

논문

포항시 산업단지 인접 주거지역 대기질의 시공간적 변동: 산업 배출과 기상 조건의 영향

Spatiotemporal Variations in Air Quality in Residential Areas Adjacent to Industrial Complexes in Pohang: Influence of Industrial Emission Sources and Meteorological Conditions

최성득^{1),2),*}

¹⁾울산과학기술원 지구환경도시건설공학과, ²⁾울산과학기술원 동남권 미세먼지연구·관리센터

Sung-Deuk Choi^{1),2),*}

¹⁾Department of Civil, Urban, Earth, and Environmental Engineering,

Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST), Ulsan, Republic of Korea

²⁾Research and Management Center for Particulate Matter in the Southeast Region of Korea,

Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST), Ulsan, Republic of Korea

접수일 2026년 8월 24일

수정일 2026년 8월 28일

채택일 2026년 8월 30일

Received 24 August 2026

Revised 28 August 2026

Accepted 30 August 2026

*Corresponding author

Tel : +82-(0)52-217-2811

E-mail : sdchoi@unist.ac.kr

Abstract The impacts of industrial emissions of criteria air pollutants on residential areas in Pohang were investigated using time-series analysis, spatial interpolation, and correlation analysis of 2024 data from 13 air quality monitoring stations (AQMSs) and surface meteorological observations. Primary pollutants exhibited typical seasonal variations with higher concentrations in cold seasons, but SO₂ also peaked around midday in summer, indicating inland transport from the steel mill and the port by daytime sea breezes. O₃ showed distinct seasonal and diurnal photochemical patterns. Hotspots of PM, SO₂, and CO occurred around the steel mill, the steel industrial complex, and Pohang Port, where the highest annual mean PM_{2.5} concentration (22.8 µg/m³) was observed; only two of the 13 AQMSs met the annual PM_{2.5} standard of 15 µg/m³. Conditional bivariate probability function analysis indicated that the Daedo station was strongly influenced by easterly winds from the steel mill, whereas the Ocheon station was more affected by the steel industrial complex under northwesterly winds. Spearman correlation analysis revealed contrasting patterns between the two stations. At Daedo, PM_{2.5} correlated slightly more strongly with NO₂ (0.52) than with CO (0.48), suggesting a greater traffic influence, whereas at Ocheon, PM_{2.5} correlated more strongly with CO (0.62), consistent with a substantial contribution from industrial combustion sources. O₃ showed an opposite spatial distribution attributed to NO titration, being lowest at Pohang Port (25.8 ppb) and highest at Yangdeok (41.4 ppb). Overall, these results suggest that air quality in residential areas in Pohang is strongly influenced by the locations of emission sources and local wind conditions, highlighting the need for site-specific air quality management near industrial complexes.

Key words: CAPs, PM_{2.5}, SO₂, Industrial emissions, AQMS

1. 서 론

우리나라는 1991년 대기환경보전법 시행 이후 연료 정책과 자동차 배출 규제 등 다각적인 노력을 통해 대기질을 개선해 왔다(Yeo and Kim, 2019). 특히, 대표

적인 1차 배출 기준성 대기오염물질(Criteria Air Pollutants, CAPs)인 이산화황(SO₂)의 농도는 1990년대 후반부터 대기환경기준을 충족하였으며, 이산화질소(NO₂) 농도는 1990~2010년대까지 비슷한 수준으로 유지되다가 2020년대에 급격히 감소하였다(NIER,

2025). 일산화탄소(CO) 농도는 1990년대에 급격히 감소하여 2000년대부터는 비슷한 수준으로 유지되고 있다. 초미세먼지(PM_{2.5})와 미세먼지(PM₁₀) 농도도 지난 30여 년간 감소해 왔다. 그러나 2017~2019년을 중심으로 고농도 사례가 빈번하게 발생하여 재난 및 안전관리 기본법에 따라 미세먼지가 사회재난으로 지정되는 등 국민적 관심사가 되었다. 한편, 2차 생성 오염물질인 오존(O₃) 농도는 이와 반대로 꾸준히 증가하여 환경기준을 초과하는 사례가 빈번하다(Lee *et al.*, 2020). 그럼에도 불구하고, 정부의 효과적인 환경정책 시행에 따른 1차 오염물질의 배출량 감소와 이로 인한 대기질 개선은 큰 성과라고 할 수 있다.

대기질 장기 추세와 환경기준 달성 여부를 평가하고 지역별 오염원 영향을 파악하는 데는 대기환경 측정소(Air Quality Monitoring Station, AQMS)의 역할이 매우 중요하다(Choi, 2022). 에어코리아(<https://www.airkorea.or.kr>)에 따르면, 각 시도보건환경연구원이 운영하는 도시대기측정소는 2026년 현재 532개소로, 대도시를 중심으로 측정망의 공간해상도가 높은 수준이다. 이에 따라, 도시별 대기환경측정소 자료를 이용하면 과거에 비해 도시 전반적인 오염수준뿐만 아니라 주요 배출원이 주변 주거지역의 대기질에 미치는 영향을 더 상세히 파악할 수 있다(Clarke *et al.*, 2014). 이 선행 연구에서는 산업도시 전반의 오염원 영향을 평가하기 위한 방법론 개발에 중점을 두었으나, 측정망 자료를 활용하여 배출원과 수용원 간의 영향 관계를 지점별로 규명하는 데에는 한계가 있었다.

포항시는 포스코 포항제철소와 철강산업단지가 도심에 인접한 대표적인 철강 산업도시이다. 다른 대도시와 마찬가지로 포항에서도 과거에 비해 대기질이 크게 개선되었으나, 산업단지와 주거지역(대도동, 오천읍, 청림동 등)이 형산강이나 도로를 경계로 인접해 있어 산업 배출에 따른 주민 건강 영향 우려가 지속적으로 제기되고 있다(Ju *et al.*, 2026). 특히 제철소에서 발생한 오염물질은 해풍에 의해 도심으로 수송될 가능성이 크며, 산으로 둘러싸인 분지 형태의 지형적 특성상 오염물질의 정체와 국지적 순환이 빈번하게 발

생할 수 있다(Jung *et al.*, 2012; Choi *et al.*, 2005). 선행 연구(Jung *et al.*, 2012)에서는 지역 규모의 대기순환모델을 사용하여 AQMS의 위치 적정성을 평가하였으나, 실제 측정 자료를 바탕으로 산업 배출과 주거지역의 노출 특성을 평가하지는 않았다. 따라서 포항의 대기질을 효과적으로 평가하기 위해서는 농도 분포와 환경기준 초과 여부를 파악하는 데 그치지 않고, 기상 조건에 따른 오염물질의 이동과 배출원 영향을 측정소별로 분석하여 주민 노출 관점에서 대기질 관리 정책을 수립해야 한다.

본 연구에서는 포항시 대기환경측정망 자료를 활용하여 산업단지 인접 주거지역 대기질의 시공간적 변동을 종합적으로 평가하였다. 구체적으로는 (1) 기준성 대기오염물질의 시계열 변동, (2) 오염물질별 공간 분포, (3) 주요 주거지역별 오염원 영향을 파악하였다. 이를 통해 포항제철소와 포항철강산업단지 주변 지역의 대기오염 현황을 파악하고, 지역별 배출원 영향을 고려한 대기질 관리 정책 마련을 위한 기초 자료를 제공하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1 기준성 대기오염물질 및 기상 자료

포항시 대기질 현황을 파악하기 위해 에어코리아에서 제공하는 13개 대기환경측정소의 2024년(1월 1일~12월 31일) 기준성 대기오염물질(PM_{2.5}, PM₁₀, SO₂, NO₂, CO, O₃) 측정 자료를 수집하였다. 포항시 대기환경측정망은 도시대기측정소 11개소, 도로변대기측정소 1개소, 향만측정소 1개소로 구성되어 있다. 해당 측정망에 설치되어 있는 각 기기의 원리, 측정범위, 검출 한계 등의 구체적인 사양은 부록(표 S1)에 제시하였다. 13개 측정소의 물질별 유효 시간자료 수, 결측률, 기술통계치는 표 S2~S4에 제시하였다. 유효 자료 획득률은 91.5~98.9% (평균: 98.0%)로 전반적으로 높았다. 포항향 측정소에서 결측률이 가장 높았지만, 이 측정소는 주거지역의 대기오염 특성을 분석하기 위한

대상에 포함되지 않아 전체적인 결과 해석에는 큰 영향을 주지 않았다. 대부분의 측정소에서 자료 획득률이 높았기 때문에 결측치는 별도로 보간하지 않고 자료처리 과정에서 제외하였다. 결측은 측정소별로 대부분 25~35시간 동안 모든 물질에 대해 동시에 발생하였으므로, 이는 측정소 정기점검에 따른 것으로 판단하였다. 주요 결측 구간 전후의 농도 변화를 측정소별로 비교한 결과, 결측이 발생한 측정소뿐만 아니라 인근 측정소에서도 유사한 농도 변화가 나타났다. 이러한 결과를 고려할 때, 결측 자료가 계절적 변동성이나 오염원 평가 결과에 미치는 영향은 크지 않은 것으로 판단된다. 본 연구에서는 모든 측정소의 시간별 농도 자료를 확보하였으나, 산업단지와 주거지역 간의 오염물질 수송 특성을 규명하기 위해, 제철소와 철강 산업단지 경계에 위치하며 인체 노출 차원에서 해당 지역을 대표할 수 있는 대동동, 청림동, 대송면, 오천읍 측정소에서 산출된 자료를 중점적으로 해석하였다.

기준성 대기오염물질의 확산과 거동에 영향을 미치는 기상 요인을 분석하기 위해 기상자료개방포털(<https://data.kma.go.kr>)에서 포항 종관기상관측소(ASOS, 지점번호 138)의 시간별 풍향, 풍속, 기온, 상대습도, 강수량 자료를 확보하였다. 대기질과 기상 자료는 시간 단위로 동기화하여 상관분석과 오염원 추적 모델의 입력 자료로 사용하였다.

