

ORIGINAL ARTICLE

수도권 미래 도시성장이 오존농도 변화에 미치는 영향 연구

석현배 · 정주희¹⁾ · 강윤희²⁾ · 김현수¹⁾ · 김유근¹⁾*

부산대학교 지구환경시스템학부, ¹⁾부산대학교 대기환경과학과, ²⁾부산대학교 환경연구원

Study on the Effects of Future Urban Growth on Surface Ozone Concentrations in the Seoul Metropolitan Region

Hyeon-Bae Seok, Ju-Hee Jeong¹⁾, Yoon-Hee Kang²⁾, Hyunsu Kim¹⁾, Yoo-Keun Kim¹⁾*

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

¹⁾*Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University, Busan 609-735, Korea*

²⁾*The Institute of Environmental Studies, Pusan National University, Busan 609-735, Korea*

Abstract

In this study, the regional climate (WRF) and air quality (CMAQ) models were used to simulate the effects of future urban growth on surface ozone concentrations in the Seoul metropolitan region (SMR). These analyses were performed based on changes in ozone concentrations during ozone seasons (May-June) for the year 2050 (future) relative to 2012 (present) by urban growth. The results were compared with the impacts of RCP scenarios on ozone concentrations in the SMR. The fractions of urban in the SMR (25.8 %) for the 2050 were much higher than those (13.9 %) for the 2012 and the future emissions (e.g., CO, NO, NO₂, SO₂, VOC) were increased from 121 % (NO) to 161.3 % (NO₂) depending on emission material. The mean and daily maximum 1-h ozone in the SMR increased about 3 - 7 ppb by the effect the RCP scenarios. However, the effect of urban growth reduced the mean ozone by 3 ppb in the SMR and increased the daily maximum 1-h ozone by 2 - 5 ppb over the northeastern SMR and around the coastline. In particular, the ozone pollution days exceeding the 1-h regulatory standard (100 ppb) were far more affected by urban growth than mean values. As a result, the average number of days exceeding the 1-h regulatory standard increased up to 10 times.

Key words : Future ozone concentrations, Urban growth, Climate change, RCP scenarios

1. 서론

지난 수십 년간 우리나라는 도시화와 산업화가 지속되었고 이로 인해 도시지역을 중심으로 대기질 악화현상이 중요한 환경문제가 되었다. 특히, 수도권은 선진국 주요 대도시에 비해 악화된 대기환경현상을 개선하기 위해 2005년 '수도권 대기환경개선 기본계획'을 수립하고, '수도권 대기환경개선 특별대책'을 추진해 오고 있다

(Kim과 Choi, 2011). 수도권은 비수도권에 비해서 대기 오염이 심각한 수준으로, 전국 오존주의보 발령횟수의 45.5 % 가 수도권에서 발생하고 있다(ME, 2013). 이러한 대기환경 문제는 미래 기온상승과 비례하여 대기 내 광화학적 반응을 촉진하여 오존 농도가 증가하는 기후변화 요인과 오염물질 배출량 증가 등에 의해 더욱 악화될 가능성이 있다.

이에 기후변화에 의한 미래 대기질 변화에 관한 연구

Received 20 November, 2014; Revised 10 December, 2014;

Accepted 15 December, 2014

*Corresponding author: Yoo-Keun Kim, Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University, Busan 609-735, Korea
Phone: +82-51-510-2282
E-mail: kimyk@pusan.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

가 미국과 유럽을 중심으로 많이 수행되었다(Mickley 등, 2004; Leung과 Gustafson, 2005; Tegarist 등, 2007; Meleux 등, 2007; Huszar 등, 2011). 예를 들면, Dawson 등(2007)에서는 기온과 풍속 등의 기후요소와 오존 농도와와의 상관성을 연구하여 기온이 5 K 증가할 때 오존 농도는 63% 증가하고, 풍속의 10% 감소는 침적과 화학반응 등의 오존 생성기작에 영향을 미쳐 오존 농도가 약 1% 증가한다는 결과를 제시하였다. 또한, 기후변화에 의한 영향은 다수 지역의 평균적인 오존농도 증가보다는 도시와 오존오염이 심각한 지역을 중심으로 고농도 오존 사례일에 더욱 영향을 미치는 것으로 나타났다(Bell 등, 2007; Wu 등, 2008; Jacob과 Winner, 2009). Wu 등(2008)은 전지구 화학 수송모델을 이용하여 2000-2050년 미국 오존 농도에 대한 기후변화의 영향을 분석한 결과, 기후변화는 미국 중서부와 북동부 지역에 2 - 5 ppb 오존농도에 기여하였으나 고농도 오존 사례일에 대해서는 10 ppb를 초과하는 영향을 보였다. 국내에서도 기온과 풍속 등의 기후변화 효과가 미래 고농도 오존 분포에 미치는 영향을 분석하였다(KEI, 2009; Jeong 등, 2011). 미래 오존농도는 기후변화 요인 외에도 오존 전구물질과 같은 배출량 증가와도 깊은 관계가 있다(Yamaji 등, 2008; Lei 등, 2012). Coleman 등(2013)이 유럽 오존농도 변화에 대한 기후와 배출량 효과를 분석한 결과, 2006년 대비 2100년의 오존농도가 기후변화를 고려할 경우 8.53 % 증가하였으나 기후와 배출량 변화를 모두 고려할 경우 13.92 % 증가하는 것으로 나타났다.

미래 대기질에 영향을 미치는 여러 요인 중에서도 도시성장은 기후와 배출량 변화에 모두 영향을 주는 중요한 요소이다(Gu 등, 2011; Wang 등, 2013; Sadorisky, 2014). 도시성장에 의한 토지피복 변화는 지역규모 혹은 도시규모의 기후에 영향을 미치는 요소로서 수치모델에서 각 토지피복 상태에 따라 반사도, 수분량, 거칠기 길이 등의 물리적 성질이 다르게 적용되어 그 영향과 중요성에 관한 많은 연구들이 수행되었다(Lam 등, 2006; Cheng과 Byun, 2008; Jeong과 Kim, 2009; Kang 등, 2010). 또한, 도시성장에 의한 인구, 교통량, 연료 사용량 증가 등에 의한 인위적 배출량 증가와 논, 밭, 산림의 감소에 의한 자연 배출량 감소에 의해 야기되는 오존생성의 전구물질인 NOx와 VOC 등의 변화는 미래 오존농도

변화에 영향을 미치는 중요한 요소로 인식되었다. 이에 국외에서는 대도시를 중심으로 도시성장이 오존농도 변화에 미치는 영향에 관한 연구가 일부 수행되었다(Civerolo 등, 2007; Song 등, 2008; Huryun 등, 2014). 예를 들면, Civerolo 등(2007)은 미국 뉴욕의 1993년과 2056년을 비교하였을 때 도시성장으로 기온은 0.6 °C 증가하고 PBL 고도는 150 m 상승하였으며, 오존농도는 약 1-7 ppb 증가하였음을 보였다. 국내에서는 수도권 도시성장이 기후변화에 미치는 영향에 관한 연구는 수행되었으나(Kim 등, 2010), 도시성장이 대기질에 미치는 영향에 관한 연구는 미흡한 실정이다. 또한, 국외 선행연구에서도 도시성장에 의한 기후와 배출량의 변화가 도시 대기질에 미치는 영향에 대한 분석은 거의 수행되지 않았다.

따라서 본 연구에서는 고농도 오존 현상이 지속적으로 나타나고 있고, 미래에도 지속적인 도시성장이 예상되는 수도권 지역을 중심으로 수도권 미래 도시성장이 오존농도 변화에 미치는 영향에 관한 연구를 수행하였다. 이를 위해 지역규모 대기질모델에 도시성장에 의한 기후와 배출량 변화를 함께 고려하여 모델링을 수행하였고, 수도권 지역의 미래 오존농도 변화에 대한 도시성장과 기후변화 효과를 정량적으로 분석하였다. 도출된 연구결과는 수도권 대기질 모델링 예측을 위한 좋은 참고자료로 활용될 수 있으리라 기대한다.

