

종관 관측 자료 변화에 따른 예보 성능 분석

한현준* · 권인혁 · 강전호 · 전형욱 · 이시혜 · 임수정 · 김태훈

(재) 한국형수치예보모델개발사업단

(접수일: 2018년 12월 5일, 수정일: 2019년 2월 9일, 게재확정일: 2019년 2월 27일)

Analysis of Forecast Performance by Altered Conventional Observation Set

Hyun-Jun Han*, In-Hyuk Kwon, Jeon-Ho Kang, Hyoung-Wook Chun,
Sihye Lee, Sujeong Lim, and Taehun Kim

Korea Institute of Atmospheric Prediction Systems, Seoul, Korea

(Manuscript received 5 December 2018; revised 9 February 2019; accepted 27 February 2019)

Abstract The conventional observations of the Korea Meteorological Administration (KMA) and National Centers for Environmental Prediction (NCEP) are compared in the numerical weather forecast system at the Korea Institute of Atmospheric Prediction Systems (KIAPS). The weather forecasting system used in this study is consists of Korea Integrated Model (KIM) as a global numerical weather prediction model, three-dimensional variational method as a data assimilation system, and KIAPS Package for Observation Processing (KPOP) as an observation pre-processing system. As a result, the forecast performance of NCEP observation was better while the number of observation is similar to the KMA observation. In addition, the sensitivity of forecast performance was investigated for each SONDE, SURFACE and AIRCRAFT observations. The differences in AIRCRAFT observation were not sensitive to forecast, but the use of NCEP SONDE and SURFACE observations have shown better forecast performance. It is found that the NCEP observations have more wind observations of the SONDE in the upper atmosphere and more surface pressure observations of the SURFACE in the ocean. The results suggest that evenly distributed observations can lead to improved forecast performance.

Key words: Conventional observation, Korean integrated model, observation impact, forecast performance

1. 서 론

기상 예보는 현재의 대기 상태를 평가하고 이를 분석하여 기상 예보 모델의 초기 조건을 생성한 후, 미래의 날씨를 예측하여 대중에게 알려주는 과정으로 이루어져 있다. 현재의 대기 상태를 평가하고 분석하기 위해 온도, 습도, 기압, 풍향 그리고 풍속과 같은 기상 요소의 정량적 관찰이 수행되며, 이를 기상 관

측이라 한다. 기상 예보의 과정에 있어서 첫 번째로 위치하고 있는 기상 관측은 예보 모델 초기 조건의 정확성을 높이기 위해 매우 중요한 요소이며, 많은 선행 연구에서도 기상 예보에 대한 기상 관측 자료의 중요성은 지속적으로 강조되어 왔다(Sienkiewicz, 1990; Kelly et al., 2007; Schulze, 2007).

이러한 이유에서 기상 예보에 대한 기상 관측 자료의 효과를 분석하기 위해 많은 연구가 수행되었다. Arnold and Dey (1986)는 기상 분석 및 예보에 있어서 관측 자료를 추가하거나 제거하여 관측 자료의 영향을 평가하는데 관측시스템 실험(Observing System Experiment, OSE)이 적절한 연구 방법임을 제시하였다. OSE 연구 방법을 통해 Atlas (1997)는 다양한 형

*Corresponding Author: Hyun-Jun Han, Data Assimilation Team, Korea Institute of Atmospheric Prediction Systems (KIAPS), Seoul 07071, Korea.
Phone: +82-2-6959-1661, Fax: +82-2-6919-2121
E-mail: hj.han@kiaps.org

태(현장 관측, 목측, 원격 탐사 관측)로 구성되는 전 지구 관측 시스템(Global Observing System, GOS)에서 관측 자료 형태별로 수치 예보에 미치는 영향을 평가하였고, 실험 결과 위성 기반의 관측 자료가 GOS에 매우 중요한 요소가 될 수 있으며, 동시에 지표면 기반의 종관 관측 자료가 대단히 중요한 역할을 한다는 것을 밝혔다. 현업 수치 예보 모델 센터에서도 OSE 방법을 사용하여 관측 자료의 효용성을 검토하였는데, 위성 관측 자료도 종관 관측 자료에 못지않은 중요한 역할을 하며 연구 결과에서 가장 중요한 관측 시스템은 SONDE라는 것을 확인하였다(Bouttier and Kelly, 2001). 특히 Hwang and Hong (2012)은 중기 기상 예보(Medium-Range Weather Forecasting)에 있어서 관측 자료별 영향을 조사하였고, 대기의 3차원 구조에 대한 정보를 주는 SONDE 관측 자료가 북반구와 열대 지역에서 중요한 역할을 한다는 것을 보였다.

최근 한국형수치예보모델개발사업단(Korea Institute of Atmospheric Prediction Systems, KIAPS; 이하 사업단)에서는 ‘우리나라에 적합한 현업용 수치 예보 모델을 개발하고 기상재해 경감과 사회 경제 발전에 이바지’라는 설립목적 하에 초기형태의 한국형수치예보 모델(Korean Integrated Model, KIM)을 개발하였다(Choi et al., 2014; Choi and Hong, 2016; Hong et al., 2018). KIM은 기상 예보를 위한 3차원 전구 수치 예보 모델로서, 육면체구 격자의 비정역학 역학코어를 사용한다(Choi and Hong, 2016). 수평 이산화는 스펙트럴 요소법(Spectral Element Method, SEM), 연직 이산화는 유한 차분법(Finite Difference Method, FDM)을 사용하고 있으며, 시간 이산화는 time-split third-order Runge-Kutta (RK3) 방법을 사용한다(Choi and Hong, 2016). 이후 사업단에서는 수치 예보 모델로서의 성능을 평가하기 위해 준실시간 예보 시스템을 구축하였고, 2015년 7월부터 2019년 1월 현재까지 준실시간 예보 시스템을 수행해오고 있다. KPOP (KIAPS Package for Observation Processing)은 사업단 자료동화 시스템에서 수행되는 관측 자료 전처리 시스템으로서, 한국 기상청(Korea Meteorological Administration, KMA)으로부터 수집된 현업 수치 예보 모델에 사용되는 관측 자료를 읽어 들여 각각의 관측종에 맞춰진 전처리 방법에 따라 관측 자료를 처리한다. 준실시간 예보 시스템에 최적의 관측 자료를 제공하는 역할을 수행하고 있으며, 사업단의 준실시간 예보 시스템에 접합되어 같은 기간 동안 잘 수행되어 오고 있다(Kang et al., 2018).

사업단의 준실시간 예보 시스템이 지난 3년 동안 수행되어 온 것과 동시에, 사업단의 준실시간 예보 시스템의 성능을 평가를 하고 그 성능을 개선하고자 하는 다양한 연구가 수행되었다(Lee et al., 2013, 2014;

Jo et al., 2015, 2018; Kim et al., 2017; Koo et al., 2017; Lee et al., 2017; Kwon et al., 2018). 그에 따른 방대한 양의 수치 예보 모델 결과와 관측 자료가 쌓이게 되었고, 이를 바탕으로 사업단 내부에서 몇몇 분석이 수행되었다. 그 가운데, 기상청에서 제공되는 관측 자료를 사용하였을 때보다 미국 NCEP (National Centers for Environmental Prediction)에서 배포하는 관측 자료를 사업단의 준실시간 예보 시스템에서 사용하는 경우 다소 향상된 예보 성능을 보인다는 점을 확인하게 되었다.

따라서 본 연구에서는 OSE 연구 방법과 사업단에서 개발된 준실시간 예보 시스템을 통해 모의 실험속에서 두 종관 관측 자료 그룹에 대한 정성적·정량적 특징을 살펴보고, 두 종관 관측 자료 그룹을 동일한 수치 예보 모델에 적용하여 어느 종관 관측 자료 그룹이 예보 성능 향상에 더 많이 기여하는지 보고자 하였다. 또한 두 종관 관측 자료 그룹에서 나타나는 차이가 수치 예보 모델의 성능에서 어떻게 반영되어 나타나는지도 분석하고자 하였다.

2. 관측 자료 및 실험 설계

2.1 기상청 BUFR and NCEP PrepBUFR

본 연구에서 사용되는 종관 관측 자료 그룹은 기상청에서 제공받고 있는 BUFR (Binary Universal Form for the Representation of meteorological data) 형식의 현업 수치 예보 모델 사용 관측 자료와 미국 NCEP에서 공개적으로 배포하고 있는 PrepBUFR (Prepared BUFR)이다.

기상청의 전구 수치 예보 모델에서 사용 중인 BUFR 관측 자료 그룹은 고층(SONDE), 지상(SURFACE), 항공기(AIRCRAFT)의 종관 관측 자료와 다양한 위성 관측 자료[Scatterometer Wind, SCATWIND; Atmospheric Motion Vector, AMV; Advanced TIROS (Television Infrared Observation Satellite) Operational Vertical Sounder, ATOVS; Atmospheric Infrared Sounder, AIRS; Advanced Technology Microwave Sounder, ATMS; Advanced Microwave Scanning Radiometer, AMSR; Sounder for Atmospheric Profiling of Humidity in the Inter-tropics by Radiometry sensor of Megha-Tropiques, MT-SAPHIR; Infrared Atmospheric Sounding Interferometer, IASI; Clear Sky Radiance, CSR; Crosstrack Infrared Sounder, CrIS; Global Navigation Satellite System Radio Occultation, GNSS RO; Ground Global Navigation Satellite System, Ground GNSS]를 포함하며, 그 세부 관측종 및 간략한 설명은 Table 1과 같다. 관측 자료들은 Global Telecommunications System (GTS)과 유럽의 EUMETSAT (European Organization

Table 1. Current obtainment state of observation data at KMA (Korea Meteorological Administration) and simple description. *u* is zonal wind, *v* is meridional wind, *T* is temperature, *q* is specific humidity, *Ps* is surface pressure, *TB* is brightness temperature, *BA* is bending angle, and *PWV* is precipitable water vapor.

Observation type	Variables used in DA	Details	
SONDE	<i>u</i> , <i>v</i> , <i>T</i> , <i>q</i>	TEMP, PILOT, Drop sonde, and Wind Profiler. Upper-air observation.	
SURFACE	<i>u</i> , <i>v</i> , <i>T</i> , <i>q</i> , <i>Ps</i>	SYNOP, BUOY, SHIP, and METAR. Measured observation near the earth surface.	
AIRCRAFT	<i>u</i> , <i>v</i> , <i>T</i>	AMDAR and AIREP. Aircraft-based observation.	
SCATWIND	<i>u</i> , <i>v</i>	ASCAT (MetOp-A/B). Ocean wind vector at 10 m height.	
AMV	<i>u</i> , <i>v</i>	Geostationary wind (COMS, Himawari-8, GOES-15, and Meteosat-8/10/11), Polar wind (NOAA-15/18/19, MetOp-A/B, Terra, and Aqua), and LEOGEO. Wind vector derived from satellite.	
ATOVS		AMSUA and MHS (NOAA-18/19 and MetOp-A/B).	
AIRS		AIRS (Aqua).	Microwave radiation observation
ATMS	<i>TB</i>	ATMS (Suomi-NPP).	
AMSR		AMSR2 (GCOM-W1).	
MT-SAPHIR		SAPHIR (Megha-Tropiques).	
IASI		IASI (MetOp-A/B).	Infrared radiation observation
CSR	<i>TB</i>	CSR (COMS, MFG, MSG, GOES, and Himawari-8).	
CrIS		CrIS (Suomi-NPP).	
GNSS RO (= GPSRO)	<i>BA</i>	GPSRO (MetOp-A/B, COSMIC, GRACE-A, TANDEM-X, and TerraSAR-X).	GNSS observation
Ground GNSS	<i>PWV</i>	Ground GNSS. Zenith Total Delay (ZTD) and Slant Total Delay (STD) observation.	

