

논문

배출원 기반 대기 중 농도 감축 정책에 대한 제고 - 광주 및 서울시 관측 농도 사례 분석

Reflection of Mitigation Strategy for Air Pollution based on Clean Air Policy Support System - Concentration Analysis from the Atmospheric Monitoring Network in the Seoul and Gwangju Areas

박채형[†], 오세호^{1)†}, 송명기, 최운선, 배민석*

국립목포대학교 환경공학과, ¹⁾국립기상과학원 미래기반연구부

Chaehyeong Park[†], Sea-Ho Oh^{1)†}, Myoungki Song, Wunseon Choi,
Min-Suk Bae*

Department of Environmental Engineering, Mokpo National University,
Muan, Republic of Korea

¹⁾Innovative Meteorological Research Department, National Institute of Meteorological Sciences,
Jeju, Republic of Korea

[†]These two authors contributed equally to this work as co-first authors.

접수일 2020년 3월 4일
수정일 2020년 3월 23일
채택일 2020년 4월 2일

Received 4 March 2020
Revised 23 March 2020
Accepted 2 April 2020

*Corresponding author

Tel : +82-(0)61-450-2485

E-mail : minsbae@mokpo.ac.kr

Abstract As particulate matter is of great interest, many mitigation policies related to PM have been established based on Clean Air Policy Support System (CAPSS) as the official statistics for emission rates. CAPSS has been developed for several decades to understand the potential source and receptor regions. The assessment of the air quality impacted from sources, concentrations monitored at the National Monitoring Stations (NMS) is often utilized to understand the evaluation of reduction effects for source control strategies. Although CAPSS should be able to represent air pollution monitoring station data, the limitation can be exist. In this study, their concentration colinearities between CAPSS and NMS for Korean 16 administrative regions were assessed. As a result, the high rank CAPSS in 2016 is barely uncorrelated with high concentrations at NMS from 2016 to 2019. In addition, the multi-statistical approaches through combinations of time series analysis and correlation matrix based on NMS have been performed for the Seoul and Gwangju areas. The future applications were proposed for their amendments such as a new management plan for the source control.

Key words: CAPSS, PM_{2.5}, Reduction policy

1. 배경

미세먼지는 사람의 호흡기에 악영향을 미치는 것으로 알려져 있으며, WHO는 대한민국의 경우 PM_{2.5} 평균농도 27 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 노출에 11,000여 명이 사망, 인구 십만 명당 사망자 수는 23명으로 예측하였다(WHO, 2016; Pope *et al.*, 2002). 한편, 에어코리아의 자료에 의하면 우리나라의 미세먼지 주의보·경보 발령 횟수

는 2015년 241회에서 2018년 412회로 약 2배 이상 증가하였고(<https://www.airkorea.or.kr/>), 2013년 초미세먼지 관련 언론 보도내용이 100건에 불과했던 것이 2014년 겨울철에만 600여 건으로 증가하였다(Hwang *et al.*, 2018; Kim *et al.*, 2014). 이는 우리나라 미세먼지의 증가와 더불어 미세먼지에 대한 국민적 관심이 높아진 것을 말한다.

미세먼지에 대한 중요성이 부각됨에 따라 정부는

미세먼지 관리를 100대 국정과제의 하나로 선정하였으며, 2017년 9월에 관계부처 합동 「미세먼지관리 종합대책」을 수립하였다. 종합대책에서는 ‘맑고 깨끗한 공기, 미세먼지 걱정 없는 대한민국’이란 비전 하에 미세먼지 배출량을 2022년까지 30% 감축하여 서울의 $PM_{2.5}$ 농도를 기존 $26 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 $18 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 낮추겠다는 목표를 제시하였다(Hwang, 2018; MOE, 2017). 중앙정부의 미세먼지 관리정책은 발전과 산업부문 등 대규모 배출원에 대한 집중관리를 주요 내용으로 하고 있으며(Hwang *et al.*, 2018), 중앙정부의 정책에 따라 서울시 등의 지자체 정책이 수립되고 있다.

미세먼지 저감 정책에 사용되는 대규모 배출원에 대한 정보는 Clean Air Policy Support System (CAPSS)을 바탕으로 확보된다. CAPSS는 정부의 대기환경정책 수립, 대기오염 총량제 이행, 대기질 예보 등을 위하여 대기오염물질 배출목록(Air Pollutants Emission Inventory)에 근거한 대기오염물질별, 부분별 배출량을 산정한다. 2019년 기준 CAPSS에 의하면 대기오염물질 배출원을 에너지산업 연소, 비산업 연소, 제조업 연소 등 13개 대분류로 구분하고 있으며, 배출량 목록은 CO, NO_x, SO_x, TSP, PM₁₀, PM_{2.5}, VOCs, NH₃의 8개 항목이다. 한편, 미세먼지 정책 수립에 있어서 배출량 자료를 제공하는 CAPSS와는 별개로 국내 대기질 현황을 관측하기 위한 대기오염 측정망이 있다. 대기오염 측정망은 대기오염의 경보체계를 구축, 오염물질의 환경기준 달성 여부 평가, 대기오염 모델의 자료 제공 등을 목적으로 대기질 현황을 제공한다. 대기오염 측정망은 측정 항목에 따라 대기환경기준물질을 측정하는 일반 대기오염측정망과 대기환경기준물질 이외의 물질을 측정하는 특수대기오염측정망으로 구분되며, 운영기관에 따라 국가 측정망과 지자체 측정망으로 구분하고 있다(MOE, 2011).

또한 일반 대기오염측정망은 설치 목적에 따라 도시대기 측정망, 교외대기 측정망, 국가배경농도 측정망, 도로변대기 측정망으로 구분되며, 2019년 기준 530여 개가 운영되고 있다. 특수대기오염측정망은 산성강하물, 대기 중금속, 유해대기물질, 광화학오염물

질, 지구대기, PM_{2.5} 측정망으로 구성된다(Kim and Kwon, 2016).

우리나라 미세먼지 저감을 위한 정책은 배출원 저감에 초점이 맞추어져 있고, 미세먼지 저감을 위한 배출원에 대한 정보는 CAPSS의 배출량 자료를 활용한다. 반면 대기질에 대한 정보 및 평가는 대기오염물질측정망을 이용하고 있다. 이는 정책 수립 과정에 사용되는 자료와 정책 평가에 사용되는 자료가 다를 수 있음을 의미한다. 따라서 효율적인 정책의 수립 및 평가를 위해서는 CAPSS의 배출량 자료와 대기오염물질 측정망 자료에 대한 대변성이 중요하다. 이와 관련한 선행 연구로, 대기오염물질측정망 주변 바람장 분석을 통한 위치 적절성 평가(Jung *et al.*, 2012), 도시공간 분석 활용 등을 이용한 측정망 최적 입지 도출(Kim and Kwon, 2016), GIS를 이용한 대기오염측정망 적정성을 분석(Na *et al.*, 2005), 다변량통계분석법에 의한 SO₂, NO₂, CO, PM₁₀, O₃ 유사 대기오염거동 평가, 서울시 도시대기측정망 중복성 평가(Choi *et al.*, 2016) 등이 있다. 하지만 현재까지 CAPSS와 대기오염측정망에 대한 대변성 평가 연구는 미비한 상태이다.

