



논문

PMF 수용모델을 이용한 평택 지역 PM₁₀의 오염원 기여율 평가 Source Apportionment of PM₁₀ at Pyeongtaek Area Using Positive Matrix Factorization (PMF) Model

허종원, 김찬혁, 민윤기, 김현자, 성연국, 김종수, 이경빈¹⁾, 허종배^{2)*}

경기도보건환경연구원, ¹⁾국립환경과학원 지구환경연구과, ²⁾서울대학교 보건대학원

Jongwon Heo, Chanhyuk Kim, Yoonki Min, Hyeonja Kim, Yeongook Sung,
 Jongsoo Kim, Kyoungbin Lee¹⁾, Jongbae Heo^{2)*}

Gyeonggi-do Institute of Health and Environment

¹⁾Global Environment Research Division, National Institute of Environmental Research

²⁾Institute of Health and Environment, Seoul National University

접수일 2018년 10월 16일
 수정일 2018년 12월 1일
 채택일 2018년 12월 3일

Received 16 October 2018
 Revised 1 December 2018
 Accepted 3 December 2018

*Corresponding author
 Tel : +82-(0)2-880-2809
 E-mail : jongbae heo@gmail.com

Abstract In order to identify the PM₁₀ pollutant sources, positive matrix factorization (PMF) was applied to the chemical composition data of ambient PM₁₀ samples that were collected at Pyeongtaek in Gyeonggi-do every fifth day from January 2015 to December 2016. Carbon species (organic and elemental carbon), ionic matter, and trace elements of PM₁₀ were analyzed and the results were included in the PMF model. Nine PM₁₀ sources were identified and apportioned by using important individual indicators of chemical species on each of the resolved source profiles from the PMF modeling. The identified nine sources were secondary sulfate (19.4%), secondary nitrate (18.7%), biomass burning (17.6%), soil (12%), sea salt (9.3%), industry (7.6%), diesel emission (6.3%), gasoline emission (5.7%), and incineration (3.3%). Also, the results of conditional probability function (CPF) showed that PM₁₀ levels were influenced by local-sources such as industry, incineration and soil. The results of this study will provide the fundamental information to help regularize the PM₁₀ control strategies for improvement the air quality in the study region.

Key words: PM₁₀, EPA PMF, CPF, Receptor model

1. 서론

최근 국내에서 대표적인 환경문제로 인식되고 있는 미세먼지 (Particulate matters < 10 μm, PM₁₀)는 세계보건기구 (World Health Organization: WHO)에서 1987년부터 대기질 가이드라인을 통하여 관리되는 대기오염물질이다. 특히, 실외 대기오염물질 중 PM (Particulate Matter)는 2016년 세계보건기구 산하인 국제암연구소 (IARC, International Agency for Research on Cancer)에서 사람에게 발암이 확인된 1군 발암물질 (Group 1)로 지정되어 관리되고 있는 실정이다. 미세먼지 (PM₁₀)는 인체에 부정적인 영향을 미

치고, 시정을 악화시키며, 최근에는 기후변화의 유발인자로 주목을 받고 있으며 (Zhang *et al.*, 2010; Menon *et al.*, 2002; Seaton *et al.*, 1995), 대기개선 및 배출원 관리를 위해 중요한 관리 대상물질임에 따라 본 연구에는 PM₁₀을 중점적으로 분석 조사를 하였다.

정부는 2003년 수도권대기환경개선에 관한 특별법 제정과 함께 대기오염물질 배출량 감축을 중심으로 한 1차 기본계획 (2005년부터 2014년까지)을 수립하여 실행한 후, 2005년 대비 2015년 수도권의 미세먼지 농도 (50 μg/m³)는 평균 18%로 전반적으로 개선되었지만, 여전히 세계 주요 도시보다는 심각한 수준이며, 최근 2013년부터 수도권의 대기질 개선은 다소

정체되는 양상을 보이고 있다(NIER, 2017). 이에 수도권권의 미세먼지 및 대기질 개선에 대한 관심이 증가함에 따라 미세먼지에 관한 다양한 연구가 수행되고 있지만, 현재 국내 연구는 서울 지역에 한정되어 있거나 특정 이벤트의 관측이 대부분이다(Park *et al.*, 2012; Lee *et al.*, 2005; Park *et al.*, 2005).

수도권 중 경기도는 최근 3년간 전국 16개 시·도 중에서 가장 높은 미세먼지 농도를 나타내면서도 불구하고 경기도의 미세먼지에 관한 연구는 매우 부족한 상황이다. 일부, 경기도 지역의 미세먼지 농도 및 배출량분석 자료에 관한 연구가 진행되었으나, 이는 연구자의 거점 지역 및 주거 지역에서의 PMF (Positive Matrix Factorization) 모델 및 통계분석을 사용한 연구가 대부분이었다(Jeong and Hwang, 2015; Kim *et al.*, 2014; Lee *et al.*, 2009; Lee *et al.*, 2008; Hwang and Kim, 2003). 실제 경기도 공단 지역 및 미세먼지가 높게 관측되는 지역에서의 PMF 모델 및 성분 분석 연구는 부족한 실정이다. 따라서 경기도 지역의 미세먼지 저감 대책에 대응할 수 있는 기초자료를 마련하기 위해서는 미세먼지의 성분 분석을 통한 배출원의 기여율 및 지역별 특성을 연구하는 것이 시급하다고 판단된다.

본 연구는 2015년 경기도 미세먼지 연평균($53 \mu\text{g}/\text{m}^3$)에 비해 상대적으로 연평균 농도가 매우 높은 평택 포승공단(2015년 연평균 $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 지역을 연구대상 지역으로 선정하였다. 평택 포승공단은 주변의 충남 당진 지역의 국가산업단지 등의 영향을 크게 받는 지역임에 따라, PMF 모델을 활용하여 평택 지역의 미세먼지의 대기 배출원의 기여율 평가 및 지역적 특성 파악을 통해 대기 배출원 관리정책을 위한 유용한 기초자료를 제공하는 데 본 연구의 목적이 있다.

2. 연구 방법

2.1 PMF (Positive Matrix Factorization) 모델

Paatero and Tapper (1994)에 의해 소개된 PMF

(Positive Matrix Factorization model) 모델은 수용체에서 채취한 입자상 혹은 가스상의 대기오염물질을 분석하여 주변 지역의 대기오염 배출원들이 수용체에 미치는 영향 및 기여율 등을 변형된 인자 분석 통계기법으로 추정하는 것이다. PMF 모델은 측정 데이터 값의 불확도 및 표준편차를 고려하여 인자 부하량은 음수 값을 배제하고, 항상 양의 값으로 계산하며, 오염원의 정량적인 추정이 가능하게 하는 통계 분석이다. PMF 모델을 통해 여러 대상의 오염원을 그룹화시켜 변수 속에 있는 대기오염물질의 오염원의 인자들을 찾아내는 것으로 최근 입자상 물질의 오염원 추정 및 기여율 등의 파악을 위해 PMF 모델이 많이 활용되고 있다(Hwang and Kim, 2013).

아래 식(1)은 PMF 모델식을 나타낸 것으로,

$$X = GF + E \quad (1)$$

행렬 X 는 n 개의 시료 중 측정된 m 개의 분석 화학종으로 나타내어진 차원이 $n \times m$ 인 자료 행렬이다. 즉, X 행렬의 행(row)은 하나의 시료에 대한 분석 화학종의 농도를 의미하여 열(column)은 각각의 채취 시료(samples)들을 의미한다. G 는 $n \times p$ 행렬이며, F 는 $p \times m$ 행렬이다. 여기서 p 는 추출된 인자의 수(오염원의 수)를 의미한다. F 행렬의 행(row)은 특정오염원에 대한 오염원 분류표(source profile)를 나타내며 이에 대응하는 G 행렬의 열(column)은 특정오염원에 대한 배출량, 즉, 각 측정 기간에 대한 오염원의 강도(strength)를 의미한다(Lee *et al.*, 2008; Hwang and Kim, 2003).

