

동아시아 대기질 예보 및 감시를 위한 모델링 기술의 현황과 발전 방향

Current Status and Development of Modeling Techniques for Forecasting and Monitoring of Air Quality over East Asia

박래설[#] · 한경만[#] · 송철한* · 박미은 · 이소진
홍성유¹⁾ · 김 준¹⁾ · 우정현²⁾

광주과학기술원 환경공학부, ¹⁾연세대학교 대기과학과,
²⁾건국대학교 신기술융합학과

(2013년 6월 15일 접수, 2013년 7월 25일 수정, 2013년 7월 25일 채택)

Rae Seol Park[#], Kyung Man Han[#], Chul Han Song*, Mi Eun Park,
So Jin Lee, Song You Hong¹⁾, Jhoon Kim¹⁾ and Jung-Hun Woo²⁾
*School of Environmental Science and Eniginnering, Gwangju Institute of
Science and Technology*

¹⁾*Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University*

²⁾*Department of Advanced Technology Fusion, Konkuk University*

(Received 15 June 2013, revised 25 July 2013, accepted 25 July 2013)

Abstract

Current status and future direction of air quality modeling for monitoring and forecasting air quality in East Asia were discussed in this paper. An integrated air quality modeling system, combining (1) emission processing and modeling, (2) meteorological model simulation, (3) chemistry-transport model (CTM) simulation, (4) ground-based and satellite-retrieved observations, and (5) data assimilation, was introduced. Also, the strategies for future development of the integrated air quality modeling system in East Asia was discussed in this paper. In particular, it was emphasized that the successful use and development of the air quality modeling system should depend on the active applications of the data sets from incumbent and upcoming LEO/GEO (Low Earth Orbit/Geostationary Earth Orbit) satellites. This is particularly true, since Korea government successfully launched Geostationary Ocean Color Imager (GOCI) in June, 2010 and has another plan to launch Geostationary Environmental Monitoring Spectrometer (GEMS) in 2018, in order to monitor the air quality and emissions in/around the Korean peninsula as well as over East Asia.

Key words : Integrated air quality modeling system, Chemistry-transport model (CTM), Air quality forecast (or Chemical weather forecast), Numerical weather prediction (NWP), Geostationary satellites

[#]Rae Seol Park and Kyung Man Han made equal contributions to this manuscript.

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)62-715-3276, E-mail : chsong@gist.ac.kr

1. 서 론

한반도를 포함한 동아시아 지역의 지속적인 경제 발전에 기인한 에너지 사용량의 증가는 대기 오염물질 및 온실기체 배출량의 증가를 유발하여 왔다. 이들 가스 및 입자상 물질은 시정악화(visibility degradation)는 물론, 기체상 및 입자상 물질의 배출/생성을 통해 호흡기, 심혈관계 및 면역계 질환을 유발하고 있는 것으로 알려져 있으며, 지역적 기상현상과 동반하여 지역규모 연무(regional haze) 형성, 미세먼지의 장거리수송 및 인체위해성, 기후변화 등의 주요 환경문제를 야기하여 왔다(Wang *et al.*, 2009; Pope and Dockery, 2006; Pöschl, 2005; Brankov *et al.*, 2003; Holloway *et al.*, 2003, 2002). 특히, 최근 환경부가 발표한 2010~2012년 연평균 초미세먼지 농도(PM_{2.5}, 공기역학 지름 2.5 μm 이하 입자 농도)는 전국 11개 측정소 중 서울, 경기, 대구, 인천 등 6곳에서 2015년 시행 예정인 PM_{2.5} 대기 환경기준인 25.0 μg/m³을 초과하였다. 특히, 서울 및 경기 지역의 초미세먼지는 미국의 뉴욕(12.5 μg/m³) 등 선진국 주요 도시의 두 배 이상인 ~30 μg/m³ 수준으로, 이들 물질은 폐 속 깊이 침투 및 흡착되어 각종 염증 및 폐암을 유발하는 것으로 알려져 있다(Pope and Dockery, 2006; Pöschl, 2005). 초미세먼지가 인체에 미치는 심각한 영향으로 인해, 미세먼지 예방 및 최소화를 위한 살수 차량 운영 및 전기차, CNG(압축천연가스, compressed natural gas) 버스 및 DPF(매연저감필터, diesel particulate filter) 부착 버스 등 친환경차 보급과 같은 대기환경 정책이 확대되고 있다. 한편, 인류의 삶의 목표가 단순한 생계 유지에서 삶의 질의 향상으로 전환되는 과정에서 건강 및 삶의 질과 밀접하게 연관되는 기후변화 및 대기질에 대한 국민들의 관심이 증대되었으며, 이에 대한 구체적인 파악 및 판단이 절실하게 요구되었다. 따라서, 최근에는 대기질 연구가 단순한 규제를 목적으로 한 정책수립의 수단으로 사용되던 단계에서 벗어나, 생활 밀착형 정책으로의 전환을 위한 대기질 예보기술의 개발 및 적용 등을 목적으로 점진적으로 발전하고 있는 추세이다.

이러한 대내외적인 요구에 부합한 보다 정밀한 대기질 감시와 예측을 위해서는 정확한 4차원 대기질 자료의 산출이 요구된다. 이러한 노력의 일환으로 동

아시아 대기질을 이해하기 위해서 PEM-West A&B (Pacific Exploratory Mission-West A&B), ACE-Asia (Asian Pacific Regional Aerosol Characterization Experiment), TRACE-P (Transport and Chemical Evolution over the Pacific) 등의 다양한 지상·항공·선박관측 등의 국제적 campaign들이 이루어져 왔으며, 국내에서는 국립환경과학원의 주도하에 다양한 목적에 부합하는 대기질 측정망을 구성하려는 노력들이 있어 왔다. 이러한 관측 자료들은 정확성이 높다는 장점이 있지만, 시·공간적인 해상도가 매우 낮기 때문에 4차원의 정밀한 대기질 감시 및 예측에 적합하지가 않다. 최근에는 이러한 관측의 한계를 극복하기 위해서 위성을 통한 대기질 관측이 많이 활용되고 있는 추세이다(Kokhanovsky *et al.*, 2006; Singh and Jacob, 2000; King *et al.*, 1999). 특히, 저지구궤도(Low Earth Orbit, LEO) 위성의 제한된 활용에서 탈피하여, 최근에는 정지궤도(Geostationary Earth Orbit, GEO) 위성을 활용함으로써 시·공간적으로 보다 정밀한 대기질 감시·관측이 가능하게 되었다. 국내에서는 2010년에 통신해양기상위성인 COMS (Communication, Ocean and Meteorological Satellite)를 발사하였으며, COMS에는 GOCI(Geostationary Ocean Color Imager) 센서가 탑재되어 해색관측이라는 본래의 목적과 더불어 동북아시아에서 에어로솔의 광학적 두께(Aerosol Optical Depth, AOD)의 시공간적 분포 자료를 현재 생산하고 있다(Lee *et al.*, 2010). 또한, 2018~2019년에는 정지궤도 복합위성인 GEO-KOMPSAT 2A/2B (Geostationary Korea Multi-Purpose Satellite 2A/2B)가 발사 예정인데, GEO-KOMPSAT 2B에 탑재될 GOCI-II와 GEMS (Geostationary Environment Monitoring Spectrometer) 센서로부터 다양한 (동)아시아 대기오염 자료들이 제공될 예정이다. 위성기술의 발달은 보다 정확하며 시·공간적 해상도가 높은 대기질 자료들을 제공함으로써 위성을 통한 대기질 감시·관측의 유용성을 증가시킨다. 그러나, 위성으로부터 산출된 자료는 위성산출 알고리즘에서 적용하는 다양한 가정들에 의한 오차, 구름 및 지표반사에 의한 관측의 제한 및 연직분포 자료의 부재 등에 의해 여전히 4차원의 정밀한 대기질 감시를 위한 자료 제공에는 일정 부분 한계가 존재한다. 이러한 지상 및 위성 관측의 한계점으로부터 보다 포괄적이고 정밀한 대기질의 예측 및 감시를 위해서 대기질 모델(air quality

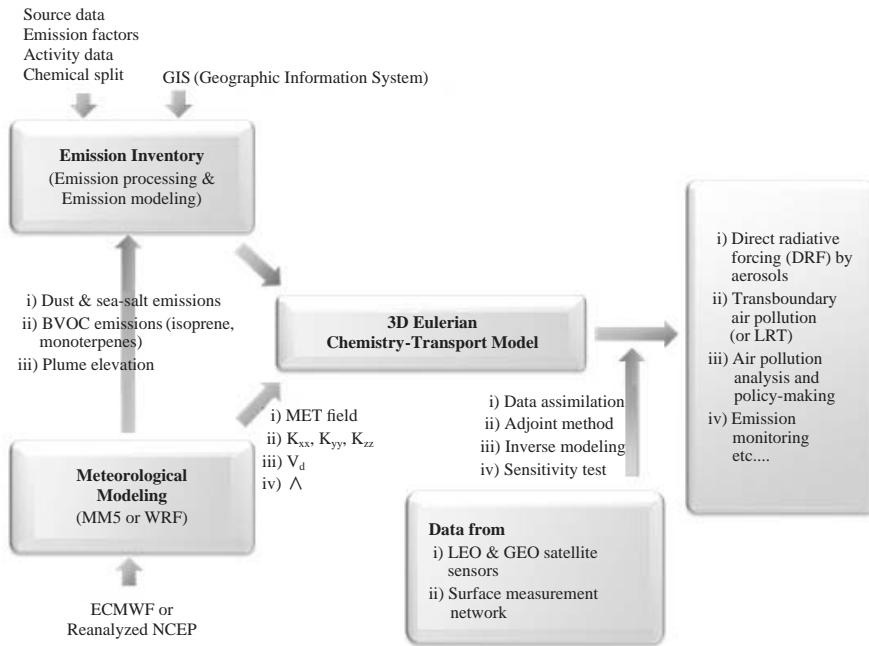


Fig. 1. Structure of integrated air quality modeling system.

model) 또는 화학수송 모델 (chemistry-transport model) 을 활용하여 통합 모델링 시스템을 개발할 필요성이 제기되어 왔다.

대기질 모델링은 대기 중에서 오염물질의 이동, 확산, 침적, 반응 등 물리·화학적 과정을 수치적 계산을 통해 구현하는 일련의 과정과 결과를 포함하며, (1) 대기 환경의 물리적 현상을 이해하기 위한 3차원 기상모델링 (3D-meteorological modeling), (2) 자연 및 인위적 오염물질에 대한 배출 목록 (emission inventory) 및 배출 모델링 (emission modeling), 그리고 (3) 기상 및 배출량 자료를 활용한 3차원 대기 화학수송 모델링으로 구성되어 있다. 본고에서는 이와 같은 시스템을 “통합 대기질 모델링 시스템 (integrated air quality modeling system)”이라 명명하고, 그림 1에서 시스템의 구조 및 핵심 기술 요소 등을 제시하였다. 대기질 모델링은 모델링 기반의 대기질 정보를 예보함으로써, 대기 유해물질에 따른 피해를 예상하고, 특히, 취약계층에 대한 단계별 행동 수칙 등을 통해 신속한 대응을 도모할 수 있다. 또한, 예보 자료의 장기적 축적을 통해 지역별, 배출원별에 따른 중장기 대기환경 정책 수립 및 정책의 사전 평가 등에도 활용

될 수 있다는 장점이 있다. 그러나, 대기질 모델링은 배출장, 기상장, 초기 및 경계 조건의 불확실성과 모델 자체의 물리적 및 화학적 모수화 (parameterization) 에 있어서의 한계 등으로 인해 지상 및 위성관측과 비교하여 그 정확성은 낮다고 알려져 왔다 (Han *et al.*, 2009; Kinne *et al.*, 2003). 따라서, 대기질 모델링 고유 기능의 장점을 극대화하기 위해서는 대기질 모델을 구성하는 각 구성 모듈의 성능 및 신뢰도가 보장되어야 한다. 대기질 모델링의 각 구성 요소별 개선을 통해 대기질 모델링의 정확성은 지속적으로 개선되어 왔지만, 여전히 그 정확성에서 일정 부분 한계를 보이고 있으며, 최근에는 각종 지상 및 원격 측정망 자료 (화학 측정망 자료, 위성관측 자료, lidar 자료, sunphotometer 관측망 자료 등)를 활용한 차세대 대기질 모델링 기술의 중요성이 부각되고 있다. 이미, 기상청에서는 기상모델, 위성자료 및 지상관측을 통합한 단기 기상예보 (NWP, numerical weather prediction 또는 physical weather forecast) 시스템을 현업에 활용 중이며 (그림 6(a) 참조), 이에 부합하여 정밀한 대기질 감시 및 예보를 위한 차세대 대기질 모델링 시스템의 구축과 운용 또한 향후 대기학회가 지향해

야 할 중요한 과제일 것이다.

차세대 대기질 모델링을 위한 화학수송 모델링, 위성자료, 지상관측 자료의 통합 과정에서 자료동화(data assimilation) 기술의 활용 또한 필수 요소가 될 수 있을 것이다. 자료동화를 통해 지상 및 위성관측 자료의 장점인 정확성과, 화학수송 모델링 자료의 장점인 높은 시·공간적 분해능을 극대화하여 4차원의 정확성 높은 대기질 자료의 생산이 가능하며, 이를 통해 보다 정밀한 대기질 감시 및 예측·예보를 수행할 수 있다. 현재까지 다양한 자료동화 기술이 개발되었으며, OI(optimal interpolation) 및 변분법(3DVAR or 4DVAR) 등이 여러 선행 연구에서 사용되었지만(Park *et al.*, 2011; Chung *et al.*, 2010; Adhikary *et al.*, 2008; Bei *et al.*, 2008; Yu *et al.*, 2003; Collins *et al.*, 2001), 최근에는 자료동화의 정확성과 효율성을 극대화하기 위해 개선 및 개발된 기술(예: ensemble Kalman filter)을 대기질 모델링에 적용하려는 연구들이 진행 중이다(Galmarini *et al.*, 2013; Henze *et al.*, 2009; Sandu *et al.*, 2004).

대기질 모델의 개발 및 운용 기술은 계속해서 진화하고 있으며, 보다 정확한 대기질 감시와 예측·예보에 대한 요구를 충족시키기 위해서는, 아직도 많은 과제들이 해결되어야 한다. 따라서, 본고에서는 국내·외의 대기질 모델 개발 및 모델링 운용 현황을 조망하고, 이를 바탕으로 향후 동아시아 대기질 감시 및 예보를 위한 대기질 모델링의 개선 및 발전 방향을 논의해 보고자 한다. 또한, 본 연구를 통해 대기질 모델링 개선을 위한 국내에서의 연구가 보다 효율적으로 진행되고, 환경부에서 대국민 서비스의 일환으로 현재 추진 중인 대기질 단기 예보제(air quality forecast) 또는 화학기상 단기 예보(chemical weather forecast) 실현을 위한 보다 나은 기반을 제공할 수 있기를 기대한다.

2. 대기질 모델링의 현황과 발전방향

“통합 대기질 모델링 시스템”의 정확도를 개선하기 위한 전략은 크게 두 가지로 나누어질 수 있는데, 이는 (1) 대기질 모델 자체의 성능 향상을 위한 지속적인 “대기질 모델 개발(air quality model development)”과 (2) 대기질 모델링과 연관된 배출장 및 배

출 모델링 개선, 기상 모델(링) 개선, 지상관측 및 인공위성 관측자료 활용 등 “관련/연관 기술 개선/개발”을 들 수 있다. 본고에서는 이와 같은 인식 하에 통합 대기질 모델링 시스템을 구성하는 관련 요소의 개선 및 통합 과정 개선을 통해 통합 대기질 모델링 기술의 개선 방안을 제시하기 위하여, 대기질 모델링의 관련 요소 기술별 현황 및 발전 방향에 대해서 기술하고, 이들 요소들을 이용하여 통합 모델링 체계를 구축하는 기술적 방안들을 논의하고자 한다.

2.1 배출장 프로세싱 및 배출 모델링 기술의 현황과 발전방향

그림 1에서와 같이 3차원 대기질 또는 대기화학수송 모델링 구동을 위한 주요 요소인 배출량 자료는 각종 통계 자료 및 지리 정보시스템(Geographical Information System, GIS) 등을 활용하여 작성되며, 일반적으로 많은 불확실성을 내포하고 있다. 대기화학수송 모델링을 지원하기 위해서는 배출장의 시간할당(temporal allocation), 공간할당(spatial allocation), 화학종 할당(chemical speciation 또는 chemical split)에 따라 화학수송 모델링의 입력자료 형태(model-ready input)로 변환해야 되는데, 이러한 과정을 “배출장 프로세싱”이라고 한다. 공간·시간 할당, 화학종 할당 등과 미래 배출량 산정과 같은 배출장 프로세싱을 수행하는 모델로는 EMS(Emissions Modeling System), EPS(Emissions Preprocessor System), SMOKE(Sparse Matrix Operator Kernel Emissions), ConCEPT(Consolidated Community Emissions Processing Tool) 등이 있으며 이중에서 SMOKE는 프로세싱과 동시에 배출 모델링도 수행할 수 있고, 연산이 빠르며, 다양한 대기질 모델과의 연계가 가능하기 때문에 현재 많은 사용자를 확보하고 있다. 최근에는 아시아 지역에서의 배출량 처리를 위해 미국 환경청(US EPA)에서 개발된 SMOKE 모델을 우리나라를 중심으로 한 아시아 지역의 특성에 맞도록 적용한 대기 오염물질 배출 처리시스템(SMOKE-Asia, Woo *et al.*, 2012)이 개발되고 있으며, 현재까지 지속적으로 여러 연구에 활용되고 있다.

표 1에서는 동아시아지역에서 활용 가능한 다양한 배출량 자료를 전구규모(global scale), 지역규모(regional scale), 및 소지역규모(local scale)로 구분하여 도표화하여 나타내었다. 이 중 동아시아 지역을 대상

Table 1. Emission inventories available in Asia.

