

수도권 지역에서 대기질 측정망 자료를 이용한 광화학모델의 이동오염원 배출량 검증

Verification of Mobile Emission for CMAQ using an Observation-based Approach in Seoul Metropolitan Area

이용미 · 이현주 · 유 철 · 송정희¹⁾ · 김지영^{2)*} · 홍지형²⁾

국립환경과학원 기후대기연구부 대기제어연구과

¹⁾국립환경과학원 환경건강위해성연구부 환경역학과

²⁾국립환경과학원 교통환경연구소

(2009년 1월 29일 접수, 2009년 4월 23일 수정, 2009년 9월 8일 채택)

Yong-mi Lee, Hyun-ju Lee, Chul Yoo, Jeong-hui Song¹⁾,
Ji-young Kim^{2)*} and Ji-hyung Hong²⁾

*Air Pollution Control Research Division, Climate and Air Quality Research Department,
National Institute of Environmental Research*

¹⁾*Environmental Epidemiology Division, National Institute of Environmental Research*

²⁾*Transportation Pollution Research Center, National Institute of Environmental Research*

(Received 29 January 2009, revised 23 April 2009, accepted 8 September 2009)

Abstract

The objective of this study was to simulate surface air pollutants and to examine reliability of mobile emission for CMAQ system using an observation-based approach in the Seoul Metropolitan Area. Accurate assessment of emissions from mobile source is one of the most debatable parts in the entire emissions inventory process. For this study, we evaluated the official emission inventories of Volatile Organic Compounds (VOCs) and nitrogen oxides (NO_x) using an observation-based approach. In this paper, we achieved VOCs/CO and NO_x/CO ratios derived from ambient measurements taken from June to August of 2005 in early morning (07:00~08:00). And we compared them with those derived from the emission inventory. Based on these ratios and on the assumption that official inventory of CO emissions is reasonably accurate, mobile emissions of NO_x seem to be slightly overestimated and VOCs emissions significantly underestimated. The results of simulations using modified emission of mobile source were in closer agreement with the observation results except NO. Predicted NO values based on revised NO_x emissions were considerably lower than the observed values. Using modified emission inventories brings the modeled values into closer agreement with observed ozone levels in Seoul. Especially in case of CO, NO_x and VOCs emission, the modified values were suitable for simulating ozone levels in Seoul and Gyeonggi. However, ozone values predicted using

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)32-560-7654, E-mail : jykim@me.go.kr

the modified emissions were higher than the observed and predicted values based on original emissions. According to the 95 percentile ozone concentrations, emission revised by CO, NO_x and VOCs from mobile source was the best for predicting high concentration.

Key words : Mobile source, Emission control, NO_x/CO, VOCs/CO, CMAQ

1. 서론

우리나라의 수도권 지역의 대기오염도는 심각한 수준에 이르렀다. 특히, 1995년 오존경보제가 도입된 이후, 오존주의보 발령횟수는 지속적으로 증가하고 있으며, 서울 지역에 국한되어 있던 발령지역은 수도권을 비롯한 부산, 대구 등의 대도시로 확산되고 있는 실정이다(조용성과 전의찬, 2005). 오존과 같은 2차 대기오염물질은 생성 기작이 복잡하고 관측이 어려운 물질로서 대기질 관리 정책의 수립, 환경영향평가 등의 연구를 위하여 대기질 모델이 많이 이용되고 있다. 이러한 대기질 모델링 결과의 정확성과 신뢰성을 높이기 위해서는 입력 자료의 준비가 매우 중요하다. 최근의 대기질 모델링은 기상 및 배출량 자료의 복잡성이 커져 이를 준비하는 데에도 상당한 노력이 요구되고 있다. 현재 국내에서는 대기질 모델의 배출량 자료로 대기정책지원시스템(Clean Air Policy Support System: CAPSS)의 인벤토리 자료를 대부분 활용하고 있다. 국립환경과학원에서는 매년 배출량의 산정 시 그 신뢰성을 향상시키기 위하여 여러가지 관련 연구를 함께 시행하고 있다. 그러나 이러한 노력에도 불구하고 여러 선행 연구에서 이동오염원 및 휘발성유기화합물 등 배출량 자료의 오차가능성을 제시하고 있다. 특히, 김현구 등(2002)에서는 면 및 이동오염원 배출량의 공간할당연구를 통해 기존 격자 체계(1km×1km)를 통해 산정된 배출량 적용 시 대기질 예측의 저평가 원인이 될 수도 있음을 밝힌 바 있다. 또한 조규탁(2005)에서는 이동오염원 배출량 산정시 평균 속도에 기초한 Top Down 접근법이 공간규모 및 CO, VOCs 등의 오염물질에 따라 저평가 가능성을 시사하였다. 국외 연구에서도 EMFAC7F 모델을 이용한 이동오염원 배출량 예측 결과, 캘리포니아 남부의 고속도로 터널에서 측정을 통한 CO 및 non-methane organic gas(NMOG) 배출량의 비가 배

출 계수 모델에 의한 예측값보다 2.7 ± 0.7 과 3.8 ± 1.5 배 높은 것으로 나타났다(Fujita *et al.*, 1992). 이러한 오차 가능성 중에서도 이동오염원에서 배출되는 NO_x 및 VOCs 배출량은 오존 생성에 기여하는 물질로 광화학 반응에 의해 생성되는 오존 예측 시 많은 오차를 야기할 수 있다. 특히 각 오염물질별 배출량이 오존 생성에 미치는 영향이 비선형적이며 복합적임에 따라 다양한 관련 연구가 필요하다는 연구결과가 많이 제시되고 있다. 따라서 광화학 수치모델을 이용한 대기질 모사의 신뢰성 향상을 위하여 입력 자료의 신뢰성 제고와 검증이 반드시 필요하다. 이에 본 연구에서는 대기정책수립에 중요한 도구가 되는 대기질 모델의 신뢰성을 높이기 위하여 고농도 오존 사례를 토대로 대기오염자동측정망의 관측 자료를 이용하여 NO_x와 VOCs 배출량의 적절한 비를 산출하였다. 또한 이러한 관측값을 활용한 오존 전구물질의 배출량 조정이 광화학 수치모델을 이용한 오존 예측 결과에 미치는 영향을 살펴봄으로써 대기질 모델의 신뢰성 향상 방안을 제고해 보았다.

2. 연구 및 방법

2.1 모델링 수행 조건 및 입력자료

본 연구의 사례기간은 전형적인 고농도 오존 발생 기상조건인 2005년 7월 22일을 중심으로 2005년 7월 21일부터 25일까지 5일간을 사례기간으로 선정하였다. 수도권 지역에서의 고농도 오존은 풍속이 낮고, 기온과 일사량이 높으며, 고온의 난기류가 유입된 후 기단의 정체 등의 조건에서 나타난다(정용승과 정재섭, 1991).

