

역궤적 분석을 통한 춘천지역 장기간 PM₁₀과 PM_{2.5} 외부 유입 경로 및 기상요인 영향 분석

Analysis of the long-term PM₁₀ and PM_{2.5} external inflow paths and meteorological factors in Chuncheon area through backward trajectory analysis

안지민^a, 홍준표^a, 황혜정^a, 최나래^{b,c*}

Ji Min An^a, Junpyo Hong^a, Hyejeong Hwang^a, Na Rae Choi^{b,c*}

^a Department of Environmental Engineering, Kangwon National University, student, Chuncheon, 24341, Republic of Korea

^b Department of Environmental Engineering, Kangwon National University, assistant professor, Chuncheon, 24341, Republic of Korea

^c Gangwon Particle Pollution Research and Management Center, Region of Korea, Kangwon National University, assistant professor, Chuncheon 24341, Republic of Korea

Received 16 December 2024; Revised 22 December 2024; Accepted 24 December 2024

Abstract

The purpose of this study is to analyze the effects of external inflow and meteorological factors on PM₁₀ and PM_{2.5} concentrations in Chuncheon area for a long time. In Korea, various policies have been implemented to reduce air pollution, but the improvement in the concentration of air pollutants (O₃, SO₂, PM₁₀, PM_{2.5}, NO₂) in particular, O₃, PM₁₀, PM_{2.5}, remained insignificant, and the concentration of ultrafine dust (PM_{2.5}) is still the highest among OECD member countries. In this situation, it is a very important task to accurately identify the cause of pollutant generation and increase in concentration. In this study, concentration analysis was conducted considering the effects of external inflow and weather, assuming that the causes of occurrence and increase of PM₁₀ and PM_{2.5} in Chuncheon area were influenced by external inflow and weather. The effects of external inflow were evaluated using reverse trajectory analysis modeling, and the correlation between pollutant concentration and meteorological variables was presented for meteorological factors through statistical analysis. Through this, we tried to find out how much the concentration of air pollutants in Chuncheon in Korea is affected by external inflow and meteorological factors. Most of the reverse trajectory clusters at high concentrations were introduced from the west. In view of this, the high concentration of air pollutants in Chuncheon was mainly affected by the airflow introduced from the west. In the relationship between meteorological factors and concentration, wind speed showed a weak negative correlation with PM₁₀ and PM_{2.5} concentration, and PM_{2.5} was somewhat more strongly affected by wind speed. Humidity showed a weak negative correlation with PM₁₀, but a weak positive correlation with PM_{2.5}. Compared to Seoul, Chuncheon had a larger correlation, but it was confirmed that there was little effect of wind speed and wind direction on the concentration because it was weak or insignificant.

Keywords: Air pollution, Backward trajectory analysis, External inflow, Weather factors, Chuncheon

1. 서론

대기오염물질은 '대기환경보전법'에 따라 환경부령으로 지정된 대기오염의 원인이 되는 가스·입자상 물질을 말한다(대기환경보전법 제2조 1항). 이들 물질의 종류는 매우 다양하지만, 대기환경기준을 통해농도가 규제되는 주요 오염물질로는 아황산가스(SO₂), 이산화질소(NO₂), 미세먼지(PM₁₀), 초미세먼지(PM_{2.5}), 오존(O₃) 등이 있다. 이러한 대기오염물질은 고농도에 노출될 경우 호흡계와

기관지, 폐 등 인체에 악영향을 미칠 뿐 아니라 환경에도 부정적인 영향을 미치기 때문에(Seo and Lee,2019)^[21], 대기오염물질의 농도를 규제하거나 관리하기 위한 다양한 정책들이 시행되고 있다(Kim et al., 2023)^[7]. 대표적으로는 국민의 건강을 보호하고 쾌적한 환경을 조성하기 위하여 환경기준을 설정하여 관리하고 있다. 예를 들어 아황산가스(SO₂) 연간평균치 0.02 ppm 이하, 이산화질소(NO₂) 연간평균치 0.03 ppm 이하, 미세먼지(PM₁₀) 연간 평균치 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하, 초미세먼지(PM_{2.5}) 연간 평균치 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하, 오존(

* Corresponding author. Tel.: +82-33-250-6353

E-mail address: narae@kangwon.ac.kr (N. R. Choi).

O₃ 8시간 평균치 0.06 ppm 이하로 설정되어 있다. 또한 ‘대기환경 개선 종합계획(제1차-3차, 2006년-2025년)’ 과 같은 중장기 정책과 대기환경보전법을 통해 체계적인 대기오염 관리가 추진되고 있다 (Shim et al., 2023)^[22]. 그 결과로, 오존(O₃)을 제외한 나머지 대기오염물질의 농도는 국내에서 점진적으로 감소하는 추세이다.

그러나 이는 국내에서의 감소세였으며, 국제적으로 비교했을 때, 한국의 대기오염 수준은 여전히 높은 편이다. 2010년부터 2019년까지 OECD 회원국의 초미세먼지(PM_{2.5}) 농도를 분석한 결과, 한국은 평균 27.4 μg/m³로 OECD 평균인 14.0 μg/m³의 약 두 배에 달하는 수치를 기록하며 회원국 중 가장 높은 농도를 나타냈다(KIER, 2023)^[2]. 이 기간 동안 OECD 전체 초미세먼지 농도는 15.7 μg/m³에서 13.9 μg/m³로 감소한 반면, 한국은 오히려 4.5 μg/m³ 증가(22.9 μg/m³ → 27.4 μg/m³)했다. 이는 국내 정책의 효과를 재검토할 필요성과 미흡함을 시사한다(Kim and Lee, 2018)^[10].

또한 정책 시행에 따른 효과분석 결과도 미미했는데, 이중차분법을 활용한 환경기준 강화에 따른 배출허용기준 강화 전후의 대기오염도 정책 효과분석 연구 결과를 통해 확인할 수 있었다 (Lho, 2020)^[15]. 강화 이후 대기오염도가 개선되기는 했지만, 이중차분 계수가 10% 유의수준에서 통계적으로 유의하지 않아 정책의 순 개선 효과는 나타나지 못하였다. 이는 규제 강화만으로는 충분하지 않으며, 기타오염원의 관리와 정책혼합의 필요성을 보여준다. 결론적으로, 대기오염문제 해결을 위해서는 기존정책의 강화뿐만 아닌, 보다 종합적이고 다각적인 접근이 필요하다.

대기오염물질 농도는 국내 배출과 국외 유입의 영향을 받으며, 국외 유입은 기상요인의 영향을 받을 수 있다(Park and Han, 2014 ; Kim, 2020)^[19, 9]. 이는 국내 대기오염 관리 정책의 효과성을 평가하는 요소로 작용할 수 있다. 국외 유입의 경우, 한·중 공동 연구 결과에 따르면 중국 유입 오염물질이 국내 고농도 미세먼지의 주요 원인으로 보고되었다. 중국과 서울의 미세먼지 성분을 분석한 결과, 유입되는 미세먼지의 주요 성분은 유기 화합물, 질산염, 황산염 등으로, 이는 장거리 이동을 통해 국내로 유입되며, 국내 고농도 미세먼지의 주요 원인으로 작용한다(Kim et al., 2020)^[6]. 또한, 국내 24시간 기류의 유입경로 분석 연구에서 국내 정체 기류(Stagnant)와 국외 유입 기류(Unstagnant)를 분석하였을 때 정기 기류가 11.4%로 적은 비중을 차지하였고, 국외 유입 기류가 88.6%를 차지하며 국외 오염물질의 유입 가능성을 시사한다(Ryoo et al., 2019)^[24]. 기상요인 중 하나인 강수량과 PM₁₀의 관계 분석 결과 강수량, 세정율은 PM₁₀ 농도와 반비례 관계라는 것을 알 수 있었다(Lim, et al., 2012)^[16]. 또한 4

차 계절관리제 결과 농도가 증가하였는데, 해당시기에 기상요인의 영향을 받은 것으로 나타났다. 해당시기에는 풍속이 감소(2.1 m/s →1.9 m/s), 대기정체일수 증가(4일 이상), 고품속일 감소(14일 이하)와 같은 기상영향이 존재하였다(환경부)^[17].

