

PBL Scheme에 대한 WRF-CMAQ 민감도 분석

Sensibility Study for PBL Scheme of WRF-CMAQ

문 난 경* · 김 순 태¹⁾ · 서 지 현

한국환경정책·평가연구원, ¹⁾아주대학교 환경건설교통공학부

(2011년 10월 18일 접수, 2011년 11월 18일 수정, 2011년 12월 1일 채택)

Nankyong Moon*, Soontae Kim¹⁾ and Jihyun Seo

Korea Environment Institute, Seoul, Korea

¹⁾*Division of Environmental, Civil & Transportation Engineering, Ajou University, Suwon, Korea*

(Received 18 October 2011, revised 18 November 2011, accepted 1 December 2011)

Abstract

Numerical simulations were carried out to investigate the impact of PBL (Planetary boundary layer) scheme implemented in WRF on the result of meteorological fields and CMAQ modeling. 25-day period, representing high ozone concentration, was selected for the simulations. The three WRF domains covered East Asia region, Korean Peninsula and Seoul metropolitan area. The sensitivity of WRF-CMAQ modeling to the various PBL schemes was assessed and quantified by comparing model output and against observation from the meteorological and the air quality monitoring network within the domain. The meteorological variables evaluated included temperature, wind speed and direction over surface sites and upper air sounding sites. The CMAQ variables included gaseous species O₃ and NO_x over monitoring stations. Although difference of PBL schemes implemented in WRF, they did not appreciably affect the WRF and CMAQ performance. There are partially differences between non-local and local mixing scheme, but are not distinct differences for the results of weather and air quality. It is suggested that impact of parameterization of vertical eddy diffusivity scheme in CMAQ also need to be researched in the future study.

Key words : WRF, PBL scheme, CMAQ, Ozone, Dry deposition

1. 서 론

미국 EPA를 비롯하여 전 세계적으로 대기질 개선 및 관리를 위한 대기 정책 수립 시 기상장 대기질

모델로 MM5-CMAQ을 최근까지 사용하였다. 선행 연구로는 CMAQ (Byun and Ching, 1999) 모델을 이용한 대기 중 수은 모의 실험 (Bullock and Brehme, 2002), CMAQ 모델을 이용한 수치 모의 평가 (Arnold *et al.*, 2003), 모델링 분석을 이용한 일본 칸토 지역의 야간 고농도 암모니아 케이스 연구 (Sakurai *et al.*, 2003), 미국 동부 지역의 지역 규모 오존 기후학 모

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)2-380-7607, E-mail : nkmoon@kei.re.kr

의 실험(Hogrefe *et al.*, 2004), 일 황산염 농도에 대한 관측값과 수치 모의 값의 통계적 비교(Jun and Stein, 2004), 미국 지역의 1차, 2차 유기 에어로졸 관련 연구(Yu *et al.*, 2004), TRACE-P와 ACE-Asia 캠페인 기간 동안의 동아시아 지역 황 화합물 수송과 변화에 관한 연구(Zhang *et al.*, 2004), 복잡 지형에서의 오존 주말 효과 수치 모의에 관한 연구(Jimenez *et al.*, 2005), CMAQ과 Eta 모델의 링킹 연구(Otte *et al.*, 2005), 해안 도시 지역에서의 MM5 PBL scheme 평가에 관한 연구(Perez *et al.*, 2005), MM5-PBL 파라미터와 지표면 모델의 적용에 따른 기상전망 평가(Han *et al.*, 2008) 등이 있다.

그러나 PSU/NCAR MM5 모델의 차세대 모델로 WRF가 개발되면서 MM5-CMAQ에서 WRF-CMAQ의 사용으로 전환되고 있다. 국내에서도 마찬가지로, 수도권 대기질 개선계획 등 대기질 개선 관리 계획을 위하여 MM5-CMAQ의 사용이 보편적이었으나, 최근 WRF-CMAQ으로 점진적으로 옮겨 가고 있다.

오존 및 미세먼지와 같은 대기오염물질 관리를 목적으로 하는 대기 정책 수립을 위한 대기질 모델링에 가장 큰 영향을 미치는 요소 중 하나가 기상자료라 할 수 있다. 특히 수평, 연직 바람성분이나 대기경계층고도(Planetary Boundary Layer, PBL) 등이 대표적인 요소들이며, 이들 요소들이 대기질 모델 결과에 직접적인 영향을 미치는 잘 알려져 있다(Seaman, 2000). 대기경계층(PBL)은 우리가 생활하고 활동하는데 직접적으로 영향을 미치는 중요한 공간이다. 뿐만 아니라 온도, 습도, 바람, 수증기, 강우량, 지표면의 상태 등의 모든 기상현상들과 오염물질의 이동과 확산은 대부분 대기경계층에서 급속하게 변화한다. 따라서 대기질 모델링에 있어 정확한 대기 경계층 모수화 방안에 대한 연구는 대기질 예측의 정확도를 높이는 데 중요한 요인이다. WRF모델 내에는 다양한 PBL scheme들이 있다. 그러나 이러한 다양한 scheme들이 대기질 모델링 결과에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 평가는 부족한 상태이다. 본 연구에서는 대기질 모델링 시 WRF를 사용함에 있어 대기질에 가장 민감하게 작용하는 기상요소를 결정짓는 PBL scheme들의 사용에 따른 WRF기상 결과와 이를 사용한 CMAQ 결과에 대한 민감도를 분석해 보고자 한다.

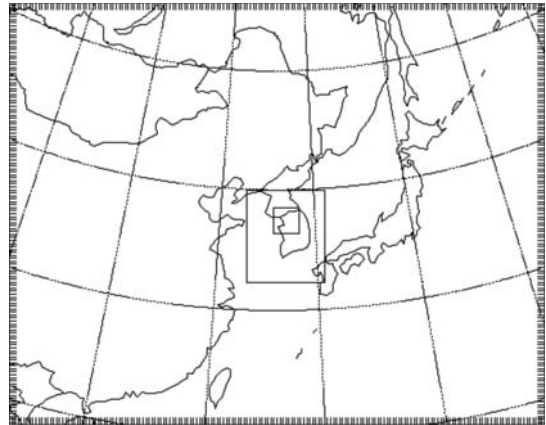


Fig. 1. Nested domains for WRF and CMAQ modeling.

Table 1. Description of three domains for WRF modeling.

Resolution	East-West	North-South	Vertical layers
Domain1 (27 km)	181	143	30
Domain2 (9 km)	79	94	30
Domain3 (3 km)	79	79	30

2. 실험설계

2.1 모델 영역

본 연구에 사용된 기상모델은 WRF 3.0 버전이며, 수치모의 영역은 그림 1과 같이 27 km, 9 km, 3 km의 동지격자를 사용하였다.

그림 1에서 보는 바와 같이 27 km 격자크기로 중국의 동쪽지역과 대만, 일본을 포함하는 동아시아 영역 안에 9 km 격자크기의 한반도 영역과 서울과 경기도를 포함하는 3 km 격자크기의 수도권 영역에서 동지격자를 설정하였다.

표 1은 각 영역의 수평 및 연직 격자수를 나타낸 것이며, 모델 최상층 고도는 50 mb로 설정하였다.

2.2 수치모의 조건

모델 수행에 필요한 초기조건 및 경계조건은 NCEP 재분석 자료를 사용하였으며, 수치모의 결과는 그림 2에 표시된 기상대 자료 및 AWS자료를 사용하여 평가하였다.

동지격자 모델의 외부경계조건을 생산하기 위해서

Table 2. WRF model physics for sensitivity test.

