

## KIAPS 자료동화 시스템에서 AMSU-A의 품질검사 및 편향보정 반복기법에 관한 연구

정한별<sup>1)2)\*</sup> · 전형욱<sup>1)</sup> · 이시혜<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>(재)한국형수치예보모델개발사업단, <sup>2)</sup>이화여자대학교 공과대학 기후·에너지시스템공학과

(접수일: 2019년 2월 7일, 수정일: 2019년 6월 9일, 게재확정일: 2019년 7월 2일)

### A Study of Iterative QC-BC Method for AMSU-A in the KIAPS Data Assimilation System

Han-Byeol Jeong<sup>1)2)\*</sup>, Hyoung-Wook Chun<sup>1)</sup>, and Sihye Lee<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Korea Institute of Atmospheric Prediction Systems, Seoul, Korea

<sup>2)</sup>Department of Climate & Energy Systems Engineering, School of Engineering,  
Ewha Womans University, Seoul, Korea

(Manuscript received 7 February 2019; revised 9 June 2019; accepted 2 July 2019)

**Abstract** Bias correction (BC) and quality control (QC) are essential steps for the proper use of satellite observations in data assimilation (DA) system. BC should be calculated over quality controlled observation. And also QC should be performed for bias corrected observation. In the Korea Institute of Atmospheric Prediction Systems (KIAPS) Package for Observation Processing (KPOP), we adopted an adaptive BC method that calculates the BC coefficients with background at the analysis time rather than using static BC coefficients. In this study, we have developed an iterative QC-BC method for Advanced Microwave Sounding Unit-A (AMSU-A) to reduce the negative feedback from the interaction between BC and QC. The new iterative QC-BC is evaluated in the KIAPS 3-dimensional variational (3DVAR) DA cycle for January 2016. The iterative QC-BC method for AMSU-A shows globally significant benefits for error reduction of the temperature. The positive impacts for the temperature were predominant at latitudes of 30°~90° of both hemispheres. Moreover, the background warm bias across the troposphere is decreased. Even though AMSU-A is mainly designed for atmospheric temperature sounding, the improvement of AMSU-A pre-processing module has a positive impact on the wind component over latitudes of 30°S near upper-troposphere, respectively. Consequently, the 3-day-forecast-accuracy is improved about 1% for temperature and zonal wind in the troposphere.

**Key words:** KPOP, AMSU-A, bias correction, quality control, iterative QC-BC method

## 1. 서 론

자료동화는 기상관측자료(observation, O)와 수치예보모델의 배경장(background field, B; 6시간 예보장)

을 활용하여 수치예보모델의 초기장인 분석장(analysis field)을 생산하는 과정이다. 수치예보모델의 예보정확도 향상을 위해서는 자료동화 과정을 통해 적절한 관측자료를 사용하여 실제 대기와 유사한 분석장을 생성하는 것이 중요하다. 자료동화의 효율을 높이기 위해서 사용되는 관측은 편향(bias)이 없고, 오차는 정규분포(Gaussian distribution)를 이룬다는 기본적인 통계적 가정을 만족해야 한다(Rabier et al., 2000; Rawlins et al., 2007; Song and Kwon, 2015). 그러나 관측자료

\*Corresponding Author: Han-Byeol Jeong, Korea Institute of Atmospheric Prediction Systems, 4F, Park Square, 35 Boramae-ro 5-gil, Dongjak-gu, Seoul 07071, Korea.  
Phone: +82-2-6959-1618, Fax: +82-2-6919-2121  
E-mail: hb.jeong@kiaps.org

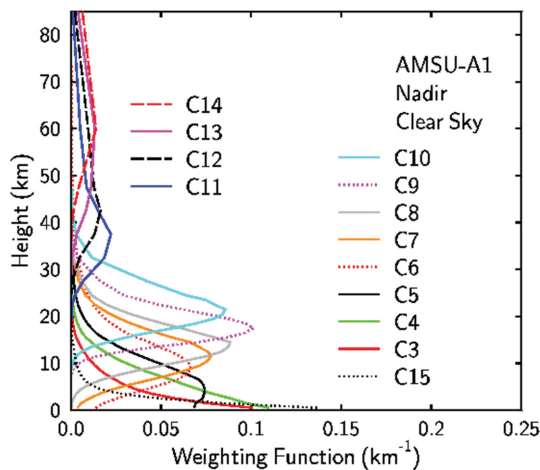


Fig. 1. AMSU-A weighting function of each channel (<http://amsu.ssec.wisc.edu/explanation.html>).

는 다양한 원인에 의해 편향을 가지고 있으며, 관측 자료의 오차는 정규분포를 이루지 못한다(Hollingsworth et al., 1986; Lorenc and Hammon, 1988). 따라서 관측자료를 자료동화에 활용하기 위해서는 여러 단계의 전처리(pre-processing) 과정이 필요하다. 일반적으로 편향보정(bias correction; BC)을 비롯한 관측의 전처리는 수치모델의 예보정확도에 상당한 영향을 미치기 때문에 관측자료 전처리 시스템은 수치예보모델의 특성을 고려하여 개발된다(Auligné et al., 2007; Kelly et al., 2007; Rabier, 2011). 영국 기상청(United Kingdom Met Office; UKMO)은 Observation Processing System (OPS) (Hilton et al., 2009)을 사용하고 있으며, 유럽중기예보센터(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts; ECMWF)는 Continuous Observation Processing Environment (COPE) (Isaksen, 2011) 시스템을 구축하여 각자의 모델 특성에 맞는 개별 관측 중의 전처리 방법을 개발하였다. 한국형수치예보모델개발사업단(Korea Institute of Atmospheric Prediction Systems; KIAPS)에서는 육면체구 격자 기반의 전구모델인 Korean Integrated Model (KIM)을 개발하였으며(Choi and Hong, 2016; Hong et al., 2018), KIM의 자료동화 시스템에 사용되는 모든 관측자료의 전처리를 위해 KIAPS Package of Observation Processing (KPOP)을 함께 개발하였다(Kang et al., 2018).

Advanced Microwave Sounding Unit-A (AMSU-A)는 극 궤도 위성(polar-orbit satellite)에 탑재 되어있는 마이크로파 센서로, 15개의 채널(23.8~89.0 GHz)로 구성되어 지표면에서 상부 중간권까지 넓은 영역에 걸쳐 대기의 온도 연직 프로파일을 제공한다(Fig. 1). 다양한 위성자료 중 AMSU-A 복사자료는 수치예보모

델의 전 지구 예측에 대한 기여도가 크다고 알려져 있다(Cardinali, 2009; Gelaro et al., 2010; Joo et al., 2013; Lorenc and Marriott, 2014). KPOP에는 AMSU-A의 품질검사(quality control; QC) 및 편향보정을 수행할 수 있는 전처리 과정을 포함하고 있다(Lee et al., 2013). Lee et al. (2014)은 KPOP에서 적절한 AMSU-A 편향보정 방법을 찾기 위하여 다양한 통계적 방법을 이용한 분석을 시도하였다.

Auligné and McNally (2007)는 품질검사와 편향보정의 관계에 대하여 설명하였으며, 편향보정과 품질검사를 반복 수행하여 자료동화 성능을 살펴보았다. 편향보정 전에 동화에 사용할 수 없는 관측을 구별하는 1차 품질검사 과정을 수행하였으며, 이 과정에서 관측중분(관측과 배경장의 차이; O-B)을 이용해 구름의 영향을 받은 관측이나 비정상적인 관측을 제거하였다. 이때, 관측중분의 임계치(threshold)를 어떻게 정하는가에 따라 추정되는 편향의 양이 달라진다(Auligné and McNally, 2007; Kim et al., 2010). 대부분의 전처리 시스템에서는 편향이 보정된 관측(bias-corrected observation; C)과 배경장의 차이인 관측중분(C-B)을 이용하여 품질검사를 수행하기 때문에 편향보정은 다음 단계의 품질검사에 영향을 주게 된다. 따라서 편향보정과 품질검사를 반복하여 수행하게 되면 두 과정은 상호 피드백을 주어 서로에게 긍정적인 영향을 줄 것이다.

