

## COSMIC-2 GNSS RO 자료 활용을 위한 관측오차 개선 연구

김은희 · 조영순 · 전형욱\* · 하지현 · 김승범  
수치모델링센터 수치자료응용과

(접수일: 2022년 12월 26일, 수정일: 2023년 2월 2일, 게재확정일: 2023년 2월 15일)

### A Study on Improvement of the Observation Error for Optimal Utilization of COSMIC-2 GNSS RO Data

Eun-Hee Kim, Youngsoon Jo, Hyoung-Wook Chun\*, Ji-Hyun Ha, and Seungbum Kim

*Numerical Modeling Center, Korea Meteorological Administration, Daejeon, Korea*

(Manuscript received 26 December 2022; revised 2 February 2023; accepted 15 February 2023)

**Abstract** In this study, for the application of observation errors to the Korean Integrated Model (KIM) to utilize the Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere & Climate-2 (COSMIC-2) new satellites, the observation errors were diagnosed based on the Desroziers method using the cost function in the process of variational data assimilation. We calculated observation errors for all observational species being utilized for KIM and compared with their relative values. The observation error of the calculated the Global Navigation Satellite System Radio Occultation (GNSS RO) was about six times smaller than that of other satellites. In order to balance with other satellites, we conducted two experiments in which the GNSS RO data expanded by about twice the observation error. The performance of the analysis field was significantly improved in the tropics, where the COSMIC-2 data are more available, and in the Southern Hemisphere, where the influence of GNSS RO data is significantly greater. In particular, the prediction performance of the Southern Hemisphere was improved by doubling the observation error in global region, rather than doubling the COSMIC-2 data only in areas with high density, which seems to have been balanced with other observations.

**Key words:** GNSS RO, observation error, KIM, COSMIC-2

## 1. 서 론

전지구위성항법시스템 전자차폐(Global Navigation Satellite System Radio Occultation, GNSS RO) 자료는 신뢰할 만한 자료로 전 세계 수치예보센터의 자료 동화에 활용되고 있다(Bauer et al., 2014; Bonavita, 2014). GNSS RO 자료는 대기 상층에서 앵커(anchor)의 역할을 하고 전 지구에 고르게 분포하며, 연직적

으로 높은 해상도를 가지고 있어 위성복사량 자료의 관측 공백 보완 및 수치예보모델의 편차보정 연구에 활용할 수 있다(Cucurull et al., 2014).

해외 각국에서는 수치예보모델의 예측성능 향상을 위해 관측 공백 해소에 기여하며 자료의 품질이 뛰어난 GNSS RO 위성을 지속적으로 발사하여 운영하고 있다. 최근 대만과 미국이 공동 개발한 FORMOSAT-7/COSMIC-2 (Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere & Climate 이후 COSMIC-2)의 6개 위성이 2019년 6월 25일 발사되었고 2020년 3월 16일부터 세계기상통신망(Global Telecommunication System, GTS)을 통해 실시간 배포되고 있다.

해외 각국의 수치예보센터에서는 신규 COSMIC-2

\*Corresponding Author: Hyoung-Wook Chun, Numerical Modeling Center, Korea Meteorological Administration, Government Complex-Daejeon, 189, Cheongsu-ro, Seo-gu, Daejeon 35208, Korea.  
Phone: +82-042-481-7536, Fax: +82-042-476-0365  
E-mail: chunhw@korea.kr

자료 활용을 위한 연구를 수행 중이다. Schreiner et al. (2020)은 COSMIC-2의 GNSS RO 굽힘각(bending angle) 관측자료와 유럽중기예보센터(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) 모델로부터 산출된 굽힘각 간 차이를 평균한 값이 6~40 km 고도에서 0에 가까워 편차가 매우 작음을 확인한 바 있다. 또한, Lien et al. (2021)은 NCEP의 전지구 예측시스템(Global Forecast System, GFS)과 매우 유사한 대만 기상청의 자료동화 체계에서 순환실험을 수행하여 COSMIC-2 자료의 품질검사 기준 별 제거율을 분석한 결과, 대기 상층(10~35 km)에서 최소의 제거율을 보여 해당 고도에서 자료의 품질이 높다는 것을 확인하였다. 해당 논문에서는 신규 자료의 효과적 사용을 위해 품질검사와 관측오차에 대한 연구를 수행하였는데, 기존 관측오차와 Desroziers et al. (2005) 방법으로 새롭게 산출한 관측오차 간에 약 2배의 차이가 나는 것을 확인하였다. 이 연구에서는 기존 관측오차 산출 당시 사용한 NCEP GFS체계가 과거 버전이어서 현재와 차이가 날 수 있다고 보았다. Shao et al. (2020)은 NCEP의 최신 현업 GFS에서 Desroziers et al. (2005)방법으로 산출한 관측오차는 기존보다 큰 값으로 새롭게 산출한 관측오차를 사용하여 COSMIC-2 자료동화 영향을 개선한 바 있다.

기상청에서는 2020년 4월부터 한국형수치예보모델(Korean Integrated Model, KIM; Hong et al., 2018)을 현업 운영한 이후로 성능 향상을 위해 물리과정과 자료동화를 주기적으로 개선하고 있다. 최근 자료동화 개선 관련해서는 Kim et al. (2021)은 KIM에 국내 아리랑-5호(KOMPSAT-5) 등의 신규 GNSS RO를 추가로 활용하기 위해 일부 자료(7~40 km)가 아닌 전체 자료(0~60 km)를 사용하고 더 많은 자료를 활용하도

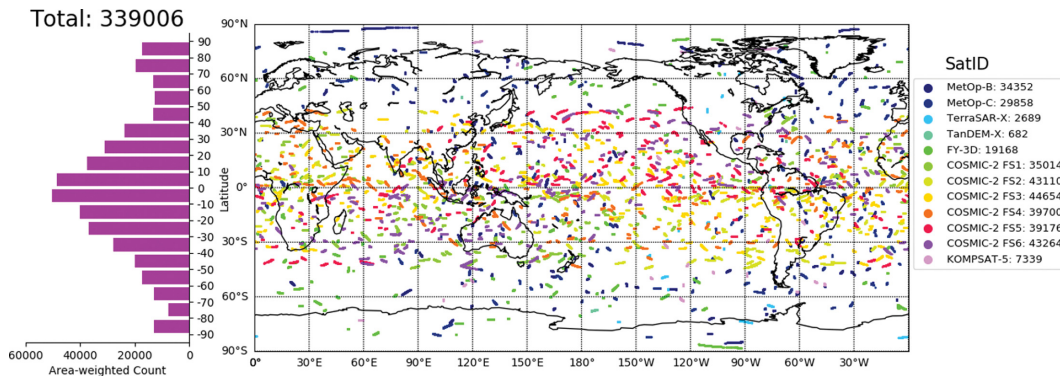
록 관측증분 기반의 품질검사 기준을 조정하여 예측 성능을 향상시킨 바 있다. 이후로 KIM의 예측성능 개선을 위해 가용한 신규 관측자료의 활용을 확대하는 연구를 꾸준히 수행 중이다.

이 연구는 KIM에 COSMIC-2 GNSS RO 신규 자료를 동화하는 과정에서 관측오차를 진단하고 최적화함으로써 초기장의 정확도와 그에 따른 수치예측 성능에 미치는 영향평가 결과를 분석하는데 목적을 두고 있다. 2장에서는 관측 비용함수 기반으로 GNSS RO의 관측오차를 진단하는 방법과 실험 구성을 설명하였고, 3장에서는 관측오차의 팽창계수 적용에 따른 관측자료 전처리 수행 결과, 자료동화 및 모델의 예측 결과를 분석하였고, 4장에서 요약 및 결론을 기술하였다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 COSMIC-2 자료

COSMIC-2는 2006년에 시작된 COSMIC-1 (Anthes, 2011)의 후속 미션이다. COSMIC-2는 COSMIC-1에 비해 미국의 GPS, 러시아의 GLONASS 등 여러 GNSS 신호를 수신할 수 있어서 훨씬 많은 자료를 생산하며 다른 위성들과는 달리 저경사(low-inclination) 궤도에 배치되어 적도 지역에서 가장 높은 자료 밀도를 가진다(Ho et al., 2020). 또한 COSMIC-2의 주요 임무는 대류권에서 GNSS RO의 관측 품질을 개선하는 것이기 때문에 첨단 수신기(Tri-GNSS RO System instrument, TGRS) 및 안테나 사용으로 인해 이전의 다른 GNSS RO 위성보다 높은 신호대잡음비(signal-to-noise ratio, SNR)를 보인다. SNR의 값이 클수록 굽힘각 오차에 대한 열적 잡음의 기여가 감소하여 보다 정확한 관측 정보를 산출할 수 있다(Schreiner et al., 2020).



**Fig. 1.** Horizontal distribution of the pre-processed GNSS RO observation locations at 1200 UTC on June 15, 2021. The colored dots represent each satellite, and additional six GNSS RO are COSMIC2-FS (1~6). The number next to each satellite's name indicates the number of data. The histogram represents the frequency of data considering the area-weighted for each latitude section.

기존에 활용해오던 GNSS RO 관측자료는 온도 정보의 높은 활용도에 비하여 수증기 정보에 미치는 영향을 현업 수치예보모델에서 보이기 어려웠지만, COSMIC-2 관측자료는 열대 지방에서 성층권 온도 및 바람에 뚜렷하게 영향을 미치는 것으로 보고되었다 (Ruston and Healy, 2020). 미국 해군 전지구모델 (United States Navy Global Environmental Model, NAVGEM)에서는 라디오존데 대비 700~300 hPa의 대류권 수증기장에서 뚜렷한 개선을 보였고 ECMWF의 통합예측모델(Integrated Forecasting System, IFS)에서는 열대 지방의 200 hPa 이상 온도 개선이 약 5%로 크게 나타났다(Ruston and Healy, 2020). 예보 선진 두 모델에서 COSMIC-2 관측자료를 활용하여 예측에 긍정적인 영향을 미치는 것을 확인하였다.

이 연구에 활용한 GNSS RO 자료는 기존의 MetOp-B/C, TerraSAR-X, TanDEM-X, KOMPSAT-5, FY-3D와 새로 추가한 COSMIC-2 이다(Fig. 1). COSMIC-2 자료는 Ho et al. (2020)에서 보인 바 대로 50°S-50°N 영역에서 관측하는데 40°S-40°N에 주로 관측자료가 분포하고 있는 것을 확인할 수 있다.

