

ORIGINAL ARTICLE

## 관측자료별 자료동화 성능이 한반도 동부 지역 기상 예보에 미치는 영향 분석 연구

김지선 · 이순환<sup>1)\*</sup> · 손건태<sup>2)</sup>

부산대학교 지구과학과, <sup>1)</sup>부산대학교 지구과학교육과, <sup>2)</sup>부산대학교 통계학과

### Study on the Impact of Various Observations Data Assimilation on the Meteorological Predictions over Eastern Part of the Korean Peninsula

Ji-Seon Kim, Soon-Hwan Lee<sup>1)\*</sup>, Keon-Tae Sohn<sup>2)</sup>

*Department of Earth Science, Pusan National University, Busan 46241, Korea*

<sup>1)</sup>*Department of Earth Science Education, Pusan National University, Busan 46241, Korea*

<sup>2)</sup>*Department of Statistics, Pusan National University, Busan 46241, Korea*

#### Abstract

Numerical experiments were carried out to investigate the effect of data assimilation of observational data on weather and PM (particulate matter) prediction. Observational data applied to numerical experiment are aircraft observation, satellite observation, upper level observation, and AWS (automatic weather system) data. In the case of grid nudging, the prediction performance of the meteorological field is largely improved compared with the case without data assimilations because the overall pressure distribution can be changed. So grid nudging effect can be significant when synoptic weather pattern strongly affects Korean Peninsula. Predictability of meteorological factors can be expected to improve through a number of observational data assimilation, but data assimilation by single data often occurred to be less predictive than without data assimilation. Variation of air pressure due to observation nudging with high prediction efficiency can improve prediction accuracy of whole model domain. However, in areas with complex terrain such as the eastern part of the Korean peninsula, the improvement due to grid nudging were only limited. In such cases, it would be more effective to aggregate assimilated data.

**Key words** : Data assimilation, Meteorological prediction, Numerical model, WRF

#### 1. 서론

최근 미세먼지 등 대기오염에 의한 건강상의 피해가 급격히 증가하고 기후 변화에 따른 미세먼지의 농도 특

성이 변화하는 현실 속에서 각국 정부는 대기오염을 예방하기 위하여 많은 노력을 기울이고 있다(Racherla and Adams, 2006; Thishan and Coowanitwong, 2008). 특히 대기 오염물질의 생성량이 많은 동아시아에서 미세

Received 23 October, 2018; Revised 15 November, 2018;

Accepted 23 November, 2018

\*Corresponding author: Soon-Hwan Lee, Department of Earth Science Education, Pusan National University, Busan 46241, Korea

Phone : +82-51-510-2706

E-mail : withshlee@pusan.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

먼저 저감정책이 중요하게 부각되고 있는데, 오염물질의 대기 중 농도는 생성원의 특성과 기온, 바람 등 기상학적인 요인에 의하여 결정된다. 특히 생성된 오염물질의 이류는 생성 지역뿐 아니라 비생성 지역까지 영향을 미치기 때문에 정확한 분석이 필요하다. 이를 평가하기 위하여 다양한 접근법이 시도되고 있다. 그 중 가장 널리 사용되는 것이 수치모델계산을 통한 접근법이다(Moreno et al., 2011). Bao et al.(2008)은 캘리포니아 센트럴밸리의 오염물질 이동을 파악하기 위해 하층 바람을 모의하고 상층 바람과의 상호작용 및 궤적 분석을 통해 수치모델이 대기 하층의 수송과정을 재현할 수 있음을 보였으며, Souri et al.(2016)은 미국 휴스턴 지역의 장기적인 기후 자료와 수치모델자료의 결합을 통한 오존 분석에서 기상 패턴에 따라 오염물질의 강도가 다양하게 나타날 수 있음을 제시하였다. 이와 같이 기상 조건을 정확히 모의하는 것이 미세먼지를 비롯한 오염물질의 예보정확도를 향상시키기 위해서 필수적인 요소임을 알 수 있다.

수치모델을 통한 기상 모의에서 가장 어려운 점 중 하나는 정확한 초기치와 경계조건을 산출해야한다는 것과 모델이 가진 비선형성에 의하여 계산 오차가 증가하게 되는 것이다. 이것은 수치모델이 가지는 근본적인 문제로 이와 같은 문제를 최소화하기 위하여 많은 연구가 수행되고 있다(Case et al., 2008; Mishra and Srinivasan, 2010; Zheng et al., 2016). 그 중 하나가 관측 자료를 수치모델 자료와 결합시켜서 모델이 가지는 계산 오차를 줄이는 방법으로 이를 관측 자료동화라 한다. Mathiesen et al.(2013)은 위성 이미지의 구름 자료동화를 통해 수치모델의 복사량과 구름 발생 예측 정확도가 향상됨을 보였으며, Zhang et al.(2013)의 연구에서는 복사의 영향으로 발생하는 강수량의 자료동화 시스템을 제시하여 지표의 강수량과 강도에 대한 예측 능력이 개선됨을 보였다.

관측기기 및 기술의 발달에 따라 직접관측 및 원격관측 자료가 급격히 증가하고 있으며 이에 따라 관측 자료동화 시스템의 활용가능성이 증대되고 있으나 위성 자료와 레이더 자료 등 원격 관측 자료를 제외하고 대부분의 관측은 불규칙적인 시간 및 공간 규모로 관측되기 때문에 다양하고 불규칙적인 직접 관측을 동화에 적용하기 위해서는 각종 기상현상 및 대기오염 현상에 대한 효용성을 평가할 필요가 있다.

또한 대부분의 자료동화 연구는 격렬한 기상현상인 집중호우와 같은 특정 기상학적인 연구가 주를 이루고, 현재 미세먼지 등에 영향을 미치는 한반도 광범위한 고기압 상태의 중관 규모에 대한 분석을 부족하며, 특히 오존 및 미세먼지의 예측 성능이 떨어지는 한반도 동부 지역에 대한 관측 자료동화의 향상성에 대한 연구는 매우 부족한 실정이다. 따라서 본 연구는 현재 생산되고 있는 다양한 관측자료 중 대표적인 상층기상 관측자료, 지상 관측자료, 항공기 관측자료, 선박 관측자료, 위성 관측자료의 자료동화 효용성을 평가하고 이를 바탕으로 자료동화가 한반도 동부 지역의 기상 예측 성능에 미치는 영향을 평가하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 연구 대상 지역

본 연구의 대상 지역은 한반도 동부 지역으로 크게 강원 권역과 영남 권역으로 구분한다. 강원 권역은 태백산맥이 중심에 위치하기 때문에 주로 높은 산악으로 구성되어 있으며, 산악에 의하여 영서와 영동으로 구분된다. 대부분 산지로 구성되어 있어 대기 오염물질의 발생원이 거의 없다. 반면 영남 지역은 태백산맥의 끝자락에 위치하기 때문에 산악 지역과 내륙 분지 그리고 해안 지역이 혼재되어 복잡한 지형을 나타낸다. 또한 내륙에는 대구 광역시, 해안에는 부산광역시와 울산광역시 등 대도시 등이 있다(Fig. 1). 따라서 강원 권역에 비하여 대기 오염물질의 방출원이 다수 존재하고 있다.