2. 연구방법

2.1. 모델링 구성

본 연구에서는 미래 도시성장이 오존농도 변화에 미치는 영향을 분석하기 위하여 기상모델인 WRF(ver. 3.6)와 대기질 모델인 CMAQ(ver. 5.0.1)을 사용하였다. 기상 입력자료를 생산하기 위하여 사용된 WRF모델은 완전 압축성 비정수계 방적식, 비정역학 모형으로 Arakawa-C 격자계이며, 연직 격자는 높이와 지형에 근거하여 새로 추가된 Eulerian 질량 좌표계이다(Skamarock 등, 2008). 미래 기후자료를 생산하기 위해 사용된 WRF모델의 초기/경계조건은 IPCC 5차 평가보고서에서 제시한 RCP(Representative Concentration Pathways) 6.0 시나리오에 의한 복사강제력을 적용하여 수행된 대기-해양 결합모델인 HadGEM2-AO모델의 자

료(135 km 해상도)이다. 또한, RCP시나리오의 모의 특성을 검증하기 위하여 NCEP(National Centers for Environmental Prediction)의 FNL 재분석 자료(1°)와 SST 자료(0.5°)를 이용하였고, 객관분석기법인 OBSGRID 프로그램을 이용하여 자료동화를 수행하였다. 모델링 기간은 환경부에서 제공하는 최근 자료를 기준으로 현재를 2012년으로 선정하였으며, 고농도 오존오염이 많이 발생하는 5월과 6월을 분석기간으로 선정하였다. 미래 예측기간은 IPCC 5차 평가보고서의 RCP 시나리오 자료에서 장기간 미래 기후를 예측한 결과를 토대로 현재와 비교하여 기후변화가 뚜렷하게 나타난 2050년을 선정하였다. 도메인은 국립환경과학원 CAPMOS(Clean Air Policy Modeling System) 홈페이지(<http://capmos.nier.go.kr>)에서 제공되는 국가도메인과 동일하게 설정하였다. Nesting 기법을 사용하여 동아시아 영역의 첫 번째 도메인(D01: 27 km 격자), 한반도를 포함하는 두 번째 도메인(D02: 9 km), 그리고 최종 수도권 도메인(D03: 3 km)으로 구성하였고(Fig. 1), 연직층은 23개로 설정하였다. 대상지역의 현실적인 지형과 지표면 상태를 모델링에 반영하기 위하여 고해상도 지형고도(SRTM 3 초 지형자료)와 토지피복 자료(환경부 중분류 자료, 약

90 m 해상도)를 사용하였다. 또한, 수도권 도시성장이 고려된 미래 토지피복 자료를 구성하기 위하여 Kim 등 (2012)의 연구에서 도시성장을 예측하는 SLEUTH모델을 이용하여 수도권 도시성장 시나리오에 따라 생산된 결과 중에서 지속적인 도시성장을 의미하는 SC1 자료를 활용하였다. WRF모델에 사용된 물리옵션은 선행연구에서 대표적으로 많이 사용하는 물리옵션을 적용하였다 (Table 1).

CMAQ모델은 U.S. EPA(Environmental Protection Agency)의 대기질 예측모델로 기상 및 배출량 입력자료를 받아 오염물질의 화학반응과 수송을 계산하며, 수평/연직 이류와 확산 모듈, 침적속도 계산 모듈, 기체상물질 화학솔버 모듈, 구름 모듈, 기체-입자-액체상 화학 메커니즘 모듈 등으로 구성되어 있다(Byun 등, 2006; NIER, 2013). CMAQ모델의 도메인은 WRF모델과 마찬가지로 3개의 영역과 23개의 연직층으로 구성하였고, 사용된 물리옵션은 기체상 물질에 대한 화학메커니즘으로 SAPRC99를 적용하였다. 이외 CMAQ모델링에 필요한 기타 모듈들에 대한 옵션은 선행연구에서 대표적으로 많이 적용되는 옵션과 기본적으로 설정되어 있는 옵션을 설정하였다(Table 1). CMAQ모델의 배출량은 인위적

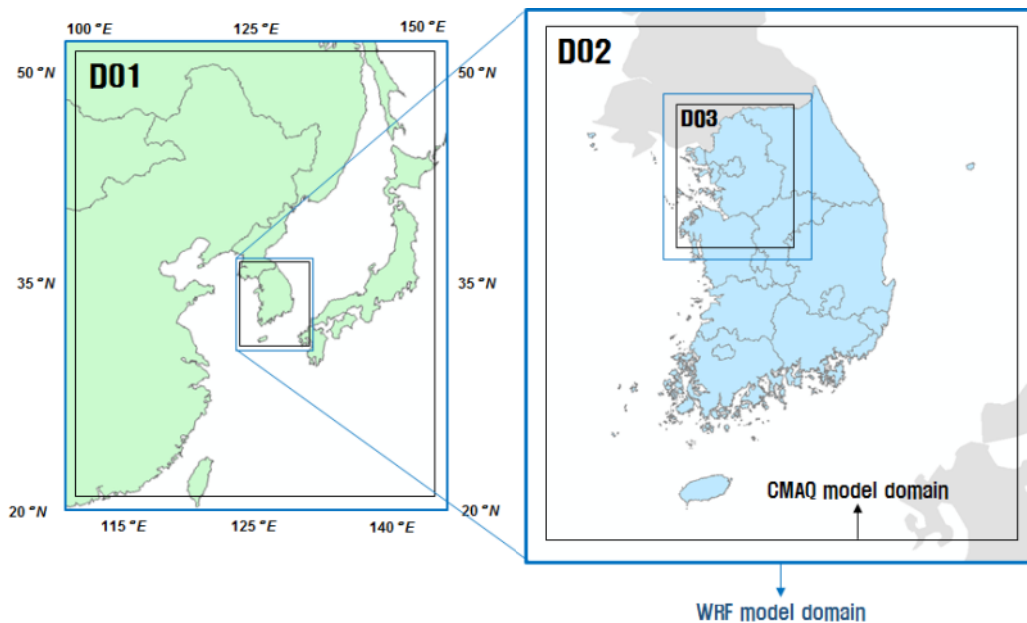


Fig. 1. The nested model domains. Blue and black lines mean the WRF and CAMQ model domains, respectively.

Table 1. Details of the grids and physical options used in the WRF and CMAQ model

Model	Grids and physical options	D01	D02	D03
WRF	Cells (x by y)	124 by 131	73 by 85	70 by 73
	Horizontal resolution (km)	27	9	3
	Cumulus parameterization	Grell 3D	×	×
	Microphysics		Lin et al	
	Longwave radiation		RRTM	
	Shortwave radiation		Goddard	
	Planetary boundary layer		YSU	
	Land surface model		Noah	
	Surface layer		MM5 similarity	
CMAQ	Cells (x by y)	118 by 125	67 by 70	60 by 63
	Chemistry mechanism		SAPRC99	
			- Horizontal advection: hyamo	
			- Vertical advection: vwrf	
	Other options		- Horizontal diffusion: multiscale - Aerosol module: aero5 - Gas-phase chemistry solver: EBI(Euler Backward Iterative)	

배출량과 자연 배출량으로 구성하였다. 인위적 배출량은 남한을 제외한 동아시아 영역에 대해서는 INTEX-B (2006) 자료를 사용하였고, 남한에 대해서는 CAPSS (2011) 자료를 적용하였다. 자연 배출량은 BEIS v3.14 를 이용하여 남한 영역에 대해 산정하였다(D02와 D03). 도시성장이 고려된 미래 배출량은 수도권 미래 도시성장 에 따라 각 중분류별 공간할당 범위를 새롭게 산출하였다. 인위적 배출량은 현재 배출량을 토대로 주거(residential), 산업(industrial), 수송(transport), 발전(power)의 도시 영역 배출량을 추출하여 물질별 평균 배출량을 산출하고 확장된 도시영역에 대해 산출된 값을 적용하였다. 자연 배출량은 BEIS모형을 통해 도시성장에 의해 감소된 식 생의 변화를 고려하여 재산정해서 적용하였다.

2.2. 모델링 실험설계 및 연구방법

본 연구에서는 수도권 미래 오존농도 변화에 대한 도시성장의 영향과 RCP 기후변화 시나리오의 영향을 각각 정량적으로 분석하기 위하여 Table 2와 같이 실험설계 하고 WRF와 CMAQ 모델링을 수행하였다. 총 4개의 실험을 구성하였으며 각 실험별로 기상 자료(Met data), 토 지피복 자료(LC data), 배출량 자료(EM data)를 다르게

적용하였다.

