

KIM을 위한 지상 기반 GNSS 자료 동화 체계 개발 및 효과

한현준* · 강전호 · 권인혁

차세대수치예보모델개발사업단

(접수일: 2022년 4월 25일, 수정일: 2022년 7월 22일, 게재확정일: 2022년 8월 11일)

Development of Ground-based GNSS Data Assimilation System for KIM and their Impacts

Hyun-Jun Han*, Jeon-Ho Kang, and In-Hyuk Kwon

Korea Institute of Atmospheric Prediction Systems, Seoul, Korea

(Manuscript received 25 April 2022; revised 22 July 2022; accepted 11 August 2022)

Abstract Assimilation trials were performed using the Korea Institute of Atmospheric Prediction Systems (KIAPS) Korea Integrated Model (KIM) semi-operational forecast system to assess the impact of ground-based Global Navigation Satellite System (GNSS) Zenith Total Delay (ZTD) on forecast. To use the optimal observation in data assimilation of KIM forecast system, in this study, the ZTD observation were pre-processed. It involves the bias correction using long term background of KIM, the quality control based on background and the thinning of ZTD data. Also, to give the effect of observation directly to data assimilation, the observation operator which include non-linear model, tangent linear model, adjoint model, and jacobian code was developed and verified. As a result, impact of ZTD observation in both analysis and forecast was neutral or slightly positive on most meteorological variables, but positive on geopotential height. In addition, ZTD observations contributed to the improvement on precipitation of KIM forecast, specially over 5 mm/day precipitation intensity.

Keywords: Ground-based GNSS, Zenith Total Delay, Korean Integrated Model, Observation impact, Forecast performance

1. 서 론

대기 속의 수증기는 수송, 혼합, 응결, 강수, 증발 등과 같은 다양한 순환에 따라 변화하며 여러 기상 현상에 관여한다. 대기 과학에 있어서 더욱 정확한 기상 예보를 하기 위해서는 대기 속 수증기의 초기상태를 적절하게 모의해야 하는데, 고층 관측(SONDE)이나 지상 관측(SURFACE)을 통해 직접적으로 관측하거나 위성에 탑재된 센서를 통해 간접적으로 관측하

여 수치 예보 모델의 입력자료로 활용해 왔다. 기상 변수의 관측 기술이 발전해감에 따라 기존 관측 방식의 시공간적 해상도 제약을 극복하기 위해 대기 중 수증기 정보를 관측하는데 있어 전지구위성정보시스템(Global Positioning System, GPS)의 신호를 이용하고자 하는 노력이 시도되었다(Tralli and Lichten, 1990; Bevis et al., 1992).

전지구위성정보시스템은 위치측정, 항법, 시간측정에 사용되는 위성 체계를 지칭하며 처음에는 미국의 GPS만을 일컬었으나, 현재는 러시아의 Global Navigation Satellite System (GLONASS), 유럽의 Galileo, 중국의 Beidou를 포함하여 포괄적인 용어인 전지구항법시스템(Global Navigation Satellite System, GNSS)으로 통합되었다. GNSS 위성 신호를 이용한

*Corresponding Author: Hyun-Jun Han, Observation Processing Team, Data Assimilation Group, Korea Institute of Atmospheric Prediction Systems (KIAPS), Seoul 07071, Korea.
Phone: +82-2-6480-6411, Fax: +82-2-6919-2622
E-mail: hjhan@kiaps.org

지상에서의 대기 관측은 다음과 같은 과정을 통해 이루어진다. GNSS 위성에서 방출된 전자기적 신호는 지구의 대기를 투과하여 지구 지표면의 수신기에서 수신되고, 전자기적 신호의 이동 시간에 빛의 속력을 곱해주면 거리의 단위로 환산이 가능하여 지상 수신기의 위치를 알 수 있다. 이때 전자기적 신호의 이동 시간은 대기 구성 요소 중 특히 수증기의 영향을 받아 지연이 발생하게 되는데 이를 대류권지연(tropospheric delay)이라고 하고, 대기 과학 관점에서는 대기 수증기의 관측 자료로서 사용할 수 있게 된다. 일반적으로 지상 수신기에서 대류권지연은 실제로 전자기적 신호가 이동한 경로인 기울여진 상태로 관측되지만, 이를 그대로 관측 자료로 사용하기에는 관측 특성이 수치 예보 모델 속 자료의 처리나 자료 동화 방식과 다르고 그 방법의 구현이 어려워 여러 기상 선진국에서도 여전히 개발 중에 있다(Eresmaa et al., 2008). 최종적으로 대류권지연은 측지학적 자료 처리를 통해 지상 수신기의 천정에서 지상 수신기까지 대류권지연이 일어난다고 가정하고, 연직적으로 수증기 정보가 누적된 형태로 연직총지연(Zenith Total Delay, ZTD)이라는 관측값으로 표현된다(Bevis et al., 1992). 해수면 부근에서 평균적으로 2.3~2.5 m의 값을 가지는 지상 기반 GNSS의 ZTD 관측 자료는 관측값을 얻는데 상대적으로 많은 계산이 필요하고, 관측 오차의 산출이 어려우며, 연직 해상도가 좋지 못하다는 단점이 있다. 하지만 지상에서 단순히 수신기를 설치하는 것으로 이미 구축되어 있는 GNSS 신호를 그대로 이용할 수 있기 때문에 다른 관측 방식에 비해 적은 비용이 소요되고 장기적으로 안정적인 관측이 가능하며, 날씨에 구애받지 않고 운용 가능하다는 장점을 가지고 있다.

이러한 장점을 바탕으로 지상 기반 GNSS 관측 자료를 수치 예보 모델에 이용하고자 하는 연구가 수행되었다. Vedel et al. (2001)은 GPS로부터 산출한 ZTD 값과 SONDE 및 수치 예보 모델에서 산출한 ZTD 값을 상호 비교하였다. 그 평균 차이는 -1.6~6.0 mm 수준이었고, 서로 간의 상관관계가 매우 높게 나타나 GPS로부터 산출한 ZTD 값은 수치 예보 모델에 수증기 정보 제공이 가능한 좋은 관측으로 판단되었다. Vedel and Huang (2004)은 관측 자료를 추가하거나 제거하여 관측 자료의 영향을 평가하는 관측 시스템 실험(Observing System Experiment, OSE) 방법을 차용하여, 지역 모델에서 ZTD 관측 자료 유무에 따른 예보 성능 효과를 분석하였다. ZTD 관측 자료가 적용된 실험의 경우 실제 관측 자료에 대비하여 지위고도는 약한 개선이 있었으며, 다른 대부분의 기상 변수에 대해서는 거의 중립적인 성능을 보였다. 또, 강수 예보에 대해서 두 실험간 차이는 작았고, 다만 강

한 강수 사례에 대해서는 ZTD 관측 자료를 적용한 실험이 실제 강수의 강도나 분포를 개선하는 것으로 나타났다. 그 외 Poil et al. (2007)과 Bennitt and Jupp (2012)도 지역 모델을 이용하여 ZTD 관측 자료 수치지 예보 모델에 적용되면 지위고도, 바람, 온도, 습도 등의 기상 변수에서 최소 중립이거나 약한 예보 성능 개선을 보인다는 것을 밝혔다. Rohm et al. (2019)는 모델의 ZTD 값을 산출하는 관측 연산자를 새롭게 정의하고 ZTD 관측 자료 전처리 방법을 소개했으며, ZTD 관측 자료 동화시 24시간 이하의 단기 예보에서 상대 습도와 강수 예보 개선이 있음을 보였다.

한국형수치예보모델개발사업단에서는 육면체 격자의 비정역학 역학코어(Choi and Hong, 2016)와 hybrid sigma 연직 격자기반의 한국형수치예보모델(Korean Integrated Model, KIM; Hong et al., 2018)을 개발하였고, 이를 위하여 관측 전처리 및 품질 검사 체계 KIM Package for Observation Processing (KPOP; Kang et al., 2018)과 Local Ensemble Transform Kalman Filter (LETKF; Hunt et al., 2007)를 포함하는 Hybrid 4-Dimensional Ensemble Variational method (H4DEV; Kwon et al., 2018) 자료 동화 체계를 구축하였다. KIM은 2015년 7월 한국형수치예보모델개발사업단에서의 준실시간 예측 운영을 시작으로 2020년 4월부터 기상청 현업모델로 운영 중이다. 이와 동시에 KIM의 자료 동화 체계에 여러 관측 자료를 적용하여 예보 성능을 개선하고자 하는 연구가 수행되었지만(Lee et al., 2013, 2014; Jo et al., 2015, 2018; Kang et al., 2018; Kwon et al., 2018), 현재 지상 기반 GNSS 관측 자료는 아직 적용되어 있지 않다.

따라서 본 연구에서는 수증기 및 강수 예보에 효과가 있는 것으로 알려진 지상 기반 GNSS 관측 자료의 전처리 모듈을 개발하고 KIM의 자료 동화 체계에 지상 기반 GNSS 관측 자료를 적용하였다. 또한 지상 기반 GNSS 관측 자료 적용에 따라 KIM의 분석장 및 예보장의 성능 변화를 분석하였다.

2. 활용 체계 개발 및 실험 설계

2.1 지상 기반 GNSS 관측 자료

본 연구에서 사용되는 관측 자료는 기상청이 제공하는 Binary Universal Form for the Representation of meteorological data (BUFR) 형식의 현업 수치 예보 모델 사용 관측 자료이다. 기상청은 종관 관측 자료와 다양한 위성 관측 자료를 Global Telecommunications System (GTS)과 다른 기상 선진국 및 선진 기관 등을 통해서 수집하고 있다. 기상청에서 수집한 다양한 형태의 원시 관측 자료들은 몇 단계의 전처리 작업을 통해 BUFR 형식의 파일로 변환되고 슈퍼컴퓨터에 저

장되어 최종적으로 수치 예보 모델에 사용된다(Han et al., 2019). 기상청에서 제공하는 지상 기반 GNSS 관측 자료의 경우, GTS를 통해 입수된 전구 및 유럽 자료만 사용 가능했으나, 근래 국가기상위성센터에서 국내 자료 수집을 File Transfer Protocol (FTP) 방식에서 Network Transport of RTCM via Internet Protocol (NTRIP) 방식으로 개선하면서 국내 자료(한국천문연구원, Korea Astronomy and Space Science Institute, KASI; 국토지리정보원, National Geographic Information Institute, NGII; 국가기상위성센터, National Meteorological Satellite Center, NMSC; 국립해양측위정보원, National Maritime PNT Office, NMPT; 서울특별시, SOUL)를 1시간 또는 15분 간격으로 실시간 입수/처리하여 사용할 수 있게 되었다. 뿐만 아니라 2020년 겨울부터 일본과 중국의 자료를 추가로 입수하면서 동아시아 지역의 지상 기반 GNSS 관측 자료

를 더욱 조밀하게 사용할 수 있게 되었다.