동아시아 지역은 중관 기상학적으로 경압성이 강한 지역이기 때문에 급격한 기상현상의 변동이 자주 나타난다. 따라서 관측자료에 따른 동화 효과가 클 것으로 판단된다. 또한 미세먼지의 농도는 배출원의 특성이 중요하다. 연구 대상 지역인 영남 지역의 경우, 조선, 자동차, 기계 등 다수의 산업단지가 위치하고 있으며 이들 대부분은 연안에 위치하기 때문에 해풍과 같이 바다에서 유입되는 바람이 형성될 때 오염이 확대될 수 있다.

### 2.2. 관측자료

관측값 자료동화를 위한 관측자료는 NCEP (National Centers for Environmental Prediction)에서 제공하고 있는 전지구 관측자료를 이용하였다. Fig. 2는 본 연구에서 적용한 항공기 관측, 위성 관측, 상층 관측, 지상 관측의

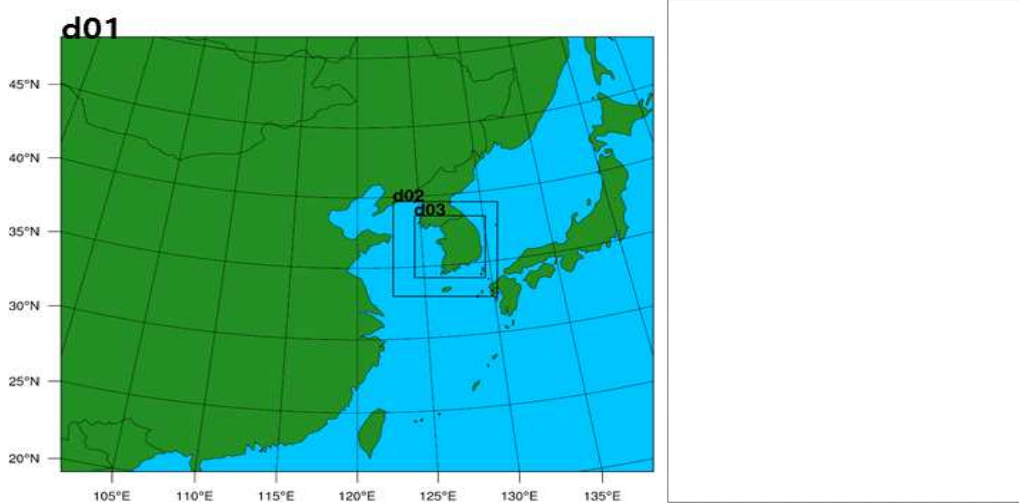


Fig. 1. Domains used this study and topography of major analysis area. a) model domains used in this study and b) topography of eastern part of Korean Peninsula.

측정 위치를 나타낸 것이다. NCEP의 전지구 관측자료는 GFS (Global Forecast System) 모델의 4차원 변분 자료동화를 위하여 WMO (World Meteorological Organization)와 함께 수집하여 관리하고 있는 자료로 상층 관측자료와 지상 관측자료를 구분하여 관리한다. 상층기상 관측자료로는 존데와 파이발 등 고정된 지점에서 주기적으로 관측을 하는 자료와 비행기 관측자료, 위성 산출물 등이 있다. 지상에는 항공기 metar 자료와 각국의 ASOS (Automated Synoptic Observing System), 선박관측, Buoy 관측자료 등이 있다.

예보 모델을 위한 관측값 자료동화는 현재 시점까지 관측된 자료만을 사용할 수 있으므로 예보 모델에서는 제약이 따를 수밖에 없다. 따라서 24시간 예보를 기준으로 모델의 적용(Spin-up time) 및 관측값 자료동화를 위해서 24시간에서 48시간까지의 과거시간부터 모델링을 하는 것으로 적용하였다.

본 연구에서는 NCEP 제공 자료뿐 아니라 연구 대상 지역의 상세 지상 관측자료도 사용한다. Fig. 3은 강원 권역과 영남 권역에서 자료동화에 사용할 수 있는 관측소 위치를 제시한 것이다. 앞서 논하였듯이 관측값 자료동화는 관측값을 참값으로 취급하는 자료동화방법이기 때문에 관측값 에러를 고려할 수 있도록 WRF (Weather Research and Forecasting) 모델에서는 이상 관측값을

제거하기 위해서 QC (Quality Control)를 수행하고 있다. 그러나 그전에 믿을 수 있는 관측값을 제공하기 위해서 한반도 내에 유인관측소와 존데, 부이 자료를 위주로 자료동화를 수행하였으며 AWS 등 주변 지역의 영향을 비교적 크게 받는 관측/지점은 자료동화에서 제외하였다.

### 2.3. 자료동화 방법

관측값 자료동화는 각 격자에 영향을 미칠 수 있는 영향반경에 따라 관측값을 객관분석하여 모델의 상태 (state)를 개선하는 방법이다(Ide et al, 1997; Stauffer and Seaman, 1997). 지상 관측, 존데 등 다양한 종관 및 비종관 관측값을 적용할 수 있으며 예단 방정식은 다음 식 (1)과 같다.

$$\frac{\partial^* \alpha}{\partial t} = F(\alpha, x, t) + G_\alpha \times p \times \frac{\sum_{i=1}^N W^2 \times \gamma \times (\alpha_o - \alpha)_i}{\sum_{i=1}^N W_i(x, t)} \quad (1)$$

