

ORIGINAL ARTICLE

## 수도권 대기질 모델링 정확도 향상을 위한 WRF 모델링: 계절별 물리옵션 민감도 연구

정주희 · 오인보<sup>1)\*</sup> · 강윤희<sup>2)</sup> · 방진희<sup>1)</sup> · 안혜연<sup>3)</sup> · 석현배<sup>4)</sup> · 김유근 · 홍지형<sup>5)</sup> · 김지영<sup>5)</sup>

부산대학교 대기환경과학과, <sup>1)</sup>울산의대 환경보건센터, <sup>2)</sup>부산대학교 환경연구원, <sup>3)</sup>부산대학교 지구환경시스템학부,  
<sup>4)</sup>(주)에코브레인, <sup>5)</sup>국립환경과학원 기후대기연구부

### WRF Modeling Approach for Improvement of Air Quality Modeling in the Seoul Metropolitan Region: Seasonal Sensitivity Analysis of the WRF Physics Options

Ju-Hee Jeong, Inbo Oh<sup>1)\*</sup>, Yoon-Hee Kang<sup>2)</sup>, Jin-Hee Bang<sup>1)</sup>, Hyeeyeon An<sup>3)</sup>,  
Hyeon-Bae Seok<sup>4)</sup>, Yoo-Keun Kim, Jihyung Hong<sup>5)</sup>, Jiyoung Kim<sup>5)</sup>

*Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University, Busan 46241, Korea*

<sup>1)</sup>*Environmental Health Center, University of Ulsan College of Medicine, Ulsan 44033, Korea*

<sup>2)</sup>*The Institute of Environmental Studies, Pusan National University, Busan 46241, Korea*

<sup>3)</sup>*Division of Earth Environmental System, Pusan National University, Busan 46241, Korea*

<sup>4)</sup>*Ecobrain Co. Ltd., Seoul 08512, Korea*

<sup>5)</sup>*Climate and Air Quality Research Department, National Institute of Environmental Research, Incheon 22689, Korea*

#### Abstract

In order to improve the prediction of the regional air quality modeling in the Seoul metropolitan area, a sensitivity analysis using two PBL and microphysics (MP) options of the WRF model was performed during four seasons. The results from four sets of the simulation experiments (EXPs) showed that meteorological variables (especially wind field) were highly sensitive to the choice of PBL options (YSU or MYJ) and no significant differences were found depending on MP options (WDM6 or Morrison) regardless of specific time periods, i.e. day and night, during four seasons. Consequently, the EXPs being composed of YSU PBL option were identified to produce better results for meteorological elements (especially wind field) regardless of seasons. On the other hand, the accuracy of all simulations for summer and winter was somewhat lower than those for spring and autumn and the effect according to physics options was highly volatile by geographical characteristics of the observation site.

**Key words** : Air quality modeling, WRF, PBL, Microphysics, Physics options, Sensitivity analysis

Received 22 July, 2015; Revised 16 November, 2015;

Accepted 17 November, 2015

\*Corresponding author : Inbo Oh, Environmental Health Center,  
University of Ulsan College of Medicine, Ulsan 44033, Korea  
Phone: +82-52-209-0050  
E-mail: oinbo@ulsan.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.

## 1. 서론

지난 수십 년간 우리나라는 지속적인 도시화와 경제 성장이 있었고 이로 인해 대기질 악화현상이 중요한 환경문제가 되었다. 특히, 수도권은 국내 다른 지역과 비교해 대기오염 현상이 심각하며(MOE, 2005), 선진국 주요 대도시와 비교에서도 대기질이 좋지 못하다(PM<sub>10</sub>은 1.8~3.5배, NO<sub>2</sub>는 1.2~1.7배 높은 수준; GRI, 2011). 최근에는 중국에서 배출된 대기오염물질의 장거리 이동 역시 수도권 대기질 악화에 기여하고 있다(Ha and Moon, 2013; Oh et al., 2010). 이러한 문제의 개선을 위해서는 대기오염물질의 지속적인 모니터링과 함께 대규모 대기질 모델링을 통한 원인 진단과 예측연구가 필연적이다.

대기질 모델링의 경우 양질의 입력자료와 적절한 모델링 수행방법의 적용이 모델결과의 신뢰성을 높일 수 있다. 여러 선행연구에서 입력자료와 모델링 방법에 따른 모델결과의 유의한 차이를 제시하고 있다(Appel et al., 2007; Arasa et al., 2012; Menut et al., 2013; Shearer et al., 2012; Yu et al., 2010). 이 중 시-공간적으로 큰 변화를 가지며 대기오염물질의 화학반응, 수송, 제거과정에 밀접히 관계하는 기상인자들의 정확도 높은 입력자료 생성은 대기질 모델링 결과에 결정적인 영향을 미치게 된다. 기상입력자료는 기상모델(Weather Research Forecast, WRF 등) 수행을 통해 얻어지며 지표피복 및 지형자료, 초기 경계조건, 정확성, 공간해상도, 수행 옵션 등의 적절한 선택에 따라 그 정확도가 달라진다. 특히 기상모델의 수행에 있어 대기경계층(planetary boundary layer, PBL) 및 미세물리(microphysics, MP) 과정의 옵션 선택은 대기하층의 기온, 바람, 수증기와 구름복사효과를 변화시키는 중요한 부분으로(Cheng et al., 2013; González et al., 2013; Hu et al., 2010; Shin and Hong, 2011) 대기질모델 정확도 향상과 깊게 관여한다.

Borge et al.(2008)은 대기질 모델링에 중요한 입력자료로 이용되는 기온, 풍속, 풍향, 혼합비에 대해 WRF모델의 PBL, MP, Land-surface model(LSM) 옵션 영향을 여름과 겨울 사례일에 대해 분석하여 Iberian 반도에 좋은 결과를 보이는 WRF모델의 물리식 조합을 제시하였고, Misenis and Zhang(2010)은 Houston-Galveston 지역의 여름 사례일에 대해 PBL과 LSM 옵션 선택이

WRF-Chem 수행결과(CO, O<sub>3</sub>, PM<sub>2.5</sub> 농도 예측)에 미치는 영향을 분석하였다. 또한, Yerramilli et al.(2010, 2012)은 Central Gulf 연안지역의 지표 오존 예측에 영향을 미치는 바람장과 PBL구조, 지표 부근의 기온, 상대 습도, 풍속, 풍향에 대해 물리옵션 민감도 분석을 수행하였다. 국내에서는 Kim et al.(2006)이 약한/강한 풍속사례일을 선정하여 WRF 모델 PBL 옵션 선택에 따른 복잡 연안지역에서의 바람장 모의 특성을 분석하였고, Moon et al.(2011)이 수도권 지역에 대해 고농도 오존이 나타났던 여름사례일 동안 3개의 WRF모델 PBL 옵션에 대한 CMAQ 결과의 민감도 분석을 수행하여 정확도의 차이를 비교하였다.

이와 같이 국내의 선행연구에서는 기상모델의 물리 옵션 적용차이에 따른 모델링 결과의 유의한 차이를 언급하고 있고, 이러한 차이는 연구 대상지역의 지리적 환경특성과 기상조건 등에 따라 다르게 나타났다. 하지만 대부분의 선행연구는 단기간의 대기오염 사례기간에 대한 분석으로 제한되었고 평균적이고 대표성 있는 결과 도출에는 한계가 있었다. 또한 계절적 기상조건을 고려한 물리옵션의 선택은 기상모델링 결과의 정확도에 영향을 미치는 부분임에도 이에 대한 구체적인 결과가 제시되지 못하였다.

본 연구에서는 고농도 대기오염 현상이 빈번하게 발생하는 수도권 지역의 대기질 모델링 정확도 향상을 위한 방안으로 기상모델의 물리옵션(PBL과 Microphysics)에 따른 계절별 차이와 특성을 분석하였다. 계절별 모델링을 통해 평균적이고 대표성 있는 결과를 제시하였고 물리옵션에 따른 낮과 밤 시간의 모의 특성에 대한 평균적/정량적 차이와 시-공간적분포 특성도 상세히 비교하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1. 사례일 선정

본 연구에서는 2012년을 대상으로 각 계절의 종관기상 특징이 반영되고 다양한 기상조건 과 대기오염물질(오존과 PM<sub>10</sub>)의 다양한 농도변화가 나타난 기간을 계절별로 20일씩 선정하였다. 모델링 결과의 평균적인 정확도 해석과 비교를 위하여 장마, 태풍, 황사현상과 같은 비 정기적이며 단기간에 대기환경 변화에 큰 영향을 미치는 기간은 제외하였다. 사례일 선정을 위하여 수도권

내 위치한 ASOS(Automatic Synoptic Observation System)와 AWS(Automatic Weather System)로부터 수집된 기상자료와 대기오염 측정망의 대기오염물질 농도자료를 분석하였다. 선정된 계절별 대표 사례기간과 대기질 측정망에서 관측된 오존 및 PM<sub>10</sub> 농도와 통계값(평균과 표준편차)을 Table 1에 제시하였다. 각 계절별 대표 사례기간의 오존과 PM<sub>10</sub> 농도의 시간변화와 서울 ASOS 지점에서의 기온과 강수 정보를 분석한 결과, 대기오염물질의 계절적 특징이 뚜렷함을 볼 수 있었으며 전반적으로 기온 변화와 강수 조건에 따라 대기오염물질 농도가 변화함을 확인하였다(NIER, 2013). 오존의 경우, 기온이 높고 일사량이 풍부한 여름철에 농도가 높게 나타났고, 특히 여름 사례기간 20일 중 오존주의보(120 ppb h<sup>-1</sup> 이상) 발령일수가 4일(6/18, 6/21, 6/23, 6/24), 대기환경기준(100 ppb h<sup>-1</sup> 이상) 초과일은 12일로 고농도 현상이 빈번히 관측되었다. PM<sub>10</sub>은 여름철에 상대적으로 농도가 낮았고 나머지 계절은 40 ug/m<sup>3</sup> 이상의 평균농도가 나타났다.