EXP-F2012는 2012년 RCP6.0 시나리오의 모의 특 성을 검증하기 위해 설계되었고, 기본적으로 2012년 FNL 기상자료와 2012년의 LC data와 EM data가 적용 되었다. 분석 기간은 2012년 5월 1일부터 6월 30일까지 이며 모델의 초기 불안정성을 제거하기 위하여 3~4일 의 spin-up 시간을 두었다(대기질모델링의 spin-up 시간 포함). 또한, EXP-F2012는 본 연구에서 사용한 WRF와 CMAQ모델링의 유의성을 평가하기 위한 실험으로 도메 인 영역에 포함되는 기상청 ASOS 기상자료와 대기질관 측망에서 관측한 자료를 각각의 모델결과들과 통계지표 들(mean bias, MB; root mean square error, RMSE; mean absolute gross error, MAGE; index of agreement, IOA)을 이용하여 분석하였다. EXP-R2012는 Base 모 델링으로 2012년 RCP6.0 자료와 2012년의 LC data와 EM data가 적용되었다. EXP-R2050은 수도권 미래 오 존농도에 대한 RCP 기후시나리오의 영향을 분석하기 위 한 실험으로 2050년 RCP6.0 자료와 2012년의 LC data 와 EM data를 사용하였다. EXP-R2050과 EXP-R2012 실험의 모델결과 차이를 분석함으로써 2012년과 2050 년의 RCP 기후변화 시나리오에 의한 오존농도 변화를

Table 2. Experimental designs

Experiments	Met data	LC data	EM data	Periods
EXP-F2012	2012 FNL	2012 LC	2012 EM	May - June, 2012
EXP-R2012	2012 RCP6.0	2012 LC	2012 EM	May - June, 2012
EXP-R2050	2050 RCP6.0	2012 LC	2012 EM	May - June, 2050
EXP-U2050	2050 RCP6.0	2050 LC	2050 EM	May - June, 2050

확인할 수 있다. EXP-U2050은 수도권 미래 오존농도에 대한 도시성장의 영향을 분석하기 위하여 설계된 실험으로 2050년 RCP6.0 자료와 2050년의 LC data와 EM data가 적용되었다. EXP-U2050과 EXP-R2050 실험의 모델결과 차이를 분석함으로써 2012년과 2050년의 도시성장에 의한 오존농도 변화를 분석할 수 있다. 수도권 미래 오존농도에 대한 상세한 분석을 위하여 고농도 오존이 주로 나타나는 낮(11:00-16:00) 시간을 중심으로 기후변화(기온, 풍속, 상대습도, PBL고도)와 오존농도 변화를 분석하였다.

각 실험별로 WRF와 CMAQ모델링에 차별적으로 사용된 2012년과 2050년의 LC data와 EM data의 특성을 Fig. 2와 Table 3에 제시하였다. Fig. 2는 2012년과

2050년의 토지피복자료의 공간분포와 각각의 변화량을 나타낸 것이다. 수도권의 경우 2012년 11.9 %를 차지하던 도시영역(UBN)이 2050년에 25.8 %로 13.9 % 증가하였다. 이러한 도시영역(UBN)의 확장은 수도권 남부에 위치한 과천, 성남, 시흥, 광주, 화성, 수원, 용인 등의 도시들을 중심으로 이루어졌으며 평택과 안성시 부근도 도시화가 상당히 진행되었다(Kim 등, 2012). 전체적인 변화추이를 보면 2050년에는 도시가 꾸준히 확장되면서 서울시를 중심으로 주변 외곽도시가 하나의 거대도시로 확대될 가능성이 있을 것으로 예측되었다. 이와는 달리 식생분포(DCL, ICL, BRF, NDF, MXF 등)는 최소 0.1 %에서 최대 6.6 % 까지 감소하였으며 ICL 비율이 가장 크게 감소하였다. 전반적으로 수도권 남부지역에 넓게

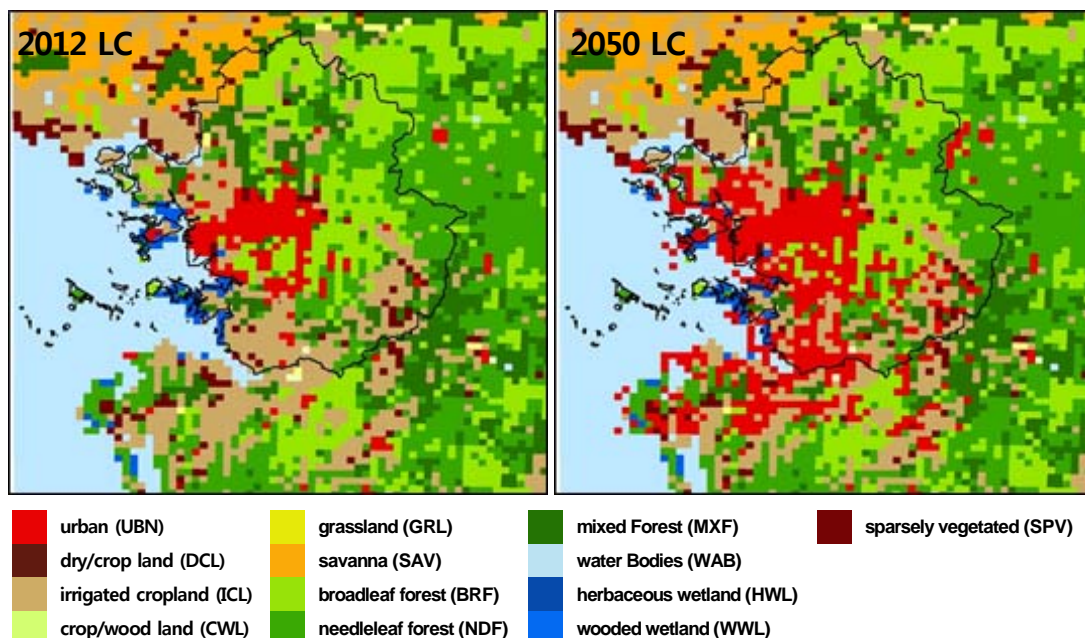


Fig. 2. The spatial distributions of the present (2012) and future (2050) land cover (LC).

Table 3. Emissions in moles day-1 for the present (2012) and future (2050) cases

Pollutants	2012 EM	2050 EM	Variation(%)
CO	15408	38363	149.0
NO	5306	11727	121.0
NO ₂	1025	2678	161.3
SO ₂	689	1679	143.7
VOC	6516	14533	123.0

퍼져있던 농경지가 대부분 도시영역으로 대체되었다. 이와 같은 도시성장 효과를 적용하여 2050년 미래 배출량을 산정하였으며, Table 3에 수도권 도시 성장에 의한 2012년과 2050년의 CO, NO, NO₂, SO₂, VOC의 배출량 변화를 비교하였다. 2012년 대비 2050년의 배출량은 물질별로 최소 121 %에서 최대 161.3 % 까지 증가하였으며, 그 중에서 NO₂가 가장 큰 증가폭을 보였다. VOC는 식생 감소에 의한 자연배출량 감소에도 불구하고 인위적으로 배출되는 VOC 양이 증가하여 123 % 증가하는 것으로 나타났다. 본 논문에는 제시하지 않았지만, 2012년에는 서울을 중심으로 배출되는 오염물질이 2050년에는 확장된 도시영역을 포함하여 수도권 전역에서 배출되는 것을 각 물질별 공간분포 분석을 통해 확인하였다.

3. 결과 및 토의

3.1. 모델 평가

RCP 기후변화 시나리오의 모의 특성과 현재 대기질

배출량을 산정하기 위하여 설계된 EXP-F2012 실험과 Base 모델링인 EXP-R2012의 유의성을 평가하기 위하여 각 실험별 WRF와 CMAQ 결과를 통계지표들(MB, MAGE, RMSE, IOA)을 사용하여 평가하였다. WRF모델은 기온, 상대습도, 풍속을 분석하였고, CMAQ모델은 1시간 평균 오존농도, 일 최고 1시간과 8시간 평균 오존농도에 대해 분석하였다(Table 4).

EXP-F2012 실험의 경우, WRF모델에서 모의된 대부분의 기상요소가 미국 EPA에서 제시하는 중규모 기상 모델 평가 기준지표(benchmarks) 범위에 포함되는 것을 확인할 수 있다(US EPA, 2007). 기온, 상대습도, 풍속 모두 높은 IOA(0.96, 0.84, 0.71)와 적은 오차값(MB: 0.47 °C, 0.11 %, 0.04 m/s, MAGE: 0.78 °C, 9.62 %, 1.04 m/s, RMSE: 2.13 °C, 12.21 %, 1.19 m/s)이 나타났다. CMAQ모델에서 모의된 결과에서는 1시간 평균 오존농도는 높은 IOA(0.75)를 보였으나, 일 최고 1시간과 8시간 평균 오존농도는 상대적으로 낮은 IOA(0.57과 0.59)가 나타났다. 이상의 결과에서 EXP-F2012 실험의 WRF와 CMAQ 모델링 결과가 다소의 단기적 오차(예,

Table 4. Statistical evaluations between the observed and modeled parameters from two different Experiments for WRF and CMAQ, respectively

Experiments	Statistics	WRF			CMAQ		
		T	RH	WS	1-h O ₃	Max. 1-h O ₃	Max 8-h O ₃
EXP-F2012	MB	0.47	0.11	0.04	-0.7	-6.8	-2.1
	MAGE	0.78	9.62	1.04	15.4	16.3	13.3
	RMSE	2.13	12.21	1.19	19.6	21.3	17.4
	IOA	0.96	0.84	0.71	0.75	0.57	0.59
EXP-R2012	MB	0.17	3.67	0.64	0.01	-10.6	-5.1
	MAGE	4.53	17.36	1.15	18.2	20.9	17
	RMSE	3.74	21.42	1.79	22.7	26.0	21.1
	IOA	0.89	0.73	0.47	0.65	0.41	0.43

