아시아 지역 대기오염 배출량 데이터의 활용성 비교 분석

나유정¹ · 김주원² · 임은하³ · 이강산⁴ · 최돈곤⁵ · 최진무⁶

¹경희대학교 지리학과 석사과정 · ²기상청 수치모델개발과 주무관 · ³기상청 수치모델개발과 연구관 ·

⁴경희대학교 지리학과 학부과정 · ⁵경희대학교 지리학과 석사과정 · ⁶경희대학교 지리학과 부교수

(2013년 5월 1일 접수, 2013년 5월 27일 수정, 2013년 6월 3일 게재 확정)

Comparison of Air Pollution Emission Data for Asia

Yu-gyung Na¹ · Juwon Kim² · Eunha Lim³ · Kang San Lee⁴ · Don Gon Choi⁵ · Jinmu Choi⁶

¹Master Program, Department of Geography, Kyung Hee University

²Assistant director-grade 7, Department of Numerical Model Development, Korea Meteorological Administration

³Senior Researcher, Department of Numerical Model Development, Korea Meteorological Administration

⁴Undergraduate Program, Department of Geography, Kyung Hee University

⁵Master Program, Department of Geography, Kyung Hee University

⁶Associate Professor, Department of Geography, Kyung Hee University

(Received 1 May 2013, Revised 27 May 2013, Accepted 3 June 2013)

Abstract : This study tried to show the usability of Asian air pollution emission data in order to improve a visibility modeling for the operation of numerical weather prediction models. For this purpose, the three most popular Asian air pollution emission data (TRACE-P, INTEX-B, REAS) were compared with domestic air pollution emission data by root mean square error. In this study, root mean square errors of air pollution materials including SO_x, NO_x, and VOC in Asia air pollution emission data were analyzed for 2001 and 2006. In the results, INTEX-B would be useful when the measurement data is required, while REAS would be acceptable if multi-year data were required and estimation data were allowed. Air pollutant diffusion model with Asian air pollution data can be used to estimate hourly air pollution concentration data by altitude, which would improve the accuracy of numerical weather prediction models.

Key Words : Numerical Weather Prediction Model, Visibility Modeling, Air Pollution Emission Data, TRACE-P, INTEX-B, REAS

1. 서론

대기오염물질은 자연적으로 발생하거나 연료의 연소 등 인위적으로 생성되어 배출된다. 대기오염물질의 장거리 이동에 대한 관심이 증가하면

서(신혜정 외, 2002) 대기오염물질의 특성(정성운 외, 2006; 정종현 외, 2003)과 대기오염물질의 공간 분포(김동영, 2010; 한진석 외, 2006; 신혜정 외, 2002) 등 대기오염물질의 확산에 대한 연구가 이루어지고 있다. 이러한 연구가 진행됨에 따라

대기오염 배출량 데이터를 취득하고 가공하는 방법을 고찰해야 할 필요성이 제기되었다.

기존의 문헌에서 대기오염 배출량 데이터 구축 방법은 주로 연구지역에서 직접 시료를 채취하여 분석하거나, 배출계수를 활용하여 특정 배출원 또는 특정 지역의 배출량을 산정했다. 각 연구에 대해 간단히 정리하면 다음과 같다. 황용우 외(2000)는 도로건설 사업에 대하여 사업 시행 시 발생하는 CO₂ 배출량을 분석하기 위해 화석연료 사용 시 배출되는 CO₂의 배출량을 산정하였다. 사용하는 장비에 따라 상이하게 나타나는 CO₂의 배출량과 에너지 소비량을 일반화하기 위해 IPCC에서 제시하는 각 에너지원별 탄소배출계수와 대한건설진흥회의 표준데이터(대한건설진흥회, 1998)를 사용하였다. 안재호·안상진(2010)은 상향식 평가기법으로 산업 부문 온실가스 배출량을 산정하였다. 오염물질 배출원을 보다 정확하게 파악하기 위하여 연구지역인 시화반월산업단지 내 중소기업을 분류하고 대상 업체를 선정하여 설문조사 및 현장방문을 통해 데이터를 취득하였다. 이재용 외(2010)는 지리속성정보 및 시설별 이산화탄소 배출량 산출 데이터 등을 이용하여 신속·정확하게 대상지역의 배출량을 도출하고자 하였다. 통계연보와 에너지 경제연구원의 시설별 이산화탄소 배출량 산출 데이터, 1:5,000 수치지도를 사용하고 통계분석을 통해 배출량을 도출하였다. 신혜정 외(2002)는 제주 고산의 대기질 특성을 분석하기 위해 시료를 채취하였는데, 분석기기를 이용하여 1분마다 대기질 특성을 실시간으로 측정하여 분석하였다.

