

공군 현업 수치예보를 위한 삼차원 변분 자료동화 체계 개발 연구

노경조^{1),2)} · 김현미^{*,1)} · 김대휘¹⁾

¹⁾ 연세대학교 대기과학과, 대기예측성 및 자료동화 연구실

²⁾ 대한민국 공군 제10전투비행단 기상대

Development of the Three-Dimensional Variational Data Assimilation System for the Republic of Korea Air Force Operational Numerical Weather Prediction System

Kyoungjo Noh^{1),2)} · Hyun Mee Kim^{*,1)} · Dae-Hui Kim¹⁾

¹⁾ Atmospheric Predictability and Data Assimilation Laboratory, Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University, Republic of Korea

²⁾ Weather Unit, 10th Fighter Wing, Republic of Korea Air Force, Republic of Korea

(Received 19 December 2017 / Revised 27 April 2018 / Accepted 25 May 2018)

ABSTRACT

In this study, a three-dimensional variational(3DVAR) data assimilation system was developed for the operational numerical weather prediction(NWP) system at the Republic of Korea Air Force Weather Group. The Air Force NWP system utilizes the Weather Research and Forecasting(WRF) meso-scale regional model to provide weather information for the military service. Thus, the data assimilation system was developed based on the WRF model. Experiments were conducted to identify the nested model domain to assimilate observations and the period appropriate in estimating the background error covariance(BEC) in 3DVAR. The assimilation of observations in domain 2 is beneficial to improve 24-h forecasts in domain 3. The 24-h forecast performance does not change much depending on the estimation period of the BEC in 3DVAR. The results of this study provide a basis to establish the operational data assimilation system for the Republic of Korea Air Force Weather Group.

Key Words : Air Force Operational Numerical Weather Prediction System(공군 현업 수치 예보 시스템), WRF 3DVAR (WRF 삼차원 변분 자료동화), Background Error Covariance(배경오차공분산)

1. 서론

수치 예보에서 초기 조건을 보다 정확하게 추정하는 것이 예보 정확도를 향상시키는데 중요한 역할을 하기 때문에, 자료동화 과정을 통해 모델의 초기 조건을 보다 효과적으로 개선하여 예보 정확도를 향상 시

* Corresponding author, E-mail: khm@yonsei.ac.kr

Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

킬 수 있다^[1]. 자료 동화는 분석 시점의 대기 배경 값과 관측값에 대한 각각의 오차 합을 최소화하여 대기 상태를 추정하는 과정이며, 자료 동화된 분석 장은 참값에 근사한 것으로 생각하여 수치예보 모델에서 초기 조건으로 사용된다.

국방 분야에 대한 기상업무를 수행하고 있는 공군 기상단은 자체적으로 보유하고 있는 고성능 컴퓨터를 활용하여 Weather Research and Forecasting-Advanced Research and Weather forecasting(WRF-ARW)^[2] 모델로 국방부, 육군, 해군, 공군 등에 작전 및 임무 특성에 부합한 사용자 중심의 수치예보를 생산하고, 실시간으로 기상예보를 지원하고 있다.

공군 기상단은 자체적으로 생산하고 있는 수치예보 모델의 정확도를 향상시키기 위하여 제한된 관측 자료를 동화함으로써 일부 지역에서 예보 정확도가 다소 향상됨을 보였다^[3]. 하지만, 컴퓨터 자원의 제한 등으로 자료동화 시스템을 체계적으로 구축하지 못해 현업으로 운영하지 못하였다. 최근에 공군 기상단은 고성능 컴퓨터 2호기를 도입하여 컴퓨터 자원을 확보하였으며, 고해상도 영역에 대한 보다 정확한 수치예보를 생산 및 지원하기 위해 자료동화 시스템 구축이 필요하다는 인식이 확대되었다.

자료동화 시스템을 구축하기 위해서는 수치예보 영역, 배경오차공분산(BES: Background Error Statistics) 계산 시기, 동화되는 관측의 종류 등이 결정되어야 한다. 중규모 지역 모델에서 자료동화를 수행할 경우 배경오차공분산은 배경 값의 불확실성을 나타내어 초기 조건을 산출하는데 중요한 역할을 한다^[4]. Xie et al.(2016)은 WRF 모델을 이용하여 Advanced TIROS Vertical Sounder(ATOVs) 위성자료 중 Advanced Microwave Sounding UnitA(AMSUA) 자료 동화를 통해 강수 예보의 정확도가 향상됨을 보였으며^[5]. Shen and Min(2015)는 WRF 모델을 이용하여 AMSUA 자료의 동화가 태풍 진로 예보의 정확도 향상에 기여함을 보였다^[6]. 또한, Kim and Kim(2017a)은 동아시아 지역에 대하여 수반모델에 기반한 관측민감도 실험을 수행하고 AMSUA 복사 관측 자료가 동아시아 지역에서 예보 오차를 감소시키는데 기여함을 보였다^[7]. 하지만, 한반도 지역에 국한해서 위성 자료의 동화 효과를 살펴 본 선행연구는 거의 없었으며, 공군 자료 동화 시스템으로 위성 관측 자료의 동화 효과를 살펴본 연구도 없었다.

이 연구에서는 공군 현업 수치 예보 시스템에 자료 동화 시스템을 체계적으로 구축하는데 필요한 사항에

대하여 연구하고자 한다. 이를 위해, 첫째, 공군 자료 동화 시스템에서 고해상도 영역의 예보 정확도 향상을 위하여 자료동화를 수행할 적절한 영역을 파악하고자 한다. 둘째, 중규모 지역 모델에서 배경오차공분산의 추정 시기에 따른 자료동화 효과를 분석하고 공군 자료동화 시스템에서 활용하기 위한 효과적인 배경오차공분산 추정 시기를 파악하고자 한다. 셋째, 구축한 공군 자료동화 시스템을 활용하여 위성 자료 동화가 북한 지역을 포함한 한반도 지역의 예보에 어떤 영향을 주는지에 대하여 분석하고자 한다.

