

논문

청주산업단지 대기오염물질 농도에 대한 통계적 분석

Statistical Analysis on the Concentrations of Air Pollutants in Cheongju Industrial Complex

성명제^{1),2)}, 이상섭^{2),*}¹⁾(주)한국산업공해연구소, ²⁾충북대학교 환경공학과Myeong-Je Seong^{1),2)}, Sang-Sup Lee^{2),*}¹⁾Korea Industrial Pollution Research Corporation, Cheongju, Republic of Korea²⁾Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University, Cheongju, Republic of Korea

접수일 2024년 7월 26일

수정일 2024년 8월 27일

채택일 2024년 9월 9일

Received 26 July 2024

Revised 27 August 2024

Accepted 9 September 2024

*Corresponding author

Tel: +82-(0)43-261-2468

E-mail: slee@chungbuk.ac.kr

Abstract Air pollutants in the Cheongju Industrial Complex were analyzed from January 2018 to December 2023. The analyzed pollutants include PM₁₀, PM_{2.5}, Pb, Cd, Cr, Cu, Mn, Fe, Ni, As, SO₂, NO₂, CO, benzene, toluene, ethylbenzene, and xylene. The main wind directions in Cheongju were south-southeast in July and August, northeast in September, and westerly in other months. The lowest pollutant concentrations were mostly observed in July, August, and September. This is likely related to the fact that wind directions other than from the west affect Cheongju more during these months. This also suggests that the region is significantly affected by air pollutants coming from the west. On the other hand, Ni showed higher concentrations during September, October, and November. Correlation analysis results showed that PM₁₀ had the highest correlation coefficient with Fe, whereas PM_{2.5} had the highest correlation with Pb. Considering that Fe mainly originates from natural sources and Pb from anthropogenic sources, the results suggest that PM_{2.5} is more influenced by human activities. Multiple linear regression analysis confirmed these findings. Consequently, a regression model for PM₁₀ was derived using Fe, Cr, and temperature as independent variables, while a regression model for PM_{2.5} was derived using Pb, Fe, Cr, temperature, and toluene as independent variables. All regression models were statistically significant and effectively predicted PM₁₀ and PM_{2.5} concentrations.

Key words: Particulate matters, Air pollutants, Correlation analysis, Multiple linear regression model

1. 서론

충청북도는 전국 시도 가운데 대기 중의 미세먼지가 높은 지역에 해당한다. 충청북도의 주요 도시인 청주시에는 2024년 2월 기준으로 충청북도 전체 대기오염물질 배출시설의 약 40%, 1~2종 사업장을 기준으로 60% 이상이 위치해 있다. 또한 사업장들이 밀집해 있고, 각종 산업단지 및 택지개발 사업이 진행되고 있어 청주시 대기질에 대한 정확한 분석과 모니터링이 요구되고 있다(Chungcheongbuk-do, 2024; Seong and Lee, 2024; Kang *et al.*, 2018). 미세먼지는 자연적

발생원과 인위적 발생원에서 모두 발생할 수 있는데, 특히 인위적 발생원에서 발생하는 미세먼지에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그리고 최근에는 미세먼지의 발생원을 파악하기 위하여 대기 중의 중금속 농도를 분석하고 있다(Liu and Smith, 1995; Rebert *et al.*, 1994).

대기질 특성 분석과 관련된 연구를 정리하면 다음과 같다. Park *et al.* (2023)은 2015년부터 2021년까지 서울에서 발생한 초미세먼지 고농도 사례를 바탕으로 화학성분 분석과 중장거리 이동 여부를 규명하였다. 경기도는 운영 중인 대기중금속측정망 자료를 바

탕으로 시공간적 특성과 오염물질 간의 상관관계, 오염도 예측을 위한 회귀식을 도출하였다(Kim *et al.*, 2014). 전라북도 부안과 고창 지역에서는 1년 동안 미세먼지(PM_{10})와 초미세먼지($PM_{2.5}$)를 관측하고 $PM_{2.5}$ 에 대한 성분 분석을 실시하여 농업 지역 대기 오염물질의 특성과 장거리 외부 유입에 대한 개략적인 특성을 도출하였다(Jeon *et al.*, 2024). 포항 지역은 총부유분진(total suspended particulate, TSP)을 분석하여 대기 중 다환방향족 탄화수소(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) 및 중금속 간의 농도 분포 특성을 파악하였다(Baek *et al.*, 2019). Kang *et al.* (2021)은 동남권에 해당하는 부산과 경남의 $PM_{2.5}$ 및 성분 농도 특성을 파악하고 이에 대한 국내외 배출 기여도와 주변 시도의 배출 기여도를 정량적으로 제시하였다. Bae *et al.* (2023)은 2차 계절관리제 기간 동안 대기 질 모사를 기반으로 $PM_{2.5}$ 농도를 정량적으로 추정하였고, Seo *et al.* (2024)은 1~4차 미세먼지 계절관리제 기간 동안 국내 17개 시도의 $PM_{2.5}$ 와 NO_2 농도에 대한 국내 배출영향의 변화를 연구하였다. Kim *et al.* (2023)은 시화 및 안산공단 인접 지역에 대한 $PM_{2.5}$ 의 물리·화학적 특성과 $PM_{2.5}$ 의 2차 생성 인자들의 영향을 파악하였다. 최근에는 지상 및 위상 관측자료와 CMAQ 모델링을 활용하여 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 의 농도를 산출하였다(Koo *et al.*, 2020). Kang *et al.* (2018)은 국내 주요 산업단지의 대기 중 중금속 농도 분포에 대한 연구를 진행하여 항목별 상관성을 규명하였으나 충청북도의 산업단지는 포함하지 않았다. 충청북도와 관련된 문헌 결과로는 서해안의 주요 대기오염물질 배출 지역인 서산, 당진, 평택 등 차령산맥 산지의 북서쪽 지역과 청주 $PM_{2.5}$ 농도의 국지적 변동성 관점에서 서로 뚜렷한 상관성을 보이지 않는다는 연구 결과를 도출한 사례가 있다(Seo *et al.*, 2024). 그러나 이외에 충청북도 대기질에 대한 분석 결과를 문헌에서 찾아보기는 어려운 상황이다.

