



논문

지표 측정자료를 활용한 동아시아 자료동화 대기질 예보 시스템 개발

A Development of Air Quality Forecasting System with Data Assimilation using Surface Measurements in East Asia

최대련, 윤희영, 구윤서*

안양대학교 환경에너지공학과

Dae-Ryun Choi, Hui-Young Yun, Youn-Seo Koo*

Department of Environmental and Energy Engineering, Anyang University

접수일 2018년 11월 19일
 수정일 2018년 12월 7일
 채택일 2019년 1월 29일

Received 19 November 2018
 Revised 7 December 2018
 Accepted 29 January 2019

*Corresponding author
 Tel : +82-(0)31-478-3781
 E-mail : koo@anyang.ac.kr

Abstract Air quality forecasting system with data assimilation system using surface measurements in China and Korea was developed, and the performance of chemical transport model with data assimilation was validated and evaluated. The air quality forecasting modeling using data assimilation show better agreement with observations for PM₁₀, PM_{2.5} and NO₂ compared with model without data assimilation that was underestimated for PM₁₀ and NO₂ and overestimated for PM_{2.5} in Seoul metropolitan area, Korea. It is estimated that PM₁₀ and NO₂ emissions in the Seoul metropolitan area were underestimated in 2015. As a result of data assimilation using China's monitoring stations, different spatial distribution (with data assimilation - without data assimilation) of PM₁₀ concentrations in the Korean Peninsula showed to be increased PM₁₀ concentration in the West Sea because of long range transport from China to Korea. Therefore, it is suggest that data assimilation using ground observations in China and Korea could improve emissions for prediction or forecasting in upwind and local as well as performance of chemical transport model. The performance of air quality forecasting model with data assimilation showed that the forecasting index (Accuracy (A), Probability Of Detection (POD), False Alarm Rate (FAR)) was improved in most regions in Korea, compared to basic model without data assimilation during 2017 and 2018. Therefore, the developed air quality forecasting model with data assimilations was improved the forecasting performance of PM₁₀ and proposed as a representative PM₁₀ forecast model in South Korea.

Key words: Data assimilation, Pun interpolation, Air quality forecasting, CMAQ

1. 서론

우리나라 고농도 미세먼지 사례는 정체성 고기압 또는 기상패턴에 의한 국내 정체, 동아시아지역에 위치한 황사 및 인위적 오염원으로부터 장거리 수송 및 두 사례가 복합적으로 발생하는 등의 현상으로 나눌 수 있다. 특히 봄, 가을 및 겨울에는 북서풍이 지배적으로 발생할 시, 황사 및 인위적 오염원의 장거리 수

송에 의해 국내 및 장거리 오염원 등이 복합적인 영향으로 인해 “매우 나쁨” 수준의 미세먼지 고농도가 한반도에 나타난다 (Koo *et al.*, 2018, 2015, 2012, 2008; Choi *et al.*, 2016; Kim *et al.*, 2016; Park *et al.*, 2013, 2010; Lee *et al.*, 2013; Lee *et al.*, 2011a). 이와 같은 미세먼지는 흡입 시 코 또는 기관지 등에서 걸러지지 않고 폐포 깊숙이 도달하여 암 발병, 호흡기, 심혈관 질환뿐만 아니라 뇌까지 전달되어 뇌질환을 유

발하기 때문에 국민 건강을 직접적으로 위협하고 있다(Wang *et al.*, 2014; Chen *et al.*, 2013; Harrison, *et al.*, 2012; Kim *et al.*, 2012; Koken *et al.*, 2003) 이를 사전에 예방하기 위해서 환경부는 2014년부터 미세먼지 예보를 전국적으로 시행중이며, 2015년도부터는 초미세먼지 예보를 시행하고 있다(www.airkorea.or.kr). 환경부 미세먼지 예보는 전국을 18개 권역(서울, 인천, 경기 북부, 경기 남부, 강원 영서, 강원 영동, 대전, 세종, 충북, 충남 광주 전북, 전남, 부산, 대구, 울산, 경북, 경남, 제주)으로 세분화하고 미세먼지 수준을 ‘좋음’과 ‘보통’, ‘나쁨’, ‘매우 나쁨’ 등 4단계 등급으로 나눠 예보하고 있다. 그러나 현재 환경부에서 운영 중인 미세먼지예보 지수적중률은 70%이나, 미세먼지 농도가 $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상인 나쁨 등급의 고농도 감지확률은 40% 미만으로 시민이 느끼는 체감 오염도와 많은 차이를 발생하고 있다(NIER, 2016, 2015, 2014).

미세먼지 예보 정확도를 높이기 위해서는 기상예측기술, 배출량 산출기술, 화학수송모델링 기술, 지상 및 위성 관측 및 해석기술, 그리고 자료동화기술 등의 최첨단 모델링 요소기술 개발이 우선되어야 하고, 이를 융합하여 예보 시스템을 구축하는 기술이 요구된다. 특히 동아시아 및 국내 지형, 기상 및 배출 특성을 반영한 각각의 예보요소기술의 개발과 함께 실시간 지상 및 위성 관측자료를 활용한 자료동화기술을 융합하여 최적의 예보 시스템을 개발하는 것이 필요하다(NIER, 2016, 2015, 2014).

대기질 분야에서 초창기 자료동화는 Nieradzik and Elbern (2006)이 관측자료를 활용하여 3차원 초기 농도장을 도출하였고, 이를 화학수송모델에 적용하였다. 관측자료를 초기조건에 적용시 예보 모형은 모형의 초기 오차를 제거할 뿐만 아니라 풍상방향의 대기오염물질 농도를 관측치로부터 재생산함으로써 풍상방향 배출량의 불확도에 의한 예보오차를 줄일 수 있다는 사실을 알 수 있었다. 이후 다양한 대기질 예보모형에서는 측정자료를 활용한 자료동화 기법이 적용되었다.

자료동화에 활용되는 측정자료는 크게 인공위성과 지표 측정자료가 있다. 인공위성자료를 활용한 대표적인 대기질 자료동화 모형은 CAMS (Copernicus Atmospheric Monitoring Service) 전 지구 모델로서, 15개의 인공위성자료를 활용하여 초기장을 자료동화하고 전 지구적으로 대기질 오염물질을 예보하고 있다. 지표 측정자료를 적용한 예보 모형은 CAMS에 지역규모 모델(유럽지역)인 CHEMERE, EMEP (European Monitoring and Evaluation Programme; MSC-W version), EURAD-IM (European Air pollution Dispersion Inverse Model), LOTOS-EUROS ((Long Term Ozone Simulation - European Ozone Simulation), MATCH (Multiscale Atmospheric Transport and Chemistry), MOCAGE (Model Of atmospheric Chemistry At larGE scale), SILAM (System for Integrated modeLLing of Atmospheric coMposition) 등 3D-var, 4D-var, Optimal Interpolation 자료동화 방법을 적용하고 운영 중에 있다(Andersson *et al.*, 2015; Memmesheimer *et al.*, 2014; Menut *et al.*, 2013; Simpson *et al.*, 2012; Schaap *et al.*, 2008; Sofiev *et al.*, 2008; Josse *et al.*, 2004; Dufour *et al.*, 2004; Robertson *et al.*, 1999).

최근 동아시아 및 한반도지역을 대상으로 대기질 예보 모형에 적용하기 위한 자료동화 연구가 활발히 진행되고 있다. Lee *et al.* (2016)은 동북아시아지역에서 GOCI AOD (Geostationary Ocean Color Imager) AOD (Aerosol Optical Depth)를 spatiotemporal-kriging (STK) 방법을 적용하여 인공위성의 공간적인 한계를 극복하고, 대기질 예보 모형에 초기장으로 입력하였다. 6시간 이후 미세먼지 단기 예측 결과 bias가 60~70% 감소하였다. Park *et al.* (2015)은 13개의 인공위성으로 자료동화된 MACC III의 전 지구 예보 자료를 지역규모 모델인 CMAQ의 초기와 경계장으로 활용하여 대기질 예보를 평가한 결과 예보 성능이 향상되는 결과를 도출하였다. Kang (2015)은 중국 및 지표 측정자료를 적용하여 다양한 자료동화 방법 중 최적의 초기장 매핑 결과를 도출하였다.

본 연구에서는 동아시아지역 및 한반도지역의 미세먼지 예보 정확도를 향상시키기 위하여, Kang (2015)에서 연구한 다양한 초기장 매핑 결과 중 실시간 미세먼지 예보 시스템에 적용 가능한 Pun and Seigneur (2006)의 Pun 자료동화 방법을 적용하고, 장기간 한반도지역에 대해 미세먼지 예보 개선 효과를 분석 및 예보모델로서의 활용가치에 대해 판단하고자 한다.

2. 연구 방법

자료동화를 적용한 대기질 예보모델의 대기질 개선효과를 살펴보기 위하여 화학수송모델링 시스템을 구축하였다. 구축된 자료동화 방법인 Pun 자료동화 기법에 대해 살펴보고, 본 연구에서 개발된 자료동화 예보 시스템에 대해 설명하고자 한다. 또한 기상 및 화학수송모델에 적용된 물리옵션에 대해 살펴보고, 자료동화 및 실시간 예보 시간테이블, 자료동화에 활용된 측정자료, 연구 평가모델 등에 대해 살펴보고자 한다.

2.1 자료동화 방법

그림 1은 모델링 격자 및 지표 측정자료를 활용한 자료동화 개념도를 나타내었다. 격자상 불규칙적으로 분포한 관측치들(빨간 사각형, k)과 예보모형의 한 격자점 i 지점에서의 영향반경을 표현하였다. 자료동화란 격자점 i의 예측값(초기추정)과 영향반경(큰 원형, R)내 모든 관측치 k와의 가중치의 결합에 의해 산정된 동화 값이다.

다양한 자료동화 방법 중 본 연구에서 적용한 연속보정법은 경험적 접근 방법에 근간을 두고 있는 통계 방법이다. 연속보정법의 대표적인 방법으로는 Cressman (1959)이 널리 알려졌으며, Cressman (1959)의 측정소 거리별 가중치를 개선하여 Pun and Seigneur (2006)는 Pun's Interpolation 방법을 개발하였다. 본 연구에서는 Pun's Interpolation을 예보모델링시스템

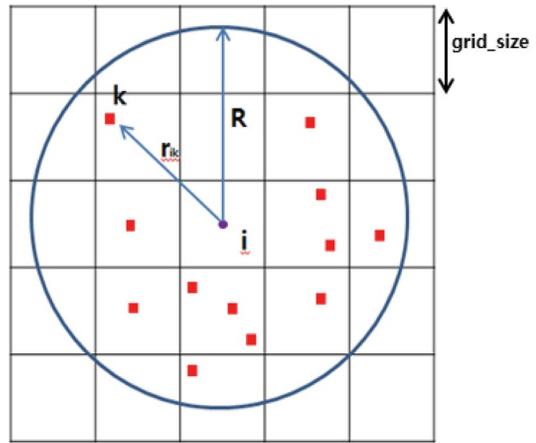


Fig. 1. Conceptual diagram of data assimilation.

에 적용하였다.

격자점에서의 모델의 예측값이나 기후 값으로 된 배경장(Background or First Guess)과 사용 가능한 관측 자료를 이용하여 배경장을 수정함으로써 분석장(Analysis Field)을 구한다. 동화 과정은 아래와 같다. 격자점에서의 초기값은 식(1)과 같이 배경장 값을 이용하여 주어진다.

$$f_i^0 = f_i^b \quad (1)$$

여기서, i는 격자점을 나타내고, 위 첨자는 반복 계산 회수를 나타낸다. 따라서, f_i^b 는 격자점 i에서 배경장 값을 나타내고, f_i^0 는 반복 계산을 하기 전의 초기값을 의미한다. 다음 단계에서 관측값을 이용하여 다음과 같이 식(2)로 계산한다.

$$f_i^{n+1} = f_i^n + \frac{\sum_{k=1}^{K_i^n} w_{ik}^n (f_k^0 - f_k^n)}{\sum_{k=1}^{K_i^n} w_{ik}^n} \quad (2)$$

Pun 내삽법은 식(2)로 표현되는 Cressman의 동화법을 아래와 같이 단순화하였다.

$$f_i^{n+1} = f_i^n + \sum_{k=1}^{K_i^n} W_{ik}^n (f_k^0 - f_k^n) \quad (3)$$

$$W_{i,ksite}^n = \frac{1/r_{icell,jcell,ksite}^2}{\sum_{k=1}^{K_i^n} 1/r_{icell,jcell,k}^2} \quad (4)$$

이 식은 Pun의 방법이 가중치를 단순히 물리 현상을 반영하여 내삽 대상 격자와 관측 지점간의 거리의 제곱에 반비례함을 나타낸다. 분모는 관측값이 두 개 이상일 경우 누적 내삽을 피하기 위한 정규화 과정이다.

그러나 이 방법은 정규화 과정으로 인해 거리가 다르지만 동일한 관측 분포를 갖는 내삽 대상 격자들이 같은 결과 값을 갖게 되는 문제가 있다. 이를 해결하기 위해 실제로는 가상의 site를 두어 아래와 같이 보정하며 n이 커질수록 거리의 영향력은 줄어든다. 본 연구에서는 n은 4를 적용하였다.

$$W_{i,ksite}^n = \frac{1/r_{icell,jcell,ksite}^2}{n_{virtual}/R + \sum_{k=1}^{K_i^n} 1/r_{icell,jcell,k}^2} \quad (5)$$

여기서 R은 영향 반경이다.

