

논문

대기경계층 모수화 차이에 의한 WRF-CMAQ 미세먼지 모의 농도 차이 분석: 2019년 3월 수도권 연무 사례를 중심으로

Bias Analysis of WRF-CMAQ Simulated PM_{2.5} Concentrations Caused by Different PBL Parameterizations: Application to the Haze Period of March in 2019 over the Seoul Metropolitan Area

정소연¹⁾, 김철희^{1),2),*}

¹⁾부산대학교 대기환경과학과, ²⁾부산대학교 환경연구원

So-Yeon Jeong¹⁾, Cheol-Hee Kim^{1),2),*}

¹⁾Department of Atmospheric Science, Pusan National University, Busan, Republic of Korea

²⁾Institute of Environment Studies, Pusan National University, Busan, Republic of Korea

접수일 2021년 10월 1일
수정일 2021년 11월 5일
채택일 2021년 11월 9일

Received 1 October 2021
Revised 5 November 2021
Accepted 9 November 2021

*Corresponding author
Tel: +82-(0)51-510-3687
E-mail: chkim2@pusan.ac.kr

Abstract In this study, the biases arising from different Planetary Boundary Layer (PBL) parameterizations were assessed in Seoul metropolitan area for the period of March 2~6 2019, when a extremely high PM_{2.5} concentration were observed. We employed WRF-CMAQ and carried out three sensitivity tests from different PBL parameterizations: Yonsei University (YSU) as a nonlocal scheme, Mellor-Yamada-Janjic (MYJ) as a local scheme, and hybrid local-nonlocal scheme named Asymmetric Convective Model2 (ACM2). Our simulations of three different PBL schemes yielded 6~30% of NMB (Normalized Mean Bias) of PBL height (PBLH) against observations between schemes, and showed different characteristics between day and night. During daytime, nonlocal PBL schemes showed seemingly better PBLH simulations, whereas local scheme simulated better for nighttime for our study period. However, all schemes underestimated nocturnal PBLH, thereby inducing higher surface PM_{2.5} concentrations. On the average, the bias ranges of PM_{2.5} were about 11.1% against ground measurements. However, our PBLH tests induced 9.9% variances for daytime, whereas nighttime PM_{2.5} bias ranges were about 13.2%, indicating much higher uncertainties in nighttime PBLH for the given period. This suggests that more comprehensive measurement-modeling PBL studies especially for nighttime are essential for the improvement of daily mean or nocturnal PM_{2.5} prediction capabilities.

Key words: PBL scheme, PM_{2.5}, WRF, CMAQ, Parameterization

1. 서 론

미세먼지 예보에 있어서 기상요소는 매우 중요하다. 기상요소 중에서 오염물질의 공간 분배를 지배하는 기상인자로는 배출원에서 어느 지역으로 수송되는지와 관련이 있는 수평 바람성분과 연직으로 얼마만큼 확산되는지와 관련이 있는 대기경계층(planetary

boundary layer, PBL)이 대표적이다(Seaman, 2000). PBL은 지표의 영향을 직접적으로 받는 대류권 하층(약 1~2 km)으로서 그 두께는 수백 미터에서 수 킬로미터까지 다양하며(Stull, 1988), PBL 내에서는 활발한 난류(turbulence) 활동에 의해 지표에서 대기로 열(heat)·운동량(momentum)·수분(moisture)을 수송시켜 기온, 상대습도, 바람 등의 매우 큰 일변화를 유

도한다(Li *et al.*, 2017). 결국 대기오염물질의 배출원이 지상에 집중되어 있다는 점과, 지상 혹은 하층 오염물질의 수송이나 확산 과정이 PBL 내의 난류의 움직임에 의해 매우 크게 좌우된다는 점을 고려할 때, 대기경계층 높이(PBL height, PBLH)는 대기질 예보에 있어서 중요한 영향 인자라 할 수 있다(Lee *et al.*, 2019; Zhong *et al.*, 2019; Miao *et al.*, 2018).

PBLH는 복잡한 난류 과정을 반영하여 결정되므로 중규모 기상모델 내에서는 직접 계산 가능한 것이 아니라, 모수화(parameterization) 과정으로 결정된다. 그러므로 중규모 기상 모델 내에서의 PBLH는 난류 운동의 여러 모수화 방법 중 어떠한 방안(scheme)을 사용하였는지에 따라 상이한 PBLH가 결정될 수 있고, 나아가 모의된 PBLH는 대기질 모델의 입력장으로 사용되므로 오염물질의 수송이나 확산 결과에 영향을 미치게 되어, 결국 지상 미세먼지 모의 결과에 상당한 영향을 주게 된다(Garcia-Diez *et al.*, 2013; Hu *et al.*, 2010). 따라서 미세먼지 예보 정확도를 향상시키기 위해서는 다양한 PBL 민감도 실험을 통해 모델 내의 PBL 방안 중 상대적으로 실제에 더 가깝게 모의되는 옵션을 선정하거나(Avolio *et al.*, 2017), 해당 지역의 특성을 잘 반영하는 합리적인 PBL 모수화 개발 연구 등이 필요하다고 할 수 있다.

국외에서는 이러한 PBL 민감도 연구가 활발하였다. Zhang and Zheng (2004)은 미국 중부지방을 대상으로 다양한 PBL 옵션을 테스트한 결과, 비국지(non-local) PBL 방안에서는 대기경계층 내 활발한 플럭스에 의해 연직 교환이 빠르게 이루어져 기상변수의 일 변화 주기가 관측과 일치하는 반면, 국지(local) PBL 방안에서는 운동량 수송이 하층으로 느리게 수송되어, 중간에 관측된 일변화와 일부 다르게 모의되는 현상을 확인하였다. Hu *et al.* (2010)는 PBL 방안에 따라 모델 내의 연직 혼합 강도(vertical mixing strength)와 경계층 상부에서의 유입 플럭스(entrainment flux)의 문제점을 분석하고, 이를 수정하여 PBLH가 개선되는 효과를 제시하였다.

국내에서도 PBL 모수화 방안을 달리하여 모델링을

수행한 민감도 연구가 많이 진행되어 왔다. Moon *et al.* (2011)은 수도권 지역을 대상으로 고농도 오존이 발생하였던 여름철 사례를 분석한 결과, 상층 오존은 큰 차이가 없었으나, 지표에는 PBL 방안에 따라 기온, 풍속 등의 차이에 의해 오존 농도의 모의 결과에 상당한 차이가 있음을 보였다. Lim *et al.* (2015)은 모델 연직 해상도와 연관시켜 PBLH의 민감도 실험을 수행한 결과, 하층 연직 해상도(특히 2km 고도 이하)를 높인 경우, PBLH의 일변화가 가장 뚜렷함을 확인하였고, PBL 모수화 방안에 따른 기상변수들의 차이도 상당함을 보였다. Seo *et al.* (2010)는 PBL 모수화 방안뿐만 아니라 지면 모델(Land Surface Model) 차이에 따른 PBLH의 차이를 분석하였으며, Jeong *et al.* (2016)은 계절별로 PBL 및 미세물리 옵션을 달리하여 여러 기상요소의 계절별 모의 정확도를 분석한 바 있다.

이처럼 국내·외 선행 연구에서는 PBL 방안에 따라 모델 결과의 유의미한 차이가 존재함을 언급하고 있었으며, 이러한 차이는 PBL 모수화 방안의 차이 외에도 대상 지역의 지리적 특성과 지표 조건 등의 환경에 따라 다양하게 나타난다. 국내에서는 PBL 옵션에 따른 기상변수들의 차이를 분석한 연구들은 다수 존재하나, 방안별 PBLH의 오차를 주·야간의 난류 특성의 차이로 원인분석을 수행하거나, 고농도 시 방안별 PBLH와 미세먼지 농도 편차를 연관시켜 정량적으로 분석한 연구는 많지 않다. 본 연구에서는 국내에서 수도권 비상저감조치가 연속으로 발령되었던 2019년 초고농도 미세먼지 사례(2019년 3월 초)를 대상으로 PBL 옵션에 따른 민감도 실험을 수행하여 주·야간의 방안별 모의 결과의 차이점과 PBLH 및 PM_{2.5} 농도 모의 능력 편차를 정량적으로 살펴보고자 한다. 특히 PBLH 산출 방식을 국지 및 비국지 방안별로 구분할 수 있는 난류 역학적 이론을 소개하고, WRF (Weather Research and Forecast)-CMAQ (Community Multi-scale Air Quality) 모델링을 수행하여 방안별 기상 및 대기질 모의 차이를 해석하였다. 이를 통해 수도권 미세먼지 예보 정확도를 향상시키는 기초를 마련하고자 한다.

2. 국지 (local) 방안과 비국지 (non-local) 방안 이론

PBL 모수화 방안은 난류 모수화 방법에 따라 두 가지, 즉 비국지 (non-local) 방안과 국지 (local) 방안으로 크게 구분된다. 두 방안별 각 난류에 의한 혼합 과정의 특징을 그림 1에 제시하였다. 첫째로, 비국지 방안은 특정 고도의 난류 강도를 상하 여러 고도에 걸쳐 있는 에디 (eddy)의 중첩된 결과로 정의하므로, 해당 고도의 난류 강도를 추정하기 위하여 여러 고도의 난류 관련 변수값을 동시에 활용한다. 두 번째로, 국지 방안은 특정 고도의 난류 강도를 해당 고도 그 자체의 난류 정보로만 모수화하여 결정한다. 따라서 국지 방안은 PBL 내의 난류 수송 및 확산을 상하 여러 고도에 걸친 큰 규모의 에디에 의한 확산보다는 규모가 상대적으로 작은 에디에 기반하게 되며, 이는 분자확산에 더 가깝게 난류 강도를 추정하는 방법이라 할 수 있다 (Dzevre and Aramola, 2020; Stull, 1988) (그림 1).

난류의 기본 특성을 규정하는 중요한 결정 인자는 난류 운동에너지 (turbulent kinetic energy, TKE)이며, 결국 TKE를 통해 난류 강도를 파악하고 이를 통해 PBLH를 모수화하게 된다. 난류 역학에서는 TKE 방정식을 풀기 위해서는 난류 종결 (closure) 문제 (TKE

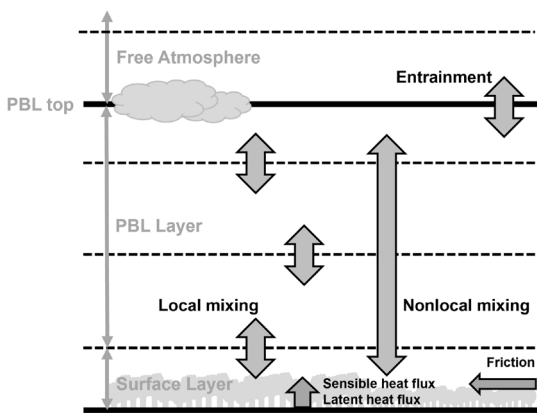


Fig. 1. Illustration of local and non-local mixing processes in Planetary Boundary Layer (reorganized from Ahasan *et al.*, 2014).