하지만 배출원별 배출량 산정방법은 광범위한 지역의 오염물질 배출원을 정확하게 파악하기 어렵고, 각기 다른 배출환경을 일반화하여 배출량을 도출하므로 오차가 존재한다는 단점이 있다. 또한 실측을 통한 데이터 취득은 장기적인 관점에

서 대기오염물질의 추이를 살펴보거나 시공간적 분포를 살펴보기 위한 연구 시 데이터 취득에 한계가 존재한다. 특히 해외 넓은 지역의 대기질 분포를 분석하여야 할 경우, 실측에 의한 데이터의 확보는 현실적이지 않다. 이러한 단점을 보완하는 방안으로 아시아 지역의 경우 대기오염 배출량 추정 데이터를 활용할 수 있다.

아시아 지역의 대기오염 배출량을 측정하거나 추정한 대표적인 데이터로는 NASA의 Transport and Chemical Evolution over the Pacific(이하 TRACE-P)와 Intercontinental Chemical Transport Experiment Phase B(이하 INTEX-B), 일본의 Regional Emission inventory in ASia(이하 REAS)가 있다. Jacob *et al.*(2003)은 TRACE-P의 항공관측을 통한 데이터를 검증하기 위해 위성장비를 통해 오염을 측정하여 TRACE-P의 배출량과 비교하였으며 TRACE-P의 데이터가 중국의 시골 지역에서는 과대 추정되는 경향이 있었으나 대체로 아시아 배출량 데이터와 일치하며 정량화하는 능력이 뛰어나다는 결과를 도출하였다. Zhang *et al.*(2012)는 중국을 대상으로 INTEX-B의 데이터를 중국 에어로졸 원격 감지 네트워크(CARS-NET, China Aerosol Remote Sensing NETwork)의 관측 데이터와 비교하여 검증한 결과 INTEX-B의 데이터와 관측데이터, 중국 대부분 지역의 MODIS 데이터가 일치하였으며 유의한 상관관계를 갖는다고 분석하였다. REAS는 NASA의 두 연구와 달리 1995년과 2000년의 관측 데이터를 바탕으로 일관된 방법론을 채택하여 2020년까지의 연간 대기오염물질 배출량 데이터를 추정하였다. Ohara *et al.*(2007)은 아시아 지역 연간 배출량 데이터를 최초로 구축한 것에 의의가 있으며 미래 연간 배출량은 중국 배출 시나리오에 영향을 받을 수 있음을 밝혔다.

대기오염 배출량 데이터는 국지기상 수치예보

모델을 이용하여 한반도와 주변의 시정을 예측하는 기초 데이터를 생산·활용하는 데 사용된다. 따라서 본 연구에서는 국내 대기오염 배출량 산정 데이터를 바탕으로 아시아 지역에 대한 3가지 대기오염 배출량 데이터(TRACE-P, INTEX-B, REAS)의 활용 가능성을 비교·분석하였다. 비교·분석은 데이터의 제약으로 인해 2001년과 2006년의 배출량을 기준으로 진행하였다.

2. 대기오염 배출량 데이터 구축

국내 지역 대기오염 배출량 데이터는 국립환경과학원에서 산정한 대기오염 배출량 데이터와 해외에서 아시아지역을 대상으로 항공관측 및 모델링을 통하여 구축한 데이터로 구분할 수 있다. 항공관측 및 모델링을 활용하여 아시아지역의 배출량을 산정한 프로젝트로는 NASA의 TRACE-P, INTEX-B, 일본의 REAS 등이 있다. TRACE-P는 2001년 배출량 데이터를 구축하였고 INTEX-B의 배출량 데이터는 2006년을 기준으로 작성되었다. REAS는 1995년과 2000년의 배출량을 기준으로 1998년부터 2010년의 배출량을 산출하였으며, 본 연구에서는 국내 배출량 데이터와 비교하기 위해 2001년부터 2009년의 데이터를 사용하였다. 우선 각 데이터에 포함된 배출물질과 데이터 구조는 다음과 같다.