2.2 인위적 배출량

중국 배출량자료는 MEIC (Multi-resolution Emission Inventory for China) 자료를 활용하였다(<http://www.meicmodel.org>). MEIC 배출량은 중국 Tsinghua University에서 개발되었으며 2010년을 기준으로 산정된 중국지역 배출량이 작성되어 공개되고 있다. MEIC 배출량의 대상물질은 SO₂, NO_x, CO, NMVOC, NH₃, CO₂, PM_{2.5}, PMcoarse, BC, OC이며 수평해상도가 0.5°×0.5°이다. 배출원 분류는 power, industry, residential, transportation, agriculture의 5개이다.

한국 및 중국을 제외한 동아시아지역의 배출량은 REAS (Regional Emission inventory in ASia)을 활용하였다(Ohara *et al.*, 2007). REAS 배출량은 2013년부터 일본 국립환경연구소에서 공개하고 있는 아시아 배출량으로 2000년부터 2010년까지 아시아 전역에 대하여 0.25도 해상도의 배출량을 제공하고 있다. 대

기질 모델을 위해 제공되는 REAS 격자 배출원의 카테고리에는 power plant, industry, road transport, aviation, international navigation, other transport, domestic, extraction, solvents, fertilizer, manure management, waste, misc 등이고 대상물질은 SO₂, NO_x, CO, NMVOC, PM₁₀, PM_{2.5}, BC, OC, NH₃, CH₄, N₂O, CO₂이다. 본 연구에서는 2008년 기준 자료를 이용하였다.

국내 배출량은 국립환경과학원에서 개발된 대기보전정책지원시스템 (Clean Air Policy Support System : CAPSS)을 사용하였다(Lee *et al.*, 2011b). 본 연구에서 적용한 국내 CAPSS 배출량은 2011년 자료로서, 13개 대분류(에너지산업 연소, 비산업 연소, 제조업 연소, 생산공정, 에너지수송 및 저장, 유기용제 사용, 도로이동오염원, 비도로이동오염원, 폐기물처리, 농업, 기타 면오염원, 비산먼지, 생물성 연소) 및 중분류, 소분류, 연료 정보에 대해서 제공하며 오염물질은 CO, NO_x, SO_x, PM₁₀, VOC, NH₃, PM_{2.5}, TSP이다.

2.3 지역규모 모델링

본 연구에서 구축한 지역규모 화학수송모델링시스템 구축 모델은 다음과 같다. 기상모델은 WRFv3.6.1 (Weather Research Forecast version 3.6.1)을 사용하였고 (Skamarock and Klemp, 2008; Borge *et al.*, 2008), 배출량 생성 모델은 SMOKE v2.7 (Sparse Matrix Operator Kernel Emissions version 2.7)에 의해 생성하였다. 대기질 화학수송모델은 US EPA Model-3 CMAQv4.7.1 (Community Multiscale Air Quality version 4.7.1)을 적용하여 대기질을 모사하였다 (Byun and Schere, 2006; Byun and Ching, 1999).

기상모델인 WRF의 주요 물리과정은 미세물리과정으로 WRF Single-Moent 6-class (WSM6) scheme, 장파, 단파 대기복사 과정은 Rapid Radiative Transfer Model (RRTM), Dudhia short radiation scheme, 행성 경계층 모수화 scheme으로는 Yonsei University (YSU) scheme, 그리고 적은 모수화 방법은 Kain-Fritsch (KF) scheme을 사용하였다. 또한 WRF 모델링

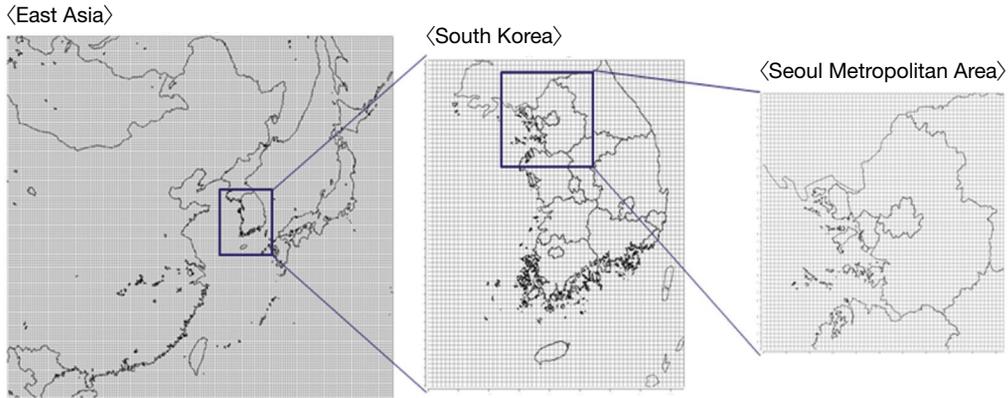


Fig. 2. The modeling domains to simulate the air quality in East Asia, Korea, Seoul Metropolitan Area region.

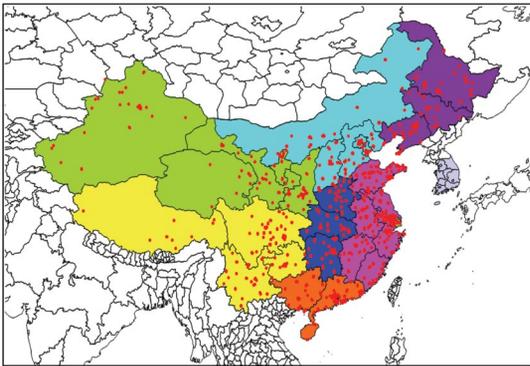


Fig. 3. Locations of regional observation in China.

에서 초기 및 경계조건은 Global Forecasting System (GFS)의 예보자료를 사용하여 지역규모모델링을 위한 기상입력자료를 작성하였다.

대기질모델인 CMAQ의 물리옵션은 가스상 화학 메커니즘은 CB05 (Carbon Bond 2005) chemical mechanism 에어로졸 화학반응은 AERO5 및 ISORROPIA 화학평형모델을 적용하였다. 수평 이류 알고리즘은 Yamo advection solver, 화학 솔버는 EBI (The Euler-Backward Iterative) chemistry solver, 수평 확산 모듈은 MultScale, 연직확산모듈은 Eddy를 적용하였다. 연직은 15 layer로 구분하였으며, 최하층은 WRF와 동일하게 적용하였다.

화학수송모델링 시스템의 모델링 영역은 그림 2에

나타내었다. 도메인 1은 동아시아 영역으로 격자크기가 27 km, 도메인 2는 한반도 영역으로 격자크기가 09 km, 도메인 3은 수도권영역으로 격자크기가 03 km이다.

2.4 자료동화에 활용된 측정자료

본 연구에서 사용된 지표 측정소는 실제 위치가 아닌 예보 격자 평균 자료를 사용하였다. 즉, 모델링 영역별 각 격자 내 측정값이 여러 개 존재할 시 평균하였다. 그림 3은 중국지역의 측정소를 각 지역별로 나타내었다(www.pm25.in). 측정소는 서북 212개, 화북 123개, 동북 169개, 화동 427개, 서북 198개, 중남 162개, 중앙 205개이며, 총 1,496개이다. 그림 4는 본 연구에서 활용한 한반도 영역 내의 도시 대기질 및 국가배경 측정소 지점을 나타내었으며, 측정소 개수는 323개를 적용하였다.

2.5 한반도 예보권역

환경부는 2018년 현재 미세먼지 예보는 총 19개 권역으로 예보되고 있다. 예보 권역은 서울, 인천, 경기 북부, 경기 남부, 강원 영서, 강원 영동, 충남, 충북, 세종, 대전, 경북, 경남, 대구, 울산, 부산, 전북, 전남, 광주, 제주도이다. 본 연구에서는 세종시를 제외한 18개 권역에 대해 미세먼지 예보를 평가하였다.

2.6 자료동화를 위한 실시간 예보 테이블

자료동화를 적용한 예보 시스템의 시간테이블은 Choi *et al.* (2018)의 예보 시스템과 유사하나 자료동화 적용으로 인하여 다소 차이가 있다. 예보시간 테이블의 자세한 내용은 표 1에 나타내었다.

자료동화는 00UTC, 12UTC 모델 초기시간부터 1시간씩 중국과 한반도 지표 측정자료를 모델의 초기장에 동화한다. 총 12시간을 모델의 초기장에 자료동화하여 측정자료를 반영하고, 예보모델링시스템에 입력한다(표 1의 음영 부분).

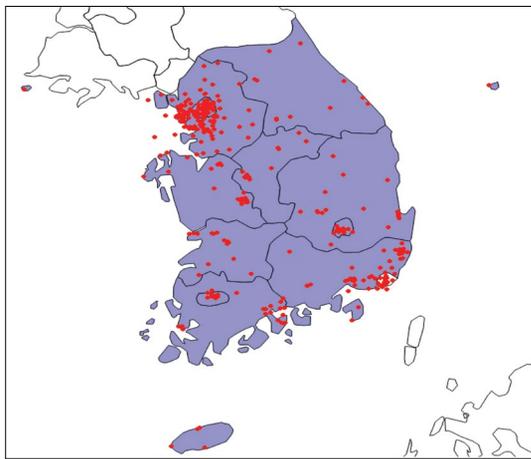


Fig. 4. Locations of air quality monitoring station in Korea.

화학수송모델링 자료동화 효과를 분석하기 위한 모델 추출시간은 00UTC의 12시간, 12UTC의 12시간을 추출하여 평가하였으며(표 1의 사선 부분), 실시간 예보 운영 평가를 위한 모델값 추출은 12UTC 모델자료의 Day + 1을 기간을 추출하였다(일 평균).

2.7 화학수송모델링 시스템 내의 자료동화 속성

화학수송모델링 시스템 내 도메인별 자료동화 속성은 표 2에 나타내었다.

Domain 1은 동아시아지역으로 27 km 해상도를 가지고 있다. 측정자료는 중국과 한반도 자료를 활용하였으며, 영향반경은 55 km로 지정하였다(격자 2개).

Domain 2는 한반도지역으로 09 km 해상도를 가지고 있다. 측정자료는 한반도 자료를 활용하였으며, 영향반경은 28 km로 지정했다(격자 3개).

Domain 3은 수도권지역으로 03 km 해상도를 가지고 있다. 측정자료는 한반도 자료를 활용하였으며, 영향반경은 10 km로 지정하였다(격자 3개).

도메인별 공통적으로 자료동화 물질은 PM₁₀, PM_{2.5}, NO₂, SO₂, CO이며, 연직 자료동화 범위는 PBL 층까지 적용하였다. PM₁₀과 PM_{2.5}는 CMAQ에 적용 시 총량을 기존 초기장(자료동화 전 초기장)의 미세먼지 성분 물질비에 할당하여 적용하였다.

Table 1. Time table for air quality forecasting system with/without data assimilation at 00 UTC (09 LST) and 12 UTC (21 LST).

Model	Time	Day-1		Day				Day + 1				Day + 2				Day + 3			
00 UTC Model (09 LST)	UTC	00	06	12	18	00	06	12	18	00	06	12	18	00	06	12	18	00	06
	LST	09	15	21	03	09	15	21	03	09	15	21	03	09	15	21	03	09	15
12 UTC Model (21 LST)	UTC	-	-	12	18	00	06	12	18	00	06	12	18	00	06	12	18	00	06
	LST	-	-	21	03	09	15	21	03	09	15	21	03	09	15	21	03	09	15

Table 2. Data assimilation configure for air quality forecasting system.

Domain	Influence radius	Measurements	Vertical data assimilation	Pollutant
Domain 1	55 km	China, Korea		
Domain 2	28 km	Korea	PBL	PM ₁₀ , PM _{2.5} , NO ₂ , SO ₂ , CO
Domain 3	10 km	Korea		

Table 3. Model configure for estimations of PM₁₀ forecasting.

Category	Global weather forecasting data	Meteorological and air quality model	Anthropogenic emission in East Asia	Anthropogenic emission in Korea	Characteristics
CASE03	GFS	WRF v3.6.1	MEIC (2010)	2011 CAPSS	Without data assimilation
CASE04		CMAQ4.7.1	REAS (2008)		With data assimilation

2.8 평가모델 구성

자료동화를 적용한 화학수송모델 자료동화 효과 분석 및 예보 평가 검증을 위하여 표 3과 같이 모델을 구성하였다. 자료동화 적용 유무에 따라 비교 모델을 구성하였으며, 기상, 대기질 모델 및 배출량을 동일하게 구성하였다.

2.9 결과분석 방법

예보모델 결과와 측정자료의 정확도를 분석 및 PM₁₀ 예보 성능평가 방법은 Choi *et al.* (2018)의 통계 분석 및 예보성능 평가 방법을 활용하였다.

3. 연구 결과

예보 평가를 수행하기 전에 자료동화를 적용한 2015년 화학수송모델 자료동화 효과를 분석하고, 2017년 1월 1일~2018년 9월 23일까지 18개 권역에 대해 실시간 예보 운영 평가를 수행 하고자 한다.

본 연구의 연구결과 분석방법은 자료동화 적용 효과 및 PM₁₀ 예보성능을 평가하는 것으로, 사전연구인 Choi *et al.* (2018)의 연구결과 평가와 유사하게 분석하였다.

3.1 화학수송모델 자료동화 효과 분석

서울, 인천 및 경기지역 도시대기 측정값과 자료동화 전후 모델값의 시계열 및 산점도 비교 결과를 그림 5~그림 10에 나타내었고, 통계분석 결과를 표 4~표 6에 제시하였다. 수도권지역의 PM₁₀ 및 NO₂ 농도는 CASE03은 모델값이 측정값을 과소평가하고 있으나, CASE04는 모델값이 측정치 농도와 유사하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 서울지역의 PM_{2.5}

농도도 CASE03 모델값이 측정값을 과대평가하고 있으나 CASE04 모델값은 측정치와 유사하게 나타나는 것으로 나타났다. 이러한 특징은 산점도 그림을 통해 더욱 분명히 확인할 수 있다. CASE03과 비교하여 CASE04의 산점도는 기울기 1에 근접하여 집중되어 측정값을 보다 잘 모사한다.