본 연구에서는 CAPSS 배출량과 대기오염측정망 자료를 비교 평가하여 상호 대변성을 검증하고자 한다. 이를 위해, 본 연구에서는 2015년 및 2016년 국립환경과학원 배출원 자료(CAPSS) 및 2016년부터 2018년까지 3년간 국내 400여 곳의 일반대기측정소에 관측한 PM_{2.5} 자료를 기반으로 농도를 분석하였다. 연구 결과는 미세먼지 저감을 위한 정책의 평가와 수립에 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

2. 방 법

연구에 사용된 대기오염측정망 자료는 환경부에서 제공하는 일반대기 측정망 자료 중 전국 도시대기 측정망과 도로변 대기측정망 자료를 사용하였으며, 자료는 2016년부터 2018년까지 측정된 PM₁₀, PM_{2.5}, NO₂, O₃의 1시간 평균으로 이용하였다(그림 1). CAPSS 자

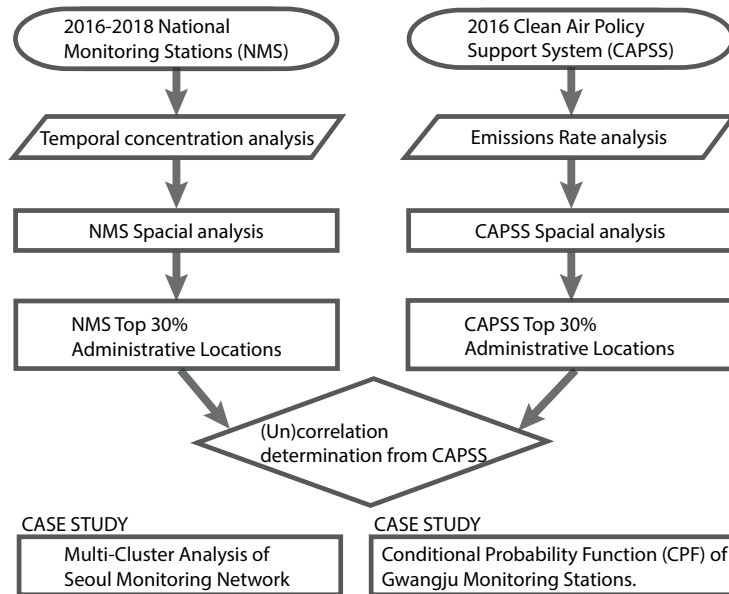


Fig. 1. Schematic diagram of the Analytical Procedure.

료는 국가미세먼지정보센터 (<http://airemiss.nier.go.kr/>)에서 제공하는 2015년 및 2016년 배출원 자료 중 점오염원 자료를 분석하였다. 측정 자료는 측정소별 목적 평균 일수에 대해 75% 이상 유효한 자료를 재분석하여 나타냈다. 이를 다시 일반대기측정망과 배출원을 좌표화하여, 권역별로 분류하였다. 세종특별시는 충청남도에 포함하여 전국을 총 16개 권역별로 분류하였다. 분류된 자료는 권역별 상위 30% 농도를 관측한 측정소 위치 및 상위 30% 배출원 위치를 산출하여 나타내었다.

16개 권역별 중, 서울시 및 광주광역시를 선택하여 별도의 통계분석을 수행하였다. 서울시의 경우, 서울시에 있는 40개의 측정소를 도시대기 측정소와 도로변대기 측정소로 분류하여, 관측 NO_2 , O_3 , $\text{PM}_{2.5}$ 에 대해 측정소별 일중 시간 평균값을 산출하였고, 도시대기 측정소와 도로변대기 측정소에 대한 다중군집분석을 산출하였다.

광주광역시의 경우, 수용 측정값의 기여율 분석을 위해 측정 성분에 질량농도, 풍향 및 풍속 자료를 이용하여 Conditional Probability Functions (CPF) 분석

을 수행하였다. CPF는 관측 풍향을 바탕으로 고농도 오염원의 위치를 추정할 수 있는 통계적 확률 모델로, 오염원의 잠재적인 위치를 추정하는 방법이다 (Watson *et al.*, 2008; Kim *et al.*, 2003). 본 연구에서, CPF 분석을 위해 광주지역의 2011년에서 2018년까지 풍향 풍속 및 농도자료에 대한 총 8년 자료를 활용하였다. 관측자료는 이상치와 누락 자료를 제외하고 24시간 중 40% 이상 유효한 자료의 일 평균값을 사용하였다. $\text{PM}_{2.5}$ 의 경우 2015년 이후 자료를 사용하였다. 본 연구에서는 관측 풍향풍속 자료를 기반으로 관측지점 상위 40% 농도를 고농도 시료로 지정하여 최종 계산값을 나타냈다. CPF는 측정 빈도수가 낮을 경우 상대 불확도가 증가할 수 있으므로, 빈도수에 따른 가중치를 식(1)과 같이 적용하여 계산하였다. 가중치는 W_{θ_i} 는 각 풍향 θ_i 별 자료개수의 평균(m_{avg})를 이용하여 0.3~1.0을 적용하였다.

$$W_{\theta_i} = \begin{cases} 1.0 & 2m_{\text{avg}} < m_{\Delta\theta_i} \\ \frac{0.7}{m_{\text{avg}}} n_{\Delta\theta_i} - 0.4 & m_{\text{avg}} < m_{\Delta\theta_i} \leq 2m_{\text{avg}} \\ 0.3 & m_{\Delta\theta_i} \leq m_{\text{avg}} \end{cases} \quad \text{식(1)}$$

3. 결 과

3.1 전국 미세먼지 농도 현황(2016~2018)

미세먼지 농도 현황을 분석하기 위하여 2016년부터 2018년까지 전국 400여 곳의 일반대기 측정소에서 관측된 PM_{2.5} 및 PM₁₀의 월평균 자료를 나타내었다(그림 2). PM_{2.5}의 평균농도는 2016년 26.0±12.8 µg/m³, 2017년 24.9±12.7 µg/m³, 2018년 23.2±10.5 µg/m³로 점차 감소하고 있는 추세이다. 하지만 에어코리아 자료에 의하면 고농도 PM_{2.5}에 의한 미세먼지 주의보 발생일수는 2016년 90회에서 2017년 129회, 2018년 316회로 크게 증가하였으며(<https://www.airkorea.or.kr/>), 이는 국내외 배출원 증가 및 대기기상현상 등이 복합적으로 나타난 결과라 판단한다. 월별 미세먼지의 변이를 살펴보면 PM_{2.5}의 경우 겨울철 최대를 나타내고 이후 점차 감소하였으며, PM₁₀의 경우 봄철에 최대를 나타내었다. 이는 겨울철 난방 연소 등에 의한 미세먼지 생성 전구물질의 배출량 증가와 봄철 국외 미세먼지의 장거리 이동에 따른 원인으로 판단된다.