방정식의 개수보다 결정해야 할 TKE 관련 변수의 개수가 더 많아서 방정식이 풀리지 않는 문제)를 해결해야 하는데, 이 경우 난류를 종결 (closure)하는 차수, 즉 난류 종결 차수에 따라 결정된다 (Stull, 1988). 비국지 방안은 1차 난류 종결 차수 (1st-order closure)를 주로 사용하며, 이 방식은 해당 고도 이외의 상하층 평균장의 연직 구배 (gradient)에 비례하여 난류 강도를 추정하므로 K-theory라고도 불린다. 반면 국지 방안은 상하층 평균장의 구배를 사용하지 않고 자체 고도에서의 난류 정보를 기반으로, 1½차 종결 (one-and-half order closure) 혹은 그 이상의 난류 종결 차수를 사용한다. 원론적으로 난류 종결 차수가 높을수록 더 정확한 해를 가진다고 할 수 있지만 계산 시간이 길고 해석이 복잡하다는 단점이 있다 (Andre *et al.*, 1978).

현재 WRF 중규모 기상 모델에서 옵션으로 제시하는 PBL 모수화 방안에는 비국지 방안으로서 YSU (Hong, 2006), MRF (Hong and Pan, 1996)가 있으며, 국지 방안으로는 MYJ (Janjic, 1994), QNSE (Sukoriansky *et al.*, 2005), MYNN (Nakanishi and Niino, 2006), BL (Bougeault and Lacarrere, 1989), UW (Bretherton and Park, 2009) 등이 있다. 또한 비국지 방안으로 분류하지만, 일부 국지의 특성을 가지는 국지-비국지 혼합 방안 (hybrid local-nonlocal)은 ACM2 (Pleim, 2007)이 대표적이다. ACM2는 상향 혼합 (upward mixing)에 대해서는 비국지 방법, 하향 혼합 (downward mixing)에 대해서는 국지 방법을 선택하여 연직 확산을 계산하도록 설계되어 있다 (Pleim, 2007).

비국지 방안인 YSU와 ACM2는 모델 내에서 PBLH를 진단할 때 벌크 리처드슨 수 (bulk Richardson number, Ri_b)를 사용하며, YSU는 불안정한 (안정한) 지표에서 계산된 Ri_b 가 임계값 0 (0.25)을, ACM2는 중립 부력 고도 이상에서 계산된 Ri_b 가 0.25를 초과하는 높이를 PBLH로 결정한다. 반면 국지 방안인 MYJ는 특정 고도에서의 TKE를 사용하여, TKE가 임계값 $0.1 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ 아래로 떨어질 때를 PBLH로 정의한다. PBL 방안에 따라 서로 호환이 가능한 지표층 (surface layer) 모수화 방안이 다른데, 이는 지표층 아래 최하

층인 층류층(viscous sub-layer) 이론에 따라 달라진다. MM5와 Eta 지표층 방안 모두 모닌-오부코프 상사 이론(Monin-Obukhov similarity theory)을 기반으로 하지만, MM5는 Carlson-Boland 층류층(Carlson and Boland, 1978) 이론을 Eta에 대해서는 Zilitinkevich 열적 층류의 거칠기 길이(Zilitinkevich, 1995)를 고려하는 이론을 적용하는 차이가 있다(Skamarock *et al.*, 2008).

관련 연구 결과를 살펴보면, 비국지 방안인 YSU와 ACM2는 큰 에디에 의한 확산을 포함하며, 강한 연직 혼합으로 인해 PBL 상부에서 더 많은 유입을 발생시켜 더 따뜻하고 건조한 PBL을 형성시키는 특징이 확인되었다(Hu *et al.*, 2010). 또한 주간에 단열적으로 가열된 지표에서의 열적 난류를 반영하므로 주간 PBL 성장을 모의하는 능력이 우수하고, 더 깊은 PBL을 모의하는 경향이 나타났다(Cohen *et al.*, 2015). 그러나 YSU에서는 차가운 바다 위와 야간에 상대적으로 낮은 PBLH를 모의하는 경향은 문제점으로 지적되기도 하였다(Hong, 2010). 혼합 방안인 ACM2는 명시적 비국지 수송뿐만 아니라 에디 확산 요소가 포함되어 있어, 더 정확한 기상변수 및 PBLH를 모의한다고 진단하였으나(Pleim, 2007), 다른 연구에서는 ACM2가 PBLH를 과대 계산하는 것으로 평가하였다(Coniglio, 2013). MYJ는 국지 혼합으로 인해 주간에 활발한 대류 조건에서 약한 혼합을 발생시키는 특징을 가지므로 비국지 방안에 비해 PBL 모의 능력이 상대적으로 떨어지는 것으로 보고되었으나, 안정한 조건에 대해서는 우수한 모의 능력을 보인 바 있다(Jia and Zhang, 2020; Shin and Hong, 2011).

본 연구에서는 국내·외 여러 PBL 민감도 실험 연구에서 주로 선택되었던 옵션 중에서, 선행 연구로부터 국지·비국지 혼합 특성의 차이가 잘 대비되어 해석할 수 있는 대표 옵션으로, 비국지 방안은 YSU, 국지 방안은 MYJ, 혼합 방안은 ACM2를 선택하여 연구를 수행하였다. WRF 내에서 PBL 방안별로 호환되는 지표층 모수화 방안이 다르므로, 이를 제외한 기타 모든 조건은 동일하게 설정한 후 총 세 가지 PBL 모수화 방

안을 사용하여 WRF-CMAQ 모델에 의해 모의되는 미세먼지 농도 차이를 정량적으로 분석하였다.

3. 연구 방법

3.1 사례 선정 및 자료

본 연구에서 선정된 사례는 수도권에서 초고농도 미세먼지가 발생했던 시기인 2019년 3월 초(03/05 01 KST~03/06 18 KST)를 대상으로 하였다. 해당 사례 기간은 수도권 전역에서 PM_{2.5} 경보 및 비상저감조치가 연속 발령되었고, 중랑 지점에서 관측한 PM_{2.5} 농도는 3월 5일 시간평균농도가 최고 160 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (일평균 농도 140 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)까지 상승하였다. 그 다음 날인 3월 6일에도 시간평균 최고 121 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 로 보고되었으며, 양일 모두 일평균 대기환경기준치인 35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 를 훨씬 초과한 극히 이례적인 고농도 사례이다.

분석 지점으로는 수도권 지역 동쪽에 위치한 중랑 지점(127.08°E, 37.59°N, 45 m)을 선정하였으며, 이 지점에서는 사례 기간 특별 관측을 통해 시간별 PBLH 관측 자료가 존재한다. 아울러 동일한 지점에 대해, 기상청에서 방재기상관측을 위해 운영하는 자동기상관측장비(Automatic Weather Station, AWS)에서 관측된 시간별 기온, 풍향, 풍속 등 기상변수 자료, 환경부에서 운영하는 대기오염측정망(Air Quality Monitoring Station, AQMS)의 도시대기측정망에서 측정된 시간별 초미세먼지 자료를 사용하였다(그림 2).

3.2 WRF-CMAQ 모델 설계

사용된 3차원 대기질 모델은 WRF-CMAQ 모델로서, 미국 국립대기연구센터(National Center for Atmospheric Research, NCAR)에서 개발한 중규모 기상모델인 WRF와 미국 환경보호청(Environmental Protection Agency, EPA)에서 개발한 3차원 광화학 모델인 CMAQ으로 구성되어 있다. 버전은 WRF는 v3.6.1, CMAQ은 v5.0.2이다.

모델 영역(그림 2)은 총 3영역으로, 38.0°N, 126.0°E

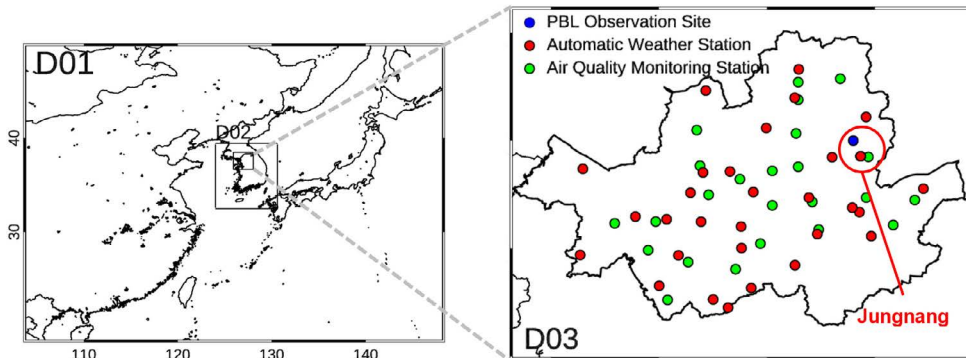


Fig. 2. Three nested domains for WRF-CMAQ modeling and observation sites. Indications are shown for Jungnang PBL observation site (blue dot), ASOS & AWS (red dot), and AQMS (green dot) in Seoul metropolitan area.

를 중심으로 동아시아 영역(D01), 한반도 영역(D02), 수도권 영역(D03)으로 구성하였으며, 영역별 수평 격자수는 (동서)×(남북)으로 185×139, 70×85, 64×67이다. 격자 간격은 각각 27 km, 9 km, 3 km이며, 토지 피복 자료는 USGS (United States Geological Survey) 자료이다. 연직으로 총 31개 층으로 설정하였고 대기 하층(약 1 km 이내)은 7개의 층으로, 그리고 최하층의 시그마 값은 0.9965, 최상단 층은 50 hPa이다.

WRF 모델의 초기 및 경계 조건은 NCEP (National Centers for Environmental Prediction)에서 제공하는 6시간 간격의 1°×1° 격자 해상도인 FNL (Final Operational Global Analysis data) 재분석자료를 사용하였다. 모델링 기간은 spin-up time을 포함하여 2019년 02/26 00 UTC~03/08 00 UTC까지이다. 생성된 WRF 기상장은 전처리 프로그램 MCIP (Meteorology Chemistry Interface Processor)를 사용하여 대기질 모의를 위한 입력자료로 변환시켰으며, 연직층은 배출량에 맞추어 15개의 층으로 설정하였다.