Physics	Option
Short-wave radiation option	Goddard shortwave radiation
Long-wave radiation option	RRTM (Rapid Radiation Transfer Model) scheme
Land-surface option	Unified NOAA land-surface model
Cumulus option	Kain-Fritsch (new Eta) scheme
Microphysics option	WSM (WRF Single Moment) 3-class simple ice scheme
Boundary-layer option	(1) Yonsei University (YSU) scheme
	(2) Mellor-Yamada-Janjic TKE scheme
	(3) Medium-Range Forecast (MRF) scheme

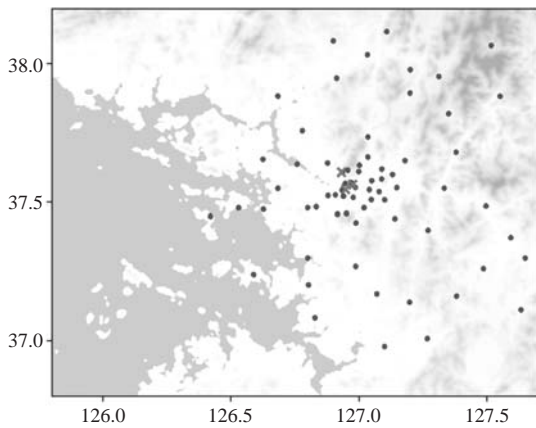


Fig. 2. Air quality monitoring sites: weather station (x) and AWS (•).

1-way interacting nested grid system을 사용하였다. 즉, 성긴 격자(Parent domain)의 계산결과는 매 시간 간격마다 동지 격자로 그 정보가 들어가지만 동지 격자(Nested domain)에서 생산된 상세한 정보는 성긴 격자의 계산에 영향을 주지 않는다. WRF 적분에 사용된 세부 물리과정은 표 2와 같다.

본 연구에서는 기상장 모의 능력을 향상시키기 위하여 WRF 모의 시 모든 영역에서 Grid nudging과 Observation nudging을 함께 수행하였다. Nudging 시 사용된 관측자료는 자동기상관측자료, 상층기상관측자료, Buoy 관측자료를 이용하였다. Nudging은 PBL 고도뿐만 아니라 모든 고도에서 이루어졌다.

2. 3 수치모의 기간

수치모의 기간은 2007년 6월 1일부터 25일이며 고농도 오존이 출현했던 기간을 포함하여 선정하였

다. 수치모의 기간으로 선정된 6월 상순 전반에는 우리나라 동해상에 위치한 고기압이 정체하는 경향을 보이면서 고기압의 가장자리에 들어 불안정한 날씨를 보였으며, 동해안을 중심으로 저온 현상이 나타났다. 후반에는 고기압의 중심에 위치하여 맑은 날씨를 보였다. 6월 중순에는 동서 고압대의 기압계 형태를 보였으나, 남서쪽에서 다가온 기압골의 영향으로 13~14일까지 남부 지방을 중심으로 강수 현상이 발생하였다. 중순 후반에는 동서 고압대의 기압계 형태를 보이며 전국적으로 맑은 날씨를 보였으며, 중부 및 경북 내륙 지역을 중심으로 일 최고 기온이 30°C를 웃도는 고온 현상이 나타났다. 그림 3은 전국적으로 맑은 날씨를 보이며 고농도 오존이 출현했던 6월 19일의 종관 분석 일기도를 나타낸 것이다.

3. 민감도 분석 결과

WRF 모형 적분에 사용된 물리과정 중에서 PBL scheme에 따른 민감도 분석을 실시하기 위하여 모든 조건을 동일하게 하고 YSU, TKE, MRF scheme을 적용한 후 그 결과를 비교하였다.

3. 1 PBL scheme에 따른 모의 결과 평가

3. 1. 1 지표면 기상 분석

본 연구에서 적용한 PBL scheme 중 TKE scheme은 local scheme으로 낮 동안 자유 대류에 의한 혼합을 덜 발달시키는 단점을 가지고 있다. 반면 MRF와 YSU scheme은 non-local mixing scheme으로 야간의 안정한 대기에서 혼합을 덜 발달시키는 단점이 있으며, YSU scheme에서 이를 개선하기 위하여 지속적

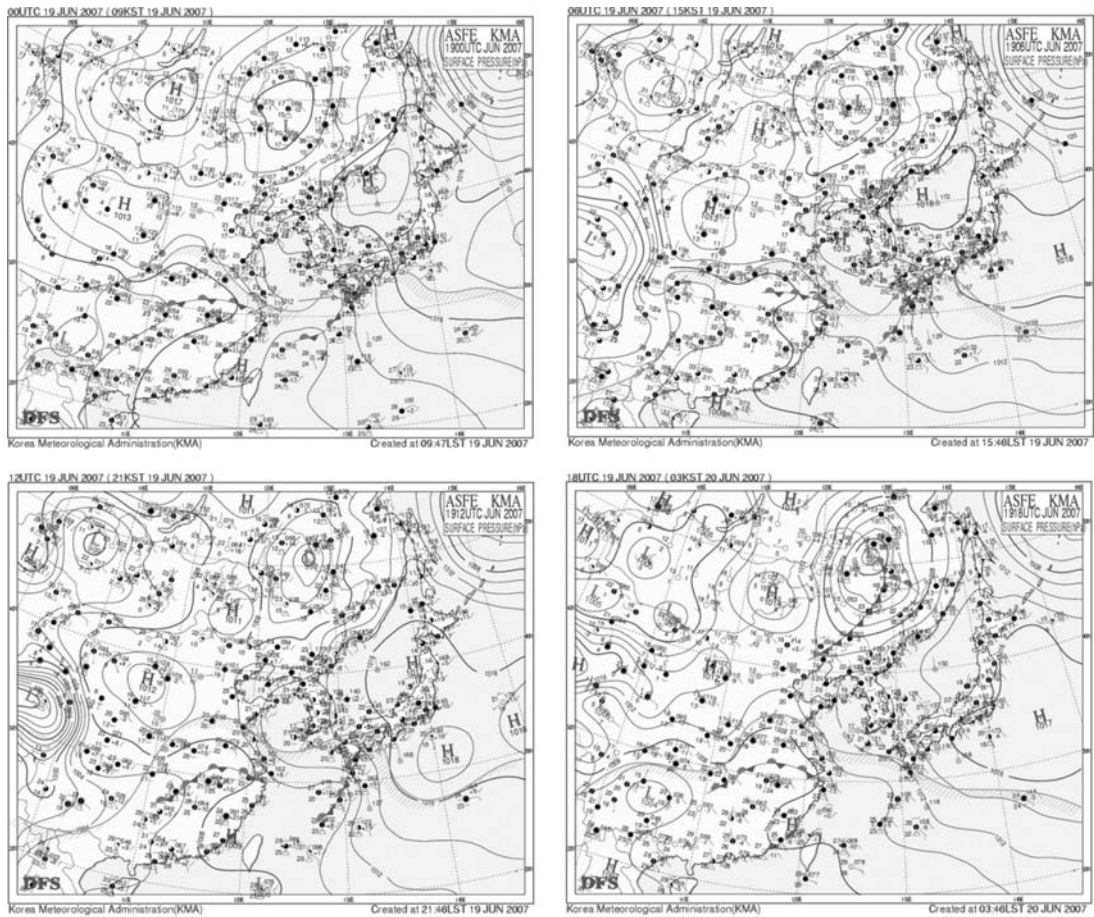


Fig. 3. Synoptic charts at 00UTC, 06UTC, 12UTC and 18UTC June 19 2007.

으로 노력하고 있다(Hong, 2010).

YSU와 MRF, TKE scheme의 PBL 물리 과정에 따른 모델 결과값을 검증하기 위하여 자동 기상 관측 장비로 관측한 지표 기온과 풍속을 비교하였다.

그림 4, 그림 5는 서울 및 수도권에서 선정한 6개 지점에서의 기온에 대한 시계열이며, 그림 6, 그림 7은 풍속의 시계열을 나타낸다.

기온에 대한 시계열을 보면 모든 scheme에서 일 최고기온은 어느 정도 일치하고 있지만 일 최저기온을 관측값보다 낮게 모의하는 경향을 보이고 있다. 서울 은평 지점과 인천 중구 지점과 같이 관측값과 비교했을 때 매우 잘 모의하는 지점이 있는가 하면 마포와 영등포 지점의 경우는 상대적으로 RMSE 값

이 크게 나타난다. 3 km 격자 크기로 모의한 수도권 영역에서 71개 지점의 관측값 평균과 관측소가 위치한 모델 격자값의 평균을 비교해 본 결과, 표 3에 제시한 바와 같이, 기온에 대한 평균 RMSE 값은 YSU scheme이 2.25°C, TKE scheme이 1.93°C, MRF scheme이 1.95°C로서 TKE scheme과 MRF scheme이 비슷한 정도로 YSU scheme보다 기온을 더 잘 모의하였다.

