대기중금속 공간해상도 확장에 따른 환경보건학적 해석

박정민*, 김준혁, 조영대, 이상헌, 유은희, 곽진

환경보건팀

Environmental Health Interpretation of Airborne Heavy Metal at High Spatial Resolution

Jeong-Min Park*, Jun-Hyuk Kim, Yeong-Dae Cho, Sang-Hun Lee, Eun-Hee Yu, Jin Kwak

Environmental Health team

Abstracts

For an environmental health analysis for the Busan, the concentrations of airborne heavy metals were analyzed at 15 different sites (environmental pollution exposure area, health vulnerable area, dense residential area, and heavy metal monitoring system). The major sources and contributions of heavy metals were estimated using the Positive Matrix Factorization (PMF) and Conditional Probability Function (CPF) models. For each site, 5~6 sources of PM-10 were identified, including Soil (19.3~42.8%), Sea salt (14.9~34.1%), Road resuspended dust (14.7~33.5%), Long range (1.0~18.2%), Combustion (0.1~27.4%), and Industry (2.5~14.3%). The risk assessment evaluated exposure to heavy metals through the inhalation of particulate matter during outdoor activities. The Excess Cancer Risk (ECR) for As exceeded guideline values (1.0E-6), ranging from 1.6E-6 (Gwangan-dong) to 6.0E-6 (Yongsu-ri), while for Cd, Ni, and Pb, negligible risk levels were indicated. The Hazard Index (HI) was below 1 at all sites, with a range from 0.090 (Bugok-dong) to 0.214 (Yongsu-ri).

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

Correspnding author. Email : jmpark2@korea.kr
Tel : +82-51-309-2946, Fax : +82-51-309-2929

Ⅰ. 서론

미세먼지(PM-10)는 직경 10 ㎛ 이하의 대기 중 부유하는 물질로 지형과 기상 등의 자연적인 인자와 다양한 인위적 배출원으로부터 발생하며, 물리화학적 구성성분이 지역적으로 다른 특성을 가진다[1]. 미세먼지는 기도의 자극, 기침, 폐기능의 저하와 같은 호흡기 관련 질환 일으키는 등 인체에 유해한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다[2),3)].

대기 중 중금속은 미세먼지에 흡착되어 부유하며 다른 물질에 비해 자체 독성과 유해성이 큰 물질로 분류되어있어 관리가 중요한 실정이다[2),3)]. 미세먼지에 부착되어 있는 중금속은 호흡경로를 통해 인체에 흡입될 시, 호흡기 및 순환기계, 신경계 등에 독성 영향을 미칠 뿐 아니라, 폐암 등을 유발하는 것으로 보고되고 있다[2),3)]. 대기중금속의 농도 분포는 지역별 특성과 환경적 요인에 의해 다양하게 나타날 수 있으며[4)], 중금속성분들은 발생원에 따라 농도 분포의 차이를 보이기 때문에 주요 성분을 추적하여 배출원을 규명하는데 중요한 역할을 한다[5)]. 따라서 대기 중 중금속의 특성 분석을 분석하여 배출원 확인하는 연구[6),7)] 및 건강영향[8),9)] 등에 관한 다양한 연구들이 제시되고 있다.

한편, 부산지역은 공업단지와 도심지의 분포가 넓고 다양하여 배출원도 다양하게 분포되어 있는 특징이 있다. 더욱이 인근에 대규모 공단이 위치하고 있는 울산지역과 인접해 있고 해양과 도심내륙의 지형적 조건이 복잡하여 대기오염에 큰 영향을 미치는 지역적 국지순환계 형태 또한 다양한 규모와 형태로 나타난다[10)]. 부산지역 특성을 고려하여 대기 중 중금속의 특성 분석, 배출원 확인 및 건강영향에 관한 연구들이 수행되었다. Park 등(2012)[11)]은 연산동(도심)과 학장동(공업)의 미세먼지 중 이온, 탄소, 중금속 성분을 분석하여 오염원 확인 및 기여도 평가를 위해 PMF 모델을 수행하였고, Jeong 등(2017)[12)]도 연산동의 PM-2.5 중 이온, 탄소, 중금속 성분을 분석하여 PCA/APCS, PMF, CMB 모델을 수행한 후 오염원을 추정하는 연구를 실시하였다. 또한, Choi 등(2021)[4)]은 연산동과 학장동(공업)의 PM-10 및 PM-2.5 중 중금속 농도를 분석한 후 As, Cr^{6+}, Ni, Cd, Pb, Mn 물질에 대한 위해성 평가를 실시하였으며, Cr^{6+} 및 As의 초과발암위해도 90%는 1.0E-5를 초과하는 수준으로 관리가 필요하다고 하였다. Choi 등(2022)[13)]은 서울, 인천, 대구 및 부산(광안동, 수정동, 연산동, 학장동)의 PM-10 중 중금속 성분을 분석하여 PMF 모델 결과로 오염원을 비교한 후, Cd, Co, Ni, Pb, As 성분의 흡입독성에 의한 위해성 평가를 수행하였다. 초과발암위해도는 1.0E-5를 초과하는 수준으로 관리가 필요하다고 하였다. 부산지역에 대한 연구가 많이 진행 중이나 공업 및 주거를 비교하는 등 일부 측정지점에서만 연구가 이루어지고 있으며 도시 구조적 다양성이 공존하는 부산시의 특성을 고려하여 오염원을 확인하고 건강영향에 관한 연구는 부족한 실정이다.

본 연구에서는 기존의 용도지역별 관점에서 벗어나 지역에 맞는 수용체 중심의 분석을 위하여 부산시에서 현재 운영 중인 대기중금속 측정망 5지점을 포함한 15지점의 대기 중 중금속 농도를 분석하였다. 이를 바탕으로 PMF(Positive Matrix Factorization) 모델을 통해 중금속 오염원과 오염원별 기여율을 추정하고, 대기 중 유해중금속 노출에 의한 건강 위해도 수준 평가하여 환경보건학적 기초자료로 활용하고자 하였다.

Ⅱ. 연구 방법

1. 연구대상 및 기간

본 연구에서는 부산지역 미세먼지(PM-10) 중 유해중금속 농도를 평가하기 위하여 중금속 성분 20항목(Al, As, Be, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Si, Ti, V, Zn)을 분석하였으며, 2023년 1월에서 12월까지 PM-10 및 대기중금속 농도 자료를 대상으로 하였다. 또한, 시료채취장비 교정 일정 및 연구기간을 고려하여 계절에 따른 영향은 봄(3~4월), 여름(6~8월), 가을(9~11월) 및 겨울(1~2. 12월)은 각각 2~3개월로 구분하였다.

2. 연구지점 및 특성

연구지점은 부산시에서 현재 운영 중인 대기환경측정소 중 환경유해인자 노출 건강영향 취약지역(환경보건학적)으로 10지점을 선정하였고, 기존의 운영 중인 대기중금속 측정망 5지점(덕천동, 광안동, 학장동, 연산동, 부곡동)을 포함하여 15지점에서 수행하였다(Fig. 1, Table 1). 10개 지점은 환경오염노출지역(장림동, 녹산동, 덕포동, 당리동, 용수리), 건강취약지역(광복동, 수정동, 대신동, 청학동) 및 주거밀집지역(좌동)으로 구분하였으며, 각 지역은 부산광역시 환경보건계획[14)]에 근거하여 분류하였다.

3. 시료채취 방법 및 분석

시료채취는 추가된 10지점과 기존 대기중금속 측정망 5지점을 구분하여 진행하였다. 추가된 10지점은 PM-10 분리입경이 10 ㎛인 Impactor를 장착한 로우볼륨샘플러(E-SEQ-FRM, Metone 및 USA/PMS-104, APM, Korea)를 흡입유량 16.7 L/min으로 연구기간 동안 매월 10일간 24시간 연속 채취하였다. 중금속 성분 분석을 위해 테프론 여지(47 mm, MTL, USA)를 사용하였으며, 여지는 시료채취 전.후 항온 및 항습 조건이 유지되도록 24시간 이상 항온항습챔버(HB-105SG, Hanbaek scientific, Korea) 내에 보관한 뒤 0.1 ㎍까지 측정할 수 있는 미세먼지 칭량 로봇 시스템(ChamBAL-500, C2K creative, Korea)으로 무게를 측정하였다. 기존 대기중금속 측정망 시료채취는 하이볼륨샘플러(Micro PNS HVS-16, MCS, Germany)로 1,130 L/min의 유량으로 매월 7일간, 24시간 연속 채취하였고, 중량농도 및 중금속 성분 분석을 위해 15 cm 석영여지(QFH 150, Hahnemuehle , Germany)를 사용하였다. 여지는 시료채취 전.후 항온 및 항습 조건이 유지되도록 24시간 동안 데시케이터 내에 보관한 뒤 0.1 ㎍까지 측정할 수 있는 저울(ME5-F, Satorius, Japan)로 무게를 측정하였다.

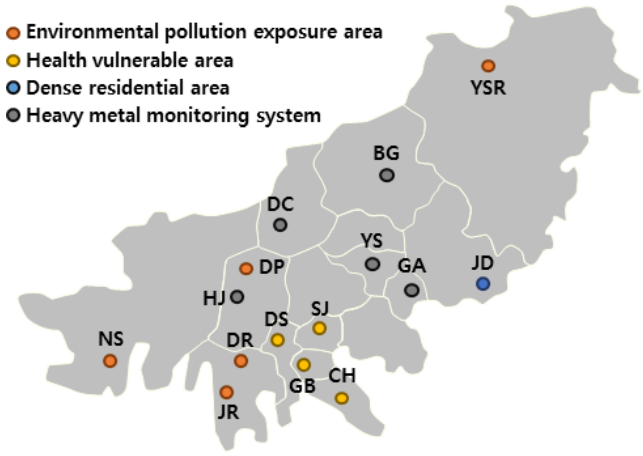

Fig. 1. Locations of sampling sites in Busan.

Table 1. Information of sampling sites in this study

Area	Sampling site	District	Location	Land type
Environmental pollution exposure area	Jangnim-dong (JR)	Saha-gu	Busan Jangrim1-dong Residents Center	Industrial
	Noksan-dong (NS)	Gangseo-gu	Busan Environmental Corporation	Industrial
	Deokpo-dong (DP)	Sasang-gu	Busan Deokpo elementary school	Residential
	Dangri-dong (DR)	Saha-gu	Busan Nagdong elementary school	Residential
	Yongsu-ri (YSR)	Gijang-gun	Busan Jeonggwan-eup Residents Center	Residential
Health vulnerable area	Gwangbok-dong (GB)	Jung-gu	Busan Gwangbokdong Residents Center	Commercial
	Sujeong-dong (SJ)	Dong-gu	Busan Dong-gu office	Residential
	Daesin-dong (DS)	Seo-gu	Korea Busan Sports Center	Residential
	Chunghak-dong (CH)	Yeongdo-gu	Cheonghangnam-ro 13beon-gil	Residential
Dense residential area	Jwa-dong (JD)	Haeundae-gu	Busan Jwa 1-dong Redients Center	Residential
Heavy metal monitoring system	Bugok-dong (BG)	Geumjeong-gu	Busan Bugok2-dong Residents Center	Residential
	Hakjang-dong (HJ)	Sasang-gu	Busan Hakjang elementary school	Industrial
	Deokcheon-dong (DC)	Buk-gu	Busan Korea Environment Corporation	Residential
	Gwangan-dong (GA)	Suyeong-gu	Busan Hanbada Middle Scool	Residential
	Yeonsan-dong (YS)	Yeonje-gu	Busan Metropolitan City	Commercial

중금속분석은 국립환경과학원의 황사 및 미세먼지 중 PM-2.5 성분분석에 관한 연구[5]를 참고하여 전처리와 분석을 진행하였으며, 사용한 여지에 따라 방법을 구분하여 진행하였다. 시료채취가 완료된 테프론 여지를 Microwave(Multiwave Pro, Anton Paar, Austria) 전용 분해용기(Teflon vessel)에 넣고 12 % 질산 10 mL를 가한 다음 Microwave 안에 넣고 전용 프로그램(180 ℃까지 승온 15분, 180 ℃로 유지 15분, 55 ℃까지 냉각 21분)으로 추출한 후 2시간 방랭하고 5A 여지로 여과하여 최종 10 mL를 맞추었고, ICP-MS(NexION 2000, PerkinElmer, USA)를 사용하여 분석하였다. 또한, 석영 여지는 전용커터를 사용해 1/4로 절단해서 뚜껑이 있는 100 mL Pyrex 유리병에 넣고 1.0M 질산과 2.23M 염산 혼합액(1:1)을 30 mL 가한 초음파 추출기(BC-1200W, BOSCO, Korea)에서 28 kHz로 100 ℃ 2시간 추출하고 식힌 후 5A 여지로 여과한 뒤 최종액량 100 mL가 되도록 하였다. 이 시료는 ICP-OES(Varian 720-ES, USA)를 사용하여 중금속 농도를 분석하였다.

4. PMF(Positive Matrix Factorization) 모델

PMF 모델은 수용체(Receptor)에서 채취한 입자상 혹은 가스상의 대기오염물질을 분석하여 주변 지역의 대기오염 배출원들이 수용체에 미치는 영향 및 기여율을 확인하고, 인자분석 통계기법으로 오염원의 정량적인 추정이 가능하게 하는 통계 분석방법이다. 본 연구에서는 사용한 PMF 모델은 미국 환경청(US EPA, United States Environment Protection Agency)에서 제공하는 PMF 5.0 버전을 활용하였으며, PMF 모델식은 다음과 같다[15].

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

여기서, X 행렬은 차원이 n×m인 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×p 차원이며, G 행렬의 열은 특정 오염원에 대한 배출량 즉, 측정기간에 대한 오염원의 강도(Strength) 또는 오염원의 기여도(Contribution)을 의미한다. F 행렬은 p×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[15),16)].

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

PMF 모델에서 Q값은 적정인자수(Factor)를 결정하는데 사용되며, 정확한 오염원을 추정하기 위해서는 Q값을 최소해야하는데, 다음식으로 나타낼 수 있다[15),16)].

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

여기서, u_{ij}는 X_{ij}의 불확도 또는 표준편차를 나타낸다.

PMF 모델을 수행하기 위해서는 입력자료인 농도(Concentration)와 불확도(Uncertainty) 자료가 필요하다. 본 연구에서는 미세먼지 성분 중 중금속 성분 20항목과 부산시 대기환경측정망의 가스상물질(CO, NO_2, NO, NO_x)을 사용하여 PMF 모델 분석에 활용하였으며[13], 기존 대기중금속 측정망의 결과는 2022년 1월~12월 자료를 추가하여 실시하였다. 분석화학종의 농도 중 결측값(Missing Value)은 해당 화학종 전체 값의 기하평균(Gmean)으로 대체하였고, 불확도는 아래의 식을 이용하여 산출하였다[17),18)].

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

$$u = 0.1 \times Concentration + \frac{MDL}{3} \quad (Conc. > MDL) \quad (5)$$

$$u = 4 \times G_{mean} \quad (Missing\ data) \quad (6)$$

5. CPF(Conditional Probability Fuction) 모델

CPF 모델은 측정한 농도값과 기상자료(풍향, 풍속)를 이용하여 기상영향에 의한 오염원의 유입 방향 등을 파악하는 데 활용된다. 본 연구에서는 PMF 모델을 통해서 확인된 오염원별 오염물질 농도값을 이용하여 각 오염원의 유입 방향을 검토하여, PMF로 확인된 오염원의 위치와 오염원 분류의 타당성을 평가하는데 활용하였다. CPF 모델의 계산식은 다음과 같다[6),16)].

$$CPF_{\triangle\theta} = \frac{m_{\triangle\theta}}{n_{\triangle\theta}} \quad (7)$$

여기서, $n_{\triangle\theta}$는 전체자료에 대해 $\triangle\theta$의 풍향에서 불

어오는 바람의 총 발생횟수, $m_{\triangle\theta}$는 동일한 풍향에서 적정 기준치를 초과할 때 발생하는 바람의 횟수를 의미한다. 본 연구에서는 지점별 가장 인접한 기상측정지점의 방재기상관측(AWS, Automatic Weather System) 자료(풍향, 풍속)를 사용하였으며, 풍향은 16방향이므로 $\triangle\theta$를 22.5로 사용하였다. 기상청에서 제시하는 0.4 m/s 이하의 무풍(Calm wind)조건은 모델 적용대상에서 제외하였다.

