

논문

청주 PM_{2.5} 고농도 발생에 미치는 주변 도시의 영향 Influence of Neighboring Cities on High PM_{2.5} Episodes in Cheongju

김재훈, 이상섭*

충북대학교 환경공학과

Jae-Hoon Kim, Sang-Sup Lee*

Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University, Cheongju,
Republic of Korea

접수일 2026년 6월 12일

수정일 2026년 8월 3일

채택일 2026년 8월 31일

Received 12 June 2026

Revised 3 August 2026

Accepted 31 August 2026

*Corresponding author

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

E-mail : slee@chungbuk.ac.kr

Abstract Chungcheongbuk-do has relatively low PM_{2.5} emissions compared with other provinces in Korea but consistently shows relatively high ambient PM_{2.5} concentrations. This suggests that regional transport may substantially contribute to PM_{2.5} pollution in inland cities. This study investigated regional transport characteristics associated with high-PM_{2.5} episodes in Cheongju, a representative inland city of Chungcheongbuk-do, using hourly AirKorea observations and NOAA GDAS meteorological data collected from 2018 to 2023. Airflow pathways were analyzed using the HYSPLIT backward trajectory model and the Potential Source Contribution Function (PSCF), while a radius-based PSCF approach was applied to evaluate the frequency of simultaneous high-concentration events when trajectories passed neighboring cities. In addition, paired-sample t-tests were performed to compare PM_{2.5} concentrations between Cheongju and neighboring cities under identical air-mass conditions. The trajectory-based PSCF analysis showed that potential source regions were primarily distributed to the west and northwest of Cheongju, consistent with the predominance of westerly and northerly winds during high-PM_{2.5} episodes. Among the neighboring cities, Cheonan and Asan showed the largest numbers of trajectory passages and high-concentration occurrences, indicating repeated associations with high-PM_{2.5} episodes in Cheongju. Paired-sample t-tests revealed no statistically significant PM_{2.5} concentration differences between Cheongju and Sejong, Asan, Cheonan, and Pyeongtaek under identical air-mass conditions, whereas significant differences were observed for Dangjin, Anseong, and Daejeon. These findings suggest that high PM_{2.5} episodes in Cheongju are closely associated with regional airflow pathways and synchronized high-concentration conditions in neighboring cities. Although the present results do not quantify source contributions, they suggest that Cheonan and Asan were more consistently associated with high-PM_{2.5} episodes in Cheongju than the other neighboring cities examined.

Key words: PM_{2.5}, Regional transport, Paired-sample t-test, HYSPLIT backward trajectory, Potential source contribution function

1. 서론

충청북도는 전국 시·도 가운데 환경대기 중 PM_{2.5} 농도가 높은 지역에 해당한다. 환경부(Ministry of Environment, MOE)에 따르면, 2018년 충북의 환경대기 중 PM_{2.5} 연평균 농도는 27 µg/m³로 전국에서 가장 높았다. 2위인 경기도는 25 µg/m³, 충남은 21 µg/m³를 보

여주었다. PM_{2.5} 나쁨일 수 또한 충북이 102일로 전북 87일, 경북 77일 등 다른 시·도에 비해 많은 것으로 보고되었다(MOE, 2019). 반면 대기정책지원시스템(Clean Air Policy Support System, CAPSS) 2018년 배출량 자료에 따르면 충북의 PM_{2.5} 연간 배출량은 3,569 ton/yr로 전국 17개 시·도 중 8위이다. 이는 경기 10,353 ton/yr, 충남 7,419 ton/yr 등보다 매우 낮은 수

준이다. 충북의 SO_x, NO_x, VOCs 배출량 순위도 각각 10위, 8위, 10위로 중위권에 해당한다(NAEIR, 2018). 또한 2023년 시·도별 환경대기 중 PM_{2.5} 연평균 농도는 인천이 22 µg/m³로 가장 높았고 경기와 충남이 각각 21 µg/m³, 충북이 20 µg/m³로 여전히 상위권에 해당하였다(NIER, 2023). 또한 CAPSS 2023년 자료에서 충북의 PM_{2.5} 연간 배출량은 2,515 ton/yr로 경기 6,826 ton/yr, 충남 4,810 ton/yr 등보다 여전히 낮은 수준을 나타내었다. 충북의 SO_x, NO_x, VOCs 배출량 순위도 각각 7위, 7위, 11위로 여전히 중위권에 해당한다(NAEIR, 2023). 이러한 경향은 2018~2023년 기간에 지속적으로 나타나서, 충북의 PM_{2.5} 배출량 순위는 전국 중위권인 반면에, PM_{2.5} 연평균 농도는 상위권에 해당하는 것으로 나타났다(NAEIR, 2018-2023; NIER, 2018-2023). 이는 충북의 PM_{2.5} 고농도 현상이 자체 배출만으로 설명되기 어렵고, 외부 지역의 영향 가능성이 존재할 수 있음을 시사한다.

이와 관련하여 충북의 대기환경에 외부 지역이 미치는 영향을 조사하는 여러 선행 연구들이 수행되었다. Son *et al.* (2021)은 CAPSS 2016년 배출량을 입력 자료로 사용하여, 대기 중 오염물질의 생성과 수송을 모의하는 화학수송모델인 Comprehensive Air Quality Model with extensions (CAMx)을 통해 충북 지자체별 PM_{2.5} 농도에 대한 배출 지역의 기여도를 분석하였다. 충북의 연평균 PM_{2.5}가 고농도 시기일수록 자체 및 주요 주변 지역 기여 농도의 합이 증가하였으며, 일평균 PM_{2.5} 농도가 증가할수록 충북 자체 기여 농도보다는 경기와 충남의 기여 농도가 크게 증가하였다. Kim *et al.* (2012)은 위성 관측 자료인 Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Aerosol Optical Depth (AOD)와 Angstrom Exponent (AE)를 이용하여 동아시아 지역의 에어로졸 공간 분포 특성을 분석하였고, 한반도 중부 내륙에 위치한 충북 청원의 대기질이 인위적 대기 에어로졸의 광역적 이동에 따라 증가한다고 밝혔다. 이러한 선행 연구들은 충북 지역의 PM_{2.5} 농도가 경기, 충남 등 외부 지역 또는 광역적 대기 이동의 영향을 받을 수 있음을 보여준다. 따라서 경

기와 충남의 도시 단위에서 청주로 유입되는 영향을 추가적으로 조사할 필요가 있다.