for the Exploitation of Meteorological Satellites), OSI SAF (Ocean and Sea Ice Satellite Application Facility), 미국 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration)의 NESDIS (National Environmental Satellite, Data, and Information Service), 위스콘신 대학교의 CIMSS (Cooperative Institute for Meteorological Satellite Studies), NCEP MADIS (Meteorological Assimilation Data Ingest System) 등을 통하여 수집되고 있으며, 수집된 관측 자료는 기상청 정보통신기술과에서 운영하는 종합기상정보시스템(COMIS) 서버에 저장된다. 기상청 현업 전구 수치 예보 모델이 수행되는 슈퍼컴퓨터에서 관측 자료들을 이용할 수 있도록 URL-API (Uniform Resource Locator-Application Programming Interface) 및 중계서버를 이용하여 관측 자료들은 슈퍼컴퓨터로 이동된다. 이후 몇 단계의 전처리 작업을 통해 다양한 형태의 원시 관측 자료들은 BUFR 형식의 파일로 변환되고, 최종적으로 전구 수치 예보 모델에서 사용할 수 있도록 ODB (Observational

DataBase; Saarinen, 2004)로 저장된다. 처리된 관측 자료들은 하루 4번 분석시간(0000, 0600, 1200, 1800 UTC) 기준으로 전후 3시간 관측 자료를 포함하며, 이른 분석과 늦은 분석에 대한 두 종류가 생산된다. 수치 예보 모델을 현업에 운영할 때 수치 예보 모델의 예보 결과를 최단 시간에 예보관에게 제공하는 것이 중요하다. 이것을 위해서 관측 자료가 100% 입수되지 않더라도 정해진 시간에 자료동화를 시작하는데, 이것을 이른 분석이라고 한다. 이후 관측 자료를 충분히 입수한 후에 자료동화와 수치 예보 모델 수행을 한 번 더 하는데, 이 자료동화를 늦은 분석이라고 한다. 늦은 분석의 목적은 다음 시점의 이른 분석에서 더 우수한 품질의 배경장을 산출하는 것이다. 이른 분석과 늦은 분석에서 사용되는 자료는 관측종의 차이는 없고, 단지 관측 자료 수집을 마감하고 관측 자료를 파일로 묶어 내는 시점인 cut-off 시간에서 차이가 있다. 이른 분석과 늦은 분석의 cut-off 시간은 분석시간을 기준으로 각각 2시간 40분과 6시간 40분이며

(2019년 1월 기준), 본 연구에서는 낮은 분석에서 생산된 BUFR 형식의 종관 관측 자료를 사용하였다.

PrepBUFR는 미국 NCEP에서 운영하고 있는 다양한 수치 예보 모델 시스템(Global Forecast System; GFS, Global Data Assimilation System; GDAS, North American Model; NAM, Climate Data Assimilation System; CDAS 등)에 연계된 GSI (Grid-point Statistical Interpolation)와 같은 관측 자료 전처리 및 자료동화 시스템에서 사용하기 위해 관측 자료 준비 단계 중 마지막에 생성되는 주요 종관 관측 자료이며, 다음과 같은 과정을 통해서 만들어진다(Keyser, 2018). GTS를 비롯한 다양한 경로를 통해 NCEP으로 입수된 관측 자료들은 BUFR Tanks라고 불리는 곳에 저장되고, 몇몇 처리 과정을 거쳐 임시 파일(dump file)로 제작된다. 임시 파일에 대해 각각의 관측 위치로 내삽된 배경장의 정보와 관측 오차의 정보가 계산된 후, 모든 관측종을 포괄하는 기본적인 품질 검사와 관측 기별별 세부적인 품질 검사가 수행되고, 최종적으로 모든 관측 정보가 한 덩어리로 묶여진 PrepBUFR 형태로 쓰여지게 된다. 따라서 PrepBUFR는 수치 예보 모델 시스템의 자료동화에서 사용하기 위한 준비가 완료된 BUFR 형식의 관측 자료라고 할 수 있으며, NCEP에서 사용되는 표준 관측 자료 형식이다. 이후 몇몇 후처리 과정을 거쳐 PrepBUFR는 FTP나 HTTP 서버를 통해 사용자가 다운로드 할 수 있도록 공개되어 있다(<http://www.nco.ncep.noaa.gov/pmb/products/gfs/>). PrepBUFR는 SONDE, SURFACE, AIRCRAFT의 종관 관측 자료뿐만 아니라 바람 정보에 대해서는 태풍, 레이다, AMV, ASCAT 관측 자료까지 포함하고 있다. 기상청과 동일하게 하루 4번 분석시간 기준으로 전후 3시간 관측 자료를 포함하며, 이른 분석과 늦은 분석에 대한 두 종류가 생산된다. 기상청의 관측 자료와 달리 cut-off 시간은 이른 분석과 늦은 분석에 대해 각각 2시간 45분, 4시간 45분이며, 본 연구에서는 기상청의 관측 자료와 동일하게 늦은 분석의 관측 자료를 사용하였다.

2.2 모델 및 실험 설계

두 종관 관측 자료 그룹 간의 예보 성능 향상의 기여도를 분석하기 위해 본 연구에서는 사업단에서 개발하고 운영중인 준실시간 예보 시스템 version 3.0을 사용하였다. 준실시간 예보 시스템은 수치 예보 모델, 자료동화 시스템 및 관측 자료 전처리 시스템으로 크게 3가지 부분으로 구성되어 있으며 간략한 설명은 다음과 같다.

수치 예보 모델은 육면체구 격자의 비정역학 역학 코어(Choi and Hong, 2016)와 hybrid sigma 연직 격자를 사용하는 KIM version 3.0이다. 본 실험에서 사

용된 해상도는 ne120np4(각 육면체구의 각 방향에서 사각형 요소의 개수, the number of quadrilateral elements, ne; 각 사각형 요소내의 한 축의 격자수, the number of point, np)로서 그에 대한 수평 해상도는 약 25 km이며, 연직은 대기 상단 0.3 hPa를 최상층으로 하여 전체 50층이다. 자료동화 시스템은 3-Dimensional Variational method(이하 3DVAR) 자료동화 시스템이다. 현재 사업단에서 사용 중인 최신 자료동화 기법은 3-Dimensional Variational method (Song and Kwon, 2015)와 Local Ensemble Transform Kalman Filter (Hunt et al., 2007, 이하 LETKF)의 두 기법을 조합한 Hybrid 4-Dimensional Ensemble Variational method (Kwon et al., 2018; 이하 H4DEV)가 있지만, 빠른 계산을 통한 계산 시간 감소와 그로 인한 빠른 결과 진단을 위해 H4DEV에서 LETKF 부분이 제외된 3DVAR의 version 3.0을 사용하였다. 3DVAR는 한 시간 간격의 모델 예측장들을 FGAT (First Guess at Appropriate Time)으로 사용한다. 관측 자료 전처리 시스템은 KPOP version 3.0을 사용하였다(Kang et al., 2018). KPOP 또한 KIM 모델에서 생산된 육면체구 격자의 6시간 예보장을 배경장으로 사용하며, 각각의 관측종에 맞는 편향 보정, 품질 검사, 슈아내기 등의 과정을 통해 관측 자료를 처리하여 자료동화 기법에서 사용될 관측 자료를 결과로 도출한다. 본 실험에서 사용된 기상청 및 NCEP 종관 관측 자료에 대한 KPOP의 전처리 적용 내용은 Table 2와 같으며, 자세한 내용은 Kang et al. (2018)을 통해서 확인 가능하다.

실험 방법은 앞서 입수된 두 종류의 종관 관측 자료 그룹을 사업단의 준실시간 예보 시스템의 입력 자료로 사용하고 각각의 수치 예보 모델 결과를 도출하여 이를 상호 비교하는 것이다. 규준 실험(이하 CTL)의 경우 기상청의 BUFR를 사용하여 모의 실험을 수행하였고, EXP 실험은 CTL 실험에서 종관 관측 자료를 NCEP의 PrepBUFR로 대체하여 수행한 모의 실험으로 구성하였다(Table 3). 부가적으로 NCEP PrepBUFR 관측종별 예보 성능 기여도를 분석하기 위해 3가지 모의 실험을 추가하였다. 세 실험은 CTL 실험에서 각각 SONDE, SURFACE, AIRCRAFT의 입력 자료를 기상청의 BUFR에서 NCEP PrepBUFR로 대체하여 모의 실험을 수행하였다. 위성 관측 자료는 기상청에서 사용하는 위성 관측 자료로 사용하여 모의 실험들을 진행하였고, 본 연구에서 사용된 위성 관측 자료의 종류는 Table 1에 언급된 SCATWIND, AMV, AMSUA, MHS, ATMS, IASI, CSR-COMS, CrIS, GPSRO이다. 마지막으로 두 모의 실험은 2017년 3월 21일 0000 UTC를 초기 시간으로 하고 3월 30일 1800 UTC를 종료 시간으로 정하여 약 9일 동안 수행하였다.

두 모의 실험에서 나타나는 종관 관측 자료 그룹의

Table 2. Pre-Processing method of KPOP on conventional data.

Processing method		SONDE	SURFACE	AIRCRAFT
Quality control		5~1100 hPa level only	-	10~1100 hPa level only
		O-B check based on observation error		
Correction		-	Height adjustment both observation and background	-
Thinning	Temporal	1 hour	1 hour	-
	Horizontal	-	0.5°	0.5°
	vertical	-	-	12 levels
Observation Error	Psfc	-	80~130 Pa	-
	Wind	1.6~2.5 m s ⁻¹	1.7~2.5 m s ⁻¹	1.7~3.2 m s ⁻¹
	T	0.55~2.0 K	1.8~2.0 K	0.8~1.5 K
	RH	5~14%	10~13%	-
	Q	0.012~0.5 kg kg ⁻¹ (according to level)	0.003 kg kg ⁻¹ (according to detailed observation type)	- (according to level)

Table 3. Summary of experiments.

Experiment	Conventional data			Satellite data
	SONDE	SURFACE	AIRCRAFT	
CTL	KMA BUFR data			
EXP	NCEP PrepBUFR data			
EXP1	NCEP PrepBUFR data	KMA BUFR data	KMA BUFR data	KMA Bufr data
EXP2	KMA BUFR data	NCEP PrepBUFR data	KMA BUFR data	
EXP3	KMA BUFR data	KMA BUFR data	NCEP PrepBUFR data	

효과를 분석하고 검증하기 위해 유럽중기예보센터 (European Center for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)에서 제공하는 IFS (Integrated Forecasting System) 재분석장(ERA-Interim; Berrisford et al., 2011)을 사용하였다.

3. 결 과

실험 결과를 서술하기에 앞서 본 연구의 연구 동기가 이자 서론에서 간략히 언급되었던 사업단 내부에서 수행되었던 연구 결과를 간략히 소개하면 다음과 같다. 사업단의 준실시간 예보 시스템에서 사용중인 모든 관측 자료 중 SONDE 관측 자료만을 NCEP에서 제공하는 관측 자료로 대체하여 준실시간 예보 시스템을 수행하였다. 이때 같은 SONDE 관측 자료를 준실시간 예보 시스템에 적용하였으므로, 관측 자료간의 큰 차이가 없다면 준실시간 예보 시스템의 예보

성능 차이는 나타나지 않을 것으로 예상하였다. 하지만, 기상청 UM (Unified Model) 분석장 대비 전구 평균 연직 동서 바람(u), 남북 바람(v)의 평균제곱근편차(root-mean-square difference, RMSD) profile을 살펴본 결과, 200~30 hPa 고도에서 기상청의 SONDE 관측 자료를 사용한 실험보다 NCEP의 SONDE 관측 자료를 사용한 실험의 RMSD가 더 작은 값을 보였다 (그림 생략). 결과적으로 NCEP의 SONDE 관측 자료가 기상청의 SONDE 관측 자료보다 예보 성능 향상에 더 기여한다는 점을 확인하였다.

