

미국의 대기질 관리계획 수립 시 활용성 강화를 위한 배출량 목록 산정에 대한 최근 접근 방안

A Recently Improved Approach to Develop Effective Emission Inventory for Air Quality Planning in US

김 병 욱 · 김 현 철^{1,2)} · 김 순 태^{3),*}

미국조지아주환경청, ¹⁾미국국립해양대기청,

²⁾메릴랜드대학 기후 · 위성 연구소, ³⁾아주대학교 환경안전공학과

(2018년 2월 2일 접수, 2018년 2월 26일 수정, 2018년 3월 7일 채택)

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

(Received 2 February 2018, revised 26 February 2018, accepted 7 March 2018)

Abstract

Emission inventory (EI) is often recognized as a foundational pillar for air quality planning. In this manuscript, we reviewed national emission inventory (NEI) development processes in United States (US) and made recommendations for South Korean emission inventory development for the future. First, we examined history of emission inventory development in US while focusing on what has been success and failure. We noticed that, in general, emission reductions led to air pollution abatement although efficacy of same degree of reduction may not result in similar air quality improvement. Second, we described conventional approaches of developing NEI and differences between NEI and EI for State Implementation Plan which is required for air quality management in US. Last, we analyzed how US Environmental Protection Agency and counterpart agencies in states came up with a new plan for the next major regulatory modeling project. Based on our analysis, we conclude that early and steady participation of local governments will lead to effective and efficient emission inventory development and, in turn, will result in successful air quality planning that is necessary for actual air quality improvement.

Key words : Emissions inventory development, CAPSS, NEI, Conventional approach

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)31-219-2511, E-mail : soontae.kim@ajou.ac.kr

1. 서 론

미국의 대기질 개선계획은 대기환경기준 비달성 지역을 포함한 주(State)에서 대기오염물질 농도 감소를 위해 자체적으로 수립해야 하는 주 시행계획(State Implementation Plan; 이하 ‘시행계획’)이 그 근간이라고 할 수 있다(Henneman *et al.*, 2017; Kuklinska *et al.*, 2015; National Research Council, 2004). 즉, 시행계획은 대기관리를 위한 주요 설계도이다(US EPA Region 4, 2008). 이러한 시행계획에는 수치모사 기반의 정량적 분석을 통해 각 지자체의 대기관리 계획이 목표연도까지 대기질 개선이 이루어질 수 있는지를 보이는 달성증명 모사가 반드시 포함되어야 한다(Cohan and Napelenok, 2011; US EPA, 2007; National Research Council, 2004). 이 달성증명 모사에 이용되는 중요한 입력 자료로 배출량 자료와 기상 자료를 꼽을 수 있다(US EPA, 2007). 특히, 배출량 자료는 과거 비달성 지역에서 현재 달성 지역으로 분류된 지자체의 유지보수 계획(Maintenance Plan) 마련 시에도 중요한 자료로 활용되며, 신규 또는 개정되는 대기환경기준에 따른 달성/비달성 지역 지정 시에도 이용된다(US EPA, 2017). 따라서, 배출량 자료는 미국 대기관리의 전체적인 관점에서 가장 중심이 되는 자료이다(US EPA, 2017). 실제로 이러한 배출량을 대기 관리를 위한 수치모사 및 다양한 분석에 활용해온 미국의 경우, 그림 1에 보이는 것처럼 배출량 목록 기반의 배출량 감축 계획 및 시행

노력은 대기질 개선에서 중요한 역할을 담당하였다.

국내의 경우에도 수도권 대기개선을 기본계획이나 대기환경규제지역에 대한 실천계획 수립 시 국립환경과학원 제공의 CAPSS(Clean Air Policy Support System) 배출량 목록을 이용하며, 시행계획이나 이행계획에 대한 평가에도 이를 근거로 한 삭감 배출량이 활용되는 등 대기질 관리에 있어 배출량 자료가 중요한 위치를 차지한다.

2017년 후반, 미 환경청과 권역대기관리 계획을 맡은 RPO(Regional Planning Organization) 및 각 주는 차기 대기질 개선계획 수립에 있어 중요한 배출량 산정 시 기존과는 다른 접근 방안에 합의하고 구체적인 실행방안을 모색하였다(McDill, 2017). 현재 미국에서 시도되고 있는 새로운 배출량 산정 방안은 다소 비효율적이었던 과거 접근법의 한계를 인지하고 문제점을 개선하고자 도출되었다. 본고에서는 이러한 미국의 배출량 산정을 최신 접근법과 그 배경을 소개하여 향후 한국의 대기질 관리를 위한 배출량 산정 및 개선 시 필요한 정보를 제공하고자 한다.

2. 본 론

2.1 미국의 대기 관리용 배출량 자료의 종류

일반적으로 배출량 목록에는 대기오염물질의 직접적인 1차 배출량 및 대기 중 2차 생성에 관여하는 전구물질의 배출량이 포함된다(Mobley *et al.*, 2005). 시간적으로는 대기환경 개선계획 수립 연도와 같이 주요 대기오염물질에 대한 연간 배출량을 담고 있으며, 공간적으로는 기초 지자체(예: County) 또는 대기질 모사 격자에 상응하는 해상도까지 지원하고 있다(US EPA, 2017).

미 환경청은 설립 초기였던 1960~1970년대부터 배출량 자료 확보에 노력을 기울였으며(Southerland, 2005), 더 체계적인 배출량 확보의 필요성이 대두됨에 따라 2002년 CERR(Consolidated Emission Reporting Rule)을 재정, 공표하였다(US EPA, 2002). 더 나아가 2008년에는 기존 CERR에 비해 보고 의무가 강화되고 통합된 절차의 AERR(Air Emission Reporting Rule)을 재정, 공표하였다(US EPA, 2008). CERR에서 대형 점오염원의 보고 기준이 실제 배출량에 대해 연간 100톤

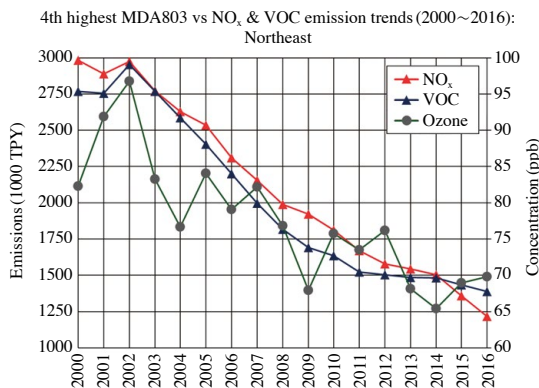


Fig. 1. Long-term trends of regionally averaged annual 4th maximum daily 8-hour ozone and regional totals of NO_x and VOC emissions in Northeastern US (ME, NH, VT, NY, MA, RI, PA, CT, NJ, DE, MD, and DC).