그리고 행렬 E 는 잔차 행렬(residual matrix)을 의미하며 아래 식(2)와 같이 표시할 수 있다(Paatero, 2000; Lee *et al.*, 1999).

$$E_{ij} = X_{ij} - \sum_{h=1}^p G_{ih} F_{hj} \quad (i = 1 \sim n, j = 1 \sim m, k = 1 \sim p) \quad (2)$$

PMF 모델의 특징은 측정 자료와 불확도(Uncertainty) 자료를 활용하여 가중 최소자승법(weighted

least-squares fit)의 수식을 활용하는 것이다. 또한, PMF는 검출한계 이하의 자료 및 missing 자료를 모델링 과정에서 각 분석화합종의 분석 오차 평가에 입각하여 그와 상응하는 값을 추정하여 사용할 수 있기 때문에, 버려지는 데이터 수를 최소화할 수 있는 장점이 있다. μ_{ij} 는 X_{ij} 의 불확도를 나타낸다. 식(3)에 도식한 Q값은 반복적인 알고리즘을 통하여 최소화(iterative minimization) 된다.

$$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left(\frac{E_{ij}}{\mu_{ij}} \right)^2 \quad (3)$$

EPA PMF 모델은 분석값과 함께 불확도를 입력해야 하며, 본 연구에서는 불확도의 산출을 위해서 식(4)와 식(5)를 활용하였다.

$$U = 2 \times \text{MDL} \quad (C \leq \text{MDL}) \quad (4)$$

$$U = \sqrt{(P \times C)^2 + (\text{MDL})^2} \quad (C > \text{MDL}) \quad (5)$$

여기서, U ($\mu\text{g m}^{-3}$)는 불확도, MDL (Minimum detection limit)는 장비의 최소검출한계, C ($\mu\text{g m}^{-3}$)는 시료의 농도를 나타낸다. P 값은 오차율(Error Fraction)으로써, 본 연구에서는 이전 연구에서와 같이 10%로 설정하여 사용하였다(Liu *et al.*, 2017; Tan *et al.*, 2014; Paatero, 2000). 유기탄소 및 원소탄소의 경우, 원소탄소의 표준물질 등이 없는 관계로 장비에서 자동으로 구해지는 값을 활용하여, 불확도를 산정하였다.

PMF 모델링 수행 시 가장 중요한 단계는 인자(오염원)의 수를 결정하는 단계인데, 인자의 수가 너무 많으면 실제 존재하지 않는 오염원의 출현 가능성이 커지며, 인자의 수가 너무 작으면 여러 오염원이 중복되어 나타날 가능성이 있다. 인자수의 결정은 특별한 지침이 있는 것이 아니라 연구자의 시행착오(trial and error)에 의해 결정된다(Hwang and Kim, 2013). 인자 수가 증가할수록 Q값은 작아지는 동시에 PM₁₀ 기여율이 없는, 혹은 1% 미만의 기여율이 나오는 인

자들의 증가된다. 본 연구에서는 산출된 오염원의 프로파일의 물리적 해석이 가능하고, 모호성이 제거가 된, 최적의 인자를 찾기 위해 시행착오 방법으로 반복 수행하였으며, 최적의 조건으로 도출된 변수는 인자의 수가 9로 결정되었다.

PMF에서는 인자분석 과정에서 발생하는 인자의 회전 문제를 제어할 수 있는 옵션(FPEAK)이 있다. 본 연구에서는 FPEAK 값을 -1.5에서 1.5까지 0.5씩 단계적으로 다른 FPEAK값을 입력하고, 모델을 반복 수행하여 Q값의 증가가 크지 않으면서 회전자유도가 적은 때의 값을 최적의 조건으로 선택하였으며, 이때 FPEAK값은 0.0이며, Q값은 6864 (이론 Q=8253)이었다.

2.2 CPF (Conditional Probability Function) 모델

CPF 모델은 기상자료(풍향과 풍속)와 PMF 모델에서 계산된 오염원 기여도 값을 활용하여 수용체에 영향을 미치는 각 오염원의 유입 방향과 위치를 추정할 수 있다. 계산된 CPF 값이 높을수록 그 방향에 오염원이 존재할 가능성이 높은 것을 의미하기 때문에, PMF 모델링을 통하여 도출된 각 오염원의 결과를 검증하여 입증하는 중요한 보조 도구로 사용된다. CPF 값은 식(6)에 의해 계산할 수 있다.

본 연구의 CPF는 R 프로그래밍의 Openair 패키지를 활용하였으며, CPF 모델의 $\Delta\theta$ 는 본 샘플링 지역과 가까운 기상자료개방포털의 방재기상관측(평택)에서 제공한 degree 값을 활용하였다.

$$\text{CPF}_{\Delta\theta} = \frac{m_{\Delta\theta}}{n_{\Delta\theta}} \quad (6)$$

여기서, $m_{\Delta\theta}$ 는 $\Delta\theta$ 방향(wind sector)에서 불어오는 바람의 오염원의 분율 기여도 값이 한계값(threshold criterion) 이상일 때 특정 영역 풍향의 발생 횟수를 의미하며, $n_{\Delta\theta}$ 동일영역 풍향의 총 발생 횟수를 의미한다. 풍속이 매우 낮을 때는 불어오는 방향에 대한 불확실도가 높기 때문에 분석에서 제외하였다(0.5 m s^{-1} 미만). 각 오염원의 풍향 의존성을 명확히 구분하

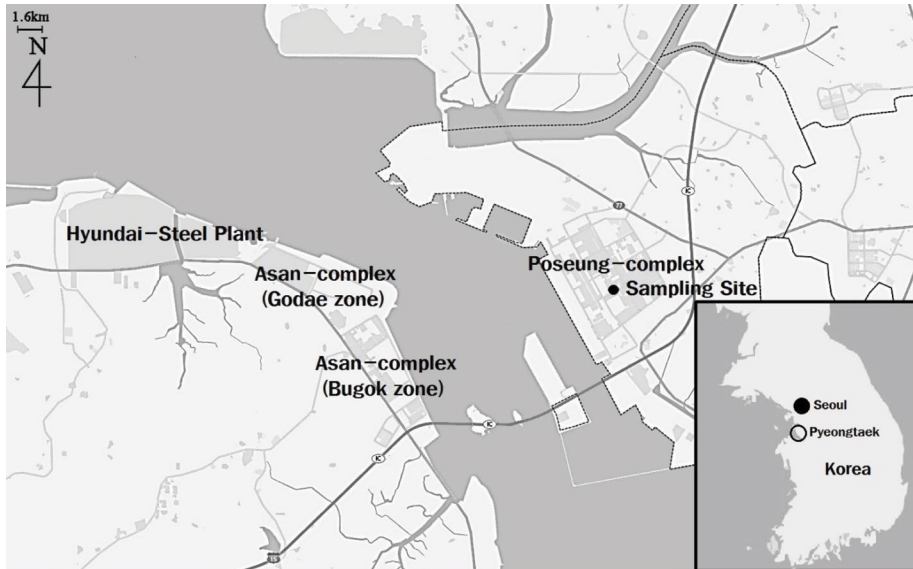


Fig. 1. Location of sampling site.

Table 1. Instrumental conditions for IC analysis.

Type	Anion	Cation
Eluent	3.2 mM Na ₂ CO ₃ , 1 mM NaHCO ₃	4 mM HNO ₃
Flow rate	0.7 mL/min	0.7 mL/min
Injection Volume	20 µL	20 µL
Column	Metrosep A Supp 5 column	Metrosep C3 250 column
Detector	Metrohm, Conductivity Detector	Metrohm, Conductivity Detector

기 위해, 본 연구에서는 한계값을 각 오염원 기여도의 60~65th percentile을 사용하였다(Jeong and Hwang, 2015; Kim and Hopke, 2004; Watson *et al.*, 2004).

2.3 샘플링 지점 및 시료채취

평택 포승공단은 안산과 시흥은 경기도 내 국가산업단지(안산, 시흥 스마트허브)와 함께 대표적인 공업 지역이며, 포승공단 내의 대기오염물질 특성을 살펴보기 위해 공단 내의 공간에서 샘플링을 실시하였다(그림 1). 시료 채취는 2015년 6월부터 2016년 12월까지 매월 둘째 주 평일 5일간 24시간 간격으로 실시하였다. 시료 채취지점에서는 일반 대기오염물질과 기상 자료를 상시 측정하는 대기오염측정망이 운영되고 있다.

대기 중 PM₁₀ 시료채취는 분리입경 10 µm인 impactor (DPM10/30/00, DIGITEL, Swiss)를 장착한 하이볼륨샘플러(DHA-80, DIGITEL, Swiss)를 이용하였으며, 1130 L/min의 유량으로 PM₁₀ 시료를 채취하였다. 필터는 직경 150 mm의 석영필터(Pall Tissuquartz™ filters, 2500 QAT-UP, USA)를 사용하였다. 시료 채취 후 데시케이터에서 24시간 필터를 항량시킨 후 전자저울(BT 224S, Sartorius, Germany)을 이용하여 0.1 mg까지 칭량하였다.