Figure 1은 품질 검사를 하기 전 ZTD 관측값(Observed ZTD 또는 O)의 여름(2020년 6월 26일 0000 UTC)과 겨울(2020년 12월 16일 0000 UTC)의 전구 분포 및 통계값이다. 본 연구에 사용된 ZTD 관측값은 지구 전역에 분포하고 있으나, 주로 유럽과 동아시아 지역에 집중적으로 분포하며, 그 값의 크기는 대부분 2.3~2.5 m 사이의 값을 가진다. 여름과 겨울 동아시아 지역의 관측 분포 차이는 기상청의 중국 ZTD 관측값 수집 시작 시점이 2020년 겨울이기 때문에 나타나는 차이이다. ZTD 관측값은 연직건조지연량(Zenith Hydrostatic Delay 또는 Zenith Dry Delay, ZHD)과 연직습윤지연량(Zenith Wet Delay, ZWD)의 합으로 나타낼 수 있다(Bevis et al., 1992). 이중 ZHD는 90%로 ZTD의 대부분을 차지하고, 건조 공기가 정역학적 평행상태에 있기 때문에 지상 관측만으로도 정확한 계산이 가능하다. 반면, ZWD는 ZHD에 비해 10% 정도로 매우 작은 편이지만, 지상 관측만으로는 정확한 결정이 어렵고, 대기 속의 수증기가 많을수록 더 큰 지연을 보이는 특성을 가진다. 이러한 ZTD 관측 특성에 따라 고위도 지역이나 관측 고도가 높은 지역보다 상대적으로 수증기가 많은 저위도 지역이나 관측 고도가 낮은 지역에서 더 큰 ZTD 관측값을 보인다.

2.2 관측 연산자의 개발 및 검증

ZTD 관측값은 수치 예보 모델에 사용하는 기상 변수가 아니기 때문에 ZTD 관측값을 직접적으로 자료 동화에 반영하기 위해서는 관측 연산자가 필요하다. 이는 주어진 관측 지점에서 모델 추정 대기장값에 의해 정의되는 배경값을 계산하는 비선형 모델(nonlinear model, NLM 또는 forward model)과 NLM을 기반으로 접선선형모델(tangent linear model, TLM) 및 수반 모델(adjoint model, ADM)을 개발하여 자료 동화 과정에서 관측값에 따른 자료 동화의 효과를 모델의 기상 변수에 전달해주기 위한 자코비안(jacobian)을 계산하는 모델로 구성된다. 위성 복사 자료 동화를 위한 관측 연산자에는 복사전달모델 Radiative Transfer for TOVS (RTTOV, Saunders et al., 1999)나, Global Navigation Satellite System Radio Occultation (GNSSRO) 자료 동화를 위한 Radio Occultation Processing Package (ROPP, Culverwell et al., 2015) 등의 관측 연산자 패키지가 공개되어 있으나, ZTD 관측값에 대한 관측 연산자는 공개된 패키지가 없기 때문에 본 연구에서는 NLM을 비롯하여 TLM과 ADM을 개발하여 ZTD 관측값을 위한 관측 연산자를 직접 개발하였다.

가장 먼저 배경장의 ZTD 값(Background ZTD 또는 B)을 계산하는 NLM은 Rohm et al. (2019)이 제안한 ZTD 계산식을 차용하여 개발하였다:

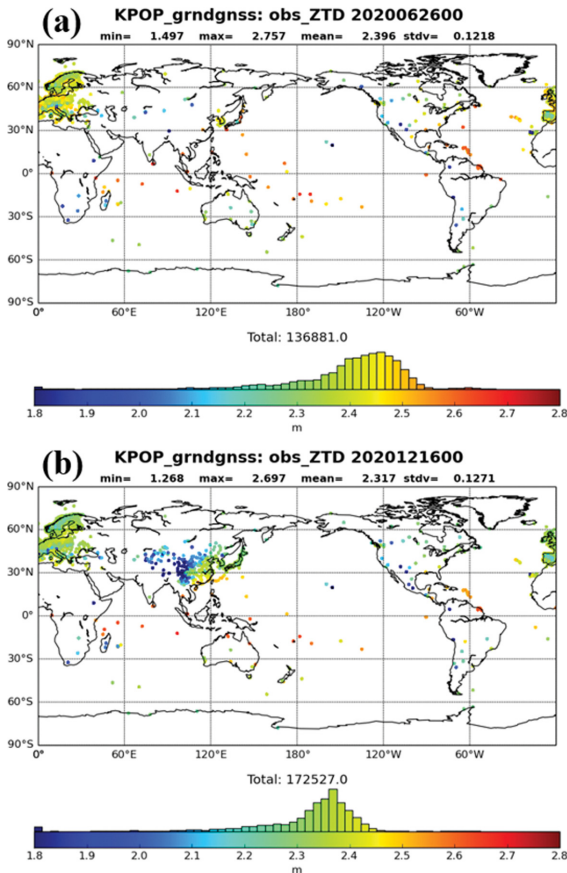


Fig. 1. Global distribution of ZTD and its statistics before KPOP processing for (a) summer (2020.06.26 0000 UTC) and (b) winter (2020.12.16 0000 UTC). The histogram shows the cumulative number of observations based on ZTD.

$$ZHD = \frac{0.0022767p_s}{1 - 0.00266\cos(2\varphi) - 0.00000029h'} \quad (1)$$

$$ZWD = \sum_{k=kts}^{k=kre} \left(\frac{wdk_1 p(i, j, k) q(i, j, k)}{t(i, j, k)} + \frac{wdk_3 p(i, j, k) q(i, j, k)}{t^2(i, j, k)} \right) \frac{\Delta h}{a_{ew}}, \quad (2)$$

$$ZTD = ZHD + ZWD. \quad (3)$$

여기서 식(1)의 p_s 는 지상 관측 지점의 지면 기압 [hPa], φ 는 위도, h 는 고도[m]이고, 식(2)의 i, j, k 는 각각 동서, 남북, 연직 방향의 모델 격자 좌표, p 는 기압[Pa], q 는 비습[kg kg⁻¹], t 는 기온[K], Δh 는 이웃하는 두 모델층 고도의 차이[m], $a_{ew} = 0.622$ (건조공기분압/수증기분압), $wdk_1 = 2.21 \times 10^{-7}$ [K Pa⁻¹], $wdk_3 = 3.73 \times 10^{-3}$ [K² Pa⁻¹]으로 상수이다. 개발된 NLM을 통해 모델 공간에서의 관측값, 즉 배경장의 ZTD 값을 계산할 수 있고 관측 자료의 전처리 과정에서 실제 관측된 ZTD 값과 비교할 수 있게 되었다.

배경장의 ZTD 값을 계산하였더라도 자료 동화의 최소화 과정에서 ZTD 관측값의 영향을 모델에 전달하기 위해서는 개발된 NLM을 기반으로 TLM과 ADM을 개발하고(Vedel and Huang, 2004; Poil et al., 2007; Bennitt and Jupp, 2012; Rohm et al., 2019), 개발된 모델들을 바탕으로 자코비안 계산 모델을 개발해야 한다. 본 연구에서는 기존에 널리 알려진 TLM과 ADM의 기본 이론을 바탕으로 Chrust (2020)가 제안한 프랑스 기상청(Météo-France)이나 유럽중기예보센터(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)의 TLM과 ADM 코딩 규칙을 차용하여 개발하였다. 개발된 TLM과 ADM에 대한 검증은 Chrust (2020)가 제안한 방법을 사용하였다.

x 와 δx 를 각각 벡터 형식의 NLM 입력자료, 벡터 형식의 TLM 입력자료로 정의하고, NLM을 기반으로 개발된 TLM을 검증하는 방법은 Linear test와 Taylor test 두 가지가 있다. 첫번째로 Linear test는 식(4)와 같이 TLM의 결과에 섭동을 곱하거나 TLM의 입력자료에 섭동을 곱하더라도 그 결과 차이는 없어야 한다는 것이다.

$$\lambda \times TLM(\delta x) = TLM(\lambda \times \delta x) \quad (4)$$

만약 결과의 차이가 있더라도 배정밀도(double precision)로 TLM이 코딩되어 있는 경우, 그 차이는 10^{-12} 보다 작아야 한다. 여기서 λ 는 임의의 섭동(0.1~0.00000001) 값이다. 개발된 TLM은 배정밀도로 코딩되어 있고 Linear test 결과, 그 차이가 10^{-16} 이하로 나타났다. 두 번째로 Taylor test는 식(5)와 같이 섭동이 고려된 입력자료의 변화에 따른 NLM의 결과 차이를 TLM에서

잘 계산할 수 있어야 한다는 것이고, 식(5)의 λ 가 작아지더라도 결과는 항상 1.0이 되어야 한다.

$$\lim_{\lambda \rightarrow 0} \frac{NLM(x + \lambda \cdot \delta x) - NLM(x)}{TLM(\lambda \cdot \delta x)} \quad (5)$$

개발된 TLM의 Taylor test 결과, λ 가 0.1에서 0.00000001까지 작아지더라도 식(5)의 결과는 1.0으로 나타났다. 앞선 Linear test와 Taylor test의 결과가 모두 허용치 이내의 결과값을 보여 본 연구에서 개발된 TLM은 잘 개발되었다고 판단하였다.

δy 를 벡터 형식의 ADM 입력자료로 정의하고, 기개발된 TLM을 기반으로 개발된 ADM을 검증하는 방법은 Adjoint identity test가 있다. 이는 식(6)과 같이 TLM의 모든 입력자료와 ADM의 모든 입력자료에 대해 TLM 결과와 ADM 입력자료의 내적은 TLM 입력자료와 ADM 결과의 내적과 같아야 한다는 것이며, 두 내적 간의 비율은 1.0이 되어야 한다.

$$\langle TLM(\delta x), \delta y \rangle = \langle \delta x, ADM(\delta y) \rangle \quad (6)$$

개발된 ADM의 Adjoint identity test 결과, 두 내적 간의 비율이 1.0으로 나타나 본 연구에서 개발된 ADM은 잘 개발되었다고 판단하였다.