오존을 포함한 대기오염물질의 계산에는 미국 EPA의 Models-3/Community Multiscale Air Quality(CMAQ)를 활용하였다(Byun and Ching, 1999). 수평과 수직적 이류 계산에는 Piecewise Parabolic Method

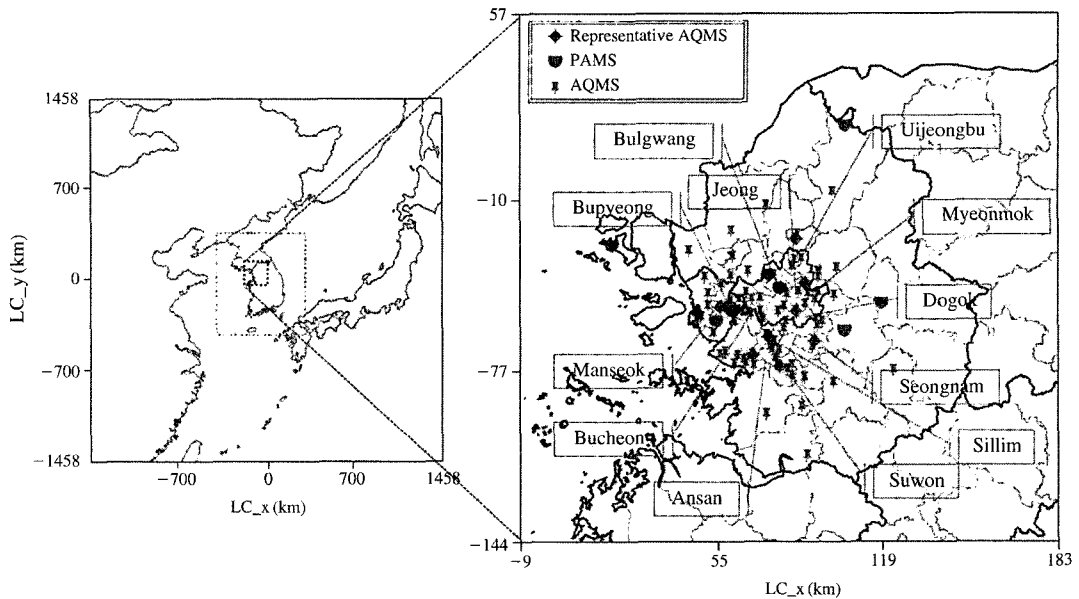


Fig. 1. The coarse and nested grid domains and air quality monitoring stations.

(PPM)를 이용하였으며, Eddy 연직 열확산 이론에 의해 연직 확산을 계산하였다. 또한 광해리울 산정과정은 clear-sky 모듈과 운량 보정을 통해 광해리울을 내삽하여 산정하였다. 화학반응 메커니즘으로는 기체상 반응으로는 Carbon-Bond Chemical Mechanism Version IV (CB4)를 사용하였고, 입자상 반응으로는 Models-3/CMAQ의 Aero3 모듈을 이용하였다. Models-3/CMAQ의 기상 자료를 산출하기 위해 Penn State University (PSU)/National Center for Atmospheric Research (NCAR)의 Mesoscale Model을 사용하였고 (Dudhia, 1993), 배출량 입력 자료의 가공을 위해 Sparse Matrix Operator Emission (SMOKE)를 활용하였다. 기상 모델 수행 시 적운 모수화 과정은 Grell cumulus scheme을 사용하였고 (Grell *et al.*, 1995), 복사과정은 Rapid Radiative Transfer Model (RRTM) Longwave Scheme을 사용하여 수증기, 이산화탄소, 오존에 의한 상세한 흡수 스펙트럼 효과를 고려하였다. 대기 경계층에 대한 물리과정은 비극지적 연직 확산을 고려하는 Eta PBL Scheme을 사용하였으며, 지표면 물리 과정은 Five-Layer soil scheme을 선택하였다 (Dudhia, 1996). SMOKE의 모델링 수행 시 화학 반응은 CMAQ에 기초하여 CB4 메커니즘에 따른 중별 프로파일을 산정하였다. 자연 배출량 계산에는

Microsoft Access에서 운영 가능한 Global Biosphere Emission and Interaction System (Globeis)을 활용하였다. 본 연구의 계산 영역은 Lambert Conformal (LC) 격자 투영법을 이용하였고 그림 1과 같이 모델영역을 2개의 동지 격자로 구성하였다. 따라서 동아시아 영역부터 수도권 영역까지 계산하여 경계의 feed-back을 허용하는 two-way interacting nested grid system을 적용하였다.

본 연구의 기상 모델의 초기 및 경계 입력 자료는 National Centers for Environmental Prediction (NCEP)의 6시간 단위 Climate Data Assimilation System (CDAS)를 활용하였다. 배출모델의 입력 자료는 초기 및 경계 자료로 최근 발표된 0.5°×0.5° 간격의 INTEX-B Project (2006)의 동아시아 배출량 인벤토리 자료와 우리나라의 1 km×1 km 간격의 Clean Air Policy Support System (CAPSS)의 2005년도 배출량 인벤토리 자료를 사용하였다 (국립환경과학원, 2007). 자연배출량은 기상모델결과 및 환경부의 토지이용도 자료를 이용하여 Globeis를 이용하여 산정하였다.

본 연구에서는 모델의 모사 능력을 향상시키기 위하여 기상 및 배출 모델의 입력자료 개선을 실시하였다. 우선, 기상모델의 경우 환경부에서 제공하는 90 m 간격의 DEM 자료를 domain3에 삽입하였다. 또한, 환

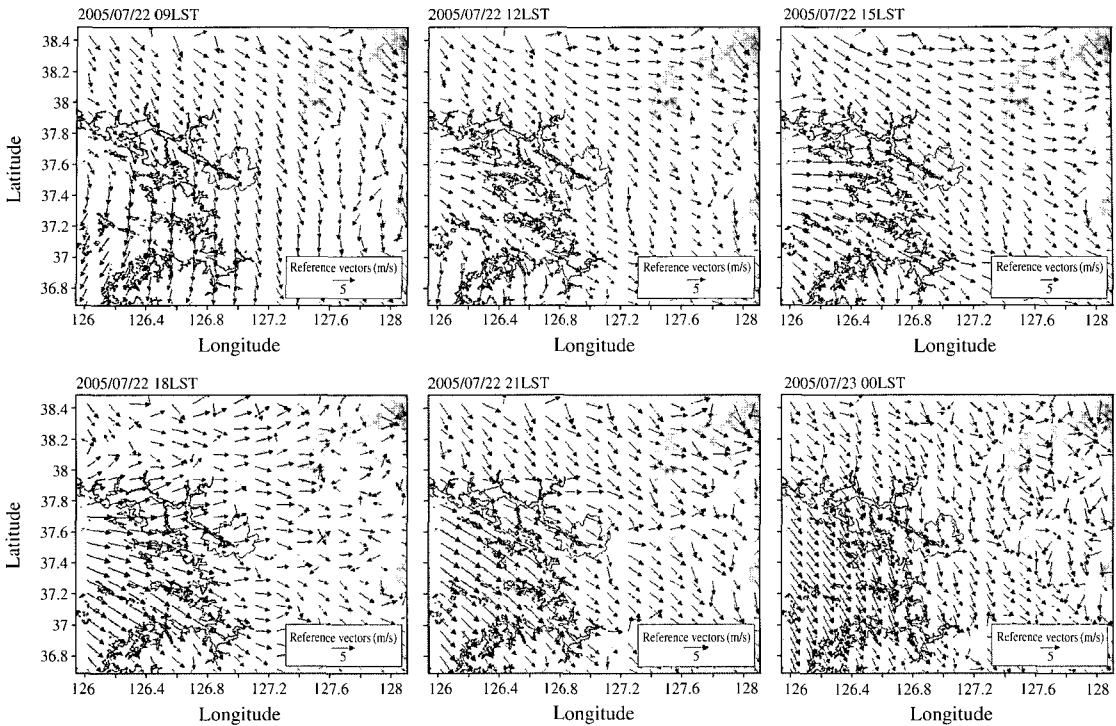


Fig. 2. The simulated horizontal wind field.