이었던 반면, AERR에서는 잠재적 배출량 혹은 배출허가권상 최대치(Potential to emit) 기준 100톤으로 실질적인 규제가 강화되었다. 2015년부터는 연방 정부차원의 대기관리 계획 및 지자체의 시행계획 수립을 지원하고자 AERR을 통해 지자체로부터 배출량뿐만 아니라 배출량 산정을 위한 입력 자료도 일부 수집하고 있다. 예를 들어, 이동오염원의 경우 배출량 산정 도구인 MOVES (MOTOR Vehicle Emission Simulator; <https://www.epa.gov/moves>)의 입력자료를 요청하며, 산불의 경우 SMARTFIRE (<https://www.airfire.org/smartfire/>) 등을 통해 연방정부에서 수집한 입력 자료를 주 정부에서 검토하도록 요청하고 있다. 물론 각 주에서 이동오염원 및 산불에 의한 배출량 자료를 직접 제출할 수도 있다.

미 환경청은 이렇게 수집된 자료들을 취합한 후 정도 관리를 수행하고, 국가 배출량 목록(National Emission Inventory)을 개발, 공표한다(US EPA, 2015a). 이때 각 지자체는 연방정부의 산정량 대신 자체 개발 자료를 국가 배출량 목록에 포함시키도록 요구할 수 있다. 한편 독성 배출량 목록의 제출은 법적으로 의무사항은 아니지만, 대부분의 주에서 미 환경청의 추산량을 검토한 후, 받아들이거나 자체 산정량을 제출하고 있다. 이러한 과정을 통해 개발된 국가 배출량 목록은 시행계획 및 미 환경청의 RIA(Regulatory Impact Analysis) 등 규제 관련 기술지원 작업에 필요한 기본 자료로 활용된다.

주의할 것은, 국가 배출량 목록 자체가 곧 법적인 구속력을 갖는 시행계획의 배출량 목록은 아니라는 점이다(Air Pollution Training Institute, 2004). 공청회 및 주의회의 승인을 거쳐야만 비로소 수치모사에 이용되는 시행계획 자료의 일부로 연방정부 차원의 구속력을 갖는(즉, “Federally Enforceable”) 배출량 목록으로 인정될 수 있다(US EPA, 2017). 예를 들어, 시행계획의 배출량 목록은 “Transportation Conformity” 등 행정적 실행의 일환으로 법적 구속력을 갖는 반면, 국가 배출량 목록은 참고자료로만 이용될 수 있다. 따라서 중요한 대기 정책용 수치모사 시에는 미국의 국가 배출량 목록을 그대로 이용하기 보다는 필요에 따라 각 주 및 지자체의 특성이 반영된 개정 배출량을 병행 활용한다. 또한, 미국의 국가 배출량 목록은 3년을 주기로 모든 배출영역에 대해 마련되는데, 시행계획의 수치모사

대상연도가 반드시 국가 배출량 목록의 작성연도와 동일해야 할 필요는 없다.

2.2 미국의 배출량 자료 개발 과정의 변화

초기에는 국가 배출량 목록의 도출을 위해 점오염원의 경우 앞 절에서 언급한 것처럼 각 지자체의 제출목록이 이용되었다. 면오염원 등 다른 오염원의 경우 미 환경청이 주도적으로 배출량 목록안을 구축하고, 각 지자체가 배출량을 검토한 후 최종안을 만드는 과정을 거쳤다(US EPA, 2015a). 그러나 배출량 목록 개발 초기 단계부터 지자체의 의견이 충분히 수렴되지 않고, 지자체와 합의되지 않은 방법론이 이용되거나, 연방정부의 배출량 산정 방법론이 각 지자체의 특성을 반영하지 못하여 개발된 배출량 목록이 실제 시행계획 수립 시 이용되지 못하는 문제가 발생하였다. 예를 들어 연방정부의 초기 배출량 산정목록을 이용할 경우, 미국 동남부 지역에서 화목 난로 등 주거용 화목 연료 연소(RWC; Residential Wood Combustion) 배출량이 고층 아파트나 빌딩, 다세대 가구가 밀집된 도심 내부에서 높게 산정되었다(Kim *et al.*, 2012). 이러한 문제점은 주 단위의 총 배출량을 인구분포를 기준으로 공간할당하였기 때문으로 밝혀졌으며, 미 동남부 주들은 자체적으로 해당 지역의 화목연료 사용 특성을 반영할 수 있는 배출량 산정 방법을 개발하였다(Kim *et al.*, 2012). 미 환경청은 이후 이러한 방법론을 일부 채택하고 전국적으로 확대 적용하였으며, 이는 지자체가 고안한 신규 방법론이 미 전역의 배출량 품질 향상에 기여한 선례가 되었다.

미국의 국가 배출량 산정에서 기존 방식의 또 다른 문제는 정도관리 및 지자체의 검토를 거친 공식적인 첫 번째 버전(즉, Version 1)으로부터 최종 버전의 국가 배출량 목록이 공표되기까지 3~5년의 시간적 격차가 발생한다는 점과 연방 정부차원의 배출량 산정 과정에 이를 실무적으로 집행해야 하는 각 주가 주요 의사 결정에 충분히 참여할 수 없다는 점이었다. 미국의 경우 국가 배출량 목록의 버전 관리에 있어 자료 취합 및 1차 정도관리하고, 지자체가 검토하기 이전 상태를 “Draft”로 명명하며, 검토 후 처음으로 완성된 자료를 “Final Version 1”으로 지정한다. 이후 활동도 자료 등이 개선되어 자료가 수정되는 경우 취합 및 검토 과정을 거쳐 “Version 2”, “Version 3”와 같이 지속적인 업데이트가

Table 1. NIF 3.0 point source "Site Record" table format details (US EPA, 2003).