**Table 1.** Analysis periods and O<sub>3</sub> and PM<sub>10</sub> concentrations for each season

Season	Periods (2012)	Pollutant concentrations (mean ± S.D)	
		O <sub>3</sub> (ppb)	PM <sub>10</sub> (μg/m <sup>3</sup> )
Spring	Apr. 03-22	30.5 ± 14.9	55.0 ± 28.4
Summer	Jun. 11-30	38.2 ± 18.8	39.2 ± 16.8
Autumn	Nov. 01-20	15.5 ± 9.3	45.1 ± 23.1
Winter	Jan. 11-30	14.2 ± 7.9	57.6 ± 30.1

**2.2. WRF 모델링 구성**

대기질 모델에서 요구되는 격자별 기상 입력자료 생성을 위하여 기상모델은 WRF(ver. 3.5)를 사용하였다. WRF 모델의 초기 및 경계조건은 자료의 사-공간해상도와 수집 용이성을 고려하여 NCEP(National Center for Environmental Prediction)에서 제공하는 FNL(Final) 전구 재분석 자료와 SST(Sea Surface Temperature) 자료를 이용하였다. FNL 자료는 6시간간격 1.0°×1.0° 격자 해상도이며, SST 자료는 일 간격 0.5°×0.5° 격자 해상도이다. 보다 정확한 기상결과 도출을 위하여 객관분석

기법인 OBSGRID 프로그램을 이용하여 자료동화를 수행하였다. 사용된 자료는 NCEP에서 제공하는 지상관측 자료(ds461.0)와 고층관측자료(ds351.0)이며, 일반적으로 사용되는 Cressman scheme을 적용하였다(Skamarock et al., 2008). 모델링기간은 모델의 초기 불안정성을 제거하기 위하여 4일의 spin-up 기간을 포함하여 봄은 2012년 3월 30일부터 4월 22일까지, 여름은 2012년 6월 7일부터 6월 30일까지, 가을은 2012년 10월 28일부터 11월 20일까지, 겨울은 2012년 1월 7일부터 1월 30일까지로 각각 설정하였다.

모델링 영역은 국립환경과학원 CAPMOS(Clean Air Policy Modeling System) 홈페이지(<http://capmos.nier.go.kr>)에서 제공되는 국가도메인과 동일하게 설정되었다. Nesting 기법을 이용하여 동아시아 영역의 첫 번째 도메인(27 km 격자)에서부터 한반도를 포함하는 두 번째 도메인(9 km 격자), 그리고 최종 수도권 도메인(3 km 격자)으로 구성하였다(Fig. 1). 대상지역의 현실적인 지형과 지표면 상태를 WRF 모델링에 반영하기 위하여 고해상도 지형고도와 토지피복 자료를 적용하였다. 사용된 자료는 SRTM(Shuttle Radar Topography Mission) 3초(약 90 m) 지형자료와 국내 환경부에서 제작한 환경공간정보서비스(Environmental Geographic Information System, EGIS)의 중분류(해상도 5 m급, 22개 항목) 토지피복 자료이다.

**2.3. 모델링 실험설계 및 연구방법**

PBL과 MP 물리옵션은 대기질 모델링과 연계하여 중요한 옵션으로 알려져 있다. PBL 옵션은 대기 중 열, 운동량, 수분의 연직플럭스를 모수화하여 오염물질의 수송 확산 등을 포함한 오염물질 농도수준에 중요한 역할을 하며, MP 물리옵션은 수분변수들의 상호작용을 조절함으로써 격자규모의 구름과 강수과정을 다룬다.

본 연구에서는 WRF 모델의 다양한 PBL과 MP 물리 옵션 중에서 YSU와 MYJ PBL 옵션과 WDM6와 Morrison double moment MP 옵션을 선택하여 모델링 실험설계를 하였다. YSU PBL 옵션은 non-local closure scheme으로 운동량에 대한 난류확산계수(eddy diffusivity coefficient)는 마찰속도(friction velocity)와 PBL 고도의 함수이고(Hong et al., 2006; Shin and Hong, 2011), MYJ PBL 옵션은 국지적 연직확산(local

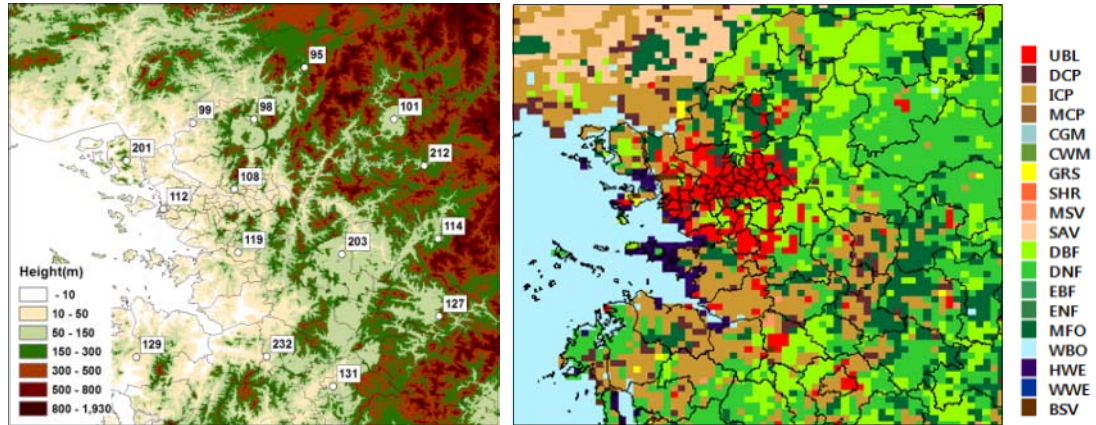


Fig. 1. Terrain height, observational sites (circles) and land cover for the SMR 1-km domain.

vertical mixing) 난류운동에너지(turbulent kinetic energy) scheme으로 난류확산계수는 혼합과 난류운동 에너지의 길이 스케일(length scale)을 기준으로 모수화된다(Yerramilli et al., 2012). WDM6 MP 옵션은 WSM6에 기초를 둔 더블모멘트 방식이며, 기본적으로 6 가지 수분물질(water vapor, clouds, rain, ice, snow, graupel)을 포함하여 혼합비를 예측한다(Hong and Lim, 2006; Hong et al., 2010). Morrison MP 옵션은 고해상도 수치모의에서 수 농도와 혼합비를 정확하게 예측하고 구름발달을 계산하는데 중요한 요소 중 하나인 입자 크

기분포를 다루는데 유용하다(Morrison et al., 2009). 각 물리옵션에 대한 상세한 설명은 NIER(2013) 보고서에 제시되었다. 모델의 다른 물리과정은 선행연구에서 대표적으로 많이 사용하는 물리옵션을 선택하여 각 실험별로 가능한 한 유사하게 적용하였다(Table 2).

PBL과 MP 물리옵션에 따른 수도권의 계절별 모의특성을 분석하기 위하여 Table 2와 같이 WRF모델링을 실험계획하였다. EXP-YW는 Base 모델링으로 선행연구 조사결과를 바탕으로 WRF모델에서 많이 사용되는 YSU PBL과 WDM6 MP 물리옵션을 적용한 실험이다

Table 2. Experimental design for sensitivity analysis of different physics options in WRF

Experiment	Domain	Physics option		
		PBL	MP	Others
EXP-YW	D01		WSM3	
	D02	YSU		
	D03		WDM6	
EXP-YM	D01		WSM3	- RRTMG for both LW and SW radiation
	D02	YSU		- Kain-Fritsch for cumulus parameterization (only D01)
	D03		Morrison	- Noah for surface process
EXP-MW	D01		WSM3	
	D02	MYJ		- Revised MM5 similarity and topo_wind option for surface layer (YSU scheme)
	D03		WDM6	
EXP-MM	D01		WSM3	- Eta similarity for surface layer (MYJ scheme)
	D02	MYJ		
	D03		Morrison	

(Byun et al., 2011; Lim and Hong, 2010; Shin and Hong, 2011). EXP-YM은 MP 옵션 차이에 따른 영향을 분석하기 위하여 WDM6 대신에 Morrison MP 옵션을 적용한 실험이고, EXP-MW는 PBL 옵션 차이에 따른 영향을 분석하기 위하여 YSU 대신에 MYJ PBL 물리옵션을 적용한 실험이다. 또한, PBL과 MP 물리옵션의 복합적인 영향을 분석하기 위하여 MYJ PBL과 Morrison MP 옵션을 적용한 EXP-MM을 설계하였다.

본 연구에서는 위의 실험결과들의 비교를 위해 수도권 도메인 3 km 격자 값을 사용하였고 대기질 모델링 정확도 향상과 깊이 관련되는 기온, 바람, 습도 기상인자들에 대한 모의 결과를 검증통계량(mean bias, MB; mean absolute gross error, MAGE; root mean square error, RMSE; index of agreement, IOA)과 시-공간적인 분포 비교 등을 통해 계절별로, 낮과 밤으로 분석하였다.

### 3. 주요 물리옵션에 따른 계절별 기상요소 민감도 분석

#### 3.1. 평균적/정량적 차이 분석

각 실험결과별 계산된 통계지표들(MB, MAGE, RMSE, IOA)을 근거로 PBL과 MP 물리옵션의 차별적인 적용에 따른 수도권의 계절별 기온, 상대습도, 바람 모의의 평균적/정량적 차이에 대해 분석하였다(Table 3~6). 전반적으로 대부분 기상요소의 결과가 미국 EPA에서 제시하는 중규모 기상모델 평가 기준지표(bench-marks) 범위에 포함되는 것을 확인할 수 있다(US EPA, 2007).

