



기술자료

미국의 초미세먼지 관리 제도 검토

Review of Particulate Matter Management in United States

김병욱, 김현철^{1,2)}, 김순태^{3),*}

미국조지아주환경청, ¹⁾미국국립해양대기청

²⁾메릴랜드대학 기후·위성연구소, ³⁾아주대학교 환경안전공학과

Byeong-Uk Kim, Hyun Cheol Kim^{1,2)}, Soontae Kim^{3),*}

Georgia Environmental Protection Division

¹⁾Air Resources Laboratory, National Oceanic & Atmospheric Administration

²⁾Cooperative Institute for Climate and Satellites, University of Maryland

³⁾Department of Environmental & Safety Engineering, Ajou University

접수일 2018년 6월 21일

수정일 2018년 7월 31일

채택일 2018년 8월 21일

Received 6 June 2018

Revised 31 July 2018

Accepted 21 August 2018

*Corresponding author

Tel : +82-(0)31-219-2511

E-mail : soontaekim@ajou.ac.kr

Abstract The objective of this study is to provide information for improving the domestic particulate matter (PM) management. To achieve the study goal, we reviewed the past and current practice of PM management in the United States (US). Our review includes the assessment about the philosophical foundation and effectiveness of PM management, systematic program implementation to reach desirable PM conditions, and steady development of analytical tools including photochemical air quality models. We noticed that the current US PM management approach has improved annual $PM_{2.5}$ concentrations 22-48% in various parts of the US in the last 16 years. In addition, we analyzed strengths and difficulties in the past US PM management implementation. Based on the results of our analyses, we propose key elements to establish more effective domestic PM management in the future than now: steady investment in technological innovations and close-communications between local governments and the central government at various stages of PM management.

Key words: Air Quality Management, $PM_{2.5}$, Clean Air Act, State Implementation Plan, Government Partnership

1. 서 론

본 기술자료는 미국의 초미세먼지(이하 $PM_{2.5}$; Particulate Matter of which diameter is equal to or less than $2.5 \mu m$) 관리 제도를 검토하여 향후 국내 $PM_{2.5}$ 관리를 위한 중장기 계획 작성에 필요한 정보 제공을 목적으로 한다. 미국의 경우 아리조나 등 사막이나 황무지와 인접한 지역을 제외하면 PM_{10} (Particulate Matter of which diameter is equal to or less than $10 \mu m$) 농도는 국가 차원의 중요 문제가 아니므로 본 자료의 주된 논의는 $PM_{2.5}$ 에 중점을 두었다.

제시하는 내용은 미국의 청정대기법(CAA; Clean Air Act)을 기반으로 관리 철학, 관리 체계, 측정, 배출

량, 배출 허가권 및 준법감시, 국제 협력 등을 포함한다. 특히 관리 체계 부분에서는 대기환경기준(NAAQS, National Ambient Air Quality Standards), 주 시행계획(SIP; State Implementation Plan, 이하 '시행계획'), 연방 시행계획(FIP; Federal Implementation Plan)을 포함하는 미국의 대기관리 제도의 전반적인 현황을 검토하였다. 이를 위해 미국의 $PM_{2.5}$ 관련 주요 제도와 기술(Technique)을 과거부터 현재까지 추적하였으며, 현재 논의 중인 주제들에 대해서도 가능한 범위 내에서 소개한다. 마지막으로 분석 도구 관련해서 연방 정부 또는 주 정부 차원의 시행계획 수립과 정량적 분석에 있어 중요한 수치모델 관련 정보도 언급하였다.

2. 본 론

2.1 미국의 PM_{2.5} 관리 실적

미국의 PM_{2.5} 관리가 과연 ‘성공적인가’에 대한 검토는 ‘미국의 PM_{2.5} 관리 사례 분석이 향후 국내 PM_{2.5} 관리에 있어 유용한가?’라는 기본적인 질문에 대한 대답이 될 것이다. 그림 1은 알래스카와 하와이를 제

외한 미국의 9개 지역에 대하여 PM_{2.5} 관리가 본격적으로 시행된 2000년부터 2016년까지 연평균 PM_{2.5} 농도 변화를 보인 것이다(US EPA, 2016a). 지역별로 다소 차이는 있으나, 16년간 연평균 PM_{2.5} 농도는 22~48% 정도 감소하였다. 특히 2000년 당시 농도가 상대적으로 높았던 지역(예: 남동부)에서의 농도 감소가 두드러지는 것은 미국 PM_{2.5} 관리 성과의 한 특

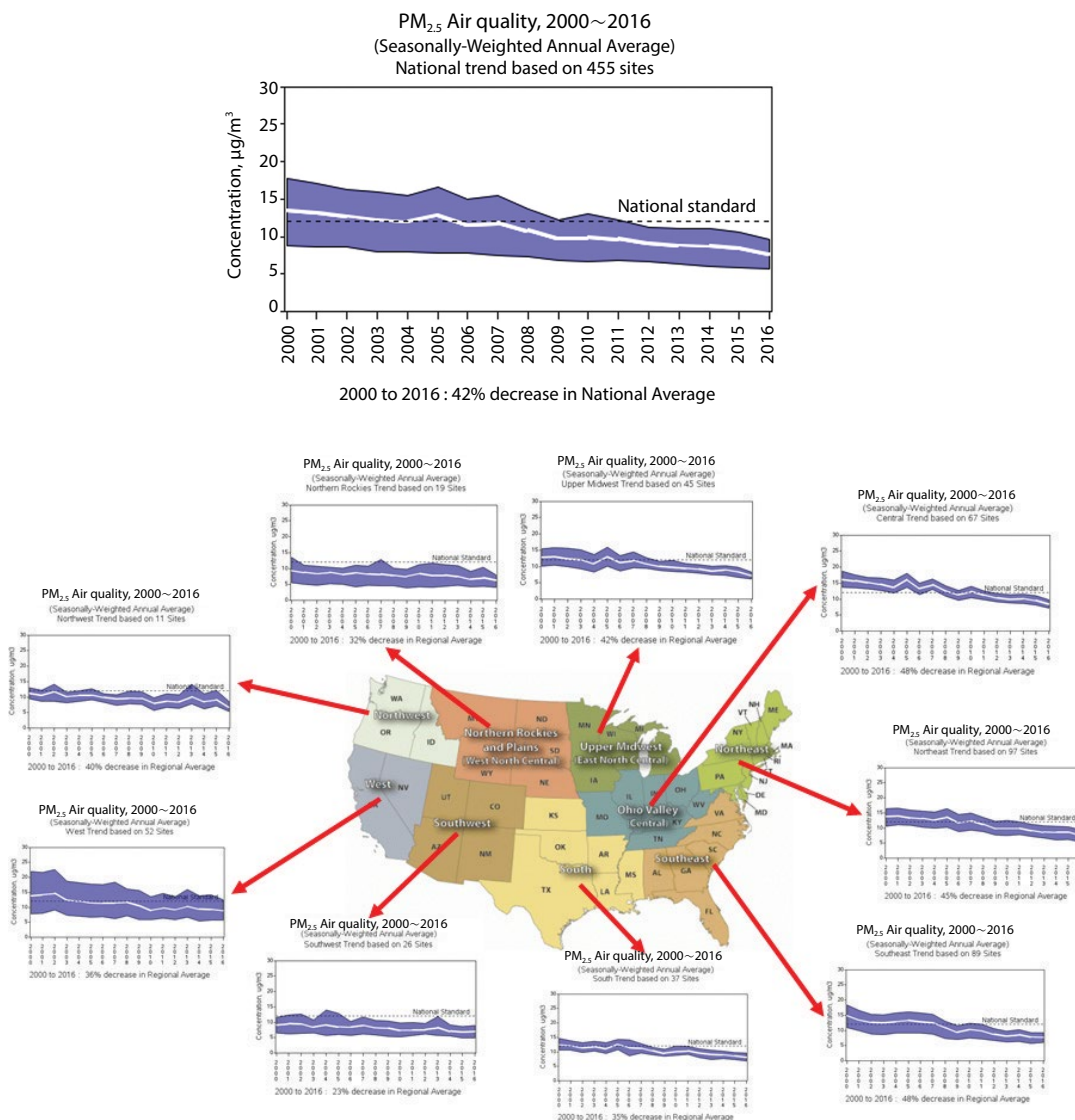


Fig. 1. National (top) and regional (bottom) trends of annual average PM_{2.5} concentrations in US from 2000 to 2016 (US EPA, 2016a).

Table 1. History of primary National Ambient Air Quality Standards for TSP, PM₁₀, and PM_{2.5} in US (US EPA, 2016b).

Indicator	Averaging time	NAAQS year	Level ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Form
TSP	24 hour	1971	260	Not to be exceeded more than once per year
	Annual	1971	75	Annual geometric mean
PM ₁₀	24 hour	1987	150	Not to be exceeded more than once per year on average over a 3-year period
		1997		
		2006		
	2012			
Annual	1987	50	Annual arithmetic mean, averaged over 3 years	
PM _{2.5}	24 hour	1997	65	98 th percentile, averaged over 3 years
		2006	35	
		2012		
	Annual	1997	15.0	Annual arithmetic mean, averaged over 3 years
		2006	12.0	
		2012		

징이라고 할 수 있다.

미국의 초창기 PM₁₀과 PM_{2.5} 관리는 1970년대 초반 총 부유분진(TSP; Total Suspended Particles) 관리에서 출발했다. 그러나 1990년 대대적인 청정대기법 개정과 함께 호흡기로 흡입되어 실제로 인체 위해성을 갖는 PM₁₀, 그리고 PM_{2.5}에 대한 대기환경기준이 순차적으로 공표되면서 관리체계를 갖추게 된다. PM_{2.5}의 대기환경기준은 1997년 처음으로 공표된 연평균 기준 15.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 일평균 기준 65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 20년이 지난 2012년에는 연평균 기준 12.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 및 일평균 기준 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 각각 20%와 46% 가량 강화되었다(표 1).

PM_{2.5} 대기환경기준은 1997년 공표 이후 2016년까지 20년간 꾸준히 강화됨에도 미국에서 미달성 지역의 공간적인 분포 범위는 현격하게 감소하였다. 2017년을 기준으로 보면 인구 밀도가 높은 일부 지역에서만 연평균 기준을 만족하지 못하는 상태이다(그림 2). 이러한 경향은 일평균 기준에서도 크게 다르지 않다. 대기환경기준의 강화는 필연적으로 보다 엄격한 PM_{2.5} 관리제도의 적용과 그에 따른 배출량 삭감 목표의 증가로 이어진다. 따라서, 현재까지 이어져오는 PM_{2.5} 농도 개선은 대기환경기준 강화와 이를 준수하고자 하는 노력의 결과이며, 미국이 PM_{2.5}

관리를 성공적으로 달성하고 있음을 보여준다.

국내에서는 2011년에 처음으로 PM_{2.5}에 대한 대기환경기준을 연평균 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 일평균 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 정하고, 2015년부터 적용하기 시작하였다. 3년이 지난 2018년 3월에는 PM_{2.5} 대기환경기준을 연평균 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 일평균 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 강화하였다. 대기환경기준 강화는 국민건강 보호라는 측면에서는 바람직하나, 이러한 대기환경기준 강화는 뒤에서 언급될 지역별 농도 현황과 그에 따른 건강영향 분석 등 과학적 분석에 근거해야 한다는 점과, 미국과 달리 변경 주기가 짧았던 점 등은 고찰이 필요하다. 특히, 대기환경기준의 신설 및 개정은 대기 관리에 있어 목표 설정과 배출량 저감 대책 수립, 집행과 감독, 필요기술 개발, 소요 재원 추정, 비용-효과/편익 분석, 농도 개선 평가 등 일련의 제도적 시행에 있어 핵심 요소라는 점에서 후속적인 조치의 연계성 검토가 선행되어야 한다.

