Research Paper

The Characteristics of PM_{2.5} Pollution and Policy Implications in Chungcheong Region

Jiyoung Gong^{ID} · Changsub Shim^{† ID} · Ki-Chul Choi^{ID} · Sungyong Gong

Korea Environment Institute

(Received December 24, 2020; Revised May 28, 2021; Accepted May 31, 2021)

Objectives : This study aims to discuss air quality policy improvement that reflect regional characteristics through analyzing recent PM_{2.5} concentration, air pollutant emission sources and those contributions to annual PM_{2.5} concentration in Chungcheong region (Daejeon Metropolitan City, Sejong Metropolitan Autonomous City, the Province of Chungcheongnam-do, and Chungcheongbuk-do) in South Korea. In addition, we identified the characteristics of the PM_{2.5} pollution at the level of fundamental local government, and demonstrated the number of vulnerable population exposed to high level of PM_{2.5} concentration in order to propose policy implications in Chungcheong region.

Methods : Based on the national emissions estimates (CAPSS: Clean Air Policy Support System) and air quality modelling system, major sectors/sources of air pollutants emission and national contributions of PM_{2.5} concentrations in Chungcheong region were analyzed. Furthermore, the study identified the number of people exposed to the higher PM_{2.5} concentrations (>25 µg/m³) by the measurement data and demographics available in 2019.

Results and Discussion : The national air pollutants emissions in Chungcheong region were emitted from Chungnam (about 59% of NOx emission volume, 89% of SOx, 70% of NH₃, 54% of VOCs, 79% of PM_{2.5}, and 68% of TSP respectively), mainly from industry, domestic, energy, and road sector. According to the results of the air quality modelling, Chungcheong region also had the largest contribution on the average annual PM_{2.5} concentration in South Korea (27%). Chungnam emitted the largest emission volume of air pollutants, mainly from industry and power generation sectors (especially in Dangjin, Seosan, and Boryeong), while Asan, Yesan, Hongseong, and Cheongyang were classified as the areas with higher PM_{2.5} concentrations (>25 µg/m³), showing a gap between the areas with large emission volume and high concentration. Chungbuk and Sejong had higher annual PM_{2.5} concentration due to the influence of external sources and their geographical characteristics. The largest vulnerable population (over 65 years old and under 18 years old) exposed to high PM_{2.5} concentrations annually lived in Cheongju. Chungbuk had about 40% more air pollutant emission volume than Chungnam, but about 17% more vulnerable population.

Conclusions : At the current stage of “master plan” in Chungcheong region, it is important to mitigate air pollutants emissions on the basis of the local emissions characteristic at the level of fundamental local government (such as industry sector in Dangjin, Seosan, and Danyang/ Domestic burning in Cheongju, Cheonan, and Daejeon/ power generation in Boryeong, Taean and Dangjin/ road in Daejeon, Cheongju, and Cheonan). In addition, Chungbuk requires management of the areas with higher PM_{2.5} concentration such as Goesan, Boeun, Okcheon, and Yeongdong located outside “air control zone”. To reduce high level of PM_{2.5} concentration in Chungcheong region, cooperation with neighboring local governments such as Gyeonggi Province is crucial, and policy solutions are needed between the stakeholders to resolve the disparity issues between areas with larger emission volume and higher PM_{2.5} concentration.

Keywords : PM_{2.5} Pollution, Chungcheong Region, Regional Environmental Governance, Vulnerable Area/Population Exposed to High Level of PM_{2.5} Concentration, CAPSS

The Korean text of this paper can be translated into multiple languages on the website of <http://jksee.or.kr> through Google Translator.

[†] Corresponding author

E-mail: marchell@gmail.com

Tel: 044-415-7701 Fax: 044-415-7788

© 2021, Korean Society of Environmental Engineers

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

연구논문

충청지역의 초미세먼지(PM_{2.5}) 오염 실태 분석 및 개선 방향

공지영[✉] · 심창섭[✉] · 최기철[✉] · 공성용

한국환경정책·평가연구원

목적: 본 연구는 초미세먼지(PM_{2.5})의 국내 기여가 크며, 고농도 지역인 충청지역(대전, 세종, 충남, 충북)의 PM_{2.5} 배출 및 농도 기여 등 현 실태에 대해 분석하고, 주요 광역 지자체간 PM_{2.5} 농도 기여도 및 고농도 노출 민감계층 인구수를 분석함으로써 지역 특성을 반영한 정책적 시사점을 제안하고자 한다.

방법: 2016년 대기정책지원시스템(CAPSS) 배출량 자료를 근거로 충청지역 내 지역별 및 물질별 배출량을 분석하고, 대기화학-수송 모형을 활용하여 충청지역과 타 지자체간 농도 기여도와 충청지역 내 농도 기여도를 분석하였다. 또한 2019년 실측 PM_{2.5} 농도자료와 인구통계자료를 통해 PM_{2.5} 고농도 지역과 고농도에 노출되는 민감계층 인구수를 도출하여 잠재적 건강영향을 파악하였다.

결과 및 토의: 2016년 충청지역의 대기오염물질 배출량 분석 결과 NO_x 배출량의 약 59%, SO_x의 89%, NH₃의 70%, VOCs의 54%, PM_{2.5}의 79%, TSP의 68%가 충남에서 배출되며, 산업부문을 중심으로 생활, 발전, 도로 부문 배출원의 영향을 받는다. 대기질 모사 결과 충청지역은 국내 연평균 PM_{2.5} 농도에도 가장 큰 영향을 끼치는 것으로 나타났다(27%). 충남은 산업, 발전 부문을 중심으로 가장 많은 대기오염물질이 배출되는데, 주 배출지역인 당진, 서산, 보령보다 그 주변 지역인 아산, 예산, 홍성, 청양이 PM_{2.5} 고농도(>25 µg/m³) 지역으로 분류되어 일부지역은 배출과 고농도 지역의 괴리를 보이고 있다. 충북, 세종은 해당 지역 외부 배출원의 영향과 지형적 특성으로 인해 전 지역에 걸쳐 연평균 PM_{2.5} 고농도를 보였다. 연평균 PM_{2.5} 고농도에 노출되는 민감계층(65세 이상, 18세 이하) 인구수는 충북 청주시가 가장 많으며 충북이 충남대비 대기오염물질 배출량은 약 40% 수준이나 고농도 노출 민감 계층 인구수는 약 17% 더 많은 것으로 나타났다.

