Journal of Korean Society for Atmospheric Environment
Vol. 33, No. 6, December 2017, pp. 554-569
https://doi.org/10.5572/KOSAE.2017.33.6.554
p-ISSN 1598-7132, e-ISSN 2383-5346

CMAQ 모델링을 통한 초기 기상장에 대한 미세먼지 농도 예측 민감도 연구

Sensitivity Study of the Initial Meteorological Fields on the PM_{10} Concentration Predictions Using CMAQ Modeling

조유진 · 이효정 · 장임석[1)] · 김철희*
부산대학교 대기환경과학과, [1)]국립환경과학원 대기질 통합예보센터

(2017년 7월 31일 접수, 2017년 9월 20일 수정, 2017년 11월 7일 채택)

Yu-Jin Jo, Hyo-Jung Lee, Lim-Seok Chang[1)] and Cheol-Hee Kim*
Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University
[1)]Air Quality Forecasting Center, National Institute of Environmental Research

(Received 31 July 2017, revised 20 September 2017, accepted 7 November 2017)

Abstract

Sensitivity analysis on PM_{10} forecasting simulations was carried out by using two different initial and boundary conditions of meteorological fields: NCEP/FNL (National Centers for Environmental Prediction/Final Analysis) reanlaysis data and NCEP/GFS (National Centers for Environmental Prediction/Global Forecast System) forecasting data, and the comparisons were made between two different simulations. The two results both yielded lower PM_{10} concentrations than observations, with relatively lower biased results by NCEP/FNL than NCEP/GFS. We explored the detailed individual meteorological variables to associate with PM_{10} prediction performance. With the results of NCEP/FNL outperforming GFS, our conclusion is that no particular significant bias was found in temperature fields between NCEP/FNL and NCEP/GFS data, while the overestimated wind speed by NCEP/GFS data influenced on the lower PM_{10} concentrations simulation than NCEP/FNL, by decreasing the duration time of high-PM_{10} loaded air mass over both coastal and metropolitan areas. These comparative characteristics of FNL against GFS data such as maximum 3~4 m/s weaker wind speed, PM_{10} concentration control with the highest possible factor of 1.3~1.6, and one or two hour difference of peak time for each case in this study, were also reflected into the results of statistical analysis. It is implying that improving the surface wind speed fluctuation is an important controlling factor for the better prediction of PM_{10} over Korean Peninsula.

Key words : PM_{10} forecast, Initial meteorological field, Sensitivity test

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

1. 서 론

미세먼지, 오존 등의 대기질 예보를 위해서는 기상-배출량-화학모델링을 포함한 3차원 모델링 시스템이 필수적이다. 우선 기상모델을 이용하여 모의하고자 하는 영역의 3차원 기상장을 모의하고 대기질 모델에 필요한 시간별 및 종별 배출량 자료를 생성해야 한다. 이렇게 확보된 3차원 기상장과 각 화학종별 배출량 자료를 대기화학수송모델의 입력자료로 사용하여 시간별 대기질 농도를 예측할 수 있다. 이러한 입력자료들과 더불어 대기의 물리화학 작용의 수식화와 수치해석 방법 등에서 오차가 발생할 수 있으며 따라서 매우 다양한 인자들이 대기질 모델의 결과에 영향을 주는 불확도 유발 인자로 작용하게 된다(Kim *et al*., 2014).

대기질에 영향을 미치는 기상 요인은 다양하다. 대기오염물질의 수평으로 얼마나 수송되느냐를 결정하는 대기경계층 내의 수평 풍속 인자와, 연직으로 얼마만큼 확산되느냐를 결정하는 대기경계층 고도 등의 기본 기상변수가 있으며, 지상에서의 기온 인자는 광화학 반응의 강도에 깊이 관여한다. 또한 대기화학수송모델 자체의 물리 · 화학적 매개변수의 불확실성 등 기상 및 화학적 불확도 인자는 여러 가지가 있다. 이상의 다양한 불확도 유발 기상 인자들을 규명하고 이를 개선하는 모델링 연구는 대기질 예보율 확보를 위해 대단히 중요한데, 이들 인자들 중에서 한반도를 포함하는 지역규모 예보에 있어서 중요한 요소 중 하나는 모델링에 있어 첫 번째 단계인 기상 모델에 사용되는 기상장의 초기 및 경계 조건과 연관된다. 즉 초기 및 경계조건의 정확도는 초기치 문제를 수치적으로 풀어야 하는 기상 및 미세먼지 예보 모델의 중요한 오차 요소로 작용하므로(NIER, 2013; Borge *et al*., 2010; Tomboru *et al*., 2009; Appel *et al*., 2007), 실제와 유사한 수준의 초기 및 경계 조건을 얼마나 잘 최적화시킬 것인지, 이로 인한 개선 정도는 어떠한지에 대한 진단적 연구는 대단히 중요하다.

기상모델의 입력자료인 기상 초기 및 경계 조건 자료에는 예보 시스템과 같이 실시간 모델링에 사용되는 NAM (North American Mesoscale model), NCEP/GFS (National Centers for Environmental Prediction/Global Forecast System), 기상청 UM (Unified Model) 등의 예보 자료가 있으며, NCEP/FNL (National Centers for Environmental Prediction/Final Analysis), NARR (North American Regional Reanalysis), ECMWF의 ERA-Interim 등의 재분석 자료가 있다. 우리나라 기상 예보모델은 UM 결과를 이용하고 있으며, 일반 연구그룹에서 많이 사용되는 초기 기상 입력 자료는 NCEP에서 제공하는 NCEP/GFS와 NCEP/FNL 자료이며, NCEP/GFS 자료와 NCEP/FNL 자료는 근본적으로 동일한 모델링시스템 및 자료동화기법을 통해 생산된다(본 연구에서는 이후 NCEP/GFS와 NCEP/FNL 자료를 편의상 각각 GFS와 FNL로 명명하였다). GFS는 NCEP의 기상 예보 모델 시스템에서 생산된 예보자료로서 예보시스템이나 예보결과가 필요한 연구에 사용되며, FNL은 재분석 자료로서 관측 값을 최대한 포함하여 보정된 자료로 GFS보다 약 10% 정도 더 많은 양의 관측 값으로 보정된다. FNL은 관측 값으로 보정되는 과정에서 GFS가 생성되는 시간보다 더 많은 시간이 필요하게 되며, 따라서 예보시스템이 아닌 일반적인 기상 및 대기질 모의 연구에서 상당히 널리 쓰이고 있다. 결과적으로 두 자료의 관측 값으로 보정된 정도의 차이는 기상 및 대기질 모의결과에 많은 영향을 미칠 수 있다.

본 연구에서는 모델 불확실성 유발 기상인자 연구의 일환으로서 연간 미세먼지 예보결과 중에서 미세먼지 예보 정확도가 상대적으로 낮은 사례를 선정하고, 선정된 사례에 대하여 위에서 설명한 기상 인자 중에서 우선적으로 간단히 적용 가능한 과정, 즉 기상 모델의 초기 및 경계조건 자료로 GFS와 FNL을 사용하여 모델링결과를 도출하여 예보 정확도가 낮은 원인을 분석하였다. 즉 두 결과로 나타나는 미세먼지 예측값의 차이가 어느 정도인지를 파악하였고, 이러한 분석을 통해 초기 기상장의 차이에 의해 유발되는 미세먼지 농도 모사결과의 오차 경향성 등을 분석하였다.

2. 자료 및 연구방법

2.1 모델링 설계

본 연구에서 사용한 중규모 기상모델은 WRF (Weather Research and Forecasting Model, v.3.5.1)이며 기온, 바람 등의 기상변수를 생산하는데 사용하였다. 생산된 기상장은 MCIP (Meteorological-Chemistry Interface Processor, v.3.6)을 이용하여 대기질수치모델의 입

력자료 형태로 변환하였다. 미세먼지 농도를 모의하기 위한 본 연구의 대기질 수치모델인 CMAQ (Community Multiscale Air Quality Model, v.4.6) 모델링 시스템은 그림 1에 나타내었다.

WRF 모델은 1990년대 후반에 중규모 기상모델인 PSU/NCAR-MM5 (Dudhia, 1993)를 대체하기 위해 미국 대기과학연구소 NCAR (National Center of Atmospheric Research)와 NCEP (National Center for Environmental Prediction)이 공동으로 개발하였으며 세계적으로 널리 보급되어 많은 연구에 활용되고 있다. 또한 CMAQ은 미국 EPA가 정한 규제모형 중에서 국내에서 제일 많이 이용되는 3차원 광화학 오일러리안 대기질 모델이며, 대기 중 오염농도, 건성침적, 습성침적 등 여러 가지 물리적 과정과 대기 중에서 발생하는 광화학 반응 등 상세한 물리 · 화학 반응 모듈을 포함하고 있다(Byun *et al*., 1999).

