3.030	0.733~13.364	3.232±2.693	0.670~13.199
	Total	9.040±5.139	2.068~28.998	9.267±4.596	2.068~23.886	9.019±6.086	3.160~28.998	8.825±4.876	3.394~25.919

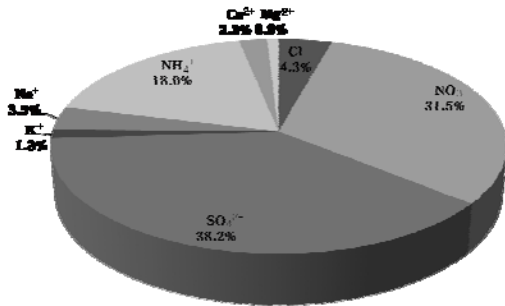


Fig. 2. Composition of ionic species.

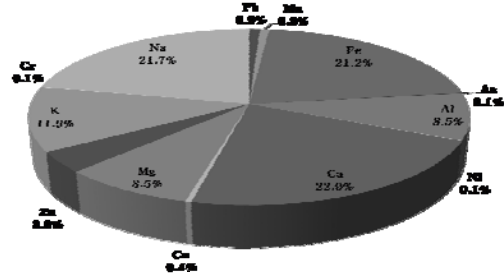


Fig. 3. Composition of metallic species.

탄소성분은 26.2%로 나타났으며, 농성동은 미세먼지가 33.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 이온성분이 14.261 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 중금속은 1.904 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 탄소성분은 9.019 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 이온성분은 미세먼지의 43.0%, 중금속은 5.7%, 탄소성분은 27.2%, 두암동은 미세먼지가 33.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 이온성분이 13.053 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 중금속은 1.661 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 탄소성분은 8.825 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 이온성분은 미세먼지의 39.2%, 중금속은 5.0%, 탄소성분은 26.5%로 나타났다. 미세먼지와 탄소는 건국동이, 이온성분과 중금속은 농성동 지점이 높게 나타났는데, 이는 건국동은 측정지점이 공업지역이며 인접한 도로의 영향으로 미세먼지와 탄소가 높게 나타난 것으로 추정되며, 농성동은 주거지역 중심으로 겨울철 난방과 휘발유, 경유 자동차에 의해 이온성분과 중금속이 높게 나타난 것으로 추정된다.

3.2. 이온성분의 농도분포

미세먼지 중 이온성분은 39.2% 차지하였으며, 이 중 음이온이 29.0%, 양이온이 10.2% 정도 차지하는 것으로 나타났다. 각 이온성분의 농도를 살펴보면, 음이온의 경우 Cl⁻은 0.566 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, NO₃⁻는 4.158 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, SO₄²⁻은 5.085 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타났으며, 양이온의 경우 Na⁺은 0.466 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, NH₄⁺은 2.390 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, K⁺은 0.175 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Ca²⁺은 0.301 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Mg²⁺은 0.125 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타나 음이온 중에는 SO₄²⁻, 양이온 중에는 NH₄⁺가 가장 높은 농도를 나타내었다.

Fig. 2에 나타난 미세먼지를 구성하고 있는 각 이온 물질의 구성비를 살펴보면, SO₄²⁻(38.2%) > NO₃⁻(31.5%) > NH₄⁺(18.0%) > Cl⁻(4.3%) > Na⁺(3.5%) > Ca²⁺(2.3%) > K⁺(1.3%) 순으로 주로 미세먼지 2차 생

성 원인물질이 높은 비율을 차지하고 있어 서울, 인천 등 타 도시지역에서 연구한 결과와도 비슷하게 나타났다(Ryu et al., 2008; Park et al., 2010; Lee et al., 2015).

3.3. 중금속의 농도분포

본 연구에서 미세먼지 중 중금속 성분은 5.1% 차지한 것으로 나타났으나, Si 등 지각 및 토양 구성성분 중 일부 항목을 분석하지 않아 실제로는 중금속 성분이 더 많이 함유되어 있을 것으로 판단된다. 각 이온성분의 농도를 살펴보면, Pb은 0.015 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Mn은 0.013 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Fe은 0.363 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, As는 0.002 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Al은 0.146 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Ni은 0.001 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Ca은 0.377 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Cu는 0.007 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Mg은 0.145 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Zn은 0.065 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, K은 0.203 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Cr은 0.001 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Na은 0.373 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타나 Fe, Ca, Na의 농도가 높게 나타났다.