Inventory	Category ¹	SR ²	TR ³	Period	Scale	Species
POET http://www.aero.jussieu.fr/ project/ACCENT/POET.php	A, BB, N	1°	AN (A), Mon (BB and N)	1990~2001	Global	CO,NO _x ,C ₂ H ₆ ,C ₃ H ₈ ,C ₄ H ₁₀ +higher,C ₆ H ₆ ,C ₇ H ₁₆ +higher, Toluene,CH ₃ OH,C ₂ H ₅ OH,HCHO,CH ₃ CHO,Acetone,MEK, Isop,Monoterpene
RETRO http://retro.enes.org/	A, BB	0.5°	Mon	1960~2000	Global	CO,NO _x ,CO ₂ ,CH ₄ ,C ₂ H ₆ ,C ₃ H ₈ ,C ₄ H ₁₀ +higher,BTX, CH ₃ OH,C ₂ H ₅ OH,C ₃ H ₇ OH,HCHO,CH ₃ CHO,Acetone,C ₂ H ₂ , Isop,Monoterpene,H ₂ ,N ₂ O,NH ₃ ,OC,BC,TC,SO ₂ ,PM _{2.5} ,TPM
EDGAR 3.2FT2000 http://www.mnp.nl/edgar/	A, BB	1°	AN	2000	Global	CO,NO _x ,CO ₂ ,CH ₄ ,N ₂ O,SO ₂ ,TVOC
GFED v2 http://ess1.ess.uci.edu/ %7Ejranders/data/GRED2/	BB	1°	Mon, D	1997~2006	Global	CO ₂ ,CH ₄ ,C,CO,NO _x ,N ₂ O,H ₂ ,BC,OC,PM _{2.5} ,TPM,TC
GICC-bb http://www.aero.jussieu.fr/ projet/ACCENT/index.php	BB	1°	Mon	1997~2006	Global	CO ₂ ,CO,NO _x ,CH ₄ ,C ₂ H ₆ ,C ₃ H ₈ ,C ₄ H ₁₀ +higher, C ₄ H ₈ +higher,HCHO,Other_ALD,CH ₃ OH,Other_Alcohols, Acetone,Ketone,totalAromatics,SO ₂ ,NH ₃ ,BC,OC
CO ₂ Andres http://www.aero.jussieu.fr/ projet/ACCENT/index.php	A	1°	AN	1751~2003	Global	CO ₂
GEIA v.1 http://www.geiacenter.org	A, BB, N	1°	AN+Mon (NO _x , SO ₂ , and NaturalVOCs)	Depends on the compound	Global	CO,NO _x ,CO ₂ ,CH ₄ ,N ₂ O,NH ₃ ,OC,BC,SO ₂ ,CFC,Pb,Hg, ReactiveCl,Pesticides,TVOC
MEGAN http://www.aero.jussieu.fr/ projet/ACCENT/MEGAN.php	N	0.5°	Mon	2000	Global	CO,CH ₄ ,C ₂ H ₆ ,C ₃ H ₈ ,C ₄ H ₁₀ ,CH ₃ CHO,CH ₃ OH, (CH ₃) ₂ CO,RC(=O)R',Toluene,Isoprene,Monoterpenes, Sesquiterpenes
AMAP-Mercury http://amap.no/Resources/ HgEmission/	A	0.5°	AN	1995 and 2000	Global	Hg
MEGAN+MOHYCAN http://tropo.aeronomie.be/ models/mohycan.htm	N	0.5°	Mon	1995~2006 2003~2009	Global	Isoprene, methanol
REAS-Asia http://www.jamstec.go.jp/frcg/ research/p2/emission.htm	A	0.5°	AN	1980~2020	Regional	CO,NO _x ,CO ₂ ,CH ₄ ,C ₂ H ₆ ,C ₃ H ₈ ,C ₄ H ₁₀ ,C ₅ H ₁₂ , Other_Alkanes,Terminal_Alkene,Internal_Alkene,C ₂ H ₂ ,BTX, Other_Aromatics,HCHO,Other_ALD,Ketone,Halocarbons, Others,TVOC

Table 1. Continued.

Inventory	Category ¹	SR ²	TR ³	Period	Scale	Species
EMEP-Europe http://www.ceip.at/	A	0.5°	AN	1970 ~ 2020	Regional	CO, NO _x , NH ₃ , SO _x , PM _{2.5} , PM ₁₀ , TVOC
ABBI-Asia (Michel <i>et al.</i> , 2005)	BB	1°	D	2000.3 ~ 2000.5 2001.3 ~ 2001.5	Regional	CO, NO, NO ₂ , CO ₂ , CH ₄ , C ₂ H ₆ , C ₂ H ₄ , C ₃ H ₈ , C ₃ H ₆ , C ₄ H ₁₀ , + higher, C ₄ H ₈ , + higher, Toluene, CH ₃ OH, C ₂ H ₅ OH, C ₃ H ₇ OH, HCHO, Acetone, Xylene, Styrene, Phenol, Acetic acid, Formic acid, Isop, H ₂ , N ₂ , OC, BC, SO ₂
East Asia LTP inventory	A, N	1°	AN	1998	Regional	SO ₂ , NO _x , CO, NH ₃ , PM ₁₀ , VOCs
ACE-ASIA & TRACE-P http://www.cgrr.uiowa.edu/EMISSION_DATA/index.htm	A, BB	1°	AN	2000	Regional	CO, NO, CO ₂ , CH ₄ , C ₂ H ₆ , C ₂ H ₄ , C ₃ H ₈ , C ₃ H ₆ , C ₄ H ₁₀ , C ₅ H ₁₂ , Other_Alkanes, Terminal_Alkene, Internal_Alkene, C ₂ H ₂ , BTX, Other_Aromatics, HCHO, Other_ALD, Ketone, Halocarbons, Others, TVOC
INTEX-B http://www.cgrr.uiowa.edu/EMISSION_DATA_new/index_16.html	A	0.5°	AN	2006	Regional	CO, NO _x , ACET, ALK1-5, ARO1-2, BACL, BALD, CCHO, CRES, ETHE, GLY, HCHO, IPRD, ISOP, MACR, MEK, MEOH, MGLY, MVK, NROG, NVOL, OLE1-2, PHEN, PRD2, RCHO, TERP, OC, BC, SO ₂ , PM _{2.5} , PM ₁₀ , TVOC
MEIC http://www.meicmodel.org	A	0.25°, 0.5°, 1°	Mon	2008, 2010	Local (China)	SO ₂ , NO _x , CO, NMVOC, NH ₃ , CO ₂ , PM _{2.5} , PMCoarse, BC, OC
CAPSS (NIER, S.Korea)	A	1 km	AN	2001 ~ 2010	Local (S.Korea)	CO, NO _x , SO _x , TSP, PM ₁₀ , NH ₃ , TVOC

^{1,3}A: Anthropogenic source (fossil fuel+bio-fuel use+agriculture waste burning)

BB: Biomass burning (fire from wild land; forest fire+savanna fire)

N: Natural source (vegetation and ocean emission)

²SR: Spatial resolution; 1km (1km × 1km), 1° (1° × 1°), 0.5° (0.5° × 0.5°), and 0.25° (0.25° × 0.25°)

³TR: Temporal resolution; AN (Annual), Mon (Monthly), and D (Day)

Table source from the <http://www.aero.jussieu.fr/projet/ACCENT/index.php>

으로 수행되는 연구에서는 LTP (Long-range Trans-boundary air Pollutants), TRACE-P (Transport and Chemical Evolution over the Pacific), REAS (Regional Emission Inventory in ASia) 및 INTEX-B (Intercontinental Chemical Transport Experiment-Phase B) 등의 인위적인 오염물질 배출장 자료가 많이 사용되고 있는데 (Zhang *et al.*, 2009; Ohara *et al.*, 2007; Streets *et al.*, 2003), 표 2에서는 이들 인위적 배출 인벤토리의 각 화학적 성분에 따른 배출량을 또한 비교하여 보았다. 표 2에서 알 수 있듯이 동일한 지역과 유사한 기간을 대상으로 배출량이 산정되었음에도 불구하고 각 인벤토리 간의 배출량 차이가 상당히 클 수 있다. 특히, CO, NMVOCs (Non-Methane Volatile Organic Compounds), NH₃, BC (Black Carbon)에 대한 한국과 일본의 배출량이 2배 이상의 큰 차이를 나타내었는데, 가장 큰 배출량 차이를 보이는 화학적 성분은 NH₃로 약 3.9배의 차이를 나타내었다. 대기화학에서 오존 형성과 적정 (titration) 및 이차 에어로솔 생성

등에 주된 역할을 담당하고 있는 NO_x의 경우도 배출목록에 따른 차이가 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 그림 2는 한 예로서 NO_x 배출량을 공간적으로 나타낸 것이다. 배출목록에 따른 NO_x 배출량의 공간적 분포는 다소 유사한 경향을 나타내고 있으나, TRACE-P 배출목록의 남한 지역 NO_x 배출량(1,322 Gg yr⁻¹)은 EDGAR (Emissions Database for Global Atmospheric Research) 배출목록의 NO_x 배출량(1,924 Gg yr⁻¹)의 0.69배이고, REAS 배출목록의 NO_x 배출량은 RETRO (REanalysis of the TROpospheric chemical composition over the past 40 years) 배출목록의 NO_x 배출량의 0.63배이다. 이와 같은 차이는 오존 농도를 비롯한 많은 대기 화학종 (atmospheric species)의 대기 중 농도에 있어서 모델링 결과에 큰 차이를 가져온다.

한편, 식생에서 배출되는 휘발성 유기화합물(Bio-genic Volatile Organic Compounds, BVOCs)은 인위적으로 배출되는 NO_x와 함께 고농도 오존 생성(Cha-

Table 2. Emission fluxes of gaseous and particulate species from several emission inventories (unit: Gg yr⁻¹).

Category	Species	Country	TRACEP/ACE-ASIA (2000)	REAS (2000)	LTP (1998)	INTEX-B (2006)
			Streets <i>et al.</i> (2003)	Ohara <i>et al.</i> (2007)		Zhang <i>et al.</i> (2009)
Anthropogenic emission	SO ₂	China	20,385	27,590	20,672	31,020
		Korea	829	926	1,146	497
		Japan	801	987	922	871
	NO _x	China	11,347	11,484	10,428	20,830
		Korea	1,322	1,967	1,084	1,159
		Japan	2,198	1,564	2,392	2,404
	gas CO	China	115,749	137,440		166,889
		Korea	2,824	2,660	979	851
		Japan	6,806	4,630	6,739	5,314
	NMVOC	China	17,440	14,700	20,811	23,247
		Korea	1,164	1,880	608	727
		Japan	1,925	1,130	2,409	2,033
	NH ₃	China	13,570	10,778	12,557	
		Korea	172	307	78	
		Japan	352	170	502	
aerosol	OC	China	3,385	2,560		3,217
		Korea	28	45		44
		Japan	74	57		21
	BC	China	1,049	1,090		1,811
		Korea	22	75		70
		Japan	53	33		51
	PM ₁₀	China				18,223
		Korea			65	334
		Japan			238	195

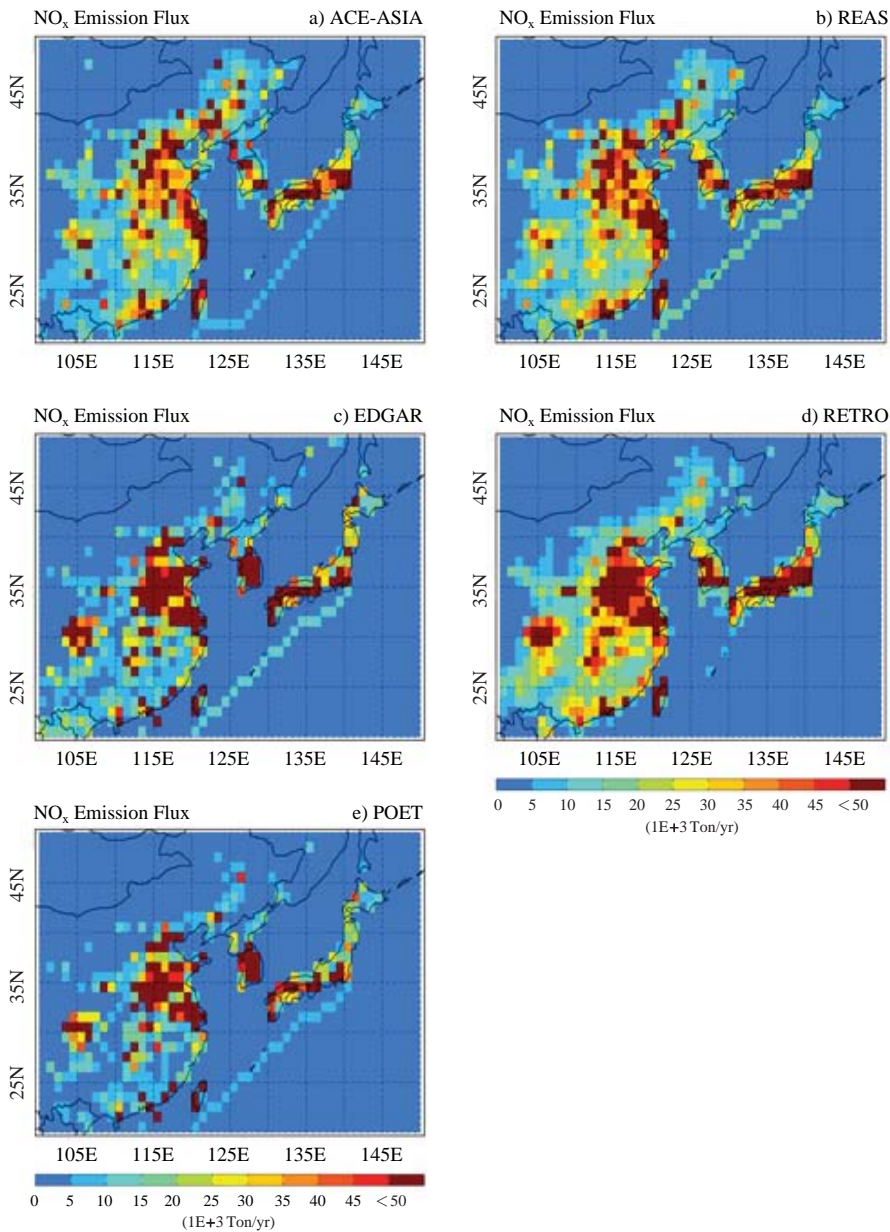


Fig. 2. Spatial distribution of annual NO_x emissions fluxes in East Asia for 2000 from a) ACE-ASIA, b) REAS, c) EDGAR, d) RETRO and e) POET emission inventories.

meides *et al.*, 1988) 및 이차 에어로솔(secondary aerosol) 생성에 관여하는 매우 중요한 전구체(precursors)이다. 아시아 지역에서 식생에 의한 배출량은 GEIA(Global Emission Inventory Activity) 및 MOHYCAN

(MOdel for HYdrocarbon emissions by the CANopy) 으로부터 연간 식생 배출량 정보를 제공하기도 하지만(표 1 참조), Guenther *et al.* (2006)이 개발한 MEGAN(Model of Emissions of Gases and Aerosols from Na-

ture) 배출 모델을 이용한 식생 배출량 추정이 많이 사용되고 있다. 그림 2와 표 2에서처럼, 배출목록 간의 배출 절대량의 차이 및 배출의 공간·시간 분포에서 나타나는 차이는 대기질 모델링에서의 모의 결과에 매우 중대한 영향을 미칠 수 있으며, 대기질 모델링의 예측 및 예보 결과의 신뢰도 향상을 위해서는 이들 차이점에 대한 이해와 지속적인 개선이 절실히 요구된다. 따라서, 본고에서는 동아시아 및 한국의 배출량 자료 산출의 개선점을 “통합 대기질 모델링”의 정확도 제고라는 관점에서 논의하고자 한다.

대기질은 대기 화학반응을 통한 대기 오염물질 생성뿐만 아니라, 대기 오염물질의 장거리 이동을 통해서도 영향을 받을 수 있으므로, 풍하 지역(down-wind area)뿐만 아니라, 풍상 지역(up-wind area)의 배출량 정보를 정확하게 정량화하고 개선하는 것은 통합 대기질 모델링의 정확도를 제고하는 데 매우 중요한 요소가 된다. 특히, 우리나라의 풍상 지역에 위치한 중국의 경우 최근, 빠른 경제성장 및 인구증가로 대기 오염 배출량 역시 빠른 속도로 증가하는 추세이다(van der A *et al.*, 2006; Richter *et al.*, 2005). Zhang *et al.* (2007)에 따르면, 중국에 대해 1995년 이후 추정된 NO_x 배출량의 변화 추이가 전체적으로 증가하는 모습을 보이며, 특히 2000년대 이후 빠르게 증가하는 양상을 보인다. 또한, 미래에도 역시 지속적으로 증가할 것으로 예상되나 배출량 산정에 있어 여러 가지 현실적인 어려움으로 일정 기간 과거 연도를 대상으로 추정이 이루어진다는 한계점을 가지고 있다. 이를 극복하고자 과거의 배출량을 기준으로 미래의 배출량을 투사 예측(projection)하는 방법이 활용되고 있으나, 현실을 반영하기에는 어려움이 있다. 그러나, 배출량의 투사 예측을 통해 가능한 한 최신의 배출목록을 구축하는 것이 배출량 정보의 신뢰도를 높이기 위한 중요한 개선점이 될 수 있다. 이런 관점에서, 한국 기반의 중국 배출량 추정을 위한 연구가 또한 필요하다(NIER, 2012, 2011). 빠르게 진행되고 있는 중국의 산업구조 변화와 이에 따른 배출 특성 변화를 최신 인벤토리 구축에 반영하기 위하여, 중국에서 발간된 신뢰할 수 있는 최신 통계자료와 국제 연구기관인 IIASA (International Institute for Applied Systems Analysis)에서 개발된 GAINS-Asia 시스템의 기반으로 업데이트된 중국의 인위적인 배출목록을 작성하는 지속적 노력이 필요하다.

비산먼지, 암모니아(NH₃), 산불(Biomass Burning, BB), BVOCs (Biogenic VOCs) 등의 배출량 계산을 위해서는 GEIA 인벤토리나 MEGAN 모델링 등이 널리 활용되고 있다. 하지만, MEGAN 모델은 해당 국가 또는 전지구 측면에서 열대 우림 및 북미 지역에서의 배출량 산정에 주로 초점을 맞추고 있어 아시아 지역에 적합한 결과를 도출할 수 있도록 개선하는 작업이 필요하다. 한 예로, 그림 3은 한반도에서의 LEO 인공위성인 Terra 및 Aqua 위성의 MODIS 센서로부터 얻어진 토지피복도(land cover) 자료와 산림지도의 식생별 비교 결과이다. 전체적으로 위성관측 기반 결과 자료와 산림지도가 약 68% 가량 일치하는 결과를 보이고 있으나, 적지 않은 부분에서 역시 식생 분류에 불일치성을 보여주었다. 이러한 불일치를 보완하기 위해서, 산림지역 내 시료 채취 및 분석을 통해 배출 성상을 확인하고, 이들 정보를 지속적으로 축적하는 과정이 요구된다.

배출의 양적인 측면뿐만 아니라, 배출 자료의 처리 과정에서 한국 및 동아시아 실정을 고려한 VOC 화학종의 할당(chemical speciation), 배출자료의 공간 할당(spatial allocation), 배출자료의 시간 할당(temporal allocation) 방법의 개선 역시 매우 중요한 요소이다. 일반적으로 각 화학종별 기작에 따른 화학종 할당 계수를 작성하고 각각의 배출원별로 적절한 할당 계수를 적용하여 화학종 할당 과정을 실시한다. 현재 이용되고 있는 시스템의 화학종 할당 계수는 미국 환경청(US EPA)에서 개발된 SMOKE의 split factors를 대부분 사용하고 있어, 한국 상황에 적합하도록 개별 배출원이나 주요 배출원에 대한 화학종 할당 계수 개발을 위한 연구가 필요할 것이다(KEI, 2006).