본 연구에서는 KPOP의 AMSU-A 전처리 기법을 개선하기 위하여 Auligné and McNally (2007)에서 제시한 방법을 적용하여 KIM 배경장의 특징을 고려한 관측중분의 임계치를 선택하였고, 품질검사와 편향보정을 반복 수행한 후 이에 대한 성능을 검증하였다. 편향보정과 품질검사를 반복 수행하는 기법(iterative BC-QC method)은 품질이 좋은 관측을 선택함과 동시에 관측이 가진 편향을 적절하게 보정할 수 있으므로 수치예보모델의 분석장 및 예보장의 성능에 긍정적인 영향을 줄 것으로 기대한다. 본 논문은 4장으로 구성되어 있다. 2장에서는 KPOP 시스템의 AMSU-A 전처리 과정 및 새로운 BC-QC 반복기법에 대해 보다 자세히 서술하고, 이에 대한 성능 검증을 위해 KIM 사이클 실험을 설계하였다. 3장에서는 KPOP에서 처리한 AMSU-A 전처리 결과와 사이클 실험을 통한 분석장 및 예보장의 성능에 관한 내용을 언급하였다. 요약 및 결론은 4장에 제시하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1 KPOP AMSU-A 복사자료 전처리 알고리즘

KPOP에서 사용하는 AMSU-A 복사자료는 기상청에서 제공하는 Advanced TIROS Operational Vertical

Sounder (ATOVS) 원시 자료에서 추출한 것으로 NOAA-15, -18, -19 및 MetOp-A, -B 위성의 AMSU-A level-1d 자료이다. 위성에서 관측한 밝기온도 (observed TB)는 과대오차 검사(Gross QC)를 통해 위경도 정보, 스캔 위치, 물리적인 실제 허용값 범위에서 관측된 값인지 점검하고 이상치로 판단되는 관측을 제거하였다. AMSU-A의 블랙리스팅을 위해 ECMWF, UKMO 등 여러 국의 현업기관의 정보를 수집하였으며, 관측의 품질이 낮다고 판단되는 NOAA-15의 6, 11, 14번 채널, NOAA-18의 8번 채널, NOAA-19의 7, 8번 채널, 그리고 MetOp-A의 7, 8번 채널을 제외하였다. 초기 품질검사(Initial QC)에서는 구름과 강수의 영향을 받은 관측 제거, 지표의 영향을 받거나 지형이 높은 지역의 관측 제거, 스캔 위치에 따른 관측 제거, 그리고 관측증분을 이용한 자료 선별(O-B check)이 수행된다(Grody et al., 1999, 2001).

한편, 기상변수로 된 모델 배경장 자료를 품질검사 및 편향보정에 이용하기 위해서는 관측과 같은 단위인 밝기온도로의 변수변환이 필요하다. 본 연구에서는 The European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites (EUMETSAT) Numerical Weather Prediction (NWP) Satellite Application Facility (SAF)에서 제공하는 복사전달모델인 Radiative Transfer for TIROS Operational Vertical Sounder (RTTOV) 버전 10.2에 배경장으로부터 추출한 모델변수(지면정보 및 대기프로파일)를 입력하여 모델의 밝기온도 (background TB)를 모의하였다. KPOP에서는 Harris and Kelly (2001)의 편향보정 방법에 따라 스캔 편향과 대기질량 편향을 보정하였으며, 대기질량 편향보정을 위하여 850~300 hPa과 200~50 hPa의 층후(thickness)를 대기에측변수(air-mass predictor)로 사용하였다. 편향이 보정된 관측과 배경장의 차이인 새로운 관측증분(즉, C-B)은 자료동화시스템에서 받아들이기 힘든 이상치를 제거하는 다음 단계의 품질검사에 이용하였다(outlier removal). 최종적으로 자료동화에 사용할 관측을 선택하는 솜아내기(thinning)는 관측 사이에 존재하는 공간오차상관을 없애고 자료의 밀도를 줄이기 위하여 원 관측보다 저해상도로 관측을 선택하는 과정이다(Bauer et al., 2011). KPOP에서는 1시간 간격으로 150 km의 공간해상도로 솜아내기 격자(thinning box)를 설정하여 관측을 선택한다. KPOP의 AMSU-A 복사자료의 전처리 과정에 관한 보다 자세한 방법은 Lee et al. (2013)에 서술되었다.

## 2.2 AMSU-A 편향보정 및 품질검사 반복기법

대부분 위성자료의 편향보정계수를 구하는 방법은 (1) 한 달 이상의 통계값을 누적하여 계산하는 오프라인 방법인 static BC scheme (Harris and Kelly, 2001;

Atkinson et al., 2005; Baker et al., 2005)과 (2) 자료 동화 과정의 외부 순환에서 업데이트 되는 모델의 분석장을 활용하여 편향보정계수를 계산하는 온라인 방법인 variational BC scheme (VarBC; Dee, 2004, 2005; Auligné et al., 2007; Rawlins et al., 2007; Cameron and Bell, 2016)이 있다. ECMWF, UKMO, Meteo-France, National Centers for Environmental Prediction (NCEP) 등 많은 현업기관에서는 위성 복사자료의 편향보정계수를 구하기 위해 static BC scheme을 주로 사용하였으나, 최근에는 대부분 VarBC scheme으로 대체하는 추세이다. 그러나 KIAPS에서 사용하는 위성 복사자료의 편향보정계수는 VarBC scheme을 개발완료하기 전 단계로, 장기간 자료를 이용하여 편향보정계수를 계산하는 static BC scheme과 달리 매 사이클마다 6시간 동화 창(assimilation window)을 이용한 변형된 방법(adaptive BC scheme)으로 계산된다. 그 이유는 첫째, KIM은 현재 개발단계에 있어 약 3개월마다 업데이트가 진행된다. 모델의 업데이트에 따라 모델의 특징과 배경장의 오차가 변하기 때문에, 한 달 이상의 장기간 자료에 기반한 static BC scheme을 도입하기에는 한계가 존재한다. 둘째, KIM 사이클 실험을 통한 선행 연구를 통해 장기간 누적된 자료를 이용하여 통계적으로 계산된 편향보정계수를 사용하는 것보다 분석시간마다 편향보정계수를 계산하였을 때 안정적이고 더 나은 자료동화 성능을 보여주었다(Kang et al., 2018).

KPOP의 전처리 과정에서 편향보정계수는 6시간 분석시간마다 구하기 때문에 관측의 품질검사는 다른 기관의 품질검사보다 보다 중요하게 여겨진다. KPOP의 AMSU-A 초기 품질검사 과정에서는  $|O - B| < 1 K$ 로 임계치를 설정하여 자료를 제거한다. 이는 임계치를 엄격하게 설정함으로써 품질이 보장되지 않은 관측을 이용하여 편향보정계수를 계산함으로써 나타날 수 있는 위험성을 제거하기 위함이다. 엄격한 O-B check은 품질이 낮은 관측을 안전하게 제거할 수 있지만, 실제 유용한 정보를 가지고 있는 관측을 제거하여 O-B의 정규분포를 망가뜨리는 원인이 될 수 있다. O-B의 최빈값(mode)이 0이 아니거나 정규분포가 좌우대칭 되지 않고 한쪽으로 치우쳐져 나타나는 경우는 초기 품질검사의 O-B check에서 O-B 히스토그램의 꼬리(tail)가 잘려서 나타나게 된다. 예를 들어, 배경장 대비 관측이 양의 편향(warm bias)을 가지는 경우, O-B의 최빈값은 양의 값을 가지고 O-B의 히스토그램은 양의 방향으로 치우쳐져 나타난다. 이때, 배경장보다 온도가 높은 쪽으로 치우친 관측(warm tail)은 제거되고, 반면에 배경장보다 차가운 쪽으로 치우친 관측(cold tail)은 제거되지 않고 품질검사를 통과할 것이다. 즉, O-B의 정규분포는 정규

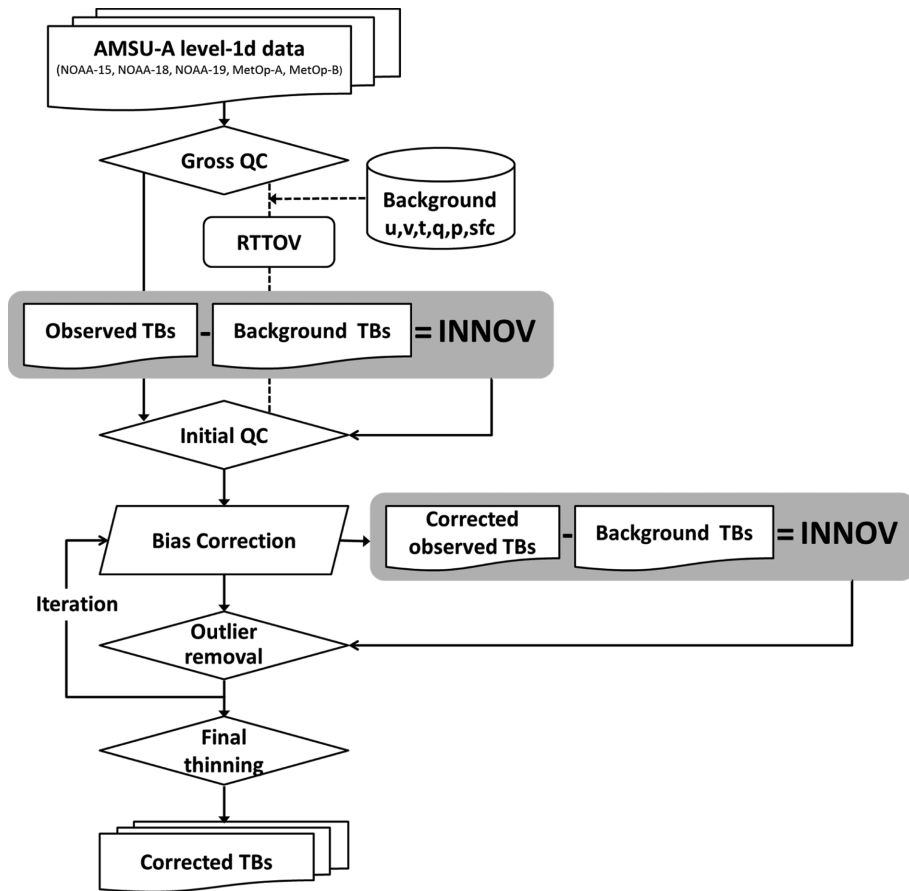


Fig. 2. Flow chart of AMSU-A pre-processing in KPOP.