NEI Input Format - Point Sources Version 3.0 Released April 2003, Revised Nov 2003 Record: Site				Mandatory/ Necessary		Data Element		Data Type		Length		Data Definitions		Use Convention Notes See User's Guide for more information		If Using MSAccess Table: tblPointSI	
Position	Begin	End	Criteria	Toxics												Field Name	Field Type
1	2	M	M		RECORD TYPE	CHARACTER	2	A code that identifies the type of Record.			SI	Code table - STATE_AND_COUNTY_FIPS_CODE. Also see notes for Tribal Code. If State and County FIPS code does not apply, enter value = 0000 (e.g., 5 zeroes).		strRecord Type	Text		
3	7	M	M		STATE AND COUNTY FIPS CODE	CHARACTER	5	The FIPS code for the state and county.						strStateCountyFIPs	Text		
8	22	M	M		STATE FACILITY IDENTIFIER	CHARACTER	15	Unique ID number used by a state/local/tribal agency to identify a facility.						strStateFacility Identifier	Text		
23	34				FACILITY REGISTRY IDENTIFIER	CHARACTER	12	The ID number assigned by the EPA Facility Registry System						strFacilityRegistry Identifier	Text		
35	36	M	M		FACILITY CATEGORY	CHARACTER	2	Indicates if HAP emitting facility is MAJOR or AREA.				Code table - FACILITY_CATEGORY		strFacilityCategory	Text		
37	42				ORIS FACILITY CODE	CHARACTER	6	Unique identifier for electric generating units.				DOE code for electric generating units.		strORISFacility Code	Text		
43	46	N	N		SIC PRIMARY	CHARACTER	4	Standard Industrial Classification code system.				Code table - SIC		strSICPrimary	Text		
47	52	M	M		NAICS PRIMARY	CHARACTER	6	North American Industry Classification code.				Code table - NAICS		strNAICSPrimary	Text		
53	132	M	M		FACILITY NAME	CHARACTER	80	The name of the facility.						strFacilityName	Text		

Table 1. Continued.

NEI Input Format - Point Sources Version 3.0 Released April 2003, Revised Nov 2003 Record: Site				Use Convention Notes See User's Guide for more information		If Using MSAccess	
Position	Mandatory/ Necessary	Data Element	Data Type	Length	Data Definitions	Table: tblPointSI	Field Type
Begin	End	Criteria	Toxics			Field Name	
133	172	SITE DESCRIPTION	CHARACTER	40	Comments/description for this facility.	strSiteDescription	Text
173	222	LOCATION ADDRESS	CHARACTER	50	Physical location of the front door/main entrance of the facility site.	strLocationAddress	Text
223	282	CITY	CHARACTER	60	The name of the city.	strCity	Text
283	284	STATE	CHARACTER	2	State abbreviation.	strState	Text
285	298	ZIPCODE	CHARACTER	14	The U.S. Postal Service zip code.	strZipCode	Text
299	338	COUNTRY	CHARACTER	40	The country name.	strCountry	Text
339	358	NTI SITE ID	CHARACTER	20	ID for the facility in the 1996 NTI.	strNTISiteID	Text
359	367	DUN & BRADSTREET NUMBER	CHARACTER	9	Dun & Bradstreet no. for the facility.	strDun&Bradstreet Number	Text
368	387	TRI ID	CHARACTER	20	Toxic Release Inventory (TRI) ID for facility.	strTRIID	Text
388	391	SUBMITTAL FLAG	CHARACTER	4	Submittal status of record when providing data corrections to NEI. Add; Delete; Revise/Del; Or: Revise/Add		Text
392	394	M	M	3	Codes that represent American Indian tribes and Alaskan Native entities.	strTribalCode	Text

See User's guide instruction. Enter applicable code - A; D; RD; or RA.

Key field and Code table implementation. Code table - TRIBAL_CODES. If Tribal Code does not apply, enter value = 000 (e.g., 3 zeroes).

Table 2. EIS facility “Staging Table” format. Shaded areas indicate new data elements compared with NIF v3.0 requirement for facility information (US EPA, 2015b). Grey lines indicate new elements that are not required in NIF v3.0.

Table/Data Element	NIF Corresponding Table/Field	Required for QA/Production	Date Type in EIS	Definition
Facility Site Identifier	SI State Facility Identifier	(Yes)	Character (20)	An Identifier by which the facility site is referred to by a system. Not required if reporting the EIS Facility Site
Facility Site Program System Code	New Data Element	(Yes)	Character (20)	Inter related information management system. Required if reporting Facility Site Identifier
State And County FIPS code	SI State and County FIPS	(Yes)	Character (5)	United States. Required if reporting agency is State.
Tribal Code	SI Tribal Code	(Yes)	Character (3)	The code that represents the American Indian Tribe or Alaskan Native entity. Required if reporting agency is
State And County FIPS code	New Data Element	(Yes)	Character (5)	Agency is Mexico or Canada.
EIS Facility Site Identifier	New Data Element	No	Character (20)	An identifier by which the facility is referred to by the EIS.
Effective Date	New Data Element	No	Date YYYY-MM-DD	The date on which the identifier became effective. Must be between 1900-01-01 and 2050-12-31.
End Date	New Data Element	No	Date YYYY-MM-DD	The date on which the identifier is no longer applicable. Must be between 1900-01-01 and 2050-12-31.
Organization Formal Name	New Data Element	No	Character (100)	Name of the organization.
Affiliation Type Code	New Data Element	No	Character (20)	Identifies the function that an organization or individual serves, or the relationship between an individual or
Facility Category Code	SI Facility Category	No	Character (20)	Code that identifies the Clean Air Act Stationary Source designation. Examples include major, minor, and synthetic
Facility Site Name	SI Facility Name	Yes	Character (80)	The name assigned to the facility site by the reporter.
Facility Site Description	SI Site Description	No	Character (100)	Supplemental text that describes the facility site.
Facility Site Status Code	New Data Element	Yes	Character (20)	Code that identifies the operating status of the facility site.
Facility Site Status Code Year	New Data Element	(Yes)	Integer (4)	The year in which the operating status became applicable. Required if facility site status is other than “OP”.

