

연구논문

수용모델을 이용한 광양만권 주거지역 대기 중 초미세먼지 발생원 기여도 평가(II)

박혜영¹ · 박현수¹ · 이보람¹ · 최희진¹ · 김학림¹ · 임희정¹ · 박찬오¹ · 김익산¹ · 박귀환¹
전두영¹ · 배민석^{2†}

¹전라남도보건환경연구원
²국립목포대학교 환경공학과

Source Assessment of PM-2.5 in the Residential Areas of Gwangyang Bay using Source Apportionment Model(II)

Hye-Young Park¹, Hyun-Su Park¹, Bo-Ram Lee¹, Hee-Jin Choi¹, Hak-Rim Kim¹, Hee-Jung Lim¹,
Chan-O Park¹, Ik-San Kim¹, Gui-Hwan Park¹, Doo-Young Jeon¹, and Min-Suk Bae^{2†}

¹Jeollanam-do Institute of Health and Environment Research, Muan-gun Samhyang-eup, Jeollanam-do, 58568, Korea
²Department of Environmental Engineering, Mokpo National University Muan-gun Cheonggye-myeon, Jeollanam-do, 58554, Korea

Received March 15, 2022 / Revised March 27, 2022 / Accepted March 31, 2022

The source contributions in PM-2.5 were investigated in two residential areas (i.e., Yeosu and Suncheon of Gwangyang Bay) using a source apportionment model. As a result, eight sources have been identified such as secondary sulfate (31%), mobile (16.8%), secondary nitrate (15.9%), soil and road emission (15.2%), biomass burning (11.5%), oil combustion (4.2%), coal combustion (3.7%), and industry activity (1.7%) in the Yeosu area. In the Suncheon area, secondary sulfate (27.3%), biomass burning (16.4%), and secondary nitrate (15.3%) were investigated as the major sources. Clustering of the trajectories revealed dominant wind patterns associated with high concentrations due to long range transport. In conclusion, this study shows that the source apportionment model yields results for identifying pollutant sources in two receptor locations.

Key word: PMF, Source Apportionment Model, Trace Elements

1. 서 론

대기오염물질 중 초미세먼지는 2013년 세계보건기구 (WHO) 산하 국제암연구소(International Agency for Research on Cancer, IARC)에서 1급 발암물질로 규정할 정도로 건강에 치명적이며, 호흡기계 및 심장 등 각종 질환을 유발하는 것으로 발표되고 있고¹⁾ 봄철 황사 및 가을, 겨울철 스모그 현상 등으로 초미세먼지는 인간의 삶에 매우 밀접한 영향을 미치고 있다. 대단위 산업단지가 조성되어 있는 광양만권지역은 중화학공업, 석유 및 제철 산업단지,

화력발전소와 항만·대형선박 등에 의한 다양한 대기오염 물질이 배출되고 있고, 그 중 여수지역이 30.7%, 광양지역 27.4%, 순천지역 3.97%로 전라남도 대기오염물질 중 62%가 배출되고 있어 대기오염물질 집중관리지역이다.²⁾

미세먼지 발생은 굴뚝 등 연료연소 시설에서 직접 배출되는 1차 발생과 가스상 전구성분이 대기 중에서 광화학반응을 통해 입자형태로 변하는 2차 발생으로 나뉜다.³⁾ 특히, 2차 미세먼지의 경우 휘발성유기화합물과 질소산화물, 황산화물 등과 화학반응을 거치면서 미세먼지 고농도 시 2차 미세먼지로서 그 농도가 높게 나타난다.⁴⁾ 특

[†]To whom correspondence should be addressed.

Tel: 82-61-450-2485, Fax: 82-61-450-2485, E-mail: minsbae@mokpo.ac.kr

히 광양만권 지역에서 휘발성유기화합물 배출량은 60,916 톤으로 전라남도의 62%를 차지하고 있으며, 황산화물과 질소산화물의 배출량도 각각 49톤(95.5%), 99톤(69.9%)으로 배출되고 있어 미세먼지 생성에 크게 영향을 미친다.²⁾ 우리나라 초미세먼지 배출원은 비산먼지가 19.7%, 비도로 이동오염원 18.2%, 생물성연소 13.1%, 도로이동오염원 7.1% 등에서 주로 배출된다. 하지만, 광양만권 지역 초미세먼지 배출원은 비도로 이동오염원, 제조업연소, 생산공정, 에너지산업연소, 비산먼지 등에 의해 배출되는 지역적 특성을 나타내고 있다.²⁾

따라서 본 연구에서는 여수지역 여천지점과 순천지역 신대지점의 도시대기측정소를 연구지점으로 광양만권 발생원 부근 주거지역에 미치는 초미세먼지 발생원을 분석하였다. 여수 여천지역은 주거 및 상업지역으로 도시 및 농촌지역이 혼재한 도시·농촌 복합 형태지역으로써 택지개발 등으로 주거와 상업지역의 신도심을 형성하고 있는 지역이다. 순천 신대지역은 최근 새롭게 조성된 대규모 아파트단지를 중심으로 순천시 전체 인구의 약 53%가 집중 분포하고 있으며 호남고속국도, 남해고속국도 등 국도 6개 노선과 지방도 8개 노선이 얽혀있는 지역이다. 두지점에는 도시대기측정소와 유해대기측정소 및 중금속측정소가 설치되어 대기오염물질을 지속적으로 모니터링하고 있는 관심지역이다. 특히 순천지역은 대기오염물질 배출량이 여수, 광양지역에 비해 매우 적게 배출되고 있음에도 지리적 위치가 두지역의 영향을 가장 많이 받고 있다. 두 지역의 오존경보 현황은 '21년 순천 17회, 여수 9회,

광양 12회, '20년 순천 12회, 여수 7회, 광양 7회로 순천 지역은 전라남도에서 매년 오존경보 횟수가 가장 많이 발령되는 지역으로 2차 대기오염물질이 활발하게 형성되는 지역으로 판단되고 있다. 따라서 초미세먼지 대기 생성반응과 함께 오존 등 광화학 산화물질이 같이 생성되므로 광양만권 초미세먼지에 대한 원인규명 등 다른 대기오염물질 저감을 위한 연구에 필수적이다.⁴⁾

본 연구에서는 Positive Matrix Factorization (PMF) 및 Conditional Probability Function (CPF) 모델을 통해 근거리 오염발생원을 파악하고, 역궤적 분석 및 Concentration Weighted Trajectory (CWT) 모델을 기반으로 한 장거리 배출원에 대한 위치를 추정하였다. 이는, 초미세먼지 성분의 발생원 특성에 맞는 지역 차원의 관리대책과 체계적인 저감대책을 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 연구방법

2.1. 시료채취

연구지점은 광양만권 지역 중 여수시 여천지점과 순천시 신대지점으로 채취 지점은 Fig. 1과 같다. 시료채취는 24시간 간격으로 한달에 두 번 14일 간격으로 7일 연속 채취하였으며, 2020년 9월부터 2021년 8월까지 여수 여천지점 187개, 순천 신대지점 184개를 분석하여 총 371개의 시료를 분석하였다. 두지점에서 대기오염 측정 자료(SO₂, NO₂, CO, O₃, PM-10, PM-2.5)를 분석하였고, 기상자료 풍향, 풍속 자료(AWS)는 기상청 여수산단지점(월

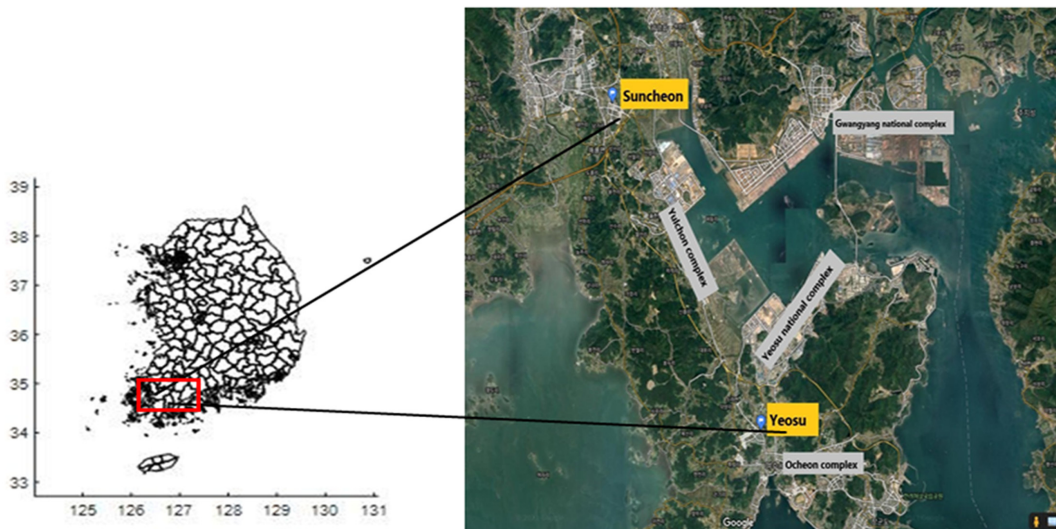


Fig. 1. Sampling Locations in Yeosu and Suncheon.