2.4 실험 방법

PM₁₀ 시료 채취 후, 중금속 분석은 석영필터의 1/4을 분취하여 사용하였고, 대기오염공정시험기준 ES 21209 (환경대기 중 중금속화합물 동시분석-유도결

합플라즈마분광법) 실험법에 따라 전처리와 증금속 분석을 진행하였다. 증금속 전처리는 마이크로웨이브(MARS, CEM, USA) 장비를 이용한 마이크로파산 분해법을 적용하였고, 분석은 ICP-OES (Inductively Coupled Plasma - Optical Emission Spectrometry, iCAP7600, Thermo, USA) 장비를 사용하였다.

수용성 무기이온분석은 대기오염측정망 설치·운영지침(별표 25)에 따라 분석하였으며, 석영필터의 1/4을 바이알에 넣고 에탄올 150 µL를 필터에 가하여 침적시킨 후, 초순수 15 mL를 넣은 후 초음파 추출기(S180H, Elmasonic, Germany)를 사용하여 120분간 이온을 추출하였다. IC (Ion chromatograph, Module IC, Metrohm, Swiss) 장비를 이용하여 총 9종류의 음이온(Cl⁻, Br⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻)과 양이온(Na⁺, NH₄⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺)을 분석하였다. 음이온과 양이온의 분석을 위해 전용 컬럼을 사용하였으며, 이온성분 분석 조건은 표 1과 같다.

유기탄소(OC: Organic Carbon) 및 원소탄소(EC: Elemental Carbon)는 대기오염측정망 설치·운영지침(별표 24)에 따라 분석을 실시하였으며, NIOSH 870 protocol을 사용하여 TOT (Thermal/Optical Transmittance, Sunset Lab., USA) 분석기로 측정하였다. 본 실험은 NIOSH (National Institute of Occupational Safety and Health) 5040 method에 준하는 TOT 방식이며, EC/OC 분석방법은 기존 연구(Choi *et al.*, 2015; Heo *et al.*, 2009)와 같은 방법을 활용하였다. 단계별로 온도에 따라 석영필터를 태워서 발생한 가스를 촉매를 이용하여 이산화탄소로 산화시키고 다시 메탄으로 환원시켜 FID (Flame Ionization Detector)로 분석/측정하며, 산소 존재 유무하에 OC와 EC를 분리하여 측정하게 된다. OC는 헬륨만 존재하는 환경에서 단계별 온도(315°C~840°C)에서 측정되며, EC는 산소가 존재하는 환경에서 단계별 온도(550°C~870°C)에서 측정된다. 앞의 두 단계의 과정이 끝난 후, 무기탄소는 내부표준물질인 5%의 메탄가스(balance 95% He)을 사용하여 교정된다.

최소검출한계 산정 시, 검정 곡선 작성시에 사용한

최저농도 표준액을 사용하여, 각 표준물질 7회이상 반복 분석한 결과치의 표준편차 3.14배 값에 평균 시료량을 계산하여 각 성분의 최소검출한계(MDL)를 결정하였다. 탄소의 경우, 현재까지 OC/EC를 구분할 수 있는 표준시료가 존재하지 않으며, 오직 유기탄소(OC) 표준물질만이 존재함에 따라, 본 논문에서의 EC의 MDL을 OC의 MDL값과 동일하게 사용하였다.

매 실험 시 바탕시료(Field Blank)를 분석하였으며, 최소검출한계(MDL)보다 높은 값은 바탕값을 보정하여 결과를 산출하였다.

3. 연구 결과

3.1 주요 성분 결과

표 2는 측정기간 전체에 대하여 분석항목의 평균(mean), 표준편차(SD), 최대값(max), 최소값(min)을 나타내었다. PM₁₀의 농도는 연평균 54 µg/m³로 분석되었으며, 최소값은 15 µg/m³, 최대값은 115 µg/m³로 나타났다. 이는 경기도의 2016년 PM₁₀ 연평균농도 53 µg/m³과 비슷한 수준이었다. 포승공단 내의 도시대기측정망에서 관측된 PM₁₀ 연속 결과는 2016년 연평균이 73 µg/m³로 나타났으며, 연속 측정장비 결과와 하이볼샘플러로 진행한 본 연구결과 모두, 대기환경기준(50 µg/m³)보다 높았고, 계절별로 봄철과 겨울철에 높은 농도 특성을 보였다(GIHE, 2017; NIER, 2017).

미세먼지의 조성은 주로 이온성분, 탄소성분, 금속성분 그리고 결합수를 포함한 기타성분으로 구성되어 있다(Lee *et al.*, 2015; Jeon and Hwang, 2014). 본 연구의 PM₁₀ 미세먼지의 주요 조성은 이온(40.9%), 탄소(15.9%), 금속성분(5%), 그리고 기타성분(38%)으로 조사되었다(그림 2). 이전 연구의 서울 지역의 PM₁₀ 분석결과(Lee *et al.*, 2015), 평균 이온성분은 38%, 탄소성분은 28%, 금속성분은 9.6%, 기타성분은 24.5%로 관측되고 있으며, 본 연구결과와 비슷한 특성을 보였다.

Table 2. The concentration and Minimum detection limit of 30 species in PM₁₀.

Species	Concentration ($\mu\text{g m}^{-3}$)						MDL ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Number of BDL	
	Min	Percentile			Mean	Max			
		1st Qu.	Median	3rd Qu.					
Ion	Cl ⁻	0.000	0.146	0.531	1.666	1.081	5.738	0.08065	7
	NO ₃ ⁻	0.329	2.538	5.851	10.733	7.546	27.675	0.04641	0
	SO ₄ ²⁻	0.577	3.345	5.285	10.502	7.485	27.166	0.08227	0
	Na ⁺	0.058	0.255	0.321	0.433	0.372	1.294	0.00074	0
	NH ₄ ⁺	0.093	2.103	3.555	6.354	4.293	12.490	0.00094	0
	K ⁺	0.000	0.179	0.278	0.386	0.355	1.988	0.00065	1
	Mg ²⁺	0.000	0.093	0.127	0.169	0.179	1.073	0.00137	1
	Ca ²⁺	0.055	0.427	0.674	0.915	0.692	2.210	0.00528	0
	Br ⁺	0.000	0.066	0.088	0.128	0.097	0.245	0.03539	9
Metal	Al	0.064	0.358	0.523	0.710	0.617	2.295	0.00126	0
	As	0.000	0.002	0.004	0.006	0.005	0.016	0.00003	2
	Cr	0.000	0.002	0.005	0.008	0.006	0.024	0.00005	7
	Cu	0.002	0.013	0.020	0.029	0.024	0.122	0.00064	0
	Fe	0.225	0.655	0.878	1.161	0.931	2.168	0.00249	0
	Mg	0.031	0.143	0.206	0.296	0.267	1.018	0.00171	0
	Mn	0.000	0.030	0.044	0.073	0.057	0.291	0.00004	0
	Ca	0.125	0.489	0.621	0.887	0.735	2.117	0.00275	0
	Ni	0.000	0.005	0.008	0.014	0.010	0.038	0.00004	2
	Pb	0.002	0.015	0.025	0.036	0.027	0.063	0.00008	0
Cd	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.005	0.00001	2	
Carbon	OC	1.667	4.600	6.074	8.129	7.062	23.070	0.16988	0
	EC	0.301	0.799	1.164	1.708	1.539	9.243	0.16988	0
PM ₁₀	15.040	37.946	51.907	67.174	54.017	115.431	-	-	

※ BDL: Below minimum detection limit

각 이온성분은 음이온이 NO₃⁻ (7.55 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) > SO₄²⁻ (7.49 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) > Cl⁻ (1.08 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)의 순으로 나타났으며, 양이온은 NH₄⁺ (4.29 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) > Ca²⁺ > Na⁺ > K⁺ > Mg²⁺ 순으로 나타났다(그림 2).

그림 3에 펄택시의 PM₁₀ 질량 농도 및 이온성분(NO₃⁻ 및 SO₄²⁻)의 계절 변동 특성을 나타내었다. 본 연구에서도 NO₃⁻의 농도는 겨울철(12월~2월)에는 평균 10.28 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 여름철(6월~8월) 평균 5.37 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 1.7배 높은 농도를 나타내었다.

일반적으로 NO₃⁻는 겨울철 및 봄철에 높은 농도를 나타냈으며, 이전 연구와 같이 여름철에 최소농도를 나타냈다(Lee *et al.*, 2015). 질산염의 농도는 높은 상대습도 및 낮은 온도에서 형성이 쉽게 됨에 따라 겨울철에 높은 특성을 보이며(Heo *et al.*, 2009; Steinfeld and Pandis, 1998), 특히 NO₃⁻의 생성되는 기작은 NH₄⁺과 관련성이 높은 것으로 알려져 있다(Lee and

Hopke, 2006; Kim *et al.*, 2003). 주변의 열공정 산업 및 이동오염원의 다량의 배출되는 질소산화물의 영향을 받아 2차 오염원인 NO₃⁻의 농도가 높은 특성을 보인 것으로 사료된다.