$$W(x, t) = w_{xy} \times w_\sigma \times w_t \quad (2)$$

여기서 N은 관측값의 개수를 뜻하며  $W(x, t)$ 로 표현되는 가중치함수(식 (2))를 통하여 자료동화의 강

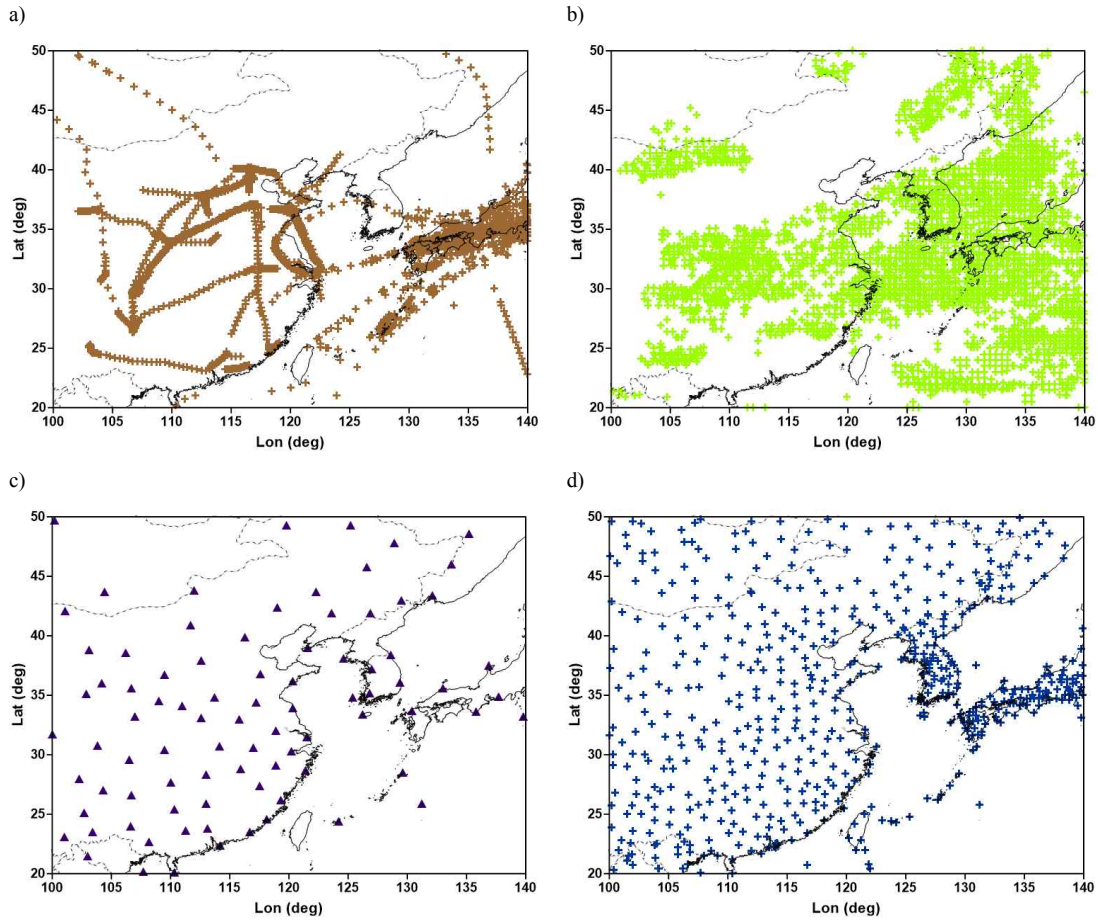


Fig. 2. Data observing location. a) air craft data, b) satellite data, c) upper air data and d) surface observation data (ASOS) over the east Asia. The data are provided by National Centers for Environmental Prediction.

도를 조절하게 된다.  $W(x,t)$ 의 각 항은 수평, 수직, 시간 가중치 항을 뜻하며, 수평 가중치,  $W_{xy}$ 는 관측 지점과 격자점의 거리, 영향반경을 이용하여 정의한다. 각 항은 격자에 물리변수가 관측된 변수에 의해 영향을 미치게 되는 크기를 시·공간적 거리에 따라 결정하는 것이다. 위 식에 의하면 모델 내 격자와 가까이 있는 관측값일수록 더 많은 영향을 끼치게 되며, 수평적으로 모델 격자와 관측되는 지점의 거리가 영향반경보다 크게 되면 전혀 영향을 미치지 않게 된다. 그러므로 모델의 격자규모와 적분 간격에 따라 관측값의 영향반경(radius influence)을 적절하게 결정하는 것이 중요하다. 객관분석에 의한 자료동화 방법은 변분

자료동화와 칼만필터링과 같이 관측값과 모델 상태의 오류를 고려해 필터링해 줄 수 없기 때문에 신뢰할 수 있는 관측값만을 사용하여야 모델의 상태를 적절하게 개선해 줄 수 있다.

#### 2.4. 수치모델과 실험 설계

서로 다른 관측자료의 자료동화 효율성을 평가하기 위하여 수치모델을 통한 수치실험을 실시하였다. 본 연구에서는 3차원 대기 역학 모형인 WRF를 통하여 3차원 기상장을 생산한다(Skamarock and Klemp, 2008). 본 연구에서 적용한 WRF 도메인은 Fig. 1에 나타내었다. 제 1 영역으로 동아시아 영역을 대상으로 27 km 해상도를 가진  $149 \times 125$ 의 수평격자망을 구성하여 동아시아

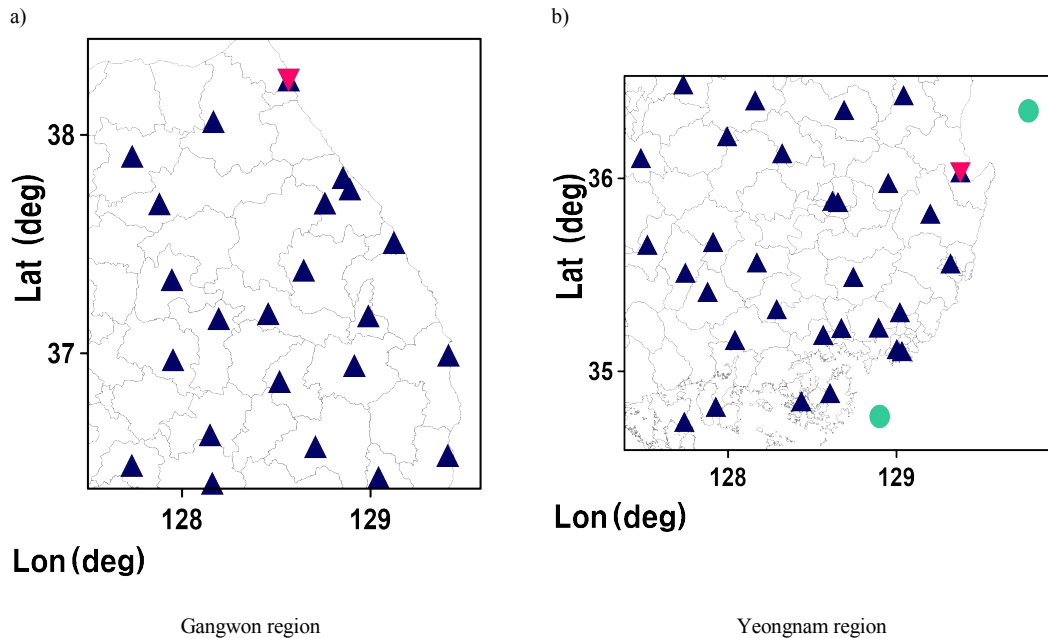


Fig. 3. Meteorological observation sites. a) Gangwon region, b) Yeongnam region. Triangles, reverse triangle, and closed circles indicate ASOS(▲), Zonde(▼), and Buoy(●) observation data, respectively.

의 영향을 분석하였으며, 제 2 영역으로 한반도 전체와 풍상측인 서해의 대부분을 포함한 영역으로 9 km 격자망을 구성하였다. 그리고 마지막 제 3 영역은 한반도 남부만을 대상으로 하며 160 × 160 격자수를 가진 3 km 해상도이다. 본 연구에서의 분석 및 검증 과정은 제 3 영역의 자료를 중심으로 수행하였다.

WRF 모델 실험에 적용된 물리옵션은 Table 1에 나타났다. 주요 물리 옵션으로 Planetary boundary layer parameterization는 YSU 스킴을 적용하였으며(Hong

et al., 2006), 장 단파 복사 모수화는 각각 RRTM (Rapid radiative transfer model)과 Doudhia 스킴을 적용하였다. 또한 구름 모수화는 WSM6를 적용하였다. 또한 해수면온도는 위성 자료를 바탕으로 매일 갱신되는 고해상도 RTG 해수면 온도자료를 적용하였다. RTG 해수면 온도 자료는 미국의 NCEP Marine Modeling and Analysis Branch (MMAB)에서 생산되는 1일 자료이다. RTG SST 자료는 AVHRR/NOAA-17의 위성 관측 자료와 부이, 선박자료가 자료동화된 것이다.