분포를 이루지 못하고, 한쪽 꼬리가 잘려져서 나타나게 된다.

한편, 기존의 KPOP 모듈에서는 관측이 자료동화 과정에서 부정적인 역할을 할 여지를 최소화 하기 위하여 슈아내기 과정에서 C-B의 절댓값이 작은 관측에 높은 가중치를 할당하였다. 그러나 그 이면에는 관측의 시그널을 과소하게 반영한다는 맹점이 있다. 슈아내기는 관측의 공간오차상관을 없애기 위한 과정이므로 슈아내기를 통해 C-B의 통계적 특징이 달라져서는 안 된다. 기존에는 C-B의 절댓값이 가장 작은 관측을 선택함으로써 C-B의 표준편차가 슈아내기 이후에 더 작은 값을 가지게 되어 자료동화에서 관측의 역할이 축소되었다.

본 연구에서는 AMSU-A 관측자료를 최대한 반영하여 보다 능동적으로 동화하기 위하여, Auligné and McNally (2007)가 제안한 품질검사와 편향보정 반복기법을 적용함으로써 AMSU-A 전처리 방법을 개선하고자 한다(Fig. 2). 개선된 내용은 아래와 같다. 기

존의 엄격한 초기 품질검사 방법을 극복하기 위하여  $|O - B| < 5K$ 로 기존보다 느슨하게 설정하였으며, 이는 KIM 배경장의 O-B 표준편차의 15배 이상으로 결정하였다. 편향보정과 C-B check 수행 후 남은 관측들을 이용하여 편향보정계수를 재계산하고, 업데이트된 편향보정계수를 이용하여 편향보정과 C-B check를 반복한다. AMSU-A C-B check를 위하여  $|C - B| < 3.5\sigma$ 를 기준으로 적용하였다. 여기서  $\sigma$ 는 관측오차를 의미한다. 품질검사와 편향보정을 반복함으로써 품질이 좋은 관측들만을 선택한다는 본래 목적에 따라 O-B 평균의 수렴을 기준으로 반복횟수를 2회로 제한하였다. 이는 마이크로파 위성 관측인 AMSU-A가 적외파 관측과 비교하여 상대적으로 구름과 강수에 민감하지 않으므로 2회 반복만으로도 효과적으로 전처리를 수행할 수 있기 때문이다. 품질검사 및 편향보정을 반복하여 수행한 뒤 마지막으로 슈아내기 과정을 수행하며, 슈아내기 격자의 가장 중앙에 있는 관측을 선택하는 방법으로 변경하였다.

**Table 1.** Model configuration of cycle experiments.

Contents	CTL	EXP
Simulation time	0000 UTC 01 Jan 2016~1800 UTC 31 Jan 2016	
Model version	KIMv3.0	
Model resolution	Ne120Np4(~25 km)L50(~0.3 hPa model top)	
DA method	3DVAR with hourly FGAT (First Guess at Appropriate Time)	
DA resolution	Ne60Np4(~50 km)L50(~0.3 hPa model top)	
KPOP version	KPOPv3.0.01	
Assimilated observation	Aircraft, AMSU-A, AMV, ASCAT, ATMS, COMSCSR, CrIS, GPSRO, IASI, MHS, Scatwind, Sonde, Surface	
AMSU-A iteration number	1	2
AMSU-A initial O-B check threshold	1 K	5 K
AMSU-A outlier removal threshold		
AMSU-A thinning method	The pixel with its  C-B  being the minimum	The most closest pixel from center of thinning box

**Table 2.** Statistics of innovation for uncorrected (O-B) and corrected (C-B) observations according to the number of adaptive BC loop on MetOp-B AMSU-A channel 8 at 0000 UTC 20 January 2016. # is the number, and STDV is the standard deviation.

# of iteration	# of observation	O-B		C-B	
		Mean (K)	STDV (K)	Mean (K)	STDV (K)
1	133,478	0.377	0.398	4.49E-05	0.296
2	130,818	0.375	0.384	6.80E-05	0.276

**2.3 자료동화 실험 설계**

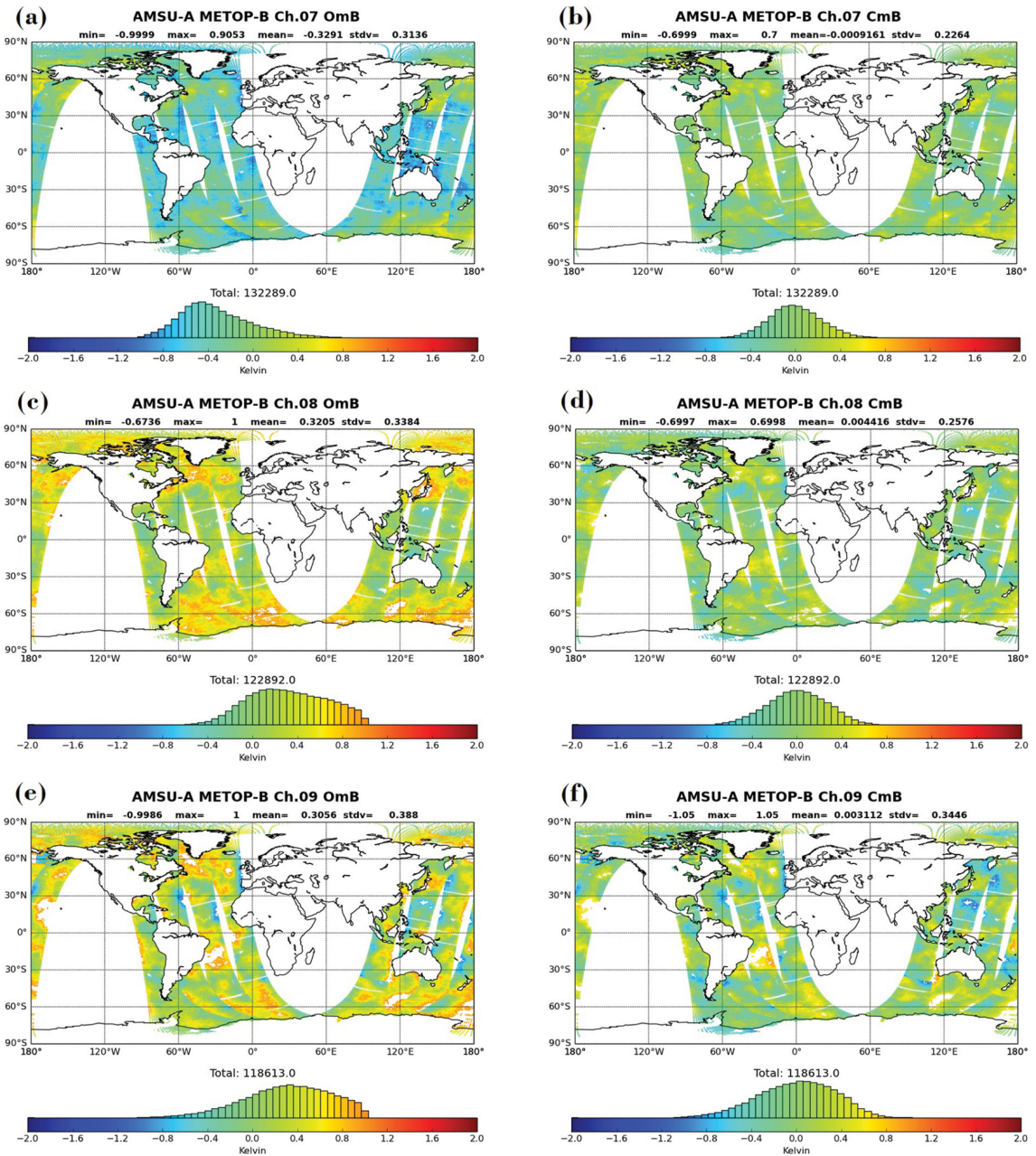
KIM VERSION 3.0 (v3.0)을 사용하여 AMSU-A의 편향보정 및 품질검사 반복기법 적용에 따른 자료동화 성능 검증을 수행하였으며, 사이클 실험을 위하여 KIM에 구축된 3차원 변분 자료동화 시스템(three-dimensional variational data assimilation system; 3DVAR; Song and Kwon, 2015)을 활용하였다. 사이클 실험은 기상청에서 산출된 2016년 1월 1일 0000 UTC의 기상청 현업모델인 Unified Model (UM) 초기자료를 시작으로 1월 31일 1800 UTC까지 한 달 동안 수행하였다. 기존의 AMSU-A 전처리 방법을 규준실험(Control; CTL)으로 설정하였으며, 종관 관측인 존데(PILOT, TEMP, wind profiler), 지면(BOUY, METAR, SHIP, SYNOP), 항공기(AIREP, AMDAR)와 위성 관측인 Advanced Scatterometer (ASCAT), Advanced Technology Microwave Sounder (ATMS), AMSU-A, Atmospheric Motion Vector (AMV), Communication, Ocean and Meteorological Satellite Clear Sky Radiance (COMSCSR), Cross-track Infrared Sounder (CrIS), Global Positioning System/Radio Occultation (GPS-RO), Infrared Atmospheric Sounding Interferometer (IASI), Microwave Humidity

Sounder (MHS)를 동화하였다. KIMv3.0에서는 AMSU-A 채널 5-10번만을 동화하는데, 그 이유는 KIMv3.0의 모델최상층(model top)이 50 km로 가중함수가 80 km까지 올라가는 상부 성층권 채널(채널 11-14번)을 동화하는 것에 어려움이 있기 때문이다(Fig. 1). 비교실험(Experiment; EXP)으로는 CTL과 동일한 실험 조건에 AMSU-A의 품질검사와 편향보정 반복기법을 적용하고 품질검사 과정을 개선하였다. 상세 실험 설계는 Table 1에 명시하였다.