1) 아시아 대기오염 배출량 데이터

(1) 국내 배출량 데이터

국내 배출량 데이터는 광역자치단체(시·도별), 기초자치단체(시·군·구별), 읍·면·동, 1km 격자의 네 가지 공간해상도로 구분된다(국립환경과학원, 2010). 상위 공간해상도에서 산정된 배출량을 배분하여 하위 공간해상도의 배출량 데

이터를 제공한다. 이 중 2001년부터 2009년까지의 1km 격자별 연간 배출량 데이터를 사용하였다. 하나의 파일은 조사년도, 시군구코드, 격자의 TM좌표, 고도, 배출원 분류코드, 연료코드, 배출물질별 연간 배출량을 포함한다. 배출물질은 CO, NO_x, SO_x, NH₃, TPS, PM₁₀, VOC의 7가지 물질이며, 각 물질의 연간배출량 단위는 'kg/year'이다.

국내 배출량 데이터는 TM Korea 좌표체계를 따른다. 국내 배출량 데이터를 해외 데이터와 비교하여야 하므로 TM 좌표체계를 경위도 좌표체계로 변환하여 사용하였다. 국내 배출량 데이터는 테이블 형식의 서식텍스트 파일로 제공되는데, 경위도좌표를 가진 데이터로 변환하여 데이터의 형식을 동일하게 맞추는 과정을 거쳤다.

(2) TRACE-P

2000년 NASA에서 대류권 화학 성분을 연구·분석하기 위해 NASA 항공기 P-3B와 DC-8을 사용하여 대기 중 화학 성분을 관측하는 프로젝트를 수행하여 TRACE-P 데이터를 구축하였다(Jacob *et al.*, 2003). 관측은 중국, 일본, 한국을 포함하는 위도 N50°~S10°, 경도 E60°~E150° 지역을 대상으로 2001년 3월과 4월에 진행되었다. 공간 해상도는 1°×1°이며, 배출량은 인위적 배출원만을 대상으로 다섯 가지 부문(industry, domestic, transport, power generation, biomass burning)으로 나누어 산정하였다.

TRACE-P 데이터의 배출목록은 총 9가지 물질(SO₂, NO_x, CO, NH₃, CO₂, CH₄, BC, OC, NMVOC)이다. 국내 배출량 데이터와 비교하면, CO, NO_x, NH₃의 세 가지 물질에 대한 배출량 데이터를 공통으로 제공하며, SO₂와 NMVOC는 국내 배출량 데이터에서 동일 계열인 SO_x 및 VOC와 비교할 수 있다. 각 화학종의 배출량은

표 1. 2001년 아시아 대기오염 배출량을 측정한 TRACE-P 데이터 구조

(단위: ton/year)

경도	위도	SO ₂	NO _x	CO	NH ₃	NMVOC
120.5	53.5	22.1	10.08	89.67	53.86	9.647
121.5	53.5	57.83	34.81	536.4	69.64	48.72
122.5	53.5	62.61	202	3348	162.7	362.7
...	...	...	...	...	...	...

아시아 전 지역을 포함하는 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 격자 배출량 데이터와 지역 배출량 데이터로 나누어 제공한다.

본 연구에서는 University of Iowa에서 보정하여 제공하는 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ (약 $110\text{km} \times 110\text{km}$) 격자 배출량 데이터를 사용하였다.¹⁾ 대기오염 배출량 데이터는 격자의 경위도좌표와 격자 내 배출물질의 연간 배출량(ton_species/yr/grid)을 포함한다. 이를 바탕으로 경위도 지점별 국내 배출량 데이터와 비교할 수 있는 TRACE-P 데이터의 5가지 배출물질(SO₂, NO_x, CO, NH₃, NMVOC)의 연간 배출량 데이터를 취합하여 표 1과 같이 구축하였다.