대기질 모델인 CMAQ 모델의 초기/경계 조건은 27 km 영역의 경우 CMAQ 패키지 내의 기본 프로파일을, 9 km와 3 km 영역은 아우터 도메인을 사용하였다. 사용된 화학반응식은 기체상 화학반응으로 국내에서 가장 많이 사용되는 것으로 알려진 SAPRC 99 (Carter *et al.*, 1999)를, 에어로졸 모듈로는 AERO 5 (Carlton *et al.*, 2010)를 사용하였다. WRF-CMAQ의 주요 물리

옵션들은 모두 표 1에 정리하였다. 본 연구의 모델에 필요한 배출량 자료는, 인위적 배출량의 경우 국외 지역에 대해 2010년 MICS-ASIA (Model Inter-Comparison Study for Asia; Li *et al.*, 2017), 국내는 2010년 CAPSS (Clean Air Policy Support System; Lee *et al.*, 2011; Kim *et al.*, 2008)를 사용하였고, 자연 배출량은 MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature; Guenther *et al.*, 2006) v2.04 모델을 통해 산출하였다.

3.3 모델 검증

WRF-CMAQ 모델 결과를 검증·평가하기 위해 수도권 전역에 위치한 AWS 29개소 및 종관기상관측소 (Automated Synoptic Observing System, ASOS) 1개소에서 관측된 기상변수 (기온, 상대습도, 풍속)와, AQMS 도시대기측정망 24개소 지점에서 측정된 PM_{2.5} 자료를 수집하여 사용하였다. 관측된 자료는 모델 결과와 비교하여 통계 분석을 수행하였다. 단, PBLH는 관측 자료가 존재한 중랑 지점에 대해서만 평가하였다. 모델 검증을 위해 사용된 통계 검증 지표는 NMB (Normalized Mean Bias Error), NME (Normalized Mean Error), RMSE (Root Mean Square Error), IOA (Index Of Agreement), r (Pearson Correlation Coefficient)이며, 각 통계 지표의 수학적 정의 및 통계 지표별 특성 등 상세 정보는 기존 여러 연구

Table 1. Description of domain and physical/chemical options for WRF-CMAQ modeling.

WRF model domain		
Horizontal resolution	27 km (D01), 9 km (D02), 3 km (D03)	
Horizontal grid	185 × 139 (D01), 70 × 85 (D02), 64 × 67 (D03)	
Vertical layer	31	
Running time	2019/02/26~2019/03/08 (241 hours)	
WRF option		Reference
Microphysics	WSM3 (D01) WDM6 (D02, D03)	Hong <i>et al.</i> , 2004 Lim and Hong, 2006
Longwave radiation	RRTM	Mlawer <i>et al.</i> , 1997
Shortwave radiation	Goddard	Chou <i>et al.</i> , 1994
Planetary boundary layer	YSU MYJ ACM2	Hong <i>et al.</i> , 2006 Janjic, 1994 Pleim, 2007
Cumulus parameterization	Grell-Freitas ensemble	Grell and Freitas, 2013
Land surface	Noah land-surface	Tewari <i>et al.</i> , 2004
Surface layer	Revised MM5 (YSU, ACM2) Eta Similarity (MYJ)	Jimenez <i>et al.</i> , 2012 Janjic, 1994
CMAQ option		
Chemical mechanism	SAPRC 99	Carter <i>et al.</i> , 1999
Aerosol option	AERO 5	Carlton <i>et al.</i> , 2010

결과를 참고하였다(Kim *et al.*, 2020; Emery *et al.*, 2017; NIER, 2017; NIER, 2013; Boylan and Russell, 2006). PM_{2.5} 농도의 화학성분 자료에 대한 검증은 측정된 미세먼지 화학성분 자료가 부족하여서, 본 연구에서는 시간 평균 PM_{2.5} 질량 농도 자료만을 검증에 적용하였다. 마지막으로 SPSS (Statistical Package for the Social Sciences, v28.0)를 이용하여 방안별 모의 결과의 유의수준(p-value)을 통계적으로 판단하였다.

3. 4 미세먼지 모의 농도 오차 및

방안별 편차 분석

본 연구는 세 가지 PBL 방안, 즉 YSU, MYJ, ACM2를 선택하여 대기질 모델에서 모의하는 미세먼지 농도의 차이를 정량적으로 분석하고자 하며, 세 방안별 PM_{2.5} 농도 모의 경향(과소 혹은 과대모의) 이유를 각 PBL 방안별 난류 역학적 차이를 통해 해석하고자 한다. 특히 국지 및 비국지 방안의 난류 특성을 규정하는 이론의 차이에서 유래할 수 있다고 판단하여, 각 방안별 모의되는 PBLH의 오차와 방안별 PM_{2.5} 농도

의 편차가 어느 정도인지 파악하였다. 단, 모의된 PBLH 오차는 주로 비국지, 국지, 혼합 방안의 체계 차이에 의해 설명될 수 있는 차이에서 설명 가능한 것으로 한정하였으며, 각 모수화 방법의 상세 차이, 예를 들면 모수화 함수 내부에 사용된 상사함수(similarity function)의 세부적인 차이 등은 생략하였다. 이외에도 내부적인 난류 계산 함수, 사례 선정, 대상 지역에 따라 유도되는 차이 역시 방안별 이론적 차이에 의한 편차보다 더 크게 나타날 수도 있으므로 관련 후속 연구는 계속 필요할 것으로 판단된다.

4. 연구 결과 및 고찰

4. 1 모델 검증 결과

모델링 기간(spin-up time 제외)의 기상 및 PM_{2.5} 질량 농도의 통계 지표 결과를 표 2에 요약하였다. 기온의 경우 RMSE, IOA, r값이 세 PBL 방안 결과 모두 양호한 결과를 보였으며, 이상의 세 지표로만 평가해

볼 때, 세 방안 중에서 MYJ가 가장 우수하게 모의하였다. 풍속은 YSU와 ACM2의 경우 검증 결과가 유사하였으며, MYJ는 두 방안 대비 NMB, NME, RMSE가 상대적으로 높게 나타나서 국지 방안에서 모의되는 풍속의 개선이 필요해 보였다. 상대습도는 세 방안 모두 높은 IOA, r값으로 양호한 일치도를 보였다. PBLH 또한 모두 상관계수 0.8 이상의 모의 수준을 보였으며, 특히 YSU 실험에서의 NMB 값이 사례 기간 평균 6.1%로서 다른 방안에 비해 가장 낮은 값을 보였고, NME, RMSE, IOA, r 모두 다른 방안에 비해 관측값에 가장 가까운 지표값을 보였다.

PM_{2.5} 농도는 모든 실험에서 NMB가 세 방안 모두 음(-)의 값을 보여 본 사례 기간 세 방안 모두 과소예측되었음을 확인할 수 있었다. 그러나 농도의 공간 및 시간 변동성을 평가하는 IOA와 r값이 각각 0.8 이상과 0.6 이상으로서 상당히 양호한 값이 확인되었다(표 2). 또한 평균 농도를 평가하는 NME, NMB 지표에서는 세 방안 중 MYJ가 YSU와 ACM2에 비해 낮은 모의 능력을 보였으나, r과 IOA 등 변동성을 나타내는 지표에서는 상대적으로 높은 모의 능력을 보임

Table 2. Results of WRF-CMAQ model evaluation by using five statistical parameters.

		NMB	NME	RMSE	IOA	r
T	YSU	9.6	17.1	1.58	0.96	0.94
	MYJ	8.7	14.3	1.35	0.98	0.95
	ACM2	11.1	17.3	1.61	0.96	0.93
WS	YSU	44.7	71.8	1.48	0.64	0.40
	MYJ	72.7	90.3	1.89	0.67	0.51
	ACM2	46.5	71.4	1.49	0.64	0.40
RH	YSU	-13.9	19.5	15.94	0.88	0.78
	MYJ	-6.2	15.8	12.70	0.90	0.82
	ACM2	-15.0	19.6	15.90	0.89	0.79
PBLH	YSU	6.1	35.0	0.26	0.90	0.86
	MYJ	27.9	54.3	0.40	0.83	0.80
	ACM2	20.0	50.5	0.36	0.86	0.87
PM _{2.5}	YSU	-41.0	42.9	53.9	0.78	0.62
	MYJ	-46.3	46.7	55.7	0.80	0.69
	ACM2	-43.4	44.5	53.9	0.81	0.68

NMB, NME (unit: %), RMSE (unit: Temperature (°C), Wind Speed (m/s), Relative Humidity (%), PBL Height (km), PM_{2.5} (µg/m³), IOA, r (no unit)

확인하였다. 본 연구에서는 관측-모델값의 상관성 분석 결과, 모든 방안에서 유의수준 $p < 0.001$ 로 나타나서, 모델이 통계적으로(신뢰수준 99%) 유의미한 결과임을 확인하였다.

4.2 PM_{2.5} 공간 분포 예측 결과

동아시아 영역에서 일평균 PM_{2.5}의 세 방안 앙상블 수평분포와 그 절대편차(앙상블 평균 대비 각 방안의 절대편차 평균)을 바람 벡터와 함께 그림 3에 나타내었다. 그 결과 4일 중국 산둥반도로부터 미세먼지가 남서기류를 통해 한반도로 유입되었고 5일 중국 동부에서 서해안 앞바다까지 고농도 지역이 넓게 분포하는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 특징은 외부 유입에 의해 한반도에서 고농도가 자주 나타난 사례로서, 지상 및 850 hPa 일기도를 통해 그 기압배치임을 확인하였다(NIER, 2018). 주요 이동 경로는 고기압이 위치한 중국 징진지(베이징-톈진-허베이)에서 배출된

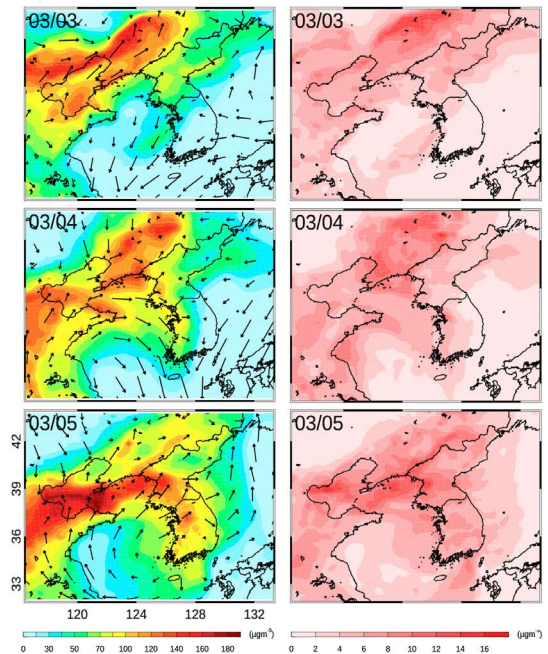


Fig. 3. Horizontal distributions of daily mean PM_{2.5} concentrations and wind vectors simulated by three PBL schemes: YSU, MYJ, ACM2 (left), and their daily mean absolute biases (right) simulated for the period of March 3~5 2019.