CMAQ 모델링 영역은 현재 현업으로 사용되는 총 3개 영역과 동일하게 설정하였고(그림 2), 첫 번째 도메인(D1)은 중점 북위 38.0도, 동경 126.0도로 174×128개의 27 km 격자간격의 해상도로 동아시아 영역을 구성하였으며, 다음으로 연차적인 둥지격자(nesting)로 67×82개의 9 km 격자간격의 한반도 영역(D2)을, 그리고 마지막으로 58×61개의 3 km 격자간격의 수도권 영역(D3)으로 설정하였다. 본 연구에서 사용된 모델링 옵션은 환경부 2013년 보고서에서 제시한 사항을 대부분 참고하여 설정하였다(표 1). 이에 따라 WRF의 주요 물리옵션 설정은 대기질 모델링에 가장 적합하다고 알려진 WSM3 (D1)와 WDM6 (D2 and D3) 미세구

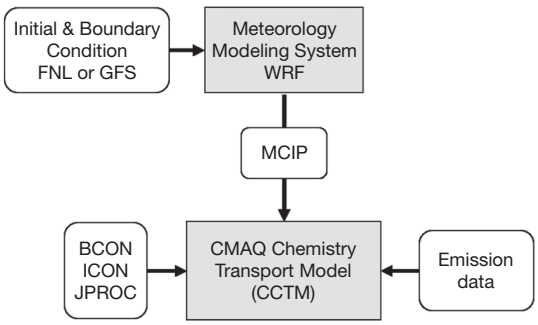


Fig. 1. Schematic diagram of the procedure in WRF-CMAQ modeling system.

Table 1. Descriptions of model configurations.

Model Domain	D1	D2	D3
• Horizontal Grid (CMAQ)	174×128	67×82	58×61
• Horizontal Resolution (km)	27	9	3
• Vertical Layer	15		
• Run Time	61 hour		
WRF Physics Option			
• Microphysics Option	WSM3 (D1), WDM6 (D2, D3)		
• PBL Scheme	YSU		
• Cumulus Parameterization	Grell-Freitas Ensemble		
• Long-wave Radiation	RRTM		
• Short-wave Radiation	Goddard		
CMAQ Chemical Option			
• Chemical Mechanism	CB 4		
• Aerosol Option	AERO 3		

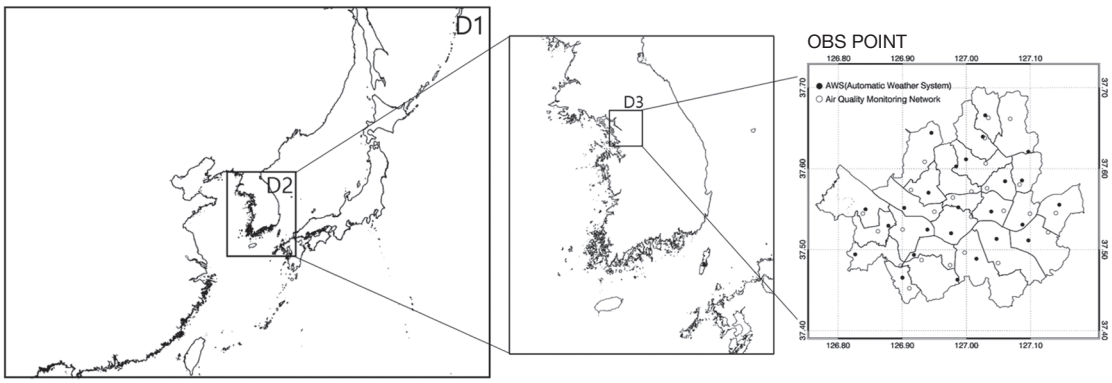


Fig. 2. Modeling domain for Korea air quality forecasting system. D1 covers East Asia with 27 km horizontal resolution and 174×128 grids. D2 covers Korean peninsular with 9 km resolution and 67×82 grids and D3 covers SMA (Seoul Metropolitan Area) with 3 km resolution and 58×61 grids.

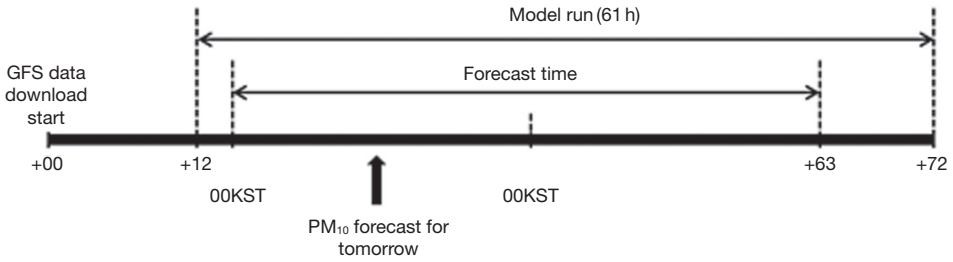


Fig. 3. Time set of daily PM_{10} forecasting simulations.

름물리방안과 YSU 행성경계층방안을 선택하였으며, CMAQ 모델의 화학메커니즘은 CB4-AERO3 옵션을 선택하였다. 또한 CMAQ 모델링의 배출량 자료는 동아시아영역은 MICS-ASIA 2010년 자료, 국내는 CAPSS 2010년 자료를 사용하였다.

모델 수행 시간은 일별 예보시간 구성(NIER, 2014)을 참고하여 그림 3과 같이 구성하였다. GFS 자료를 00 UTC부터 81시간 예보자료까지 다운받은 후, 12:00 UTC~72:00 UTC (61시간)에 대해 모델을 수행하였다. 예보결과는 다음날 00:00 KST부터 23:00 KST까지의 결과로 정의하였으며, 동일한 시간 구성으로 FNL 자료를 초기 및 경계 조건으로 사용하여 GFS 자료를 사용한 경우와 비교하여 미세먼지 농도모의의 민감도를 분석하였다.

2.2 초기 기상장 자료

본 연구에서 초기 기상장에 따른 미세먼지 모사 민감도 분석을 위해 사용한 WRF의 초기 및 경계 조건 자료는 전지구 영역의 재분석 자료인 FNL과 예보자료인 GFS이다.

FNL은 전지구 영역을 대상으로 1°×1°의 수평해상도를 가지고 연직적으로 1,000 mb에서부터 10 mb까지 26개의 층으로 이루어져 있다. 또한 1999년 7월 30일 자료부터 현재까지의 자료가 있으며 매일 6시간 간격(00, 06, 12, 18 UTC)으로 업데이트가 이루어지고, 많은 변수를 포함하는 동시에 업데이트가 빠르고 인터넷을 통해 쉽게 다운로드 받을 수 있어서 가장 많이 사용되는 기상 모델링의 초기 및 경계 조건 자료 중 하나이다. 한편 GFS는 2005년 2월부터 현재까지의 자료를 다운로드 받을 수 있고 하루에 4번(00, 06, 12, 18 UTC) 3시간 간격으로 총 180시간의 예보자료를 제공하며, 1°×1°의 수평해상도를 가진다.

두 자료는 동일한 모델링시스템에서 생산되므로 거의 유사한 도출과정을 가지지만 FNL이 상대적으로 최대 약 10% 더 많은 관측자료를 통해 보정되므로, 동일한 변수라 할지라도 보정 결과에 따라 서로 다른 값을 가질 수 있으며 이러한 초기기상장의 차이는 기상 및 대기질 모의결과에 영향을 줄 수 있다. 예를 들어 PM_{10}이 과소 모의된 2014년 2월 말 고농도 사례의 경우 WRF의 10 m 풍속의 과다 예측이 고농도 미세먼지 오보의 중요 인자로 분석되어 보고되었으며(NIER, 2017), 이러한 현상들은 기상 변수의 예측치 개선을 통해 고농도 미세먼지의 이동을 더 정확히 예측할 수 있음을 의미한다.

2.3 사례일 선정

민감도 분석을 위한 본 연구의 사례일은 국립환경과학원에서 제공받은 2014년 전 기간의 미세먼지 예보결과를 이용하여 선정하였다. 2014년 서울지역 미세먼지 예보결과와 동기간 관측된 값의 시계열 변화를 비교해본 결과 관측 연평균 미세먼지 농도는 45.8 μg/m^{3}인 반면 예보 값의 연평균 미세먼지 농도는 38.2 μg/m^{3}로 나타나 전반적으로 예보결과가 관측보다 낮음을 알 수 있다. 본 연구에서는 예보 값과 관측 값과의 차이가 큰 날의 순위를 정하고 이 중 50 μg/m^3 이상 차이가 났던 날을 본 연구의 오보사례일로 사용하였으며(표 2), 이 중 예보 값과 실제 관측 값의 차이가 가장 컸던 날을 우선적으로 선별한 후 종관기상장이 유사한 3일-CASE1 (12/30), CASE2 (4/16), CASE3 (3/1)-을 최종 사례일로 선정하였다(이때 황사발생일인 9일은 제외하였음). 이상의 사례일에 대하여 초기 기상장에 따른 미세먼지 농도 모의의 민감도 분석결과는 가장 큰

Table 2. List of false forecasting cases. Each case was selected from the model vs. observation differences in descending order. Occurrences of Asian Dust were also indicated here.

Ranking	Date	OBS	Forecast	Difference	Note
1	5/18	163.836	58.2	105.636	Asian Dust
2	5/27	146.87	48.1	98.77	Asian Dust
3	1/1	116.59	18.3	98.29	Asian Dust
4	3/18	121.337	26.6	94.737	Asian Dust
5	2/28	109.594	22.1	87.494	
6	3/19	116.264	36	80.264	Asian Dust
7	12/2	89.1956	12.6	76.5956	Asian Dust
8	4/16	146.395	73.9	72.495	CASE 2
9	1/21	102.555	32.6	69.955	
10	3/1	90.3105	26	64.3105	CASE 3
11	11/13	77.2838	15.5	61.7838	Asian Dust
12	5/26	76.9531	20.4	56.5531	Asian Dust
13	12/30	107.113	52.4	54.713	CASE 1
14	4/24	104.758	51.4	53.358	
15	2/3	60.798	8.8	51.998	Asian Dust

오보 사례일을 선정하였으므로, 우리나라의 미세먼지 농도를 예측하는 기상 인자의 중요도를 판단할 수 있을 뿐만 아니라 미세먼지 예보 시 본 연구의 사례일과 유사한 종관기상장을 가지는 날의 미세먼지 예보 개선에 중요한 참고자료가 될 수 있다.