### 2.2 모델 및 실험 구성

이 연구에서는 KIM 버전 3.7(KIM3.7) 자료동화 체계에 COSMIC-2 자료를 추가로 활용하였다. 전반적인 실험체계 설정은 Kim et al. (2021)과 동일하게 구성하였다. 관측오차 조정없이 COSMIC-2 신규 자료를 활용한 결과에서 예측성능에 미치는 영향이 긍정적이지는 않았다(결과 미제시). COSMIC-2를 최적으로 활용하기 위해서 관측오차 조정 실험을 설계하게 되었다. 현재 KIM 자료동화체계에서는 관측자료 전처리 과정에서 설정된 관측오차의 10% 팽창오차를 활용하고 있다. 따라서 규준실험(CNTL)은 현재 활용 중인 MetOp-B/C, TerraSAR-X, TanDEM-X, KOMPSAT-5, FY-3D와 신규 관측인 COSMIC-2를 추가 활용한 실험으로 설정하였고, 이때 자료동화에 활용되는 관측오차는 앞서 밝힌 바와 같이 10% 팽창된 오차이므로 여기서는 팽창계수(inflation factor)를 1.1이라고 표기하였다(Table 1). EXP1과 EXP2 실험을 구성하기 위해서 관측오차 진단을 선행하였고(자세한 내용은 2.3 절에서 확인), 진단 결과를 통해 GNSS RO 관측자료

가 분석장에 미치는 영향이 과도함을 확인하였기 때문에 자료의 효과를 줄이기 위한 방안으로 관측오차를 증가시키는 실험을 구성하게 되었다. CNTL에서 GNSS RO가 다른 위성에 비해 약 6배 크게 영향을 미치고 있었기에 그 영향을 4배까지 줄이기 위해 EXP1은 전 지구적으로 모든 GNSS RO의 팽창계수를 CNTL 대비 2배로 증가한 것이고, EXP2는 Fig. 1의 위도별 히스토그램에서 볼 수 있듯이 COSMIC-2로 인해 단 위면적당 관측의 수에 대한 밀집도가 높은 남위 40도에서 북위 40도까지 영역에 대해서만 모든 GNSS RO의 팽창계수를 2배로 설정하고 나머지 영역은 CNTL과 동일하게 1.1로 설정한 것이다. CNTL과 EXP1을 비교하면 관측오차 팽창계수를 2배로 한 효과를 살펴볼 수 있고, EXP1과 EXP2를 비교하면 자료량에 따른 관측오차 조정 효과를 알 수 있다. 즉, 두 실험을 통해 관측오차 조정에 따른 GNSS RO 자료가 수치 모델에 미치는 영향을 파악할 수 있다.

실험 기간은 2021년 6월 25일부터 7월 31일까지 6시간 간격으로 순환 실험을 수행하였으며 12시간 간격(00, 12)으로 5일을 예측하였고, 6일간의 스펀업을 제외하고 7월 1일부터 31일까지 예측장에 대한 검증을 수행하였다.

### 2.3 관측오차 진단 방법 및 결과

KIM에서 GNSS RO의 관측오차는 지표에서 최대 20%부터 고도 10 km에서 1%까지 선형적으로 감소하고 10 km 이상 고도에서는 1%의 오차 모형을 기반으로 한다(Kwon et al., 2015). GNSS RO의 위도대별 관측품질에 차이가 있음을 반영하여 현재는 5~10 km로 1% 오차가 시작되는 고도가 위도별로 다르게 설정되어 있다. GNSS RO의 관측오차는 굽힘각에 이 오차 모형을 곱한 값을 사용하고 있다. 변분 자료동화는 식(1)에서와 같이 비용함수(cost function, 이하  $J$ )를 관측(observation, 이하  $J_o$ ) 항과 배경장(background, 이하  $J_b$ ) 항으로 각각 관측오차와 배경오차를 고려해서 정의한 후에 두 항의 합이 최소일 때에 최적의 분석장을 생산한다. 이 연구에서는 KIM의 자료동화 과정으로 생성되는 관측 비용함수와 관측개수를 활용하여 관측 중별로 관측오차의 수축(Shrink) 정도를 진단하였다. 이때 관측오차는 관측 공간에서 관측, 배경, 분석 굽힘각의 상관성을 활용하는 방법(Desroziers et al., 2005)을 바탕으로 산출하였다. 식(2)의 초기 관측 비용함수( $J_o^{initial}$ )는 배경장( $x_b$ )과 관측( $y$ )의 차이로 구해진 비용함수, 식(3)의 최종 관측 비용함수( $J_o^{final}$ )는 분석장( $x_a$ )과 관측( $y$ )의 차이로 구해진 비용함수로 간주할 수 있다. 실제로 자료동화에 입력하는 관측오차( $\sigma_o^2 input$ )는 관측의 고도나 지역 체널별로 각기 다른 값을 가지지만, 개별 관측 중에서 동일한 관측오차

**Table 1.** Configuration of experiments on applying the inflation factor of observation error by region.

Experiment	Inflation Factor
CNTL	1.1 (90°S-90°N)
EXP1	2.2 (90°S-90°N)
EXP2	1.1 (90°S-40°S, 40°N-90°N), 2.2 (40°S-40°N)

( $\sigma_o^2 input$ )를 입력한다고 가정하면, 비용함수를 식(2), (3)과 같이 단순화할 수 있다. 식(4)에서 정의한 관측 오차의 수축 지수(Shrink Index)는 초기와 최종 관측 비용함수를 각각 관측 개수(N)로 나눈 후 더한 값으로 구할 수 있다. Desroziers 방법으로 산출된 배경오차( $\sigma_b^2$ )와 분석오차( $\sigma_a^2$ )의 차이가 관측오차( $\sigma_o^2$ )에 비해서 현저히 작을 값이라고 가정하면, 수축 지수는 식(4)의 마지막 항과 같이 입력하여 사용한 관측오차( $\sigma_o^2 input$ ) 대비 진단된 관측오차( $\sigma_o^2$ )의 비율을 나타낸다. 이 지수가 큰 값을 가질수록 진단된 관측오차에 비해서 입력하여 사용하고 있는 관측오차가 더 많이 수축되어 있음을 나타내므로 수축 지수라고 명명하였다. 식(4)에 의해 입력하는 관측오차가 1/2배로 수축되어 있다면 수축 지수는 4배가 된다. 따라서 수축 지수를 통해서 특정 관측 중에 입력한 관측오차의 크기가 진단된 관측오차에 비해 상대적으로 작게 설정한 것인지 크게 설정한 것인지 판단할 수 있다.

$$J(x) = (x - x_b)^T B^{-1} (x - x_b) + (y - H[x])^T R^{-1} (y - H[x]) = J_b(x) + J_o(x) \tag{1}$$

$$J_o^{initial} = \sum_i^{N^{initial}} \frac{(y - H[x_b])_i^2}{\sigma_o^2 input} \cong \frac{N^{initial} (\sigma_o^2 + \sigma_b^2)}{\sigma_o^2 input} \tag{2}$$

$$J_o^{final} = \sum_i^{N^{final}} \frac{(y - H[x_a])_i^2}{\sigma_o^2 input} \cong \frac{N^{final} (\sigma_o^2 - \sigma_a^2)}{\sigma_o^2 input} \tag{3}$$

Shrink Index

$$= \frac{J_o^{initial}}{N^{initial}} + \frac{J_o^{final}}{N^{final}} \cong \frac{2\sigma_o^2 + \sigma_b^2 - \sigma_a^2}{\sigma_o^2 input} \cong \frac{2\sigma_o^2}{\sigma_o^2 input} \tag{4}$$

자료동화시 분석장이 결정되는 가중치는 관측오차와 배경오차의 비율에 의해서 결정된다. 즉 관측오차와 배경오차를 둘 다 동일한 배수로 증가시키면 절대값은 달라지지만 관측오차와 배경오차의 비율은 동일하여, 증가시키기 전과 후의 분석장은 동일하다. 진단된 관측오차와 배경오차의 비율이 최적이라고 하면, 식(5)와 같이 입력하여 사용한 오차의 비율이 진단된 것과 동일하게 맞춰주어야 최적으로 사용한 것이 된다.

식(5)를 약간 변형하여 식(6)으로 나타내면, 최적으로 오차를 입력하여 사용한다면, 입력한 관측오차와 진단된 관측오차의 비율은 입력한 배경오차와 진단된 배경오차의 비율과 동일하다. 식(6)을 식(4)에 대입하면 식(7)과 같이 수축 지수는 입력한 배경오차와 진단된 배경오차의 비율로 결정될 수 있다. 이는 관측의 특성이 다르더라도, 유사한 배경장에 영향을 미치는 관측종들 사이의 수축 지수가 유사한 값이 되어야 함을 의미한다. GNSS RO 자료의 경우에 원격탐사 관측이면서 상층 온도에 민감한 관측인 AMSUA, IASI 등의 유사한 관측 종과 수축 지수가 비슷해야 하며, 특히하게 큰 값을 가진다면 입력하는 관측오차를 키워서 최적으로 맞출 필요가 있다.

$$\frac{\sigma_o^2}{\sigma_b^2} = \frac{\sigma_o^2 input}{\sigma_b^2 input} \tag{5}$$

$$\frac{\sigma_o^2}{\sigma_o^2 input} = \frac{\sigma_b^2}{\sigma_b^2 input} \tag{6}$$

$$\text{Shrink Index} \cong \frac{2\sigma_o^2}{\sigma_o^2 input} = \frac{2\sigma_b^2}{\sigma_b^2 input} \tag{7}$$

실험의 검증 기간에 대해 MetOp-B/C, TerraSAR-X, TanDEM-X, KOMPSAT-5, FY-3D와 COSMIC-2 GNSS RO 자료를 현업에 적용된 수축 지수를 통해 관측오차를 적용하여 진단하였다. 이는 2.3절에서 기술할 규준실험(CNTL)에 해당한다. 수축 지수를 1개월 평균했을 때, 라디오존데가 0.92의 값으로 가장 높게 나타났고 이어 GNSS RO가 0.66, Aircraft가 0.38, Aladin이 0.30 순으로 나타났다(Table 2). KIM에서는 종관 자료인 라디오존데의 초기 입력되는 관측오차를 상대적으로 작게 설정해서 모델 내에서의 자료 영향이 가장 큰 것으로 나타났고 그 다음으로 GNSS RO의 자료 영향이 크게 작용하는 것으로 나타났는데 이는 다른 위성의 평균값이 0.11인 것에 비해 약 6배 큰 값이다. 그 뒤를 이어 항공기와 Aladin 위성 바람 자료의 영향이 큰 것으로 나타났다. 온습도를 직접 관측하는 라디오존데나 항공기 관측은 상대적으로 작은 관측오차를 입력하고 있지만, 위성에서 간접 관측하

**Table 2.** The results of the input observation error diagnosis in the control experiment based on Jo and marked in descending order.

