

대기 환경 용량과 대기 환경 수용 능력 재설정에 관한 고찰: 응축성 먼지를 중심으로

이임학* · 김민영** · 박영권*[†]

*서울시립대학교 환경공학부
02504 서울시립대학교 환경공학부
**(재)FITI시험연구원 기후환경팀
28115 충북 청주시 청원구 오창읍 양청3길 43
(2025년 4월 26일 접수, 2025년 10월 5일 수정본 접수, 2025년 10월 13일 채택)

Observations of Resetting for the Atmospheric Environmental Capacity and the Atmospheric Environmental Carrying Capacity Focused on Condensable Particulate Matters

Im Hack Lee*, Min Young Kim** and Young-Kwon Park*[†]

*School of Environmental Engineering, University of Seoul, Seoul, 02504, Korea
**Team of Air Environment, FITI Testing & Research Institute, Seoul, 07791, Korea
(Received 26 April 2025; Received in revised from 5 October 2025; Accepted 13 October 2025)

요 약

본 연구에서는 대기환경종합계획의 주요 키워드 중 하나인 대기 환경 용량 (Atmospheric Environmental Capacity)에 대하여 우리나라의 실정에 맞는 개념 정리, 구성요소 파악 및 향후 재산정 방향에 대하여 고찰하였다. 우리나라 대기 환경 용량의 재설정 방향을 찾기 위하여 지금까지 국내외 대기 환경 용량(atmospheric environmental capacity)과 대기 환경 수용 능력(atmospheric environmental carrying capacity)의 개념과 입자상 물질의 생성 메커니즘에 대해 살펴 보았으며, 최근 국회 등 사회적으로 이슈화되고 있는 응축성 먼지의 측정 및 배출량 산정 방법 등의 연구동향, 이를 포함한 대기질 모델링 활용법 등을 고려하여 우리나라 대기 환경 용량 재설정 방향성을 제시하였다.

Abstract – This study aimed to examine the concept organization, component identification, and future recalculation direction of Atmospheric Environmental Capacity, one of the key keywords of the Comprehensive Air Quality Plan, in accordance with the current situation in Korea. In order to increase the achievement rate of South Korea's PM-2.5 environmental standards, it is believed that first of all, we need to thoroughly reset our country's atmospheric environmental capacity and atmospheric environmental carrying capacity, and develop overseas emission management methods, programs, and policies that are equivalent to the intensity of emission management methods for domestic emission sources including our country's workplaces. If an unavoidable situation arises where policies equivalent to the intensity for domestic emission sources cannot be implemented for overseas emission sources, it will be necessary to explain the reason to the South Korean people and seek their understanding, and in the future, experts from the public/private/research fields will need to continuously seek alternatives to increase the achievement rate of South Korea's PM-2.5 environmental standards.

Key words: Atmospheric environmental capacity, Atmospheric environmental carrying capacity, Primary PM, Secondary PM, FPM, CPM

1. 서 론

우리나라 정부는 지금까지 3차례에 걸쳐 대기환경종합계획을 발표하였다. 1차 계획은 2006년~2015년의 기간에 대한 계획으로 주

요 골자는 PM-10을 기준으로 2001년 $56 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로부터 2015년에 $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (동경수준)까지 낮추며, NO_2 를 2001년 26 ppb 로부터 2015년에 22 ppb (파리수준)까지 낮추는 것이었다. 2차 계획은 2016년~2025년의 기간에 대한 계획으로 1차 계획의 패러다임이 대도시 중심으로 관리였다는데 반하여 2차 계획은 환경기준 초과지역 중심으로 관리를 하겠다는 패러다임을 채용하였는데, 그 계획의 주요 골자는 환경기준 달성률 기준으로 2014년에 61% (PM-10) 으로부터 2025년에 90% (PM-10, PM-2.5)까지 높이며, 오존(1시간 기준)의 경우 2014년에 38%로부터 2025년에 70%까지 높이는 것

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: catalica@uos.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

이었다. 3차 계획은 2023년~2032년의 기간에 대한 계획으로 주요 골자는 PM-2.5을 기준으로 중간목표로서 2027년에 $13 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (OECD 가입국 중위권 수준)까지 낮추며, 2032년에 $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 까지 낮추는 것이었으며, 오존 달성률은 2032년까지 전국 1시간 기준 달성률을 50%까지 올리는 것이었다[1-3].

위와 같이, 우리나라 정부는 최근까지 3차례에 걸쳐 대기환경종합계획을 수립하여 관리에 힘썼음에도 불구하고, 안타깝게도 우리나라의 대기환경 관리의 결과를 만족할 만하다고 평가하기에는 부족한 면이 있었다.

1차 계획의 사후 평가 결과, 대기질 개선을 위한 교통 및 에너지 수요관리에 한계가 있었으며, 미세먼지 및 질소산화물 등의 환경기준이 WHO(World Health Organization) 권고기준에 비하여 만족스럽지 못하여 단계적 강화가 필요하였으며, 대기환경기준 미달성 측정소가 과다했었고, 부산권/대구권/광양만권 등의 3개 지역이 대기질 개선목표를 달성하지 못하고 규제지역으로 여전히 지정된 상태를 유지하였다[2].

2차 계획의 사후 평가 결과, PM-2.5의 연평균 및 24시간 항목 모두 환경기준 달성률이 저조하였으며, 오존의 경우도 전국적 농도 증가 추세로 8시간 항목의 달성률이 0.6%, 1시간 항목의 달성률이 40.8%로서 모두 환경 기준 달성률이 저조하였다[3].

위와 같은 상황은 국가 차원에서 대규모 인력과 재원을 투입하여 대기환경개선대책을 공들여 수립하고 대기오염물질의 배출량을 제어하기 위하여 약 20년 동안 노력을 기울였음에도 불구하고 먼지와 오존의 대기환경농도 면에서 만족할 만한 수준의 결과를 끌어내지 못했다고 표현할 수 있다. 이는 대기환경종합계획의 설계 단계부터 핵심이 되는 주요 키워드의 개념설정 단계부터 무엇인가 결여되어 있는 상태인데도, 수정보완이 이루어지지 못한 채로 계획과 집행이 반복해서 이루어지는 악순환이 계속 되었기 때문이 아닌가라고 본 연구진은 생각하였다. 만약 그렇다면 이를 개념 설계 단계부터 재정립할 필요성이 있다고 사료되었다.

위와 같은 상황은 국가 차원에서 대규모 인력과 재원을 투입하여 대기환경개선대책을 공들여 수립하고 대기오염물질의 배출량을 제어하기 위하여 약 20년 동안 노력을 기울였음에도 불구하고 먼지와 오존의 대기환경농도 면에서 만족할 만한 수준의 결과를 끌어내지 못했다고 표현할 수 있다. 이는 대기환경종합계획의 설계 단계부터 핵심이 되는 주요 키워드의 개념설정 단계부터 무엇인가 결여되어 있는 상태인데도, 수정보완이 이루어지지 못한 채로 계획과 집행이 반복해서 이루어지는 악순환이 계속 되었기 때문이 아닌가라고 본 연구진은 생각하였다. 만약 그렇다면 이를 개념 설계 단계부터 재정립할 필요성이 있다고 사료되었다.

따라서, 본 연구에서는 대기환경종합계획의 주요 키워드 중 하나인 대기 환경 용량(Atmospheric Environmental Capacity)에 대하여 우리나라의 실정에 맞는 개념 정리, 구성요소 파악 및 향후 재산정 방향에 대하여 고찰하고자 하였다.

우리나라 환경정책기본법의 제3조7항에서 ‘환경용량이란 일정한 지역에서 환경오염 또는 환경훼손에 대하여 환경이 스스로 수용, 정화 및 복원하여 환경의 질을 유지할 수 있는 한계를 말한다.’라고 정의하고 있고, 제9조2항에서 ‘정부는 환경용량의 범위에서 산업간, 지역간, 사업간 협의에 의하여 환경에 미치는 해로운 영향을 최소화하도록 지원하여야 한다.’라고 명기하고 있으며, 제21조1항에서 ‘국가 및 지방자치단체의 장은 토지의 이용 또는 개발에 관한

계획을 수립할 때에는 국가환경종합계획, 시·도 환경계획 및 시·군·구 환경계획(이하 “국가환경종합계획” 등이라 한다)과 해당 지역의 환경용량을 고려하여야 한다.’라고 규정하고 있다.

위와 같이 대한민국 정부는 국법에서 환경용량을 고려하여 환경계획을 수립하라고 규정하고 있는데, 대기분야의 환경용량을 고려하여 환경계획을 수립하려면 우리나라 대기분야 환경용량의 숫자와 단위로 표현되는 정량화가 당연히 필요하다고 본 연구진은 생각하였다. 그러나, 현재 우리나라의 중앙, 권역, 광역시도 규모의 각 행정부들은 ‘대기환경종합계획’ 등 대기환경 분야 관리정책 문건들의 내용에 숫자와 단위로 명확히 정량화된 대기환경용량을 제시되지 않고 있지 않은 상태에서 대기환경기준을 설정하고, 대기질 모델링을 수행하며, 미래 배출량을 예측하고, 배출원별 삭감량과 시기를 결정하여 관리정책에 사용하고 있다.

최근 국내 연구진들의 연구들이 배출원의 먼지 배출량 중 여과성 먼지 대비 응축성 먼지 배출량의 비중이 적지 않다고 보고하고 있다. 현재 우리나라에 영향을 미칠 수 있는 먼지 배출량 중 공식적으로는 여과성먼지 배출량 통계만을 사용하고 있는 우리나라가 응축성 먼지 배출량을 고려하게 되었을 때, 국가 통계상의 우리나라 대기환경용량의 변화가 분명히 발생할 것이기 때문에 이에 대한 ‘reset’이 필요하다고 생각한다. 또한 기존에 고려되지 않았던 배출량들이 공식적인 국가통계 체계로 들어오게 되면 우리나라 대기환경용량과 대기관리 정책이 어느 정도로 기존 대비 차이를 보일 것인가를 정량적으로 추정하려면 아직까지 우리나라는 응축성 먼지 관리를 위한 관리정책 기법이나 경험이 많지 않기 때문에 우리나라보다 먼저 고민을 했던 국외 정부들의 관리 사례를 살펴볼 필요성이 있을 것이다.

따라서, 본 연구에서는 우리나라 대기환경용량의 ‘reset’의 방향을 첫 번째, 기존에 고려되지 않고 있었던 배출원 배출량의 추가 정량화에 대한 타당성과 두 번째, 기존에 고려되지 않고 있었던 배출원 배출량의 추가 도입을 시행할 때의 시행착오를 줄이고자 국외 정부들의 선행 관리 사례를 검토하는 것으로 설정하였다.

독자들의 용어의 생소함에 대한 불편함을 줄이고 가독성을 높이기 위하여 Table 1에 ‘환경 용량’, ‘수용 능력’, ‘환경 부하’, ‘응축성 먼지’에 대한 정의를 정리하여 나타내었다.

우리나라 환경정책기본법의 제3조7항에서 ‘환경용량이란 일정한 지역에서 환경오염 또는 환경훼손에 대하여 환경이 스스로 수용, 정화 및 복원하여 환경의 질을 유지할 수 있는 한계를 말한다.’라고 정의하고 있고, 제9조2항에서 ‘정부는 환경용량의 범위에서 산업간, 지역간, 사업간 협의에 의하여 환경에 미치는 해로운 영향을 최소화하도록 지원하여야 한다.’라고 명기하고 있으며, 제21조1항에서 ‘국가 및 지방자치단체의 장은 토지의 이용 또는 개발에 관한 계획을 수립할 때에는 국가환경종합계획, 시·도 환경계획 및 시·군·구 환경계획(이하 “국가환경종합계획” 등이라 한다)과 해당 지역의 환경용량을 고려하여야 한다.’라고 규정하고 있다.

위와 같이 대한민국 정부는 국법에서 환경용량을 고려하여 환경계획을 수립하라고 규정하고 있는데, 대기분야의 환경용량을 고려하여 환경계획을 수립하려면 우리나라 대기분야 환경용량의 숫자와 단위로 표현되는 정량화가 당연히 필요하다고 본 연구진은 생각하였다. 그러나, 현재 우리나라의 중앙, 권역, 광역시도 규모의 각 행정부들은 ‘대기환경종합계획’ 등 대기환경분야 관리정책 문건들의 내용에 숫자와 단위로 명확히 정량화된 대기환경용량을 제시되

Table 1. Definitions of major words in this paper [4]

Item	cContents
environmental capacity	The maximum allowable discharged volume of certain pollutants, including SO ₂ , NO _x , VOC, NH ₃ , primary PM-2.5
Environmental carrying capacity	Composing of two sections: 'recessive' and 'expressive' indicators. The 'recessive' component is the actual ability for maintaining environmental quality such as a regional economic state, industrial structure, energy structure, technological level, natural resources, geographical and meteorological factors, investments of environmental protection or other factors. The 'expressive' component is the external comprehensive performance of the 'recessive' portion. It is the accumulative reduced discharged volume shown as the sum of the stock and increment that counteracts a part of AES
Environmental stress	The produced volume of atmospheric pollutants owing to human social and economic activities.
Condensable Particulate Matters	Material that is vapor phase at stack conditions, but which condenses and/or reacts upon cooling and dilution in the ambient air to form solid or liquid PM immediately after discharge from the stack (U.S.A. Code of Federal Regulation § 51.50)

지 않고 있지 않은 상태에서 대기환경기준을 설정하고, 대기질 모델링을 수행하며, 미래 배출량을 예측하고, 배출원별 삭감량과 시기를 결정하여 관리정책에 사용하고 있다.

최근 국내 연구진들의 연구들이 배출원의 먼지 배출량 중 여과성 먼지 대비 응축성먼지 배출량의 비중이 적지 않다고 보고하고 있다. 현재 우리나라에 영향을 미칠 수 있는 먼지 배출량 중 공식적으로는 여과성먼지 배출량 통계만을 사용하고 있는 우리나라가 응축성 먼지 배출량을 고려하게 되었을 때, 국가 통계상의 우리나라 대기환경용량의 변화가 분명히 발생할 것이기 때문에 이에 대한 'reset' 이 필요하다고 생각한다. 또한 기준에 고려되지 않았던 배출량들이 공식적인 국가통계 체계로 들어오게 되면 우리나라 대기환경용량과 대기관리 정책이 어느 정도로 기존 대비 차이를 보일 것인가를 정량적으로 추정하려면 아직까지 우리나라는 응축성 먼지 관리를 위한 관리정책 기법이나 경험이 많지 않기 때문에 우리나라보다 먼지 고민을 했던 국외 정부들의 관리 사례를 살펴볼 필요성이 있을 것이다.

따라서, 본 연구에서는 우리나라 대기환경용량의 'reset'의 방향을 첫 번째, 기준에 고려되지 않고 있었던 배출원 배출량의 추가 정량화에 대한 타당성과 두 번째, 기준에 고려되지 않고 있었던 배출원 배출량의 추가 도입을 시행할 때의 시행착오를 줄이고자 국외 정부들의 선행 관리 사례를 검토하는 것으로 설정하였다.

독자들의 용어의 생소함에 대한 불편함을 줄이고 가독성을 높이기 위하여 Table 1에 '환경 용량', '수용 능력', '환경 부하', '응축성 먼지'에 대한 정의를 정리하여 나타내었다.

2. 대기 환경 용량과 대기 환경 수용 능력

2-1. 국내 대기 환경 용량의 개념

환경정책기본법에서는 "환경용량"의 정의를 '일정한 지역에서 환경오염 또는 환경훼손에 대하여 환경이 스스로 수용, 정화 및 복원하여 환경의 질을 유지할 수 있는 한계'로 규정하고 있었다[5].

우리나라 환경정책 분야에서 사용하는 '환경 용량'의 개념은 주로 지속가능성을 염두에 둔 연구에서부터 다루어졌는데, 제주특별자치도는 '수동적 환경용량'이란 자연의 자원 공급 능력과 자정 능력에 의하여 결정되며, 환경 훼손이 발생하지 않고, 인간이 이용할 수 있는 한계 수준으로 인간의 지적 수준과 기술 등이 고려되지 않음이라 하였고, '능동적 환경 용량'이란 환경 관련 문제를 찾아내고 이를 해결할 수 있는 지역 사회의 총체적 능력으로서 자연자원 및 자정작용과 함께 인간의 기술, 관리 능력 및 지역 사회의 능력 등이 포함된 포괄적인 용량이라 보고하였다[6]. 이창우와 오용선은 일정

한 지역의 자연시스템이 부양할 수 있는 경제 규모(인구, 산업, 주택, 도로, 교통 등이 포함)이라 보고하였다[7].