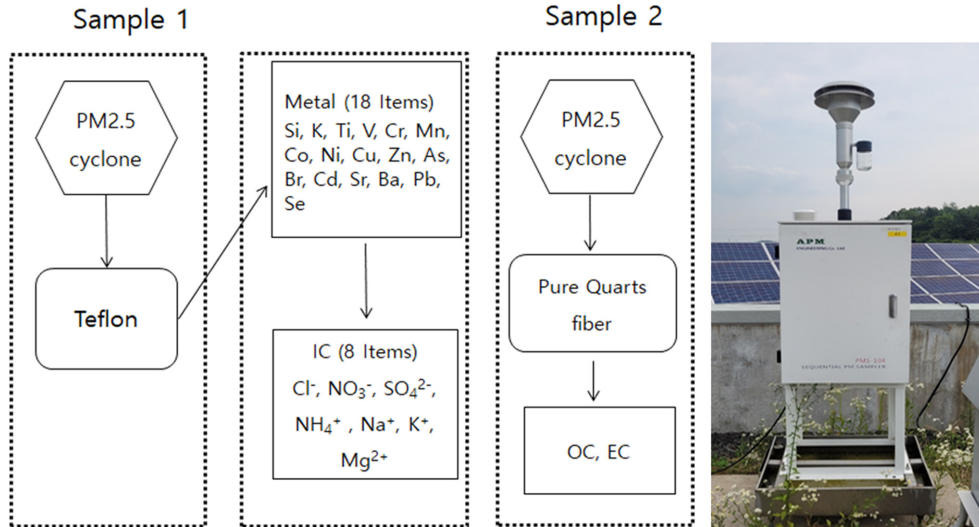


Fig. 2. Schematic diagram of the chemical analysis using time integrated aerosol sampler.

내용) (해발고도 79 m), 순천시(덕연동) (해발고도 13 m) 관측자료를 사용하였다. 성분분석을 위한 시료채취는 석영 여과지(Whatman Filter Paper)와 Poly Tetra Fluoro Ethylene (PTFE) 재질의 테플론 여과지 (PT47DMC-KR, 2.0 μm , 47 mm, MTL)를 사용하였다. 채취장비는 PMS-104(APM Engineering, Korea)를 이용하여, 유량 16.7 L/min 하에, 입경분리 임팩트 Well Impactor Ninety-Six (WINS) 장착하여 PM-2.5 시료를 채취하였다(Fig. 2). 분석항목은 Fig. 2와 같이 석영 여과지로 유기탄소(organic carbon, OC), 원소탄소(elemental carbon, EC)를 분석하였고, 테플론 여과지는 중량농도, 원소성분(Si, K, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Br, Cd, Sr, Ba, Pb, se)과 이온성분(Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-}) 등을 분석하여 총 29항목을 분석하였다.

2.2. 분석방법

OC/EC, 금속성분, 이온성분의 분석방법은 대기오염측정망 설치·운영지침에 따라 분석하였다.⁵⁾ PM-2.5 질량농도는 PTFE 필터를 660°C에서 2시간 이상 전처리 후 시료채취 전, 후 데시케이터에서 24시간 필터를 항량시키고 초미세먼지 로봇 칭량 시스템(Model CHAMBAL-500, C2K Creative, Korea)을 사용하여 PM-2.5 질량농도를 0.1 mg까지 칭량하였다. OC/EC 분석은 NIOSH 870을 사용하여 Thermal Optical Transmittance (TOT) 방법인 탄소분석기(Lab OC/EC Analyzer, Sunset, USA)를 이용하여 산소 존재 유무 및 레이저 투과율에 따라 유기탄소 및 원소탄소를 분리하여 분석하였다. sucrose solution

(4.207 $\mu\text{g}/\mu\text{L}$)을 이용하여, 상대표준편차(RSD) 5.5%, 측정 하한값(자유도 6, 신뢰수준 95%) 0.66 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 하에 정량분석하였다.

원소성분 분석은 Energy Dispersive X-ray Fluorescence Spectrometry (ED-XRF) (QUANTX, ThermoScientific, USA)를 이용하여 분석하였다. 표준물질은 원소별 aerosol membrane(nucleipore)을 사용(농도 0.055 $\mu\text{g}/\text{cm}^2 \sim 7.1 \mu\text{g}/\text{cm}^2$)하였다. 상대표준편차는 0.06% ~ 0.84%, 측정 하한값(detection limit, 자유도 6, 신뢰수준 99%)은 0.25 $\text{ng}/\text{m}^3 \sim 5.98 \text{ng}/\text{m}^3$ 으로 나타났다. 비교분석으로 NIST(national institute of standard and technology)의 SRM 2783 (serial no. 1345)을 사용하여 재현성을 확인하였다.

XRF 분석 후, 이온크로마토그래피(930 compact IC Flex, Metrohm, Swiss)를 이용하여 이온성분을 분석하였다. 음이온(Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-})성분 상대표준편차(RSD)는 0.47% ~ 1.59%, 측정 하한값(자유도 6, 신뢰수준 99%)은 0.005 mg/L ~ 0.061 mg/L이었고, 양이온(Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+})성분 상대표준편차(RSD)는 0.19% ~ 1.00%, 측정 하한값(자유도 6, 신뢰수준 99%)은 0.005 mg/L ~ 0.044 mg/L로 나타났다.

2.3. 원인분석방법

2.3.1. Positive Matrix Factorization

수용모델은 측정물질의 수용점에서 농도를 이용하여 발생원을 추정하는 모델이다.⁶⁾ PMF 모델은 일반대기 중 수용체(Receptor)에서 대기오염물질의 물리·화학적 특성을 분석 후 대기질에 영향을 미치는 오염원을 일차적으로 확

인 후 통계적 방법을 활용하여 오염원별 기여도(Contribution)를 추정하여 대기질 해석과 원인 규명에 초점을 둔 모델이다. PMF모델은 수용모델의 한 방법으로 오염원 분류표의 부재시에도 각 오염원의 기여도를 파악할 수 있다. 배출원의 기여도를 추정하여 배출원 할당 방법들 중 수용체 모델인 양의 행렬 인자 분석법으로 가장 많이 적용되고 있는 방법이다.⁷⁾ 즉 수용체에서 채취한 입자상 혹은 가스상 대기오염물질이 수용체에 미치는 영향과 기여율을 추정한다. 초미세먼지 농도에 기여하는 다양한 배출원들의 기여도를 비교하여 배출원 할당(source apportionment)에 의해 계산된 결과는 미세먼지 관리에 중요한 자료로 활용될 수 있다.⁸⁾ 본 연구에서 분석항목 중 결측치가 있는 시료와 실측 PM-2.5 농도와 계산된 PM-2.5 농도 차이가 $\pm 50\%$ 를 넘는 시료, 음이온과 양이온 균형이 평균 $\pm 2\sigma$ (σ :표준편차)값을 벗어나는 시료들은 모델 입력자료에서 삭제하였다. 그리고 인자분석 과정에서 발생하는 인자의 회전 문제를 제어하는 옵션(fpeak) 값을 사용하여 -1.5에서 1.5까지 0.5씩 단계적으로 수행하여 회전자유도가 적은 최적의 조건을 선택하였으며 fpeak값 0.5를 이용하였다. 마지막으로, DISP Error Estimation 및 Bootstrap Error Estimation를 이용하여 통계적 유의수준에서 모델 결과를 확인하였다.

2.3.2. Conditional Probability Function

CPF 모델은 기상자료(풍향, 풍속)와 PMF 모델을 통해 계산된 오염원 팩터(Factor)별 기여도 값을 활용하여 수용체에 영향을 미치는 유입 방향과 위치를 추정하는 통계적 확률모델이다.⁹⁾ CPF 값이 높으면 유입방향 부근에서 오염원이 존재할 가능성이 높다는 것을 의미하므로 PMF로 계산되어진 발생원을 검증하는 보조 도구로 사용된다. 본 연구에서 CPF 모델은 R 프로그램 openair 패키지를 사용하였다. CPF 모델은 수식 (2)에 의해 계산된다.

$$CPF_{\Delta\theta} = \frac{m_{\Delta\theta}}{n_{\Delta\theta}} \quad (2)$$

수식 (2)에서 $m_{\Delta\theta}$ 는 $\Delta\theta$ 방향에서 불어오는 바람의 방향으로 기여도 값이 한계값 이상일 경우 풍향의 발생 횟수이며, $n_{\Delta\theta}$ 는 동일 영역 풍향의 총 발생 횟수를 의미한다. 본 연구에서는 풍속이 0.5 m/s 미만은 분석에서 제외하였으며, 한계값을 각 기여도의 60%하에 근거리에서 발생하는 오염원을 파악하였다.¹⁰⁾

2.3.3. Hysplit을 이용한 역궤적 군집분석 및 Concen-

tration Weighted Trajectory

대기의 이동 경로를 계산하기 위해 미국 National Oceanic and atmospheric administration/Air research lab. (NOAA/ARL)에서 개발한 Hybrid Single Particle Lagrangian Intergreated Trajectory (HYSPLIT) 모델을 사용하였다. 궤적은 공기의 기원 및 오염물질과의 혼합, 오염된 공기의 수평적 이동 방향 등을 설명하는데 사용된다.¹¹⁾ 광양만권지역에 종관규모 이상의 기류 패턴을 분석하기 위해 입력 기상자료 National Centers for Environmental Prediction (NCEP)에서 제공하는 Global Data Assimilation System (GDAS) Final (FNL)을 사용하여 순천(신대지점) 위·경도로 2020년 9월~2021년 8월까지 일별로 72시간 역궤적을 계산하였다. 계산된 역궤적 결과로 최종위치의 유사성을 통해 군집분석을 분석하였다.

