



창립 40주년 기념 특집호

국내 대기오염 배출자료의 평가와 발전 방향

Review of Emission Inventory in Korea and Direction for Improvement

장영기, 김순태¹⁾, 우정현^{2),*}

수원대학교 환경공학과, ¹⁾아주대학교 환경안전공학과, ²⁾건국대학교 사회환경공학과

Young-Kee Jang, Soon-Tae Kim¹⁾, Jung-Hun Woo^{2),*}

Department of Environmental Engineering, University of Suwon, Suwon, Republic of Korea

¹⁾Department of Environmental and Safety Engineering, Ajou University, Suwon, Republic of Korea

²⁾Civil and Environmental Engineering, Konkuk University, Seoul, Republic of Korea

접수일 2023년 8월 17일

수정일 2023년 9월 20일

채택일 2023년 9월 21일

Received 17 August 2023

Revised 20 September 2023

Accepted 21 September 2023

*Corresponding author

Tel : +82-(0)2-453-2706

E-mail : jwoo@konkuk.ac.kr

Abstract In this study, we focused on the Clean Air Policy Support System (CAPSS), which provides current national air pollution emission data, and compared and analyzed domestic and international emission estimation methods and uncertainty assessment methods. We evaluated the level of domestic emissions using modeling and observational data and proposed strategies to improve national air pollution emission data. Comparing the uncertainty of Korea's CAPSS inventory with other Asian countries' inventories, it showed a lower level of uncertainty compared to TRACE-P's China level but similar to Japan's emission uncertainty level. Recent studies on CAPSS inventory data uncertainty indicated relatively higher uncertainty in agricultural emissions (manure management), organic solvent use (paint facilities), fine dust emissions (fugitive road dust), and on-road mobile sources (passenger cars and trucks). Based on long-term simulation results, we examined overall emission characteristics. For air pollutants like PM₁₀ that were underestimated, it was determined that improvements were needed, taking into account unaccounted emission sources, emission factors, and activity data on a regional basis. In the case of PM_{2.5}, simulation accuracy was higher compared to PM₁₀, but improvements were needed for overestimated or underestimated components. Regarding NO₂, annual average concentrations were similar to observational data, but seasonal variations showed some differences, indicating uncertainties in the process of allocating monthly emissions from annual averages. Evaluation of volatile organic compounds (VOCs) revealed significant underestimation in industrial areas such as Yeosu, unlike urban areas, suggesting the need for improvements in fugitive emissions and VOC emission data related to industrial processes. To enhance the reliability of national air pollution emission data, a comprehensive understanding of industrial emissions and investigation and improvement of unreported emission sources are urgently required at the national level. Moreover, enhancing statistical data on emission-related activities should be pursued at the government level.

Key words: Air pollutant, CAPSS, Emissions inventory, Evaluation, Uncertainty

1. 서론

대기오염 배출자료는 정치적 측면이나, 경제적 측면에 있어 복잡한 상호 이해관계가 얽혀있는 자료이며 대기 환경 개선을 위한 정책적, 연구적 접근에 필수적인 정보이다. 또한 대기오염 관리 및 기후변화 대응정책 수립의 필수적인 기초자료이며 관리정책의 성

과를 평가하기 위한 주요한 도구이다. 이에 따라 인위적 활동에 의한 오염물질의 배출량을 산정하고자 하는 노력이 계속되어 왔다. 하지만 배출정보가 가지고 있는 신뢰성에 대해 직접적인 분석이 제한적이고, 많은 경우 대기오염도 예측 능력 저하와 정책 이행 효과 분석에 대한 불확실성 제공요인으로 지적받고 있다.

2010년대 들어서면서 고농도 미세먼지 사태가 여

러 차례 발생하면서 미세먼지에 대한 관심과 관리의 필요성이 높아졌다. 이 과정에서 국가 대기오염물질 배출자료의 신뢰도와 문제점에 대한 지적이 많아지면서 개선 필요성이 높아졌다. 이에 본 연구에서는 현재 국가 대기오염 배출자료를 제공하고 있는 대기정책지원시스템(CAPSS)을 중심으로 국내·외 배출량 산정 방법과 신뢰도 평가방법을 비교 분석하였고, 모델링과 관측자료를 이용하여 국내 배출량의 수준을 평가하였으며, 국가 대기오염물질 배출자료를 개선하기 위한 전략을 제안하였다.

2. 국내 대기오염 배출자료의 구성

2.1 대기오염 배출원 분류체계의 구성

환경부에서는 대기정책지원시스템(Clean Air Support System; CAPSS)을 2001년에 개발하여 1999년 이후 국가 대기오염 배출자료 작성에 활용하고 있다. CAPSS는 1999년부터 2010년 배출자료까지는 7개의 대기오염물질(CO, NO_x, SO_x, TSP, PM₁₀, VOC, NH₃)을 대상으로 배출자료를 작성하였다. 이후 2011년 배출자료에는 PM_{2.5}를 추가하고, 2014년에는 블랙카본(BC)을 추가한 이후 2023년 현재까지 9개 대기오염물

질에 대한 배출자료를 작성하고 있다.

CAPSS는 사실상 국가 대기오염물질 배출자료 관리 종합시스템으로 과학적인 대기오염 관리를 위한 지원 시스템 역할을 하고 있다. 또한 지역 특성에 적합한 대기 보전 시책 수립·추진 지원, 대기오염물질 배출원에 대한 과학적 관리를 통한 대기질 관리를 위하여 전문가 및 일반 국민을 대상으로 대기오염물질 배출 정보를 제공한다는 목표를 가지고 있다. CAPSS는 현재 전국 시·군·구 지자체 단위와 1×1 km 격자 단위 공간 해상도의 배출자료를 제공하고 있다.

대기오염 배출원 분류체계는 대기오염 배출자료의 관리와 갱신을 위한 주요 구성체계이다. 표 1과 같이 미국 환경 보호국(US EPA: United States Environmental Protection Agency)은 SCC(Source Classification Code)로 배출원 분류체계를 구성하고 있으며 13개의 대분류를 적용하고 있고, 유럽연합(EU: European Union)은 SNAP(Selected Nomenclature for Sources of Air Pollution)로 배출원 분류체계를 구성하고 있으며 11개의 대분류를 적용하고 있다. 초기 CAPSS는 유럽연합의 SNAP 분류체계와 유사한 분류체계로 출발하여 1999년부터 2006년 배출자료는 11개 대분류체계로 작성되었다. 이후 CAPSS는 2009년 발표된 2007년 기준 배출자료부터 신규 배출원을 추가하고

Table 1. Source categories of air pollution emission inventory by countries.

USA	EU	Korea
Fuel combustion - electric utilities	Combustion in energy and transformation industries	Fuel combustion - electric utilities (1)
Fuel combustion - industrial	Combustion in manufacturing industry	Fuel combustion - industrial (3)
Fuel combustion - other	Non-industrial combustion plants	Fuel combustion - other (2)
Chemical & allied product MFG	Production processes	Production processes (4)
Metals processing		
Petroleum & related industrials		
Others industrial processes		
Solvent Utilization	Solvent and other product use	Solvent utilization (6)
Storage & transport	Extraction & distribution of fossil fuels	Fossil fuels storage & transport (5)
Waste disposal & recycling	Waste treatment and disposal	Waste treatment (9)
Highway vehicles	Road transport	Road mobile sources (7)
Off-highway	Other mobile sources and machinery	Non-road mobile sources (8)
Miscellaneous	Other sources and sinks	Other area sources (11)
	Agriculture	Agriculture (10)
		Fugitive dust (12)
		Combustion of biomass (13)

많은 배출계수를 갱신하면서 대분류에서 자연 오염원을 빼고 기타 면오염원과 비산먼지 부문을 추가하여 12개 대분류의 배출원 분류체계로 변경되었다. 2015년 기준 배출자료부터는 대분류에 생물성연소가 추가되면서 현재 13개 대분류, 64개 중분류, 355개 소분류의 배출원 분류체계로 작성되고 있다.

2015년 이후 적용되고 있는 13개 대분류체계는 연료연소에 대해서 발전시설 배출은 에너지연소(1), 난방에 의한 배출은 비산연소(2), 제조업의 연료연소 배출은 제조업연소(3)로 구분되고, 제조업 공정과정에서 발생하는 오염배출은 생산공정(4), 유류수송과 저장과정 VOC 배출은 에너지수송 및 저장(5), 페인트 도색과 세탁시설의 VOC 배출은 유기용제사용(6)으로 분류하고 있다. 또한 승용차, 화물차, 버스 등의 배출은 도로이동오염원(7), 철도, 선박, 항공, 건설기계, 농기계 등의 배출은 비도로이동오염원(8), 폐기물소각과 매립에 의한 배출은 폐기물처리(9), 축산분뇨와 비료사용에 의한 암모니아 배출은 농업(10), 산불 및 화재에 의한 배출은 기타 면오염원(11), 도로재비산, 건설공사, 농축산 활동에 의한 비산먼지 배출은 비산먼지(12), 농업잔재물 소각, 고기구이, 화목난로 사용에 의한 배출은 생물성연소(13) 부문으로 작성되고 있다. 그러나 대분류체계에서 비산먼지와 생물성연소는 배출 오염물질과 형태를 고려한 표현이므로 앞으로 배출 부문 특성을 고려한 대분류체계로 정비할 필요가 있다.

2.2 대기오염 배출량 산출방법의 발전

대기오염 배출량 조사를 위한 연구는 국립환경연구원에서 1989년부터 1991년까지 도시 대기질 개선연구를 대기공학과에서 수행하고 자동차 대기오염 배출계수 연구를 자동차공해 연구소에서 수행하면서 이루어졌다(NIER, 1993). 연구과제로 작성된 배출량 산출 관련 연구들은 Park *et al.* (1993)이 서울 지역의 1991년 배출 자료를 작성한 이후 여러 지역을 대상으로 다양한 배출원의 배출량 산출에 대한 연구들이 시도되었다. 그러나 이러한 배출 관련 연구들은 연구과제의

부수적인 연구로 대부분 추진되었으며 자료의 검증이 제대로 되지 않아 여러 연구자나 정책결정자가 사용하기에는 무리가 있으며, 국가적으로 표준화되고 검증된 배출자료 작성으로 연결되는 데 한계가 있었다. 배출원별 배출량 산출방법에 대한 제안들은 MOE (1995)와 GIR (1999)의 연구가 있었고, 이동오염원의 배출량 산출방법에 대해서는 KIER (2001, 2000), NIER (2007b)의 연구가 수행되었다.

국가적으로 표준화되고 검증된 배출자료 작성의 필요성에 대해 환경산업기술원의 차세대환경기술개발사업의 일환으로 2001년부터 2005년까지 수행된 NIER (2005)에서 배출원 분류체계 개선, 배출계수 정보시스템 구축, 도로 비산먼지와 VOC 배출계수 개발 등에 대한 연구를 수행하였다. 이후 이 사업을 통하여 제안된 배출계수와 배출량 산출방법론은 환경부 정보화 사업으로 추진되고 있었던 CAPSS의 개선에 직접 활용되었다. 이 연구사업 결과들은 대기오염 배출량 산출방법 편람에 반영되어 2007년 기준 대기오염 배출자료 개선과 작성에 활용되었고 도로 비산먼지가 대분류로 추가되었다. 그러나 이후 이 사업은 계속 추진되지 못하여 지속적 배출자료 개선 작업으로 연계되지 못하였다. 생물성연소와 비산먼지를 포함하는 PM_{2.5} 배출량 산출에 대해서는 NIER (2009a, 2009b)의 연구가 수행되었다.

