

ORIGINAL ARTICLE

인자분석을 이용한 광주지역 초미세먼지(PM_{2.5})의 특성 연구

이세행* · 이경석 · 윤상훈 · 양윤철 · 박지영 · 배석진 · 이대행

광주광역시보건환경연구원 환경연구부

Characteristics of PM_{2.5} in Gwangju Evaluated by Factor Analysis

Se-Haeng Lee*, Kyung-Seog Lee, Sang-Hoon Yoon, Yoon-Cheol Yang, Ji-Young-Park,
Seok-Jin Bae, Dae-Haeng Lee

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

Abstract

The objective of this study was to estimate the trends of air quality in the study area by analyzing monthly and seasonal concentration trends obtained from sampled data. To this aim, the mass concentrations of PM_{2.5} in the air were analyzed, as well as those of metals, ions, and total carbon within the PM_{2.5}. The mean concentration of PM_{2.5} was 22.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. The mass composition of PM_{2.5} was as follows: 31.1% of ionic species, 2.2% of metallic species, and 26.7% of carbonic species (EC and OC). Ionic species, especially sulfate, ammonium, and nitrate, were the most abundant in the PM_{2.5} and exhibited a high correlation coefficient with the mass concentration of PM_{2.5}. Seasonal variations of PM_{2.5} showed a similar pattern to those of ionic and metallic species, with high concentrations during winter and spring. PM_{2.5} also had a high correlation with the ionic species NO₃⁻ and NH₄⁺. In addition, NH₄⁺ was highly correlated with NO₃⁻. Through factor analysis, we identified four controlling factors, and determined the pollution sources using the United States Environmental Protection Agency(U.S. EPA) pollution profile. The first factor, accounting for 19.1% of PM_{2.5} was attributed to motor vehicles and heating-related sources; the second factor indicated industry-related sources and secondary particles, and the other factors indicated soil, industry-related and marine sources. However, the pollution profile used in this study may be somewhat different from the actual situation in Korea, since it was obtained from US EPA. Therefore, to more accurately estimate the pollutants present in the air, a pollution profile for Korea should be produced.

Key words : PM_{2.5}, Ionic species, Metallic species, Factor analysis, Pollution profile

1. 서론

초미세먼지가 사회적 이슈로 크게 부각되면서 초미세먼지의 위해성이 알려지고 이와 관련된 많은 정보들이 인터넷, SNS 등 여러 곳에서 제공되는 등 초미세먼지 관

련 언론 보도 건수도 폭발적으로 증가하고 있다. 이렇게 초미세먼지에 대한 위해성이 알려지고 국민들의 관심이 높아지자 우리나라에서도 초미세먼지 규제를 2015년부터 시행하고 있으며, 2016년에는 경유차와 석탄화력 발전소 규제를 통해 초미세먼지를 줄이겠다는 특별 대책을

Received 13 February, 2019; Revised 23 February, 2019;
Accepted 28 March, 2019

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

발표하였다. 또한 2019년에는 초미세먼지 문제를 흑한, 폭염처럼 재난에 수준으로 관리하기 위한 재난 및 안전 관리기본법 등 관련법을 개정할 계획이다(Kim, 2017).

세계보건기구에서 1급 발암물질로 지정한 초미세먼지는 작은 크기 때문에 호흡기를 통해 폐에 침투하는 성향이 강하여 폐에 염증을 일으키거나 폐를 손상하기도 하며(Brook et al., 2003), 호흡기계 질환을 비롯한 심근경색, 혈관장애, 동맥경화를 유발하는 것으로 보고되고 있다.(Peters et al., 2001 ; Kunzli et al., 2005).

이렇게 초미세먼지가 국민 건강과 생활에 미치는 영향이 심각해지자 학계에서는 초미세먼지에 대한 발생 원인과 대책 등 다양한 측면에서 연구가 수행되었다(Yao et al., 2002). 초미세먼지의 오염원과 위해성을 파악하기 위해 초미세먼지에 함유된 이온, 중금속, 탄소 등 구성 성분을 조사한 결과, 초미세먼지 발생 원인은 크게 연료연소, 산업활동, 자동차 배기가스, 2차 초미세먼지 등으로 구분할 수 있었다. 아울러 도시 대기 중에는 2차 초미세먼지가 상당량을 차지하고 있으며, 2차 초미세먼지의 30%에서 60% 정도가 이온성분으로 황산염, 질산염, 암모늄염이 주로 차지하는 것으로 알려져 있다(Park et al., 2006; Won et al., 2010; Lee et al., 2015).

