



논문

대기질 예측모델의 기상모의패턴이 자료동화효과에 미치는 영향 분석

A Study on Influence of Meteorological Patterns on Data Assimilation Effect using the Air Quality Prediction Model

김태희*, 명지수, 이용희, 서인석, 장임석

국립환경과학원 대기질통합예보센터

Taehee Kim*, Jisu Myoung, Yonghee Lee, Insuk Suh, Limsuk Jang

Air Quality Forecasting Center, National Institute of Environmental Research

접수일 2018년 11월 19일

수정일 2018년 12월 28일

채택일 2019년 1월 29일

Received 19 November 2018

Revised 28 December 2018

Accepted 29 January 2019

*Corresponding author

Tel : +82-(0)32-560-7257

E-mail : kimth0806@korea.kr

Abstract In this study, the surface measurements of PM_{2.5} are assimilated into the Community Multi-scale Air Quality (CMAQ) model using the successive correction method, the cressman weighting method. The surface measurements are assimilated at model starting time (03 UTC) and the model result predicted 72 hours every day from September 2016 to August 2017. The prediction performances are measured by the daily averaged, next day after 12 hours "free" run period. And the effect of the assimilation according to weather patterns are analyzed using the empirical orthogonal function. As a result, the case that assimilates with the observations has the best performance (IOA: 0.9, R: 0.8, NMB: within $\pm 10\%$). The most important meteorological factors affecting data assimilation effect are planetary boundary layer height, temperature and relative humidity in spring and summer, and the location of the pressure trough and the development of strong low pressure in autumn and winter. It was also found that compared to the model result that don't assimilate with the observations, the data assimilation indicate the positive effects in a stable atmosphere but negative effects in the unstable atmosphere.

Key words: Data assimilation, Cressman, Meteorological pattern, Empirical orthogonal function, Air Quality prediction model

1. 서론

최근 초미세먼지 (Particulate Matter less than 2.5 μm , PM_{2.5})에 대한 대기환경기준이 일평균 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하에서 주요 선진국 수준인 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하로 강화됨에 따라 과거대비 고농도 발생일수와 장기지속 사례의 빈도가 증가할 것으로 예측된다. 이에 보다 신속하고 정확한 예보자료의 생산 및 제공이 필요해졌다. 국내대기질예보는 다양한 수치모델의 결과와 관측 자료를 기반으로 한 예보관의 종합적인 판단에 의해 결정되며 최종등급결정에 있어 수치모델의 정확

도는 중요한 요소로 작용한다 (Jang *et al.*, 2014). 정확한 예보자료 생산을 위해서는 수치모델의 예측성이 향상되어야 하며, 이를 위해서는 모델자체의 성능향상과 더불어 배출량 및 기상입력자료의 개선 그리고 자료동화 (Data Assimilation, DA) 기술 개발을 통한 초기조건 개선이 필수적이다 (Park *et al.*, 2013). 이에 대기질통합예보센터에서는 수치모델의 예측성능을 좌우하는 주요 요인인 초기조건을 개선하고자 선진 자료동화기법을 개발·적용 중에 있으며, 보다 좋은 품질의 관측 자료를 활용한 연구를 수행하고 있다.

자료동화는 모델링 결과의 오류를 줄이기 위해 관측 자료를 이용하여 실제대기에 가깝도록 수치모델의 초기조건을 개선시키는 방법으로 예측성능 향상에 기여하는 정도가 높은 것으로 알려져 있다(Park *et al.*, 2015; Lee *et al.*, 2011; Park *et al.*, 2011; Song *et al.*, 2008). 이에 따라 자료동화기법을 활용하여 다양한 매개변수(적용 물질, 주기, 영향반경 등)에 대한 최적화 및 민감도 연구가 다수 선행되었다(Kim *et al.*, 2016; Lee *et al.*, 2013; Tombette *et al.*, 2009). 자료동화에 사용되는 너징 종류와 적용도메인에 따른 오존농도 모의민감도실험(Kim *et al.*, 2016)에서는 고해상도도메인까지 그리드너징을 적용시켰을 때 정확도의 향상이 가장 큰 것으로 보고된 바 있으며, 봄철 황사기간을 대상으로 자료동화 주기에 따른 PM_{10} 모의결과(Lee *et al.*, 2013)에서는 6시간 간격으로 자료동화를 수행할 것을 제시한 바 있다. Tombette *et al.* (2009)는 자료동화 시 사용되는 다양한 매개변수에 따른 대기질 예측모델의 불확실성이 배출입력자료에 따른 불확실성보다 클 수 있으며, 자료동화 적용에 따른 예측 정확도는 단기(One-day) 예측 시에는 향상되나 예측시간이 길어질수록 정확도 개선이 미미함을 확인한 바 있다. 일반적으로 수치모델은 주변격자와 비교하여 모의농도가 비이상적인 차이를 보일 때, 이를 평활화(smoothing)하는 특성이 있다. 이러한 특성으로 인해 예측시간이 길어질수록 자료동화를 수행한 것과 하지 않는 것은 유사한 모의수준을 보이게 되며, 기상과 배출패턴 또한 예측시간 증가에 따른 자료동화효과 감소에 영향을 준다. 이와 같이 자료동화를 통한 초기농도보정효과의 지속시간에 대한 연구는 선행된 바 있으나, 지속시간에 영향을 미치는 변수에 대한 분석은 선행되지 않았다.