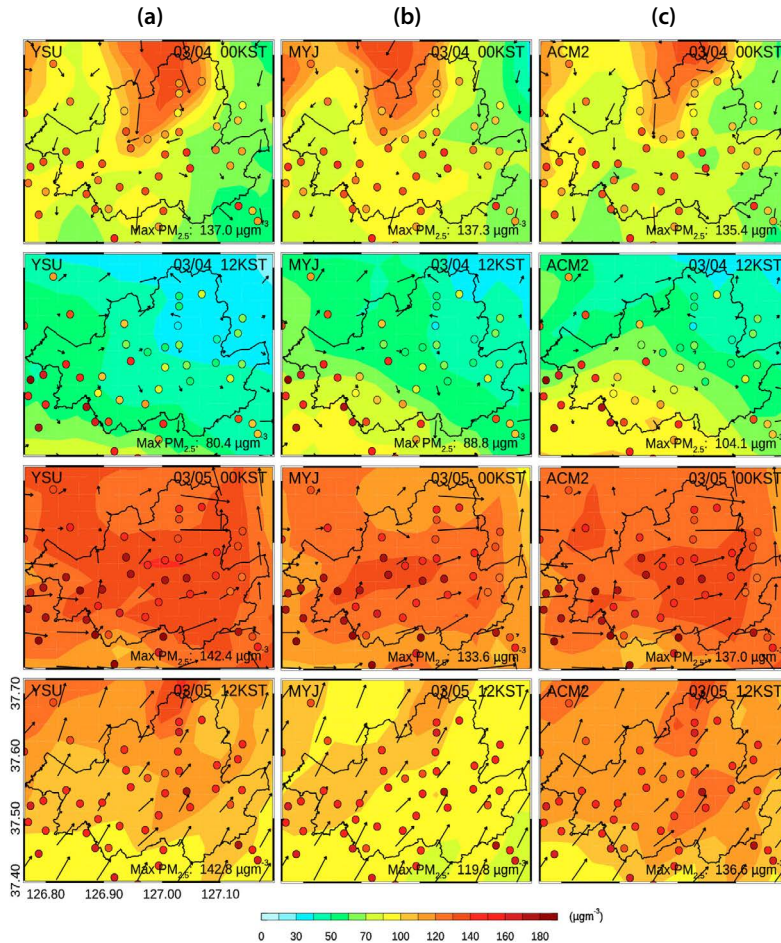


Fig. 4. Horizontal distributions of simulated and observed $PM_{2.5}$ concentrations with wind vectors from three PBL schemes: (a) YSU, (b) MYJ, (c) ACM2 at 00 KST and 12 KST on March 4 and 5 2019. Circle shows observations at AQMS.

오염물질이 상층에서 남서풍을 타고 산둥반도 방향으로 이동한 후, 북서풍(혹은 북풍)에 의해 동북 3성(만주 지역)과 북한을 거쳐 저기압의 영향권에 속하였던 서울로 최종 유입되었다(Woo *et al.*, 2018). 또한 5일에는 한반도 상공 정체 고기압의 영향으로 낮은 풍속이 이어졌고, 따라서 외부 유입 후 정체 현상이 동시에 발생하면서 우리나라 수도권에 초고농도 사례가 발생했던 2015년 2월 4일, 2016년 2월 23일, 2017년 1월 9일 등과 유사한 상층 중관기상 상황임을 확인하였다(NIER, 2018).

방안별 절대편차 평균 분포(그림 3의 우측)는 고농

도 미세먼지가 발생한 지역에서 상대적으로 크게 나타났다. 이는 고농도 발생 시에 PBL 방안에 따른 편차가 크다는 것을 의미하며, 특히 고농도 대기질을 예보함에 있어 PBL 방안 선택에 따른 $PM_{2.5}$ 농도 모의 차이가 크게 나타남을 확인할 수 있었다. 또한 만주 북부 등 자연 배출원이 우세한 지역에서도 편차가 크게 나타나는 점을 감안해 볼 때, 예보 정확도 향상을 위한 배출-기상-대기화학 과정의 각 개별 오차 분석 연구가 우선 필요할 것으로 판단된다.

그림 4에 수도권 지역 및 인근 지역의 3월 4일~5일 00 KST, 12 KST에 모의된 $PM_{2.5}$ 공간분포를 측정자료

(도시대기층정망)와 함께 나타내었다. 4일 00 KST에는 수도권 지역 북쪽에서부터 오염물질이 수송되었으며, 5일에는 비교적 낮은 풍속에 기인하여 국지 배출 영향이 함께 반영된 것으로 분석되었다. 최대농도는 YSU, ACM2, MYJ 순으로 각각 시간평균 $142.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $137.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $133.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 으로 모의되었으며, 상대적으로 높은 농도를 모의한 YSU 결과가 관측과 더 유사하였으나 그 차이는 $9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 정도로서 크지 않았다. 3월 5일 12시에는 남서풍계열의 강한 풍속으로 인해 농도가 낮아지는 것이 모든 실험에서 나타났다. MYJ에서는 풍속을 상대적으로 높게 모의하여 오염물질을 더 빠르게 수송시켰고, 그 결과 5일에는 4일과 달리 다른 방안보다 약 $20 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 정도 더 낮은 최대 농도를 모의하여 방안별 상당한 차이를 보였다. 전반적으로 수도권 지역의 모의된 $\text{PM}_{2.5}$ 공간분포는 전체적인 지역에서 평균적으로 모델이 과소모의하는 분포를 보였으며, 그중 YSU가 소폭 높게 모의되어 상대적으로 관측에 더 근접하는 양상을 보였다(그림 4).

4.3 시계열 분석

그림 5에 분석 지점(중랑구 지점)의 $\text{PM}_{2.5}$ 농도와 PBLH의 모델-측정값 시계열을 나타내었다. 측정 $\text{PM}_{2.5}$ 농도는 4일 18 KST부터 $80 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 이상의 고농도가 지속되었으며, 5일 00 KST까지 시간 평균 최대 $160 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 까지 치솟았다. 이후 농도가 점차 감소하여 6일 오후에 주의보 및 경보가 해제되고 고농도 현상이 해소되었다. 전체적으로 $\text{PM}_{2.5}$ 는 모델이 측정보다 낮게 모의하였으며, 이는 표 2에서도 확인할 수 있었다(NMB -47%~-40%).

방안별 결과를 살펴보면, YSU와 ACM2는 유사한 경향성을 보였고, 국지 방안인 MYJ보다는 상대적으로 소폭 높은 모의 농도를 보였다. 그러나 배출량 등 여러 결정 요인이 다양하게 존재하므로 항목별 구분하여 오차를 정량적으로 분석하여 비교하는 연구가 필요해 보인다. 방안별 전반적인 PBLH 모의 경향은 오후에 MYJ, ACM2는 관측 대비 높게(YSU는 관측치와 유사하거나 소폭 높게), 그리고 새벽에는(3일, 5일

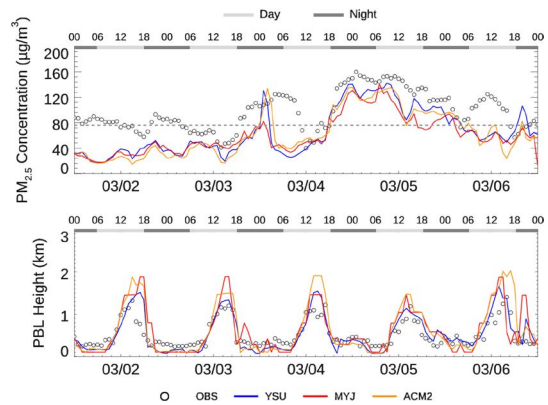


Fig. 5. Time series of $\text{PM}_{2.5}$ concentrations and PBL heights simulated by three PBL schemes: YSU (blue), MYJ (red), ACM2 (yellow), and PBLH observations (black dot) at Jungnang site for the period of March 2~6 2019. Grey dotted line is the $\text{PM}_{2.5}$ concentration corresponding to the “vary bad” atmospheric environment standard value in Korea ($75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$).

MYJ 제외하고는) 관측 대비 모든 방안에서 모델이 낮게 모의하였다(그림 5).

그림 6은 기온, 상대습도, 풍향·풍속의 모델-측정값 시계열을 나타낸 그림이다. 기온은 $1.3\sim 1.6^\circ\text{C}$ 의 매우 낮은 RMSE를 가지며, 관측값과 잘 일치하였으며 상대습도 또한 0.78 이상의 높은 IOA와 r을 보이며 전체적으로 모든 방안에서 우수한 일치도를 확보한 것으로 판단된다(표 2, 그림 6). 그러나 5일과 6일 새벽 시간에 세 방안 모두 상대습도가 높게 모의하는 경향을 보였는데, 이러한 결과는 기온의 과소모의와 전날 풍속의 과대모의 영향으로 수증기 플럭스가 일부 과도하게 유입된 결과로 추정된다. 풍속은 모델이 오후에 높게 모의하는 경향을 보였는데, YSU, ACM2보다 MYJ에서 상대적으로 더 과대모의하는 경향을 보였다. 사례 기간의 $6 \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 이상의 과대모의 풍속은 모두 MYJ에서만 모의되었으며(그림 6, 7c), 이러한 경향은 지표 부근의 난류 생성량과 평균류의 연동 과정에서 지표 가열에 의한 TKE 영향이 상하층 전체가 아닌 특정 고도 값으로 추정하는 국지 방안에서 상당한 풍속 오차가 발생할 수 있음을 간접적으로 유추할 수 있었다. 모든 방안에서 지표 풍속의 전반적인 과대모

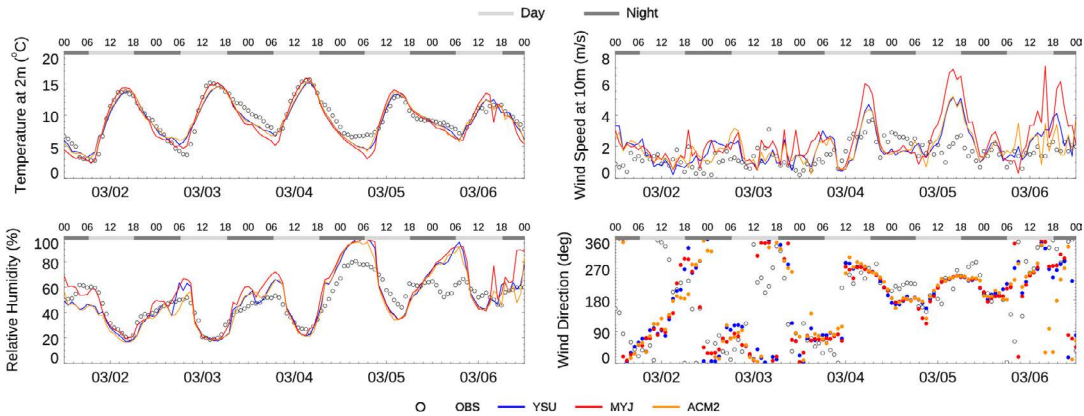


Fig. 6. Time series of meteorological variables: temperature, relative humidity, wind speed, and direction simulated by YSU (blue), MYJ (red), ACM2 (yellow) schemes, and observations (black dot) at Jungnang site for the period of March 2~6 2019.

