

수도권 배출량 저감에 따른 오존 발생 과정 분석에 관한 수치연구

정여민 · 이순환^{1)*} · 이화운 · 전원배

부산대학교 지구환경시스템학부, ¹⁾부산대학교 환경연구원
(2011년 11월 21일 접수; 2011년 12월 19일 수정; 2012년 1월 31일 채택)

Numerical Study on the Process Analysis of Ozone Production due to Emissions Reduction over the Seoul Metropolitan Area

Yeo-Min Jeong, Soon-Hwan Lee^{1)*}, Hwa Woon Lee, Won-Bae Jeon

Division of Earth Environmental System, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

¹⁾Institute of Environmental Studies, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

(Manuscript received 21 November, 2011; revised 19 December, 2011; accepted 31 January, 2012)

Abstract

In order to clarify the impact of emissions reductions on the air quality over Metropolitan area of Korean Peninsula, several numerical experiment and analysis of integrated process rate(IPR) of ozone were carried out. Numerical models used in this study are WRF for the estimate the meteorological elements and CMAQ for assessment of ozone concentration.

As result in the sensitive test of VOC/NO_x reduction experiments, although VOC reduction tends to induce the different impact on the advection and photochemical reaction rate of ozone in urban area and rural area, the mechanism of ozone appeared to be more sensitive to the reduction of VOC than that of NO_x over the metropolitan and its surround area. So the control of VOC emission inventories is an effective means to decrease the ozone concentrations around this area.

Key Words : Emissions Reduction, Ozone concentration, WRF - CMAQ

1. 서론

급속한 산업화와 경제성장으로 발생한 대기오염문제는 이미 국내에서 개선되어야 할 시급한 문제로 떠올랐으며, 지속적인 오염 물질의 배출 억제 노력으로 1차 대기오염물질이 개선되고 있는 실정이다. 그러나 환경관리공단 대기질 측정망 자료에 따르면 대도시 지역에서의 2차 광화학 오염물질인 오존의 경우 오염 문제가 악화되고 있는 추세로, 특히 서울을 포함한 수도권 지역에서 오존 경보가 가장 많이 발생하는 것으

로 나타나 이에 대한 대책이 절실히 요구되고 있다.

일반적으로 오존의 규제 전략은 대기 중 오존을 생성하는 전구물질인 휘발성 유기화합물(Volatile Organic Compounds, VOC)과 질소산화물(nitrogen oxide, NO_x)의 제어를 통하여 이루어진다(이와 황, 2005). 그러나 NO_x와 VOC는 다양한 오염원에서 배출되기 때문에 양적인 규제는 매우 어렵다. 따라서 일반적인 접근 방법은 오존 생성에 영향을 미치는 전구물질을 일률적으로 증가 또는 감소를 통하여 오존 발생에 미치는 영향 분석한다(박과 이, 2007). Vivanco와 Andrade(2006)는 브라질 상파울로를 대상으로 전구물질의 양을 임의로 조정하여 오존의 민감도를 살펴보았다. 이들은 도심지내 선오염에서 방출되는 VOC와 NO_x의 적절한 조합이 중요하다고 제시하였으며, 이용미 등(2009)은 일산화탄소와 NO_x, VOC의 배출량 조절을

*Corresponding author : Soon-Hwan Lee, Institute of Environmental Studies, Pusan National University, Busan 609-735, Korea
Phone: +81-51-583-2651
E-Mail: withshlee@pusan.ac.kr

통하여 수도권지역의 모의 정확도 향상을 이룰 수 있다고 제시하였으며, 서울지역과 경기도 지역에서 전구물질에 따른 오존 생성 민감도를 서로 다르게 제시하였다. 또한 Lee 등(2008)은 한반도 동남지역 오염원을 지역적으로 구분하여 이들 지역 간의 전구물질 상호 이류에 따른 영향을 분석하며, 전구물질의 이류 형태가 매우 중요한 요소로 작용한다고 설명하였다. 이화운 등(2010)은 여수지역의 오염물질 입자 확산 실험을 통하여 일주기 중규모 기류에 따른 전구물질의 재순환과정을 분석하고, 오존의 생성은 단순한 발생원에서의 오염배출량 증가 뿐 아니라 중규모 대기 순환에 의한 영향도 고려하여야 함을 밝혔다.

이러한 국·내외의 다양한 대기질 연구에서 CMAQ (Community Multiscale Air Quality model, Byun 와 Ching, 1999) 모델링을 통한 대기오염물질의 농도를 수치모의를 통해 산출하고 있으나, 전체적인 오존 총량에 국한된 연구가 주를 이룬다. 그러나 각 전구물질의 양적 변화는 발생원의 배출량 증가 뿐 아니라 중규모 기류에 의한 이류도 고려해야 하며, 따라서 생성 기원에 따른 오존 변화 분석이 요구된다. 본 연구는 오존 발생기원 분석 기법인 IPR(Integrated Process Rate)의 PA(Process Analysis)를 통하여 서울지역 고농도 사례일을 분석하고, VOC와 NOx를 조절하는 실험을 통하여 각 전구물질의 발생 기작이 오존생성에 미치는 영향을 정량적으로 살펴보고자 한다.

2. 자료 및 방법

2.1. 대상지역

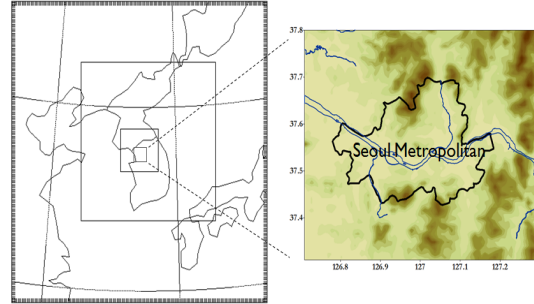


Fig. 1. The domains of numerical experiments and detailed topography of Seoul Metropolitan and its surround area.