2.2 PM_{2.5} 관리철학 및 사례

그림 3은 기본적인 미국의 PM_{2.5} 관리체계를 보인 것으로, 1) 대기 중 PM_{2.5} 농도, 2) 인체 위해성과, 3) 과학적 이해를 바탕으로 한 정량적 관리 등 세 단계로 구분할 수 있다(NARSTO, 2004). 첫 단계는 배출

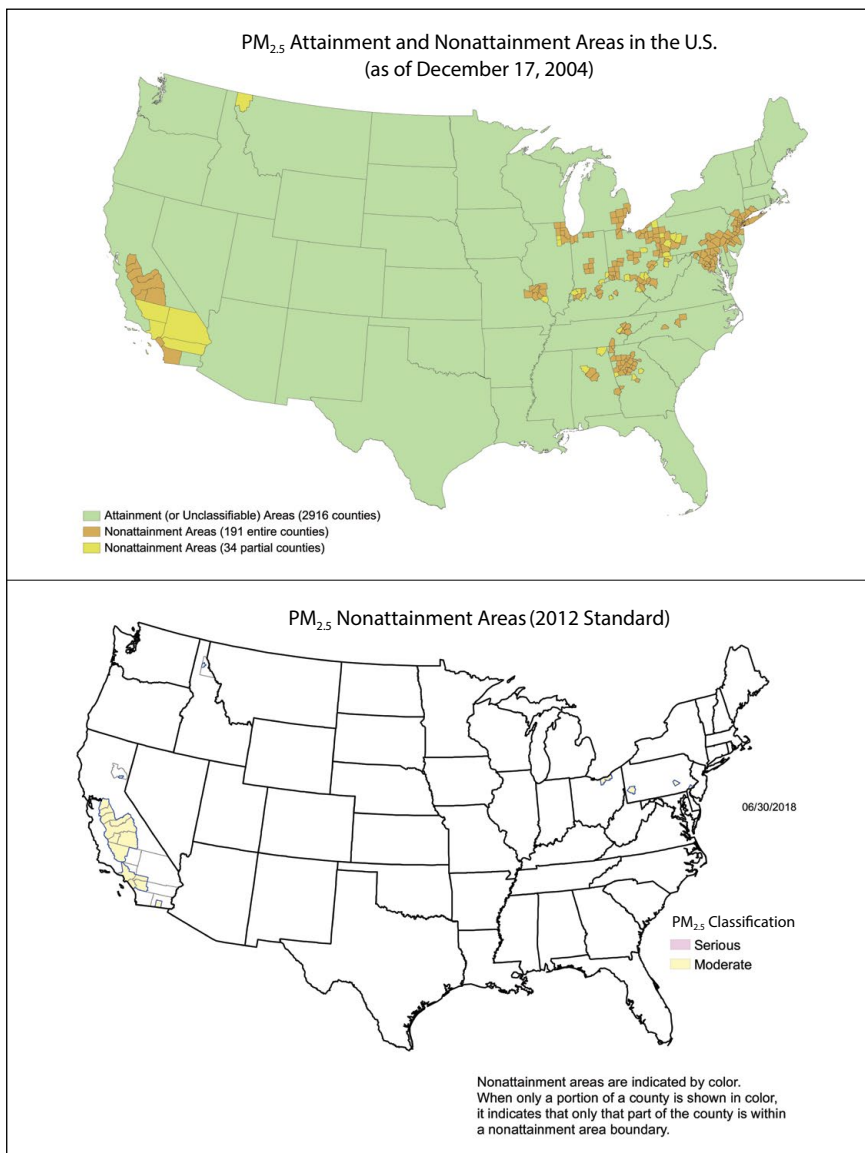


Fig. 2. US non-attainment areas of annual $PM_{2.5}$ NAAQS in 2004 (Top) and 2017 (Bottom) (US EPA, 2004, 2017a).

된 대기오염물질이 대기환경 중 기상인자와 같은 환경요인에 의한 물리화학적 변화가 투영된 농도 결정 과정이다. 특히 이 단계에는 대기오염 현상에서의 인과관계 분석과 정성적 평가를 종합적으로 이해하는 개념 모델링(Conceptual modeling)이 포함된다. 두 번째 단계는 $PM_{2.5}$ 농도 변화가 보건, 시정, 기후, 생태

계 등에 미치는 영향을 정량적으로 평가하는 과정이다. 세 번째는 농도-영향 평가 결과를 환경개선 목표에 어떻게 반영하여 계획을 수립하고 실천할 것인지, 그리고 관리 계획의 실천이 실제로 대기환경 개선에 어떠한 영향을 주는지 검토한다. 이 마지막 과정은 다시 첫 단계와 이어지며 대기질 관리의 선순환적인

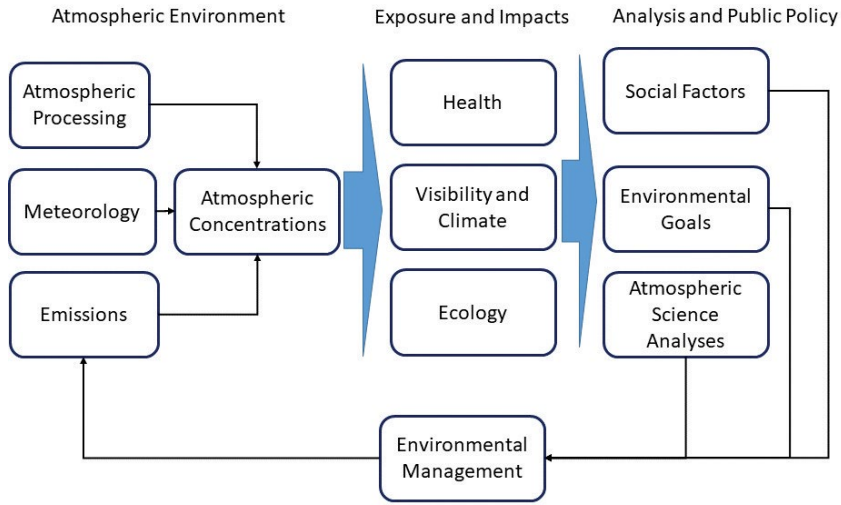


Fig. 3. Scientific Framework for PM_{2.5} Management (adopted after simplifying the original diagram from (NARSTO, 2004)).

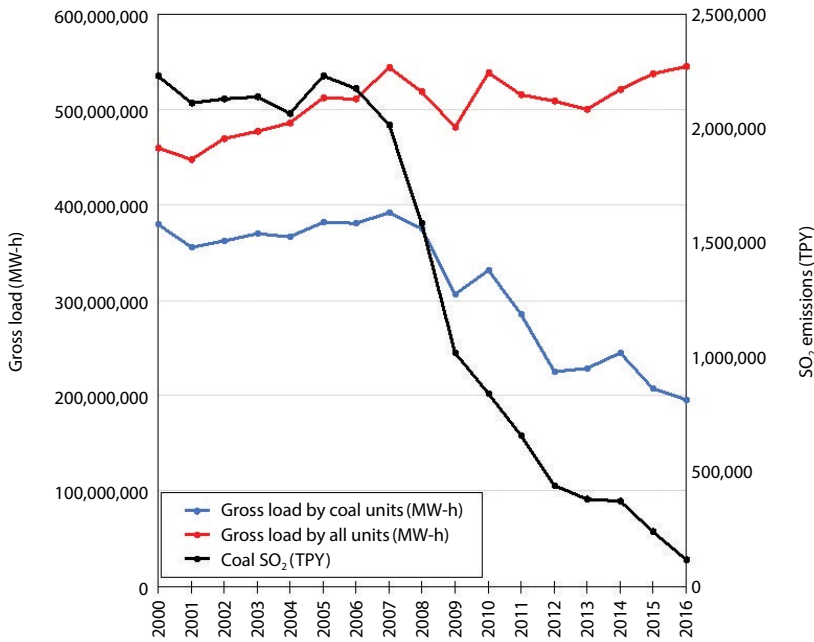


Fig. 4. Annual trends of SO₂ emissions by coal-fired electricity generating units (black line), gross loads by coal-fired electricity generating units (blue line), and gross loads by all fossil fuel fired electricity generating units (red line) in 6 southeastern states in US (AL, FL, GA, NC, SC, and VA) from 2000 to 2016 (Data Source: <https://ampd.epa.gov/ampd/>).

구조를 이루게 된다. 이러한 선순환은 정량적 대기질 관리를 위한 수치 모델링과 대기 중 PM_{2.5} 실제 농도

를 파악하는 측정이 내재하고 있는 개별적인 약점을 보완하며 유기적인 관리체계를 구성한다.

NARSTO (2004)는 미국의 각 지역에 대해 이러한 분석체계를 토대로 PM_{2.5}의 주요 전구물질들과 배출원을 지역별로 정리하였다. 미 남동부에서는 석탄 화력발전에서 배출되는 SO₂가 주요한 PM_{2.5}의 전구물질로 지목되었다. 따라서, SO₂의 제어는 PM_{2.5} 대기환경기준 준수를 위한 주요 요소가 되었다. 실제로 미 남동부 지역의 석탄화력 발전관련 SO₂ 배출량과 이들 설비로부터 생산한 발전량은 2000년 대비 2016년에 5%와 51% 수준으로 낮아졌다(그림 4). 같은 기간 전체 화석연료 발전량은 19% 증가하였음에도 불구하고, SO₂ 배출량이 95%나 감소는 석탄 화력 발전의 감소가 주 원인으로, 이러한 석탄 화력 발전소의 감소에는 여러가지 요인이 복합적으로 작용하였다. 그 예로 강화되는 대기환경기준을 만족하기 위한 석탄 화력 발전설비에 대한 탈황장치 등 방지시설의 설치 및 운전 비용, 상대적으로 저렴한 복합 천연가스 발전으로의 전환, 전반적인 전력 수요 증가율 감소, 신재생에너지 기반의 발전, 효율적인 전력 생산 등이 언급될 수 있다(Mills *et al.*, 2017; US EIA, 2014).

NARSTO의 PM_{2.5} 관리 체계는 Jeffries (2003)가 제안한 과학-공학-정책의 상호작용에 대한 개념과도 상당히 일치하는데(그림 5), 여기서 특히 중요한 것

은 과학-공학-정책이 각각의 역할을 담당함에 있어서 연결고리가 되는 부분들이다. Jeffries (2003)는 과학은 현재 일어나는 현상들에 대한 설명 또는 이해 과정으로, 공학은 이러한 과학적 지식을 최대한 현실에 적용하여 미래 변화를 예측 또는 실현 가능하게 만드는 것이 주요 역할인 것으로 보았다. 또한 Jeffries (2003)는 과학과 공학으로부터 얻어진 과학적 지식과 예측된 변화를 바탕으로 정책이 설계되고 실행되며, 이것을 다시 과학적으로 설명하고 확인하는 구조(structure) 또는 주기(cycle)가 중요하다고 보았다. 이러한 일련의 과정에서 대기질 수치모사는 현재 까지 알려진 최신의 과학적 지식에 공학적 요소(예, 실험식 등)를 가미하여 향후 대기질 개선에 필요한 혹은 제안된 정책의 실효성을 예측하고 정량화하는 도구이다(Russell and Dennis, 2000; Oreskes *et al.*, 1994). 이러한 이유로 미국의 PM_{2.5} 관리에서 수치모사는 매우 중요한 도구로 자리잡았다(US EPA, 2007a).

앞 절에서 언급한 개념 모델링은 ‘대기질 현황 분석 및 이해’로 볼 수 있다. 이러한 개념 모델링에서는 해당 지역의 농도 및 배출량 현황, 장기 추세, 시공간적 변화 등이 검토되며, 주기적인 업데이트를 통해

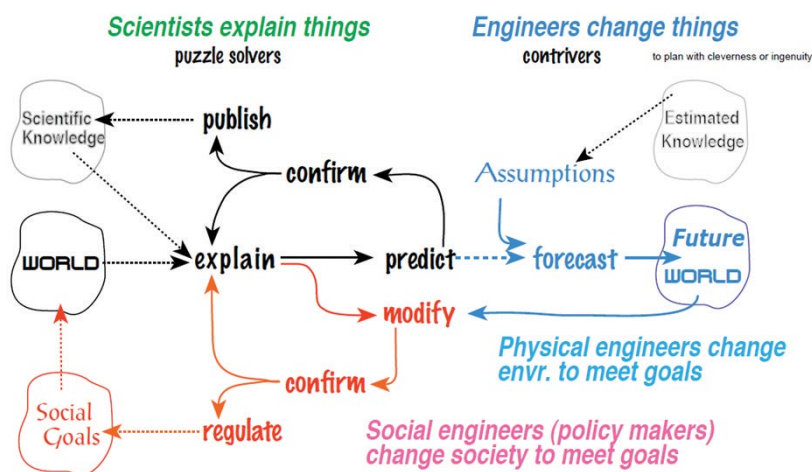


Fig. 5. Conceptual diagram about interaction among science, engineering, and policy in air quality management (Jeffries, 2003).