대기오염 배출량 자료는 대부분 국가별 행정 구역별로 산정 및 제공되고 있기 때문에 모델이 요구하는 일정한 해상도의 격자화된 배출량 자료로의 전환이 필요하다. 이에 따라 인구자료, 도로면적 또는 차량 통행량, 가축 사육두수, 산림 정보, 농지 정보 등과 같은 대체(surrogate) 자료의 공간적인 가중 정보를 배출원 별로 적용하여 격자별로 할당된다. 하지만, 미국 환경청에서 개발된 SMOKE의 경우, 한국지역 공간할당 정보가 고려되지 않았기 때문에, 이를 위한 별도의 준비과정이 요구되는데, 환경정책평가 연구원에서 개발한 한국배출처리 시스템(Korea Environment Institute-Emissions Inventory Preparation System, KEI-

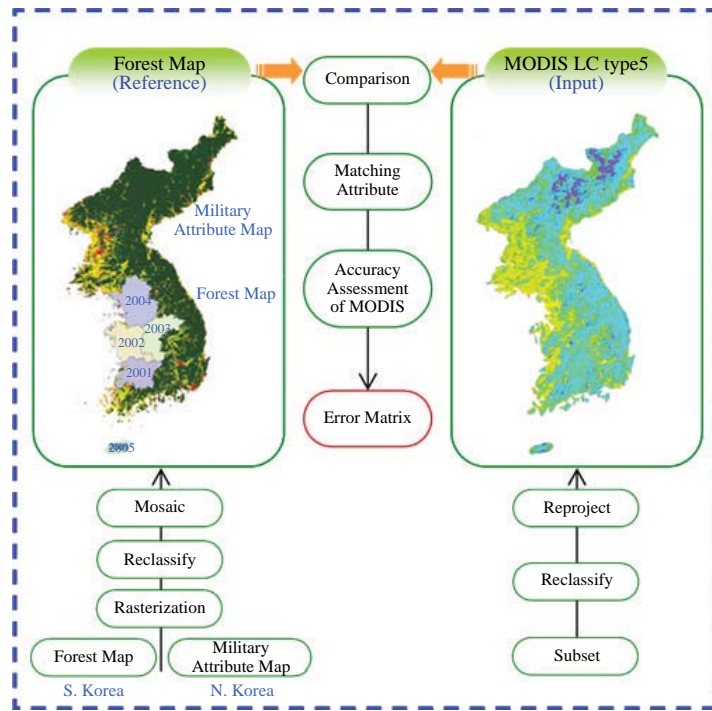


Fig. 3. Comparison between Land cover from MODIS and forest map in the Korean peninsula.

EIPS)과 아시아 배출저리시스템(SMOKE-Asia, Woo *et al.*, 2012)의 결합을 통해 각각의 장점들을 통합한다면, 동아시아 지역에서 수행되는 모델링 연구의 공간적 해상도와 배출량의 질을 향상시킬 수 있을 것이다.

또한, 대기오염 물질 배출량 자료들은 물질별 연간 총량을 산정하고 있어, 모델에서 요구하는 시간 해상도로의 할당이 필요하다. 배출량의 실질적인 시간별 배출 양상을 고려하기 위하여 각 배출원의 시간적인 배출 특성을 고려한 시간 할당은 매우 중요한 논의점이다. 한국 및 아시아 지역을 대상으로 모델 배출 자료 작성 과정에서 미국 환경청 등 외국에서 개발되어 이용 중인 각 배출원별 시간 할당 계수를 대부분 차용하고 있으나 각 지역별 특성에 적합한 배출원별 시간할당 계수 개발 역시 매우 필요하다(Woo *et al.*, 2012).

상기한 배출장 프로세싱과 배출장 모델링에 관련한 토의를 바탕으로 동아시아 통합 대기질 모델링의 예측 및 예보 정확성 제고를 위해 가장 시급한 항목들을 요약하면 아래와 같다.

- 한반도 및 한반도의 풍상 지역인 중국의 배출량 및 이들 배출량의 공간 할당 정확도 개선 및 배출 sector별 일간, 주간, 월간, 연간 배출량의 시간 할당(diurnal, weekly, monthly, and inter-annual allocation of emissions)에 대한 연구는 매우 중요하다.
- 한국형 SPECIATE 구축이 필요하다. 개별 또는 주요 SCC (source classification code)에 대한 NMVOC species의 화학종 할당은 오존 형성, OH-HO₂ partitioning 및 이차 유기입자(Secondary Organic Aerosols, SOAs) 형성 연구에 매우 중요하다(Robinson *et al.*, 2007; Volkamer *et al.*, 2006).
- NMVOC와 더불어, NO_x의 배출 절대량과 NO/NO₂ 배출비는 오존 단기에보 시 매우 중요하다. O₃+NO 반응은 오존 적정 반응(titration reaction)으로, 오존 소멸 반응(destruction reaction)은 아니나, 이 반응이 단기 오존 농도 예보의 정확도를 결정할 수는 있다.
- NH₃ 배출 및 대기 중 NH₃ 농도의 정확한 예측은 입자상 NH₄NO₃ 형성 예측에 필수적 요소이므로,

동아시아 NH₃ 배출의 정확도 제고가 필요한 이유이다(Song *et al.*, 2008; Kim *et al.*, 2006).

- 여름철 동아시아에서 BVOC 배출량 예측의 정확도 개선을 위한 연구 방법론의 확립 및 개선이 필요하다.
- 현재 동아시아 통합 대기질 모델링에서 불확도(uncertainty)가 가장 큰 부분은 배출장이라고 추정되며, 향후 이의 개선을 위해, 기존의 상향식(bottom-up) 배출 자료뿐만 아니라, 인공위성 자료에서 계산되는 하향식(top-down) 배출 자료의 동시적 활용도 필히 고려되어야 할 것이다. 특히, 중국과 한반도에서 공간 및 시간 할당의 정확도를 제고하는 방법 중 하나로 향후 GEO 인공위성 자료가 매우 유용하게 활용될 수 있을 것으로 예상되고, 더욱 중요하게는 상향식 배출 자료에 대한 자료 확보가 어려운 북한 배출량의 경우에는 하향식 배출장 자료의 이용 및 축적이 요구된다. 하향식 배출장에 관련해서는 본고의 “인공위성 활용”에서 다시 한번 논의하고자 한다.

2.2 기상모델링 기술의 현황과 발전방향

정확성 높은 기상장의 산출은 배출장과 함께 대기질 예보의 예측성을 향상시키기 위한 중요한 요소

중 하나이다(그림 1 참조). 기상장의 정확성을 향상시키기 위해서는 기상 모형의 전반적인 과정에 대한 개선이 요구된다. 관측의 양적 및 질적 향상과 자료 동화 과정의 연구를 통한 초기 조건의 개선, 전구모델과의 동지 격자모델링(nested-grid modeling)을 통한 지역 기상 모델링의 경계조건 개선, 기상모델의 역학과정 및 물리과정의 개선 등이 진행되어야 할 것이다. 기상 모델들은 각각 다른 역학과정과 물리과정으로 구성되기 때문에 예측 성능의 차이가 나는 원인을 찾고 모델의 성능을 향상시키기 위해서 각각의 특성을 정확하게 파악해야 한다. 특히, 정확한 대기질 예측·예보 모델링을 위해서는 기상 예보 모델과의 연계 과정이 중요하다. 따라서, 본 장에서는 현재 국내외에서 기상 예보 및 기상 모델링을 위해 현업으로 사용 중인 기상모델의 발전 과정과 특징을 살펴본 후 대기질 감시 및 예보를 위한 기상모델의 발전 방향을 기술해 보고자 한다.

2.2.1 국내외 현업 단기 기상 예보모델

표 3은 국내외 기관에서 단기 기상예보를 위해 활용중인 현업 기상모델을 간략하게 요약하였다. 표 3에서 언급한 국가 중, 한국을 제외한 대부분의 국가는 독자적인 현업 기상모델을 개발하여 활용하고 있

Table 3. Meteorological models for numerical weather prediction.

Nation	Organization	Operational model	Horizontal resolution	Vertical levels	Numerical method
EU	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)	Integrated Forecast System (IFS)	~10 km	L91	Spectral
United Kingdom	United Kingdom Meteorological Office (UKMO)	Unified Model (UM)	~25 km	L70	Finite differential
USA	National Centers for Environmental Prediction (NCEP)	Global Forecast System (GFS)	~22 km	L64	Spectral
Japan	Japan Meteorological Agency (JMA)	Global Spectral Model (GSM)	~15 km	L60	Spectral
German	Deutscher Wetterdienst (DWD)	Global MEteorological model (GME)	~20 km	L60	Finite differential
China	China Meteorological Administration (CMA)	Global and Regional Assimilation and Prediction System (GRAPES)	~30 km	L60	Spectral
Korea	Korean Meteorological Administration (KMA)	Global Data Assimilation and Prediction System (GDAPS)	~35 km	L40	Spectral
		Unified Model (UM)	~25 km	L70	Finite differential
	Korea Air Force (KAF)	Global and Regional Integrated Model System (GRIMs)	~25 km	L64	Spectral

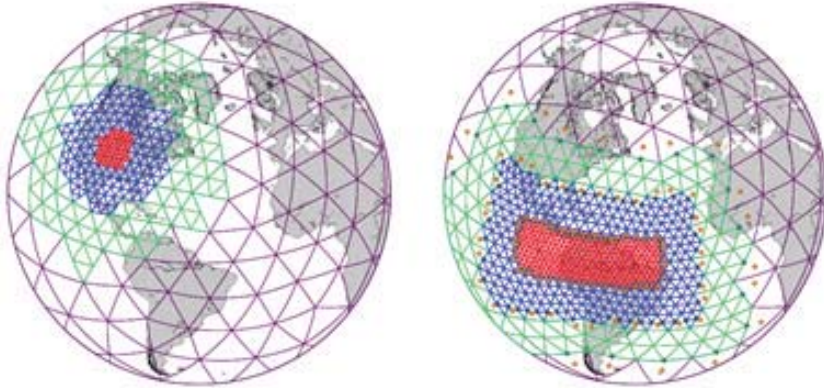


Fig. 4. Icosahedral grid system.

으며, 현재 한국에서도 한국형 수치모델 개발 사업단 (Korea Institute of Atmospheric Prediction Systems: KIAPS)에서 독자 모델을 개발하는 과정에 있다. 대부분의 현업 모델은 10~30 km의 수평 해상도와 연직 방향으로 40~90개의 층으로 나누어 수치적분을 수행하고 있지만, 지속적으로 보다 고해상도의 모델로 발전하려는 계획을 가지고 있다. 고해상도를 추구하기 위해서 계산 시간의 단축을 위한 노력 또한 병행되고 있는데, 예를 들면 NCEP (National Centers for Environmental Prediction)은 모델의 전체 구성을 Earth System Modeling Framework (ESMF, Hill *et al.*, 2004)를 사용하여 계산 효율을 높였고, JMA (Japan Meteorological Agency)는 계산 시간 단축을 위하여 reduced Gaussian grid system (Hortal and Simmons, 1991)으로 개선하였다. 독일 기상청 (Deutscher Wetterdienst, DWD)은 고해상도에서 스펙트럴 모델의 계산 효율이 떨어지는 단점을 보완한 icosahedral 역학체계를 처음으로 도입하였으며 (그림 4), 독일 기후연구소인 Max-Planck-Institute for Meteorology (MPI-Meteorology)와 함께 공동 연구로 지역적으로 상세한 변동 격자를 사용할 수 있는 삼각형 6각-20면체 격자에서 완전 압축성 비정수역학 방정식을 해결하는 것을 추진할 예정이다.

각 국가는 독자적 모델의 개발 및 활용을 추구하면서 동시에 국가별 긴밀한 협조 관계를 유지하며 지속적인 개선을 추진 중이다. 중국 기상청에서 개발 및 운영하는 GRAPES (Global/Regional Assimilation and Prediction System) 모델은 2000년 개발 초기부

터 National Center for Atmospheric Research (NCAR)의 Weather Research & Forecasting (WRF) 모델 그룹과 정기적 공동 워크숍 등을 통한 긴밀한 협조 하에 개발되어 왔다. 한국 기상청은 1998년 일본 기상청 (JMA)으로부터 GDAPS (Global Data Assimilation and Prediction System)를 도입하여 수치예보 시스템에 사용하기 시작하였으며, 이후 우리 환경과 실정에 맞게 성능 개선을 지속적으로 추진하고 있다. 한국은 좁은 면적에 비해 복잡한 지형을 가지고 있어서 상대적으로 기상 예보에 큰 어려움이 있으며 이를 개선하기 위해서 GDAPS 모델은 지표 근처에서는 시그만 좌표계, 상층에서는 기압 좌표계로 표현되는 hybrid sigma-pressure 좌표계를 사용함으로써 하층 경계 조건을 잘 나타내고, 험한 산악 지대와 같은 고지대에서 기압 경도력의 유한 차분 오차를 줄일 수 있도록 개선되었다. 현재 한국 기상청은 2008년 5월에 차세대 모델로써 기상 단기예보 정확도 세계 2위 수준인 영국 통합모델 (UM, Unified Model)을 도입하여 2010년에 차세대 수치예보 시스템으로 현업 운영을 시작하였다. 한편, 한국공군 (Korea Air Force)에서는 연세대에서 개발한 GRIMs (Global and Regional Integrated Model System, Hong *et al.*, 2013)를 도입하여 2012년 3월부터 군 작전 예보에 현업으로 운영 중이다. GRIMs는 전지구에서 지역, 날씨 예보 및 계절, 기후 예보에 사용할 수 있는 통합적인 예측 시스템으로 스펙트럴 모형의 계산 효율성을 향상시킨 이중 스펙트럴 (Double Fourier Spectral) 역학 코어를 포함한다. 미국 기상청 (NOAA)에서는 차세대 전지구 모형으로 icosahedral

방법의 역학코어와 GRIMs 물리과정 패키지를 접합한 모델을 사용하여 전지구 격자 4 km의 실시간 예보 시스템을 구축 중이다.

2.2.2 기상 모델링의 주요 기술과 발전 방향

기상 모델링의 정확도 개선을 위해서는 자료동화 기술을 포함한 다양한 기술의 개선이 요구되지만, 본 장에서는 자료동화 기술과 행성 경계층 모수화 방안에 관해서 주로 논의하고자 하며, 기타 통합 대기질 모델링의 성능 향상이란 관점에서, 기상 모델링 부문에서 개선되어야 할 사항은 다음 절에서 요약해 제시하고자 한다.

2.2.2.1 자료동화 기술

현업용 단기 기상예보 모델에 적합한 핵심 동화기술로 4차원 변분(4-DVAR) 자료동화 기법을 들 수 있다. 4차원 변분 자료동화 기법은 수반 모델(adjoint model)이 있어야만 구현할 수 있는 방법이며, 수반 모델은 임의의 섭동장(perturbation field)을 입력 값으로 받아들여서 그 섭동장의 원인이 되는 과거 시간의 섭동장을 찾아준다. 수반 모델을 개발함으로써, 4차원 변분 자료동화 기법의 구현뿐만 아니라, 한반도 상에서 벌어지는 기상 현상의 원인을 명확히 밝히는 것에도 기여할 수 있다. 4차원 변분 자료동화 기법을 구현하기 위해서는 배경 오차 공분산(covariance)이 필요하다. 모든 기상 상태에 대하여 같은 배경 오차 공분산을 사용하여 자료동화 과정을 수행할 수도 있겠으나, 더 정확한 예보를 위해서는 기상 상태에 따른 적합한 배경오차 공분산을 계산하여서 사용하는 것이 필요하다. UM 모델의 자료동화 시스템에서 해당하는 모듈을 떼어내어 이식하거나, 한반도 상의 기상현상을 위한 자료동화 시스템 구축에 적합하게 알고리즘의 향상을 도모할 수도 있다.

현업용 기상모형에 적합한 또 다른 핵심 동화기술로 앙상블 칼만필터(ensemble Kalman filter) 기법을 들 수 있다. 앙상블 칼만 필터는 수반 모델을 요구하지 않는다. 기법 자체를 구현하는데 있어서는 4차원 변분 자료동화 기법보다 개발시간이 적게 소요된다. 계산 자원의 한계로 인해서 사용할 수 있는 앙상블의 수가 한정되므로 적은 수의 앙상블로 가장 좋은 효과를 얻을 수 있도록 최적의 앙상블을 생성하는 기술이 필요하다. 이미 개발되어 있는 NCAR의 Data

Assimilation Research Testbed (DART)가 공개하고 있는 앙상블 칼만 필터 코드나 각국의 센터에서 연구 보고하고 있는 기법들을 실험해 볼 필요가 있다. 앙상블 칼만필터 기법은 모델 변수와는 다른 차원의 제어변수들을 이용하여 구현될 수 있다. 앙상블 예보 결과들을 이용하여 배경오차 공분산을 생성하는 과정은 4차원 변분 자료동화 시스템의 배경오차 공분산 생성 모듈을 이용하여서 구현될 수 있다. 경계조건 업데이트 과정의 경우는, 경계조건 자체를 섭동시켜서 앙상블을 생성하여 이를 극복하는 방식을 취할 수 있으나, 대규모 역학적 균형들은 4차원 변분 자료동화 시스템의 해당 모듈을 이용함으로써 적절히 이루어질 수 있다.

자료동화는 기법 자체도 중요하지만, 활용되는 관측 자료의 정확성 및 활용도 역시 중요하다. 독일 기상청의 보고에 따르면, 2008년에 비하여 2011년에는 위성 기술의 발달로 인해 위성 자료의 분량이 약 10 배정도 늘어난 것을 보고하였다. 더욱이 우리나라의 경우는 2010년에 통신헤양기상위성인 COMS를 발사하였으며, 2018~2019년에는 정지궤도 복합위성인 GEO-KOMPSAT이 발사 예정이므로 이러한 정지궤도 위성으로부터 많은 자료가 제공될 것이며 이의 활용도는 매우 높을 것이다. 이러한 정보를 효과적으로 동화하기 위해서는 위성관측 자료를 보다 효율적으로 제어할 관측 연산자를 개발해야 하고 어느 정도의 해상도로 공간 평균을 하여 자료를 받아들일지 결정하는 민감도 실험이 필요하다. 또한, 자료동화 과정을 개선하기 위해서는 품질 검사 과정의 효율성과 정확도를 높이는 것이 중요한데, 이를 위해서는 품질 검사가 완료된 자료를 메타 데이터화하여 관리하고 이에 대하여 실시간 접근이 가능하도록 자료관리 과정을 개선해야 할 것이다.