2.2. 연구 대상지역과 실험 기간

서울특별시를 포함한 수도권 지역은 고농도 오존 사례 최다 발생지역으로 오존 경보 또한 지속적으로 발생하고 있다. 산업, 교통, 주거 배출원이 밀집되어 있는 거대도시이며 바다, 산지와 강을 낀 지형적 특징을 가지고 있어 국지적 기류가 발생한다. 이러한 국지 기류의 영향은 일정한 패턴의 고농도 오존 사례를 유발하는 조건을 갖추고 있다.

본 연구에서는 2007년 수도권 지역에서 100 ppb이상의 고농도가 발생한 사례일을 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration) HYSPLIT (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory)

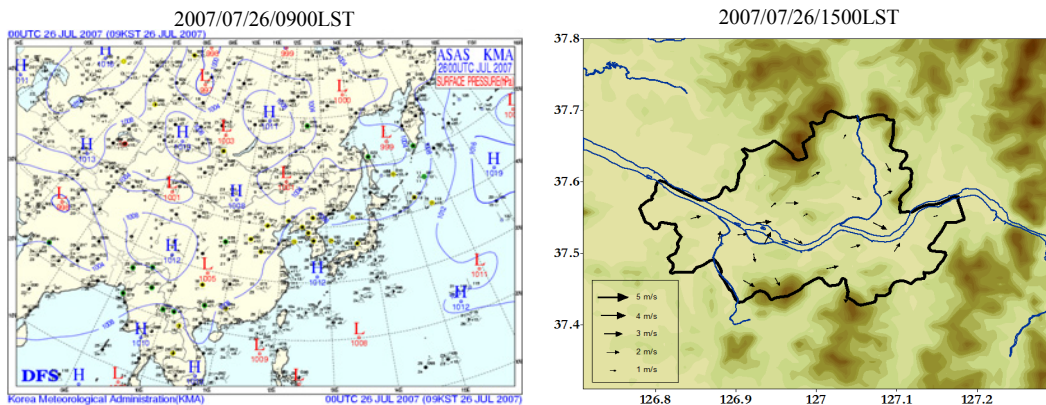


Fig. 2. Surface synoptic charts at 0900LST and wind observations at 1500LST on 26 July 2007.

모형을 이용하여 Backward Trajectory를 실시한 결과 14일의 사례일 중 9일(64.3%)에서 남서풍의 계열로 공기궤적이 이동하는 것을 확인하였다. 이러한 남서풍의 공기 이동 궤적은 편서풍지대에 위치한 한반도의 지리적 특성에 기인한 것으로 판단된다. 따라서 본 연구는 남서풍의 종관장을 대상지역의 전형적인 공기 이동 패턴으로 상정하고 이러한 패턴이 나타난 7월 26일을 사례일로 선정하여 수도권 지역의 고농도 오존 사례와 배출량 조절에 따른 변화를 살펴보았다. Fig. 2는 사례일인 2007년 7월 26일 0900LST의 지상 종관 상태를 나타낸 것이다. 7월 26일 남해안 상공에 1012 hpa의 강한 고기압이 위치하여 수도권을 포함한 한반도에서는 사례 기간 동안 약한 종관 바람장이 나타났으며, 사례일 1500LST의 AWS(Automatic Weather System)로 관측된 바람장 그림을 통해 수도권의 풍계를 확인하였다.

3. 수치모의 설계

3.1. 기상장 수치모델

기상장 수치모의 모델은 미국 국립대기연구소와 미국 해양대기관리청의 국립환경예측센터에서 개발한 WRFv3.2(Weather Research and Forecasting)를 사용하였다. 모델의 초기 입력장은 미국 해양대기관리청의 국립 환경예측센터에서 제공하는 1.0x1.0 FNL(Final Operational Global Analysis data)을 사용하였고, 경계조건에서의 수치모델링 계산 오차를 줄이기 위해 3개의 등지격자를 설정하여 nesting 방법을 이용하였다. 수도권 지역을 중심으로 설정한 마지막 도메인 영역은 1 km 해상도의 가로와 세로의 격자수를 151개로 하여 수치모의 하였다(Fig. 1). 지형 및 토지 이용 자료는 미국항공우주국에서 제공하는 3초 지형자료인 SRTM(Shuttle Radar Topography Pission) 3초와 환경부에서 제공하는 1초 토지이용 자료인 KLU(Korea Land Use) 1초를 사용하여 정확도를 향상시켰다(Lee 등, 2008; 전원배 등, 2009). 모델링 영역은 Fig. 2에 나타내었고, 수치모의에 사용된 물리 모수화 방안은 Table 1과 같다.

Table 1. The configuration of WRF modeling

	Domain 1	Domain 2	Domain 3
Horizontal grid	160 × 160	232 × 232	151 × 151
Horizontal resolution	9 km	3 km	1 km
Vertical layers	28 layers		
Physical options	Kain-Frisch(new Eta) cumulus scheme		
	YSU scheme		
	WSM 3-class simple ice scheme		
	RRTM long-wave scheme		
Initial data	Dudhia short-wave scheme		
	NCEP FNL Operational Global Analysis data		
Time Period	2007. 07. 25. 0900 LST ~ 2007. 07. 27. 0900 LST		

3.2. 대기질 수치모델

대기질 수치모의에 사용된 모델은 미국 보건환경국(Environmental Protection Agency, EPA)에서 개발된 CMAQ v4.6이다. WRF 모델 결과를 대기질 수치모의의 입력자료로 사용하여 대기질 수치모의를 수행하였다. 수도권 지역이 포함되는 WRF 수치모의의 Domain 3에서 경계값의 오차가 나타나지 않을 범위를 지정하여 138 × 138 수평격자로 설정하여 1 km 수평 해상도로 모델링을 실시하였고 화학 메커니즘은 CB-IV(Carbon Bond Mechanism - Version IV)를 사용하였다. CMAQ 수치모의의 구성은 Table 2에 나타내었다.