춘천은 일반적으로 청정지역으로 알려져 왔으나, 서울과의 비교 연구를 통해 대기 오염물질 농도가 생각보다 높은 수준임이 확인되었다(Jeong, 2008)^[4]. 특히, PM₁₀의 농도를 살펴본 결과, 춘천과 서울 모두 감소하는 추세를 보였음에도 불구하고, 춘천과 서울, 두 도시의 농도 수준은 비슷했다(Lee and Kwak, 2018)^[14]. 이는 춘천이 대규모 대기오염 배출원이 거의 없는 상황에서도 대기오염물질 농도가 서울과 비슷하다는 점에서 주목할만하다. 실제로 2016-2021년의 연간 서울의 PM₁₀배출량은 약 9,532,963 톤으로, 춘천의 배출량인 528,138 톤에 비해 약 18배 이상 많았다. PM_{2.5}의 경우도, 서울 2,605,801 톤, 춘천 209,891 톤으로 서울이 춘천의 약 12배 이상이었다. 서울과 춘천의 배출량 비교 자료는 Fig. 1에 제시하였다(통계청, 2024)^[18]. 이처럼 서울의 배출량이 월등히 높았으나, 두 도시의 대기오염물질 농도가 비슷한 이유는 외부에서 유입되는 오염물질의 기여가 컸을 가능성을 시사한다.

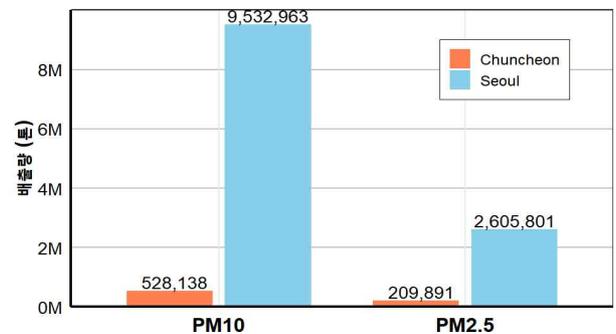


Fig. 1 Emissions from Seoul and Chuncheon(통계청, 2024).

이와 더불어, 춘천의 대기질이 외부 유입 뿐만 아니라 기상요인에 의해 영향을 받을 수 있다는 점도 주목할 점이다. 기상요인은 대기 중 오염물질의 확산, 이동, 정체와 같은 현상에 영향을 미칠 수 있다. 대기정체의 경우 외부에서 유입된 오염물질이 춘천에 장기간 체류하며 고농도를 만들 가능성이 있다. 따라서 본 연구는 외부유입과 기상요인이 춘천의 대기오염에 어떠한 영향을 주는 것인지 규명하고자 한다.

2. 연구방법

본 연구는 춘천지역에서 PM₁₀ 및 PM_{2.5}의 농도에 영향을 미

치는 외부유입과 기상요인의 기여를 규명하기 위해 역계적 분석과 기상통계 분석을 진행하였다. 연구대상 대기오염물질로 PM₁₀과 PM_{2.5}를 선정하게 된 원인에 대해서는 이들이 대기 중 체류시간이 상대적으로 길기 때문에 선정하였다(Sim, 2019)^[23]. NO_x와 O₃의 경우 이동확산보다는, 대기중에서의 화학반응의 생성과 소멸, 기상요소의 원인영향이 높다(Lee et al., 2004; Peterson et al., 2019)^[12, 20]. 반면 PM₁₀과 PM_{2.5}의 경우 긴 체류시간을 갖고 중장거리 이동의 특성을 갖기 때문에 연구대상 물질로 선정하였다. 이를 분석하기 위해 춘천시역의 8년치의 장기간(2015.01.01.-2022.12.31)대기 및 기상 데이터를 종합적으로 분석하였다. PM₁₀과 PM_{2.5}의 농도 데이터는 에어코리아(Air Korea)^[11]에서, 기상데이터의 경우 기상청의 기상자료 개방 포털^[8]을 이용하였다.

2.1 역계적 분석 (HYSPLIT)

오염물질의 국외유입 영향을 분석하기 위해 Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Transport (HYSPLIT) 모델을 이용하여 진행하였다. HYSPLIT 모델은 미국 국립해양대기청(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)산하 대기연구소(Air Resources Laboratory, ARL)와 호주기상청이 공동개발한 모델로, 여러 기관에서 오염물질의 장거리 수송모델로 사용되고 있다. 이 모델은 오염물질의 전방향 및 역방향으로의 궤적 추적도 가능한 코드로 장거리 이동이나 추적 등에 많이 활용되고 있다(Lee et al., 2007)^[11]. 분석 기간은 2015년 1월 1일부터 2022년 12월 31일까지 총 8년간의 데이터로 수행하였으며, 기상데이터는 National Centers for Environmental Prediction (NCEP)를 활용하였다. NCEP 2.5-degree 6-hourly data를 사용하였는데, 1948년부터 제공되는 기상자료로, 125Mb 단위로 매달 데이터를 다운로드할 수 있어 용량 관리가 용이한 것이 특징이다. 다른 기상데이터인 Global Data Assimilation System (GDAS) 1-degree 3-hourly data도 많이 사용되지만, GDAS 데이터는 1주일 단위로 다운받아야 하고 용량이 매우 커서 장기간 클러스터링에는 적합하지 않았기 때문에 본 NCEP 데이터를 사용하였다. 대상지점은 춘천의 지리적 위치인 위도 37.87° N, 경도 127.74° E로 설정되었으며, 자료는 24시간 단위로 세분화하여 처리한 후, 하루 단위로 사용하였다. 본 연구에서는 기상 데이터가 1시간, 24시간(하루), 월, 연 단위로 존재하므로 이에 맞춰 역계적도 24시간으로 처리하였다. 분석 방법으로는 대기오염물질의 유입경로를 파악하기 위해 군집 분석(Clustering)을 적용하였으며, 2922일 동안의 하루 단위 궤적 데이터를 5개의 주요 이동 경로(클러스터)로 분류하여 시각화하였다. 이를 통해 계절별 주요 이동 경로(클러

스터)로 분류하여 시각화하였다. 이를 통해 계절별 주요 이동 경로를 정의하고, 각 경로에 따른 대기오염물질 농도의 차이를 분석하였다. 고농도 이벤트 시 외부유입의 기여도를 클러스터링을 통해 시각적으로 나타내었다.