통계분석 결과를 살펴보면, 측정값과 모델의 시계열 유사도를 나타내는 IOA가 자료동화 후 PM₁₀은 서울지역에서 0.58 → 0.78, 인천지역에서 0.57 → 0.83, 경기지역에서 0.57 → 0.82로 개선되었고, PM_{2.5}는 서울지역에서 0.67 → 0.84로 향상되었다. 마지막으로 NO₂는 서울지역에서 0.72 → 0.88, 인천지역에서 0.71 → 0.88, 경기지역에서 0.64 → 0.91로 증가하였다.

모델의 과대·과소평가 정도를 나타내는 NMB는 자료동화 후 PM₁₀은 서울지역에서 -25.38% → -0.99%, 인천지역에서 -31.5% → -2.99%, 경기지역에서 -37.36% → 7.9%로 개선되었고, PM_{2.5}는 서울지역에서 8.15% → 9.16%로 증가하였다. 마지막으로 NO₂는 서울지역에서 -22.32% → 1.13%, 인천지역에서 -18.90% → -2.12%, 경기지역에서 -34.73% → -8.52%로 향상되었다. 따라서 자료동화를 적용함으로써 오염물질의 공간분포 및 측정값과 정합도가 향상되었다.

그림 11~그림 13은 2015년 PM₁₀, PM_{2.5} 및 NO₂ 년 평균 농도 공간분포를 자료동화기법 적용 전후에 대하여 동아시아지역 (Domain 1 (27 km)), 한반도지역 (Domain 2 (9 km)) 및 수도권지역 (Domain 3 (3 km))을 대상으로 나타내었다. 동아시아지역의 측정망 자료를 자료동화함으로써 중국지역의 과소 모의된 PM₁₀ 및 PM_{2.5} 농도를 공간적으로 보완하고 있으며, 자료동화로 증가된 중국지역의 PM₁₀ 및 PM_{2.5} 농

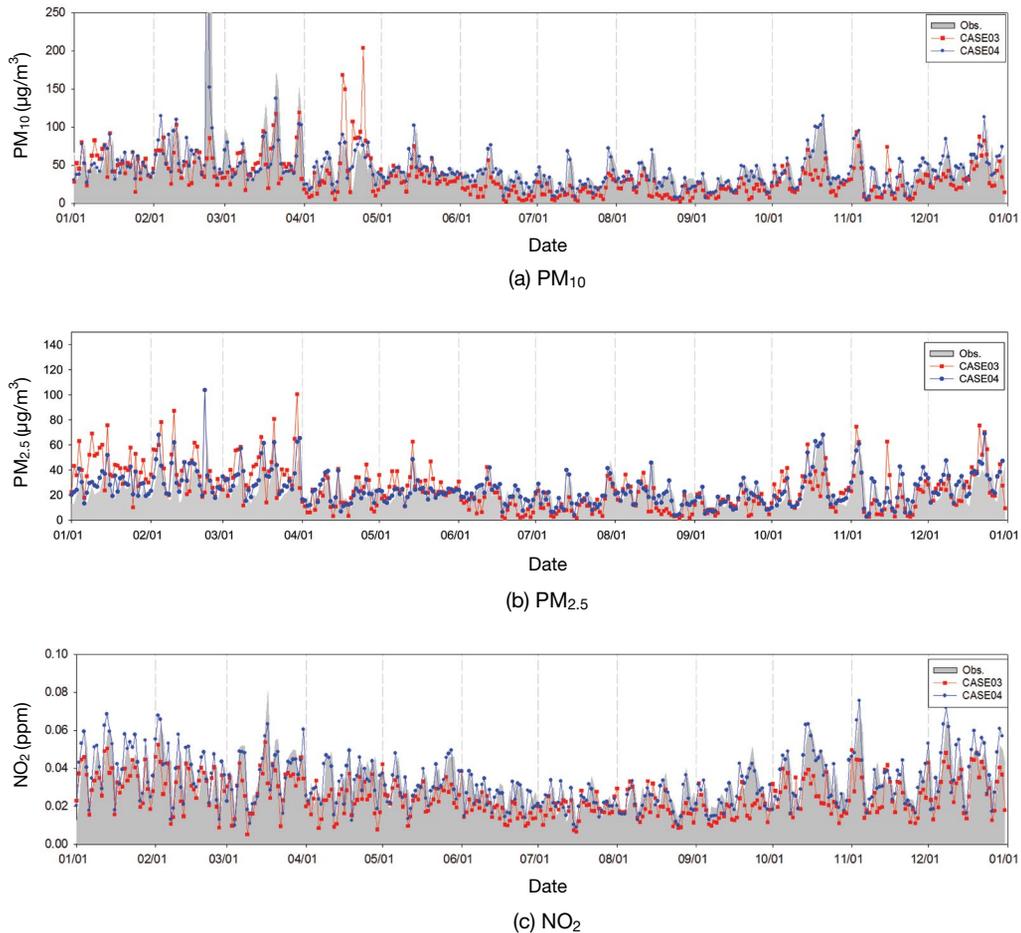


Fig. 5. Time series plots of measured and forecasted daily concentrations using data assimilation for 2015 in Seoul.

도가 한반도지역으로 이루어져, 자료동화 후 한반도 서해부근에 농도가 높아지는 것을 확인할 수 있다. NO_2 는 국지성 오염물질로 월경성 영향이 적으며, 한반도 내에 9 km 및 3 km 측정망자료 농도에 의해 자료동화 후 공간적으로 보완되는 것을 알 수 있었다.

3.2 실시간 예보 운영 평가

개발된 자료동화 모델을 실시간 화학수송모델링 시스템에 적용하여, 예보 개선효과를 평가하였다.

예보 평가기간은 2017년 전 기간, 2018년 1월 1일~2018년 9월 23일까지이다. 여기서, 2017년은 미세먼지 고농도 사례일이 대부분 존재하는 봄(3월~5월)과

겨울(12월~2월)로 구분하여 계절별로 평가하였다.

평가지역은 예보권역 19개 중, 세종시를 제외한 18개 지역인 서울, 인천, 경기 남부, 경기 북부, 강원 영서, 강원 영동, 충청북도, 충청남도, 대전, 경상남도, 경상북도, 부산, 대구, 울산, 전라북도, 전라남도, 광주, 제주도이다.

예보 평가 지표는 예보 지수(A: 적중률, POD: 감지확률, FAR: 오경보율) 및 통계지수(R, NMB)이다.

3.2.1 2017년 운영평가

그림 14는 2017년 자료동화를 적용한 예보모델(CASE04)과 자료동화를 적용하지 않은 예보모델

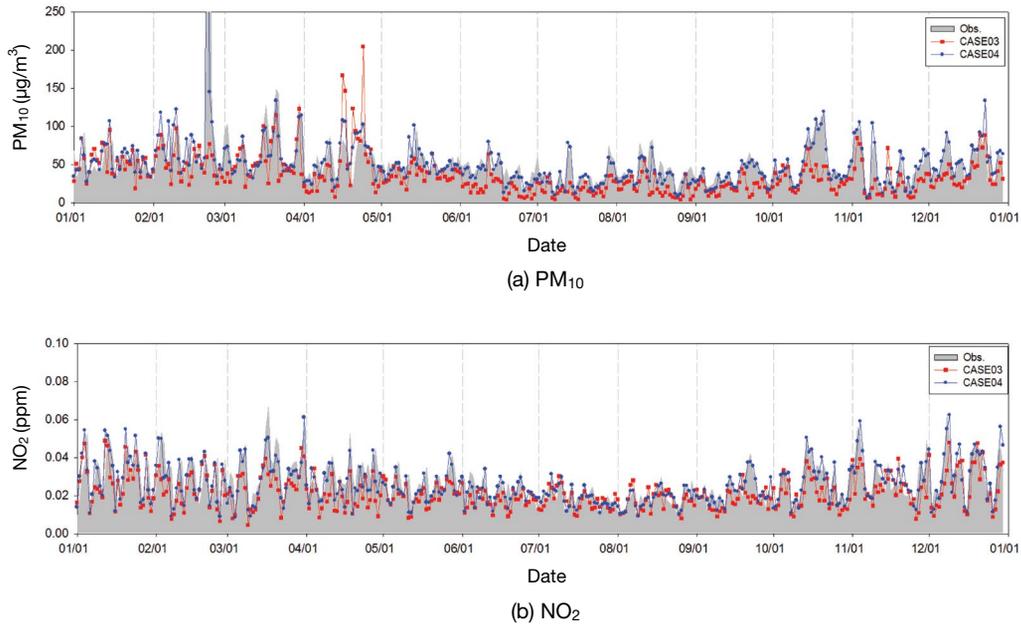


Fig. 6. Time series plots of measured and forecasted daily concentrations using data assimilation for 2015 in Incheon.

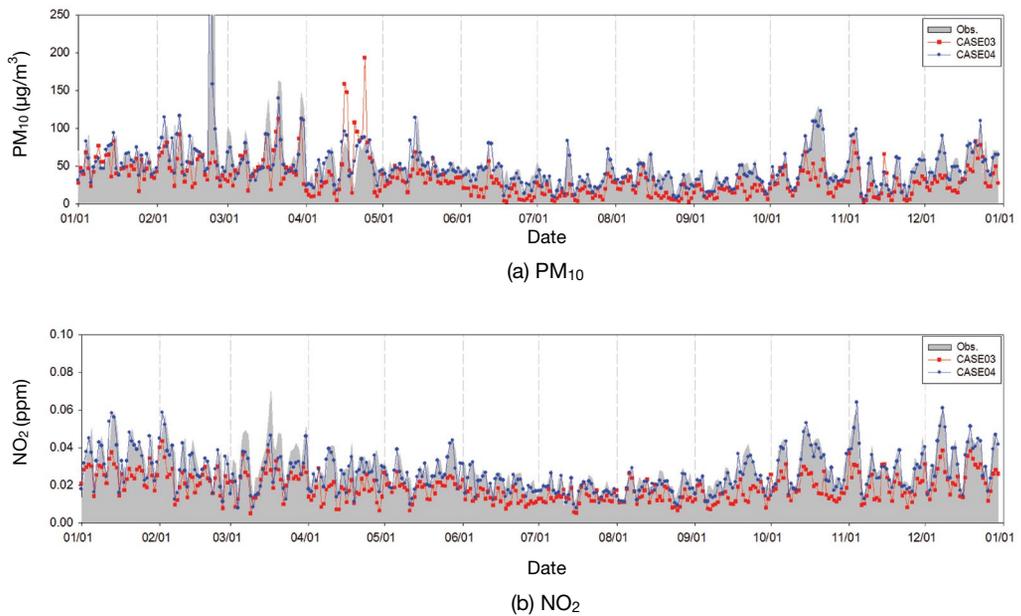


Fig. 7. Time series plots of measured and forecasted daily concentrations using data assimilation for 2015 in Gyeonggi.

(CASE03) 다음날(D+1) 예보 값에 대하여 예보지수를 평가하였다.

A는 CASE03이 강원 영동지역에서 66.20%로 가장 낮았으며, 충북지역이 81.18%로 가장 높았다.

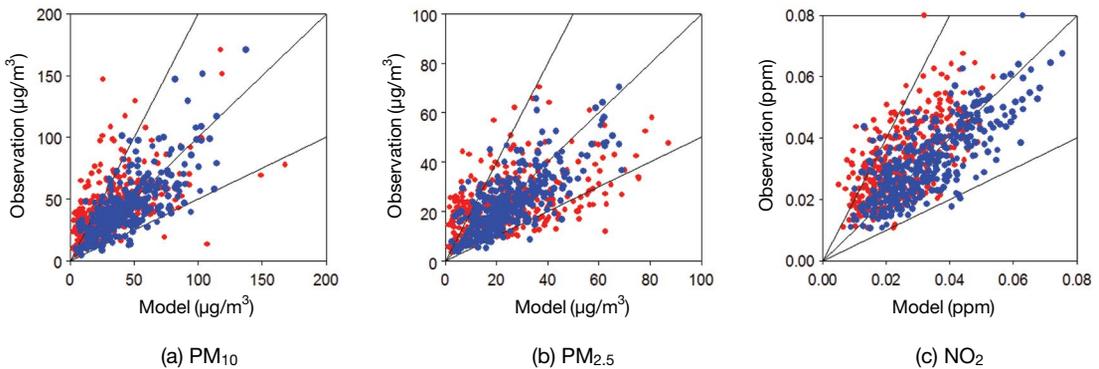


Fig. 8. Scatter plots of measured and predicted daily PM_{10} , $PM_{2.5}$ and NO_2 concentrations in Seoul ((a) PM_{10} , (b) $PM_{2.5}$, (c) NO_2), (red circle: CASE03, blue circle: CASE04).

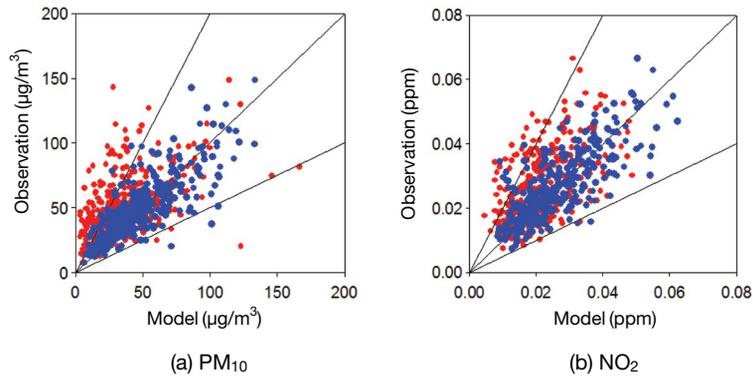


Fig. 9. Scatter plots of measured and predicted daily PM_{10} and NO_2 concentrations in Gyeonggi ((a) PM_{10} , (b) NO_2), (red circle: CASE03, blue circle: CASE04).