경부에서 제공하는 30m 대분류 토지피복자료를 이용하여 domain3의 토지이용도를 개선하였다. 또한 2005년도 배출량의 SMOKE 적용을 위하여 화학종 및 시간 분류 프로파일 등의 입력자료를 추가 작성하였다. 입력 자료는 기존 연구(김지영 등, 2008; 김정수 등, 2006)를 기반으로 하여 화학종별 프로파일은 총 109개, 시간 할당 프로파일은 총 37가지를 추가 할당하였다.

2.2 모델링 정합도 분석

2005년 7월 20일 00LST(Local Standard Time)~7월 26일 00LST까지의 사례기간 동안 대기질에 큰 영향을 미치는 바람장의 분석 결과는 그림 2와 같다. 또한 서울, 인천, 수원 기상대의 관측값과 수치모델의 결과 간의 상관분석 결과, 기온의 IOA값은 모두 0.8 이상으로 높은 상관성을 나타냈다. 풍속은 서울(0.55), 인천(0.54), 수원(0.47) 세 지역 모두 비교적 유의한 상관성을 나타냈다(표 1).

대기질 모델링의 정합도 분석을 위하여 표 2와 같

Table 1. Model performance statistics calculated for temperature and wind.

Meteorology	Region	RMSE	IOA	Bias
Temperature	Seoul	3.28	0.80	-
	Incheon	2.23	0.86	-
	Suwon	2.14	0.92	-
Wind speed	Seoul	1.34	0.55	-
	Incheon	1.56	0.54	-
	Suwon	1.64	0.47	-
Wind direction	Seoul	-	-	82.49
	Incheon	-	-	74.39
	Suwon	-	-	72.90

이 시도별 평균 오존 및 NO₂의 결과 분석을 실시하였다. 서울 지역의 오존 평균 예측값은 26.01 ppb로 관측값에 비해 낮게 모사되었으나 관측값과의 IOA 값은 0.74로 높았다. 경기도와 인천의 예측값은 30.09 ppb와 37.72 ppb로 관측값에 비해 모두 높았으나, 경기도의 IOA값은 0.78, 인천은 0.57로 비교적 높은 상관성을 보였다. RMSE는 경기도가 18.21로 가장

Table 2. Model performance statistics calculated for O₃ and NO₂.

Pollutant	Region	Mean prediction (ppb)	Mean observation (ppb)	R	IOA	RMSE
O ₃	Seoul	26.01	29.58	0.70	0.74	22.11
	Gyeonggi	30.09	26.10	0.75	0.78	18.21
	Incheon	37.72	18.78	0.47	0.57	24.24
NO ₂	Seoul	35.60	30.37	0.14	0.46	15.09
	Gyeonggi	31.16	25.75	0.36	0.60	11.56
	Incheon	19.46	22.81	-0.14	0.23	13.59

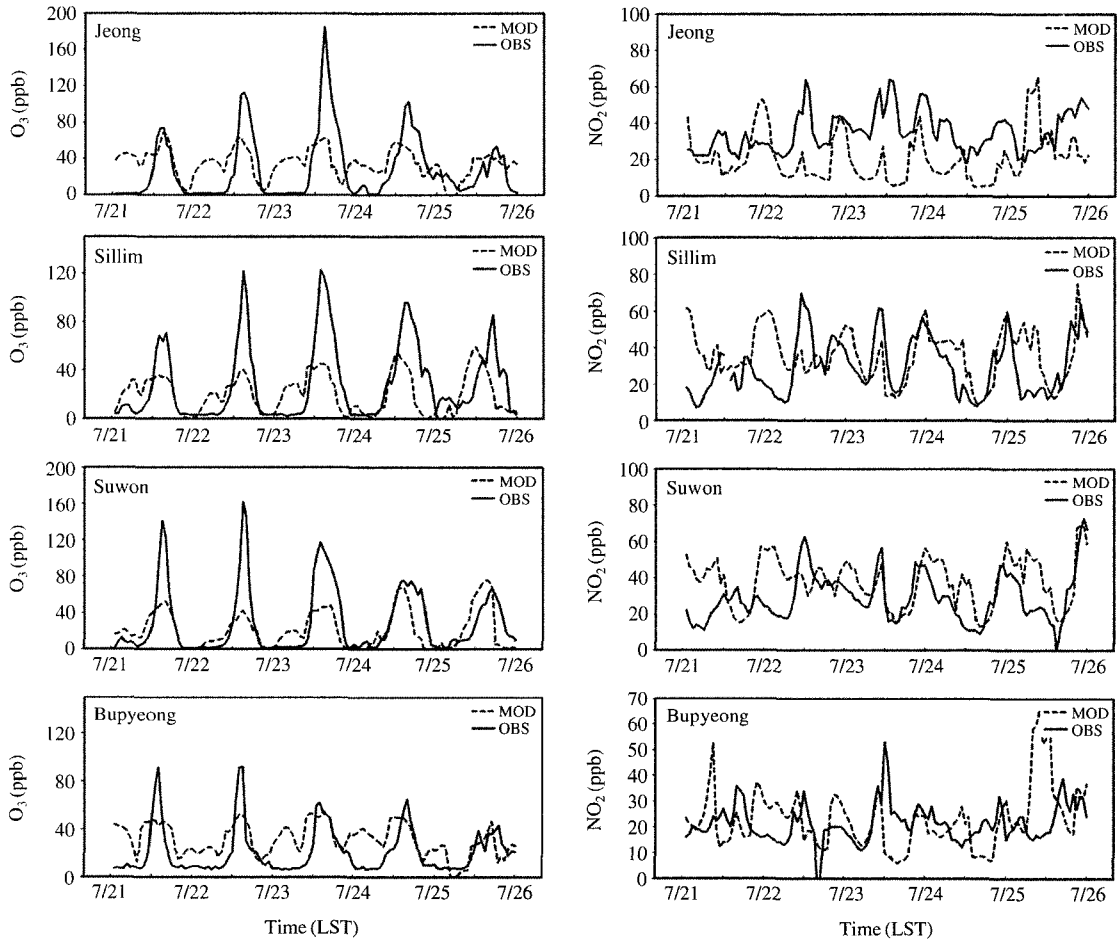


Fig. 3. Time series of O₃ and NO₂ between observed and predicted value at AQMS.