선정된 사례일의 일기도와 유선도를 그림 4에 나타내었다. 사례일의 00 UTC, 12 UTC의 850 hPa 일기도와 유선 분석 결과, CASE1과 CASE3은 공통적으로 중국 동부의 고배출 지역에서 남풍→서풍→북서풍 계열의 풍계로 인해 북경 부근에서 배출된 고농도 미세먼지의 한반도 유입 경로가 예상되며, CASE2는 정체성 고기압이 우리나라 남쪽 해상에 위치해 있어서 우리나라 자체 배출원 영향이 우세한 경우이지만 정체성 고기압의 영향 권역이 수도권에 걸쳐 있으며, 수도권 북부 및 북한 지역에서는 오히려 정체영역이 아니라 캄차카반도 저기압의 영향으로 북서풍계의 영향을 받고 있어서 한반도의 기류 영역 구분이 뚜렷하지 않은 사례로 판단된다. 그러나 세 사례 모두 공통적으로 캄차카반도 해상 저기압 혹은 알류산 저기압으로 인해 한반도 상공에 북풍 또는 북서풍계열의 바람을 강하게 유도하는 사례들로 한반도 주변에서 유사한 풍계와 종관기상학적 조건을 가지고 있었다.

모의결과 검증을 위해 서울지역의 28개 자동기상관측시스템(Automatic Weather System, AWS)과 25개 대기오염측정망(Air Quality Monitoring Network)에서 관측된 1시간 평균 기온, 바람, PM_{10} 값을 다양한 방법으로 모의결과와 비교하였다. 서울의 각 관측지점은 그림 2에 나타내었다. 각 관측 값과 모의결과의 차이를 정량적으로 비교하기 위하여 MB (Mean Bias), RMSE (Root Mean Square Error), IOA (Index of Agreement), R (correlation coefficient) 등의 통계적 방법을 이용하였다.

3. 결 과

3.1 기상장 모사 결과 비교

일반적으로 모델 내에서 계산되는 미세먼지 농도의 변화는 이류, 난류확산, 배출, 화학반응, 침적제거 등으로 표현할 수 있다. 미세먼지의 주요 구성성분으로는 질산염(Nitrate, NO_3^-), 황산염(Sulfate, SO_4^{2-}), 암모늄(Ammonium, NH_4^+) 등의 이온성분과 OC (Organic Carbon), EC (Elemental Carbon)과 같은 탄소성분, 중금속성분 등이 있으며, 이 중 이차생성에어로졸의 생성 과정의 광화학 반응에서 주요한 인자로 작용하는 기온과 이류에 의한 미세먼지 농도 변화의 주요 인자인 풍속을 중점으로 비교 · 분석하였다.

먼저 기상장의 초기입력 자료인 FNL과 GFS의 기상변수 값의 기본적인 모델 결과의 차이를 살펴보았다. 수도권 주변의 격자 값을 선별하기 위하여 북위 37도, 동경 127도 지점의 2 m 기온과 10 m 풍속을 수집하여 그림 5에 나타내었다. 그 결과 기온의 경우 전반적인

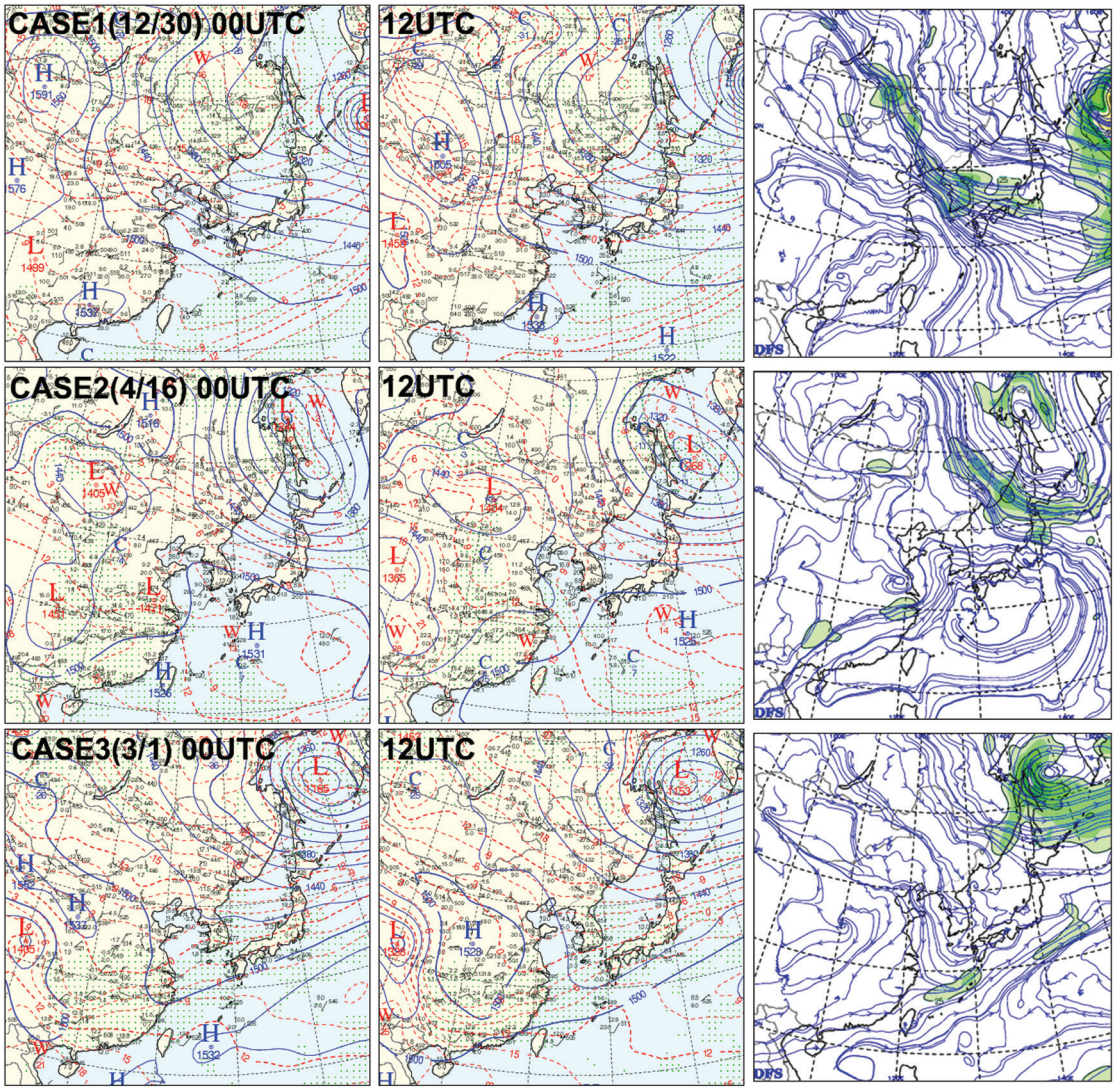


Fig. 4. Synoptic weather charts and streamlines of 850 hPa for the selected cases of sensitivity analysis.

농도 값 뿐만 아니라 피크를 나타내는 시간에서도 두 자료의 차이는 크지 않음을 알 수 있었다. 반면 풍속의 경우 GFS에서 전반적으로 더 강하게 모의되었는데, 각 사례일별로 각각 4.4 m/s, 4.0 m/s, 2.9 m/s로 나타났으며, 첫 사례일의 경우 그 차이가 4 m/s 이상 차이가 나타났음을 확인하였다. 또한 유사한 일변화 경향을 보였으나 일중 최고값을 나타내는 피크 시간에서도 큰 차이를 보이는 등 기온과는 전혀 다른 편차를 보였다. 결과적으로 수도권 사례 연구에서 볼 때, 재분석 자료가 예보자료보다 열역학적 예보 인자의 차이보다는 풍속과 같은 역학적 인자의 차이가 상대적으로 더 크게 나타나는 경향을 보였고, 본 사례에서 제외된 다른 사례일의 경우 또한 유사한 경향을 보였다.