마지막으로 자코비안을 위한 모델은 관측 자료의 채널 유무에 따라 기개발된 ADM 프로그램에 채널에 대한 배열을 추가하는 작업으로 개발할 수 있지만, 지상 기반 GNSS는 채널이 없는 관측 자료이므로 ADM 그대로 자코비안 모델을 대신할 수 있다(Kleespies, 2006). 따라서 앞선 과정들을 통해 얻어진 ADM을 자코비안 모델로 그대로 사용하고 그 결과물인 ZTD 관측값에 대한 기온(T)와 습도(q) 자코비안을 살펴보았다. 이때 자코비안을 계산하기 위한 입력값 ztd_k는 ZTD 관측값의 전구 분포에 대한 표준편차 근사값인 +0.1 m로 정하였다. 2020년 6월 26일 0000 UTC 모든 관측 지점에서 산출된 T와 q 자코비안을 연직으로 누적하여 그려보면 Fig. 2와 같다. 정의된 ztd_k 값에 대한 ZTD 관측값의 연직 T 자코비안은 음의 값을, 연직 q 자코비안은 양의 값을 보였다. 이는 ZTD 관측값의 관측 증분(O-B innovation)이 자료 동화 과정에서 양의 값을 갖는 경우, 수치 예보 모델 초기장의 ZTD 관측 지점에서 연직 T는 감소시키고 연직 q는 증가시키게 됨을 의미한다. 또, 연직 T 자코비안 값이 연직 q 자코비안 값에 비해 매우 작기 때문에, 수치 예보 모델 초기장에 대한 T의 민감도가 q의 민감도에 비해 매우 작을 것이다.

2.3 관측 자료 전처리

최적의 관측 자료를 자료 동화 과정에 제공하기 위해서 ZTD 관측 자료들은 크게 편향 보정, 품질 검사,

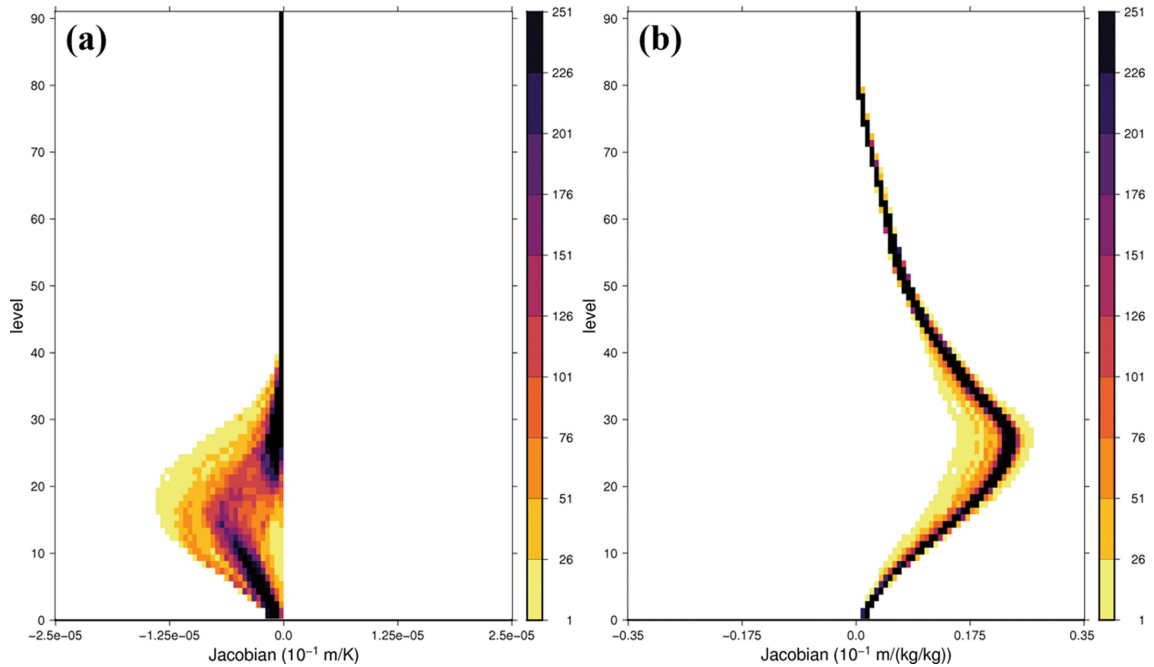


Fig. 2. Jacobian profile value and its count at each model level for (a) T and (b) q (2020.06.26. 0000 UTC). Value of ztd_k to calculate jacobian for T and q was +0.1 m.

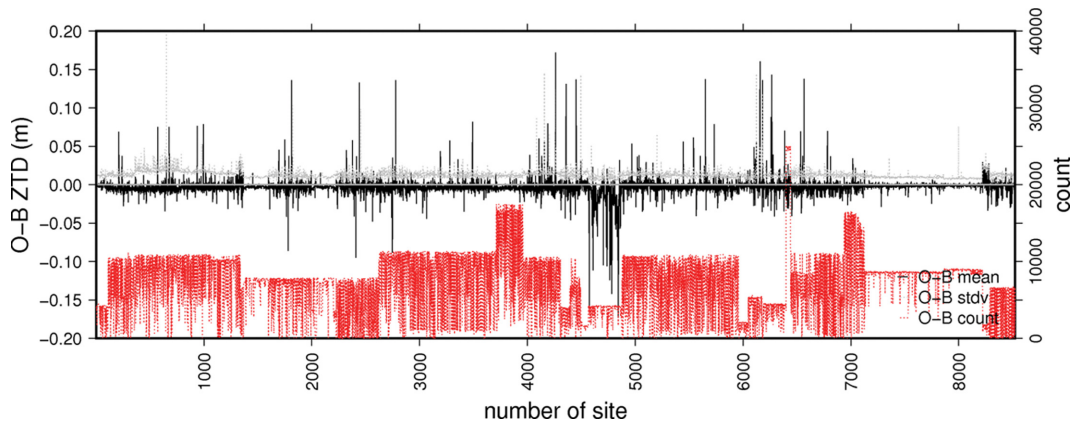


Fig. 3. O-B ZTD statistics for each site and production institute based on long-term background (2020.06.26 0600 UTC~2020.08.12 1200 UTC, 2020.12.15 1800 UTC~2021.02.01 0000 UTC). Each line means average (black solid line), standard deviation (gray dot line), and count (red dot line) of O-B ZTD.

슈아내기 과정을 거치게 된다.

수치 모델의 지형은 실제와 다르기 때문에 지표면에서 관측된 ZTD와 배경장으로부터 구한 배경장 ZTD를 비교하기 위해서 ZTD 관측값에 대한 고도 보정이 필요하다. 첫번째로 ZTD 관측이 모델의 지면 고도에서 이루어졌다는 가정하에 ZTD 고도 보정을 수행하였다. 고도 변화에 따른 ZTD 관측값 변화 상관관계

를 살펴보기 위해 2020년 6월 26일 0000 UTC를 기준으로 지상 관측 고도와 모델 지면 고도의 차이 대비 O-B ZTD 값의 회귀계수를 구해보았다. 이때 산출된 회귀계수는 0.0003이었고, R² 값은 0.9로 높게 나타났다(그림 생략). 또 산출된 회귀계수는 여름 및 겨울 사례에서도 일관되게 계산되었다. 회귀 계수를 통해 지상 관측 고도와 모델 지면 고도 차이가 +1 m

라면, ZTD 관측값은 0.0003 m씩 감소하는 관계가 있음을 알 수 있었고, 이러한 관계를 감률(lapse rate)로 정의하여, 모든 관측 지점별로 지상 관측 고도와 모델 지형 고도 차이에 따른 ZTD 관측값 고도 보정을 수행하였다. 두번째로 개별 지점에서 가지고 있는 편향을 제거하였다. 이를 위해 각 지점의 장기간 O-B ZTD 평균값을 편향 보정 계수로 사용하는 많은 선행 연구의 방법을 사용하였다(Poil et al., 2007; Bennitt and Jupp, 2012, Bennitt et al., 2017, Rohm et al., 2019, Hdidou et al., 2020). Figure 3은 각 관측 지점 및 자료 생산 기관별 여름(2020년 6월 26일 0600 UTC~2020년 8월 12일 1200 UTC)과 겨울(2020년 12월 15일 1800 UTC~2021년 2월 1일 0000 UTC)의 O-B ZTD 통계값을 나타낸 것이다. 이 중 O-B ZTD의 평균값(Fig. 3 검은색 실선)을 편향 보정을 위한 계수로 사용하였다. 하지만 이 계수를 그대로 적용하기에는 너무 큰 편향 보정 계수값들이 포함되어 있다. 과대 편향 보정을 피하기 위해 편향 보정 계수값들의 평균(-0.003118282)과 표준편차(0.0125)를 구하고, 편향 보정 계수값의 평균 기준 표준편차의 2배 범위 안에 들어오는 경우(-0.028118282~0.021881718)에만 편향 보정하고 나머지 자료들은 제거하였다. 추가적으로 편향 보정 계수를 구하는데 있어 샘플 자료의 표준편차가 0.03보다 크거나 개수가 100개 보다 작은 경우, 산출된 편향 보정 계수의 대표성을 장담할 수 없는 것으로 판단해서 제거하였다. 앞서 설명한 방법으로 고도 보정과 각 지점별 편향 보정을 완료한 ZTD 값(Corrected ZTD 또는 C)를 산출하였다.

ZTD 관측값의 고도 및 편향 보정을 수행한 이후에도 지상 관측 고도와 모델 지면 고도의 차이가 너무 크거나 C-B ZTD 값이 너무 큰 자료의 경우, 자료 동화 과정에서 악영향을 줄 수 있기 때문에 이러한 자료를 제거하는 추가 품질 검사를 수행하였다. 첫번째로 지상 관측 고도와 모델 지면 고도의 차이의 절대값이 Bennitt et al. (2017)이 제안한 300 m 보다 크면 제거하였다. 고도의 차이가 큰 경우, 이미 과도한 고도 보정이 수행되었을 수 있고, 관측 연산자에서도 좋은 결과를 줄 것이라는 기대를 하기 어렵기 때문이다. 두번째로 C-B ZTD의 절대값이 0.1 m 보다 큰 자료를 제거하였는데, 이는 Bennitt and Jupp (2012)이 제안한 장기간 O-B ZTD 표준편차 3배수의 근사값에 해당한다.