**3. 실험결과**

**3.1 AMSU-A 전처리 결과 비교**

자료동화 성능 검증에 앞서 KPOP에서 수행된 AMSU-A의 전처리 결과를 살펴보았다. CTL과 EXP의 AMSU-A 전처리 결과 비교를 위하여 사이클 중반인 2016년 1월 20일 0000 UTC의 MetOp-B 위성 AMSU-A 채널 8번에 대하여 분석하였다. Table 2에서는 EXP의 AMSU-A 전처리 반복횟수에 따른 관측 증분의 통계값을 보여준다. 첫번째 반복에서 관측수가 133,478개로 나타나지만 outlier removal에서 관측



**Fig. 3.** Spatial distribution of the MetOp-B AMSU-A innovations in CTL experiment for uncorrected (left panel) and corrected (right panel) observations at 0000 UTC 20 January 2016. (a, b) channel 7. (c, d) channel 8. (e, f) channel 9.

이 제거되어 두번째 반복에서 관측수가 130,818개로 감소된 것을 확인할 수 있다. AMSU-A의 O-B 평균은 반복횟수에 따라 거의 유사하지만, 표준편차는 3.52% 감소하였다. EXP의 O-B 평균이 유사한 것으로 보아 O-B 히스토그램의 모양이 반복실험에서 거

의 일정하게 유지되었음을 알 수 있다. 이는 CTL에서 나타난 O-B 히스토그램의 한쪽 꼬리가 과하게 잘리는 문제점이 나타나지 않았음을 의미한다. C-B의 표준편차는 첫번째 반복보다 두번째 반복에서 6.76% 감소하여 첫번째 반복의 outlier removal이 두번째 반

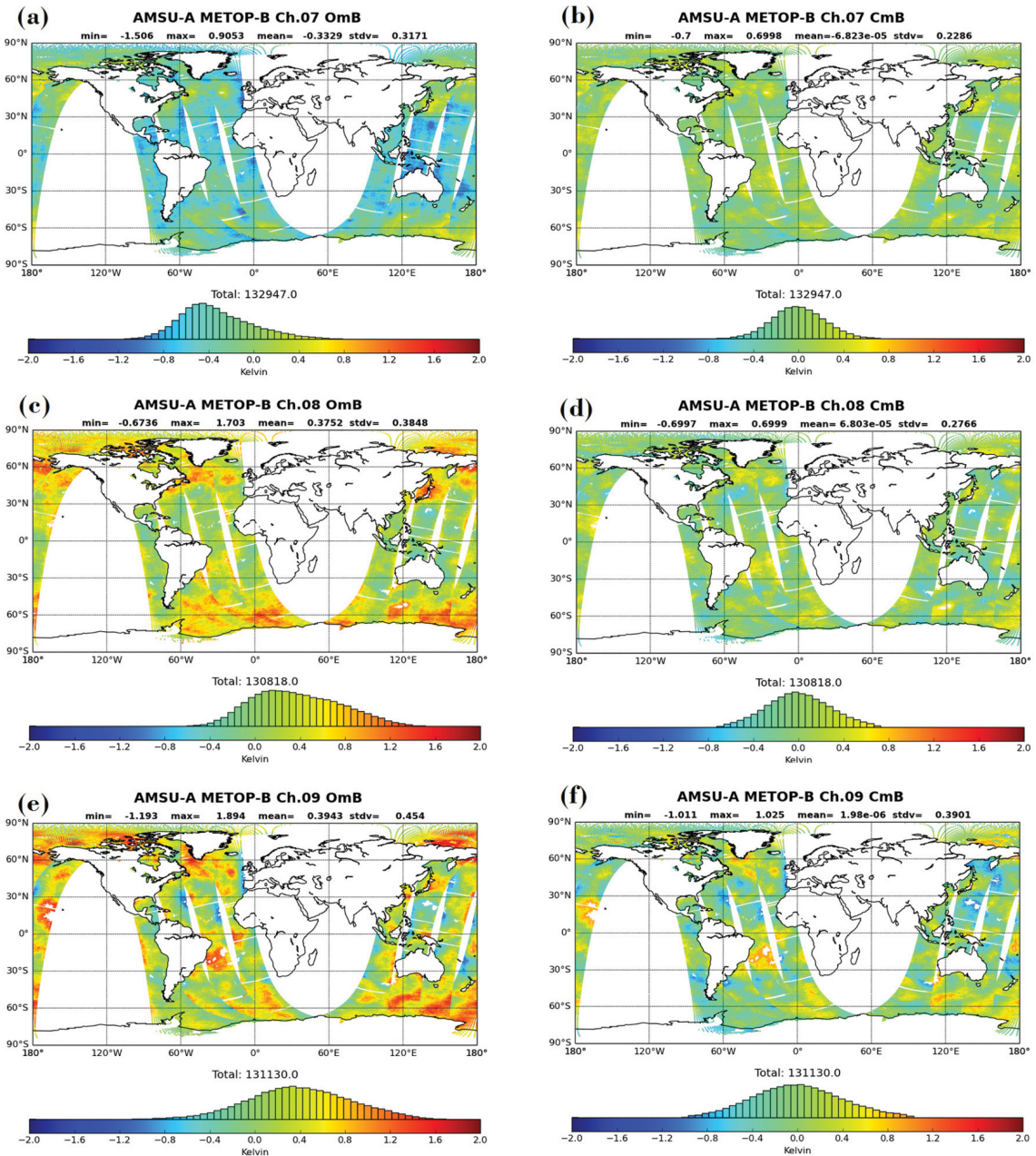


Fig. 4. Same as Fig. 3 but for EXP experiment.

복의 편향보정에 영향을 주었음을 알 수 있다. 즉, EXP에서는 품질검사와 편향보정이 반복되면서 O-B가 큰 불확실한 관측을 효과적으로 제거하고, 편향보정을 적절하게 수행하는 것이 확인되었다.

Figures 3, 4는 CTL과 EXP 실험의 편향보정 전·후에 모니터링 한 MetOp-B AMSU-A 채널 7-9번 관측

증분의 수평분포로 사이클 중반인 2016년 1월 20일 0000 UTC의 결과이다. O-B check의 임계치를 1로 설정한 CTL (Figs. 3a, b)은 AMSU-A 채널 7번의 O-B 평균이  $-0.33$ (음의 편향)이고 O-B 표준편차가 0.31로 크지 않기 때문에, EXP (Figs. 4a, b)와 마찬가지로 전처리가 정상적으로 수행되었다. 그러나 양의 편향을

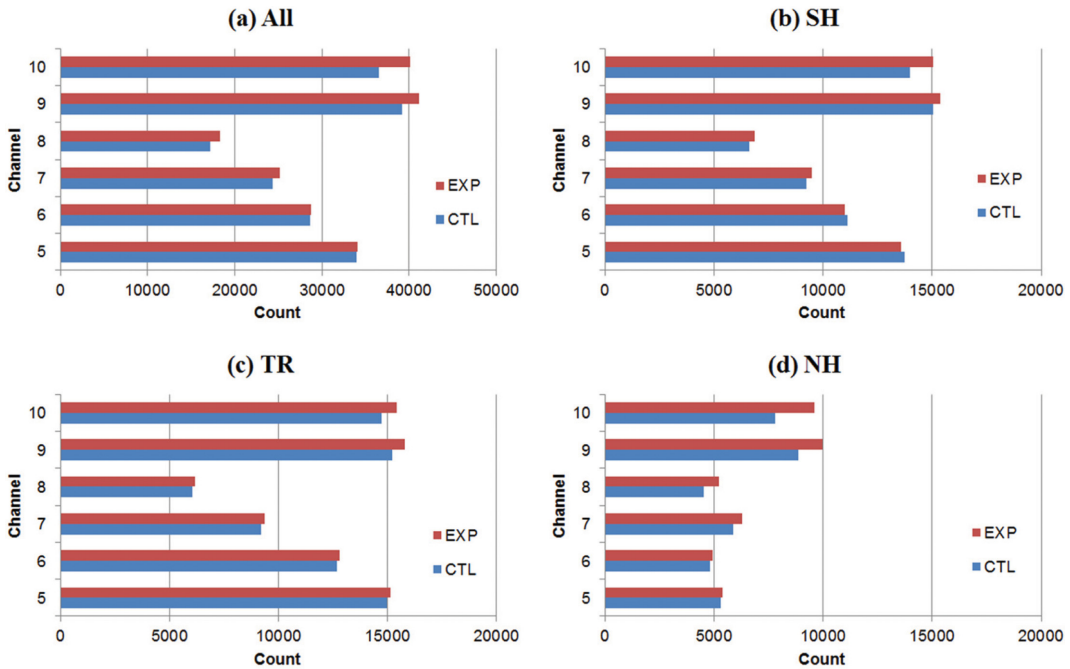


Fig. 5. The number of AMSU-A observations at 0000 UTC 20 January 2016. (a) global (ALL). (b) Southern hemisphere (SH). (c) Tropics (TR). (d) Northern hemisphere (NH).