Table 1. Description of WRF simulations

	D1	D2	D3
Horizontal resolution	27 km	9 km	3 km
Horizontal grids	149 × 125	79 × 82	160 × 160
Vertical layers	33 layers		
Physical options	RRTM scheme Doudhia scheme WSM scheme		
Initial met. data	FNL		
Simulation period	2014. 01. 15 ~ 2014. 01. 18		

**Table 2.** Design of numerical simulations

Simulation CASE	with/without nudging	Data for assimilations
BASE	-	no data assimilation
GRID	Grid	only grid nudging
AIREP	Grid + Obs	Air craft data with grid nudging
SATOB	Grid + Obs	Satellite data with grid nudging
SYNOP	Grid + Obs	Synoptically observed data over all of China and grid nudging
SYNOP_east	Grid + Obs	Synoptically observed data over eastern part of China and grid nudging
Upper	Grid + Obs	upper air observation data with grid nudging
All_east	Grid + Obs	Synoptically observed data over eastern part of China and upper air observation data with grid nudging

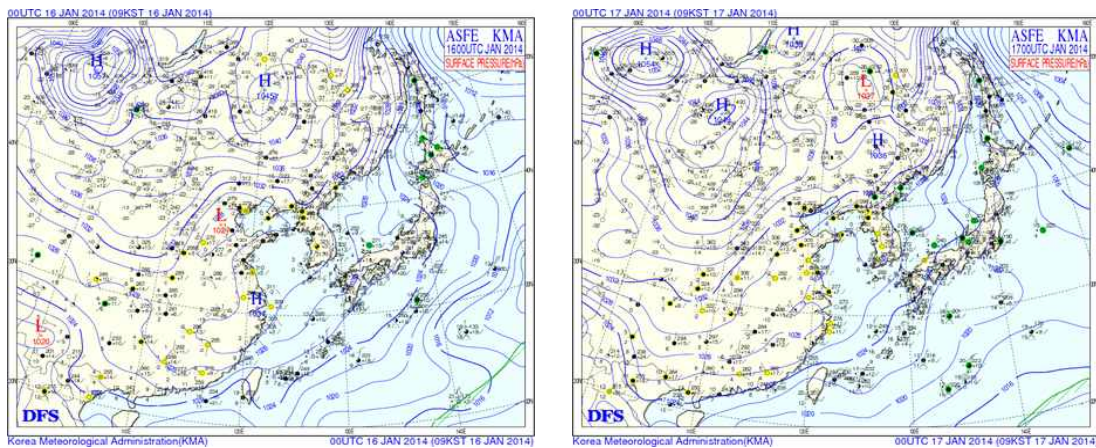
수치모의는 시베리아 고기압이 강하게 발달하여 종관적인 변화가 심하였던 2014년 1월 15일부터 1월 18일까지 72시간동안 수행하였다. 지난 시간이지만 예보모델에 적용할 것을 감안하여 앞 48시간은 모델링 적용 기간으로 자료동화를 수행하였고 이후 24시간은 예보임을 감안하여 관측값 자료동화를 수행하지 않았다.

수치실험은 다양한 자료를 각각 적용하여 관측값과 비교하는 방법으로 진행한다. 본 연구에서 적용한 실험 설계는 Table 2에 제시하였다. 자료 동화를 실시하지 않은 사례(case BASE)와 FNL 자료의 grid nudging(case GRID)을 적용한 사례를 중심으로 구성된다. case GRID 사례에 각각 항공기 관측자료(case AIREP), 위성 관측자료(case SATOB), 중국 전역의 지상관측자료

(case SYNOP), 중국 동부 지역의 지상 관측자료(case SYNOP\_east), 상층 관측자료(case TEMP)를 자료 동화하여 산출한 기상 및 미세먼지 자료를 비교하였다. 중국 지상 관측자료의 경우 case SYNOP\_east는 우리나라의 풍상 측에 해당하는 중국 동부의 관측자료를 자료동화하였을 때 기상장의 모의정확도를 확인하기 위한 실험으로 설정되었고, 추가로 중국 전역과 동부로 제한된 관측자료를 자료동화한 결과의 차이를 파악하기 위해 중국의 지상 관측자료 자료동화 실험을 구분하여 수행하였다.

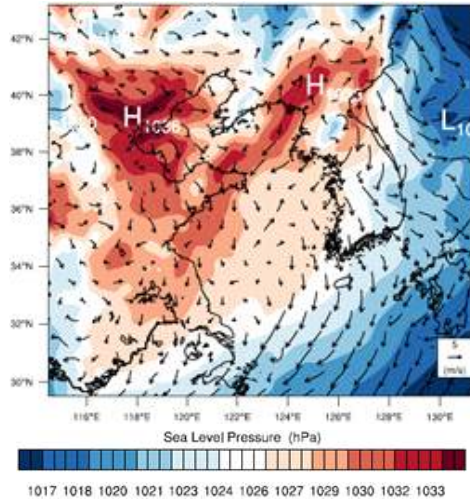
### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 종관 분석

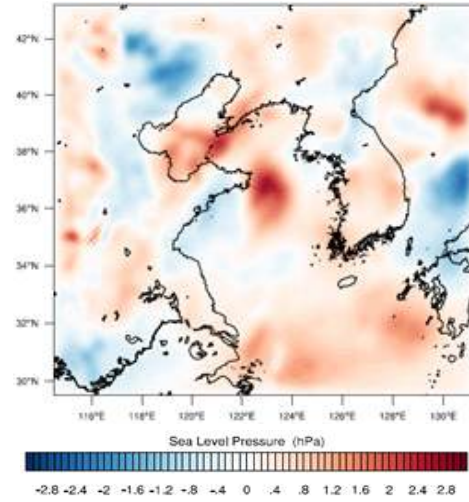


**Fig. 4.** Surface synoptic charts at 09 LST 16 and 17 January 2014. These charts are provided by Korea Meteorological Administrator.

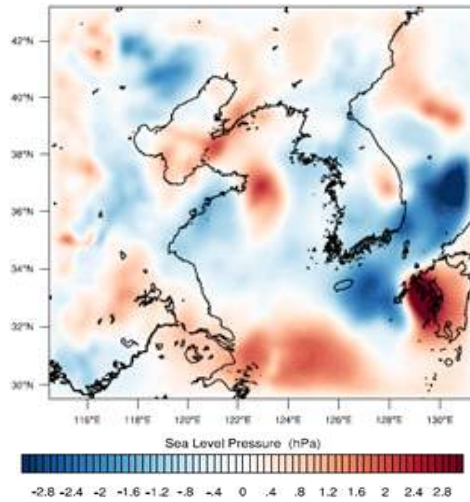
a) case BASE



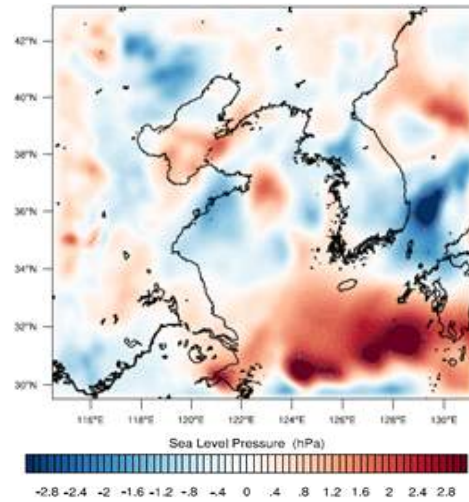
b) case BASE - case GRID



c) case BASE - case AIREP



d) case BASE - case SATOB



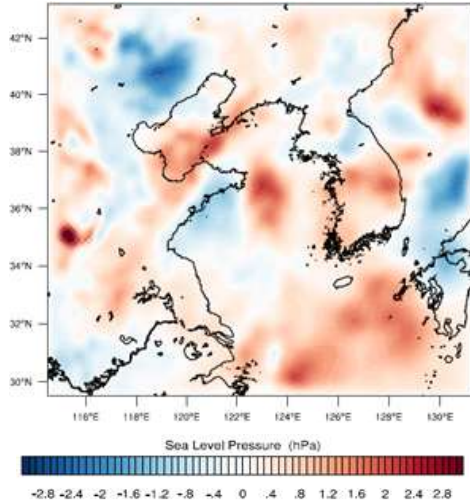
**Fig. 5.** Differences of estimated surface pressure at 12 LST 17 2014 for b) case Grid, c) case AIREP, d) case SATOB, e) case SYNOP, f) case SYNOP\_east, g) case UPPER, and h) case ALL from a) case BASE. a) show the surface wind vectors and pressure distributions at case BASE.