따라서 본 연구에서는 청주 산업단지 주변의 도시 대기측정망, 대기중금속측정망, 유해대기물질측정망, 기상 자료를 분석하여 미세먼지를 포함한 대기오염물

질 농도 분포 특성을 분석하였다. 동시에 다변량통계 기법을 이용하여 분석 항목들 간의 상관성과 인과관계, 기여도를 분석하여 청주 지역 미세먼지의 발생 특성과 영향인자를 이해하고, 미세먼지 농도를 예측할 수 있는 회귀모형을 도출하였다.

2. 연구 방법

2.1 대상 측정망 및 조사자료

본 연구의 대상 지역은 청주에 위치한 청주산업단지이며 주변에 주거지역이 밀집되어 있다. 현재 청주 산업단지 북쪽으로는 청주테크노폴리스 택지개발이 진행 중으로 청주에 근접한 산업단지는 늘어날 전망이다. 따라서 청주 지역이 산업단지로부터 직접 영향을 받을 것으로 예상되는 인접한 측정소의 데이터를 자료로 활용하여 대기 중 미세먼지를 포함한 대기오염물질의 분포 특성을 알아보고자 하였다.

송정동 측정소는 도시대기측정망(air quality monitoring station; AQMS), 대기중금속측정망으로 청주 산업단지 내에 위치하고 있으며 (구)충북문화재연구원 옥상에 설치되어 있다. 복대동 청주기상청 또한 청주산업단지 내에 위치하고 있으며 송정동 측정소로부터 남서쪽 약 680 m 이격거리에 위치하고 있다. 유해 대기오염물질은 봉명동 유해대기물질측정망의 자료를 활용하였으며 청주산업단지 부지 경계로부터 동쪽 약 1 km 이격거리에 위치하고 있다. 조사자료로 활용된 측정망의 위치와 기상청 위치는 그림 1에 나타내었다.

표 1은 본 연구에서 활용된 항목들을 나타낸 표로써 5개 분야(미세먼지, 중금속 오염물질, 가스상 오염물질, 휘발성 유기화합물, 기상인자) 총 20개 항목을 정리하였다. 분석대상 오염물질은 2018년 01월부터 2023년 12월까지의 대기환경일보에 수록된 물질들로서, 미세먼지(PM_{10} , $PM_{2.5}$), 대기 중금속(Pb, Cd, Cr, Cu, Mn, Fe, Ni, As), 가스상 오염물질(SO_2 , NO_2 , CO), 휘발성 유기화합물(benzene, toluene, ethylbenzene,



Fig. 1. Air quality monitoring sites in Cheongju (satellite images provided by Google Earth Pro).

Table 1. Classification of air pollutants and variables

Variable	Air pollutant	Item			
Dependent variable	Particulate Matter	PM ₁₀	PM _{2.5}	-	-
	Heavy metal	Pb Mn	Cd Fe	Cr Ni	Cu As
Independent variable	Gaseous pollutant	SO ₂	NO ₂	CO	-
	Volatile organic compound	Benzene	Toluene	Ethylbenzene	Xylene
	Meteorological factor	WS	TEMP	RH	-

xylene)이다. 다만 2020년 6월의 경우 PM₁₀, PM_{2.5}의 분석 결과가 등록되어 있지 않아서 본 연구에서 고려하지 않았다. 대기오염물질의 조사 및 분석방법은 환경부·국립환경과학원에서 발간하는 대기환경측정망 설치·운영지침(MOE and NAIR, 2024)에 수록되어 있으며 측정 분석에 대한 내용은 다음과 같다. 미세먼지는 베타선법(β -ray Absorption Method)으로 측정하며 측정 결과는 상온 상태로 환산된 단위부피당 질량농도로 나타낸다. 대기 중금속 물질은 PM₁₀을 5일(5회)간 채취하여 원자흡수분광법, 흡광광도법, 유도결합플라즈마 원자발광분광법 등을 활용하여 분석한다. 가스상

물질의 SO₂는 자외선 형광법(Pulse U.V Fluorescence Method), CO는 비분산적외선분석법(Non-Dispersive Infrared Method), NO₂는 화학발광법(Chemiluminescent Method)으로 자동 분석하며 VOCs는 자동연속 측정방법과 고체흡착열탈착분석법을 병행하여 측정 및 분석한다. 그 외 세부 사항은 대기환경측정망의 자료를 바탕으로 진행된 선행 논문(Seo *et al.*, 2024; Kim *et al.*, 2023; Kim *et al.*, 2014)에 상세 기술되어 있다. 기상인자로는 풍속(WS), 기온(TEMP), 상대습도(RH)를 정리하였다.

2.2 통계 분석방법

분석대상 오염물질에 대한 통계분석을 위해 Statistical Package for the Social Science (SPSS) Ver 21.0을 사용하였다. 상관분석은 PM₁₀과 PM_{2.5} 각각에 대하여 분석항목과의 상관성을 알아보려고 하였다. 회귀분석 시 PM₁₀과 PM_{2.5}를 종속변수로 하고 대기오염물질과 기상항목을 독립변수로 하였으며, 독립변수 선택방법은 새로운 변수를 모형에 추가할 때 이미 모형에 포함된 변수에 대한 유의성 검정을 통해 유의하지 않으면 모형에서 제거하는 단계선택 (stepwise) 방법으로 수행하였다.

독립성 검정을 위해 D-W (Durbin-Watson) 검정과 독립변수 간의 다중공선성 (collinearity) 검정을 실시한다. 다중공선성은 회귀식의 독립변수 사이의 공선성으로 인하여 발생하는 분산값의 팽창 정도를 측정하는 분산팽창요인 (VIF; variance inflation factor)을 구하여 평가하며 값이 1에 가까우면 다중공선성이 없는 것으로 판단하며, 10 이상일 경우 다중공선성이 있는 것으로 판단한다(Kim, 2017) 회귀식의 진단방법으로는 유의성을 검정하는 F-검정과 선형성을 설명하는 결정계수값 (R²)을 통해 회귀식의 유의성을 검증하였다. 식 (1), (2)의 F-검정은 회귀식에 의해 설명되는 변동 (MSR)과 회귀식에 의해 설명되지 않는 변동 (MSE)의 비로써 그 값이 커질수록 회귀식의 신뢰도가 높고, 유의확률 (p-값)이 유의수준 0.05보다 작을 때 회귀식은 유의하다고 평가한다.

$$\sum_{i=0}^{i=n} (y_i - \bar{y})^2 = \sum_{i=0}^{i=n} (\hat{y}_i - \bar{y})^2 + \sum_{i=0}^{i=n} (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (1)$$

$$SST = SSR + SSE$$

$$F = \frac{\text{회귀선에 의해 설명되는 변동}}{\text{회귀선에 의해 설명되지 않는 변동}} = \frac{MSR}{MSE} = \frac{(n-p-1) \times SSR}{p \times SSE} \quad (2)$$