그러나 그동안 국내 연구의 대부분 분석항목이 원소 성분이나 이온성분 등 제한적으로 이루어져 있으며, 분석 시점과 지역에 따라 기여도가 다르게 평가되고 있다. 이에 국내·외적으로 초미세먼지에 대한 정확한 구성성분을 규명하고 초미세먼지를 효율적으로 제어하고 관리방

안을 마련하기 위해서는 초미세먼지가 어디에서 오는지, 어떻게 생성하는지 등을 상세히 알아야 적절한 대책을 강구할 수 있으며, 초미세먼지에 대한 중량농도 뿐만 아니라 구성성분에 대한 정성·정량분석이 선행되어야 한다. 이를 위해 수용체(receptor)에서 오염물질의 물리·화학적 특성을 분석한 후 오염원의 확인 및 오염원의 정량적 기여도를 평가하는 수용모델을 이용한 연구가 필요하며, 이러한 연구가 늘어나고 있는 추세이다(Hwang et al., 2001; Park et al., 2010; Hwang et al., 2013).

이에 본 연구에서는 초미세먼지(PM_{2.5})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 초미세먼지 농도 변화에 미치는 주요 영향인자를 파악하고 발생원을 추정하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 채취지점 및 방법

본 연구에서는 광주광역시 서구 농성동 종합대기측정소 옥상에서 초미세먼지를 채취하였으며, 이 지점은 대기오염물질과 기상을 상시 측정하는 대기오염자동측정소로 Fig. 1과 같다. 농성동 지점은 광주의 중심에 위치한 주거지역으로 주변에 공원이 있으며, 북서쪽으로 아파트 신축 공사가 진행 중에 있다.



Fig. 1. The locations of the sampling sites in Nongsung.

Table 1. Sampling and analytical methods

Classification	Measuring equipment	Chemical components
Analyzer	PM _{2.5} Analyzer (BAM1020, MetOne)	PM _{2.5}
Sampling	Sampler (SEQ-47/50, SEVEN LECKEL)	PM _{2.5}
Ion analysis	Ion Chromatography (850 Professional IC, Metrohm)	- Anion : NO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻ , Cl ⁻ - Cation : NH ₄ ⁺ , Na ⁺
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)

시료채취는 2017년 10월부터 2018년 9월까지 매월 7일~14일 연속으로 채취하였으며, 채취 시간은 당일 00:00부터 익일 00:00까지 24시간 연속 채취하였다. 채취한 시료는 현장에서 PTFE (polytetrafluoroethylene) 재질의 테이프로 밀봉한 다음 실험실로 운반 후 향온 향습 데시케이터에 시료를 24시간 동안 보관한 뒤 분석을 실시하였다.

2.2. 분석방법

초미세먼지(PM_{2.5}) 농도는 농성동 대기오염자동측정소의 초미세먼지 측정기(BAM 1020, MetOne)에서 측정된 자료를 사용하였으며, 이온 성분과 중금속 성분 분석은 시료채취장비(SEQ-47/50, SEVEN LECKEL) 2대를 사용하여 16.7 LPM의 유량으로 각각 24시간 시료채취 후 사용하였다. 또한 초미세먼지 측정자료의 검증을 위해 자동측정기(BAM 1020)와 수동측정기(SEQ-47/50)의 자료를 32회 비교분석한 결과, 기울기가 1.06, 절편값이 2.13으로 환경부 대기오염측정망 설치·운영지침(2018)에서 제시한 기울기 0.9~1.1, 절편값이 -2.25~2.25 수준을 만족하였다.

시료채취에 사용된 여지는 Zefluor supported PTFE (pore size 2.0 μm , ϕ 47 mm, Pall Co.)를 사용하였으며, 여지는 시료채취 전후 3일간 향온, 향습상태의 데시케이터내에 보관하여 향량시킨 후 시료분석에 사용하였다.