2010년대 대기오염 배출자료의 개선에 대한 종합적인 연구는 환경산업기술원의 환경정책 공공기술개발사업의 일환으로 2011년부터 2014년까지 수행된 NIER (2014)에서 배출자료의 불확도 평가, 도로 비산먼지의 배출계수 보완, 생물성연소의 배출계수 개발과 역모델링에 의한 배출자료의 평가 등에 대한 연구를 수행하였다. 이 사업을 통하여 제안된 배출계수와 배출량 산출방법론은 CAPSS 배출자료 개선에 활용되어 2015년 기준 배출자료부터 생물성연소 부문이 배출원 분류체계의 대분류로 추가되었고, 비산먼지와 생물성연소 대분류를 추가한 PM_{2.5} 배출량이 공식적으로 발표되기 시작하여 이후 초미세먼지 관리 대책의 기초자료로 활용되었다. 이후 NIER (2018)에서 국가

대기오염 배출자료의 신뢰도 향상을 위한 평가방법과 장기적인 배출자료 개선 작업을 위한 로드맵과 전략이 제안되었다.

2.3 대기오염 배출자료의 작성과 관리체계

CAPSS 운영과 배출자료 작성이 국립환경연구원에서 이루어지던 2019년 이전에는 대기연구부에서 배출계수위원회를 운영하여 대기오염 배출량 산출방법과 새로 산출된 배출계수의 검증 업무를 수행하였다. 또한 CAPSS 배출자료 작성에 적용되었던 배출량 산출방법과 배출계수 현황을 “국가 대기오염물질 배출량 산출방법 편람”으로 발간하였고 매년 국가 대기오염 배출량 연보를 발간하였다. 2019년 2월에는 「미세먼지 관리 및 저감에 관한 특별법」이 시행되어 미세먼지 관리정책을 총괄하는 미세먼지 특별대책위원회와 미세먼지 저감사업단이 총리실에 구성되었고, 동법에 의하여 대기오염 배출자료 전반을 관리하는 국가 미세먼지정보센터가 2019년 12월 설립되었다. 이에 따라 국립환경과학원에서 운영하던 CAPSS 운영과 배출자료 작성 업무는 2020년 이후 국가미세먼지정보센터에서 수행하게 되었으며 2017년 기준 배출자료부터는 국가미세먼지정보센터에서 발간하게 되었다. 또한, 2020년 5월에는 관련 전문가들로 구성된 국가 대기오염물질 배출정보 관리위원회가 구성되어 대기오염 배출량 산출방법과 배출계수 개선과 검증에 대한 심의 업무를 본격적으로 수행하게 되었다. 이에 따

라 주로 국립환경과학원을 중심으로 이루어지던 국내 배출계수 개발에 더하여 농업과학원과 축산과학원에서 진행하는 연구과제들에서 농축산 부문 암모니아와 미세먼지 배출계수들이 제안되면서 국내 특성을 반영하는 작업들이 증가하기 시작하였다.

현재 CAPSS에 적용되고 있는 배출계수는 표 2와 같이 약 3만 개에 달하고 있으며 국내에서 개발된 배출계수는 약 22%, 국외의 배출계수는 약 78%가 적용되고 있다. 국외의 배출계수는 미국 EPA의 AP-42, Web FIRE, 미국 캘리포니아 대기국(CARB: California Air Resources Board)과 유럽연합 EEA (European Environment Agency)의 EMEP/EEA Air pollutant emission inventory guidebook의 자료들이 많이 활용되고 있다. 그러나 도로 이동오염원의 배출계수는 국립환경과학원 교통환경연구소에서 개발한 배출계수가 98% 적용되어 국내 특성을 반영하고 있다.

이러한 국내 배출계수 개발과 새로운 배출원의 추가, 배출량 산출방법 수정에 따라 연도별 배출량이 크게 변동되는 것처럼 표현되는 상황이 발생하였다. 특히 도로 비산먼지가 추가된 2007년 PM₁₀ 배출량과 비산먼지와 생물성연소 부문이 대분류 배출원으로 추가된 2015년 기준 PM₁₀과 PM_{2.5} 배출량은 모두 크게 증가하는 것으로 표현되었다. 따라서 산출방법 변화에 따른 배출량 변화가 배출관리정책에 의한 실제 배출량의 변화로 오해되는 상황은 해결이 필요하다. 이에 따라 국가 미세먼지정보센터에서는 2020년 기준 배

Table 2. Numbers of air pollution emission factors in CAPSS (2017 emission inventory).

Air pollutant	Sub total	Developed by Korea	Developed by US. EPA	Developed by EEA
TSP	3,549	521	2,974	54
PM ₁₀	3,840	570	3,247	23
PM _{2.5}	2,996	489	2,479	28
SO _x	3,409	1,263	1,943	203
NO _x	3,940	2,059	1,835	46
VOC	3,962	670	3,187	105
NH ₃	3,825	272	3,344	209
CO	3,884	682	3,155	47
Total	29,405	6,526	22,164	715

Yoo (2022)

출자료를 작성하면서 오류 수정과 배출계수에 대한 수정과 보완 작업이 이루어지면서 수정된 배출량 산출방법을 적용하여 2016년부터 2020년까지 연도별 배출자료를 재산정한 결과를 발표하였다(2023.04.13. 국가미세먼지정보센터 보도자료 참조). 이러한 과거 연도에 대한 배출자료 재산정은 앞으로도 배출자료의 신뢰도 향상을 위하여 불가피하고 중요한 작업이다.

3. 대기오염 배출량 산출방법과 신뢰도 평가

대기오염 배출량은 대기오염 관리 및 기후변화 대응정책 수립의 근간이 되는 자료임과 동시에 정책의 성과를 평가할 수 있는 주요한 도구로 활용된다. 이에 배출량의 정확도와 신뢰도를 제고하는 것은 대기질 관리를 위한 시작점으로 볼 수 있으며, 국내·외에서도 배출량의 정확도를 높이기 위한 다양한 연구가 꾸준히 진행되고 있다.

배출량의 신뢰도를 향상시키기 위해서는 우선 산정된 배출량에 대한 신뢰도 평가가 진행되어야 한다. 배출량 신뢰도 평가는 배출계수 및 활동도 등을 이용하여 배출량을 산정하는 과정에서의 오류를 제어하는 QA/QC 방법과 추정된 배출량이 참값으로부터 얼마만큼의 편차(Error 및 Bias)를 나타내는지, 이러한 편차와 분산을 유발하는 불확실성 요인이 무엇인지를 평가하는 불확도(uncertainty) 평가방법으로 구분할 수 있다.

이에 본 장에서는 국외배출량의 작성방법과 국내외에서 적용되고 있는 다양한 대기오염 배출량 신뢰도 평가방법을 분석하고, 현재 아시아 배출 목록에 비해 국내 대기오염 배출량 신뢰도 수준과 개선 방안 등에 대해 논의하고자 한다.

3.1 배출자료의 작성과 신뢰도 평가 선진사례

미국은 환경 보호국이 주도하여 3년에 한 번씩 배출량을, 1년에 한 번씩 입력자료를 갱신하여 국가인벤토리(NEI: National Emissions Inventory)를 작성하고

있다. 미국 인벤토리의 큰 특징 중 하나는 EMF (Emissions Modeling Framework)에 있다. EMF는 다양한 조직에서 활용할 수 있는 배출목록에 대해 배출 시나리오를 작성, 관리하여 미래 정책 효과를 포함하는 배출목록을 작성하고 모델링을 지원하는 데 목적을 두고 있다. EMF의 다양한 모듈 중 CoST (Control Strategy Tool)는 삭감정책에 따른 배출량을 작성하고, 이에 따른 비용효과를 작성하는 모듈이다. CoST는 국가 및 지역 규모의 다중 오염물질의 분석을 지원하며, 각종 정책에 따르는 비용과 효율 등을 계산할 수 있다.

일본에서는 하나의 공인된 국가 통합 인벤토리가 있는 것이 아니라 각 배출원별로 특정한 자료에 대한 조달과 관리가 용이한 기관에서 산정하고 관리하는 몇 가지 갈래의 배출 인벤토리가 존재한다. JATOP (Japan Auto-Oil Program)은 1) 직접 통계자료로부터의 계산식으로 산출되는 배출원과, 2) 배출량 산정모형 등을 활용하여 각기 다른 방법으로 산정된 배출원, 3) 별도 기관에서 산정/관리되는 배출원들을 통합하고, 모델 입력자료를 생성하여 배포하는 하나의 전체적인 통합 인벤토리 프로그램을 통칭하며, 여기서 일본 배출목록인 JEI-DB를 작성한다. JATOP 시스템의 산정방법을 살펴보면, 인위적 오염원에서 차량과 선박을 제외한 나머지 점오염원과 면오염원은 활동도와 배출계수 등을 가지고 통계자료와 산정식에 의해 배출량이 산출된다. 반면 차량 이동오염원은 JEI-VEM이라는 모형 구동에 의해 산정되며, 선박은 NMRI (National Maritime Research Institute)라는 해양기술안전연구소에서 산정을 한다. 또한 자연 배출원 중 BVOC는 MEGAN (the Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature) 배출모형을 통해 산정하고, 화산 배출량에 대해서는 일본 기상원에서 산정하며, 그 외 자연적 입자성 물질에 대해서는 화학수송 모형에 의해 자동으로 산출된 값을 사용한다.

유럽연합은 각 회원국에게서 배출량 자료를 제출받아 관리하고 있는데, 대부분의 유럽연합 국가는 배출목록이 CORINAIR 시스템으로 표준화되어 있다. 회원국들은 UNECE의 Convention on Long-range Trans-

boundary Air Pollution)에게도 유해대기오염물질 배출량 자료를 제출해야 하며, UNFCCC에도 EU에게 제출한 오염물질과 동일하게 온실가스 물질을 제출해야 한다. 이들은 모두 CORINAIR 구조로 되어있어, 실질적으로 유럽연합 국가들은 일반대기오염물질과 유해대기오염물질 그리고 지구온난화물질 모두를 함께 관리하는 체계를 이루고 있다고 할 수 있다.

국외 배출자료의 신뢰도 평가방법 중 QA/QC를 통한 오류 제어과정을 검토하기 위해 미국과 유럽의 국가 인벤토리 작성과정을 조사하였다. 미국의 NEI 작성을 위해서는 배출 인벤토리 시스템(Emissions Inventory System, EIS)을 통해 미국 내 주, 지방 및 관련 기관으로부터 배출 입력정보들을 수집하며, 해당 정보의 QA/QC를 거쳐 NEI를 구축한다. 이때, QA/QC는 이전 버전의 NEI와 비교 분석을 통해 이상점을 확인하는 이상점 확인(Outlier Check)과 EIS에 누락된 데이터를 확인하는 누락자료 확인(Missing data check), 각 부문의 배출량 이상값을 검토하는 부문별

자료 확인(Sector level check) 등을 통해 진행된다.

유럽연합 회원국들은 CEIP(the Center on Emission Inventories and Projections)를 통해 각국의 배출 인벤토리를 작성한다. 각국은 CEIP가 제공한 템플릿 양식에 맞춰 배출량 및 활동자료, 배출 전망자료 등을 제출하며, CEIP는 입수된 배출자료에 대한 QA/QC를 통해 당사국의 배출 데이터를 검증한다. CEIP는 3단계 검토과정을 통해 배출 인벤토리를 작성하며, 각 과정은 1) 각국이 제출한 초기 데이터 검토, 2) 시계열 일관성, 인벤토리, 경제지수를 사용한 배출량 비교, 3) EEA의 지원을 받아 배출량 심층 검토를 포함하여 배출량의 QA/QC를 진행하고 있다. 위와 같이 미국과 유럽에서는 인벤토리 작성과정에서의 다양하고 연속적인 QA/QC를 통해 배출량을 산정할 때 발생할 수 있는 오차들을 제거하고 있다.

배출자료의 불확도 평가방법은 배출자료의 양과 질에 따라 배출정보의 작성 단계에서의 자료 검증 및 평가부터 역모델링을 이용한 방법까지 복잡성의 단계가

Table 3. Comparison of uncertainty assessment methods for air pollution emission data.