한편, 외부 지역의 영향을 실제 이동 경로를 통해 파악하기 위해 기류 이동 경로를 추적하는 역궤적 분석(Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory, HYSPLIT)을 수행한 선행 연구들이 있다. Do and Jung (2015)은 부산 지역 PM₁₀ 농도 분포에 영향을 미치는 배출원의 위치를 파악하기 위해 HYSPLIT을 활용하였으며, 부산의 고농도 PM₁₀은 중국 동부와 몽골을 통과한 기류의 영향을 받는 것으로 보고하였다. Lee *et al.* (2018)은 울산 지역의 유해대기오염물질의 오염 특성을 분석하는 과정에서 울산 고농도 기간에 발생한 Indeno-[1,2,3-cd]pyrene (IcdP)가 유해대기물질측정망에서는 검출되지 않아 외부 장거리 이동의 영향일 가능성을 검토하기 위해 HYSPLIT을 보조적으로 활용하였다. 그 결과 울산 고농도 시 PAHs 중 IcdP는 중국의 영향을 받은 것으로 제시되었다. Kim *et al.* (2023)은 시화-안산공단 인접 지역의 고농도 미세먼지 발생 시 PM_{2.5} 기원을 HYSPLIT을 통해 분석하였다. 고농도 PM_{2.5} 발생 시 상·하층 기류가 중국 방향에서 유입되는 경향을 보였으며, 해당 시기의 PM_{2.5} 농도는 연간 관측된 농도 중 가장 높은 수준으로 나타났다. 따라서 기존의 HYSPLIT 연구는 주로 국외의 장거리 수송을 대상으로 수행되었다.

대기오염물질 농도 차이를 통계적으로 분석하기 위해 대응표본 t-검정을 활용한 연구 사례도 보고된 바 있다. Ju *et al.* (2021)은 COVID-19 발생 전후 PM₁₀ 및 PM_{2.5} 농도 차이를 분석하기 위해 대응표본 t-검정을 적용하였으며, 연간 차이에 대한 p-value가 각각 0.001 미만과 0.001로 나타나 농도가 유의하게 감소한 것으로 나타났다. Yang *et al.* (2003)은 수용성 유기 탄소(Water-Soluble Organic Carbon, WSOC) 측정에 Aerosol Carbon Analyzers (ACA)를 사용하는 타당성을 평가하기 위해 대응표본 t-검정을 수행하였고, ACA 사용 전후 유의한 차이가 없는 것으로 나타났다. 이러한 선행 연구들은 서로 대응되는 두 자료군의 평균 차이를 대응표본 t-검정을 통해 분석할 수 있음을 보여

준다.

본 연구에서는 충청북도의 인구 밀집 도시인 청주를 대상으로 PM_{2.5} 고농도 사례와 관련된 외부 유입 특성을 분석하였다. 경기, 충남 등 청주 주변 도시를 통과한 기류의 이동 특성을 분석하기 위하여 HYSPLIT을 활용하였다. 그리고 도시 간 PM_{2.5} 평균 농도 차이를 대응표본 t-검정을 통해 분석하였다. 따라서 청주의 대기 중 PM_{2.5} 농도가 높을 때, 기류 이동 경로 및 도시간의 PM_{2.5} 농도 유사성을 함께 고려하여 주변 도시가 청주의 PM_{2.5} 농도에 미치는 영향을 평가하였다.

2. 연구 방법

2.1 연구 지역 및 자료 수집

본 연구는 충청북도 청주를 대상 도시로 선정하여 분석을 수행하였다. 청주는 2018~2023년 기상자료 분석에서 서풍 계열의 바람이 우세한 지역으로 나타났으며(Seong and Lee, 2024), 이에 북서쪽에 위치한 지역과 청주와 지리적으로 인접한 지역인 당진, 아산, 안성, 천안, 평택, 수원, 대전, 세종을 비교 도시로 선정하였다. 본 연구에서 PM_{2.5} 자료는 한국환경공단 에어코리아(www.airkorea.or.kr)에서 제공하는 2018년 1월 1일부터 2023년 12월 31일까지의 시간별 측정 자료를 수집하여 사용하였다. 기류 경로 분석을 위해 미국 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration)의 GDAS (Global Data Assimilation System) 기상자료를 2018년 1월 1일부터 2023년 12월 31일까지 수집하였다.

2.2 역궤적 분석 및 PSCF 산출

청주로 유입되는 대기 이동 경로를 파악하기 위해 HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) 모델을 이용한 역궤적 (Backward trajectory) 분석을 수행하였다. HYSPLIT 모델은 공기의 이동 궤적을 계산하여 특정 시점에서 공기가 어떤 경로

를 거쳐 도달했는지를 추적하는 모델이다(He *et al.*, 2025; Choi *et al.*, 2023). 청주를 시작점으로 설정하여 2018년 1월 1일부터 2023년 12월 31일까지, 매일 UTC 00시와 12시에 출발하는 24시간 역궤적을 계산하였으며, 시작 고도는 지표 부근 유입을 반영하기 위해 10 m로 설정하였다. 기상자료는 GDAS 1 (Global Data Assimilation System)을 활용하였으며, GDAS 1 기상장의 시간해상도는 1 h이며, 공간해상도는 1°이다. 청주 PM_{2.5} 고농도 형성과 관련된 잠재적 기여 지역을 파악하기 위해 PSCF (Potential Source Contribution Function) 분석 기법을 사용하였다. PSCF는 조건부 확률 기반의 잠재적 배출원 지역을 식별하는 기법으로, 식 (1)과 같이 특정 격자(i, j)를 통과한 전체 궤적 수(n_{ij}) 대비 고농도 사례에서 해당 격자를 통과한 궤적 수(m_{ij})의 비율로 정의된다(Do and Jung, 2015). 값이 클수록 해당 격자가 고농도 형성에 기여했을 가능성이 높음을 의미한다. 궤적 기반 PSCF 분포를 산출할 때에는 시간별 PM_{2.5} 농도 중 최댓값을 일일 대표 농도로 사용하였다. 본 연구에서는 계산된 역궤적을 0.1°×0.1° 격자에 할당하여 격자 기반 PSCF를 산출함으로써 잠재 기여 지역을 공간적으로 파악하였다.

$$PSCF = \frac{m_{ij}}{n_{ij}} \quad (1)$$

다만 n_{ij} 가 작은 격자에서는 PSCF 값이 과대평가될 가능성이 있으므로, 이를 보완하기 위해 격자별 궤적 수에 따른 경험 가중치 $W(n_{ij})$ 를 PSCF 값에 곱하여 적용하였다. 가중치 함수의 임계값은 궤적이 실제로 통과한 격자($n_{ij} > 0$)를 기준으로 계산한 격자당 평균 궤적 수(n_{ave})를 바탕으로 설정하였다. n_{ij} 가 n_{ave} 의 3배 미만인 격자에서는 표본 수가 부족한 것으로 판단하여 단계적으로 가중치를 감소시켰다(Polissar *et al.*, 2001).

$$W(n_{ij}) = \begin{cases} 1.00 & 3n_{ave} < n_{ij} \\ 0.70 & 1.5n_{ave} < n_{ij} \leq 3n_{ave} \\ 0.42 & n_{ave} < n_{ij} \leq 1.5n_{ave} \\ 0.17 & n_{ij} \leq n_{ave} \end{cases} \quad (2)$$