Fig. 4는 2014년 1월 16일과 17일 09시의 지상일기도를 나타낸 것이다. 16일의 지상일기도에서 중앙아시아 바이칼 호수 근처에 발달한 시베리아 고기압이 위치하고 있으나 한반도에는 영향을 미치지 못한다. 또한 중국 북동부에 위치한 약한 저기압의 영향으로 한반도 전체는 바람이 약하게 불고 있다.

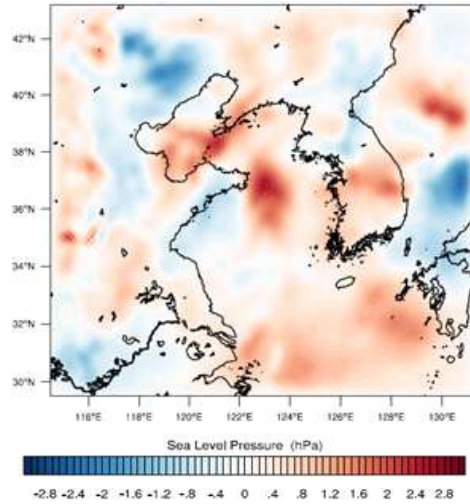
그러나 17일에는 중앙아시아에서 분리된 강한 고기압

이 한반도로 접근하고 있으며, 한반도 북동쪽에 위치한 고기압이 강화되면서 한반도 상에서 점차 바람이 강하게 분다. 또한 시베리아 기단의 영향으로 서고동저형의 기압배치가 되며, 이로 인해 서풍이 강화된다. 그리고 16일 중국에 위치한 저기압에 의하여 상승한 중국 지역의 공기가 점차 동쪽으로 이동하여 한반도에 대한 종관 기상의 영향이 강해지고 있다고 판단할 수 있다.

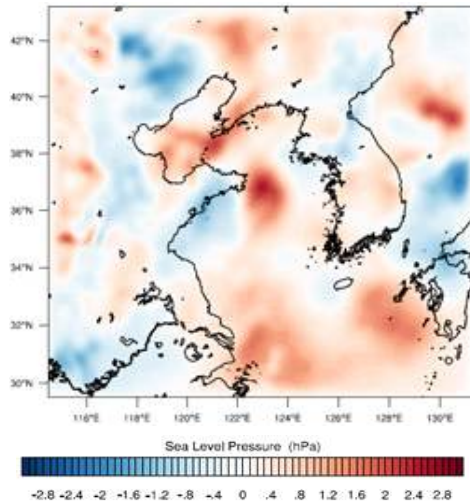
e) case BASE - case SYNOP



f) case BASE - case SYNOP\_east



g) case BASE - case Upper



h) case BASE - case ALL\_east

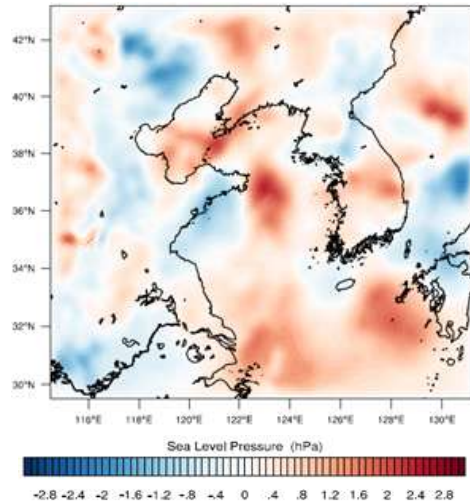


Fig. 5. continue

3.2. 관측 자료동화별 예측 향상도 분석

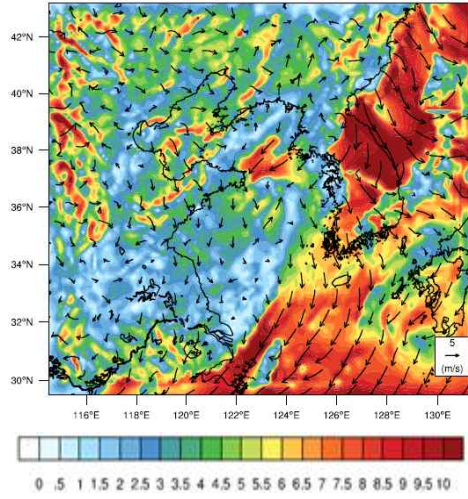
Fig. 5는 2014년 1월 17일의 기압배치를 실험별로 나타낸 것이다. Fig. 5a를 제외한 그림은 기준사례인 case BASE에서 산출된 기압에 대하여 각 사례에서 산출된 기압의 차이를 나타낸다. 먼저 Fig. 5a는 case BASE에서 산출된 지상 기압과 바람벡터이다. 앞서 일기도에서 확인한 바와 같이 시베리아 중심에서 떨어져 나온 강한 고기압이 중국 북동부에 위치하며 우리나라 서해를 가로

지르는 고기압이 있기 때문에 서해 지역은 전체적으로 북서풍 또는 북풍의 바람이 분다.

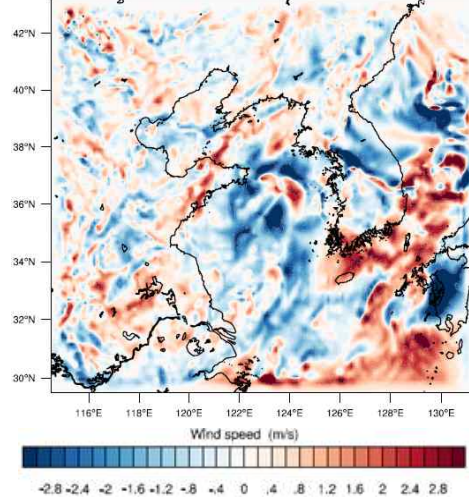
자료동화를 실시하지 않은 사례(case BASE)와 각각의 자료를 동화한 사례의 기압을 비교해보면, 전체적으로 산둥반도 부근 서해와 동해 지역에서 양의 값이 나타난다. 이러한 모습은 모든 사례에서 유사하게 나타난다. 이는 grid nudging의 영향으로 판단된다. grid nudging의 유용성은 이전 연구에서 제시된 바 있으며(Jeon et