따라서 본 연구에서는 다양한 요인 중 기상 모의 패턴이 자료동화효과 지속에 미치는 영향을 분석하고자, 대기질 예측모델에 자료동화를 적용하여 계절별 $PM_{2.5}$ 예측성능 개선 및 자료동화효과를 평가하였다. 4.1장에서는 자료동화를 적용한 대기질 예측모델의 예측성 검증 및 양·음의 효과일을 선정하였고,

4.2장에서는 선정된 사례를 대상으로 기상모의 패턴에 따른 자료동화효과를 분석하였다. 기상모의 패턴 분석은 $PM_{2.5}$ 의 생성과 성장 그리고 이동에 영향을 주는 지면과 850, 500 hpa의 기압(pressure, PRES), 풍향(wind direction of U·V component, U·V), 풍속(wind speed, WS), 기온(temperature, TA), 상대습도(relative humidity, RH) 그리고 대기경계층고도(planetary boundary layer height, PBL)에 대해 실시하였다.

2. 대기질 예측모델 구성

대기질 예측자료 생산을 위해 3차원 중규모 기상모델인 WRF (Weather Research and Forecasting model) v3.3과 3차원 광화학 수송 모델인 CMAQ (Community Multi-scale Air Quality model) v4.7.1을 사용하였다. WRF는 기상청에서 생산 중인 UM (Unified Model) 18 UTC 자료를 이용하였으며 MCIP (Meteorology-Chemistry Interface Processor)을 통해 재구성하여 CMAQ 모델의 기상입력자료로 사용하였다. 배출량 입력자료는 인위적 배출량(국외/국내: MIX-Asia 2010/CAPSS 2010)과 자연배출량(MEGAN, Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature)을 합산하여 사용하였다. 도메인은 총 2개로 동아시아영역(D1, 수평해상도 27 km)과 남한영역(D2, 9 km)으로 설정하였으며(그림 1), WRF와 CMAQ의 연직 격자는 각각 30, 15개의 층(Top: 50 mb)으로 구성하였다. WRF/CMAQ 모델링에 사용된 도메인의 상세정보와 물리과정은 표 1에 기술하였다.

대기질 예측자료는 2016년 9월~2017년 8월에 대해 당일(Day) 12시부터 글피(Day+3) 12시까지 총 72시간에 대해 생산하였으며, 다음날(Day+1) 모델은 전날(Day) 수행된 모델에서 초기입력장을 받아 수행하였다. 이때 초기입력자료의 불확실성을 개선하여 실제 대기에 가깝게 만들어 주기 위해 지상관측 자료를 이용한 자료동화를 실시하였다.

3. 자료동화

자료동화 기법은 크게 경험적 분석 기술(연속보정 방법, 완화법)과 통계적 보간 기술(최적내삽, 3·4차원 변분법)로 나누어진다. 본 연구에서는 다양한 기법 중 연속보정방법을 통한 초기입력장 개선이 대기질 예측에 미치는 영향에 대해 분석하고자 Cressman 가중치 산정방법을 이용하였다(식 1). 가중치 산정 시 중요한 요소인 영향반경은 자료들의 공간적·시간적 연관성(correlation)을 나타내는 PCSV (Point Cumulative SemiVariance) 지수를 이용하여 D1에는 90 km, D2에는 45 km로 적용하였다.

자료동화는 모델의 초기 한 타임(03 UTC)에만 수행하였으며, 품질이 검증된 지상 PM_{2.5} 관측 자료(중국 891개: <http://www.pm25.in>, 국내 254개: www.air-korea.or.kr)를 사용하였다(그림 1). 품질검증에 사용된 Buddy test는 인근 측정소와의 비교분석을 통해 해당 측정소 자료의 품질을 검증하는 방법으로, 본 연구에서는 평균, 분산, 상관관계를 고려하기 위해 Z-검정, F-검정, 상관계수분석을 실시하였다. Z-검정과 F-검정은 유의수준 0.05, 상관계수는 0.6 이상을 기준으로 2개 이상 만족 시 해당 지점을 자료동화에 사용하였다. 이때 동일 격자 내의 복수의 측정소가 위치할 경우 해당 측정소들의 평균값을 사용하였으며, 자료동화에 앞서 결측 및 이상치는 제외하였다.

$$DA_i = con_i^m + \frac{\sum_{j=1}^{j_i} W_{ij} (con_j^o - con_i^m)}{\sum_{j=1}^{j_i} W_{ij}}$$

$$W_{ij} = \begin{cases} \frac{R^2 - r_{ij}^2}{R^2 + r_{ij}^2} & (r_{ij} \leq R) \\ 0 & (r_{ij} > R) \end{cases} \quad (1)$$

i : i -th model grid point

j : j -th observation around i -th model grid point

DA : data assimilation value con^m : model forecast

con^o : observation W : weight R : impact radius

r_{ij} : distance between the observation and model grid point

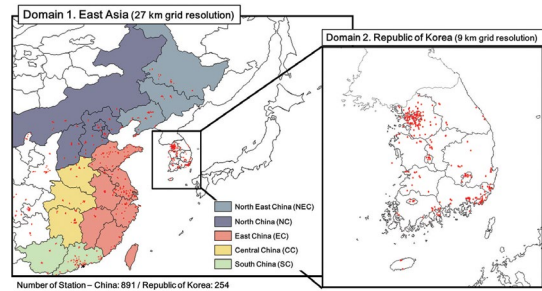


Fig. 1. Modeling domains of the coarse domain for East Asia and the finer domain for Republic of Korea. Location of the air pollution measurement station for China and Republic of Korea used in data assimilation with regional definitions are shown on the study area.

Table 1. Details of the grids and physical options used in the WRF/CMAQ model.

