



기술자료

국내 오존 개선을 위한 미국의 오존 관리 검토와 제언

Review on Ozone Management in US and Recommendations for Domestic Ozone Control

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 and Atmospheric Administration

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

³⁾Department of Environmental and Safety Engineering, Ajou University

접수일 2019년 4월 25일

수정일 2019년 6월 5일

채택일 2019년 6월 10일

Received 25 April 2019

Revised 5 June 2019

Accepted 10 June 2019

*Corresponding author

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

E-mail : soontae.kim@ajou.ac.kr

Abstract This study attempts to provide information for South Korea's domestic ozone control strategy development. To achieve the study goal, we reviewed several aspects of ground level ozone management in US. First, we summarized characteristics of ground level ozone. In our summary, we emphasized currently known physico-chemical nature of ozone is the fact that ozone being a product of two major precursors - NO_x and VOCs - as well as processes that determine source-receptor relationships. Second, we described an overview of current ozone management in US. We highlighted major goals, processes, and tools in the current US ozone management system. Third, we examined history of the US ozone management system including advances of ozone science from 1940s to present. We examined series of historical events and explained how those events led to processes and tools used in the current US ozone management. Special emphases were placed on relationships between various ozone control policies and ozone science advances in US over time. Last, we reviewed lessons learned from past US ozone management practices and suggest what can be adopted and avoided for South Korea's future ozone control strategy.

Key words: Ozone, Air quality, State implementation plan, Air quality modeling, History

1. 서 론

대류권 오존은 인체, 농작물, 생태계에 악영향을 미치며 (Ainsworth, 2017; Chuwah *et al.*, 2015; Monks *et al.*, 2015; Bell *et al.*, 2011, 2007), 국내를 포함한 세계 각국은 오존을 규제 대상 대기오염물질로 규정하고, 농도 개선을 위해 노력하고 있다 (US EPA, 2018a; Shin *et al.*, 2017; Guerreiro *et al.*, 2014; Clean Air Asia, 2010). 그럼에도 불구하고 국내 오존 농도의 장기 추세를 보면, 초미세먼지와는 달리 1990년대부터 2016년까지 대도시와 산업도시를 중심으로 꾸준히 악화

되고 있다 (Ju *et al.*, 2018; Jung *et al.*, 2018; Kim *et al.*, 2018a; Kim and Lee, 2018). 미국의 경우 최근 오존 농도의 악화 경향은 보이지 않으나, 1940년대부터 현재까지 대도시 및 산업 지역에서 오존 문제는 지속되고 있으며 (Parrish *et al.*, 2011), 전 세계적으로도 이와 유사한 현황이다 (Guerreiro *et al.*, 2014; Lelieveld *et al.*, 2013). 그러나, 미국은 오존 문제 해결을 위해 상당히 오랜 기간 동안 노력과 꾸준한 진전을 보이고 있다 (그림 1).

본 기술자료에서는 미국의 과거부터 현재까지 오존 농도 저감을 위한 노력과 대책을 검토하여 국내에서

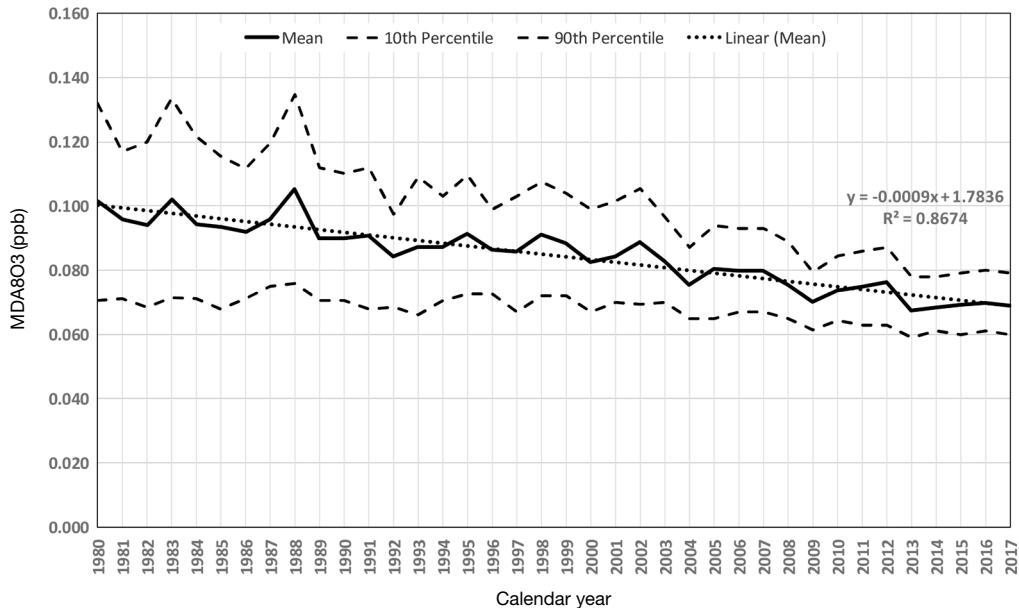


Fig. 1. US national ozone (as maximum daily 8-hour average ozone; MDA8O3) trends for selected 200 Monitors: 90th percentile (upper dashed line), mean (solid line), and 10th percentile (lower dashed line). The regression equation for the mean 'maximum daily 8-hour ozone' (MDA8O3) trend indicates 0.9 ppb/year improvement (Data source: (US EPA, 2018b)).

오존 개선 전략 수립에 있어 유용한 정보를 제공하는 데 목적이 있다. 본고의 구성은 다음과 같다. 첫째, 현재까지 알려진 대류권 오존 오염과 관련된 물리, 화학적 특성을 제어 관점에서 요약한다. 이를 통해 오존 제어가 단편적인 대책이 아닌, 포괄적이고 종합적인 대책이 강구되어야 함을 설명한다. 둘째, 미국의 현행 오존 관리 체계를 정리한다. 이 정리에는 가장 최근에 공표된 2015년 오존 대기환경기준을 중심으로 농도 달성 시행 관련 정보를 포함한다. 여기에서는 오존을 비롯한 대기오염물질의 대책 및 제도 체계의 중요성을 보이고자 한다. 셋째, 앞서 정리한 미국의 오존 관리 체계의 주요 요소에 대한 역사적 배경을 살펴보고 중요한 결정 단계의 쟁점들을 짚어본다. 미국의 경우 대류권 오존 관련 개선 대책 수립 시, 관련된 과학적 사전 기초 지식이 부족한 가운데 관리 정책이 시작되어 다양한 시행착오를 겪었다. 이에 오존 관리의 성공 및 실패 사례들을 중심으로 검토한다. 이를 통해 국내 오존 문제 해결 시 과학적 이해와 접근 필요성을 논의

한다. 넷째, 앞서 언급된 논의를 종합하는 것으로 미국의 오존 관리 시행착오 검토 결과, 관리 체계 현황, 과거 및 현재 쟁점들을 바탕으로 향후 국내에 필요한 오존 관리 전략 체계 및 대응 방안을 추천한다.

2. 오존 대기 오염 문제의 특성

대기 중 오존 농도는 다양한 물리 화학적 과정의 결과이다(Russell and Dennis, 2000). 오존은 전구물질인 질소산화물(Nitrogen Oxides; $\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$)과 휘발성 유기물질(VOCs; Volatile Organic Compounds)이 오존 생성(Ozone Conductive) 기상 조건하에서 복잡한 광화학 반응을 거치며 생성된다(Finlayson-Pitts and Pitts Jr, 1999; Haagen-Smit, 1952). 화학반응의 경우 대개 주 반응 물질은 농도가 낮아지고 생성물의 농도는 높아지게 되는데, 이때 예외적인 것이 오존으로 광화학 반응의 되먹임(feedback)이 있는 경우이다

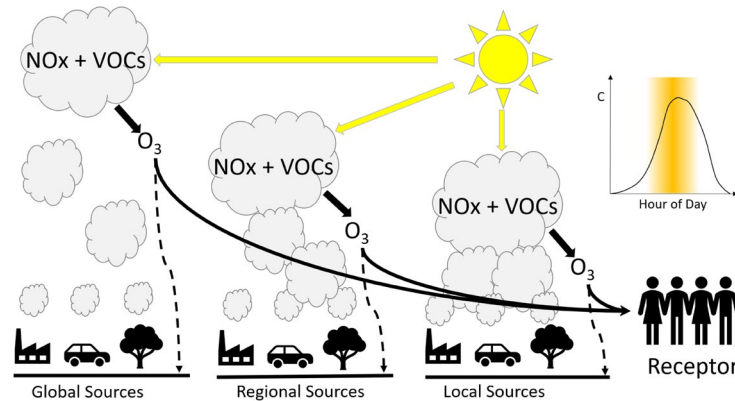


Fig. 2. Illustration of ozone formation and transport. Major processes are depicted with symbols in parentheses as follow: precursor emission sources (buildings, cars, and trees), dispersion (grey clouds without texts), photochemical reaction (grey clouds pointed by yellow arrows and thick black arrows), removal by deposition (dotted arrows), and transport (curved arrows), and Typical diurnal ozone concentrations with ultraviolet intensity are depicted with orange gradient colors in the upper right corner.

(Seinfeld and Pandis, 2016; Finlayson-Pitts and Pitts Jr, 1999). 오존 및 전구물질의 대기 중 농도를 결정하는 물리적 과정으로는 수평 및 수직 이류, 확산, 건식 및 습식 침적이 있다(Russell and Dennis, 2000).

특정 수용점에서의 오존 농도를 이러한 물리화학 과정을 고려하여 영향 인자들을 나눈다면, 크게 배경 농도 영향과 자체 지역에서의 생성영향으로 구분할 수 있다(Hogrefe *et al.*, 2018; Jaffe *et al.*, 2018). 배경농도는 이류 및 확산을 통해 다른 지역으로부터 이동해 온 오존에 의해 더해지는 농도로 이동 규모에 따라 지구적(수천 km 이상), 광역적(수백 km~수천 km), 지역적(수 km~수십 km)으로 나눌 수 있다(Monks *et al.*, 2015; Seaman, 2000). 따라서 수용점에서의 오존 농도는 이류 확산 과정을 거친 풍상의 오존 및 풍상의 전구물질이 이동 중 만든 부분을 포함하고 수용점 부근에서 배출된 전구물질이 반응하여 국지적으로 생성된 오존과 더해져 결정된다(그림 2).

어떤 지역에서 특정 시간에 대한 일 최고 오존 농도는 이송을 무시하면 단순하게 전구물질인 NO_x 와 VOC의 오존 중 농도에 의해 결정되는 것으로 설명할 수 있다(NRC, 1991). 전구물질들 중 어느 것이 충분히 존재하는지 여부에 따라 NO_x 제한(limited) 혹은 VOC 제한조건으로 오존 생성을 설명할 수 있다.

NO_x 제한조건에서는 NO_x 농도 변화에 따라 오존 농도 변화가 뚜렷한 반면, VOC 농도 변화에 따른 오존 농도 변화는 매우 작다. VOC 제한조건인 경우 이와는 반대가 되므로 개선 대상 지역이 NO_x 제한인지, VOC 제한인지를 파악하는 것은 효과적인 오존 저감을 위한 전구물질 배출량 제어 관점에서 중요하다. 전구물질 제어를 통해 오존을 제어해야 하는 이러한 특성은 오존 제어가 어려운 가장 큰 이유 중 하나이다(OTA, 1989).

오존 전구물질의 배출원을 제어 가능 여부에 따라 나누면, 인간 활동에 의한 전구물질의 배출과 그에 따른 오존 생성은 제어 가능한 것으로 구분되며, 산불이나 자연 배출량 등은 인위적인 노력에 의해 현실적으로 제어가 어려운 것으로 구분된다. 이는 전 지구 규모적인 접근에 의한 것으로, 국가 또는 지방정부 규모에서 오존 제어가 필요한 경우 앞서 언급한 배경농도는 해당 지역의 행정 집행권으로 제어 불가능한 상황에 놓일 수도 있다. 특히 광역 규모의 배경농도는 해당 국가의 국경을 넘어 월경성(transboundary) 배경농도가 될 수 있으므로 국제적 협력이 필요하다. 한편, 한 국가 내에서도 지자체의 규모와 배출 특성에 따라 풍상의 오존 및 전구물질이 풍하 지역에 큰 영향을 줄 수 있는데(예: 그림 2), 극단적인 경우 풍하에 위치한

지자체의 배출량을 모두 삭감하여도 오존 대기환경기준을 충족시키기 어렵다. 특히 최근 국내에서 발생하는 고농도 오존의 원인 중 하나로 오존의 장거리 이동 영향을 주목해야 하는 이유가 아래에서 설명하는 오존의 배출지-수용지 간의 인과관계 때문이다.

대도시 및 산업 지역의 오존 문제는 배출지와 수용지 간의 복잡한 인과관계와 다른 지역에서 이동해 오는 전구물질과 오존까지 고려해야 하기 때문에 효과적인 오존 관리를 위해서는 매우 과학적이고 종합적인 계획이 필요하다. Sullivan *et al.* (2019)은 미 동북부의 오존 현황 파악 및 관리를 위해 지표 관측을 통한 지표 농도 분석, 항공 관측을 통한 해상 및 상층 농도 분석, 드론을 이용한 수직적 오존 농도 분포 특성 파악 등을 수행한 바 있다. 국내의 경우에도 오존에 대한 다각적인 검토를 위해 시/공간에 대한 3차원 관측 자료 확보가 요구된다. 한편, 많은 나라에서 NO_x 의 일부인 NO_2 와 몇몇 VOC(예: 벤젠, 포름알데하이드)를 그 자체로 기준성 대기오염물질 및 대기독성물질로 지정하여 관리하고 있다(European Commission, 2018; Ministry of Environment, 2017; US EPA, 2015a). 따라서 성공적인 오존 저감 대책 마련 및 시행으로 오존뿐만 아니라 전반적인 대기질 개선 효과를 기대할 수 있다. 또한 국내의 경우 NO_2 자체 농도가 많은 지역에서 대기환경기준을 초과하고 있으며(Ju *et al.*, 2018), 초미세먼지 농도 대책 수립 시에도 대기 중 비선형적인 반응이 고려되어야 한다(Kim *et al.*, 2017a, b).