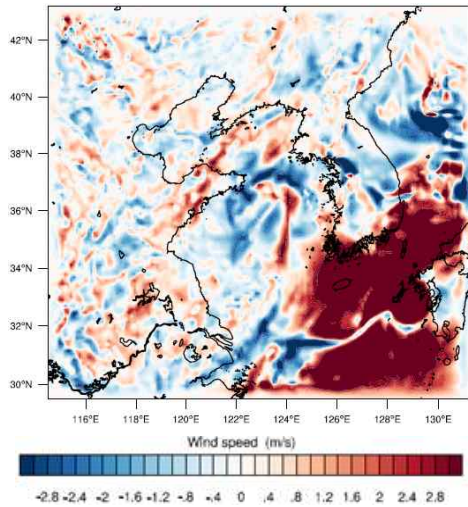
a) case BASE



b) case BASE - case GRID



c) case BASE - case AIREP



d) case BASE - case SATOB

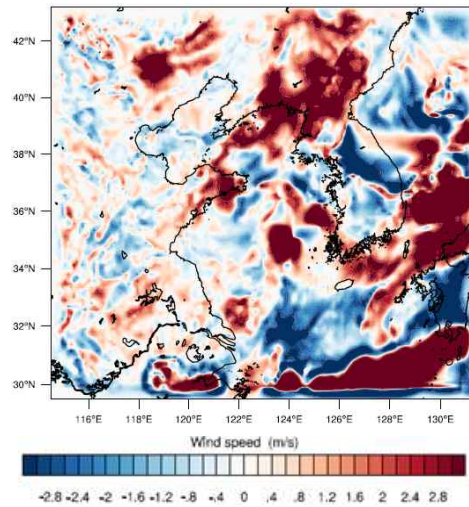


Fig. 6. Same as Fig. 5 but for estimated surface wind speed.

al., 2016; Li et al, 2016), 그림과 같이 양의 값이 나타나는 것은 grid nudging을 하지 않은 경우 서해와 동해 남부 해상의 기압을 과대모의하는 것을 의미한다. 한반도 내부의 경우 Fig. 5c, Fig. 5d를 제외한 모든 사례에서 기압 차이가 양의 값을 가지며, 특히 풍하 지역인 한반도 동부 지역에서 강한 양의 값을 나타낸다. 이 역시 기존의 case BASE의 기압이 과대모의되었음을 의미한다. 자료 동화를 통하여 이러한 기압의 과대모의가 해소됨에 따라 풍속의 감소가 나타날 수 있다.

반면 대부분의 사례에서 대한 해협을 중심으로 음의 값이 나타난다. 특히 case AIREP의 경우 강한 음의 값이 나타난다. 이러한 기압의 변동은 대한 해협에서의 풍속을 강화시킨다. case SATOB 경우에서도 유사하게 후쿠오카 지역 주변에서 음의 값이 나타나 기압이 BASE 경우에 비해 높아지는 경향성을 보인다. case AERIP에서 나타나는 대한 해협의 강한 음의 값은 다른 사례에서는 나타나지 않는다. 이것은 Fig. 2에서 보인 바와 같이 항공기 관측의 주요 통로상에 대한 해협이 위치하기 때문에

다른 관측자료에 비하여 관측빈도가 높기 때문이라고 판단된다. 따라서 직접관측의 빈도가 높은 경우 자료의 정확도뿐 아니라 자료동화의 효율성 역시 증가하는 것을 알 수 있다. Fig. 5e-h의 case SYNOP, SYNOP\_east, Upper, ALL은 case GRID와 약간의 강도 차이를 제외하고는 비슷한 패턴이 나타나고 있다.

Fig. 6은 각 사례별 지표면 풍속의 차이를 나타낸 것이다. case SYNOP, case SYNOP\_east, case Upper, case ALL의 사례는 Fig. 5와 마찬가지로 case GRID와 비슷한 패턴이 나타나 그림으로 나타내지 않았다. case BASE 경우, 수평 풍속은 한반도 강원도 내륙에서 최대 10 m/s 이상으로 강하게 나타나며, 제주도 남쪽에서도 강한 풍속이 분포한다. 이러한 case BASE의 강한 풍속은 자료 동화를 통하여 완화되는 경향이 나타나며 전체적으로 기압의 차이에 비하여 매우 복잡한 양상을 나타낸다. 이것은 각 사례별 기압의 변화가 풍상측과 풍하측에서 다르게 나타나기 때문이다. 모든 사례에서 양적인 차이는 존재하지만 전체적으로 서해 및 한반도 내륙 전체에서 풍속이 감소하는 경향이 나타나는데, 이는 중국으로부터 한반도로 유입되는 기류와 한반도에서 동해로 빠져나가는 기류의 변화에 영향을 미칠 것으로 판단된다. 특히 Fig. 6c, Fig. 6d의 AIREP과 SATOB 경우에는 남부 지방의 동해와 남해에서 5 m/s 이상의 큰 풍속 차이를 보임으로써 자료동화에 의해 한반도에서 남해 및 동해로 빠져나가는 미세먼지 농도에 큰 변화가 있을 것으로 판단된다.

### 3.3. 자료동화에 따른 기상 예측 향상도 통계분석

이러한 관측자료별 기상장 예측 효율성을 정량적으로 평가하기 위해 통계값을 비교하였다. 본 연구에서 제시한 통계자료는 Mean Bias (MB), Root Mean Square Error (RMSE), Index Of Agreement (IOA)이다. 각각의 정의는 아래와 같다.

$$MB = \frac{1}{n} \sum_1^n (M - O) \quad (3)$$

$$SE = \sqrt{\frac{\sum_1^n (M - O)^2}{n}} \quad (4)$$

$$IOA = 1 - \left[ \frac{\sum_1^n (O - M)^2}{\sum_1^n (|M - \bar{O}| + |O - \bar{O}|)^2} \right] \quad (5)$$

각 식에서 n은 자료의 개수를 말하며, M은 모델값, O는 관측값을 말한다. Mean bias와 Root mean square error는 관측과 모델값의 편향과 오차를 나타내는 값으로 0에 가까울수록 이상적인 값이며, Index of agreement는 관측과 모델 결과값의 일치도를 나타내는 지수로 1에 가까울수록 이상적인 값이다.

Table 3은 한반도 ASOS 97개 지점에 대해서 2014년 1월 17일 0900LST 이후 24시간 동안의 통계 분석을 실시한 결과이다. 자료동화에 의한 예보 영향을 알아보기 위해 예보일 이전 48시간 동안 관측값 자료동화를 적용하고, 이후 24시간 동안의 결과에 대해 통계 분석을 실시하였다. 먼저 앞서 Fig. 5와 Fig. 6에서 제시한 바와 같이 자료동화를 실시하지 않는 case BASE에 비하여 grid nudging과 자료동화를 실시한 경우 실험간 차이가 크게 나타남을 알 수 있다. 특히 grid nudging의 적용 효율성이 매우 크게 나타난다. 이는 case BASE에 비하여 grid nudging을 적용했을 경우 전체적인 기압 분포의 변화를 가져오기 때문에 기상장의 예측 성능이 향상되는 것으로 보인다. 따라서 grid nudging에 적용되는 해석장의 정확도가 중요하며 종관강제력이 강하게 작용하는 경우 grid nudging의 효과가 크게 나타날 수 있다.

여기서 주목할 점은 항공기 자료와 위성 자료를 자료동화한 경우 풍속에서 예측 정확도가 case GRID에 비하여 떨어진다는 점이다. case GRID의 IOA가 0.66인데 비하여 case AERIP와 case SATOB의 IOA는 각각 0.64와 0.63으로 떨어진다. 이 점은 비종관 자료를 자료동화할 경우 예측 정확도가 떨어질 수 있음을 의미하며, 역학적으로 균형이 잡힌 수치대기에 관측자료 동화가 계산 오차로 작용할 수 있다는 것이 결과로 나타난 것이다. 따라서 관측자료의 전체적인 분포 및 관측자료의 정확도를 사전에 파악하여야 한다.