Table 2. The configuration of CMAQ modeling

	CMAQ domain
Input Data	WRF Domain 3 Output Data
Horizontal Grid	138 × 138
Horizontal Resolution	1 km
Vertical Layers	28 layers
Emission Data	CAPSS
Chemical Mechanism	CB-IV
Time period	2007. 07. 25. 0900 LST ~ 2007. 07. 27. 0900 LST

CMAQ 모델링 수행시 사용된 배출량 자료는 CAPSS (Clean Air Policy Support System)로 국립환경 연구원에서 생산하는 배출물질을 격자별 연간 총 배출량의 형태로 제공한다. 광화학 수치모의 수행시 사용된 반응 메커니즘은 CB-IV로 36개의 물질을 고려하고 93개의 화학반응을 고려한다. 대기질 수치모의 기간은 기상장 수치모의와 동일하게 48시간으로 설정하여 수치 계산을 실시하였다.

3.3. 실험 설계

오존의 생성에 기여하는 물질은 크게 2가지로 휘발성 유기화합물(VOC)과 질소산화물(NOx)로 나뉘는데, 오존을 형성하는 메커니즘에 각각의 오염 물질이 다른 역할을 하므로 CMAQ의 IPR 분석의 PA를 통해 도메인 영역의 각 그리드에서 수평 방향과 연직 방향의 수송, 건성 침적, 화학적 메커니즘을 통한 오존 생성량을 계산하였다(Xu 등, 2008). 또한 수도권 지역 오존의 저감 효과를 알아보기 위해 다음과 같은 실험 설계를 하였다. 배출량 조절에 따른 오존 농도의 변화를 살펴보기 위해 CMAQ에서 사용되는 배출량 자료에서 오존 생성에 기여하는 VOC 8종의 물질과 NOx 2종의 물질을 아래 식에 나타내었으며, 수도권 지역에서의 VOC와 NOx의 분포를 Fig. 3에 제시하였다. 배출원의 수평 분포를 살펴보면 수도권 지역에 배출원이 밀집되어 있는 것을 확인할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{DEFINE FAMILY NOX} &= \text{NO} + \text{NO}_2 & 1) \\ \text{DEFINE FAMILY VOC} &= \text{ALD}_2 + \text{ETH} + \text{ISOP} + \text{OLE} + \text{PAR} + \text{TOL} + \\ &\quad \text{XYL} + \text{FORM} & 2) \end{aligned}$$

본 연구에서는 오존의 총량 분석 뿐 아니라 각 오존 생성 메커니즘에 따른 과정 분석(PA)을 실시하였다. 과정 분석은 오존 생성 과정상 물리적, 화학적 발생 중요도를 평가하기 위하여 실시하는 분석 방법으로 오염물질의 기여에 따른 전반적인 변화를 파악하고 대기 흐름과 물질 반응 속에서 각각의 물리, 화학적 특성을 바탕으로 기여정도를 정량화하는 데 이용할 수 있다. 본 연구에서는 이류, 확산, 배출, 화학반응, 에어로졸 생성 등의 과정상에서 오존 발생에 기여하는 정도를 정량적으로 산출하는 IPR 방법을 적용하였다.

본 연구의 수치실험은 오존 생성에 관여하는 NOx와 VOC의 배출량을 임의로 조절하여 이들이 오존생성에 미치는 영향을 총량과 각 과정별 기여율을 평가하는 것이다. 각 실험의 NOx와 VOC의 조절은 Table 3에 나타내었다. 배출량 조절은 서울특별시(Fig. 1)로 한정하고, CAPSS자료에서 방출량을 직접적으로 저감하는 방법을 적용하였다.

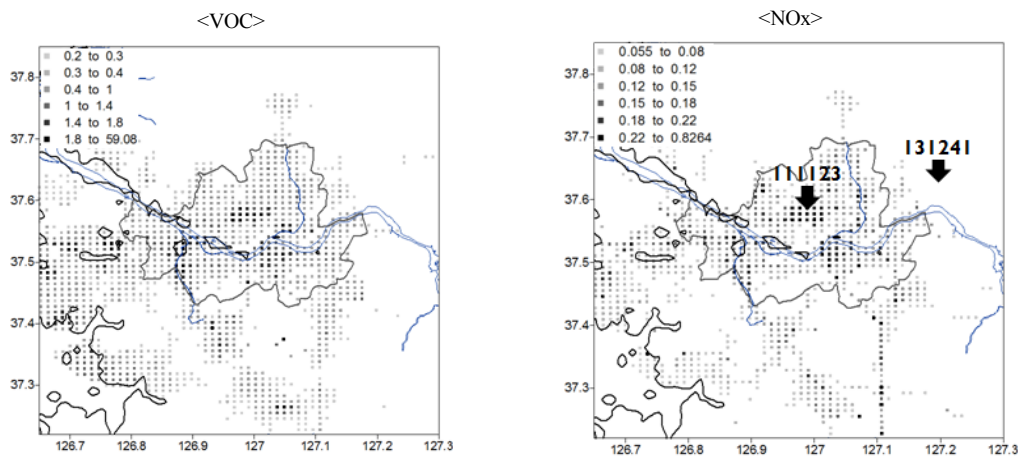


Fig. 3. VOC and NOx distribution of the Seoul metropolitan and its surround. Thick arrows indicate the sites number at Hoyje(11123) and Gungok (131241) for process analysis.

Table 3. Design of the Air Quality Modeling

	Identification	Name	description
	Basic case	Base	No change
Experiments	VOC variable	VOC25%	Reduce VOC 25%
		VOC50%	Reduce VOC 50%
	Control variable	NOx25%	Reduce NOx 25%
		NOx50%	Reduce NOx 50%

4. 결과 및 고찰

4.1. 기상장 결과 분석

Fig. 4에 2007년 7월 26일의 0600LST와 1500LST의 기온의 수평장과 바람의 수평장을 나타내었으며 내륙에 위치한 수도권 영역을 타원으로 표시하였다.