2.2 자료처리 방법

포항시의 지리적 조건과 기준성 대기오염물질 공간 분포를 시각화하기 위해 지리정보시스템(Geographic Information System, GIS) 소프트웨어인 ArcGIS Pro 3.6.1 (Esri, USA)을 사용하였다. 대기환경측정소와 종관기상관측소 좌표를 위성 지도상에 입력하여 해당 관측소의 위치를 표시하였으며, 기준성 대기오염물질의 공간분포를 효과적으로 파악하기 위해 역거리 가중(Inverse Distance Weighting, IDW) 보간법을 적용하여 오염물질별 분포 지도를 작성하였다. 이를 통해 산업단지 인근의 국지적 고농도 핫스팟(hotspot)과 주거지역과의 상대적인 농도 구배를 파악하였다. 다만

측정소 사이의 보간 결과는 관측값에 기반한 추정치이므로, 측정소가 설치되지 않은 산업단지 내부와 교외 지역에서는 보간 농도의 불확실성이 크다. 그러므로 이 보간 지도는 전체적인 오염 분포를 파악하기 위한 시각적 도구로만 활용하였다.

바람장미, 시계열 그래프, 달력 그림, 조건부 이변량 확률함수(Conditional Bivariate Probability Function, CBPF) 분석에는 R (version 4.5.2)의 오픈소스 패키지인 openair (version 2.19.0)를 이용하였다. CBPF를 활용하여 상위 고농도(90th percentile)에 해당하는 풍향과 풍속 조건을 도출하고, 이를 바탕으로 배출원 종류와 위치를 추정하였다(Uria-Tellaetxe and Carslaw, 2014).

Shapiro-Wilk 정규성 검정을 실시한 결과, 모든 오염물질 농도 자료가 비정규 분포를 나타냈다($p < 0.01$). 이에 따라 정규분포 가정이 필요 없는 비모수적 방법인 스피어만(Spearman) 상관분석을 적용하였다. 상관계수(r_s)와 통계적 유의성 평가에는 R 기본 함수(cor, cor.test)를 사용하였으며, 유의수준(p)은 0.05와 0.01을 선택하였다. 모든 통계 분석은 추가 패키지 없이 R 기본 환경에서 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 포항의 입지 조건

포항시 도심은 영일만을 중심으로 형성된 해안 평탄지에 위치하고, 시 외곽은 산악지대로 둘러싸인 복합지형 특성을 나타낸다(그림 1). 대기오염물질의 주요 배출원인 포항제철소는 철광석과 석탄을 해상을 통해 반입하며, 포항신항과 인접 전용부두에서 하역한다. 제철소 서쪽(도심과 형산강 인접 지역)에는 고로, 코크스 공정, 소결 공정이 배치되어 석탄 기반 연소와 열처리 과정에서 생성되는 오염물질이 주로 배출되며, 동쪽(청림동 인근)에는 열연 및 냉연 공정이 위치하여 철강 가공과 표면처리 과정에서 발생하는 오염물질이 배출된다. 또한, 제철소 외부 동쪽에 인접한 청림지구는 1차 금속, 비금속, 화학 산업(OCI 등)

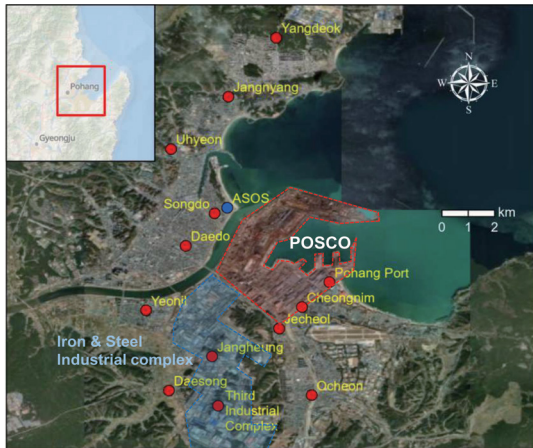


Fig. 1. Locations of 13 air quality monitoring stations (AQMSs), the automated synoptic observing system (ASOS), and major industrial complexes in Pohang, South Korea.

이 밀집해 있어 산업 배출의 영향을 많이 받는다. 제철소 남쪽으로는 포항철강산업단지가 위치하며, 전기로를 가동 중인 현대제철과 동국제강을 비롯하여 세아제강(강관 제조), TCC 스틸(표면처리강판 제조), 벡스틸(철강관 제조) 등 다수의 대형 철강업체와 금속가공 제조업체가 상시 조업하고 있다. 포항철강산업단지 입주 업체 현황과 배치도는 포항철강산업단지 관리공단(<http://www.phsic.or.kr/>)에서 확인할 수 있다.

주요 주거지역인 대도동, 해도동, 송도동은 형산강을 경계로 포항제철소와 마주하고 있으며, 제철소 경계로부터 직선거리 약 1~2.5 km 이내에 인접해 있다. 제철소 동쪽의 청림동은 제철소뿐만 아니라 청림지구의 산업 배출 영향을 동시에 받을 수 있다. 한편, 연일읍과 오천읍 등은 포항철강산업단지에 인접해 있으며, 특히 오천읍 일대는 폐기물 처리시설도 밀집해 있고 최근 대규모 아파트 단지가 조성됨에 따라 산업 관련 대기오염에 대한 민원이 지속적으로 제기되는 지역이다.

포항시 관내 도시대기측정소는 남구(9개소)와 북구(2개소)를 포함하여 총 11개소가 운영 중이다(NIER, 2025). 용도지역별로는 상업지역(1개소: 장량동), 주거지역(5개소: 대도동, 대송면, 송도동, 오천읍, 연일읍),

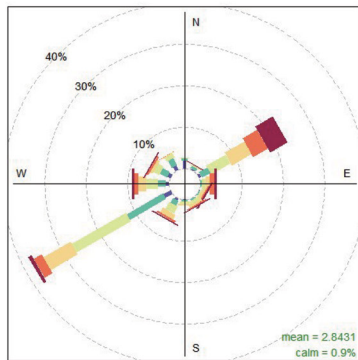
공업지역(4개소: 장흥동, 3공단, 청림동, 제철동), 녹지지역(1개소: 양덕동)에 분포하고 있다(그림 1). 또한, 북구에 도로변대기측정소(1개소: 우현동)와 남구에 항만측정소(1개소: 포항항)가 설치되어 총 13개 측정소가 기준성 대기오염물질을 측정하고 있다. 측정소 배치는 도심과 교외지역을 고르게 포괄하고 있으며, 주거지역과 산업단지의 지리적 인접성을 고려할 때 산업 배출 영향을 파악하기에 적절하다(Choi, 2022; Jung *et al.*, 2012).

2024년 바람장미 분석 결과, 포항에서는 연간 남서풍과 북동풍이 우세한 이봉형 풍향 분포를 보였다(그림 2). 이러한 경향은 과거 10년 자료(기상청 기상자료 개방포털 바람장미)에서도 일관되게 나타났으므로, 포항의 전형적인 풍향 분포라고 할 수 있다. 계절별로는 여름철에 남서풍이 감소하고 북동풍이 증가하는 반면, 겨울철에는 남서풍이 증가하였다. 일반적으로 겨울철에는 북서 계절풍이 우세하지만, 포항 인근 산악지형의 영향으로 북서풍이 직접 유입되지 못하고 형산강 지구대를 통과하여 포항 시내로 남서풍이 유입되는 것으로 해석할 수 있다. 주간에는 동풍과 북동풍 계열의 해풍이 증가하고, 야간에는 남서풍 계열의 육풍이 증가하였다. 이러한 풍향 조건과 산업단지의 위치를 고려할 때, 여름철과 주간에는 산업단지에서 배출된 오염물질이 해풍에 의해 내륙으로 이동할 가능성이 높다. 한편, 남동풍과 북서풍의 빈도는 상대적으로 낮으므로, 이들 풍향에 의한 산업단지 배출의 영향은 포항시 전반적인 연평균 농도 측면에서는 다소 제한적일 것이다. 이러한 결과는 대기확산모델을 사용한 선행 연구에서도 보고된 바 있다(Choi *et al.*, 2007, 2005). 다만 출현 빈도가 낮더라도 해당 풍향이 우세한 시간대에는 풍하 주거지역에서 단기 고농도가 발생할 수 있으므로, 풍향·풍속에 따른 고농도 현상은 3.3절에서 CBPF 분석을 통해 상세히 검토하였다.

3.2 기준성 대기오염물질의 시계열 변화

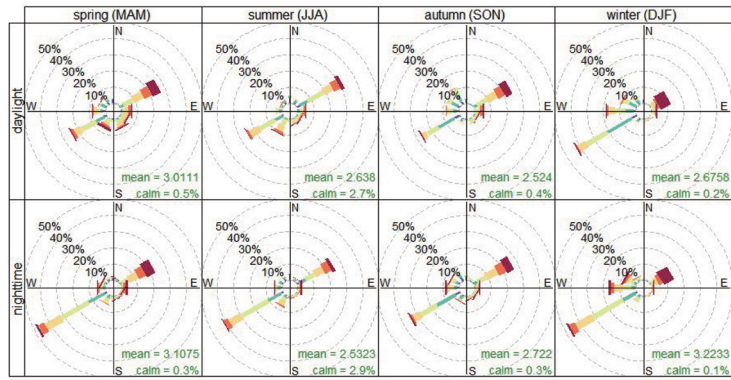
포항시 13개 대기환경측정소의 2024년 일평균 기준성 대기오염물질 농도를 시계열로 나타내었다(그림

(a) Annual



Frequency of counts by wind direction (%)

(b) Seasonal



Frequency of counts by wind direction (%)

Fig. 2. Seasonal and diurnal wind patterns in Pohang in 2024. Meteorological data were obtained from the ASOS (ID 138) operated by the Korea Meteorological Administration.