Fig. 3에 나타난 미세먼지를 구성하고 있는 각 중금속의 구성비를 살펴보면, Ca(22.0%) > Na(21.7%) > Fe(21.2%) > K(11.9%) > Al, Mg(8.5%) > Zn(3.8%) > Pb(0.9%) > Mn(0.8%) > As, Cr, Ni(0.1%) 순으로 주로 토양 및 지각성분인 물질들이 높은 비율을 차지하고 있는 것으로 나타났다.

3.4. 계절별 농도분포

Fig. 4는 미세먼지, 이온성분, 중금속, 탄소성분의 계절별 농도분포를 나타낸 것으로, 미세먼지는 겨울 40.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ > 봄 38.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ > 가을 33.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ > 여름 23.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 순으로 나타났다. 겨울과 봄에 농도가 높는데, 이는 겨울철 난방에 의해 발생된 미세먼지가 봄에 까지 영향을 미치는 것으로 추정되며, 또한 겨울철과

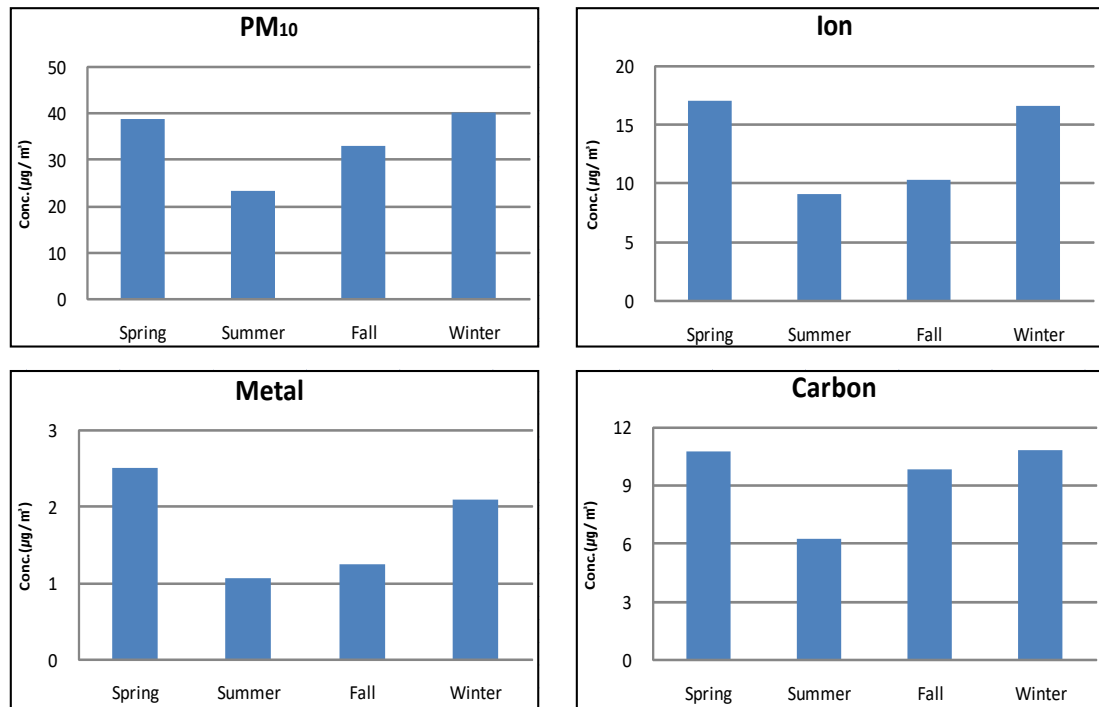


Fig. 4. Seasonal concentrations of PM₁₀, ion, metal and carbon.

봄철 강우량이 적어 강우에 의한 자연적인 제거율이 낮은 것으로 판단된다.

이온성분은 봄 $17.2 \mu\text{g}/\text{m}^3 >$ 겨울 $16.7 \mu\text{g}/\text{m}^3 >$ 가을 $10.4 \mu\text{g}/\text{m}^3 >$ 여름 $9.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 순으로, 중금속도 봄 $2.5 \mu\text{g}/\text{m}^3 >$ 겨울 $2.1 \mu\text{g}/\text{m}^3 >$ 가을 $1.3 \mu\text{g}/\text{m}^3 >$ 여름 $1.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 순으로, 탄소성분은 겨울 $10.9 \mu\text{g}/\text{m}^3 >$ 봄 $10.8 \mu\text{g}/\text{m}^3 >$ 가을 $9.9 \mu\text{g}/\text{m}^3 >$ 여름 $6.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 순으로 모두 미세먼지와 유사한 봄과 겨울에 높게 나타났다. 특히 이온성분과 중금속 성분은 황사의 영향으로 봄에 높게 나타났다.