6. PSCF(Potential Source Contribution Function) 모델

대기오염물질 배출원과 오염물질의 이동경로를 파악하기 위해 미국해양대기관리처(NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration)의 HYSPLIT(HYbrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory) 모델을 사용하였다[19]. 부산지역에 도달하는 종관규모 이상의 기류 패턴을 분류하기 위하여 HYSPLIT 모델을 사용하였으며, 조사기간동안 일별로 6시간 역궤적을 계산하였다. 부산의 인접지역에서 단기간에 미치는 영향을 파악하기 위하여 상대적으로 짧은 계산시간으로 설정하였다. 입력기상자료는 부산보건환경연구원의 진단평가시스템에서 NCEP(National Centres for Environmental Prediction)의 FNL(Final analyses) 전구 기상자료를 사용하여 상시 운영중인 WRF(Weather Research and Forecasting) 기상모델의 결과를 사용하였다. 모델링 시작 지점은 조사지점 15개소 각각으로, 모델링 시작 시간은 오후 시간대 형성되는 높은 혼합고의 영향을 고려하기 위하여 오후 3시로 설정하여 1시간 간격으로 총 6시간 동안 역궤적을 추적하였다.

계산된 역궤적 분석자료를 바탕으로 PSCF(Potential Source Contribution Function) 모델 분석을 수행하였다. PSCF 모델은 수용점에서 측정된 자료와 역궤적 자료를 이용하여 수용점에 영향을 주는 오염원에 대한 위치 정보를 파악하는 하이브리드 모델이다[20]. PSCF 모델의 원리는 현재 수용점으로 이동하는 공기괴의 이동 궤적상에 오염원이 존재하면, 오염원에서 배출된 오염물질이 공기의 이동 궤적을 따라 수용점에 영향을 주게 되고, 이때 측정농도는 오염원에서 배출된 오염물질이 포함되어 있으므로 고농도 값을 보일 것이라는 가정에서 시작된다. 수용점에서 측정된 결과를 분석하면 사용자의 기준에 의해 고농도와 저농도로 구분할 수 있다. 또한 해당 측정기간 동안의 역궤적 자료도 고농도 기간의 역궤적 자료와 저농도 기간의 역궤적 자료로 구분할 수 있다. PSCF 값은 식 (8)에 따라 계산하였다[6),16)].

$$PSCF_{ij} = m_{ij} / n_{ij} \quad (8)$$

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

Substance name		End Point			RfC (μg/m³)	Reference
Non-Carcinogen	Al	Lung, Nervous system			5	IRIS
	As	Lung, respiratory system			0.015	OEHHA
	Cd	Lung, kidneys, Respiratory system			0.02	OEHHA
	Co	Bronchus, Respiratory system			0.1	ATSDR
	Mn	Nervous system			0.3	ATSDR
	Ni	Lung, Nasal Cavity, Respiratory system			0.09	ATSDR
	Ti	Respiratory system			0.1	ATSDR
	V	Respiratory system			0.1	ATSDR
Substance name		**Classification**		**End Point**	**Unit Risk (μg/m³)$^{-1}$**	**Reference**
		US EPA[a)]	**IARC[b)]**			
Carcinogen	As	A	1	Lung	0.0033	OEHHA
	Cd	B1	1	Lung	0.0018	IRIS
	Ni	A	1	Lung	0.00024	IRIS
	Pb	B2	2A	Kidneys	0.000012	OEHHA

[a)]United States Environment Protection Agency

[b)]The International Agency for Research on Cancer

여기서, n_{ij}는 i번째 행과 j번째 열의 cell(격자)을 지나는 총 end point의 수를 의미하며, m_{ij}는 i번째 행과 j번째 열의 cell을 지나는 고농도(특정 기준치) end point의 수를 의미한다. 높은 PSCF 값을 갖는 격자일수록 주요 오염원의 위치일 가능성이 높게 된다[10].

7. 위해성 평가

위해성 평가는 실외 활동시간 동안 미세먼지 흡입으로 인한 중금속 노출에 대해 평가하였으며, 국립환경과학원 고시 제2021-13호(화학물질 위해성평가의 구체적 방법 등에 관한 규정)[21]에 따라 유해성 확인, 용량-반응 평가, 노출 평가, 위해도 결정 4단계 순서로 수행하였다. 유해성 확인은 대상물질에 노출되었을 때 유해한 영향이 있는지 여부를 확인하는 정성적 평가 단계로 인체 및 동물 독성 실험자료 등 기존 연구자료를 검토하여 확인하였다. 용량-반응 평가를 통한 중금속 독성정보는 발암물질의 단위위해도(Unit Risk), 비발암물질의 흡입독성참고치(RfC, Reference Concentration)를 활용하였으며, IRIS(Integrated Risk Information System), OEHHA (The California Environmental Protection Agency's Office of Environmental Health Hazard Assessment), ATSDR(Agency for Toxic Substances and Disease Registry) 등의 자료를 참고하여 Table 2에 나타내었다.

노출평가는 유해성이 확인된 물질에 얼마나 노출되었는지, 수용체의 노출조건을 고려하여 체내로 유입될 수 있는 양을 정량적으로 추정하는 단계이다. 본 연구에서는 대기 중 미세먼지 흡입을 통한 중금속 위해성 평가를 수행하기 위해, 실외활동 시간의 흡입노출을 고려하였으며 국립환경과학원 고시[21]에서 제시한 인체노출량식을 통해 노출량을 평가하였다. 흡입 경로를 통한 평생일일노출량(LADD, Lifetime Average Daily Dose) 산출에 적용된 식은 아래와 같다.

$$LADD(\mu g/kg.day) = \frac{Cons \times IR \times ET \times Abs}{BW \times LT} \quad (9)$$

여기서, Con(Concentration)은 대상물질 농도(μg/㎥), IR(Inhalation rate)은 호흡률(㎥/day), Abs(Absorption rate)는 체내흡수율, ET(Exposure Time)는 노출시간(year), BW(Body Weight)는 체중(kg), LT(Lifetime)은 기대수명(year)을 의미한다. 체중, 호흡률, 기대수명, 노출빈도, 노출기간은 국립환경과학원에서 발간한 한국인의 노출계수 핸드북[22] 및 한국 어린이의 노출계수 핸드북 자료[23]를 참고하였으며, 흡수율은 체내 흡수율에 대한 자료가 부족할 시 보수적으로 가정하여 100%로 적용한다는 국립환경과학원 고시[21]에 따라 수행하였다.

또한, 본 연구에서는 지역별 인구특성을 고려하여 노출평가를 실시하고자 하였으며, 부산광역시 주민등록 인구통계 자료를 참고하여 측정지점이 위치한 15개 동의 성별 및 연령별 인구분포를 파악하였다. 지역별 인구분포에 노출계수핸드북 자료를 반영하여 새로운 노출계수를 산출(평균값)하였으며, 산출된 노출계수는 Table 3에 나타내었다. 노출계수 결과값은 EPA에서 제시한 노출계수 분포를 참조하여, 확률론적 위해성 평가에 적용하였으며, 체중과 호흡률은 정규로그분포, 노출기간은 삼각분포를 가정하였고, 평균수명은 부산광역시 주민등록인구통계 자료를 활용하였다.

위해도 결정은 흡입 경로에 따라 산출된 노출량을 이용하여 초과발암위해도(ECR, Excess cancer risk)와 비발암독성위해도(HQ, Hazard Quotient)를 산출하였으며, 초과발암위해도(ECR)는 식 (10)을 이용하여 계산하였다[24].

$$ECR = LADD \times SF \quad (10)$$

여기서, SF(Slope Facor)는 발암잠재력((μg/kg.day)$^{-1}$)을 의미한다. 산출된 ECR을 기준으로 1.0E-4 이상이면 위해가 있다, 1.0E-6 이하이면 위해가 없다라고 하였고, WHO 권고기준은 1.0E-5으로 본 연구에서는 위해가 있으나 허용가능한 수준으로 판단하였다.

비발암독성위해도(HQ)는 식 (11)을 적용하여 계산하였으며, 통합 비발암위해도(HI, Hazard Index)는

Table 3. Exposure factor of this study for risk assessment

	All age	0~2	3~6	7~15	16~18	19~64	64 older	Man (Adult)	Woman (Adult)
BW	60.10	10.93	19.26	43.33	62.20	65.36	59.40	70.69	57.59
IR	14.33	9.55	10.47	12.67	15.03	14.88	14.06	16.38	13.07
ET	5.82	2.11	2.51	2.46	2.03	6.20	7.39	7.15	5.82
AT	84.51	82.76	82.89	82.90	82.94	83.94	87.79	82.17	87.35

HQ의 합(식 (12))으로 나타내었다[24].

$$HQ = \frac{LADD}{RfD} \quad (11)$$

$$HI = \Sigma HQs \quad (12)$$

여기서, RfD(Reference Dose)는 독성참고치(μg/kg.day)로 RfC 값에 본 연구에서 산출한 호흡률(IR)을 곱하고 체중(BW)을 나누어서 계산한 값이다[21]. 산출된 HQ를 기준으로 1 이상이면 위해가 있다고 판단하였으며, 본 연구에서는 민간계층 보호를 위한 보수적인 기준으로 0.1 이상이면 위해가 없으나 관리가 필요한 수준으로 판단하였다[25].

확률론적 위해성 평가를 위해서 Crystall ball(Clorado, Denver, USA, ver 11.1.2.1)을 활용하여 Monte-carlo simulation을 실시하였으며, 검출된 농도 자료를 대상으로 1,000,000번의 반복 실행을 수행하여 위해도 범위와 발생확률에 대한 결과값(50%와 95% 수준)을 산출하였다.

Ⅲ. 결과 및 고찰

1. 미세먼지 및 대기중금속 농도

1.1. 미세먼지 중 대기중금속 농도 분포

2023년 1월에서 10월까지의 부산지역 미세먼지(PM-10) 및 대기중금속 농도를 조사하였으며, 그 결과를 Table 4에 나타내었다. 15지점의 평균 PM-10 농도는 28 μg/m³이었으며, 대기중금속 합의 평균 농도는 1.42 μg/m³로 PM-10 농도의 약 5%를 차지하는 것을 확인하였다. 일반적으로 대기 중 미세먼지는 이온, 탄소, 금속성분 및 기타 성분으로 구성되어있으며, Heo

Table 4. Concentration of PM-10 and metals

		Annual		Spring	Summer	Autumn	Winter
		Mean (μg/m³)	Ratio (%)	Mean (μg/m³)	Mean (μg/m³)	Mean (μg/m³)	Mean (μg/m³)
PM-10		28		46	18	19	34
Crustal	Al	0.20136	0.73	0.50076	0.07548	0.11261	0.21544
	Ca	0.17701	0.64	0.37970	0.07507	0.11220	0.19294
	Fe	0.35555	1.29	0.58945	0.18690	0.27082	0.45754
	Mg	0.14716	0.53	0.29094	0.09649	0.09122	0.15034
	Si	0.39356	1.42	1.02344	0.11325	0.18197	0.49161
	Total	**1.27463**	**4.61**	**2.78429**	**0.54719**	**0.76882**	**1.50787**
Trace	As	0.00397	0.01	0.00535	0.00261	0.00274	0.00674
	Be	0.00001	0.00	0.00003	0.00000	0.00000	0.00001
	Cd	0.00060	0.00	0.00082	0.00053	0.00048	0.00069
	Co	0.00030	0.00	0.00043	0.00013	0.00027	0.00044
	Cr	0.00645	0.02	0.00646	0.00648	0.00634	0.00687
	Cu	0.00812	0.03	0.00941	0.00627	0.00786	0.00964
	Mn	0.01680	0.06	0.02436	0.00941	0.01510	0.02110
	Mo	0.00115	0.00	0.00124	0.00103	0.00101	0.00140
	Ni	0.00330	0.01	0.00440	0.00248	0.00291	0.00388
	Pb	0.01131	0.04	0.01286	0.00980	0.01033	0.01390
	Sb	0.00314	0.01	0.00262	0.00284	0.00479	0.00331
	Se	0.00091	0.00	0.00115	0.00078	0.00062	0.00123
	Ti	0.00794	0.03	0.01578	0.00398	0.00611	0.00890
	V	0.00136	0.00	0.00201	0.00172	0.00080	0.00106
	Zn	0.05972	0.22	0.07491	0.03877	0.05149	0.08648
	Total	**0.12508**	**0.45**	**0.16183**	**0.08683**	**0.11084**	**0.16564**
Total		**1.39972**	**5.06**	**2.94611**	**0.63403**	**0.87967**	**1.67352**

등(2018)[15]의 연구에서도 중금속 성분이 미세먼지의 5%를 차지하며 본 연구의 결과와 유사한 수준이었다. 대기중금속 농도는 Al, Ca, Fe, Mg 및 Si를 포함한 지각유래금속(Crustal)과 As, Cd, Mn, Ni 및 Pb 등을 포함한 기타미량금속(Trace)로 구분할 수 있으며, 지각유래금속의 농도는 1.29 μg/㎥, 기타미량금속은 0.13 μg/㎥으로 각각 대기중금속 농도의 91% 및 9%로 지각유래금속이 대부분을 차지함을 확인하였다. 지각유래금속 중 Si(0.38881 μg/㎥) > Fe(0.35881 μg/㎥) > Al(0.20694 μg/㎥), 기타미량금속 중 Zn(0.05976 μg/㎥) > Mn(0.01654 μg/㎥) > Pb(0.01182 μg/㎥) 순으로 농도가 높게 나타났다. Heo 등(2018)[15]도 지각유래금속이 기타미량금속에 비해 높게 나타났으며, Al, Ca 및 Fe의 농도는 높고 As, Cd, Cr의 농도는 낮게 조사되었다고 하였다. 또한, 대기중금속 중 유해한 As, Cd, Mn, Ni 및 Pb의 평균농도는 0.00062~0.01654 μg/㎥으로 PM-10 중 기여율이 0.06% 이하로 매우 낮은 수준임으로 확인할 수 있었다.

1.2. 계절별(월별) 대기중금속 농도 분포

PM-10과 대기중금속 농도는 계절(월별)에 따라 뚜렷한 차이가 나타나며, 그 결과를 Table 4와 Fig. 2에 나타내었다. PM-10 농도는 봄(3~4월, 46 μg/㎥) > 겨울(1~2월, 36 μg/㎥) > 여름(6~8월, 18 μg/㎥) > 가을(9~10월, 17 μg/㎥) 순으로 높게 나타났으며, 대기중금속 농도도 봄(2.9 μg/㎥) > 겨울(1.7 μg/㎥) > 가을(0.7 μg/㎥) > 여름(0.6 μg/㎥) 순으로 PM-10과 유사

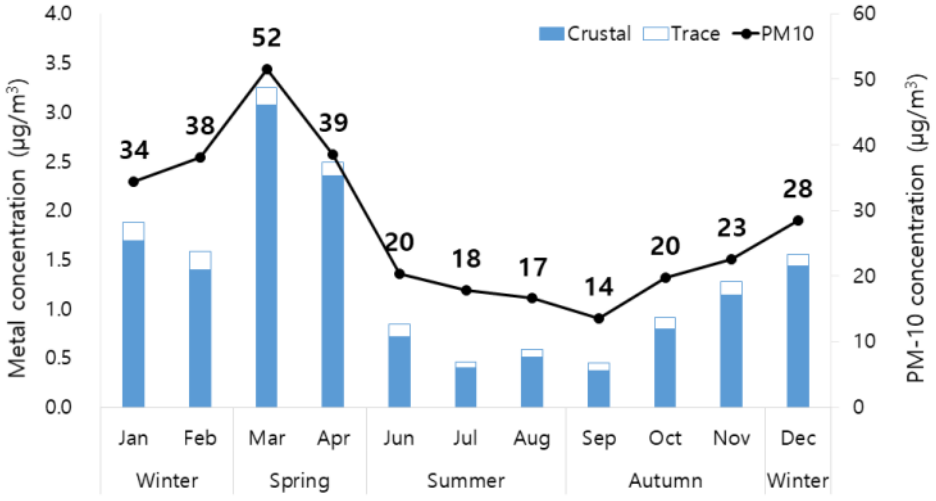

Fig. 2. Concentration distribution of PM-10 and metals by month.