이승준 등은 '환경정책기본법'에서 정의하고 있는 환경용량을 '환경오염의 정화능력'으로 한정함으로써 자원의 공급과 오염의 정화라는 포괄적인 환경의 용량 개념보다 다소 좁은 범위의 개념으로 평가하였음에 반하여, 그들이 본래의 취지에 가깝다고 생각하는 환경용량의 개념은 주어진 환경이 지탱할 수 있는 최대 개체수를 의미하는 'carring capacity' 개념과 맥락을 같이 하며, 보다 실질적으로는 사회 경제 활동을 위해 공급할 수 있는 환경자원의 양과 사회 경제활동의 결과로 배출되는 오염물을 정화하는 환경의 종합적인 능력이라고 보고하였다[8].

우리나라 대기 환경 용량의 개념은 조경두 등의 연구에서 일본의 나이토 마사키가 주장한 환경용량의 개념을 인용한 것으로부터 찾아볼 수 있었다[9,10]. 나이토 마사키의 주장은 후술하였다.

김정수 등은 '도시지역 대기질 관리를 위한 대기 환경 용량 산정 기법 연구'에서 대기 환경 용량 산정을 'Atmospheric Environmental Critical Loads' 개념으로 접근하였으며[11], 장영기 등은 '시흥 및 안산지역의 대기 환경 용량 추정에 관한 연구'에서 대기 환경 용량의 산정을 목표농도, 장래 예측농도, 장래 배경농도, 장래 지역 배출량 등의 변수를 조합하여 산정하였고[12], 박상찬과 강병욱 등 '충주지역의 대기 환경 용량 추정에 관한 연구'에서 ISC3 모델을 활용하여 대기 환경 용량을 추정하였다[13].

2-2. 서방권과 중국의 환경 용량 개념 비교

서방(Western)권역에서 '환경 용량'이라는 개념의 기원을 찾기 위하여 'environmental capacity'라는 조건으로 검색해보면 자료를 찾기가 쉽지 않다. 그 이유는 현대의 서방권 환경 관리 분야에서 '환경 용량'의 개념을 가진 용어는 'environmental capacity(환경 용량)'가 아닌 'environmental carrying capacity(환경 수용 능력)'으로 대부분 표현하기 때문인데, 이는 엄밀히 해석하면 서방권에서는 초창기부터 'environmental capacity'와 'environmental carrying capacity'의 의미를 동일하게 여겼기 때문이라고 보는 것이 맞을 것으로 추정한다.

Table 2에 서방과 중국의 EC(environmental capacity)와 ECC(environmental carrying capacity)에 대한 연구들의 연표를 나타내었다.

Feng 등이 보고한 자료를 인용하여[14], carring capacity에 대한 서방권의 연구 역사를 다음과 같이 기술하였다. 1798년 Malthus는 인구 이론에 대해 발표한 에세이에서 carrying capacity(수용 능력) 개념에 대한 현대적 의미를 부여하였다[15]. Malthus의 기본 이론을

Table 2. The chronicle of environmental capacity (EC) and environmental carrying capacity (ECC)

Year	Western	China	EC	ECC
1798	Malthus		not divided	
1838	Verhulst		not divided	
1921	Park and Burgoss		not divided	
1922	Hadwen and Palmer		not divided	
1948	William, V.		not divided	
1974	Bishop et al.		not divided	
1987	Naito		not divided	
1991		Zeng and Yang	divided	
1992		Ye et al.	divided	
1997	Jeju Gov.		not divided	
1998		Zeng et al.	divided	
1999	Lee and Oh		not divided	
2003	Kim et al.		not divided	
2005	Jang et al.		not divided	
2008	Park et al.		not divided	
2009		Liu et al.	divided	
2017		Zhou and Zhou	divided	
2020	Lee et al		not divided	
2024	Korean Gov. Law		○	-

바탕으로 Verhulst는 로지스틱 방정식을 제안했는데[16], 이는 carrying capacity의 초기 수학적 표현이었다. Park and Burgoss는 carrying capacity 개념을 인간 생태학으로 확장하여 carrying capacity가 특정 환경 조건에서 부양할 수 있는 최대 개체 수(주로 생활 공간, 영양소, 햇빛 및 기타 주요 생태적 요소의 조합이라고 함)라고 주장했다[17]. 그로부터 1년 후, Hadwen and Palmer는 초원 생태학의 관점에서 새로운 carrying capacity의 개념을 제안했다[18]. 그들은 carrying capacity를 초원에 점진적인 피해를 주지 않고 초원에서 부양할 수 있는 가축의 양으로 생각했다. 궁극적(즉, 최대) 용량이 초기 carrying capacity 개념이 정립될 때의 주요 관심사였음을 알 수 있었다. 전 세계적으로 도시화가 진행되면서 전통적인 단일 요인 carrying capacity 연구는 사회 발전에서 마주치는 새로운 문제를 해결하기에는 너무 단순하다는 한계에 부딪힘에 따라, 점차 복잡한 carrying capacity에 대한 연구를 심화하게 되는데, 이러한 방향으로 가장 초기의 연구는 William, V가 쓴 책인 Road to Survival에서는 자원과 환경의 과도한 착취로 인한 생태적 변화를 처음으로 “생태적 불균형”이라고 칭했고, 지역 자원과 환경이 지역 인구와 경제 발전을 지원할 수 있는 능력을 반영하기 위해 지역적 수용력이라는 개념이 제안되었다[19].

1960년대와 1970년대에는 자원 고갈과 환경 파괴와 같은 문제가 세계적으로 확대되면서 생태계와 인간 활동 간의 경쟁과 의존의 역할이 점차 인식되기 시작하여, carrying capacity의 연구 범위도 빠르게 확대되어 전체 생태계를 포괄하게 되었다[14]. 이에 U.S. EPA에서도 1970년대 이래로 ‘carring capacity’라는 용어로 환경용량의 개념을 사용하고 있었다[20].

앞서 조경두 등의 연구[10]에서 인용한 일본의 나이토 마사아키가 주장한 환경용량의 개념은 두 가지로 설명할 수 있는데, ‘제1종 환경용량’이란 환경에 어느 정도의 외적 규범 예를 들면 환경기준을 설정하고 이 범위에서 인간의 활동량을 적정하게 배분하기 위한 기초를 부여하는 개념인 인간다움을 확보하기 위한 적정용량(reasonable capacity)이며, ‘제2종 환경용량’이란 자연 또는 환경생

태계의 안정을 유지하는 것과 같은 절대적인 조건 하에서 인간활동의 한계를 설정하는 근거로 이어지는 개념인 정화능력과 같은 한계용량(marginal capacity)이다[9].

이에 대해 조경두 등은 제1종과 제2종 환경용량의 개념이 적절히 구분되지 못했고 아직까지도 제2종 환경용량을 제시하는 것은 거의 불가능하거나 현실성을 갖기 어려운 상징적인 선언에 불과할 것이며, 그렇다고 제1종 환경용량의 제시가 용이하다고 할 수 없으며 더구나 정책 결정 과정을 통하여 누구나 공감할 수 있는 객관성을 담보하기는 더욱 어렵다고 평가하였다[10].

한편, 중국 연구진들은 environmental capacity와 environmental carrying capacity라는 단어들의 의미에 대하여, 서방권의 선진국들이 바라보는 시각과 개발도상국인 중국이 바라보는 시각 사이에 현격한 차이가 존재한다고 주장하였다[4]. 중국 연구진 주장에 따르면, 선진국들은 경제개발과 환경보호라는 상호 상충할 수 있는 주제를 함께 고려하고 국가를 운영하는데 있어서, 환경의 질(quality)을 유지하는 원칙을 지켜오면서 극단적인 배출량 저감 기술의 필요성 없이도 기존의 관리 감독 시스템이나 법규만 가지고도 그들이 유지하고자 하는 환경의 질(quality) 상태를 유지할 수 있었다. 이 때문에 서방 선진국들의 연구자들은 environmental capacity와 environmental carrying capacity 사이에 개념의 차이를 두기보다는 생태적, 환경적 시스템 그 자체(숲, 토지 이용도, 해안가, 이송 능력 등)에 그들의 연구역량을 집중하게 되었다는 입장이었다[21-26].

이와 같은 서방 선진국들의 상황과는 달리 중국에서는 environmental capacity와 environmental carrying capacity라는 두 가지 개념을 구별하여 사용하였는데, 중국 연구진들은 carrying capacity의 의미를 사회, 경제, 기술개발로 인해 부수적으로 발생하는 공해 문제와 연동하는 것으로서, 특정 지리적 영역 내에서 특정 기간동안 환경 시스템 구조를 질적 변화 없이 유지하고 인간의 활동을 지원하면서도 그 기능을 파괴하지 않는 환경 시스템의 한계치라고 보고하였다[27-29].

중국과 같은 개발도상국은 고도의 경제성장을 중요시하기 때문에,

몇몇 환경 지표는 국가가 설정한 환경기준을 만족하지 못했다. 그러므로 환경이 스스로 정화할 수 있는 능력(자정능력; environmental capacity)과 초과하게 되는 것을 알면서도 어쩔 수 없이 자정능력을 넘어서 상태로 존재하게 만드는 인간의 사회/경제적 활동의 산물 (environmental stress), 그리고 사회적/경제적 활동으로 인하여 발생하는 환경오염을 인간이 목표로 삼고자 하는 환경의 질(quality)을 확보하고자 하는 인간의 활동 영역(환경 수용 능력; environmental carrying capacity)로 구분하였다[4].

Zhou and Zhou 등은 atmospheric environmental capacity (AEC), atmospheric environmental stress (AES), atmospheric environmental carrying capacity (AECC)에 대한 상호 관계를 시나리오별로 개발도상국과 선진국으로 나누어 2개의 그래프로 보여주었는데, 첫 번째는 화석연료 사용에 기반한 전형적인 GDP(gross domestic product) 성장 모드 시나리오 상황에서 나타나는 개발도상국 상황의 그래프로서, AECC는 AES보다 항상 작기 때문에, 대기오염도(combined curve)는 AEC보다 높아서 대기질은 심각하게 악화하였다. 선진국의 상황을 나타내는 두 번째 시나리오 그래프에서는 AECC가 AES보다 크기 때문에 대기오염도(combined curve)는 AEC에 수렴하다가 결국 대기질의 개선 효과를 가져오게 되었다[21,28-31].

따라서, 개발도상국의 주위에 있는 선진국들에게 있어서, 자국 내의 대기오염물질 배출원에 대한 관리 정책만으로는 자국의 대기 환경의 질을 대기환경기준 이하로 유지하는데 임의의 시점부터는 한계에 부딪힐 수 있는 가능성도 존재할 수 있었다고 사료되었다.

3. PM의 생성 메커니즘과 측정 분석

3-1. PM 측정 분석 분야 연구 동향

입자상 물질 분야에 관한 atmospheric environmental capacity (AEC), atmospheric environmental stress (AES), atmospheric environmental carrying capacity (AECC)를 파악하기 위해서는 우선 먼지 측정분석 분야에 대하여 지금까지 발전과정을 살펴볼 필요성이 있다고 판단하였다.

입경은 대기 중 입자의 특성과 발생, 사멸을 결정하는 가장 중요한 파라미터이다[32].

Whitby and Sverdrup은 대기 중 입자상 물질의 분포에 대한 측정분석을 수행하였는데, 이에 대한 결과를 두 가지 그래프로 보고하였다. 첫 번째 그래프에서 가로축은 입자의 입경을, 세로축을 입자의 개수를 나타내고, 두 번째 그래프에서 가로축은 입자의 입경을, 세로축을 입자의 부피를 나타내었다. 첫 번째 그래프에서는 오염도가 높은 지역과 그렇지 않은 지역 등 모든 측정 지점에서 공통적으로 입경이 작은 입자의 개수가 크게 나타나서 측정지점 간 분석 결과 특성의 차이를 뚜렷하게 구별하기가 어려웠지만 그래프의 세로축을 입자의 부피로 설정한 두 번째 그래프에서는 측정지점(sampling site)에 따른 입경 별 부피 분포 특성을 확연하게 구분할 수 있었다. 청정지역과 도시의 대기 특성을 구분할 수 있었던 두 번째 그래프를 보면, 인위적인 오염원의 비중이 낮은 청정지역의 배경농도는 입경이 1 μm 보다 큰 입자의 부피 비중이 높게 나타나는 2산 분포의 특징을 보인데 반하여, 도시 배출원의 영향을 많이 받는 오염된 지역의 그래프에서는 입경이 1 μm 보다 작은 나노(nano) 사이즈 입자의 부피 비중이 높게 나타나는 2산 분포의 특징을 보여주었다[33].

측정분석 분야에서 U.S. EPA의 시각으로는 1996년까지만 해도

PM의 입경분포를 2산 분포로 인식하고 있었다. 이는 앞선 Whitby 연구의 영향을 받은 것으로 Coarse Mode는 입경 별 중량분포 중 가장 낮은 비중을 차지하는 1~3 μm 보다 큰 입경의 PM으로서 주로 기계적인 마모나 부스러짐으로부터 생성되는 입자이며, Fine Mode는 1~3 μm 보다 작은 입경의 PM으로서 주로 가스로부터 기인하여 생성되는 PM으로 보고되었다. Coarse Mode는 측정하는 기기에 따라, Wide ranging of aerosol collector (WARC)나 high volume sampler의 흡입부 형상에 따라 TSP, PM-10, PM-2.5의 입경별 중량농도를 선택하여 분석할 수 있었다[32].

1980년 이후 약 15년 동안 대부분의 측정분석 데이터는 2.5 μm 에서 cut-off 되어, 그때까지의 연구자들은 PM-2.5 이상을 Coarse Mode로, PM-2.5를 fine mode라고 생각했다. 그런데, 1997년에 Wilson and Suh는 General Motors Proving Grounds에서 자동차 교통량이 많은 상태에서 포집한 PM 샘플 분석에서 측정분석 기법의 발전에 힘입어 Fine Mode를 Nuclei Mode와 Accumulation Mode로 나누어 볼 수 있는 3산 분포 그래프를 보고하였다. 이들은 Coarse Mode 입자들은 기계적으로 포장 또는 비포장 도로 위의 흡 입자와 같은 커다란 입자들이 작은 입자들로 쪼개지며 생겨나는 것으로 보다 작은 입자들이 생기려면 그만큼 커다란 에너지가 투입되어야 한다고 설명하였다. Fine Mode에 속하는 입자는 일반적으로 가스로부터 생성되는 것을 말하는데, nucleation, condensation, coagulation 현상을 포함하고 있음을 보고하였다[34].

입자가 건강에 미치는 영향은 입자 크기와 표면에 흡착된 물질에 따라 달라질 수 있다. Black carbon과 같은 매우 작은 입자는 크기가 ultra fine (0.1 μm 미만)에서 fine (2.5 μm 미만)까지 다양할 수 있으며, 더 큰 입자보다 건강에 더 해로울 수 있다. 흡입 후 4 μm 보다 크거나 0.002 μm 보다 작은 입자는 입과 목에 침전될 경향이 더 높고 0.002~0.2 μm 사이의 입자는 폐의 폐포 부위에 침전된다고 덴마크 EPA 등은 입자의 입경별 특징을 0.1 μm 미만의 입자를 'ultra fine'으로 구분한 3산 분포 그래프로 보고하였다[35,36].

3-2. 연소 후 발생 ultra fine PM의 측정분석 사례

연소과정에서 발생하는 ultra fine PM의 입경별 특성을 파악하기 위해서는 연료별, 배출원별로 발생하는 ultra fine PM의 특성을 정리할 필요가 있어, 연소과정에서 발생하는 먼지의 peak 입경을 Table 3에 나타내었고 그 부연 설명을 원문에 근거하여 다음과 같이 인용 하였다[37].

Fan 등은 nephelometric particulate monitor를 사용하여 촛불, 등유 램프 및 히터, 기름 램프, 가스랜지 등의 연소기구에서 발생하는 미세먼지를 측정된 결과, 촛불 끌 때를 제외하면 먼지 분포의 peak 입경이 모두 0.1 μm 로 보고하였는데[38], 이는 사용기기의 최소 검출 한계가 0.1 μm 이었기 때문일 것으로 추정되었다.

Wallace 등은 10분 동안 가스 버너를 연소시킨 후 발생한 먼지를 불을 끈 후 5분~37.5분 까지 SMPS 기기로 분석하여 peak 입경이 0.005~0.010 μm (5~10 nm)로 나타남을 보고하였다. 이 실험은 불을 끈 후 시간이 지나면서 관측되는 먼지의 입경이 커지고 있음을 의미하고 있었다[39].