2 장에서는 본 연구에서 활용한 방법에 대하여 설명하였고, 3 장에서는 실험에 대한 검증 및 분석 결과를 보였으며, 마지막으로 4 장에서는 결론 및 논의를 제시하였다.

2. 연구 방법

2.1 모델, 자료동화 방법 및 관측 자료

2.1.1 WRF 모델 및 공군 현업 수치 예보 시스템

본 연구에서는 중규모 지역 모델인 WRF v3.6.1을 활용하였다. WRF 모델은 완전 압축성 비정수계(Fully compressible non-hydrostatic) 모델이며^[2], 수평격자는 Arakawa-C 격자 체계를 사용한다.

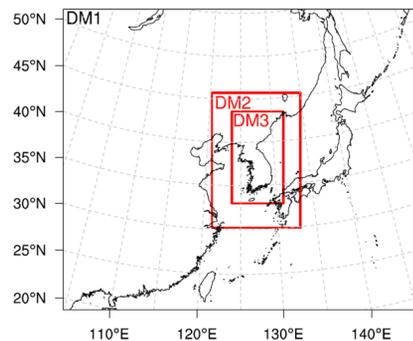


Fig. 1. Experimental model domain. DM1, DM2, and DM3 represent the domain 1, 2, and 3, respectively

모델 내의 물리과정, 영역 등 세부적인 구성은 공군 현업 수치 예보 시스템과 동일하게 설정하여 실험을 수행하였다. Fig. 1과 같이 모델 영역은 총 3개로 구성(DM1, DM2, DM3) 하였으며, 각 영역은 단 방향 등

지격자체계(1-way nesting)로 구성하였다. 자세한 모델 구성은 Table 1과 같다.

Table 1. A summary of model configuration

	Domain1	Domain2	Domain3
Horizontal grid size	18 km	6 km	2 km
Vertical layers / Top	31 layers / 50 hPa		
Time interval(sec.)	50	12	4
Microphysics	WSM6 ^[8]		
PBL physics	YSU PBL ^[9]		
Cumulus Parameterization	Kain-Fritsch ^[10]	None	
Radiation	RRTMG ^[11]		
LSM	Noah LSM (MODIS Land use data)		
Initial and Boundary conditions	NCEP GFS analysis and forecast(0.25° resolutions)		

2.1.2 3DVAR와 WRFDA

Three-Dimensional Variational(3DVAR) 자료 동화 방법은 Bayesian 확률 및 Gaussian 오차 분포를 사용한 변분 방법이며^[12], 비용 함수(식 (1))의 최소화를 위하여 반복적인 최소화 과정을 통해 대기 상태의 분석값을 찾는 것이다.

$$J(x) = J^b + J^o = \frac{1}{2}(x - x^b)^T B^{-1}(x - x^b) + \frac{1}{2}(y - H(x^b))^T O^{-1}(y - H(x^b)) \quad (1)$$

여기서 J^b 와 J^o 는 각각 배경장과 관측값의 오차와 관련된 비용함수이고, x 는 상태 벡터, x^b 는 배경 장 또는 first guess, B 는 배경오차공분산, y 는 관측값, H 는 관측연산자(비선형), O 는 관측오차공분산을 나타낸다.

자료동화 시스템은 WRF Data Assimilation(WRFDA) v3.6의 3DVAR를 사용하였다^[13]. 배경오차공분산 추정 은 National Meteorological Center(NMC) 방법을 활용하여^[14] Control Variable 5(CV5) 옵션을 이용하였다. 2015년 7월, 2014년 7월, 2015년 여름철(6, 7, 8월)기간에 대하여 각각 12시간 예보와 24시간 예보로부터 NMC 방법을 활용하여 배경오차공분산을 추정하였다.

2.1.3 관측자료

자료동화에 이용된 관측 자료는 Meteorological Terminal Air Report(METAR), Global Positioning System Precipitable Water(GSPW), sea surface observations by buoy(BUOY), surface synoptic observations(SYNOP), sea surface observations by ship(SHIP), sea wind observations by Quick Scatterometer(QSCAT), Airport Report(AIREP), upper-air wind profile from pilot balloon or radiosonde (PILOT), Geostationary Earth Orbit satellites Atmospheric Motion Vector(GEOAMV)가 포함된 conventional 자료와 AMSUA 자료이다. National Oceanic and Atmospheric Administration(NOAA)와 European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites(EUMETSAT)의 극궤도 위성에 탑재되어 있는 AMSUA는 15개의 다중 채널 복사계가 존재하며 마이크로파를 활용하기 때문에 기상상태에 큰 영향 없이 대기의 연직구조에 대한 특성을 파악할 수 있어 주로 대기의 온도에 대한 정보를 제공하고 있다. 이번 연구에서는 5번부터 9번까지의 채널을 사용하였으나, 세계기상기구의 권고에 의해 NOAA 15 위성에서는 6번 채널을, NOAA 19 위성에서는 8번 채널을 블랙리스트 처리하였으며^[15] 90 km 수평 속아내기를 하였다^[16].

2.2 실험 설계

자료동화는 자체 사이클을 통해 수행하였으며, 매 6시간 마다 분석장을 생산하고 분석 시점을 기준으로 24시간 예보를 수행하였다(Fig. 2b). 초기 장의 영향을 최소화하기 위하여 스핀업 기간은 7일로 설정 하였다. 관측 자료는 기본적으로 분석 시점을 기준으로 3시간 전후 기간의 자료가 동화되었다. 작은 규모의 기상현상까지 수치 예보에서 정확하게 표현할 수 있도록 영역 3에 대하여 중점을 두고 실험 및 검증을 하였다.

