

부산시 미세먼지 내 유해중금속 발생특성에 관한 연구

이상헌*, 박정민, 김준혁, 최성화, 곽진

환경보건팀

Characteristics of Hazardous Heavy Metals in Particulate Matter(PM-10) of Busan

Sang-Hun Lee*, Jeong-Min Park, Jun-Hyuk Kim, Seong-Hwa Choi, Jin Kwak

Environment Health Team

Abstracts

The objective of this study was to identify the sources of heavy metals in PM-10 using Positive Matrix Factorization(PMF) and Conditional Probability Function(CPF) to clarify the priority reduction target among the identified sources by health risk assessment. The PM-10 samples were collected at Hakjang, Yeonsan, Gwangan in Busan from January to October 2022. The 33 elements (Al, Mg, Ca, Fe, Si, Pb, Cr, Cd, Cu, Mn, Ni, Zn, Li, As, V, Se, Sr, Sb, Mo, Be, Co, Ti, Tl, K⁺, Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Cl⁻, NH₄⁺, SO₄²⁻, NO₃⁻, OC, EC) were analyzed using Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry(ICP-MS). A total of 7 sources were identified and apportioned by PMF. Contribution of 7 sources were as follows : Biomass burning(21.4%), Road & Vehicle(22.5%), Resuspended dust(7.3%), Soil(11.5%), Secondary aerosol(15.1%), Sea salt(9.4%), Industry(7.4%_Hakjang-Gwangan) / Combustion (23.6%_Yeonsan). And also, the risk assessment was applied to metals, that were categorized as human carcinogens and probable human carcinogens, in the 7 sources. As a result, level of the excess cancer risk was over 1.0E-06 that Road & Vehicle(1.3E-06), Industry(5.6E-06), Secondary aerosol(2.0E-06) at Hakjang, Road & Vehicle(3.4E-06) at Yeonsan, Industry(1.8E-06) at Gwangan and Hazard Index was under the limit value(<1) at all sites.

Key words : PM-10, Heavy metal, PMF, CPF, Risk assessment

I. 서론

부산시는 동남해안에 접해 있으면서 도시 전역에 걸쳐 산지가 절반을 차지하고, 주거지와 상업지구를 둘러싸고 있는 도시 녹지, 낙동강을 중심으로 한 주변 평야 및 하천환경, 대규모 공단지역을 포함하는 등 도시의 구조적 다양성이 매우 높은 지역이다¹⁾.

미세먼지(PM-10)는 직경 10 μ m 이하의 대기 중 부유하는 물질로 지형과 기상 등의 자연적인 인자와 다양한 인위적 배출원으로부터 발생하며, 물리화학적 또는 구성성분이 지역적으로 다른 특성을 가진 것으로 알려져 있다²⁾. 그리고 미세먼지는 기도의 자극, 기침, 폐기능의 저하와 같은 호흡기 관련 질환 일으키는 등 인체에 유해한 영향^{2,3)}을 미치는 것으로 알려져 있고, WHO 산하의 국제암연구소(IARC)에서는 PM(Particulate matter)을 1군 발암물질(Group 1)로 지정하여 관리⁴⁾하고 있다. 미세먼지가 인체에 미치는 유해성은 여기에만 국한되는 않고, 미세먼지에 흡착되어 존재하는 중금속에 의한 인체 독성과 유해성이 더 큰 문제로 대두되고 있다^{3,5)}.

중금속은 비중이 4~5 g/cm³ 이상인 금속 혹은 일부 반금속과 이들의 화합물⁶⁾로, 대기 중 중금속은 증기의 형태, 유기·무기물질과 결합 또는 입자에 부착된 형태로 존재한다^{2,6)}. 이 중 미세먼지에 부착되어 있는 중금속은 호흡경로를 통해 인체에 흡입될 시, 호흡기 및 순환기계, 신경계 등에 독성 영향을 미칠 뿐 아니라, 폐암(Lung cancer) 등을 유발하는 성분으로 보고되고 있다^{2,3,5)}.

부산시 중금속 농도는 겨울철과 봄철 미세먼지 고농도 시기에 높아지는 경향이 있으며, 특히 니켈(Ni)과 크롬(Cr) 농도는 7개 특·광역시 중 최근 5년간 가장 높은 수준으로 나타났는데, 부산의 대표적인 공업단지인 사상공단 내에 위치한 금속 및 도금 등의 제조업체 영향인 것으로 기존에 분석된 자료⁷⁾와 기존 연구⁸⁾를 통해 확인되었다. 이처럼 부산지역의 대기 중 중금속에 대한 연간 또는 계절별 농

도 경향, 공업단지와 같이 인과성이 뚜렷한 오염원의 확인은 기존 선행되었던 연구^{9,10)}를 통해 확인이 되었으나, 도시 구조적 다양성이 공존하는 부산시의 특성을 고려한 오염원 확인 등의 연구는 부족한 실정이다.

이에 본 연구에서는 부산지역 내 운영중인 대기중 금속측정소 5개소 중 용도지역을 대표할 수 있는 3개소(공업지역_학장동, 상업지역_연산동, 주거지역_광안동)에서 입자상 물질의 오염원과 기여율을 추정하는 데 많이 활용되고 있는 수용모델인 PMF(Positive Matrix Factorization) 모델을 통해 부산시의 주요 미세먼지 및 중금속 오염원과 오염원별 기여율을 추정하고, 추정된 오염원은 CPF(Conditional Probability Function)모델로 검증한 후, 오염원 노출에 의한 건강 위해도 수준을 발암과 비발암(독성) 정보를 가진 중금속을 토대로 평가하고자 한다. 이를 통해, 부산지역의 대기 중 유해중금속 농도를 저감하기 위한 정책 수립에 기여할 수 있는 기초자료를 제공하고, 중점 관리가 필요한 오염원을 파악하는 데 본 연구의 목적이 있다.

II. 연구재료 및 방법

1. 연구대상 및 기간

연구대상은 미세먼지(PM-10)에 함유된 중금속성분(23항목)과 PMF(Positive Matrix Factorization) 모델을 활용한 오염원 추정 시 오염원별 기여도와 오염원의 분류를 명확하게 하기 위한 이온성분(8항목), 탄소성분(2항목)으로 하였으며, 연구기간은 2022년 1월에서 10월(10개월)까지로 설정하여, 지점별 월·계절 발생특성도 확인하고자 하였다. 계절은 봄철(3~4월), 여름철(6~8월), 가을철(9~10월), 겨울철(1~2월)로 구분하였는데, 시료채취장비 교정 일정 및 연구기간을 고려하여 여름철을 제외한 겨울, 봄, 가을철은 각 2개월로 설정하였다. 연구대상은 Table 1.에 정리하였다.

Table 1. The analytical item in PM-10

Item	Item in detail
Heavy metals	Al, Mg, Ca, Fe, Si, Pb, Cr, Cd, Cu, Mn, Ni, Zn, Li, As, V, Se, Sr, Sb, Mo, Be, Co, Ti, Tl
Ion	K ⁺ , Na ⁺ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Cl ⁻ , NH ₄ ⁺ , SO ₄ ²⁻ , NO ₃ ⁻
Carbon	OC, EC

2. 연구대상 지점 및 특성

연구대상 지점은 부산시에서 현재 운영중인 대기 중금속측정소 5개소(덕천동, 광안동, 학장동, 연산동, 부곡동) 중 용도지역을 대표할 수 있는 3개소(학장동, 연산동, 광안동)를 선정하였다. 공업지역을 대표하는 학장동 측정소는 부산의 대표적인 공업단지로 사상구 학장동 학장초등학교 옥상에 위치해 있으며, 인근에 중소 제조업체들이 밀집해 있다. 2021년 기준으로 학장동 소재 대기배출시설은 199개소로 금속 및 도금 관련 업종이 39.7%, 자동차수리업종 19.1%, 주물주조 및 도장업종 12.0%가 주종을 이루고 있다. 상업지역을 대표하는 연산동 측정소는 부산광역시청 녹음광장 내 창고 옥상에 위치하고 있으며, 주변은 상가, 시장 등의 상업시설이 밀집해 있다. 주거지역을 대표하는 광안동 측정소는 수영구 소재 한바다중학교 옥상에 위치하며 주변은 아파트 단지, 빌라 등의 주거지가 밀집해 있으며, 부산시의 대표 해수욕장 중 하나인 광안리해수욕장이 인근에 위치에 있다. 참고로 연산동 및 광안동 측정소 주변에는 대규모 대기오염물질 배출시설은 존재하지 않는다⁸⁾.

3. 시료채취 방법 및 분석

시료채취는 지점별로 미세먼지(PM-10) 분리입경이 10 μm 인 Impactor를 장착한 2대의 로우볼륨샘플러(E-SEQ-FRM, Metone, USA / PMS-104, APM,

Korea)를 흡입유량 16.7 L/min의 유량으로 연구기간 동안 매일 10일간 24시간 연속 채취하였다. 금속 및 이온성분 분석을 위해 테프론 여지(47mm, MTL, USA), 탄소성분 분석을 위해 석영 여지(47mm, Whatman, UK) 사용하였으며, 석영여지는 시료채취 전에 여지 자체가 가지고 있는 유기성분을 제거하기 위하여 650 °C에서 4시간 가열하였다. 각각의 여지는 시료채취 전·후 항온 및 항습 조건이 유지되도록 24시간 이상 항온항습챔버(HB-105SG, Hanbaek scientific, Korea) 내에 보관한 뒤 0.1 μg 까지 측정할 수 있는 미세먼지 칭량 로봇시스템(ChambAL-500, C2K creative, Korea)로 무게를 측정하였다^{8,11)}.

미세먼지 시료채취 후, 중금속분석은 국립환경과학원의 황사 및 미세먼지 중 PM-2.5 성분분석에 관한 연구¹²⁾, 이온 및 탄소분석은 대기환경측정망 설치·운영지침(별표 25, 26)¹³⁾를 참고하여 전처리와 분석을 진행하였다. 중금속 분석은 시료채취가 완료된 테프론 여지 1/2를 분취한 후 Microwave(Multiwave Pro, Anton Paar, Austria) 전용 분해용기(Teflon vessel)에 넣고 12% 질산을 10 ml 가한 다음 분해용기의 마개를 닫아 Microwave 안에 넣고 전용 프로그램(180 °C까지 승온 15분, 180 °C로 유지 15분, 55 °C까지 냉각 21분)으로 추출한 후 2시간 방랭하고 5A 여지로 여과하여 최종 10 mL를 맞추었고, 전처리한 시료는 ICP-MS(NexION 2000, PerkinElmer, USA) 장비를 사용하여 분석



Fig. 1. Study sites in Busan

하였다. 이온분석은 나머지 테프론 여지 1/2을 절취한 후 에탄올 100 μl 에 침적시킨 후, 초순수 10 ml를 가한 후 초음파 추출기(BC-1200W, Bosung ultrasonic, Korea)를 사용하여 120분간 추출 한 후 0.45 μm 공극의 실린지 필터(SLHV033NS, Millex, Germany)로 여과하였다. 전처리된 시료는 양이온과 음이온 전용 컬럼을 사용하여 이온크로마토그래피(ICS-5000+, Dionex, USA)로 분석하였다. 탄소분석은 시료채취가 완료된 석영여지를 탄소분석기전용 Punching 장비를 사용하여 시편(1.0 cm \times 1.5 cm)을 만든 후 Auto Sampler에 장착하여 미국 NIOSH(National Institute of Safety and Health)의 NIOSH 5040 프로토콜에 따라 탄소분석기(OCEC Carbon aerosol analyzer, Sunset Laboratory, USA)로 분석하였다. 그리고 중금속, 이온, 탄소 성분의 바탕시험을 위해 공여지를 동일한 방법으로 전처리 및 분석하였으며, 각 성분별 분석한 농도 값을 공여지 시료 값으로 보정하여 최종 농도 값으로 사용하였다.

4. PMF(Positive Matrix Factorization) 모델

PMF 모델은 수용체에서 채취한 입자상 혹은 가스상의 대기오염물질을 분석하여 주변 지역의 대기오염 배출원들이 수용체에 미치는 영향 및 기여율을 인자분석 통계기법으로 오염원의 정량적인 추정이 가능하게 하는 통계 분석방법으로 본 연구에서는 사용한 PMF 모델은 미국 환경청(United States Environment Protection Agency)에서 제공하는 PMF 5.0 버전을 활용하여 수행하였다. PMF 모델식은 다음과 같다⁴⁾.

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

X 행렬은 차원이 $n \times m$ 인 자료행렬로서 n는 시료의 수, m은 분석화학종을 나타내며, X 행렬의 행(row)은 하나의 시료에 대한 화학성분들의 농도, 열(Column)은 각각의 채취시료들로 구성된다. G 행렬은 $n \times p$ 차원이며, G 행렬의 열은 특정 오염원에 대한 배출량 즉, 측정기간에 대한 오염원의 강도(Strength) 또는 오염원의 기여도(Contribution)을 의미한다. F 행렬은 $p \times m$ 차원이며, F 행렬의 행은 특정 오염원에 대한 오염원 분류표(Source Profile)를 나타내며, G와 F 행렬은 항상 양의 값을 가지며, 두 행렬에서 p는 추출한 인자의 수를 나타낸다. E 행렬은 잔차행렬(Residual Matrix)를 의미하며, 다음식으로 나타낼 수 있다^{2,14)}.

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

PMF 모델에서 Q 값은 적정수의 인자수를 결정하는데 사용되며, 정확한 오염원을 추정하기 위해서는 Q값을 최소화해야하는데, 다음식으로 나타낼 수 있다.

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

여기서, u_{ij} 는 X_{ij} 의 불확도 또는 표준편차를 나타낸다^{2,14)}.

PMF 모델을 수행하기 위해서는 입력자료인 농도(Concentration)와 불확도(Uncertainty) 자료가 필요하다. 본 연구에서는 지점별 채취시료를 대상으로 미세먼지 성분 중 이온성분 8항목, 탄소성분 2항목, 중금속성분 23항목을 분석화학종으로 하였다. 분석화학종의 농도 중 결측값(Missing Value)는 해당 화학종 전체 값의 중앙값(Median)으로 대체하였고, 불확도는 아래의 식을 이용하여 산출하였다¹⁵⁾.

$$u = 0.2 \times \text{Concentration} + \frac{MDL}{3} \quad (\text{Conc.} \leq MDL) \quad (4)$$

$$u = 0.1 \times \text{Concentration} + \frac{MDL}{3} \quad (\text{Conc.} > MDL)$$

5. CPF(Conditional Probability Function) 모델

CPF 모델은 측정된 농도값과 기상자료(풍향, 풍속)를 이용하여 기상영향에 의한 오염원의 유입 방향 등의 영향을 파악하는 데 활용된다. 본 연구에서는 PMF 모델을 통해서 확인된 오염원별 오염물질 농도값을 이용하여 오염원의 유입 방향을 검토하여, PMF로 확인된 오염원의 위치와 오염원 분류의 타당성을 평가하는데 활용하였다. CPF 모델의 계산식은 다음과 같다.

$$CPF_{\Delta\theta} = \frac{m_{\Delta\theta}}{n_{\Delta\theta}} \quad (5)$$

$n_{\Delta\theta}$ 는 전체자료에 대해 $\Delta\theta$ 의 풍향에서 불어오는 바람의 총 발생횟수, $m_{\Delta\theta}$ 는 동일한 풍향에서 적정 기준치를 초과할 때 발생하는 바람의 횟수를 의미한다. 본 연구에서는 지점별 가장 인접한 기상측정지점(연산동-동래, 학장동-사상, 광안동-대연)의 방재기상관측(AWS, Automatic Weather System) 자료(풍향, 풍속)를 사용하였으며, 풍향은 16방향이므로 $\Delta\theta$ 를

22.5로 사용하였다. 그리고, 기상청에서 제시하는 0.4m/sec이하의 무풍(Calm wind)조건은 모델 적용 대상에서 제외하였으며, PMF모델을 통해 확인된 각 오염원의 기준 농도치는 65~70th percentile 값을 사용하였다^{16,17,18)}.