추가적으로 청주 고농도 형성에 기여했을 가능성이 높은 도시를 평가하기 위해 반경 기반 PSCF를 수행하였다. 격자 기반 PSCF와 반경 기반 PSCF는 모두 통과 횟수 대비 고농도 사례 수의 비율을 산정한다는 점에서 동일한 조건부 확률 구조를 가진다. 식 (1)의 격자 기반 PSCF는 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 격자 단위로 산출하여 청주 PM_{2.5} 고농도 사례와 관련된 잠재적 기여 지역의 공간적 분포를 파악하기 위한 분석으로 PSCF 값은 지도상의 색상 강도로 표현하였다. 반면에 반경 기반 PSCF는 동일한 PSCF 개념을 비교 도시별 통과 사례에 적용하여 도시별 고농도 동반 비율을 평가하기 위한 분석으로 PSCF 값은 수치로 제시하였다. 반경 기반 PSCF에서는 청주의 00시와 12시 출발 역궤적 중 해당 출발 시각의 PM_{2.5} 농도가 $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상인 경우를 고농도 사례로 정의하여 분석하였다. 여기서 $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 는 대기 환경 기준에서 제시하는 PM_{2.5} 24시간 평균 농도의 나뉠 기준을 참고한 값이다. 반경 기반 PSCF는 식 (1)에서 격자 위치가 아닌 비교 도시를 기준으로 산정한 것이다. 반경 기반 PSCF에서 n_{ij} 는 청주의 고농도 사례에서 산출된 역궤적이 비교 도시를 통과한 횟수가 된다. 비교 도시의 통과 횟수는 산업단지 인근에 위치한 대기오염측정소 좌표를 중심으로 반경 5 km, 10 km, 15 km 이내를 각각 통과한 궤적을 기준으로 산정하였다. 또한 반경 기반 PSCF에서 m_{ij} 는 통과 시점들 중 비교 도시의 시간별 PM_{2.5} 농도가 고농도인 횟수를 의미하며, 동일한 기류 이동 내에서 비교 도시를 여러 시점에 통과하더라도 1회로 산정하였다.

2.3 대응표본 t-검정

청주와 비교 도시 간의 PM_{2.5} 농도 차이를 통계적으로 분석하기 위해 Statistical Package for the Social Sciences (SPSS) Ver 28.0을 사용하였다. 청주의 PM_{2.5} 농도는 청주 고농도일의 00시 및 12시 관측값을 사용하였다. 비교 도시의 PM_{2.5} 농도는 청주 고농도일의 00시 및 12시 역궤적을 기준으로 동일한 공기괴가 비교 도시를 통과하는 구간에서 추출하였다. 이 구간에서 관측된 여러 시점의 농도 중 최댓값을 대표값으로 사용하였으며, 비교 도시에서도 고농도가 나타난 사례를

대상으로 분석하였다. 이때 각 역궤적은 서로 독립된 사건으로 간주하였으며, 청주의 PM_{2.5} 농도와 비교 도시의 PM_{2.5} 농도를 1:1로 대응시킨 후 두 값의 차이를 비교하기 위해 대응표본 t-검정을 실시하였다. 대응표본 t-검정은 짝지어진 두 관측값의 차이를 산출한 뒤, 그 차이값의 평균이 0인지 검정하는 방법이며, 기본 가정은 차이값이 정규분포를 따르는 것이다(Vetter and Mascha, 2018). 정규성은 Shapiro-Wilk 검정을 통해 검토하였으나, 대부분의 도시가 정규성을 만족하지 않았다. 그러나 t-검정은 정규성 위반에도 비교적 강한 것으로 보고되어(Rochon *et al.*, 2012), 본 연구에서는 대응표본 t-검정을 적용하였다. 유의확률(p-value)이 0.05 미만일 경우 통계적으로 유의한 차이가 있는 것으로 판단하였다. 또한 95% 신뢰구간에 0이 포함되는지 확인하였으며, 신뢰구간에 0이 포함될 경우 차이값 평균이 0일 가능성을 배제할 수 없다고 해석하였다. 효과 크기는 동일한 사건에서 얻은 두 관측값 차이의 평균을 차이값의 표준편차로 나눈 Cohen's d_z 를 산출하였으며(Lakens, 2013), 식 (3)에 제시하였다. 여기서 M_{diff} 는 차이값의 평균, X_{diff} 는 각 차이값, X_1 은 청주의 PM_{2.5} 농도, X_2 는 비교 도시의 PM_{2.5} 농도, N 은 표본 수를 의미한다. 또한 소표본에서 발생할 수 있는 효과 크기 편향을 보정하기 위해 Hedges' g 를 함께 산출하였다(Hedges, 1981). Hedges' g 는 식 (4)와 같이 Cohen's d_z 에 보정계수 J 를 적용하여 계산하였다. 보정계수 J 는 식 (5)와 같이 자유도(df)에 기반하여 산출하였으며, 효과 크기의 과대추정을 줄이기 위해 사용하였다. 효과 크기는 절댓값 기준으로 0.2 이상이면 작은 효과, 0.5 이상이면 중간 효과, 0.8 이상이면 큰 효과로 판단하였다(Cohen, 1992).

$$Cohen's d_z = \frac{M_{diff}}{\sqrt{\frac{\sum (X_{diff} - M_{diff})^2}{N - 1}}} \quad (3)$$

$$g = d_z \times J \quad (4)$$

$$J = \left(1 - \frac{3}{4df - 1}\right) \quad (5)$$

Table 1. Sensitivity analysis of radius-based PSCF results using different radius criteria.

City	5 km			10 km			15 km		
	Pass	High	PSCF	Pass	High	PSCF	Pass	High	PSCF
Dangjin	33	22	0.667	72	48	0.667	112	77	0.688
Daejeon	50	19	0.380	96	34	0.354	168	71	0.423
Sejong	60	20	0.333	129	53	0.411	254	116	0.457
Suwon	16	6	0.375	30	10	0.333	49	22	0.449
Asan	66	41	0.621	169	105	0.621	292	203	0.695
Anseong	24	20	0.833	52	37	0.712	101	74	0.733
Cheonan	102	60	0.588	227	151	0.665	336	226	0.673
Pyeongtaek	25	15	0.600	78	50	0.641	137	101	0.737

여기서, $M_{diff} = \frac{\sum X_{diff}}{N}$, $X_{diff} = X_1 - X_2$, $df = N - 1$

3. 연구 결과

3.1 역계적 분석

3.1.1 반경 기준에 따른 PSCF 민감도 분석

반경 기반 PSCF 분석에서 비교 도시 통과 여부는 기준 반경 설정에 따라 달라질 수 있으므로, 5 km, 10 km, 15 km 반경에 따른 반경 기반 PSCF 결과를 서로 비교하였다. 표 1의 결과를 보면, 5 km, 10 km, 15 km 반경 모두에 대해 대체로 통과 횟수와 고농도 사례 모두 천안, 아산, 세종 순서로 높은 결과를 보여주었다. 그리고 다른 비교 도시들도 적용 반경이 변함에 따라 서로 비슷한 결과를 보여주었다. 다만 적용 반경이 증가함에 따라 각 도시별로 통과 횟수와 고농도 사례 수가 증가하는 경향을 보인다. 따라서 적용 반경이 크면 도시 간에 적용되는 영역이 서로 겹치게 됨을 고려해야 하고, 적용 반경이 작으면 기류 이동 시간별 분석 등의 추가 분석을 하기 어려운 점이 있어서, 본 연구에서는 적용 반경을 10 km로 설정하였다.