0600LST의 기온의 수평장을 살펴보면 야간의 복사로 인해 지표 냉각이 발생하는데 내륙의 수도권 지역은 20°C의 기온 분포가 나타나며 도심을 둘러싼 산지에서 19°C로 수도권 보다 1°C 정도 낮은 기온 분포를 보였다. 1500LST에는 수도권 지역의 기온은 32°C로 나타났고 내륙 일부 지역에서는 33°C까지 기온이 상승하였다. 산지에서는 31°C 정도의 기온 분포가 나타났으며 수도권 지역의 서쪽 해안 지역에서는 상대적으로 낮은 27°C의 기온 분포가 나타났다. 야간의 바람장(0600LST)을 살펴보면 산지로 둘러싸인 내륙에서는 고풍이 복잡하게 나타나 뚜렷한 풍향을 확인할 수 없었으며 풍속도 1m/s이하로 매우 약하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 해안 지역에서는 바다로 불어 나

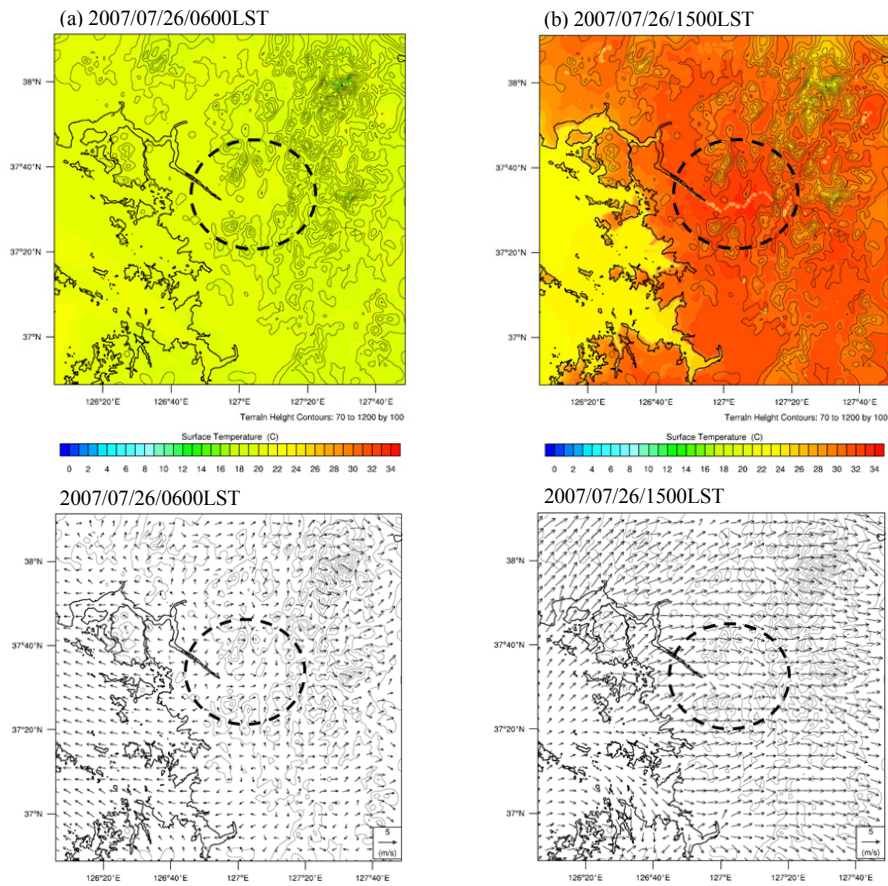


Fig. 4. The horizontal distribution of air temperatures and wind vectors estimated by case BASE at 0600LST and 1500LST 26 July 2007.

가는 육풍이 동풍 계열로 1~2m/s 풍속으로 나타났다. 1500LST의 수평 바람장에서는 해안에서 유입된 해풍이 3~4m/s의 풍속으로 서쪽 연안에서 불어 들어 왔으며, 해안 지역에서 내륙으로 유입된 해풍은 산풍과 결합되어 내륙 깊숙이 침투하는 것을 확인하였다.

수치모의 결과의 통계적 유의성을 확인하기 위해 RMSE(Root Mean Squared Error)값과 IOA(Index of Agreement)값을 이용하였다. 대상 지역 내에 위치한 14개의 자동 기상 관측(AWS) 자료를 이용하여 모델값과의 비교를 통해 각 통계치를 산정하였다. 기온의 경

우 RMSE가 2.112, IOA가 0.916, 풍속의 경우 RMSE가 0.993, IOA가 0.702로 기상장 수치모의를 통해 계산된 기온과 풍속의 값이 관측된 기상 자료와 일치도가 높게 나타났으며, 본 연구의 기상장 모델링의 결과값이 현황을 잘 모의하는 것으로 확인할 수 있었다.

4.2. 대기질 결과 분석

대기질 수치모의를 실시하고 결과값인 오존 농도의 수평장을 0300LST부터 1800LST까지 3시간 간격으로 Fig. 5에 나타내었다. (a)에 나타난 0300LST의