시간별 PM₁₀ 및 PM_{2.5}의 평균농도를 살펴보면, PM_{2.5}, PM₁₀ 모두 오전 09~11시에 일 중 최댓값을 나타냈다. 이는, 하루 활동시간 및 출퇴근 차량에 의한 것으로 해석된다. 하지만, PM_{2.5}, PM₁₀의 비율을 살펴보면, 새벽 4~5시경에 최댓값을 나타냈다. 따라서 새벽 기온역전 등의 기상 요인보다 난방 등에 의한 새벽 1차 연소 배출이 주원인으로 해석된다. 즉, 계절별, 시

간별 PM_{2.5} 및 PM₁₀의 농도 변화는 난방 등 연소 활동에 의한 PM_{2.5} 증가가 확인된다. 이는 향후, PM_{2.5} 저감을 위해 새벽 및 겨울철 연소 활동에 대한 전국적 조사 및 저감 정책이 필요하다.

3.2 일반대기 측정소 관측 결과 및 CAPSS 배출량 비교 평가

국내 미세먼지 저감 대책은 주로 배출원 배출량 저감에 초점이 맞추어져 있다. 즉, 발생원 기준 1차 미세먼지 저감과 2차 미세먼지 생성에 기여하는 NO_x, SO_x 등의 전구물질 저감이다. 하지만, 배출원에 의한 미세먼지 및 전구물질의 발생량과 대기 중에 존재하는 미세먼지의 농도는 비선형적인 관계를 나타낸다. 이는 대기 중에 존재하는 미세먼지 농도는 배출원 배출량뿐만 아니라 대기 거동에 의한 2차 생성 및 확산, 생성, 소멸 등의 농도 변화까지 영향을 미치기 때문이다. 그럼에도 불구하고 대기질 개선 계획의 효과 분석을 위해서는 배출원 배출량 감소에 의한 대기 중 미세먼지 농도 변화가 추정되어야 한다. 이러한 대책별 비용-편익 분석은 미세먼지 저감 정책의 효과 평가뿐만 아니라 향후 투자 재원의 효율적인 사용을 위해서도 수행되어야 할 필요가 있다.

최근 수립되고 있는 미세먼지 관리 종합계획과 대기질 권역 관리 제도는 일부 지역에 국한되지 않고 배출에 따른 영향 범위를 고려하여 전국적이고 광역적인 대책들을 마련하고 있다. 이러한 대책 마련 및 효율 평가를 위해 대기오염물질 배출량은 국가 배출

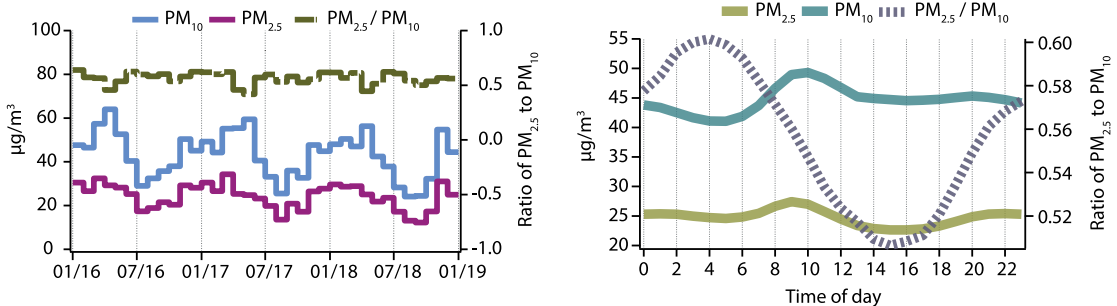


Fig. 2. Time series and diurnal concentrations of PM_{2.5} and PM₁₀ concentrations monitored at the entire National Monitoring Stations between 2016 and 2018.

목록인 CAPSS를 주로 사용하며, 대기 중 대기오염물질의 농도는 전국에 설치되어 있는 일반대기 측정소의 관측 결과를 주로 이용한다. 따라서 CAPSS에서 산정한 대기오염물질 배출량과 일반대기 측정소에서 관측된 대기오염물질의 농도는 서로를 대변할 수 있는 상관성을 가지고 있어야 한다. 하지만 배출량과 농도 간 관계를 정량적으로 설명하는 것은, 측정소의 위치, 지역대변성 등의 복잡성으로 인해 쉽지 않다. 이에, 본 연구에서는 권역별 배출량과 관측 농도를 비교하고, CPF 분석을 바탕으로 배출지점과 측정지점의 상관성을 분석하여 CAPSS의 배출량에 대한 일반대기 측정소 관측의 대변성을 살펴보았다.

그림 3은 2016년부터 2018년까지 전국 17개 권역별 일반대기 측정소에서 조사된 미세먼지의 평균농도와 CAPSS에서 조사된 미세먼지 발생량을 나타낸 것이다(세종시 PM_{2.5}에 대한 CAPSS 배출량 결과는 없음). 분석 결과를 살펴보면 PM₁₀의 평균농도는 경기, 전북, 서울, 경북 등의 높은 순으로 나타났으며, 전남은 17개 권역에서 최하위를 나타냈다. 반면 PM₁₀

의 배출량은 경북, 전남, 경기 등의 순으로 나타나 전남이 17개 권역에서 2번째로 높은 결과를 보였다. CAPSS 배출량은 대기 거동에 의한 2차 생성 미세먼지를 직접적으로 대변할 수 없을지라도, 상대적으로 고농도에 대한 직접 배출량을 제시한다. 반면 일반대기 측정소는 2차 생성 미세먼지를 포함한 관측 농도를 반영할지라도, 앞서 설명한, 지난 3년간 전국 측정소를 분석 시간별 PM₁₀ 및 PM_{2.5}의 평균농도 등을 살펴보면, 지역별 특이성이 존재할지라도 국내 전체 평균 관점에서 1차 배출에 의한 대기 중 미세먼지의 기여 강도가 상대적으로 크다. CAPSS의 배출량이 일반대기 측정소 농도보다 순위적으로 높다는 것은 배출원의 영향 반경을 일반대기 측정소에서 반영하지 못하기 때문인 것으로 추정된다. 특히, 최근 전남지역에 설립된 국가산업단지의 대기 영향을 CAPSS에서는 반영하지만 일반대기 측정소에서는 이를 반영하지 못하기 때문인 것으로 판단된다.