Methodology	Description
Qualitative discussion	Sources of uncertainty are listed and discussed. General direction of bias, and relative magnitude of imprecision are given if known.
Subjective data quality ratings	Subjective rankings based on professional judgement are assigned to each emission factor or parameter (Assessment of Emission Factor Grading in U.S. EPA AP-42).
Data attribute rating system, DARS	Numerical values representing relative uncertainty are assigned through objective methods.
Expert estimation method	Emissions distribution parameters (i.e., mean, standard deviation, and distribution type) are estimated by expert.
Propagation of errors method	Standard statistical techniques of error propagation, typically based upon Taylor's series expansions, are used to estimate the composite uncertainty.
Direct simulation method	Monte Carlo, Latin hypercube, bootstrap (resampling), and other numerical methods are used to estimate directly the central value and confidence intervals of individual emission estimates.
Direct or indirect measurement (validation) method	Direct or indirect field measurement of emissions are used to compute emissions and emissions uncertainty directly.
Receptor modeling method	Using receptor modeling, the relative contribution of specific emission sources is estimated through chemical analysis of pollutants in the atmosphere.
Inverse air quality modeling method	Air quality simulation models are used in an inverse, iterative approach to estimate the emissions that would be required to produce the observed concentrations fields.

U.S EPA (1996)

다양하게 존재한다. 이에 불확도 평가는 현실적인 적용 가능성과 활용 지속성을 모두 고려한 방법론을 이용해야 한다. 미국 EPA에서는 배출정보 개선 프로그램인 EIIP (air Emission Inventory Improvement Program) 보고서를 통해 배출원별 배출량 산정을 위한 방법론과 배출자료의 신뢰도를 높이기 위한 불확도 평가방법을 제시하고 있는데, EIIP에서 소개하는 배출자료 불확도 평가기법은 표 3과 같다.

아시아에 대한 현대적 의미에서의 배출 인벤토리는 2000년에 NASA의 TRACE-P 항공캠페인에 활용될 배출 인벤토리가 개발되며 활성화되기 시작했다(Streets *et al.*, 2003). Streets *et al.* (2003)의 인벤토리 연구와 Zhao *et al.* (2011)의 연구에서는 각각 아시아 배출량과 중국의 인위적 배출량 인벤토리에 대한 상대적인 신뢰 구간을 도출하여 불확도를 평가하였다. 이때 신뢰 구간은 배출량 산정 인자들(활동도, 배출계수 등)에 대한 개별 신뢰성을 할당하고 이를 결합하여 도출하였다. Kurokawa and Ohara (2020)는 동아시아 배출 인벤토리인 REAS v.3을 대상으로 배출량 산정 인자에 대한 불확실성을 추정하여 최종배출량의 복합적인 불확도를 평가하였다. 이처럼 이미 산정된 배출량의 산정과정에서의 불확도를 계량화하여 배출량의 불확도를 평가하는 방식을 순방향(Bottom-up 또는 Forward) 방식이라 하며, 불확도 통합방식에 따라 다음의 두 가지로 나눌 수 있다. 배출량 산정 인자들의 확률밀도함수를 도출한 뒤, 인자들의 변화들이 결합된 최종값들의 변화를 다량으로 생산하여 결과의 확률밀도함수를 이용해 불확도를 평가하는 몬테카를로(Monte Carlo) 접근법과 산정 인자들의 불확도를 각각 산출한 후 통합하는 오차 증식법으로 구분된다. 순방향 불확실성은 Streets *et al.* (2003), Zhao *et al.* (2011)과 Kurokawa and Ohara (2020)에서 산정된 바 있다. 이와 같은 순방향 방식은 이미 존재하는 인벤토리 부문과 인자들이 적절히 존재하는 경우 상당히 유용한 방법론이다. 하지만 대부분의 경우 확률함수를 구할 만큼 배출량 산정 인자가 많지 않고, 누락 배출원과 같이 존재하지 않는 배출원으로 인한 배출 불확도에 대한 평가는 불

가능하며, 자연 배출원과 같이 산정 인자가 이질적인 배출원에 대해서도 평가가 어렵다는 한계가 있다.

위에서 서술한 순방향 방식의 한계점들은 역방향(Top-down 또는 Inverse) 방식으로 보완될 수 있다. 역방향 방식은 순방향으로 산정된 배출량을 이용하여 대기환경 모델링으로 농도화된 값이 실제 관측농도와 얼마나 일치하는지 평가하거나, 아예 관측농도로부터 대기환경 모델을 역방향으로 수행하여 배출량을 추정하고 순방향으로 작성된 배출량과 비교함으로써 배출량의 신뢰도를 평가하는 방법이다. Lamsal *et al.* (2011)은 순방향으로 산정한 NO₂ 배출량과 OMI (Ozone Monitoring Instrument)를 통해 예측한 NO₂ 배출량을 비교함으로써 배출량의 변화를 짧은 시간에 예측하였다. 선박과 같은 비도로 이동오염원은 위치가 정해져 있는 점오염원들이나 지정된 도로 위를 다니는 도로 이동오염원과 달리 이동경로를 파악하기 어렵다는 한계가 있다. Richter *et al.* (2004)과 Vinken *et al.* (2013)은 이러한 선박 배출량을 위성 관측을 통해 추정하였다. McLinden *et al.* (2016) 연구에서는 OMI를 통해 Persian Gulf 인근에서 순방향 배출자료에서 누락된 SO₂와 NO₂ 배출원을 발굴하였다. Fioletov *et al.* (2015) 연구에서는 OMI 관측으로부터 미국 내 특정 배출원의 배출량을 각기 다른 방법으로 추정하여 순방향 배출자료를 이용해 검증하였다. Fioletov *et al.* (2017)은 배출자료로부터 SO₂의 컬럼 농도를 계산하여 OMI SO₂ 자료와의 상관성을 분석한 바 있다. Lamsal *et al.* (2015)은 화학수송모델 GEOS-Chem (Goddard Earth Observing System-Chemistry)을 이용하여 배출자료와 위성관측을 비교함으로써 상향식 배출량과 하향식 배출량을 비교하였다. 위의 사례들은 역방향 방식을 이용하여 배출량을 평가한 다양한 연구들이다. 이러한 역방향 방식은 순방향 배출량의 산정 인자에 대한 정보는 파악할 수 없다는 한계가 있지만, 실제 관측자료에 기반하여 배출량을 정량화하기 때문에 배출량의 절댓값을 독립적으로 찾아내는 데 유용하다. 위와 같이 국외에서는 순방향과 역방향 평가방법을 각각 적용하거나, 함께 적용하여 배출량의 신뢰

도를 평가하고 개선하는 연구를 활성화하고 있다.

3.2 국내 배출자료의 신뢰도 평가

환경부 국가 미세먼지정보센터에서는 배출정보 종합시스템인 CAPSS를 통해 배출량 산정에 필요한 활동자료의 수집과 관리, 배출 인벤토리를 작성 및 제공하고 있다. 이때, 배출원에 따른 활동자료는 대기배출원관리시스템(SEMS: Stack Emission Management System)과 유관기관을 통해 입수되며, 기존의 체계를 유지하여 등록 형식으로 변환한 후 CAPSS 시스템을 이용하여 구축된다. 입수된 활동자료는 1) 입수자료와 등록 결과의 비교, 2) 전년도 자료와 비교, 3) 유사 자료와의 비교를 통해 오류를 검토한다. 개별 배출원에 적용되는 활동자료의 자세한 검토방법은 《국가 대기 오염물질 배출량 기초자료구축을 위한 표준업무절차서》를 통해 정의되어 있다(NIER, 2019). 이처럼 국내에서도 배출 인벤토리 작성에 있어 개별 배출원에서 사용되는 활동자료의 QA/QC를 통해 활동자료의 유효성을 검증하고 있다.

CAPSS의 대기오염물질 배출량에 대한 불확도 평

가는 KEITI (2014) 연구와 NAIR (2021) 연구에서 각각 2008년, 2017년 배출자료를 기준으로 DARS (Data Attribute Rating System) 평가방법을 이용하여 진행되었다.

DARS 평가방법은 배출자료의 신뢰도에 영향을 주는 속성을 측정의 정합성, 오염원의 대표성, 공간 및 시간 속성의 적합성 등 4가지로 구분하여 배출계수와 활동자료의 불확도를 평가하는 방법이다. 위 연구를 통해 2008년과 2017년의 배출원에 따른 배출계수 및 활동도, 배출량 불확도를 정량적으로 평가하였다. 배출 기여도와 불확도 크기가 큰 배출원일수록 개선 작업에 의한 효과가 크게 나타나 배출자료 신뢰도 개선에 기여할 수 있다(Kim and Jang, 2014).

배출 기여도 가중치 불확도

$$= \text{배출량 기여도}(\%) \times \text{불확도 크기}$$

$$\text{불확도 크기} = (1 - \text{불확도 평가점수})$$

표 4는 2017년 CAPSS를 대상으로 배출원별 불확도 평가 결과와 배출 기여도를 고려한 배출 기여도 가중

Table 4. Prioritization of uncertainty improvement by pollutant and emission source considering emission contribution.

Pollutant	Ranking	First-level category	Second-level category	Third-level category
CO	1	Road transport	Vessel	Recreational vessels
	2	Non-Road transport	Vessel	Fishing vessels
NO _x	1	Non-road transport	Vessel	Cargo Ships
	2	Road transport	Truck	Large
SO _x	1	Industrial process	Petroleum industry	Petroleum product processing - Sulfur recovery units
	2	Non-road transport	Vessel	Cargo ships
TSP	1	Fugitive dust	Road dust	Passenger vehicles
	2	Manufacturing industry	Other	Primary metal industry
PM ₁₀	1	Manufacturing industry	Other	Primary metal industry
	2	Fugitive dust	Construction	Non-residential facilities
PM _{2.5}	1	Manufacturing industry	Other	Primary metal industry
	2	Non-road transport	Vessel	Cargo ships
VOC	1	Solvent use	Other solvent use	Residential and commercial solvent use
	2	Solvent use	Painting facilities	Buildings and structures
NH ₃	1	Agriculture	Livestock manure management	Swine
	2	Agriculture	Livestock manure management	Poultry

NIER (2021)

치 불확도 평가 결과를 나타낸다. 이를 통해 물질별, 분류별 불확도 개선 우선순위를 도출하였다. 이러한 DARS 평가방법은 배출량 산정 인자들에 대한 불확도를 정량화하는 것으로 순방향 방식 중 정성적 방법과 정량적 방법의 중간 정도라고 볼 수 있다.

3.3 국내외 배출자료의 신뢰도 비교 평가

최근 미세먼지를 포함한 대기오염 문제가 환경 문제를 넘어 사회적 문제로 변화되고 있다. 이에 국내 대기오염물질 배출량을 정량적으로 확인할 수 있는 CAPSS 인벤토리의 과학적, 정책적 역할에 대한 기대감이 커짐과 동시에 신뢰성에 대한 우려가 공존하는 상태이다. 본 절에서는 우리나라 CAPSS 인벤토리와 국외 배출자료의 신뢰성에 대해 비교·분석한 연구를 조사하여 CAPSS 인벤토리의 신뢰성 수준을 파악하였다.

Lim (2009)은 DARS 평가방법을 이용하여 동아시아 지역의 배출 인벤토리와 CAPSS 인벤토리의 신뢰도를 비교하였다. 이때, 비교 대상 인벤토리로는 아시아를 대상으로 한 TRACE-P 인벤토리를 선정하였으며, TRACE-P 인벤토리 내 아시아 국가 가운데 우리나라에 장거리 이동오염의 영향을 주는 중국, 일본, 한국을 중심으로 비교하였다. 표 5는 CAPSS와 TRACE-P (중국, 일본, 한국)의 DARS 평가 결과를 나타낸다. DARS 점수는 0점에서 1점 사이의 값을 가지며, 1점에 접근할수록 배출목록의 신뢰도가 높음을 의미한다.