해안선 인근 일부 관측지점이 존재하나 관측값의 시/공간적 변화경향을 잘 재현하는 등 전반적으로 충분한 신뢰성이 있음을 확인하였다. RCP 기후변화 시나리오를 적용한 EXP-R2012의 경우, 전반적으로 EXP-F2012 실험보다 낮은 IOA와 높은 오차값이 나타났다. WRF모델에서 모의된 기온의 경우 MB가 0.3 °C 감소해서 과대모의 경향은 줄었지만 상대적으로 높은 MAGE와 RMSE를 나타내 기온의 극값에 대해 일부 오차가 존재하였다. 상대습도의 경우 경향성은 유지되었지만 오차의 간격이 더 커졌으며 풍속의 경우 관측값과의 오차가 기온이나 상대습도보다 크게 나타났다. CMAQ모델의 1시간 평균 오존농도의 경우 약한 과대모의 경향이 나타났으며 EXP-F2012보다 오차가 약간 증가하였다. 일 최고 1시간과 8시간 평균 오존농도는 EXP-R2012에서 오차의 범위가 더 커졌으며, 과소모의 경향이 뚜렷하였고, IOA도 낮은 경향을 나타내어 전반적으로 관측값을 모의함에 있어 EXP-F2012보다 높은 오차를 나타내었다.

RCP 기후변화 시나리오 자체가 FNL 재분석 자료와는 다르게 장기간 기후 예측에 대한 결과이므로 일정부분 불확실성을 가질 수밖에 없어 오차의 발생은 당연한 부분으로 생각된다. 그럼에도 모델평가를 통해 나타난 EXP-R2012 실험의 통계값은 본 연구의 Base 모델링으로 사용하기에 충분한 신뢰성이 있음을 보였다.

이상의 분석에서 Base 모델링으로 설계된 EXP-R2012 모의결과를 EXP-F2012 실험과 관측값과 비교함으로써 RCP 시나리오를 적용한 WRF와 CMAQ모델링의 모의특성을 분석할 수 있었고, 이러한 결과는 기후변화 분석과 오존농도 변화 분석에 참고자료로 활용된다.

3.2. 기후변화 분석 및 기여도 평가

수도권 지역의 미래 오존농도 변화에 대한 도시성장의 효과를 분석하기 위하여 우선 지역기후모델의 기후예측 결과에 대한 도시성장의 영향과 RCP 시나리오 영향을 분석하였다(Fig. 3~5). Fig. 3은 EXP-U2050과

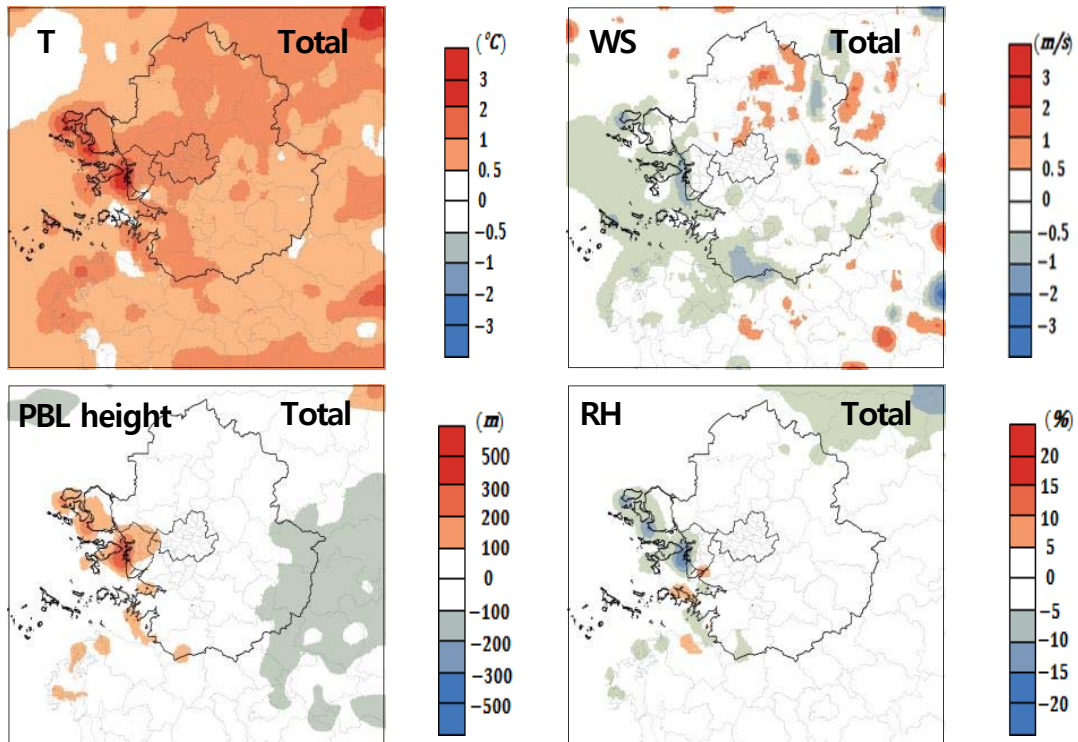


Fig. 3. Horizontal distribution of differences in T, WS, PBL height, and RH between the EXP-U2050 and EXP-R2012 during daytime for entire modeling periods.

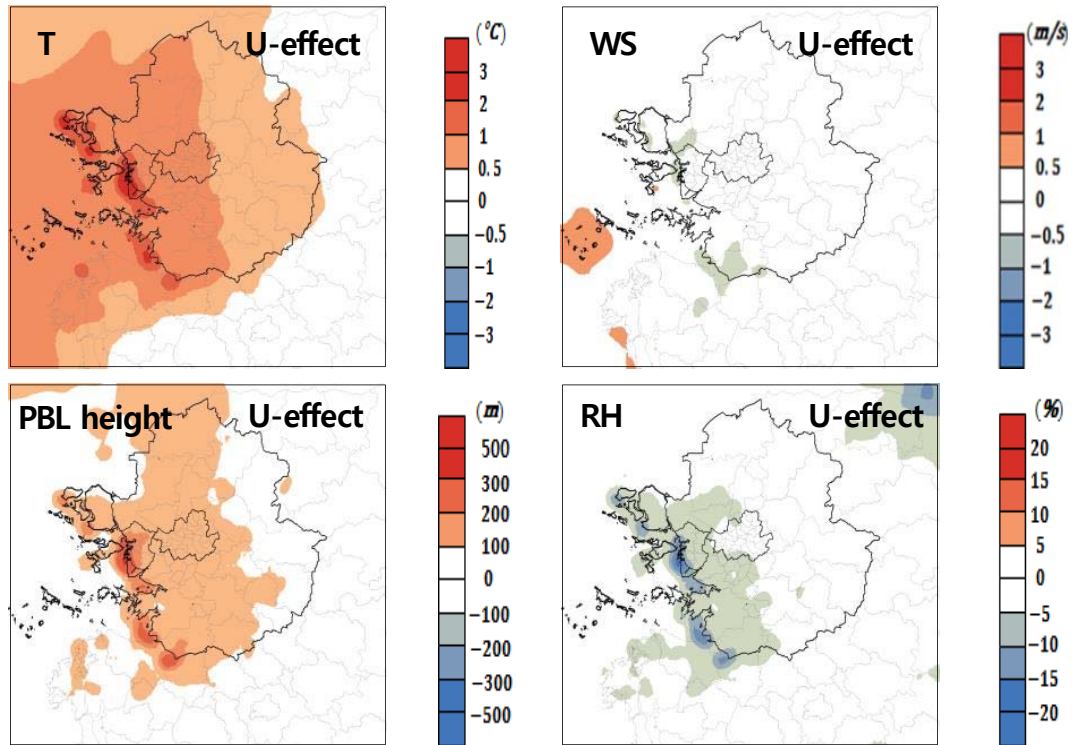


Fig. 4. Horizontal distributions of differences in T, WS, PBL height, and RH between the EXP-U2050 and EXP-R2050 (the effect of urban growth) during daytime for entire modeling periods.

EXP-R2012 실험의 모델결과 차이를 분석한 공간분포로써 2050년 기후에 대한 도시성장의 영향과 RCP6.0 시나리오의 영향이 종합적으로 고려된 결과이다(Total). 분석은 고농도 오존이 주로 나타나는 낮 시간의 기온(T), 풍속(WS), 상대습도(RH), PBL고도 값에 대해 격자별 차이의 평균값을 제시하였다. Fig. 4와 5는 EXP-U2050과 EXP-R2050 모델결과와 EXP-R2050과 EXP-R2012 모델결과의 차이를 나타낸 것으로 각각 도시성장(U-effect)과 RCP 시나리오의 영향(R-effect)을 의미한다.