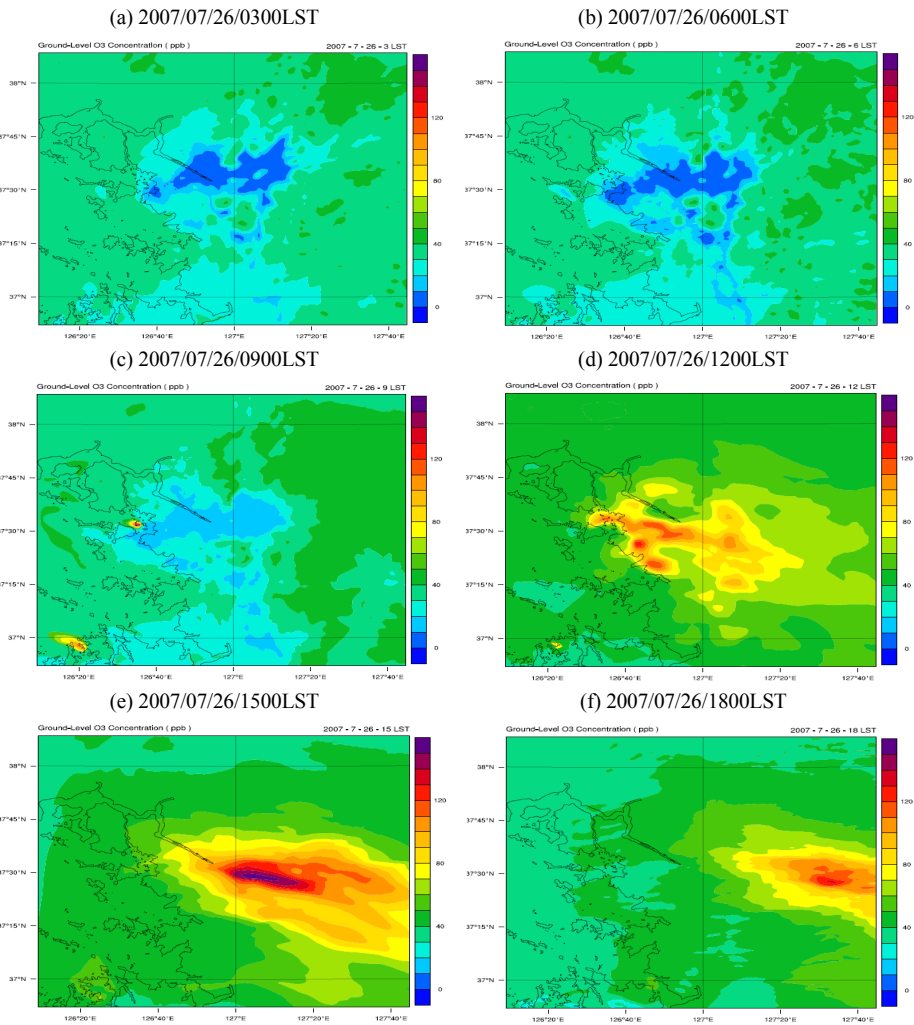


Fig. 5. The horizontal distribution of ozone concentration calculated by case Base from 0300LST to 1800LST 26 July 2007 with three hour intervals.

오존의 수평장을 살펴보면 수도권 지역은 야간에 10-20 ppb 정도 낮은 오존 농도가 나타나며, 수도권을 둘러싼 산지와 교외 지역은 평균적으로 30-40 ppb의 오존 농도가 나타나는 것으로 확인되었다. NOx의 배출량이 많은 수도권 지역에 야간 시간에 발생하는 NOx와 전날 발생하여 축적된 NOx가 존재하여, 오존을 제거하는 작용을 하므로 낮은 농도의 오존이 나타나는 것으로 볼 수 있다. (b)에 나타낸 0600LST의 오존의 수평장에서도 0300LST와 유사한 형태를 확인할 수 있다. (c)900LST가 되면서 수도권 서쪽의 인천에서 고농도 오존이 발생하며, (d)1200LST에는 수도권 지역에서 전체적으로 60-70 ppb의 농도를 나타내었으며, 부분적으로 고농도 오존이 발생하는 것이 확인되었다. (e)1500LST에는 120 ppb를 초과한 고농도 오존이 수도권의 강남 지역에서 나타났으며, 평균적으로 80-90 ppb에 달하는 높은 농도 분포가 나타났다. 고농도 오존이 풍하측으로 이동하면서 (f)1800LST에는 수도권 지역으로는 오존 농도가 점차 낮아져 60-70 ppb 이하로 나타났으며, 풍하측 지역에서는 90 ppb의

고농도 오존의 분포가 나타났다.

대기질 수치모의 결과의 통계적 유의성을 확인하기 위해 Regression(R)값과 Index of Agreement(IOA) 값을 이용하였으며 19개 지점의 대기질 관측소의 오존값과 모델을 통해 계산된 오존 농도의 IOA는 0.752, R값은 0.849으로 나타나 현황의 오존 농도를 모델이 잘 예측하는 것을 확인 하였다.

4.3. 배출량 저감에 따른 메커니즘 분석

수도권 지역 오존의 저감 효과를 알아보기 위해 VOC와 NOx를 각각 25%, 50% 감소시킨 실험을 실시하여 Fig. 6에 나타내었다. 현황에서 모의된 1200LST의 오존 수평장(Fig. 5(d))에서 각 실험의 1200LST 오존 수평장의 값을 뺀 Difference 수평장을 살펴보면, VOC를 25% 저감시킨 경우에 1200LST의 오존 농도가 최고 37.3 ppb 정도 낮아지는 것을 확인할 수 있고, 50% 저감시킨 경우에는 최고 67.2 ppb 이상 오존 농도가 낮아지는 것이 나타났다. 이와 반대로 NOx를 25% 저감시킨 경우 수도권 지역에서 평균적으로 10 ppb이

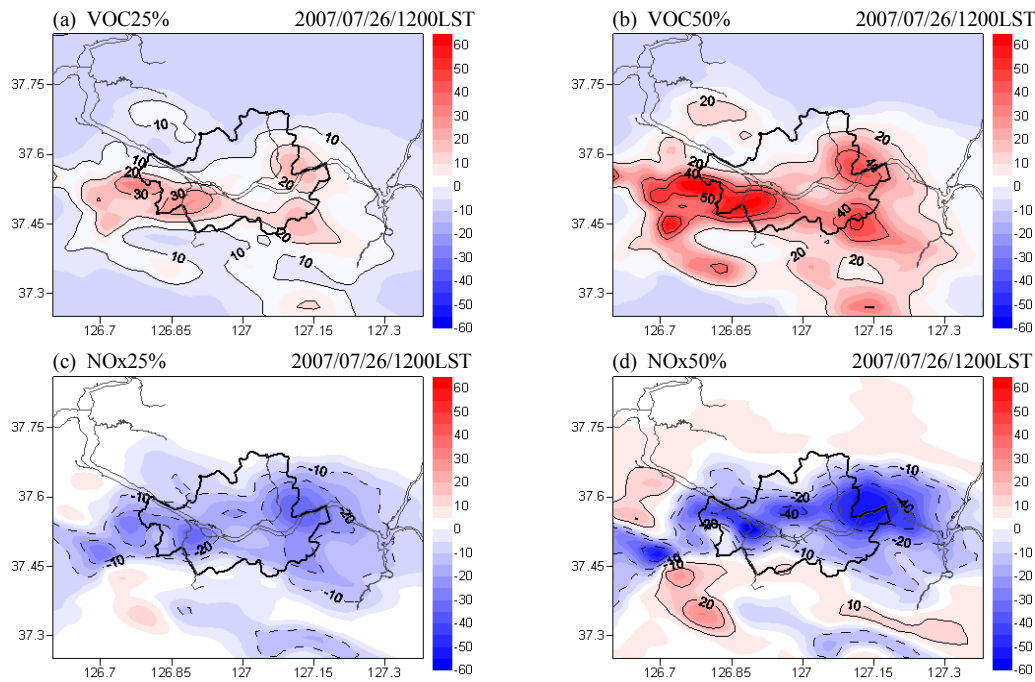


Fig. 6. Differences of simulated ozone concentration each reduction cases; (a)VOC25%, (b)Voc50%, (c)NOx25%, and (d)NOx50% at 1200LST.