PM₁₀ 내 수용성 이온성분들 중 두 번째로 많은 부분을 차지하고 있는 SO₄²⁻는 화석연료 연소 등에서 배출되어 수증기와 반응하여 황산이 되고, 이는 다시 암모니아 등과 반응하여 황산암모늄 등 2차 미세입자를 생성되게 된다. 특히, 수용성 이온성분 SO₄²⁻는 여름철에 높은 농도를 보였으며, 이는 황산염 형성에 중요 전구물질인 SO₂가 강한 태양광선의 광화학반응에 의해 입자로 전환되어 기여율이 여름철에 높아지는 것으로 알려져 있다(Heo *et al.*, 2009; Lee *et al.*, 2009; Kim *et al.*, 2007; Song *et al.*, 2001). NH₄⁺은 세 번째로 높은 이온성분이며, 암모늄은 주로 축산, 비료 사용 등으로부터 배출되는 암모니아로부터 2차적으

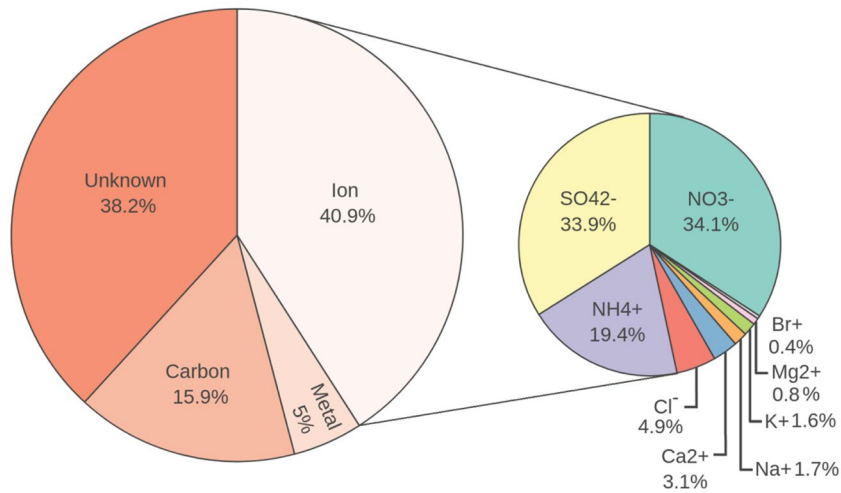


Fig. 2. Composition (%) of ion, metal, carbon and unknown components in PM₁₀.

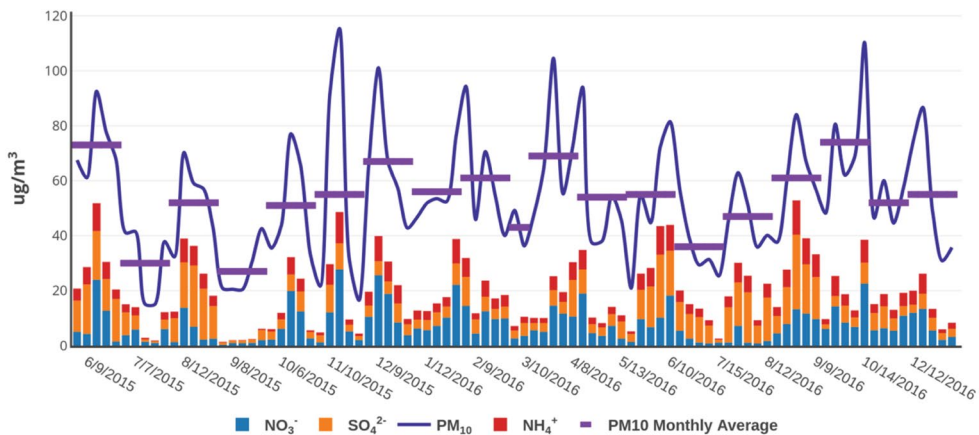
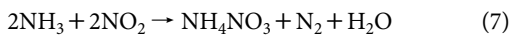


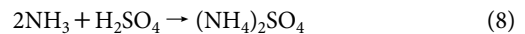
Fig. 3. Variations of particulate ion (NO₃⁻, SO₄²⁻, NH₄⁺) and PM₁₀ concentration.

로 생성되며, 도시대기 지역의 경우에 촉매장치가 장착된 자동차가 암모니아의 주된 배출원으로 보고되고 있다 (Fraser and Cass, 1998). 각종 연소 과정에서 발생한 질소산화물은 가스상으로 존재하는 암모니아와 반응하여 질산암모늄(NH₄NO₃)이 된다(식(7)).



또한 이황산가스(SO₂)는 수증기와 반응하여 황산이 되고, 다시 암모니아 등과 반응하여 황산암모늄

((NH₄)₂SO₄)으로 형성하게 된다(식(8)). 이때 형성된 질산암모늄과 황산암모늄 등이 2차 생성입자가 된다.



금속성분의 분석 결과 PM₁₀의 기여율은 평균 5%이었으며, Fe > Ca > Al > Mg > Mn > Pb > Cu > Ni > Cr > As > Cd 순이었으며, 지각기원인 Fe, Ca, Al 농도가 높고, 인의적으로 발생하는 유해대기오염물질

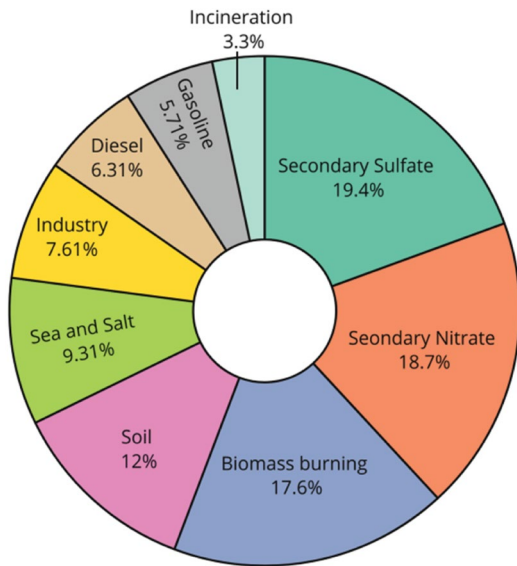


Fig. 4. Sources contribution (%) of PM₁₀ result from PMF.

인 Cd, As, Cr 등이 낮게 조사되었다.

탄소성분 분석 결과 평균 OC는 7.06 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (1.67~23.10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), EC는 1.54 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (1.67~23.10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)로 각각 나타났으며, 일반적으로 2차 유기성 입자물질(SOA : secondary organic aerosol) 형성 시 OC/EC 비율이 > 2.0~2.2 이상으로 보고 되고 있다(Chow *et al.*, 1996). 본 연구의 평균 OC/EC 비율은 5.92로 나타났으며, 특히 여름철(6.98)이 겨울철(4.77)에 비해 높은 특성을 보였다. 여름철에는 높은 온도와 습도의 영향으로 광화학 반응이 활발하게 되어 OC의 농도가 상대적으로 높아지는 것으로 판단된다.

3.2 PMF 모델 결과

EPA PMF 5.0을 활용하여 총 9개의 오염원을 확인하였고, 오염원 기여도와 오염원 분류표(source profile) 등은 그림 4와 5에 도시하였다.

첫 번째 오염원은 SO_4^{2-} , NH_4^+ 등이 높게 기여하는 것으로 나타난 2차 황산염(Secondary sulfate) 오염원으로 판단되며, 본 오염원은 PM₁₀에 19.4% 기여하는 것으로 분석되었다. 황산염은 주로 태양이 강한

여름철에 전구물질인 SO_2 가 광화학반응을 일으켜 2차 입자형성이 용이함에 따라 여름철에 높은 특성을 보이게 된다(Heo *et al.*, 2009; Lee *et al.*, 2009; Lee *et al.*, 2008). 그림 6에서 일별 기여도를 확인한 결과, 다른 계절에 비해 여름철(6월~8월)에 기여도가 높은 것을 알 수 있다.

두 번째 오염원은 NO_3^- , NH_4^+ 등이 주로 기여하는 2차 질산염(Secondary nitrate) 오염원으로 PM₁₀에 18.7% 기여하는 것으로 분석되었다. 2차 질산염은 화학반응을 통해 생성되는 오염원이기 때문에 장거리 이동의 영향을 받을 수 있다. 특히, 대기 중에 방출된 NO_x 등이 암모니아 등과 결합하여 질산염의 형태로 존재하여 미세먼지의 농도를 높이게 된다(Lee *et al.*, 2008).