2.2.2.2 행성경계층 (Planetary Boundary Layer) 모수화 (Parameterization) 방안의 현황과 발전 방향

행성경계층 모수화 방안은 물리 과정(physical process) 모수화 방안에 포함되며, 선행 연구를 통해 수치 예보 모델의 예보 결과는 행성 경계층 모수화 방안에 매우 민감함이 보고되었지만, 여전히 매우 큰 불확실성을 가지고 있다(Li and Pu, 2008; Steeneveld et al., 2008; Braun and Tao, 2000; Hong and Pan, 1996;

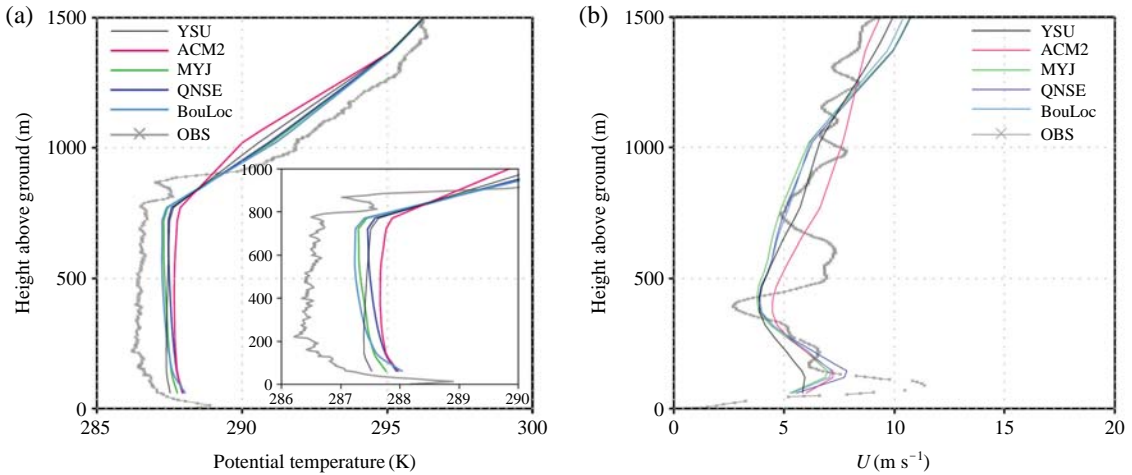


Fig. 5. Vertical profiles of (a) simulated potential temperature (K), (b) wind speed (m/s) with corresponding radiosonde soundings (grey lines with cross marks) (Shin and Hong, 2011). The simulated results are from the YSU (black), ACM2 (red), MYJ (green), QNSE (blue), and BouLoc (light blue) experiments. In (a), the inset provides a closer look at the temperature profiles in the lowest 1,000 m.

Holtslag and Boville, 1993). 또한, 행성 경계층의 높이는 대기 오염 예측 및 예보에 있어서 연직 방향으로의 오염물질의 혼합을 결정하기 때문에, 기상 모델링에서 행성 경계층의 정확도는 대기 수송 모델링에서 오존이나 미세 먼지 농도의 계산 정확도에 매우 큰 영향을 준다. 실제로 Wyoming 지역 등에서 겨울 스모그(winter smog)는 30~80m 정도의 낮은 행성 경계층에 의한 오염 물질 농축 효과가 큰 역할을 하고 있는 것으로 보고된 바도 있다(Schnell *et al.*, 2009).

행성 경계층 모수화 방안은 일반적으로 “국지적(local) 방안”과 “비국지적(non-local) 방안”으로 분류한다. 국지적(local) 방안이란 난류에 의한 어떤 지점에서의 기상 변수의 변화량을 동일한 지점의 값, 혹은 인접한 지점의 기상 변수 값을 사용하여 표현하는 방안을 의미하고, 비국지적(non-local) 방안은 이와 다르게 어떤 지점에서 난류에 의한 기상 변수의 변화를 표현하는 데에 인접한 지점뿐만 아니라 여러 지점에서의 값을 고려해 주는 방안을 의미한다.

행성 경계층의 모수화 방안은 하층 제트의 세기, 강수를 동반하는 대류현상 등의 기상모형의 결과에 영향을 미치기도 하지만(예: Shin and Hong, 2011; Hong and Pan, 1996), 기상모형을 설계할 때, 최하층의 높이가 행성 경계층의 모수화의 적합성을 결정하

기도 한다(Shin *et al.*, 2012). Shin and Hong (2011)은 5개의 행성 경계층 모수화 방안을 사용하여 모의한 낮 시간대와 밤 시간대의 기상장의 연직 프로파일을 Cooperative Atmosphere-Surface Exchange Study-1999 (CASES-99) (Poulos *et al.*, 2002) 관측 프로그램 중 하루의 관측 값에 대해 비교·검증하였다(그림 5). 선택된 5개의 PBL 방안은 2개의 비국지적 방안인 Yonsei University (YSU) PBL (Hong, 2010; Hong *et al.*, 2006), Asymmetric Convective Model version 2 (ACM2) (Pleim, 2007) 방안과 3개의 국지적 방안인 Mellor-Yamada-Janjic (MYJ) (Janjic, 1990), Quasi-Normal Scale Elimination (QNSE) (Sukoriansky *et al.*, 2005), Bougeault-Lacarrere (BouLac) PBL (Bougeault and Lacarrère, 1989) 방안이다. Shin and Hong (2011)에 따르면, 비국지적 방안인 YSU PBL 방안과 ACM2 방안은 이러한 구조를 비교적 잘 모의하는 반면(그림 5a), 국지적 방안인 MYJ, QNSE, BouLac PBL 방안은 불안정한 온도 프로파일을 모의한다. 밤 시간대의 안정한 경계층에서는 모든 행성 경계층 모수화 방안이 바람장의 연직 혼합을 강하게 계산함으로써 하층 제트(low level jet)의 세기를 과소 모의하고 있다(그림 5b). 행성 경계층 모수화 방안에 따른 최하층 높이에 대한 민감도는 각각의 행성 경계층 모수화 방안의

Table 4. Operational strategy for numerical weather prediction using WRF model.

	DM1	DM2	DM3
Model version		WRF v3.4	
Vertical layer		31 layers	
Resolution	18 km	6 km	2 km
Grids	230 × 170	211 × 211	250 × 250
Forecasting duration	84 hrs	84 hrs	24 hrs
Microphysics	WSM3		WDM6
Cumulus PBL	Kain-Fritch	Kain-Fritch	None
		YSU-PBL	
Radiation	RRTMG (LW)/RRTMG (SW)		
Land surface model	Noah LSM (OML, MODIS data)		

알고리즘과 연관지어 설명할 수 있었다. 이에 따라 행성 경계층 모수화 방안의 알고리즘을 최하층 높이에 민감하지 않게 수정함으로써, 최하층 높이에 의한 비현실적 효과를 완화시킬 수 있을 것이다.

2.2.2.3 기상 모델 운영방안

기상 모델링의 정확성은 모델 자체의 개선도 중요하지만, 사용자의 운영 능력에 의해서도 결정된다. 현재 운영되는 모델들은 영역별로 자체의 여러 가지 schemes이 제공되고 있고, 모델링의 해상도 및 목적에 따라 이들을 운영하는 방법이 달라져야 하며, 이러한 schemes의 운영 방법이 기상 모델링의 결과에 영향을 미친다. 따라서, 본 장에서는 WRF 모델을 대상으로 기상예보의 목적에 따른 모델의 해상도 및 운영방안을 제안하여 보았다(표 4). 84시간 예보를 위해서는 18 km 또는 6 km의 수평 해상도를, 24시간 예보를 위해서는 2 km의 수평 해상도를 제안한다. 연직 해상도, 복사, 구름 및 지표모델 등은 해상도에 따라 동일하게 적용하고, 미세물리(microphysics)에 관련된 schemes에서는 수평 해상도가 18 km인 경우에는 3-class Microphysics scheme (WSM3)을 적용하고, 6 km인 경우에는 WRF Double-Moment 6-class (WDM6)를 적용할 것을 제안한다.

2.2.2.4 대기질 모델링을 위한 기상 모델(링) 개선 사항

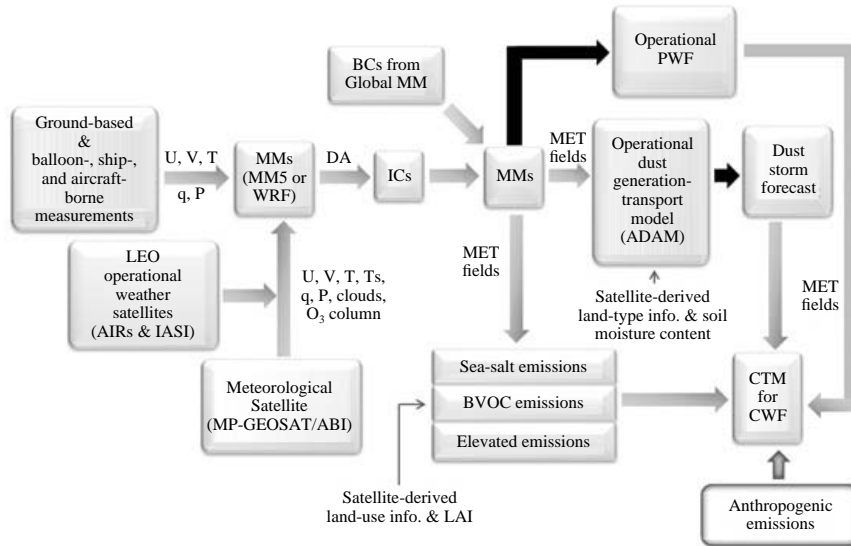
통합 대기질 모델링의 예측·예보 정확성을 제고하기 위한, 기상 모델의 개선 및 기상 모델링 운용에서의 개선 사항을 정리하면 다음과 같다.

- 앞서 설명한 바와 같이, 기상 모델에서 정확한 PBL

(Planetary Boundary Layer) 및 MBL (Marine Boundary Layer)의 높이 계산은 정확한 대기질 예측 및 예보를 위해 매우 중요한 요소이다.

- 지역 기상장 모델링 실행 시, 전구 기상 모델의 결과를 지역 기상 모델링의 경계조건(Boundary Conditions, BCs)으로 사용하여, 지역 기상 예측의 정확성을 높이는 것이 필요하다. 또한, 앞서 언급한 바와 같이 선진적인 자료동화 시스템을 이용하며, 다양한 측정 자료와 결합하여 초기장(Initial Conditions, ICs)의 정확도를 향상시키는 것 또한 기상 예보 및 대기질 예보 정확성을 개선시키는 데 매우 중요한 요소이다(이와 관련해서는 그림 6(a) 참조).
- 강수량 및 강수 분포 예측에 있어, 기상장 모델링의 정확성은 대기질 모델링에서도 매우 중요하다. 일반적으로 강수 후 에어로솔과 오존 농도의 현격한 감소가 관찰되는데, 이는 강수에 의한 에어로솔과 오존 전구물질의 습식 제거(below-cloud scavenging)에 의한 것이다. 또한, 강수 후에는 새 입자 형성(nucleation bursting)이 자주 발생한다. 따라서, 강수의 정확한 예측은 대기질 예측 및 예보에도 매우 중요하며, 또한 동아시아 aerosol indirect forcing 연구를 위해서도 또한 중요하다. 앞 절에서 언급한 바, WRF 모델 사용 시, WDM6 double moment scheme을 이용한다면 구름응결핵, 구름 및 빗방울의 수 농도 등의 예측 정확도를 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.
- 위에서 언급한 항목과 연계하여 에어로솔과 구름의 상호 작용에 대한 개선 역시 필요하다.
- 정확한 기상장은 또한 정확한 배출장 계산에도 중요하게 사용된다. 정확한 온도 및 복사량 예측은 여름철 isoprene이나 mono-terpene과 같은 BVOC 배출량 계산에 매우 중요하며, 정확한 바람장, 기압 배치 및 토양 수분량(soil moisture content)의 예측은 동아시아 봄철 황사 발생량 예측에 중요하다. 또한, 토지 수분량은 여름철 토양에서의 NO_x 및 OH 배출량 추정에도 매우 중요하다(이와 관련해서는 그림 6(a) 참조). 특히, 2013년 1~2월 중국 CEC (Central East China) 지역에서 관측된 고농도 에어로솔 연무 사례(PM₁₀ 기준 500~1,000 μg/m³)는 겨울철 해동기 토양 및 잔설의 수증기가 에어로솔의 성장(particle growth)에 영향을 미친 연무 사례로 보인다.

(a) NWP (Numerical Weather Prediction)



(b) CWF (Chemical Weather Forecasting)

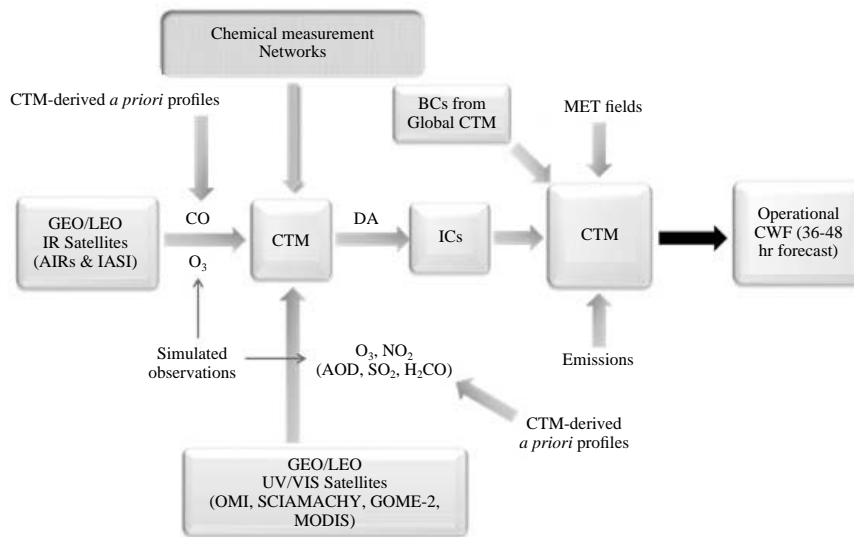


Fig. 6. Structures and flow diagrams of (a) numerical weather prediction (NWP) and (b) chemical weather forecasting (CWF) systems.

2.3 화학수송 모델링 기술의 현황과 발전 방향

화학수송 모델링(또는 대기질 모델링)은 대기 중 에서 이류·난류확산 및 반응하는 가스상 및 입자상 물질의 배출, 반응 및 침착 과정을 수치적으로 계산

하여 시·공간적 분포를 가상적으로 구현하는 방법 이다. 화학수송 모델링은 앞에서 언급한 배출장과 기상장을 주요 입력장으로 활용하기 때문에 이들의 정확성이 화학수송 모델링의 정확성에 큰 영향을 미친 다(그림 1 참조). 그러나, 배출장과 기상장의 정확성

을 극대화하여도 여전히 모델 자체의 물리·화학적 모수화 및 초기/배경 조건의 불확실성에 기인하여 상당한 오차를 내포하고 있다. 이러한 이유로 화학수송 모델 자체의 개선을 위한 많은 노력들이 있어 왔으며, 목적 및 대상지역에 따라 다양한 모델이 활용되고 있는 상황이다. 따라서, 화학수송 모델링의 발전방향을 논의하기 이전에 각 국가에서 대기질 모델링을 위해 사용하고 있는 화학수송 모델의 종류와 활용 방안에 대한 이해가 우선시되며, 이를 바탕으로 화학수송 모델의 개선방향에 대한 논의가 필요할 것으로 보인다.

2.3.1 국가별 대기질 예보를 위한 화학수송 모델 운영 현황

3차원 화학수송모델링은 국가별 기관별로 운용 모델 및 방법에서 어느 정도의 차이를 보이고 있다. 한 예로, 미국의 경우는 US EPA (United States Environmental Protection Agency)에서 주관하여 CMAQ 모델을 개발하고 있으며, NOAA에서는 모델 운영 결과를 활용하여 대기질 단기에보를 실시하고 있다. CMAQ 모델의 개발은 AER (Atmospheric and Environmental Research) Inc., Environ. Inc. 및 대학 연구소에서 개발한 모듈을 결합하는 방식으로 진행되며, 자문그룹과의 회의를 통해 모델의 개발 방향이나 과학적 지향점 등이 결정된다.

프랑스는 유럽에서 대기질 단기에보가 가장 활성화된 것으로 판단된다. 환경/에너지/지속발전/해양부의 주도하에 PERVAIR (www.prevoir.org)라는 project가 2003년부터 진행되었으며, CHIMERE라는 대기화학수송 모델을 이용하여 O₃, CO, PM_{2.5}, NO₂의 대기질 단기에보가 수행되었다. CHIMERE modeling의 개발은 CNRS/IPSL (Centre National de la Recherche Scientifique/Institute Pierre Simon Laplace) 및의 LMD (Laboratoire de Météorologie Dynamique)에서 담당하고 있고, 이를 이용한 실질적 단기에보의 수행은 프랑스 환경부 산하 국립환경연구소인 INERIS (French National Institute for Industrial Environment and Risks)에 의해 수행되고 있다. 독일에서도 Rhenish Institute of Environmental Research of Cologne (RIU)를 중심으로 대기질 예보를 위한 연구가 진행 중이다. MM5, EURAD-CTM 및 EEM (EURAD Emission Model)으로 구성된 European Air Pollution Disper-

sion (EURAD) model system을 활용하며, Europe, Central Europe, Northern Hemisphere, Germany, Northrhme-Westfalia, Bavaria, Lower Saxony, Meclenburg-Vorpommern 등의 다양한 영역에 대한 대기질 단기에보를 수행하고 있다. 상기한 6개 모델링 영역에 대하여 O₃, NO₂, CO, SO₂, C₆H₆, PM₁₀의 총 6종의 대기오염 물질 예보업무가 수행 중이며, EU 예보 기준에 따른 6가지 상태 (very good, good, satisfactory, sufficient, poor, very poor)로 대기질을 구분하여 대기질 상태를 예보하고 있고, 관측 자료와의 비교를 통한 예보 자료의 검증 내용도 함께 제공한다.