갖는 AMSU-A 채널 8, 9번은 O-B 히스토그램에서 정규분포의 한쪽 꼬리가 잘린 것을 볼 수 있다(Figs. 3c, e). Figures 3c, e의 붉은색으로 표현된 지역의 관측들이 O-B check에서 한꺼번에 제거되는데, 해당 지역은 주변과 연속선상에서 O-B가 큰 지역이므로 이를 이상관측으로 판단하기 어렵다. 그 이유는 O-B check에서 B를 참값으로 가정하지만, 실제로 수치예보모델은 모두 오차를 가지기 때문에 O-B가 연속적으로 커지는 고위도 일부 지역은 관측의 오차보다 배경장의 오차에 의해 O-B가 크게 나타날 수 있다. 초기 품질검사의 O-B check는 배경장과 관측을 비교하여 불연속적으로 오류가 있는 관측 혹은 심각하게 이질적인 관측을 제거하는 과정이므로 O-B가 크다는 이유로 관측을 제거해서는 안 된다. 따라서 해당 영역의 관측은 자료동화를 통해 배경장 오차를 줄이는데 긍정적인 역할을 할 것으로 기대된다. CTL에서는 엄격한 초기 품질검사로 인해 O-B와 유사하게 C-B 히스토그램이 좌우대칭 되지 않았고, C-B 평균이 0보다 큰 값을 나타냈다(Figs. 3d, f). 이를 통해 품질검사 방법이 관측의 편향을 추정함에 있어 영향을 주는 것을 확인할 수 있었다. 반면 EXP에서는 O-B가 큰 관측을 포함하여 채널 8번과 9번의 O-B 평균이 0.38과 0.39로 CTL보다 크게 나타났고, O-B 히스토그램이 정규분포 형태로 적절하게 표현되었다(Figs. 4c, e). EXP의 C-B

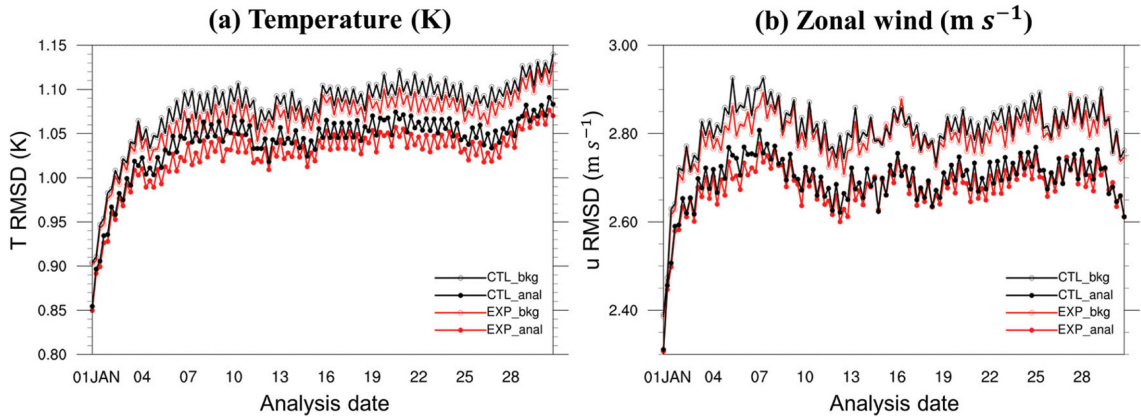
평균은 거의 0으로 편향이 적절하게 제거되었고, 표준편차는 CTL보다 큰 값을 나타내 EXP에서는 배경장과 차이가 큰 관측도 자료동화에 참여하게 되었다(Figs. 4d, f).

Figure 5는 5개 위성의 AMSU-A를 150 km의 공간 해상도로 속아내기를 한 CTL과 EXP의 채널별 관측수를 나타낸 것이다(2016년 1월 20일 0000 UTC 결과임). 전구(90°S-90°N; ALL), 남반구(90°S-30°S; SH), 열대 지역(30°S-30°N; TR), 그리고 북반구(30°N-90°N; NH)로 지역을 나누어 살펴보았다. 두 실험 모두 각 채널별로 북반구에 비해 남반구와 열대 지역의 관측이 상대적으로 더 많았다. 모든 채널에서 CTL 대비 EXP의 관측수는 비교적 배경장 오차가 작은 하층 채널에서는 변화가 크지 않았고, 상층 채널로 갈수록 관측수가 증가하였다. 전체적으로는 EXP의 AMSU-A 채널 5-10번에서 총 관측수가 CTL 보다 4.19% 증가하였다.

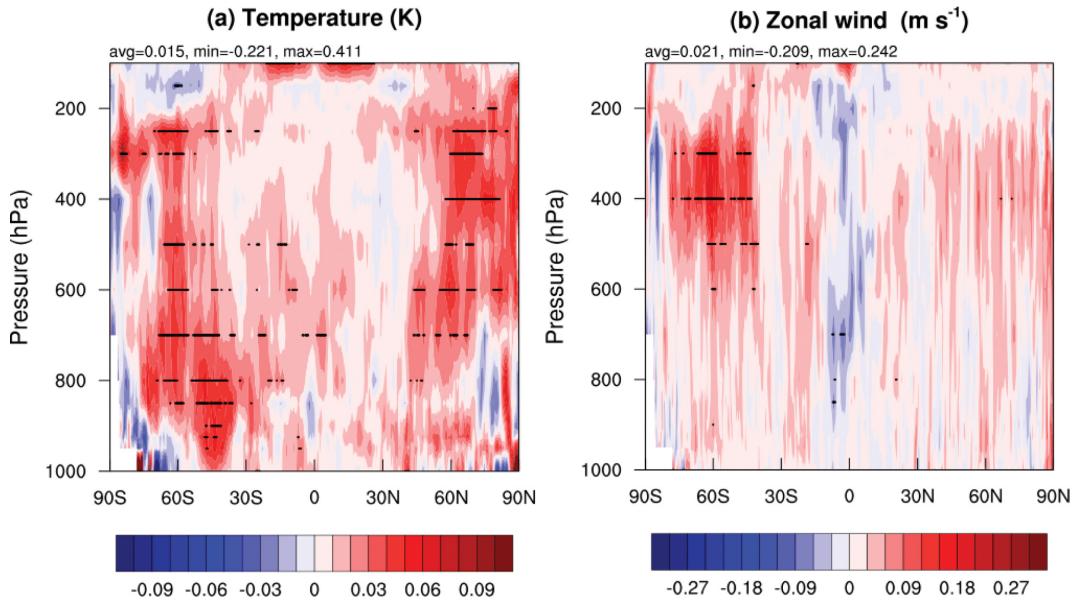
### 3.2 자료동화 성능 검증

자료동화 성능 검증을 위하여 참값에 근접하다고 여겨지는 ECMWF Integrated Forecasting System (IFS) 분석장(Andersson and Thépaut, 2008)을 활용하였다. Figure 6은 CTL (검정 실선)과 EXP (빨간 실선) 사이클 실험에서 온도와 동서풍 바람의 배경장과 분





**Fig. 6.** Time series of background and analysis RMSDs for temperature (a; K) and zonal wind (b;  $m s^{-1}$ ). Black open circles and black closed circles denote background and analysis for CTL, respectively. Red symbols stand for the same but for EXP. The global DA cycling started at 0600 UTC on 1 January 2016.