낮고 인천이 24.24로 가장 높게 분석되었다. 서울과 경기도에서 NO₂ 평균 예측값은 35.6 ppb와 31.16 ppb로 관측값보다 높았고, 인천의 평균 예측값은 19.46 ppb로 관측값에 비해 약간 낮았다. NO₂의 상관성 분

석 결과, 인천 지역을 제외하고 서울(0.46)과 경기도(0.60)는 비교적 유의한 상관성을 나타냈다. RMSE는 경기도(11.56)가 가장 낮았으며 서울(15.09)이 가장 높게 분석되었다.

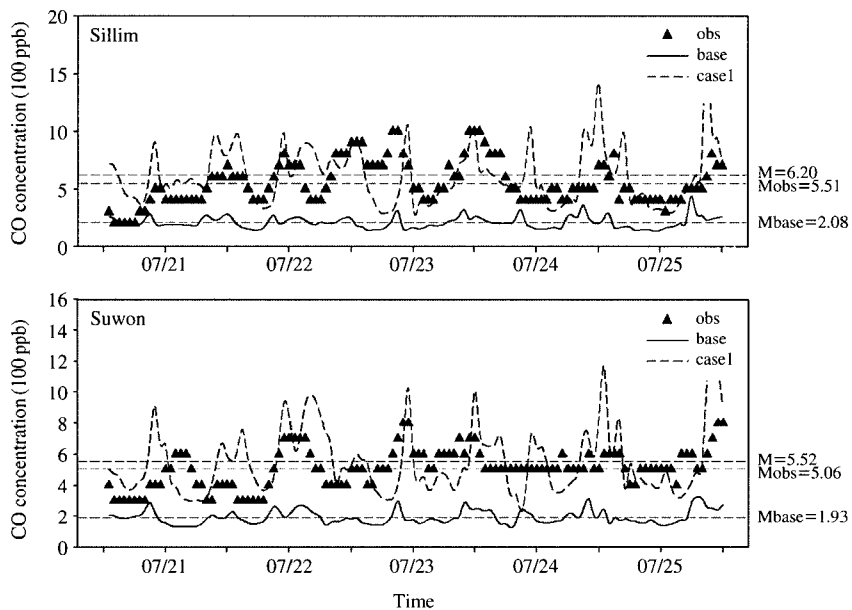
그림 3은 수도권 지역의 대기오염자동측정망의 지점별 오존 및 NO₂의 시계열 분석의 예를 나타낸 것이다. 전반적으로 오존의 경우 시간에 따른 패턴을 잘 모사하고 있는 것으로 분석되었다. 그러나 오존 최고치가 비교적 낮게 모사되었고 일부 지역에서의 야간 중 고농도 오존 발생 등의 오차가 나타났다. NO₂의 경우 비교적 예측값과 관측값이 유사한 농도 수준이나 시계열을 잘 모사하지 못하는 것으로 분석되었다. 특히, 정동 및 부평의 경우 시간별 패턴을 잘 모사하지 못하고 있었으며, 일부 낮시간 동안의 NO₂ 농도가 저평가되었다.

3. 결 과

3.1 모델링 시나리오 선정

본 연구는 우리나라 대기질 모델링 적용을 위한 배출량 입력 자료의 적합성을 검토하기 위한 연구이다. 기존의 여러 연구를 통해 우리나라의 VOCs 및 CO 배출량의 저평가 가능성(하용선, 2006; 장명도, 2004)과 NO_x 배출량의 과대평가 가능성(KEI, 2007)

을 언급한 바 있다. 따라서 본 연구는 대기 중 오존 생성 전구물질인 NO_x, VOCs 등의 배출기여도가 크고 불확실성이 높은 이동오염원을 중심으로 배출량 조정에 따른 오존 예측 결과를 비교 분석하였다. 본 연구의 배출량 조정 시나리오는 Vivanco and Andrade (2006) 연구를 활용하였다. Vivanco and Andrade (2006)는 top-down 접근법으로 이른 아침 대기 중 CO, NO_x, NMOG의 농도가 자동차의 영향이 크고, 일사량과 풍속이 낮음에 따라 광화학 반응에 의한 영향이 작다는 가정을 기반으로 하고 있다. 우리나라 수도권 지역의 배출량 분석 결과 이동오염원 부문 CO, NO_x 및 VOCs 배출량이 전체 배출량의 88%, 64% 및 19%로 많은 양을 차지하고 있다(국립환경과학원, 2007). 또한, 아침 시간은 낮은 혼합고와 풍속으로 인한 수송과 광화학 반응에 의한 영향이 적은 시기로 배출량 검증에 위한 가장 적절한 시간이다. 또한 Vivanco and Andrade(2006)에서는 NO_x 및 VOCs 배출량의 적용하기에 앞서 CO 배출량의 정확성을 언급하고 있다. 따라서 반응성이 비교적 적은 CO의 경우 대기질 예측농도와 관측값 간의 비교를 통하여 조정비율을 결정하였으며, 기존 연구(KEI,



*Mobs is Mean observation, M is Mean prediction by 5 time CO emission and Mbase is Mean prediction by base CO emission

Fig. 4. Time series of average CO between modified and original CO emission at Sillim and Suwon station for 21~25, July.

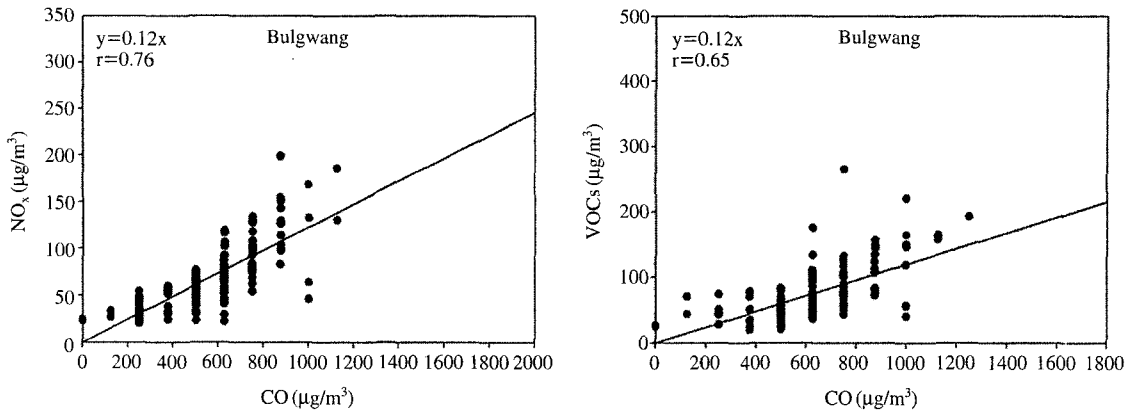


Fig. 5. Plot of ambient NO_x and VOCs versus ambient CO concentrations measured from 07:00 to 08:00 at Bulgwang.

Table 3. Average of NO and NO₂ according to emission scenarios at AQMS.

Pollutant	Seoul			Gyeonggi			Incheon		
	OBS	BASE	CASE1	OBS	BASE	CASE1	OBS	BASE	CASE1
NO	19.78	16.34	12.06	17.97	11.71	8.19	32.08	6.45	5.00
NO ₂	30.37	35.6	31.8	25.75	31.16	27.15	22.81	19.46	17.06

Table 4. Average of VOCs according to emission scenarios value at AQMS.