시행계획 수립 시 중요한 기초자료로 활용된다. 국내의 경우 일부 지자체에서도 이와 유사한 자료 분석을 수행하고 있으나, 향후 PM_{2.5} 문제 해결을 위해서는 국내외 배출원에 대한 민감도 및 기여도 분석, 지자체별 상호 영향, 오염원별 관리 방안, 측정망 운영 계획 등 중앙정부 차원에서의 종합적인 검토가 필요하다. 또한, 그림 5에서 설명한 바와 같이 향후 국내 PM_{2.5} 관리를 위해서는 과학과 행정 간에 유기적인 관계 형성이 중요하며, 과학적인 근거에 기반한 정책 도출을 위한 선순환적 구조 또는 제도 마련이 요구된다.

2.3 미국 PM_{2.5} 관리체계의 현황

미국의 PM_{2.5} 관리는 일반적인 기준성 대기오염물질과 유사한 관리체계를 따른다. 미국 대기질 관리체계의 기본적인 골격을 보면, 대기환경기준 및 각종 법령은 미 환경청(US EPA)에서 제정, 공포한다. 다만, 캘리포니아의 경우 미 환경청보다 강화된 자체 대기환경기준 및 해당 기준 준수를 위한 법령의 제정 및 집행이 가능하다(Karmel and FitzGibbon, 2002). 통상 대기질 관리를 위한 시행계획은 각 주에서 작성하며, 이를 미 환경청의 승인 하에 실행된다. 또한, 미 환경청에서 전국적인 적용을 위해 개발한 배출 허가권 등 관리 제도의 실제 집행은 각 주에 위임(delegate)하고 있다(ECOS, 2016). 미국의 대기질 관리 체계 상 중요한 개별 요소는 대기환경기준 검토 및 개정, 미달성 지역의 지정, 주 및 연방 시행계획(SIP과 FIP)이다.

2.3.1 대기환경기준 검토 및 개정

대기환경기준의 신규 제정 및 개정에 있어 중요한 점은 위해성만이 대기환경기준 설정의 척도가 되며, 위해성을 충분히 고려해서(adequate margin of safety) 설정하며, 비용적인 측면은 전혀 고려되지 않는다는 것이다(Whitman v. American Trucking Assns., Inc., 2001). 다만, 미 환경청은 효과적인 대기질 관리를 위해 대기환경기준 설정 단계에서부터 “Regulatory

Impact Analysis”를 수행하여 최종 확정된 대기환경기준을 이행할 시에 비용적인 부분이 고려되도록 하고 있다(US EPA, 2012). 실제로 미 환경청은 1990년 청정대기법의 대대적인 개정 이후 2020년까지 청정대기법 제정 및 시행에 따른 비용 편익 분석결과를 공개하여 청정대기법 시행에 따른 사회적 이익이 비용보다 훨씬 더 크다는 것을 강조하고 있다(US EPA, 2015a).

미 환경청은 원칙상 매 5년마다 대기환경기준을 신규 제정 또는 개정을 검토하며, 크게 4단계로 나누어 진행한다(US EPA, 2014a). 첫번째 단계는 계획(Planning) 단계로 자료 수집, 전문가 의견, 이해 관계자들의 의견을 고려하여 구체적인 로드맵을 제시한다. 두번째 단계는 종합적 과학평가(ISA; Integrated Science Assessment)로 PM_{2.5} 노출과 건강 위해성 간의 인과관계를 평가하는 작업이다. 이때 PM_{2.5} 관련 대기화학 및 배출원 관련 자료도 함께 검토한다. 세번째 단계는 위해성/노출평가(REA; Risk/Exposure Assessment)로 PM_{2.5} 노출에 따른 조기사망률과 같은 정량적인 위해성 평가를 수행한다. 마지막 단계는 정책평가(PA; Policy Assessment)로 종합적 과학평가와 위해성/노출평가를 통해 밝혀진 과학적인 증거들을 고려하여 정책적 선택 사항들을 발굴하는 단계이다. 이 단계에서는 특히 대기환경법 과학자문위원회(CASAC; Clean Air Scientific Advisory Committee)가 미 환경청장에게 종합적 과학평가와 위해성/노출평가를 통해 얻어진 자료들을 총체적으로 고려하여 기존 대기환경기준이 충분한지, 개정이 필요한지 등을 ‘조언’한다. 이를 위해 정책평가 단계에서는 대기환경기준의 4대 요소인 지시자(Indicator, 예: PM_{2.5}), 평균 시간(Averaging time, 예: 1년), 형태(Form, 예: 3년치 연평균의 평균), 수준(Level, 예: 12.0 µg/m³)을 집중적으로 다룬다. 궁극적으로는 앞서 언급된 모든 정보와 조언을 고려하여 미 환경청장이 최종적인 대기환경기준을 정하게 된다.

신규 혹은 개정된 대기환경기준이 공포되면, 미 환경청은 이를 구체화하기 위한 대기환경기준 시행계

획(NAAQS Implementation Plan)을 마련하게 된다(US EPA, 2014b). 이 계획에는 개정된 대기환경기준, 미달성 여부의 판정을 위한 분석 지침, 향후 일정, 그리고 미달성 지역을 포함하는 추가 제출해야 하는 시행계획의 필수 요소와 이에 대한 구체적인 해설이 포함된다. 대기환경기준 시행계획에서 중요한 자료 중 하나는 설계치(Design Values)이다. 설계치 산정은 공식 측정방법인 FRM(Federal Reference Method) 혹은 이와 동등한 FEM(Federal Equivalent Method)을 따라 측정된 농도 자료에 대기환경기준의 4대 요소 중 지시자, 평균시간, 형태를 동일하게 적용하여 산정한다. 이 설계치가 대기환경기준을 초과하면 아래 소개하는 “미달성 지역의 지정” 과정을 진행하게 된다. 현재 설계치를 이용한 미달성/달성 판정은 별도의 불확도를 고려하지 않은 “bright line” 접근법을 이용하는데, 그렇기 때문에 유효 숫자가 매우 민감한 사안이 되기도 한다. 따라서, 미 환경청은 자세한 설계치 산정 방법(예: 소수점 처리 등), 정도관리 방법, 그리고 측정 농도자료의 설계치 산정 시 이용 가능 여부(예: clean data determination) 등을 판단할 수 있는 상세 기준들도 함께 제시하고 있다. 한편, 자연적인 산불 등의 이유로 발생한 고농도 관측은 예외적 사례(Exceptional event)로 제외하고, 나머지 측정자료만을 설계치로 사용하는 것이 합리적이므로, 이러한 자료의 선별 작업과 예외적 사례에 대한 증거문서 제출에 대한 요구사항 및 마감일 등도 대기환경기준 시행계획에 포함된다.

최근 PM_{2.5} 대기환경기준 시행계획에서는 전구물질 증명(Precursor demonstration)이라는 것이 제시되었는데, 이는 미달성 지역에 대한 주 시행계획에서 PM_{2.5}의 4가지 주요 전구물질(SO₂, NO_x, VOC, NH₃) 배출이 대기환경기준 달성에 ‘중요하지 않은’(Insignificant) 것을 증명하면 해당 전구물질에 대한 배출량 저감 의무를 면제받을 수 있다(US EPA, 2016c). 2016년 11월 17일 이에 대한 지침 초안(Draft Guidance)이 공표되었고, 의견수렴(Comment)은 2017년 3월 31일에 마감한 상태로, 현재는 미 환경청 내부의

최종 검토가 진행 중이다. 미 환경청이 미확정된 정책에 대해서 의견 수렴을 하며 새로운 시도와 관련된 방안이나, 정보를 미리 공개하는 것은 궁극적으로는 개발 단계에서부터 이를 실제로 집행할 지자체의 의견을 수렴하고, 보다 효과적인 대기환경 개선을 위한 노력의 일환으로 충분한 가치가 있다고 판단된다.

국내에서 PM_{2.5}의 대기환경기준은 2015년부터 적용되었으며, 2018년 3월 연평균과 일평균 기준이 각각 15 µg/m³과 35 µg/m³으로 강화되었다. 앞서 언급한 바와 같이 미국의 경우 대기환경기준의 변경 및 신설 검토 주기는 매 5년으로 정하고 있으며, 과학적인 분석에 근거하여 개정 절차를 따른다. 또한, 대기환경기준 개정에 따른 미달성 지역 지정 및 개선을 위한 시행계획과 집행 등 일련의 과정이 체계적으로 준비되어 있다. 향후 국내에서 실질적인 대기오염 개선을 도모하기 위해서는 큰 틀에서의 제도 개선과 그에 따른 대기환경기준 설정에 대한 절차, 주기, 방법 등을 구체적으로 마련하는 것이 필요하다. 한 가지 덧붙여 국내에서는 아직 설계치 산정에 대한 본격적 논의가 시작되지 않고 있다. 그 이유 중 하나는 지금까지의 수도권 대기환경개선에 관한 특별법, 대기환경규제 지역에서의 실천계획 등에서의 기본계획 등에서 실질적 시행평가, 이행평가는 삭감 배출량 위주로 진행되기 때문으로 판단된다. 배출량 위주의 평가는 대기질 현황에 대한 완전한 이해를 요구하지 않으며, 이러한 제한점은 현재 우리가 당면하고 있는 초미세먼지 문제에 있어 정량적 원인을 명확히 규명하기 어려운 현실과 맥락을 같이 한다. 기준성 대기환경물질이라면 개선 대책에 대한 평가 역시 대기 중 농도를 기준으로 평가되는 제도가 필요할 것이다.

2.3.2 미달성 지역의 지정

미달성 지역 지정은 미 환경청이 각 주에 미달성 여부에 대한 추천안을 기일 내(기준 공표일로부터 120일 후에서 1년이내)에 제출하도록 통보하는 것으로 시작한다. 각 주는 미 환경청에서 제시하는 5-요소 분석(Five-factor analysis) 지침에 따라 대기질, 배출

량, 기상이 포함된 종합적인 정보를 분석한다. 이러한 분석 결과를 토대로 각 주가 미달성 지역을 추천하면, 미 환경청은 추천안을 검토하여 해당 주의 모든 지역에 대한 미달성 여부를 판정한다(US EPA, 2016d). 이 과정에서 미 환경청은 각 주의 추천안에 대해 이의를 제기하고 미달성 지역을 변경할 수 있는데, 이러한 변경을 하면 미 환경청은 각 주에 120일의 반론기간을 주어야 한다. 미달성 지역은 기준 공표일로부터 2년 내에 지정되어야 하므로 120일의 반론기간은 기준 공표일로부터 최소한 1년 8개월 이전에는 시작되어야 한다.

PM_{2.5}의 경우 미달성 지역을 대기환경기준 초과 정도에 따라 심각(Serious)과 중간(Moderate)으로 구분하고, 각각에 대해 다른 시행계획 요건(SIP requirement)을 부여한다(US EPA, 2016e). 예를 들어 2012년 PM_{2.5} 연평균 대기환경기준의 경우, 심각 지역은 미달성 지역 지정일로부터 4년 6개월, 중간 지역은 18개월 내에 시행계획을 제출해야 한다. 미달성 지역에 대한 시행계획 요건의 주요 요소에는 배출량 목록, 배출량 저감 계획, 수치모사를 통한 달성 증명, 적정 추가 저감(RFP; Reasonable Further Progress) 및 비상 조치(Contingency measure)가 포함된다. 여기서 비상 조치는 만약 대기환경기준 달성 예정일까지 목표를 달성하지 못할 경우 최소한의 행정절차만으로 구현 가능한 배출저감 계획이다.

수치모사를 통한 달성 증명에서 대기환경기준이 만족되는 미래연도는 최대한 현실적으로 빨리 도달할 수 있는 기간을 설정하며, 기준연도는 설계치에 근접한 연도 중 가능한 배출량 목록의 정확도가 높은 연도를 선택한다. 기존의 수치모사를 통한 달성 증명은 현재 측정망에서 수치모사 결과의 상대적인 변화인자(Relative reduction factor)와 기준연도 설계치의 곱을 통해 얻은 미래 설계 기대치(Future design value)가 대기환경기준보다 낮은지가 주요 관건이었다. 최근에는 측정망이 없는 지역에 대해 수치모사 결과를 활용한 비측정 지역 분석(Unmonitored area analysis)을 통해 고농도 모사 지역으로 기존 측정망

을 옮기거나 이러한 지역에서의 고농도를 방지하기 위해 추가 저감계획을 마련할 것을 선택사항으로 제시하고 있다.