풍속의 경우에는 YSU와 TKE scheme이 전반적인 패턴은 관측값과 비교적 잘 일치하지만 다소 크게 모의하는 경향을 보이고 있다. YSU scheme은 0.80 m/s, TKE는 1.11 m/s, MRF scheme은 1.01 m/s로서 YSU scheme이 풍속을 관측값과 가장 유사하게 모

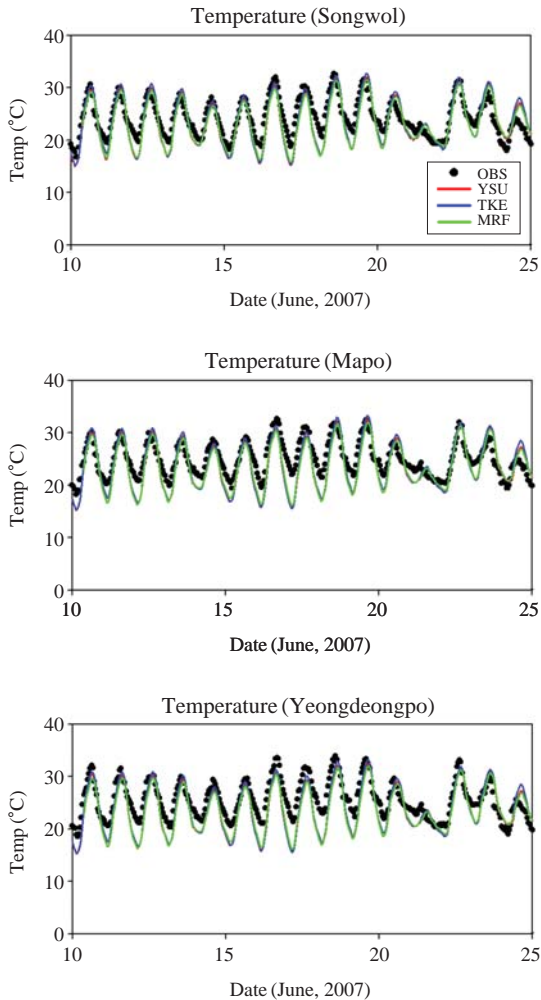


Fig. 4. The diurnal variations of observed and simulated temperature at Songwol, Mapo and Yeongdeongpo during the period of June 10~25 2007.

의하였다. 이는 안정한 대기 상태에서 낮은 PBL 고도를 모의했던 부분을 YSU scheme에서 수정한 결과로서 상대적으로 강한 바람을 모의하게 된 것으로 해석된다. 반면 TKE scheme은 상대적으로 약한 바람을 모의하나 본 연구에서 선정한 수치모의 기간 동안에는 관측치와 유사한 결과를 보이고 있으며, MRF scheme은 앞서 언급한 대로 안정한 대기 상태에서의 낮은 PBL 고도를 예측하는 경향이 그대로 나타나고 있다.

오존 농도가 높았던 6월 18일과 19일의 기온과 풍

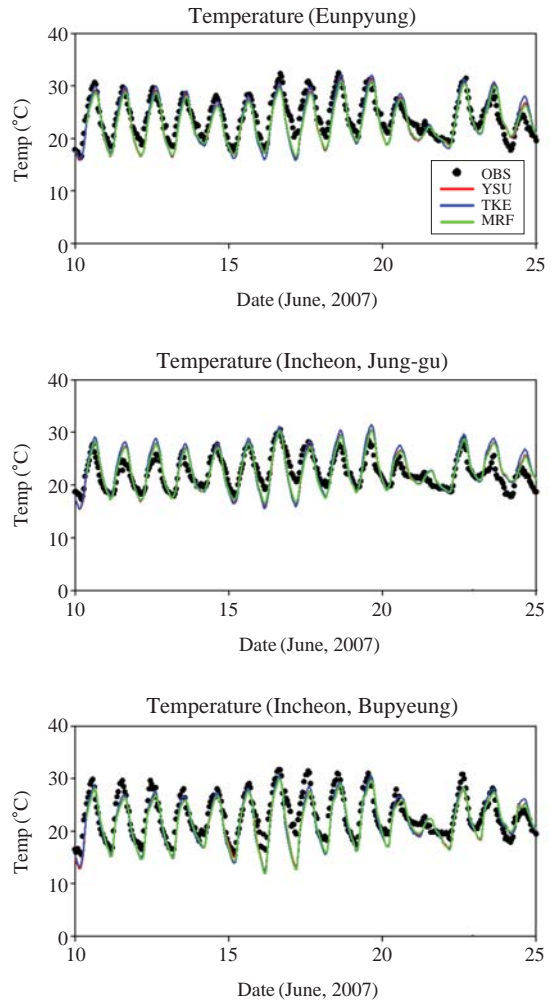


Fig. 5. Same as Fig. 4. but at Eunpyung, Jung-gu and Incheon, Bupyeong.

속을 살펴보면 거의 모든 지점에서 기온이 30°C 이상으로 높게 모의되었으며 풍속의 경우 2m/s 이하로 모의되어 고농도 오존이 발생할 수 있는 조건이 잘 갖추어졌던 것을 알 수 있다.

3. 1. 2 상층 기상 분석

상층 기상 관측 자료를 자료 동화에 사용하여 얻은 기상 모델 결과를 다시 관측 자료와 비교하는 것은 어떤 측면으로는 큰 의미가 없다고 할 수도 있으나, 본 연구의 주요 목적적인 PBL 옵션에 따른 모델 결과를 비교한다는 측면에서 그 필요성이 있으므로

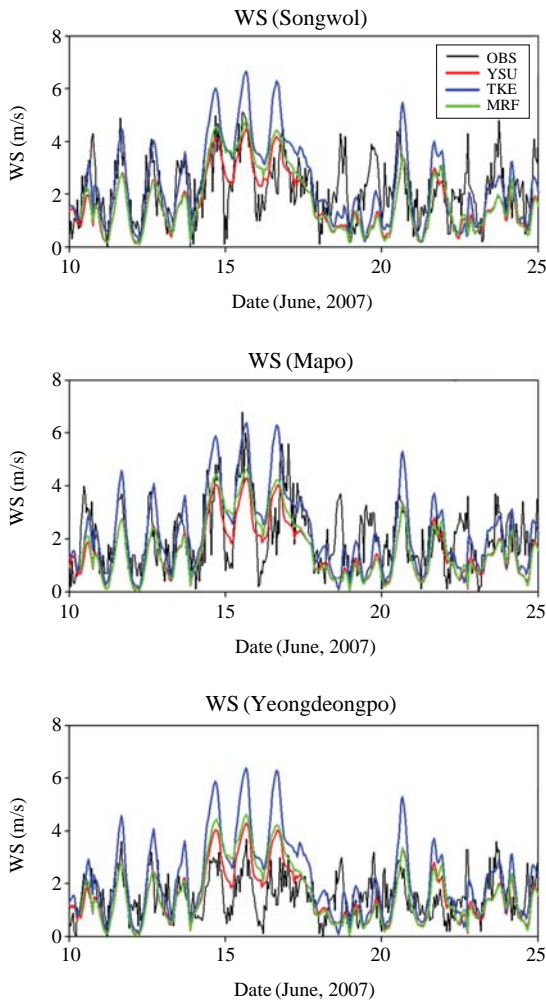


Fig. 6. The diurnal variations of observed and simulated wind speed at Songwol, Mapo and Yeongdeongpo during the period of June 10~25 2007.