Table 2. Continued.

Table/Data Element	NIF Corresponding Table/Field	Required for QA/Production	Date Type in EIS	Definition
Facility Site Comment	New Data Element	No	Character (400)	Any comments regarding the facility site.
NAICS Code	SI NAICS Primary	Yes	Character (6)	The code that represents a subdivision of an industry that accommodates user needs in the United States.
Location Address Text	SI Location Address	Yes	Character (100)	The physical location of a facility site or organization.
Supplemental Location Text	New Data Element	No	Character (50)	The text that provides additional information about a place, including a building name with its secondary unit and
Locality Name	SI City	Yes	Character (60)	The name of the city, town, village, or other locality.
Location Address State Code	SI State	Yes	Character (5)	Canada, or Mexico.
Location Address Country Code	New Data Element	No	Character (20)	A code used to identify a primary geopolitical unit of the world. ONLY USED FOR CANADA AND MEXICO
Location Address Postal Code	SI Zip code	Yes	Character (10)	The code that represents a U.S. ZIP code or International postal code.
Address Comment	New Data Element	No	Character (400)	Any comments regarding the address information.
Latitude Measure	New Data Element	Yes	Decimal (8.5)	The measure of the angular distance on a meridian north or south of the equator.
Longitude Measure	New Data Element	Yes	Decimal (8.5)	The measure of the angular distance on a meridian east or west of the prime meridian.
Source Map Scale Number	New Data Element	No	Integer (6)	The number that represents the proportional distance on the ground for one unit of measure on the map or photo.
Horizontal Accuracy Measure	New Data Element	No	Integer (6)	—
Horizontal Accuracy Unit of Measure	New Data Element	(Yes)	Character (20)	The horizontal accuracy unit of measure. Required if reporting Horizontal Accuracy Measure
Horizontal Collection Method Code	New Data Element	No	Character (3)	The code that identifies the method used to determine the latitude and longitude coordinates for a point on the
Horizontal Reference Datum Code	New Data Element	No	Character (3)	The code that represents the reference datum used in determining latitude and longitude coordinates.

Table 2. Continued.

Table/Data Element	NIF Corresponding Table/Field	Required for QA/Production	Date Type in EIS	Definition
Geographic Reference Point Code	New Data Element	No	Character (3)	The code that represents the place for which geographic coordinates were established.
Data Collection Date	New Data Element	No	Date YYYY-MM-DD	The calendar date when data were collected.
Geographic Comment	New Data Element	No	Character (200)	The text that provides additional information about the geographic coordinates.
Vertical Measure	New Data Element	No	Integer (6)	The measure of elevation (i.e., the altitude), above or below a reference datum.
Vertical Unit of Measure Code	New Data Element	(Yes)	Character (20)	The vertical unit of measure. Required if reporting vertical measure
Vertical Collection Method Code	New Data Element	No	Character (3)	The code that identifies the method used to collect the vertical measure (i.e., the altitude) of a reference point.
Vertical Reference Datum Code	New Data Element	No	Character (3)	The code that represents the reference datum used to determine the vertical measure (i.e., the altitude).
Verification Method Code	New Data Element	No	Character (3)	The code that represents the process used to verify the latitude and longitude coordinates.
Coordinate Data Source Code	New Data Element	No	Character (3)	The code that represents the party responsible for providing the latitude and longitude coordinates.
Geometric Type Code	New Data Element	No	Character (3)	Points.

이루어진다. 과거에는 여러 번의 수정을 거쳐야 할만큼 초기 자료의 품질이 좋지 않았는데, 2005년 국가 배출량 목록 개발과정이 그 대표적인 예이다.

미 환경청은 2007년 부근까지 기존 국가 배출량 목록 자료 취합에 이용되던 NIF/NOF (NEI input format/NEI output format) 형식에서 벗어나, 지금과 같은 Extensible Markup Language 기반의 EIS (Emission Inventory System) 및 신규 자료 교환을 위한 CDX (Central Data Exchange) 시스템 변경 설계 및 구현을 진행해왔다. NIF/NOF는 배출량과 관련된 자료를 Relational Database에 필요한 테이블에 담은 형식으로, 배출원의 수가 증가함에 따라 시설 확인번호 등에 대한 연도별 일관성이 결여되는 등 중요 정보처리에 있어 문제가 제기되어왔다. 또한 연방 정부차원에서 시설 정보와 배출량 정보를 구분하는 관리를 요구하는 등 개편 필요성에 따라 2004년부터 객체지향형 자료 구조 기반의 신규 체계인 EIS 개발을 추진하였다. 표 1과 표 2는 각각 배출시설 정보와 관련하여 NIF v3.0과 EIS에서 필요로 하는 사항을 정리한 것이다. 표 2의 회색부분은 EIS에서 새롭게 추가된 사항으로, 보다 상세한 배출원 관련 정보를 얻을 수 있는 기틀을 마련했다고 할 수 있다.