다음으로 각각의 초기기상장 자료로 모의된 기온과 바람장의 결과를 비교해 보았다. 기온 모의결과에 대한 민감도를 분석하기 위해 기온의 일변화와 공간분포를 분석하여 그림 6과 그림 7에 제시하였다. 여기서 그림 6의 결과는 서울지역 모든 관측지점의 평균값을 나

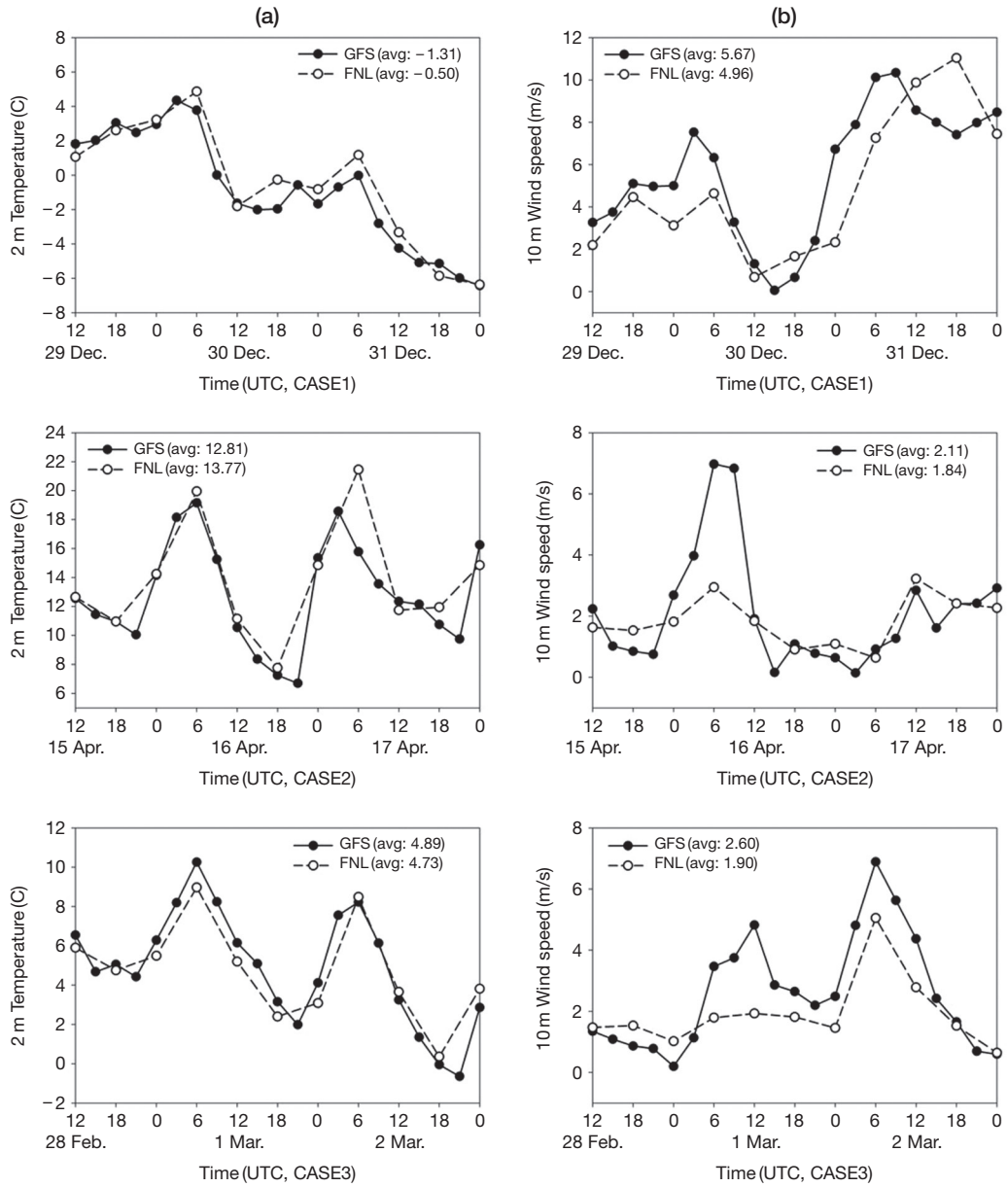


Fig. 5. Time series of (a) 2 m temperature and (b) 10 m wind speed.

타낸다. 그 결과 FNL과 GFS 모두 CASE1에서는 기온을 과소모의, CASE2, CASE3에서는 과대모의하여 사례일별로 기온 모의 경향이 다르게 나타났는데, 이는 결국 각 초기 기상장에 따른 기온 모의결과가 공통적인 특성이나 차이점이 뚜렷하게 존재하지 않으며, 따라서 이차생성에어로졸의 생성 · 소멸 과정과 연관된 중요한 인자인 기온에 따른 미세먼지 농도의 민감도는 초기 기상장의 차이에 기인한 요인으로서는 크지 않은 것으로 해석할 수 있다.

다음으로 바람의 모의결과를 분석하였는데 그림 8은 수도권, 경기도 및 일부 충청도 지역을 포함하는 서해안 영역에 대해 기상청에서 제공되는 AWS 관측 자

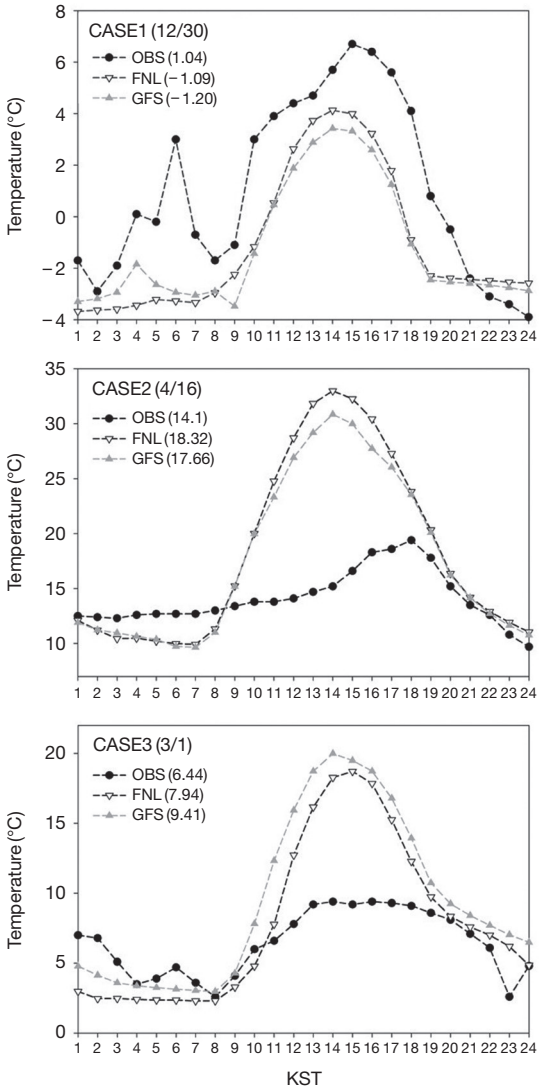


Fig. 6. Diurnal variations of simulated and observed surface temperature in Seoul. Observations are values averaged for all observation sites (●) as indicated in Fig. 2.

료의 바람 분포와 모델결과를 비교하여 나타낸 그림이다. 풍향의 경우 서해안 지역은 북서풍이 우세하고 육지로 갈수록 서풍계열의 풍계로 바뀌는 모습을 보였고, FNL과 GFS 모두 서해안과 수도권영역에서 주로 북서풍을 모의하여 전반적인 풍향은 잘 모의 하였으나, 지형이 복잡한 육지로 갈수록 풍향의 모의결과의 정확도는 감소하였다. 두 초기 기상장에 따른 풍향 모의결과의 차이는 크지 않았던 반면 풍속의 경우 두 자료 모두 관측치에 비해 과대모의하고 있으며 그 정도는 GFS가 더 크게 과대모의 하였으며, 이는 앞서 살펴보았던 두 초기 기상장 자료의 기온과 풍속의 차이가 기상장 모의에 그대로 영향을 준 것으로 해석할 수 있다.

두 초기 기상장에 따른 모의결과 차이가 크게 나타났던 풍속의 모의결과를 좀 더 자세히 살펴보기 위해 그림 9와 그림 10에 서울지역에 대한 풍속 시계열과 공간분포를 나타내었다. 여기서 그림 9의 결과는 서울지역 모든 관측지점의 평균값을 나타내며, '○'안의 값은 관측된 일평균 풍속을 나타낸다. 그 결과 앞서 살펴본 것과 마찬가지로 FNL과 GFS 모두 모든 사례일에서 풍속을 과대모의 하였는데, 특히 GFS의 경우 평균적으로 약 1.25배, 그리고 최대 3.7배까지 풍속을 상대적으로 강하게 모의하였다. 이러한 풍속의 과대모의는 미세먼지의 체류 시간을 줄여 줌으로써 결국 고농도 미세먼지 농도를 실제보다 과소하게 모의할 가능성이 매우 높다.

표 3은 기온과 풍속 모의결과와 관측 결과와의 통계값을 정리한 것으로 MB, R, RMSE, IOA 값을 수록하였다. 그 결과 기온의 경우 MB가 −2.24~4.22, IOA 0.48~0.82의 범위를 가졌으며, 앞서 시계열과 공간분포 비교에서 기술하였듯이 FNL과 GFS의 뚜렷한 차이는 나타나지 않았다. 풍속의 경우 MB 0.28~1.95, IOA 0.34~0.75의 범위를 보였으며, 전반적으로 FNL을 초기 기상장으로 사용한 결과가 관측치와 비교하여 볼 때 상대적으로 더 유사하게 나타났다.