결론: 현재 시행 계획 수립 단계 중인 ‘중부권 대기환경관리 기본계획’에서 충청지역의 산업(충남 당진, 서산, 충북 단양), 생활(충북 청주, 충남 천안, 대전), 발전(충남 보령, 태안, 당진), 도로(대전, 충북 청주, 충남 천안)부문 배출 저감은 기초지자체 차원의 실효적 미세먼지 개선에 핵심요소이며, 이는 전국 연평균 PM_{2.5} 농도 저감에도 중요한 요소이다. 또한, 충북은 전 기초지자체가 연평균 고농도 지역으로 나타나 대기관리권역 이외의 지역(괴산, 보은, 옥천, 영동)의 관리가 요구된다. 충청지역의 미세먼지 저감을 위해 경기 등 인접한 지자체와 상호 미세먼지 저감에 대한 협력이 필요하며, 충청지역 내에서도 대기오염물질을 다량 배출하는 지역과 고농도 노출지역 간의 불균형문제에 대한 당사자 간 정책적 해결이 필요한 것으로 판단된다.

주제어: 충청지역, 초미세먼지(PM_{2.5}), 지역 환경정책, 고농도 노출 민감계층, 대기정책지원시스템(CAPSS)

1. 서론

우리나라는 「대기관리권역의 대기환경개선에 관한 특별법」(2019년 4월 2일 제정, 2020년 4월 3일부터 시행)에 따라 기존의 관리권역인 수도권 이외에 중부권(대전광역시, 세종특별자치시, 충청북도 일부, 충청남도 일부, 전라북도 일부), 동남권(부산광역시, 대구광역시, 울산광역시, 경상북도 일부, 경상남도 일부), 남부권(광주광역시, 전라남도 일부)을 권역으로 추가 설정하였다. 이에 총 77개의 특·광역시 및 시군을 4개 권역으로 구분하여 관리하고 있다.¹⁾ 이로써 그동안 중앙정부와 수

도권 중심으로 이루어졌던 대기환경관리 정책과 다르게 대기오염물질 배출원이 주변 지역에 미치는 상호간의 영향까지 고려한 지자체별 관리가 본격화 되었다. 관리권역에 포함되는 지역은 배출량, 기상 여건 등을 고려해 국내 초미세먼지(PM_{2.5}) 농도에 미치는 기여율을 기반으로 설정되었다. Table 1은 관리권역의 기여도를 나타낸 표인데, 충청지역 대부분을 포함(충남 금산, 충북 괴산, 보은, 영동, 옥천, 증평 제외)한 중부권의 연평균 PM_{2.5} 농도 기여율이 약 31%로 전국에서 가장 높은 비중을 차지한다.¹⁾

따라서 중부권의 주요 행정구역인 충청지역의 미세먼지 저

Table 1. Key statistics of 'Air control zone'.

	Administrative district (Cities/Do)	Contributions on PM _{2.5} concentration ¹⁾	Places of business ²⁾	Land area ³⁾
Total	77개	82%	1,094개	38%
Metropolitan	30개	21%	407개	9%
Central	25개	31%	256개	14%
Southern	7개	10%	92개	4%
Southeastern	15개	20%	339개	11%

**Metropolitan area: 수도권/Central area: 중부권/Southern area: 남부권/Southeastern area: 동남권

1) The result of air quality modelling about the effect on the concentration of PM_{2.5} in South Korea by aggregating air pollutants emission volume which can generate PM_{2.5}, weather conditions, etc.

2) The number of places of business to which the total permissible emission volume of pollutants subject to the total volume control is allocated in 2019

3) Total land area in 2018

Source: A comprehensive plan on particulate matter management (2020-2024), a master plan on air quality management in metropolitan area, central area, southern area, southeastern area (2020-2024).²⁻⁵⁾

감을 위해 충청지역의 주요 배출원을 파악하고, 이를 저감하는 것이 대기개선 목표를 달성하는데 필수적이다. 본 연구에서는 충청지역의 PM_{2.5} 농도 분석을 통해 농도관리가 필요한 지역을 파악하고, 충청지역 내 지자체별 대기오염물질 배출원 특성, 대기질 모델링을 통한 지역 간 연평균 PM_{2.5} 농도 기여율과 고농도에 노출된 인구수를 분석하였다. 그 결과로 충청지역에서 미세먼지를 저감 정책 이행 시 고려해야 할 지역별 배출 특성 및 정책적 주요 고려사항에 대해 제안하고자 한다.

2. 연구방법

2.1. 충청지역 현안 및 PM_{2.5} 관측자료 분석

충청지역의 대기환경 현안을 파악하기 위해 대기오염물질 배출사업장 및 부문별 에너지 소비 실적을 살펴보았다. 또한, PM_{2.5} 농도를 파악하기 위해 도시대기측정망에서 측정된 일별 평균 농도를 기준으로 최근 3년(2017-2019년) 월평균 및 2019년 연평균 농도를 도출하여 고농도 지역을 분류하였다.⁶⁾

PM_{2.5}에 의한 건강 위해성은 주로 장기적 영향이 중요한 요소이므로, 건강위험이 상대적으로 높은 지역을 파악하기 위해 2019년 연평균 PM_{2.5} 농도를 기초지자체 단위로 분석하였다. 건강 위해성을 고려한 고농도 기준을 설정하기 위하여 국내 PM_{2.5} 농도 수준과 세계보건기구(WHO)에서 제시하고 있는 기준을 적용하였다(Supplementary Material Table S1 참고). WHO는 건강위해성을 고려하여 미세먼지에 대해 4단계의 기준을 제시하는데⁷⁾ 우리나라의 경우 2018년까지는 잠정목표 2를 적용하였고⁸⁾, 2019년 이후 잠정목표 3로 강화하였다.⁹⁾ 본 연구에서는 연평균 농도가 이전 목표인 PM_{2.5} 잠정목표 2 (25 µg/m³)를 초과하는 지역을 고농도 지역으로 분류하여 장기 영향을 받는 지역을 분석하였다.

본 연구에서의 PM_{2.5} 농도 분석은 모두 도시대기측정망 관

측치를 사용하였다. 도시대기측정망의 측정방법은 중량농도법 혹은 이에 준하는 자동 측정법을 적용한다.¹⁰⁾

2.2. 충청지역 배출량 특성과 지역 분포 분석

충청지역의 대기오염물질 배출량 분석을 위해 국가미세먼지 정보센터의 대기정책지원시스템(CAPSS: Clean Air Policy Support System)에서 제공하는 CAPSS 2016 배출목록¹¹⁾으로 부문별(산업/Industry, 생활/Domestic, 발전/Energy, 도로/Road, 비산먼지/Fugitive dust, 농업/Agriculture, 비도로/Non-road), 기초지자체별 대기오염물질(NOx, SOx, NH₃, 휘발성 유기화합물(VOCs), PM_{2.5}, TSP) 연간 배출량을 분석하였다.

2.3. 대기화학-수송 모델링

충청지역의 연평균 PM_{2.5} 농도 기여도, 충청지역 내의 광역 지자체간 농도 기여도를 평가하기 위하여 대기화학 수송 모델링 시스템을 구성하였다.