2.2 기상통계 분석 및 대기오염물질 자료 수집

기상통계 분석에선 기상요인이 대기오염 물질 농도에 미치는 영향을 분석하였다. 이 때, 춘천시역이 기상요인에 영향을 받는 지에 대해서는 서울과의 비교를 통해 두 지역을 대상으로 기상요인(풍속, 상대습도)과 농도 간 상관관계를 분석하였다. 두 지역의 대기질 특성과 기상요인의 상관관계를 비교함으로써 춘천의 특이성을 파악하고 기상요인이 농도에 미치는 영향을 더 이해하기 위함이다. 분석 기상요인으로는 풍속과 상대습도로 선정하였다. 풍속은 외부유입 시 장거리 이동요소로서의 역할이 주목되며, 풍속이 강할 시 그 농도가 낮아지는 경향을 보여 강력한 지배인자로 판단된다(Chae, 2009)^[3]. 상대습도의 경우, 습도가 높아지면 에어로졸 수분함량이 증가해 액상반응이 활성화되어 생성반응이 촉진될 수 있다. 상대습도가 대기 에어로졸 성장에 미치는 영향을 연구한 실험에서는 수분 공급 직전에 비해, 수분을 공급하는 동안의 입자 수 농도가 증가하였다(Lee et al., 2004)^[13]. 풍속과 상대습도가 온도를 포함한 타 기상요인에 비해 본 연구에서 더 직접적인 영향을 미친다고 보아 두 기상요인으로 선정하였다. 풍속과 습도 데이터는 기상청의 기상자료개방 포털에서 수집하였다. 지상데이터 중 종관기상관측(Automated Synoptic Observing System, ASOS)을 사용하였는데, 종관규모의 날씨를 파악하기 위하여 정해진 시각에 모든 관측소에서 같은 시각에 실시하는 지상관측 방법이다. 수집된 기상자료는 2015년 1월 1일부터 2022년 12월 31일까지의 8년간 일평균 값으로 처리되었다. PM₁₀ 및 PM_{2.5} 농도 데이터는 에어코리아(Air Korea)에서 동일한 기간의 일평균 자료를 활용하였다. 대상오염물질과 풍속, 습도 등의 기상요인 간 상관관계 분석을 위해 R 프로그래밍을 활용하였으며, R 프로그램의 ggplot2, readxl, dplyr 패키지를 사용하였다. 풍속 및 습도와 대기오염물질 간 상관관계를 분석하기 위해 피어슨 상관계수(Pearson Correlation Coefficient)를 계산하였다. 또한, 기상요인의 농도변화에 미치는 영향을 평가하기 위해 농도수준(저농도, 중간농도, 고농도)에 따라 풍속 및 습도의 분포를 시각화 하였다. 고농도와 저농도 간의 차이를 검증하기 위해 독립표본 t-검정(Independent, t-test)을 사용하여 통계적 유의성을 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 외부 유입 영향 확인

춘천지역의 국외 유입 영향성을 규명하기 위해 HYSPLIT 모델을 활용하여 총 8년의 분석기간 동안 2922 일에 대한 24 시간 단위의 역궤적 경로 데이터를 클러스터링 분류한 결과, 역궤적 유입경로는 총 다섯가지 주요 클러스터로 구분되었다. 클러스터별 빈도 퍼센트를 나타낸 결과는 Fig. 2에 제시하였다. Cluster1은, 전체 경로 중 15% (443 일)를 차지하며, 북서쪽에서 장거리 이동한 유입경로였다. 해당 경로는 춘천으로 유입되기 전 북서방향으로부터 먼 거리를 이동한 장거리 오염물질을 포함할 수 있으며, 해당 경로 유입 시 주로 북서쪽의 북한 및 중국지역에서 기원한 오염원의 영향을 받을 수 있음이 분석되었다. Cluster2는 전체경로 중 17%를 차지하며, 북한에서 중거리 이동한 경로로 나타났다. Cluster3은 전체경로의 16%로 서쪽에서 장거리 이동한 경로였다. 해당 경로는 춘천에 유입되기 전 서쪽 지역의 국내 및 국외 기원지를 거쳤을 가능성을 시사한다. Cluster4도 16%로, 북동쪽 및 동쪽의 이동경로이다. 이는 강원도 해안 지역에서 발생하는 오염원 혹은 동해에서 기원한 해양 오염원 및 선박 배출물의 유입 가능성을 보여준다. 마지막으로, Cluster5는 전체 사례 중 36%로 가장 큰 비중을 차지하며, 남쪽에서의 이동경로가 특징적이다. 이 경로는 다른 클러스터에 비해 비교적 짧은 거리의 이동을 보이며, 빈도가 가장 높은 주 이동경로로 확인되었다. 이는 춘천지역의 대기오염에 있어 남쪽에서 유입되는 기류와 오염물질의 영향이 상대적으로 빈번할 점을 보여준다. 또한, 해당 기류는 국내에서 발생한 오염물질이 정체 되는 국내 정체 현상을 나타내었다.

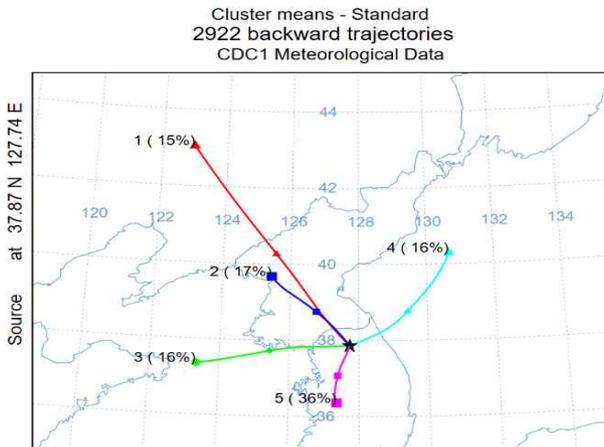


Fig. 2 Cluster by standard 2922 backward trajectories by distribution.

3.1.1 농도 분포 분석

이와 같은 역궤적 결과를 농도 분포에 따라 분석한 결과는 다음 Fig. 3에 제시하였다. 각 클러스터 별 PM₁₀과 PM_{2.5}의 농도 특성은 전체적으로 비슷한 분포를 보였다. PM₁₀ 농도는 모든 클러스터에서 PM_{2.5} 보다 높은 분포를 보였으며, PM_{2.5}와의 농도 분포 차이가 가장 컸던 경로는 Cluster1이었다. 클러스터별 분포는 C1 > C4 > C3 > C2 > C5 순으로 나타났으며, PM_{2.5} 농도 분포는 PM₁₀에 비하여 상대적으로 낮았지만 클러스터별로는 C5 > C2 > C3 > C4 > C1 순으로 높게 나타났다. 면밀하게 살펴보면, 북서쪽(Cluster1, 67.9%, 중국 동북부 및 북한)에서 PM₁₀의 농도분포가 가장 높게 나타난 반면, 남쪽(Cluster5, 62.8%, 국내 정체)은 PM_{2.5}의 축적이 용이해진다. 또한, 전구물질들이 화학반응을 통해 PM_{2.5}로 전환될 가능성도 높아져 위와 같은 결과가 도출된 것으로 해석할 수 있다.

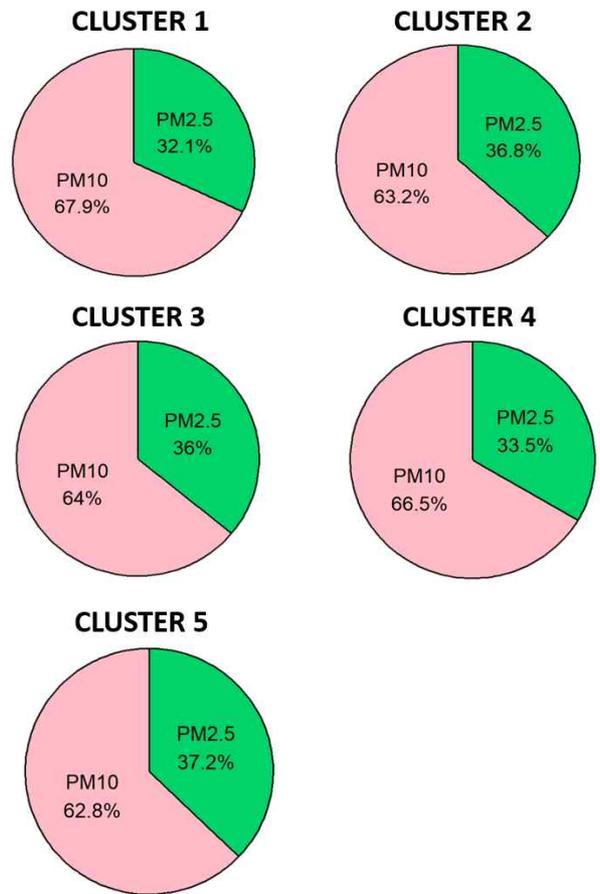


Fig. 3 Concentration distribution by backward trajectories cluster.