이상의 결과는 기존의 연구결과인 Koo *et al.* (2012)의 연구에서 기온 IOA가 0.98 이상, MB가 ±1 미만, 풍속 IOA가 0.75 이상으로 보고한 결과와 비교하여 기온과 풍속의 모의 신뢰도가 낮게 나타난 결과와 일치하는데, 이것으로 미루어 보아 결국 본 연구에서의 사례일은 상대적으로 신뢰도가 낮은 기상장 모의결과가 미세먼지 농도 예보에 미친 영향이 크다는 것을 간접적으로 유추할 수 있다. 그 외의 기상변수로서 습도장, 기압장 등의 민감도를 분석해본 결과, 상대적으로 기온과 바람장에 비하여 훨씬 덜 민감하게 나타나 본 연구에서는 상세한 기술을 생략하였다.

아울러 초기 기상장 뿐만 아니라 기상모델 그 자체의 차이 또한 미세먼지 모의와 연관된 상세한 기상장

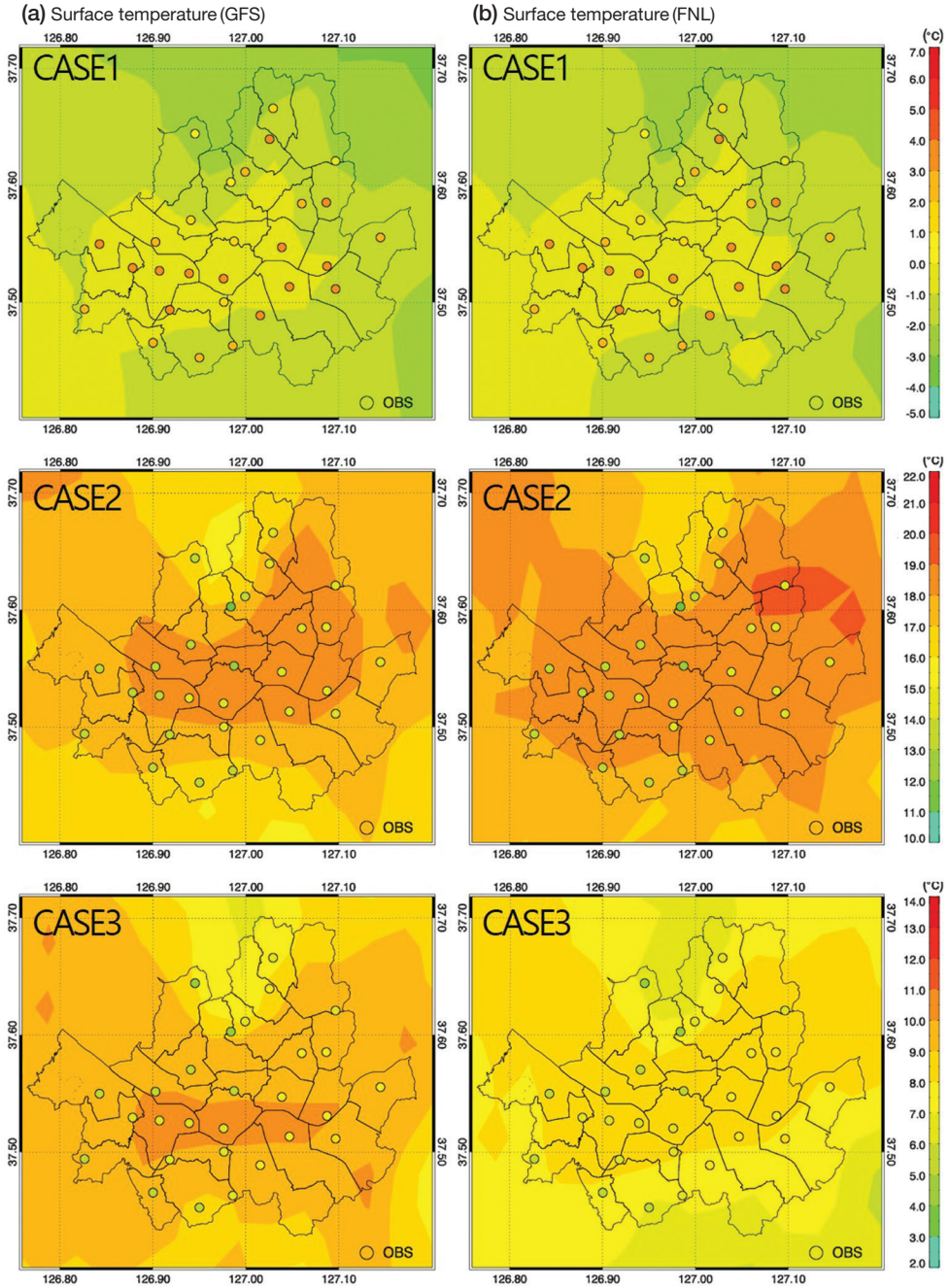


Fig. 7. Spatial distributions of daily mean temperature in Seoul. Circles represent observed values.

의 분석 연구가 요구된다. 예를 들어 기상청 현업 모델인 UM은 서로 다른 기상모델인 WRF보다 풍속이 상대적으로 적게 모의되는 경향을 보여 UM-CMAQ에 의한 PM_{10} 농도 모의한 결과가 일반적으로 WRF-CMAQ 결과보다 상대적으로 과대 모의되는 경향이 보고되고 있다(NIER, 2017). 기상청 현업 모델의 경우

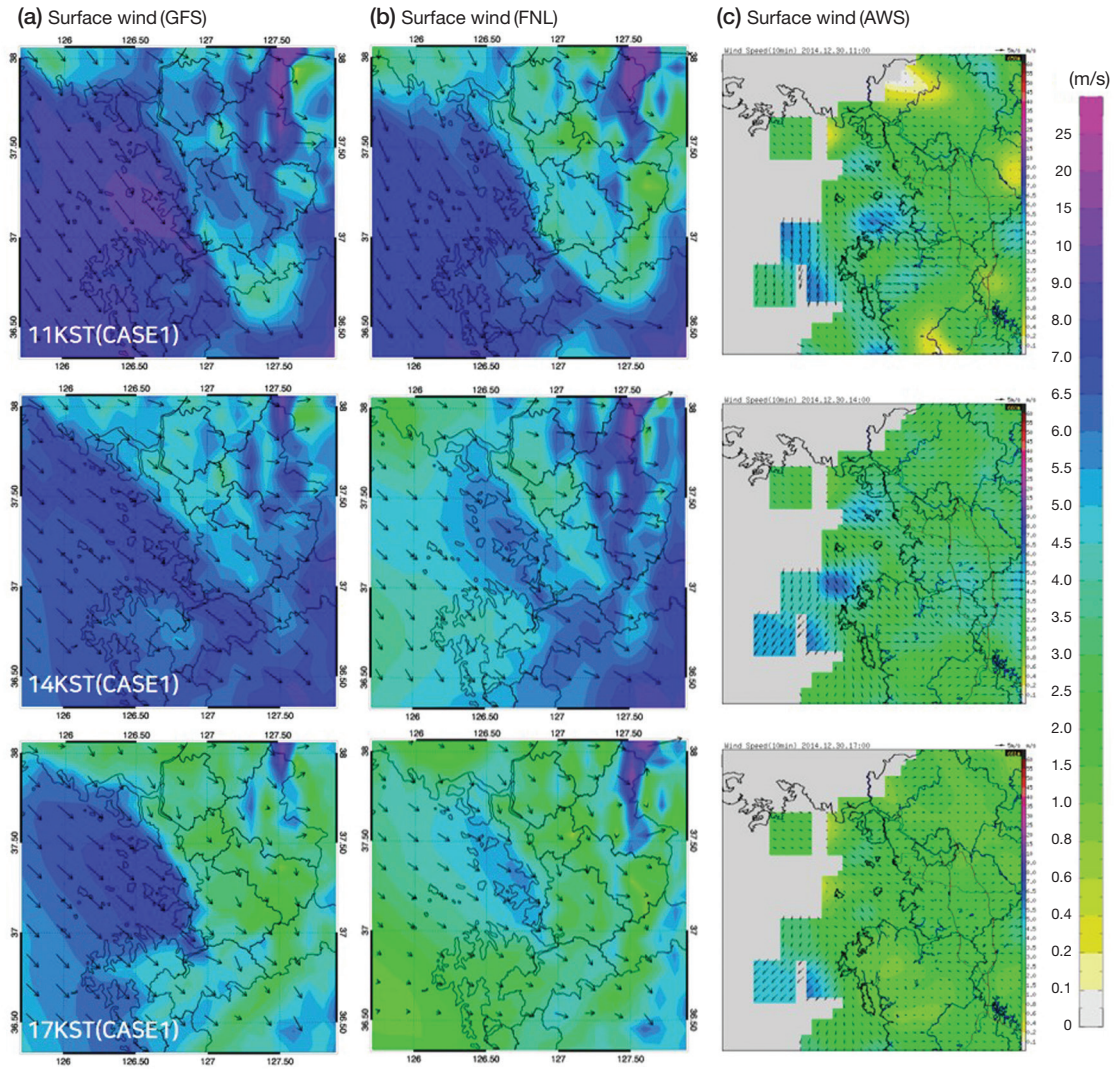


Fig. 8. Spatial distributions of simulated and observed wind fields in western coastal area. (a) and (b) represent simulations from GFS and FNL data, respectively, and (c) represents observations.

연직 수분 구조 특성 분석과 같은 악기상 혹은 강수 예보에 중점을 두는 반면 미세먼지와 같은 대기오염 예보는 하층 혹은 지표 바람장이 고농도 플룸의 이동 및 지속 시간과 직접적으로 연관되기 때문인 것으로 분석된다.