인위적 대기오염물질 배출량 자료는 국내 배출량의 경우 CAPSS 2016 배출목록을 사용하고, 국외는 KORUS-AQ (Korea-United States Air Quality) 항측 연구를 위하여 개발된

Fig. 1. Domain setting for WRF modelling system (Source: Shim et al. (2019)¹⁵⁾).

Table 2. The status of air pollutant-emitting facilities in 2019 (unit).

Division of area		Total	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4	Type 5
National		60,611	1,831	1,641	2,038	19,956	35,145
Region	Chungcheong (National total %)	9,352 (15%)	242 (13%)	339 (21%)	377 (18%)	3,030 (15%)	5,364 (15%)
Province	Chungbuk	4,400	74	180	180	1,388	2,578
Province	Chungnam	3,887	133	107	162	1,317	2,168
City	Daejeon	648	10	27	24	211	376
City	Sejong	417	25	25	11	114	242

Classification of places of business: Type 1-Total NOx, SOx, TSP emission volume over 80 tons per year/ Type 2-Total volume from 20 to 80 tons/ Type 3-Total volume from 10 to 20 tons/ Type 4-Total volume from 2 to 10 tons/ Type 5-Total volume under 2 tons

Source: The Ministry of Environment (2019)¹⁹⁾

KORUS 2015 배출목록¹²⁾의 개선된 버전을 기반으로 활용하였다. 대기 모델 지원을 위한 배출처리모델은 국외의 경우 SMOKE-Asia¹³⁾, 국내의 경우 한국 CAPSS 배출목록 적용을 목표로 개발된 SMOKE 배출 모델링 시스템¹⁴⁾을 활용하였다.

기상 모델로는 중규모 기상 모델인 WRF v3.9.1 (Weather Research and Forecast)을, 기상 초기장은 NCEP (National Centers for Environmental Prediction) FNL (Final Operational Global Analysis data) 자료를 기반으로 하였다(Fig. 1 참고).

대기질 모델로는 CAMx v6.2 모델을 이용하였으며, 대상기간은 배출목록 자료의 기준연도를 고려하여 2016년 전체를 기준으로 하였다. 모델에 적용한 물리·화학 수행 조건으로 SAPRC99 Chemical mechanism with EBI chemical solver, AERO5 aerosol module, ACM2 vertical diffusion, PPM advection을 적용하였다.

PM_{2.5} 농도 기여도 분석은 지역간 농도 기여도를 평가한다. 지역구분은 수도권을 세분화하여 서울, 인천, 경기도 나누고, 강원권, 영남권(경북, 경남, 대구, 울산, 부산), 충청권(충남, 충북, 세종, 대전), 호남권(전남, 전북, 광주), 제주까지 총 8개 지역으로 나누었다. 기여도 분석을 기반으로 하여 전국에서 충청지역이 연평균 PM_{2.5} 농도에 기여하는 비율과 충청지역 내에서 각 광역지자체 간 연평균 PM_{2.5} 농도에 기여하는 비율을 도출하였다.

미세먼지 배출원별 농도 기여도 평가에는 배출원 배분법(Source apportionment)에 기반한 CAMx 모델의 PSAT (Particulate Source Apportionment Technology) 도구¹⁶⁾를 활용하여 연구를 수행하였다.

유사한 방법론으로 수행된 2017년 국립환경과학원의 대기질 모사¹⁷⁾에서 배출정보를 CAPSS 2012에 기반한 2015년 추계 배출량을 사용한 반면 본 연구에서 수행한 대기질 모델링은 CAPSS 2016 자료를 활용함으로써 비산먼지와 생물성 연소가 공식배출원에 추가되었으며, 최신 배출량 산정방법을 반영하였다.¹⁸⁾ 또한 2019년 수행된 전국 주요 지역단위 간 농도 기여도를 산정한 연구¹⁵⁾ 사례가 있으나 본 연구에서는 충청지역 내 광역지자체 간의 농도 기여율을 도출하여 충청지역 내

에서 지역 간 영향을 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 충청지역 대기환경 현안

'19년 기준 전국 대기오염물질 배출사업장의 약 15%가 충청지역에 소재하고 있으며, 특히 충청지역의 1종 사업장 중 약 55%가 충남 소재이다(Table 2 참조). 충청지역은 전국 에너지 소비실적 중 약 28%를 차지하며, 발전 및 산업 부문의 에너지 소비가 각각 43%, 21%로 높은 비중을 차지한다.²⁰⁾

따라서 충청지역은 전국대비 대기오염물질 배출사업장 수(전국 대비 약 15%)에 비해 발전과 산업부문의 에너지 소비량이 많아 두 부문의 배출이 대기환경에 큰 영향을 미친다. 특히 충청지역의 발전 및 산업 에너지 소비실적은 각 약 100%, 약 84%가 충남에 소재한다.²⁰⁾

3.2. 충청지역 PM_{2.5} 고농도 지역 분석

2019년부터 도시대기측정소의 PM_{2.5} 측정 자료가 존재하는 충북 괴산, 음성, 보은을 포함해 충청지역은 각 기초지자체에 1개 이상의 관측소를 보유하고 있으며, 인구밀집도가 높은 대전과 청주, 세종, 천안, 아산에 다수의 측정소가 위치한다. 대전은 2019년 말 기준으로 총 10개, 세종은 4개, 충남은 31개, 충북은 17개로 전체 62개의 관측소가 있다(Fig. 2 참조).

PM_{2.5} 일평균 농도 측정자료를 기반으로 평균농도를 구하여 고농도 지역을 살펴보았다. Fig. 2의 충청지역 연평균 PM_{2.5} 농도분포를 살펴보면 세종과 대전 대덕구, 충남 당진, 아산, 예산, 홍성, 청양이 고농도 지역이고 충북은 전체가 고농도 지역으로 분류된다. 연평균 농도 기준으로 행정구역상 충청지역 전체의 약 68%의 면적이 고농도 지역으로 분류된다.

Fig. 3은 최근 3년간(2017~2019년) 충청지역 월평균 PM_{2.5} 농도로 월별 고농도 시기 및 광역지자체 기준으로 고농도 지역을 분석하였다. 11월부터 3월까지의 충청 전 지역에서 월평균 농도가 25 µg/m³를 초과하는 고농도를 보이고 7월부터 10

Fig. 2. The locations of air pollution monitoring stations and annual mean concentrations of PM_{2.5} in Chungcheong region in 2019 (µg/m³)(Source: AirKorea⁶⁾, NIER²¹⁾.

월까지 월평균 농도가 20 µg/m³ 이하로 상대적으로 낮은 농도를 기록했다. 특히, 충북은 8월을 제외한 모든 월에서 가장 높은 농도를 보였다.