국내의 경우 미국의 미달성 지역 지정과 마찬가지로 수도권(특별법)을 비롯한 대기환경규제지역 지정 고시가 마련되어 있으나, 실질적 적용은 어려운 상황이다. 그 이유는 초미세먼지 측정자료에 근거한 미달성 지역 지정은 현재 측정망이 존재하는 거의 모든 지자체에서 미달성이 예상되며, 측정망이 없는 지자체의 포함 여부, 지정에 따른 대책 마련, 배출원 규제, 비용 문제 등 많은 부분에서 사회적 합의 도출이 필요하다. 보다 효과적인, 그리고 효율적인 대기질 관리를 위해서는 배출량-농도-노출 정도의 연속성에서 정책의 비용-효과/편익 등이 철저히 분석되어야 할 것이다.

2.3.3 주 및 연방 시행계획

실제적인 시행계획 마련에는 앞서 언급된 미 환경청의 지침과 시행계획 요건에 따라 각 주의 필요와 지역 특성이 반영된다. 이렇게 개발된 시행계획은 미 환경청에서 승인하고 연방관보(Federal register)를 통해 공표되는 순간 연방법으로 강제 집행 가능한(Federally enforceable) 지위를 갖게 되는데, 각 주에서는 필요 시 주 조례(State rule)와 같은 별도의 규제를 마련하기도 한다. 각 주의 고유 권한은 때로는 매우 한정된 공간적 범위에 국한된 특정 오염원에 의한 대기환경기준의 미달성과 같은 지역 특색의 문제 해결을 위한 유연성을 보장한다(Galvis *et al.*, 2015). 이렇게 연방정부에서 주 정부로 위임된 권한을 활용하여 각 주는 지역적인 배출 및 화학 특성을 반영하여 보다 효과적인 주 조례 마련 및 집행이 가능하다. 하나의 예로써 미국 조지아 주의 경우 대형 화력발전소의 SO₂ 및 NO_x 배출량 저감을 위해 3차원 광화학 모사를 수행하고, 오존 및 PM_{2.5}에 대해 단위 배출량 저감에 따른 농도 변화와 필요 비용을 산출하고 이를 기반으로 개별 발전시설에 대해 매우 구체적인 운영 관련 규정을 개발, 공표, 집행하고 있다(Cohan *et al.*,

2007).

한편, PM_{2.5}는 광역적인 특성을 크게 나타내며, 개별 주가 미달성 지역에 대한 문제해결을 독자적으로 수행할 수 없는 경우도 있다. 이러한 경우를 대비하여 청정대기법은 선린 조항(Good neighbor provision)을 담고 있는데, 기본 틀은 각 주의 배출량이 다른 주의 달성 유지 및 미달성 지역 지정 여부 판단에 큰 영향을 미치지 않음을 증명하는 것이다. 이를 위해 미 환경청은 ‘광역 대기오염법’(CSAPR; Cross-State Air Pollution Rule)을 제정하여 연방 시행계획으로 실천하고 있다.

정리하자면, 미국의 현행 PM_{2.5} 관리체계는 효과적인 목표 달성을 위해 중앙 정부에서는 대기환경 기준과 전국규모의 정책을 마련하면서 지방 정부의 효과적인 정책 개발을 위한 지침, 분석 방법론 및 도구를 제공한다. 지방 정부는 이러한 지침 등을 사용하여 실제적인 저감정책의 수립 및 정책을 집행하는 것으로 요약할 수 있다. 다른 한편으로는 대기환경기준 설정, 달성 현황 및 시행계획에 따른 달성여부 평가를 한 주기로 볼 때, 매 주기마다 대기환경기준을 만족하기 위한 여러 제도적 장치들을 필요에 따라 가감하는 유연함도 추구하고 있다.

최근 국내에서는 PM_{2.5}를 포함한 대기질의 효과적인 관리를 위해 권역 설정 및 광역 지자체간 공동의 노력을 유도하고 있으며, 이 경우 미국의 선린 조항이 상호 영향을 미치는 지방 정부 간의 협력 및 갈등 해소를 위한 정책 마련 시 좋은 본보기가 될 것이다. 또한 미국의 예처럼 국내에서도 중앙 정부에서는 전반적인 제도 검토와 지원 방안을 마련하고, 구체적인 계획 및 집행은 지방 정부에서 주요 역할을 할 수 있도록 제도적 준비가 필요하다.

2.4 측정

미국에서 제도적으로 초미세먼지의 정의가 확립된 것은 1997년 대기환경기준의 공표를 통해서였다. 그러나 대기환경기준 공표이후 미 환경청은 단순히 총중량 농도(Total mass concentration) 측정만으로는

관리방안을 위한 관련 정보를 충분히 얻지 못한다는 점을 깨달았고, 2000년 초반부터 대대적으로 전국 측정망에 대한 측정체계 검토를 하였다(US EPA, 2008a). 그 결과 미 환경청의 측정관련 기본 전략이 ‘통찰력 있는 측정(insightful measurement)’, 즉 배출량 저감 효과를 확인할 수 있는 측정으로 전환하게 된다(US EPA, 2008a). 여기에서 ‘통찰력 있는 측정’이란 대기질 개선을 위해 필요한 종합적인 정보를 확보하고 계획 수립에 충분한 근거 제공이 가능한 측정을 의미한다. 이를 위해 많은 수의 단편적인 측정소를 분산하여 설치하고 운영하기 보다는, 비록 측정소 수를 줄이더라도 한정된 재원을 집중적으로 투자하여 여러 대기오염물질을 종합적으로 측정하는 전략을 채택한다. 또한, 도심의 농도 감소와는 달리 교외지역의 농도 증가와 광역적 이동성 대기오염현상에 대한 이해 증진과 모사 활용 측면에서 기존의 측정소를 보다 효율적으로 통합 운영하는 것이 요구되었다(US EPA, 2008a). 이러한 일련의 변화는 ‘NCore’ 측정소의 설치 및 확대에 이어진다(US EPA, 2016f).

국립공원을 포함하는 Class I 지역에서 PM_{2.5} 기인에 의한 시정감소 문제 해결을 위해 미 환경청은 기준성 대기오염물질로써의 PM_{2.5} 농도 관리와 병행하여 1985년부터 IMPROVE(Interagency Monitoring of Protected Visual Environments) 측정망을 국립공원 관리처(NPS; National Park Service), 미 농무부의 산림처(USFS; USDA Forest Service) 등과 같은 다른 연방기관과 협력하여 운영하고 있다. 따라서 현재 미국의 PM_{2.5} 관련 측정망은 PM_{2.5} FRM(Filter-based), PM_{2.5} FEM(연속 측정소), NCore, IMPROVE를 포함하여 네 종류이다.

앞서 설명한 PM_{2.5} 설계치 산정에는 FRM 혹은 FEM 측정 자료만이 이용되는데, 이는 기본적으로 FRM으로 인정된(혹은 법제화된) 측정망 자료만이 정책 용도로 사용이 가능하기 때문이다. 미국의 경우 최근 주목받고 있는 마이크로 센서(Micro-sensor) 혹은 저비용 센서(low cost sensor) 역시 정책적 활용 방안이 마련되고 있다. 이러한 신기술의 정책용 사용에

는 많은 주의가 필요한데, 대기관리를 위한 측정은 정확도, 시공간 해상도 및 범위가 설계치 및 대기관리의 목표에 부합해야 하기 때문이다 (Hall *et al.*, 2014).

한편 주요 PM_{2.5} 성분 측정법에 대해서는 지속적인 연구와 검토가 있었는데, 그 중 대표적인 것이 원소탄소(EC; Elemental Carbon)이다. 검댕(Soot)과 블랙카본(BC; Black Carbon), 원소탄소에 대한 구분이 때때로 명확하지 않아 혼선을 빚기도 하는데, 이들 물질이 운영상 정의되었기(Operationaly defined) 때문이기도 하다(Long *et al.*, 2013). 원소탄소의 경우 측정방법에 따라 질량농도에서 많은 차이가 때때로 보고됨에 따라 본격적인 조사가 진행되었다(Chow *et al.*, 2004). 쟁점이 된 원소탄소의 측정 방법들은 STN (Speciation Trend Network, CSN의 전신) 망에서 사용하던 열광학적 투과도법(TOT; Thermal Optical Transmittance)과 IMPROVE 망에서 사용하던 열광학적 반사도법(TOR; Thermal Optical Reflectance)이었는데, 두 방법의 교차비교 후, 미 환경청은 기존 열광학적 투과도법로 측정된 2006년 이전 자료들을 순차적으로 열광학적 반사도법 기반으로 갱신하고, 향후 STN 망에서의 원소탄소 측정을 열광학적 반사도법 방법으로 수행하는 것으로 결정하였다. 원소탄소 측정법의 변동은 원소탄소 뿐 아니라 같은 방법으로 측정하던 유기탄소(OC; Organic Carbon) 및 유기탄소로부터 추정하던 대기 중 유기물질(OM; Organic Matter) 측정에도 영향을 미쳤다(Khan *et al.*, 2012). 이는 기존 STN 망에서 측정된 유기탄소에 대해서는 계수 1.4를 곱하여 유기물질 농도를 추정하는 반면, IMPROVE에서 측정된 유기탄소 값에는 1.8을 곱하는 추정법을 적용하였기 때문이다(Dillner, 2016; Chow *et al.*, 2010).

PM_{2.5} 총 질량농도 및 그 구성 성분의 농도 측정값은 설계치 산정과 수치 모사와 함께 대기관리의 성공 여부를 추적하는 역할뿐 아니라, 보다 효과적인 PM_{2.5} 관리를 위한 통찰력을 얻기 위해 매우 중요한 자료이다. 따라서 여타 과학과 마찬가지로 시간적으

로 주기적인 검토와 함께 측정-모사 간의 상호작용을 고려하여 과학발전을 실무에 반영할 수 있는 기반을 만드는 것은 매우 중요하다. 앞서 언급한 것과 같이 비용 측면에서 탁월한 마이크로 센서의 등장으로 매우 광대한 영역에서의 자료 생산 가능성을 고려하면, 여러 수준의 대표성을 갖는 다양한 측정값을 정책에 반영할 수 있는 방안 모색이 큰 숙제가 될 것으로 판단된다.

현재 국내에서 초미세먼지 관리에서 많은 관심이 집중되는 암모니아 배출량 및 농도 문제는(Kim *et al.*, 2017a, 2017b; Link *et al.*, 2017), ‘통찰력 있는 측정’의 중요성을 보이는 좋은 예시이다. 암모니아의 경우 무기성 이온 성분의 생성 및 성장 과정에 대한 이해와 함께 정량적 기여도 분석에도 중요 인자로 작용한다. 이러한 암모니아의 대기 중 거동과 역할을 살펴보기 위해서는 입자상 농도뿐 아니라 가스상 농도의 동시 측정이 필요하다(Clappier *et al.*, 2017; Jiang and Xia, 2017; Meng *et al.*, 2017). 국내 초미세먼지 문제는 단기적으로 해결이 어려우며, 강구될 수 있는 많은 대책들의 검토가 필요한 상황에서 관리대상 오염물질의 대상 확대를 위해서는 배출량 및 농도 현황 분석, 마련될 수 있는 대책의 적용 가능성, 타 대책과의 저감 효과 분석 및 비용적 효율성 등이 분석되어야 하며, 이를 위한 통합적 관측은 매우 중요하다.

2.5 배출량 산정 및 목록 작성

시행계획을 개발하고 구현하는 과정에서 배출량 목록은 매우 중요한 자료이다. 달성 증명의 경우 수치모사를 이용한 대상 대기오염물질의 농도가 대기환경기준을 만족함을 입증하지만, 다른 시행계획의 요소들, 특히 적정 추가 저감 등은 배출량만으로 평가되기 때문이다. 따라서 미 환경청은 ‘배출량 목록 산정지침’ (Emissions Inventory Guidance for Implementation of Ozone and Particulate Matter National Ambient Air Quality Standards (NAAQS) and Regional Haze Regulations) 및 교육 프로그램(Preparation

of Fine Particulate Emission Inventories)을 제공하고 있다(US EPA, 2017b; APTI, 2004).

시행계획에 이용되는 배출량 목록은 통상 Air Emission Reporting Rule 및 National Emission Inventory 프로그램을 통해 기본 자료를 확보하고, 해당 시행계획에 필요한 사항은 추가, 수정, 보완하여 작성한다. 한편 최근 미 환경청은 시행계획 배출량 목록에 응축성 미세먼지(PM condensable) 배출량을 보고하도록 의무화하였으며(US EPA, 2008b), 연돌에서의 응축성 미세먼지 측정방법 표준화를 위해 ‘Method 202’를 공표하였다(US EPA, 2010). 하지만 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 현장에서의 필요를 충족시키는데 난항을 겪었다. 또한 현재까지도 수치모사 시 배출량 목록에서 제공하는 응축성 먼지 배출량을 일관성 있게 반영하기에는 어려움이 있다. 이런 부분은 미국의 대기관리 현장에서 종종 발생하는데, 시의 적절한 방법론이 제공되지 않는 경우 전체적인 관리의 효율성을 저하시킨다.