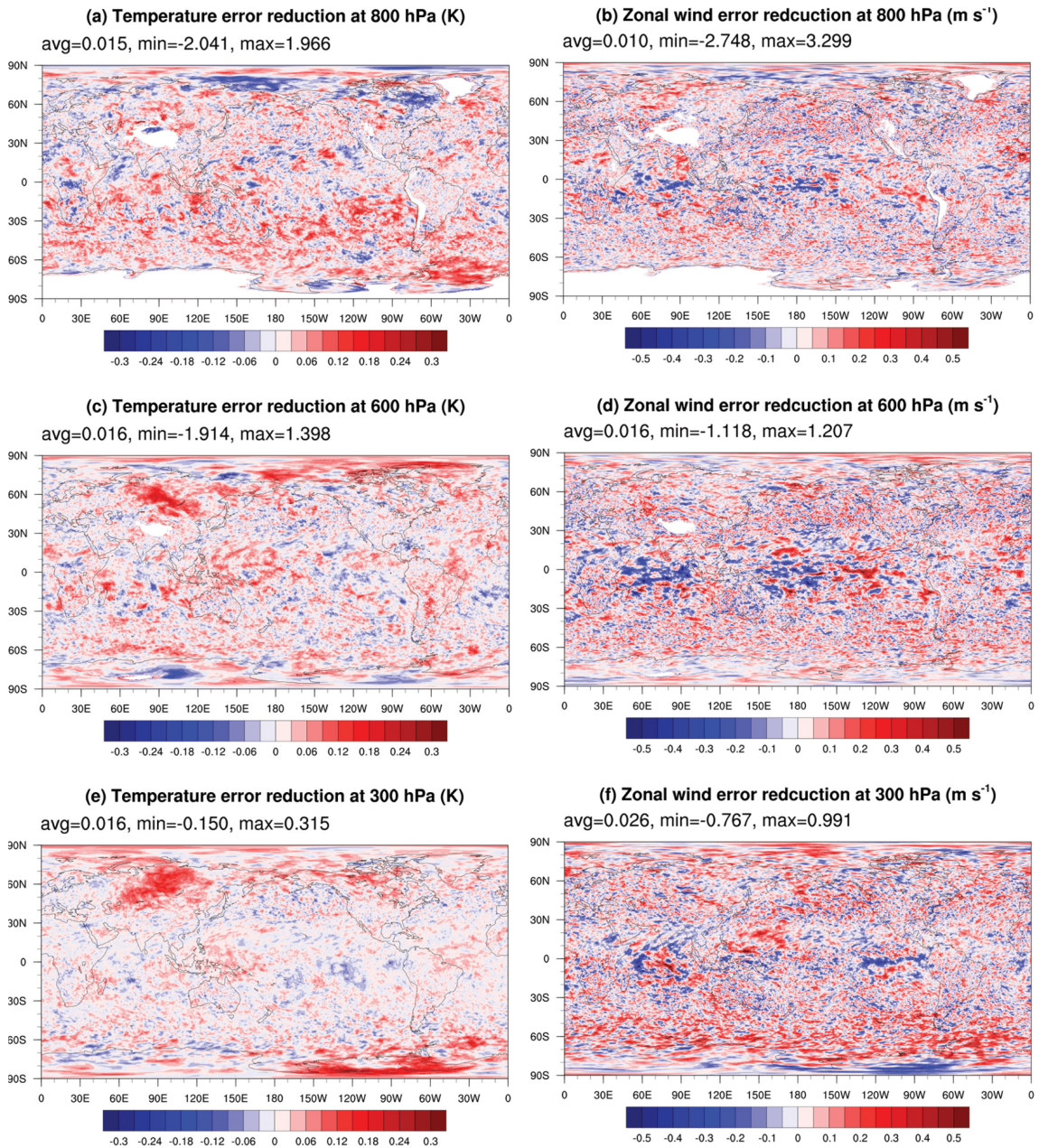


**Fig. 7.** Composite of analysis RMSDs reduction of zonal-mean temperature (a; K) and zonal-mean zonal wind (b;  $m s^{-1}$ ) against ECMWF IFS analysis, in January 2016 with 6 h interval. The vertical levels range from 1,000 to 100 hPa. The RMSD reductions are the difference of CTL RMSD and EXP RMSD (CTL RMSD-EXP RMSD), i.e., red and blue colors mean positive and negative impacts, respectively. The black-dots are marked where the difference is larger than the 95% confidence interval.

석장에 대한 IFS 분석장 대비 Root-Mean Squared Difference (RMSD)를 연직 100~1,000 hPa 고도에 대하여 전구 평균하여 시계열로 나타낸 것이다. 두 실험에서 배경장 RMSD보다 분석장 RMSD가 더 작은 것으로 보아 자료동화가 잘 수행되고 있음을 알 수 있다. 사이클 기간 전반에 걸쳐 CTL 대비 EXP의

RMSD가 줄어들어, AMSU-A 전처리 방법의 개선이 자료동화 과정에서 긍정적인 역할을 했음을 확인하였다. 온도 사운딩 관측인 AMSU-A 전처리 방법의 개선으로 온도 RMSD가 개선됨은 물론이고, 바람 RMSD 개선에도 긍정적인 영향을 주는 것으로 분석되었다.

Figure 6에서 전구 연직 평균으로 살펴보았던 분석



**Fig. 8.** Horizontal distribution of improvement of analysis of EXP from that of CTL for temperature (left panel; K) and zonal wind (right panel;  $m s^{-1}$ ) at 800 hPa (a, b), 500 hPa (c, d), and 300 hPa (e, f). The RMSD reductions are inferred from the average of analysis RMSDs during January 2016 in 6 h interval.

장 RMSD를 Fig. 7에서는 동서방향으로 평균하여 실제 어떤 고도와 위도에서 분석장이 개선되었는지 확인해 보았다. Figure 7은 사이클 수행 기간인 2016년 1월 한 달간 평균한 CTL과 EXP의 온도와 동서바람의 RMSD 차이(즉, CTL RMSD-EXP RMSD)를 나타

낸 것으로 CTL 대비 EXP 분석장의 RMSD가 줄어들면 양의 값을 나타내고, RMSD가 늘어나면 음의 값으로 나타난다. 따라서 붉은색 계열이 CTL 대비 EXP 분석장의 개선을 의미하고, 색이 진할수록 개선 효과가 크다는 것을 나타낸다. 검은색 점은 CTL과 EXP

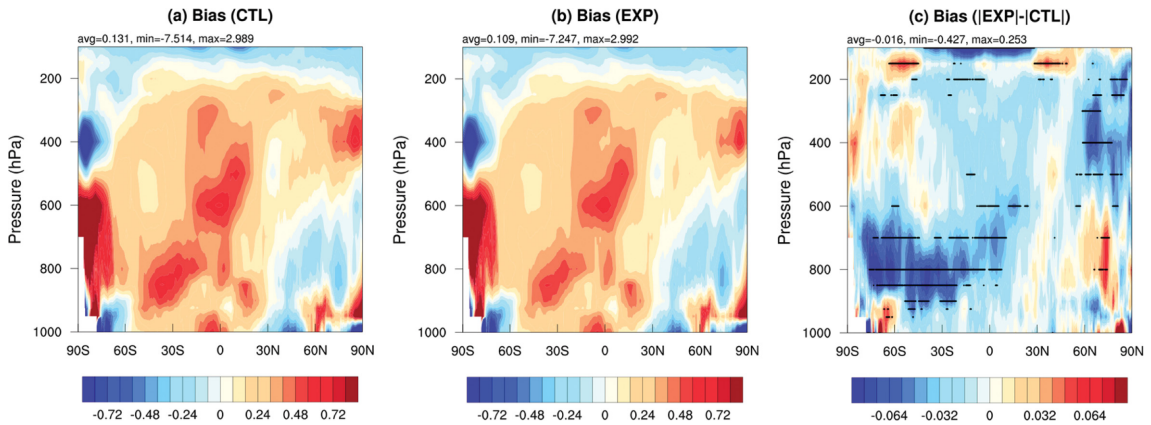


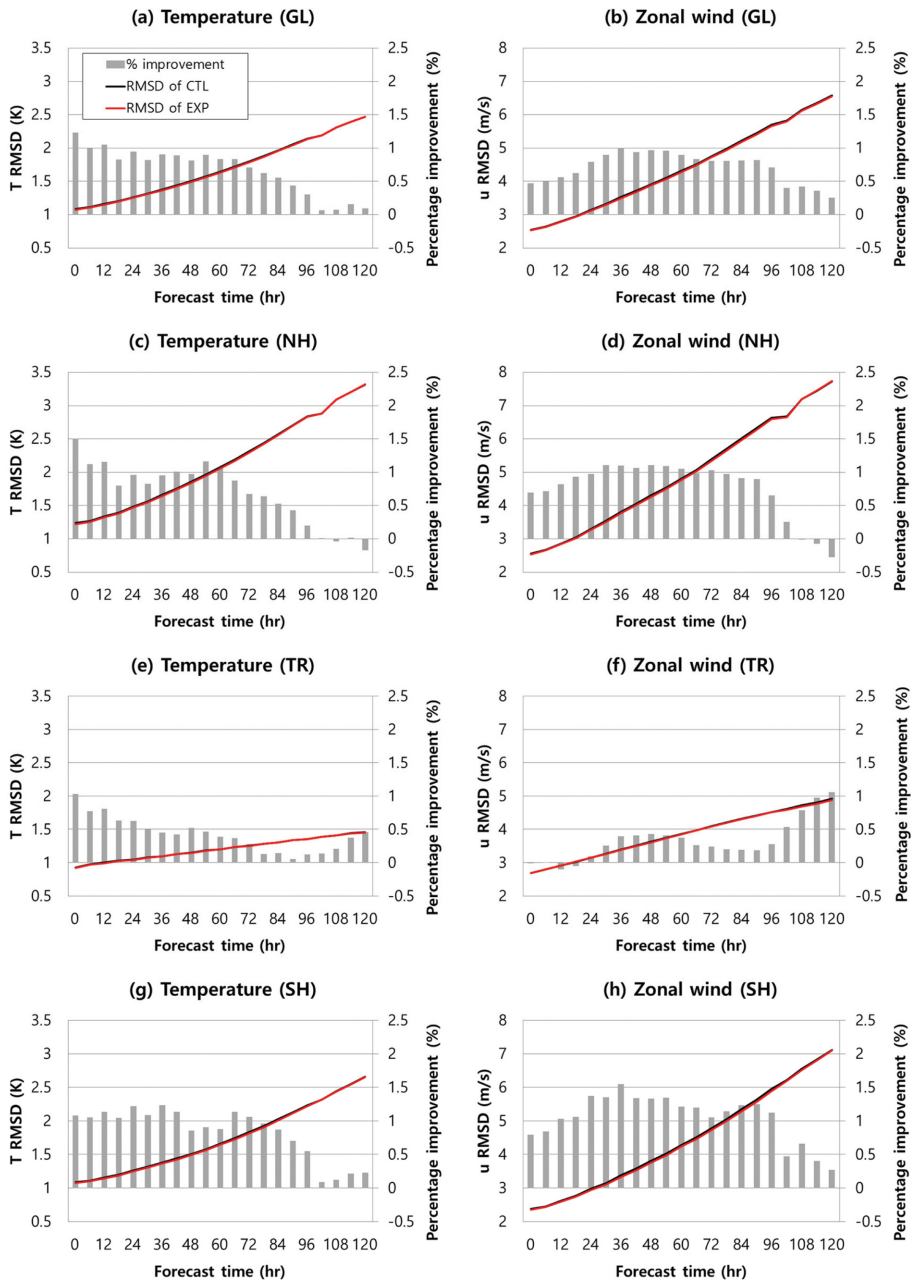
Fig. 9. Zonally averaged bias of temperature (unit: K) of CTL (a) and EXP (b), and difference of bias amount between CTL and EXP (c) during January 2016. The black-dots are marked where the difference is larger than the 95% confidence interval.