	D1	D2
Horizontal grid	180 × 142	78 × 93
Horizontal resolution	27 km	9 km
Vertical layers	30 layers	
Microphysics	WRF Single-Moment	
Radiation (long/short wave)	3-class scheme	
Planetary Boundary layer	RRTM/Goddard	
Surface layer option	YSU	
Land surface option	MM5	
Cumulus option	Noah	
	Kain_Fritsch	
Horizontal grid	174 × 128	67 × 82
Horizontal resolution	27 km	9 km
Vertical layers	15 layers	
Chemistry mechanism	SAPRC99	
Aerosol module	Aero5	

4. 연구 방법

4.1 예측성검증 및 사례일 선정방법

모델의 예측성은 자료동화를 수행하지 않은 모델(NoDA)과 수행한 모델(DA)의 예측결과 중 내일(Day + 1)에 해당하는 데이터만 추출하여 검증하였다(NIER, 2017). 검증에는 과대·과소모의경향을 판단할 수 있는 정규오차를 의미하는 NMB (Normalized Mean Bias)와 추정치와의 일치도를 나타내는 IOA (Index Of Agreement) 그리고 증가·감소경향 모사를

판단하는 R (Correlation) 지수를 사용하였다. 일반적으로 NMB는 0에 근접할수록 IOA와 R은 1에 가까울수록 실제 현상을 모델이 잘 모의하고 있음을 의미한다. 특히 PM_{2.5}에 대해서는 NMB가 $\pm 30\%$ 이내, IOA가 0.5, R이 0.4 이상일 때 모델의 성능은 유의하며, NMB가 $\pm 10\%$ 이내, R이 0.7 이상일 경우 해당 모델의 성능은 우수하다고 표현한다 (Emery *et al.*, 2016; Hurley, 2011; Willmott *et al.*, 1985).

사례일 선정을 위해 먼저 예측시간에 따른 초기농도보정효과 (DA-NoDA)의 변화를 분석하여 초기농도보정효과가 일정한 값으로 수렴하는 시간을 ‘지속시간’으로 정의하였다. 이후 초기농도보정효과와 지속시간을 기준으로 관측과의 오차변동이 있는 날을 ‘효과일’이라 하고, 오차가 감소하는 날 ($E_{NoDA} > E_{DA}$)과 증가하는 날 ($E_{NoDA} < E_{DA}$)을 각각 ‘양의 효과일’, ‘음의 효과일’로 선정하였다.

4.2 경험적 직교함수

기상모의패턴분석에 사용된 경험적 직교함수 (Empirical Orthogonal Function, EOF)는 주성분분석 (principal component analysis)의 일종으로 데이터의 변동성을 일련의 공간패턴 (EOFs)과 시간분포 (PC)로 분해하는 방법이다. EOF분석은 중복된 데이터를 단순화하고 배제하는 새로운 직교 함수 집합을 생성하여 원래 데이터의 선형 변환을 제안함으로써 시·공간 변동성을 동시에 효과적으로 제시한다. 또한 변수의 개수를 대폭 줄임으로서 회귀분석, 정준상관분석 (Canonical Correlation Analysis)과 같은 다른 통계적 기법과 접목이 가능하고, 각 고유 벡터가 가지는 물리적 의미를 정확히 규명할 수 없어도 몇 개의 고유함수만으로도 재현이 가능하다는 장점이 있다.

본 연구에서는 시간평균이 제거된 편차(X)로 계산된 공분산행렬 (Covariance, C)을 이용하여 식 (2)을 만족시키는 3개 모드의 고유치 (eigenvalue, λ_i)와 고유벡터 (eigen vector, U)를 결정하였다. 이후 엄지손가락의 법칙 (The rule of thumb, North *et al.*, 1982)을 이용하여 EOF결과의 통계적 유의성을 검증하였다.

엄지손가락의 법칙은 각 모드의 95% 신뢰구간 (CI_{95} , 식 3)과 고유치를 이용하여 EOF결과의 일반적인 오류를 평가하는 방법으로 하위모드의 고유치가 상위모드의 신뢰구간에 포함되지 않을 경우 산출된 EOF결과가 통계적으로 유의함을 의미한다.

$$C = X^t X = ULU^t \quad (2)$$

$$CI_{95}(\lambda_i) \approx \lambda_i(1 \pm \sqrt{\frac{2}{s}}) \quad (3)$$

C: covariance X: deviation U: eigen vector

L: diagonal matrix with eigenvalues

CI_{95} : confidence interval at 95 percent levels

λ_i : eigenvalue s: number of data

5. 자료동화효과 분석결과

5.1 예측성 검증 및 사례일 선정

모델 예측성 검증 결과(표 2), DA와 NoDA 모두 IOA와 R값이 0.9, 0.8로서 모델이 관측현상을 적절하게 모의하고 있는 것으로 판단된다. NMB의 경우 DA는 $\pm 10\%$ 이내의 값을 보이며 성능이 우수하였고, NoDA는 겨울과 전체기간을 제외한 나머지 기간에 대해서 우수한 성능을 보였다. 자료동화 적용 유무에 따라 일치도와 상관성은 유사하였으나, NoDA 대비 DA에서 오차의 개선이 나타났다. 이러한 결과는 본 연구에 적용된 자료동화가 관측을 충분히 반영하고 있다는 것을 의미하며, 자료동화를 통한 초기장 개선은 오차의 보정에 효과적임을 시사한다. 정규오차를 나타내는 NMB는 전체기간에 대해 -11.4%에서 -1.6%으로 9.8% 감소하였고, 겨울(8.0%), 여름(6.7%), 가을(6.3%), 봄(2.8%) 순서로 NMB 감소가 크게 나타났다. 봄철의 경우 자료동화 적용 시 NMB가 -9.7%에서 6.9%로 과소모의에서 과대모의로 모의경향이 변화한 반면 다른 기간의 경우 과소모의경향이 유지되었다. 일평균 농도가 $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 초과하는 고농도일은 총 54일로 봄, 여름, 가을, 겨울 각각 19일, 2일, 12일, 21일이 해당하였다. 고농도일에 대한 예측

성 검증결과, NoDA와 DA 모두 NMB가 $\pm 30\%$ 이내, IOA가 0.7, R이 0.6으로 유의하였다. 특히 자료동화 적용에 따른 NMB의 감소는 봄($19.1\% \rightarrow 0.1\%$)과 가을($7.1\% \rightarrow 1.5\%$)에 두드러지게 나타났다.