이 외에도 유럽을 포함한 여러 국가에서 대기질 예보를 수행 중이지만 (표 5 참조), 아시아 국가들에서의 대기질 예보를 위한 현업 시스템은 아직 구축되지 못한 실정이다. 다만, 우리나라를 비롯한 중국과 일본에서 대기질 예보 시스템 개발을 위한 연구가 활발히 진행 중에 있다. 일본에서는 Kyushu 대학, NIES (National Institute for Environmental Studies), JAMSTEC (Japan Agency for Marine Science and Technology) 등에서 대기질 예보에 관한 연구를 활발히 진행 중이며, 중국에서는 IAP (Institute of Atmosphere Physics)의 Z. Wang 교수팀에서 Beijing 지역을, Nanjing 대학의 T. Wang 교수팀에서 Shanghai 지역을 대상으로 대기질 단기에보에 대한 연구를 진행하고 있다. 국내에서는 아직 대기질 예보 모델 및 대기질 예보 시스템 개발이 이루어지고 있지 않지만, 대기질 연구를 위한 여러 가지 모델링 시스템이 구축되어 있다. 대기질 연구를 위해 사용 중인 주요 대기화학 수송모델링은 현재 국내에서 MM5/WRF-CMAQ이 가장 빈번하게 활용되고 있고, 또 다른 중규모 지역모델인 MM5/WRF-CAMx와 WRF-CHEM, 그리고, 전구규모 모델인 GEOS-CHEM이 활용되고 있다. 중국 및 일본에서 개발될 대기질 예보 시스템은 향후 우리나라에서 개발될 대기질 예보 시스템과의 연계를 통해 동아시아에 대한 보다 정확한 대기질 예보 및 감시 시스템의 구축을 가능하게 할 것으로 판단된다.

2.3.2 화학수송모델링 개선방향

3차원 통합 대기질 모델링의 정확성은 앞에서 언급한 배출장과 기상장이 매우 중요하지만, 이외에도 물리·화학적 모수화에 따른 모델 자체의 모사 능력, 해상도, 초기 및 배경조건 등에 의해서도 결정된다.

Table 5. Status of air quality modeling system operated by European countries.

Nation	Institute	Model and input data	Air quality forecast		etc.
			Species	Domain	
EU	MACC	MOZART (CTM), MPI-M (CTM), MOCAGE (CTM), TM5 (CTM), ECMWF (MET), FP5 RETRO, GFEDv2, AEROCOM, EDGAR (emission)	CO, O ₃ , NO ₂ , SO ₂ , HCHO, AOD, aerosol	Globe, EU	▶ funded by EU ▶ organized by European Centre for Medium-Range Weather Forecast (ECMWF) and managed by 36 institutes
Finland	Finnish meteorological institute	SILAM TNO-MACC (Anthropogenic emissions) ECMWF IFS forecasts (MET)	SO ₂ , NO, NO ₂ , O ₃ , CO, PM _{2.5} , PM ₁₀	EU, Finland	▶ operated and developed by Finnish meteorological institute
UK	UK-AIR	WRF-CMAQ	Ozone, NO _x , NO ₂ , SO ₂ , PM ₁₀ , PM _{2.5}	EU, UK	▶ Operated by Ricardo-AEA in Defra and the Devolved Administrations ▶ Observations are also available
Austria	BOKU-Met	Air-Quality model for Austria (AQA)	O ₃	Austria	
Spain	UPM	OPANA UPM MM5-CMAQ and WRF/CHEM-EMINO	Ozone, CO, NO ₂ , SO ₂ , NH ₃ , PM ₁₀ , PM _{2.5}	EU	
Italia	ARPA Lombardia	MINERVE/SurfPRO-FARM	NO ₂ , PM ₁₀	Lombardy	
Greece	NKUA-AUTH	MM5-CAMX	Ozone, NO, NO ₂ , CO, SO ₂ , NH ₃ , Rn, PM _{2.5}	EU, the Balkan Peninsula	
Poland	Warsaw University of Technology	GEM-AQ	Ozone, CO, NO ₂ , SO ₂	EU, Poland	
Canada	Environmental Canada	AURAMS (CTM), GEM (MET model) Canadian NPRI and US-EPA (emissions)	O ₃ , PM _{2.5} , PM ₁₀	North America	▶ Operated and managed by Environmental Canada
Australia	Center for Atmospheric Chemistry	GEOS-CHEM (CTM)		Globe, Australia	▶ Operated by University of Wollongong

Table 6. Satellites and instruments relevant to air quality and atmospheric composition.

Satellite	EP	ERS-2	Terra	Envisat		Aura			METOP		GOSAT	Geo-KOMPSat
Sensor	TOMS	GOME	MOPITT	SCIA-MACHY	MIPAS	HRDLS	OMI	TES	IASI	GOME2	TANSO	GEMS
Orbit	PS	PS	PS	PS	PS	PS	PS	PS	PS	PS	PS	GEO
Launch	1979	1995	1999	2002	2002	2003	2003	2003	2007	2007	2009	(2018)
O ₃	○	○		○	●	○	○	○	○, ●	○		○
H ₂ O	○	○		○		○		○				
CO			○	○	●					○		
NO				○	●	○						
NO ₂		○		○	●	○	○		○	○		○
HNO ₃					●	○		○	●			
CH ₄			○	○	●	○		○	○		○	
HCHO		○		○			○					○
SO ₂		○		○			○			○		○
BrO		○		○						○		
CO ₂				○					○		○	
Aerosol	○			○			○	○		○		○

○: Column, ●: Profile

PS: Polar sun-synchronous, GEO: Geostationary

또한 기상 모델과 화학수송 모델의 결합 여부도 화학수송 모델링의 결과에 영향을 미친다(Baklanov *et al.*, 2010). 따라서, 본고에서는 화학수송 모델링의 불확실성을 야기하는 각 요인들을 개선하는 방법을 논의하고자 한다.

화학수송모델의 정확성, 특히 대기질 단기 예보의 정확성을 결정하는 요인으로 초기 및 배경 조건의 정확성을 고려할 수 있다. 특히, 대기질 단기 예보의 수치 적분에 있어 정확한 초기 조건의 입력은 매우 중요하다. Spin-up 구동을 통해 초기 조건은 실제 대기질의 상태에 근접하도록 일정 부분 보정되지만, 배출장 및 기상장의 불확실성에 의해 여전히 큰 불확실성을 내포한다. 이러한 단점을 극복하기 위해서, 기상 단기 예보 시스템과의 유사성에 기초해서 지상 및 항공, 선박 측정 자료 및 위성 측정 자료를 자료 동화하여 초기 조건을 생성·마련하는 방안이 필요하다(그림 6(a) 및 (b) 참조). 이 방법은 ECMWF의 현업 CO 및 AOD의 전구 대기질 예보에 실제 이용되고 있는 방법이며, 오존 및(초)미세먼지 단기 예보를 위한 활용 방안에 대해서도 현재 활발히 연구가 진행되고 있다. 단, 위성으로부터 제공되는 자료는 주로 연직 분포를 포함하지 않은 연직 적분 값이고, 고려되는 모든 대기질 성분을 포함하지 않기 때문에(표

6), 위성자료를 직접적으로 초기조건으로 활용하기 위해서는 기술적 어려움이 있다. 따라서, 위성자료를 가공하여 화학수송 모델의 초기조건을 생성하는 방법에 대한 연구가 필요할 것이다. 특히, 에어로솔의 광학적 특성(예, AOD)을 활용하여 에어로솔을 구성하는 성분별 농도를 환산하는 방법을 통해(초)미세먼지 단기 예보(Particulate Matter forecast)를 위한 초기 조건을 마련 할 수 있을 것이다. 이 때, 성분비 및 연직분포에 대한 가정이 필요하기 때문에 많은 민감도 실험을 통해 방법의 보완이 선행되어야 할 것이다. 한편, 최근 중요시되는 장거리수송 등의 영향으로 배경 조건의 중요성이 역시 부각되고 있다. 특히 한반도의 경우는 중국으로부터 유입되는 대기오염물질의 양이 한반도의 대기질을 결정하는 데 큰 비중을 차지하기 때문에 작은 규모로 대기질 모델링을 실시하거나, 등지 격자 모델링(nested-grid modeling)을 실시할 때 배경조건의 중요성은 매우 크다.

화학수송모델과 기상모델은 물리 및 화학적 과정이 상호 밀접한 관계를 이루고 있음에도 불구하고, 현재까지 빈번하게 사용되고 있는 대기질 모델링은 오프라인(off-line) 모델로, 화학·수송 과정과 기상 과정을 개별적으로 취급해 왔다. MM5나 WRF로부터 계산된 기상 요소는 화학수송 모델(예: CMAQ)에

주어진 시간간격에 따라서 적분과정을 수행한다. 이런 방법을 이용한 모델을 one-way interactive model 이라고도 하고, 기상적 요소와 화학적 요소의 분리로 인해 대기질의 변화에 의한 기상 요소의 변화를 경우에 따라 모의하지 못하며, 이러한 기상 요소의 변화는 화학수송 모델링에 반영되지 않는다. 실제로, 대기질의 변화는 “구름 정보” 및 “에어로솔과 오존에 의한 복사 에너지의 분포 및 크기”를 변화시킨다. 그러나 오프라인 모델에서는 이러한 구름 정보의 변화와 복사 에너지의 변화가 기상 모델링에 반영되지 않으며, 이는 다시 화학수송 모델링에서 강수에 의한 에어로솔의 소멸과정 등을 구현하는 데 한계로 작용한다. 이러한 기존의 오프라인 모델의 단점을 개선하기 위해서 최근에는 WRF-CHEM 및 WRF-CMAQ 등의 온라인(on-line 혹은 two-way coupled model) 모델의 개발·활용이 점차적으로 증가하고 있다(Pleim *et al.*, 2008; Grell *et al.*, 2005, 2000). 따라서 장기적인 관점에서, 대기질 예보의 정확한 예측을 위해서는, 온라인 모델로의 전환도 바람직 할 것이다.

화학수송 모델은 매우 복잡한 구조를 가지며, 다양한 하위 루틴·모듈로 구성되어 있다. 각 하위 모델의 주요 특징들은 Kukkoen *et al.* (2012)에 의해서 요약된 바 있다. 현재 운영 중인 다양한 화학수송 모델들은 이러한 하위 모델의 결합된 형태라고 할 수 있으며, 하위 모델의 정확성은 화학수송 모델의 정확성을 결정하는 주요 요인이다. 그러나, 모델의 개발자가 아닌 사용자의 입장에서는 하위모델을 개발하고 개선하는 과정보다는 다양한 하위 모델을 연구의 시공간적 영역 및 연구 목적에 부합하도록 운영하는 과정이 더욱 중요할 것이다. 모델에 따른 최적의 운영 체계는 지속적인 민감도 실험 및 다양한 조합 실험을 통해 획득할 수 있을 것이다.

2.3.3 대기질 모델(링)의 성능 개선

대기질 모델의 일반적인 성능 향상을 위해서는 다양한 노력이 필요하지만, 본 절에서는 동아시아 및 한반도에서의 통합 대기질 모델링의 정확도 개선을 위해 어떤 노력이 필요한 지에 대해 간략히 요약하고자 한다.

- 현재의 화학수송 모델은 유기 입자(OAs: Organic Aerosols)의 생성량을 제대로 모사하지 못하고 있다. 예로, 중국 CEC 지역에서 최근 측정된 유기 입

자의 농도는 전체 입자 질량의 30~50% 정도이나(Zhang *et al.*, 2007b), US EPA의 CMAQ 모델로 계산된 유기 입자의 질량비는 대략 10% 미만이다(Song *et al.*, 2008). 따라서, 정확한 미세먼지 단기 예보(PM forecast) 및 동아시아/한반도 대기 정책 수립을 위해서는 유기 입자의 형성 과정에 대한 정확한 모수화가 시급히 요구된다. 또한, 동아시아에서 황산염(sulfate)의 생성량도 낮게 계산되고 있어, 황산염의 비구질 반응에 대한 모수화 개선 역시 필요하다(Robinson *et al.*, 2007; Volkamer *et al.*, 2006).

- 대기 중 및 토양에서의 HONO/nitrite(N(III))와 관련된 반응은 현재 활발히 연구가 진행되고 있는 이슈로서, 특히 동아시아 대도시의 경우 측정된 HONO 농도는 모델에서 계산된 농도보다 훨씬 높다. 따라서, HONO와 관련된 반응은 NO_x를 비롯한 많은 대기 화학종들의 평균 lifetime이나 오존 생성에 큰 영향을 줄 수 있어 이에 대한 신중한 고려가 있어야 할 것이다(Elshorbany *et al.*, 2012; Gonçalves *et al.*, 2012; Su *et al.*, 2011).
- 앞에서 언급한 바와 같이 기상, 대기질 on-line coupling 모델에 대한 장기적인 연구 및 접근은 보다 정확한 대기질 예측 및 예보를 위해 매우 중요한 것으로 예상된다.
- 동아시아 및 한반도 대기질 모델링의 경우 최적의 격자 크기는 배출량 및 기상장 자료의 신뢰성(특히, 배출장 신뢰성)과 연결되어 있으므로 동아시아 및 한반도 배출량과 연계된 대기질 모델링에 있어서 최적 격자(optimized grid-resolution) 크기에 대한 연구가 있어야 할 것이다.
- 대기질 단기 예보의 경우 (1) 배출장의 정확성과 더불어 (2) 초기 조건(ICs)의 정확도가 대기질 단기 예보의 정확도를 결정하는 주요 요소라고 할 수 있으며, 초기 조건의 경우 장기적으로는 다양한 측정값의 활용을 위한 hindcast 방법과 함께 자료 동화 기법에 대한 연구가 필요할 것으로 보인다. 또한, 동아시아 모델링 영역 밖에서 발생한 산불 플룸의 장거리 이동은 모델링 영역 안쪽의 대기질에 큰 영향을 줄 수 있으므로 이를 대기질 모델링의 배경 조건(BCs)으로 고려해 줄 수 있는 기술적 연구가 필요하다.
- 동아시아 및 한반도 대기질 미세 먼지 단기 예보

의 경우 봄철 황사의 발생 및 이동에 대한 고려는 매우 중요할 수 있고, 이에 대한 정확한 모델의 개선·개발이 필요하다.

- 대기질 모델의 모듈 개선에는 매우 다양한 이슈들이 국제적으로 활발히 논의되고 있는 바, 이에 대한 올바른 평가 및 자체 모델 개발 시 이들을 모델 개발에 반영함은 매우 중요하다. 현재 대표적으로 논의되고 있는 연구 주제들로는 (1) N₂O₅의 비균질 반응을 포함한 nighttime 화학(e.g. Davis *et al.*, 2008; Brown *et al.*, 2006; Evans and Jacob, 2005; Riemer *et al.*, 2003), (2) isoprene 및 mono-terpene 화학의 개선(e.g. Butler *et al.*, 2008; Lelieveld *et al.*, 2008), (3) 할로겐족 화학(Halogen chemistry)에 대한 모수화, (4) NO_y 화학 기작 개선, (5) 에어로솔의 습식 및 건식 침적에 대한 모수화 개선, (6) 대기 중 입자들의 혼합 상태(mixing state)에 대한 정확한 모수화(e.g. Song *et al.*, 2012, 2007, 2005) 등이 있다.

2.4 위성 및 지상 관측 자료를 활용한 대기질 모델링의 개선

서론에서 언급했듯이, 통합 대기질 모델링 시스템을 구성하는 배출장, 기상모델링 및 화학수송 모델링 기술로 구성된 대기질 모델링 시스템은 점차 차세대 모델링 시스템으로의 전환이 요구되고 있다. 차세대 대기질 모델링 시스템의 핵심 요소는 위성 및 지상 관측으로부터 제공되는 자료들의 효율적 관리와 활용이라고 할 수 있다(그림 1). 이를 위해서는, 현재 활용 가능한 위성 및 지상관측 자료에 대한 이해가 우선적으로 필요하며, 이를 바탕으로 자료의 효율적 관리와 활용 방안에 대한 논의가 요구된다.

2.4.1 위성 관측자료

표 6에서는 현재 활용 가능한 인공위성 센서와 각 센서를 활용하여 측정 가능한 기체 및 입자 성분에 대한 정보를 제시하였다. SCIAMACHY (Scanning Imaging Absorption SpectroMeter for Atmospheric CHartography), OMI (Ozone Monitoring Instrument) 및 GOME2 (Global Ozone Monitoring Experiment-2) 와 같은 인공위성들은 연직적분(column) 자료가 제공되며, MIPAS (Michelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounding) 및 IASI (Infrared Atmospheric Sounding Interferometer)는 특정 성분에 대한 연직분

포 자료도 제공하고 있다. 여러 연구 기관으로부터 제공되는 연직 적분자료는 성층권 기여도를 제거하는 방법과 AMF (Air Mass Factor)를 계산하는 방법에 따라 연직 적분 값이 상이하다(van Noije *et al.*, 2006). 예를 들어, OMI로부터 측정된 NO₂ 연직적분 농도는 TEMIS (Tropospheric Emission Monitoring Internet Service)와 미국 NASA (National Aeronautics and Space Administration)에 의해 제공되고 있고, TEMIS에서 제공되는 자료는 NTR (Near Real Time) 혹은 DOMINO 산출물로 불리고, 네덜란드 기상청 (Royal Netherlands Meteorological Institute, KNMI)에 의해 분석되고 있다(Boersma *et al.*, 2007).

대기 환경위성에 의해 관측된 다양한 성분의 농도 자료는 모델링에서 계산된 값에 비하여 정확하다고 알려져 있지만, 지상 또는 화학 관측 자료와 비교할 때는 어느 정도의 오차를 보인다. 이는 광학적으로 관측된 시그널을 농도 자료로 환산하는 과정에서 여러 가지 가정이 포함되기 때문이고, 지표 반사나 구름에 의한 간섭 효과로부터 발생한다. 현재까지 위성에 의해 관측된 성분별 농도의 오차는 아래와 같다.

- NO₂: 지표 자료와 비교할 때, 약 15~30%의 오차를 보이며, 지표와의 상관도는 0.6보다 큼 (Leitão *et al.*, 2010; Boersma *et al.*, 2004).
- SO₂: 표준 편차가 경계층에서 1.5 DU, 상층 및 배경대기에서 0.3 DU 정도임(Lee *et al.*, 2009).
- 대류권 O₃: 저위도에서는 상관성이 0.84 정도이고, 고위도에서는 상관성이 0.77 정도임(Liu *et al.*, 2010, 2005).
- HCHO: 각 격자별로 비교하면 오차는 50~100% 정도이고, 3~5일 정도의 평균을 사용하는 것이 바람직함(De Smedt *et al.*, 2008; Wittrock *et al.*, 2006).
- CO: 10~20%의 오차를 보이며, MOPITT과 좋은 상관성을 보임.

이러한 오차의 원인은 구체적으로 기계 자체의 오류, AMF의 불확실성, 온도 자료의 불확실성, 대류권계면 정의에 따른 오차 등을 포함한다.