DARS 평가 결과를 이용하여 TRACE-P 인벤토리와 CAPSS 인벤토리의 불확도를 비교해 보면 CAPSS 인벤토리는 TRACE-P의 중국 인벤토리보다는 불확도가 낮고, 일본 인벤토리와는 비슷한 수준을 나타내었다. 더불어 CAPSS 인벤토리는 최신 배출 인벤토리일수록 불확도가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 그림 1

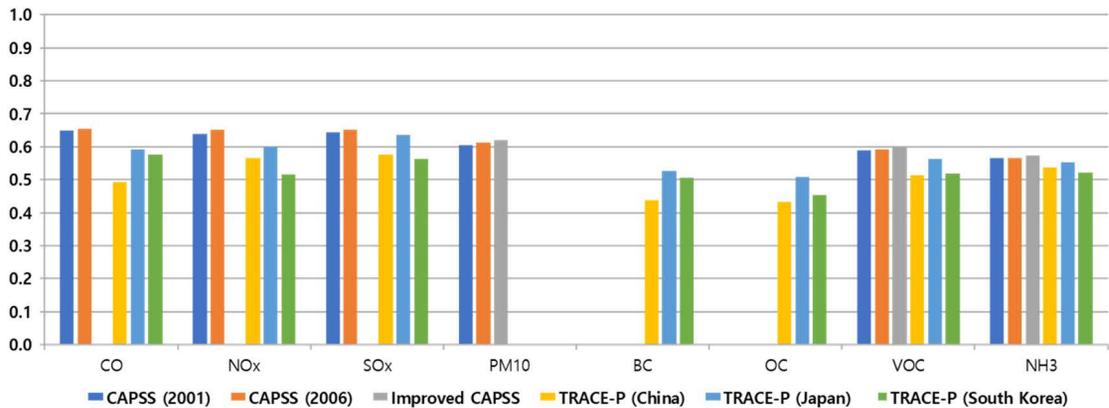


Fig. 1. Comparison of DARS scores between CAPSS and TRACE-P inventories (Lim, 2009).

Table 5. Assessment of Substance-Specific DARS Results for CAPSS and TRACE-P Inventories.

	CO	NO _x	SO _x	PM ₁₀	BC	OC	VOC	NH ₃
CAPSS (2001)	0.648	0.640	0.645	0.605	-	-	0.589	0.565
CAPSS (2006)	0.654	0.651	0.653	0.613	-	-	0.593	0.566
Improved CAPSS	-	-	-	0.621 ¹⁾	-	-	0.600 ²⁾	0.574 ³⁾
TRACE-P (China)	0.493	0.567	0.576	-	0.437	0.432	0.514	0.536
TRACE-P (Japan)	0.592	0.600	0.635	-	0.527	0.508	0.562	0.553
TRACE-P (South Korea)	0.575	0.515	0.563	-	0.506	0.454	0.519	0.521

¹⁾NIER (2006), ²⁾NIER (2007c), ³⁾NIER (2008, 2007a)

을 보면 CAPSS 2001, 2006에서는 NH₃ 부문에서 가장 낮은 점수를 나타내며, TRACE-P 인벤토리에서는 OC와 BC 부문에서 가장 낮은 점수를 나타낸다. 이는 CAPSS에서는 NH₃의 불확도 개선이, TRACE-P에서는 OC와 BC의 불확도 개선이 상대적으로 중요함을 의미한다.

위와 같이 국내의 배출 인벤토리의 불확도를 비교함으로써 국내 인벤토리의 신뢰성 평가와 함께 신뢰도 수준을 파악할 수 있다. 더불어 불확도의 상대적인 비교가 가능하여 향후 어느 부문의 불확도 개선에 집중해야 하는지 파악할 수 있다. 이처럼 국내 배출자료의 신뢰도를 평가하고 검증하는 다양한 연구를 통해 배출자료의 불확도를 줄여 나간다면 인벤토리 자체뿐 아니라 활용성 차원에서도 더 개선된 국내 배출자료를 작성할 수 있을 것으로 기대된다.

4. 관측 자료를 이용한 국내 배출목록의 평가

4.1 배출-농도 관계에서의 배출량 불확도

배출량 자료는 산정 단계에서의 평가와는 별도로, 대기질 모사를 통해 배출량을 농도로 환산하고, 이를 관측자료와 비교하는 간접적인 방법으로도 평가가 가능하다. 본 절에서는 국내에서 수행된 관련 선행 연구

를 토대로 국내 배출량 자료의 불확도를 우선 정리해 보았다. 배출량은 산정 시기에 따라 배출계수와 활동도 등에서 달라질 수 있는 바, 본 연구에서는 선행 연구에서 도출된 불확도 자체보다는 개선 방안을 제시하는 데 초점을 두었다.

일반적으로 특정 대상 지역의 대기질 개선 대책 수립을 위해서는 해당 지역의 대기오염에 대한 현상학적 이해(conceptual modeling)가 우선되어야 하며, 주요 오염원에 대한 기여도 분석을 기반으로 배출량 저감에 따른 대기오염물질의 농도 변화를 예측할 수 있어야 한다(U.S EPA, 2018). 대상 지역의 배출 특성(주요 배출원, 배출물질 등)을 고려하여 대기질 변화를 예측하기 위해 대기화학모형이 이용될 수 있다(Tessum *et al.*, 2022). 다만, 대기질 모사의 정확도는 기상을 제외하면 입력되는 배출 입력자료의 영향을 가장 크게 받으므로, 대기질 개선정책 효과 예측에 있어 배출량의 정확도는 매우 중요하다.

국내에서 대기질 개선 대책 수립을 위한 대기질 모사에서는 주로 국가 배출목록이 배출량 자료로 이용되며, 국가 배출목록은 배출계수 개선, 누락 배출원 발굴 등을 통해 그 정확도가 꾸준히 향상되어 왔으나(Choi *et al.*, 2021), 꾸준한 불확도 개선은 요구된다. 기존 연구에서 국내 기초 지자체에 대한 CAPSS 2016 배출목록 기반의 대기질 모사 수행평가 결과를 살펴

Table 6. Mean biases of annual mean PM_{2.5}, NO₂, and SO₂ concentrations simulated with CMAQ utilizing the CAPSS2016 emissions inventories in previous studies.

	Mean bias			Reference
	PM _{2.5} [μg/m ³]	NO ₂ [ppb]	SO ₂ [ppb]	
Seoul	4.0	5.3	0.1	(Bae <i>et al.</i> , 2021)
Incheon	6.6	5.8	1.2	(Kim <i>et al.</i> , 2021b)
Gyeonggi	2.8	-0.7	0.5	(You <i>et al.</i> , 2020)
Chungcheongbuk-do	1.6	-1.3	-0.7	(Son <i>et al.</i> , 2021)
Jeollabuk-do	-3.4	-0.4	-3.4	(Kim <i>et al.</i> , 2021a)
Jeollanam-do	-0.7*	2.6*	7.5*	(Kim <i>et al.</i> , 2021c)
Gyeongsangbuk-do	-1.1*	3.1*	1.6*	(Kim <i>et al.</i> , 2022)
Gyeongsangnam-do	-4.2	-3.1	-0.3	(Kang <i>et al.</i> , 2021a)
Busan	-6.2	3.6	2.4	(Kang <i>et al.</i> , 2021a)
Ulsan	1.3	3.8	11.1	(Kang <i>et al.</i> , 2021b)

*Re-calculated after excluding non-public anthracite coal combustion emissions.

보면(표 6), 많은 시도에서 농도 편차(=모사농도-관측농도)가 Emery *et al.* (2017)이 권고하는 수준을 만족하나, 일부 시도의 경우 대상 물질 농도에 대한 과대 또는 과소 모사를 보인다. 선행 연구에서는 이러한 오차 요인이 대부분 배출목록의 불확실성에서 유발된 것으로 평가하였다.

표 6에서 주목할 만한 다른 한 가지는 제시된 대상 물질에 대한 불확도는 지자체별로 차이를 보인다. 대기질 모사의 불완전성을 고려하더라도 관측농도와 모사농도의 편차가 바로 이웃한 시도에서 다른 양상을 보이는 것은 배출량의 과대 또는 과소 산정이 시도별로 다를 수 있음을 의미한다. 예를 들어, 표 4에서 수도권에 위치한 경기도에 대한 NO₂의 모사 편차는 -0.7 ppb인 반면, 이웃한 서울과 인천에서는 각각 5.3, 5.8 ppb로 상대적으로 크다. 다른 예로 동남권에 위치한 부산과 울산에서 SO₂에 대한 모사농도 편차는 2.4 ppb와 11.1 ppb로 현저한 차이를 보인다. O₃ 및 PM_{2.5} 등 2차 대기오염물질의 농도는 1차 대기오염물질과는 달리 이웃한 시도의 배출 영향이 작지 않다는 점에서, 이러한 배출량의 불확도는 해당 지자체는 물론 한 권역 내에 이웃한 지자체의 대기질 관리에 중요한 불확도로 작용할 수 있다. 따라서, 이러한 점을 고려할 때 배출목록의 작성과 평가 및 검증과정에서 향후 국내 대기질 관리의 고도화를 위해서는 보다 높은 신뢰성 확보가 필요할 것으로 예상된다. 특히, 국내의 경우 국토 면적이 좁아 지자체 간 상호 배출 영향이 다른 나라와 비교하여 작지 않을 것으로 예상된다. 따라서 향

후 엄격한 대기환경기준 적용 시, 지자체 간 상호 영향은 미국의 선린 조항과 같이 주요한 이슈로 부각될 수 있다(Kim *et al.*, 2018). 이러한 상황에서, 대기질 개선정책 수립 및 효과 예측에 있어 정확한 배출량 정보를 확보하는 것은 대기환경권역관리 차원에서도 중요한 문제가 될 수 있다.

4.2 관측자료에 기반한 하향식 배출정보 평가

지상-항공-우주를 망라하는 종합관측캠페인은 배출정보의 불확실성을 평가하는 좋은 기회가 된다. 2016년 국립환경과학원과 미국의 항공우주국이 진행한 ‘한-미 협력 국내 대기질 공동 조사(KORUS-AQ Aircraft field campaign)’ 연구에서는 다양한 역방향 방식을 통해 배출자료의 신뢰도를 평가하였다(NIER and NASA, 2020).. 먼저 배출 인벤토리를 개선하고, 개선된 배출 인벤토리와 관측치를 비교하여 배출량을 평가하였는데, 이때 배출 인벤토리는 KORUS-AQ 총 연구기간 동안 업데이트된 활동자료와 관측 및 모델링 연구 커뮤니티의 피드백을 통해 KORUSv.1에서 v.5로 개선되었다. 개선된 KORUSv.5 배출 인벤토리와 KORUS-AQ 관측 결과를 사용한 모델 모의값 비교 결과, 물질(SO₂, NO_x 및 방향족 VOC (toluene)등)에 따라 큰 영향을 받는 오염원과 상향식 인벤토리에서 개선되어야 할 배출원을 파악하였다. 더불어 여러 대기질 모델을 상호 비교하여 개별 모델에 따라 오염물질과 분포의 신뢰도가 달라질 수 있음을 확인하였다(그림 2).

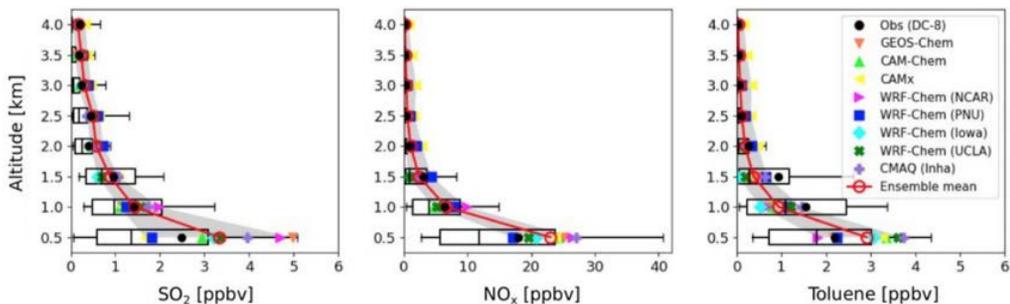


Fig. 2. Comparison of DC 8 observations with model simulations for SO₂ (left), NO_x (center) and toluene (right) in the lower atmosphere over the Seoul metropolitan area during KORUS AQ (Park *et al.*, 2021).