마지막으로 먼 오염원에 대한 배출량 산정은 주로 활동도와 배출계수를 기반으로 산정되는데, 일부 활동도 자료(예: 연료사용량)의 경우 먼 및 대형 점오염원 모두에 공통적으로 적용되는 경우가 발생된다. 따라서, 해당 활동도가 대형 점 오염원과 연관되는 경우, 대형 점오염원에 해당되는 활동도를 제외하고 먼 오염원의 배출량을 산정해야 하며, 이 과정을 Point Source Subtraction 혹은 Point Source Reconciliation 이라 한다. 이 작업을 위해서는 대형 점오염원의 배출량뿐 아니라 활동도 정보, 즉 물질 사용량(Throughput)이 정확하게 제공되어야 한다. 과거에는 이러한 정보가 영업기밀(Confidential Business Information)이라는 이유로 정보 취합에 현실적인 어려움을 겪었다. 최근 미 환경청은 이러한 문제를 해결하고자 시행계획 배출량 목록 작성 지침에 사업장의 영업기밀이 배출량 산정에 방해 사유로 적용되는

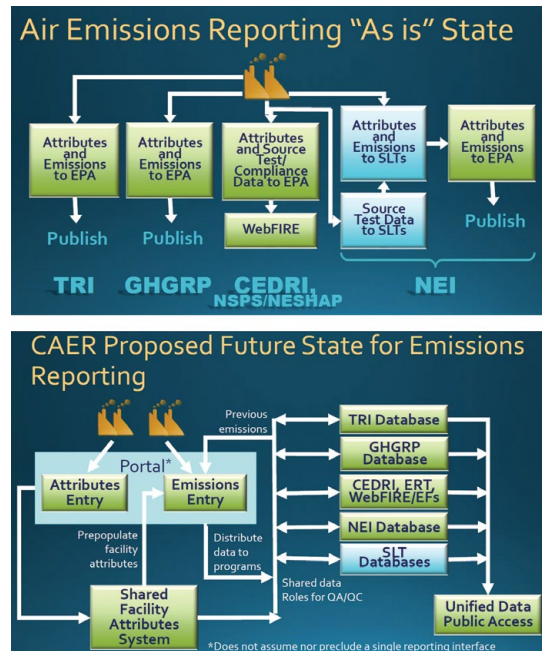


Fig. 6. Emission information flow before (top) and after (bottom) the implementation of Combined Air Emissions Reporting (CAER) (US EPA, 2016h).

것을 금지하도록 명시하였다(US EPA, 2017b). 따라서, 향후 배출량 목록에는 물질 사용량 정보가 충분히 반영된 먼오염원 산정이 가능할 것으로 판단된다.

한편, 배출량 관련 정보 관리 측면에서 미 환경청은 3차원 수치모사 및 수용모델을 이용한 분석을 위해 다양한 PM_{2.5} 오염원에서 배출되는 PM_{2.5} 화학종 및 개별 공정별 배출계수에 대한 상세한 정보 제공을 위하여 화학종 데이터베이스인 SPECIATE을 지속적으로 갱신하고 있으며(US EPA, 2015b), 최근에는 웹기반의 WebFire를 개발하여 공개하였다(US EPA, 2017c). 동시에 미 환경청은 최근 각종 연돌에서 규정 준수 여부를 감시하기 위해 배출량 측정 정보를 준실시간으로 중앙 데이터베이스에 저장하고 관리하는 CEDRI (Compliance and Emissions Data Reporting Interface)를 개발하였다(US EPA, 2016g). 또한 CEDRI에 자료 제출시, 사용하는 ERT (Electronic Reporting Tool)는 WebFire와 연동되어 최대한 빠른

시간 내에 새로운 배출계수를 산정하도록 시스템이 구축되어 있다. 이러한 일련의 노력은 CAER (Combined Air Emissions Reporting) 시스템의 개발로 이어졌다(그림 6).

CAER 개발 이전에 각종 대형 점오염원 관련 배출량 정보 제출 시에는 온난화 관련 배출 목록 보고 프로그램 등 개별 대기관리 관련 프로그램에 따라 업체 정보 등의 공통 정보를 여러 번 제출하거나 서로 다른 정보 요구사항으로 인한 혼란이 야기되었다. 동시에 제출 시기도 통일성이 없어 한정된 재원을 효율적으로 사용하지 못하고 배출량의 정도관리가 어렵다는 지적이 있었다. CAER는 이러한 단점들을 극복하고 아래와 같은 6가지 목표를 달성하고자 개발된 시스템이다(US EPA, 2016h).

1. 대형 점오염원 사업장의 배출량 보고 부담 경감
2. 자료의 적시성 및 투명성 개선
3. 전체적인 대기관리 프로그램 사이의 일관성 유지
4. 자료의 품질 개선
5. 자료의 유용성 및 접근성 개선
6. 시의 적절한 대기관리 의사 결정을 위한 지원

이러한 정보 공개 및 지속적인 자료 갱신, 그리고 시스템의 개발은 미국의 PM_{2.5} 관리에 상당히 기여하였고 향후 계속 기여할 것으로 사료된다.

최근 국내에서도 배출량 목록에 대한 문제점 인식 및 개선방안에 대한 논의가 활발히 진행되고 있다. 기존 제도권에 포함되지 않은 오염원에서의 배출량, 배출계수 및 활동도의 불확도, 유해대기오염물질 등 배출물질에 대한 다변화, 발전 및 대형 산업시설 등 주요 점오염원에 대한 실시간 배출자료 이용 방안 등이 장기적인 관점에서 계획되어야 할 것이다. 또한 향후 배출량 산정은 보다 정교함이 요구될 것이며, 여러 기관으로부터 전달받은 다양한 자료의 이용이 불가피한 바, 이용 자료에 대한 표준화(예, 배출원 분류, 항목, 위치 등) 방안이 보다 적극적으로 검토되어야 한다.

2.6 배출허가권, 배출량 제어기술, 준법감시

2.6.1 배출허가권

미국의 배출허가권(Permit) 제도는 청정대기법 초기 제정과 함께 시작되었다. 배출허가권 제도는 신규(New Source) 혹은 기존 배출원 중 일정 규모 이상의 공정 변경(Major Modification)이 있는 경우, 이들 배출원에 의한 대기질 영향이 일정 수준 이하가 되도록 하는데 목적이 있다. 배출허가권 제도의 실제 집행은 달성 지역에 대한 대기질 악화 방지(PSD, Prevention of Significant Deterioration)와 미달성 지역에 대한 신규 배출원 검토(NNSR, Non-attainment area New Source Review) 제도로 구분할 수 있다(US EPA, 2015c, 2015d). 두 가지 제도로 분리된 가장 큰 이유는 대기질 악화 방지의 경우 달성지역의 오염원들이 현 상태의 대기환경이 향후 기준 달성을 충분히 이루는 범위 내에서 대기질을 관리하기 위한 것이고, 신규 배출원 검토의 경우 이미 미달성인 지역의 달성목표 구현에 배출원이 방해가 되지 않도록 하기 위함이다. 또한, 앞서 언급된 대기환경기준 이행계획에서는 현재 달성/미달성 상태에 따라 필요한 배출량 제어기술 수준을 다르게 요구하고 있다.

신규 배출원 제한 제도는 현재 대기질이 환경기준을 초과하는 상태에 대한 프로그램이므로 신규 혹은 변경에 의한 해당 지역의 총 배출량 증가 자체를 허가하지 않는다. 따라서, 신규 혹은 변경을 요청하는 경우, 허가 신청자가 자신의 다른 배출 공정으로부터 배출량을 감축하거나 해당 지역의 다른 배출원으로부터 배출 허가량을 획득하여 추가 배출량을 상쇄해야 한다. 다만, 미달성 정도가 심한 경우에는 추가되는 배출량보다도 더 많은 배출량을 상쇄하는(Offset) 의무가 지워질 수 있다(US EPA, 2015d). 또한 추가되는 배출량에 대한 배출제어 기술은 허가권 신청 당시 가장 효율이 높은 LAER (Lowest Achievable Emission Rate) 수준으로 적용해야 한다. 동시에 배출 허가권과는 별도로 미달성 지역의 기존 공정들은 RACT (Reasonably Available Control Technology) 수준의 제어

기술을 적용해야 한다.

대기질 악화 방지 제도는 현재 대기질이 대기환경 기준 보다 낮은 상태에 대한 프로그램이므로 신규 혹은 변경에 의한 배출량 증가를 어느 정도 허용하고 있다. 방지 기술 측면에서 신규 배출원 제한과 같이 LAER 수준의 제어 효율을 요구하지는 않으나, 현존하는 기술 중 경제성 등을 고려한 가장 적절한 방지 기술인 BACT (Best Available Control Technology)를 의무적으로 적용한다. 다만, 허용 배출량이 대기환경 기준을 초과하지 않더라도 해당 지역에서 현 수준의 대기질을 유지하기 위한 “대기질 악화를 위한 최대 허용 배출량” (PSD Increment)이라는 개념을 도입하였으나, 실제 적용 시 기상 및 대기환경 조건에 따라 변동되는 농도를 기준으로 한 적용은 현실성이 떨어져, 원래 목표인 농도 변화가 아닌 배출량 변화를 추적하는 방식으로 변경됨에 따라 많은 문제를 야기시켰다 (Stensvaag, 2006). 이것을 포함하여 현재 미국의 대기질 악화 방지 제도는 매우 복잡하며 많은 문제점을 낳고 있다. 앞서 언급한 대기관리를 위한 다른 프로그램들은 미 환경청에서 완결된 지침을 준비한 반면, 대기질 악화 방지의 경우 1990년에 지침 초안이 나온 이후로 최종판이 아직 발간되지 못하고 있으며, 1990년 지침 초안의 별명이 “Puzzle Book”일 정도로 매우 복잡하다 (Lilley and Day, 2007). 때문에 2002년 “NSR Reform” (US EPA, 2007b)으로, 최근에는 대통령령에 의한 “Permit Streamlining”의 일환으로 개혁의 대상이 되었다 (US EPA, 2017d).

이 외 최근에 추가된 사항으로 PM_{2.5} 배출 허가권과 관련된 기술 분석은 기존에는 1차 오염물질만을 대상으로 가우시안 플룸 모델인 AERMOD를 이용하던 것에 반하여 앞으로는 광화학 모델을 이용하여 전구물질에 의한 2차 대기오염물질의 영향 평가가 포함된다 (US EPA, 2016i). 다만, 광화학 모델은 1차 오염물질 농도 평가에는 사용이 불가하다.

건설 전 허가(Preconstruction permit)에 따라 신규 혹은 변경이 종료되면 시설 운영을 위해서는 운영 허가(Operating permit)를 얻어야 한다. 대형 점오염원

의 경우 청정 대기법 5장, 즉 Title V에 해당되어 때때로 Title V 허가라고 부르기도 한다. 사실 Title V 허가는 준법감시를 효과적으로 수행하기 위한 제도이다 (US EPA, 2015e). Title V 허가 제도가 지자체에게 중요한 이유는 청정대기법에서 공식적으로 대기관리 프로그램을 위해서만 사용할 수 있는 비용을 Title V 허가 승인과정에서 확보할 수 있기 때문이다. 대부분의 지자체는 대기관리를 위한 비용의 상당 부분을 여기에서 충당하고 있다.

국내의 경우 통합환경관리 제도와 관련하여 미국과 유사한 제도를 적용 중에 있으나, 그 대상이 주로 1차 오염물질에 제한되고 있으며, 국내에서 현재 많은 관심이 모아지고 있는 PM_{2.5} 전구물질의 배출과 대기 중 2차 생성에 대한 영향평가 방법과 준비가 필요하다. 통합환경관리 제도에서 2차 대기오염물질에 대한 평가는 광화학 모델을 이용한 평가가 가능하나, 자세한 활용 지침 등은 아직 정해지지 않고 있다. 또한, 현재 국내의 전반적 초미세먼지 농도 현황이 대기환경기준을 초과하고 있으며, 2018년 3월 강화된 대기환경기준을 만족하기 위해서는 상당한 저감노력이 필요하다는 점을 고려하면 향후 배출량 허가제도와 대기질 관리제도의 연계 필요성이 중요할 것으로 예상된다. 특히, 국내의 국토 면적, 기상조건, 배출량과 인구 밀집도를 고려하면 국지 규모의 노출평가가 중요하며, 이 경우 미 환경청의 NATA (National Air Toxics Assessment; <https://www.epa.gov/national-air-toxics-assessment>)와 같이 1차 및 2차 대기오염물질의 노출평가 체계 구성이 필요하다. 미 환경청의 2011년 NATA 보고서에는 이용되는 자료와 방법론에 제한점을 언급하고 있으나, 중금속류와 diesel PM 등 초미세먼지 구성성분에 대한 평가를 포함하며, 벤젠 등은 다른 가스상 대기오염물질의 대리인자로 활용되기도 하였다.