앞서 살펴본 2019년 연평균 PM_{2.5} 농도 및 최근 3년간 월평균 PM_{2.5} 농도로 보아 충청지역 내에서 충북이 고농도 현상으로 인한 가장 큰 피해지역임을 알 수 있다.

3.3. 충청지역 대기오염물질 배출량 특성과 지역 분포

고농도 초미세먼지의 원인인 주요 대기오염물질 배출원을 파악하기 위해 CAPSS 2016¹¹⁾을 기반으로 충청지역의 물질별(NOx, SOx, NH₃, VOCs, PM_{2.5}, TSP) 최대 배출원을 분석하였다. Fig. 4는 충청지역에서 배출되는 6가지 대기오염물질의 부문별 배출 비중을 나타내는데 SOx, PM_{2.5}, NOx는 산업부문에서 가장 많이 배출되었고 각각 약 63%, 59%, 31%), NH₃는 농업부문에서 약 83%, VOCs는 생활부문에서 약 48%, TSP는 비산먼지에서 약 54% 배출되었다(자세한 대기오염물질 배출원 분류기준은 Supplementary Material Table S2 참고). NH₃, VOCs, TSP은 각 배출량에서 산업부문의 비중이 두 번째로 높아(각 약 15%, 44%, 36%) 충청지역은 산업부문이 가장 중요한 저감 대상임을 알 수 있다.

Fig. 4. The national air pollutants emissions in Chungcheong region (ton/year)(Source: CAPSS 2016¹¹⁾).

Fig. 3. The monthly average of PM_{2.5} concentration from 2017 to 2019 in Chungcheong region (µg/m³)(Source: AirKorea⁶⁾).

Fig. 5. The national air pollutants emissions in Daejeon (tons/year)(Source: CAPSS 2016¹¹⁾)

다음으로 충청지역 내 광역지자체별로 대기오염물질 배출량 상위 기초지자체 및 주요 배출원을 분석하였다.

Fig. 5는 대전의 대기오염물질 배출량 및 주요 배출원을 나타낸다. 인구밀도가 높은 대도시 특성에 따라 VOCs와 NOx의 배출량이 타 물질에 비해 높은데, VOCs 배출량은 생활부문(약 58%)의 유기용제 사용이 가장 큰 비중을 차지하고, 산업부문이 약 31%를 차지한다. NOx는 도로부문이 가장 큰 비중을 차지하고(약 64%), 생활부문(약 18%)과 비도로부문(약 13%)이 차순위를 차지한다.

Fig. 6은 세종의 대기오염물질 배출량 및 주요 배출원을 나타낸다. 대전과 같이 VOCs와 NOx의 배출량이 가장 높은데, VOCs 배출량의 약 68%가 생활부문에서 배출되고 이 중 유기용제 사용이 가장 큰 비중을 차지한다. NOx는 대전과는 달리 건설장비 등의 비도로 이동오염원에서 약 48%, 도로부문에서는 약 35%가 배출된다. 대전과 세종은 충청지역 전체에 비해 교통(도로 및 비도로부문)과 생활부문의 배출량 비중이 큰 것으로 나타났다.

Fig. 6. The national air pollutants emissions in Sejong (tons/year)(Source: CAPSS 2016¹¹⁾).

Fig. 7은 충남 전체의 주요 배출원 및 대기오염물질별 배출량 상위 4개의 기초지자체를 선정하여 그 배출량을 나타냈다. 충남은 NOx와 NH₃를 제외하고 산업부문 배출량이 높은 비중을 차지하는데, 그 중에서도 당진은 물질별로 가장 많은 대기오염물질을 배출하는 지역이다(상위 4개 기초지자체별 배출량 및 주요 배출원은 Supplementary Material **Fig. S1-S8** 참고). 당진의 대기오염물질 배출량은 NH₃를 제외하고 산업부문 배출이 압도적으로 높은 비중을 차지하는데 NOx는 산업부문에서 약 57%, 발전부문에서 약 31%가 배출된다. TSP와 SOx는 산업부문에서 각 약 91%, 85%가 배출된다. 그 중 1차 금속제조업의 배출량 비중이 가장 높는데, 2016년 기준으로 충남의 1차 금속제조업의 사업체 수가 전체 419개 중 당진에 124개(약 30%)로 가장 많고 종사자 수 역시 충남 전체 17,583명 중 당진에 11,513명(약 65%)으로 가장 높은 비중을 차지한다.²²⁾

서산은 대산산업단지 등의 영향으로 NOx, SOx, NH₃, VOCs의 배출량 중 산업부문에서 배출되는 대기오염물질이 높은 비중을 차지한다(각 약 44%, 91%, 65%, 90%). VOCs,

Fig. 7. The national air pollutants emissions in Chungcheongnam-do (tons/year)(Source: CAPSS 2016¹¹⁾).

SOx, NOx의 순으로 배출량이 높는데, VOCs의 약 90%, SOx의 약 91%가 생산공정을 포함한 산업부문에서 배출된다. NOx는 화물선박 등으로부터 배출되는 비도로부문이 약 32%를 차지한다. 보령은 NOx와 SOx가 주로 배출되는데, 석탄화력발전소로 인한 발전부문 배출량이 가장 큰 비중(각각 약 86%, 약 98%)을 차지한다.

Fig. 8은 충북 전체 주요 배출원 및 대기오염물질별 배출량 상위 4개의 기초지자체를 선정하여 그 배출량을 나타냈다. 충북은 충남에 비해 산업부문 배출량 비율이 낮은 것으로 드러났다. NOx와 SOx는 산업부문에서 배출되는 비중이 가장 크지만(각 약 49%, 82%), VOCs와 PM_{2.5} 배출량은 생활부문 배출량 비율이 상대적으로 높다(각 약 63%, 35%). 청주는 VOCs 및 NOx배출량이 큰 비중을 차지하는데 VOCs는 폐기물처

Fig. 8. The national air pollutants emissions in Chungcheongbuk-do (tons/year)(Source: CAPSS 2016¹¹⁾).

리 및 유기용제 사용을 포함한 산업부문에서 약 51%, 유기용제 사용 등을 포함한 생활부문에서 약 43% 배출된다(상위 4개 기초지자체별 배출량 및 주요 배출원은 Supplementary Material Fig. S1-S8 참고). NOx는 도로이동오염원으로부터 약 56%가 배출되고 건설장비 및 공항, 철도를 포함한 비도로 이동오염원에서 약 16%가 배출된다. 단양은 NOx의 약 94%, SOx의 약 98%가 제조업연소, 특히 시멘트 생산을 포함한 산업부문에서 배출된다. TSP 배출량은 도로 및 비포장도로 재비산먼지를 포함한 비산먼지가 약 47%, 제조업 연소 등을 포함한 산업부문으로부터 약 45% 배출된다. 제천은 대기오염물질 배출량 중 NOx가 가장 큰 비중을 차지하는데 대부분 시멘트 생산을 포함한 산업부문에 의해 배출된다(약 75%).