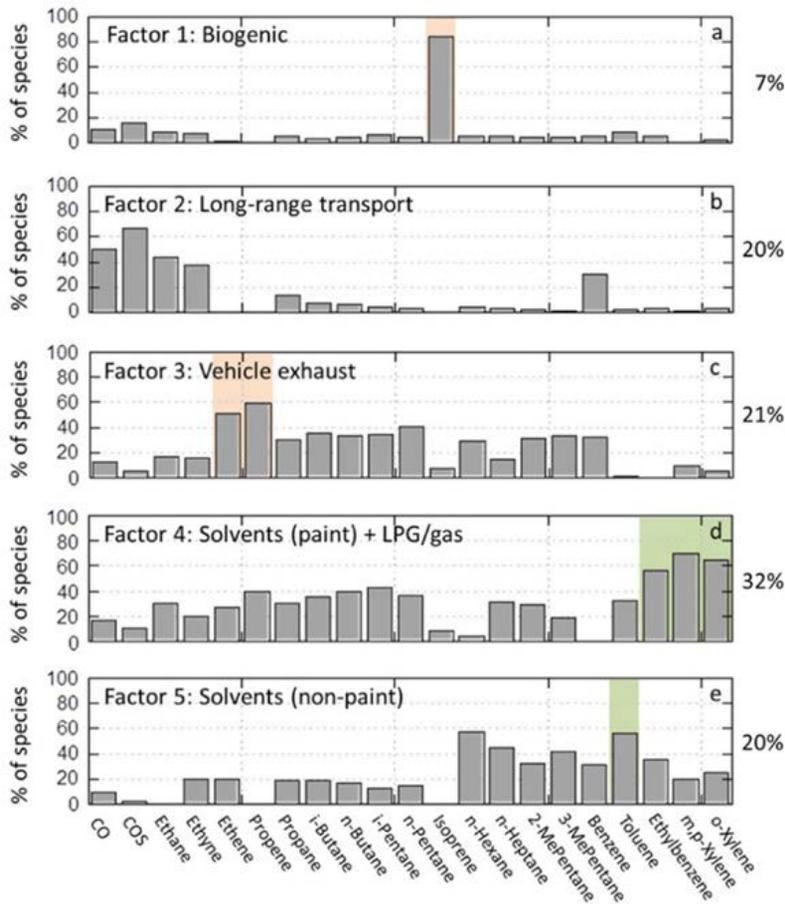


Fig. 3. Source apportionment results for selected VOCs measured over Seoul during KORUS-AQ (Simpson *et al.*, 2020).

KORUS-AQ 캠페인 기간 중 배출원 할당 (Source apportionment) 기법을 사용하여 서울의 VOC 주요 배출원을 확인하였다. 그 결과, KORUS-AQ 기간 동안 서울에서 측정된 VOC의 주요 배출원은 장거리 이동 배출원 (20%), 차량 배기가스 배출원 (21%), 페인트 용제 및 청정연료 배출원 (32%) 및 비-페인트 용제 배출원 (20%)이 혼합된 것으로 계산되었다 (그림 3). 이는 유기용제 사용으로 인한 배출량이 총 VOC 배출량의 50% 이상을 차지하는 CAPSS 배출 인벤토리에 대한 과대/소 평가 가능성을 제시한다.

Lee *et al.* (2017)은 국립환경과학원의 PM_{2.5} 측정 농도와 여러 조건의 대기화학 모델링을 이용하여 추

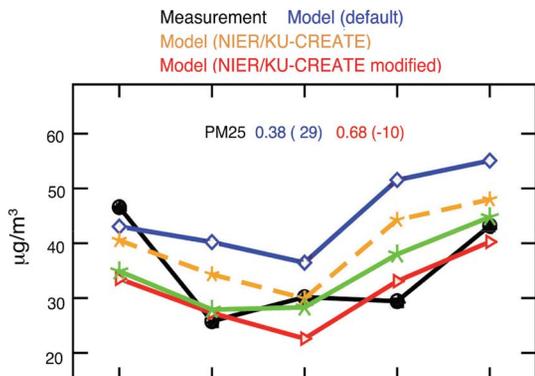


Fig. 4. Comparison of measured PM_{2.5} concentration and estimated PM_{2.5} concentration using modeling of various conditions (Lee *et al.*, 2017).

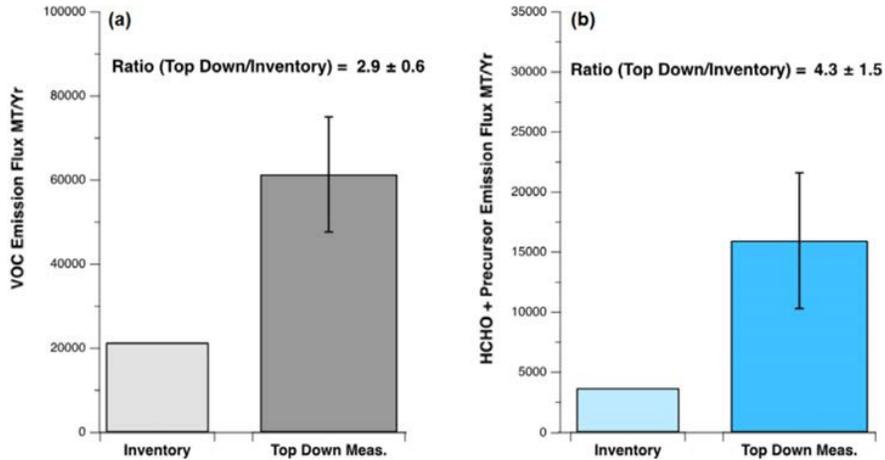


Fig. 5. Comparison of top-down and bottom-up VOC emission estimates through aircraft observations of Daesan during KORUS-AQ (Fried *et al.*, 2020).

정한 PM_{2.5} 농도를 평가하여 모델링 결과에 영향을 끼치는 요인들을 분석하였다(그림 4). Fried *et al.* (2020)은 항공기 측정을 통해 국내 대산 석유화학단지에서 발생하는 VOC 배출량을 정량화하고, 상향식 인벤토리와 비교하였다. 그 결과, 하향식 방식을 통해 추정된 배출량은 상향식 배출량보다 2.9±0.6배 더 높은 것으로 나타났다(그림 5). Kwon *et al.* (2021)은 KORUS-AQ 동안 관측자료를 이용하여 배출량을 역추적하는 하향식 방법을 이용하여 대산 석유화학단지의 NMVOC 배출량을 평가하였다. 이때 NMVOC 배출량은 Formaldehyde (HCHO) 관측치를 사용하여 추정하였으며, 그 결과 대산의 상향식 VOC 배출량이 4.0±2.3배 정도 낮다고 평가하였다(그림 6). 이는 Fried *et al.* (2020)의 연구 결과로 도출된 오차범위와 상당히 비슷하였다. 위와 같은 KORUS-AQ 연구 결과들은 관측 결과를 사용하여 배출 인벤토리 개선할 수 있음을 보여줌으로써 관측자료를 통한 상향식 배출량에 대한 평가 즉 하향식 방식의 활용성을 보여준다. 위의 사례들을 통해 국내에서도 순방향 방식(DARS 평가방법)과 역방향 방식(KORUS-AQ 연구)을 이용하여 배출자료의 신뢰도를 개선하고 평가하기 위한 연구가 꾸준히 진행되고 있음을 확인하였다.

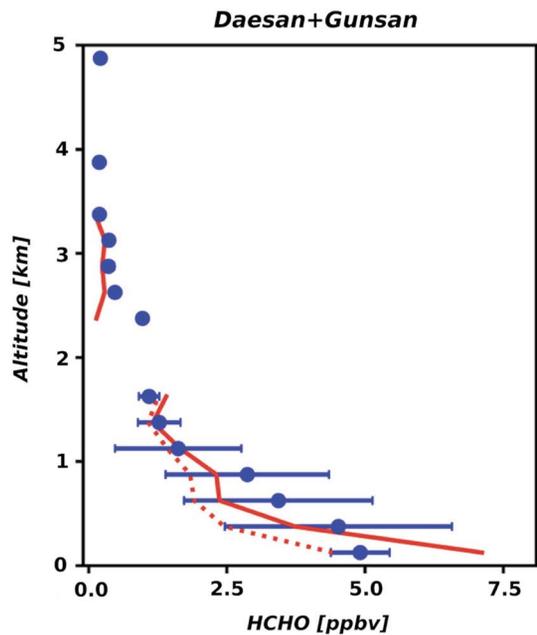


Fig. 6. Comparison of top-down and bottom-up HCHO emission estimates of Daesan during KORUS-AQ (Kwon *et al.*, 2021).

4.3 농도-노출 연구를 위한 배출량 자료 고도화

대기질 관리의 궁극적인 목표는 대기오염물질에 대한 인체 노출을 최소화하고, 이를 통한 건강 증진에 있다. Egerstrom *et al.* (2023)에 의하면 서태평양지역

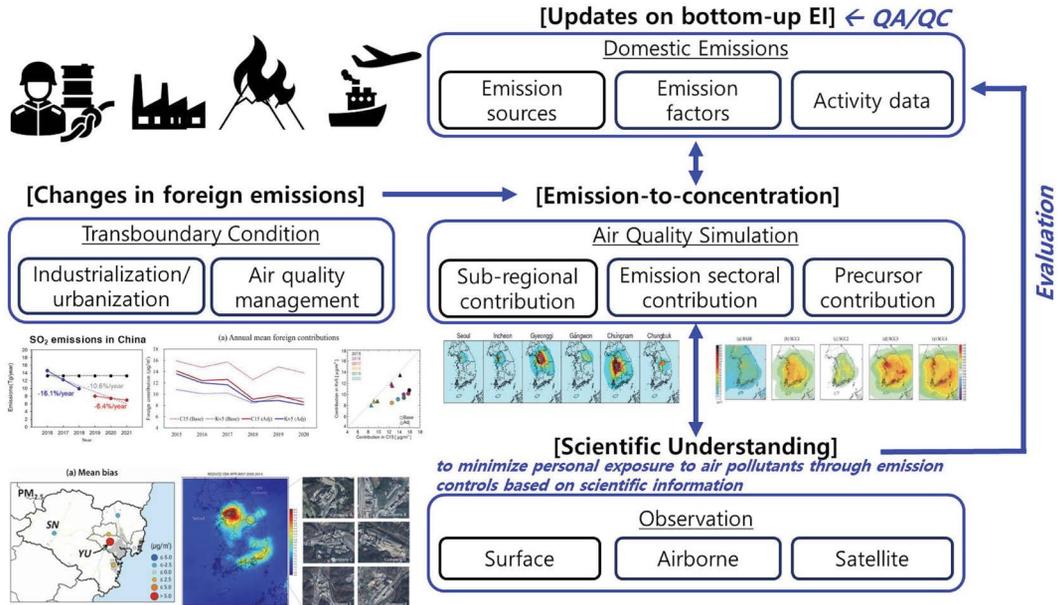


Fig. 7. A conceptual diagram of updating domestic emissions inventory utilizing air quality simulation and observation.

에서 한국은 대기질 관리에 따른 건강편익이 높은 지역으로 분류된다. 이를 현실화하기 위해서는 대기오염물질의 배출 부문별, 물질별 방지 비용과 편익 효과 등을 분석할 수 있는 체계가 마련되어야 하며, 배출 지역별, 부문별, 물질별 고도화된 배출량 자료가 준비되어야 한다. 이러한 과정에는 상당한 시간과 노력이 필요하며, 이를 지원할 수 있는 행정체계가 준비되어야 한다. 그림 7은 상향식으로 산정되는 국내 배출목록의 개선과 아울러 국내 대기환경에 대한 이해와 인체 노출 및 기여도 분석을 통한 배출원 관리 대책 수립과정에서 배출량-관측-대기질 모사가 어떻게 연계되어야 하는지 제시한다.