많은 수의 관측 자료를 한꺼번에 동화하면 계산 비용이 많이 증가할 뿐만 아니라 관측 오차의 상관성이 증가하게 된다. ZTD 관측 자료의 경우 Fig. 1에서 보인 바와 같이 유럽이나 동아시아 지역에서 공간적으로 서로 조밀하게 위치하고 있고, 시간 해상도가 높아 시공간적 슈아내기를 적용할 필요가 있다. 공간 슈

아내기의 경우, 위도별 고른 관측 자료 분포를 위해 Kang et al. (2018)이 제안한 등거리 슈아내기 격자(equidistance thinning grid box)를 사용하였고, 그 격자의 크기는 2.0°로 적용하였다. 또 시간 슈아내기의 경우, 분석시간(0000, 0600, 1200, 1800 UTC) 기준 -3.5시간에서 +3.5시간까지의 자료 동화 시간대에 대해 각 지점에서 매 정시에 가장 가까운 한 개의 자료만을 사용하도록 하였다.

2.4 자료 동화 순환예측 실험 설계

지상 기반 ZTD 관측의 자료동화 효과를 분석하기 위하여 KIM 기반 수치 예보 모델(Hong et al., 2018)을 이용하였다. 관측 자료 전처리 시스템인 KPOP은 현업 수치 예보 모델에 사용되는 관측 자료를 읽어 들여 각각의 관측종에 맞춰진 전처리 방법에 따라 관측 자료를 처리한다(Kang et al., 2018). 자료 동화는 3차원 변분 자료 동화에 기반하여 LETKF 기법을 조합한 H4DEV (Kwon et al., 2018)를 사용하고, 1시간 간격의 배경장을 사용하여 분석장을 만든다. 전지구 수치 예보 모델로서 KIM은 자료 동화 과정에서 만들어진 분석장을 바탕으로 5일까지 예측장을 예보한다.

KIM 기반 수치 예보 모델에서 ZTD 관측 자료의 효과를 살펴보기 위해 ZTD 활용에 따라 두 가지 실험을 수행하였다. 기상청 현업 관측 자료를 활용한 실험을 CTL이라 하고, CTL 실험에 ZTD 관측 자료 활용을 추가한 실험을 EXP라 하였다. 이때 사용되는 KIM은 KIM3.6a를 사용하였고, 매일 0000 UTC와 1200 UTC마다 약 25 km의 수평해상도를 가진 5일 예측장을 산출하도록 수행하였다. 두 예보 실험은 2020년 6월 26일 0000 UTC를 초기 시간으로 하고 2020년 7월 31일 1800 UTC를 종료 시간으로 하여 약 36일 동안 수행하였다.

본 연구에서는 지상 기반 ZTD 관측 자료의 효과를 분석하고 검증하기 위해 ECMWF의 분석장(Integrated Forecasting System, IFS)을 참값이라 가정하였다.

3. 결 과

3.1 분석장에서의 효과 분석

가장 먼저, 배경장이 서로 같은 예보 실험 수행 첫날, 각각 두 실험에서 생산한 분석 증분을 비교하여, 지상 기반 GNSS 관측 자료가 잘 동화되었는지, 모델의 초기장에 어떤 영향을 미치는지 살펴보았다. Figure 4a는 예보 실험 수행 첫날 두 실험의 850 hPa 전구 q 분석 증분의 차이이고, Fig. 4b와 4c는 Fig. 4a에 대해 각각 유럽과 동아시아 지역의 확대 그림이다. 그림에서 붉은색으로 나타난 부분은 CTL에 비해 EXP가 더 큰 q 분석 증분을 보인 지역을 나타내며, 결국, CTL

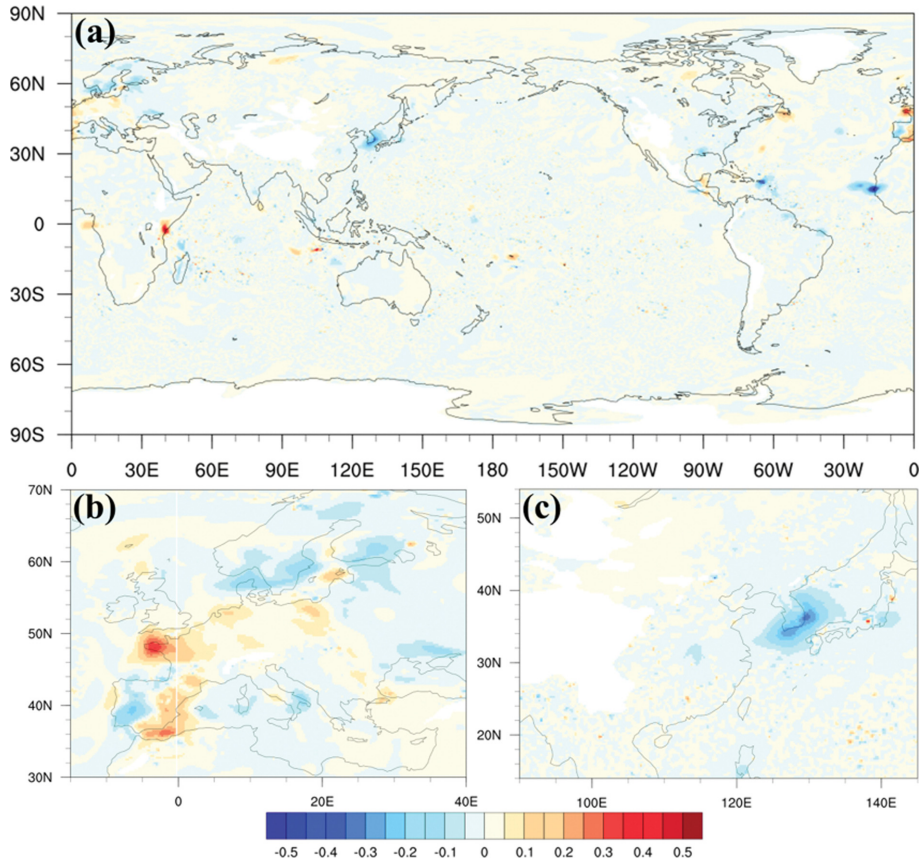


Fig. 4. Analysis increment difference (EXP-CTL) of q at 850 hPa for (a) Global, (b) Europe, and (c) East Asia (2020.06.26 0000 UTC).

대비 지상 기반 GNSS 관측 자료의 자료 동화률 더 많은 수증기를 분석한 지역을 의미한다. Figure 1a의 ZTD 관측 자료가 위치한 지역과 동일한 지역에서 분석 증분의 차이가 크게 나타나는 것으로 보아, 지상 기반 GNSS 관측 자료는 그 효과가 잘 동화되었음을 알 수 있다. 많은 관측 자료가 위치해 있던 유럽과 동아시아의 경우, 그와 마찬가지로 유럽과 동아시아 지역에서 상대적으로 큰 분석 증분의 차이를 보인다(Fig. 4b and 4c). 이러한 분석 증분의 차이는 T의 경우 모든 고도에서 거의 나타나지 않았고(그림 생략), q 의 경우 연직 q 자코비안의 최대값이 나타나는 고도에 해당하는 850 hPa 부근에서 가장 크게 나타났다(Fig. 2 참고). 모의 실험 첫날, 그리고 이후 실험이 진행되면서 나타날 지상 기반 GNSS 관측 자료로 인한 분석 증분의 차이가 수치 예보 모델의 결과에 긍정적인 효과를 주는지는 예보 실험이 종료된 후 분석장과 예보장을 비교 분석하여 알 수 있다.

예보 실험들은 배경장으로부터 시작하여 관측 자료

를 바탕으로 자료 동화가 이뤄지고 모델의 분석장을 만들게 되는데, 이때 본 연구에서는 IFS 분석장을 참으로 가정하고 두 실험의 배경장과 분석장의 평균제곱근편차(root-mean-square difference, RMSD)값을 계산하여 지상 기반 GNSS 관측 자료가 분석장에 어떠한 영향을 미치는지 살펴보았다.

Figure 5는 IFS 분석장과 두 예보 실험 분석장과 1000 hPa에서 10 hPa까지의 동서 바람(u), 남북 바람(v), 지상 기압(Ps), 기온(T), 습도(q), 및 지위고도(HGT)의 전구 평균 RMSD 시계열이다. RMSD 값이 작을수록 예보 실험에서의 분석장은 IFS와 더 가깝게 모의되었다는 것을 의미하며, 결국 RMSD 값이 더 작은 예보 실험이 더 좋은 분석장을 만들어 냈다는 것을 의미한다. 모든 기상 변수에서 CTL과 EXP의 RMSD 값은 큰 차이를 보이지 않았는데, 이는 지상 기반 GNSS 관측 자료가 동화되더라도 수치 예보 실험의 분석장에 큰 영향을 미치지 않는다는 것을 의미한다. 이를 정량적으로 살펴보기 위해 실험 기간 동안 각

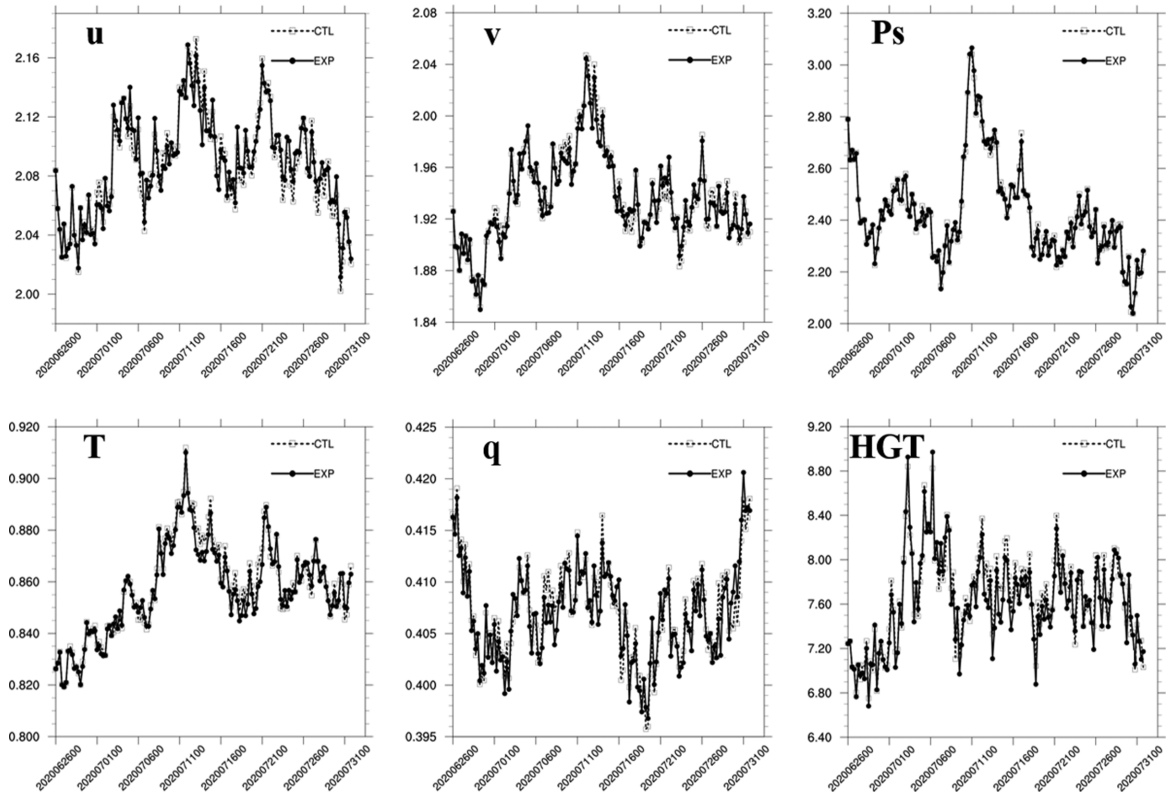


Fig. 5. Global mean (vertically 1000~10 hPa) RMSD of analysis against IFS for u, v, Ps, T, q, and HGT during 36 day (from 2020.06.26 0000 UTC to 2020.07.31 1800 UTC).