도시성장과 RCP 시나리오의 복합적인 영향을 분석하면(Total), 기온은 전반적으로 1 °C 이상의 증가를 나타내며 그 영향은 서울, 인천, 연안 인근을 중심으로 집중되어 나타났고 수도권 북부 지역에도 일부 증가하는 경향을 보였다. 풍속의 경우 수도권 남부와 연안 부근에서 약 1 m/s 감소한 모습을 확인할 수 있으며, 수도권 북서부 일부 지역에는 약간의 풍속 증가를 보이기도 하였다. PBL고도는 연안에 인접한 수도권 서부지역을 중심으로

증가하는 경향이 뚜렷하였지만(약 100 m 이상), 동부지역에는 다소 감소하는 것으로 나타났다. 상대습도의 경우도 인천을 포함한 연안 부근에서 다소 감소하였다. 미래 도시성장이 수도권의 2050년 기후예측에 미치는 영향을 분석한 결과, 기온은 바다와 인접한 연안지역을 중심으로 2 °C 이상 크게 증가하였고, 서울을 포함한 수도권 서쪽 지역에서도 1 °C 이상 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 기온의 증가는 도시가 확장된 지역을 중심으로 뚜렷하게 나타났으며, 도시영역이 확대된 인근 지역에도 영향을 주는 것을 확인할 수 있었다. 풍속의 경우는 도시성장 효과가 기온변화 보다는 뚜렷하게 나타나지 않았지만, 수도권 서쪽 지역을 중심으로 약간의 감소를 보였다. PBL고도는 기온의 변화와 거의 유사한 변화 경향을 보이고 있으며, 수도권 대부분의 지역에서 100 m 이상 증가하였고 연안 인근 지역에서는 최대 300 m 이상 PBL 고도가 증가하였다. 상대습도는 도시가 확장되어 기온 증가가 나타난 지역을 중심으로 약 5~15 % 정도

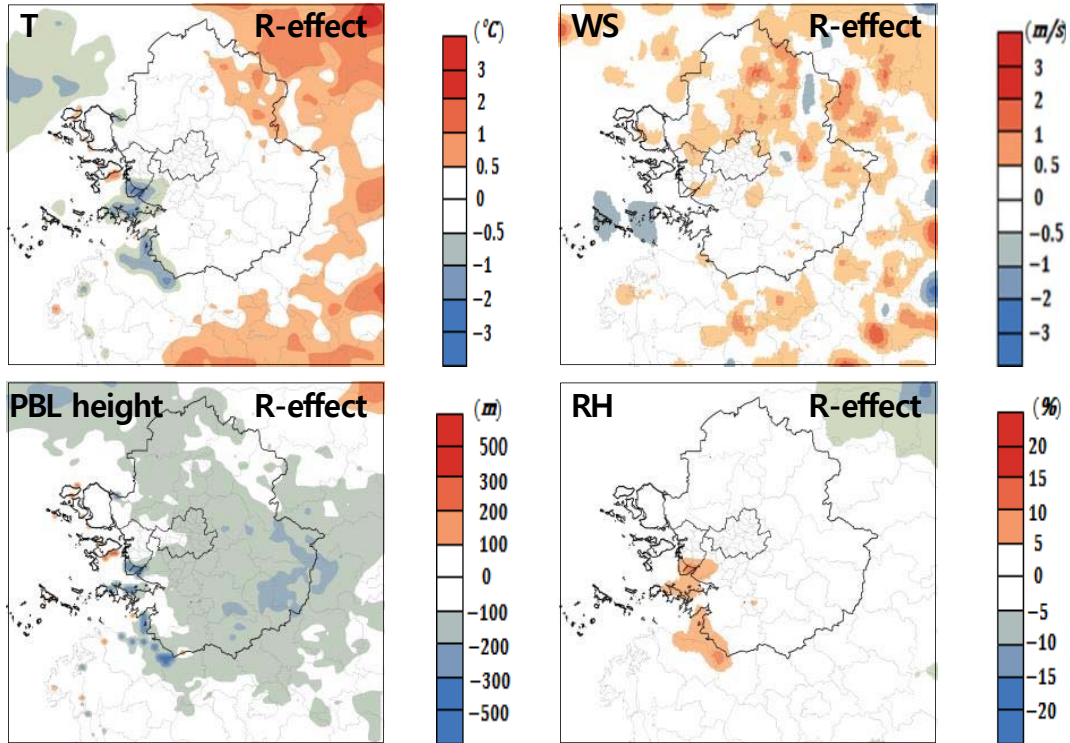


Fig. 5. Same as Fig. 4 except for the differences between the EXP-R2050 and EXP-R2012 (the effect of RCP6.0 scenario).

감소하는 경향을 보였다. 도시성장 효과에 비해 RCP 기후변화 시나리오의 영향은 수도권에서 상대적으로 뚜렷하게 나타나지 않았다. 수도권의 2050년 기온은 2012년과 큰 차이를 보이지 않았으나 강원도 일부 지역에 기온 증가가 나타났다. 풍속의 경우 수도권 북동부와 인근 외곽 지역을 중심으로 다소 증가(0.5~2 m/s)하는 경향을 보였고, PBL고도는 수도권 대부분의 지역에서 100~200 m 감소하였고, 상대습도는 기온이 증가 또는 감소했던 지역을 중심으로 일부 감소 또는 증가하는 경향이 나타났다.

전반적으로 2050년 수도권 기후예측에 대한 영향은 기온은 도시영역이 확대된 지역과 연안 인구를 중심으로 뚜렷하게 증가하였고, 풍속은 약간의 감소를 보였다. 수도권 영역에 대해 모델링 기간 평균값을 분석한 결과, 도시성장에 의한 영향은 약 1°C 정도 증가하였고 RCP6.0 기후변화 시나리오에 의한 영향은 약 0.6°C 증가하였다. 두 요인이 동시에 고려되었을 경우에는 기온이 약 1.4°C

증가하는 것으로 나타났다. PBL고도는 도시성장에 의해서는 다소 증가하고 RCP6.0 기후변화 시나리오에 의해서는 약간 감소하였다. 도시성장 영향에 의한 상대습도 변화는 기온의 분포지역과 유사하였고, 기온이 증가한 지역을 중심으로 감소하는 경향이 나타났다. 수도권 영역에 대한 평균값을 분석해 보면 도시성장에 의해 3%, 기후변화 시나리오 영향에 의해 2% 정도 감소함을 보였다. 이상의 결과에서 나타난 수도권 기후예측결과에 대한 도시성장과 RCP6.0 시나리오의 영향이 2050년 오존농도 변화에 미치는 효과와 기여도를 다음 절에서 분석하였다.

3.3. 오존농도 변화 분석 및 기여도 평가

수도권의 2050년 오존농도 변화에 대한 미래 도시성장의 영향을 분석하기 위하여 전체 모델링 기간에 대한 평균 오존농도의 공간분포와 각 실험별 CMAQ모델링 결과 차이에 대한 분석을 수행하였다(Fig. 6~8).