(3) INTEX-B

INTEX-B는 2006년 NASA에서 국제적인 대기의 에어로졸 광학두께(Aerosol Optical Depth)를 측정하기 위해 항공기 DC-8을 이용해 3월 1일부터 5월 15일까지 10주 동안 관측한 데이터이다(Zhang *et al.*, 2012). INTEX-B는 2006년을 기준 연도로 총 8가지 물질(SO₂, NO_x, CO, NMVOC, OC, BC, PM₁₀, PM₂₅)의 아시아지역 배출량을 제

공한다. 국내 배출량 데이터와는 CO, NO_x, PM₁₀의 3가지 배출물질에 대한 배출량 데이터를 공통으로 제공하며, SO₂와 NMVOC는 국내 배출량 데이터에서 동일 계열인 SO_x 및 VOC와 비교할 수 있다.²⁾

공간 해상도는 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ (약 $55\text{km} \times 55\text{km}$)로 TRACE-P($1^{\circ} \times 1^{\circ}$)와 비교하였을 때 공간해상도가 우수하다. 배출량은 인위적 배출원만을 대상으로 네 가지 부문(power, industry, residential, transportation)으로 나누어 산정하였다. 국내 대기오염 배출량 데이터가 점·면 오염원에 의한 배출량만을 고려하기 때문에 비교분석을 위하여 선 오염원인 교통(transportation) 부문 배출량을 제외하였다. 따라서 전력(power), 산업(industry), 주거(residential) 부문의 배출 총량을 기준으로 데이터를 재구축하였다. 데이터의 형태는 표 2와 같다. 표 2는 2006년 아시아 지역 산업부문 배출량을 예시로 제시한 것이며, 최종적인 데이터 구축 시에는 국내 대기오염 배출량 데이터와 비교하여야 하므로 부문별 배출량을 사용하지 않고 총량으로 재

표 2. 2006년 아시아의 산업부문 대기오염 배출량에 대한 INTEX-B 데이터 구조

(단위: ton/year)

행	열	위도	경도	BC	CO	NO _x	OC	PM ₁₀	PM ₂₅	SO ₂	NMVOC
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
1	121	53	120.5	0.97105	59,0584	3,14535	1,14881	11,1236	7,98849	0,35047	4,98001
1	122	53	121	1.44586	87,5252	4,64248	1,71033	16,4799	11,8329	0,51729	7,38361
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
133	195	-13	157.5	0	0	0	0	0	0	0	0

구축한 데이터를 사용하였다.

(4) REAS

REAS는 일본에서 진행된 아시아 지역별 대기 오염 배출량 프로젝트에 의해 표본으로 실측된 데이터를 바탕으로 추정된 데이터이다. 연구지역은 한반도를 포함하는 동아시아 지역으로 위도 $N50^{\circ} \sim S10^{\circ}$, 경도 $E60^{\circ} \sim E150^{\circ}$ 지역을 대상으로 하며, 배출량 데이터의 해상도는 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 로 INTEX-B와 해상도가 같다(Ohara *et al.*, 2007).

REAS의 데이터는 다른 배출목록과 달리 1995년과 2000년에 관측한 데이터를 바탕으로 1998년부터 2010년까지의 배출량 데이터를 선형내삽법으로 추정하여 제공한다. 인위적인 배출만을 고려하며 각 배출물질의 배출량 데이터는 배출원 구분 없이 연간 총배출량으로 제공된다.³⁾

각 배출물질별 배출량 산정 시 고려한 배출원은 아래의 표 3과 같다. 인위적 배출부분은 크게 연소, 비연소, 농업, 기타 부문으로 나뉘며 배출물질에 따라 고려하는 배출원에 차이가 있다. 본 연

구에서는 TRACE-P 및 INTEX-B와의 비교를 통해 대기오염 배출 총량 데이터를 사용하였다.

2) 대기오염 배출량 데이터 변환

국제 대기오염 배출량 데이터와 국내 배출량 데이터를 동일한 지점에서 비교하기 위하여 형식을 변경하고 좌표체계를 동일하게 변환하였다. 국제 대기오염 배출량 데이터는 경위도 좌표의 위치 속성을 가지고 있으며 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 또는 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 의 해상도로 나누어져 있는 각 격자 내 연간 배출량을 제공한다. TRACE-P, INTEX-B, REAS의 배출량 데이터는 위치 정보와 속성 정보를 포함한 아스키(ASCII) 코드로 이루어져 있다. 수집한 데이터를 래스터데이터로 변환하기 이전에 데이터의 공간적 손실여부를 확인하기 위하여 점 데이터(point shapefile)로 우선 변환하였다(그림 1(a)). 연구지역 내 모든 격자의 데이터가 손실 없이 존재함을 확인한 후 래스터 형태로 변환하였다. 각 배출량 데이터를 CO를 사례로 변환한 데이터를 살펴보면 그림 1과 같다.