6. 위해도 평가

위해도평가(Risk Assessment)는 미세먼지(PM-10)에 포함된 중금속 항목 중 흡입 경로로 노출될 경우, 발암 및 비발암(독성) 위해도 정보를 가진 항목을 대상으로 하였다. 흡입 경로로 노출 될 시, 단일 물질이 아닌 복수의 물질에 의해 노출되므로 각 항목별로 단일 발암위해도 또는 비발암(독성)위해도를 산출한 후 합하여 구해진 통합 발암위해도 또는 비발암(독성) 위해도로 평가를 수행하였다⁸⁾. 발암위해도를 가진 항목은 As, Ni, Cd, Pb이며, 비발암(독성)위해도를 가진 Mn, Al, Se 항목이 위해도평가 대상이다. 위해도평가는 불확실성과 가변성을 반영하기 위하여 확률론적 위해성

평가(Probabilistic risk assessment) 방법인 Monte-carlo simulation을 적용하였으며, 위해도 평가 프로그램인 Crystal ball(Colorado, Denver, USA, ver 11.1.2.1)을 사용하여 10,000번의 시뮬레이션을 수행 한 후 일반적인 평균 농도 수준에서의 노출 경향을 의미하는 50th percentile 값으로 위해도 수준을 평가하였다⁸⁾. 평가대상 중금속 항목의 발암 및 비발암(독성) 정보는 Table 2.에 나타내었다.

위해도평가에 적용한 인체노출계수는 국립환경과학원의 화학물질 위해성평가의 구체적 방법 등에 관한 규정(2021)²²⁾과 한국인의 노출계수핸드북(2019)²³⁾을 참고하였다. 성인 평균 체중(Body weight)은 64.5 kg, 호흡율(Inhalation rate)은 14.62 m³/day, 평균수명(Life time)은 70년, 노출빈도(Exposure frequency)는 365일, 노출기간(Exposure period)은 25년이며, 호흡으로 노출된 양은 100%가 흡수된다고 가정하였다. 본 연구에 적용한 인체노출계수는 Table 3.에 나타냈다.

Table 2. Toxicity information of carcinogenic and non-carcinogenic metals for risk assessment

		Carcinogeny classification		Inhalation unit risk (µg/m ³) ⁻¹	Source
		US-EPA ^a	IARC ^{b,19)}		
Carcinogeny	As	A	1	4.3E-03	US-EPA IRIS ²⁰⁾
	Ni	A	1	2.4E-04	US-EPA IRIS ²⁰⁾ (Ni Refinery dust)
	Cd	B1	1	1.8E-03	US-EPA IRIS ²⁰⁾
	Pb	B2	2A	1.2E-05	US EPA IRIS ²⁰⁾
		Carcinogeny classification		RfC ^c (µg/m ³)	Source
		US-EPA	IARC		
Non-Carcinogenic	Mn	D	-	5.0E-05	US-EPA IRIS ²⁰⁾
	Al	-	-	5.0E-03	US-EPA IRIS ²⁰⁾
	Se	D	3	2.0E-02	OEHHA ^{d,21)}

^aUnited States Environment Protection Agency

^bThe International Agency for Research on Cancer

^cReference Concentration

^dThe California Environmental Protection Agency's Office of Environmental Health Hazard Assessment

Table 3. Exposure factor for risk assessment

Factors	Unit	Values	Source
Body weight (BW)	kg	64.5(S.D.=12.65)	Korea NIER ^{22,23)}
Inhalation rate (IR)	m ³ /day	14.62(S.D.=3.19)	
Lifetime (LT)	year	70	
Exposure frequency (EF)	day	365	
Exposure period (EP)	year	25	

발암위해도 평가는 Table 3.에 언급한 인체노출 계수를 적용하여 산출한 평생일일평균용량(LADD, Lifetime Average Daily Dose)과 호흡노출단위 위험도(IUR, Inhalation Unit Risk)에 한국인의 평균체중 및 평균 호흡량으로 보정된 발암잠재력(CPF, Cancer Potency Factor)으로 산출한 초과 발암위해도(Excess Cancer Risk)가 위해 없는 수준($1.0E-06$)에서 위해 있는 수준($1.0E-04$)의 발암확률 범위에서 평가되며, 발암위해도 평가에 적용된 식은 아래와 같다⁸⁾.

$$LADD(mg/kg/day) = \frac{Conc.(mg/m^3) \times IR(m^3/day) \times EF(day/year) \times EP(year)}{BW(kg) \times LT(day)}$$

$$CPF(mg/kg/day)^{-1} = \frac{IUR(\mu g/m^3)^{-1} \times BW(kg)}{IR(m^3/day)} \quad (6)$$

$$Excess\ Cancer\ Risk = LADD(mg/kg/day) \times CPF(mg/kg/day)^{-1}$$

비발암(독성) 위해도 평가는 평생일일평균용량(LADD)을 섭취량(RfD, Reference Dose)으로 나누어 평가할 수 있으며, 비발암위해도는 위험성 몫인 HQ(Hazard Quotient) 지수로 나타내고, 모든 오염물질에 따른 비발암위해도는 이들 HQ 지수들을 총합한 HI(Hazard Index) 지수로 나타낸다⁸⁾. 이들 수치가 1을 초과하는 경우에는 건강상 위해영향(독성)이 발생할 가능성이 있음을 나타내며, 1 이하인 경우에는 위해영향 발생 가능성이 낮음을 의미하나, 위해도지수의 크고 작음에 따라 위해도의 정도는 평가되지 않는다⁸⁾. 비발암(독성) 위해도 평가에 적용한 식은 아래와 같다.

$$HQ = LADD/RfD = \frac{LADD(mg/kg/day)}{RfC(mg/m^3) \times BW(kg) / IR(m^3/day)} \quad (7)$$

$$HI = \sum HQ$$

Ⅲ. 결과 및 고찰

1. 기상상황

연구기간 동안 지점별 기상상황을 계절별 특성에 따라 봄철(3~4월), 여름철(6~8월), 가을철(9~10월), 겨울철(1~2월)로 구분하여 아래의 Table 4.~6.와 Fig.2.~4.에 나타내었다. 기온은 계절에 따라 전 지점에서 유사한 수준으로 나타났으나, 여름철은 상업지역인 연산동이 열섬 현상 등의 영향으로 평균기온 26.1℃로 가장 높았으며, 겨울철은 부산 서부에 위치하여

한랭한 북서풍 영향을 받는 학장동에서 평균기온 2.9℃로 가장 낮은 것으로 나타났다. 풍향은 봄철과 여름철은 남서풍, 가을철은 학장과 광안동에서는 북동풍, 연산동은 북서풍, 겨울철은 북서풍이 주풍으로 나타났다. 풍속은 고층 건물 등의 상업시설이 인근에 위치한 연산동이 계절별 상대적으로 가장 낮은 것으로 나타났다. 상대습도는 겨울철이 가장 건조하고 여름철이 가장 다습한 것으로 나타났다.

Table 4. Meteorological conditions at Hakjang

Hakjang	Temperature(°C)				Wind direction(16)				Wind speed(m/s)				Relative Humidity(%)			
	SP	SU	AU	WI	SP	SU	AU	WI	SP	SU	AU	WI	SP	SU	AU	WI
Mean	11.6	25.2	20.2	2.9	SW	SW	NE	NW	2.8	3.1	2.9	2.6	70.0	81.8	70.3	48.3
S.D	3.3	2.6	4.4	2.8	-	-	-	-	1.0	1.4	1.0	1.0	12.2	7.4	7.1	12.9
Max	18.0	29.4	27.2	8.5	-	-	-	-	5.8	7.8	5.2	4.8	93.2	98.0	81.1	69.5
Min	5.8	18.2	14.1	-3.0	-	-	-	-	1.6	1.0	1.6	1.3	45.1	68.1	57.6	24.7

* SP : Spring, SU : Summer, AU : Autumn, WI : Winter

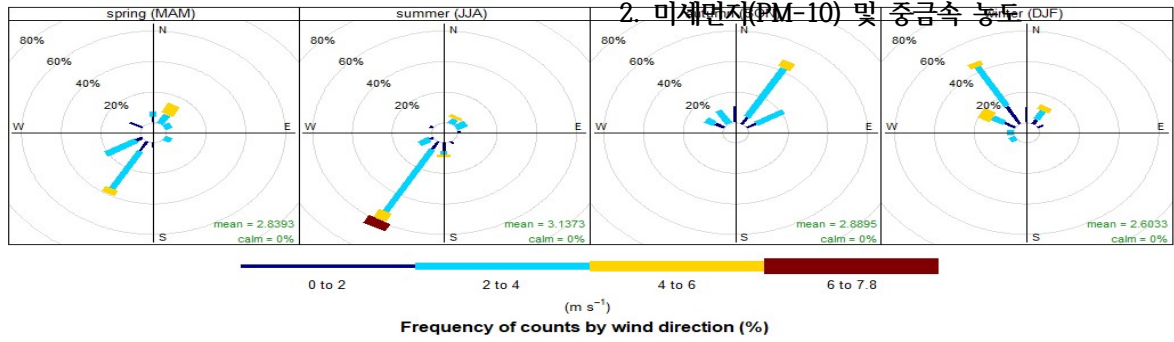


Fig. 2. Seasonal windrose at Hakjang

Table 5. Meteorological conditions at Yeonsan

Yeonsan	Temperature(°C)				Wind direction(16)				Wind speed(m/s)				Relative Humidity(%)			
	SP	SU	AU	WI	SP	SU	AU	WI	SP	SU	AU	WI	SP	SU	AU	WI
Mean	12.1	26.1	19.1	3.9	SW	SW	N	NW	1.7	1.3	1.6	1.4	57.1	79.6	68.5	37.1
S.D	3.8	2.3	3.4	2.8	-	-	-	-	0.4	0.6	0.6	0.4	14.2	8.2	9.7	15.2
Max	19.9	29.7	26.0	8.3	-	-	-	-	2.4	2.6	2.8	2.2	81.5	96.4	83.5	60.9
Min	5.7	18.9	13.9	-2.9	-	-	-	-	1.0	0.5	0.7	0.7	29.5	65.8	49.0	10.9

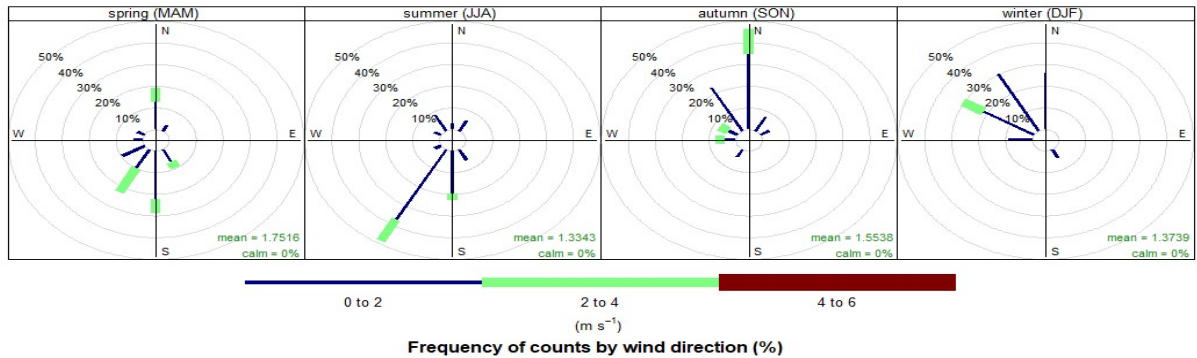


Fig. 3. Seasonal windrose at Yeonsan

Table 6. Meteorological conditions at Gwangan

Gwangan	Temperature(°C)				Wind direction(16)				Wind speed(m/s)				Relative Humidity(%)			
	SP	SU	AU	WI	SP	SU	AU	WI	SP	SU	AU	WI	SP	SU	AU	WI
Mean	11.7	24.0	19.8	4.6	SW	SW	NE	NW	3.0	2.7	3.4	3.1	65.8	85.3	73.2	43.0
S.D	3.5	2.7	3.3	2.2	-	-	-	-	1.3	1.6	1.4	0.7	15.2	7.3	10.5	15.1
Max	17.9	28.2	25.8	8.1	-	-	-	-	6.3	9.0	7.1	4.8	97.8	99.1	91.6	68.9
Min	5.5	16.8	13.8	0.9	-	-	-	-	1.8	0.9	1.1	2.1	35.6	70.6	53.3	15.9

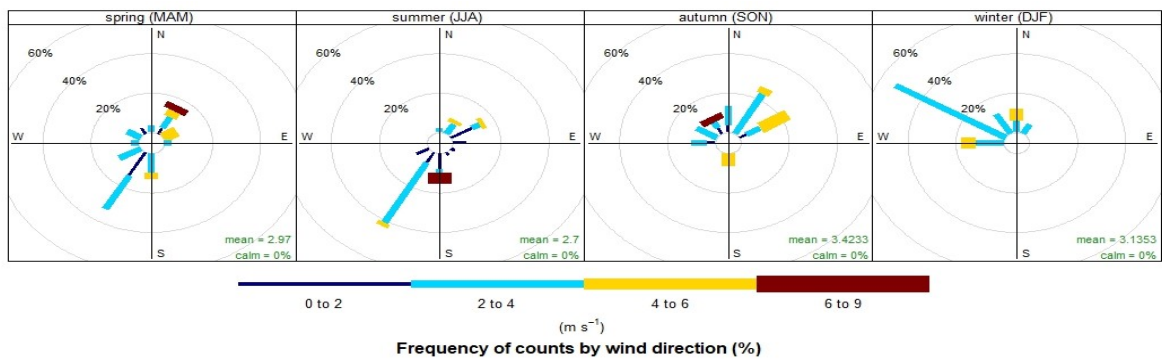


Fig. 4. Seasonal windrose at Gwangan

2.1. 미세먼지(PM-10) 성분조성

대기 중 미세먼지의 일반적인 구성성분은 이온, 탄소, 무기원소(금속·비금속)와 그 외 기타 성분들로 구성되며, 지역적인 특성에 따라 다소 차이를 보이는 것으로 알려져 있다⁹⁾. 미세먼지 농도의 구성비율은 기타성분(Unknown)을 제외하고 이온 > 탄소 > 무기원소 순인 것으로 알려져 있으며, 지점별로 확인된 미세먼지의 구성비율은 허 등(2018)⁴⁾이 경기도 평택지역의 미세먼지 분석결과(이온_40.9%, 탄소_15.9%, 무기원소_5%, 기타성분_38%)와 비슷한 특성을 보였다(Table 7.). 이 중 무기원소는 전 지점에서 봄철에 구성비율이 4.7%~7.7%로 가장 높은 것으로 나타났는데, 일교차가 크고 대기가 건조한 계절적 특성에 의해 빈번히 발생하는 비산먼지의 영향²⁴⁾으로 지각기원금속 농도가 증가한 것으로 판단된다(Fig.5.).