3.5. 상관분석

상관분석은 구성성분간의 상관관계를 알아보는 데 유용한 분석이며, 그 결과가 항목간의 인과관계를 의미하지는 않는다. 상관계수는 -1에서 1사이의 값을 가지며 상관계수가 0에서 1에 근접할수록 양(+)의 상관성이 높아지며, 0에서 -1에 근접할수록 음(-)의 상관성 높아짐을 의미한다. Table 5는 PM₁₀의 구성성분에 대한 상관분석 결과를 표로 나타낸 것이며, 상관계수

중 **, *로 표시한 것은 각각 0.01, 0.05 수준에서 유의한 값을 의미한다.

상관분석 결과 미세먼지는 이온성분 중 NO_3^- ($r=0.839$), NH_4^+ ($r=0.890$)과 상관성이 높게 나타나 2차 미세먼지 생성 원인물질과 연관이 있는 것으로 판단되며, 탄소성분과도 상관성이 높게 나타났다. 또한 중금속 중 K, Ca, Mn, Fe, Cu 등 토양원인물질과 상관성이 높게 나타났다.

이온성분 중 NH_4^+ 은 SO_4^{2-} , NO_3^- 와 상관성이 높게 나타나 2차 미세먼지 생성원인 물질간에도 상관관계가 높은 것으로 나타났으며, NO_3^- 와 NH_4^+ 은 K, Ca, Ti, Mn, Fe, Zn, Pb 등 자동차와 토양기원물질과 상관성이 높게 나타났다. 중금속 성분들 간에서도 자동차와 토양기원물질간의 상관성이 높게 나타났다.

3.6. 인자분석

인자분석은 다변량 분석의 하나로 특정변수 간의 상호관련을 통해서 잠재적인 구조를 탐색하고, 인자 부하량 행렬이나 인자구조 행렬의 추정치 등으로부터

Table 5. Results of correlation analysis of PM₁₀ composition

	PM ₁₀	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	OC	EC	K	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	As	Pb	Al
SO ₄ ²⁻	0.525**																				
NO ₃ ⁻	0.839**	0.257*																			
Cl ⁻	0.331**	-0.202*	0.491**																		
Na ⁺	-0.006	-0.190	0.163	0.742**																	
NH ₄ ⁺	0.890**	0.764**	0.789**	0.192	-0.071																
OC	0.837**	0.251*	0.711**	0.352**	0.010	0.641**															
EC	0.909**	0.361**	0.758**	0.205*	-0.153	0.757**	0.809**														
K	0.843**	0.247*	0.855**	0.467**	0.184	0.715**	0.814**	0.779**													
Ca	0.823**	0.416**	0.841**	0.407**	0.051	0.775**	0.683**	0.765**	0.749**												
Ti	0.777**	0.213*	0.806**	0.460**	0.082	0.648**	0.708**	0.771**	0.817**	0.876**											
V	0.194	0.510**	0.119	-0.259*	-0.285**	0.386**	-0.084	0.165	0.116	0.160	0.162										
Cr	0.390**	-0.060	0.494**	0.309**	0.066	0.247*	0.392**	0.399**	0.519**	0.420**	0.531**	0.344**									
Mn	0.847**	0.344**	0.742**	0.328**	-0.107	0.729**	0.768**	0.806**	0.776**	0.807**	0.786**	0.216*	0.448**								
Fe	0.846**	0.361**	0.794**	0.344**	-0.059	0.757**	0.755**	0.810**	0.813**	0.890**	0.924**	0.222*	0.461**	0.898**							
Ni	0.111	0.257*	0.051	-0.007	-0.033	0.185	-0.045	0.042	0.039	0.053	0.062	0.518**	0.294**	0.117	0.083						
Cu	0.813**	0.264**	0.689**	0.369**	-0.033	0.645**	0.787**	0.871**	0.745**	0.763**	0.849**	0.179	0.571**	0.802**	0.834**	0.143					
Zn	0.731**	0.299**	0.720**	0.427**	0.015	0.671**	0.714**	0.659**	0.737**	0.744**	0.731**	0.156	0.492**	0.728**	0.790**	0.063	0.734**				
As	0.415**	0.028	0.449**	0.260*	-0.001	0.329**	0.437**	0.318**	0.491**	0.306**	0.402**	0.055	0.284**	0.429**	0.410**	0.018	0.339**	0.397**			
Pb	0.848**	0.421**	0.788**	0.336**	-0.034	0.802**	0.707**	0.805**	0.713**	0.831**	0.717**	0.183	0.356**	0.814**	0.805**	-0.008	0.735**	0.739**	0.308**		
Al	0.748**	0.285**	0.796**	0.453**	0.080	0.684**	0.683**	0.651**	0.790**	0.880**	0.909**	0.076	0.386**	0.777**	0.928**	0.006	0.682**	0.751**	0.401**	0.712**	
Mg	0.501**	0.084	0.684**	0.808**	0.722**	0.444**	0.428**	0.316**	0.649**	0.631**	0.627**	-0.119	0.321**	0.421**	0.544**	-0.013	0.410**	0.537**	0.306**	0.465**	0.683**