3.1 관측 자료간 비교

본 연구의 모의 실험들에서 나타나는 종관 관측 자료의 특징과 KPOP 종관 관측 자료 전처리 현황을 살펴보기 위해, 2017년 3월 23일 0000 UTC 기준으로 두 실험에서의 KPOP 전처리 전의 그림을 Fig. 1에 나타냈으며, KPOP 전처리 후의 그림을 Fig. 2에 나

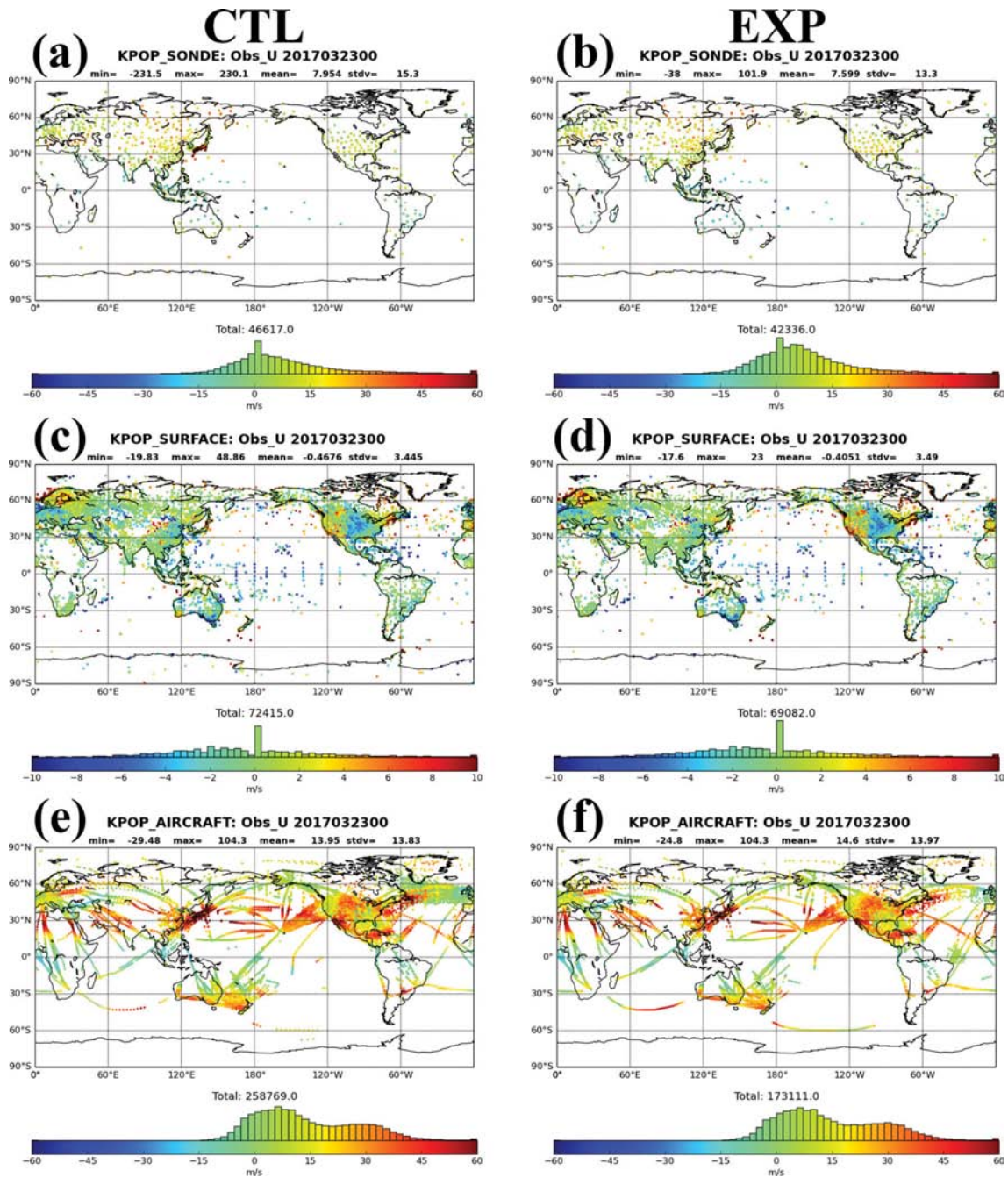


Fig. 1. Global distribution of u wind before KPOP processing for (left column) CTL and (right column) EXP, for (a, b) SONDE, (c, d) SURFACE, and (e, f) AIRCRAFT at 2017.03.23 0000 UTC. The histogram shows the cumulative number of observations based on wind speed.

타내었다. 종관 관측 자료에 대한 KPOP 주요 전처리 내용은 Table 2에 요약하였으며, 자세한 내용은 Kang et al. (2018)을 통해서 확인 가능하다.

가장 먼저 KPOP 전처리 전의 두 관측 자료 그룹의 관측종별 동서 바람(u)에 대한 전구 분포도 및 통계값들을 살펴보았다. 두 관측 자료 그룹에서 나타나

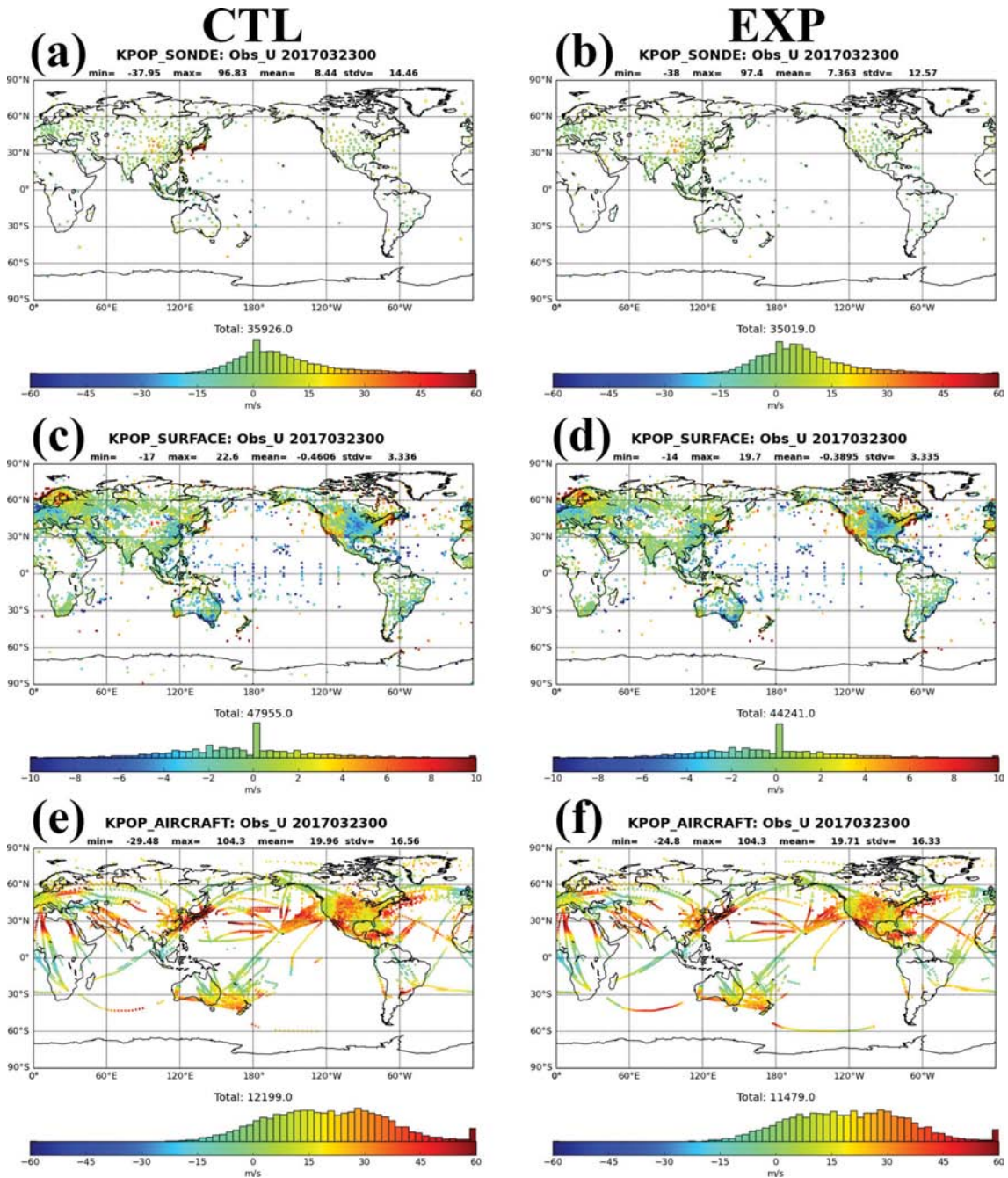


Fig. 2. The same as the Fig. 1, but for the u wind after KPOP processing.

는 관측 지점의 차이는 SONDE와 SURFACE의 경우 거의 차이가 없었다. 이는 빈도의 차이는 있을 수 있겠으나, 매 관측이 고정된 지점에서 수행되기 때문이다. 하지만 AIRCRAFT의 경우 두 관측 자료 그룹 간의 약간의 차이가 나타났는데, 북대서양에서는 EXP 실

험보다 CTL 실험, 열대 대서양에서는 CTL 실험보다 EXP 실험에서 더 넓은 지역에 관측 자료가 존재하고 있었다(Figs. 1e, f 참고). 또한 Fig. 1a의 우리나라와 일본 부근 동서 바람(u) 및 남북 바람(v) 관측 자료의 값이 Fig. 1b의 관측 자료값과 서로 다르게 나타나는

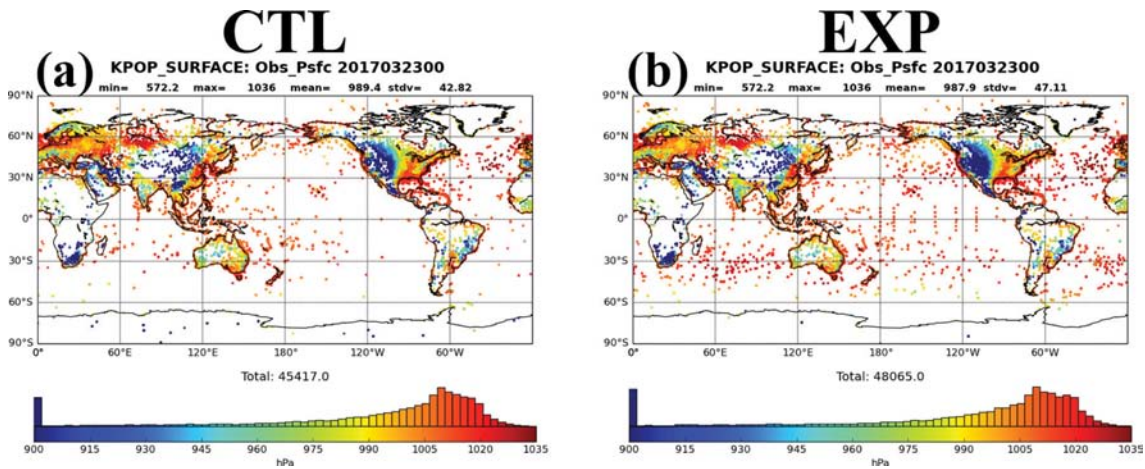


Fig. 3. Global distribution of Ps after KPOP processing for (left) CTL and (right) EXP, for SURFACE at 2017.03.23 0000 UTC. The histogram shows the cumulative number of observations based on surface pressure.

데, 이는 기상청 BUFR의 경우, 전세계에서 수집된 SONDE 관측 자료에 우리나라와 일본의 Wind Profiler 관측 자료를 부가적으로 수록하기 때문이며, 같은 이유로 그림 아래쪽 막대 그래프로 나타난 관측종별 관측값 분포도에서도 두 실험 간 차이가 나타난다(남북 바람(v) 그림 생략). 이러한 차이는 관측 지점에서 생산된 BUFR 자료를 접근하고 수집하는데 있어, 두 기관의 차이가 있음을 내포한다.

바람 정보를 제외하고 다른 기상 변수에 대한 두 관측 자료 그룹 간 차이는 SONDE, AIRCRAFT보다 SURFACE에서 크게 나타났으며, 특히 지면 기압(Ps) 관측 자료에서 큰 차이를 보였다(Fig. 3). 2017년 3월 23일 0000 UTC 기준으로 SURFACE Ps 관측 자료 분포를 비교해보면 CTL 실험보다 EXP 실험의 해양에서 더욱 많은 관측 자료 개수를 보였으며, 이 관측 자료들은 대부분 선박(SHIP)에서 관측된 Ps 자료였고 중위도대의 전구 해양에서 비교적 골고루 분포하고 있었다(Fig. 3). 이 관측 자료들은 기상청 BUFR에서는 찾아볼 수 없었으나 NCEP PrepBUFR에서는 다양으로 존재하여 역시 두 기관의 자료 접근 및 수집 가능 유무의 차이가 있음을 알 수 있다.