L'Orange 등은 Wood Pellet Cook Stove으로부터 배출되는 먼지를 cascade impactor로 측정하여 먼지의 peak 입경이 0.22~0.33 μm 로 나타남을 보고하였다. 이는 바이오매스를 연료로 사용하는 조리기구로부터 발생하는 먼지는 가스 기구로부터 발생하는 먼지 입경보

Table 3. Peak diameter of particles emitted by various combustion and cooking activities [37]

Researcher	Detecting Device	Detecting Range (μm)	Combustion Device (Fuel)	Food	Peak Diameter (μm)
Fan et al. (USA, 2001)	nephelometric particulate monitor (PDM-3)	0.1~10	Candle	-	0.1 (burning) 0.6 (extinguishing)
Fan et al. (USA, 2001)	nephelometric particulate monitor (PDM-3)	0.1~10	Kerosene Lamp	-	0.1
Fan et al. (USA, 2001)	nephelometric particulate monitor (PDM-3)	0.1~10	Oil Lamp	-	0.1
Fan et al. (USA, 2001)	nephelometric particulate monitor (PDM-3)	0.1~10	Kerosene Heater	-	0.1
Fan et al. (USA, 2001)	nephelometric particulate monitor (PDM-3)	0.1~10	Gas Range	-	0.1
Wallace et al. (USA, 2008)	SMPS (TSI-3936)	0.002~0.064	Gas Burner	-	0.005~0.010
L'Orange et al. (USA, 2012)	cascade impactor (NanoMOUDI 125-R, MSP Corp.)	0.01~10	Wood Pellet Cook Stove	-	0.22~0.33
Tiwari et al. (India, 2014)	Condensation Particle Counter	0.011~1.083	Fire wood	-	0.123
Tiwari et al. (India, 2014)	Condensation Particle Counter	0.011~1.083	Coal	-	0.048
Tiwari et al. (India, 2014)	Condensation Particle Counter	0.011~1.083	Dung Cake	-	0.152
Tiwari et al. (India, 2014)	Condensation Particle Counter	0.011~1.083	Kerosene	-	0.062
Tiwari et al. (India, 2014)	Condensation Particle Counter	0.011~1.083	LPG	-	0.052
Li et al. (China, 2017)	Electrical Low Pressure Impactor	0.03~10	Liquid Gas	Rapeseed Oil	0.2
Li et al. (China, 2017)	Electrical Low Pressure Impactor	0.03~10	Liquid Gas	Sunflower Oil	0.1~0.2
Li et al. (China, 2017)	Electrical Low Pressure Impactor	0.03~10	Liquid Gas	Soybean Oil	0.03~0.2
Li et al. (China, 2017)	Electrical Low Pressure Impactor	0.03~10	Liquid Gas	Corn Oil	0.1~0.2
Abt et al. (USA, 2000)	SMPS (TSI-3934)	0.02~0.6	Gas Oven	Oven Cooking	0.02~0.06
Buonanno et al. (Australia, 2009)	SMPS/APS (TSI), Condensation Particle Counter (CPC 3775 TSI)	0.01~10	Gas Stove	Cheese grilling	0.041
Buonanno et al. (Australia, 2009)	SMPS/APS (TSI), Condensation Particle Counter (CPC 3775 TSI)	0.01~10	Gas Stove	pork meat grilling	0.043
Buonanno et al. (Australia, 2009)	SMPS/APS (TSI), Condensation Particle Counter (CPC 3775 TSI)	0.01~10	Gas Stove	bacon grilling	0.049
Buonanno et al. (Australia, 2009)	SMPS/APS (TSI), Condensation Particle Counter (CPC 3775 TSI)	0.01~10	Gas Stove	vegetable grilling	0.029
Buonanno et al. (Australia, 2009)	SMPS/APS (TSI), Condensation Particle Counter (CPC 3775 TSI)	0.01~10	Gas Stove	Olive oil + Chip	0.061
Buonanno et al. (Australia, 2009)	SMPS/APS (TSI), Condensation Particle Counter (CPC 3775 TSI)	0.01~10	Gas Stove	Peanut oil + Chip	0.049
Buonanno et al. (Australia, 2009)	SMPS/APS (TSI), Condensation Particle Counter (CPC 3775 TSI)	0.01~10	Gas Stove	Sunflower oil + Chip	0.049
Lee (Korea, 2012)	OPC (Grimm 1.10)	0.3~20	Char	Beaf	0.35
Lee (Korea, 2012)	OPC (Grimm 1.10)	0.3~20	Char	Pork	0.35

다는 수 십배 크다는 것을 의미한다[40].

Abt 등은 Gas Oven을 사용하여 오븐 요리를 할 때, SMPS를 사용하여 peak 입경을 조사한 결과 0.02~0.06 μm로 보고하였다[41].

Tiwari 등은 Condensation Particle Counter를 사용하여 연료별 먼지의 peak 입경을 산정한 결과 장작불이 0.123 μm, 석탄이 0.048 μm, 우분 케익이 0.152 μm, 등유가 0.062 μm, LPG가 0.052 μm로 나타났음을 보고하였다[42].

Li 등은 팬 위에 유채씨유, 해바라기씨유, 콩기름, 옥수수기름 등을 두르고, 액화가스를 연료로 하여 가열한 후 발생먼지의 peak 입경을 Electrical Low Pressure Impactor를 사용하여 측정된 결과 유채씨유 사용 시 0.2 μm, 해바라기씨유 사용 시 0.1~0.2 μm, 콩기름 사용 시 0.03~0.2 μm, 옥수수기름 사용 시 0.1~0.2 μm로 보고하였다[43].

Buonanno 등은 SMPS/APS (TSI)와 Condensation Particle Counter (CPC 3775 TSI) 기기를 사용하여 가스 스토브 조리 시 발생하는

먼지의 peak 입경을 실험한 결과 Cheese grilling에서 0.041 μm, pork meat grilling에서 0.043 μm, bacon grilling에서 0.049 μm, vegetable grilling에서 0.029 μm를 나타내었다고 보고하였으며, Olive oil + Chip에서 0.061 μm, Peanut oil + Chip에서 0.049 μm, Sunflower oil + Chip에서 0.049 μm로 보고하였다[44].

이준복은 OPC (Optical Particle Counter)를 활용하여 쇠고기와 돼지고기를 숯불에서 직화구이로 조리할 때, 발생하는 미세먼지를 입경별로 측정했는데, 최소 사이즈인 0.35 μm에서 peak 농도를 나타내었다[45].

3-3. PM 생성 메커니즘 연구 동향

1970년대 초반부터 Knutson과 Whitby는 입자의 입경 별 분포를 nm 단위부터 μm 단위까지의 범위를 측정할 수 있는 기기를 개발하였고[46] 이를 통해 얻은 측정 결과를 활용하여 대기 중 입자의 생성

과 입경별 성장 모드에 대한 이론을 소개했는데, 이제는 이 이론이 입자 생성의 교과서처럼 여겨지고 있다[47]. Knutson and Whitby 이론은 세 부분으로 나누어 볼 수 있는데, 첫 번째, 고온의 증기가 응축(condensation)되어 1차 입자가 된 후 coagulation을 거쳐 chain화 되면 0.001~1 μm의 입자(fine particle)가 형성된다. 두 번째, 가스가 저휘발성 증기로 변하는 화학반응이 일어난 뒤, nucleation 및 응축(condensation) 과정과 coagulation 과정을 거친 후 fine particle이 된다. 세 번째는 물리적인 풍화작용 등에 의해서 생겨나는 coarse particle 이다.

1978년 이후 측정기술은 더욱 발달되어 1999년에는 0.001~0.01 μm 입경의 입자까지 측정 분석하게 되어 입자의 생성 메커니즘을 3산 분포가 아닌 4산 분포로 설명하게 되었다[48]. 이후 Slade는 Pitts 등이 제시한 4산 분포 그림을 수정하였는데, 첫 번째 모드(0.001~0.01 μm)를 2차 입자, 두 번째 모드(0.01~0.1 μm)를 연소산물인 1차 입자, 세 번째 모드(0.1~1 μm)를 2차 입자, 네 번째 모드(1~10 μm)를 1차입자로 표현하였다[49]. 그런데, Pitts 등의 원서 확인 결과[48], Slade의 주장에서 첫 번째 모드가 2차 입자라고 한 것은 오타로 보이는데, Pitts 등의 원서에서는 프로판이나 메탄올의 연소 산물인 입자의 입경이 0.001~0.01 μm 범위로 보고하고 있었기 때문에[48] Slade의 주장에서 첫 번째 모드(0.001~0.01 μm)는 2차 입자만이 아니고 1차 입자(primary particle)와 2차 입자 모두 생성되는 것으로 수정하는 것이 옳다고 사료되었다.

4. 응축성 먼지의 국내외 제도권 도입 동향

4-1. 응축성 먼지의 개요

앞선 연구 동향에서 살펴본 바와 같이 미세먼지는 발생 기작을 크게 1차 생성 입자와 2차 생성 입자로 구분할 수 있다. 이 중 1차 생성 입자는 여과성 입자(Filterable Particulate Matters; FPM)와 응축성 입자(Condensable Particulate Matters; CPM)로 구분되고 주로 PM-10과 PM-2.5의 형태로 존재하고 있다[50].

국내의 미세먼지 연구를 살펴보면 FPM에 대해 굴뚝 배출가스 중 미세먼지(PM-10 & PM-2.5) 측정 분석 방법 자료집[51]부터 굴뚝 미세먼지 공정시험기준 마련을 위한 조사 연구[52]를 통하여 “환경부 고시 제 2014-9호 “(Korean MOE, 2014a)로 미세먼지 중 PM-10 및 PM-2.5 (ES 01317.1) 공정시험기준(Korean MOE, 2014b)을 마련하였지만, CPM에 대한 측정 방법이 마련되어 있지 않아 미세먼지에 대한 체계적이고 종합적인 배출특성 파악이 어렵다. 이에 CPM 측정 방법에 대한 방법론을 정립하고 적절한 측정방법의 개선이 필요한 상황이다.

연소 먼지 배출원에 대한 PM-2.5 관련 이슈들을 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1에서 세로 점선의 왼쪽은 굴뚝 내부를 나타내고 세로 점선의 오른쪽은 굴뚝 외부를 나타낸다. 굴뚝 내/외부의 환경 중 가장 큰 차이점은 온도 조건일 것이다. 일반적으로 연소현상이 관여하는 배출시설과 방지시설 후단 굴뚝에서의 온도는 100 °C 이상이며 일부에서는 300 °C를 상회하는 곳도 있다. Fig. 1의 가로 점선 위쪽은 입자상물질의 영역을 나타내며, 가로 점선의 아래쪽은 가스상 물질의 영역을 나타낸다.

고정오염원의 굴뚝 내부에서 발생하는 입자상 물질은 여과성 먼지와 응축성 먼지가 있는데, 현재 우리나라 먼지 배출량 인벤토리에서는 공식적으로는 여과성 먼지만을 관리하고 있으며, 응축성

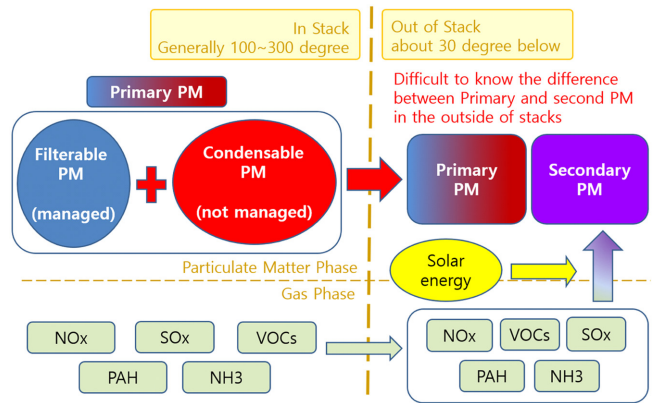


Fig. 1. PM-2.5 issues on combustion sources.

먼지는 최근에서야 환경부의 공정시험기준이 만들어진 상태이고, 국가 대기오염물질 배출량 산정방법편람에도 그 배출량의 산정방법이 기술되어 있지 않으며, CAPSS (Clean Air Policy Support System)에서도 계산하고 있지 않아, 법적으로 또는 공식적으로 관리하고 있지 않다고 말할 수 있을 것이다.

고정오염원의 굴뚝 내부에서 발생하는 가스상 물질은 NOx, SOx, PAH, VOCs 암모니아 등이 있을 것이다. 이 중 암모니아는 최근에 NOx를 저감하기 위해 연소실 내부로 강제 주입하고 있는데, 연소실 내부에서 반응하지 못한 잉여 암모니아가 그대로 대기 중에 배출되어, NOx를 제어하고자 사용한 암모니아에 의해 굴뚝이 새로운 대기 중 암모니아 배출원으로 지목될 가능성도 존재할 수 있다.

굴뚝 내부에서 발생한 1차 먼지는 굴뚝 외부로 배출되면 굴뚝 외부에 존재하던 기존 먼지와 혼합될 수도 있는데, 이 때, 굴뚝 내부에서 고온의 조건에서도 측정이 가능한 여과성 먼지의 경우는 해당 배출원의 먼지 배출량으로 산정이 가능하겠으나, 굴뚝 내부의 온도 조건에서는 여과지에 잡히지 않다가 굴뚝 밖으로 배출되고 상온 조건에 노출되면서 응축 현상에 의하여 계측되는 응축성 먼지는 전통적인 굴뚝 내부에서 여과지에 의한 포집하는 측정법으로는 정량화가 어려웠기에 현재까지도 그 실체나 개념이 대중화 되지 않고 있다.

응축성 먼지는 배출 기작이 물리화학적 응축현상에 기인하므로, 화학반응에 의하여 생성되는 2차 먼지(secondary PM)와는 생성기작이 엄연히 다르기 때문에 2차 먼지와 응축성 먼지의 개념은 혼동되어서는 아니 되고 독립적으로 구분되어 정량화되어야 한다고 판단한다. 그러나, 일단 굴뚝 외부로 배출되어 응축되면서 여타 먼지와 혼합되면 분석 대상 지역의 대기 중 먼지 속에서 어떤 것이 1차 먼지 중 여과성 먼지이고, 어떤 것이 1차 먼지 중 응축성 먼지이고, 어떤 것이 2차 먼지인지 구별이 매우 어렵기 때문에 현재 대기 중 먼지의 배출기작, 거동, 저감정책을 공부하는 연구자들이 응축성먼지 고려 여부를 누락하거나 혼동하여 진행하는 것이 안타까웠다.

한편, 2017년 9월 26일에 우리나라에서는 미세먼지 관리 종합대책을 발표하였는데 이 보고서에서 우리나라 미세먼지 배출 특성을 직접배출(1차 배출)과 간접배출(2차 배출)로 구분하였고, 전국 기준으로 2차 먼지(secondary PM)의 기여도를 72%, 1차 먼지의 기여도를 28%로 보고하였는데, 주목할 점은 먼지 배출량 중 응축성 먼지는 고려하지 않았다는 점이다[53]. 그런데, 같은 해인 2017년도에 대기환경학회에서는 이임학 등이 1차 먼지 배출량 중 응축성 먼

지의 배출량 기여도가 여과성 먼지의 기여도에 비하여 무시할 수 없을 정도의 비중을 나타내었다는 보고를 한 바 있었다[54].

최근, 여과성 먼지와 응축성 먼지 관련 측정분석 측면에서의 학술적인 연구 결과는 한국, 미국, 중국, 대만 등 다수 국가에서 보고 한 바가 있었다[55]. 그러나, 국가 또는 정부 단위의 공식적인 연구 또는 배출량 인벤토리와 허가 사항 등 관리 측면에 대해서는 아직 정리된 보고가 미흡하였다. 따라서, 본 연구에서는 미국, 유럽, 일본, 중국 등 국내외의 국가 혹은 정부 차원에서 응축성먼지 배출량 관리에 대한 동향을 보고하고, 향후 우리나라의 응축성먼지 배출량 관리를 위한 연구 방향에 대하여 고찰하였다.

4.2. 응축성 먼지 관련 동향 파악의 목적

본 절에서는 미국, 일본, 유럽, 중국, 한국 정부 차원의 응축성 먼지를 포함한 먼지 배출량 관리 정책에 대해 분석하였으며, 후반부에는 최근의 학계 연구동향을 고찰하였다. 이는 우리나라에서 응축성 먼지를 공식적으로 관리하게 될 경우, 여타 분야에 어떠한 영향을 미칠 수 있을지를 보고, 향후 정부 차원에서 공식적으로 관리하기 위해서 법규를 비롯한 정책 관련 로드맵 등에 대한 의견을 도출하기 위한 기초자료로 활용하기 위함이다.