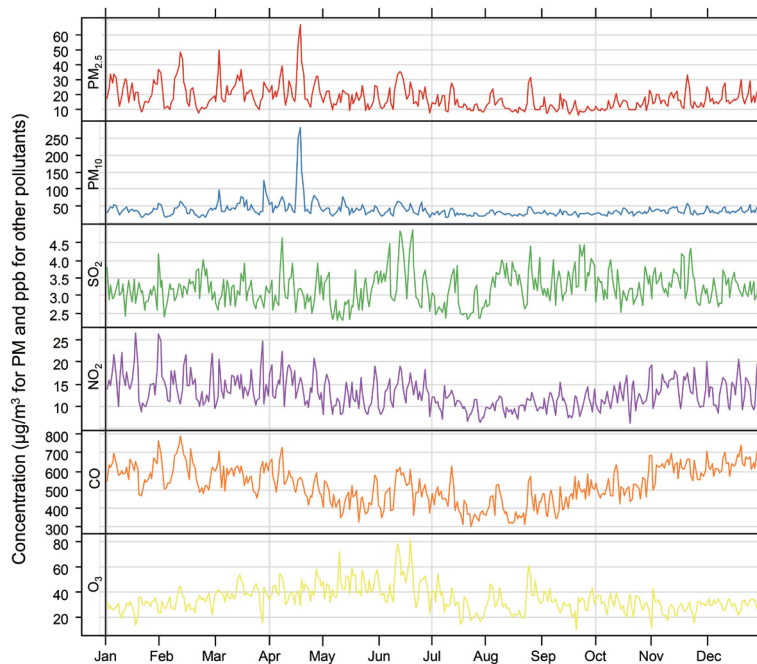


Fig. 3. City-averaged daily concentrations of criteria air pollutants from 13 AQMSs in 2024.

3). $PM_{2.5}$ 와 PM_{10} 농도는 주로 겨울(12~2월)과 봄(3~4월)에 상대적으로 높았으며, 단기적인 고농도 사례들도 관찰되었다. SO_2 농도는 다른 1차 배출 오염물질과

달리 6월에 가장 높은 농도를 보이다가 7월에 급감하는 큰 변동을 보였다. NO_2 와 CO 농도는 겨울철에 높고 여름철에 낮은 전형적인 동고하저의 계절 변동을

보였으며, 특히 11~2월에 높은 수준이 유지되었다. 반면, O_3 농도는 늦봄부터 초여름(5~6월) 사이에 가장 높은 수준을 보였고, 이후 가을과 겨울로 갈수록 감소하였다. 이러한 전반적인 계절변화는 난방용 연료 사용에 의한 1차 배출, 봄철 황사, 주풍향 변화에 의한 산업 배출 영향 증가, 여름철 2차 생성 등으로 설명할 수 있으며, 인근에 위치한 울산에서의 계절별 오염 경향과 유사하다(Clark et al., 2014; Lee et al., 2011).

기준성 대기오염물질의 일별 농도 수준을 달력 그림으로 표출하여 물질별 오염 경향을 날짜별로 효과적으로 비교하였다(그림 4). $PM_{2.5}$ 는 1~4월에 겨울철 난방과 봄철 황사의 영향을 받은 전형적인 고농도 사례를 보였으며, 6월 11~15일에도 상대적으로 고농도가 관측되었다. 6월 고농도 기간에는 SO_2 , NO_2 , CO, O_3 농도도 증가하였는데, 이는 여름철 대기청제 시 1차 배출 오염물질이 축적되고 강한 일사량으로 2차 생성이 증가하여 $PM_{2.5}$ 와 O_3 농도가 함께 상승한 것으로 해석된다. 산업 배출과 2차 생성으로 인한 여름철 $PM_{2.5}$ 고농도 현상은 울산에서도 보고되었다(Lee et al., 2023). 4월 16~18일에는 PM_{10} 농도가 급증하였으며, 이는 황사 유입의 영향이었다. SO_2 의 경우에는 6월에 집중적으로 고농도 사례가 나타났다. 일반적으로 SO_2 농도는 화석연료 사용량이 많은 겨울철에 높지만, 국내 임해공업지역에서는 여름철 계절풍의 영향과 일사량 증가에 따른 해륙풍 발달로 산업단지와 항만(특수차량과 선박 중유연소)에서 배출된 오염물질이 내륙지역으로 수송되며 고농도 현상이 발생할 수 있다(Lee et al., 2024; Lee et al., 2011). NO_2 와 CO 농도는 늦가을부터 증가하여 겨울에 높은 수준을 보이고 여름에 감소하는 전형적인 동고하저 계절변동을 나타냈다. 이러한 경향은 겨울철 난방 수요 증가와 광화학 반응 감소에 의한 것으로 해석된다(Clark et al., 2014). 반면, O_3 농도는 4월부터 상승하여 일사량이 많은 6월에 가장 높은 수준이었는데, 이는 강한 일사량과 높은 기온 조건에서 NO_x 와 휘발성유기화합물의 광화학 반응이 활발하기 때문이다(Kim et al., 2023). 이후 7월에는 연중 최대 강수량(271 mm)과 일사량 감소로 O_3 농도

가 감소하는 경향을 나타냈다. 8월 평균 기온($28.3^{\circ}C$)은 연중 가장 높았으나 상대습도(75.3%)가 높아 OH 라디칼 생성에 의한 오존 소멸(Hu et al., 2011) 등의 영향을 받은 것으로 추정된다. 이후 가을과 겨울에는 일사량이 급격하게 감소하여 광화학 반응이 억제되면서 낮은 농도 수준을 유지하였다. 이와 같은 내용을 종합하면, 포항의 대기질은 전형적인 동해안 임해공업지역의 오염 경향을 따르고 있다.

기준성 대기오염물질의 추세를 상세히 파악하기 위해 포항제철소 서쪽에 위치한 대도동 측정소의 농도 자료를 표준화하여 시계열로 도식화하였다(그림 5). 일주기 변동을 분석한 결과, 차량 배출 영향을 직접적으로 받는 NO_2 와 CO는 출퇴근 시간대인 오전 8시와 오후 8시 전후로 농도가 급증하였다. $PM_{2.5}$ 와 PM_{10} 도 다소 약하지만 이와 유사한 추세를 보였으므로, 산업 배출 외에도 도심 차량 배출에 의한 기여가 상당한 것으로 해석된다. 반면, 석탄을 사용하는 산업 공정과 중유를 사용하는 선박에서 주로 배출되는 SO_2 는 정오 전후로 높은 수준을 유지하였다. 이는 대도동 측정소 동쪽에 위치한 포항제철소와 항만에서 배출된 SO_2 가 주간에 발달한 해풍을 따라 형산강을 넘어 내륙 주거지역으로 수송되었기 때문으로 해석된다. O_3 농도는 일사량이 가장 강한 오후 2~4시 사이에 농도가 가장 높아 전형적인 광화학 반응 기작을 나타내었다(Clark et al., 2014). 요일별 변동의 경우, $PM_{2.5}$, PM_{10} , NO_2 , CO 농도는 목~금요일에 가장 높았으며(물류 수송량 집중과 통행량 변동으로 추정됨), 주말에는 교통량 감소로 인해 농도가 크게 감소하였다. O_3 농도는 NO_2 농도가 낮은 주말에 증가하는 주말 효과를 보였는데, 이는 차량 운행이 감소하여 NO에 의한 오존 적정 효과($NO + O_3 \rightarrow NO_2 + O_2$)가 약화되면서 오존 소멸량이 줄어들었기 때문이다(Clark et al., 2014). 다만, 토요일과 일요일을 비교하면 일요일에 NO_2 농도가 추가로 크게 감소함에도 O_3 농도는 증가하지 않고 오히려 소폭 낮아지는 경향을 보였다. 이 결과는 NO_x 농도가 특정 수준 이하로 낮아지면서, 광화학 반응에 필요한 전구물질 공급이 부족한 NO_x 제한 조건으로