3.1.2 계절별 역계적 분석

그림 1은 청주의 PM_{2.5} 고농도 사례에 대한 격자 기반 PSCF의 계절별 공간 분포를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 모든 계절에서 대체로 청주의 서쪽과 북쪽 방향의 지역에서 높은 PSCF 값을 나타내

Table 2. Overall and seasonal frequencies (%) of eight wind-direction sectors in Cheongju during 2018~2023.

	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Full period	20.7	6	7.5	4.4	14.4	4.6	37.4	5
Spring	15.2	3.9	7.5	4.3	14.6	7	44.1	3.4
Summer	14.9	6.7	9.8	7.2	17.6	4.6	34.4	4.8
Fall	27.1	9.2	9.1	4	13.5	3.4	28.1	5.7
Winter	25.8	4.4	3.7	2	11.8	3.2	43	6

Note. Values indicate percentages (%).

Table 3. Overall and seasonal frequencies (%) of eight wind-direction sectors during high PM_{2.5} episodes in Cheongju (2018~2023).

	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Full period	31.4	5.3	3.4	1.9	13.6	4.9	33.1	6.3
Spring	19.2	2.9	2.9	2.1	18.3	6.7	41.7	6.2
Summer	20.5	8.4	2.4	0	6	6	42.2	14.5
Fall	36.5	6.6	5.4	2.1	17	5.4	21.2	5.8
Winter	37.5	5.4	2.8	2.1	10.5	3.5	33.3	4.9

Note. Values indicate percentages (%).

고, 청주 동쪽 인근에서도 일부 높은 PSCF 격자가 확인되었다. 그리고 여름철에는 전반적으로 낮은 PSCF 분포를 보인다.

청주의 풍향 특성을 검토하기 위해, 2018~2023년 기간 동안 00시 및 12시의 풍향 자료를 8방위로 분류하여 계절별 풍향 빈도를 산정한 결과를 표 2에 나타내었다. 그리고 청주의 대기 중 PM_{2.5}가 고농도 사례일 때만 따로 분류하여 계절별 풍향 빈도를 산정한 결과를 표 3에 나타내었다. 표 2를 보면 청주에 불어오는

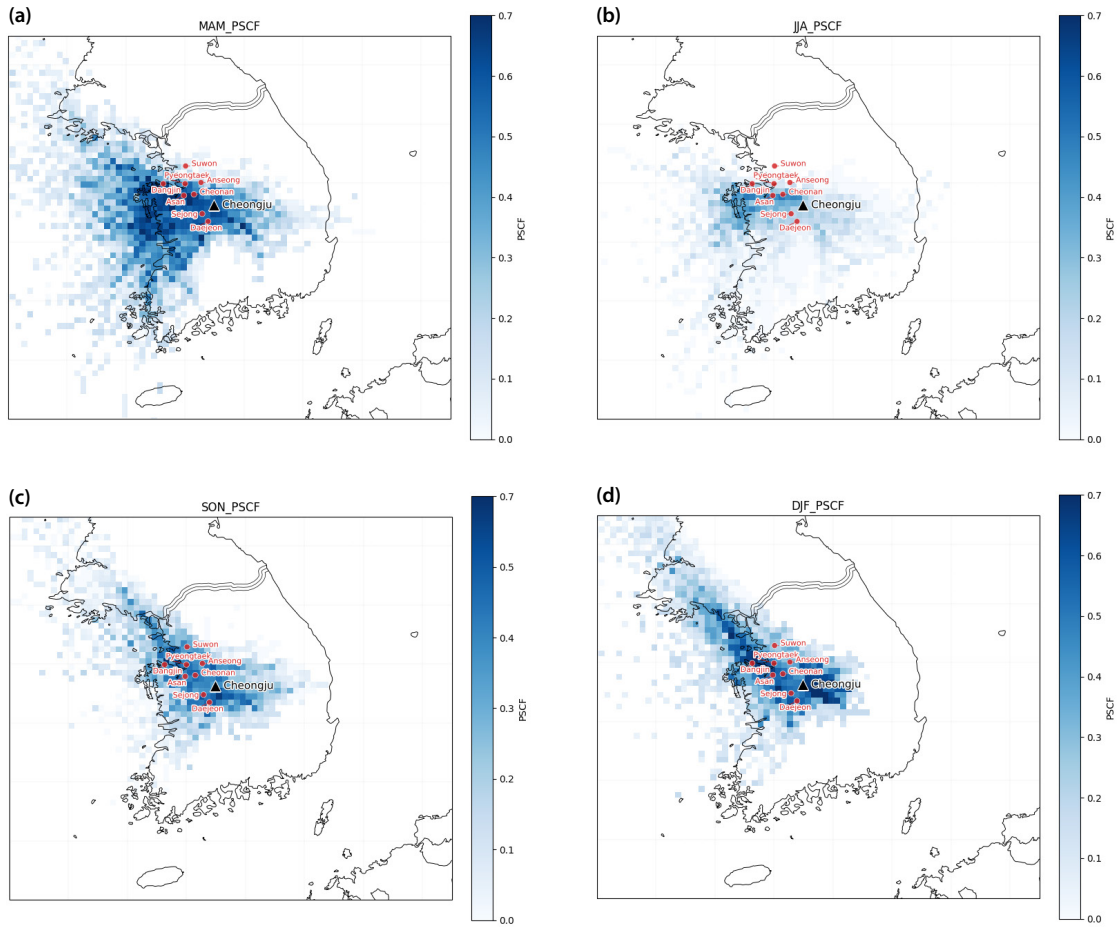


Fig. 1. Seasonal trajectory-based PSCF distributions (a: spring, b: summer, c: fall, d: winter).

바람의 주 풍향은 서풍임을 알 수 있다. 그리고 표 2와 3을 비교해 보면, $PM_{2.5}$ 고농도 사례에서 북풍의 비중이 증가하는 현상을 볼 수 있다. 또한 표 2에서와 같이 여름철에는 동풍과 남풍 계열의 바람 비중이 증가하지만, 표 3의 고농도 사례에서는 동풍과 남풍 계열의 바람 비중이 크게 감소하는 것을 볼 수 있다. 따라서 청주의 $PM_{2.5}$ 고농도 사례에서는 북풍과 서풍 계열의 바람 비중이 높은 것을 알 수 있다. 이는 그림 1에서 청주의 동쪽과 남쪽보다는 서쪽과 북쪽에서 PSCF 값이 높게 나타난 공간적 분포와 일치한다. 그리고 표 2와 3의 경우 모두 청주의 봄과 여름에는 상대적으로 서풍의 비중이 높은 반면에, 가을과 겨울에는 북풍의 비중

이 증가하는 특성도 보인다.