표 3. REAS의 배출원 분류

인위적 배출원			NO _x	SO ₂	CO	CO ₂	N ₂ O	NH ₃	BC	OC	CH ₄	NM VOC
연소	Industry (산업)	Fossil fuel (화석연료) + Biofuel (바이오연료)	○	○	○	○		○	○	○	○	○
	Power (전력)											
	Transport (교통)											
	Domestic (가정)											
비연소	Industrial processes (산업 처리) (Oil, Gas, Solvent etc)			○	○	○				○	○	
농업	Agricultural soil (농업 토양)		○				○	○			○	
	Livestock (목축)						○	○			○	
기타	Waste treatment (쓰레기 처리)										○	
	Human, Latrines (생활, 하수)							○				
	International aviation (항공)		○	○	○	○			○	○	○	
	International shipping (항해)		○	○	○	○			○	○	○	

그림 1(b)에서 2001년 CO 배출량 데이터인 TRACE-P의 CO 배출 분포를 살펴보면, 한·중·일의 배출량이 적은 편에 속하며 인도·미얀마 부근에서 CO 배출량이 크게 나타난다. 이와 달리 그림 1(c)의 2006년 배출 데이터인 INTEX-B의 CO 배출 분포는 중국 지역의 배출량이 크게 나타난다. REAS는 다년간의 배출량 데이터를 가지고 있으며, 그림 1(d)인 2006년 REAS 데이터를 기준으로 살펴보면, 인도와 중국에서 많은 양의 CO

가 배출되며 한국과 일본은 상대적으로 적은 양의 CO를 배출하는 것으로 나타났다.

대기오염 배출량 데이터의 정확도 분석을 위한 첫 단계로, 국제 대기오염 배출량 데이터와 국내 대기오염 배출량 데이터의 격자 크기를 일치시켰다. 이를 위해 데이터 형식 변환과정을 거쳤다. 격자의 크기가 큰 국제 배출량 데이터의 격자 크기를 기준으로 내륙지역에 의해 격자별 AOI(Area Of Interest)를 생성하였다. 해안지역과 접경지역

(a) 대기오염 배출량 점 데이터

(b) 2001년 TRACE-P의 CO 배출량

(c) 2006년 INTEX-B의 CO 배출량

(d) 2006년 REAS의 CO 배출량

그림 1. 대기오염 배출량 데이터 분포

에 대해서는 국내 배출량 데이터가 없으므로 비교대상지역에서 제외하였다. 따라서 해안지역과 접경지역을 제외한 내륙지역의 데이터를 사용하기 위하여 좌상단(E126.75°, N37.75°)과 우하단(E128.75°, N34.75°)을 기준으로 남한 내륙지역의 AOI를 생성하였다. 총 24개의 구역으로 나누었으며, 각 격자에는 분석을 위한 참조구역번호를 그림 2와 같이 부여하였다. 그림 2의 기준격자의 크기는 INTEX-B와 REAS 데이터의 격자 크기인 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 로 선정하여 구축하였다. TRACE-P 데이터의 해상도는 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 이므로 기준격자 네 개를 합한 면적의 배출량이 동일한 값을 나타내도록 하였다.

그림 2. $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 해상도의 내륙 AOI 격자 생성

3. 대기오염 배출량 데이터 오차 평가

정확도 분석을 위해 국내 배출량 데이터와 해외 배출량 데이터를 구역별로 정리하여 이를 바탕으로 오차(Root Mean Square Error, RMSE)를 계산하였다. 2001년의 국내배출량데이터를 바탕으로 TRACE-P와 2001년 REAS의 오차를 계산하여 비교하였다. 2006년의 국내 배출량 데이터는 INTEX-B와 2006년 REAS와의 오차를 계산하여 비교하였다.