CWT 오염원 위치 추적모델을 이용하여 잠재적 오염원 위치를 분석하였다. CWT 모델은 전체 연구기간 중 역기류를 수용지점 농도와 결합하여 지정된 지역내의 오염원 위치별 수용지점에 대한 영향정도를 농도 경사로 표현할 수 있는 장점이 있다.¹²⁾ CWT 모델은 측정기간의 역궤적을 수용점 농도와 결합하여 지정된 지역내 배출원 위치를 추적하며 다음과 같이 계산된다.¹³⁾

$$C_{(i,j)} = (1/\varepsilon \sum_{l=1}^M \tau_{ijl}) \times \sum_{l=1}^M Cl \tau_{ijl} \quad (3)$$

C_{ij} 는 (i, j) 결자의 가중평균 기여 농도, Cl은 수용점에서 각 배출원 기여 농도이고, τ_{ijl} 은 수용점에서 Cl 농도와 관련되는 궤적점 수이며, M은 (i, j) 격자상의 궤적점 수를 가지는 수용점에서 배출원 기여 농도 수이다.¹²⁾

3. 결과 및 고찰

3.1. PM-2.5 질량 농도 및 구성성분

연구기간 동안 PM-2.5 질량 농도는 여수(여천) $1.9 \mu\text{g}/\text{m}^3 \sim 110.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (평균 $16.14 \pm 13.71 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 순천(신대) $3.9 \mu\text{g}/\text{m}^3 \sim 89.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (평균 $18.34 \pm 11.73 \mu\text{g}/\text{m}^3$)으로 순천지역 평균농도가 높게 나타났다(Table 1). 질량농도에 대한 계절별 농도 중 여수지역은 겨울 ($24.48 \pm 23.20 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > 봄 ($15.52 \pm 7.86 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > 가을 ($13.50 \pm 6.33 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > 여름 ($10.73 \pm 4.45 \mu\text{g}/\text{m}^3$)이었고, 순천지역은 겨울 ($25.52 \pm 12.24 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > 가을 ($20.55 \pm 13.16 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > 봄 ($16.32 \pm 12.52 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > 여름 ($11.41 \pm 4.38 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 순으로 나타나 두 지역은 겨울에 가장 높았으며, 여름에 가장 낮게 나타났다. 특히 겨울철에는 황사 및 국내외 미세먼

Table 1. Average of chemical components in PM-2.5 in Yeosu and Suncheon

Species	Yeosu		Suncheon		
	Mean	Max	Mean	Max	
Ion ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Cl ⁻	0.193	0.733	0.225	1.085
	NO ₃ ⁻	1.579	10.377	1.105	9.644
	SO ₄ ²⁻	2.562	7.469	2.944	7.961
	Na ⁺	0.119	1.086	0.151	5.079
	NH ₄ ⁺	1.367	9.336	1.236	8.551
	K ⁺	0.178	0.664	0.185	0.532
	Ca ²⁺	0.158	0.432	0.203	1.501
	Mg ²⁺	0.039	0.233	0.058	0.379
Metal (ng/m^3)	Si	215.302	2,542.860	286.663	1,1171.582
	K	476.896	2,014.073	495.218	5,807.899
	Ti	5.877	52.381	7.429	247.415
	V	1.351	3.983	1.152	10.705
	Cr	24.547	88.779	21.718	79.418
	Mn	7.780	102.770	9.079	109.741
	Fe	149.204	1,169.108	152.317	2,877.909
	Co	0.679	3.934	0.685	6.099
	Ni	0.988	6.523	2.167	78.372
	Cu	44.113	474.614	3.946	47.775
	Zn	95.544	767.290	150.387	3,492.388
	As	1.838	12.747	1.531	11.900
	Se	1.729	12.448	1.438	9.909
	Br	15.339	60.746	12.860	43.468
	Sr	2.366	14.216	2.614	22.904
	Cd	28.096	83.650	24.739	110.040
Ba	7.171	35.203	6.032	88.629	
Pb	11.588	42.373	12.012	48.024	
Carbon ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	OC	3.082	7.198	3.305	9.683
	EC	0.338	2.411	0.355	2.660
PM-2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	16	111	18	89	

먼지가 더해져 농도가 높았으며, 연구기간 동안 여름철(7월~8월)에 600 mm 이상의 장마로, 가을철에 가장 낮았던 미세먼지 농도는¹⁹⁾ 본 연구기간에는 여름철에 미세먼지 농도가 가장 낮게 나타났다.

PM-2.5를 구성하고 있는 화학성분들의 조성 비율을 Fig. 3에 나타냈다. 여수지역은 이온성분(39%) > 기타성분(33%) > 탄소성분(21%) > 금속성분(7%), 순천지역은 기타성분(39%) > 이온성분(34%) > 탄소성분(20%) > 금속성분(7%)으로 나타났다. 두 지역 중 여수지역은 이온성분이 가장 많은 비율을 차지하였으며, 이온성분 중 황산이온이 41%로 가장 높았고 질산이온 25%, 암모늄이온 22%, 염소이온 3%로 분석되었다. 순천지역은 기타성분 비율이 가장 높았고, 다음으로 이온성분으로 황산이온

48%, 암모늄이온 20%, 질산이온 18%, 염소이온 4%로 나타났다. 계절별로 황산이온 농도는 순천지역은 여름철에 3.27 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 여수지역은 겨울철에 3.04 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 높았으며, 질산이온은 겨울철에 여수지역 4.06 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 순천지역 2.99 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 분석되었다. 암모늄이온은 여수지역 2.59 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 순천지역 2.03 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 겨울철에 가장 높았다. 특히 순천지역은 초미세먼지 농도가 낮은 여름철에 황산이온 농도가 가장 높아 2차 황산염농도 생성이 활발함을 알 수 있었다.

PM-2.5 주요 구성성분은 Table 1에 나타냈다. 여수지역 OC 33.8% (3.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) > SO₄²⁻ 28.1% (2.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) > NO₃⁻ 17.3% (1.58 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) > NH₄⁺ 15.0% (1.37 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) > Cl⁻ 2.1%(0.19 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)로 분석되었고, 순천지점은 OC 35.9%

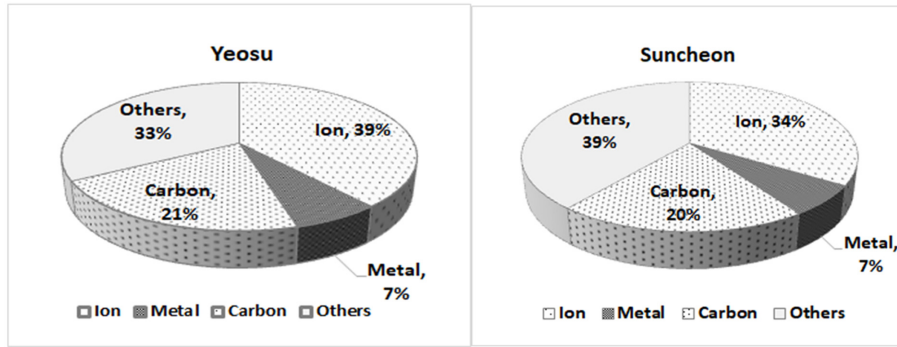


Fig. 3. Average of chemical components in PM-2.5.

Table 2. Correlation coefficient between OC and EC at sites

Site	Spring	Summer	Fall	Winter
Yeosu	0.20	0.38	0.57	0.74
Suncheon	0.24	0.21	0.73	0.82

($3.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > SO_4^{2-} 32.0% ($2.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > NH_4^+ 13.4% ($1.24 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > NO_3^- 12.0% ($1.10 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > Cl^- 2.44% ($0.23 \mu\text{g}/\text{m}^3$)로 분석되었다. 탄소성분은 Fig. 2에서 여수지역 21%, 순천지역 20%를 차지하였고, 두 지역의 초미세먼지 성분 중 유기탄소 성분이 가장 높았고, 순천지역에서 더 높게 나타났다. 탄소입자는 원소탄소(EC)와 유기탄소(OC)로 구성되어 있다.¹⁵⁾ 원소탄소는 연소발생원에서 대기 중으로 직접 배출되는 1차 오염물질로서 1차 유기탄소의 추적자로 사용된다.¹⁶⁻¹⁷⁾ 유기탄소는 형성과정에 따라 생물성 연소, 화석연료 연소 등 다양한 연소과정에서 직접 배출되는 1차 유기탄소(primary organic carbon, POC)와 1차 유기탄소가 산화와 노화과정을 거쳐 변환되는 2차 유기탄소(secondary organic carbon, SOC)가 있다.¹⁸⁾ 또한, 휘발성유기화합물 등이 대기 중 화학적 반응을 거쳐 기

체가 입자로 전환(gas-to-particle conversion)되어 2차 유기탄소(secondary organic carbon, SOC)로 생성된다.^{16,18)} 탄소성분의 OC/EC 비가 2.5 이상일 때 2차 생성 OC 기여가 큰 것으로 알려져 있어¹⁶⁾ 연구지점 두 지역 OC/EC 비는 평균 약 9로 나타났고, 특히 OC와 EC 상관관계수(R)는 Table 2와 같다. OC, EC 상관성이 높은 것은 OC, EC 배출원 유사성을 의미하여 계절별 상관관계수는 여수 지역 봄철~여름철 0.20~0.38로 매우 낮았으며, 가을~겨울 0.57~0.74로 상관성이 상대적으로 높았다. 순천지역은 봄철~여름철 0.24~0.21로 매우 낮았으며, 가을철~겨울철 0.74~0.82로 상관성이 매우 높았다. 또한 휘발성유기화합물 배출량이 여수지역에서 45,873톤으로²⁾ 전남지역 50%를 배출하고 있어 두 지역에서 봄철과 여름철에 휘발성유기화합물의 광화학 반응에 의한 2차 유기탄소(SOC) 생성이 활발한 것으로 판단되었다. 초미세먼지 중 금속성분이 차지하는 비율은 두 지역 모두 7%로 나타났다. 이번 연구기간에는 칼륨(K), 규소성분(Si)이 포함되어 금속성분의 비율은 높았으나, 두 성분을 제외하면 2%로 광양만권 발생원 부근 연구¹⁴⁾와 비슷한 비율로 나타났다. 금속

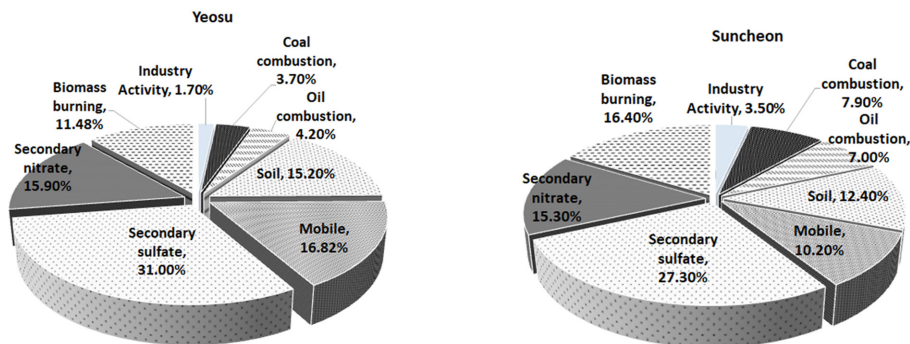


Fig. 4. PMF results of PM-2.5 in Yeosu and Suncheon.