자료동화를 통한 초기농도보정효과(DA-NoDA)는 자료동화 직후 감소하여 일정한 값으로 수렴하는 형태를 보이며, 감소기울기는 계절별로 상이하였다(그림 2). 여름과 가을의 초기농도보정효과의 지속시간은 36시간으로 산정되었으며, 봄과 겨울은 예측시간에 따른 초기농도보정효과가 수렴하지 않아 산정이 불가하였다. 이러한 계절별 초기농도보정효과의 지속시간과 그래프 기울기 차이는 초기농도가 변화에 따라 대기화학반응 조건이 변화했음을 의미한다. 자료동화 후 36시간까지 초기농도보정효과가 지속됨에 따라 예측성 평가와 동일하게 내일(+12~36h)을 기준으로 효과일을 선정하였다. 그 결과, 봄, 여름, 가을, 겨울에 대한 양의 효과일은 44일, 34일, 45일, 44일, 음의 효과일은 39일, 30일, 31일, 28일이 해당하였다. 이때 계절별 평균 오차변동량($E_{DA}-E_{NoDA}$)은

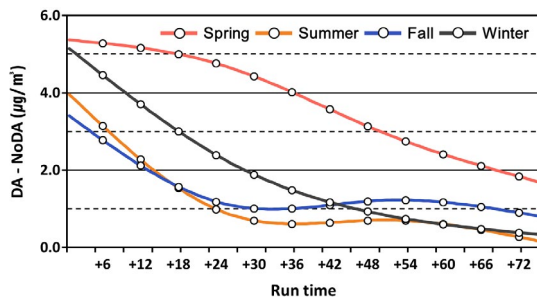


Fig. 2. The effects of initial concentration correction (DA-NoDA) according to the predicted time through data assimilation.

양의 효과일에 $-3.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $-2.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $-2.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $-3.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 음의 효과일에 $6.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $1.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $2.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 봄철을 제외한 나머지 계절에 대해 오차 변동량의 절대 값이 양의 효과일에 크게 나타났으며, 이는 표 2에 나타난 계절별 오차 변화 양상과 일치하였다.

5.2 기상패턴 분석

분석에 사용된 다양한 기상변수 중 자료동화효과 특성에 영향을 미치는 변수를 선정하고자, 엄지손가락법칙에 따른 EOF 결과의 통계적 유의성 검증과 패턴상관계수와 T-test를 통한 양·음의 효과일의 패턴 모의차이 검증을 실시하였다. 먼저, 엄지손가락법칙에 사용되는 모드 1~3에 대한 고유치와 모드 1의 95% 신뢰구간을 그림 3에 나타내었다. 그 결과, 과반수 이상의 계절에 대해 양·음의 효과일 모두 통계적으로 유의한 변수로 대기경계층고도와 지상의 기압·풍속·상대습도·기온, 상층(850, 500 hpa)의 기압·풍향·풍속·기온이 선정되었으며 지상의 풍향과 상층의 상대습도는 유의하지 않은 것으로 분석되었다. 이후 통계적으로 유의한 변수 중에서 양·음의 효과일의 기상모의패턴 차이가 5% 유의수준에서 유의하고 패턴상관계수가 ± 0.5 이내로 상관성이 없는 변수를 최종 선정하였다. 선정 결과 대기경계층고도와 지상과 850 hpa의 기온, 습도 그리고 850·500 hpa의 풍향, 풍속이 자료동화효과특성에 영향을 미치는 변수로 최종 선정되었다. 최종 선정된 변수에 대한 모드 1의 고유치는 표 3에 제시하였다.

그림 4~6은 선정된 변수에 대한 EOF 결과로서, 결과의 대부분을 설명하는 모드 1에 해당하는 날(PC값

Table 2. Statistical evaluation between the observation and predicted model result (DA, NoDA) for daily mean $\text{PM}_{2.5}$ in Republic of Korea during total analysis period.

	Spring		Summer		Fall		Winter		Annual	
	DA	NoDA	DA	NoDA	DA	NoDA	DA	NoDA	DA	NoDA
NMB (%)	6.9	-9.7	-0.3	-7.0	-3.2	-9.5	-9.5	-17.5	-1.6	-11.4
IOA	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
R	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8

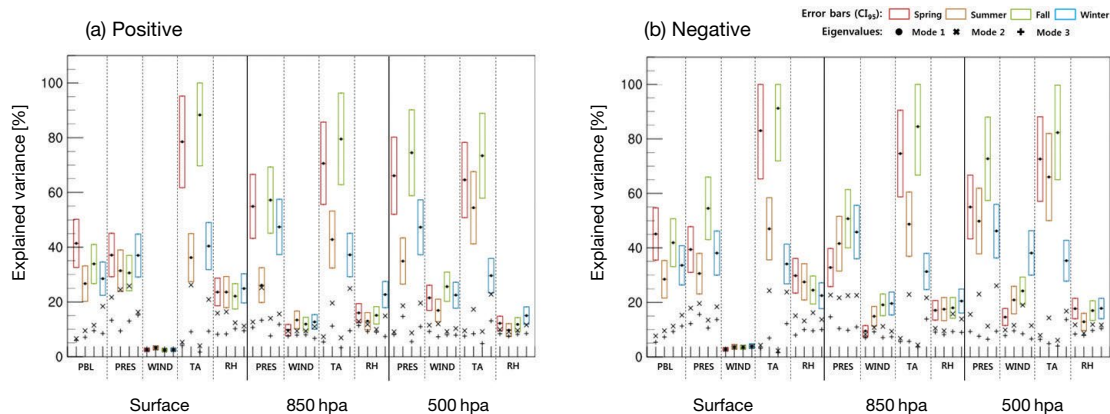


Fig. 3. Variance spectrum of the spatial (a) positive, (b) negative case. Error Bars indicate the 95% confidence interval according to Eq (3). The Circle, X, cross points are eigenvalues of Mode 1, 2, 3, respectively.