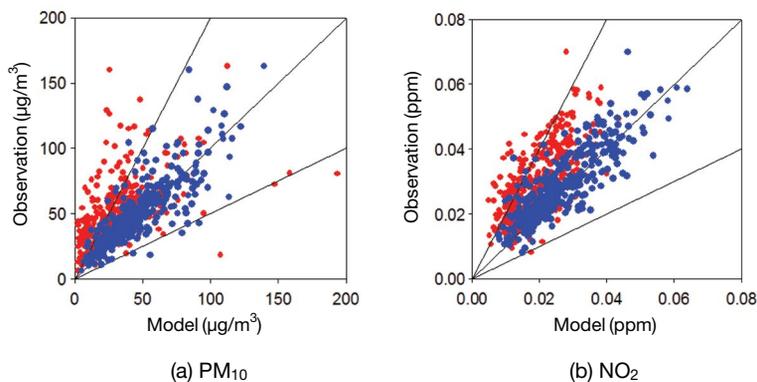


Fig. 10. Scatter plots of measured and predicted daily PM_{10} and NO_2 concentrations in Gyeonggi ((a) PM_{10} , (b) NO_2), (red circle: CASE03, blue circle: CASE04).

Table 4. A statistical summary for performance of predicted PM₁₀ concentrations using real-time forecasting without and with data assimilation for 2015.

Region	Classify	Mean obs. ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Mean model ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	IOA	MBIAS ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	RMSE ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	NMB (%)
Seoul	CASE03	44.98	33.57	0.58	-11.42	36.96	-25.38
	CASE04	44.98	44.54	0.78	-0.45	29.77	-0.99
Incheon	CASE03	51.35	35.18	0.57	-16.18	37.05	-31.50
	CASE04	51.35	49.82	0.83	-1.54	25.62	-2.99
Gyeonggi	CASE03	52.02	32.58	0.57	-19.44	38.64	-37.36
	CASE04	52.02	47.91	0.82	-4.11	27.19	-7.90

Table 5. A statistical summary for performance of predicted PM_{2.5} concentrations using real-time forecasting without and with data assimilation for 2015.

Region	Classify	Mean obs. ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Mean model ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	IOA	MBIAS ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	RMSE ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	NMB (%)
Seoul	CASE03	22.92	24.79	0.67	1.87	15.22	8.15
	CASE04	22.92	25.02	0.84	2.10	9.59	9.16

Table 6. A statistical summary for performance of predicted NO₂ concentrations using real-time forecasting without and with data assimilation for 2015.

Region	Classify	Mean obs. ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Mean model ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	IOA	MBIAS ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	RMSE ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	NMB (%)
Seoul	CASE03	0.0320	0.0249	0.72	-0.0071	0.0120	-22.32
	CASE04	0.0320	0.0324	0.88	0.0004	0.0087	1.13
Incheon	CASE03	0.0262	0.0213	0.71	-0.0050	0.0104	-18.90
	CASE04	0.0262	0.0257	0.88	-0.0006	0.0070	-2.12
Gyeonggi	CASE03	0.0287	0.0187	0.64	-0.0100	0.0127	-34.73
	CASE04	0.0287	0.0263	0.91	-0.0025	0.0063	-8.51

CASE04는 CASE03과 같이 강원 영동지역이 66.20%로 가장 낮았으며, 충북지역이 83.62%로 가장 높았다. A는 전남지역을 제외하고 전 지역에서 자료동화를 적용한 CASE04가 개선되는 것으로 나타났다. 특히 광주지역에서는 6.27%로 가장 크게 개선되었다.

POD는 CASE03이 경남지역에서 12.50%로 가장 낮았으며, 인천지역이 43.48%로 가장 높았다. CASE04는 강원 영동지역이 11.11%로 가장 낮았으며, 서울지역이 52.38%로 가장 높았다. POD는 경기 북부, 강원 영동지역을 제외하고 예보 전 지역에서 개선되는 것을 확인할 수 있었다. 특히 대전 및 제주

지역에서는 각각 23.08%, 28.57%로 가장 크게 개선되었다.

FAR는 경기 북부, 부산, 강원 영동, 경기 북부 및 제주지역을 제외하고는 자료동화를 적용한 CASE04가 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

자료동화를 적용한 예보모형은 A, POD, FAR가 예보 전 권역에서 대부분 개선되는 것을 확인할 수 있었다.

그림 15은 2017년 자료동화를 적용한 예보모델(CASE04)과 자료동화를 적용하지 않은 예보모델(CASE03) 다음날(D+1) 예보 값에 대하여 통계평가

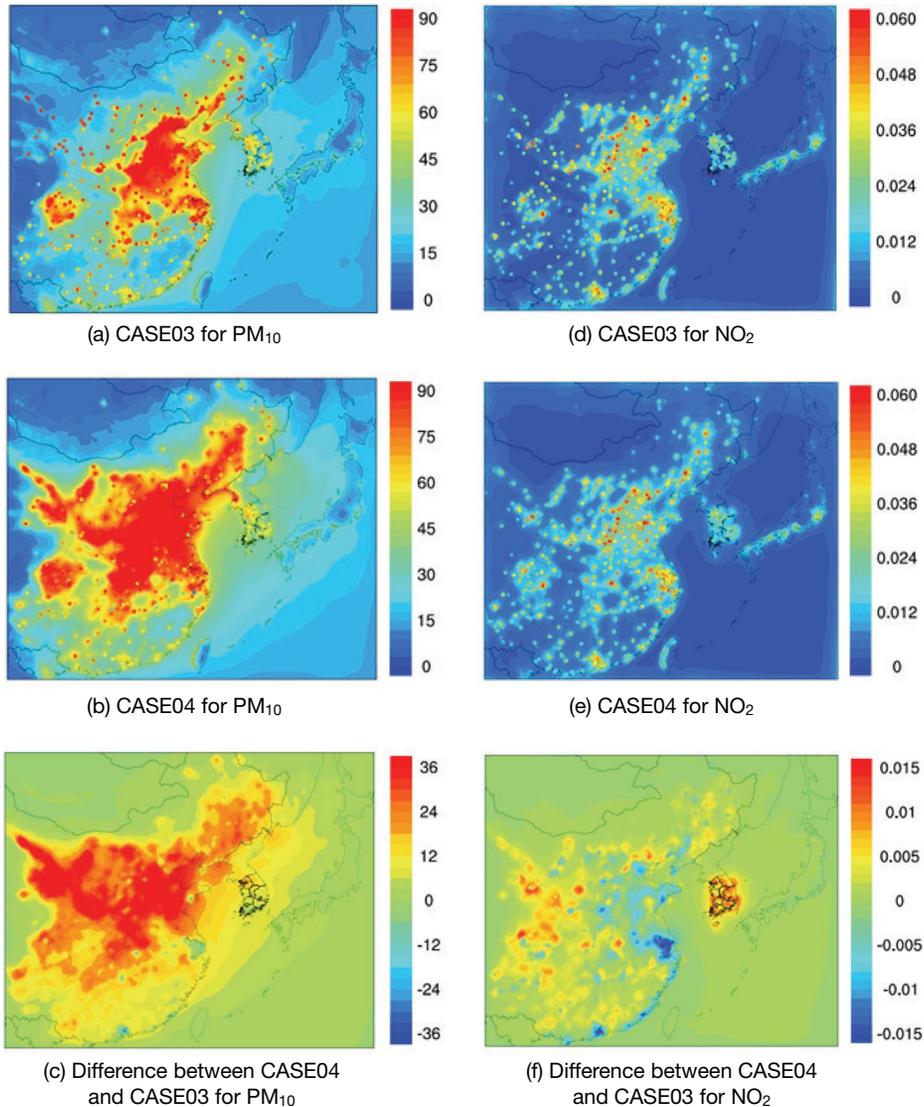


Fig. 11. Spatial distribution of yearly PM_{10} and NO_2 concentrations of CASE03 and CASE04 in East Asia for 2015.

를 나타내었다.

R은 모델과 측정값의 시계열 유사도를 평가하는 지표로서, CASE03은 전남지역에서 0.41로 가장 낮았으며, 강원 영서지역에서 0.66으로 가장 높았다. CASE04는 강원 영동지역에서 0.47로 가장 낮았으며, 제주지역에서 0.75로 가장 높았다. R은 자료동화를 적용한 CASE04가 CASE03 모델보다 전 지역에서 크게 개선이 되고 있으며, 모델값이 측정값의 시계열

패턴을 보다 적절하게 모사하고 있다.

NMB는 모델과 측정값의 과대 과소를 평가를 나타내는 지표로서, CASE03은 서울지역에서 0.74%로 가장 낮았으며, 제주지역에서 -35.02%로 가장 높았다. CASE03은 서울, 강원 영동, 전남지역을 제외하고 대부분 모델이 측정값을 과소평가하고 있다. CASE04는 충북지역에서 -0.10%로 가장 낮았으며, 전남지역에서 -27.28%로 가장 높았다. 자료동화를 적용한

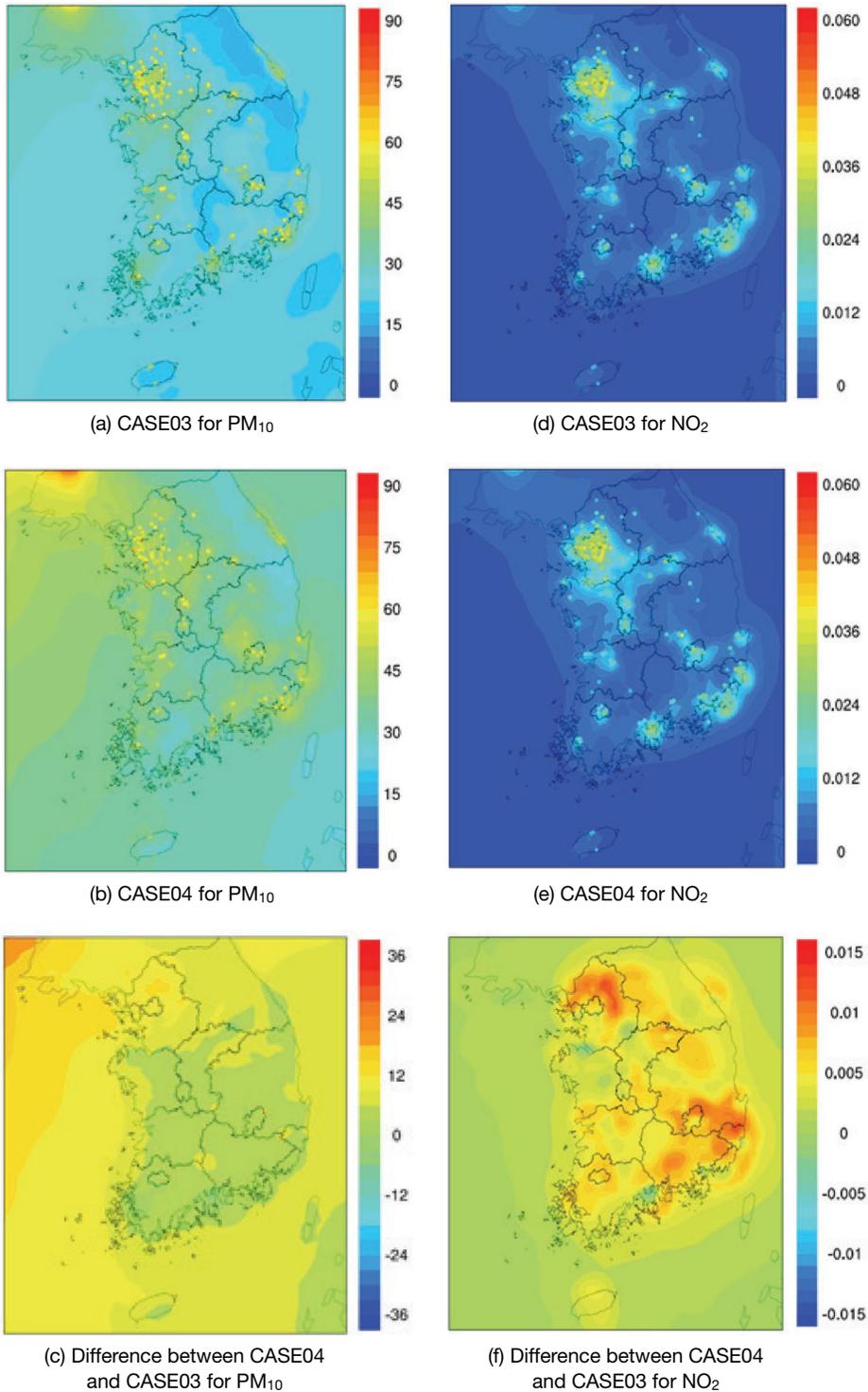


Fig. 12. Spatial distribution of yearly PM_{10} and NO_2 concentrations of CASE03 and CASE04 in Korea for 2015.