4.3. 미국의 응축성 먼지 관리

4.3-1. 미국의 응축성 먼지 관련 법규

미국은 연방법규에 배출원에서 배출되는 먼지에 대한 정의를 규정하고 있었다. 배출원에서 기원하는 먼지는 1차 먼지와 2차 먼지로 구분하였으며, 1차 먼지는 다시 여과성 먼지와 응축성 먼지로 구분하였다[56].

미국 CFR 코드에서 1차 먼지 중 응축성 먼지를 정의하는데 있어서 굴뚝에서 배출된 후 즉시(immediately) 응축되어 만들어지는 입자이며 ‘화학반응’을 생성 조건으로 요구하지 않았다.

그러나, ‘2차 먼지’를 정의하는데 있어서는 세 가지 조건을 규정하였는데, 첫 번째는 “희석이나 응축이 충분히 일어난 후에 일반대기 조건에서”이며, 두 번째는 “화학반응”을 통해 만들어지며, 세 번째는 “배출원으로부터 풍하 방향으로 어느 정도 이격된 거리에서 만들어진다”는 점이다. 이를 정리하여 Table 4에 나타내었다.

즉, 미국 연방정부에서는 배출원에서 배출되는 먼지 중 ‘응축성 먼지’와 ‘2차 먼지’의 개념을 법규에 생성기작부터 개별적인 항목으로 규정하고 있었으며, 이에 그치지 않고 대기오염물질 배출 사업장의 인허가 사항에도 먼지를 여과성 먼지와 응축성 먼지를 구분하거나 이를 합산한 1차(primary) 먼지로 적용하고 있으므로[57],

우리나라에서도 향후 먼지 발생량 산정, 거동 해석, 삭감정책 등에서 응축성 먼지와 2차 먼지는 별개의 항목으로 구별하여 각각 적용할 필요성이 있을 것이다.

한편, 미국 연방법에서 응축성 먼지의 정의를 규정함에 있어서, 굴뚝 내부에서는 증기 상태(vapor phase)로 규정하였는데, ‘가스상’이라는 개념이 기존에는 무리가 없었을 수도 있으나, 최근 이루어지고 있는 연구들에 의하면 정확히 응축성 먼지의 개념을 정의하는데 있어서는 한계점이 발생할 수도 있다고 판단되었다.

이렇게 말할 수 있는 이유는 두 가지이다. 첫 번째는 이후에도 계속 기술하겠으나, 기존(2000년대 이전)에 응축성 먼지의 개념이나 생성기작이 연구되던 무렵에는 주로 ‘응축성 먼지’라 하면 유기성(organic) 에어로졸에 가중치가 기울어 있는 경향을 보여주고 있었으나, 최근(2000년대 이후)에 수행된 응축성 먼지 연구 결과들에서는 질산염이나 황산염, 암모늄처럼 무기성(inorganic) 먼지가 과거에 비하여 상대적으로 비중 있게 다루어지고 있기 때문이었다. 일반적으로 대기 환경 분야에서 질산염, 황산염, 암모늄 등을 ‘가스’라고 부르지는 않을 것이다.

두 번째는 미국의 응축성 먼지에 대한 연구는 그 역사가 1980년대까지 거슬러 올라가는데, 응축성 먼지에 대한 미국 정부 차원에서의 관리가 90년대부터 시작되다 보니[58], 그 당시에는 배출원에서 발생하는 PM-2.5의 개념도 생소할 정도로 현재 대비 정밀한 측정 기술이 없었기 때문에 법률적인 표현도 ‘입자상’이 아니면 ‘증기상’(또는 가스상)으로 표현할 수 밖에 없었기 때문이 아닐까 하고 추정하는 것이었다.

따라서, 미국의 법규에서 유기성 에어로졸의 비중이 높게 여겨지던 과거에는 ‘증기상’(vapor phase)이라는 표현이 적용될 수 있었겠으나, 무기성(inorganic) 성분의 비중에 대한 연구가 활발해진 최근의 연구 동향을 고려한다면, 입자의 크기가 작다고 하여 nitrate 혹은 sulfate를 ‘증기상’이라고 규정하기에는 무리가 발생하므로, 향후 우리나라의 ‘응축성 먼지’의 개념 정의를 함에 있어 ‘증기상’이라는 표현은 수정 보완 작업이 필요할 것으로 사료되었다.

4.3-2. 미국의 응축성 먼지 배출량 인벤토리

문헌 기준으로 미국에서 응축성 먼지에 대한 측정/분석 연구를 시작한 것은 1980년대이지만[59], 미국 EPA 차원의 배출량 인벤토리 제도에서 응축성 먼지 개념을 고려한 것은 1994년이였다[58].

1994년 미국 EPA는 먼지 배출량 인벤토리 요구서에서 먼지 배출량을 PM-2.5의 개념은 없이 PM-10만으로 산정하였고, 먼지 배출량의 개념을 현재 미국 연방법규처럼 1차 먼지를 여과성 먼지와 응

Table 4. Definitions of emitted PM concepts in USA Federal law(40 CFR 51.50)

Item	Definition
Filterable PM2.5 or Filterable PM10	Particles that are directly emitted by a source as a solid or liquid at stack or release conditions and captured on the filter of a stack test train. Filterable PM2.5 is particulate matter with an aerodynamic diameter equal to or less than 2.5 micrometers. Filterable PM10 is particulate matter with an aerodynamic diameter equal to or less than 10 micrometers.
Condensable PM	Material that is vapor phase at stack conditions, but which condenses and/or reacts upon cooling and dilution in the ambient air to form solid or liquid PM immediately after discharge from the stack. Note that all condensable PM, if present from a source, is typically in the PM2.5 size fraction and, therefore, all of it is a component of both primary PM2.5 and primary PM10.
Primary PM2.5	The sum of filterable PM2.5 and condensable PM
Primary PM10	The sum of filterable PM10 and condensable PM
Secondary PM	Particles that form or grow in mass through chemical reactions in the ambient air well after dilution and condensation have occurred . Secondary PM is usually formed at some distance downwind from the source . Secondary PM should not be reported in the emission inventory and is not covered by this subpart.

축성 먼지로 나누지도 않았다.

대신, 먼지 배출량을 1차 먼지(primary PM), 응축성 먼지(condensable PM), 2차 먼지(secondary PM)로 구분하였는데, 흥미로운 것은 현재 미국 연방법에서는 응축성 먼지를 정의할 때, ‘증기상’(vapor phase)이라는 표현이 쓰이고 있지만, 1994년에는 ‘증기상’이라는 표현이 없었고, 단지 ‘굴뚝 내부에서는 입자상이 아니다’라는 표현만이 존재하였다. 또한 그 당시에도 PM-10 먼지 배출량에서 중요한 부분을 차지하기 때문에, 응축성 먼지도 배출량 인벤토리에 포함되어야 한다고 강조하였다.

미국 EPA는 먼지 배출량 인벤토리 요구서에서 응축성 먼지를 포함할 것을 규정한 것은 1994년이었으나, 미국 국가 오존 및 먼지 대기질 농도 유지를 위한 가이드라인에서 사용하는 먼지 배출량 인벤토리에 ‘응축성 먼지’가 인벤토리의 대상으로 규정된 보고서가 보이기 시작한 것은 1999년인 것으로 파악되었다[60]. 위 문헌에서, 미국 EPA는 PM-2.5 National Ambient Air Quality Standards (NAAQS)를 달성하기 위하여, PM-10과 PM-2.5의 1차 먼지 배출량(응축성 먼지 포함)과 SOx, NOx, VOCs, 암모니아 배출량 인벤토리를 작성해야 한다고 규정되어 있었는데, 이 문헌에서는 1994년 배출량 인벤토리 요구서와는 달리 1차 먼지를 여과성 먼지와 응축성 먼지로 구분하고 있었고, 2차 먼지는 배출량 인벤토리에서는 보고하지 않는 것으로 규정하였다.

US EPA는 배출량 목록에 응축성 미세먼지 배출량을 보고하도록 의무화하였으며[61], 굴뚝에서의 응축성 미세먼지 측정방법 표준화를 위해 ‘Method 202’를 공표하였다[62]. Method 202는 여과성 미세먼지(PM filterable) 측정법인 Method 201A에 비해 매우 늦은 2010년에 공표되었고, 2014년에는 해당 측정법의 현장 적용 지침을, 2016년에 Best Practice Handbook이 발간되는 등 현장에서 필요를 충족시키는데 난항을 겪었다[63].

4-3-2. 미국의 응축성 먼지 배출계수

미국의 대기 배출원의 대기오염물질 배출계수는 AP-42로 Table 5와 같이 관리하고 있다[64].

미국의 AP-42는 우리나라 CAPSS의 분류체계와 유사한 특징을 갖고 있는데, 각 Chapter 아래에는 세부적인 배출계수를 나타내기 위한 하위 분류체계들이 존재한다.

각 하위 분류체계별로 수록된 문서에는 먼지, NOx, SOx VOCs와

Table 5. Stationary Point and Area Sources categories in US EPA AP-42

Chapter	Title
Chapter 1	External Combustion Sources
Chapter 2	Solid Waste Disposal
Chapter 3	Stationary Internal Combustion Sources
Chapter 4	Evaporation Loss Sources
Chapter 5	Petroleum Industry
Chapter 6	Organic Chemical Process Industry
Chapter 7	Liquid Storage Tanks
Chapter 8	Inorganic Chemical Industry
Chapter 9	Food and Agricultural Industries
Chapter 10	Wood Products Industry
Chapter 11	Mineral Products Industry
Chapter 12	Metallurgical Industry
Chapter 13	Miscellaneous Sources

같은 일반대기오염물질 뿐만 아니라 중금속, PAHs, 알데히드류와 같은 유해물질의 배출계수도 제공하는데, 우리나라의 ‘국가대기오염물질 산정방법 편람’상의 먼지 배출계수와 다른 점은 미국 EPA의 AP-42의 먼지 배출계수는 여과성 먼지와 응축성 먼지를 구분하여 배출계수를 제공하고 있다는 점이다.

4-4. 일본의 응축성 먼지 관리

4-4-1. 일본의 응축성 먼지 관련 법규 및 정책

일본에서는 아직 법규의 형태로 응축성 먼지를 규정하고 있지는 않았다. 현재로는 국가 인벤토리 상으로도 응축성 먼지를 관리하고 있지 않다고 말할 수 있을 것이다.

일본은 우리나라의 환경부에 해당하는 ‘환경성’ 주관으로 미소입자상물질 등 전문위원회(微小粒子状物質等専門委員会)를 2013년3월부터 2021년 11월까지 13차에 걸쳐 진행하였다[65]. 이 중 응축성 먼지와 관련된 내용을 소개하면 다음과 같다.

제 9회 위원회에서 PM-2.5 등 대기오염물질 배출인벤토리의 정비상황 소개와 관련지식을 수집/정리하는 방법을 소개하는 자리에서 응축성 입자와 관련된 현존하는 지식 등이 충분히 확보되어 있지 않고 있는데, 장래 대기질 시뮬레이션의 정밀화 등을 고려하는 입장에서 유용하다고 판단되므로 PM-2.5 인벤토리에 반영하는 것을 검토하는 것으로 보고하였다[66].

응축성먼지 측정과 관련하여, 2007년부터 2017년까지 일본 환경성과 지방공공단체가 실시한 측정사례를 Table 6에 나타내었다. 측정 방법은 모두 공기희석법인 ISO25597(가스 냉각온도 42도 이하, 희석배율 20배 이상, 체류시간 10초 이상)에 의해 진행되었다[67].

2016년에 일본은 환경성에 소속된 종합환경정책국, 환경보건부, 지구환경국 공동으로 PM-2.5 예측정밀도 향상을 위한 모델 및 발생원 데이터의 개량과 에어로졸의 휘발특성 평가를 수행한 결과를 보고하였다[68].

이 문헌에 근거하면 일본의 정부차원에서 바라보는 응축성 먼지의 연구범위는 반(semi)휘발성유기화합물 등의 유기성분(organic

Table 6. Condensable PM data in various sources measured by Japan MOE etc

Sources	(FPM + CPM) / FPM	
Boiler	Bunker oil	1.2 ~ 5.5 (n = 11)
	Gas	0.6 ~ 3.0 (n = 3)
	Wood	0.6 ~ 8.2 (n = 3)
	Coal	0.6 (n = 1)
Sintering furnace (steel)	0.7 ~ 1.4 (n = 3)	
Glass smelting furnace	0.6 (n = 1)	
Drying furnace	Aggregate (LNG)	0.8 ~ 14.0 (n = 3)
	Aggregate (bunker)	0.5 ~ 2.3 (n = 3)
Waste incinerator	Wood	0.6 ~ 0.8 (n = 2)
	General	0.5 ~ 62.0 (n = 4)
	Industrial	0.8 (n = 1)
	Sewage cake	1.6 ~ 11.0 (n = 2)
Petroleum heating furnace	0.9 ~ 24.0 (n = 3)	
Diesel engine	0.8 ~ 1.2 (n = 5)	
Gas turbine	2.2 ~ 27.0 (n = 3)	
Gas engine	4.3 ~ 7.0 (n = 2)	
Electric furnace	0.7 (n = 1)	
Cokes furnace	1.2 (n = 2)	

materials)에 관심을 갖는 경향을 보이고 있었다.

해당 연구진들은 대기질 모델링의 입력자료로서 동경도가 측정된 응축성 먼지 데이터를 활용하여 반휘발성 성분을 포함하는 유기 에어로졸과 반휘발성 유기화합물의 합(OA + SVOC)의 배출량을 추계하였다. 주목할 점은 일본 연구에서 응축성 먼지 관련해서는 1차 배출 유기에어로졸(Primary Organic Aerosol) 카테고리에 편성하여 연구를 진행하는 성향을 보여주고 있었으나, 1차 먼지 배출량 중 응축성 먼지와 질소산화물 혹은 황산화물과의 상관성에 대해서는 논의하지 않고 있었다.

유기 성분(organic) 응축성 먼지 연구 결과를 구체적으로 기술하면, 응축성 먼지를 고려하지 않은 배출량 인벤토리에서 유기 에어로졸(Organic Aerosol)의 배출량은 PM-2.5 배출량(여과성)의 20% 정도이던 것에 비하여 희석보정 후 유기 에어로졸(Organic Aerosol)의 배출량은 5배 증가함을 보였다.

이는 대규모 고정 연소 발생원에서의 배출량 측정이 고온 조건 하에서 실시되기 때문에, 기존 배출량 인벤토리가 유기 에어로졸(OA) 배출량을 과소평가하게 됨을 시사하는 것이며, 희석보정 후에는 1차 PM-2.5 배출량에서 유기 에어로졸이 중요한 발생원이라는 것을 의미한다. 희석보정을 고려하는 작업에 의하면 대규모 고정 연소 배출원 기원의 유기에어로졸 배출량이 22배 증대함을 보고하였다.

한편 일본 국립환경연구소는 고정발생원으로 배출되는 먼지 배출량 추계에 응축성 입자를 고려하는 방안으로 다음과 같이 3가지 방법을 제안하였다[69].

- ① 종래와 같이 일률적인 응축성 입자 비율을 적용
- ② 측정결과를 해석하여, PM-2.5 농도와 응축성 입자 비율의 상관관계를 나타내는 회귀식을 산출
- ③ 응축성 입자의 가스 입자 분배는 열역학으로 설명될 수 있으므로, PM-2.5 농도와 배출가스 온도로부터 열역학 모델을 이용하여 산출

4.5. 유럽의 응축성 먼지 관리

4.5-1. 유럽의 응축성 먼지 관련 법규

영국 환경부는 대기 분야 인허가 업무에 사용할 목적으로 굴뚝 배출량 모니터링 절차에 대한 기준을 명기하고 있었다. 여과성 먼지에 대해서는 EN 13284-1 방법을 준용하도록 규정하였으며, 응축성 먼지에 대해서는 희석법(ISO 25597)을 준용하도록 규정하고 있었다[70].

4.5-2. 유럽의 응축성 먼지 관리 관련 정책

최근 유럽 연소 먼지 배출량 인벤토리에서는 여과성 먼지와 응축성 먼지의 존재를 구별하여 언급하고 있으며, 응축성 먼지 배출계수는 유럽 버전을 사용하지 않고 미국 AP-42의 배출계수를 사용하고 있었다[71].

유럽의 대기배출량을 연구하는 CLRTAP (Convention on the Long Range Transboundary Air Pollution)이나 EMEP (European Monitoring and Evaluation Programme)에 관련된 전문가 그룹에서는 응축성 물질과 먼지 배출량 문제에 대하여 다음과 같은 다섯 가지 논점을 가지고 고민하고 있었다[72].