여기서 MSR: mean square regression

MSE: mean square error

SST: sum of square total

SSR: sum of square regression

SSE: sum of square error

n: degree of freedom

p: No. of independent variables in regression model

3. 결과 및 고찰

3.1 기상 및 대기오염 현황

먼저 청주 지역에서 과거 6년 동안 풍향과 풍속을 분석하였다. 그림 2와 같이 월별로 풍향과 풍속에 대한 평균으로 바람장미도를 작성하였다(KMA, 2023). 그림에서 보는 바와 같이 청주는 대부분 서풍이 주 풍향이고, 7월, 8월에 남남동풍의 비중이 매우 높아지고, 9월에는 북동풍의 비중이 매우 높은 특징이 있다. 그리고 6월과 10월에는 서풍이 주 풍향이긴 하지만, 풍속이 낮은 날의 비중이 높았다.

3.2 대기오염물질 농도 분포 특성

앞서 청주 지역의 풍향과 풍속을 월별로 알아본 것처럼, 각 대기오염물질의 평균농도를 월별로 계산하여 표 2에 나타내었다. 표에서 보는 것과 같이 모든 대기오염물질에 대해서 서풍이 주 풍향이 되는 10~3월 사이 중에서 가장 농도가 높은 달이 존재하였다. 그리고 가장 농도가 낮은 달은 toluene, Cr, Ni를 제외하고 7, 8, 9월로 나타났다. 이는 청주 지역이 7, 8, 9월에 서풍이 약화되는 점과 관련 있는 것으로 판단된다. 그리고 청주 지역이 서쪽 외부에서 유입되는 대기오염물질의 영향을 많이 받음을 뜻하는 것이기도 하다. 다만 7, 8, 9월에는 강수로 인한 세정효과도 있고, 화석연료의 사용도 감소하는 시기이므로, 서풍에 따른 유입효과를 정확히 판단하기 위해서는 청주 외부 지역의 대기질에 대한 조사도 필요하겠하다. 4월 또는 5월에 가장 낮은 농도 값을 가졌던 toluene, Cr, Ni 중에서도 toluene, Cr은 여름철에 상대적으로 낮은 농도 값을 가지고, 겨울에 높은 농도 값을 가지는 경향을 보인다는

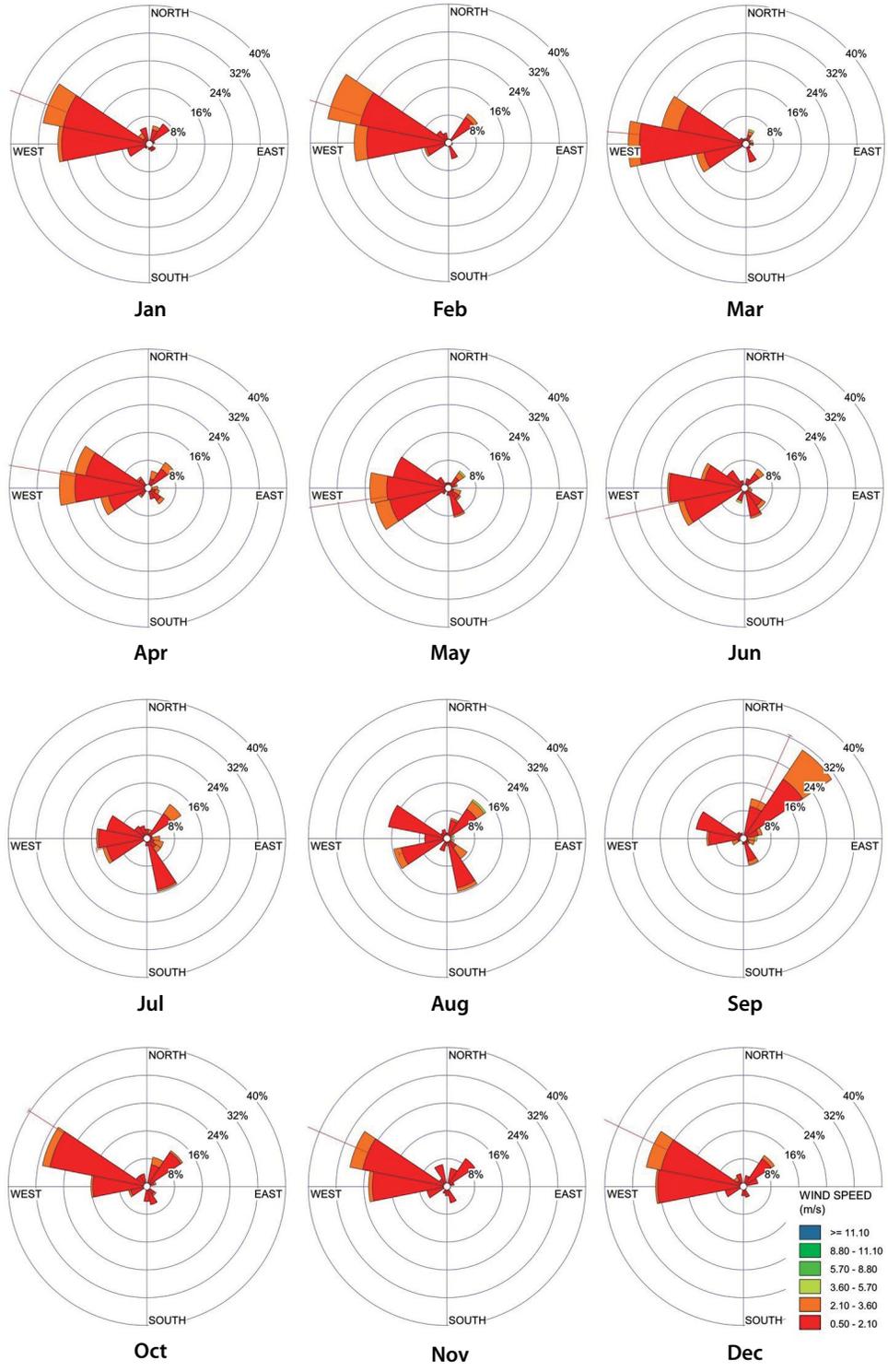


Fig. 2. Monthly wind direction in Cheongju.

Table 2. Monthly mean concentrations of air pollutants.