3. 미국의 현행 오존 관리 체계

3.1 관리 체계

미국 현행 오존 관리의 궁극적인 목적은 앞서 2절에서 설명한 복잡한 오존 생성과 제어의 특성을 고려하여 지표 오존 농도를 대기환경기준 이하로 낮추는 것이다. 이러한 목적을 위한 관리 순서를 다음과 같이 5단계로 제시할 수 있다(그림 3). 첫째, 대기환경기준을 설정한다. 원칙상 미 환경청장은 5년마다 기

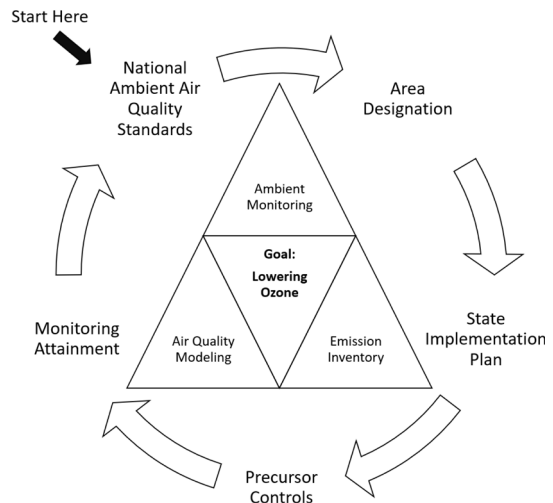


Fig. 3. Schematic diagram of ozone air quality management in US: goal (the center triangle), processes (arrows), and tools (triangles around the goal symbol).

존 대기환경기준을 새로운 과학적 사실을 바탕으로 재검토하여 기존 기준을 유지할 것인지, 신규 기준을 재설정할 것인지 결정한다. 둘째, 대기환경기준 검토 후 최종 기준이 설정되면 그 기준에 따라 대기질 측정에 기반한 설계치 (DV; Design Value)를 산정하고, 기준 달성 지역과 미달성 지역을 나눈다. 셋째, 기준 미달성 지역을 포함하는 주는 주 시행계획 (SIP; State Implementation Plan)을 개발한다. 주 시행계획에는 향후 전구물질 배출량 저감 계획과 수치모사를 통해 그 계획이 시행되면 미래 달성 예정연도까지 기준 달성이 가능하다는 증거가 포함된다. 넷째, 주 시행계획에 따라 배출량을 저감하고, 저감이 적절히 이루어지는지 지속적인 준법감시 (Compliance)를 포함한 행정 집행을 수행한다. 마지막으로, 주 시행계획의 세부사항들이 이행됨에 따라 실제로 오존 대기질이 개선되는지 지속적으로 관찰하게 된다. 기술적인 면에서 이러한 단계별 오존 관리를 가능하게 해 주는 도구로는 현황 파악을 위한 대기질 측정, 배출량 현황과 저감을 반영한 배출목록, 과거 대기질을 재현하고 배출량 저감에 의한 오존 농도 변화를 정량적으로 산정하는 대기질 모형이 있다.

Table 1. History of US NAAQS for O₃; Rearranged data from US EPA (2018a).

Date	Indicator	Averaging time (hours)	Level (ppm)	Form	Ref.
1971-04-30	Total photochemical oxidants#	1	0.08	No more than one hour per year	36 FR 8186
1979-02-08	O ₃	1	0.12	No more than a day with maximum hourly O ₃	44 FR 8202
1993-03-09	EPA decided that revisions to the standards were not warranted at the time.				58 FR 13008
1997-07-18	O ₃	8	0.08	3-year average of annual 4th-highest daily maximum 8-hour O ₃	62 FR 38856
2008-03-27	O ₃	8	0.075	3-year average of annual 4th-highest daily maximum 8-hour O ₃	73 FR 16483
2015-10-26	O ₃	8	0.070	3-year average of annual 4th-highest daily maximum 8-hour O ₃	80 FR 65292

#: Total oxidant (including H₂O₂, peroxyacyl nitrates, etc.) concentrations measured with potassium iodide measurement method.

국내의 경우 다른 대기오염물질과 마찬가지로 장단기 대기환경기준 설정 절차나 주기, 방법 등이 명확하지 않다. 이는 대기질 관리의 궁극적 목적이 국민의 건강 보호라는 점과, 이를 토대로 국내 대기환경기준 마련과 대기질 개선 대책이 수립됨을 고려하면 미 환경청의 CASAC (Clean Air Scientific Advisory Committee)과 같은 자문 위원회 등을 운영하여 높아지는 국민 관심 및 불안을 명확하게 설명해 줄 필요가 있다. 이러한 검토 주기는 기존의 수도권 대기질 개선 기본계획, 대기환경규제지역의 실천계획 등과 하나의 체계 내에서 운영되는 것이 바람직할 것이다.

3.2 대기환경기준과 설계치

미국의 오존 관리 체계에 있어 핵심이 되는 수치 두 가지는 대기환경기준과 달성 지역 지정에 사용되는 설계치이다. 미국의 대기환경기준은 국민의 건강 보호를 위해 오존의 인체 위해성을 고려한 1차(primary) 기준과, 생태계에 대한 영향을 고려한 2차(secondary) 기준으로 구분된다. 표 1은 1971년부터 미 환경청에서 공표한 오존의 1차 및 2차 대기환경기준 연표이다. 미 환경청장은 체계적인 과학·정책 검토를 바탕으로 대기환경기준의 네 가지 요소인 지시자(Indicator; 예: 오존), 평균시간(Averaging time; 예: 8시간), 수준 혹은 농도(Level; 예 70 ppb), 그리고 형태(Form; 예: 최근 3년의 각 연도의 4번째 최고 농도의 평균)에 맞

추어 개정을 최종 결정한다(US EPA, 2014).

설계치는 측정된 오존 농도에 대기환경기준의 요소 중 지시자, 평균시간, 형태를 동일하게 적용하여 산정한 값으로, 대기환경기준 대비 현황 농도를 정량적으로 알 수 있는 지표이다. 즉, 설계치가 대기환경기준보다 높으면 목표 달성을 위해 그 차이만큼 오존 농도를 낮추어야 한다. 미국의 오존 관리 체계에서 설계치는 적용연도와 목적에 따라 기준연도 설계치(DVB; Design Value for Base Year)와 미래연도 설계치(DVF; Design Value for Future Year)로 나눌 수 있다. 오존 기준연도 설계치는 가장 근래에 측정된 자료 중 인증된(certified) 3년간의 자료만을 가지고 산정한다. 이때 자연재해(예: 산불) 등에 의해 발생한 고농도는 예외 사례(Exceptional Event)로 제외된다. 어떤 지역의 측정소에서 기준연도 설계치가 대기환경기준을 초과하면 해당 지역(예: County)과 영향을 미치는 주변 지역에 대해 오존 측정자료, 배출량, 기상, 지형, 행정 구역 등 5 요소에 대한 분석을 수행하며, 선택적 수치모사를 통해 대기환경기준 달성/미달성을 지정한다(US EPA, 2015b). 오존 미래연도 설계치는 오존 대기환경기준 미달성 지역에서 향후 기준 달성이 가능할 수 있도록 전구물질 배출량 저감 전략을 수립하고, 이를 바탕으로 달성 목표연도에 기준 달성이 가능한지 판정하기 위해 산정한다(US EPA, 2018c).

국내의 경우 측정소별 또는 지역별 오존 설계치에

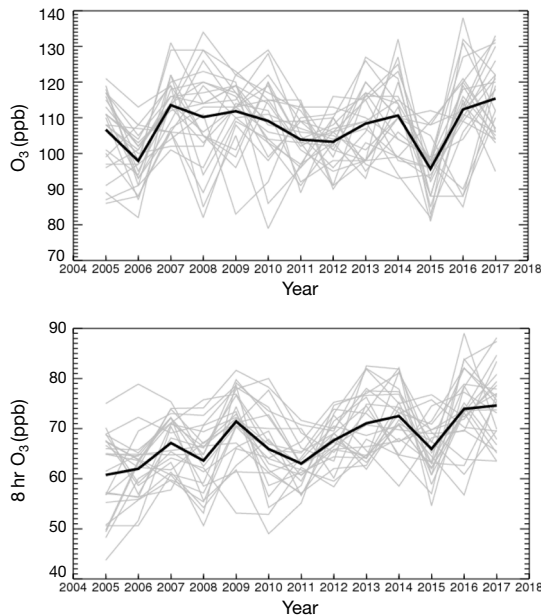


Fig. 4. Design values of daily maximum 1-hr (top) and 8-hr (bottom) mean ozone concentrations in Seoul during 2005 to 2017. Gray thin and black thick lines represent individual 25 air quality monitoring stations inside Seoul and the mean of all the stations.

대한 접근이나 시도가 없어 오존 농도를 얼마나 초과하는지, 대기환경기준 만족 여부 관점에서 장기간에 걸쳐 어떻게 변화하고 있는지 등에 대한 정량적 지표가 설정되어 있지 않다. 또한 수도권 기본계획 등에서 부분적으로 8시간 평균 오존 농도를 검토하여 왔으나, 에어코리아 웹 등에서는 아직 1시간 평균 오존 농도만이 제공되고 있다. 서울에 위치하는 도시대기 측정망에서의 1시간 및 8시간 평균 오존 설계치의 연간 변화에서 1시간 평균 오존보다는 8시간 평균 오존이 증가 추세를 보인다(그림 4).

3.3 주 시행계획

3.3.1 현황 분석 및 이해

오존 주 시행계획(Ozone SIP)은 궁극적으로 미국 각 주별로 모든 지역에서 오존 대기환경기준을 충족할 수 있도록 하는 것을 목적으로 한다. 이러한 주 시

행계획은 각 주가 충분한 대기관리를 할 수 있는 체계를 갖추고 있는지를 확인하는 인프라 시행계획(In-frastructure SIP; 이하 iSIP)과 달성 지역이 계속해서 달성 상태를 유지할 수 있음을 증명하는 달성유지 시행계획(Maintenance SIP), 미달성 지역의 대기오염도를 기준치 이하로 개선할 수 있음을 증명하는 달성 시행계획(Attainment SIP)으로 나눌 수 있다(Kim *et al.*, 2018b; US EPA, 2015c).

iSIP에는 공기과의 풍상에 있는 주(state)가 풍하주의 대기환경기준 준수 및 달성 계획을 방해하지 않음을 증명하는 내용이 포함된다. 이는 미국의 청정대기법상 선린조항(“Good Neighbor Provision”)에 따른 것으로 이를 위해 미 연방환경청은 이동 규제(Transport Rule)를 개발 공표한다. 가장 최근에 발효된 규정은 CSAPR(Cross State Air Pollution Rule)로 오존의 경우 수치모사를 통해 한 주의 기여도가 다른 주의 측정소 위치에 일정 수준을 초과하면 “연결(linked)”된 것으로 보고 있다. 그림 5는 미 연방환경청에서 발표한 2008년 오존 대기환경기준 시행을 위해 수행한 오존 이동 모사 결과에 기반한 연결 상태를 나타낸 것이다(US EPA, 2016a). 만약 연결이 된 주라면, 해당 주는 자체 오존 대기환경기준 준수 및 달성 계획 승인에 필요한 배출량 저감에 더하여 다른 주의 대기환경기준 달성을 위해 추가적으로 배출량을 저감해야 한다.

국내의 경우 현재 증가하고 있는 오존 농도에 대한 명확한 원인 검토는 미흡한 실정이다. 특히 수도권과 같이 질소산화물의 농도가 높은 지역에서의 NO 적정(titration) 효과와 휘발성유기물질 배출량 및 조성 등은 오존 관리에 있어 매우 중요한 사항으로 철저한 현황 분석이 요구된다. 특히 현재의 배출량 목록에 의한 대기질 모사 분석 시 질소산화물이 높은 수도권 도심 지표에서는 주로 NO 적정 효과가 나타나는 점을 고려하면, 대기질 개선 계획 수립 시 근간이 되는 배출량 목록의 불확도 개선과 함께, 지표 및 항공 관측 등을 통한 심도 깊은 검토가 중요해 보인다. 특히 국내의 경우 높은 인구 및 배출 밀도, 도심과 산업단

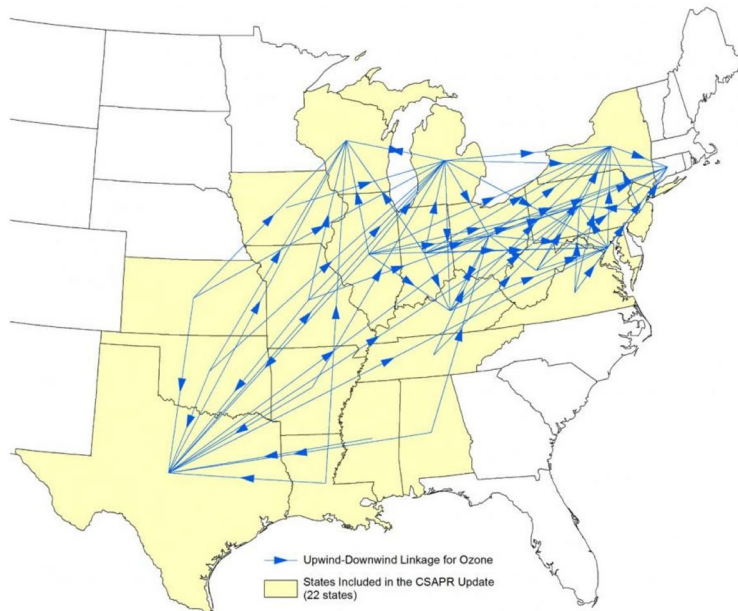


Fig. 5. “Linked” upwind-downwind relationship for the purpose of the Cross-State Air Pollution Rule Update for the 2008 Ozone NAAQS (Adopted from US EPA (2016a)).

지 간의 배치와 거리 등을 고려하면 광역 지자체 간 영향을 파악하는 것이 필요하며, 국외 유입량 파악 역시 필요해 보인다(Ju *et al.*, 2018; Choi *et al.*, 2014).

3.3.2 달성 시행계획

달성 시행계획(이하 “시행계획”)에는 (1) 현재의 대기오염 문제가 어떠한 원인에 의해서 발생했는지에 대한 정성, 정량적인 조사 결과, (2) 향후 어떻게 대기오염도를 개선할 것인지에 대한 대책 제안 혹은 배출량 저감 계획, (3) 제안된 대책 혹은 배출량 저감 계획을 통해 달성 목표연도까지 대기오염도를 개선할 수 있을지 수치모사로 증명하는 달성 증명이 포함된다(US EPA, 2015c). 이러한 주 시행계획은 최초 작성부터 승인 후 대기환경기준이 개정되거나 해당 지역의 대기질(즉, 기준연도 설계치) 변화 시에는 개정안을 제출하여 승인을 취해야 한다. 오존 시행계획이 다른 기준성 물질(특히 $PM_{2.5}$)과 다른 부분은 표 3에 나타난 것처럼 각 지역의 현황 등급(classification)을 6개로 나누고 기준 미달성 정도가 심할수록 주 시행계획

에 포함해야 하는 달성 목표연도, 전구물질 제어 요구사항 등 필수 사항이 증가한다는 점이다(US EPA, 2015d).