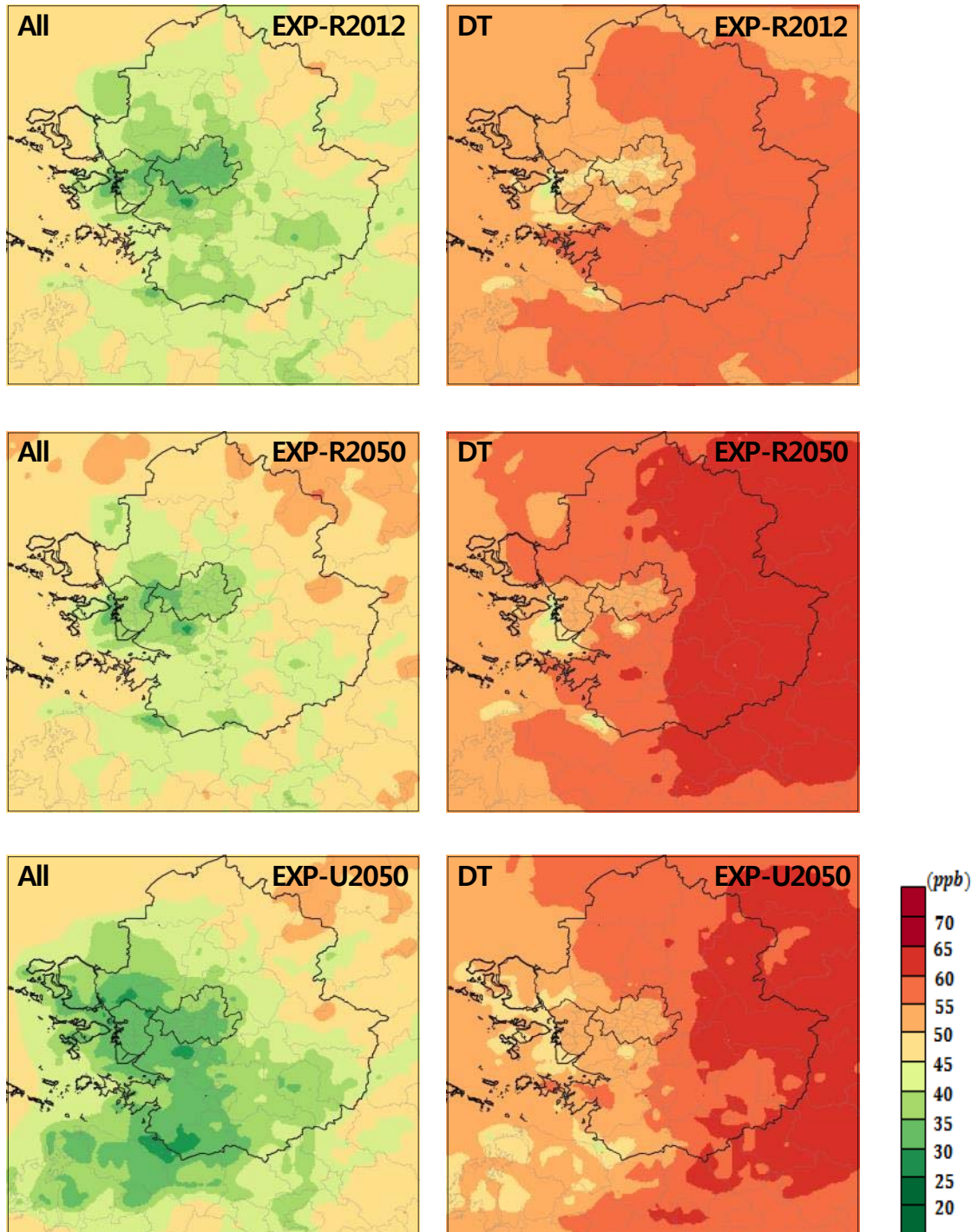


Fig. 6. The spatial distribution of mean ozone concentrations during the entire modeling periods (All) and daytime (DT) for EXP-R2012, EXP-R2050, and EXP-U2050, respectively.

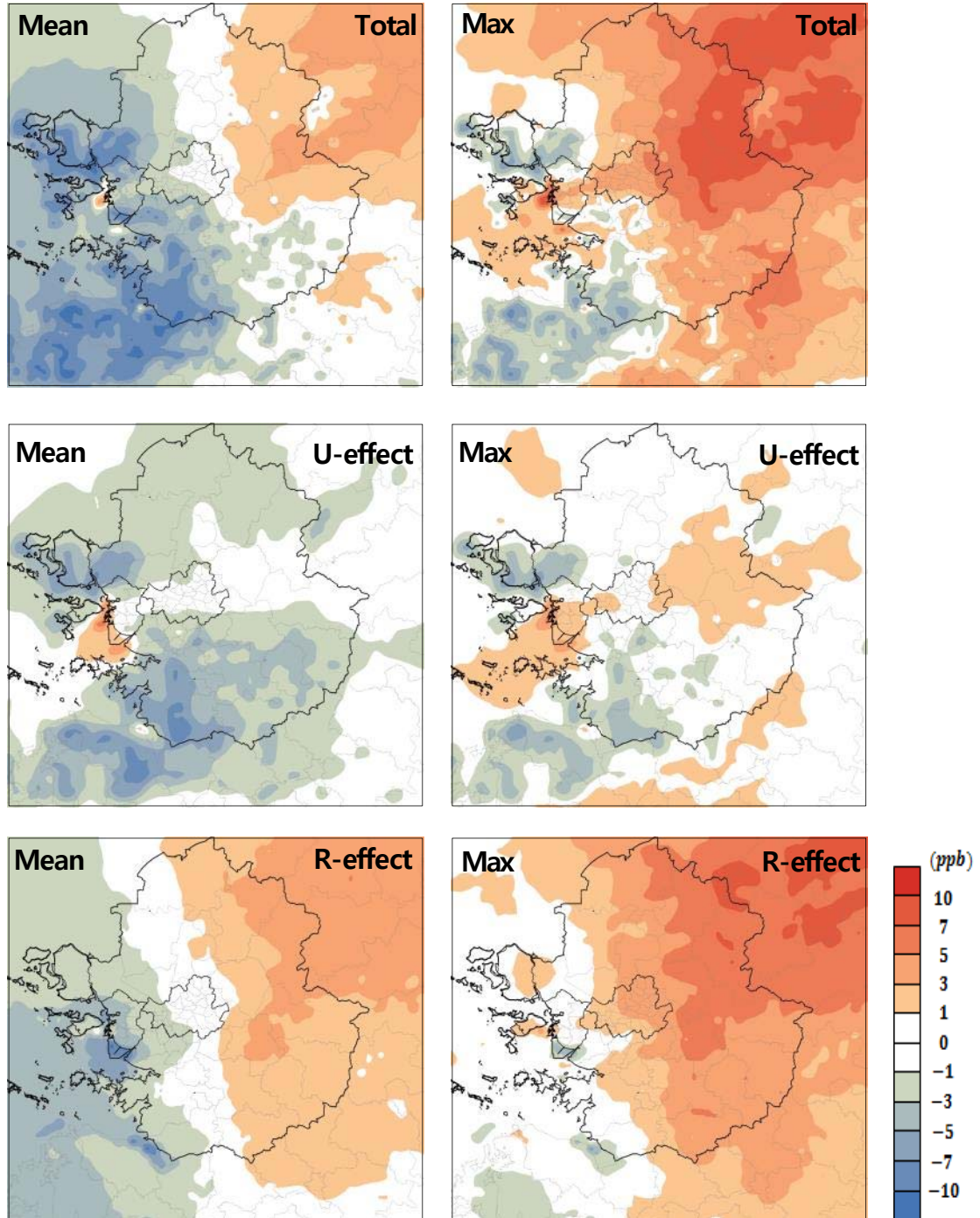


Fig. 7. Horizontal distributions of differences in mean ozone concentration and daily max ozone concentration between the EXP-U2050 and EXP-R2012 (total), EXP-U2050 and EXP-R2050 (U-effect), EXP-R2050 and EXP-R2012 (R-effect), respectively.