앞서 살펴본 바와 같이 두 관측 자료 그룹 간 기상 변수 분포와 관측값의 차이는 일부 존재하였다. 하지만 그 외 다른 관측종 및 기상 변수에 대한 전구 통계값과 히스토그램으로 나타난 관측값의 분포가 서로 유사했기 때문에(그림 생략), 본 연구에서 KPOP 전처리 수행 이전 두 관측 자료 그룹 간 종관 관측 자료의 차이는 일부 존재하나 크지 않다고 판단하였다.

KPOP 전처리 전과 후 종관 관측종별 u 관측 자료에 대한 전구 관측 지점의 차이는 거의 나타나지 않

는다(Figs. 1, 2 참고). 하지만 모의 실험이 수행되는 기간에 대해 일관적으로 나타나는 특징이 있는데, 그 특징은 다음과 같다. AIRCRAFT의 경우, KPOP 전처리 전에는 대륙을 넘나드는 장거리 비행의 관측을 간간히 살펴볼 수 있으나, KPOP 전처리 후에는 비행 경로의 한쪽 끝 자료가 제거된 관측이 있다. 이는 KPOP AIRCRAFT 전처리 과정 중 분석 시간과 관측 시간을 비교하는 과정에서 큰 차이로 인해 제거된 관측 자료이다(Fig. 1e와 Fig. 2e의 중국 내륙 지역 참고). 또한 KPOP 전처리 전 Fig. 1e와 Fig. 1f의 두 실험 u 관측값 분포도에서 약 7 m s^{-1} 와 30 m s^{-1} 에서 보이던 이중 최고점 분포가 KPOP 전처리 후(Figs. 2e, f)에는 30 m s^{-1} 부근에서만 최고점을 보여 7 m s^{-1} 부근의 풍속이 많이 제거된 것을 살펴볼 수가 있다. 또한 AIRCRAFT 기온(T) 관측값 분포도에서 250~300 K의 관측값이 KPOP 전처리 과정에서 많이 제거되고 있었다(그림 생략). 따라서 AIRCRAFT의 바람 자료와 기온 자료에서 많이 제거되는 관측 자료를 서로 연관 지어 봤을 때, 상대적으로 낮은 풍속과 높은 온도를 가지고 있는 배경장의 대기 하층과 AIRCRAFT의 대기 하층 관측값이 두 실험에서 모두 비교적 일치하지 않다는 것을 말해주고 있다.

두 실험 간 KPOP 전처리 전과 후의 관측종별 기상 변수 누적 개수를 시간에 따라 살펴보면, KPOP 전처리 전에는 두 실험 간 관측 자료의 개수 차이가 비교적 크게 나타났지만 전처리 후에는 그 차이가 많이 줄어들었음을 확인할 수 있다(Fig. 4). 이는 KPOP에 다른 개수의 관측 자료가 입수되더라도 같은 배경장에 대해 동일한 전처리 과정과 동일한 해상도의 슈아내기 과정(Table 2)을 거친 일정량의 관측 자료가

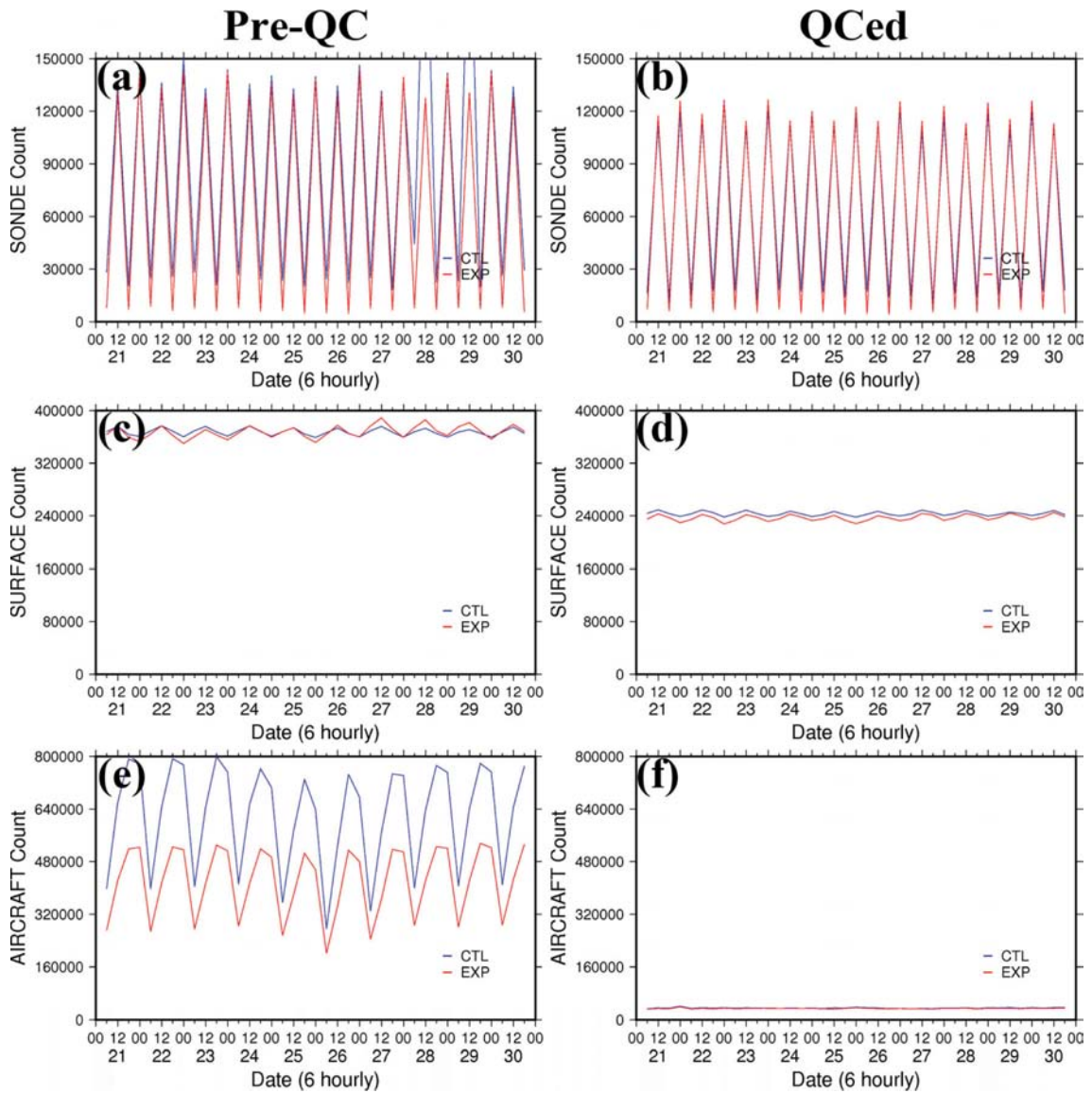


Fig. 4. Time series of Pre-QC (left column) and QCed (right column) observation number of (a, b) SONDE, (c, d) SURFACE, and (e, f) AIRCRAFT for CTL (blue solid line) and EXP (red solid line) during 9 days (from 2018.03.21 0600 UTC to 2018.03.30 1800 UTC). Counted value represents the sum of meteorological variables.

결과로 산출되기 때문이다. 이러한 특징을 통해 KPOP 은 모의 실험이 수행되는 동안 자료동화 과정에서 많은 계산 비용을 요구하는 많은 수의 관측 자료가 아니라 상대적으로 적은 개수로도 최적의 자료동화 효과를 내하고자 하는 안정적인 개수의 전처리와 완료된 관측 자료를 생산 할 것으로 예상 가능하다. 실제로 모의 실험이 수행되는 동안 과도한 개수의 관측 개수가 아니면서 두 실험 간 관측 자료의 개수 차이가 크

지 않은 일정량의 관측 자료(SONDE의 0000, 0600 UTC 경우 두 실험 모두 약 118,000개, 1200, 1800 UTC 경우 CTL 및 EXP 실험에서 각각 약 11,500개 및 6,000개; SURFACE의 경우 두 실험 모두 약 240,000개; AIRCRAFT의 경우 두 실험 모두 약 35,000 개)를 KPOP의 결과로서 생산하고 있음을 확인 할 수 있었다(Figs. 4b, d, and f). 또한 KPOP에 의해 전처리된 관측 자료는 관측 지점의 분포, 최솟값의 범위,

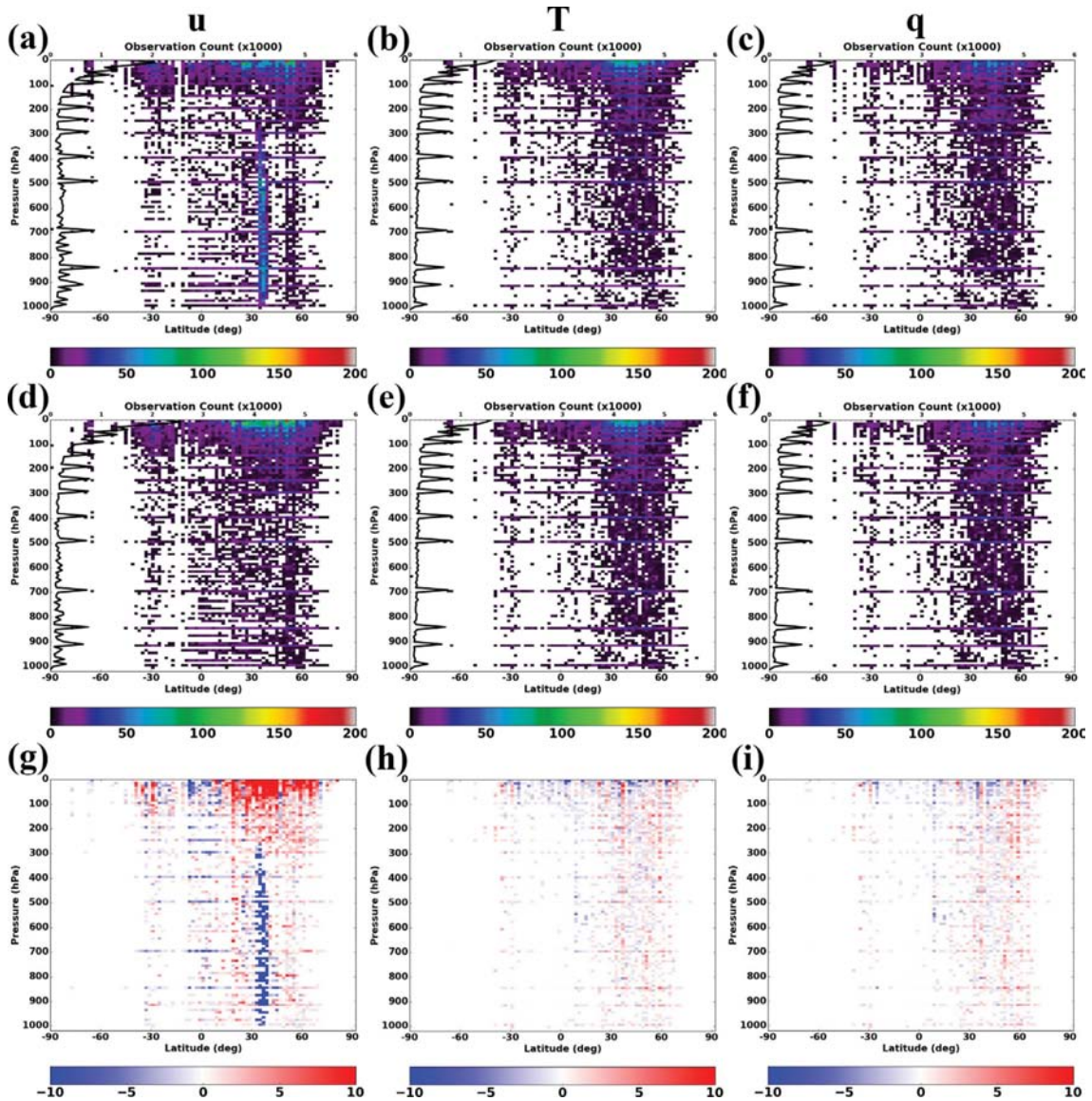


Fig. 5. Vertical distribution (point) of SONDE for (a, d) u, (b, e) T, and (c, f) q on (upper) CTL, and (middle) EXP at 2018.03.23 0000 UTC and sum of points at each 10 hPa (black line). Lower panel shows the difference of observation count between CTL and EXP for (g) u, (h) T, and (i) q (red color means that EXP have more observations than CTL).