상 오존 농도가 증가하며, 국지적으로는 34.6 ppb 이상 오존 생성이 증가하는 것으로 확인되었다. 또한 50% NOx의 저감을 통해 1200LST의 오존 농도는 최고 59.4 ppb까지 많이 생성되는 것으로 나타났다. 그림에는 나타내지 않았으나 0600LST 각 수치실험의 차이를 살펴본 결과 VOC 저감 실험은 야간 오존 농도에 거의 영향을 미치지 않았고, NOx 저감 실험은 case NOx25%와 case NOx50%에서 야간의 오존 농도를 최고 5.5 ppb, 12.1 ppb 높게 모의하는 것으로 나타났다.

수도권 지역의 VOC와 NOx의 저감을 통한 국지적 오존 생성 메커니즘에 미치는 영향을 살펴보기 위해 CMAQ의 IPR 분석을 실시하였다. 분석을 실시한 지점은 수도권 지역에서 오염원이 가장 밀집된 종로구 효제동(111123)과 수도권의 풍하측에 해당하는 남양주 금곡동(131241)이며 Fig. 3에 위치를 나타내었다.

Fig. 7은 case BASE의 IPR 분석을 통하여 계산된 두 분석 지점의 0800LST부터 1500LST까지 오존 생성 메커니즘별 누적 항과 일 최고 오존 농도를 나타낸 것이며, 동일한 분석을 각각 VOC50%저감 실험과 NOx50%저감 실험에 적용한 결과이다. 그리고 그들의 차이를 나타낸 것이 Table 4이다. 오존 생성 메커니즘의 누적 항은 CMAQ의 각 격자에서 오존 생성 과정을 계산한 값으로 수평방향으로 수송된 오존량(H-tran), 연직방향으로 수송된 오존량(V-tran), 수평과 연직 방향으로의 수송된 총 오존량(Tran), 건성 침적된 오존량(Dry-dep)과 화학 메커니즘을 통해 생성된 오존량(Chem)으로 나타내었다.

먼저 IPR 분석을 통한 두지역의 오존 생성 소멸 기작을 보면, 가장 큰 차이를 보이는 요소는 수평 이류이다. 효제동 지점은 211.0 ppb 인데 비하여 금곡동 지점은 -434.5 ppb로 반대로 나타난다. 즉 효제동의 경우 수평적인 이류에 의한 오존 발생이 나타나며, 반대로 금곡동 지점은 비록 풍하측에 위치하지만 수평이류가 오존 소멸 기작으로 작용한다는 것을 의미한다. 따라서 오염원 밀집 지역인 효제동 주변에서 생성된 오존의 많은 양이 바람을 타고 관측 지점으로 이류하는 것을 알 수 있다. 그러나 비록 풍상측에 오염원이 존재하지만 금곡동 지역 주변에 큰 오염원이 없기 때문에 전체적으로 금곡동지역에서는 수평이류에 의하여 오존이 감소한다. 반면, 화학반응에 의한 오존 생성

의 경우 효제동에서는 소멸기작(-179.1 ppb)으로 작용하지만 금곡동 지역에서는 생성기작(55.0 ppb)으로 작용한다. 이는 풍상측에서 이류 되어 온 전구물질 등에 의하여 금곡동 지역에서 오존의 화학적 생성이 활발하다고 볼 수 있다.

VOC50%저감 실험과 현황 수치모의 결과를 비교해보면, 효제동 지점의 오존 생성과정은 수평방향과 연직방향의 수송으로 인해 오존 농도가 증가하며, 화학적 감쇄 반응에 의해 오존 농도가 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 이러한 오존 생성 요인이 VOC50% 저감 실험에서도 거의 동일하게 나타나지만 수평 수송의 값이 74.9 ppb로 크게 감소하고 연직수송 값은 52.4 ppb 증가하여, 총 수송된 오존량이 22.5 ppb 감소하였으며, 화학적 감쇄 반응과 건성 침적에 의한 오존 감소량이 각각 5 ppb 감소가 나타났다. 이는 VOC 감소로 인하여 주변 지역에서의 오존 생성량 감소와 효제동의 오존량에 영향을 크게 미치는 주변 지역 이류량 감소로 오존량이 감소한다.

반면 금곡동 지점의 VOC50% 저감 실험에서는 수평과 연직의 수송량이 각각 52.6 ppb 증가하고 56 ppb 감소하면서 수송에 의한 총량은 3.3 ppb 감소하는 것으로 나타났다. 전체적으로 효제동에 비하여 작은 감소량을 보인다. 이는 풍상측에서 생성되는 오존량 감소에 기인한다. 반면 화학적 반응에 의한 오존 생성량 감소가 38.6 ppb로 전체 오존량 감소에 큰 부분을 차지한다.

NOx50% 저감 실험과 현황 수치모의 결과를 비교하면, 효제동 지점의 경우 현황에 비해 NOx50% 저감 실험의 수평 방향의 수송된 양이 154.7 ppb 증가하고, 연직 방향의 수송된 양은 267.7 ppb 감소하여 현황에 비해 연직 방향으로 발산하여 빠져나가는 오존량이 크게 증가한 것을 확인할 수 있었다. 결과적으로 수송에 의한 총 오존 생성량은 112.9 ppb이 감소한다. 그러나 화학적인 반응에 의한 증가가 132 ppb로 나타나 전체적으로 오존생성이 현황에 비하여 6.1 ppb 증가한다. 금곡동 지점의 오존량 역시 효제동과 마찬가지로, 수송에 의한 오존 생성량은 감소하지만, 화학반응에 의한 생성량이 증가하여 전체적으로는 현황에 비하여 감소하지만, VOC 50% 저감실험에 비하여 감소율이 떨어진다.