*p<0.05, **p<0.01]

Table 6. The summary results of factor analysis for PM₁₀

	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4
SO ₄ ²⁻	0.293	-0.136	0.303	0.836
NO ₃ ⁻	0.847	0.316	0.080	0.093
Cl ⁻	0.334	0.844	-0.056	-0.199
Na ⁺	-0.119	0.944	-0.062	-0.040
NH ₄ ⁺	0.757	0.061	0.211	0.562
OC	0.874	0.050	-0.127	-0.028
EC	0.901	-0.107	0.030	0.110
K	0.868	0.275	0.076	-0.006
Ca	0.869	0.219	0.069	0.240
Ti	0.893	0.224	0.111	-0.031
V	0.117	-0.238	0.818	0.273
Cr	0.508	0.132	0.541	-0.482
Mn	0.904	0.004	0.119	0.072
Fe	0.937	0.087	0.109	0.110
Ni	-0.027	0.042	0.849	0.047
Cu	0.884	0.030	0.167	-0.075
Zn	0.823	0.167	0.111	0.038
As	0.496	0.064	0.056	-0.270
Pb	0.853	0.074	0.014	0.268
Al	0.852	0.274	0.003	0.118
Mg	0.476	0.847	-0.012	0.076
Eigenvalue	10.7	2.8	1.9	7.8
Variance(%)	51.1	13.5	9.2	7.8

인자의 해석이 실시된다. 하지만 변수들이 여러 인자에 대하여 비슷한 인자 부하량을 나타낼 경우에 변수들이 어느 인자에 속하는지를 분류하기가 어렵다. 따라서 변수들의 인자 부하량이 어느 한 인자에 높게 나타나도록 하기 위해서 인자축을 회전시키는데, 크게 직각회전(orthogonal rotation)과 사각회전(oblique rotation)으로 나뉘어진다. 직각회전방식에는 Varimax, Quartimax, Equimax 등이 있는데 이 중에서 Varimax 방식이 가장 널리 이용된다. 본 연구에서는 Varimax 직각회전방식을 이용해 미세먼지 인자분석을 실시하였으며, 그 분석결과를 Table 6에 나타냈다.

미세먼지 인자분석 결과, 고유값 1 이상인 요인이 4개로 전체 분산의 81.6%를 설명해주고 있었으며, 인자 1은 51.1%, 인자 2는 13.5%, 인자 3은 9.2%, 인자

4는 7.8%를 설명해주는 것으로 조사되었다. 각 인자별로 미국 EPA에서 제시한 오염원 분류표(source profile)를 이용하여 발생원을 추정한 결과, 인자 1에는 NO₃⁻, NH₄⁺, OC, EC, K, Ca, Mn, Fe, Cu, Zn, Pb, Al 등으로 그 발생원이 주로 자동차, 2차 입자, 토양 등과 관련된 성분이며, 인자 2에는 Cl⁻, Na⁺, Mg 등으로 그 발생원이 해양과 관련된 성분으로 추정할 수 있었다. 인자 3에는 V와 Ni로 그 발생원이 산업과 관련된 성분이며, 마지막 인자 4에는 SO₄²⁻, NH₄⁺로 그 발생원이 난방과 관련된 성분으로 추정할 수 있었다. 하지만 본 연구에 사용된 오염원 분류표는 미국 EPA에서 제시한 것으로 오염원 분류표가 국내 실정과는 다소 차이가 있을 수 있다. 따라서 현재보다 더 정확한 오염원을 추정하기 위해서는 우리나라 실정에 맞는 오염원

분류표를 만들 필요가 있다.