오존 주 시행계획에서 수치모사는 크게 두 단계로 나뉜다(그림 6). 1단계는 오존 미달성 지정연도(즉, 기준연도)에 대한 수치모사이다. 이 수치모사에서는 최대한 기준연도에 근접한 최고 수준의 배출목록을 기반으로 기상자료와 같은 기타 모사 입력자료를 사용하여 모사 정확도를 확보한다. 특히, 1단계에서 중요한 것은 해당 지역이 미달성 지역으로 지정되는 데 기여한 고농도 오존 일에 대해 모사 재현성을 정확히 확보하는 것이다. 이는 같은 농도의 오존이 여러 다른 조합의 NO_x 와 VOC 농도에 의해 발현될 수 있으므로, 고농도 오존에 대한 효과적인 대책 마련을 위해서는 특별히 해당 지역의 오존이 NO_x 에 의해 제한을 받는지 혹은 VOC에 의해서 제한을 받는지에 대한 파악이 이루어져야 한다.

2단계에서는 기준연도 모사에 이용된 기상자료 등 대부분의 자료는 그대로 유지하고 기준 달성연도까

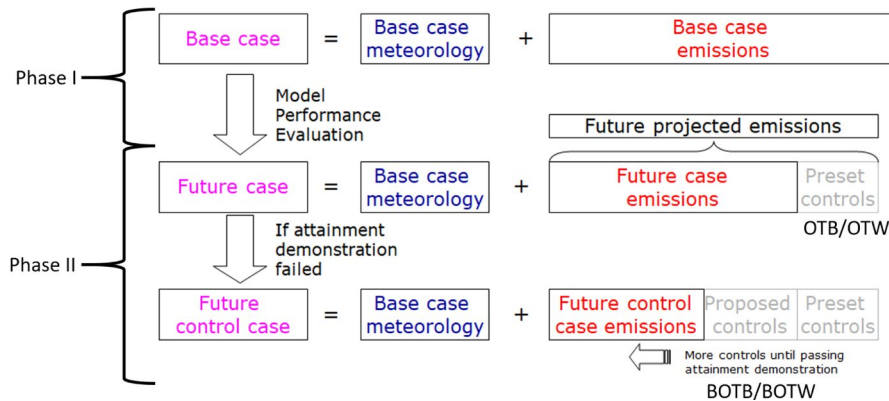


Fig. 6. Schematic diagram of typical attainment demonstration modeling processes.

Table 2. Illustrative examples of non-EGU OTB/OTW controls (adopted from MECTEC (2002)). “MACT”, “RACT”, “RFP”, and “NO_x SIP Call” are emission control technologies or rules. These are further explained in the following chapter.

On-the-Books (Cut-off of July 1, 2004 for Base 1 adoption)

- Atlanta / Northern Kentucky / Birmingham 1-hr SIPs
- Industrial Boiler/Process Heater/RICE MACT (see Section 2.1.2.3.2)
- NO_x RACT in 1-hr NAA SIPs
- NO_x SIP Call (phase I-except where States have adopted II already e.g. NC)
- Petroleum Refinery Initiative (October 1, 2003 notice; MS & WV)
- RFP 3 percent Plans where in place for one hour plans
- VOC 2-, 4-, 7-, and 10-year maximum achievable control technology (MACT0 Standards) Combustion Turbine MACT

On-the-Way

- NO_x SIP Call (Phase II-remaining States & IC engines)

지의 오존 전구물질 제어 정보가 반영된 미래연도 배출량 입력자료를 바탕으로 수치모사를 수행한다. 이때 오존 전구물질 제어 정보는 저감 정책의 발효 시기에 따라 “OTB (on-the-book)”, “OTW (on-the-way)”로 구분된다. OTB는 기준연도의 정책과 달성 목표연도까지 공식적으로 발효되어 실제적인 배출량 저감을 현실화할 수 있는 정책을 포함한다. OTW는 아직 발효는 되지 않았으나, 달성 목표연도까지 실제 발효가 될 수 있는 정책을 말한다. 앞서 설명한 미 연방청의 이동 규제와 같은 것들은 OTB/OTW에 포함된다. 표 2는 미 동남부 지역의 시행계획을 위한 미래연도 배출목록 개발 과정에서 고려된 비발전 부문의 OTB/OTW의 예를 나타낸 것이다.

OTB나 OTW는 시행 주체에 따라 연방 정부 또는

주 정부 차원의 제어 전략으로 나뉜다. 또한 배출원의 종류에 따라 크게 고정 오염원, 면 오염원, 이동 오염원으로 분류된다. 이들 제어 전략은 이론상 배출원의 종류에 따라 매우 상이한 비용-효과 특성을 보이므로, 실무적인 배출량 제어 정보 제공을 위해 미 연방환경청은 물질별, 오염원별 배출량 제어 관련 정보를 담은 “Menu of Control Measures”를 제공한다 (US EPA, 2016b). 만약 OTB와 OTW를 고려하여도 달성이 어려우면 배출량 저감 정책을 추가로 더 발굴하게 되고 이들은 “BOTB (beyond OTB)”나 “BOTW (beyond OTW)”로 부르게 된다. 주 시행계획에 포함되는 배출량 저감 정책이 중요한 것은 이들 저감 정책이 (BOTB 및 BOTW포함) 미 환경청의 주 시행계획 승인과 동시에 연방 정부 차원에서 효력을 갖는

(“federally enforceable”) 실제적인 법령이 된다.

여기서의 시사점은 오존 관리 방안 마련에 있어 대기질 모사는 현황 이해를 위한 주요 방법이 되며, 계획된 배출량 삭감에 따른 농도 개선 파악이라는 점에서 그 역할이 매우 중요하다. 질소산화물 또는 휘발성유기물질 관리 방안에 따른 방향 제시 및 효과 분석 관점에서도 현재의 고농도 오존 농도 발생원인을 올바르게 이해하는 것이 필요하다. 여러 대책이 강구될 수 있으나, 그 효과에 대한 신뢰성이나 중요도가 낮다면 결코 성공적인 오존 관리 대책을 유도할 수 없는 점을 고려하여 관측과 대기질 모사 등을 이용한 국내 오존에 대한 현황 분석이 무엇보다도 우선되어야 한다.

3.3.3 배출량 제어

미국의 주 시행계획에서 저감 정책의 대상이 되는 배출군은 배출 형태에 따라 크게 대형 점 오염원과 이동 오염원으로 나눌 수 있다. 미국의 대기관리에서 고정 오염원 (Stationary Source)은 일반적으로 규제 대상 대기오염물질 배출량이 일정 수준을 넘는 경우 대형 (Major) 고정 오염원으로 간주되어 다양한 배출 제한 규정을 준수해야 한다. 대형 고정 오염원의 배출 제한 규정은 적용 범위에 따라 전국적으로 동일하게 적용되는 연방 규정인 NSPS (New Source Performance Standards), 각 주의 시행계획의 일부인 대기오염 배출 허가권과 관련되어 사례별로 정하는 규정인 RACT (Reasonably Available Control Technology), LAER (Lowest Achievable Emission Rate), BACT (Best Available Control Technology)로 구분할 수 있다(오류! 참조 원본을 찾을 수 없습니다.).

오존의 경우 직접 배출되지는 않으나 전구물질의 광화학반응으로 인해 생성되므로 전구물질인 NO_x 와 VOC에 대해 배출 제한 규정이 적용된다. NSPS는 미 환경청이 공식 규제법령을 제정하여 신규 혹은 일정 규모 이상의 공정 변경하는 배출원이 준수하도록 하는 전국적인 배출량 규제이다 (US EPA, 2016c). 이는 국내에서 시행 중인 통합환경관리제도와 유사하다.

Table 3. Attainment Status and Control Technology Requirements as part of the Air Permit Program.

Attainment Status	New Source or Major Modification	Existing Sources
Attainment Area	BACT	-
Non-Attainment Area	LAER	RACT

RACT와 BACT 등은 국내 통합환경관리에서 지정하고 있는 BAT 기술들로 이해할 수 있다. RACT (Reasonably Available Control Technology)는 미달성 지역의 기존 대형 배출원에 요구되는 방지기술을 말한다 (US EPA, 2016d).

미국의 대기관리 체계에서 이동 오염원은 크게 도로 이동 오염원과 비도로 이동 오염원으로 나누어 관리된다. 도로 이동 오염원은 모터 사이클, 자가용 승용차와 트럭, 상업용 트럭과 버스로 세분화되며, 비도로 이동 오염원은 비행기, 중장비, 기차, 선박과 기타 소형 엔진 (예: 제초 기계) 등으로 세분화된다 (US EPA, 2016e). 승용차, 트럭, 버스 등 주요 도로 이동 오염원에 대해서는 배기구에서의 오염물질 농도를 제한하는 배출량 규제 및 운행거리 대비 연료 사용을 제한하는 연비 규제가 적용된다. 그림 7에 1990년대 이후 현재까지 신규 승용 차량에 대한 배출구에서의 배출기준 변화를 보였다. Tier 3이 완전히 구현되면 Tier 1에 비해 배출량이 94%가량 감소할 것으로 예상된다. 또한, 이러한 연방 배출기준 공표 및 시행은 시행계획상 주요 OTB/OTW로서 각 주의 오존 기준 달성에 지대한 영향을 미칠 것으로 기대된다. 한편, 미국의 미달성 지역에서는 각 주의 시행계획의 일부로써 이동 오염원 특히 차량의 배출량 규정에 대해 규정준수 방법으로 운행차 배출가스 감사 (“I/M”; “Inspection and Maintenance”)를 시행하고 있다 (US EPA, 2016f).

배출량 관리는 오존뿐 아니라 대기질 개선 계획과 통합환경관리, 배출 총량제 등에서 국내에서도 진행되고 있다. 다만, 오존 농도에 많은 영향을 미치는 휘발성유기물질의 경우 누출 및 비통상적인 배출이 많고, 관리가 어렵다는 점에서 보다 면밀한 관리가 필요하다. 다른 한 가지 관점으로는 배출량 관리를 위

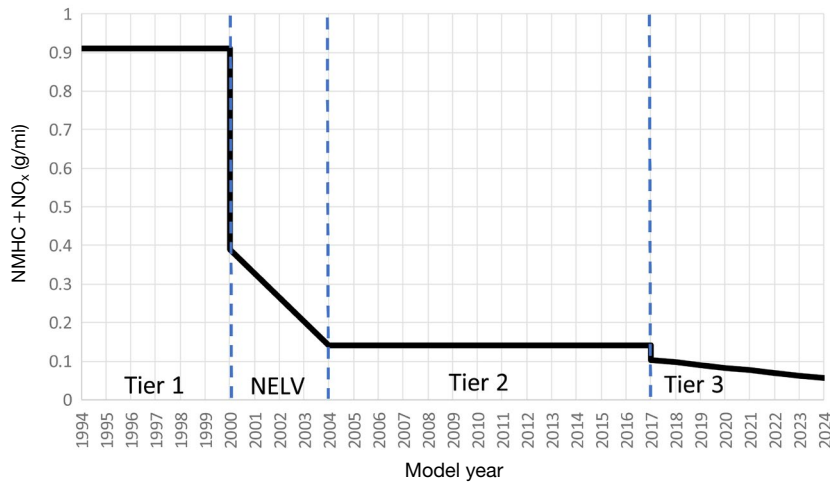


Fig. 7. Illustration of US exhaust emission standards for light duty vehicles as the sum of NMOG (Non-methane organic gas) and NO_x . Emission standards are based on Supplemental Federal Test Procedure (Data source: US EPA (2016g)).

해서는 정확한 배출량 자료 확보와 해당 배출량의 대기질 관리에서의 중요도가 파악되어야 한다. 정확한 배출량의 산정은 국가 기관만의 역할로는 부족하며, 배출량 자체가 규제의 대상이 된다는 점에서 배출량 산정 단계에서부터 이해당사자(예, 시민, 산업체, 지방 지자체 등)의 적극적 참여가 바람직하다.

3.4 2015년 오존 대기환경기준 공표 및 시행

일반적으로 미 환경청은 대기환경기준에 대한 1차 검토가 끝나면, 연방관보(Federal Register)에 대기환경기준안을 포함한 제안규정(Proposed Rule)을 공표하고 3개월간 의견을 수렴한다. 미 환경청장은 2015년 오존 대기환경기준의 최종 1, 2차 기준을 기존 0.075 ppm에서 공히 0.070 ppm 수준으로 강화하되, 기존 오존 대기환경기준의 형식(즉, 연중 4번째로 높은 일 최고 오존 농도의 3년간 평균)과 평균시간(8시간)은 유지하였다. 오존 대기환경기준이 확정되면 이를 실행하기 위한 시행계획(NAAQS Implementation Plan)이 개발된다. 오존 대기환경기준의 시행계획 항목에는 기준 시행 관련 주요 일정 정보도 포함된다. 예를 들어, 오존 대기환경기준이 개정되면 24개월 내로 미국 전역에 대해 달성/미달성 지역 지정을 끝내

고, 주 시행계획의 요구사항에 대한 규정을 발표해야 한다. 그러나, 그림 8과 같이 이상적인 2015년 오존 대기환경기준 시행 관련 주요 일정과 실제 진행되는 일정과는 차이가 있다. 이러한 차이가 발생하는 가장 큰 이유는 대기환경기준 자체 및 시행 관련 규정과 관련하여 주 정부 및 산업체 간 행정 소송 때문이다. 그리고 이러한 소송들은 때로 법적, 절차적 문제뿐 아니라 과학적인 문제들로 인해서 발생하기도 한다. 다음 절에서는 미국의 과거 오존 관리 역사를 검토하면서 어떠한 문제들이 발생해 왔고 미국에서는 어떻게 해결해 왔는지를 살펴본다.