Item	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
PM ₁₀	55	54	63	57	45	36	25	25	28	42	53	47
PM _{2.5}	34	33	33	23	20	21	16	14	14	23	30	29
SO ₂	0.004	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003
NO ₂	0.027	0.028	0.025	0.02	0.016	0.015	0.014	0.016	0.015	0.021	0.025	0.027
CO	0.603	0.515	0.462	0.372	0.375	0.379	0.355	0.368	0.353	0.445	0.598	0.617
B	0.31	0.29	0.2	0.13	0.1	0.11	0.11	0.08	0.12	0.22	0.27	0.3
T	1.7	1.65	1	0.67	0.68	0.7	0.7	0.69	1.09	1.8	3.1	1.84
E	0.16	0.15	0.14	0.14	0.13	0.14	0.12	0.12	0.21	0.36	0.5	0.28
X	0.21	0.2	0.16	0.18	0.19	0.18	0.14	0.14	0.27	0.44	0.94	0.43
Pb	0.0169	0.0151	0.0161	0.0077	0.0061	0.0063	0.0026	0.0038	0.0062	0.0108	0.0156	0.0128
Cd	0.0006	0.0005	0.0007	0.0003	0.0003	0.0003	0.0001	0.0002	0.0004	0.0004	0.0006	0.0003
Cr	0.0021	0.0026	0.0025	0.002	0.0009	0.0012	0.0013	0.0021	0.0023	0.0032	0.0028	0.0027
Cu	0.0178	0.0183	0.0173	0.0123	0.0118	0.014	0.0075	0.0091	0.01	0.0201	0.0196	0.0196
Mn	0.0207	0.0231	0.0256	0.0207	0.0164	0.0188	0.0089	0.0101	0.0165	0.0229	0.0269	0.0206
Fe	0.5501	0.6886	0.7306	0.6079	0.4732	0.4482	0.1678	0.1934	0.2324	0.3571	0.6294	0.5135
Ni	0.0101	0.016	0.01	0.0103	0.0063	0.016	0.0136	0.0175	0.0264	0.0372	0.0273	0.0167
As	0.0035	0.0029	0.0036	0.0019	0.0014	0.0011	0.0006	0.0009	0.0013	0.0035	0.004	0.0023

B : Benzene
 T : Toluene
 E : Ethylbenzene
 X : Xylene
 ■ : the highest mean concentration of each air pollutant
 □ : the lowest mean concentration of each air pollutant

점에서 다른 대기오염물질과 유사하였다. 반면에 Ni 은 9, 10, 11월의 가을철에 높은 농도를 보이는 특이한 현상을 나타내었다. 이와 관련하여 경기도 지역 대기 에 대한 분석 결과(Kim *et al.*, 2014)와 비교해 볼 때, 경기도 지역의 대기는 PM₁₀과 Ni이 어느 정도 서로 비례하는 결과를 보였던 점을 고려하면, 청주 지역의 결과는 청주 지역 대기질의 특성을 보여주는 결과로 판단된다.

3.3 대기오염물질 상관분석

미세먼지는 기상인자, 지역적, 계절적 특성 등 여러 가지 요인에 의해 오염도가 다르다(Yang *et al.*, 2004). 본 연구에서는 대기 중 미세먼지를 포함한 대기오염 물질과 기상인자 항목 간의 상관성을 통계적으로 분석하였다. 표 3은 미세먼지와 중금속 항목 간의 상관 관계를 두 변수 간 선형상관관계를 평가하는 기법인

Pearson 상관분석기법으로 분석한 표이다. PM₁₀과 Fe 와의 상관계수가 0.756으로 가장 높은 정적 상관성(변 수 간 증감의 방향이 같음)을 보이는 것으로 나타났 으며 Mn(0.595), Pb(0.587), As(0.495) 항목과도 비교적 높은 상관관계로 나타났다. 반면에, PM_{2.5}와 가장 높은 상관성을 나타내는 항목은 Pb(0.828)로 나타났고, Fe (0.672), As(0.660), Mn(0.570) 순으로 높은 상관관계를 나타내었다. 이로써 PM₁₀, PM_{2.5} 각각에 상관성이 높은 중금속 물질은 Fe, Mn, Pb, As로 동일하였지만, 상관성이 높은 순서가 바뀌었다. 특히 PM₁₀은 Fe와의 상관계수가 가장 높은 반면에, PM_{2.5}는 Pb와의 상관계 수가 가장 높았다. Fe는 주로 자연적 환경에서 발생하 고, Pb는 인위적 환경에서 발생하는 점을 고려할 때, PM_{2.5}가 인위적인 배출원의 영향을 많이 받음을 보여 주는 결과이다.

관련 연구 사례로 부산 사상공단을 중심으로 진행

Table 3. Pearson correlation coefficient among PM₁₀, PM_{2.5} and heavy metals.

	PM ₁₀	PM _{2.5}	Pb	Cd	Cr	Cu	Mn	Fe	Ni	As
PM ₁₀	1									
PM _{2.5}	.776**	1								
Pb	.587**	.828**	1							
Cd	.354**	.564**	.738**	1						
Cr	.116	.234	.424**	.348**	1					
Cu	.394**	.569**	.772**	.531**	.481**	1				
Mn	.595**	.570**	.702**	.473**	.430**	.631**	1			
Fe	.756**	.672**	.718**	.453**	.354**	.590**	.814**	1		
Ni	-.105	-.091	.013	.071	.305*	.022	.465**	-.031	1	
As	.495**	.660**	.843**	.610**	.315**	.521**	.605**	.580**	.109	1

* : Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed)

** : Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed)

된 선행 연구 (Choi *et al.*, 2021)에서는 상관계수가 PM₁₀-Mn (0.650), PM_{2.5}-Pb (0.310)로 가장 높게 나타났다. 국내 주요산단을 연구한 논문 (Kang *et al.*, 2018)에서는 시화의 TSP-Mn (0.88), 반월의 TSP-Pb (0.58), 울산의 TSP-Fe (0.70)로 나타났다. 경기도에 대한 분석 결과 (Kim *et al.*, 2014)를 보면, PM₁₀과 Mn의 상관계수가 0.82로 가장 높은 상관성을 보였고, As (0.78), Fe (0.77), Ni (0.61), Pb (0.60) 순으로 나타났다. 선행 연구에서는 주로 PM₁₀, TSP와 중금속 간의 상관관계를 분석하여 본 연구 결과와 직접적으로 비교하기는 어려운 점이 있다. 그러나 PM₁₀과 상관성이 높은 중금속 물질로 Mn, As, Fe, Pb가 해당되는 공통점이 있다. 차이점은 상관성이 높은 순서나 정도가 다르다는 것이고, 청주 지역 대기에서는 Ni이 음적 상관성을 보인다는 것이다. 이는 미세먼지와 중금속 물질 간의 상관관계가 지역에 따라 서로 다를 수 있음을 보여주는 결과이다.