오차(RMSE)는 추정 값 또는 예측 값과 실제로 관측된 값의 차이를 비교할 때 흔히 사용하는 척도이다. 오차(RMSE)는 추정 값과 관측 값의 차이, 즉 편차(bias)를 제공한 값을 평균하여 제공된 형태로 바꾸어줌으로써 하나의 비교 척도로 사용한다. 오차(RMSE)의 식은 아래와 같다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n_{test}} \sum_{i=1}^{n_{test}} [y(x_i) - \hat{y}(x_i)]^2}$$

$y(x_i)$: 국내 배출량 데이터에서 x_i 격자의 배출량

$\hat{y}(x_i)$: 해외 배출량 데이터에서 x_i 격자의 배출량

n_{test} : 격자의 수(24개)

국내 배출량 데이터의 측정단위는 kg/year이므로 국제 배출량 데이터의 측정단위인 ton/year 단위로 맞추어 주었다. REAS 데이터와 국내 배출량 데이터의 오차(RMSE) 값은 표 4와 같다. NH_3 의 오차가 가장 작게 나타났지만 2007년에는 예외적으로 큰 값을 보인다. CO는 가장 큰 오차를 갖고, 2001년에 비해 시간이 갈수록 정확도가 계속해서 감소하는 경향이 있다. SO_x 는 4만~5만 톤 내외의 값을 가지며, 2007년에는 예외적으로 작은 값을 갖는다. NO_x 는 2만~3만 톤 내외의 값을 갖는다.

표 4. REAS 데이터의 오차(RMSE) 계산결과

(단위: ton/year)

	SO _x	NO _x	VOC	NH ₃	CO
배출량평균A	276899095	701916009	3442945561	150417953	474214797
배출량평균B	451206,6	599752,9	649102,1	100048,9	2603092,3
2001	45386,1	24809,4	20364,7	3477,5	251568,4
2002	42810,0	27487,0	21533,3	3324,5	190776,0
2003	51644,6	46542,0	21632,3	4299,6	220519,4
2004	45174,4	36042,4	24567,7	3438,8	238502,7
2005	44566,6	33596,9	27338,2	3878,4	257894,9
2006	47917,0	36440,9	19976,0	3706,0	275538,6
2007	13825,3	29202,6	26754,1	11051,5	342654,2
2008	55359,0	38806,0	33452,7	3360,5	328072,7
2009	56888,7	38370,8	28014,8	3713,1	336931,4

*배출량평균A: 2001~2009년 국내 배출량 데이터의 남한 전 지역 배출량의 평균

배출량평균B: 2001~2009년 REAS 데이터의 남한 전 지역 배출량의 평균

REAS 데이터는 2001년부터 2009년까지의 배출량 데이터가 모두 존재하기에 국내 배출량 데이터와 비교하여 2001년에서 2009년까지의 오차를 계산할 수 있으나, TRACE-P 데이터와 INTEX-B 데이터의 경우 각각 2001년, 2006년만을 비교할 수 있다. 각 데이터는 다양한 대기오염 물질에 대한 데이터를 포함하고 있지만 수치예보모델에 필요한 대기오염 물질인 SO_x, NO_x, VOC를 중심으로 2001년 및 2006년 데이터에 대해 국내 대기오염 배출량 데이터와 아시아 지역 대기오염 배출량 데이터의 오차를 비교·분석하였다. 다만 국내 배출량 데이터인 SO_x, NO_x, VOC에 대해 아시아 데이터에서 동일한 데이터가 없는 경우는 동일 계열 데이터인 SO₂, NO₂, NMVOC를 대신 비교하였다. 따라서 TRACE-P, INTEX-B, REAS를 상호비교하기 위해 2001년과 2006년의 SO_x(SO₂), NO_x(NO₂), VOC(NMVOC) 데이터에 대해 국내 배출량과의 오차를 비교할 수 있는 연도인 2001년과 2006년에 대해 비교하면 표 5와 같다.

표 5에서 SO_x의 경우, 2001년에는 TRACE-P가

REAS에 비해 오차가 크고, 2006년에는 INTEX-B가 REAS에 비해 오차가 작다. 국내 배출량 데이터에 대해 작은 오차(RMSE)를 보이고 있어 INTEX-B를 국외지역에 대한 배출량 데이터로 활용하는 것이 가장 바람직할 것으로 보인다. 또한 실측데이터인 TRACE-P와 INTEX-B 중 INTEX-B가 최신 데이터이므로 이를 활용하는 것이 현재의 대기상황과 보다 더 유사할 수 있다.