이러한 개발 과정 중 신규 시스템 완성 이전에 국가 배출량 목록의 3년 주기가 도래하는 문제가 대두되었으며, 이를 해결하고자 연방환경청에서는 2005 NEI Version 1에 “Reduced Efforts” 접근법을 채택하였다 (Cui *et al.*, 2012; Dombrowski *et al.*, 2005). 기본적인 구상은 2005 NEI Version 1 구축 시, 확보 가능한 대형 점오염원 이외의 상당부분을 2002 NEI 최종 버전의 자료로 대체한다는 것이었다. 그러나 2005 NEI Version 1의 품질이 다른 연도 NEI에 비해 크게 떨어짐에도 불구하고, 출간된 국가 배출량 목록이라는 이유로 2005년도 국가 대기오염물질 독성 평가(National Air Toxic Assessment) 초기 연구 등에 사용된 경우가 발생하였다. 이외에도 시스템 변경에 따른 혼란이 발생하였는데, 이는 이와 같은 시스템 변화가 연방정부의 주도하에 진행됨에 따라 실제로 실행해야 하는 각 주가 세부적인 의사결정 과정에 충분히 참여할 수 없었기 때문으로 판단된다. 표 3은 2005년 국가 배출량 목록 개발과정의 시간 순서를 나열한 것으로, 2009년 말이 되어 서야 2005년 국가 배출량 목록의 최종본이 완성된 것

Table 3. Anticipated timeline for 2005 national emission inventory development (Oommen, 2009) (reformatted and revised for some wording).

Time	Task
Spring 2007	2005 NEI, Version 1 Prepared
Summer/Fall 2007	Data Gathering/QA
May 2008	2005 NEI, Version 2 Draft
Summer 2008	EPA Internal Review
October 2008	2005 NEI, Version 2 Final
Spring 2009	2005 NEI, Version 3 Draft
Summer/Fall 2009	2005 NEI, Version 3 Final

을 확인할 수 있다.

미국에서는 최근 몇 년간 이와 같은 접근법에 대한 한계를 극복하고자 새로운 연방 환경청-지자체 간의 협력 방법론을 진행 중에 있다. 본고에서는 이러한 협력 방법론 중 두 가지를 대표적인 성공 예시로 소개하고자 한다.

첫째는 미 동부의 지자체들을 중심으로 한 ERTAC (Eastern Regional Technical Advisory Committee)의 설립 및 운영이다 (Dorn *et al.*, 2010; ERTAC, 2008). 각 지자체의 기술직 공무원들 중 일부가 자발적으로 해당 기관의 허가를 받아 위원회에 참여하는 형식으로, 위원회의 운영은 RPO의 기술 담당자들이 주도해 왔다. 발전시설 (EGU; Electric Generating Unit), 철도 (Rail), 비점오염원 (Non-point) 등에 대한 위원회가 비교적 성공적으로 운영되고 있다 (McLeod *et al.*, 2015; Bergin *et al.*, 2009). 특히, 발전시설 분과의 경우 기존 미 환경청의 미래연도 발전시설 미래 배출량 산정 도구인 IPM (Integrated Planning Model)의 여러 문제점 (예: 가동 중단 예정이 없는 발전소의 해체 등)에 대한 구체적인 대안을 제시하였고 (ERTAC EGU Committee, 2015), 연방 정부 차원에서 수 년간 고수하던 독점적 IPM 결과 사용에 대한 정책 변화를 이끌어냈다 (US EPA, 2017). 두 번째는 현재 진행 중인 NEMO (Nonpoint Emission Methodology and Operator instructions)이다 (Mason *et al.*, 2017). ERTAC의 비점오염원 위원회의 경우, 기존 중앙정부의 주도적인 노력을 지자체만의 힘으로 단기간에 대체할 수 없음을 인지하여 위원회 구성 초기부터 미 환경청의 적극적인 참여를 유도하였다. 한편 미 환경청에서도 배출량 목록 개발의 효율성 및 개발된 배출목록의 효용성 제고에 대한 필요성이 제기되었다. 이를 위해 2016년 11월 연방 정부와 지자체 기술직 공

무원들이 미 환경청 본부에서 “Lean Event”를 개최하였다. 이 협력 모임에서는 기존 비점오염원 배출량 산정 과정의 문제점을 심도있게 파악하고 그에 따른 개선계획을 도출하였으며, 이에 대한 전국적인 워크숍의 및 의견 교환 등을 거쳐 NEMO가 태동하게 되었다. NEMO는 필요에 따라 간헐적으로 운영되던 ERTAC 비점오염원 위원회의 비상설 분과위원회를 상설로 전환하고, 미 환경청 직원이 회의록 작성 및 의견 조율과 같은 업무를 지속적으로 담당하도록 하여 2017년 국가 배출량 목록 개발과정에서 보다 많은 지자체들이 공감하는 국가 배출량 목록을 산정하였으며 그 과정에 대한 구체적인 문서화 작업을 진행하였다. NEMO의 목표달성을 위해 미 환경청은 최소 2~3주에 한 번씩 진행상황 보고 및 의견 수렴을 위한 전화 음성회의 및 소식지를 제공하고 있다.

2.3 미국의 대규모 수치모사를 위한 차기 배출량 자료 개발 접근법

미국의 전국규모 혹은 지역규모의 차기 대기관리 지원용 수치모사를 위한 대상연도는 기존 국가 배출량 목록의 작성연도인 2014년이나 2017년이 아닌 2016년이다. 미국의 각 주는 2015년에 갱신된 오존 대기환경 기준에 대한 달성 목표연도인 2023년에 대한 배출량과 시정장애(RH; Regional Haze) 관리 시행계획에 따른 중간 검토를 위해 2028년 미래연도 배출량을 우선적으로 개발해야 하는 상황에 놓여있다. 통상 대기관리를 위한 수치모사는 국가 배출량 목록 작성연도를 기준연도로 설정하나, 차기 오존 및 시정장애 모사의 경우 기상 특성상 미국의 국가 배출량 목록의 작성연도인 2014년 및 2017년이 선정되는 것에 대한 우려가 표명되었다. 만약 2014년이나 2017년에 전국적인 대기 오염 현황이 전형적이었던 이 두 해 중 한 해가 모사연도로 선택되어야 하나, 전국적으로 대기 오염 생성 조건이 둔화되는 경향을 보였다. 이에 미 환경청은 과거와 달리 미국 전역의 지자체를 대표하는 RPO들의 의견을 적극 수렴하여 2016년을 기준연도로 선정하였으며, 연방 정부로부터 지자체에 이르는 모든 참여기관의 합의를 도출할 수 있었다. 또한, 2000년대 초반에 도입된 배출량 목록을 포함하여 시공간적으로 분배된 수치모사를 위한 배출량 자료의 모음을 일컫는 배출량 플랫폼(EMP; Emission Modeling Platform)이라는 개념

을 바탕으로, 2016년 배출량 플랫폼 개발 시에는 초기 단계부터 지자체의 의견을 고려하여 배출목록을 개발하기로 동의하였다. 이와 같이, 미국의 경우 연방 정부-지방 정부간의 표면적 협력관계에 대한 문제점을 인식하고, 미 환경청과 RPO 및 지자체간 보다 적극적인 의견 수렴을 반영하는 배출목록 개발 접근법에 합의하였다.