표 4는 PM₁₀, PM_{2.5}와 가스상 오염물질, 기상인자, 휘발성 유기화합물과의 상관관계를 분석한 표이다. PM₁₀과 높은 상관관계를 나타내는 가스상 물질로는 NO₂로써 0.480으로 나타났다. 기상인자로는 TEMP와 -0.648, RH와 -0.644로 높은 음의 상관관계를 나타내었다. VOCs 항목은 benzene, toluene, ethylbenzene, xylene 순으로 나타났다. PM_{2.5}의 경우 가스상 물질로는 NO₂가 0.591로 가장 크게 나타났다. 기상인자

Table 4. Results of correlation analysis for PM₁₀ and PM_{2.5}.

Class	Compound	PM ₁₀	PM _{2.5}
Gaseous pollutant	SO ₂	.264*	.566**
	NO ₂	.480**	.591**
	CO	.428**	.501**
Meteorological factor	WS	-.253*	-.347**
	TEMP	-.648**	-.757**
	RH	-.644**	-.448**
Volatile organic compound	Benzene	.457**	.721**
	Toluene	.292*	.498**
	Ethylbenzene	.132	.240*
	Xylene	.096	.146

* : Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed)

** : Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed)

로는 TEMP와 RH가 각각 -0.757, -0.448로 여전히 음의 상관관계를 보였다. VOCs 항목도 PM₁₀과 동일하게 benzene, toluene, ethylbenzene, xylene 순으로 나타났다. 따라서 가스상 오염물질, 기상인자, 휘발성 유기화합물의 경우는 PM₁₀과의 상관관계와 PM_{2.5}와의 상관관계가 서로 비슷하였다. 상관계수의 값은 기온(TEMP)이 가장 높았는데, 이는 표 2에서 보았던 바와 같이 대부분의 오염물질들이 여름철에 상대적으로 낮은 농도 값을 가지고, 겨울에 높은 농도 값을 가지는 경향을 보이기 때문이다. 그리고 기온 이외에 나머지 인자들은 대체적으로 중금속 물질보다 낮은 상관계수를 보이는 경우가 많았다.

그림 2에서 살펴본 청주 지역 풍향 특성을 고려해 7~8월, 9월, 10~6월로 기간을 나누어, 각 기간에 대하여 상관분석을 실시하였다. 표 5에서 보는 바와 같이 10~6월에 대한 분석 결과는 전체 기간과 비슷하였다. 즉, PM₁₀은 Fe와 상관계수가 가장 높았고, PM_{2.5}는 Pb와 상관계수가 가장 높았다. 반면에 7~8월, 9월에 대한 상관분석 결과는 매우 다르게 나타났다. 7~8월에는 상관계수가 높은 인자가 거의 존재하지 않았고, 9월에는 PM_{2.5}와 풍속의 상관계수가 높았다. 다만, 7~8월, 9월의 기간만으로는 데이터의 개수가 적어 유의수준 0.01을 만족하는 인자는 존재하지 않았고, 유의수준 0.05는 9월의 풍속만 만족하였다. 그러나 청주 지역에서 7~9월에 10~6월과 다른 대기질 특성을 나

타낸다는 점은 확실해 보인다.

이제 단계적 (stepwise) 다중회귀분석을 실시하여 미세먼지에 대한 각 인자의 인과관계와 기여도에 대해 알아보고, 인자를 이용하여 미세먼지 농도를 예측하고자 한다. 본 연구에서는 PM₁₀, PM_{2.5}를 각각 종속변수로 정하고 대기오염물질과 기상인자를 독립변수로 이용하여 회귀식을 도출하였다. 표 5에서 살펴본 바와 같이 기간을 나누었을 때 신뢰수준이 높은 인자가 존재하지 않으므로, 전체 기간에 대하여 다중회귀분석을 실시하였다.

다중선형회귀분석 결과, 회귀모형의 계수값은 표 6에 정리하였으며 PM₁₀은 Fe, Cr, TEMP, PM_{2.5}는 Pb, Fe, Cr, TEMP, toluene을 독립변수로 하는 회귀모형을

Table 5. Results of correlation analysis for PM₁₀ and PM_{2.5} at each term.

Compound	July~August		September		October~June	
	PM ₁₀	PM _{2.5}	PM ₁₀	PM _{2.5}	PM ₁₀	PM _{2.5}
Pb	.119	-.093	.255	-.554	.413**	.815**
Cd	.541	-.089	-.335	-.189	.228	.589**
Cr	.221	.170	.169	.639	.041	.212
Cu	.152	.002	-.210	-.464	.234	.524**
Mn	.332	-.107	.438	.122	.466**	.474**
Fe	.266	.052	.024	-.530	.626**	.518**
Ni	.345	-.077	.612	.456	-.149	-.095
As	-.448	-.349	.798	-.289	.290*	.571**
SO ₂	.435	-.064	.487	.667	.237	.724**
NO ₂	.311	.078	.379	.700	.244	.436**
CO	.260	.233	.007	-.170	.177	.315*
WS	-.012	-.028	.070	-.836*	-.145	-.262
TEMP	.136	.026	-.523	.349	-.330*	-.597**
RH	.050	-.242	.214	.628	-.352**	-.024
Benzene	.335	.326	.788	.202	.243	.663**
Toluene	.209	.312	.392	.805	.121	.423**
Ethylbenzene	.307	.200	.673	.748	-.021	.151
Xylene	.322	.386	.541	.688	-.030	.049

*: Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed)

** Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed)

Table 6. Coefficients of independent variables in the regression model for PM₁₀ and PM_{2.5}.