표 4는 반경 10 km를 기준으로 산정한 계절별 반경 기반 PSCF 결과이다. 반경 기반 PSCF는 청주의 00시 및 12시 고농도 사례에서 산출된 역궤적이 비교 도시를 통과한 경우, 비교 도시의 $PM_{2.5}$ 농도가 고농도인 사례의 비율을 의미한다. PSCF 값이 클수록 청주 고농도 사례에서 기류가 해당 비교 도시를 통과할 때 두 지역에서 고농도 현상이 함께 나타난 비율이 높음을 의미한다. 한편, 표 4에서 PSCF가 ‘-’로 표시된 경우는 해당 계절 또는 시간 구간에서 통과 사례가 없는 경우에 해당한다.

봄(3~5월)철 반경 기반 PSCF 결과를 보면, 아산과

Table 4. Seasonal radius-based PSCF results for each neighboring city.

Period	Dangjin			Daejeon			Sejong			Suwon		
	Pass	High	PSCF	Pass	High	PSCF	Pass	High	PSCF	Pass	High	PSCF
Spring	9	6	0.667	38	20	0.526	52	29	0.558	2	0	0
Summer	4	2	0.500	13	2	0.154	18	4	0.222	0	0	–
Fall	21	11	0.524	20	3	0.150	20	3	0.150	9	4	0.444
Winter	38	29	0.763	25	9	0.360	39	17	0.436	19	6	0.316

Period	Asan			Anseong			Cheonan			Pyeongtaek		
	Pass	High	PSCF	Pass	High	PSCF	Pass	High	PSCF	Pass	High	PSCF
Spring	36	24	0.667	2	1	0.500	30	19	0.633	5	3	0.600
Summer	7	3	0.429	2	0	0	8	2	0.250	2	0	0
Fall	41	14	0.341	19	13	0.684	68	35	0.515	22	12	0.545
Winter	85	64	0.753	29	23	0.793	121	95	0.785	49	35	0.714

Pass : Passing count

High : High concentration count

PSCF : High concentration count/Passing count

당진의 PSCF 값은 0.667로 동일하였으나 아산은 역계적 통과 횟수 36회 중 24회가 고농도 사례에 해당하였고, 당진은 횟수와 고농도 사례가 각각 9회, 6회로 낮았다. 천안은 통과 횟수 30회, 고농도 사례 19회로 PSCF 값은 0.633으로 나타났다. 세종은 통과 횟수와 고농도 사례가 각각 52회, 29회로 높았으나 PSCF 값은 0.558로 중간 수준으로 나타났으며, 대전(38회 중 20회)의 PSCF 값은 0.526으로 나타났다. 아산, 천안, 세종, 대전의 경우 통과 횟수와 고농도 사례가 비교적 많아 봄철 청주 PM_{2.5} 고농도 사례에서 고농도 현상이 함께 발생하는 경향이 높은 도시로 해석된다. 반면에 안성과 수원 지역의 고농도 사례는 각각 1회, 0회로 매우 적었다. 이는 표 3의 청주 PM_{2.5} 고농도 사례일 때 계절별 풍향 빈도에서 나타난 바와 같이, 봄철에는 북풍보다 서풍 계열의 바람 비중이 높으므로, 청주의 북쪽에 위치한 안성과 수원 지역에서 고농도 사례의 통과 횟수가 상대적으로 적은 것으로 보인다.

여름(6~8월)철 PSCF 결과를 보면, 전체적으로 통과 횟수와 고농도 사례가 모두 낮았다. 세종(18회 중 4회), 아산(7회 중 3회), 천안(8회 중 2회) 등 전반적으로 고농도 사례가 적게 나타났다. 여름철에는 청주를 포함하여 전국적으로 낮은 미세먼지 농도를 보이기

때문에 고농도 사례의 통과 횟수도 전체적으로 크게 감소하는 결과를 보인다.

가을(9~11월)철 PSCF 결과를 보면, 전체 구간에서 안성은 19회 통과 중 13회가 고농도 사례로 PSCF 값이 0.684로 가장 높았다. 평택(22회 중 12회), 당진(21회 중 11회), 천안(68회 중 35회)은 PSCF 값이 중간 수준(0.52~0.55)으로 나타났으며, 아산은 통과 횟수와 고농도 사례는 각각 41회, 14회로 비교적 높았지만, PSCF 값은 0.341로 낮았다. 봄철과 비교하였을 때, 가을철에 천안의 통과 횟수가 크게 증가하였고, 안성과 수원의 통과 횟수도 증가하였다. 이는 표 2와 3에서 확인한 바와 같이 가을철에 북풍 계열의 바람 비중이 증가함으로 인하여 다른 도시들에 비해 청주에서 북쪽에 위치한 천안, 안성, 수원에서의 통과 횟수가 증가한 것으로 보인다.

겨울(12~2월)철에는 전국적으로 PM_{2.5} 고농도 사례가 증가함에 따라 비교 도시들의 통과 횟수는 증가하고 PSCF 값도 증가하는 결과를 보였다. 봄, 여름, 가을철에 다른 비교 도시들에 비해 상대적으로 높은 통과 횟수를 보인 천안, 아산이 겨울철에도 각각 121회 중 95회, 85회 중 64회로 매우 높은 통과 횟수와 고농도 사례를 보였다. 그리고 PSCF 값도 각각 0.785,

0.753으로 증가하였다. 그리고 가을철과 마찬가지로 다른 도시들에 비해 청주에서 북쪽에 위치한 천안, 안성, 수원에서 고농도 통과 횟수가 봄철에 비해 크게 증가하는 결과도 보였다.

3.1.3 전체 기간 역궤적 분석

전체 기간 반경 기반 PSCF 결과를 보면(표 5), 안성은 52회 통과 중 37회가 고농도 사례로 PSCF 값이 0.712로 가장 높게 나타났다. 이는 안성을 통과한 횟수는 적었지만 안성을 통과한 기류에서 $PM_{2.5}$ 고농도 동반 비율이 높았음을 의미한다. 천안(227회 중 151회)과 아산(169회 중 105회)의 PSCF 값은 각각 0.665, 0.621로 나타났으며, 통과 횟수와 고농도 사례가 크게 나타나 $PM_{2.5}$ 고농도 현상이 반복적으로 함께 발생하는 경향을 보였다. 세종(129회 중 53회)과 대전(96회 중 34회), 수원(30회 중 10회)의 PSCF 값은 낮은 수준을 보였으며, 통과 횟수 대비 고농도 사례도 낮았다. 또한 표 5는 역궤적의 이동 시간별로 통과 횟수와 고농도 사례 결과도 나타내고 있다. 0~6시간 구간에서 천안(161회 중 112회)과 아산(107회 중 66회)에서 통과 횟수와 고농도 사례가 많았다. 이는 단시간 이동한 기류에서도 고농도 동반 사례가 반복적으로 나타났음을 의미한다. 7~12시간 구간은 천안(58회 중 35회),

아산(53회 중 29회), 당진(36회 중 24회), 평택(34회 중 23회)에서 고농도 사례가 지속적으로 나타났으며, 13~18시간 구간에서는 천안(42회 중 22회), 아산(36회 중 20회), 안성(27회 중 21회)에서 통과 횟수와 고농도 사례가 확인되었다. 이러한 결과는 전체 기간 동안 청주 $PM_{2.5}$ 고농도 사례가 특정 시간 구간에 국한되지 않음을 보여준다.