Table 4. The Process Analysis difference between case BASE modeling results and each experiments in both locations. Chracter A and B indicates analysis cites for Hoyoje and Gungok, respectively, and unit of each value is ppb

case name	H_tran		V_tran		Tran		Dry-dep		Chem		Max_O3	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
VOC50%	74.9	-52.6	-52.4	56.0	22.5	3.3	-5.0	-13.0	5.0	38.6	13.6	-23.7
NOx50%	-154.7	88.1	267.7	-76.5	112.9	11.5	13.2	24.1	-132.0	-20.7	-6.1	-13.8

따라서 VOC와 NOx의 저감 실험을 통해 효제동 지점은 VOC 저감에 따른 주변지역에서의 오존 이류량의 감소와 관련하여 오존 저감 효과가 크다. 그러나 NOx의 저감의 경우, NOx 감소에 따른 이류에 의한 저감효과 보다는 화학반응에 의한 생성 효과가 크기 때문에 전체적인 저감효과는 작은 VOC-limited 지역

으로 설정할 수 있으며, 풍하측인 금곡동 지점은 NOx, VOC 저감에 따른 전체 이류효과의 변화는 크지 않으나 화학적인 오존생성효과의 차이가 발생한다. 따라서 금곡동 지점은 VOC의 저감은 화학적 오존 생성을 감소시키고, NOx의 저감은 화학적 오존 생성을 증가시키므로 VOC-limited 지역으로 추정된다.

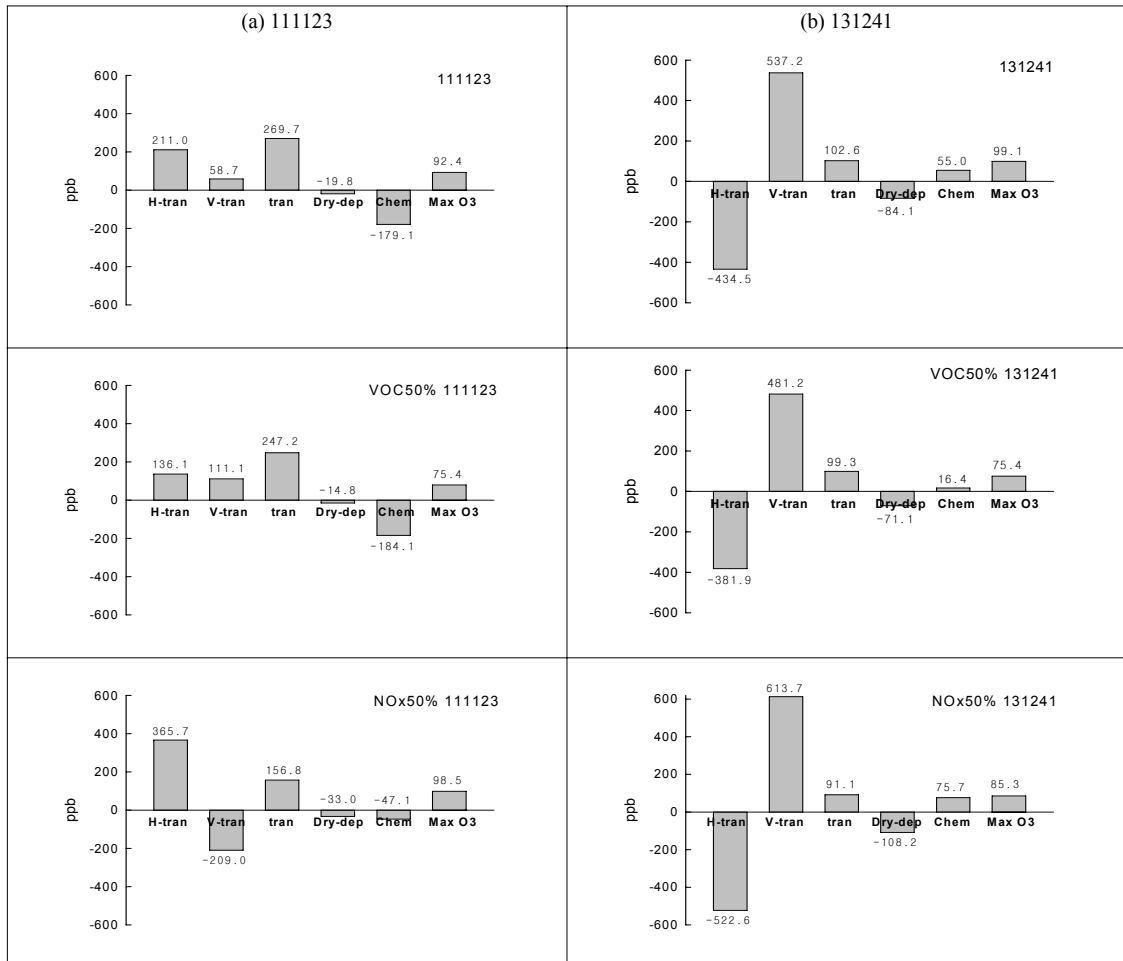


Fig. 7. The Process Analysis results of each experiments in both locations.

5. 결론

본 연구는 수도권 영역을 중심으로 배출량 저감 효과에 따른 오존 농도 분석을 위해 수치모의를 실시하였으며, 중규모 기상 모델 WRF와 대기질 모델인 CMAQ을 사용하였다. 오존은 2차 대기오염 물질로 전구물질인 휘발성 유기화합물(VOC)과 질소산화물(NOx)의 복잡한 메커니즘을 통해 생성되므로 VOC와 NOx가 오존 농도에 미치는 저감효과를 각각 살펴보기 위한 수치 실험을 설계하였다. 수도권 영역을 중심으로 VOC를 25%, 50% 저감시킨 case VOC25%와 case VOC50%의 수치실험과 NOx를 25%, 50% 저감한 case NOx25%와 case NOx50%의 수치실험을 실시하였고 결과는 다음과 같다.