기상 변수별 RMSD의 평균과 CTL 대비 EXP의 개선율을 살펴보면 Table 1과 같다. Figure 5의 그림에서 보였던 것처럼 두 실험간 각 기상 변수별 평균 RMSD

Table 1. The mean RMSD of experiments and the improvement rate of EXP relative to CTL during 36 days (from 2020.06.26 0000 UTC to 2020.07.31 1800 UTC).

	CTL	EXP	
Mean RMSD	u [$m s^{-1}$]	2.08703	2.08811
	v [$m s^{-1}$]	1.93695	1.93611
	T [K]	0.85822	0.85702
	q [g/kg]	0.40716	0.40691
	Ps [Pa]	2.42965	2.42826
	HGT [m]	7.65979	7.61937
Improvement rate relative to CTL	u [%]	-	-0.05100
	v [%]	-	0.04300
	T [%]	-	0.13900
	q [%]	-	0.06100
	Ps [%]	-	0.05700
	HGT [%]	-	0.52700

의 차이는 작았지만, CTL 대비 EXP의 개선률을 살펴보면 u를 제외한 대부분의 기상 변수에서 양의 값이 나타났고, 특히 HGT의 개선률이 0.527%로 가장 크게 나타났다. 이러한 결과는 지상 기반 GNSS 관측 자료가 동화되었을때 수치 예보 모델의 분석장에 미치는 영향이 전혀 없는 것이 아니고, 비록 큰 개선은 없지만 HGT의 약한 개선을 비롯하여 다른 기상 변수에도 약하지만 긍정적인 영향을 준다는 것을 알 수 있다.

앞선 분석을 연직 고도별로 살펴보기 위해 전체 실험 기간에 대해 IFS의 분석장과 예보 실험들 분석장과의 전구 수평 평균 연직 RMSD를 계산하고, 이에 대한 CTL 실험과 EXP 실험의 차이를 분석하였다(Fig. 6). Figure 6에서 파란색으로 나타난 부분이 EXP 실험이 CTL 실험보다 더 작은 RMSD 값을 보인 부분이고, 이는 EXP 실험의 분석장이 CTL 분석장 보다 IFS 분석장과 유사하여 더 나은 분석장 성능을 보였다는 것을 의미한다. 예보 실험 기간 동안 u, v에 대해서는 눈에 띄지 않는 두 실험간의 차이가 없어 해당 기상 변수에 대해서 지상 기반 GNSS 관측 자료는 분

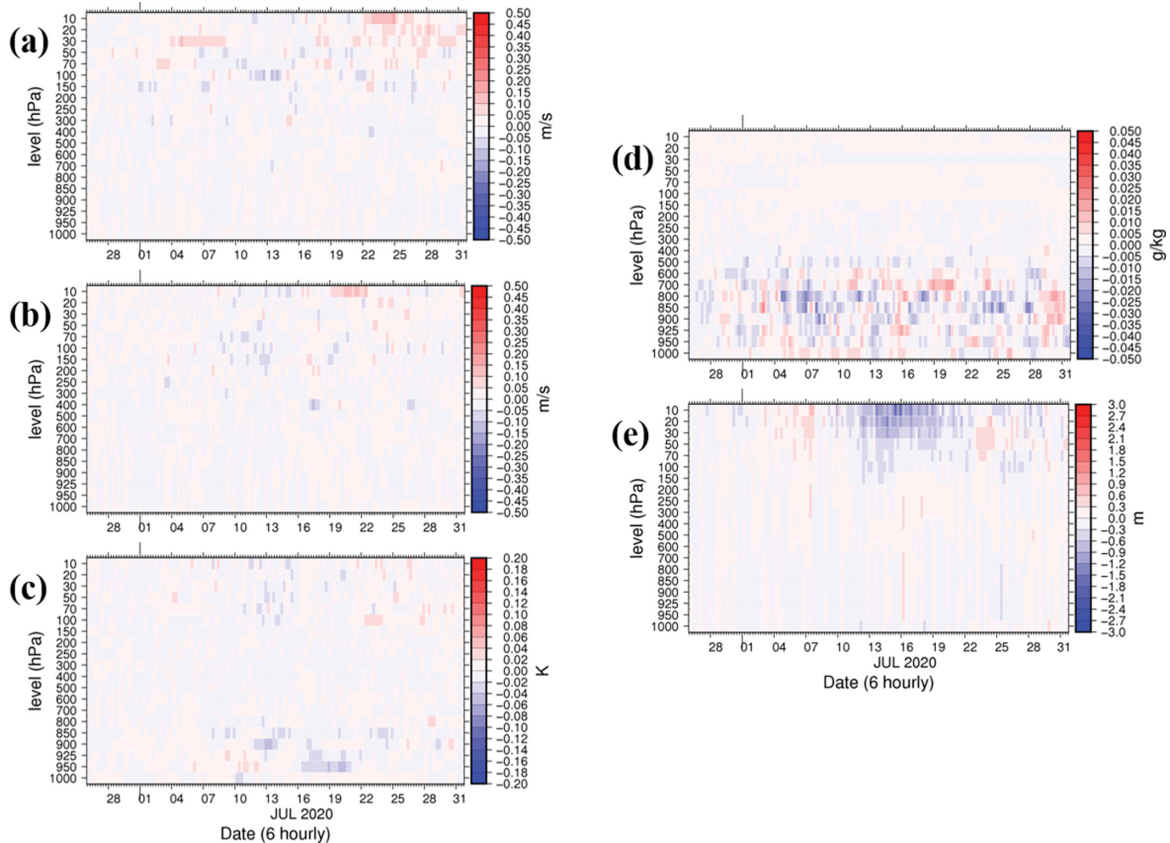


Fig. 6. Vertical RMSD difference between CTL and EXP of analysis against IFS for (a) u, (b) v, (c) T, (d) q and (e) HGT. Blue color means that EXP shows better analysis performance than CTL.

석장에 큰 영향을 주지 않았음을 알 수 있다(Fig. 6a, and 6b). 기온 T의 경우, 실험 중반(2020년 7월 13일부터 20일까지)에 대기 하층에서 지상 기반 GNSS 관측 자료로 인한 긍정적인 영향이 보인다. 습도 q의 경우, 예보 실험이 수행되는 모든 기간에 대해 500 hPa 이하 대기의 중하층에 긍정적인 영향과 부정적인 영향이 혼재되어 나타난다. 이는 지상 기반 GNSS 관측 자료가 지표면에 위치한 관측 자료이며 Fig. 2b로 살펴본 것과 같이 ZTD 자코비안의 q 영향이 모델의 중하층에 집중되기 때문이다. 상대적으로 큰 개선을 보였던 HGT의 경우, 예보 실험의 중반에 100 hPa 이상의 대기 상층에서 큰 개선이 있었음을 알 수 있다.

이를 다시 위도에 따라 연속적으로 지상 기반 GNSS 관측 자료의 효과를 분석해 보았다. Figure 7은 IFS 분석장 대비 시간 평균 전구 수평 평균 CTL과 EXP의 연직 RMSD 차이이다. Figure 7에서 파란색 부분은 EXP 실험이 CTL 실험의 RMSD 값보다 작아 더 나은 분석장 성능을 보였다는 것을 의미하며, 검은색 점은 신뢰도 구간이 95% 이상인 부분을 표시한 것이

다. 앞의 분석 결과들과 일관되게 u, v에서는 지상 기반 GNSS 관측 자료의 영향이 거의 없는 것을 볼 수 있다(Fig. 7a, and 7b). 기온 T의 경우 Fig. 6c의 실험 중반 대기 하층에서 나타났던 긍정적인 영향은 주로 북극과 남극 주변에서 나타남을 확인할 수 있다. 습도 q 분석 결과를 살펴보면(Fig. 7d), 북반구에 많이 위치하고 대기 중하층에 수증기 정보를 주는 지상 기반 GNSS 관측 자료의 영향이 분석장에 그대로 나타나는 것을 볼 수 있다. 다만 긍정적인 부분과 부정적인 부분이 혼재되어 나타나 거의 중립적인 효과를 나타내고 있다. 지위고도 HGT의 경우, 이전 분석에서 지속적으로 나타난 100 hPa 이상 상층에서의 분석장 성능 개선은 주로 북반구와 남반구의 고위도 상층에서 나타났다. 이 부분은 지상 기반 GNSS로 인한 북반구 하층 q의 약한 개선(Fig. 7d의 40°N-70°N)과 북극 주변 HGT 개선이 북반구 상층에 긍정적인 영향을 주었고 그 효과가 KIM의 배경오차공분산 특성으로 남반구까지 효과를 준 사례로 판단되었다. ZTD 동화로 인한 상층 HGT 개선은 Vedel and Huang (2004)