충청지역의 대기오염물질 배출량 분석 결과 NOx 배출량의

Fig. 9. Results of statistical verification of simulated daily mean $PM_{2.5}$ concentration (Black dots: winter, red dots: spring, blue dots: summer, gray dots: fall).

약 59%, SO_x 의 89%, NH_3 의 70%, VOCs의 54%, $PM_{2.5}$ 의 79%, TSP의 68%가 충남에서 배출된다. 특히, 충남 당진과 서산의 대기오염물질 배출량이 높은 비중을 차지하는 만큼 이 지역의 산업부문 배출(당진, 서산 전체의 약 76%) 감시 및 저감이 집중적으로 이행되어야 한다. VOCs는 산업(충남 서산)과 생활(충북 청주, 대전)부문의 저감이 필요한데, VOCs는 배출량의 불확실성과 초미세먼지 기여도가 큰 것으로 알려졌다.²³⁾ 따라서 현재 ‘중부권 대기관리 기본계획(2020~2024)’의 목표를 상회하는 저감이 필요하며, 관련 사업장 및 관련 배출원의 집중 감시와 실효적 배출저감 정책이 요구된다.

3.4. 전국 지역간 연평균 $PM_{2.5}$ 농도 상호 기여도 및 충청지역 내 농도 기여도

앞서 구축한 모델링 시스템의 결과를 검증하기 위해, 전국 일평균 $PM_{2.5}$ 관측자료와 모델링 결과를 비교하였다. 본 모의

의 신뢰 수준을 산포도와 통계지표, 월별 예측 성능에 대해 Fig. 9에 나타내었다(전반적 예측 성능 유효 범위 NMB $\pm 10\%$, $R > 0.7$ ^{24,25)}, 각 계절별 예측 성능유효 범위 NMB $\pm 30\%$, IOA > 0.5 , $R > 0.7$).²⁴⁾ 여기서 흑색점은 겨울, 적색점은 봄, 청색점은 여름, 회색점은 가을을 나타낸다.

대기화학-수송모델을 통해 도출된 국내 주요 지역별 연평균 $PM_{2.5}$ 농도 기여도는 충청지역과 영남지역이 약 27%로 전국에서 가장 큰 비중으로 기여하며, 그 다음은 수도권(서울+인천+경기)지역 약 23% 순이다. 그 다음으로 호남지역 약 19%, 강원지역 약 4% 순의 기여도를 보인다.

Table 3은 각 지역별 연평균 $PM_{2.5}$ 상호간 농도 기여도를 보여준다(제주 포함 전체 기여도 합산 100%, 제주는 영향력이 미미하여 Table 3에서 제외함). 충청지역은 수도권지역에서 수도권 자체기여를 제외하고 다음으로 큰 기여도를 보이며(서울 14%, 인천 22%, 경기 24%), 비수도권지역 간의 농도 기여도에서도 중요한 영향을 끼친다. 호남 및 영남에서는 자체 기여도(각 61%) 다음으로 충청지역이 가장 높은 기여도를 보이며(각 16%), 강원지역은 자체 기여도(27%) 외에 경기, 충청지역 배출이 강원지역 연평균 농도에 높은 기여도를 보이는 것을 확인할 수 있다(각 29%, 22%). 이로써 충청지역은 지역 내 자체 배출로 인한 기여도 외 경기, 인천 호남, 영남, 강원을 아우르는 전국 각 지역의 연평균 $PM_{2.5}$ 농도에 상당부분 기여함을 알 수 있으며 앞서 언급한 것처럼 충청지역의 산업, 생활, 발전, 도로 부문의 저감이 해당 지역과 전국 $PM_{2.5}$ 농도 저감을 위한 주요 목표라 볼 수 있다.

Table 3. The matrix showing source (columns) regions and receptor (rows) regions based on annual contributions of $PM_{2.5}$ concentrations in 2016 (%).

Receptor \ Source	Seoul	Incheon	Gyeonggi	Gangwon	Chungcheong	Honam	Yeongnam
National	3	2	18	4	27	19	27
Seoul	40	6	34	1	14	2	3
Incheon	9	26	33	1	22	5	5
Gyeonggi	8	5	53	3	24	3	5
Gangwon	6	3	29	27	22	4	9
Chungcheong	2	2	17	2	59	8	10
Honam	1	1	6	1	16	61	14
Yeongnam	2	1	8	2	16	11	61

*Excluded foreign contributions

Table 4. The contributions to annual mean $PM_{2.5}$ concentrations among four administrative units (Sejong, Daejeon, Chungnam and Chungbuk) in Chungcheong region (%).

Receptor \ Source	Gyeong-gi	Sejong	Daejeon	Chungnam	Chungbuk	Gyeongbuk	Jeonbuk
Sejong	15	16	4	36	9	5	4
Daejeon	12	5	18	30	8	7	8
Chungnam	13	1	2	60	3	3	7
Chungbuk	22	2	2	19	28	9	3

*Excluded foreign contributions

Table 5. The total number&ratio of vulnerable population exposed to high level of annual average concentrations of PM_{2.5} (>25 µg/m³)—Top 10 cities in Chungcheong region.

Province/metropolitan city	City/county	Total population	Vulnerable population	Ratio of vulnerable population
Chungbuk	Cheongju-si	839,566	260,812	31%
Chungnam	Cheonan-si	314,395	105,757	30%
Sejong	Sejong-si	340,575	115,724	34%
Chungnam	Asan-si	314,395	105,757	34%
Chungbuk	Chungju-si	210,737	72,246	34%
Chungnam	Dangjin-si	167,042	60,597	36%
Daejeon	Daedeok-gu	177,031	53,293	30%
Chungbuk	Jecheon-si	134,617	47,760	35%
Chungnam	Hongseong-gun	100,423	39,590	39%
Chungnam	Yesan-gun	79,238	32,807	41%