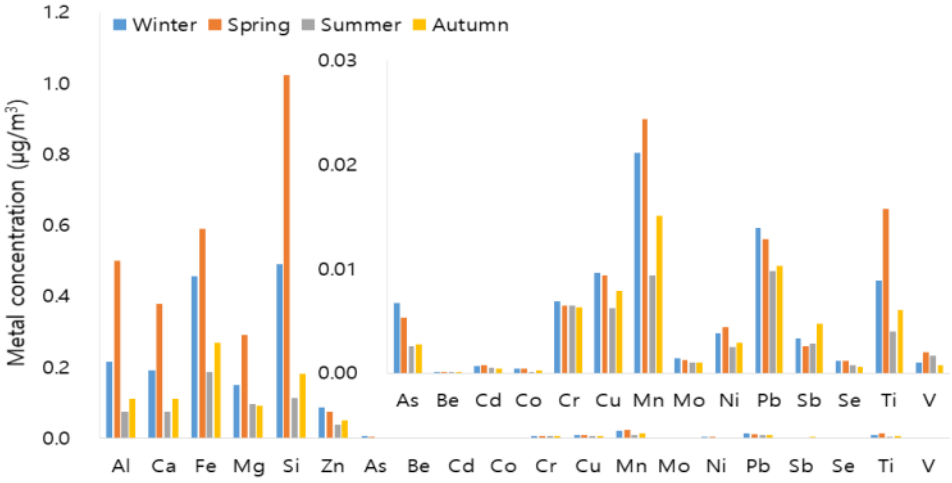

Fig. 3. Concentration distribution of metals by season.

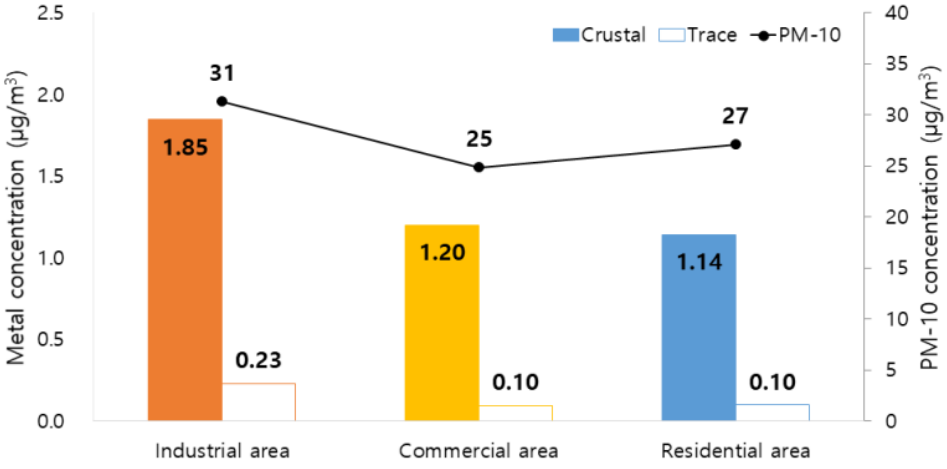

Fig. 4. Concentration distribution of PM-10 and metals by land type.

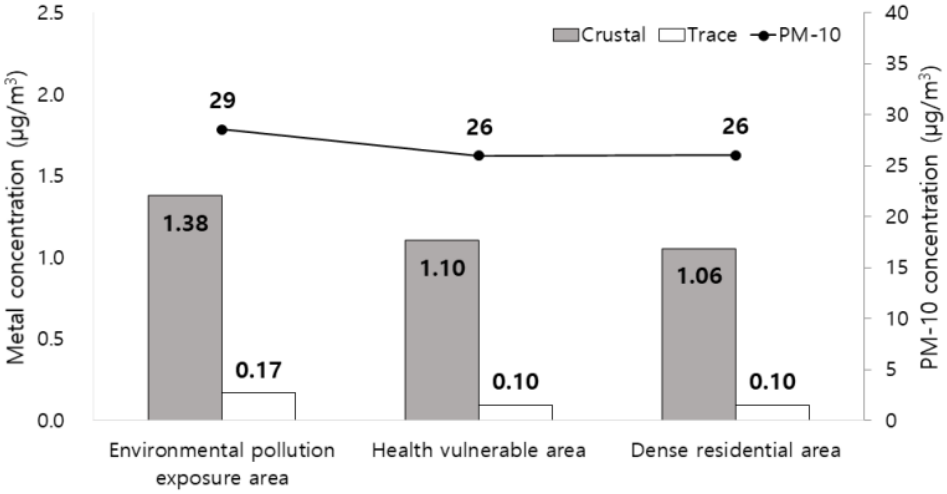

Fig. 5. Concentration distribution of PM-10 and metals by area.

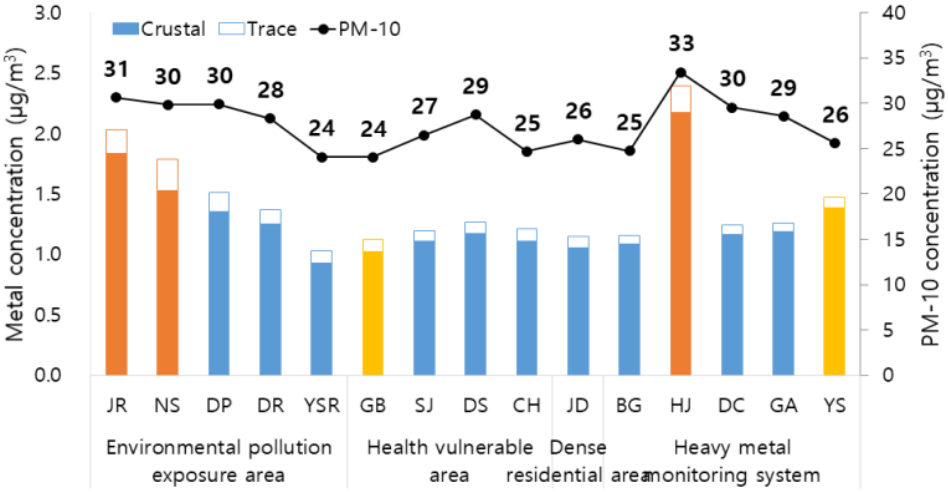

Fig. 6. Concentration distribution of PM-10 and metals by sites.

한 결과를 보였다. PM-10과 대기중금속 농도는 각각 겨울~봄이 여름~가을보다 2.7배 및 4.8배 높게 나타났다. 겨울~봄철은 지표면 부근의 냉각효과로 인한 대기정체와 낮은 대기 혼합고로 인해 대기확산이 어려운 특성[26]으로 겨울철부터 미세먼지와 중금속 농도가 증가하여 봄철인 3~4월에 최고 농도 수준을 보이며, 또한 봄철의 높은 PM-10 농도는 봄철에 자주 나타나는 서풍계열의 종관풍으로 인하여 장거리 수송된 먼지의 영향으로 판단된다[10]. 여름철은 집중된 강우로 인한 세정효과로 PM-10 및 대기중금속 농도가 낮게 나타난 것으로 생각된다[11]. Fig. 3은 계절에 따른 대기중금속 원소 20종의 농도를 나타낸 것으로 지각유래금속은 겨울(1.54484 μg/㎥)~봄(2.78429 μg/㎥) 농도가 높고 여름(0.54390 μg/㎥)~가을(0.58390 μg/㎥))에 농도가 감소하는 경향을 보이는 반면, 기타미량금속은 지각유래금속에 비해 농도가 낮을 뿐만 아니라 겨울(0.18895 μg/㎥)~봄(0.16183 μg/㎥) 및 여름(0.08585 μg/㎥)~가을(0.09582 μg/㎥)의 차이가 적은 것으로 확인되었다. 봄철 지각유래금속의 농도 증가는 일교차가 크고 대기가 건조한 계절적 특성에 의해 빈번히 발생하는 비산먼지의 영향[27]으로 지각기원금속 농도가 증가한 것으로 판단되며, 기타미량금속은 계절적인 영향과 더불어 주변 및 지역 특성에 더 영향을 받는 것을 사료된다.

1.3. 지점별 대기중금속 농도 분포

지점별 PM-10 및 대기중금속 농도 분포 특성을 알아보기 위하여 기존 대기중금속 측정망 5지점을 포함하여 부산지역 15지점의 농도분포를 확인하였으며, 조사지점의 용도지역별 및 조사지역별(환경보건학적)로 분류하였다. 먼저, Fig. 4는 15개 지점을 용도지역별(공업, 상업, 주거지역)로 분류하여 PM-10 및 대기중금속 농도를 나타낸 것으로 PM-10의 농도는 공업(32 μg/㎥) > 주거(28 μg/㎥) > 상업(25 μg/㎥) 순으로 나타났으며, 대기중금속 중 지각유래금속은 공업(1.85 μg/㎥) > 상업(1.23 μg/㎥) > 주거(1.17 μg/㎥), 기타미량금속은 공업(0.22 μg/㎥) > 상업, 주거(0.10 μg/㎥) 순으로 확인되었다. 공업지역이 상업 및 주거지역에 비해 PM-10 1.3배 및 대기중금속 농도 1.6배 높았으며, 상업지역과 주거지역은 유사한 농도 수준으로 나타났다. Choi 등(2021)[4]의 연구에서도 공업지역이 주거지역에 비해 PM-10이 1.2배, 대기중금속이 1.3배 정도 높은 수준으로 나타났다고 하였다. 또한, 본 연구에서 제시한 조사지역별로 구분(Fig. 5)하면 PM-10 농도는 환경오염노출지역(29 μg/㎥) > 건강취약지역, 주거밀집지역(27 μg/㎥) 순이었으며, 대기중금속 중 지각유래금속은 환경오염노출지역(1.37 μg/㎥) > 건강취약지역(1.12 μg/㎥) > 주거밀집지역(1.06 μg/㎥), 기타미량금속은 환경오염노출지역(0.17 μg/㎥) > 건강취약지역(0.10 μg/㎥) > 주거밀집지역(0.09 μg/㎥) 순으로 나타났다.

Fig. 6은 조사지점에 따른 PM-10과 대기중금속 농도를 나타낸 그림으로 PM-10 농도는 24 μg/㎥(광복동)~34 μg/㎥(학장동)이었으며, 대기중금속 농도 합은 1.0 μg/㎥(용수리)~2.5 μg/㎥(학장동)으로 PM-10 기여율은 4.2%(용수리)~7.3%(학장동) 수준으로 나타났다. PM-10 농도가 높은 지점일수록 대기중금속 농도도 증가하는 경향을 보였다. 학장동의 경우 PM-10 및 대기중금속 농도가 가장 높게 나타났으며, 장림동과 녹산동 순으로 높은 농도를 보였다. 이들은 모두 부산의 대표적인 공업단지인 사상산업단지(학장동), 장림·신평공단(장림동) 및 녹산공단(녹산동)에 위치한 지점으로 주변 사업장 배출물질의 영향으로 농도가 가장 높게 나타난 것으로 생각된다. Choi 등(2006)[28]의 연구에서도 공업지역의 대기중금속 농도가 주거지역 및 녹지지역에 비해 높은 농도를 보인다고 하여 본 연구와 유사한 결과를 보였다. 주거지역인 덕포동과 당리동은 그 다음으로 대기중금속(1.4~1.5 μg/㎥)의 농도가 높게 나타나는데 이는 주변에 위치한 장림·신평공단(장림동) 및 사상산업단지(학장동)의 영향을 받아 다른 주거지역에 위치한 지점보다 중금속 성분이 높았던 것으로 사료된다. Choi 등(2006)[28]도 공업지역에 인접한 주거지역의 대기중금속 노출량이 큰 것으로 조사된다고 하였다. 한편, 용수리의 대기중금속 농도는 1.0 μg/㎥으로 조사지점 중 가장 낮은 농도로 조사되었다.

대기중금속 농도는 공업지역인 장림동, 녹산동 및 학장동에서 높았으며 지각유래금속도 이 지점에서 높게 나타난 반면, 기타미량금속은 공업지역에서 농도가 높은 편이나 조사지점에 따라 차이를 보이는 것으로 나타났다. Fig. 7은 기타미량금속 중 As, Cd, Mn, Ni 및 Pb의 농도 분포를 지점별로 나타낸 것이다. As와 Cd 평균 농도분포는 각각 0.00242 μg/㎥(덕천동)~0.00597 μg/㎥(용수리) 및 0.00033 μg/㎥(덕천동)~0.00100 μg/㎥(용수리)으로 조사지점에 따라 유사한 경향을 보였으나[4], 용수리(As 0.00597 μg/㎥, Cd 0.00100 μg/㎥)와 좌동(As 0.00518 μg/㎥, Cd

0.00087 μg/m³)에서 다소 높게 나타났다. 황사 및 미세먼지 중 PM2.5 성분분석에 관한 연구[5]에서 As과 Se의 경우 석탄화력발전의 주요 배출원 추적인자로서 산단이 밀집한 울산지역에서 가장 높은 0.00608 μg/m³이 나타났다고 하였으며, 울산지역에서 오염원이 이송된 것으로 판단된다. Mn의 경우 평균 농도분포는 0.00906 μg/m³(좌동)~0.05366 μg/m³(학장동)이었으며, 학장동 > 녹산동 > 장림동 순으로 공업단지 지점에서 농도가 높게 나타났다. 특히 학장동은 Mn 농도가 0.05366 μg/m³로 평균 Mn의 농도인 0.01654 μg/m³보다 3.2배 높았음을 확인하였는데, 이는 금속 및 도금관련 업체 밀집지역인 사상산업단지의 영향으로 생각된다[4]. Ni은 0.00071 μg/m³(부곡동)~0.01378 μg/m³(녹산동)의 농도분포를 보였으며, 녹산동의 경우 Ni 농도가 0.01378 μg/m³로 평균 농도 0.00312 μg/m³에 비해 4.4배 높은 농도 수준을 확인하였다. Ni은 선박 등에 사용되는 중유연소 발생하는 물질로[12] 부산신항 인근에 위치한 지리적인 특성과 금속·기계 제조업 등 다양한 업종의 사업장이 위치한 녹산공단의 영향으로 Ni 농도가 높은 것으로 사료된다. 녹산동 다음으로 학장동(0.00709 μg/m³) > 덕포동(0.00702 μg/m³) > 장림동(0.00346 μg/m³) 순으로 높았으며, 나머지 지점의 농도는 유사한 수준이었다. 사상산업단지에 위치한 학장동 및 신평·장림공단에 위치한 장림동의 농도는 주변 사업장의 영향으로 높게 나타났다. 주거지역인 덕포동은 사상산업단지(학장동) 인근 사업장에서 배출되는

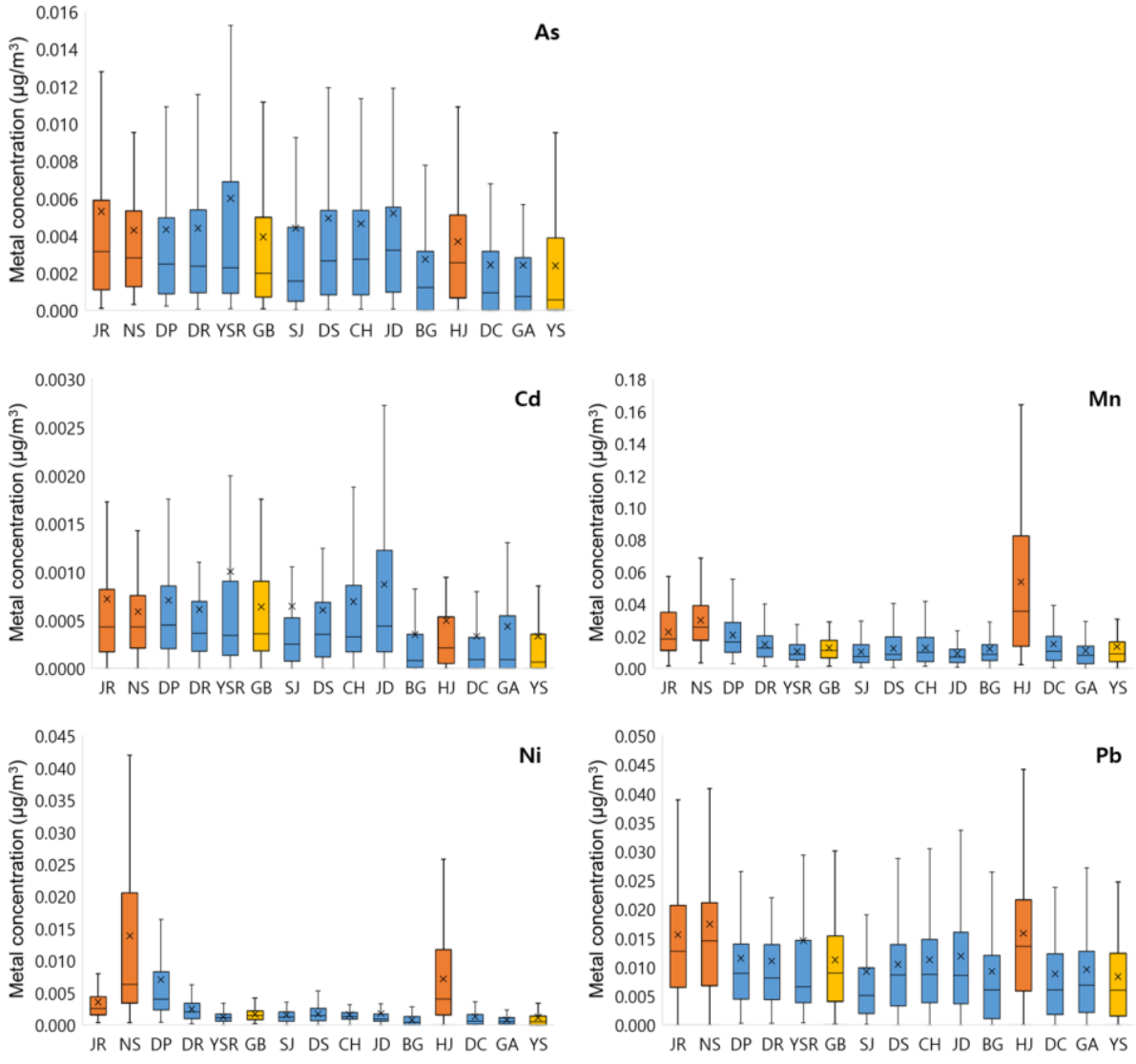

Fig. 7. Concentration distribution of trace metals by sites.