평균 및 표준편차가 두 관측 자료 그룹 간 서로 유사하여 배경장의 품질에 맞게 관측 자료가 잘 처리되었음을 확인할 수 있다.

서론에서 간략히 언급된 사전 연구에서 SONDE 관측 자료로 인한 모의 실험의 예보 성능 차이가 났으므로, 본 연구에서 수행된 두 모의 실험 속의 관측 자료 그룹 간 SONDE 연직 관측 자료 특징을 살펴보았다. 모의 실험에서 나타난 KPOP 전처리 후 SONDE

관측 자료의 연직 관측은 대부분의 관측 자료가 남위 30도에서 북위 60도까지 위치하고 있으며, 표준등압면 고도를 비롯하여 연직적으로 관측 자료가 존재하는 SONDE 고유의 관측 특징이 잘 나타난다(Fig. 5). 기상 변수(u, v, T, q)별 관측 증분의 평균값과 표준 편차의 연직 분포는 유사한 반면(그림 생략), 연직 관측 개수 분포에서는 다음과 같은 차이를 보인다. T (Figs. 5b, e)와 q (Figs. 5c, f)의 경우, 두 실험에서 연직 관

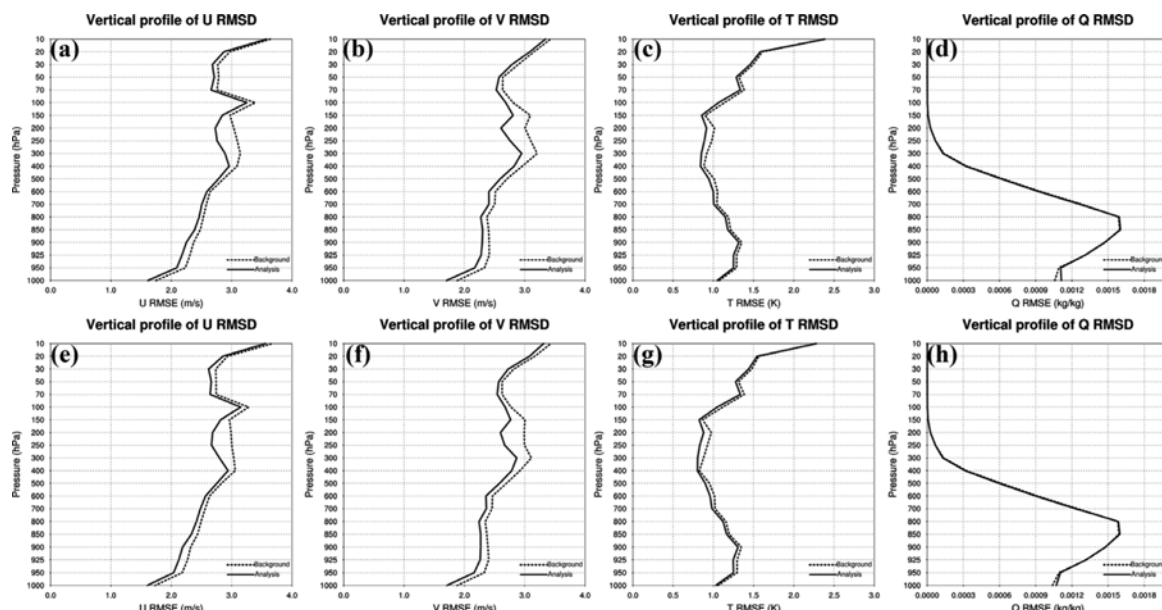


Fig. 6. Vertical profile of global mean RMSD against IFS for (a, e) u, (b, f) v, (c, g) T, and (d, h) q on (upper) CTL and (lower) EXP at 2018.03.29 0000 UTC.

측 개수는 유사하게 분포하지만 CTL 실험보다 EXP 실험에서 연직적으로 더욱 고르게 나타난다. u (Figs. 5a, d)의 경우, T와 q 처럼 CTL 실험보다 EXP 실험에서 연직적으로 고르게 분포해 보인다. 하지만 CTL 실험에서 우리나라와 일본 주변(Fig. 5a 북위 30~40도 사이)에 추가된 Wind Profiler 관측 자료가 누적되어 보이고, 특히 북반구 250~0 hPa 사이의 관측 자료 개수 분포는 CTL 실험보다 EXP 실험에서 연직적으로 조밀하게 더 많은 관측 자료가 존재하고 있었다.

3.2 예보 성능 비교

가장 먼저 두 관측 자료 그룹이 모의 실험 속에서 잘 적용되고 자료동화에 맞물려 잘 작동하는지 살펴 보았다. 각각의 모의 실험은 배경장으로부터 시작하여 관측 자료를 바탕으로 자료동화가 이뤄지고 모델의 분석장이 만들어지게 되는데, 이때 IFS 분석장과 비교하여 배경장과 분석장의 RMSD 값을 각각 계산할 수 있다. IFS 분석장을 참이라고 가정하였을 때, 올바르게 자료동화가 작동하였다면 배경장의 RMSD 값보다 분석장에서의 RMSD 값이 더 작을 것이고, 혹은 배경장의 RMSD 값이 분석장의 RMSD 값보다 크다면, 이는 자료동화가 올바르게 작동하지 못했다는 것을 의미하므로 향후 그 원인에 대한 추가적인 분석이 필요할 것이다.

앞서 제시한 정보를 기반으로 두 모의 실험에 대해 IFS 분석장 대비 기상 변수별 배경장과 분석장의 전

구 평균 연직 RMSD 값을 살펴보았다(Fig. 6). 모의 실험의 후반부인 2018년 3월 29일 0000 UTC를 기준으로 전구 평균 연직 RMSD 값은 모든 기상 변수에서 대부분의 고도에 대해 분석장 전구 평균 연직 RMSD 값이 배경장 전구 평균 연직 RMSD 값보다 작게 나타났다. 또한 EXP 실험의 분석장 전구 평균 연직 RMSD 값이 CTL 실험에서의 전구 평균 연직 RMSD 값보다 다소 작게 나타나 해당 시점에 대해 EXP 실험의 분석장이 CTL 실험의 분석장보다 IFS 분석장에 더 가깝다는 것을 알 수 있다. 이러한 특성들은 모의 실험 후반부뿐만 아니라 모의 실험 전체 기간에 대해 일관되게 나타났으며, 두 모의 실험 모두 관측 자료를 기반으로 자료동화가 잘 작동하였음을 알 수 있었다.

두 모의 실험의 총괄적인 예보 성능을 비교하기 위해 두 모의 실험의 분석장과 IFS 분석장과의 1000 hPa에서 10 hPa까지의 전구 평균 RMSD 시계열을 살펴 보았다(Fig. 7). 모든 기상 변수의 전구 평균 RMSD 시계열에서 눈에 띄는 특징은 모의 실험 기간 동안 기상청의 BUFR를 사용한 CTL 실험보다 NCEP의 PrepBUFR를 사용한 EXP 실험에서 더 작은 RMSD 값을 보였다는 것이며, 그 차이는 시간이 흐를수록 점점 더 커지고 있었다. 또한 모의 실험 기간 동안 CTL 실험 대비 EXP 실험의 개선율을 계산해본 결과, 모든 기상 변수에서 작게는 0.74%부터 최대 5.86%까지 양의 값을 보였다(Table 4). 이러한 결과는 CTL 실험

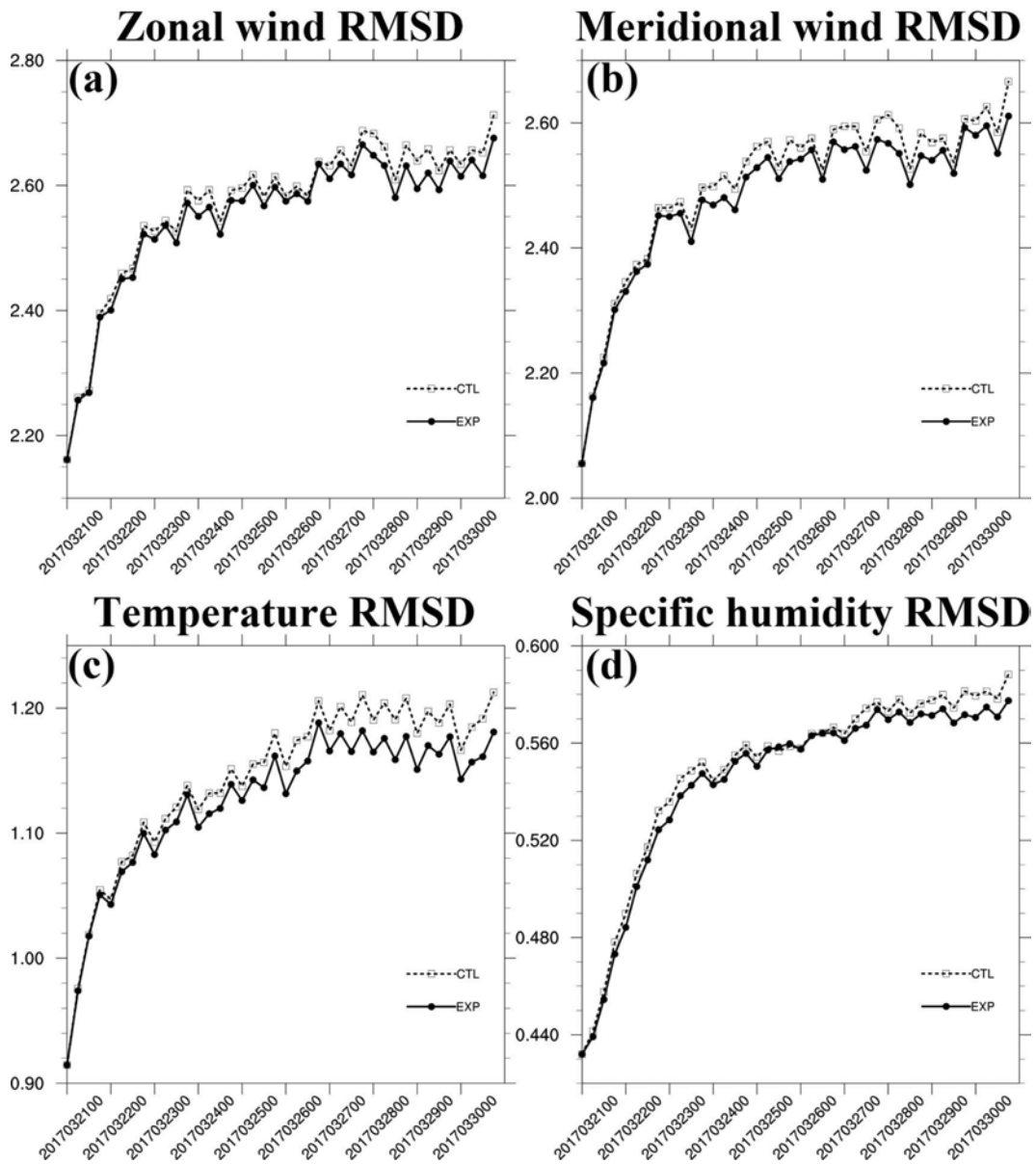


Fig. 7. Time series of global mean (vertically 1000~10 hPa) RMSD against IFS for (a) u , (b) v , (c) T , and (d) q during 9 days (from 2018.03.21 0000 UTC to 2018.03.30 1800 UTC).

에 비해 EXP 실험에서 KPOP 전처리 후 더 적은 개수의 관측 자료가 모의 실험에 반영되었음에도 불구하고(Figs. 4b, d, and f), CTL 실험의 분석장보다 EXP 실험의 분석장이 본 연구에서 참이라고 가정한 IFS 분석장에 더 유사하다는 것을 의미한다. 결국 기상청의 BUFR 자료를 사용하여 기상 예보를 할 때보다 NCEP PrepBUFR를 사용하는 것이 더 나은 예보 성능을 보인다는 것을 뜻한다.