Source: Ministry of the Interior and Safety²⁸⁾

Table 4는 충청지역 내 광역지자체별 연평균 PM_{2.5} 농도 기여도를 나타낸다. 2016년 기준으로 충남은 충청지역 내 각 광역지자체에서 가장 큰 영향을 미친다. 세종은 자체 기여도가 16%에 그치는 반면 충남에 의한 기여도는 36%를 차지한다. 대전 역시 자체 기여도는 18%이지만 충남에 의한 기여도는 30%로 가장 큰 비중을 보여준다. 충남은 자체 기여도가 60%로 가장 높으며, 경기가 13% 기여한다. 충북은 자체 기여도가 28%로 가장 큰 비중을 차지하지만 경기와 충남에 의한 기여도가 각 22%, 19%로 그 뒤를 따른다. 따라서 충청지역 내 대부분 지자체는 충남 대기오염물질 배출에 가장 큰 영향을 받으므로 충남의 배출 저감이 충청지역 내 전반적인 미세먼지 개선을 위한 가장 중요한 과제임을 알 수 있다. 또한, 충북과 충남은 지역 내 영향 이외에도 경기(각 22%, 13%)의 영향이 크다. 연평균 PM_{2.5} 농도는 주변 지역 간 상호 영향을 많이 받으므로 충청지역 미세먼지 저감을 위해 경기를 포함한 인접 지자체간 영향 분석과 저감을 위한 공동의 노력이 필요함을 알 수 있다. 본 모델링에서는 기초지자체 수준의 초미세먼지 농도 상호기여도는 포함되지 않았다. 그러나 앞서 살펴본 대기오염물질 배출량 분석 결과 충청지역의 배출량이 집중된 곳은 당진, 서산, 보령 등의 산업 및 발전시설, 인구가 밀집된 천안, 청주 지역의 교통, 생활부문의 영향이 두드러져 이들 지자체에 대한 저감이 충청지역 미세먼지 개선의 핵심요소임을 알 수 있다.

3.5. 충청지역 PM_{2.5} 고농도 노출 민감계층 인구수 분석

미세먼지 정책은 정책 수용자 중심의 건강 위해성을 고려할 필요가 있다. 건강 위해성은 민감계층에 더 큰 영향을 끼치므로 고농도(>연평균 25 µg/m³) PM_{2.5} 노출 민감계층 인구수를 파악하기 위해 「미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법 시행령」 제14조(취약계층의 범위)에 대한 규정을 참고하여²⁶⁾ 65세 이상 노인계층과 어린이·영유아 및 고농도 미세먼지 대

응 시 건강취약계층에 포함되는 청소년(만 12~18세)까지 포함하여²⁷⁾ 국가 통계자료를 분석하였다.

고농도 노출 민감계층 인구수 산출 결과, 전국에서 2019년 평균 PM_{2.5} 고농도에 노출되는 총 인구수는 17,481,011명인데, 충청지역 내 PM_{2.5} 고농도 지역으로 분류되는 기초지자체의 총 인구수는 3,505,657명으로 전국인구의 약 20%를 차지한다. **Table 5**는 충청지역에서 고농도 지역으로 분류되는 기초지자체 중 민감계층 인구수가 많은 상위 10개 기초지자체를 분석하였다. 대기오염배출량은 상대적으로 적지만 고농도 지역으로 분류되었던 충북 청주, 충주, 제천과 충남 아산, 예산, 홍성이 포함되었다.

또한 ‘중부권 대기환경관리 기본계획(2020~2024)’상 관리 권역에는 충북 괴산, 보은, 옥천, 영동이 관리 대상에서 제외되었으나³⁾, PM_{2.5} 고농도 기준을 고려하였을 때, 고농도에 대한 민감계층 관리 대상에 포함하는 것이 타당하다. 특히 충남에서 연평균 고농도에 노출되는 민감계층 인구수는 총 460,394명, 충북은 537,262명으로 충북이 충남보다 약 17%가 더 많다. 따라서 대기오염물질 배출원 지역과 PM_{2.5} 고농도 지역들의 불균형 분포를 고려해 배출원(Source)-수용지(Receptor)간 정책협약이 요구되며, 충청지역은 이러한 특성을 반영하여 배출저감 뿐 아니라 민감계층의 위해성을 저감하기 위한 다양한 정책 노력이 필요하다. 따라서 PM_{2.5} 노출에 민감한 인구수를 고려하여 충북은 건강 위해성을 낮추는 것을 중점으로, 충남은 주요 대기오염물질 배출량을 저감시키는 정책을 집중적으로 추진하는, 지역 미세먼지 특성을 반영한 정책의 이행이 바람직하다.

4. 결론

1) 본 연구결과 충청지역은 전국 연평균 PM_{2.5} 농도 기여도가 약 27%에 달하며 국내 대기질에 가장 큰 영향을 끼친다. 따라서 충청지역의 효과적인 미세먼지 저감이 전국 미세먼지

농도를 저감하는데 중요한 역할을 한다고 볼 수 있다. 충청지역은 산업, 생활, 발전, 도로이동오염원 등 다양한 대기오염물질 배출원을 보유하고 있는데, 특히 충남 당진, 서산 일대의 산업부문 배출량의 영향이 큰 것으로 나타났다. 하지만 ‘미세먼지 관리 종합계획(2020~2024)’ 등 기존 미세먼지 정책은 지역별 배출 특성 및 농도를 고려한 맞춤형 대책이 아닌 전국 단위의 저감 정책을 제시하였다. 최근 시행된 ‘중부권 대기환경관리 기본계획(2020~2024)’도 권역별 맞춤형 대책 수립을 중점사항으로 정책목표를 제시하였으나, 기초지자체별 특성을 반영한 정책 이행이 필요한 실정이다. 따라서 본 연구는 충청지역의 효과적인 미세먼지 저감을 위해 해당 지역의 광역 및 기초지자체의 미세먼지 농도 및 대기오염물질 배출 특성, 지역간 기여도 등을 분석하였다.

본 연구결과 충청지역은 최근 3년간(2017~2019년) 11, 12, 1, 2, 3월에 월평균 $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상의 고농도 현상을 보이며, 특히 2019년 평균 $\text{PM}_{2.5}$ 농도는 충북 전 지역에 걸쳐 고농도 지역으로 분류되었다. 충남은 당진, 아산, 예산, 홍성, 청양과 세종이 고농도 지역으로 분류되었다. 2016년 배출량을 기준으로 충남이 충북의 2.5배에 달하는 대기오염물질을 배출한다. 충청지역 내 주요 배출원은 산업(충남 당진, 서산, 충북 단양), 생활(충북 청주, 충남 천안, 대전), 발전(충남 보령, 태안, 당진), 도로(대전, 충북 청주, 충남 천안)로 나타났다. 물질별로는 NO_x 와 VOCs의 배출이 많아 이에 대한 실효적 저감이 필요한 것으로 나타났다.

대기질 모의 결과, 충청지역 내에서는 충남이 가장 큰 농도 기여도를 보여준다(19%). 충청지역 내 주요 대기오염물질 배출원은 충남에 주로 위치하는데, 주 배출지역(당진, 서산, 보령)보다 그 주변 지역(아산, 예산, 홍성, 청양)과 충북 전역이 $\text{PM}_{2.5}$ 고농도 지역으로 분류되어 해당 지역은 타 지역의 영향을 크게 받음을 알 수 있다. 이는 배출지역-고농도 지역간 정책이슈를 야기할 수 있다.