위성 원격 측정 자료는 육지에 분포된 지상 관측망의 한계를 극복하며, 단일 센서에 의한 균질한 품질의 자료 제공이 가능하다. 그러나, 현재의 위성 자료는 지표 반사도(surface reflectance)나 구름에 의해

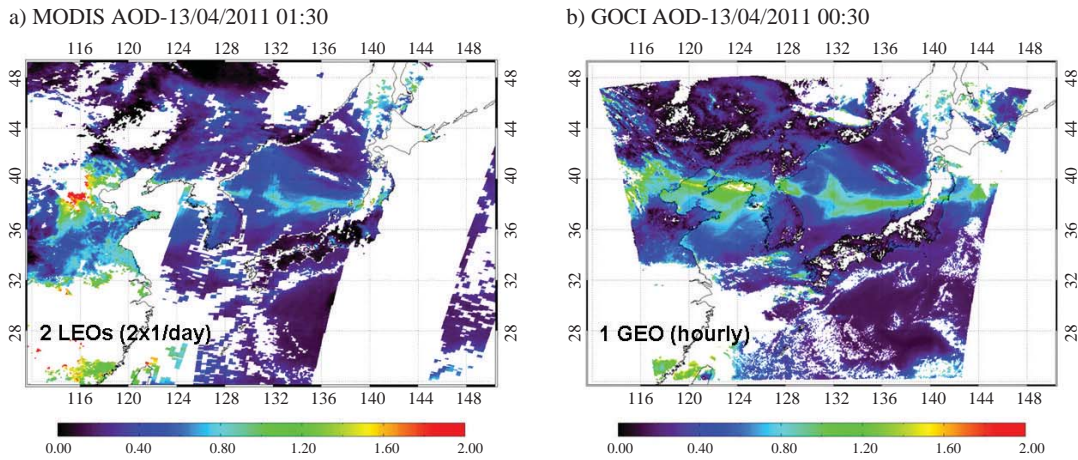


Fig. 7. Spatial distributions of a) AOD retrieved from MODIS and b) AOD retrieved from GOCI over East Asia (unit: dimensionless; Lee *et al.*, 2010).

누락된 정보도 많지만, 시·공간적인 해상도가 낮기 때문에, 배출장의 실제 일변화와 같은 변화를 반영하기 어렵다. 이러한 단점의 원인은 현재까지 대부분의 위성이 특정 궤도를 따라 지구 주변을 특정한 주기로 공전하는 저궤도 위성(표 6에서 Low Earth Orbit: LEO)이기 때문이고, 이러한 단점을 극복하기 위해 최근, 정지궤도 위성(표 6에서 Geostationary Earth Orbit: GEO)에 대한 관심이 증가하고 있다. 그림 7은 저궤도 위성과 정지궤도 위성으로부터 산출된 AOD의 공간 분포를 보여 주고 있다. MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)의 경우 하루 두 번 정도 동일한 위치를 관측하기 때문에 매시간 변하는 에어로솔 분포의 변화 과정을 포착하기 어렵지만, GOCI(Geostationary Ocean Color Imager)와 같은 정지궤도 위성 자료는 1시간 간격의 고해상도 자료이기 때문에 장거리 수송과 같은 변화를 정밀하게 매시간 관측할 수 있다. 현재까지의 연구 및 실용 위성은 LEO 위성이 주를 이뤘지만, 점차 GEO 위성으로 관심축의 이동이 이루어지고 있는 추세이다. 우리나라는 1990년 ‘우주개발 진흥 기본계획’을 통해 장기적인 우주 개발에 필요한 위성을 쏘아 올리는 국가 계획을 실행하여 현재까지 진행 중에 있고, 최근 정지궤도 위성인 ‘통신해양기상위성’ 혹은 ‘천리안’이 발사되었다. 향후 2018년에는 GEMS 센서가 탑재된 정지궤도 위성이 한국에서 발사 될 예정이며, 이 센서로부터 에어로솔, NO_x, SO_x, HCHO, CHOCHO

및 오존 등 다양한 물질의 시공간적 정보를 제공할 예정이기에 그 활용도에 대한 기대가 크다.

2.4.2 지상관측자료

지상 관측에 의한 자료는 화학수송 모델링 및 위성 자료와 비교할 때, 정확성은 매우 높은 반면, 시공간적 해상도가 상대적으로 낮기 때문에, 대기질 감시 및 예보를 위한 활용도 역시 상대적으로 낮다. 그러나, 모델링 및 위성자료를 검증하고, 자료동화의 효율을 높이는 과정에서는 필수적인 요소이다. 대기질 모델링 및 위성자료의 검증과 자료동화 효율성 개선을 위해 활용 가능한 지상 관측망 자료로는 Acid Deposition Monitoring Network in East Asia (EANET), Lidar network (ADNET), AERONET 및 DOAS (Differential Optical Absorption Spectroscopy) 네트워크를 들 수 있다.

EANET은 동아시아에서의 산성 강하물에 대한 이해도를 높이기 위한 국제적인 노력의 일환으로 조직되었다. 아시아의 13개 국가가 참여하고, 현재 일본의 ACAP (Asia Center for Air Pollution Research)가 관리하고 있다. 총 53개의 관측소에서 관측이 이루어지지만, 대기질 감시 및 예측과 관련하여 filter-pack 방법을 활용한 건성 침식 상태의 입자상 물질의 농도 자료는 39개의 특정 관측지에서만 제공되고 있다. ADNET은 Lidar 네트워크이고, 일본의 NIES (National Institute of Environmental Research)에서 운영한다. Lidar를 통해

획득 가능한 자료 중에서 고도별 에어로솔 및 에어로솔의 광학적 특성 자료는 다른 관측 자료에서 획득하기 어렵기 때문에 대기질의 연직 분포를 검증하기 위한 자료로써 중요하다. NASA Goddard Space Flight Center (GSFC)에서 관리하는 AERONET은 cimel-sunphotometer 네트워크이며, 에어로솔의 광학적 특성 및 복사량 자료 등을 제공하고 있다. 현재까지 매우 광범위한 대기질 연구 분야에서 활용하고 있으며, 최근에는 DRAGON (Distributed Regional Aerosol Gridded Observation Networks) campaign 등을 통해 한반도 및 일본 지역의 집중 관측 자료를 제공하고 있다. DOAS 네트워크는 일본의 JAMSTEC (Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)에서 관리하는데 아시아 및 러시아에 걸쳐 6군데에 자체 개발한 MAX-DOAS를 설치하여 미량 기체 및 에어로솔 광학두께 (AOD) 산출 자료를 제공하고 있다.

2.4.3 지상 및 위성관측 자료의 활용

2.4.3.1 Averaging Kernel

위성관측 자료를 산출하는 과정에서 기본적으로 연직 분포의 가정이 포함되며 이는 위성관측 자료의 오차를 유발하는 요인 중 하나이다. 따라서, 위성자료와 모델링 결과를 비교하거나 자료동화를 통해 통합하는 과정에서 직접적인 비교와 통합은 연직분포의 가정으로부터 발생하는 오차를 포함하게 된다. 따라서, 최근에는 이러한 오차 가능성을 제거하기 위해 모델링 결과에 Averaging Kernel (AK)을 적용하여 보정하는 과정을 거치는 경우가 증가하고 있다.

AK는 식(1)을 통해 산출할 수 있고, 식(2)를 통해 적용한다.

$$A = AMF^{-1} \times \frac{\partial SCD}{\partial x} = \frac{\sum_1^1 m_1}{AMF} \tag{1}$$

$$\begin{aligned} X_{rv} &= X_a + A(X_{true} - X_a) \\ &= AX_{true} + (I - A)X_a \end{aligned} \tag{2}$$

여기에서,

X_{rv} : retrieved gas profile

X_{true} : true profile

X_a : a priori profile

A: averaging kernel (ideally, A=I)

AK는 시간별, 지역별, 위성별, 성분별로 세분화되어 제공되며, 오차를 최소화하기 위하여 식(3)과 같은 비용함수 (cost function, J)를 최소화하는 방법을 사용한다.

$$J = \frac{1}{2}(AX - X_{rv})^T C^{-1}(AX - X_{rv}) + \frac{1}{2}(X - X_a)^T C_a^{-1}(X - X_a) \tag{3}$$

여기에서, X , X_a , C_a , C 는 다음과 같다.

X : profile (atmospheric state vector)

X_a : a priori profile (a priori atmospheric state vector)

C_a : a priori state uncertainty matrix

C : data uncertainty matrix

이러한 과정을 통해 계산된 AK는 모델링 결과와 위성자료와의 비교뿐만 아니라, 인공위성 자료를 이용한 모델링의 자료동화에 반드시 필요하다 (Eskes and Boersma, 2003).

앞서 설명한 바와 같이(그림 1 참조), AK를 사용할 경우 동아시아에서 배출장의 검증이 가능하다. 동아시아 지역 NO_x , VOCs, 및 SO_x 배출량 자료 검증의 경우, 인공위성에 탑재된 환경 센서로부터 관측된 NO_2 (Han *et al.*, 2011, 2009; Uno *et al.*, 2007), HCHO (Fu *et al.*, 2007), SO_2 등의 기체상 오염물질 총적분 농도 자료가 많이 활용되고 있다. 위성으로 관측된 자료는 위성으로부터 복사량을 특정 대기 물리량의 연직 적분 값으로 환산하는 과정을 통해 자료를 산출하며, 이 과정에서 AMF 값이 적용되는데, 이때 AMF는 선형적 수직 분포(a priori profile)를 가정하는 것이므로, 이러한 가정이 모델과 위성자료를 비교할 경우 불확실성이 발생하게 된다. 이러한 불확실성을 제거하기 위해 AK를 모델링 결과에 적용하는 것이 요구된다. 그림 8은 CMAQ 모델링과 OMI 관측으로부터 NO_2 총적분 농도 비교를 위해 AK가 적용되는 비교 모식도이다. 식(1)로부터 계산된 AK의 적용은 수직 분포 가정에 의해 발생하는 시스템 오차로부터 자유롭기 때문에 모델링과 관측 결과의 직접 비교가 가능하다 (Eskes and Boersma, 2003). 하지만, 동아시아 지역을 대상으로 한 모델링 및 위성 자료 비교 연구에서는 아직까지 AK를 적용하는 사례는 없으며, 그림 8과 같은 비교 연구 절차가 요구된다.

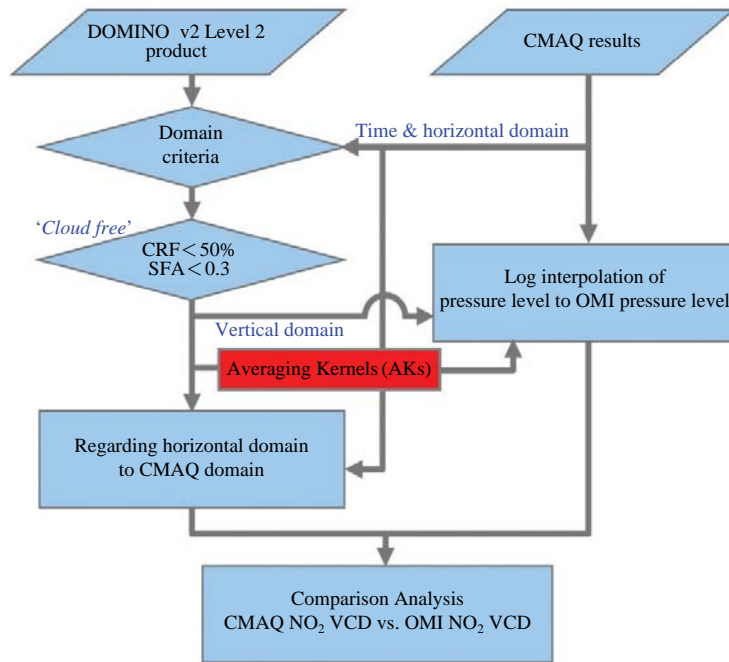


Fig. 8. Schematic diagram for comparison between CMAQ-estimated and OMI-retrieved NO₂ columns using averaging kernels (AKs).

2.4.3.2 Top-down 배출량 산출

동아시아 지역에 대한 상향식 (bottom-up) NO_x 배출량 자료의 불확실성은 많은 연구자들에 의한 제기 되어 왔다(Han *et al.*, 2011, 2009; Uno *et al.*, 2007; Ma *et al.*, 2006; Kunhikrishnan *et al.*, 2004). 상향식 NO_x 배출량 자료의 불확실성을 보완하기 위하여 최근, 모델링과 인공위성 관측 자료를 활용한 하향식 접근법의 NO_x 배출량 산출 방안이 제시되고 있고(Lin *et al.*, 2010; Boersma *et al.*, 2008; Wang *et al.*, 2007; Jaeglé *et al.*, 2005; Martin *et al.*, 2003; Leue *et al.*, 2001), 하향식 (top-down) 배출량 산출을 위해서도 인공위성 자료의 활용이 가능하다. 그러나, 선행 연구에서 제안한 방법들은 격자 간격을 크게 적용(예, 2° × 2.5°)하는 전 지구 모델링에서는 top-down NO_x 배출량 산정에 있어, air mass의 격자간 이동에 따른 영향을 무시할 수 있으나, 격자간격(예, 30 × 30 km²)을 작게 적용한 모델링으로부터 top-down NO_x 배출량 산출 시에는 air mass의 격자간 이동에 따른 영향을 무시할 수 없기 때문에 지역규모의 배출량 산정을 위해서는 여전히 개선되어야 할 많은 요소들이 남겨져 있다. 또한,

NO_x 배출량과 NO₂ 증적분 농도를 선형적으로 가정하고 있어서, 실제 대기 화학의 비선형성을 반영하지 못한다는 단점과 NO_x의 소멸시간 계산에서 NO_x의 화학적 소멸속도(chemical loss rate)를 정교하게 고려하지 못한다는 문제점이 지적되기도 하였다. 위성 자료를 활용한 배출량 산정 방안은 아직까지는 개선의 여지가 남아있지만, 그럼에도 불구하고 북한과 같은 배출량 정보 획득이 어려운 지역의 배출량을 간접적으로 획득할 수 있다는 장점이 있으며, 이는 향후 국내 대기질 예보의 정확도를 크게 개선할 수 있는 한 가지 방안이라고 생각된다.

2.4.3.3 자료동화 적용 및 개선

화학수송 모델링에서는 대기질 단기 예보 시 초기 조건 개선 및 모델링 자료와 측정 자료와의 수학적 결합 등을 목적으로 자료동화 기법이 활용된다. 자료동화는 서로 다른 과정에 의해 도출된 자료를 통합하여 자료의 정확성을 높이는 과정으로, 화학수송 모델링의 경우는 모델링의 결과를 개선하기 위한 목적으로 활용된다. 가장 보편적인 방법으로는 Kalman filter

를 활용한 방법을 들 수 있는데, Optimal Interpolation 기술이나 Ensemble 기술 등을 들 수 있다(Colette *et al.*, 2012; Park *et al.*, 2011). 이 외에도 3차원 또는 4차원 변분법 등도 많이 쓰이는데, 기본적으로 자료동화는 최종 결과의 오차를 최소화시키기 위한 iteration 과정에서 결과가 도출된다. 최근에는 모델링 결과의 오차 원인을 밝히고 개선하기 위해 adjoint 방법이 활용되기도 하였다(Henze *et al.*, 2009; Sandu *et al.*, 2004). 자료동화 기술이 복잡해지고 정밀해지면서 계산에 필요한 시간이 급속도로 증가하고, 이를 보완하고자

Hybrid 방법도 개발되었는데, 이는 계산에 필요한 시간을 단축하면서 요구 수준의 정확성을 유지할 수 있는 절충안이라고 할 수 있다(Clayton *et al.*, 2012).

화학수송 모델링에서 자료동화는 위성자료 및 지상관측 자료를 활용하는데, 위성 및 지상관측 자료의 정확성이 차이가 나기 때문에 자료의 활용 방안에 따라 자료동화의 효율성을 증가시킬 수 있다. 한 예로, Park *et al.* (2011)은 위성자료와 지상관측 자료를 동시에 자료동화에 적용하지 않고, 자료동화의 단계를 나누어 수행하였다. 먼저, 위성자료와 모델링 결과

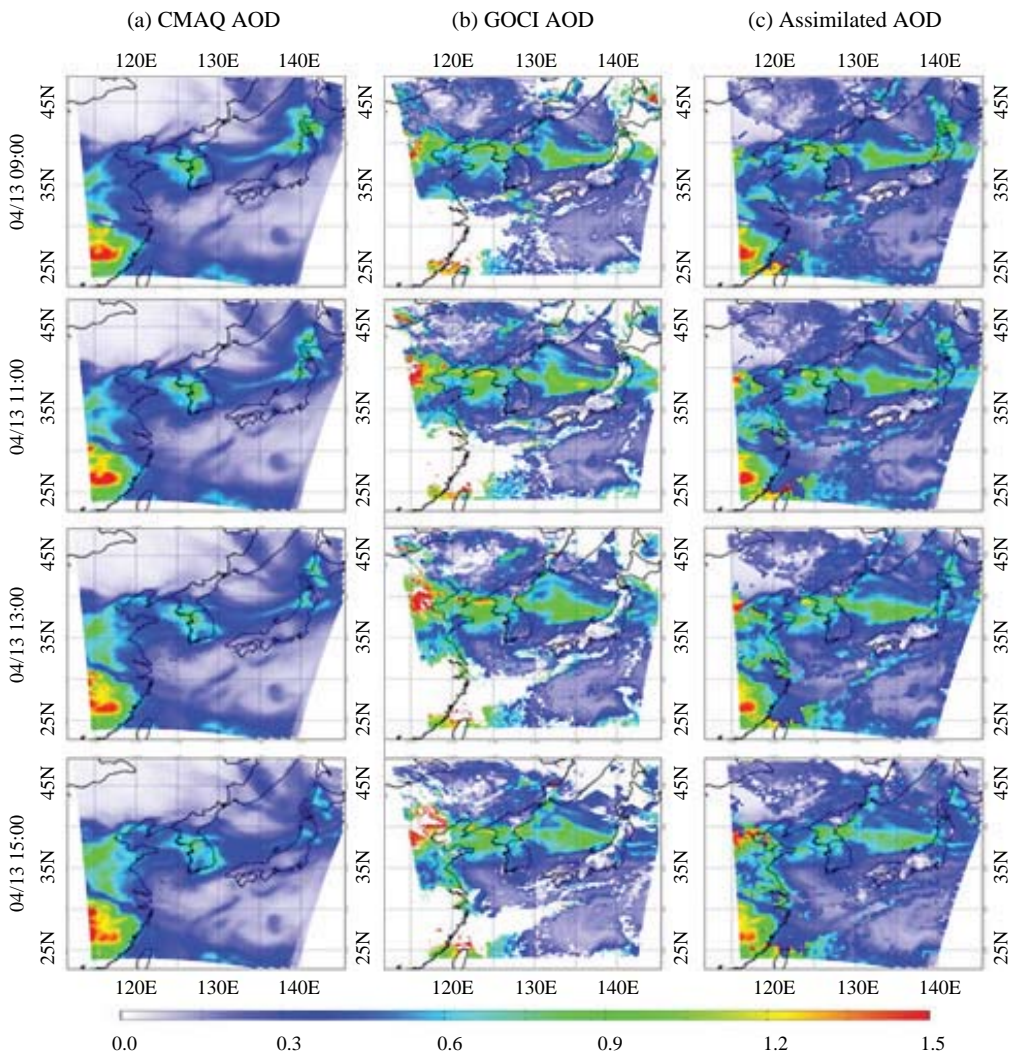


Fig. 9. Spatial and temporal distributions of (a) CMAQ-simulated AOD, (b) GOCI-retrieved AOD, and (c) assimilated AOD over northeast Asia at 09:00, 11:00, 13:00, and 15:00 LST on 13 April, 2011 (Park *et al.*, 2013).