질산염은 황산염과 반대로 낮은 온도와 높은 습도가 2차 질산염 형성을 돕기 때문에 주로 겨울철에 높은 특성을 보이게 된다(Heo *et al.*, 2009; Lee *et al.*, 2009; Lee *et al.*, 2008). 일별 기여도를 확인한 결과 겨울철에 높은 특성을 보였다(그림 6).

세 번째 오염원은 OC, EC, K^+ , SO_4^{2-} 등이 주로 기여하는 생물상 연소(Biomass burning) 오염원으로 PM₁₀에 17.6% 기여하는 것으로 분석되었다. 특히 높은 OC와 K^+ 는 노천소각과 관련된 주요 추적자(marker species)로 평가되고(Jeong and Hwang, 2015; Park and Kim, 2005; Kang *et al.*, 2004) 있으며, 조사 지역은 농사 및 공업활동이 혼재된 지역으로 폐기물, 목재, 노천소각 등의 생물상 연소가 자주 일어나는 곳으로 판단된다. 계절에 관계없이 지속적으로 일어나지만 그림 6에서 일별 변화를 확인결과 다른 계절에 비해 상대적으로 겨울철에 기여도가 높은 것을 알 수 있다.

네 번째 오염원은 주요 토양 기원인 Mg, Al, Ca, Fe, Ca^{2+} 이 주로 기여하는 것으로 토양 및 도로 비산과 관련된 오염원이며, 이 오염원의 PM₁₀ 기여도는 12%로 분석되었다. 토양의 주요 중금속은 Mg, Al, Ca, Fe, Si와 K을 대표하며(Heo *et al.*, 2009), 토양의 입자는 도로교통 및 건설공사 현장과 같은 발생으로부터 대

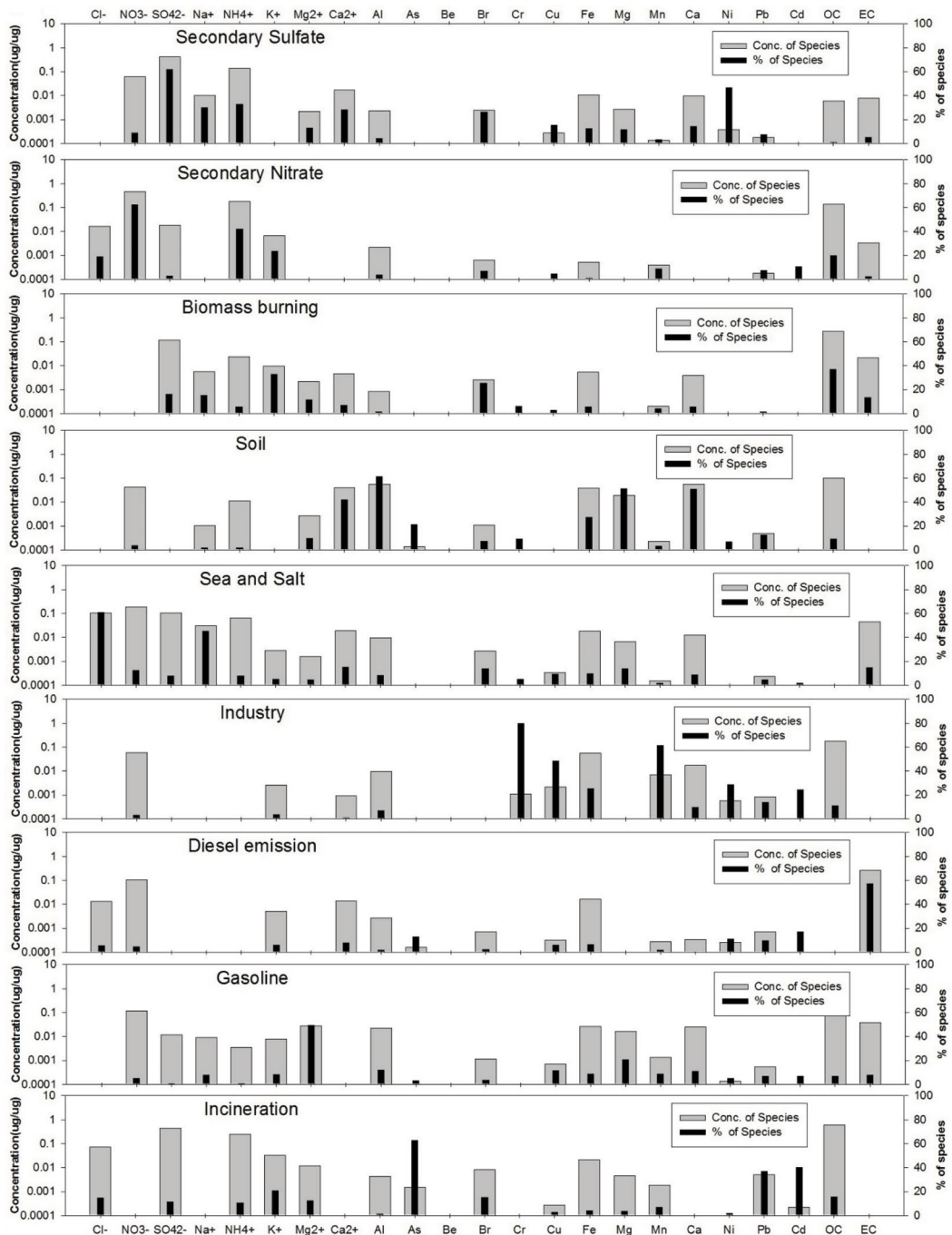


Fig. 5. The source profiles of PM₁₀ in Pyeongteak-si by EPA PMF5.0.

기 증으로 재비산 되는 것으로 판단된다(Lee and Hopke, 2006). Ca²⁺는 도로포장시 석회석에서 주로

발생하며, 자동차 운행에 따른 마모 등에 의해 배출하여 도로 분진의 marker로 알려져 있다(Lee et al.,

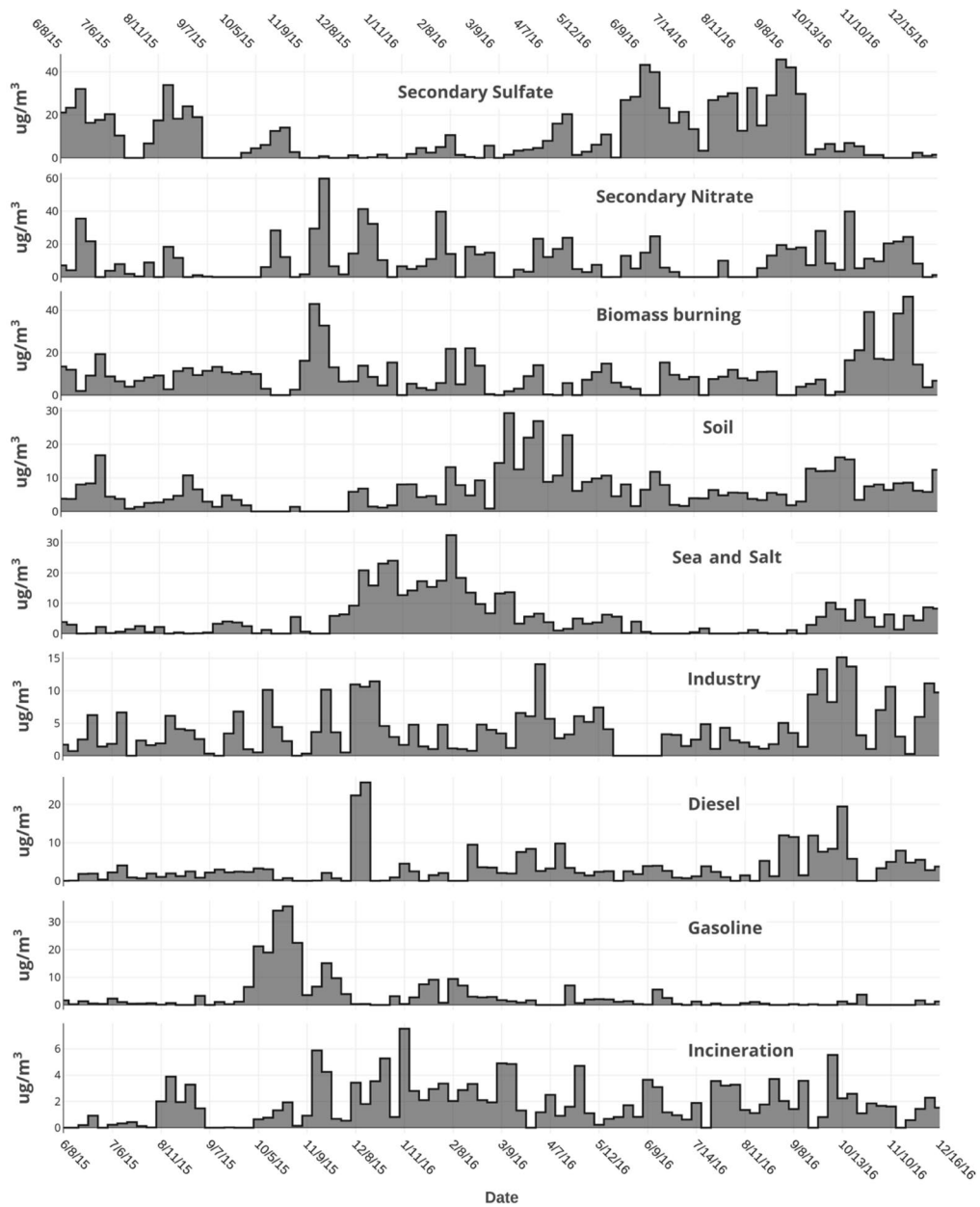


Fig. 6. Time series plots for source contribution of PM_{10} in Pyeongteak-si.