최근 UM을 사용한 경우와 GFS 및 FNL 자료를 사용한 결과의 차이를 분석한 보고서에 따르면, FNL 결과가 GFS보다 높은 미세먼지 농도를 보이며, UM을 사용한 결과는 FNL 혹은 GFS 자료를 사용한 결과보다 더 높게 나타났으며 피크값이 경우에 따라서 2배 혹은 그 이상 높게 모의하였고, 그 결과는 오히려 측정결과에 더 가까운 수준을 자주 모의하였음을 확인하였다(NIER, 2017).

3.2 미세먼지 모사 결과 비교

그림 11은 동아시아 영역에서 사례일별로 두 초기 기상장에 대한 바람장 및 미세먼지 농도의 공간분포와 두 결과의 차이를 나타낸다. CASE1과 CASE3의 사례

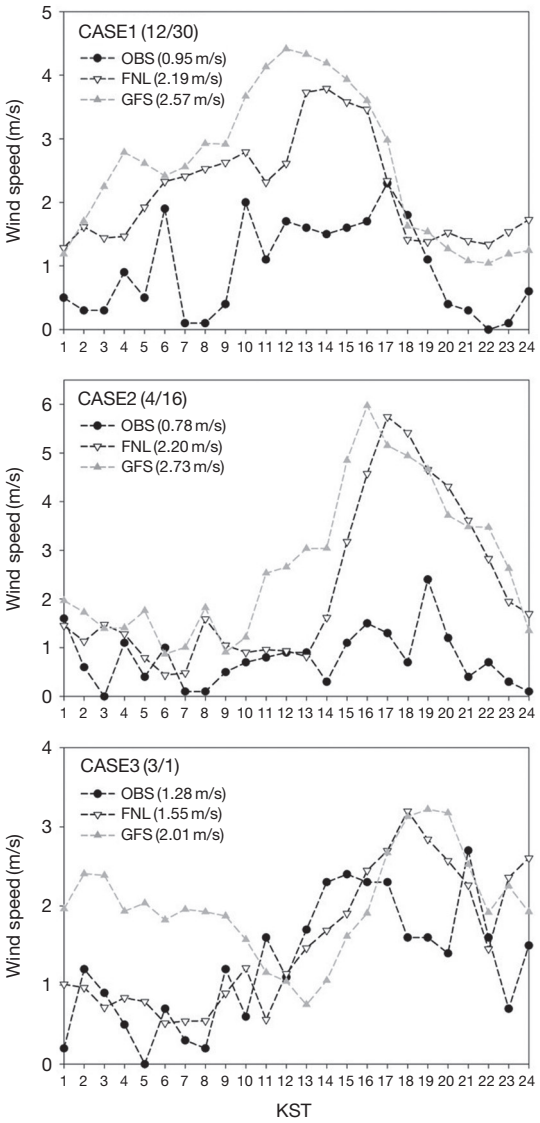


Fig. 9. Diurnal variations of simulated and observed surface wind speed in Seoul. Observations are values averaged for all observation sites (●) as indicated in Fig. 2.

에서는 중국 동부의 고배출 지역에서 배출된 PM_{10} 플룸이 남풍→북풍 · 북서풍 계열의 풍계로 인해 우리나라까지 영향을 주는 모습을 확인할 수 있다. CASE2의 경우는 한반도상공 정체성 고기압의 영향으로 약한 바람이 모의되었으나 황해상의 강한 남풍이 주목할 만하였다. FNL과 GFS를 사용한 두 모의결과의 차이를 비교해본 결과(그림 11c), 수도권과 서해연안 지역에서 FNL을 초기 기상장으로 사용하였을 때 미세먼지 농도가 GFS를 사용한 경우 보다는 상대적으로 더 높게 모의됨을 확인할 수 있다. 따라서 FNL을 사용할 경우, GFS를 사용한 경우보다 대기질 모의결과를 개선할 수 있는 여지가 많음을 알 수 있다. 3.1절에서 확인한 바와 같이 본 연구의 사례일의 경우 GFS의 과대모의된 풍속의 영향이 큰 사례였는데 CASE1과 CASE3의 경우처럼 북서풍을 타고 장거리 이동되어 한반도로 유입될 때, 고농도 미세먼지의 한반도 체류 시간을 보다 더 잘 예측할 수 있는 정확한 지표 풍속의 모의가 미세먼지 모의 개선에 중요한 단서가 됨을 유추할 수 있으며, CASE2의 경우 정체성 고기압이 존재할 경우 정체 영역이 수도권에 걸쳐있어서 이에 대한 정체성 고기압의 정확한 이동속도의 모의가 중요한 인자로 판단된다.

이러한 기상장의 초기조건의 차이가 실제 한반도 내의 도시권역 미세먼지 농도 모의에 얼마나 영향을 미치는지 정량적으로 알아보기 위하여 수도권 모의결과를 측정치와 비교하여 살펴보았다. 그림 12는 두 초기 기상장에 따른 수도권 시간평균 미세먼지의 모의값과 측정값의 일변화를 나타낸 것으로 모든 사례일에 대해 FNL과 GFS를 사용한 결과 모두 미세먼지 농도를 과소모의하고 있으며, 일부 결과에서만 야간의 농도가 증가하여 관측과 유사한 수준을 보였다. 초기 기상장에 대한 미세먼지 농도의 차이는 크지 않으나 FNL을 사용하였을 경우가 GFS를 사용한 경우보다 상대적으로 미세먼지 농도를 높게 모의하였으며(평균 1.3배~1.6배), 특히 CASE3에서는 최대 2.4배까지 높게 모의하는 것으로 나타났으며, 특히 피크 값에서 두 결과의 차이가 상대적으로 더 크게 나타났다. 결과적으로 FNL를 초기 기상장으로 하였을 경우가 측정치와 더 유사한 결과를 도출하였다.

또한 본 연구의 사례일의 경우 전반적으로 미세먼지 농도가 낮게 모의되는 것 뿐만 아니라 측정치에서 나타난 미세먼지 농도의 피크 시간에 대해서도 모의 정확도가 다르게 나타났다(그림 11에서 피크 시간은 ↓로 표시하였음). CASE1의 경우 측정치에서는 오후 12시~1시 사이에 미세먼지 농도의 피크가 나타난 반면 모의결과에서는 오전 10시~11시 사이에 피크가 나타났으며, 특히 GFS를 사용한 모의결과에서 상대적으로 1~2시간 더 빨리 피크가 모의되어 측정자료의 피크타

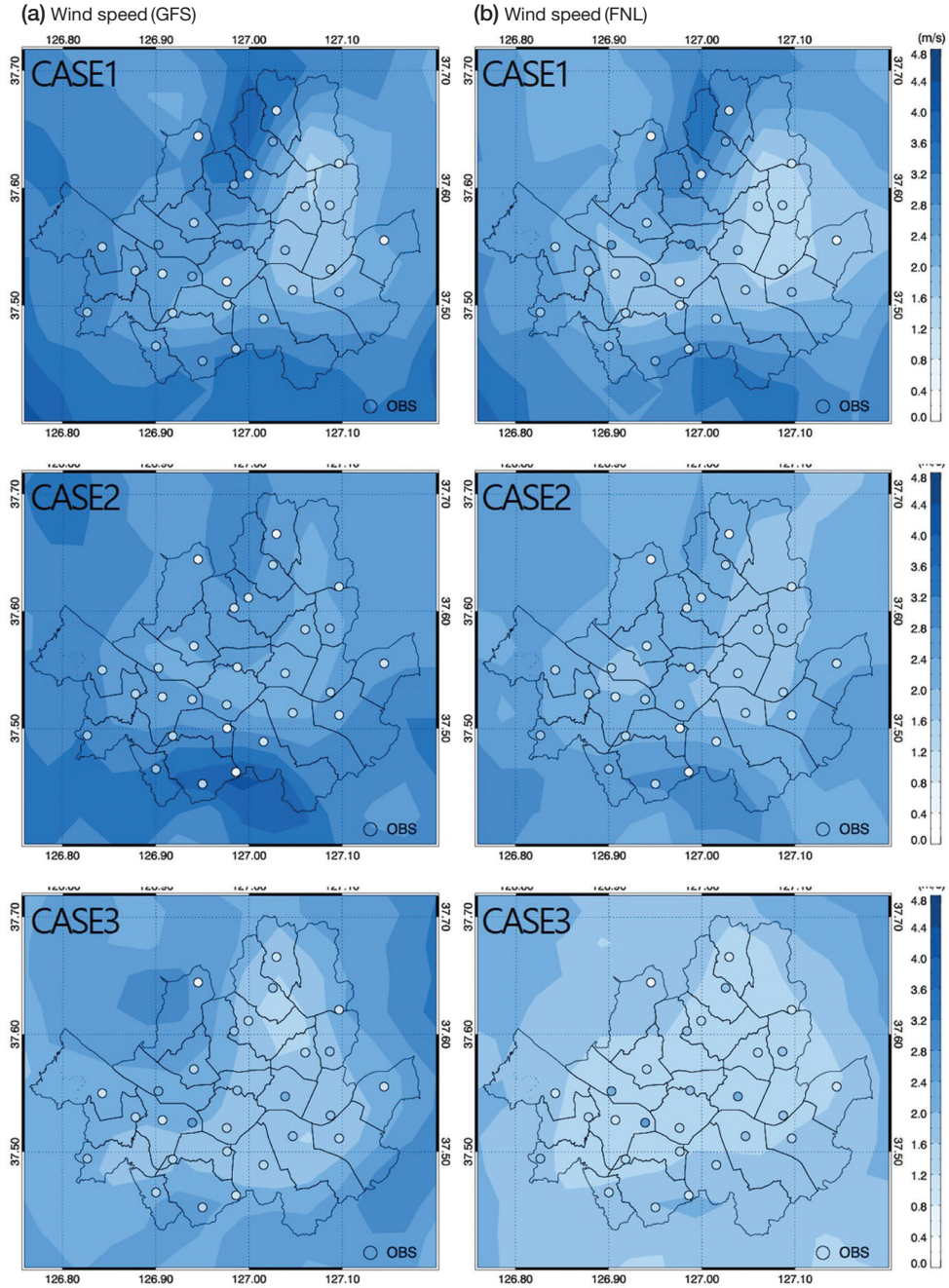


Fig. 10. Spatial distributions of daily mean wind speed in Seoul. Circles represent observed values.