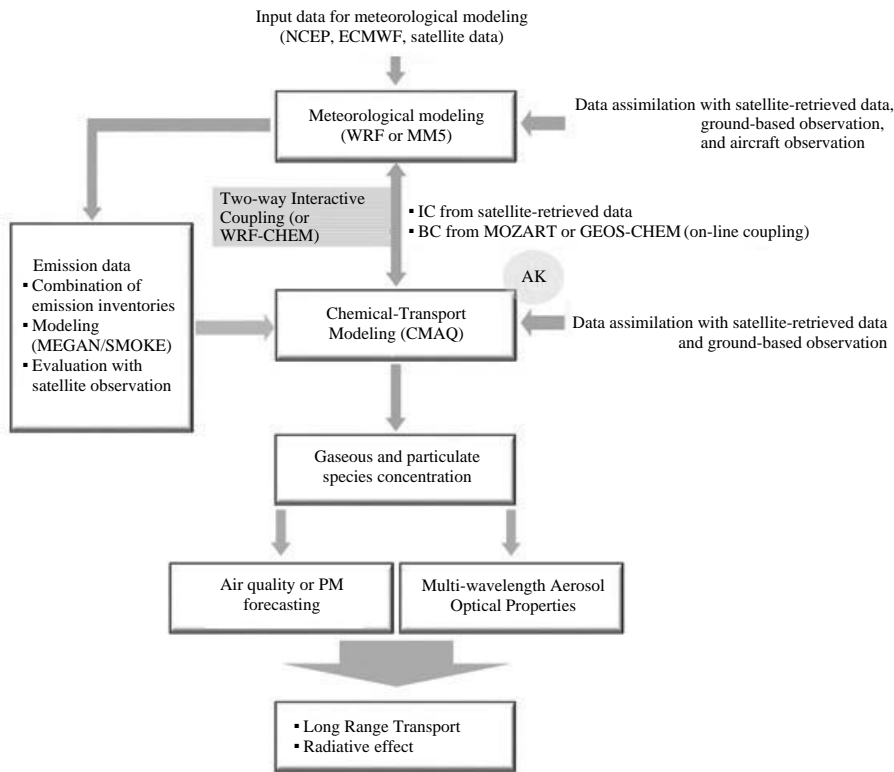


Fig. 10. Schematic diagram of integrated air quality modeling system for monitoring and forecasting air quality over East Asia.

를 동화하는 과정인데, 이 과정에서 지상관측 자료와의 비교를 통해 자료동화의 효율을 증가시켰다. 그리고, 1차적으로 동화된 결과를 지상관측 자료와 추가로 동화시키는 과정을 통해 자료의 품질을 개선하였다. 그림 9에서는 개선된 자료동화 기법을 활용하여 CMAQ에서 얻어진 AOD와 GOCI AOD 자료를 통합한 결과를 보여준다. 자료동화를 통해 GOCI AOD 자료에서 구름 때문에 나타나는 흰색 지역(whitening area)이 제거되었고, CMAQ AOD의 정확성이 개선되었다(Park *et al.*, 2013). 이처럼, 위성 및 관측 자료를 활용하여 자료동화를 수행하는 방안에 따라서 최종 결과의 품질이 크게 달라질 수 있으며, 이러한 방안에 대한 연구가 지속되어야 할 것이다.

2.5 통합 대기질 모델링 시스템 구축과 대기질 예보제 실행 방안

통합 대기질 모델링 시스템(Integrated Air Quality

Modeling System)은 장거리수송, 미세먼지 등의 대기질 현황을 정확하게 감시하며 예측하는 것을 목적으로 하며, 이미 언급한 배출 모델링, 기상 모델링, 지역 규모 및 전구규모의 화학수송 모델링, 인공위성 및 지상관측 자료 활용, 자료동화 등의 다양한 기술을 통합함으로써 구축할 수 있다. 각 기술들은 상호 보완을 통해 정확성을 개선하는 역할을 수행할 수 있으며, 최종적으로 동아시아에 대한 4차원 대기질 감시 및 예측예보 자료를 생산하게 될 것이다.

세부 기술들을 통합하여 대기질 통합 모델링 시스템을 구축하기 위한 방법의 한 예로 그림 10과 같은 방안을 제안할 수 있다. 제안된 방안에서는 시스템을 구성하는 구성 요소들의 정확성을 다양한 방법으로 극대화하고, 이를 최적의 자료동화 기술을 통해 통합하게 된다. 이러한 시스템으로부터 획득한 결과는 대기질 및 미세먼지 예보에 활용할 수 있으며, 장거리수송과 같은 국가 간 문제의 이해를 목적으로도 할

용 가능하다. 또한, 에어로솔의 광학적 특성 산출 및 대기질에 의한 복사 강제력 산출을 통해 기후변화 연구에도 활용이 가능하다. 현재 운영 중인 COMS 위성 자료와 향후 발사 예정인 GEO-KOMPSAT 자료와 같은 방대한 자료의 활용이 국내에서의 대기질 통합 모델링 시스템 개발 및 개선을 위한 주요 과제 및 현안 중 하나이며, 국내에서 개발될 시스템이 다른 나라 시스템과 비교될 때의 수월성이라 할 수 있다. 그러나, 이러한 시스템을 활용하여 대기질 및 미세먼지 예보제를 실현하기 위해서는 추가적인 사항들을 고려하여야 할 것이다.

대기질 및 미세먼지 예보는 실시간 대기질 정보와 예측자료를 짧은 시간에 산출하고 제공할 수 있어야 가능하다. 이를 위해서는 실시간으로 활용 가능한 모델링 및 위성자료의 “유기적 결합”과 “신속한 자료 처리”가 필요하다(그림 9). 이를 위해서는 각 “요소별로 효율적인 운영과 관리”가 필요하며 독립적인 기관이나 조직의 설립 및 운영 계획이 필요하다. 전담기구에서는 배출량, 측정망 자료 등 통합 대기질 모델링 시스템 운용에 필요한 자료의 통합관리 및 중장기 연구 사업을 총괄하는 업무를 담당하게 될 것이다. 대기질 예보를 위한 모델링 팀의 구성 및 운영은 업무의 중요성에 입각하여 장기적이고 구체적인 계획의 수립을 필요로 한다. 또한, 위성자료 획득 및 활용이나 지상 관측망 자료의 활용을 위해서 타 조직과의 유기적인 협력체계가 구축되어야 한다.

3. 결론 및 전망

본 논문에서는 동아시아 대기질의 정밀한 감시 및 예보를 위한 모델링 기술의 현황을 파악하고 향후 가능한 대략의 발전 방향을 제시하였다. 대기질 모델링을 구성하는 배출장 및 배출모델링, 기상모델링, 화학수송 모델링의 국내외 현황을 요약하였고, 이를 바탕으로 향후 발전 방향을 요소별로 제안하였다. 대기질 모델링의 개선을 위한 대기질 통합 모델링 시스템을 제안하였고, 지상 및 위성관측 자료 활용의 중요성을 강조하였으며, 효율적인 자료동화 방안의 필요성을 논의하였다. 대기질 및 미세먼지 예보제 실현을 위해서는 시스템의 효율적 운영과 관리를 위한 독립적인 기관의 필요성과 타 기관과의 협력체계 구

축의 필요성을 강조하였다.

대기질 통합 모니터링 시스템을 구축하기 위해서는 배출장 프로세싱 및 모델링 기술, 기상 모델링 기술, 화학수송 모델링 기술, 지상 및 인공위성 측정 자료 활용 기술 등 관련 기술의 정확성 및 활용도를 극대화 시키는 연구가 선행되어야 한다. 이러한 개선된 관련 기술을 효율성 있게 통합하기 위해서 최적의 자료동화 기법을 적용할 필요가 있으며, 충분한 민감도 실험이 수행되어야 할 것이다. 이러한 과정을 통해 구축된 대기질 통합 모니터링 시스템은 지역적 기상현상과 동반하여 지역규모 연무(regional haze) 형성, 미세먼지의 장거리수송 및 인체위해성, 기후변화 등의 주요 환경문제를 지속적으로 정밀하게 모니터링 및 분석하기 위해서 활용 될 것이며, 최근 국내에서 중요성이 부각되고 있는 대기질 또는 미세먼지 예보를 위해 활용할 수 있을 것이다. 또한, 현재 운영 중인 GOCI/COMS 위성과 2018년 발사 예정인 GEMS/GEO-KOMPSAT 위성 자료를 활용함으로써 대기질 통합 모니터링 시스템의 정확성이 크게 개선될 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 환경부 “차세대 핵심환경기술개발사업(과제번호: 2012000160004 및 411-113-013)”과 기상청 “기후변화 감시·예측 및 국가정책지원 강화사업(과제번호: CATER2012-7110)”의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사를 표합니다.

References

Adhikary, B., S. Kulkarni, A. Dallura, Y. Tang, T. Chai, L.R. Leung, Y. Qian, C.E. Chung, V. Ramanathan, and G.R. Carmichael (2008) A regional scale chemical transport modeling of Asian aerosols with data assimilation of AOD observations using optimal interpolation technique, *Atmos. Environ.*, 42(37), 8600-8615.

Baklanov, A., A. Mahura, and R. Sokhi (2010) *Integrated Systems of Meso-Meteorological and Chemical Transport Models*, Eds., Springer, Berlin, Heidelberg, Germany, ISBN 978-3-642-13979-6, 186 pp.

- Bei, N., B. de Foy, W. Lei, M. Zavala, and L.T. Molina (2008) Using 3DVAR data assimilation system to improve ozone simulations in the Mexico City basin, *Atmos. Chem. Phys.*, 8, 7353-7366.
- Boersma, K.F., D.J. Jacob, E.J. Bucsela, A.E. Perring, R. Dirksen, R.J. van der A, R.M. Yantosca, R.J. Park, M.O. Wenig, T.H. Bertram, and R.C. Cohen (2008) Validation of OMI tropospheric NO₂ observations during INTEX-B and application to constrain NO_x emissions over the eastern United States and Mexico, *Atmos. Environ.*, 42, 4480-4497.
- Boersma, K.F., H.J. Eskes, J.P. Veefkind, E.J. Brinksma, R.J. van der A, M. Sneep, G.H.J. van den Oord, P.F. Levelt, P. Stammes, J.F. Gleason, and E.J. Bucsela (2007) Near-real time retrieval of tropospheric NO₂ from OMI, *Atmos. Chem. Phys.*, 2013-2128, sref: 1680-7324/acp/2007-7-2103.
- Boersma, K.F., H.J. Eskes, and E.J. Brinksma (2004) Error analysis for tropospheric NO₂ retrieval from space, *Journal of Geophysical Research*, 109, D04311, doi: 10.1029/2003JD003962.
- Bougeault, P. and P. Lacarrère (1989) Parameterization of orography-induced turbulence in a mesobeta-scale model, *Mon. Wea. Rev.*, 117, 1872-1890.
- Brankov, E., R.F. Henry, K.L. Civerolo, W. Hao, S.T. Rao, P.K. Misra, R. Bloxam, and N. Reid (2003) Assessing the effects of transboundary ozone pollution between Ontario, Canada and New York, USA, *Environ. Pollut.*, 123, 403-411.
- Braun, S.A. and W.-K. Tao (2000) Sensitivity of high-resolution simulations of hurricane Bob (1991) to planetary boundary layer parameterizations, *Mon. Wea. Rev.*, 128, 3941-3961.
- Brown, S.S., T.B. Ryerson, A.G. Wollny, A.C. Brock, R. Pletier, A.P. Sullivan, R.J. Weber, W.P. Bubé, M. Trainer, J.E. Meagher, F.C. Fehsenfeld, and A.R. Ravishankara (2006) Variability in nocturnal nitrogen oxide processing and its role in regional air quality, *Science*, 311, 67, DOI: 10.1126/science.1120120.
- Butler, T.M., D. Taraborrelli, C. Brühl, H. Fischer, H. Harder, M. Martinez, J. Williams, M.G. Lawrence, and J. Lelieveld (2008) Improved simulation of isoprene oxidation chemistry with the ECHAM5/MESy chemistry-climate model: lessons from the GABRIEL airborne field campaign, *Atmos. Chem. Phys.*, 8, 4529-4546, doi:10.5194/acp-8-4529-2008.
- Chameides, W.L., R.W. Lindsay, J. Richardson, and C.S. Kiang (1988) The role of biogenic hydrocarbons in urban photochemical smog: Atlanta as a case study, *Science* 241, 1473-1475.
- Chung, C.E., V. Ramanathan, G. Carmichael, S. Kulkarni, S. Tang, B. Adhikary, L.R. Leung, and Y. Qian (2010) Anthropogenic aerosol radiative forcing in Asia derived from regional models with atmospheric and aerosol data assimilation, *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 6007-6024, www.atmos-chem-phys.net/10/6007/2010/.
- Clayton, A.M., A.C. Lorenc, and D.M. Barker (2012) Operational implementation of a hybrid ensemble/4D-Var global data assimilation system at the Met Office, *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, doi: 10.1002/qj.2054.
- Colette, A., C. Granier, Ø. Hodnebrog, H. Jakobs, A. Maurizi, A. Nyiri, S. Rao, M. Amann, B. Bessagnet, A. D'Angiola, M. Gauss, C. Heyes, Z. Klimont, F. Meleux, M. Memmesheimer, A. Mieville, L. Rouil, F. Russo, S. Schucht, D. Simpson, F. Stordal, F. Tampieri, and M. Vrac (2012) Future air quality in Europe: a multi-model assessment of projected exposure to ozone, *Atmos. Chem. Phys.*, 12, 10613-10630, doi:10.5194/acp-12-10613-2012.
- Collins, W.D., P.J. Rasch, B.E. Eaton, B.V. Khatatov, and J.-F. Lamarque (2001) Simulating aerosols using a chemical transport model with assimilation of satellite aerosol retrievals: Methodology for INDOEX, *J. Geophys. Res.*, 106, 7313-7336.
- Davis, J.M., P.V. Bhawe, and K.M. Foley (2008) Parameterization of N₂O₅ reaction probabilities on the surface of particles containing ammonium, sulfate, and nitrate, *Atmos. Chem. Phys.*, 8, 5295-5311.
- De Smedt, I., J.-F. Muller, T. Stavrakou, R. van der A, H. Eskes, and M. Van Roozendael (2008) Twelve years of global observations of formaldehyde in the troposphere using GOME and SCIAMACHY sensors, *Atmos. Chem. Phys.*, 8, 4947-4963.
- Elshorbany, Y.F., B. Steil, C. Bruhl, and J. Lelieveld (2012) Impact of HONO on global atmospheric chemistry calculated with an empirical parameterization in the EMAC model, *Atmos. Chem. Phys.*, 12, 9977-10000, doi:10.5194/acp-12-9977-2012.
- Eskes, H.J. and K.F. Boersma (2003) Averaging kernels for DOAS total-column satellite retrievals, *Atmos. Chem. Phys.*, 3, 1285-1291.
- Evans, M.J. and D.J. Jacob (2005) Impact of new laboratory studies of N₂O₅ hydrolysis on global model budget of tropospheric nitrogen oxides, ozone, and OH,

- Journal of Geophys. Res., VOL. 32, L09813, doi: 10.1029/2005GL022469.
- Fu, T., D. Jacob, P. Palmer, K. Chance, Y.X. Wang, B. Barletta, B. Blake, J.C. Stanton, and M.J. Pilling (2007) Space-based formaldehyde measurements as constraints on volatile organic compound emissions in east and south Asia and implications for ozone, *Journal of Geophysical Research*, 112, D06312, doi:10.1029/2006JD007853.
- Galmarini, S., I. Kioutsioukis, and E. Solazzo (2013) E pluribus unum: ensemble air quality predictions, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 13, 581-631. doi:10.5194/acpd-13-581-2013.
- Gonçalves, M., D. Dabub, W.L. Chang, O. Jorba, and J.M. Baldasano (2012) Impact of HONO sources on the performance of mesoscale air quality models, *Atmos. Environ.*, 54, 168-176.
- Grell, G.A., S.E. Peckham, R. Schmitz, S.A. McKeen, G. Frost, W.C. Skamarock, and B. Eder (2005) Fully coupled on-line chemistry within the WRF model, *Atmos. Environ.*, 39, 6957-6975.
- Grell, G.A., S. Emeis, W.R. Stockwell, T. Schoenemeyer, R. Forkel, J. Michalakes, R. Knoche, and W. Seidl (2000) Application of a multiscale, coupled MM5/chemistry model to the complex terrain of the VOTALP valley campaign, *Atmos. Env.*, 34, 1435-1453.
- Guenther, A., T. Karl, P. Harley, C. Wiedinmyer, P.I. Palmer, and C. Geron (2006) Estimates of global terrestrial isoprene emissions using MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature), *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6, 3181-3210.
- Han, K.M., C.H. Song, H.J. Ahn, R.S. Park, J.H. Woo, C.K. Lee, A. Richter, J.P. Burrows, J.Y. Kim, and J.H. Hong (2009) Investigation of NO_x emissions and NO_x-related chemistry in East Asia using CMAQ-predicted and GOME-derived NO₂ columns, *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 1017-1036.
- Han, K.M., C.K. Lee, J. Lee, J. Kim, and C.H. Song (2011) A comparison study between model-predicted and OMI-retrieved tropospheric NO₂ columns over the Korean peninsula, *Atmos. Environ.*, 45, 2962-2971.
- Henze, D.K., J.H. Seinfeld, and D.T. Shindell (2009) Inverse modeling and mapping US air quality influences of inorganic PM_{2.5} precursor emissions using the adjoint of GEOS-Chem, *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 5877-5903, doi:10.5194/acp-9-5877-2009.
- Hill, C., C. Deluca, Balaji, M. Suarez, and A.D. Sivia (2004) The architecture of the Earth system modeling framework, *Comput. Sci. Eng.*, 18-28.
- Holloway, T., A. Fiore, and M.G. Hastings (2003) Intercontinental transport of air pollution: will emerging science lead to a new hemispheric treaty?, *Environ. Sci. Technol.*, 37, 4535-4542.
- Holloway, T., H. Levy II, and G.R. Carmichael (2002) Transfer of reactive nitrogen in Asia: development and evaluation of a source-receptor model, *Atmos. Environ.*, 36, 4251-4264.
- Holtslag, A.A.M. and B.A. Boville (1993) Local versus nonlocal boundary-layer diffusion in a global climate model, *J. Climate*, 10, 1825-1842.
- Hong, S.-Y. (2010) A new stable boundary-layer mixing scheme and its impact on the simulated East Asia summer monsoon, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 136, 1481-1496.
- Hong, S.-Y., H. Park, H.-B. Cheong, J.-E. Kim, M.-S. Koo, J. Jang, S. Ham, S.-O. Hwang, B.-K. Park, E.-C. Chang, and H. Li (2013) The Global/Regional Integrated Model system (GRIMs), *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.*, 49, 219-243. DOI:10.1007/s13143-013-0022-1.
- Hong, S.-Y., Y. Noh, and J. Dudhia (2006) A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes, *Mon. Wea. Rev.*, 134, 2318-2341.
- Hong, S.-Y. and H.-L. Pan (1996) Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a Medium-Range Forecast model, *Mon. Wea. Rev.*, 124, 2322-2339.
- Hortal, M. and A.J. Simmons (1991) Use of reduced Gaussian grids in spectral models, *Mon. Wea. Rev.*, 119, 1057-1074.
- Jaégle, L., L. Steinberger, R.V. Martin, and K. Chance (2005) Global partitioning of NO_x sources using satellite observations: Relative roles of fossil fuel combustion, biomass burning and soil emissions, *Faraday Discuss.*, 130, 407-423, doi:10.1039/b502128f.
- Janjić, Z.A. (1990) The step-mountain coordinate: Physics package. *Mon. Wea. Rev.*, 118, 1429-1443.
- KEI (2006) Air Quality Modeling System I: Development of Emissions Preparation System with the CAPSS.
- Kim, J.Y., C.H. Song, Y.S. Ghim, J.G. Won, S.-C. Yoon, G.R. Carmichael, and J.H. Woo (2006) An investigation on NH₃ emissions and particulate NH₄⁺ and NO₃⁻ formation in East Asia, *Atmos. Environ.*, 40(12), 2139-2150.
- King, M.D., Y.J. Kaufman, D. Tanre, and T. Nakajima (1999) Remote sensing of tropospheric aerosols from space: Past, present, and future, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*,