NCEP PrepBUFR로 인한 예보 성능의 향상이 어느 관측종에서 비롯되었으며 그 기여도는 얼마나 되는지 분석하기 위해, 추가적으로 수행한 3가지 모의 실험의 결과를 CTL 실험의 결과와 비교 분석하였다. 가장 먼저 EXP1, EXP2, EXP3 실험의 분석장과 IFS 분석장과의 전구 평균 RMSD 시계열을 살펴보았으며(그림 생략), 모의 실험 기간 동안 CTL 실험 대비 추가된 실험들에서의 개선율은 Table 4과 같다. EXP3

Table 4. Mean RMSD and improvement rate of each experiment during 9 days (from 2018.03.21 0000 UTC to 2018.03.30 1800 UTC).

Experiment		CTL	EXP	EXP1	EXP2	EXP3
Mean RMSD	u	2.56836	2.54921	2.55791	2.55470	2.57254
	v	2.50369	2.47999	2.49038	2.48909	2.50393
	T	1.14291	1.12542	1.13584	1.13304	1.14330
	q	0.54879	0.54446	0.54818	0.54345	0.54949
	Ps	2.40511	2.26406	2.39457	2.27091	2.40634
Improvement rate relative to CTL (%)	u	-	0.74565	0.40689	0.53186	-0.16257
	v	-	0.94667	0.53146	0.58294	-0.00974
	T	-	1.53051	0.61856	0.86319	-0.03423
	q	-	0.78811	0.11094	0.97236	-0.12826
	Ps	-	5.86483	0.43831	5.57991	-0.05104

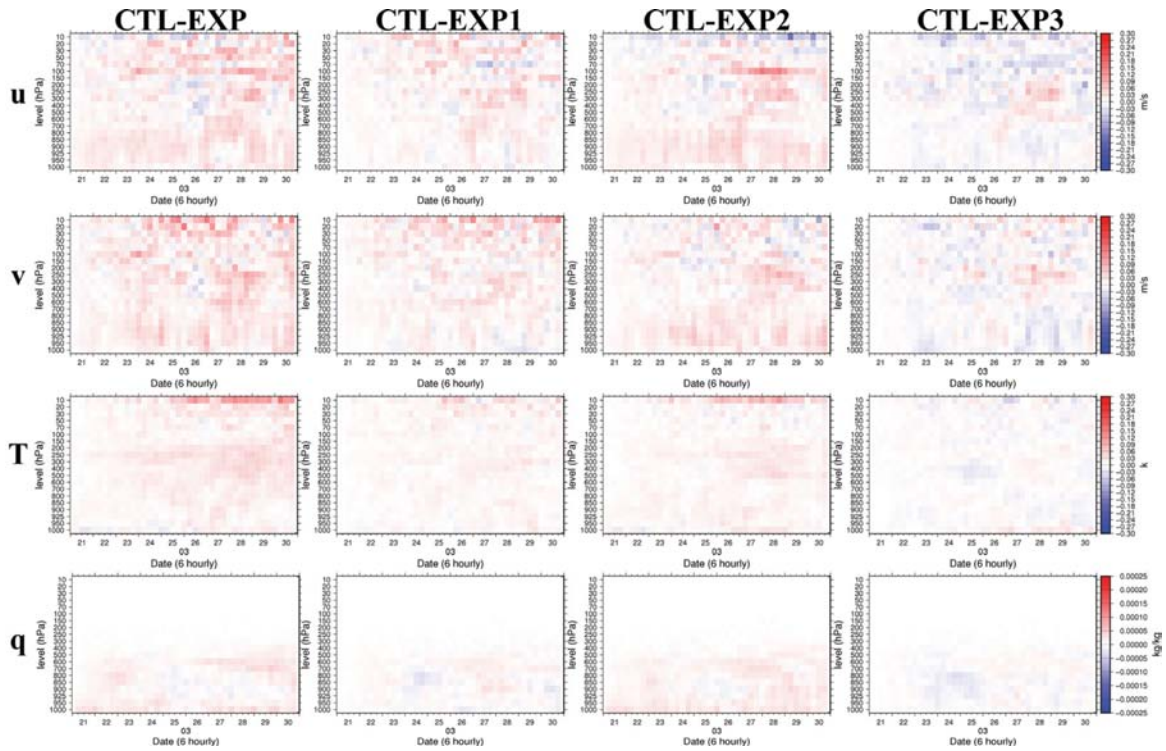


Fig. 8. Time series of vertical RMSD difference between CTL and EXPs against IFS for u, v, T, and q. Red color means that EXPs shows better forecast performance than CTL.

실험 개선율을 살펴보면 모두 음의 값을 보였고, 이는 CTL 실험 대비 EXP3 실험의 예보 성능의 개선이 나타나지 않음을 의미한다. 따라서 NCEP PrepBUFR AIRCRAFT의 예보 성능 향상 기여도는 거의 없으며, 오히려 미약하게 성능을 저하시키는 것으로 판단된다.

EXP1과 EXP2 실험의 개선율을 각 기상 변수별로 살펴보았을 때 q의 경우, EXP2 실험의 개선율이 EXP1

실험의 개선율에 비해 우세하여, q에서의 예보 성능 향상은 많은 부분이 NCEP PrepBUFR SURFACE 관측 자료로부터 기인한 것임을 알 수 있었다(Table 4의 q 참고). u, v 그리고 T의 경우, EXP1과 EXP2 실험의 예보 성능 개선율의 크기가 서로 유사하기 때문에 NCEP PrepBUFR SONDE와 SURFACE는 서로 동등한 비율로 예보 성능 개선에 기여를 하고 있다는

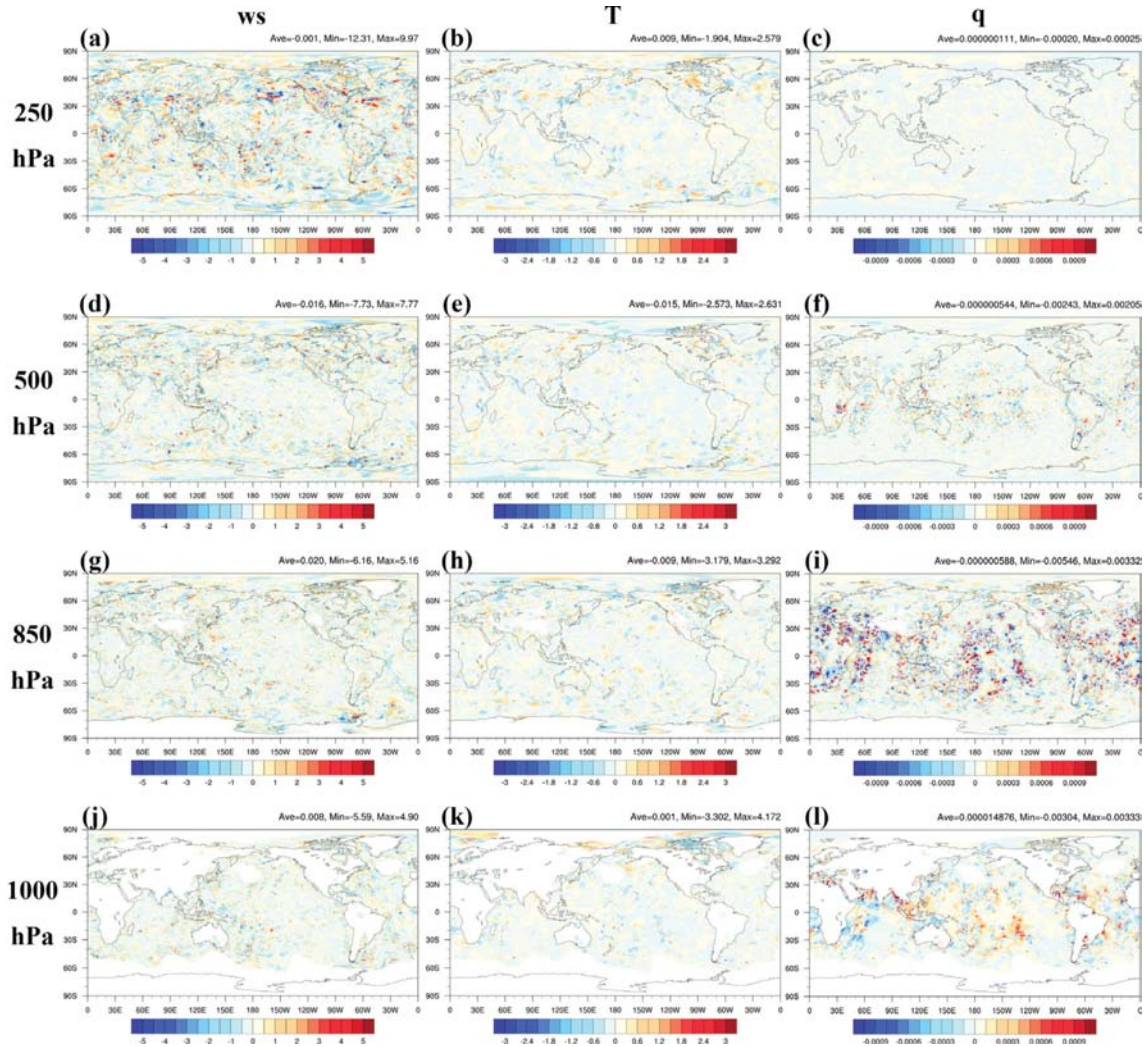


Fig. 9. Horizontal error reduction difference between CTL and EXP against IFS for (a, d, g, j) wind speed, (b, e, h, k) T, and (c, f, i, l) q for (first row) 250 hPa, (second row) 500 hPa, (third row) 850 hPa, and (fourth row) 1000 hPa at 2018.03.29 0000 UTC. Red color means that EXP shows better forecast performance than CTL.

것을 알 수 있다. 가장 큰 예보 성능 개선을 보인 Ps의 경우, NCEP PrepBUFR SURFACE의 Ps가 독보적인 역할을 하고 있는 것을 볼 수 있다(Table 4의 Ps참고). 기본적으로 자료동화에 제공되는 Ps 관측값은 SURFACE에서만 제공되는 기상 변수이기 때문에, SONDE나 AIRCRAFT에 비해 SURFACE로 인한 예보 성능 개선이 가장 클 것임을 예상할 수 있다. 특히, 본 연구에서는 Fig. 3에서 살펴볼 수 있듯이, NCEP PrepBUFR SURFACE의 Ps가 기상청 BUFR SURFACE의 Ps에 비해 관측 자료 개수가 많을 뿐만 아니라 기상청 자료에서 포함되지 않은 중위도 해양 지역의 많은 SHIP 자료들도 포함하고 있기 때문에, 이 관측 자

료들이 동화된 EXP 실험에서 NCEP PrepBUFR SURFACE의 Ps로 인한 예보 성능 개선이 우세하게 나타난 것으로 분석된다.