Table 3. The eigenvalue in Mode 1 for the final selected variable.

		Positive				Negative			
		Spring	Summer	Fall	Winter	Spring	Summer	Fall	Winter
PBL		41.4	26.7	33.7	28.5	45.1	28.5	41.9	33.6
850 hpa	TA	70.6	42.8	79.5	37.2	74.6	48.7	84.5	31.3
	RH	16.0	13.0	15.1	22.7	17.1	17.5	18.0	20.5
	WIND	9.7	13.4	11.9	12.7	9.5	14.9	19.1	19.6
500 hpa	WIND	21.5	16.9	25.6	22.5	14.6	20.9	24.2	38.1

이 1 이상인 날)의 공간장이다. 대기경계층높이와 기온 그리고 습도의 경우 양·음의 효과일의 차이가 가장 뚜렷하게 나타난 자료동화 후 첫 타임(+1 h, 전반) 결과만 그림 4, 5에 제시하였고, 예측시간 경과에 따른 패턴의 변화가 발견된 바람성분은 자료동화 후 첫 타임과 동일시간대의 내일결과(+25 h, 후반)를 그림 6에 나타냈다. 이때 500 hpa의 바람장의 경우, 겨울을 제외한 나머지 계절의 패턴변화가 미미하여 제시하지 않았으며, 비교적 단순한 형태이지만 지상 기압계와 모양이 비슷해 오염물질의 수평이동분석에 주로 사용되는 850 hpa의 바람장 결과만 제시하였다.

대기경계층은 지면의 영향을 직접 받는 부분으로 바람의 난류가 형성되어 있는 대기층을 뜻한다. 따라서 대기경계층이 낮을 경우 오염물질의 소산이 억제되고 높을수록 생성된 오염물질이 상층까지 상승할

가능성이 높다(NIER, 2013). 일반적인 온대역에서의 대기경계층이 지상으로부터 1 km 이내임을 감안하였을 때, 봄과 여름의 양·음의 효과일은 황사발원지로 알려진 중국 화북지역(NC)에서 1.5~2 km로 평균보다 높은 대기경계층을 보였고, 가을과 겨울의 경우 한반도 동쪽 해상과 일본 해상에서 높은 대기경계층을 모의하였다(그림 4). 전반적으로 음의 효과일 대비 양의 효과일의 평균적 대기경계층 고도는 봄과 여름에 낮고 가을에는 높으며 겨울에는 유사한 특징을 보였다. 특히 여름의 경우 가장 뚜렷한 양·음의 효과일의 차이를 보이며 대기경계층고도가 중요한 요인으로 작용하였음을 알 수 있었다.

그림 5는 지상 및 850 hpa에서의 기온과 상대습도 분포로서 대기오염물질의 생성 가능성과 연직적 대류 흐름을 파악할 수 있다(Jeon, 2012; McMurphy and

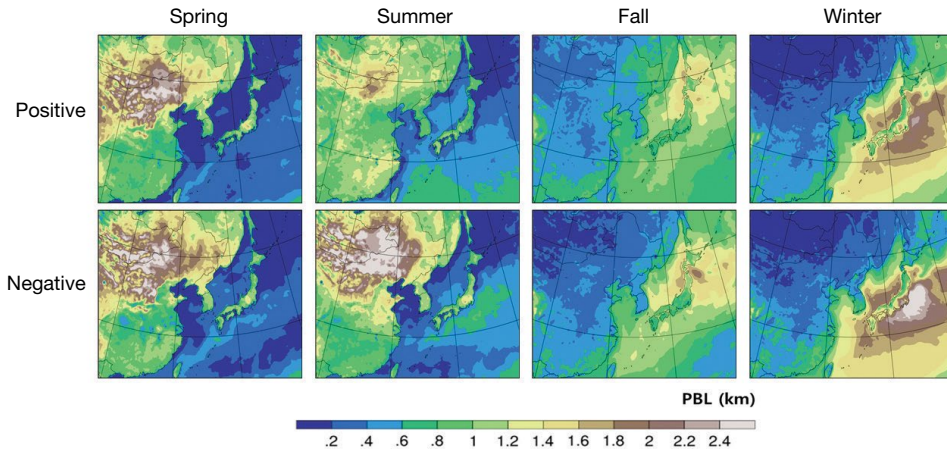


Fig. 4. Spatial distribution of planetary boundary layer height (km) simulated first time after data assimilation over East Asia for all four seasons, respectively; (Top) positive case, (Bottom) negative case.

Zhang, 1989; Tang *et al.*, 1978). 지상분포 분석 결과, 양·음의 효과일에 대한 지상의 기온이 유사한 분포를 보임에 따라 $PM_{2.5}$ 의 생성과 소멸은 상대습도에 의해 주로 영향을 받는 것으로 판단된다. 지상의 상대습도의 분포는 전 계절 동일하게 중국 화북지역(NC)에서 상대적으로 건조한 대기상태를 모의하였고, 중국 동부와 중부지역(EC, SC, CC)에서는 상대적으로 습윤한 대기상태를 보였다. 이때 한반도의 상대습도는 봄과 겨울에는 낮고 여름과 가을에는 높았으며, 음의 효과일 대비 양의 효과일에 상대적으로 습한 대기상태를 모의하였다.