NO_x의 경우, 2001년과 2006년 모두에서 REAS의 오차가 작게 나타난다. 하지만 REAS 데이터는 1995년과 2000년 관측 데이터로부터 추정된 데이터라는 한계가 있다. 만약 실측한 데이터를 활용하여야 한다면 연도가 달라서 직접비교는 불가능하지만 REAS와의 비교를 통해 상대적으로 살펴본다면 대체로 REAS와의 오차간격이 작은 INTEX-B가 TRACE-P에 비해 오차가 작은 것이므로 INTEX-B를 활용하는 것이 바람직할 것으로 보인다.

VOC의 경우, 2001년에는 TRACE-P가 REAS에 비해 오차가 크고, 2006년에는 INTEX-B가 REAS에 비해 오차가 작다. REAS와 INTEX-B

표 5. 국내 배출량과 아시아 배출량의 오차(RMSE) 비교

(단위: ton/year)

		SO _x	NO _x	VOC
2001	TRACE-P	61842.3	47386.9	66770.7
	REAS	45386.0	24809.4	20364.7
2006	REAS	47916.9	36440.9	19976.0
	INTEX-B	12062.2	41108.1	16698.6

의 오차가 비슷하지만, 이 경우에는 REAS보다는 실측데이터인 INTEX-B를 활용하는 것을 추천할 수 있다.

국내 배출량 데이터와 국제 배출량 데이터의 산정방법이 다르기 때문에 배출량 데이터 수치에 차이가 발생한다. 상대적으로 지표와 가까운 곳에서 측정하고 배출원을 바탕으로 산정한 국내 배출량 데이터의 배출량이 큰 수치를 보인다. 산정방법으로 인한 차이를 인식하고 데이터를 사용해야 할 것이다. 이상의 세 가지 물질의 비교를 종합하면 매년 데이터가 필요하고 추정데이터의 사용이 가능한 경우는 REAS 데이터를 활용하는 것이 바람직할 것이다. 비록 2006년에 제한되어 있지만 실측데이터를 사용하여야 할 경우에는 INTEX-B를 활용하는 것이 타당할 것이다.

4. 결론

본 연구는 아시아 지역에 대한 다양한 대기오염 배출량 데이터를 국내 대기오염 배출량 데이터와 비교·분석하여 그 활용가능성을 제시하고자 하였다. 활용가능성이 있는 아시아 지역의 대기오염 배출량 데이터로는 TRACE-P, INTEX-B, REAS 데이터가 존재한다. TRACE-P는 2001년 전 세계 대기오염 배출량 데이터이고 INTEX-B는 2006년 전 세계 대기오염 배출량 데이터로 실측을 통해 구축되었다. REAS는 1995년과 2000년

의 대기오염 배출량을 기준으로 1998년부터 2010년까지의 배출량을 추정하여 산출한 데이터이다.

TRACE-P는 인위적인 발생원에 의한 총 9가지 물질(SO₂, NO_x, CO, NH₃, CO₂, CH₄, BC, OC, NMVOC)의 연간 총 배출량을 1°×1°해상도로 제공한다. INTEX-B는 인위적인 발생원에 의한 총 8가지 물질(SO₂, NO_x, CO, NMVOC, OC, BC, PM₁₀, PM₂₅)의 연간 총 배출량을 0.5°×0.5°해상도로 제공한다. REAS는 인위적인 발생원에 의한 총 10가지 물질(NO_x, SO₂, CO, CO₂, N₂O, NH₃, BC, OC, CH₄, NMVOC)의 연간 총 배출량을 0.5°×0.5°해상도로 제공한다.

TRACE-P, INTEX-B, REAS의 대기오염 배출량 데이터를 국내 대기오염 배출량 데이터와 비교한 결과 SO_x의 경우, 2001년에는 TRACE-P가 REAS에 비해 오차가 크고, 2006년에는 INTEX-B가 REAS에 비해 오차가 작았다. NO_x의 경우, 2001년과 2006년 모두에서 REAS의 오차가 작게 나타난다. VOC의 경우, 2001년에는 TRACE-P가 REAS에 비해 오차가 크고, 2006년에는 INTEX-B가 REAS에 비해 오차가 작았다. 세 가지 물질(SO_x, NO_x, VOC)을 비교한 결과로는 INTEX-B, REAS, TRACE-P의 순으로 오차가 작았다. 하지만 INTEX-B는 2006년 데이터로 시간적인 제약이 있으며, REAS는 연도별 데이터를 포함하고 있지만 추정된 데이터라는 한계를 갖고 있다.