관측종별 관측 자료의 분포와 예보 성능 향상 요인을 연관지어 살펴보기 위해 전체 실험 기간에 대해 IFS의 분석장과 개별 실험의 분석장과의 전구 평균 연직 RMSD를 계산하고 이에 대한 CTL 실험과 각 실험별 차이를 분석하였다(Fig. 8). 붉은색으로 나타난 부분이 CTL 실험 보다 EXP 실험들에서 더 나은 예보 성능을 보였다는 것을 의미한다. CTL-EXP 그림에서 나타나는 시간에 따른 예보 성능 개선은 CTL 실험 대비 EXP1, EXP2, EXP3 실험들의 예보 성능 개

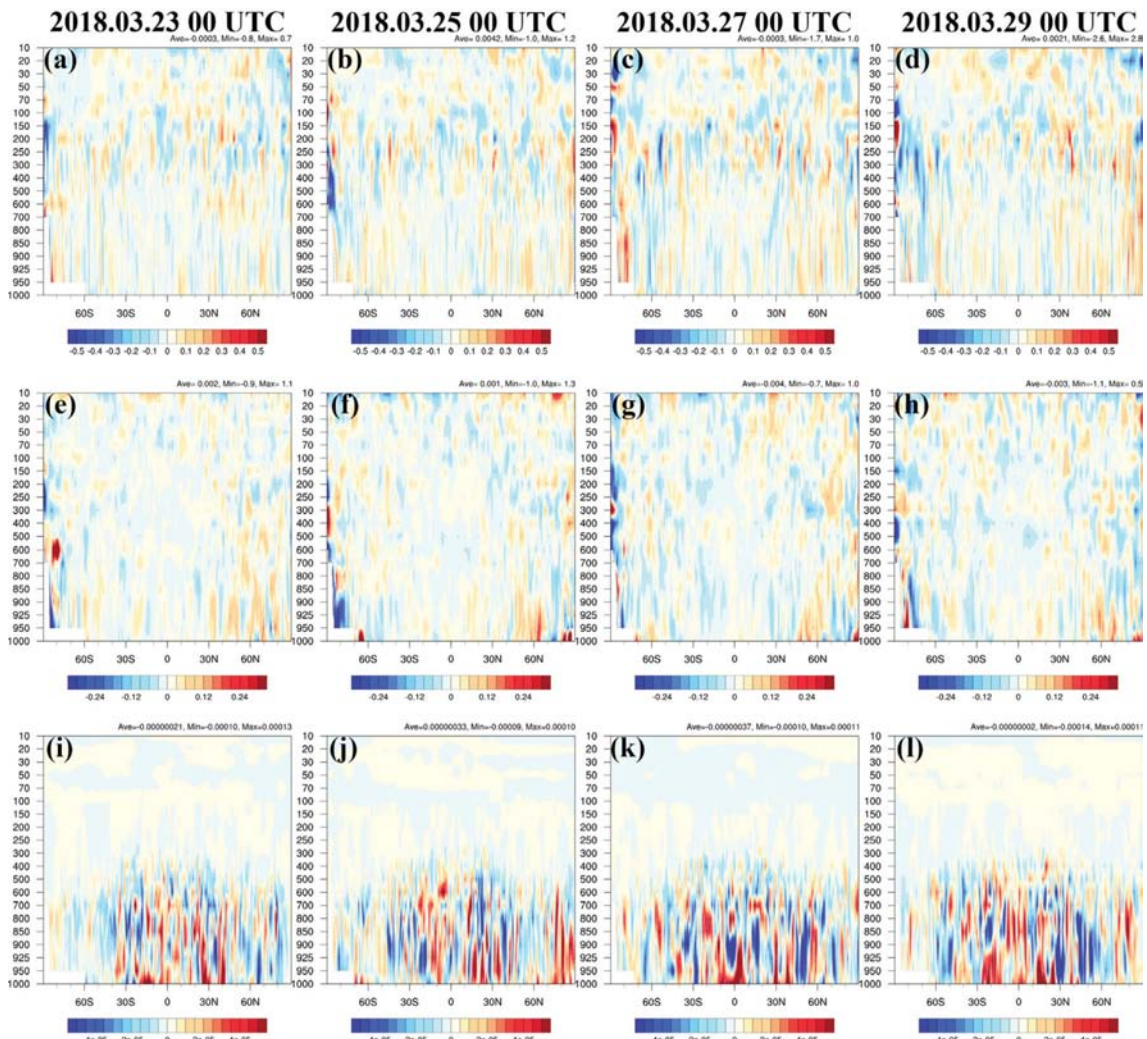


Fig. 10. Vertical error reduction difference between CTL and EXP against IFS for (a, b, c, d) wind speed, (e, f, g, h) T, and (i, j, k, l) q at (first column) 2018.03.23 0000 UTC, (second column) 2018.03.25 0000 UTC, (third column) 2018.03.27 0000 UTC, and (fourth column) at 2018.03.29 0000 UTC. Red color means that EXP shows better forecast performance than CTL.

선 효과를 모두 합한 결과와 유사하게 나타나기 때문에, EXP 실험 속에서 예보 성능 향상은 각 관측종에서의 예보 성능 향상 조합의 결과가 나타난 것임을 알 수 있다.

CTL-EXP3에서는 Table 4의 EXP3 개선을 결과와 동일하게 NCEP PrepBUFR AIRCRAFT에 의한 예보 성능 저하는 대부분의 고도에서 나타나고 있다. CTL-EXP2의 경우, 관측 자료가 지표면에 위치하고 있는 SURFACE 관측 자료의 특징처럼 전체 모의 실험 기간에 대해 예보 성능 향상의 효과는 주로 대기 하층에서 나타나며 모의 실험 후반으로 갈수록 대기 상층에서도 개선 효과가 나타난다. CTL-EXP1의 경우 예

보 성능 향상은 u, v 변수에 대해 모의 실험 초반부터 대기 하층보다 대기 상층에서 나타나고 있다. 이 고도는 앞서 관측 자료간 차이에서 살펴본 NCEP PrepBUFR SONDE 관측 자료가 집중적으로 위치해 있는 고도와 일치하므로 NCEP PrepBUFR SONDE로 인한 예보 성능 개선 효과를 다시 한번 직접적으로 확인할 수 있었다.

NCEP PrepBUFR로 인한 예보 성능 개선 효과를 고도별로 공간적으로 분석하였다(Fig. 9). IFS 분석장 대비 배경장의 RMSD 값과 분석장의 RMSD 값을 이용하여 두 값의 차이를 구하면, 모의 실험 속에서 자료 동화에 의해 분석장이 생성되면서 자료동화에 대한

IFS 분석장 대비 정량적인 오차 감소량을 알 수 있다. 다시 이 값에 대해 두 실험 간 차이를 계산하여 IFS 분석장에 비해 어느 실험이 더 많은 오차 감소를 보였는지 살펴보았다. 2018년 3월 29일 0000 UTC를 기준으로 고도별 각각 변수별 IFS 분석장 대비 두 실험 간 오차 감소의 차이는 Fig. 9에 나타냈으며, 붉은색으로 나타난 부분이 CTL 실험 보다 EXP 실험에서 더 나은 예보 성능을 보였다는 것을 의미한다. 풍속(ws)의 경우, 하층에 비해 상층에서 두 실험 간 오차 감소 차이값이 크게 나타났으며(Figs. 9a, d), 이는 Fig. 5a와 Fig. 5d에서 보였던 것처럼 두 관측 자료 그룹에서의 u, v 관측 자료 개수의 차이가 예보 성능 차이에 영향을 끼친 것으로 보인다. 특히 Fig. 5a에서 보였던 우리나라와 일본 부근에 집중적으로 추가된 바람 관측 자료에 대해 Fig. 9의 ws 그림에서 지역적으로나 연직적으로 뚜렷한 차이를 보이지 않는다. 따라서 좁은 지역에 집중적으로 분포된 관측 자료가 모의 실험 속의 예보 성능 향상에 기여한다고 판단되지 않는다. 마지막으로 q의 경우, q의 대기 분포 특성에 맞게 상층보다는 하층에서 두 실험 간의 반응이 더 크게 나타나며, 예보 성능에 대한 오차 감소의 차이는 상당히 혼재되어 나타나고 있다. 이 결과를 다시 몇몇 시간에 대해 위도에 따라 연직적으로 살펴보면(Fig. 10), ws에서 비교적 강한 반응은 대기의 하층보다 상층에서 나타났으며, 우리나라와 일본 주변에서 EXP 실험보다 CTL 실험에서 더 나은 예보 성능을 보이지 않았다. 뿐만 아니라 200 hPa 부근에서의 ws 예보 성능 향상은 시간이 지남에 따라 EXP 실험에서 점차 강화되고 있는 특징을 보였다(Fig. 10 ws 그림 참고).

지금까지 살펴본 여러 결과들을 종합해보면 본 연구에서 수행된 기간보다 더 장기간의 모의 실험을 진행하였을 때, NCEP PrepBUFR를 사용한 EXP 실험의 예보 성능이 기상청의 BUFR 자료를 사용한 CTL 실험의 예보 성능보다 더 향상된 예보 성능을 보일 것으로 기대된다. 또한 대기 상층 지역은 관측 자료가 조밀하게 분포하고, 동시에 연직적으로 고른 분포를 하고 있으며 상대적으로 적은 관측 자료 개수를 가지는 NCEP PrepBUFR가 EXP 실험에 사용되었음을 고려해볼 때, 반드시 많은 양의 관측 자료가 예보 성능에 긍정적인 영향을 끼친다고 판단하기 어려우며 잘 처리된 관측 자료가 예보 성능 향상에 있어서 더 중요한 역할을 한다고 생각해볼 수 있다.

4. 요약 및 결론

기상 예보에 있어서 기본이라 할 수 있는 기상 관측은 과거에서 현재에 이르기까지 많은 연구에 의해 그 중요성이 강조되어 왔다. 한국형수치예보모델개발

사업단은 2015년 7월부터 준실시간 예보 시스템을 수행해왔으며, 지난 3년간 사업단 내부에서 수행된 많은 분석에 의해 기상청 현업 사용 관측 자료보다 미국 NCEP의 현업 사용 관측 자료가 사업단의 준실시간 예보 시스템에서 향상된 예보 성능을 보인다는 점을 확인하게 되었다. 이에 본 연구에서는 두 종관 관측 자료 그룹의 특징 및 예보 시스템에 대한 효능 그리고 두 종관 관측 자료 그룹의 차이에 대한 수치 예보 모델 결과에서의 반응을 분석하고자 하였다.

실험 방법은 기상청의 현업 사용 관측 자료와 NCEP의 PrepBUFR를 사업단에서 개발하고 운영중인 준실시간 예보 시스템 version 3.0에 동일하게 적용하고 약 9일간의 모의 실험을 수행하였다. 결과 분석 방법은 두 모의 실험 결과를 사용하여 두 관측 자료 그룹 간 차이를 비교 분석하고, 참이라고 가정할 수 있는 ECMWF의 IFS 분석장과 차이를 분석하여 관측 자료 그룹 간의 모의 실험 예보 성능 차이를 관별하였다.

모의 실험을 통해 분석된 두 종관 관측 자료 그룹의 차이는 다음과 같다. 기본적으로 두 기관에서는 관측 지점에서 생산된 관측 자료를 접근하고 수집하는데 있어 차이가 있기 때문에, KPOP에 의해 전처리되기 이전 두 관측 자료 그룹 간의 차이는 일부 지역에서 존재했다. 또한 기본적인 전처리가 수행된 NCEP의 PrepBUFR가 EXP 실험에서 사용되었기 때문에, 상대적으로 적은 관측 자료 개수, 좁은 범위의 최솟값 및 통곶값들이 EXP 실험 결과에서 나타났다. KPOP 전처리 이후에는 두 모의 실험에서 서로 유사한 관측 자료 개수 및 통곶값들을 보였기 때문에, 배경장의 대기 상태와 비교하여 관측종별 품질 검사가 잘 수행되었음을 확인할 수 있었다. 두 종관 관측 자료 그룹 간 가장 큰 차이점은 NCEP PrepBUFR에서 북반구 250~0 hPa 사이의 연직적으로 조밀하게 더 많은 SONDE 관측 자료가 존재하고 있었으며, SURFACE의 SHIP에서 관측된 Ps 자료가 중위도 전구 해양에 고르게 분포하고 있었다는 점이다. 이러한 차이점은 모의 실험이 진행되는 동안 모의 실험의 성능에 영향을 미칠 것으로 예상하였다.

IFS 분석장과 두 실험의 분석장을 비교하여 살펴봤을 때, 두 관측 자료 그룹은 자료동화에 맞물려 모의 실험 속에서 잘 작동하고 있었다. 모의 실험에 적용된 관측 자료의 특성에 대한 총괄적인 예보 성능은 NCEP PrepBUFR가 적용된 EXP 실험이 CTL 실험보다 우세한 예보 성능을 보였다. 관측종별 기여도를 관별하기 위해 수행했던 실험들의 결과를 살펴보면 u, v 그리고 T는 NCEP PrepBUFR SONDE와 SURFACE가 거의 동등한 비율로 예보 성능 개선에 기여하고 있었으며, q와 Ps는 NCEP PrepBUFR SURFACE가 가장 큰 비율로 예보 성능 개선에 기여하고 있었다.

두 관측 자료 그룹 간 큰 차이를 보였던 지역들과 예보 성능 개선이 나타났던 지역을 연관 지어보면 상대적으로 관측 자료가 많고 고르게 분포한 지역이 예보 성능 개선에 긍정적인 영향을 보인다는 것을 알 수 있으며, 그 효과는 시간이 지남에 따라 점차 커지는 것을 확인 할 수 있었다. 이 결과들을 종합해보면 기상 예보에 있어서 기상청의 종관 관측 자료를 사용하는 것보다 NCEP PrepBUFR를 사용하는 것이 더 좋은 결과를 기대할 수 있다.