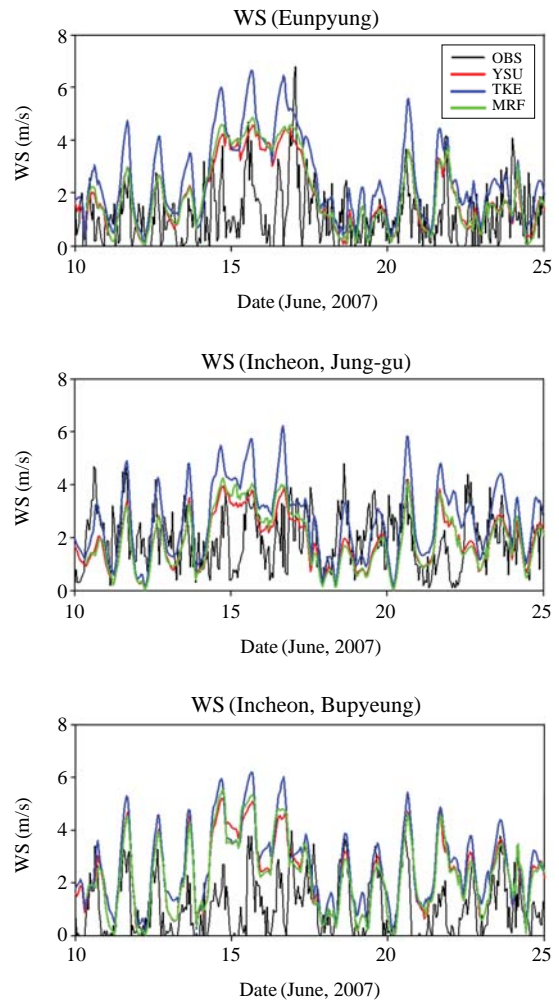


Fig. 7. Same as Fig. 6. but at Eunpyung, Jung-gu and Incheon, Bupyeong.

오산 상층 관측 자료와 PBL 옵션별 모델 결과를 비교하였다.

PBL 고도 내 (700 mb, 약 3 km)에서 925 mb, 850 mb, 그리고 700 mb 고도를 각각 선정하여 기온, 동서 방향 바람, 남북 방향 바람, 풍향, 풍속에 대한 시계열을 그림 8부터 그림 12에 나타내었다. YSU, TKE, MRF scheme으로 모의된 WRF의 기온 자료의 경우 그림 8에서 보이는 것처럼 관측값과 비슷한 경향성을 보이며 모의되고 있다. 기온은 모든 고도에서 거의 모든 시간에 약 1~1.5°C 가량 낮게 모의하는 경

향을 보이고 있다. 동서 바람 및 남북 방향 바람의 경우는 관측값과 비교했을 때 925mb 고도에서는 1 m/s 이하의 RMSE 값을 나타낼 정도로 잘 모의하고 있으며 850 mb와 고도에서도 1.3 m/s 정도의 RMSE 값을 나타내었다. 풍속의 경우 지표층에서 모의된 값이 관측값과 비교했을 때 크게 모의된 반면에 925 mb, 850 mb 고도에서는 그러한 경향이 없이 모의되었다. 표 4에 나타난 바와 같이 YSU, TKE, MRF scheme을 사용한 경우 모두 925 mb, 850 mb 고도에서 약 0.82 m/s, 1.33 m/s 정도의 RMSE 결과값을 보여주고 있어 YSU scheme을 사용한 경우 비교적 관

Table 3. RMSE for temperature and wind speed simulated with three different PBL schemes from WRF output.

Site	Temp. (°C)			Wind speed (m/s)		
	YSU	TKE	MRF	YSU	TKE	MRF
Songwol	2.16	2.15	2.06	1.19	1.25	1.26
Mapo	2.56	2.50	2.52	1.14	1.19	1.16
Yeongdeongpo	2.87	2.71	2.81	0.94	1.41	1.08
Eunpyung	1.89	1.90	1.86	1.41	1.93	1.83
Incheon, Bupyeong	2.14	2.13	2.19	1.69	1.96	1.70
Incheon, Jung-gu	1.85	2.17	1.41	1.27	1.59	1.61
Average of metropolitan area (71sites)	2.25	1.93	1.95	0.80	1.11	1.01

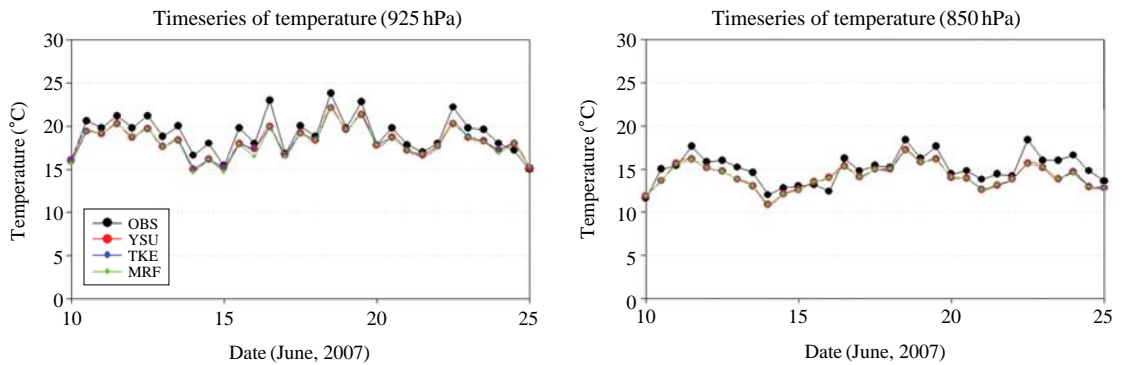


Fig. 8. The diurnal variations of observed (Osan) and simulated temperature during the period of June 10~25 2007 for 925 hPa and 850 hPa.

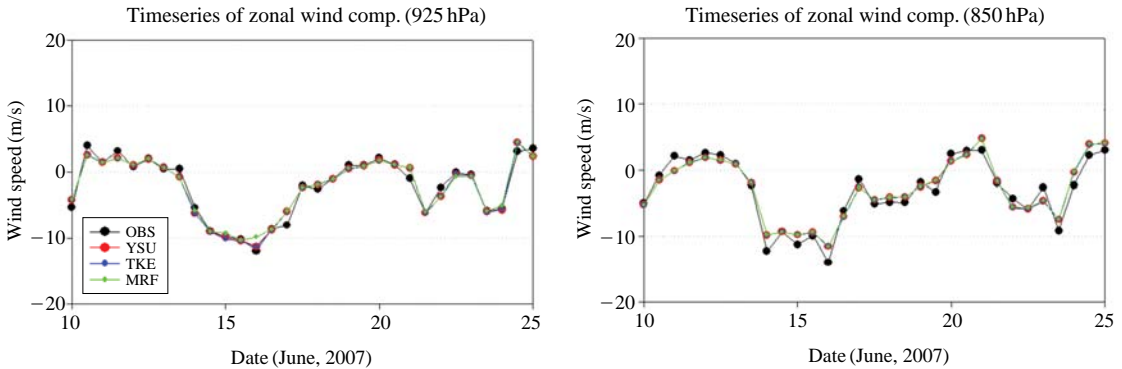


Fig. 9. The diurnal variations of observed (Osan) and simulated zonal wind comp. during the period of June 10~25 2007 for 925 hPa and 850 hPa.

측값과 유사하게 모의하는 것으로 나타났다.

그림 13과 그림 14는 서울 및 경기의 일부 지역에서 일 최고 오존농도가 180 ppb 이상을 나타내며 6 시간 동안 오존발령이 있었던 기간인 6월 17일과 19

일의 기온, 풍속의 연직분포를 나타내고 있다. 기온의 경우 YSU, TKE, MRF scheme을 적용한 결과 모두 유사하게 모의되었다. 최하층에서 모델값이 다소 높게 모의하는 경향을 보이고 있지만 전반적으로 관측

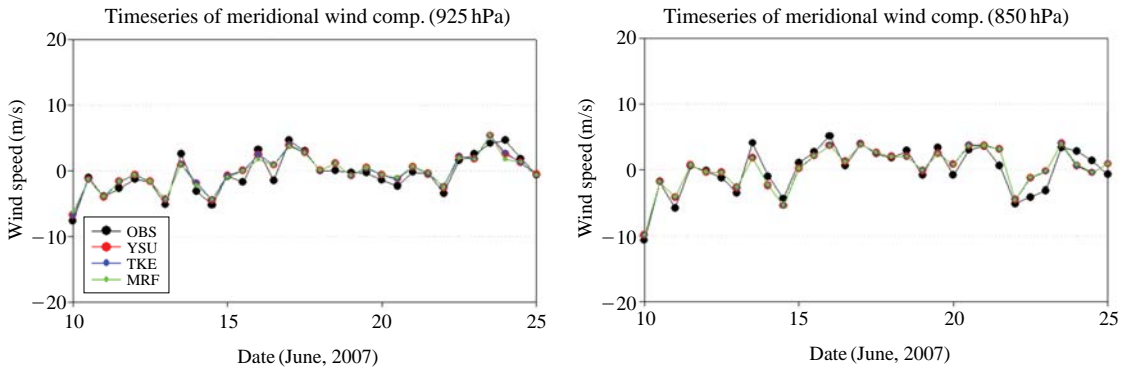


Fig. 10. The diurnal variations of observed (Osan) and simulated Meridional wind comp. during the period of June 10~25 2007 for 925 hPa and 850 hPa.