수행한 실험은 Table 2와 같다. 첫째, 자료동화가 수행되는 영역에 따라 영역 3의 수치예보에 어떤 영향을 주는지에 대한 실험을 수행하여 공군 자료 동화 시스템에서 자료동화를 수행할 최적의 영역을 파악하고자 한다. 이를 위해, 영역 2에 자료동화 한 실험(EXP1)과 영역 3에 자료동화한 실험(EXP2)의 결과를 비교하였다. 둘째, 배경오차공분산을 추정하는 시기가 영역 3의 예보 정확도에 미치는 영향을 분석하여, 공군 자료동화 시스템에서 활용하기 위한 적절한 배경오차공분산 추정 시기에 대하여 파악하고자 한다. 이를 위해 EXP1, EXP3(2014년 7월에 대한 배경오차공분산을 이

용하여 영역 2에 자료동화한 실험)와 EXP4(2015년 6, 7, 8월에 대한 배경오차공분산을 이용하여 영역 2에 자료동화한 실험)를 비교하였다. 배경오차공분산을 계산할 때는 각 실험에서 자료동화하는 영역에 대해 계산하였다. 셋째, 자료동화 과정에서 GEOAMVs 자료의 시간 분포에 따른 동화 효과를 살펴보고자 EXP1과 EXP5를 비교하였고, EXP5에 AMSUA 자료를 동화했을 때의 부가적 효과를 살펴보고자 EXP5와 EXP6를 비교하였다.

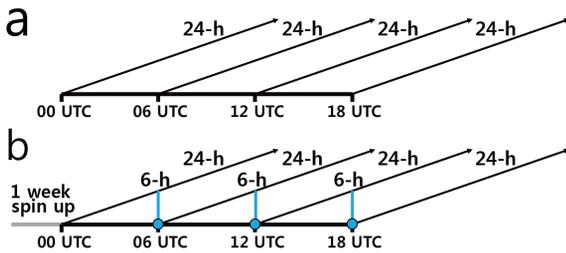


Fig. 2. (a) The operational Numerical forecasting system in Republic of Korea Air Force does 24-h predictions using initial conditions from NCEP every 6-h interval. (b) The 3DVAR data assimilation system developed in this study does assimilation every 6-h interval to produce initial conditions for 24-h predictions

Table 2. Implemented experiments

Experiments name	Description
EXP1	Data assimilation for domain 2 with BES estimated in July 2015.
EXP2	Data assimilation for domain 3 with BES estimated in July 2015.
EXP3	Data assimilation for domain 2 with BES estimated in July 2014.
EXP4	Data assimilation for domain 2 with BES estimated in June/July/August 2015.
EXP5	Same as EXP1, except ± 1 hour assimilation window at every analysis time only for GEOAMV data.
EXP6	Same as EXP5, except AMSUA data assimilation

2.3 검증 방법

상층 및 지상 변수(10 m 풍속, 2 m 온도, 2 m 상대 습도)에 대해서는 Root Mean Square Error(RMSE)를 이용하여 관측 대비 예보의 오차를 검증하였다. 강수 검증은 Equitable Threat Score(ETS), Frequency Bias Score(FBI), Fraction Skill Score(FSS)를 활용하였다. ETS와 FBI의 자세한 수식은 Kim and Kim(2017b)을, FSS의 자세한 수식은 Kim et al.(2015)를 참고하기 바란다. ETS 값은 $-1/3 \sim 1$ 사이에 분포하며, 1이 완벽한 예보를 의미한다. FBI 값은 1보다 클 경우는 과대 모의를, 1보다 작은 경우는 과소 모의를 의미한다. ETS와 FBI는 6시간 누적 강수량 기준으로 10개의 임계값에 대하여 검증하였다. FSS 방법은 모델의 격자에서만 강수 예보를 검증하는 것이 아니라 기준이 되는 격자점을 중심으로 설정한 영향 반경에 대해서 강수 예보를 검증하는 neighborhood 방법이다^[17,18]. FSS의 값은 0부터 1까지이며, 1은 완벽한 예보를, 0은 zero skill을 의미한다. 일반적으로 FSS 값이 0.5 이상인 경우 강수 예측이 유효하다고 분석한다. 6시간 누적 강수량 기준으로 1 mm와 5 mm의 임계값을 사용하였다.

Double penalty 문제를 최소화하기 위하여, 고해상도의 강수 예보를 수평 격자 간격을 크게 해 저해상도 강수 예보로 만든 후 관측값과 비교하기 때문에^[19,20], 이 연구에서는 대한민국 영토 내의 Automatic Weather System(AWS) 수평격자가 약 15 km임을 고려하여, 모델 영역 3의 수평격자를 2 km에서 15 km로 상향하여 강수 예보값을 AWS 관측값과 비교하였다. 고해상도의 강수 예보를 저해상도의 강수 예보로 변환할 때, 격자 간의 거리에 반비례하는 weighting을 이용해 내삽하였다.

검증은 영역 3 내에 존재하는 라디오존데 관측과 대한민국 영토 내의 AWS 관측 자료를 활용하였다. 또한, 95 % 신뢰구간에서 유의성 검증을 수행하였다.

실험 기간은 한국에서 집중호우와 태풍 등의 영향으로 악기상이 빈번하게 발생하는 여름 시기인 2015년 7월 8일부터 7월 31일까지이다. 실험 기간에서 spin-up 기간을 고려하여 검증은 2015년 7월 15일부터 2015년 7월 31일까지 수행하였다. 기본적으로 매 6시간 간격으로 산출된 24시간 예보값을 검증 기간 동안에 대해 통계 분석하고, 강수 사례에 대해서는 별도로 분석하였다.