Table 1에 시료채취방법 및 주요 분석기기를 간략히 나타내었으며, 초미세먼지 중 이온성분은 여지를 추출용

기에 넣고 시료채취면에 에탄올 200 μl 를 첨가하여 여지가 초순수에 잘 적셔지도록 하였다. 여기에 초순수 30 mL를 가한 후 초음파 추출기(model 324149, Bo Sung Ultrasonics Co.)에 넣어 2시간 동안 추출하였으며, 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)로 2개의 양이온(NH₄⁺, Na⁺)과 3개의 음이온(SO₄²⁻, NO₃⁻, Cl⁻)을 분석하였다.

금속성분은 대기오염공정시험기준 환경대기 중 금속화합물-유도결합플라즈마 분석법으로 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)로 총 13개의 금속성분(Fe, Al, Zn, Pb, Mn, Cu, V, Ni, As, Cr, Mg, K, Na)을 분석하였다.

탄소성분은 농성동측정소의 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)에서 측정된 OC와 EC 농도를 사용하였다.

2.3. 자료분석

본 연구에서는 초미세먼지의 측정지점별, 월별 농도를

Table 2. The variation of PM_{2.5}, metal, ion and carbon in the ambient air (unit: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Item	Nongsung		
	Mean \pm S.D.	Range	
PM _{2.5}	22.7 \pm 14.5	6.0 ~ 95.0	
Ion	Cl ⁻	0.076 \pm 0.047	0.016 ~ 0.311
	NO ₃ ⁻	1.52 \pm 1.968	0.131 ~ 11.900
	SO ₄ ²⁻	3.61 \pm 2.400	0.495 ~ 12.733
	Na ⁺	0.105 \pm 0.112	N.D. ~ 0.613
	NH ₄ ⁺	1.734 \pm 1.222	0.107 ~ 5.600
	Total	7.053 \pm 4.234	1.230 ~ 23.534
Metal	Pb	0.008 \pm 0.008	N.D. ~ 0.038
	Cr	0.003 \pm 0.008	N.D. ~ 0.046
	Cu	0.002 \pm 0.005	N.D. ~ 0.046
	Mn	0.009 \pm 0.007	N.D. ~ 0.037
	Ni	0.001 \pm 0.002	N.D. ~ 0.017
	As	0.005 \pm 0.004	N.D. ~ 0.021
	Fe	0.108 \pm 0.080	N.D. ~ 0.424
	Al	0.054 \pm 0.095	N.D. ~ 0.478
	Ca	0.044 \pm 0.049	N.D. ~ 0.319
	Mg	0.035 \pm 0.044	N.D. ~ 0.225
	Zn	0.033 \pm 0.024	N.D. ~ 0.162
	K	0.186 \pm 0.170	0.017 ~ 0.753
	Ti	0.006 \pm 0.008	N.D. ~ 0.052
	V	0.003 \pm 0.002	N.D. ~ 0.012
	Total	0.496 \pm 0.312	0.063 ~ 1.415
Carbon	OC	4.736 \pm 2.169	0.930 ~ 11.565
	EC	1.331 \pm 0.599	0.215 ~ 3.550
	Total	6.067 \pm 2.628	1.510 ~ 13.176

산출하여 평균, 표준편차, 최소값, 최대값 등을 기술통계량을 산출하였으며, 각 성분별 농도를 산출하여 함유율, 변화추이를 분석하였다. 또한 초미세먼지와 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 초미세먼지와 이온, 금속, 탄소성분의 농도 분포를 나타낸 것으로 측정기간 중 초미세먼지의 평균농도는 22.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 이온성분은 7.053 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 중금속은