의 경향은 여러 연구에서도 문제점으로 지적되고 있으며 (Kim *et al.*, 2021; Avolio, 2017; Gunwani and Mohan, 2017; Xie *et al.*, 2012; Hu, 2010), 지형과 지표면 피복 특성 등의 차이, 도시지역 내 아격자(sub-grid) 규모에서의 지표 거칠기 길이 (roughness length)와 경계층 하부의 부정확한 난류 특성 등이 복합적인 오차 요인으로 작용한 것으로 판단된다. 풍향은 관측값과 비교하여 전체적으로 유사한 것으로 판단되나, 일부 차이 또한 확인되었다. 예를 들어 3일 오후 모델은 전반적으로 북풍을 모의하였으나 실제로는 서풍 계열로 관측되었으며, 그 결과, $PM_{2.5}$ 농도의 시계열 (그림 5)에서도 4일 새벽부터 오후까지 농도를 절반 이하로 낮게 모의하는 결과를 보였다. 특정 한 지점의 바람 정보만으로 판단하기에는 무리가 있으나, 풍향의 오차로 인해 오염물질의 이류 방향을 정확히 모의하지 못하여 결국 농도를 과소모의하였을 것으로 추정하였다.

4.4 PBL 방안별 상세 분석

4.4.1 주·야간의 차이점 비교

그림 7, 8은 PBLH 관측자료가 존재하는 중랑 지점의 모델 및 관측 농도 산포도를 주간(그림 7)과 야간(그림 8)으로 나누어 나타낸 그림이며, 표 3은 주·야간 모의 결과를 통계 분석한 결과이다. 본 연구에서는

주간은 12 KST~18 KST, 야간은 00 KST~06 KST로 구분하였으며, 주간의 경우(그림 7) 기온은 MYJ에서 양의 NMB 값을 가지며 과대모의한 반면, YSU와 ACM2는 과소모의하는 경향을 보였다(그림 7a). 상대습도는 세 방안 모두 관측치와 잘 일치하였으며, 상대습도가 높아질수록 관측값과의 오차가 커지는 경향을 확인하였으나(그림 7b), 기온과 상대습도 모두 세 방안 별 편차는 크지 않았다.

반면 풍속의 경우 관측과의 오차는 방안별 상대적으로 크게 나타났으며, 특히 MYJ가 YSU, ACM2보다 2배 이상의 NMB, NME, RMSE 값을 가지며 과대모의하고 있음을 확인하였다(그림 7c). 이는 비국지 방안, 즉 전체 고도의 난류 강도를 고려하여 연직 확산을 결정하는 방법이 본 사례에서는 풍속을 실제에 더 가깝게 모의하는 것으로 나타났다. PBLH는 전체적으로 1~2 km 사이에서 $ACM2 > MYJ > YSU$ 순으로 과대모의하였고 이 중 YSU가 상대적으로 낮은 RMSE를 나타내며 관측값에 가깝게 모의되는 경향을 확인하였다(그림 7d). $PM_{2.5}$ 는 세 방안 모두 농도를 낮게 모의하였고, 그중 YSU가 상대적으로 높은 농도를 모의하였으나 그 폭은 크지 않았다(그림 7e).

야간의 경우(그림 8) 기온은 세 방안 모두 과소모의하고 있었으며, 주간과 반대로 MYJ가 가장 낮은 기온을 모의하여 상대적으로 큰 일변화와 오차를 보였다

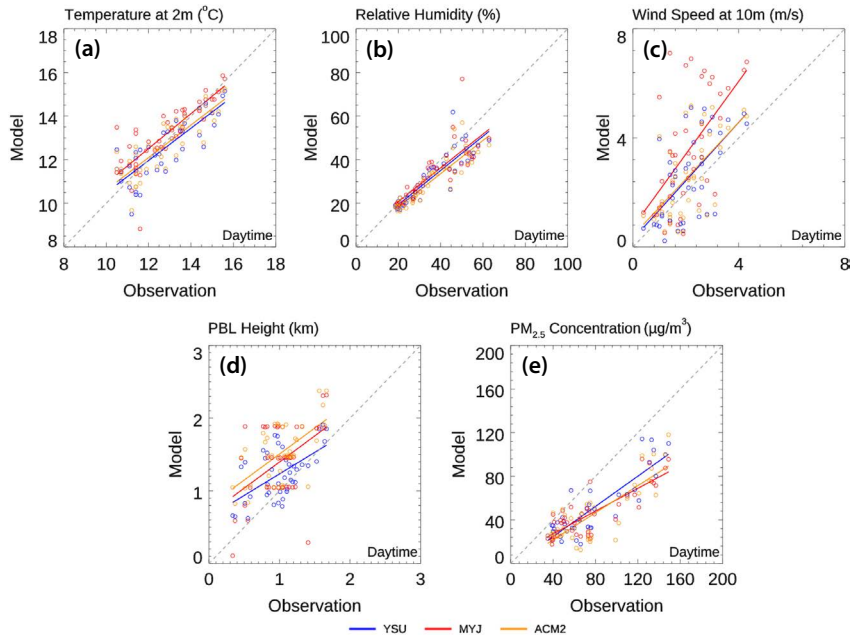


Fig. 7. Scatter diagrams of daytime observations vs simulations for (a) temperature, (b) relative humidity, (c) wind speed, (d) PBL height, and (e) PM_{2.5} concentration at Jungnang site for the period of March 2~6 2019. Circles show the results from YSU (blue), MYJ (red), ACM2 (yellow) schemes, respectively, and daytime is defined as 12 KST~18 KST.

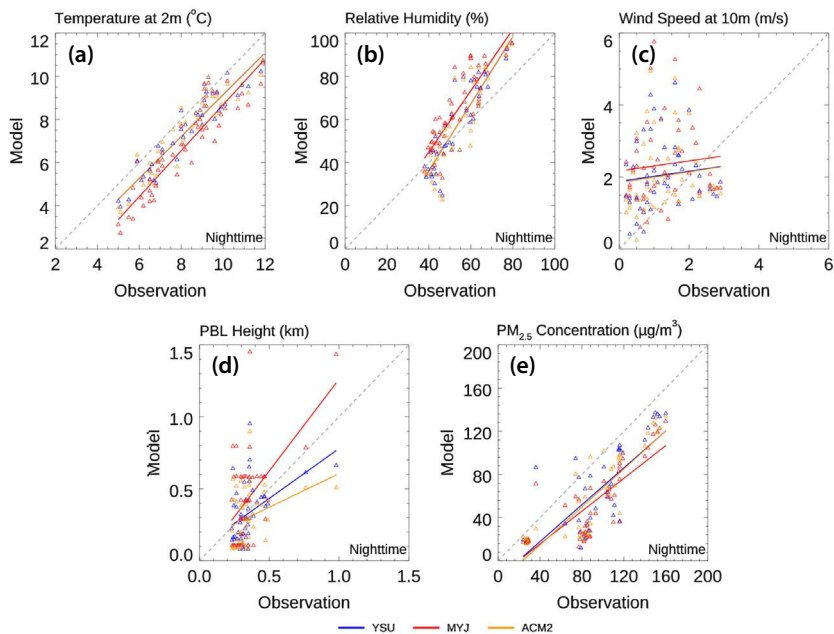


Fig. 8. Scatter diagrams of nighttime observations vs simulations for (a) temperature, (b) relative humidity, (c) wind speed, (d) PBL height, and (e) PM_{2.5} concentration at Jungnang site for the period of March 2~6 2019. Circles show the results from YSU (blue), MYJ (red), ACM2 (yellow) schemes, respectively, and daytime is defined as 00 KST~06 KST.

(그림 8a). 상대습도는 MYJ가 다른 방안들에 비해 2~3배 크게 과대모의하였고(표 3의 NMB), YSU와 ACM2는 낮은 상대습도(약 60% 이하)에서 일부 과소 모의하는 경향도 보였다(그림 8b). 풍속은 주간과 마찬가지로 모든 방안에서 과대모의하고 있었으나, 관측 대비 그 경향을 파악하기 힘들 정도로 상당한 오차를 보였고(그림 8c), $r < 0.1$ 로 나타나 주간과는 달리 상관성을 발견하기 어려운 결과를 보여서 모델 내의 특히 야간 풍속에 대한 개선이 필요할 것으로 사료된다.

야간 PBLH는 주간에 비해 NMB, NME 오차가 크고 모의능력이 떨어지는 것으로 나타났다(그림 8d). 그중에서 YSU, ACM2가 MYJ에 비하여 상대적으로 더 큰 NMB 오차를 보였고, 이러한 통계 결과로부터 비국지 방안이 국지 방안보다 PBLH를 더 과소모의하는 경향을 확인할 수 있었다. 이는 Hong (2010)이 언급했던 야간의 비국지 방안의 PBLH 과소모의 경향과 일치하는 결과로 나타났다. $PM_{2.5}$ 농도에 대해서는 주간과 마찬가지로 세 방안 모두 전체적으로 과소모의하는 수준으로 나타났으며(그림 8e), 특히 비국지 방안은 야간의 낮은 PBLH로 인해 미세먼지 농도가

높아져 측정치와 유사해지는 경향을 일부 확인할 수 있었다.