그림 2는 전체 기간에 대하여 격자 기반 PSCF의 공간 분포를 나타낸 것이다. 앞서 그림 1의 계절별 PSCF

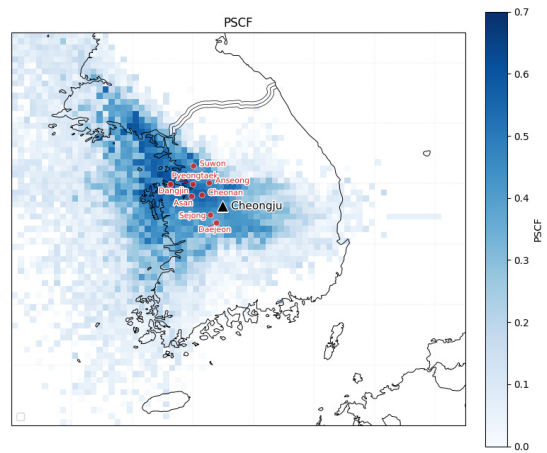


Fig. 2. Full-period trajectory-based PSCF distribution.

Table 5. Full-period radius-based PSCF results for the neighboring cities according to transport time.

Period	Dangjin			Daejeon			Sejong			Suwon		
	Pass	High	PSCF	Pass	High	PSCF	Pass	High	PSCF	Pass	High	PSCF
Overall	72	48	0.667	96	34	0.354	129	53	0.411	30	10	0.333
0~6 h	16	12	0.750	48	16	0.333	73	36	0.493	2	0	0
7~12 h	36	24	0.667	45	15	0.333	41	16	0.390	7	2	0.286
13~18 h	18	12	0.667	38	7	0.184	44	14	0.318	15	7	0.467
19~24 h	15	4	0.267	23	4	0.174	23	4	0.174	12	3	0.250
Full period	Asan			Anseong			Cheonan			Pyeongtaek		
	Pass	High	PSCF	Pass	High	PSCF	Pass	High	PSCF	Pass	High	PSCF
Overall	169	105	0.621	52	37	0.712	227	151	0.665	78	50	0.641
0~6 h	107	66	0.617	6	3	0.500	161	112	0.696	19	12	0.632
7~12 h	53	29	0.547	22	18	0.818	58	35	0.603	34	23	0.676
13~18 h	36	20	0.556	27	21	0.778	42	22	0.524	23	16	0.696
19~24 h	25	13	0.520	17	11	0.647	32	12	0.375	19	7	0.368

공간 분포 결과에서 확인한 바와 같이, 청주의 동쪽과 남쪽 지역보다는 서쪽과 북쪽 지역에서 높은 PSCF 값이 분포하는 경향을 보였다. 이는 앞서 살펴본 바와 같이 청주에서 PM_{2.5} 고농도 사례일 때 모든 계절에 대하여 북풍과 서풍 계열의 바람 비중이 매우 높기 때문으로 보인다.

표 5는 전체 기간에 대하여 반경 기반 PSCF 결과를 나타낸 것이다. 또한 비교 도시에서 청주까지 기류가 이동한 시간을 0~6, 7~12, 13~18, 19~24시간으로 분류하여 결과를 나타내었다. 여기서 시간 구간별 결과 합이 전체 기간의 결과와 일치하지 않는데, 이것은 동일한 기류 이동 내에서 비교 도시를 여러 시점에 통과 하더라도 전체 기간에서는 1회로 산정하였기 때문이다. 표에서 보는 바와 같이 안성과 당진은 PSCF 값이 각각 0.712, 0.667로 높은 값을 보였으나, 통과 횟수와 고농도 사례는 적은 편이었다. 통과 횟수와 고농도 사례가 모두 가장 많은 도시는 천안이고, 다음은 아산으로 나타났다. 그리고 천안과 아산은 0~6시간 구간에서 통과한 사례의 비중이 높았다. 반면에 당진, 수원, 안성, 평택과 같이 상대적으로 청주와 거리가 먼 도시들은 7~12 또는 13~18시간 구간에 높은 비중을 나타내었다. 그리고 대전과 세종과 같이 청주와 거리가 가까우면서 남서 방향에 위치한 도시들은 모든 시간 구간에서 비교적 고르게 분포하는 특성을 보였다.

3.1.4 비교 도시 통과 시점의 동시 고농도 특성

우리나라에서 발생하는 초미세먼지 고농도 현상으로 전국적으로 나타나는 경우가 많으므로, 특정 비교 도시 통과 시점에 다른 비교 도시들도 고농도의 PM_{2.5}를 나타내었는지 확인하였다. 표 6은 통과 도시만 고농도였던 횟수와 모든 비교 도시들에서 고농도가 나타난 횟수를 보여준다. 표에서 보는 바와 같이 통과 도시만 고농도인 경우의 비중은 매우 낮았고, 모든 비교 도시들이 고농도로 나타나는 비중은 도시별로 26.5~52.9%였다. 특히 대전, 세종과 같이 청주와 가까운 도시를 통과할 때, 모든 비교 도시들이 고농도의 미세먼지를 보여주는 비중이 높았다. 따라서 청주에서 PM_{2.5} 고농도 현상이 나타나는 경우, 모든 비교 도시에서 고

Table 6. Frequency of simultaneous high-PM_{2.5} occurrences in neighboring cities at the time of trajectory passage.

City	High-PM _{2.5} in the passing city only	High-PM _{2.5} in all neighboring cities
Dangjin	3 (6.3%)	15 (31.3%)
Daejeon	0 (0.0%)	18 (52.9%)
Sejong	2 (3.8%)	21 (39.6%)
Suwon	1 (10.0%)	3 (30.0%)
Asan	4 (3.8%)	33 (31.4%)
Anseong	4 (10.8%)	13 (35.1%)
Cheonan	5 (3.3%)	40 (26.5%)
Pyeongtaek	4 (8.0%)	16 (32.0%)

Note. Values indicate the number of cases and percentages. Percentages were calculated based on the number of high-passage cases for each neighboring city.

농도가 나타나는 경우도 있고, 일부 도시에서만 고농도가 나타나는 경우도 있는 것으로 확인되었다.