미 환경청에서는 State Implementation Plan 수립 시 이용되는 배출량의 불확도를 줄이기 위해 배출목록의 작성 단계에서부터 다양한 검증 절차를 적용하고 있다(Kim *et al.*, 2019, 2018). 또한, 배출량 자료의 불확도를 고려하여 상향식 배출량 기반의 대기질 모사 결과에 Relative Reduction Factor를 적용하는 등의 후처리과정을 통해 정책 효과를 예측하고 있다(U.S

EPA, 2018). 즉, 배출량 자료를 대기질 대책 수립에 이용하기 이전 단계에서 최대한 불확도를 줄이는 노력이 필요하다. 알려진 바와 같이 국내 지역별로 주요 배출원이 다르며, 그에 따라 지자체별로 주요 배출물질과 배출량의 불확도 역시 차이를 보일 수밖에 없다. 따라서, 지역별 배출 특성을 고려한 배출량의 평가를 통해 혹시 있을 누락배출원을 발굴하고, 함께, 배출계수 및 활동도 등에 대한 검토를 장단기적인 농도 현황 및 변화 추세에 대비하여 비교 분석할 수 있는 체계를 마련하는 것이 필요해 보인다. 이를 통해 지역 대기질을 설명할 수 있는, 그리고 대기질 개선대책 마련 시 기초가 되는 신뢰할 수 있는 배출량 자료를 확보할 수 있을 것으로 기대된다.

최근 국내의 경우에도 환경부 국가미세먼지정보센터에서는 국가 배출목록에 대한 불확도를 개선하기 위한 노력의 일환으로 2016~2020년 기간에 대해 CAPSS 배출목록을 재산정하였다(환경부 보도자료). 이러한 배출목록의 재산정과정은 국내 대기오염 현황을 보다 객관적으로 설명할 수 있는 자료를 구축하고

활용한다는 점에서 고무적이다. 그러나, 배출목록과 관련된 모든 불확도를 일시에 해소하기는 쉽지 않다. 특히, 배출목록상의 배출량이 국내 대기질을 설명하는데 얼마나 정확한지를 평가하는 과정에는 배출목록을 작성하는 단계에 대한 QA/QC뿐 아니라, 대기질 관측과 모사 등 배출량이 농도로 전환된 후에 대한 2차적인 평가 등 다각적인 접근이 필요하다. 국내에서도 국가 배출목록에 대한 평가와 검증 노력은 일부 있었으나(Kim *et al.*, 2023; Bae *et al.*, 2020a; Kim *et al.*, 2020; Lee *et al.*, 2020), 지속적인 평가와 이를 통한 배출량 산정 개선으로 이어진 경우는 드물다. 이러한 배출량 평가에는 상시적인 지표 관측 외에 집중적인 더 많은 화학종을 항공 및 위성 관측 등을 통해 일정 고도 이상에서 측정하는 것과, 중간 물질의 측정 등이 포함되어야 하며, 이를 이용한 해석과 논의과정 역시 중요하다.

한편, 국내에서 대기환경기준을 크게 초과하는 PM_{2.5}와 오존은 장거리 이동이 가능한 물질이다. 따라서, 이들 물질의 농도 관리를 위해서는 국내 배출량에 대한 정확한 산정과 함께, 중국과 북한 등 풍상에 위치한 국외 배출량의 동향을 파악하는 것이 중요하다(Bae *et al.*, 2022; Bae and Kim., 2022; Chong *et al.*, 2022). PM_{2.5}를 비롯한 국내 대기오염물질 농도에 중국의 배출량이 중요한 영향을 미친다는 것은 잘 알려져 있다(Bae *et al.*, 2020c; Bae *et al.*, 2019, 2017). 최근 중국의 대대적인 배출량 감소정책 시행은 중국뿐만 아니라 국내 대기오염물질 농도 감소에도 영향을 주었다(Bae *et al.*, 2020b). 이는 국내 대기질 개선에 고무적인 상황이라고 판단되나, 풍하 지역인 국내에서는 풍상에 배출량과 농도 변화에 대한 지속적인 관찰 및 자료 확보가 필요하다. 한편, 우리나라와 맞닿아 있는 북한의 경우 경제발전과 산업화가 진행될 경우 현재에 비해 배출량이 증가할 것으로 예상된다. 따라서, 북한 배출량의 변화를 예측하고 국내 대기질에 얼마나 영향을 미칠 것인지 선제적으로 분석하는 것이 필요해 보인다. 또한, 지역 간 대기오염물질의 유출입 및 2차 생성과 제거과정 등을 설명할 수 있는 배출량을 마련하는 것이 국내로서는 중요해 보인다.

5. 대기오염 배출자료의 개선과 발전 방향

5.1 부문별 배출자료의 개선 방향

현재 국내에는 약 6만 개의 크고 작은 대기오염물질 배출 사업장이 있는 것으로 파악되고 있다. 전체 사업장 중의 약 90% 정도가 4~5종에 해당하는 중소 규모 배출 사업장으로 추정된다. 우리나라는 사업장 배출시설 관리의 중요성을 인식하고 SEMS, CAPSS, PRTR 등 배출자료 시스템을 구축하여 사업장 배출자료 개선에 노력을 기울였다. 그러나 개별 배출시설에 대한 자료의 불확실성은 여전히 매우 큰 것으로 파악되고 있다. 특히 4~5종의 중소사업장은 시설의 입지와 가동 여부 파악도 정확하지 않으며 배출시설, 방지시설, 배출구 등에 관한 배출 관련 자료의 갱신이 제대로 되지 않고 있는 상황이다. 지금까지 배출사업장 및 배출시설 조사는 주로 연료연소 부문에 대해 중점적으로 이루어져 왔다. 그러나 휘발성유기화합물, 유해대기오염물질 등의 비산먼지 배출 등에 대한 관리도 중요하므로 배출시설 조사 시 생산공정 배출상황을 대폭 보완할 필요가 있다. 또한 1~3종 사업장은 환경부 SEMS 및 CAPSS와 연계하여 공유하고, 지자체 단위에서 관리하고 있는 4~5종 시설을 포함하여 일원화된 배출시설 데이터베이스 구축이 필요하다. 배출시설 정보에는 배출시설과 배출량 정보뿐만 아니라 규제 및 관리 관련 정보도 포함하여 각 배출시설의 등록, 조회, 관리 기능과 배출시설에 대한 각종 통계분석이 가능하도록 구성될 필요가 있다.

생산공정 부문 오염물질 배출량이 실제 산업의 생산공정을 모두 포함하고 있는지에 대한 검증과정이 필요하다. 실제로 중분류에서 언급하고 있는 산업공정이 현재 표준산업분류체계나 대기환경보전법상의 대기배출시설을 모두 포함하지 못하는 문제점이 있다. 최근 환경오염시설의 통합관리에 관한 법률에 의하면 총 19개 업종에 대하여 매우 상세한 배출정보를 제출하고 배출수준 분석을 수행하도록 요구하고 있다. 또한 공정별 최적방지기술을 설정하여 인허가를 받도록 제도를 설계하여 향후 사업장 제출자료를 활용하면

정확한 배출량 정보를 구축할 수 있을 것으로 기대된다. 이를 활용하기 위해서는 CAPSS의 생산공정 분류체계를 국내 표준산업분류체계에 맞추어 변경하는 것이 필요하다. SEMS의 경우 TMS 굴뚝이 아닌 경우 자가측정자료를 활용하며 일부 시설은 배출시설의 명칭이 현재 제조업 연소에서 분류하지 않은 배출시설명을 갖고 있는 것도 상당수 존재한다. 대형사업장의 경우 사업장 굴뚝은 수백 개를 상회하지만, TMS 부착 굴뚝은 이보다 적은 것이 현실이므로 SEMS 자료에서 소규모 TMS 미부착 굴뚝에 대한 정보는 배출시설명도 부정확하고 배출량도 자가측정자료를 기반으로 구성되어 불확실성이 높다. 이로 인하여 석유화학과 제철소와 같은 대형사업장의 비산배출과 소규모 배출시설의 배출정보는 과소평가될 가능성이 높으므로 이를 정기적으로 개선하는 체계가 필요하다.

이동오염원은 배출원 특성상 고정오염원과 달리 이동 상황에 대한 활동도 자료의 시공간 해상도가 배출자료의 신뢰도를 좌우할 수 있다. 도로 이동오염원의 경우 현재 대표적인 도로주행 모드를 개발하여 이를 기반으로 차대동력계 위에서 주행 조건을 구현하여 산출한 배출계수를 적용하고 있다. 그러나 최근 실도로 주행일 때 실험실의 차대동력계에서 구현하는 주행상황보다 많은 대기오염이 배출되는 것으로 확인되고 있다. 따라서 실도로 주행배출(RDE: Real Driving Emission)을 고려하는 배출계수 개발을 확대하는 것이 필요하다.

비도로 이동오염원의 경우에는 건설기계, 농기계, 선박, 항공기, 소형엔진과 같이 종류가 많고 활동 특성이 다양하여 활동도 자료의 불확실성이 높은 실정이다. PM₁₀ 배출량의 경우 2011년 이후에는 비도로 이동오염원의 배출량이 도로 이동오염원의 배출량보다 많아지는 상황이라서 비도로 이동오염원의 활동도 파악과 배출관리의 중요성이 높아지고 있다. 따라서 비도로 이동오염원은 다양한 마력별 배출계수를 개발하는 것과 함께 건설기계와 농기계와 같이 월별 활동도 변화가 큰 경우에는 월별 가동시간에 대한 시간해상도와 실제 작업이 이루어지는 지역에 대한 공간해상

도의 신뢰도를 높이는 작업이 필요하다. 특히 소형엔진의 경우 정원관리장비, 레저장비, 소형발전기 등과 같이 다양한 형태로 이용되고 있어서 활동도의 파악과 관리가 쉽지 않다. 그러나 소형엔진은 엔진 특성상 연료 사용량에 비하여 CO와 PM_{2.5}의 배출량이 많을 것으로 추정되어 이에 대한 오염배출 실태파악이 필요하다.

5.2 국가 대기오염 배출자료의 개선 전략

기존 CAPSS 시스템의 문제점에 대한 관련 전문가들의 의견을 모아보면 CO와 VOC는 아직 과소평가되고 있는 것으로 판단되어 배출량 산출방법론 개선과 누락 배출원 파악이 필요하다. 또한 기존 국내 대기오염배출 관련 연구 성과가 충분히 CAPSS 개선에 활용되지 못하며, 배출량 산출 관련 전 과정이 CAPSS에서 수행되어 시스템이 너무 무겁다는 의견이 있다. 배출자료의 개선을 위해서는 큰 배출량을 차지하고 있는 사업장 배출자료의 개선이 필요하고, 관련 활동도 자료의 연계와 개선이 시급하다. 배출자료 시스템의 구성과 운영에 대하여 다음과 같은 발전 전략이 필요하다.

첫째, 현재 국내 대기오염 배출자료 중에서 과소평가되고 있는 것으로 추정되는 CO와 VOC 배출량에 대한 개선 작업이 우선적으로 필요하다.

CO는 배출자료의 신뢰도에 대한 주요 지표로 과소평가는 파악된 배출원의 불완전연소 상황을 과소평가하거나 아직 파악하지 못하고 있는 누락 배출원이 많이 존재한다는 의미이다. CO의 과소평가를 개선하기 위해서는 기존 연소시설들의 비정상 운전 상태가 축소 보고되는지 확인이 필요하고, 작은 활동도에 비하여 많은 불완전연소가 일어날 수 있는 노천소각, 불법 폐기물소각, 화목난로, 소형엔진 등에 대한 사용 실태 파악과 배출계수 확인이 필요하다. VOC의 과소평가를 개선하기 위해서는 유기용제 사용 실태가 축소 보고되는지 확인이 필요하고, 석유화학공단과 같은 대형 산업공정과 유류의 저장 운반과정에서 비산 배출되는 VOC 배출량의 누락 가능성을 점검하는 것이 필

요하다. CO와 VOC 배출량의 과소평가는 앞으로 실태 파악이 필요한 HAP 배출량도 과소평가될 가능성이 있으므로 이 문제를 개선해야 HAP을 포함하는 대기 관리로 발전할 수 있다.

둘째, 배출자료의 형태를 이원화하는 전략이 필요하다.