3.1.2 계절별 농도별 분석

이번에는 각 클러스터가 대기오염물질과 계절별 및 농도별로 관계가 있는지에 대해 분석하기 위해 클러스터별로 계절과 농도 분석을 진행하였다. 계절별 클러스터의 분석결과는 Fig. 4에 그 결과를 나타내었다. 봄은 3월-5월, 여름은 6월-8월, 가을은 9월-11월, 겨울은 12월-2월로 설정하였다. 분석 결과, 대기오염물질의 유입경로는 계절에 따라 차이를 보였다. 봄, 여름, 가을에는 남쪽(Cluster5, 국내정체)이 각각 37.09%, 64.13%, 27.06%로 가장 큰 비중을 차지한 반면, 겨울에는 북서쪽 유입(Cluster1, 34.35%)이 주요 경로로 나타났다. 특히 가장 높은 계절분포는 여름의 Cluster5 였는데, 이는 64.13%로 남쪽유입의 국내정체 경로였다. 여름철 남쪽에서의 기류 유입의 우세성을 추측해 볼 수 있다. 이 국내정체(Cluster5)를 제외해본 경로에서는 봄에는 서쪽 유입(Cluster3, 24.05%), 여름과 가을에는 동쪽유입(Cluster4, 18.21% 26.24%)이 두 번째로 큰 비중을 보였으며, 겨울에는 북서쪽 유입(Cluster2, 24.95%)이 두 번째로 높은 경로로 분석되었다. 이러한 계절별 경로의 분석 결과는 전형적인 계절별 기단패턴을 보였다. 여름철 높은 Cluster5의 유입(64.13%)은 북태평양 기단의 영향을, 겨울철 Cluster의 북서쪽 유입(34.35%)은 시베리아 기단의 영향을 받았을 가능성이 높음을 보여준다. 이는 계절에 따라 대기오염물질의 이동이 계절과 지역의 영향을 받을 가능성이 있으며, 계절적 특성을 고려한 대기오염관리 및 정책 수립이 필요할 수 있음을 시사한다.

PM₁₀ 및 PM_{2.5} 농도의 클러스터별 분석 결과는 Fig. 5에 제시하였다. 서쪽유입(Cluster3, C3)에서 두 오염물질 모두 농도가 가장 높게 나타났으며, 북서쪽 유입(Cluster2, C2)이 그 뒤를 이었다. 이는 서쪽에서의 이동을 통해 춘천으로 유입되는 기류 중, 고농도의 PM₁₀, PM_{2.5} 공기가 포함되었을 가능성을 보여준다.

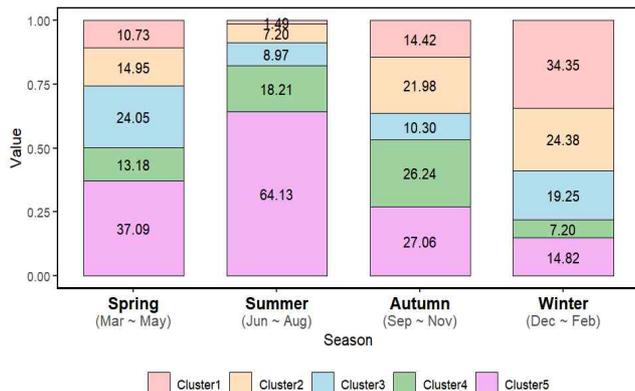


Fig. 4 Distribution of clusters by season.

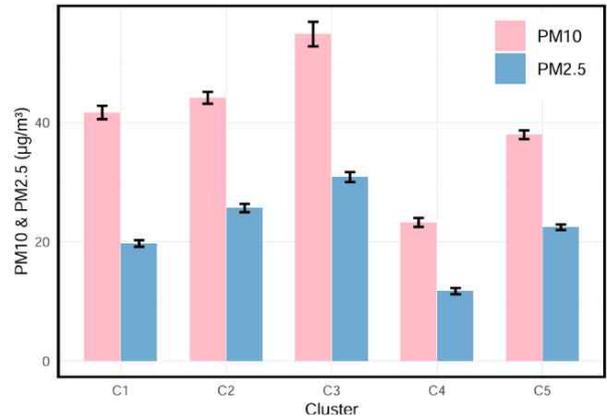


Fig. 5 Compare PM₁₀ and PM_{2.5} Concentration Between Clusters.

3.2 역계적 분석 - 고농도 이벤트 경로 분석

2015년부터 2022년까지 PM₁₀ 및 PM_{2.5}의 고농도 발생 시 대기 유입경로를 분석하였다. 고농도의 판단기준은 미세먼지 예보등급 중 나쁨 이상으로 선정하였다. PM₁₀의 경우 81 µg/m³ 이상, PM_{2.5}는 36 µg/m³ 이상이였다. PM₁₀의 고농도 사례는 157일, PM_{2.5}의 고농도 사례는 484일로 확인되었으며, 이를 주요 유입경로 5개의 클러스터로 분류하여 고농도 이벤트의 경로특성을 분석하였다. 고농도 이벤트 발생 시 역계적 유입경로는 총 다섯가지 주요 클러스터로 구분되었다. 이는 클러스터별 빈도 퍼센트의 결과는 Fig. 6에 나타내었다.

PM₁₀의 고농도 유입경로 사례 중 가장 큰 비중을 차지한 유입경로는 Cluster4로, 43%(68일)의 서해상에서 유입된 경로로 분석되었다. 그 다음으로는 Cluster1(25%, 40일)과 Cluster2(16%, 25일)가 주요 경로로 분석되었으며, 각각 서쪽 및 북서쪽에서 유입된 기류가 PM₁₀ 농도증가에 기여하였다. 반면 Cluster3(8%, 12일)와 Cluster5(8%, 12일)는 유입빈도가 상대적으로 낮았으나, 국지적 영향 및 동남쪽 지역에서의 공기 이동이 일부 영향을 미친 것으로 보인다.

PM_{2.5} 고농도 역계적 유입경로는 총 다섯 가지 주요 클러스터로 구분되었다. 또한 클러스터 별 빈도 퍼센트를 나타낸 결과는 Fig. 7에 제시하였다. PM_{2.5}의 고농도 유입 경로 사례에서는 Cluster2가 가장 높은 비중(36%, 172일)을 차지하였으며, 서쪽에서 유입된 공기가 PM_{2.5} 고농도 사례의 주요원인으로 파악되었다. 이는 서쪽에서 유래한 PM_{2.5}가 장거리 이동을 통해 춘천으로 유입된 경로로, 비교적 높은 빈도를 보였으며, PM₁₀의 고농도 유입경로 사례중 가장 큰 비중을 차지한 유입 경로인

Cluster4의 주요 경로와 서쪽에서 유입이라는 유사한 패턴을 보였다. 그 외에도 Cluster3 (16%, 78 일)는 북쪽, Cluster5(20%, 97 일)는 남쪽에서 유입된 경로로 분석되었으며, Cluster1(21%, 104 일)는 서쪽 및 남서쪽에서의 유입경로로 분석되었다. 가장 낮은 빈도는 Cluster4(33%, 7 일)의 동쪽 유입경로로 PM_{2.5} 고농도 사례의 발생에 상대적으로 낮은 빈도로 관찰되었다.