전남의 경우 일반측정소 농도 권역별 순위에 비해 배출량 권역별 순위는 높았으나, 서울시의 경우

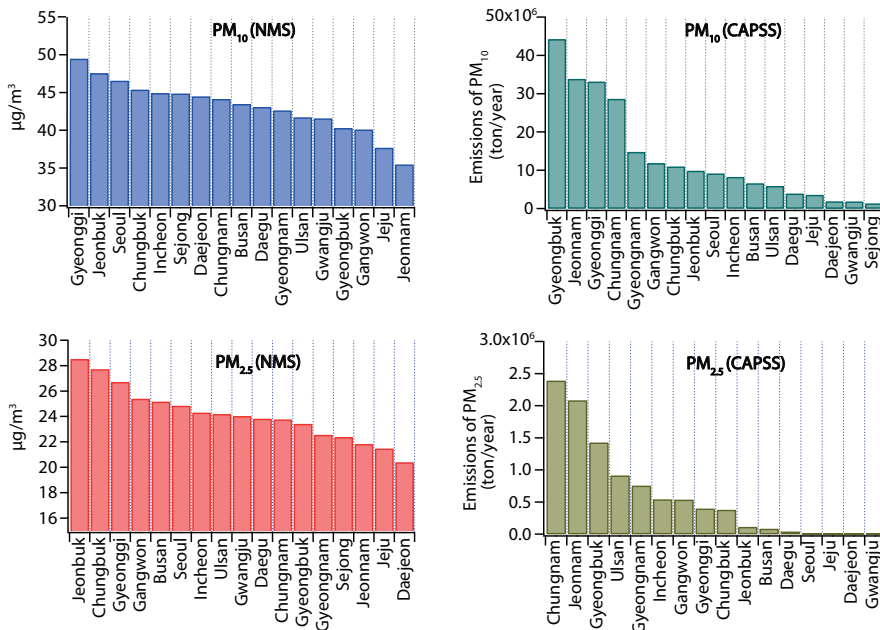


Fig. 3. Regional comparison of Clean Air Policy Support System (CAPSS) as the 2016 official statistics and concentrations of National Monitoring Stations (NMS).

PM₁₀의 배출량이 농도에 비해 낮은 권역별 순위를 보였다. 이처럼 배출량에 비해 농도의 권역별 순위가 높은 곳은 서울, 인천, 대전, 부산, 대구, 광주 등 대도시였다. 또한 CAPSS에서 산정된 배출량은 권역별 순위에 따라 최대 10배 이상 차이가 나지만 측정소에서 관측된 농도는 권역별 순위에 따라 최대/최소의 편차가 2배 이하로 나타났다. 이는 (1) 비점오염원을 포함한 배출량 산정의 한계성, (2) 측정소 위치의 지역 대변성, (3) 자체 배출량을 포함하는 외부유입농도 및 2차 생성 등의 복합적 원인에 의한 결과로 판단된다.

PM_{2.5}의 분석 결과를 살펴보면, 일반대기 측정소에서 관측된 농도는 전북, 충북, 경기 순으로 높게 나타났으며, 광주광역시에는 17개 권역 중 9위를 나타내 PM₁₀보다 높은 권역별 순위를 나타냈다. 반면 PM_{2.5} 배출량의 경우 충남, 전남, 경북 순으로 높게 나타났으며, 광주는 최하위 수준으로 분석되었다. 광주광역시의 경우 서울시 PM₁₀ 농도에서와 같이 배출량에 비해 높은 농도 권역별 순위를 나타냈다. 이는 앞서 설명한 바와 같이, 비점오염원을 포함한 배출량 산정의 한계성, 측정소 위치의 지역 대변성, 자체 배출량보다 외부유입농도 등의 복합적 원인에 의한 결과로 판단된다.

CAPSS 배출원에 대한 일반대기 측정소 관측의 대

변성을 설명하기 위하여 CPF 분석을 수행하였다. CPF 분석은 관측지점에서 측정된 농도를 각 관측 시간의 풍향을 고려할 경우 오염원의 잠재적인 위치를 추정하는 데 유용하다. CPF 분석은 PM_{2.5} 기준 배출량과 관측 농도 결과의 차이가 높은 광주광역시를 대상으로 하였고, CPF 분석에 사용된 자료는 2011년부터 2018년까지의 한국환경공단 에어코리아의 1시간 데이터를 사용하였으며 풍향을 12방위로 나누어 분석하였다. 그림 4는 광주광역시 구역별(북구, 서구, 동구, 남구, 광산구) PM_{2.5} 배출량을 표시한 것이며, 그림 5는 광주광역시의 점배출원 위치와 배출량 및 일반대기 측정소에 대한 CPF 분석 결과를 보여준다. 그림 4에서와 같이 점오염원의 경우 광주광역시 PM_{2.5} 배출량은 광산구가 3,945 kg/year 가장 높았으며, 서구 1,914 kg/year, 북구 188 kg/year 순으로 나타났다. 상기 결과를 CPF 분석한 결과(그림 5) 건국동의 경우 주 오염원은 북동쪽, 두암동 북서쪽, 운암동 남서쪽, 농성동 남서쪽, 서석동 남쪽, 주월동 남쪽, 지평동 남서쪽, 송정동 북쪽, 오선동 서쪽 계열로 고농도 오염원의 영향을 받는 것으로 분석되었으며, 성분에 따른 큰 차이 없이 오염원 방향은 같은 경향을 보였다. CPF 분석 결과를 그림 5에 표시된 CAPSS 점오

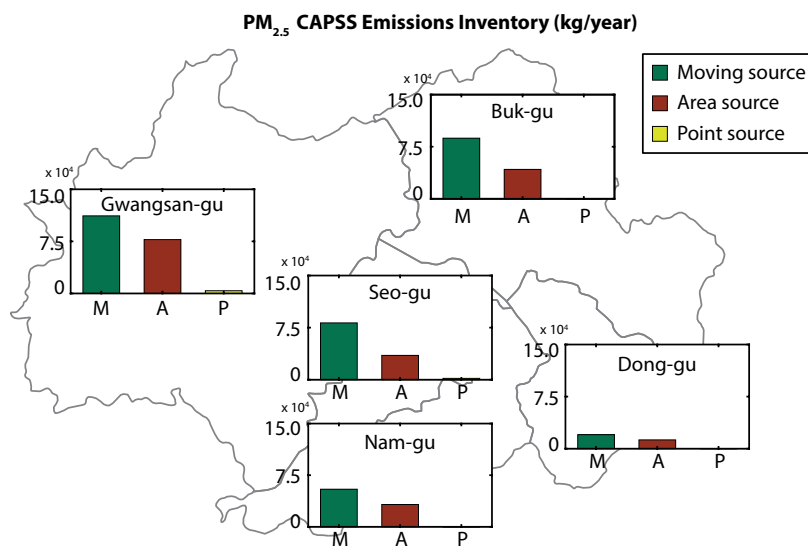


Fig. 4. PM_{2.5} Gwangju Regional comparison of Clean Air Policy Support System (CAPSS) as the 2016 official statistics.