- ◎ 어떠한 배출원 카테고리에서 응축성 물질이 비중있게 다루어지는가?
- ◎ 국가 등의 규모에서 수행하는 배출량 인벤토리에는 어떠한 내용이 담겨 있는가?

◎ 유럽의 관련자들은 응축성 유기물질 배출량이 배출량 인벤토리에서 누락되는 것을 바라는가?

◎ 샘플의 수가 충분하지 않은 배출계수 데이터로 대규모 배출원으로부터 배출되는 응축성 증기가 대기중 먼지 농도에 미치는 기여도를 합리적으로 예측할 수 있겠는가?

◎ 배출량 인벤토리 분야 혹은 화학수송 모델에서 응축성 물질을 고려하거나 제외하는 방향을 결정할 수 있는 실질적인 접근법을 제안할 수 있을까?

한편, 유럽도 일본과 마찬가지로 응축성 물질은 주로 유기물질에 비중을 두는 경향을 보이고 있었다.

위와 같은 고민을 해결하기 위하여, CLRTAP과 EMEP의 전문가 그룹은 다음의 사항에 중점을 두고 연구를 진행하고 있었다.

◎ 인간의 건강과 생태환경을 보호하고 향상시키기 위하여 합리적이고 최적화된 배출량 할당이 가능한 유럽 내 국가들에서 범용적으로 사용할 수 있는 배출량 데이터를 가능한 신속하게 준비해야 함

◎ 몇몇 국가들은 기존의 관례를 변경하는데 어려움이 존재함

◎ 학술적 측면에서 과학자들은 대기 중 먼지 농도에 대하여 응축성 먼지와 2차 먼지의 실체를 정의하고 정량화할 수 있는 중장기 연구 프로젝트를 원함

◎ EU를 구성하고 있는 각 국가들의 상황을 고려하여 물리적 시간, 과학적 신뢰성, 비용 측면 등을 고려하여 접근할 수 있는 단기, 및 장기 정책 수행 계획에 대한 요구

유럽의 먼지 인벤토리 전문가들이 위와 같이 응축성 먼지에 대하여 신중한 접근법을 택하고 있는데, 2000년대 중반에 미국에서 실행에 옮겼던 응축성 먼지를 고려한 먼지 인벤토리 결과를 목도했던 경험이 있었으나, 그 이후로 20여년 동안 별다른 관련 제도의 변동이 없는 상태였다.

2004년에 유럽연합은 덴마크 국립환경연구소를 중심으로 한 “Assessment of the effectiveness of European air quality policies and measures” 프로젝트를 진행하였다[73].

Table 7에 1990년, 2001년, 2020년의 미국과 유럽의 PM-10과 PM-2.5 배출량을 나타내었다. PM-10 기준으로 1990년에는 유럽이 미국보다 배출량이 높았으나, 2001년이 되면 미국의 배출량이 유럽 배출량의 1.46배 정도로 증가했다. 그 이유는, 유럽의 경우에는 1990년과 2001년 모두 여과성 먼지만을 인벤토리의 대상으로 산정하였으나, 미국의 경우에는 1990년 인벤토리에서는 여과성 먼지만을, 2001년에는 여과성 먼지에 응축성 먼지까지 고려하여 인벤토리를 작성했기 때문이었다[73].

2001년 배출량 추계 분석 이후, 미국은 먼지 인벤토리에서 응축성 먼지를 계속 고려하고 있고, 유럽은 아직도 응축성 먼지를 공식적인 먼지 인벤토리에 고려하고 있지 못하였다.

분명한 것은 현재 응축성 먼지를 PM-2.5 인벤토리 범주에 넣고 있지 못하는 유럽의 전문가들도 응축성 먼지가 대기질에 미치는 영향이 적지 않음을 인지하고 있으며, 응축성 먼지 인벤토리 도입 문

Table 7. Energy industry emissions of PM-10 and PM-2.5 in the USA and EU

year	PM-10 10 ³ tons		PM-2.5 10 ³ tons	
year	USA	EU	US	EU
1990	267	461	110	N/A
2001	601	409	515	75
2020 (predicted)	N/A	55	N/A	37

제를 합리적인 방법으로 해결하기 위하여 내부적으로 고민이 많다는 점이다.

4-5-3. 노르웨이의 응축성 먼지 관리 관련 정책

노르웨이에서는 응축성 먼지의 배출원으로 가정부문의 연료 연소에서 배출되는 PM2.5 중 응축성 먼지에 대한 이슈에 관심이 많음을 보고하였다.

먼지는 인간의 건강에 비중 있는 오염물질로 작용하며, 인간의 조기사망에 주요한 원인이기 때문에, 가정부문에서 목재 연료의 연소는 대기분야 인벤토리에 포함될 필요성이 요구된다. 가정부문의 연소 배출원은 먼지 배출량에 있어서 주요 항목임에도 불구하고 일반적으로는 응축성 먼지를 인벤토리에 포함하고 있지 않지만, 노르웨이는 응축성 먼지가 매우 중요하다는데 동의하며, 건축 생산 규정(Construction Production Regulation 305/2011) 및 에코디자인 규칙(Ecodign Regulation(EU) 2015/1185)과 연관되어 있는 CEN/TC 295(RESIDENTIAL SOLID FUEL BURNING APPLIANCES; 가정용 고정연료 연소 기기) 규정에 대한 기술 기구와 유럽 표준 위원회 차원에서 논의가 시작되기를 노르웨이 전문가들은 원하고 있었다[74].

CEN/TC 295 차원에서 먼지 측정 기준이 개선되면 응축성 먼지를 포함하면서 실질적인 먼지 배출계수 및 배출량 인벤토리 산정의 토대가 이루어질 것이며, 화목난로의 먼지 배출량 삭감에도 기여할 것이다. 삭감된 결과는 삭감 전후의 먼지 배출계수를 대기질 모델 혹은 건강영향 예측 모델에 삭감 전후 배출원의 배출계수를 입력자료로 사용한 결에 의하여 확인할 수 있을 것이다[74].

노르웨이 환경청은 현재 국가 배출량 인벤토리에서 화목연료 연소에 대한 응축성 먼지를 포함한 PM-10과 PM-2.5 배출계수를 Table 8과 같이 보고하고 있었다[75].

4-5-4. 스웨덴의 응축성 먼지 관리 관련 정책

스웨덴 환경연구소는 2014년에 고온의 굴뚝 내부 배기 가스를

포집하여 희석터널을 통과시키면, 배기가스는 희석이 되면서 냉각 과정을 거치면 다량의 먼지가 발생하는데, 이는 반휘발성유기화합물(semi-VOCs)이 기여했기 때문으로, 희석법에 의하여 측정된 응축성 먼지를 포함 총먼지량은 여과성 먼지량에 비하여 연소 조건에 따라 2~10배까지 커질 수 있음을 인지하고, 스웨덴의 여과성 먼지 배출계수와 EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook에서 권고하는 응축성 먼지 배출계수를 검토하여 Table 9와 같이 보고하였다[76].

2019년 이전 스웨덴의 먼지 배출계수에서는 응축성 물질이 포함되어 있지 않았기 때문에, 스웨덴과 노르웨이의 먼지 배출계수 사이에 커다란 차이가 보였으나, 2019년부터 스웨덴 먼지 배출계수에 응축성 성분을 포함시켰다. 스웨덴의 응축성 먼지 측정은 노르웨이의 시험기준인 Norwegian standard 3058을 따른다[72].

2022년에 스웨덴 환경 보호청은 에너지 생산, 정유, 철강, 금속생산 등 각 산업 업종뿐 아니라, 가정부문 등 비산업 연소를 포함한 연소 활동에 의하여 발생하는 먼지 배출량 인벤토리에서 응축성 먼지를 포함하여 보고하였다[77].

4-6. 중국의 먼지 배출량 관리

중국은 아직 정부 차원에서의 응축성 먼지 배출량을 관리하고 있지 않는 것으로 보인다.

중국 환경보호부는 국가발전개혁위원회, 국가에너지국과 공동으로 2015년 12월 11일에, 「석탄화력발전 초저배출 및 에너지절약 개조의 전면 실시를 위한 업무방안(全面實施燃煤電廠超低排放和節能改造工作方案)」의 발표를 통해 중국 정부는 2020년까지 달성을 목표로 하는 초저배출 기준의 이행을 지시하였다. 동 방안에서는 2020년까지 개조조건을 갖춘 중국 내 전체 석탄화력발전소가 기준 산소함량 6% 조건 하에서 연기. 먼지, 이산화황, 질소산화물의 배출농도를 각각 10, 35, 50 mg/m³을 초과하지 않도록 하는 초저배출 기준을 제정하였다. 그리고 동 방안은 석탄화력발전 설비의 유형에 따라

Table 8. Emission factors for firewood in Norway (involved Condensable PM)

Pollutant	Category (g/kg dry matter)		
	Open Fireplaces	Ovens (~1997)	Ovens (1998~)
PM-10	17.0	22.2	13.1
PM-10 large cities	17.0	17.1	12.0
PM-2.5	16.4	21.6	12.7
PM-2.5 large cities	16.4	16.5	11.6

Table 9. Comparison of PM2.5 emission factors for firewood in Sweden (2015) and EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook (unit; g/GJ)

Source	Fuel	Sweden (2015) (not CPM involved)	EMEP/EEA Guidebook (CPM involved)
Commercial boiler	wood	150	-
boiler	wood logs	150	-
boiler	wood chips	30	-
boiler	pellets	100	-
Stove	pellets	30	-
Stove	wood logs	150	-
boilers < 50 kW	wood	-	470
Stove	wood	-	740
Energy efficient stoves	wood	-	370
Advanced / ecolabelled stoves and boilers	wood	-	93
stoves and boilers	pellets	-	29

초저배출 기준의 준수 규정을 달리하고 있는데, 신규 설비에 대해서는 초저배출 기준을 즉시 준수할 것을 규정하고 있다. 한편, 기존 석탄화력발전 설비의 경우 2020년까지 초저배출 기준의 계획을 조기 달성하고자 하는 목적에서 베이징, 텐진, 허베이, 랴오닝, 상하이, 장쑤, 저장, 푸젠, 산둥, 광둥, 하이난(海南) 등 11개 성시가 포함된 동부지역은 2017년까지 달성하고, 산시(山西), 지린(吉林), 헤이룽장(黑龍江), 안후이(安徽), 장시(江西), 허난, 후베이, 후난 등 8개 성이 포함된 중부지역은 2018년까지 달성할 것을 목표로 하며, 내이멍구(內蒙古), 광시(廣西), 충칭, 쓰촨, 구이저우, 윈난(雲南), 시짱(西藏), 산시(陝西), 간쑤, 칭하이(青海), 닝샤, 신장(新疆) 등 12개 지역이 포함된 서부지역은 2020년까지 달성할 것을 목표로 규정하였다. 또한, 동 방안에서는 각 성·자치구·직할시의 환경보호 유관부처, 국유전력기업인 국가전망공사(SGCC: State Grid Corporation of China)와 남방전망공사(CSG: China Southern Power Grid), 그리고 5대 국유발전사인 화녕(華能), 다탕(大唐), 화전(華電), 귀톈(國電), 국가전력투자(國家電投)그룹 등에 초저배출 기준의 순조로운 이행과 조기 달성을 지시하였다.

「화력발전소 대기오염물질 배출기준(GB13223-2011)」, 「중점지역 대기오염 특별배출제한 기준치」, 2020년까지 달성 목표의 초저배출 기준 등에 근거한 중국의 석탄화력발전 대기오염물질 배출허용기준과 각각의 기준이 규정하고 있는 세부 내용에 대하여, 석탄화력발전 대기오염물질 배출에 대한 중국 정부당국의 규제는 중점 규제지역 설정을 통한 강화된 규제 이행과 동부·중부·서부 등 단계별 규제 이행 등의 권역별 규제의 실시와 함께 발전설비에 대해서 기존 건설 및 신축 등으로 구분된 유형별 규제 실시 등으로 보다 세분화되어 왔으며, 대기오염물질 배출허용 기준 역시 Table 10과 같이 강화되고 있음을 확인할 수 있었다[78].

그러나, 이는 어디까지나 여과성 먼지에 국한된 배출허용기준으로 보이며, 중국은 아직 정부 차원에서 응축성 먼지 관리를 하고 있지 않은 것으로 분석되었다.

4-7. 우리나라 정부의 응축성 먼지 관리 현황

우리나라 정부는 여타 아시아 국가들과 마찬가지로 아직 응축성 먼지를 공식적으로 국가배출량 인벤토리에 넣어 관리하고 있지는 않고 있다. 다만, 응축성 먼지 도입을 위한 타당성을 분석하기 위하여 이벤트성 연구가 이루어지고 있는데, 현재 정부 차원에서 응축성

Table 10. PM emission standards of coal power plants in China

Year	PM standard (mg/m ³)
GB13223-96 (1996)	200
GB13223-2003 (2003)	50
GB13223-2011 (2011)	30
hot-spot special emission standard (2014)	20
ultra-low emission standard to satisfy until 2020 (2015)	10

Table 11. Condensable PM researchs in Korean government

Researcher	contents
Korean NIER (2014-2015)	A Study on the Improvement of Fine Particles Measurement Method in Flue Gas
Korean The Board of Audit and Inspection (2019)	A study on domestic and foreign industrial air pollutants management cases
Korean NIER (2020)	A study on the Emission Characteristics of FPM and CPM in Power Plants
Korean NIER (2022)	A study on creating mechanism of Fine PM by cases in air emission sources
Korean NAEIRC (2022)	A possibility and feasibility study on condensable PM emission inventories

먼지 관련하여 수행한 연구를 정리하면 Table 11과 같다.

2014년부터 2015년까지 국립환경과학원에서는 ‘배출가스 중 미세먼지 측정법 개선에 관한 연구’ 연구를 통하여 LNG, 경유, 중유, 석탄 등의 연료 연소 시 발생하는 여과성 먼지와 응축성 먼지의 농도와 성분을 정량화하여 보고하였고[79, 50], 2019년 감사원에서는 미국의 신설 오염원 허가(New Source Review Permitting) 시, 먼지 (PM, PM-10, PM-2.5) 배출허용기준은 응축성 먼지(CPM)도 포함하여 함께 고려하도록 요구하였음을 보고하였다[80].

2020년 국립환경과학원은 학계에 보고한 ‘발전시설에서의 여과성 및 응축성 먼지 배출특성 연구’ 논문을 통하여 석탄과 가스를 연료로 사용하는 발전소에서 배출하는 여과성 먼지와 응축성 먼지를 정량화 하였는데, 가스 화력발전소에서의 응축성 먼지 중량 농도가 여과성 먼지 중량 농도보다 51배 높음을 기술하여[81], 동 기관에서 2015년에 보고한 53.3배와 유사한 결과를 나타내어[2], LNG 연소로 발생하는 응축성 먼지 중량 농도 측정 결과가 재현성이 있음을 추론할 수 있었다.

이처럼 응축성 먼지의 중요성이 국내외적으로 이슈화됨으로 인하여, 우리나라 국립환경과학원은 2020-2022년에 걸쳐 대기배출 시설의 미세먼지 형태별 생성기작 연구(I-II)를 통하여 응축성 먼지의 발생 기작 규명과 응축성 먼지 측정 관련 국가 공정시험기준 마련을 위한 연구를 수행 중이다[82].

또한 국가미세먼지정보센터에서는 ‘응축성 미세먼지(CPM) 배출량 산정 가능성·타당성 검토’ 연구를 통하여, 배출원별 응축성 미세먼지 배출량 산정 방법 검토, 응축성 미세먼지 배출량 산정을 위한 데이터 수집/시험 산정/평가, 응축성 미세먼지 배출량 산정 가이드라인 작성 및 정책효과 분석 반영 방안 마련, 응축성 미세먼지 배출량 산정 정확도 향상을 위한 연구 로드맵 작성 등의 내용을 연구하였다[83].

4-8. 학계의 응축성 먼지 최근 연구동향

학계의 응축성 먼지에 대한 최근 연구 동향은 첫 번째, 배출원별 배출량 측정분석과 생성메커니즘 규명 부분과 두 번째, 배출량 저감 부분으로 나눌 수 있었다.