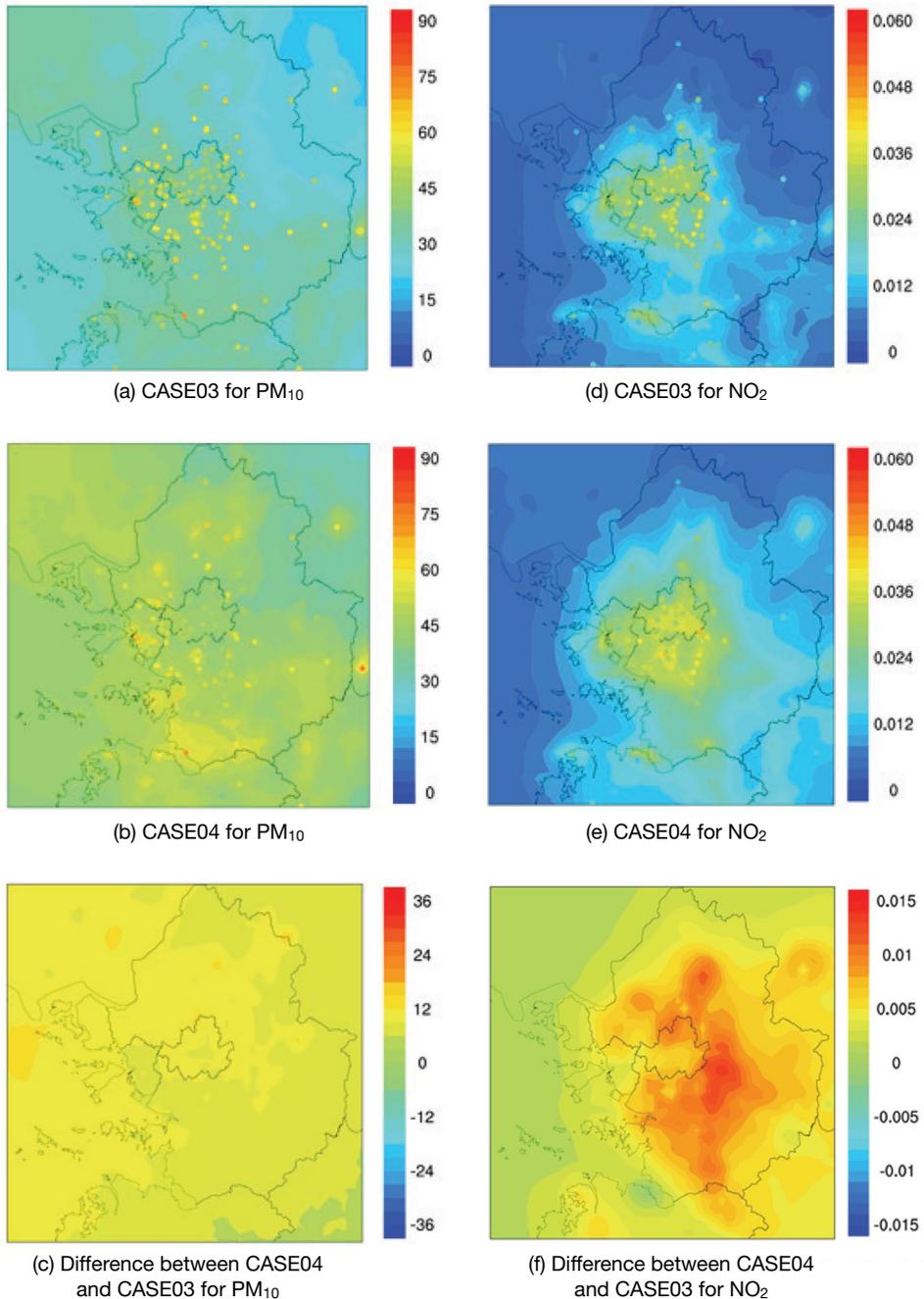


Fig. 13. Spatial distribution of yearly PM₁₀ and NO₂ concentrations of CASE03 and CASE04 in the Seoul Metropolitan Area for 2015.

CASE04는 전 지역에서 모델이 측정값을 과소평가하는 경향을 개선한다. 그러나 기존모델(CASE03)이 측

정값을 과대평가하는 지역은 더욱 과대평가하는 경향이 나타나는 문제점이 나타났다.

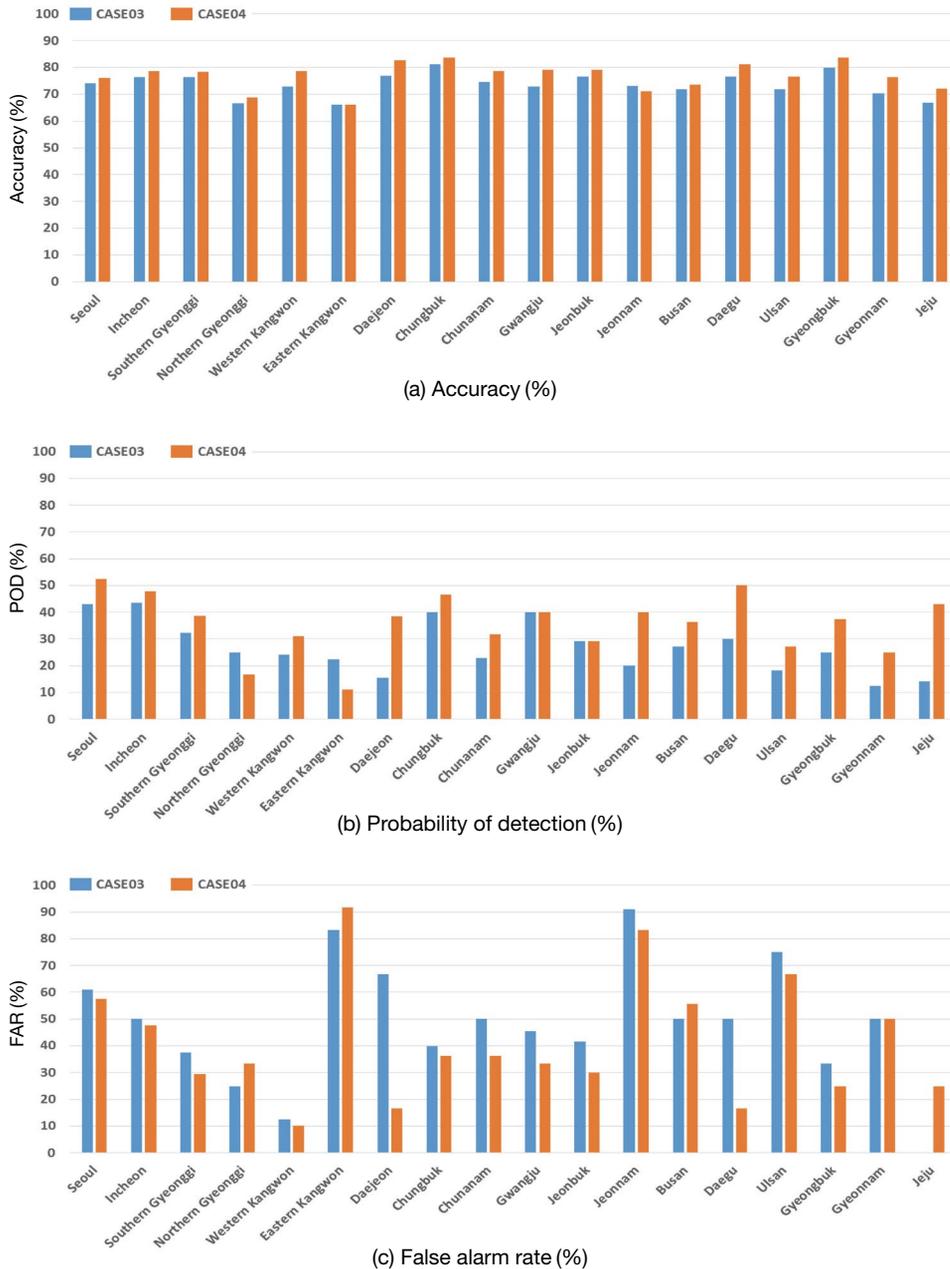


Fig. 14. A categorical forecasts scores for performance of real-time forecasting without and with data assimilation for 2017.

자료동화는 화학수송모델의 초기장을 개선하여 대기질 예보에 일정 시간 동안 영향을 주며, 초기장의 개선 효과는 이후 지속 강도가 점차 약해지므로(Lam and Fu 2010; Tombrou *et al.*, 2009; Fu *et al.*, 2008), 예

보지역에서 자료동화된 풍상 측 바람이 형성되거나 정체성 고기압패턴일 때 예보 개선 효과가 클 것으로 판단된다. 그러나 위 사례가 아니면 초기장보다 배출량에 의한 영향이 화학수송모델에 더욱 의존적으로

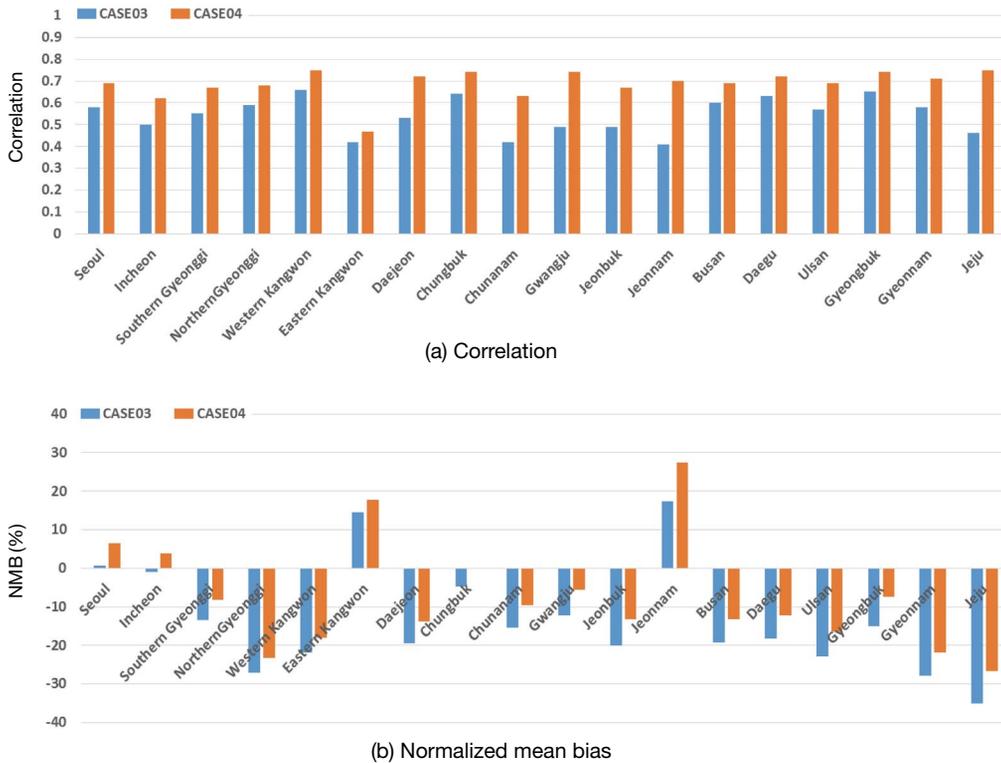


Fig. 15. A statistical summary for performance of real-time forecasting without and with data assimilation for 2017.

영향을 줄 것이라 판단된다. 따라서 자료동화는 미세 먼지 평균 농도를 보완하지만 특정 사례가 아닐 시에는 자료동화를 적용하지 않은 모델 결과와 유사 또는 과대하게 평가되는 것을 확인할 수 있었다. 향후 이러한 문제점을 검증 및 확인하기 위하여 다양한 사례에 대해 자료동화 예보 효과를 분석할 필요가 있다.

3.2.1.1 봄 (3월~5월)

그림 16은 2017년 봄, 자료동화를 적용한 예보모델 (CASE04)과 자료동화를 적용하지 않은 예보모델 (CASE03) 다음날 (D+1) 예보 값에 대하여 예보지수를 평가하였다.

A는 CASE03이 제주지역에서 51.69%로 가장 낮았으며, 전남지역이 83.15%로 가장 높았다. CASE04는 제주지역이 62.92%로 가장 낮았으며, 충북지역이 86.52%로 가장 높았다. A는 강원 영동 및 전남지역을

제외하고 전 지역에서 자료동화를 적용한 CASE04가 개선되는 것으로 나타났다. 특히 경남 및 경북지역에서는 각각 13.48%, 12.36%로 가장 크게 개선되었다.

POD는 CASE03이 경남, 경북, 대구, 전남 및 대전 지역에서 0%로 가장 낮았으며, 광주지역이 28.57%로 가장 높았다. CASE04는 강원 영동지역이 12.50%로 가장 낮았으며, 부산 및 제주지역이 42.86%로 가장 높았다. POD는 강원 영동 및 전북지역을 제외하고 예보 전 지역에서 개선되는 것을 확인할 수 있었다. 특히 자료동화를 적용한 CASE04가 POD가 0%였던, 경남, 경북, 대구, 전남 및 대전지역에서 고농도를 감지하는 확률이 개선되었으며, 부산 및 제주지역에서 각각 28.57로 가장 크게 개선되었다.