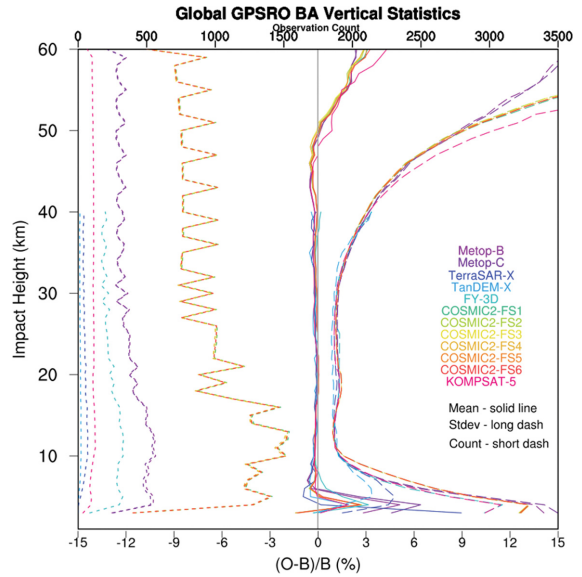
Observational species	Shrink Index	Observational species	Shrink Index	Observational species	Shrink Index	Observational species	Shrink Index
Sonde	0.92395	Scatwind	0.17523	ATMS	0.12625	ATMSWV	0.04400
GNSSRO	0.66362	Amsr2	0.15554	AMSUA	0.12187	CSRHIMA	0.04074
Aircraft	0.38228	AMV	0.13068	IASI	0.08377	CSRMMSG	0.03909
Aladin	0.29863	Surface	0.12968	MHS	0.05197	CSRGK2A	0.02619

는 자료들은 큰 관측오차를 입력하고 있다. GNSS RO의 경우 다른 위성의 복사관측에 비해서는 절대적인 오차의 크기는 작을 수 있지만, 수축 지수를 고려하면 규준실험에서 최적으로 진단된 관측오차에 비해서 너무 작은 관측오차를 입력하고 있는 것으로 판단된다.

### 3. 결 과

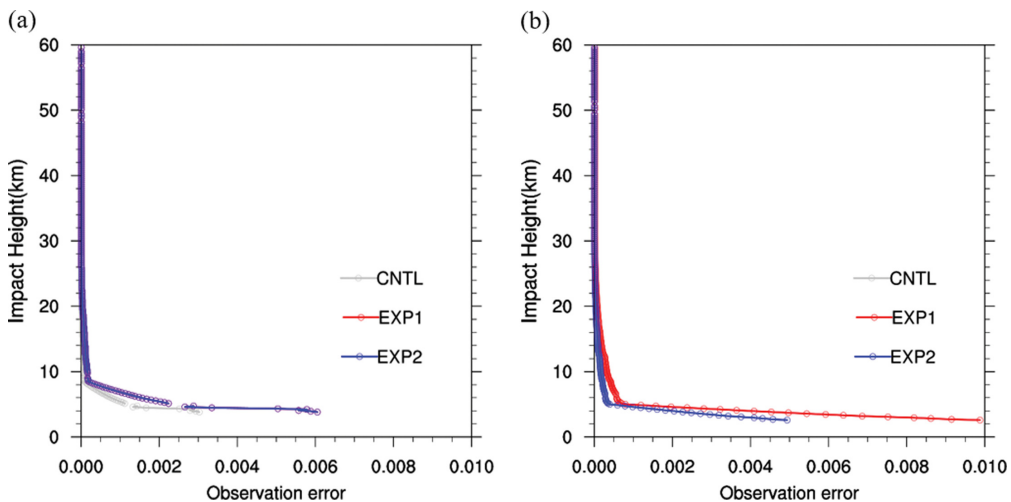
#### 3.1 GNSS RO 전처리 결과

동화의 영향을 살펴보기 전에 자료처리 과정에서 관측증분(O-B)의 통계를 분석하였다. 이것은 자료의 품질이 반영되었으며 관측오차 실험을 위해 우선적으로 규준실험에 사용된 GNSS RO 자료의 관측품질을 KIM 모델장과 비교하였다. Figure 2는 2021년 7월 한 달 동안 위도 50°S-50°N 내의 COSMIC-2를 포함한 GNSS RO 자료에 대한 관측증분의 통계를 나타낸다. GNSS RO 관측자료인 굽힘각의 관측(O)과 모델(B) 간 차이가 매우 작기 때문에 일반적으로 모델값 대비 표준화한 값((O-B)/B)으로 비교한다. 이 값의 평균(Mean), 표준편차(Stdev), 개수(Count)를 각 위성별로 표시한 연직분포도에서 COSMIC-2 위성 6기의 통계 값이 전반적으로 유사하게 나타났다(Fig. 2). 또한 개수를 제외한 평균과 표준편차가 다른 위성들과 비교했을 때에도 COSMIC-2와 유사한 것을 볼 수 있다. 특히, 고도 5 km에서는 MetOp-B/C와 FY-3D가 약 2%의 양의 편차를 보였고 TerraSAR-X와 TanDEM-X가 약 -0.5%의 음의 편차를 보인 것과는 대조적으로 COSMIC-2의 편차는 0에 가깝게 나타났으며 표준편차는 TerraSAR-X와 TanDEM-X를 제외하고 나머지



**Fig. 2.** The vertical statistics of global bending angle innovation mean (solid line), standard deviation (long dash) and number (short dash) of the pre-processed GNSS RO observation locations from 50°S to 50°N on July 2021. The colored lines represent each satellite, and additional six GNSS RO are COSMIC2-FS (1~6).

위성들은 약 9%로 유사하였다. COSMIC-2는 열대 지방의 하층 대기 정보를 보다 정확하게 탐측하기 위한 센서를 탑재한 것으로 관측증분의 통계를 통해 COSMIC-2 자료가 하층에서 품질이 우수하다는 것을



**Fig. 3.** Vertical distribution of observational error for each experiment at any one point at (a) tropics and (b) high-latitude at 12 UTC on 15 June 2021.

확인하였다. COSMIC-2의 관측품질은 이미 다른 연구들(Schreiner et al., 2020; Lien et al., 2021)에서 보고된 바와 같이 품질이 양호한 것으로 확인되었다.

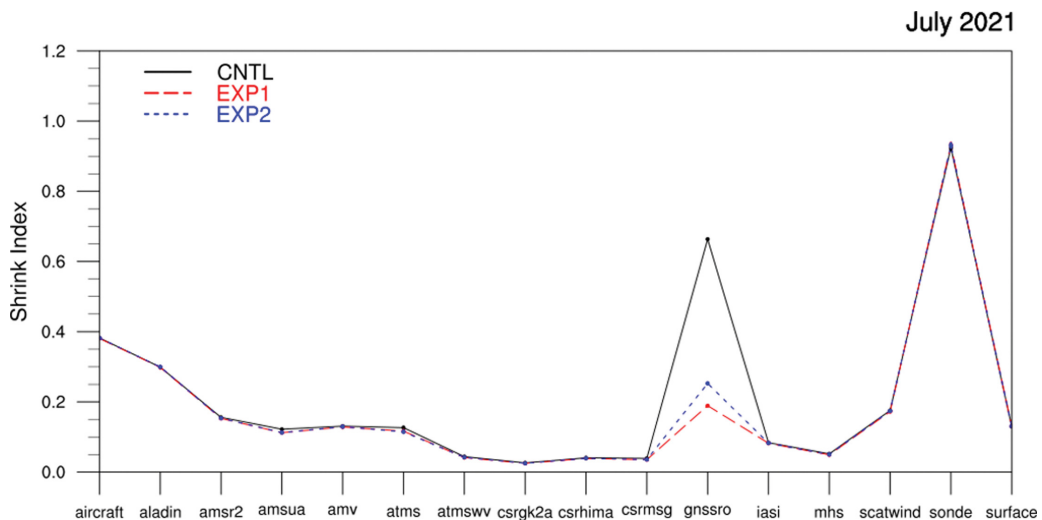
Figure 3은 기준(CNTL)과 두 실험(EXP1, 2)에서 남위 20도 부근(Fig. 3a) 적도와 북위 50도 부근(Fig. 3b) 고위도에서 임의의 한 지점에서 실제 자료동화에 적용된 관측오차의 연직분포를 나타낸 그림이다. 그림의 결과는 Table 1의 실험 구성에서도 알 수 있듯이 적도 부근에서는 기준만 팽창계수 1.1로 관측오차가 작고 EXP1과 EXP2는 기준보다 2배 증가된 것을 볼 수 있다(Fig. 3a). 10 km 이상 고도에서는 급히 각 자체가 작아서 관측오차의 차이 또한 크게 나지 않고 있지만, 10 km 이하(특히 5 km) 고도에서는 관측자료의 불확실성이 높아 관측오차 모형을 지상에서 최대 20% 가까이 적용하므로 큰 차이가 나는 것을 확인할 수 있다. 중위도에서는 EXP1에서만 관측오차가 2배이고, 기준과 EXP2는 관측오차를 작게 설정한 것을 볼 수 있다(Fig. 3b).