우선, 측정 분석과 생성메커니즘 규명 부분과 관련하여, 김종호 등은 응축성 먼지의 성분은 석탄과 중유 연소 발전시설에서는 유기 성분 대비 무기 성분이 각각 약 7배, 약 88배로 많게 측정되었으나, LNG 가스터빈은 무기 성분과 유기 성분의 비율이 비슷하게 측정됨을 보고하였다[84]. 전기준 등은 동일한 배출원에 대하여 여과성 먼지와 응축성 먼지를 각각 측정하여 합산한 양과 여과성 먼지와 응축성 먼지를 구분하지 않고 1차 먼지(Primary PM)형태로 측정했을 때의 양이 상이함을 보고하였다[85]. 이는 정부가 향후 우리나라가 응축성 먼지 배출량을 국가의 공식적인 먼지 인벤토리 통계체계에 기록하고 관리할 때 해결해야 할 두 가지 중요한 숙제가 발생하였음을 의미한다. 그 숙제라고 하는 것은 첫 번째, 현재 학계나 각국

정부에 알려져 있는 여과성 먼지와 응축성 먼지의 측정 분석 방법이 대부분 배기가스 중 혼합되어 있는 여과성 먼지와 응축성 먼지를 전처리 과정을 통하여 각각 분리하여 포집과 분석을 실시하고 있는 실정에서, 전기준 등의 연구 결과와 같이 여과성 먼지와 응축성 먼지를 분리하지 않고 혼합한 채로 측정된 결과가 전처리 과정을 통하여 각각 별도로 측정된 결과의 합산량 대비 높게 분석되었다. 배출원에서 배출되는 대기오염물질을 누락 없이 관리해야 한다는 원칙과 취지의 입장으로 바라본다면 응축성 먼지의 배출량은 1차 먼지(Primary PM) 형태로 별도 분리 없이 포집과 분석이 이루어진 후, 그 결과로부터 여과성 먼지의 분석 결과를 차감하는 것이 합리적이고 정확한 분석결과를 얻게 되어 국가의 먼지 관리 정책에 보다 정확하고 효율적으로 기여할 수 있다고 본 연구진은 판단하였다. 두 번째로, 현재 응축성 먼지는 강제응축법과 공기희석법 등 측정 방법이 국가별로 그리고 연구자 별로 상이하게 채택되어 운영되고 있으므로 향후 먼지 배출량 관리를 위한 국가 간 국제 협력 등의 업무에서 같은 표나 그래프 위에서 서로 다른 측정 분석 방법에 의해 도출된 응축성 먼지 배출량 비교 등의 업무를 수행할 때, 상이한 방법에 의해 산정된 응축성 먼지 배출량 간의 차이를 상쇄하기 위한 변환계수 등의 연구가 필요하다고 본 연구진은 생각하였다.

배출량 저감 부분과 관련하여, Peng 등은 촉매산화 등의 방지기술을 활용한 유기 응축성 먼지의 제어에 대해 보고하였으며[86], Zhang 등은 습식 스크러버에서 제거되는 응축성 먼지에 대해 보고하였다[87].

5. 응축성 먼지를 고려한 우리나라 대기 환경용량의 재설정 방향 고찰

2025년 3월 25일에 개정되어 시행이 된 대한민국 정부의 대기환경보전법 제3조 6항은 ‘먼지’의 정의를 ‘먼지는 여과성(濾過性) 먼지와 응축성(凝縮性) 먼지를 포함한다.’라고 개정하였으며, 제3조 6의 2항에서 ‘여과성 먼지란 대기오염물질배출시설에서 고체 또는 액체 상태로 배출되는 먼지를 말한다.’라고 하였으며, 제3조 6의 3항에서 ‘응축성 먼지란 대기오염물질배출시설에서 기체 상태로 배출된 이후 대기 중에서 고체 또는 액체 상태로 즉시 응축되는 먼지를 말한다.’라고 개정하였다. 또한 제7조 4의 2항에서 ‘환경부장관은 대기 중에 존재하는 물질의 위해성을 심사·평가를 하는 경우 대기오염물질배출시설을 통하여 대기 중으로 배출되는 응축성 물질의 위해성을 심사·평가하기 위한 기준과 방법·절차 등을 마련하여야 한다.’라고 추가하였다.

이는 향후 대한민국의 대기환경 중 먼지 관리 정책에 중요한 부분을 차지하고 있는 각 배출원들의 배출량을 숫자와 단위로 정량화할 때, 지금까지 고려하고 있지 않았던 응축성 먼지를 이제는 고려해야 함을 대한민국 정부가 국법으로 정한 것이다. 따라서, 지금까지 여과성 먼지만을 고려하여 수립하였던 배출량 산정방법에 대한 대규모의 수정이 불가피하다고 판단하여 본 연구진은 이에 ‘reset’이라는 표현을 사용하였으며, reset의 방향을 간단하게 표현하면 지금까지 고려되고 있지 않았던 배출원과 배출량의 추가 정량화라고 말할 수 있으며, 지금의 상태에서 구체적인 사례로 들 수 있는 것 중의 하나가 주로 연소 배출원에서 배출되고 있는 ‘응축성 먼지’일 것이다.

2025년 3월 25일에 개정되어 시행이 된 대한민국 정부의 대기환경

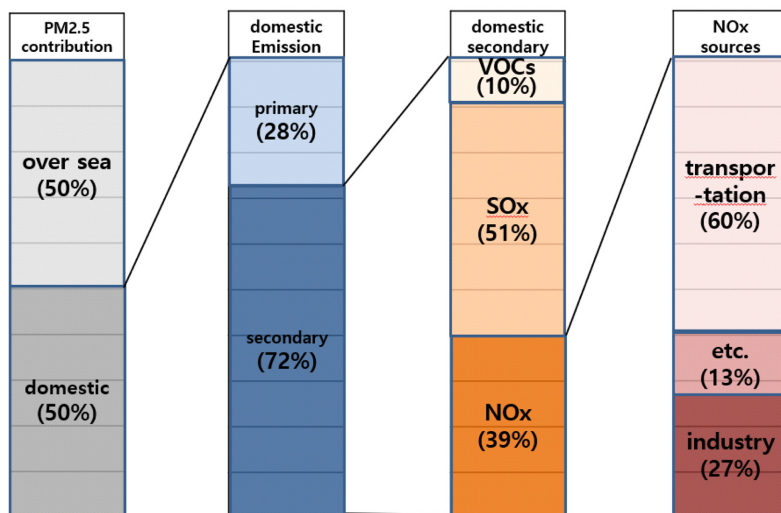
보전법 제3조 6항은 ‘먼지’의 정의를 ‘먼지는 여과성(濾過性) 먼지와 응축성(凝縮性) 먼지를 포함한다.’라고 개정하였으며, 제3조 6의 2항에서 ‘여과성 먼지란 대기오염물질배출시설에서 고체 또는 액체 상태로 배출되는 먼지를 말한다.’라고 하였으며, 제3조 6의 3항에서 ‘응축성 먼지란 대기오염물질배출시설에서 기체 상태로 배출된 이후 대기 중에서 고체 또는 액체 상태로 즉시 응축되는 먼지를 말한다.’라고 개정하였다. 또한 제7조 4의 2항에서 환경부장관은 대기 중에 존재하는 물질의 위해성을 심사·평가를 하는 경우 대기오염물질배출시설을 통하여 대기 중으로 배출되는 응축성 물질의 위해성을 심사·평가하기 위한 기준과 방법·절차 등을 마련하여야 한다.’라고 추가하였다.

이는 향후 대한민국의 대기환경 중 먼지 관리 정책에 중요한 부분을 차지하고 있는 각 배출원들의 배출량을 숫자와 단위로 정량화할 때, 지금까지 고려하고 있지 않았던 응축성 먼지를 이제는 고려해야 함을 대한민국 정부가 국법으로 정한 것이다. 따라서, 지금까지 여과성 먼지만을 고려하여 수립하였던 배출량 산정방법에 대한 대규모의 수정이 불가피하다고 판단하여 본 연구진은 이에 ‘reset’이라는 표현을 사용하였으며, reset의 방향을 간단하게 표현하면 지금까지 고려되고 있지 않았던 배출원과 배출량의 추가 정량화라고 말할 수 있으며, 지금의 상태에서 구체적인 사례로 들 수 있는 것 중의 하나가 주로 연소 배출원에서 배출되고 있는 ‘응축성 먼지’일 것이다.

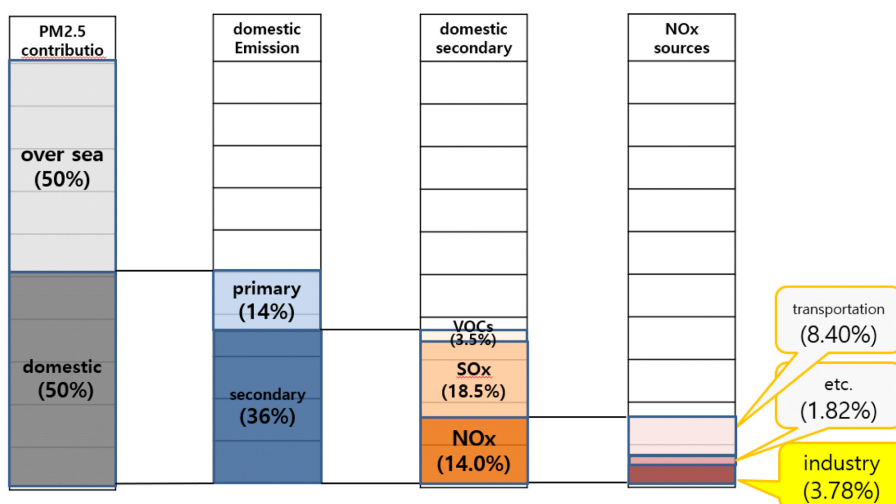
우리나라 대기 환경 용량의 개념을 재설정 하려면 기존 우리나라 대기 환경 용량에 대한 정량화 시도가 필요할 것이다. 이에 대한 근거 자료는 우리나라 정부에서 공식적으로 보고한 자료를 활용하기로 하였다. 이를 활용하여 PM-2.5 대기 환경 용량을 정량화 하였으며, 그 중 산업 분야의 NOx 배출량으로 인한 2차 먼지의 기여도를 계산한 사례를 Fig. 2에 나타내었다.

제3차 대기환경종합계획에 따르면, 우리나라 국민에게 노출되고 있는 먼지의 기원이 절반은 국외에서, 절반은 국내에서 배출된다고 보고하였다. 2017년 9월26일에 정부에서 보고한 미세먼지 926대책에서는 국내 배출량 중 1차 먼지는 28%, 2차 먼지는 72%로 보고하였으며, 2차 먼지 중 기여도를 VOCs는 10%, SOx는 51%, NOx는 39%로 보고하였다[3,53]. 그리고, 다시 제3차 대기환경종합계획에서 국내 NOx 배출량의 수송, 산업, 기타 부문의 기여도를 고려하여 각 가정별로 총 배출량을 100%로 놓고 상대스케일로 표현한 막대 그래프가 Fig. 2a이며, 이를 절대 스케일로 나타낸 막대 그래프가 Fig. 2b 이다. 즉, 국가가 공식적으로 보고한 자료에 의하면, 우리나라 국민에게 노출되는 PM-2.5를 100%라고 가정했을 때, 국내 산업 분야에서 배출하는 NOx 배출량이 차지하는 기여도는 3.78%라고 말할 수 있을 것이다.

2021년의 우리나라 연평균 PM-2.5 농도는 $18 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, 2027년과 2032년도의 PM-2.5 목표 농도는 각각 $13 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다[3]. Fig. 2의 각 배출원별 1차, 2차 PM-2.5의 기여도를 근거로 하여 2021년의 PM-2.5 현황농도 및 2027년 2032년의 저감 목표를 Fig. 3에 그래프로 나타내었다. 제3차 대기환경종합계획에 따르면, 사업장 오염물질 배출허용 총량을 2021년 대비 2027년에 50% 이상 축소하겠다고 발표하였다[3]. 2021년 대비 2027년의 PM-2.5 농도 저감 비율이 약 28%인데, 사업장 오염물질 배출허용 총량을 2021년 대비 2027년에 50% 이상 축소하겠다는 것이다. 그런데, 이를 실행하려면 합리적인 근거와 명분이 필요할 것인데, Fig. 2에서 설명



a. Graphs of relative scale contributions on each PM-2.5 source



b. Graphs of absolute scale contributions on each PM-2.5 source

Fig. 2. Analysis of PM-2.5 atmospheric environmental capacity on the contribution of NOx from industrial part in Republic of Korea.

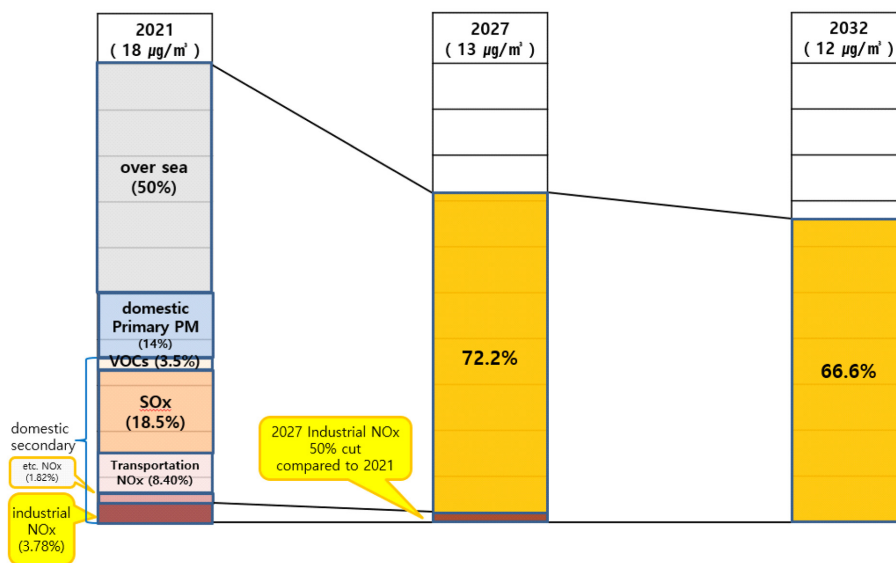


Fig. 3. Korean goals of PM-2.5 concentrations in 2027 and 2032 concerning the secondary PM-2.5 emission and reduction ratios from industrial part.

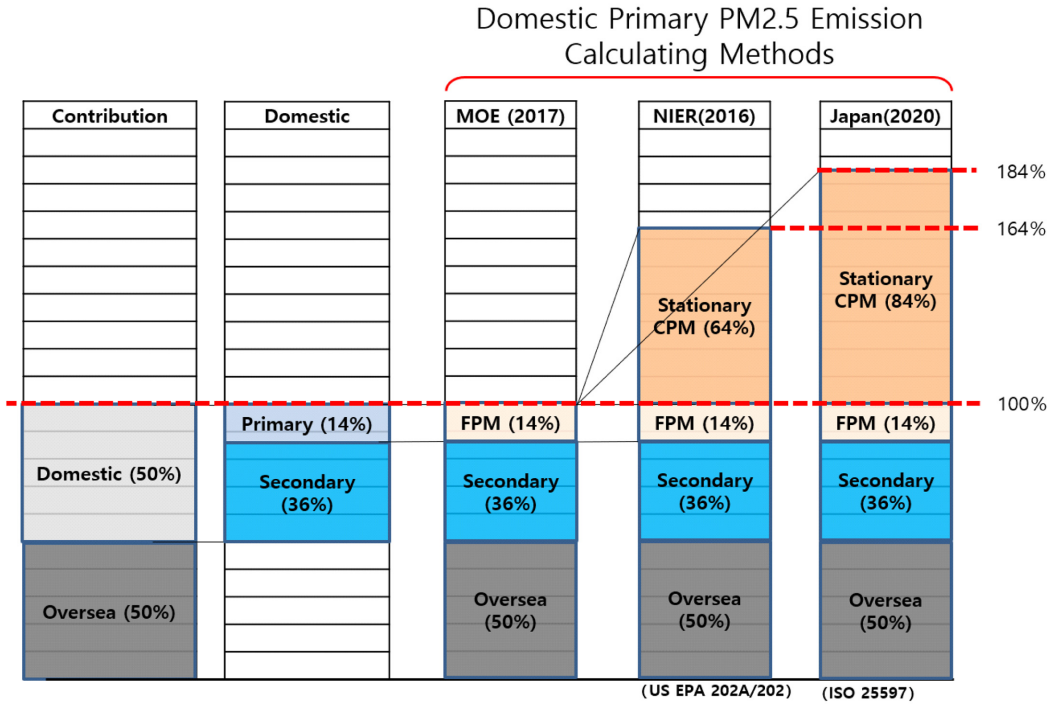


Fig. 4. The contributing ratio analysis on PM-2.5 sources by various aspects in Korea.

하였듯이, 우리나라에 영향을 미치는 PM-2.5 배출 요인 중 산업 분야에서 배출하는 NOx 배출량이 차지하는 기여도는 3.78%로서 여타 요인에 비하여 상대적으로 비중이 압도적으로 크다고 말하기도 어렵다. 오히려 상대적 비중을 고려한다면 국외 배출원이 제일 크다고 말할 수 있을 것이다.