성분은 두지역에서 비슷하게 나타났으며 금속성분 중 칼륨(K), 크롬(Cr), 아연(Zn), 카드뮴(Cd) 성분이 높게 조사되어 이들 성분에 대한 관리가 필요하며, 특히 구리(Cu) 성분은 순천지역에서 평균 $0.004 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 조사된것에 반해 여수지역에서는 평균농도 $0.044 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 특히 가을철~겨울철 $0.060 \mu\text{g}/\text{m}^3 \sim 0.126 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 높게 조사되어 추가 연구를 통해 원인분석을 진행할 예정이다.

3.2. PMF 모델 결과

두 지점에서 채취한 431개 시료 중 최종 371개(여수 155건, 순천 160건)의 유효자료를 활용하여 PMF(EPA 5.0) 모델 분석을 하였다. 분석 결과 두 지역 모두 8개의 오염원을 확인하였고 Fig. 4와 같다. 또한, 대기 중 정량적 기여도를 Fig. 5~6에 나타냈다. 초미세먼지 성분 주요 발생원은 여수지역은 2차 황산염(31%), 자동차(16.8%),

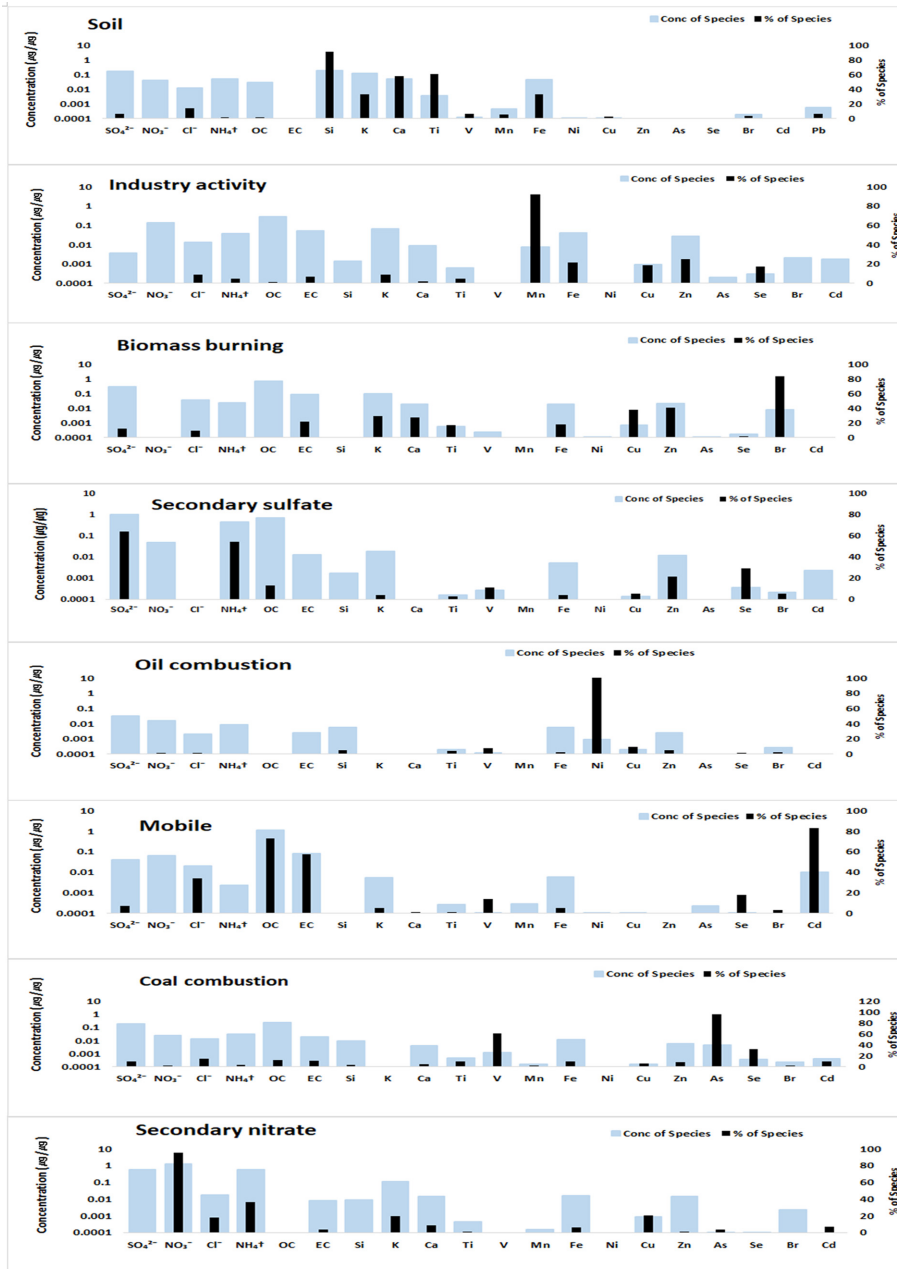


Fig. 5. Source profiles of PM-2.5 in Yeosu.

2차 질산염(15.9%), 토양 및 비산먼지(15.2%), 생물성연소(11.5%), 중유연소(4.2%), 석탄연소(3.7%), 산업활동(1.7%)로 분석되었다. 순천지역은 2차 황산염(27.3%), 생물성연소(16.4%), 2차질산염(15.3%), 토양 및 비산먼지(12.4%), 자동차(10.2%), 석탄연소(7.9%), 중유연소(7.0%), 산업활동(3.5%)로 나타났다. 두 지역 모두 2차 황산염에 의한 미세먼지 기여도가 가장 크게 나타났고, 특히 순천

지역은 2차 미세먼지 생성이 여수지역 보다 활발하게 일어나는 것으로 나타났다.

좀 더 자세히, 첫 번째 오염원은 Si, K, Ca, Ti, Fe, V, Mn, Pb 등이 주로 기여하는 토양 및 도로 비산먼지 관련 오염원으로 분류되었고,²⁰⁾ 여수지역 15.2%, 순천지역 12.4%로 나타났다. 광양만권 초미세먼지 중 비산먼지 발생량은 여수지역 109톤, 순천지역 114톤, 광양지역 66톤

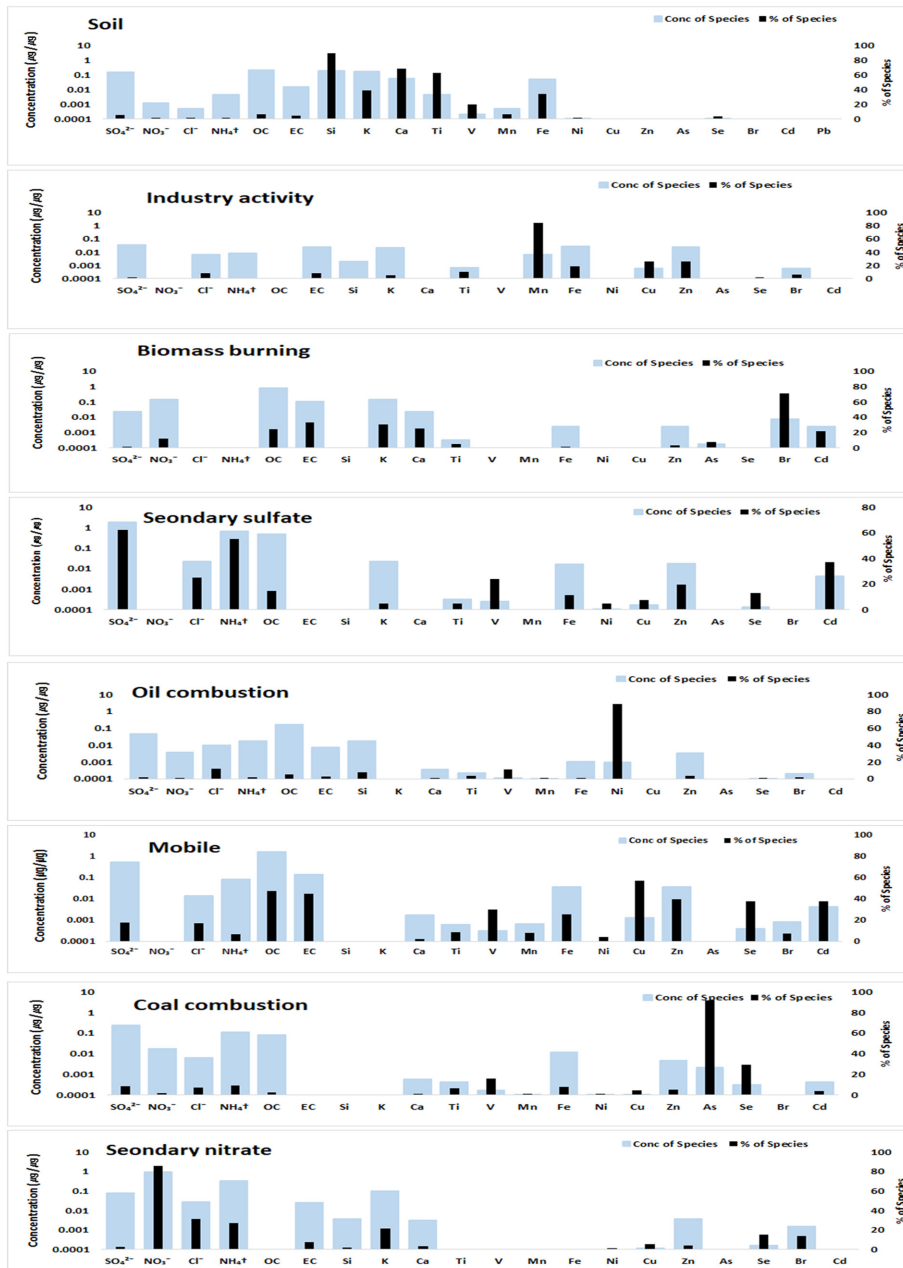


Fig. 6. Source profiles of PM-2.5 in Suncheon.