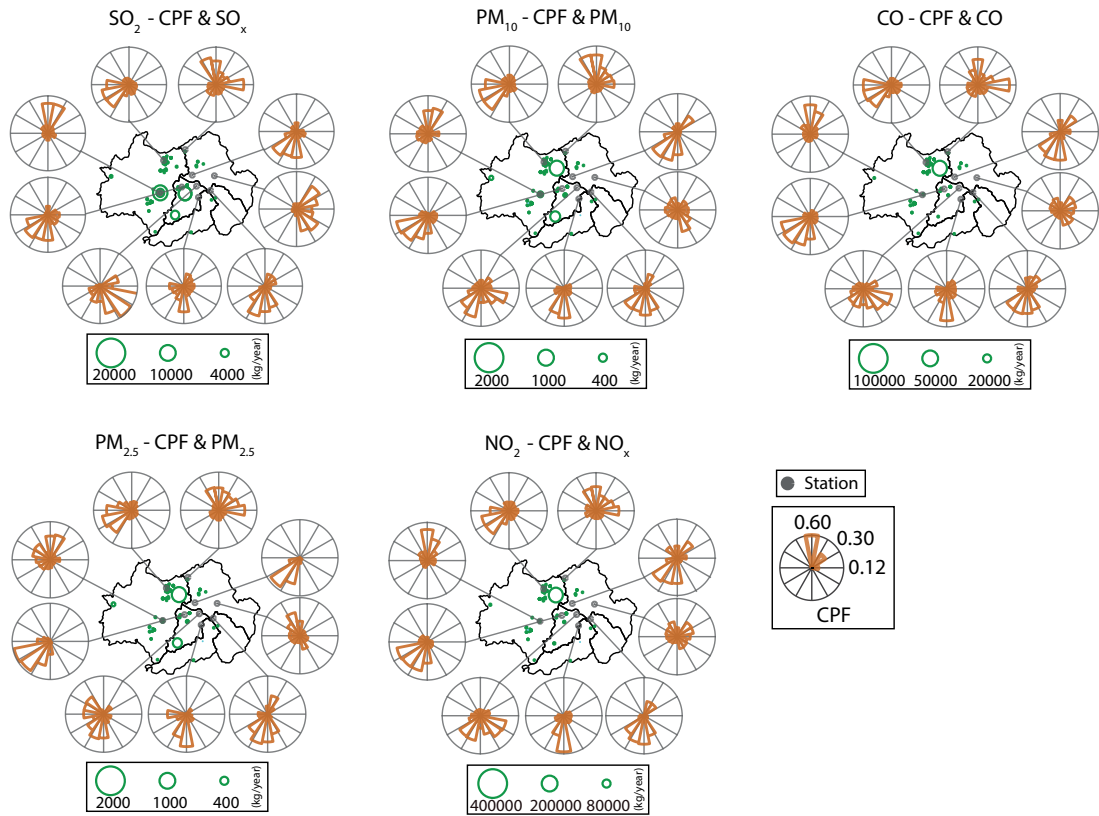


Fig. 5. Results of conditional probability function (CPF) at the Gwangju National Monitoring Stations.

염원과 비교하였다. 그 결과 항목별 CPF 분석에 의해 확인된 고농도 오염물질의 유입 방향과 CAPSS에서 확인된 고농도 배출원 지점은 상관성이 없는 것으로 나타났다. 또한 그림 5의 CAPSS 배출원은 위치에 따라 항목별 배출량에 차이가 있었지만, CPF 분석 결과에서는 고농도 오염물질 유입 방향이 항목별로 큰 차이가 없다. 이러한 결과는 위에서 언급한 외부유입농도 및 2차 생성을 고려하더라도 일반대기 측정소가 광주지역 배출원에 대한 결과를 직접적으로 대변할 수 없음을 보여주고 있다. 또한, 광주광역시의 9개 측정소 CPF 결과가 모두 다르게 나타남을 볼 때, 상위 40%에 해당하는 고농도의 원인이 외부유입농도와는 상관성이 없음을 나타낸다. 즉, 국소 지형에 의한 측정소 풍향의 오차를 고려하더라도 외부유입이 광주광역시 고농도에 크게 영향을 줄 경우 측정소별 비슷

한 CPF를 나타내야 하기 때문이다.

권역별 일반대기 측정소의 농도 순위와 CAPSS 배출량 순위, 광주광역시 기준 CPF 분석을 바탕으로 배출지점과 측정지점의 상관성을 분석한 결과 CAPSS에서 제시한 배출량과 일반대기 측정소의 관측 결과는 서로 대변될 수 없다는 것을 알 수 있었다. 이러한 결과는 CAPSS를 기준으로 수립된 정책을 평가할 때 일반 대기측정소의 관측 결과를 사용하는 것은 정책의 효율 평가에 큰 오류를 발생시킬 수 있다는 것을 나타낸다. 또한 정책 방향 수립에 있어서 CAPSS 배출량만을 고려할 때, 지역 농도와 같은 외부 효과가 배제될 수 있다. 따라서 CAPSS 뿐만 아니라 일반대기 측정소의 관측 결과까지 이용하여 정책을 수립하는 것이 지역 특성에 맞는 미세먼지 저감 정책을 수립할 수 있을 것으로 판단된다.

3.3 정책 수립 및 평가를 위한 일반대기 측정소와 CAPSS 자료 활용 제안

본 연구 결과는 외부유입농도 및 2차 생성을 고려 하더라도 일반대기 측정소와 CAPSS 자료가 직접적으로 서로 대변하기에는 한계가 크다. 하지만 국내 미세먼지 저감을 위한 정책은 배출원 저감을 주요 정책으로 수립하고 있기 때문에 정책 수립에 있어서 CAPSS 자료가 절대적으로 필요하며, 미세먼지의 저감 효과를 확인하기 위해서는 일반대기 측정소의 관측 결과가 필요한 실정이다. 이에 본 연구에서는 CAPSS 배출량 자료를 대변할 수 있는 일반대기 측정소 위치를 확인하여 보았다. 또한 CAPSS의 자료를 대변하기 어려운 일반대기 측정소 관측 자료의 활용 방법을 제안하고자 한다.

CAPSS에서 산정된 배출원 배출량 증감을 확인하기 위한 일반대기 측정소의 위치를 알아보았다. 이를 위해 16개 권역의 상위 30% 관측 농도 및 배출원 위치를 표기하여 그림 6에 나타내었다. 상위 30% 선정 기준은 2017년 9월 26일 미세먼지관리종합대책의 일환으로 2022년까지 국내 배출량 30% 감축을 목표로 설정되었기 때문이다. 분석 결과 그림에서와 같이 상

위 30%의 관측 농도 및 배출량을 나타내는 곳은 크게 2가지로 구분할 수 있었다. 첫 번째는 농도 관측 지점과 배출원이 상대적으로 근거리(약 10 km 이내)에 있는 (1) 위치 상관성 지점, 두 번째는 농도 관측 지점과 배출원이 떨어져 있는 (2) 위치 비상관성 지점이다. 위치 상관성 지점은 배출원에 의한 미세먼지 증·감 효과를 설명할 수 있으며, 위치 비상관성 지점은 비점오염원 및 기타 원인에 의한 미세먼지의 증·감효과를 설명할 수 있다. 즉, 위치 상관성 지점은 현재 시행되고 있는 배출원 저감 정책에 대한 실효성을 평가할 수 있는 지점으로 평가되며, 위치 비상관성 지점은 비점오염원 파악 및 비점오염원 저감대책 수립을 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 평가된다. 또한 상기 위치 상관성 지점과 위치 비상관성 지점의 차이를 이용하여 지역 내 미세먼지 농도에 기여하는 요소를 확인할 수 있을 것으로 기대된다. 이는 지역 내 미세먼지 농도에 영향을 미치는 요소가 배출원과 그 외로 구분될 수 있게 한다. 따라서 미세먼지 감축을 위한 배출원 저감 정책의 수립/평가 또는 비점오염원 저감을 위한 정책을 수립/평가함에 있어서 상기 위치 상관성 지점과 위치 비상관성 지역을