3. 결과

3.1 자료동화 수행 영역에 따른 효과

상층 변수 검증 결과, 6시간 예보에서(Figs. 3a-d), 동서 바람, 온도, 혼합비는 일부 층을 제외하고 EXP1의 RMSE 값이 EXP2 보다 작게 나타났다. 12시간 예보에서(Figs. 3e-h), 온도와 혼합비는 일부 층을 제외한 대부분의 층에서 EXP1의 RMSE 값이 EXP2 보다 각각 0.027 K(2.5 %)와 0.018 g/kg(1.4 %) 작았다.

강수에 대한 FSS 검증 결과, 임계 값 5 mm에서 12 시간 예보까지 EXP1의 강수 예보 정확도가 EXP2 보다 높게 나타났다(Fig. 4). 지상 변수에 대한 검증 결과, 10 m 풍속과 2 m 상대습도는 EXP1의 RMSE 값이 EXP2 보다 작게 나타났다. 2 m 온도는 12시간 예보까지는 EXP2의 RMSE 값이 EXP1 보다 작지만, 12 시간 이후 예보에서는 EXP1의 RMSE 값이 0.074 K (4.6 %) 작았다(Fig. 5).

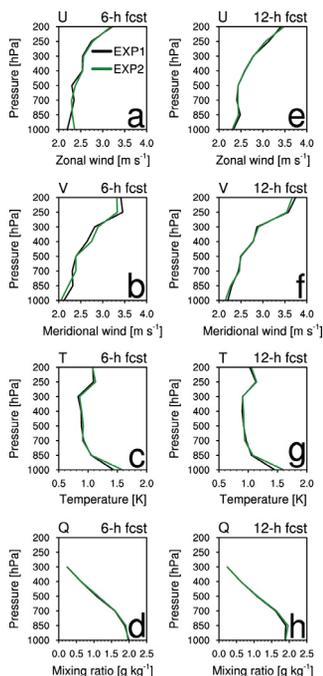


Fig. 3. Vertical profiles of the average RMSE for the verification period of experiment for EXP1 (black) and EXP2(green) with respect to radiosonde observations: (a-d) 6-h forecast and (e-h) 12-h forecast for zonal wind, meridional wind, temperature, and mixing ratio

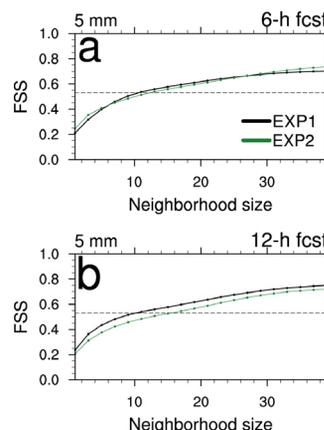


Fig. 4. The average FSS for 5 mm threshold of 6-h accumulated precipitation of EXP1(black) and EXP2(green) for the verification period of experiment: (a) 6-h forecast and (b) 12-h forecast. The dash line means the halfway value of random forecast skill and perfect skill

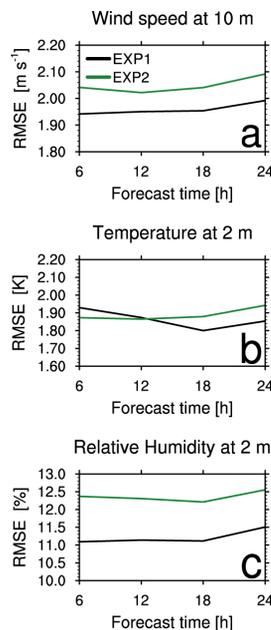


Fig. 5. Time series of the average RMSE for the verification period of experiment for EXP1 (black) and EXP2(green), with respect to AWS observations: (a) 10 m wind speed, (b) 2 m temperature, and (c) 2 m relative humidity

따라서, EXP1의 예보가 EXP2의 예보 보다 전반적으로 정확도가 높음을 알 수 있다. 이는 상위 영역에서 자료동화를 수행하면 하위 등지 영역에 보다 정확한 기상정보를 제공하여 예보 정확도 향상에 기여할 수 있다는 Lee et al.(2010)의 결과와 유사하다^[21]. 그러므로 영역 3의 예보 정확도를 향상시키기 위해서는 영역 2에서 자료를 동화하는 것이 보다 효과적이라 판단된다.

3.2 배경오차공분산 계산 시기에 따른 효과

이 연구의 실험 기간인 2015년 7월 예보를 위해서는 2015년 7월 또는 6, 7, 8월 예보 통계로부터 배경오차공분산을 계산하여 자료동화 시 사용하면 가장 좋지만, 현업 예보 시에는 현재 시점에 대한 배경오차공분산을 통계적으로 계산하기가 어렵다. 따라서 배경오차공분산을 2014년 7월에 대해서도 계산하여 그 효과를 비교해 보았다.

상층 변수 검증 결과, 6시간 예보에서(Figs. 6a-d), 동서방향 풍속은 500 hPa 이하에서 각 실험들 간 RMSE 값은 큰 차이를 보이지 않으며, 전 층에 대한 RMSE 평균값은 신뢰구간 95 % 수준에서 유의미한 차이가 없었다. 온도, 혼합비도 각 실험 간 RMSE 값은 신뢰구간 95 % 수준에서 유의미한 차이를 보이지 않았다. 12시간 예보에서(Figs. 6e-h), 동서와 남북방향 풍속은 EXP1의 RMSE와 EXP3의 RMSE가 신뢰구간 95 % 수준에서 유의미한 차이가 없었으나, EXP4의 RMSE 값이 가장 높게 나타났다. 온도와 혼합비의 RMSE 값 또한 신뢰구간 95 % 수준에서 각 실험 간 유의미한 차이를 보이지 않았다.