2008; Finnlayson-Pitts and Pitts Jr, 2000). 그림 6에서 월별 변화를 확인한 결과, 이는 고비사막 등에서 발생한 황사의 영향으로 봄철(3월~4월)이 다른 계절에 비해 상대적으로 높은 것을 알 수 있으며, 반면 높

은 습도와 많은 강우량에 의해 여름철에는 토양의 영향이 낮은 것을 확인할 수 있다.

다섯 번째 오염원은 Na^+ , Cl^- 이 주성분인 해염의 영향으로 분류하였다. 본 연구의 조사지역은 평택항

과 가까워 해염 입자의 PM₁₀ 기여율 9.3%로 분석되었다. 해염입자의 주성분은 Na⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, Mg²⁺, Ca²⁺로 알려져 있으며 (US EPA, 1999), 본 연구의 오염원 분류표(그림 5)에도 해염의 주성분이 잘 나타난 것을 알 수 있다.

여섯 번째 오염원은 PM₁₀ 기여율이 7.6%로 Fe, Ca, Cr, Cu가 높은 농도 분포를 보이고 있는 산업관련 오염원으로 조사되었다. 특히, 소성로 및 용광로의 주요 Tracers는 Fe, Cu, Pb, Cd, AS 및 Mn으로 알려져 있으며 (Watson *et al.*, 2004), 주변의 산업시설 중 제철 및 비철금속과 같은 금속 가공시설에서의 영향으로 큰 것으로 판단된다.

일곱 번째 오염원은 높은 EC 농도가 주성분인 디젤기관의 연소시설 및 기름연소 등의 오염원 영향으로 판단되며, PM₁₀ 기여율 6.3%로 분석되었다. 디젤 자동차는 높은 EC 농도 및 Ca, Cu 등이 배출되며 (Lee and Hopke, 2006), 디젤기관 및 난방시설의 불완전 연소로 인한 EC 농도 증가 늘어난 것으로 판단된다. Ni, Cu의 경우는 기름연소의 marker로써, 경유나 B-C 등의 연소에 의해 배출되는 것으로 알려져 있으며 (Lee *et al.*, 2008; Lee *et al.*, 2002; Song *et al.*, 2001), 가을과 겨울철의 기여도 분포가 높은 특성을 보여주고 있어, 겨울철 난방에 의한 영향을 잘 반영한다(그림 6). 또한 본 지역은 주요 고속도로와 가까우며, 공

단 지역의 특성상 대형 화물차의 이동이 빈번히 발생하므로 디젤 기관의 영향이 다른 지역에 비해 높은 것을 알 수 있다.

여덟 번째 오염원은 PM₁₀ 기여율이 5.7%로 OC, Ca, Cu, Fe, NO₃⁻, SO₄²⁻ 등이 높은 가솔린 기관의 연소와 관련된 오염원으로 분석되었다. 가솔린은 EC에 비해 OC가 높은 농도 특성을 보이며 (Heo *et al.*, 2009; Lee and Hopke, 2006), Ca는 차량 윤활유 그리고 Cu는 브레이크 마모에 의해 (Lough *et al.*, 2005), Fe는 촉매장치 장착된 가솔린 차량에서 배출된다고 알려져 있다 (Schauer *et al.*, 2002). 하지만 가솔린 차량의 경우에는 일년 내내 유사한 오염 특성을 보여야 하나, 본 PMF 모델은 개별로 오차율을 산정할 수 없어 평균 오차율을 사용하여 불확도를 제시하였으며, 이때 제시된 불확도는 정확성의 한계를 가지고 있다.

마지막으로 아홉 번째 오염원은 Cl⁻, OC, SO₄²⁻ 및 유해 중금속(As, Pb, Cd)의 분포가 큰 소각시설 등의 영향으로 판단 된다. SO₄²⁻와 함께 Cl⁻, OC는 소각 오염원에서 약 10% 이상 기여하는 것으로 알려져 있으며 (Watson *et al.*, 2004; Chow, 1995), 유해 중금속 등도 큰 분포로 나타나 소각에 의한 영향이 존재하는 것으로 판단된다.

공업 단지임에도 불구하고 산업관련 오염원에 대한 기여도가 제철 및 비철금속 관련시설 7.6%와 소각

Table 3. Comparison of source contributions (%) for PM₁₀ in Korea using the PMF model.

Study Sampling site	NIER (2006) ^{a)}		Lee <i>et al.</i> (2008) ^{a)} Yongin	Lee <i>et al.</i> (2009) ^{a)}			Lim <i>et al.</i> (2010) ^{a)} Deajeon	Yi and Hwang (2014) ^{a)} Seoul	Hwang <i>et al.</i> (2008) ^{b)} Gumi	This study ^{b)}
	Seoul	Incheon		Hwasung	Paju	Icheon				
Soil Dust	35.9	26.9	25.4	32.8	26.5	26.3	16	34.9	5	12.0
Combustion/ Industry	-	3.9	16.9	7.2	14.9	18.4	37	4.9	10	10.9
Motor Vehicle	11.8	14.3	17.7	11.1	15.2	16.2	21	16.6	26	12
Biomass/ Field burning	7.2	18.3	-	11.0	10.5	12.1	3	6.0	3	17.6
Secondary Aerosol	15.4	17.3	34.4	26.2	26.5	20.2	23	25.5	56	38.1
Natural source	3.8	2.3	-	11.8	6.1	5.1	-	6.2	-	9.3
Others	25.9	17	5.6	-	-	-	-	5.8	-	-

^{a)} Sampling location (Land use): Residential area, ^{b)} Sampling location (Land use): Industrial area

시설 3.3%로 총 10.9%로 낮게 평가되었다. PM₁₀에 대한 PMF 모델을 적용 후 주거 지역에서의 국내 이전 연구결과는 2차 황산염과 2차 질산염과 같은 2차 입자 형성 기여율은 비교적 낮은 것으로 나타났으며,

반면 산업 지역에서는 2차 입자 형성 기여율이 높아지는 특성을 보여주고 있다(표 3). PMF 모델을 통해 직접적인 산업 배출원별로 요인을 분리하지 못하였으나, 실제 공단 지역에서 배출된 가스상 전구물질이