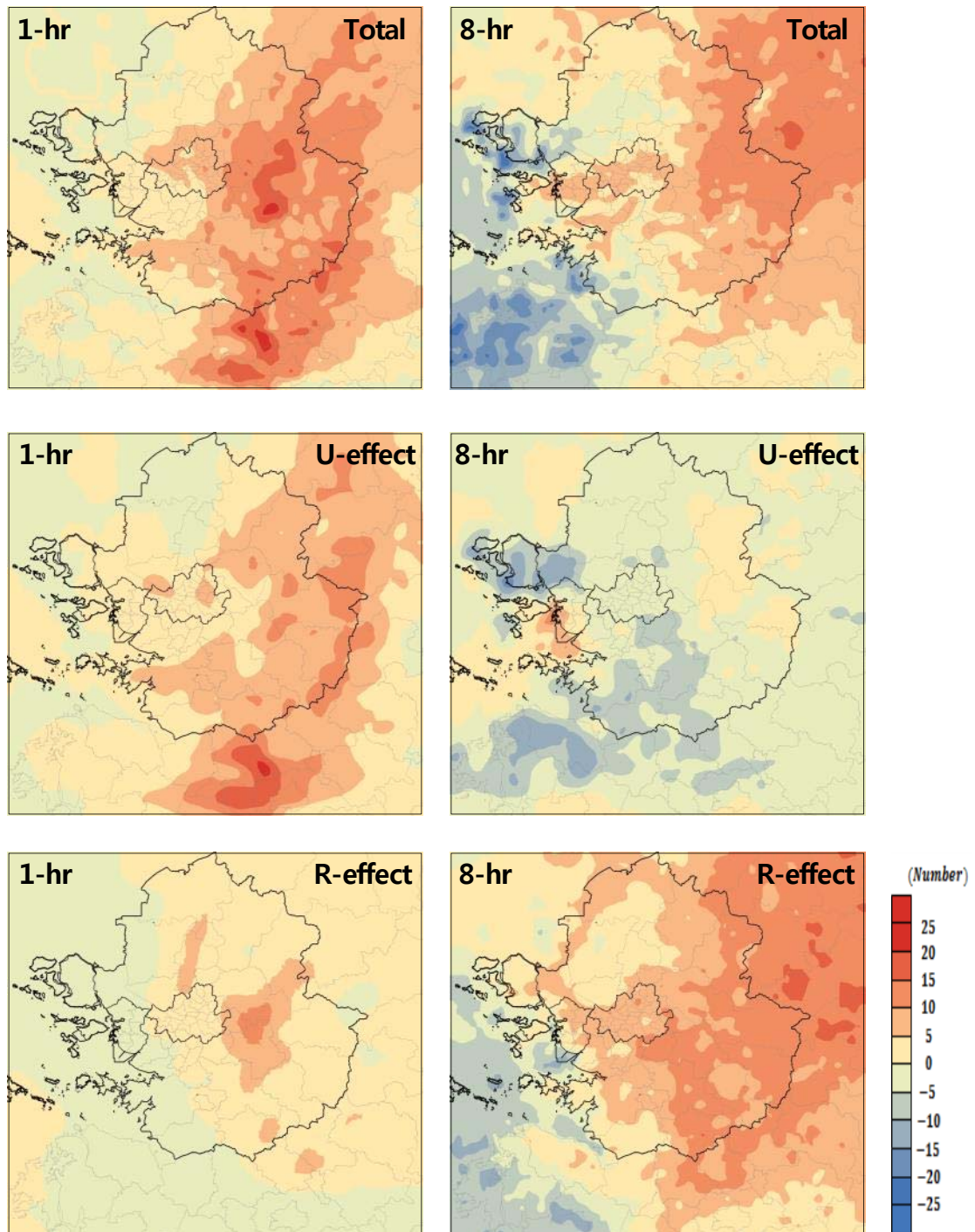


Fig. 8. The ozone pollution frequency exceeding the 1-hr and 8-hr regulatory standard for Total, U-effect, and R-effect, respectively.

Fig. 6은 3개(EXP-R2012, EXP-R2050, EXP-U2050) 실험의 모델링 결과에 대해 전체 평균한 오존농도의 공간분포와 낮 시간을 중심으로 평균한 오존농도의 공간분포를 나타낸 그림이다. EXP-R2012 실험은 전체 시간에 대해서(All) 서울과 인천을 포함한 수도권 중심지역에서 오존농도가 35 ppb 이하를 보였으며, 외곽에서는 상대적으로 5 ppb 가량 높은 40 ppb 이상의 농도를 나타내었다. 낮 시간(DT)의 공간분포도 이와 유사하나 농도가 다소 높은 경향을 보였다. EXP-R2050의 경우 EXP-R2012 실험에 비해 농도가 약간 증가하였으며 수도권 동쪽에서 그 영향이 뚜렷하게 나타났다. 특히, 서울은 5 ppb 이상의 농도 증가를 보였다. EXP-U2050 실험결과는 상대적으로 일평균 오존농도와 낮 시간의 평균 오존농도가 감소함을 보였다. 이는 도시성장에 의한 기온증가와 PBL 고도의 상승이 오존의 연직분포에 영향을 미친 것으로 보인다.

Fig. 7은 수도권의 2050년 평균 오존농도와 일 최고 오존농도 변화에 대한 도시성장과 RCP 기후변화 시나리오의 영향을 제시하였다. Total은 도시성장과 RCP 시나리오의 영향이 동시에 고려된 것으로 EXP-U2050과 EXP-R2012 실험의 모델결과 차이를 분석한 것이다. U-effect와 R-effect는 EXP-U2050과 EXP-R2050 모델결과와 EXP-R2050과 EXP-R2012 모델결과의 차이를 나타낸 것으로 각각 도시성장과 RCP 시나리오의 영향을 의미한다. Total 평균오존농도의 변화는 전반적으로 연안에 근접한 지역과 수도권 남부지역에서 최대 7 ~ 10 ppb 정도 감소하였으며 북동부 지역에서는 약 1 ~ 3 ppb 증가하였다. 일 최고 오존농도는 강화도와 수도권 남서부 일부 지역에서 약간(3 ppb 이내) 감소하는 모습을 보였고 그 외 수도권 대부분의 지역에서는 최대 9 ppb 정도 일 최고 오존농도가 증가하는 경향을 보였다. 미래 도시성장이 수도권의 2050년 오존농도에 미치는 영향을 분석한 결과(U-effect), 평균 오존농도의 경우 수도권 대부분의 지역에서 최대 3 ppb 정도 감소하였다. 반면, 일 최고 오존농도에서는 수도권 동부지역에서 2 ppb 이내의 증가를 보였고, 연안 인근 지역에서는 최대 5 ppb 정도의 증가를 나타내었다. RCP 시나리오 영향의 경우(R-effect), 평균 오존농도는 연안 인근 지역과 수도권 동부지역에서 각각 평균 3 ppb 정도의 감소와 증가하는 경향을 보였다. 일 최고 오존농도의 경우 수도권 대부

분 지역에서 1 ppb 이상 증가하였고 동부 지역에서는 최대 7 ppb 정도 증가하였다.

고농도 오존발생에 대한 도시성장의 영향을 보다 상세하게 분석하기 위하여 환경부에서 제시한 환경기준을 적용하여 각 실험별 모델링 결과에서 기준을 초과하는 고농도현상의 발생 빈도를 분석하였다. Fig. 8은 연구를 수행한 전체 대상기간 중에서 대기환경기준치인 1시간 100 ppb와 8시간 60 ppb를 초과하는 횟수를 누적하여 고농도 오존의 발생에 대한 도시성장과 RCP 기후변화 시나리오 각각의 기여도를 제시하였다. 1시간 오존농도 분석에서는 전반적으로 수도권의 고농도 오존의 발생이 증가하였고 서울과 수도권 동쪽에서 누적횟수가 더욱 증가하는 경향을 보였다(Total). 도시성장에 의한 영향(U-effect)은 도시가 확장된 영역을 포함해 대부분의 지역에서 초과횟수가 최대 10회 정도 증가하였음을 보여 오존의 1시간 자료에 대한 고농도 발생은 도시성장의 영향이 뚜렷하였음을 보였고, RCP 기후변화 시나리오에 의한 영향은 수도권 일부 지역에서만 한정적으로 나타났다. 반면, 8시간 오존농도 분석에서는 도시성장보다는 RCP 시나리오가 더 많은 영향을 주는 것으로 나타났다.

이상의 분석에서 수도권 미래 오존농도에 대한 RCP 기후시나리오의 영향은 전반적으로 오존농도 증가에 기여하였으나, 도시성장의 영향은 일 최고 오존농도 증가에 뚜렷한 영향을 미치는 것을 확인하였다. 특히, 도시성장 효과는 단기간의 고농도 오존발생과 밀접한 관계가 있음을 확인할 수 있었다. 미래 수도권 오존의 평균농도와 고농도 발생은 연안과 내륙지역의 지역별 특성으로 각각 다른 차이를 보였고, 이러한 결과는 도시와 고농도 오존 사례일을 중심으로 미래 오존농도가 더욱 증가한다는 기존 선행연구 결과와 유사하게 나타났다.

4. 결론

본 연구에서는 수도권 지역을 대상으로 미래 도시성장이 2050년 오존 농도에 미치는 영향을 분석하였고, RCP 기후변화 시나리오의 영향과 비교하였다. 2012년 11.9 %를 나타낸 수도권의 도시영역은 2050년에 25.8 %로 13.9 % 증가하였고, 도시성장에 의한 CO, NO, NO₂, SO₂, VOC 배출량 변화는 물질별로 2050년에 최소 121 % (NO)에서 최대 161.3 % (NO₂)까지 증가하였

다. 이러한 도시성장이 2050년 수도권 기후에 미치는 영향은 전반적으로 기온과 PBL고도 증가에 영향을 미쳤으며, 특히 서울을 중심으로 수도권 서쪽 지역에서 1 °C 이상의 기온 증가를 야기하였다. 풍속과 상대습도는 기온이 증가한 지역을 중심으로 감소하는 경향을 보였으며, 특히 풍속은 일부 연안지역에서 1 m/s 이상 감소하였다. 반면, RCP 시나리오의 영향은 기온에 대한 영향은 뚜렷하지 않았고, 풍속은 수도권 북동부 지역을 중심으로 약 0.5 ~ 2 m/s 증가하였으며, PBL고도는 전반적으로 감소하였다.