장수에 대한 FSS 검증 결과(Fig. 7)도 12시간 예보까지 각 실험간 FSS 값의 차이가 거의 없었다. 지상 변수에 대한 검증 결과, 10 m 풍속과 2 m 온도, 2 m 상대습도는 신뢰구간 95 % 수준에서 각 실험 별 RMSE 값이 유의미한 차이가 나타나지 않았다.

그러므로 NMC 기법으로 CV5 옵션을 이용해 배경오차공분산을 추정하여 3DVAR에서 활용할 경우, 월별로 배경오차공분산을 추정하게 되면 추정 시기가 예보 정확도에 미치는 영향은 크지 않다는 것을 알게 되었다. 이는 3DVAR에서 시간에 따라 변화하지 않는 배경오차공분산을 사용하기 때문이라고 판단된다. 그러나 월별로 배경오차공분산을 추정할 실험과 계절별로 추정한 실험에 대한 비교 결과, 12시간 예보에서 계절별로 배경오차공분산을 추정한 실험의 바람 변수

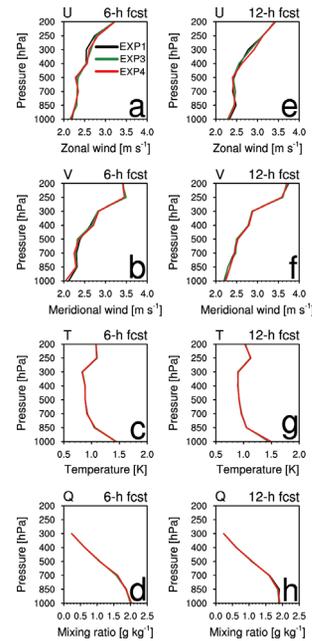


Fig. 6. Vertical profiles of the average RMSE for the verification period of experiment for EXP1 (black), EXP3 (green), and EXP4 (red) with respect to radiosonde observations: (a-d) 6-h forecast and (e-h) 12-h forecast for zonal wind, meridional wind, temperature, and mixing ratio

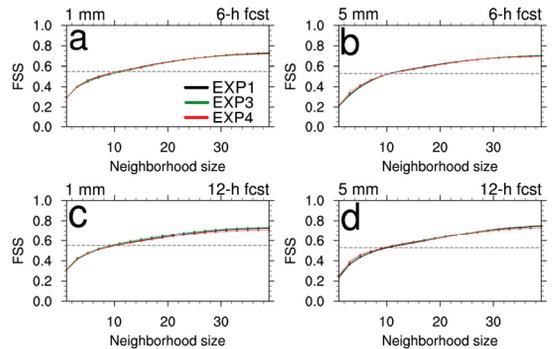


Fig. 7. The average FSS for 1 mm and 5 mm threshold of 6-h accumulated precipitation of EXP1 (black), EXP3 (green), and EXP4 (red) for the verification period of experiment: (a, b) 6-h forecast and (c, d) 12-h forecast. The dash line means the halfway value of random forecast skill and perfect skill

정확도가 월별로 추정된 실험 보다 다소 낮게 나타났다. 이를 통해 공군 자료동화 시스템에서 배경오차공분산은 월별로 추정하여 자료동화에 활용하는 것이 더 효과적이라 판단된다.

3.3 위성 관측 자료의 동화 효과

3.3.1 대기 운동 벡터 동화시간 조정에 따른 효과

GEOAMVs 자료의 시간 분포에 따른 동화 효과는 상층 바람변수에서 EXP5가 EXP1 보다 전반적으로 정확도가 향상되었으나 그 차이는 적었고, 강수 예보 정확도에 일부 긍정적인 영향을 주는 것을 알 수 있었다(Noh, 2017)^[22]. 또한, 지상변수에 대해서는 95 % 신뢰구간에서 유의미한 차이가 없었다.

3.3.2 AMSUA 관측 자료 추가에 따른 동화 효과

6시간 예보에서(Figs. 8a-d), 동서 및 남북 방향 풍속, 온도, 혼합비는 EXP5의 RMSE 값이 EXP6 보다 각각 0.111 m/s(4.4 %), 0.105 m/s(3.9 %), 0.024 K(2.3 %), 0.074 g/kg(5.9 %) 작았다. 12시간 예보에서(Figs. 8e-h), 동서 방향 풍속, 온도, 혼합비는 EXP5의 RMSE 값이 EXP6 보다 각각 0.031 m/s(1.4 %), 0.005 K(0.05 %), 0.051 g/kg(4.1 %) 작았다.

강수에 대한 ETS 검증 결과에서 6시간 예보에서 EXP6의 강수 예보 정확도가 EXP5 보다 높게 나타났으며, FBI 검증 결과에서 12시간 예보까지는 EXP6의 강수 예보가 관측 대비 과대모의를 하고, EXP5는 관측대비 과소모의를 하였다(Fig. 9). 지상 변수에 대한 검증 결과, 2 m 상대 습도는 EXP6의 RMSE 값이 EXP5 보다 낮게 나타났다(Noh, 2017).

따라서 한반도 지역에서 WRF 모델로 3DVAR 자료 동화 기법을 활용한 AMSUA 동화는 상층 예보 정확도에 부정적인 영향을 주나, 일부 강수 예보 시간과 일부 지상 변수의 예보 정확도 향상에 긍정적인 영향을 주고 있음을 알게 되었다. 이는 Kim et al.(2013)에서 특정 사례에 대해서는 AMSUA 동화가 한반도 지역의 예보 정확도에 부정적인 영향을 줄 수 있다는 연구 결과와 유사하다^[23].