2.2. 지점별 미세먼지 및 중금속 농도 분포

미세먼지 농도는 학장동이 평균 31.9±13.1 µg/m³으로 연산동(23.4±10.6 µg/m³), 광안동(25.8±12.4 µg/m³) 보다 높은 것으로 나타났다. 미세먼지 중 중금속

농도는 지각기원(Crustal)금속과 미량(Trace)금속으로 구분²⁾하여 Table 8. 에 나타냈다.

지각기원금속과 미량금속 중에서 가장 높은 농도를 나타낸 항목은 학장동 Fe(평균 0.7907 µg/m³)과 Zn(평균 0.1689 µg/m³), 연산동 Si(평균 0.2300 µg/m³)와 Zn(평균 0.0552 µg/m³), 광안동 Fe(평균 0.2206 µg/m³)과 Zn(평균 0.0524 µg/m³)인 것으로 나타났다. 미량금속 중 공업지역인 학장동에서 Cr, Cu, Mn, Ni이 타 지점 대비 농도가 높은 것으로 나타났는데, 이는 공업지역 내 주요 업종인 도금·주물주조·금속가공업의 영향인 것으로 사료된다.

월별 중금속 농도는 미세먼지 농도 증감에 따라 변화되는 것을 확인할 수 있었다. 여름철은 집중된 강우로 인한 세정효과로 미세먼지 농도가 봄철(학장 37.7 µg/m³, 연산 27.4 µg/m³, 광안 32.8 µg/m³)에 비해 여름철(학장 27.1 µg/m³, 연산 19.4 µg/m³, 광안 22.2 µg/m³)이 낮은 것으로 나타났다. 또한, 중금속 농도도 감소하는 것으로 나타났는데, 비산먼지나 건설활동 등으로 인해 발생하는 지각기원금속의 농도(학장 60.5% 감소, 연산 70.9% 감소, 광안 76.4% 감소)가 미량금

Table 7. Composition ratio of PM-10 in each site (Unit : %)

	Hakjang					Yeonsan					Gwangan				
	SP	SU	AU	WI	TO	SP	SU	AU	WI	TO	SP	SU	AU	WI	TO
PM-10 (µg/m ³)	37.7	27.1	24.6	39.3	31.9	27.4	19.4	20.8	27.1	23.4	32.8	22.2	19.8	35.1	25.8
Ion	34.4	29.2	28.4	34.7	32.0	42.1	38.5	32.9	50.5	41.3	35.7	35.7	35.7	31.8	35.0
Carbon	18.6	18.8	21.1	25.0	20.8	18.6	30.1	19.9	28.9	24.2	16.1	18.0	16.0	19.4	17.3
Metal	7.7	4.5	3.2	5.5	5.4	5.1	2.3	2.1	3.0	3.3	4.7	1.8	1.9	1.8	2.7
Unknown	39.4	47.5	47.3	34.8	41.7	34.1	29.1	45.1	17.6	31.2	43.5	44.6	46.4	47.0	45.0

* SP : Spring, SU : Summer, AU : Autumn, WI : Winter, TO : Total

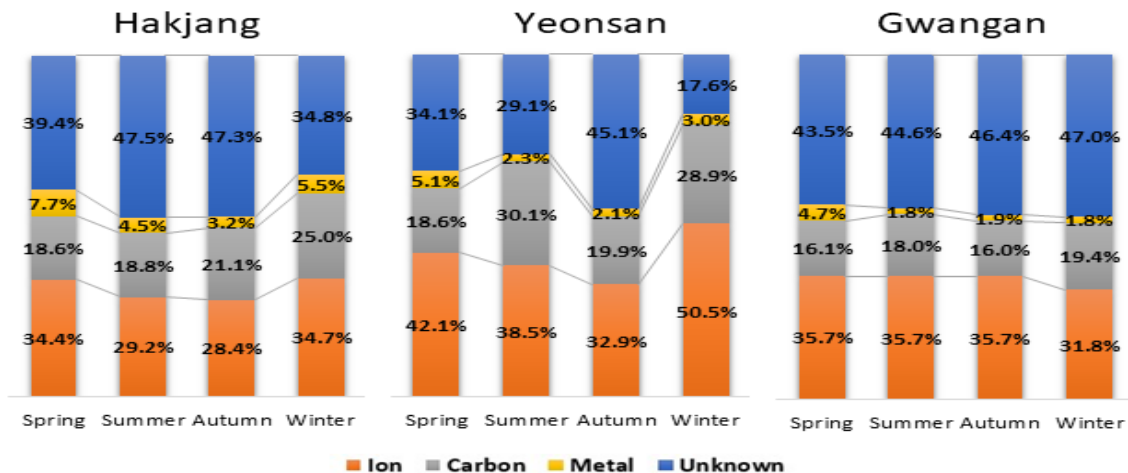


Fig. 5. Seasonal composition ratio(%) of PM-10 in each site

속 농도(학장 43.6% 감소, 연산 36.3% 감소, 광안 55.0% 감소) 대비 더 큰 폭으로 감소하는 것으로 나타났다.

봄·겨울철은 지표면 부근의 냉각효과로 인한 대기정체와 낮은 대기 혼합고로 인해 대기확산이 어려운 특성²⁾으로 겨울철부터 미세먼지와 중금속 농도가 증가하여 봄철인 3, 4월에 최고 농도 수준을 보이는 것으로 나타났다(Fig.6.). 이는 연구기간 중 겨울철에 우세했던 북서풍과 편서풍 지대의 특성으로 인한 황사 등 국외 미세먼지 유입에 따른 영향인 것으로 사료된다. 특히, 학장동은 부산 서부에 위치하여 김해평야 등의 농업활동에 의한 영향²⁵⁾으로 다른 지점 대비 봄철 지각기원금속의 농도(학장 2.506 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 연산 1.267 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 광안 1.410 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)가 높은 것으로 사료된다.

3. PMF 모델 결과

PMF 모델을 수행하기 전에 지점별로 채취하여 분석한 값을 대상으로 미국 환경청의 PMF 5.0 User guide(2014)²⁶⁾와 국립환경과학원의 수용모델 운영방법의 표준화 및 정책적 활용성 제고(2021)²⁷⁾ 자료를 참고하여 입력파일을 작성하였다. PMF 모델 수행을 통해 최적의 인자수를 찾기 위해, S/N비(Signal to noise ratio)가 0.2 미만으로 측정값의 신뢰도가 낮은 Li, Co, Be, Tl, Se(학장동)은 모델 수행 시 제외하였고, 무기원소 Ca과 Mg 농도의 변동성을 모델에서 예측하지 못하여 이온형태의 Ca^{2+} , Mg^{2+} 농도로 오염원을 추정하였다. 모델을 통해 추정된 최적의 오염원 수는 7개로 결정되었으며, 지점별 Q값(이론 Q값)은 학장동 1497(2167), 연산동 1017(1755), 광안동 1122(1974)으로 나타났다. 모델을 통해 추정된 오염원 대해서는 미국 환경청의 오염원 분류표인 SPECIATE version 5.2²⁷⁾와 기존 연구^{2,4,9,14,15,16,17,18,29)}를 통해 확인된 오염원별 지표항목을

Table 8. Concentrations of PM-10 and Metals in each sites (unit: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

	Hakjang		Yeonsan		Gwangan		
	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.	
PM-10	31.9	13.1	23.4	10.6	25.8	12.4	
Crustal	Al	0.1031	0.1571	0.0767	0.1458	0.0669	0.1454
	Ca	0.1236	0.1855	0.0680	0.1312	0.0604	0.1525
	Fe	0.7907	0.6444	0.2200	0.1964	0.2206	0.5377
	Mg	0.1259	0.0734	0.0885	0.0576	0.0936	0.0653
	Si	0.3321	0.4563	0.2300	0.3984	0.1675	0.3575
	Total	1.4754	1.2308	0.6831	0.7919	0.6089	0.9002
Trace	As	0.0026	0.0043	0.0018	0.0043	0.0016	0.0040
	Be	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	Cd	0.0006	0.0006	0.0005	0.0007	0.0005	0.0007
	Co	0.0003	0.0006	0.0001	0.0003	0.0001	0.0003
	Cr	0.0107	0.0131	0.0020	0.0021	0.0020	0.0022
	Cu	0.0160	0.0198	0.0042	0.0056	0.0031	0.0035
	Li	0.0000	0.0001	0.0000	0.0001	0.0000	0.0001
	Mn	0.0236	0.0279	0.0050	0.0060	0.0037	0.0048
	Mo	0.0017	0.0017	0.0004	0.0006	0.0003	0.0004
	Ni	0.0127	0.0157	0.0015	0.0054	0.0010	0.0023
	Pb	0.0045	0.0088	0.0025	0.0043	0.0021	0.0037
	Sb	0.0029	0.0031	0.0022	0.0024	0.0020	0.0023
	Se	0.0009	0.0015	0.0038	0.0031	0.0050	0.0036
	Sr	0.0012	0.0012	0.0008	0.0012	0.0008	0.0012
	Tl	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	Ti	0.0075	0.0077	0.0052	0.0060	0.0050	0.0068
	V	0.0007	0.0008	0.0005	0.0006	0.0005	0.0006
	Zn	0.1689	0.1452	0.0552	0.0416	0.0524	0.0461
Total	0.2548	0.2148	0.0861	0.0649	0.0802	0.0638	

참고하여 검증하였다.

연구지점(학장동, 연산동, 광안동)에서 오염원을 확인한 결과, 지점별로 7개의 오염원을 확인할 수 있었으

며, 각 지점별 오염원 분류(Source profile)와 기여도(Source contribution)는 Fig. 7.~ Fig. 13.에 나타냈다.

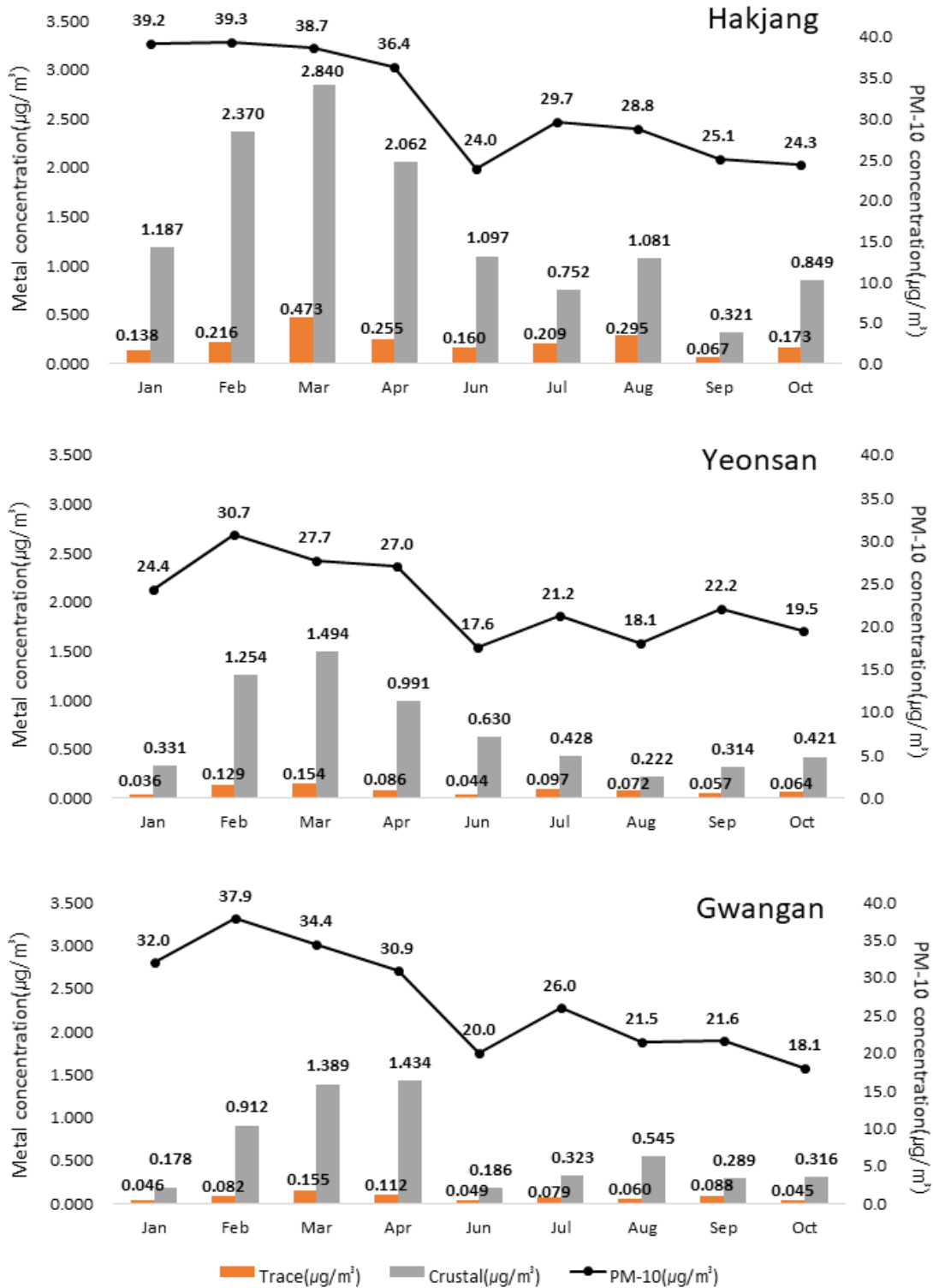


Fig. 6. Monthly average concentration of metal and PM-10 in each site

3.1. 오염원 현황 및 기여율

첫 번째 오염원(Source 1)은 미세먼지 기여도가 전 지점 평균 21.4%를 차지한 생물성 연소(Biomass burning)인 것으로 나타났으며, 생물성 연소의 주요 추적자(Marker species)인 K^+ , OC, EC, SO_4^{2-} 가 높게 기여하는 것으로 나타났다¹⁴⁾. 연구지점별 기여율은 학장동과 연산동에서 각각 25.9%, 24.2%로 광안동(14.2%) 대비 높게 나타났으며, 연산동에서는 가장 기여율이 큰 오염원으로 나타났다. 이는 연산동 지점 주변에 재래시장과 상가들이 밀집한 지역 특성의 영향인 것으로 사료된다. 생물성 연소는 전 지점에서 겨울철과 봄철에 상대적으로 높은 기여를 하는 것으로 나타났다¹⁴⁾.

두 번째 오염원(Source 2)은 미세먼지 기여도가 평균 22.5%인 도로와 자동차(Road & Vehicle) 관련인 것으로 나타났다. 도로와 자동차의 주요 추적자인 OC, EC가 가장 높은 기여를 하는 것으로 나타났으며, 학장동은 타이어 마모 시 주로 발생하는 Zn, 연산동은 브레이크 라이닝 마모 시 발생하는 Fe과 차량 윤활유에서 발생하는 Ca^{2+} 도 상대적으로 높은 기여를 하는 것으로 나타났다^{4,14)}. 연구지점별 기여율은 학장동과 광안동에서 각각 27.7%, 21.8%로 연산동(17.9%) 대비 높았으며, 학장동과 광안동에서 가장 높은 기여를 하는 것으로 나타났다. 도로와 자동차 오염원은 계절적인 차이가 상대적으로 크지 않고, 전체 계절에서 지속적인 기여를 하는 것으로 나타났다^{4,14,30)}.