Regression model	Constant	Pb (µg/m ³)	Fe (µg/m ³)	Cr (µg/m ³)	TEMP (°C)	Toluene (ppb)
PM ₁₀	40.692	-	35.370	-2218.446	-0.597	-
PM _{2.5}	19.271	612.291	6.170	-1115.673	-0.278	1.689

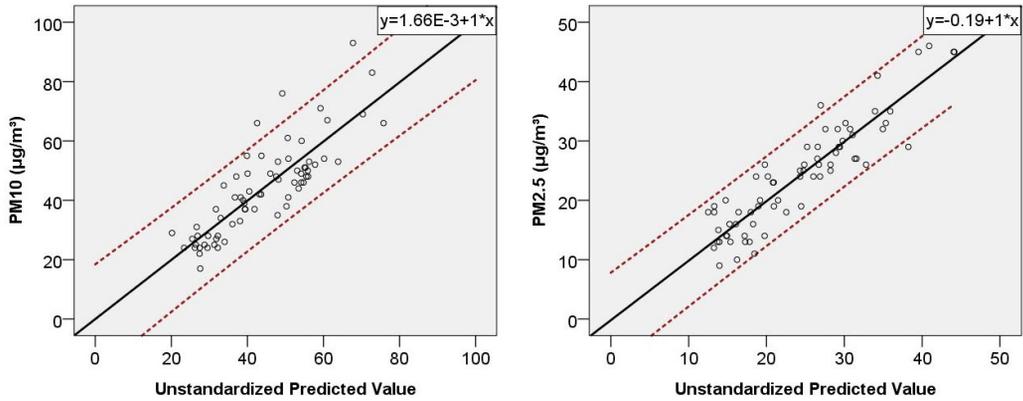


Fig. 3. Graphs of the regression models for PM_{10} and $PM_{2.5}$.

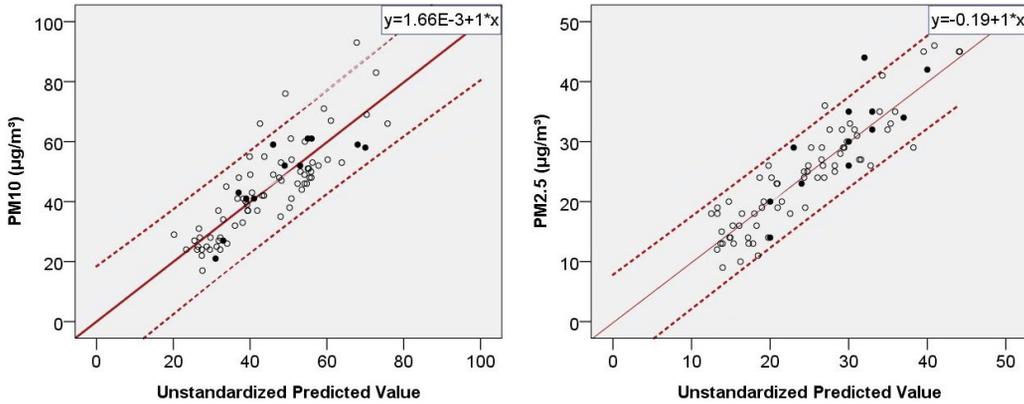


Fig. 4. Graphs of the regression models for PM_{10} and $PM_{2.5}$ with the values (represented as black dots) measured at Cheongju in 2017.

도출하였다. 이는 표 3에서 확인된 상관성이 높은 항목(PM_{10} 은 Fe, $PM_{2.5}$ 는 Pb)과 일관성 있는 결과이다. 회귀 모형식을 통해 예측된 미세먼지의 값을 X축, 실제 미세먼지의 농도를 Y축으로 하는 산점도를 그림 3에 나타내었고, 95% 신뢰수준 구간을 빨간 점선으로 나타내었다. 95% 신뢰구간에서 벗어난 개수는 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 가 각각 3개, 2개만이 존재하여 회귀식이 PM_{10} , $PM_{2.5}$ 농도를 적절히 예측하는 것으로 나타났다. 신뢰구간 상단을 벗어난 점은 실측값이 예측값에 비해 큰 결과가 나온 경우를 말하며, 반대로 하단을 벗어난 점은 예측값이 실측값보다 크게 나온 결과를 의미한다.

PM_{10} 산점도에서 신뢰구간을 벗어난 값은 각각 '21년 3월, '21년 5월, '23년 4월의 결과값으로, Fe의 실측값이 낮은 특성이 있다. $PM_{2.5}$ 산점도에서 신뢰구간을 벗어난 값은 각각 '18년 3월, '19년 11월의 결과값으로 Pb의 실측값이 특이하였다.

또한 통계분석에 포함되지 않은 기간의 측정치를 사용하여 회귀모형의 신뢰도를 분석하고자, 2017년 측정치를 적용하여 PM_{10} , $PM_{2.5}$ 예측모형에 그림 4와 같이 검은 점으로 각각 나타내었다. 왼쪽 그림에서 보는 바와 같이 PM_{10} 회귀모형의 95% 신뢰수준 구간에 2017년 측정치가 모두 포함됨을 확인할 수 있었다. 반

면에 오른쪽 그림과 같이 PM_{2.5}의 경우는 농도가 가장 높았던 2017년 3월 측정 결과에서 회귀모형의 95% 신뢰수준 구간을 벗어나는 것을 확인하였다. 이는 2017년 3월 Pb의 실측값이 낮음으로 인하여 95% 신뢰수준 구간을 벗어나는 결과를 나타내었고, 그림 3에서 확인한 것과 동일한 현상이다.

표 7은 표준화된 독립변수인 계수값(β)을 정리한 표로써 예측변수의 상대적 기여도를 확인할 수 있다. β의 산출은 회귀식의 독립변수별 계수값을 각각의 종속변수의 중앙값으로 나누어 나타낸다. 부호에 상관 없이 절대값이 큰 변수가 작은 변수보다 종속변수에 대한 영향력이 큰 것으로 해석할 수 있다. β의 절대값을 보면 Fe가 0.639로 PM₁₀에 가장 큰 영향력을 갖고 있는 것으로 평가되었다. PM₁₀에 영향을 주는 정도는 Fe, TEMP, Cr의 순이며 TEMP와 Cr은 음(-)의 영향력을 나타내고 있다. PM_{2.5}는 Pb가 0.498로 가장 큰 영향을 주는 인자로 분석되었다. PM_{2.5}에 영향을 주는 정도는 Pb, TEMP, Fe, toluene, Cr 순이며 이중 TEMP와 Cr은 음의 영향력을 나타내고 있다. 앞서 상관관계 분석 결과와 동일하게 PM₁₀은 상대적으로 자연적 환경에서 발생하는 Fe에 가장 큰 영향을 받고, PM_{2.5}는

인위적 환경에서 발생하는 Pb에 가장 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 그리고 각 인자에 대한 상관관계 분석 결과와는 다르게 다중선형회귀분석에서는 Cr이 음의 영향력을 가졌다.