4. 미국의 오존 관리 역사상 주요 쟁점들

4.1 문제 인식과 해결을 위한 초기 노력

세계 2차 대전이 한창이던 1943년 7월 26일, 이날은 미국 캘리포니아 주 로스앤젤레스(LA; Los Angeles)에서 오존 대기오염 역사에 큰 발자취를 남긴, 심각한 오존 문제가 공식적으로 인식된 날로 기록되어 있다(Brienes, 1976; Senn, 1948). 그 심각한 수준은 심지어 일본의 “가스 공격”(gas attack)으로 오인되었다고 한

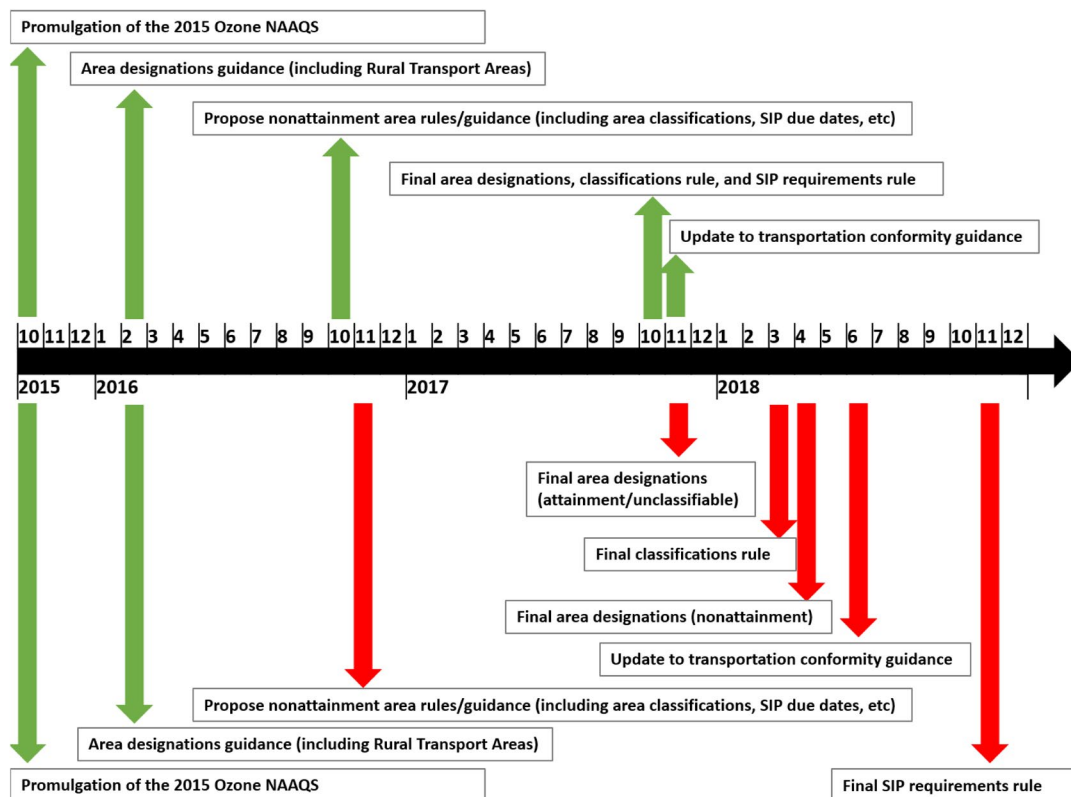


Fig. 8. Important timelines of the 2015 Ozone NAAQS Implementation (Data Source: US EPA (2015e)). The top panel shows “ideal” timelines following statutory requirements. The bottom panel indicates actual timelines. Green arrows in the bottom panel depicts on-time implementation while red arrows highlight delayed implementations.

다(Dundon, 2018; Brienese, 1976). 이로부터 9년이 지난 1952년 Hagen-Smit 박사는 “Chemistry and physiology of Los Angeles smog”라는 논문을 발표하였는데, 이 논문에서 그는 광화학 오존의 생성 기작이 탄화수소(HC; Hydrocarbon)와 NO_x 의 광화학 반응에 의한 것임을 증명하면서 탄화수소와 NO_x 의 주요 배출원으로 자동차를 지목하였다(Haagen-Smit, 1952). 한편, 오존 문제의 본격적인 인식과 그에 대한 공식적인 첫 원인 규명이 있었던 9년 기간 중인 1947년 6월 10일, 캘리포니아는 미국에서 최초로 주 대기환경법(CAPCA; California Air Pollution Control Act)을 공포하여 지역별 대기 관리를 관장하는 기관의 설립 근거를 마련하였다(Forswall and Higgins, 2005, pp. 1970-2005). 즉, 오존 오염에 대한 원인이 밝혀지기도 전에

심각한 오존 문제를 겪었던 대도시를 기반으로 오염 문제 해소를 위한 법안이 발표되었으며, 법안의 목적을 이루기 위한 기관의 설립까지 이루어진 셈이다. 캘리포니아는 그 후 1967년 8월 30일, CARB (California Air Resource Board)를 설립하여 주에 대한 대기관리 업무를 통합 관리하기 시작하였다. 그리고 1966년, 신규 제작차에 대한 배출가스 제어를 실시하도록 규정을 공포하고 실시하였다(Paul and Solomon, 2009).

연방 정부 차원에서는 1955년 Air Pollution Control Act가 공포되어 대기오염 관련 연구 활동을 본격적으로 지원하였으며, 1963년 청정대기법(CAA; Clean Air Act)이 공포되면서 US Public Health Service에 실사 및 행정 집행 권한을 부여하였다(US EPA, 2015h). 1967년에는 Air Quality Act가 공포되어 대기질 제어

Table 4. Ozone nonattainment area classification definition, attainment due date, and other requirements for the 2015 Ozone NAAQS (Data source: US EPA (2015f, 2015g)).

Area Class	Design Value, X (ppm)	Attainment Due date (Years from Designation)	NSR Offset Ratio	Major Source Threshold	SIP Requirements	Emission Related Requirements including Emission Controls
Marginal	$X < 0.081$	3	1.1:1	100	Nonattainment NSR Program	Transportation Conformity, General Conformity, Emission Inventory, Periodic Emission Inventory Updates
Moderate	$0.081 \leq X < 0.093$	6	1.15:1	100	Attainment Demonstration, Enhanced Monitoring	RACT, 6-Year ROP/RFP, Contingency Measure, Basic I/M and all requirements for Marginal areas
Serious	$0.093 \leq X < 0.105$	9	1.2:1	50	Clean Fuels Program (or Substitute Measure)	3% Annual RFP, Enhanced I/M, VMT Reporting and all requirements for Moderate areas
Severe-15	$0.105 \leq X < 0.111$	15	1.3:1	50	Penalty Fee Program for Major Sources	VMT Growth Demonstration and all requirements for Serious areas
Severe-17	$0.111 \leq X < 0.163$	17	1.3:1	25		Same as Severe-15 areas
Extreme	$0.163 \leq X$	20	1.5:1	10		Clean Fuels for Boilers, Traffic Congestion Controls and all requirements for Severe-17 areas

권역(AQCR; Air Quality Control Regions)과 함께 측정, 배출목록, 제어, 실사 등 기본 틀을 위한 요소들을 마련하였다. 1970년 개정된 청정대기법에서는 이러한 요소들을 시행계획이라는 큰 틀 안에 포함하면서 대기환경기준 시행 및 달성 확인을 주요 단계로 채택한 본격적인 현행 대기환경법의 모습을 갖추었다(US EPA, 2015h). 1970년 개정된 청정대기법의 큰 공헌이라고 한다면, 1960년대에 첨예하게 대립하였던 위해성 기반의 대기관리와 명령 및 제어(command-and-control)를 통한 일률적 배출 허용기준 적용을 주 시행계획이라는 틀 안에 복합적으로 담아낸 계기가 되었다는 점이다(Bachmann, 2007). 이를 시작으로 대기환경기준과 주 시행계획이 기준성 물질에 대한 미국 대기 관리의 중심축으로 자리잡게 되었다. 또한, 이러한 체계를 구현함으로써 1970년 12월, 실질적인 대기질 개선을 위한 미 연방환경청(US EPA; United States Environmental Protection Agency)이 설립되었다. 한편, 1960년대 후반부터 1970년 후반의 기간 동안 이루어진 자동차 배출규제와 삼원 촉매 장치의 개발은 큰 사건이었다(Paul and Solomon, 2009). 당시 미국에서는 자동차 생산 업체들과 환경관리 기관 사이에 이른바 선 기술개발-후 규제("Technology-Following")와 선 규제-후 기술개발("Technology-Forcing")에 대한 의견이 첨예하게 대립하던 시기였다(Paul and Solomon, 2009). 결국 미국 의회는 선 규제-후 기술개발을 채택하였고, 이는 1980년대 초 미국의 모든 신규 제작차에 삼원 촉매장치를 설치 운용하게 되는 결과를 낳았다(Paul and Solomon, 2009).

본격적인 관리에 맞추어 주 시행계획 제출이 최초로 의무화된 것은 앞서 언급한 1970년 청정대기법이었으며, 당시 기준 달성 목표연도는 1975년이였다. 1971년 4월 30일 첫 대기환경기준이 제정된 후 9개월 안에 모든 주가 주 시행계획을 제출해야 했으며, 1972년 5월 31일 첫 공식 승인이 공표되었다(US EPA, 1972). 그러므로 현재의 주 시행계획들은 사실상 1972년에 제출된 원래 주 시행계획들의 개정판(revision)이라고 할 수 있다.

OTA (1989)에 따르면, 최초 주 시행계획의 문제는 1970년 청정대기법의 달성 목표연도였던 1975년까지 수많은 지역이 여전히 미달성 지역으로 분류되었다. 그 이유 중 하나로 신규 제작차 배출량을 90% 줄이는 법안이 발효되었으나, 원래 예상했던 것보다 도로 이동 오염원의 배출량 저감이 미진하였고, 고정 오염원의 VOC 배출량 저감 또한 부족한 것으로 거론되었다(OTA, 1989). 결국 미 의회는 1977년 개정된 청정대기법에서는 달성 목표연도를 1982년 12월 31일로 수정하였다(Erbes, 1996). 이후 미 환경청은 대기환경기준 달성이 이루어지지 않은 지역이 있는 주에 대해 제재 조치(sanction)를 취하였다. 그러나, 이러한 제재조치의 행정적 유효성과 법적 해석에 관해 미 환경청과 의회가 견해 차이를 보이면서 실제적인 제재조치 없이 1987년까지 개정된 주 시행계획 제출이 연장되었다. 이에 대해 훗날 1970년과 1977년 개정된 청정대기법에서는 달성을 위한 구체적인 계획 및 추진 방안에 관해 미 환경청에 너무 많은 권한을 비체제적("broad discretion" or "discretion-filled approach")으로 부여한 것으로 평가되기도 하였다(472 F.3d 882, 2006).

오존 문제는 수십 년 전부터 풀어야 할 대기환경 관련 숙제이나 아직도 진행 중이다. 미국에서 확실한 대책 분석과 주체, 방안이 충분히 마련되었다고 가정한다면, 북미 지역의 오존 문제는 이미 오래 전에 해결되었을 것이다. 이런 점을 고려하면 국내에서도 장기적인 이해를 필요로 하며, 이런 과정은 결국 제도적 뒷받침 없이는 어렵다는 점에서 지금부터라도 관련 법규 및 제도 등 오존 관리 체계에 대한 고민이 필요하다.

4.2 대대적인 관리 체계의 정비: 1990년 청정대기법 개정

1977년도 청정대기법 개정 후 미국의 대기환경 관리의 일종의 정체기를 지나게 된다. 표 1에서 보듯이 1979년 1시간 오존 기준의 공표 이후 1980년대에는 아무런 기준 변경도 없는 상태였다. 더구나, 100여 개가 넘는 도시 지역에서 당시 미국 인구의 절반이 넘는 사람들이 대기환경기준 미달 지역에 거주하는 상

황이었다(OTA, 1989). 따라서, 1980년대 후반, 미국에서는 1977년도 청정대기법 개정 후에도 10년이 넘는 세월 동안 오존 저감 노력이 별다른 성과가 없었던 이유에 대한 원인 분석의 필요성이 대두되었다. 이에 미 의회 직속 기술 분석 및 자문 기구인 미 의회 기술 영향평가국(OTA; Office of Technology Assessment)은 1989년 "Catching Our Breath: Next Steps for Reducing Urban Ozone"라는 보고서를 발간하여 1977년 이후 오존 대기질 개선 실패의 주요 원인을 분석하였으며, 여기에서 주목한 6가지 주요 원인은 다음과 같다(OTA, 1989).

- 1) 불완전한 그리고 불충분한 배출목록("Incomplete and Inadequate Emissions Inventories")
- 2) 기준 달성을 위한 배출량 제어 범위에 대한 과소 평가("Underestimates of the Extent of Control Required To Attain the Standard")
- 3) 주의 고정 배출원 규제에 대한 어려움("States Had Difficulty Issuing Stationary Source Regulations")
- 4) 배출량 증가 제어 미흡("Poor Control Over Emissions Growth")
- 5) "수송"되는 오존 및 전구물질 제어 능력 부재("Inability To Control 'Transported' Ozone and Precursors")
- 6) 문제 해결을 위한 정치적 의지와 리더십의 부재("Lack of Leadership and Political Will To Solve the Problem")

결국 1970~80년대에는 대기환경기준 달성과 관련하여 명확한 행정적, 기술적 분석이 없었으며, 대기질 개선을 위한 의회와 미 환경청의 실제적 행정권 사용에 대한 의견 차이가 기준 달성 실패로 이어졌다. 이로 인해 실효성 있는 대책 수립의 부재 및 달성연도 연장이라는 악순환을 반복한 것이다. 보다 체계적인 대기환경기준 달성을 위한 측정, 계획, 제어, 평가를 포함하는 현재의 청정대기법의 모습을 갖춘 대대적인 개정은 1990년에 비로소 이루어졌다(Bachmann, 2007; Waxman *et al.*, 1991). 주의할 만한 사항으로

1990년 청정대기법에서 주요하게 등장한 새로운 오존 관리 관련 법령은 공식적으로 한 개 이상의 주를 넘나드는 지역 규모(regional scale)의 오존 이동을 인지하였다. 이 문제의 해결을 위하여 여러 주를 하나의 권역으로 묶는 오존 이동 지역(OTR; Ozone Transport Region)을 지정하고 해당 지역의 오존 문제를 관리하는 오존 이동 위원회(OTC; Ozone Transport Commission)의 설립 근거를 마련하였으며 선린조항을 명문화하였다. 미 의회 기술영향평가국에서 지적한 주요 원인들 중 상당수와 추천된 해결책은 이후 1990년 청정대기법 개정안의 개발 과정에서 많은 영향을 끼친 것으로 사료된다.