BASE 실험에 비해서 ALL\_east 실험의 경우, 기온에 대해 MB 0.73 °C, RMSE 0.29 °C, IOA 0.03, 풍속에 대해서는 MB 0.06 m/s, RMSE 0.13 m/s, IOA 0.09 만큼의 차이를 보였다. 이는 앞선 48시간 동안의 관측값 자료

**Table 3.** statistics of estimated surface air temperature and wind speed during 24 hours forecasting for each case

24h	T (°C)			WS (m/s)		
	MB	RMSE	IOA	MB	RMSE	IOA
BASE	1.24	2.82	0.83	1.27	2.12	0.57
GRID	0.97	2.61	0.86	1.26	2.03	0.66
AIREP	0.84	2.57	0.86	1.39	2.12	0.64
SATOB	1.04	2.59	0.86	1.37	2.14	0.63
SYNOP	0.51	2.53	0.86	1.21	1.99	0.67
SYNOP_east	0.51	2.53	0.86	1.21	1.99	0.67
Upper	0.99	2.61	0.86	1.26	2.05	0.66
ALL_east	0.51	2.53	0.86	1.21	1.99	0.67

동화 효과가 이후 24시간 동안에도 여전히 영향을 미치는 것을 확인할 수 있는 결과로 이와 같은 기상요소의 자료동화 적용 효과가 미세먼지 등의 대기 오염물질 예측 정확도 개선에도 영향을 미칠 것으로 사료된다.

Table 4는 72시간 동안(2014년 1월 15일 0900LST ~ 18일 0800LST)의 결과를 통계 분석하여 나타낸 것이다. 우선 기본적인 case BASE 경우에서 초기장 자료동화를 적용한 GRID 경우, 24시간 예보 통계와 마찬가지로 향상을 보였지만 향상 정도는 크지 않다. 위성자료를 이용한 SATOB 경우에는 MB와 RMSE가 증가하여 오히려 풍속의 정확도가 감소하는 결과가 나왔다. 결과적으로 기온 및 풍속 모두에서 가장 높은 향상을 보인 실험은 앞선 24시간에 대한 통계 분석 결과와 마찬가지로 종관기상관측자료를 이용한 SYNOP와 SYNOP\_east 그리고 case ALL이다. case BASE 경우와 비교하여 case ALL\_east 경우는 기온에 대해 MB 0.73°C, RMSE

0.29°C, IOA 0.01, 풍속에 대해서는 MB 0.06 m/s, RMSE 0.13 m/s, IOA 0.09 만큼의 개선이 나타나 24시간 예보보다는 작지만 예보 향상 효과가 나타났다. 종관기상 관측자료와 고층기상 관측자료를 함께 사용한 ALL\_east 경우는 SYNOP\_east와 큰 차이가 없어 고층기상 관측자료의 효과가 지상관측자료와 비교한 통계분석에서는 그 효과가 크게 나타나지 않는 것으로 보인다.

#### 3.4. 강원 및 영남지역 기상장 향상성 분석

Fig. 7은 수치모의 기간 동안 강원과 영남 지역에 해당하는 각 사례별 강릉과 대구의 기온 및 풍속 시계열을 나타낸 것이다. Aircraft, SYNOP, SYNOP\_east 경우 ALL\_east와 비슷한 수치를 나타나 제외하였다. 기온의 경우, 일 변동성은 잘 모의하며 사례별로 큰 차이는 나타나지 않는다. 특히 Table 3과 4에서 제시된 바와 같은 grid nudging에 따른 향상 정도가 작게 나타난다. 이는

**Table 4.** Same as Table 3 except for 72 hours forecasting

72h	T (°C)			WS (m/s)		
	MB	RMSE	IOA	MB	RMSE	IOA
BASE	1.24	2.82	0.80	1.27	2.12	0.57
GRID	0.97	2.61	0.82	1.26	2.03	0.66
AIREP	0.84	2.57	0.82	1.39	2.12	0.64
SATOB	1.04	2.59	0.83	1.37	2.14	0.63
SYNOP	0.51	2.53	0.81	1.21	1.99	0.67
SYNOP_east	0.51	2.53	0.81	1.21	1.99	0.67
Upper	0.99	2.61	0.82	1.26	2.05	0.65
ALL_east	0.51	2.53	0.81	1.21	1.99	0.66

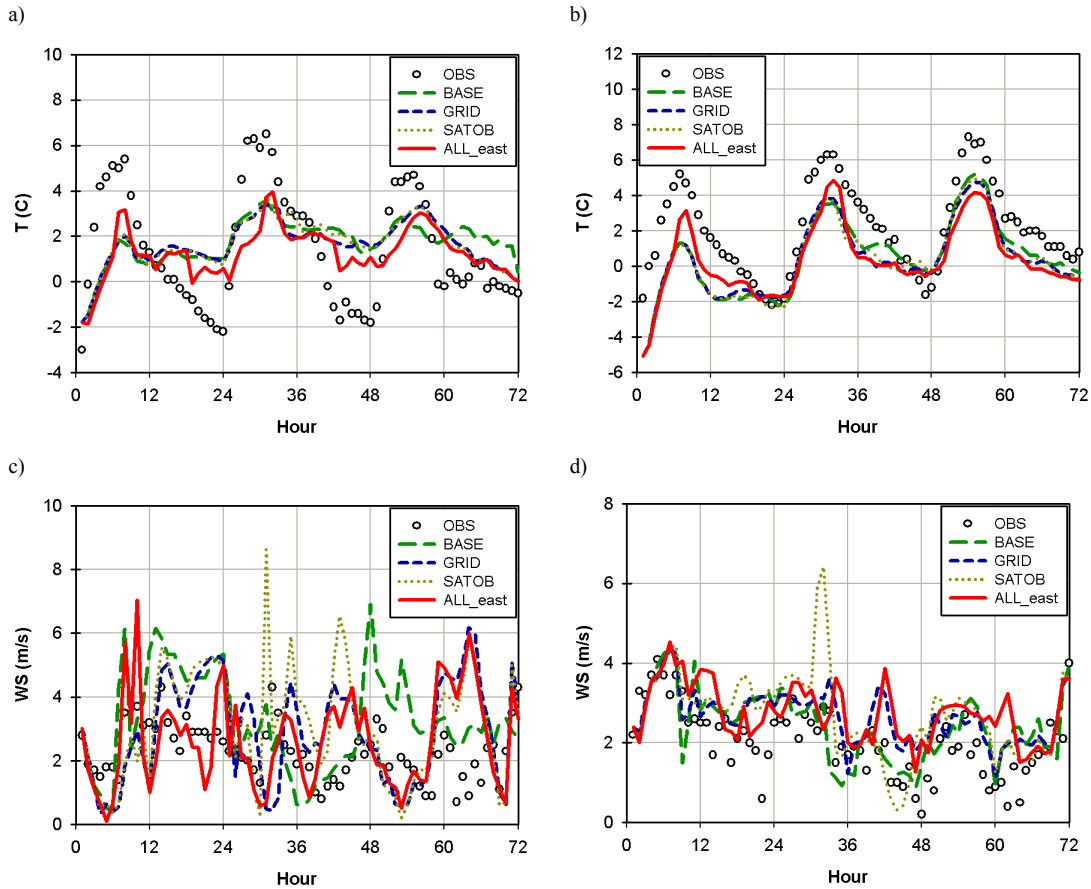


Fig. 7. Temporal variation of surface air temperature and wind speed estimated for case BASE, case GRID, case SATOB and ALL\_east, and observation data at Gangreung(left panels) and Daegu(right panels).

grid nudging이 한반도 내 97개 지점의 평균에 대해 정확도 향상성은 분명하지만 한반도 동부 지역만을 볼 때, 향상성이 명확하게 나타나지 않는다는 것을 의미한다. 그러나 case ALL\_east의 경우 다른 사례에 비하여 기온의 향상성이 뚜렷하기 때문에 한반도 동부 지역은 다양한 자료를 복합적으로 자료동화를 하는 것이 효과적일 수 있음이 나타난다.