에 대해 *t*-test를 수행한 후 95% 신뢰구간에 포함되는 영역을 표시한 것이다. CTL과 비교해 전처리를 개선한 EXP에서 대류권 전반에 걸쳐 온도 분석장과 바람 분석장의 성능 개선이 뚜렷하게 나타났다. 적도 중층 및 위도 30° 이상의 남·북반구 대부분의 영역에서 온도 분석장의 RMSD가 통계적으로 유의하게 감소했다. 대류권(100~1,000 hPa) 평균 0.015 K의 RMSD가 감소하여 1.44%의 개선이 나타났으며, 위도 30° 이상의 남·북반구 고위도에서는 온도 오차 감소가 6.00%로 크게 나타났다. 또한, 자료동화과정에서 배경오차공분산으로부터 유도된 바람 분석증분의 변화는 분석장의 오차를 감소하는데 긍정적인 영향을 주었다. 전구 평균한 동서바람성분의 RMSD가 0.02 m s<sup>-1</sup> 감소하여 0.64%의 분석장 개선이 나타났으며, 특히 남반구 상부 대류권(200~600 hPa)에서 개선효과가 뚜렷했다. 한편, 적도 하층의 동서바람성분에 대한 자료동화 효과는 약하게 부정적 영향을 미치고 있다. Song et al. (2017)에 의하면 온도와 바람의 변수상관은 지균규형 관계를 이용하기 때문에 적도에서는 코리올리힘이 작아 온도로부터 유도된 바람 분석증분이 적절하지 않을 수 있다고 설명하였다. 본 연구에 사용한 자료동화시스템(3DVAR)에서 배경오차공분산의 관계가 적도 하층 동서바람성분의 RMSD 증가에 영향을 미쳤을 것으로 사료된다.

추가적으로 고도별 수평분포를 통해 지역별 분석장 개선을 확인해 보았다. Figure 7에서 가장 크게 변화가 나타났던 800 hPa, 600 hPa, 그리고 300 hPa 고도의 온도와 동서바람성분의 RMSD 차이(즉, CTL RMSD-EXP RMSD)를 2016년 1월 한 달간 평균하여 Fig. 8에 제시하였다. 남반구 중위도에서 온도 개선이 크게 나타났던 800 hPa에서 남반구 해양의 온도 RMSD

가 개선된 것을 확인할 수 있다(Fig. 8a). 600 hPa과 300 hPa에서는 해양뿐만 아니라 AMSU-A 관측이 동화되지 않는 북반구 육지와 극지방에서도 개선이 확인되는데, 이는 사이클 기간 동안 나타난 해양의 온도 개선이 육지 영역에도 영향을 주는 것으로 분석되었다(Figs. 8c, e). 동서바람성분의 RMSD는 Fig. 7b에서 살펴본 바와 같이 적도 근처에서 약간 증가하지만, 다른 지역에서는 대부분 개선되는 방향으로 나타났다(Figs. 8b, d). 대류권계면 부근인 300 hPa의 동서바람 분석장에서 평균 0.026 m s<sup>-1</sup>의 RMSD 개선이 나타났으며, 이는 30°S 이상의 남반구 고위도 지역에서 RMSD가 크게 감소하였기 때문인 것으로 확인되었다(Fig. 8f).

배경장의 편향이 큰 지역에서 AMSU-A의 O-B가 크게 나타나기 때문에, 해당 지역에 관측을 동화함으로써 배경장의 편향이 감소할 것으로 기대하였다. 따라서 IFS 분석장 대비 두 실험의 온도 편향에 대하여 살펴볼 필요가 있다. Figure 9는 전체 사이클 기간 동안 평균한 CTL과 EXP의 온도 분석장의 편향과 두 실험에서 편향의 절댓값 차이(즉, |EXP\_BIAS| - |CTL\_BIAS|)를 나타낸 것이다. Figure 9c와 같이 음의 값(푸른색)을 나타내면 CTL 대비 EXP에서 온도 분석장의 편향의 크기가 감소하였음을 의미한다. KIMv3.0의 온도 분석장은 대류권 전반에 걸쳐 IFS 분석장 대비 양의 편향(warm bias)을 가지고 있으며, CTL과 EXP의 온도 편향의 평균은 각각 0.13 K와 0.11 K로 나타났다(Figs. 9a, b). CTL 배경장의 양의 편향이 크게 나타나는 지역(Fig. 9a)과 두 실험의 편향 절댓값 차이가 감소한 지역(Fig. 9c)이 일치하는 것으로 보아 EXP가 온도 배경장이 가진 양의 편향을 감소시켰다고 판단된다. 전체적으로 양의 편향이 나타나는 KIMv3.0의 온도 분석장에서 EXP는 양의 편향을 가지는 지역에서



**Fig. 10.** Forecast impacts of temperature (left panel; K) and zonal wind (right panel;  $m s^{-1}$ ) for CTL (black line) and EXP (red line) verified against IFS analysis from 0000 UTC 15 January 2016 to 0000 UTC 25 January 2016. (a, b) global (GL). (c, d) Southern hemisphere (SH). (e, f) Tropics (TR). (g, h) Northern hemisphere (NH). Bar graph is the percentage improvement, i.e.,  $100 \times (CTL \text{ RMSD} - EXP \text{ RMSD}) / CTL \text{ RMSD}$ .

배경장 편향 감소 및 오차 개선을 이끌었다. 그러나 음의 편향을 가지는 600 hPa 이하의 남반구 고위도 영역에서는 EXP가 해당 지역의 온도를 더욱 낮게 만들어 음의 편향을 증폭시켰다. 결과적으로 EXP에서

C-B 표준편차가 커지면서 자료동화에서 AMSU-A의 영향이 더 커졌으며, 이는 전반적으로 양의 편향을 가진 KIMv3.0의 분석장 성능에 긍정적인 영향을 준 것으로 해석할 수 있다.

**3.3 예보 성능 검증**

3.2절에서 AMSU-A 품질검사 및 편향보정 반복수행이 온도와 동서바람성분의 분석장에 긍정적인 영향을 준다는 것을 확인하였다. 이번 절에서는 온도와 바람 초기장의 개선으로 인한 이들 변수의 예보장 개선을 살펴보고자 한다. 2016년 1월 15일 0000 UTC부터 2016년 1월 25일 0000 UTC까지 120시간 예보를 수행하였으며, 분석장 검증과 마찬가지로 IFS 분석장을 이용하여 검증하였다. Figure 10은 온도와 동서바람의 예보 성능을 위도별(예, GL, NH, TR, SH)로 나타낸 것으로, 연직 100~1,000 hPa 고도에 대하여 평균하여 살펴보았다. 온도와 동서바람성분 모두 예보시간에 따라 RMSD가 증가하고, CTL과 EXP의 차이는 크지 않음을 알 수 있다. Figure 10의 막대바는 EXP의 예보 성능 개선율을 나타낸 것으로 양의 값을 가질 때 CTL 대비 EXP의 예보장이 개선되었음을 의미한다. AMSU-A의 직접적인 영향을 받는 온도 RMSD는 초기장의 개선율이 가장 크게 나타났고, 72시간 예보까지 약 1%의 RMSD 개선율을 유지하다가 예측 후반으로 갈수록 개선 정도는 서서히 줄어들었다. 동서바람성분은 36시간 예보까지 예보 성능 개선율이 점차 증가하여 96시간 예보시간까지 높은 개선율을 유지하다가 그 이후 서서히 줄어들었다(적도 제외). 한 가지 흥미로운 것은 분석장 검증에서는 적도에서 동서바람성분의 RMSD가 증가했으나(Fig. 7b), 예보장에서는 시간이 지남에 따라 CTL의 RMSD보다 EXP의 RMSD가 감소하여 예보 후반에는 가장 긍정적인 영향을 보였다(Fig. 10f). 3.2절의 분석장 성능과 유사하게 예보장에서 남반구의 온도와 동서바람성분의 개선이 다른 지역에 비해 크게 나타났다. 36시간 예보에서 남반구 동서바람성분의 RMSD는 CTL 대비 EXP에서 약 1.5% 감소하였다.