Pollutant	Seoul			Gyeonggi			Incheon		
	OBS	BASE	CASE2	OBS	BASE	CASE2	OBS	BASE	CASE2
Ethylene	3.52	1.03	3.18	0.46	0.16	0.21	2.43	1.75	4.81
Toluene	7.62	2.04	3.01	0.4	0.08	0.1	8.11	4.31	5.41

* Ethylene and toluene is predicted and observed at Jeong-dong of Seoul, Pocheon of Gyeonggi and Guweol of Incheon.

2007)의 수정비를 참고하였다. 이러한 과정을 통해 본 연구에서는 이동오염원의 CO 배출량 조정 비율을 5배로 결정하였다(그림 4). CO 배출량 조정으로 인하여 기존에 저평가되었던 CO 농도가 관측값과 유사한 수준으로 향상되었다. 또한 시계열 분포 역시 더욱 향상되어 출·퇴근 시간대의 고농도 현상을 잘 묘사하였다. 그러나 이동오염원의 배출량 증가에도 불구하고 인천 지역의 예측 농도는 낮게 분석되었다. 이러한 영향은 선박 및 항공 부분의 배출량 저평가에 의한 것으로 사료된다(환경부, 2008).

NO_x와 VOCs의 배출량 조정 비율 산출을 위하여 대기오염자동측정망의 CO 및 NO, NO₂ 등의 자료와 광화학측정망의 VOCs 자료를 이용하였다. 본 자료는

모델링 사례일을 포함한 2005년 5~8월간의 무강수 일을 대상으로 광화학 반응이 낮은 오전 7~8시 사이의 값을 활용하였으며, 측정망의 NO_x와 CO 및 VOCs와 CO 간의 상관성 분석을 통해 배출량 조정비를 산출하였다. 이때, NO_x와 CO 간의 상관계수(correlation coefficient, r)는 불광, 정동, 심곡의 모든 지역에서 0.7 이상, VOCs와 CO 간의 상관계수는 0.65 이상의 높은 상관성을 나타냈다(그림 5). 이렇게 산출된 이동오염원의 NO_x 배출량 조정 비율은 0.8배, VOCs 배출량 조정 비율은 4배이다. 본 연구에서는 CO 배출량 조정을 기반으로 NO_x 배출량을 조정한 사례를 CASE1, VOCs를 조정한 사례를 CASE2 그리고 NO_x 및 VOCs 배출량을 모두 조정한 사례를

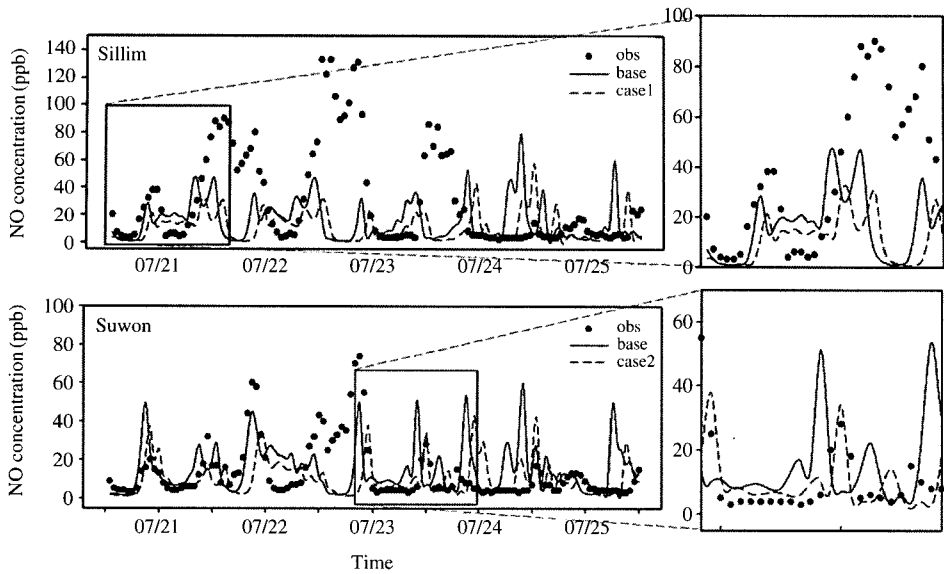


Fig. 6. Diurnal variation of NO according to emission scenarios at Sillim and Suwon station.

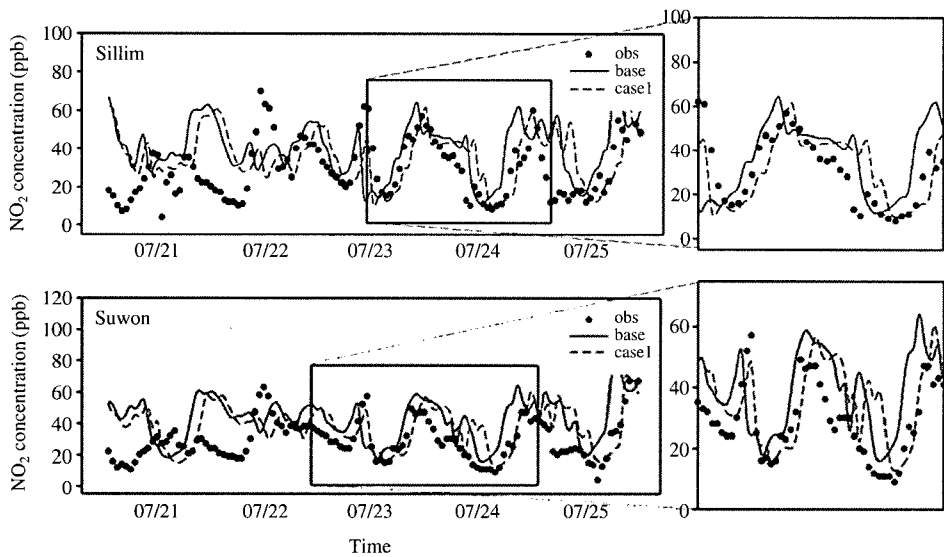


Fig. 7. Diurnal variation of NO₂ according to emission scenarios at Sillim and Suwon station.

CASE3으로 선정하여 비교·분석하였다.