수도권 미래 오존농도에 미치는 영향을 분석한 결과, 도시성장 효과는 수도권 대부분 지역의 평균 오존농도를 1~3 ppb 정도 감소시켰으며 일 최고 오존농도에 대해서는 수도권 동부지역과 연안 인근 지역을 중심으로 2~5 ppb 정도 증가하는데 기여하였다. 반면 RCP 시나리오의 영향은 수도권 내륙 지역의 평균 오존농도를 3 ppb 정도, 일 최고 오존농도를 최대 7 ppb 증가시켰다. 이상의 분석에서 수도권 미래 오존농도에 대한 RCP 기후시나리오의 영향은 전반적으로 오존농도 증가에 기여하였으나, 도시성장의 영향은 일 최고 오존농도 증가에 뚜렷한 영향을 미치는 것을 확인하였다. 특히, 도시성장 효과는 단기간의 고농도 오존발생과 밀접한 관계가 있는 것으로 나타나서 결과적으로 고농도 오존이 많이 발생하는 수도권 중심지역과 내륙지역을 중심으로 1시간 100 ppb 환경기준을 초과하는 고농도 오존의 발생 횟수를 최대 10회 가량 증가시키는데 기여하였다. 본 연구결과는 미래 수도권 고농도 오존 발생에 기후변화 요인 뿐만 아니라 도시성장 효과도 중요한 영향을 미치고 있음을 보여주는 것이며, 미래 고농도 오존 발생을 예측·관리·제어하기에 좋은 참고자료로 활용될 수 있을 것이라 생각한다. 향후에 고해상도 기후자료 적용과 장기간의 모델링이 수행된다면 보다 향상된 결과를 도출할 수 있을 것이다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2010-0012045).

REFERENCE

- Bell, M. L., Goldberg, R., Hogrefe, C., Kinney, P. L., Knowlton, K., Lynn, B., Patz, J. A., 2007, Climate change, ambient ozone, and health in 50 US cities, *Climatic Change*, 82(1-2), 61-76.
- Byun, D., Schere, K. L., 2006, Review of the governing equations, computational algorithms, and other components of the Models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) modeling system, *Applied Mechanics Reviews*, 59(2), 51-77.
- Cheng, C. S., Campbell, M., Li, Q., Li, G., Auld, H., Day, N., Yap, D., 2007, A synoptic climatological approach to assess climatic impact on air quality in south-central Canada. Part II: future estimates, *Water, Air, and Soil Pollution*, 182(1-4), 117-130.
- Cheng F-Y, Byun D. W., 2008, Application of high resolution land use and land cover data for atmospheric modeling in the Houston-Galveston metropolitan area, Part I: meteorological simulation results, *Atmos Environ*, 42, 7795 - 7811.
- Civerolo, K., Hogrefe, C., Lynn, B., Rosenthal, J., Ku, J. Y., Solecki, W., Kinney, P., 2007, Estimating the effects of increased urbanization on surface meteorology and ozone concentrations in the New York City metropolitan region, *Atmospheric environment*, 41(9), 1803-1818.
- Coleman, L., Martin, D., Varghese, S., Jennings, S. G., ODowd, C. D., 2013, Assessment of changing meteorology and emissions on air quality using a regional climate model: Impact on ozone, *Atmospheric Environment*, 69, 198-210.
- Dawson, J. P., Adams, P. J., Pandis, S. N., 2007, Sensitivity of ozone to summertime climate in the eastern USA: A modeling case study, *Atmospheric environment*, 41(7), 1494-1511.
- Gurjar, B. R., Butler, T. M., Lawrence, M. G., Lelieveld, J., 2008, Evaluation of emissions and air quality in megacities, *Atmospheric Environment*, 42(7), 1593-1606.
- Gu, C., Hu, L., Zhang, X., Wang, X., Guo, J., 2011, Climate change and urbanization in the Yangtze River Delta, *Habitat International*, 35(4), 544-552.
- Huryn, S. M., Gough, W. A., 2014, Impact of urbanization on the ozone weekday/weekend effect in Southern

- Ontario, Canada, *Urban Climate*, 8, 11 - 20.
- Huszar, P., Juda-Rezler, K., Halenka, T., Chervenkov, H., Syrakov, D., Krüger, B. C., Belda, M., 2012, Effects of climate change on ozone and particulate matter over Central and Eastern Europe, *Climate Research*, 50(1), 51-68.
- Jacob, D. J., Winner, D. A., 2009, Effect of climate change on air quality, *Atmospheric Environment*, 43(1), 51-63.
- Jeong, J. H., Kim, Y. K., 2009, The Application of High-resolution Land Cover and Its Effects on Near-surface Meteorological Fields in Two Different Coastal Areas, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 25(5), 432-449.
- Jeong, Y. M., Lee, H. W., Lee, S. H., Choe, H. J., J, W. B., 2010, Numerical Study on the Impact of Regional Warming on the Meteorological Field and Ozone Concentration over the South-Eastern Part of the Korean Peninsula, *Journal of the Environmental Sciences*, 19(12), 1431-1445.
- Kang, Y. H., Kim, Y. K., Oh, I. B., Hwang, M. K., Song, S. K., 2010, Modeling the Impacts of Increased Urbanization on Local Meteorology in the Greater Seoul Area, *Journal of Environmental Science International*, 19(12), 1361-1374.
- Kim, D. Y., 2011, Impact of urbanization on the ozone weekday/weekend effect in Southern Ontario, 2011-34, Gyeonggi Research Institute. Gyeonggi.
- Kim, H. S., Jeong, J. H., Oh, I. B., Kim, Y. K., 2010, Prediction of Future Climate Change Using an Urban Growth Model in the Seoul Metropolitan Area, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 26(4), 367-379.
- Kim, H. S., Jeong, J. H., Kim, Y. K., 2012, Analysis of Climate Variability under Various Scenarios for Future Urban Growth in Seoul Metropolitan Area (SMA), Korea. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 28(3), 261-272.
- Kim, S. J., 2007, Effects of Various Conditions for Numerical Analysis on Urban Climate, *Architectural Institute of Korea*, 23(6), 297-304.
- Korea Environment Institute(KEI), 2009, The Impact of Climate Change on Regional Scale Air Quality, Research report(2009-14), Seoul.
- Lam, J. S. L., Lau, A. K. H., Fung, J. C. H., 2006, Application of refined land-use categories for high resolution mesoscale atmospheric modeling, *Boundary-Layer Meteorology*, 119, 263-288.
- Lei, H., Wuebbles, D. J., Liang, X. Z., 2012, Projected risk of high ozone episodes in 2050, *Atmospheric Environment*, 59, 567-577.
- Leung, L. R., & Gustafson, W. I., 2005, Potential regional climate change and implications to US air quality, *Geophysical Research Letters*, 32(16).
- National Institute of Environmental Research(NIER), 2013, Studies on the optimization method for improving the accuracy of air quality modeling, National Institute of Environmental Research, Contents No. 5567639, Incheon.
- Meleux, F., Solmon, F., Giorgi, F., 2007, Increase in summer European ozone amounts due to climate change, *Atmospheric environment*, 41(35), 7577-7587.
- Mickley, L. J., Jacob, D. J., Field, B. D., Rind, D., 2004, Effects of future climate change on regional air pollution episodes in the United States, *Geophysical Research Letters*, 31(24).
- Ministry of Environment(ME), 2013, Annual Report of Ambient Air Quality in Korea, 2012. Ministry of Environment, Incheon.
- Sadorsky, P., 2014, The effect of urbanization on CO2 emissions in emerging economies, *Energy Economics*, 41, 147-153.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., 2008, A time-split nonhydrostatic atmospheric model for weather research and forecasting applications, *Journal of Computational Physics*, 227(7), 3465-3485.
- Song, J., Webb, A., Parmenter, B., Allen, D. T., McDonald-Buller, E., 2008, The impacts of urbanization on emissions and air quality: comparison of four visions of Austin, Texas, *Environmental science & technology*, 42(19), 7294-7300.
- Tagaris, E., Manomaiphiboon, K., Liao, K. J., Leung, L. R., Woo, J. H., He, S., Amar, P., Russell, A.G., 2007, Impacts of global climate change and emissions on regional ozone and fine particulate matter concentrations over the United States, *J. Geophys. Res.* 112, D14312.1 -D14312.11.
- Wang, M., Zhang, X., Yan, X., 2013, Modeling the climatic effects of urbanization in the Beijing - Tianjin - Hebei metropolitan area, *Theoretical and applied climatology*, 113(3-4), 377-385.

Wu, S., Mickley, L. J., Leibensperger, E. M., Jacob, D. J., Rind, D., Streets, D. G., 2008, Effects of 2000 - 2050 global change on ozone air quality in the United States, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984 - 2012), 113(D6).

Yamaji, K., Ohara, T., Uno, I., Kurokawa, J. I., Pochanart,

P., Akimoto, H., 2008, Future prediction of surface ozone over east Asia using Models 3 Community Multiscale Air Quality Modeling System and Regional Emission Inventory in Asia, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984 - 2012), 113(D8).