오염원으로 다른 주거지역에 위치한 지점보다 농도가 높았으며, 학장동의 Ni 농도와 유사한 경향을 보였다[28]. 또한, Pb 농도는 0.00869 μg/㎥(연산동)~0.01732 μg/㎥(녹산동)이었으며, 녹산동 > 학장동 > 장림동 순으로 공업지역에서 다소 높았으나 이들 측정지점을 제외하고는 유사한 농도수준을 보였다. 대기 중 Pb는 자동차의 타이어 마모와 엔진마모 등에서 배출되는 자동차 관련 오염배출물질[29]로 대부분의 지점에서 유사하게 나타났으며, 공업지역에서는 자동차관련 배출원 외에 사업장에서 배출되어 농도가 다소 높은 것으로 판단되었다.

2. PMF 모델 결과

PMF 모델을 수행하기 전에 지점별로 분석한 대기중 금속 농도를 미국 환경청의 PMF 5.0 User guide[30]와 국립환경과학원의 수용모델 운영방법의 표준화 및 정책적 활용성 제고[31] 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 Be, Co, Mo, Sb, Se는 모델 수행 시 제외하였다. 모델을 통해 추정된 최적의 오염원(Source profile) 수는 측정지점별에 따라 5~6개로 결정하였으며, 모델을 통해 추정된 오염원 대해서는 미국 환경청의 오염원 분류표(SPECIATE version 5.2)와 기존 연구[13),15),16),17),18)]를 통해 확인된 오염원별 지표항목을 참고하여 검증하였다.

15지점의 PMF 모델을 각각 수행한 결과, 지점별로 5~6개의 오염원으로 결정하였고 오염원은 토양(Soil), 해염(Sea salt), 도로재비산(Road resuspended dust), 장거리이동(Long range), 연소(Combustion) 및 산업(Industry)으로 판단하였으며, 그 결과를 Table 5에 나타내었다. 장림동, 녹산동, 학장동, 수정동 및 청학동은 6개의 오염원, 광복동, 연산동, 당리동, 대신동, 좌동, 부곡동, 덕천동 및 광안동은 산업관련 오염원을 제외한 5개, 덕포동 및 용수리는 연소관련 오염원을 제외한 5개의 오염원으로 분류하였다. 표에서 보듯이, PM-10의 오염원별 기여도는 평균적으로 토양(30.0%) > 해염(24.2%) > 도로재비산(23.7%) > 연소(11.1%) > 장거리이동(8.9%) > 산업(7.6%) 순으로 높게 나타났다. Choi 등(2022)[13]은 PMF 분석 결과 토양(Soil), 해양(Marine), 교통(Traffic), 연소(Coal&Oil combustion), 산업(Industry)의 오염원으

Table 5. Sources contribution(%) of PM-10 by each site

		Soil	Sea salt	Resuspended dust	Long range	Combustion	Industry
Mean		30.0	24.2	23.7	8.9	11.1	7.6
Industrial area	JR	26.6	25.7	15.1	9.0	15.3	8.3
	NS	27.9	21.8	14.7	18.2	13.0	4.4
	HJ	25.0	25.6	28.5	11.0	2.7	7.2
	Mean	26.5	24.4	19.4	12.7	10.3	6.6
Commercial area	GB	41.9	26.3	21.8	2.6	7.5	-
	YS	30.5	33.7	16.4	13.0	6.4	-
	Mean	36.2	30.0	19.1	7.8	7.0	-
Residential area	DP	28.2	14.9	32.2	10.4	-	14.3
	DR	24.8	28.0	24.4	6.2	16.7	-
	YSR	30.6	29.4	26.0	4.7	-	9.1
	SJ	25.8	16.0	16.8	11.5	22.4	7.4
	DS	30.0	27.3	32.7	9.8	0.1	-
	CH	31.4	15.4	22.2	1.0	27.4	2.5
	JD	42.8	17.3	23.9	7.0	9.0	-
	BG	33.5	34.1	18.4	7.2	6.8	-
	DC	19.3	20.5	33.5	11.1	15.6	-
	GA	31.3	26.7	29.6	11.4	1.0	-
	Mean	29.8	23.0	26.0	8.0	12.4	8.3

로 분류하였으며 토양 및 해양관련 오염원이 약 64%로 가장 많은 부분을 차지한다고 하여 본 연구의 결과와 유사하였다. 용도지역별로 구분하면 공업 및 상업지역은 토양(26.5~36.2%) > 해염(24.4~30.0%) > 도로재비산(19.1~19.4%) > 장거리이동(7.8~12.7%) > 연소(7.0~10.3%) > 산업(6.6%) 순이었으며, 주거지역은 토양(29.8%) > 도로재비산(26.0%) > 해염(23.0%) > 연소(12.4%) > 산업(8.3%) > 장거리이동(8.0%) 순으로 주거지역에서 도로재비산관련 오염원의 기여도가 다소 증가함을 확인하였다.

조사지점에 따라 PMF 수행하였고 먼저, 공업지역인 장림동, 녹산동 및 학장동의 오염원 분석결과를 Fig. 8~10에 나타내었다. 첫 번째 오염원은 Al, Ca, Fe, Mg, Si이 높게 기여하는 토양(Soil)과 관련된 오염원으로, 이 오염원의 PM-10 기여도는 25~28%로 분석되었다. 토양의 주요 중금속은 Al, Ca, Fe, Mg 및 Si를 대표하며[32], 토양의 입자가 대기 중으로 비산되는 것으로 판단된다[33]. 토양 오염원은 겨울~봄철의 기여도가 여름~가을철 보다 높은 것으로 확인하였다. 이는 겨울철에 우세했던 북서풍 및 편서풍 지대의 특성으로 인한 국외 미세먼지 유입에 따른 영향인 것으로 사료되며, 반면 높은 습도와 많은 강우량에 의해 여름철에는 토양의 영향이 낮은 것을 확인할 수 있다[15].

두 번째 오염원은 Ca, Mg 등이 주성분인 해염(Sea salt)에 의한 영향으로 분류하였다. 일반적으로 해염은 Na^+, Cl^-, Ca^{2+}, Mg^{2+}를 주요 추적자(Maker species)로 판단하지만[5], 본 연구에서는 대기 중 중금속만을 분석하여 Ca, Mg 원소로 해염 오염원을 분류하였다[13]. 부산지역은 해안을 접하고 있는 지리적인 위치로 해륙풍에 의한 바다의 영향을 많이 받으며[34] 22~26%의 기여도를 확인할 수 있었다.

세 번째 오염원은 자동차와 재비산먼지를 포함한 도로재비산(Resuspended dust)으로, 이 오염원의 주요 추적자는 Cu, Fe, Mn, Ti, Zn이며 기여도는 15~28%로 나타났다. Pb 및 Zn 성분은 타이어 마모, Cu는 브레이크 마모, Mn 및 Fe은 휘발유 차량의 촉매제에서 발생하는 것으로 알려져 있다[13),34]. 재비산먼지는 겨울~봄철 높은 기여를 하는 것으로 나타나는데, 대기가 건조하여 비산먼지가 자주 발생하는 계절적 특성[27]과 국외 미세먼지 유입등에 의한 영향인 것으로 사료된다.

네 번째 오염원는 부산 외 울산 등에서 오염원이 넘어온 것으로 예상되는 장거리이동(Long range) 관련 오염원으로 As, Cd, Pb을 주요 추적자로하고 기여도는 9.0~18.2%로 나타났다. 이들 오염원은 울산 온산산업단지 등에서 부산으로 장거리 수송되어 PM-10 농도에 영향을 미쳤을 것으로 판단된다. 이는 Fig. 7에서 울산산업단지와 가까운 용수리 및 좌동에서 As와 Cd 농도가 높았던 것과 유사한 결과로 생각된다. 온산산업단지는 비철금속산업을 주로하여 석유화학, 기계 등 업종이 분포하고 있는 지역으로[35),36], As, Cd, Pb, Zn 등의 미량금속 농도가 다른 산업단지에 비해서도 높은 편으로 알려져있으며[36], 특히 As는 금속제조 및 화석연료 사용 등 산업활동으로 인해 환경 중으로 배출되어 우선적인 관리가 필요한 지역이다[35].

다섯 번째 오염원은 Ni, V, Cr이 주로 기여하는 연소(Combustion)에 의한 것으로 분석되었다[37]. Ni과 V는 중유연소(Oil combustion)의 중요한 부산물이며, 항만과 선박 등에서 중유를 많이 사용하고 있다[34]. 부산신항과 가까운 장림동(15.3%) 및 녹산동(13.0%)에서는 연소 오염원 기여율이 높았으며 내륙에 위치한 학장동의 기여율은 2.7%로 가장 낮은 결과를 확인하였다.

여섯 번째는 Cd, Cu, Fe, Mn, Pb 등 산업활동(Industry)에 의한 오염원으로 PM-10 기여도는 4~8%로 확인되었다. 지점에 따라 금속성분 기여도의 차이가 나타났으며, 장림동은 Ca 및 Mg 성분, 녹산동은 Cr, Ni 및 V, 학장동은 Cd, Pb 및 Zn의 성분이 높게 조사되었다. 장림동의 경우 신평·장림공단에 위치하고 있으며, 2021년부터 진행한 주택재개발(장림1구역) 및 아파트 공사 현장이 맞은 편에 위치하고 있어 Ca 및 Mg를 포함한 성분이 증가한 것으로 사료된다. Ca의 경우 시멘트먼지(Cement dust)의 주요 추적자로 높게 기여하는 것으로 알려져있다[38]. 또한, 녹산동은 녹산공단 및 부산신항 인근, 학장동은 사상산업단지에 위치하여 주변 사업장의 영향으로 미량금속들이 각각 증가한 것으로 생각된다.

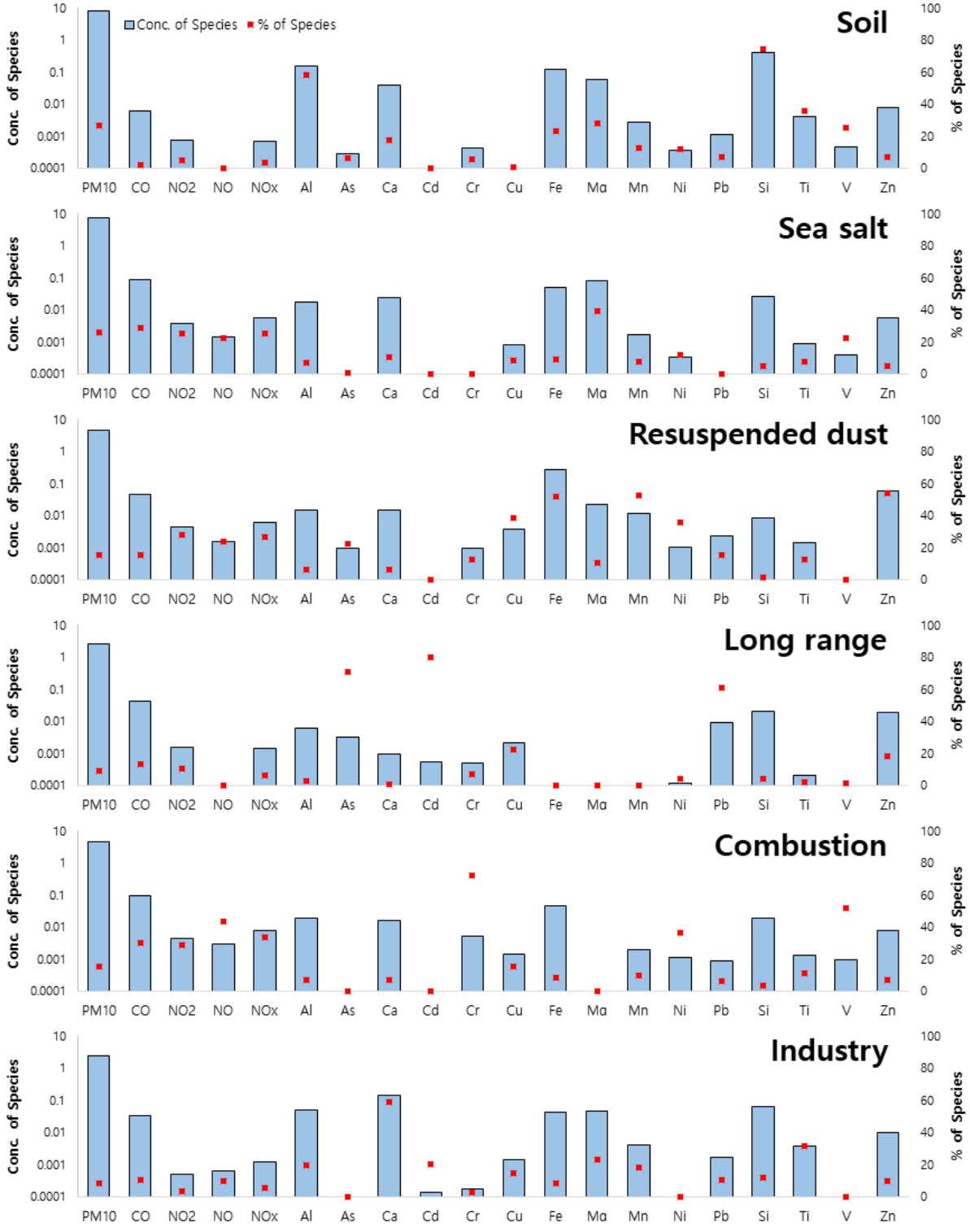

Fig. 8. Source profiles of PM-10 in Jangnim-dong (JR).