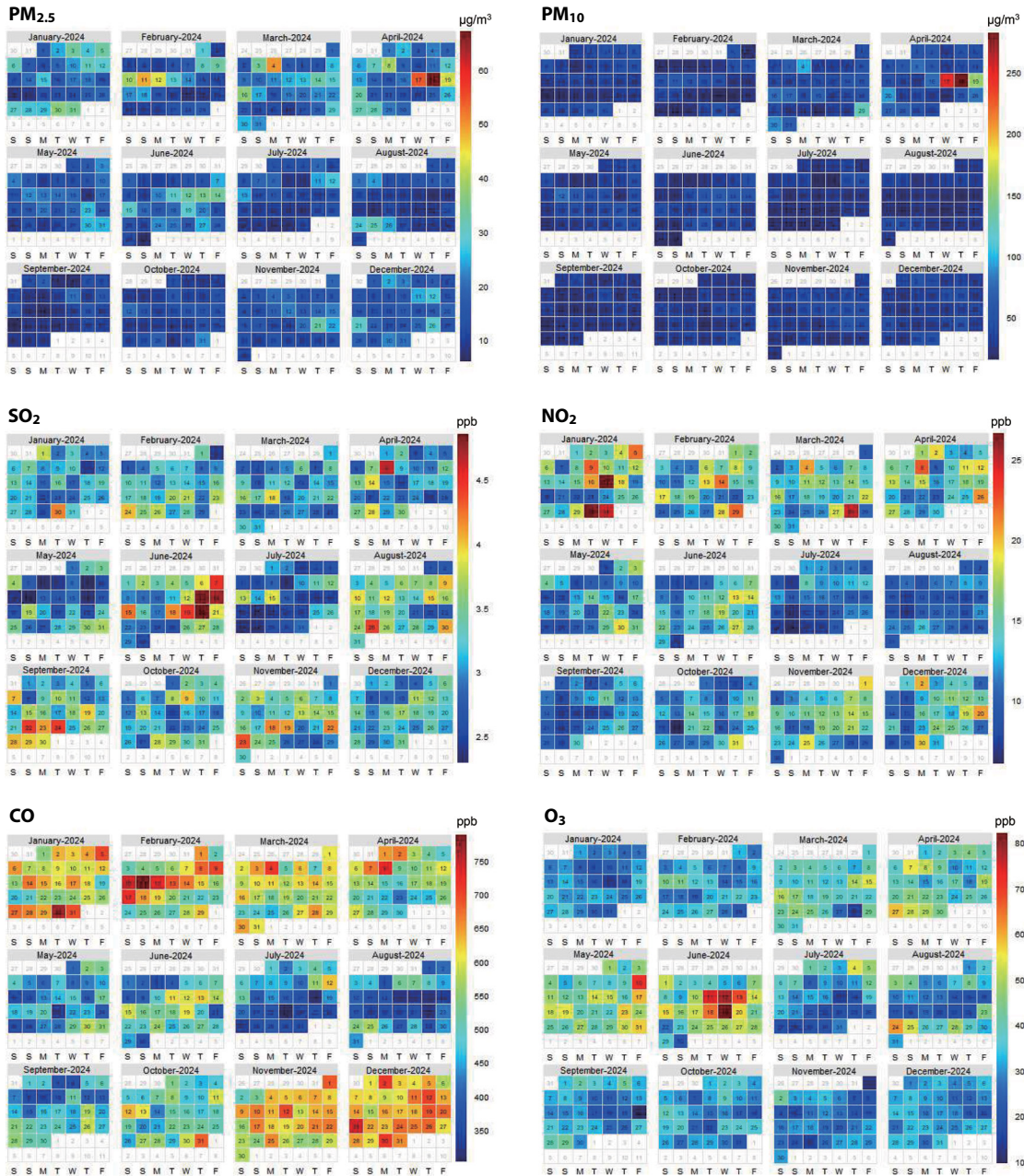


Fig. 4. Calendar plots of city-averaged daily criteria air pollutant concentrations from 13 AQMSs in 2024.

전환된 것으로 설명할 수 있다(Seinfeld and Pandis, 2016).

3.3 기준성 대기오염물질의 공간분포와 산업 배출 영향

지점별 연평균 농도의 보간 결과에 의하면, 주요 산

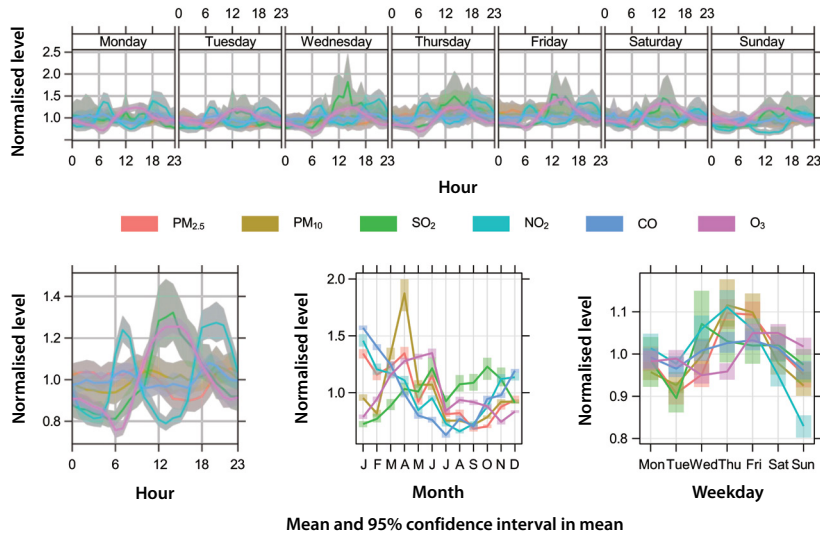


Fig. 5. Diurnal, weekly, and seasonal patterns of normalised criteria air pollutant concentrations at the Daedo station in 2024.

업시설의 위치와 배출 특성에 따라 오염물질별로 뚜렷한 지역적 차이가 관찰되었다(그림 6). 산업 공정 및 연료 연소와 밀접한 관련이 있는 $PM_{2.5}$, PM_{10} , SO_2 , CO는 포항제철소 인근에서 가장 높은 농도를 나타내었다. 특히, 포항항 측정소의 연평균 농도는 $PM_{2.5}$ ($22.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$), PM_{10} ($55.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$), SO_2 (5.7 ppb), CO (666 ppb)로서 전체 지점 중 최고 농도를 기록하며 산업 배출뿐만 아니라 항만 활동의 대기질 영향이 매우 큰 것을 확인하였다. 또한, 청림동 ($PM_{2.5}$ $18.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, PM_{10} $47.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, SO_2 4.6 ppb, CO 561 ppb)과 제철동 ($PM_{2.5}$ $19.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, PM_{10} $39.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, SO_2 3.7 ppb, CO 582 ppb)에서도 비교적 농도가 높았다. $PM_{2.5}$ 는 산업단지뿐만 아니라 오천읍 ($20.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$)과 송도동 ($19.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 등 주거지역에서도 상대적으로 고농도를 보여 다른 오염물질에 비해 국지적 배출 영향범위가 넓은 것으로 판단된다. 반면, CO는 일반적인 도심지역보다 산업단지 내부와 인접 지역에서 고농도를 나타내어 차량 배출보다는 산업활동에 의한 기여가 큰 것으로 해석하였다. 이와 대조적으로 NO_2 는 포항항 (23.9 ppb) 외에도 교통량이 많은 우현동 도로변대기측정소 (17.7 ppb)에서 상대적으로 높은 농도가 유지되어 차량 배출의 영향을 확인

하였다. 한편, O_3 농도는 일차 오염물질 배출이 집중된 포항항 (25.8 ppb)에서 최저였으며, 가장 북쪽에 위치한 양덕동 (41.4 ppb)과 장량동 (39.6 ppb) 측정소에서 최고 수준이었다. 이 두 측정소는 주변에 아파트 단지와 녹지가 많이 있으며 포항제철소 및 철강산업단지에서 가장 멀리 떨어져 있으므로 1차 오염물질의 직접적인 배출 영향을 적게 받은 것으로 보인다. 다만 아래에서 설명하는 바와 같이 산업과 도심지역에서 배출된 전구물질이 풍하 방면으로 수송되는 과정에서 광화학 반응을 거치므로, 2차 생성 측면에서는 산업 배출의 간접적인 영향을 받는 것으로 해석된다. 산업지역에서는 NO 배출에 의한 오존 적정 효과로 인해 O_3 농도가 낮지만, 산업단지 외곽에서는 풍하측으로 수송된 전구물질들이 광화학 반응을 거쳐 O_3 농도를 증가시킨 것으로 해석할 수 있다. 이와 같은 현상으로 인해 NO_2 와 O_3 의 공간분포는 전반적으로 반대 경향을 보였다. 개별 물질의 연평균 농도와 연간 대기환경기준 ($PM_{2.5}$ $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$, PM_{10} $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, SO_2 20 ppb, NO_2 30 ppb)을 비교한 결과, 장량동과 대송면 측정소에서만 $PM_{2.5}$ 연간 기준을 충족하였다. PM_{10} 은 포항항 ($55.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$)에서만 기준을 초과하였으며, 그 외 모든 지점

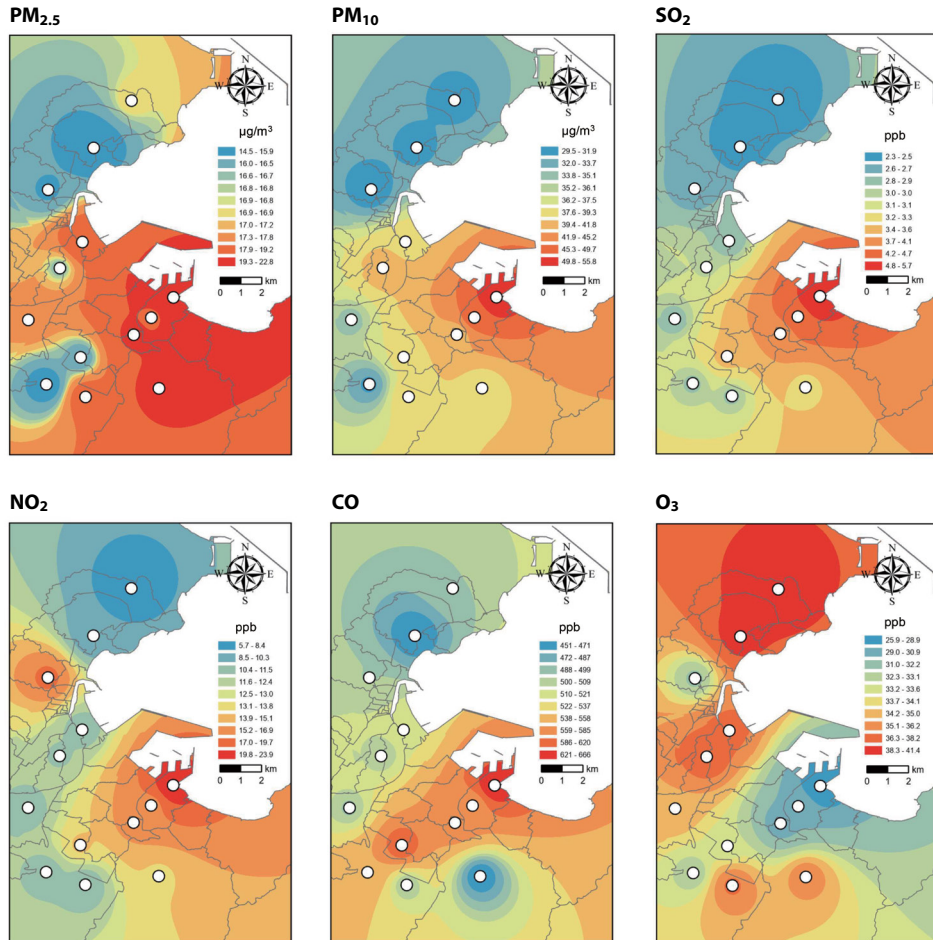


Fig. 6. Annual mean spatial distributions of criteria air pollutants in 2024, estimated using inverse distance weighting (IDW).