FAR는 서울, 경기 남부, 충남, 전남 및 경남지역을 제외하고는 자료동화를 적용한 CASE04가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 봄철에 자료동화를 적용한

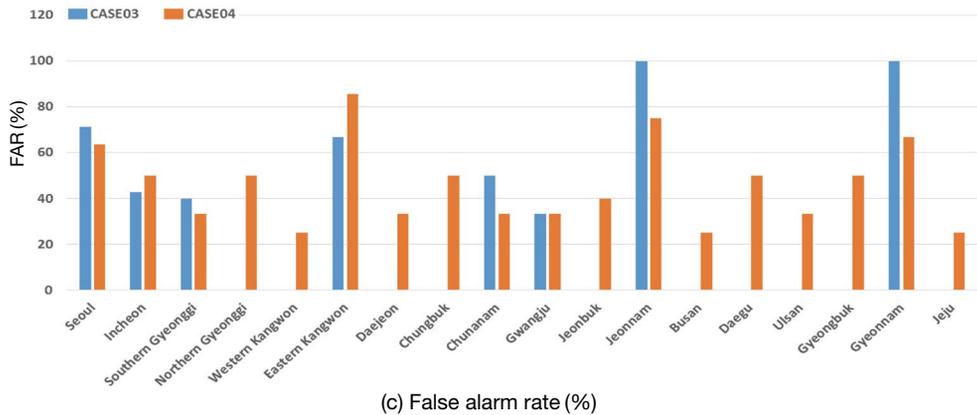
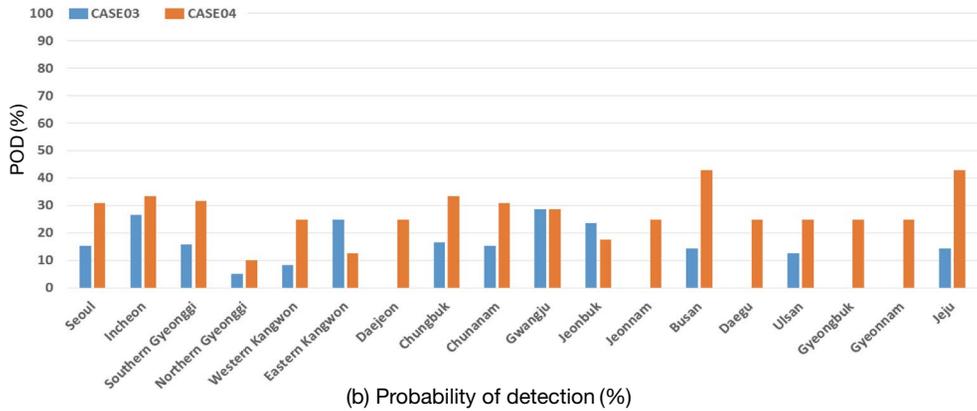
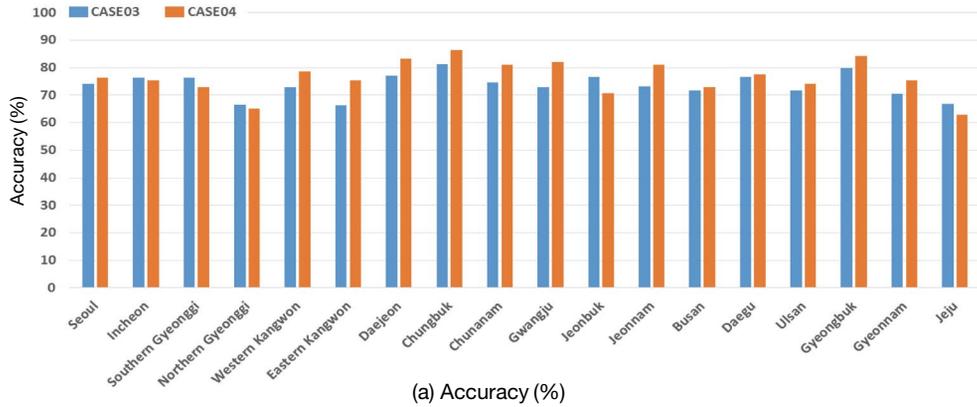


Fig. 16. A categorical forecasts scores for performance of real-time forecasting without and with data assimilation in spring for 2017.

예보모형은 A, POD가 대부분 예보 권역에서 대부분 개선되지만 FAR가 증가하는 경향을 보인다.

그림 17은 2017년 봄, 자료동화를 적용한 예보모델 (CASE04)과 자료동화를 적용하지 않은 예보모델

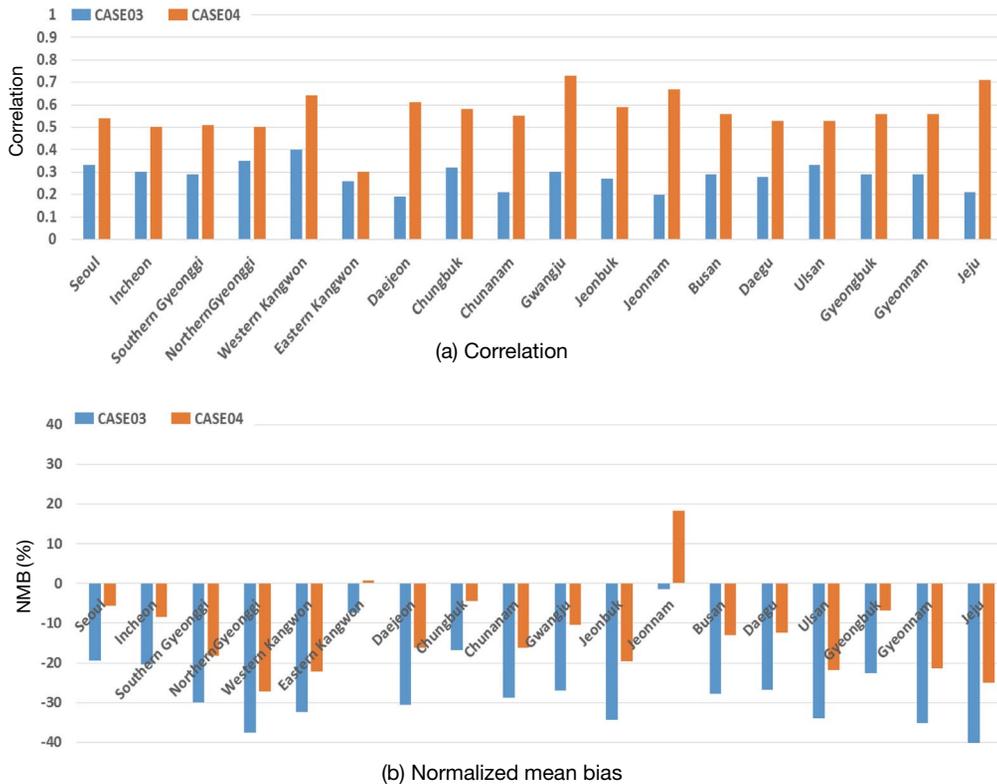


Fig. 17. A statistical summary for performance of real-time forecasting without and with data assimilation in spring for 2017.

(CASE03) 다음날(D+1) 예보 값에 대하여 통계평가를 나타내었다.

R은 모델과 측정값의 시계열 유사도를 평가하는 지표로서, CASE03이 대전지역에서 0.19로 가장 낮았으며, 강원 영서지역에서 0.40으로 가장 높았다. CASE04는 강원 영동지역에서 0.30으로 가장 낮았으며, 광주지역에서 0.73으로 가장 높았다. R은 자료동화를 적용한 CASE04가 CASE03 모델보다 전 지역에서 크게 개선이 되고 있으며, 모델값이 측정값의 시계열 패턴을 보다 적절하게 모사하고 있다.

NMB는 모델과 측정값의 과대 과소를 평가를 나타내는 지표로서, CASE03이 전남지역에서 -1.40%로 가장 낮았으며, 제주지역에서 -44.18%로 가장 높았다. CASE03는 예보 전 권역에서 모델이 측정값을 과소평가하고 있다. CASE04는 강원 영동지역에서

0.67%로 가장 낮았으며, 경기 북부지역에서 -27.15%로 가장 높았다. 자료동화를 적용한 CASE04는 예보 전 권역에서 모델이 측정값을 과소평가하는 경향을 개선한다. 그러나 기존모델(CASE03)이 측정값을 과대평가하는 지역은 더욱 과대평가하는 경향이 나타나는 문제점이 나타나며, 봄철에는 모델값이 측정값을 과소 모의하는 경향을 확인할 수 있었다.

3.2.1.2 겨울

그림 18은 2017년 겨울, 자료동화를 적용한 예보모델(CASE04)과 자료동화를 적용하지 않은 예보모델(CASE03) 다음날(D+1) 예보 값에 대하여 예보지수를 평가하였다.

A는 CASE03이 제주지역에서 경기 북부, 강원 영서 및 강원 영동지역에서 67.07%로 가장 낮았으며,

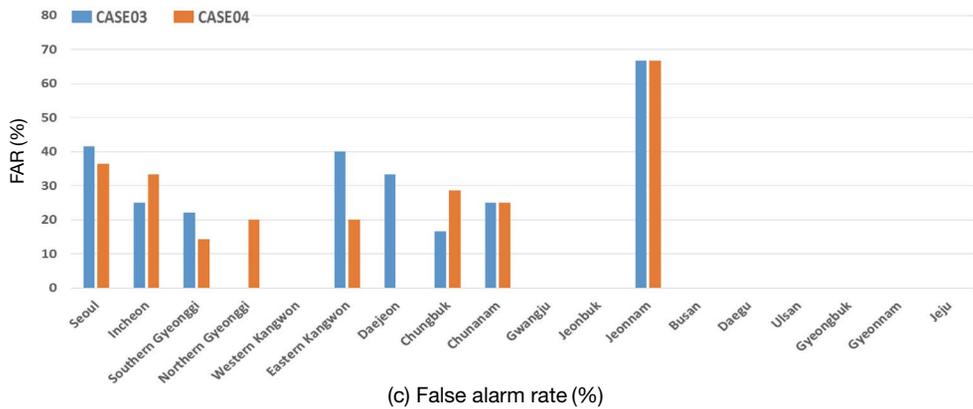
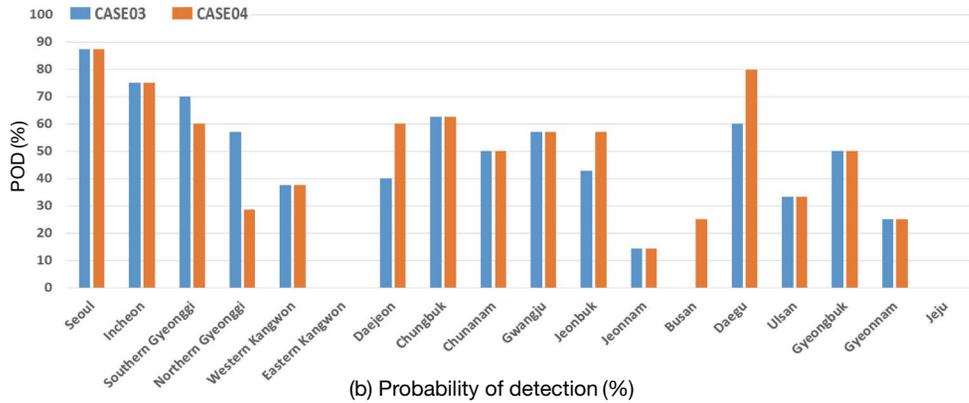
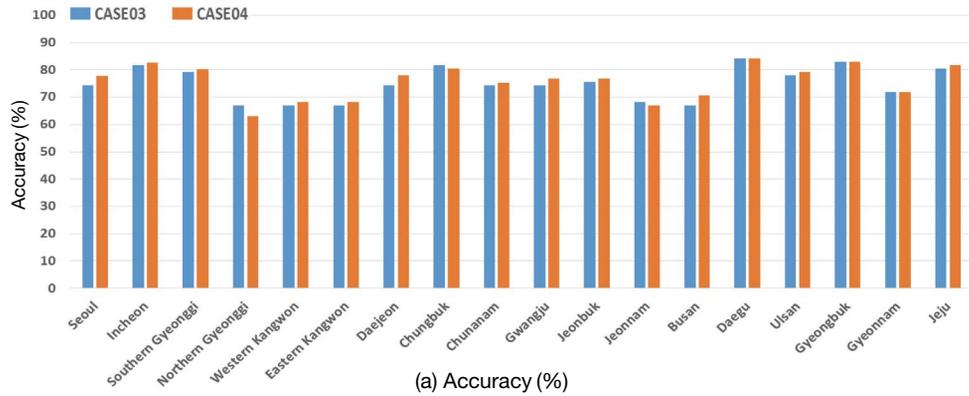


Fig. 18. A categorical forecasts scores for performance of real-time forecasting without and with data assimilation in winter for 2017.

대구지역이 84.15%로 가장 높았다. CASE04는 경기 북부지역이 62.96%로 가장 낮았으며, 대구지역이

84.15%로 가장 높았다. A는 경기 북부, 전남, 충북지역을 제외하고 전 지역에서 자료동화를 적용한

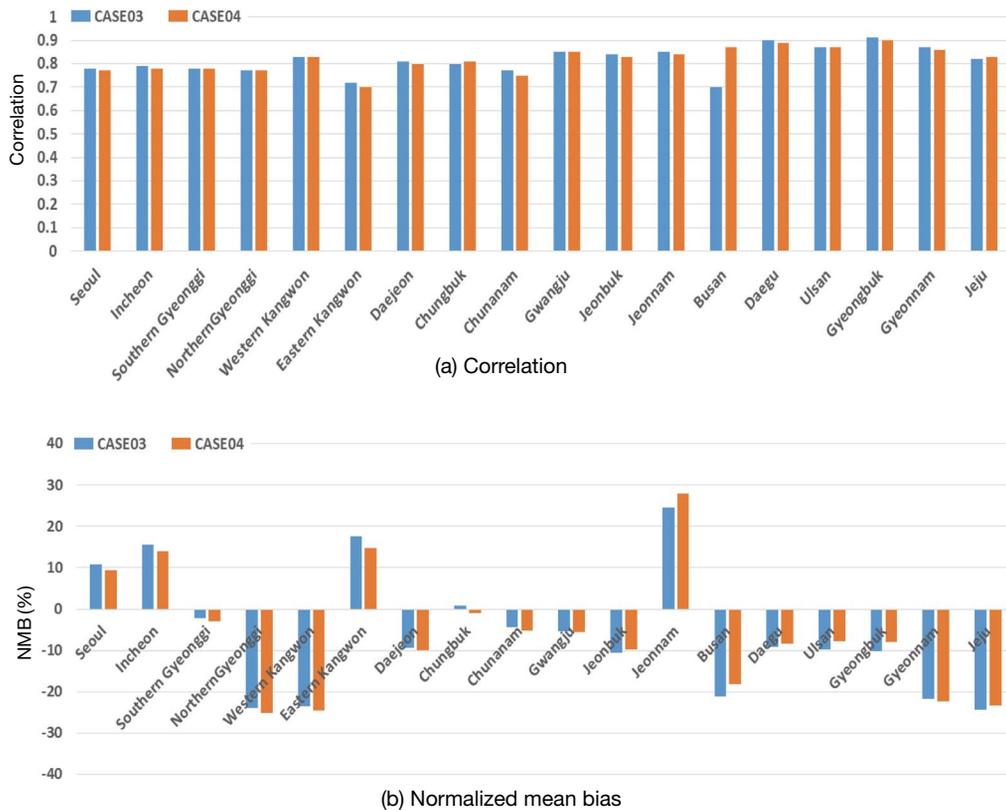


Fig. 19. A statistical summary for performance of real-time forecasting without and with data assimilation in winter for 2017.