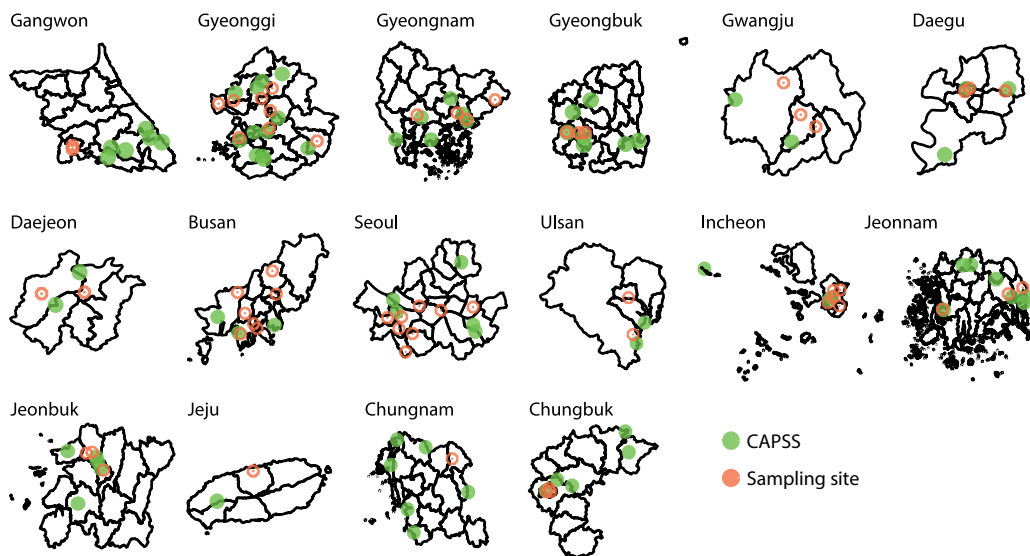


Fig. 6. Location of National Monitoring Stations and Clean Air Policy Support System (CAPSS) related to the top of 30% monitored and emitted concentrations for sixteen administrative region.

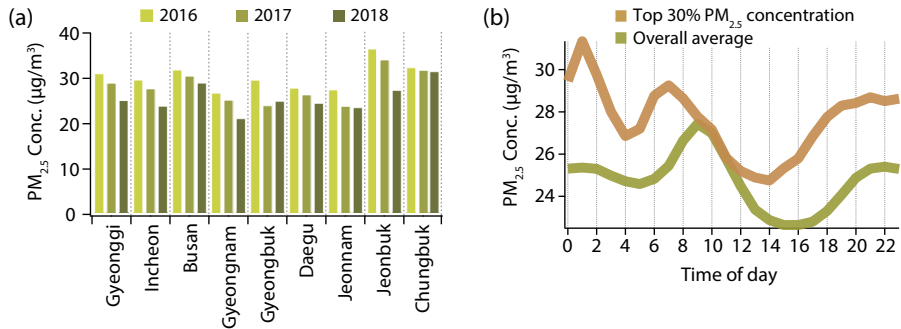


Fig. 7. Top of PM_{2.5} 30% concentrations for sixteen administrative region.

구분하여 활용하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

상기 제시한 위치 상관성 지점 및 위치 비상관성 지점을 이용하여 미세먼지 저감 효과 및 미세먼지 생성 원인을 살펴보았다(그림 7). 그림 7의 (A)는 2016년부터 2018년까지 위치 상관성 지점만 따로 자료 추출하여, PM_{2.5} 연평균농도를 나타낸 것이다. 농도 경향성을 살펴보면, 2016년부터 2018년까지 경기, 인천, 부산, 경남, 경북, 대구, 전남, 전북, 충청지역의 상위 30% 농도 감소를 확인할 수 있다. 농도 감소의 원인이 종합대책에 의한 것인지는 명확히 판별할 수 없지만, 본 분석 결과를 바탕으로 판단해 볼 때, 배출원 저감 정책에 의해 배출원 지역 PM_{2.5} 농도가 감소되는 것으로 판단된다. 이러한 결과는 PM_{2.5} 저감을 위한 정책 실효성을 대변하는 결과로 해석될 수 있다.

그림 7의 (B)는 배출원 위치 상관성 지점 상위 30% PM_{2.5} 평균농도를 시간별 전체평균농도와 비교한 것이다. 앞서 설명한 바와 같이, 전체평균의 경우 오전 10~11시경에 일중 최댓값을 나타냈다. 이는, 하루 활동 시간 및 출퇴근 차량에 의한 것으로 해석된다. 하지만, 배출원 위치 상관성 지점 상위 30%의 PM_{2.5} 시간별 평균농도를 살펴보면, 새벽 1~2시경에 최댓값을 나타냈다. 이는, 새벽 1차 연소 배출이 고농도 측정의 주원인으로 해석된다. 이를 바탕으로 판단할 때, 향후 야간 배출원의 전국적 조사 및 원인대책이 필요할 것으로 판단된다. 이처럼 CAPSS를 대변할 수 있는 일반대기 측정소의 위치를 파악하는 것은 정책의

평가뿐만 아니라 향후 정책 수립의 방향을 결정하는데 큰 역할을 한다. 따라서 향후 정책의 평가 및 수립에 사용되는 CAPSS 자료와 일반대기 측정소의 자료는 상기 제시한 것과 같이 상관성을 바탕으로 구분하여 사용하는 것을 제안한다.

이와 더불어, 서울시의 경우 인구밀도 및 대형 배출원이 없는 특성을 나타내고 있어, 현 대기오염에 대한 원인을 과학적으로 규명하고 이해해야 한다. 서울시 측정소는 행정적으로 다른 구에 위치함에도 불구하고 지리적으로 가까운 측정소가 존재한다는 점을 감안하면, 측정소 간의 유사한 대기환경 자료를 생산하고 있을 가능성이 있으며, 대기오염에 영향을 주는 주 인자가 도로변 등으로 제한적인 것을 감안하면 측정소 간의 상관성이 높을 가능성이 있다. 이에 서울시 도시대기 측정소와 도로변 측정소를 중심으로 현재의 전체 측정망이 이와 같은 상황에 얼마나 영향을 받는지, 또는 이러한 잠재적 문제를 어떻게 보완 또는 개선하여야 할지의 여부를 시계열 농도 변화와 군집분석 등의 통계적 기법 등을 동원하여 다각도로 살펴보았다. 이를 토대로 새롭게 운용 방향의 개선을 도모하기 위한 몇 가지 제언을 하고자 한다.