PM₁₀의 고농도 발생일은 157 일, PM_{2.5}의 고농도 발생일은 484 일로 PM_{2.5}의 고농도 발생일이 더 많았다. PM₁₀ 및 PM_{2.5} 고농도 사례 모두에서 서쪽(PM₁₀, Cluster1 및 PM_{2.5}, Cluster2)과 남서쪽(PM₁₀, Cluster4 및 PM_{2.5}, Cluster1)의 유입경로가 중요한 기여요인으로 작용함을 확인하였다. 이는 특히, 서쪽 및 남서쪽에서 유입된 공기가 춘천의 대기질에 상당한 영향을 미쳤으며, 해당경로에서 유입되는 오염물질 농도가 고농도 발생에 중요한 요인임을 시사한다. 전체 기간의 역궤적 경로에서 남쪽 및 국내 정체(Cluster5)의 유입 빈도가 가장 높았던 것을 고려해 본다면, 비교적 빈도가 높고 농도가 중간 수준 혹은 저농도인 유입이 주를 이루었을 가능성이 있다.

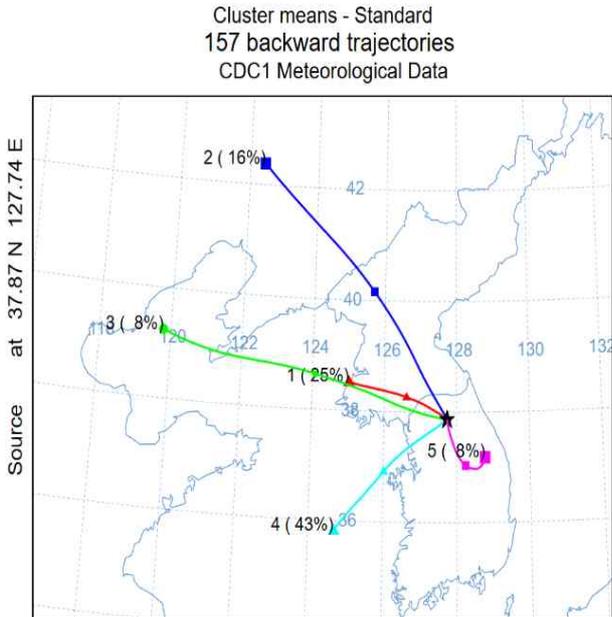


Fig. 6 Cluster by standard 157 high concentration backward trajectories by distribution PM₁₀.

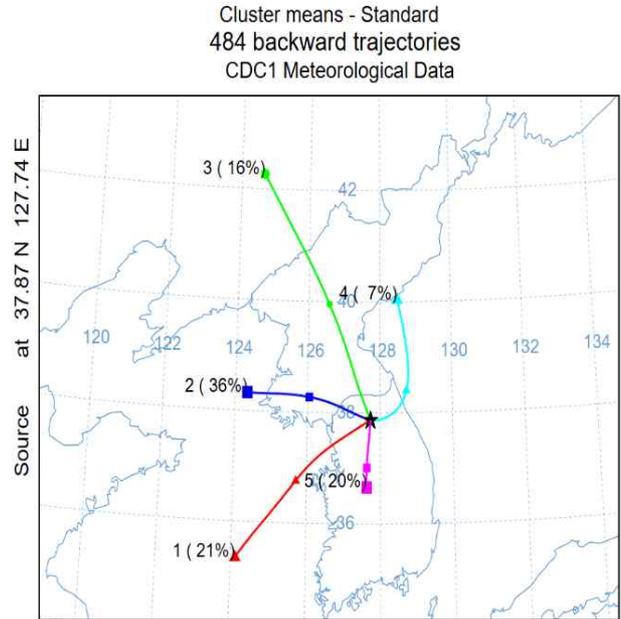


Fig. 7 Cluster by standard 484 high concentration backward trajectories by distribution PM_{2.5}.

3. 기상통계 분석

춘천지역의 기상 요인의 영향성을 규명하기 위해 통계프로그램인 R을 활용하여 2015년 1월 1일부터 2022년 12월 31일까지 총 8년간의 농도와 기상 데이터를 바탕으로 기상통계 분석을 수행하였다. 먼저 춘천지역이 기상요인의 영향을 받는지에 대해 분석했고, 풍속과 습도의 기상요인이 농도에 어떠한 영향을 주는지에 대해 분석했다. 춘천지역이 기상에 영향을 받는지에 대해서는 서울과의 비교를 통해 춘천과 서울을 대상으로 기상요인(풍속, 상대습도)과 농도(PM₁₀, PM_{2.5})간의 상관관계를 비교, 분석하였다. 풍속과 습도가 농도에 미치는 영향에 대해서는 저농도, 중간농도, 고농도일때의 풍속, 습도를 분석해 보았다. PM₁₀과 PM_{2.5}의 농도 데이터는 에어코리아(Air Korea)에서, 기상 데이터는 기상청의 기상자료 개방포털을 이용하였다. 춘천지역이 기상의 영향을 받는지에 대해 알아보기 위해 기상 요인(풍속, 습도)과 PM₁₀, PM_{2.5}의 상관관계를 나타낸 그래프를 Fig. 8에, 서울은 Fig. 9에 제시했다.

춘천의 경우, PM₁₀과 풍속(Wind Speed, WS) 간 상관관계수는 $r = -0.12$, ($p < 0.0016$)로 나타났으며, 약한 음의 상관성을 보였다. 이는 풍속이 증가할수록 PM₁₀ 농도가 감소하는 경향을 시사하나, 그 영향이 크지 않음을 의미한다. 반면, PM_{2.5}와 풍속

간의 상관계수는 $r = -0.34$ ($p < 2e-16$)로 PM₁₀ 보다는 강한 음의 상관성을 보였다. 따라서, 춘천지역에서 PM₁₀, PM_{2.5}는 풍속의 영향을 적게 받으며, PM_{2.5}가 풍속의 영향을 다소 더 많이 받았다. 이는 풍속 증가에 따라 PM_{2.5}가 더 효과적으로 확산되거나 제거될 수 있는 가능성을 시사한다.

상대습도(Relative Humidity, RH)와의 상관관계에서는 PM₁₀의 경우 $r = -0.18$ ($p < 1.7e-06$)로 나타나 통계적으로 유의미한 음의 상관성을 보였으며, PM_{2.5}는 $r = 0.04$ ($p < 0.23$)로 약한 양의 상관성을 보였으나 통계적으로 유의미하지는 않았다. 일반적으로 습도가 높아지면 에어로졸의 수분함량이 증가하여 액상반응이 활성화되고, 이에 따라 생성반응이 촉진될 것이라는 가설과는 달리, 춘천지역에서는 PM₁₀이 약한 음의 상관관계를 나타냈고, PM_{2.5}는 통계적 유의성을 확보하지 못한 약한 양의 상관관계를 보였다.

서울지역의 풍속과 PM₁₀ 농도 간의 상관계수는 $r = -0.04$ 로 약한 음의 상관관계였다. 풍속과 PM_{2.5} 농도 간의 상관계수는 $r = -0.22$ 로 PM₁₀보다 높은 음의 상관관계를 나타냈으며, 유의미한 결과로 확인이 되었다($p < 2e-16$). 이는 서울지역에서 PM_{2.5}가 PM₁₀에 비해 풍속의 영향을 다소 더 받는다는 것을 보여준다.

상대습도와의 관계를 살펴보면, PM₁₀의 경우 상대습도와의 상관계수는 $r = -0.14$ 로 유의미하지만, 약한 음의 상관관계를 나타냈다($p < 8e-15$). PM_{2.5}와의 상관계수는 $r = -0.03$ 으로 낮으며, 통계적으로 유의미하지 않았다($p < 0.078$).