CASE04가 개선되는 것으로 나타났다. 특히 대전 및 부산지역에서는 각각 3.66%로 가장 크게 개선되었다.

POD는 CASE03이 강원 영동, 부산, 제주지역에서 0%로 가장 낮았으며, 서울지역이 87.50%로 가장 높았다. CASE04는 강원 영동 및 제주지역에서 0%로 가장 낮았으며, 서울지역이 87.50%로 가장 높았다. POD는 경기 남부 및 북부를 제외하고 예보 전 지역에서 개선되는 것을 확인할 수 있었다. 특히 부산, 대구 및 대전지역에서 각각 25.00%, 20.00%, 20.00%로 가장 크게 개선되었다.

FAR는 인천, 경기 북부, 충북지역을 제외하고는 자료동화를 적용한 CASE04가 감소하는 것으로 확인할 수 있었다. 겨울철에 자료동화를 적용한 예보모형은 봄철과 비교하여 개선 효과가 크게 나타나지 않으나

대부분 지역에서 A, POD, FAR가 다소 개선되는 것을 확인할 수 있다.

그림 19는 2017년 겨울, 그림 8은 2017년 봄, 자료동화를 적용한 예보모델(CASE04)과 자료동화를 적용하지 않은 예보모델(CASE03) 다음날(D+1) 예보값에 대하여 통계평가를 나타내었다.

R은 모델과 측정값의 시계열 유사도를 평가하는 지표로서, CASE03가 부산지역에서 0.70으로 가장 낮았으며, 경북지역에서 0.91로 가장 높았다. CASE04는 강원 영동지역에서 0.70으로 가장 낮았으며, 경북지역에서 0.90으로 가장 높았다. R은 자료동화를 적용한 CASE04가 CASE03 모델과 비교하여 대부분 지역에서 유사하거나 개선되었으며, 모델값이 측정값의 시계열 패턴을 보다 적절하게 모사하고 있다. 특히 봄철과 비교하여 겨울철 모델의 시계열 변화는 더

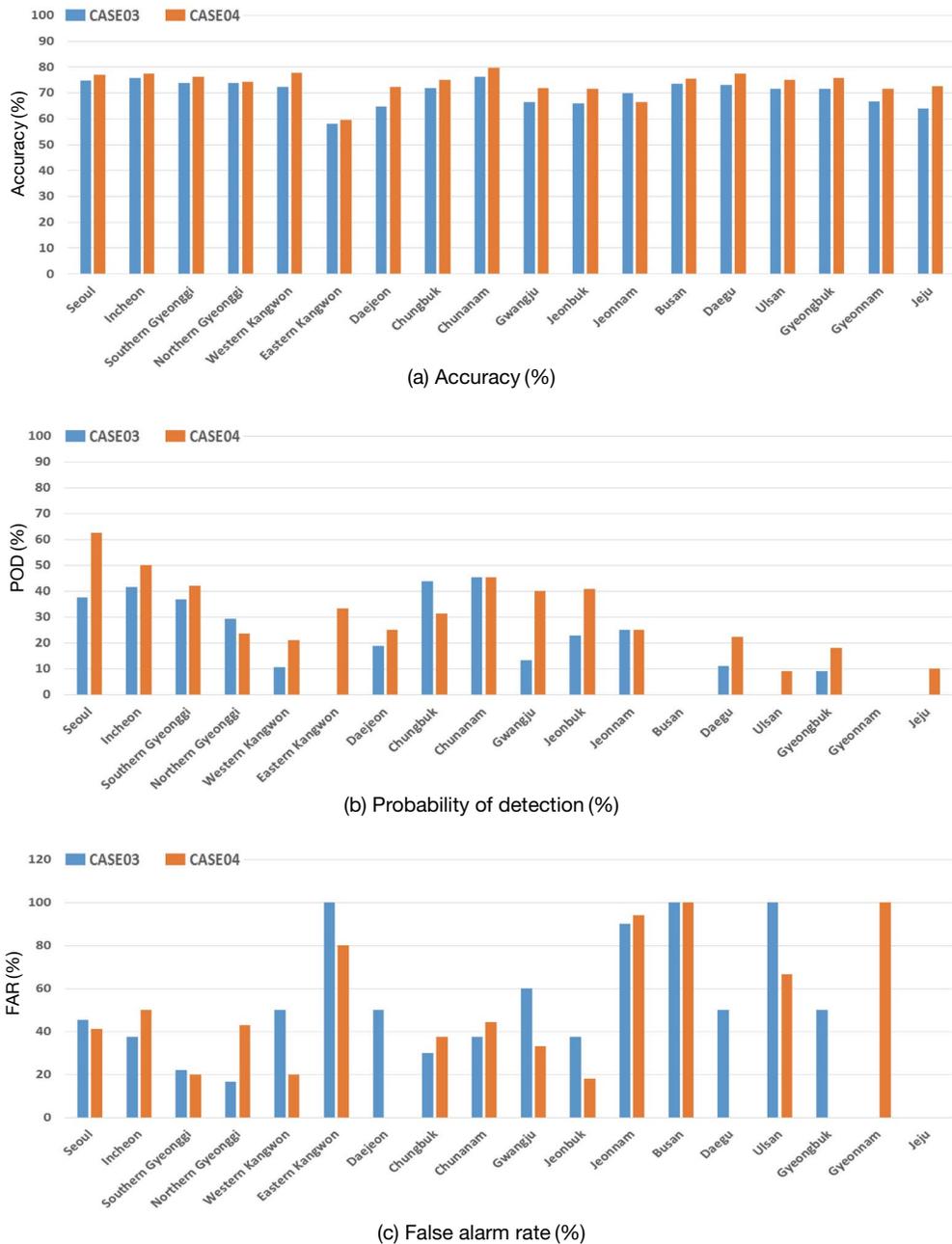


Fig. 20. A categorical forecasts scores for performance of real-time forecasting without and with data assimilation for 2018.

욱 측정값과 유사하게 나타난다.

NMB는 모델과 측정값의 과대 과소를 평가를 나타내는 지표로서, CASE03가 충북지역에서 0.76%로 가

장 낮았으며, 제주지역에서 24.64%로 가장 높았다.

CASE03는 서울, 인천, 강원 영동 및 전남지역을 제외하고 모델이 측정값을 과소평가하고 있다. CASE04

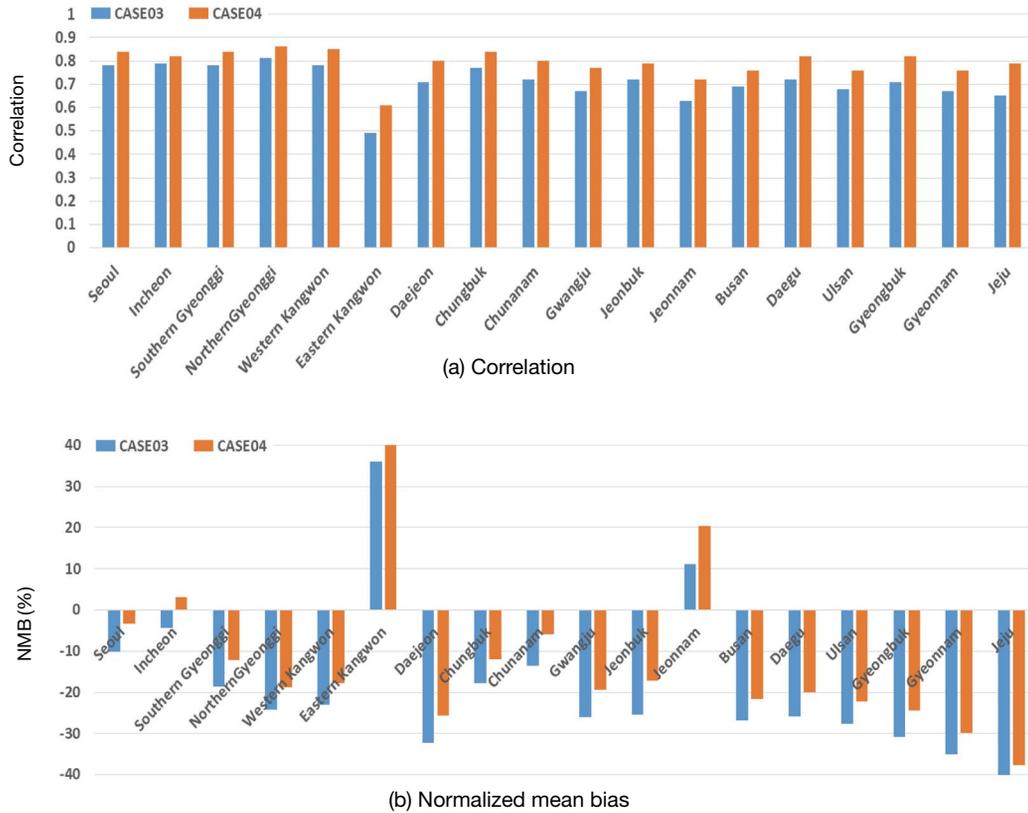


Fig. 21. A statistical summary for performance of real-time forecasting without and with data assimilation for 2018.

는 충북지역에서 -1.08% 로 가장 낮았으며, 전남지역에서 27.99% 로 가장 높았다. 자료동화를 적용한 CASE04는 예보 전 권역에서 모델이 측정값을 과소 평가하는 경향을 개선하거나 CASE03 결과와 유사하게 나타난다.

3.2.2 2018년 운영평가

그림 20은 2018년 자료동화를 적용한 예보모델 (CASE04)과 자료동화를 적용하지 않은 예보모델 (CASE03) 다음날(D+1) 예보 값에 대하여 예보지수를 평가하였다.

A는 CASE03이 강원 영동지역에서 58.10% 로 가장 낮았으며, 충남지역이 76.29% 로 가장 높았다. CASE04는 CASE03과 같이 강원 영동지역이 59.68% 로 가장 낮았으며, 충남지역이 79.84% 로 가장 높았

다. A는 전남지역을 제외하고 전 지역에서 자료동화를 적용한 CASE04가 개선되는 것으로 나타났다. 특히 대전지역에서는 7.51% 로 가장 크게 개선되었다.

POD는 CASE03이 강원 영동, 부산, 울산, 경남 및 제주지역에서 0% 로 가장 낮았으며, 충남지역에서 45.46% 로 가장 높았다. CASE04는 부산 및 경남지역이 0% 로 가장 낮았으며, 서울지역이 62.50% 로 가장 높았다. POD는 경기 북부지역을 제외하고 예보 전 지역에서 개선되는 것을 확인할 수 있었다. 특히 CASE03에서 고농도를 모사하지 못하였던, 강원 영동, 울산 및 제주지역에서 자료동화를 적용한 CASE04가 고농도를 모사하고 있으며, 강원 영동 및 광주지역에서 각각 33.33% , 26.67% 로 가장 크게 개선되었다.

FAR는 인천, 경기 북부, 충북, 충남, 전남, 경남지역

을 제외하고는 자료동화를 적용한 CASE04가 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

자료동화를 적용한 예보모형은 A, POD, FAR가 예보 전 권역에서 대부분 개선되는 것을 확인할 수 있었다.

그림 21은 2018년 자료동화를 적용한 예보모델(CASE04)과 자료동화를 적용하지 않은 예보모델(CASE03) 다음날(D+1) 예보 값에 대하여 통계평가를 나타내었다.

R은 모델과 측정값의 시계열 유사도를 평가하는 지표로서, CASE03이 강원 영동지역에서 0.49로 가장 낮았으며, 인천지역에서 0.79로 가장 높았다. CASE04는 강원 영동지역에서 0.61로 가장 낮았으며, 경기 북부지역에서 0.88로 가장 높았다. R은 자료동화를 적용한 CASE04가 CASE03 모델보다 전 지역에서 크게 개선이 되고 있으며, 모델이 측정값의 시계열 패턴을 보다 적절하게 모사하고 있다.

NMB는 모델과 측정값의 과대 과소를 평가를 나타내는 지표로서, CASE03가 인천지역에서 -4.25%로 가장 낮았으며, 제주지역에서 -43.94%로 가장 높았다. CASE03는 강원 영동 및 전남지역을 제외하고 대부분 모델이 측정값을 과소평가하고 있다. CASE04는 인천지역에서 3.11%로 가장 낮았으며, 강원 영동지역에서 40.93%로 가장 높았다. 자료동화를 적용한 CASE04는 전 지역에서 모델이 측정값을 과소평가하는 경향을 개선한다. 그러나 기존모델(CASE03)이 측정값을 과대평가하는 지역은 더욱 과대평가하는 경향이 나타나는 문제점이 나타나고, 여전히 모델이 대부분 지역에서 측정값을 과소모의하고 있다.