평균기온은(Table 3에 AVG) 겨울을 제외한 모든 계절에서 높은 IOA(0.92~0.96)와 적은 오차값(MB: -0.03~1.34°C, MAGE: 1.10~1.59°C, RMSE: 1.77~1.89°C)이 나타났다. 겨울에는 높은 IOA(0.95)에도 불구하고 상대적으로 모델이 과대모의 하는 모습이다(MAGE: 2.19~2.30°C, RMSE: 2.05~2.12°C). 상대습도는 전 계절에서 모델과 관측값의 일치도가 높으나(IOA: 0.87~0.94), MAGE 값은 계절별로 다소 차이를 보였고(봄:2.41~4.26%, 가을:8.55~10.27%) RMSE 값은 모든 계절에서 평균적으로 10% 내외 유사한 값이 나타났다. 이상과 같이 평균 기온과 상대습도 모의결과 평가에서는 PBL과 MP 물리옵션에 따른 정확도 차이가

뚜렷하지 않았다. 평균적으로 두 물리옵션 선택에 따른 차이는 MB는 기온 0.14°C와 상대습도 -0.66%, MAGE는 -0.03°C와 0.94% RMSE는 0.14°C와 -0.05%, IOA는 -0.001과 0 정도로 나타났다.

바람의 경우, 풍속은 전반적으로 여름(0.65~0.76)과 겨울(0.64~0.72)이 봄(0.75~0.82)과 가을(0.71~0.80)에 비해 낮은 IOA 값을 보였다. 풍속의 모의 정확도는 PBL 물리옵션에 따라 뚜렷한 차이를 보였다. YSU PBL을 적용한 모델링 결과가 MYJ PBL을 적용한 결과보다 IOA는 최소 0.07에서 최대 0.11 증가하였으며, RMSE는 최소 0.68 ms<sup>-1</sup>에서 최대 0.86 ms<sup>-1</sup> 감소하였다. 특히, YSU PBL 적용효과는 계절별로 바람의 U성분과 V성분 개선효과가 차별적으로 나타났다. 전반적으로 V성분 바람보다는 U성분 바람 개선에 기여하였으며, 이는 서풍계열 바람이 지배적인 여름에 뚜렷하였다. 이는 YSU PBL의 난류수송계수 모수화 특성과 SFC layer 옵션에 의한 surface flux 전달방법이 지역적 특성을 잘 반영한 것으로 보인다. 반면, MP 물리옵션에 대한 영향은 거의 나타나지 않았다.

낮과 밤 시간 동안의 상세 분석에서는 물리옵션 적용에 따른 계절별 모델 결과의 특징적인 차이를 확인할 수 있었다. 기온의 경우 여름과 겨울은 낮 시간(IOA: 0.87~0.98, MAGE: 0.76~1.23°C)이 밤 시간(0.74~0.92, 1.48~2.32°C)에 비해 상대적으로 높은 정확도를 보였으나 봄과 가을에는 뚜렷한 특징이 나타나지 않았다. 상대습도는 모든 계절에서 낮 시간(IOA: 0.85~0.94, MAGE: 3.70~7.77%)보다는 밤 시간(0.75~0.90, 2.41~10.27%)에 정확도가 낮았고, 그 차이는 가을에 가장 크게 나타났다. 기온과 상대습도 모의에서는 낮과 밤 시간으로 구분하여 분석하여도 PBL과 MP 물리옵션에 따른 영향은 미약하였다.

풍속의 경우, 여름을 제외한 계절에서 낮 시간(0.61~0.85)이 밤 시간(0.56~0.74) 보다 높은 IOA 값을 보였으나 모델의 오차값(MAGE와 RMSE)도 함께 높았다. 이는 낮 시간의 풍속이 상대적으로 강하기 때문으로 해석될 수 있다. 반면, 여름에는 밤 시간(IOA: 0.61~0.71, RMSE: 0.99~1.61 ms<sup>-1</sup>)이 낮 시간(0.55~0.69, 1.09~1.95 ms<sup>-1</sup>)보다 모의 정확도가 약간 높은 특징을 보였다. YSU PBL이 MYJ PBL 보다 낮 시간에 풍속을 더 정확하게 모의하였으며, 밤 시간에는 두 PBL 간의 모의

**Table 3.** Statistical results for each season between the observed and modeled meteorological parameters from four different EXPs. spring

Variable	Statistics	Benchmark	Average, all period (AVG)				Daytime (DT)				Nighttime (NT)			
			EXP-YW	EXP-YM	EXP-MW	EXP-MM	EXP-YW	EXP-YM	EXP-MW	EXP-MM	EXP-YW	EXP-YM	EXP-MW	EXP-MM
T2	MB (°C)	±0.50	-0.03	0.02	0.15	0.20	-0.59	-0.53	-0.20	-0.13	0.05	0.06	0.27	0.30
	MAGE (°C)	<2.00	1.30	1.41	1.10	1.17	1.27	1.38	1.42	1.50	1.30	1.41	1.10	1.17
	RMSE (°C)		1.85	1.82	1.83	1.83	1.71	1.71	1.64	1.64	1.71	1.63	1.56	1.57
	IOA	≥0.80	0.96	0.96	0.96	0.96	0.95	0.95	0.96	0.96	0.95	0.95	0.96	0.96
RH2	MB (%)		1.70	1.07	1.02	0.69	4.09	3.28	2.80	2.41	0.50	-0.04	-0.30	-0.57
	MAGE (%)		2.50	4.26	2.41	4.09	3.70	7.11	5.16	7.77	2.50	4.26	2.41	4.09
	RMSE (%)		10.42	10.42	10.32	10.44	10.15	10.34	9.94	10.25	9.14	9.11	9.01	9.07
	IOA		0.94	0.93	0.94	0.93	0.94	0.93	0.94	0.93	0.90	0.89	0.90	0.89
WS10	MB (ms <sup>-1</sup> )	±0.50	0.08	0.09	1.36	1.35	-0.07	-0.07	1.81	1.78	0.44	0.46	1.05	1.04
	MAGE (ms <sup>-1</sup> )		0.67	0.65	0.83	0.78	1.75	1.81	4.51	4.51	0.67	0.65	0.83	0.78
	RMSE (ms <sup>-1</sup> )	<2.00	1.37	1.37	2.22	2.21	1.45	1.44	2.68	2.66	1.28	1.28	1.74	1.72
	IOA	≥0.60	0.82	0.82	0.75	0.75	0.85	0.85	0.72	0.73	0.60	0.60	0.60	0.61
U10	MB (ms <sup>-1</sup> )		0.21	0.23	0.80	0.79	0.32	0.33	1.39	1.39	0.17	0.20	0.28	0.26
	MAGE (ms <sup>-1</sup> )		0.79	0.95	1.08	1.29	1.74	1.79	2.59	2.27	0.79	0.95	1.08	1.29
	RMSE (ms <sup>-1</sup> )		1.51	1.51	2.32	2.31	1.65	1.65	2.84	2.81	1.38	1.39	1.83	1.82
	IOA		0.87	0.87	0.83	0.83	0.90	0.90	0.83	0.83	0.67	0.66	0.66	0.66
V10	MB (ms <sup>-1</sup> )		-0.02	-0.03	0.07	0.05	-0.45	-0.46	-0.40	-0.43	0.37	0.34	0.43	0.42
	MAGE (ms <sup>-1</sup> )		0.81	0.81	1.03	0.73	2.73	2.83	4.71	4.96	0.81	0.81	1.03	0.73
	RMSE (ms <sup>-1</sup> )		1.60	1.60	2.00	2.01	1.82	1.82	2.30	2.31	1.43	1.43	1.67	1.67
	IOA		0.73	0.73	0.70	0.70	0.78	0.78	0.75	0.74	0.59	0.60	0.58	0.58

**Table 4.** Same as Table 3 except for EXPs. summer

Variable	Statistics	Benchmark	Average, all period (AVG)				Daytime (DT)				Nighttime (NT)			
			EXP-YW	EXP-YM	EXP-MW	EXP-MM	EXP-YW	EXP-YM	EXP-MW	EXP-MM	EXP-YW	EXP-YM	EXP-MW	EXP-MM
T2	MB (°C)	±0.50	0.54	0.58	1.01	1.04	-0.61	-0.57	0.15	0.19	0.99	1.00	1.37	1.39
	MAGE (°C)	<2.00	1.59	1.59	1.48	1.50	0.84	0.84	0.76	0.91	1.59	1.59	1.48	1.50
	RMSE (°C)		1.77	1.77	1.86	1.87	1.55	1.54	1.59	1.58	1.74	1.75	1.79	1.80
	IOA	≥0.80	0.93	0.93	0.92	0.92	0.87	0.87	0.87	0.87	0.76	0.76	0.75	0.74
RH2	MB (%)		-0.47	-0.60	-1.75	-1.83	3.16	3.04	1.56	1.43	-2.66	-2.76	-3.92	-3.99
	MAGE (%)		5.96	5.92	6.86	7.02	6.23	5.96	6.08	6.06	5.96	5.92	6.86	7.02
	RMSE (%)		10.04	10.01	10.11	10.11	9.60	9.46	9.51	9.37	8.20	8.20	8.52	8.57
	IOA		0.89	0.89	0.89	0.89	0.85	0.85	0.85	0.85	0.80	0.80	0.80	0.80
WS10	MB (ms <sup>-1</sup> )	±0.50	-0.01	-0.01	1.09	1.09	-0.29	-0.29	1.07	1.07	0.24	0.25	0.97	0.97
	MAGE (ms <sup>-1</sup> )		0.90	0.90	1.24	1.24	1.06	1.05	0.85	0.83	0.90	0.93	1.24	1.24
	RMSE (ms <sup>-1</sup> )	<2.00	1.07	1.06	1.83	1.83	1.11	1.09	1.95	1.86	0.99	0.99	1.61	1.61
	IOA	≥0.60	0.76	0.76	0.65	0.65	0.68	0.69	0.55	0.58	0.71	0.71	0.61	0.61
U10	MB (ms <sup>-1</sup> )		-0.20	-0.19	-0.69	-0.73	-0.13	-0.09	-0.42	-0.41	-0.42	-0.42	-1.14	-1.13
	MAGE (ms <sup>-1</sup> )		0.81	0.81	1.20	1.20	0.80	0.81	0.96	0.91	0.81	0.81	1.20	1.20
	RMSE (ms <sup>-1</sup> )		1.35	1.33	2.15	2.12	1.48	1.46	2.41	2.34	1.18	1.18	1.82	1.82
	IOA		0.84	0.84	0.77	0.77	0.86	0.86	0.79	0.81	0.71	0.71	0.62	0.62
V10	MB (ms <sup>-1</sup> )		0.07	0.07	0.17	0.13	-0.10	-0.13	-0.09	-0.11	0.10	0.11	0.26	0.25
	MAGE (ms <sup>-1</sup> )		0.81	0.83	0.99	0.99	1.22	1.24	1.33	1.20	0.81	0.83	0.99	0.99
	RMSE (ms <sup>-1</sup> )		1.32	1.30	1.64	1.64	1.52	1.49	1.90	1.80	1.08	1.08	1.31	1.30
	IOA		0.69	0.70	0.69	0.69	0.66	0.68	0.67	0.69	0.65	0.66	0.64	0.65