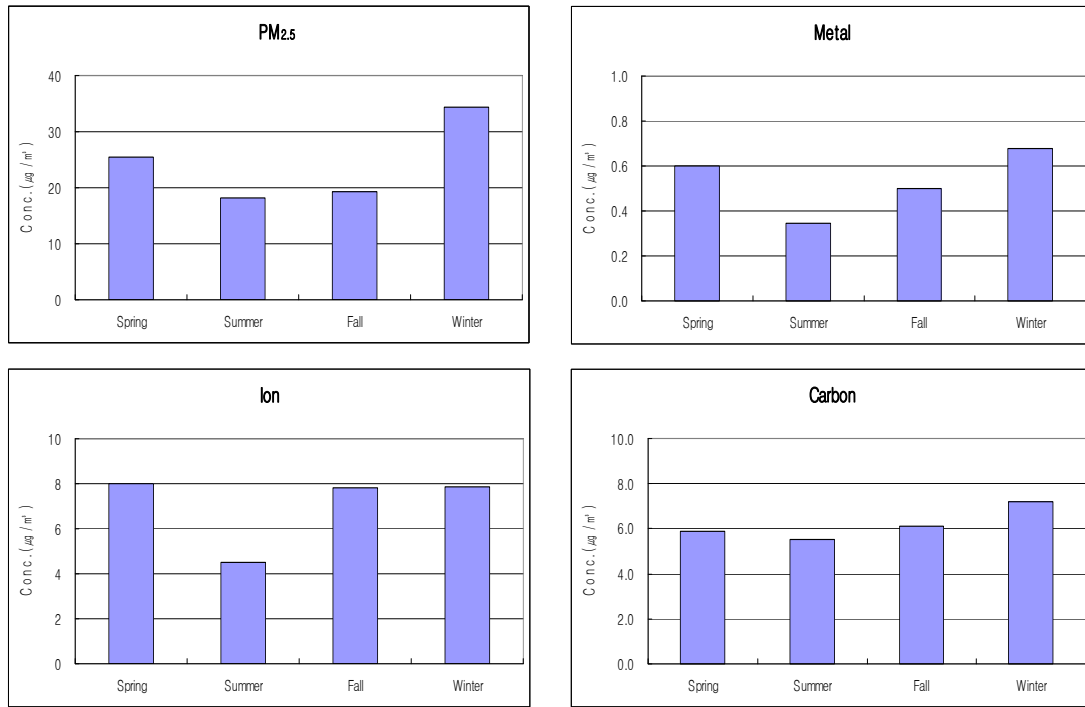


Fig. 2. Seasonal concentrations of PM_{2.5}, ion, metal and carbon.

0.496 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 탄소성분은 6.067 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로, 이온성분은 미세먼지의 31.1%, 중금속은 2.2%, 탄소성분은 26.7% 차지하는 것으로 나타났다. 이는 농성동이 주거지역으로 도로가 인접해 있으며, 겨울철 난방과 휘발유, 경유 자동차에 의해 이온성분과 중금속이 높게 나타난 것으로 추정되며, 서울, 부산, 청주지역을 대상으로 조사한 연구결과와 같이 이온성분이 가장 높은 비중을 차지하고 다음이 탄소, 중금속 순으로 나타났다(Park et al., 2010; Kang et al., 2015; Lee et al., 2015).

3.2. 이온성분의 농도분포

초미세먼지 중 이온성분은 31.1% 차지하였으며, 이 중 음이온이 22.9%, 양이온이 8.1% 정도 차지하는 것으로 나타났다. 각 이온성분의 농도를 살펴보면, 음이온의 경우 Cl⁻은 0.076 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, NO₃⁻는 1.524 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, SO₄²⁻은 3.613 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타났으며, 양이온의 경우 Na⁺은 0.105 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, NH₄⁺은 1.735 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타나 음이온 중에는 SO₄²⁻, 양이온 중에는 NH₄⁺가 가장 높은 농도를 나타내었다.

초미세먼지를 구성하고 있는 각 이온물질의 구성비를 살펴보면, SO₄²⁻(51.2%) > NH₄⁺(24.6%) > NO₃⁻(21.6%) > Na⁺(1.5%) > Cl⁻(1.1%) 순으로 주로 초미세먼지 2차 생성 원인물질이 높은 비율을 차지하고 있어 서울, 부산, 청주 등 타 도시지역에서 연구한 결과와도 비슷하게 나타났다(Park et al., 2010; Kang et al., 2015; Lee et al., 2015).