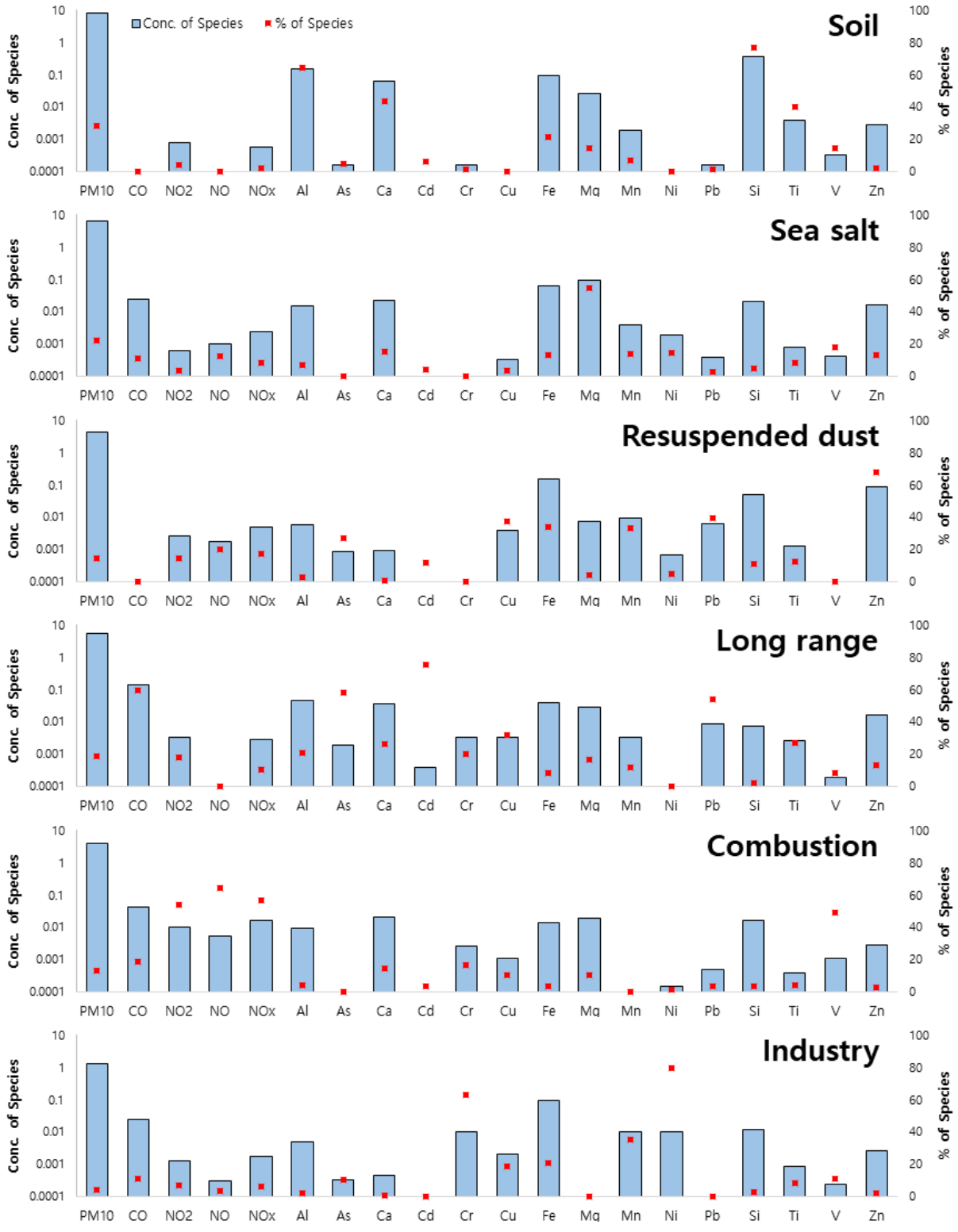

Fig. 9. Source profiles of PM-10 in Noksan-dong (NS).

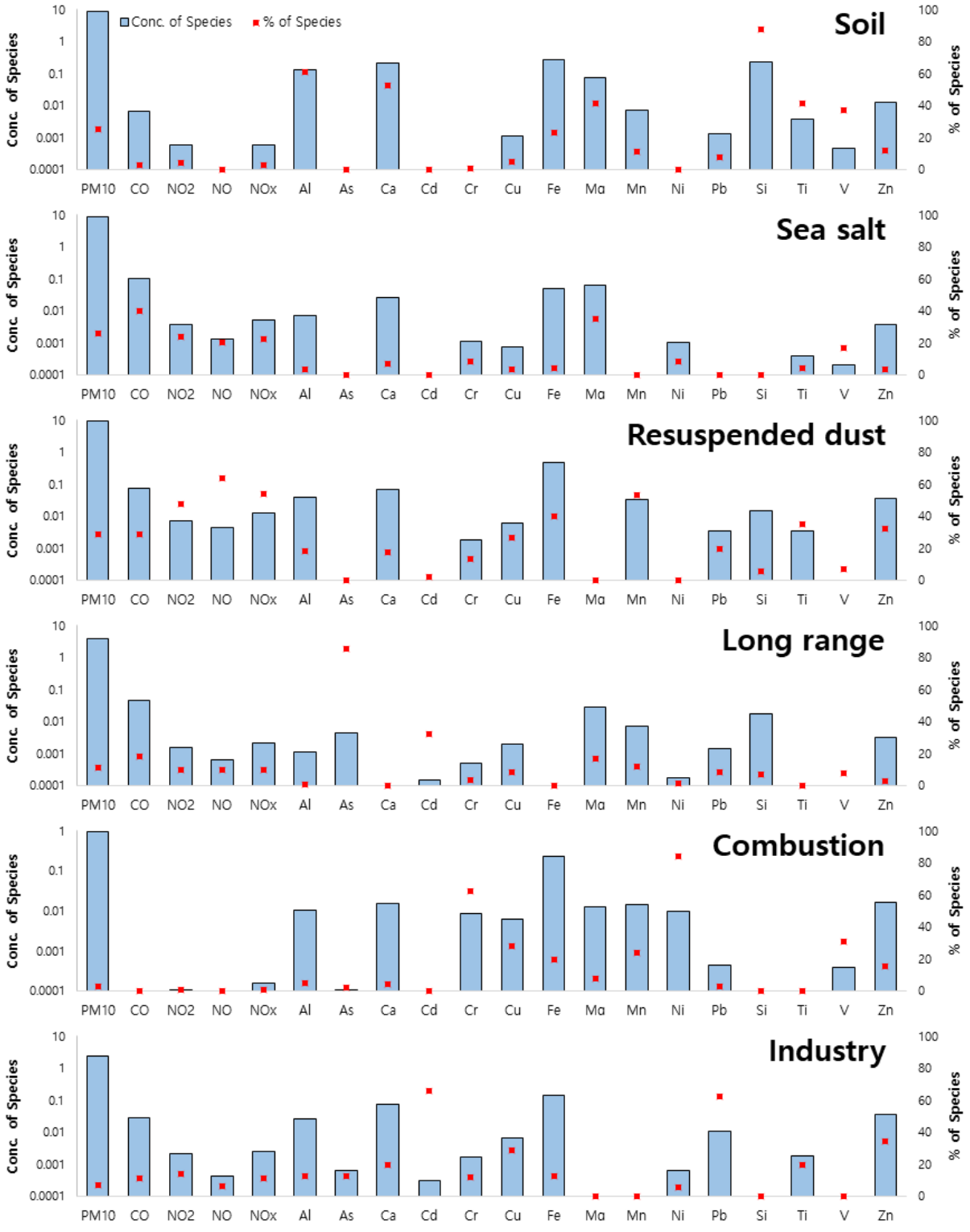

Fig. 10. Source profiles of PM-10 in Hakjang-dong (HJ).

다음으로 상업지역인 광복동은 토양, 해염, 도로재비산, 장거리이동 및 연소의 5개 오염원이 확인하였다. Fig. 11은 광복동의 PMF 결과를 나타낸 것으로, 토양, 해염 및 장거리이동 관련 오염원은 공업지역과 유사한 경향으로 확인되었다. Cu, Fe, Mn, Ti, Zn 등을 주요 추적자로 하는 도로재비산 관련 오염원은 PM-10의 약 22%, Ni, V, Cr 등이 높게 기여하는 연소 관련 오염원은 약 7%로 나타났다. 다른 상업지역인 연산동의 경우에도 광복동과 동일한 5개의 오염원으로 구분되며, 연소를 제외한 각각의 오염원의 중금속 성분 농도 및 기여도는 두 지점에서 유사하여 연소관련 오염원의 중금속 성분 차이를 확인하였다(Fig. 12). 광복동의 경우에는 중유연소의 부산물인 Cr, Ni 및 V의 기여도가 연산동보다 높게 나타나는데, 이는 광복동 인근에 위치한 부산남항과 부산항연안여객터미널 등의 영향으로 생각되며, 같은 용도지역이라도 주변 배출원에 따른 차이가 확연하여 그에 맞는 관리가 필요한 것으로 생각된다.

Fig. 13은 주거밀집지역인 좌동(주거지역)의 PMF 결과를 나타낸 것으로, 토양, 해염 및 장거리이동 관련 오염원은 공업 및 상업지역과 유사한 경향이 확인되었다. Cu, Fe, Mn, Ti, Zn 등을 주요 추적자로 하는 도

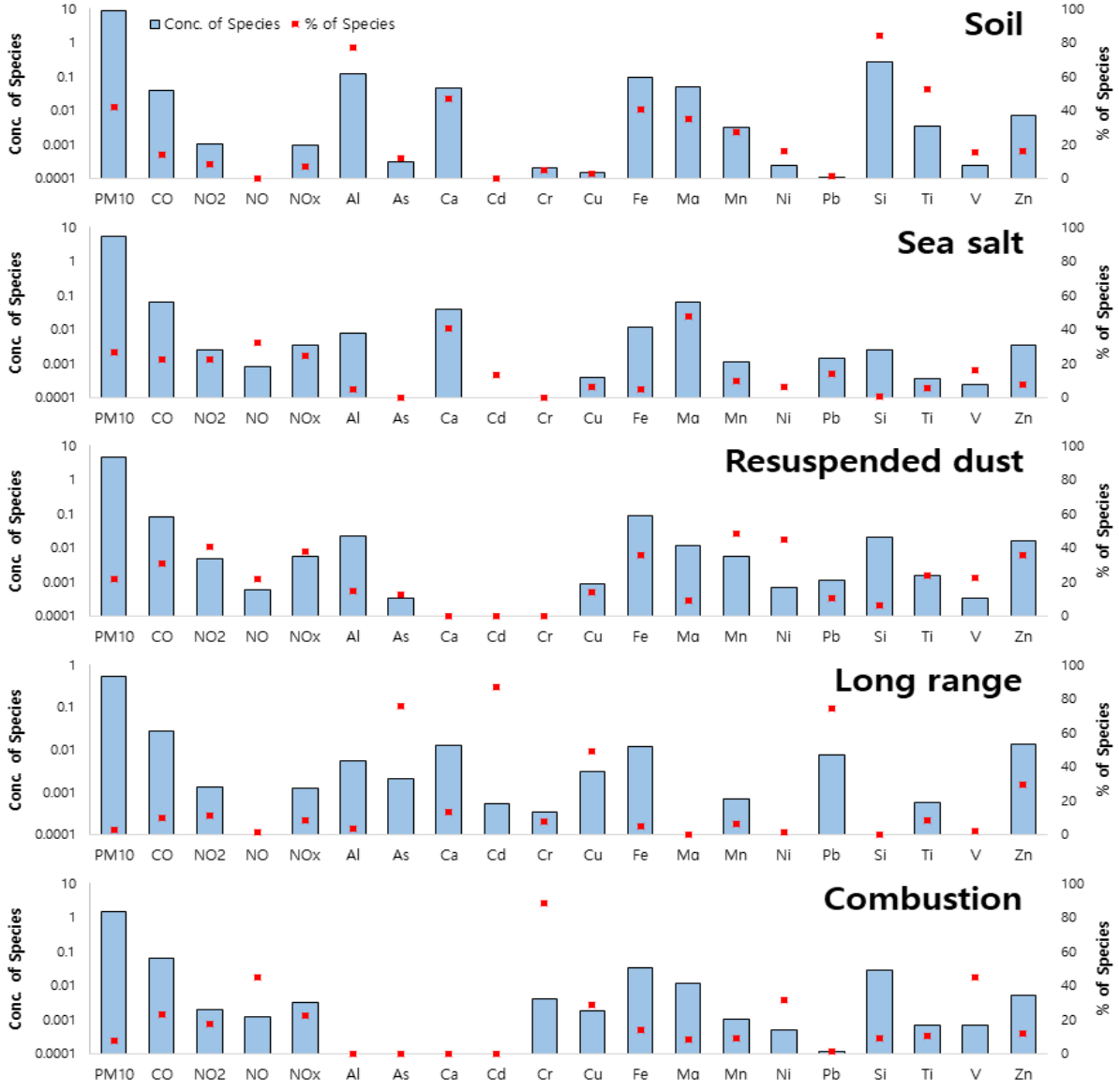

Fig. 11. Source profiles of PM-10 in Gwangbok-dong (GB).

로재비산 관련 오염원은 PM-10의 약 24%, Ni, V, Cr 등이 높게 기여하는 연소 관련 오염원은 약 9%로 나타났다. 한편, 덕포동(학장동과 직선거리 3 km)의 경우 타 주거지역에 비해 미량금속 성분의 농도가 높은 결과(Fig. 7)를 보였는데, 산업 오염원의 Cr, Cu, Fe, Mn 및 Ni의 성분구성이 높게 나타났고, 이는 Fig. 14

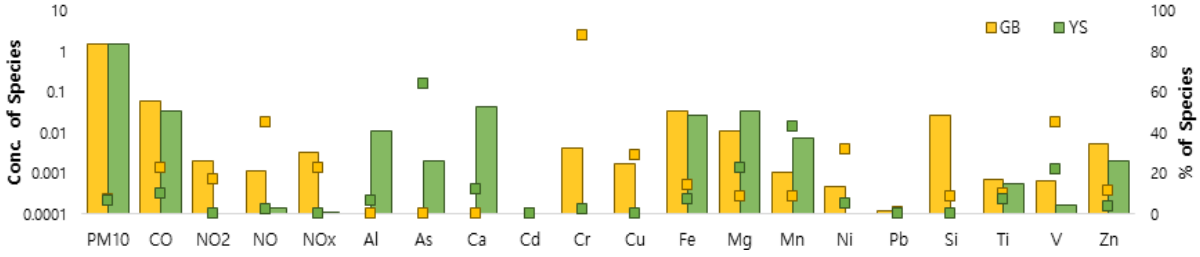

Fig. 12. Comparision of the Combustion sources in Gwangbok-dong (GB) and Yeonsan-dong (YS).

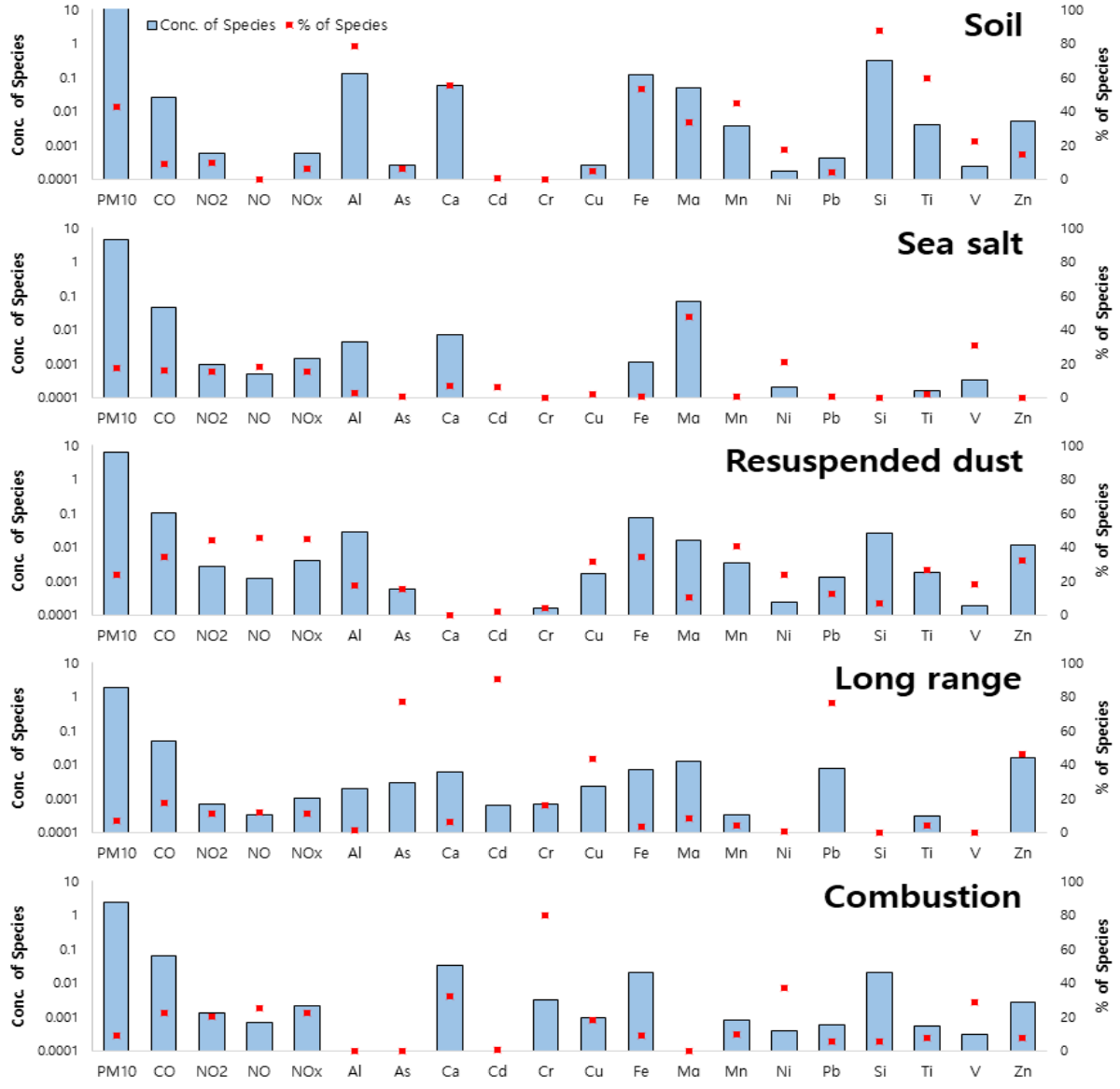

Fig. 13. Source profiles of PM-10 in Jwa-dong (JD).