**Table 5.** Same as Table 3 except for EXPs. autumn

Variable	Statistics	Benchmark	Average, all period (AVG)				Daytime (DT)				Nighttime (NT)			
			EXP-YW	EXP-YM	EXP-MW	EXP-MM	EXP-YW	EXP-YM	EXP-MW	EXP-MM	EXP-YW	EXP-YM	EXP-MW	EXP-MM
T2	MB (°C)	±0.50	1.12	1.18	1.29	1.34	0.63	0.66	0.95	0.96	1.19	1.28	1.32	1.40
	MAGE (°C)	<2.00	1.27	1.41	1.13	1.23	1.14	1.14	1.58	1.58	1.27	1.41	1.13	1.23
	RMSE (°C)		1.79	1.81	1.87	1.89	1.38	1.40	1.56	1.55	1.84	1.88	1.90	1.94
	IOA	≥0.80	0.94	0.94	0.94	0.94	0.95	0.94	0.93	0.93	0.92	0.92	0.92	0.92
RH2	MB (%)		-0.89	-1.71	-1.42	-2.16	2.78	2.15	2.18	1.65	-2.47	-3.56	-3.09	-4.05
	MAGE (%)		8.55	9.66	9.91	10.27	4.34	4.37	4.01	4.61	8.55	9.66	9.91	10.27
	RMSE (%)		10.77	10.62	10.93	10.79	10.32	10.30	10.39	10.31	10.73	10.62	10.99	10.88
	IOA		0.90	0.90	0.89	0.89	0.91	0.91	0.91	0.90	0.76	0.76	0.75	0.76
WS10	MB (ms <sup>-1</sup> )	±0.50	0.19	0.20	1.41	1.44	-0.01	0.00	1.63	1.65	0.30	0.31	1.30	1.34
	MAGE (ms <sup>-1</sup> )		1.38	1.40	2.14	2.28	1.30	1.30	3.73	3.71	1.38	1.40	2.14	2.28
	RMSE (ms <sup>-1</sup> )	<2.00	1.20	1.22	2.06	2.08	1.26	1.26	2.28	2.29	1.18	1.19	1.87	1.91
	IOA	≥0.60	0.80	0.79	0.71	0.71	0.82	0.82	0.69	0.69	0.74	0.73	0.69	0.68
U10	MB (ms <sup>-1</sup> )		0.08	0.08	0.42	0.44	0.23	0.24	0.98	0.94	-0.16	-0.17	-0.14	-0.14
	MAGE (ms <sup>-1</sup> )		1.02	0.88	1.75	1.60	1.13	1.13	2.51	2.51	1.02	0.88	1.73	1.60
	RMSE (ms <sup>-1</sup> )		1.29	1.30	2.01	2.07	1.38	1.38	2.27	2.29	1.21	1.21	1.86	1.87
	IOA		0.87	0.86	0.82	0.82	0.90	0.90	0.85	0.84	0.80	0.80	0.77	0.77
V10	MB (ms <sup>-1</sup> )		-0.20	-0.22	-0.26	-0.27	-0.39	-0.39	-0.55	-0.51	-0.04	-0.07	0.03	-0.02
	MAGE (ms <sup>-1</sup> )		1.85	1.97	2.17	2.39	1.56	1.55	3.43	3.40	1.85	1.85	2.19	2.39
	RMSE (ms <sup>-1</sup> )		1.34	1.34	1.73	1.75	1.54	1.54	2.06	2.05	1.21	1.21	1.54	1.58
	IOA		0.68	0.68	0.66	0.65	0.68	0.68	0.66	0.66	0.68	0.67	0.66	0.65

**Table 6.** Same as Table 3 except for EXPs. winter

Variable	Statistics	Benchmark	Average, all period (AVG)				Daytime (DT)				Nighttime (NT)			
			EXP-YW	EXP-YM	EXP-MW	EXP-MM	EXP-YW	EXP-YM	EXP-MW	EXP-MM	EXP-YW	EXP-YM	EXP-MW	EXP-MM
T2	MB (°C)	±0.50	1.16	1.19	1.31	1.34	0.08	0.15	0.35	0.41	1.82	1.83	1.92	1.94
	MAGE (°C)	<2.00	2.22	2.21	2.19	2.30	0.99	0.98	1.23	1.22	2.223	2.21	2.31	2.32
	RMSE (°C)		2.05	2.05	2.11	2.12	1.20	1.17	1.28	1.26	2.35	2.36	2.41	2.44
	IOA	≥0.80	0.95	0.95	0.95	0.95	0.98	0.98	0.97	0.97	0.91	0.92	0.91	0.91
RH2	MB (%)		2.35	2.14	1.20	0.40	7.43	6.87	6.13	5.01	-1.85	-1.77	-2.99	-3.48
	MAGE (%)		6.71	6.80	7.50	7.13	7.45	7.25	6.15	5.92	6.71	6.80	7.50	7.26
	RMSE (%)		12.21	12.09	11.95	11.64	11.68	11.12	10.79	9.90	12.12	12.32	12.33	12.60
	IOA		0.87	0.88	0.88	0.88	0.88	0.89	0.90	0.91	0.80	0.80	0.79	0.79
WS10	MB (ms <sup>-1</sup> )	±0.50	0.35	0.36	1.34	1.35	0.09	0.11	1.58	1.55	0.45	0.46	1.19	1.19
	MAGE (ms <sup>-1</sup> )		1.00	1.03	1.78	1.78	1.10	1.12	2.45	2.58	1.00	1.03	1.78	1.78
	RMSE (ms <sup>-1</sup> )	<2.00	1.17	1.18	1.84	1.86	1.10	1.11	2.03	2.06	1.13	1.14	1.65	1.67
	IOA	≥0.60	0.72	0.72	0.65	0.64	0.75	0.75	0.61	0.61	0.61	0.62	0.56	0.56
U10	MB (ms <sup>-1</sup> )		0.21	0.20	0.53	0.52	0.27	0.24	0.98	0.95	0.07	0.09	0.10	0.12
	MAGE (ms <sup>-1</sup> )		1.12	1.19	1.69	1.73	0.98	0.99	1.93	2.03	1.12	1.19	1.69	1.73
	RMSE (ms <sup>-1</sup> )		1.17	1.18	1.68	1.69	1.28	1.28	1.97	1.97	1.07	1.08	1.42	1.44
	IOA		0.79	0.79	0.75	0.76	0.81	0.82	0.76	0.76	0.67	0.67	0.67	0.63
V10	MB (ms <sup>-1</sup> )		-0.44	-0.46	-0.89	-0.90	-0.57	-0.59	-1.22	-1.22	-0.30	-0.32	-0.69	-0.71
	MAGE (ms <sup>-1</sup> )		0.82	0.80	1.26	1.24	1.24	1.27	2.10	2.20	0.82	0.80	1.26	1.24
	RMSE (ms <sup>-1</sup> )		1.41	1.41	1.87	1.88	1.51	1.51	2.14	2.02	1.27	1.28	1.70	1.70
	IOA		0.60	0.60	0.56	0.56	0.65	0.65	0.61	0.61	0.54	0.54	0.49	0.50

결과 차이가 상대적으로 적었다(특히, 봄에 밤 시간에는 거의 유사함). 이러한 YSU와 MYJ PBL 물리옵션에 따른 풍속모의 차이는 낮과 밤 시간의 난류수송계수 모수화 특성과 SFC layer 옵션에 의한 surface flux 전달방법에 의한 영향 때문으로 해석된다. 두 PBL의 옵션의 선택에 따른 모델결과의 정확도 차이는 대부분의 계절에서 낮 시간에 더 뚜렷하게 나타났으며, 여름에는 밤 시간에도 다소 차이를 보였다.

### 3.2. 관측지점별 특성 분석

PBL과 MP 물리옵션들의 선택에 의한 영향은 지형적인 특성과 국지적인 기상조건에 따라 차이가 나타날 수 있다. 물리옵션 적용에 따른 차이를 수도권 도메인에 위치하는 지상관측지점별(Fig. 1 참고) 기온, 상대습도, 풍속에 대해 낮과 밤을 구분하여 대표적인 통계지표(IOA와 RMSE)로 분석하였다(Fig. 2~4).

기온의 경우, 대부분의 관측지점에서 모든 실험의 모델값이 관측값을 잘 재현하였으나(EPA 중규모 기상모델 평가 기준지표(IOA  $\geq 0.80$ 과 RMSE  $< 2.0^\circ\text{C}$ ) 범위 안에 포함됨) 여름과 겨울의 밤 시간 일부 관측지점에서 낮은 IOA와 높은 RMSE 값을 보였다. 여름 밤 시간은 98, 112, 119, 203, 232 지점 등에서 IOA 값이 낮았고, 겨울 밤 시간은 95, 98, 99, 101, 129 지점 등에서 높은 RMSE 값이 나타났다. 여름밤에 나타난 낮은 일치도는 모델이 고려하지 못하는 인공열, 건물효과 등의 도시효과가 상대적으로 여름밤에 강하게 나타나 기온 변동성을 모의하는데 한계가 있음을 보여주는 것이며, 겨울에 나타난 큰 오차는 기온 일변화(diurnal cycle)는 잘 재현하고 있지만 전반적으로 일 최저기온을 높게 모의하는 모델의 warm bias 특성 때문으로 확인되었다. 기온 모의에서는 대부분의 계절에서 PBL과 MP 물리옵션에 따른 영향이 뚜렷하지 않았고 편차도 적었으나 여름에는 일부 관측지점(예를 들면, 여름 낮 시간의 114, 127 등)에서 MYJ PBL이 좋은 결과를 보이기도 하였다.