으로 보고되었다.²⁾ 발생원 부근 연구에서는¹⁴⁾ 철, 구리, 카드뮴, 납, 티타늄 성분이 높아 산업단지 비산먼지 영향이 크게 나타났으나, 본 연구기간 동안 Si, K, Ca, Ti, Fe 성분이 높게 나타나 황사 및 토양먼지 영향과, Fe, V, Pb, Ti 성분등의 산업단지에서 배출되는 비산먼지 등의 영향을 미치는 것으로 나타났다. 특히 여수지역에서 토양먼지와 도로 비산먼지 영향이 더 크게 나타났다. 두번째 오염원은 Mn, Fe, Cu, Zn 등이 주로 기여하는 산업활동(Industry activity)에 의한 오염원으로 제철, 비철관련 시설로 분류되었다.²¹⁾ 여수지역은 1.7%, 순천지역은 3.5%로 조사되었다. 특히 제철, 비철관련 시설 성분인 망간, 철, 아연 성분이 높게 나타났으며, 특히 순천지역에서 이들 성분의 영향이 더 크게 나타나 광양지역 산업단지 영향을 상대적으로 크게 받는 것으로 판단되었다. 세번째 오염원은 K, OC, EC, Cl⁻, Br⁻, SO₄²⁻ 등이 주로 기여하는 생물성연소(Biomass burning)이다. 여수지역 12%, 순천지역 16%로 순천지역에서 2차 황산염 다음으로 두 번째로 높은 발생원으로 나타났다. 생물성소각 배출량은 여수 48톤, 순천 70톤, 광양 27톤으로 보고 되었다.²⁾ 특히 두 지역에서 칼륨(K) 성분이 높게 검출되었고, 칼륨(K)성분은 목재연소 시 탄소성분과 함께 다량 배출되는 성분이다.^{14,22)} 일반적으로 생물성연소 농도는 농업잔재물 소각 등으로 겨울에 농도가 높아지는 계절적 영향을 받는 성분인데, 두 지역에서는 여름을 제외하고 봄, 가을, 겨울에 칼륨농도가 비슷하게 0.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ~0.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타나 계절적 영향이 크지 않음을 알 수 있었다. 따라서 생물성연소 발생원은 연소시설 등에서 배출되는 것으로 판단되었으나, 생물성 연소 지표물질로 셀룰로스가 열변환 된 후 생성된다고 알려진 레보글루코산(Levogluconan) 분석을 통해 더 정확한 판단이 가능할 것으로 보였다.²³⁾ 네 번째 오염원은 SO₄²⁻, NH₄⁺, OC, EC 등이 기여하는 2차 황산염(Secondary sulfate) 입자로 여수지역 31%, 순천지역 27.3%로 나타났다. 황산이온 평균농도는 여수지역 2.56 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 순천지역 2.94 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로, 계절별로 여수지역은 겨울 > 가을 > 여름 > 봄 순으로 높았으나, 순천지역은 여름 > 겨울 > 봄 > 가을 순으로 높게 나타났다. 광양만권지역 황산화물 배출량은 여수 24.4톤, 순천 0.1톤, 광양 22.2톤으로 보고되었다.²⁾ 황산염이온의 생성은 대기 중 배출되는 SO₂ 가스가 산화되어 황산으로 변환된다. SO₂는 대기 중 물에 흡수된 후 산소와 철, 망간 등 촉매에 의해 산화되어 황산염으로 변화되며 이후 암모니아와 결합하여 NH₄HSO₄(Ammonium bisulfate), (NH₄)₂SO₄(Ammonium sulfate)등의 입자를 생성한다.²⁴⁾ 일반적으로 온도가 높고

가시광선이 강하며 습기가 많을 때 2차 황산염 생성이 크다고 보고 되었다.²⁵⁾ 특히 순천지역에서는 낮동안 불어오는 해풍의 풍하지역에 위치하고 있어 황산화물 및 촉매물질(Fe, Mn, VOCs) 등의 대기오염물질의 이동 및 정체 시간이 길어지면서 여름철 광화학반응을 일으키는 주요 발생원지역 여수, 광양지역 보다 광화학반응이 활발하게 일어나는 것으로 판단되었다. 다섯 번째 오염원은 V, Ni 등이 주로 기여하는 중유연료 연소(Oil combustion)에 의한 것으로 여수지역 4.2%, 순천지역 7.9%로 조사되었다. 바나듐(V)과 니켈(Ni)은 중유(Heavy oil) 연소시 중요한 부산물이다. 여수, 광양지역은 석유정제공장, 대형 제철 제련시설 등과 연계된 대형 항만과 선박 등에서 많은 양의 중유를 사용하고 있다. 특히 여수지역은 미세먼지 중 비도로이동오염원이 53.5%로 보고되고 있어²⁾ 항만이 인접한 여수 삼일동에서 중유연료 연소에 대한 오염이 14%로 높았으나, 주거지역에 위치하고 있는 여수 여천지점에서는 4.2%로 조사되었고, 오히려 항만과 인접한 지역에 위치한 순천 신대지점에서 7.0%로 높게 나타났다. 여섯 번째 오염원은 OC, EC, Fe, Be, Cd, Zn, Cu 등 이동성 오염원인 자동차(Mobile)에 의한 오염원이다. 여수지역 17%, 순천지역 12%로 나타났다. 여수, 광양지역 산업단지 부근에서는 대형화물차의 이동이 많아 OC 보다 EC 농도가 높아 디젤자동차의 영향을 더 받는 것으로 나타났다.^{14,26)} 주거지역에서는 OC가 EC 보다 높아 휘발유 차량의 영향이 더 크게 나타났다. 일곱 번째 오염원은 As, Se, Fe, Cu 등이 주성분인 석탄연소(Coal combustion)의 영향으로 여수지역 3.7%, 순천지역 7.9%로 나타났다. 특히 As 성분은 유연탄 연소 시 주요 부산물이며, As, Cu, Fe 성분은 철 제련 용광로에서도 배출된다.²⁶⁻²⁷⁾ 여수지역의 여수화력, 호남화력발전소 및 광양지역 광양제철소와 경남 하동화력발전소에서 사용하는 고체연료 영향과 함께 철강 제련 산업단지가 위치하고 있어 여수지역에서는 비소, 구리, 셀레늄성분이 순천지역에서는 철성분이 높아 여수지역은 화력발전소, 순천지역은 광양 철 제련시설의 영향을 받는 것으로 나타났다. 여덟 번째 오염원은 NO₃⁻, NH₄⁺ 등이 주로 기여하는 2차 질산염(Secondary nitrate)으로 여수지역 16%, 순천지역 15%로 조사되었다. 대기 중 NO₂는 OH 라디칼 등에 의해 산화되어 질산을 생성하고 암모니아와 결합하여 질산암모늄 입자를 형성하며 미세먼지 농도를 높이게 된다.²⁸⁾

일반적으로 NO₃는 높은 상대습도 및 낮은 온도에서 질산암모늄(NH₄NO₃)이 쉽게 형성되어 겨울철에 높은 특성을 보이며, 국내 질소산화물 배출량과 장거리 국외배출량

인 중국 지역 질소산화물이 산화하여 2차 질산염이 형성된다.^{25,29)} 본 연구에서도 질산이온 평균농도는 여수지역 1.58 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 순천지역 1.10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, 겨울철 여수지역 4.06 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 순천 2.99 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 겨울철에 질산이온이 가장 높아 이러한 특성들을 잘 설명해 주었다. 암모늄은 질산염, 황산염 등의 음이온과 결합하여 입자를 형성하는 가장

중요한 양이온이다. 질소산화물 배출량이 여수지역 32톤, 광양지역 32톤, 순천지역 4톤으로 배출되었으나,²⁾ 순천지역에서 산업단지 영향을 크게 받는 것으로 분석되었다.