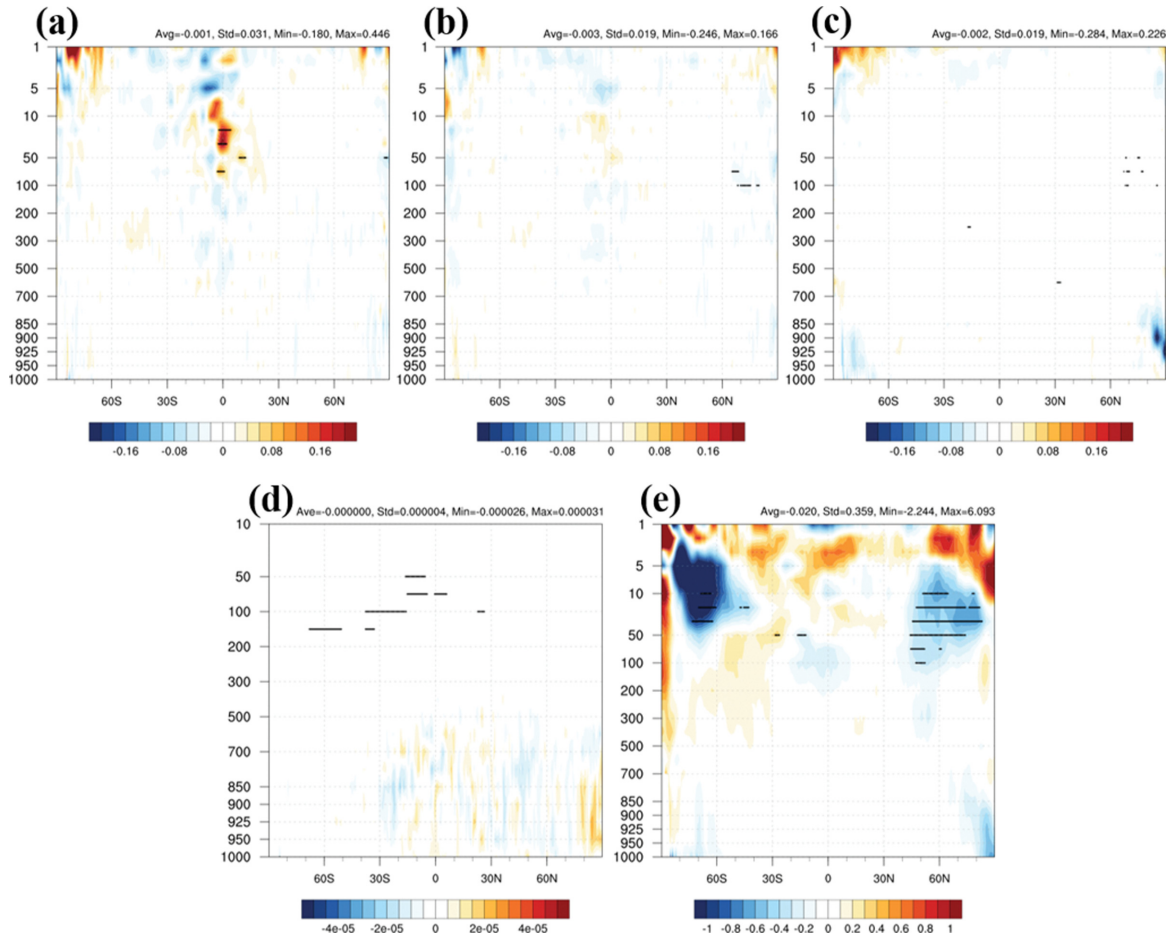


Fig. 7. Time averaged zonal mean vertical RMSD difference of analysis between CTL and EXP against IFS for (a) u , (b) v , (c) T , (d) q , and (e) HGT. Blue color means that EXP shows better analysis performance than CTL. Block dot illustrates a confidence level that is greater than or equal to 95 %.

및 Poil et al. (2007)의 결과와 유사했으며, Vedel and Huang (2004)에 따르면 그 원인을 이해하기 어렵지만, 분석 체계에서 자료 동화의 다양한 변수 특성과 대기의 여러 물리적 특성을 통해 관측 지점 부근의 다른 변수를 개선할 수도 있다고 서술하였다. 결국, 본 연구에서는 지상 기반 GNSS 관측 자료의 간접적인 효과로 대기 상층의 HGT 성능 개선이 나타난 것으로 판단하였다.

3.2 예보장에서의 효과 분석

지상 기반 GNSS 관측 자료의 적용에 따른 수치 예보 모델의 예보 성능을 분석하고자 수행된 예보 실험들의 예보장 검증을 수행했다. 예보장 검증을 하는데 있어 IFS 모델과 KIM 모델이 서로 다르기 때문에 기인되는 검증과정에서의 예보장 성능 해석의 어려움을

배제하고자 자기분석장 대비 예보 검증을 수행하였고, 예보 실험들의 예보장 자체 성능을 정량적으로 검증해보고자 IFS 분석장 대비 예보 검증을 수행하였다. 뿐만 아니라 Climate Prediction Center (CPC)의 전구 일 강수 분석장(Xie et al., 2010)과 같은 강수 자료에 대해서도 예보 실험들의 강수 예보 검증을 수행하여 지상 기반 GNSS 관측 자료가 수치 예보 모델의 강수 예보에 미치는 영향을 분석하였다.

예보장 검증에 있어서 지역 구분은 World Meteorological Organization (WMO)에서 제안한 검증영역을 사용하였고, 다음과 같이 주로 5가지 지역에 집중하여 검증하였다(Northern Hemisphere, NH, 20°-90°N; Southern Hemisphere, SH, 20°-90°S; Tropics, TR, 20°S-20°N; Asia, 60°-145°E, 25°-65°N; Europe, EU, 10°W-28°E, 25°-70°N).

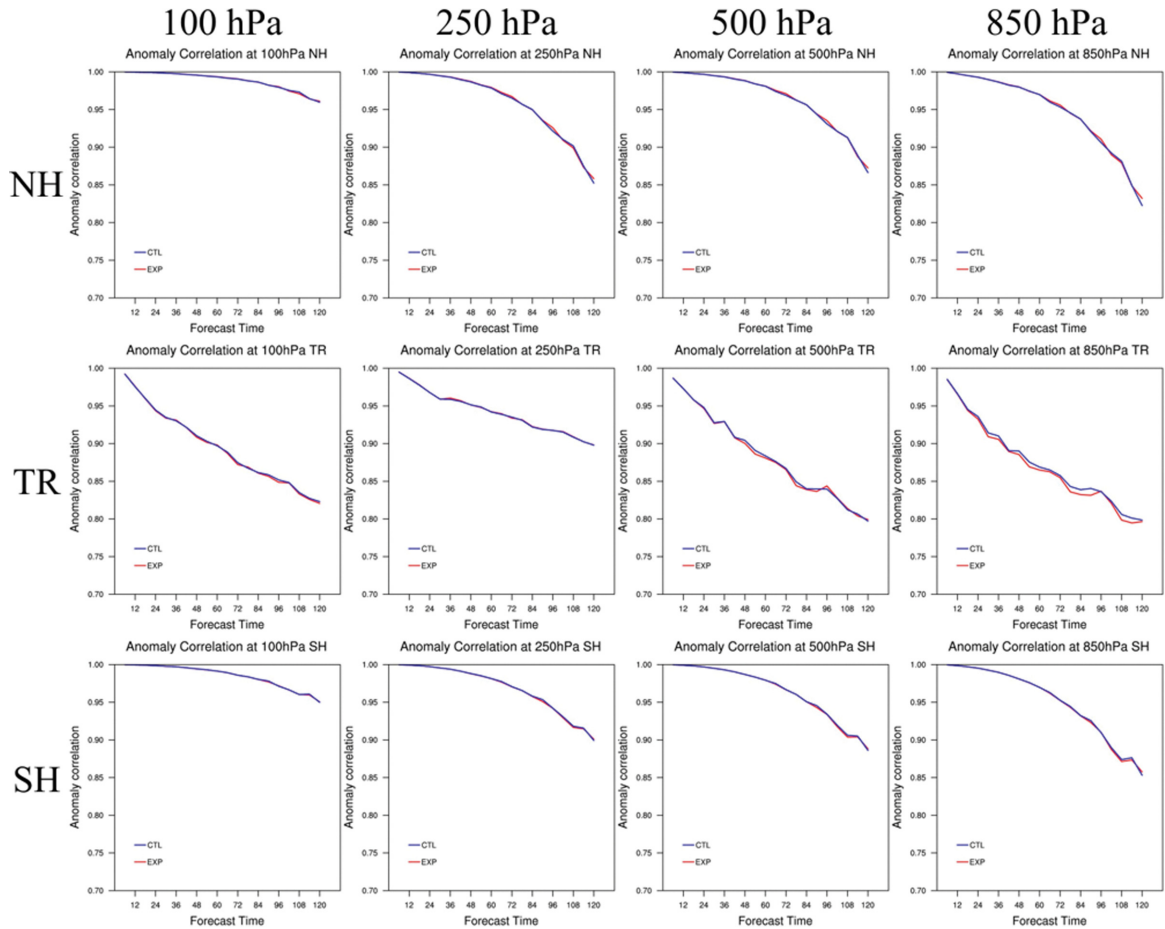


Fig. 8. Mean anomaly correlation of the CTL and EXP against its own analysis for HGT over NH, TR, and SH at each level (100 hPa, 250 hPa, 500 hPa and 850 hPa) based on 0000 UTC.

지상 기반 GNSS 관측 자료 적용에 따른 수치 예보 모델의 예보 성능을 가늠하고자 예측 시간에 따른 자기 분석장 대비 이상 상관 계수와 RMSD 값을 분석해 보았다. Figure 8은 각 지역별(NH, TR, SH) 고도별(100 hPa, 250 hPa, 500 hPa, 850 hPa) 0000 UTC 기준 HGT의 자기 분석장 대비 예측 시간에 따른 CTL (푸른색 실선)과 EXP(붉은색 실선)의 이상 상관 계수이다. Figure 8을 살펴보면 열대 지방 중하층을 제외하고 예측 시간에 따른 두 예보 실험의 HGT 이상 상관 계수 차이는 거의 나타나지 않는다. 또 같은 분석을 1200 UTC 기준으로 했을 경우, 다른 기상 변수(T와 해면기압)를 분석했을 경우, 이상 상관 계수뿐만 아니라 RMSD 값의 결과를 살펴보아도, 자기 분석장 대비 두 실험의 이상 상관 계수 및 RMSD 차이는 거의 나타나지 않는다(그림 생략). 이는 지상 기반 GNSS 관측 자료가 동화되어도 동화되기 전 수치 예보 모델

의 예측 성과와 큰 차이가 없다는 것을 의미한다. 0000 UTC 및 1200 UTC 기준, 지역별 자기 분석장 대비 주요 기상 변수의 RMSD 차이를 살펴보면 Table 2와 같다. Table 2의 결과 해석에 앞서 Table 2의 유의성 검사를 해본 결과, 0000 UTC와 1200 UTC 모두 북반구 및 아시아 지역에서 예측 시간이 길어질수록 유의성이 낮은 결과를 보여 72 h 이하 단기 예측 성능에 대해서만 결과 해석을 하였다(그림 생략). Table 2에서 음의 값은 EXP가 CTL 보다 더 작은 RMSD 값을 보여 예보장이 자기 분석장에 더 가깝게 모의되었다는 것을 의미하며, 결국 EXP가 더 나은 예보 성능을 보였다는 것을 의미한다. 72 h 이하의 단기 예측 성능에서 0000 UTC와 1200 UTC 모두, 북반구와 아시아 지역에서는 거의 모든 예측 시간에 대해 대부분 RMSD 차이값이 음수로 나타나 EXP가 CTL 보다 최소 중립 또는 약한 예측 성능 개선을 보였다. 하지만,

Table 2. RMSD difference between CTL and EXP against its own analysis for HGT, T, Mean Sea Level Pressure (MSLP), Wind Speed (WS) over Northern Hemisphere (NH), Tropics (TR), Southern Hemisphere (SH), Asia (ASIA), at each forecast time based on 0000 and 1200 UTC. Negative values mean that EXP shows better forecast performance than CTL.