에서 보듯이 학장동 연소관련 오염원과 거의 유사한 결과를 보였다. 이는 사상산업단지(학장동)의 영향이 덕포동 인근까지 미치는 것을 확인할 수 있었고, 앞선 대기중금속 중 Ni의 농도가 높은 경향과 동일한 결과로 확인할 수 있다. 당리동(장림동과 직선거리 2.5 km)도 이와 유사하게 장림동의 연소 및 산업오염원의 원소 기여도가 유사하여 신평·장림공단(장림동)의 영향을 받는 지역으로 판단되며 배출원 및 오염원에 맞는 적절한 관리가 필요한 것으로 사료된다. 또한, 청학동(광복동과 직선거리 3 km)의 경우에도 토양, 해염, 도로재비산, 장거리이동 관련 오염원은 타 지점과 비슷한 특징이 나타났으며, 산업관련 오염원의 중금속 성분은 인근에 위치한 광복동(연소 오염원)과 유사한 결과를 보였다(Fig. 15). 측정지점 인근 부산남항 등 항만 및 수리조선소와 같은 업체의 영향을 받은 것으로 사료된다. 마지막으로 주거지역 중 용수리, 수정동, 대신동, 부곡동, 덕천동 및 광안동은 5~6개의 오염원으로 확인되었으며, 앞에서 설명한 다른 지점들의 오염원 특성과 유사한 결과를 보였다.

3. CPF 결과

PMF 모델을 통해서 얻은 자료와 기상청 지역별 상세 기상관측자료(AWS)를 활용하여 국지적인 오염원의 영향을 파악하기 위해 CPF 모델(60~75%)을 수행하였다. Fig. 16~21은 오염원별 CPF 결과로 각 오염원의 특징이 가장 잘 나타나는 지점을 선정하여 나타내었다. 토양, 해염 및 장거리이동 관련 오염원은 모든 측정지점에서 공통적인 특징을 보였다. 토양 오염원(Fig. 16) 모든 측정지점에서 북서풍과 남서풍을 포함한 서풍계열 바람의 영향을 받는 것을 확인할 수 있는데, 이는 연구기간 중 겨울철에 우세했던 북서풍과 편서풍 지대의 특성으로 인한 황사 등 국외 미세먼지 유입에 따른 영향인 것으로 사료된다[15]. 해염관련 오염원(Fig. 17)은 측정지점의 위치에 따라 다소 차이가 있었으나 대부분의 지역에서 남풍계열 바람에 영향을 받는 것으로 나타났으며 남서에서 북동까지 길게 이어진 해안의 영향으로 사료된다[13]. 또한, 장거리 이동관련 오염원(Fig. 18)은 북동과 남동을 포함한 동쪽에서 농도가 높게 나타난 것으로 보아, 부산의 동쪽에 오염원이 위치할 확률이 높은 것으로 판단된다. 부산의 동쪽에는 울산 온산공단 등이 위치하고 있으며 인근에서 배출된 오염원들이 부산을 지나면서 모든 측정지점에 영향을 미치는 것으로 생각된다[36].

한편, 도로재비산, 연소 및 산업관련 오염원은 측정지점에 따라 CPF 결과의 차이를 보였으며, 도로재비산 관련 오염원(Fig. 19)은 측정지점 인근 및 주변에 통행량이 많은 대로 및 교차로 인근에서 고농도로 나타날 확률이 높게 확인되었다. 측정소 인근에 고농도가 확인되었던 지점은 덕포동, 당리동, 좌동 및 덕천동 등으로, 덕포동 측정소는 백양대로(직선거리 200 m), 당리

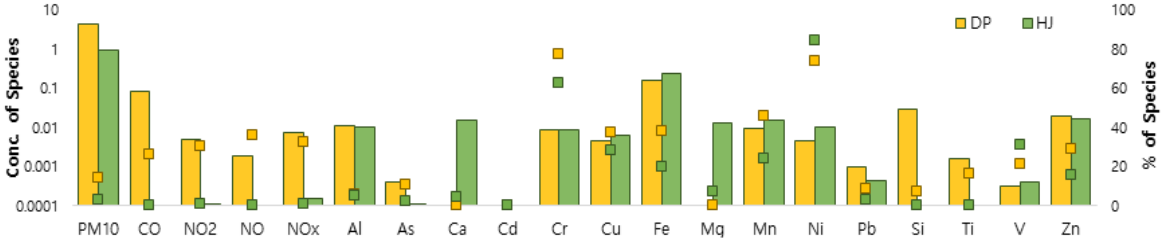

Fig. 14. Comparision of the Industry source in Deokpo-dong (DP) and the Combustion in Hakjang-dong (HJ).

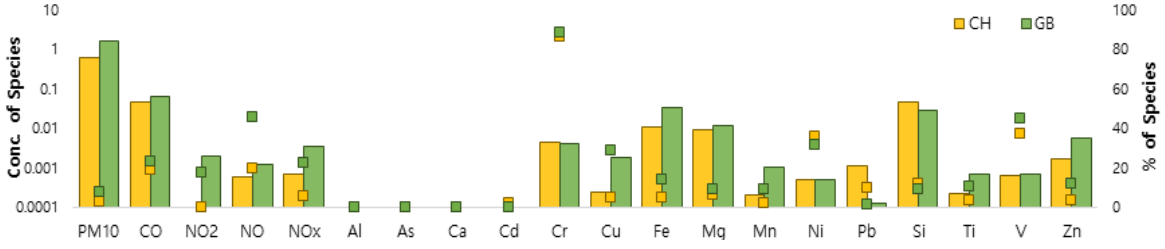

Fig. 15. Comparision of the Industry source in Chunghak-dong (CH) and the Combustion in Gwangbok-dong (GB).

동은 낙동대로(직선거리 150 m), 좌동은 좌동로, 양운로 및 해운대로 등 큰 도로가 인접한 교차로(해운대문화회관 교차로 100 m, 장산역 교차로 200 m), 덕천동은 남해고속도로(직선거리 100 m)가 인접하여 측정지점 인근에서 고농도가 나타난 것으로 사료된다. 장림동, 녹산동 및 연산동은 측정지점에서 거리가 다소 떨어진 주변에서 고농도가 나타났으며, 장림동은 측정지점 기준으로 북서쪽의 농도가 높았는데 북서쪽에 위치한 강변대로(직선거리 1.5 km)와 을숙도대로(신평장림산업단지 사거리, 직선거리 350 m)의 영향으로 생각된다. 녹산동은 북서쪽에 위치한 녹산산업대로(직선거리 400 m)와 가락대로(직선거리 2 km)의 영향, 연산동은 남쪽에 위치한 중앙대로 및 연제로(시청앞교차로, 직선거리 150 m)의 영향으로 판단하였다. 또한, 학장동은 측정소 인근을 포함한 북서쪽에서 고농도가 나타났으며, 이는 인접해있는 동서고가로(직선거리 550 m)와 북서쪽에 위치한 낙동대로 및 강변대로(직선거리 1.3 km)의 영향으로 높은 농도가 보였다고 사료된다.

연소관련 오염원(Fig. 20)의 경우 장림동, 녹산동, 광

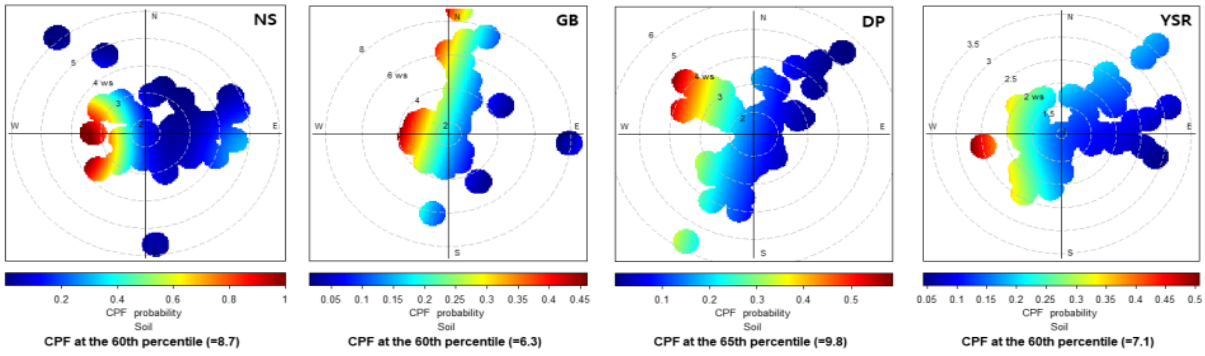

Fig. 16. CPF plots for the Soil source of PM-10 at each site.

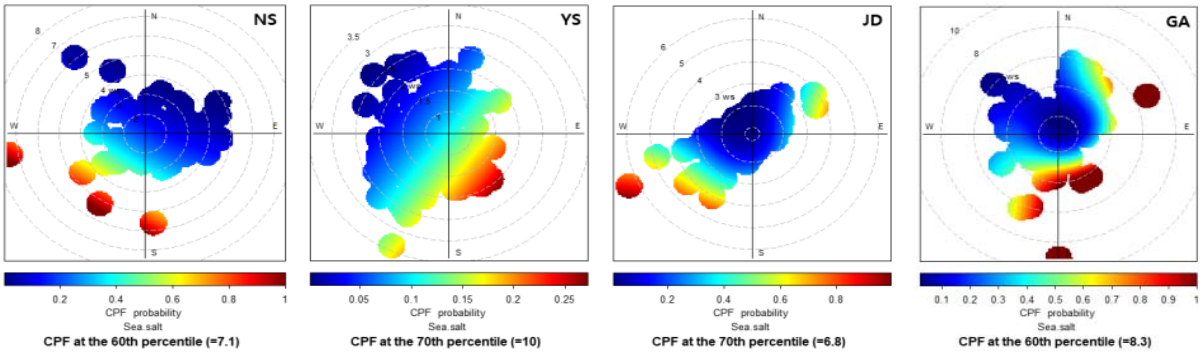

Fig. 17. CPF plots for the Ses salt source of PM-10 at each site.

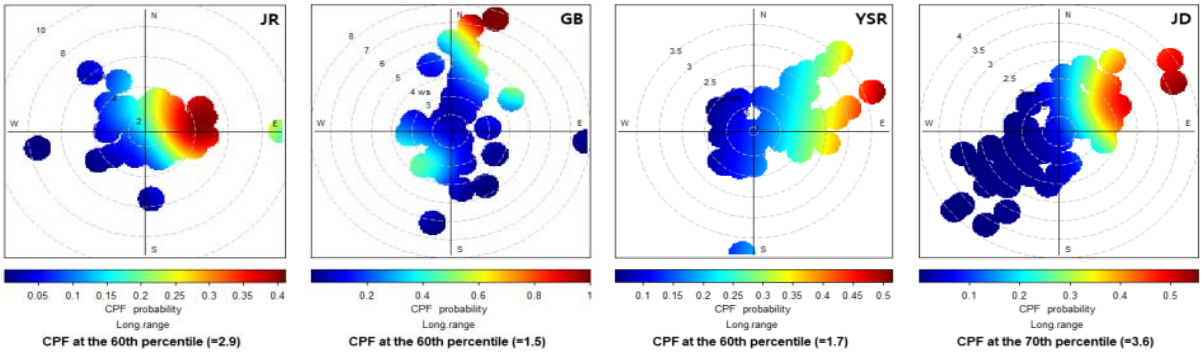

Fig. 18. CPF plots for the Long range source of PM-10 at each site.

복동, 수정동, 청학동 및 학장동은 측정지점 인근에서 고농도로 나타났으며, 장림동, 녹산동 및 학장동은 각각 장림·신평공단, 녹산공단 및 사상산업단지에서 기인하였고, 광복동과 청학동은 선박과 관련된 부산남항과 수리조선소 등의 영향, 수정동은 선박(부산항 제5부두) 및 철도(부산진역철도물류센터) 관련 영향으로 사료된다. 나머지 측정소의 경우에는 각 지점에 다르게 나타났으며 측정지점 인근에 위치한 주거 및 상가밀집지역의 영향으로 유입된 연소관련 배출원으로 판단하였으며 중금속 성분만으로는 상가 등에서 배출될 수 있는 생물성연소 등의 구분이 어려움을 확인하였다.

마지막으로 산업관련 오염원(Fig. 21)도 측정지점 인근에서 유입되는 경우와 원거리에서 유입되는 경우로 나눌 수 있었다. 장림동, 녹산동, 청학동 및 학장동은 인근에서 유입되는 경우로, 장림동, 녹산동 및 학장동은 측정지점이 위치한 장림·신평공단, 녹산공단 및 사상산업단지에서 유입되었고, 청학동의 경우에는 수리조선소 등이 밀집되어 있는 곳으로 이 영향을 받았던

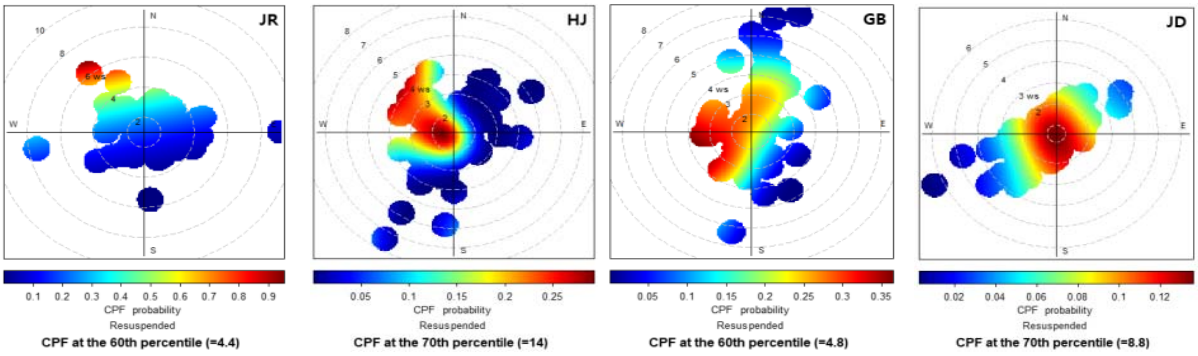

Fig. 19. CPF plots for the Resuspended dust source of PM-10 at each site.

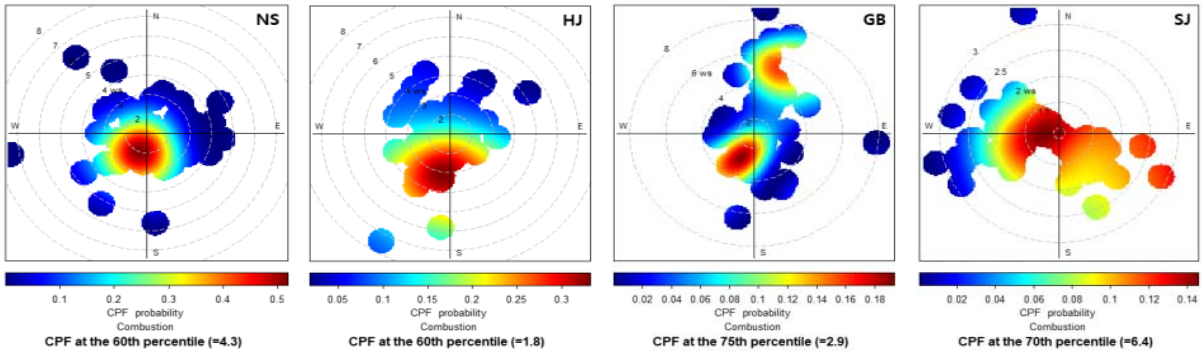

Fig. 20. CPF plots for the Combustion source of PM-10 at each site.