현황 대기질 수치실험은 수도권에서 남서풍 계열의 공기괴의 유입이 나타나며, 일 최고 오존 농도가 100 ppb를 초과하고 국지 순환계의 영향을 받을 수 있도록 종관장의 영향이 약하게 나타난 2007년 7월 26일은 선정하여 실시하였다. 수치모의 결과를 통해 수도권 지역의 고농도 오존 사례는 인천과 서울의 배출원 지역에서 고농도 오존이 발생하며, 서풍계열 해풍의 지속적인 유입으로 15시 이후 고농도 오존은 동쪽으로 수송되는 패턴을 확인하였다.

배출량 저감에 따른 오존 농도 실험 결과 case VOC25%와 case VOC50%의 1200LST의 오존 농도는 현황 대기질 실험 결과인 case BASE보다 최고 37.3 ppb와 67.2 ppb 감소하는 것으로 확인되었으며, 0600LST에는 1 ppb 미만으로 차이가 미비한 수준인 것으로 나타났다. case NOx25%와 case NOx50%의 수치실험의 1200LST 결과를 현황 대기질 실험 농도보다 국지적으로 최고 34.6ppb와 59.4ppb 증가하는 것으로 확인되었으며, 0600LST에는 5.5 ppb, 12.1 ppb 오존 농도가 높게 나타났다. 이는 교통량이 집중된 수도권 영역의 많은 NOx 배출량으로 인해 오존 생성 메커니즘에서 상대적으로 적은 전구물질인 VOC 저감에 따른 오존 농도의 감소가 더 민감하게 나타나는 것으로 보이며, 0600LST의 NOx 저감 효과는 야간 오존 감소반응이 약해진 것으로 고려된다. 이러한 결과는 CMAQ의 IPR 분석을 통해 오염원이 가장 밀집된 종로구 효제동(111123)과 수도권의 풍하층에 해당

하는 남양주 금곡동(131241)의 분석에서 VOC의 저감 실험이 일 최고 오존 농도를 효과적으로 감소시키는 결과를 통해 뒷받침된다.

지속적인 경제 성장이 예상되는 수도권 지역의 대기질 개선을 위한 노력은 강력히 요구 되고 있으며, 저감 대책은 불가피 할 것으로 보인다. 따라서 본 연구의 수도권 지역 오존 분포의 특성과 전구물질 저감을 통한 수치실험 결과는 오존에 관한 저감 대책에 활용도가 높다고 전망되며, 수도권 지역 고농도 오존 문제에 대해 VOC의 저감 정책이 효과적일 것으로 사료된다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기상지진개발사업(CATER2006-2205)의 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- 박수갑, 이종범, 2007, CMAQ 모델에 의한 수도권지역에서 자연배출 VOC가 오존농도에 미치는 민감도, 한국 대기환경학회 2007년 환경 공동학술대회 초록집, 1548-1551.
- 이용미, 이현주, 이동원, 김준순, 홍지형, 2009, 고농도 오존 사례일을 통한 수도권지역의 배출량 변화에 따른 민감도 분석, 한국대기환경학회 2009 춘계대회논문집, 529-530.
- 이종범, 황경진, 2005, PAMS 자료와 MODEL-3/CMAQ을 이용한 수도권 지역의 VOCs 배출량 평가, 한국 대기환경학회 2005년 춘계학술대회논문집, 194-195.
- 이화운, 이현미, 이순환, 최현정, 2010, 라그랑지안 입자 확산모델을 이용한 광양만 권역에서의 공기괴 재순환 현상의 수치모의, 한국환경과학회지, 19(2), 157-170.
- 전원배, 이화운, 이순환, 최현정, 임현호, 2009, 상세 해수면 온도자료의 반영에 따른 국지 기상장 개선에 관한 수치연구, 한국대기환경학회지, 25(4), 304-315.
- Jianhui, B., Gengchen, W., Mingxing, W., 2005, An empirical correlation between surface O3 and its factors, Atmospheric Environment, 39(25), 4419-4423.
- John, P. D., Peter, J. A., Spyros, N. P., 2007, Sensitivity of ozone to summertime climate in the eastern USA: A modeling case study, Atmospheric Environment,

- 41(7), 1494-511.
- Khiem, M., Ooka, R., Hayami, H., Yoshikado, H., Huang, H., Kawamoto, Y., 2010, Process analysis of ozone formation under different weather conditions over the Kanto region of Japan using the MM5/CMAQ modelling system, *Atmospheric Environment*, 44(35), 4463-4473
- Lee, S. H., Sung, K. H., Lee, H. W., 2008, Impacts of regional trans boundary ozone associated with complex terrain on urban air quality, *Atmospheric Environment*, 42, 7384-7396.
- Lee, H. W., Choi, H. J., Lee, S. H., Kim, Y. K., Jung, W. S., 2008, The impact of topography and urban building parameterization on the photochemical ozone concentration of Seoul, Korea, *Atmospheric Environment*, 42(18), 4232-4246.
- Liu, X., H., Zhang, Y., Xing J., Zhang, Q., Wang, K., Streets, D., G., Jang, C., Wang, W., X., Hao, J., M., 2010, Understanding of regional air pollution over China using CMAQ, part II. Processanalysis and sensitivity of ozone and particulate matter to precursor emissions, *Atmospheric Environment*, 44(30), 3719-3727.
- Vivanco, M. G., Andrade, M. F., 2006, Validation of the emission inventory in the Sao Paulo Metropolitan Area of Brazil, based on ambient concentration ratio of CO, NMOG and NOx and on a photochemical model, *Atmospheric Environment*, 40(7), 1189-1198.
- Xu, J., Zhang, Y., Fu, J. S., Zheng, S., Wang, W., 2008, Process analysis of typical summertime ozone episodes over the Beijing area, 399(1-3), 147-157.