**4. 요약 및 결론**

본 연구에서는 KPOP의 AMSU-A 복사자료의 전처리 방법을 개선하기 위하여 Auligné and McNally (2007)가 제안한 품질검사와 편향보정 반복기법을 적용하였고, KIMv3.0 3DVAR 시스템을 활용하여 분석장과 예보장 성능을 평가하였다. KPOP 시스템에서 BC-QC 반복 구조를 통해 편향보정계수를 재계산할 수 있도록 수정하였으며, O-B 평균의 수렴을 기준으로 반복 횟수는 2회로 제한하였다. 기존의 엄격한 품질검사 방법은 O-B 전구분포가 정규분포를 이루지 못하고 히스토그램의 한쪽 꼬리가 잘리는 문제점이 나타났으며, 이로 인해 관측의 편향을 정확히 추정하기가 어려웠다. 기존 방법을 개선하기 위하여 초기 품질검사의 O-B check 임계값을 보다 크게 설정하고 품

질검사와 편향보정을 반복수행 하였으며, 이로 인해 적절하게 AMSU-A 전처리를 수행할 수 있게 되었다. 또한, 기존에는 C-B를 기준으로 슈아내기를 수행함으로써 관측의 역할을 제한함과 동시에 슈아내기 전·후의 C-B 표준편차가 달라지는 문제점이 있었다. 개선된 전처리 기법에서는 슈아내기 격자의 중앙에 있는 관측을 선택함으로써 기존 슈아내기 방법의 문제점을 해결할 수 있었으며 보다 적극적으로 관측을 동화할 수 있게 되었다.

개선된 전처리 기법을 적용하여 2016년 1월 한 달간 KIM 사이클 실험을 수행한 후 ECMWF IFS 분석장을 통해 검증하였다. 사이클 초기부터 AMSU-A 전처리 기법의 차이로 인해 대류권에 존재하는 양의 편향이 감소하여 온도 분석장과 예보장의 성능이 개선되었다. 특히 개선된 전처리 기법은 남·북반구 고위도에 긍정적인 영향을 준다는 것을 알 수 있었다. 온도에 민감한 AMSU-A 전처리 방법의 수정이었을 뿐인데, 전구 바람장에도 긍정적인 변화를 보여 모델 변수들 간의 상관성에 대해 다시 한번 생각할 기회가 되었다. 온도장 뿐만 아니라 바람장의 긍정적인 변화는 결과적으로 모델의 예보 성능을 좌우하는 주요한 요인으로 작용할 것이다. 또한, 종관 관측이 부족한 해양 및 고위도에서의 바람장 성능 개선은 매우 긍정적으로 여겨진다. AMSU-A 해양 관측의 긍정적인 영향은 사이클이 진행됨에 따라 대기의 흐름에 의해 북반구 육지로 확장되었다. 이러한 분석결과는 AMSU-A만의 특징이 아니며, 현재 KIM에 동화되고 있는 다른 위성관측에서도 유사하게 나타날 것이다. AMSU-A와 유사한 ATMS에 동일한 방법을 적용하여 사이클 결과를 살펴보는 것도 의미 있는 일이 될 것이다. 품질검사 및 편향보정 반복기법을 다른 관측 종으로 확대함으로써 위성 관측의 전처리를 보다 정확하게 수행할 수 있고, 이는 KIM의 자료동화 성능 개선에 긍정적인 역할을 할 것으로 사료된다.

**감사의 글**

본 연구는 기상청의 지원을 받는 한국형수치예보모델개발사업단의 연구과제를 통해 수행되었습니다. 본 연구에 도움을 주신 익명의 심사위원님들과 한국형수치예보모델개발사업단의 강건호 박사, 권인혁 박사, 임수정 연구원에게 깊이 감사드립니다.

**REFERENCES**

Andersson, E., and J.-N. Thépaut, 2008: ECMWF's 4D-Var data assimilation system - the genesis and ten years in operations. *ECMWF Newsletter*, **115**, 8-12.

- Atkinson, N., J. Cameron, B. Candy, and S. English, 2005: Bias correction of satellite data at the Met Office. *Presentation, ECMWF/NWP-SAF Workshop on bias estimation and correction in data assimilation*, UK, ECMWF [Available online at <https://www.ecmwf.int/node/15846>].
- Auligné, T., and A. P. McNally, 2007: Interaction between bias correction and quality control. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **133**, 643-653.
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, and D. P. Dee, 2007: Adaptive bias correction for satellite data in a numerical weather prediction system. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **133**, 631-642.
- Baker, N. L., T. F. Hogan, W. F. Campbell, R. L. Pauley, and S. D. Swadley, 2005: The impact of AMSU-A radiance assimilation in the U.S. Navy's Operational Global Atmospheric Prediction System (NOGAPS). NRL Memorandum Report. NRL/MR/7530--05-8836, 22 pp.
- Bauer, P., R. Buizza, C. Cardinali, and J.-N. Thépaut, 2011: Impact of singular-vector-based satellite data thinning on NWP. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **137**, 286-302.
- Cameron, J., and W. Bell, 2016: The testing and planned implementation of variational bias correction (VarBC) at the Met Office. *Proceedings of the 20th International TOVS Study Conferences*, Wisconsin, USA, 21 pp.
- Cardinali, C., 2009: Monitoring the observation impact on the short-range forecast. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **135**, 239-250.
- 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.
- Dee, D. P., 2004: Variational bias correction of radiance data in the ECMWF system. *Proceedings of the ECMWF workshop on assimilation of high spectral resolution sounders in NWP*, Reading, UK, ECMWF, 97-112.
- \_\_\_\_\_, 2005: Bias and data assimilation. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **131**, 3323-3343.
- Gelaro, R., R. H. Langland, S. Pellerin, and R. Todling, 2010: The THORPEX observation impact intercomparison experiment. *Mon. Wea. Rev.*, **138**, 4009-4025, doi:10.1175/2010MWR3393.1.
- Grody, N., F. Weng, and R. Ferraro, 1999: Application of AMSU for observation water vapor, cloud liquid water, precipitation, snow cover and sea ice concentration. *Proceedings of the 10th International TOVS Study Conference*, Boulder, CO, 230-240.
- \_\_\_\_\_, J. Zhao, R. Ferraro, F. Weng, and R. Boers, 2001: Determination of precipitable water and cloud liquid water over oceans from the NOAA 15 advanced microwave sounding unit. *J. Geophys. Res.*, **106**, 2943-2953.
- Harris, B. A., and G. Kelly, 2001: A satellite radiance-bias correction scheme for data assimilation. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **127**, 1453-1468.
- Hilton, F., N. C. Atkinson, S. J. English, and J. R. Eyre, 2009: Assimilation of IASI at the Met Office and assessment of its impact through observing system experiments. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **135**, 495-505.
- Hollingsworth, A., D. B. Shaw, P. Lönnberg, L. Illari, K. Arpe, and A. J. Simmons, 1986: Monitoring of observation and analysis quality by a data assimilation system. *Mon. Wea. Rev.*, **114**, 861-879.
- 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.
- Isaksen, L., 2011: Data assimilation on future computer architectures. Proc. Seminar on Data Assimilation for Atmosphere and Ocean, *ECMWF Seminar on Data assimilation for atmosphere and ocean*, Reading, United Kingdom, ECMWF, 301-322.
- Joo, S., J. Eyre, and R. Marriott, 2013: The impact of Metop and other satellite data within the Met Office global NWP system using an adjoint-based sensitivity method. *Mon. Wea. Rev.*, **141**, 3331-3342, doi:10.1175/MWR-D-12-00232.1.
- 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.
- Kim, Y.-J., W. F. Campbell, and S. D. Swadley, 2010: Reduction of middle-atmospheric forecast bias through improvement in satellite radiance quality control. *Wea. Forecasting*, **25**, 681-700, doi:10.1175/2009WAF2222329.1.
- Lorenc, A. C., and O. Hammon, 1988: Objective quality control of observations using Bayesian methods. Theory, and a practical implementation. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **114**, 515-543.
- \_\_\_\_\_, and R. T. Marriott, 2014: Forecast sensitivity to observations in the Met Office global numerical weather prediction system. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*,

- 140**, 209-224, doi:10.1002/qj.2122.
- 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 (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 (in Korean with English abstract).
- Rabier, F., 2011: Pre- and post-processing in data assimilation. *Conf. paper, Seminar on data assimilation for atmosphere and ocean*, Reading, UK, ECMWF, 45-59 [Available online at <https://www.ecmwf.int/node/11785>].
- \_\_\_\_\_, H. Jarvinen, E. Klinker, J.-F. Mahfouf, and A. Simmons, 2000: The ECMWF operational implementation of four-dimensional variational assimilation. I: experimental results with simplified physics. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **126**, 1143-1170.
- Rawlins, F., S. P. Ballard, K. J. Bovis, A. M. Clayton, D. Li, G. W. Inverarity, A. C. Lorenc, and T. J. Payne, 2007: The Met Office global four-dimensional variational data assimilation scheme. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **133**, 347-362.
- 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.
- \_\_\_\_\_, J. Kwon, I.-H. Kwon, J.-H. Ha, J.-H. Kang, S. Lee, H.-W. Chun, and S. Lim, 2017: The impact of the nonlinear balance equation on a 3D-Var cycle during an Australian-winter month as compared with the regressed wind-mass balance. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **143**, 2036-2049, doi:10.1002/qj.3065.