- 80, 2229-2259.
- Kinne, S., U. Lohmann, J. Feichter, M. Schulz, C. Timmreck, S. Ghan, R. Easter, M. Chin, P. Ginoux, T. Take-mura, I. Tegen, D. Koch, M. Herzog, J. Penner, G. Pitari, B. Holben, T. Eck, A. Smirnov, O. Dubovik, I. Slutsker, D. Tanre, O. Torres, M. Mishchenko, I. Geogdzhayev, D.A. Chu, and Y. Kaufman (2003) Monthly averages of aerosol properties: A global comparison among models, satellite data, and AERONET ground data, *J. Geophys. Res.*, 108, 4634, doi:10.1029/2001JD001253.
- Kokhanovsky, A.A., W. von Hoyningen-Huene, and J.P. Burrow (2006) Atmospheric aerosol load from space, *Atmos. Res.*, 81, 176-185.
- Kukkonen, J., T. Olsson, D.M. Schultz, A. Baklanov, T. Klein, A.I. Miranda, A. Monteiro, M. Hirt, V. Tarvainen, M. Boy, V.-H. Peuch, A. Poupkou, I. Kioutsioukis, S. Finardi, M. Sofiev, R. Sokhi, K.E.J. Lehtinen, K. Karatzas, R. San José, M. Astitha, G. Kallos, M. Schaap, E. Reimer, H. Jakobs, and K. Eben (2012) A review of operational, regional-scale, chemical weather forecasting models in Europe, *Atmos. Chem. Phys.*, 12, 1-87, doi:10.5194/acp-12-1-2012.
- Kunhikrishnan, T., M.G. Lawrence, R. von Kuhlmann, A. Richter, A. Ladstätter-Weißmayer, and J.P. Burrows (2004) Analysis of tropospheric NO_x over Asia using the model of atmospheric transport and chemistry (MATCH-MPIC) and GOME-satellite observations, *Atmos. Environ.*, 38, 581-596.
- Lee, C., R. Martin, A. van Donkelaar, G. O'Byrne, N. Krotkov, A. Richter, L. Gregory Huey, and J.S. Holloway (2009) Retrieval of vertical columns of sulfur dioxide from SCIAMACHY and OMI: Air mass factor algorithm development, validation, and error analysis, *Journal of Geophysical Research*, 114, D22303, doi:10.1029/2009JD012123.
- Lee, J., J. Kim, C.H. Song, J. Ryu, Y. Ahn, and C.K. Song (2010) Algorithm for retrieval of aerosol optical properties over the ocean from the Geostationary Ocean Color Imager, *Remote Sens. Environ.*, 114, 1077-1088.
- Leitão, J., A. Richter, M. Vrekoussis, A. Kokhanovsky, Q.J. Zhang, M. Beekmann, and J.P. Burrows (2010) On the improvement of NO₂ satellite retrievals-aerosol impact on the air mass factors, *Atmos. Meas. Tech.*, 3, 475-493.
- Lelieveld, J., T.M. Butler, J.N. Crowley, T.J. Dillon, H. Fischer, L. Ganzeveld, H. Harder, M.G. Lawrence, M. Martinez, D. Taraborrelli, and J. Williams (2008) Atmospheric oxidation capacity sustained by a tropical forest, *Nature*, 452, 737-740.
- Leue, C., M. Wenig, T. Wagner, O. Klimm, U. Platt, and B. Jähne (2001) Quantitative analysis of NO_x emissions from global Ozone Monitoring Experiment satellite image sequences, *J. Geophys. Res.*, 106(D6), 5493-5505.
- Li, X. and Z. Pu (2008) Sensitivity of numerical simulation of early rapid intensification of hurricane Emily (2005) to cloud microphysical and planetary boundary layer parameterizations, *Mon. Wea. Rev.*, 136, 4819-4838.
- Lin, J.T., M.B. McElroy, and K.F. Boersma (2010) Constraint of anthropogenic NO_x emissions in China from different sectors: a new methodology using multiple satellite retrievals, *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 63-78.
- Liu, X., P.K. Bhartia, K. Chance, R.J.D. Spurr, and T.P. Kurosu (2010) Ozone profile retrievals from the Ozone Monitoring Instrument, *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 2521-2537, doi:10.5194/acp-10-2521-2010.
- Liu, X., K. Chance, C.E. Sioris, R.J.D. Spurr, T.P. Kurosu, and R.V. Martin (2005) Ozone profile and tropospheric ozone retrievals from the Global Ozone Monitoring Experiment: Algorithm description and validation, *Journal of Geophysical Research*, 110, D20307, doi:10.1029/2005JD006240.
- Ma, J., A. Richter, J.P. Burrow, H. Nüß and J.A. van Aardenne (2006) Comparison of simulated tropospheric NO₂ over China with GOME satellite data, *Atmos. Environ.*, 40, 593-604, 2006.
- Martin, R.V., D.J. Jacob, K. Chance, T.P. Kurosu, P.I. Palmer, and M.J. Evans (2003) Global inventory of nitrogen oxide emissions constrained by space-based observation of NO₂ columns, *J. Geophys. Res.*, 108(D17), 4537, doi:10.1029/2003JD003453.
- Ohara, T., H. Akimoto, J. Kurokawa, N. Horii, K. Yamaji, X. Yan, and T. Hayasaka (2007) An Asian emission inventory of anthropogenic emission sources for the period 1980-2020, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 7, 4419-4444.
- Park, M.E., C.H. Song, R.S. Park, J. Lee, J. Kim, S. Lee, J.H. Woo, G.R. Carmichael, T.F. Eck, B.N. Holben, S.S. Lee, C.K. Song, and Y.D. Hong (2013) New approach to monitor transboundary particulate pollution over northeast Asia, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 13, 15867-15905.
- Park, R.S., C.H. Song, K.M. Han, M.E. Park, S.-S. Lee, S.-B. Kim, and A. Shimizu (2011) A study on aerosol opti-

- cal properties over East Asia using a combination of CMAQ-simulated aerosol optical properties and remote-sensing data via a data assimilation technique, *Atmos. Chem. Phys.*, 11, 12275-12296, doi:10-5194/acp-11-12275-2011.
- Pleim, J., J. Young, D. Wong, R. Gilliam, T. Otte, and R. Mathur (2008) Two-Way Coupled Meteorology and Air Quality Modeling, *Air Pollution Modeling and Its Application XIX*, C. Borrego and A.I. Miranda (Eds.), 496-504, ISBN 978-1-4020-8452-2, Springer, The Netherlands.
- Pleim, J.E. (2007) A combined local and nonlocal closure model for the atmospheric boundary layer. Part II: Application and evaluation in a mesoscale meteorological model, *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 46, 1396-1409.
- Pöschl, U. (2005) Atmospheric aerosols: Composition, transformation, climate and health effects, *Angew. Chem. Int. Ed.*, 44, 7520-7540.
- Pope, C.A. and D.W. Dockery (2006) Health Effects of Fine Particulate Air Pollution: Lines that Connect, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 56(6), 709-742.
- Poulos, G.S., W. Blumen, D.C. Fritts, J.K. Lundquist, J. Sun, S.P. Burns, C. Nappo, R. Banta, R. Newsom, J. Cuxart, E. Terradellas, B. Balsley, and M. Jensen (2002) CASES-99: A comprehensive investigation of the stable nocturnal boundary layer, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 83, 555-581.
- Richter, A., J.P. Burrows, H. Nüß, C. Granier, and U. Niemeier (2005) Increase in tropospheric nitrogen dioxide over China observed from space, *Nature*, 437, 129-132, doi:10.1038/nature04092.
- Riemer, N., H. Vogel, and B. Vogel (2003) Impact of the heterogeneous hydrolysis of N_2O_5 on chemistry and nitrate aerosol formation in the lower troposphere under photochemical conditions, *Journal of Geophys. Res.*, 108(D4), 4144, doi:10.1029/2002JD002436.
- Robinson, A., N.M. Donahue, M.K. Shrivastava, E.A. Weikamp, A.M. Sage, A.P. Grieshop, T.E. Lane, J.R. Pierce, and S.N. Pandis (2007) Rethinking organic aerosols: Semivolatile emissions and photochemical aging, *Science*, 315, 1259-1261.
- Sandu, A., D.N. Daescu, G.R. Carmichael, and F.T. Chai (2004) Adjoint sensitivity analysis of regional air quality models, *J. COMPUT. PHYS.*, doi:10.1016/j.jcp.2004.10.011.
- Schnell, R.C., S.J. Oltmans, R.R. Neely, M.S. Endres, J.V. Molenaar, and A.B. White (2009) Rapid photochemical production of ozone at high concentrations in rural site during winter, *Nature Geoscience*, 120-122.
- Shin, H., S.-Y. Hong, and J. Dudhia (2012) Impacts of the lowest model level height on the performance of planetary boundary-layer parameterizations, *Mon. Wea. Rev.*, 140, 664-682.
- Shin, H. and S.-Y. Hong (2011) Intercomparison of planetary boundary-layer parameterizations in the WRF model for a single day from CASES-99, *Bound.-Layer Meteor.*, 139, 261-281.
- Singh, H.B. and D.J. Jacob (2000) Future Directions: Satellite observations of tropospheric chemistry, *Atmos. Environ.*, 34, 4399-4401.
- Song, C.H., C.M. Kim, Y.J. Lee, G.R. Carmichael, B.K. Lee, and D.S. Lee (2007) An evaluation of reaction probabilities of sulfate and nitrate precursors onto East Asian dust particles, *J. Geophys. Res.*, 112, D18206, doi:10.1029/2006JD00809.
- Song, C.H., J.E. Nam, K.M. Han, M.K. Lee, J.H. Woo, and J.S. Han (2012) Influence of mineral dust mixing-state and reaction probabilities on size-resolved sulfate formation in Northeast Asia, *Atmos. Environ.*, doi:10.1016/j.atmosenv.2011.10.057.
- Song, C.H., M. Maxwell-Meier, R.J. Weber, V. Kapustin, and A. Clarke (2005) Dust composition and mixing state inferred from airborne composition measurements during ACE-Asia C130 Flight#6, *Atmos. Environ.*, 39, 359-369.
- Song, C.H., M.E. Park, K.H. Lee, H.J. Ahn, Y. Lee, J.Y. Kim, K.M. Han, J. Kim, Y.S. Ghim, and Y.J. Kim (2008) An investigation into seasonal and regional aerosol characteristics in East Asia using model-predicted and remotely-sensed aerosol, *Atmos. Chem. & Phys.*, 8, 6627-6654.
- Steenefeld, G.J., T. Mauritsen, E.I.F. de Bruijn, J.V.-G. de Arellano, G. Svensson, and A.A.M. Holslag (2008) Evaluation of limited-area models for the representation of the diurnal cycle and contrasting nights in CASES-99, *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 47, 869-887.
- Streets, D.G., T.C. Bond, G.R. Carmichael, S.D. Fernandes, Q. Fu, D. He, Z. Klimont, S.M. Nelson, N.Y. Tsai, M.Q. Wang, J.-H. Woo, and K.F. Yarber (2003) An inventory of gaseous and primary aerosol emissions in Asia in the year 2000, *Journal of Geophysical Research*, 108(D21).

- Su, H., Y. Cheng, R. Oswald, T. Behrendt, I. Treb, F.X. Meixner, M.O. Andreae, P. Cheng, Y. Zhang, and U. Poschl (2011) Soil nitrite as a source of atmospheric HONO and OH radicals, *Science*, 333, 1616-1618.
- Sukoriansky, S., B. Galperin, and V. Perov (2005) Application of a new spectral theory of stable stratified turbulence to the atmospheric boundary layer over sea ice, *Bound.-Layer Meteor.*, 117, 231-257.
- Uno, I., Y. He, T. Ohara, K. Yamaji, J.-I. Kurokawa, M. Katayama, Z. Wang, K. Noguchi, S. Hayashida, A. Richter, and J.P. Burrows (2007) Systematic analysis of interannual and seasonal variations of model-simulated tropospheric NO₂ in Asia and comparison with GOME-satellite data, *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 1671-1681.
- van der A, R.J., D.H.M.U. Peters, H.J. Eskes, K.F. Boersma, M. Van Roozendaal, I. De Smedt, and H.M. Kelder (2006) Detection of the trend and seasonal variation in tropospheric NO₂ over China, *J. Geophys. Res.*, 111, D12317, doi:10.1029/2005JD006594.
- van Noije, T.P.C., H.J. Eskes, F.J. Dentener, D.S. Stevenson, K. Ellingsen, M.G. Schultz, O. Wild, M. Amann, C.S. Atherton, D.J. Bergmann, I. Bey, K.F. Boersma, T. Butler, J. Cofala, J. Drevet, A.M. Fiore, M. Gauss, D.A. Hauglustaine, L.W. Horowitz, I.S.A. Isaksen, M.C. Krol, J.-F. Lamarque, M.G. Lawrence, R.V. Martin, V. Montanaro, J.-F. Müller, G. Pitari, M.J. Prather, J.A. Pyle, A. Richter, J.M. Rodriguez, N.H. Savage, S.E. Strahan, K. Sudo, S. Szopa, and M. van Roozendaal (2006) Multi-model ensemble simulations of tropospheric NO₂ compared with GOME retrievals for the year 2000, *Atmos. Chem. Phys.*, 6, 2943-2979, doi:10.5194/acp-6-2943-2006.
- Volkamer, R., J.L. Jimenez, F. San Martini, K. Dzepina, Q. Zhang, D. Salcedo, L.T. Molina, D.R. Worsnop, and M.J. Molina (2006) Secondary organic aerosol formation from anthropogenic air pollution: Rapid and higher than expected, *Geophys. Res. Lett.*, 33, doi:10.1029/2006GL026899.
- Wang, H., D.J. Jacob, P. Le Sager, D.G. Streets, R.J. Park, A.B. Gilliland, and A. van Donkelaar (2009) Surface ozone background in the United States: Canadian and Mexican pollution influences, *Atmos. Environ.*, 43, 1310-1319.
- Wang, Y.X., M.B. McElroy, R.V. Martin, D.G. Streets, Q. Zhang, and T.M. Fu (2007) Seasonal variability of NO_x emissions over east China constrained by satellite observations: Implications for combustion and microbial sources, *J. Geophys. Res.*, 112, D06301, doi:10.1029/2006jd007538.
- Wittrock, F., A. Richter, H. Oetjen, J.P. Burrows, M. Kanakidou, S. Myriokefalitakis, R. Volkamer, S. Beirle, U. Platt, and T. Wagner (2006) Simultaneous global observations of glyoxal and formaldehyde from space, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L16804, doi:10.1029/2006GL026310.
- Woo, J.-H., K.-C. Choi, H.K. Kim, B.H. Baek, M. Jang, J.-H. Eum, C.H. Song, Y.-I. Ma, Y. Sunwoo, L.-S. Chang, and S.H. Yoo (2012) Development of an anthropogenic emissions processing system for Asia using SMOKE, *Atmospheric Environment*, 58, 5-13.
- Yu, H., R.E. Dickinson, M. Chin, Y.J. Kaufman, B.N. Holben, I.V. Geogdzhayev, and M.I. Mishchenko (2003) Annual cycle of global distributions of aerosol optical depth from integration of MODIS retrievals and GOCART model simulations, *J. Geophys. Res.*, 108(D3), 4128, doi:10.1029/2002JD002717.
- Zhang, Q., D.G. Streets, G.R. Carmichael, K.B. He, H. Huo, A. Kannari, Z. Klimont, I.S. Park, S. Reddy, J.S. Fu, D. Chen, L. Duan, Y. Lei, L.T. Wang, and Z.L. Yao (2009) Asian emissions in 2006 for the NASA INTEX-B mission, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9, 5131-5153.
- Zhang, Q., D.G. Streets, K. He, Y. Wang, A. Richter, J.P. Burrows, I. Uno, C.J. Jang, D. Chen, Z. Yao, and Y. Lei (2007) NO_x emission trends for China, 1995-2004: The view from the ground and the view from space, *J. Geophys. Res.*, 112, D22306, doi:10.1029/2007JD008684.
- Zhang, Q., J.L. Jimenez, M.R. Canagaratna, J.D. Allan, H. Coe, I. Ulbrich, M.R. Alfarra, A. Takami, A.M. Middlebrook, Y.L. Sun, K. Dzepina, E. Dunlea, K. Docherty, P.F. DeCarlo, D. Salcedo, T. Onasch, J.T. Jayne, T. Miyoshi, A. Shimojo, S. Hatakeyama, N. Takegawa, Y. Kondo, J. Schneider, F. Drewnick, S. Borrmann, S. Weimer, K. Demerjian, P. Williams, K. Bower, R. Bahreini, L. Cottrell, R.J. Griffin, J. Rautiainen, J.Y. Sun, Y.M. Zhang, and D.R. Worsnop (2007b) Ubiquity and dominance of oxygenated species in organic aerosols in anthropogenically-influenced Northern Hemisphere mid-latitudes, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L13801, doi:10.1029/2007GL029979.