특히 충북은 연평균 고농도 지역임과 동시에 고농도에 노출되는 민감계층 인구수가 충남보다 약 17%가 더 많다. 그러므로 충북은 인구가 많은 청주시 등을 중심으로 미세먼지 주의보/경보 시 적극적인 알람 및 올바른 대처방법 홍보와 같은 고농도 감시, 민감계층의 건강 위해성을 고려한 저감 조치가 필요하다. 또한 향후 기존 대책이 이행되었을 경우 민감계층의 노출도를 얼마나 감소할 수 있는지, 노출도 감소에 효과적인 정책은 무엇인지 등에 대한 추가 연구가 필요하다.

2) 하지만 현재 정부 중부권 기본계획의 대기오염물질 저감 대책별 투자계획을 살펴보면, 투입 예산 전체의 약 86%가 도로이동오염원부문에 할당되어 있다.³⁾ 충청지역 내에서 산업부문이 전체 배출량의 가장 큰 비중(약 38%)을 차지하는 만큼 산업부문 배출 저감을 위한 실효적인 정책 수단(예, VOCs 저감 장치 지원)의 개발과 이행이 매우 중요하다.

또한, ‘중부권 대기환경관리 기본계획(2020~2024)’에서 산

업부문 저감 대책의 중심이 되는 사업장총량관리제의 경우 4-5종 사업장은 총량관리대상에서 제외되었다.³⁾ 하지만 2019년 기준으로 1~5종 사업장 중 4~5종 사업장의 비율은 대전 약 91%, 세종 약 85%, 충남 약 90%, 충북 약 90%의 높은 비율을 차지하고 있다.¹⁹⁾ 이러한 중소형 사업장은 관리의 대상에서 벗어나는 만큼 이에 대한 감시, 관리 강화 및 배출량을 집계할 수 있는 시스템이 구축되어야 한다.

하지만 현재 지자체 차원의 관리 인력 부족과 이로 인한 미세먼지에 대한 전문성 부족²⁹⁾으로 실효적인 이행방안을 구축하는데 어려움을 겪고 있어 재정 및 인력 지원이 요구된다. 앞서 언급한 충청 지역 내 지역별 특성을 반영한 정책 시행의 지원을 위해 미세먼지 문제 해결을 위한 ‘국가기후환경회의’에서 2019년 11월 29일 충남을 시작으로 2020년 1월 29일 충북 지역 타운홀미팅을 개최해 지역 현안을 살펴본 바 있다.³⁰⁾ 이와 같은 중앙정부-기초지자체-지역 주민 등 당사자간 소통은 지역 현안을 파악하는데 효과적인 방안으로 관련된 거버넌스 발전을 통해 정책문제를 해결할 수 있다.

3) 본 연구는 CAPSS 자료의 불확실성과 함께 모델링 기법상 정확성의 한계를 일부 포함하고 있다. 대기화학 수송 모형을 활용하여 농도 기여도의 분석 범주를 (1) 충청지역이 국내 전체에 미치는 영향 및 타 지역(서울, 인천, 경기, 강원권, 호남권, 영남권)과의 상호 기여, (2) 충청지역 내 광역지자체간 상호 기여에 초점을 맞춘 공간해상도(9 km)로 모의 및 분석하였는데, 모든 기초지자체 단위로 상호기여를 파악하기에는 공간해상도 상의 한계가 있다. 따라서 더욱 상세한 해상도로 기초지자체 단위의 농도 상호 기여도에 대한 추가 분석이 필요하다. 또한 본 연구에서 논의한 주요 저감 대상은 배출 비중 상의 중요도에 근거한 것으로 실제 해당 지역 혹은 타 지자체의 미세먼지 농도 영향과 일치하지 않을 수 있어, 향후 한계점에 대한 세부적 규명이 정책 실효성 측면에서 필요하다.

현재 CAPSS 자료 상 생활, 농업부문과 비산업, VOCs 배출정보의 불확실성은 상대적으로 여전히 크다.^{15,23)} 이는 정부뿐 아니라 ‘권역별 대기환경관리 기본계획(2020~2024)’ 수립의 주체인 지자체의 감시 및 자료조사가 향후 필요하다. 또한 짧은 $\text{PM}_{2.5}$ 측정기간과 면적이 큰 기초지자체의 미세먼지 측정소가 해당 지자체의 평균농도를 대표하는 것에도 다소 공간적인 불확실성이 존재한다. 일 최고 미세먼지 농도 등 다양한 변수를 활용하면 건강영향을 보다 종합적으로 파악할 수 있을 것으로 사료된다. 따라서 향후 측정자료 등 기초자료의 개선과 축적을 통해 보다 정교한 지자체 차원의 미세먼지 실태 파악과 정책 논의가 가능할 것으로 예상된다.

농업부문에서 주로 배출되는 암모니아(NH_3) 또한 $\text{PM}_{2.5}$ 의 2차 생성에 기여도가 크며, 국내 $\text{PM}_{2.5}$ 생성 원인 중 NH_3 영향이 높은 것으로 드러났다.^{15,31)} 충남 홍성, 예산, 청양 및 세종은 농축산 활동으로 인한 NH_3 배출량이 상대적으로 높지만 배출량 자료의 불확실성, 삭감량 산정의 어려움을 이유로³²⁾

타 오염물질에 비해 정책이행이 어려운 실정이다. ‘중부권 대기관리 기본계획(2020~2024)’에서도 NH₃ 배출 저감을 위한 정성적 대책이 포함되어 있으나 구체적인 감축 목표가 부재하고, 감축목표를 구체적으로 제시하는 관리 대상물질에도 제외되어 있어 정량적인 삭감 대책을 제시할 수 있도록 향후 개선이 필요하다. 이 밖에 미세먼지의 조성을 측정하고 성분별 위해성을 조사하는 등의 세밀한 관측과 인체 영향에 대한 연구가 시급한 것으로 사료된다.

Acknowledgements

이 논문은 한국환경정책·평가연구원이 수행한 ‘미세먼지 통합관리 전략 수립 연구(심창섭 외, 2020)’의 연구비 지원으로 수행되었으며, 일부 내용을 수정 및 보완하였습니다(과제번호: GP2020-12). 또한 한국연구재단의 미세먼지국가전략프로젝트 사업(과제번호: 2017M3D8A1092026)과 융복합연구(과제번호: NRF-2019M1A2A2104003), 2020년도 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단-동북아-지역 연계 초미세먼지 대응 기술개발사업의 일부 지원을 받아 수행하였습니다(과제번호: 2020M3G1A1114616, 2020M3G1A111462511).