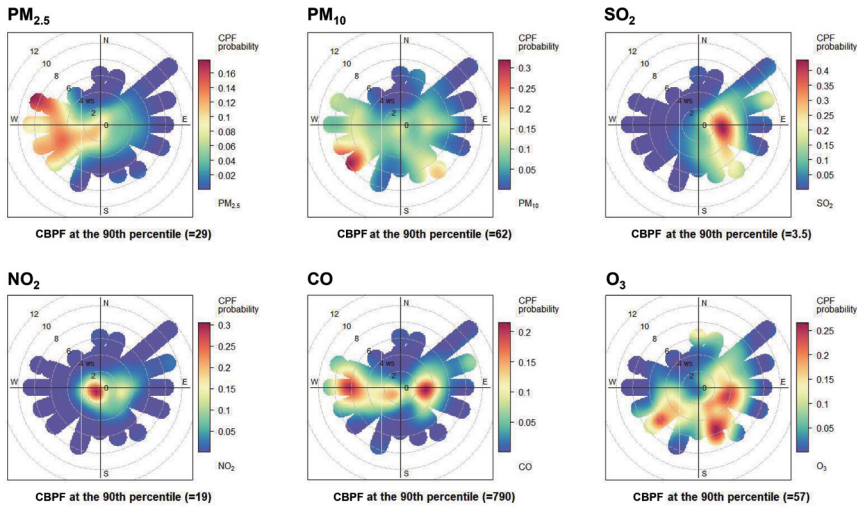
의 PM_{10} , SO_2 , NO_2 농도는 기준을 충족하였다. 포항항은 제철공정과 항만 배출 외에 석탄 야적장의 영향으로 비산먼지 농도가 높은 지점이다(Go *et al.*, 2024).

산업단지 경계와 대표 주거지역(대도동, 대송면, 오천읍, 청림동)에 대한 CBPF 분석 결과를 그림 7에 제시하였다. 포항의 대표적 주거지역인 대도동은 산업단지와 도심 교통의 복합적인 영향을 나타냈다. $PM_{2.5}$ 와 PM_{10} 은 강한 풍속(>6 m/s)의 북서풍과 남서풍에 의해 고농도 확률이 관찰되어, 산업단지보다는 외부 유입(항사와 장거리 수송)이 고농도 현상의 주요 요인이었다. 반면, 고농도 SO_2 는 동풍 계열의 영향을 받았는데,

측정소 동쪽에 위치한 포항제철소의 석탄연소와 항만 배출 영향을 받은 것으로 해석할 수 있다. NO_2 는 풍속이 낮은 CBPF 그림 중심부에 고농도 확률이 집중되어 주거지역 난방과 인근 도로의 교통 배출 영향으로 해석할 수 있으며, CO는 동쪽(포항제철소)과 서쪽(도심)의 양방향 오염원이 확인되었다. 한편, O_3 농도는 남서풍과 남동풍 조건에서 높았으며, 이 결과는 풍하층에서의 광화학 반응과 전구체 수송의 영향을 반영하는 것으로 판단된다.

철강산업단지 3단지에 인접한 대송면은 산업활동에 의한 직접적인 영향을 보였다. $PM_{2.5}$ 와 PM_{10} 은 남

(a) Daedo



(b) Daesong

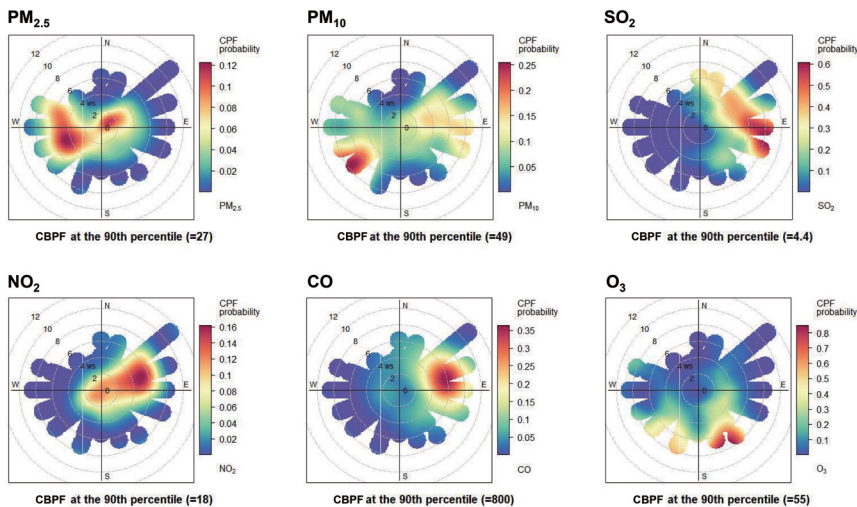
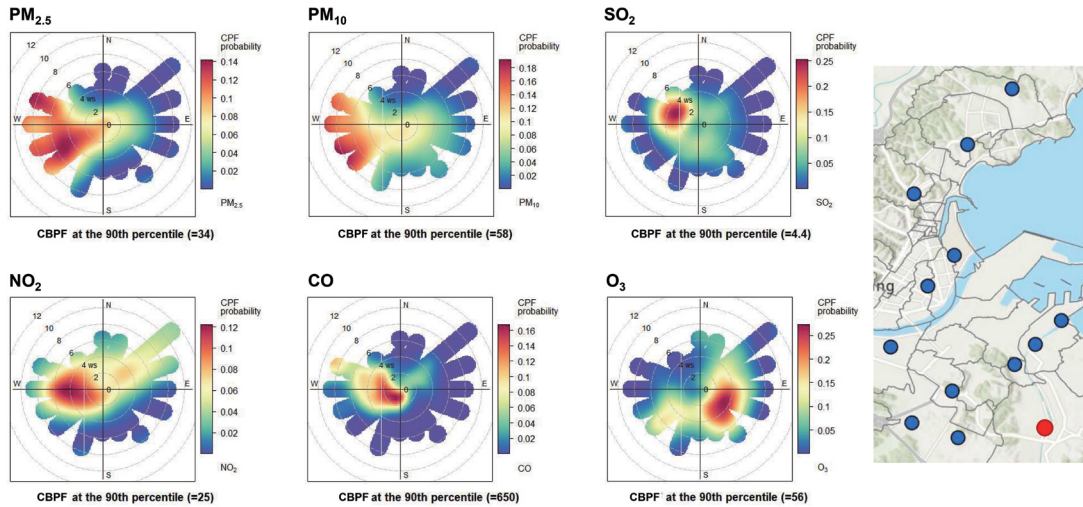


Fig. 7. Polar plots of criteria air pollutant concentrations at four selected AQMSs, derived from the conditional bivariate probability function (CBPF). Hourly data in 2024 were used.

서풍뿐만 아니라 북동풍의 영향으로 고농도 확률이 나타나 인근 산업 배출을 반영하였다. SO₂, NO₂, CO 역시 북동풍 영향으로 고농도 확률을 보여 산업활동의 영향을 강하게 받는 것을 확인하였다. O₃의 경우, 강한 풍속(6~8 m/s)의 남서와 남동풍에 의해 상대적으로 높은 농도 확률을 보였으므로 외부 유입 영향을 나타내었다.

산업단지 남동쪽에 위치한 주거지인 오천읍에서는 북서풍에 의해 O₃를 제외한 모든 오염물질 농도가 증가하는 현상이 나타났다. 이는 철강산업단지와 포항제철소에서 배출된 오염물질이 북서풍에 의해 오천읍으로 유입되는 것을 의미한다. 포항에서는 북서풍이 주풍이 아니지만 북서풍이 강한 일부 시간대에 산업단지에서 배출된 다량의 오염물질이 오천읍으로 유입되

(c) Ocheon



(d) Cheongnim

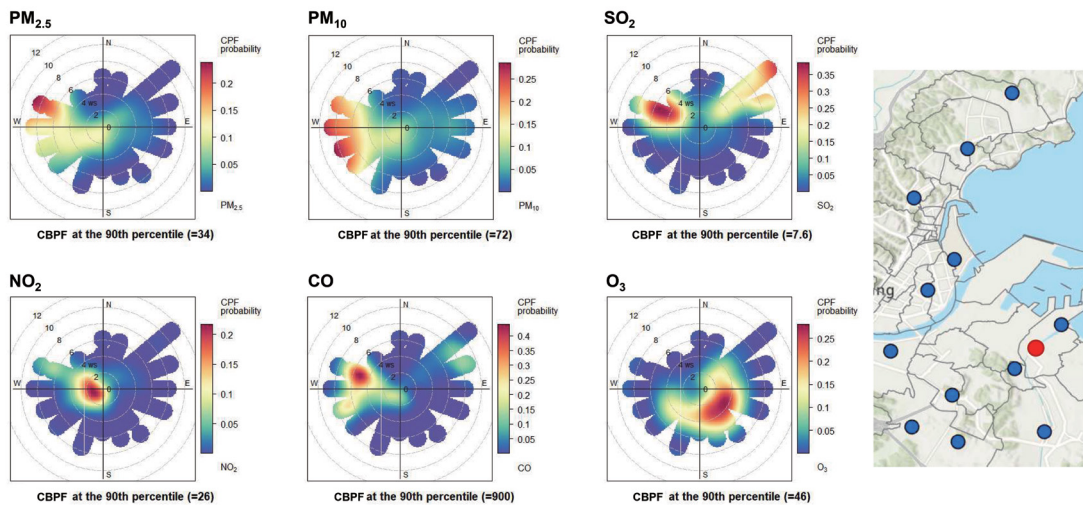


Fig. 7. Continued.

는 것으로 해석할 수 있다. 반면, O₃는 남동 계절 해풍 유입 시 높은 농도를 보였다. NO 농도가 낮은 해풍이 유입되고 산악지역을 통과하면서 적정 효과가 감소하여 내륙지역에서 O₃ 농도가 증가한 것으로 보인다.

청림동 측정소는 포항제철소, 포항신항, 청림지구, 산업로와 인접해 있으므로 도시대기측정소 중에서 PM₁₀, SO₂, NO₂ 농도가 가장 높은 지점이다. 오천읍

측정소와 마찬가지로 O₃를 제외한 모든 물질의 농도가 북서풍의 영향으로 높아졌으므로 포항제철소의 영향을 많이 받는 것을 확인하였다. 또한, SO₂는 북동풍에 의해서도 고농도가 나타났는데, 이는 청림지구와 항만 배출의 영향으로 판단된다. O₃는 오천읍에서와 동일한 결과를 보였다.