연구 결과에서 관측 자료가 많은 지역이 대체로 예보 성능의 개선이 이뤄진 것으로 나타났지만, CTL 실험 속 기상청 SONDE Wind Profiler 자료가 예보 성능 개선에 있어서 공간적으로나 시간적으로 뚜렷한 효과를 보이지 않았던 것처럼 지역적으로 많은 양의 관측 자료가 반드시 예보 성능 향상을 이끌어 낸다고 판단되지 않는다. 오히려 관측 공백 지역에 많은 관측 자료를 가지고 있거나 개수는 적더라도 전구적으로 고르게 분포하고 있는 관측 자료가 예보 성능 개선과 좀 더 연관되어 보인다. 결국 기상 예보에 있어서 관측 자료는 전구적으로 많은 양의 관측 자료를 확보하는 것과 동시에 기상 예보 성능에 긍정적인 영향을 미치는 관측 자료들만을 잘 선별하여 사용하는 것이 중요하다고 생각해볼 수 있다.

또한 블랙리스트와 같은 기초적인 품질 검사와 관련하여 다음과 같은 특징을 살펴볼 수 있었다. KPOP 전처리 후에 나타나는 두 관측 자료 그룹의 SURFACE Ps 전구 분포를 살펴보면(Fig. 3), 남극 일부 지역(동경 45~120 부근과 그 외 일부 지점들)에서 CTL 실험의 경우 모의 실험 기간 내내 Ps 관측 자료가 존재했던 반면, EXP 실험의 경우 모의 실험 기간 내내 Ps 관측 자료가 존재하지 않았다. 해당 지점들의 Ps 관측 자료 값들은 KPOP 전처리 전 PrepBUFR SURFACE의 Ps 전구 분포에서도 나타나지 않았기 때문에 블랙리스트에서 제거되었을 것임을 추측할 수 있다. 이러한 지점들에 초점을 맞춰서 모의 실험 기간 동안 두 실험의 예보 성능 개선 차이를 살펴보면, EXP 실험에 비해 남극 지역 Ps 관측 자료를 지속적으로 사용했던 CTL 실험에서 예보 성능 감소가 뚜렷하게 나타났다(그림 생략). 이로 인해 NCEP PrepBUFR SURFACE에서 존재하지 않았던 남극 지역의 일부 Ps 관측값들은 수치 예보 모델의 예보 성능에 악영향을 미치고, 자료동화에서 사용하지 않는 것이 예보 성능 개선에 있어서 긍정적인 효과를 이끌어 낸다는 것을 알 수 있었다. 결국, 수치 예보 모델의 성능에 악영향을 미치는 관측 자료를 미리 제거하는 블랙리스트가 수치 예보 모델의 예보 성능 개선에 매우 중요한 역할을 한다는 것을 확인 할 수 있었다.

본 연구 결과를 토대로 NCEP PrepBUFR를 기상청

의 현업 수치 예보 모델에 사용한다고 가정한다면 기상청 현업 수치 예보 모델의 예보 성능이 더 향상될 것으로 기대할 수 있지만 이는 보장되지 않는다. 첫째 이유로 실시간 제공되는 NCEP PrepBUFR는 자료 제공 기관의 요청에 따라 실시간 제공이 제한된 자료가 있기 때문이다(https://www.nco.ncep.noaa.gov/sib/restricted_data/restricted_data_sib 참고). NCEP PrepBUFR의 cut-off 시간이 기상청 BUFR의 cut-off 시간보다 빠르기 때문에 실시간 공개되는 NCEP PrepBUFR를 기상청의 현업 수치 예보 모델에 적용하는 것은 가능해 보인다. 하지만 제한된 자료로 인한 다소 부족한 NCEP PrepBUFR를 현업 수치 예보 모델에 사용한다면 그 예보 정확도는 떨어질 것으로 예상되기 때문이다. 다만 NCEP에서는 48 시간이 지난 제한된 자료에 대해 재공개를 하고 있기 때문에 재공개된 NCEP의 PrepBUFR를 연구 목적의 수치 예보 모델에 사용하는 것은 가능하고 그 사용 목적도 타당해 보인다. 두 번째 이유로 기상청 현업 수치 예보 모델에서 사용하는 관측 자료 전처리 시스템(Observational Processing System, OPS)의 전처리 성능이 KPOP의 전처리 성능보다 더 우월할 수 있기 때문이다. 기상청의 BUFR를 OPS가 전처리하여 기상청의 현업 수치 예보 모델에 더 최적화된 관측 자료를 도출해 낼 수도 있기 때문에, NCEP PrepBUFR를 기상청 현업 수치 예보 모델에 사용한다고 하더라도 예보 성능의 향상은 보장할 수 없다. 이를 확인하기 위해서는 두 관측 자료 그룹을 기상청, NCEP, 그리고 사업단의 수치 예보 모델의 입력 자료로서 사용하고 그 결과를 비교 분석하여 각 기관별 관측 자료 전처리 시스템의 전처리 특성 및 성능을 파악할 필요가 있다. 하지만 이는 본 연구의 주요 목적과 거리가 멀고 연구 범위를 넘어선다고 판단되어 향후 진행될 예정이다.

예보 성능 향상을 위해 NCEP에서도 본 연구와 비슷한 성격의 많은 연구가 수행되었을 것으로 짐작할 수 있다. 오랜 기간 동안 개발된 비교적 정확한 선진 기상모델의 결과를 배경장으로 사용하여 효과적인 관측 자료를 선별하기 위한 연구가 진행되었을 것이며, 그에 따른 예보 성능 분석도 수행되었을 것이다. 또한 관측 자료를 수집하고 처리하는데 있어서도 더 나은 방법과 개선된 컴퓨팅 기술을 통해 항상 최신의 관측 자료를 수집하고 이를 반영하여 예보 성능을 개선하려는 노력이 적지 않았을 것이다. 그에 반해 지금의 사업단에서는 관측 자료에 있어서 기상청에서 제공하는 현업 사용 관측 자료만을 사용하고 있으며, 관측 자료 전처리에 있어서도 배경장을 제공할 KIM의 개발 및 개선이 진행 중이며, KPOP 역시 관측종별 전처리 모듈 고도화에 대한 연구가 여전히 진행 중이라는 한계점이 있다. 다만 이러한 한계점은 시간

이 지남에 따라 많은 연구와 개발이 진행되면서 점차 극복될 것으로 예상된다.

마지막으로 본 연구를 통해 다른 기관의 자료와 비교하여 사업단 관측 자료 전처리 시스템(KPOP)의 성능과 그 현황에 대해 가늠해 볼 수 있었다. 또한 사업단의 준실시간 예보 시스템의 예보 성능을 향상시키기 위해 관측 자료 전처리는 최적의 관측 자료 선별(블랙리스트링 및 속아내기), 품질 검사 고도화, 편향 보정을 위한 결과 모니터링과 같은 업무를 지속적으로 진행할 필요성에 대해 생각해 볼 수 있는 연구였다.

감사의 글

본 연구는 기상청의 지원을 받는 한국형수치예보모델개발사업단의 연구과제를 통해 수행되었습니다.

REFERENCES

- Arnold, C. P. Jr., and C. H. Dey, 1986: Observing-Systems Simulation Experiments: Past, Present, and Future. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **67**, 687-695.
- Atlas, R., 1997: Atmospheric observations and experiments to assess their usefulness in data assimilation. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, **75**, 111-130.
- Berrisford, P., and Coauthors, 2011: The ERA-Interim archive Version 2.0. ECMWF ERA Report Series-1, 23 pp.
- Bouttier, F., and G. Kelly, 2001: Observing-system experiments in the ECMWF 4D-Var data assimilation system. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, **127**, 1469-1488.
- Choi, S.-J., and S.-Y. Hong, 2016: A global non-hydrostatic dynamical core using the spectral element method on a cubed-sphere grid. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **52**, 291-307, doi:10.1007/s13143-016-0005-0.
- _____, F. X. Giraldo, J. Kim, and S. Shin, 2014: Verification of a non-hydrostatic dynamical core using the horizontal spectral element method and vertical finite difference method: 2-D aspects. *Geosci. Model Dev.*, **7**, 2717-2731, doi:10.5194/gmd-7-2717-2014.
- Hong, S.-Y., and Coauthors, 2018: The Korean Integrated Model (KIM) system for global weather forecasting. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **54**, 267-292, doi:10.1007/s13143-018-0028-9.
- Hunt, B. R., E. J. Kostelich, and I. Szunyogh, 2007: Efficient data assimilation for spatiotemporal chaos: A local ensemble transform Kalman filter. *Physica D*, **230**, 112-126.
- Hwang, S.-O., and S.-Y. Hong, 2012: The impact of observation system on medium-range weather forecasting in a global forecast system. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **48**, 159-170, doi:10.1007/s13143-012-0016-4.
- Jo, Y., J.-S. Kang, and H. Kwon, 2015: Optimization of the vertical localization scale for GPS-RO data assimilation within KIAPS-LETKF system. *Atmosphere*, **25**, 529-541, doi:10.14191/Atmos.2015.25.3.529 (in Korean with English abstract).
- _____, S. Lim, I.-H. Kwon, and H.-J. Han, 2018: Investigation of analysis effects of ASCAT data assimilation within KIAPS-LETKF system. *Atmosphere*, **28**, 263-272, doi:10.14191/Atmos.2018.28.3.263 (in Korean with English abstract).
- Kang, J.-H., and Coauthors, 2018: Development of an observation processing package for data assimilation in KIAPS. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **54**, 303-318, doi:10.1007/s13143-018-0030-2.
- Kelly, G., J.-N. Thépaut, R. Buizza, and C. Cardinali, 2007: The value of observations. I: Data denial experiments for the Atlantic and the Pacific. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **133**, 1803-1815.
- Keyser, D., cited 2018: PREPBUFR processing at NCEP [Available online at http://www.emc.ncep.noaa.gov/mmb/data_processing/prepbufyr.doc/document.htm].
- Kim, K.-B., E.-H. Lee, and K.-H. Seol, 2017: Sensitivity of typhoon simulation to physics parameterizations in the global model. *Atmosphere*, **27**, 17-28, doi:10.14191/Atmos.2017.27.1.017 (in Korean with English abstract).
- Koo, M.-S., S. Baek, K.-H. Seol, and K. Cho, 2017: Advances in Land Modeling of KIAPS Based on The Noah Land Surface Model. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **53**, 361-373, doi:10.1007/s13143-017-0043-2.
- Kwon, I.-H., and Coauthors, 2018: Development of an operational hybrid data assimilation system at KIAPS. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **54**, 319-335, doi:10.1007/s13143-018-0029-8.
- Lee, E.-H., I.-J. Choi, K.-B. Kim, J.-H. Kang, J. Lee, E. Lee, and K.-H. Seol, 2017: Verification of the Global Numerical Weather Prediction Using SYNOP Surface Observation Data. *Atmosphere*, **27**, 235-249, doi:10.14191/Atmos.2017.27.2.235 (in Korean with English abstract).
- Lee, S., J.-H. Kim, J.-H. Kang, and H.-W. Chun, 2013: Development of pre-processing and bias correction modules for AMSU-A satellite data in the KIAPS observation processing system. *Atmosphere*, **23**, 453-470, doi:10.14191/Atmos.2013.23.4.453 (in Korean with English abstract).
- _____, S. Kim, H.-W. Chun, J.-H. Kim, and J.-H. Kang,

- 2014: Pre-processing and Bias Correction for AMSU-A Radiance Data Based on Statistical Methods. *Atmosphere*, **24**, 491-502, doi:10.14191/Atmos.2014.24.4.491 (in Korean with English abstract).
- Saarinen, S., 2004: *ODB User Guide*. ECMWF Reading UK, 289 pp [available at <https://www.ecmwf.int/sites/default/files/elibrary/2004/12074-part-i-observation-processing.pdf>].
- Schulze, G. C., 2007: Atmospheric observations and numerical weather prediction. *S. Afr. J. Sci.*, **103**, 318-323.
- Sienkiewicz, J. M., 1990: An example of the importance of ship observations. *Wea. Forecasting*, **5**, 683-687.
- Song, H.-J., and I.-H. Kwon, 2015: Spectral transformation using a cubed-sphere grid for a three-dimensional Variational data assimilation system. *Mon. Wea. Rev.*, **143**, 2581-2599, doi:10.1175/MWR-D-14-00089.1.