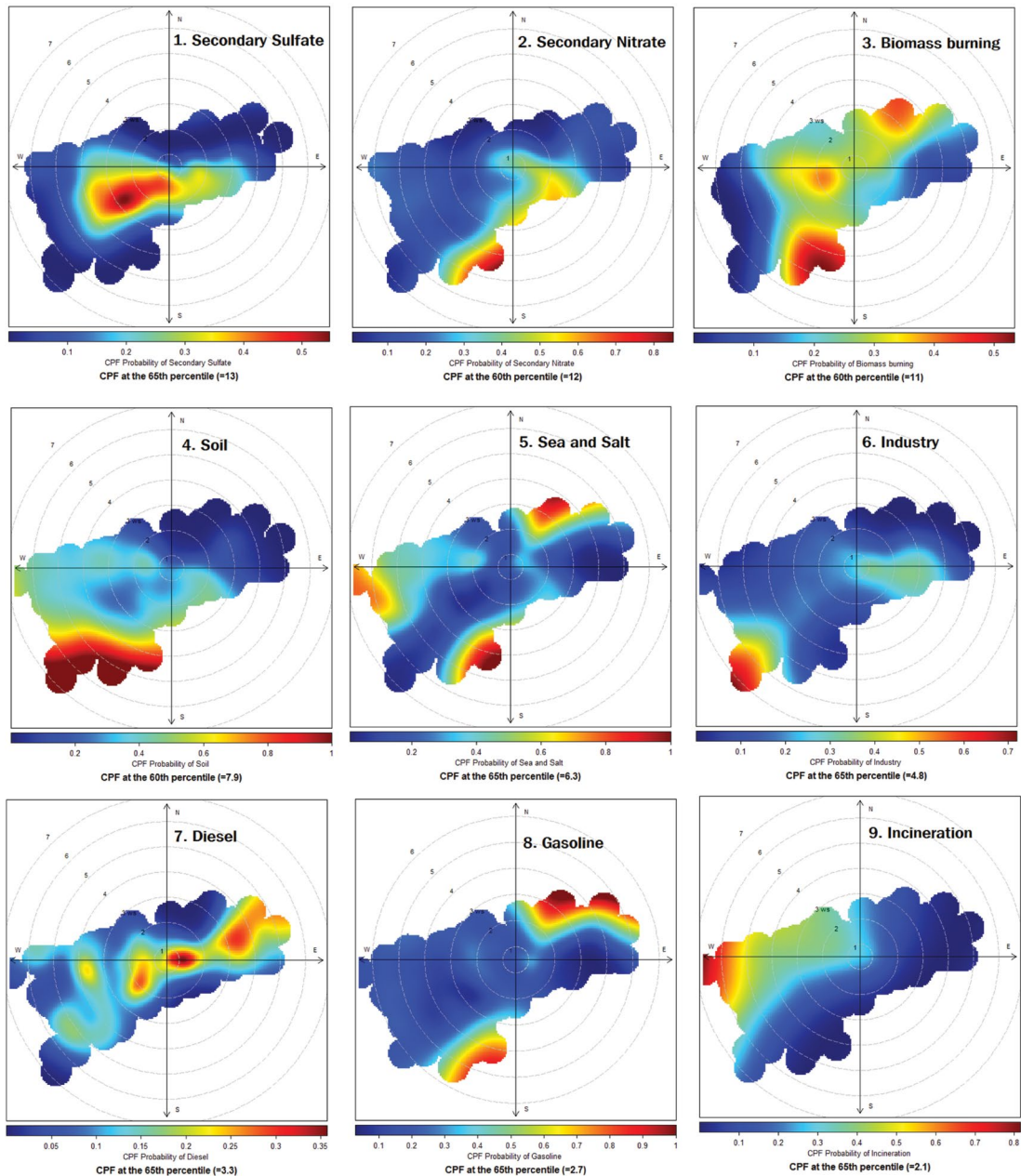


Fig. 7. CDF plots for the contributor of PM₁₀.

2차 입자의 형성과 기여율에 직간접적으로 영향을 많이 준 것으로 판단된다.

3.3 CPF 결과

국지적인 오염원의 영향을 파악하기 위해 CPF 모델을 수행하였으며, 그 결과는 그림 7에 나타내었다. 2차 황산염(Secondary sulfate) 오염원은 주로 남서쪽 방향에서 오는 것으로 평가되었다. 2차 황산염의 경우 주로 광화학반응 통한 장거리 운송 오염물질로 중국에서의 영향이 큰 것으로 판단되며, 또 다른 2차 미세먼지 생성오염물질인 질산염(Secondary nitrate) 오염원은 주 방향이 남향과 남동향으로 제시하고 있다. 이는 시료채취장소로부터 남쪽-남동쪽에 위치한 금속 가공시설 및 열공정 시설에서 배출된 NO_x의 영향을 받는 것을 알 수 있다.

생물상 연소(Biomass burning) 오염원은 조사지역의 남서방향과 북서방향 지역에서 폐기물, 목재, 노천 소각 등의 생물상 연소가 자주 일어나는 곳으로 판단된다. 생물상 연소는 미세먼지의 기여율이 3번째로 높기 때문에 이 주변 지역에 대한 생물상 연소 금지 등에 대한 캠페인이 필요할 것으로 판단된다.

토양관련 오염원은 남쪽을 중심으로 남서방향에서 유입되는 것을 알 수 있다. 남서방향 2.5 km 이내에 대규모 포승지구 부지조성공사가 2015년 10월부터 2020년 말까지 진행 중에 있다. 이런 택지 부지조성공사 중에 발생하는 비산먼지, 그리고 공사차량 운행에 의한 재비산 등이 빈번히 발생하고 있어, PM₁₀ 오염도에 영향을 주는 것으로 사료된다.

해염의 영향의 경우, 실제 샘플링 지역의 남서쪽 1.5 km 이내에 평택항이 존재하며, CPF 결과도 바다와 가까운 남쪽 및 서쪽에서 해염이 우세하게 기여하고 있음을 보여준다.

산업 관련 오염원은 주로 남서 방향에서 유입되는 것으로 판단된다. 남서방향에는 당진 지역으로, 국가산업단지내 제철 및 비철금속 공장 등의 대규모 대기 배출원이 존재하며, 또한 샘플링 지역 남서방향 포승공단 주변에도 비철금속의 가공시설 등이 존재

하므로, 복합적으로 주변 배출원의 영향을 받는 것으로 판단된다.

디젤기관의 오염원은 북동쪽과 샘플링 지역의 주변의 유입의 영향이 큰 것으로 나타났다. 북동 방향에는 왕복 6차선 77국도와 서해안고속도로가 지나가고 있어, 이곳의 선오염원 영향을 받으며, 또한 공단 지역 특성상 물류 운반 등을 위한 대형차량의 운행이 다른 지역에 비해 높아, 이 디젤기관 오염원의 영향이 큰 것으로 판단된다. 가솔린 기관은 디젤기관과 유사하게 북동쪽의 간선도로(국도77번)와 남쪽의 서해고속도로(시료채취 장소에서 남쪽의 직선거리 2 km 이내에 위치) 오염원의 영향을 받고 있는 것을 확인할 수 있다. 소각시설 오염원은 서쪽으로부터 영향을 크게 받는 것으로 나타났으며, 실제 북서쪽 방향 1.5 km 떨어진 곳에 산업폐기물 소각장 오염원이 존재한다.

4. 결 론

본 연구에서는 2015년 6월부터 2016년 12월까지 포승공단 내 도시대기측정망에서 채취한 PM₁₀에서의 탄소성분, 이온성분 및 중금속 성분 데이터에 PMF 및 CPF 모델링을 적용하여, 주요 오염원의 기여도를 추정하고자 하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

분석 자료에서 최적의 영향 오염원 수가 9로 결정되었고, 2차 황산염(Secondary sulfate) 및 2차 질산염(Secondary nitrate)은 PM₁₀에 기여율이 19.4% 및 18.7%로, 2차 생성물질이 차지하는 비율이 38.1%로 PM₁₀ 농도에 많은 영향을 미치는 것으로 조사되었다. 그 이외에 생물상 연소(17.6%), 토양관련 오염원(12%), 해염의 영향(9.3%), 산업 관련 오염원(7.6%), 디젤기관의 오염원(6.3%), 가솔린 기관(5.7%), 소각시설 오염원(3.3%) 순으로 나타났다.

오염원의 지역적 영향 특성을 파악하기 위해서 PMF 오염원별 기여도와 기상자료를 이용하여 CPF

수행하였다. 분석 결과, 지역적 오염원의 기여도 및 오염원 유입 방향 등의 특성이 잘 반영되는 것으로 나타났고, 이들 결과는 지역 대기 정책자료로 활용될 수 있을 것으로 생각된다. 특히, 생활상 연소 및 대규모 택지개발로부터 생성되는 토양 오염원 등은 대기 질 향상을 위해 지역정부 자체에서 감시/규제 및 캠페인 등과 같은 정책적 제도 모색이 가능한 오염원으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 국립환경과학원의 시도보건환경연구원 국고보조사업의 일환으로 부분적으로 지원받아 수행한 연구임(076-1900- 1946-309-330).