한편, 미 의회 기술영향평가국의 보고서 발표 2년 뒤인 1991년 미 국립연구협의회의(NRC; National Research Council)에서는 “Rethinking the Ozone Problem in Urban and Regional Air Pollution”라는 보고서를 발간하였다(NRC, 1991). 이 보고서는 1990년대 초까지의 오존 관련 과학, 공학, 정책과 관련된 학계, 산업계, 정부의 자료를 집대성하여 그야말로 당시로서 가장 최신 정보를 담아내었다. 이 보고서에서 다룬 주요 논의점은 미국의 오존 관리 성공 여부, 오존 대기질 경향, 시행계획에 대한 검토, 인위 또는 자연 VOC 배출량, 오존 관련 대기질 측정 등이었다(NRC, 1991). 해당 보고서는 이 논의점들을 짚어가며 이후 미국 오존 관리에 있어서 매우 중요한 여러 추천사항을 담게 된다. 그 중에서도 이후의 오존 관리에 크게 영향을 미친 것을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 오존을 충분히 감소시키기 위해서는 VOC와 NO_x 중 상당량의 NO_x 저감이 필요하다(NRC, 1991). 이는 1991년 이전의 오존 관리가 VOC 위주였던 것에 대해 대전환을 알리는 것으로 미국의 오존 관리에 있어서 패러다임의 전환으로 여겨진다.
- 2) VOC 배출량의 불확도는 오존 제어 전략에 큰 영향을 미칠 수 있다. 따라서 NRC(1991)은 인위 VOC 배출량의 정확한 산정을 요구하였으며, 자연 VOC 배출량과 인위 NO_x 배출량이 오존 형성

에 매우 중요한 역할을 하므로 자연 VOC 배출량의 정확도를 더 높여야 한다고도 지적하였다.

- 3) 시행계획은 그 자체로는 기본적으로 좋은 틀이지만, 실무적으로 검증 방법의 부재로 인해 결함이 있다고 지적하였다(NRC, 1991).
- 4) 수치모사가 오존 관리 계획에 매우 중요한 역할을 하는 것을 재확인하였다(NRC, 1991). 다만, 실무적으로 모사에 필요한 입력자료의 불확실성과 모델 자체의 불확실성을 명료하게 하면서 전구물질 저감량 도출을 위한 모사의 설계에 주의를 요구하였다.
- 5) 미 국립연구협의회의 보고서는 향후 오존 저감을 보다 더 효과적으로 하기 위해 조율된 프로그램(Coordinated Program)의 필요성을 추천하였다(NRC, 1991).

1994년에 발족된 NARSTO(North American Research Strategy for Tropospheric Ozone)는 위에서 언급한 추천사항 중 마지막 항목을 반영한 것으로 미국, 멕시코, 캐나다의 연구진들과 대기관리 실무자들을 아우르는 북아메리카 오존 전반에 대한 검토와 연구를 수행하였다(NARSTO, 2006). 이는 당시의 오존에 대한 이해를 바탕으로 도시 규모 뿐만 아니라 장거리 이동을 포함한 시공간의 규모를 고려한 결정이었다. NARSTO의 노력은 이후 학문적으로는 2000년 Atmospheric Environment라는 학회지에 24편의 단독 논문을 게재하는 결실로 이어졌고(Schere and Hidy, 2000), 보다 실무적인 정보를 제공하기 위하여 “An Assessment of Tropospheric Ozone Pollution-A North American Perspective”이라는 한 권의 보고서를 출간하였다(NARSTO, 2006). NARSTO 보고서에서 중요하게 다루었던 의제를 몇 가지 정리해보면 다음과 같다.

- 1) 대륙 규모의 오존 장거리 이동이 화두로 떠올랐다. 이전까지는 주로 지역 규모 혹은 광역 규모의 오존 유입을 인식하고 다루어 왔으나, 향후 그보다 더 큰 규모(예: 반지구 규모)의 장거리 오존 이동에 따른 대책마련이 필요함을 언급하였다.
- 2) 효과적인 오존 관리를 위해서는 배출 및 기상 특

성을 충분히 잘 이해하여 계획되고 실행되어야 함을 재확인하였다.

- 3) 측정과 3차원 수치모사의 상호 보완과 광범위한 검토가 중요성이 강조되었다. 이러한 일련의 관련 연구는 객관적이고 실효성이 있는 오존 관리를 위해 필요하다.

한편, 해당 보고서의 검토 위원들은 학술적 목적과 정책 지원 목적의 수치모사가 매우 다른 특성이 있음을 주목하였다. 학술 목적상 모사 정확도는 그 자체로 크게 중요하지 않을 수 있으나 정책 지원 목적으로 쓰일 경우 일정 수준의 모사 정확도가 확보되어야 한다는 점을 강조하였다(NARSTO, 2006).

오존 농도에 영향을 미치는 전구물질의 배출량 파악과 함께, 배출규제의 우선 순위(예, 대상 물질, 대상 오염원)를 정하는 것은 개선 대책의 전반적 방향 설정에 있어 매우 중요하다. 국내 오존 관리는 도시와 산단의 밀집도와 거리, 삼면이 바다인 지형적 효과, 장거리 이동 및 광역 지자체간 상호 영향, 배출 및 중간 물질 농도 미확보 등 다양한 문제점이 선결되어야 보다 확실한 대책이 강구될 수 있다는 점에서 미국을 중심으로 북미 지역에서 이전에 논의되었던 주요 사항들을 되짚어봐야 할 것이다.

4.3 설계치 산정과 대기환경기준 개정

앞서 3.2절에서는 오존 관리를 위한 대기환경기준과 설계치의 중요성에 대해 기술하였다. 이렇게 중요한 대기환경기준과 설계치의 핵심은 형태, 수준, 평균 시간으로, 미국은 여러 번의 시행착오를 거쳐 현재의 체계를 이루었다. 형태의 경우, 1971년 대기환경기준에서 “1회” 기준치 초과를 허용한 것은 불확실하고 예외적인 기상조건까지 고려할 때 완전한 기준 달성은 공학적 판단(Engineering Judgement)에 따라 불가능하다고 보았기 때문이었다(Bachmann, 2010). 문제는 기준 초과일에 기준 초과 시간이 한 시간 이상 발생하는 것이 일반적이라 이러한 형태는 실제적으로는 단 1회의 기준치 초과도 허용하지 않는 셈이라는 해석이 있었다. 따라서 후일 연간 1일 최고 농도를 기

준으로 1회를 허용하는 통계적인 형태로 바뀌게 되었다(US EPA, 1978).

평균시간의 경우에는, 노출 기간에 따른 위해성과 밀접한 관련이 있다. 현재와 같이 8시간 평균으로의 전환은 1997년 기준 개정 시 이루어졌다. 1978년 이후 축적된 보건 및 역학적인 자료로부터 1시간 단기 노출뿐만 아니라 상대적으로 낮은 농도에서 8시간 노출 되는 것 역시 충분히 유해하다고 알려졌으며, 8시간 기준을 달성할 수 있다면 1시간 단기 노출에 의한 위해성 역시 충분히 감소시킬 수 있다는 판단 때문이었다(US EPA, 1996a).

오존 대기환경기준과 관련하여 1997년의 오존 기준 개정은 미국 오존 관리 역사상 기준 설정과 관련된 매우 중요한 사건을 야기하였다. 1997년 오존 대기환경기준에 대해 미 화물운송업협회(American Trucking Association)는 미 환경청을 상대로 ‘비용발생’이라는 측면에서 소송하였다. 2001년 2월 27일 미국 대법원은 미 연방환경청의 대기환경기준 설정 시 경제적인 면은 “고려 대상이 아니다”라는 판결을 내었고(Whitman v. American Trucking Associations, 2001), 이후 개정될 대기환경기준 설정의 철학적 기반을 다지는 중요한 이정표가 되었다(Bachmann, 2007). 그러나, 시의 적절한 기준 개정과 시행이라는 면에서 보면 이러한 개정-소송의 반복은 결과적으로 미국의 오존 농도 개선을 저해하였다. 대기환경기준은 앞서 언급한 것처럼 5년마다 재검토하고 필요시 개정해야 하는데, 오존의 경우 대기환경기준이 1997년 기준 발표 후 11년만인 2008년에서야 개정되었다. 이는 1997년 오존 대기환경기준 공표 이후 4년에 걸친 소송과 이후 1시간 기준에서 8시간 기준으로의 전환에 대한 대비책 마련 등 많은 관련 이슈 때문이다. 결국 2012년에서야 미 환경청은 최종 실행계획을 마련했으며, 2015년에는 공식적으로 1997년 4월 공표된 오존 대기환경기준의 효력을 취소하였다(US EPA, 2016f). 이때는 이미 2008년 오존 대기환경기준이 효력을 발휘한지 7년째였으며, 이로부터 불과 6개월 후인 2015년 10월에 미 환경청은 개정된 오존 대기환경기준을 공표하였다.

한 지역의 오존 설계치는 해당 지역에서 관측된 농도와 대기환경기준을 바탕으로 산정된다. 최근 높아지는 국내 오존 농도 관리를 위해서는 설계치 산정을 통하여 오존 농도 현황 및 저감 정도를 분석하는 과정이 필요하다. 특히, 8시간 평균 오존 농도의 경우 인체 유해성 면에서 1시간 평균 오존보다 중요할 수 있으나, 실제 관리에 적용된 적은 드물다. 또한 미국의 예와 같이 공표되는 대기환경기준에 따라 이해 당사자들의 수용 정도가 다른 점을 고려한다면, 면밀한 검토를 통한 규정이 필요하다. 더욱이 국내의 경우 미국과 같은 주기적인 대기오염기준의 개정 및 변경에 대한 절차 및 제도가 부재하다는 점도 고민해 봐야 할 사항이다.

4.4 오존의 장거리 이동 관리

1980년 후반 기술영향평가국의 보고서에서는 오존과 그 전구물질의 장거리이동에 대한 관리의 필요성을 제기하였으며, 이는 1990년대 미국 오존 관리의 핵심이 되었다. 1990년 청정대기법에서는 주요 개정 항목으로 관련 법령을 추가하였으며, NARSTO의 연구 활동에서도 장거리 이동 영향을 구체적으로 지적하였다(Caplan, 2001; NRC, 1991; OTA, 1989). 다만, 1990년대 중반까지도 미국의 많은 주들(특히 오존 이동 지역의 주들)은 청정대기법상 실무적인 오존 관리 관점에서 기준 준수 의무를 다하지 못하는 위기를 맞닥뜨리고 있었다(Keating and Farrell, 1999).

1990년 청정대기법의 개정에서 미 의회는 미 연방환경청을 통해 미국의 각 주 정부에게 수치모사를 이용하여 1994년 11월 15일까지 달성 증명을 포함하는 주 시행계획을 제출하도록 정하였다. 그러나, 앞서 언급한 오존 이동 지역 지정과 이를 관리하기 위한 오존 이동 위원회의 설립에도 불구하고, 미 동북부의 많은 주들은 1994년부터 1995년 초 즈음에 이미 대기환경기준 달성 증명이 포함된 시행계획의 제출이 요원해 보였다(Farrell and Keating, 2002). 이러한 난관의 가장 큰 이유로 Farrell and Keating (2002)은 주 정부의 장거리 이동을 포함한 수치모사 능력 부재를 언급하였다. 결국 미 환경청장은 1994년 후반과 1995년

초반 고유 권한으로 오존과 전구물질의 이동에 의해 심각하게 영향을 받는 지역은 달성 증명 대신 달성이 어려운 상황을 수치모사로 정량적 증명 시, 시행계획 제출 기한을 연장하도록 허가하였다. 이러한 제출 기한 연장의 목표는 향후 2년간 연방 정부-주 정부 간의 협업을 통해 장거리 오존 이동에 의한 오존 대기환경기준을 준수하기 위한 방안 모색이었다(Farrell and Keating, 2002). 그리하여 1995년 5월 18일 탄생한 것이 오존 이동 평가 사업단(OTAG; Ozone Transport Assessment Group)이다. 1997년 6월 19일까지 2년간 공식 활동을 하게 된 오존 이동 평가 사업단은 미국 대기 환경 관리 역사상 “유일무이한”(“unprecedented”) 그룹이라고 할 수 있다(Anderson, 2000). 오존 이동 평가 사업단의 이상적인 초기 주요 목표는 장거리 이동과 미달성 지역 자체적인 노력이 융합된 미 북동부의 오존 대기환경기준 달성을 위한 오존 전구물질 배출 합의가 포함된 달성 증명을 기반으로 한 주 시행계획의 개발 및 승인이었다(Bergin *et al.*, 2005). 비록 Keating and Farrell (1999)이 주목하였듯 실제적인 정책 합의는 도출되지 않았으나, 이동 평가단의 활동을 통해 미국은 오존 이동 현상과 관련한 상당한 과학적 지식을 축적하고 개선된 모사 기술을 개발하였다. 또한, 장거리 이동이 미 북동부에만 국한되지 않는 일반적인 현상이라는 인식을 대중화하였다. 그리고 이는 향후 미국의 장거리 오존 관련 규정의 토대가 되었다(Keating and Farrell, 1999).

오존 이동 평가 사업단의 활동 이후, 미 환경청은 중장거리 오존 이동으로 풍하 지역의 지방자치단체에서 대기환경기준 신규 달성 및 달성 유지가 어렵다고 판단하였다(US EPA, 1998). 그리하여 “NO_x SIP Call”이라는 규정을 제시하게 된다. 이 규정은 미 환경청이 연방 정부 차원에서 각 지방자치단체에 NO_x 저감 할당량을 주고 지방자치단체가 참고할 수 있는 저감 계획의 정보를 제공하되, 실제적인 최종 저감 정책은 지방자치단체에 일임하도록 하였다. 이후 2000년대 초반 미 환경청은 CAIR를 통해 오존뿐만 아니라 초미세먼지 전구물질의 장거리 이동 또한 규

제하였다(US EPA, 2005a). CAIR는 오존 기간에 대한 NO_x 저감을 포함하여 기존 NO_x SIP Call을 대체하였다. 한편, 2015년 1월 1일부터는 CSAPR (Cross-State Air Pollution Rule)가 실제적으로 CAIR를 대체하게 되었다(US EPA, 2016h). 앞서 살펴본 바와 같이, 비록 오존 이동 평가 사업단이 원래 목표했던 이해 당사자 간의 자발적 정책 합의는 실패하였으나, 공동으로 수행한 연구의 결과를 바탕으로 한 연방 정부의 후속 정책에 대해서 충분히 이해하고 수렴하는 기회가 되었다는 점은 주목할 만하다.