3.3. CPF 모델에 의한 국지적 오염 배출원 추정 PMF 모델을 통해 얻은 기여도 자료와 기상청 지역별

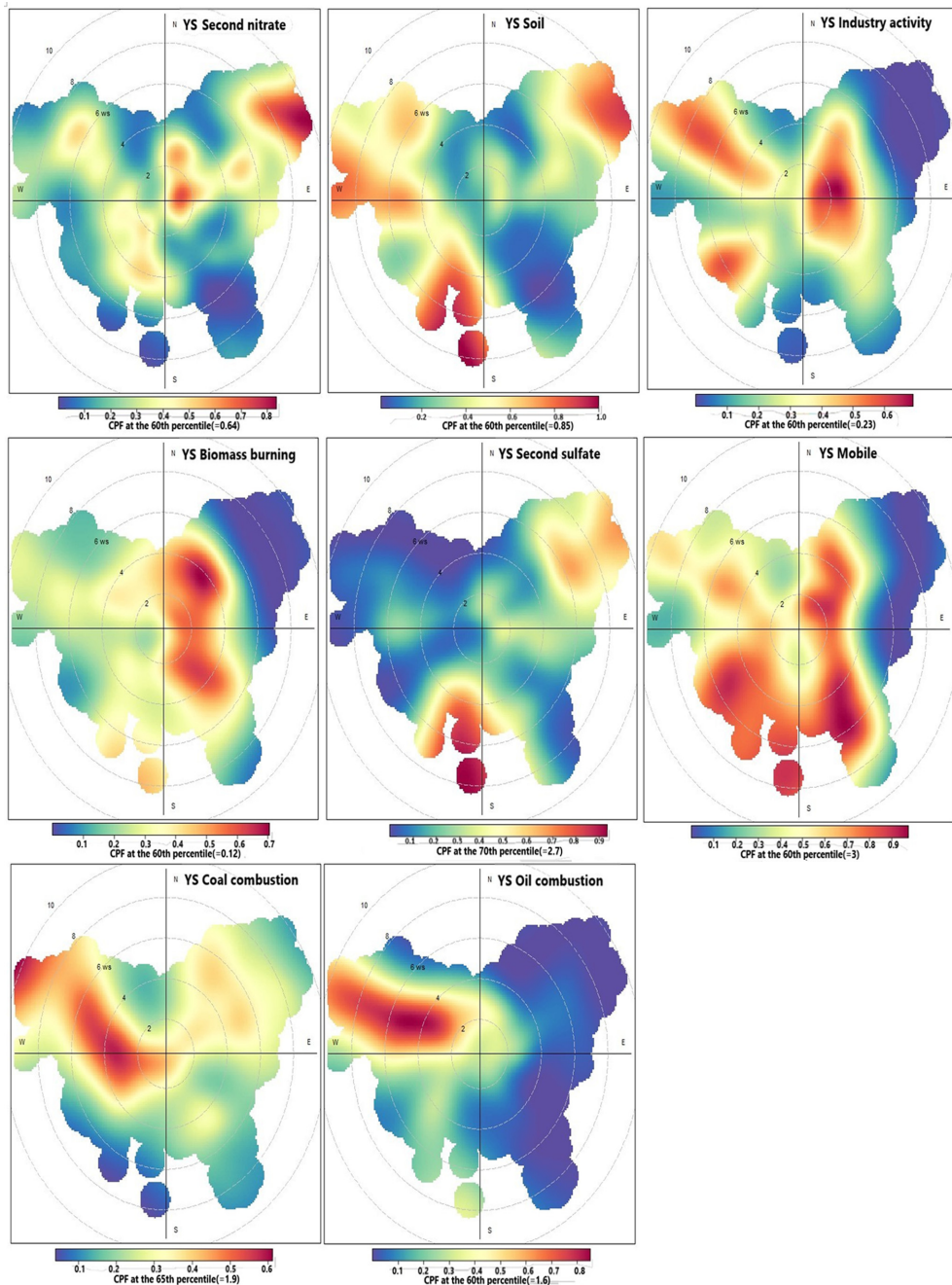


Fig. 7. CPF results of PM-2.5 at Yeosu.

상세 AWS 풍향과 풍속을 통해 국지적 오염원 파악을 위해 CPF를 분석한 결과 Fig. 7-8에 나타냈다. 그 결과, 토양 및 비산먼지 오염원에 대한 위치는 여수 북서, 남남서, 북동 방향, 순천지역 북북서 방향 수용체 끝단에서 유입이 두드러졌고 산단 부근에서 유입도 나타났다. 주로 고

농도는 수용체의 끝쪽 오염원일 확률이 높아 장거리 이동에 의한 토양입자 유입으로 분석된다. 산업활동과 자동차 오염원은 여수, 광양국가산단에서 유입이 강하게 나타났으며, 특히 자동차 오염원은 산업단지와 함께 측정지점 부근에서도 유입이 높아 주거지역에서 자동차 통행량이

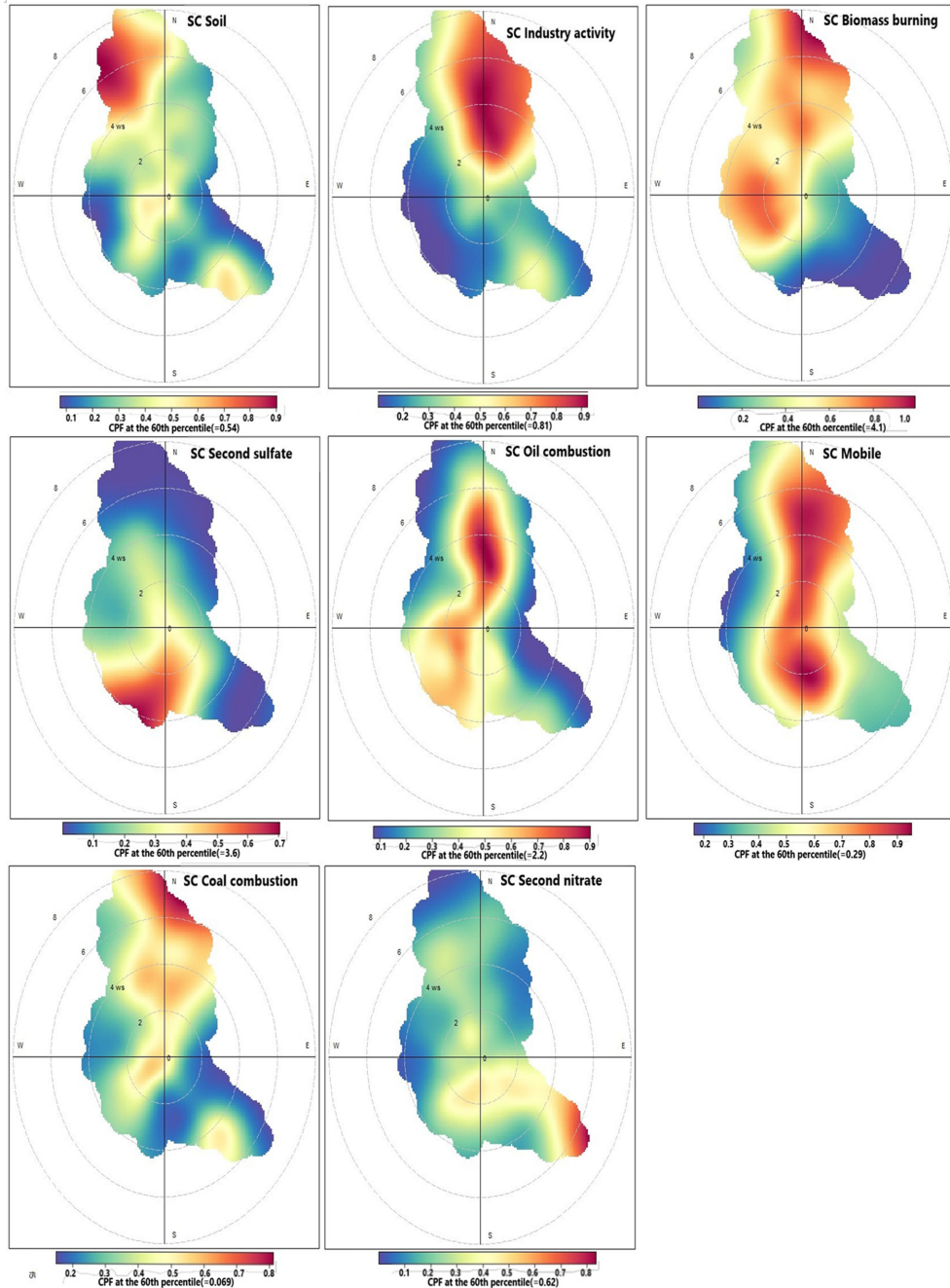


Fig. 8. CPF results of PM-2.5 at Suncheon.

많아 오염농도가 높은 것으로 판단된다. 생물성연소에 의한 발생원은 북동, 남동쪽 방향 여수산단과 오천산단방향 유입이 뚜렷하였고, 농촌지역 생물성 소각에 의한 소라면, 신월동 부근 등 유입된 것으로 분석된다. 순천지역은 북쪽 방향 광양국가산단과 광양과 순천 농촌지역 생물성소각 유입이 나타났으며, 서쪽방향 울촌산단에서 유입도 강하게 나타나 생물성연소 발생원은 연료 연소발생원 및 농촌지역 생물성 소각과 함께 복합적으로 나타나는 것으로 분석되었다. 중유연료연소 오염원은 두지역 모두 강하게 광양항과 해양 방향인 여수 북서방향, 여수 북쪽, 남서방향에서 강하게 유입되었다. 2차황산염 오염원은 여수지역은 북동방향 여수국가산단 및 화력발전소 및 남남서 울촌산단, 오천산단에서 유입이 두드러지게 유입되었고, 순천지역은 남서방향 울촌산단 유입이 강하게 나타났다. 석탄연소에 의한 영향은 여수지역은 서북서방향 여수 및 호남화력 발전소, 여수화력 발전소, 북동쪽 광양 복합화력 발전소 영향을 받고 있음을 보여줬고, 순천지역은 북쪽방향의 광양제철소와 광양 화력발전소 및 남동쪽 방향 여수화력발전소 영향을 받고 있다. 2차질산염은 울촌, 여수 국가산단에서 유입도 있으며, 북동쪽 끝단에서 유입으로 외부 장거리 유입도 확인되었으며, 순천지역도 산업단지 유입과 남동쪽 끝단에서 유입이 강하게 나타나 장거리 이차질산염 입자 유입도 원인으로 확인되었다.