배출자료 산정에 많은 관련 통계들이 적용되다 보니 활동도 자료 연계와 배출량 산출에 시간이 걸리고 매년 많은 인력과 자원이 투입되어야 한다. 따라서 사용자에 따라 필요한 해상도의 자료를 신속하게 제공할 수 있도록 배출자료 형태를 공식적인 국가배출자료(KNEI)와 연구지원용 대기정책지원 배출자료(CAPSS)로 이원화하여 활용도를 개선하는 전략이 필요하다. 국가 배출자료(KNEI: Korean National Emission Inventory)는 시군구별 공간해상도와 연간 배출량의 시간해상도를 갖는 배출자료를 산출하고, 1~3종 사업장의 점오염원 배출자료를 반영하여 공식 발표 시기를 최대한 빠르게 하는 전략이 필요하다. 반면 연구용 대기정책지원 배출자료(CAPSS)는 격자별 공간해상도와 월별, 요일별, 시간별 배출자료의 시간해상도를 갖는 모델링 입력자료로 활용될 수 있도록 구성하며 최근 수행된 배출계수와 배출량 산출방법 연구 결과들을 반영하여 3~4년 주기로 개선하는 전략이 필요하다.

셋째, 배출량 산출방법 개선에 따라 과거 배출자료에 대한 정기적 재산정 작업이 필요하다.

배출계수 개발과 배출량 산출방법의 개선으로 인하여 연도별 산출방법의 일관성을 갖도록 과거년도 배출자료에 대한 지속적인 재산정 작업이 반드시 필요하다. 배출자료 재산정 작업이 제대로 이루어지지 않으면 산출방법의 변화에 의한 연도별 배출량 변화를 대기오염 관리정책에 의한 실제 배출량 변화로 혼동할 수 있다는 점을 유의하여야 한다.

6. 결론과 제언

본 연구에서는 현재 국가 대기오염 배출자료를 제

공하고 있는 대기정책지원시스템(CAPSS)을 중심으로 국내·외 배출량 산정방법과 신뢰도 평가방법을 비교 분석하였고, 모델링과 관측자료를 이용하여 국내 배출량의 수준을 평가하였으며, 국가 대기오염물질 배출자료를 개선하기 위한 전략을 제안하였다.

우리나라의 CAPSS 인벤토리 불확도를 아시아의 타 국가 인벤토리의 수준과 비교해 보면 TRACE-P의 중국 수준보다는 낮고, 일본의 배출량 불확도와 비슷한 수준을 나타내었다. 최근 CAPSS 인벤토리에 대한 배출자료 불확도 연구에 따르면 우리나라 인벤토리의 농업(분뇨관리), 유기용제사용(도장시설), 비산먼지(도로재비산), 도로이동오염원(승용차, 화물차) 등의 배출 불확도가 상대적으로 높은 것으로 나타났다. 하지만 누락 배출원과 같이 존재하지 않는 배출원으로 인한 배출 불확도에 대한 평가는 불가능하고, 자연 배출원과 같이 그 산정 인자가 이질적인 배출원에 대해서도 평가가 어렵기 때문에, 이를 극복할 수 있는 추가적인 방법론이 필요하다.

장기모사 결과를 바탕으로 전반적인 배출량 특성을 검토하였을 때, PM₁₀과 같이 과소평가되는 대기오염물질의 경우 지역별로 고려되지 않은 배출 오염원 및 배출계수, 활동도에 대한 보완이 필요한 것으로 판단된다. PM_{2.5}의 경우에는 PM₁₀에 비해 모사 정확도가 높게 나타나지만, 과대 또는 과소평가되는 성분에 대한 개선이 필요한 것으로 판단된다. NO₂의 경우 연평균 농도는 관측자료와 유사한 수준으로 모의되나, 계절별 변동에서는 다소 차이를 보이는데, 이는 연평균으로 산정되는 배출량을 월별로 시간 할당하는 과정에서 불확도가 있을 수 있음을 시사한다. 따라서 배출량 목록의 개발 단계에서만 아니라 SMOKE 등 이용 단계에서의 개선도 병행되어야 할 것으로 판단된다. 휘발성 유기화합물질(VOCs)에 대한 평가는 도심 지역과는 달리 여수 등 산단 밀집지역에 대한 과소 모의가 두드러지게 나타나, 비산 배출량 및 생산공정에 대한 VOC 배출량 검토가 필요함을 시사한다. 위성 관측자료를 바탕으로 검토한 경우에도 누락된 오염원이 존재하는 것으로 판단되었다.

본 연구에서는 다양한 방법으로 국내 배출목록을 평가하였으며, 전반적으로 대기오염물질의 배출량이 과소평가됨을 확인하였다. 국가 대기오염배출량 산정 시스템의 효율성을 높이고 배출자료의 신뢰도를 높이기 위하여 현재 과소평가되고 있는 것으로 추정되는 CO와 VOC 배출자료에 대한 개선 작업이 필요하고, 대기오염 배출자료의 공식자료와 연구용 자료로 이원화, 배출량 산출방법 개선에 따른 과거 배출자료에 대한 지속적인 재산정 작업을 제안하였다.

감사의 글

이 논문은 2022학년도 건국대학교의 연구년교원 지원에 의하여 연구되었습니다.

This paper was written as part of Konkuk University's research support program for its faculty on sabbatical leave in 2022.

References

- Bae, C., Kim, B.-U., Kim, H.C., Yoo, C., Kim, S. (2019) Long-Range Transport Influence on Key Chemical Components of PM_{2.5} in the Seoul Metropolitan Area, South Korea, during the Years 2012-2016, *Atmosphere*, 11(1). <https://doi.org/10.3390/atmos11010048>
- Bae, C., Kim, E., Kim, B.-U., Kim, H.C., Woo, J.-H., Moon, K.-J., Shin, H.-J., Song, I.H., Kim, S. (2017) Impact of Emission Inventory Choices on PM₁₀ Forecast Accuracy and Contributions in the Seoul Metropolitan Area, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 33(5), 497-514. <https://doi.org/10.5572/kosae.2017.33.5.497>
- Bae, C., Kim, H.C., Kim, B.U., Kim, S. (2020a) Surface ozone response to satellite-constrained NO_x emission adjustments and its implications. *Environmental Pollution*, 258, 113469. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113469>
- Bae, M., Kim, B.-U., Kim, H.C., Jung, H.W., Kim, S. (2022) An observation-based adjustment method of regional contribution estimation from upwind emissions to downwind PM_{2.5} concentrations, *Environment International*, 163, 107214. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107214>
- Bae, M., Kim, B.-U., Kim, H.C., Kim, J., Kim, S. (2020b) Role of Emissions and Meteorology in the Recent PM_{2.5} Changes in China and South Korea from 2015 to 2018, *Environmental Pollution*, 270, 116233. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116233>
- Bae, M., Kim, B.-U., Kim, H.C., Kim, S. (2020c) A Multiscale Tiered Approach to Quantify Contributions: A Case Study of PM_{2.5} in South Korea During 2010-2017, *Atmosphere*, 11(2), 141. <https://doi.org/10.3390/atmos11020141>
- Bae, M., Kim, E., You, S., Son, K., Kang, Y.-H., Kim, S. (2021) Local Authority Level Source Apportionments of PM_{2.5} Concentrations based on the CAPSS 2016: (VII) Seoul, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(3), 466-486. <https://doi.org/10.5572/kosae.2021.37.3.466>
- Bae, M., Kim, S. (2022) Adjustment of Foreign Emission Impacts on Provincial PM_{2.5} Concentrations in South Korea based on Upwind Observations and Estimation of Domestic Emission Uncertainty, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 38(4), 624-636. <https://doi.org/10.5572/kosae.2022.38.4.624>
- Choi, S.-w., Bae, C.-h., Kim, H.-c., Kim, T., Lee, H.-k., Song, S.-j., Jang, J.-p., Lee, K.-b., Choi, S.-a., Lee, H.-j., Park, Y., Park, S.-y., Kim, Y.-m., Yoo, C. (2021) Analysis of the National Air Pollutant Emissions Inventory (CAPSS 2017) Data and Assessment of Emissions based on Air Quality Modeling in the Republic of Korea, *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 15(4), 114-141. <https://doi.org/10.5572/ajae.2021.064>
- Chong, H., Lee, S., Cho, Y., Kim, J., Koo, J.H., Kim, Y.P., Kim, Y., Woo, J.H., Ahn, D.H. (2022) Assessment of air quality in North Korea from satellite observations, *Environment International*, 171, 107708. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107708>
- Egerstrom, N., Rojas-Rueda, D., Martuzzi, M., Jalaludin, B., Nieuwenhuijsen, M., So, R., Lim, Y.H., Loft, S., Andersen, Z.J., Cole-Hunter, T. (2023) Health and economic benefits of meeting WHO air quality guidelines. *Western Pacific Region, Bulletin of the World Health Organ*, 101(2), 130-139. <https://doi.org/10.2471/BLT.22.288938>
- Emery, C., Liu, Z., Russell, A.G., Odman, M.T., Yarwood, G., Kumar, N. (2017) Recommendations on statistics and benchmarks to assess photochemical model performance, *Journal of Air & Waste Management Association*, 67(5), 582-598. <https://doi.org/10.1080/10962247.2016.1265027>

- Fioletov, V., McLinden, C.A., Kharol, S.K., Krotkov, N.A., Li, C., Joiner, J., Moran, M.D., Vet, R., Visschedijk, A.J.H., Denier van der Gon, H.A. (2017) Multi-source SO₂ emission retrievals and consistency of satellite and surface measurements with reported emissions, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(20), 12597-12616. <https://doi.org/10.5194/acp-17-12597-2017>
- Fioletov, V.E., McLinden, C., Krotkov, N., Li, C. (2015) Lifetimes and emissions of SO₂ from point sources estimated from OMI, *Geophysical Research Letters*, 42(6), 1969-1976. <https://doi.org/10.1002/2015GL063148>
- Fried, A., Walega, J., Weibring, P., Richter, D., Simpson, I.J., Blake, D.R., Blake, N.J., Meinardi, S., Barletta, B., Hughes, S.C., Crawford, J.H., Diskin, G., Barrick, J., Hair, J., Fenn, N., Wisthaler, A., Mikobiny, T., Woo, J.H., Park, M.W., Kim, J.S., Min, K.E., Jeong, S.H., Wennberg, P.O., Kim, M.J., Crouse, J.D., Teng, A.P., Bennett, R., Yang-Martin M., Shook, M.A., Huey, G., Tanner, D., Knote, C., Kim, J.H., Park, R.J., Brune, W. (2020) Airborne formaldehyde and volatile organic compound measurements over the Daesan petrochemical complex on Korea's north-west coast during the Korea-United States Air Quality study Estimation of emission fluxes and effects on air quality, *Elementa: Science of the Anthropocene*, 8(1), 121. <https://doi.org/10.1525/elementa.2020.121>
- Gyeonggi Research Institute (GRI) (1999) Computerization of air pollutant emission data and establishment of improvement measures.
- Kang, Y.-H., You, S., Kim, E., Bae, M., Son, K., Kim, S. (2021a) Local Authority-Level Source Apportionments of PM_{2.5} Concentrations based on the CAPSS 2016: (VIII) Busan and Gyeongnam, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(6), 871-890. <https://doi.org/10.5572/kosae.2021.37.6.871>
- Kang, Y.-H., You, S., Son, K., Kim, E., Bae, M., Kim, S. (2021b) Municipality-Level Source Apportionment of PM_{2.5} Concentrations based on the CAPSS 2016: (V) Ulsan, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(3), 487-511. <https://doi.org/10.5572/kosae.2021.37.3.487>
- Kim, B.-U., Kim, H.C., Kim, S. (2018) Review of Particulate Matter Management in United States, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(4), 588-609. <https://doi.org/10.5572/kosae.2018.34.4.588>
- Kim, B.-U., Kim, H.C., Kim, S. (2019) Review on Ozone Management in US and Recommendations for Domestic Ozone Control, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(3), 370-394. <https://doi.org/10.5572/kosae.2019.35.3.370>
- Kim, E., You, S., Bae, M., Kang, Y.-H., Son, K., Kim, S. (2021a) Municipality-Level Source Apportionment of PM_{2.5} Concentrations based on the CAPSS 2016: (IV) Jeollabuk-do, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(2), 292-309. <https://doi.org/10.5572/kosae.2021.37.2.292>
- Kim, H.C., Kim, S., Lee, S.-H., Kim, B.-U., Lee, P. (2020) Fine-Scale Columnar and Surface NO_x Concentrations over South Korea: Comparison of Surface Monitors, TROPOMI, CMAQ and CAPSS Inventory, *Atmosphere*, 11(1), 101. <https://doi.org/10.3390/atmos11010101>
- Kim, J., Jang, Y.-K. (2014) Uncertainty Assessment for CAPSS Emission Inventory by DARS, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 30(1), 26-36. (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2014.30.1.026>
- Kim, J., Seo, B.K., Lee, T., Kim, J., Kim, S., Bae, G.N., Lee, G. (2023) Airborne estimation of SO₂ emissions rates from a coal-fired power plant using two top-down methods: A mass balance model and Gaussian footprint approach, *Science of The Total Environment*, 855, 158826. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158826>
- Kim, S., Son, K., You, S., Bae, M., Kang, Y.-H., Kim, E., Kim, S. (2022) Municipality-Level Source Apportionment of PM_{2.5} Concentrations based on the CAPSS 2016: (IX) Gyeongsangbuk-do, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 38(2), 237-257. <https://doi.org/10.5572/kosae.2022.38.2.237>
- Kim, S., You, S., Kang, Y.-H., Kim, E., Bae, M., Son, K., Kim, Y., Kim, B.-U., Kim, H.C. (2021b) Municipality-Level Source Apportionment of PM_{2.5} Concentrations based on the CAPSS 2016: (II) Incheon, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(1), 144-168. <https://doi.org/10.5572/kosae.2021.37.1.144>
- Kim, S., You, S., Kim, E., Kang, Y.-H., Bae, M., Son, K. (2021c) Municipality-Level Source Apportionment of PM_{2.5} Concentrations based on the CAPSS 2016: (III) Jeollanamdo, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(2), 206-230.
- Korea Environmental Industry & Technology Institute (KEITI) (2014) Improvement of Air Pollution Emission Inventory and Its Reliability. <https://doi.org/10.23000/TRKO201500001376> (accessed on Aug. 17, 2023).
- Korea Institute of Energy Research (KIER) (2000) Research on Emission estimation Methods and Non-Road Emission Factors.
- Korea Institute of Energy Research (KIER) (2001) Estimation of emissions from mobile pollutants (including non-