850 hpa의 상대습도는 지상과 마찬가지로 중국 화북지역(NC)에서 상대적으로 건조한 대기상태를 모의하였고, 중국 동부와 중부지역(EC, SC, CC)에서는 상대적으로 습윤한 대기상태를 보였다. 이때 중국의 화북지역과 북동지역(NEC) 그리고 한반도를 중심으로 음의 효과일 대비 양의 효과일에 대해 봄과 여름은 상대적으로 낮고, 가을과 겨울은 높은 상대습도를 모의하는 특징이 나타났다. 850 hpa의 기온은 전반적으로 양의 효과일에 따뜻하였고, 양·음의 효과일 분포 차이는 봄과 여름에 가장 뚜렷하게 나타났다. 봄의 경우 양의 효과일 대비 음의 효과일에 동해에 위치한 온도골이 강하게 발달하여 추후 북쪽으로부터

의 한랭이류의 남하가 예상되었으며, 찬 공기의 성질에 따라 동해상에 하강대류가 형성될 것으로 판단된다. 이와 반대로 여름의 경우 음의 효과일 대비 양의 효과일에 동해상에 온도능이 위치하여 추후 남쪽으로부터의 온난이류의 북상이 예상되었다. 이러한 양·음의 효과일에 대한 기온과 습도의 모의패턴 차이는 $PM_{2.5}$ 생성 및 화학반응 기작에 영향을 주었을 것으로 사료되며, 전반적으로 안정한 대기상태에서 양의 효과가 발생하였음을 알 수 있다.

계절별 바람장 분석 결과(그림 6), 자료동화 유무에 따른 계절별 자료동화효과특성에는 예측시간에 따른 풍향의 변화와 풍속의 차이(봄, 여름), 기압골의 위치(가을) 그리고 강한 저기압 형성 유무(겨울)가 중요한 요인으로 작용하였다. 전반적으로 봄과 여름에는 음의 효과일 대비 양의 효과일에 약한 풍속을 모의하는 특징을 보였고 풍향의 변화를 상이하였다. 봄의 양의 효과일에는 일본 혼슈 동남부해역에 위치한 고기압성 흐름을 따라 전반(+1 h)에는 남풍이 형성되었고, 이후 후반(+25 h)에는 중국 허베이성을 중심으로 형성된 고기압성 흐름과 한반도 북쪽에 위치한 저기압성 흐름 사이로 북서풍이 불었다. 반면, 음의 효과일의 전반에는 중국 내륙 후베이성을 중심으로 형성된 고기압성 흐름을 따라 북서풍이 불었으

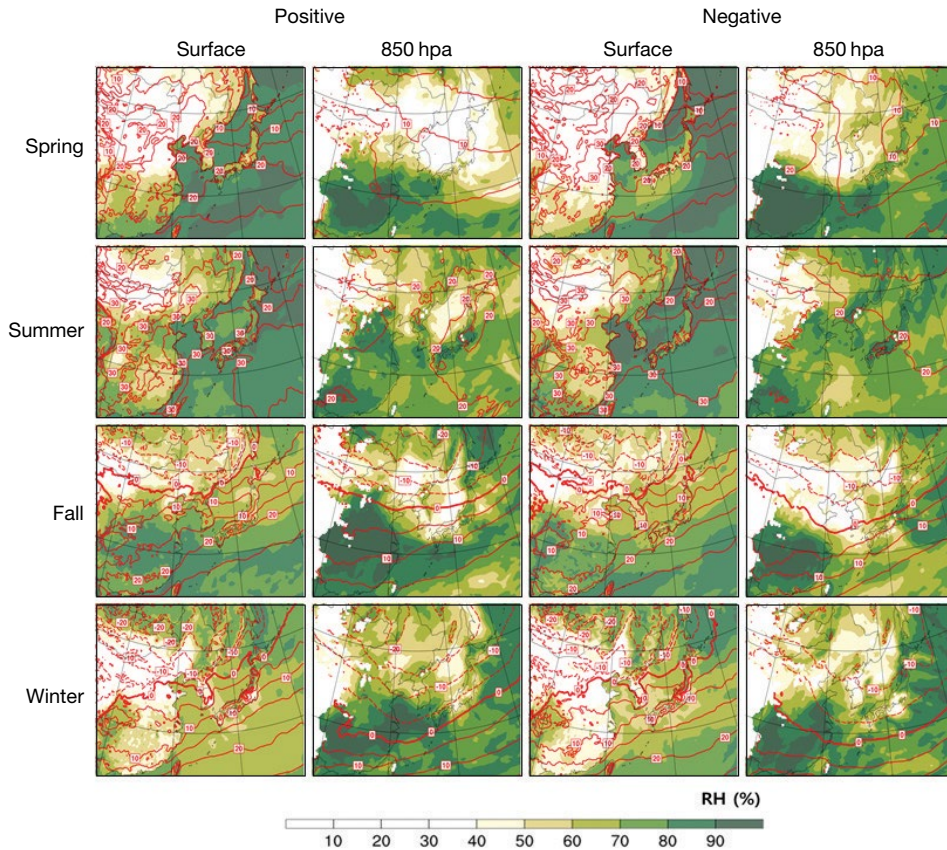


Fig. 5. Spatial distribution of relative humidity (%; shade) and temperature ($^{\circ}\text{C}$; contours) simulated first time after data assimilation at surface and 850 hpa for all four seasons, respectively; the two columns on the left are positive case and the others are negative case.

며 이후 후반에는 남해상까지 고기압성 흐름이 동진하여 서풍이 불었다. 여름의 양의 효과일 전반에는 한반도 북쪽에 형성된 저기압성 흐름과 제주도에 위치한 약한 고기압성 흐름의 영향으로 서풍이 불었고, 이후 저기압성 흐름의 세력이 약해지고 고기압성 흐름이 북진함에 따라 후반에는 2 m/s 이하의 안정적인 대기상태를 보였다. 음의 효과일에도 한반도 북쪽에 저기압성 흐름이 형성되어 있었으나 고기압성 흐름이 중국내륙에 광범위하게 위치하여 북서풍이 불었고, 이후 고기압성 흐름이 동진함에 따라 서풍에 가까운 북서풍이 형성되었다.