검증 기간(31일 × 4회)에 대해 식(4)를 기반으로 16개 관측 종의 수축 지수를 평가하였다(Fig. 4). 이 연구에서는 GNSS RO만의 관측오차를 변경하였으므로 기준과 EXP1, EXP2에서 GNSS RO에서 입력 관측오차의 증가로 인한 수축 지수의 감소가 나타난 것을 확인하였다. 기준의 경우 한 달 평균 약 0.66의 값을 가졌고, EXP1은 관측오차를 2배 증가시켰으므로 이론적으로 기준 대비 수축 지수가 4배 감소해야 하지만, 실제로는 약 3.5배 감소한 0.19의 값을 보였으며 EXP2에서는 자료 영향력이 약 2.6배 감소하여 0.25의

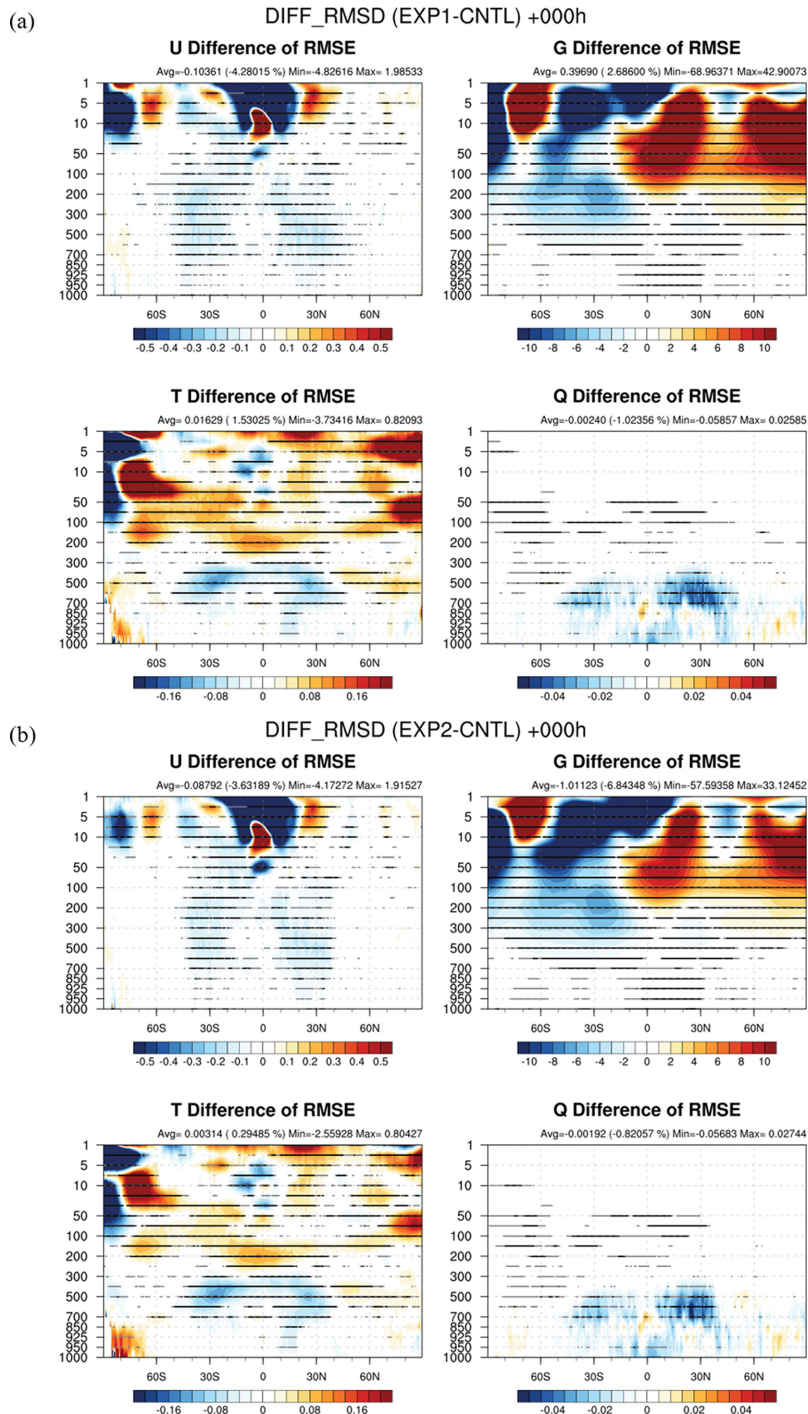
값을 가진다. 한 달 평균 수축 지수의 표준오차는 각 실험의 표준편차를 샘플개수로 나눈 값( $\frac{\sigma}{\sqrt{n}}$ )으로, 그림에서는 연직바로 함께 나타내었다. 평균 표준편차가 매우 작게 나타나서 실험 결과의 추정치가 정확하다는 것을 알 수 있다. 여러 관측 종 중에서 라디오존데의 표준편차가 다른 관측에 비해 크게 나타나는 이유는 6시간 간격 자료량의 차이에서 발생하는 것으로 추정되며 0000, 1200 UTC에서는 0004, 0600, 1800 UTC에서는 0.09의 표준편차를 보였다. 또한, AMSUA와 ATMS에서 실험 별 미세한 값의 차이가 나타났는데 이는 GNSS RO 관측오차의 변경에 따라 분석장이 변화되고, 관측자료 전처리에서 사용되는 배경장이 달라지는데 결과적으로 배경장을 이용하여 전처리를 수행하는 위성자료에도 영향을 미치게 된 것으로 보인다. 이러한 결과는 GNSS RO 자료가 상층 위성 관측자료의 편차보정에 영향을 미쳤다는 선행연구(Cucurull et al., 2014)와 유사한 결과로 확인된다.

### 3.2 자료동화 결과

각 실험에서 GNSS RO 자료의 관측영향을 조절한 자료동화 결과 분석을 위해 CNTL, EXP1~2의 분석장과 ECMWF의 IFS 분석장을 실제 대기로 가정하여 비교하였다. Figure 5는 IFS 분석장을 실제 대기로 가정하여 기준과 두 실험과의 평균제곱근오차(Root Mean Square Error, RMSE)를 각각 구한 후 실험과 기준간 차이(EXPs-CNTL, RMSD)를 위도와 고도로 나타낸



**Fig. 4.** The result of evaluation of the observational impact of CNTL, EXP1 and EXP2 experiments by observational species. The color of each line represents the experiment, and the error bar is also displayed.



**Fig. 5.** Vertical profiles of zonal mean of the analysis error difference for (a) EXP1, (b) EXP2, and (c) EXP1-EXP2 compared with CNTL during the period from 1 July to 31 July 2021. The analysis error means the Root Mean Square Difference (RMSD) of each experiment against the IFS analysis. The negative values indicate that the error in the analysis field has decreased due to modified observational error. The black and gray dots indicate significance confidence level of 95% and 68%, respectively. Parentheses indicate the average improvement rate of the experiment compared to the control.

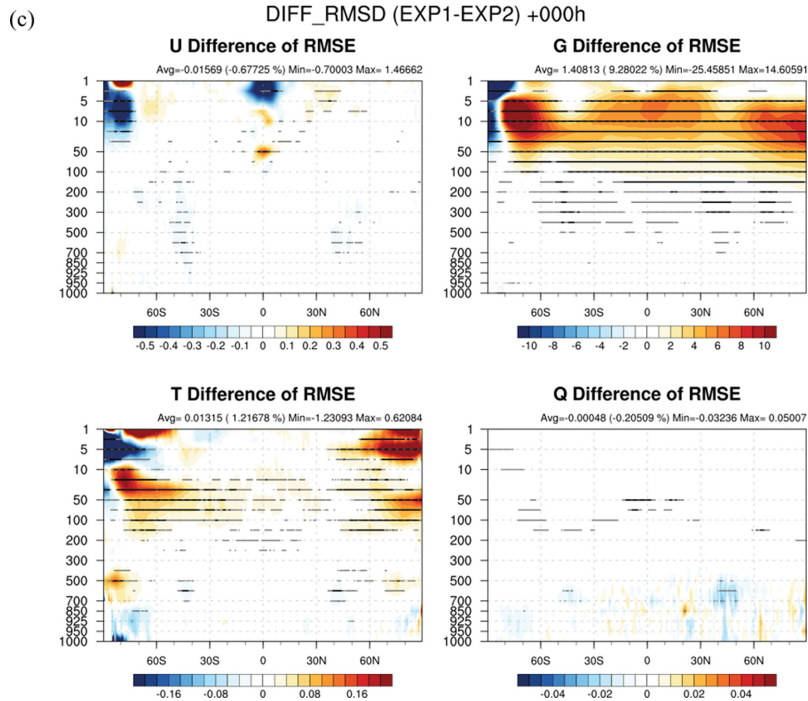


Fig. 5. Continued.

그림으로 음의 값이 실험의 성능이 개선되는 것을 의미하며 신뢰수준 68%, 95% 영역에 회색과 검은색 점을 각각 표시하였다. EXP1과 EXP2는 남위 40~90도와 북위 40~90도에서 GNSS RO 관측의 영향이 다르게 적용된 것으로 EXP1은 기준대비 관측오차가 2배 커져 관측의 영향이 줄어들었고, EXP2는 관측오차가 작아서 관측의 영향이 크게 작용하게 된다. 전반적으로 Figs. 5a, b의 패턴이 매우 유사하게 나타나고 있으나 남위 40~90도와 북위 40~90도에서 실험간 차이가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 자세히 살펴보면 동서 바람(U)은 전체 영역에 관측오차를 2배 증가한 실험(EXP1)에서는 남위와 북위 50도 부근의 약 150~700 hPa에서 기준 대비 RMSE가 감소하여 개선이 나타나지만, 적도 부근에만 관측오차를 2배 증가한 실험(EXP2)에서는 개선되는 영역이 적도에서부터 남북으로 위도 40도 이내로 제한되어 나타나고 있다. U의 분석장 성능 개선율( $\frac{EXP_s - CNTL}{CNTL} \times 100$ )은 EXP1에서 각각 -4.28%이고 EXP2에서 -3.63%로 EXP1의 개선율이 더 높게 나타났다. 온도(T)에서는 300 hPa 이하 고도에서 U와 마찬가지로 위도 40도 내외에서 개선 성능의 차이가 나타났다. 300 hPa 이상 고도에서

는 기준 대비 오차가 증가하는 패턴은 유사하였으나 실험간 강도에서 차이를 보였는데 EXP1에서 양 극 부근의 RMSD가 EXP2보다 더 컸다. 이는 전 지구적으로 관측오차를 2배 증가한 실험에서 대기 상층의 앵커(anchor) 역할을 하는 GNSS RO의 관측오차를 증가시켜 자료의 영향을 줄였으므로 상층에서의 IFS 대비 오차가 증가한 것은 당연한 결과로 보인다. 하지만 남극 하층에서는 EXP1의 RMSD가 오히려 감소하는 결과를 보였는데 이는 극 하층의 모델 불확실성이 높기 때문에 관측의 오차 또한 증가시키는 것이 분석장의 성능 개선에 중요한 것으로 보인다. 온도는 기준 대비 EXP1과 EXP2에서 각각 1.53%, 0.29% 저하되는 성능을 보였다. 지위고도(G)는 온도와 관련되어 EXP1에서 상층의 지위고도 성능 저하가 두드러졌는데 EXP1에 비해 EXP2에서는 남반구 고위도에서 성능 개선이 강화되었고, 북반부 고위도에서는 성능 저하가 약화되었다. 지위고도의 기준 대비 EXP1과 EXP2는 각각 2.69% 저하, -6.84% 개선되는 성능을 보였다. 비습(Q)에서도 동서 바람, 온도 변수와 마찬가지로 위도 40도 부근에서 성능 개선 차이가 뚜렷하였고 EXP1과 EXP2의 개선율이 각각 -1.02%, -0.82%로 나타나서 EXP1에서의 분석장 성능이 더 크게 나타났다.