세 번째 오염원(Source 3)은 미세먼지 기여도가 평균 7.3%인 재비산먼지(Resuspended dust) 관련인 것으로 나타났다. 재비산먼지 오염원은 인위적인(Anthropogenic) 오염원과 토양 오염이 복합적으로 작용하는 특성을 나타낸다²⁹⁾. 연구지점별 기여율은 광

안동 15.7%로 학장동(1.7%)과 연산동(4.5%) 대비하여 높은 기여율을 나타냈다. 광안동은 Mg^{2+} , EC, Cu, Fe, Mn이 높은 기여를 하는 것으로 나타났으며, 전체 계절에서 높은 기여를 하는 것으로 나타났다. 이는 남서쪽에 위치한 감만·용당부두로 진입되는 도로 등의 선 오염원에 의한 영향인 것으로 사료된다. 학장동과 연산동은 겨울철과 봄철에 높은 기여를 하는 것으로 나타났는데, 이는 대기가 건조하여 비산먼지가 자주 발생하는 계절적 특성³³⁾과 국외 미세먼지 유입 등에 의한 영향인 것으로 사료된다.

네 번째 오염원(Source 4)는 학장동과 광안동은 산업(Industry) 관련으로 평균 7.4%의 기여도를 나타냈으며, 연산동은 연소(Combustion) 관련으로 23.6%의 기여도를 나타냈다. 학장동은 주요 업종인 도금·주조·금속업에서 기인하는 Cr, Cu, Fe, Ni, Mn 가 높게 기여하는 것으로 나타났다^{8,31)}. 광안동은 As, Cd, Cu, Fe, Pb, Zn와 같은 산업(항구도시) 관련 오염원에서 기인하는 성분이 높은 기여를 하는 것으로 나타났다. 주거지역의 특성상, 인근에는 산업 관련 오염원이 존재하지 않으나, 해당 오염원의 기여율이 높았던 측정일에 북동풍 기류가 울산 등 타 지역을 거쳐 유입되는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해 북동쪽 해안을 따라 형성된 여러 항구도시와 원거리에 위치한 대규모 산업 배출원의 영향에 의한 것으로 사료된다. 산업 오염원의 기여율은 학장동 8.4%, 광안동 6.4%로 나타났으며, 전체 계절에서 지속적인 기여를 하는 것으로 나타났으나, 광안동은 학장동 대비 낮은 농도 수준을 보이는 것으로 확인되었다.

연산동은 연소 오염원의 주요 추적자인 OC, EC, SO_4^{2-} 와 석탄 연소(Coal combustion)의 추적자인 Se이 높은 기여를 하는 것으로 나타났다^{4,14)}. 연소 오염원

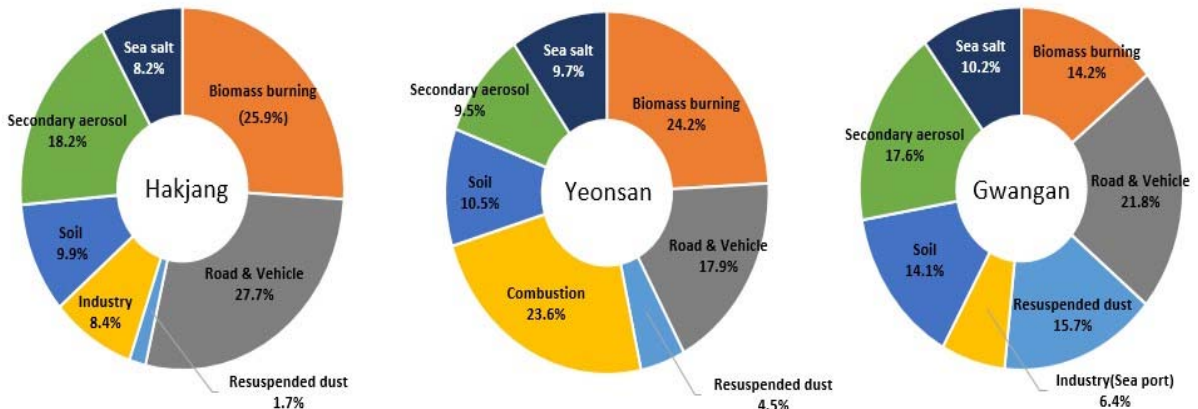


Fig. 7. The source contributions(%) of PM-10

은 생물학적 연소 다음으로 높은 23.6%의 기여도를 나타냈으며, 여름철과 가을철에 높은 기여를 하는 것으로 나타났다.
다섯 번째 오염원(Source 5)은 미세먼지 기여도가

평균 11.5%인 토양(Soil) 관련으로 나타났다. 토양의 주요 추적자는 Al, Fe, Ca²⁺, Mg²⁺, Si 로 전 지점에서 높게 기여하는 것으로 나타났다^{4,14)}. 연구지점별 기여율은 학장동 9.9%, 연산동 10.5%, 광안동 14.1%로 나

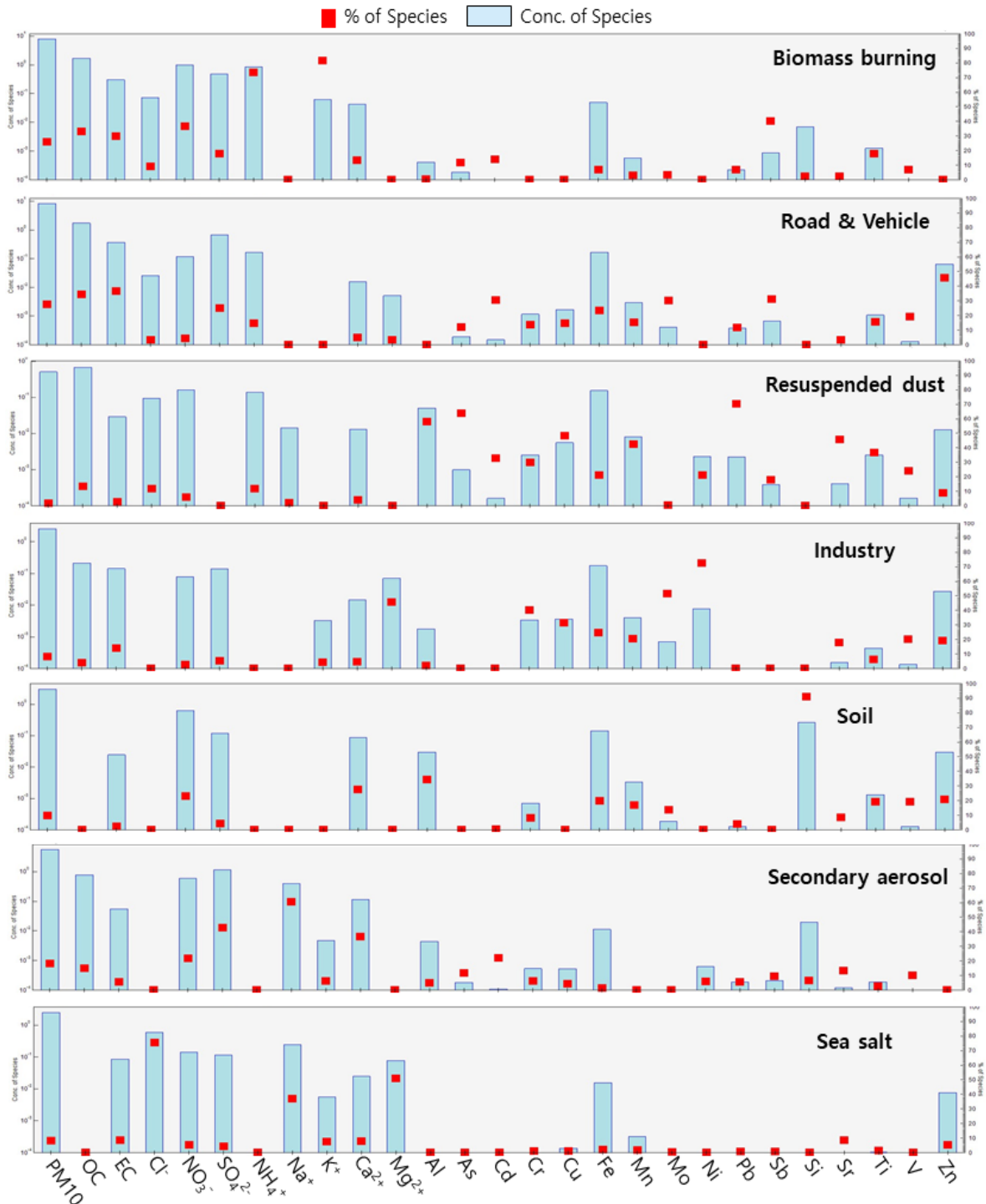


Fig. 8. The source profiles of PM-10 in Hakjang

타났으며, 겨울철과 특히 봄철에 높은 기여를 하는 것으로 나타났다. 이는 연구기간 중 겨울철에 우세했던 북서풍과 편서풍 지대의 특성으로 인한 황사 등 국외 미세먼지 유입에 따른 영향인 것으로 사료된다.

여섯 번째 오염원(Source 6)은 미세먼지 기여도가 평균 15.1%인 2차 생성물질(Secondary aerosol) 관련인 것으로 나타났다. 주요 추적자는 NH_4^+ , SO_4^{2-} , NO_3^- , OC 이며, SO_4^{2-} , NH_4^+ 은 SO_2 가 광화학 반응에

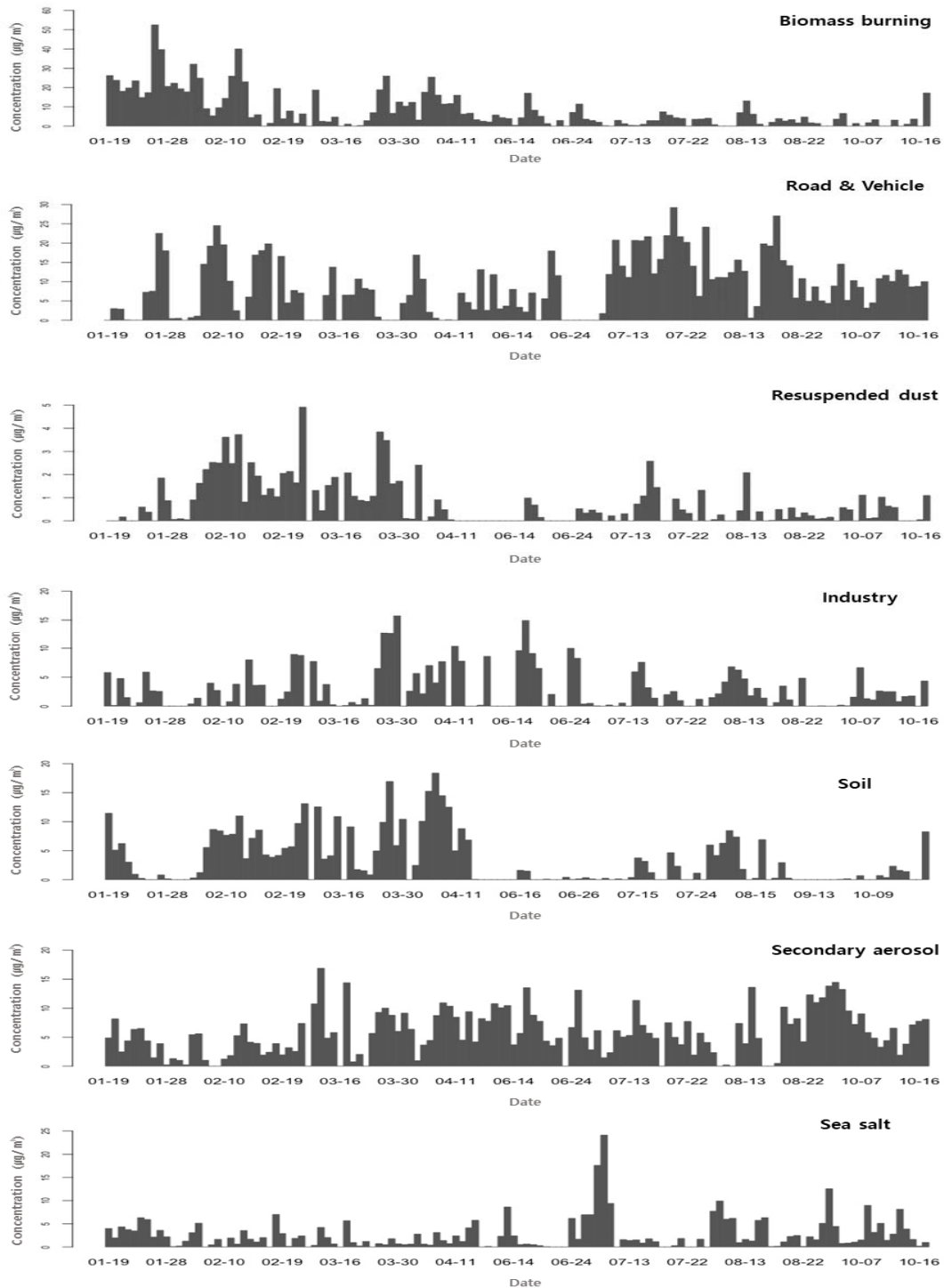


Fig. 9. Time series plots of sources from PMF model in Hakjang

의해 H_2SO_4 로 변환되어 생성되며, 겨울철 보다는 여름에 잘 발생하는 것으로 알려져있다¹⁴⁾. NO_3^- , NH_4^+ 는 대기 중에 방출된 NO_x 등이 NH_3 (암모니아)와 결합하여 생성되며, SO_4^{2-} 과는 반대로 겨울철에 농도가 높은 특성을 가지는 것으로 알려져 있다⁴⁾. 연구지점별 기여율은 학장동 18.2%, 광안동 17.6%로 연산동(9.5%) 대

비 높게 나타났다. 계절별 기여도에서 학장동은 NH_4^+ , SO_4^{2-} , NO_3^- 의 기여도가 높아 계절 구분없이 높은 기여를 하는 것으로 나타났으며, NH_4^+ , SO_4^{2-} , 의 기여도가 높은 광안동과 연산동은 봄, 여름철에 상대적으로 높은 기여를 하는 것으로 나타났다.