따라서 본 연구에서 비교한 세 가지 아시아 배

출량 데이터(TRACE-P, INTEX-B, REAS) 중 국내 배출량 데이터와 함께 사용할 아시아지역 국외 배출량 데이터의 활용에 대해 다음과 같이 제안한다. 첫째, 실측값을 사용하여야 할 경우는 INTEX-B를 활용하는 것이 타당하다. 둘째, 다년의 데이터가 필요하고 추정값의 활용이 가능한 경우는 REAS도 활용할 수 있을 것이다. 특히 SO_x의 경우는 추정에 의한 REAS 배출량의 오차가 다른 두 가지 배출량 정보보다 작은 것으로 나타났다. 아시아 배출량 데이터를 대기오염 확산모델에 활용하면 각 오염물질의 고도별·시간별 대기오염 농도 데이터를 취득할 수 있을 것으로 기대한다. 특히 수치예보모델의 운용을 위해 고도별 대기오염 농도를 활용할 수 있을 것이며 이를 통해 수치예보모델의 시정예측 정확도 개선에 기여할 수 있을 것이다.

사사

본 연구는 기상청 재원으로 연구된 「수치예보모델 운영기술 개선」 연구보고서의 일부를 수정·보완한 내용이다.

주

- 1) TRACE-P 데이터는 http://www.cgrer.uiowa.edu/EMIS-ION_DATA/index.htm에서 취득 가능함.
- 2) INTEX-B 데이터는 <http://www-air.larc.nasa.gov/mis-sions/intex-b/dataaccess.htm>에서 취득 가능함.
- 3) REAS 데이터는 http://www.jamstec.go.jp/frsgc/research/d4/reas_c.html에서 취득 가능함.

참고문헌

- 국립환경과학원, 2010, 국가 대기오염물질 배출량 산정방법편람(Ⅱ).
- 김동영, 2010, 수도권 대기오염물질 배출의 공간분포 분석.
- 대한건설진흥회, 1998, 건설공사 표준품셈.
- 신혜정·김지영·최병철·오성남·Jianzhen Yu·Keith Bower, 2002, ACE-Asia 집중관측기간에 제주 고산에서 측정된 대기오염물질의 농도 분포특성, 한국대기환경학회지, 18(6), 487-501.
- 안재호·안상전, 2010, 상향식 방법을 이용한 산업 부문의 온실가스 배출량 산정 연구, 한국태양에너지학회 논문집, 30(6).
- 이재용·문주연·박진식·장성호·안경모, 2010, 탄소 배출량 산정을 위한 GIS 적용연구, 한국환경과학회 2010년 정기학술발표회 논문집, 19, 521-522.
- 정성운·류정호·유영숙·임철수, 2006, 국내 다목적 자동차의 오염물질 배출특성 연구, 한국대기환경학회지, 22(1), 127-134.
- 정중현·손병현·정덕영·김현규·이협희, 2003, 폐기물 소각로의 유해 대기오염물질 배출 특성, 한국환경위생학회지, 29(5), 17-26.
- 한진석·이민도·임용재·이상욱·김영미·공부주·안준영·홍유덕, 2006, 수도권 지역에서 환경대기 중 유해대기오염물질(VOCs, Aldehydes, PAHs) 농도분포 특성 연구, 한국대기환경학회지, 22(5), 574-589.
- 황용우·박광호·서성원, 2000, 도로건설에 따른 CO₂ 배출량 평가, 대한토목학회지, 20(1-B), 113-121.
- Jacob, D. J., Crawford, J. H., Kleb, M. M., Connors, V. S., Bendura, R. J., Raper, J. L., Sachse, G. W., Gille, J. C., Emmons, L., and Heald, C. L., 2003, Transport and Chemical Evolution over the Pacific (TRACE-P) aircraft mission: Design, execution, and first results, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108 (D20).
- Ohara, T., Akimoto, H., Kurokawa, J., Horii, N.,

Yamaji, K., Yan, X., and Hayasaka, T., 2007, An Asian emission inventory of anthropogenic emission sources for the period 1980-2020, *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 7(3), 6843-6902.

Zhang, H., Zhang, M., Cui, Z., Wang, Y., and Xin, J., 2012, Simulation and validation of the aerosol optical thickness over China in 2006, *Acta Meteorologica Sinica*, 26(3), 330-344.