3.4. 역궤적을 통한 군집 분석 및 CWT 모델을 이용한 장거리 수송 오염물질 배출원 기여도 추정

광양만권 순천 신대지점으로 유입되는 PM-2.5 대표적인 수송 경로를 분석하였다. 모델 시작 시간은 초미세먼지 평균농도가 높았던 12 LST(03 UTC)로 설정하였고 분석 지점 좌표는 순천 신대측정소 좌표(34.936608 °N, 127.548626 °E)로 설정하였다. 역궤적 경로는 Above Ground Level (AGL)이 500m인 고도에서 각각 6시간 간격으로 총 72시간에 대해 모사되었다. Fig. 9는 각 군집별 평균 역궤적을 나타낸 그림으로 총 3개의 군집으로 분류되었다. 연구대상 기간 총 궤적수는 360개이며 cluster 1이 46%, 164일, cluster 2는 32%, 114일, cluster 3은 23%, 82일로 cluster 1이 가장 높은 발생빈도를 나타냈으며, 이동경로가 짧고 우리나라 북동지역에서 동해상을 거쳐 도달하는 경로를 나타냈다. Fig. 10는 각 군집별 PM-2.5 농도를 나타낸 것으로 cluster 2가 가장 평균농도가 높았다. 군집별 평균농도는 cluster 1 $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$, cluster 2 $19 \mu\text{g}/\text{m}^3$, cluster 3 $13 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다. cluster 1은 1월~2월을 제외하고 매월 50%이상 높은 빈도수를 나타냈

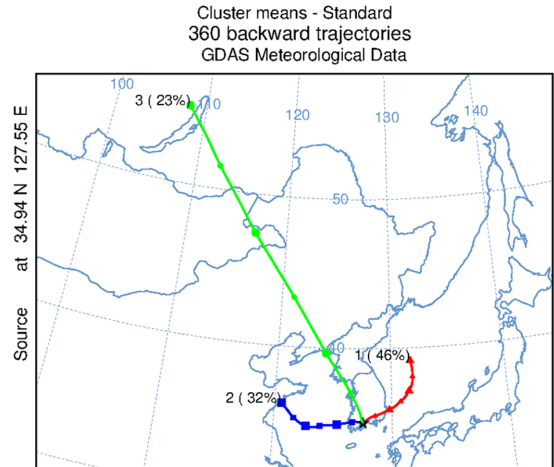


Fig. 9. Cluster analysis of back-trajectories calculated by the Hysplit model.

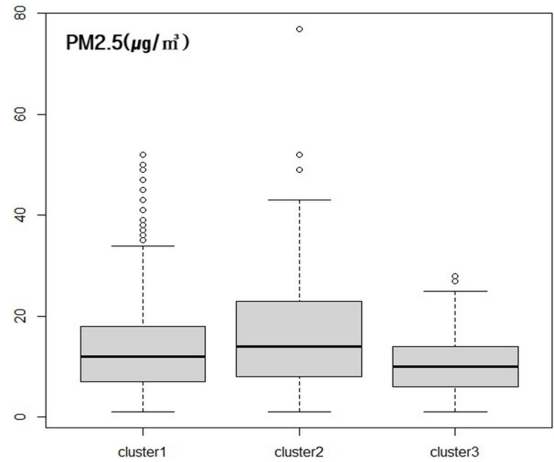


Fig. 10. PM-2.5 concentration related with cluster analysis.

다. cluster 2는 중국 동부지역 산둥반도에서 서해상을 지나서 편서풍을 타고 도달하는 경로로 연중 20% 정도 고르게 분포했으나 특히 5월에 발생빈도가 높았다. 또한 cluster 2는 이동경로가 중국 산둥반도 부근 대기오염물질과 국내 오염물질과 더해지며 대기정체가 일어나는 경로로 초미세먼지 농도가 가장 높게 나타났다. cluster 3은 23%, 82일로 가장 긴 이동경로로 몽골 및 중국 북동지역을 거쳐 도달하는 경로이다. 특히 겨울철에 50% 이상 발생빈도가 높게 나타났으며, 이동경로가 길어지면서 오히려 대기오염물질이 확산·희석되면서 초미세먼지 농도는 가장 낮게 나타났다. 광양만권 지역으로 이동하는 장거리 수송 기류는 중국을 거쳐 이동하는 장거리 기류인 cluster 2, 3이 약 55% 발생빈도를 나타냈으며, 역궤적을 통해 광양

만권 황사는 cluster 2, 3번 경로로 이동된 것으로 확인되었다.

역계적 분석 결과 및 순천시 PM-2.5 농도를 이용하여 CWT 분석을 수행하였다. 앞서 설명한 바와 같이, CWT 분석은 역계적 결과의 시점별 궤적의 위치와 수용지역의 농도를 결합하여 가중평균하는 방법으로 수용지역 고농도 도시 기류의 유입 경로를 분석함으로써 수용지역 농도에

대한 영향 지역을 추정할 수 있다.³⁰⁾ Fig. 11~12는 순천신대 지점을 대상으로 전체기간과 PM-2.5 농도가 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상인 기간에 대한 CWT 분석 결과와 계절별 분석 결과를 나타낸 것이다. PM-2.5 농도가 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상인 기간에 중국 지역에서의 기류 유입이 뚜렷이 나타나 보이면서, 계절별로 특히 봄, 겨울철에 cluster 2, 3 형태로 유입되는 것을 확인할 수 있었다.

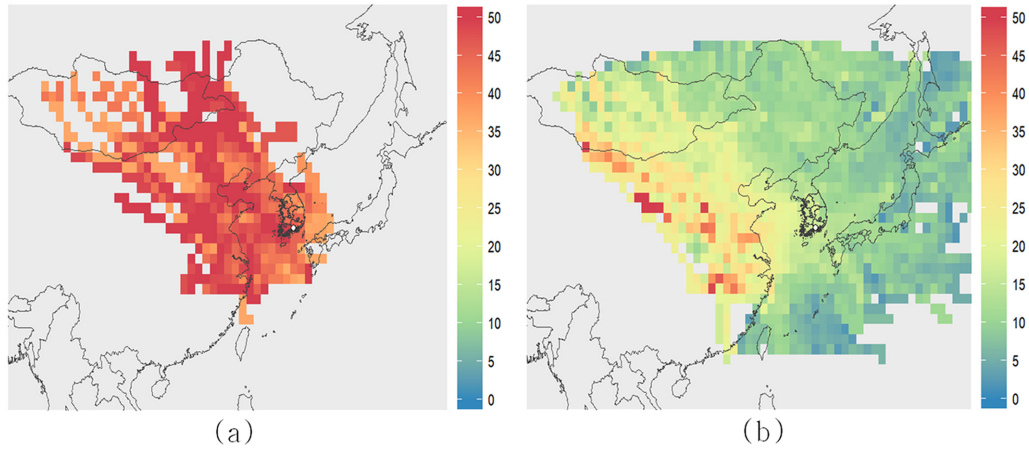


Fig. 11. CWT results for upper 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (a) and all concentration during the measurement period (b)

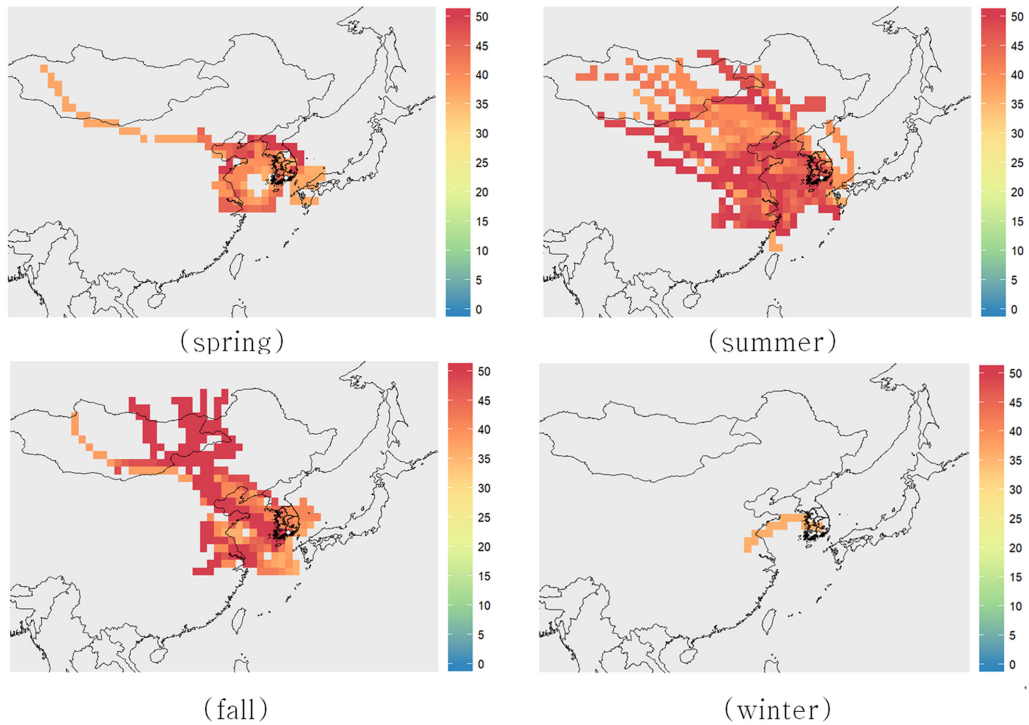


Fig. 12. CWT results of four season during the measurement period.

4. 결 론

본 연구에서는 2020년 9월부터 2021년 8월까지 여수 여천동, 순천 신대동 도시대기측정소에서 채취분석한 초미세먼지 자료를 통해 주거지역에 미치는 오염원 현황과 발생 기여도를 추정하기 위해 PMF 및 CPF 모델을 수행하여 지역규모의 오염원을 분석하였으며, 역계적분석과 이를 기반으로한 CWT모델을 통해 장거리 오염원 유입가능성을 분석하였다. 그 결과, 다음과 같이 요약할 수 있다.