일곱 번째 오염원(Source 7)은 미세먼지 기여도가

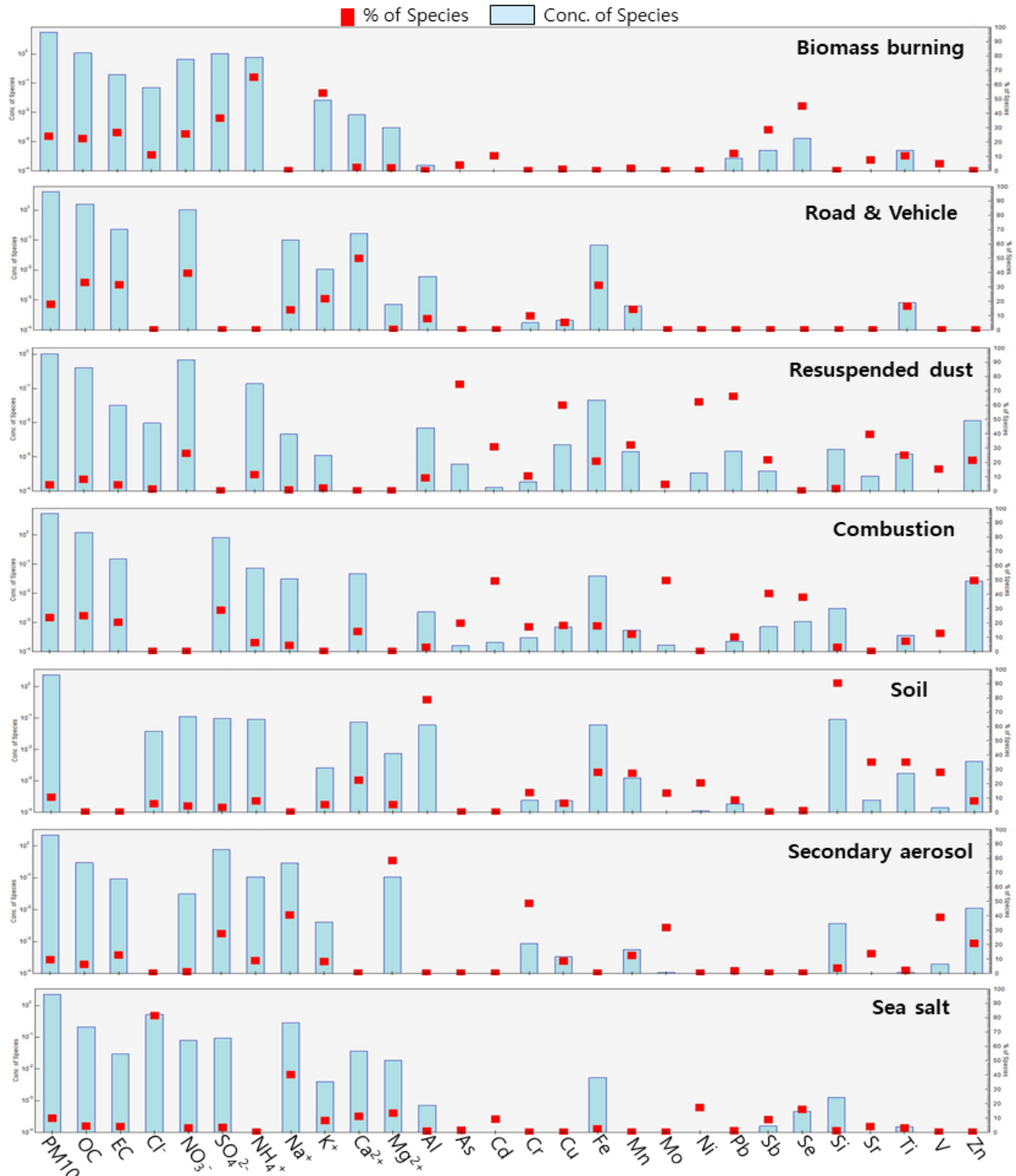


Fig. 10. The source profiles of PM-10 in Yeosan

평균 9.4%인 해염(Sea salt) 관련인 것으로 나타났다. 해염은 주요 추적자는 Na^+ , Cl^- 로 전 지점에서 가장 높게 기여하는 것으로 나타났다¹⁴⁾. 연구지점별 기여율

은 학장동 8.2%, 연산동 9.7%, 광안동 10.2%로 유사한 기여도 수준을 보였으며, 여름철과 가을철에 상대적으로 높은 기여를 하는 것으로 나타났다¹⁴⁾.

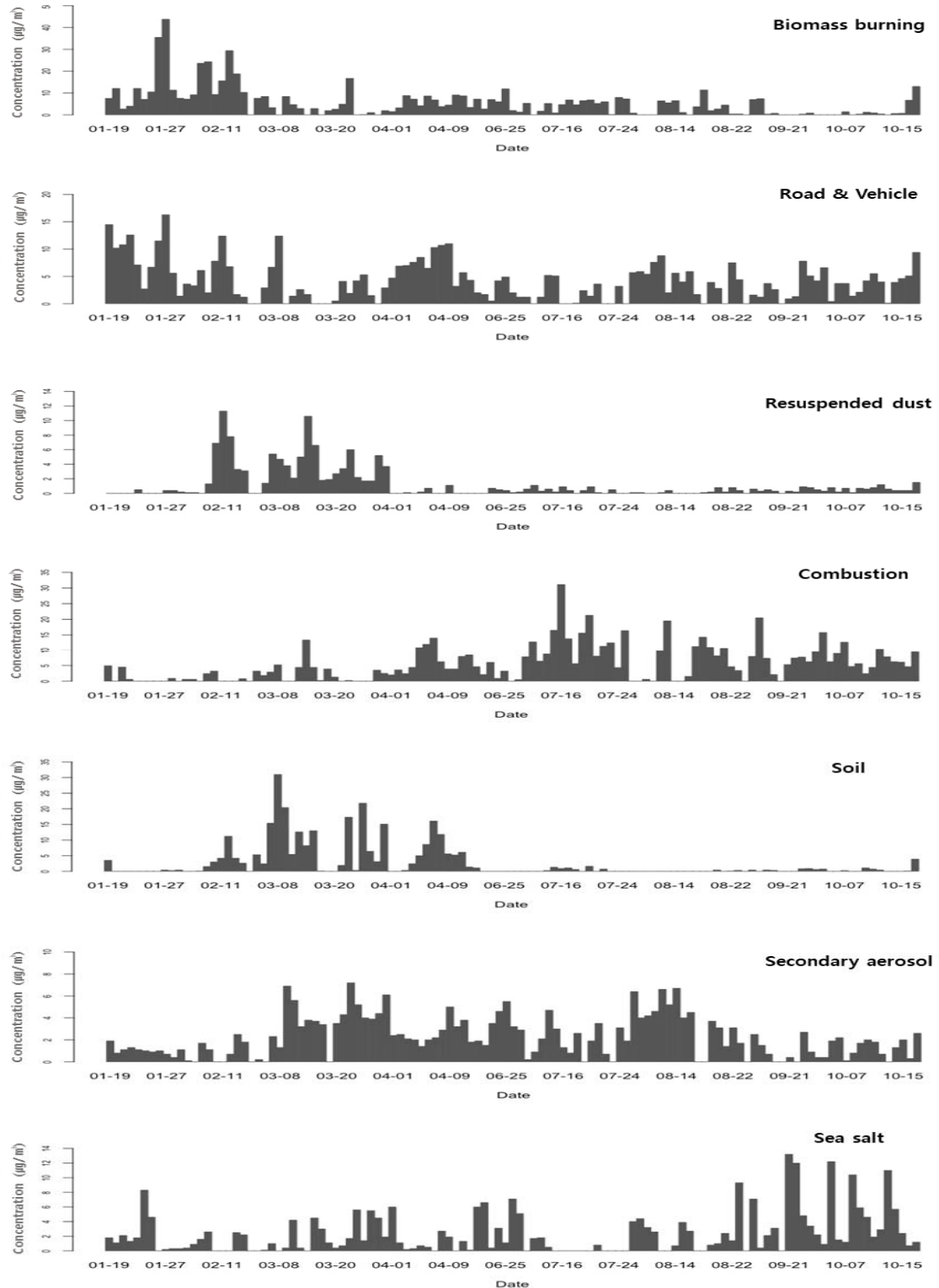


Fig. 11. Time series plots of sources from PMF model in Yeosan

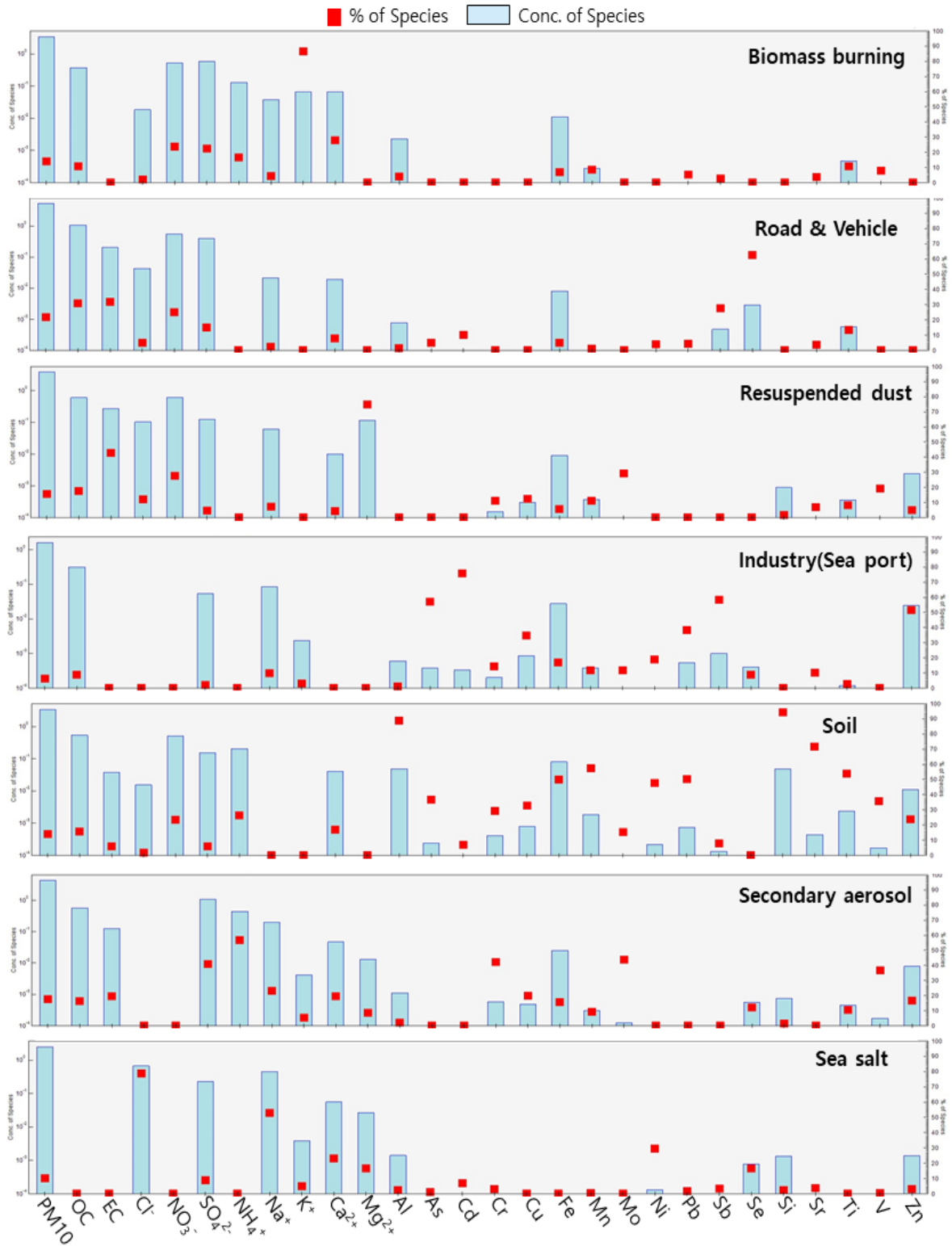


Fig. 12. The source profiles of PM-10 in Gwangju

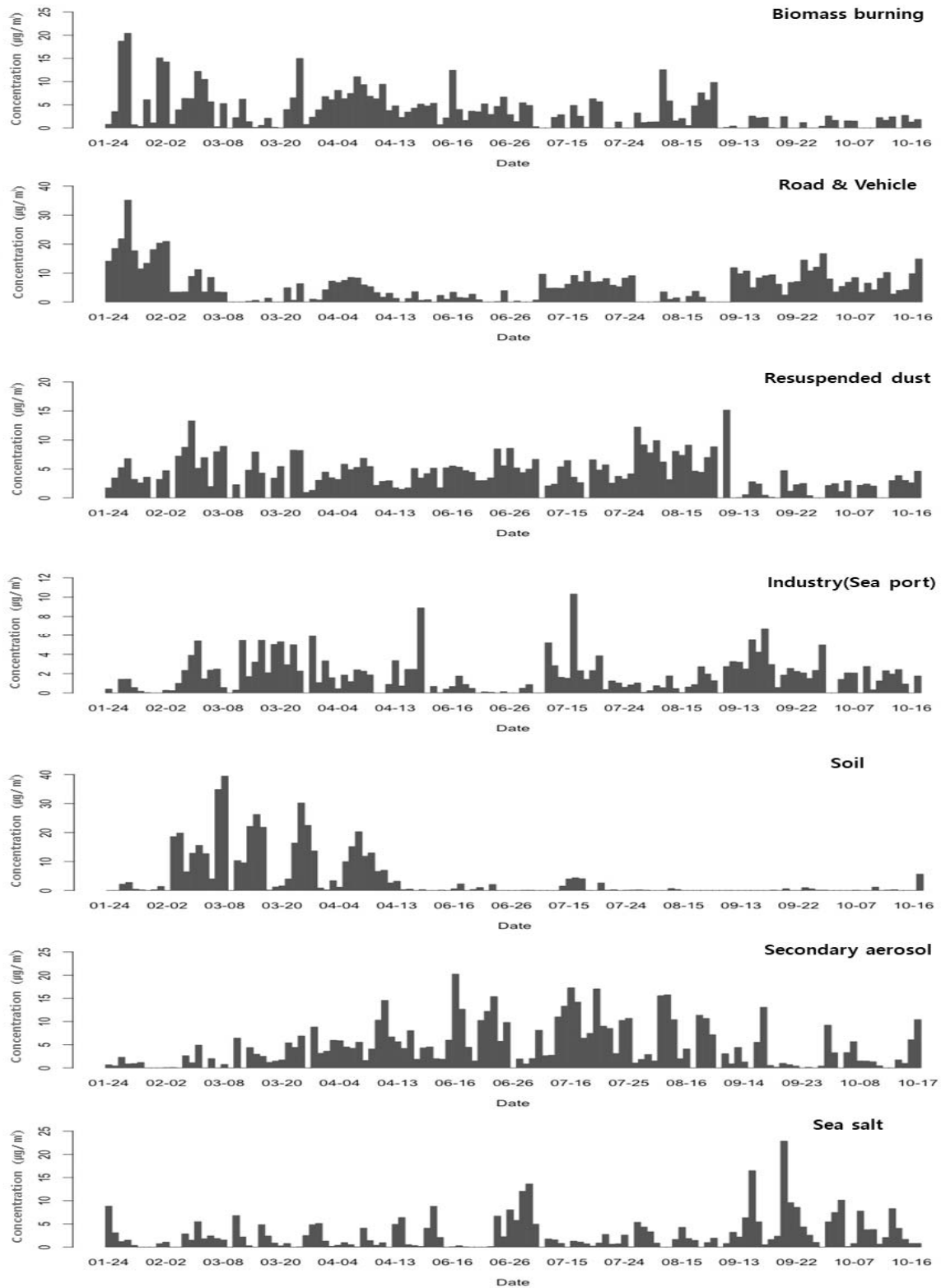


Fig. 13. Time series plots of sources from PMF model in Gwangan

3.2. 오염원별 중금속 농도 분포 특성

오염원별 중금속 농도 분포 특성은 Fig. 14.~Fig. 15.에 나타났다. 전 지점에서 공통적으로 재비산먼지와 토양 관련 오염원이 중금속 발생에 대한 기여율이 각각 6.5~32.6%, 16.0~41.3%의 높은 수준인 것으로 나타났다는데, 이들 오염원이 자연유래하는 지각기원금속(Al, Fe, Si)의 발생에 직접적인 영향을 미치지 때문인 것으로 사료된다.

학장동은 산업과 도로 및 자동차 관련 오염원의 기여율이 각각 19.2%, 16.7%로 높은 것으로 나타났으며, 공업지역의 특성이 반영된 결과인 것으로 사료된다. 특히, 미량금속농도가 도로 및 자동차 관련 오염원에서 높은 것으로 나타났는데, 이는 타이어 마모시 발생

하는 Zn¹⁴⁾의 농도와 기여율이 높았기 때문인 것으로 사료된다.