전반적으로 춘천지역에서 기상요인과 대기오염물질 농도의 상관관계가 서울지역에 비해 유의미한 값을 보이는 경우가 더 많았으나, 두 지역 모두 전반적으로 여전히 약한 수준의 관계를 보였다. 따라서, 춘천지역의 PM₁₀ 및 PM_{2.5} 농도에 풍속과 습도가 미치는 영향은 거의 없었다. 춘천에서는 풍속과 PM_{2.5}간의 상관관계가 $r = -0.34$ 로 PM₁₀에 비해 다소 더 강하게 나타났으며, PM_{2.5}가 강풍이 작용할 때 PM₁₀보다 확산과 희석이 진행되어 더 영향을 받을 가능성이 확인되었다. 이와 같이, 춘천과 서울 두 지역 모두에서 풍속은 대기오염물질 농도와 음의 상관관계를 보였으나, 춘천이 다소 더 강하게 작용했다. 하지만 약한 수준의 상관관계 결과를 보이기 때문에 춘천지역의 PM₁₀과 PM_{2.5} 농도 변화에 풍속이 미치는 영향은 거의 없는 것으로 볼 수 있었다. 상대습도의 경우, 두 지역 모두에서 PM₁₀ 농도와 약한 음의 상관관계를 보였다. PM_{2.5}와는 서울에서 음의 관계를 보였지만, 춘천에서는 $p < 0.23$ 으로 유의미하지 않은 양의 상관관계를 보였다. 따라서 상대습도는 춘천의 PM₁₀과 PM_{2.5} 농도변화에 거의 영향

을 미치지 않았다.

풍속과 습도가 농도에 미치는 영향에 대해서는 저농도, 중간농도, 고농도일 때의 풍속, 습도를 분석해 보았다. 대기오염 농도 수준(고농도, 중간농도, 저농도)에 따른 풍속(WS)과 습도(RH)의 차이를 분석한 결과, PM₁₀, PM_{2.5} 농도는 풍속과 약한 음의 상관관계를 보였으며, 상대습도와도 농도에 따라 차이를 나타내었다. 농도 수준은 미세먼지, 초미세먼지 예보등급의 기준을 이용했다. 3.2 파트에서는 고농도 기준만 언급하였으나, 본 절에서는 농도 수준을 더욱 세분화하여 고농도, 중간농도, 저농도의 기준을 모두 제시하였다. 고농도의 경우 미세먼지($PM_{10} \geq 81 \mu\text{g}/\text{m}^3$)와 초미세먼지($PM_{2.5} \geq 36 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 예보등급의 "나쁨 이상" 기준을 적용하였다. 중간농도는 보통 기준에 해당하며, 저농도의 경우 $PM_{10} \leq 30 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $PM_{2.5} \leq 15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 설정하였다. 풍속과의 결과는 Fig. 10에, 습도와의 결과는 Fig. 11에 제시하였다. 통계적 유의성은 다음과 같이 표현하였다. $p^* = p < 0.05$, $p^{**} = p < 0.01$, $p^{***} = p < 0.001$.

PM₁₀ 및 PM_{2.5} 농도에 따른 풍속분포를 분석한 결과, 두 오염물질 모두 저농도 구간에서 높은 풍속, 고농도 구간에서 낮은 풍속을 보이는 음의 상관관계가 관찰되었다. PM₁₀의 경우, 저농도(Low)와 중간농도(Mid)구간의 풍속 간에는 통계적으로 유의미한 차이가 있었으며(p^{***}), 저농도(Low)와 고농도구간 간에도 유의미한 차이가 나타났다(p^{***}). PM_{2.5}에 대해서는 저농도와 중간농도, 중간농도와 고농도, 고농도와 저농도 간 모두 유의미한 차이가 확인되었으며(p^{***}), PM_{2.5}의 농도 변화가 PM₁₀보다 풍속의 차이에 더 민감하게 반응하였다. 이는 PM_{2.5}가 풍속과 더 강한 음의 상관관계를 갖음을 의미한다.

강한 풍속일수록 대기의 확산과 희석이 활발해져 오염물질 농도가 감소하는 반면, 저풍속일 경우 대기 정체로 인해 오염물질이 축적되는 결과를 초래할 것이라는 가설과 일치하였다. 특히 PM_{2.5}의 경우, 크기가 더 작고 가벼운 특성으로 인해 풍속변화에 더욱 민감하게 반응하는 결과로 보이며, 고농도와 저농도 간 풍속 차이가 PM₁₀보다 크게 나타났다. PM_{2.5}가 풍속 변화에 의해 더 효과적으로 확산되고 제거될 수 있는 가능성이 큼을 확인하였다.

상대습도와 미세먼지 농도 수준 간의 관계를 분석한 결과, PM₁₀은 저농도(Low) 구간에서 높은 습도를 보였고, 고농도(High) 구간으로 갈수록 상대습도가 감소하는 경향이 나타났다. 저농도와 중간농도(Mid), 저농도와 고농도 간의 차이가 통계적으로 유의미하게 나타났다(p^{***}). 반면, PM_{2.5}는 저농도 구간에서 높은 습도를 보이며 중간농도로 갈수록 습도가 감소하

는 경향을 보였지만, 고농도에서는 다시 증가하였다. 저농도와 중간농도, 중간농도와 고농도 간에는 통계적으로 유의미한 차이가 있었으나(p^{***}), 저농도와 고농도 간에는 유의미한 차이가 나타나지 않았다(NS).

이러한 결과는 PM_{10} 이 $PM_{2.5}$ 에 비해 상대습도 변화에 더 민감하게 반응할 가능성을 시사하며, 상대습도가 PM_{10} 과 같은 큰 입자의 농도변화에 변수로 작용할 가능성을 보여준다. 풍속은 크기가 작은 $PM_{2.5}$ 에 다소 더 높은 약한 음의 영향을 보였던 반면, 습도는 크기가 상대적으로 큰 PM_{10} 에 약한 음의 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 상대습도가 PM_{10} 에 더 영향을 미쳤지만, 약한 관계를 나타내므로 상대습도가 농도에 미치는 영향은 미미하거나 거의 없었다. 이러한 결과는 기존 연구에서 저고도(지상포함)에서는 상대습도의 변화량이 작기 때문에 미세먼지 농도변화에 뚜렷한 영향을 미치지 않았다는 결론과 일치하며(Kim, 2017)^[5], 상대습도 변화와 미세먼지 농도 간의 연관성이 고도에 따라 차별적으로 나타날 수 있음을 시사한다. 따라서 본 연구에서 상대습도와 미세먼지 농도 간 상관성이 거의 없던 결과의 주요 원인은 지상의 기상 데이터를 기반으로 분석이 진행되었기 때문으로 판단된다.

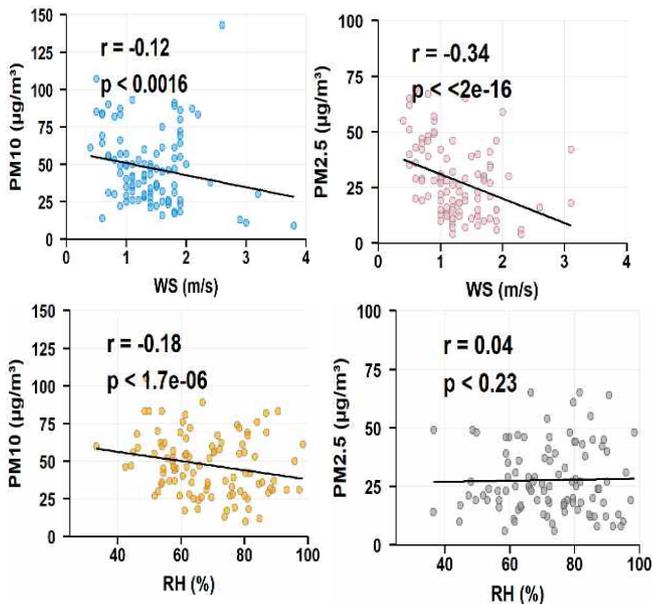


Fig. 8 Correlation between wind speed and Relative humidity with PM_{10} and $PM_{2.5}$ in Chuncheon.