3.2 대응표본 t-검정

동일 공기와 조건에서 청주와 비교 도시가 고농도인 사례를 대상으로, 도시 간 PM_{2.5} 농도 차이를 분석하기 위해 대응표본 t-검정을 수행하였다. 분석은 청주 고농도 사례에서 00시 및 12시 관측값과 동일한 역궤적에 해당하는 비교 도시의 PM_{2.5} 농도 중, 고농도 조건을 만족하는 최댓값을 1:1로 대응시켜 수행하였다. 분석 결과(표 7), 세종, 아산, 천안, 평택은 청주와의 PM_{2.5} 농도 차이가 통계적으로 유의하지 않았다. 세종과의 평균 차이는 $-0.07 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (95% 신뢰구간 = $-6.55 \sim 6.40$), $p=0.491$, 효과 크기 -0.003 으로 나타났다. 이는 세종이 전체 기간 반경 기반 PSCF 결과에서는 상대적으로 낮은 값을 보였으나, 청주와 세종이 모두 고농도인 조건에서는 PM_{2.5} 농도가 매우 유사하였음을 의미한다. 아산은 평균 차이 $-0.86 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (95% 신뢰구간 = $-4.70 \sim 2.98$), $p=0.329$, 효과 크기 -0.043 으로 나타났고, 천안은 평균 차이 $-0.88 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (95% 신뢰구간 = $-4.15 \sim 2.40$), $p=0.299$, 효과 크기 -0.043 으로 확인되었다. 아산과 천안은 평균 차이와 효과 크기가 모두 작아 동일 공기와 조건에서 청주와의 PM_{2.5} 농도 수준이 유사한 것으로 나타났다. 또한 아산과 천안은 전체 기간 반경 기반 PSCF 결과에서도 높은 PSCF 값

Table 7. Paired-sample t-test results comparing PM_{2.5} concentrations between Cheongju and the neighboring cities.

Region	N	Mean difference (μg/m ³) (confidence interval)	T	P-value	Effect size
Dangjin	48	-9.78 (-18.81, -0.75)	-2.179	0.017	-0.309
Daejeon	34	10.26 (3.93, 16.60)	3.297	0.001	0.552
Sejong	53	-0.07 (-6.55, 6.40)	-0.023	0.491	-0.003
Suwon	10	3.35 (-15.84, 22.54)	0.395	0.351	0.114
Asan	105	-0.86 (-4.70, 2.98)	-0.444	0.329	-0.043
Anseong	37	-7.15 (-14.13, -0.17)	-2.078	0.022	-0.334
Cheonan	151	-0.88 (-4.15, 2.40)	-0.528	0.299	-0.043
Pyeongtaek	50	-4.00 (-11.38, 3.37)	-1.092	0.140	-0.152

을 보였으며, 통과 횟수 및 고농도 사례가 많았다. 평택은 평균 차이 -4.00 μg/m³ (95% 신뢰구간=-11.38~3.37), p=0.140, 효과 크기 -0.152로 나타나 동일 공기과 조건에서 청주와의 PM_{2.5} 농도 수준이 비교적 유사한 것으로 확인되었다.

반면 당진, 안성, 대전은 동일 공기과 조건에서 청주와의 PM_{2.5} 농도 차이가 통계적으로 유의하였다. 당진은 평균 차이 -9.78 μg/m³ (95% 신뢰구간=-18.81~-0.75), p=0.017, 효과 크기 -0.309로 나타났고, 안성은 평균 차이 -7.15 μg/m³ (95% 신뢰구간=-14.13~-0.17), p=0.022, 효과 크기 -0.334로 나타났다. 당진과 안성은 청주와의 PM_{2.5} 농도 차이가 통계적으로 유의하였으나, 효과 크기는 절댓값 기준 0.2~0.5로 작은 효과 수준이었다. 따라서 당진과 안성의 PM_{2.5} 농도가 청주와 뚜렷하게 다르다고 해석하기는 어려웠다. 안성의 경우 전체 기간 반경 기반 PSCF 결과에서 가장 높은 PSCF 값을 보였지만, 대응표본 t-검정에서는 청주와 통계적으로 유의한 농도 차이가 나타났다. 이는 안성을 통과한 기류에서 고농도 현상이 함께 나타나는 비율은 높았지만, 청주와 안성이 모두 고농도일 때는 PM_{2.5} 농도 수준이 서로 유사하지 않았음을 의미한다. 이러한 차이는 PSCF가 고농도 동반 비율을 나타내는 지표인 반면, 대응표본 t-검정은 두 도시의 실제 농도 수준 차이를 비교하는 분석이기 때문에 나타난 것으로 해석된다. 대전은 평균 차이 10.26 μg/m³ (95% 신뢰구간=3.93~16.60), p=0.001, 효과 크기 0.552로 나타났다. 이는 청주와의 PM_{2.5} 농도 차이가 통계적으로

유의할 뿐 아니라, 효과 크기도 중간 수준으로 나타나 PM_{2.5} 농도 차이가 비교적 뚜렷했음을 의미한다. 수원 은 평균 차이 3.35 μg/m³ (95% 신뢰구간=-15.84~22.54), p=0.351, 효과 크기 0.114로 나타나 청주와의 PM_{2.5} 농도 차이가 통계적으로 유의하지 않았다. 그러나 수원은 표본 수가 10개로 적어, 해당 결과는 표본 수를 고려하여 신중하게 해석할 필요가 있다.

4. 결 론

본 연구는 PSCF 분석과 대응표본 t-검정을 이용하여 청주의 대기 중 PM_{2.5} 농도가 높을 때, 기류 이동 경로 및 도시 간의 PM_{2.5} 농도 유사성을 함께 고려하여 주변 도시인 당진, 대전, 세종, 수원, 아산, 안성, 천안, 평택이 청주의 PM_{2.5} 농도에 미치는 영향을 평가하였다. 계절별 PSCF 분석 결과, 여름철에 미세먼지 농도가 감소하고, 겨울철에 미세먼지 농도가 증가하는 전국적인 현상처럼, 여름철에는 다른 도시를 통과하는 역궤적의 통과 횟수와 고농도 사례가 크게 감소한 반면, 겨울철에는 크게 증가하였다. 청주의 풍향 특성을 분석해 보면, 봄과 여름에는 상대적으로 서풍의 비중이 높았지만, 가을과 겨울에는 북풍의 비중이 증가하는 특성을 보였다. 이에 따라 가을과 겨울에 다른 도시들에 비해 청주의 북쪽에 있는 천안, 안성, 수원에서 고농도 통과 횟수가 증가하는 결과를 보였다. 전체 기간에 대하여 통과 횟수와 고농도 사례가 가장 많은 도