위의 결과를 종합하면, 1차 배출 오염물질들은 풍향

에 따라 포항제철소와 철강산업단지의 영향을 직접적으로 받고 있다. 특히, $PM_{2.5}$ 와 PM_{10} 농도는 산업단지 전반의 영향과 외부 유입 효과를 광범위하게 받지만, SO_2 농도는 외부 영향보다는 산업 배출원의 영향을 풍향에 따라 민감하게 반영하였다. 이러한 결과는 배출원 특성, 측정소 위치, 풍향이 주거지역의 대기질을 결정하는 핵심 인자라는 것을 의미한다. 한편, O_3 의 경우에는 국지적 배출보다는 적정 효과 완화와 전구물질 수송에 의한 2차 생성이 고농도의 주요 원인이라고 할 수 있다.

3.4 풍향과 상관계수 기반의 배출원 영향 파악

주요 산업단지로부터의 영향과 인구를 고려하여 대도동과 오천읍 측정소의 $PM_{2.5}$ 와 SO_2 농도에 대해 추가적인 해석을 실시하였다. 대도동 측정소에서는 오

염물질별로 기여 풍향의 계절적 차이를 확인하였다(그림 8a). 고농도 $PM_{2.5}$ 는 겨울철과 봄철에 국지적 수송과 장거리 외부 유입의 영향으로 서풍(W)과 남서풍(SW) 계열의 빈도가 높았다. 반면, 여름철에는 북동풍(NE) 계열에 의한 고농도 사례가 자주 관찰되었다. 대도동은 형산강을 사이에 두고 포항제철소와 마주보고 있기 때문에 해풍이 발달하면 제철 공정의 영향을 직접적으로 받을 수 있다. 상위 10% 이내의 고농도는 주로 봄과 겨울철 서풍 영향을 받았지만(그림 7), 동풍 영향을 받으면 단기간 고농도 현상이 발생하였다. 대도동의 연평균 $PM_{2.5}$ 농도($16.5 \mu g/m^3$)는 다른 주거지역(오천읍, 송도동, 연일읍)의 농도보다 낮지만, $50 \mu g/m^3$ 이상의 고농도 시기에는 포항제철소 영향을 직접 받으므로 주요 노출 지역으로 간주해야 한다. 한편, SO_2 는 모든 계절에 걸쳐 동풍(E)과 북동풍(NE) 계열

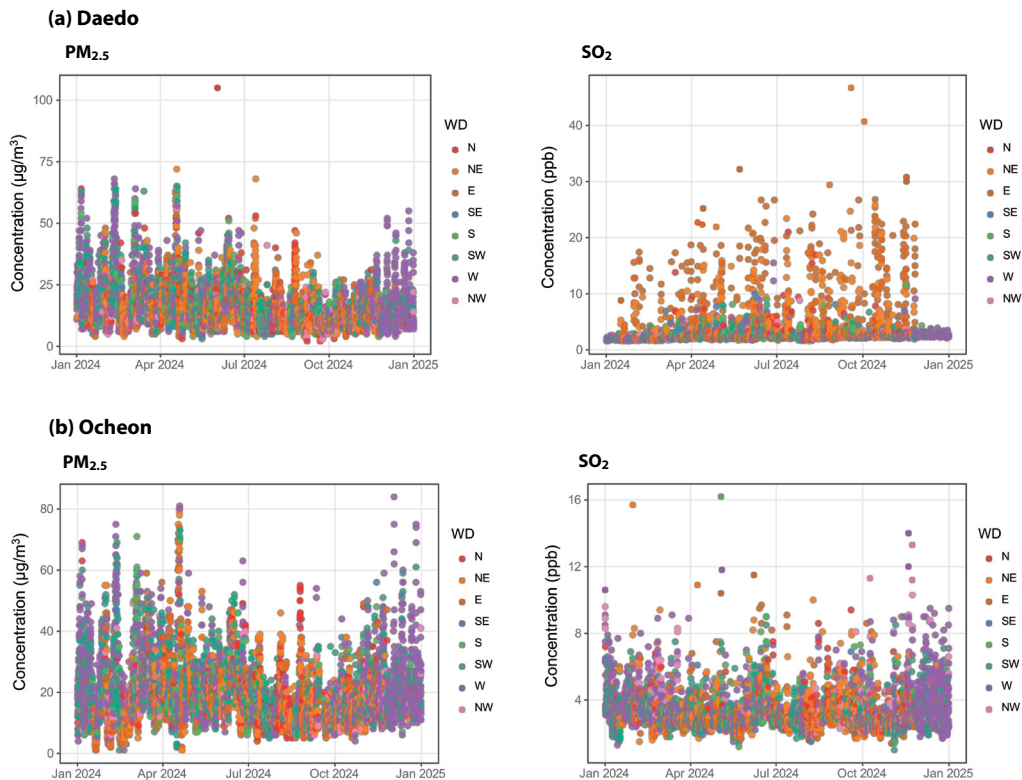


Fig. 8. Scatter plots of $PM_{2.5}$ and SO_2 concentrations versus date at the (a) Daedo and (b) Ocheon stations, with points colored by wind direction.

에서 순간적인 고농도 현상이 빈번하게 발생하였다. 이 결과는 대도동의 SO₂ 농도가 포항제철소의 석탄 연소 공정(소결과 코크스 공정 등)의 영향을 직접적으로 받고 있음을 의미한다. 그러므로 대도동을 포함한 형산강 서쪽의 주거지역은 해풍이 우세한 주간 시간대에 제철 공정에서 유래한 황산화물과 석탄 연소 생성물(유기오염물질과 중금속)에 노출될 가능성이 높다. 11월과 12월에는 고농도 사례가 급감했는데, 이는 11월부터 동풍이 급격히 감소했기 때문이다.

오천읍에서는 대도동과는 대조적인 풍향 영향이 확인되었다(그림 8b). 대도동에서는 PM_{2.5}와 SO₂ 고농도 시기의 풍향이 달랐으나, 오천읍에서는 PM_{2.5}와 SO₂ 모두 서풍(W)과 북서풍(NW) 계열에서 고농도를 보였다. 이는 철강산업단지가 오천읍 측정소의 북서쪽에 위치하고 있기 때문에 두 물질이 함께 유입된 것으로 보인다. 공간분포 분석에서 확인된 바와 같이(그림 6), 오천읍(20.0 µg/m³)은 포항항(22.8 µg/m³) 다음으로 PM_{2.5}의 연평균 농도가 높았고 대규모 주거단지가 조성되어 있으므로 주민 건강영향 차원에서 장기 노출 평가와 먼지 구성성분에 대한 모니터링이 필요하다. 두 측정소 결과를 정리하면, 대도동은 동풍과 북동풍에 의해 주로 포항제철소 영향을 받으며, 오천읍은 서풍과 북서풍이 우세할 때 제철소와 철강산업단지의

영향을 받는다. 따라서 오천읍 주거지역은 대도동과는 차별화된 풍향 조건에 기반한 대기질 관리 전략이 필요하다.

대도동과 오천읍에서 측정한 기준성 대기오염물질의 시간별 자료를 이용하여 스피어만 상관분석을 실시하였다(표 1). 두 지점 모두에서 모든 오염물질 간에 통계적으로 유의한 양 또는 음의 상관관계가 나타났다. 대도동에서는 PM_{2.5}와 PM₁₀이 강한 양의 상관관계($r_s=0.80$)를 보였으며, PM_{2.5}는 CO($r_s=0.48$)보다 NO₂($r_s=0.52$)와 다소 높은 상관성을 보였으나, 두 상관계수의 차이는 크지 않았다. 미세입자는 산업활동뿐만 아니라 도심 교통 배출원의 영향도 많이 받기 때문에 이러한 결과를 보인 것으로 해석할 수 있다(Crilly *et al.*, 2017). SO₂도 다른 오염물질과 양의 상관관계를 보였으나, 상관계수가 모두 0.4 이하로 나타나 다른 오염물질과는 차별화된 배출원(제철소 석탄 연소와 선박 중유연소) 영향과 이동 특성을 보이는 것으로 판단된다. O₃는 앞서 언급한 바와 같이 NO₂ 및 CO와 음의 상관관계를 보였다. CO는 O₃를 직접적으로 소멸시키는 주요 물질은 아니지만, NO_x와 배출원이 유사하기 때문에 이러한 시계열 경향이 나타난 것으로 해석된다(Wang *et al.*, 2004).

오천읍에서도 PM_{2.5}와 PM₁₀이 강한 양의 상관관계

Table 1. Spearman correlation coefficients for hourly concentrations of criteria air pollutants at the (a) Daedo and (b) Ocheon stations in 2024.