임과 오차가 상대적으로 더 크게 나타났다. CASE2의 경우 측정결과에서 오전 11시~오후 8시 사이에 미세먼지 농도가 높게 나타났으며 FNL을 사용한 모의결과에서 오전 7시~오후 1시 사이에 측정치와 유사한 패턴이 모의되었다. 반면 GFS를 사용한 모의결과에서는 이러한 피크가 모의되지 않았다. CASE3의 경우 낮 시

Table 3. Statistics of model performance for the simulated temperature and wind speed.

Meteorological variables	CASE	I/B condition	MEAN	MB	R	RMSE	IOA
Temperature	CASE1	FNL	−1.09	−2.12	0.85	2.79	0.82
	OBS: 1.04°C	GFS	−1.20	−2.24	0.87	2.86	0.79
	CASE2	FNL	18.32	4.22	0.71	7.95	0.48
	OBS: 14.1°C	GFS	17.66	3.56	0.73	6.88	0.53
	CASE3	FNL	7.94	1.49	0.84	4.23	0.71
	OBS: 6.44°C	GFS	9.41	2.97	0.85	5.11	0.64
Wind Speed	CASE1	FNL	2.19	1.24	0.53	1.44	0.53
	OBS: 0.95 m/s	GFS	2.57	1.62	0.59	1.86	0.47
	CASE2	FNL	2.20	1.42	0.48	2.02	0.38
	OBS: 0.78 m/s	GFS	2.73	1.95	0.54	2.33	0.34
	CASE3	FNL	1.55	0.28	0.62	0.76	0.75
	OBS: 1.28 m/s	GFS	2.01	0.73	0.04	1.22	0.41

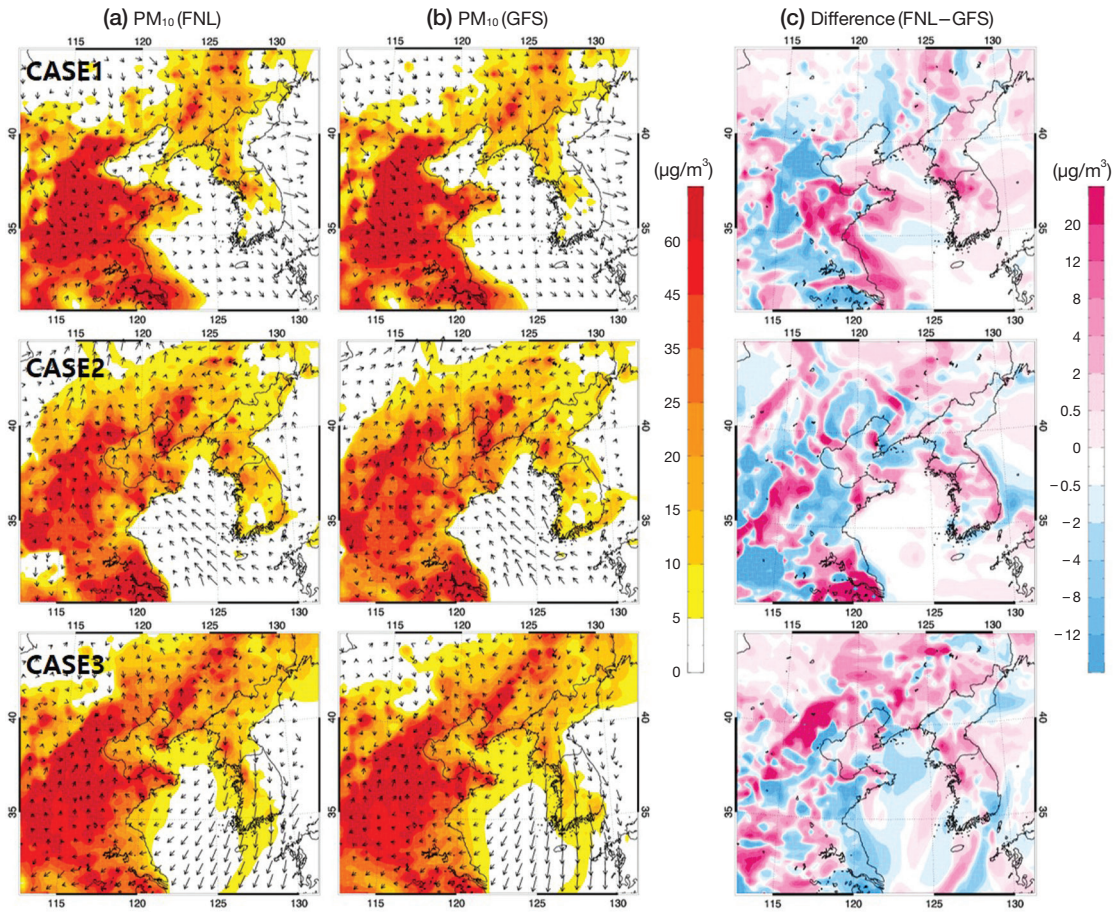


Fig. 11. Spatial distributions of simulated PM_{10} concentrations from using (a) FNL (1st panel), (b) GFS (2nd panel) data, and (c) its differences (3rd panel). The red area in (c) means the PM_{10} concentrations from FNL data is higher than GFS data.

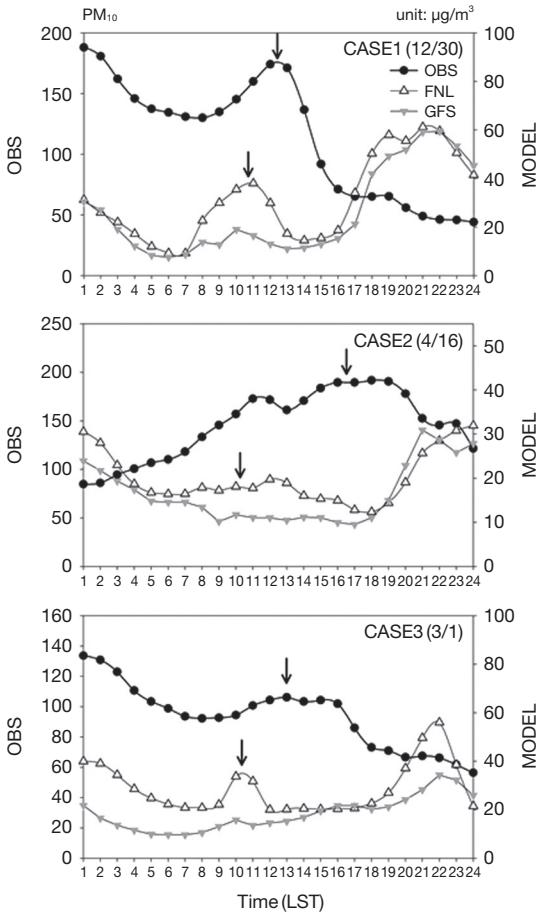


Fig. 12. Diurnal variations of simulated and observed PM_{10} concentrations in Seoul. Observations are concentrations averaged for all observation sites (○) as indicated in Fig. 2.

간의 피크가 측정치에서는 오후 1시를 전후로 나타났으나 모의결과에서는 오전 10시를 중심으로 피크가 나타나 전반적으로 모델이 미세먼지 농도의 피크를 실제보다 더 빨리 모의하였으며 두 모의결과의 피크 모의 시간대는 비슷하였으나 FNL을 사용한 모의결과에서 더 뚜렷한 피크를 확인할 수 있었다. 이는 FNL의 풍속의 크기가 상대적으로 GFS에 비해 더 적게 모의되면서 관측 풍속에 가깝게 모의되었으며, 이는 미세먼지 농도 시계열에도 실제에 더 가깝게 피크치의 이동을 모의하였음을 의미한다.