인자분석에서 산출한 각 인자들이 미세먼지 농도에 어느 정도 영향을 미치는지 알아보기 위해 회귀분석을 실시한 결과, 식 (1)과 같이 인자 1은 16.175 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 씩, 인자 2는 1.556 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 씩, 인자 3은 1.650 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 씩, 인자 4는 4.760 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 씩 농도가 높아지는 것으로 나타났다. 결정계수(R^2)는 0.877로 추정된 회귀식에 의해 전체 미세먼지 농도의 87.7%를 설명할 수 있으며, 유의수준 0.01 이하로 통계적으로 유의한 것으로 나타났다.

$$PM_{10} = 16.175 \text{ factor}1 + 1.556 \text{ factor}2 + 1.650 \text{ factor}3 + 4.760 \text{ factor}4 + 31.82 \quad (1)$$

4. 결론

본 연구는 2016년 9월부터 2017년 8월까지 건국동, 농성동, 두암동 대기오염자동측정소에서 미세먼지의 이온성분, 중금속, 탄소성분을 분석하고 광주지역 미세먼지(PM₁₀)의 구성 성분별 농도, 배출원 및 배출원의 기여도 등을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

미세먼지의 평균농도는 33.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 이온성분은 13.306 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 중금속은 1.737 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 탄소성분은 9.040 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로, 이온성분은 미세먼지의 39.2%, 중금속은 5.1%, 탄소성분은 26.6% 차지하는 것으로 나타났다. 건국동은 공업지역이며 인접한 도로의 영향으로 미세먼지와 탄소가, 농성동은 주거지역으로 겨울철 난방과 자동차에 의해 이온성분과 중금속이 높게 나타난 것으로 추정된다.

미세먼지의 이온성분 39.2% 중 음이온이 29.0%, 양이온이 10.2% 정도 차지하는 것으로 나타났으며, 음이온 중에는 SO_4^{2-} , 양이온 중에는 NH_4^+ 가 가장 높은 농도를 나타내었다. 이온물질 중 미세먼지 2차 생성 원인물질인 SO_4^{2-} (38.2%), NO_3^- (31.5%), NH_4^+ (18.0%)가 높은 비율을 차지하고 있는 것으로 나타났다. 이렇게 2차 생성된 미세먼지는 입경이 작아 폐포에 침착할 가능성이 높기 때문에 SO_2 , NH_3 , NO_x 에 대한 배출 저감대책이 매우 필요하다.

중금속은 Ca(22.0%), Na(21.7%), Fe(21.2%) 등 주로 토양 및 지각성분인 물질들이 높은 비율을 차지하

고 있는 것으로 나타났으며, 미세먼지, 이온성분, 중금속, 탄소성분 모두 겨울과 봄에 농도가 높는데, 이는 겨울철 난방에 의해 발생된 미세먼지가 봄에까지 영향을 미치는 것으로 추정되며, 또한 겨울철과 봄철 강우량이 적어 강우에 의한 자연적인 제거율이 낮은 것으로 판단된다.

미세먼지는 이온성분 중 NO_3^- , NH_4^+ 와 같은 2차 미세먼지 생성 원인물질과 상관성이 높게 나타났으며, 탄소성분과 토양기원물질인 K, Ca, Mn, Fe, Cu 등에도 상관성이 높게 나타났다. 또한 이온성분 중 NH_4^+ 는 SO_4^{2-} , NO_3^- 와 상관성이 높게 나타나 2차 미세먼지 생성원인 물질간에도 상관관계가 높은 것으로 나타났으며, NO_3^- 와 NH_4^+ 은 K, Ca, Ti, Mn, Fe, Zn, Pb 등 자동차와 토양기원물질과 상관성이 높게 나타났다.