(a) Daedo	PM _{2.5}	PM ₁₀	SO ₂	NO ₂	CO	O ₃
PM _{2.5}	1.00**	0.80**	0.24**	0.52**	0.48**	0.13**
PM ₁₀	0.80**	1.00**	0.35**	0.47**	0.36**	0.25**
SO ₂	0.24**	0.35**	1.00**	0.36**	0.17**	0.03**
NO ₂	0.52**	0.47**	0.36**	1.00**	0.68**	-0.30**
CO	0.48**	0.36**	0.17**	0.68**	1.00**	-0.17**
O ₃	0.13**	0.25**	0.03**	-0.30**	-0.17**	1.00**
(b) Ocheon	PM _{2.5}	PM ₁₀	SO ₂	NO ₂	CO	O ₃
PM _{2.5}	1.00**	0.85**	0.33**	0.37**	0.62**	0.16**
PM ₁₀	0.85**	1.00**	0.32**	0.39**	0.59**	0.18**
SO ₂	0.33**	0.32**	1.00**	0.40**	0.40**	0.02*
NO ₂	0.37**	0.39**	0.40**	1.00**	0.56**	-0.27**
CO	0.62**	0.59**	0.40**	0.56**	1.00**	-0.09**
O ₃	0.16**	0.18**	0.02*	-0.27**	-0.09**	1.00**

**Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed). *Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

($r_s=0.85$)를 보였다. 주목할 점은 오전읍에서 $PM_{2.5}$ 가 NO_2 ($r_s=0.37$)보다 CO ($r_s=0.62$)와 훨씬 강한 양의 상관관계를 보였다는 것이다. 또한, PM_{10} 과 CO의 상관관계수($r_s=0.59$)도 대도동($r_s=0.36$)보다 높아, 오전읍에서는 산업 배출이 PM 오염수준에 큰 영향을 미쳤을 가능성이 있다. 다만 PM과 CO는 배출원이 유사할 뿐만 아니라 대기 정체와 혼합고 변화 등 공통된 기상 조건의 영향을 함께 받을 수 있으므로, 상관관계수만으로 특정 배출원의 기여도를 정량적으로 평가하는 데는 한계가 있다. SO_2 역시 $PM_{2.5}$, NO_2 , CO와의 상관관계수가 대도동보다 높게 나타나, 오전읍의 대기질이 대도동에 비해 산업 배출의 영향을 상대적으로 크게 받는 것으로 해석할 수 있다. 대도동과 마찬가지로 O_3 는 NO_2 와 음의 상관관계($r_s=-0.27$)를 보였으나, 상관관계수의 절대값은 대도동보다 작았다. 이는 오전읍에서 대도동에 비해 교통 배출과 관련된 NO 적정 효과가 상대적으로 약하다는 것을 의미한다. 위의 내용을 종합하면, 대도동은 상대적으로 도심 주거지역의 특성을 보이는 반면, 오전읍은 산업단지 배후 지역으로서 산업 배출의 영향을 보다 크게 받는 대기질 특성을 나타낸다.

4. 결 론

본 연구에서는 포항제철소와 포항철강산업단지가 주거지역의 대기질에 미치는 영향을 평가하기 위해 포항시 대기환경측정망에서 측정된 기준성 대기오염물질 자료를 분석하였다. 시계열 자료 분석 결과에 의하면 1차 배출 오염물질은 화석연료 사용과 관련하여 추운 계절에 농도가 높아지는 뚜렷한 계절 변동을 보였다. 그러나 SO_2 는 이러한 계절적 특성과는 달리 임해공업지역의 영향을 반영하는 양상을 보였으며, 여름철에도 고농도 현상이 발생하였다. 특히 낮 시간대에 해풍이 우세할 때 산업 배출의 영향이 명확하게 나타났다. 반면, O_3 는 여름철 오후에 농도가 증가하는 전형적인 2차 생성 특성을 보였으며, 이는 강한 일사

조건과 관련된 것으로 해석된다. 공간분포를 파악한 결과, 포항제철소, 철강산업단지, 포항항 주변에서 PM, SO_2 , CO의 고농도 지역이 확인되었다. 이와는 달리, O_3 는 산업지역과 도심지역에서 NO 적정에 의해 감소하면서 NO_2 와 반대되는 공간분포를 나타냈고, 풍하측 외곽에 위치한 양덕동과 장량동에서 가장 높은 농도를 기록하였다. 지역별 고농도 현상의 배출원 영향을 확인하기 위해 CBPF와 상관분석을 수행하였다. 형산강 인근의 대도동에서는 동풍이 불 때 포항제철소의 배출 영향을 직접적으로 받는 반면, 산업단지의 풍하측에 위치한 오전읍에서는 북서풍 조건에서 철강산업단지에서 배출된 오염물질의 수송 영향이 상대적으로 크게 나타났다. 또한 오전읍에서는 대도동에 비해 $PM_{2.5}$ 와 CO의 상관관계가 강하게 나타나 산업 연소와 관련된 오염물질이 해당 지역의 대기질에 상당히 기여하는 것으로 판단된다.

이번 분석을 통해 포항시 주거지역의 대기질은 배출량뿐만 아니라 주거지역과 배출원의 공간적 배치와 국지적인 기상 조건의 영향을 받는 것으로 나타났다. 대도동에서는 도심 교통과 산업 배출의 영향이 복합적으로 나타난 반면, 오전읍에서는 산업단지의 풍하측에 위치한 지역적 특성이 보다 뚜렷하게 반영되었다. 그러므로 동일한 지자체 내에서도 단순히 오염물질의 평균 농도가 아닌 주거지역의 위치와 주요 배출원의 관계를 고려한 대기질 관리가 필요하다. 이러한 측면에서 대도동과 오전읍에서 정기적인 집중 모니터링을 실시하고 이를 토대로 유해대기물질측정소와 대기중 금속측정소를 신설하거나 기존 측정소를 이전하는 방안을 검토할 필요가 있다.

본 연구에서는 특정 풍향 조건에서 주거지역의 단기적인 고농도 노출 가능성을 확인함으로써 환경보건 차원의 연구 필요성을 제시했다는 의의가 있다. 다만 본 연구는 2024년 단일 연도의 측정망 자료를 사용하였으며, 13개 측정소의 오염원 영향을 평가하는 과정에서 종관기상관측소 1개 지점의 풍향·풍속 자료를 공통적으로 적용하였다. 따라서 해안과 내륙에서 나타나는 국지적 대기순환의 공간적 차이를 충분히 반영

하지 못했다. 또한 상관분석 결과에는 배출원의 유사한 변동뿐만 아니라 기상 조건의 공통적인 영향도 포함될 수 있으므로, 이 결과를 배출 기여도로 직접 해석하는 데에는 한계가 있다. 향후 연구에서는 미세먼지 성분 분석을 통해 산업 배출의 영향을 정량적으로 평가하고, 상세 기상 모델링도 수행하여 지역별 오염원 기여도를 보다 정밀하게 규명할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단의 대학중점연구소 사업(RS-2020-NR049578)과 동남권 미세먼지연구·관리센터(NIER-2024-03-03-002)의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- Choi, S.-D. (2022) Evaluation of urban air quality monitoring stations in Ulsan using geographic information system, *Journal of Environmental Analysis, Health and Toxicology*, 25(3), 99-110, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.36278/jeaht.25.3.99>
- Choi, S.-D., Baek, S.-Y., Chang, Y.-S. (2007) Influence of a large steel complex on the spatial distribution of volatile polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) determined by passive air sampling using membrane-enclosed copolymer (MECOP), *Atmospheric Environment*, 41(29), 6255-6264. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.03.058>
- Choi, S.-D., Kim, J.-H., Chang, Y.-S., Park, J.-B., Lee, S.-H., Yoon, H.-Y. (2005) Assessment of odor dispersion in the steel complex with meteorological data, *Journal of Korean Society of Odor Research and Engineering*, 4(2), 95-103, (in Korean with English abstract).
- Clarke, K., Kwon, H.-O., Choi, S.-D. (2014) Fast and reliable source identification of criteria air pollutants in an industrial city, *Atmospheric Environment*, 95, 239-248. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.06.040>
- Crilley, L.R., Lucarelli, F., Bloss, W.J., Harrison, R.M., Beddows, D.C., Calzolari, G., Nava, S., Valli, G., Bernardoni, V., Vecchi, R. (2017) Source apportionment of fine and coarse particles at a roadside and urban background site in London during the 2012 summer ClearfLo campaign, *Environmental Pollution*, 220, 766-778. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.06.002>
- Go, M.-J., Lee, H.-Y., Hong, S.-J., Choi, S.-D. (2024) Analysis of targeted, suspect, and non-target polycyclic aromatic hydrocarbons in the atmosphere of Pohang, Korea using GC×GC-TOFMS, *Journal of Environmental Analysis, Health and Toxicology*, 27(2), 49-64, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.36278/jeaht.27.2.49>
- Hu, G., Xu, Y., Jia, L. (2011) Effects of relative humidity on the characterization of a photochemical smog chamber, *Journal of Environmental Sciences*, 23(12), 2013-2018. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(10\)60665-1](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(10)60665-1)
- Ju, J.-T., Lee, S.-J., Cho, I.-G., Choi, J.-Y., Kim, T., Choi, S.-D. (2026) Machine learning-based spatiotemporal modeling and health risk assessment of PAHs and metals in an industrial city, *Atmospheric Environment*, 382, 122190. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2026.122190>
- Jung, J.-H., Lee, H.-D., Shon, B.-H. (2012) Assessment of location of the air quality monitoring stations according to the analysis of wind sector division in Pohang, *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, 13(4), 1931-1938, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5762/KAIS.2012.13.4.1931>
- Kim, S.-J., Lee, H.-Y., Lee, S.-J., Choi, S.-D. (2023) Passive air sampling of VOCs, O₃, NO₂, and SO₂ in the large industrial city of Ulsan, South Korea: spatial-temporal variations, source identification, and ozone formation potential, *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 125478-125491. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-31109-z>
- Lee, G., Park, J.-H., Kim, D.-G., Koh, M.S., Lee, M., Han, J.-S., Kim, J.-C. (2020) Current status and future directions of tropospheric photochemical ozone studies in Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36(4), 419-441, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2020.36.4.419>
- Lee, S.-J., Lee, H.-Y., Kim, S.-J., Kang, H.-J., Kim, H., Seo, Y.-K., Shin, H.-J., Ghim, Y.S., Song, C.-K., Choi, S.-D. (2023) Pollution characteristics of PM_{2.5} during high concentration periods in summer and winter in Ulsan, the largest industrial city in South Korea, *Atmospheric Environment*, 292, 119418. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119418>
- Lee, S.-J., Song, C.-K., Choi, S.-D. (2024) Past and recent changes in the pollution characteristics of PM₁₀ and SO₂ in the

- largest industrial city in South Korea, *Atmospheric Environment*, 319, 120310. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2023.120310>
- Lee, Y.-S., Choi, S.-D., Kwon, H.-O., Kim, C.-S., Son, H.-S., Ye, J. (2011) Temporal and spatial distribution of sulfur dioxide in Ulsan, Korea, *Journal of the Korean Society for Environmental Analysis*, 14(4), 249-256, (in Korean with English abstract).
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2025) 2024 Annual Report on Air Quality, Incheon, Republic of Korea, <https://library.mcee.go.kr/#/search/detail/5928716> (accessed on Sep. 1, 2026).
- Seinfeld, J.H., Pandis, S.N. (2016) *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*, 3rd Ed., Wiley, USA, pp. 209-210.
- Uria-Tellaetxe, I., Carslaw, D.C. (2014) Conditional bivariate probability function for source identification, *Environmental Modelling & Software*, 59, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.05.002>
- Wang, T., Lam, K.S., Tsang, C.W., Kot, S.C. (2004) On the variability and correlation of surface ozone and carbon monoxide observed in Hong Kong using trajectory and regression analyses, *Advances in Atmospheric Sciences*, 21(1), 141-152. <https://doi.org/10.1007/BF02915688>
- Yeo, M.J., Kim, Y.P. (2019) Trends of the PM₁₀ concentrations and high PM₁₀ concentration cases in Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(2), 249-264, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2019.35.2.249>

Author Information & Contribution

최성득(울산과학기술원 지구환경도시건설공학과 교수, sdchoi@unist.ac.kr) Conceptualization, Methodology, Formal analysis, Investigation, Writing - original draft, Writing - review & editing

Supplementary Materials

Table S1. Specifications of the continuous automated analyzers used at air quality monitoring stations in Pohang, South Korea.