주간과 야간의 이러한 모의 결과의 차이는 비국지 방안과 국지 방안의 구별된 난류 특성에 의해 일부 설명될 수 있으며, 국지 방안인 MYJ에서 야간에 연직 혼합 강도가 상대적으로 약하게 나타나는 것과 관련이 있는 것으로 판단하였다(Hu *et al.*, 2010). 주간의 경우 열적 난류가 지배적으로, 국지 및 비국지 방안 모두 부력(buoyancy)에 의해 하층으로부터의 열·운동량·수분 속의 수송이 강하여 방안별 차이가 적게 나타날 수 있다. 야간의 경우 시어(shear)에 의한 기계적 난류가 우세하여 작은 에디에 의한 연직 확산은 차이가 적을 가능성이 많으나, 큰 에디의 이유에 의한 연직수송이 발생할 경우 방안별 난류 혼합 방법에 따라 큰 차이가 발생할 가능성이 있다. 즉 국지 방안의 난류 이론에서는 작은 에디에 중점을 두어 큰 에디로 인한 연직 혼합, 예를 들어 큰 에디에 의한 penetrating plume을 고려할 수 없으므로(Xie *et al.*, 2012), 국지 방안인 MYJ가 다른 비국지 방안보다 연직으로 더 적은 혼합을 모의할 가능성이 있으며, 그 결과 PBL 상부에

Table 3. Results of WRF-CMAQ model evaluation at Jungnang station for daytime (12 KST~18 KST) and nighttime (00 KST~06 KST).

		Daytime					Nighttime				
		NMB	NME	RMSE	IOA	r	NMB	NME	RMSE	IOA	r
T	YSU	-1.9	5.6	0.89	0.90	0.82	-10.7	11.6	1.06	0.97	0.94
	MYJ	2.7	5.1	0.94	0.91	0.83	-19.3	19.7	1.74	0.95	0.92
	ACM2	-0.9	5.1	0.81	0.91	0.84	-10.4	11.8	1.08	0.96	0.92
WS	YSU	20.8	48.4	1.28	0.73	0.62	81.8	105.8	1.55	0.40	0.06
	MYJ	68.6	84.1	2.24	0.63	0.58	95.4	115.1	1.69	0.43	0.15
	ACM2	23.6	47.5	1.27	0.74	0.63	85.8	110.1	1.67	0.37	-0.01
RH	YSU	-11.5	14.3	7.20	0.94	0.89	7.6	16.5	10.51	0.87	0.85
	MYJ	-8.0	15.1	8.04	0.90	0.82	22.9	25.5	15.37	0.85	0.80
	ACM2	-15.2	17.4	7.99	0.94	0.90	6.5	18.4	11.28	0.85	0.83
PBLH	YSU	16.4	24.6	0.34	0.79	0.62	-38.4	44.6	0.19	0.83	0.70
	MYJ	36.5	45.3	0.58	0.68	0.47	-22.4	48.7	0.21	0.78	0.73
	ACM2	45.4	47.2	0.57	0.77	0.59	-50.5	53.7	0.22	0.82	0.68
$PM_{2.5}$	YSU	-34.7	35.3	31.34	0.92	0.87	-34.7	37.7	36.91	0.91	0.82
	MYJ	-39.5	39.8	36.28	0.86	0.83	-41.4	42.9	39.83	0.91	0.84
	ACM2	-42.0	42.4	37.64	0.88	0.82	-36.9	37.5	35.90	0.93	0.87

서의 유입이 적게 모의될 수 있다. 본 연구에서도 야간에 NMB를 살펴보면 MYJ는 YSU, ACM2보다 기온을 더 과소모의하였으며, 그 결과 포화 수증기압이 낮아져 상대습도를 2~3배 더 높게 모의하는 경향을 확인하였다(표 3).

4.4.2 주·야간 모의 결과 오차율 분석

농도가 가장 높았던 5일에 대하여 중랑 지점의 PM_{2.5} 농도와 PBLH의 시간별 관측·모델값 및 그 오차율을 그림 9에 제시하였다. 여기서 오차율은 $\frac{(M-O)}{O} \times 100$ (%)이다 (M: 모델값, O: 관측값). PM_{2.5}는 당일 01 KST에 가장 높게 측정되었으나, 모델에서는 다소 늦은 시간인 07 KST~09 KST에서 최고농도가 모의되었다. PM_{2.5} 농도 오차율은 모두 음(과소모의)의 값을 보였다. 오차가 가장 큰 시간대는 YSU, MYJ, ACM2 순서로 각각 14 KST, 19 KST, 14 KST (-41%, -48%, -54%)였으며, 이는 대부분 주간에 발생하였다. PBLH는 오후 최고, 새벽 최저의 뚜렷한 일변화를 모의하는 가운데, 방안별 오차는 야간에 훨씬 크게 나타났다. 밤에는 MYJ (232%) > YSU (167%) > ACM2 (136%) 순서로 과대모의하는 오차율을 나타내며, 모두 22 KST에서 최대 오차율을 보였다. 그러나 새벽 시간(03 KST~06 KST)에는 한밤중(22 KST)과는 달리, 일부 과소모

의 경향이 확인되었으며, 전반적으로 야간 PBLH에 대한 모의 정확도를 확보하는 연구가 필요해 보인다.

한편, PBLH와 관련해서는 주간에 과대모의가 나타나며, 이에 따른 강한 연직 혼합이 지상 미세먼지 농도의 과소모의 경향을 유발할 가능성이 있는 것으로 해석하였다. 특히, 광화학반응이 활발한 시간(12 KST~15 KST)에 상대적으로 더 큰 오차율이 나타나 2차 광화학 미세먼지 생성 과정에서 발생하는 불확도가 혼재한 상황으로 보이며, 5일 오후(12시경)에 다소 과대모의된 기온 및 풍속과, 과소모의된 상대습도로 부터 유도되는 등 복합적인 요인이 불확실성을 높이는 인자로 작용한 것으로 판단된다(그림 6).

주·야간 오차율을 더 자세히 분석하기 위하여, 주간의 미세먼지 2차 생성 최고조 시간과 심야(새벽) PBL 최저 고도 시간대로 좁혀서 오차율을 분석하였다. 주간에 활발한 광화학 반응이 발생하는 시간(12 KST~15 KST)을 T1, 새벽~일출 직전인 심야시간(03 KST~06 KST)을 T2로 정의하여 시간별 변화를 분석하였다(그림 9). 그 결과 모의된 PBLH는 광화학 피크 시간대인 T1에서 평균적으로 ACM2 (63.2%) > MYJ (51.5%) > YSU (32.0%) 순으로 과대모의를, 심야시간대인 T2에서 YSU (-56.0%) > ACM2 (-51.2%) > MYJ (-30.7%) 순으로 과소모의를 보였다. 이에 따른 PM_{2.5} 농도는 T1에서 MYJ (-38.3%) > ACM2 (-37.1%) > YSU (-32.0%) 순으로 과소모의, T2에서 MYJ (-19.7%) > ACM2 (-18.9%) > YSU (-8.0%) 순으로 인해 PBLH가 높은 T1에서 세 방안 모두 PM_{2.5} 오차가 큰 것으로 나타났다. 또한, 대기가 불안정한 시간대인 T1에서는 큰 에디에 의한 확산을 포함시켜 난류를 모수화하는 YSU에서 PBLH의 모의 정확도가 높은 반면, 비교적 대기가 안정한 시간대인 T2에서는 인접한 층을 고려하여 난류 혼합을 계산하는 국지 방안인 MYJ의 정확도가 높았다는 점이 주목할 만하였다. 그러나 T2에서 MYJ가 더 정확한 PBLH를 모의함에도 불구하고 여전히 야간 PM_{2.5}에 대한 오차는 큰 것으로 나타났으며, 이는 MYJ에서 다른 방안들보다 상대적으로 풍속을 더 크게 모의한 것이 주요 원인으로 본 연구에서는 해석하였다.

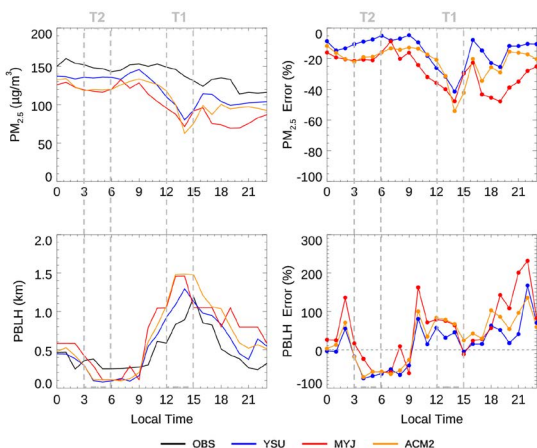


Fig. 9. Time series of PM_{2.5} concentrations, PBL heights (left) and their error ranges (right) on March 5 2019.

Table 4. Summary of simulated PM_{2.5} concentrations and PBL heights simulated by three different PBL schemes; YSU, MYJ, and ACM2, during daytime (12 KST~18 KST) and nighttime (00 KST~06 KST) on March 4~5.

		Daytime	Nighttime	Daily average	Daily maximum
PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	OBS	99.2	106.3	120.5	154.0
	YSU	74.4	102.7	87.7	139.4
	MYJ	67.4	89.8	78.4	124.8
	ACM2	70.8	101.6	85.7	130.6
	Bias (%)	9.9%	13.2%	11.1%	11.1%
PBLH (m)	OBS	1093.6	242.4	516.7	1205.5
	YSU	1285.5	123.7	592.3	1529.2
	MYJ	1422.6	190.3	680.6	1676.2
	ACM2	1208.0	249.3	599.0	1703.3
	Bias (%)	16.4%	66.9%	14.1%	10.6%

4.4.3 방안별 주·야간 및 일평균 모의 능력 편차 비교

고농도 발생 2일간(3월 4~5일) 방안별 PM_{2.5} 및 PBLH의 통계 평가 결과를 표 4에 요약하였다. 세 방안별 일평균 농도는 YSU, MYJ, ACM2 순서대로 87.7 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 78.4 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 85.7 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 로 최대 9.3 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 차이를 나타내며, 세 방안의 앙상블 평균 대비 농도 편차는 11.1%로 나타났다. 주간과 야간으로 나누어 분석하였을 경우, 주간 평균 9.9%, 야간 평균 13.2%의 편차가 나타났으며 야간의 PM_{2.5} 모의에 대한 방안별 편차가 상대적으로 매우 크게 나타남을 확인할 수 있었다. 최고농도는 세 방안 평균 131.6 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 였으며, 최고농도 대비 방안별 편차는 평균 11.1% 정도로 계산되었다. PBLH 편차는 주간 평균 16.4%, 야간 평균 66.9%였으며, 이 또한 주간에 비해 야간에 방안별 편차가 매우 크게 나타나 야간 PBLH 개선의 필요성을 확인하였다. 이러한 차이는 PBLH 모의 및 고농도 사례 시의 방안별 농도 변동 수준을 파악할 수 있어, 대기질 예보에 있어 PBL 방안 선택의 중요성을 나타내며 WRF 모델링을 수행할 때 PBL 옵션 선택 시 참고해야 할 수치로 판단된다.