Fig. 4에 몇 가지 버전의 PM-2.5 배출원 기여도 분석에 대한 막대그래프를 나타내었다.

Fig. 4의 첫 번째 막대그래프는 제3차 대기환경종합계획에 따라 50%는 국외, 50%는 국내로부터 기인한다고 보고한 것을 나타낸 것이며, 두 번째 막대 그래프는 2017년 9월26일에 정부에서 보고한 미세먼지 926대책에서 국내 배출량 중 1차 먼지는 28%, 2차 먼지는 72%로 보고한 것을 나타낸 것이다. 세 번째 막대 그래프는 두 번째 막대그래프에서 1차 먼지로 표현한 부분은 여과성 먼지를 뜻하는 것이므로 이 부분을 여과성 먼지(Filterable Particulate Matters)로 나타낸 것이다. 이는 2017년 당시, 아직 우리나라에서는 공식적으로 응축성 먼지 배출량을 산정하지도 통계에 수록하지도 않았기 때문이었다.

네 번째와 다섯 번째 막대그래프는 응축성 먼지를 고려했을 때의 우리나라 PM2.5 배출원 기여도를 나타낸 것으로, 현재 우리나라에서는 PM2.5 배출량에서 응축성 먼지를 공식적으로 산정하지 않고 있기 때문에, 응축성 먼지 배출량을 고려하게 되면 기존 배출량 기여도의 통합인 100%를 초과하게 되는 그래프의 형태를 보이게 된다.

이 중, 네 번째 막대그래프는 고정오염원에 대한 응축성 먼지 배출량을 미국의 강제응축법(EPA 201a/202 method)으로 우리나라 국립환경과학원이 보고한 배출원별 응축성먼지 농도를 이입학 등이 우리나라 CAPSS의 활동도를 활용하여 배출량을 산정했었던 방법을 사용하여 계산한 결과로서 기존 우리나라 배출량보다 64% 초과하는 것으로 나타났다[54].

다섯 번째 막대그래프는 고정오염원에 대한 응축성 먼지 배출량을 일본이 사용하여 보고했었던[67] 희석법(ISO25597 method)으로 측정된 응축성 먼지 결과를 우리나라 CAPSS에 반영한 결과를 나타낸 것이다. 미국의 강제 응축법에 근거하여 계산한 배출량을 고려하면 기존 우리나라 배출량보다 64% 초과하는 것으로 나타났으며, 일본이 사용했었던 희석법(ISO25597)에 의하여 계산한 배출량을 고려하면 기존 우리나라 배출량보다 84% 초과하는 것으로 나타났다.

6. 결 론

우리나라 대기 환경 용량의 재설정 방향을 찾기 위하여 지금까지 국내의 대기 환경 용량(atmospheric environmental capacity)과 대기 환경 수용 능력(atmospheric environmental carrying capacity)의 개념과 입자상 물질의 생성 mechanism에 대해 살펴보았으며, 최근 국회 등 사회적으로 이슈화되고 있는 응축성 먼지 배출량을 고려한 대기 환경 용량 재설정 방향 정립 사례에 대한 고찰을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었으며, 이를 위해 필요한 파라미터들을 정리하여 Fig. 5에 나타내었다.

첫 번째, 국내 대기 환경 관리는 대기 환경 부하(atmospheric environmental stress)가 대기 환경 기준을 만족하는 수준을 유지하도록 사업장을 비롯한 배출원의 방지기술 효율을 강화하는 등의 형태로 경제 발전에 합당하는 대기 환경 수용 능력(atmospheric environmental carrying capacity)의 수준을 배출 허용 기준 강화, 총량 규제, 통합환경관리 등의 방법으로 대응하려고 노력해 왔으나, 중국을 비롯한 동아시아의 일부 주변국들은 Zhou and Zhou 등이 기술한 바와 같이 경제 발전을 우선하여 대기 환경 용량(atmospheric environmental capacity)을 초과하는 대기 환경 부하(atmospheric

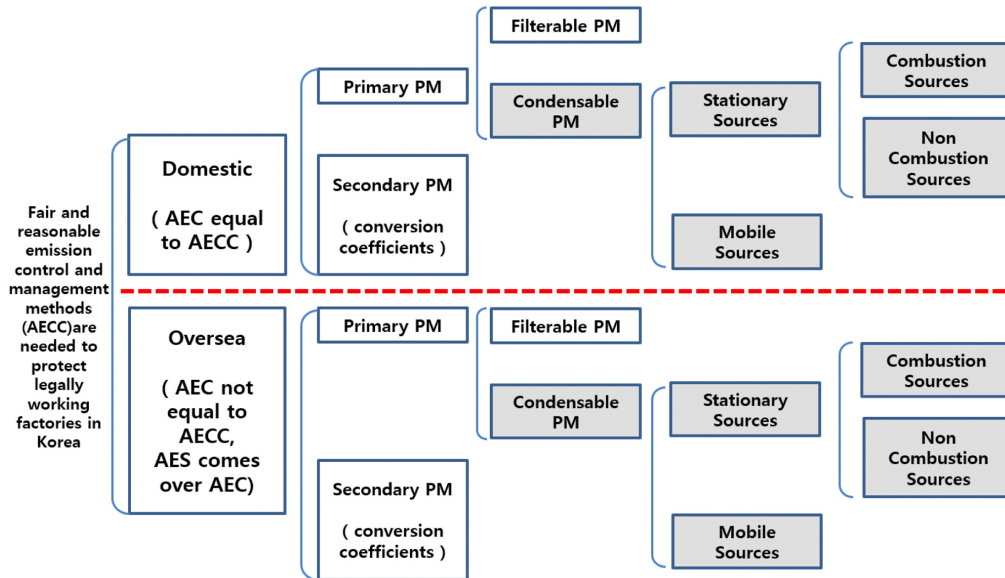


Fig. 5. Parameters for resetting PM-2.5 Atmospheric Environmental Capacity and PM-2.5 Atmospheric Environmental Carrying Capacity in Korea.

environmental stress) 상태를 용인하여 왔다[4]. 그 결과로, 2020년대 들어 국내 대기오염물질 배출 사업장들의 경우, 수십 년간 유지해 오던 굴뚝 배출 허용 기준을 강화하여 배출량을 제어하는 방법만으로는 더 이상 사업장의 배출량을 획기적으로 저감하는 데에 무리가 오게 된 상황임에도 불구하고, 우리나라의 PM-2.5 환경 기준 달성률은 그다지 만족스럽지 못한 결과를 낳고 있는 현실을 우리는 경험하고 있는 것이다.

따라서, 대한민국의 PM-2.5 환경 기준 달성률을 높이기 위해서는 우선, 우리나라 대기 환경 용량(atmospheric environmental capacity)과 대기 환경 수용 능력(atmospheric environmental carrying capacity)을 꼼꼼하게 재설정하고, 우리나라의 사업장을 비롯한 국내 배출원에 대한 배출량 관리 방법의 강도에 준하는 국외 배출량 관리 방법이나 프로그램, 정책의 개발이 필요하다고 사료된다. 만약, 국외 배출원에 대해, 국내 배출원에 대한 강도에 준하는 정책을 실행에 옮기지 못할 불가피한 상황이 발생한다면 그 사유를 대한민국 국민에게 설명하고 이해를 구하고, 차후에 끊임없이 민/관/연 각 분야의 전문가들이 대한민국의 PM-2.5 환경 기준 달성률을 높이기 위한 대안을 모색하는 절차가 필요할 것이다.

두 번째, CPM 배출량을 포함하게 되면 국가 규모, 권역 규모, 혹은 광역시도 규모의 PM-2.5 배출량 통계가 일시적으로 늘어나 보이게 될 것인데, 이 상황은 행정부 혹은 누구의 잘못도 아니라는 것을 우리 모두 분명히 밝혀야 한다. 지금까지 우리나라의 대기 환경은 환경부 행정직 공무원들의 불철주야 대기 배출원 관리를 위한 끊임없는 노력이 없었다면 현재 수준으로 유지되지 못했을 것이다. 대기환경 보전법이 제정된 후 수십 년 동안, 대기환경 악화를 초래하는 여러 위기가 닥쳐올 때마다 매번 그 당시로서는 최첨단의 기술력을 가지고 최선을 노력으로 우리나라 대기환경을 지속가능 하도록 우리나라 환경부 행정직 공무원들은 문제를 해결해 왔던 것이다. 따라서, 이전과 마찬가지로 CPM 문제도 측정분석 기술이 발전하면서 기존에 인지하지 못했던 대기오염물질이 보이기 시작한 것이고, 이를 관리하기 위한 또 하나의 needs가 생겼을 뿐이므로 이를 슬기롭게

해쳐 나아가기 위해서는 어느 누구의 탓을 하기 보다는 민/관/연/이 다시금 머리를 맞대고 해결 방안을 찾아야 할 것으로 생각한다.

세 번째, 대기 관리를 위한 정책의 의사결정 지원을 위해 수행하는 대기질(air quality) 모델이나 수용(receptor) 모델 등의 배출량 자료에 응축성 먼지와 같은 새로운 배출량의 도입이 필요하다. 제3차 대기 환경종합계획에서 우리나라에 영향을 미치는 국외 배출량의 영향 정도는 LTP(Joint research project for Long range Transboundary Air Pollutants in Northeast Asia)의 자료를 인용하여 보고한 것으로[88] 우리나라, 중국, 일본 모두 응축성 먼지 배출량을 공식적으로 관리하지 않았고, 2019년 보고 자료의 CMAQ 모델링 결과는 응축성 먼지를 포함하지 않은 자료이므로 그 정확도에 의문을 가질 수 밖에 없을 것이다. 따라서, 향후 대기질 정책 수립 및 환경영향평가 등 각종 대기환경 정책의 의사결정 지원을 위한 모델링에 사용되는 배출량 자료는 모델링 결과의 정확도를 제고하기 위하여 배출량 자료 DB에 응축성 먼지를 포함해야 할 것이라고 사료되었다.

CPM 배출량을 대기질 모델에 반영했었던 구체적인 사례로서 일본의 모리노 등의 연구와 이임학 등의 연구 사례를 제시할 수 있다. 모리노 등은 일본 도시를 대상으로 대기질 모델인 CMAQ을 활용하여 유기성 먼지 거동에 대한 모사를 수행하는 과정에서 먼지 배출량을 여과성 먼지와 응축성 먼지로 구분하여 입력하였다. 대기 중 먼지 농도가 심해지는 겨울철의 경우, 여과성 먼지만을 고려하여 대기질 모델링을 수행하였을 경우에는 응축성 먼지를 고려하여 수행했을 경우에 비하여 관측값 대비 과소평가되는 결과를 보였기 때문에 대기질 모델링의 정확도를 제고하기 위해서는 응축성 먼지를 고려하는 것이 필요함을 증명한 사례이다[89].

모리노 등의 사례에서 사용한 모델은 화학반응을 모사하여 1차, 2차 먼지의 생성과 거동을 모사했었던 사례이다. 그런데, 우리나라의 환경영향평가 등에서 사용하는 대기질 모델은 모리노 등의 사례에서 사용했었던 CMAQ과 같은 화학반응을 모사할 수 있는 모델 외에도 환경영향평가 대상과 적용 상황의 조건에 따라 AERMOD나 Calpuff과 같이 화학반응을 모사에 한계가 있는 비반

응성 모델을 사용하기도 한다. 이 때, 비반응성 대기질 모델을 사용하는 환경영향평가 업무에서도 응축성 먼지를 포함해서 대기질 모델링을 수소가 당연히 발생할 것이므로 이입학 등은 비반응성 모델의 한 종류인 Calpuff을 활용한 여과성 먼지와 응축성 먼지의 대기질 모델링 결과를 보고하였다. 이입학 등은 우리나라 환경영향평가에서 사용하는 방법으로 Calpuff 모델을 활용하여 대기질 모델을 수행하여 여과성 먼지 배출량만을 고려한 모델링 수행 결과 대비 여과성 먼지와 응축성 먼지 배출량을 함께 고려한 모델링 수행 결과가 관측값과의 비교에서 편차가 적어, 응축성 먼지 배출량의 고려를 통하여 대기질 모델링 정확도의 개선을 확보했음을 보고하였다[90].

우리나라는 국가 차원의 배출원 분류체계(CAPSS 등)에서 먼지의 경우에는 여과성 먼지만을 산정하여 관리하고 있다. 따라서, 먼지 배출량 인벤토리의 완성도를 높이기 위해서는 응축성 먼지의 배출량에 대한 인벤토리 분류체계를 추가할 필요성이 있는데, 구체적으로 말하면 다음과 같이 제안할 수 있다.

현재 먼지 배출량은 TSP, PM-10, PM-2.5 등 3가지로 구분하고 있다. 여기에서, TSP, PM-10, PM-2.5 카테고리 별로 여과성 먼지와 응축성 먼지를 각각 나누어 추가로 구분할 것을 제안한다. 다음으로, 작성된 먼지 배출량의 활용도는 통계표나 보고서 상의 나열에만 그치지 않고 미래 대기질을 예측하거나 대기환경용량을 계산하거나 각 배출원의 각급 정책 효과를 정량화하기 위한 대기질 모델링의 입력자료로 활용된다. 이 때, 사용되는 대기질 모델의 종류가 비반응성 모델일 경우에는 상관이 없겠으나, CMAQ 처럼 화학반응 모듈을 탑재하고 있어서 2차 먼지 생성 등을 모사할 수 있는 모델이라면 입력되는 먼지 자료도 모델링 입력조건에 만족하도록 화학적인 특성을 그 배출량 정보를 탑재할 필요성이 있다. 그러므로 CAPSS 배출량에 기록이 되는 먼지 정보는 기존의 여과성 먼지 외에 새로이 추가되는 응축성 먼지도 배출원 카테고리 별로, 사용연료별로, 화학적 조성을 프로파일 형태로 표현되어질 필요성이 있다. 이 때 당연히 여과성 먼지와 응축성 먼지 배출량 화학조성 DB의 프로파일은 국가에서 사용하는 대기질 모델(예를 들면 CMAQ)이 요구하는 먼지 입력자료 프로파일 형식을 만족하도록 설계할 것을 제안한다.

References

1. Korean Ministry of Environment, "10-Year Comprehensive Plan for Air Quality Improvement," *Korean Ministry of Environment* (2005).
2. Korean Ministry of Environment, "2nd Comprehensive Plan for Air Quality Improvement ('16~'25)," *Korean Ministry of Environment* (2015).
3. Korean Ministry of Environment, "3rd (2023-2032) Comprehensive Plan for Air Quality Improvement," *Korean Ministry of Environment* (2022).
4. Yejing Zhou, Jingxuan Zhou, "Urban Atmospheric Environmental Capacity and Atmospheric Environmental Carrying Capacity Constrained by GDP-PM2.5," *Ecological Indicators*, **73**, 637-652, ISSN 1470-160X(2017).
5. Ministry of Government Legislation, "Basic Environmental Policy Act," *National Law Information Center* (2024).
6. JeJu regional government, "Establishing Environmental Indicators for Eco-friendly Development of Jeju Island," JeJu regional government (1997).
7. Lee, C. W. and Oh, Y. S., "Study on the Environmental Capacity Assessment of Seoul City," *Seoul Institute* (1999).
8. Lee, S. J., Kang, D. S., Han, and S. G., "Assessment and Application of Carrying Capacity for the Sustainability Policy," *Korean Environmental Institute* (2020).
9. Naito, M., "Environmental Capacity," *Environmental Information Science*, (内藤正明. 1987. 環境容量論. 環境情報科學, Japanese) (1987).
10. Cho, K. D., Choi, S. J. and Jyoong, J. T., "Environmental Capacity assessment in Incheon Area," *Inchon Regional Environmental Technology Development Center* (2003).
11. Kim, J. S., Park, I. S., Lee, S. J., Kim, M. S., Kim, R. H., Yoo, C., "Methodology of Atmospheric Environmental Critical Loads for the Management of Urban Air Quality," *Proceeding of the 35th Meeting of Korean Society for Atmospheric Environment* (2003).
12. Jang Y. G., Kim, H. J., Song, G. B. and Kim, K., "A Study on the Atmospheric Environmental Capacity in Siheung and Aansan Area," *Proceeding of the 39th Meeting of Korean Society for Atmospheric Environment* (2005).
13. Park, S. C., Yeon, I. J., Cho, B. R., Cho, J. S. and Kang, B. W., "A Study on the Atmospheric Environmental Capacity in Chungju Area," *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, **24**(1), 122-127(2008).
14. Feng, Z., Sun, T., Yang, Y. and Yan, H., "The Progress of Resources and Environment Carrying Capacity: from Single-factor Carrying Capacity Research to Comprehensive Research," *Journal of Resources and Ecology*, **9**(2), 125-134(2018).
15. Maltus, T. R., "An Essay on the Principle of Population," *London: St Paul's Church-Yard* (1798).
16. Verhulst, P. F., "Notice Sur La Loi Que La Population Suit Dans Son Accroissement," *Correspondence Mathematique et Physique (Ghent)*, **10**, 113-121(1838).
17. Park, R. F. and Burgoss, E. W., "An Introduction to the Science of Sociology," *Chicago: The University of Chicago Press* (1921).
18. Hadwen, I. A. S. and Palmer, L. J., "Reindeer in Alaska," *Washington: US, Department of Agriculture* (1922).
19. William, V., "Road to Survival," *London: Victor Gollancz Ltd.* (1948).
20. Bishop, A. B., Fullerton, H. H., Crawford, A. B., Chambers, M. D. and Mckee, M., "Carrying Capacity in Regional Environmental Management," *Washington Environmental Research Center U.S. EPA* (1974).
21. Zeng, W. H. and Yang, Y. M., "Environmental Carrying Capacity: A Key to the Coordination of the Development of Population, Resources and Environment," *China Popul. Resour. Environ.* **1**(2), 33-37(1991).
22. Kenneth Arrow, Bert Bolin, Robert Costanza, Partha Dasgupta, Carl Folke, C. S. Holling, Bengt-Owe Jansson, Simon Levin, Karl-Göran Mäler, Charles Perrings, David Pimente, "Economic Growth, Carrying Capacity, and the Environment," *Ecological Economic*, **15**(2), 91-95(1995).
23. Saveriades, A., "Establishing the Social Tourism Carrying Capacity for the Tourist Resorts of the East Coast of the Republic of Cyprus," *Tour. Manag.* **21**(2), 147-156(2000).