Pollutant	Instrument model	Measurement principle	Measurement range	Lower detectable limit	Zero noise	Zero drift	Manufacturer
SO ₂	Teledyne API T100	UV fluorescence	0~50 to 0~20,000 ppb (selectable)	<0.4 ppb	<0.2 ppb (RMS)	<0.5 ppb/24 h	Teledyne API, USA
NO ₂	Teledyne API T200	Chemiluminescence (NO/NO ₂ /NO _x)	0~50 to 0~20,000 ppb (selectable)	<0.2 ppb	<0.1 ppb (RMS)	<0.5 ppb/24 h	Teledyne API, USA
CO	Teledyne API T300	Gas filter correlation IR (non-dispersive)	0~1 to 0~1,000 ppm (selectable)	<0.04 ppm	<0.02 ppm (RMS)	<0.1 ppm/24 h	Teledyne API, USA
O ₃	Teledyne API T400	UV absorption (Beer-Lambert law)	0~100 ppb to 0~10 ppm (selectable)	<0.4 ppb	<0.2 ppb (RMS)	<1.0 ppb/24 h	Teledyne API, USA
PM ₁₀ , PM _{2.5}	Met One BAM-1020	Beta-ray attenuation	0~10,000 µg/m ³	<4.8 µg/m ³ (1 h, 2σ) <1.0 µg/m ³ (24 h, 2σ)	N/A	N/A	Met One Instruments, USA

Specifications are based on manufacturer datasheets and operation manuals (Teledyne API; Met One Instruments). RMS (root-mean-square) denotes the statistical magnitude of random signal fluctuation about a reference value.

Table S2. Descriptive statistics of hourly PM_{2.5} and PM₁₀ concentrations at 13 air quality monitoring stations in Pohang, South Korea, 2024.

Station	PM _{2.5} (μg/m ³)								PM ₁₀ (μg/m ³)							
	N	Missing	Missing (%)	Mean	SD	Min	Median	Max	N	Missing	Missing (%)	Mean	SD	Min	Median	Max
Uhyeon	8,641	143	1.6	15.7	10.2	0.0	13.0	84.0	8,614	170	1.9	29.4	19.1	1.0	25.0	226.0
Jangheung	8,633	151	1.7	15.9	8.9	1.0	14.0	98.0	8,632	152	1.7	38.2	27.8	6.0	32.0	415.0
Jangnyang	8,669	115	1.3	14.4	8.0	2.0	13.0	74.0	8,595	189	2.1	30.9	27.1	4.0	25.0	400.0
Daedo	8,647	137	1.6	16.5	9.5	2.0	14.0	105.0	8,631	153	1.7	40.9	28.0	5.0	35.0	375.0
Daesong	8,630	154	1.8	14.9	9.3	1.0	13.0	93.0	8,629	155	1.8	31.1	25.1	1.0	26.0	391.0
3rd Industrial Complex	8,618	166	1.9	18.6	11.1	1.0	16.0	119.0	8,681	103	1.2	39.4	29.9	1.0	32.0	428.0
Songdo	8,588	196	2.2	19.3	11.0	2.0	17.0	209.0	8,663	121	1.4	38.7	26.5	6.0	33.0	363.0
Ocheon	8,487	297	3.4	20.0	10.8	1.0	18.0	84.0	8,626	158	1.8	37.3	27.4	1.0	31.0	393.0
Cheongnim	8,675	109	1.2	18.8	11.5	1.0	16.0	105.0	8,665	119	1.4	47.8	28.3	2.0	42.0	367.0
Yeonil	8,634	150	1.7	17.6	11.1	1.0	15.0	99.0	8,671	113	1.3	34.5	26.8	7.0	29.0	424.0
Jecheol	8,666	118	1.3	19.6	12.7	1.0	16.0	109.0	8,646	138	1.6	39.6	30.2	3.0	32.0	406.0
Yangdeok	8,677	107	1.2	16.9	10.2	1.0	15.0	92.0	8,675	109	1.2	30.9	26.2	4.0	25.0	370.0
Pohang Port	8,034	750	8.5	22.8	14.3	0.0	20.0	99.0	8,056	728	8.3	55.8	36.8	1.0	48.0	397.0

Table S3. Descriptive statistics of hourly SO₂ and NO₂ concentrations at 13 air quality monitoring stations in Pohang, South Korea, 2024.

Station	SO ₂ (ppb)								NO ₂ (ppb)							
	N	Missing	Missing (%)	Mean	SD	Min	Median	Max	N	Missing	Missing (%)	Mean	SD	Min	Median	Max
Uhyeon	8,625	159	1.8	2.6	1.1	1.5	2.4	23.1	8,661	123	1.4	17.7	10.5	2.8	15.3	76.4
Jangheung	8,608	176	2.0	3.4	2.0	0.8	2.7	22.9	8,550	234	2.7	14.1	6.7	2.0	12.4	70.9
Jangnyang	8,683	101	1.1	2.3	0.7	1.4	2.1	21.0	8,596	188	2.1	8.5	4.9	0.2	7.1	37.6
Daedo	8,663	121	1.4	2.9	2.7	1.5	2.3	46.7	8,663	121	1.4	11.3	6.5	3.0	9.4	61.5
Daesong	8,621	163	1.9	2.8	1.4	1.0	2.4	19.8	8,624	160	1.8	10.9	5.5	3.0	9.5	57.8
3rd Industrial Complex	8,660	124	1.4	2.8	1.2	0.6	2.5	18.9	8,590	194	2.2	10.2	6.0	0.2	8.6	63.9
Songdo	8,638	146	1.7	2.7	1.6	1.1	2.3	19.9	8,603	181	2.1	10.6	6.4	2.7	8.7	60.2
Ocheon	8,596	188	2.1	3.2	1.1	1.0	2.9	16.2	8,596	188	2.1	13.5	9.3	2.6	10.8	92.1
Cheongnim	8,609	175	2.0	4.6	2.8	1.6	3.7	33.7	8,658	126	1.4	16.3	6.9	3.9	15.0	53.9
Yeonil	8,666	118	1.3	2.8	2.4	1.3	2.1	39.3	8,635	149	1.7	10.7	5.7	3.0	9.1	48.7
Jecheol	8,648	136	1.6	3.7	2.7	1.3	2.8	46.7	8,457	327	3.7	15.6	7.4	3.9	14.0	52.7
Yangdeok	8,680	104	1.2	2.2	0.7	1.4	2.1	15.4	8,656	128	1.5	5.6	3.4	1.4	4.6	36.3
Pohang Port	8,450	334	3.8	5.7	3.4	0.6	4.8	52.1	8,473	311	3.5	23.9	10.6	3.2	22.7	83.5

Table S4. Descriptive statistics of hourly CO and O₃ concentrations at 13 air quality monitoring stations in Pohang, South Korea, 2024.

Station	CO (ppb)								O ₃ (ppb)							
	N	Missing	Missing (%)	Mean	SD	Min	Median	Max	N	Missing	Missing (%)	Mean	SD	Min	Median	Max
Uhyeon	8,662	122	1.4	499	162	160	480	2,460	8,657	127	1.4	31.9	16.3	1.3	32.4	107.8
Jangheung	8,470	314	3.6	616	344	100	530	4,120	8,609	175	2.0	33.1	15.5	0.1	32.2	115.4
Jangnyang	8,662	122	1.4	450	141	80	450	1,680	8,648	136	1.6	39.6	15.4	3.0	38.5	119.1
Daedo	8,658	126	1.4	499	225	20	460	3,100	8,663	121	1.4	38.2	15.7	1.7	37.4	123.2
Daesong	8,598	186	2.1	559	232	200	530	3,660	8,623	161	1.8	32.4	17.6	0.1	31.8	117.8
3rd Industrial Complex	8,659	125	1.4	495	250	140	440	2,830	8,659	125	1.4	36.7	15.1	0.2	35.6	117.4
Songdo	8,624	160	1.8	512	214	50	490	3,060	8,507	277	3.1	37.2	14.0	2.1	36.9	109.1
Ocheon	8,631	153	1.7	451	165	60	440	1,800	8,597	187	2.1	35.9	17.3	0.5	35.7	125.3
Cheongnim	8,655	129	1.5	561	263	80	500	2,970	8,629	155	1.8	30.8	14.4	0.1	30.3	122.6
Yeonil	8,648	136	1.6	496	230	70	470	2,960	8,666	118	1.3	34.9	15.0	2.6	34.0	121.1
Jecheol	8,650	134	1.5	582	267	150	520	2,740	8,635	149	1.7	29.9	15.1	0.3	29.5	114.7
Yangdeok	8,679	105	1.2	500	138	220	470	1,910	8,685	99	1.1	41.4	16.6	2.5	40.7	130.4
Pohang Port	8,438	346	3.9	666	502	40	540	6,300	8,476	308	3.5	25.8	14.3	0.1	25.0	102.7