연산동은 상업지역인 특성으로 연소와 2차 생성물질 관련 오염원의 기여율이 20.5%, 10.8%로 높았으며, 미량금속 중 석탄(Coal) 및 기름(Oil) 연소의 주요 추적자인 Se, V을 비롯한 Zn, Sb, Mo, Cd, Cr의 기여율이 높은 것으로 나타났다^{32,33)}.

광안동은 토양 다음으로 산업(항구도시) 관련 오염원이 24.3%의 높은 기여율을 나타냈으며, 미량금속 중 산업 오염원의 주요 추적자인 As, Cu, Pb, Zn의 기여율이 높은 것으로 나타났다^{32,33)}. 이는 연구지점의 북동쪽에 형성된 여러 항구도시와 원거리에 위치한 대규모 산업 배출원의 영향인 것으로 사료된다.

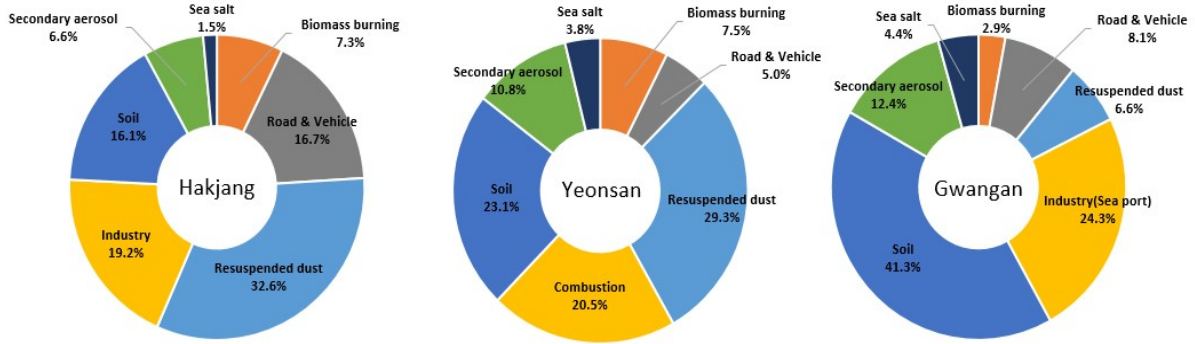


Fig. 14. The source contributions(%) of Metal

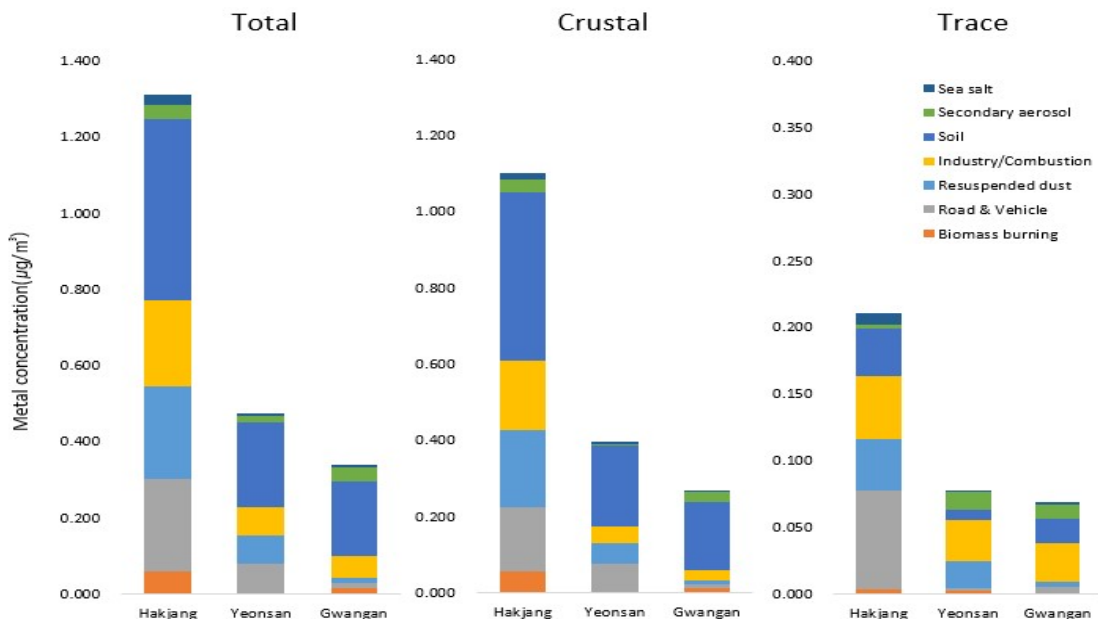


Fig. 15. The source concentration(µg/m³) of Metal

Table 9. The source contributions for metal in Hakjang (unit: %)

	Hakjang						
	Biomass burning	Road & Vehicle	Resuspended dust	Industry	Soil	Secondary aerosol	Sea salt
Al	0.5	0.0	57.9	2.0	34.6	5.0	0.0
Fe	6.8	23.4	21.3	24.7	20.0	1.6	2.2
Si	2.4	0.0	0.0	0.0	91.0	6.6	0.0
As	11.9	12.2	63.8	0.0	0.0	11.8	0.3
Cd	14.1	30.7	32.7	0.0	0.5	22.0	0.0
Cr	0.1	13.8	30.1	40.2	8.3	6.3	1.2
Cu	0.0	14.6	48.3	31.4	0.0	4.5	1.2
Mn	2.9	15.3	42.5	20.6	17.1	0.0	1.6
Mo	3.5	30.4	0.4	51.6	13.7	0.0	0.4
Ni	0.0	0.0	21.3	72.8	0.0	5.9	0.0
Pb	7.1	11.9	70.3	0.0	4.0	5.8	0.9
Sb	40.3	31.3	18.0	0.0	0.0	9.5	0.9
Sr	2.3	3.5	45.8	17.9	8.5	13.6	8.4
Ti	18.0	15.6	36.7	6.4	19.1	2.7	1.5
V	6.9	19.4	24.0	20.1	19.1	10.3	0.2
Zn	0.0	45.7	8.9	19.2	20.9	0.0	5.3
Total	7.3	16.7	32.6	19.2	16.1	6.6	1.5

Table 10. The source contributions for metal in Yeonsan (unit: %)

	Yeonsan						
	Biomass burning	Road & Vehicle	Resuspended dust	Combustion	Soil	Secondary aerosol	Sea salt
Al	0.2	7.9	9.3	3.0	78.7	0.0	0.9
Fe	0.0	31.1	20.8	17.8	27.9	0.0	2.4
Si	0.0	0.0	1.7	3.0	90.4	3.6	1.3
As	4.0	0.0	74.7	20.0	0.0	0.0	1.3
Cd	10.6	0.0	30.8	49.4	0.0	0.0	9.2
Cr	0.0	9.9	10.5	17.2	13.6	48.8	0.0
Cu	1.2	5.5	60.1	18.3	6.2	8.7	0.0
Mn	1.8	14.4	32.1	12.1	27.2	12.4	0.0
Mo	0.0	0.0	4.8	49.8	13.4	32.0	0.0
Ni	0.0	0.0	62.4	0.0	20.4	0.0	17.2
Pb	12.3	0.0	66.3	10.1	8.4	1.8	1.1
Sb	28.5	0.0	21.9	40.6	0.0	0.0	9.0
Se	45.2	0.0	0.0	37.9	1.0	0.0	15.9
Sr	7.7	0.0	39.7	0.0	35.1	13.6	3.9
Ti	10.4	16.7	25.0	7.4	35.2	2.2	3.1
V	5.0	0.0	15.4	12.6	28.0	39.0	0.0
Zn	0.0	0.0	21.6	49.7	7.8	20.9	0.0
Total	7.5	5.0	29.3	20.5	23.1	10.8	3.8

4. CPF 모델 결과

PMF 모델을 통해서 확인된 지점별 오염원에 대한 CPF 모델 결과는 Fig. 16.~Fig. 18.에 나타났다.

학장동 미세먼지에 기여하는 생물성 연소, 도로 및 자동차 오염원, 산업 관련 오염원은 연구지점을 중심으로 반경 1.2 km 내에 중소제조업체들이 밀집해 있는 지역적 특성과 북서쪽에 위치한 낙동·강변대로(직선거리 1.2 km), 남동쪽에 위치한 학감대로(직선거리 0.5 km)의 영향을 받은 것으로 사료된다. 토양과 재비산먼지 관련 오염원은 북서쪽에 위치한 김해평야(직선거리 6 km)와 낙동강을 따라 형성된 생태공원 및 나대지(직선거리 3 km 내)의 영향, 2차 생성물질 관련 오염원은 남동쪽에 위치한 부산항(직선거리 7 km) 영향, 해염 관련 오염원은 남서에서 동쪽까지 길게 분포한 해안(반경 10 km 내)의 영향에 의한 것으로 사료된다.

연산동은 생물성 연소와 연소(Combustion) 관련 오염원은 연구지점 중심으로 반경 0.1~0.2 km 내에 위치한 거제시장과 상가들이 밀집한 지역 특성의 영향에 의한 것으로 사료된다. 토양과 비산먼지 관련 오염원은 21년부터 진행되고 있는 부산진구 양정 1~3구역 주택재개발 사업(남동쪽 직선거리 1 km 이내) 등의 대규모 공사의 영향을 받은 것으로 사료된다. 도로 및 자동차 관련 오염원은 남동쪽에 위치해 부산시청을 지나는 중앙대로(직선거리 0.2km)와 왕복 10차선의 교통통행량이 많은 거제대로(서쪽 직선거리 0.5 km) 영향, 2차

생성물질 관련 오염원은 남서쪽에 위치한 부산 최대 상업지역이며 교통 중심지인 서면(직선거리 3 km)에 의한 영향, 마지막으로 해염 관련 오염원은 남서에서 동쪽까지 이어진 해안(반경 7 km 이내)의 영향에 의한 것으로 사료된다.

광안동은 생물성 연소는 남서쪽에 위치한 부경대학교 주변 상가 밀집지역(직선거리 2.5 km 이내)과 용당 및 감만부두(직선거리 6 km 이내)의 영향, 도로 및 자동차 관련 오염원은 북서쪽에 위치한 왕복 6차선의 수영로(직선거리 0.5 km)의 영향을 받은 것으로 사료된다. 재비산먼지 관련 오염원은 남서쪽 대남교차로 인근 대규모 아파트 조성 공사(직선거리 2.2 km 이내)와 용당 및 감만부두로 진입하는 물류이동이 많은 신선로(남서쪽 직선거리 2.5 km) 주변의 영향, 토양 관련 오염원은 광안 2동 재건축 및 주택재개발 정비사업(서쪽 직선거리 0.8 km)의 영향, 2차 생성물질 관련 오염원은 교통 통행량이 많은 대남교차로와 도시가스 오거리(남서쪽 직선거리 2.5 km 이내)의 영향에 의한 것으로 사료된다. 해염 관련 오염원은 남서에서 북동까지 이어진 해안(반경 6 km 이내)의 영향, 산업(항구도시) 관련 오염원은 북동쪽에 해안가를 따라 형성된 여러 항구도시와 원거리에 위치한 대규모 산업 배출원의 영향에 의한 것으로 사료된다.

Table 11. The source contributions for metal in Gwangan (unit: %)

	Gwangan						
	Biomass burning	Road & Vehicle	Resuspended dust	Industry (Sea port)	Soil	Secondary aerosol	Sea salt
Al	4.2	1.4	0.0	1.1	88.7	2.0	2.6
Fe	6.9	4.9	5.7	17.0	49.9	15.6	0.0
Si	0.0	0.0	1.7	0.0	94.3	1.4	2.6
As	0.0	5.1	0.0	57.2	36.6	0.0	1.1
Cd	0.0	10.1	0.0	76.0	7.1	0.0	6.8
Cr	0.0	0.0	11.3	14.5	29.3	42.1	2.8
Cu	0.0	0.0	12.6	34.9	32.7	19.8	0.0
Mn	8.6	1.2	11.3	11.7	57.3	9.3	0.6
Mo	0.0	0.0	29.2	11.7	15.1	44.0	0.0
Ni	0.0	3.8	0.0	19.0	47.7	0.0	29.5
Pb	5.3	4.3	0.0	38.2	50.4	0.0	1.8
Sb	2.7	27.8	0.0	58.4	7.8	0.0	3.3
Se	0.0	62.5	0.0	8.7	0.0	12.1	16.7
Sr	3.6	3.6	7.0	10.3	71.7	0.0	3.8
Ti	10.8	13.3	8.4	2.8	54.0	10.4	0.3
V	7.9	0.0	19.2	0.0	35.9	36.6	0.4
Zn	0.0	0.0	5.1	51.6	23.8	16.6	2.9
Total	2.9	8.1	6.6	24.3	41.3	12.4	4.4