가을의 경우, 한반도에 위치한 기압골이 동진하여 후반에는 기압골 후면에 한반도가 위치하였을 때 양

의 효과가 나타났다. 이는 한반도 지상에 고기압이 형성되어 하강기류를 수반한 안정적인 대기상태가 모의될 때 양의 효과가 나타남을 의미한다. 반면, 발해만에 형성된 기압골 전면에 한반도가 위치하여 후반에는 지상에 저기압이 형성되고, 이에 따라 상승기류를 수반한 대기상태를 모의하였을 때 음의 효과가 나타났다. 겨울철의 경우, 전형적인 서고동저의 기압배치가 모의되었을 때 양의 효과가 나타났고, 500 hpa까지 강하게 발달한 동해상의 저기압의 영향으로 대기가 불안정할 때 음의 효과가 나타났다. 이러한 결과는 앞선 분석의 결과와 동일하게 안정적인 대기상태에서 양의 효과가 발생함을 의미한다.

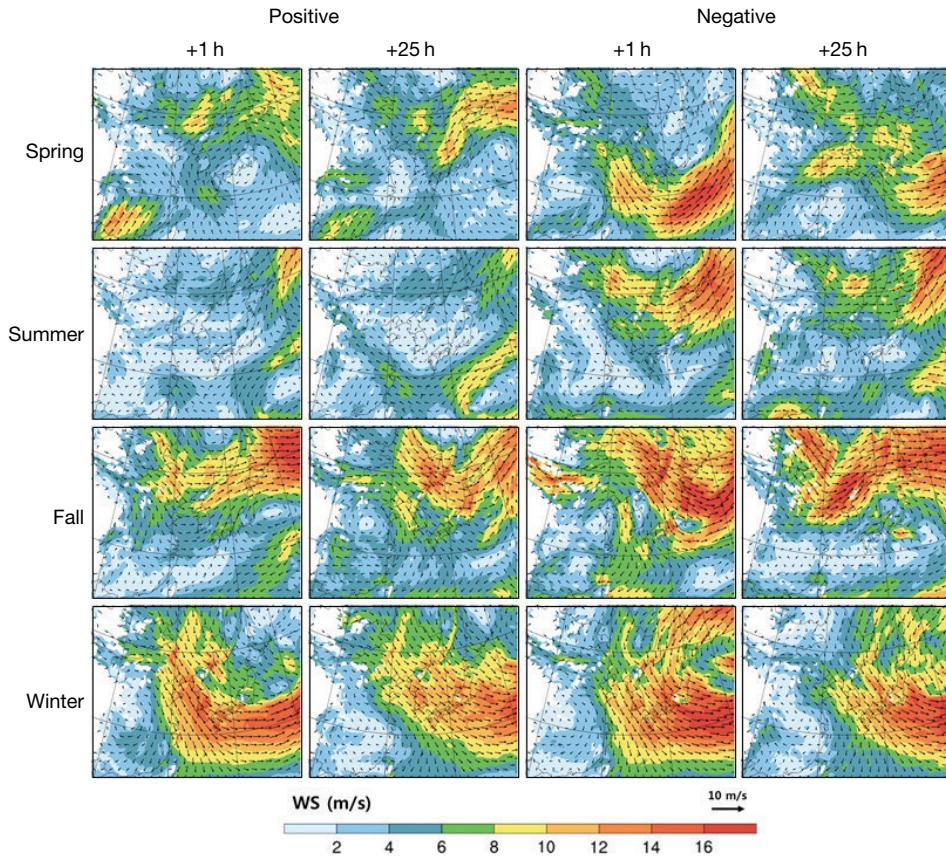


Fig. 6. Spatial distribution of wind speed (m/s, shade) and direction (vector) simulated first and 25th time after data assimilation at 850 hpa for all four season, respectively; the two columns on the left are positive case and the others are negative case.

6. 요약 및 결론

본 연구에서는 자료동화 적용에 따른 계절별 PM_{2.5} 예측성능개선과 더불어 자료동화효과 특성에 따른 기상패턴을 분석하였다. 다양한 자료동화기법 중 연속보정방법 (Cressman 가중치산정방법)을 이용하여 모델 초기 시작시간에 자료동화를 수행하였고, 최적화된 영향 반경 및 품질 검증된 중국·국내 지상관측 자료를 활용하였다.

먼저, 자료동화수행모델은 일치도와 상관성이 0.9, 0.8, 정규오차가 $\pm 10\%$ 이내로 관측을 충분히 잘 반영하고 있는 우수한 모델로서, 자료동화를 통한 초기 입력장 개선은 경향성보다 오차의 개선에 효과적인

을 확인하였다. 자료동화를 통한 초기농도보정효과는 계절별로 상이하였으며 예측시간이 경과할수록 감소하여 최대 36시간까지 지속되었다. 이에 자료동화적용에 따라 오차의 변화가 나타난 ‘효과일’의 경우 내일 (+12 h~+35 h) 예측결과를 기준으로 선정하였다. 그 결과 봄, 여름, 가을, 겨울에 대해 83일, 64일, 76일, 72일이 선정되었고, 오차의 개선이 나타난 양의 효과일은 44일, 34일, 45일, 44일이 해당하였다. 계절별 양·음의 효과일에 대한 기상패턴분석결과, 대기경계층고도와 지상, 850 hpa의 기온, 습도 그리고 850, 500 hpa의 풍향, 풍속이 영향변수로 선정되었다. 이때 자료동화효과에 영향을 주는 중요 영향변수는 850 hpa의 풍향과 풍속(전 계절), 850 hpa의 기온

(봄, 여름) 그리고 대기경계층고도(봄, 여름, 가을)가 해당하였다. 각 계절별 양의 효과일에 대한 중요 영향변수의 모의패턴은 다음과 같이 나타났으며, 겨울의 경우 동해상에 500 hpa까지 강하게 발달한 저기압이 위치할 경우 음의 효과가 나타났다.