References

1. Korea Ministry of Environment, A comprehensive plan on particulate matter management(2020-2024), Korea Ministry of Environment, Sejong, Korea, pp. 35-36(2019).
2. Korea Ministry of Environment, A modified plan for the second master plan on air quality management in metropolitan area(2015-2024), Korea Ministry of Environment, Sejong, Korea, pp. 1-88(2020).
3. Korea Ministry of Environment, A master plan on air quality management in central area(2020-2024), Korea Ministry of Environment, Sejong, Korea, pp.1-59(2020).
4. Korea Ministry of Environment, A master plan on air quality management in southern area(2020-2024), Korea Ministry of Environment, Sejong, Korea, pp.1-59(2020).
5. Korea Ministry of Environment, A master plan on air quality management in southeastern area(2020-2024), Korea Ministry of Environment, Sejong, Korea, pp.1-59(2020).
6. AirKorea Homepage, https://www.airkorea.or.kr/web/pastSearch?pMENU_NO=123, October(2020).
7. World Health Organization(WHO), WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide, Word Health Organization(WHO), Geneva, Switzerland, pp. 9-13(2005).
8. M. S. Lee, Gender review, Korea Women's Development Institute, Seoul, Korea, pp. 54-60(2019).
9. Korea Ministry of Environment, Particulate matter fact check, ask anything about particulate matter!, Korea Ministry of Environment, Sejong, Korea, pp. 16-17(2019).
10. National Institute of Environmental Research(NIER), Annual report of air quality in Korea 2018, National Institute of Environmental Research, Incheon, Korea, pp. 12(2019).
11. National Air Emission Inventory and Research Center, National Air pollutants emission 2016, http://www.air.go.kr/jbmd/sub43_detail.do?tabPage=3&detailKey=70025P07&inputSchTxt=&typeSchOption=sj&menuId=POT041, May(2020).
12. R. J. Park, International air-craft measurement campaign for megacity air pollution study(ii)-modeling study on source attribution and domestic emission inventories verification, pp. 2-61(2016).
13. J. H. Woo, K. C. Choi, H. K. Kim, B. H. Baek, M. Jang, J. H. Eum, C. H. Song, Y. I. Ma, Y. S. Woo, L. S. Chang, S. H. Yoo, Development of an anthropogenic emissions processing system for asia using SMOKE, Atmos. Environ., 58, 5-13(2012).
14. S. Kim, M. K. Moon, D. W. Byun, Korea emissions inventory processing using the US EPA's SMOKE system, Asian J. Atmos. Environ., 2(1), 34-46(2008).
15. C. S. Shim, A study on integrated management of particulate matter pollution, Korea Environment Institute, Sejong, Korea, pp. 52(2019).
16. K. M. Wagstrom, S. N. Pandis, G. Yarwood, G. M. Wilson, R. E. Morris, Development and application of a computationally efficient particulate matter apportionment algorithm in a three-dimensional chemical transport model, Atmos. Environ., 42(22), 5650-5659(2008).
17. J. B. Lee, et al., A study on quantitative estimation of emission sources and regional contributions to air quality on forecasting area(I), National Institute of Environmental Research(NIER), Incheon, Korea, pp. 3-12(2017).
18. National Air Emission Inventory and Research Center, 2016 National air pollutants emission, National Air Emission Inventory and Research Center, USA, pp. 11-19(2019).
19. Korea Ministry of Environment, The status of air pollutant-emitting facilities and emission quantities of air pollutants in 2019, https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=106&tblId=DT_106N_03_0200077&conn_path=I2, September(2020).
20. Korea Ministry of Trade, Industry and energy, national energy consumption in 2019, https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=115&tblId=DT_11507N_209&conn_path=I2, September(2020).
21. National Institute of Environmental Research(NIER), Annual report of air quality in Korea 2019, National Institute of Environmental Research, Incheon, Korea, pp. 358-363(2020).
22. The Province of Chungcheongnam-do, A report of the census on establishments 2016, Korea, pp. 287-386(2017).
23. Korea Ministry of Environment, Introduction to the KORUS-AQ rapid science synthesis report, Korea Ministry of Environment, Sejong, Korea, pp. 1-40(2019).
24. C. Emery, Z. Liu, A. G. Russell, M. T. Odman, G. Yarwood, N. Kumar, Recommendations on statistics and benchmarks to assess photochemical model performance, J.

- Air Waste Manage., 67(5), 582-598(2016).
25. K. C. Choi, Y. J. Lim, J. B. Lee, K. Nam, H. Lee, Y. Lee, J. Myoung, T. Kim, L. Jang, Evaluation of the simulated pm_{2.5} concentrations using air quality forecasting system according to emission inventories-focused on China and South Korea, J. Korean. Soc. Atmos., 34(2), 306-320(2018).
26. National Law Information Center Home Page, <https://www.law.go.kr/법령/미세먼지저감및관리에관한특별법시행령>, September(2020).
27. Korea Ministry of Education, <https://www.me.go.kr/home/file/readDownloadFile.do?fileId=140541&fileSeq=5>, September (2020).
28. Ministry of the Interior and Safety, Statistics of Residence Registration Population in 2019, https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=101&tblId=DT_1B04006&vw_cd=MT_ZTITLE&list_id=A_7&seqNo=&lang_mode=ko&language=kor&obj_var_id=&itm_id=&conn_path=MT_ZTITLE, September (2020).
29. S. A. Kwon, A comparative policy analysis on living environment crisis in local government - focusing on the policy and management of fine particulate matter in Korea, Crisisonomy, 14(3), 31-46(2019).
30. National Council on Climate and Air Quality, https://www.ncca.go.kr/cmn/board/BBSMSTR_000000000003/bbsList.do(2020).
31. J. Choi, R. J. Park, H.-M. Lee, S. Lee, D. S. Jo, J. I. Jeong, D. K. Henze, J.-H. Woo, S.-J. Ban, M.-D. Lee, C.-S. Lim, M.-K. Park, H. J. Shin, S. Cho, D. Peterson, C.-K. Song, Impacts of local vs. trans-boundary emissions from different sectors on PM_{2.5} exposure in South Korea during the KORUS-AQ campaign, Atmos. Environ., 203, 196-205(2019).
32. The Board of Audit and Inspection of Korea, A report of audit of particulate matter management policy, The Board of Audit and Inspection of Korea, Seoul, Korea, pp. 63-65 (2020).

Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Authors and Contribution Statement

Jiyoung Gong

Korea Environment Institute, Researcher, ORCID[®] 0000-0003-1397-1511: Conceptualization, Methodology, Validation, Writing - original draft.

Changsub Shim

Korea Environment Institute, Senior Research Fellow, ORCID[®] 0000-0003-1735-6655: Conceptualization, Validation, Writing - original draft.

Ki-Chul Choi

Korea Environment Institute, Research Fellow, ORCID[®] 0000-0001-6098-4476: Methodology, Validation.

Sungyong Gong

Korea Environment Institute, Chief Research Fellow: Conceptualization.