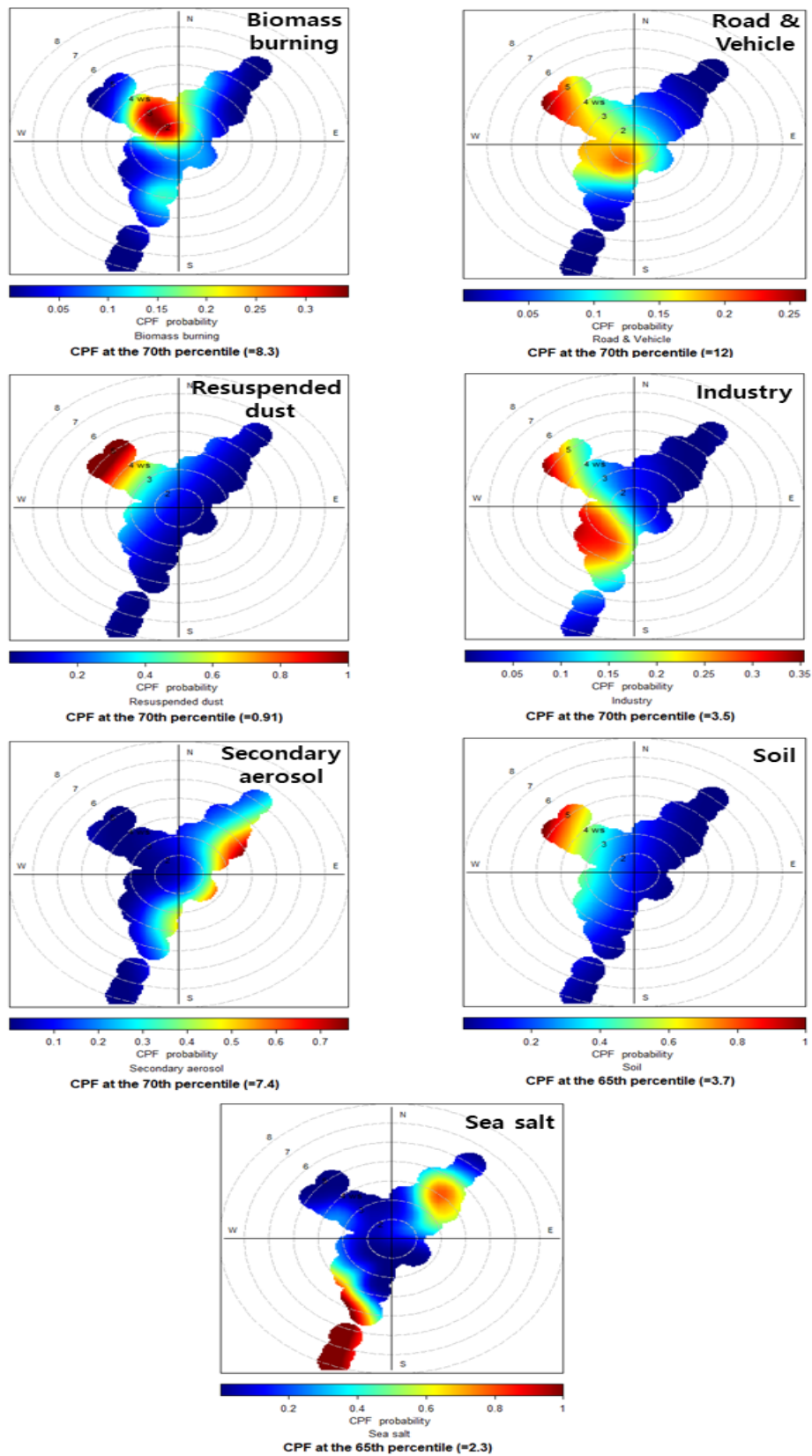


Fig. 16. CPF plots for the source contributors of PM-10 in Hakjang

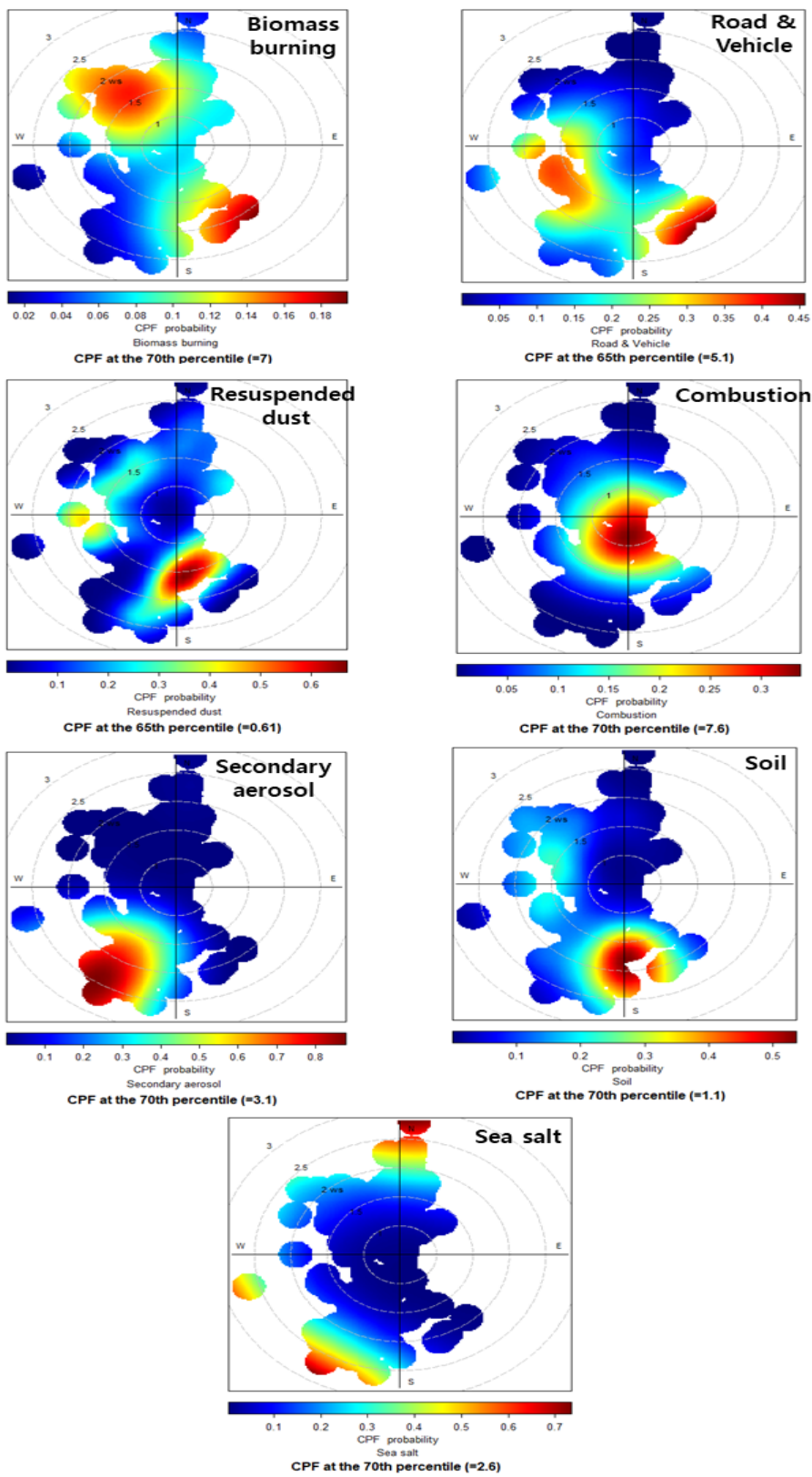


Fig. 17. CPF plots for the source contributors of PM-10 in Yeonsan

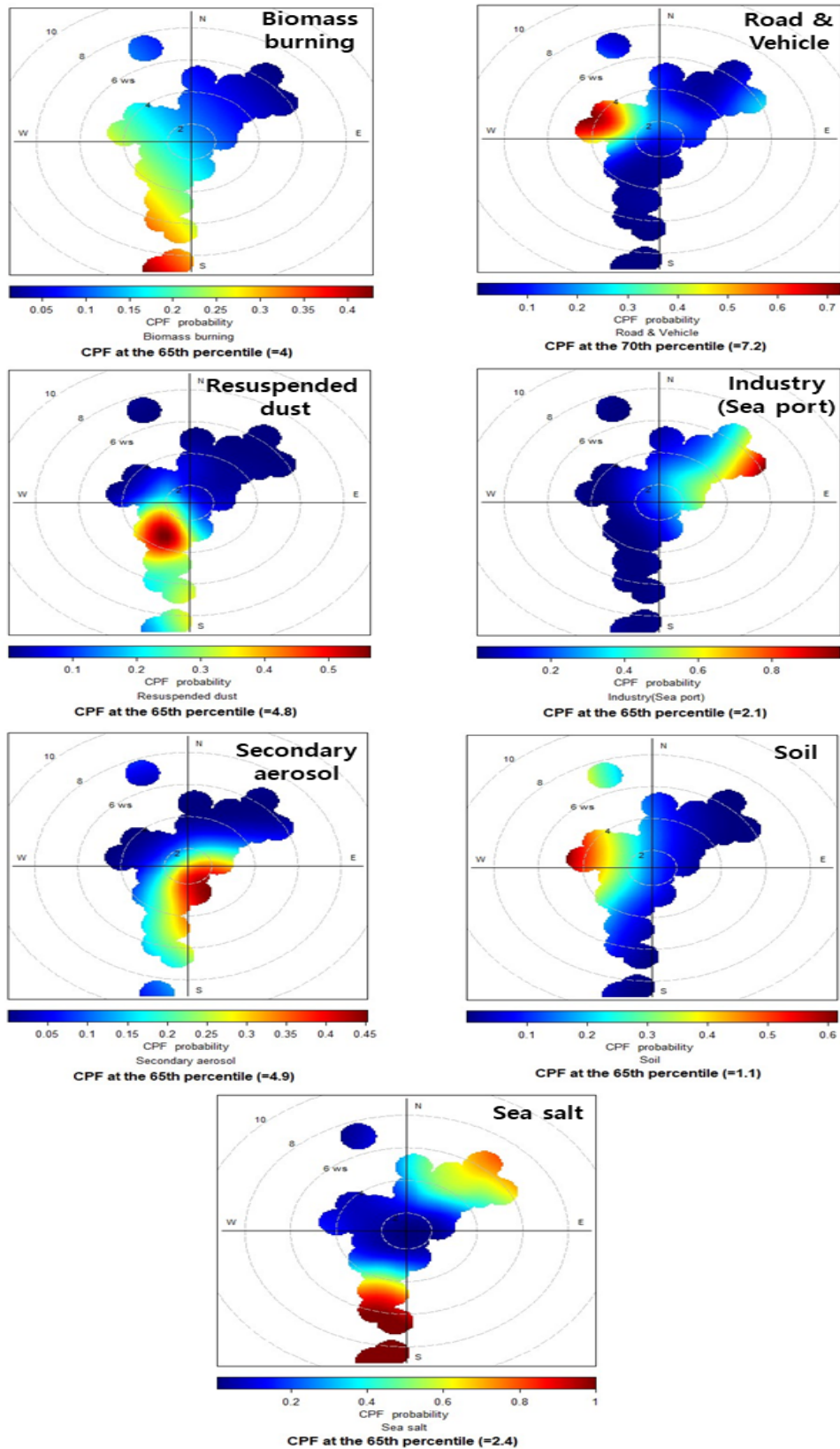


Fig. 18. CPF plots for the source contributors of PM-10 in Gwanggan

5. 위해도 평가 결과

5.1 오염원별 발암성 평가

오염원별 호흡노출에 의한 발암 위해도 정보가 있는 중금속(As, Ni, Cd, Pb)을 대상으로 발암 위해도를 평가한 결과를 Table 12.에 나타냈다. 단일 발암위해도와 통합 발암위해도 평가 결과, 대부분 위해 없는 수준(1.0E-06)보다 낮은 것으로 나타났으며, 위해 있는 수준(1.0E-04)을 초과하는 것은 없는 것으로 나타났다.

단일 발암위해도는 대부분의 오염원에서 위해 없는 수준(1.0E-06) 이하인 것으로 나타났으나, Ni 항목에서 학장동의 산업 및 2차 생성물질 관련 오염원에서 각각 5.5E-06, 1.1E-06 수준으로 위해 없는 수준을 초과한 것으로 나타났다. 이는 학장동 내 Ni 발생과 관

련된 도금업 사업장의 영향인 것으로 사료된다.

통합 발암위해도는 학장동에서 도로 및 자동차, 산업, 2차 생성물질 관련 오염원에서 각각 1.3E-06, 5.6E-06, 2.0E-06으로 위해 없는 수준을 초과하였고, 연산동과 광안동에서는 각각 도로 및 자동차 관련 오염원(3.4E-06), 산업 관련 오염원(1.8E-06)에서 초과하는 것으로 나타났다. 특히, 도로 및 자동차, 산업 관련 오염원은 공통적으로 발암 위해도 수준이 다른 오염 대비 높은 수준을 보이므로 이들 오염원에 대한 관리가 필요할 것으로 생각된다(Fig.19.).

Table 12. Excess Cancer risk level on carcinogenic metals in each source⁸⁾

		Excess Cancer risk						
		Biomass burning	Road & Vehicle	Resuspended dust	Industry (Combustion)	Soil	Secondary aerosol	Sea salt
As	Hakjang	4.2E-07	4.3E-07	3.4E-08	1.8E-08	1.9E-08	4.3E-07	2.0E-08
	Yeonsan	2.2E-08	1.1E-08	9.4E-08	(9.8E-08)	1.0E-08	1.1E-08	1.6E-08
	Gwangan	7.0E-09	1.6E-08	7.0E-09	5.8E-07	2.7E-08	7.2E-09	9.9E-09
Ni	Hakjang	1.9E-08	1.9E-08	3.9E-08	5.5E-06	1.9E-08	1.1E-06	1.9E-08
	Yeonsan	6.3E-09	6.5E-09	5.9E-08	(6.4E-09)	2.0E-08	6.4E-09	4.8E-08
	Gwangan	7.0E-09	1.2E-08	7.0E-09	4.0E-08	3.8E-08	6.8E-09	4.8E-08
Cd	Hakjang	9.2E-08	2.3E-07	1.2E-08	6.1E-09	6.5E-08	1.6E-07	5.7E-09
	Yeonsan	7.8E-08	5.3E-09	2.5E-08	(2.2E-07)	5.4E-09	5.5E-09	7.5E-08
	Gwangan	4.8E-09	7.4E-08	4.8E-09	4.2E-07	1.1E-08	4.8E-09	3.1E-08
Pb	Hakjang	3.6E-07	5.9E-07	3.3E-08	1.4E-08	4.0E-08	3.4E-07	2.3E-08
	Yeonsan	3.9E-07	1.1E-08	1.3E-07	(3.3E-07)	3.0E-08	3.0E-08	2.1E-08
	Gwangan	5.1E-08	4.2E-08	1.1E-08	7.5E-07	3.6E-08	1.0E-08	2.3E-08
Total	Hakjang	8.9E-07	1.3E-06	1.2E-07	5.6E-06	8.4E-08	2.0E-06	6.8E-08
	Yeonsan	4.9E-07	3.4E-06	3.1E-07	(6.5E-07)	6.6E-08	5.3E-08	1.6E-07
	Gwangan	7.0E-08	1.4E-07	2.9E-08	1.8E-06	1.1E-07	2.9E-08	1.1E-07

Table 13. Non-carcinogenic health risk(HQ) for metals in each source⁹⁾

		Hazard Quotient (HQ)						
		Biomass burning	Road & Vehicle	Resuspended dust	Industry (Combustion)	Soil	Secondary aerosol	Sea salt
Al	Hakjang	5.1E-07	1.3E-07	1.0E-06	6.1E-07	4.5E-05	1.9E-05	1.1E-07
	Yeonsan	1.4E-07	1.9E-05	1.1E-06	(8.0E-06)	3.0E-08	1.1E-06	3.7E-07
	Gwangan	1.0E-05	7.5E-07	3.4E-08	4.5E-07	3.1E-06	9.2E-07	9.3E-07
Mn	Hakjang	2.9E-04	1.0E-03	2.7E-05	7.7E-04	6.8E-04	1.0E-05	2.3E-04
	Yeonsan	5.1E-05	2.0E-04	3.0E-05	(1.6E-04)	1.7E-04	3.0E-05	3.7E-06
	Gwangan	9.8E-05	2.9E-05	1.2E-04	1.3E-04	1.6E-05	9.0E-05	9.8E-06
Se	Hakjang	-	-	-	-	-	-	-
	Yeonsan	1.0E-06	1.0E-07	1.0E-07	(9.0E-07)	9.8E-08	1.0E-07	3.2E-07
	Gwangan	2.3E-08	1.9E-06	2.4E-08	3.5E-07	2.3E-08	4.3E-07	3.9E-07
HI* (ΣHQ)	Hakjang	2.9E-04	1.0E-03	2.8E-05	7.7E-04	7.3E-04	2.9E-05	2.3E-04
	Yeonsan	5.2E-05	2.2E-04	3.2E-05	(1.7E-04)	1.7E-04	3.2E-05	4.4E-06
	Gwangan	1.1E-04	3.2E-05	1.2E-04	1.3E-04	1.9E-05	9.2E-05	1.1E-05

*If HI>1, potential non-carcinogenic health risk would occur

5.2 오염원별 비발암성(독성) 평가

오염원에 함유된 금속 중 호흡노출에 따른 참고농도 (RfC, Reference Concentration)자료가 있는 중금속 (Al, Mn, Se)을 대상으로 비발암성(독성)을 평가한 결과는 Table 13.에 나타났다. 결과 중, 학장동 Se 항목은 PMF 모델 수행 시 S/N비가 0.2 이하로 측정값의 신뢰도가 낮아 제외하였기에 본 평가대상에서도 제외하였다. 비발암성(독성) 평가 결과, 모든 오염원에서의 위해도 지수(Hazard Index, HI)가 1 이하인 것으로 나타났다으므로, 이들 중금속에 의한 노출 시 건강 상 위해 영향(독성)이 발생할 가능성이 낮은 것으로 나타났다.