미국의 경우에도 여러 시행착오를 겪으며, 제도를 보완해 나가고 있는 점을 보더라도 오존 관리에서 장거리 이동 영향을 정량적으로 평가하는 것은 쉽지 않다. 그러나, 이런 현실은 반대로 말하자면, 오존의 장거리 이동 현상 규명은 농도 관리에 있어 중요하며, 인접한 지자체 또는 국가간의 협력이 요구된다는 점을 시사한다.

4.5 비 전형적 오존 문제의 등장

미국의 경우 1940년대부터 지금까지 가장 심각한

오존 대기오염 문제가 발생해 온 지역은 캘리포니아 주, 특히 로스엔젤레스 및 리버사이드 지역을 포함하는 남 캘리포니아 지역이다. 따라서, 어떤 지역이 캘리포니아보다 더 오존 문제가 심각하다는 것은 단순한 농도 비교의 문제를 넘어선다. 1980년부터 2017년까지 연중 2번째로 높은 1시간 오존의 지역 평균 농도를 보면 1997, 1999, 2000년 휴스턴 지역의 농도는 캘리포니아 주의 로스엔젤레스나 리버사이드 지역보다 월등히 높다(그림 9). 이 무렵은 앞 절에서 언급한 1991년 미 국립연구협회의회의 보고서 발간 이후 미국의 오존 관리가 전반적으로 NO_x 저감 정책으로의 대적인 전환을 하고 있던 시기였다.

휴스턴은 2000년 당시 전 세계 에틸렌과 프로필렌의 약 5분의 1을 생산하는 대규모 정유 시설을 유지하고 있었다(Forswall and Higgins, 2005). 2000년부터 2006년까지의 휴스턴 지역의 오존 생성률 감소에 대해 연구한 Zhou *et al.* (2014)의 논문에 따르면 이들 정유시설에서 누출된 “HRVOC (Highly Reactive VOC)” 배출량의 감소가 주요 원인이었다. 결과적으로만 보면 2000년대 초, 중반 휴스턴 지역의 대기 관리 결정

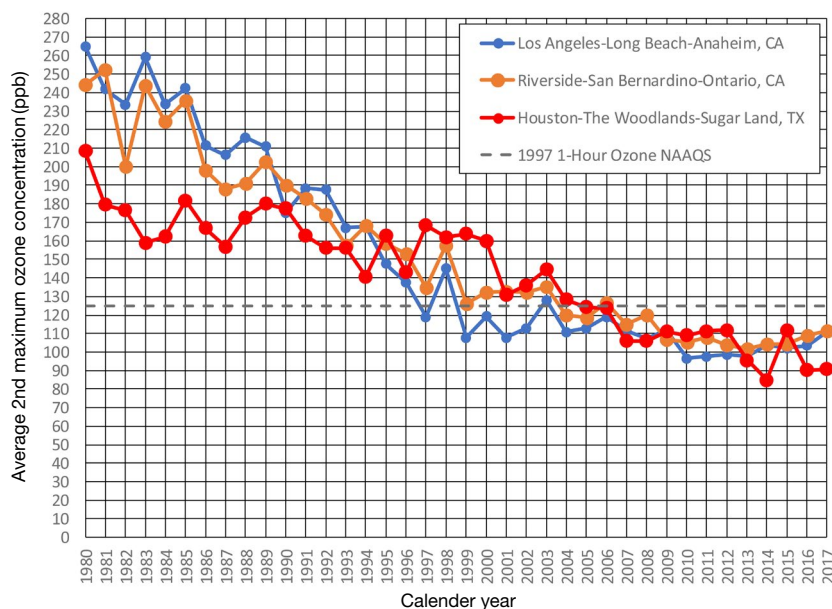


Fig. 9. Average 2nd maximum 1-hour ozone concentrations in Los Angeles, CA (blue), Riverside, CA (orange), and Houston, TX (red) Metro areas from 1980 to 2017 (Source: US EPA AQS). Grey horizontal dotted line is for the 1979 1-hour ozone NAAQS level.

권자들이 HRVOC 배출량을 감축하여 지역별로 배출 특성을 반영한 효과적인 오존 관리 전략을 구현한 것처럼 보일 수 있다. 그러나, 휴스턴의 당시 오존 대기 질 개선 전략 수립 과정은 4.1절과 4.2절에 소개한 미국의 전반적인 대기 관리 실무 중 일어난 시행착오, 특히 오존 개선 계획의 중요한 요소인 개별 지역의 배출, 기상, 화학 특성을 반영한 주 시행계획 수립을 놓친 예로 볼 수 있다.

1990년대 말까지 휴스턴의 오존 관리 상황은 앞서 미국의 청정대기법의 탄생과 1990년 대대적인 개정까지의 상황과 크게 다르지 않았다. 텍사스 주는 1970년 청정대기법에 따라 1972년에 첫 번째 주 시행계획을 제출하였으나 다른 주들과 마찬가지로 1975년까지 기준을 달성하지 못하였다. 이후 텍사스 주는 1985년까지 몇 번에 걸친 시행계획 제출-검토 과정을 거쳐 주 시행계획을 최종 승인받았다(Forswall and Higgins, 2005). 그러나 시행계획 승인 후 얼마 지나지 않아 휴스턴은 1990년 청정대기법에 따라 당시 1시간 오존 대기환경기준 등급상 Severe-17으로 분류되었으며, 2007년까지 기준을 달성해야 하는 상황에 놓였다. 이에 따라 1998년 5월부터 2000년 4월까지 텍사스 주는 의무사항을 충족하고자 몇 차례 시행계획을 제출하였다. 이 시행계획들의 특징은 그 당시 주요 화두였던 VOC 위주의 제어 전략으로부터 NO_x 위주 제어 전략으로의 전환을 반영한 듯이 주요 오존 전구물질로 NO_x를 선정하였다는 점이다. 특히 최종 개정안이었던 2000년 4월 개정안에서는 대형 고정 오염원에 대해 집중 검토 결과를 바탕으로 RACT를 포함한 기존 NO_x 저감 계획과 더불어, 남은 NO_x 배출량의 90%를 저감하도록 하는 매우 공격적인 NO_x 저감 계획을 담았다(Forswall and Higgins, 2005).

여기에서 문제점은 2000년 4월 개정안의 경우 전구물질 제어 전략의 기반이 된 수치모사 결과와 전구물질 배출량 제어 전략의 경제성 두 가지로 나누어 살펴볼 수 있다. 2000년 4월 개정안의 경우 기존 1993년 사례 모사 결과를 바탕으로 하였는데, 이 당시 가장 큰 문제는 해당 사례 기간에 대한 고농도 오존을 재현할

수 없었다(Forswall and Higgins, 2005). 또한, 기존 RACT를 충분히 만족하는 80% NO_x 저감 계획 대비 추가적인 10% NO_x 저감 계획을 포함하는 90% NO_x 저감 정책의 경우 NO_x를 배출하는 모든 산업공정에 선택적 촉매 환원 공정(SCR; Selective Catalytic Reduction) 장비를 장착해야 했다. 이는 초기 투자비용 45억 달러, 연간 유지비용 30~40억 달러를 지출이 예상되어 경제적, 기술적, 현실적으로 어려운 상황이었다(Jeffries, 2009; "SIP Revision: Houston-Galveston-Brazoria," 2000). 이에 따라 휴스턴 지역의 산업체들은 대안을 찾기 시작하였으며, HRVOC 제어가 효과적인 오존 저감을 위한 대책이 될 수 있음을 주장하였다. 텍사스 주는 시행계획 제출 시한을 넘기지 않기 위해 원안대로 NO_x 90% 감축을 골자로 하는 시행계획을 제출하였으나, 산업체는 텍사스 주에 소송하였다. 2001년 6월 법원은 향후 18개월간 객관적인 오존 문제의 이유와 기준 달성을 위한 잠재적인 저감 계획을 찾을 것을 명령하였다. 이에 텍사스 주는 TexAQS (Texas Air Quality Study) 2000자료를 단기간에 심층 분석하는 ASE (Accelerated Science Evaluations)를 통해 오존의 급격한 생성을 야기한 ethylene, propylene, butene, and butadiene을 HRVOC로 구분하고 이에 대한 본격적인 연구를 수행하였다(Kleinman *et al.*, 2002).

당시 모사에 있어 가장 큰 문제는 측정을 통해 확인된 HRVOC의 오존 생성이 모사에서는 재현되지 않는다는 것이었으며, 배출량 목록의 부정확성과 비정밀성이 원인으로 지적되었다. 이에 배출량, 특히 모사를 위한 배출량 입력자료 개선에 많은 노력이 검토되었는데, 이 과정에서 텍사스 주 환경청은 HRVOC 배출량 개선을 위한 여러 방법 중 모사 영역 전체에 대한 배출량 조절 방식을 선택하였다.

당시 휴스턴 오존 모사는 크게 두 가지 사항을 주의했어야 했다. 하나는 모사의 정확도가 옳은 이유(right answer for right reason)로 확보가 되었는지 여부이며, 다른 하나는 모사 정확도 확보를 위해서는 모사 조건 중 수평해상도가 매우 중요하다는 것을 인식하는 것이었다. ASE의 결과를 토대로 한 일련의 모

사 연구는 1km의 고해상도 모사 조건에서 단기간 고밀도의 HRVOC 배출을 적정한 위치에서 구현하는 것이 모사에서 실제 현상을 적절히 반영하는 것임을 보였다(Henderson *et al.*, 2011, 2010; Vizuite *et al.*, 2008; Byun *et al.*, 2007). 이러한 결과는 궁극적으로 주 환경청에 받아들여져 2002년 시행계획 개정안으로부터 HRVOC의 본격적인 저감을 시작하였으며, NO_x 저감률도 80%로 하향 조정되었다(TCEQ, 2019; US EPA, 2005b). 즉, 휴스턴의 경우 기존 미국 전역에서 벌어졌던 VOC 제어에서 NO_x 제어로의 패러다임 전환이 이루어지던 가운데, 오존의 지역별 광화학적 특성을 반영하여 제어 전략을 수립해야 함을 다시금 상기시키는 좋은 예가 되었다.

초미세먼지와 마찬가지로 오존 농도의 관리 역시 전구물질의 배출량 저감 노력이 결국 농도 개선을 예측하게 한다. 다만 대상 지역의 특성을 제대로 파악하지 못할 경우 비현실적인 정책이 도출될 수 있으며, 이는 많은 비용이 투입되더라도 농도 개선은 요원할 수 있다는 점에서 중요할 수 있다. 또한 기존의 이해와는 달리 지역마다, 시기마다 고농도 오존 발생 원인은 차이를 보일 수 있으므로, 유연한 관리 대책과 체계를 유지하는 것도 필요하다.

4.6 광화학 격자 모형

기본적으로 수치모사는 특정한 작업(예: 달성 증명)을 완수하기 위한 도구이다(Oreskes *et al.*, 1994). 따라서 그 정합도 분석 및 평가 역시 그러한 목적에 충실한가에 초점을 맞추어야 한다(Beck, 2002). 즉, 모사 결과의 정합도 평가는 궁극적으로 모사에 사용된 입력자료나 모형 자체의 문제를 드러낼 수 있어야 한다. 이는 정책 지원용 수치모사에서 중요한 사안이며, 미 감사원이 이미 1980년대 후반에 지적하였듯이 모사 자료의 정확도에 따라 필요 삭감 배출량이 크게 달라지기 때문이다(OTA, 1989). 더욱이, 앞서 오존의 광화학 특성에서 살펴보았듯 대기 중 NO_x와 VOC의 농도비를 바탕으로 지역적으로 형성되는 오존이 NO_x 제한조건에 의한 것인지, VOC 제한조건에 의한

것인지 판단하고, 이를 바탕으로 해당 지역의 최종 오존 제어 정책의 방향을 결정한다.

3차원 모사의 경우 기상 및 배출의 시공간적인 변화를 고려하여 모사 정합도를 하나의 숫자로 단순히 평가하기보다는 시공간적 변화에 대한 검토가 추가되어야 한다. 그러한 관점에서 단순한 통계적 정합도 분석으로 수치모사 결과를 통째로 받아들이거나 부정하는 것은 부적절하다(Beck, 2002). 미 연방환경청은 이러한 사실을 감안하여 모사 불확실성을 반영한 정합도 분석을 위해 증거비중(WOE; Weight-of-Evidence) 분석을 추가하였다(US EPA, 1996b). 다만, 증거비중 분석을 적절히 수행하기 위한 충분한 가이드를 주지 않아 또 다른 부작용을 낳기도 하였다. 예로, 2000년대 초반 뉴욕 주의 시행계획 달성 증명에서 미래연도 고농도 오존은 171 ppb까지 나타났다. 뉴욕 주는 되돌리기(rollback) 기법을 적용하여 불확도를 고려할 시, 실제 예측되는 미래연도 오존 농도는 118 ppb로 유지될 것으로 주장하였다. 미 환경청은 1970년 후반 이미 되돌리기 기법, 특히 선행적 되돌리기 기법이 오존과 관련되어 매우 제한된 조건에서만 적용될 수 있음을 인지하고 그 위험성을 경고하였다(Meyer Jr *et al.*, 1977). 그러나, 법원은 이러한 기법을 달성 증명에 사용하는 것을 받아들였다(2nd Circuit, 2003). 결국 이 사례가 보여준 것은 정합도 분석이 주관적인 판단이 포함되는 과정이기는 하나, 보다 객관적인 접근법이 확보되지 않는 경우 미 환경청의 지침 문서의 최소 요구 사항이 충족된다고 판단되면 비록 수치모사에 큰 문제가 있더라도 법적으로는 수용 가능하다는 점이다(5th Circuit, 2003). 텍사스 주에서 벌어진 90% NO_x 저감과 관련된 혼란도 1993년 시행계획 모사의 정확도 평가의 문제와 관련이 깊다. 수치모사와 관련하여 과학적인 발전이 지속되어야 하며 모형 자체의 개선도 중요하다. 앞서 살펴본 일련의 사건들은 실무에서 오존 수치모사를 수행하고 그 결과를 해석하여 실효성 있는 정책을 수립해야 하는 지자체 공무원들에게 체계적이고 과학적인 훈련이 반드시 필요하다는 것을 방증한다.