2.6.2 배출량 제어 기술 및 준법감시 (Compliance)

한편 앞서 언급한 여러가지 대기오염 방지기술은

대개의 경우 사례별로(case-by-case) 검토하게 되는데, 어떤 기술을 적용하는 것이 대기질 악화 방지 혹은 신규 배출원 제한 제도의 규정을 만족하는지 판정하는 것이 배출허가권 심사의 매우 중요한 부분이다. 따라서 미 환경청은 이를 위하여 Clean Air Technology Center를 통해 RBLC(RACT/BACT/LAER Clearinghouse) 및 대기오염 방지 비용 편람(Air Pollution Control Cost Manual)을 제공하고 있다(US EPA, 2016j, 2016k). 각 주에서는 배출 허가권 심사 시 이러한 정보 검색을 통해 허가권 신청 업체가 충분한 오염물질 제어를 하고 있는지 가늠할 수 있다.

배출 허가권 제도의 효과적인 운용은 적절한 준법 감시가 병행되어야 한다. 따라서 미 환경청은 2016년 10월 4일 준법감시를 위한 효과적인 측정 전략을 담은 Clean Air Act Stationary Source Compliance Monitoring Strategy를 발표했다(US EPA, 2016l). 이 전략의 5대 목표는 준법감시 측정의 일관성과 유연성을 확보하고, 미 환경청과 주 정부의 긴밀한 의사소통 개선, 측정가능한 대기환경 개선에 초점을 맞춘 프로그램 개발, 준법여부 판단을 위한 각종 도구의 발굴 및 활용을 위한 제도 개발, 그리고 준법여부 평가의 일관된 수준 확보이다. 이러한 전략이 중요한 이유는 기 언급된 연돌에서의 응축성 $PM_{2.5}$ 측정 기법인 Method 202의 예에서 보았듯이, 보고 의무 등의 규정과 더불어 그것을 실제로 구현할 수 있는 도구들이 적절한 시기에 이용 가능하지 않거나 충분한 지침이 주어지지 않으면 대기관리를 위한 프로그램의 운용은 비효율적이고, 최악의 경우 대기관리를 위한 의무 사항을 이행할 수 없게 된다. 한편, 기술과 환경은 지속적으로 변화하므로 전략이나 프로그램 또한 계속해서 진화할 필요가 있다. 따라서 앞서 언급된 다른 전략과 마찬가지로 Clean Air Act Stationary Source Compliance Monitoring Strategy의 경우도 향후 개정에 대비하여 전 과정이 동적으로 변화 가능한 준비의 필요성을 강조하고 있다.

최근 국내에서도 $PM_{2.5}$ 관리에 있어 준법감시의 중요성은 강조되고 있다. 중앙 정부에서는 배출 등을

정량적으로 감독 평가할 수 있는 방법 마련과 함께 지방 정부에서는 이를 실제 현장에서 적극적으로 활용할 수 있는 체계마련이 중요할 것이다. 국내에서도 기존에는 여과성 미세먼지 배출량을 측정하던 것에서 탈피하여 현재 응축성 미세먼지에 대한 측정 및 관리방안에 대한 연구가 수행되고 있다(Lee *et al.*, 2017; Gong *et al.*, 2016). 미국과 마찬가지로 다양한 배출원에 대한 측정 및 관리가 필요하다는 점에서 표준화된 측정기술 개발 및 적용이 필요할 것으로 예상된다.

2.7 국제협력

대기오염은 기본적으로 국경을 넘어 이웃한 국가의 대기질에 영향을 미친다. 따라서, 북미 지역에서도 이러한 특성을 반영하여 다양한 분야에서 $PM_{2.5}$ 관리를 위해 국제적으로 협력하고 있다. 가장 대표적인 것이 앞서 인용한 NARSTO 활동이다. NARSTO 활동은 현재 $PM_{2.5}$ 관리체계의 근간을 마련하였으며, 동시에 전반적인 미국의 대기관리에 많은 영향을 끼쳤다. 한편 설계치와 관련된 예외적 사례의 경우 미국은 캐나다와 멕시코 접경지역에 대한 산불, 아프리카 대륙으로부터 이동해 오는 사하라 먼지와 같은 대규모 자연활동에 의한 $PM_{2.5}$ 문제에 대응, 공해상과 국경 연안해 선박에 의한 배출량 저감노력(US EPA, 2014c), 광역규모의 대기질 모사를 위해 캐나다 및 멕시코와의 배출량 자료 공유를 활발히 수행하고 있다(US EPA, 2015f, 2013). 또한, 분석 도구의 일관성 및 성능 개선을 위해 미국-유럽간 공동 연구도 꾸준히 수행해오고 있다(US EPA, 2017e; Nopmongcol *et al.*, 2012; Vautard *et al.*, 2012; Rao *et al.*, 2011). 마지막으로 허가권 및 시행계획 개발을 위해 필요한 오염제어 기술정보도 RBLC를 통해 캐나다, 멕시코와 공유하고 있다. 이러한 일련의 정보 공유 및 공개활동은 궁극적으로 인접 국가간 $PM_{2.5}$ 관리에 도움이 될 것으로 판단된다. 이외에도 미 환경청은 중국을 포함한 수많은 국가와 대기관련 국제협력을 추구하고 있다. 국내의 경우 중국, 북한, 일본 등 인접 국가들과 배출

량, 관측자료 등 국내 PM_{2.5} 관리 시 활용할 수 있는 기초 자료 확보를 마련할 수 있을 것으로 판단된다.

2.8 분석도구의 개선

미국의 PM_{2.5} 관리와 관련된 분석도구로써 수치모델들은 매우 독특한 지위를 갖는데, 바로 “Appendix W”로 불리우는 정책지원용 대기질 수치모사 모델과 관련된 법령 때문이다 (US EPA, 2017f). 특별히 Appendix W에서는 배출허가권 심사와 시행계획에서의 대기환경기준 달성 증명용 모사에 관련된 내용을 담고 있다. 기존에는 배출허가권 심사와 관련해서 심사대상 배출원으로부터 반경 25 km 내의 단거리 영향 모사에는 AERMOD를, 그 이상의 장거리 영향 분석에는 CALPUFF를 이용하도록 명시하였다. 시행계획의 달성 증명을 위해서는 크게 CMAQ (Community Multi-scale Air Quality Model) (Byun and Schere, 2006) 및 CAMx (Comprehensive Air quality Model with eXtension) (Ramboll-Environ, 2016) 혹은 이와 유사한 3차원 광화학 모델을 사용하였다. 배출허가권 심사와 관련해서 2017년 개정된 법령의 두드러진 변화는 바로 장거리 이동 영향 평가에 사용되던 CALPUFF를 공식 목록에서 제외하고 3차원 광화학 모델로 대체한 것이다. 다른 변화는 기존 AERMOD 모사용 기상장 준비는 반드시 측정자료를 AERMET으로 처리하여 사용하던 것에 반해, MMIF (Mesoscale Model Interface Program)를 개발, 제공하여 시행계획 등에 이용되는 3차원 광화학 모델의 기상 입력자료 생성 모델인 WRF (Weather Research and Forecasting) 모델을 이용할 수 있도록 한 점이다. 한편 앞서 언급한 시행계획의 전구물질 증명에서는 2차 PM_{2.5}에 대해 CMAQ 혹은 CAMx를 사용하도록 권고하며, 배출허가권 관련한 2차 PM_{2.5}에 대해서는 반드시 CMAQ 또는 CAMx를 직접 사용하거나, 이 두 모델에 기반한 접근법을 사용하도록 명시하고 있다 (US EPA, 2017g).

대기질 모델 자체는 이러한 2차 생성 PM_{2.5}의 정책적, 과학적 중요도 증가에 따라 PM_{2.5}에 대한 대대적

인 개선을 담게 되는데, 최근 PM_{2.5}의 산도 (Acidity) 및 이온 평형 (Ion balance)의 중요성을 반영하여 광물질 (Mineral)을 보다 구체적으로 모사하는 모듈을 추가하고 기존 모사에서 큰 취약점으로 지적 받아온 SOA (Secondary Organic Aerosol)에 대해서도 VBS (Volatility Basis Set) 도입 (Koo *et al.*, 2014)과 기존 모듈에 비해 보다 상세한 2차 유기 입자의 전구물질 모사 등 지속적인 개선에 힘쓰고 있다. CMAQ v5.0 공개 버전 이후 추가된 광물질들 (특히 K⁺와 Ca²⁺)은 이온 평형과 열역학평형 계산, 황산염 생성 (예: Fe²⁺와 Mg²⁺) 및 isoprene epoxydiol (IEPOX)을 포함한 SOA 형성에 관여하며 (Appel *et al.*, 2013), IEPOX는 황산염과 PM_{2.5}의 산도와 연관이 있는 것으로 알려져 있다 (Appel *et al.*, 2017). 최근 동북아 지역에 대한 PM_{2.5} 대기질 모사에서 광물질 농도에 따라 모사 정확도가 개선됨을 보고되었다 (Itahashi *et al.*, 2018). 한편 해안 등지에서의 해염 입자 및 할로겐 화학의 중요성을 인식하고, 이를 기체상 및 PM_{2.5} 관련 모사에 반영하고 있다. 또한, 오존 생성과 같은 기체 반응에서 중요한 라디칼 (Radical) 반응이 PM_{2.5} 관련 화학반응에서의 중요도를 인지하여 기체상 반응 메커니즘 역시 지속적으로 보강되고 있다.

정책적으로 중요한 기여도와 민감도를 정량적으로 도출할 수 있는 진단 도구의 개선과 결과해석 방법론에 대한 연구도 꾸준히 진행되고 있다. 특히 PM_{2.5} 기여도 및 민감도의 경우 사용되는 도구와 결과 해석 방법에 따라 최종적인 정책적 의미가 달라질 수 있다. 예를 들어 앞서 언급한 시행계획의 한 요소로서 수행할 수 있는 전구물질 증명을 위한 지침 (US EPA, 2016c)에서는 SO₂-sulfate와 같이 전구물질과 평가 대상이 되는 PM_{2.5} 성분 농도를 규정하고 있다. 다만, 이와 관련된 지침 역시 향후 개정에 따라서는 현재와 차이를 보일 수 있다.

다른 예로, 민감도와 기여도 분석에 많이 사용되는 BFM (Brute Force Method)의 경우 개별 전구물질 혹은 배출원에 대한 결과와 전체적인 배출량에 대한 결과를 비교하면 일치하지 않을 가능성이 높다 (Clappi-

er *et al.*, 2017). 이는 특히 암모니아 농도가 중요한 황산염, 질산염의 농도가 높은 여름철 혹은 겨울철에 두드러진다. 또한 BFM과 대비하여 CAMx에서 제공하는 PM_{2.5} 기여도 분석 도구인 Particulate Source Apportionment Technique의 경우 암모니아에 대한 민감도와 기여도 분석 시, 암모니아 농도 변화에 따른 직간접(Direct/Indirect) 효과를 처리하는 방식이 달라져 정책에 따라 그 적용성이 달라질 수 있다. 따라서, 이러한 고도화된 모사 도구의 사용에 있어서 학계의 꾸준한 연구뿐 아니라 실무에서 이를 적용 시에는 신중한 검토가 매우 중요하다.

국내에서는 PM_{2.5} 농도와 관련하여 국내외 기여도 분석, 주요 오염원에 대한 정량적 평가, 배출원-수용지 관계 분석, 배출량 삭감에 따른 농도 변화 등에 진단 도구 및 방법 등이 적용되고 있으며, 기 언급된 바와 같이 적용 방법 차이에 따라 다른 결과가 제시될 수 있으므로 보편적인 이해가 가능하도록 학계에서는 방법론에 대한 많은 토론과 검토가 필요할 것으로 예상된다. 이런 관점에서 중국의 MICS-Asia (Gao *et al.*, 2018), 일본이 J-STREAM (Chatani *et al.*, 2018)와 같이 국내 상황에 적합한 국가 차원의 대기질 모사 체계를 마련해 가는 것도 한 방편으로 판단된다.