3.4 사례 분석

사례는 2015년 7월 29일 00 UTC 강수 사례로, 우리나라 중부지방 및 북한 지역은 지상은 저기압, 상층은 기압골 및 온도골의 영향을 받았고, 남부지방은 고기압 가장 자리의 영향을 받았다. 기단 차이와 온도 불

연속으로 인하여 서해상 및 중부지방을 중심으로 전선이 형성되어 경기 남부와 충청 북부 지역은 50 ~ 100 mm/일 내외의 강수가 관측되었다(Noh, 2017).

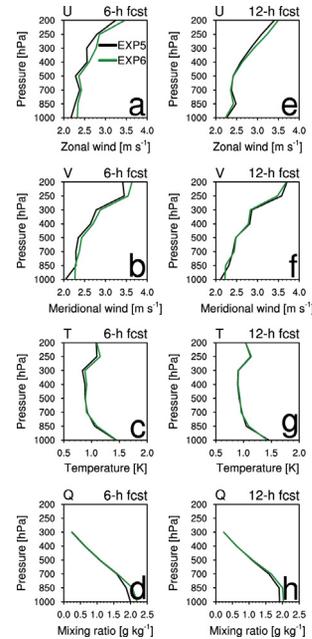


Fig. 8. Vertical profiles of the average RMSE for the verification period of experiment for EXP5 (black) and EXP6(green) with respect to radiosonde observations: (a-d) 6-h forecast and (e-h) 12-h forecast for zonal wind, meridional wind, temperature, and mixing ratio

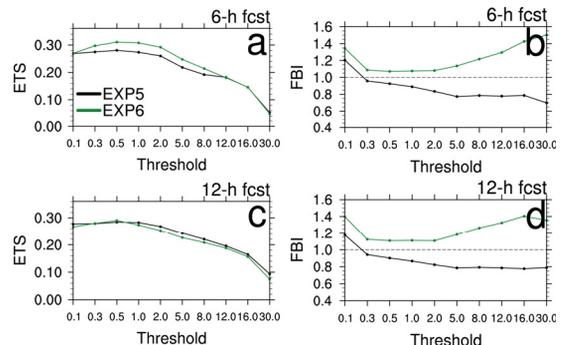


Fig. 9. The average ETS and FBI of EXP5(black) and EXP6(green) for the verification period of experiment: (a, b) 6-h forecast and (c, d) 12-h forecast

2015년 7월 8일부터 31일까지의 실험 기간 동안 평균적으로 가장 좋은 결과를 보인 EXP1의 결과를 공군 현업 수치예보 시스템에서 생산되는 예보인 CNTL의 결과와 비교하여 자료동화의 효과를 살펴보았다.

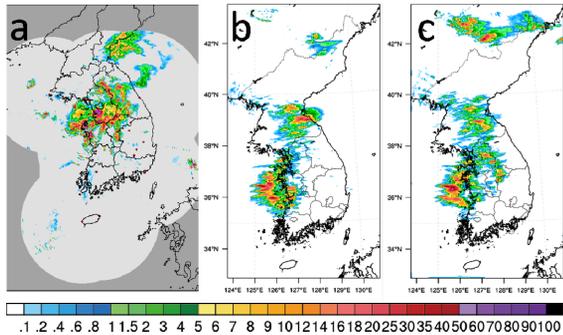


Fig. 10. (a) KMA radar image at 00 UTC 29 July 2015. The horizontal distribution of 1-h accumulated precipitation for the case of 00 UTC 29 July 2015; (b) CNTL and (c) EXP1

강수 수평장을 살펴보면(Fig. 10), EXP1의 강수 예보가 CNTL 보다 더 정확하게 강수 위치와 강수 강도를 모의하고 있다. ETS, FSS 검증에서도 EXP1의 예보 정확도가 CNTL 보다 높음을 확인하였다(Fig. 11). 사례 분석을 통해 자료동화를 수행하지 않은 강수 예보보다 자료동화를 수행한 강수 예보의 정확도가 높다는 것을 확인하였지만, 일부 사례에 대해서만 분석한 내용이기 때문에 추후에 더 다양한 사례에 대한 분석이 필요할 것으로 생각된다.

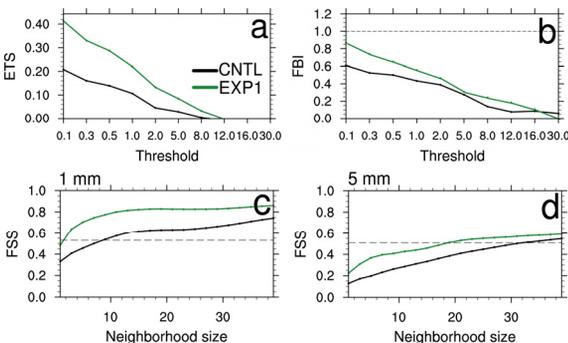


Fig. 11. (a) ETS, (b) FBI, and (c, d) FSS of CNTL and EXP1 for the case of 00 UTC 29 July 2015

3.5 북한 지역에서의 자료동화 효과

북한 지역은 사용 가능한 일반적인 관측 자료가 많이 없으므로 위성자료의 영향이 클 것으로 예상된다. 북한 지역에서 위성 관측 자료동화의 효과를 살펴보기 위해 EXP1, EXP5, EXP6 결과를 북한 지역에 대해서만 분석하였고, 이를 각각 EXP1_nk, EXP5_nk, EXP6_nk로 명명하였다. 북한 지역에는 라디오존데 관측과 AWS 관측 자료가 없으므로 유럽중기예보센터에서 생산한 재분석장인 ERA-Interim 자료로 검증을 하였다. 상층 동서 및 남북 방향 풍속, 온도, 혼합비에 대한 검증 결과에서 EXP6_nk의 RMSE 값이 가장 높게 나타났으며, EXP1_nk와 EXP5_nk의 RMSE 값은 유의미한 차이가 없었다(Fig. 12).