3.2 시나리오별 모델링 결과 분석

각 배출량 조정에 따른 오염물질별 대기오염도의 변화를 지역별로 살펴본 결과는 아래 표 3 및 4와

같다. 우선, NO의 예측 농도는 관측농도에 비해 낮게 분석되었다. 특히 인천의 경우 예측 농도가 관측값의 1/5 정도 수준으로 낮았다(표 3). NO 농도는 기본 배출량 적용시 가장 관측값에 가깝게 모사되었으나 NO_x 배출량 조정으로 일변화 모사는 더욱 향상된 것

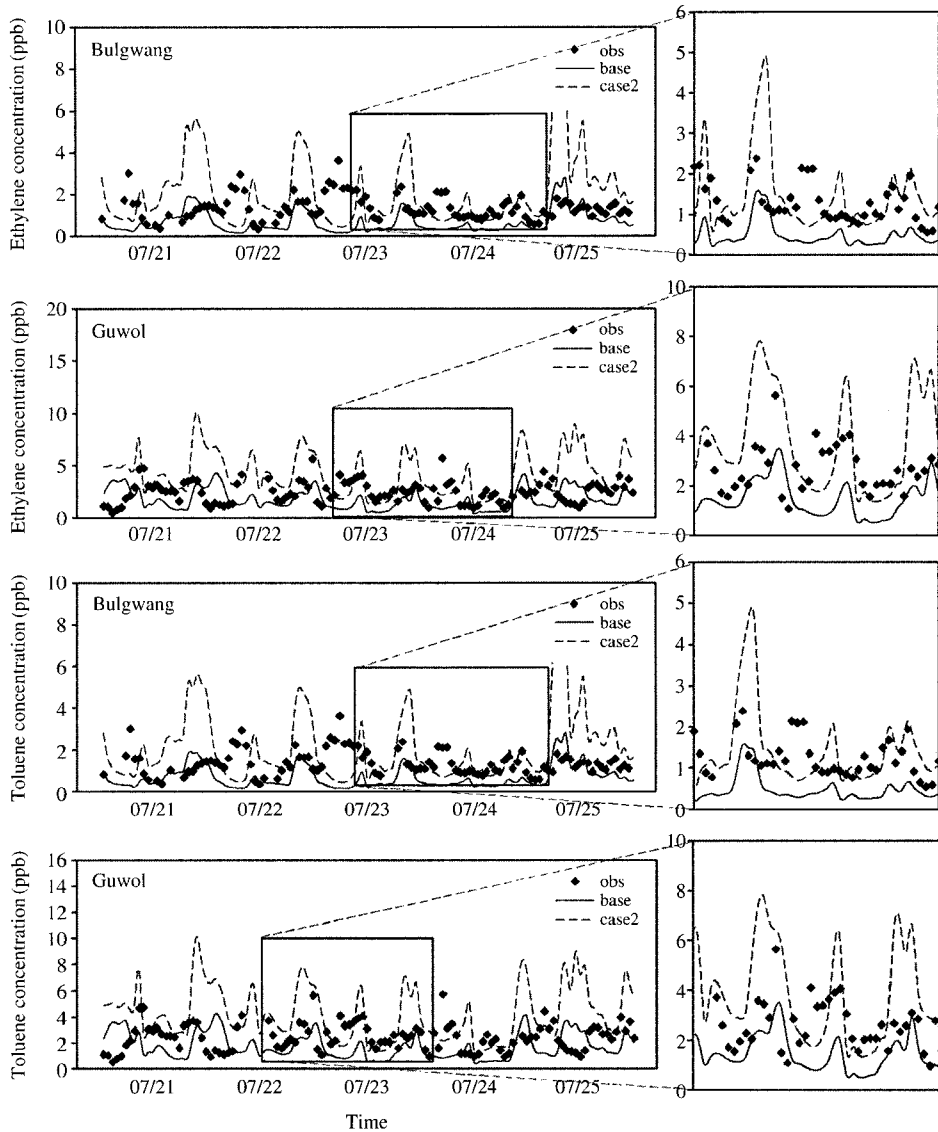


Fig. 8. Diurnal variation of Ethylene and Toluene according to emission scenarios at Bulgwang and Guwol station.

으로 분석되었다(그림 6). NO₂의 경우 서울과 경기 지역에서는 NO_x 배출량 조정으로 NO₂ 농도는 관측값과 유사한 수준으로 모사되었고 관측값과의 상관성 역시 향상된 것으로 분석되었다(그림 7). 이러한 결과를 통해 NO와 NO₂의 배출비율의 조정으로 모델링을 이용한 예측 농도가 향상되었음을 시사하였다. 그러나 현재 NO의 주요한 오염원인 토양오염원

(김득수, 2001)이 제외되어 있으며, 인천 지역에서는 선박 배출량의 저평가(환경부, 2008) 등으로 NO 배출량이 크게 저평가되어 있어 이에 따른 추가연구가 필요할 것이다.

광화학측정망의 VOCs 중별 자료 중 Ethylene과 Toluene을 이용한 예측농도분석결과, 관측값에 비해 전반적으로 낮게 모사되었다(표 4). 그러나 관측값을

Table 5. Model performance statistics calculated for O₃ according to emission scenarios.

Region	Case	Mean prediction (ppb)	95th percentile prediction (ppb)	R	IOA	RMSE
Seoul	Observation	29.58	91.78	—	—	—
	BASE	26.01	55.38	0.70	0.74	22.11
	CASE1	29.35	57.61	0.83	0.82	18.61
	CASE2	27.63	57.55	0.84	0.84	18.09
	CASE3	30.41	60.49	0.83	0.84	18.16
Gyeonggi	Observation	26.10	77.78	—	—	—
	BASE	30.09	55.41	0.75	0.78	18.21
	CASE1	33.71	60.27	0.81	0.81	17.89
	CASE2	32.46	61.64	0.82	0.84	16.75
	CASE3	35.28	65.47	0.82	0.83	17.89
Incheon	Observation	18.78	56.46	—	—	—
	BASE	37.72	51.15	0.47	0.57	24.24
	CASE1	39.98	52.75	0.48	0.56	25.99
	CASE2	38.60	52.59	0.51	0.58	24.72
	CASE3	40.13	54.22	0.53	0.57	25.83

이용한 배출량 조정에 의한 예측값은 비교적 관측값과 유사한 수준으로 향상되었다. 그러나 지점별 시계열 분석결과, 일변화를 정확하게 예측하지 못하고 있었으며, 배출량 조정으로 인하여 고농도를 더욱 과대평가하는 것으로 분석되었다(그림 8). 그러나 전반적인 VOCs 배출량 저평가와 같은 문제점은 관측값을 이용한 배출량 조정으로 향상된 결과를 나타냈다. 그러나 종별 VOCs 모사 능력의 전반적인 개선을 위해서는 배출량 조정뿐만 아니라 국내화된 VOCs 프로파일 연구가 함께 필요하다. 현재 배출모델의 VOCs 프로파일은 미국의 VOCs 화학종 분류에 기반으로 하여 국내 특성을 제대로 모사하지 못하고 있는 실정이다(Kim *et al.*, 2008). 특히, 하용선 등(2005)에서는 Toluene의 화학종 분류 계수의 저평가로 인하여 이동오염원의 배출량 증가에도 불구하고 관측값보다 낮게 모사됨을 밝힌 바 있다.

3.3 시나리오별 오존 결과 비교 분석

지금까지 배출량 조정에 따른 NO_x, VOCs 종별 대기오염도 변화를 통해 예측 정확도 개선에 대해 살펴 보았다. 본 장에서는 이러한 배출량 조정에 따른 오존 농도의 모사 결과를 살펴보았으며, 특히 고농도 오존 예측 결과의 개선여부를 95퍼센타일 농도 분석을 통해 평가하였다.

표 5는 서울, 경기도, 인천의 지역별 평균 오존 농도 및 시나리오별 오존 예측 결과를 나타낸 것이다.