3.3. 중금속의 농도분포

본 연구에서 초미세먼지 중 중금속 성분은 2.2% 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 0.008 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Cr은 0.003 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Cu는 0.002 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Mn은 0.009 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Ni은 0.001 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, As는 0.005 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Fe은 0.108 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Al은 0.055 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Ca은 0.044 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Mg은 0.035 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Zn은 0.033 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, K은 0.186 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Ti은 0.006 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, V은 0.003 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타나 K, Fe, Al, Ca, Na의 농도가 높게

Table 3. Results of correlation analysis of PM_{2.5} composition

	PM _{2.5}	Pb	Cr	Cu	Mn	Ni	As	Fe	Al	Ca	Mg	Zn	K	Ti	V	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	OC	
Pb	0.627**																					
Cr	-0.002	-0.019																				
Cu	-0.088	0.101	0.357**																			
Mn	0.144	0.145	0.493**	0.183*																		
Ni	0.338**	0.070	0.159	-0.066	0.136																	
As	0.290**	0.298**	-0.008	0.141	0.002	0.010																
Fe	0.461**	0.415**	0.133	-0.003	0.369**	0.196*	0.162															
Al	0.041	0.193*	-0.076	-0.045	0.030	-0.037	-0.077	0.054														
Ca	0.316**	0.283**	-0.102	-0.041	0.109	0.036	0.233*	0.570**	0.078													
Mg	-0.030	0.312**	-0.184*	-0.001	-0.018	-0.133	-0.059	0.084	0.605**	-0.065												
Zn	0.523**	0.561**	0.101	-0.058	0.302**	0.282**	0.148	0.462**	0.070	0.270**	0.073											
K	0.762**	0.599**	-0.090	-0.056	0.152	0.095	0.161	0.434**	0.115	0.319**	0.161	0.354**										
Ti	0.281**	0.322**	-0.065	-0.011	0.143	0.009	0.184*	0.612**	0.050	0.842**	0.043	0.292**	0.380**									
V	0.271**	-0.014	0.127	0.062	0.160	0.132	-0.044	0.176	-0.252**	0.042	-0.383**	0.106	0.155	-0.046								
Cl ⁻	0.237*	0.278**	0.052	0.105	0.153	0.033	0.123	0.042	-0.135	0.059	-0.088	0.115	0.072	0.009	0.002							
NO ₃ ⁻	0.833*	0.659**	0.001	-0.053	0.036	0.336**	0.309**	0.395**	0.033	0.210*	0.109	0.475**	0.653**	0.244**	0.075	0.198*						
SO ₄ ²⁻	0.435**	0.062	-0.043	-0.031	0.139	0.107	0.091	0.286**	-0.200*	0.323**	-0.306**	0.262**	0.248**	0.194*	0.537**	0.027	0.074					
Na ⁺	-0.021	-0.198*	0.021	-0.032	-0.066	0.060	-0.136	-0.177	-0.068	-0.068	-0.219*	0.021	-0.190*	-0.138	0.109	0.135	-0.112	0.067				
NH ₄ ⁺	0.614**	0.139	0.042	-0.038	0.119	0.247**	0.182	0.279**	-0.245**	0.170	-0.395**	0.304**	0.343**	0.036	0.582**	0.148	0.300**	0.781**	0.029			
OC	0.666**	0.396**	-0.064	-0.111	0.197*	0.055	0.064	0.424**	-0.013	0.250**	-0.084	0.403**	0.621**	0.288**	0.339**	-0.021	0.400**	0.483**	-0.005	0.462**		
EC	0.735**	0.567**	0.090	-0.083	0.221*	0.203*	0.086	0.422**	0.187*	0.109	0.096	0.419**	0.563**	0.096	0.167	0.133	0.585**	0.229*	-0.011	0.350**	0.710**	

*p<0.05, **p<0.01

나타났다.

초미세먼지를 구성하고 있는 각 중금속의 구성비를 살펴보면, K(37.5%) > Fe(21.8%) > Al(11.0%) > Ca(8.8%) > Mg(7.1%) > Zn(6.6%) > Mn(1.8%) > Pb(1.5%) 순으로 주로 토양 및 지각성분인 물질들이 높은 비율을 차지하고 있는 것으로 나타났다.