시는 천안이고, 다음은 아산이었다. 그리고 역궤적의 이동 시간별로 통과 횟수와 고농도 사례를 분석한 결과, 천안과 아산은 0~6시간 구간의 단시간 이동으로 영향을 미치는 비중이 높았지만, 당진, 수원, 안성, 평택과 같이 청주와 거리가 먼 도시들은 7~12 또는 13~18시간 구간에 높은 비중을 나타내었다. 그리고 대전과 세종과 같이 청주와 거리가 가까우면서 남서쪽에 있는 도시들은 모든 시간 구간의 값이 서로 고르게 분포되는 특성을 보였다. 특정 비교 도시 통과 시점에 다른 비교 도시들에서 고농도의 PM_{2.5}가 나타나는 빈도를 조사한 결과, 모든 비교 도시에서 고농도가 나타나는 비중은 도시별로 26.5~52.9%로 나타났다. 동일 공기와 조건에서 청주와 비교 도시가 고농도인 사례를 대상으로 도시 간 PM_{2.5} 농도 차이를 분석하기 위해 대응표본 t-검정을 수행한 결과, 세종, 아산, 천안, 평택은 청주와의 PM_{2.5} 농도 차이가 통계적으로 유의하지 않았다. 결과를 정리해 보면, 천안, 아산의 경우 역궤적이 통과하는 횟수와 고농도 사례도 많고, 단시간 이동으로 영향을 주는 가능성이 높으며, 청주와의 PM_{2.5} 농도 차이도 통계적으로 유의하지 않은 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서 고려한 청주의 주변 도시 가운데 천안과 아산이 청주의 PM_{2.5} 고농도 사례와 가장 일관된 연관성을 보인 것으로 판단된다. 그러나 PM_{2.5} 고농도 현상은 전국적으로 동시에 발생하는 경우가 많고, 천안과 아산 역시 기류 이동 경로상에 위치한 도시일 수 있으므로, 본 연구 결과로부터 정량적 기여도를 평가하기는 어렵다. 향후 연구에서는 PM_{2.5} 배출량 자료, 성분 자료, 기상자료 등을 함께 활용하여 외부 유입의 정량적 기여도를 평가할 필요가 있다.

감사의 글

이 논문은 기후에너지환경부 폐자원에너지·재활용 전문인력양성사업의 지원, 충북녹색환경지원센터의 지원, 2025학년도 충북대학교 학술연구영역 사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

References

- Choi, W., Song, M.Y., Kim, J.B., Kim, K., Cho, C. (2023) Regional Classification of High PM₁₀ Concentrations in the Seoul Metropolitan and Chungcheongnam-do Areas, Republic of Korea, *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(9), 1075. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11732-6>
- Cohen, J. (1992) A Power Primer, *Psychological Bulletin*, 112(1), 155-159. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.112.1.155>
- Do, W.-G., Jung, W.-S. (2015) Estimation of PM₁₀ Source Locations in Busan Using PSCF Model, *Journal of Environmental Science International*, 24(6), 793-806, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5322/JESI.2015.24.6.793>
- He, R.-R., Li, D.-Q., Zhang, S. (2025) A Framework for Mining Inter-city Relationship of PM_{2.5} Based on Granger Causality Test: Application to Cities in China, *Environmental Modeling and Assessment*, 30(4), 735-747. <https://doi.org/10.1007/s10666-025-10033-1>
- Hedges, L.V. (1981) Distribution Theory for Glass's Estimator of Effect Size and Related Estimators, *Journal of Educational Statistics*, 6(2), 107-128. <https://doi.org/10.2307/1164588>
- Ju, M.J., Oh, J., Choi, Y.H. (2021) Changes in Air Pollution Levels after COVID-19 Outbreak in Korea, *Science of The Total Environment*, 750, 141521. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141521>
- Kim, C.H., Kim, J., Hwang, K., Kim, P., Shin, S.H., Park, J.-S., Park, S., Lee, G., 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.-S., Kim, J.-M., Sohn, J.-J. (2012) An Analysis of MODIS Aerosol Optical Properties and Ground-based Mass Concentrations in Central Korea in 2009, *Journal of the Korean Earth Science Society*, 33(3), 269-279, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5467/JKESS.2012.33.3.269>
- Lakens, D. (2013) Calculating and Reporting Effect Sizes to Facilitate Cumulative Science: A Practical Primer for t-tests and ANOVAs, *Frontiers in Psychology*, 4, 863. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00863>
- Lee, S.J., Kim, S.J., Park, M.K., Cho, I.G., Lee, H.Y., Choi, S.D. (2018) Contamination Characteristics of Hazardous Air Pol-

- lutants in Particulate Matter in the Atmosphere of Ulsan, Korea, *Journal of the Korean Society for Environmental Analysis*, 21(4), 281-291, (in Korean with English abstract).
- Ministry of Environment (MOE) (2019) The First Comprehensive Plan for Fine Dust Management (2020-2024), (in Korean).
- National Air Emission Inventory and Research Center (NAEIR) (2018) CAPSS Regional Air Pollutant Emissions, National Fine Dust Information Center, Republic of Korea.
- National Air Emission Inventory and Research Center (NAEIR) (2018-2023) CAPSS Regional Air Pollutant Emissions, National Fine Dust Information Center, Republic of Korea.
- National Air Emission Inventory and Research Center (NAEIR) (2023) CAPSS Regional Air Pollutant Emissions, National Fine Dust Information Center, Republic of Korea.
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2018-2023) Annual Report of Air Quality in Korea, (in Korean).
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2023) Annual Report of Air Quality in Korea, (in Korean).
- Polissar, A.V., Hopke, P.K., Harris, J.M. (2001) Source Regions for Atmospheric Aerosol Measured at Barrow, Alaska, *Environmental Science and Technology*, 35(21), 4214-4226. <https://doi.org/10.1021/es0107529>
- Rochon, J., Gondan, M., Kieser, M. (2012) To Test or Not to Test: Preliminary Assessment of Normality When Comparing Two Independent Samples, *BMC Medical Research Methodology*, 12, 81. <https://doi.org/10.1186/1471-2288-12-81>
- Seong, M.-J., Lee, S.-S. (2024) Statistical Analysis on the Concentrations of Air Pollutants in Cheongju Industrial Complex, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 40(5), 528-540, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2024.40.5.528>
- Son, K., Kang, Y.-H., You, S., Kim, E., Bae, M., Kim, S. (2021) Municipality-Level Source Apportionment of PM_{2.5} Concentrations based on the CAPSS 2016: (VI) Chungcheongbuk-do, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(3), 429-455, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2021.37.3.429>
- Vetter, T.R., Mascha, E.J. (2018) Unadjusted Bivariate Two-Group Comparisons: When Simpler is Better, *Anesthesia and Analgesia*, 126(1), 338-342. <https://doi.org/10.1213/ANE.00000000000002636>
- Yang, H., Li, Q., Yu, J.Z. (2003) Comparison of Two Methods for the Determination of Water-soluble Organic Carbon in Atmospheric Particles, *Atmospheric Environment*, 37(6), 865-870. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(02\)00953-6](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(02)00953-6)

Authors Information & Contributions

- 김재훈 (충북대학교 환경공학과 석사과정, jh2146123@naver.com)
 Conceptualization, Data curation, Formal analysis, Investigation, Methodology, Validation, Visualization, Writing - original draft
- 이상섭 (충북대학교 환경공학과 교수, slee@chungbuk.ac.kr)
 Conceptualization, Formal analysis, Funding acquisition, Methodology, Supervision, Writing - review & editing