3.4 서울시의 미세먼지 특성

서울시는 2018년 기준 약 10,124,579명의 인구가 거주하고 있으며, 인구 밀도는 16,100명/km²으로 전

R1-R15: Road sampling site
G1-G25: General sampling site

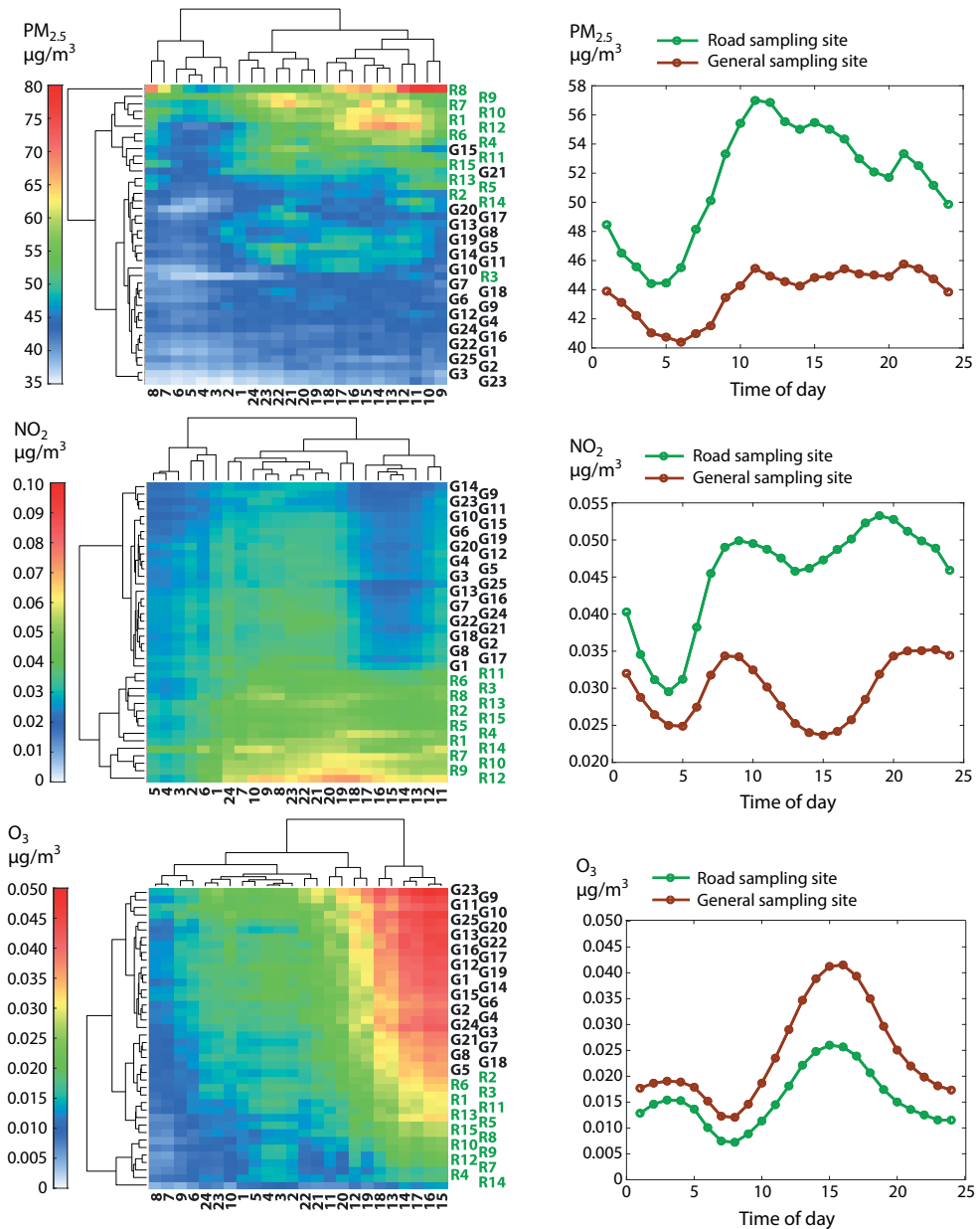


Fig. 8. Multi-Cluster Analysis in Time-of-day of PM_{2.5}, NO₂, and O₃ at the Seoul Monitoring Network from 2016 to 2018.

국 인구밀도 509명/km²에 비해 32배 높은 수준이다. 이에 서울시에 등록된 차량등록대수는 전국차량등록대수의 약 13.2%인 3,114,000여 대로 매우 높은 반면,

주요 대기오염물질 배출원인 1종 사업장은 인구수 대비 낮은 수준이다. 이는 서울시의 미세먼지 배출원인은 사업장 등의 배출원보다 차량 배출 및 가정

난방 등에 의한 배출이 높다는 특성을 가지고 있다. 따라서 서울시는 다른 권역과는 차별적인 특성이 있기 때문에 미세먼지의 발생 원인을 해석하기 위해서는 독립적인 분석을 수행해야 한다. 본 연구에서는 서울시 전체 측정망의 농도 해석에 대한 가장 일반적인 방법으로 측정소와 측정소 간의 관측값이 시간적 변화를 기준으로 얼마만큼 상관성이 있는지를 분석하였다(Bae *et al.*, 2013). 이는 서울측정소를 중심으로 통계적인 분석 방법을 통해 공간적 특이성과 공통성을 분석하여 서울시 측정망 자료의 일중 시간별 분석과 함께 측정소 간 상관관계를 다각도로 해석하였다. 측정망의 통계적 해석을 위해 측정소와 측정소 간의 관측값이 시간적 변화를 갖고 서로 상관성이 있는지를 군집 분석을 통해 모사하였다. 본 분석에서는 ‘계층적 군집 분석 방법’을 이용하였다. 계층적 군집 분석은 개개의 군집들로부터 전체가 하나의 군집을 형성할 때까지 모아가는 병합적 방법으로, 서울시 측정소 간의 상관관계 분석 목적에 부합되는 방법이다(Bae *et al.*, 2013).

그림 8은 서울시 측정소별 시간평균 $PM_{2.5}$, NO_2 , O_3 농도와 함께 다차원 군집분석을 나타내었다. 이들 측정소를 다시 도로변 측정소(녹색, R1~R15)와 도시 대기측정소(G1~G25)로 나누어 표시하였다. $PM_{2.5}$ 의 경우 평균값이 $80 \mu g/m^3$ 이상인 경우엔 모두 홍색으로 나타내었다. 이에 상관성이 높은 집단으로 분류한 군집분석을 수행한 결과, 측정소별로 $PM_{2.5}$ 및 NO_2 모두에서 농도에 따른 도로변 측정소 고농도 군집을 형성함을 확인할 수 있었다. 이를 일중 평균값과 비교하여 다각도로 분석해 보면, 최고농도 군집은 낮 시간대부터 저녁시간대 걸쳐 고농도를 나타낸 것을 볼 수 있다. 특히, 오전, 오후의 출퇴근 시간대에 상대적으로 높은 농도를 나타냄을 알 수 있다. 이는 서울시의 미세먼지가 차량 등에 의해 발생됨을 의미하며, 이러한 결과는 향후 서울시 고농도 감축을 위한 차량 배출 저감 대책에 활용될 수 있다. 반면, 오존의 경우 일반측정소에서 높게 나타났다. 이는, 질소화합물 순환 및 휘발성화합물 농도에 의한 결과로 해석된다. 향후, 서울