3.4. 계절별 농도분포

Fig. 2는 초미세먼지, 이온성분, 중금속, 탄소성분의 계절별 농도분포를 나타낸 것으로, 초미세먼지는 겨울 34.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ > 봄 25.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ > 가을 19.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ > 여름 18.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 순으로 나타났다. 겨울과 봄에 농도가 높는데, 이는 겨울철 난방에 의해 발생된 초미세먼지가 봄에 까지 영향을 미치는 것으로 추정되며, 또한 겨울철과 봄철 강우량이 적어 강우에 의한 자연적인 제거현상이 적은 것으로 판단된다.

이온성분은 봄 8.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ > 겨울 7.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ > 가을 7.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ > 여름 4.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 순으로, 중금속도 겨울 0.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ > 봄 0.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ > 가을 0.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ > 여름 0.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 순으로, 탄소성분은 겨울 7.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ > 가을 6.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ > 봄 5.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ > 여름 5.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 순으로 모두 초미세먼지와 유사한 봄과 겨울에 높게 나타났다.

3.5. 상관분석

상관분석은 구성성분간의 상관관계를 알아보는데 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 3은 PM_{2.5}의 구성성분에 대한 상관분석 결과를 표로 나타낸 것이며, 상관계수 중 **, *로 표시한 것은 각각 0.01, 0.05 수준에서 유의한 값을 의미한다.

상관분석 결과 초미세먼지는 이온성분 중 NO₃⁻ (r=0.833), NH₄⁺ (r=0.614)과 상관성이 높게 나타나 2차 미세먼지 생성 원인물질과 연관이 있는 것으로 판단되며, 탄소성분과도 상관성이 높게 나타났다. 또한 중금속 중 K, Zn, Fe 등 토양원인물질과 상관성이 높게 나타났다.

이온성분은 NH₄⁺가 NO₃⁻와 상관성이 높게 나타나 2차 미세먼지 생성원인 물질간에도 상관관계가 높은 것으로 나타났으며, NO₃⁻와 NH₄⁺은 Pb, Zn, Ti 등 자동차

와 산업과 상관성이 높게 나타났다. 중금속 성분들 간에서도 자동차와 토양기원물질간의 상관성이 높게 나타났다.

3.6. 인자분석

인자분석은 다변량 분석의 하나로 특정변수 간의 상호관계를 통해서 잠재적인 구조를 탐색하고, 인자부하량 행렬이나 인자구조 행렬의 추정치 등으로부터 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 4에 나타냈다.

초미세먼지 인자분석 결과, 고유값 1이상인 요인이 7개로 전체 분산의 72.8%를 설명해주고 있었으며, 인자 1은 19.1%, 인자 2는 14.2%, 인자 3은 12.0%, 인자 4는 8.7%, 인자 5는 6.8%, 인자 6은 6.1%, 인자 7은 5.9%를 설명해주는 것으로 조사되었다. 각 인자별로 미국 EPA에서 제시한 오염원 분류표(source profile)를 이용하여 발생원을 추정한 결과, 인자 1에는 Pb, Zn, K, NO₃⁻, OC, EC 등으로 그 발생원이 주로 자동차, 난방과 관련된 성분이며, 인자 2에는 V, SO₄²⁻, NH₄⁺으로 그 발생원이 산업, 2차 입자 생성과 관련된 성분으로 추정할 수 있었다. 인자 3에는 Fe, Ca, Ti이, 인자 4에는 Cr, Cu, Mn이, 인자 5에는 As, 인자 6에는 Ni, 인자 7에는 Cl⁻, Na⁺으로 주로 토양, 산업, 해양과 관련된 성분으로 추정할 수 있었다. 하지만 본 연구에 사용된 오염원 분류표도 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 초미세먼지 농도에 어느 정도 영향을 미치는지 알아보기 위해 회귀분석을 실시한 결과, 식 (1)과 같이 인자 1은 11.899 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 씩, 인자 2는 4.681 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 씩, 인자 3은 2.309 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 씩, 인자