24. Furuya, K., "Environmental Carrying Capacity in An Aquaculture Ground of Seaweeds and Shellfish in Sanriku Coast," *Bull. Fish. Res. Agency*, 65-69(2004).
25. Enrico Borgogno Mondino, Enrico Fabrizio, Roberto Chiabrando, "A GIS Tool for the Land Carrying Capacity of Large Solar Plants," *Energy Procedia*, **48**, 1576-1585(2014).
26. Salvatore Martire, Valentina Castellani, Serenella Sala, "Carrying Capacity Assessment of Forest Resources: Enhancing Environmental Sustainability in Energy Production At Local Scale," *Resources, Conservation and Recycling*, **94**, 11-20(2015).
27. Ye, W. H., Mei, F. J. and Guan, B. R., "Theory of Environmental Carrying Capacity and Its Scientific Significance," *Res. Environ. Sci.* **5**(S1), 108-111(1992).
28. Zeng, W. H., Wang, H. D., Xue, J. Y., Ye, W. H. and Guan, B. R., "Theory of Environment Carrying Capacity and Its Application of Environmental Planning on Meizhou Bay," *China Environ. Sci.* **18**(Suppl), 70-73(1998).
29. Liu, Z. R., Wang, C. W., Hao, J. M., Su, B. L. and Ma, Y. L., "Measuring Environmental Carrying Capacity," *J. Basic Sci. Eng.* **17**(1), 49-61(2009).
30. Wang, C. W., Liu, Z. R. and Ge, C. F., "Theoretical Research of Environmental Carrying Capacity and Its Practice," *China Environmental Science Press*, Beijing (2010).
31. Zhang, Y.-J. and Hao, J.-F., "The Evaluation of Environmental Capacity: Evidence in Hunan province of China," *Ecological Indicators*, **60**, 514-523(2016).
32. U.S. Environmental Protection Agency, "Air Quality Criteria for Particulate Matter Volume I of III," *U.S. Environmental Protection Agency*(1996).
33. Whitby, K. T. and George M. S., "California Aerosols - Their Physical and Chemical Characteristics," *Adv. Environ. Sci. Technol.*, Vol. 9(1980).
34. Wilson, W. E. and Suh, H. H., "Fine Particles and Coarse Particles: Concentration Relationships Relevant to Epidemiologic Studies," *Journal of the Air & Waste Management Association*, **47**(12), 1238-1249(1997).
35. Danish EPA, "Health Effects Assessment of Exposure to Particles from Wood Smoke," Environmental Project No. 1235; Danish Environmental Protection Agency: Copenhagen, Denmark (2008).
36. Shrestha, G., Traina, S. J. and Swanston, C. W., "Black Carbon's Properties and Role in the Environment: A Comprehensive Review," *Sustainability* **2**(1), 294-320(2010).
37. Kim, S. M., Lee, I. H., Lee, K. B., Kim, J. S. and Kwon, M. H., "Diameters Analyses of Fine Particles Emitted When Mackerels Cooked," *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, **33**(4), 361-369(2017).
38. Fan, C. W. and Zhang, J. J., "Characterization of Emissions From Portable Household Combustion Devices: Particle Size Distributions, Emission Rates and Factors, and Potential Exposures," *Atmospheric Environment*, **35**, 1281-1290(2001).
39. Lance Wallace, Fang Wang, Cynthia Howard-Reed, and Andrew Persily, "Contribution of Gas and Electric Stoves to Residential Ultrafine Particle Concentrations between 2 and 64 nm: Size Distributions and Emission and Coagulation Rates," *Environmental Science & Technology* **42**(23), 8641-8647(2008).
40. L'Orange, C., Volckens, J. and DeFoort, M., "Influence of Stove Type and Cooking Pot Temperature on Particulate Matter Emissions From Biomass Cook Stoves," *Energy for Sustainable Development*, **16**, 448-455(2012).
41. Abt, E., Suh, H. H., Allen, G. and Koutrakis, P., "Characterization of Indoor Particle Sources: A Study Conducted in the Metropolitan Boston Area," *Environmental Health Perspectives*, **108**, 35-44(2000).
42. Tiwari, M., Sahu, S. K.; Bhangare, R. C., Yousaf, A. and Pandit, G. G., "Particle Size Distributions of Ultrafine Combustion Aerosols Generated From Household Fuels," *Atmospheric Pollution Research*, **5**, 145-150(2014).
43. Shuangde Li, Jiajia Gao, Yiqing He, Liuxu Cao, Ang Li, Shengpeng Mo, Yunfa Chen, Yaqu Cao, "Determination of Time- and Size-dependent Fine Particle Emission with Varied Oil Heating in an Experimental Kitchen," *Journal of Environmental Sciences*, **51**, 157-164(2017).
44. Buonanno, G, Morawska, L. and Stabile, L., "Particle Emission Factors During Cooking Activities," *Atmospheric Environment*, **43**, 3235-3242(2009).
45. Lee, J. B., "A Study on Characteristics of Particulate Matter Generated from the Under-fired Char Broiling of Meat," *A Doctor's Thesis, Department of Environmental Engineering Graduate School, University of Seoul* (2012).
46. Knutson, E. O. and Whitby, K. T., "Aerosol Classification by Electric Mobility: Apparatus, Theory, and Applications," *Journal of Aerosol Science*, **6**, 443-451(1975).
47. Monks, P. S., Ravishankara, A. R., von Schneidmesser, E., and Sommariva, R., "Opinion: Papers That Shaped Tropospheric Chemistry," *Atmos. Chem. Phys.*, **21**, 12909-12948(2021).
48. Finlayson-Pitts, B. J. and Pitts, J. N. Jr., "Chemistry of the Upper and Lower Atmosphere : Theory, Experiments, and Applications," (1999).
49. Slade, J. H., "Biogenic Aerosol Production in the Great Lakes Region," *In Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science Purdue University* (2009).
50. Korean National Institute of Environmental Research, "A Study on the Improvement of Fine Particles Measurement Method in Flue Gas(II)," *Korean National Institute of Environmental Research* (2015).
51. Korean National Institute of Environmental Research, "Fine PM (PM-10 & PM-2.5) Sampling and Analysis Methods from Stack Emitted," *Korean National Institute of Environmental Research* (2011).
52. Korean National Institute of Environmental Research, "Investigation Research for Fair Testing Standards of fine PM from Stacks," *Korean National Institute of Environmental Research* (2012).
53. Korean Government, "Comprehensive Plan for Fine PM management," *Korean Government* (2017).
54. Lee, I. H., Choi, D. S., Ko, M. J. and Park, Y.-K., "PM Management Methods Considering Condensable PM Emissions from Stationary Sources in Seoul and Incheon," *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, **33**(4), 319-325(2017).
55. Choi, D. S., Youn, J.-S., Lee, I. H., Park, Y.-K., Choi, B. J. and Jeon, K.-J., "Analysis of National PM2.5 (FPM and CPM) Emissions by Past, Current, and Future Energy Mix Scenarios in the Republic of Korea," *Sustainability* **11**(16), 4289(2019).
56. USA ECDR System, "Title 40 § 51.50 What Definitions Apply

- to This Subpart?, Code of Federal Regulation,” *USA ECDCR System* (2022).
57. U.S. Environmental Protection Agency RBLC Data Base, “RBLC Basic Search,” <https://cfpub.epa.gov/rblc/index.cfm?action=Search.BasicSearch&lang=en> (2024).
 58. U.S. Environmental Protection Agency, “PM-10 Emission Inventory Requirements,” *U.S. Environmental Protection Agency* (1994).
 59. Guy B. Oldaker, “Condensable Particulate and Its Impact on Particulate Measurement,” *Entropy Environmentalists, Inc.*(1980).
 60. U.S. Environmental Protection Agency, (1999) “Emissions Inventory Guidance for Implementation of Ozone and Particulate Matter National Ambient Air Quality Standards (NAAQS) and Regional Haze Regulations,” *U.S. Environmental Protection Agency* (1999).
 61. U.S. Environmental Protection Agency, “Air Emissions Reporting Requirements,” *U.S. Environmental Protection Agency*, **80**, 8787(2008).
 62. U.S. Environmental Protection Agency, “Field Evaluation of an Improved Method for Sampling and Analysis of Filterable and Condensable Particulate Matter,” EPA-HQ-OAR-2008-0348(2010).
 63. Kim, B.-U., Kim, H. C. and Kim, S., “Review of Particulate Matter Management in United States,” *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, **34**(4), 588-609(2018).
 64. U.S. Environmental Protection Agency, “AP-42: Compilation of Air Emissions Factors,” U.S. Environmental Protection Agency (2022).
 65. Japan Ministry of Environment, “微小粒子状物質等専門委員会 議事次第資料・議事録一覧,” <https://www.env.go.jp/council/07air-noise/yoshi07-08.html>, 2022.07.05. accessed(2022).
 66. Japan Ministry of Environment, “微小粒子状物質等専門委員会(第9回)PM2.5等大気汚染物質排出インベントリの整備状況,” <https://www.env.go.jp/council/07air-noise/y078-09b.html>, 2022.07.05. accessed(2022).
 67. Japan Ministry of Environment, “微小粒子状物質等専門委員会 (第9回)国内のPM2.5対策に係る取組の状況,” <https://www.env.go.jp/council/07air-noise/y078-09b.html>, 2022.07.05. accessed (2022).
 68. Japan Ministry of Environment, “Improvement of a Simulation Model and Emission Data and Evaluation of the Aerosol Volatilization Characteristic for the Improvement of the Accuracy of PM2.5 Forecast,” *Japan Ministry of Environment* (2016).
 69. Japan National Institute for Environmental Studies, “PM Emission Inventory Concerning Condensable PM,” *Japan National Institute for Environmental Studies* (2021).
 70. UK Environment Agency, “Guidance Monitoring Stack Emissions: Techniques and Standards for Periodic Monitoring,” *UK Environment Agency*, Last updated 24 September 2021, (2021).
 71. European Environment Agency, “EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook 2019,” *European Environment Agency* (2019).
 72. Hamilton, J., “How Should Condensables Be Included in PM Emission Inventories Reported to EMEP/CLRTAP?,” *European Monitoring and Evaluation Programme*, 72 p.(2020).
 73. Europe Union, “Assessment of the Effectiveness of European Air Quality Policies and Measures,” *Europe Union*, (2004).
 74. Working Group on Strategies and Review Fifty-eighth session, “Informal Document Submitted by Norway - Reporting of Condensable Part in Emissions of Particulate Matter,” *Working Group on Strategies and Review Fifty-eighth Session* (2020).
 75. Norwegian Environment Agency, “Informative Inventory Report (IIR). Norway Air Pollutant Emissions 1990-2020,” *Norwegian Environment Agency* (2022).
 76. Swedish Environmental Research Institute, “Swedish Air Pollutant Emission Scenarios to 2050,” *Swedish Environmental Research Institute* (2014).
 77. Swedish Environmental Protection Agency, “Informative Inventory Report Sweden 2022 Submitted under the Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution,” *Swedish Environmental Protection Agency* (2022).
 78. Choi, M. U., “An Overview on China's Recent Air Pollution Regulation and Management Policy,” *Environmental and Resource Economics Review*, **27**(3), 569-611(2018).
 79. Korean National Institute of Environmental Research, “A Study on the Improvement of Fine Particles Measurement Method in Flue Gas,” *Korean National Institute of Environmental Research* (2014).
 80. Korean The Board of Audit and Inspection, “A study on Domestic and Foreign Industrial Air Pollutants Management Cases,” *Korean The Board of Audit and Inspection* (2019).
 81. Korean Ministry of Environment, “Handbook of Business Place Air Pollutant Emission-Cap Management,” *Korean Ministry of Environment* (2020).
 82. Korean National Institute of Environmental Research, “A Study on Creating Mechanism of Fine PM by Cases in Air Emission Sources,” *Korean National Institute of Environmental Research* (2022).
 83. Korean National Air Emission Inventory and Research Center, “A Possibility and Feasibility Study on Condensable PM Emission Inventories,” *Korean National Air Emission Inventory and Research Center* (2022).
 84. Kim, J. H., Song, J. H., Kim, J. H., Lee, D., Yu, J., Yu, M. S., Jung, J. H. and Chun, S. N., “Concentration of Filterable and Condensable PM from Coal, Oil and LNG-fired Power Plants,” *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment?* **39**(4), (2023).
 85. Le, Y. T., Jung, Y. W., Kim, D. W. Jang, K. W., Kang, C., Kang, D. I., Bae, G. N., Youn, J. S., Park, P.-M. and Jeon, K. J., “Rethinking Primary Particulate Matter: Integrating Filterable and Condensable Particulate Matter in Measurement and Analysis,” *Science of the Total Environment*, 961 (2025).
 86. Zhengkang P., Hanxiao L., Chuxuan Z., Yunfei Z., WeiHu, Y. T., Xiaomin L., Zijian Z. and Xun G., “Potential Strategy to Control the Organic Components of Condensable Particulate Matter : A Critical Review,” *Environmental Science & Technology*, **58**, 7691-7709(2024).
 87. Zhuping, Z., Lu, W., Yuzhong, L., Tailin, C., Hongwei, Z., Zongwei, G. and Lejun, D., “Mechanism of Condensable Particulate Matter Transformation and Reduction in Flue Gas Scrubbing Process,” *Fuel*, **366**, 131255(2024).
 88. Joint Research Project for Long-range Transboundary Air Pollutants in Northeast Asia, “Summary Report of the 4th stage (2013-2017) LTP Project,” *Joint Research Project for Long-range Transboundary Air Pollutants in Northeast Asia* (2019).
 89. Yu, M., Satoru, C., Kiyoshi, T., Yuji, F., Tazuko, M., Katsuyuki, T., Kei, S. and Seiji, S., “Contributions of Condensable Particulate Matter to Atmospheric Organic Aerosol over Japan,” *Envi-*

ronmental Science & Technology, **52**, 8456-8466(2018).

90. Choi, D. S., Youn, J. S., Lee, I. H., Choi, B. J. and Jeon, K. J., "Considering Condensable Particulate Matter Emissions Improves the Accuracy of Air Quality Modeling for Environmental Impact Assessment," *Sustainability*, **13**(8), 4470(2021).

Authors

Im Hack Lee: Research Professor, School of Environmental Engineering, University of Seoul, Siripdaero 163, Dongdaemun-gu, Seoul, Republic of Korea, 02504, imhack@empal.com

Min Young Kim: Senior Researcher, Climate Environment Team, FITI Testing & Research Institute, Ochang-eup, Cheongwon-gu, Cheongju-si, Chungbuk, Republic of Korea, 28115, mykim@fiti.re.kr

Young-Kwon Park: Professor, School of Environmental Engineering, University of Seoul, Siripdaero 163, Dongdaemun-gu, Seoul, Republic of Korea, 02504, catalica@uos.ac.kr