상대습도 모의에서는 대체로 낮 시간에는 좋은 일치도와 적은 오차를 보였으나, 밤 시간에는 다수의 관측지점에서 낮은 IOA와 높은 RMSE 값을 보였고 지점별로도 큰 차이가 나타났다. 전반적으로 관측지점별 PBL과 MP 물리옵션에 따른 영향이 뚜렷하지 않았으나, 일부 관측지점에서는 그 영향을 약하게 볼 수 있다. 예를 들면,

여름 낮 시간 112 지점은 YSU PBL 적용결과가 다소 좋았고, 가을 밤 시간 112 지점은 WDM6 MP 적용으로 IOA 증가와 RMSE 감소가 약하게 나타났다. MP 물리옵션은 기본적으로 대기 수분 변수들의 상호작용을 조절함으로써 구름, 강수, 습도 분포에 영향을 주어 대기질 모델의 photolysis rate 형성과 오염물질의 습성침적(wet deposition)과 관계되지만, 전반적으로 맑은 날씨(dry weather conditions)가 많이 포함된 고농도 대기오염 사례일에 대해서는 WDM6와 Morrison 물리옵션 적용 차이에 따른 기온과 습도의 변화가 뚜렷하지 않았다.

바람의 경우, 풍속은 관측지점별로 PBL 물리옵션에 의한 영향이 뚜렷하게 차이가 있고 관측지점별 차이도 크게 나타났다. 특히, MYJ PBL을 적용한 실험이 YSU PBL을 적용한 실험보다 관측지점별 큰 차이를 보였다. 풍속 모의정확도는 대부분의 관측지점에서 YSU PBL을 사용한 실험(EXP-YW와 EXP-YM)이 좋은 결과를 보였으나, 일부 지점에서는 MYJ PBL을 사용한 실험이 개선된 결과를 보이기도 하였다. 예를 들면, 108 지점은 모든 계절에서 MYJ PBL을 사용한 실험이 정확도가 높았다. 앞 절의 평균분석 결과와 마찬가지로 MP 물리옵션에 의한 풍속의 영향은 뚜렷하지 않았다. 대부분의 계절에서 낮 시간이 밤 시간보다 모의 정확도가 높았고, 관측지점별로 YSU PBL과 MYJ PBL의 적용에 따른 IOA와 RMSE 차이도 크게 나타났다. 반면, 여름에는 밤 시간에도 PBL 적용에 따라 관측지점별 IOA와 RMSE에 큰 차이를 보였다. 본 논문에는 제시하지 않았지만, 관측지점별 바람의 U, V 성분 분석에서도 풍속과 유사한 경향을 보였다(NIER, 2013). 이렇게 관측지점별로 나타난 PBL 물리옵션에 따른 바람모의 차이는 각 PBL 옵션에 의한 난류수송계수의 모수화 특성과 surface flux 전달방법에 관측지점별 지형적인 특성(friction velocity 등)과 국지적인 기상조건(PBL 고도 등)이 반영된 결과로 사료된다.

### 3.3. 수평분포 분석

PBL 물리옵션에 따른 계절별 공간적인 영향을 분석하기 위하여 각 실험별(EXP-MW와 EXP-YW) 모델결과 차이의 수평분포를 분석하였다(Fig. 5~7). 수도권 기온 모의에 대한 PBL 물리옵션의 영향은 봄과 여름에는 연안(낮)과 내륙(밤)을 중심으로 나타났고 가을과 겨울



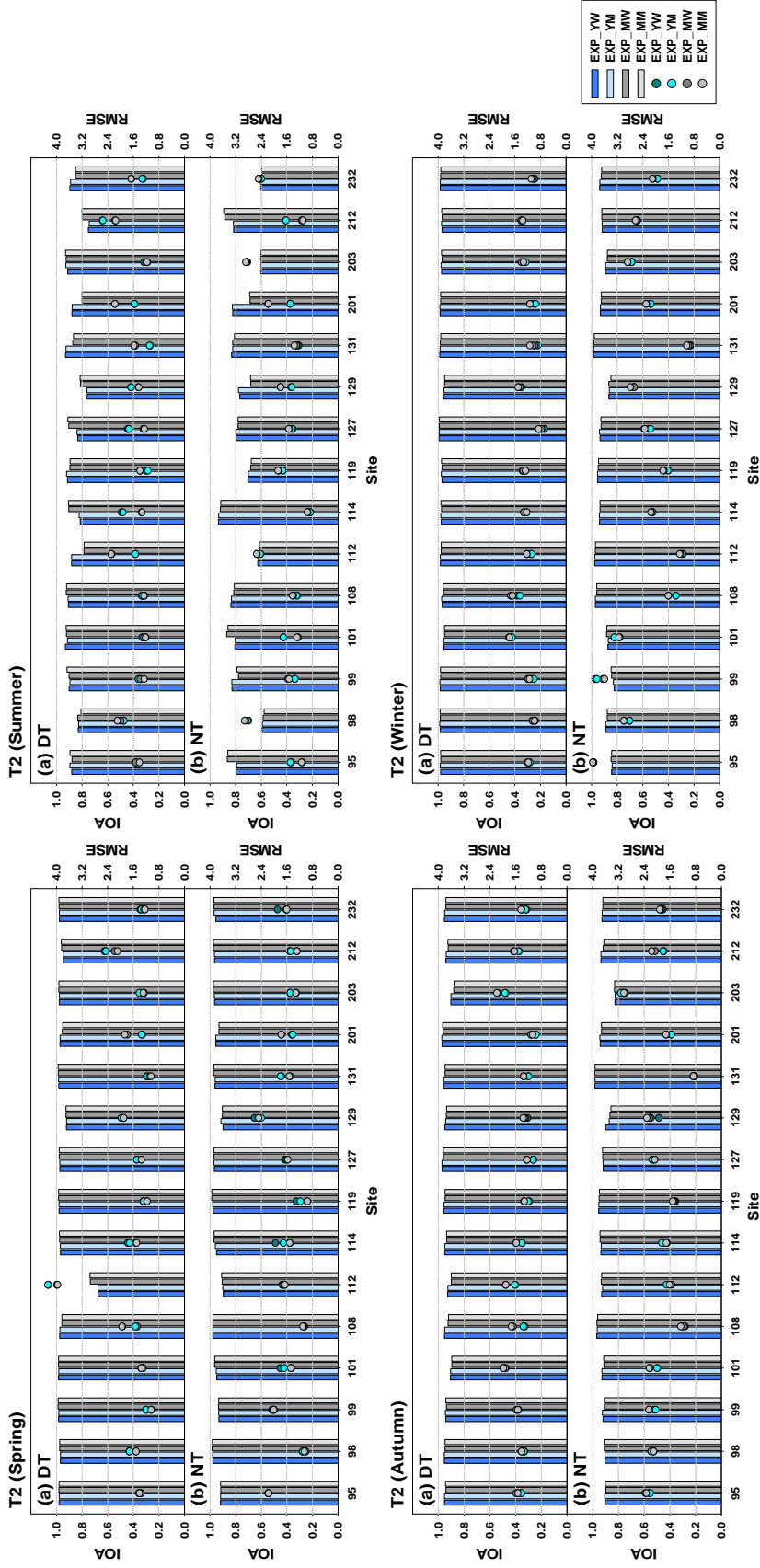


Fig. 2. Distributions of IOA and RMSE for observed and modeled temperature (2 m agl., T2) at each observation site during daytime (DT) and nighttime (NT) in four seasons.