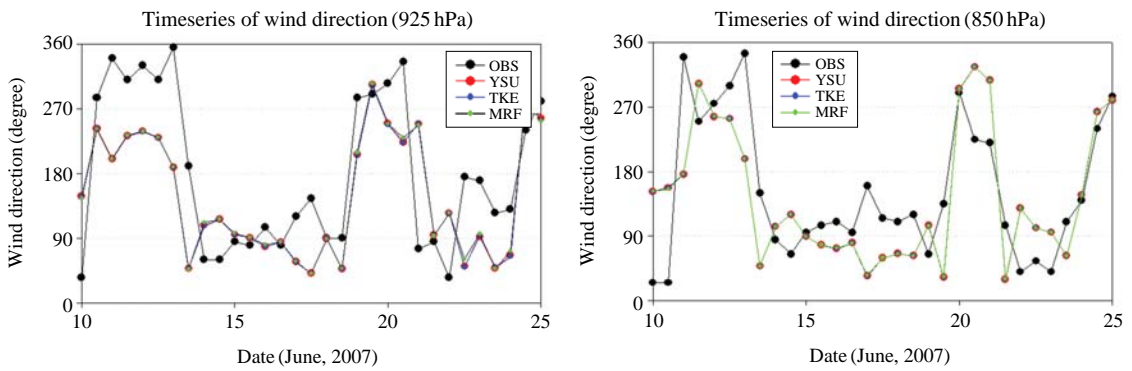


Fig. 11. The diurnal variations of observed (Osan) and simulated wind direction during the period of June 10~25 2007 for 925 hPa and 850 hPa.

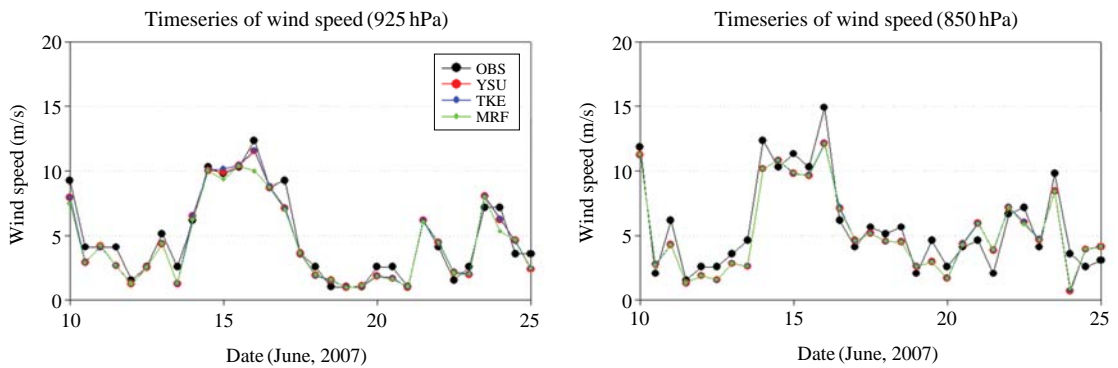


Fig. 12. The diurnal variations of observed (Osan) and simulated wind speed during the period of June 10~25 2007 for 925 hPa and 850 hPa.

값과 유사한 값을 나타내며 모의되고 있다.

PBL 고도 내에서의 평균풍속의 경우 YSU, TKE,

MRF scheme을 적용한 결과 모두 유사하게 모의되었지만, TKE scheme의 경우 940 mb 부근에서 과대

평가되는 경향을 나타내었다. 일반적으로 지표면 거칠기 길이와 마찰속도와 관련하여 17일 00UTC의 경우와 같이 고도가 증가함에 따라서 그 속도도 증

가하는 모습을 보인다. 하지만 고농도 오존이 나타났던 19일 00UTC의 경우를 보면 평소와 비교하여 고도가 증가함에도 불구하고 풍속이 증가하는 경향은 매우 약함을 알 수 있다. 특히, 서울 및 경기지역에서 오존농도가 매우 높았던 19일 00UTC에는 1 km 상공 까지도 1 m/s 정도의 풍속을 나타낼 정도로 매우 약한 값을 보이고 있으며 WRF 모델은 이러한 경향을 잘 모의하고 있다.

Table 4. RMSE for temperature, U-wind, V-wind, wind direction and wind speed simulated with three different PBL schemes at 925 mb and 850 mb.

Height	SCHEME	Temp. (°C)	U-wind (m/s)	V-wind (m/s)	W.D. (degree)	W.S (m/s)
925 mb	YSU	1.22	0.82	1.00	85.72	0.82
	TKE	1.22	0.83	0.97	86.04	0.81
	MRF	1.23	0.84	0.98	85.93	0.84
850 mb	YSU	1.23	1.29	1.36	77.33	1.33
	TKE	1.23	1.30	1.36	77.37	1.33
	MRF	1.23	1.30	1.36	77.37	1.33

그림 15는 대기질 모델링 시 배출된 오염물질이 혼합되는 층의 두께와 관련이 깊은 PBL 고도를 각 scheme으로 예측한 결과를 나타낸 것이다. PBL 고도의 분석기간 역시 고농도 오존이 나타났던 6월 18~19일의 일 평균과 일 최고 PBL 고도로 살펴보았다. 그림 15를 보면 전반적으로 모의된 PBL 고도는 한

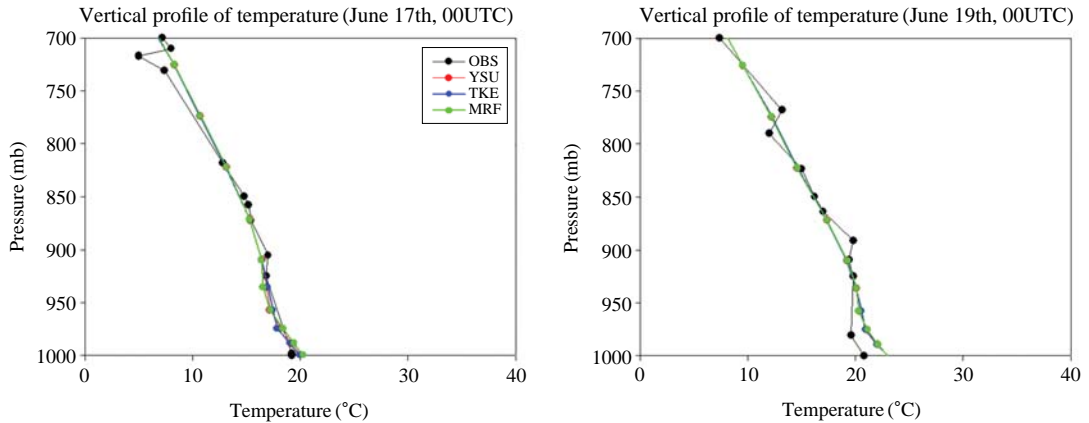


Fig. 13. The vertical profiles of temperature for observation (Osan) and WRF.