4. 결 론

중국 및 한반도 지표 측정자료를 활용하여 자료동화 예보 시스템을 개발하였고, 개발된 모형의 화학수송모델링 자료동화 효과 분석 및 실시간 예보 운영평가를 진행하였다.

화학수송모델링 자료동화 효과 분석 결과, PM₁₀과 NO₂는 자료동화 전(CASE03)은 모델값이 측정값을 저평가하고 있으나, 자료동화 후(CASE04)는 모델값이 측정값과 유사하게 나타났다. 반대로 PM_{2.5}는 CASE03이 모델값이 측정값을 과대평가하고 있으나, CASE04는 모델값이 측정값과 유사하게 나타났다. 수도권지역에서 PM₁₀과 NO₂ 배출량(CAPSS 2011)은 2015년에 과소 산정된 것으로 판단된다.

중국 지표 측정자료를 자료동화한 결과, 월경성 오염원인 PM₁₀의 한반도 공간분포는 중국으로부터 이루어 되는 오염물질을 정확하게 모사하여 서해지역에 농도 차이가 발생하는 것으로 나타났다. 따라서 자료동화 시 중국 측정자료를 자료동화 함으로써, 중국으로부터 한반도로 유입되는 월경성 오염원의 영향을 적절히 모사할 수 있을 것이라 판단된다.

2017년 및 2018년 예보 성능 평가 결과, 자료동화를 적용한 예보모델(CASE04)은 기존모델(CASE03)과 비교하였을 때, 예보 성능이 대부분 지역에서 개선되는 것을 확인할 수 있었다. 계절 특성을 살펴보면, 봄에는 CASE04가 CASE03과 비교하여 크게 개선되었으며, 2017년 전체 결과와 유사하게 나타났다. 겨울은 CASE04가 CASE03과 유사한 결과를 보인다.

자료동화를 적용한 예보모형은 동아시아지역에 저평가하고 있는 PM₁₀을 보완하고 있으나 여전히 측정값을 저평가하고 있다. 그러나 예보 전 권역에서 예보성능 및 통계수치가 개선되었다. 따라서 한반도지역에 대표 대기질 예보모형으로 사용하기에 적합하다고 판단된다.

그러나 본 연구에서 진행한 자료동화 방법은 지표 측정자료를 적용하였으므로 공간적인 한계가 있다. 따라서 Kriging 내삽법 또는 인공위성 자료를 활용하는 자료동화 방법을 개발할 필요가 있다. 뿐만 아니라 본 연구에서 활용한 자료동화 방법은 Pun Interpolation 기법을 활용하였으나 3D-Var, 4D-Var, Optimal Interpolation 등 다양한 기법이 있으므로, 이를 적용하여 예보 성능을 개선할 필요가 있다.

감사의 글

본 논문은 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다 (NIER-2016-01-02-041, NIER-2017-03-02-012).

References

- Andersson, C., Bergström, R., Bennet, C., Robertson, L., Thomas, M., Korhonen, H., Lehtinen, K.E.J., Kokkola, H. (2015) MATCH-SALSA-Multi-scale Atmospheric Transport and CHemistry model coupled to the SALSA aerosol microphysics model – Part 1: Model description and evaluation, *Geoscientific Model Development*, 8(2), 171-189.
- Borge, R., Alexandrov, V., del Vas, J.J., Lumberras, J., Rodriguez, M.E. (2008) A comprehensive sensitivity analysis of the WRF model for air quality applications over the Iberian Peninsula, *Atmospheric Environment*, 42(37), 8560-8574.
- Byun, D.W., Ching, J.K.S. (1998) Science algorithms of the EPA Models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) Modeling System, EPA.
- Byun, D.W., Schere, K.L. (2006) Review of the governing equations, computational algorithm and other components of the Models-3 Community Multi-scale Air Quality (CMAQ) modeling system, *Applied Mechanics Reviews*, 59(2), 51-77.
- Chen, R.J., Zhao, Z.H., Kan, H.D. (2013) Heavy smog and hospital visits in Beijing, China, *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 188(9), 1170-1171.
- Choi, D.R., Koo, Y.S., Jo, J.S., Jang, Y.K., Lee, J.B., Park, H.J. (2016) The effect of dust emissions on PM₁₀ concentration in East Asia, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 32(1), 32-45. (in Korean with English abstract)
- Choi, D.R., Yun, H.Y., Koo, Y.S. (2018) A Development of Particulate Matter Forecasting System with Inverse Modeling using Source Contribution, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(6), 889-910. (in Korean with English abstract)
- Cressman, G.P. (1959) An Operational Objective Analysis System, *An Operational Objective Analysis System*, *Monthly Weather Review*, 87, 367-374.
- Dufour, A., Amodei, M., Ancellet, G., Peuch, V.H. (2004) Observed and modelled “chemical weather” during ESCOMPTE, *Atmospheric Research*, 74(1-4), 161-189.
- Fu, J.S., Jang, C.J., Streets, D.G., Li, Z., Kwok, R., Park, R.J., Han, Z. (2008) MICS-Asia II: Modeling gaseous pollutants and evaluating an advanced modeling system over East Asia, *Atmospheric Environment*, 42(15), 3571-3583.
- Harrison, R.M., Laxen, D., Moorcroft, S., Laxen, K. (2012) Processes affecting concentrations of fine particulate matter in the UK atmosphere, *Atmospheric Environment*, 46, 115-124.
- Hass, H., Jakobs, H.J., Memmesheimer, M. (1995) Analysis of a regional model (EURAD) near surface gas concentration predictions using observations from networks, *Meteorology and Atmospheric Physics*, 57(1-4), 173-200.
- Josse, B., Simon, P., Peuch, V.H. (2004) Radon global simulations with the multiscale chemistry and transport model MOCAGE, *Tellus B*, 56(4), 339-356.
- Kang, J.G. (2015) A study of data assimilation with optimal interpolation to improve PM₁₀ forecasting accuracy, *Master's thesis*, 85pp.
- Kim, J.H., Choi, D.R., Koo, Y.S., Lee, J.B., Park, H.J. (2016) Analysis of domestic and foreign contributions using DDM in CMAQ during particulate matter episode period of february 2014 in Seoul, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 32(1), 82-99. (in Korean with English abstract)
- Kim, J.Y., Kim, S.W., Ghim, Y.S., Song, C.H., Yoon, S.C. (2012) Aerosol properties at Gosan in Korea during two pollution episodes caused by contrasting weather conditions, *The Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 48(1), 25-33.
- Koken, P.J.M., Piver, W., Ye, F., Elixhauser, A., Olsen, L.M., Portier, C.J. (2003) Temperature, air pollution, and hospitalization for cardiovascular diseases among elderly people in Denver. *Environmental Health Perspectives*, 111(10), 1312-1317.
- Koo, Y.S., Choi, D.R., Kwon, H.Y., Jang, Y.K., Han, J.S. (2015) Improvement of PM₁₀ prediction in East Asia using inverse modeling, *Atmospheric Environment*, 106, 318-328.
- Koo, Y.S., Kim, S.T., Cho, J.S., Jang, Y.K. (2012) Performance evaluation of the updated air quality forecasting system for Seoul predicting PM₁₀, *Atmospheric Environment*, 58, 56-69.
- Koo, Y.S., Kim, S.T., Yun, H.Y., Han, J.S., Lee, J.Y., Kim, K.H., Jeon,

- E.C. (2008) The simulation of aerosol transport over East Asia region, *Atmospheric Research*, 90(2-4), 264-271.
- Koo, Y.S., Yun, H.Y., Choi, D.R., Han, J.S., Lee, J.B., Lim, Y.J. (2018) An analysis of chemical and meteorological characteristics of haze events in the Seoul metropolitan area during January 12-18, 2013, *Atmospheric Environment*, 178, 87-100.
- Lam, Y.F., Fu, J.S. (2009) A novel downscaling technique for the linkage of global and regional air quality modeling, *Atmospheric Chemistry Physics*, 10(23), 4013-4031.
- Lee, S., Ho, C.H., Choi, Y.S. (2011a) High-PM₁₀ concentration episodes in Seoul, Korea: background sources and related meteorological conditions, *Atmospheric Environment*, 45(39), 7240-7247.
- Lee, D., Lee, Y., Jang, K., Yoo, C., Kang, K., Lee, J., Jung, S., Park, J., Lee, S., Han, J., Hong, J., Lee, S. (2011b) Korean National Emissions Inventory System and 2007 Air Pollutant Emissions, *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 5(4), 278-291.
- Lee, S., Ho, C.H., Lee, Y.G., Choi, H.J., Song, C.K. (2013) Influence of transboundary air pollutants from China on the high PM₁₀ episode in Seoul, Korea for the period October 16-20, 2008, *Atmospheric Environment*, 77, 430-439.
- Lee, S., Song, C.H., Park, R.S., Park, M.E., Han, K.M., Kim, J., Choi, M., Ghim, Y.S., Woo, J.H. (2016) GIST-PM-Asia v1: development of a numerical system to improve particulate matter forecasts in South Korea using geostationary satellite-retrieved aerosol optical data over Northeast Asia, *Geoscientific Model Development*, 9(1), 17-39.
- Memmesheimer, M., Friese, E., Ebel, A., Jakobs, H.J., Feldmann, H., Kessler, C., Piekorz, G. (2004) Long-term simulations of particulate matter in Europe on different scales using sequential nesting of a regional model, *International Journal of Environment and Pollution*, 22(1/2), 108-132.
- Menut, L., Bessagnet, B., Khvorostyanov, D., Beekmann, M., Blond, N., Colette, A., Coll, I., Curci, G., Foret, G., Hodzic, A., Mailler, S., Meleux, F., Monge, J.L., Pison, I., Siour, G., Turquety, S., Valari, M., Vautard, R., Vivanco, M.G. (2013) CHIMERE 2013: a model for regional atmospheric composition modelling, *Geoscientific Model Development*, 6(4), 981-1028.
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2014) A Study of Accuracy Improvement of Numerical Air Quality Forecasting Model (I).
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2015) A Study of Accuracy Improvement of Numerical Air Quality Forecasting Model (II).
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2016) A Study of Accuracy Improvement of Numerical Air Quality Forecasting Model (III).
- Nieradzki, L., Elbern, H. (2006) Variational assimilation of combined satellite retrieved and in situ aerosol data in an advanced chemistry transport model, *Proceedings of the ESA Atmospheric Science Conference*, Frascati, ESRIIN.
- Ohara, T., Akimoto, H., Kurokawa, J., Horii, N., Yamaji, K., Yan, X., Hayasaka, T. (2007) An Asian emission inventory of anthropogenic emission sources for the period 1980-2020, *Atmospheric Chemistry Physics*, 7(16), 4419-4444.
- Park, S.S., Jung, S.A., Gong, B.J., Cho, S.Y., Lee, S.J. (2013) Characteristics of PM_{2.5} haze episodes revealed by highly time-resolved measurements at an air pollution monitoring supersite in Korea, *The international journal of Aerosol and Air Quality Research*, 13, 957-976.
- Park, S.U., Cho, J.H., Park, M.S. (2013) Analyses of high aerosol concentration events (dense haze/mist) occurred in East Asia during 10-16 January 2013 using the data simulated by the aerosol modeling system, *International Journal of Chemistr*, 3, 10-26.
- Park, Y.S., Jang, I.S., Cho, S.Y. (2015) An Analysis on Effects of the initial conditoin and Emission on PM₁₀ Forecasting with Data Assimilation, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 31(5), 430-436. (in Korean with English abstract)
- Pun, K., Seigneur, C. (2006) Using CMAQ to interpolate among CASTNET measurements, *CMAS conference 2006*.
- Robertson, L., Langner, J., Engardt, M. (1999) An Eulerian limited area atmospheric transport model, *The Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 38, 190-210.
- Schaap, M., Timmermans, R.M.A., Sauter, F.J., Roemer, M., Velders, G.J.M., Boersen, G.A.C., Beck, J.P., Bultjes, P.J.H. (2008) The LOTOS-EUROS model: description, validation and latest developments, *International Journal of Environment and Pollution*, 32(2), 270-289.
- Simpson, D., Benedictow, A., Berge, H., Bergström, R., Emberson, L.D., Fagerli, H., Flechard, C.R., Hayman, G.D., Gauss, M., Jonson, J.E., Jenkin, M.E., Nyiri, A., Richter, C., Semeena, V.S., Tsyro, S., Tuovinen, J.P., Valdebenito, Á., Wind, P. (2012) The EMEP MSC-W chemical transport model - technical description, *Atmospher-*

- ic Chemistry Physics, 12(16), 7825-7865.
- Skamarock, W.C., Klemp, J.B. (2008) A time-split non-hydrostatic atmospheric model for weather research and forecasting applications, *Journal of Computational Physics*, 227(7), 3465-3485.
- Sofiev, M., Galperin, M.V., Genikhovich, E. (2008) Construction and evaluation of Eulerian dynamic core for the air quality and emergency modeling system SILAM, in: *NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security, Air Pollution Modelling and Its Application*, XIX. SPRINGER-VERLAG BERLIN, 699-701.
- 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(31), 4793-4804.
- United States 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*.
- Wang, Y., Zhang, R.Y., Saravanan, R. (2014) Asian pollution climatically modulates midlatitude cyclones following hierarchical modeling and observational analysis, *Nature Communications*, 5(21), 3098.

Authors Information

- 최대련 (안양대학교 환경에너지공학과 연구원)
윤희영 (안양대학교 환경에너지공학과 조교수)
구윤서 (안양대학교 환경에너지공학과 정교수)