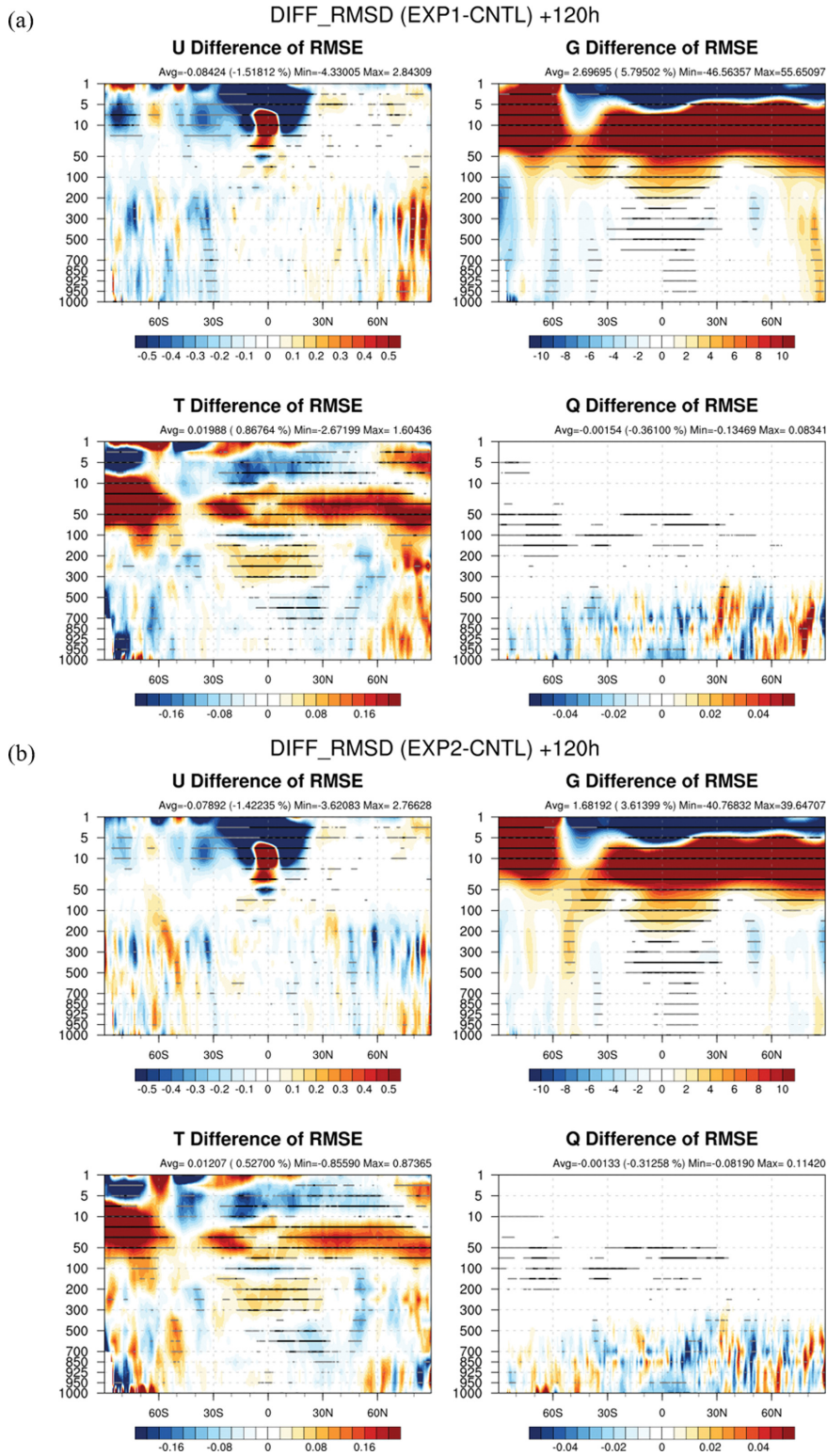


Fig. 6. Same as in Fig. 5 except for 5-day forecast.

(c)

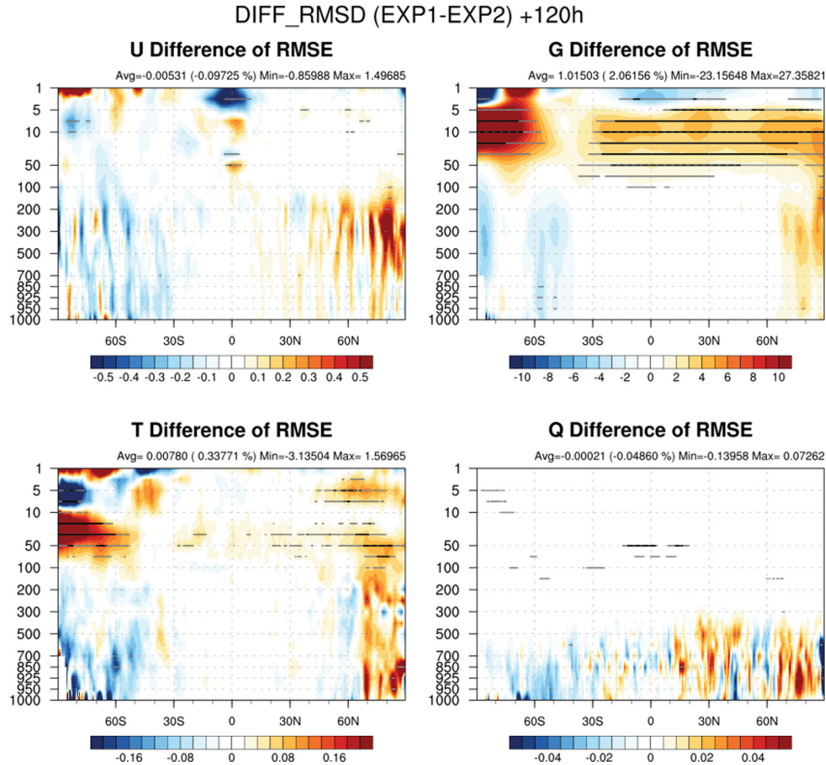


Fig. 6. Continued.

기준 대비 EXP1과 EXP2 두 실험간 분석장 성능을 보다 쉽게 비교하기 위해 RMSD의 차이(EXP1-EXP2)를 Fig. 5c에 나타내었다. 두 실험의 차이는 앞서서도 언급했듯이 동서 바람의 남위와 북위 50도 부근에서 EXP1의 RMSE가 EXP2보다 작은 것으로 나타났지만, 100 hPa 이상 온도에서는 양 극에서 EXP1의 RMSE가 더 큰 것으로 나타났고 이는 앞서 설명했듯이 전 영역의 관측오차를 기존보다 2배 증가시켰기 때문에 대류권에 비해 모델의 모의 성능이 상대적으로 부정확한 성층권 이상에서는 GNSS RO의 관측 영향력을 줄임에 따라 오차가 증가하는 결과를 보인다. 온도는 EXP1에서 남극 850 hPa 이하 하층 온도는 개선되었지만, 150 hPa 이상 상층에서는 분석장의 성능이 저하되는 것으로 나타났고, 이에 대한 영향으로 상층 지위고도에서도 분석장의 성능 저하가 나타났다. 비습의 경우에는 남반구뿐만 아니라 북반구 중위도의 분석장 성능이 EXP1에서 개선되는 것을 볼 수 있다. 즉, GNSS RO의 관측오차를 전 지구 영역에서 기존보다 2배 증가한 실험의 결과에서 대류권에서는 바람, 온도, 비습에서 중립 이상의 성능 개선이 나타난 반면 성층권에서는 온도와 지위고도에서 분석장의 성능이 저하된 것을 확인하였다.

### 3.3 모델 예측 결과

이전 절에서 분석한 자료동화의 결과를 초기장으로 한 120시간 예측 결과에서도 EXP1과 EXP2가 전반적으로 유사하지만 두 실험간 관측오차가 다르게 적용된 고위도(40~90도)의 온도와 동서 바람에서 예측 성능 차이가 뚜렷하게 나타났다(Fig. 6). 이를 자세히 살펴보면, 동서 바람의 경우 EXP1에서 기준 대비 200 hPa 이하 남반구에서 RMSE가 감소하였고 북극에서는 RMSE가 증가한 반면, EXP2에서는 남반구 고위도에서 RMSE가 증가하는 고도가 나타났으며 북극에서는 EXP1에 비해 RMSE 증가 영역이 좁고 강도도 약한 것으로 나타났다. 온도는 동서 바람과 유사하게 EXP2에서 EXP1에 비해 남반구 고위도의 성능 저하, 북반구 고위도에서는 성능 개선을 보였다. 50 hPa 이상 상층의 RMSE 증가의 강도도 EXP2에서 약화된 것을 볼 수 있다. 이러한 온도 예측성능이 지위고도에 그 경향이 반영된 것을 확인할 수 있다. 비습에서도 EXP1의 남반구 성능 향상, 북반구 성능 저하가 EXP2에서 반대의 경향으로 나타나는 결과를 보였다.