표 8은 회귀식의 검정값을 나타낸 것으로 회귀식의 신뢰도를 설명하는 F-value 값과 수정된 결정계수(adj.R²)를 통해 볼 때, PM_{2.5}가 PM₁₀보다 상대적으로 높은 수준의 신뢰도를 나타내었다. F-value 값은 높을수록 모델이 데이터를 잘 설명하고 있음을 의미하며 adj.R² 값은 0.814의 경우 독립변수가 종속변수의 변동을 81.4% 설명할 수 있음을 의미한다. p-value는 두 가지 모델 모두 p < 0.000으로 통계적으로 매우 유의미하다는 것을 나타낸다. 시간 변화에 따른 자기상관을 나타내는 D-W 값이 1.571, 1.729의 값을 보여 자기상관이 존재하지 않아 시계열 분석은 필요하지 않은 것으로 분석된다. 또한 다중공선성을 판단하는 공차(TOL)는 전체 항목의 결과가 0.1보다는 크고, VIF 값은 10보다 작아 독립변수 간 다중공선성이 존재하지 않는 것으로 판단된다.

4. 결 론

2018년 01월부터 2023년 12월까지의 대기환경월보를 바탕으로 청주시 산업단지에 위치한 청주(송정동)의 PM₁₀, PM_{2.5} 농도와 주요 인자에 대하여 분석하였다. 청주(북대동)의 주 풍향은 서풍인데, 7, 8월에는 남

Table 7. Standardized coefficients (β) for PM₁₀ and PM_{2.5}.

β	Pb	Fe	Cr	TEMP	Toluene
PM ₁₀	-	0.639	-0.199	-0.380	-
PM _{2.5}	0.498	0.193	-0.173	-0.307	0.189

Table 8. Assessment results for the regression model of PM₁₀ and PM_{2.5}.

Regression model	F-test		adj. R ²	D-W	Collinearity Statistics		
	F-value	P-value			Compound	TOL	VIF
PM ₁₀	52.213	0.000	0.693	1.571	Fe	0.697	1.434
					TEMP	0.753	1.328
					Cr	0.870	1.149
PM _{2.5}	60.579	0.000	0.814	1.729	Pb	0.346	2.889
					TEMP	0.542	1.846
					Cr	0.780	1.282
					Toluene	0.719	1.390
					Fe	0.453	2.206

남동풍의 비중이 크게 증가하였고, 9월에는 북동풍이 주 풍향이 되는 특징이 있다. 그리고 6월과 10월에는 서풍이 주 풍향이긴 하지만, 풍속이 낮은 날의 비중이 매우 높았다.

본 연구에서 분석한 대기오염물질은 미세먼지 (PM_{10} , $PM_{2.5}$), 대기 중금속 (Pb, Cd, Cr, Cu, Mn, Fe, Ni, As), 가스상 오염물질 (SO_2 , NO_2 , CO), 휘발성 유기화합물 (benzene, toluene, ethylbenzene, xylene)이다. 각 대기오염물질의 평균농도를 월별로 분석한 결과 서풍이 주 풍향이 되는 10~3월 사이 중에서 모든 대기오염물질의 농도가 높았다. 특히 가장 농도가 낮은 달은 대부분 7, 8, 9월로 나타났다. 이는 청주 지역이 7, 8, 9월에 서풍이 약화되는 점과 관련이 있는 것으로 판단된다. 그리고 청주 지역이 서쪽 외부에서 유입되는 대기오염물질의 영향을 많이 받음을 뜻하는 것이기도 하다. 다만 7, 8, 9월에는 강수로 인한 세정 효과도 있고, 화석연료의 사용도 감소하는 시기이므로, 서풍에 따른 유입효과를 정확히 판단하기 위해서는 청주 외부 지역의 대기질에 대한 조사도 필요하겠다. 반면에 Ni은 9, 10, 11월의 가을철에 높은 농도를 보이는 특이한 현상을 나타내었다.

중금속 오염물질, 가스상 오염물질, 기상인자, 휘발성 유기화합물과 PM_{10} , $PM_{2.5}$ 와의 상관분석을 실시한 결과, PM_{10} , $PM_{2.5}$ 는 중금속 오염물질과 기온에 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. PM_{10} , $PM_{2.5}$ 각각에 상관성이 높은 중금속 물질은 Fe, Mn, Pb, As로 동일하였는데, 상관성이 높은 순서는 서로 다르게 나타났다. 특히 PM_{10} 은 Fe와의 상관계수가 가장 높은 반면에, $PM_{2.5}$ 는 Pb와의 상관계수가 가장 높았다. Fe는 주로 자연적 환경에서 발생하는 물질이고, Pb는 인위적 환경에서 발생하는 물질임을 고려할 때, $PM_{2.5}$ 가 인위적인 배출원의 영향을 많이 받음을 보여주었다. 반면에 서풍이 약화되는 7~8월과 9월에 대해서만 분석하면 전체 기간이나 10~6월과 서로 다른 상관관계를 보이기 때문에, 청주 지역의 대기질이 풍향의 영향을 많이 받는 것으로 판단된다. 전체 기간에 대한 다중선형회귀분석에서도 PM_{10} 은 Fe가 가장 큰 영향을 주는 인자

로 나타났고, $PM_{2.5}$ 는 Pb가 가장 큰 영향을 주는 인자로 나타났다. 결과적으로 PM_{10} 은 Fe, Cr, 기온을 독립변수로 하는 회귀모형을 도출하였고, $PM_{2.5}$ 는 Pb, Fe, Cr, 기온, toluene을 독립변수로 하는 회귀모형을 도출하였다. PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 회귀모형 모두 통계적으로 유의미한 것으로 나타났다. 회귀모형의 95% 신뢰구간에서 벗어나는 값은 PM_{10} 이 3개, $PM_{2.5}$ 가 2개 확인되었고, 2017년 측정치를 PM_{10} , $PM_{2.5}$ 회귀모형에 각각 적용한 결과, $PM_{2.5}$ 의 실측값 1개만 95% 신뢰수준 구간을 벗어나는 것으로 확인되었다. 95% 신뢰수준 구간을 벗어나는 경우는 PM_{10} 의 경우 Fe의 실측값이 특이성을 보이는 경우이고, $PM_{2.5}$ 의 경우 Pb의 실측값이 특이성을 보이는 경우였고, 이 외에는 회귀식이 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 농도를 적절히 예측하는 것을 확인할 수 있었다. 다만, 본 연구는 초미세먼지에 포함된 주성분이 아닌 대기오염물질과 기상인자를 독립변수로 하여 분석한 것이므로 초미세먼지의 주 성분과의 상관분석이 추후 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 충북녹색환경지원센터의 재원과 2023학년도 충북대학교 학술연구영역 사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

References

- Bae, M.a., Woo, J.H., Kim, S.T. (2023) Seasonal PM Management: (II) How Low $PM_{2.5}$ Concentration in South Korea can be Achieved?, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 39(1), 9-23, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2023.39.1.9>
- Baek, K.M., Seo, Y.K., Chung, D.H., Baek, S.O. (2019) Atmospheric Occurrence and Concentrations of PAHs and Heavy Metals in Pohang, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(5), 533-554, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE>.