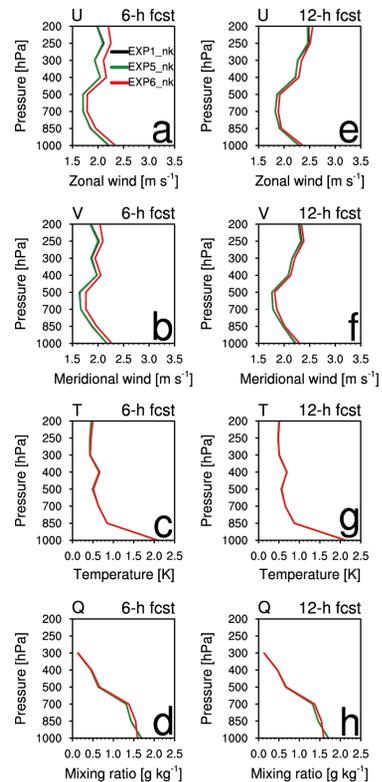


Fig. 12. Vertical profiles of the average RMSE for the verification period of experiment for EXP1_nk (black), EXP5_nk (green), and EXP6_nk (red) with respect to the ERA-Interim: (a-d) 6-h forecast and (e-h) 12-h forecast for zonal wind, meridional wind, temperature, and mixing ratio

10 m 풍속은(Figs. 13a and b) 12시간 예보에서 EXP6_nk의 RMSE가 가장 높았고, EXP1_nk와 EXP5_nk는 유의미한 차이가 없었다. 2 m 온도와 혼합비(Figs. 13c and d)의 RMSE 값은 EXP6_nk가 가장 작고, EXP1_nk와 EXP5_nk는 유의미한 차이가 없었다. 따라서 AMSUA 자료 동화는 북한 지역의 2 m 온도와 혼합비 예보의 정확도 향상에 긍정적인 영향을 주고 있음을 알 수 있으며, GEOAMVs 자료의 시간 분포에 따른 동화 효과는 유의미한 차이가 없음을 확인하였다.

북한 지역은 자료동화에 활용할 수 있는 관측 자료가 제한되기 때문에, 위성 및 레이더 자료를 포함하여 풍상측에 위치하고 있는 중국 지역의 관측 자료 등의 동화를 통해 보다 더 정확한 초기 값을 생산하는 것이 필요하다고 판단된다.

2에서 자료동화를 수행하는 것이 효과적이었다. 둘째, 배경오차공분산 계산 시 전년도의 해당 월 예보값을 활용하더라도 예보 기간이 포함된 해당 월의 예보값을 활용한 것 대비 유의미한 차이가 없었다. 또한 배경오차공분산은 월별로 추정하여 활용하는 것이 효과적이라 판단된다. 셋째, GEOAMVs 자료의 동화 시간 분포에 따른 민감도 실험에서 분석 시점을 기준으로 전후 1시간 자료를 동화한 실험이 일부 변수의 예보 정확도 향상에 더 기여하였다. 넷째, AMSUA 동화는 상층 예보 정확도에 부정적인 영향을 주나, 일부 강수 예보와 지상 변수의 예보 정확도 향상에 긍정적인 영향을 주었다. 특히, 한 사례이기는 하지만 AMSUA 자료 동화는 북한 지역의 2 m 온도와 혼합비 예보의 정확도 향상에 긍정적인 영향을 주고 있음을 알 수 있었다.

이 연구의 결과는 공군 현업 수치 예보 향상을 위한 자료동화 시스템을 구축하는데 기반이 될 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 대한민국 공군 기상단, 2017년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단(No. 2017R1E1A1A03070968)의 지원 및 기상청 기상씨앗기술개발사업(KMIPA 2015-5200)의 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] E. Kalnay, "Atmospheric Modeling, Data Assimilation and Prediction," Cambridge University Press, Inc. United Kingdom, p. 341, 2003.
- [2] W. C. Skamarock, and J. B. Klemp, "A Time-Split Nonhydrostatic Atmospheric Model for Weather Research and Forecasting Applications," J. Comput. Phys., Vol. 227, No. 7, pp. 3465-3485, 2008.
- [3] Choi et al., "Numerical Forecasting for Military Firepower Operation," Proceeding of the Autumn Meeting of KMS, pp. 602-603, November, 2012.
- [4] V. Rakesh and P. Goswami, "Impact of Background Error Statistics on 3D-Var Assimilation: Case Study Over the Indian Region," Meteorol. Atmos. Phys.,

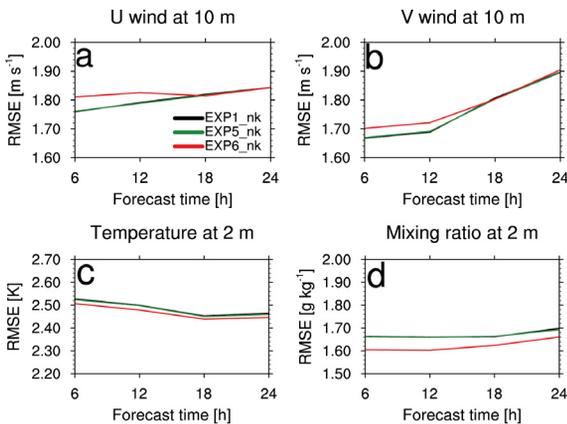


Fig. 13. Time series of average RMSEs for the verification period of experiment for EXP1_nk (black), EXP5_nk (green), and EXP6_nk with respect to the ERA-Interim: (a) 10 m zonal wind, (b) 10 m meridional wind, (c) 2 m temperature, and (d) 2 m mixing ratio