앞서 분석장과 5일 예측 결과를 동서평균한 위도와 고도별로 살펴봤는데 수치모델의 예측성능을 보다 정량적인 수치로 분석하고자 한다. Figure 7은 IFS 분

(a)

	Globe						North Hemisphere						Tropics						South Hemisphere						Asia						North Pole					
	0	24	48	72	96	120	0	24	48	72	96	120	0	24	48	72	96	120	0	24	48	72	96	120	0	24	48	72	96	120	0	24	48	72	96	120
Q 700hPa	2.28	1.71	1.52	1.21	0.91	0.75	2.74	2.21	1.57	0.82	0.15	0.36	1.46	1.21	1.49	1.43	1.62	0.93	4.01	2.25	1.44	1.56	0.96	1.45	1.47	1.00	0.64	0.45	-0.60	-0.11	1.29	1.37	0.74	-0.25	1.20	-0.08
U 250hPa	3.91	2.40	1.21	1.74	1.10	0.91	2.77	2.14	1.03	1.42	0.58	-0.28	4.21	2.29	0.69	0.56	0.71	0.40	4.56	2.77	1.78	2.78	1.83	2.17	2.24	1.22	0.67	1.71	1.15	-0.83	1.03	0.65	-0.38	1.15	-0.36	-1.90
U 500hPa	4.07	1.93	1.23	1.25	0.93	0.67	5.30	2.52	1.35	0.44	-0.74	-0.88	3.04	1.59	0.41	0.65	0.11	0.30	4.26	1.82	1.54	1.83	2.00	1.60	3.30	0.72	-0.64	-0.20	-0.39	-0.68	0.85	-0.10	0.40	-1.19	-1.09	-1.34
U 850hPa	1.59	1.09	1.19	1.47	1.15	1.44	1.90	0.85	0.90	0.47	-0.50	-0.68	1.38	0.57	0.78	1.27	0.90	0.56	1.49	1.68	1.58	2.06	2.14	2.72	1.44	0.05	-0.49	0.13	-0.56	-0.47	0.47	0.00	0.21	-1.23	-2.30	-2.08
V 250hPa	3.46	1.90	1.68	2.21	1.84	1.89	2.32	0.79	1.05	2.12	0.82	0.63	3.44	1.90	0.67	0.43	0.47	0.63	4.51	3.03	2.99	3.19	3.37	3.44	2.42	0.96	1.00	2.56	1.51	-0.81	1.75	-0.05	-0.49	2.20	0.37	-1.44
V 500hPa	3.94	1.62	1.79	1.49	1.95	1.19	5.12	2.28	1.72	1.02	1.39	-0.87	2.97	1.11	0.68	0.35	0.42	-0.24	3.96	1.54	2.22	2.02	2.55	2.37	3.77	1.31	1.93	1.61	2.25	-1.44	1.21	0.72	-0.12	0.51	0.24	-2.93
V 850hPa	1.61	1.08	1.51	1.17	1.52	1.61	1.95	0.97	0.96	0.62	0.04	0.07	1.33	1.04	0.93	0.78	1.94	1.02	1.53	1.18	2.08	1.55	2.24	2.53	1.40	-0.09	1.04	-0.32	-0.98	0.56	0.38	0.47	0.04	-0.59	-2.04	-2.65
GPH 250hPa	19.43	2.86	1.20	2.18	1.37	1.00	-0.10	3.73	2.73	2.97	1.12	-0.27	17.63	1.10	-2.97	-1.81	-0.89	-0.53	30.95	2.89	0.58	1.87	1.59	1.71	11.71	1.55	4.11	3.75	3.09	0.58	-27.65	-3.83	-0.06	2.32	-0.63	-3.19
GPH 500hPa	16.71	3.31	4.56	3.03	2.42	1.40	14.81	6.77	4.67	2.09	-0.11	-2.36	20.67	19.09	35.49	14.60	11.38	7.90	16.10	5.61	2.85	2.52	2.98	2.62	14.63	2.21	6.38	4.51	2.87	0.19	0.98	1.04	1.37	0.64	-1.73	-4.14
GPH 850hPa	0.81	1.44	1.29	2.06	2.12	1.70	2.32	-0.66	-0.29	0.02	-1.70	-2.84	4.95	3.04	0.99	4.26	3.90	3.06	-1.68	1.96	2.00	2.58	3.35	3.19	-2.68	-7.84	-4.26	-2.33	-2.68	-3.67	0.15	1.00	-0.63	-1.22	-3.34	-4.04
T 250hPa	-4.00	-5.44	-2.70	-0.89	-0.05	0.12	0.55	-0.38	-0.59	-0.12	-1.00	-1.08	-16.78	-18.98	13.16	10.31	-7.47	-6.94	-2.59	-2.76	-0.38	1.35	2.07	2.70	0.83	1.40	-0.69	1.95	0.65	0.27	0.44	-0.29	0.65	0.81	-2.42	-2.54
T 500hPa	4.59	3.60	2.47	2.36	2.04	1.54	4.21	4.96	3.87	2.99	2.27	0.92	6.31	7.25	5.94	5.71	4.31	2.56	3.45	-0.42	-0.18	0.95	1.42	1.74	4.12	3.66	1.91	1.28	1.41	-0.24	-9.73	-3.24	0.39	1.08	-0.52	-1.06
T 850hPa	1.16	0.91	1.32	1.48	1.18	1.18	0.34	0.66	1.59	1.65	0.81	-0.33	2.12	1.84	2.04	2.43	1.87	1.06	1.09	0.45	0.68	0.86	1.16	2.24	2.32	1.43	2.57	2.27	2.32	0.80	-0.61	-0.17	0.35	0.75	0.85	-1.12

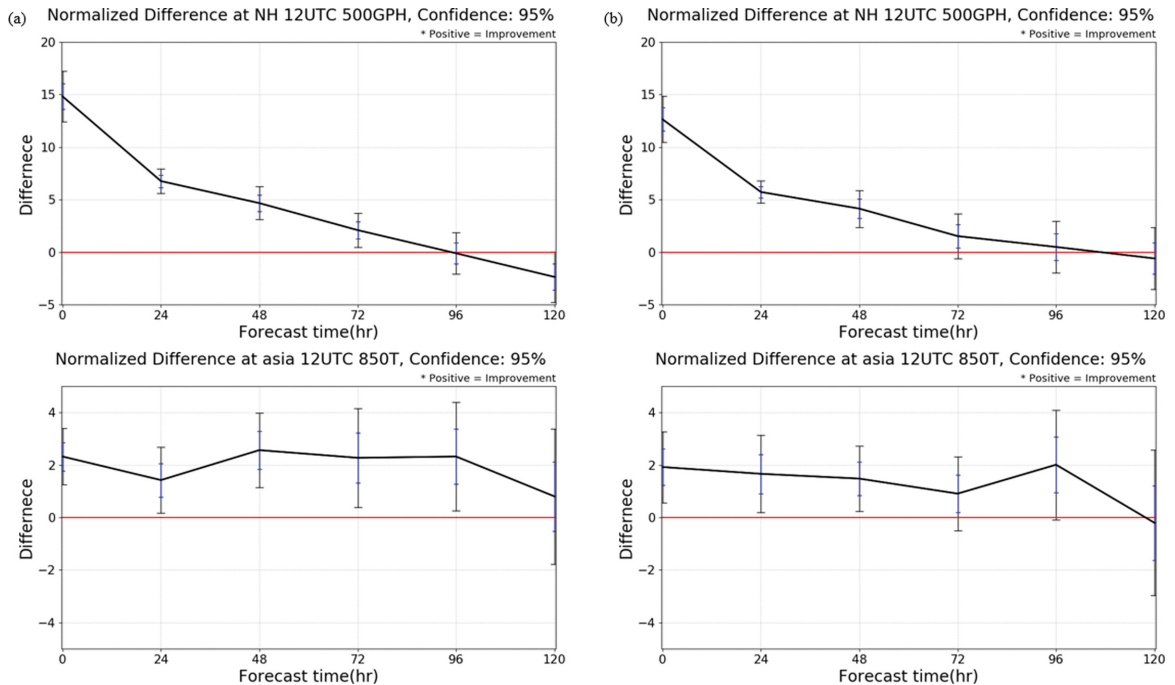
(b)