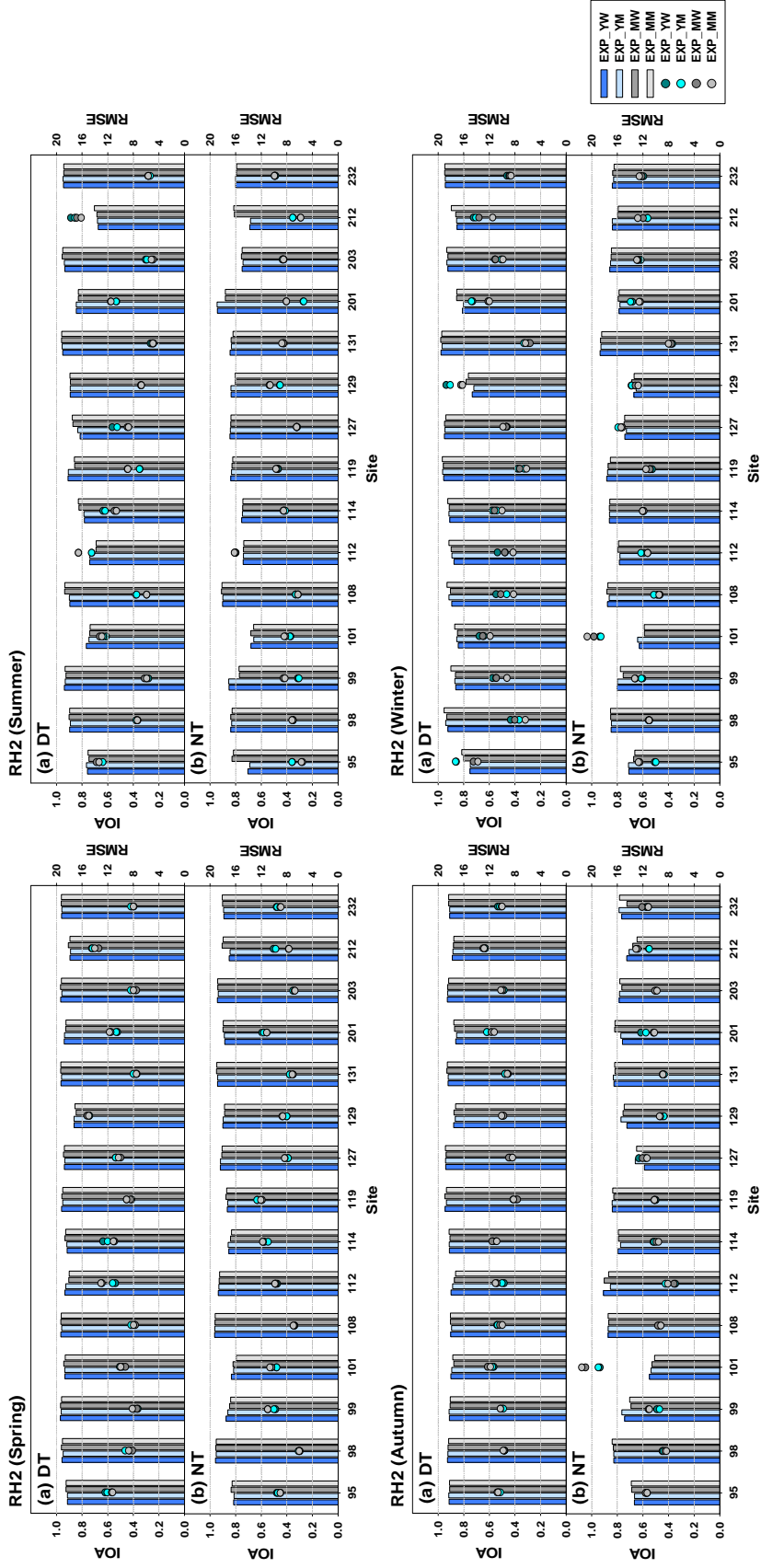


Fig. 3. Same as Fig. 2 except for relative humidity (RH2).

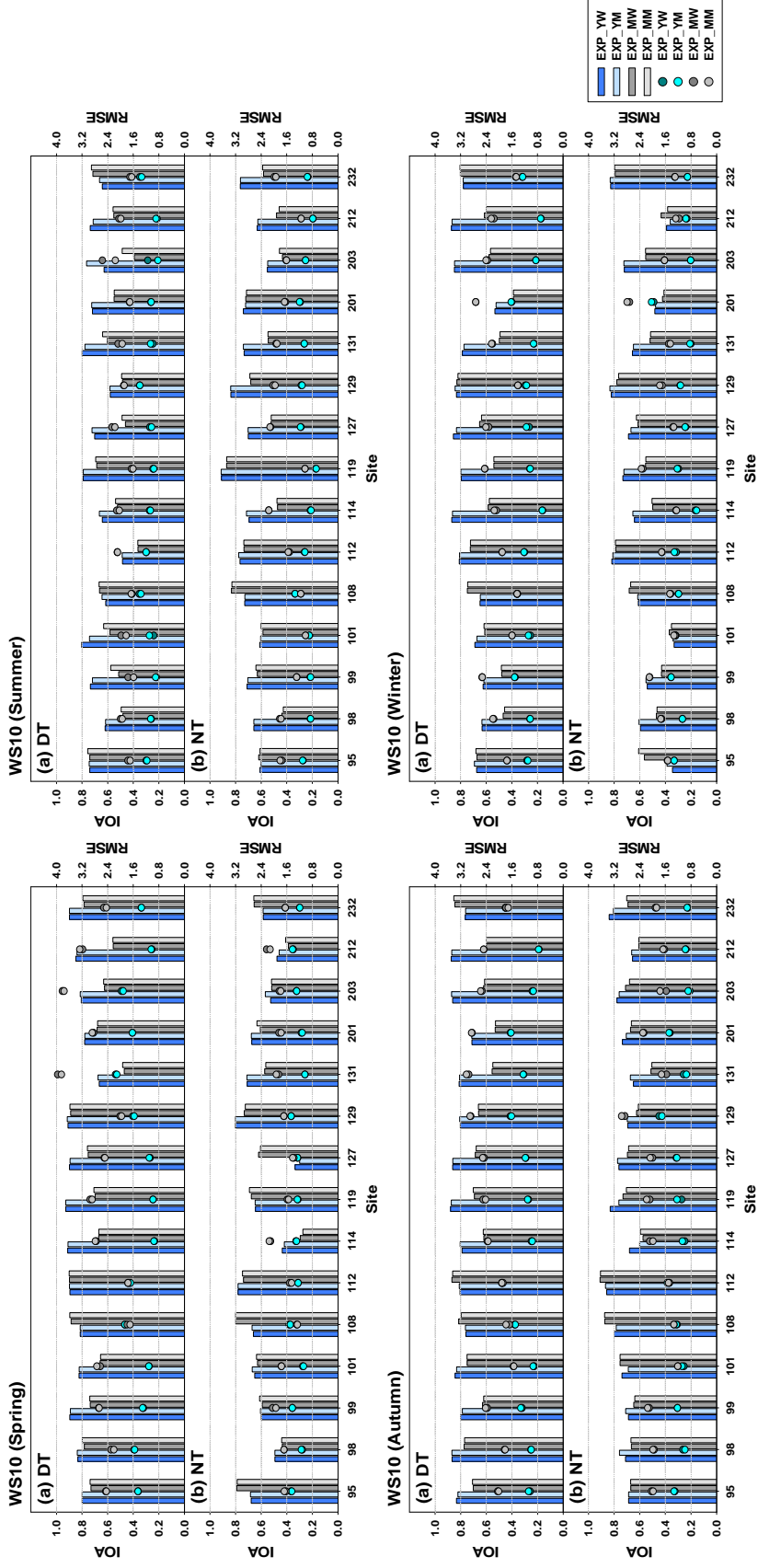


Fig. 4. Same as Fig. 2 except for wind speed (WS10).

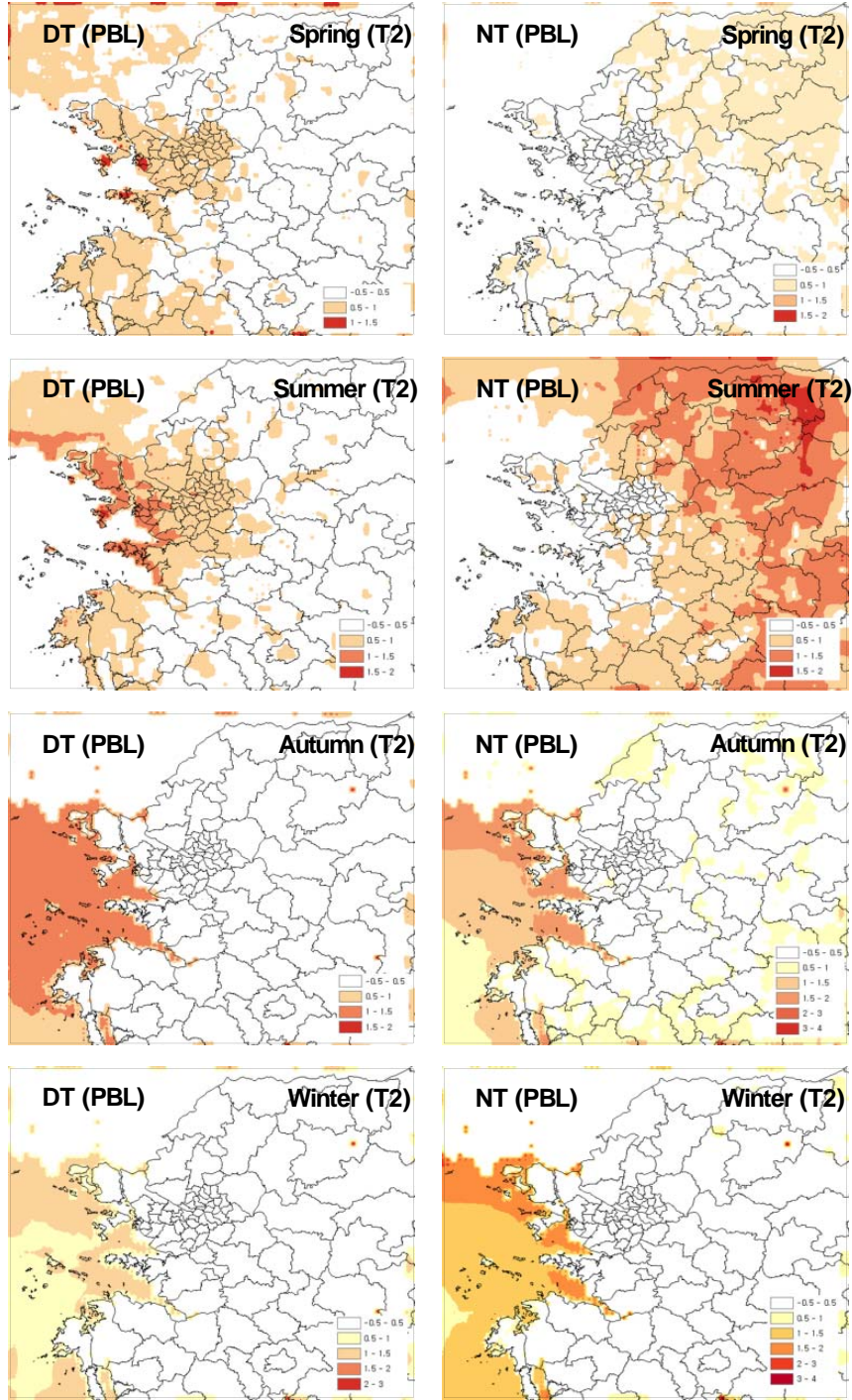


Fig. 5. Horizontal distributions of differences in T2 between the EXP-MW and EXP-YW (the effect of MYJ PBL option) during DT and NT in four seasons.