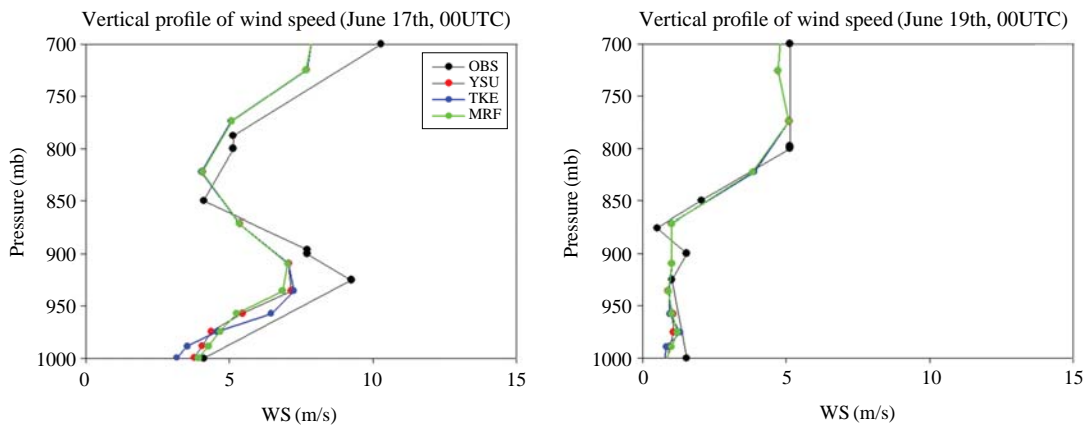


Fig. 14. The vertical profiles of wind speed for observation (Osan) and WRF.

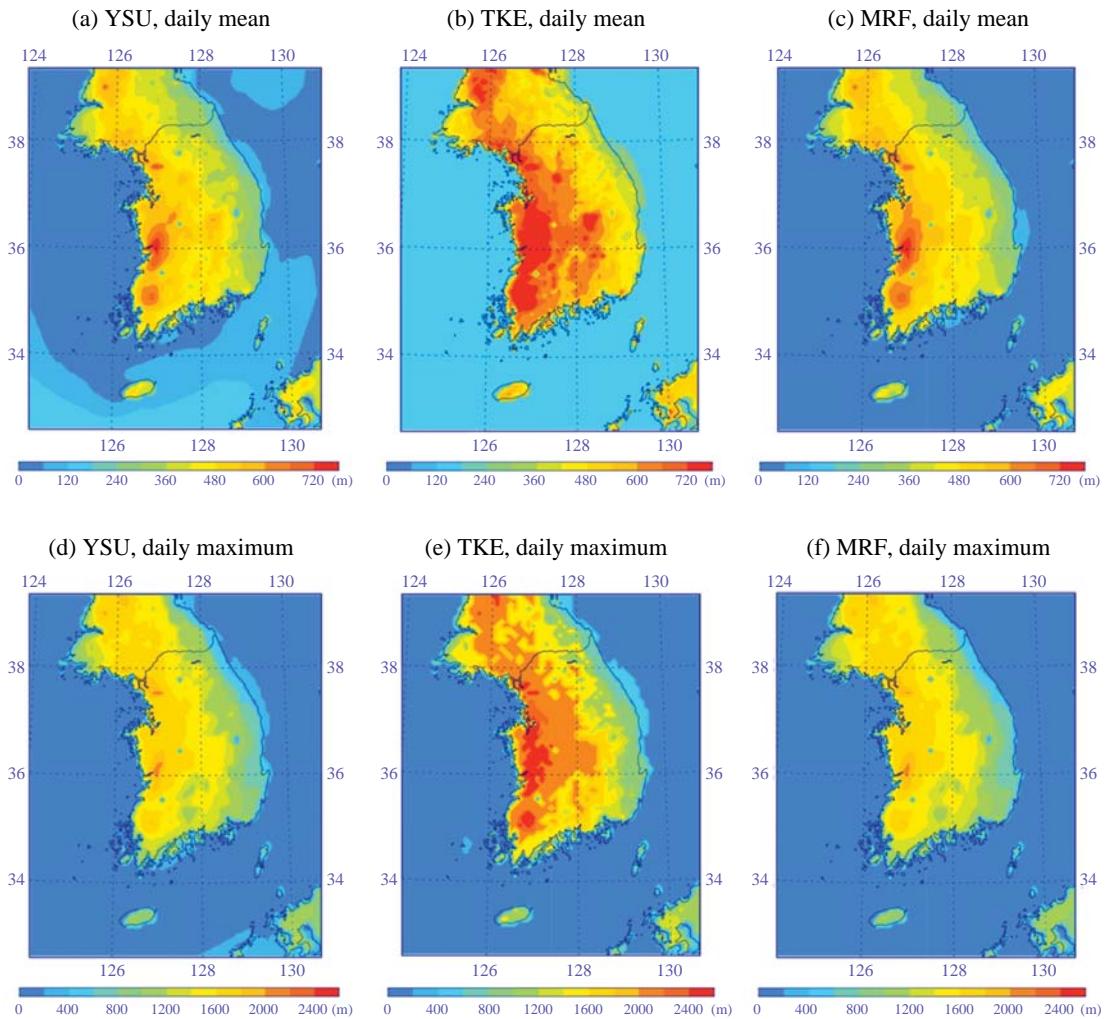


Fig. 15. The horizontal distributions of simulated daily mean and daily maximum PBL height during June 17~18 2007 for YSU, TKE and MRF schemes.

반도의 서쪽지역이 동쪽지역보다 높게 모의되었다. 일 평균 PBL 고도의 경우, YSU와 MRF scheme이 수도권에서 약 550m 정도를 모의한 반면 TKE scheme은 700m 이상을 모의하였으며 일 최고 PBL 고도 역시 YSU, MRF scheme이 약 1,600m인 반면에 TKE scheme이 2,200m 가량으로 모의되어 TKE scheme이 가장 높게 PBL 고도를 모의하는 것으로 나타났다. 이는 local mixing scheme을 사용하는 TKE scheme의 경우 non-local scheme을 사용하는 MRF 및 YSU scheme에 비하여 대체로 높은 PBL 고도를 예

측하는 것을 알 수 있다.

3. 2 PBL scheme에 따른 오존 농도 분석

CMAQ 수치모의를 위한 배출량 산정을 위하여 2007년 CAPSS (Clean Air Policy Supporting System)를 사용하고 SMOKE (Sparse Matrix Operator Kernel Emissions)를 통해 시공간 할당 및 화학종 분류를 수행하였다 (Kim *et al.*, 2008). 3 km 모사영역에 대한 경계조건 생성을 위한 수평해상도 27 km와 9 km 모사영역의 경우, 국외 배출량은 2006년 INTEX-B