		0000 UTC				1200 UTC			
		HGT 500 hPa [m]	T 850 hPa [K]	MSLP [hPa]	WS 250 hPa [m s ⁻¹]	HGT 500 hPa [m]	T 850 hPa [K]	MSLP [hPa]	WS 250 hPa [m s ⁻¹]
NH	24 h	-0.018	0.000	-0.002	-0.023	-0.051	-0.008	-0.007	-0.048
	48 h	-0.161	0.000	-0.005	-0.117	-0.149	-0.002	-0.009	-0.087
	72 h	-0.637	-0.019	-0.038	-0.128	-0.092	-0.003	-0.001	-0.012
	96 h	-0.680	-0.048	-0.038	-0.133	-0.061	0.001	0.009	0.071
	120 h	-0.587	-0.043	-0.048	-0.063	0.087	0.003	0.051	0.059
TR	24 h	0.051	0.002	0.013	-0.015	0.069	-0.001	0.013	0.001
	48 h	0.084	0.003	0.012	0.001	0.068	-0.007	0.008	-0.007
	72 h	0.033	0.005	0.010	-0.009	0.074	0.000	0.011	-0.031
	96 h	-0.062	-0.009	-0.001	-0.031	-0.011	-0.002	-0.008	-0.030
	120 h	-0.012	-0.018	0.000	-0.050	0.035	-0.010	-0.006	-0.063
SH	24 h	-0.056	0.005	0.000	0.026	0.031	0.002	0.006	0.017
	48 h	0.001	0.011	0.002	0.072	-0.118	0.006	0.002	0.015
	72 h	0.063	0.010	0.011	0.023	-0.024	0.005	-0.009	0.078
	96 h	0.023	0.002	-0.027	-0.052	0.304	0.000	0.027	0.135
	120 h	-0.496	-0.015	-0.092	-0.079	0.608	0.009	0.055	0.154
ASIA	24 h	-0.053	-0.005	-0.015	0.015	-0.197	-0.013	-0.034	-0.046
	48 h	-0.352	0.001	-0.014	-0.195	-0.253	-0.009	-0.026	-0.056
	72 h	-0.756	-0.056	-0.068	-0.049	0.173	0.007	-0.002	0.001
	96 h	-0.573	-0.095	-0.043	-0.081	0.745	0.020	-0.016	0.303
	120 h	0.008	-0.067	0.013	0.551	1.190	0.046	0.029	0.175

열대 지역이나 남반구의 경우 초기 예측 시간에서는 RMSD 차이값이 주로 양수로 나타나 CTL이 EXP보다 더 나은 예측 성능을 보였다. 이 결과를 지상 기반 GNSS 관측 자료의 분포와 연관지어 생각해보면, 많은 관측 자료가 분포해 있는 북반구나 아시아 지역에서는 수치 예보 모델의 예측 시간 초반부터 지상 기반 GNSS 관측 자료가 최소 중립이거나 약한 긍정적인 영향을 주었음을 알 수 있다.

다음은 두 예보 실험의 예보장을 IFS 분석장과 비교하여 지상 기반 GNSS 관측 자료가 예측 성능에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. Figure 9는 IFS 분석장 대비 지역별 예측 시간별 CTL과 EXP 예보장의 RMSD를 구하고, 주요 기상 변수에 대한 CTL 대비 EXP의 RMSD 개선률을 나타낸 그림이다. 붉은색으로 나타난 부분이 EXP가 CTL에 비해 예보장을 IFS 분석장에 더 유사하게 모의했다는 의미이며, EXP가 CTL에 비해 더 좋은 예측 성능을 보였다고 볼 수 있다. 0000 UTC 기준(Fig. 9a), 대부분의 지역과 예측 시간에서 지상 기반 GNSS 관측 자료가 적용된 EXP가 CTL보다 더 긍정적인 결과를 보인다. 특히 관측 자

료가 많이 위치한 북반구와 아시아 지역에서 더 긍정적인 결과를 보인다. 이러한 결과는 앞서 자기 분석장 대비 예보장 검증 결과와 유사한 결과이다. 한가지 주목할 점은 3.1장의 분석장 검증에서 언급했던 내용으로, 다른 기상 변수 대비 HGT의 분석장 개선이 두드러졌었는데(Fig. 6e and Fig. 7e), 예보장에서도 HGT 개선이 상대적으로 두드러지게 나타난다. 이러한 특징은 분석장의 개선을 통해 예보장을 개선시킬 수 있다는 좋은 증거가 될 수 있다. 0000 UTC 결과에서 보이던 북반구, 아시아 지역의 후반 예측 시간의 EXP 예보 성능 개선(Fig. 9a)은 1200 UTC의 결과(Fig. 9b)에서 보이지 않는다. 이는 1200 UTC 경우, 지상 기반 GNSS 관측 활용으로 예측 초반은 개선되나 예측 후반 성능 향상에는 크게 기여하지 않는 것으로 나타났다. 본 논문에서 수행한 예측 사례는 31개로 향후 긴 기간에 대해 실험을 수행한 후 결과 분석이 필요할 것으로 생각된다.

마지막으로 지상 기반 GNSS 관측 자료는 수치 예보 모델에 수증기 정보를 제공하는 관측 자료이므로 두 예보 실험의 예보장 속 강수 예보 성능을 비교해

Improvement Rate of RMSD



Fig. 9. Improvement rate of RMSD of EXP of analysis against CTL over NH, TR, SH, and ASIA for (a) 0000 UTC and (b) 1200 UTC. Red color means that EXP shows better forecast performance than CTL.

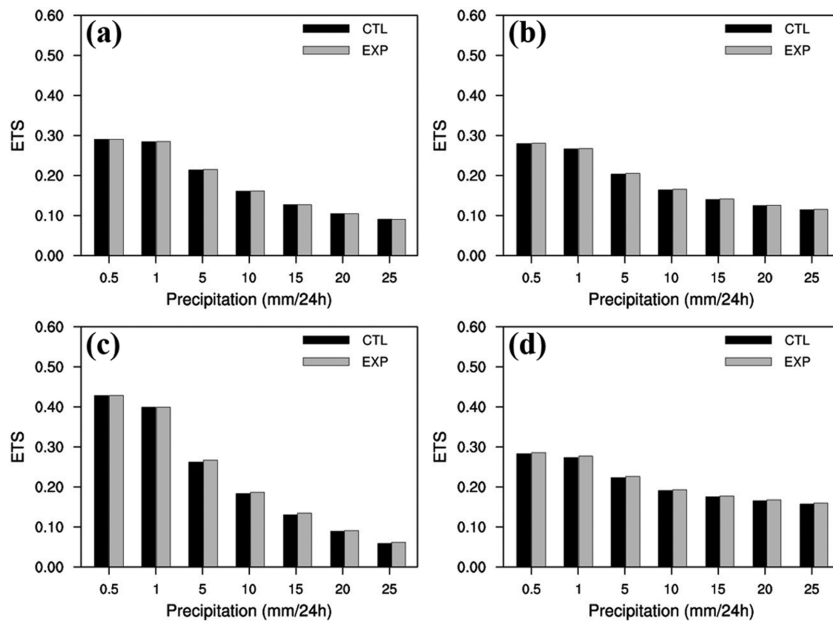


Fig. 10. Global mean Equivalent Threat Scores (ETS) of 24 h precipitation for 5-day forecasts period against CPC for (a) global, (b) NH, (c) EU, and (d) ASIA based on 0000 UTC.

보았다. Figure 10는 CPC 강수 자료 대비 양분 예보 검증 스코어 중 Equivalent Threat Scores (ETS) 검증 결과이다. ETS 검증은 모델의 예보와 강수 관측이 주어진 임계값을 잘 맞췄는지 검증하는 도구로서 그 결과가 1에 가까울수록 수치 예보 모델이 완벽한 예보를 했다는 것을 의미한다. Figure 10a와 10b를 살펴보면 전구와 북반구에 대해 CTL과 EXP는 서로 유사한 강수 예보 성능을 보인다. 하지만 지상 기반 GNSS 관측 자료가 상대적으로 많이 위치하고 있는 유럽(Fig. 10c)과 아시아(Fig. 10d) 지역의 결과에서는 약한 강수 강도의 사례보다 5 mm 이상 강한 강수 강도의 사례에 대해 ETS 값의 변화량은 크지 않지만 EXP가 CTL에 비해 더 큰 ETS 값을 보였다. 따라서 지상 기반 GNSS 관측 자료 활용으로 ETS가 향상되어 지상 기반 GNSS 관측 자료가 수치 예보 모델의 예보장 강수 예보에 긍정적인 영향을 준다는 것을 알 수 있다.

4. 요약 및 결론

정확한 기상 예보를 하기 위해 대기 속의 수증기는 다양한 방법으로 관측되어 수치 예보 모델의 입력자료로 사용되어 왔다. 그 중 GNSS 위성 신호를 이용하여 대기 속 수증기를 관측하고자 하는 노력은 지속되어 왔으며, 최종적으로 연직 수증기 정보가 누적된 형태의 관측인 ZTD를 수치 예보 모델에 사용할 수 있게 되었다. 많은 선행 연구에서는 지상 기반 GNSS ZTD 자료를 전처리하고 자료 동화하여 수치 예보 모델에 적용한 결과, 대부분의 기상 변수에 중립이거나 약한 개선에 기여함을 발견하였다. 이에 본 연구에서는 KIM 자료 동화 체계에 지상 기반 GNSS 관측 자료를 전처리하고 적용하여 KIM 기반 수치 예보 모델의 분석장 및 예보장에 어떠한 영향을 미치는지 분석하고자 하였다.