Table 4. The summary results of factor analysis for PM_{2.5}

	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Factor 5	Factor 6	Factor 7
Pb	0.798	-0.169	0.197	0.077	0.291	-0.035	0.093
Cr	-0.062	0.055	-0.081	0.834	0.009	0.203	0.010
Cu	-0.058	-0.018	-0.077	0.617	0.342	-0.336	0.032
Mn	0.177	0.086	0.199	0.759	-0.176	0.074	0.027
Ni	0.142	0.096	-0.003	0.099	0.004	0.863	-0.006
As	0.166	0.037	0.164	-0.014	0.733	-0.010	-0.029
Fe	0.419	0.126	0.660	0.248	-0.011	0.163	-0.130
Al	0.322	-0.525	0.068	0.007	-0.413	-0.157	-0.154
Ca	0.108	0.097	0.920	-0.065	0.097	-0.022	0.035
Mg	0.363	-0.674	-0.003	-0.040	-0.199	-0.228	-0.219
Zn	0.562	0.066	0.297	0.161	-0.025	0.337	0.150
K	0.771	0.142	0.229	-0.070	0.100	-0.047	-0.137
Ti	0.144	-0.023	0.927	-0.011	0.095	-0.025	-0.043
V	0.114	0.770	-0.056	0.158	-0.105	-0.011	-0.035
Cl ⁻	0.191	-0.014	-0.008	0.134	0.323	-0.070	0.731
NO ₃ ⁻	0.750	-0.003	0.083	-0.073	0.345	0.338	0.036
SO ₄ ²⁻	0.193	0.799	0.250	-0.028	-0.081	-0.078	-0.009
Na ⁺	-0.135	0.136	-0.066	-0.079	-0.349	0.082	0.737
NH ₄ ⁺	0.328	0.810	0.035	-0.003	0.102	0.113	0.022
OC	0.678	0.464	0.186	-0.042	-0.184	-0.092	-0.056
EC	0.839	0.158	-0.018	0.085	-0.127	0.092	0.047
Eigenvalue	4.0	3.0	2.5	1.8	1.4	1.3	1.2
Variance(%)	19.1	14.2	12.0	8.7	6.8	6.1	5.9

5은 2.492 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 씩, 인자 6은 3.142 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 씩, 인자 7은 1.226 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 씩 농도가 높아지는 것으로 나타났으며, 인자 4는 유의수준이 0.01 이상으로 유의하지 않아 회귀식에서 제외하였다. 결정계수(R^2)는 0.886로 추정된 회귀식에 의해 전체 미세먼지 농도의 88.6%를 설명할 수 있으며, 유의수준 0.01 이하로 통계적으로 유의한 것으로 나타났다.

$$PM_{2.5} = 11.899 \text{ factor1} + 4.681 \text{ factor2} \\ + 2.309 \text{ factor3} + 2.492 \text{ factor5} + 3.142 \text{ factor6} \\ + 3.142 \text{ factor6} + 1.226 \text{ factor7} + 22.716 \quad (1)$$

4. 결론

본 연구는 2017년 10월부터 2018년 9월까지 농성동

대기오염자동측정소에서 초미세먼지의 이온성분, 중금속, 탄소성분을 분석하고 광주지역 초미세먼지(PM_{2.5})의 구성 성분별 농도, 배출원 및 배출원의 기여도 등을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

초미세먼지의 평균농도는 22.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 이온성분은 7.053 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 중금속은 0.496 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 탄소성분은 6.067 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로, 이온성분은 초미세먼지의 31.1%, 중금속은 2.2%, 탄소성분은 26.7% 차지하는 것으로 나타났으며, 농성동 지점은 주거지역으로 도로가 인접해 있으며, 겨울철 난방과 휘발유, 경유 자동차에 의해 이온성분과 중금속이 높게 나타난 것으로 추정된다.

초미세먼지의 이온성분 31.1% 중 음이온이 22.9%, 양이온이 8.1% 정도 차지하는 것으로 나타났으며, 음이온 중에는 SO₄²⁻, 양이온 중에는 NH₄⁺가 가장 높은 농도를 나타내었다. 이온물질 중 초미세먼지 2차 생성 원인물

질인 SO₄²⁻(51.2%), NH₄⁺(24.6%), NO₃⁻(21.6%)이 높은 비율을 차지하고 있는 것으로 나타났다. 이렇게 2차 생성된 미세먼지는 입경이 작아 폐포에 침착할 가능성이 높기 때문에 SO₂, NH₃, NO_x에 대한 배출 저감대책이 매우 필요하다.