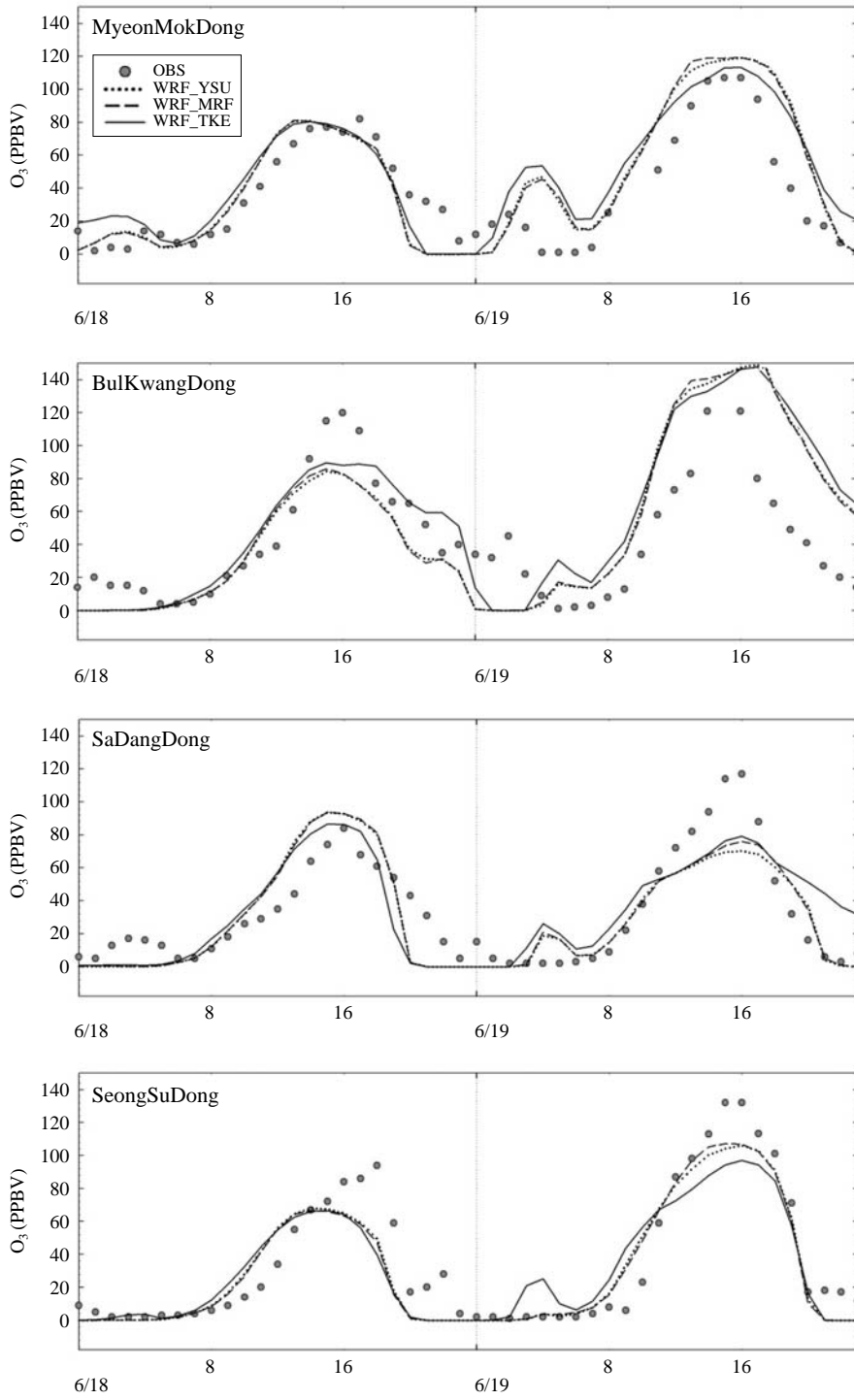


Fig. 16. The diurnal distributions of observed and simulated ozone concentration in Seoul metropolitan area during June 18 ~ 19 2007 (M1_0: YSU scheme, M1_9: MRF scheme, M1_10: TKE scheme).

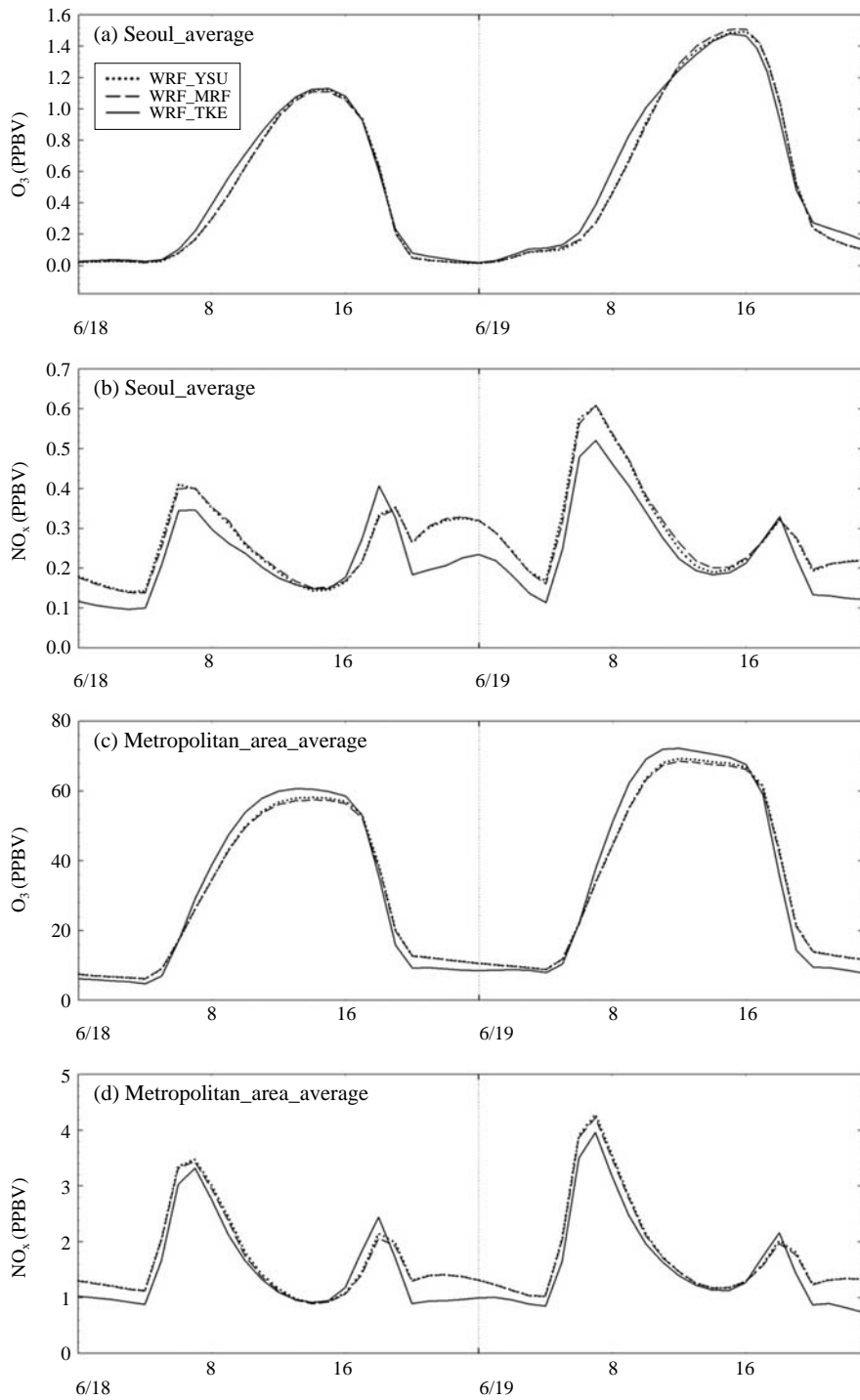


Fig. 17. The diurnal variations of simulated Ozone (a, c) and NO_x (b, d) dry deposition during June 18~19 2007.

(International Chemical Transport Experiment-Phase B; Zhang *et al.*, 2009) 자료를 이용하여 3-km 모사영역과 동일한 방법으로 처리하였다. 점 오염원의 경우 MCIP (Meteorology-Chemistry Interface Processor)을 통해 마련된 기상자료를 이용하여 수직확산을 적용하였다. 자연배출량의 경우는 MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature; Guenther *et al.*, 2006)을 이용하여 산정하였다.

그림 16은 각 scheme에 따른 WRF 결과를 사용한 CMAQ으로 예측된 오존 농도의 시계열 분포를 나타낸 것이다. 시계열 분포를 살펴보면 모든 scheme에서 일 최고농도와 일 최저농도를 전반적으로 잘 모사하고 있는 것을 확인하였다. 전체적으로 관측값과 비교했을 때 잘 모사하는 것으로 나타나지만, 시간대별로 살펴보면 19일 새벽 시간대에 과대평가하는 경향을 나타내며, 특히 TKE scheme을 적용한 경우 더 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 또한 PBL scheme별 시계열 분포를 보면 YSU와 MRF scheme의 모의결과가 서로 유사하게 나타나며, TKE scheme의 모의결과는 앞의 두 scheme과 다른 경향을 나타내고 있다.

그러나 각 경우에 대한 RMSE 값을 살펴본 결과 YSU scheme이 19.03 ppb, MRF scheme이 18.77 ppb, TKE scheme이 19.14 ppb로 상대적으로 큰 차이를 보이지 않음을 알 수 있었다.