본 연구는 하나의 고농도 사례에 대한 제한적 사례 연구임에도 불구하고, 미세먼지 예보 정확도 개선 연구로서 몇 가지 시사점을 확인하였다. 특히 수도권 초

고농도 사례에서 모델의 미세먼지 농도 과소모의는 기상요소인 풍속-풍향의 불일치에서 오는 오차가 흔한 상황이나, 방안별 PBLH 및 PM_{2.5}의 오차 수준을 일평균 및 주·야간 시간대로 구분한 결과 그 특징을 어느 정도 정량적으로 파악할 수 있었다. 오후의 강한 일사량에 의한 연직 확산 능력의 향상으로 과대모의된 PBLH가 오염물질 재분배 능력에 밀접한 영향을 미쳤으며, 새벽 시간에 PBLH 과소모의는 모든 방안에서 문제점으로 지적될 수 있음을 확인하였다. 야간의 PBLH 모의 결과 또한 그 불확도가 상당함을 확인하였으며, 방안 사이의 편차도 큰 것으로 나타났다. 따라서 향후 야간 PBLH를 개선하는 모델링 연구와 함께, 고도별 상세 난류 강도 입체 관측 등을 통한 PBLH 불확도를 규명하는 연구가 매우 중요할 것으로 판단된다.

5. 요약 및 결론

본 연구는 WRF-CMAQ 기반으로 PBL에 대한 민감도 실험을 수행하여 PBLH와 PM_{2.5}의 오차를 분석하였다. PBL 방안은 국내에서 주로 사용하는 옵션인 YSU, MYJ, ACM2를 선택하였고, 모델링은 2019년 2월 26일~3월 8일까지 수행하였으며, 집중 분석 지점으로 PBLH 관측이 수행된 수도권 지역의 중랑구(127.02°E, 37.59°N) 지역을 선정하였다.

PBLH는 대기가 불안정한 시간대에는 비국지 방안인 YSU에서 모의 정확도가 상대적으로 높은 반면, 비교적 안정한 심야에는 국지 방안인 MYJ의 정확도가 상대적으로 높게 나타났다. 이는 전반적으로 YSU는 PBL 내에서 큰 에디를 고려하며, 열적으로 생성된 난류를 통해 열·운동량·수분을 연직으로 확산시키는 메커니즘으로 주간 PBL 성장 모의 능력이 우수한 반면 MYJ는 국지 혼합만을 고려하여 PBL을 성장시켜 약한 혼합을 모의하는 등의 난류 혼합 특성 차이에 기인한 것으로 해석하였다. 하지만, 모든 모델에서 새벽에 PBLH를 과소모의하였으며, 야간에는 방안별 모의 편차 또한 크게 나타나 새벽을 포함한 야간 PBLH를

개선하는 연구가 필요할 것으로 판단된다.

PBL 방안에 따른 $PM_{2.5}$ 농도 및 기상변수의 시간변화 경향을 살펴본 결과, 관측과 모델이 높은 일치도를 보였으며, 시간별·방안별 차이 또한 확인되었다. 특히 주간보다는 야간에 국지 방안과 비국지 방안별 차이가 크게 나타났음을 확인하였는데, 이는 큰 에디를 고려하기 어려운 국지 방안인 MYJ의 특성이 일부 반영된 것으로 판단하였다. 그 결과 연직 혼합 강도가 국지 방안에서 상대적으로 약하게 모의하였고, 이로 인해 특히 야간에 낮은 기온 → 포화 수증기압 감소 → 상대습도 증가 현상으로 모의되는 것을 확인하였다.

최종 결과인 $PM_{2.5}$ 농도를 통계적으로 검증해 본 결과, 전반적으로 $PM_{2.5}$ 는 모든 방안에서 모델이 과소 모의하였던 것으로 나타났으나, IOA와 r값이 각각 0.5, 0.7을 보이는 등 본 연구의 신뢰도를 확보할 수 있었으며, 모델과 관측의 유의성 검증 결과 $p < 0.001$ 로 모델이 통계적으로 유의미함을 확인하였다. 본 사례 기간에는 세 방안 중에서는 YSU가 상대적으로 높은 농도를 모의하면서 관측과 더 일치하는 경향을 보였으나 그 폭은 크지 않았다. $PM_{2.5}$ 공간분포 모의 경향 또한, YSU에서 상대적으로 고농도가 나타난 면적이 더 넓게 분포하고 있어 관측값과 유사한 경향을 보였다. 또한 고농도 당일에는 심야보다 주간 광화학 최고 조 시간에 $PM_{2.5}$ 농도 오차가 훨씬 더 크게 나타남을 확인할 수 있었는데, 결국 광화학 반응에 의한 미세먼지의 2차 생성 모의 과정에서의 오차와 주간 PBLH 과대모의로 인한 불확도가 혼재하는 것으로 해석되며, 따라서 물리 및 화학적 과정을 세분화하여 불확도 평가를 수행할 필요가 있을 것으로 판단된다.

본 연구는 2019년 3월 수도권에서 발생한 초고농도 사례에 국한된 결과로, 비수도권역에서는 지역 특성이 상이하게 나타날 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 대기질 예보의 정확도를 향상시키기 위해서는 지표 및 지형 특성 등 난류 강도에 영향을 미치는 지역별 상황을 적절히 고려하여 PBL 방안을 선택하는 것이 중요하므로, 장기간의 연구 기간과 관측 지역 등을 확장시켜 지역별 경계층에 대한 민감도 연구를 수행할

필요가 있을 것으로 사료되며, 특히 야간의 경우 PBLH 모의 정확도가 주간에 비해 현저히 떨어지는 점에서 우리나라 야간 대기경계층의 이해와 개선 연구가 향후 매우 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2020년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No. 2020R1I1A2075417)입니다. 본 논문을 세심하게 심사해 주신 심사위원분께 감사드립니다.

References

- Ahasan, M.N., Chowdhury, M.A.M., Quadir, D.A. (2014) Sensitivity test of parameterization schemes of MM5 model for prediction of the high impact rainfall events over Bangladesh, *Journal of Mechanical Engineering*, 44(1), 33-42. <https://doi.org/10.3329/jme.v44i1.19496>
- Andre, J.C., Moor, G.D., Lacarrere, P., Thery, G., Vachat, R.D. (1978) Modeling the 24-hour evolution of the mean and turbulent structures of the Planetary Boundary Layer, *Journal of the Atmospheric Science*, 35(10), 1861-1883. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1978\)035<1861:MTHEOT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1978)035<1861:MTHEOT>2.0.CO;2)
- Avolio, E., Federico, S., Miglietta, M.M., Feudo, T.L., Calidonna, C.R., Sempreviva, A.M. (2017) Sensitivity analysis of WRF model PBL schemes in simulating boundary-layer variables in southern Italy: An experimental campaign, *Atmospheric Research*, 192, 58-71. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.04.003>
- Bougeault, P., Lacarrere, P. (1989) Parameterization of orography-induced turbulence in a mesobeta-scale model, *Monthly Weather Review*, 117(8), 1872-1890. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1989\)117<1872:POOITI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1989)117<1872:POOITI>2.0.CO;2)
- Boylan, J.W., Russell, A.G. (2006) PM and light extinction model performance metrics, goals, and criteria for three-dimensional air quality models, *Atmospheric Environment*, 40(26), 4946-4959. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.09.087>

- Bretherton, C.S., Park, S. (2009) A new moist turbulence parameterization in the community atmosphere model, *Journal of Climate*, 22(12), 3422-3448. <https://doi.org/10.1175/2008JCLI2556.1>
- Carlson, T.N., Boland, F.E. (1978) Analysis of urban-rural canopy using a surface heat flux/temperature model, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 17(7), 998-1013. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1978\)017<0998:AOURCU>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1978)017<0998:AOURCU>2.0.CO;2)
- Carlton, A.G., Bhave, P.V., Napelenok, S.L., Edney, E.O., Sarwar, G., Pinder, R.W., Pouliot, G.A., Houyoux, M. (2010) Model representation of secondary organic aerosol in CMAQv4.7, *Environmental Science & Technology*, 44, 8553-8560. <https://doi.org/10.1021/es100636q>
- Carter, W.P.L. (1999) Documentation of the SAPRC-99 chemical mechanism for VOC reactivity assessment: Final report to California Air Resources Board, Contract 92-329 and Contract 95-308, Center for Environmental Research and Technology, University of California: Riverside, CA.
- Chou, M.D., Suarez, M.J. (1994) An efficient thermal infrared radiation parameterization for use in general circulation models, *NASA Technical Memorandum* 104606 3, 85.
- Cohen, A.E., Cavallo, S.M., Coniglio, M.C., Brooks, H.E. (2015) A review of planetary boundary layer parameterization schemes and their sensitivity in simulating southeastern U.S. cold season severe weather environments, *Weather and Forecasting*, 30(3), 591-612. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-14-00105.1>
- Coniglio, M.C., Correia, J.Jr., Marsh, P.T., Kong, F. (2013) Verification of convection-allowing WRF model forecasts of the Planetary Boundary Layer using sounding observations, *Weather and Forecasting*, 28(3), 842-862. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-12-00103.1>
- Dzebre, D.E.K., Adaramola, M.S. (2020) A preliminary sensitivity study of Planetary Boundary Layer parameterisation schemes in the weather research and forecasting model to surface winds in coastal Ghana, *Renewable Energy*, 146, 66-86. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.133>
- Emery, C., Liu, Z., Russell, A.G., Odman, M.T., Yarwood, G., Kumar, N. (2017) Recommendations on statistics and benchmarks to assess photochemical model performance, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 67(5), 582-598. <https://doi.org/10.1080/10962247.2016.1265027>
- García-Díez, M., Fernández, J., Fita, L., Yagüe, C. (2013) Seasonal dependence of WRF model biases and sensitivity to PBL schemes over Europe, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 139(671), 501-514. <https://doi.org/10.1002/qj.1976>
- Grell, G.A., Freitas, S.R. (2013) A scale and aerosol aware stochastic convective parameterization for weather and air quality modeling, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14, 5233-5250. <https://doi.org/10.5194/acp-14-5233-2014>
- Guenther, A., Karl, T., Harley, P., Wiedinmyer, C., Palmer, P.I., Geron, C. (2006) Estimates of global terrestrial isoprene emissions using MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosol from Nature), *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6(11), 3181-3210. <https://doi.org/10.5194/acp-6-3181-2006>
- Gunwani, P., Mohan, M. (2017) Sensitivity of WRF model estimates to various PBL parameterizations in different climatic zones over India, *Atmospheric Research*, 194, 43-65. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.04.026>
- Hong, S.Y., Pan, H.L. (1996) Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model, *Monthly Weather Review*, 124(10), 2322-2339. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1996\)124<2322:NBLVDI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1996)124<2322:NBLVDI>2.0.CO;2)
- Hong, S.Y., Dudhia, J., Chen, S.H. (2004) A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of cloud and precipitation, *Monthly Weather Review*, 132(1), 103-120. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2004\)132<0103:ARATIM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2004)132<0103:ARATIM>2.0.CO;2)
- Hong, S.Y., Noh, Y., Dudhia, J. (2006) A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes, *Monthly Weather Review*, 134(9), 2318-2341. <https://doi.org/10.1175/MWR3199.1>
- Hong, S.Y. (2010) A new stable boundary-layer mixing scheme and its impact on the simulated East Asian summer monsoon, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 136(651), 1481-1496. <https://doi.org/10.1002/qj.665>
- 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(9), 1831-1844. <https://doi.org/10.1175/2010JAMC2432.1>
- Janjic, Z.I. (1994) The step-mountain eta coordinate model: further developments of the convection, viscous sub-layer, and turbulence closure schemes, *Monthly Weather Review*, 122(5), 927-945. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1994\)122<0927:TSMECM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1994)122<0927:TSMECM>2.0.CO;2)
- Jeong, J.H., Oh, I.B., Kang, Y.H., Bang, J.H., An, H.Y., Seok, H.B., Kim,