References

- Choi, N.R., Lee, J.Y., Jung, C.H., Lee, S.Y., Yi, S.M., Kim, Y.P. (2015) Concentrations and Characteristics of Carbonaceous Compounds in PM₁₀ over Seoul: Measurement between 2006 and 2007, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 31(4), 345-355. (in Korean with English abstract).
- Chow, J.C. (1995) Measurement methods to determine compliance with ambient air quality standards for suspended particles, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 45(5), 320-382.
- Chow, J.C., Watson, J.G., Lu, Z., Lowenthal, D.H., Frazier, C.A., Solomon, P.A., Thuillier, R.H., Magliano, K. (1996) Descriptive analysis of PM_{2.5} and PM₁₀ at regionally representative locations during SJVAQS/AUSPEX, *Atmospheric Environment*, 30(12), 2079-2112.
- Finnlayson-Pitts, B., Pitts Jr, J. (2000) *Chemistry of the upper and lower atmosphere*, Academic, San Diego.
- Fraser, M.P., Cass, G.R. (1998) Detection of excess ammonia emissions from in-use vehicles and the implications for fine particle control, *Environmental Science & Technology*, 32(8), 1053-1057.
- GIHE (2017) *Annual Report of Air Quality in Gyeonggi-do, 2016*, Gyeonggi-do Institute of Health & Environment.
- Heo, J.B., Hopke, P., Yi, S.-M. (2009) Source apportionment of PM_{2.5} in Seoul, Korea, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(14), 4957-4971.
- Hwang, I., Kim, D. (2003) Source identification of ambient PM-10 using the PMF model, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 19(6), 701-717.
- Hwang, I., Kim, D. (2013) Research Trends of Receptor Models in Korea and Foreign Countries and Improvement Directions for Air Quality Management, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 29(4), 459-476.
- Hwang, I.J., Cho, Y.H., Choi, W.G., Lee, H.M., Kim, T.O. (2008) Quantitative estimation of PM-10 source contribution in Gumi city by the positive matrix factorization model, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 24(1), 100-107. (in Korean with English abstract)
- Jeon, B.I., Hwang, Y.S. (2014) Characteristics of Metallic and Ionic Concentrations in PM₁₀ and PM_{2.5} in Busan, *Journal of Environmental Science International*, 23(5), 819-827. (in Korean with English abstract)
- Jeong, Y., Hwang, I. (2015) Source Apportionment of PM_{2.5} in Gyeongsan Using the PMF Model, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 31(6), 508-519. (in Korean with English abstract)
- 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, *Atmospheric Environment*, 38(28), 4749-4760.
- Kim, E., Hopke, P.K. (2004) Source apportionment of fine particles in Washington, DC, utilizing temperature-resolved carbon fractions, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 54(7), 773-785.
- Kim, E., Hopke, P.K., Edgerton, E.S. (2003) Source identification of Atlanta aerosol by positive matrix factorization, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 53(6), 731-739.
- Kim, H.S., Huh, J.B., Hopke, P.K., Holsen, T.M., Yi, S.M. (2007) Characteristics of the major chemical constituents of PM_{2.5} and smog events in Seoul, Korea in 2003 and 2004, *Atmospheric Environment*, 41(32), 6762-6770.
- Kim, J.S., Hong, S.M., Kim, M.S., Kim, Y.Y., Shin, E.S. (2014) 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. (in Korean with English abstract)

- lish abstract)
- Lee, B.K., Kim, Y.H., Ha, J.Y., Lee, D.S. (2005) Development of an Automated and Continuous Analysis System for PM_{2.5} and Chemical Characterization of the PM_{2.5} in the Atmosphere at Seoul, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 21(4), 439-458.
- Lee, E., Chan, C.K., Paatero, P. (1999) Application of positive matrix factorization in source apportionment of particulate pollutants in Hong Kong, *Atmospheric Environment*, 33(19), 3201-3212.
- 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, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 24(4), 439-454. (in Korean with English abstract)
- Lee, J.H., Hopke, P.K. (2006), Apportioning sources of PM_{2.5} in St. Louis, MO using speciation trends network data, *Atmospheric Environment*, 40, 360-377.
- Lee, J.H., Yoshida, Y., Turpin, B.J., Hopke, P.K., Poirot, R.L., Liroy, P.J., Oxley, J.C. (2002) Identification of sources contributing to mid-Atlantic regional aerosol, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 52(10), 1186-1205.
- Lee, K.B., Kim, S.D., Kim, D.S. (2015) Ion Compositional Existence Forms of PM₁₀ in Seoul Area, *Korean Society Of Environmental Engineers*, 37(4), 197-203. (in Korean with English abstract)
- Lee, T.J., Huh, J.B., Yi, S.M., Kim, S.D., Kim, D.S. (2009) Estimation of PM₁₀ source contributions on three cities in the Metropolitan area by using PMF model, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 25(4), 275-288. (in Korean with English abstract)
- Lim, J.M., Lee, J.H., Moon, J.H., Chung, Y.S., Kim, K.H. (2010) Source apportionment of PM₁₀ at a small industrial area using Positive Matrix Factorization, *Atmospheric Research*, 95(1), 88-100.
- Liu, B., Yang, J., Yuan, J., Wang, J., Dai, Q., Li, T., Bi, X., Feng, Y., Xiao, Z., Zhang, Y. (2017) Source apportionment of atmospheric pollutants based on the online data by using PMF and ME2 models at a megacity, China, *Atmospheric Research*, 185, 22-31.
- Lough, G.C., Schauer, J.J., Park, J.S., Shafer, M.M., DeMinter, J.T., Weinstein, J.P. (2005) Emissions of metals associated with motor vehicle roadways, *Environmental Science & Technology*, 39(3), 826-836.
- Menon, S., Hansen, J., Kazarenko, L., Luo, Y. (2002) Climate effects of black carbon aerosols in China and India, *Science*, 297(5590), 2250-2253.
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2006) Investigation of formation process and establishment of emission reduction strategy for PM₁₀, National Institute of Environmental Research.
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2017) Annual Report of Air Quality in Korea, 2016, National Institute of Environmental Research.
- Paatero, P. (2000) User's Guide for Positive Matrix Factorization Programs PMF2 and PMF3, Part 1: Tutorial; 2000, There is no corresponding record for this reference.
- Paatero, P., Tapper, U. (1994) Positive matrix factorization: A non-negative factor model with optimal utilization of error estimates of data values, *Environmetrics*, 5(2), 111-126.
- Park, E.J., Kang, M.S., You, D.E., Kim, D.S., Yu, S.D., Chung, K., Park, K. (2005) Health risk assessment of heavy metals in fine particles collected in Seoul metropolitan area, *Journal of Environmental Toxicology*, 20(2), 179-186. (in Korean with English abstract)
- Park, S., Moon, K., Park, J., Kim, H., Ahn, J., Kim, J. (2012) Chemical characteristics of ambient aerosol during Asian Dusts and high PM episodes at Seoul intensive monitoring site in 2009, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 28(3), 282-293. (in Korean with English abstract)
- Park, S.S., Kim, Y.J. (2005) Source contributions to fine particulate matter in an urban atmosphere, *Chemosphere*, 59(2), 217-226.
- Schauer, J.J., Kleeman, M.J., Cass, G.R., Simoneit, B.R. (2002) Measurement of emissions from air pollution sources. 5. C1– C32 organic compounds from gasoline-powered motor vehicles, *Environmental Science & Technology*, 36(6), 1169-1180.
- Seaton, A., Godden, D., MacNee, W., Donaldson, K. (1995) Particulate air pollution and acute health effects, *The Lancet*, 345(8943), 176-178.
- Song, X.-H., Polissar, A.V., Hopke, P.K. (2001) Sources of fine particle composition in the northeastern US, *Atmospheric Environment*, 35(31), 5277-5286.
- Steinfeld, J.H., Pandis, S.N. (1998) *Atmospheric Chemistry and Physics From Air Pollution to Climate Change*, John Wiley & Sons, New York.
- Tan, J.H., Duan, J.C., Chai, F.H., He, K.B., Hao, J.M. (2014) Source apportionment of size segregated fine/ultrafine particle by PMF in Beijing, *Atmospheric Research*, 139, 90-100.
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (1999) Air quality criteria for particulate matter, Vol 1, EPA/600/P-99/002a, US Environmental Protection

Agency, Office of Research and Development, National Center for Environmental Assessment.

- Watson, J., Chow, J., Fujita, E. (2004) Protocol for applying and validating the CMB model for PM_{2.5} and VOC, US Environmental Protection Agency.
- Yi, S.-M., Hwang, I. (2014) Source Identification and Estimation of Source Apportionment for Ambient PM₁₀ in Seoul, Korea, *Asian Journal of Atmospheric Environment* (AJAE), 8(3), 115-125.
- Zhang, Q., Zhang, J., Xue, H. (2010) The challenge of improving visibility in Beijing, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(16), 7821-7827.

Authors Information

- 허종원 (경기도보건환경연구원 환경연구사)
김찬혁 (경기도보건환경연구원 환경연구사)
민윤기 (경기도보건환경연구원 환경연구사)
김현자 (경기도보건환경연구원 환경연구사)
성연국 (경기도보건환경연구원 환경연구관)
김종수 (경기도보건환경연구원 환경연구관)
이경빈 (국립환경과학원 환경연구사)
허종배 (서울대학교 보건대학원 연구교수)