그림 17은 O_3 와 NO_x 에 대한 서울과 수도권 지역 평균 전성 침적 농도 시계열 분포를 나타낸 것이다. 결과를 살펴보면, 동일한 이론을 사용하는 MRF와 YSU scheme의 경우 유사한 값을 보이고 있으며, 상대적으로 PBL고도를 높게 예측했던 TKE의 경우는 낮은 전성침적 농도를 나타내고 있다. 특히 NO_x 에 대한 야간의 전성 침적 농도는 TKE scheme의 경우 MRF와 YSU scheme에 비하여 낮게 모의되고 있음을 알 수 있다. 이는 TKE scheme의 경우 야간의 안정한 대기 조건에서 상대적으로 낮은 풍속으로 인한 결과로 기인된 것으로 판단된다.

4. 결 론

대기질 예측에 가장 민감한 인자 중 하나인 기상 요소를 결정짓는 PBL scheme에 따른 WRF 기상 결

과의 민감도를 분석해 보았다. 고농도 오존이 출현했던 기간을 포함한 2007년 6월 1~25일로 선정하였고, 동일한 조건하에서 YSU, TKE, MRF scheme을 적용한 후 그 결과를 살펴보았다.

지표 기온의 경우는 수도권 71개 지점의 관측값과 비교한 RMSE의 값이 YSU scheme에서 2.25°C, TKE scheme에서 1.93°C, MRF scheme에서 1.95°C로서 TKE와 MRF scheme이 비슷한 정도로 관측값과 유사한 값을 모의하였다. 세 scheme 모두 전반적으로 일최고기온은 잘 모의하였지만 일부 지역에서 일 최저기온을 관측값보다 더 낮게 모의하는 경향이 나타났다. 반면 풍속의 경우에는 YSU scheme에서 0.80 m/s, TKE scheme에서 1.11 m/s, MRF scheme에서 1.01 m/s가 모의되어 YSU scheme의 경우 관측치에 상대적으로 유사한 값을 보였다.

오산 상층기상관측자료를 이용한 925 mb, 850 mb, 700 mb 고도에서의 고도별 시계열 분석에서는 YSU, TKE, MRF scheme이 거의 유사한 값을 모의하는 것으로 나타났다. 연직고도별 분석에 있어서도 PBL 고도내의 최하층에서 약간 다르게 모의되었을 뿐 세 scheme 모두 유사한 값으로 모의되었다. 특히, 오존 농도가 높았던 19일 00UTC의 연직분포에서 1 km 정도까지의 매우 약한 풍속을 잘 모의하고 있다.

오존 농도가 높았던 2007년 6월 18~19일의 기간에 한반도 영역에서의 일 평균 PBL 고도와 일 최고 PBL 고도의 수평 분포를 살펴본 결과, YSU와 MRF가 비슷한 정도의 값을 모의하였고 TKE scheme이 가장 높은 일 평균 및 일 최고 PBL 고도를 모의하였다. 오존 농도의 경우 시계열 분포를 보면 모든 scheme에서 일 최고농도와 일 최저농도를 전반적으로 잘 모의하는 것을 확인하였다. 그러나 통계 분석을 실시한 결과 RMSE 값이 YSU scheme이 19.03, MRF scheme이 18.77, TKE scheme이 19.14로서 큰 차이를 나타내지 않았다.

전체적으로 적용한 WRF모델의 PBL scheme에 따른 결과의 큰 차이가 나타나지는 않지만, 부분적으로 non-local과 local mixing scheme의 차이를 볼 수 있었다. 그러나 기상 및 대기질 예측 결과에서 뚜렷한 차이를 분석할 수 없었다. 따라서 CMAQ 내 연직 확산 scheme 등에 따른 다양한 수치실험의 추가 분석이 후속 연구로 이루어지고 있으며 이를 통하여 뚜렷한 결과 분석을 실시할 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

본 논문으로 변태원 교수님의 가르침에 깊은 감사를 표하며, 평안히 잡드시길 기원합니다.

참고 문헌

- Arnold, J.R., R.L. Dennis, and G.S. Tonnesen (2003) Diagnostic evaluation of numerical air quality models with specialized ambient observations: testing the Community Multiscale Air Quality modeling system (CMAQ) at selected SOS 95 ground sites, *Atmospheric Environment*, 37, 1185-1198.
- Bullock, O.R. and K.A. Brehme (2002) Atmospheric mercury simulation using the CMAQ model: formulation description and analysis of wet deposition results, *Atmospheric Environment*, 36, 2135-2146.
- Byun, D.W. and J.K.S. Ching (Eds.) (1999) Science algorithms of the EPA Models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) Modeling System, EPA Report N. EPA-600/R-99/030, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency, Washington, DC.
- Guenther, A., T. Karl, P. Harley, C. Wiedinmyer, P.I. Palmer, and C. Geron (2006) Estimates of global terrestrial isoprene emissions using MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature), *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6, 3181-3210.
- Han, Z., H. Ueda, and J. An (2008) Evaluation and intercomparison of meteorological predictions by five MM5-PBL parameterizations in combination with three land-surface models, *Atmospheric Environment*, 42, 233-249.
- Hogrefe, C., J. Biswas, B. Lynn, K. Civerolo, J.-Y. Ku, J. Rosenthal, C. Rosenzweig, R. Goldberg, and P.L. Kinney (2004) Simulating regional-scale ozone climatology over the eastern United States: model evaluation results, *Atmospheric Environment*, 38, 2627-2638.
- Hong, S.-Y. (2010) A new stable boundary-layer mixing scheme and its impact on the simulated East Asian summer monsoon, *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, DOI: 10.1002/qj.665.
- Jimenez, P., R. Parra, S. Gasso, and J.M. Baldasano (2005) Modeling the ozone weekend effect in very complex terrains: a case study in the Northeastern Iberian Peninsula, *Atmospheric Environment*, 39, 429-444.
- Jun, M., and M.L. Stein (2004) Statistical comparison of observed and CMAQ modeled daily sulfate levels, *Atmospheric Environment*, 38, 4427-4436.
- Kim, S., N.K. Moon, and D.W. Byun (2008) Korean emissions inventory processing using the US EPA's SMOKE system, *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 2(1), 34-46.
- Otte, T.L., G. Pouliot, J.E. Pleim, J.O. Young, K.L. Schere, D.C. Wong, P.C.S. Lee, M. Tsidulko, J.T. McQueen, P. Davidson, R. Mathur, H.-Y. Chuang, G. DiMego, and N.L. Seaman (2005) Linking the Eta Model with the Community Multiscale Air Quality (CMAQ) Modeling System to build a National Air Quality Forecasting System, *Weather and Forecasting*, 20, 367-384.
- Perez, C., O. Jorba, M. Sicard, P. Jimenez, A. Rodriguez, and J.M. Baldasano (2005) Evaluation of MM5 PBL scheme in an urban coastal site over the western Mediterranean by LIDAR and meteorological data, *Geophysical Research Abstracts*, 7, 05641.
- Sakurai, T., S.-I. Fujita, H. Hayami, and N. Furuhashi (2003) A case study of high ammonia concentration in the nighttime by means of modeling analysis in the Kanto region of Japan, *Atmospheric Environment*, 37, 4461-4465.
- Seaman, N.L. (2000) Meteorological modeling for air-quality assessments, *Atmospheric Environment*, 34, 2231-2259.
- Yu, S., R.L. Dennis, P.V. Bhave, and B.K. Eder (2004) Primary and secondary organic aerosol over the United States: estimates on the basis of observed organic carbon (OC) and elemental carbon (EC), and air quality modeled primary OC/EC ratios, *Atmospheric Environment*, 38, 5257-5268.
- Zhang, M., I. Uno, Y. Yoshida, Y. Xu, Z. Wang, H. Akimoto, T. Bates, T. Quinn, A. Bandy, and B. Blomquist (2004) Transport and transformation of sulfur compounds over East Asia during the TRACE-P and ACE-Asia campaigns, *Atmospheric Environment*, 38, 6947-6959.
- Zhang, Q., D.G. Streets, G.R. Carmichael, K.B. He, H. Huo, A. Kannari, Z. Klimont, I.S. Park, S. Reddy, J.S. Fu, D. Chen, L. Duan, Y. Lei, L.T. Wang, and Z.L. Yao (2009) Asian emissions in 2006 for the NASA INTEX-B mission *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 5131-5153.