봄: 낮은 대기경계층고도, 풍향의 변화(850 hpa, 남풍→북서풍), 동해상에 위치한 온도골

여름: 낮은 대기경계층고도, 2 m/s 이하의 매우 안정적인 풍속(850 hpa), 동해상에 위치한 온도능

가을: 높은 대기경계층고도, 기압골 후면에 한반도 위치

겨울: 서고동저의 기압배치 모의

자료동화를 통해 개선된 초기조건의 사용은 고농도가 장기적으로 발생하였을 때 예측성능을 좌우하는 주요요인으로 작용할 수 있다. 하지만 연구의 결과와 같이 기상모의패턴에 따라 자료동화효과는 달라질 수 있다. 이는 자료동화 수행 시, 다양한 매개변수뿐만 아니라 기상 및 배출량자료에 대한 특성 또한 고려되어야 함을 시사한다. 이에 향후 기상패턴에 따른 자료동화적용방법 민감도 실험과 더불어 다양한 관측 자료를 활용한 추가 연구가 수행된다면 보다 향상된 결과를 도출할 수 있을 것이며, 이러한 정보는 예보관 의사결정 시 자료동화모델의 신뢰성을 판단하는 근거로 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 논문은 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다(NIER-RP2017-174).

References

- Emery, C., Liu, Z., Russell, A.G., Odman, M.T., Yarwood, G., Kumar, N. (2016) Recommendations on statistics and benchmarks to assess photochemical model performance, *Journal of the Air and Waste Management Association*, 67(5), 582-598.
- Hurley, P.J., Blockley, A., Rayner, K. (2011) Verification of a prognostic meteorological and air pollution model for year-long predictions in the Kwinana industrial region of Western Australia, *Atmospheric Environment*, 35(10), 1871-1880.
- Jang, I.-S., Lee, D.-G., Yu, J.A., Hong, S.-C., Son, J.-S., Choi, J.-Y. (2014) PM₁₀ forecasting status and improvement measure, *Proceedings of the Spring Meeting of KMS*. (in Korean with English abstract)
- Jeon, B.-I. (2012) Meteorological characteristics of the winter-time high PM₁₀ concentration episodes in busan, *Journal of the Environmental Sciences*, 21(7), 815-824. (in Korean with English abstract)
- Kim, T., Kim, Y.-K., Shon, Z.-H., Jeong, J.-H. (2016) Sensitivity Analysis of Ozone Simulation according to the Impact of Meteorological Nudging, 32(4), 372-383. (in Korean with english abstract)
- Lee, D., Byun, D.W., Kim, H., Ngan, F., Kim, S., Lee, C., Cho, C. (2011) Improved CMAQ predictions of particulate matter utilizing the satellite-derived aerosol optical depth, *Atmospheric Environment*, 45, 3730-3741.
- Lee, E.-H., Ha, J.-C., Lee, S.-S., Chun, Y. (2013) PM₁₀ Data Assimilation over South Korea to Asian Dust Forecasting Model with the Optimal Interpolation method, *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 49(1), 73-85.
- McMurry, P.H., Zhang, X.Q. (1989) On the sensitivity of particle size to relative humidity for Los Angeles aerosols, *Atmospheric Environment*, 23, 497-507.
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2013) A study on the development of high-PM₁₀ episode forecast technique in statistics-dynamics hybrid system (I). (in Korean with English abstract)
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2017) A study on improving air quality predictability and producing chemical reanalysis data using data assimilation techniques (III). (in Korean with English abstract)
- Park, R.S., Song, C.H., Han, K.M., Park, M.E., Lee, S.-S., Kim, S.-B., Shimizu, A. (2011) A study on the aerosol optical properties over East Asia using a combination of CMAQ-Simulated aerosol optical properties and remote-sensing data via a data assimilation technique, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11, 12275-12296.
- Park, Y.-S., Jang, I.-S., Cho, S.-Y. (2015) An analysis on effects of the initial condition and emission on PM₁₀ forecast-

- ing with data assimilation, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 31(5), 430-436. (in Korean with English abstract)
- Park, R.S., Han, K.M., Song, C.H., Park, M.E., Lee, S.J., Hong, S.Y., Kim, J., Woo, J.-H. (2013) Current Status and Development of Modeling Techniques for Forecasting and Monitoring of Air Quality over East Asia, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 29(4), 407-438. (in Korean with English abstract)
- Song, C.H., Park, M.E., Lee, K.H., Ahn, H.J., Lee, Y., Kim, J.Y., Han, K.M., Kim, J., Ghim, Y.S., Kim, Y.J. (2008) An investigation into seasonal and regional aerosol characteristics in East Asia using model-predicted and remotely-sensed aerosol properties, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8, 6627-6654.
- Tang, I.N., Munkelwitz, H.R., Davis, J.G. (1978) Aerosol growth studies: IV. Phase transformation of mixed salt aerosols in a moist atmosphere, *Atmospheric Environment*, 9, 505-511.
- Tombette, M., Mallet, V., Sportisse, B. (2009) PM₁₀ data assimilation over Europe with the optimal interpolation method, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 57(9), 57-70.
- Willmott, C.J., Ackleson, S.G., Davis, R.E., Feddema, J.J., Klink, K.M., Legates, D.R., O'Donnell, J., Rowe, C.M. (1985) Statistics for the evaluation and comparisons of model, *Journal of Geophysical Research*, 90(C5), 8995-9005.

Authors Information

김태희 (국립환경과학원 대기질통합예보센터 전문위원)
 명지수 (국립환경과학원 대기질통합예보센터 전문위원)
 이용희 (국립환경과학원 대기질통합예보센터 연구사)
 서인석 (국립환경과학원 대기질통합예보센터 연구관)
 장임석 (국립환경과학원 대기질통합예보센터 센터장)