반면 풍속은, SATOB이 BASE 경우에 비해서 더 과대모의 하는 경향성이 나타나지만 그 외의 실험에서는 BASE 경우에 비해 큰 차이가 나타나지 않는다. 바람의 경우 대상 지역인 강릉과 대구가 매우 복잡한 지형을 가지고 있기 때문에 종관적인 영향보다 국지적인 영향이 더욱 강하게 작용할 가능성이 크다. 따라서 관측자료 자

료동화에 의한 한반도 동부 지역의 향상 정도는 다른 요인에 비하여 크지 않다고 볼 수 있다.

#### 4. 결론

관측자료의 자료동화가 기상요소 및 미세먼지 예측성에 미치는 영향을 파악하기 위하여 다양한 관측 자료동화를 포함한 수치실험을 실시하였다. 수치실험에 적용된 관측요소는 항공기 관측, 위성 관측, 상층 관측, 지상 관측자료이다. 연구에 사용된 모델은 3차원 역학 모형인 WRF이다. 서로 다른 관측자료 동화를 통하여 아래와 같은 결과를 도출하였다.

1) grid nudging을 수행한 경우, 전체적인 기압 분포

의 변화를 가져오기 때문에 자료동화를 수행하지 않는 경우에 비하여 기상장의 예측 성능이 향상된다. 특히 중관 강제력이 중요한 조건일 때 grid nudging의 효과가 크게 나타날 수 있다.

2) 다수의 관측자료 동화를 통한 기상 요소의 예측성의 향상은 기대할 수 있으나 한 가지의 관측 자료에 따른 자료동화는 자료동화를 하지 않은 경우보다 예측성능이 떨어질 수 있다. 이 점은 관측 자료의 관측 특성에 따라 1개의 관측 자료를 자료동화할 경우 예측 정확도가 떨어질 수 있음을 의미하며, 역학적으로 균형이 잡힌 수치대기에 관측 자료의 자료동화가 계산 오차로 작용할 수 있다는 것을 나타낸다.

3) 항공기 관측 자료의 자료동화와 같이 관측의 획득 구간이 제한적이고 관측 빈도가 높게 나타나는 경우, 자료의 수가 많기 때문에 정확도가 높아질 수 있으나 관측 자료의 획득 영역이 제한적이기 때문에 전체 구역의 역학적인 균형이 어긋나는 경우가 발생할 수 있어 주의하여야 한다.

4) 예측 효율이 높은 grid nudging에 따른 기압의 변동은 모델 도메인 전체의 예측 정확도에 향상을 줄 수 있다. 그러나 한반도 동부 지역과 같이 지형이 복잡한 지역에서는 grid nudging만을 적용했을 때 향상 정도가 낮게 나타날 수 있으며 이러한 경우에는 다양한 자료를 복합적으로 자료동화를 하는 것이 효과적이다.

### 감사의 글

이 연구는 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

### REFERENCES

- Bao, J. W., Michelson, S. A., Persson, P. O. G., Djalalova, I. V., Wilczak, J. M., 2008, Observed and WRF-Simulated low-level winds in a high-ozone episode during the Central California Ozone Study, *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 47, 2372-2394.
- Case, J. L., Crosson, W. L., Kumar, S. V., Lapenta, W. M., Peters-Lidard, C. D., 2008, Impacts of high-resolution land surface initialization on regional sensible weather forecasts from the WRF Model, *J. Hydrometeorol.*, 9, 1249-1266.
- Hong, S. Y., Y. Noh, J. Dudhia, 2006, A New vertical diffusion package with explicit treatment of entrainment processes, *Mon. Wea. Rev.*, 134, 2318-2341.
- Ide, K., Courtier, P., Ghil, M., Lorenc, A. C., 1997, Unified notation for data assimilation: Operational, sequential, and variational, *J. Meteor. Soc. Japan*, 75, 181-189.
- Jeon, W., Choi, Y., Percell, P., Souri, A. H., Song, C. K., Kim, S. T., Kim, J., 2016, Computationally efficient air quality forecasting tool: implementation of STOPS v1.5 model into CMAQ v5.0.2 for a prediction of Asian dust. *Geosci. Model Dev.*, 9, 3671-3684.
- Li, X., Choi, Y., Czader, B., Roy, A., Kim, H., Lefter, B., Pan, S., 2016, The impact of observation nudging on simulated meteorology and ozone concentrations during DISCOVER-AQ 2013 Texas campaign, *Atmos. Chem. Phys.*, 16, 3127-3144.
- Mathiesen, P., Collier, C., Kleissl, J., 2013, A High-resolution, cloud-assimilating numerical weather prediction model for solar irradiance forecasting, *Sol. Energy*, 92, 47-61.
- Mishra, S. K., Srinivasan, J., 2010, Sensitivity of the simulated precipitation to changes in convective relaxation time scale, *Ann. Geophys.*, 28, 1827-1846.
- Moreno, T., Querol, X., Alastuey, A., Reche, C., Cusack, M., Amato, F., Pandolfi, M., Pey, J., Richard, A., Prévôt, A. S. H., Furger, M., Gibbons, W., 2011, Variations in time and space of trace metal aerosol concentrations in urban areas and their surroundings, *Atmos. Chem. Phys.*, 11, 9415-9430.
- Racherla, P. N., Adams, P. J., 2006, Sensitivity of global tropospheric ozone and fine particulate matter concentrations to climate change, *J. Geophys. Res.*, 111, D24103.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., 2008, A Time-split nonhydrostatic atmospheric model for weather research and forecasting applications, *J. Comput. Phys.*, 227, 3465-3485.
- Souri, A. H., Choi, Y. S., Li, X. S., Kotsakis, A., Jiang, X., 2016, A 15-year climatology of wind pattern impacts on surface ozone in Houston, Texas, *Atmos. Res.*, 174-175, 124-134.
- Stauffer, D. R., Seaman, N. L., 1994, Multiscale four-dimensional data assimilation, *J. Appl. Meteor.*, 33,

- 416-434.
- Thishan Dharshana, K. G., Coowanitwong, N., 2008, Ambient PM<sub>10</sub> and respiratory illnesses in Colombo City, Sri Lanka, *J. Environ. Sci. Health*, 43, 1064-1070.
- Zhang, S. Q., Zupanski, M., Hou, A. Y., Lin, X., Cheung, S. H., 2013, Assimilation of precipitation-affected radiances in a cloud-resolving WRF ensemble data assimilation system. *Mon. Wea. Rev.*, 141, 754-772.
- Zheng, Y., Alapaty, K., Herwehe, J. A., Genio, A. D. D., Niyogi, D., 2016, Improving high-resolution weather forecasts using the weather research and forecasting (WRF) model with an updated kain - fritsch scheme. *Mon. Wea. Rev.*, 144, 833-860.