1. 연구지점 PM-2.5 평균농도는 여수지역 16.14(±13.71) $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 순천지역 18.34(±11.83) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었고, 겨울철에 가장 높았고, 여름철에 가장 낮게 나타났다.
 2. 초미세먼지 화학성분 조성은 여수지역 이온성분(39%) > 기타성분(31%) > 탄소성분(21%) > 금속성분(7%), 순천지역은 기타성분(39%) > 이온성분(34%) > 탄소성분(20%) > 금속성분(7%)으로 분석되었다. 두지역 모두 이온성분이 높았으며 이온성분 중 황산이온이 가장 높았다. 그리고 초미세먼지 성분 중 개별 성분은 유기탄소 성분이 가장 높았으며, 두 지역에서는 봄철~여름철 2차 유기탄소(SOC) 입자생성이 활발한 것으로 나타났다. 향후, 전구성분에 대한 추가적 연구와 관리가 필요한 것으로 판단되었다.
 3. 분석자료를 통한 PMF 모델 결과 8개 원인으로 분석되었다. 즉, 여수지역은 2차 황산염 31% > 자동차 16.8% > 2차질산염 15.9% > 토양 및 비산먼지 15.2% > 생물성 연소 11.5% > 중유연소 4.2% > 석탄연소 3.7% > 산업활동 1.7%였으며, 순천지역은 2차 황산염 27.3% > 생물성 연소 16.4% > 2차질산염 15.3% > 토양 및 비산먼지 12.4% > 자동차 10.2% > 석탄연소 7.0% > 중유연소 7.0% > 산업활동 3.5% 나타났다.
 4. CPF 분석결과 2차 황산염, 석탄연소, 생물성 연소, 자동차에 의한 오염원이 여수산단, 울촌산단, 광양산단 및 화력발전소 부근의 유입으로 나타났고, 중유연소에 의한 오염원은 체력·제련시설과 광양항 주변 대형선박에서 영향을 크게 받는 것으로 조사되었다. 2차 질산염 및 토양 및 비산먼지 발생원은 산업단지 영향과 함께 장거리 유입에 의한 복합적인 영향으로 분석된다. 특히, 고농도 시 장거리 유입형태는 산동반도에서 유입과 몽골 및 중국 북동지역을 거쳐 유입되는 것으로 분석되었다.
- 본 연구결과는 우리나라 거대 배출지역의 발생 원인을

분석함으로써, 향후 배출원에 대한 관리 대책 수립 및 지역 인체 유해성을 분석하는데 기초자료로 활용 될 수 있다.

감사의 글

본 연구는 국립환경과학원의 “환경분야 시험·검사의 국제적 적합성 기반 구축”사업에 따른 국고보조금이 일부 지원되어 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 최중일, 이영수, “초미세먼지(PM-2.5) 배출량이 호흡기계 질환에 미치는 연구”, *한국환경정책학회*, **2015**, 23(4), 155-172.
2. 환경부 국가미세먼지정보센터, <https://www.air.go.kr>, (CAPSS) 2019년.
3. 김중연, 윤대욱, 김영훈, 신원정, “청주시 미세먼지 배출원의 특성과 대책에 대한 연구”, *한국지리학회지*, **2019**, 8(3), 399-415.
4. Y. P. Kim, “Research and Policy Directions against Ambient Fine Particles”, *Korea Environmental Policy And Administration Society*. **2017**, 33(3), 191-204.
5. 환경부·국립환경과학원, “대기오염측정망 설치·운영지침”, **2019**, 367-387.
6. 한상희, 이지이, 이종식, 허종배, 정창훈, 김은실, 김용표, “안면도에서의 초미세먼지 유기성분 주요 영향원 평가”, *한국입자 에어로졸학회*, **2018**, 14, 135-144.
7. 황인조, 김동술, “수용모델의 국내외 연구동향과 대기질 관리를 위한 발전방향”, *한국대기환경학회지*, **2013**, 29(4), 459-476.
8. C.-S. Liang, F.-K. Duan, K.-B. He, and Y.-L. Ma, “Review on recent progress in observations source identifications and countermeasures of PM-2.5”, *Environment International*, **2016**, 86, 150-170.
9. 이용민, 송명기, 김은영, 오세호, 박채형, 최운선, 이태형, 손장호, 배민석, “부산 항만지역 초미세먼지 주원소 성분 연구-원소성분 XRF 비교 분석 중심”, *한국대기환경학회지*, **2020**, 36(2), 216-227.
10. S. Kim, T.-Y. Kim, S.-M. Yi, and J. Heo, “Source apportionment of PM-2.5 using positive matrix factorization(PMF) at a rural site in Korea”, *Environmental Management*, **2018**, 214, 325-334.
11. O. Klemm, A. S. Bachmeier, R. W. Talbot, and K. I. Klemm, “Fog chemistry at the new England coast: influence of air mass history”, *Atmospheric Environment*, **1994**, 28(6), 1181-1188.
12. 강병욱, 강충민, 이학성, 선우영, “하이브리드 수용모델을 이용한 서울시 PM-2.5 오염원의 위치 추적” *한국*

- 대기환경학회지*, **2008**, 24(6), 662-673.
13. Y.-K. Hsu, T. M. Holsen, and P. K. Hopke, "Comparison of hybrid receptor models to locate PCB sources in Chicago", *Atmospheric Environment*, **2003**, 37(4), 545-562.
 14. 박혜영, 오길영, 박현수, 김학립, 이보람, 박찬오, 임희정, 박귀환, 박중수, 배민석, "평양만권 대기 중 초미세먼지 원인별 기여율 평가", *환경분석과 독성보전*, **2021**, 24(2), 62-74.
 15. S. Zidat, M. Ruff, N. Perron, L. Wacker, H.-A. Synal, M. Hallquist, A. S. Shannigrahi, K. E. Yttri, C. Dye, and D. Simpson, "Fossil and non-fossil sources of organic carbon(OC) and elemental carbon(EC) in G?teborg, Sweden", *Atmospheric Chemistry and Physics*, **2009**, 9, 1521-1535.
 16. B. J. Turpin and J. J. Huntzicker, "Secondary formation of organic aerosol in the Los Angeles Basin: A descriptive analysis of organic and elemental carbon concentrations", *Atmospheric Environment. Part A. General Topics*, **1991**, 25(2), 207-215.
 17. 정진희, 김성락, 최보라, 김계선, 허종배, 이승묵, 한영지, "춘천과 서울에서 측정된 PM-2.5 내 탄소성분의 농도 특성에 관한 연구", *한국대기환경학회지*, **2009**, 25(2), 141-153.
 18. D. R. Gentner, G. Isaacman, D. R. Worton, A. W. H. Chan, T. R. Dallmann, L. Davis, S. Liu, D. A. Day, L. M. Russell, K. R. Wilson, R. Weber, A. Guha, R. A. Harley, and A. H. Goldstein, "Elucidating secondary organic aerosol from diesel and gasoline vehicles through detailed characterization of organic carbon emissions", *Environmental sciences*, **2012**, 109(45), 18318-18323.
 19. 함지영, 이해정, 차주완, 류상범, "2016년 봄철 서울의 PM10, PM-2.5 및 OC와 EC 배출원 기여도 추정", *한국기상학회지*, **2017**, 27(1), 41-54.
 20. 정영진, 황인조, "PMF 모델을 이용한 경산지역 PM-2.5의 오염원 기여도 추정", *한국대기환경학회지*, **2015**, 31(6), 508-519.
 21. J. G. Watson, J. Chow, and E. Fujita, "Protocol for applying and validating the CMB model for PM-2.5 and VOC", **2004**, Environment protection Agency, US.
 22. R. M. Harrison, D. C. S. Beddows, L. Hu, and J. Yin, "Comparison of methods for evaluation of wood smoke and estimation of UK ambient concentrations", *Atmospheric Chemistry and physics*, **2012**, 12, 8271-8283.
 23. X. Bi, B. R. T. Simoneit, G. Sheng, S. Ma, and J. Fu, "Composition and major sources of organic compounds in urban aerosols", *Atmospheric Research*, **2008**, 88, 256-265.
 24. 업정훈, 신진호, 이만호, 유승성, 권승미, 최용석, 오석률, 안미진, 박창민, 양혜란, 김은숙, 전명진, 심미희, 이원영, 신윤미, 박세영, 유시리, 이민주, 김영준, "2019년 서울시 초미세먼지 성분 분석 보고서", **2020**, 33-38, 서울특별시보건환경연구원, KR.
 25. 김민경, 차영욱, 이소립, 유은철, "부산지역 미세먼지 중 2차 생성 기여도 평가 연구", *부산시보건환경연구원 보*, **2014**, 24(1), 146-160.
 26. J. J. Huntzicker, R. L. Johnson, J. J. Shah, and R. A. Cary, "Analysis of organic and elemental carbon in ambient aerosols by a thermal optical method", *Particulate Carbon*, **1982**, 79-88.
 27. C. C. Judith, "Measurement methods to determine compliance with ambient quality standards for suspended particles", *Air & Waste Management Association*, **1995**, 45(5), 320-382.
 28. 이형우, 이태정, 양성수, 김동술, "PMF모델을 이용한 용인수원 경제지역에서 PM10 오염원의 확인과 상대적 기여도의 추정", *한국대기환경학회지*, **2008**, 24(4), 439-454.
 29. C. A. Belis, F. Karagulian, B. R. Larsen, and P. K. Hopke, "Critical review and meta-analysis of ambient particulate matter source apportionment using receptor models in Europe", *Atmospheric. Environment*, **2013**, 69, 94-108.
 30. 도우근, 정우식, "PSCF 모델을 활용한 부산지역 PM10의 발생원 추정", *한국환경과학회지*, **2015**, 24(6), 793-806.