중금속은 K(37.5%), Fe(21.8%), Al(11.0%) 등 주로 토양 및 지각성분인 물질들이 높은 비율을 차지하고 있는 것으로 나타났으며, 초미세먼지, 이온성분, 중금속, 탄소성분 모두 겨울과 봄에 농도가 높는데, 이는 겨울철 난방에 의해 발생된 초미세먼지가 봄에까지 영향을 미치는 것으로 추정되며, 또한 겨울철과 봄철 강우량이 적어 강우에 의한 자연적인 제거현상이 적은 것으로 판단된다.

초미세먼지는 이온성분 중 NO₃⁻, NH₄⁺과 같은 2차 미세먼지 생성 원인물질과 상관성이 높게 나타났으며, 탄소성분과 토양기원물질인 K, Zn, Fe 등과도 상관성이 높게 나타났다. 또한 NH₄⁺은 NO₃⁻과 상관성이 높게 나타나 2차 미세먼지 생성원인 물질간에도 상관관계가 높은 것으로 나타났으며, NO₃⁻과 NH₄⁺은 Pb, Zn, Ti 등 토양 기원물질과도 상관성이 높게 나타났다.

인자분석 결과 총 7개의 인자가 도출되었고, 첫 번째 인자에는 자동차와 난방과 관련된 성분으로 초미세먼지의 19.1%를 설명해 주고, 두 번째 인자는 산업과 2차 입자 생성과 관련된 성분으로 14.2%, 세 번째 인자는 12.0%, 네 번째 인자는 8.7%, 다섯 번째 인자는 6.8%, 여섯 번째 인자는 6.1%, 일곱 번째 인자는 5.9%로 주로 토양, 산업, 해양과 관련된 성분으로 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 2018년 환경부 환경분야 시험검사의 국제적 적합성 기반구축사업과 광주광역시보건환경연구원 연구역량강화 사업의 지원으로 수행하였습니다.

REFERENCES

Brook, R. D., Brook, J. R., Rajagopalan, S., 2003, Air

- pollution: the "heart" of the problem, *Curr. Hypertens. Rep.*, 5, 32-39.
- 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.
- Kang, B. W., Lee, H. S., 2015, Source apportionment of fine particulate matter (PM_{2.5}) in the Chungju City, 31, 437-448.
- Kang, C. M., Lee, H. S., Kang, B. W., Lee, S. K., Sunwoo, Y., 2004, Chemical characteristics of acidic gas pollutants and PM_{2.5} species during hazy episodes in Seoul, South Korea, *Atmos. Environ.*, 38, 4749-4760.
- Kim, Y. P., 2017, Research and Policy Directions against Ambient Fine Particles, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 33(3), 191-204.
- Kunzli, N., Jerrett, M., Mack, W. J., Beckerman, B., LaBree, L., Gilliland, F., Thomas, D., Peters, J., Hodis, H. N., 2005, Ambient air pollution and atherosclerosis in Los Angeles, *Environmental Health Perspectives*, 113, 201-206.
- 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 Dague, J. Korean Soc. Atmos. Environ., 22, 627-641.
- Peter, A., Dockery, D. W., Muller, J. E., Mittleman, M. A., 2001, Increased particulate air pollution and the triggering of myocardial infarction, Circulation, 103, 2810-2815.
- 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.
-
- 이세행, 광주광역시보건환경연구원 환경연구부 환경연구사 sehang@korea.kr
 - 이경석, 광주광역시보건환경연구원 환경연구부 환경연구사 ksl5180@korea.kr
 - 윤상훈, 광주광역시보건환경연구원 환경연구부 환경연구사 enoughface@korea.kr
 - 양윤철, 광주광역시보건환경연구원 환경연구부 환경연구사 ycyang83@korea.kr
 - 박지영, 광주광역시보건환경연구원 환경연구부 환경연구사 jiyoung730@korea.kr
 - 배석진, 광주광역시보건환경연구원 환경연구부 환경연구부장 bsj4833@korea.kr
 - 이대행, 광주광역시보건환경연구원 환경연구부 대기연구과장 ldh0928@korea.kr