시 주거지역에 대한 2차 생성물의 고농도 정책에 적극적으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

국내 미세먼지 저감 정책의 수립과 평가를 위하여 CAPSS 배출량 자료와 일반대기 측정소 관측 농도를 주로 사용한다. 이에 CAPSS 배출량 자료와 일반대기 측정소의 관측 농도는 상호 대변성이 확보되어야 한다. 그 이유는 정책 수립 과정에서 사용되는 CAPSS 배출원 배출량과 지역 미세먼지 농도를 대변하는 일반대기 측정소 관측 농도가 서로 대변되지 않을 경우 정책의 수립과 평가에 오류가 생기기 때문이다. 이는 지역 미세먼지 배출 특성에 관계 없는 정책 수립 및 효과적인 정책에 대한 저평가 등으로 이어질 수 있다. 따라서 CAPSS 배출량과 일반대기 측정소 관측 농도의 대변성 확인은 정책 수립과 평가에 있어 매우 중요한 요소이다.

본 연구에서는 CAPSS 배출량 자료와 일반대기 측정소 관측 농도 자료를 비교 평가하였으며, 정책 수립과 평가에 사용될 수 있는 자료를 선정하여 보았다. 연구 결과, 권역별 일반대기 측정소의 농도 순위와 CAPSS 배출량 순위, 광주광역시 기준 CPF 분석을 바탕으로 배출지점과 측정지점의 상관성 등을 고려할 때, CAPSS 배출량과 일반대기 측정소 관측 농도는 서로 대변될 수 없다는 것을 알 수 있었다. 하지만 고농도에 대한 일반대기 측정소 지점과 CAPSS 배출량 지점을 상관성에 기초하여 분류할 경우 ‘위치 상관성 지점’과 ‘위치 비상관성 지점’으로 구분할 수 있었으며, ‘위치 상관성 지점’은 배출원 저감을 위한 정책 수립 및 평가에 적합한 지점으로 평가되었다. 또한 ‘위치 상관성 지점’과 ‘위치 비상관성’ 지점의 비교는 지역별 미세먼지 배출 특성을 일부 나타낼 수 있었다. 이는 미세먼지 저감을 위한 지역별 정책 수립 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단되며, 미세먼지 저감을 위한 정책 평가에 있어서도 큰 도움이 될 것으로 예상된다.

감사의 글

본 논문은 정부 재원으로 한국연구재단(NRF-2017R1D1A1B03029517 및 NRF-2017M3D8A1092222)의 지원을 받아 수행하였습니다. 또한, 이 연구는 기상청 국립기상과학원 「황사·연무 감시 및 예보기술 개발」(KMA-2018-00521)의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Bae, M.-S., Jung, C.-H., Ghim, Y.-S., Kim, K.-H. (2013) A Proposal for the Upgrade of the Current Operating System of the Seoul's Atmospheric Monitoring Network Based on Statistical Analysis, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 29(4), 447-458, (in Korean with English abstract), <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2013.29.4.447>
- Choi, I.-J., Jo, W.-K., Sin, S.-H. (2016) Evaluation of Air Pollution Monitoring Networks in Seoul Metropolitan Area using Multivariate Analysis, *Journal of Environmental Science International*, 25(5), 673-681, (in Korean with English abstract), <https://doi.org/10.5322/JESI.2016.25.5.673>
- Hwang, I.C. (2018) Particulate Matter Management Policy of Seoul: Achievements and Limitations, *KOREAN POLICY STUDIES REVIEW*, 27(2), 27-51, (in Korean with English abstract), UCI: I410-ECN-0102-2018-300-004001294
- Hwang, K.-I., Han, B.-H., Kwark, J.-I., Park, S.-C. (2018) A Study on Decreasing Effects of Ultra-fine Particles (PM_{2.5}) by Structures in a Roadside Buffer Green - A Buffer Green in Songpa-gu, Seoul -, *Journal of Korean Institute of Landscape Architecture*, 46(4), 61-75, <https://doi.org/10.9715/KILA.2018.46.4.061>
- 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, A.Y., Kwon, C.H. (2016) Study on Optimal Location of Air Pollution Monitoring Networks in Urban Area Using GIS : Focused on the case of Seoul City, *Journal of the Korea Society of Disaster Information*, 12(4), 358-365, (in Korean with English abstract), <https://doi.org/10.15683/KOSDI.2016.12.31.358>
- Kim, E., Hopke, P.K., Edgerton, E.S. (2003) Source Identification of Atlanta Aerosol by Positive Matrix Factorization, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 53(6), 731-739, <https://doi.org/10.1080/10473289.2003.10466209>
- Kim, W.S., Kim, J.S., Hong, J.H., Lee, J.J. (2014) A Study on Establish PM_{2.5} Advisory Criteria with Emission Source Management System in Seoul, The Seoul Institute, 183pp, <https://seoulsolution.kr/sites/default/files/gettoknowus/Seoul%20Policy%20Package%20of%20Environment%20Policy.pdf>
- Ministry of Environment (MOE). (2011) Air pollution monitoring network installation and operation instructions, 4(5), 30-32, <http://www.me.go.kr/mamo/web/board/read.do?menuId=575&boardMasterId=187&boardCategoryId=623&boardId=258454>
- Ministry of Environment (MOE). (2017) Comprehensive measures for fine dust management, <http://www.me.go.kr/home/file/readDownloadFile.do?fileId=168738&fileSeq=2>
- Na, Y.W., Kim, J.S., Choi, B.G. (2005) The Allocation Analysis of TMS Using GIS, *Journal of Korean Society for Geospatial Information Science*, 13(1), 81-87, (in Korean with English abstract), UCI: G704-001694.2005.13.1.009
- Pope III, C.A., Burnett, R.T., Thun, M.J., Calle, E.E., Krewski, D., Ito, K., Thurston, G.D. (2002) Lung Cancer, Cardiopulmonary Mortality, and Long-term Exposure to Fine Particulate Air Pollution, *JAMA* 287, 1132-1141. <https://doi.org/10.1001/jama.287.9.1132>
- Watson, J.G., Antony Chen, L.-W., Chow, J.C., Doraiswamy, P., Lowenthal, D.H. (2008) Source Apportionment: Findings from the U.S. Supersites Program, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 58(2), 265-288, <https://doi.org/10.3155/1047-3289.58.2.265>
- World Health Organization (WHO). (2016) World Health Organization, Ambient Air Pollution: A Global Assessment of Exposure and Burden of Disease, ISBN: 9789241511353

Authors Information

- 박재형 (국립목포대학교 석사연구원)
 오세호 (국립기상과학원 미래기반연구부 연구원)
 송명기 (국립목포대학교 연구교수)
 최운선 (국립목포대학교 석사연구원)
 배민석 (국립목포대학교 교수)