	Globe						North Hemisphere						Tropics						South Hemisphere						Asia						North Pole					
	0	24	48	72	96	120	0	24	48	72	96	120	0	24	48	72	96	120	0	24	48	72	96	120	0	24	48	72	96	120	0	24	48	72	96	120
Q 700hPa	1.68	1.22	0.99	0.82	0.67	0.61	1.94	1.53	1.14	0.50	0.11	0.58	1.10	0.76	0.85	1.14	1.35	0.55	3.16	2.06	1.06	0.46	0.20	1.02	0.68	0.47	0.17	-0.60	-0.78	0.21	1.27	0.44	-0.37	0.24	0.82	0.82
U 250hPa	3.26	1.49	0.51	0.66	0.39	0.77	1.74	0.93	0.23	0.78	1.00	1.15	4.26	1.78	0.91	0.74	0.83	-0.15	3.41	1.77	0.41	0.48	-0.36	0.88	0.96	0.71	0.81	1.42	1.81	-0.67	0.29	0.90	-0.04	1.39	0.22	0.40
U 500hPa	3.04	1.13	0.56	0.36	0.09	0.21	3.94	1.61	0.91	0.55	0.42	1.00	2.33	1.01	0.53	1.09	0.76	1.08	3.11	0.93	0.38	0.04	-0.23	-0.35	2.39	0.72	0.45	-0.68	1.47	1.41	-0.02	-0.33	0.10	0.22	-0.67	0.57
U 850hPa	1.18	0.67	0.45	0.28	-0.29	0.19	1.51	0.69	0.26	0.05	-0.51	0.09	1.17	0.58	0.79	1.17	1.16	0.32	0.90	0.71	0.36	0.04	-0.54	0.21	0.65	0.86	-1.33	-1.94	0.70	2.48	0.41	-0.31	-0.04	-0.19	-2.53	-0.65
V 250hPa	2.70	1.48	1.02	0.90	0.61	0.64	1.19	0.52	0.59	1.38	1.12	0.81	3.48	1.60	0.62	0.66	0.80	0.84	3.15	2.43	1.67	0.56	0.12	0.49	0.55	0.68	1.13	1.20	1.96	-2.47	0.59	1.00	-1.06	-0.11	0.97	-0.79
V 500hPa	2.99	0.98	0.68	0.01	0.38	-0.28	3.65	0.98	0.89	0.71	1.63	-0.17	2.66	0.96	0.68	0.00	0.28	0.11	2.78	1.01	0.54	-0.32	-0.17	-0.37	1.37	0.00	0.73	1.46	3.14	-0.18	0.39	-0.58	-0.95	-0.55	0.22	-2.48
V 850hPa	1.38	0.76	0.59	0.04	-0.19	-0.26	1.61	0.70	0.34	0.03	-0.10	0.29	1.48	1.21	0.94	1.56	1.76	0.56	1.10	0.51	0.56	-0.48	-0.65	-0.62	0.32	-0.10	0.62	-2.00	-0.28	1.43	0.30	-0.05	-0.65	-0.46	-2.53	-1.56
GPH 250hPa	23.17	4.30	1.17	-0.03	-0.55	-0.34	5.06	5.10	3.58	2.54	1.81	1.16	23.24	4.38	-0.66	0.54	-0.16	-0.88	31.98	3.73	-0.23	-1.59	-1.05	-1.09	17.64	3.07	5.11	4.53	4.76	-1.34	18.51	-0.97	-0.16	0.75	0.03	-1.15
GPH 500hPa	15.76	7.39	3.21	0.36	-0.52	-0.90	10.05	5.73	4.14	1.53	0.49	-0.60	19.53	18.75	34.67	13.54	10.38	6.66	15.05	4.58	1.12	-0.99	-1.30	-1.25	12.42	2.23	6.84	2.51	3.60	0.17	0.86	1.93	0.35	0.08	-1.34	-2.26
GPH 850hPa	1.25	1.00	0.20	-0.21	-1.17	-0.03	2.95	-0.04	-0.07	-0.16	-2.03	-1.37	5.33	3.77	1.13	3.60	2.81	2.86	-1.30	0.47	0.04	-0.64	-1.04	-0.75	-2.28	-5.46	-2.89	-3.87	-1.03	-0.47	0.95	1.21	-0.08	-0.90	-4.71	-2.41
T 250hPa	-3.47	-5.35	-2.84	-1.54	-1.12	-0.75	1.09	-0.78	-0.59	0.14	-0.68	-1.26	14.07	17.09	11.55	-0.76	-6.77	-5.79	-3.19	-3.29	-1.39	-0.99	-0.15	0.78	-0.30	0.26	0.40	2.63	3.55	1.56	0.74	0.09	-0.18	0.06	-2.42	-2.44
T 500hPa	5.48	3.55	2.14	1.18	0.97	1.03	4.31	4.41	3.57	3.14	2.63	1.38	6.38	6.79	5.48	4.74	3.39	2.89	5.77	0.31	-0.45	-1.12	-0.50	0.52	1.96	1.82	1.92	1.62	3.02	-0.35	-5.46	-1.92	-0.23	0.71	-0.36	-1.29
T 850hPa	0.63	0.49	0.75	0.57	0.03	0.12	0.18	0.43	0.95	0.96	0.48	-0.10	2.45	1.93	1.92	2.21	1.49	1.37	-0.25	-0.43	-0.08	-0.49	-0.00	-0.08	1.92	1.66	1.48	0.91	2.01	-0.20	-1.04	-0.37	0.43	1.25	-0.22	-0.67

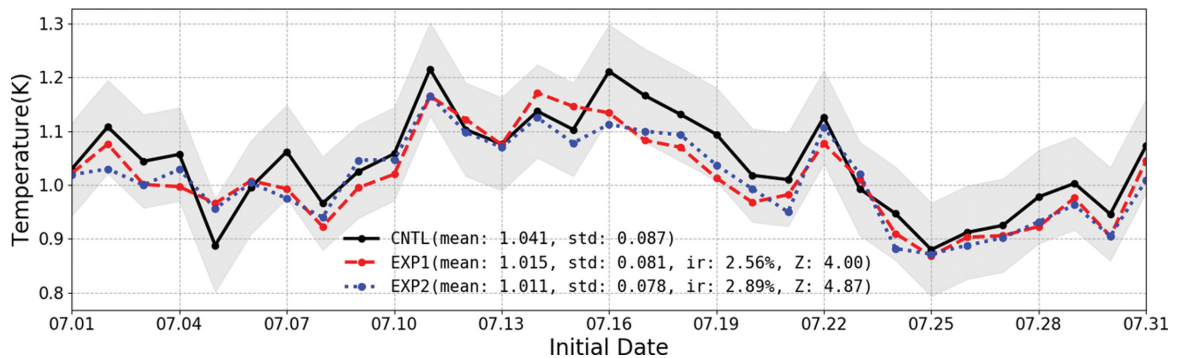
Fig. 7. Score card of regional averaged root mean square error (RMSE) of analysis and forecast field for (a) EXP1 and (b) EXP2 compared with CNTL against IFS analysis at 1200 UTC during the period from 1 to 31 July 2021. The positive value indicates improvement of EXPs.

석장 대비 두 실험에 대한 포괄적인 예측 검증 결과를 보여주는 그림이다. 전구, 북반구, 적도, 남반구, 아시아 영역에 대해 비습, 동서 바람, 남북 바람, 지위 고도, 온도 변수의 분석에서 120시간 예측까지 기준 대비 두 실험의 개선율  $\left(\frac{CNTL - EXPs}{CNTL} \times 100, \%\right)$ 을 나타낸 것이다. 두 실험의 예측결과는 분석장과 마찬가지로 전반적으로 매우 유사하게 나타났지만, 영역과 변수별로 차이를 보였다. 북반구와 적도, 아시아에서는 대체로 유사한 결과를 보였는데 특히, 적도의 중상층 지위고도의 분석장 성능 개선이 두드러졌다. 남반구에서 주로 성능 차이가 나타났는데 두 실험의 중상층 온도와 중상층 지위고도의 분석장에서 성능 개선을 보였으나, EXP1에서는 예측이 진행됨에 따라 개

선이 유지된 반면, EXP2에서는 초기 예측성능은 EXP1과 유사하였지만 점점 성능이 저하되었다. 적도 상층 온도에서는 분석장뿐만 아니라 5일 예측장까지 성능 저하가 뚜렷하게 나타났는데 이는 3.2절에서도 언급되었듯이 관측오차를 2배 증가하였기에 나타나는 결과로 보인다. 전구 영역에서는 남반구의 성능과 유사하게 EXP1에서는 상층 온도에서 분석장부터 4일 예측까지 예측성능의 저하가 나타났을 뿐 나머지 변수와 예측시간에서는 개선을 보였다. 북반구와 아시아의 예측후반 성능이 개선되고 적도의 상층 온도의 성능이 저하되었다. Figure 7에서 기준 대비 각 실험의 RMSE 개선율을 보였지만 어느 정도 신뢰 가능한 수치인지를 분석하기에는 다소 어려움이 있다. 따라서 예측성능의 유의성을 평가하기 위해 주요 검증 요소인 북반구 500



**Fig. 8.** Normalized difference root mean square error (RMSE) of forecast time in Northern hemisphere (upper) and Asia (lower) for (a) EXP1 and (b) EXP2 compared with CNTL against IFS analysis at 1200 UTC during the period from 1 to 31 July 2021. The positive value indicates improvement of EXPs. Black and blue range bar are confidence level of 95.0% and 68.3%, respectively.



**Fig. 9.** The time series of root mean square errors (RMSE) of 120 hours forecast 500 hPa temperature (K) in the tropics (20S~20N) in the CNTL (black line), EXP1 (red line), and EXP2 (blue line) experiments, verified against the IFS analysis, for a month period. The grey shaded area represents from min to max standard deviation of CNTL at 1200 UTC.

hPa 지위고도와 아시아 850 hPa 온도에 대해 기준과 두 실험 간 RMSE 개선율( $\frac{CNTL - EXPs}{CNTL} \times 100, \%$ )에 대해 신뢰수준 95%, 68.3%를 각각 검은색, 파란색 오차막대로 표시하였다(Fig. 8). EXP1의 북반구 500 hPa 지위고도는 분석장에서 기준 대비 약 15% 개선되었

지만 성능이 점점 저하되어 5일 예측에서는 약 -3%로 유의미하게 저하되는 결과를 보였다. 850 hPa 온도에서는 분석장부터 5일 예측까지 유의미하게 개선되는 결과를 보였다. EXP2에서는 EXP1에 비해 개선율이 다소 줄어든 것으로 나타났는데 500 hPa 지위고도와 850 hPa 온도의 5일 예측에서 약 -1% 내에서

저하되었지만 신뢰구간 내에 위치하고 있어서 중립이라 할 수 있다.

Figure 9는 500 hPa 열대지방 온도에 대한 5일 예측의 2021년 7월 한 달에 대한 각 실험별 RMSE의 시계열이다. COSMIC-2 자료동화는 실험 기간 동안 열대지방의 증층 기온을 크게 개선시키며 이는 Lien et al. (2021)에서 보고한 결과와 유사하게 나타나고 있다. 기준 대비 EXP1은 2.56%, EXP2는 2.89% 개선되었다. Z score는 1 이상 값일 때 유의함을 의미하는데 두 실험 모두 3 이상 값을 보여 유의한 결과라는 것을 확인할 수 있다.

#### 4. 요약 및 결론

이 연구는 신규 COSMIC-2 GNSS RO 자료를 KIM에 최초로 활용한 결과이다. 전 세계적으로 가장 영향력이 컸던 COSMIC-1의 후속 위성인 COSMIC-2 위성자료를 KIM에 활용하기 위해 GNSS RO 자료의 관측오차를 우선 진단하였다. GNSS RO의 관측오차를 다른 관측과 비교하고 팽창계수(inflation factor)를 조정하여 예측성능을 향상하기 위해 관측과 모델 간 균형을 찾고자 하였다.

기준의 관측오차를 관측 비용함수( $J_o$ )를 기반으로 진단한 결과, GNSS RO의 입력 관측오차가 다른 위성에 비해 과도하게 작게 설정되어 있어 이를 다른 위성과 유사한 수준으로 증가시키기 위해 기준 대비 관측오차를 2배로 증대하였다. 또한, 관측 밀집도에 따른 관측 영향 민감도를 살펴보기 위해 COSMIC-2 자료가 집중되어 있는 남위와 북위 40도 이내에만 관측오차를 2배로 증가하고 그 이외 영역에서는 기준과 동일하게 설정하여 비교하였다.