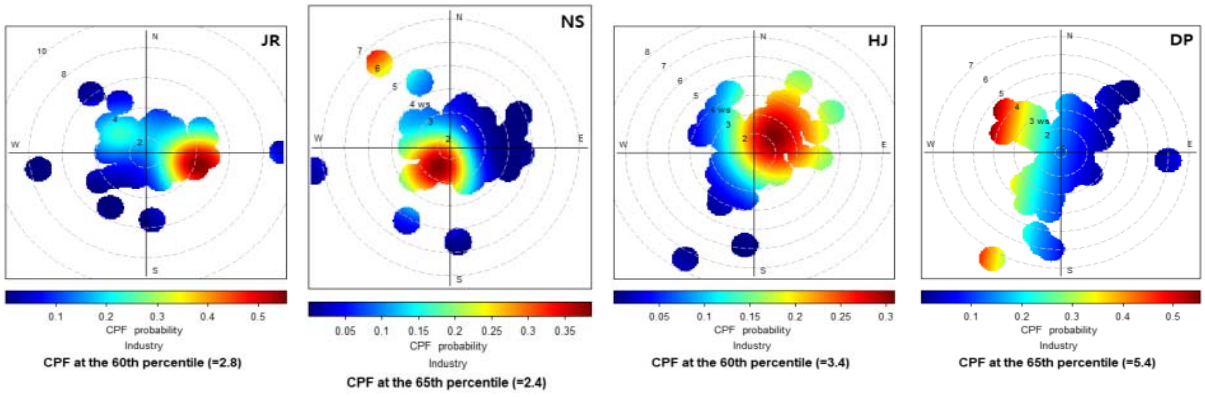

Fig. 21. CPF plots for the Industry source of PM-10 at each site.

것으로 사료된다. 장림동은 고농도가 나오는 곳이 측정지점에서 서쪽지역으로 다소 치우쳐있어 보이며, 이는 장림·신평공단의 영향 외에도 바로 옆에서 진행되는 아파트 공사(장림1구역 주택재개발)의 영향으로 앞서 설명한 PMF 결과와 동일하게 나타났다. 한편, 덕포동, 수정동 및 용수리는 다소 원거리에서 유입되는 경로로 덕포동은 사상산업단지에서 북서쪽으로, 용수리는 정관산업단지에서 남쪽으로 유입된 영향으로 판단된다.

4. PSCF 결과

PSCF 모델은 오염물질의 장거리 이동에 대한 경로와 발생지점에 대해 광역 도표화(mapping)를 가능하게 하여 오염물질의 배출원과 이동경로 및 영향배출원의 분포특성을 가시적으로 규명해준다[39]. PSCF 모델은 각 측정지점별 PMF 모델을 통해 얻은 오염원 정보와 역궤적 결과를 사용하여 분석하였으며, 오염원의 농도는 80% 수준으로 적용하였다. PMF 결과 중 장거리이동 관련 오염원을 중점으로 수행하였고, 대표적으로 연산동, 용수리, 장림동에서의 결과를 Fig. 22에 나타내었다. 비교를 위해 연산동의 도로재비산 관련 오염원도 함께 나타내었는데 이 경우에는 측정지점 인근에서 농도가 높아 오염원이 인근에 있음을 확인할 수 있었다. 반면에 장거리이동 관련 오염원은 모든 지점에서 울산 온산공단지역을 통과하며 그 지역에서 농도가 높게 나타나는 것을 확인하였다. 특히 공단지역과 가까운 용수리에서 그 농도와 영향이 높은 것으로 나타났다.

5. 위해성 평가

5.1. 노출평가

대기중금속 중 유해성 확인된 Al, As, Cd, Mn, Ni, Pb, Ti 및 V의 평생일일노출량(LADD)을 부산 지역별

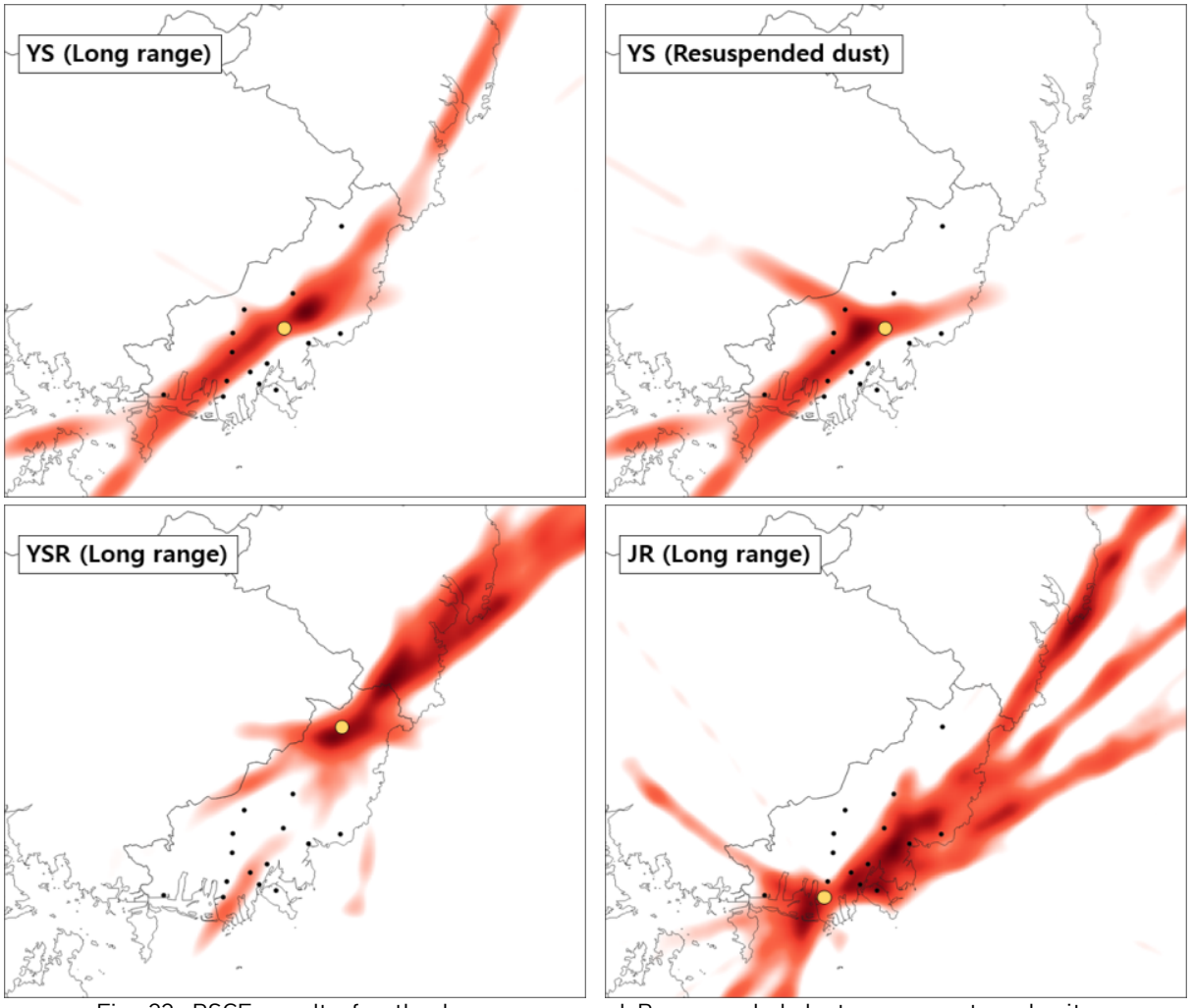

Fig. 22. PSCF results for the Long range and Resuspended dust sources at each site

인구특성을 고려하여 연령과 성별에 따라 계산하였으며, 그 결과를 Table 6에 나타내었다. LADD는 연령에 따라 0~2세(As 9.3E-5 μg/kg-day) 가장 높았으며 점차 감소하다 16~18세(As 2.5E-5 μg/kg-day) 가장 낮은 값을 보인 후 19세 이상(As 7.1E-5 μg/kg-day)에서 다시 증가하는 경향을 보였다. 이는 어린이의 경우 단위체중 당 호흡량이 성인의 2~3배 높고[40], 16~18세는 실외노출시간이 작았기 때문이다[22]. 부산 인구특성을 고려한 본 연구에서도 어린이의 경우 성인(19~64세)과 비교하였을 때, 0~2세는 3.8배, 3~6세는 2.4배 높은 결과를 보였으며, 16~18세는 성인의 실외시간은 6.2년인데 반해 16~18세는 2.03년으로 3배 정도 차이가 나는 것을 확인하였다(Table 3). 성별에 따라서는 남성(As 8.5E-5 μg/kg-day)이 여성(As 6.3E-5 μg/kg-day)에 비해 높은 값을 보였는데, 남성이 여성이 비해 체중 당 호흡량이 많고 실외 노출시간이 길었기 때문으로 생각된다(Table 3)[41]. 또한 중금속 항목에 따라 비교해 보았을 때 대기 중 중금속 농도가 높았던 Al > Mn > Pb > Ti > As > Ni > V > Cd 순으로 LADD도 동일한 결과를 보였다.

5.2. 발암성 평가

PM-10 중 발암성 중금속 노출에 의한 초과발암위해도(ECR) 분석을 Table 7에 나타내었으며, ECR 분석은 As, Cd, Ni, Pb 항목에 대해 몬테카를로 시뮬레이션에 의한 확률론적 분석을 실시하였다. PMF 모델 수행 시 S/N비가 0.2 이하로 측정값의 신뢰도가 낮은 항목(Be, Co, Mo, Sb, Se)은 본 평가대상에서도 제외하

Table 6. LADD(μg/kg-day) of metals by age and gender

	All age	0~2	3~6	7~15	16~18	19~64	64 older	Man (Adult)	Woman (Adult)
Al	3.4E-3	4.6E-3	3.4E-3	1.8E-3	1.2E-3	3.5E-3	4.1E-3	4.2E-3	3.1E-3
As	6.9E-5	9.3E-5	6.9E-5	3.6E-5	2.5E-5	7.1E-5	8.4E-5	8.5E-5	6.3E-5
Cd	1.0E-5	1.4E-5	1.0E-5	5.4E-6	3.7E-6	1.0E-5	1.2E-5	1.3E-5	9.4E-6
Mn	2.7E-4	3.7E-4	2.7E-4	1.4E-4	9.8E-5	2.8E-4	3.3E-4	3.3E-4	2.5E-4
Ni	5.1E-5	6.9E-5	5.1E-5	2.7E-5	1.8E-5	5.2E-5	6.2E-5	6.3E-5	4.7E-5
Pb	1.9E-4	2.6E-4	1.9E-4	1.0E-4	7.0E-5	2.0E-4	2.3E-4	2.4E-4	1.8E-4
Ti	1.3E-4	1.8E-4	1.3E-4	7.0E-5	4.8E-5	1.4E-4	1.6E-4	1.6E-4	1.2E-4
V	2.4E-5	3.3E-5	2.4E-5	1.3E-5	8.7E-6	2.5E-5	2.9E-5	3.0E-5	2.2E-5

Table 7. ECR of metals by land type

		As	Cd	Ni	Pb
Busan	Median (50th)	7.8E-7	6.2E-8	2.4E-8	6.9E-9
	Extreme Value (95th)	3.0E-6	2.4E-7	2.2E-7	3.7E-8
Industrial Area	Median (50th)	6.7E-7	4.8E-8	7.4E-8	1.1E-8
	Extreme Value (95th)	4.3E-6	3.2E-7	5.2E-7	4.4E-8
Commercial Area	Median (50th)	4.3E-7	5.1E-8	1.9E-8	5.9E-9
	Extreme Value (95th)	2.7E-6	2.1E-7	7.4E-8	3.0E-8
Residential Area	Median (50th)	7.8E-7	6.2E-8	2.9E-8	6.1E-9
	Extreme Value (95th)	3.0E-6	2.5E-7	1.0E-7	3.5E-8

였다. 평가 대상 항목 중 As의 노출로 인한 ECR이 가장 높은 것으로 나타났다. 부산지역 As의 분석결과 50%는 7.8E-7, 95%는 3.0E-6로 50%의 경우에는 위해가 없는 수준(1.0E-6 이하)이었으나, 95% 결과는 위해가 없는 수준을 초과하였으나 허용 가능한 수준(1.0E-5 이하)임을 확인하였다. 이후 위해성 평가 결과에서는 민감계층 보호를 위해 95% 수준의 결과를 제시하고자 한다. Cd, Ni 및 Pb의 경우 95% 결과 값은 각각 2.4E-7, 2.2E-7 및 3.7E-8으로 모든 항목에서 위해 없는 수준임 확인하였으며, Cd > Ni > Pb 순으로 높게 나타났다.

용도지역별로 구분하였을 때, 공업지역의 경우 As의 95% 위해도는 4.3E-6로 허용가능한 수준으로 나타났으며, 상업(As 95% 2.7E-6)과 주거(As 95% 3.0E-6) 지역의 결과보다 높은 값을 보였다. Cd, Ni 및 Pb의 경우에도 공업지역이 높게 나타났지만 모든 지역에서

Table 8. ECR of metals by each site

		As	Cd	Ni	Pb
Industrial Area	JR	4.3E-6	2.8E-7	1.5E-7	3.2E-8
	NS	3.1E-6	2.0E-7	8.0E-7	3.8E-8
	HJ	2.5E-6	1.5E-7	4.1E-7	2.9E-8
Commercial Area	GB	5.4E-6	4.6E-7	4.2E-8	3.9E-8
	YS	2.1E-6	1.2E-7	7.0E-8	2.3E-8
Residential Area	DP	3.0E-6	2.5E-7	3.3E-7	2.4E-8
	DR	3.3E-6	2.2E-7	9.3E-8	2.2E-8
	YSR	6.0E-6	5.0E-7	4.8E-8	4.4E-8
	SJ	4.5E-6	3.2E-7	6.5E-8	2.5E-8
	DS	4.4E-6	2.7E-7	6.6E-8	2.3E-8
	CH	3.7E-6	3.0E-7	5.3E-8	2.6E-8
	JD	4.1E-6	4.0E-7	6.5E-8	2.8E-8
	BK	1.9E-6	1.1E-7	3.9E-8	2.7E-8
	DC	1.7E-6	1.0E-7	7.2E-8	1.7E-8
	GA	1.6E-6	1.6E-7	3.9E-8	2.8E-8

Table 9. HQ of metals by land type

		Al	As	Cd	Mn	Ni	Ti	V	HI
Busan	Median (50th)	0.002	0.016	0.002	0.003	0.001	0.004	0.001	0.028
	Extreme Value (95th)	0.012	0.060	0.007	0.014	0.010	0.021	0.004	0.127
Industrial Area	Median (50th)	0.002	0.014	0.001	0.006	0.003	0.006	0.001	0.034
	Extreme Value (95th)	0.016	0.086	0.009	0.026	0.024	0.024	0.005	0.189
Commercial Area	Median (50th)	0.001	0.009	0.001	0.002	0.001	0.003	0.001	0.018
	Extreme Value (95th)	0.010	0.054	0.006	0.009	0.003	0.018	0.003	0.104
Residential Area	Median (50th)	0.001	0.016	0.002	0.002	0.001	0.004	0.001	0.027
	Extreme Value (95th)	0.012	0.061	0.007	0.010	0.005	0.020	0.003	0.118

위해가 없는 수준으로 확인되었다.

조사지점에 따른 ECR을 평가하였으며, 그 결과 95%의 초과발암위해도를 Table 8에 나타내었다. As 초과발암위해도는 1.6E-6(광안동) ~ 6.0E-6(용수리)로 허용 가능한 수준임을 확인하였다. Cd, Ni 및 Pb의 경우 모두 위해가 없는 수준으로 나타났다.