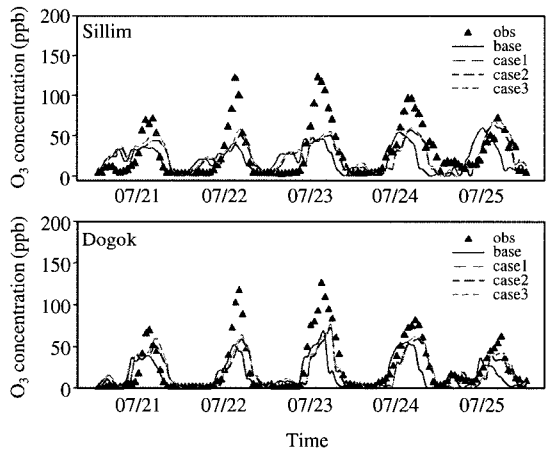


Fig. 9. Time series of O₃ concentrations for each scenario at Sillim and Dogok stations.

서울지역의 오존 예측 농도는 기본 배출량 적용 시 26.01 ppb로 관측값에 비해 낮게 나타났다. 그러나 NO_x 배출량 조정 시 오존농도는 증가하여 29.35 ppb로 관측값과 가장 유사하게 분석되었으며, VOCs 조정시 오존 농도는 27.63 ppb로 약간 감소하였다. 서울지역은 VOCs 배출량 변화에 오존이 민감하게 반응하는 VOCs 한계조건과 intermediate 조건이 공존하는 상태로 비교적 VOCs 증가에 따른 오존 농도가 급격히 변화하며, NO_x 농도 감소 시 오존이 증가하는 패턴으로 알려져 있다(이종범과 김영하, 2004).

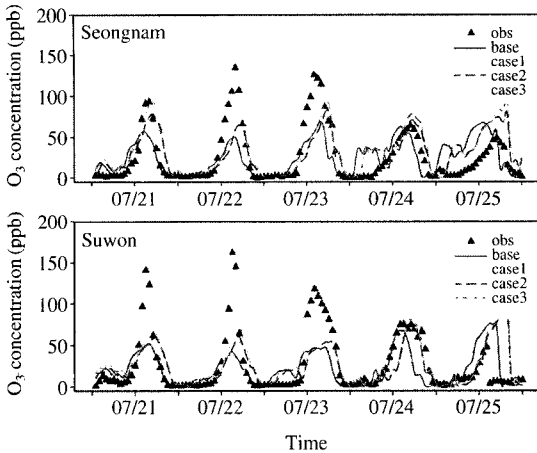


Fig. 10. Time series of O₃ concentrations for each scenario at Seongnam and Suwon stations.

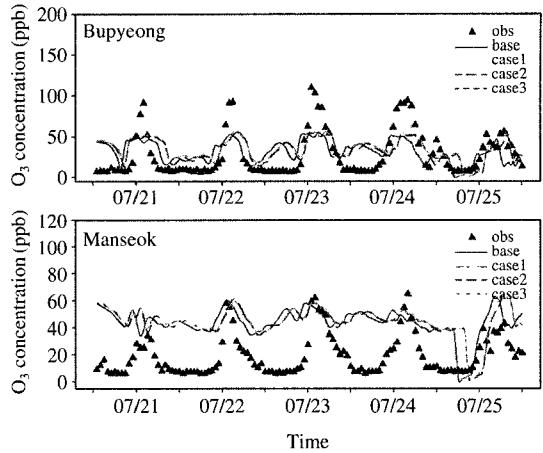


Fig. 11. Time series of O₃ concentrations for each scenario at Bupyeong stations.

본 연구에서는 서울지역 결과가 VOCs 한계조건에 유사한 패턴을 나타내고 있으나, 이동오염원 부문의 VOCs 배출 비율이 적음에 따라 VOCs 배출량에 변화에 따른 민감도가 낮은 것으로 분석되었다. 서울시의 결과로는 VOCs 배출량 조정 시 상관계수와 IOA 값이 모두 0.84로 가장 높게 나타났으며, 오차의 범위도 18.09로 낮게 모사되었다. 서울시의 대표 대기 오염자동측정망 지점인 신림과 도곡 지점의 시계열 분포 및 95퍼센타일 농도를 살펴본 결과(그림 9), NO_x 및 VOCs 배출량 조정에 따라 오존 패턴 및 고농도 오존을 잘 모사하는 것으로 분석되었다. 따라서, 서울시의 경우 관측값에 기반한 NO_x 및 VOCs 배출량 조정으로 오존 농도 모사 능력을 향상시킨 것으로 분석되었다.

경기도의 경우 기본 배출량을 이용한 대기질 예측 농도가 관측값인 26.10 ppb에 비해 높은 것으로 나타났다. 특히, NO_x 및 VOCs를 모두 조정할 경우 경기도 지역의 평균 오존 농도가 35.28 ppb까지 상승하여 큰 차이를 보였으나 관측값과의 상관성은 향상된 것으로 분석되었다(그림 10). 본 연구에서 활용된 경기도 지역의 측정망은 주로 경기 중남부 지역으로서 기존연구에서 이들 지역은 대부분 VOCs 한계지역으로 밝힌 바 있으며(김영하, 2005), 본 연구에서도 이러한 연구와 유사한 결과를 나타내고 있었다. 특히 VOCs의 배출량 저감량에 비해 오존 농도의 증

가폭이 비교적 높은 것으로 분석되었다. 또한, VOCs 배출량 조정시 관측값과의 상관성이 가장 향상되어 경기도의 오존 농도 모사의 정확도를 높이기 위해 VOCs 배출량 조정이 유용한 것으로 분석되었다. 95 퍼센타일 농도로 살펴본 고농도 오존은 NO_x 및 VOCs를 조정할 경우 고농도 오존을 가장 가깝게 모사하는 것으로 분석되었다. 그러나 그림 10과 같이 7월 24일 및 25일 오전의 고농도 오존 등과 같은 오차로 인하여 평균농도가 과대평가되었으며 이러한 오존의 고농도 현상에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 사료된다.

인천 지역은 표 5와 같이 전반적인 예측 농도가 관측값에 비해 크게 과대평가되어 있으며, 평균 예측 농도가 약 37~40 ppb 정도로 관측값(18.78 ppb)에 비해 두 배 이상 과대평가되는 것으로 나타났다(표 5). 인천 지역의 오존 예측 농도 역시 VOCs 배출량 조정시 관측값의 시계열을 잘 모사하는 것으로 분석되었으며, 관측값과의 상관성도 향상되었다(그림 11). 95퍼센타일 농도의 경우 NO_x 및 VOCs 조정시 관측값과 가장 가깝게 모사되었다. 그러나 인천은 비도로서 NO_x 및 VOCs 배출량의 저평가 및 일 최저농도를 과대평가 등의 여러 오차를 발생하였다. 이러한 문제점은 인천 지역의 관측 자료의 확보를 통한 차등 배출량 조정 시나리오 및 해안 지역의 모델 모사 능력 향상 등의 추가연구가 필요할 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구는 MM5-SMOKE-CMAQ 모델링 시스템을 이용한 수도권 대기질 예측평가 시, 관측자료를 이용하여 모델링 입력 자료인 배출량자료의 조정함으로써 예측 결과의 신뢰성을 향상시키고자 하였다. 우선, 배출량 조정 시나리오 작성을 위해 기존 연구의 이동오염원 부문 CO 배출량 저평가 가능성을 토대로 CO 배출량 조정비를 5배로 산정하였다. NO_x 및 VOCs는 측정방법 5~8월간의 NO_x/CO 및 VOCs/CO의 관측값의 비를 토대로, 이동오염원 배출량을 NO_x는 0.8배 그리고 VOCs는 4배로 조정하였다.