- 2019.35.533
- Choi, S.H., Choi, S.W., Kim, D.Y., Cha, Y.W., Park, S.W., Lee, S.I., Yoo, E.C. (2021) 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), 133-148, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.36278/jeaht.24.3.133>
- Chungcheongbuk-do (2024) Status of Air Pollutant Emission Facilities ('24. 2. 29). <https://www.chungbuk.go.kr/www/selectBbsNttList.do?bbsNo=76&key=526>. Accessed March 05, 2024, (in Korean).
- Jeon, H.j., Song, M.k., Oh, S.H., Ko, D.H., Yu, G.H., Choe, S.y., Park, C.h., Kim, M.w., Bae, M.S. (2024) Long-Range Elemental Composition Analysis and Seasonal Concentration Characteristics Using ED-XRF: Simultaneous Measurements in Buan and Gochang, Jeollabuk-do, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 40(3), 384-397, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2024.40.3.384>
- Kang, B.W., Kim, M.J., Baek, K.M., Seo, Y.K., Lee, H.S., Kim, J.H., Han, J.S., Baek, S.O. (2018) A Study on the Concentration Distribution of Airborne Heavy Metals in Major Industrial Complexes in Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 32(2), 269-280, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2018.34.2.269>
- Kang, Y.H., You, S.h., Kim, E.h., Bae, M.a., Son, K.w., Kim, S.t. (2021) Local Authority-Level Source Apportionments of PM_{2.5} Concentrations based on the CAPSS 2016: (VIII) Busan and Gyeongnam, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(6), 871-890, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2021.37.6.871>
- Kim, C.H., Kim, J.h., Hwang, K.c., Kim, P.h., Shin, S.H., Park, J.S., Park, S.c., Lee, G.h., Lee, J.Y., Kim, J.B. (2023) Characteristics Analysis of PM_{2.5} in Industrial Complex Near Area According to Domestic and Foreign Influences in Case of High Concentration PM_{2.5} Episode Occurrence, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 39(1), 62-76, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2023.39.1.62>
- Kim, H.-c. (2017) SPSS 21.0 ver. Self-Learning Statistical Analysis, Hakjisa, 266-267.
- Kim, J.S., Hong, S.M., Kim, M.S., Kim, Y.Y., Shin, E.S. (2014) Distribution Characteristics of PM₁₀ and heavy Metals in Ambient Air of Gyeonggi-do Area using Stastical Analysis, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 30(3), 281-290, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2014.30.3.281>
- Koo, Y.S., Choi, D.R., Yun, H.Y., Yoon, G.W., Lee, J.B. (2020) A Development of PM Concentration Reanalysis Method using CMAQ with Surface Data Assimilation and MAI-AC AOD in Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36(4), 558-573, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2020.36.4.558>
- Korea Meteorological Administration (KMA) (2023) Automated Synoptic Observing System (ASOS). <https://data.kma.go.kr/data/grnd/selectAsosRltmList.do>, (in Korean).
- Liu, C., Smith, M.h. (1995) Urban and rural aerosol particle properties, *Journal of Atmospheric Environment*, 29, 3293-3301.
- Ministry of Environment (MOE), National Institute of Environmental Research (NIER) (2024) Guidelines for the Installation and Operation of Air Quality Monitoring Networks, NIER-GP2024-001, (in Korean).
- Park, H.Y., Ahn, J.Y., Park, J.S., Cho, S.Y. (2023) Characteristics of Multi-day PM_{2.5} Episode from 2015 to 2021 in Seoul, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 39(6), 1022-1037, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2023.39.6.1022>
- Rebert, J.F., Welsing, P.R., Rozzi, C. (1994) PM₁₀ and ozone control strategy to improve visibility in the Los Angles basin, *Journal of Atmospheric Environment*, 19, 539-545.
- Seo, J.h., Gweon, J.e., Kim, J.B., Youn, D.o., Kim, K.H., Lee, K.y., Kim, J.Y. (2024) Spatial Correlation Analysis on PM_{2.5} Local Variability in the Chungcheong Area, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 40(1), 131-148, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2024.40.1.131>
- Seo, J.w., Kang, Y.H., Kim, E.h., Jeong, S.e., Kim, J.h., Kim, S.t. (2024) Changes in Domestic Emissions Impact on Provincial PM_{2.5} and NO₂ Concentrations during the 1st to 4th Seasonal PM Management Periods, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 40(2), 242-262, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2024.40.2.242>
- Seong, M.J., Lee, S.S. (2024) Analysis of the correlation between heavy metal concentrations and gaseous pollutants in the ambient air of Cheongju, *Journal of Industrial Science and Technology Institute*, (in press.)
- Yang, W.H., Son, B.S., Kim, Y.S., Choi, K.H., Sohn, J.R., Lee, J.D. (2004) Characteristics of PM₁₀ and Air-borne Metallic Elements in Asan and Seoul, *Korean Journal of Environmental Health Society*, 30(2), 123-132, (in Korean

with English abstract).

Yang, Y.C., Lee, S.H., Park, B.H., Jo, G.U., Yoon, S.H., Park, J.Y., Jang, D., Chong, J.H., Bae, S.J., Jeong, S.K. (2020) Estimation of Heavy Metal Contamination by PM₁₀ Inflow Pathways while Asian Dust in Gwangju, *Journal of Environmental Science International*, 29(1), 55-68, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5322/JESI.2020.29.1.55>

Authors Information

성명제 ((주)한국산업공해연구소 이사, 충북대학교 환경공학과 박사과정) (sungtrue@iipc.co.kr)

이상섭 (충북대학교 환경공학과 교수)
(slee@chungbuk.ac.kr)