COSMIC-2 자료의 밀집도가 높은 적도와 GNSS RO 자료의 영향이 크게 나타나는 남반구에서 분석장의 성능이 월등하게 향상되었다. 특히, COSMIC-2 자료가 집중적으로 분포하고 있는 영역에만 관측오차를 2배 증가하는 것보다 전 지구 영역에 동일하게 2배 팽창하는 것이 기준 대비 남반구에서의 예측성능에 긍정적인 영향을 미쳤고 전 지구적으로도 성능이 향상되는 결과를 보였다. 이는 GNSS RO 관측오차 조정을 통해 수치모델 내에서 관측과 배경장간 균형이 잘 맞으면서 더 좋은 예측 결과를 나타내는 것으로 보인다. 이 연구를 통해 COSMIC-2 신규 위성자료를 추가로 활용할 때, 전 지구 영역에 관측오차를 2배로 증가시키는 것이 GNSS RO 자료의 관측영향이 크게 미치는 남반구에서 KIM의 예측성능을 향상시킨다는 것을 알 수 있었다.

지역별, 위성별 관측자료의 영향이 다르게 나타나므로 추후 관측오차를 세밀하게 조정할 필요가 있다.

또한 전 세계적으로 GNSS RO 관측 미션들이 증가하고 있어서 신규 자료의 추가 활용을 꾸준히 진행해 나갈 예정이다. 관측자료 활용률 증대와 함께 자료동화 결과로부터 관측오차를 직접 산출하는 등 관측오차 상세화를 위한 질적 향상 연구도 수행할 계획으로 KIM의 초기장 성능 개선에 긍정적 영향을 미쳐 예측장 성능에도 기여할 것으로 기대한다.

#### 감사의 글

본 논문의 완성도를 높이기 위해 좋은 의견을 제시해 주신 두 분의 심사위원께 감사를 드립니다. 이 연구는 수치모델링센터 『수치예보 및 자료응용 기술개발(KMA2018-00721)』 과제의 일환으로 수행되었습니다.

#### REFERENCES

- Anthes, R. A., 2011: Exploring earth's atmosphere with radio occultation: contributions to weather, climate and space weather. *Atmos. Meas. Tech.*, **4**, 1077-1103, doi:10.5194/amt-4-1077-2011.
- Bauer, P., G. Radnóti, S. Healy, and C. Cardinali, 2014: GNSS radio occultation constellation system experiments. *Mon. Wea. Rev.*, **142**, 555-572, doi:10.1175/MWR-D-13-00130.1.
- Bonavita, M., 2014: On some aspects of the impact of GPSRO observations in global numerical weather prediction. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **140**, 2546-2562, doi:10.1002/qj.2320.
- Cucurull, L., R. A. Anthes, and L.-L. Tsao, 2014: Radio occultation observations as anchor observations in numerical weather prediction models and associated reduction of bias corrections in microwave and infrared satellite observations. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **31**, 20-32, doi:10.1175/JTECH-D-13-00059.1.
- Desroziers, G., L. Berre, B. Chapnik, and P. Poli, 2005: Diagnosis of observation, background and analysis-error statistics in observation space. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **131**, 3385-3396, doi:10.1256/qj.05.108.
- Ho, S.-P., and Coauthors, 2020: The COSMIC/FORMO-SAT-3 radio occultation mission after 12 years: accomplishments, remaining challenges, and potential impacts of COSMIC-2. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **101**, e1107-e1136, doi:10.1175/BAMS-D-18-0290.1.
- 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.
- Kim, E.-H., Y. Jo, E. Lee, and Y. H. Lee, 2021: A study on

- improvement of the use and quality control for new GNSS RO satellite data in Korean integrated Model. *Atmosphere*, **31**, 251-265, doi:10.14191/Atmos.2021.31.3.251.
- Kwon, H., J.-S. Kang, Y. Jo, and J. H. Kang, 2015: Implementation of a GPS-RO data processing system for the KIAPS-LETKF data assimilation system. *Atmos. Meas. Tech.*, **8**, 1259-1273, doi:10.5194/amt-8-1259-2015.
- Lien, G.-Y., and Coauthors, 2021: Assimilation impact of early FORMOSAT-7/COSMIC-2 GNSS radio occultation data with Taiwan's CWB global forecast system. *Mon. Wea. Rev.*, **149**, 2171-2191, doi:10.1175/MWR-D-20-0267.1.
- Ruston, B., and S. Healy, 2020: Forecast impact of FORMOSAT-7/COSMIC-2 GNSS radio occultation measurements. *Atmos. Sci. Lett.*, **22**, e1019, doi:10.1002/asl.1019.
- Schreiner, W. S., 2020: COSMIC-2 Radio Occultation Constellation: First Results. *Geophys. Res. Lett.*, **47**, e2019GL086841, doi:10.1029/2019GL086841.
- Shao, H., K. Bathmann, H. Zhang, Z.-M. Huang, L. Cucurull, F. Vandenberghe, R. Treadon, D. Kleist, and J. Yoe, 2020: COSMIC-2 NWP assessment and implementation at JCSDA and NCEP. *Fifth Int. Conf. on GPS radio occultation*, Hsinchu, Taiwan.

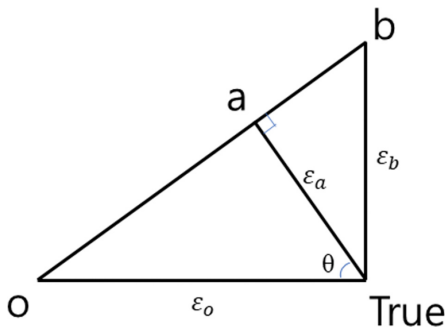
**부록 A: 관측오차 진단**

이 연구에 사용된 관측오차 진단 방법은 Desroziers et al. (2005)을 기반으로 하며 현업 자료동화시스템의 변분자료동화 과정이 선형추정이론을 따른다는 가정 하에 이루어졌다. 이때 Fig. A1처럼 삼각 도형으로 표현하면 이해에 도움이 된다. 그림에서  $o$ 는 관측,  $b$ 는 배경장,  $a$ 는 분석장, True는 실제 대기의 정상 상태를 나타내고  $\epsilon_o$ 는 관측의 표준편차(관측오차,  $\sigma_o$ ),  $\epsilon_b$ 는 배경장의 표준편차(배경오차,  $\sigma_b$ ),  $\epsilon_a$ 를 분석장의 표준편차(분석오차,  $\sigma_a$ )라고 정의한다. Desroziers 방법은 두 가지 가정을 사용하는데 첫째는 관측오차와 배경오차는 상관이 없는 서로 독립적이라는 것이고 둘째는 분석장 산출 시 관측( $o$ ), 배경장( $b$ ), 분석장( $a$ )에 편향(bias)이 없다는 것이다.

초기 관측 비용함수는 배경장( $b$ )과 관측( $o$ )의 차이로 구해진 비용함수로 식(A1)으로 정의하여 관측 개수( $N$ )으로 나누면 식(A2)로 다시 쓸 수 있다.

$$J_o^{initial} = \frac{\sum_i^{N^{initial}} (o-b)_i^2}{\sigma_o^2 input} = \frac{\sum_i^N (o-b)_i^2}{\tilde{\sigma}_o^2 input} \quad (A1)$$

$$\frac{J_o^{initial}}{N^{initial}} = \frac{(o-b)^2}{\tilde{\sigma}_o^2 input} \quad (A2)$$



**Fig. A1.** Triangular diagram of observation error diagnosis based on Desroziers method.

식(A2)에서 분자항만을 풀어쓰면 식(A3)과 같다. 이때, 관측오차와 배경오차 사이에는 상관이 없으므로  $Cov(\epsilon_o, \epsilon_b)$ 은 0이 되며 편향도 없으므로  $(o-b)^2$  역시 0이 된다.

$$\begin{aligned} (o-b)^2 &= \sigma_{o-b}^2 + (o-b)^2 = \sigma_o^2 + \sigma_b^2 \\ -2Cov(\epsilon_o, \epsilon_b) + (o-b)^2 &= \sigma_o^2 + \sigma_b^2 \end{aligned} \quad (A3)$$

최종 관측 비용함수에 대해서도 동일하게 적용하면 식(A4)로 정의할 수 있고 관측 개수( $N$ )으로 나누면 식(A5)로 다시 표현할 수 있다.

$$J_o^{final} = \frac{\sum_i^{N^{final}} (o-a)_i^2}{\sigma_o^2 input} = \frac{\sum_i^N (o-a)_i^2}{\tilde{\sigma}_o^2 input} \quad (A4)$$

$$\frac{J_o^{final}}{N^{final}} = \frac{(o-a)^2}{\tilde{\sigma}_o^2 input} \quad (A5)$$

식(A5)에서 분자항만을 풀어쓸 때,  $Cov(\epsilon_o, \epsilon_a)$ 은  $\sigma_o \sigma_a \cos \theta$ 에 의해  $(\sigma_o^2)$ 이 되며 편향은 없으므로  $(o-a)^2$ 는 0이 되어 식(A6)과 같이 된다.

$$\begin{aligned} (o-a)^2 &= \sigma_{o-a}^2 + (o-a)^2 = \sigma_o^2 + \sigma_a^2 - 2Cov(\epsilon_o, \epsilon_a) \\ + (o-a)^2 &= \sigma_o^2 + \sigma_a^2 - 2\sigma_o^2 = \sigma_o^2 - \sigma_a^2 \end{aligned} \quad (A6)$$

초기와 최종 관측 비용함수를 각각 관측개수( $N$ )로 나눈 식(A2)와 (A5)을 더한 값을 수축 지수 식(A7)로 다시 쓸 수 있다. 여기서 Desroziers 방법으로 산출된 배경오차( $\sigma_b^2$ )와 분석오차( $\sigma_a^2$ )의 차이가 관측오차( $\sigma_o^2$ )에 비해서 현저히 적은 값이라고 가정하면, 수축 지수는 초기 설정한 관측오차( $\tilde{\sigma}_o^2 input$ ) 대비 산출된 관측오차의( $\sigma_o^2$ ) 비율을 나타낸다.

Shrink Index

$$= \frac{J_o^{initial}}{N^{initial}} + \frac{J_o^{final}}{N^{final}} \approx \frac{2\sigma_o^2 + \sigma_b^2 - \sigma_a^2}{\tilde{\sigma}_o^2 input} \approx \frac{2\sigma_o^2}{\tilde{\sigma}_o^2 input} \quad (A7)$$