- road mobile).
- Kurokawa, J., Ohara, T. (2020) Long-term historical trends in air pollutant emissions in Asia: Regional Emission inventory in ASia (REAS) version 3, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20(21), 12761-12793. <https://doi.org/10.5194/acp-20-12761-2020>
- Kwon, H.A., Park, R.J., Oak, Y.J., Nowlan, C.R., Janz, S.J., Kowalewski, M.G., Freid, A., Walega, J., Bates, K.H., Choi, J.K., Blake, D.R., Wisthaler, A., Woo, J.H. (2021) Top-down estimates of anthropogenic VOC emissions in South Korea using formaldehyde vertical column densities from aircraft during the KORUS-AQ campaign, *Elementa: Science of the Anthropocene*, 9(1), 00109. <https://doi.org/10.1525/elementa.2021.00109>
- Lamsal, L.N., Duncan, B.N., Yoshida, Y., Krotkov, N.A., Pickering, K.E., Streets, D.G., Lu, Z. (2015) US NO₂ trends (2005-2013): EPA Air Quality System (AQS) data versus improved observations from the Ozone Monitoring Instrument (OMI), *Atmospheric Environment*, 110, 130-143. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.03.055>
- Lamsal, L.N., Martin, R.V., Padmanabhan, A., Van Donkelaar, A., Zhang, Q., Sioris, C.E., Chance K., Kurosu, T.P., Newchurch, M.J. (2011) Application of satellite observations for timely updates to global anthropogenic NO_x emission inventories, *Geophysical Research Letters*, 38(5), L05810. <https://doi.org/10.1029/2010GL046476>
- Lee, H.M., Park, R.J., Henze, D.K., Lee, S., Shim, C., Shin, H.J., Moon, K.H., Woo, J.H. (2017) PM_{2.5} source attribution for Seoul in May from 2009 to 2013 using GEOS-Chem and its adjoint model, *Environmental Pollution*, 221, 377-384. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.11.088>
- Lee, J.S., Lee, C.D., Kwon, M.J. (2020) A Study of Uncertainty on BFM Method with Variations in Reduction of Emissions to Estimate Source Contributions of Cargo Ships, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36(6), 757-773. <https://doi.org/10.5572/kosae.2020.36.6.757>
- Lim, O.J. (2009) Uncertainty Analysis of Emission Inventories in Support of Air Quality Management for Seoul Metropolitan Area, Domestic Master's Thesis Konkuk University Graduate School. <http://www.riss.kr/link?id=T11714701&outLink=K>
- McLinden, C.A., Fioletov, V., Shephard, M.W., Krotkov, N., Li, C., Martin, R.V., Moran, M.D., Joiner, J. (2016) Space-based detection of missing sulfur dioxide sources of global air pollution, *Nature Geoscience*, 9(7), 496-500. <https://doi.org/10.1038/NGEO2724>
- Ministry of Environment (MOE) (1995) Research on the development of research methods and research guidelines for area and mobile source pollutants.
- National Air Emission Inventory and Research Center (NAIR) (2021) Clean Air Policy Support System (CAPSS) evaluation and validation research (I).
- National Institute of Environmental Research (NIER) (1993) Estimation of Emission Factor and Air Pollutant Emission by Motor Vehicles.
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2005) A Study on Atmospheric Emission Inventory Development, and the Estimation of Air Pollutant Emission Factors and Quantity.
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2006) Improvement of Emission Coefficient to Enhance the Reliability of Fugitive Dust Emission in CAPSS. <https://ecolibrary.me.go.kr/nier/#/search/detail/166540#ik-export> (accessed on Aug. 17, 2023).
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2007a) Estimation and Inventory of Atmospheric Ammonia Emissions (I). <https://ecolibrary.me.go.kr/nier/#/search/detail/168682?offset=4> (accessed on Aug. 17, 2023).
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2007b) Improvement of air pollution emission estimation method for road transport sector and research on future emission projection method.
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2007c) Study on Domestic Application Strategies through the Analysis of Volatile Organic Compounds (VOC) Emission Reduction Cases in Developed Countries. <https://scienceon.kisti.re.kr/commons/util/originalView.do?cn=TRKO201200011504&dbt=TRKO&rn=> (accessed on Aug. 17, 2023).
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2008) Estimation and Inventory of Atmospheric Ammonia Emissions (II). <https://ecolibrary.me.go.kr/nier/#/search/detail/5552867> (accessed on Aug. 17, 2023).
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2009a) Research for PM_{2.5} air quality standards.
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2009b) Research on PM_{2.5} emission characteristics and estimation of contribution.
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2014) Improvement of Air Pollution Emission Inventory and Its Reliability.
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2018) Development of national air pollutant emission evaluation method and roadmap improvement research.
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2019) Stan-

- standard work procedure for establishing basic data on national air pollutant emissions (Based on 2016 emission).
- National Institute of Environmental Research (NIER), National Aeronautics and Space Administration (NASA) (2020) KORUS-AQ Final Science Synthesis Reports, 11-1480 523-004196-01.
- Park, R.J., Oak, Y.J., Emmons, L.K., Kim, C.H., Pfister, G.G., Carmichael, G.R., Saide, P.E., Cho, S.Y., Kim, S.T., Woo, J.H., Crawford, J.H., Gaubert, B., Lee, H.J., Park, S.Y., Jo, Y.J., Gao, M., Tang, B., Stanier, C.O., Shin, S.S., Park, H.Y., Bae, C.H., Kim, E. (2021) Multi-model intercomparisons of air quality simulations for the KORUS-AQ campaign, *Elementa: Science of the Anthropocene*, 9(1), 00139. <https://doi.org/10.1525/elementa.2021.00139>
- Park, S.-U., Jhun, J.-G., Yoon, S.-C. (1993) A study on the calculation of pollutant emissions for long-term air pollution concentration prediction.
- Richter, A., Eyring, V., Burrows, J.P., Bovensmann, H., Lauer, A., Sierk, B., Crutzen, P.J. (2004) Satellite measurements of NO₂ from international shipping emissions, *Geophysical Research Letters*, 31(23), L23110. <https://doi.org/10.1029/2004GL020822>
- Simpson, J.J., Blake, D.R., Blake, N.J., Meinardi, S., Barletta, B., Hughes, S.C., Fleming, L.T., Crawford, J.H., Diskin, G.S., Emmons, L.K., Fried, A., Guo, H., Peterson, D.A., Wisthaler, A., Woo, J.H., Barré, J., Gaubert, B., Kim, J.S., Kim, M.J., Kim, Y.H., Knote, C., Mikoviny, T., Pusede, S.E., Schroeder, J.R., Wang, Y., Wennberg, P.O., Zeng, L. (2020) Characterization, sources and reactivity of volatile organic compounds (VOCs) in Seoul and surrounding regions during KORUS-AQ, *Elementa: Science of the Anthropocene*, 8, 37. <https://doi.org/10.1525/elementa.434>
- 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. <https://doi.org/10.5572/kosae.2021.37.3.429>
- Streets, D.G., Bond, T.C., Carmichael, G.R., Fernandes, S.D., Fu, Q., He, D., Klimont, Z., Nelson, S.M., Tsia, N.Y., Wang, M.Q., Woo, J.-H., Yarber, K.F. (2003) An inventory of gaseous and primary aerosol emissions in Asia in the year 2000, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D21), 8809. <https://doi.org/10.1029/2002JD003093>
- Tessum, M.W., Anenberg, S.C., Chafe, Z.A., Henze, D.K., Kleiman, G., Kheirbek, I., Marshall, J.D., Tessum, C.W. (2022) Sources of ambient PM_{2.5} exposure in 96 global cities, *Atmospheric Environment*, 286, 119234. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119234>
- U.S Environmental Protection Agency (U.S EPA) (1996) EVALUATING THE UNCERTAINTY OF EMISSION ESTIMATES Final Report VOLUME VI: Chapter 4. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-08/documents/vi04.pdf> (accessed on Aug. 17, 2023).
- U.S Environmental Protection Agency (U.S EPA) (2018) Modeling Guidance for Demonstrating Air Quality Goals for Ozone, PM_{2.5}, and Regional Haze. https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-10/documents/o3-pm-rh-modeling_guidance-2018.pdf (accessed on Aug. 17, 2023).
- Vinken, G.C.M., Boersma, K.F., van Donkelaar, A., Zhang, L. (2013) Constraints on ship NO_x emissions in Europe using GEOS-Chem and OMI satellite NO₂ observations, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(7), 19351-19388. <https://doi.org/10.5194/acpd-13-19351-2013>
- Yoo, C. (2022) Recent national air pollutant emission estimation method and results, and data presented at the Seoul Metropolitan Area Fine Dust Forum.
- You, S., Bae, C., Kim, H., Yoo, C., Kim, S. (2020) Municipality-Level Source Apportionment of PM_{2.5} Concentrations based on the CAPSS 2016: (I) Gyeonggi Province, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36(6), 785-805. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2020.36.6.785>
- Zhao, Y., Nielsen, C.P., Lei, Y., McElroy, M.B., Hao, J. (2011) Quantifying the uncertainties of a bottom-up emission inventory of anthropogenic atmospheric pollutants in China, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11(5), 2295-2308. <https://doi.org/10.5194/acp-11-2295-2011>

Authors Information

장영기 (전 수원대 환경공학과 교수) (musim@suwon.ac.kr)

김순태 (아주대학교 환경안전공학과 교수)
(soontaekim@ajou.ac.kr)

우정현 (건국대학교 사회환경공학과 교수) (jwoo@konkuk.ac.kr)