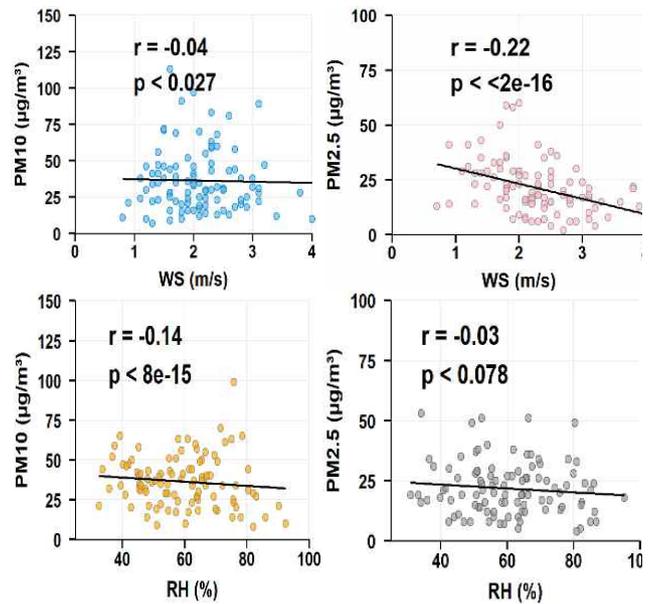


Fig. 9 Correlation between wind speed and Relative humidity with PM_{10} and $PM_{2.5}$ in Seoul.

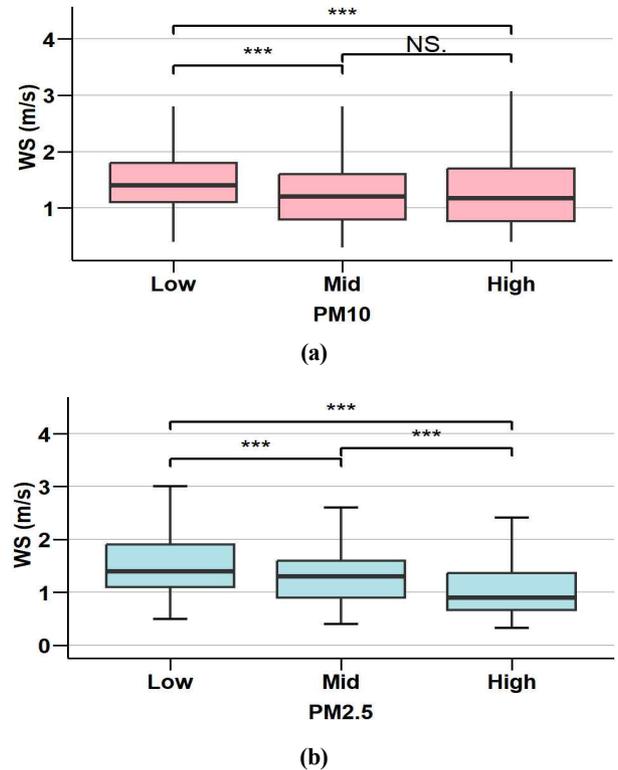


Fig. 10 Wind speed according to PM_{10} (a), $PM_{2.5}$ (b) concentration level.

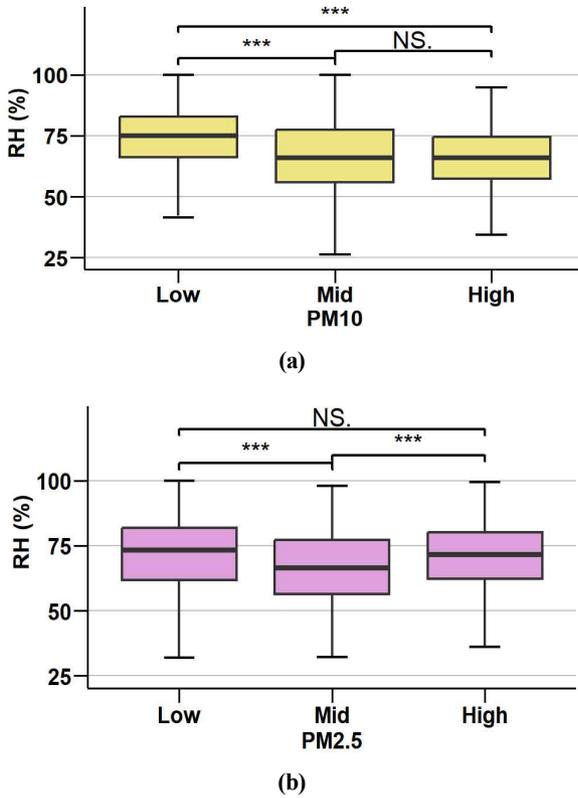


Fig. 11 Relative humidity according to PM₁₀ (a), PM_{2.5} (b) concentration level.

4. 결론

본 연구는 2015년부터 2022년까지 춘천지역의 대기오염물질 (PM₁₀, PM_{2.5}) 농도 증가 및 변화에 외부유입과 기상요인의 영향이 있을 것이라 판단하여 그 영향들을 분석해보았다. 춘천으로 유입되는 역계적 기류와 기상요인(풍속, 습도)간의 상관관계를 분석하며, 농도수준(저농도, 중간농도, 고농도)에 따른 기상요인의 영향을 종합적으로 평가하였다. 이와 같은 연구 결과를 토대로 다음과 같은 결론을 도출하였다.

첫째, 춘천지역의 고농도 PM₁₀ 및 PM_{2.5} 농도는 주로 서쪽기류의 영향을 받은 것으로 나타났다. 이는 중국과 수도권이 위치한 서쪽으로부터 유입된 오염물질이 춘천지역 대기질에 중요한 영향을 미쳤음을 시사한다. 반면, 남쪽으로부터 유입비율이 제일 많았음에도 위와 같은 결과로 해석해본다면, 남쪽에서 유입된 기류는 고농도 물질의 축적보단 대체로 저농도 또는 중간농도 수준의 대기오염물질과 관련이 있다고 볼 수 있다.

둘째, 춘천지역 농도와 풍속 간의 관계는, PM₁₀ 및 PM_{2.5} 모두에서 약한 음의 상관관계를 보였으며, PM_{2.5}($r=-0.34$)에서 그 관

계가 다소 더 강하게 나타났다. 이는 PM_{2.5}가 PM₁₀보다 강한 풍속의 영향이 작용할 시 더 확산되어 농도가 낮아질 가능성이 높음을 보여주었다. 농도수준에 따른 풍속분석의 결과에서도 PM₁₀, PM_{2.5}와 음의 관계를 잘 보여주었지만 PM_{2.5}가 저농도, 중간농도, 고농도 간 모두 유의미한 차이를 보였다. 풍속과의 상관관계는 춘천이 서울보다 크지만, 여전히 약한 수준($r = -0.12, -0.34$)에 머물러 풍속이 춘천지역 농도 변화에 영향을 미친다고 보기는 어려웠다.

셋째, 상대습도는 PM₁₀과 약한 음의 상관관계를, PM_{2.5}와는 약한 양의 상관관계를 보였으나, 전반적으로 상관관계가 약해 농도가 상대습도의 영향을 받는다고 보기 어려웠다. 농도 수준별로는 PM₁₀이 저농도에서 높은 습도를, 고농도에서 낮은 습도를 보이는 경향을 보였으며, PM_{2.5}는 저농도와 중간농도 간 차이는 유의미했으나 고농도에서는 다시 습도가 증가하였다. PM₁₀이 PM_{2.5}에 비해 상대습도 변화에 다소 더 민감하게 반응함이 관찰되었지만, 춘천지역의 상대습도와 상관관계가 약했으므로 농도가 상대습도에 영향을 받는다고 볼 수 없었다.