이동오염원의 CO 배출량을 조정한 결과, 서울(650 ppb), 경기(460 ppb) 및 인천(295 ppb) 모두 기본 배출량 적용 시에 비해 관측값에 근사하게 모사되었으며, 관측값과의 상관성도 향상되어 CO 예측 능력이 개선되었다. 관측값을 이용한 NO_x의 배출량 조정 시 서울과 경기도의 NO 및 NO₂의 모사 능력이 비교적 향상되었으나 NO 배출량의 전반적 저평가와 인천 지역의 선박 배출량 저평가 및 지형적인 특이성을 고려한 추가 연구가 필요할 것이다. CO 배출량 조정을 기반으로 이동오염원 부문의 VOCs 배출량 조정 결과, Toluene과 Ethylene의 예측값은 2.26 ppb, 2.20 ppb로 기본 배출량 적용시보다 관측값에 가깝게 모사되었다. 또한 관측값과의 상관성도 모두 증가한 것으로 분석되었다. 따라서 전반적인 VOCs 예측 정확성을 향상하기 위해 배출량 조정이 필요하며, 관측값을 이용한 배출량 조정 시나리오가 대기질 모델을 이용한 VOCs 농도 예측시 유용한 것으로 나타났다. 그러나 배출량 조정 후에도 일변화의 모사 문제와 Toluene의 저평가 등의 오차가 존재하는 것으로 나타났다. 이러한 VOCs 모사 능력 전반의 개선을 위해서는 배출량 조정뿐만 아니라 국내화된 VOCs 프로파일 연구가 함께 필요할 것이다. 마지막으로 각 시나리오 적용에 따른 오존 모사 능력을 살펴본 결과, 서울 지역에서는 오존농도 예측값과 관측값의 차이가 감소(3.5 ppb → 0.9 ppb)하였으며, CO, NO_x 및 VOCs 조정시 관측값과의 상관성이 가장 높게 나타났다. 배출량 조정 시나리오 적용시 경기도의 예측농도와 관측값 간의 차이는 더욱 커졌으나, CO 및 VOCs 조정시 가장 높은 일치도를 갖는 것으로 분석

되었다. 인천의 경우 배출량 조정에 따른 개선 효과는 미비하였다. 따라서, 인천 지역을 제외한 수도권 지역의 오존 모사 능력 향상을 위하여 관측값을 이용한 배출량 조정이 유용할 것으로 사료된다. 특히, 고농도 오존(95퍼센타일 농도)을 대상으로 분석한 결과 이동오염원 부문의 CO, NO_x 및 VOCs 배출량을 모두 조정할 경우 예측값이 관측값에 가장 유사하게 나타났다. 그러나, 인천의 경우 배출량의 오차 및 복합 지형의 영향으로 인하여 모사 능력이 현저히 낮게 나타남에 따라 이에 대한 상세 연구가 필요할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- 국립환경과학원 (2007) 대기오염물질 배출량 2005, 환경부.
- 김득수 (2001) 챔버를 이용한 농작지로부터의 기체배출량 측정과 배출특성연구: 일산화질소(NO)와 아질산가스(N₂O)의 배출량 산정, 한국대기환경학회지, 17(2), 203-212.
- 김영하 (2005) 배출량 변화에 따른 CMAQ의 오존 농도 모사에 대한 민감도 분석, 강원대학교.
- 김정수, 정동일, 홍지형, 김대근, 김지영, 반수진, 박상남, 이용미, 최은경 (2006) 수도권 대기질 예측평가에 필요한 모델 입력시스템 개발, 국립환경과학원.
- 김지영, 김정수, 홍지형, 정동일, 반수진, 이용미 (2008) SMOKE 모델의 입력 모듈 변경에 따른 영향 분석, 한국대기환경학회지, 24(3), 284-299.
- 김현구, 이자명, 김인호 (2002) 면/이동오염원 배출량 공간 할당에 대한 연구, 포항산업과학연구원.
- 이종범, 김영하 (2004) 배출량 변화에 따른 CMAQ의 오존농도 모사에 대한 민감도분석, 한국대기환경학회 학술대회논문집, 247-249.
- 장명도 (2004) 광화학모델을 이용한 수도권지역 오존농도의 시공간 거동에 관한 연구, 강원대학교.
- 정용승, 정재섭 (1991) 서울 수도권 지역의 광화학오존에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 7(3), 169-179.
- 조규탁 (2005) 자동차 평균통행속도 적용방식에 따른 대기 오염 배출량 비교 연구, 한국대기환경학회지, 21(4), 401-411.
- 조용성, 전의찬 (2005) 서울시민의 오존오염에 대한 인식 및 의사결정 분석, 한국대기환경학회지, 21(2), 205-213.
- 하용선, 구윤서, 김성태 (2005) 광화학모델링을 위한 배출량 검증에 관한 연구, 한국대기환경학회, 2005 추계학술대회 논문집. 241-242.

- 하용선 (2006) 광화학 모델을 위한 배출량 검증에 관한 연구, 안양대학교.
- 환경부 (2008) 인천지역 항만시설, 선박, 항공기, 공항시설에서의 배출량 산정과 영향 분석 및 저감대책 마련 연구, 환경부.
- Byun, D.W. and J.K.S. Ching (1999) Science algorithms of the EPA Models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) Modeling System, EPA-600.R-99/030, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C.
- Dudhia, J. (1993) A nonhydrostatic version of the Penn state-NCAR Mesoscale Model: Validation tests and simulation of an Atlantic cyclone and cold front, Monthly Weather Review, 121, 1493-1513.
- Dudhia, J. (1996) A multi-layer soil temperature model for MM5, The Sixth PSU/NCAR Mesoscale Model Users' Workshop, Boulder, Colorado, 49-50.
- Fujita, E.M., B.E. Croes, C.L. Bennett, D.R. Lawson, F.W. Lurmann, and H.H. Main (1992) Comparison of emission inventory and ambient concentration ratios of CO, NMOG and NO_x in California's South coast air basin, Journal of the Air and Waste Management Association, 42, 264-276.
- Grell, G.A., J. Dudhia, and D.R. Stauffer (1995) A Description of the Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5). NCAR/TN-398+STR, National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, 107.
- Kim, S.T., N.K. Moon, and D.W. Byun (2008) Korea Emissions Inventory Processing Using the US EPA's SMOKE System, Asian Journal of Atmospheric Environment, 2(1), 34-46.
- Korea Environment Institute (KEI) (2007) Air Quality Modeling System I- Development of Emissions Preparation System with the CAPSS, KEI.
- Vivanco, M.G. and M.F. Andrade (2006) Validation of the emission inventory in the Sao Paulo Metropolitan Area of Brazil, based on ambient concentrations ratio of CO, NMOG and NO_x and on a photochemical model, Atmospheric Environment, 40(7), 1189-1198.