새로운 배출 목록의 개발을 위해 우선 미 환경청, RPO, 지자체의 기술직 공무원들로 이루어진 협의체를 구성하고, 산하에 조정 위원회(Coordination Committee)를 중심으로 자연배출량(Biogenics), 발전시설, 자연적/인위적 산불(Fires), 선박(Marine), 비발전 대형시설(Non-EGU), 비점오염원, 비도로 이동오염원(Non-road), 석유-가스(Oil & Gas), 도로 이동오염원(Onroad), 철도, 캐나다/멕시코(Canada/Mexico) 등 주요 배출원군에 대한 전담조직을 배치하였다. 각 전담조직은 미 환경청의 대표 1명과 RPO/지자체 대표 1명씩을 두어, 미 환경청 및 지자체가 더욱 지속적이고 체계적인 의사소통을 할 수 있도록 장려하고 있다.

새로운 방법론의 실제적인 실천 예시로 자연 배출량 분과의 내용을 살펴보면 다음과 같다. 자연 배출량 분과의 책임은 BEIS3 (Biogenic Emissions Inventory System version 3; Bash *et al.*, 2016)와 MEGAN v3 (a Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature version 3; Guenther, 2006)을 바탕으로 작성된 2016년 자연 배출량 목록자료와 이들 자료의 생성에 이용된 각종 입력자료를 비교 검토하는 것으로, 자연 배출목록 작성에 적용된 방법론을 문서화하고 정도관리를 수행하는 것이 핵심 임무이다. 개선방안의 도출은 추가 업무이며, 가능한 선에서 측정치와 배출량과의 비교도 수행할 예정이다. 이를 위해 연방 환경청 및 RPO, 지자체는 현재 가용한 2016년도 자연배출량 산정 결과를 취합하여 위원회 구성원들에게 공개하였다. 구성원들 중 각 지자체에서 참여하는 위원들은 소속된 지자체 및 지역의 특성을 감안한 자연배출량 목록 검토 작업을 수행하여 그 결과를 위원회에 보고하도록 하고 있다. 향후 수행할 검토 작업을 위해 표 4의 2008년도 미서부 지역의 자연배출량 개선 과제(Sakulyanontvitaya *et al.*, 2012)와 같은 기존 작업들을 최대한 활용할 계획이다.

2016년도 배출량 산정에 적용되는 이 새로운 방법

Table 4. Comparison of GloBEIS3.5 with MEGAN2.04, MEGAN 2.1, and BEIS 3.14 (Sakulyanontvittaya et al., 2012).

Category	MEGAN2.04	MEGAN2.10	BEIS3.14	GloBEIS3.5	GloBEIS vs BEIS	GloBEIS vs MEGAN2.10	
Emission factors	Isoprene EF (mg/m ² /h)	oaks = 24	oaks = 24	oaks = 17.5	oaks = 17.5	↓↓↓	=
	Monoterpene EF (mg/m ² /h)	pine = 1.45	pine = 1.45	pine = 2.1	pine = 2.1	↑↑	↑↑↑
	Sesquiterpene EF (mg/m ² /h)	pine = 0.2	pine = 0.2	pine = 0.08	pine = 0.2	↑↑↑	=
	OVOC EF (mg/m ² /h)	oak = 2	oak = 2	oak = 2.4	oak = 0.55	↓↓↓	↓↓↓
Foliage distributions	Peak LAI	satellite data	satellite data	constant	both options	↓	≈
	LAI variations	satellite data	satellite data	based on temperature	both options	↓	≈
Solar radiation	Solar constant (W/m ²)	1367	1367	1320/1300	1367	↑	≈
	Visible fraction	F (diffuse Frac)	F (transmission)	F (diffuse Frac)	46% of total solar	↑	≈
	Diffuse fraction	F (transmission)	different for PPFd	F (P, zenith angle, Q)	F (transmission)	↓	↓↓
	μmol photons per Joule	4.55	diffuse = 4.3, direct = 4.6	4.6	4.55	≈	↑
	Sun vs shade leaves	40% sun	xx% sun	37% sun	40% sun	↑	≈
	Canopy PPFd	5 levels; xx% transmitted	5 levels; xx% transmitted	1 level; 1xx% transmitted	5 levels; xx% transmitted	↓	≈
	Isoprene/MBO light response	α, C _L = f(past light)	α, C _L = f(past light)	α = 0.00185, C _L = 1.42	α, C _L = f(LAI depth)	↑↑	↓
	MT/SQT response to light	5 to 80% light dependent	parameters vary	none	none	=	↑
	CH ₃ OH response to light	80% light dependent	parameters vary	responds to light	100% light dependent	↓	↓
	OVOC response to light	5 to 80% light dependent	parameters vary	none	100% light dependent	↓	↓
Temperature	Canopy leaf temperature	energy balance	energy balance	equal to air temperature	equal to air temperature	↑	=
	Isoprene response to T	E _{opt} , T _{opt} = f(past T)	E _{opt} , T _{opt} = f(past T)	E _{opt} = 1.9, T _{opt} = 312.5	E _{opt} , T _{opt} = f(past T)	↑↑↑	↑↑
	MT response to T	β = 0.09 or 0.12	β = 0.1	β = 0.09	β = 0.09	=	↓
	SQT response to T	β = 0.12 or 0.17	β = 0.17	β = 0.17	β = 0.17	=	↓
	OVOC response to T	β = 0.08 to 0.13	β = 0.08 to 0.13	β = 0.09	β ≈ 0.12	↑	≈
Other activity factors	Leaf age	Guenther et al., 2006	Guenther et al., 2006	none	Guenther et al., 1999	↓	≈
	Drought	= f(soil moisture)	= f(soil moisture)	none	= f(drought index)	↓	≈
	CO ₂	none	= f(ambient CO ₂)	none	none	≈	≈

Comparisons are for late summer, midday conditions in Western U.S.; = indicates there is no difference; ≈ indicates GloBEIS is within 3%; ↑(↓) GloBEIS is 3 to 7% higher (lower); ↑↑(↓↓) GloBEIS is 8 to 15% higher (lower); ↑↑↑(↓↓↓) GloBEIS is > 15% higher (lower); XX represents varying amount which is dependent on internal calculations.