3. 요약 및 제언

본 원고는 미국의 PM_{2.5} 관리 제도를 다각도로 분석하여 향후 국내 PM_{2.5} 관리 방안 재고 시 유의미한 정보를 제공하고자 하였다. 우선, 미국에서 PM_{2.5} 관리의 기본 목표는 위해성과 관련된 대기 중 PM_{2.5} 농도의 형성 과정에 대한 과학적인 이해와, 이를 바탕으로 한 정량적 관리이다. 둘째, 대기관리 체계는 효과적인 목표 달성을 위한 주요 기본 원칙을 준수하는 동시에(예: 대기환경기준농도 설정 시 오로지 위해성만을 고려), 주기적인 재검토 과정을 통해 새로운 정보를 반영할 수 있는 제도의 유연성을 보장한다. 셋째, 측정과 관련하여 미국은 효과적인 저감대책 수립을 위한 통찰력있는 측정을 목표로 집중 측정소의 확

대 전략과 함께, 마이크로 센서와 같은 신기술들이 대기관리 목표에 접목될 수 있도록 측정 체계를 수정 중에 있으며, 원소탄소 측정방법의 재검토와 같이 꾸준하고 지속적인 연구개발을 추구하고 있다. 넷째, 대기관리 계획 및 실천에 있어 핵심이 되는 배출량의 경우 지속적인 산정지침 제공과 정보 갱신을 지원하며, 정보공개 통합 시스템을 개발하여 향후 보다 효율적인 관리 기반을 다지고 있다. 다섯째, 배출허가권 제도와 관련하여 대기환경기준 달성 여부에 따른 탄력적인 프로그램을 운영하며, 제어 기술에 대한 꾸준한 자료 확보와 제공을 통해 지방 정부를 지원하고 있다. 준법감시에 대해서도 앞선 대기질 측정 체계를 마찬가지로 진보된 기술을 반영하면서 유연성있는 원칙을 도모한다. 여섯째, 미국은 인접 국가와 접경 지역에서의 PM_{2.5} 관리가 자국만의 노력으로 해결되지 않음을 인식하고, 배출량, 제거 기술, 분석 기술 등 전반적인 기술자료의 공유 및 일관성 있는 접근법을 찾고자 국제 협력을 하고 있다. 마지막으로, 미국의 PM_{2.5} 관리에서 매우 독특한 위치를 갖는 수치모델은 과학적인 정책 수립에 활용되며, 지속적으로 이용 방법론에 대한 논의와 최신 기술이 개발되고 있다.

동시에 미국이 지난 20년의 역사를 거치며 혼란을 겪었거나 대대적인 수정이 필요하였던 사항에 대해, 국내에서 똑같은 실행착오를 겪지 않기를 바라는 몇 가지는 다음과 같다. 첫째, 응축성 PM_{2.5} 측정법과 같이 실무에서 필요한 방법이나 기술의 부재와 행정의 무 중복 등은 미리 지양되어야 한다. 둘째, 미국의 배출허가권 제도의 경우 태생적으로 미국에서 PM_{2.5}에 대한 과학적 기반 확립 전에 시작된 프로그램으로 필요에 따라 부분적인 수정을 거듭하며 지금에 이르렀다. 특히 달성지역의 허가권 프로그램인 대기질 악화 방지 제도는 현재에도 그 복잡함과 모호함으로 많은 혼선을 야기하고 있다. 특히 배출허가권 제도가 초기에는 농도 규제를 목표하였으나, 이후 배출량 위주로 선회되면서 2차 PM_{2.5} 관련 평가기법이 최근에 추가되는 등 많은 문제점을 보이고 있다. 부분적인 수정으로 인한 난해성과 어려운 실행과정을 고려할 때,

이러한 제도의 유지 여부가 큰 문제로 남아있다(US EPA, 2015g). 셋째, 배출허가권 관련 수치모사에서 2차 생성관련 내용을 보다 일찍 반영할 수 있었음에도 불구하고 최근에 그 중요성을 인식하게 되었다.

미국의 PM_{2.5} 관리와 일련의 관련 자료를 검토한 결과로부터 향후 국내 PM_{2.5} 관리에 대해 중요한 시사점을 정리하면 다음과 같다.

1. 대기 중 PM_{2.5} 농도에 대한 정확한 목표 설정이 필요하며, 과학적 분석을 통한 정량적 관리방안을 마련해야 한다.
2. 중앙 정부에서는 주요 관리 원칙을 기반으로 지방 정부와 역할 분담이 필요하다. 중앙 정부는 PM_{2.5} 관리를 위한 지침 및 방법, 기술, 도구를 선제적 안목으로 개발, 개선하고, 시의 적절하게 지방 정부에 제공하여 효과적이고 효율적인 관리가 가능하게 한다.
3. 새로운 정책 및 기술개발 초기 단계부터 실제적 관리자인 지방 정부의 의견을 반영하기 위한 기반과 제도를 마련하고 운영한다.
4. PM_{2.5} 관리에서 측정 및 수치모사와 같은 기술적인 부분에서 통찰력있고 과학적인 이해를 얻기위한 지속적인 개발과 투자가 필요하다.
5. PM_{2.5} 관리를 위한 기본 원칙이 준수됨과 동시에 신기술 및 새로운 과학적 사실을 실무 정책에 반영하기 위한 유연성이 확보되어야 한다.
6. 부분적인 일부 수정만으로 목표 달성이 어려운 관리 제도의 경우 조기 개혁을 통한 새로운 제도 모색이 현실적일 수 있다.

비록 미국의 PM_{2.5} 관리제도는 현재에도 여러 문제점을 안고 있으나 앞서 기술한 바와 같이, 지난 약 20년간 미국에서의 대기질 개선 결과는 긍정적으로 평가할 수 있다. 따라서, 본 기술자료에서 분석한 미국 관리제도의 장단점이 향후 국내 PM_{2.5} 관리 방안 개선에 있어 활용되기를 기대한다.

감사의 글

이 연구는 환경부 연구용역사업 (국가산업단지 주

변지역 등 대기질 권역관리체계 마련 연구)과 정부 (과학기술정보통신부, 환경부, 보건복지부) 재원 한국연구재단 미세먼지 국가전략프로젝트사업(2017 M3D8A1092020)의 일환으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

- Air Pollution Training Institute (APTI) (2004) Preparation of Fine Particulate Emission Inventories. Research Triangle Park, NC.
- Appel, K.W., Napelenok, S.L., Foley, K.M., Pye, H.O., Hogrefe, C., Luecken, D.J., Bash, J.O., Roselle, S.J., Pleim, J.E., Foroutan, H. (2017) Description and evaluation of the Community Multiscale Air Quality (CMAQ) modeling system version 5.1, *Geoscientific Model Development*, 10(4), 1703-1732.
- Appel, K.W., Pouliot, G.A., Simon, H., Sarwar, G., Pye, H.O.T., Napelenok, S.L., Akhtar, F., Roselle, S.J. (2013) Evaluation of dust and trace metal estimates from the Community Multiscale Air Quality (CMAQ) model version 5.0, *Geoscientific Model Development*, 6(4), 883-899. <https://doi.org/10.5194/gmd-6-883-2013>
- Byun, D., Schere, K.L. (2006) Review of the Governing Equations, Computational Algorithms, and Other Components of the Models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) Modeling System. *Applied Mechanics Reviews*, 59(2), 51-77. <https://doi.org/10.1115/1.2128636>
- Chatani, S., Yamaji, K., Sakurai, T., Itahashi, S., Shimadera, H., Kitayama, K., Hayami, H. (2018) Overview of Model Inter-Comparison in Japan's Study for Reference Air Quality Modeling (J-STREAM), *Atmosphere*, 9(1), 19. doi:10.3390/atmos9010019
- Chow, J.C., Watson, J.G., Chen, L.-W.A., Arnott, W.P., Moosmüller, H., Fung, K. (2004) Equivalence of elemental carbon by thermal/optical reflectance and transmittance with different temperature protocols, *Environmental Science & Technology*, 38(16), 4414-4422.
- Chow, J.C., Watson, J.G., Chen, L.-W.A., Rice, J., Frank, N.H. (2010) Quantification of PM_{2.5} organic carbon sampling artifacts in US networks, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(12), 5223-5239. <https://doi.org/10.5194/acp-10-5223-2010>
- Clappier, A., Belis, C.A., Pernigotti, D., Thunis, P. (2017) Source

- apportionment and sensitivity analysis: two methodologies with two different purposes, *Geoscientific Model Development*, 10(11), 4245-4256. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-4245-2017>
- Cohan, D.S., Boylan, J.W., Marmur, A., Khan, M.N. (2007) An Integrated Framework for Multipollutant Air Quality Management and Its Application in Georgia, *Environmental Management*, 40(4), 545-554. <https://doi.org/10.1007/s00267-006-0228-4>
- Dillner, A. (2016) Recent Changes to the IMPROVE and CSN Organic Carbon Artifact Adjustment Method. https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-10/documents/recent_changes_to_the_improve.pdf (accessed 2018)
- Environmental Council of the States (ECOS) (2016) State Delegation of Environmental Acts. <https://www.ecos.org/wp-content/uploads/2016/02/February-2016-Green-Report.doc> (accessed 2018).
- Galvis, B., Bergin, Michael, Boylan, J., Huang, Y., Bergin, Michelle, Russell, A.G. (2015) Air quality impacts and health-benefit valuation of a low-emission technology for rail yard locomotives in Atlanta Georgia, *Science of The Total Environment*, 533(15), 156-164. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.06.064>
- Gao, M., Han, Z., Liu, Z., Li, M., Xin, J., Tao, Z., Li, J., Kang, J.-E., Huang, K., Dong, X., Zhuang, B., Li, S., Ge, B., Wu, Q., Cheng, Y., Wang, Y., Lee, H.-J., Kim, C.-H., Fu, J.S., Wang, T., Chin, M., Woo, J.-H., Zhang, Q., Wang, Z., Carmichael, G.R. (2018) Air quality and climate change, Topic 3 of the Model Inter-Comparison Study for Asia Phase III (MICS-Asia III) - Part 1: Overview and model evaluation, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(7), 4859-4884. doi:10.5194/acp-18-4859-2018
- Gong, B., Kim, J., Kim, H., Lee, S., Kim, H., Jo, J., Kim, J., Gang, D., Park, J.M., Hong, J. (2016) A Study on the Characteristics of Condensable Fine Particles in Flue Gas, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 32(5), 501-512. doi:10.5572/kosae.2016.32.5.501. (in Korean with English abstract)
- Hall, E.S., Kaushik, S.M., Vanderpool, R.W., Duvall, R.M., Beaver, M.R., Long, R.W., Solomon, P.A. (2014) Integrating sensor monitoring technology into the current air pollution regulatory support paradigm: Practical considerations, *American Journal of Environmental Engineering*, 4(6), 147-154.
- Itahashi, S., Yamaji, K., Chatani, S., Hayami, H. (2018) Refinement of Modeled Aqueous-Phase Sulfate Production via the Fe- and Mn-Catalyzed Oxidation Pathway, *Atmosphere*, 9(4), 132. <https://doi.org/10.3390/atmos9040132>
- Jeffries, H. (2003) How Well Do Quality Models Simulate Air Pollution Emissions & Corresponding Reductions Needed to Protect Health and the Environment?, Air Quality in Houston, Fall 2003 Seminar Series, Shell Center for Sustainability, Rice University, November 4, 2003
- Jiang, B., Xia, D. (2017) Role identification of NH₃ in atmospheric secondary new particle formation in haze occurrence of China, *Atmospheric Environment*, 163, 107-117. doi:10.1016/j.atmosenv.2017.05.035
- Karmel, P.E., FitzGibbon, T.N. (2002) PM_{2.5}: Federal and California Regulation of Fine Particulate Air Pollution, *California Environmental Law Reporter* 18.
- Khan, B., Hays, M.D., Geron, C., Jetter, J. (2012) Differences in the OC/EC Ratios that Characterize Ambient and Source Aerosols due to Thermal-Optical Analysis, *Aerosol Science and Technology*, 46(2), 127-137. <https://doi.org/10.1080/02786826.2011.609194>
- Kim, S., Bae, C., Kim, B.U., Kim, H.C. (2017a) PM_{2.5} Simulations for the Seoul Metropolitan Area: (I) Contributions of Precursor Emissions in the 2013 CAPSS Emissions Inventory, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 33(2), 139-158. doi:10.5572/kosae.2017.33.2.139. (in Korean with English abstract)
- Kim, S., Bae, C., Yoo, C., Kim, B.U., Kim, H.C., Moon, N. (2017b) PM_{2.5} Simulations for the Seoul Metropolitan Area: (II) Estimation of Self-Contributions and Emission-to-PM_{2.5} Conversion Rates for Each Source Category, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 33(4), 377-392. doi:10.5572/kosae.2017.33.4.377. (in Korean with English abstract)
- Koo, B., Knipping, E., Yarwood, G. (2014) 1.5-Dimensional volatility basis set approach for modeling organic aerosol in CAMx and CMAQ, *Atmospheric Environment* 95, 158-164. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.06.031>
- Lee, I.H., Choi, D.S., Ko, M.J., Park, Y.-K. (2017) 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. doi:10.5572/kosae.2017.33.4.319. (in Korean with English abstract)
- Lilley, K.A., Day, A. (2007) New Source Review Rulemakings & Court Decisions. <http://www.lawseminars.com/materials/07AIRWA/Lilley%2009-26-07.pdf> (accessed 2018).
- Link, M.F., Kim, J., Park, G., Lee, T., Park, T., Babar, Z.B., Sung, K.,