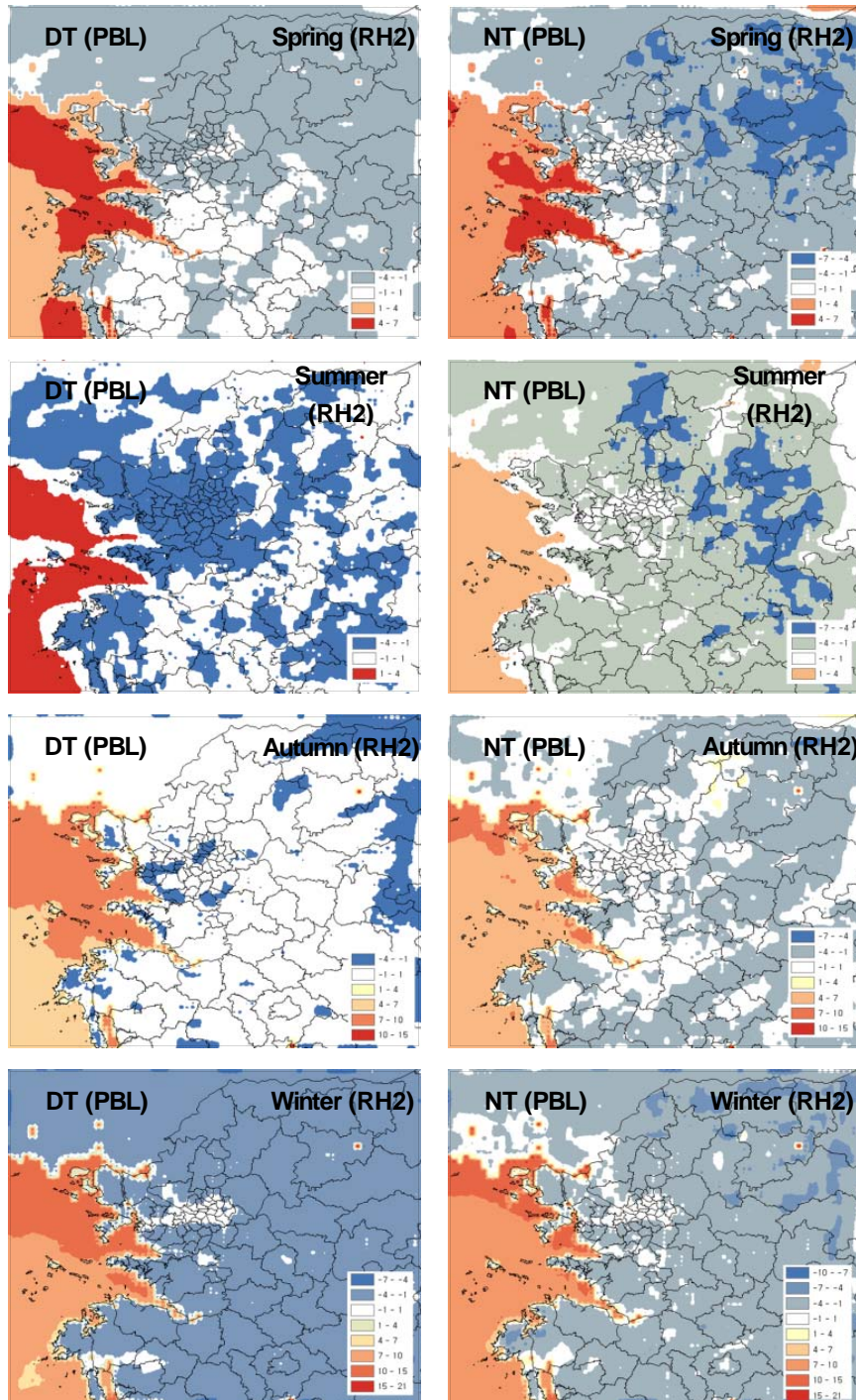


Fig. 6. Same as Fig. 5 except for RH2.

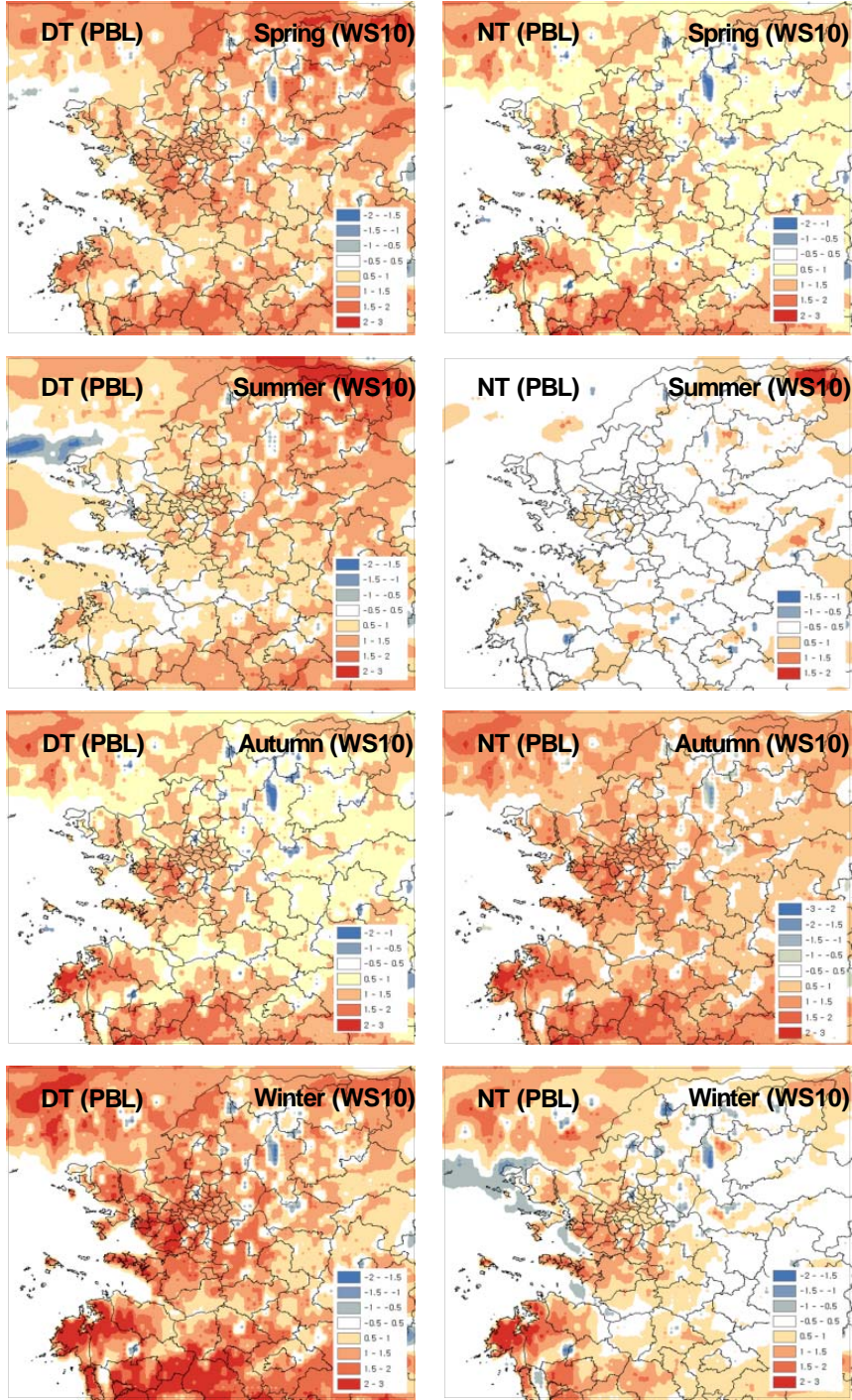


Fig. 7. Same as Fig. 5 except for WS10.

에는 해상에서 주로 볼 수 있다. 전반적으로 MYJ PBL 옵션을 적용한 모델이 낮 시간에 해안선 부근에서 기온을 비교적 높게 모의하였고, 여름 밤 시간에는 내륙에서의 기온이 상당히 높았다(최대 1.5~2°C). 가을과 겨울에는 MYJ PBL이 YSU PBL 보다 상대적으로 해양에서의 기온을 높게 모의하는 특성을 보였고, 특히 겨울 밤 시간에 가장 큰 차이를 보였다(최대 1.5~2°C). PBL 물리옵션에 따른 이러한 계절별 내륙과 해양의 기온 차이는 수도권 지역의 중규모 기상현상(예로 해상풍)에 중요한 영향을 미칠 것으로 사료된다.

상대습도 모의에서는 대부분의 계절에서 MYJ PBL을 적용한 실험이 YSU PBL을 적용한 실험보다 내륙에서는 상대습도를 낮게 모의하였고(-7~-4%), 해양에서는 다소 높게 모의하는 특징을 보였다(15~21%). 해양에서 상대적으로 높은 상대습도는 MYJ PBL이 가을과 겨울에 해양에서의 기온을 높게 모의하는 특징과 관련지을 수 있다. 바람의 경우, MYJ PBL이 전반적으로 내륙에서의 풍속을 강하게 모의하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 특징은 겨울 낮 시간에 연안지역에서 상대적으로 뚜렷하게 나타났다. 반면, 여름 밤 시간에는 두 PBL의 차이가 거의 나타나지 않았다. 이렇게 PBL 물리옵션에 따라 계절별 내륙과 해양에서 나타난 열, 수분, 운동량의 모의결과 차이가 대기질 모델의 기상 입력자료로 반영된다면 오염물질 화학반응과 수송 및 확산 등에 영향을 미쳐 대기 중 농도수준 결정에 중요한 역할을 할 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 수도권 지역의 대기질 모델링 정확도 향상을 위한 방안으로 WRF 모델의 PBL과 MP 물리옵션에 따른 기온, 상대습도, 바람 예측에 대한 계절별 모의 정확도와 특성을 분석하였다.