5.3. 비발암성 평가

비발암 평가는 유해성 확인 및 용량반응 평가를 통해 독성자료가 확보된 Al, As, Cd, Mn, Ni, Ti 및 V 7개의 항목에 대해 실시하였고, 그 결과를 Table 9에 나타내었다. 부산지역 비발암위해도 지수(HQ)는 모두 1보다 작은 수준이었으며, 통합 비발암위해도(HI)도 1을 넘지 않았으므로 실외활동 시간 동안 미세먼지 흡입으로 인한 중금속 위해 우려 가능성은 낮다고 볼 수 있다. 부산지역 HI의 95%는 0.127로 0.1을 초과하는데, 이는 위해는 없지만 관리가 필요한 수준으로 평가되었다. As(95% HQ, 0.060)가 HI의 영향을 가장 크게 미치는 원소로 관리가 필요한 것으로 생각되나, 환경중 비소의 매체통합 노출평가 및 위해성평가 연구[42]와 ADD(4.5E-5~ 5.4E-4 ㎍/kg-day)를 비교하였을 때 우려할만한 수준은 아닌 것으로 판단된다.

용도지역별로 구분하였을 때, HI 95% 값은 공업지역이 0.189로 가장 높았으며 상업 및 주거은 각각 0.104, 0.118로 확인되었다. 각 지역별로도 As의 HQ가 가장 높았으며, 각 지역에 맞는 관리가 필요한 것으로 사료된다.

Table 10은 조사지점에 따른 유해중금속 물질의 HQ를 나타낸 것으로 결과 값은 95% 수준을 사용하였다. HI는 0.090(부곡동) ~ 0.214(용수리)로 모든 지점에서 위해가 없는 수준으로 확인되었으며, 장림동, 녹산동 및 학장동 등을 포함한 일부지역은 관리가 필요한 수준으로 평가되었다. 장림동, 광복동, 용수리, 수정동, 대신동 및 좌동의 경우 As의 HQ 값이 0.1을 초과하여 각 지역에 맞는 관리가 필요한 것으로 판단된다.

Ⅳ. 결 론

부산지역에 맞는 수용체 중심의 환경보건학적 분석을 위하여 15개 지점의 대기 중 중금속 농도 20항목을 분석하였다. 대기중금속의 주요 오염원과 기여도는 PMF 모델과 CPF 모델을 사용하여 추정하였고, 위해성 평가는 실외 활동시간 동안 미세먼지 흡입으로 인한 중금속 노출에 대해 평가하였으며 그 결과는 다음과 같다.

1. 본 연구기간 동안 15개 지점에서 PM-10의 평균농도는 28 ㎍/㎥이었으며, 대기중금속 합의 평균 농도는 1.42 ㎍/㎥로 PM-10 농도의 약 5%를 차지하는 것을 확인하였다. 대기중금속 중 지각유래금속(Crustal)은 1.29 ㎍/㎥, 기타미량금속(Trace)는

Table 10. HQ of metals by each site

		Al	As	Cd	Mn	Ni	Ti	V	HI
Industrial Area	JR	0.013	0.112	0.010	0.014	0.009	0.025	0.004	0.186
	NS	0.014	0.079	0.007	0.020	0.048	0.022	0.007	0.197
	HJ	0.017	0.064	0.005	0.049	0.024	0.024	0.004	0.187
Commercial Area	GB	0.010	0.141	0.016	0.007	0.003	0.016	0.002	0.195
	YS	0.013	0.055	0.004	0.011	0.004	0.023	0.002	0.113
Residential Area	DP	0.012	0.079	0.009	0.013	0.020	0.021	0.003	0.156
	DR	0.011	0.085	0.008	0.010	0.006	0.019	0.003	0.142
	YSR	0.011	0.155	0.018	0.008	0.003	0.017	0.002	0.214
	SJ	0.013	0.116	0.011	0.007	0.004	0.020	0.003	0.175
	DS	0.014	0.114	0.010	0.009	0.004	0.021	0.003	0.174
	CH	0.011	0.096	0.011	0.008	0.003	0.018	0.004	0.151
	JD	0.012	0.107	0.014	0.006	0.004	0.018	0.003	0.164
	BK	0.010	0.049	0.004	0.009	0.002	0.014	0.002	0.090
	DC	0.012	0.043	0.004	0.012	0.004	0.017	0.002	0.095
	GA	0.012	0.041	0.006	0.009	0.002	0.018	0.002	0.091

0.13 μg/㎥으로 나타났다. PM-10과 대기중금속 농도는 각각 겨울~봄이 여름~가을보다 2.7배 및 4.8배 높게 나타났다.

2. 조사지점을 용도지역별로 구분하였을 때, 대기중금속 농도는 공업지역이 상업 및 주거지역에 비해 1.6배 높았으며, 학장동 > 장림동 > 녹산동 순으로 높은 것을 확인하였다. 기타 미량금속(Trace) 중 As, Cd, Mn, Ni, Pb의 농도를 조사지점에 따라 비교하였고, As 및 Cd는 용수리와 좌동에서 다소 높았으나 조사지점에 무관하게 유사한 경향을 보였다. 학장동의 Mn 농도는 평균 Mn의 농도보다 3.2배, 녹산동의 Ni 농도는 평균 농도에 비해 4.4배 높은 농도 수준을 확인하였고, Pb는 공업지역(녹산동, 학장동, 장림동)에서 다소 높았으나 다른 지점에서는 유사한 농도수준을 보였다.
3. PMF 모델과 CPF 모델을 통해 오염원을 추정한 결과, 각 지점별로 5~6개의 오염원으로 분류할 수 있었으며, 오염원은 토양(Soil), 해염(Sea salt), 도로재비산(Road resuspended dust), 장거리이동(Long range), 연소(Combustion) 및 산업(Industry)으로 판단하였다. PM-10의 오염원별 기여도는 평균적으로 토양(30.0%) > 해염(24.2%) > 도로재비산(23.7%) > 연소(11.1%) > 장거리이동(8.9%) > 산업(7.6%) 순으로 높았으며, 도로재비산, 연소 및 산업관련 오염원은 주변 배출원과 오염원에 영향을 많이 받는 것으로 나타나 지역에 적합한 배출원 관리가 필요한 것으로 생각된다.
4. 조사지점별 확률론적 위해성평가를 실시하였으며 민간계층 보호를 위해 95% 수준의 결과를 확인하였다. 초과발암위해도(ECR)는 As, Cd, Ni, Pb 항목에 대해 평가하였고, As의 ECR는 1.6E-6(광안동) ~ 6.0E-6(용수리)로 허용 가능한 수준, Cd, Ni 및 Pb의 경우 모두 위해가 없는 수준으로 나타났다. 통합 비발암위해도(HI)는 Al, As, Cd, Mn, Ni, Ti 및 V 7개의 항목에 대해 수행하였으며, HI는 0.090(부곡동) ~ 0.214(용수리)로 모든 지점에서 위해가 없는 수준으로 확인되었다.

대기중금속의 공간해상도 확장에 따른 중금속 오염원과 오염원별 기여율을 추정하고, 유해중금속 노출에 의한 건강 위해도 수준 평가하여 환경보건학적 기초자료를 수립했다는 것에 의의가 있다고 생각된다. 이에 대기오염 특성에 맞는 정책 제안 등 향후 부산시의 대기질 개선에 필요한 정책자료로 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

참고문헌

1. Koo, T. W., Hong, M. S., Moon, S. H., Kim, H. J., "The $PM_{2.5}$ Emission Source Contribution Analysis using The PMF Model in Urban Area.", Journal of the Korean Applied Science and Technology, 36(3), pp. 905-914, (2019).
2. Martinelli, N., Olivieri, O., Girelli, D., "Air Particulate Matter and Cardiovascular Disease: A Narrative Review.", European Journal of Internal Medicine, 24(4), pp. 295-302, (2013).
3. McGuinn, L. A., Ward-Caviness, C., Neas, L. M., Schneider, A., Di, Q., Chudnovsky, A., Schwartz, J., Koutrakis, P., Russell, A. G., Garcia, V., Kraus, W. E., Hauser, E. R., Cascio, W., Diaz-Sanchez, D., Devlin, R. B., "Fine Particulate Matter and Cardiovascular Disease: Comparison of Assessment Methods for Long-Term Exposure.", Environmental Research, 159, pp. 16-23, (2017).
4. 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).
5. 국립환경과학원, 황사 및 미세먼지 중 PM2.5 성분분석에 관한 연구 (2008).
6. Kim, S., Kim, T. Y., Yi, S. M., Heo, J., "Source Apportionment of $PM_{2.5}$ using Positive Matrix Factorization (PMF) at a Rural site in Korea.", Journal of Environmental Management, 214, pp. 325-334, (2018).
7. Kara, M., Hopke, P. K., Dumanoglu, Y., Altiok, H., Elbir, T., Odabasi, M., Bayram, A., "Characterization of PM using Multiple site Data in a Heavily Industrialized Region of

Turkey.", Aerosol and Air Quality Research, 15(1), pp. 11-27, (2015).
8. Popoola, L. T., Adebanjo, S. A., Adeoye, B. K., "Assessment of Atmospheric Particulate Matter and Heavy Metals: A Critical Review.", International Journal of Environmental Science and Technology, 15, pp. 935-948, (2018).
9. Lee, Y. S., Kim, Y. K., Choi, E., Jo, H., Hyun, H., Yi, S. M., Kim, J. Y., "Health Risk Assessment and Source Apportionment of $PM_{2.5}$-bound Toxic Elements in the Industrial City of Siheung, Korea.", Environmental Science and Pollution Research, 29, pp. 66591-66604, (2022).
10. Do, W. G. and Jung, W. S., "Estimation of PM10 Source Locations in Busan using PSCF model.", Journal of Environmental Science International, 24(6), pp. 793-806, (2015).
11. Park, G. H., Jeong, J. W., Cho, J. G., "Evaluation of Pollution Characteristics and Chemical Composition of PM2.5 in Ambient Air in Busan (Ⅲ).", The Annual Report of Busan Metropolitan city Institute of Health & Environment, 22(1), pp. 142-159, (2012).
12. Jeong, J. H., Shon, Z. H., Kang, M., Song, S. K., Kim, Y. K., Park, J., Kim, H., "Comparison of Source Apportionment of $PM_{2.5}$ using Receptor Models in the Main Hub Port City of East Asia: Busan.", Atmospheric Environment, 148, pp. 115-127, (2017).
13. Choi, E., Yi, S. M., Lee, Y. S., Jo, H., Baek, S. 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, pp. 28359-28374, (2022).
14. 부산광역시, 부산광역시 환경보건계획 (2023).
15. Heo, J., Kim, C., Min, Y., Kim, H., Sung, Y., Kim, J., Lee, K., Heo, J., "Source Apportionment of PM_{10} at Pyeongtaek area using Positive Matrix Factorization (PMF) model.", Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 34(6), pp. 849-864, (2018).
16. Kim, E. and Hopke, P. K., "Identification of Fine Particle Sources in Mid-Atlantic US area.", Water, Air, and Soil Pollution, 168, pp. 391-421, (2005).
17. Tauler, R., Viana, M., Querol, X., Alastuey, A., Flight, R. M., Wentzell, P. D., Hopke, P. K., “Comparison of the Results obtained by Four Receptor Modelling Methods in Aerosol Source Apportionment Studies.", Atmospheric Environment, 43(26), pp. 3989-3997, (2009).
18. Kim, E. and Hopke, P. K., "Comparison between Sample-Species Specific Uncertainties and Estimated Uncertainties for the Source Apportionment of the Speciation Trends Network Data.", Atmospheric Environment, 41, pp. 567-575, (2007).
19. Stein, A. F., Draxler, R. R., Rolph, G. D., Stunder, B. J. B., Cohen, M. D., Ngan, F., “NOAA’s HYSPLIT Atmospheric Transport and Dispersion Modeling System.", American Meteorological Society, 96(12), pp. 2059-2077, (2015).
20. Li, K. C. and Hwang, I. J., "Characteristics of $PM_{2.5}$ in Gyeongsan using Statistical Analysis.", Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 31(6), pp. 520-529, (2015).
21. 국립환경과학원, 고시 제2021-13호 화학물질 위해성평가의 구체적 방법 등에 관한 규정 (2021).
22. 국립환경과학원, 한국인의 노출계수 핸드북 (2019).
23. 국립환경과학원, 한국 어린이의 노출계수 핸드북 (2019).
24. 국립환경과학원, 화학물질의 위해성에 관한 자료 작성 해설서 (2021).
25. 한국산업안전보건공단, 유해화학물질의 위해도 평가 (2011).

26. Kim, S. and Kim, C., "The Physico-Chemical Character of Aerosol Particle in Seoul Metropolitan Area.", Seoul Studies, 9(3), pp. 23-33, (2008).
27. Jeon, B. I., "The Metallic Elements of PM_{10} and $PM_{2.5}$ in Western Region of Busan in the Springtime of 2005.", Journal of Environmental Impact Assessment, 16(5), pp. 327-340, (2007).
28. Choi, B. W., Jung, J. H., Choi, W. J., Jeon, C. J., Shon, B. H., "Distribution Characteristics of Ambient Heavy Metals based on the Emission Sources and their Carcinogenic Risk Assessment in Ulsan, Korea.", Journal of Environmental Health Sciences, 32(5), pp. 522-531, (2006).
29. Smichowski, P., Gomez, D., Frazzoli, C., Caroli, S., "Traffic-related Elements in Airborne Particulate Matter.", Applied Spectroscopy Reviews, 43, pp. 23-49, (2007).
30. United States Environmental Protection Agency, "EPA Positive Matrix Factorization (PMF) 5.0 Fundamentals and User Guide.", (2014).
31. 국립환경과학원, 수용모델 운영방법의 표준화 및 정책적 활용성 제고 (2021).
32. Heo, J. B., Hopke, P. K., Yi, S. M., "Source Apportionment of $PM_{2.5}$ in Seoul, Korea.", Atmospheric Chemistry and Physics, 9(14), pp. 4957-4971, (2009).
33. Lee, J. H. and Hopke, P. K., "Apportioning Sources of $PM_{2.5}$ in St. Louis, MO using Speciation Trends Network Data.", Atmospheric Environment, 40, pp. 360-377, (2006).
34. Park, H. Y., Oh, G. Y., Park, H. S., Kim, H. R., Lee, B. R., Park, C. O., Lim, H. S., Park, G. H., Park, J. S., Bae, M. S., "Assessment of Regional Source Contribiution of $PM_{2.5}$ in the Gwangyang Bay Area.", Journal of Environmental Analysis Health and Toxicology, 24(2), pp. 62-74, (2021).
35. Jung, J. Y., Lee, H. W., Park, S. H., Lee, J. I., Yoon, D. K., Lee, C. M., "Health Risk Assessment by Exposure to Heavy Metals in $PM_{2.5}$ in Ulsan Industrial Complex Area.", Journal of Environmental Health Sciences, 49(2), pp. 108-117, (2023).
36. Kang, B. W., Kim, M. J., Baek, K. M., Seo, Y. K., Lee, H. S., Kim, J. H., Han, J. S., Baek, S. O., "A study on the Concentration Distribution of Airborne Heavy Metals in Major Industrial Complexes in Korea.", Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 34(2), pp. 269-280, (2018).
37. Murrells, T. P., Passant, N. R., Thistlethwaite, G., Wagner, A., Li, Y., Bush, T., Norris, J., Walker, C., Stewart, R. A., Tsagatakis, I, Whiting, R., Conolly, C., Okamura, S., Peirce, M., Sneddon, S., Webb, J., Thomas, J., MacCarthy, J., Choudrie, S., Webb, N, Mould, R., "UK Emissions of Air Pollutants 1970 to 2009.", (2011).
38. Kim, E. and Hopke, P. K., "Source Apportionment of Fine Particles in Washington, DC, Utilizing Temperature- Resolved Carbon Fractions.", Journal of the Air & Waste Management Association, 54, pp. 773-785, (2004).
39. Lee, J. H., Kim, S. J., Jung, J. H., “Source Apportionment of Aerosols using Air Parcel Backward Trajectories”, Korea Atomic Energy Research Institute, (2007).
40. 서울특별시, 서울시 환경보건정책 로드맵 수립 연구 (2013).
41. Yu, C. and Kwon, H., "Estimation of Multi-Route Exposure and Aggregated Risk Assessment for Cadmium and Lead.", Journal of Food Hygiene and Safety, 35(6), pp. 587-601, (2020).
42. Sim, K. T., Kim, D. H., Lee, J., Lee, C. H., Park, S., Seok, K. S., Kim, Y., "Exposure and Risk Assessments of Multimedia of Arsenic in the Environment.", Journal of Environmental Impact Assessment, 28(2), pp. 152-168, (2019).