결론적으로, 본 연구는 춘천지역 대기오염물질(PM₁₀, PM_{2.5})의 농도가 외부유입과 기상요인의 영향을 받는다는 점을 확인하고자 하였다. 춘천지역이 외부유입 기류, 특히 서쪽에서 기원한 고농도 PM₁₀ 및 PM_{2.5}의 영향을 받는 지역임을 확인하였다. 반면, 기상요인은 외부유입된 오염물질이 춘천지역에 미치는 영향을 증가시키거나 감소시키는데 있어 그 역할이 미미했다. 약한 상관성을 보이기는 하였지만, PM_{2.5}는 풍속변화에 의해 민감하게 영향을 받는 반면, PM₁₀은 상대습도의 변화에 민감하게 반응하는 특성을 보였다. 춘천은 서울에 비해, 풍속과 습도의 상관관계가 다소 뚜렷했으나, 여전히 약한 수준의 관계를 보였기 때문에 춘천의 PM₁₀, PM_{2.5} 농도에 풍속과 습도가 미치는 영향은 거의 존재하지 않았다. 이러한 결과는 대기질 관리전략 수립 시 외부유입을 국가, 지역적 맥락에서 고려할 필요성을 강조한다. 특히 춘천지역의 PM₁₀, PM_{2.5}의 개선을 위해서는 국외유입의 영향을 줄이기 위한 국제적 협력과 함께, 적합한 정책 관리대책이 요구된다.

사 사

이 연구는 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원(NIER-2021-03-03-007)을 받아 수행하였습니다. 또한 2023년도 강원대학교 학술연구조성비로 연구하였습니다.

References

- [1] Air Korea, n.d. Inquiry of final confirmed measurement data, <https://www.airkorea.or.kr/web/pastSearch?pMENU_NO=123>.
- [2] An, J., KIER, viewed 17 Jul.2023, 1990-2019 Changes in the concentration of ultrafine dust (PM_{2.5}) in the atmosphere of OECD member countries, <<https://www.kier.re.kr/tpp/tppBoard/view/24?menuId=MENU00962>>.
- [3] Chae, H. J, 2009, Effect on the PM₁₀ Concentration by Wind Velocity and Wind Direction, Journal of Environmental and Sanitary Engineering. 24:3 37-54.
- [4] Jeong, H. J, 2008, Study on correlation between Air Pollution Concentration and Meteorological Element in Seoul and Chuncheon(1997~2006), Master Thesis, Hanyang University, Republic of Korea.
- [5] Kim, H. S, 2017, Development of aerial particle measurement system using UAV(Unmanned Aerial Vehicle) and humidity effect on particle concentration, Master Thesis, Hanyang University, Republic of Korea.
- [6] Kim, H., Zhang, Q. and Sun, Y., 2020, Measurement report: Characterization of severe spring haze episodes and influences of long-range transport in the Seoul metropolitan area in March 2019, Atmospheric Chemistry and Physics. 20:19 11527-11550.
- [7] Kim, K., Lee, C., Choi, D., Joo, H., Kim, S, Lee, K, Park, J, Han, J, 2023, How air pollutants influence environmental issues: Focused on Seoul Metropolitan Area, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment. 39:5 807-829.
- [8] Korea Meteorological Administration, n.d., Automated Synoptic Observing System(ASOS)-Data, <<https://data.kma.go.kr/data/grmd/selectAsosRltnList.do?pgmNo=36>>.
- [9] Kim, S. Y, 2020, Analysis of the factors influencing PM_{2.5} concentration, Journal of The Korean Data Analysis Society, 22:4 1335-1347.
- [10] Kim, Y, & Lee, G, 2018, Trend of Air Quality in Seoul: Policy and Science, Aerosol and Air Quality Research, 18:9 2141-2156.
- [11] Lee, K, Moon, J, Park, H, 2007, Case Analysis of Air Diffusion Characteristics of Pollutants Using HYSPLIT Model, Abstracts of Proceedings of the Korean Radioactive Waste Society SPRING 2016 14:1 247.
- [12] Lee, S, Bae, G, Jim, H, Ghim, Y, Moon, K, Shim, S, 2004, Shipboard measurements of air pollutants across the Yellow sea, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment. 20:1 33-46.
- [13] Lee, S, Kim, M, Bae, G, Lee, Y, Jin, H, Moon, G, 2004, Effect of Water Vapor on the Growth of Atmospheric Aerosols in a Smog Chamber, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment. 38. 139-140.
- [14] Lee, Y, Kwak, K, 2018, Using visibility to estimate PM_{2.5} concentration trends in Seoul and Chuncheon from 1982 to 2014, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment. 34:1 156-165.
- [15] Lho, S. W, 2020, Impacts on the Degree of Air Pollution by Industrial Emission Limit Value, Journal of Environmental Policy and Administration. 28:1 51-70.
- [16] Lim, D, Lee, T, Kim, D, 2012, Quantitative Estimation of Precipitation Scavenging and Wind Dispersion Contributions for PM₁₀ and NO₂ Using Long-term Air and Weather Monitoring Database during 2000~2009 in Korea, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment. 28:3 334-339.
- [17] Ministry of Environment viewed 23 May.2023, The results of the 4th fine dust seasonal management system are disclosed, <https://www.airkorea.or.kr/portal/web/board/7/1761/?pMENU_NO=161>.
- [18] Ministry of Environment viewed 26 Feb.2024, Air Pollution Releases in Chuncheon, <https://stat.kosis.kr/statHtml_host/statHtml.do?orgId=651&tblId=DT_65101_L000010&conn_path=I2&dbUser=NSI_IN_651>.
- [19] Park, L, Han, K, 2014, Contribution of long-range transported air pollution from China to particulate matter over Korean Peninsula, The Magazine of the Korean Society of Hazard Mitigation. 54 26-36.
- [20] Peterson, D, Hyer, E, Han, S, Crawford, J, Park, R, Holz, R, Kuehn, R, Eloranta, E, Knute, C, Jordan, C, Lefer, B, 2019, Meteorology influencing springtime air quality, pollution transport, and visibility in Korea, Elementa-Science of the Anthropocene, 7, Science of the Anthropocene. 57:7 1-23.
- [21] Seo, H., Lee, H, 2019, How air pollutants influence on Environmental diseases? : Focused on Seoul Metropolitan Area, Seoul Studies Academic Journal. 20:3 39-59.

- [22] Shim, C., Choi, K., Gong, S., Hahn, J., Lee, S., Chung, Y., Jung, E., Na, G., 2023, The Significance of the 3rd Comprehensive National Air Quality Improvement Plan and Directions for Policy Implementation, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment. 39:5 710-711.
- [23] Sim, C. W, 2019, A study on the characteristics of hazardous heavy metal distribution and analysis of fine dust concentration in urban atmosphere, Master Thesis, Hoseo University, Republic of Korea.
- [24] Yoo, J, Kwan, T, Kang, I, Lee, G, Jo, C, Kim, J, Kim, H, Jang, W, Park, J, Yoo, T, 2019, A Study for Characteristics of Fine Particulate Matter and Atmospheric Stagnation Considering Elevation and Backward Trajectory, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment. 35:6 706-712.

대표저자소개

최 나 래(Na Rae Choi)



- 2016년 2월 : 이화여자대학교 환경공학과 (공학석사)
- 2021년 8월 : 이화여자대학교 환경공학과 (공학박사)
- 2021년 9월 ~ 2023년 2월 : 미국 조지아공과대학 (Research Scholar)
- 2023년 3월 ~ 현재 : 강원대학교 환경공학전공 (조교수)

<주요 연구 분야>

- 대기오염물질의 모니터링 및 미량 분석기법 개발/대기 중 유해 물질의 대기화학반응 메커니즘 규명