론은 크게 보면 기존 ERTAC 및 NEMO 접근법의 장점을 수용한 것으로, 배출량 산정에 직접 관여하는 집단들의 동의를 조기에 끌어내고 배출량 산정 과정을 투명하게 공개하여 향후 배출량 개정 시 소모적인 논쟁은 최소화하는 한편, 최종 배출량 목록을 보다 신속하게 확보하는 데 궁극적인 목적이 있다.

3. 결론 및 제언

배출량 목록은 대기질 연구 및 관리에 있어 불확도가 높은 자료 중 하나임에도(Digar *et al.*, 2011; Southerland, 2005; Fine *et al.*, 2003), “기술적인” 것일 뿐, 학문적인 영역으로는 인정받지 못했다(Southerland, 2005). 최근에 들어서야 배출량 산정이 지역 규모부터 전 지구적 규모인 대기화학 연구에 있어 매우 중요한 6가지 미래 중점 연구 분야의 하나로 인식되며(National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2016), “과학”의 일부분으로 인정받는 추세이다.

배출량 자료는 대형 점오염원을 제외하면 직접 측정이 매우 어려우며, 면오염원과 같이 배출계수와 활동도처럼 높은 불확도를 내재한 산정 방법이 적용되는 배출원들도 상당 부분 존재한다. 특히 오존과 같은 2차 오염물질은 그림 1에서 보인 것처럼 배출량 감소에 따른 농도 감소 추세가 점차 둔화될 것으로 예상됨에 따라, 배출량 저감 노력이 더욱 강화되어야 할 것으로 판단된다. 이에 배출원에 대한 구체적인 분류와 정확도 확보가 더 중요해지므로, 지역 특성을 잘 파악할 수 있는 지자체의 역할 증대는 의심의 여지가 없다.

배출량 목록 작성 및 정도 관리에서 어려운 점은 산정된 배출량을 검증하는 데 있다. 하지만 ‘과학 이론은 반증(Falsification)이 가능할 때 의미가 있다’는 칼 포퍼(Popper, 2005)의 주장에 귀를 기울이며, 그렇기 때문에 그 반증의 과정이 투명해야 한다는 점을 주목할 필요가 있다. 앞서 소개한 미국의 2016년도 배출량 준비 과정은 과거 실무의 어려움을 통해 얻은 교훈을 바탕으로 투명성 확보에 상당한 노력이 요구된 작업이었다고 할 수 있다.

한국은 향후 정부 그리고 지자체 차원의 대기질 현황 분석 및 개선대책 마련을 위해 정확한 배출량 자료의 이용이 중요하게 될 것이다. 대기오염에 대한 지자

체별 책임소재에 대한 갈등을 방지하고 지역적 특성을 제대로 반영하기 위해서는 배출량 산정 단계에서부터 지자체의 참여가 필요하다. 또한, 대부분의 대기오염 관리에서 사업장 부문에 대한 규제를 배제할 수 없다. 규제에 앞서 합리적 수준의 배출 관리를 위해서는 배출량 목록 산정 과정을 투명하게 하고, 가능한 범위에서 협의체를 구성하는 등 사업체의 적극적인 참여를 유도할 필요가 있다. 미세먼지 문제 해결을 위해서는 교통, 난방 등 민간부문에서의 배출량 저감도 절실하며, 효과적인 대기질 개선대책 마련을 위한 기초자료로써 배출량 목록이 차지하는 위상이 제고되어야 할 것으로 판단된다. 마지막으로, 미국의 2016년도 자연배출량 위원회의 예시에서 볼 수 있듯이, 중앙 정부 관련 인력뿐 아니라 지역적 배출특성 및 정도 관리를 수행할 수 있는 지자체별 기술 인력 양성 또한 필요하다.

References

Air Pollution Training Institute (2004) Preparation of Fine Particulate Emission Inventories. Research Triangle Park, NC, http://www.4cleanair.org/APTI/419B_Combined.pdf (accessed on Mar. 15, 2018).

Bash, J.O., Baker, K.R., Beaver, M.R. (2016) Evaluation of improved land use and canopy representation in BEIS v3.61 with biogenic VOC measurements in California, Geoscientific Model Development 9, 2191-2207, <https://doi.org/10.5194/gmd-9-2191-2016>

Bergin, M., Harrell, M., McDill, J., Janssen, M., Driver, L., Fronczak, R., Nath, R., Seep, D. (2009) ERTAC Rail: A Collaborative Effort in Building a Railroad-Related Emissions Inventory Between Eastern States Air Protection Agencies and Participation with the Railroad Industry, 2012 International Emission Inventory Conference, Tampa, FL, August 13-16, 2012.

Cohan, D.S., Napelenok, S.L. (2011) Air Quality Response Modeling for Decision Support, Atmosphere 2, 407-425, <https://doi.org/10.3390/atmos2030407>

Cui, J., Lapan, H., Moschini, G. (2012) Are exporters more environmentally friendly than non-exporters? Theory and evidence. Economics Working Papers (2002-2016), https://lib.dr.iastate.edu/econ_las_working_papers/77/ (accessed on Mar. 15, 2018).