인자분석 결과 총 4개의 인자가 도출되었고, 첫 번째 인자에는 복합적인 발생원으로 자동차, 2차 입자, 토양 등과 관련된 성분으로 미세먼지의 51.1%를 설명해 주고, 두 번째 인자는 해양과 관련된 성분으로 13.5%, 세 번째 인자는 산업과 관련된 성분으로 9.2%, 네 번째 인자는 난방과 관련된 성분으로 7.8%를 설명해 주는 것으로 추정된다.

하지만 본 연구에 사용된 오염원 분류표는 미국 EPA에서 제시한 것으로 오염원 분류표가 국내 실정과는 다소 차이가 있을 수 있다. 따라서 현재보다 더 정확한 오염원을 추정하기 위해서는 우리나라 실정에 맞는 오염원 분류표를 만들 필요가 있다고 판단된다.

감사의 글

이 연구는 2017년 환경부 환경분야 시험검사의 국제 적합성 기반구축사업과 광주광역시보건환경연구원 연구역량강화 사업의 지원으로 수행하였습니다.

REFERENCES

- Hu, M., He, L. Y., Zhang, Y. H., Wang, M., Kim, Y. P., Moon, K. C., 2002, Seasonal variation of ionic species in fine particles at Qingdao, China, Atmos. Environ., 36, 5853-5859.
- Hwang, I. J., Kim, D. S., 2013, Research trends of receptor models in Korea and foreign countries and

- improvement directions for air quality management, J. Korean Soc. Atmos. Environ., 29, 459-476.
- Hwang, I. J., Kim, T. O., Kim, D. S., 2001, Source identification of PM₁₀ in Suwon using the method of positive matrix factorization, J. Korean Soc. Atmos. Environ., 17, 133-145.
- Hyon, J. W., 2015, Legislative research for the improvement of air quality laws to reduce particulate matters, Korea legislation research institute.
- Kang, C. M., Lee, H. S., Kang, B. W., Lee, S. K., Woo, Y. S., 2004, Chemical characteristics of acidic gas pollutants and PM_{2.5} species during hazy episodes in Seoul, South Korea, Atmos. Environ., 38, 4749-4760.
- Lee, H. W., Lee, T. J., Yang, S. S., Kim, D. S., 2008, Identification of atmospheric PM₁₀ sources and estimating their contributions to the Yongin-Suwon bordering area by using PMF, J. Korean Soc. Atmos. Environ., 24, 439-454.
- Lee, K. B., Kim, S. D., Kim, D. S., 2015, Ion Compositional Existence Forms of PM₁₀ in Seoul Area, J. Korean Soc. Environ. Eng., 37, 197-203.
- Lee, Y. J., Jung, S. A., Jo, M. R., Kim, S. J., Park, M. K., Ahn, J. Y., Lyu, Y. S., Choi, W. J., Hong, Y. D., Han, J. S., Lim, J. H., 2014, Characteristics of PM Chemical Component during Haze Episode and Asian Dust at Gwang-ju, J. Korean Soc. Atmos. Environ., 30, 434-448.
- Park, G. H., Cho, J. G., Ryu, B. S., 2010, Evaluation of pollution characteristics and chemical composition of PM_{2.5} in ambient air in Busan(Ⅱ), The annual report of Busan Metropolitan city institute of health and environment, 20, 154-167.
- Park, J. S., Kim, C. H., Lee, J. J., Kim, J. H., Hwang, U. H., Kim, S. D., 2010, A Study on the chemical mass composition of particle matter in Seoul, J. Korean Soc. Ur. Environ., 10, 293-303.
- Park, J. Y., Lim, H. J., 2006, Characteristics of water soluble ions in fine particles during the winter and spring in Daejeon, J. Korean Soc. Atmos. Environ., 22, 627-641.
- Ryu, H. J., Kim, H. J., Song, Y. J., Lee, C. D., Ha, H. S., 2008, Evaluation of ambient PM-10 aerosol in Incheon, The annual report of Incheon Metropolitan city institute of health and environment.
- Won, S. R., Choi, Y. C., Kim, A. R., Choi, S. H., Ghim, Y. S., 2010, Ion concentrations of particulate matter in Yongin in Spring and Fall, J. Korean Soc. Atmos. Environ., 26, 265-275.
- Yao, X., Chan, C. K., Fang, M., Cadle, S., Chan, T., Mulawa, P., He, K., Ye, B., 2002, The water-soluble ionic composition of PM_{2.5} in Shanghai and Beijing, China, Atmos. Environ., 36, 4223-4234.