IV. 결 론

부산시 미세먼지 내 유해중금속의 특성을 파악하기 위해 용도지역을 대표하는 3개 지점(학장동, 연산동, 광안동)에서 중금속 물질의 생성에 기여하는 주요 오염원을 PMF와 CPF 모델을 통해 추정하고, 이들 오염원에 대한 건강 위해도 평가를 통해 중점 관리가 필요한 오염원을 검토한 결과는 다음과 같다.

1. 전체 연구지점에서 중금속 농도는 겨울철부터 증가되어 봄철인 3, 4월에 최고 농도 수준을 보이는 것

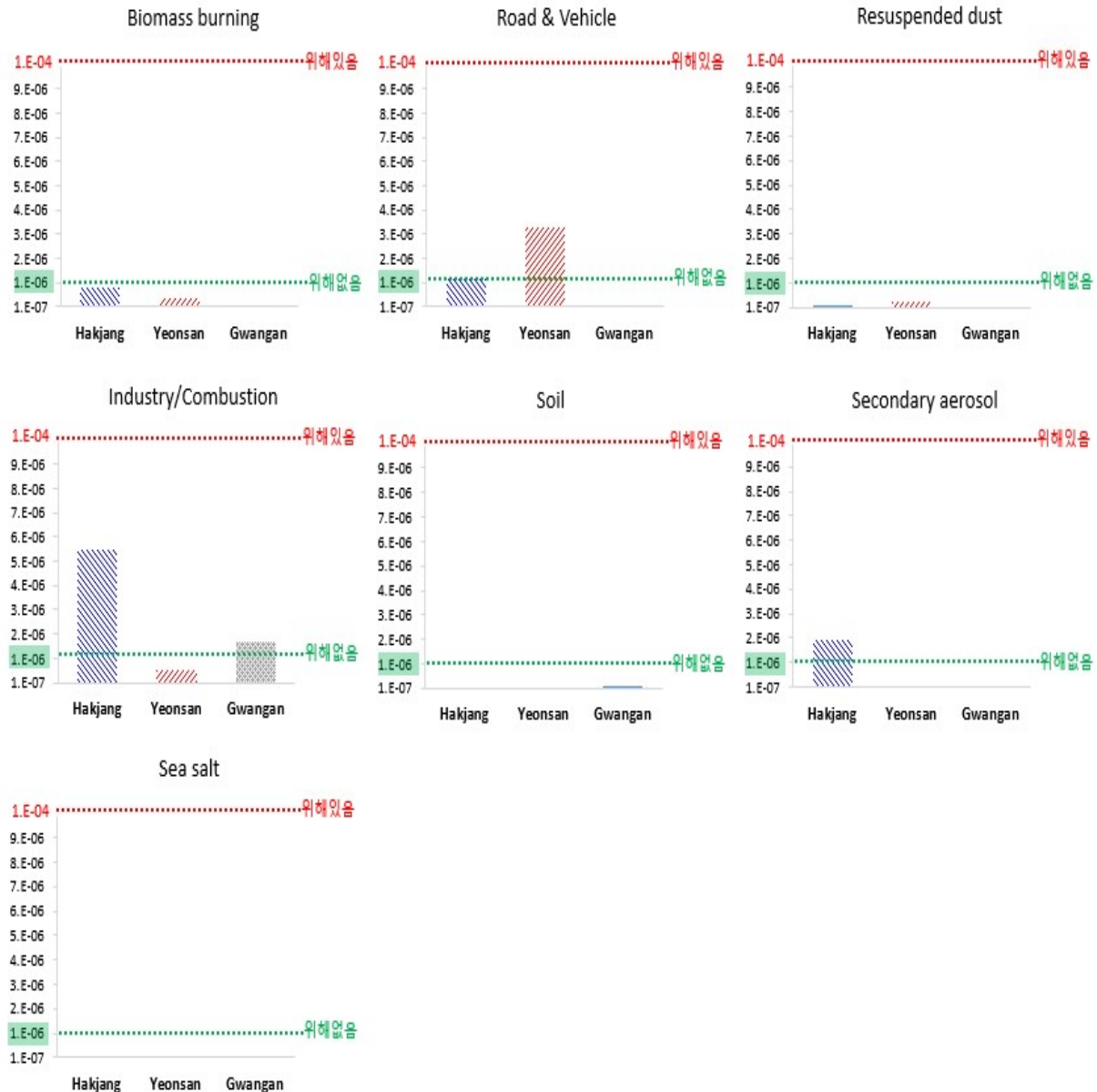


Fig. 19. Excess cancer risk level on total carcinogenic metals in each source

으로 나타났으며, 이는 겨울철에 발생한 북서풍 영향에 의한 국외 미세먼지 유입과 봄철 일교차가 크고 대기가 건조한 계절적 특성으로 빈번히 발생하는 비산먼지로 인한 지각기원금속 농도의 증가가 원인인 것으로 사료된다.

2. PMF과 CPF 모델을 통해 오염원을 추정된 결과, 지점별로 7개로 분류할 수 있었다. 공통적으로 6개 오염원(생물성 연소, 도로 및 자동차, 재비산먼지, 2차 생성물질, 토양, 해양)을 추정할 수 있었으며, 나머지 1개 오염원은 지역의 특성이 반영된 오염원(학장 및 광안동-산업, 연산동-연소)인 것으로 나타났다.
3. 오염원별 중금속 발생에 대한 기여율은 공통적으로 자연에서 유래하는 지각기원금속과 연관된 재비산먼지(6.5~32.6%)와 토양(16.0~41.3%) 관련 오염원이 높은 것으로 나타났다. 그 외 학장동은 산업(19.2%), 도로 및 자동차(16.7%), 연산동은 연소(20.5%), 광안동은 산업(항구도시) 관련 오염원(24.3%)의 기여도가 높은 것으로 나타났는데, 이들 오염원은 미량금속의 발생과 연관된 것으로 나타났다.
4. 오염원별 건강 위해도 평가를 수행한 결과, 발암 위해도는 대부분 위해 없는 수준($1.0E-06$), 비발암(독성) 평가 결과는 전 지점의 오염원에서 위해도 지수가 1 이하로 건강상 위해한 영향이 발생할 가능성은 낮은 것으로 나타났다. 단, 학장동의 도로 및 자동차, 산업, 2차 생성물질, 연산동의 도로 및 자동차, 광안동의 산업(항구도시) 관련한 일부 오염원의 발암 위해도가 위해 없는 수준보다 소폭 상회($1.3E-06$ ~ $5.6E-06$)하였으나, 위해 있는 수준($1.0E-04$)보다는 훨씬 낮은 수준이었다.

본 연구를 통해 유해중금속을 저감하기 위해서는 미량금속의 발생과 연관된 산업, 도로 및 자동차, 2차 생성물질 관련 오염원에 대한 관리와 저감 대책 방안의 모색이 필요한 것으로 사료된다. 이와 함께, 부산시가 시행하고 있는 미세먼지 저감 사전관리(사업장 점검, 노후차량 조기폐차 등) 정책도 지속적으로 병행되어야 할 것으로 판단된다. 또한, 이번 연구의 결과가 부산시 대기 중 유해중금속 발생에 기여하는 오염원을 파악하는 기초자료를 수립했다는 것에 의의

가 있다고 생각되며, 향후 부산시의 대기질 개선에 필요한 정책자료로 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

참고문헌

1. Park, S. Y., "Local-Level Analyses of Atmospheric PM₁₀ and PM_{2.5} Concentrations in Busan Metropolitan City Based on a Multi-Scale Approach", The Korean Association of Professional Geographers, 55(3), pp.321~334(2021).
2. 박기형, 부산지역 대기 중 PM_{2.5}의 화학적조성과 건강위해도 평가 연구, 울산대학교 건설환경공학과 박사학위논문(2013).
3. Li, H., Qian, X., Wang, Q. G., "Heavy Metals in Atmospheric Particulate Matter: A Comprehensive Understanding is Needed for Monitoring and Risk Mitigation", Environmental Science & Technology, 47, pp.13210~13211(2013).
4. Heo, J. W., Kim, C. H., Min, Y. K., Kim, H. J., Sung, Y. G., Kim, J. S., Lee, K. B., Heo, J. B., "Source Apportionment of PM₁₀ at Pyeongtaek Area Using Positive Matrix Factorization(PMF) Model", Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 34(6), pp.849~864(2018).
5. International Agency for Research on Cancer(IARC): Outdoor air pollution a leading environmental cause of cancer deaths(2013).
6. United Nations Economic Commissions for Europe(UNECE), The 1998 Aarhus Protocol on Persistent Organic Pollutants (http://www.unece.org/env/Lrtap/pops_hl.htm),(1998).
7. 부산광역시 보건환경연구원, 보건환경정보시스템 (http://heis.busan.go.kr/environmental/eair_04_001.aspx).
8. Choi, S. H., Choi, S. W., Kim, D. Y., Cha, Y. W., Park, S. W., Lee, S. I., Yoo, E. C., "Evaluation of Health Risk from Concentrations of Heavy Metal in PM-10 and PM-2.5 particles at Sasang Industrial Complex of Busan, Korea", Journal of Environmental Analysis, Health

- and Toxicology, 24(3), pp.133~148(2021).
9. Park, G. H., Kwak, J., Jeong, J. W., Yoo, E. C., "The Research on the Estimation of Source Apportionment of PM-2.5 in Busan", The Annual Report of Busan Metropolitan city Institute of Health & Environment, 24(1), pp.174~184(2014).
 10. Jeon, B. I., Hwang, Y. S., "Characteristics of Metallic and Ionic Concentrations in PM₁₀ and PM_{2.5} in Busan", Journal of Environmental Science International, 23(5), pp.819~827(2014).
 11. Kang, T. Y., Yu, S. J., Jeong, S. Y., Jeong, E. J., Lee, J. I., Jeong, H. U., Cho, E. J., "A Study on the Concentration Distribution and Chemical Composition of PM-2.5 at Subway Stations in Busan", The Annual Report of Busan Metropolitan city Institute of Health & Environment, 31, pp.451~471(2022).
 12. 국립환경과학원, 황사 및 미세먼지 중 PM_{2.5} 성분 분석에 관한 연구(2008).
 13. 환경부·국립환경과학원, 대기환경측정망 설치·운영지침(2022).
 14. Hwang, I. J., Kim, D. S., "Source Identification of Ambient PM-10 Using the PMF Model", Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 19(6), pp.701~717(2003).
 15. Tauler, R., Viana, M., Querol, X., Alastuey, A., Flight, R. M., Wentzell, P. M., Hopke, P. K., "Comparison of the results obtained by four receptor modelling methods in aerosol source apportionment studies", Atmospheric Environment, 43, pp.3989~3997(2009).
 16. Lee, H. W., Lee, T. J., Yang, S. S., Kim, D. S., "Identification of Atmospheric PM₁₀ Source and Estimating Their Contribution to the Yongin-Suwon Bordering Area by Using PMF", Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 24(4), pp.439~454(2008).
 17. Choi, E. H., Yi, S. M., Lee, Y. S., Jo, H. R., Baek, Sung. O., Heo, J. B., "Sources of Airborne Particulate Matter-bound Metals and Spatial-Seasonal Variability of Health Risk Potentials in Four Large Cities, South Korea", Environmental Science and Pollution Research 29, 28359~28374(2022).
 18. 경기도보건환경연구원, PMF 수용모델 적용 및 포천/평택 미세먼지 기여율 산정(2020).
 19. International Agency for Research on Cancer(IARC), IARC Monographs on The Identification of Carcinogenic Hazards to Humans (<https://monographs.iarc.who.int/list-of-classifications>), December(2022).
 20. United States Environmental Protection Agency(US EPA), Intergrated Risk Information System(IRIS), (<https://iris.epa.gov/AdvancedSearch/?keyword=>), December(2022).
 21. The California Environmental Protection Agency's Office of Environmental Health Hazard Assessment(OEHHA), (<https://oehha.ca.gov/chemicals>), December(2022).
 22. 국립환경과학원, 화학물질 위해성평가의 구체적 방법 등에 관한 규정, 국립환경과학원 고시 제 2021-13호(2021).
 23. 국립환경과학원, 한국인의 노출계수 핸드북(2019).
 24. Seo, G. Y., Kim, S. H., Lee, K. S., Min, K. W., Seo, H. J., Kang, Y. J., Paik, K. J., Moon, Y. W., Shin, D. Y., "Characteristics of Ambient Particulate Matter in Gwangju", Journal of Environmental Health Sciences, 36(2), pp.108~117(2010).
 25. Jeon, B. I., "The Metallic Elements of PM₁₀ and PM_{2.5} in Western Region of Busan in the Springtime of 2015", Journal of Environmental Impact Assessment, 16(5), pp.327~340(2007).
 26. United States Environmental Protection Agency (US EPA), EPA Positive Matrix Factorization (PMF) 5.0 Fundamentals and User Guide(2014).
 27. 국립환경과학원, 수용모델 운영방법의 표준화 및 정책적 활용성 제고(2021).
 28. United States Environmental Protection Agency (US EPA), SPECIATE Data Browser

- (<https://www.epa.gov/air-emissions-modeling/speciate-0>), November(2022).
29. Alleman, L. Y., Lamaison, L., Perdrix, E., Robache, A., Galloo, J. C., "PM10 metal concentrations and source identification using positive matrix factorization and wind sectoring in a French industrial zone", *Atmospheric Research* 96, pp.612~625(2010).
 30. Hopke, P. K., "Receptor Modeling in Environmental Chemistry", John Willy & Sons, (1985).
 31. Kang, B.W., Han, J. S., Lee, M. D., Lee, H. S., Kim, J. H., et al, "Concentration characteristics of airborne hexavalent chromium in the industrial area", *Journal of Korean Society for Atmospheric Environmental*, 25(3), pp.179~187(2009).
 32. Choi, J. K., Heo, J. B., Ban, S. J., Yi, S. M., Zoh, K. D., "Source apportionment of PM2.5 at the coastal area in Korea", *Science of the Total Environment*, 447, pp.370~380(2013).
 33. Song, X. H., Polissar, A. V., Hopke, P. K., "Sources of fine particle composition in the northeastern US", *Atmospheric Environment*, 35, pp.5277~5286(2001).
 34. Jeong, Y. J., Hwang, I. J., "Source Apportionment of PM2.5 in Gyeongsan Using the PMF Model", *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 31(6), pp.508~519(2015).
 35. Kim, J. Y., Heo, S., Lee, S. K., Ryu, B. R., "A Study on Characteristics of Metallic and Ionic Elements of PM10 in Daejeon Using Statistical Analysis", *Journal of Korean Society for Environmental Technology*, 21(1), pp.64~71(2020).
 36. Hwang, I. J., Kim, D. S., "Estimation of Quantitative Source Contribution of Ambient PM-10 Using the PMF Model", *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 19(6), pp.719~731(2003).
 37. Kim, E., Hopke, P. K., "Comparison between Conditional Probability Function and Nonparametric Regression for Fine Particle Source Directions", *Atmospheric Environment* 38, 4667~4673(2004).
 38. Hwang, I. J., Kim, D. S., "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), pp.459~476(2013).
 39. Jang Eunhwa, Source Identification and Reactivity Study on Atmospheric Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, Universty of Birmingham for the degree of Doctor of Philosphy(2014).
 40. Lee, J. T., "Dust on the health effects of domestic dynamics case", *Society of Environmental Toxicology Conference*, pp.129~142(2003).