물리옵션에 따른 영향 분석결과, PBL 물리옵션의 영향이 MP 옵션보다 상대적으로 뚜렷하였고, 특히 기온과 상대습도 보다는 바람 모의에 PBL 옵션의 영향이 크게 나타났다. YSU PBL을 적용한 실험이 계절별 대부분의 기상요소에서 모의 정확도가 높았고 이는 YSU PBL의 난류수송계수 모수화 특성과 SFC layer 옵션에 의한 surface flux 전달방법이 지역적 특성을 잘 반영한 것

로 볼 수 있다. MYJ PBL을 적용한 실험에서는 관측값에 비해 내륙에서의 풍속을 과대 모의하는 결과가 특징적이다. 예로 여름의 경우 YSU PBL을 적용한 실험이 평균적으로 0.4% 과소모의 하는 반면, MYJ PBL을 적용한 실험은 51.9% 과대모의 하였다. PBL 물리옵션에 의한 영향은 계절별 낮과 밤 시간에 내륙과 연안/해양에서 기상요소별로 약간의 차이를 보였다. 전반적으로 여름과 겨울이 봄과 가을에 비해 기상인자들의 모델결과 정확도가 낮았고, 대부분의 계절에서 낮 시간이 밤 시간보다 모의 정확도가 높았다. 여름밤에 나타난 낮은 일치도는 모델이 고려하지 못하는 인공열, 건물효과 등의 도시효과가 상대적으로 여름밤에 강하게 나타나 기온 변동성을 모의하는데 한계가 있음을 보여주는 것이며, 겨울에 나타난 큰 오차는 기온 일변화(diurnal cycle)는 잘 재현하고 있지만 일 최저기온을 전반적으로 높게 모의하는 모델의 warm bias 특성 때문으로 설명될 수 있다. 기온 모의에서는 대부분의 계절에서 PBL과 MP 물리옵션에 따른 영향이 뚜렷하지 않았고 편차도 적었으나 여름에는 일부 관측지점에서 MYJ PBL이 좋은 결과를 보이기도 하였다.

결론적으로 수도권 대기질 모델링 정확도 향상을 위한 WRF 모델의 물리옵션 민감도 연구에서는 계절별로 다소 차이를 보였으나 YSU PBL을 적용한 실험이 전반적으로 좋은 결과를 보였다. MP 물리옵션의 경우, WDM6 MP를 사용한 실험에서 약간의 개선된 결과가 나타났으나 대기질 모델링 정확도 향상에 영향을 줄 수 있는 의미있는 차이는 아니었다. 기상모델링의 정확도를 높일 수 있는 최적의 물리옵션의 선택은 본 연구의 결과에서도 제시 되었지만 지역적 특성, 계절적 기상조건의 영향에 따라 달라질 수 있다. 아울러 모델링 기간, 모델격자의 해상도, 자료동화의 유무 등에 따라서도 최적의 옵션 선택은 다를 수 있을 것이다. 하지만 본 연구에서 도출된 연구결과는 국내 대기질 모델링 정확도 향상 연구의 참고자료가 될 수 있으며 현재 국립환경과학원이 운영 중인 대기정책 모델링 지원시스템(CAPMOS, 2014)의 모델링 표준화 기초자료로 활용될 수 있다.

#### 감사의 글

이 논문은 환경부 국립환경과학원의 지원을 받아 수

행된 연구이며(NIER-SP2013-210), 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업입니다(NRF-2013R1A1A4A01012837).

## REFERENCES

- Appel, K. W., Gililand, A. B., Sarwar, G., Gilliam, R. C., 2007, Evaluation of the Community Multiscale Air Quality(CMAQ) model version 4.5: Sensitivities impacting model performance part I-Ozone, *Atmospheric Environment*, 41, 9603-9615.
- Arasa, R., Soler, M. S., Olid, M., 2012, Numerical experiments to determine MM5/WRF-CMAQ sensitivity to various PBL and land-surface schemes in north-eastern Spain: application to a case study in summer 2009, *International Journal of Environment and Pollution*, 48, 105-116.
- Borge, R., Alexandrov, V., Vas, J. J., Lumbreras, J., Rodriguez, E., 2008, A comprehensive sensitivity analysis of the WRF model for air quality applications over the Iberian Peninsula, *Atmospheric Environment*, 42, 8560-8574.
- Byun, U. Y., Hong, S. Y., Shin, H. Y., Lee, J. W., Song, J. I., Hahm, S. J., Kim, J. K., Kim, H. W., Kim, J. S., 2011, WRF-based short-range forecast system of the Korea air force: Verification of prediction skill in 2009 summer, *Atmosphere. Korean Meteorological Society*, 21(2), 197-208.
- Cheng, W. Y. Y., Liu, Y., Liu, Y., Zhang, Y., Mahoney, W. P., Warner, T. T., 2013, The impact of model physics on numerical wind forecasts, *Renewable Energy*, 55, 347-356.
- González, A., Expósito, F. J., Pérez, J. C., Díaz, J. P., Taima, D., 2013, Verification of precipitable water vapour in high-resolution WRF simulations over a mountainous archipelago, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 139(677), 2119-2133.
- Gyeonggi Research Institute(GRI), 2011, Complimentary implementation plan of air quality management in Gyeonggi-do.
- Ha, J. S., Moon, N. K., 2013, Uncertainty and estimation of health burden from particulate matter in Seoul metropolitan region, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 29(3), 275-286.
- Hong, S. Y., Lim, J. O., 2006, The WRF Single-Moment 6-Class Microphysics Scheme (WSM6), *Journal of the Korean Meteorological Society*, 42, 129-151.
- Hong, S. Y., Lim, K. S. S., Lee, Y. H., Ha, J. C., Kim, H. W., Ham, S. J., Dudhia, J., 2010, Evaluation of the WRF Double-Moment 6-Class Microphysics Scheme for Precipitating Convection, *Advances in Meteorology*, 1-10.
- Hong, S. Y., Noh, Y., Dudhia, J., 2006, A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes, *Monthly Weather Review*, 134, 2318-2341.
- Hu, X. M., Nielsen-Gammon, J. W., Zhang, F., 2010, Evaluation of three planetary boundary layer schemes in the WRF model, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49, 1831-1844.
- Kim, Y. K., Jeong, J. H., Bae, J. H., Oh, I. B., Kweon, J. H., Seo, J. W., 2006, Improvement in the simulation of sea surface wind over the complex coastal area using WRF model, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 22(3), 309-323.
- Lim, K. S. S., Hong, S. Y., 2010, Development of an effective double-moment cloud microphysics scheme with prognostic Cloud and Condensation Nuclei (CCN) for weather and climate models, *Monthly Weather Review*, 138, 1587-1612.
- Menut, L., Bessagnet, B., Colette, A., Khvorostiyarov, D., 2013, On the impact of the vertical resolution on chemistry-transport modelling, *Atmospheric Environment*, 67, 370-384.
- Ministry of environment(MOE), 2005, Basic plan on the metropolitan area air quality management.
- Misenis, C., Zhang, Y., 2010, An examination of sensitivity of WRF/Chem predictions to physical parameterizations, horizontal grid spacing, and nesting options, *Atmospheric Research*, 97, 315-334.
- Moon, N. K., Kim, S. T., Seo, J. H., 2011, Sensibility study for PBL scheme of WRF-CMAQ, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 27(6), 791-804.
- Morrison, H., Thompson, G., Tatarskii, V., 2009, Impact of cloud microphysics on the development of trailing stratiform precipitation in a simulated squall line: Comparison of one and two-moment schemes, *Monthly*



- Weather Review, 137, 991-1006.
- National Institute of Environmental Research(NIER), 2013, Studies on the optimization method for improving the accuracy of air quality modeling, NIER-SP., 2013-210.
- Oh, I. B., Kim, Y. K., Hwang, M. K., Kim, C. H., Kim, S. T., Song, S. K., 2010, Elevated ozone layers over the Seoul metropolitan region in Korea: evidence for long-range ozone transport from eastern China and its contribution to surface concentrations, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49(2), 203-220.
- Shearer, M. S., Harley, R. A., Jin, L., Brown, N. J., 2012, Comparison of SAPRC99 and SAPRC07 mechanisms in photochemical modeling for central California, *Atmospheric Environment*, 46, 205-216.
- Shin, H. H., Hong, S. Y., 2011, Intercomparison of planetary boundary-layer parameterizations in the WRF model for a single day from CASES-99, *Boundary-Layer Meteorology*, 139, 261-281.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. M., Baker, D., Duda, M. G., Huang, X., Wang, W., Powers, J. G., 2008, A description of the advanced research WRF version 3, NCAR Technical Note, NCAR/TN-468+STR, Mesoscale and Micro scale Meteorology Division, National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, USA.
- Yerramilli, A., Challa, V. S., Dodla, V. B. R., Dasari, H. P., Young, J. H., Patrick, C., Baham, J. M., Hughes, R. L., Hardy, M. G., Swanier, S. J., 2010, Simulation of surface ozone pollution in the Central Gulf Coast Region using WRF/Chem model: Sensitivity to PBL and land surface physics, *Advances in Meteorology*, doi:10.1155/2010/319138.
- Yerramilli, A., Challa, V. S., Dodla, V. B. R., Myles, L., Pendergrass, W. R., Vogel, C. A., Tuluri, F., Baham, J. M., Hughes, R., Patrick, C., Young, J., Swanier, S., 2012, Simulation of surface ozone pollution in the Central Gulf Coast region during summer synoptic condition using WRF/Chem air quality model, *Atmospheric Pollution Research*, 3, 55-71.
- Yu, S., Mathur, R., Sarwar, G., Kang, D., Tong, D., Poulot, G., Pleim, J., 2010, Eta-CMAQ air quality forecasts for O<sub>3</sub> and related species using three different photochemical mechanisms (CB4, CB05, SAPRC-99): comparisons with measurements during the 2004 ICARTT study, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10, 3001-3025.