- Y.K., Hong, J.H., Kim, J.Y. (2016) WRF modeling approach for improvement of air quality modeling in the Seoul metropolitan region: Seasonal sensitivity analysis of the WRF physics options, *Journal of Environmental Science International*, 25(1), 67-83, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5322/JESI.2016.25.1.67>
- Jia, W., Zhang, X. (2020) The role of the Planetary Boundary Layer parameterization schemes on the meteorological and aerosol pollution simulations: A review, *Atmospheric Research*, 239, 104890. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.104890>
- Jimenez, P.A., Dudhia, J., Gonzalez-Rouco, J.F., Navarro, J., Montavez, J.P., Garcia-Bustamanete, E. (2011) A revised scheme for the WRF surface layer formulation, *Monthly Weather Review*, 140(3), 898-918. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-11-00056.1>
- Kim, C.H., Lee, S.H., Jang, M., Chun, S.N., Kang, S.J., Ko, K.K., Lee, J.J., Lee, H.J. (2020) A study on statistical parameters for the evaluation of regional air quality modeling results, *Journal of Environmental Impact Assessment*, 29(4), 272-285, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.14249/eia.2020.29.4.272>
- Kim, C.H., Meng, F., Kajino, M., Lim, J.H., Tang, W., Lee, J.J., Kiriya, Y., Woo, J.H., Sato, K., Kitada, T., Minoura, H., Kim, J.Y., Lee, K.B., Roh, S., Jo, H.Y., Jo, Y.J. (2021) Comparative numerical study of PM_{2.5} in exit-and-entrance areas associated with transboundary transport over China, Japan, and Korea, *Atmosphere*, 12(4), 469. <https://doi.org/10.3390/atmos12040469>
- Kim, S.T., Moon, N.K., Byun, D.W. (2008) Korea emissions inventory processing using the US EPA's SMOKE System, *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 2(1), 34-46. <https://doi.org/10.5572/ajae.2008.2.1.034>
- Lee, D.G., Lee, Y.M., Jang, K.W., Yoo, C., Kang, K.H., Lee, J.H., Jung, S.W., Park, J.M., Lee, S.B., Han, J.S., Hong, J.H., Lee, S.J. (2011) Korean national emissions inventory system and 2007 air pollutant emissions, *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 5(4), 278-291. <https://doi.org/10.5572/ajae.2011.5.4.278>
- Lee, H.J., Jo, H.Y., Kim, S.W., Park, M.S., Kim, C.H. (2019) Impacts of atmospheric vertical structures on transboundary aerosol transport from China to South Korea, *Scientific Reports*, 9, 13040. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-49691-z>
- Li, M., Zhang, Q., Kurokawa, J., Woo, J.H., He, K.B., Lu, Z., Ohara, T., Song, Y., Streets, D.G., Carmichael, G.R., Cheng, Y.F., Hong, C.P., Huo, H., Jiang, X.J., Kang, S.C., Liu, F., Su, H., Zheng, B. (2015) MIX: a mosaic Asian anthropogenic emission inventory for the MICS-Asia and the HTAP projects, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(2), 935-964. <https://doi.org/10.5194/acp-17-935-2017>
- Li, Z., Guo, J., Ding, A., Liao, H., Liu, J., Sun, Y., Wang, T., Xue, H., Zhang, H., Zhu, B. (2017) Aerosol and boundary-layer interactions and impact on air quality, *National Science Review*, 4, 810-833. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwx117>
- Lim, A.Y., Roh, J.W., Jee, J.B., Choi, Y.J. (2015) Sensitivity experiments of vertical resolution and Planetary Boundary Layer parameterization schemes on the Seoul metropolitan area using WRF Model, *Journal of the Korean Earth Science Society*, 36(6), 553-566, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5467/JKESS.2015.36.6.553>
- Lim, K.S.S., Hong, S.Y. (2010) Development of an effective double-moment cloud microphysics scheme with prognostic cloud condensation nuclei (CCN) for weather and climate models, *Monthly Weather Review*, 138(5), 1587-1612. <https://doi.org/10.1175/2009MWR.2968.1>
- Miao, Y., Liu, S., Guo, J., Huang, S., Yan, Y., Lou, M. (2018) Unraveling the relationships between boundary layer height and PM_{2.5} pollution in China based on four-year radiosonde measurements, *Environmental Pollution*, 243, 1186-1195. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.09.070>
- Mlawer, E.J., Taubman, S.J., Brown, P.D., Iacono, M.J., Clough, S.A. (1997) Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102(14), 16663-16682. <https://doi.org/10.1029/97JD00237>
- 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, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2011.27.6.791>
- Nakanishi, M., Niino, H. (2006) An improved Mellor-Yamada level-3 model: its numerical stability and application to a regional prediction of advection fog, *Boundary-Layer Meteorology*, 119, 397-407. <https://doi.org/10.1007/s10546-005-9030-8>
- 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 (NIER) (2017) A study for improvement of accuracy on numerical air quality forecasting model (III).

- National Institute of Environmental Research (NIER) (2018) A study on developing conceptual models to improve forecast accuracy for high-concentration particulate matter (PM_{2.5}) events (I).
- Pleim, J.E. (2007) A combined local and nonlocal closure model for the atmospheric boundary layer. Part I: model description and testing, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 46(9), 1383-1395. <https://doi.org/10.1175/JAM2539.1>
- Seaman, N.L. (2000) Meteorological modeling for air-quality assessments, *Atmospheric Environment*, 34, 2231-2259. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00466-5](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00466-5)
- Seo, B., Byon, J., Choi, Y. (2010) Sensitivity Evaluation of Wind Fields in Surface Layer by WRF-PBL and LSM Parameterization, *Korean Meteorological Society*, 20(3), 319-332, (in Korean with English abstract).
- Shin, H.H., Hong, S.Y. (2011) Intercomparison of Planetary Boundary-Layer parameterizations in the WRF model for a single day from CASE5-99, *Boundary-Layer Meteorology*, 139, 261-281. <https://doi.org/10.1007/s10546-010-9583-z>
- Skamarock, W.C., Klemp, J.B., Dudhia, J., Gill, D.O., Barker, D.M., Duda, M.G., Huang, X.Y., Wang, W., Powers, J.G. (2008) A description of the advanced research WRF version 3, NCAR Technical Note, TN-475_STR, 113pp.
- Stull, R.B. (1988) *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Paper No. 197-240. 6.
- Sukoriansky, S., Galperin, B., Perov, V. (2005) Application of a new spectral theory of stably stratified turbulence to the atmospheric boundary layer over sea ice, *Boundary-Layer Meteorology*, 117, 231-257. <https://doi.org/10.1007/s10546-004-6848-4>
- Tewari, M., Chen, F., Wang, W., Dudhia, J., Lemone, M.A., Mitchell, K., Ek, M., Gayno, G., Wegiel, J., Cuenca, R.H. (2004) Implementation and verification of the unified NOAA land surface model in the WRF model (Formerly Paper Number 17.5), in: 20th Conference on Weather Analysis and Forecasting/16th Conference on Numerical Weather Prediction, NCAR, 11-15.
- Woo, J.H., Bu, C.J., Kim, J.S., Ghim, Y.S., Kim, Y.H. (2018) Analysis of regional and inter-annual changes of air pollutants emissions in China, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(1), 88-100. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2018.34.1.087>
- Xie, B., Fung, J.C.H., Chan, A., Lau, A. (2012) Evaluation of nonlocal and local Planetary Boundary Layer schemes in the WRF model, *Journal of Geophysical Research*, 117. <https://doi.org/10.1029/2011JD017080>
- Zhang, D.L., Zheng, W.Z. (2004) Diurnal cycles of surface winds and temperatures as simulated by five boundary layer parameterizations, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 43(1), 157-169. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2004\)043<0157:DCOSWA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2004)043<0157:DCOSWA>2.0.CO;2)
- Zhong, J., Zhang, X., Wang, Y., Wang, J., Shen, X., Zhang, H., Wang, T., Xie, Z., Liu, C., Zhang, H., Zhao, T., Sun, J., Fan, S., Gao, Z., Li, Y., Wang, L. (2019) The two-way feedback mechanism between unfavorable meteorological conditions and cumulative aerosol pollution in various haze regions of China, *Atmospheric Chemistry Physics*, 19, 3287-3306. <https://doi.org/10.5194/acp-19-3287-2019>
- Zilitinkevich, S. (1995) Non-local turbulent transport: pollution dispersion aspects of coherent structure of convective flows, *Air Pollution III Volume 1 Air Pollution Theory and Simulation*, 9, 53-60. <https://doi.org/10.2495/AIR950071>

Authors Information

정소연 (부산대학교 대기환경과학과 석사과정)

김철희 (부산대학교 대기환경과학과 교수)