5. 결 론

5.1 미국 오존 관리의 시행착오 및 성공 요인

본고에서는 1940년대 이래 미국에서 오존 문제 해결을 위해 시작된 노력이 현행 오존 대기질 관리 체제에 도달하기까지의 주요 쟁점과 해결 방안의 제시라는 관점에서 살펴보았다. 오존 문제의 인식과 해결 노력에 있어 흥미로운 것 중 하나는 오존 문제가 불거진 무렵 오존 문제 해결이 얼마나 어려운지에 대해 미국의 일부 위정자들이 보였던 인식 부족이다. 예를 들어, 1943년 심각한 광화학 스모그를 겪은 LA 시장은 4개월 안에 오존 문제를 해결할 것이라 공언하였다(McNally, 2010). 대기오염 문제의 경중에 대한 이러한 오해는 앞서 검토한 청정대기법의 역사에서 본 것처럼 법 개정과 그에 따른 달성 목표연도의 지속적인 연장에서도 엿볼 수 있다. 오존 관리 역사 초기 오존 농도 개선에 대한 미국의 선부른 기대는 오존 문제에 대한 하겐스미트 박사의 기본적인 화학적 원인 규명이 공식적으로 발표된 1952년으로부터 66년이 지난 지금까지 여전히 난제가 되리라는 것을 미처 인지하지 못했기 때문일 것이다.

미국 오존 관리 역사의 초반은 과학-정책이라는 관점에서 보면 뚜렷한 인과관계를 과학에서 얻기 전에 이미 문제 자체의 인식으로부터 관리의 필요를 정책이라는 도구를 통해 구현하고자 하였다. 그렇기 때문에 본격적인 문제 인식의 시작이었던 1943년부터 현대적인 관리 골격을 갖추게 된 1990년까지 47년간을 시행착오의 기간으로 보내게 되었다. 비록 1943년으로부터 75년이 지난 지금까지도 미국에서 오존 미달성은 여전히 진행 중인 문제이지만, 앞서 살펴본 시행착오를 거쳐 미국은 현재의 대기 관리의 기본틀인 주 시행계획을 정착시키게 되었고, 이는 미 환경청이 기준을 세우고 각 주는 시행계획을 수립하고 시행하는 이른바 “Cooperative federalism”의 좋은 예가 된다(Fischman, 2005). 그리고 지속적으로 강화된 대기환경기준에도 불구하고 꾸준히 기준 이상의 농도에 노출되는 지역의 수를 줄여갈 수 있었다.

반면, 같은 기간 이동 오염원과 관련해서는 정책적인 의지로 일찍 큰 성공을 거두었다고 볼 수 있는데, 대표적인 예가 삼원 촉매장치의 의무 사용이다. 앞서 언급한 바와 같이 선 기술개발-후 규제와 선 규제-후 기술개발에 대해 규제 주체와 피규제 주체와의 줄다리기에 가운데 미 의회의 전폭적인 지지와 캘리포니아 환경청 및 미 환경청의 의지가 결합하여 선 규제-후 기술개발이라는 접근법이 선택되었으며, 전국의 오존 농도를 지속적으로 낮추는 데 크게 일조하였다.

시행착오를 통한 성공의 또 다른 예로는 1990년대 VOC 위주의 오존 저감 정책에서 NO_x 위주의 오존 저감 정책으로의 패러다임 전환이 있다. 1990년대 이전의 실패는 당시 운용되던 수치모사 및 그를 위한 배출량 산정 및 불확도와 연관이 깊다. 기술영향평가국이 지적하였듯이 많은 부분에서 인위 및 자연 VOC 배출량이 저평가되어 모사 결과에서 오존 생성이 VOC 제한에 의한 것으로 보고되었고, 이는 오존 저감을 위해 VOC 감소에 치중하는 결과를 낳기 때문이다. 그러나, 미 의회는 1990년 청정대기법의 대대적인 개정을 하면서 기술영향평가국과 미 국립연구협회가 지적한 문제점과 오존 이동에 대한 필요성을 빠르게 받아들였다. 또한, 미 환경청과 주 정부들이 문제 해결에 필요한 제도 마련 및 지원을 통해 오존 이동 평가 사업단이나 NARSTO와 같은 기구를 발족시킨 것은 주목할 만하다. 오존 이동 평가 사업과 NARSTO의 활동에서 주목할 만한 것은 이들의 활동에 학계와 정부뿐 아니라 다양한 산업체(예: 발전, 자동차, 석유)의 대표자들까지 포함하였다는 것이다. 다만, 2000년 초반 이후로 미국에서는 미 의회 기술영향평가국, 미 국립연구협회의, NARSTO의 활동과 같은 정부, 학계, 산업계를 아우르는 광범위하고 종합적인 오존 관리 검토와 관련된 활동이 부재하다.

마지막으로 미국의 경우 오존 관리에서 매우 중요한 도구이지만, 많은 논란의 여지가 있는 수치모형 및 모사와 관련하여 실무적인 정책 지원용 수치 모형의 운용, 결과 분석과 이용 단계에 있어 오용 문제에 주목하였다(OTA, 1989). 이러한 오용 문제의 일부는

과도한 모사 “조정” 문제를 포함한다 (Russell and Dennis, 2000). 그러나 궁극적으로 이러한 일련의 문제는 보다 과학적인 근거에 기반한 수치모사 개선, 실무진의 모사 역량 강화, 연방-주-규제 대상 단체 사이의 모사 관련 자료 공유 및 공동 검토 등을 통해 점진적으로 해결되었다. 최근 활발하게 추진되고 있는 효과적인 대기질 개선 전략 개발을 위한 연방환경청과 지자체 사이의 배출량 산정을 위한 협력은 이러한 역사적 교훈을 충분히 잊지 않고 지속적으로 이어가고 있다 (Kim *et al.*, 2018c).

5.2 국내 오존 문제 개선에 대한 시사점 및 제언

오존 기준 미달성 지역에 대한 미국의 오존 관리 노력과 관련하여 현재 중앙 정부와 지자체의 역할을 구분 지어 보자면 중앙 정부는 해당 지역의 배경 농도 감축을, 지자체는 해당 지역의 국소적인 오존 발생 억제를 주요 목표로 하고 있다고 할 수 있다. 이를 위해 중앙 정부는 도로 이동 오염원의 배출량 규정, 오존 이동 규정 등 보다 광역적인, 전국적으로 적용되는 규정을 개발, 공포 및 집행하고 있다. 반면 지방 정부는 그러한 규정에 더해 해당 지역의 오존 발생 특성을 파악하고 파악한 특성을 기반으로 지역적으로 효과적인 오존 생성을 저감하는 정책을 개발, 공포, 집행하고 있다. 따라서 오존 관리 구조 측면에서 중앙 정부는 목표와 도구를 제시하고, 지방자치단체는 그러한 목표 달성을 위해 중앙 정부의 도움을 받아 제공된 도구를 활용하며, 지역 특성 등과 같은 중앙정부가 간과할 수 있는 정보를 중앙 정부에 제공하여 동시에 같이 개선하는 체계 구축이 국내 오존 농도 저감에도 많은 도움이 될 것이다.

앞서 언급한 바와 같이 수도권 등 국내 오존 문제는 정확한 현황 및 원인 진단, 장거리 이동과 지역별 배출량에 의한 정량적 영향 분석, 배출-이동-생성-소멸 단계별 이해 등에서 갈 길이 멀다. 즉각적인 효과를 기대하는 행정 노력과는 달리 과학적인 이해는 장기적인 접근과 이해 당사자 간 협력이 필요하며,

이는 제도 및 체계적인 지원이 없이는 불가능함을 인지해야 한다. 또한 제대로 고농도 오존 발생 원인을 규명하지 못한다면, 마련되는 대책에 의해 오존 농도가 개선된다는 보장도 없으며 비용 면에서도 손해일 수밖에 없다. 특히 국내의 경우 초미세먼지, 이산화질소 등 다양한 기준성 물질들이 대기환경기준을 초과하는 상황이라는 점에서 보다 정확하고 정밀한 과학적 접근이 필요하다.

감사의 글

본 논문은 정부(과학기술정보통신부, 환경부, 보건복지부) 재원 한국연구재단 미세먼지 국가전략프로젝트사업(2017M3D8A1092020)과 아주대학교 교내 연구비 지원 하에 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

References

- 2nd Circuit (2003) Environmental Defense vs U.S. Environmental Protection Agency.
- 5th Circuit (2003) Business Coalition for Clean Air vs U.S. Environmental Protection Agency.
- 472 F.3d 882 (2006) South Coast Air Quality Management District vs U.S. Environmental Protection Agency.
- Ainsworth, E.A. (2017) Understanding and improving global crop response to ozone pollution, *The Plant Journal*, 90(5), 886-897, DOI:10.1111/tpj.13298.
- Anderson, J.W. (2000) Interview with Mary Gade, former chair of the Ozone Transport Assessment Group (OTAG), *RESOURCES FOR THE FUTURE*, 138(19).
- Bachmann, J. (2010) Question about 1971 Oxidant NAAQS.
- Bachmann, J. (2007) Will the Circle Be Unbroken: A History of the U.S. National Ambient Air Quality Standards, *Journal of the Air and Waste Management Association*, 57(6), 652-697, DOI: 10.3155/1047-3289.
- Beck, B. (2002) Model Evaluation and Performance, *Encyclopedia of Environmetrics*, John Wiley and Sons, Chichester, New York, 1275-1279.
- Bell, M.L., Goldberg, R., Hogrefe, C., Kinney, P.L., Knowlton, K., Lynn, B., Rosenthal, J., Rosenzweig, C., Patz, J.A. (2007) Climate change, ambient ozone, and health in 50 US

- cities, *Climatic Change*, 82(1-2), 61-76, DOI:10.1007/s10584-006-9166-7.
- Bell, M.L., Morgenstern, R.D., Harrington, W. (2011) Quantifying the human health benefits of air pollution policies: Review of recent studies and new directions in accountability research, *Environmental Science and Policy*, 14(4), 357-368, DOI:10.1016/j.envsci.2011.02.006.
- Bergin, M.S., West, J.J., Keating, T.J., Russell, A.G. (2005) Regional atmospheric pollution and transboundary air quality management, *Annual Review of Environment and Resources*, 30, 1-37, DOI: 10.1146/annurev.energy.30.050504.144138.
- Brienes, M. (1976) Smog Comes to Los Angeles, *Southern California Quarterly*, 58(4), 515-532, DOI:10.2307/41170674.
- Byun, D.W., Kim, S.-T., Kim, S.-B. (2007) Evaluation of air quality models for the simulation of a high ozone episode in the Houston metropolitan area, *Atmospheric Environment*, 41(4), 837-853, DOI:10.1016/j.atmosenv.2006.08.038.
- Caplan, C.C. (2001) The failure of current legal and regulatory mechanisms to control interstate ozone transport: The need for new national legislation, *Ecology Law Quarterly*, 28, 169.
- Choi, K.-C., Lee, J.-J., Bae, C.H., Kim, C.-H., Kim, S., Chang, L.-S., Ban, S.-J., Lee, S.-J., Kim, J., Woo, J.-H. (2014) Assessment of transboundary ozone contribution toward South Korea using multiple source - receptor modeling techniques, *Atmospheric Environment*, 92, 118-129, DOI:10.1016/j.atmosenv.2014.03.055.
- Chuwah, C., van Noije, T., van Vuuren, D.P., Stehfest, E., Hazeleger, W. (2015) Global impacts of surface ozone changes on crop yields and land use, *Atmospheric Environment*, 106, 11-23, DOI:10.1016/j.atmosenv.2015.01.062.
- Clean Air Asia Factsheet (2010) Ozone (O₃) Standards in Asia, Publishers CAI-Asia, Pasig City, Philippines, https://cleanairasia.org/wp-content/uploads/portal/files/documents/15_Ozone_Standards_in_Asia_Factsheet_25_Aug_2010.pdf (accessed on Jun. 14, 2019).
- Dundon, R. (2018) Photos: L.A.'s mid-century smog was so bad, people thought it was a gas attack, <https://timeline.com/la-smog-pollution-4ca4bc0cc95d> (accessed on Jun. 14, 2019).
- Erbes, R.E. (1996) *A Practical Guide to Air Quality Compliance*, 2nd Edition.
- European Commission (2018) Standards - Air Quality - Environment, <http://ec.europa.eu/environment/air/quality/standards.htm> (accessed on Mar. 9, 2019).
- Farrell, A.E., Keating, T.J. (2002) Transboundary environmental assessment: Lessons from OTAG, *Environmental Science & Technology*, 36(12), 2537-2544.
- Finlayson-Pitts, B.J., Pitts Jr, J.N. (1999) *Chemistry of the upper and lower atmosphere: theory, experiments, and applications*, Academic press.
- Fischman, R.L. (2005) *Cooperative Federalism and Natural Resources Law*, New York University Environmental Law Journal, 14, 179.
- Forswall, C.D., Higgins, K.E. (2005) Clean Air Act Implementation in Houston: An Historical Perspective 1970-2005, Rice University, Houston, TX.
- Guerreiro, C.B.B., Foltescu, V., de Leeuw, F. (2014) Air quality status and trends in Europe, *Atmospheric Environment*, 98, 376-384, DOI:10.1016/j.atmosenv.2014.09.017.
- Haagen-Smit, A.J. (1952) Chemistry and physiology of Los Angeles smog, *Industrial & Engineering Chemistry*, 44(6), 1342-1346, DOI: 10.1021/ie50510a045.
- Henderson, B.H., Jeffries, H.E., Kim, B.-U., Vizuete, W.G. (2010) The Influence of Model Resolution on Ozone in Industrial Volatile Organic Compound Plumes, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 60(9), 1105-1117, <https://doi.org/10.3155/1047-3289.60.9.1105>.
- Henderson, B.H., Kimura, Y., McDonald-Buller, E., Allen, D.T., Vizuete, W. (2011) Comparison of Lagrangian Process Analysis tools for Eulerian air quality models, *Atmospheric Environment*, 45(29), 5200-5211, DOI:10.1016/j.atmosenv.2011.06.005.
- Hogrefe, C., Liu, P., Pouliot, G., Mathur, R., Roselle, S., Fleming, J., Lin, M., Park, R.J. (2018) Impacts of different characterizations of large-scale background on simulated regional-scale ozone over the continental United States, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18, 3839-3864, DOI: 10.5194/acp-18-3839-2018.
- Jaffe, D.A., Cooper, O.R., Fiore, A.M., Henderson, B.H., Tonneson, G.S., Russell, A.G., Henze, D.K., Langford, A.O., Lin, M., Moore, T. (2018) Scientific assessment of background ozone over the U.S.: Implications for air quality management, *Elem Sci Anth*, 6(1), 56, DOI:10.1525/elementa.309.
- Jeffries, H. (2009) Influence of Highly Variable Spatial and Temporal VOC Emissions in Houston Texas on 1-h and 8-h Ozone SIP Modeling. Is this relevant to California? Chair's.
- Ju, H., Kim, H.C., Kim, B.-U., Ghim, Y.S., Shin, H.J., Kim, S. (2018) Long-term Trend Analysis of Key Criteria Air Pollutants over Air Quality Control Regions in South Korea using Observation Data and Air Quality Simulation, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*,