- Kim, P., Kang, S., Kim, J.S., Choi, Y., Son, J., Lim, H.-J., Farmer, D.K. (2017) Elevated production of NH₄, NO₃ from the photochemical processing of vehicle exhaust: Implications for air quality in the Seoul Metropolitan Region, *Atmospheric Environment*, 156, 95-101. doi:10.1016/j.atmosenv.2017.02.031
- Long, C.M., Nascarella, M.A., Valberg, P.A. (2013) Carbon black vs. black carbon and other airborne materials containing elemental carbon: Physical and chemical distinctions, *Environmental Pollution*, 181, 271-286. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.06.009>
- Meng, Z., Lin, W., Zhang, R., Han, Z., Jia, X. (2017) Summertime ambient ammonia and its effects on ammonium aerosol in urban Beijing, China. *Science of The Total Environment*, 579, 1521-1530. doi:10.1016/j.scitotenv.2016.11.159
- Mills, A.D., Wiser, R.H., Seel, J. (2017) Power Plant Retirements: Trends and Possible Drivers. <https://doi.org/10.2172/1411667> (accessed 2018).
- Nolte, C.G., Appel, K.W., Kelly, J.T., Bhawe, P.V., Fahey, K.M., Collett Jr, J.L., Zhang, L., Young, J.O. (2015) Evaluation of the Community Multiscale Air Quality (CMAQ) model v5. 0 against size-resolved measurements of inorganic particle composition across sites in North America, *Geoscientific Model Development*, 8(9), 2877-2892. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-2877-2015>
- Nopmongcol, U., Koo, B., Tai, E., Jung, J., Piyachaturawat, P., Emery, C., Yarwood, G., Pirovano, G., Mitsakou, C., Kallos, G. (2012) Modeling Europe with CAMx for the Air Quality Model Evaluation International Initiative (AQMEII), *Atmospheric Environment*, 53, 177-185. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.11.023>
- North American Research Strategy for Tropospheric Ozone (NARSTO) (2004) *Particulate Matter Science for Policy Makers: A NARSTO Assessment*, Cambridge University Press, Cambridge, England.
- Oreskes, N., Shrader-Frechette, K., Belitz, K. (1994) Verification, validation, and confirmation of numerical models in the earth sciences, *Science*, 263(5147), 641-646.
- Ramboll-Environ (2016) *Comprehensive Air Quality Model with Extensions*. <http://www.camx.com/> (accessed 2016).
- Rao, S.T., Galmarini, S., Puckett, K. (2011) Air Quality Model Evaluation International Initiative (AQMEII): Advancing the State of the Science in Regional Photochemical Modeling and Its Applications, *Bulletin of the American Meteorological Society* 92, 23-30. <https://doi.org/10.1175/2010BAMS3069.1>
- Russell, A., Dennis, R. (2000) NARSTO critical review of photochemical models and modeling, *Atmospheric Environment*, 34(12-14), 2283-2324.
- Stensvaag, J.M. (2006) Preventing Significant Deterioration Under the Clean Air Act: Baselines, Increments, and Ceilings-Part II, *Environmental Law Reporter*, 36, 10017-10046.
- U.S. Energy Information Administration (US EIA) (2014) Almost all power plants that retired in the past decade were powered by fossil fuels. *Today in Energy*. <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=34452> (accessed 2018).
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2004) Map of Nonattainment Areas | Fine Particle (PM_{2.5}) Designations. <https://www3.epa.gov/pmdesignations/1997standards/documents/final/nonattainingreen.htm> (accessed 2017).
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2007a) Guidance on the Use of Models and Other Analyses for Demonstrating Attainment of Air Quality Goals for Ozone, PM_{2.5}, and Regional Haze (No. EPA-454/B-07-002). <https://www3.epa.gov/scram001/guidance/guide/final-03-pm-rh-guidance.pdf> (accessed 2018).
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2007b) Prevention of Significant Deterioration (PSD) and Nonattainment New Source Review (NSR): Removal of Vacated Elements, 72 FR 32526. <https://www.federalregister.gov/documents/2007/06/13/E7-11289/prevention-of-significant-deterioration-psd-and-nonattainment-new-source-review-nsr-removal-of> (accessed 2018).
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2008a) *Ambient Air Monitoring Strategy for State, Local, and Tribal Air Agencies*. Research Triangle Park, NC. <https://www3.epa.gov/ttnamti1/files/ambient/monitorstrat/AAMS%20for%20SLTs%20%20-%20FINAL%20Dec%202008.pdf> (accessed 2018).
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2008b) *Air Emissions Reporting Requirements*, 80 FR 8787. <https://www.gpo.gov/fdsys/pkg/FR-2015-02-19/pdf/2015-03470.pdf> (accessed 2018).
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2010) Field Evaluation of an Improved Method for Sampling and Analysis of Filterable and Condensable Particulate Matter, EPA-HQ-OAR-2008-0348. <https://www3.epa.gov/ttnemc01/methods/preamble201a202.pdf> (accessed 2018).

- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2012) Regulatory Impact Analysis for the Proposed Revisions to the National Ambient Air Quality Standards for Particulate Matter (No. EPA-452/R-12-003). <https://www3.epa.gov/ttnecas1/regdata/RIAs/finalria.pdf> (accessed 2018).
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2013) U.S.-Mexico Border 2020 Program. <https://www.epa.gov/border2020> (accessed 2017).
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2014a) Process of Reviewing the National Ambient Air Quality Standards <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants/process-reviewing-national-ambient-air-quality-standards> (accessed 2017).
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2014b) NAAQS Implementation Process. <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants/naaqs-implementation-process> (accessed 2017).
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2014c) Collaboration with Mexico to Reduce Emissions from Ships. <https://www.epa.gov/international-cooperation/collaboration-mexico-reduce-emissions-ships> (accessed 2017).
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2015a) Benefits and Costs of the Clean Air Act 1990-2020, the Second Prospective Study. <https://www.epa.gov/clean-air-act-overview/benefits-and-costs-clean-air-act-1990-2020-second-prospective-study> (accessed 2018).
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2015b) SPECIATE Version 4.5 through 4.0. <https://www.epa.gov/air-emissions-modeling/speciate-version-45-through-40> (accessed 2017).
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2015c) Prevention of Significant Deterioration Basic Information. <https://www.epa.gov/nsr/prevention-significant-deterioration-basic-information> (accessed 2018).
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2015d) Nonattainment NSR Basic Information <https://www.epa.gov/nsr/nonattainment-nsr-basic-information> (accessed 2018).
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2015e) Operating Permits Issued under Title V of the Clean Air Act <https://www.epa.gov/title-v-operating-permits> (accessed 2017).
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2015f) U.S.-Canada Air Quality Agreement <https://www.epa.gov/airmarkets/us-canada-air-quality-agreement> (accessed 2017).
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2015g) NSR Regulatory Actions <https://www.epa.gov/nsr/nsr-regulatory-actions> (accessed 2017).
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2016a) Particulate Matter (PM_{2.5}) Trends. <https://www.epa.gov/air-trends/particulate-matter-pm25-trends> (accessed 2017).
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2016b) Table of Historical Particulate Matter (PM) National Ambient Air Quality Standards (NAAQS). <https://www.epa.gov/pm-pollution/table-historical-particulate-matter-pm-national-ambient-air-quality-standards-naaqs> (accessed 2017).
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2016c) Draft PM_{2.5} Precursor Demonstration Guidance. <https://www.epa.gov/pm-pollution/draft-pm25-precursor-demonstration-guidance> (accessed 2017).
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2016d) Particle Pollution Designations Guidance and Data. <https://www.epa.gov/particle-pollution-designations/particle-pollution-designations-guidance-and-data> (accessed 2017).
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2016e) PM_{2.5} NAAQS Final SIP Requirements Rule. <https://www.epa.gov/pm-pollution/pm25-naaqs-final-sip-requirements-rule-july-2016> (accessed 2017).
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2016f) NCore Multipollutant Monitoring Network. <https://www3.epa.gov/ttnamti1/ncore.html> (accessed 2017).
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2016g) Compliance and Emissions Data Reporting Interface (CEDRI). <https://www.epa.gov/electronic-reporting-air-emissions/compliance-and-emissions-data-reporting-interface-cedri> (accessed 2017).
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2016h) E-Enterprise Combined Air Emissions Reporting (CAER). <https://www.epa.gov/e-enterprise/e-enterprise-combined-air-emissions-reporting-caer> (accessed 2017).
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2016i) Guidance on the Development of Modeled Emission Rates for Precursors (MERPs) as a Tier 1 Demonstration Tool for Ozone and PM_{2.5} under the PSD Permitting Program. https://www3.epa.gov/ttn/scram/guidance/guide/EPA454_R_16_006.pdf
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2016j) RACT/BACT/LAER Clearinghouse (RBLC) Basic Information. <https://www.epa.gov/catc/ractbactlaer-clearing->

- house-rblc-basic-information (accessed 2017).
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2016k) Cost Reports and Guidance for Air Pollution Regulations. <https://www.epa.gov/economic-and-cost-analysis-air-pollution-regulations/cost-reports-and-guidance-air-pollution> (accessed 2018).
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2016l) Clean Air Act Stationary Source Compliance Monitoring Strategy. <https://www.epa.gov/compliance/clean-air-act-stationary-source-compliance-monitoring-strategy> (accessed 2018).
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2017a) Green Book, https://www3.epa.gov/airquality/greenbook/mappm25_2012.html (accessed 2017).
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2017b) Air Emissions Inventory Guidance for Implementation of Ozone and Particulate Matter NAAQS and Regional Haze Regulations. Research Triangle Park, NC.
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2017c) Factors Information REtrieval System (FIRE). <https://cfpub.epa.gov/webfire/> (accessed 2017).
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2017d) Streamlining Permitting and Reducing Regulatory Burdens for Domestic Manufacturing, 82 FR 8667, <https://www.gpo.gov/fdsys/pkg/FR-2017-01-30/pdf/2017-02044.pdf> (accessed 2018).
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2017e) The Air Quality Model Evaluation International Initiative (AQMEII). https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?dirEntryId=335518 (accessed 2017).
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2017f) Revisions to the Guideline on Air Quality Models: Enhancements to the AERMOD Dispersion Modeling System and Incorporation of Approaches To Address Ozone and Fine Particulate Matter, 82 FR 5182, <https://www.gpo.gov/fdsys/pkg/FR-2017-01-17/pdf/2016-31747.pdf> (accessed 2018).
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2017g) Use of Photochemical Grid Models for Single-Source Ozone and secondary PM_{2.5} impacts for Permit Program Related Assessments and for NAAQS Attainment Demonstrations for Ozone, PM_{2.5} and Regional Haze. Research Triangle Park, NC.
- Vautard, R., Moran, M.D., Solazzo, E., Gilliam, R.C., Matthias, V., Bianconi, R., Chemel, C., Ferreira, J., Geyer, B., Hansen, A.B., Jericevic, A., Prank, M., Segers, A., Silver, J.D., Werhahn, J., Wolke, R., Rao, S.T., Galmarini, S. (2012) Evaluation of the meteorological forcing used for the Air Quality Model Evaluation International Initiative (AQMEII) air quality simulations, *Atmospheric Environment*, 53, 15-37. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.10.065>
- Whitman v. American Trucking Assns., Inc. (2001) 531 U.S. 457, 121 S. Ct. 903, 149 L. Ed. 2d 1