이처럼 초기 기상장의 차이, 특히 풍속의 차이에 의해 전반적인 농도 수준, 피크 모의 농도 수준 및 피크 시간, 그리고 공간분포 등에서 서로 다른 모의결과가 나타나며, 그 정확도는 특히 FNL을 사용한 모의결과에서 더 실제에 가깝게 모의되었음을 확인하였고, 그 오차 또한 상당한 수준임을 확인할 수 있었다. 아울러 모델 버전에 따른 기상장의 차이 또한 자주 보고되는데, 이러한 기상 모사 특성에 따라 모의되는 미세먼지의 불확도를 파악하는 상세 연구는 계속 필요할 것으로 판단된다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 미세먼지 모의의 정확도 향상을 위한 기초연구로서 대기질 모델의 정확도에 많은 영향을 미치는 초기 기상장의 변화에 대한 미세먼지 모사의 민감도를 분석하였다. 재분석 자료인 FNL과 예보자료인 GFS를 기상모델의 초기 및 경계 조건 자료로 사용하여 초기 기상장에 따른 미세먼지 농도 모의의 민감도 분석을 실시하였다. 국립환경과학원에서 현업으로 사용되고 있는 GFS 기반 모델의 미세먼지 예보결과를 이용하여 본 민감도 분석의 사례일을 선정하였는데, 사례일의 공통된 특징은 먼저 예보결과가 측정치에 비해 일평균 값이 50 μg/m^3 이상 낮았으며, 한반도 북동쪽에 알류산 저기압이 강하게 자리 잡고 있어서 기상장 모의 시 한반도 상공의 바람을 강하게 모의할 가능성이 높았다.

먼저 미세먼지 농도에 가장 큰 영향을 미치는 기온과 바람의 모의결과를 비교한 결과 기온은 두 초기 기상장에 따른 모의결과 차이가 크지 않았으며 사례일별로도 모의경향이 다양하게 나타났는데, 이는 결국 이차생성에어로졸의 생성과 소멸 과정의 주요인자인 기온의 모의 불확실성이 미세먼지 과소모의에 미치는 영향은 크지 않음을 의미한다. 반면 풍속의 경우 모든 사례일에서 GFS를 초기 기상장으로 사용했을 때 서해안과 수도권지역을 중심으로 풍속을 더 강하게 모의하였고 이러한 특성은 통계분석에서도 잘 나타났다. 따라서 이러한 풍속의 과대모의는 서해안과 수도권지역의 미세먼지를 빠르게 확산 및 수송시켜 환기효과를 과도하게 계산할 가능성이 높으며 이는 모의된 미세먼지농도를 시계열, 수평공간분포 등 다양하게 비교한 결과에서 확인할 수 있었고, 모든 사례일에서 상대적으로

FNL을 초기 기상장으로 사용했을 때 농도 수준과 피크모의, 통계값 등에서 그 정확도가 더 높게 나타났다.

비록 재분석 자료인 FNL 자료가 예보자료인 GFS 자료에 비해 더 정확한 기상 및 대기질 모의결과를 생산하는 것이 예측 가능한 결과일 수 있으나, 본 연구에서는 서로 다른 초기 기상장에 대해 미세먼지 모의결과가 다르게 나타났으며 그 원인이 다른 기상요소 보다 풍속이 크게 기여하였다는 점과 피크값은 2배 이상 차이 나는 특수한 경우가 있었다는 점, 그리고 피크 시간대 또한 FNL을 사용한 경우가 더 측정치에 근접하였다는 점 등에서 그 의미를 찾을 수 있다. 따라서 미세먼지 예보 통계분석 시 실제보다 예보 농도가 낮은 오보 사례는 지상풍속의 과대예측이 빈번한 오보인자로 판단되며, 한반도 주변의 이동성 혹은 정체성 고기압의 이동 속도(풍속)의 정확한 모의가 수도권과 같은 도시규모 대기질 모의에 중요하다는 것을 유추할 수 있다.

나아가 지표 풍속 이외에도 기온, 대기경계층 내 풍속 및 대기경계층고도 등의 기상변수와의 비교를 통한 오차 분석 및 이에 근거한 광화학 과정, 오염물질의 연직 수송 및 확산과 연관된 미세먼지 모의 불확실성에 대한 연구가 추가적으로 필요할 것으로 사료되며, 대기화학수송모델 자체의 물리 · 화학적 매개변수의 불확실성 또한 고려해야 한다.

본 연구의 세 사례 모두 일본 북부 혹은 캄차카 반도 부근의 강한 저기압이 한반도 풍속 오차를 유도하고 있었다는 것이 주목할만 하였으며, 따라서 북서풍 계열의 강한 바람으로 유입되는 장거리 이동 패턴 등의 종관기상 패턴 분류를 통해 오보의 원인을 분석하는 것 또한 향후 대기질 예보 개선에 바람직할 것으로 판단된다. 나아가 현재 기상청 현업 기상장 모델인 UM 모델 자료를 추가하여 각 모델간 차이점을 연구하여 한반도 권역별 미세먼지 예보율 확보를 위한 보다 정량적인 초기 기상장 연구를 수행할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원(NRF-2015R1D1A1A01060088)과 국립환경과학원 미세먼지 예보센터 “관측기반 대기질 모델 개선체계 구축(II)” 사업의 일부지원으로 이루어졌습니다.

References

Appel, W., Gilliland, A., Sarwar, G., Gilliam, R.C. (2007) Evaluation of the community multiscale air quality (CMAQ) model version 4.5: sensitivities impacting model performace: part I - ozone, Atmospheric Environment, 41, 9603-9613.

Borge, R., Lopez, J., Lumbreras, J., Narros, A., Rodriguez, E. (2010) Influence of boundary conditions on CMAQ simulations over the Iberian Peninsula, Atmospheric Environment, 44, 2681-2695.

Byun, D.W., Ching, J.K.S. (1999) Science algorithms of the EPA Models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) Modeling System, U.S. Environmental Protection Agency (US EPA), EPA/600/R-99/030.

Jang, L.S., Lee, D.G., Yu, J.A., Hong, S.C., Son, J.S., Choi, J.Y. (2014) Status of PM forecast and improvement plan, Proceedings of the Spring Meeting of KMS (Korean Meteorological Society), 2-3.

Jang, Y.G., Kim, J., Kim, P.S., Sin, Y.I., Lee, H.J., Choi, M.A. (2009) Comparison of Regional PM_{10} Emission Complemented Fugitive Dust and Biomass burning, Proceeding of the 48th Meeting of KOSAE (Korean Society for Atmospheric Environment), 169-170.

Kim, D.Y. (2009) PM Analysis Using CMAQ in Seoul Metropolitan Area, Gyeonggi Research Institue, 33-42.

Kim, E.H., Cho, J.H., Kim, S.T. (2015) Variation of gas phase simulation and PM_{10} simulated concentration using initial field - February 2014 case, Proceedings of the Spring Meeting of KMS (Korean Meteorological Society), 56-57.

Kim, E.H., Kim, H.C., Cho, J.H., Kim, S.T. (2015) Analysis of air quality simulation concentration change using WRF and UM simulation results, Proceedings of the Autumn Meeting of KMS (Korean Meteorological Society), 837-838.

Kim, J, Jang, Y.K. (2014) Uncertainty Assessment for CAPSS Emission Inventory by DARS, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 30(1), 26-36. (in Korean with English abstract)

Koo, Y.S., Kim, S.T., Cho, J.S., Jang, Y.G. (2012) Performance Evaluation of the Updated Air Quality Forecasting System for Seoul Predicting PM_{10}, Atmo-

spheric Environment, 58, 56-69.

Lee, D.G., Kim, S.T., Kim, H.C., Ngan, F. (2014) Retrospective Air Quality Simulation of The TexAQS-II: Focused on Emissions Uncertainty, Asian Journal of Atmospheric Environment, 8(4), 212-224.

Moon, Y.S., Lim, Y.K., Lee, K.Y. (2011) An Estimation of Concentration of Asian dust (PM_{10}) using WRF-SMOKE-CMAQ (MADRID) During Springtime in the Korean Peninsula, Journal of Korean Earth Science Society, 32(3), 276-293. (in Korean with English abstract)

National Institute of Environmental Research (NIER) (2011) Example of air quality modeling report based on air quality modeling guidelines for establishing and evaluating national air policies, 2-6.

National Institute of Environmental Research (NIER) (2013) A Study on Improvement and Expansion of Urban Scale PM Forecasting System (IV), 5-13.

National Institute of Environmental Research (NIER) (2014) Studies on the optimization method for improving the accuracy of air quality modeling, 47-61.

National Institute of Environmental Research (NIER) (2017) The 1st in-depth analysis and information sharing on the controlling factors for low predictability on high PM_{10} episodic cases in 2017 (I), 1-5.

Park, Y.S., Jang, I.S., Cho, S.Y. (2015) An Analysis on Effects of the Initial Condition and Emission on PM_{10} Forecasting with Data Assimilation, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 31(5), 430-436. (in Korean with English abstract)

Peng, G. (2014) What's the difference between FNL and GFS?, Atmospheric & Geoscience Research Data Archive, Computational & Information systemp Lab., National Center for Atmospheric Research.

Tombrou, M., Bossioli, E., Protonotariou, A.P., Flocas, H., Giannakopoulos, C., Dandou, A. (2009) Coupling GEOS-CHEM with a regional air pollution model for Greece, Atmospheric Environment, 43, 4793-4804.

U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2007) Guidance on the Use of Models and Other Analyses for Demonstrating Attainment of Air Quality Goals for Ozone, $PM_{2.5}$, and Regional Haze, EPA-454/B-07-002.

Wu, Q., Xu, W., Shi, A., Li, Y., Zhao, X., Wang, Z., Li, J., Wang, L. (2014) Air Quality Forecast of PM_{10} in Beijing with Community Multi-scale Air Quality Modeling (CMAQ) system: Emission and Improvement, Geoscientific Model Development, 7, 2243-2259.