Dombrowski, S., Solomon, D., Carrier, R. (2005) Cleaner

- Data for a Better National Emission Inventory, 14th Annual International Emissions Inventory Conference, Las Vegas, NV, April 11-14, 2005.
- Dorn, J.G., Divita, Jr., F., Huntley, R., Janssen, M. (2010) Implementing a Collaborative Process to Improve the Consistency, Transparency, and Accessibility of the Nonpoint Source Emission Estimates in the 2008 National Emissions Inventory, 19th Annual International Emission Inventory Conference, San Antonio, TX, September 27-30, 2010.
- Eastern Regional Technical Advisory Committee (ERTAC) (2008) Eastern Regional Technical Advisory Committee, <http://www.ertac.us/> (accessed on Dec. 26, 2017).
- Eastern Regional Technical Advisory Committee (ERTAC) Electricity Generating Unit (EGU) Committee (ERTAC EGU Committee) (2015) Eastern Regional Technical Advisory Committee (ERTAC) Electricity Generating Unit (EGU) Emission Projection Tool (2015 EIC), <https://www.epa.gov/air-emissions-inventories/eastern-regional-technical-advisory-committee-ertac-electricity-generating> (accessed on Dec. 30, 2017).
- Fine, J., Vuilleumier, L., Reynolds, S., Roth, P., Brown, N. (2003) Evaluating uncertainties in regional photochemical air quality modeling, *Annual Review of Environment and Resources*, 28, 59-106.
- Guenther, C.C. (2006) Estimates of global terrestrial isoprene emissions using MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature), *Atmospheric Chemistry and Physics* 6.
- Henneman, L.R.F., Liu, C., Mulholland, J.A., Russell, A.G. (2017) Evaluating the effectiveness of air quality regulations: A review of accountability studies and frameworks, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 67, 144-172. <https://doi.org/10.1080/10962247.2016.1242518>
- Kim, B.U., Anderson, T., Van Bruggen, J., Bollman, A. (2012) Improvement of Residential Wood Combustion Emissions in the Southeastern U.S., 2012 International Emission Inventory Conference, Tampa, FL, August 13-16, 2012.
- Kuklinska, K., Wolska, L., Namiesnik, J. (2015) Air quality policy in the U.S. and the EU - a review, *Atmospheric Pollution Research*, 6, 129-137. <https://doi.org/10.5094/APR.2015.015>
- Mason, R., Dombrowski, S., Snyder, J., Ryan, R., Miller, J., Bollman, A., Wilbanks, C., Kim, B.U. (2017) New Approach for Building the 2017 Nonpoint NEI, 2017 International Emission Inventory conference, Baltimore, MD, August 14-18, 2017.
- McDill, J. (2017) 2016 Emissions Modeling Platform Development Plan V1.0., http://vibe.cira.colostate.edu/ogec/docs/meetings/2017-11-09/2016%20Emissions%20Modeling%20Platform%20Development%20Plan_V1.0.pdf (accessed on Mar. 15, 2018).
- McLeod, D., Lin, J.S., McDill, J., Janssen, M., Jakuta, J., Kim, B.U. (2015) ERTAC EGU Tool: Origin and Uses, 2015 International Emission Inventory Conference, San Diego, California, April 13-16, 2015.
- Mobley, J.D., Deslauriers, M., Rojas-Brachos, L. (2005) Improving emission inventories for effective air-quality management across North America-A NARSTO assessment, <https://www3.epa.gov/ttnchie1/conference/ei14/plenary/narsto.pdf> (accessed on Mar. 15, 2018).
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (2016) *The Future of Atmospheric Chemistry Research: Remembering Yesterday, Understanding Today, Anticipating Tomorrow*, The National Academies Press, Washington, DC, <http://dels.nas.edu/Report/Future-Atmospheric-Chemistry-Research/23573> (accessed on Mar. 15, 2018).
- National Research Council (2004) *Air Quality Management in the United States*. National Academies Press, <https://www.nap.edu/catalog/10728/air-quality-management-in-the-united-states> (accessed on Mar. 15, 2018).
- Oommen, R. (2009) Preparation of the 2005 National Emissions Inventory, 14th Annual International Emissions Inventory Conference, Las Vegas, Nevada, April 11-14, 2005.
- Popper, K. (2005) *The Logic of Scientific Discovery*, Routledge, UK.
- Sakulyanontvittaya, T., Yarwood, G., Guenther, A., Superior, C.O. (2012) Improved Biogenic Emission Inventories across the West: Final Report, https://www.wra.pair2.org/pdf/WGA_BiogEmisInv_FinalReport_March20_2012.pdf (accessed on Mar. 15, 2018).
- Southerland, J.H. (2005) An Abridged History of Emission Inventory and Emission Factor Activities, 14th Annual International Emissions Inventory Conference, Las Vegas, Nevada, April 11-14, 2005.
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2002) Consolidated Emissions Reporting, <https://www3.epa.gov/airtoxics/cerr/cerrpg.html> (accessed on Mar. 15, 2018).
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2003) NEI

- Input Format (NIF) Version 3.0 User's Guide Instructions and Conventions of Use.
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2007) 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 on Mar. 15, 2018).
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2008) Air Emissions Reporting Requirements, <https://www.epa.gov/air-emissions-inventories/air-emissions-reporting-requirements-aerr> (accessed on Mar. 15, 2018).
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2015a) National Emissions Inventory (NEI), <https://www.epa.gov/air-emissions-inventories/national-emissions-inventory-nei> (accessed on Mar. 15, 2018).
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2015b) Facility Staging Requirement, https://www.epa.gov/sites/production/files/2017-09/facility_staging_requirements06192015_0.xlsx (accessed on Mar. 15, 2018).
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2017) Air Emissions Inventory Guidance for Implementation of Ozone and Particulate Matter NAAQS and Regional Haze Regulations, Research Triangle Park, NC, <https://www.epa.gov/air-emissions-inventories/air-emissions-inventory-guidance-implementation-ozone-and-particulate> (accessed on Mar. 15, 2018).
- U.S. Environmental Protection Agency Region 4 (US EPA Region 4) (2008) Planning for Clean Air, An Introduction to the "SIP Process", <https://www3.epa.gov/region4/air/sips/Writers%20Workshop/SIP%20101%2008-21-08.pdf> (accessed on Mar. 15, 2018).