4. 결론 및 논의

본 연구에서는 국방 분야에 대한 기상정보를 제공하고 있는 공군 기상단의 현업 수치 예보 시스템을 위하여 WRF 3DVAR를 활용한 자료동화 체계를 효과적으로 구축하기 위해 필요한 사항에 대하여 연구를 수행하였다. 첫째, 공군 현업 수치 예보 시스템의 모델 영역 3에 대한 예보 정확도를 향상시키기 위하여 영역

- Vol. 112, No. 1-2, pp. 63-79, 2011.
- [5] Y. Xie, J. Xing, J. Shi, Y. Dou and Y. Lei, "Impacts of Radiance Data Assimilation on the Beijing 7.21 Heavy Rainfall," *Atmos. Res.*, Vol. 169, No. A, pp. 318-330, 2016.
- [6] F. Shen and J. Min, "Assimilating AMSU-A Radiance Data with the WRF Hybrid En3DVAR System for Track Predictions of Typhoon Megi (2010)," *Adv. Atmos. Sci.*, Vol. 32, No. 9, pp. 1231-1243, 2015.
- [7] S.-M. Kim and H. M. Kim, "Adjoint-Based Observation Impact of Advanced Microwave Sounding Unit-A(AMSUA) on the Short-Range Forecast in East Asia," *Atmosphere*, Vol. 27, No. 1, pp. 93-104, 2017a.
- [8] S.-Y. Hong and J.-O. J. Lim, "The WRF Single-Moment 6-class Microphysics Scheme(WSM6)," *J. Korean Meteor. Soc.*, Vol. 42, No. 2, pp. 129-151, 2006.
- [9] S.-Y. Hong, Y. Noh and J. Dudhia, "A New Vertical Diffusion Package with an Explicit Treatment of Entrainment Processes," *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 134, pp. 2318-2341, 2006.
- [10] J. S. Kain, "The Kain-Fritsch Convective Parameterization: An Update," *J. Appl. Meteor.*, Vol. 43, pp. 170-181, 2004.
- [11] G. C. Iacono, J. S. Delamere, E. J. Mlawer, M. W. Shephard, S. A. Clough and W. D. Collins, "Radiative Forcing by Long-Lived Greenhouse Gases: Calculations with the AER Radiative Transfer Model," *J. Geophys. Res.* Vol. 113, No. D13, 2008.
- [12] A. C. Lorenc, "Analysis Methods for Numerical Weather Prediction," *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, Vol. 112, No. 474, pp. 1177-1194, 1986.
- [13] D. M. Barker, W. Huang, Y. R. Guo, A. Bourgeois and Q. Xiao, "A Three-Dimensional Variational (3DVAR) Data Assimilation System for MM5: Implementation and Initial Results," *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 132, pp. 897-914, 2004.
- [14] D. F. Parrish and J. C. Derber, "The National Meteorological Center's Spectral Statistical Interpolation Analysis System," *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 120, pp. 1747-1763, 1992.
- [15] Q. Lu and W. Bell, "Characterising Channel Center Frequencies in AMSU-A and MSU Microwave Sounding Instruments," *J. Atmos. Oceanic Technol.*, Vol. 31, pp. 1713-1732, 2014.
- [16] M. Kim, H. M. Kim, J. Kim, S.-M. Kim, C. Velden, and B. Hoover, "Effect of Enhanced Satellite-Derived Atmospheric Motion Vectors on Numerical Weather Prediction in East Asia Using an Adjoint-Based Observation Impact Method," *Weather and Forecasting*, Vol. 32, pp. 579-594, 2017.
- [17] N. M. Roberts and H. W. Lean, "Scale-Selective Verification of Rainfall Accumulations from High-Resolution Forecasts of Convective Events," *Mon. Weather Rev.*, Vol. 136, pp. 78-97, 2008.
- [18] S. Kim, H. M. Kim, J. K. Kay and S. W. Lee, "Development and Evaluation of the High Resolution Limited Area Ensemble Prediction System in the Korea Meteorological Administration," *Atmosphere*, Vol. 25, No. 1, pp. 67-83, 2015.
- [19] A. M. Rossa, P. Nurmi and E. Ebert, "Overview of Methods for the Verification of Quantitative Precipitation Forecasts. Precipitation: Advances in Measurement, Estimation and Prediction," MichaelidesSC(ed.) chapter 16. Springer, Germany; pp. 418-450, 2008.
- [20] S. Kim and H. M. Kim, "Effect of Considering Sub-Grid Scale Uncertainties on the Forecasts of a High-Resolution Limited Area Ensemble Prediction System," *Pure Appl. Geophys.*, Vol. 174, No. 5, pp. 2021-2037, 2017b.
- [21] D. K. Lee, D. Y. Eom, J. W. Kim and J. B. Lee, "High-Resolution Summer Rainfall Prediction in the JHWC Real-Time WRF System," *A.P.J. Atmos. Sci.* Vol. 46, No. 3, pp. 341-353, 2010.
- [22] K. Noh, "A Study of the Three-Dimensional Variational Data Assimilation Method for the Republic of Korea Air Force Operational Numerical Weather Prediction System," MS thesis, Yonsei University, 2017.
- [23] S. Kim, H. M. Kim, E. J. Kim and H. C. Kim, "Forecast Sensitivity to Observation for High-Impact Weather Events in the Korean Peninsula," *Atmosphere*, Vol. 21, No. 2, pp. 171-186, 2013.