지상 기반 GNSS 관측 자료는 기상청이 제공하는 BUFR 형식의 현업 수치 예보 모델 사용 관측 자료이다. 지상 기반 GNSS 관측 자료의 특성을 살펴보면 관측 자료들은 주로 북반구, 특히 유럽과 동아시아 지역에 집중적으로 분포한다. 대기 속에 수증기가 많을수록 더 많은 지연이 발생하여 고위도 지역보다 저위도 지역에서, 그리고 관측 고도가 높은 지역보다 관측 고도가 낮은 지역에 더 큰 ZTD 관측값을 보인다. ZTD 관측값을 직접적으로 자료 동화하기 위해 NLM, TLM, ADM을 포함하는 관측 연산자를 직접 개발하였다. 개발과 동시에 개별 모델에 대한 검증을 수행하여, ZTD 값에 대한 자코비안을 얻고자 하였다. 최종적으로 얻어진 자코비안을 살펴보면 연직 T 자코비안 값은 연직 q 자코비안 값에 비해 상대적으로 매우 작았고, 연직 q 자코비안 값은 모델의 중하층에 유의

미한 값을 가지고 있었다. 최적의 관측 자료만을 자료 동화 과정에 사용하기 위해 ZTD 관측 자료들은 편향 보정, 품질 검사, 속아내기 과정을 거쳤다. 고도 보정은 회귀 계수 산출을, 편향 보정 계수 산출은 선행 연구의 방법을 차용하여 적용하였다. 품질 검사 역시 선행 연구에서 제안된 방법을 사용하여 임계값을 정하였으며, 속아내기의 경우 공간 속아내기와 시간 속아내기가 적용되었다. 지상 기반 GNSS 관측 자료의 자료 동화 효과를 살펴보기 위해 OSE 방법을 차용하여 KIM을 이용해 지상 기반 GNSS 관측 자료 적용 유무 실험을 수행하고 그 분석장 및 예보장을 상호 비교하였다.

예보 실험들의 분석장 성능 결과를 종합해보면 지상 기반 GNSS 관측 자료는 KIM 기반의 수치 예보 모델 분석장에 대부분의 기상 변수에서 최소 중립이거나 약한 개선 효과에 기여할 것으로 기대된다. 그 효과는 수치 예보 모델의 수행 기간 동안 주로 500 hPa 이하의 대기 중하층에서 나타날 것이고, 간접적인 효과로 100 hPa 이상의 대기 상층에서 HGT의 개선이 나타날 수 있다. 예보 실험들의 예보장 성능 결과를 종합해보면 지상 기반 GNSS 관측 자료는 KIM 기반의 수치 예보 모델의 예보장에 대부분의 기상 변수에서 약한 개선에 기여하고 그 가운데 HGT의 개선에 가장 크게 기여할 것으로 기대된다. 뿐만 아니라 강수 예보에 있어서도 기여하고 있다. 따라서 지상 기반 GNSS 관측 자료를 KIM 기반의 자료 동화 체계에 적용하면 KIM 분석장 및 예보장의 개선이 가능할 것이라는 기대를 할 수 있다.

지상 기반 GNSS 관측 자료 활용으로 분석장 및 예보장의 HGT 개선을 확인하였으나, 개선 정도는 중립 이상으로 이는 선행 연구의 결과와도 유사한 결과이다. 다만 ZTD 자료 동화로 인한 수치 예보 모델의 HGT 성능 개선 원인에 대해서는 명백하게 밝히지 못했는데, 이와 관련하여 그 원인을 밝힐 수 있는 추가 연구가 필요하다. 그 외 다음의 방법과 개선으로 지상 기반 GNSS 관측 자료의 자료 동화 효과를 극대화할 수 있을 것으로 예상된다. 첫번째로 가용한 관측 자료의 확대이다. Figure 1에서 보인 바와 같이 지상 기반 GNSS 관측 자료는 주로 유럽과 동아시아 지역에 높은 밀도로 분포하고 있다. 현재 GTS와 NMSC에서 수집되는 자료만을 사용하기 때문에 전구의 자료를 사용하지 못하고 있고, 특히 미국의 경우 자국의 지상 기반 GNSS 관측 자료를 상용화하여 현재 원활히 사용할 수 없다는 아쉬운 점이 있다. 두번째로는 고도화된 관측 연산자의 개발 및 전처리 기술의 적용이다. 본 연구에서 개발된 관측 연산자라도 지상 기반 GNSS 관측 자료를 동화하고 그 효과를 파악하는데 무리가 없으나, 지금보다 더 높은 연직 해상도

와 정확도를 가지고 연직 수증기 정보를 자코비안으로 잘 분석할 수 있다면, ZTD 관측값의 영향을 효과적으로 KIM의 초기장에 전달해줄 것으로 기대된다. 또, 본 연구에서 구현된 지상 기반 GNSS 관측 자료의 전처리 방법은 많은 부분이 선행 연구의 방법을 차용하여 만들어졌다. 이는 지상 기반 GNSS 관측 자료를 전처리하는데 문제가 없지만 향후 더욱 고도화된 품질 검사 방법이 개발될 여지도 있고, 더욱이 KIM에 최적화된 전처리 방법이 있을 것이라는 여지가 아직 남아 있다. 그 예로는 편향 보정 계수의 새로운 산출 방법 적용 또는 새로운 배경장으로부터의 편향 보정 계수 산출 등의 방법이 있다. 향후 편향 보정 계수 산출 임계값 수정 및 시공간 축아내기 기준 수정을 통한 한국형수치예보모델에서의 ZTD 자료 품질 개선을 통한 예측 성능을 기대할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 기상청 출연사업인 (재)차세대수치예보모델개발사업단의 4차원 고품질 기상분석을 위한 최신 자료동화기술 개발(KMA2020-02211)의 지원을 받아 수행되었음.

REFERENCES

- Bennett, G. V., and A. Jupp, 2012: Operational assimilation of GPS zenith total delay observations into the met office numerical weather prediction models. *Mon. Wea. Rev.*, **140**, 2706-2719, doi:10.1175/MWR-D-11-00156.1.
- _____, H. R. Johnson, P. P. Weston, J. Jones, and E. Pottiaux, 2017: An assessment of ground-based GNSS zenith total delay observation errors and their correlations using the met office UKV model. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **143**, 2436-2447, doi:10.1002/qj.3097.
- Bevis, M., S. Businger, T. A. Herring, C. Rocken, R. A. Anthes, and R. H. Ware, 1992: GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the Global positioning system. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **97**, D14, 15787-15801, doi:10.1029/92JD01517.
- 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-Pacific J. Atmos. Sci.*, **52**, 291-307, doi:10.1007/s13143-016-0005-0.
- Chrust, M., 2020: Tangent linear and adjoint models for variational data assimilation. *ECMWF Training course: Data assimilation* [Available online at https://events.ecmwf.int/event/153/contributions/907/attachments/470/858/Training_course_2020_TLAD.pdf]
- Culverwell, I. D., H. W. Lewis, D. Offiler, C. Marquardt, and C. P. Burrows, 2015: The Radio Occultation Processing Package, ROPP. *Atmos. Meas. Tech.*, **8**, 1887-1899, doi:10.5194/amt-8-1887-2015.
- Eresmaa, R., S. Healy, H. Järvinen, and K. Salonen, 2008: Implementation of a ray-tracing operator for ground-based GPS Slant Delay observation modeling. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **113**, D11114, doi:10.1029/2007JD009256.
- 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).
- Han, H.-J., I.-H. Kwon, J.-H. Kang, H.-W. Chun, S. Lee, S. Lim, and T. Kim, 2019: Analysis of forecast performance by altered conventional observation set. *Atmosphere*, **29**, 21-39, doi:10.14191/Atmos.2019.29.1.021 (in Korean with English abstract).
- Hdidou, F. Z., S. Mordane, P. Moll, J.-F. Mahfouf, H. Erraji, and Z. Dahmane, 2020: Impact of the variational assimilation of ground-based GNSS zenith total delay into AROME-Morocco model. *Tellus A*, **72**, 1-13, doi:10.1080/16000870.2019.1707854.
- Hong, S.-Y., and Coauthors, 2018: The Korean Integrated Model (KIM) system for Global weather forecasting. *Asia-Pacific 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, doi:10.1016/j.physd.2006.11.008.
- Kang, J.-H., and Coauthors, 2018: Development of an observation processing package for data assimilation in KIAPS. *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.*, **54**, 303-318, doi:10.1007/s13143-018-0030-2.
- Kleespies, T. J., 2006: Jacobian (or K) Coding. *Sub Group for Radiative Transfer and Surface Property Models: Tangent Linear and Adjoint Coding Short Course* [Available online at https://cimss.ssec.wisc.edu/itwg/groups/rtwg/tl_ad_lectures/K_Lectures.pdf].
- Kwon, I.-H., and Coauthors, 2018: Development of an

- operational hybrid data assimilation system at KIAPS. *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.*, **54**, 319-335, doi:10.1007/s13143-018-0029-8.
- 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).
- Poil, P., P. Moll, F. Rabier, G. Desroziers, B. Chapnik, L. Berre, S. B. Healy, E. Andersson, and Z.-Z. El Guelai, 2007: Forecast impact studies of zenith total delay data from European near real-time GPS stations in Météo France 4DVAR. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **112**, D06114, doi:10.1029/2006JD007430.
- Rohm, W., J. Guzikowski, K. Wilgan, and M. Kryza, 2019: 4DVAR assimilation of GNSS zenith path delays and precipitable water into a numerical weather prediction model WRF. *Atmos. Meas. Tech.*, **12**, 345-361, doi:10.5194/amt-12-345-2019.
- Saunders, R. W., M. Matricardi, and P. Brunel, 1999: An improved fast radiative transfer model for assimilation of satellite radiance observations. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **125**, 1407-1425, doi:10.1002/qj.1999.49712555615.
- Tralli, D. M. and S. M. Lichten, 1990: Stochastic estimation of tropospheric path delays in Global positioning system geodetic measurements. *B. Géodésique*, **64**, 127-152, doi:10.1007/BF02520642.
- Vedel, H., K. S. Mogensen, and X.-Y. Huang, 2001: Calculation of zenith delays from meteorological data, comparison of NWP model, radiosonde and GPS delays. *Phys. Chem. Earth*, **26**, 6-8, 497-502, doi:10.1016/S1464-1895(01)00091-6.
- _____, and X.-Y. Huang, 2004: Impact of ground based GPS data on numerical weather prediction. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, **82**, 1B, 459-472, doi:10.2151/jmsj.2004.459.
- Xie, P., M. Chen, and W. Shi, 2010: CPC global unified gauge-based analysis of daily precipitation. *24th Conf. on Hydrology* [Available online at https://ams.confex.com/ams/90annual/techprogram/paper_163676.htm, Available download at <https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.cpc.globalprecip.html>].