- 34(1), 101-119, (in Korean with English abstract), DOI: 10.5572/KOSAE.2018.34.1.101.
- Jung, H.-C., Moon, B.-K., Wie, J. (2018) Seasonal changes in surface ozone over South Korea. *Heliyon*, 4(1), e00515, DOI: 10.1016/j.heliyon.2018.e00515.
- Keating, T.J., Farrell, A. (1999) Transboundary Environmental Assessment: Lessons from the Ozone Transport Assessment Group (No. NCEDR/99-02), National Center for Environmental Decision-making Research, Knoxville, TN 36(12), 2537-2544.
- Kim, B.-U., Kim, H.C., Kim, S. (2018a) Review of Particulate Matter Management in United States, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(2), 342-355, (in Korean with English abstract), DOI:10.5572/KOSAE.2018.34.4.588.
- Kim, B.-U., Kim, H.C., Kim, S. (2018b) A Recently Improved Approach to Develop Effective Emission Inventory for Air Quality Planning in US, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(4), 588-609, (in Korean with English abstract), DOI:10.5572/KOSAE.2018.34.2.342.
- Kim, J., Ghim, Y.S., Han, J.-S., Park, S.-M., Shin, H.-J., Lee, S.-B., Kim, Jeongsoo, Lee, G. (2018) Long-term Trend Analysis of Korean Air Quality and Its Implication to Current Air Quality Policy on Ozone and PM₁₀, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(1), 1-15, (in Korean with English abstract), DOI:10.5572/KOSAE.2018.34.1.001.
- 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, (in Korean with English abstract), DOI:10.5572/KOSAE.2017.33.2.139.
- 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, 377-392, (in Korean with English abstract), DOI:10.5572/KOSAE.2017.33.4.377.
- Kim, Y.P., Lee, G. (2018) Trend of Air Quality in Seoul: Policy and Science, *Aerosol and Air Quality Research*, 18(9), 2141-2156. (in Korean with English abstract), DOI:10.4209/aaqr.2018.03.0081.
- Kleinman, L.I., Daum, P.H., Imre, D., Lee, Y.-N., Nunnermacker, L.J., Springston, S.R., Weinstein-Lloyd, J., Rudolph, J. (2002) Ozone production rate and hydrocarbon reactivity in 5 urban areas: A cause of high ozone concentration in Houston: OZONE PRODUCTION RATE AND HYDROCARBON REACTIVITY, *Geophysical Research Letters*, 29(10), 105-1-105-4.
- Lelieveld, J., Barlas, C., Giannadaki, D., Pozzer, A. (2013) Model calculated global, regional and megacity premature mortality due to air pollution, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(14), 7023-7037, DOI:10.5194/acp-13-7023-2013.
- McNally, J. (2010) July 26, 1943: L.A. Gets First Big Smog. *Wired*.
- MECTEC. (2002) Appendix E, Documentation of VISTAS Inventories and Georgia 2002 CERR Inventory.
- Meyer Jr, E.L., Summerhays, J.P., Freas, W. (1977) Uses, Limitations, and Technical Basis of Procedures for Quantifying Relationships between Photochemical Oxidants and Precursors, in EPA-450/2-77-021a: Environmental Protection Agency Research Triangle Park, NC.
- Ministry of Environment. (2017) Air Quality Standards and Air Pollution Level. 26 February 2017. <http://eng.me.go.kr/eng/web/index.do?menuId=252> (accessed 2.26.2017).
- Monks, P.S., Archibald, A.T., Colette, A., Cooper, O., Coyle, M., Derwent, R., Fowler, D., Granier, C., Law, K.S., Mills, G.E., Stevenson, D.S., Tarasova, O., Thouret, V., von Schneidemesser, E., Sommariva, R., Wild, O., Williams, M.L. (2015) Tropospheric ozone and its precursors from the urban to the global scale from air quality to short-lived climate forcer, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(15), 8889-8973, DOI:10.5194/acp-15-8889-2015.
- North American Research Strategy for Tropospheric Ozone (NARSTO) (2006) Ozone Assessment, https://www.narsto.org/ozone_assessment (accessed 12.8.18).
- National Research Council (NRC) (1991) Rethinking the Ozone Problem in Urban and Regional Air Pollution. National Academies Press, Washington.
- Oreskes, N., Shrader-Frechette, K., Belitz, K. (1994) Verification, validation, and confirmation of numerical models in the earth sciences, *Science*, 263(5147), 641-646.
- Office of Technology Assessment (OTA) (1989) Catching Our Breath: Next Steps for Reducing Urban Ozone (No. OTA-O-412), US Government Printing Office, Washington, D.C.
- Parrish, D.D., Singh, H.B., Molina, L., Madronich, S. (2011). Air quality progress in North American megacities: A review, *Atmospheric Environment*, 45(39), 7015-7025. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2011.09.039.
- Paul, M., Solomon, M. (2009) A Brief History of Technology-Forcing Motor Vehicle Regulations, *Air and Waste Management Association*, 5.

- Russell, A., Dennis, R. (2000) NARSTO critical review of photochemical models and modeling, *Atmospheric environment*, 34(12), 2283-2324.
- Schere, K.L., Hidy, G.M. (2000) The NARSTO Ozone Assessment-Critical Reviews-Foreword: NARSTO critical reviews, *Atmospheric Environment*, 34(12-14), 1853-1860.
- Seaman, N.L. (2000) Meteorological modeling for air-quality assessments, *Atmospheric Environment*, 34(12-14), 2231-2259.
- Seinfeld, J.H., Pandis, S.N. (2016) *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*. John Wiley & Sons.
- Senn, C.L. (1948) General Atmospheric Pollution - A Symposium: Los Angeles "Smog." American Public Health Association.
- Shin, H.J., Park, J.H., Park, J.S., Song, I.H., Park, S.M., Roh, S.A., Son, J.S., Hong, Y.D. (2017) The Long Term Trends of Tropospheric Ozone in Major Regions in Korea, *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 11(4), 235-253. DOI: 10.5572/ajae.2017.11.4.235.
- SIP Revision: Houston-Galveston-Brazoria (2000) <https://www.tceq.texas.gov/airquality/sip/apr2000hgb.html> (accessed 4.19.19).
- Sullivan, J.T., Berkoff, T., Gronoff, G., Knepp, T., Pippin, M., Allen, D., Twigg, L., Swap, R., Tzortziou, M., Thompson, A.M., Stauffer, R.M., Wolfe, G.M., Flynn, J., Pusede, S.E., Judd, L.M., Moore, W., Baker, B.D., Al-Saadi, J., McGee, T.J. (2019) The Ozone Water-Land Environmental Transition Study: An Innovative Strategy for Understanding Chesapeake Bay Pollution Events, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 100(2), 291-306. DOI: 10.1175/BAMS-D-18-0025.1.
- Texas Commission on Environmental Quality (TCEQ) (2019) Controlling HRVOC Emissions, TCEQ, <https://www.tceq.texas.gov/airquality/stationary-rules/voc/hrvoc.html> (accessed 2.23.19).
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (1972) Approval and Promulgation of Implementation Plans, Federal Register.
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (1978) Proposed Revisions to the National Ambient Air Quality Standard, Federal Register.
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (1996a) Review of National Ambient Air Quality Standards for Ozone: Assessment of Scientific and Technical Information (No. EPA-452/R-96-007), OAQPS Staff Paper.
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (1996b) Guidance on Use of Modeled Results to Demonstrate Attainment of the Ozone NAAQS (No. EPA-454/B-95-007).
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (1998) Finding of Significant Contribution and Rulemaking for Certain States in the Ozone Transport Assessment Group Region for Purposes of Reducing Regional Transport of Ozone, Federal Register, <https://www.federalregister.gov/documents/1998/10/27/98-26773/finding-of-significant-contribution-and-rulemaking-for-certain-states-in-the-ozone-transport>.
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2005a) Rule To Reduce Interstate Transport of Fine Particulate Matter and Ozone (Clean Air Interstate Rule), Federal Register, <https://www.federalregister.gov/documents/2005/05/12/05-5723/rule-to-reduce-interstate-transport-of-fine-particulate-matter-and-ozone-clean-air-interstate-rule> (accessed 10.6.17).
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2005b) Approval and Promulgation of Air Quality Implementation Plans; Texas; Highly Reactive Volatile Organic Compound Emissions Cap and Trade Program for the Houston/Galveston/ Brazoria Ozone Nonattainment Area, Federal Register, <https://www.federalregister.gov/documents/2006/09/06/06-7412/approval-and-promulgation-of-air-quality-implementation-plans-texas-revisions-to-the-ozone> (accessed 10.6.17).
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2014) Process of Reviewing the National Ambient Air Quality Standard, <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants/process-reviewing-national-ambient-air-quality-standards> (accessed 10.6.17).
- U. S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2015a) Initial List of Hazardous Air Pollutants with Modifications, <https://www.epa.gov/haps/initial-list-hazardous-air-pollutants-modifications> (accessed on Mar. 9, 2019).
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2015b) Ozone Designations Guidance and Data, <https://www.epa.gov/ozone-designations/ozone-designations-guidance-and-data> (accessed 1.7.19).
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2015c) Basic Information about Air Quality SIPs, <https://www.epa.gov/sips/basic-information-air-quality-sips> (accessed 11.24.18).
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2015d) Required SIP Elements by Nonattainment Classification, <https://www.epa.gov/ground-level-ozone-pollution/required-sip-elements-nonattainment-classification> (accessed on Nov. 25, 2018).
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2015e) Ozone NAAQS Timelines, <https://www.epa.gov/ground-lev->

- el-ozone-pollution/ozone-naaqs-timelines (accessed 12.25.18).
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2015f) Ozone Designation and Classification Information, <https://www.epa.gov/green-book/ozone-designation-and-classification-information> (accessed 6.4.19).
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2015g) Implementation of the 2015 National Ambient Air Quality Standards (NAAQS) for Ozone: State Implementation Plan (SIP) Requirements, <https://www.epa.gov/ground-level-ozone-pollution/implementation-2015-national-ambient-air-quality-standards-naaqs-ozone> (accessed 6.4.19).
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2015h) Evolution of the Clean Air Act, <https://www.epa.gov/clean-air-act-overview/evolution-clean-air-act> (accessed 11.12.18).
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2016a) Final Cross-State Air Pollution Rule Update - Benefits Information and Maps, <https://www.epa.gov/airmarkets/final-cross-state-air-pollution-rule-update-benefits-information-and-maps> (accessed 2.18.19).
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2016b) Menu of Control Measures for NAAQS Implementation, <https://www.epa.gov/air-quality-implementation-plans/menu-control-measures-naaqs-implementation> (accessed 2.18.19).
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2016c) New Source Performance Standards, <https://www.epa.gov/stationary-sources-air-pollution/new-source-performance-standards> (accessed 1.12.19).
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2016d) RACT/BACT/LAER Clearinghouse (RBLC) Basic Information, <https://www.epa.gov/catc/ractbactlaer-clearinghouse-rbcl-basic-information> (accessed 10.9.17).
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2016e) How Mobile Source Pollution Affects Your Health, <https://www.epa.gov/mobile-source-pollution/how-mobile-source-pollution-affects-your-health> (accessed 2.14.19).
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2016f) Vehicle Emissions Inspection and Maintenance (I/M): Regulations, <https://www.epa.gov/state-and-local-transportation/vehicle-emissions-inspection-and-maintenance-im-regulations> (accessed on Jun. 14, 2019).
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2016g) Emission Standards for Light-Duty Vehicles and Trucks, <https://www.epa.gov/emission-standards-reference-guide/epa-emission-standards-light-duty-vehicles-and-trucks> (accessed 3.1.19).
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2016h) Overview of the Cross-State Air Pollution Rule (CSAPR), <https://www.epa.gov/csapr/overview-cross-state-air-pollution-rule-csapr> (accessed 10.6.17).
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2018a) Table of Historical Ozone National Ambient Air Quality Standards (NAAQS) | Ground-level Ozone Pollution | US EPA, <https://www.epa.gov/ground-level-ozone-pollution/table-historical-ozone-national-ambient-air-quality-standards-naaqs> (accessed 11.11.18).
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2018b) Ozone Trends | National Air Quality: Status and Trends of Key Air Pollutants, <https://www.epa.gov/air-trends/ozone-trends> (accessed 12.8.18).
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2018c) Modeling Guidance for Demonstrating Air Quality Goals for Ozone, PM_{2.5} and Regional Haze, https://www3.epa.gov/ttn/scram/guidance/guide/O3-PM-RH-Modeling_Guidance-2018.pdf (accessed 2.18.19).
- Vizuite, W., Kim, B.-U., Jeffries, H., Kimura, Y., Allen, D.T., Kiourmourtzoglu, M.-A., Biton, L., Henderson, B. (2008) Modeling ozone formation from industrial emission events in Houston, Texas. *Atmospheric Environment*, 42(33), 7641-7650. DOI:10.1016/j.atmosenv.2008.05.063.
- Zhou, W., Cohan, D.S., Henderson, B.H. (2014) Slower ozone production in Houston, Texas following emission reductions: evidence from Texas Air Quality Studies in 2000 and 2006, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14(6), 2777-2788. DOI: 10.5194/acp-14-2777-2014.

Authors Information

김병욱 (Unit Manager, Georgia Environmental Protection Division, Atlanta, GA, USA)
 김현철 (Research Scientist, Air Resources Laboratory, National Oceanic and Atmospheric Administration)
 김순태 (아주대학교 환경안전공학과 교수)